平成７年度先導研究報告書
ＮＥＤＯ－ＰＲ－９５０１２(1)

NEDO-PR--95012(1)

フォトンテクノロジー
（レーザープロセス技術）

平成８年３月

RECEIVED
DEC 12 1996
OSTI

MASTER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

RB

新エネルギー・産業技術総合開発機構
委託先(社)日本オプトメカトロニクス協会

平成７年度先導研究フォトンテクノロジー「レーザープロセス技術」

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会

平成８年３月　２５３頁

調査目的

(レーザープロセス技術)は平成７年度から開始した先導研究「フォトンテクノロジー」のテーマのひとつである。

本調査研究は、物質とフォトンとの相互作用によるレーザー加工技術を開発するための研究開発課題の抽出、および研究開発推進方策を定めることを目的とし、そのためのレーザープロセス応用技術、レーザービームの伝送・計測技術、および必要とされるレーザーの発生技術について検討し、新しい産業技術、産業分野の創成に寄与することを目的とした。

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

まえがき

本調査は新エネルギーを産業技術総合開発機構（ＮＥＤＯ）からの委託研究として実施したものである．

工業技術院では一昨年度から新たに産業科学技術研究制度を発足させており，基礎的独創的領域の研究開発および公共・社会・福祉領域における研究開発が対象として取り上げられている．この制度においては，事前の予備的な調査・研究によるプロジェクトの効率的な推進を目的として，「先導研究」を実施することが求められているが，本調査研究テーマの「フォトンテクノロジー・レーザープロセス技術」は今年度にスタートした先導研究テーマの一つである「フォトンテクノロジー」のうち，レーザープロセス技術に関するものである．

機械技術は今日の産業基盤を形成し，これまで関連産業分野に多大の貢献を行ってきた．しかしながら，近年，地球規模での環境問題，あるいは，資源・エネルギー問題などが世界共通のものとして取り上げられつつある中で，産業界に対して新規な技術の創出によるプロセスイノベーションが求められている．フォトンテクノロジーはレーザー光と物質の相互作用という観点から，機械技術を核とする従来の加工技術の延長上にはない，新しい加工技術あるいは材料創成技術を生み出すものと期待できる．

この技術を実現するためには（１）高出力・高品質のレーザー光を発生させる技術，（２）レーザー光を伝送する技術，レーザー光と物質の相互作用を計測・制御する技術，そしてこれらの要素技術の上に立った（３）プロセス応用技術の開発が必要とされる．

このため，先導研究「フォトンテクノロジー・レーザープロセス技術」においては，（社）日本オプトメカトロニクス協会内の「フォトンテクノロジーセンター」の中に「レーザープロセス技術委員会」を設置，本技術分野における技術体系の調査研究を行なうことになり，辻内順平東京工業大学名誉教授に委員長をお願いした．また，その下部組織として「発生技術分科会」，「伝送・計測制御技術分科会」，「プロセス応用技術分科会」を設置し，各々に産学官の幅広い分野の専門家に委員を委嘱して，広範な視点から多様な発想に基づく意見を提起して頂くとともに議論を深めて頂いた．また，「フォトンテクノロジー・ワークショップ

実行委員会」（実行委員長：機械技術研究所　松田浄史物理情報部長）のご尽力により，本年３月１１日・１２日の２日間，つくば市において「フォトンテクノロジー・ワークショップ」を開催したところ，国内外から約３００人の研究者，技術者等の専門家の参加を得て盛大に行われた．この国際ワークショップの開催を通して，レーザー光と物質の相互作用の解明とそれを基礎にしたイノベイティブなプロセス技術の開発に対する国内外の関心の高さを伺い知ることができた．

本報告書は，それらの討議の内容を含め，フォトンテクノロジーに関する技術の体系化，技術開発課題の提言などをまとめたものである．

本調査にあたり，種々のご指導を頂いたＮＥＤＯ産業技術研究開発部の方々，ご指導ご協力を頂いた委員長はじめ委員各位，ならびに機械技術研究所，電子技術総合研究所，物質工学工業技術研究所，計量研究所，四国工業技術研究所の関係者の方々に対し，心からの謝意を表するとともに，本報告書が関係各位のお役に立つことを切望する次第である．

平成８年３月

社団法人　　日本オプトメカトロニクス協会
会　　長　　鈴木哲夫

平成７年度先導研究
フォトンテクノロジー（レーザープロセス技術）
調査研究報告書目次

まえがき …… i
序論 …… vii
委員名簿 …… ix
概要 …… xiii
Abstract …… xv

第１章　研究開発の概要 …… 1
１．１　研究開発の意義・目的 …… 1
１．２　レーザープロセス技術の概念 …… 2
１．３　レーザープロセス技術の研究開発課題 …… 2
１．４　期待される効果 …… 6

第２章　研究開発状況 …… 8
２．１　当該研究分野に関する調査検討状況 …… 8
２．２　当該研究分野における国内の研究開発動向 …… 8
２．２．１　終了プロジェクト …… 9
２．２．２　現行プロジェクト …… 10
２．３　当該研究分野における海外の研究開発動向 …… 11
２．３．１　米国におけるレーザープロセス関連技術開発の現状 …… 11
２．３．２　欧州におけるレーザープロセス関連技術開発の現状 …… 13

第３章　産業動向と研究開発ニーズ …… 14
３．１　産業動向 …… 14
３．２　研究開発ニーズ …… 14

第４章　研究開発課題 …… 18
４．１　はじめに …… 18
４．２　装置・システム技術 …… 19
４．２．１　フォトンマシニングの概念 …… 19
４．２．２　マシンシステムの具体例 …… 24
４．３　プロセス応用技術 …… 30
４．３．１　はじめに …… 30
（１）レーザーと物質の相互作用 …… 30
（２）レーザープロセスの過去-現在，将来への研究開発課題 …… 31

4．3．2　光切断／接合／熱処理（除去，切断，溶接）技術 …… 37
（1）除去加工（金属切断・穴あけ加工） …… 37
（2）接合技術 …… 41
（3）熱処理（急速加熱・急冷，アニーリング） …… 46
4．3．3　機能構造体／新材料の作成技術 …… 53
（1）超微粉製造・クラスター技術 …… 53
（2）同素体創製技術 …… 65
（3）超微粉応用新材料創製技術（スーパーマテリアル） …… 66
（4）光応用構造体作成技術（選択的光機能加工） …… 67
4．3．4　新表面・被膜形成技術 …… 73
（1）超微粒子応用被膜形成技術（レーザーガスデポジション） …… 73
（2）光量子利用被膜作成技術（アブレーション、ＣＶＤ等） …… 78
4．3．5　機能回復（リサイクルアシスト）技術 …… 91
（1）構造体機能回復 …… 91
（2）電子デバイス機能回復 …… 94
4．3．6　最新計測・分析・加工制御技術 …… 97
（1）インプロセスモニタリング技術 …… 98
（2）加工制御技術 …… 103
（3）加工シミュレーション技術 …… 110
4．3．7　短波長・短パルスフォトンプロセス技術 …… 117
（1）真空紫外領域 …… 117
（2）短パルスレーザープロセス …… 119
4．3．8　レーザーハイブリッド技術 …… 124
（1）波長コンバインド加工技術 …… 124
（2）高エネルギービーム複合加工技術 …… 125
4．3．9　まとめ …… 133
4．4　伝送・計測制御技術 …… 135
4．4．1　はじめに …… 135
（1）自由空間における光ビームの伝送 …… 135
（2）光ファイバによる伝送 …… 136
4．4．2　高出力伝送システム …… 138
（1）光ファイバ伝送 …… 138
（2）空間伝送技術 …… 143
（3）伝送における非線形現象・破壊 …… 147
4．4．3　高品位フォトン計測制御技術 …… 150
（1）ビーム品質の計測制御 …… 150
（2）波面・偏光の計測制御技術 …… 153
（3）高性能光共振器技術 …… 159
（4）ビーム形状・位置計測技術 …… 163
4．4．4　最新計測・評価技術 …… 165

４．４．５　まとめ …… 169
４．５　発生技術 …… 171
４．５．１　はじめに …… 171
４．５．２　レーザー技術の現状と課題 …… 173
４．５．３　レーザー・光制御材料技術 …… 175
（１）固体レーザー材料 …… 175
（２）非線形光学材料 …… 180
（３）光制御材料 …… 186
４．５．４　高出力半導体レーザー（LD）技術 …… 188
（１）高効率・高出力化 …… 188
（２）短波長化 …… 191
（３）高機能化 …… 193
４．５．５　高機能光学素子技術 …… 195
（１）高機能光学素子 …… 195
（２）光学部品・素子の集積化・高機能化 …… 200
４．５．６　LD励起固体レーザー技術 …… 203
（１）高効率化・高出力化 …… 203
（２）広帯域波長可変レーザー …… 206
（３）超短パルスレーザー …… 209
（４）短波長レーザー …… 212
（５）超高品質ビームの発生 …… 215
４．５．７　素子化レーザー技術 …… 219
（１）ファイバーレーザー …… 219
（２）集積化レーザー …… 221
４．５．８　波長変換技術 …… 225
（１）ＳＨＧレーザー技術 …… 225
（２）ＯＰＯ …… 228
４．５．９　新産業技術基盤としての期待 …… 229
４．５．１０　まとめ …… 231
（１）LD励起高効率レーザー技術 …… 231
（２）高性能半導体レーザー技術 …… 232
（３）高機能材料・光学技術 …… 234
（４）波及効果 …… 235

第５章　プロジェクト化に向けての基本的構想 …… 238
５．１　研究目的 …… 238
５．２　研究開発内容 …… 238
（１）フォトンプロセス応用技術 …… 238
（２）フォトン伝送・計測制御技術 …… 239
（３）フォトン発生技術 …… 239

５．３　研究開発体制 …… 240

第６章　まとめ …… 241

Appendix …… 243
Ａ１．フォトンテクノロジー・ワークショップ('95)の報告 …… 243
（１）オープニングセッションの概要 …… 244
（２）招待講演の概要 …… 244
（３）ポスターセッション …… 246
Ａ２．レーザープロセス技術委員会活動状況 …… 252
（１）本委員会の活動状況 …… 252
（２）３技術分科会の活動状況 …… 252

序論

光技術は21世紀社会の新産業の基盤技術として期待されている．しかしながら現在，光（フォトン）の持つ潜在性ポテンシャルを十分に発揮しているのは光通信などの限られた分野に過ぎない．特に光と物質の相互作用は，特定の化学結合や元素を選択的に励起するなどの高度な利用が期待されているが，まだ理論的に予測されているほどの成果は得られていない．そこで，フォトンと物質の関与した物理化学現象などの基礎的解明を推し進めるとともに，基盤となるフォトンの発生・制御及び利用技術の開発を行い，さらには関連技術の展開を推進して，フォトンの量子性を高度に利用した新技術の開拓を行うことを目的として，平成７年度より２年間の予定で工業技術院の産業科学技術研究開発制度の中で「フォトンテクノロジー」が先導研究として発足した．

本研究開発は非常に幅広い分野を網羅しており，調査研究をより効率的に進めるために，対象とする光の波長領域及び研究開発のフェーズの異なる「レーザープロセス技術」と「ハードフォトン技術の」の２つに分けて，平成７年度の研究調査を行ってきた．本調査書はそのうちで「レーザープロセス技術」に関する調査研究の成果を纏めたものである．

「レーザープロセス技術」は一言でいえば，レーザーを用いた加工技術である．今日では，レーザーは新しい加工の手段として広く利用され，洋服の裁断から船舶や航空機産業における素材の切断・溶接に，更には医療における新しい手術用メスとして重要な働きをしている．一方，物質の微細加工，微粉製造などの特殊な技術分野においても，レーザーの果たす役割は極めて大きいことが明らかとなり，新しい産業分野の台頭が予見されている．

このように，産業界におけるレーザーの役割は日に日に増大しているが，実際の現場では，適切な機材の調達が困難であったり，加工に要する費用の高騰に苦慮するという状態が続き，レーザーを用いる加工技術の普及が阻まれているという現実がある．

レーザープロセス技術調査研究委員会では，レーザーによる加工の目的を明確にし，それに最も適合するレーザーと，その加工を支援する技術を開発することを目指して研究を進めている．これまでのレーザーの開発は，科学技術的興味が優先したり，使用目的を特定しない汎用のものを対象とする傾向が強かったため，既製のレーザーから目的とする用途向けの仕様に近いものを探すという傾向が強く，必ずしも最適条件を満たす事ができなかったし，場合によっては最適条件すら明確ではなかった．また，レーザーと併用するビームの伝送・制御装置にしても，使用するデバイスが専用に作られたものは少なく，一般的な製品から間に合うものを探し出して採用するため，十分な性能を発揮できないという現実があった．

本調査研究では，目的に対して最も適合したレーザー加工技術を開発するため，まず物質とフォトンとの相互作用の解明を行い，不明確な事象を明確にするとともに，加工のための最適条件を設定し，それを実現するために必要なレーザーとその伝送・制御システムを完成することを目指して，その研究開発推進方策を定めることを目的としている．そのために，プロセス応用技術分科会，伝送・計測制御技術分科会，及び発生技術分科会の３分科会を設置し，それぞれフォトンと物質との相互作用の解明と加工技術への応用，加工

に必要なレーザービームの伝送と制御を最適化する技術の開発，及びレーザープロセスに必要なフォトンを発生するレーザー装置の開発を目的として，相互に連携を図りながら研究を進めた．

各分科会では，それぞれカバーする分野を委員の分担によって調査し，分科会内での討論，分科会間での調整を行いながら，平成７年度の調査研究を行い，この報告書をまとめた．本報告書では，第１章で研究開発の概要，第２章で国内及び国外の研究開発の概要を述べ，第３章ではこの分野における産業動向と研究開発の必要性を述べている．第４章は本報告書の主要部分であって，研究開発を実施する場合の課題を装置・システム技術，プロセス応用技術，伝送・計測制御技術，及び発生技術の分類して調査を行っている．第５章はこの研究プロジェクトを実現するための基本構想について提案し，第６章で全体をまとめている．本報告書がプロジェクトの策定をはじめ，将来の研究開発の実施に役立つことを期待している．

おわりに，本先導研究の計画と運営，さらに報告書の作成に携わられた関係各位に，深く感謝する．

レーザープロセス技術委員会委員長　　辻内 順平

平成７年度先導研究フォトンテクノロジー

レーザープロセス技術委員会

委員名簿

（◎分科会長，○分科会幹事　順不同）

委員長	辻内順平	東京工業大学名誉教授
幹事	松田浄史	機械技術研究所　物理情報部 部長
◎委員	植田憲一	電気通信大学レーザー極限技術研究センター 教授
◎ 〃	藤村貞夫	東京大学 工学部計数工学科 教授
◎ 〃	松縄　朗	大阪大学 溶接工学研究所 教授
○ 〃	宮崎健創	電子技術総合研究所 光技術部レーザー研究室 室長
○ 〃	黒沢富蔵	計量研究所 力学部機械計測研究室 室長
○ 〃	志村洋文	機械技術研究所 基礎技術部トライボロジー研究室
〃	井澤靖和	大阪大学 レーザー核融合研究センター 教授
〃	吉田国雄	大阪工業大学 電子工学科 教授
〃	芳野俊彦	群馬大学 工学部電気電子工学科 教授
〃	村上浩一	筑波大学 物質工学系 教授
〃	新野秀憲	東京工業大学 工学部機械知能システム学科 助教授
〃	桜井慧雄	計量研究所 量子部 部長
〃	矢部　明	物質工学工業技術研究所　首席研究官
〃	勝村宗英	四国工業技術研究所 基盤技術部 部長
〃	牧田雄之助	電子技術総合研究所 光技術部光機能研究室 室長
〃	原　　熙	石川島播磨重工（株）航空宇宙事業部光プロジェクト部 部長
〃	熱田稔雄	川崎重工業（株）関東技術研究所・光技術研究部長
〃	渕田英嗣	真空冶金（株）ＵＦＰ部 課長
〃	坂根敏夫	住友大阪セメント（株）光電子事業部商品開発室 主幹研究員
〃	遠藤　彰	住友重機械工業（株）総合技術研究所 主席研究員
〃	布施敬司	住友電気工業（株）基盤技術研究所 電子光材料
〃	佐藤　守	第一化成（株）栃木工場 顧問
〃	石田修一	（株）東芝 生産技術研究所 レーザー研究部長
〃	近藤正恒	トヨタ自動車（株）生技開発部次長
〃	窪田恵一	日本電気（株）レーザ・メカトロ（事）基本技術開発部長
〃	菅 博文	浜松ホトニクス（株）中央研究所　研究主幹
〃	佐藤正純	日立金属（株）開発本部研究開発部
〃	軽部規夫	ファナック（株）常務取締役　レーザ研究所所長
〃	妻沼孝司	（株）フジクラ 光ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所 光通信部課長
〃	渡辺泰史	古河機械金属（株）日野研究所 主任技師
〃	高橋志郎	ＨＯＹＡ（株）　Ｒ＆Ｄセンター所長
〃	吉田岳人	松下技研（株）超機構研究所 技師
〃	山岸喜代志	三井金属鉱業（株）総合研究所 光材料グループ 主任研究員

〃	江田　昭	三井石油化学工業(株)機能材料研究所レーザーグループリーダー
〃	松田桂一	三菱重工業(株)軽水炉技術部 部長代理
〃	八木重典	三菱電機(株)先端技術総合研究所
〃	井口敏之	(株)リコー 研究開発本部　生産技術研究所 第1加工研究ｾﾝﾀｰ所長
〃	八木隆志	(財)産業創造研究所 レーザー研究センター 主任研究員
〃	藤田雅之	(財)レーザー技術総合研究所
〃	深津憲一	(株)レーザー応用工学研究所 長岡センター センター長
〃	桝本弘毅	(株)超高温材料研究所 山口研究所長
〃	和久田基美	(社)日本工作機械工業会 技術部付
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞ	近藤正幸	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発官
〃	根岸寿実	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発専門職
〃	佐々木信也	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発官付
〃	尾崎孝良	通商産業省 機械情報産業局 産業機械課 課長補佐
〃	庄野勝彦	通商産業省 機械情報産業局 産業機械課 課長補佐
〃	永山純弘	通商産業省 機械情報産業局 産業機械課 係長
〃	中山　亨	通商産業省 機械情報産業局 電子機器課 課長補佐
〃	福田応夫	ＮＥＤＯ 産業技術研究開発部 研究開発課 主査

発生技術分科会
委員名簿

分科会長	植田憲一	電気通信大学レーザー極限技術研究センター 教授
幹事	宮崎健創	電子技術総合研究所 光技術部レーザー研究室 室長
委員	井澤靖和	大阪大学 レーザー核融合研究センター 教授
〃	吉田国雄	大阪工業大学 電子工学科 教授
〃	遠藤　彰	住友重機械工業(株)総合技術研究所 主席研究員
〃	窪田恵一	日本電気(株)レーザ・メカトロ(事)基本技術開発部長
〃	菅 博文	浜松ホトニクス(株)中央研究所　研究主幹
〃	佐藤正純	日立金属(株)開発本部研究開発部
〃	軽部規夫	ファナック(株)常務取締役　レーザ研究所所長
〃	高橋志郎	ＨＯＹＡ(株)　Ｒ＆Ｄセンター所長
〃	山岸喜代志	三井金属鉱業(株)総合研究所 光材料グループ 主任研究員
〃	江田　昭	三井石油化学工業(株)機能材料研究所レーザーグループリーダー
〃	松田桂一	三菱重工業(株)軽水炉技術部 部長代理
〃	八木重典	三菱電機(株)先端技術総合研究所 光部
〃	八木隆志	(財)産業創造研究所 レーザー研究センター 主任研究員
〃	藤田雅之	(財)レーザー技術総合研究所
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞ	根岸寿実	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発専門職
〃	佐々木信也	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発官付
〃	福田応夫	ＮＥＤＯ 産業技術研究開発部 研究開発課 主査

伝送・計測制御技術分科会
委員名簿

分科会長	藤村貞夫	東京大学 工学部計数工学科 教授
幹事	黒沢富蔵	計量研究所 力学部機械計測研究室 室長
委員	芳野俊彦	群馬大学 工学部電気電子工学科 教授
〃	永寿伴章	機械技術研究所 物理情報部 光工学研究室
〃	角井嘉美	電子技術総合研究所 大阪ﾗｲﾌｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究ｾﾝﾀｰ 環境ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究室 室長
〃	松本弘一	計量研究所 研究企画室
〃	本多徳行	計量研究所 量子部光学計測研究室 主任研究官
〃	原　熙	石川島播磨重工(株)航空宇宙事業部光プロジェクト部 部長
〃	坂根敏夫	住友大阪セメント(株)光電子事業部商品開発室 主幹研究員
〃	布施敬司	住友電気工業(株)基盤技術研究所 電子光材料
〃	妻沼孝司	(株)フジクラ 光ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所 光通信部課長
〃	渡辺泰史	古河機械金属(株)日野研究所 主任技師
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞ	根岸寿実	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発専門職
〃	佐々木信也	通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発官付
〃	福田応夫	ＮＥＤＯ 産業技術研究開発部 研究開発課 主査

プロセス応用技術分科会
委員名簿

分科会長	松縄　朗	大阪大学 溶接工学研究所 教授
幹事	志村洋文	機械技術研究所 基礎技術部トライボロジー研究室 主任研究官
委員	村上浩一	筑波大学 物質工学系 教授
〃	新野秀憲	東京工業大学 工学部機械知能システム学科 助教授
〃	斉藤敬三	機械技術研究所 エネルギー部 環境技術研究室 室長
〃	田中章浩	機械技術研究所 基礎技術部 トライボロジー研究室 室長
〃	綾　信博	機械技術研究所 エネルギー部 環境技術研究室 主任研究官
〃	明渡　純	機械技術研究所 生産システム部生産機械研究室 主任研究官
〃	矢部　明	物質工学工業技術研究所 首席研究官
〃	古賀義紀	物質工学工業技術研究所 極限反応部レーザー反応研究室 室長
〃	今井庸二	物質工学工業技術研究所 無機材料部無機機能制御研究室 室長
〃	新納弘之	物質工学工業技術研究所 極限反応部レーザー反応研究室 研究員
〃	勝村宗英	四国工業技術研究所 基盤技術部 部長
〃	米田理史	四国工業技術研究所 基盤技術部 表面工学研究室 室長
〃	牧田雄之助	電子技術総合研究所 光技術部光機能研究室 室長
〃	熱田稔雄	川崎重工業(株)関東技術研究所・光技術研究部長
〃	渕田英嗣	真空冶金(株)ＵＦＰ部 課長
〃	佐藤　守	第一化成(株)栃木工場 顧問

〃　石田修一　(株)東芝 生産技術研究所 レーザー研究部長
〃　近藤正恒　トヨタ自動車(株)生技開発部次長
〃　吉田岳人　松下技研(株)超機構研究所 技師
〃　井口敏之　(株)リコー 研究開発本部　生産技術研究所 第1加工研究ｾﾝﾀｰ所長
〃　深津憲一　(株)レーザー応用工学研究所 長岡センター センター長
〃　桝本弘毅　(株)超高温材料研究所 山口研究所長
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞ　根岸寿実　通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発専門職
〃　佐々木信也 通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発室 研究開発官付
〃　福田応夫　ＮＥＤＯ 産業技術研究開発部 研究開発課 主査

フォトンテクノロジー・ワークショップ実行委員会
委　員　名　簿

委員長　松田浄史　機械技術研究所　物理情報部長
委員　岡山重夫　(財)新機能素子研究開発協会　研究開発部長
〃　小貫英雄　電子技術総合研究所 量子放射部光放射研究室長
〃　黒沢富蔵　計量研究所 力学部機械計測研究室長
〃　古室昌徳　電子技術総合研究所 電子デバイス部マイクロビーム研究室長
〃　志村洋文　機械技術研究所 基礎技術部トライボロジー研究室
〃　須賀昭雄　(社)日本オプトメカトロニクス協会 専務理事
〃　富江敏尚　電子技術総合研究所 極限技術部高密度エネルギー研究室長
〃　福田応夫　ＮＥＤＯ 産業技術研究開発部 研究開発課 主査
〃　宮崎健創　電子技術総合研究所 光技術部レーザー研究室 室長
〃　矢部　明　物質工学工業技術研究所　首席研究官

調査実施責任者

(社)日本オプトメカトロニクス協会　会長　鈴木哲夫

概 要

高齢化社会の本格的な到来を目前に，21世紀社会の対応が重要と言われている．しかし，経済成長を図るための労働力，及び設備投資が期待できない現状では，科学技術が果たす役割は極めて大きい．そのため，これからの取り組みでは，独創的研究開発を通し新規産業分野を大いに発展させ，自ら経済フロンティアを実行していくことが重要となる．

一方，機械加工技術はあらゆる産業の基盤をなす技術である．この技術に関し欧米諸国と日本とを比較した場合，技術的高度性については欧米諸国が，技術の信頼性については日本が優れていると言われている．しかし，このような特徴を生かした既存の産業開発だけでは，国際的競争力に打ち勝つことは決してできない．この技術分野の産業全体に与える重要性にいち早く気付いたのは欧米諸国であり，その強化のために戦略的且つ強力な研究プロジェクト（米国 Precision Laser Machining，独国レーザー2000等，いずれも1994年開始）をスタートさせ，新たな視点から機械加工技術の展開を行っている．欧米諸国に遅れをとらないためには，日本においても産学官の協力のもとナショナルプロジェクトとして推進し新たな産業分野を開拓していくことが必要不可欠となる．

また，通産省の分野別研究開発会議においても，機械技術分野は今後マイクロ化・知能化を目指して研究を進めて行く必要性が指摘され，今後取り組む重要な技術開発としてフォトンテクノロジーが位置づけられている．フォトンテクノロジーは，フォトンの量子性を高度に利用した新技術の開拓を目指す調査研究である．

従来の光技術は，光の持つ多様な特質（エネルギー，波長，位相，波面，量子性 etc.）を十分に生かし切れていなかったが，本テーマでは，この光の特質を十分に生かした活用を行い，未踏エネルギー領域を開拓し新しいフォトンプロセス技術分野を開発する．そしてレーザープロセス分野においては，高品質フォトンをツールとして原子・分子レベル特有の機能を発現させる機能付与加工技術（フォトンマシニング技術）の確立を図る．そのためには，フォトンの発生と伝送の高度化を図り，高品質フォトンを得て，フォトンと物質の関与した物理化学現象等の未解明な科学分野の基礎的解明を押し進める．さらに関連応用技術の展開を推進し，従来の機械・熱的加工技術による形状加工だけでなく，量子レベルの機能付与加工技術を実現させ，新たな技術体系の構築を図ると共に新しい産業創出に寄与する．

フォトンマシニングは，物理や化学の基礎から新接合技術までの複数分野にまたがる広い技術分野である．そのため，この分野では，それぞれの技術分野の研究者がまとまった形で研究開発を行ってはいなかった．また，高出力レーザーの発明からまだ日が浅いため，関連する学問的体系が遅れていることも事実である．これらの理由から，本研究開発分野では新たな概念及び体制固めを早急に行い，国のリーダーシップのもとに産学官の異分野の専門家が互いに連携してプロジェクトを推進する必要がある．

Abstract

Of importance, one must consider how to cope with an aging population and the associated economic impact. Science is essential to economic growth in this scenario, primarily because there are no assurances in the future strength of the labor force and capital investment in equipment. Therefore, to sustain economic growth, creative research must be developed. Moreover, the frontiers of the economy will be stimulated by the creation and development of new industries or even industrial sectors.

On the other hand, machining technology is fundamental to almost all industry. After having compared the technologies of Europe and the United States with Japan, the technological sophistication of the former nations is superior to that of Japan. Furthermore, Japan's economic structure is more heavily dependent on technology than Europe or the United States. Extension of extant technology alone will not assure future victory in the competitive international arena.

Europe and the United State noted the great impact of technology on industry. Consequently, these nations have already begun technological projects that are strategic from a research perspective (e.g., Precision Laser Machining (USA), LASER 2000 (Germany), each project began in 1994). The motivation of these projects is intensification of the field. These nations have tackled new development of machine processing from a different point of view. Without lagging behind Europe and the United States, Japan should promote the national project of photon machining in cooperation with industries and government, including national laboratories.

During the meeting on the future course of research development in each field at MITI, mechanical engineering was targeted for research promotion, with specific attention to micronization and intellectualization. Of significance, photon machining is a rapidly emerging technology that also must be considered. Photon machining seeks to develop new technology that utilizes the quantum nature of photons. To date, conventional laser technology has not fully capitalized on these quantum features (such as energy, wavelength, phase, wavefront, etc.). In the field of photon machining, the laser will be exploited in practical use, previously unexplored energy regimes will be explored, and the new field of photon processing will be developed. Thus, in the field of laser processing, photons are used as tools, special functions of atoms and molecules will be discovered, and processing for functional fabrication (photon machining) will be established. In pursuit of these goals, the generation and transmission of the photons must become highly developed, thereby producing high quality photons. In this process, the basic research related to the physical and chemical phenomena associated with photons and materials will be accomplished. By promoting development of the related application technology, processing of functional fabrication at the quantum level will be achieved, as well as configuration machining based on conventional mechanical machining and thermal processing. In this manner, a new technological sector will be established, contributing to the creation of new industries.

Photon machining is related to multiple fields, such as physics and chemistry, through applications

such as new jointing technology (e.g., welding). Traditionally, multidisciplinary collaborative research has not been a common practice and, consequently, there has been a retardation of scientific systemization.

For these reason, a new infrastructure must be constructed soon; the promotion of collaborative projects between specialists from different fields in universities, industries, and national labs, all under government leadership, is required.

フォトンテクノロジー
（レーザープロセス技術）

本　論

第１章　研究開発の概要

１．１　研究開発の意義・目的

人類の創世以来，文明社会の発展にもたらしてきた機械技術の恩恵には計り知れないものがある．その基礎原理をニュートン以来の力学におく機械技術は全ての科学技術の基礎となり，関連周辺技術との積極的な融合と調和の過程を経て，今日の産業界の重要な基盤技術を形成してきた．そして，それが機械関連産業はもとより，多様な産業分野の中枢を担う重要な役割を果たしてきたことに疑う余地はない．

昨今の円高は製造業を中心とする企業の海外進出を促し，これに伴う国内産業の空洞化と共に生産労働者の高齢化が深刻になってきた．それに加え，資源・エネルギーから環境に至る様々な問題も大きくクローズアップされる現代社会においては，低迷していた産業界を活性化させたかつての自浄作用を期待できる状況にはない．低迷した現在の産業界に活を入れ，これら現代に固有の諸問題に対処するためには，従来の技術に対する既成概念の抜本的改革と技術そのものの飛躍的変革が必要不可欠となる．そのためには，産学官が連携して最新の科学技術を積極的に活用し，知と技のフィードバックのもと，より高度な技術の研究開発及び新しい技術の創出を行い，ハイテク産業を創出・育成することが最重要課題となってくる．

フォトンテクノロジーは，フォトンと物質との相互作用を系統的に解明することによって新しいプロセス技術を確立し，関連する産業の創出・育成に寄与するものである．これは，大型建造物等の作成の際に基礎となる接合技術に密接に関連しており，輸送機器，発電設備，石油化学プラントなどの構造安全性を飛躍的に向上させることが可能となるため，最終的には国民生活の安全性を保証する技術となるものである．また，フォトンと物質の相互作用を解明する過程で得られる基礎科学的知見は，プロセス技術への貢献のみならず，既成概念を打ち破る新しい科学技術の萌芽となるはずである．

フォトンテクノロジーが包括する探査領域は，光と物質の相互作用の解明に関わる基礎科学的諸問題からそれに基づく接合技術の確立まで非常に広範囲に渡っている．そのため，これらの研究及び技術開発課題を効率よく推進していくためには，産学官における各分野の専門家を結集し，さらにそれらを有機的に結合させての大規模な取り組みが必須となる．また，関連する国外の動向として，産学官の協力体制のもと，新しいレーザー技術の開発を目指す大規模な国家プロジェクトが，独国（Ｌａｓｅｒ　２０００）及び米国（Ｐｒｅ-ｃｉｓｉｏｎ　Ｌａｓｅｒ　Ｍａｃｈｉｎｉｎｇ）で　既にスタートしていることは無視できない事実である．

以上の背景のもと，フォトンテクノロジーではフォトンと物質との相互作用の解明をキーワードとして，力学を基礎とする従来技術とは全く異なる新しいタイプの加工技術を構築すべく『フォトンマシニング』を推進する．この技術分野の構築は，２１世紀の機械産業にインフラストラクチャー（生産技術基盤）を形成すると共に，既存技術の飛躍的高度化，新しい概念に基づく新技術の創出，そしてそれらに伴う新産業の創出に寄与するものとなる．

１．２　レーザープロセス技術の概念

フォトンテクノロジーは，力学を基礎とする従来の加工技術とは完全に異なり，光をツールとする加工技術の新たな展開を目指す革新的技術である．この光をツールとする新しい加工技術を『フォトンマシニング』と呼び，その概念を図１．１に示す．

ここで導入されるツールとしての光には，フォトンの量子としてのエネルギーを利用した物質の結合状態の変換や，フォトンを局在化させることにより発生する超高温・高圧場を利用したプロセシングの他，フォトンと物質の相互作用によって生じる諸現象を的確に把握するプローブとしての役割がある．すなわち，フォトンマシニングとは，『エネルギーと情報をもった光のツール』に基づき加工技術の新展開を目指す，画期的な研究開発推進構想と言える．このようなツールとしての光を利用したフォトンマシニングでは，図１．２示すように従来のマシニング技術では不可能であった形状付与加工や機能付与加工，また原子・分子レベルの加工から大型構造体の加工に至るまで，柔軟かつ広範囲な加工技術を実現させることが可能となっている．また，これらの新技術には特筆すべき以下の特徴がある．

（１）　超高エネルギー密度加工が可能
（２）　反力が無く，オイルフリーの加工技術を実現
（３）　除去・付与加工が可能
（４）　多機能な生産手段を提供
（５）　加工に際しては時間・空間・雰囲気を自由に選択可能
（６）　加工材料の選択が自由
（７）　リモート加工が可能
（８）　インプロセスモニタリングが可能

このようなフォトンマシニングを実現するためには，図１．１に示すように，（１）プロセス応用技術をはじめ，それを実現するための要素技術となる（２）フォトン伝送・計測制御技術，及び（３）フォトン発生技術の重点的研究開発が重要となる．また，これらの複数分野に関連する周辺技術の研究開発については，各分野の有機的かつ緊密な連携の基に推し進めていくことが，全体目標の達成のために必要不可欠となる．

１．３　レーザープロセス技術の研究開発課題

２１世紀の機械関連産業への多大なインパクトが期待されるフォトンマシニングの研究開発項目は，以下の３点に集約される．そこでは，光と物質の相互作用に関するの未踏領域に一歩踏み込み，未解明科学を技術の域にまで昇華することがキーポイントとなる．

（１）　プロセス応用技術

フォトンのエネルギーを利用した物質の結合状態の変換や，フォトンを微小領域に閉じこめ超高温・高圧場を発生させ，それを新たなプロセス技術に応用する技術の研究開発を推進する．

①フォトンと物質の相互作用の解明

高出力・高密度のフォトン（光）が物質と相互作用すると，物質は超高温になりプ

フォトンテクノロジー

・機械工学に新たな概念（フォトンマシニング）を導入し，２１世紀には機械工学が技術・知識の原点となることをめざして，フォトンの量子としてのエネルギーを利用し，物質の結合状態を変えることや，フォトンを微小領域に集めることにより，超高温・高圧場を発生させ，新たなプロセス技術を開発する．

開発技術

1．フォトン発生技術
　・ＬＤ励起固体レーザーの開発
　・ファイバーレーザーの開発

2．フォトン伝送・計測制御技術
　・高出力伝送用光ファイバーの開発
　・高品質ビーム保存光伝送システムの開発
　・補償光学システムの開発

3．フォトンプロセス技術
　・新材料の創製
　　（超微粉，クラスター技術，同素体の創製技術）
　・光を使った分子オーダーの加工技術の開発
　　（分子間の付与切断，新機能の発現，アブレーション）
　・接合技術の開発

フォトンと物質の相互作用の解明

フォトンマシニング

＝エネルギーと情報を持った光のツール＝

特長

・多機能な生産手段
・超高エネルギー密度加工
・反力のない加工
・除去，付加加工可能
・時間・空間・雰囲気が自由に選択可
・材料選択が自由
・遠隔制御性が大きい
・インプロセスモニタリング可能

図１・１　フォトンマシニングの概念

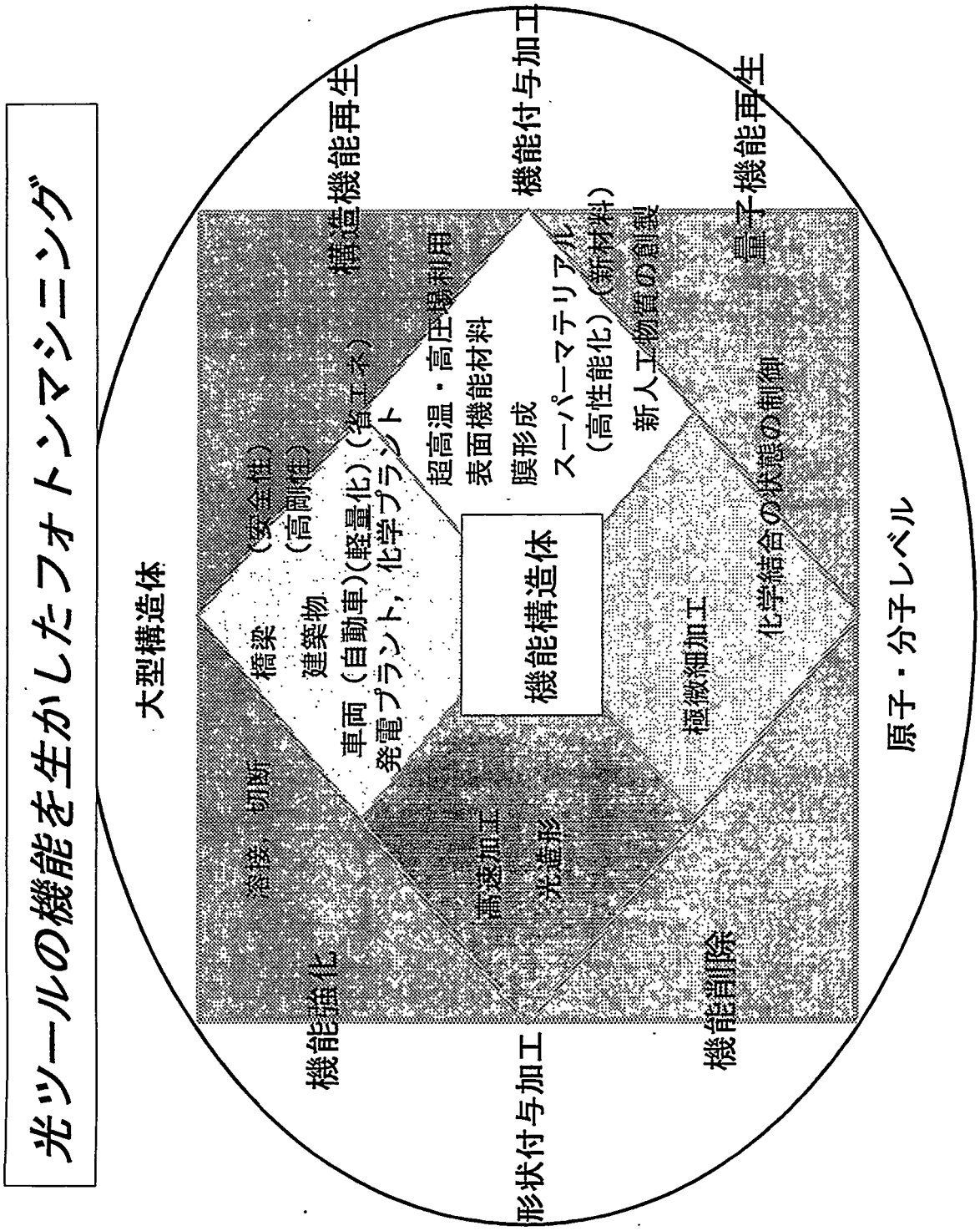


図１．２　フォトンマシニングの機能

ラズマ化される．この時に発生するプラズマの性質は，温度，密度，圧力，イオン価数によって支配されるが，一般には非常に不安定であり，その変化は空間的・時間的ゆらぎを伴っている．例えば，時間と共にフォトンの吸収形態や屈折率分布が変化するが，それが新たに発生するプラズマの初期状態を決定することになるため，これら一連のループが複雑なプラズマ不安定性を生み出すこととなる．また，これらの変化が極めて短時間に起こることも，プラズマの挙動の十分な理解を妨げる重要な要因となっている．

その結果，溶接においてはビームの照射位置や材料表面に到達するエネルギーが複雑に変化する．従って，この変化を十分に理解し能動的に制御しなければ，精度の良い溶接は実現できない．また，レーザーによる超微粒子の生成においては，発生するプラズマのゆらぎが粒径不揃いの原因となる．レーザーアシストガスデポジションにおいては，プラズマのゆらぎが生成される同素体の種類の相違や量子ドットの構造変化を引き起こすこととなる．

すなわち，レーザーを制御しプラズマ状態を安定化させることを目指した，広い意味でのフォトンと物質の相互作用の解明は，関連技術の発展には必要不可欠な普遍の研究テーマとなる．

②レーザー接合（溶接）技術

現状：フォトンと物質の相互作用が不明．溶融材料の挙動が不明．

キーテクノロジー：プラズマによる照射位置とパワーの変化の解明

③レーザーアシストガスデポジション

現状：基本的技術が未完成．フォトンと物質の相互作用が不明．

キーテクノロジー：超高温，高圧場の達成と制御技術の確立．

④その他

・レーザーアブレーションによる表面微細加工技術及び薄膜作成技術

・レーザー切断の高速化技術

・レーザークラッディング，レーザーアロイイング，レーザーグレージング．

・レーザー熱処理技術の高速化技術

（2）　伝送・計測制御技術

①ファイバー伝送技術

現状：紫外及び赤外のハイパワーレーザー光を伝送するファイバーが存在しない．

キーテクノロジー：ファイバーの耐熱性を著しく向上させることによってハイパワーレーザー伝送を可能にする．そのため，ファイバー材料の均質化を図る．

②アダプティブオプティクス技術

現状：ハイパワーレーザー用の波面補正技術が開発されていない．

キーテクノロジー：位相共役技術やデフォーマブルミラー技術を用いて，波面を補正する．この場合，光学材料や部品の破壊を起こさない高精度な加工技術及び光学系の熱変形を予測制御する技術の開発が重要となる．

（3）　フォトン発生技術

プロセスに利用するレーザーの開発を行う．このためには，レーザーの高出力化，

高効率化，高品質化，さらには産業応用に欠かせない小型化を達成しなければならない．これらの要求を満たすＬＤ励起完全固体レーザーの研究開発が重要となる．

①レーザー発振器の開発

現状：大型，低発振効率，高コスト，メンテナンスが困難．

キーテクノロジー：ＬＤ励起完全固体レーザー発振器（高出力・高寿命のＬＤ開発，ファイバーレーザーの開発，発振媒体を単結晶から焼結体へ，位相共役技術）

このように，フォトンテクノロジーの技術開発ではプロセス応用技術と，それを支える要素技術となるフォトン発生技術及びフォトン伝送・計測制御技術の開発が必要となる．要素技術の開発の進展が，中心となる項目の研究開発に大きく影響を及ぼすことが予想されることから，それぞれの研究項目の間で緊密な連携をとりながら研究を進めていく必要がある．

１．４　期待される効果

レーザープロセス技術（フォトンマシニング）の研究開発と，それに基づく応用研究により，以下のような波及効果が期待される．

（１）　除去加工・接合技術・熱処理の研究開発により，高品位，高速接合技術を完成することができ，接合部の構造安全性の向上と生産効率の向上が図れる．具体的には，例えば，

①除去加工：自動車の高速薄板切断・アンテナの穴の切断，橋梁・造船における厚板の切断，車両の車体構造の薄板切断（軟鋼，ステンレス鋼，アルミ合金），電気・電子分野における板金加工（炭素鋼・ステンレス鋼の複雑形状切断），航空機のタービンブレードの冷却用穴あけ，ガスタービンの冷却用穴あけ，蒸気タービン静翼スペンサーリングの切断．

②接合技術：自動車のボディ・エンジン回転部品・燃料タンク・ボンネットやトランク（アルミ合金）・ギヤ類のレーザー溶接，鉄鋼分野における珪素鋼板・鋼管溶接製造ライン・コルゲート鋼板（浪板と平板の組合せ）のレーザー溶接，電機・電子分野におけるブラウン管電子銃・電動モーターのレーザー溶接，加圧水型原子炉（スリーブ溶接）・燃料集合体のレーザー溶接．

③熱処理：自動車シリンダ内のレーザー焼き入れ，船舶用２サイクルエンジン用シリンダライナー・小型船ピストンリング溝のレーザー焼き入れ（長寿命化），耐熱・耐摩耗材（アルミ合金）のレーザー肉盛溶接，パイプ内面のレーザークラディング，電磁アクチュエーターのレーザー熱処理．

（２）　レーザーアシストガスデポジション技術の開発により，造形技術，トライボロジー部材，合金，セラミックス，電子デバイス，医薬品の新たな展開が期待できる．具体的には，例えば，

①３次元構造体・各種被膜：金型・精密機械部品，マイクロセンサー，アクチュエータ，精密案内面・バブルシート・ピストンリング（耐摩耗性被膜），蒸気タービン翼・ガ

スタービン翼・各種配管（耐エロージョン・コロージョン被膜）.

②スーパーマテリアル：自然界では作成困難なＰｂ－Ａｌ合金，Ｗ－Ａｌ合金，ブロンズ.

③電子デバイス：量子ドット，面発光素子，低電気抵抗配線，超磁性材料，超伝導材料，半導体，強力モーター，スピーカー，太陽電池.

④その他：抗癌剤（医薬品），人工骨（バイオ材料）.

（３）　超微粉・クラスター分野の新たなる知見により，新しい機能を有する新物質の創製が期待できる.

（４）　伝送・計測技術の開発により，高出力レーザーのファイバー伝送による加工のフレキシビリティが拡大される.

（５）　アダプティブオプティクスによってもたらされる波面補正技術は，精密機械産業や天体望遠鏡において問題となる大気のゆらぎ補正等に大きなインパクトを与える．具体的には，近接場光学顕微鏡技術：生体試料の計測，光エレクトロニクス材料・素子の評価，量子ドットの発光スペクトル測定，面発光素子評価，色素分子の蛍光測定，非線形現象の高分解測定，金属薄膜の表面プラズモン波の検出，表面プラズモンセンサーへの応用.

（６）　ＬＤ励起完全固体レーザーの研究により，高出力，高効率，高品質，かつ小型のレーザーが開発されるため，光をツールとするプロセス技術に大きなインパクトを与えると共にレーザー産業の拡大につながる．具体的には，例えば，

①材料・デバイス分野：高輝度ビームによる脱真空・選択励起プロセス，超微粒子を用いた機能構造体作成や高品位薄膜の実現.

②機械加工：自動車工場での金型不要・金属切断・３次元溶接，光加工工場の実現.

③紫外光レーザー：半導体露光，光ＣＴ，癌治療，大容量メモリ，通信情報機器.

第２章 研究開発状況

２．１ 当該研究分野における調査検討状況

平成６年度（社）日本オプトメカトロニクス協会に，フォトンテクノロジーセンター（センター長は，須賀昭雄日本オプトメカトロニクス協会理事）を組織し，フォトンテクノロジー調査研究委員会（委員長は，辻内順平東工大名誉教授）を設置した．フォトンテクノロジー委員会はレーザープロセス分科会，フォトン伝送・制御分科会，大出力レーザー分科会から構成され，最新プロセス技術（分子加工制御，超微粉・クラスター，切断・接合，表面改質等）に主眼を置き，他にＸ線から赤外線迄の高出力レーザー技術，発振器，最新計測，最新短波長プロセス技術の動向等を調査し，とりまとめた．また，各々の市場動向についても言及している．そしてレーザー加工機産業の拡大，レーザー加工技術による産業の活性化，新しい産業創出への期待が大きいと結論づけている．

また，（財）産業創造研究所においては，高品位レーザービーム発生のための位相制御技術とその応用動向調査委員会を設置し，平成５年度及び平成６年度の２年間にわたり，調査研究を実施した．平成５年度（委員長は，計量研松本弘一室長）は光の位相技術についての現状と今後の動向に関する詳細な調査を実施し，平成６年度（委員長は，上江州由晃早稲田大学教授）は前年度のさらなる調査に加えて，未来技術として可能性が期待される技術についても詳細な調査を行った．

さらに，（株）レーザー応用工学研究所においては，平成６年度に複機能部材構造制御技術の研究開発，レーザー応用先進加工システム技術（委員長は，松縄朗大阪大学教授）の調査研究を行い，まとめた報告書が新エネルギー・産業技術総合開発機構に提出された．

このほかの関連調査研究は，

（１）先端オプティクス用光新機能素子技術に関する調査研究報告書（平成７年５月），（社）日本オプトロメカニクス協会

（２）オールソリッドレーザー応用技術調査専門委員会，（財）光産業技術振興会協会

等である．

２．２ 当該研究分野における国内の研究開発動向

レーザーが初めて発振された１９６０年から１０年も経たない内に，機械・電子・情報・印刷産業などでのレーザー利用技術が導入されはじめたが，国家プロジェクトとして開始されたのは，昭和５２（１９７７）年度からの「超高性能レーザー応用複合生産システム」である．当時，通商産業省工業技術院における大型工業技術研究開発（大プロ）制度（昭和４７年度開始）では，システム，プラント技術を中心とした先導的大型工業技術の研究開発を目的としており，当プロジェクトでの開始は，わが国におけるレーザー応用技術の大型化・システム化を目指すものであった．以降，科学技術を基盤とする産業の成長の中にあって，レーザー技術も目覚しい躍進をし続け，レーザー装置の高度化・高性能化が進展し，広く産業界に貢献してきた．この過程には，新規レーザーの開発およびその利用技術の展開が進み，産業の高度化の牽引力として重要な位置を占めてきた．それは，その後にレーザー技術開発を核とする国家プロジェクトが順次施行されてきた足跡からも明

らかである．ここでは，それらのプロジェクトが生まれた背景や内容の概略を把握し，将来への展開を図るための資料とする．

なお，ここで取り上げたプロジェクトはあくまでもレーザー装置とその利用技術の研究開発が課題の核心であり，計画の主体であるものを対象とした．一部にレーザー・利用技術が関与しているプロジェクトはその他にも多く見られたが，それらは除外した．

また，大型プロジェクトや産技プロジェクト以外にも，科学技術庁振興調整費研究課題として「大出力・波長可変レーザー及びレーザープロセッシング技術に関する研究」（昭和５９～６３年度）が施行され，①大出力・波長可変レーザーの開発，および②波長選択性を利用した材料の合成・処理技術の開発が行なわれたが，詳細は割愛した．

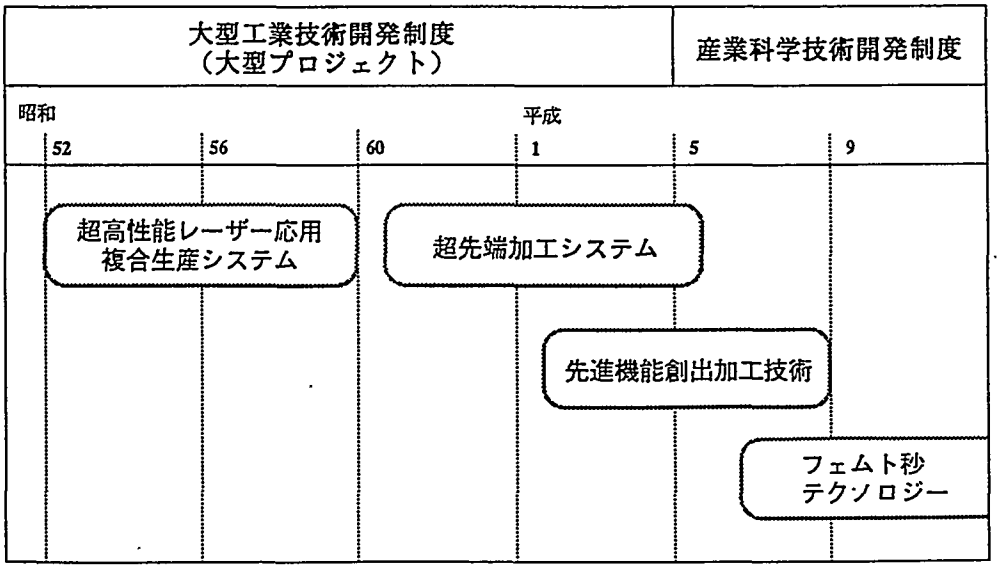


図 2.2.1.1　国内におけるレーザー関連国家プロジェクトの推移

２．２．１　終了プロジェクト

１）「超高性能レーザー応用複合生産システム」（昭和５２～５９年度：８年間）

昭和５０年代を迎えて，将来の機械工業の発展を図る上で，鍛圧機械，工作機械などのいわゆるマザーマシン（機械を作る機械）に関する自主技術の開発及びその技術的蓄積を図ることが急務であった．国民生活の向上とともに，需要者からの要請は多種多様なものとなってきており，製品の多様化傾向が強まり，既存の生産体系ではこれらの需要に応じてゆくことが困難になりつつあった．さらに，機械工業は技術集約型産業の中核的存在ではあるものの，特に，多品種少量生産分野においては，熟練工の不足や単純な繰り返し作業，ダーティーワーク，危険作業などの劣悪な労働環境などの問題点も抱えており，これらの問題解決のためにも，新たな生産システムの開発が要請されていた．

本プロジェクトは，それらの背景を踏まえて，多品種少量生産の機械構成部品を金属素材から一貫したシステムで柔軟かつ迅速に生産できる「複合生産システム」の開発に必要

な技術を確立することを目標に，新成形・切削加工技術，レーザーを応用した新加工技術，新組立技術，自動診断技術等の要素技術の研究開発を行い，これらの要素技術を有機的に結合して，従来の鍛造機械，工作機械等に代わる新生産システムの開発を行った．

最終的な主たる成果は，当時世界最大級の２０ｋＷ炭酸ガスレーザーを完成させ，素材加工機構システムの実用化試験が達成されたことである．

２）「超先端加工システム」（昭和６１～平成５年度：８年間）

近代科学技術の導入により産業の高度化が一段と進み，エネルギー，精密機械，エレクトロニクス，航空・宇宙等の先端技術分野においては，積極的な技術開発が要請されていた．また，技術の進歩に伴って材料仕様の一層の高度化や，加工困難な材料の出現，電子技術の進歩に機械部品の精度の追従が困難になりつつあるという問題に直面していた．

一方，精密機械技術のシーズについては，近年進歩が著しいエキシマレーザー，イオンビームの活用と，これらのビームを用いて精密加工した部品や新材料からなる機械加工装置を用いることにより，従来とは異なる方式で超精密加工を実現する可能性がでてきいた．

以上のような観点から，本プロジェクトでは，超先端加工装置技術として，

① 短波長高品位エキシマレーザー技術および大出力高繰り返しエキシマレーザー技術，
② 高集束広域エネルギーイオンビーム技術および大電流高エネルギーイオンビーム技術，
③ 自由局面対応超精密機械加工装置技術
④ エキシマレーザーおよびイオンビームを用いた超先端加工技術，超先端加工を支援する超精密計測評価技術

から構成された．

このプロジェクトで得られたレーザー関係の成果は，生産加工用として世界最大級の２ｋＷエキシマレーザー装置の開発，リソグラフィ用狭帯域ＫｒＦエキシマレーザー装置の開発，長寿命化エキシマレーザー装置の開発，およびレーザーＣＶＤ法による高耐光強度多層膜の作製などである．

２．２．２　現行プロジェクト

１）「先進機能創出加工技術」（平成２～８年度：７年間）

高齢化社会への移行，環境・防災に対する要求の高度化に応えるため，人工臓器，高性能触媒，高感度センサーの開発が嘱望されているが，生体との適合性，センサーの機能の限界等により，そのニーズには十分に応えられていない．このようなニーズに応えていくため，飛躍的に高度な加工技術の開発および産業分野の育成が急速に求められている．すなわち，人工臓器の生体適合性，安全確保のためのセンサーの識別能力等の機能を付与するためには，従来の加工技術では限界がり，革新的な化学加工的プロセスが必要不可欠である．これらの観点から，本プロジェクトでは，人工臓器，高性能触媒，高感度センサー等の開発に必要な生体適合性，特定ガスの選択的な検知等の先進機能を部材に付与するための，革新的な化学加工的プロセスの研究開発を行う．

研究内容を技術的に大別すると，

① レーザーによる選択励起等により，金属類の純度を極限まで高めて，その特性を飛躍的に向上させようとする超高純度分離加工技術，
② プラズマ，レーザー，加速イオン，分子ビーム等を複合的に用いて，超微粒子の結晶を制御し，傾斜組織や超薄膜の多層ハイブリッド材等を創製しようとする超微粒子結晶制御技術，
③ 超高圧，超強磁場，極低温，有機分子ビームや高品位フォトンによる極限的な複合反応場によって，分子配向等の構造制御を図り，機能特性の向上を実現しょうとする高機能有機材料合成技術，
④ 以上の課題を横断的に支える計測・評価技術
からなる．

物質変換のエネルギー源として，レーザーの他にイオンビーム，プラズマなども含むものであるが，約半数は何らかのレーザー，特にエキシマレーザーが多いが，使用される．ただし，本プロジェクト全体の特徴は，既製のエキシマレーザーやプラズマ，イオンビームなどの手法と特徴的な反応場を複合化させて革新的な化学的加工法を開発するものであり，新たなレーザー開発や新規レーザーによる利用技術は含まれていない．

2）「フェムト秒テクノロジー」（平成７～１６年度：１０年間）

２１世紀の高度情報化社会を支える新たな産業基盤技術の創出を目指し，光と電子のフェムト秒時間領域（10^{-15}～10^{-12}秒）で制御する技術の研究開発を通じて，従来のエレクトロニクス技術における速度限界を超え，かつ新機能性を包含する超高速エレクトロニクス技術の実現に必要な基盤技術を確立することを目的としている．

研究開発の概要としては，フェムト秒時間領域の物理現象，化学現象の解明を行うとともに，それらに基づく要素技術開発並びに関連応用技術の展開を図る．具体的には，フェムト秒レーザー技術，フェムト秒材料関連技術，フェムト秒光エレクトロニクス技術，フェムト秒システム化技術の研究開発を行う．

２．３　当該研究分野における海外の研究開発動向

２．３．１　米国におけるレーザプロセス関連技術開発の現状

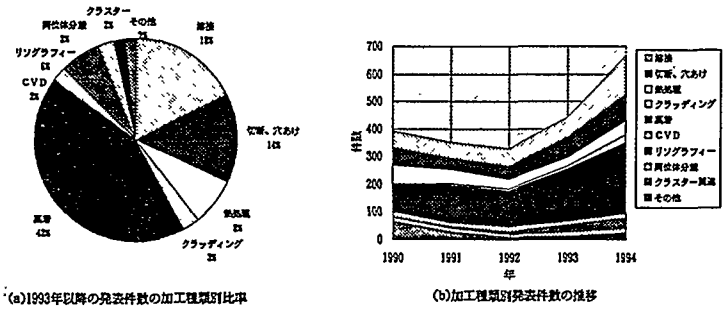
米国では民需，軍需の双方をカバーする技術の開発を目的として1994年にスタートした技術再投資計画 (TRP:Technology Reinvestment Pro-gram) の中で，精密レーザ加工がテーマとしてとりあげられ，21の大学，研究機関及び企業が参加して研究が行われている．この計画では，炭酸ガスレーザやランプ励起の固体レーザに代わるレーザとして，平均出力6kW，ピークパワー25MW を有するダイオード励起固体レーザの開発と，その高速，高精度加工ツールとしての応用技術の開発を目指している．対象とする加工は，金属，複合材の精密穴あけ，切断，高精度溶接及び熱処理など多岐にわたっている．

図2.3.1(a) は米国における1993年以降のレーザ加工に関する発表件数を加工プロセス別に分け，その比率を示したものである．蒸着関係が最も多く全体の４割強を占め，溶接，切断・穴あけの比率が低いことがわかる．蒸着関係は実用化の度合いが低く，基礎研究が多いこと，逆に溶接，切断・穴あけでは実用化の度合いが高く，応用研究が多いことから，

前者の比率が高い米国は基礎研究重視傾向とも受けとることができる．

図2.3.1(b) は米国におけるレーザ加工関係の発表件数変化を示している．発表件数は技術再投資計画に向けた動きが開始された1992年以降急激な伸びを示しており，研究活動の活発化がうかがえる．とくに特定の加工プロセスに偏重することなく全体的な伸びを示しているのが特徴的で，1992年までほぼ横這いもしくは減少傾向にあった，溶接及び切断・穴あけも件数が増加している点など，TRP の影響がうかがえる．

図2.3.2 は1993年以降のレーザ発振器関係の発表の比率をレーザの種類別に示してる．米国では半導体レーザ，YAG レーザの比率が大きく，これらはまさに TRP の開発課題と一致している．レーザ発振器関係全体の発表数はレーザ加工と同様，1992年以降，急激な増加が見られる．これらの他，レーザの伝送・計測技術に関する発表の数も1994年には1992年比で1.4倍になるなど，米国においてレーザに関する研究は急激に活発化してきているといえよう．



(a)1993年以降の発表件数の加工種類別比率　　(b)加工種類別発表件数の推移

図２.３.１　米国におけるレーザ加工の研究動向

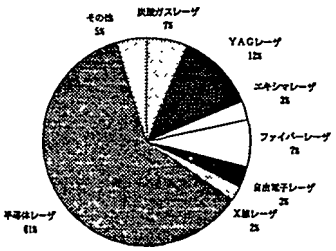


図２.３.２　米国における発表件数のレーザ種類別比率

2．3．2　欧州におけるレーザプロセス関連技術開発の現状

ヨーロッパにおける技術開発プロジェクトとしては，EUREKA 計画が有名である．この中には「メガパルスＱスイッチレーザによる各種新材料プロセス技術に関する研究」，「製造と生産への銅蒸気レーザの応用」，「先進製造技術のための固体レーザ」，「ハイパワー固体レーザ」，「レーザによる表面改質」，「ハイパワーレーザの産業への応用評価」といった,本フォトンテクノロジーとも関係の深い領域をターゲットとしたプロジェクトがあり，長期にわたる取り組みが行われている．

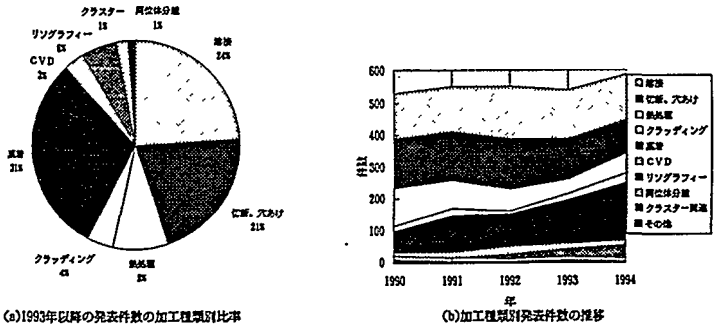
また，ドイツでこれらとは別に「レーザ2000」と呼ばれるプロジェクトが1994年にスタートした．これは，ＬＤ励起固体レーザ，ガスレーザの高出力化，Ｘ線レーザなど発振器開発から，光学系開発，そして精密加工，アブレーション等，加工技術の高度化やバイオテクノロジー，医学など広い領域の技術開発が行われている．

図2.3.3(a) はヨーロッパにおける1993年以降のレーザ加工に関する発表件数を加工プロセスごとの比率で示したものである．米国と比較すると，蒸着と溶接，切断・穴あけがほぼ同じ割合となっていることが特徴で，これは，レーザ加工技術が基礎から応用まで，幅広く研究されている結果と見ることができる．とはいえ，図2.3.3(b) に示すように，炭酸ガスレーザによる薄板切断など実用段階に達した領域をもつ，切断・穴あけは件数が減少しており，他領域へ研究がシフトしている．全体としては近年の米国ほど急激ではないものの漸増傾向にある．

発振器開発の分野では米国同様，半導体レーザと,高輝度化などの技術的課題を残したYAG レーザの他，自由電子レーザに関する発表が多い（図2.3.4）．

総発表件数では発振器開発は，レーザの伝送・計測技術ともに，安定した伸びを示している．

最後に，本節における発表件数は JICST による機械検索の結果であることを付記しておく．



(a)1993年以降の発表件数の加工種類別比率　　(b)加工種類別発表件数の推移

図2.3.3　ヨーロッパにおけるレーザ加工の研究動向

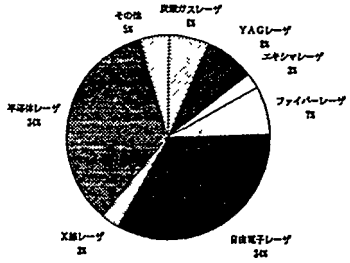


図2.3.4　ヨーロッパにおける発表件数のレーザ種類別比率

3．産業動向と研究開発ニーズ

3．1　産業動向

近年のバブルの崩壊と急速なる円高により我が国の産業界は思わぬ打撃を受け，その結果としてあらゆる分野において従来型の産業構造を大幅に変革していく必要に迫られた．ここへ来て，経済動向の乱れもひと段落し，各分野ともようやく落ちつきを見せ始めてきてはいるが，中長期的にはいずれの産業分野においても，世界の中での生き残りを賭けて，今後も変革を続けていく必要がある．

製造業分野においては，労働集約型大量生産から，機能・知識集約型の高付加価値生産へ，３Ｋからの脱皮といった，質的革新が要請されている．製品に対するニーズにおいても，高度情報化社会を支えるための，新合金・新物質の創製，高度機能のデバイス・マイクロマシンの開発製造，２４時間社会，環境調和型社会，高度福祉社会を支えるための高信頼性製品・施設・設備等のニーズが，急速に高まってきている．

製造業分野に不可欠な基盤である機械分野においては，こうした経済フロンティアを支え，さらに発展させるための，加工技術のマイクロ化・知能化に向けた技術革新が必要となっている．

各産業における今後の開発の方向性，課題，これに応じた加工システムへの要求について，（社）オプトメカトロニクス協会フォトンテクノロジーセンターが実施した「高出力レーザー開発・実用化における産業分野別ユーザーニーズと将来予測に関する市場動向調査報告書」に基づいて，産業分野別に，表３．１．１にまとめた．

この表から，

・輸送機械産業における，輸送機器の軽量化，高剛性化，高安全化，高耐久化
・重機械産業，建築・建設・土木産業における，構造物等の安全性，構造健全性の向上
・金属・鉄鋼産業における部材の高剛性化，軽量化

といった要求に応えるための，高性能・高品質・高信頼性機械加工システム

・電気電子，光学機器，精密機械産業における部品の小型化・高集積化
・石油・化学産業における製品の高機能化

といった要求に応えるための，超微細加工システム・新機能材料／構造体作製プロセス

が加工技術への要請となっていることがわかる．

3．2　研究開発ニーズ

前節で述べたことを言い換えると，高性能・高品質・高信頼性機械加工システム，超微細加工システム・新機能材料／構造体作製プロセスの確立が加工技術への２つの大きな要請となっている．

フォトンは制御性のよい高品質な光エネルギーであり，これをツールとした加工技術は，従来のマシニング技術では困難であった形状付与加工から機能付与加工まで，また原子・分子レベルの加工から大型構造体の加工まで，柔軟かつ広範囲なマシニングプロセスを実現しうるものである．

高性能・高品質・高信頼性の機械加工システムを実現する上では，１）高精度加工，２）高速加工，３）高品質加工が可能，という特徴を持つフォトンプロセスは，非常に重要な

キーテクノロジーとなる．特に，軽量化・省エネルギー・リサイクル性の要望から需要の大幅な拡大が見込めるアルミニウム，ステンレス鋼や超高張力鋼等の薄板溶接構造物等の溶接においては，従来の溶接法では変形が大きく精度及び生産効率の観点から問題が大きいため，低歪・高速溶接可能なレーザー溶接プロセスの確立が強く期待されている．

一方，超微細加工・新機能材料／構造体作製においては，フォトンプロセスは，1）材料，2）雰囲気を選ばない，3）高制御性，4）高能率プロセスという特徴を有しており，新たなニーズに応じた製品を作製できるプロセスとして重要である．特に，このプロセスにより作製される超微粒子応用量子機能構造体／被膜は，小型高性能ディスプレイ等，光・電子産業における次世代製品への応用が期待され，大きな市場が見込まれている．

表3．1．1には，産業から見た加工技術への要請に応えられる，フォトン応用プロセスとその製品，更にその市場性について，併せて示した．

フォトンマシニング技術は，従来加工技術の高性能化代替技術として，また，新製品（材料，機能構造体）創製のための加工技術（微細加工技術，量子加工技術等）として，今後増加する加工技術ニーズ・今後大きな市場が見込める製品製造の要求に応えうる，広範な産業分野において極めて有用な加工技術と位置づけることができる．そして，この技術の確立は，全産業の基盤技術である加工技術の技術革新を通して，産業競争力の維持強化と新産業創出に大きく寄与するものと考えられる．

しかしながら，現時点では，以下のような問題点がある．

①プロセス技術そのものが未完成．工業的な用途に用いるためには，プロセスの最適制御が不可欠．

②プロセスに用いるフォトンの伝送・制御において，高品位伝送が不可能．

③プロセスに用いるフォトンの発生において，フォトンコストが高い．

このような課題を解決し，フォトンマシニングの技術を実現するための，光学・材料科学・量子力学・計測制御工学等の広範な理論・知識・技術を集約した研究開発が必要となる．すなわち，

（1）プロセス技術

溶接を中心とする光切断／接合／熱処理技術等の熱加工技術，超微粉技術を中核とする機能構造体／新材料作製技術，レーザーガスデポジション・アブレーション等の新表面・被膜作成技術，機能回復技術等が非常に重要な研究開発課題となる．

また，プロセスの潜在能力を引き出し，信頼性を高めるためには，インプロセスモニタリング，シミュレーション技術の開発が非常に重要となる．このためには，レーザーで誘起されるプラズマの挙動（空間分布と時間変化）等のフォトンを物質に照射した場合に生ずる諸現象の把握等を行うことが不可欠となる．

（2）フォトン伝送計測制御技術

ファイバーを中心としたハイパワー伝送システム，ビーム品質を補償する高品位フォトンゴトン計測制御技術などの開発が非常に重要である．

プロセスに最適な光を供給するための，高エネルギー・高品位フォトン伝送系システムを実現しなければならない．

（3）フォトン発生技術

固体レーザ材料を中心とするレーザー・光制御材料技術，高出力半導体レーザー（LD）

技術，高機能光学素子技術及びＬＤ励起固体レーザー技術等の開発が重要となる．

ＬＤ励起完全固体レーザーは，高効率，連続発振，小型・軽量，易移動性，メンテナンスフリーである高品位フォトン発生源として期待されており，この開発は産業界へのプロセス技術の普及のキーとなるものである．

第４章においては，これらの研究開発課題における現状，問題点，研究動向の詳細について，詳述する．

表３．１．１　産業分野別，産業動向と研究開発ニーズ（その１）

産業分野		開発の方向性	製品への要求	加工技術への要請	フォトン応用ﾌﾟﾛｾｽ例	市場性
輸送機器産業分	自動車産業	①安全性向上 ②低環境負荷 ③省エネルギー ④消費者ニーズ多様化への対応	①高剛性化 ②軽量化 ③多品種少量生産	①加工性能アップ ②マルチツール加工 ③高速加工	①切断・穴あけ ②薄板溶接 （ブランク溶接） ③表面加工	①超高速切断機の導入→１００ライン程度 ②レーザー溶接ロボットの導入→１０００台程度
	鉄道車両産業	①車両の高速化	①軽量化 ②高剛性化	①加工性能アップ	①低歪溶接 ②高精度溶接 ③高速度溶接	①アルミ製車体用レーザー→250台程度 ②ステンレス製車体用レーザー→250台程度
	船舶産業	①船舶の高速化 ②廃船のリサイクル	①軽量化 ②高剛性化 ③多品種少生産	①加工性能アップ ②マルチツール加工	①低歪溶接 ②高精度溶接 ③高速度溶接 ④厚板溶接 ⑤切断	①高速アルミ船 ②廃船の解体
航空機・宇宙産業分野		①高信頼性	①高剛性化 ②軽量化	①加工性能アップ ②マルチツール加工	①低歪溶接 ②高精度溶接	①新型航空機製造
プラント（重工業）産業分野		①安全性・高信頼性 ②２４時間稼働、メンテナンスフリー	①高剛性化 ②軽量化	①高精度加工 ②高信頼性加工	①切断・穴あけ ②溶接 ③表面加工 ④厚板加工	①発電設備・プラント類関連 ②配管パイプ製造 ③建設機械・重機械
建築・土木産業分野		①安全性向上 ②低コスト ③構造健全性 ④耐環境性 ⑤建設の容易性	①低コスト化 ②部品数・組立作業の低減 ③多品種少量生産 ④水中での加工 ⑤アルミ住宅・ビル建材の使用 ⑥海上空港建設 ⑦超々高層ビル建設	①加工性能アップ ②マルチツール加工 ③水中溶接システム ④小型化	①厚板溶接 ②水中溶接 ③屋外遠隔操作可能な小型大出力レーザ ④低歪溶接	①ＴＩＧ／ＭＩＧ溶接機からレーザー溶接機への切り換え→700～800台程度
鉄鋼産業分野		①高強度・軽量構造部材 ②高信頼性部材	①多品種多量生産	①高速加工 ②低歪加工	①鋼管溶接 ②コルゲート鋼板溶接 ③ハニカム鋼板溶接	①各産業用鉄鋼素材

表3．1．1　産業分野別，産業動向と研究開発ニーズ（その2）

産業分野	開発の方向性	製品への要求	加工技術への要請	フォトン応用ﾌﾟﾛｾｽ例	市場性
新素材産業分野	①耐環境材料 ②易加工材料 ③機能（付加）材料	①超微粉作成	①新材料製造 ②機能付加加工	①表面合金化等表面加工 ②量子加工 ③微粒子・クラスタによる合金・焼結体、多層膜、傾斜組成材料	①ポリシング材料 ②固体潤滑材料 ③超耐環境性易加工新合金 ④塑性加工可能な新セラミックス（スーパーﾏﾃﾘｱﾙ） ⑤耐食性材料（金属において５千億円セラミックスにおいて３千億円）等 ⑥磁性材料
一般加工産業・機械部品産業	①高硬度製品・部品 ②耐環境性製品・部品 ③高装飾性製品 ④ニーズの多様化	①多品種少量生産	①表面改質の低コスト化 ②難加工材料の加工技術	①微粒子による高硬度被膜形成 ②微粒子による耐環境性被膜 ③微粒子による潤滑性被膜 ④レーザアニール（グレージング）による高硬度被膜	①各産業用部材
電気電子産業分野	①小型・軽量化 ②高性能化	①部品の小型化 ②部品の軽量化	①超微細加工	①エキシマレーザ等による量子加工 ②超微粒子・クラスタによる機能性被膜／構造体加工	①誘電体薄膜素子 ②圧電体薄膜素子 ③超伝導薄膜素子 ④発光薄膜素子 ⑤ダイヤモンド被膜・フラーレン被膜 ⑥光記憶素子 ＊レーザーによる機能被膜だけで１０年後の市場規模１兆２千億円 ⑦ディスプレイ ＊＊２００１年には２兆円規模（山一証券経済研究所予測）
光学機器・精密機械産業分野	①小型・軽量化 ②高性能化	①部品の小型化 ②部品の高集積化	①超微細加工	①エキシマレーザ等による量子加工 ②超微粒子・クラスタによる機能性被膜／構造体加工	①マイクロマシン（部品）
石油・化学産業	①プロセスの簡略化 ②新機能薬剤・薬剤担体	①低コスト化 ②高機能化	①熱化学反応以外の新プロセス	①光化学反応による新ポリマー ②超微粒子・クラスタによる機能性被膜／構造体加工	①化粧品（１０年後１５０億） ②触媒 ③ドラッグデリバリーシステム

第４章　研究開発課題

４．１　はじめに

レーザー技術を中心とするフォトンテクノロジーは，物理学及び化学に基づいて想定される潜在的能力が極めて高く，従来の材料加工技術では達成不可能な様々な革新的技術の確立が期待されるだけでなく，従来技術もフォトンテクノロジーに置き換えることにより飛躍的な精度向上，加工速度向上，信頼性向上，等が見込まれている．この意味で，フォトンテクノロジーは21世紀において産業界における中心的基盤加工技術になることは間違いない．フォトンという量子がカバーしうる加工のスケールは，ナノメーター単位（10^{-9} m）からキロメーター単位（10^{3} m）と実に10^{12}倍の範囲に及び，極めて広範な対象の加工が可能である．このように一つの道具で広範なスケールの物質を加工できる方法あるいは技術は従来存在していなかった．そこで，ここではフォトンを用いた物質加工法を「フォトンマシニング」（Photon Machining）と定義することとする．

フォトンマシニングは従来の機械加工，熱加工，化学加工及び量子加工の全てを包含する新しい概念であるが，未だ一般的通念にはなっていない．上記の４種の加工には互いに共通する問題とそれぞれの独自の問題が存在する．先ず，共通するキーワードは新機能加工，超高精度加工，超高速加工，及び超高信頼度加工である．レーザーはこれらの要求を十分満たす要素を潜在能力として持っているが，現状では種々の制約から十分機能しているとは云えない．フォトンマシニングは要素としてレーザー発振器，伝送・集光光学系，ワークテーブル・ロボット，及び加工プロセス技術から成立するが，個々の要素機器及び技術の未成熟性と要素技術間の不整合性から十分に能力が発揮出来ていない．この最大の原因は，レーザーと物質の相互作用の結果生じる極微少領域・極短時間での加工現象に未解明な部分が多すぎること，及びそれを説明する物理学・化学等の基礎理論が十分に確立していない領域が多くあることである．また現状の計測・分析技術がレーザー加工プロセスに対応できないことや，従来型のフィードバック制御が時間分解能及び空間分解能の観点からハード的にもソフト的にも対応できないため，適応制御が全く採用されていない．以上が，加工スケールの大小に関わらず，共通する技術的・学術的課題である．

一方，個々の加工における独自の問題は，加工スケール，機能付与の目的・方法，製品に要求される機能と信頼性保証の程度によりそれぞれ異なる．そのため，現状ではフォトンマシニングという一つの枠組みの中で説明すると混乱を生じる恐れがある．そこで，本章では，先ずフォトンマシニングの概要，レーザーとビームの相互作用と研究開発課題を述べ，ついで各種プロセス応用技術を製品の持つべき機能別に整理するとともに，新規に期待できるプロセスの展望，及び加工制御に関する現状と展望を整理する．

本章における分析と課題の抽出を通じて，フォトンマシニングの概念の確立と普及，及びフォトンマシニングの前に存在する種々の技術的・学術的バリアを如何に乗り越えられるかを整理することにより，全く新しい展望が開けるようになると確信している．このフォトンマシニングは，従来の細分化した工学体系を凌駕した総合的な発想が要求され，同時に異なる専門学術分野及び技術分野が有機的に融合した形での研究開発を遂行する必要がある．

4．2 装置・システム技術

4．2．1 フォトンマシニングの概念

近年，あらゆる産業分野において稼働している「機械」は，電気・電子工学，材料科学，並びに情報科学といった機械工学以外の様々な科学・工学・技術分野において得られた新たな知見や成果を積極的に組込み，また利用することによって，いわば受動的に発展してきたといえよう．フォトンの量子としてのエネルギーを利用して物質の結合状態を変えたり，フォトンを微小領域に高密度に集束し，超高温，超高圧場を発生させて新たなプロセス技術を確立しようとするフォトンマシニング（photon machining）は，従来形の特定の加工単位の形状付与加工を主体とした加工概念と大きく異なり，小は原子・分子レベルから大は大形構造物に至るまでの加工単位を対象とした「形状付与加工」と「機能付与加工」を実現する新たな加工概念である．「機械工学」は，この新たな概念を手に入れることによって従来の機械工学の受動的発展過程には見られなかった能動的展開をはかられることが約束され，２１世紀における科学，技術，並びに人間の智恵の原点となると共に，様々な産業や科学，工学分野に大きな波及効果を与えながら自らも増殖的に展開することが期待されることになる．

ところで，フォトンマシニングは，「レーザ加工に代表される高いエネルギー強度，高い制御性，高い指向性をそれぞれ特徴とする高エネルギー密度のエネルギーソースから得られた高品位フォトンと対象原子・分子との相互作用による加工」として一般的定義がなされよう．その加工プロセスは具体的なフォトンエネルギーの利用形態により大きく分けることができ，基本的には「フォトンエネルギーの原子・分子への直接作用を利用する量子加工」と「フォトンエネルギーを熱エネルギーに変換して利用する熱加工」に分類される．その具体的な加工概念を端的に表現した場合，「在来の機械加工におけるツール（工具）を光に置き換えた加工」としてとらえられ[1]，その特徴を積極的に生かして従来のマシニング技術では困難であった新たな付加加工，機能付与加工，機能構造体創出等の先進加工技術を開拓することが可能である．すなわち，フォトンマシニングそのものが潜在的に有している豊富な能力，機能的特徴，並びにエネルギーソースの制御系等の周辺技術の著しい発展を考慮すると，単なる形状付与加工を主体とする在来加工の補完技術や特殊な代替加工技術としての位置付けではなく，今後様々な産業，工学分野においてニーズが拡大すると予測されている「新機能材料の創出技術」，「新機能の創出技術」，並びに「高附加価値製品の創出技術」といった新たな加工技術や生産科学を確立するための加工概念として新たな展開が期待できる．

上述したように，フォトンマシニング技術は，次世代生産環境を実現する上で基本的に重要となるべきキー・テクノロジであり，具体的には次のような機能的及び構造的な特徴を同時に備えた次世代対応形の高度な加工技術である．ただし，このようなフォトンマシニングを合理的に実現するためには，まず，「フォトンと物質の相互作用の解明」が高度な加工制御を系統的に行う上で，解決すべき最も重要な課題のひとつであると考えられる．また，加工精度の観点から，「絶対精度（accuracy）は高いが相対精度（precision）は低い」といわれている一般的なエネルギー加工特有の問題点について解決することが急務であろう．

a）工具欠損や工具摩耗等の工具管理が必要な在来加工方法，具体的には機械加工を中心とする在来マシニングに代わって，フォトンマシニングは，光を「ツール」とする新たなエネルギーソースによる加工であり，照射する光量子エネルギービームを広範囲にわたり，かつ自由に集束することにより，加工対象の表面に光子エネルギービームを選択的に照射，励起した上で様々な種類のマシニングを行うことが可能である．さらに，光子エネルギービームの照射時間や量子状態を適宜制御することによる局所的な加工や深さ方向等の加工制御を行うことができ，空間的にも時間的にも要求に合わせて自由な選択的プロセスが可能である．

b）フォトンマシニングは，基本的に一方向に集束した高密度の光子エネルギービームによる非接触加工であるため，加工中に在来加工において大きな問題となるような加工反力を生じない．従って，フォトンマシニングシステムの本体構造には，在来のマザーマシンのような過性能な変位基準設計による高剛性機械構造体を必ずしも本体構造として必要としていない．又，在来工作機械構造のような大掛かりな加工熱に対する本体構造の熱変形抑制対策をも必要としない．従って，構造的にはシンプルで軽量，かつコンパクトな本体構造で加工プロセスが実現できる．

c）フォトンマシニングは，超高エネルギー密度による加工であり，そのエネルギー密度を幅広い範囲で制御することにより，加工単位，あるいは加工スケールを自由に設定し，加工対象に最適な加工条件で，かつ最適なエネルギー密度により高効率の加工を実現可能である．

d）フォトンマシニングの対象は，単なる除去加工だけではなく，付加加工，表面改質加工，あるいは材料創成等を広く包含し，在来加工における複合加工では実現できなかった高次元の加工プロセスの組合せによる複合加工を短時間に，かつ合理的に実現加工である．たとえば，化学的に活性な超微粒子等の材料を加工対象の母材表面に付与し，フォトンを照射することにより，焼結，相変態，並びに各種反応を生じさせ，所要の表面創成や形状創成等の新たな機能や特性を加工表面やバルク等，加工対象に発現させることが可能である．

e）フォトンマシニングは，多くの他の種類のエネルギービーム加工において必要不可欠となる加工空間における雰囲気を選ばない．すなわち，加工対象や加工材料に適した，いわゆる適材適所による加工雰囲気の中において所要の加工プロセスを容易に実現できる．すなわち，真空，磁場，電場，超高圧，あるいは極低温といった各種反応場における「加工雰囲気制御加工プロセス」を容易に実現することができる．具体的には，電子ビーム加工やイオンビーム加工等に代表される多くのエネルギービーム加工において大きな制約条件となる超高真空チャンバーを必ずしも必要としない，いわゆる「脱超高真空化プロセス」を実現可能である．このような脱超高真空プロセスを導入することによって，従来必要不可欠であった超高真空環境の実現，維持，管理のための膨大な設備，維持コストを削減することができ，結果的に，デバイスコストを大幅に低減することが可能となる．特に，試

料成長室等の加工空間を大気にさらした後，超高真空に到達させるような場合の多大な装置のデッドタイムを削減できることにもなる．なお，加工対象によっては，材料に適した活性ガス雰囲気中における加工や熱加工によって生じた不要な溶融材料を適当なガスジェットによって除去することも可能である．

ｆ）フォトンマシニングは，在来加工に比べて一連の加工工程を著しく短時間に完了可能であり，究極の高能率かつ高校率な生産形態である「同時同所加工」を実現するフレキシブル複合加工システムを合理的に構築可能である．その結果，フォトンマシニングは，次世代ＦＭＳ（フレキシブル生産システム，flexible manufacturing system）の中核加工機能を担うことが可能である．

ｇ）フォトンマシニングは加工対象としての材料を選ばず，素材選択の多様性が高いことから，決め手となる有効な加工方法が存在しなかった先進複合材料の加工方法や，それら材料の高機能化加工プロセスとして有用である．また，加工エネルギーの制御の自由度が高いことから加工条件の最適化が在来加工に比べて容易であり，ＣＯレーザーとエキシマレーザーとの重畳[(2)]やエキシマレーザーとイオンビームとの組合せ[(3),(4)]等に代表されるような複数のエネルギービームの複合化プロセスにより，現時点において加工が困難とされている加工材料に対しても新たな加工技術を創出可能であり，それら素材加工の過程で新たな機能性材料の創出も大いに期待できる．

ｈ）フォトンマシニングを実現可能な加工システムは，加工系自体の運用に高度な熟練，長年の経験，並びに勘といった不確定因子の比重が高かった在来加工方法に比べて，具体的な加工制御が格段に容易で，かつ制御因子の定量化も可能である．従って，ソフトウエア制御によるコンピュータ援用機械システム系への展開も容易であり，熟練技能や経験的知識の移植も可能である．それに伴い，加工システム全体の高度知能化への取り組みも在来加工に比べて容易である．これらの点から，今後ニーズが拡大する遠隔制御性の高い加工システム構築に有効な加工プロセスであるともいえる．

ｉ）フォトンマシニングにおいては，加工中の音響信号，プラズマ発光，加工点状態の画像処理等の加工点近傍の各種加工計測情報の検出が可能であるため，それらの信号発生と加工状態の相関関係を定量的に明らかにすることができれば，それら信号と光ビームの動的制御系の制御因子を有機的に結合したインプロセス計測機能を組み込んだ計測制御一体加工を容易に実現することが可能である．

ｊ）フォトンマシニングは，加工材料や加工形状に対応した最適な加工条件を設定することができれば，形状付与加工に代表される在来のマシニングの代替加工としてだけではなく，イオン注入やイオンエッチング等の各種加工プロセスに対しても，ダメージフリー加工を実現できる可能性がある．

ｋ）フォトンマシニングでは，るつぼの使用を前提としない加工プロセスを実現するこ

とができるため，従来では困難であった化学的反応性の高い材料や高融点材料をも加工対象として取り扱うことが可能となる．例えば，次世代電子材料の創出や加工を対象として，従来，るつぼ材との化学的反応性や，るつぼ材の分解温度よりも高い高融点であることから使用できなかった材料でも新たな蒸発源として使用することが可能となる．このように，るつぼ材料を使用せずに真空中において高融点材料を加熱融解し，蒸発させる方法として電子衝撃法が知られているものの，この方法ではハースと呼ばれる銅製るつぼの中に原料を入れ，電子ビームを集束して照射することにより原料を加熱融解させるという加工原理のため，銅ハースからの銅の蒸発，混入が避けられないことから高純度の薄膜材料の創出には適用が困難であった．従って，「るつぼフリーによる加工プロセス」は新たな材料選択の拡大と，それによる新素材創出の可能性を秘めている．

1）フォトンマシニングでは，半導体のプロセス技術において一般的な危険な有毒ガスを使用したプロセスから脱却した「原材料のオール固体ソース化プロセス」の実現が可能である．具体的には，レーザー・アブレーション法を用いた原材料の蒸発が可能であり，それにより危険で有毒な各種ガスプロセスを使用する必要が無くなり，特殊高圧ガスの付帯設備への投資が軽減され，また特殊高圧ガス関連法規や条例の拘束を受けることなく，安全でクリーンな生産環境を合理的に実現できることになる．その結果，無駄なエネルギー消費を極力低減可能になり，資源を有効活用すると共に，環境保護にも貢献することができ，地球環境適合形の加工プロセスを実現できる．

上述のように，提案したフォトンマシニングの概念は，在来マシニングには無い数多くの有用な機能的及び構造的特徴を具備し，かつ研究開発面においてもめざましい進展が期待されている．ところが，現時点においては産業界において最も多く利用されている炭酸ガスレーザー装置についてさえも，それが有する潜在的能力を十分に生かしきれておらず，板金切断，穴明け，溶接加工といった用途に限定されているのが実状である．その原因には，現時点におけるシステムの加工性能が在来加工を代替するに十分ではないことも挙げられるよう．しかし，在来加工に比べて，その優位性と適用の妥当性が十分に評価，確認されていないことも一因であろう．

そこで，フォトンマシニングを具体的に産業分野に適用した場合の工業的優位性とその適用の妥当性について検討するため，ここでは在来加工技術の中で最も加工効率が高いことから，産業界において各種製品の創出プロセスにおいて広く利用されている運動転写原理に基づく「切削・研削による除去加工」と「フォトンマシニング」の特徴を比較分析刷る．表4．2．1には，レーザー加工を中心とする広義の光量子エネルギービーム加工を含む「フォトンマシニング」及び機械的除去加工を中心とする在来切削加工による「在来マシニング」を，現時点における技術レベルでの定性的特徴を中心に比較した結果をまとめている．表からも明かなように，一部の項目を除いて在来マシニングに対するフォトンマシニングの優位性が確認できると共に，高能率精密加工技術，あるいは新たな機能創出技術のひとつとしての未来と展開可能性が示唆されている．

表４．２．１　　フォトンマシニングと在来マシニングの比較

	フォトンマシニング	マシニング（在来機械加工）
加工原理	超高エネルギー密度加工 光量子反応， 熱加工	工具／工作物間の干渉による 直接的運動転写
加工反力	０～１Ｇ	有り（ｋｇオーダ以上）
加工物形状	特に選ばない	低剛性，薄物の加工は困難
加工単位	選択的に可変 10^{-10}～10^{-7} m 微細加工の可能性高い	材料特性にも大きく依存 10^{-6}～10^{-3} m nmオーダの微細加工は困難
複合加工の可能性	非常に高い 除去，付加加工が可能	主として機械加工同士の複合
加工物材料	特に選ばない	主として金属材料
加工のフレキシビリティ	高い 時間，空間，加工雰囲気を選ばない 超微細加工から超大形加工まで広範囲	相対的に低い 運動軸，運動範囲により制限
加工能率	高い 出力，ビーム径， 送り速度に依存.	低い 主軸馬力，主軸速度，送り速度に依存.
加工精度	ビームの安定性，径 運動精度等に依存	機械剛性，運動精度，熱変形特性等，総合機械特性に依存
インプロセスモニタリング	計測制御一体加工の 実現可能性高い	機械加工計測技術に依存し 自由度が低い
加工変質層	無視出来ない	無視できる
加工条件	基本的にバラツキ無し	熟練度によりバラツキ有り
工具	フォトンが工具	工具の損耗が有り
工具交換	必要無し	必要有り 加工対象に対応した工具を用意する必要有り
加工液	必要無し	必要有り 加工点の冷却・潤滑効果
加工可能な最小穴径	１０μｍ以下が可能	１００μｍ程度
治具・取付具	必要無し	剛性確保が重要
テーブルの送り速度	高速 ９０m/min以上が可	低速 ３０m/min程度
本体構造	・高剛性である必要無し ・動剛性：高速運動の場合に重要 ・熱変形対策は問題無し ・応力基準設計	・剛性確保が重要 ・動剛性が重要 ・熱変形抑制対策必要 ・変位基準設計
本体重量	軽量化が可能	軽量化が困難 高剛性，高減衰能の確保
設置環境	特に選ばない	十分な機械基礎が必要
メンテナンス	簡易	通常の機械メンテナンス以外に工具／治具の管理が必要

参考文献

1) 松縄朗：レーザ溶接の進歩とその応用，金属，65[10], 863.

2) 佐藤俊一：産業創造研究所レーザ研究センターの紹介，レーザ協会誌，20[3], (1995), 71.

3) 第５回超先端加工システム技術シンポジウム予稿集，超先端加工システム技術研究組合，(1994), 1.

4) S. Mineta et al. :Preparation of cBN amd DLC films by CO2 Laser PVD with simultaneous ion supply, Proc. of Inter. Conf. on Laser Advanced Materials Processing, Nagaoka, (1992), 897.

４．２．２　マシンシステムの具体例

フォトンマシニングは，本質的には，前節（１）において指摘したような数多くの機能的・構造的特徴を有すると共に，そのプロセス自体が高いマシニングの融通性（フレキシビリティ，flexibility）と多様性（バーサティリティ，versatility）を具備していることから次世代生産環境において最も有効と考えられる中核的な加工プロセスであるといえよう．従って，現時点において工業的に広く応用されている板金の切断，穴明け，溶接，表面改質といった一般的な適用以外に，本来フォトンマシニングの有している様々な特徴を十二分に発揮させるべく，更に幅広い適用領域の拡大と適用可能性について検討する必要がある．

ここでは，特にレーザー加工を中心とした現時点における産業界の適用例をベースに，今後の展開が可能であると考えられるフォトンマシニングの応用分野について具体的なマシンシステムの適用例を挙げて分析する．なお，それらの結果を，代表的な加工形態に基づいて分類することにより，以下のような５項目の分野に整理，集約した．但し，参考までに個々の具体例について，それぞれの具体例を実現する際にポイントとなる根拠を簡単に解説した．

a）除去加工分野　一般的に除去加工は加工対象の不要な形状部分を屑として合理的に除去することによって所要の形状，寸法，加工精度を得る加工であり，除去に必要なエネルギーの種類とエネルギーの伝達媒体の違いによって，従来から多くの加工方法が考えられてきた．ここでは，それらの在来加工方法との競合が比較的少なく，本来のフォトンマシニングの有する特徴を生かすことのできるマシンシステムとして，以下のようなマシンシステムを具体例として挙げる．

・リニアモータ駆動による超高速板金切断システム
フォトンマシニングの特徴のひとつである加工反力を発生しないこと，高速の加工プロセスの処理可能性といった特徴を生かすことにより，高速テーブル系とビームヘッドの直線運動の駆動系に超高速リニアモータを組み込み，様々な加工スケール，様々な加工空間のフレキシビリティを実現して板金の超高速かつ精密切断加工を実現する．

・高エネルギー密度複合波長レーザー重畳による切断システム
高エネルギー密度の複合波長のレーザーを複合化することにより，在来のレーザー切断加工システムの有していた素材選択の自由度と加工機能を一段と高めたシステムを実現する．

・高精度非接触大領域マーキングシステム
非接触加工，高精度，高速処理，自由な加工スケールといった特徴を生かして，大型船舶，航空機，宇宙飛翔体，大形建築構造物等の高能率，高精度マーキングを実現する．

・非接触大領域表面クリーニングシステム
非接触加工，高い加工スケールの自由度，高速処理といった特徴を生かして，大領域の材料表面のデブリ除去，ペンキ剥し，錆取り，並びに超清浄表面の創成等の処理を高能率に実現する．

・高精度及び高能率大形マスクレス直接描画システム
エッチングプロセス等の複雑かつ煩雑なプロセスを必要とせずに，大領域のガラス基板，ダイヤモンド基板，シリコン基板，機能材料等の様々な大形基板上に微細パターンを高能率，高精度に直接描画する．

・低剛性及び柔軟材料の非接触3次元加工システム
加工反力を発生しないこと，高速処理性，治具を必要としないという特徴を生かして，特別な工作物取り付け治具を必要とせずに，高精度の3次元除去加工を実現する．

・難削材料の微小径深穴加工システム
集束した指向性の高いソフトツール，高エネルギー密度加工，工具損耗の無いツールの特徴を最大限に生かして，在来ツールでは不可能であった微小径，かつ深穴の穴明け加工を高能率，超精密に実現する．

・高性能3次元自由曲面金型製造システム
高精度，高能率，加工の融通性，多様性，高度ソフトウエア機能の組み込み可能性等の特徴を生かして，非接触でフリーサイズの精密自由曲面金型の加工システムを実現する．

・レーザー応用コンパクトＦＭＣ
高度なシステム機能の集積，複合加工機能，高精度高能率加工機能，高い加工の自由度，コンパクト性，加工モニタリングの容易性といった特徴を生かして高度フレキシブル生産セルを構築する．特にインプロセスモニタリン機能とそれによるレーザビームのフィードバックが可能になることにより，加工制御の高度化を含めた知能形生産セルの構築が可能となる．

b）接合加工分野　自動車や大形船舶に代表される溶接接合加工，航空宇宙飛翔体における接着接合加工などは，軽量で強度の高い機械構造を実現する上で必要不可欠な在来加工技術であり，フォトンマシニングは，これらの分野への積極的展開が図られる可能性がある．特に，在来技術とは別に，微細部品の接合を対象とするマイクロ接合技術，異種材料の接合等にも潜在力を生かして展開が図られる可能性がある．

・対象材料の光吸収性を考慮した厚肉板材の深融込み溶接システム
高いエネルギー制御性，高精度，高能率加工，高い加工の自由度，高エネルギー密度加工の利点を生かし，薄板材への適用が主体の現有技術の展開を図り，選択的に様々な材料の高剛性溶接継ぎ手の最適加工を実現する．

・異種セラミックス及び難接合材料同士の接合システム
高エネルギー密度加工，光量子加工，加工エネルギー制御性の特徴を生かし，現在，決め手となる手段がないといわれている異種セラミックス材料同士の接合，あるいはセラミックス材料と各種金属材料の高能率，高精度接合への積極的な展開を図る．

・多軸制御ハイブリッド溶接システム
高いエネルギー制御性，複合加工の多様性，加工のフレキシビリティ，高エネルギー密度加工，高速処理の可能性の特徴を生かして，様々な複雑な加工形状の素材同士の溶接を高能率に実現する．

・超微細パターン接合システム
局所加工性，集束された光量子エネルギーの最適制御，高速処理性，高精度加工の特徴を生かして，基板上の複雑なマイクロパターンの接続や切断，形状修正加工等を高能率に実現する．

c）**表面改質加工分野**　在来の加工技術において表面改質は，加工対象の表面に異種の材料の層や膜を付加，拡散したり，表面処理を施すことによって表層部のみを加熱して相変態させて母材の有する性質を向上させ，高硬度化，対摩耗性，低摩擦化を付与することを目的として適用されている．それらは主として物理化学的方法や電気的方法により実現されているが，材料選択の自由度，プロセスの簡素化，並びに加工単位の自由度等を勘案すると，フォトンマシニングの適用が有効であると考えられる．

・大領域均質表面創成システム
プロセスの均質性，加工エネルギーの制御性，自由な加工スケールと加工単位，加工のフレキシビリティの特徴を生かして，在来加工方法では不可能であった大領域の加工範囲全域，あるいは局所的に結晶粒の微細化やアモルファス化を行い，材料の組成，組織構造を制御し，所要の加工範囲に均質な表面を創成する．

・選択的多層メッキ加工システム
加工の複合化，エネルギーの選択的集束性，加工のフレキシビリティの特徴を生かして，対象加工部位の必要箇所に対して必要な性能を有する局所領域の多層メッキを実現する．

・合金化表面創成システム

原材料に適合した複合加工性，脱超高真空プロセス，局所的な加工の実現，加工エネルギーの高度制御性の特徴を生かし，対象とする加工材料の表面の所要領域に対して必要な合金化を深さ方向を制御しながら高品位の特定の厚さの合金化を実現する．

・高能率表面性状改善システム

高速処理性，自由な加工スケール，均質面の創成，高エネルギー密度加工，加工エネルギーの制御性といった特徴を生かし，表面粗さ，残留応力の除去，結晶粒界段差の除去等を対象表面全域にわたり改善する．

・材料表面の局所熱処理システム

高エネルギー密度加工，加工エネルギーの制御性，局所加工性，高速処理性といった特徴を生かして，局部の熱処理を実現する．

・表面衝撃硬化処理システム

高エネルギー密度加工，加工エネルギーの制御性，局所加工性，高い加工スケールの自由度の特徴を生かして，加工面表層に圧縮残留応力を発生させて疲労強度を向上させる．このような効果を発現させることを目的として従来は，ショットピーニングが一般的に行われてきたが，制御性の高い高速，高エネルギー密度のフォトンエネルギーを対象表面に衝突させることにより高能率に必要部位の表面硬化を実現することができる．

d）新物質・機能物質創成分野　対象材料にエネルギーと情報を与えて必要とする情報を有する材料を創成することが様々な分野において試みられている．フォトンマシニングにより，在来加工技術では得られなかった薄膜形成，超微粉創成，積層機能材料，並びに積層化複合機能材料の創成等を含む新たな物質，機能物質の高能率創成が実現可能であると考えられる．

ところで，現在，各種の高速光・電子素子やエネルギー素子に使用される多様な半導体（GaAs, InP, CdTe, $CuInSe_2$, Bi_2Te_3）は，As, In, Se, Cd, Ge等の資源寿命が短い材料を多量に使用しているが，長期的な資源の供給問題を考えた場合に，資源的に枯渇の心配が少ない非希少元素，すなわちSi, Fe, Ca, Al, Cu, C, O, N等の元素を用い，それらから半導体的性質を示す2元系物質を創出する等による新しい半導体工学の出現が望まれている．フォトンマシニングはこのような非希少元素を半導体材料に適用して電子材料を創出したり，それによる新たなプロセス技術を確立する上で有効な手段になり得ると考えられる．

・超微粉及びクラスター創出システム

高エネルギー密度加工，脱超高真空化プロセス，高い加工エネルギーの制御性といった特徴を生かして，純度，均一性，並びに結晶構造の制御により，従来の方

法では得られなかった超微粒子やクラスターを高能率に創出することができる．その際に，加熱及び蒸発方法として有効と考えられるレーザー蒸発法は，前述したようにるつぼが不要であるために，るつぼによる汚染が無く，プロセスのクリーン化が図られるため，高純度の微粒子やクラスターを高能率に創出可能である．また，加熱到達温度が高いため，Pt，Mo，Wからセラミックスなどの高融点材料の粒子創出が可能である．

・超微粒子応用薄膜による高能率被覆システム
選択的な3次元表面形状の制御機能や深さ方向の加工エネルギーの制御機能により，超微粒子から構成される機能性薄膜による被覆を高能率による実現することが可能である．具体的には，クリーンなレーザー蒸発法を用いて生成された超微粒子をガス搬送し，微小径ノズルから高速噴射することによって基板上に超微粒子膜を形成する，いわゆるガスデポジション法により，高純度の機能性膜を形成可能である．更にその成膜過程でレーザー照射によるエネルギー付与を施すレーザーアシストデポジションを援用することによって，機能性厚膜の生成を高能率に実現できる可能性がある．

・超伝導薄膜形成システム
高エネルギー密度加工，3次元表面制御，加工エネルギーの深さ方向制御性，相制御が可能である等の特徴を生かして，高品位の超伝導特性を有する薄膜形成を実現できる可能がある．

・厚膜形成システム
非接触加工，低温度加工プロセス，脱超高真空化プロセス，自由度の高い加工雰囲気の実現，高い加工スケールの自由度等の特徴を生かして，厚膜形成を実現することが可能である．

・高性能光造形システム
高精度，高能率，高い加工の自由度，高エネルギー密度といった特徴を生かして，在来の光造形システムの性能を格段に越える性能を有するシステムを実現可能である．

・高分子材料のリサイクルシステム
高エネルギー密度加工，材料の固体ソース化，脱超高真空化プロセスといった特徴を生かして，原子や分子のイオン化や活性化反応を積極的に生じさせ，在来方法では得られなかった環境調和形素材の創出を実現する．

e）フォトンマニピュレーション分野　　レーザーの局所的な空間制御性，非接触反応性，非反力性といったフォトンの特性を生かして，フォトンが対象とする物質に衝突する際の運動量の受渡しを積極的に利用し，超微粒子を3次元空間において自由

に操作することが可能となる[1],[2]．このような超微粒子の操作機能を積極的に利用することによって，以下のような超微粒子マニピュレーション技術等の新しいマイクロマシン技術を確立することができる．

・超微粒子マニピュレーションシステム
　フォトンの放射圧を利用した超微粒子の移動，回転，凝集，空間配列，接続，3次元組立，あるいは物理的結合等を行い，マイクロマシン，超微粒子等の超微小構造物の組立を行う．

・細胞融合支援システム
・遺伝子操作支援システム
・超微細パターンの修正システム

なお，本節では，フォトンマシニングを適用したマシンシステムの概念を挙げ，その簡単な説明を補足したに留めた．より，詳細な具体例については，「4．3　プロセス応用技術」に述べられているので参照頂きたい．

参考文献

1) 三澤弘明，高分子，41[9]，(1992)，658.
2) 三澤弘明，応用物理，63[9]，(1994)，898.

４．３　プロセス応用技術

４．３．１　はじめに

（１）レーザーと物質との相互作用

ａ）基本過程

材料の加工あるいは物質・材料の製造のためのエネルギー源としてレーザーを利用するレーザープロセスとは，いかなる材料・物質にいかなるレーザーをいかなる条件で照射して，いかなるプロセスをさせるのかであり，ここでは，先ずレーザープロセスの原点として物質とレーザーの対応をまとめる．

物質とレーザーの対応は，照射させるレーザーを物質に吸収させることであり，物質の吸収とレーザーの発振波長の関係で示される．

□　物質のレーザー吸収，励起：

物質固有のエネルギー準位に励起される吸収係数で示される．エネルギー準位は波長（振動数）にも対応するので，レーザー発振波長と相関する．

○　金属：伝導帯に存在する自由電子の励起が赤外，可視，紫外領域に広く分布

○　無機化合物：一般にバンドギャップが大きく，紫外以上

○　有機化合物・有機金属化合物・高分子化合物：振動・回転準位は赤外，電子準位は可視，紫外以上

振動・回転準位からの熱反応と電子準位からの光化学反応に区分される．

□　レーザーの要素

○　発振波長（フォトンエネルギー）：遠赤外，赤外，可視，紫外，真空紫外

○　発振時間；連続，パルス（パルス幅，繰り返し数）

○　強度（フルエンス）：ＦＷＨＭ，尖頭出力（ピークパワー）

○　出力（平均出力）：連続，パルス（フルエンス＋繰り返し数）

○　ビーム形態：発振モード，波長幅，パルス波形，発散角

○　照射面積：微細ビーム，大面積

○　フォトンコスト：レーザー本体＋ランニングコスト

□　プロセスの要素

○　レーザー照射の対象物

・物質：金属，無機化合物，有機化合物，有機金属化合物，高分子化合物など

・材料：金属材料（合金），無機材料（セラミックス），有機材料（プラスチックス，有機結晶），生体物質，複合材料

○　照射系，反応系

・気相，液相，固相　　○　照射雰囲気，反応雰囲気，媒質

・大気中，真空中（減圧），液相中（水中），特定ガス中

○　処理，反応

・熱処理，熱（化学）反応，光化学反応

ｂ）基本操作

○　システム

・　レーザー発振装置

・　レーザー制御（モニタリング）装置

・　照射光学系，ビーム伝送系
・　物質・材料照射系（ワークステイション・チェンバー・反応容器）

○　レーザー照射による対象物質・材料の励起
・　対象物質・材料自体（基板）の励起：溶接・孔明け・切断などのレーザー加工一般に用いられるレーザー照射
・　原料（反応物質・反応基質）の励起：超微粉や薄膜作製，あるいは特定のガス雰囲気下での表面処理など
・　対象物質と原料との両者の励起：気相化学堆積（ＣＶＤ）法による薄膜作製など

c）基本現象

対象となる物質・材料の多様さに加えて，近年の紫外レーザーの進展に伴い，従来からの熱効果だけでなく，種々の光化学効果が見いだされている．

○　熱効果
・　加熱，急速加熱・急速冷却，局所加熱などによる溶接・切断・エッチング
・　熱溶融による合金化，クラッディング，表面硬化
・　加熱蒸発・アブレーションによる微粒子形成
・　加熱による相転移（組成変態），再結晶，結晶成長，アニーリング，アモルファス化

○　光化学効果
・　光化学反応による合成，表面反応，微粒子形成，薄膜堆積，エッチング，ドーピング
・　フォト・アブレーションによるエッチング，薄膜堆積，表面構造変化

d）レーザープロセス

種々のレーザーに共通するレーザーの特徴とその特徴がプロセスにどうように活用されるかをまとめる．

【単 色 性】物質との選択的な相互作用，精緻な反応制御（副反応抑制），短波長レーザーによる超精密局所反応

【高ｴﾈﾙｷﾞｰ】急速加熱・熔融蒸発，光化学反応による結合開裂（アブレーション，多光子解離）

【指 向 性】局所的高エネルギー密度加熱，局所的化学反応，光干渉

【短ﾊﾟﾙｽ性】急速加熱急冷却による熔融蒸発，多光子解離による反応，多光子吸収による光反応，高密度・多光子吸収によるアブレーション，紫外短パルスレーザーによる低温・非熱損傷

（２）レーザープロセスの過去ー現在，将来への研究開発課題

a）レーザープロセスの過去ー現在

1）熱処理，熱加工

CO_2レーザー加工では，従来切断に関する適応事例が多く，溶接がこれに続き表面処理の例は少数である．一方，ＹＡＧレーザーでは，電子部品関連の溶接の比重がCO_2に比べて大きく，孔明けやマーキング，トリミングのニーズが多い．これは，従来のレーザ

ーの出力による差が大きかったことに起因しており，最近ではＹＡＧレーザーの出力向上により，従来の適用分野のすみわけが不明確になりつつある．

表4.3.1.1　熱処理プロセス・熱加工の現状

プ　ロ　セ　ス	具　　体　　例	使用レーザー
孔明け	・ルビー軸受け　・電子管部品 ・タービンブレード	ＹＡＧ CO_2
切断	・鋼板　・ステンレス鋼板 ・複合材料	CO_2 ＹＡＧ
微小除去 ・トリミング ・リペアリング ・マーキング ・スクライビング	・電子回路部品チューニング ・ＬＳＩチップ ・ＩＣパッケイジ ・セラミック基板	ＹＡＧ CO_2
接合・溶接	・自動車機構部品　・航空機エンジン部品　・鉄鋼コイル継ぎ　・鋼管の圧接　・モーターフレーム ・原子炉蒸気発生管の補修　・ブラウン管／真空管の電子銃／電極	CO_2 ＹＡＧ
表面処理・表面改質	・鉄鋼材料の表面焼き入れ　・電磁鋼板の磁区制御	CO_2 ＹＡＧ
薄膜作製	・金属　・セラミックス	CO_2 ＹＡＧ
微粒子作製	・セラミックス	CO_2 ＹＡＧ

２）光化学プロセス，量子加工

１９６０年のこの世の中で最初のレーザー発振以来，化学分野ではレーザーの出現により化学反応が思いのままに切断，接合できる"化学結合のレーザーメス"が可能になるという期待があったが，６０，７０年代のレーザー化学反応の活発な研究の結果は，必ずしも選択的に化学結合が開裂しないことが判明し，化学工業からは遠のいた状況であった．その後，７０年代のエキシマレーザーの発振により，これまでの赤外レーザーによる励起ではなく，紫外レーザーによる電子励起が可能となり，新たな進展がもたらされた．熱による副反応や熱損傷のない非熱的なプロセス，光化学反応に起因する量子加工の出現がレーザー利用技術の可能性を画期的なまでに拡大している．エキシマレーザー利用技術の核

心となっている基本現象はアブレーションである．８０年代にエキシマレーザー装置の高性能化・大出力化が進展し，９０年前後から工業での実用化技術が開始され始めた．　すでに工業化された技術の基本はアブレーションによるエッチングである．プラスチックス材料の精密加工は従来の赤外レーザーでは困難であったミクロンレベルの孔明けが可能となった．また，現在，最も活発な研究開発が進められているのは，アブレーションによる薄膜作製である．特に，高温酸化物超電導体薄膜が最も注目されているが，その他焦電体や磁性体薄膜なども期待されている．さらに，アブレーション以外でも，紫外レーザーによる特徴は，有機・高分子材料において注目され，フッ素樹脂の表面改質などの新技術が見いだされている．また，液晶ディスプレイ用の薄膜トランジスタ（ＴＦＴ）のアニーリングは実用化が検討され始めた．

表 4.3.1.2　光化学プロセス・量子加工の現状

プ　ロ　セ　ス	具　　体　　例	使用レーザー
孔明け	・電子回路基板　・インクジェットノズル　・医療部品	エキシマ
切断	・複合材料　・セラミックス電子部品	エキシマ
微小除去 ・エッチング ・リペアリング ・マーキング ・スクライビング ・クリーニング	・ＬＳＩチップ ・ＩＣパッケイジ ・セラミック基板	エキシマ
表面改質 ・ドーピング ・アニーリング（結晶化／アモルファス化） ・接着性	・半導体ﾃﾞﾊﾞｲｽ　・薄膜ﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ液晶 ・フッ素樹脂	エキシマ
薄膜作製	・超伝導体金属酸化物　・金属磁性体　・金属酸化物焦電体　・フッ素樹脂　・ダイヤモンド	エキシマ ＹＡＧ
微粒子作製	・セラミックス　・フラーレン類 ・クラスター	エキシマ ＹＡＧ
物質合成・精製	・同位体分離	CO_2励起ﾗﾏﾝ 銅蒸気

b）将来への研究開発課題

1）熱処理プロセス・熱加工における研究開発課題

赤外レーザーによる熱処理，熱加工はすでに多くの産業で活躍しているものの，将来への課題も山積している．例えば，CO_2レーザーによる薄板を扱う板金加工業の切断工程で大量に利用され，業界内部には良質に切断するノウハウが蓄積されているが，厚板の切断現象の解明や高速切断，モニタリング，シミュレーション，装置の小型化，安全性の確保等の検討課題がある．

一方，溶接に関しては，加工現象が複雑であるために，レーザーと発生するプラズマのインターラクション，キーホール内部の現象解明，加工品質の維持，加工部品のモニタリング，シミュレーション等が検討課題である．

溶融を伴わない表面処理に関しては，加工現象が比較的シンプルであるために，熱伝導モデルで詳細に検討されており，材料の組織変化を巧みにシミュレートできるようになっているが，表面形状が変化した場合の安定性の確保や装置の小型化が将来課題である．

プロセスの信頼性を高めるモニタリングやシミュレーションに関しては，加工現象の観察がどこまで正確に行われるかによって，その精度は大きく変わる．特に，プラズマとレーザーのインターラクションが生じる分野（溶接や微粒子生成）では重要な検討課題となる．

次節以降において，各種産業における現状での問題点を抽出し，それに対応する研究開発課題が詳細に述べられるが，ここでは，プロセス全体からみた要点をまとめておく．

①高速加工の阻害因子を解明し，レーザー発振器に求められる光の質を定量化する．

②厚板加工の現象を解明し，レーザーによる厚板加工の限界を明確にし，将来への適応対象の拡大を検討する．

③レーザーによる超精密な加工技術の限界を明確にし，加工組立の高精度化に対して，新しい適用分野を開拓する．

④光ファイバーを使った超フレキシブルな加工技術を検討し，産業界に広く利用できる加工技術の確立を図る．

⑤光の質を明確に規定し，加工現象が一義的に決定できる理論の構築とこれに基づく加工品質の保証手段を確立する．

⑥光の質の評価指標を明確にし，レーザー加工機による異なりをノウハウに依らず一元的に扱える手法を確立する．加工条件のデータを相互に利用できるデータベースの確立を図る．

⑦加工現象を物質とレーザーの相互作用レベルから詳細に解明し，加工条件と加工結果の関係を明確にする．

⑧加工現象の簡易な観察手段を確立し，インプロセスでのモニタリングを可能にし，フィードフォワードの手段にも利用できる技術を確立する．

⑨加工現象の正確なモデリング手法を確立し，加工対象に対して事前の検討を可能にし，実加工との比較を行いながら，加工品質の補償が実現できる方式を開発する．

2）光化学プロセス・量子加工における研究開発課題

量子加工はまだ歴史も新しく，産業界での実績は乏しく，利用技術も限定されている．

しかし，基礎研究は非常に活発化しており，将来の産業応用への可能性は極めて大きい．次節以降で，各論は詳細に述べられるが，ここでは，将来研究開発課題の核心となるレーザーアブレーション法とフォトンの高度利用技術の基本点を考察しておく．

□　レーザーアブレーション法

物質の蒸気圧に依存せず，溶融蒸発に比較するほとんどの物質において，制御性良く，物質を蒸発できる技術として，レーザーアブレーション法は材料のエッチングや表面改質技術としてだけでなく，アブレーションで生成，蒸散されるフラグメントの堆積による薄膜作製，あるいはフラグメントの凝集による微粒子作製などとして期待される．

物質の蒸気圧とはほぼ無関係に原料の蒸発が起きるために，高融点な原料の蒸発に適しており，また，逆に蒸気圧が非常に高すぎて加熱蒸発では蒸発速度の制御が困難な材料の蒸発にも優れている．

さらに，レーザーアブレーション法の特徴を列挙すると，

①アブレートされた粒子ビームの中には，中性分子，原子，イオン化した原子・分子等の多彩な量子が存在し，これらの粒子の存在比を制御することにより，多様な結晶形態を示す結晶構造，有機分子の異方性に基づく分子配向などを制御できることが予測されている．

②上記の多彩な粒子は，多様な運動エネルギーを保持しており，機械的チョッパーや電場，磁場などを用い，特定のエネルギーをもった粒子を選択することにより，　結晶形態制御，化学組成制御，ケラスターサイズ制御などが可能となり，新物質・新材　料創製の有力な手法となる．

③非熱平衡材料のためにバルクの製作は困難であった材料ばかりでなく，極限技術（超高温，超高圧，超高磁場など）が必要であった難合成物質の創製が，レーザーアブレーションを用いた非熱平衡手法で可能となる．

④ＣＶＤ法やＭＢＥ法などの薄膜作製法での必須であった真空系反応装置を必ずしも必要としない．

⑤作製できる対象物質・材料として，金属，半導体，絶縁体，有機・高分子材料などと非常に幅広い．

⑥原料として固体試料が使用でき，従来の各種有毒ガスで作製されていた物質・材料が取扱易く，安全性の高い固体原料から可能となる．

⑦高融点で蒸発し作製している物質・材料が，レーザーアブレーション法によればルツボ不用となる．したがって，ルツボ材との化学反応性の高い蒸発源やルツボ材の分解温度よりも高い温度で蒸発する蒸発源でも容易に扱える．

□　フォトンの高度利用技術

レーザーの量子加工における重要性は，レーザーを単に熱源として利用するのではなく，物質の原子・分子レベルでの相互作用に基づく加工法である．ここでは，将来への研究開発課題の要点として，レーザーと物質との相互作用を最も緻密に活用する課題を列挙しておく．

①波長可変レーザーによる物質との相互作用の依存性を考察し，最適な照射波長による特定物質・材料の創製．

②偏光レーザーの照射による分子配向制御による高機能材料の創製．特に，異方性のある

有機分子のレーザー反応による配向制御材料は電子・光機能材料として期待される．

③極短パルス紫外レーザーによる非熱的反応の抑制．一般のエキシマレーザーのアブレーションでも，かなりの熱的現象が含まれる．特に熱発生の嫌う系での光化学効果だけによるプロセスはデバイス加工での高分解能化や新材料創製での活用が期待できる．．

④現在の紫外光領域からさらに短波長の真空紫外光領域のレーザーも開発されつつあり，プロセス応用の革新が期待できる．それは，物質との相互作用として，紫外レーザーによる結合電子励起から，全く未開拓の内殻励起への進展であり，新規化学反応からの新物質創製への可能性が期待されるからである．

⑤材料加工・物質創製のために，アーク放電，プラズマ，イオンビーム法なども活用されているが，これらの手法には短所・長所があり，これらの短所を陵駕するために，レーザーの特徴を加味した新技術を導入することにより，画期的に優れた新規プロセッシングが期待される．また，レーザー手法としても，近年においては多様なレーザーが利用できる状況にあり，種類の異なるレーザーを使用するレーザーコンバインド技術によるレーザープロセッシングの高度化が期待できる．

3）将来の研究開発課題の構成

次節以降で示される開発課題の全体構成を図示する．

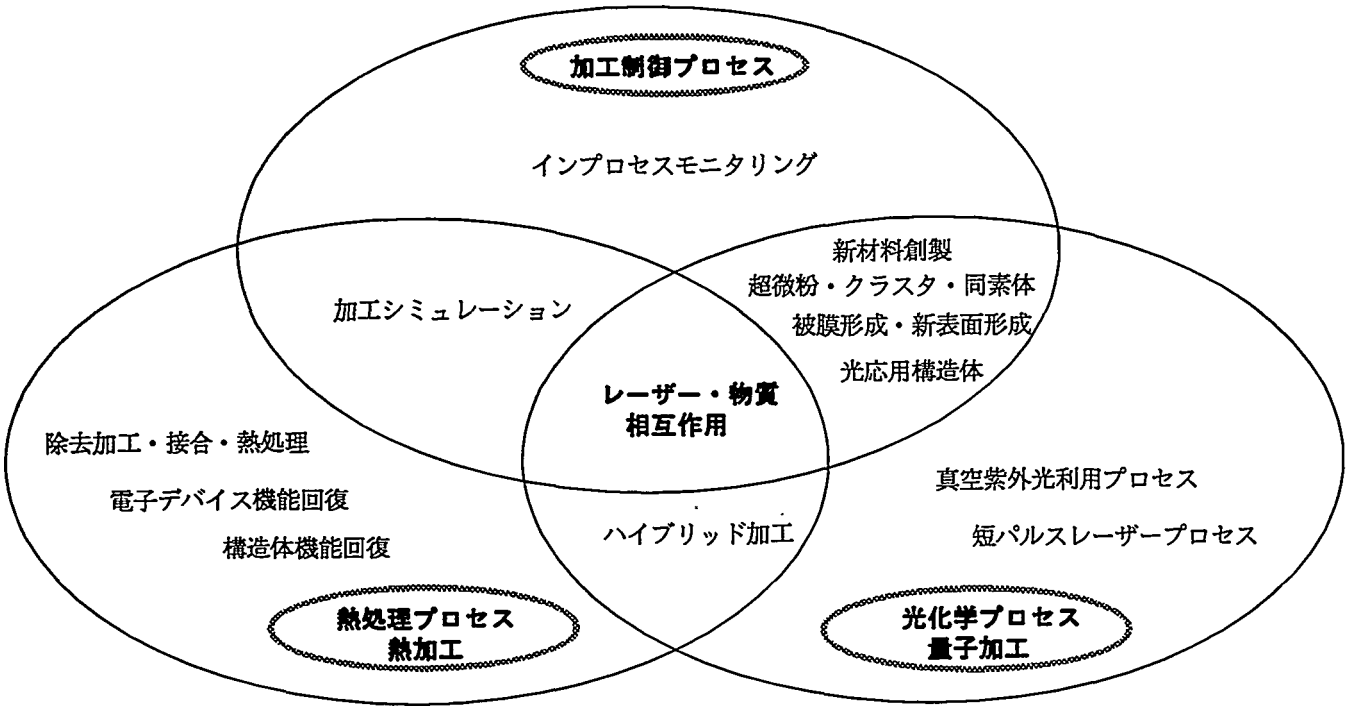


図 4.3.1.1　開発課題の全体構成

4．3．2　光切断／接合／熱処理（除去，切断，溶接）技術

（1）除去加工（金属切断・穴あけ加工）

a．現状技術の概要

1）分野別の特徴ある適用事例

i）自動車分野[2,3]

大量生産を行う自動車分野においては，薄板の切断には高速性が要求される．量産部品ではプレス切断に比べると，レーザー切断の速度は遅い．従って採用される分野は，多品種少量の生産形態で，型代が高くてプレス型を用意するとコスト増につながる場合である．また試作品の分野では，レーザーによるトリミングが採用される場合が多い．またアンテナ用の穴などの切断には，生産ラインにフレキシブルなファイバー導光のＹＡＧレーザーが採用されている例もある．

ii）橋梁，造船分野[1,4,5]

CO_2レーザーによる軟鋼の切断板厚が向上した事により，厚板を扱う造船や橋梁分野でレーザーの適用例が出てきた．代表的な加工システムの例を図4.3.2.1に示す．現在では3 kWクラスのレーザーにより30mm程度が切断できるレーザー装置が開発されており，切断部の性能向上の研究も盛んに行われている．これは従来法のガス切断やプラズマ切断の品質である50S程度の切断面粗度が確保されるようになり，レーザー切断幅，切断面粗さ，さらに切断による歪みが小さい点で他の加工法と競争できるようになったためである．対象板厚は 9mm から12mm の鋼板である．部材はコンベアで搬送され，切断ラインは切断等の図面情報とともに，コンピュータで管理されており，ラインは無人化されている．この装置の導入の効果は，高精度な切断が行える事により，下流工程の組立て，溶接仮組み工程が高精度になったこと，高精度な搬送コンベアと集材装置との組み合わせで省人省力が実現でき，切断ラインの操作，管理が容易になって特殊な技能者が不要になった事が上げられる．また従来ＮＣ加工機で穴あけ作業を行っていたものをレーザーによる穴開けにする事が可能となり，効率が向上している．

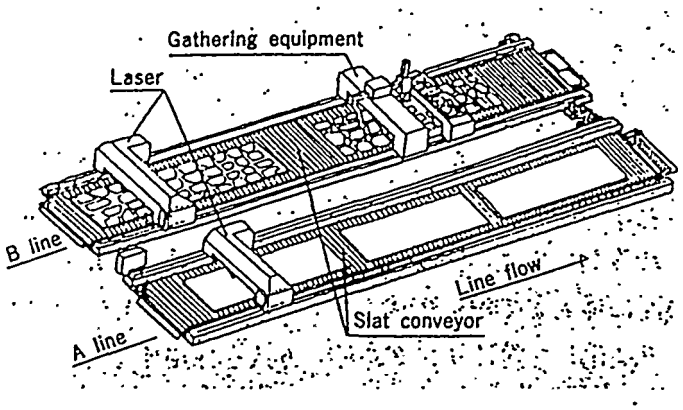


図4.3.2.1橋梁分野における加工システムの代表例[4]

造船分野におけるレーザー切断の導入時に，従来法のプラズマ切断とレーザー切断を比較する場合には，レーザー切断の大きな特徴はプラズマ切断で必要な電極の交換がないために，無人運転が可能であると評価している．また切断精度が向上する事から，後加工のグラインダ作業が不要となる特徴も大きい．また作業環境が著しく改善された事で，環境にかける費用が低減したとのメリットも出ている．

造船分野での適用は，この他に後工程のアーク溶接ロボットの溶接を実現するために，切断精度の向上が必要であるため，レーザー切断の導入が行われている．

iii)車両分野[1)]

車両分野では車体構造の薄板切断にレーザー切断装置の導入がされている．扱う材質は軟鋼，ステンレス鋼，アルミ合金等であり，板厚も4-5mm程度までが多い．板厚が薄いためレーザーによる高速切断によるメリットが生かせる．

建設機械の製造ラインにレーザーを導入した例が有る．部材のストッカ兼供給装置を組合せた無人稼動システムを構築している．従来はシャーリング，プラズマ，パンチングプレス，ガス切断等で加工していたものを，レーザーに置き換えている．対象板厚は16mm程度であり，ほとんどの加工がレーザーで可能となっている．レーザーによるメリットは，従来法に比べて鋭いバリがなくなり作業の効率が良く，騒音もないために夜間の無人運転が出来るようになった事である．

iv)電気・電子分野[6)]

電機分野において扱う板厚は，電源の筐体や操作盤といった9mm以下の炭素鋼やステンレス鋼等を使用した板金加工が中心であり，従来使用していたタレットパンチプレスの欠点を補う事が出来る点でレーザー切断が採用されている．また部品製造の合理化，部品の軽量化，後工程の高精度化についても，各種の検討が行われている．タレットパンチプレスとレーザー加工とを比較すると，型切断に比べて，複雑形状の切断，低騒音の切断，設計の自由度等の点で優れていると考えられている．切断ラインの構成は，自動仕分け装置による小物部品の選別，コンベアによる搬送システムが採用されている．

v)航空機分野[1)]

航空機の分野では，ＹＡＧレーザーによりジェットエンジンのタービンブレードの冷却用の穴明けが実用化されている．エンジンの効率を上げるためには，燃焼温度の上昇が必要であるが，これに伴うブレードの熱負荷を下げるために冷却用の穴が多数あけられる．従来法の放電加工に比べて加工速度が格段に速い事が採用の決め手となっている．

最新鋭の航空機に使われる部材には，近年複合材料（ケブラー，グラファイト等）が盛んに用いられているが，切削刃物では寿命が短く，これを解消するためにレーザーによる切断が行われている．レーザー切断の導入により，切削加工時間の低減，粉塵環境からの解放，品質の向上及び総合的なコストの削減効果が実現されている．

また機体の重量を軽減するために，アルミ合金のケミカルミーリングが用いられているが，この前段階としてのマスキングの樹脂の切断にCO_2レーザが採用されている．これは従来人間が型枠を使ってナイフで切る込みをしていたものを，ＮＣのレーザー加工に置き換えたものである．

vi)特殊分野[7)]

産業用のガスタービンの冷却用の穴明けにパルスＹＡＧレーザーが採用された例が有る．

従来は穴径が1-2mmで比較的大きく，板厚が10mmを越え，寸法精度が厳しく，材質が耐熱合金で有る事から，放電加工が採用されていたが加工時間が長くかかった．これに対して加工時間が短く，遮熱コーティング後の切断加工が出来るレーザーによる穴明けが採用されるようになった．切断システムは部材のパレットチェンジャシステムを組合せて段取り時間の無駄を省いた高生産システムとなっている．

蒸気タービンの静翼のスペーサリングの切断にレーザー切断を採用した例が有る．
従来内外のリングの間に挿入して翼を構成していた複雑形状のノズル片を，単純化して，内外リングに挿入する方式を採用するときに必要なスペーサリングをレーザで切断するものである．ノズル先端部形状の鋭い穴形状にも対応できるレーザー切断が，採用された．放電加工では切断精度が高く出来るが，加工時間が長くかかる．対象板厚は6mm-8mmのステンレス鋼である．

2)現状技術の最前線[1,8,9,10,11,12,13,14,15]

・従来加工法であるガス切断やプラズマ切断に比べて，レーザー切断では切断部の粗さが粗い．また板厚が厚くなると切断速度が極端に低くなる．従来レーザー切断は薄板の形状切断を比較的速い速度で，しかも静かに実現でき，多品種少量の生産に向いているという特徴を有している．

・レーザーのビーム品質が高いものでは薄板の高速切断が可能で，数十m毎分の高速度でのレーザー切断が実現されている．しかしながら形状切断としては，コーナ部での切断精度は，ＮＣの精度による制約によりそれ程高くとる事は出来ないのが現状である．

・厚板の分野でもレーザー切断に対する要求があり，現状では20mm程度の軟鋼が比較的速い速度で切断されている．更に厚い板厚については，要求される切断部の品質が得られないために今後の課題となっている．

・レーザー切断精度が薄板と同じレベルで，厚板の分野でも確保できれば，後工程の組立精度や，溶接の工程に対して有利となる．レーザー切断の品質の確保が板厚の広い分野に渡って実現される事は重要である．材質に関しても軟鋼ばかりでなくステンレス鋼等についてもドロスフリーで精度良く切断できることが必用である．

以下にレーザー切断や穴明けの分野で特徴的な技術の最前線について解説する．

・高ピークパルスCO_2レーザー[12]装置の実現で，アルミナセラミックスの穴明け時に発生するクラックのない加工が実現できる．これは高ピークパルスのレーザーにより，被加工物に残留する溶融層を薄く出来，加工部でのマイクロクラックの発生が押さえられたためである．また最近の電子機器の高性能化に伴い，0.3mm以下の穴をガラスエポキシ基板に開けるような要求がある．高ピークパルスのレーザーではガラス繊維を同時に飛ばす事が出来るため，良好な加工が実現できるようになった．

・高ビーム品質のＹＡＧレーザー[10]では，加工レンズの焦点距離を長くとっても小さな集光ビームが選られるために，加工では非常にメリトがある．従来ＹＡＧレーザーは，ビームの質が悪く，波長が短くて集束性が本来良いものが期待されているにもかかわらず，良く絞れないと言われてきた．最近ＹＡＧレーザーのスラブ化により，CO_2レーザー並みの高品質のビームが出せるようになった．このため細径ファイバに導入できしかも良く絞れるビームが，ｋｗ級のＹＡＧレーザーで実現できるようになっている．このレーザーを使用する事により，航空機エンジンのタービンブレードの冷却用穴の作成の高速化高品

質化が図られるようになってきている．また自動車や単車のエンジンにおけるコンロッドのオイル供給用の穴明け（穴径1mm，深さ15mm）を従来の機械加工の速度に比べて4倍に高めている．このようにレーザービームの高品質化により，加工速度の向上，厚板への対応，薄板の高速加工等が図られるため，装置開発上の重要な課題である．

b．研究開発課題[1,2,5,8,10,12,13,14,15,16]

1)切断加工の安定性の確保

切断時の不安定要因としては，レーザー装置の出力側に変動がある場合と材料側の表面状態が変化する場合がある．出力の変動は限界近くの条件で切断している場合には，安定切断を疎外する大きな要因となる．材料の表面状態の変化は，レーザーの吸収特性が変化するために生じることが多い．加工条件を十分にゆとりをもって設定できる時は大きな問題とはならないが，装置の出力安定性を高める必要がある．また焦点位置の変動も加工条件に大きく影響を及ぼす．従って加工装置として光の安定性の確保をいかに保証するかが課題となる．また表面性状が変化しても，追随できる高速のフィードバック制御も課題である．

2)切断品質の保証

レーザーは，ガス切断やプラズマ切断に比べて表面の粗さが粗いといわれている．特に板厚が厚くなるとこの傾向は顕著となる．設定した条件での切断品質が保たれることと，他の切断法に比べて粗さの少ない切断面を得ることが出来ればベストである．切断品質の保証は，装置の安定性に大きく影響されるが，表面粗さの向上については，粗くなる原因を解明し，これに基づく装置の改良が課題と考えられる．

3)高速切断加工

薄板の分野ではレーザーの高速加工が出来るが，この場合には形状切断を行うと，切断精度を確保しようとすればＮＣテーブルの追随が出来なくなり，結果として切断速度を低下せざるを得ない．この原因は駆動部装置の重量が大きいことが原因の一つであることから，テーブル移動式の場合も加工ヘッド移動型の場合にも，装置の重量を軽くすることが課題となる．

4)厚板切断加工[13,14]

厚板の切断加工では，軟鋼の場合3kWのCO_2レーザーでは，良好に切断できる限界は20mm程度となっている．この切断限界は，板厚の下部に生じるドラグラインの不整の原因が明確でないため対応がこれまで良く解らなかった．最近では切断部の状況を詳しく観察する事で，発生のメカニズムが明らかになりつつある．発生のメカニズムは，厚板下部での入熱不足及び溶融した金属の対流が切断部の不整を生じさせて，切断表面に大きな凹凸が生じていると考えられる．このため良好に切断板厚を増加させるためには，切断下部におけるレーザー入熱の供給，参加反応熱の増加，及び溶融滞留物の強制排除を行えば，良好切断の板厚は増加できる可能性を有している．このためレーザー出力の増加，切断ノズルの改良といった対策が必要となる．このように加工現象を更に詳しく観測できれば，厚板切断に対して最適な切断が実現出来る可能性を有するといえる．

5)フレキシブルな切断加工

フレキシブルな切断加工は，立体切断において強く求められる．空間的な位置の精度は，

加工ヘッドのハンドリング方法により大きく左右される．被加工対象に対してアクセスし，ノズル位置を安定に保ちながら軌跡精度を保って切断加工を行うシステムにおいては，直交型の切断装置が優れているが，装置が大掛かりになりレーザーのメリットを十分に出しているとはいえない．これに対してレーザーロボットが注目される．レーザービームのハンドリングをミラーで行う炭酸ガスレーザーロボットでは，ロボット装置本体が大きくなってしまい，またレーザー発振器と加工機を接近させて置く必要があるため，場所を自由に選定できない．これに対してファイバー導光の出来るＹＡＧレーザーでは，小型のロボットが使用可能である．しかしながら精密に切断加工をする時には，これらのロボットには，強い剛性が求められる．従ってフレキシブルなレーザ切断を実現するためには，高い剛性のロボットで移動速度の早いものの開発が課題となる．

6)加工コスト

レーザー加工装置の普及を妨げている大きな因子は，加工コストが高いことがあげられる．加工コストの内，発振器の占める割合は，ランニングコストに比べて大きく，導入を妨げている．ランニングコストは，消耗部材の低減化が進み，かなり安くなって来ているが，装置のコストは他の加工方法に比べて高い．これを解消する事が大きな課題である．

（2）接合技術

a)現状技術の概要

1)分野別の特徴ある適用事例[1,16,17]

i)自動車分野[2,18,19,20,21,22]

自動車分野は，比較的板厚が薄く，レーザーの能力との関連で，適用できる個所は本質的に大きく，これまで広範囲にレーザー溶接が適応されている．適用の対象は電装品，エンジン部品，マフラー，燃料タンク，ギヤ類，車体構造と広がっている．

自動車用発電機ステータコアの固定には従来アーク溶接やスポット溶接などが使われていたが，加工前の洗浄工程の排除，発生歪みの低減化，高速溶接による生産性の向上，更には形状の異なる部品に対するフレキシブルな加工が出来るという事など，レーザーのメリットが発揮され，非常に能率の良い生産システムが稼動している．

ボンネットやトランク等の周辺部（ヘム）は，折り曲げて接合組立てされているが，この部分にもＹＡＧレーザー溶接が検討されるようになっている．材質は軽量化のためにアルミ合金が採用されている．従来法ではＭＩＧ溶接が採用されているが，溶接の見栄えが悪く，修正加工が必要であった．また接着剤による接合も採用されているが，接着強度の保証や変形防止などで課題は多い．これに対して接合強度が高く，変形が少なく見栄えの良いレーザー溶接が採用されるようになった．

またエンジン用の回転部品にもレーザー溶接は採用されている．レーザーと従来の他の加工法を比べると，装置の運転費に関しては高くなるが，全体の装置費用材料費の点で優位に立ち，トータルの製造コストが他の方法に比べて最も安くなっている．

自動車ボデーのスポット溶接をレーザー溶接に置き換える試みは，早くからトライされていたが，組立ての精度がレーザーの要求精度に合致しなかったため失敗に終わっている．しかしながら精度の向上が図られれば将来的にも必ずトライされる適用分野であると考えられている．最近では図4.3.2.2に示すように，プレス整形前の板の一体化にレーザー溶

接が採用されて，大きな成功を納めている．自動車のボデーは部所によって要求される強度は異なる．このため必要な部分には板厚を厚く，他の場所は薄くして，軽量化を図りたいという要求が有る．これに対して，プレス前の板厚の異なる板をレーザー溶接し，しかる後にプレス加工を行うという，テーラードブランク溶接法が採用されるようになった．この方法では，板の状態で突き合わせの溶接を行うために，しっかりした拘束冶具を用いる事が出来，レーザー溶接の開先精度の要求を満たす事が可能となる．この方法の採用により，材料の歩留まりの向上，車体の軽量化が実現できたため，今後も車体部品製造に多く採用されると考えられる．

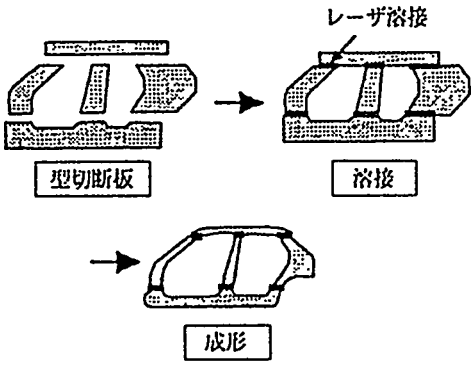


図4.3.2.2テーラードブランク溶接法[21)]

ii)鉄鋼分野[23, 24, 25)]

レーザー溶接が鉄鋼分野で導入されたのは比較的早い時期であり，その後の利用方法を考える上で非常に大きな影響を与えた．導入の場所は，珪素鋼板の酸洗ラインで，コイルのつなぎの方法としてレーザー溶接が採用された．これは珪素鋼板という熱の履歴に対して材質が敏感である事で，ＴＩＧ溶接では入熱が高すぎて熱の影響が大きかったため，レーザの採用が検討された．その後連続化にレーザーが使えるとの認識の元，5-10kWクラスのCO_2レーザーが，各種の鋼板の接合に用いられるようになった．

鋼管の溶接製造ラインでは従来高周波加熱を利用した圧接が採用されていたが，厚板になるにしたがって，板厚中央部では加熱の不均一性が生じる．このため，板厚の中央部をレーザー加熱して接合する方法が採用されるようになった．このような技術のハイブリッド化により，フォトンコストの高いレーザーに高周波加熱という安い熱源を共用する事により，従来技術の限界を越える事が出来た，画期的な方法といえる．

また新しい構造部材の製造方法としても，レーザー溶接が採用されるようになっている．強度を高く保ってかつ軽量であることが，新しい部材には求められる特質であるが，このような部材として，ハニカム構造（蜂の巣）やコルゲート構造（浪板と平板の組合せ）が有る．コルゲート鋼板の接合に最近レーザ溶接の適用がなされるようになっている．これ

はレーザー加工の高速性と小さい溶接歪みの点で有利な方法と考えられている．

iii)電機電子分野

電機電子分野での，レーザー溶接の適用は，ＹＡＧレーザーによるブラウン管の電子銃の溶接が成功例の一つである．これは従来法の抵抗溶接では，性能の向上に伴う小型化に対応できなかったが，溶接部の周辺に熱影響が最少に押さえることが出来るレーザー溶接が採用された．しかもブラウン管のガラスの外からレーザを入射させ溶接を行えるＹＡＧレーザが最適な選択であった．現在ブラウン管の製作は国外にシフトしているが，すべて同様な方法で溶接されるようになっている．

小物の部材が多く存在するこの分野でのレーザー溶接の適用例は，主にＩＣの半田付け等の半導体のデバイスの製造ラインで存在する．

比較的大型の部材としては，電動モータのフレームの溶接に10kW クラスの CO_2 レーザー溶接の適用例が有る．またレーザ溶接の信頼性が向上するのに伴い，圧力容器への適用が始まっている．真空ガス遮断器用の圧力容器は第二種圧力容器であり，胴体とフランジの溶接に，従来は炭酸ガス溶接が採用されていた．しかしながら溶接時の変形が大きく精度の確保のために溶接後の大型ＮＣ装置による機械加工が必要であった．これに対してレーザ溶接では変形が小さいため，溶接のままで十分に精度が保つ個ｔが出来，全体として製造効率の向上と製造コストの低減が図られるようになった．

iv)特殊分野[26,27,28,29,30]

原子力分野においてファイバー導光のＹＡＧレーザーが採用された特筆すべき例は，加圧水型原子炉（ＰＷＲ）の蒸気発生器のインコネル伝熱細管を補修するためのスリーブ溶接である．従来法では，スリーブを挿入し拡管後金ろう付けで接合されていたが，作業効率が非常に悪かった．これに対して，250m に渡ってファイバー導光されたＹＡＧレーザーにより溶接補修するシステムが開発された．このシステムの導入により補修効率が飛躍的に向上した．原子炉という特殊環境化での溶接ではあるが，このファイバーによる遠隔加工技術は，他の産業分野にも波及するものと思われる．

原子力分野の他の適用例としては，燃料集合体のレーザー溶接の例が有る．材料はジルコニュームで，従来はＴＩＧ溶接で組み立てられていたが，溶接部の健全性の確保，設備の自動化の要求に基づき，レーザ溶接が採用された．

米国において潜水艦の補修用としてファイバー導光のＹＡＧレーザーを用いた例が報告されている．大出力（3kW）で100m の導光距離を使って，狭隘個所の溶接が行える，ファイバー導光レーザーのメリットが十分に生かされたものである．

建材分野において，最近はアルミ合金が使われるようになっているが，大型パネルの製作には，大型の高価な金潟が使われていた．レーザー溶接では溶接の歪みが小さいため，プレス整形されたものを溶接組立てする事で，大型のパネルの製作が出来るようになった．使用されるレーザーは，アルミに対する吸収率の点でも有利なファイバー導光のＹＡＧレーザーが採用されている．

2)現状技術の最前線[26,29,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46]

三次元の加工システムを構築すると，溶接個所の精度が保証されれば，複雑形状のレーザ溶接は可能である．ファイバー導光のできるＹＡＧレーザーを用いるとロボットとの組み合わせで，かなり自由に溶接加工を実現する事が出来る．また複数台のロボットの協調

動作を行うと，加工システムとしての自由度は更に拡大すると考えられる．

最近ではファイバー導光レーザーで小型の加工ヘッドが可能となってきており，従来法では難しかった狭隘個所の溶接や，高能率な加工が実現し，適用個所の拡大につながるものと思われる．

また溶接速度を向上させるためには，レーザービームを良く絞って溶接する事が必要であるが，速度が速くなると，溶融金属の不安定現象（ハンピング）が生じるため，最大でも毎分数十m止まりである．これを越える速度の溶接をするためには，加熱溶融する部分を圧接しながら溶接を行う方法が理想的である．板をロールで押さえこみながら，界面をレーザー加熱して重ね溶接を実現する方法では，毎分数百mの溶接速度が，実現されている．この方法では接合できる板の形状に限度が有るが，ロールの形状を工夫する事で，飛躍的な接合法として利用される可能性が有る．

最近鉄鋼メーカでは，25kW級のCO_2レーザを導入し，溶接構造のステンレスパイプの製造に適用を開始している．これは従来法のＴＩＧ溶接に比べて，溶接部の性能が良く，しかも高速溶接が可能となるため，生産効率の向上のために導入するものである．大出力レーザーを溶接の高速化に適用する例として興味が有る．

次にレーザー出力を増大すると溶込み深さを増大する事が出来る．15kW のCO_2レーザーでは25mmの溶込み深さが，25kWのCO_2レーザでは，安定して20mmの板を溶接できる．また45kWのCO_2レーザーでは，40mmの溶込み深さが報告されている．この溶込み深さの限界は，レーザービームで形成されるキーホール内部に発生するプラズマに影響されており，真空中で加工すればプラズマが拡散して電子ビーム溶接と同じ程度の深さまで深くなる．従って発生するプラズマの影響のない波長のレーザー（例えば1000nmレベルのＹＡＧレーザーやヨウ素レーザー）を用いると更に同一出力に対して深い溶込みが選られると予想される．

以上はワンパス溶接の場合であるが，溶接の加工ヘッドが極端に小さく出来れば，狭開先の多層盛り溶接により，板厚の制限なく厚板の溶接が可能となる．この方法は，ファイバー導光のＹＡＧレーザーを溶接に使用した場合に有効であり，レーザーの適用分野を拡大出来る可能性を有している．従来低出力にしか対応できなかったＹＡＧレーザーの大出力化が始まっており，最近では出力4kWのファイバー（ファイバー径1mm）導光レーザーが開発されて溶接用としての利用が始まろうとしている．また複数台の発振器から出たファイバーを集めて，5.5kWまでの出力を確保するＹＡＧレーザーや，一本のファイバーに複数台のレーザ発振器の出力を合成する手法等が開発されており，今後ますますＹＡＧレーザーの大出力化が進めば，溶接の分野での利用が活発になるものと思われる．

従来レーザ溶接の採用に成功している例では，単なる従来法の置き換えでなく，レーザならではの適用分野製品であること，上流工程を見直してレーザーに合う加工とすること，下流工程にレーザー加工のメリットが生かせ，工程全体としてコストメリットが享受できることなどがあげられる．即ち設計レベルに踏み込んだ検討を行わないと，本当のメリットは確保できないし，レーザーの導入は失敗してしまうことになる．従ってユーザがレーザ溶接に求めることは，高い生産性と高精度な加工結果と，トータルなコストメリットであると言える．

b．研究開発課題[1, 2, 10, 16, 17, 25, 28, 30, 34, 35, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 49]

1)溶接加工の安定性の確保

レーザー溶接では切断と異なり加工現象が複雑であるため，安定性の確保のためには種種の問題を抱えている．レーザ溶接時に発生するプラズマとレーザーとのインタラクションが，溶接結果に与える影響は大きく，従ってプラズマの発生をどのようにして押さえるか，又は常に安定して保持するかが課題となる．もちろんレーザー出力側の変動を押さえることはいうまでもない．また溶接中に生じる溶融池の変動は，溶接欠陥の発生を引き起こす．これらの変動は，装置側で起こる場合と，材料のイレギュラによって起こる場合があるが，いずれの場合にでも安定側に加工条件がすばやく対応できるようなシステムの開発は課題である．

2)溶接品質の保証

溶接品質の確保は，溶接中の安定性の確保と完全にリンクしている．従ってプラズマの安定性確保が大きな問題となる．プラズマの安定性を維持しながら溶接を行うために，プラズマの状態を正確にモニタリングして，異変が生じた時には直ちに条件を適正に変化させる技術の開発も大きな課題である．選定された加工条件が適正範囲に十分に入っていることはもちろん必要なことであるが，突発的に生じる現象に対する対処の方法を簡単に行える方法を見出すことが開発の課題であると言える．これまで溶接時の品質を保証するために，溶接部の画像認識や近傍の温度分布の計測，プラズマの発光のモニタリングなどが行われているが，まだまだ完全な決め手になる技術となっていないように思われる．

3) 高速溶接

溶接の高速化は，溶融池に生じるハンピング等の不安定現象により上限が決まる．従って不安定現象を解消するような溶接法を採用すれば，さらに高速溶接が可能となる．これまでロール圧接と組み合わされた接合法が提案されたり，タンデム溶接法が提案されたりしているが，今後も新しい高速溶接手法の開発が課題であるといえる．

4)厚板溶接

レーザービームによる厚板の加工は，同じ高エネルギービームの電子ビーム溶接を参考にすることが出来る．電子ビーム溶接との差は真空中であるかないかであり，この差が溶け込みの深さに影響する．即ち溶接中のプラズマの発生がレーザーをトラップし，大気中で溶接するレーザー溶接では溶け込み深さが浅くなる．逆に真空にして溶接すると電子ビーム一溶接の溶け込み深さとほぼ等しくなる．この事から厚板のレーザー溶接では，発生するプラズマをいかに除去するかの方法を確立することが課題となる．レーザーの大出力化では，現在50kWクラスの炭酸ガスレーザーが実用化されている．ワンパスの溶接板厚の限界は出力が向上するほど厚くなり，溶接速度も高く取れるが，一方開先形状を考慮して，フィラーワイヤを用いた多層溶接を行うことで板厚の限界は解消できる可能性がある．この場合には，多層溶接法に関する最適方法の確立が課題となる．また欠陥の発生に対していかに補修溶接を実施するかの技術を開発する事も大きな課題である．

5)フレキシブルな溶接加工

フレキシブルな溶接加工を実現するためには，加工の自由度が大きいロボットとの組み合わせが重要である．レーザー発振器がダウンサイジング出来ない場合には，ファイバー導光の出来るレーザーを利用することが望ましい．この場合には切断加工と同じように，

駆動装置の位置，及び軌跡精度の保証，加工ヘッドとワークとの位置の保持精度の確保，高速加工等に関する機構の開発が課題といえる．

6)狭隘箇所の溶接

特殊環境における溶接作業，例えばパイプ内面からの加工が出来れば従来の溶接方法を陵駕できる加工分野が開ける．このような環境においても，ファイバー導光のレーザーが本命となる．狭隘箇所での溶接には，加工ヘッドの小型化が最大の課題である．また狭隘箇所であるための周辺機器として，加工ヘッドのハンドリング機器，加工部分を遠隔でモニタリング出来るような装置の開発が課題と思われる．

7)加工コスト

レーザーが他の加工方法に置き換えられるためには，コストの低減が大きな因子となる．コストに占める装置のイニシャルコストの割合は大きく，従来加工法に比べてレーザーのメリットが生かせない場合が多い．生産をトータルに考えるとレーザーのメリットが生かせる分野はかなり特殊分野であり，一般の溶接加工分野に進むためにはこのコストの壁を打ち破ることが出来れば，大きくレーザー溶接が伸びる可能性を含んでいる．従って装置価格を低減化するようなシステムの構築，単体価格の低減化が課題となる．

(3)熱処理（急速加熱・急冷，アニーリング）

a)現状技術の概要

1)分野別の特徴ある適用事例[1, 19, 50, 36]

ＧＭ社で自動車用ディゼルエンジンのシリンダライナーの内面にレーザーによる焼き入れ加工がなされた成功例から，それ以後の適用例は学んでおり，必要な場所を局所的に焼き入れする方法が自動車分野で検討されてきた．

舶用の２サイクルエンジン用シリンダライナーでも，燃焼させる重油の種類が種々あり，低質の重油に対しても性能が保証される必要がある．シリンダの直径は500mm-750mmでレーザで最適な部分に線状に焼き入れがなされた．最適なビーム形状を得るために，ビームのシェイピングが行われている．

カライドスコープによるビームシェイピングを行い，送風機の軸材に焼き入れを行った例や，小型船のピストンリング溝の焼き入れを行い，リング溝の長寿命化を図った例も有る．これらの例は何れも焼き入れ性の良い材料を含めて検討されており，最適な素材の開発と，レーザー焼き入れの特質を最大限生かした適用がなされている．

自動車用のエンジンバルブシートやバルブは，エンジンの効率を上げるために耐熱，耐磨耗性の良好な材料が，使われるが，従来はこれらの部材を圧入ではめ合わせていた．現在では，エンジンの軽量化のために素材としてアルミ合金が使われるようになっており，アルミ合金に耐熱，耐磨耗材の肉盛溶接が出来れば，伝熱効率が上がりバルブの温度を下げる事が出来るために，燃費の低減や，バルブ材料の低グレード化が図れるため，大きなメリットが期待できる．そこで図4.3.2.3に示すように，希釈率の低いレーザー粉末肉盛によるクラッド層の形成が図られた．この例でも，アルミ合金の表面での馴染みをよくするための材料の開発が，成功の決め手となっている．またレーザービームの均質性の確保のために，高速ビームオシレーション装置や品質の安定性を確保するために，自動判定システムが開発されている．

ファイバー導光のＹＡＧレーザーを使ったパイプ内面へのレーザークラディングが実用化されている．パイプの内面という狭隘個所での粉体の自動ハンドリング装置や,加工冶具等が成功の決め手となっている．

ステンレス鋼の非磁性化処理にレーザー合金化処理が適応された例が有る．電磁アクチュエータの磁気コアに局所的に非磁性部を形成する処理に CO_2 レーザーが採用されている．Ｎｉの添加量と母材の溶融量を調整する事により，非磁性部の形成に成功している．

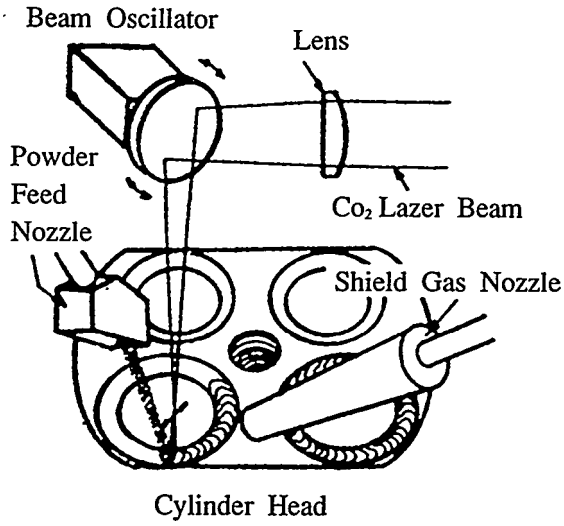


図4.3.2.3エンジンバルブシートのレーザー肉盛法[19)]

2)現状技術の最前線[50, 51, 52, 56)]

レーザーによる表面処理の特徴は，少ない入熱で必要なところを効果的に処理する事にある．従って対象部品は，表面処理後そのまま利用できる程度に低歪みであること，全面処理ではなく部分処理であること，光が到達できるような位置に処理部があること，表面の吸収特性が良好であること等を満たした部材であることが必要である．

レーザーが熱処理に利用できるのは，急速加熱急速冷却が自己冷却で可能となる事が大きい．従って部材の寸法は自己冷却が可能となるマスが必要となり，薄い部材，質量の小さい小物部材には適用が難しい．また急速冷却を実現出来る事で，急速加工処理が可能であるが，表面層のみの加熱冷却である事から，熱的な変質層は薄い．アモルファス金属を作る場合には，この急速加熱冷却は魅力的である．

レーザー熱処理では，表面層をわずかばかり変質させる事が特徴の処理方法であるため，処理深さを深くしたいような加工には向いていない．この事は従来の設計の基準からすると，焼き入れ深さが浅いために適用できないとの結論が出される事が多い．しかしながら設計を合理的に検討した場合には，果たして処理深さがどれだけ必要であるかが明確でない場合がある．レーザーの処理深さで十分目的を達成できる場合は多く，しかも加工に伴う変形が小さい事などの利点があり，品質としては総合的に判断する必要がある．

最近工具鋼に用いられる高炭素高合金鋼を，レーザー表面溶融処理で合金元素を過飽和に固溶した急冷凝固組織を形成して，焼き戻しによる二次硬化の増大の試みがなされている．

また焼き入れ性の悪いマルテンサイト系ステンレス鋼をレーザーで表面溶融化処理した

レーザー硬化処理について検討された例があり，溶融プロセスでは，硬化深さが大きく，最高硬さの上昇も確認されている．

アルミ合金の耐磨耗性の向上（高硬度化，深い硬化層）のために，レーザー加熱溶融部にＮｉ－Ｔａ等の合金粉末を添加して合金層を形成する試みがなされている．従来法に比べて表面層の硬さがＨｖ600-800と高く，0.8mm程度の厚い膜厚の形成が確認されている．以上の例は何れもレーザー表面改質では，処理深さが浅くこの点が実用上問題になっていたものを，表面をわずかに溶融処理する事により性能の向上を図ろうとしたものである．

また更に新しい検討として，材料表面の残留応力の改善の手法として，レーザーの利用が試みられている．使用するレーザーは，水中を透過する可視光（銅蒸気レーザー）のパルスレーザーであり，水中に設置された部材に石英ファイバーで導かれたパルスレーザーが照射され，材料表面の急速加熱で発生したプラズマが水により閉じこめられたために引き起こされた瞬間的な圧力で，材料をたたき，材料表面に圧縮応力を形成するものである．

b）研究開発課題[16]

1）熱処理の安定性確保

熱処理の安定性は，レーザー出力の安定性と材料表面の状態変化に大きく左右される．熱処理では特殊な光学系を使用することが一般的であり，これによりビームのシェーピングを行っている．従って装置に求められる課題は，これらの装置の安定性を保つことが出来るシステムを開発することである．また吸収率の良い表面状況を確保するために処理材を塗布したり，表面処理を行う場合があるが，この処理材を用いなくても熱処理出来る方式の開発が課題となる．

2）熱処理品質の保証

急速加熱冷却で，自己冷却が基本のレーザー熱処理においては，加熱中に部材自身の温度が上昇し，加熱の最初と終わりの部分で熱負荷条件が異なり，熱処理の品質が変化することがある．特に丸物の処理の場合には著しい．このため品質を安定させるために，熱の効果的な除去方法の検討が課題となる．また処理中の温度場を正確にモニタリングし，この温度を一定に保つためのフィードバックが必要となる．レーザー出力の変動はもちろん小さくする必要があるが，使用する光学系の安定性確保の方法を確立する事も課題となる．

3）狭隘箇所の熱処理

加熱処理を行うためには，必用な場所にレーザー光を照射する必用があるが，狭隘個所では光学系自身を小さくする必用がある．小さい光学系では光学部品に対する熱負荷の程度は大きくなり，光学系の安定性の確保が難しくなってくる．このため狭隘個所を対象としたレーザー熱処理では，以下に安定した小型光学系が設計製作出来るかを解決する事が課題であるといえる．また光の伝送や，加工部の状況を把握するためのモニタリング機構など，周辺機器類の整備が課題となる．

4）加工コスト

従来法による熱処理コストは非常に安く，熱処理を従来法からレーザー法に変えるだけでは，何等のメリットは産み出せない．従来法で出来ないような場所や，加工品質を得るためにレーザー加熱処理を採用する必用が有る．加工のコストは，レーザー装置の単体コスト，システムコストとランニングコストが現状では高いため，レーザーならではの処理部材に適応することが必須であるように思える．従って部材の要求性能を正確に引き出し，

付加価値の高い部品に対してコストメリットを出せるように検討する事が要求される．もちろんシステム価格の低減化のために，部材のハンドリングを含む周辺機器の整備が大きな課題である．

(4)研究課題のまとめ

除去加工，接合加工及び熱処理加工技術の研究開発課題のまとめを，表4.3.2.1に示す．研究課題は加工技術により異なるが，主として装置に起因する課題，加工ソフトに関する課題及びコストに関する課題に分ける事が出来る．レーザー加工がこれまで以上に生産現場に浸透するためにはこれらの課題を解決する事がぜひとも必用であると考える．

表4.3.2.1　レーザー熱加工の研究課題

課題	原因の所在	熱加工技術の研究開発課題	加工分野
加工の安定性	発振器、導光系 加工光学系、素材	発振器の長時間安定性	切断、溶接、熱処理
		戻り光の除去機構	切断、溶接、熱処理
		導光系、加工光学系の安定性	切断、溶接、熱処理
		高速応答の発振器開発	切断、溶接、熱処理
加工品質の保証	発振器、導光系 加工光学系、素材	ｲﾝﾌﾟﾛｾｽﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞの確立	切断、溶接、熱処理
		ﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞｼｽﾃﾑの構築	溶接
		ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ因子の特定	溶接
		異常ｼﾝﾀﾞﾝｼｽﾃﾑの構築	切断、溶接、熱処理
		加工現象の解明	切断、溶接
		加工ﾓﾃﾞﾘﾝｸﾞ技術の確立	切断、溶接、熱処理
		ﾋﾞｰﾑｼｪｰﾌﾟﾋﾝｸﾞ技術の確立	熱処理
		溶接欠陥の発生ﾒｶﾆｽﾞﾑの解明	溶接
		ﾌﾟﾗｽﾞﾏとﾚｰｻﾞのｲﾝﾀﾗｸｼｮﾝの解明	溶接
高速加工	発振器、導光系 加工光学系、素材	発振ﾋﾞｰﾑの高品質化	切断、溶接
		発振器の高出力化	切断、溶接、熱処理
		ﾋﾞｰﾑﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞの高度化	切断、溶接、熱処理
		加工現象の解明	切断、溶接
厚板加工	発振器、導光系 加工光学系	発振器の大出力化	切断、溶接
		発振ﾋﾞｰﾑの高品質化	切断、溶接
		導光系の最適化	切断、溶接
		加工系の最適化	切断、溶接
		加工現象の解明	切断、溶接
ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙ加工	発振器、導光系 加工光学系	発振装置の小型化	切断、溶接、熱処理
		導光系のﾌﾚｷｼﾌﾞﾙ化	切断、溶接、熱処理
		加工光学系の小型化	切断、溶接、熱処理
狭隘箇所の加工	導光系、加工光学系 ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ系	加工ﾍｯﾄﾞの小型化	切断、溶接、熱処理
		ﾌｧｲﾊﾞ導光系の安定性確保	切断、溶接、熱処理
		導光ﾛｽの低減化	切断、溶接、熱処理
		ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ系の小型化	切断、溶接、熱処理
装置の低価格化	発振器	市場形成の明確化	切断、溶接、熱処理
		ﾕｰｻﾞ要求の明確化	切断、溶接、熱処理
		装置のﾓｼﾞｭｰﾙ化	切断、溶接、熱処理
ﾗﾝﾆﾝｸﾞｺｽﾄの低減	発振器	発振器効率の向上	切断、溶接、熱処理

参考文献

１）安田耕三“重工業分野におけるレーザー加工の応用”
オプトロニクス (1994)No. 7, pp119-126
２）宮田修，漆崎守“自動車電装品のレーザー加工”
第26回レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp229-243
3）加藤俊之“レーザーダルロールによる薄鋼板製造とその適用”
塑性と加工 (日本塑性加工学会誌)，　Vol. 36, No. 411(1995), pp332-338
４）芝田之克，塚本幸夫“鉄構工場における最近の切断技術”
溶接技術，(1995年6月), pp64-68
５）“切断精度向上，夜間無人運転で生産能力大幅アップーレーザー切断導入で作業環境も画期的改善”溶接技術 (1995年6月)pp90-93
６）森川彰“電機業界におけるレーザー板金加工”　オプトロニクス (1994)No. 7, pp133-140
７）光斎直樹他“ＹＡＧレーザーによる産業用ガスタービンブレードの穴あけ加工”
第29回レーザー熱加工研究会論文集 (1993年2月)pp85-89
８）森安雅治“レーザー切断の安定化・高品質化について”第33回レーザー熱加工研究会論文集 (1994年12月)pp63-70
９）高野元太他“ＣＯレーザーによる炉内構造物の切断技術の開発”
第35回レーザー熱加工研究会誌，　Vol. 2, No. 2(1995), pp139-150
10）家久信明他“スラブ型結晶ＹＡＧレーザーの加工特性”
第36回レーザー熱加工研究会誌，　Vol. 2, No. 3(1995), pp125-139
11）J. E. Scott, W. P. Latham"High Speed Material Processing of Thick Stainless Steel with a Chemical Oxygen-Iodine Laser"ICALEO'95(1995)
12）福島司，水野正紀，竹野祥瑞“高ピーク短パルス CO_2 レーザーとその応用”
光アライアンス (1995年9月)，　pp22-25
13）竹野祥瑞他“切断溝における溶融金属挙動の観察ー厚板のレーザー切断現象に関する研究 (第2報)”溶接学会全国大会講演概要，第56集 (1995)pp132-133
14）永田陽造，石井幸二，沼田慎治“軟鋼厚板レーザー切断における酸素気流の影響に関する考察”レーザー熱加工研究会 ·WG 資料 (1995年12月)
15）伊藤弘，後藤訓顕，今井信一“光ファイバーによるＹＡＧレーザー光の伝送とその工業的応用”レーザー研究，　Vol. 22, No. 4, pp97-104
16）須賀昭雄“フォトン応用技術の最新動向”　pp64-74
17）松縄朗“レーザー溶接の進歩と応用”金属，　Vol. 65(1995)No. 10, pp7-14
18）丸山盤男，高倉敬司“ブーツバンドのレーザー溶接におけるレーザー溶接品質管理”
第33回レーザー熱加工研究会論文集 (1994年12月)pp77-84
19）河崎稔“レーザークラッド・バルブシートの開発”第35回レーザー熱加工研究会誌，Vol. 2, No. 2(1995), pp217-230
20）高橋雄二“自動車産業におけるレーザー加工応用”
オプトロニクス (1994)No. 7, pp127-132
21）新美友治，夏見文章“ CO_2 レーザー溶接の自動車ボデーへの応用”

第28回レーザー熱加工研究会論文集 (1992年7月)pp171-184
22) 高橋浩三，松崎紀之“乗用車ボデーへのレーザー溶接工法実用化”
第29回レーザー熱加工研究会論文集 (1993年2月)pp205-211
23) 新谷進，稲葉洋次“レーザー溶接によるステンレスパイプの製造”
第２６回レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp213-218
24) 南田勝宏他“高出力レーザービームの鉄鋼製造プロセスへの応用”
第２８回レーザー熱加工研究委員会論文集 (1992年7月)pp185-189
25) 市古修身，吉田三男，藤沢淳一“鋼片のレーザーきず手入れのための要素技術の開発”精密工学会誌, Vol. 61, No. 8(1995), pp1126-1130
26) 石出孝，妻鹿雅彦，下楠善昭“高出力 CO_2 レーザーの厚板への適用”
第35回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 2(1995), pp231-239
27) 梅田真一他“パルス式ＹＡＧレーザーによるアルミニューム合金溶接の実用化”
第36回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 3(1995), pp143-147
28) 松本長他“蒸気発生伝熱管の光ファイバー伝送によるレーザースリーブ溶接技術の開発”第26回レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp201-212
29) 石出孝，妻鹿雅彦，下楠義昭“高出力 CO_2 レーザー溶接技術に関する基礎的検討”
三菱重工技報， Vol. 32No. 2(1995), pp109-112
30) 石出孝，松本長“高出力ＹＡＧレーザーの加工への適用ー重工業分野での適用”
レーザー研究， Vol. 22, No. 11, pp2-11
31) 阿部信行“レーザービームによる深溶込み溶接現象”第26回レーザー熱加工研究会論文集 (1991)pp65-75
32) 清水弘之，芳野文人“パルスＹＡＧレーザーのビームプロファイルと溶接現象の直接観察”第33回レーザー熱加工研究会論文集 (1994)pp47-60
33) 森清和，坂元宏規“自動車部品のプラズマモニタリング”第33回レーザー熱加工研究会
34) 宮本勇，真岩卓臣，森清和“CO_2 レーザー溶接におけるキーホールプラズマの解析”第35回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 2(1995), pp157-167
35) 森清和，宮本勇“プラズマモニタリングの角度特性”第35回レーザー熱加工研究会誌，Vol. 2, No. 2(1995), pp169-173
36) 西谷昌一郎，森安雅治“レーザー合金化によるフェライト系ステンレス鋼の非磁性化処理”第３５回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 2(1995), pp175-183
37) 木村定彦他“高出力ＹＡＧレーザー発振器と加工特性”第36回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 3(1995), pp61-74
38) 近藤康夫他“50ＫＷ級大出力 CO_2 レーザー加工装置とその性能”
第36回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 3(1995), pp75-84
39) 藤長茂樹他“5.5kW ＹＡＧレーザーシステムとその加工例”
第36回レーザー熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 3(1995), pp103-113
40) 石出孝他“ＹＡＧレーザー溶接のハイブリッド化”第36回レーザー熱加工研究会誌，Vol. 2, No. 3(1995), pp115-123
41) 谷生至誠他“ CW 4kW Ｎｄ：ＹＡＧレーザー”

レーザー学会研究会報告，RTM-95-25(1995年11月), pp1-6
42) 安田耕三“レーザー加工装置の現状”岡山県レーザー加工技術研究会資料 (1995年11月)
43) 安田耕三“フィラー材を用いる厚板のレーザー溶接” レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp113-119
44) 片山聖二“アルミニューム合金のレーザー溶接ー現状と課題” 第２６回レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp145-158
45) 吉川光昭他.“2kW－ＹＡＧレーザーによる各種アルミニューム合金の溶接” 溶接技術 (1994年3月)pp119-124
46) 清水弘之，斎藤洋，芳野文人“ CO_2 レーザーによる厚板の溶接” レーザー技術研究会報，No. 100(1995), pp41-83
47) 金沢祐孝他“４ＫＷレーザーとその加工特性”第36回レーザー熱加工研究会誌，Vol. 2, No. 3(1995), pp53-60
48) 金鍾道他“レーザー有機プルームの分光学的解析” 第119回溶接アーク物理研究委員会資料 (1995年7月)
49) 宮本勇“レーザー溶接の将来技術” 第26回レーザー熱加工研究会論文集 (1991年7月)pp251-262
50) 佐野雄二，小長井主税“レーザーを使用した水中加工技術” 光アライアンス (1995年9月)，pp19-21
51) 岩佐孝“レーザー表面改質によるアルミ合金の耐磨耗性表面” 第28回レーザ熱加工研究会論文集 (1992年7月)pp109-117
52) 牧野吉延他“マルテンサイト系ステンレス鋼のレーザー硬化処理” 第29回レーザー熱加工研究会論文集 (1993年2月)
53) “レーザー溶接の現状と将来技術”レーザー熱加工研究会 (1994年3月)
54) “レーザー加工の現状と動向”.レーザー熱加工研究会 (1988年8月)
55) “レーザー加工機のビーム計測と光学部品の評価技術ーレーザー加工の標準化に向けて” レーザー熱加工研究会 (1990年3月)論文集 (1994年12月)
56) 関勇一，芦田喜郎“レーザー表面溶融処理により形成された高炭素高合金鋼の急冷凝固組織とその焼戻し挙動”鉄と鋼 Vol. 81(1995)No. 5, pp53-58

4．3．3 機能構造体／新材料の作成技術

（1）超微粉製造・クラスター技術

a）超微粒子作成技術

超微粒子作成技術は，粉砕を中心とするブレークダウン(breaking down)法[1]とビルドアップ法(building up)という二つに大別される．ビルドアップ法は原子，分子，イオンなどから超微粒子を合成する方法である．生成される粒子はブレークダウン法と比較すると，小粒径で高純度物質の合成に適している．また，作成条件の制御により，粒径，粒度分布，結晶系などの制御が可能であり，さらには，化合物，アモルファス層などの複雑な多元成分系への適用も期待される．高純度物質を制御性よく合成できるビルドアップ法は機能材料，構造材料および新材料への発展利用の可能性が大きい．

ビルドアップ法による超微粒子の作成方法には，表4．3．3．1に示すように化学的な反応を利用する方法と，高純度な粒子を作成するのに適している物理的方法の二種類がある．以下に物理的な方法であるガス中蒸発法[2]について具体例を示す．

1）高周波誘導加熱法

低活性・低融点金属（Au，Ag，Cu，Al，Fe，Ni，Coなど）の超微粒子の生成には高周波誘導加熱法が使用できる．超微粒子生成過程の模式図および超微粒子の生成過程を調査した[15]装置の概略図を図4．3．3．1および図4．3．3．2にそれぞれ示す．ルツボ内の溶融金属の表面から蒸発した金属原子は周囲のガス分子で冷却され，凝縮して原子の集合体としての微小粒子（約2nm程度）が生成する．その後，その微小粒子が10～数10個合体・成長し，20～30nmの超微粒子となる（図4．3．3．3）．その後の合体・成長はなく，磁性超微粒子はチェーン状に連なった形状のものができる．

高周波誘導加熱法は溶湯の撹拌効果により，均一温度が維持でき，また，溶湯内の合金組成の均一性が良い．故に，粒径分布がシャープで，合金組成が均一な超微粒子の生成が可能であり，また，量産性にも適している．

2）レーザー蒸発法[16]

大出力レーザービームを適当な光学系で集光すると，その空間的パワー密度は10^7W／mm^2以上にまで上昇させることが可能である．その高パワー密度のレーザー照射を受ければ，どのような物質でもその表面はごく短時間でその材料の蒸発温度に達し，照射部分から激しい蒸発が生じる．故に，レーザー蒸発法を使用すれば，高周波誘導加熱法では作成が困難であった高融点金属（Pt，Mo，Wなど）やセラミックス（SiO_2，Al_2O_3，PZTなど）の蒸発が可能となる．

また，レーザー蒸発法では，蒸発源が蒸発系（真空容器）外に設置でき，さらに，ルツボが不要であることから，高純度な生成環境が整えられる．それ故に，高活性金属（Ti，Ta，Zrなど）の超高純度な超微粒子の生成も可能となる．レーザー蒸発法による超微粒子生成装置の一例を図4．3．3．4に示す．超微粒子の生成機構，回収機構および真空排気機構で構成されている．ステンレス製の超微粒子生成室を真空排気系により10^{-4}Pa以下まで真空排気した後，99.999％以上の高純度HeガスあるいはArガスを所定の

表4.3.3.1　ビルドアップ法による超微粒子作成方法

	製法名	原理・特徴
物理的方法	ガス中蒸発法 [3,4,5,6]	不活性ガス中で金属を蒸発させ，ガスとの衝突により冷却・凝縮させ超微粒子を生成する方法．蒸発源として高周波誘導加熱，抵抗加熱，また高融点物質にはレーザー加熱，アーク加熱，電子ビーム加熱などがあるまたハイブリッドプラズマ法はプラズマガンと高周波誘導加熱を組み合わせ，高温プラズマを発生させ，原料粉を導入し気化させる方法で，化合物超微粒子生成に適している．
	スパッタリング法 [7]	蒸発源の替わりにスパッター現象を利用する．高融点物質および化合物などの粒子生成に適している．ガス圧が低ければ膜が形成される．
	金属蒸気合成法 [8]	真空下(10^{-1}Pa以下)で金属を加熱し，蒸発した原子を有機溶剤と伴に有機溶剤の凝固点以下に冷却した基板上に共蒸着させ，超微粒子を得る．
	流動油上真空蒸発法 [9]	オイル上に金属を真空蒸着させる．５ｎｍ以下というきわめて粒径の小さな，粒径分布のシャープな超微粒子を作ることもできる．
化学的方法・液相	コロイド法 [10]	高分子界面活性剤を共存させ，アルコール中で貴金属塩還流条件下で還元すると，高分子に被覆された金属超微粒子がコロイド状で生成する．粒径がよく揃っていることが特徴である．
	アルコキシド法 [11]	金属アルコキシドの加水分解により酸化物超微粒子を得る．ほとんどすべての元素について適用可能であり複合粒子の作成に適し，$BaTiO_3$(５０ｎｍ程度) SiO_2，ZrO_2などが得られる．
化学的方法・気相	有機金属化合物の熱分解法 [12]	金属カルボニル化合物($Fe_2(CO)_8$，$Co_2(CO)_8$)などの熱分解反応により超微粒子を得る．
	金属塩化物のH_2中還元法 [13]	金属塩化物をH_2気流中で還元する．
	酸化物・含水酸化物の水素中還元 [14]	α－ＦｅＯＯＨを水素気流中で数百度に加熱して還元する．市販されている磁気テープ用の金属超微粒子は大半がこの方法で作られている．

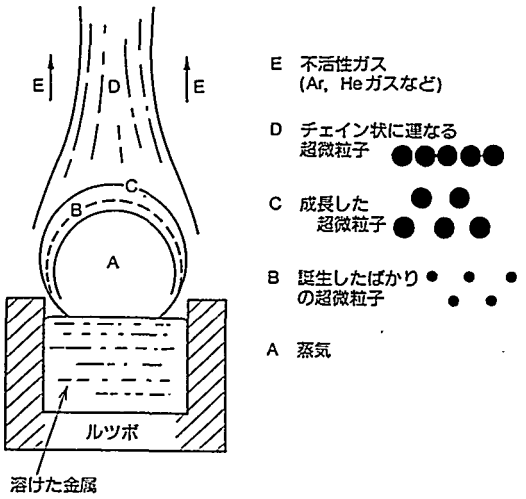


図4.3.3.1　超微粒子生成過程の模式図

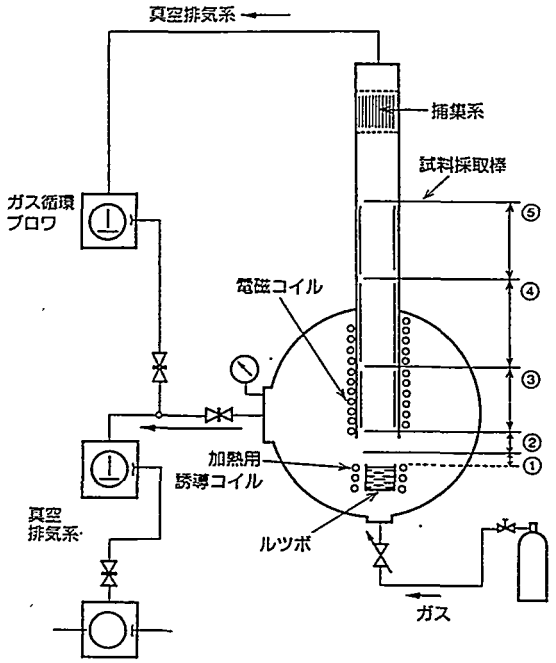


図4.3.3.2　超微粒子の生成過程を調査した高周波誘導加熱装置の概略図

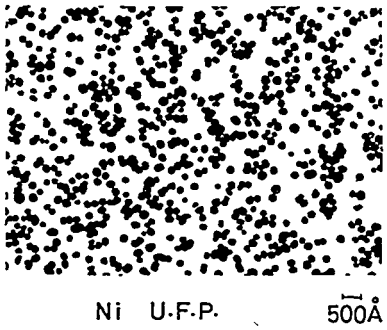


図4.3.3.3　高周波誘導加熱法で生成された超微粒子の透過型電子顕微鏡写真

圧力まで導入する．生成室側面のレーザー導入窓より高出力のCO_2レーザーを99.99%以上の高純度な蒸発材へ導入する．レーザー照射された高純度な材料部分のみが蒸発され，ガス中蒸発法の原理によりクリーンな超微粒子が生成される．円板状の蒸発材はサーボモーターの制御により回転と並進運動が可能であり，蒸発材のリング状部分全体が一様に超微粒子化される．

また，レーザー光路分岐システムの使用により2種類の蒸発源に同時にレーザーを照射させ，2種混合超微粒子の生成も可能である．その際，レーザー照射条件を選べば混合組成が任意に設定できる．生成された超微粒子はガスと共に搬送され，搬送管を通って回収機構で回収される．ガス搬送過程で熱処理を施すことも可能であり，また，搬送粒子を任意の高純度な活性ガスと反応させ酸化物，窒化物，炭化物，硫化物などの高純度な化合物超微粒子を作製することもできる．また，蒸発材を活性ガス中で蒸発させれば，化合物超微粒子も合成できる．

レーザー蒸発法は高周波誘導加熱法では制限されていた高融点・高活性金属の蒸発を可能にする優れた方法であるが，しかし，レーザー蒸発法の蒸発効率や超微粒子生成機構についての詳細は未だ十分には判明されておらず，今後の研究に期待される．また，レーザー照射時に発生するプラズマの性質を十分に解明することにより，レーザー蒸発法を工業規模で応用する際に必須の制御性が加味される．たとえば，レーザー照射面の温度を制御性よくコントロールできれば，生成粒子の粒子径，結晶系，単位時間当たりの生成量の制御が可能となる．また，混合超微粒子の組成制御も容易となる．

生成された高純度な超微粒子をガス搬送し，微小ノズルから高速で噴射させ，対向する基板に超微粒子からできた膜を形成することもできる．この膜形成方法をガスデポジション法[17,18]と呼んでいるが，その概念図を図4．3．3．5に示す．低活性・低融点金属の膜形成には蒸発源として高周波誘導加熱が使用できるが，高活性・高融点金属およびセラミックスの膜形成にはレーザー蒸発法が必要不可欠である．ガスデポジション法およびレーザーアシストガスデポジションについては，後で「4．3．4（1）超微粒子応用被膜形成技術」において詳細に述べられている．

b）クラスター作成技術

クラスター作成技術は物質の気化方法の違いにより，次の三種類のクラスター源に大別される．原理的にはすべてガス中蒸発法でクラスター（微小粒子）を作成し，そのクラスターを高真空中へ引き出すというものである．

1）加熱型クラスター源

ルツボを抵抗加熱あるいは電子線衝撃で加熱して，金属原子を蒸発させる方法である．その概念図を図4．3．3．6に示すが，生成されたクラスターをスキマーを通して凝縮槽外へ取り出すようになっている[19]．ルツボを使うため高融点・活性金属には適用できない．

2）放電プラズマ型クラスター源

グロー放電プラズマにより発生した不活性ガスイオンでターゲット金属をスパッタして，

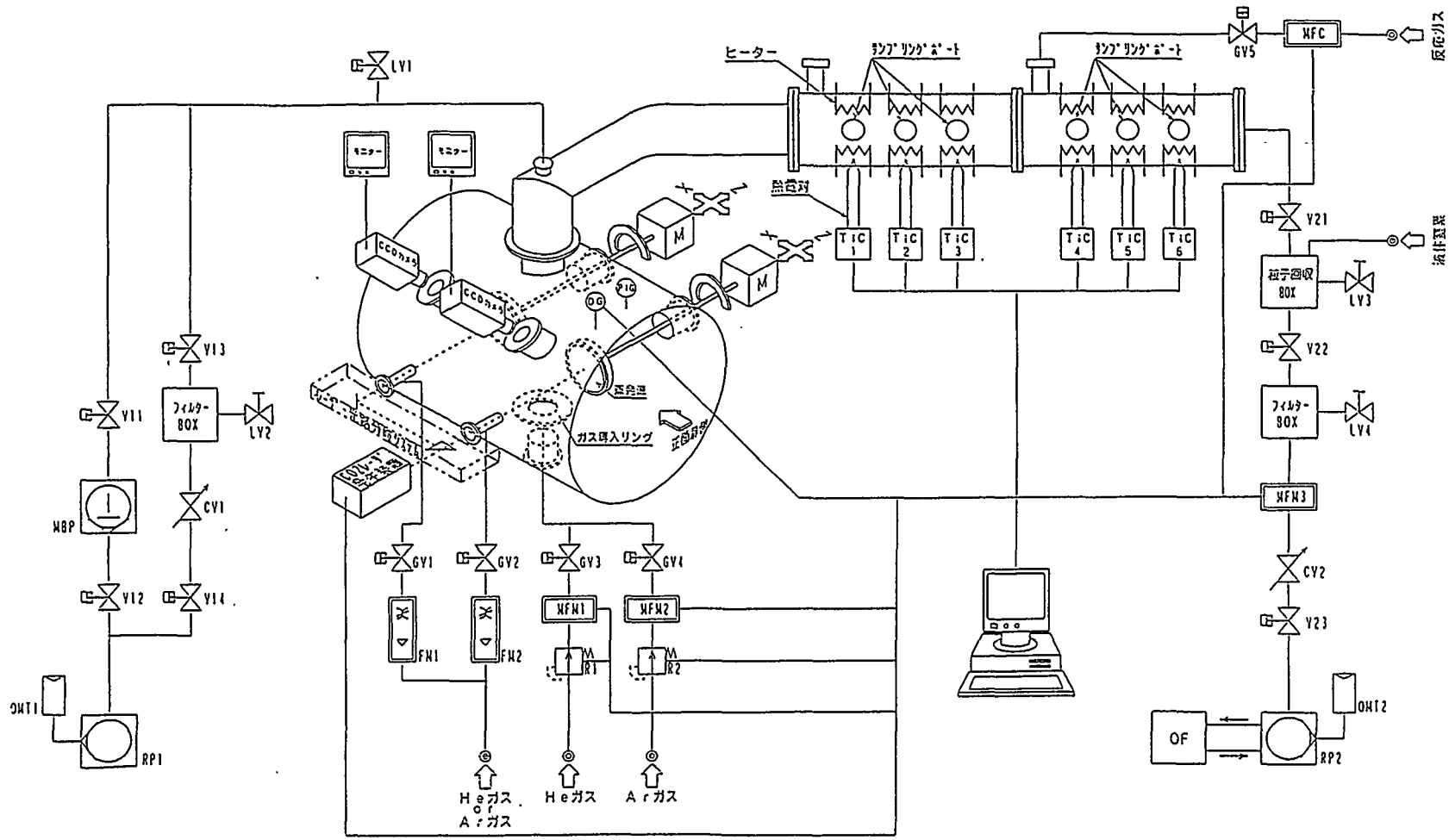


図4.3.3.4　レーザー蒸発法による超微粒子生成装置の一例

金属を気化させる方法である．高効率なクラスター源の概念図を図4．3．3．7に示すが，中性クラスターの生成と同時に正または負に帯電したイオンクラスターも発生できる[20]．不活性ガスがプラズマ発生，気化金属の冷却・凝縮および搬送の全工程に寄与するため，クラスタービーム密度の制御が難しい．

3）レーザー蒸発型クラスター源

レーザー蒸発型クラスター源の概念図を図4．3．3．8に示す[21]．回転する棒状ターゲットに焦点を合わせてレーザーパルスを照射し，ターゲット金属を蒸発させる．レーザービームに同期して不活性ガスをパルス的に導入し，気化金属を冷却・凝縮させスキマーを通して高真空槽へ取り出す．クラスターの酸化や不純物の混入が抑制でき，さらに高出力レーザー光源の開発により，クラスターの大量生産やイオンクラスターの発生も可能となる．

最近，これらのクラスターをマトリックス中に分散させた，いわゆるグラニュラー物質の作成に関する研究も進められている[22]．

c）レーザー励起プロセスによる超微粒子作製技術の現状

光電子素子の微細化あるいは新機能創出の要求に対し，従来の熱平衡プロセス・イオンビームプロセス・プラズマプロセス等の組み合わせでは限界が現われてきており，これを打開する新しいプロセスの実用化が望まれている．本章においてこれまで述べられてきたように，フォトン（光量子）の無質量性と非熱平衡性を有効活用するレーザー励起プロセス技術（特に可視－紫外域）は上記要求に答える最有力プロセスあり，この分野における実質的特徴としては次の項目が挙げられるであろう．

1. イオンビームやプラズマを主体とするドライプロセスに較べて格段に低ダメージであること（低ダメージ性），
2. フォトンエネルギーの選択により特定の材質に作用させることが可能であること（材料選択性），
3. 空間的に局所励起が可能となること（空間選択性），
4. 局所励起性と反応室全体としての低温化の実現により汚染物の混入が少ないこと（クリーン性），

等がある．最近は，レーザー励起プロセスの中でも，安全性・環境対応性・ランニングコスト等の観点から，化学的プロセスのみならず物理的プロセスも注目されてきている．その代表がレーザーアブレーション法である（4.3.1節参照）．この方法は多元系薄膜の高品位化を中心として発展してきたが[23-25]，さらに新機能微細構造体プロセスとしての可能性が国内外で盛んに研究され始めている．

以上のような特徴を有するレーザーアブレーションプロセスの最適な適用対象として，不純物の混入・結晶性・表面状態等が高度に制御された超微粒子（粒径が数nmから100nm程度の微粒子で，特に孤立・分散状態で特性を発揮するもの）の作製が挙げられる．超微粒子は単位体積当たりの表面積割合が極めて大きいことで，この特性を利用した様々な応用がなされてきた[26]．近年，粒径5 nm以下の半導体超微粒子を量子的な擬0次元物

ＵＦＰガスデポジション技術
（省資源、省エネ、クリーン、プロセスの簡素化）

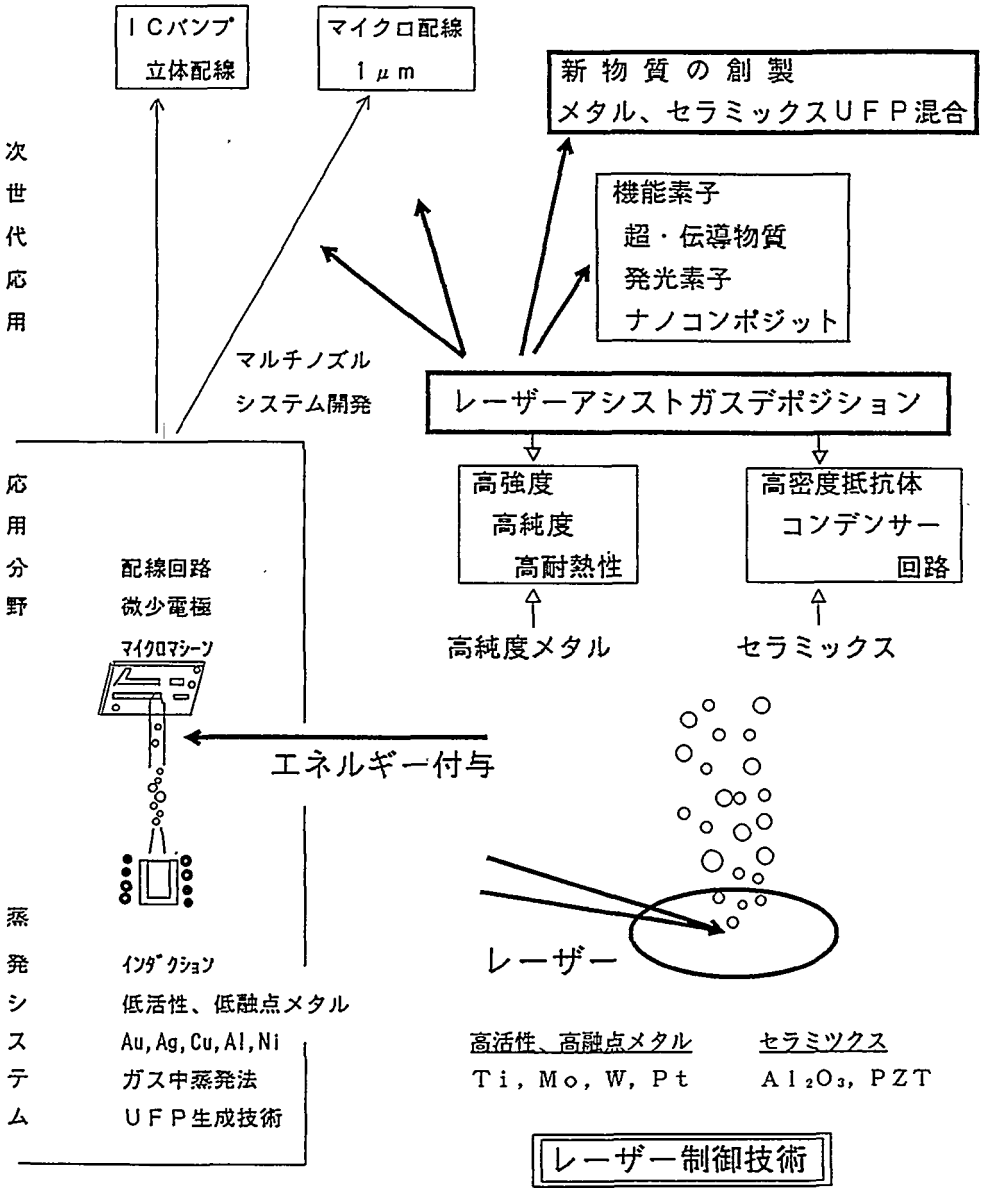


図４．３．３．５　ガスデポジション法の概念図

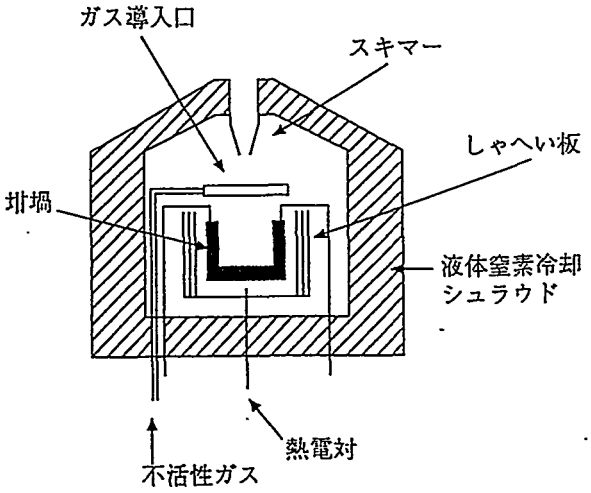


図４．３．３．６　加熱型クラスター源の概念図

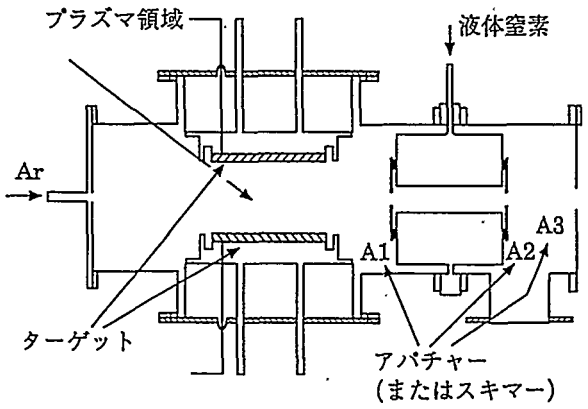


図４．３．３．７　放電プラズマ型クラスター源の概念図

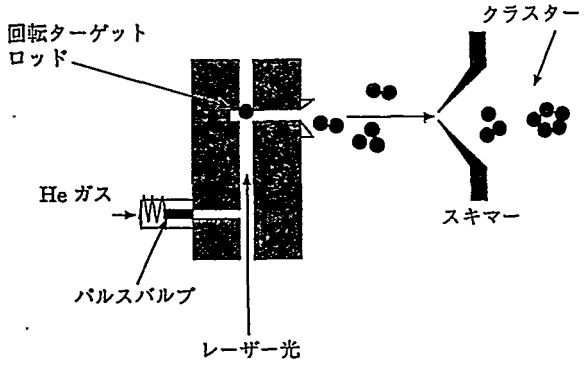


図４．３．３．８　レーザー蒸発型クラスター源の概念図

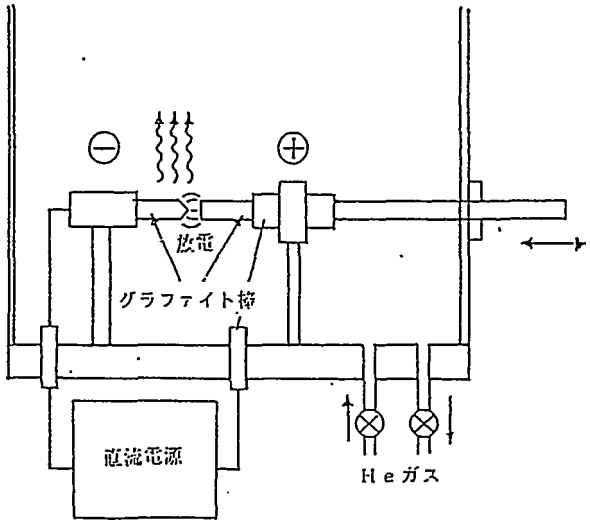


図４．３．３．９　直流アーク放電によるカーボンクラスター生成装置概略図

質（量子ドット）として捉え，その特異な物性を引き出すという，さらに本質的な応用展開が進展しつつある．また構成原子数が数十個レベルのクラスターまでに範疇を拡げて考えると，すべてのドライプロセス（PVD, CVD, イオン注入等）にこのクラスターがかかわっており，ドライプロセスの高度化にはクラスターの特性理解が不可欠である．このように，超微粒子・クラスターは将来的にも大きな可能性を秘める素材であるといえる．

上記の目的における超微粒子作製には，レーザーアブレーション法を中心に，他の従来プロセスと融合させたものが有効と考えられる．レーザーアブレーション法は酸化物超伝導体等の多元系薄膜の高品位化において研究が盛んになったものである[23-25]．この手法は，さらに改良を加えることにより超微粒子の作製に対しても有効である．すなわち，アブレーションを行う真空槽内に希ガスを一定圧力導入し，脱離・射出粒子の空中での会合と成長を促せば，比較的簡便に超微粒子を作製することができる．この方法の特徴はさらに，導入希ガスの圧力等のプロセスパラメータを変化させることにより，平均粒径を制御させることが可能なことである．この手法の概念図を図4.3.3.10に示す[27]．基本的な構成は，ArFエキシマレーザー光源からのレーザー光（波長：193nm）が，整形光学系を経由して真空反応室内部に配置されたターゲット（例えば高純度単結晶Si）の表面に集光照射される．照射条件は，パルス幅：12ns，パルスエネルギー密度：1.0－3.0 J/cm^{2}である．ターゲットは自転機構を有するターゲットホルダー上に配置されており，このターゲットの法線方向に7－10mmの距離で，かつ表面に平行に堆積基板が配されている．上記のレーザー照射条件での脱離物質は主に原子・分子乃至クラスターであるので，高真空中でのレーザーアブレーションでは，堆積基板に薄膜が堆積されることになる．これに対し，希ガス導入系と差動排気系を組み合せることにより，一定圧力の希ガス雰囲気中（例えばHe：2.0－20.0Torr）で，上記照射条件のレーザーアブレーションを行うと，脱離粒子は雰囲気希ガス原子に衝突し，飛行方向が乱雑化するとともにエネルギーを散逸するため，空中での会合と成長が促進される．従って，堆積基板に到達・補集した時点では，粒径数nmから数十nmの超微粒子に成長している．

すでに述べたように，この希ガス雰囲気レーザーアブレーション法の特徴として，導入希ガスの圧力を変化させることにより，生成する超微粒子の平均粒径を制御できる点がある．図4.3.3.11に，生成したSi超微粒子粒径の雰囲気Heガス圧依存性を示す[27]．これによると，Heガス圧2.0－20.0Torrの範囲では，Si超微粒子粒径はHeガス圧の約1/3乗に比例して単調に増加していることがわかる．このことは，希ガス雰囲気レーザーアブレーション法が粒径制御可能な超微粒子製造法に成り得ることを示唆している．

d）課題と将来展望

次にこれまでのレーザーアブレーション等のPVD法による超微粒子作製における課題と将来展望について述べる．先ず，c節でも述べたように，経験的には超微粒子の制御法（例えば希ガス圧による）が把握されているものの，気相中での超微粒子の成長機構に対する詳細な理解（モデリング）が必要である．特にエキシマレーザーなどは10nsレベルのパルス励起を行うもので，このように極端な熱的非平衡状態下での気相成長を論じた理

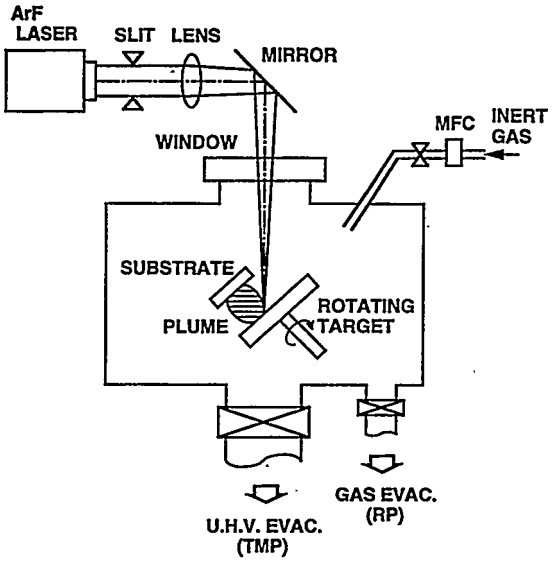


図４．３．３．１０：希ガス雰囲気レーザーアブレーションによる超微粒子作製法の概念図.

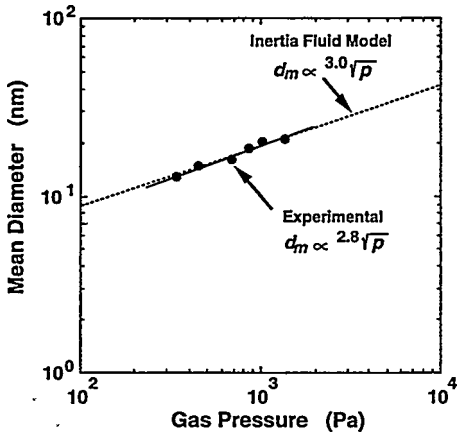


図４．３．３．１１：生成したSi超微粒子粒径の雰囲気Heガス圧依存性.

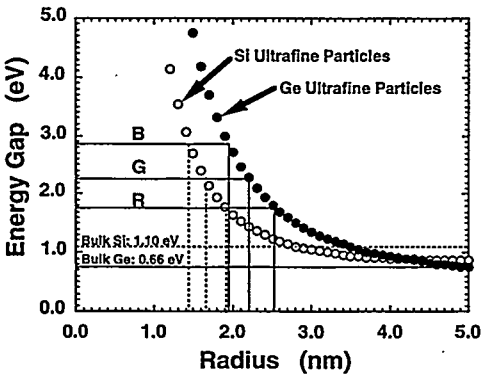


図４．３．３．１２：半導体球形超微粒子のバンドギャップエネルギーの粒径依存特性.

論は極めて少ない．試行的で粗いモデルではあるが，雰囲気希ガスを慣性媒質と見立て，パルスレーザー照射による射出粒子が，この慣性媒質にエネルギー散逸することによる超微粒子の凝縮を解析した例がある[28]．ここでは，限られた実験範囲（希ガス圧力）ではあるが，実験結果とモデルとの一致性が見られている．さらに広範な実験条件（希ガス圧力，基板距離，パルスエネルギー等）での検証が必要であろう．さらには，CW レーザー励起あるいは抵抗加熱法など，より熱平衡に近い状態における超微粒子の凝縮・成長をも包括する詳細なモデルが望まれるところである．

レーザーアブレーション等の PVD 法で，直接超微粒子の堆積を行っただけでは，結局は超微粒子からなる多孔質形状の薄膜を形成してしまう．素子化を前提とすると，多孔質形状は電極接続や粉塵発生等において不利である．またこのことは，前述した微小粒子の孤立状態（実際には透明媒質中での分散状態等）での特性を引き出すという，超微粒子としての構想にも反する．従って作製された超微粒子は何らかの方法で透明媒質中に分散されていることが必要である．そのためには，1.堆積された超微粒子の表面酸化処理を行う，2.SiO_2等透明媒質の従来法堆積（CVD or PVD）と超微粒子のレーザーアブレーション堆積を同時に行う，などの従来プロセスとのハイブリッド化で達成できると考えられる．

参考文献

1) 神保元二ほか：微粒子ハンドブック（朝倉書店，1991)226

2) R. Uyeda:Progress in Materials Science, vol. 35, (1991)1-96

3) 八谷繁樹：応用物理，41(1972)604

4) S. Iwama:Jpn. J. Appl. Phys. , 12(1973)1531

5) 宇田雅広：微粒子ハンドブック（朝倉書店，19991)260

6) 吉田豊信 :J. Appl. Phys. , 54(1983)640

7) S. Ohnuma, Y. Nakanouchi and T. Masumoto:Proc. 5th Int. Conf. Rapidly Quenched Metals, Wurzburg(1984)1117

8) K. Matsuo and K. J. Kulabunde:J. Catalys. , 73(1982)216

9) S. Yatsuya, K. Mihama and R. Uyeda:Jpn. J. Appl. Phys. , 13(1974)749

10) 平井英央：高分子錯体触媒，2(1982)57

11) 尾崎義治：工業材料，29(1981)85

12) J. R. Thomas:J. Appl. Phys. , 37(1966)2914

13) 大塚研一，山本裕正，吉沢昭宣：日本化学会誌，(1984)869

14) 橋本：化学工学，48(1984)38

15) E. Fuchita, M. Oda and S. Kashu:Proceed. 7th Intern. Conf. on Vac. Meta. (1982)973

16) A. Matsunawa, H. Yoshida, S. Katayama:Proc. ICALEO'84, Boston, 44(1984)35

17) C. Hayashi, S. Kashu, M. Oda and F. Naruse:Mat. Sci. and Engi. , A163(1993)157

18) 渕田英嗣，小田正明，林主税：まてりあ，34(1995)455

19) 梶本興亜編：クラスターの化学，培風館 (1992)

20) 石井清，後藤充：日本応用磁気学会誌，17(1993)301

21) P. Melinon, V. Paillard, V. Dupuis, A. Perez, P. Jensen, A. Hoareau, J. P. Perez, J. Tuaillon, M. Broter, J. L. Vialle, M. Pellarin, B. Baguenard and J. Lerme: Int. J. Mod. Phys., B9(1995)339

22) 隅山兼治, 鈴木謙爾：まてりあ, 35(1996)42

23) D. B. Geohegan: Appl. Phys. Lett. 60, (1992) 2732.

24) K. Scott, J. M. Huntley, W. A. Philips, John Clarke, and J. E. Field: Appl. Phys. Lett. 57, (1990) 922.

25) A. Gupta, B. Braren, K. G. Casey, B. W. Hussey, and R. Kelly: Appl. Phys. Lett. 59, (1991) 1302.

26) 林, 上田, 田崎："超微粒子 - 創造科学技術 -", (三田出版会, 1988).

27) T. Yoshida, Y. Yamada, T. Orii, and S. Takeyama: Ext. Abst. 1995 Int. Conf. Solid State Devices and Materials, (1995) 968.
Y. Yamada, T. Orii, I. Umezu, S. Takeyama and T. Yoshida: Jpn. J. Appl. Phys. 35, [2] (1996) in press.

28) T. Yoshida, S. Takeyama, Y. Yamada, and K. Mutoh: to be published in Appl. Phys. Lett.

（2）同素体創製技術

a）炭素同素体（フラーレン）

炭素の同素体には，四方に炭素の手が延びた（ｓｐ^{3}混成軌道をもった）炭素原子からなるダイヤモンド，平面状に三方に結合が延びた（ｓｐ^{2}混成軌道の）炭素原子からなる黒鉛およびｓｐ混成軌道をもった原子からなる無定形炭素，カルビン（ｃａｒｂｙｎｅ）がある．１９８５年，Kroto，Smalleyおよびその共同研究者たちは炭素クラスターの質量分析から原子数６０個のクラスターが特異的に安定であることを報告している[1]．炭素の新しい安定構造でフラーレンと呼ばれ，５員環１２個を含み，他を６員環からなる多面体型炭素分子は，サッカーボール型でよく知られているC_{60}にとどまらず，C_{70}，C_{76}，C_{82}など原子数にして１５０個を超える大きさまでの高次フラーレンが純物質として取り出されている．最近では炭素原子で組み上げられたカゴの内部に異原子を閉じ込めた金属内包フラーレン[2]（LaC_{82}，YC_{82}，ScC_{82}など）や新しいタイプの炭素繊維でカーボンナノチューブ[3]と命名された物質についての研究が活発に行われている．

カーボンクラスター（C_{60}など）はＨｅガス雰囲気中でグラファイト棒を電極として，その間に直流アーク放電を発生させて生成された’ススの中に含まれている．この方法はガス中蒸発法の一種で，蒸発源に直流アーク放電を使用したものである．その概略図を図４．３．３．９に示す．グラファイト電極間でアーク放電を発生させると，主にプラス側のグラファイト電極から炭素蒸気が発生し，Ｈｅガス分子と衝突し冷却されて凝縮して，粒子となる．粒子は搬送Ｈｅガスによって回収部に運ばれ冷却板に’ススとして付着回収される．生成条件として，２０Ｖの電圧をかけ，３００～５００Ａの放電電流を発生させる．Ｈｅガス圧はおよそ5×10^3Ｐａを保つようにガスを供給し続ける．交流電圧よりも直流電圧のほうが生成効率は高い．

フラーレン物質を工業規模で利用するためには，その価格を３桁以上引き下げる必要があり，大出力のレーザー蒸発法などの手法に期待が寄せられている．また，炭素以外の，たとえばＢ，Ｓｉなどについての同素体にも関心が寄せられている．

b）同素体作成技術

同素体は物質の温度，圧力，時間による相の変化によって作製されるため，通常は加熱・加圧状態で特定の相（同素体）をつくり，その状態から，相変態が起こる速度より高速で急冷・急減圧により，常温・常圧状態で実現される相（加熱・加圧状態の相と同じと考えられる）の呼称である．従って我々の位置している環境では準安定の相である．例として，ダイヤモンド（Ｃ）は高温・高圧状態から急減圧により作製し，オゾン（O_3）は放電場や紫外線場で励起された元素（Ｏ）をその場から急速に常温・常圧場に導いて作製し，ゴム状硫黄（Ｓ）は溶融状態から急冷して作製する．また，近年注目を集めているフラーレン類は放電場やレーザーによって誘起されたプラズマ場での相を急速冷却・減圧して作製される．[4]高温・高圧場を発生する手段として，放電やレーザー等の高密度エネルギーが利用される（通常，電子ビームやイオンビームは真空中でのみしか利用できないため，使用範囲は極めて小さいものとなる）．レーザーは雰囲気を問わず，高温・高圧場の発生

に利用できるため，最も有効な同素体作製のツールと考えられる．

金属内包フラーレンが超伝導性[5]を示したり，高い収率でフラーレン結晶から合成ダイヤ[6]を得たり，潤滑材としての可能性が示される[7]等，今後，同素体の利用分野は光電変換素子，半導体，光メモリー等の電子デバイス分野，先進機械分野や医薬品分野へと広がるであろう．

参考文献

1) H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl and R. E. Smalley:Nature, 318(1985) 162

2) R. E. Smalley:Accounts of Chem. Res. , 25(1992)98

3) S. Iijima and T. Ichihashi:Nature, 363(1993)603

4) 丸山茂夫：季刊ﾌﾗｰﾚﾝ（ﾀﾞｲﾔﾘｻｰﾁ），2(3)(1994)101

5) A. F. Habard et al:Nature, 350(1991)600

6) D. M. Greun:U. S. P. 5, 328, 676 (1994, 7, 12)

7) B. Bhushan:Diamond & Structual Carbon News, Feb. p. N/A(1994)

（３）超微粉応用新材料創製技術（スーパーマテリアル）

耐環境性（耐食性や耐熱性）が大きく，機械加工が容易な材料の開発は材料分野の中心的テーマである．

耐環境性の大きな金属材料は発電設備，航空機，原子炉等に不可欠の材料であり，現在はニッケル基の超合金が最も利用されている．この材料は常温の強度より高温（７００～９００℃）の強度が大きく，耐熱性としては望ましい性質をもっている．高温の強度が大きい理由は塑性変形が起こりにくい結晶構造に由来しているため，この種の材料は機械加工が極めて困難である．しかし，極めて小さな結晶にすると，結晶粒間の滑りによる塑性変形が起こり易くなるため，微結晶の材料の作製が要望されている．超微粒子をその粗大化が起こらない温度で焼結した材料はこの性質が大きく現れるため（超塑性現象），容易に機械加工できる材料となり，加工後，結晶粒を大きくする熱処理を行えば，その使用条件に対する要求はクリアーできる．また，金属の元素組成も容易に制御できる．これは現在検討されている製法（レオキャスト等）より微細な結晶組織の作製ができ，新たな組成の金属材料設計に大きく寄与できる．しかし，超微粒子を用いた材料はその原料である微粉の製造コストが極めて大きく（例えば　Ｎｉで数千円／ｇ，Ｍｏで数万／ｇ）実用化する場合の障壁となっている．レーザーを用いた超微粉の製造はその緒についたばかりであり，フォトンコスト（レーザー機器の価格）の低減が図れれば，実用化に大きな前進となろう．また，セラミックスにおいての同様に超塑性等の現象を利用した加工ができるため，この方法に対する期待は大きなものとなっている．

なお，この方法の特徴の１つとして挙げられる，元素組成の制御の容易さを利用し，金属マトリックスの表面近傍を傾斜組成化し，最表面をセラミックス化することにより，実用上大きな問題となっている耐環境性（耐エロージョン・コロージョン性）の向上が容易に図れる．これは，現在大きな社会問題となっているゴミ消却のキーテクノロジーとして

の期待が大きい．現在のゴミ（特に家庭ゴミ）は塩（ＮａＣｌ）が含まれているため，高温（８００℃以上）で消却すると塩がＮａとＣｌに分解し，Ｃｌは水と反応し，塩酸（ＨＣｌ）となる．この高温の塩酸は極めて腐食性が大きく，[1),2)]金属材料の寿命を縮めている．また，低温燃焼では消却によって得られるエネルギー（熱）の利用効率が小さくなる．また，耐高温塩酸性の被膜をコーティングすると，伝熱管（ボイラーの水配管）の熱伝導率が小さくなるため，消却装置の設計等に問題が発生する．従って，パイプ状に加工できる超合金をつくり，その表面を傾斜組成化により耐高温塩酸性のセラミックスにすることにより，解決が図れる．また，塩のもう１つの元素であるＮａは高温ではNa_2Oのような酸化物であるが，消却を停止した場合，低温になるとこのNa_2Oは水と反応し，カセイソーダ（ＮａＯＨ）となる．消却炉の耐火煉瓦は酸化物であり固体酸であるため，このカセイソーダにより還元腐食される．これを防止するには新たな安定なセラミックス材料の開発が待たれる．

また，現在の人工骨，人工歯根はサファイヤやＴｉ合金等の材料でつくられている．これらの材料は強度的には問題はないが，生体適合性に大きな問題がある（人工関節，特に人工股関節はリウマチやエリテマトーデス等の膠原病の治療薬の副作用による骨頭壊死に対する治療に用いられることが最も多い）．しかし，人間の骨はアパタイトという材料で構成されているため，免疫系が異物と認識するため，長時間体内に存在すると，その周りの骨の細胞の死滅を促進したり，増殖の阻害が起こる．従って，人工骨部材は接合部やネジ部が緩み，問題を起こす（寿命が短い）．人工のアパタイトは生体適合性は高いが，強度が低いという欠点をもっている．超微粒子アパタイト焼結材や，炭素材料上にレーザアシストガスデポジションでアパタイトをコーティングした材料はこの問題の解決に最も近い道であると考えられる．

これら以外にも，磁性，超伝導，半導体材料の作製においても超微粒子焼結体は今後の利用が期待されている．

参考文献

1) 深迫　他：火力原子力発電，88号 (1985)19
2) 上門　他：腐食防食協会第40回腐食防食討論会予行集1993

（４）光応用構造体作成技術（選択的光機能加工）

ａ）発光性光機能素子技術

従来の材料開発（例えば発光材料や非線形光学材料等）においては，新しい機能（例えば発光波長制御や非線形感受率増加）を発現させるために，それに対応する新しい材料を探索することによって推進されてきた（材料探索－新機能発現型）．しかし超微粒子のｎｍレベルでの超微細構造制御（粒径・分散状態等）により新しい機能が発現できれば，新たに超微細構造制御－新機能発現型の材料開発を可能とするものであり，この手法は昨今の環境・資源問題を鑑みても極めて有効な方法であるといえる．

次に上記の超微細構造制御－新機能発現型の材料開発を，Ⅳ族半導体元素からなる発

光材料の創製に焦点をあてて述べることにする．1990年までに微結晶Siの強い室温可視発光が確認されてから[1-3]，従来は間接遷移型半導体であるため発光素子とは無縁と考えられてきたSiの室温可視発光特性の研究が盛んとなってきた．しかしながら，これらの報告の大多数はポーラス（多孔質）形状Siに関するものである[4]．可視発光のメカニズムに量子サイズ効果（波数選択則の緩和，エネルギーバンド幅変化等）が関与するのであれば，今後は粒径がnmレベルで制御され，さらに表面状態も良く制御された球形微粒子での研究が重要となるであろう．

さらに，nm領域における半導体球形超微粒子の量子閉じ込め効果による，エネルギーバンド幅の粒径依存特性については，Brus[5]，Takagawara[6]等によって計算されている．一例として，Takagawara[6]によって導かれた半導体球形超微粒子のエネルギーバンド幅の粒径依存特性を図4.3.3.12に示す．有効質量近似を用いているためそれぞれの材料種によって適用可能範囲があるものの，概ねこれを実証する実験データも報告されている[7-8]．IV族半導体がこの原理に従うのであれば，図4.3.3.12より，Si及びGeにおいては，3.0nmから5.0nmの範囲において粒径を制御することができれば，単一IV族半導体による，RGB 3原色発光も夢ではない．

元来II-VI族やIII-V族で構成されていた半導体発光材料をIV族に置き換えることの有益な波及性を列挙すると，1.低発掘コスト（無尽埋蔵量），2.環境汚染フリー，3.Si超LSIプロセス技術との高い整合性，等がある．これらのファクターは，産業展開する際の極めて強力な牽引力となることは間違いない．

次にIV族半導体超微粒子による発光材料を実現する際の課題について述べる．先ず，実験事実としてはすでに多数示されているもの[1-4]，間接遷移型半導体であるIV族(Si, Ge)がnmレベルの微細構造を持つことにより（ポーラス，超微粒子ともに）強い室温可視発光を示し出す機構が完全には把握されていない．極く最近，3次元的な量子閉じ込め効果であるとする説[9]も再浮上して来たが，やはり表面状態特有の発光準位が関与するものだとする説[4]も根強い．いずれにしても，これらを発光材料乃至は素子として実用化する過程において，歩留まり・信頼性を確保するためには，発光の起源を原理的に把握しておく必要がある．

これまで，レーザー励起プロセスによるIV族半導体超微粒子の創製技術と発光材料への応用という観点で述べてきたが，次にこれらを中心とした技術の光産業上の展開性について述べる．

1)IV族半導体超微粒子の発光材料は単体の発光素子に成りえるばかりか，RGB 3原色の発光さえ実現すれば従来のSi超LSIプロセスとの整合性を生かして，小型で高精細なデイスプレイ素子への応用展開が可能と考えられる．現状の小型デイスプレイはカラー液晶が主体であるが，これはバックライト・色フィルター・液晶の3元構造であるためアセンブリが避けえず，消費電力の割に輝度が暗い．本デイスプレイはSiプロセスを用いてアセンブリレス製造を可能とするものであり，このことは耐衝撃性・耐熱性等の総合的な耐環境性の向上にも繋がる．また成熟したSi超LSIプロセスと同等の微細パターニングが可能であるため小型で高密度な画像の提供ができる．さらに自発光素子であることは，

画質・応答速度・消費電力当たりの輝度の向上なども期待できる．以上のような小型・高精細のデイスプレイは，携帯移動端末等パーソナルユースのマルチメデイア機器は勿論のこと，カテーテル手術法におけるモニター等の医療分野をはじめ，航空・宇宙分野においても大きな潜在需要があると考えられる．

2)半導体超微粒子における量子サイズ効果の応用例として，レーザー媒質への適用が考えられるのでこれについて記す．一般に半導体の電子状態密度は，nmレベル（電子のド・ブロイ波長のオーダー）で形状制御することで，不連続的な特性を示すようになる．量子井戸構造（2次元），量子細線（1次元）等の半導体低次元構造の研究はこの原理に基づく，レーザー動作としての望ましい効果（しきい値の低下，温度雑音の低減，モード制御等）をねらったものである．この流れの極限にあるのが，量子ドット構造（0次元）である．実例としては，NaCl結晶中に粒径5-6nmの半導体（CuCl）超微粒子を分散させた媒質を窒素レーザーで励起することで，この媒質のレーザー発振が確認されている（波長：391.5nm，しきい値：2.1MW/cm^2）[10]．CuClの単位体積当たりの光学利得で比較すると，バルクから超微粒子化したことで約2桁増大していることも確かめられている[11]．以上のように，半導体超微粒子技術の展開性としては，新機能固体レーザーの開発にも大きな寄与を及ぼすものであると考えられる．

3)次にこれまで述べてきたレーザー励起プロセスを実現するプロセス装置自体の産業への展開を考える．a節で述べた希ガス雰囲気レーザーアブレーション法（一種のレーザーPVD法に属す）を例にとって，これを実現するためのプロセス装置としての条件を列挙すると，1.レーザー照射スポットにおけるエネルギー密度乃至その分布がインプロセスモニターできること，2.レーザー照射スポットの空間的走査機能があること，3.熱酸化・CVD/PVD堆積等の従来プロセス機能とのハイブリッド化が可能であること，などである．さらにレーザー光自体の特性として，1.レーザービームのエネルギー密度均一性等のビーム品質が良好であること，2.パルスエネルギーさらにはパルス時間の可変性，3.フォトンエネルギーの選択性向上，などが実現すればプロセスとしての可能性がさらに飛躍的に向上すると思われる．また上記1)，2)項の産業展開を支えるためには不可欠なプロセス装置であり，このプロセス装置自体の開発と生産も新たな産業展開を生み出すと言えるであろう．

b）機械的機能構造体作成技術

ニーズや価値観の多様化，個性化に伴い少量多品種に対応できる効率的な生産技術の確立が求められ，様々な材質や複雑な形状に迅速に対応できる新しい加工プロセス技術の探索が必要となってきている．また，機械技術はマイクロ化・分散化の傾向にあり，センサーやアクチュエータを微小な機械に組み込む必要性がでてきており，これまでの機械加工技術だけでは対応することが難しくなってきている．

最近この様な背景の下に，光硬化性樹脂とレーザー光線の走査により任意の複雑3次元形状を創成する光造形法が注目されている．[12]この技術は，コンピュータ上で生成された3次元ＣＡＤデータを直接形状創成に用いれるので，上述のような要求に対して有望で，マイクロ加工への応用例も報告されている．[13]しかし，この場合材質が光硬化性樹脂に

限られ純粋な金属材料あるいはセラミックスで作ることはできない．また，光硬化に伴う造形物の収縮が精度，強度上で大きな問題となる．一方，金型や直接金属の機能部品を直接作ることを目的に，樹脂中に金属フィラーを混ぜたり[14]（アメリカ，日本），光硬化樹脂の代わりに金属粉末を用いこれをレーザーで焼結して造形するもの（アメリカ：3-Dimensional Printing 法[15]，Selective Laser Sintering 法[16]，ＭＤ*法[17]，Ballistic Particle Manufacturing 法[18]；ドイツ：Laser Generating 法[19]；ベルギー：Selective Metal Powder Sintering 法[20]），肉盛り溶接を高度に制御・積層して造形する方法（日本：Plasma Powder Melting 法[21]，イギリス：Laser Surface Cladding 法[22]）或いは金属薄板をレーザーで切断し，これを積層溶接することで造形するもの（日本）[23]などが盛んに研究され金属ラピッドプロトタイピングと呼ばれている．しかし，ＳＬＳ（樹脂コーティングされた金属粉末をレーザーで選択的に焼結）や３ＤＰ，ＢＰＭ（金属粉体に結合材を吹き付け熱処理）等では，層状に堆積された粉体間の結合を強めるために焼結をおこない結合剤を焼失させると収縮により歪みが生じ精度が出ない．また，積層の厚みを薄くすることが困難なため加工段差が生じ表面が非常に粗く，内部に微小な空孔が多数あるため金属充填率も低く高い機械的強度は得られず，様々な機能の発現が困難である．これと同じく，ＭＤ*法（ネガ・ポジマスクを用いた溶融金属スプレー膜の積層）でも溶融皮膜の凝固に伴う収縮により，大きな内部応力が発生し反りや層間の剥離が生じて精度がでない．この様に，光造形技術は研究盛んな新しい分野ではあるが，従来の切削・除去に基づくＮＣ工作機械等に比べると加工精度，加工材質，装置コスト（レーザーが高価等）の点でまだまだ多くの問題があり，ＣＡＤとの整合性や，加工時間の短縮等のメリットを実際の市場でうまく出し切っていないのが現状である．レーザーを用いた金属の切断，溶接，焼結や熱拡散などに高度な制御性が要求され従来の材料や溶接技術だけの知見では克服困難だと考えられる．

また，粉体成形技術の分野では金属粉を微粒化する事により金属組織構造を微細化，非平衡化し，溶融・凝固では得られない機械的強度を達成している．しかし，粉体成形物を得る際にバインダー（結合剤）を混入する必要があり，焼結による収縮ため形状精度は機械加工に比べ劣る。また，一度焼結されたものは硬度が高くなるため一般に機械加工が困難である．さらに，粉体粒径を１μｍ以下にすると脱バインダーが困難になり，型と成形物の焼き付けが生じるため粉体材質への制約が大きく，機能の発現も困難である．これらの問題点と微粒子のハンドリング，製造コストの問題とあいまって，まだ充分にそのポテンシャルを生かしきっていない．

これらの課題に答えるために，機能発現性を持つ様々な材質の超微粒子を効率的にハンドリングし堆積させる技術を研究・開発することが重要である．光励起を用いたレーザーアシスト・ガスデポジション法（詳細は、４．３．４．（１））は，様々な材料に対し超微粒子の高い活性を利用して比較的低温で１００μｍ以上の緻密な機能性厚膜の高速形成がおこなえ，この様な要求に対して有効と考えられる．この方法では，部分的に材質が異なったり（ﾅﾉｺﾝﾎﾟｼﾞｯﾄ材料や傾斜機能構造等も可能），電気的機能（センサー，配線，電子部品等）を造形と同時に作り込める可能性がある．また，マイクロ部品の組立は，これまで半導体微細加工技術などで使われる犠牲層エッチングなどにより行ってきたが，犠牲

層の形成が２次元平面的であるため，複雑な形状物同士の組上げは困難で行程数も増える．これに対して，レーザーアシストガスデポジション法を利用しコンピュータ上に生成された３次元ＣＡＤデータに基づく積層技術とを組み合わせれば，犠牲層部を３次元立体的に形成できるため複雑な形状の機能性部品の創成も夢ではない．

しかしながら，堆積膜の緻密さや積層面の接合力の強化，さらには異なった材質境界層の制御や材料の微細構造に基づく機能の発現はまだ充分に可能となっていない．これらの課題を克服するには，高エネルギーレーザー光（フォトン）と活性微粒子の相互作用を明かにすることが望まれる．

参考文献

1) S. Furukawa and T. Miyasato: Jpn. J. Appl. Phys. 27, (1988) L2207.

2) H. Takagi, H. Ogawa, Y. Yamazaki, A. Ishizaki, and T. Nakagiri: Appl. Phys. Lett. 56, (1990) 2379.

3) L. T. Canham: Appl. Phys. Lett. 57, (1990) 1046.

4) Z. C. Feng and R. Tsu: *Porous Silicon* (World Scientific, 1994).

5) L. Brus: J. Chem. Phys. 80, (1984) 4403.

6) T. Takagawara and K. Takeda: Phys. Rev. B46, (1992) 15578.

7) T. Arai, H. Fujimura, I. Umezu, T. Ogawa, and A. Fujii: Jpn. J. Appl. Phys. 28, (1989) 484.

8) Y. Kamemitsu, H. Uto, and Y. Masumoto: Phys. Rev. B48, (1993) 2827.

9) S. Schuppler, S. L. Friedman, M. A. Marcus, D. L. Adler, Y.-H. Xie, F. M. Ross, Y. J. Chabal, T. D. Harris, L. E. Brus, W. L. Brown, E. E. Chaban, P. F. Szajowski, S. B. Christman, and P. H. Citrin: Phys. Rev. B52, (1995) 4910.

10) 舛本泰章：固体物理 27, (1992) 314.

11) 舛本，河村，片柳，第39回応用物理学関係連合講演会予稿集，31aQ-8/II (1992).

12) P. F. Jacobs, T. H. Pang, 島田洋：「高速３次元成形の基礎」，日経ＢＰ出版ｾﾝﾀｰ, (1993)

13) 生田，小島：「３次元ﾏｲｸﾛﾌｧﾌﾞﾘｹｰｼｮﾝの研究」，第13回日本ロボット学会学術講演予行集，(1995), p379

14) 荻原，日原，八代，佐野：「粉末混入樹脂による光造形に関する研究」1994年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集，(1994), p633

15) Adapted from an MIT on DTM originally appearing in R. P. & M. Report, (1991), p6

16) Adapted from an article on DTM originally appearing in R. P. & M. Report, (1991), p1

17) Adapted from an article on C. M. U originally appearing in R. P. & M. Report, (1991), p2

18) P. F. Jacobs, T. H. Pang, 島田洋：「高速３次元成形の基礎」，日経ＢＰ出版ｾﾝﾀｰ, (1993), p391

19) aser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94, (1994), p785

20) aser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94, (1994), p793

21) 鉄と鋼，76，3(1990), p98

22) Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94, (1994), p803

23) 「ﾚｰｻﾞｰ加工による薄板積層型の開発研究」素形材ｾﾝﾀｰ研究調査報告301, (1984)

4．3．4　新表面・被膜形成技術

（1）超微粒子応用被膜形成技術（レーザーガスデポジション）

この技術は超微粒子を用い，レーザーを援用し，被膜形成を行うものであり，レーザーアシストガスデポジション技術と言い換えて述べる．

超微粒子（30nm以下の粉，小さいものはクラスターや分子という）を母材表面に吹き付け，被膜や細線をつくる技術をガスデポジションと言う[1),2),3)]．この時，レーザーを照射し，超微粒子の焼結，相変態，反応を行わせるのがレーザーアシストガスデポジションである．フォトン（レーザー）は質量がないので，他のエネルギービーム（電子ビーム，プラズマ等）と異なり，超微粒子を吹き飛ばさないことと雰囲気を問わないことに大きな特徴をもつ．なお，これは我国オリジナル技術である．

この技術の特徴は以下に示すものである．

（イ）極めて反応性が大きいため，低温での被膜形成が容易であり，被膜の密着力も大きい．

（ロ）被膜作製雰囲気に制限がない．

（ハ）被膜の作製速度が大きい．

（ニ）微小領域への被膜形成が可能である．

（ホ）材料の物性（導電性等）による制限を受けない．

（ヘ）作成された被膜に希ガス以外の不純物が混入しない．

（ト）反応物被膜の作製が容易であり，被膜材料元素のストイキオメトリーの制御も容易である．

（チ）高エネルギー密度のレーザーを用いることにより，同素体被膜の作製も可能である

図4．3．4．1にレーザーアシストガスデポジションの概念図とプラズマとのハイブリッド被膜作法の概念図を示す．

a．現状

4．3．3で述べた各種の作製法によって作られた超微粒子を用い，ノズルから吹き出し，加熱された材料表面に堆積させ，焼結することにより，被膜や細線を作製している．レーザーアシストガスデポジションでは，ノズルから吹き出すと同時に高出力レーザーを照射し，微粉の焼結や雰囲気との反応による不純物を含まない被膜・細線の作成を行う．この方法は，方向性がない被膜でかつ1μm以下の薄膜からmm以上の厚膜まで対応でき，被膜強度やメッキ，CVD・PVD等の被膜形成法に代わる技術である．現在，これらの被膜はトライボロジー用途や電子デバイス用配線等に利用している．図4．3．4．2に，この方法でIC検査用バンプ（電気接点）の作製図を示す．

b．新たな技術展開

レーザーを用いる方法ではレーザーによる急加熱・急冷による相変態を利用し，準安定状態の材料や非化学量論的化合物の創製により，極めて耐摩耗性が大きな材料，電気抵抗の小さい材料及び新たな半導体の作成が可能となる．また，高出力レーザーを用た高温度状態では微粉は再度プラズマ状態となり，超急速加熱・急冷，急減圧課程を経て，新たな同素体が作成される4)．さらに，この状態の制御により現在注目されている規則性量子ドットの作成も可能である．これらは新たな機能材料として，今後の飛躍的発展が期待できる．

ｃ．技術課題

上記の技術で最も重要な課題は「フォトンと物質の相互作用の解明」である．

材料にフォトン（レーザー）が照射され，微粉等になる課程におけるプラズマとフォトンとの相互作用，超微粒子の光吸収等に不明な点が多く，この問題の解決なしでは作成課程の制御が行えず，レーザーアシストガスデポジション技術の完成は望めない．また，超微粒子の生成課程の把握，粒径制御技術，搬送技術，超微粒子の融合課程，超微粒子と母材の反応課程の解明等技術課題の解決も不可欠である．

このプロセスに必要なレーザー光源は微小領域に集光できる必要があり，コヒーレンスの大きなレーザー発振器が要求される（コヒーレンス長１０ｃｍ以上，横モードシングル）．現状で最適な高出力レーザーは炭酸ガスレーザーであるが，コヒーレンシーの良いシングルモードレーザーで最大出力４ｋＷ程度であり，発振効率は５％とに満たずフォトンコストが大きい．また波長が長いため，微小領域への集光が困難である．新たなレーザーの出現が望まれる．なお，光の伝送，インプロセスモニタリングを行うための計測・制御についても研究の必要があることは言うまでもない．

ｄ．波及効果

１）３次元構造体作成（新光造形法）（金型，精密機械部品，マイクロセンサー・アクチュエータ等）

この技術はレーザーにより超微粒子を直接焼結し構造体を作成するものであり，従来技術では不可能である．また，他のエネルギービームでは雰囲気や圧力等の制約があるため，作成不可能である．例えば，電子ビームは真空が必要であり，超微粒子を搬送するガスに吸収され，使用不可能であり，プラズマでは超微粒子を吹き飛ばすため，所定の位置にデポジットすることができず，使用不可能である．

（技術課題：超微粒子搬送技術，超微粒子の融合（焼結）課程の解）

２）一般産業機械や輸送機器等の摺動部の超耐摩耗性被膜（精密案内面，バルブシート，ピストンリング等）

構造材料の必要部分のみ耐摩耗性を向上する部材に適用する技術である．

現在は厚膜には肉盛り，溶射，レーザークラッディング等によって行われており，超微粒子ではなく，数十μｍ程度の粉末を用いている．．

ガス，アーク，プラズマ等の熱による肉盛りは構造材料に大きな熱歪や熱変態をもたらすため，大型構造物以外には使用できない．溶射はプラズマ溶射が主流である．この方法では作成した被膜は密着性が悪い，ポーラスである，合金化も不十分である，粉末の付着率が悪いという欠点をもっている．レーザークラッディングは粒子が大きいため，付着率に問題があるが，今後発展の可能性をもっている．また，薄膜にはメッキ，ＣＶＤ，ＰＶＤ等が用いられている．これらは密着性に問題がある，被膜結晶が１方向に配向している，合金被膜の作成が困難等の問題を抱えている．レーザーアシストガスデポジションはこれらの欠点を全て解決できる方法である．

（技術課題：超微粒子と母材の反応課程の解明）

３）発電設備の耐エロージョン・コロージョン被膜（蒸気タービン翼，ガスタービン翼，各種配管等）

この分野には（２）と同様な方法が用いられており，同様な問題を抱えている．

（技術課題：超微粒子と母材の反応課程の解明）

4）スーパーマテリアル（地球上では作成困難なＰｂ－Ａｌ，Ｗ－Ａｌ合金，ブロンズ等）

この作成方法は溶解法と粉末焼結で行われるが，溶解法では比重差や融点差の大きい元素の合金は作成困難である．焼結法では現在使用されている粉末が大きいため，均一な元素組成や十分な傾斜組成材料の作成は困難である．

レーザーアシストガスデポジションはｎｍオーダーの微粒子を使用するため，上記の問題の解決が図れる．

（技術課題：超微粒子の融合課程の解明）

5）マイクロ機能構造体（量子ドット，面発光素子）

今までの機能発現は物質の基本的物性によることが中心であったが，量子ドットはその構造が機能発現に寄与するものである．今まではＣＶＤ法による微粒子の堆積による研究が進められてきた．この方法で発光する素子等がつくられている．ＣＶＤ法は必要な化合物をガス状にし，プラズマやレーザーにより分解し，その生成物を被膜にする方法であり，ガス状化合物に含まれる粒子や被膜として不必要な元素が含まれる．必要な元素のみの粒子化・被膜化はレーザーアシストガスデポジション法をおいて他に見当たらない．また，レーザーアシストガスデポジションは電場・磁場または他のエネルギービームとの複合ができるため，種々の複合化技術の展開が図れる．

（技術課題：超微粒子の粒径制御技術，デポジション位置制御技術）

6）超磁性材料，超伝導材料，半導体（強力モーター，スピーカー，光機能素子，太陽電池等）

超微粒子応用技術として，そのものの被膜化・バルク化による優れた磁性や伝導性を示す材料の開発が可能であるばかりでなく，超微粒子に高出力レーザーを照射し，それを超高温・高圧状態で分解し，新たな同素体や化合物の作成も注目されている．前者は現状の強力磁石材料の微細結晶化（更に強力な磁石ができる），超伝導材料の元素組成の制御等が容易に行え，後者は新たな物質や材料の創製に期待が集まっている．この領域ではレーザーアシストガスデポジションをおいて他の技術は考えられない．

（技術課題：プラズマ中での超微粒子生成課程の解明，超微粒子の融合課程の解明）

7）電子デバイス（低電気抵抗配線）

電子デバイスの配線に要求されるのは低電気抵抗，透明性等がある．通常，金属材料（Ａｌ，Ａｇ，Ａｕ等）が用いられている．しかし，今後集積化がさらに進むと，線幅をさらに小さくする必要があり，さらに電気抵抗の小さな材料

が要求される．これに対応する材料は導電性セラミックスであり，ブロンズ（ＮａやＫとＷやＭｏとの複酸化物）である．これらは非化学量論的材料（構成元素の比が整数でない材料，例$Na_{0.8}WO_3$）であり，合成が困難であるばかりでなく，配線化するのは極めて難しく，超微粒子を用いたレーザーアシストガスデポジション以外では不可能に近い．また，この種の材料は透明なものが多く，液晶ディスプレイの配線の用いられているＩＴＯ（ＩｎとＳｎの複酸化物）に代わる材料としても注目されている．

（技術課題：元素比率の制御技術）

8）医薬品・バイオ材料（抗ガン剤，抗エイズ剤，人工骨等）

ここでの技術はレーザーアシストガスデポジションばかりでなく，レーザーを用いた超

微粒子や同素体の作成についても応用できる．

炭素同素体であるフラーレンＣ60は２重結合を数多くもっているため（結合子が余っている），他の化合物と結合しやすい．そこでガン細胞に集まる性質の分子と抗ガン剤を同じフラーレンに結び付けておけば，ガン細胞に集まり，ガン細胞のみを攻撃することが可能であり，全身の細胞に影響を与えにくいので副作用が小さい．現在，フラーレンの用途として，光学素子や光電変換素子，触媒等が注目されているが，短い波長の光で分解しやすいという問題も抱えている．そこでこの医薬品としての用途が現在注目されている（欧米で精力的に研究が進められている．ＩＢＭ，バイエル等）．

現在の人工骨，人工歯根はサファイヤやＴｉ合金等の材料でつくられている．これらの材料は強度的には問題はないが，生体適合性に大きな問題がある（人工関節，特に人工股関節はリウマチやエリテマトーデス等の膠原病の治療薬の副作用による骨頭壊死に対する治療に用いられることが最も多い）．しかし，人間の骨はアパタイトという材料で構成されているため，免疫系が異物と認識するため，長時間体内に存在すると，その周りの骨の細胞の死滅を促進したり，増殖の阻害が起こる．従って，人工骨部材は接合部やネジ部が緩み，問題を起こす（寿命が短い）．人工のアパタイトは生体適合性は高いが，強度が低いという欠点をもっている．超微粒子アパタイト焼結材や，炭素材料上にレーザーアシストガスデポジションでアパタイトをコーティングした材料はこの問題の解決に最も近い道であると考えられる．

（技術課題：超微粒子及び材料の生体適合性の評価方法の開発）

上記のようにレーザーアシストガスデポジションは極めて多分野に波及する技術であるため，最も注目されている被膜形成技術であり，産業機械の耐久性，信頼性，安全性の向上が図れるばかりでなく，材料，電子，バイオ分野において，大きな技術革新となるとともに，新たな産業の創出が期待できる．

ｅ．ナショナルプロジェクトとしての必要性

レーザーアシストガスデポジション技術はガスデポジション技術の延長であり，ＣＶＤ・ＰＶＤ等の被膜形成技術との関連が大きく，高出力レーザーをツールとして活用する研究は緒についたばかりである．今後，この分野の研究の発展のためには，フォトンと物質の相互作用の研究を基礎とし，被膜形成技術の再検討を試みなければならない．そのためには大学・国研で行われてきたフォトンの発生からプロセスまでの基礎研究と民間企業で実用化されている被膜形成技術とが統合された形態で研究開発を進める必要がある．従って，ナショナルプロジェクトとして採択されることが極めて有意義であると考えられる．

また，欧米においてもナショナルプロジェクトとして，この分野の研究が進められている．我国の国際競争力を高めるためにも必要と考えられる．

参考文献

1) 小田，精密工学会誌.，５６／１２，９（１９９０）
2) 賀集　他，粉体および粉末冶金.，３７（１），９４（１９９０）
3) C. Hayashi et al, Materials Science and Engineering, A163., 157(1993)
4) 佐々木，炭素素原料科学の進歩.，６，１３２（１９９４）

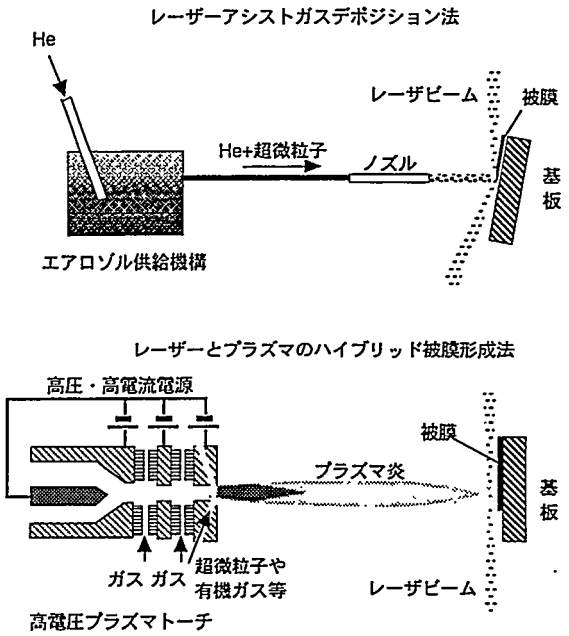


図４．３．４．１　レーザーアシストガスデポジションとレーザープラズマハイブリッド被膜作法の概念図

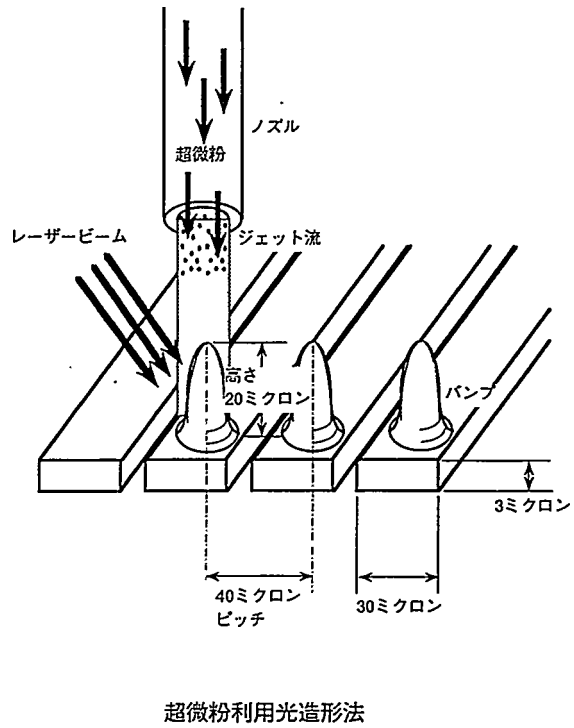


図４．３．４．２　ＩＣ検査用バンプ（電気接点）の作製図

（2）光量子利用被膜形成技術（アブレーション，ＣＶＤ等）

a）ポリマー材料の高性能化・高機能性付与

1）背景および現状技術

近年のポリマーの研究開発は，急速に進歩しており，金属材料を越える高性能なポリマーが数多く誕生している．このような高性能エンジニアリングプラスチックが，工業製品を中心とする様々な用途に用いられるにつれて，バルクの特性だけでなく表面に対しての高機能化が求められている．

現在，ポリマーの表面改質技術として，すでに試薬を用いた化学的な方法やプラズマ等による物理的な方法が確立されているが，さらに高度な表面改質技術が要求されている．これに応える新しい方法として，エキシマレーザーによる表面反応や被膜作成が注目されている．有機・高分子材料を対象としたレーザープロセスの特徴をまとめると下記のようになる．[1)]

(1) ほとんどの高分子材料がエキシマレーザーの紫外光領域に高い吸収帯を持っているので，アブレーションや光反応の効率が高いこと，
(2) 光プロセシングを対象とする高分子材料表面に非接触で表面層から一定の深さに限定して行えること，
(3) 空間的な解像力が高く，マイクロメータレベルの局所場でのアブレーションや任意の平面形状や位置制御された微細表面光反応が可能であること，
(4) 光化学反応が主であるため，周囲に熱的な損傷・歪や副反応が無視できること，
(5) プロセスの反応過程は，発振波長・光強度・パルス数などの照射条件によって，ある程度制御可能であること，
(6) 光は「波」であるので，偏光や位相といった波動性を利用した選択励起や干渉効果が可能であること，
(7) 照射雰囲気を大気中，減圧下，活性ガス雰囲気等と自由に選べること，

従来，エキシマレーザーの登場以前には，材料プロセッシング用レーザーといえば，ヤグレーザーや炭酸ガスレーザーが主力であり，高分子材料の加工に対しても，これらのレーザーを使用せざるを得なかった．しかし，金属・無機材料と比較して，耐熱性に劣る高分子材料にとって，赤外レーザーと紫外レーザーの違い，すなわち，熱励起過程と光励起過程との差が歴然と現われる．特に，高分子材料とエキシマレーザーは極めて相性が良く，今後，さらに多様な手法と反応を駆使することにより大きな発展性のある課題であると考えられる．

現時点で，研究ないし期待されているテーマ・特性には以下の項目があげられる．これらの特性や機能は，バルク材料ではすでに達成されているものが多いが，局所的に任意の位置に機能を付与する技術は依然として確定していない．しかし，部分的な（位置選択的な）表面改質は材料（特にデバイス）の機能を飛躍的に向上させることができるので，早急に研究開発を進める必要がある．

《性能の向上・改質》
接着性，耐摩耗性，潤滑性，耐熱性，耐候性，親水性・親油性，撥水・撥油性，耐薬品性，印刷性，染色性，防曇性・防滴性，制電性，化学反応性，抗血栓性，生体適合性，抗菌性など

《機能の付与・改質》
光学機能（反射率，透過率，屈折率），非線形光学効果，絶縁体，導電体，多層膜体（発光素子），光導波路素子，液晶分子配向機能，焦電機能など

さらに，レーザーを反応性ガス（溶液）雰囲気において材料に照射すると，材料表面と光との相互作用だけでなく，ガスやガスの光分解物と活性された材料表面との反応が期待されるため，難加工性材料の表面改質や新規な被膜を作製する場合には効果的である．例えば，ArFエキシマレーザーによって光分解されたヒドラジンを撥水撥油性のフッ素樹脂表面と反応させることで表面を親水的に変化させ，続いて化学めっき法で銅やニッケルをパターン状に堆積させることが報告されている[2]．このような，反応系はレーザーの高強度性を利用し，反応性の高い活性種を多量に生成させることで達成されている．しかし，レーザーはコヒーレンス性の高い光源であるので，ビームの高強度性や指向性だけに注目するのではなく，光の波動性を積極的に活用するプロセスが望まれる．

2）解決すべき課題および将来動向

紫外レーザーを用いた有機材料プロセスは，熱プロセスや他の高エネルギープロセス（プラズマ法，イオン法）と比較しても，数々の有利な特徴がある．しかし，現時点ではレーザープロセスの長所を最大限に活用しているとは言えず，解決すべき課題やさらなる進展が期待される課題は多い．

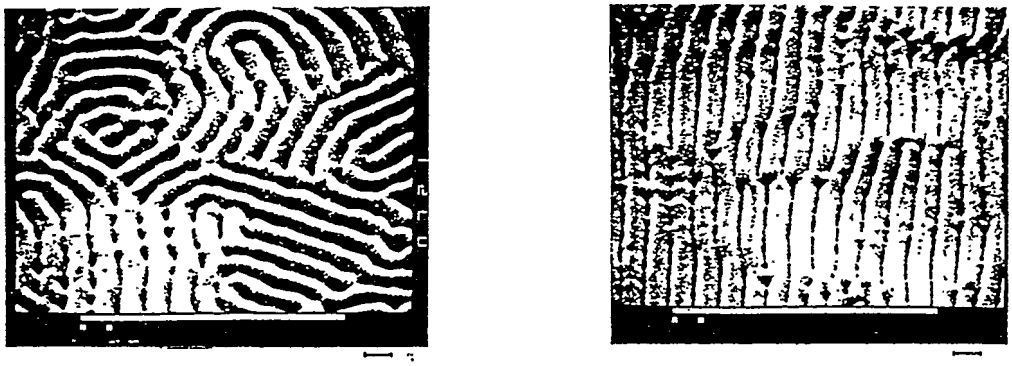
○光の波動性を活用したポリマー材料の高性能化および高機能性付与

・干渉効果の利用

位相のそろった複数のレーザーを異なる方向から材料表面に照射すると，干渉効果によって，波長程度の周期を有する格子状の微細構造を作製することができる．ホログラフィック・グレーティング法と呼ばれるこの手法は，高品位の回折格子作成方法として実用化されている．最近，固体表面のランダムな凹凸からの散乱光と位相の揃った入射光との干渉によって，サブマイクロメータ程度の微細な格子状パターンが形成されることが判明した[3]．現時点ではこの方法は，干渉効果による材料表面での光強度分布を使って，微細構造を作成しているにすぎないが，多波長照射による複数の干渉効果を利用して，分子の配列をパターン化（モザイク化）することができれば，分子自体が持っている自己組織化能と組み合わせて，微細な有機デバイスを構築することができると考えられる．マイクロメータサイズの平面加工は現状のレーザー技術で十分対応できるので，光の回折限界を超える微細レベルの制御性は分子の自己組織化能が作用し，デバイスとしての形態は二段階のレーザー加工が制御する．

・偏光の利用

レーザーは偏光素子を用いることで，高い指向性を有する偏光ビームをつくることができる．直線偏光のビームを用いると，基質の分子配向に対応して選択的に励起することができる．また，ポリエーテルスルホンに偏光度の異なるXeClエキシマレーザーを照射し，アブレーションを起こすと，偏光度に対応してマイクロメータの大きさの微細構造の方向が配列する（図4.3.4.3）[4]．このように，偏光を使うことによってパターンの配向を自由に制御することできることが報告されており，レーザーの単色性や短パルス性を相互に活用しながら，多成分系における選択的な反応や異方性制御に効果的であると考えられる．また，円偏光を利用することで，光学不斉物質を表面に合成することも可能性があり，生体微量物質の検出のためのセンサーに有望である．

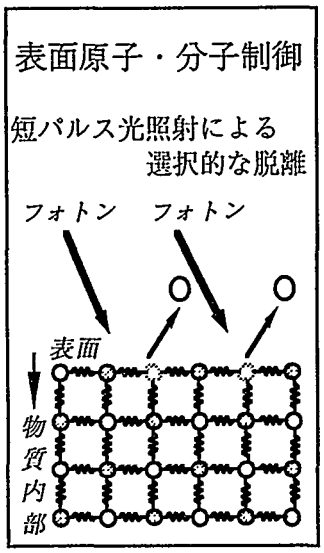


(a) 未偏光照射　1μm　　(b) 直線偏光照射　1μm

図4.3.4.3　偏光度の異なるエキシマレーザーを照射したときのポリエーテルスルホン表面の微細構造の変化

○高エネルギー状態から合成されたエキゾチックマテリアル（新物質）の被膜（積層体）創製

レーザー照射による表面プロセスでは，励起状態の分子を高密度に作成することが可能で，また，単色性を利用することで分子選択または結合選択的励起を行うことができるので，反応の効率や選択性を向上させることができる．例えば，光反応性のモノマー分子を低温基板上に凍結固化させて固体膜を作成した後，レーザー照射によってアブレーションを行い，高密度の励起種ビームを対向する基板に照射して炭素系薄膜[5]やフッ素修飾表面[6]を作成している．本法の特徴は，比較的単純な機器構成で高濃度の励起種ビームを作成できる点で優れており，複数の化学種から発生させた励起種ビームを混合／交差させることで新規な励起種を段階的に合成することが可能である．今後，生成した活性種の精密な分析や反応性の評価を行うことでより汎用性の高い技術にすることができと考えられる．また，励起源であるレーザーをより高品位なものに変更することで，微細場励起や単一モード励起などの分子励起活性化プロセスを構築することができる．



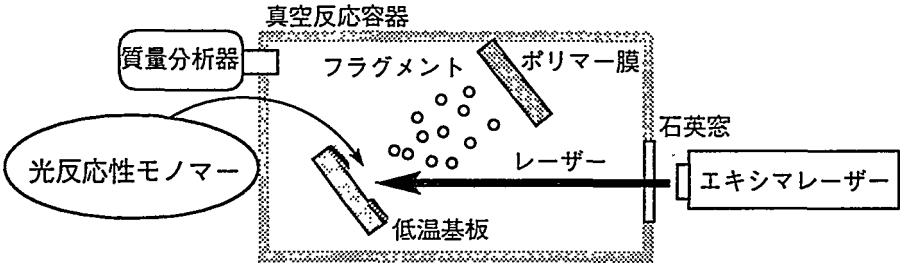


図4.3.4.4　レーザーアブレーションを用いた励起種ビームの作成[6)]

参考文献

1) 矢部，新納，物質工学工業技術研究所報告， vol. 2， 383(1994).

2) H. Niino and A. Yabe， Appl. Phys. Lett.， vol. 63， 3527(1993).

3) M. Bolle and S. Lazare， J. Appl. Phys.， vol. 73， 3516(1993).

4) H. Niino and A. Yabe， J. Photochem. Photobiol. A: Chem.， vol. 65， 303(1992).

5) M. Hanabusa and K. Tsujihara， J. Appl. Phys.， vol. 78， 4267(1995).

6) H. Niino and A. Yabe， Appl. Surf. Sci.， in press.

b）ミクロンレベルの機能膜を付与したメートルサイズの構造体の製造

レーザー光には，赤外光から紫外光の波長域で単色性・指向性がよく，連続出力光や高い尖頭値・狭い時間幅をもつパルス光が得られる特徴がある．このようなレーザー光を利用したプロセスでは，赤外光による熱反応から，紫外光による光化学反応まで幅広いプロセスを実現でき，超微細加工が可能であり，高パワー密度のため高融点材，高硬度材料の処理も可能である．また，非熱平衡・低温プロセスなので，従来の高温プロセスでは不可能であった難合成物質の創製が可能である．さらに，非接触処理であるため，処理中の試料に力が加わらず，真空中でなく，ガスあるいは大気中で作業できる．

これまでのレーザー光を利用した処理では，ＣＶＤ，アブレーション，エッチング，ドーピングなどがあるが，一部を除いて真空反応容器中で行われるものである．その対象は，小サイズのデバイスそのものが主になっていたが，先に述べたレーザー光の非接触処理やガスあるいは大気中で作業できる優位性を積極的に利用することで，低コストでよりフレキシビリティの高いプロセスとすることができる．真空容器などは使用せずに，所定のガス雰囲気中で形成できれば，メートルサイズの構造体上にも機能膜形成ができる．その有力な手法のひとつとして，必要な材料を溶かした溶剤を大型構造体の局所に塗布し，ガス雰囲気中でレーザー照射により特定の機能を発現させる方法が考えられる．

機能の基本構成はシリコン系の半導体電子デバイスと考えられる．電子デバイスをつくるためには，半導体膜とともに，電気絶縁用の膜，配線用の導電性膜も必要となる．機能膜の基本となるシリコン膜をつくる方法として，ポリシランから作り出すことがあげられる．ポリシランは，主鎖が珪素-珪素結合（$(SiH_2)_n$）のみから成る重合体のことである．これをアルコール溶剤に溶かし，それを基板に塗布・乾燥させ，レーザー照射してポリシリコン・アモルファスシリコンを形成できる．酸素雰囲気にし，ポリシランを酸化すれば絶縁膜であるSiO2とすることができる．

ポリシランからシリコン膜を形成した例として，シラン（SiH_4）を原料にしてグロー放電分解法により，-110℃にした基板に形成したポリシラン薄膜に，ArFレーザー光（波長193nm）を20mJ/cm^{2}で2000ショット照射し，アモルファス・多結晶シリコンが形成されたことが報告されている[2)]．図4.3.4.5には，ポリシラン膜とレーザー照射後の膜のラマン分光結果が示してある．形成膜のカーブ（下）の～430cm^{-1}のピークはポリシランのＬＯモードに起因している．レーザー照射後の膜のカーブ（上）では，～518cm^{-1}に結晶化シリコンのTOモードの高ピークと，～480cm^{-1}にアモルファスシリコンの弱く広いTOモードが現れている．前者の高ピークの半値幅は～9cm^{-1}であり，バルクのシリコンの半値幅と比較すると，生成されたポリシリコンの平均グレインサイズとして～300　と見積もられている．また，マスクを使い，幅1ミクロンのポリシリコンのラインも形成されている．

このようにポリシランにレーザー光を照射することにより，シリコン化することが確かめられている．さらに，塗布型のポリシランでは，レーザー光が照射されない部分は元の状態のままなので，再び，アルコールで除去できるのでマスクを不要とするパタン加工が可能であるという特長がある．

他の塗布型の代表例としてゾルーゲル法[3)]がある．プロセスの低温化，機能の高度複合化，形状付与性などに優れ，導電性膜，絶縁性膜，セラミックス膜の薄膜形成が可能であ

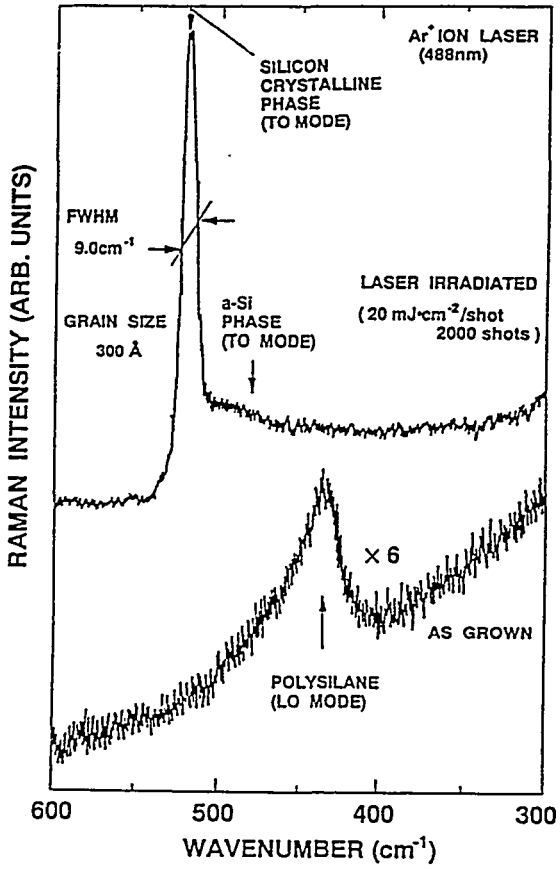


図４．３．４．５　ポリシラン膜のレーザー光照射前後のラマン分光結果[2)]
レーザー照射後にポリ・アモルファスシリコンの振動スペクトルが表れて，ポリシランがシリコン化している．

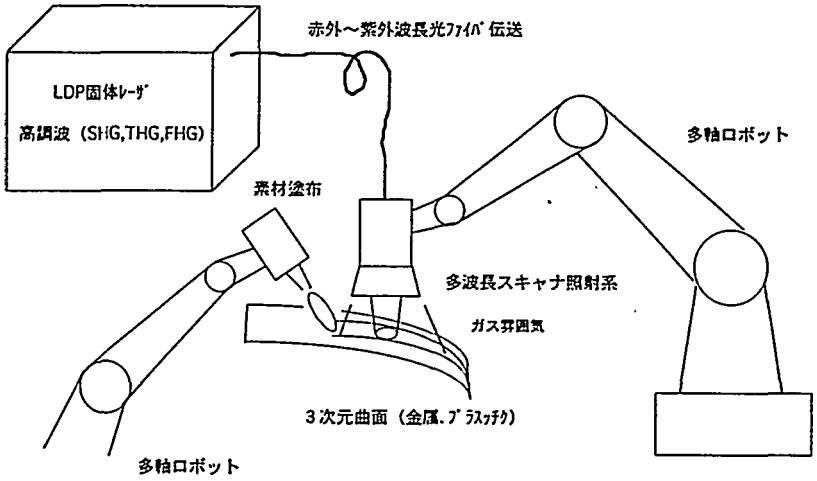


図４．３．４．６　製造装置構成の予想概念図
三次元曲面に沿って，塗布する機構，所定のガス雰囲気中でレーザー光を塗布する機構，多波長レーザ光の発生源・伝送系から成る．

る．

膜形成に必要な素材を塗布し，レーザー光照射により機能を発現させるという手法の利点は，いろいろな形状で，小さいものからからメートル級までのサイズを持つ三次元構造体に適用できることにある．そのひとつに，比較的単純構造で大きな面積を必要とする電子デバイスに太陽電池があげられる．太陽光発電技術が普及するためには，太陽電池の価格を現在の1/4以下にする必要があるといわれているが[4]，塗布方式で製造できれば，真空反応容器を必要としないため，より低価格で製造できる可能性が大きい．また，塗布型の優位点を生かして，自動車や列車などの車体にも形成できる．これらは保有台数が多いため，大きな市場が期待できる．また，航空宇宙産業などでは，航空機の骨組材の亀裂やストレスの状況を常にモニターし，異常が検知したら直ちに警報を発するセンサーを形成することで全体の信頼性をあげることが考えられる．

図4.3.4.6に製造装置構成の予想概念図の一例を示す．ポリシランなどの素材を塗布またスプレーするロボットアーム機構，レーザー光を照射するスキャナ光学系をもつロボットアーム機構，赤外から紫外までを発生する多波長レーザー発振器から成る．多波長レーザー発振器は，小形で，信頼性が高く，波長変換で紫外まで発生できる固体レーザー（Nd:YAGなど）が適している．また，多波長のレーザー光を伝送する光ファイバーが製造装置として不可欠なものとなる．多波長スキャナ照射系波，広い面積照射とともに，微細パタン加工できるような仕組みを持つ．太陽電池形成工程の例を考えると，裏面電極用の導電膜の形成，ポリシリコンの形成，ドーピングによるＰＮ接合形成，表面透明電極の形成，配線などを順次，塗布・レーザー照射・除去・パタン加工で製作していく．

ポリシランをレーザー光照射でシリコン結晶化する研究は始まったばかりで，実際に塗布型でシリコンを形成した報告がないのが現状である．基本となるシリコン薄膜作製技術の確立から始め，塗布する素材・方法の選定，絶縁性膜形成技術，導電性膜形成技術，ＰＮ接合の形成技術，デバイス作製技術などすべての工程にわたって明確にする必要がある．また，レーザー光発生装置，他波長伝送光ファイバー，多波長スキャナ照射系などのハード面からの開発も必要である．

以上述べたように，レーザー光プロセスの低温処理，非接触処理，真空容器不要の利点を生かし，大面積，３次元曲面へ機能膜を形成できる塗布型の方法が確立されると，レーザープロセスとして全く新しい産業分野においてにその利用が広がると考えられる．

参考文献

1) R. D. Miller, J. Michl, "Polysilan High Polymers", Chemical Reviews, Vol. 89, No. 6, 1989, 1359-1410.

2) M. Hirose, etal, "Beam induced Modification of polysilan for fine pattern generation", J. of Photopolymer Science and Technology, Vol7, No3, 1994, 599-606.

3) 平野眞一，”ゾルーゲル法”，応用物理，第62巻，第12号，（1993）1448-1249.

4) 林豊他，”太陽光発電”，応用物理，第63巻，第8号，（1994）792-797.

c．難合成電子材料被膜

特性が優れているため将来的に有望と考えられるが，合成や薄膜結晶成長が非常に困難であるため，実用化が断念されてきたいくつかの電子材料がある．ここではエキシマレーザー・アブレーション法が，それらの材料の薄膜堆積手法として優れた可能性を有している点を指摘し，将来フォトンプロセス技術の応用分野として大きく発展する可能性を秘めている点を指摘したい．

従来，半導体材料の薄膜結晶成長は主にＭＢＥ法やＣＶＤ法などを用いて行われて来た．これらの手法には長所も多いが短所もある．ＣＶＤ法は原料としてガスを用いるが，半導体用の原料ガスに爆発性や有毒性の高いものが多い事実は否めない．そのために薄膜堆積装置以外の安全設備や除害設備に多大のコストがかかり，維持と管理に多大な努力が必要となる．ＭＢＥ法は基本的に固体原料を利用するので，ＣＶＤ法よりも危険性が低い点は長所である．しかしながら，ＭＢＥ法には以下のような欠点がある．まず第一に，５元系～６元系といった複雑な組成を持つ材料の堆積には余り適していない．なぜならば，必要な元素の種類だけ蒸発源を用意し，各々の分子線強度を精密に制御しなければならないからである．また利用可能な原料の種類にも限界がある．なぜならば，原料の蒸発にクヌーセン・セルを利用する標準的なＭＢＥの場合には，クヌーセン・セルで実現が可能な温度範囲（およそ1800℃以下）において適切な大きさの蒸気圧を示す原料しか利用できないからである．また”適切な大きさ”という意味は，大き過ぎても小さ過ぎても望ましくない事を意味している．すなわち，蒸気圧を充分に確保できない高融点な原料の場合には，充分な堆積速度を得ることが困難であるし，逆に（例えばⅥ族元素等のように）揮発性が高く蒸気圧が大き過ぎる原料の場合には，分子線強度の精密な制御が困難になる．またクヌーセン・セルではルツボを利用するので，ルツボとの化学的な反応性の観点からも，利用可能な原料の種類に限界が生ずる．ルツボ温度が約1300～1350℃以下の場合には，PBNがルツボ材料として非常に優れており，最も一般的に利用されている．しかしながら，ルツボ温度が1350℃を越える場合には，PBNに相当するような万能のルツボ材料は無く，原料の種類に応じて取捨選択しなければならない．万が一ルツボとの化学的な反応がある場合は，原料物質の中にルツボ物質が不純物として混入する危険がある．例えばシリコンに対しては，適切なルツボ材料は未だに見出されていないのが現状である．

蒸発に高温を必要とする原料（高融点で低蒸気圧な物質）に対しては，電子ビーム加熱を利用する手段もある．しかしながら，電子ビーム加熱により成長された薄膜結晶の品質には，様々な理由により問題点が指摘されており，また分子線強度の精密な制御が難しいという欠点もある．また基本的にＭＢＥ法を実行するには，真空中で原料を蒸発のために高温に加熱しながら，同時に成長中の雰囲気を高真空に維持しなければならないという，一見矛盾した条件を両立しなければならない．そのためには強力な真空排気設備を用意し，大量の液体窒素を消費するなど，運転に多大なコストと労力が必要である．

エキシマレーザー・アブレーション法がこれらの欠点を全て解決している訳ではないが，材料によってはその特徴が発揮できる分野もある．その特徴を以下に述べてみる．エキシマレーザー・アブレーション法は基本的に固体原料を利用するので，ＣＶＤ法のようなガスの利用に伴う危険性は回避されている．また原料の蒸発メカニズムにアブレーションを

利用しているので，原料（ターゲット）の温度は基本的には室温で良い．すなわち，原料を高温に加熱する必要が無く，結晶成長中の雰囲気を高真空に維持することが比較的用意である．従って大型の真空排気設備を用意する必要が無く，ＭＢＥやＣＶＤと比較して装置の構築や維持が容易である．また複雑な組成を持つ材料の堆積に適している点も長所である．なぜならば，一般的にエキシマレーザー・アブレーション法で生成された蒸気の組成は，ターゲット原料の組成と比較して差異が少ないという特徴があるため，目的の薄膜の組成と同一の組成を持ったターゲット材料が用意できれば，原則的に使用すべき蒸発源はただ一つで足りるからである．蒸気の組成と原料の組成との差異が少ないという事実は，蒸発の機構が原料に含まれている個々の元素に固有な蒸気圧とは無関係である事を示唆している．すなわち，エキシマレーザー・アブレーション法における原料物質の蒸発は，従来の熱平衡的な加熱→融解→蒸発あるいは加熱→昇華といった機構で起きているのではなく，非熱平衡的な新しい機構で起きている事が示唆される．

原料の蒸発機構が熱平衡的ではないという事実から，エキシマレーザー・アブレーション法が，高融点で低蒸気圧な原料や，逆に揮発性で高蒸気圧な原料の蒸発に適している特徴も結論される．すなわち，原料固有の蒸気圧に余り左右されずに，レーザー光の強度を制御することで，適切な大きさに分子線強度を制御することが可能になると期待される．また高蒸気圧な原料を蒸発させる際にも，雰囲気の真空度を劣化させる危険が少ない点も長所である．またエキシマレーザー・アブレーション法ではルツボを利用しないので，クヌーセン・セルを利用する標準的なＭＢＥ法に存在した様々な困難も回避されている．以上の諸点から，エキシマレーザー・アブレーション法の特徴が有効に活用できると期待される材料の特徴を整理すると，以下の４点に要約されると考えられる．(1)非常に複雑な組成を持つ材料，(2)高融点で蒸気圧の非常に低い元素を含む材料，(3)揮発性が高く蒸気圧の非常に高い元素を含む材料，(4)化学的な反応性が高く，ルツボが利用できない材料．従来これらの性質を持つ材料は，難合成材料と考えられ敬遠されてきた．しかしながら，それらの材料の中には，特性が優れているため将来的に有望と考えられて来た材料もある．従って，もしエキシマレーザー・アブレーション法によってそれらの高品質な薄膜結晶成長が容易になれば，将来のフォトンプロセス技術の有力な応用分野と成り得るであろう．その様な材料の候補として，シリコン化合物を含む２～３の材料を以下に指摘したい．

β-$FeSi_2$は0.8～0.875eVの禁制帯幅を持つ半導体材料である．この物質の特徴はその光学的な性質にあり，基礎吸収端近傍（0.8～1.2eV）における光吸収係数の値が約10^5 cm^{-1}と非常に大きいことが特徴的である[1]．それに加えて，光吸収スペクトルの結果等も考え合わせることにより，この物質の電子帯構造は直接遷移型ではないかと期待されており，受光素子，発光素子，光電変換素子への応用が期待されている材料である．また熱電変換素子への応用は長い研究の歴史があり，現在でも活発に研究が続けられている．またシリコン化合物なのでシリコン・テクノロジーとの相性が比較的に良いことや，シリコンや鉄などの原料資源が豊富であること，材料そのものに有毒性が無いことも，今後は長所として考慮される点であろう．

この物質は，薄膜堆積にエキシマレーザー・アブレーション法を利用すると，レーザー・アブレーション法の特徴が有効に発揮できると期待される材料の候補であると我々は考

えている．なぜならば，シリコンも鉄も共に融点が高く（1400℃以上），蒸気圧の低い材料だからである．実際この物質の薄膜材料を，クヌーセン・セルを用いた標準的ＭＢＥ法で作製しようとすると，たちまち深刻な困難に遭遇する．その理由は，実用的な堆積速度（例えば１μm/時）を得るために必要な分子線強度を確保するためには，原料物質であるシリコンと鉄を融解して約1700～1800℃程度まで加熱する必要があるが，そのような温度でシリコンの融液を，化学的な相互作用が無く安定に保持できるルツボ材料は存在しないからである．そこでβ-$FeSi_2$の薄膜材料の創製は，従来は電子ビーム加熱を利用して試みられて来た．しかしながら様々な理由により，現状では堆積薄膜の品質は必ずしも満足のゆくものではなく，新しい手法による薄膜堆積技術の開発が待たれている．筆者らは既にエキシマレーザー・アブレーション法によるβ-$FeSi_2$の薄膜堆積の研究に注目し，予備的な実験を開始している段階にある．但し，この材料は半導体材料としての観点から見ると欠点もある．その一つは，通常半導体として必要とされる純度（例えば７Ｎ以上）を満足するような，鉄の原料を入手することが困難な点である．これは将来の課題として残されている．

また上の考察によると，シリコンそれ自身の薄膜堆積も，エキシマレーザー・アブレーション法を利用しその特徴を発揮させるのに興味深い課題である．固体を原料としたシリコン薄膜のＭＢＥ成長は，現在でも電子ビーム加熱を利用した場合にのみ可能であり，クヌーセン・セルを用いた標準的ＭＢＥ法の適用は不可能である．エキシマレーザー・アブレーション法で作製されたシリコン薄膜に対する評価は，まだ本格的な研究が行われていないが，従来のＭＢＥ法と比較して，少なくとも製膜システムの小型・簡便化などの点では長所があると考えられる．

WS_2（二硫化タングステン）は，グラファイトと類似な層状の結晶構造をもつ物質で，半導体である[2)]．この物質もまた，薄膜堆積にエキシマレーザー・アブレーション法を利用すると，レーザー・アブレーション法の特徴が有効に発揮できると期待される材料の候補であると思われる．WS_2の結晶構造を図4.3.4.7に示す[2)]．図には比較のためにグラファイトの結晶構造も示されている．図4.3.4.7はグラファイトの典型的な結晶構造であるが，グラファイトに可能な結晶構造はそれだけではないことが今では知られている．すなわち，フラーレンと呼ばれる各種の多面体構造や，ナノチューブと呼ばれる微小なチューブ状の構造などがそれである．これらの新しい構造を持った物質は，従来の物質には無い新しい物理的性質を示す可能性が期待されており，純粋科学上および応用上の両方の観点から大きな注目を集めている．さて，その典型的な構造がグラファイトと類似た層状構造であるという理由から，WS_2のような物質についてもグラファイトの場合と同様に，フラーレン構造やナノチューブ構造の実現が可能ではないかと期待することができる．この予想は実際に実現され，WS_2を用いたフラーレン構造およびナノチューブ構造の両方の作製が，Tenne等によって成功された[2)]．Tenne等によって作製されたWS_2のナノチューブの電子顕微鏡写真を図4.3.4.8に示す[2)]．彼らがこの現象を発見した試料は，石英基板の上にタングステンの薄膜を堆積し，それを還元雰囲気中でH_2Sの中で1000℃で熱処理を施して得られた物である．

WS_2の薄膜堆積にエキシマレーザー・アブレーション法を利用する試みは，その物質が高融点で蒸気圧の非常に低い元素（タングステン），および揮発性が高く蒸気圧の非常

に高い元素（硫黄），の両方を同時に含む材料だからという理由により，その特徴が有効に活用できると期待される分野である．従来技術を用いてこれらの材料の蒸発を同時に同一の真空容器内部で行うことを考えれば，直ちに深刻な困難に遭遇することが想像される．タングステンの蒸発には非常な高温を必要とするであろうし，また硫黄の蒸気圧は低温においても非常に高いので，分子線強度の精密な制御が困難だと考えられるからである．従って両者を同一の真空容器に同居させ同時に蒸発させる事は，従来の製膜技術の範囲では，大きな困難を伴うものと予想される．

以上，薄膜堆積にエキシマレーザー・アブレーション法を利用すると，エキシマレーザー・アブレーション法の特徴が有効に発揮できると期待される材料をいくつか指摘した．もしエキシマレーザー・アブレーション法によってそれらの高品質な薄膜結晶成長が容易になれば，将来のフォトンプロセス技術にとって，有力な応用分野と成る可能性が秘められていると考えられる．

1) C. A. Dimitriadis, J. H. Werner, S. Logopthetidis, M. Stutzmann, J. Weber and R. Nesper, J. Appl. Phys. 68, 1726 (1990).
2) R. Tenne, L. Margulis, M. Genut and G. Hodes, Nature 360, 444 (1992).

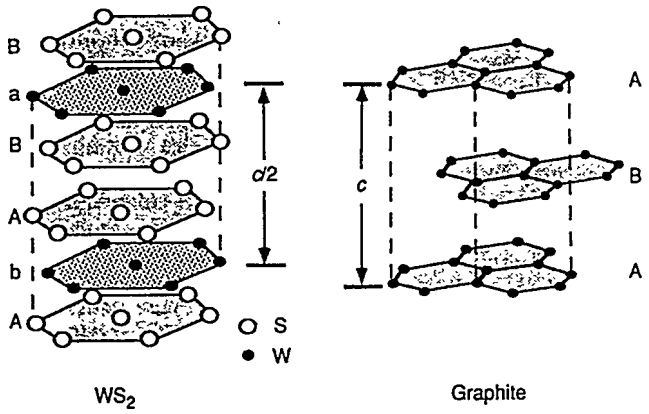


図4．3．4．7　WS_2とグラファイトの結晶構造[2]，両方共に層状構造をとることに特徴がある．

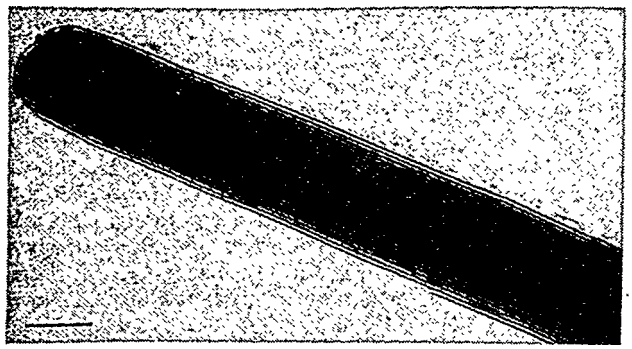


図4．3．4．8　WS_2で作製されたナノチューブの電子顕微鏡写真[2]，図中左下の棒線は10nmを表す．

d）エネルギー関連材料

ＣＶＤ法が，表面改質または薄膜製造方法として従来より実用化されている湿式法（電解析出法，無電解析出法，浸漬法等）や溶射法，真空蒸着法，スパッタリング法に比較して，(1)高融点金属材料，同合金，セラミックス等多様な材料を，傾斜機能材料的な組成制御を含め相当任意の組成で(2)エピタキシャル成長から繊維状，ウィスカー，粉末状等の種々の形態で成長でき，且つ(3)析出速度も相当速い（条件によって数μm/min以上も），(4)均一被覆性が高く緻密な組織を得ることが可能，などの優れた特徴を持っていることは，よく知られている．ＣＶＤ法において，原料ガスの反応を起こさせるために必要なエネルギーを，光エネルギーの形で与えることで光ＣＶＤが可能になる．その特質として，従来から言われてきた(1)反応温度の低温化，(2)光の直進性を利用したマスキング，(3)レーザ光源の単色性を利用した反応選択性，のほか，　(4)反応場所の空間的局在化，とくに，気相内での粉末生成と基板上での不均一核生成の差を利用した，組成・構造の違う物質系の選択作成が可能である．(5)反応の過飽和度をレーザ強度，繰り返し周波数等により基板温度と独立に制御することによる，多様なモーフォロジー，結晶配向のコントロールが可能である等の特徴を期待できることが明らかになってきた．これらの性質は，熱伝導度，電気伝導度等の輸送性質に直接リンクするので，エネルギー関連材料の作成にあたっては，とりわけ重要な因子となる．

一方では，熱ＣＶＤ用反応試薬に必要な条件；(1) 室温で十分安定(2) 十分な揮発性(3)反応・分解温度は，少なくとも基板の融点より低いこと．(4) 手に入りやすく，毒性が少なく安価であること，に加えて，用いる光の波長に吸収をもつことが一般には必要であり，反応試薬の候補となる有機金属化合物昇華ガス等の光吸収特性がまだ十分調べられていない現状では，作成しうる材料にある程度制約がでてくることも事実である．したがって，ここでは，最近期待の高まっている，炭素類縁化合物を中心にエネルギー関連薄膜材料への光プロセス適用の可能性を調査した．

炭素（Ｃ）は，周期律表で近接した位置にあるホウ素（Ｂ），窒素（Ｎ），ケイ素（Ｓｉ）等の元素と共有結合性化合物を作る．これらの中には，バルク焼結体が発熱材や研磨材等に従来から用いられてきたSiCを代表例として，ﾀﾞｲｱﾓﾝﾄﾞに次ぐ硬さのB_4C[1]や熱電変換機能に注目の集まっているSiB_4[2]，絶縁性・高硬度・高熱伝導性基板材料として最近期待の高まっているC_3N_4[3]等，特異な機能性を示すものが多い．しかしながら，これらは通常粉体として得られ，難焼結材料として知られており，焼結によって緻密な純粋相を得ることは困難である．この対策として，組成制御性がよく，緻密な膜を形成できるＣＶＤ反応を用いることが考えられるが，熱ＣＶＤ法では高い反応温度を要するため制約が多い．近年研究の進展の著しいフォトン励起反応を利用すると反応の低温化が期待され，非平衡化合物の形成を含め，Ｃ，Ｓｉ，Ｂ，Ｎ系の新規化合物薄膜を作製する技術を確立することが期待できる．

Ⅵａ属（C, Si)の元素については，Siの，Si_2H_6やSiH_4を用いた半導体関係の数多くの研究例がある．Ｃについても，アセチレンやベンゼン等の炭化水素にArFレーザーを照射して硬質のアモルファスカーボン膜を得たという報告が多数ある．Ⅵａ属同士の化合物としてのSiCは高温で使えるﾊﾟﾜｰｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ素子や青色発光素子として最近注目をあつめているほか，ｱﾓﾙﾌｧｽSi-C-Hのﾌｫﾄﾙﾐﾈｯｾﾝｽ効果やﾘﾝ・ﾎｳ素をﾄﾞｰﾌﾟしてｱﾓﾙﾌｧｽ太陽電池上に

堆積したﾍﾃﾛ接合太陽電池，高温熱電エネルギー変換材料などの用途も開かれている．炭化水素＋ｼﾗﾝ系ガスのほかｱﾙｷﾙｼﾗﾝを用いれば真空紫外光分解によってSiC膜の直接生成が可能であるが，過剰の炭素に留意する必要がある．

一方Ⅵａ属に対するドーピング剤としても必要のあるⅢａ属，Ｖａ属については，以下の通りである．

Ⅲａ属（B, Al, Ga, In, Tl）：この系列に属する元素のうち，Al, Gaは化合物半導体に関連した金属アルキルを用いた研究例が多い．$Al(CH_3)_3$の吸収端は260nmなのでKrF, ArFで分解する．Al_2O_3も酸化剤としてN_2O（吸収端は240nm付近）を用いることで得られている．AlNは熱的に安定で強いﾋﾟｴｿﾞ電気効果を示すので，超音波デバイスとして研究されてきたが，従来は熱ＣＶＤ ($AlCl_3$＋NH_3 1100～1300℃），ﾌﾟﾗｽﾞﾏCVD（$AlCl_3$＋N_2），Alのﾌﾟﾗｽﾞﾏ窒化等が研究されてきた．　Gaについては，化合物半導体としてのGaAsの他，青色発光素子としてのGaNが注目を集めている．InやTlはヨウ化物（InI, TlI）のArFレーザーまたはXeアークランプ照射で得られている．　B_2H_6は200nm以下に吸収を持つので，ホウ化物を作るのに使用できるはずである．上述のSiBxのほかでは，多くの金属ﾎｳ化物が融点が高く，硬く，化学的・熱的に安定で金属電導を示すので注目を集めているが，合成温度が高く，単相を得ることすら容易ではないとされている．

Ｖａ属（N, P, As, Sb, Bi）：この系列の元素の水素化物（NH_3, P_2H_6, AsH_3 等）は概ね210～270nm付近以下に吸収を持ち，窒化物，リン化物，ヒ化物の生成原料として用いられるはずである．B_2H_6＋ NH_3 の 熱ＣＶＤではBNの化学量論比よりもホウ素richな化合物しか得られないが，ArFを照射するとNH_3の光分解がB_2H_6のそれよりも大きく化学量論比に近いものが得られるとされている．Ⅲ－Ⅴ族半導体のBPや$B_{13}P_2$なども興味深い[4]．SbはCo等との金属間化合物はSkutterdite構造を有し，新規熱電変換素子として，最近注目を集めている[5]．また，窒化ﾘﾝは，熱力学計算では高温でしか生成しないが，ﾌﾟﾗｽﾞﾏ法では生成が報告されている．化学量論的P_3N_5は透明絶縁膜であるが，Ｎ不足の黄色褐色のｱﾓﾙﾌｧｽ窒化ﾘﾝは誘電損失が低く高い絶縁破壊強度をもつ化合物半導体の候補である[6]．

以上の気体原料のほか，Ｃ，Ｓｉ，Ｂ 等の固体原料へのﾚｰｻﾞｱﾌﾞﾚｰｼﾞｮﾝやﾏｲｸﾛ波による活性化窒素ガスの導入によって，生成材料の範囲をより広範にすることも可能であろう．以上，いささか羅列的に今後期待される材料，特にエネルギー関連材料について述べた．上述の光ＣＶＤ法で期待される特質がいかされれば，構造・組成が制御され，それ故，高機能である材料の開発が期待される．

参照文献

1) 玉木昭彦　セラミックス，24 (1989) 533

2) M. Mukaida, T. Goto, T. Hirai, Mat. Manu. Processes 7 (1992) 625.

3) P. H. Fang, J. Mater. Sci. Lett., 14 (1995) 536 and references therein.

4) 熊代幸伸　セラミックス，24 (1989) 538

5) See, for example, J. P. Fleurial, T. Caillat, A. Borshchevsky, Proc. 13th Int. Conf. Thermoelectrics., A2-3(1994).

6) S. Veprek, Z. Iqbal, J. Bunnst, M. Scharli, Phil. Mag., B43 (1981) 527.

4.3.5　機能回復（リサイクルアシスト）技術

(1)構造体機能回復

素材に種々の加工を施して製作した構造体は，サイズの大小あるいは機能の程度を問わず製作直後から必ず機能の経年劣化が始まる．経年劣化の程度は同一構造体であっても使用する環境及び負荷により著しく異なり，その程度を設計時に正確に予測する方法は現在確立されていない．

従来の大量生産・大量消費の時代には図4.3.5.1に示すように，素材を加工して製品を作る一次元的造出過程が専ら取り入れられ，多くの大衆向け製品では新製品ができると機能が劣化する以前でも廃棄されていた．一方，発電プラント，橋梁，道路などのインフラストラクチャーはその社会的重要性から定期的に点検・補修されているが，一般的には延命技術の重要性については製造技術に比べて認識が浅いと言わざるを得ない．しかし，保守・延命技術は工場生産技術に比べるとはるかに困難な要素を含んでいる．すなわち，作業環境が著しく劣ること，完全な検査が行いがたいこと，どのような補修を行うべきかの評価技術が確立していないこと，補修作業の自動化・高能率化が困難なこと，などが挙げられる．

近年，資源保護及び環境保護が大きな社会的問題となっている．製造業においてもこれは大きな課題となっており，一次元的造出・廃棄過程からの脱却が必要となっている．これに対処するための発想を図4.3.5.2に示す．ここでは仮に「再帰循環型造出・再生・廃棄過程」と呼ぶ．

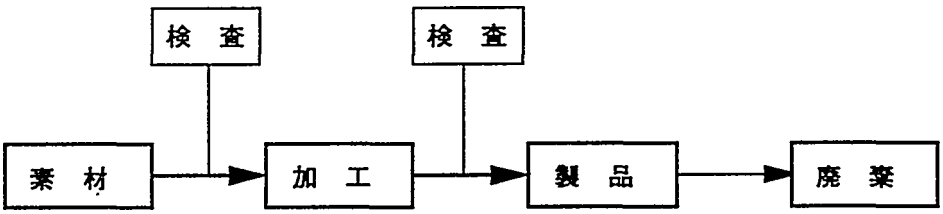


図4.3.5.1　一次元的造出・廃棄過程

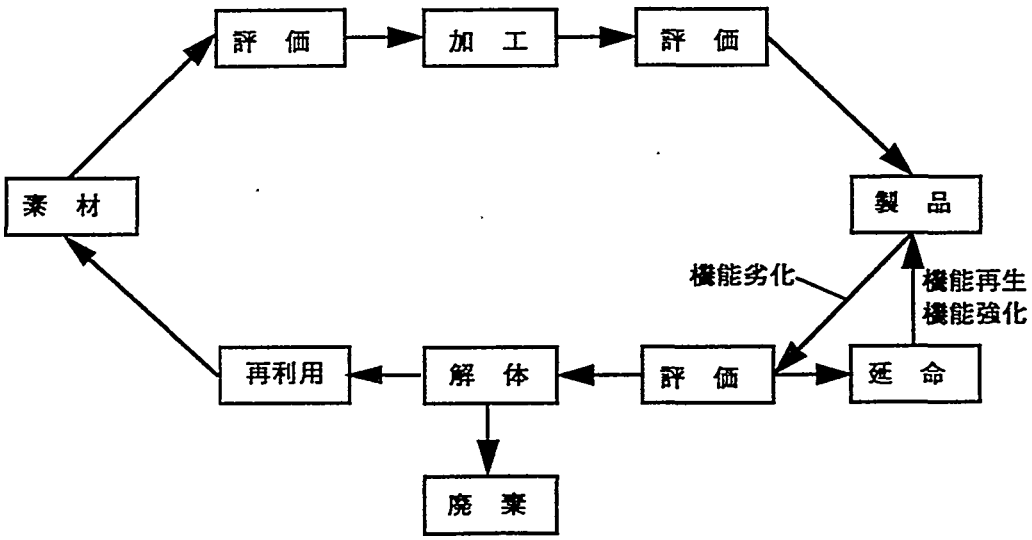


図4.3.5.2　再帰循環型造出・再生・廃棄過程

a) 原子力発電プラントにおけるレーザー補修溶接

高温・高圧下で使用する各種プラントは事故防止及び安全性確保のために点検整備が入念に行われている．特に，原子力発電プラントは万が一事故が生ずると甚大な放射能汚染被害が想定されるため，点検及び整備に最も気を使っている．原子力発電プラントには加圧水型（ＰＷＲ）と沸騰水型（ＢＷＲ）の２種があるが，最も損傷が出やすいのがステンレス鋼の配管系統で披露亀裂の発生や応力腐食割れ（ＳＣＣ）である．

加圧水型原子炉（ＰＷＲ）の蒸気発生器内には熱交換用の細管が３～４０００本設置されている．これらの細管は圧力容器内の支持板で固定されているが，振動等の影響で永年の使用中に支持板近傍の細管が損傷を受け，これを補修する効率的な方法が求められていた．この難問を解消したのがファイバー伝送されたＹＡＧレーザによる溶接補修法である．

従来は，損傷箇所の補修は管内径より若干細いスリーブを挿入・拡管し金ろう付法で接合していた．しかし，インコネル製の伝熱管の内径は20mm弱と細く，大電力を送給できないためろう付に時間がかかり作業効率に問題があった．そこで，溶融溶接法の採用が検討されたが，アーク溶接では電力ケーブルや水冷及びシールドガス等のパイプ類がが太くなるため，狭隘箇所での作業はほとんど不可能と判断されるに至った．

ＹＡＧレーザの波長（1.06μｍ）は石英系光学ファイバーによって遠隔伝送が可能である．例えば，0.6mm φの細いファイバーで数ｋＷのＹＡＧレーザパワーをほとんど損失無しに伝送することが出来る．このことを利用して開発したのが図4.3.5.3に示すスリーブ溶接用ＹＡＧレーザロボットである．[1] ２ｋＷ級ＹＡＧレーザビームを径0.6mm φのオプテイカルファイバーで250m伝送し，回転する小型集光系でスリーブと管を重ね溶接する．この方法の採用により，蒸気発生器管の補修溶接効率は飛躍的に向上し，世界的に

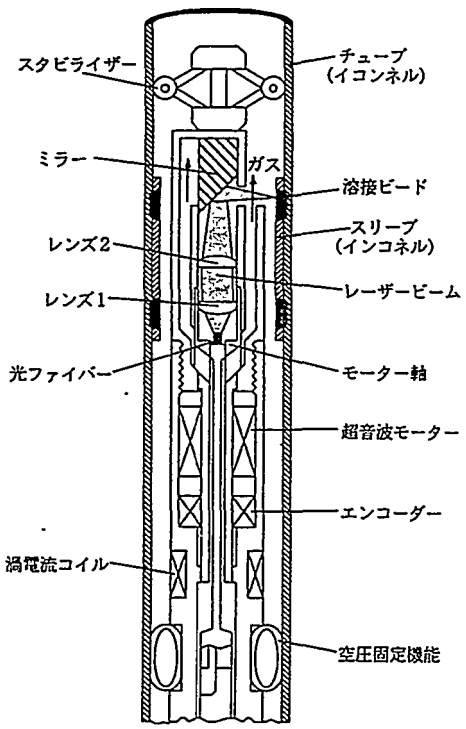


図4.3.5.3　原子炉（ＰＷＲ）蒸気発生器のレーザー補修溶接ロボット[1]

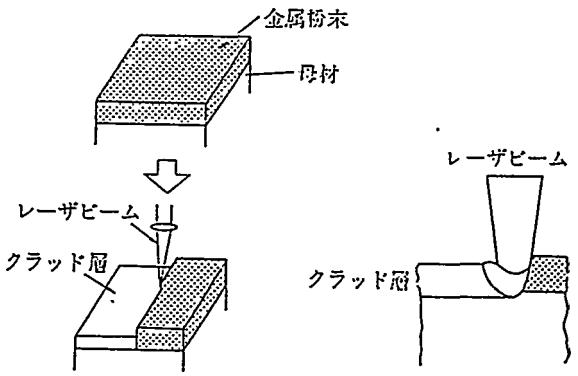


図4.3.5.4　レーザークラッド工法施工手順[2]

注目されている技術である．この画期的な技術は原子力プラントへの適用という極めて特殊な目的のために開発されたものであるが，この技術は今後ブレークダウンされて様々な分野に適用されるものと思われる．

一方，沸騰水型原子力発電プラントで発生するＳＣＣの防止策として蒸気のスリーブ溶接法と似た装置によるステンレス鋼管内面のレーザークラッド法が開発されている．[2] 予めパイプ内面に耐ＳＣＣ特性に優れたＣｒ－Ｎｉけい粉末合金を耐熱有機溶媒をバインダーとして塗布し（図4.3.5.4），ファイバー伝送されたYAGレーザーを照射溶融してクラッド層を形成する方法である．

以上は，レーザーによる溶融加工であるが，極短パルスレーザ照射によるＳＣＣ防止法が検討されている．[3]　ＳＣＣは表面が引張応力状態の場合に発生しやすく，圧縮応力状態では発生しにくい．そこで，数ナノ秒程度の極短パルスを照射した場合に発生する高温・高圧プラズマの反動力を表面に発生させ表面層に圧縮応力を発生させようとするものである．この場合，大気圧中ではプラズマ圧力が1000気圧程度であり衝撃効果は低いので，図4.3.5.5に示すように水中で照射することによりプラズマを拘束すると数万気圧の衝撃力が得られ，図4.3.5.6に示すように材料中を伝播する衝撃力により表面圧縮応力が得られる．レーザー衝撃硬化法の特徴はショットピーニング法に比べて深い部分まで圧縮応力を与えられることである．なおこの方法では，レーザービームが水中を伝播しなければならないので，レーザービームとしてはＹＡＧの基本波またはグリーンのＳＨＧ，及び可視光の銅蒸気レーザーが有力候補である．

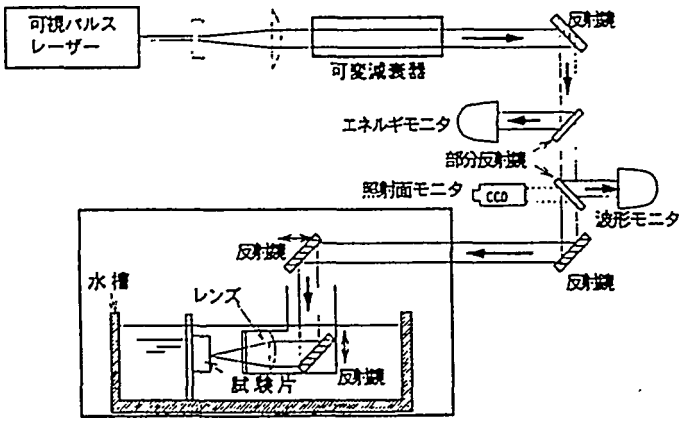


図4.3.5.5　水中表面処理装置の構成[3]

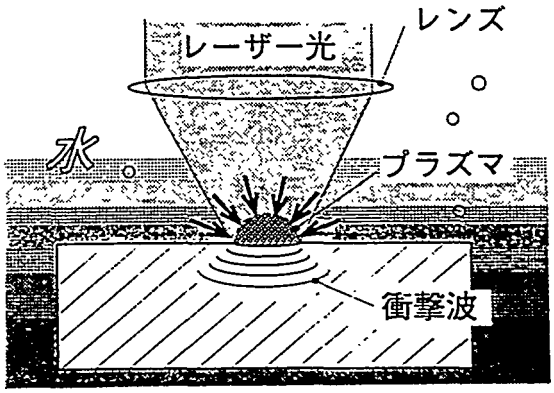


図4.3.5.6　レーザーによる残留応力の改善[3]

参考文献：

1) T. Ishide and others: Proc. LAMP'92, 7 - 12 June, 1992, Nagaoka, High Temperature Society of Japan, p. 957.

2) 入沢，他：「小口径管内面のレーザクラッド工法に表面改質」，火力原子力発電，Aug., 1991, p. 1036.

3) 佐野，小長井：「レーザーによる水中表面処理技術」，平成８年レーザー学会学術講演会第１６回年次大会講演予稿集，平成８年１月２４日２５日，パシフィコ横浜会議センター，p. 157.

（2）電子デバイス機能回復

フォトンプロセスを用いた電子デバイスの機能回復を考察するにあたり，その対象例として，水素化アモルファスシリコン（a-Si:H）太陽電池を取り上げる．a-Si:Hにバンドギャップ以上のフォトンエネルギーを長時間照射した場合，光伝導度と暗伝導度が低下するが，暗状態での160℃以上の焼どん（アニーリング）により数時間で回復することが知られている．この光誘起の機能低下は，1977年，Staebler と Wronski によって見い出されたので SW 効果と呼ばれる[1,2]．図4.3.5.7に電気伝導度の光照射による低下とアニーリングによる回復の過程を示す．電気伝導度の低下は太陽電池機能としての効率低下のつながるため，SW 効果による素子機能低下の防止あるいは回復を行うことは，実用上の重要課題である．

SW 効果の起源については現在までのところ，フォトルミネッセンス（PL）[3]，電子スピン共鳴（ESR）[4]，光音響分光（PAS）[5]等の評価結果から総合的に以下の理解が得られている[2]．

1) 光照射により創成された準安定ダングリングボンド（DB）が，光励起キャリアの再結合センターとして働き，キャリア寿命及び光伝導度を低下させる，
2) 準安定 DB は PL メインバンド（1.3-1.4 eV）の消光センターとして，かつサブバンド（0.8-0.9 eV）の発光センターとして働く，
3) 準安定 DB の出現によって局在準位密度のエネルギー分布に変化が生じ，フェルミレベルがバンド中央へシフトすることにより暗伝導度の活性化エネルギーが増加する．

昨今，地球環境保護の面から，重要性が再認識されるようになった資源リサイクルの観点からすると，何らかの回復プロセスを経て素子および機器を再生利用することは重要な課題である．SW 効果による機能低下の回復については，Staebler と Wronski による発見の当初から，160-180℃・数時間のアニーリングにより回復することが判明している[1]．しかしながら，180℃であっても6時間以上のアニーリングを必要とすることは（図4.3.5.1），現実的には長時間に過ぎると思われる．単純には，アニーリング温度を高温化することにより，短時間化することが期待できそうである．しかし，a-Si:H においては，200℃以上では含有水素の脱離[6]が，600℃では a-Si の結晶化[7]が顕著になるので，現実的ではない．いずれにしても，a-Si:H を主体とする太陽電池部を含んでパッケージングの成された機器を，160-180℃の温度に晒すことは不可能といえる．できるならパッケージ状態のまま，a-Si:H 部分に局所的に機能回復効果のあるアニーリングを施す手法が望まれるところである．これにはやはり，光誘起プロセスのうちでも，フォトンとしての特性を活用したものが有効であると考えられる．

すでに，インコヒーレントな近赤外光（波長：0.9 μm）を10^3秒間照射することにより，a-Si:H 層の電気特性回復を評価した例がある[8]．結果的に，ギャップ内準位密度とダイオード理想因子にわずかな回復（低下）が見い出された．ただしこれらは，暗状態での室温放置における場合と同程度の回復量であるので，室温でのアニーリング効果であるとされている．これらの実験結果を図4.3.5.8に示す．これまでのところ，レーザー誘起プロセスを a-Si:H 太陽電池の機能回復に適用した例はあまり多く無いが，フォトンエネルギー（波長），パルス幅，パルスエネルギー（CW なら照射パワー）をうまく選定し，さら

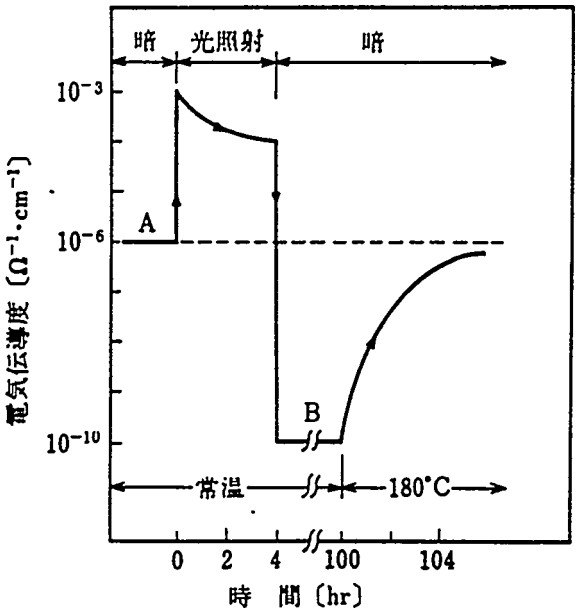


図4.3.5.7　a-Si:H層に対する，光照射による光伝導度と暗伝導度の減少およびそれらの熱アニーリングによる回復過程（SW効果．照射光，パワー密度：200 mW/cm^2，波長：600-900 nm）[1-2]．

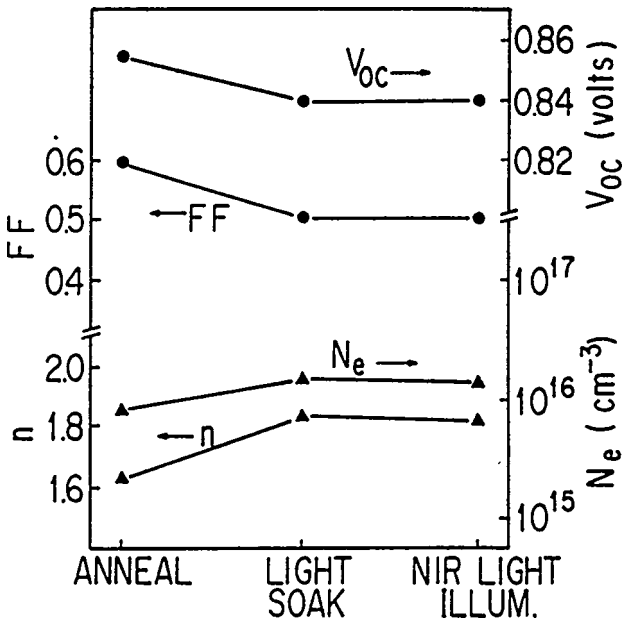


図4.3.5.8　a-Si:H n-i-p型ダイオードの光照射特性劣化と回復．
(ANNEAL) - (LIGHT SOAK) 間は AM1.5光，2.0時間照射による劣化，
(LIGHT SOAK) - (NIR LIGHT ILLUM) 間は波長0.9μ m近赤外光，1000秒照射による回復．V_{oc}：開放電圧，FF: 曲線因子，Ne: ギャップ内準位密度，n: 理想因子．Ne, n は近赤外光照射によりわずかながら回復（減少）する[8]．

に雰囲気ガス，温度（せいぜい100℃以下として）を考え合わせれば，バンドギャップ光の長時間照射により発生したDB（SW.効果とそれに伴う効率低下をもたらす）を，低温・短時間のプロセスで除去することもできると思われる．なぜなら，以上のプロセスの組み合せによればDBの起源が，1)水素原子やSi原子の解離によるものであっても（真性構造欠陥），2)酸素・炭素・窒素の混入によるものであっても（外因性構造欠陥），いわゆるボンドエンジニアリングが可能となるため，理想的なa-Si:H層に回復させることが可能であると考えられるからである．

参考文献

1) D. L. Staebler and C. R. Wronski: Appl. Phys. Lett. 31, (1977) 292.

2) K. Tanaka, E. Maruyama, T. Shimada, and H. Okamoto: “アモルファスシリコン”, (オーム社, 1993).

3) J. J. Pankove and J. E. Berkeyheiser: Appl. Phys. Lett. 37, (1980) 705.

4) S. Yamasaki et al.: AIP Conf. Proc. 157, (New York, 1987) 9.

5) K. Tanaka et al.: “ Tetrahedrally-bonded Amorphous Semiconductors ” ed. by D. Adler and H. Fritzsche (Plenum Pub., 1985) 239.

6) W. Beyer and H. Wagner: J. Non-cryst. Solids 59&60, (1983) 161.

7) C. C. Tsai and H. Fritzsche: Solar Energy Materials 1, (1979) 29.

8) 坂田功：“アモルファスシリコン太陽電池の動作特性解析と光特性変化の研究”, 電子技術総合研究所研究報告，第898号，(1988) pp123-125.

4．3．6　最新計測・分析・加工制御技術

レーザーはエネルギー源として下記のような特徴を有し，レーザーによる材料加工は21世紀のキーテクノロジーといわれている[1)]．

①制御して使用できるエネルギー源の中で最も高いパワー密度が達成できる．

②単一波長の光で，特定エネルギーレベルの光子エネルギーが利用できる．

③クリーンエネルギーである．

④エネルギーの遠隔伝送および遠隔制御ができる．

しかしこれらの材料加工における長所は下記に示すように自動化の大きな阻害要因にもなっている[1)]．

①加工部が微細で，加工速度が極めて速い．

②加工内部の状態が不可視で，また加工現象の変化が速く，未知の加工現象が多く，制御因子が十分に解明されていない．

③制御因子が既知であっても，空間的・時間的に高分解能を有するセンシング技術およびセンサーが存在しない．

④仮にセンシングができてもレーザー発振器の応答速度およびＮＣ制御器の処理演算速度，さらには加工テーブル，ロボットなどの位置追跡速度が遅すぎる．

このため自動化が困難な状況にあり，工業化が遅れているのが現状である．

一方日本の基幹産業において，高齢化，熟練工不足は深刻な問題であり，この種加工の自動化は不可避である．この相矛盾する両者を満足させるためには従来型のフィードバック制御の観念を捨てて，図4.3.6.1に示すような研究フローを基にしたモデル規範型の予

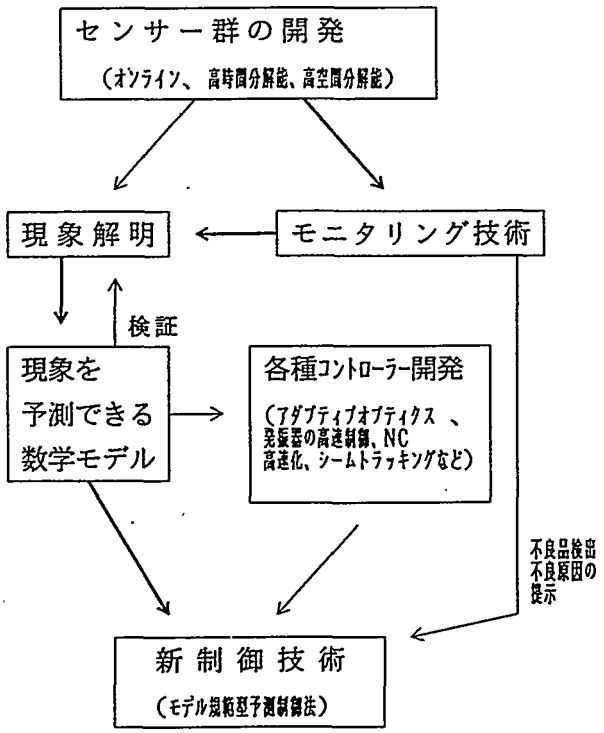


図4.3.6.1 新しい制御技術の研究フロー

測制御の概念を取り入れた新しい制御技術の確立が必要である．

このためには新たなモデル規範型の予測制御技術の開発が必要であり、先に示したフローに従って下記の課題を解決しなければならない．

①高時間分解能および高空間分解能を有する各種オンラインセンサー群の開発

②各種センサー群を駆使したモニタリングシステムの開発

③各種モニタリング技術を駆使した科学的現象の解明と制御因子の抽出

④加工現象の数学的モデルの開発と実験的検証

⑤各種コントローラの開発

⑥モデルによる予測と制御への応用

（1）インプロセスモニタリング技術

a．レーザー切断／接合／熱処理加工におけるモニタリング技術

表4.3.6.1にはレーザー加工におけるセンサー群の開発状況を示す[2]．安定した加工を行うためにはビームパワーからビームモード，材料の光吸収率，開先の位置，焦点位置，シールドガス，各種加工品質など多種に亘るセンサーの開発が必要である．これらの内，大部分はいまだ研究段階である．また既に開発されたレーザービームアナライザー，ホローニードルなど大部分のものはオフラインでの検査用のものである．このことから空間的

表4.3.6.1 センサーの開発状況[2]

Signal	Sensor	Commercial or Research	Sensor	Commercial or Research
Beam power	Laser Beam Analyser (LBA)	Commercial	Leakage from cavity mirror	Commercial
Beam diameter and mode	LBA	Commercial	Perforated mirror	Commercial
	Hollow needle	Commercial		
Location	Acoustic mirror	Research	Modified LBA	Research
	LBA	Commercial	Scanning slot/beam splitter	Research
	Edge thermocouples	Research		
Traverse speed and table position	Encoders	commercial	Linear Moire encoders	Commercial
	Tachometers	commercial	Laser interferometer	Commercial
	Laser doppler anemometer(LDA)	commercial		
Vibration/stability	Accelerometers	commercial	LDA	Commercial
	Strain guages	commercial		
Focal position	Infra red	Research	Pressure	Research
	Capacitance	Commercial	Feeler	Commercial
	Inductance	Commercial	Laser diode	Research
Shroud gas Velocity	Nozzle pressure	Commercial	Speckle interferometry	Research
	Schlieren	Research		
Surface Aabsorption	Acoustic mirror	Research	Back reflection	Research
Seam location	Optical	Res/com	Acoustic	Research
	Pressure	Research		
Cutting quality	TV camera on spark discharge	Research	Acoustic mirror	Research
	Temperature of cut face	Research	Viewing down beam	Research
Welding quality	Acoustic mirror	Research	Plasma charge sensor	Research
	Acoustic workpiece	Research	Laser probe	Research
	Sonic microphone	Research	Acoustic nozzle	Research
	Optical emissions	Research	Video camera	Research
	Electric signals	Research		
Surface hardening quality	Temperature	Res/com	Acoustic	Research
	Infra red	Research		
Cladding dilution	Inductance	Research		
Powder feed rate	Pressure	Research	Vibration	Research
	Stress	Research		

・時間的に高分解能を有するセンシング技術は，無に等しいといえる．

センシングやモニタリングの現状の研究は大別してその目的が２つに分けられる．１つは実生産における品質保証を目的としたものであり，後１つは現象の解明の研究を目的としたものである．最近の２，３の研究の例を以下に示す．

池本らは薄板の突合せ溶接の品質検査のため，図4.3.6.2に示すような溶接された後に半導体レーザーによるスリット光と高速画像処理を用いて，溶接ビード形状を測定し，形状の良否を判定して不良品を抽出する方法を開発した[3]．

松本らは原子炉用鋼管の補修溶接の不具合を検出するため，図4.3.6.3に示すように溶接用ビームの伝送用ファイバの廻りに細径の１７本のモニタリングファイバを配置し，溶接部の発光，反射光を取り出し，発光および反射光強度の異常が出た場合は溶接を停止するシステムを構築した[4]．

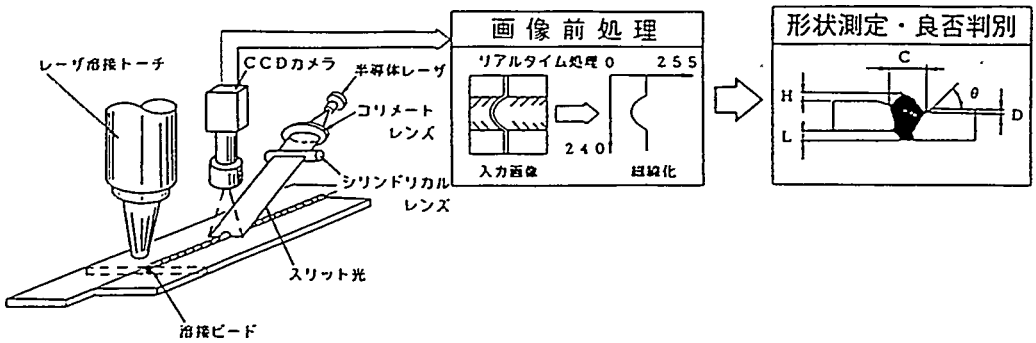


図4.3.6.2 薄板の突合せ溶接の品質検査システムの例[3]

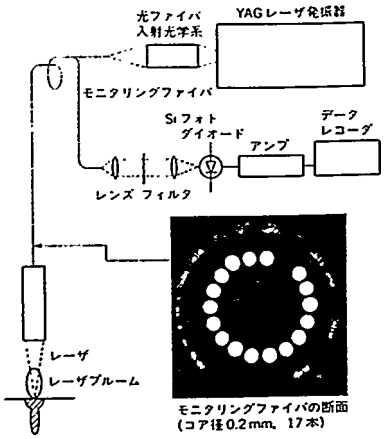


図4.3.6.3
鋼管の補修溶接の異常検出のモニタリングシステムの例[4]

金らはＹＡＧレーザーによるＡｌ合金のスポット溶接現象を把握するため，4500ｺﾏ/秒の高速カメラでプルームおよび溶融池を観察すると共にスペクトル強度の時間変化を観測した．図4.3.6.4にはプルーム挙動の高速カメラの撮影例を示す．このような観察からキーホール挙動の周期性，スパッタの飛散速度，Ａｌ蒸気とＭｇ蒸気の化学反応などについて解析した[5]．

渡辺らはCO_2レーザーによるステンレス鋼のビードオンプレート溶接時の被溶接体とレーザーノズル間の電位の変化およびプルームの発光強度から，プルーム内での金属蒸気およびＡｒガスが部分的に電離し，その構成が図4.3.6.5に示すようになっていると提案している[6]．

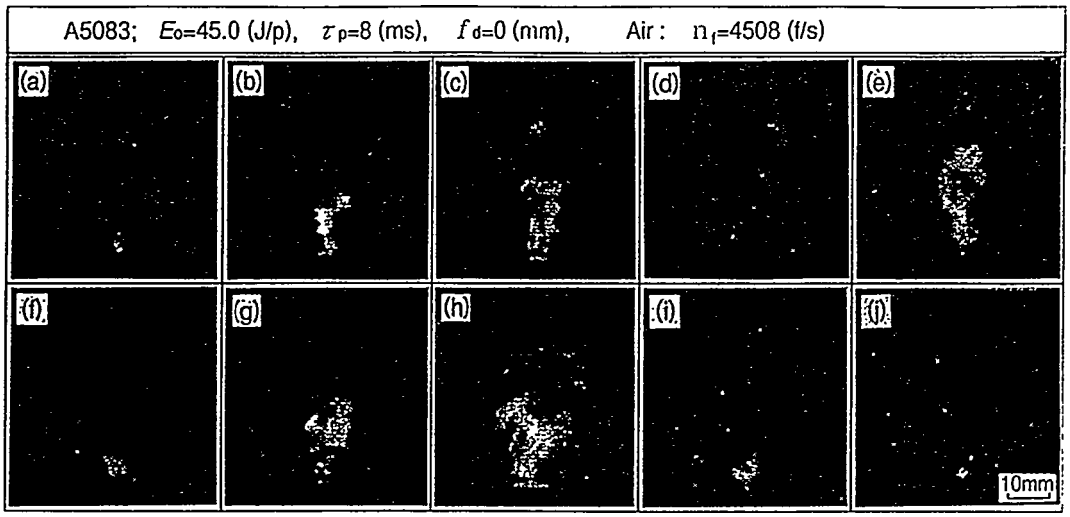


図4.3.6.4 Ａｌ合金スポット溶接時のプルーム挙動の高速カメラによる観察例[5]
（(a)0.18ｍｓ(b)0.41ｍｓ(c)1.51ｍｓ(d)2.18ｍｓ(e)3.51ｍｓ
(f)4.8　ｍｓ(g)5.51ｍｓ(h)6.17ｍｓ(i)6.84ｍｓ(j)7.73ｍｓ）

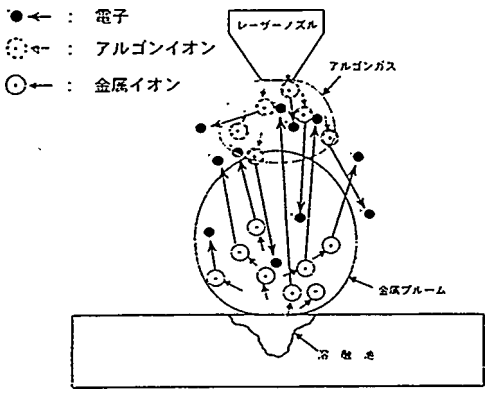


図4.3.6.5 プラズマ電位の測定から得られた
プラズマ電離の模式図[6]

b．微粒子・クラスター及びこれを用いた機能構造体／被膜／材料作製におけるモニタリング技術

微粒子・クラスター及びこれを用いた機能構造体／被膜／材料作製プロセスにおいては，クラスタ・超微粒子の生成・成長場における粒子及び雰囲気のモニタリングと，その堆積場における堆積被膜・バルクの微細構造及び中／大規模構造のモニタリングが，プロセスの最適制御技術のための，評価技術として重要である．以下では，プロセスで最も重要な各種物性値のインプロセスモニタリング手法について述べる．

1)プラズマ状態のガス成分，密度，温度

レーザー蒸発法による超微粒子・クラスタ生成においては，プラズマ状態のモニタリングが重要になる．このプロセスは，熱加工時のプルーム発生と等価であり，この計測技術は熱加工のモニタリングに対しても重要である．

蒸発粒子を含む多成分プラズマの温度，組成，電子密度分布の発光分光解析法については，主にアークプラスマを対象として研究が進んできた[7]．この手法は，レーザープラズマに対しても有力な手法である．

ホログラフィによる屈折率計測も温度等を解析するための有力な手法である．特に，ストリークホログラフィ[8]の手法を用いることで時間変化を解析できる．GaP等のフォトリフラクティブ結晶[9]を記録材料に用いることで，多重記録によるストリークホログラフィ記録や，リアルタイム計測を行いうるため，特に早い時間変化を伴う系の解析等が可能になるものと期待されている．

この他，赤外吸収分光法，ラマン分光法，ＣＡＲＳ（コヒーレント反ストークスラマン分光），ＬＩＦ（レーザ誘起蛍光分光）等により，成分濃度の検出が行いうる．特に，ＣＡＲＳは，温度測定が同時に可能な方法であり，雰囲気圧力が高い系に適しているため，これまで燃焼計測などに応用されている．今後，レーザープラズマのモニタリングにおいても有力な手法となると考えられる．

2)クラスター・微粒子の粒子径，濃度

クラスター・微小粒子は，周囲雰囲気の変化に非常に敏感に急速に，性状変化を起こすため，プロセス中の粒子を測定するためには，レイリー散乱光の解析に基づく方法が有力である．しかし，プロセスにおいて対象とする数～数十 nm のオーダーの粒子では，散乱光強度が，粒径の６乗に比例する非常に微弱なものとなり，またその散乱角度依存性も粒径によらない．このため，単一粒子からの散乱光の絶対的強度測定に基づく方法や，その角度分布の解析を用いる方法を適用するのは非常に困難である．極微弱光の光子計数技術に基く光子相関法[10,11]は，粒子の相対運動速度，すなわち，拡散係数を計測する方法であり，気体中における50nm 以下の粒径のその場測定に唯一成功している方法である．レーザーＣＶＤプロセスへの応用例[12]　も報告されている．10nm 以下の粒子測定も可能と考えられているが，プローブ光による加熱，光圧力の影響[13]の評価など，課題が残っている．

サンプリング計測は多くの場合困難であるが，粒子ビームとして系から引き出すような場合には，イオン分析技術等が適用できる．大気圧～低真空領域においては，ＤＭＡ (Diff

erential Mobility Analiser) による静電分級法により，1nm までの粒子の粒度分布を測定できる．一方高真空中では，マススペクトルを用いた測定が可能である．

3)膜・表面構造体の積層厚み

加工表面の計測については，４．４．４（２）においても，触れられているので，ここでは，クラスター・微粒子の沈着による積層厚み変化の測定に限って述べる．

表面上に沈着した粒子の測定は理想であるが，レイリー散乱光による測定は100nm 以下の粒子には適用できていない．

ほぼ一様な膜状に堆積する場合，エリプソメトリー等の反射光の偏光状態の膜厚による変化を測定する方法が実用化されている．この場合，赤外光を利用することで，干渉縞の間隔が広がり厚い膜まで測定できる，また，半導体等の場合透過能に優れる．レーザー法ではないが，高周波プラズマ中で成長している a-Si:H 膜薄膜堆積のその場観察[14]等に応用されている．

また，ある程度の広い空間範囲にわたって一様に堆積する場合，表面そのものではなく近傍にセンサーを置くことで，モニタリングできる．工業的に実用化されているこのような手法[15]に，水晶振動子法がある．これは，製膜を行う基板近傍に設置した水晶振動子上に同時に沈着を行わせ，その質量変化により振動子の共振周波数が変化することを利用するものである．

雰囲気圧力が低い場合には，RHEED 等電子線を利用した分析手法を用いることができ，構造，組成など多くの情報が得られうる．

c．インプロセスモニタリング手法としての光測定・画像測定の新たな展望

インプロセスモニタリング技術においては，光測定・画像測定が非常に重要である．

光測定法のうち，プローブ光を用いる測定においては，プローブ光のエネルギーの測定対象への影響を評価しなくてはならない．この問題は従来から指摘されながらも定量的評価が不十分であった．光と物質のダイナミックな相互作用の全貌の記述は，この問題を解決し，優れたモニタリング手法を確立するためにも重要な課題である．

光検出デバイスの性能（感度，速度）の向上，データ処理システムの高速化，信号処理素子の高速化，フェムト秒レーザや波長可変レーザ等の新たなプローブ光源の出現は，光測定・画像測定の測定限界・精度の向上に大きく寄与する．また，従来から提案されてはいても，技術的に不可能であった測定も実現可能とする．このようにして，インプロセスモニタリング技術が進歩すれば，これによって更に優れたデバイス等が作製可能となることが期待できる．

参考文献

1) 松縄朗 :" レーザー加工の現状と今後の課題 ", 軽金属溶接, Vol. 29 [No. 5](1991)p191-204

2) W. M. Steen:"Adaptive Control of Laser Material Processing", Proceedings of LAMP'92(1992)p439-444

3) 池本公一ら :" 自動車用ボディパネルのレーザ溶接 ", 溶接学会論文集, Vol. 10, [No. 1] (1992)p196-201

4) 松本長ら :"レーザ溶接インプロセスモニタリング技術の開発とその実用化",三菱重工技報, Vol. 30, [No. 5](1993)p451-454
5) 金鍾道ら :"アルミ合金のパルスＹＡＧレーザ誘起プラズマの分光学的研究（第２報）",溶接学会全国大会講演概要, 第55集 (1994)p18-19
6) 渡辺真生ら :"レーザー溶接に適用されるモニタリング法の特質とその応用",溶接学会全国大会講演概要, 第57集 (1995)p376-377
７) 平岡和雄ら : 金属材料研究所研究報告集17(1995)213
８) K. Nagayama et al. :Opt. Eng. , 31(1992)1946
９) M. Saffman et al. :Phys. Rev. A, 48[4](1993)3209
１０) R. Pekora (ed.):"Dynamic Light Scattering", Plenum(1985)
１１) 伊藤正行ら : エアロゾル研究, 2[1](1987)21
１２) I. L. Tuinman et al. : Proc.　4th Intl.　Congress Optical Particle Sizing(1995)195
１３) Y. Harada et al. :Proc.　3rd Intl.　Congress Optical Particle Sizing(1993)89
１４) Y.　Toyoshima et al. : J.　Non-cryst.　Solids 137&138(1991)765
１５) 長岡誠 : 実用表面改質技術便覧, (株) 産業技術サービスセンター (1993)759

（２）加工制御技術

ａ．レーザプロセスの加工制御に関わる制御対象と制御因子

フォトンプロセスの代表例であるレーザプロセスにおいては，レーザ光が加工点である被加工物の表面で吸収されることにより，所要の加工プロセスが実現される．このような加工点におけるレーザ光の吸収は，レーザ光と被加工物材料との間の相互作用の結果として生じるものであり，当然のことながらレーザ光の波長，偏光，並びに入射角の影響を大きく受ける．一方，被加工物の表面性状である表面粗さやうねりなどの影響も受け，例えば溶接加工等では，ビーム孔における多重反射により実効的な吸収が増大する場合がある．また，加工の基本的な作用が熱的現象によるものか，あるいは光化学的現象によるものかは，レーザ光の波長と材料の組合せによって決定される．一般的にレーザ加工の進行速度は，吸収されるレーザ光の強度に依存し，その強度分布は，レーザの出力や発振モード，伝送方法，並びに集光方法によって決定される．ただし，エッチングや成膜のプロセスにおいては，ガスの供給量や反応部の温度が支配因子になる場合がある．

以下では，レーザプロセスの加工制御を実現する際に考慮すべき具体的な制御対象の特性について述べることにする．

１）レーザビームの制御

在来加工におけるハード・ツール（工具）に対応するソフト・ツールであるレーザビームを制御するためには，以下のようなレーザビームの有する諸特性について明らかにしておく必要がある．

・レーザパワー

基本的にレーザパワーの制御は，励起入力の制御によって行われる．すなわちレーザの出力変調，パルスの出力制御，並びにそれらのフィードバックなどは

励起入力を適宜制御することによって行われる．また，共振器のQ値をスイッチングすることによって，ナノ秒オーダの短パルス高ピーク出力が生成される．この場合には，上述の励起入力の他にQスイッチング速度などが制御因子になる．

・レーザビームの波長

通常の高出力の発振器を用いる加工では，波長の安定度が大きな問題になるようなことは無い．しかし，レーザリソグラフィ（直接描画）やウラン濃縮のような，波長を狭帯域化したレーザを用いる場合には，波長のスペクトル幅や安定度の保持が問題になる．このような狭帯域化や波長の制御には，グレーティングやエタロンといった光学素子が使用される．また，その場合のフィードバック制御は，素子の温度，雰囲気圧，並びにビームの入射角等を制御することにより行われる．

・レーザの発振モード，ビーム径，並びに広がり角

レーザの発振モード，ビーム径，並びに広がり角は，いずれもレーザ光の伝搬系や集光系の構成を支配する重要な因子である．すなわち，集光点におけるビームの強度分布は発振モードの影響を受け，ビームスポット径はビーム径と広がり角の影響を強く受ける．これらいずれも，励起密度の制御と光共振器の構成によって制御されるが，フィードバック制御が行われることは少ない．しかし，ビームエキスパンダのズーミング機能を利用することによって，集光光学系に合わせたビーム径と広がり角度に変換するようなことは一般的に行われている．

・レーザの伝送

レーザの伝送方法は，空間を伝搬させる方式と光ファイバを用いる方式に分けられ，それぞれ得失がある．前者の空間伝送方式では，ビーム径と広がり角を適宜制御して伝送する方式及びリレーレンズにより像として伝送していく方式の2種類が，使用するレーザ源の種類や対象プロセスに応じて使い分けられている．なお，このような空間伝送方式では，光路上に存在する光学素子の傾きなどにより，光軸が種々変化するため，長距離伝送では光軸のずれの検出と補正が必要不可欠である．一方，後者の光ファイバ伝送方式では，光ファイバの屈折率分布により伝送モードや出射端における強度分布が支配されるという特性があり，GI（graded index）タイプとSI（step index）タイプがそれぞれ使い分けられる．

・レーザビームの偏光特性と可干渉性

被加工物表面におけるレーザ光の吸収は，ビームの偏光特性や入射角の影響を大きく受ける．従って，偏光特性は，偏光を規定したり制御するための光学素子を光路上に設置することにより制御されるが，偏向特性をフィードバック制御するようなことは現実には行われていない．このような偏光を規定したことによって生じる出力変動を抑制するために，出力のフィードバック制御が併用

されることは多い．また，可干渉性については，特に強度分布のホモジナイズなどを目的としてビームを重ねる際に大きな問題となる．干渉を抑制して，均一な強度分布を作り出すためには，可干渉性は低い方が有利であることから，可干渉性を低下させることを目的としたマルチモード発振の光共振器が採用されることもある．

・レーザビームの集光

所要の加工プロセスに必要な強度分布をもったレーザビームの形状またはスポットに変換するために，それに適した光学系が構築される．特にビームの形状が重視される場合には，マスクと結像光学系が採用される．溶接や切断等を目的としたレーザプロセスでは，ビームウエストの結像点で加工が行われることが多い．また，走査を光学系で行う場合には，スキャナーが使用されるが，スキャナーでは，位置決め精度や走査速度が問題になる．その場合，スキャナー及びレンズ系により生じる誤差は，ソフトウエアにより補正される．

2）レーザ加工ヘッドとテーブル系の相対運動の制御

レーザ加工ヘッドとテーブル系の相対運動制御に必要な制御因子としては以下のものが挙げられる．

・所要運動経路及び運動ストローク

・テーブルとトーチの運動速度

・剛性

機械剛性と制御系の剛性

・位置決め精度

位置決め誤差補正，始動・反転時のロストモーション補正，繰返し精度補正，熱変形補正，テーブルのバックラッシュ補正等

・応答性

・トーチ及びテーブルの姿勢誤差補正

テーブル系の直線運動における真直度補正，テーブルの姿勢誤差（ピッチング，ヨーイング，ローリング），旋回台の回転誤差（フラジアルモーション，アキシャルモーション，アンギュラーモーション）や回転むら等の補正

なお，これらのレーザ加工ヘッド及び加工テーブル系の運動制御の制御因子は代表的な在来機械加工であるマシニングセンタ加工における主軸スピンドルヘッドの運動機能及び工作物を搭載するテーブル系の運動機能の制御パラメータに対応している．

レーザプロセスは，既に述べたように制御性が高いことをひとつの特徴とし，高精度と高速の両立が可能な加工方法である．これらの両立には，設計によるレーザの高性能化と制御による諸特性の高いレベルでの稼働条件の保持が必要である．また，機構部を含む加工システムとしても高度な加工制御が必要である．高精度と高速化の対象を，加工する部品や製品の設計から製作までと広範囲に捉えると，ＣＡＤ／ＣＡＭデータから自動的に加

工制御プログラムを生成できるようなソフトウエア機能や高機能マンマシン・インタフェースを組込んだ知能形の加工制御システムの実現が必要となる．

b．レーザ加工ヘッド及びテーブル系の数値制御技術

レーザ加工ヘッドとテーブル系の相対運動の制御技術には，高速化と高精度化といった加工要求が高まっていることから，板金加工分野において広く使用されている２次元加工においてさえも，最近では在来の汎用工作機械とは比較にならないような高精度でかつ高速運動に対応可能な数値制御（numerical control, NC）技術が要求されている．特に金型加工に代表される複雑な３次元空間における運動経路の生成が要求される自由曲面加工をレーザプロセスを用いて実現するような場合には，複数の送り軸を実時間で同時に制御し，複雑な制御演算を高速処理する制御系を具備する必要がある．そのためには，在来機械加工システムや工作機械に組込まれている３２ビットのマイクロプロセッサを搭載した汎用のＣＮＣ（computerized numerical control）装置では，もはや機能的に不十分であり，より高度な通信制御機能とグラフィック表示機能を組込んだ高機能マンマシンインタフェースを備えると共に，高速化及び高精度化に対応可能な６４ビット以上の高性能マイクロプロセッサを搭載したＣＰＵが使用された高性能ＣＮＣ装置，あるいは知能形セルコントローラを備えることが必要となる．

それらの厳しい加工要求に対応する高性能ＣＮＣ装置や知能形セルコントローラには，所要最小駆動単位が在来のサブミクロンからナノメートルオーダに移行していることからも現状の数１０倍以上の数値制御の演算能力を有すること，高速制御演算用専用ＤＳＰ（digital signal processor）や高速応答パワーエレクトロニクス素子を組込んだディジタルサーボ系の実現，レーザー・ロータリエンコーダに代表される位置制御のための高分解能検出器の具備が必要不可欠となる．それらの要素技術の他に，更にシステム全体の運動精度の評価と補償，並びに位置安定性を保持するためのハードウエア及びソフトウエア両面からの検討が必要となる．

c．レーザ加工の制御技術

レーザ加工は高いエネルギーを利用する加工であるため，急速な相変化を伴うものが多い．加工を安定に行うためには，加工中に発生した諸変動，例えばビーム特性の変化や予測できない瞬間的環境変化による加工状態の変化に対応して，瞬時にビームの制御パラメータを調整して加工を制御することが必要である．すなわち，従来の機械加工において熟練技能者が行っていた判断と調整を高速に行う適応制御の実現が必要である．このような適応制御に必要な機能は，具体的には「所定の加工環境で，常にシステムが最適な状態で運転されるように，制御系のパラメータを自動的に調整する」ことを意味しており，時々刻々と変化する加工プロセスの特性変化に対応して，加工条件やシステムの運転条件を自律的に調整する作業を制御装置自体が行うことが必要である．そのためには，加工中に実時間で加工パラメータを収集し，フォトンエネルギービームの加工制御パラメータを変化させて性能を最大限に発揮するように最適化を行うことのできる制御機能を備える必要が

ある．

ところで，加工プロセス中の各種の加工制御パラメータをいかに検出するかがこのような適応制御の有効性を大きく左右するため，センサー技術が適応制御を実現する上で最も重要な技術のひとつとなる．具体的には，加工中の加工現象を各種センサーにより，実時間で検出し，フィードバック制御することが有効と考えられるが，そのためには多量のセンサー情報を基にフィードバック処理を高速演算する処理系の構築とフィードバック信号を得るためのインプロセスモニタリング機能を合理的に実現することが必要である．ところが，プロセス情報を検出，収集するインプロセスセンサー技術が技術的に不十分であるため，現時点では実用化が進展していない．また，そのような適応制御モデルを構築する際に各種プロセスパラメータは制御変数として取り扱われるのが一般的であるが，ほとんどのパラメータは上述したようにセンサー技術が確立されていないという理由から実時間インプロセス計測が困難なため，実際に計測系を構築する際には，ある程度の観測変数を介して間接的に計測されることになる．レーザプロセスにおいて最も正確に加工中のプロセス情報を得ることのできる「加工点におけるフォトンと物質の相互作用の状態認識」は，加工点における放射，吸収，反射，並びに散乱等の直接的，間接的な検出によって始めて可能になると考えられるが，これらの現象をレーザビームの実時間による加工制御にフィードバックするのに必要とする高精度及び高速で検出するための光源，分光器，光センサの性能は現時点ではまだ不十分であり，ビームの加工制御を合理的に実現するためには，それらの要素技術の開発も急務となる．

d．レーザプロセス用インプロセス状態認識センサーに要求される基本的機能

上述のレーザビームの加工制御を実現する際には，各種のプロセスパラメータを検出するインプロセス状態認識を対象とするセンサーに以下のような諸機能を具備することが要求される．

・多機能センシング機能の具備

物理的，化学的，並びに数学的に複数の複雑な現象が複合化されたレーザプロセスの加工監視に必要な多面的な観察機能を備えること，具体的には複合形センシング機能と能動形センシング機能を同時に具備し，設定された正常な加工環境を自らが理解する機能を有していることが望ましい．

・高感度，高精度，高S／N比の具備

外乱の含まれた信号の中から加工制御に必要とする対象の微小な状態変化をとらえられること，また加工制御に必要とする信号を迅速に自動抽出可能な高精度な局所観察機能を有すること．

・高信頼性の具備

高エネルギー密度でかつ超高速現象といった厳しい加工環境において，いかなる異常現象に対しても迅速に対応可能であり，かつ加工中の経時変化が少なく，予期しない状態の変化に対しても自動校正機能を有すること．

・環境適応性の具備

外乱に対して強固，かつセンサー自体がコンパクト構造を有し，加工空間の中で重要な情報獲得場所に容易に設置可能であること，また設置場所の変更に対しても迅速に対応可能であること．

・経済性の具備

省エネルギ形で工業的に実用可能な低コストであること，更に保守・点検・メンテナンスが容易であること．

e．センサーフュージョンによるレーザビームの加工制御

レーザプロセスにおいては，様々な状態変化を正確に認識すると共に，自律的に加工プロセスに関わる諸パラメータの変更を行い，最適に加工制御する手段が有効であると考えられる．しかし，既に述べたことからも明らかなように，決め手となるセンサー技術及び信号処理アルゴリズムが未成熟であることから，まず加工状態認識に有効と考えられる複数種類のセンサーを同時に併用したプロセスパラメータを推定するセンサーフュージョン技術を確立することが必要と考えられる．センシング機能の複合化の結果，在来の加工状態認識方法に比較して認識可能なセンシング範囲の拡大，認識プロセスの処理効率，並びに加工制御の効率の向上，認識精度の向上，耐環境性の向上等といった数多くの効果が期待できる．特にフォトンプロセスにおける状態認識のような多面的で不確定な情報の抽出には，測定原理と能動的センシング（active　sensing）機能及び受動的センシング（pasive sensing）機能を有するセンサー特性の異なる複数センサーの組合せが必要であり，そのようなセンサー系の複雑化に対応するため以下のような高度な信号処理系の確立が重要となる．

・微小な加工領域における加工状態や加工環境の変化に対して迅速に対応して，あらかじめ設定された複数のセンサー群から有効と予測される特定の必要なセンサー情報を自動選択し，信号処理すること．
・センサー自体の中に高密度マイクロ化した高度な演算機能を組込むことにより，自律的なセンシング機能を実現すること．
・高速な信号処理系を実現すること．
・センサー部と信号処理系の間の信号通信の負荷を低減すると共に，同時に膨大なセンサー情報を特定の処理系に集中させて取扱うことを避けるため，高速な分散並列処理系を有すること．

ここで対象とするようなレーザビームの加工制御に必要なインプロセスモニタリング機能を実現する際には，在来の単純な性能の低いセンサー系と信号処理アルゴリズムを結合することでは到底対応できない．すなわち，在来機械加工に比べて多種類の質的に異なるセンサー情報を同時に高速に処理する必要のあること，従来のセンサー系に比べて情報量が格段に増大する可能性があること，並びに測定原理の異なる複数のセンサー情報の間に矛盾が生じる可能性があること，などの問題点が浮上する可能性のあることから新たな信号処理のアルゴリズムを構築する必要がある．現在，使用されている信号処理系に使われるアルゴリズム間には，一長一短があることから，以下のようなアルゴリズム間の短所を

相互補完しあうことができるハイブリット処理を組込んだ知識情報処理の構築も有効であると考えられる．

・物理的，化学的な現象，例えば物理法則や化学法則として確立された現象を取扱う信号処理には「原因と結果の対」から構成される因果関係ループによるネットワーク表現を用いて，それぞれの現象に応じた処理手順を探索するようなプロセスを組込む．

・原因と結果に対応関係があまりなく，明示的な表現が困難な信号処理を行う必要のある場合には，統計的処理やニューラルネットワークによる意思決定方法を組込んだ処理手順を組込む．

・明示的な表現が可能な信号処理部分は，プロダクションルール（production rule）やフレーム（frame）による知識表現を組込んだエキスパートシステム形の処理過程を用いる．

一般的な加工制御に使用されるアルゴリズムは，フィードバック形の制御方式が中心であるが，レーザプロセスは，微小空間における極短時間の物理的・化学的現象であることから従来形のフィードバック制御では限界があることが指摘されている(1)．従って，まずはレーザプロセスに有効なインプロセスセンサーの選択と高速信号処理系について検討を行いながら，新たな予測制御やフィードフォーワード制御の概念に基づく適応制御について詳細に検討する必要がある．マイクロプロセッサやセンサーの性能等に代表されるように，現時点においてレーザビームの高度加工制御の実現を困難にしている要因があることは事実である．しかし，今後，高い精度で実際のプロセスをシミュレート可能な新たなプロセスモデルの構築することにより，実際の加工の進展と同期して実時間で演算を行って種々のパラメータを導出することは可能であろう．さらに，それらのパラメータの中から必要なものを選択し，最適化や拘束条件の計算に適用することにより，高度な適応制御を合理的に行うといった「モデル規範形加工制御システム」の実現の可能性はも考えられる．

以上のような観点から，レーザビームの高度な加工制御を系統的に実現するためには，まず，未解明の科学分野のひとつである極めて微小空間において短時間に発現される『フォトンと物質の相互作用のメカニズム』を様々な実験や計算機シミュレーション，並びにそれらの深い考察により科学的に解明し，フォトンの発生からプロセスに至るまでの『フォトンマシニングの加工原理』を確立することが基本的に重要になる．さらに，それらの詳細かつ多面的な考察を基に，複雑なそれらのメカニズムを解明することのできる『加工現象を定性的かつ定量的に記述できる数学的・物理学的モデル』をひとつひとつ段階的にでも良いから構築していくことが必要不可欠である．それら所期の目的を達成するための鋭意，精力的なアプローチを系統的に統合することにより，レーザビームの高度加工制御が実現されると共に，「Accuracy（絶対精度）は高いが，Precision（相対精度）は低い」といわれるフォトンマシニングの課題は解決され，様々な産業分野において更なる大きな展開が図られよう．

参考文献

1) 松縄朗：レーザ溶接の進歩とその応用，金属，65[10],(1995),863.

（3）加工シュミレーション技術

レーザ加工のシュミレーションとしては，金属の溶融を扱う熱伝導的なアプローチと，分子動力学をベースとしたようなレーザによる蒸発形態から迫るものとに別れる．
図4.3.6.6にシュミレーションの代表的な出力例を示す．以下にシュミレーションの概要について述べる．

a．現状技術の概要

1)穿孔現象のモデル[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12]

レーザ照射による溶融・蒸発現象を微視的に明らかにするためには，材料を連続体としてではなく，原子・分子の集合体として取り扱うことが重要である．計算機の能力向上に伴い，原子オーダの解析やシュミレーションを行う手段として，分子動力学的な考えが導入されるようになった．

レーザ照射による材料の溶融・蒸発現象と熱衝撃現象のシュミレーションを，分子動力学を用いて試みた例があり，銅の単結晶やアルミ，鉛，シリコンの単結晶について吸収係数を考慮したレーザ光吸収のモデルが提案されている．またFCC（面心立方）金属の材種による熱衝撃現象や蒸発形態の相違等が検討されている．その結果，材料表面からクラスタ状になって飛散する蒸発粒子の形態の材料による差や，溶融から蒸発にいたる過程がシュミレーションされ，加工との対応においてもうまく現象を説明していることが明らかとなった[1]．

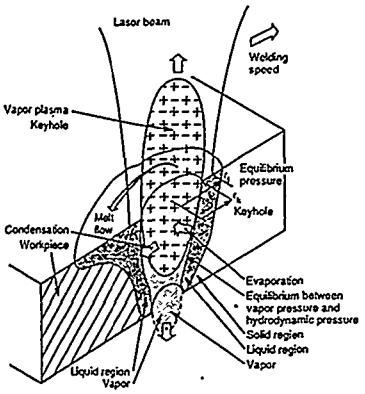
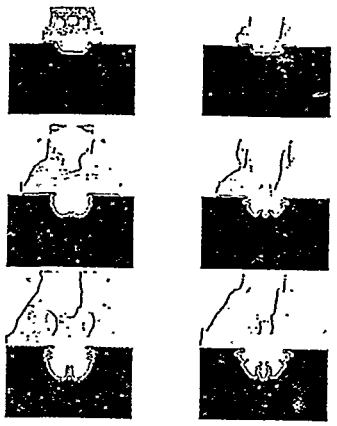
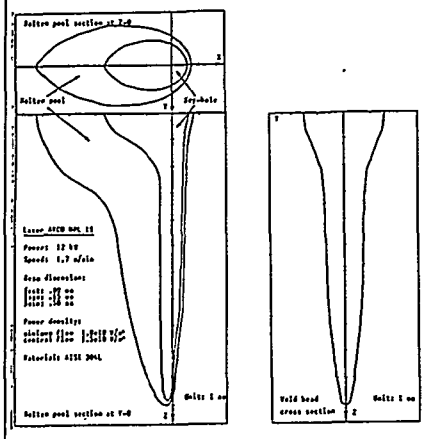
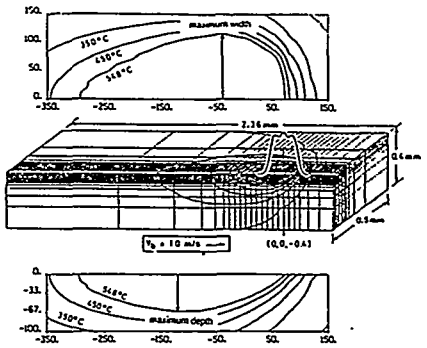
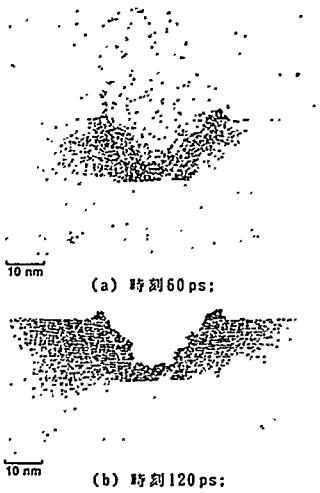
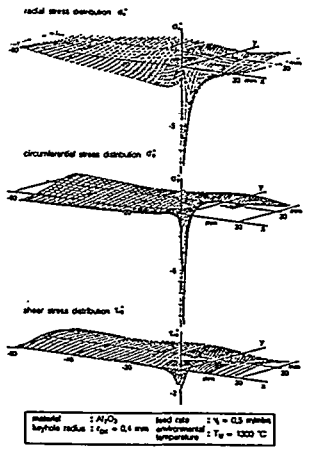
同じように分子動力学によるシュミレーションとして，材料の蒸発時に発生するプラズマとレーザの相互作用を検討した例が報告されている．アルミ合金を対象として波長の異なるレーザを照射したときのプラズマ中での吸収率が異なる事，短波長のレーザでは発生するプラズマの温度が長波長のレーザに比べて低い事，従ってプラズマの形状が変化している様子をマイクロセックオーダの現象として明らかにしている[2]．

レーザ切断時の切断現象をモデリングした例がある．レーザ切断時の現象は，切断前面におけるレーザ加熱による部材の温度の上昇・溶融，更に切断ガスとして酸素を用いたときには，酸素と部材との酸化反応による熱の供給，熱伝導，輻射による熱の流失，及び溶融した金属がガスにより吹き飛ばされる過程等を扱う必要がある．計算により事前に切断に及ぼすパラメータの影響が解れば，実験をしなくても何をどのように変えて，どのような結果を得るかが明確になる．レーザ切断による切断界面における溶融層の厚み，酸化したスラグの厚みを計算で求め，そこから予測される切断幅，切断部表面粗さを求める手法がすでに提案されている．最終的にはドロスフリー切断の条件を，モデルから求める事を目標としている[3,4]．

溶接時にレーザビームにより形成されるキーホールの生成メカニズムに関しては，これまで種々の研究がなされており，深溶込みのメカニズム，プラズマの発生メカニズム等に関してモデリングが行われており，キーホール深さ，形状に関して計算と実験を対比した例などが報告されている[5,6,7,8,9,10,11,12]．

蒸発による反力だけを考慮してキーホールの形成を，分子動力学を用いてシュミレーシ

図4.3.6.6 レーザ熱加工のシュミレーションの例

項目	参考図	項目	参考図
キーホールイメージ		分子動力学による穿孔シュミレーション	
キーホール形成シュミレーション		熱伝導による溶接部シュミレーション	
分子動力学によるSi蒸発シュミレーション		溶接時の残留応力シュミレーション	

ョンした例があり，表面張力や熱伝導，状態方程式を取り入れると更に精度の高い解析が可能と思われる[5]．

レーザ溶接のモデル化に関して，キーホールの形成と，キーホールからの熱伝導にのみ着目した検討結果が報告されている．キーホールの形状をを維持するための因子として，溶融池表面に加わる力として光圧，蒸発に伴う反発力，溶融池の表面張力に起因する力，キーホールの深さに比例する静水圧等を考慮している．またキーホールへのレーザによる熱の輸送，熱伝導による熱の損失等を考慮したモデルを立てシュミレートしたものである．出力としては，レーザ出力，速度に対して，キーホールの形状深さ，溶込み深さを求めており，レーザによる実験結果と比較して，溶込み深さでは，良い近似となっている事を示した[5]．また母材蒸発現象のモデルを作成し，蒸発とキーホールの形成の関係を実験と計算の両面から検討し，キーホール形成の限界を計算モデルで予測できるとしている[6]．

キーホールの形成は蒸発現象と深く関連しており，レーザのエネルギ密度が低い間は熱伝導的な溶接が，エネルギが高くなると急激に蒸発現象が始まり，キーホールが形成される．実験的な手法での現象を解明した報告では，蒸発の反力の影響がキーホール形成に大きく寄与していると指摘している[8,11]．

2)溶融・凝固のモデル[13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24]

レーザ溶接の溶融凝固モデルに関しては，二次元，三次元の熱伝導的な取り扱い，キーホールを意識した定常非定常の線熱源モデルやキーホール内面の分布熱源のモデル，レーザビームの出力分布を考慮した熱源，溶融金属の対流を考慮したモデル等が提案されており，実験結果と対比してモデルの妥当性を示したものもある．モデリングの出力としては，レーザ出力に対する溶込み深さ，溶融幅，温度分布等が上げられる．

溶接における熱伝導解析は，既に長い歴史を持ち，温度場の予測はかなり正確に出来るようになっているが，レーザ溶接特有のキーホールを，どのように取り扱うか，溶融金属内部における金属の対流をどのように扱うかにより，結果に差が出てくる．

3)凝固組織の予測モデル[25,26]

レーザ溶接時の熱伝導による温度場の計算はかなり高い精度で出来るようになっているが，凝固を問題とする場合には解析は難かしい．

アルミ合金の熱伝導型のパルスレーザ溶接部に対して，凝固時の潜熱の放出を考慮した三次元熱伝導・凝固モデルに基づき，数値解析を行い，急速溶融，凝固挙動，急速凝固時のデンドライト状セルの成長とミクロ偏析挙動に関して，検討したものが報告されている[25]．シュミレーションの結果としては急速に変化する温度履歴と冷却速度の推定，溶融・凝固挙動，デンドライト状セルの成長速度に関する，知見が得られている[25,26]．

4)表面硬化層のモデル

レーザ変態硬化処理によって選られる硬化層の断面形状や組織分布，硬さ分布が推定できるような硬化モデルが提案されている．処理前の鋼材の顕微鏡組織を入力し，三次元熱伝導解析とオーステナイト中の炭素拡散過程の解析に基づき，レーザ照射によって組織が変化していく過程を数値計算し，結果を逐次擬似カラーで画像表示する数値シュミレーションシステムが構築されている．さらに母材の鋼種と旧オーステナイトの平均粒径，平均

層間隔を与えて，レーザ照射による組織変化過程も数値シュミレーション出来るようになっている[27]．

5)加工後の力学的性能予測モデル[28,29]

レーザ溶接の温度履歴が引き起こす，材料内部の残留応力に関して，シュミレーションされた例が報告されている．対象材料はアルミナセラミックスで，計算は二次元の熱伝導解析と境界条件は端面フリーの状態である．温度場のシュミレーションと実験とは高い相関性が認められ，溶接部近傍の熱応力状態が解析された[28]．

同様な試みがＹＡＧレーザによる溶接でシュミレーションされている．対象となる溶接部材はアルミ合金で，レーザのパルス条件を変化させた場合の温度場と熱応力のシュミレーション結果が実験の結果と対比されており，良い対応が示されている[29]．

6)微粒子生成モデル[30,31,32,33]

パルスレーザを用いてプラズマプルームをコントロールし，Ｃ，Ｎｉの薄膜の積層量の最適化をシュミレーションした例が有る．プラズマプルームの特性は，パーティクルの密度分布に依存しているとし，サブストレートの動きに対してターゲットにおける積層量を算出し，実験結果と良い対応をしている事が示されている．

微粒子生成過程については，一般動力学方程式により検討されてきている．最近では，分子動力学手法も導入されつつある．プロセス中のクラスター・微粒子の物理，化学性状は，核生成によるガスからのクラスター・粒子生成，粒子へのガスの凝縮成長，クラスター・粒子間の凝集，粒子内反応，境界面への沈着等，多様なメカニズムによって急速に変化するが，これらのメカニズムのすべてを，実際のプロセス場において考慮すると，数値計算刻みを相当荒くしても，膨大な数値計算が必要である．このため，比較的簡単な系についてのみ検討が行われている．

レーザープロセスにおける粒子生成では，パルスレーザによるブレークダウンプラズマによる粒子生成において，発生したプラズマが急速に膨張して急冷されるまでの間に，クラスター・粒子が凝集して微粒子の生成が達成されるというモデルで，実験条件による生成粒子径の変化の傾向を一応説明できている．

ｂ．研究開発課題

1)加工条件の設定から見たモデリング手法に求められる課題

モデリングに求められる事項は，生産現場での加工現象をうまく説明でき，シュミレーションにより加工条件が選定でき，実際の加工中にモニタリングした結果と対応させながら，適正な条件で安定した加工を実現でき，加工結果が事前に予測できるレベルまで到達する事であり，これが実現できると素晴らしく有用なシュミレーションが構築できる．このためには，各加工現象を説明するのに十分な精度で，出来るだけ簡単な形のモデル化が出来ている事が必用であり，加工現象の厳密な観察による最適モデルの考案が重要といえる．板厚，材質が決まれば，自動的に最適な加工条件が算出される方式の開発が今後の課題である．

2)加工品質から見たモデリング手法に求められる課題

現象を正確に反映するモデリングが実現できれば，加工結果を予測する事も可能である．特に切断加工では，切断部の品質が重要であり，条件を設定する場合に予め予測できる事は大きなメリットである．溶接では溶接部に発生する欠陥を，材料との関係で明確にできれば，事前に行う膨大な実験は不要となり，予測できる欠陥に対する設計上，材質上の事前検討が出来て大きなメリットとなる．またモニタリングとの関係で，加工品質の保証を行う事が出来る．熱処理の分野でも，シュミレーションにより各材質に対する最高硬さの評価や加工部の歪みの予測などが実現でき，製品の事前検証と品質の確保に対して大きな利益となる．

溶接結果に関するモデリングでは，溶接現象が複雑であるため，現象の解明が必要である．主としてレーザと発生するプラズマとのインタラクション，穿孔現象，溶融金属の流れ，凝固過程と欠陥の発生過程等に関する詳細な検討に関してはまだ未解明な点が多く，今後の課題である．

切断に関しては溶接ほど現象が複雑ではないと考えられており，品質に関しても厚板の分野を除いて検討課題は少ない．厚板では，母材に投入される入熱が大きくなりこれに伴う溶接品質の劣化が生じるが，これを減少させる条件に関しての検討が課題となる．

熱処理に関しては，熱伝導解析と材料の変化に関して，現在でもかなり正確にシュミレーションを行っているように見える．

3)微粒子の関与するプロセスのモデリングに求められる課題

粒子の平均粒径や粒度分布の広がりなどは，超微粒子やこれを利用したプロセス製品の性能を決定する最も重要な値であり，この予測ができれば，プロセスの最適設計・制御に大いに役立つ．

微粒子の性状変化や運動・沈着に係わるメカニズムや粒子と光の相互作用のメカニズムに関して理論式は提案されているものの，レーザーＰＶＤ／アブレージョンによる微粒子生成や，レーザーアシストガスデポジション等の実際の複雑なプロセス場のモデリングは未だ殆ど行われていない．こうしたプロセスの解析・評価に適用しうる，妥当性を保ちつつ簡略化したモデルの作製と，インプロセスプロセスモニタリングによるその検証は，今後の重要な課題である．

4)解決すべき研究開発課題

・加工条件の最適化手法の確立
・加工現象の観察による最適モデリングの構築
・加工現象と加工品質の相関性の解明
・プラズマとレーザとのインタラクションの解明
・材料変化に対する定量的評価手法の確立
・粒子とレーザの相互作用の解明

参考文献

1)大村悦二，福本一郎“レーザ熱加工における溶融・蒸発シュミレーション”

第35回レーザ熱加工研究会誌， Vol. 2, No. 2(1995), pp73-82

2) T. Yabe, T. Mochizuki, H. Hara"Multi-Dimensional Hydrodynamic Simulation of Laser-Induced Evaporation Dynamics"Proceedings of LAMP'92, Nagaoka (June, 1992), pp387-392

3) V. Kovalenko, V. Romanenko, N. Chuck"Mathematical Modeling at Metal Laser Cutting Quality Evaluation"Proceedings of LAMP'92, Nagaoka(June, 1992), pp393-396

4) D. Schuocker"The Physical Mechanism and Theory of Laser Cutting" Industrial laser handbook, pp65-79

5) 瀬口正記 "ＣＩＰ法による溶接過程のシュミレーション" CIPUS ANNUAL REPORT , CIPUS-A93, (1992. 9-1994. 3)

6) 松広克之，稲葉洋次，黄地尚義 "キーホール溶接のモデル解析" 溶接学会論文集， Vol. 11, No. 4(1993), pp479-483

7) 松広克之他 "高エネルギ密度ビーム溶接におけるキーホール形成限界について" 溶接学会論文集， Vol. 13, No. 2(1995), pp218-222

8) 宮本勇，丸尾大 "レーザ溶接における蒸発特性" 溶接学会論文集， Vol. 13, No. 4(1995), pp544-549

9) R. Ducharme, P. Kapadia"The Collapse of the Keyhole in the Laser Welding of Materials "ICALEO(1993), pp177-183

10) J. Dowden et al. "A Mathematical Model for the Penetration Depth in Welding with continuous CO2 Lasers"ICALEO(1994), pp451-460

11) T. Ohji et al. "A Mathematical Model for Laser Welding with Keyhole" ICALEO(1994), pp471-479

12) D. Schocker"Physical mechanism and modeling of deep-penetration laser welding" Industrial laser handbook, pp67-73

13) J. Mazumder et al. "Bath convection in laser melting" ECLAT'90, Fundamental aspects, pp37-53

14) D. Schuocker"Modelling of the laser welding process" ECLAT'90, Fundamental lasers, pp55-64

15) G. Molino et al. "Thermal modelling of the laser welding process using a realistic power distribution of the beam"ECLAT'90, Fundamental aspects, pp195-205

16) J. Milewski, G. Keel"Modeling and Validation of Multiple Joint Reflections for Ultra-Narrow Gap Laser Welding"Proceedings of ICALEO'95, LA-OR-95-3424

17) A. F. A. Hoadley, M. Rappaz, and M. Zimmermann"Heat-Flow Simulation of Laser Remelting with Experimental Validation"Metallurgical Transactions B, Vol. 22B, Feb. (1991), pp101-109

18) H. Onuma et al. "Thermal Conduction Analysis for Laser Surface Modification

Process"Proceedings of LAMP'92, Nagaoka(June, 1992), pp341-346

19) E. Wolfgang et al. "Melt Dynamics and Solidification in Surface Processing with Laser Radiation"Proceeding of LAMP '92, Nagaoka (June, 1992), pp353-359

20) J. Mazumder, D. Voelkel"Challenges in Modeling and Measurement of Laser Materials Processing"Proceedings of LAMP792, Nagaoka(June, 1992), pp373-380

21) Y. Matsuhiro, Y. Inaba, T. Ohji"Mathematical Modeling of Molten Pool in Laser Welding"Proceedings of LAMP'92, Nagaoka(June, 1992), pp381-386

22) R. Duchame, P. Kapadia"An Integrated Mathematical Model for the Welding of Thick Sheets of Metal with a Continuous CO2 Laser"ICALEO(1993), pp97-105

23) V. I. Mazhukin "Dynamics of Melting and Evaporation in Pulsed Laser Deposition :Numerical Simulation" ICALEO(1993), pp184-192

24) J. C. Ion"Modeling of laser material processing"Industrial Laser Hnadbook pp39-47

25) 片山聖二，水谷正海，松縄朗“パルスレーザ溶接の凝固モデル“ 第29回レーザ熱加工研究会論文集 (1993)pp179-190

26) S. Katayama et al. "Laser Rapid Solidification Microstructure and Microsegrega-tion of Aluminum Alloy Single Crystals"Proceedings of LAMP'92, Nagaoka, (June, 1992) pp361-366

27) 井上勝敬，大村悦二“レーザ変態硬化過程の数値シュミレーション” 第23回レーザ熱加工研究会論文集，(1990年1月)， pp43-52

28) H. K. Tonshoff, C. W. Byun"Numerical Calculation of Temperature and Stress Field in Laser Welding of Ceramics with Two-Dimensional Free Boundary" Proceedings of LAMP792, Nagaoka(June, 1992), pp367-372

29) E. J. Michaud, D. C. Weckman, H. W. Kerr"Effects of Pulse Shape on Predicted Thermomechnical Strains in Nd:YAG Laser Welded Aluminum"ICALEO(1994) pp461-470

30) R. Dietsch et al. "A Modified Plasma Source for Controlled Layer Thickness Synthesis in Laser Pulse Vapour Deposition(LPVD)"Advanced Materials for optics and Electronics, Vol. 2(1993)pp19-29

31) 東野達“エアロゾルの粒度分布変化のシュミレーション手法”エアロゾル研究 Vol. 10, No. 2(1995), pp106-113

32) 松本充弘“クラスターの分子動力学計算”エアロゾル研究， Vol. 10, No. 2(1995), pp89-94

33) 奥山喜久夫，吉沢昭宣“気相における粒子の生成・成長の機構”エアロゾル研究 Vol. 3, No. 1(1988), pp6-22

4.3.7 短波長・短パルスフォトンプロセス技術

(1) 真空紫外領域

a. 真空紫外フォトンプロセスによる有機・ポリマー材料の高性能化・高機能性付与

1) 背景および現状技術

紫外光 (Ultra-violet; UV) とは波長400～200nm の光のことであるが，それよりも波長の短い200～1nm の領域の光を真空紫外光 (Vacuum UV; VUV) と呼んでいる．これは，大気中の酸素が VUV を吸収するために，実験を行うには真空雰囲気が必要であった過去の経緯から，このように命名されている．

VUV を用いた材料プロセス研究の歴史は紫外光プロセスに比べると，光源の特殊性からそれほど長くないが，光源装置の開発の進展から現在活性化してきている．この理由として，UV プロセスが π (パイ) 電子や価電子帯の励起を起点にして進行するのに対して，VUV プロセスは σ (シグマ) 電子や内殻電子の励起に基づいていることが挙げられる．現時点では内殻励起過程は未知の部分が多いものの，高い励起状態を生成することができるので，新しい VUV 光反応に基づいた材料プロセスのブレークスルーが期待されている．VUV 材料プロセスに用いられる主な光源として，

①レーザー：F_2レーザー，Ar_2レーザー，アンチストークスラマンレーザー

②ランプ：希ガスエキシマランプ，重水素ランプ

③放電プラズマ光：Zピンチ希ガス放電プラズマ

④シンクロトロン放射光 (SR)

がある．光源としてのポテンシャルは，波長可変性や高強度光の放射といった特徴から SR が最も優れているが，装置が巨大かつ高価であるために，一般の研究室単独で装置を維持・管理することは不可能であり，マシンタイムを自由に設定できないのが欠点である．レーザーは波長が固定化（単色化）されており，高強度での照射ができるので，材料プロセスの研究には最も適した光源といえる．ランプの場合，光強度がやや低いが，光に指向性がないために大面積処理に適しており，また，上記の4つの光源の中では最もフォトンコストが安いので，実用化を目指した研究には重要な光源である．特に，希ガスエキシマランプの装置開発は最近進展しているので，低強度の照射でも処理が可能である系や，大面積照射を必要とするプロセスでは好適な光源といえる．

また，VUV 照射環境としては真空ないし減圧下が望ましい．しかし，長波長部の VUV (波長150nm 以上) の使用であれば，高純度のヘリウムや窒素ガスをパージガスに用いることで，大気圧雰囲気での照射は可能である．このように，VUV は UV に比べると大気中を伝搬できないので，装置の制約や作業効率は悪い．しかし，VUV には UV にない種々の魅力があるため，新反応の探索を目的とした研究が進められている (表4.3.7.1)．

現在までに報告されている VUV を用いた有機・ポリマー材料プロセッシングの研究には，

①アブレーション加工，再構築膜の作成[1-3]

② CVD 法による薄膜作成[4]

③表面化学処理[5]

が，代表的である．とくに，ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) に代表されるフッ素樹脂のプロセッシングが注目されている．これは，フッ素樹脂が耐薬品性・耐熱性・耐候性に優れ，さらに，電気特性として高周波領域においても低誘電性をもつ材料であるため，工

業的に広く興味が持たれているためであることと，UVでの直接光加工が不可能であるためである．VUV領域にはPTFEの吸収があるため，高効率なプロセスが期待されている．VUV処理によって，微細加工を行った例や表面自由エネルギーを大きくし，接着性を改良した例がある．また，炭化水素ポリマーで化学結合が飽和している難加工性ポリマー（ポリプロピレンなど）の表面処理も検討され始めている．

表4.3.7.1　真空紫外光および紫外光を用いた材料プロセスの比較

	真空紫外フォトンプロセス	紫外フォトンプロセス
波長範囲	1～200nm	200～400nm
励起対象	σ電子，内殻電子	π電子，価電子帯
励起状態	高励起状態，イオン化過程	励起状態，ラジカル化過程
対象ポリマー	結合飽和系ポリマー	芳香族系ポリマー
照射雰囲気	大気中不可	大気中可

2）解決すべき課題および将来動向

VUVを使った材料プロセスは，光源開発が発展途上であるので，研究が本格的に始まったばかりである．したがって，現状は基礎研究に勢力が集中している．解決すべき課題は多数あるが，VUVの特徴を最大限に活用したテーマを選定すべきである．

○光源の特徴を生かした新材料プロセスの開発

・高解像度の微細パターンプロセス

VUVはUVよりも波長が短いので，高い解像度の微細パターンプロセスが達成できる．現在，種々の電子デバイスの平面解像度はサブミクロン程度であるが，将来，数10nmの解像度が必要な場合にはVUVまたはX線プロセッシングが高スループットの系を提供できる．

・高励起状態からの新物質創製

UV励起の場合よりもさらに高エネルギーレベルに励起することが可能であるので，新規な反応が期待される．特に，高い量子収率でイオン種を生成することができるので，これまで定量的なイオン化が困難であった有機分子への応用が興味深い．高効率でイオン種を定量的に発生させることができれば，適当な電場を印加することでビーム状のイオン種のハンドリングが容易になり，フォーカスした有機分子の活性種ビームを使ったプロセスが可能になる．

○内殻励起／シグマ電子励起による反応の機構解明

現在の光化学は，パイ電子励起に基づいた反応系に立脚しているので，内殻励起／シグマ電子励起過程は不明の部分が多い．光と物質の相互作用を解明していくには，VUVによる励起状態および素反応解析の研究を推進する必要がある．特に最近，分光されたSR光をポリメチルメタクリレート(PMMA)に照射すると，照射波長に対応してPMMA表面から放出されるフラグメントの種類が変化することが見出されている(図4.3.7.1)[6]．これ

は，波長選択的な内殻励起によって分解過程が変化することを示しており，光を使った結合選択的な解離反応への応用として興味深い結果である．

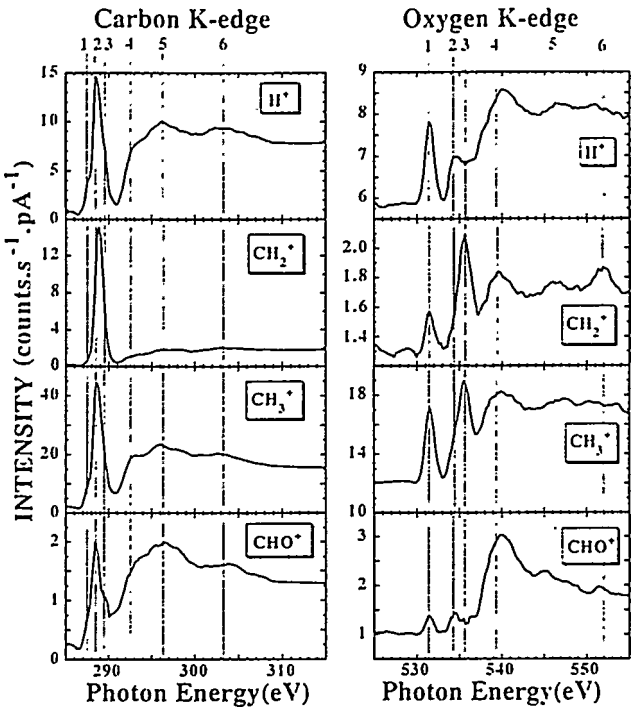


図4.3.7.1　PMMA表面から放出されたフラグメントの波長依存性[6)]

参考文献

1) S. Wada, et. al., Appl. Phys. Lett., vol. 62, 211(1993).
2) Y. Ueno, T. Fujii, and F. Kannari, Appl. Phys. Lett., vol. 65, 1370(1994).
3) H. Niino, et. al., J. Photopolym. Sci. Technol., vol. 5, 301(1992).
4) M. Hanabusa, Thin Solid Films, vol. 218, 144(1992).
5) H. Niino and A. Yabe, J. Photopolym. Sci. Technol., vol. 7, 369(1994).
6) K. Tamaka, Rev. Sci. Instrum., vol. 66, 1474(1995).

（2）　短パルスレーザープロセス

a．有機・ポリマー材料への応用

1）背景および現状技術

現在一般に，材料プロセスで用いられるパルスレーザーとしては，エキシマレーザー，炭酸ガスレーザー，YAGレーザーなどが挙げられるが，これらのレーザーのパルス幅はナノ秒(1ns=10^{-9} s)領域の装置が多く，代表的には数10nsの機種が多い．しかし，化学反応にとってナノ秒は素反応の時間領域ではなく，大部分の素反応ではピコ秒(1ps=10^{-12} s)またはサブピコ秒がその時間領域である[1)]．したがって，ナノ秒のレーザーパルスを用いた場合，パルスの前半部分で生成した活性種が，パルスの後半部分でさらに光を吸収して別の分子に変化する可能性があり，反応系が複雑化することがある．このような多段階反応が望ましくない場合には，反応を単純化する一つの解決策として，サブピコ秒程度の極

短パルスを反応に用いることが挙げられる．このような経緯から検討された系には電子移動反応の直接観察が挙げられる[1]．

また，極短パルスレーザーを集光して材料表面に照射した場合，入射光が誘起する電場は10^{10} V/mを超える高電場になるために分子の電子雲の形状にひずみが生じる．したがって，分子軌道が変形するために，吸収スペクトルの位置がシフトする．さらに，きわめて短い時間に大量のフォトンが限られた狭い空間に入射するので，分子はフォトンを何回も吸収することになり，多光子吸収過程が高い確率で起こることになる．このような励起過程は，ランプやナノ秒のパルスレーザーの照射では起きない現象であるので，極短パルスレーザーの特徴といえる．

極短パルスレーザー装置の問題点としては，ナノ秒のレーザー装置がほとんどメンテナンスを必要としないのに比べて，極短パルスレーザーは構造が複雑であるために，光軸の調整に高度な専門技術が必要であること，および，室温の変化・建物の振動などに影響されて発振状態の安定性が低いことが挙げられる．これらの装置の課題は，徐々に改善されつつある．

現在までに報告されている極短パルスを用いた有機・ポリマー材料を対象とした研究は，基礎研究が大部分[1]であるが，プロセッシング分野の研究としては，

1. 高分子材料のアブレーション加工[2-3]
2. 生体材料のアブレーション加工[4-5]

が報告されている．現時点ではナノ秒パルスとサブピコ秒パルス照射時の比較が大部分であるが，装置が普及するにつれて，極短パルスに特異的な現象が見いだされることであろう．

一方，パルス時間幅を短くするだけでなく，ピコ秒～ミリ秒のスケールで希望する任意の時間プロファイルに成形することができれば，プロセスの適用範囲が広がる[6]．これは，現在のレーザー装置が発振方式によって，パルス時間形状がほぼ固定化されるためで，例えば，鋭い尖塔パルスを最初に持ち，続いて任意に加工したプロファイルが発振するような光源があれば，加工残査除去の問題や加工表面の平坦性を向上できる可能性がある．

2）解決すべき課題および将来動向

極短パルスレーザーの応用としては多光子吸収過程を利用した高励起状態からの反応が期待される．前節の真空紫外光の利用によっても高励起状態は生成するが，反応雰囲気に制限があるので，大気中での処理が可能な極短パルス照射は，特に生体関連材料のプロセッシングや液体を含む試料に適していると考えられる．

参考文献

1) J. Manz and L. Woste, eds., "Femtosecond Chemistry", VCH, Weinheim, (1995).
2) S. Kuper ans M. Stuke, Appl. Phys. Lett., vol. 54, 4(1989).
3) R. Srinivasan, E. Sutcliffe, and B. Braren, Appl. Phys. Lett., vol. 51, 1285(1987).
4) W. Kautek, et. al., Appl. Phys., vol. A58, 513(1994).
5) J. Fischer, et. al., Appl. Phys., vol. B58, 493(1994).
6) R. Srinivasan and B. Braren, Appl. Phys. Lett., vol. 53, 1233(1988).

b.　金属材料への応用

レーザのプロセスエネルギー源としての特長の一つに，Ｑスイッチングや短パルス放電により短パルスで高ピークな出力を容易に発生できることが挙げられる．短パルスで高ピークな出力は薄膜を選択的に加熱するのに適している．下地を損傷させることなく，除去加工[1]や溶融リフロー[2]などを行うことが可能となる．また，試料表面を蒸発させ，微細な凹凸を表面に形成することの可能である[3]．効果的にプラズマを発生させることもできる．プラズマで生成される衝撃波を利用して表面に残留圧縮応力を形成する試みも行われている[4]．

高い選択加工を実現していく上で，短パルス性は重要な要素である．例えば，パルス幅数１０ｎｓ以下のレーザ出力を用いれば，金属材料の表面を熱影響１μｍ以内で加工することが可能になる．半導体や電子デバイスの製造では，パルス幅数ｎｓのＹＡＧレーザのＱスイッチ出力が，リペアを目的とした薄膜の除去加工に用いられている．これらのデバイスではパターンの微細化が進行している．これに対応していくために，サブｎｓのレーザパルスの発生と加工が試みられている[1]．短パルス化は加工分解能の向上だけでなく，

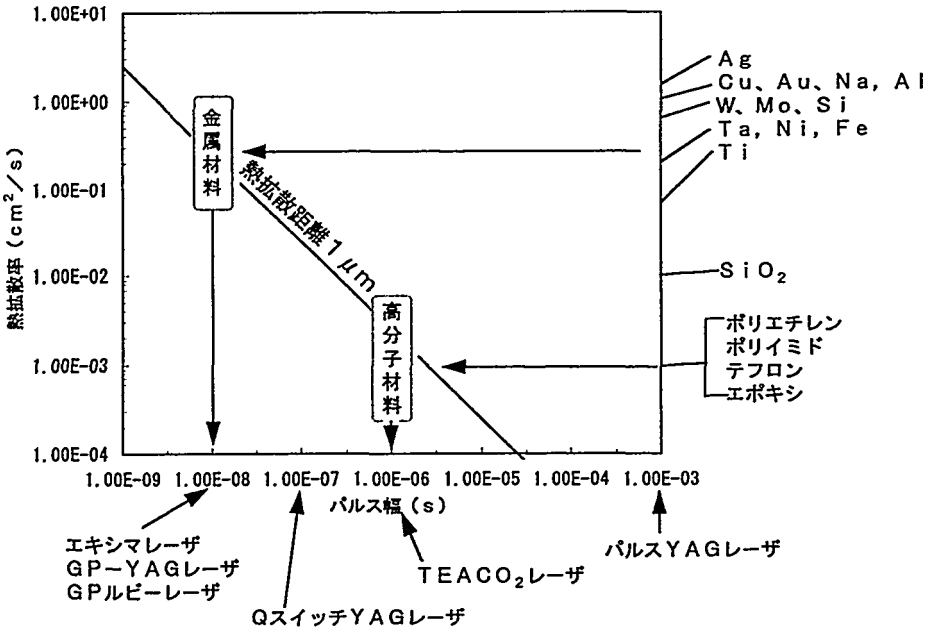


図4.3.7.2　各種材料において熱拡散距離が１μｍとなる加熱時間

下地への熱影響低減にも大きく寄与している．溶融リフローでは，エキシマレーザを用いて，下地に損傷を与えることなくスパッタで形成したアルミ合金の薄膜をホールへ埋め込んでいる[2]．レーザリフローを用いることにより従来のスパッタ法では埋め込み困難であった，微細で高アスペクト比のホールへの埋め込みが可能となる．また，溶融凝固に伴う再結晶により，配線としての性能も大きく改善される．これは，半導体での多層配線の実現に大きく寄与していく技術である．このプロセスにおいて埋め込みは溶融した金属の表面張力により行われる．安定に埋め込むためには，金属膜を熱変形させることなく瞬時に

溶融させることが必要である．１００μｓのパルス出力では，溶融前に金属膜が熱変形して密着性が悪くなる為，下地露出を生じる．この表面張力の作用を利用して，切削加工における加工痕を平坦にすることも可能である[3]．ＹＡＧレーザのＱスイッチ出力を用いて平坦化を図った例を図２に示す．ｐ－ｖで１０μｍあった表面粗さが２μｍに改善されている．これは，高速な表面仕上げ方法として期待されている．

レーザによる除去作用を利用して，表面に凹面を形成した例を図３に示す．１００ｎｓのパルス出力を用いて数μｍの分解能で深さ２０μｍのくぼみが形成されている．潤滑や意匠形成を目的とした，制御された表面処理技術として高い可能性を持っている．

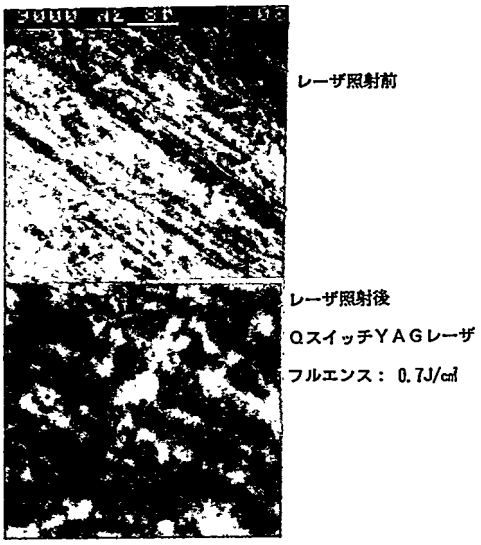


図4.3.7.3
アルミニウム合金（ＡＺ０１７Ｓ）切削面の
ＱスイッチＹＡＧレーザによる平坦化

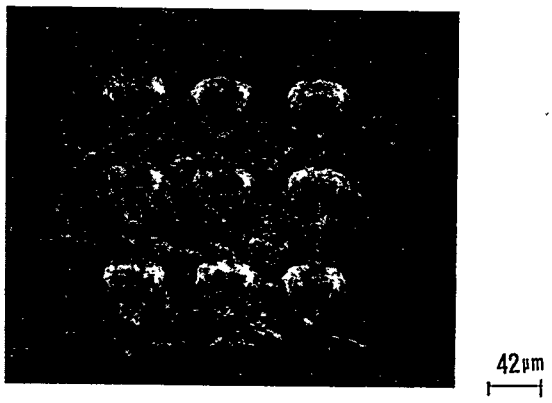


図4.3.7.4
高炭素鋼へのくぼみ形成
ＱスイッチＹＡＧレーザと結像
光学系を使用

衝撃波利用では，ＧＰ－ＹＡＧレーザにより発生させた５ｎｓのパルス出力を水中でステンレス鋼に照射して，衝撃波により残留圧縮応力の形成に成功している．５０ｎｓの銅蒸気レーザでは，表面に加熱の履歴と思われる残留引っ張り応力が形成されている．この残留圧縮応力の形成は，原子力プラントの溶接部の耐食性改善技術として期待されている[4]．

短パルス出力を用いることにより，レーザ加熱により生じる表面の溶融や除去，プラズマ発生の現象をプロセスとして制御した形で利用することが可能である．これらの現象を利用して，表面の形状や性質の制御が可能となる．ドーピングや酸化・窒化などと組み合わせることにより，さらに高度な機能形成が可能となる．将来，一つの表面に複数の機能を作り込み，高度な機能持った部品を実現していくことにつながっていく技術である．

これらの応用実現におけるレーザ技術の課題は，プロセスに適したパルス波形の把握と，その発生およびハンドリングである．適正パルス波形の検討には，レーザ照射部の挙動の

観察が重要であるが，短時間で完了するプロセスの変化を，十分な分解能を持った画像や信号で捕らえることは難しい．シミュレーション技術の利用なしにプロセスの最適化は困難である．任意のパルス波形は，複数の小形発振器を用いて合成し増幅する手法が効果的である．課題は，大出力化である．リペアのような特殊な用途を除き，プロセスと実用化していくためには，数十W以上の平均出力をもつレーザが必要である．ビームハンドリングでは，高ピーク・大出力の光ファイバ伝送技術が課題である．

参照文献

1) 吉野洋一，他："短パルス固体レーザによる薄膜電子部品の微細加工",レーザ学会学術講演会第16回年次大会講演予稿集，(1998)s13-s15
2) 石田修一："半導体・液晶プロセスとしてのＵＶレーザ加工",レーザ学会学術講演会第１６回年次大会講演予稿集，(1998)s9-s12
3) 藤森康朝："レーザによる表面加工",日本機械学会誌，Vol.95,No.889，(1992) 1081-1084
4) 佐野雄二，小長井主悦："レーザーによる水中表面処理",レーザ学会学術講演会第16回年次大会講演予稿集，(1998)157-160

4.3.8　レーザハイブリッド技術

(1)波長コンバインド加工技術

レーザは媒体，励起方法によってフォトンエネルギー（波長），フォトン量（パワー，パルス幅等）が異なっており，これにより，材料表面での反射率，内部での吸収係数，あるいは直接作用する化学結合，励起準位に違いが生じることが知られている．最近ではこれらの違いに着目し，複数のレーザを組み合わたレーザコンバインド加工により，溶接，表面処理，成膜等多岐にわたる領域で加工能力の大幅な改善，新加工プロセスの開発が試みられている．

溶接におけるレーザコンバインド加工は，２本の炭酸ガスレーザあるいは炭酸ガスレーザとYAGレーザを組み合わせた例が報告されている[1-3]．特に後者は炭酸ガスレーザを用いたセラミックス溶接の予熱手段としてYAGレーザを用いていることが特徴で，YAGレーザの浸透深さが大きい材料では板厚方向に均一な温度場が他の手段と比較してはるかに短時間に形成することが可能で，加工時間の大幅な短縮が期待できる．ただし，適正な予熱条件を得る上で，材料表面での反射率，内部での吸収係数等のデータが不可欠であり，データの蓄積および吸収モデルの構築が課題となっている．

焼き入れ，合金化などの表面改質では，ビーム吸収率向上の目的でレーザコンバインド加工を用いた例がある[4-6]．大出力を特徴とし，熱処理に通常用いられる連続出力炭酸ガスレーザは金属表面での反射率が高く，照射前に吸収体の塗布が必要であるが，高いパルスピークパワーを有する$TEA\text{-}CO_2$レーザあるいはエキシマレーザ照射を組み合わせることによって吸収率の向上が可能で，前処理，さらにレーザ照射後吸収体を除去するプロセスをも省略することができる．特に波長が短いエキシマレーザは金属表面での吸収率が高いことから，低出力でも高い効果が期待できる．これは実用化に近い技術といえるが，最大の課題は$TEA\text{-}CO_2$レーザおよびエキシマレーザ等吸収率のコントロールに使用するレーザ発振器のコスト低減にある．

レーザアブレーションによる成膜プロセスである，PLDにおいても，アブレーション用に加えて第２のレーザを用いたレーザコンバインドプロセスが検討されている．PLDにおける第２レーザの照射領域としては，(1)ターゲット[7,8]，(2)プルーム[9]，(3)基板[10,11]があり，それぞれ，以下のようにPLDの抱える問題の改善，新たなプロセス開発の可能性を秘めている．

(1)ターゲットの予熱，表面状態制御（成膜速度，溶融粒子の防止）

(2)粒子の微細化，粒子サイズ制御（溶融粒子等の防止，膜構造制御）

(3)基板の温度場制御，基板表面での粒子活性化（膜の構造制御）

図4.3.8.1はアブレーションプルームは基板へのレーザ照射により，成膜中に膜表面を励起した例で，高温超伝導体や強誘電体を作製する際の基板予熱温度を大幅に低減できる可能性がある．また，ターゲット及びレーザビームを複数使用した，新しいタイプのレーザコンバインドＰＬＤプロセスも試みられている．

このようにレーザコンバインド技術によりPLDプロセスの高度化が期待される．なお，現状では基本となるPLDプロセス自身も，(1)ターゲット表面でのアブレーション現象，(2)飛行中のプルームの状態，(3)基板上での堆積過程など，十分な解析が行われているとはいえず，今後も，前述した新しいプロセスの開発と並行した解析が必要不可欠である．

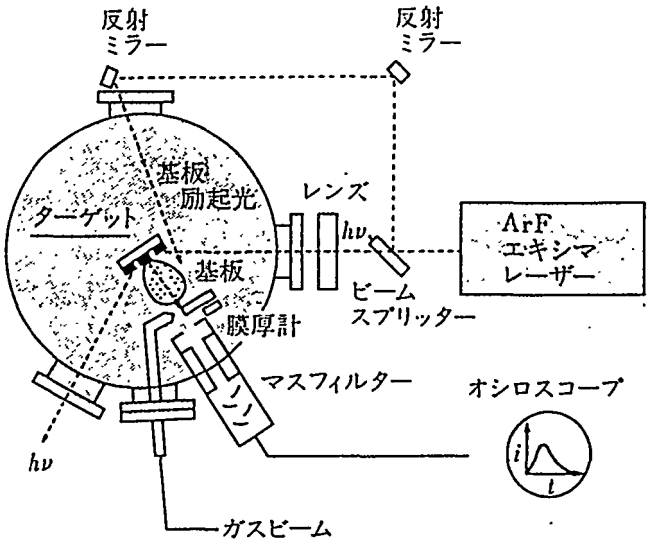


図4.3.8.1　レーザ照射を複合したレーザP.V D[11)]

（2）高エネルギービーム複合加工技術

a．レーザ・プラズマハイブリッドプロセス

プラズマを利用したハイブリッドプロセスとしては，プラズマ溶射とレーザビーム照射を併用することによる，各種高機能性皮膜・新物質の形成技術が提案されている[12)]．プラズマ溶射は耐熱性，耐食性，耐摩耗性の特性向上に役立つ種々の厚膜の材料が，大気中あるいは減圧下において容易に形成できるが，基材との密着性および皮膜の緻密性・靭性の改善が望まれている．プラズマ溶射に，制御性のよい高出力レーザビーム照射を併用することによって，溶射皮膜の緻密化および組織制御を行い，皮膜を高性能化することにより，新しい機能性複合多層膜コーティング技術の開発が行われている．これまでに，図4.3.8.2に示すような減圧チャンバー内に6軸NC制御ロボットと最大出力80kWのプラズマガンを備え，外部より最大出力10kWの炭酸ガスレーザを導入できる装置が開発されている[12)]．　このレーザ・プラズマハイブリッドプロセスにより，下記の先進材料の開発が期待されている[13, 14)]．

(1) 耐環境性先進複合材料（C/Cコンポジット材料への多層コーティング）

(2) 高性能トライボマテリアル（高温固体潤滑材料）

(3) 無機同素体クラスター（フラーレン類）

また，レーザPVDにおいて，窒素または酸素プラズマを併用することにより，薄膜の組成制御および低温成膜を目的とした研究が行われている[15)]．この方法により，耐摩耗性材料等の高速成膜等への利用が見込まれる．

b．レーザ・アークハイブリッドプロセス

アーク放電現象に伴う高温場は，大熱量，低コスト熱源であるが，一般的に加工速度，精度，制御性に多くの課題を残している．レーザとのハイブリッド化はこれらを解決すると同時に，アークに熱源としての新たな可能性を拓くものである．近年試みられている，レーザとアークのハイブリッド化の主なものは，制御性の高いレーザを通して積極的にアークの制御を行おうとするもので，溶接における溶融部形状の改善，溶接速度の向上の他，表面処理への応用が試みられている[16)]．

図4.3.8.3は，レーザ・アークハイブリッド化による表面処理の例を示している[17]．この例では，アーク単体では安定放電が維持できないような高速処理条件においても，レーザとのハイブリッド化により均一な熱処理が可能となるとされ，作業効率の大幅な向上が見込まれている[18, 19]．

図4.3.8.4はレーザ・アークハイブリッド化によるPVD装置の例である[20]．この装置ではターゲットにQ-スイッチYAGレーザを照射してアークをスタートさせ，さらにビームによる温度上昇域にアーク放電領域を限定することにより，アーク放電エネルギーの集中化が可能で，高い能率で成膜が行えるとしている．

また，近年，アーク放電に伴う高温状態を利用して新たな材料を創製するための研究が行われているが，レーザとのハイブリッド化により超高圧下においても，アーク放電の安定性維持，あるいは特定領域への放電の限定を可能とし，また，レーザ自身も熱源として有効に作用する等、材料創製の際の環境パラメータの大幅な拡大が可能となるため，この

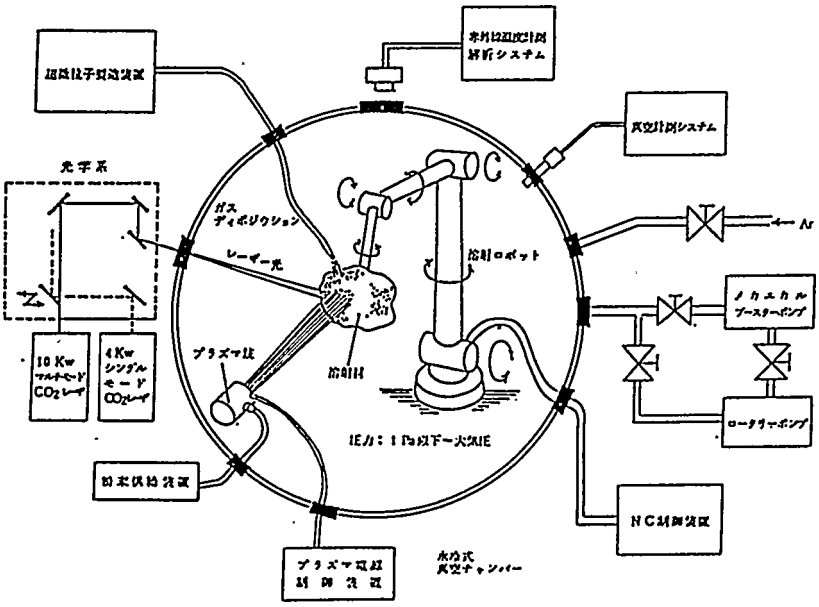


図4.3.8.2　レーザ・プラズマハイブリッド溶射システム[12]

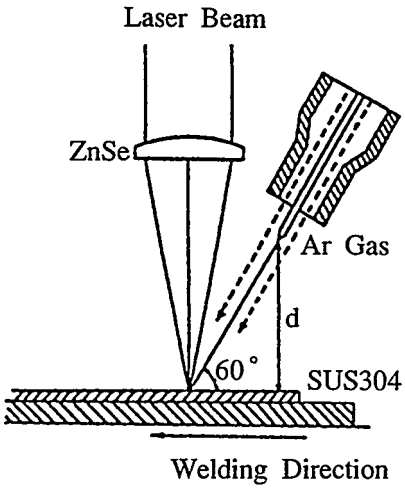


図4.3.8.3　レーザ・アーク併用高速表面処理法[17]

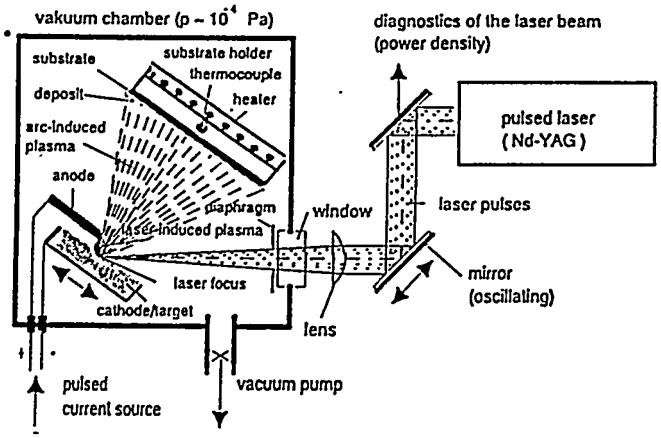


図4.3.8.4　レーザ援用アークＰＶＤ[20)]

分野での応用も期待される．

現状では，レーザ・アークハイブリッド化によるアーク安定化の理由，安定化条件などは解明されておらず，今後，現象の普遍化に必要な解析，安定領域の拡大，さらに新たな応用技術開発を目指して，プラズマ状態の解析，陰極・陽極点の挙動解析など，

(1) 放電制御技術の確立

(2) アーク・レーザ併用時のプラズマ状態の解明

を目標とした研究をプロセス開発と並行して行っていく必要がある．

c．レーザ・イオンビームハイブリッドプロセス

イオンビームは，広範囲のエネルギーを有する制御性のよいエネルギービームであることに加えて，多種類の物質を独立に供給できる物質ビームであるという大きな特徴を有し，薄膜結晶の配向性制御等構造制御にも有効である．これらの特徴を活かしつつ，レーザープロセスとハイブリッド化させることにより，新たな可能性が期待できる．以下に対象材料を，半導体材料と構造用材料にわけて記述する．

1）半導体材料用プロセス

従来よりレーザーを利用した非晶質半導体の単・多結晶化（レーザー・アニーリング）や，高エネルギーイオンビームを利用した非晶質半導体のエピタキシャル結晶成長（イオンビーム誘起結晶成長；Ion-beam-induced epitaxial crystallization; IBIEC）が研究されており，一部実用化されている．前者においてはあるしきい値以上のパワーのレーザーの照射により結晶化が誘起されるが偏析等により非熱平衡組成の半導体材料の結晶化が困難であるのに対して[1)]，後者では熱的な固相成長より充分低い温度において（Si では固相成長に必要な温度が500℃以上であるのに対して，IBIEC では200℃程度）エピタキシャル結晶成長が誘起され，低温プロセスであることや高い非熱平衡組成の形成が可能であるという特徴がある[2)]．しかし後者においては結晶成長を誘起するイオンビーム自身により結晶深部に欠陥が残るという欠点がある．この両者の欠点を補い低温での半導体の結晶成長を誘起すると考えられるのが両者を併用したレーザー・高エネルギーイオンビームハイブリッドプロセスによる結晶成長技術である．試料の溶融を起こさない低パワーのレーザー照射により電子励起を誘起することにより原子移動や再配列が起こることが化合物半導体等で観測されている一方，IBIEC においては，主要な結晶成長を誘起する因子が空孔やダングリン

グボンドであることや，同じ空孔生成率においては電子励起効果の大きい場合に結晶成長速度が大きいことが判明している[2]．このような事から，レーザーのもつ高い電子励起効果とイオンビームの持つ大きな核反跳効果の相乗効果により半導体特に非熱平衡組成を有するIV族合金半導体の良好なエピタキシャル結晶成長が可能となると考えられる．図4.3.8.5にこの方法の概念図を示す．数100keV～数MeVのイオンビームとエキシマレーザーやNd:YAGレーザーをベースとした波長可変レーザーとの複合化により非晶質合金半導体等の結晶成長を誘起する方法である．

一方，低エネルギーの物質ビーム（原子・分子・クラスター等のビーム）は，分子線エピタキシー（MBE）法に代表されるように薄膜の堆積に用いられたり，スパッタリング・エッチング等固体表面の加工に用いられるが，これらの堆積・加工の際には特定反応の促進や抑制が大きな支配因子となることが多い．そのためにレーザーによる励起・電離等により限定された状態へのビーム内部量子状態の制御を利用することが研究されている．また特に中性ビームの場合はその偏向・収束等の運動性の制御が困難であるために，レーザーから受ける光子圧や双極子モーメントを利用した運動性の制御の研究が進展している[3,4]．図4.3.8.6に示すのは，オーブンから発生する超音速物質ビームをレーザーにより運動性を制御したり励起状態の形成を行い，原子分子や物質表面との反応の誘起や反応状態の動的分析・観測を行うシステムの概念図である．この場合には，速度あるいは速度幅の極端に小さいビームの形成・収束とともにその内部量子状態制御による反応の微細制御を行うことや観測手段のプローブビームとしての利用が考慮されている．さらに反応表面のレーザー光励起を行う事で半導体生成層の構造的・光学的・電気的特性の改善が報告されているが[5]，物質ビームの制御のみならず反応表面の電子的な制御を行う事で新しい物質や構造の生成への応用が可能となることが考えられる．

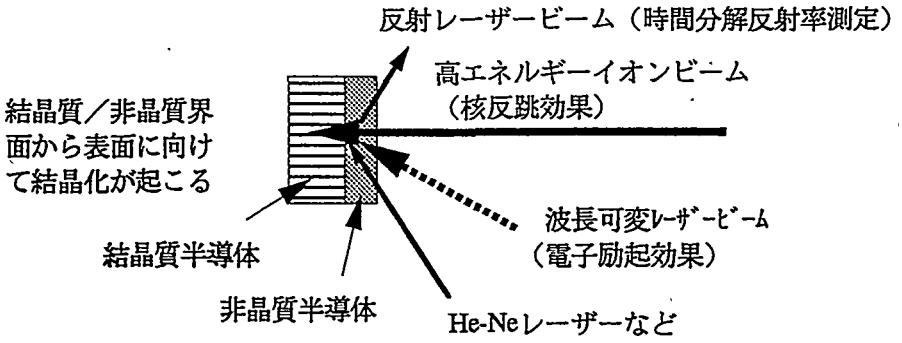


図4.3.8.5 レーザー・高エネルギーイオンビームハイブリッドプロセス概念図．

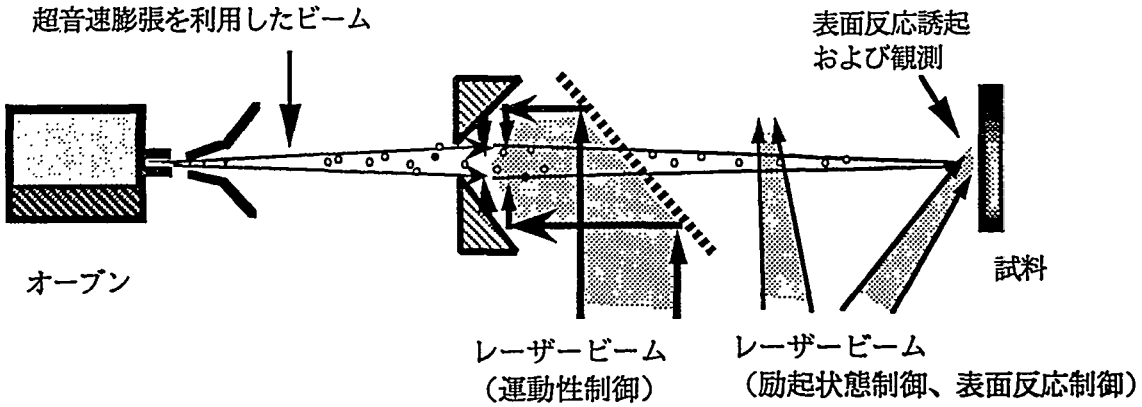


図4.3.8.6 レーザーによる中性物質ビームの運動性・励起状態制御概念図.

参考文献；

1) E. Fogarassy, D. Dentel, J. J. Grob, B. Prevot, J. P. Stoquert and R. Stuck: "$Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ film formation by pulsed excimer laser crystallization of heavily Ge and C implanted silicon", Materials Research Society Symposium Proceedings, 354 (1995) pp. 585-590.

2) N. Kobayashi:"Structural characterization of ion-beam-induced epitaxially crystallized thin layers of III-V and IV-IV semiconductors", Thin Solid Films, 270 (1995) pp. 307-313.

3) V. I. Balykin and V. S. Letokhov:"Laser Optics of Neutral Atomic Beams", Physics Today, April (1989) pp. 23-28.

4) K. Sengstock and W. Ertmer:"Laser Manipulation of Atoms", Advances in atomic, molecular and optical physics, 35 (Academic Press, San Diego, 1995), pp. 1-44. 5) J. F. Schetzina: "Photoassisted MBE growth of II-VI films and superlattices", Applied Surface Science 79/80 (1994) pp. 171-185.

d．構造材料用プロセス

耐熱性，耐食性，耐摩耗性の向上等，主に構造用材料を対象としたレーザビームとイオンビームのハイブリッドプロセスにおいては，イオンビームによる表面活性化，および物質の供給と薄膜構造の制御を目指した新プロセスの開発が試みられている．

表面を活性化する作用の応用としては，イオンビームにより原子オーダーで材料表層を除去し，活性な新生面を作ることにより，材料の接合性を改善する研究が行われている．エキシマレーザ照射とアルゴンイオンビーム照射の組合わせで，窒化ケイ素や窒化アルミニウム等のセラミックス表面に金属との接合性を発現させることが可能となっている[21]．また，レーザ PVD で薄膜を形成する前に，アルゴンイオンや薄膜の構成元素イオンを照射することにより，薄膜の密着性を大幅に向上させうることも示されている[22, 23]．さらに，イオンビームスパッタ成膜とレーザ照射を組合せたプロセスにより，図4.3.8.7に示す装置において，イオンビームスパッタ成膜に，基板へのエキシマレーザを併用することにより，これまで900K の成膜温度が必要とされていた，配向性ペロブスカイト構造薄膜を室温で合成すること[24]が可能となっている．

一方，イオンビームによる物質の供給と結晶成長の制御を目指したプロセスとして，レ

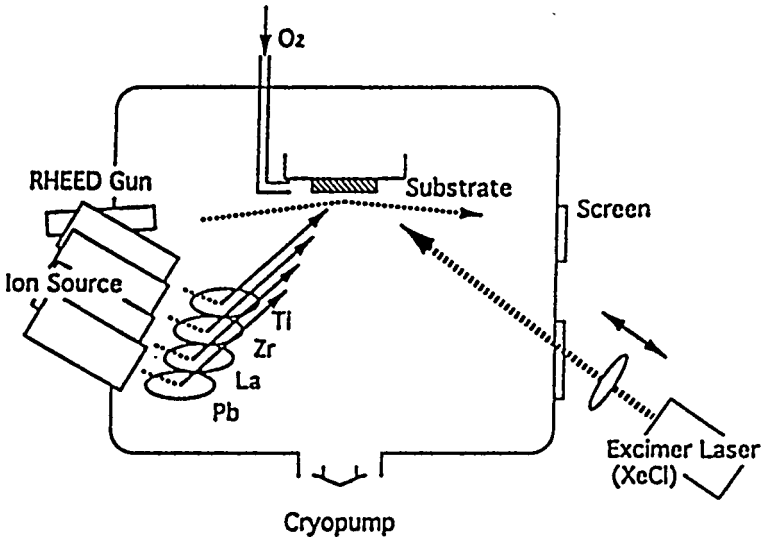


図4．3．8．7　レーザ照射を複合したスパッタリング成膜[24]

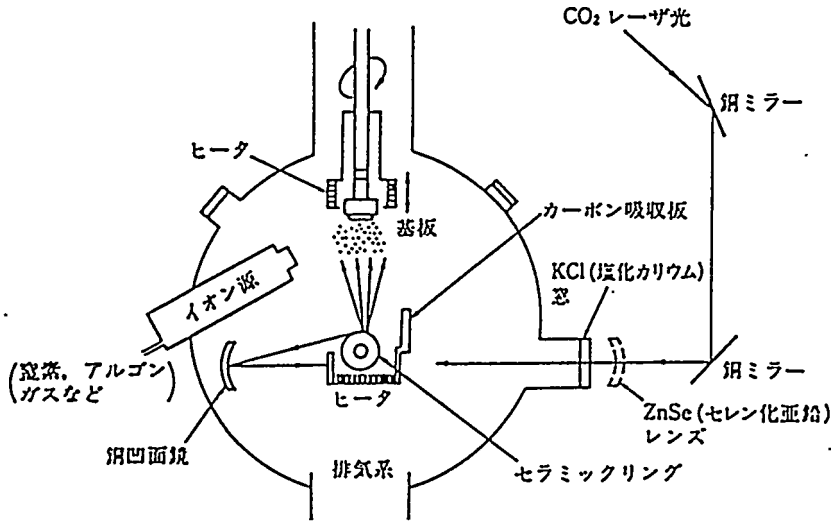


図4．3．8．8　イオン照射を複合したレーザPVD[25]

ーザPVDとイオンビームを併用し，化合物薄膜をつくる研究が進展している．図4.3.8.5に示す装置において，h-BNやグラファイトのターゲットをレーザアブレーションしながら，薄膜に窒素イオン注入することにより，ダイヤモンドと同等またはそれを越える高硬度が期待される，c-BNやC_3N_4薄膜を形成させる研究が活発化している[25,26]．また，酸化物系ターゲットをレーザアブレーションしながら，酸素イオン注入することにより，元の結晶以上に密度の高いアモルファス膜を形成し，高屈折率の薄膜が得られた例もある[27]．

レーザ・イオンハイブリッドプロセスを使うことによる，多層膜化や傾斜組成膜化等によって新しい機能性複合コーティング技術の開発が期待される．今後，成膜過程における，

(1) イオン注入量をコントロールすることによる薄膜中の組成制御

(2) イオンの運動エネルギーの選択による薄膜の構造・配向制御

を可能とする，構造・配向性のその場評価等による制御技術の確立が必要である．

（5）　その他

レーザハイブリッド技術には，これまで述べてきた他の熱源とのハイブリッド化以外，機械加工プロセス等とのハイブリッド化も開発が進んでいる．産業基盤の大きな分野を占める機械加工プロセスとレーザビームとのハイブリッド化プロセスにおいては，

(1) 独立した２つのプロセスとしての組み合わせ

(2) 複合化プロセスとしての組み合わせ

があり，前者の例としてはパンチ・レーザ複合加工機が開発，実用化されている．これはパンチング加工の高生産性と成形加工性，レーザ加工の自由度のメリットを最大限に引き出した加工機である．また，レーザビームと熱処理技術を組み合わせたレーザ複合熱処理の研究も進められており[27]，浸炭窒化とレーザ焼入れ，イオン窒化とレーザ焼入れについて炭酸ガスレーザにおいて複合による耐摩耗性向上の効果を得ている．イオン窒化などの従来法の熱処理技術により，十分な深さまで窒素を導入させたのち，表面をレーザ焼入れし窒素を含む微細なマルテンサイト組織を生成させ，高硬度の組織が得られることが示されている．これらの技術では，前節までに述べたレーザ切断，溶接，表面処理等の研究成果が生かされている．

後者は，レーザ照射により粗加工あるいは機械加工に適するように材料の特性を変化させながら機械加工を行うもので，例えば，インコネルなど難加工材料の切削を高効率化したもの[28]，セラミックス表層のレーザ除去加工と研削・切削加工を組み合わせた研究等が行われている．

このように，レーザビームと機械加工のハイブリッド化においては，

(1) レーザ波長他，ビームパラメータの選択基準

(2) レーザ照射による材料の硬度，組成，表面状態変化

を明確にしていくことが今後の課題といえる．

また，近年開発されてきた，様々な波長，パルス幅，パルス波形を有するレーザ，ファイバ等による伝送技術，新しい加工用光学系，モニタリングシステムにより，今後さらに多様な応用技術開発を進めることも必要であろう．

参考文献

1) C. Glumann, J. Rapp, F. Dausinger, H. Hugel:Laser Materials Processing, 77(1993)672.

2) T. C. Chen, E. Kannatey-Asibu:Laser Materials Processing, 79(1994)668.

3) H. Exner, B. Gerber, T. Kimme, U. Seifert, R. Straube:Laser Materials Processing, 77(1993)611.

4) G. Scott, S. W. Williams, P. C. Morgan, M. Dempster:SPIE, 2207()623.

5) Z. Liu, H. Woellmer, K. G. Watkins, W. M. Steen:SPIE, 2246(1994)74

6) R. Jaschek, R. Taube, K. Schutte, A. Lang, H. W. Bergmann:Laser Treatment of Materials, ECLAT, (1992)673.

7) P. Siemroth, T. Witke, T. Schulke, A. Lenk:Surf. Coat. Tech. 68/69(1994)713.

8) S. Witanachchi, K. Ahmed, P. sakthivel, P. Mukherjee:Appl. Phys. Lett. , 66(1995)1469.

9) 江龍修，千葉裕司，村上浩一，升田公三：レーザ研究, 19(1991)254.

10) M. Inayoshi, M. Hiramatsu, Y. Sugiura, H. Kawamura:J. Vac. Sci. tech. A13(1995)255.

11) 川合知二，田畑仁，柴田佳彦：応用物理, 62(1993)1244.
12) H. Shimura, S. Sasaki, K. Hasegawa, K. Hirano:Proc. 10th Tsukuba General Symp. (1990).
13) 志村洋文，佐々木信也，高須一郎，山下信行，越塚充欣：トライボロジスト，38(1993)613.
14) 佐々木信也：溶接技術, (1992)87.
15) K. Kaneda, K. Shibata:Jpn. J. Appl. Phys. 32(1993)5652.
16) L. Dengping, Z. Shaobin, H. Shegsun, S. Dong, Z. Jiarui:China Welding, 2(1993)104.
17) 内海明博，松田純，米田理史，勝村宗英，矢納広靖，茂川利幸，西田稔，荒木孝雄：溶接学会講演概要集, 56(1995)252.
18) J. Paulini, G. Simon:J. Appl. Phys., 26(1993)1523.
19) 内海明博，松田純，米田理史，勝村宗英，荒木孝雄，矢納広靖：溶接学会講演概要集，57(1995)356.
20) H. J. Scheibe, B. Schultrich:Thin Solid Films, 246(1994)92.
21) 矢野哲夫，大家利彦，米田理史，勝村宗英：日本金属学会誌, 59(1995)89.
22) 矢野哲夫，大家利彦，米田理史，勝村宗英：日本金属学会誌, 58(1994)1429.
23) J. C. Pivin. T. J. Lee, J. H. You, H. Park, F. Davanloo, C. B. Collins, P. Catania, Y. Sampeur, H. bernas:Nuc. Instrum. Meth. Phys. Res., B80/B81(1993)1499.
24) I. Kanno, S. Hayashi, R. Takayama, H. Sakakima, T. Hirao:Jpn. J. Appl. Phys. 34(1995)5211.
25) S. Mineta, N. Yasunaga, S. Ogura, M. Kohata:Proc. Int. Conf. Laser Adv. Mater. Proc., (1992)897.
26) R. E. Treece, J. S. Horwitz, D. B. Chrisey:Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 327(1994)245.
27) G. Reisse, B. Keiper, S. Weissmantel, H. Johansen, T. Martini, R. Scholz:Phys. Stat. Sol. (a)145 (1994)461.
28) 薬師寺正雄：金属臨時増刊号, (1990)20.
29) M. Bass, S. M. Coply, D. Beck:Proc. 4th. Europ. Electo-Optic Conf. (1978).

4.3.9　まとめ

以上，加工プロセスの観点からフォトンマシニングの現状と将来展望，及びフォトンマシニング確立のための学術的・技術的課題を総合的及び各論的に概括してきた．現在は，フォトンマシニングの概念が一般的に定着していないため，専門を異にする研究者及び技術者に若干の認識のずれが存在することも事実である．しかし，本章をまとめるに当たり，何回もの会合における討論を経てその認識の差異は互いに大幅に縮小したと云える．若干の認識の違いを容認した上で，本章で明らかにされた主要な結論をまとめると以下のごとくである．

1) レーザー技術を中心とするフォトンマシニングは，サブミクロンからキロメータにわたる広範な　加工スケールの中で，２１世紀における中心的基盤加工技術である．
2) 対象となる製品及びその機能は多岐にわたるが，フォトンマシニングへの共通した期待は
    - 超高精度加工
    - 超高速加工
    - 超高信頼性
    - 新規機能の発現

    などである．
3) 上記の期待を実現化するには，レーザーと物質との相互作用に基づく加工現象の詳細及び多くの領域で現象を説明できる学理の整備が遅れている．このため，レーザーと物質の相互作用の解明を系統的に進めることがフォトンマシニング確立のために必要不可欠である．
4) さらに，既存の計測・分析技術が空間分解能的にも時間分解能的にもフォトンマシニングに対応しきれないため，制御技術の開発が大幅に遅れている．このため，フォトンマシニングに対応できる計測・分析・制御技術の開発が不可欠である．
5) レーザーによるフォトンマシニングのみならず他のエネルギー源とハイブリッドに組み合わせた　技術は新規加工機能が期待できるばかりでなく，フォトンコストの低減にも極めて有効である．

以上の加工プロセスからみた展望を実現するためには，レーザー発振器，ビーム伝送・集光光学系及びワークテーブル・ロボットの飛躍的性能改善が要求される．これらの要望を列記すると，

1) レーザー発振器に関しては；
    - 加工目的に対応した自由な高速精密応答性及び制御性
    - 加工用レーザーの高品位ビーム化
2) 伝送・集光光学系に対しては；
    - ビームの高品位伝送・集光
    - 熱誘起歪み等に対応できる大出力レーザー用アダプテイブオプテイックスの開発

3)　ワークテーブル・ロボットに関しては；

・超高速・超高精度位置再現性

などが挙げられる．すなわち，フォトンマシニングを確立するためには，レーザー発振器，伝送・集光光学系，ワークテーブル及び加工プロセスを一体化した観点からの技術開発研究が必要である．

4．4　伝送・計測制御技術

4．4．1　はじめに

レーザプロセスにおいては，レーザ出力光をプロセス対象部まで最も効果的に伝送し，必要に応じてレーザ光の強度，スポット形状，波面，偏光等を固定的（受動的）または可変的（能動的）に制御することが基本技術として要求される．また，インプロセスモニタリングとそのための適応制御も高度レーザプロセスには望まれる．使用されるレーザは高パワーなものなので熱効果や光化学反応による光学素子・機器の機能低下，損傷・破壊，非線形光学効果など通常の強さの光に対しては余り問題とならないことが考慮対応すべき課題となる．本章ではこれらの技術の現状，課題さらに将来展望について述べる．

（1）自由空間における光ビームの伝送

光波の自由空間における伝搬は光学原理的には自己ビーム回折によって決まる．数学的に厳密な取扱いとしては平面波展開法が便利である．任意の一断面における光の振幅及び位相すなわち複素振幅分布から，そのフーリエ角スペクトル（平面波成分）を計算する．各平面波を伝搬による位相変化を考量して，任意に離れた断面においてそれを合成する．これにより，任意の光波の空間伝搬が正確に記述できる．複素振幅分布のフーリエ角スペクトルは，ビームの遠方における広がりを表す．TEM_{00}モード発振のレーザ光や単一モード光ファイバの出射光ビームの断面強度はガウス分布をする．ガウスビームは有限のビーム径をもつ球面波と見なせ、そのビーム径と球面の曲率半径の伝搬則が比較的簡単な公式で記述できる．

光線の空間ガイドのためには光ビームを偏向させる素子が必要となる．光ビーム偏向素子としては，ミラー回転，プリズム透過，回折格子やレンズによる偏角，音響光学素子による回折などがある．表面での反射を防ぐためには，誘電体コーティングや入・出射面のブリュスター角配置などを利用する．高反射ミラーには誘電体コートミラーと金属ミラーが使われる．誘電体多層膜ミラーは特定の入射角の光線に対しては１００％反射が実現できるが角度依存性が大きい．金属ミラーは，１００％反射にはならないが広角で使える．一般に透明体のフレネル反射でも９０°近い入射角の光線に対しては高反射となる．使用波長の光線に対して透明材料があれば，その全反射プリズムも使える．

光線のビーム断面形状を変化させるためには，プリズムによる屈折，円筒レンズ通過などを利用する．位相共役鏡は波面補償を可能とする素子としての応用がある．

集光には，透過光学系ではレンズが，反射光学系では凹面ミラーが使われる．レンズの機能は，幾何光学的には光線の偏向作用である．偏角の大きさは，光線の入射高（入射点とレンズの中心の距離）に比例する．波動光学的には，分布位相シフターである．集光スポット径の下限はレンズの開口の回折によって決まり，レンズの開口数をNAとすると，下限は約λ/NAで与えられる．その深度はλ/NA^2で与えられ、NAの増加とともに深度が浅くなる．ミラー使用の場合は，斜入射光学系の構成となるのが普通なので，その場合，非点収差が発生し，その補正には傾いた平行平面板などを使う．

現在，光通信，光計測などオプトエレクトロニクスにおいては，光強度，偏向，位相，偏光，波面制御のためのバルク光学素子を用いた受動または能動素子が種々開発されているが，そのままではレーザプロセスの様な高光パワーでの使用には問題がある．素子は光

吸収によって加熱され，不均一屈折率が発生し，それがレンズ効果や回折効果によるビームの広がりや偏向をもたらす．さらに大きな光パワー光の照射の場合には，熱歪や絶縁破壊による光学素子の損傷，破壊をもたらす．耐熱素材の開発を含めた新規開発が要求される．

（2）光ファイバによる伝送

フォトンをフレキシブルにハンドリングよく伝送するためには，光導波路が必要となり，このために光ファイバが使われる．ファイバは高屈折率のコア部とその周辺の低屈折率部のクッラドからなり，光の全反射によって導波されるのを基本とする．コア，クラッドの屈折率はステップ変化ばかりではなく連続変化でもよい．ファイバの光エネルギー伝送で重要なパラメータは，ファイバ軸に対してどれだけ斜めから入射した光線を導入できるかすなわち最大受光角の正弦である開口数NAとファイバのコア径aの二つである．一般に，光線の任意点における断面サイズa_Lとビーム広がり角α_Lの積$a_L\alpha_L=B$はいかなる結像系を通しても一定である．すなわち，光源で決まってしまう．レーザ光は一般に指向性がよいので，αが小さく，従ってBの値が小さい．この関係は，光ファイバに光線を導入する際には重要で，ファイバはコア径a_f，開口数$NA=\alpha_f$がそれぞれ固有であるので，それらを入射ビームのα，a以下にするとよい結合効率が得られる．このためのビーム変換のためにレンズ系を使う．むやみに集光すると$\alpha_L \gg \alpha_f$となり，かえってファイバとの光結合効率が低下する場合も当然起こり得る．光線が入射し易くなるa_f, α_fの大きなファイバは多モードファイバとなる．多モードファイバでは，2個以上の異なるモードがそれぞれ異なる速度で伝送するので，出射断面においては光の振幅，位相が一様ではない．レーザ光伝搬の場合は，多モードが互いに干渉しスペックルパターンを示し，出力光はランダムな強度分布をもつので，レンズによっても集光効率も悪く，精密なレーザプロセス応用においては問題となる．

多モードファイバを束ねたものがファイババンドルであり，広がったビームを導入伝送するのに便利である．紡糸法または溶融法によって作られ，可能曲げ半径5ｍｍの可とう性のあるものから，可能曲げ半径5ｃｍ程度のセミフレキシブル型まである．

多モードに対して，コア径と開口数の積がある値以下のファイバは単一モードファイバとなり，平面の波面とガウス分布をもつ基本モードのみが伝送する．従って単一モードファイバ出射光はレンズで鋭く集光したり，平行ビーム化し易い．しかし，広がった光源からの結合効率は低くならざるを得ない．単一モードファイバでは，伝送波面が一様なので，入出力端面の構成するファブリペロ干渉計など干渉効果による出力光強度の不安定性、さらには曲げ・外力による偏光の変動が顕著である．この偏光変動を抑えることを目的に開発されたものに，偏波面保存ファイバがある．これは，ファイバの断面形状や屈折率に偏光異方性を与えたもので，直線偏波保存ファイバと円偏波保存ファイバとがある．このうち直線偏波保存ファイバが現在普及しており，その偏光軸に偏らせて入射した光線は，ファイバが少々捻れてもファイバ偏光軸に沿って直線偏光を伝送できる．偏光の保持度は，消光比にして10^{-3}程度でる．

単一モードファイバのプロセス応用での最大の課題は，いかにして効率よくかつ非破壊にハイパワーレーザをファイバに導入するかである．対策として，離散光学系ばかりではなくレーザと一体化するこうなアプローチも望まれる．

ファイバの伝送損失は，材料吸収，散乱および曲げ損失によって生じる．レーザプロセス応用ではmオーダ長のファイバを使用するので，光通信応用と違って極限的な伝送損失低減は必要ではない．伝送損失に関しては，石英系ファイバが使用できる波長可視域，近赤外域では余り問題がないが，CO_2レーザ（10．6μm）やエキシマー紫外レーザなどに対して開発課題となる．このような波長域でのファイバ材としても，使用波長に共鳴光吸収や光化学反応を起こさないことは勿論，素材がファイバ化（線引きやクラッド付け）し易いことが条件となるので結晶ファイバのようなものには発展性に限界がある．

窓材の得にくい波長域では，中空ファイバ（真空コアファイバ）も考えられている．ガイドのために金属膜などの反射膜をコーテイングをクラッド内面にコートする．この場合，伝送損失は主にクラッド壁面でのフレネル反射損で決まるので，細径コアや曲がりのあるファイバでは反射回数が多くなり反射損は増え，短いファイバに用途が限定される．屈折率は分散式に従って変化するので，共鳴吸収波長域では屈折率が1以下になる場合があり，中空ファイバがガイド（全反射）条件を満せる（例、波長10．6μmにおけるGeO_2）．ただし，同時に共鳴光吸収を伴うので伝送損失は大きくなる．

ファイバ伝搬光をファイバ内で制御するために，ファイバ型の分波・合波器，偏光子，回折格子波長フイルターなどファイバ素子が素子が種々開発されている．また，ファイバ光増幅器，ファイバレーザなど増幅・発振機能を有するファイバ素子も開発されているがこれらの高パワーレーザ応用例はまだ殆どない．

４．４．２　高出力伝送システム

（１）光ファイバ伝送

ａ．光ファイバの種類

高出力レーザー装置は，波長，パワーによって，加工対象物や適用分野が異なる為，種々のレーザーが使用されている．最も短波長のレーザーとしてエキシマレーザー（ＡｒＦ＝０．２５μｍ）が，長波長ではCO_2レーザー（１０．６μｍ）がある．しかし，０．２５～１０．６μｍと紫外から赤外域まで広がっている伝送波長を全てカバー出来る光ファイバ伝送路は，現状では存在しない．従って，それぞれのレーザーの波長に適した光ファイバを適宜，使用することになる．

光ファイバには高出力レーザー光を効率良く伝送することの他に，

＊ 耐久性：高密度パワー伝送が可能．破損，破断事故がない．

＊ 可撓性：許容曲げ半径が小さい．

＊ 耐環境性：高温，高湿度といった環境でも変質しない．

といった様な特性が要求されるが，特に，近年，ハンドリング性向上を目的として，高出力のエネルギーを，出来るだけ細径の光ファイバに導入する，いわゆる高密度パワー伝送への要求が高まって来ている．

以下，現状の高出力レーザー導光用ファイバの種類とその問題点について記述する．一般に，光ファイバは，波長によって，紫外，可視，近赤外，そして，赤外光伝送用ファイバに区分される．これを材質で区分すると，石英ガラス，フッ化物ガラスや結晶等に分類される．図４．４．２．１に，ファイバに使用される材質の損失波長特性を示す．現在，高エネルギー伝送用ファイバとして，一般に普及しているのは，唯一，石英系光ファイバのみといえる．石英系光ファイバは周知の通り，長距離通信路として，その発達は著しいものがあり，現在，光ファイバの低損失化も，ほぼ，理論限界に近付き，その周辺技術の開発が活発に行われている．このように石英系光ファイバが発展したのは，本来石英が持つ，材料としての筋の良さが幸いしているためで，上に，掲げた，高エネルギー伝送路としての条件も，２μｍ以下の波長については，ほぼ，満足できる唯一の光ファイバと考えられる．以下，ここでは，現状ある石英系光ファイバの問題点，特に，紫外域の伝送損失増について述べ，その後，近赤外，赤外用伝送路についての，現状と問題点について述べる．

１）石英ガラス光ファイバ

石英光ファイバはコア材質によって，純粋石英のものと，Ｇｅドープのものに区別され，使用波長や用途によって使い分けられている．Ｇｅドープファイバはコア部にGeO_2をドープして，屈折率を上げたもので，屈折率分布はグレーデット型である．Ｇｅドープファイバは紫外域では，損失増が大きく，使用困難であるが，半面，近赤外域での特性に優れ，２．５μｍにおいても約４ｄＢ／ｍであり，短い長さでは，この波長域でも使用可能である．高出力レーザー導光用ファイバとして，Ｇｅドープファイバが使用されているレーザーはＮｄ－ＹＡＧ（１．０６４μｍ），Ｈｏ－ＹＡＧ（２．１μｍ），Ａｒレーザー（０．５１４μｍ）等である．Ｇｅドープファイバは，後述する純粋石英コアファイバに比較して，開口数を大きく取れるといった利点があり，光ファイバの使用量も最も多い．これまで，石英ファイバでは極端な光軸ずれや端面の汚れが無い限りファイバの破壊は起きなかった．しかし，最近，高出力パルスレーザー等が出現しファイバの耐久性が問題と

なって来ている．一般に，ファイバのダメージは入出射端面近傍で起こり易く，途中の不純物，材質の不均一などにも起因して発生する．パルスレーザーはピークのエネルギーが大きく，瞬間的にファイバの耐久限界を越え，破損に至る．Ｇｅドープファイバの耐久性は5×10^{4}W／mm^2といわれているが，レーザー出力の増大に伴い，更なる耐久性の向上が望まれている．

一方，純粋石英コアファイバは，コア部は純粋石英で，クラッド部はフッ素やボロンをドープした構造を有する．屈折率分布はステップ型が一般的である．伝送特性としては紫外域の特性に優れ，近赤外域ではＯＨによる吸収ピークが強くみられる．紫外域レーザーの代表例としてエキシマレーザーが上げられる．エキシマレーザーは紫外光であるため，光子エネルギー密度が高く，ソラリゼーション（レーザー光照射により誘起される吸収）の問題がある．ソラリゼーションの原因は，製造工程中に起因するガラス中の構造欠陥やガラス中に溶存した酸素等の気体分子である．現在，ＡｒＦ，ＫｒＦ用の光ファイバはまだ，開発段階といえるが，ＸｅＣｌ（０．３０８μｍ）エキシマレーザーを使用した治療装置の導光路としては実用レベルにある．その他，純粋石英コアファイバはＮｄ－ＹＡＧ，Ａｒレーザーの伝送媒体としても使用される．耐久性に関しては，一般に，Ｇｅドープファイバに比較して，純粋石英コアファイバの方が高エネルギー密度に対して，耐久性で優る．一般に，純粋石英で10^{6}W／mm^2と言われているが，最近，製造方法の改良等により，5×10^{6}W／mm^2の耐性を有するファイバも報告されている．しかし，前述した様に，より高密度エネルギー伝送に対する要求が高まっており，一層の改良が望まれる．

２）赤外ファイバ

赤外ファイバはレイリー散乱，ブリリアン散乱といった物質固有の散乱や吸収が減少する為，透過波長域が長波長まで広がっており，CO_2レーザー光（１０．６μｍ）などの伝送が可能である．赤外ファイバは，大きく，ガラスファイバと結晶ファイバに区分される．

2-1) 赤外ガラスファイバ

赤外ガラスファイバの材質としては，酸化物ガラス，フッ化物ガラス，カルコゲナイドガラスが上げられる．酸化物ガラスは，ガラス化の可能な酸化物としては，GeO_2，As_2O_3，Sb_2O_3等があるが，この中で，GeO_2はガラス化範囲が広いことや，石英光ファイバで実績のあるＶＡＤ法（気相軸付け法）で作製出来ることから，ファイバとして，唯一，実用化されている．ただし，適切なクラッド材が無いことや，吸湿性等の問題から，現状ではあまり，使用されていない．

フッ化物ガラスは，酸化物ガラスに比較して，より長波長域の光（２～５μｍ）を透過する．現在，ZrF_4系やAlF_4系の各種組成のガラスが検討されており，医療用のＥｒ－ＹＡＧレーザーの導光路として，一部，実用化されている．しかし，伝送可能なエネルギーが数１００ｍＪ／pulseと小さく，工業用の大出力レーザー用には適用出来ない．従来，鋳型にコア，クラッドとなるガラス素材を流し込むといったプリフォーム製造方法が取られているが，適用範囲を広げるには，いかに均一なコア／クラッド界面を得るかが今後の課題である．

カルコゲナイドファイバの中で，Ａｓ－Ｓファイバはクラッド無しでは耐環境性に著しく劣るため，Ａｓ－Ｓ組成比の異なるガラスや低屈折率プラスチック（フッ素系樹脂）等がクラッド材として用いられる．透過波長域が２～５μｍにある為，ＣＯレーザー（５μ

m）用に使用される．また，セレン系のファイバは１０μmまで良好な透過率を示すことから，CO_2レーザー光（１０．６μm）の伝送路としても検討されている．しかし，いずれも，石英ファイバに比較すると耐熱温度で１／８，引っ張り強度で１／２０と耐環境性や機械強度が十分でなく，また，伝送可能な
エネルギーがCO_2レーザーでは１０W程度しかなく，これらを如何に改善していくかが，今後の課題である．

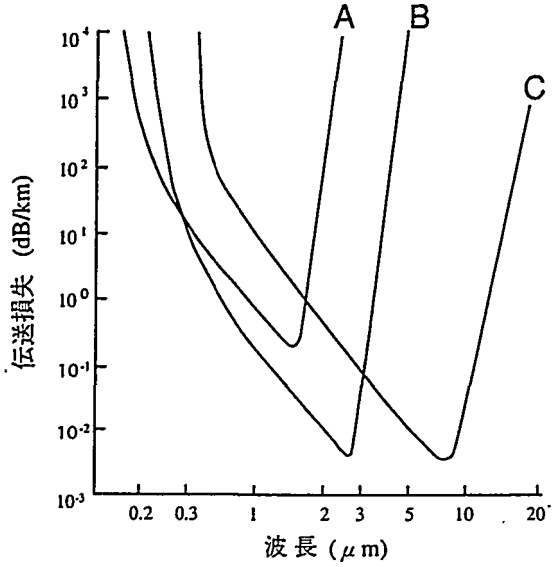
2-2) 赤外結晶ファイバ

結晶ファイバの作製方法には，単結晶による方法と，押し出し加工法にてファイバ化する方法があり，それぞれ，単結晶ファイバ，多結晶ファイバの名称で，区別される．透過波長域が赤外ガラスファイバに比較して，更に，長波長域に延びる為，CO_2（１０．６μm）レーザーの導光路として使用される．単結晶ファイバは，アルカリハライドや銀ハライドの溶融液から，連続的に，結晶を成長させる方法で作製され，ファイバ全体が単一の結晶からなる単結晶ファイバである．ＡｇＢｒ，ＴｌＢｒでファイバ化された例が報告されている．一方，多結晶ファイバは，コア／クラッド構造を有する単結晶の母材を加熱しながら押し出し，ファイバ化する．多結晶ファイバは単結晶ファイバと異なり，極微細な結晶の集合体になっている．コア／ＫＲＳ－５（ＴｌＢｒ－ＴｌＩ）でクラッド／ＫＲＳ－６（ＴｌＢｒ－ＴｌＣｌ）からなるファイバがCO_2レーザー導光路として開発され，一部，実用化されている．しかし，製造上安定化したものが得られないことやタリウムの毒性，耐環境性，機械強度が著しく劣るといった問題等今後，解決すべき問題は多い．

光出力レーザー伝送システムは図４．４．２．２に示す様に，光ファイバ以外に様々な光学系から成り立っている．以下，特に，現状広く使用されている石英系光ファイバの接続，及び，ファイバカップリングについて記述する．

ｂ．ファイバ接続，分岐

通信用光ファイバでは，接続点が多いほど損失が増加する為，基本的にはなるべく，接続点を少なくすることが望まれる．しかし，実際には，光源や受光器との接続，ファイバ同士の接続と，多くの接続点を必要とするため，如何に，損失の少ない接続を行うかが，システム全体の性能に大きく影響する．以下，通信用ファイバとの比較において，高出力レーザー導光用ファイバ接続方法について述べる．前述したように，高出力レーザー導光用ファイバは，通信用に比較して，コア径が大きい，これは，通信用のＳＭ用ファイバでは，その光軸のアライメントが非常に，難しく，高精度を要求されるのに対して，一桁程度，粗い調整で十分と考えられるが，損失を出来るだけ
小さくするには，精度が高いほど良いのは当然である．一般に，ファイバの接続には，着脱可能なコネクター方式と，永久接続方法として，融着接続が上げられる．通信用光ファイバコネクターとしては，日本で開発されたＦＣ，ＳＣタイプや米国で開発されたＳＴ，ＳＭＡといったタイプがある．通信用光コネクタは，一般に，図４．４．２．３に示すように，外径寸法が極めて，精度良く作られたフェルールとその軸同士が精度良く合致するように調芯するための嵌合スリーブ，及び，ハウジングと呼ばれる３つの部品から成り立っている．高出力レーザー導光用ファイバ用コネクタも基本構造はそのまま，継承されているが，通信用光ファイバコネクタが光ファイバとフェルールが接着剤で固定され，端面が光学研磨されているのに対して，高エネルギーを伝送しても，直接の入射光や出射光のワ



A：石英ガラス、B：フッ化物ガラス、
C：重金属ハロゲン化物結晶体

図4. 4. 2. 1
各種光ファイバの損失波長特性

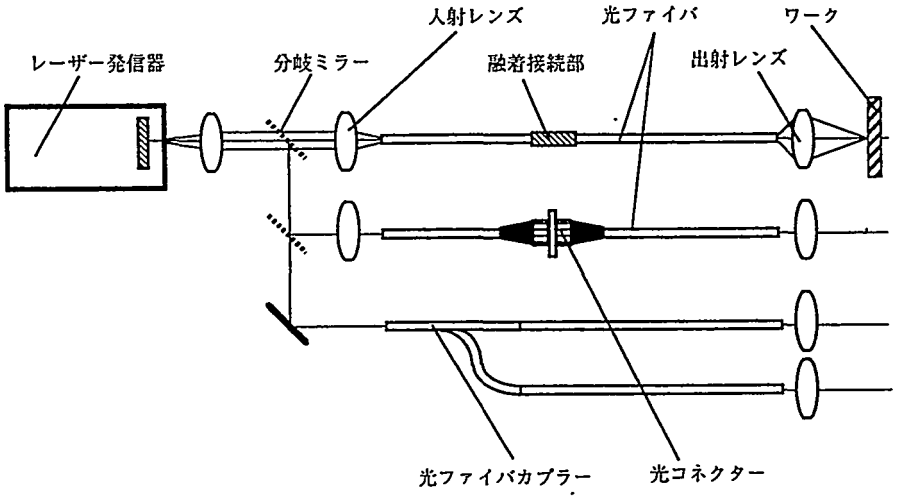


図4. 4. 2. 2　高出力レーザー伝送用光学系

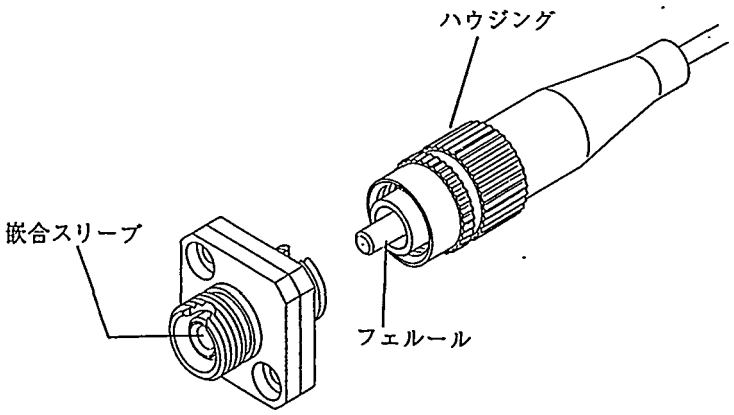


図4. 4. 2. 3　光コネクタの構造

ークからの反射光で，その端面接着剤の燃えやファイバの破壊を防ぐ為に，先端ファイバ部分のある長さを裸にして，かつ，中空に浮かせる構造を有するものが採用されている．しかし，接続損失や信頼性という意味ではまだ十分では無く，新たなコネクターの開発が望まれている．

一方，融着接続は，アーク放電による火花を用いて，ファイバ端面を溶融し永久的に接続する方法である．通信用として，ほぼ，自動化された融着接続機が開発されており，ＳＭファイバでは0.05ｄＢと，光ファイバコネクタと比較して一桁小さい接続損失が達成されている．しかし，高出力レーザー導光用ファイバの接続をこの融着接続機を使用して行うのは困難である．ファイバ径が太い分，大きな溶融エネルギが必要であり，現在あるもので，接続可能なのは，２００μｍ程度であり，これも，かなり，調整が必要である．現在，高出力レーザー導光用ファイバの使用長は最大でも１００ｍ程度であるが，将来の応用範囲の拡大に伴い，数百ｍでの使用が予想されることから，その場合，ファイバ同士の融着接続が必要になってくると考えられる．従って，高出力レーザー導光用ファイバの融着接続の開発も望まれるところである．一方，単一レーザー光源からのレーザー光を多分岐することで，ワークの同時加工や多目的加工が可能となる．現状では，主に，ビームスプリッタで光分岐が行われ，分割されて，それぞれの光ファイバに入射されたレーザー光が目的位置まで導光される．また，高出力レーザー導光用ファイバとしては，光ファイバカプラーが一部実用化されている．これは，光ファイバ同士を近づけた時に発生する漏話を利用して，光分岐を行うもので，光ファイバ同士を延伸，融着することで製造されている．これは，光軸の調整が不要で，高信頼性を有するが，高出力レーザー光の伝送における耐久性や，数百μｍ程度のファイバ径での信頼性については，ほとんど検討されておらず，今後の研究課題といえる．通信用では，この他に，光導波路型の光分岐モジュールが開発されており，その応用も検討されるべきと考えられる．

ｃ．ファイバカップリング

１）入射光学系

レーザー光源から出てくる光をファイバに効率良く，入射させるにはレンズ等の光学部品を用いて，レーザービームの形状を変化させる必要がある．一般に，光源から出てくるビーム径はファイバのコア径より大きい為，集光して入射スポット径を小さくすることが必要となる．これらの光学系を設計するに当たっては，結合特性に大きく影響するビーム性状や，ビームスポット径，開口数，コア径を考慮に入れる必要がある．また，高出力レーザー用レンズのレンズ材やコーティング材には高耐久性が要求されが，更に，ファイバ種類が波長によって区分されるように，ファイバカップリング用のレンズ系もその材質等は使用波長で区分されるのは当然である．

２）出射光学系

ファイバ出射端面から出てくる光の開口数や，エネルギー分布といった特性はファイバの光学特性に依存する．従って，実際の加工においては，スポット径やプロファイル，ファイバ端面からワークまでの作動距離等を加工目的に合致させる為，ズーム等の光学系が必要となる．しかし，現状の光学系は大きさを無視すれば，ほぼ，要求特性を満たせるといえるが，ハンドリング性を考えれば，その小型化が必要不可欠であり，今後の開発課題と考えられる．

参考文献

1) 久保：医用レーザー入門，33-62(オーム社，1985)
2) PW France : " Progress in fluoride fibers for optical communications" BTTJournal, Vol. 5(2), 28-44(1987)
3) T. Miyashita : " Infrared Optical Fibers" IEEE journal of Quantum Electronics, Vol. QE-18(10), 1432-1450(1982)
4) 千吉良：" 石英大口径ファイバの伝送特性"，藤倉電線技報第76号 (1989)
5) 三村：" 赤外ファイバ"，通信学会誌 12/'83, Vol. 66, No. 12
6) P. W. France : " Ultimate realistic losses of ZrF4 based IR fibers", SPIE, Proceedings of Infrared Optical Materials and Fibers IV(1986)
7) S. Shibata :"Prediction of loss minima in infrared optical fibers", Electrics letters (1981)
8) T. J. Bridges : "Single-crystal AgBr infrared optical fibers", Optics Letters (1980)
9) S. Sakuragi: "Policrystalline KR-5 infrared fibers for power transmission", SPIE, Proceedings on Advances in Infrared Fibers II(1982)

（2） 空間伝送技術

a．光学材料

レンズ，ビームスプリッター，ウィンドウ，ミラーなどの空間伝送用光学部品は，その表面粗さ，形状精度，材料の均質性などにおいて，対象となる光の波長に応じた光学的レベルでの高い品質を有することが要求される．しかしながら，対象がハイパワーのレーザである場合には，光学部品の『熱誘起光学歪み (thermally induced optical distortion)』という動的現象が伝送光学系の性能を左右する支配的な因子となるため，光学部品は通常の静的な品質を満足するだけでは十分ではない．これは，ハイパワーレーザの高品質な伝送を阻害する最も大きな問題の一つと考えられる．

産業用として現在最も高いパワーを有する炭酸ガスレーザでは，化合物半導体材料の一種である ZnSe (zinc selenide) 製の光学部品が最も多く用いられている． ZnSe は，化学気相成長 (chemical vapor deposition, CVD) によって合成された多結晶の光学材料で， 0.5～22μmの広い波長域で透明である．吸収係数は，波長10.6μmで1×10^{-3} cm^{-1}と比較的小さいが，吸収によって生じる不均一な温度分布によって光学部品が光学的に歪められ，レーザのモードや発散角が変化するなどのレーザ品質の不安定を招くことが知られている．この現象は，レーザのパワーが大きくなるほど顕著になる．光学部品の冷却はハイパワーレーザ用には不可欠であるが，冷却によって温度分布を均一化することは困難であり，根本的な対策とはなっていない．

熱誘起光学歪みの小さい材料を開発することは，ハイパワーレーザ伝送技術開発の重要な課題の一つである．アルカリハライド系材料の一種である KCl (potassium chloride) は，熱誘起光学歪みが小さい材料としてハイパワー炭酸ガスレーザの開発当初より注目されている．また，機械的強度，熱伝導性，化学的安定性など多くの点で優れた特性を有するダイヤモンドは，近年の気相合成技術の進展に伴って，その光学部品への応用が期待されてい

る．以下では，この2つの材料について述べる．

各種光学材料の熱誘起光学歪みの大きさは，次の式で定義される光学歪み係数 (optical distortion coefficient) χ_+により評価することができる（χ_-については説明を略す）[1]．

$$\chi_+ \equiv \frac{dn}{dT} + (n-1)\alpha(1+\nu) + \frac{n^3\alpha E}{4}(q_{\parallel}+q_{\perp}) \qquad (4.4.2.1)$$

ここで，nは屈折率，Tは温度，nはポアソン比，αは線膨張係数，Eはヤング率，$q_{\parallel}$，$q_{\perp}$は応力の方向に平行，または垂直な偏光に関する応力光係数 (stress-optic coefficient) である．χ_+は，屈折率の温度依存性，熱膨張による表面の幾何学的変形，応力による屈折率変化のそれぞれの効果を反映している．ZnSeとKClの光学歪み係数を図4.4.2.4に示す[1]．KClのχ_+は，ZnSeのそれよりも一桁小さいのがわかる．これは，KClの屈折率の温度依存性が負の値を有しており，式(4.4.2.1)において正の値を持つ他の効果と相殺されるためである．また，KClは吸収が小さい材料で，波長10.6μmでの吸収係数 7×10^{-5} cm^{-1}はZnSeの1/10以下である．熱誘起光学歪みに対する性能評価指数として，

$$\mathrm{FOM} \equiv \frac{K}{\beta\cdot\chi_+} \qquad (4.4.2.2)$$

を用いるならば（ここで，Kは熱伝導度，bは吸収係数），KClのFOMはZnSeの約70倍大きい．

KClを光学材料として適用する最大の問題点は，潮解性と機械的強度の弱さである．潮解性の対策として，耐湿性を高めるために保護膜をコーティングする必要がある．保護膜として，一般的にはプラスティック，カルコゲナイドガラスなどが挙げられる[2]．ハイパワーレーザ用としては，ThF_4，As_2S_3の研究例があるが耐湿性は十分ではない[3]．これは，膜のピンホール欠陥からの水分侵入が原因であり，最適な膜材料の選択とコーティング技術の改善により欠陥の少ない緻密な膜を形成することが求められる．また，機械的強度の改善については，KCl単結晶を加熱鍛造して多結晶化することが必要である．これによって強度を10倍以上に向上できることが示されており[4]，ZnSeに匹敵する強度まで向上できる．

ZnSe製造技術の発展により，現在ではKClをレーザ用光学部品として使用することは少なくなっている．しかしながら，KClはハイパワーレーザ用光学材料として優れた特性を有しており，上記の課題が解決されれば，今後のレーザプロセス技術発展に伴ってその需要が高まっていくものと思われる．

次に，ダイヤモンドについて述べる．ダイヤモンドは，機械的強度，熱伝導性，化学的安定性など以外にも光学的に優れた特性を有しており，ハイパワーレーザ用光学材料として有望である．一般に，材料固有の多音子吸収 (multi-phonon absorption) のある2～6μmの範囲を除き，紫外から遠赤外まで広い波長範囲で透明な材料である．ダイヤモンドの熱誘起光学歪みは，熱膨張が小さいために屈折率の温度変化が支配的である．光学歪み係数は，正確な値ではないが波長1μmで1×10^{-5} K^{-1}と小さく[5]，符号は異なるがKClと同程度である．吸収係数は，上記の吸収帯を除く波長範囲でも0.01～0.1 cm^{-1}と比較的大きいが，熱伝導度が極めて大きいため，FOMはZnSeの数倍～100倍と考えられる．結晶中の不純物や欠陥を減らすことで1×10^{-4} cm^{-1}以下の吸収係数になるとの予測もあり[5]，今後の進展が期待される．また，ダイヤモンドの高い機械的強度や化学的安定性は，高圧，

汚染，腐食などの厳しい環境下での使用の点でも注目されている．

ダイヤモンドの合成は，最初に高温－高圧プロセスで成功したが，同時期に低圧下の気相成長が可能であることが示され，その後様々なCVD法が開発されている[6,7]．成長速度は，1～900μm／hまであり，膜材料としてだけではなくウィンドウをはじめとするバルク材料としての利用も可能となりつつある．

ダイヤモンドは，その高い機械的強度のために加工が難しく，加工形状の制限や高い仕上がりの困難性，加工効率の低さなどが大きな課題である．ダイヤモンド砥粒，工具による機械的加工が一般的であるが，それ以外に，超音波加工，レーザ加工，イオンエッチング加工，熱化学的加工などの例がある[8]．特に，YAGレーザによる切断，穴あけ加工や，高温の鉄板との熱化学作用を利用した研磨加工[9]が注目される．

ハイパワーレーザ用光学材料としてのダイヤモンドは，高品質大型結晶の合成が重要な課題の一つであり，また，その後の加工，コーティングを含めた製造プロセス全体の技術開発が必要である．更に，産業化にはコスト低減が必須である．課題は多いが，機械，電子デバイスだけではなく光学の分野でも，究極の材料として期待される．

b．光学部品

光学部品は，材料，形状，コーティングを最適に設計し高品質に製造することによって様々な機能を持たせることができる．複数の光学部品を組み合わせて複合光学系とすれば，更に高い性能，機能を実現することが可能である．しかしながら，光学部品点数の増加は，光学装置の大型化を招き，特にハイパワーレーザ用では，光学系の吸収率増大とそれに伴う熱誘起光学歪みの問題が深刻となる．非球面光学部品は，光学部品点数を減らすのに有効であるが，面形状の自由度はそれほど高いとは言えない．これに対して，波動光学に基づく回折型光学部品 (diffractive optical element, DOE) は，表面の微細な構造によって光の波面(位相分布)を直接的に制御するため，光学部品の薄型化や点数の減少，単一光学部品への機能複合化が容易であり，光学装置を小型化することができる．また，従来の屈折，反射型の光学部品には無い機能を実現できる点でも注目される．DOEは，既にCDプレーヤーのピックアップヘッド用レンズ[10]など適用が始まっており，今後の応用展開が期待されている．ここでは，ハイパワーレーザ用としてのDOEの可能性について述べる．

DOEの代表的な機能を図4.4.2.5に示す．これらの機能は，従来の光学部品でも実現可能なものがあるが，DOEの場合，少ない部品点数に複合的に機能を集約することが可能であり，光学装置を小型化できる点で特徴がある．また，DOEは，電子デバイス分野で培われた微細加工技術によって製造可能である点でも特徴がある．その代表であるフォトリソグラフ技術は，サブミクロンの加工が可能で精度が非常に高く，量産技術として確立されている．この方法によって製造されたDOEは，表面の微細構造が階段状となる．通常は，回折効率 (diffraction efficiency) を高くするために，8段の階段形状とされる[11]．

DOEをハイパワーレーザ用として考えた場合にも，熱誘起光学歪みの問題がある．表面の微細構造が熱変形により歪められ，また屈折率が温度変化し不均一な分布が生じることによって，DOEの特性が劣化することが予測される．熱誘起光学歪みの小さい材料の選択と同時に，この影響をできるだけ受けないような設計を行うことも重要であり，その手法開発が課題の一つである．また，表面の微細な形状は局所的に強い電界強度を発生さ

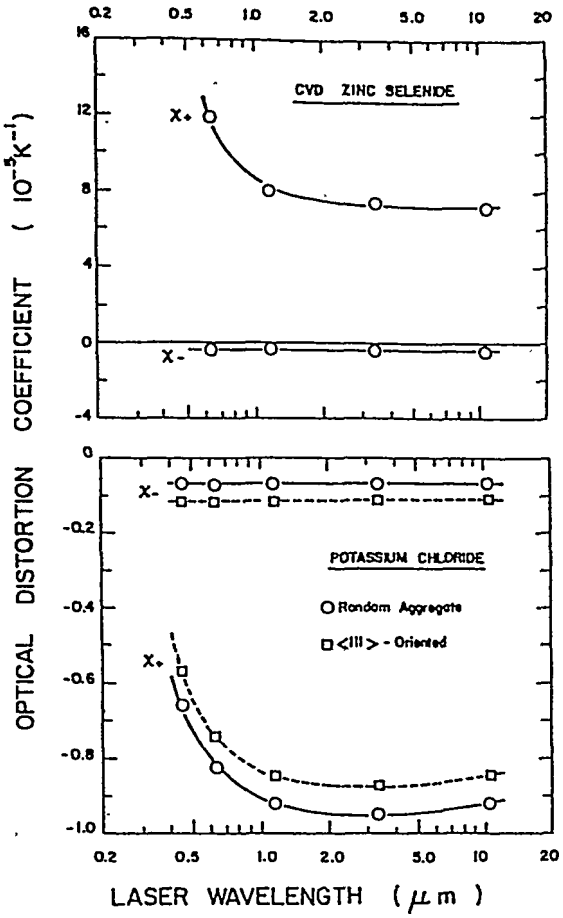


図4．4．2．4　ZnSeとKC１の光学歪み係数[1)]

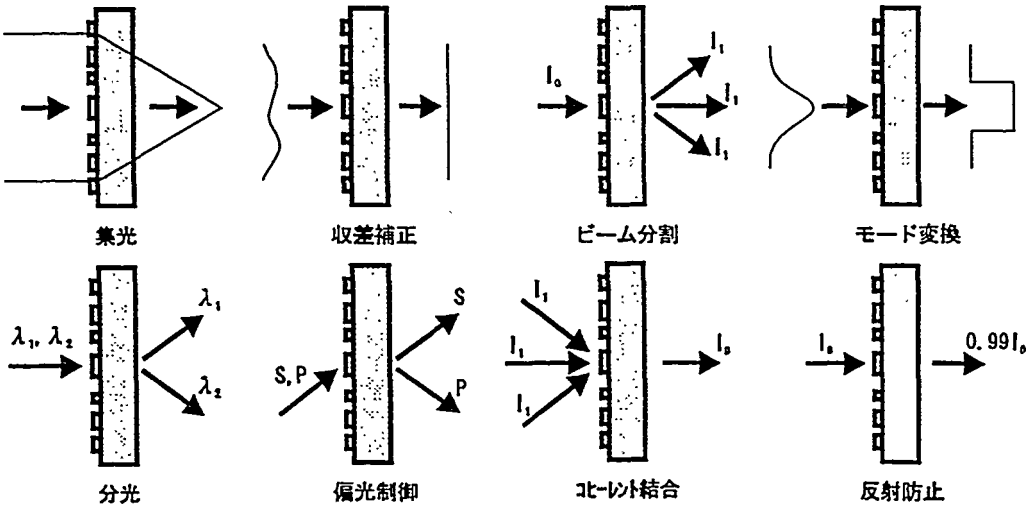


図4．4．2．5　回折型光学部品の機能

せ，レーザ損傷 (laser induced damage) の引き金になることが予測される[12]．これについても，今後の検討が必要である． DOE のハイパワーレーザ用途への適用は現状では少ないが，上記のように DOE は優れた光学的特性を有しており， レーザプロセス技術においても，今後その発展の一躍を担うことが期待される．

参考文献

1) C. A. Klein, *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1980*, NBS Spec. Publ. 620 (1981) 117.
2) J. A. Savage, *Optical Materials* (Marcel Dekker, New York, 1990) 323.
3) 小野拓弘，岩渕 俊，宮田威男，超高性能レーザー応用複合生産システム レーザ技術研究成果中間発表会論文集 (1982) 130.
4) H. K. Bowen, R. N. Singh, H. Posen, A. Armington and S. A. Kulin, Mat. Res. Bull. 8 (1973) 1389.
5) C. A. Klein, *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1991*, SPIE 1624 (1991) 475.
6) 吉川昌範，*やさしいニューダイヤモンド*（工業調査会，1991).
7) 瀬高信雄，金属 8月号 (1995) 72.
8) 青山 昇，精密工学会誌 59 [3] (1993) 389.
9) 楊 政峰，吉川昌範，精密工学会誌 57 [3] (1991) 504.
10) 加藤 誠，細美哲雄，第22回冬季講習会ホログラムと回折型光学素子－基礎理論から産業応用まで－（日本光学会，1996) 89.
11) 高木康博，光技術コンタクト 31 [6] (1993) 316.
12) N. Bloembergen, Appl. Opt. 12 (1973) 661.

（3） 伝送における非線形現象・破壊[1-3]

a．非線形現象

高出力レーザ光を加工等に利用する場合には，発振器からできるだけ損失や発散が少なく，途中に介在する光ファイバーや光学素子に損傷や破壊を与えないように，加工プロセスまで伝送することが重要である．ところが，レーザが発明された当初から，高出力パルスレーザによるいろいろな非線形現象が観測され，理論的研究も盛んに行われてきた．非線形光学現象は，①第二高調波や第三高調波など入射光と異なる周波数への変換，②空間強度分布や波形など入射光自身の変化に分類することができる．ここでは，連続波 (CW) 加工用高出力レーザ光が媒質を伝搬する場合に発生可能な媒質の屈折率変化や吸収による②に属する非線形現象に限定する．

単一モードのガウシャンビームが屈折率 n

$$n=n_0+\Delta n(|E|^2)$$

をもつ媒質を伝搬する様相を図4.4.2.6に示す．$\Delta n<0$の場合は発散する (a)．$\Delta n>0$ならば高い強度をもつビームの中心部は周縁部より大きな屈折率をもつ．物質は凸レンズのような働きをしてひとりでに絞られて自己集束する (b)．この自己集束はレーザ強度に比例する．他方，ビーム径を r とすると回折は，r^2に反比例する．したがって，自己集束と回折がバランスした状態ではビーム径が変化しない自己束縛状態が存在する (c)．これは$\Delta n=0$に対応する．ところが，わずかな吸収や散乱があると回折によりビームは広が

るので，実際には自己束縛状態はきわめて存在しにくい．後述するように，自己集束現象は固体材料の光損傷や破壊と密接に関係する．CWレーザの場合はパルスレーザと異なる現象を生じる．電界による密度変化を起こし，屈折率変化を誘因して，熱的自己集束現象を発生させる．気体中での自己集束は，実験的にも理論的にもあまり研究されていない．屈折率変化は固体の場合と異なり原子の拡散に依存する．自己集束ビームの光エネルギーは，一部は原子励起，緩和，拡散等で失われるので，気体中の伝送では深刻な問題となる．また，光の屈折率変化が光の偏り方向に依存する．この現象を巧みに利用すると超高速の光シャッタへの応用が考えられる．屈折率の時間的変化は，スペクトルの形を変えたり，スペクトル幅を広げる．

物質の吸収係数も光の強度に依存する．非常に強い光を物質に当てると，多光子吸収による電離が起こり，物質が解離やプラズマ化を生じる．高温プラズマ化は，レーザ核融合に，解離現象は同位体分離への応用が期待されている．また，多光子吸収よるイオン化がなだれ現象を引き起こし，レーザによる絶縁破壊の原因となる．

b．破壊現象

高出力レーザの応用を考えた場合，光学材料（窓材，レンズ，プリズム，偏光器，金属鏡，回折格子など），蒸着薄膜，光ファイバー等の損傷や破壊の問題は避けられない．レーザ損傷や破壊のきっかけには物質の光吸収が必要で，十分なエネルギーが照射されると，分子構造の破壊，機械的な構造的な破壊を誘因し，結果的に物質の劣化や損傷・破壊につながる．破壊は二つのカテゴリーに分けられる．

破壊
- 光破壊（固体内の目に見えるクラック）
- 光損傷（目に見えない屈折率の局部的変化）

破壊現象は複雑なので，正確な解析は非常に難しいが，破壊のメカニズムは二つ考えられる．一つは，媒質がレーザからエネルギーを吸収して急激に熱に変換した結果生じる直接的なレーザヒーティングに起因する線形現象の破壊である．これは固体の融解に影響を及ぼしレーザアニーリングの基礎となっている．さらに過剰なヒーティングを行うと，物質が蒸発する．これは物質創成の新しい手法となっている．このようにレーザの熱破壊は，レーザ科学や産業応用上きわめて重要である．もう一つは，多光子吸収電離が種となって起こる電子なだれイオン化による非線形現象の破壊である．

どのぐらいのパワーを物質に照射した場合に破壊現象が起こるかの目安として破壊しきい値がある．物質のレーザ損傷・破壊しきい値が既知であれば，高出力レーザ装置の設計及び出力，寿命，信頼性向上などレーザシステムの運用にとって非常に有益である．したがって，物質のレーザ損傷・破壊しきい値の標準化された測定技術の開発や信頼性の高いデータの集積は重要な研究課題となる．破壊しきい値は，気体，液体，固体の順で低下する．

媒質が気体の場合，熱上昇は強力なイオン化を起こし，結果的にはプラズマ生成を導く．

したがって，直接空間伝送では考慮すべき問題である．

固体の場合，吸収係数の大きな材料では，パルス幅の長いレーザやＣＷレーザによる熱的損傷である．熱的損傷過程のしきい値を決める因子は吸収，反射係数，熱容量，熱伝導度，融点などである．それに対して，吸収係数の小さい透明な光学材料や反射防止膜や高反射の蒸着膜では，多光子吸収による電子なだれ損傷・破壊と考えられている．耐損傷性を上げるには破壊しきい値の高い材料を選ぶこと，表面に欠陥（クラック，微小なピット等），吸着物質，不純物，ストレスなどをできるだけ生じないように仕上げることが肝要である．将来のレーザ加工で重要視されると考えられる紫外領域では，レーザ用光学素子の光損傷に関する研究が可視，赤外に比べて極端に少ない．最大の弱点は，表面，誘電体多層膜にある．また，紫外レーザ光が焦点に達するまでに吸収があるため，レーザ光の強度の絶対的評価が難しいので，信頼性の高い損傷しきい値データを得るのが困難である．

高出力レーザ光を微小断面積の光ファイバーに導くことになるので，伝送可能な出力は光ファイバーの光損傷のしきい値で決まる．光ファイバーの損傷の研究も必ずしも十分とはいえない．高出力 CW レーザ光を伝送する場合には熱的効果が損傷や破壊の原因になる．

以上損傷いきい値の高い欠陥の少ない新材料の研究開発が第一に上げられるが，それと並行して損傷しきい値測定技術や超精密研磨技術，冷却等周辺技術の開発も重要である．

参考文献

1)Y. R. Shen: The Principles of Nonlinear Optics(A Wiley-Interscience Publication　JOHN WILEY & SONS, New York, 1984)303.

2) レーザ学会編：レーザハンドブック（オーム社，1982）162,452

3)Selected papers on Laser Damage in Optical Materials,　ed.　by M. Wood,　SPIE Miletne Series,　Vol. MS 24,　SPIE Optical Engineering Press(1990)

4．4．3高品位フォトン計測制御技術

（1）ビーム品質の計測制御

レーザビームの品質を評価するのに必要な基本的数値として，レーザ出力，発振の縦横モード，ビームの広がり角がある．以下それぞれの項目について，測定法を記述する．

a．レーザ出力測定

レーザ出力測定は，レーザの最も基本的な計測である．その方法は，レーザの動作モード（ｃｗまたはパルス発振の違い），発振波長などによって異なる．またそれによって検出方式も異なる．代表的な検出方式としては，レーザ光のエネルギを吸収体に吸収させその温度上昇を測定する方法，電気信号に変換して測定する方法，光化学的な反応を利用する方法がある．

1）熱的測定法

レーザの出力測定は，レーザエネルギを熱に変換する方法が採用される例が多い．熱に変換して測定すれば，検出器には波長依存性がなく紫外光から赤外光までの長いダイナミックレンジを得ることができる．測定すべきレーザ光を，吸光物質に吸収させ，その物質の温度上昇をサーモパイルのような温度センサの熱起電力として測定することによって温度を算出する．ｃｗレーザによく使われるコヒーレント社の５ｋＷまで測れるパワーメータの仕様を表４．４．３．１に示す．しかし，熱に変換する場合，その応答速度は遅く，急激なレーザ発振の状況変化に追随できない欠点がある．パルス動作の場合は，断熱状態で吸光物質の温度上昇を測定するだけで，原理的には，ｃｗレーザの場合と同様である．

レーザ出力が，吸光物質の耐光強度以上になるような高出力の場合は，レーザ出力の一部を検出器に取り込んで測定する．そのための減衰器に相当するものとして鏡の表面に細かな穴を開けた機械的な部分透過鏡，あるいはコーティングにより透過率を制御した部分透過鏡を使用すれば良い．

最もシンプルなｃｗレーザ出力測定法は，融点の低い物質にレーザエネルギを吸収させその気化量から出力を算出することである．高出力CO_2レーザの出力測定に，アクリルの気化重量，あるいは水の温度上昇の測定が利用されたことがある．

2）電気的測定法

光電効果，光起電力，光導電流を用いた検出法なので，高感度，高速応答が可能であるが，検出器には波長依存性がある．しかし，この方法は普通は非常に低出力の光信号を検出するのに使用される．光電子増倍管やアバランシェ・フォトダイオードは紫外から近赤外域にかけて使用できる．

3）光化学的方法

写真フィルムに撮影し，そのフィルムの黒化度から，間接的に出力を算出する．フィルムには，波長依存性（一般的に紫外光から可視光の範囲）がある上に，感光特性が直線性を有する範囲で使用しなければならないなど注意が必要である．

b．レーザ発振波長測定

レーザ発振波長の測定は，その中心波長をおよそ知るためには，分光器を用いる．波長が短い場合は，プリズムが，赤外光については，グレーティングが用いられることが多い．さらに詳細なスペクトル測定（例えば縦モード測定）には，ファブリーペロー干渉計によ

る測定が行われるが，波長の絶対値は測定できない．

c．レーザ横モード測定

レーザ光の伝播方向の強度分布を示す横モードは，レーザ光を集光したり，伝播させる時に影響する重要な物理量であるが，基本的な計測法はビームの直接的２次元観察である．紫外から可視光の範囲では，写真撮影などのような方法で可視化して直接観測することが可能である．それ以上の長波長のレーザ例えば，CO_2レーザなどの場合，写真撮影が困難なためレーザによるバーンパターン測定から推測するしか方法がなかった．感光物質としては，感熱紙，アクリル，耐火レンガ，木片などが使われてきた．しかし最近，赤外光に感度を持つ２次元検出器が開発され，ビームプロファイルの測定が容易になった．この装置を使用することによって，２次元的，３次元的なビームプロファイルはもとより，ピーク値の時間変化，ビーム安定度の測定が可能になった．検出器に２次元パイロ素子を用いれば，紫外域から遠赤外域までの測定ができる．表４．４．３．２に代表的な例である，スピリコン社製のレーザビーム・アナライザの仕様を示す．

ｃｗレーザでビームプロファイルが時間的に安定していれば，もう少し簡単で安価な測定法がある．即ちレーザビームに比較して，十分に径の小さなピンホールをビームに直交する断面内をスキャンして，ビーム断面の強度分布を測定する方法である．　またレーザビームに直交する断面内で反射率の一様な径の小さいワイヤを回転し，その反射光強度を回転するワイヤの中心から順に外側へ測定すれば，ピンホール法と同様にビーム断面の強度を測定できる．

d．ビーム広がり角測定

レーザのビーム広がり角の測定は，計測距離が十分得られる時は，レーザビームを飛ばして，レーザから離れた２点でビームに直交する面内のビーム径を測定し，これらの数値から算出する．伝搬距離が十分取れないときは，焦点距離が長くかつ焦点距離の分かったレンズをレーザの出力鏡の近くに置き，レーザ光を集光し，レンズの焦点部分のビームウエストを実測して算出することができる．

e．偏光測定

発振レーザ光の偏光面が加工の進行方向にたいして平行か直角かによって，レーザ加工に影響があるため，その測定は重要である．その測定には，偏光板または，ブリュースタ角に設置した２枚の平行平板，プリズムなどを回転させることによって，Ｐ波とＳ波の出力の比から算出することができる．

f．レーザビーム位置検出

レーザビームの中心がどこにあるかを検出することは，レーザ加工の見地から大変重要であり，多くの方法が提案されている．　共振器の内部あるいは外部に開口を持ったプレートを設置し，その開口部にレーザビームを通し，プレートの開口部によって蹴られるビーム強度をプレートの開口近傍に設置したビーム検出器で検出し，その強度分布が一様ならば，ビームが開口部の中心にあると評価する方法が特許として提案されている．この場合開口部によって蹴られたエネルギーを検出する代わりに，開口部を通るレーザビームのエネルギにより開口部近辺の媒質の温度上昇を音波の伝播速度の違いで検出する方法も提案されている．

g．今後の課題

2次元センサによるビームプロファイル測定及びそれに伴うデータ処理によって，多くのレーザパラメタが算出できるので今後この種の測定器の重要性が増すと思われる．特に分解能を向上させるには，1個のピクセル寸法を小さくし，且つピクセル数の増加が必要である．応答速度の速い検出器を用い，測定されたデータをリアルタイム処理し，その結果を共振器制御にフィードバックすれば，安定な高品質レーザビームを得ることができ，加工精度の向上に効果的である．

項　　目	仕　　様
測定出力	cw　1～5000W
検知器	サーモパイル
応答波長域	0.3～30μm
精　　度	＋5％
最大cwパワー密度	2500W／cm²
ビーム入射口径	55mm

表4.4.3.1　市販のcwパワーメータの一例
（コヒーレント社）

項　　目	仕　　様
カメラ　ピクセル数	64x64（パイロ素子）
感度（cwの場合）	55nW／ピクセル　160μW／cm²
感度（パルスの場合）	0.8nJ／ピクセル　2.3μJ／cm²
測定波長域	100nm～400μm
表示器　処理装置	ビーム位置，ビームサイズ，ビームエネルギ，ビーム安定度，ビーム広がり測定が可能で，2次元，3次元表示が可能

表4.4.3.2　市販のビームプロフィル撮像装置の一例
（スピリコン社）

参考文献

1) レーザー学会編：レーザーハンドブック，オーム社，(1982)
2) レーザー学会編：先端レーザーテクノロジー，日経技術図書，(1992)
3) 平井紀光：実用レーザ技術，共立出版，(1987)
4) 大竹祐吉：市販レーザ装置活用のためのレーザの使い方と留意点，オプトロニクス社，(1986)

5) 磯部浣一，レーザー関係用語の標準化，O puls E，72(1994)
6) 出願人三菱電機：特許特公平 6-82878
7) 出願人三菱電機：特許特公平 5-20195
8) コヒーレント社カタログ
9) スピリコン社カタログ

（2）波面・偏光の計測制御技術

a．位相共役システム

位相共役波は元になる信号光の時間成分を反転させた光なので，それが元の光と同じ経路を逆向きに伝搬することによってその経路中で受けた歪みを自動的に除去することができる[1]．図4．4．3．1に，その原理を示す．この原理を用いれば，波面の歪みの少ない低出力のレーザー光源に光増幅器と位相共役鏡を組み合わせて，大出力でかつ波面の歪みの少ないレーザー光を得ることができる．実際に，1994年に位相共役波を用いた市販のNd:YAG レーザーシステムが発売された（コヒーレント社 Infinity 40-100)．このレーザーシステムは400mJ/Pulse のパルス光を100Hz 以下の繰り返しレートで出力することができる[2]．

レーザーを光源とする場合，単色性が良いことから，3次の非線形光学効果（光の照射により媒質の屈折率や吸収率が変化する効果）を利用して比較的に簡便に位相共役波を発生させることができる．代表的な発生方法として，後方誘導ブリュアン散乱を用いる方法と4光波混合を行う方法があり，前者では信号光のみを媒質に入射させれば良く，後者では信号光と別の方向から互いに逆向きに伝搬する一対の励起光を入射させれば良い．図4．4．3．2に4光波混合の配置を示す．

現在、位相共役波の発生の基本的な原理はほぼ明らかになっているが，安定性に問題がある．すなわち，高い効率で位相共役波を発生させるには非線形光学効果の大きい発生媒質を用いる必要があるが，一方でその場合に位相共役波が不安定になりやすい．位相共役波のパワーが時間的に大きく変動したり，またそれに伴って位相共役波の空間パターンが変化することがしばしば観測されている．例えば，最近の研究で位相共役ビームのスポットが自発的に図4．4．3．3のような六角形のパターンに変化し，そのパターンが時間とともに揺れ動くという現象が報告された[3]．図4．4．3．3のパターンはニオブ酸カリウム結晶を媒質として位相共役波を発生させた場合に得られたので，結晶の構造を反映しているのではないかと誤解されやすいがニオブ酸カリウム結晶に六角形に相当する対称性は無い．また，位相共役波の発生の媒質に液晶[4]や気体[5]などの全く構造が異なる媒質を用いた場合にも良く似た現象が観測されているので位相共役波の発生過程の本質に根ざした問題と考えられる．位相共役波の時間的・空間的な安定性は一般に確立されておらず，加工用のレーザーに用いられるような高パワーの光に関しては特にそうである．そこで、高効率と安定性を両立させる位相共役波の発生技術が開発課題となる．この課題の解決により初めてレーザー加工への応用に耐える集光性と安定性に優れたレーザー光を得ることができる．

参考文献

1) 左貝潤一：位相共役光学（朝倉書店，1990） p.6.
2) コヒーレント社カタログ CI-014/61P0630P.

3) T. Honda: Opt. Lett., Vol. 18 (1993) 598.
4) M. Tamburrini, M. Bonavita, S. Wabnitz, and E. Santamato: Opt. Lett., Vol. 18 (1993) 855.
5) A. Petrossian, M. Pinard, A. Maitre, J.-Y. Courtois, and G. Grynberg: Europhys. Lett., Vol. 18 (1992) 689.

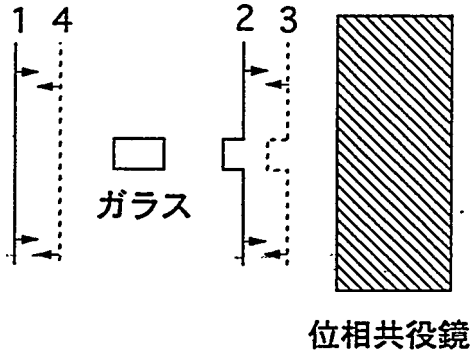


図4.4.3.1　位相共役波による波面の歪みの補正の原理．1が元になる光，2が波面の歪んだ信号光，3が位相共役波，4が歪みの補正された出力光である．

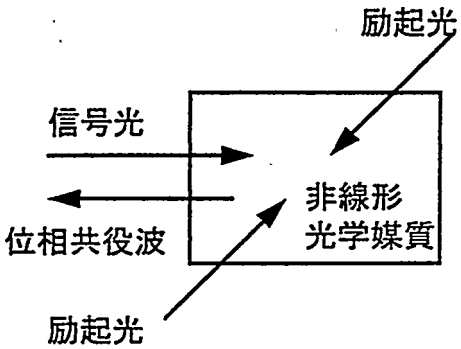


図4.4.3.2　4光波混合による位相共役波の発生の配置

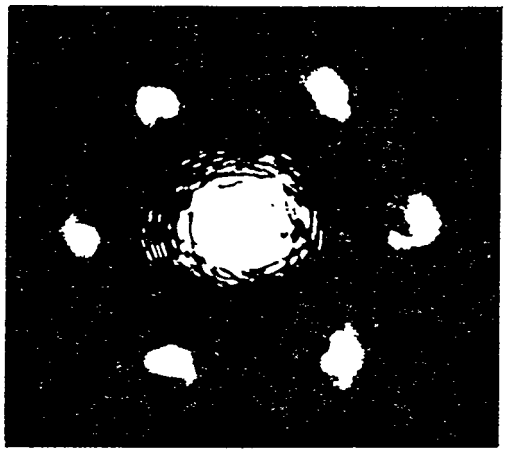


図4.4.3.3　六角形のパターンに変化した位相共役ビーム．中央のスポットが本来の位相共役ビームであるが，その周囲に六角形に並ぶ6つのスポットが現れている．

b．補償光学システム

1）はじめに

補償光学システムの研究開発は，現在世界各国で大口径の望遠鏡が次々と建設されている状況にある天文学の分野において盛んである[1-5]．これらの望遠鏡は遠方にある暗い未知の星をも観測する能力を有するが，地上に設置されるためにそのままだと大気の揺らぎによって星像が歪められ，正しい観測が行えない．そこで既知の星（ガイド星と呼ばれ，人工的に作られるものでもよい）を利用して大気の揺らぎを検出し，歪んだ星の光の波面を実時間で補正するように鏡の表面形状を変形させて正しい星像を得ようと試みられている．この鏡は形状可変鏡（＝Deformable　mirror）と，これらのシステムは一般に補償光学システムと，そしてこのような学問分野は適応光学と呼ばれている．これらは，フォトンプロセス技術においても極めて有効であると考えられるため以下にその概要を示す．

2）形状可変鏡

現在までに提案されている形状可変鏡型式の代表的なものは 図4．4．3．4に示したとおり，フェースシート型，バイモルフ型，メンブレン型の三種類である[6]．フェースシート型は鏡面の背後に並べられた複数のアクチュエータを鏡面に垂直方向に変位させることによって鏡面形状を変形させるもので，波面の補正に適しており，最も一般的なものである．バイモルフ型は，鏡面の背後に並べられた複数のアクチュエータをバイメタルのように鏡面に平行な方向に変位させることによって鏡面形状を変形させるもので，大きな変形量が得られ，ある形状を創成することも可能である．メンブレン型は表面に金属を蒸着した膜を引っ張った状態にしておき，静電力で変形させるもので，外部からの音や振動に弱いがヒステリシスが少ないという特長がある．実際，フェースシート型が三社［Litton/Itek社（米），Xin ξ tics社（米），CILAS社（仏）］によって9機種が，バイモルフ型が二社［CILAS社（仏），FirmTURN社（露）］によって4機種がそれぞれ製作および販売されている．形状可変鏡の性能に影響を与える重要なパラメータとしては，一般に形状可変方式，アクチュエータの数，変形量の大きさ，ヒステリシス，応答性等があげられる．

3）放物面鏡の補償

フォトンプロセス技術の中のレーザー加工（切断，溶接，描画等）においては，レーザー光を任意の波面に整形すること，とりわけ一点に集光することが重要である．一点に集光することによって，一般的にエネルギー密度を最大にすると共に加工精度を向上させることができる．今，簡単のために平面波のレーザー光が得られているとしよう．これを正しい姿勢および位置に置かれた軸外放物面鏡に照射すると，その反射光は全て一点に集光するはずである．しかしながら放物面鏡の表面に局所的な形状誤差があるとその部分による反射光は集光点からそれるため，集光ビーム径が大きくなり，エネルギー密度も低くなる．その場合 図4．4．3．5のように放物面鏡と被加工物の間にフェースシート型の形状可変鏡を挿入し，放物面鏡の形状誤差分だけを補正してやれば一点に集光する光が得られる．また放物面鏡が形状誤差を持たなくても，その位置または姿勢が正しくない（最初正しくても加工中に光学系が熱変形等によってずれる）と被加工物上の一点には集光しないが，この場合にも形状可変鏡が有効である．

4）波面形状検出技術

形状可変鏡で波面を整形するには歪んだ波面形状を正確に計測する必要がある．その方

法はいろいろあるが現状では，幾何光学方式（シャックハルトマン法），干渉方式（シア干渉計）等が用いられている．

この場合注意しなければならないのは，通常の干渉計（トワイマン－グリーン，フィゾー，マッハツェンダー干渉計等）は鏡面の形状誤差は計測できるが波面の形状誤差は計測できないということである．そのため波面形状誤差を正確に計測できる新たな干渉計を開発する必要があり，その一つとして位相共役干渉計が考えられる．図4．4．3．6に放物面鏡によって作られた平面波面の形状誤差を計測するための位相共役干渉計を示す．これは従来のフィゾー型干渉計の一つであるが，参照平面鏡のかわりに位相共役鏡が用いられている点に特色がある．得られた干渉縞は波面誤差の絶対量の分布を，用いたレーザー光の半波長毎の等高線として表示している．したがってこの量だけ形状可変鏡で補正してやれば完全な平面波が得られることになる．

5）形状可変鏡の問題点

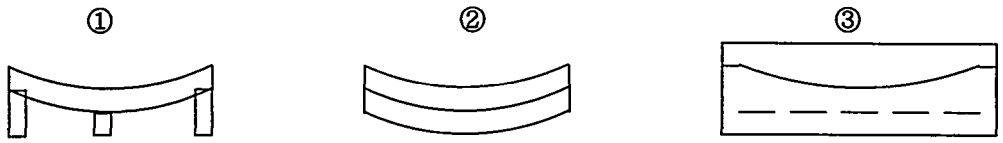
形状可変鏡の変形が大きなレンジに渡って正確にかつ迅速になされる（理想的な性能）ならば，光の波面整形にきわめて有効であるが，現状ではこれらは互いに相反する条件であって同時に満たすことは大変難しい．例えば上記の平面波生成では放物面鏡と補正鏡である形状可変鏡を組合わせて平面波を得るが，もし形状可変鏡が理想的な性能を持つなら，形状可変鏡だけで放物面鏡を形成すればよい．ところが実際には困難なので，工夫によってこれを克服する必要がある．

6）多重可変鏡による波面補正

フェースシート型形状可変鏡を複数枚光軸方向にシリアルに並べるという光学系が提案されている[7]．そこで例えばアクチュエータが一素子で面積が充分大きなフェースシート型の可変平面鏡を作り，これを例えば他の形状可変鏡で補正しきれずに残った局所的的収差部分に可変部を移動させて補正してやれば平面波が得られる．この場合，フェースシート型で既に補正してある部分は，形状可変鏡の平面部分によって影響を受けずに済むというのが利点であり，また一素子だけなので
応答が速い．もしこれでも補正が不十分ならさらに一素子可変平面鏡を用いて補正すればよい．また他の多重可変鏡として，例えば既存の形状可変鏡であるバイモルフ型とフェースシート型をシリアルに並べると，前者で大きな形状を形成し，後者で前者の収差部分を補正するという，それぞれの形状可変鏡の特長を活かした補正系も考えられる．

7）透過型光学素子による偏光及び波面の補償

これまで述べた形状可変鏡は鏡，つまり反射型の補償光素子である．これは反射波面の位相を変えるものであって偏光状態は変えない．レーザー加工においては偏光状態の違いによって被加工材料の光吸収率が変るものもあり，重要なパラメータとなる．例えば液晶パネルは，入射波面を整形して透過させることができる透過型の補償光学素子であり，偏光状態（リターデーション）を変えたり，位相を変えたりできる．最近適応光学用に高性能な液晶空間光変調素子が製作され，販売されている[8]．一般に透過型素子の場合は既に調整された光学系の光路中に挿入するだけで補償光学系が実現できるので，反射型に比べ光学調整が容易であり，省スペースであるという利点がある．ただし問題点としては，通常の液晶では応答速度が遅いこと，液晶ピクセル中の電極や隣り合うピクセル間の境界線が影となって透過波面を遮ったり回折波を生じて波面を乱してしまうこと，加工用レーザ



①フェースシート型　②バイモルフ型　③メンブレン型
（ピエゾアレー変形方式）（バイメタル変形方式）（静電力薄膜変形方式）

図4.4.3.4 形状可変鏡の方式

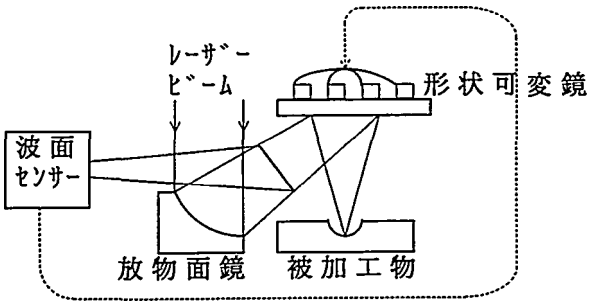


図4.4.3.5 レーザー加工における波面の検出と補正

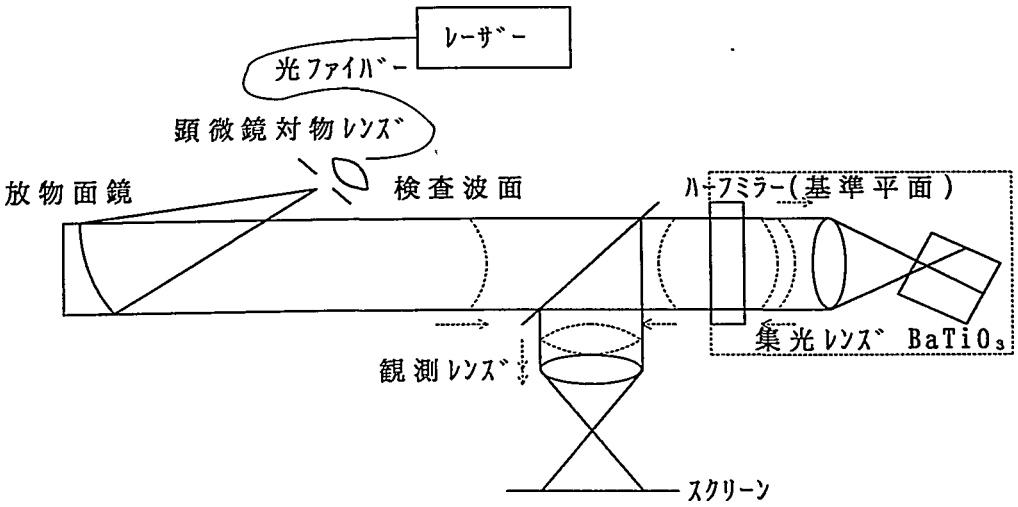


図4.4.3.6 フィゾー型位相共役干渉計による波面形状の検出

ーのような強い光に照射されると耐熱性が弱いため破壊される恐れがあること（形状可変鏡には強いレーザー光に対しては冷却機構を組込むことができ，実際に製作されているものがある）が挙げられる．理想的には応答性が良く，耐熱性があり，滑らかな補正波面を作れる偏光補正素子が望まれる．

8）形状可変鏡の応答

天文学における大気揺らぎの場合（その時間的変化は主として固定した揺らぎパタンが風に流されることによって生じる），制御に時間遅れがあると，波面誤差を生じてしまい，星像が正しく観測されず深刻な問題となる．レーザー加工の場合には，光学系の収差や調整誤差（静的）の補正，およびそれらの比較的ゆっくりした熱変形の補正を行なう場合には，問題は応答性よりも如何に精度良く波面形状誤差を検出するかになる．

9）まとめ

波面や偏光の補償光学システムについて，現状を踏まえての問題点，課題を挙げ，それらを解決するであろう手法について一部触れた．レーザー光の波面や偏光を制御する技術は，研究および実用の両面において興味深く重要な技術であり，最近著しく開発が進んでいる形状可変鏡や液晶パネル等の素子，およびそれを制御する計算機の著しい発達と共に大きく実を結んでいくものと思われる ts.

参考文献

1) N. Hubin, "ESO VLT adaptive optics program", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST(1995)p2.

2) G. Gilmore, "United Kingdom adaptive optics programs", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST (1995)p5.

3) P. L. Wizinowich, "Keck Observatory adaptive optics program", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST(1995)p16.

4) R. Rachine, "The Gemini adaptive optics system", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST(1995) p19.

5) H. Takami, M. Iye, N. Takato, Y. Hayano, M. Otsubo and K. Nakashima, "Subaru adaptive optics program", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST(1995)P22.

6) 高見英樹" ｱﾀﾞﾌﾟﾃｨﾌﾞ光学による光ﾋﾞｰﾑ制御の現状，精密工学会誌" Vol. 60(1994)p1091.

7) D. C. Johnston and B. M. Welsh, "Analysis of multiconjugate adaptive optics", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11(1994)p394.

8) G. D. Love, S. R. Restanio, R. A. Carelas, G. C. Loos, R. M. Sharpes and R. V. Morison, "High-quality liquid crystal light modulators for adaptive optics", ADAPTIVE OPTICS TECHNICAL DIGEST(1995)p223.

(3) 高性能光共振器技術

ビームの高品位化，高精度制御の一例として超高性能光共振器を採りあげる一般にミラーを対向させて配置し，その間に利得媒質を挿入することによりレーザー発振は可能であるが，同様な配置でレーザー媒質のない光共振器により多くの技術革新が可能な[1]時代になってきた本節では高性能光共振器の作製とその利用について述べる

a 高性能光共振器の現状

一般に共振器の波長選択性を示す指標としてフィネスFを用い，

$$F=\frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \qquad (4.4.3.1)$$

ミラーの反射率Rの関数として表すことができる．図4．4．3．7に反射率とフィネスの関係を示す現時点までの世界最高品質の共振器は損失1.6ppm，フィネス1.9×10^{6}というものである[2]．従来，フィネスは高々200程度であったため，この様なフィネスが100万を越える高性能の光共振器の利用は考えられてこなかった．しかし，リングレーザージャイロ技術や浮遊粒子計測技術からの要請により高性能光共振器が開発された．さらに，現在では世界中の研究者が争って重力波の検出に挑んでいるが，この重力波の検出に超高性能の光共振器は欠かせない物となっている．重力波の検出は実に10^{-21} の変位を測定しようとする試みであるから，いかに困難な計測技術であるかわかるであろう．重力波検出用の光共振器は純粋に基礎科学からの要請であるが，この様な高性能光共振器の技術は様々な形で適用でき，多くの産業技術のブレークスルーを可能とする技術である．例えば今までのレーザーではレーザー媒質による利得がミラーの損失を上回っていたので発振していたのであるが，共振器だけでも位相のそろった単一波長の光を蓄積できるということは光学技術として革新的なことである

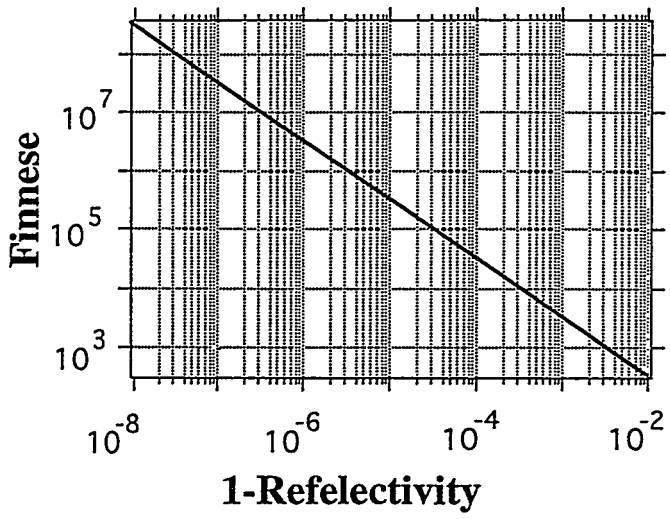


図4．4．3．7　反射率とフィネスの関係

b．高反射率ミラー

高性能共振器の実現を可能にしたのは超高精度の誘電体多層膜高反射率ミラーによるこ

の誘電体多層膜ミラーの作製には超平滑研磨技術とイオンビーム スパッタデポジション (Ion Beam Sputter Deposition, IBSD) 技術が欠かせない．超平滑研磨によりスーパースムースウエハーよりもフラットなサブ　の面粗さの基盤の作製が可能であり，この様な超平滑研磨技術はX線光学系にも必要とされる技術である．また，従来，誘電体ミラーは電子ビーム蒸着によって作られてきた．一方，IBSDは蒸気種のエネルギーが高い，ターゲットの表面温度が低い，ターゲットの面積が大きい，ストイキオメトリが良い，散乱の少ないアモルファス多層膜の成膜が可能など利点があり注目されてきたが，成膜速度の遅さが欠点であった．しかし，これはカウフマンガン，ＲＦイオン源などのイオン源技術の進展により回避され，現時点では，イオンビームスパッタが最も優れた実用的な光学薄膜作成技術を提供している[3]．図４．４．３．８にイオンビームスパッタデポジションの配置を示す．イオンとしては主にアルゴンイオンが用いられ，イオン源を出射後，直ちに電子ビームにより電荷中和され，ターゲットに到る．ターゲットでは成膜材料がスパッタされて，基盤上に成膜される．また，基盤をささえるホルダーには成膜の均一性のために遊星回転機構があるのが一般的である．イオンエネルギーは1.2keV，イオン電流250mAで成膜速度は50-100Å/分程度である．これにより８時間－24時間程度で30層程度の膜厚をえることができる．現在までに報告されているIBSDで作製されたミラーのうち最も高い反射率は 850 nmで99.99984%，1.06μ mで99.996%である．一般に多層膜の設計には Quarter　Wave Type と Non-Quarter Wave Type があり，層数は20層から100層程度である．電子ビーム蒸着などにより作製される薄膜と異なりイオンビームスパッタによる薄膜は密度が固体の密度と同程度と高くなり，理想的な薄膜となる．図４．４．３．９に設計例をあげる．IBSDによって作製された薄膜は密度の高さゆえに耐環境性も高い．また，成膜速度が比較的遅いことは膜厚の制御が精密にできるという利点となっている．この膜厚の制御は短パルスレーザーや偏光を扱うとき重要である．一方，損失には散乱損失と吸収損失があるが，現時点で，寄与が大きいのは散乱損失である．これは界面の不均一性に由来する散乱 (Surface Scattering) と薄膜内からの体積散乱 (bulk　Scattering) による．薄膜表面の粗さは散乱光（全散乱，後方全散乱，散乱光の角度依存性）を測定すること等により評価できる．図４．４．３．１０に透過率，吸収率とフィネスの関係を示す．この場合は反射率Ｒは1-A-Tとなる．ここでＡとは吸収と散乱を含んだ損失であり，Ｔは透過率である．屈折率比が大きいほど同じ総数でも反射率が高いことがわかる．現在，（光学薄膜用の）スパッタ技術は技術革新の最中で1970年代のイオン注入技術の様相とよく似ている．すなわち，スパッタ技術を基盤技術とする多くの革新的な技術の開発が可能となってきたのである．

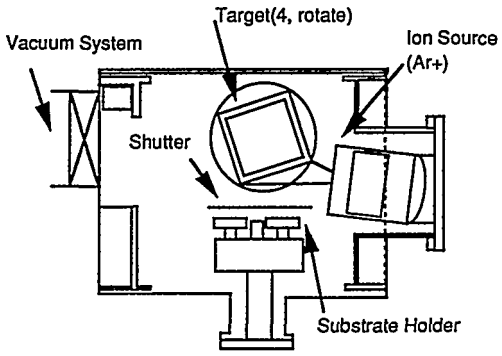


図４．４．３．８　イオンビームスパッタ装置

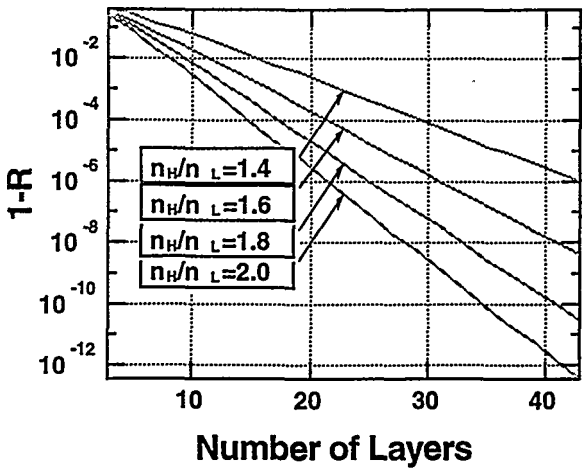


図４．４．３．９　ＱＷＯＴ系で構成された理想的な誘電体薄膜の反射率
n_Hおよびn_Lはそれぞれ高屈折率薄膜の屈折率と低屈折率薄膜の屈折率

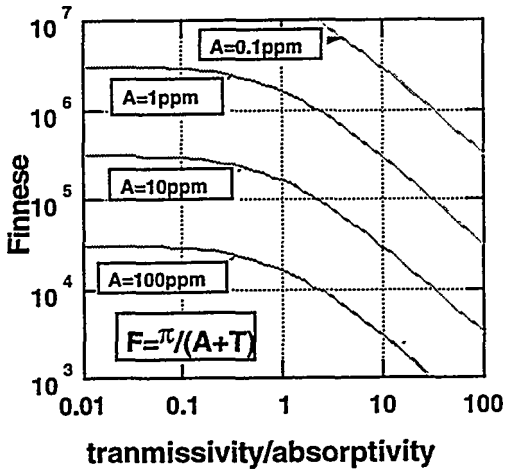


図４．４．３．１０　吸収（散乱を含む）と透過率、吸収率比に対する
フィネスの依存性

ｃ．高性能光共振器の適用

高性能光共振器の利用は様々な分野でなされている例えば強い波長選択性を利用した高精度分光，周波数標準の他に，光蓄積，高電界発生，コヒーレント加算，低利得レーザー，一原子レーザー[4]，マイクロレーザー，Ｘ線レーザーのための高電荷イオンの量子状態の分光測定，などである高性能共振器がこのように多くの分野に適用可能なのは光子の寿命が非常に長いからである高反射率ミラーによって構成される共振器内の光子の寿命t_cは

$$t_c \approx \frac{l}{c(1-R)} \approx \frac{l \cdot F}{\pi \cdot c} \qquad (4.4.3.2)$$

である．ここでlは共振器間隔，cは光速であるppmレベルの損失のミラーによりミリ秒レベルの光子寿命となることがわかる．この様に光子寿命が原子，分子の励起→緩和過程を経るよりも長い時間であるために，共振器中に原子が一個しかないレーザーの発振が可能なわけである．単一原子レーザーはフィネス8×10^5の共振器に^{138}Ba原子を熱して入射して791nmでの発振が行われた[4]．また，光と電子の相互作用という点でも，光を蓄積できることの利用は計り知れない．さて，この超高性能共振器を周波数標準として用いる事によりレーザーの安定化，発振スペクトルの狭帯域化が可能である．2台のレーザーを同じ共振器にロックして安定化し，ビート線幅193mHzが得られている[5]．この様なレーザーはさらに，高電界の発生にも利用できる．光共振器内の電界は入射レーザーのおよそフィネス倍になるのでフィネス100万の光共振器に安定化したμWのレーザーを入射すればWレベルの電界が発生する．すなわち，高価な大出力のレーザーを使用しなくて共振器中に高電界を発生させることができる．蓄積できるエネルギーの上限を決めるのはミラーのダメージ閾値であるが，熱によるミラーの曲率の歪みも考慮しなくてはならない．ダメージ閾値は電子ビーム蒸着の場合よりも高くすることが可能である．

高性能光共振器を作製するための成膜技術の別の分野へ適用としてガウシアンミラーの作製がある．レーザーの共振器内の出力鏡にガウシアンミラーを用いると高品質ビームを高効率で得ることができる．従来は単一横モード発振させるために共振器中にアパーチャーをいれる手法が一般的であった．しかしこの方法ではモード体積を大きくとることができず，効率的ではなかった．ガウシアンミラーにより単一縦モード，単一横モードの発振が可能である．

以上の様に超高性能の光共振器は基礎的な技術であるだけに，この改善が単に量的ではなく質的に異なった技術の展開につながる．光共振器を作製するための技術のうち多くは半導体技術の要請から発展してきたものが多い．現在までに半導体の製造に多くの光学技術が利用されてきた．今後は半導体技術およびその周辺技術が光技術を支え，互いにその成果を利用しあう時代になったのではないだろうか．

参考文献

1) K. Ueda, " Ultra-Stabilized Solid State Lasers and Their Application", Proc. the 6th Int'l Forum on the Frontier of Telecommunications Technology (1994) 2-1

2) G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble and R. Lalezari, "Measurement of Ulatralow Losses in an Optical Interferometer", Opt. Lett. 17 (1992) 363

3) A. T. Howe and D. D. Phillips, "High-Quality Coatings Earn Their Keep", Photonics Spectra, July, (1993)143

4) K. A. James, J. Childs, R. R. Dasari and M. S. Feld, "Microlaser: A Laser with One Atom in an Optical Resonator", Phys. Rev. Lett. 73[25] (1994)3375

5) N. Uehara and K. Ueda, "193mHz Beat Linewidth of Frequency-Stabilized Laser-Diode-Pumped Nd:YAG Ring Lasers, Opt. Lett., 18[7] (1993) 505

（4）ビーム形状・位置計測技術

a．ビームの評価

レーザー光は，長い距離をあまり拡がることなく伝搬し，また容易に小さな点に集光することができると考えられている．これは，He-Ne レーザーやアルゴンレーザーのように，主として単一の TEM_{00} モードで発振させ，ビームの断面強度分布がガウス型をしているレーザーについては正しいといえるが，加工用のレーザーのように大出力を目的にしたレーザーでは細かく見ると単一モードとはいえない場合が多い．ビームの断面強度分布がガウス型の場合には，強度のピークとピーク強度から一定割合（通常 $1/e^2$）強度が弱くなる位置の直径を測定すれば，ビームの中心や，直径，拡がり角等のビームの特性を記述することができるが，不規則な分布をしている場合には，簡単には中心や直径を定義できない．そこで，最近では Siegman [1] により提案された M^2 値が用いられている [2]．これによれば，近軸光線の規格化強度分布 I(x, y) の平均位置 $(\bar{y}, \bar{x})$ および平均拡がり角方向 $(\bar{\theta}_x, \bar{\theta}_y)$ の軌跡は，自由空間で直線になる．ここで

$$\bar{x} = \int xI(x,y)dxdy, \quad \bar{\theta}_x = \int \theta_x I(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y, \tag{4.4.3.3}$$

とする．位置および角度の標準偏差 σ_x^2，$\sigma_{\theta x}^2$ を考えると，ガウス型のビームのばあい，そのポイントの幅Dと拡がり角Θはそれぞれ

$$D = 4\sigma, \quad \Theta = 4\sigma_\theta, \tag{4.4.3.4}$$

となる．ビームが z 軸上に進む場合，z の位置でのビームの直径Dは

$$D = D_0^2 + \Theta^2 (z - z_0)^2, \tag{4.4.3.5}$$

となる．ビームウェストにおける理想的な場合の直径 d_0 と拡がり角 θ の関係は，

$$d_0 \theta = \frac{4\lambda}{\pi}, \tag{4.4.3.6}$$

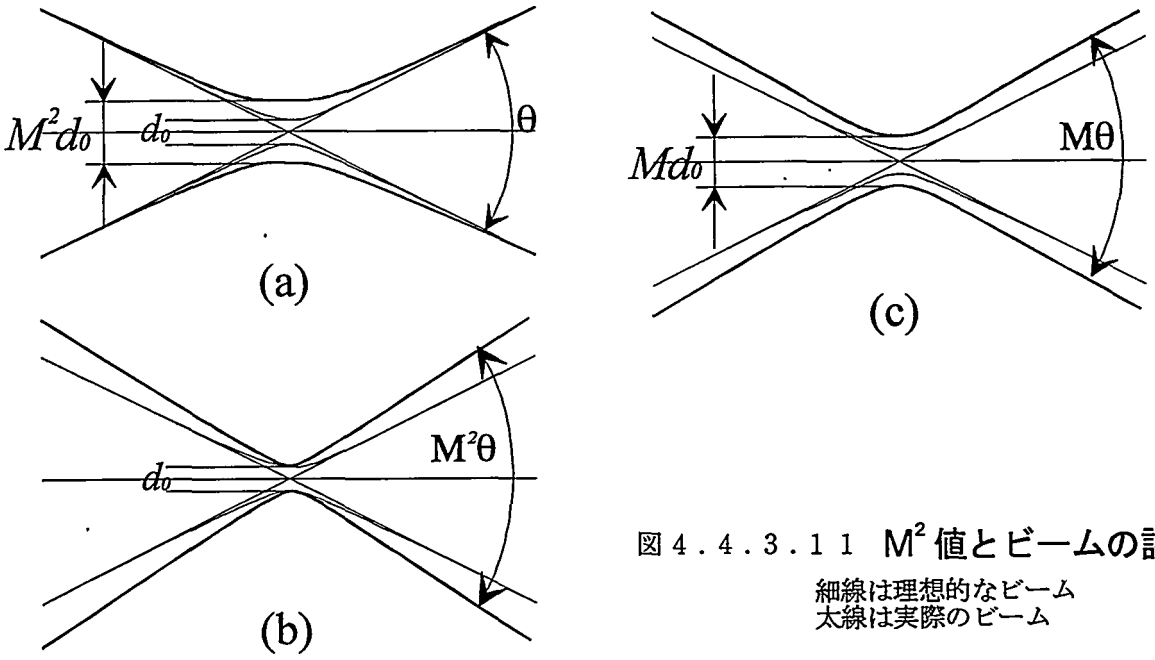


図4．4．3．11　M^2 値とビームの評価

細線は理想的なビーム
太線は実際のビーム

となるが，実際には拡がりが大きくなって，

$$D_0\Theta = \frac{4\lambda}{\pi}M^2, \qquad (4.4.3.7)$$

すなわち

$$D_0\Theta = d_0 M^2\theta, \qquad (4.4.3.8)$$

となるM^2は直径と拡がり角に適当に分担させられる．　図4.4.3.11は (a) 拡がり角は理想値に近く，ウェスト径が大きい場合，(b) はウェスト径は細いが拡がり角が大きい場合，(c) は双方ともに少しずつ大きい場合をしめす．$M^2=1$が理想的なビームの場合である．

(4.4.3.8) 式から

$$M^2 = \frac{\pi D_0\Theta}{4\lambda}, \qquad (4.4.3.9)$$

となり，このM^2をもってビームの評価に使うことが多くなってきている．

b．ビームの測定

ビームの強度分布の測定には大きく分けて，ＣＣＤや感光材料を用いていったん画像として記録してから，その感光した量（電荷や濃度等）の分布から測定する方法と，ナイフエッジでレーザービームを切断したときの強度の時間的変化とナイフエッジの位置から測定する方法とがある．

前者の場合，記録された画像イメージを解析するため，極短パルス光のビームの測定も可能である．ＣＣＤカメラを利用した場合，通常ビデオ出力でも６０Ｈｚ程度まで，特殊なものではさらに10kHz程度までの高速の繰り返しパルスに対して一発毎の測定が可能である．また，光路中にサンプル用半透鏡を多数配列することによって，光軸方向の強度分布を加えた３次元的な強度分布を得ることも可能である．測定波長範囲は，通常のＣＣＤでは約200nmから1100nm程度まで可能であり，紫外線，赤外線の領域で感度を持つ特殊なものを使用すれば，10nmから22000nmまでの広い範囲での測定が可能である．

ナイフエッジによる方法では，互いに逆方向に４５度に傾いた２つのナイフエッジを回転ドラム上に取り付け，それを回転させてビームを切断し，その時の強度変化からビームウェストの位置，幅，M^2の値を計算する2．最初の測定の後，ナイフエッジ上にビームウェストがくるように調整すると，光量が全体の半分になったところが中心の位置になるので，複雑な処理なしにリアルタイムでビームの情報が得られ，高速な測定が可能となる．

参考文献

1) A. E. Siegman, New developments in laser resonators, SPIE Vol. 1224, Optical Resonators, 1990.
2) M. W. Sasnett, T. F. Johnston, Jr., Beam characterization and measurement of propagation attributes, SPIE
Vol. 1414, Laser Beam Diagnostics, 1991, 21-32.

4.4.4　最新計測・評価技術

最近注目されている走査型プローブ顕微鏡，レーザー超音波顕微鏡，白色光干渉計等の表面測定法，装置についてまとめた．

走査型プローブ顕微鏡は，1981年にIBMで発表された，きわめて接近させた物質間に生ずるトンネル電流を検出して表面形状を測定する走査型トンネル顕微鏡（STM）をはじめに，原子間の微小な斥力，引力を検出する原子間力顕微鏡（AFM），エバネシェント光を検出する走査型近接場光学顕微鏡（Scanning Near field Optical Microscope）など，微小なプローブを精密に走査して表面の微小領域の情報を得る装置の総称である．プローブの機能により，これらの他に摩擦力顕微鏡(Friction Force Microscpoe)，磁気力顕微鏡(Magnetic Force Microscope)，非接触原子間力顕微鏡(Non Contact AFM)，表面電位顕微鏡（ＳＰＭ），電気化学プローブ顕微鏡等，多くのバリエーションが開発され，形状だけでなく，摩擦や弾性率など機械的な性質についてもnmオーダーでの測定が可能となってきている．ＡＦＭのプローブが試料から受ける力は，ファンデルワールスの力，静電気，表面張力などが複雑に関連するが，簡単には次のような近似式が使われている[1]．

$$F(d)=E^{*}\sqrt{Rd^{3}}-\sqrt{\frac{3}{2}\pi wE^{*}}\,(Rd)^{3/4}, \qquad (4.4.4.1)$$

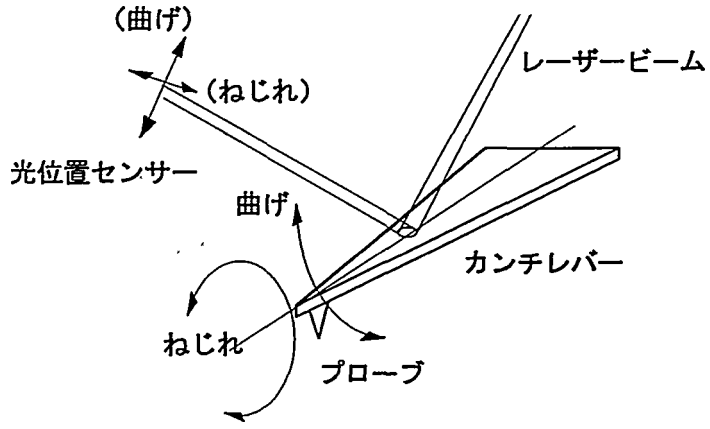


図４．４．４．１　ＬＭ－ＡＦＭのカンチレバーの動き

摩擦のような機械的な性質の測定には，試料を超音波振動子で振動させ，その時に励起されるカンチレバーのねじれ振動を検出する横振動モードＡＦＭ（ＬＭ－ＡＦＭ）や用いる[2]．図４．４．４．１のようにプローブを支えるカンチレバーが振動している試料表面に接触しようとするとき，試料からの力により，曲げが生ずると共に，横方向の摩擦力のため，カンチレバーの軸回りのねじれが生ずる．カンチレバーの背面は鏡面になっており，反射されたレーザービームの方向は曲げとねじれにより２方向に変位する．これを４分割センサーなどで測定し，曲げの量から表面形状を，ねじれの量から摩擦力を求める．試料

を面内で走査することによって2次元の（画像化）形状，摩擦情報が得られる．通常のＦＦＭと比較して，試料の凹凸の影響を受けにくい，摩擦力の実時間測定が可能などの利点がある．

弾性率の測定にはカンチレバーの固有振動数よりずっと大きな周波数で加振して，慣性によってカンチレバーを試料に押し込む現象を利用した超音波力顕微鏡（Ultra sonic Force Microscope）も開発されている[2]．

物質内部の欠陥等を映像化する手段として，超音波顕微鏡がある．超音波を試料に照射するには，超音波振動子で発生させ，音響レンズで集束しているが，液体カップラーが不可欠であり，真空や高温環境，液体により影響を受ける試料には利用が困難であった．そこでレーザーパルスを試料に直接照射し光音響効果によって，試料に超音波を発生させる方法がKesslerらによって提案された[3]．これをさらにすすめて，走査干渉縞によるバルク波の発生技術が開発された[4]：この方法では，効率よく一定の周波数の表面弾性波を発生させることができるので図４．４．４．2に示されるように，片方のレーザーの周波数を変調して干渉縞を走査することによって，表面弾性波を任意の方向に伝搬するバルク波に変換することができる

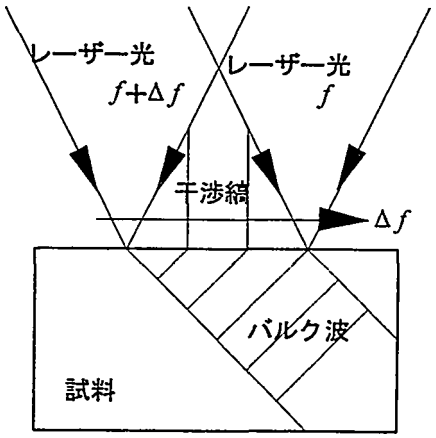


図４．４．４．２　走査干渉縞によるバルク波の発生

フォトンＳＴＭは光の回折限界をこえるものとして開発され，試料表面の近傍，およそ波長程度の近接場領域に存在する光の非伝搬成分であるエバネッセント光を利用してnmオーダーの分解能が得られるものである．エバネッセント光はたとえば，ガラス板を横から照明して全反射の状態にしておいたとき，表面に指などを押しつけると，指紋が明るく浮かび上がって見えるように，そのままでは伝搬せず，従って観測もできない光であるが，表面に散乱体が接近すると場が乱され伝搬光となって観測できるようになる．波長以下の微小な凹凸に対するエバネッセント光の存在する厚さは波長に依存せずその大きさ程度であることが報告されている[5]．したがって波長以下の大きさの微小なプローブの周囲には，それに応じて微小なエバネッセントが生じ波長以下の構造の観測が可能となる．非伝搬であることをのぞけば通常の光と変わらず，微小領域での分光分析による試料の評価の可能性がある．フォトンＳＴＭでは特にプローブの形状の影響が大きいのでその作製は重要な技術である．最初はガラス細管を加熱し伸張して作製していたが最近ではフッ酸を用いた

選択化学エッチングによる方法[6]がとられている．フォトンＳＴＭの応用としては，生体試料の計測，光エレクトロニクス用材料，素子の評価，量子ドットの発光スペクトル測定，面発光素子の評価，色素分子の蛍光測定，非線形光現象の高分解測定，金属薄膜の表面プラズモン波の検出，表面プラズモンセンサーへの応用など広範な分野が考えられる[7]．

面の形状の精密な測定法としては，従来から干渉計が用いられてきており，位相シフト法やヘテロダイン法などにより，縦方向についてはnmオーダー以下の精度が達成されている．空間的な解像力では近接場光などによらない限り，波長オーダー以下の達成は困難である．一方，位相シフト法などでは干渉縞の位相を計算することによって高精度化を達成しているが；計算結果は２π周期の繰り返しとなるため，ある程度の起伏のある面の測定には位相飛びの方向を推定して位相接続する必要性がある．傾斜が連続的に変化する場合には比較的に容易に推定できるが，リソグラフィや薄膜で作製されるようなステップ状に変化する場合には，誤った推定をする場合がある．これをさけ，解析的に２πを超える面を測定する方法として，２波長干渉計，波長掃引型干渉計[8]，白色光干渉計[9]などがある．

波長掃引型干渉計による形状測定では、光源の波長の掃引による干渉縞の変化をもとに形状を測定する。そのため、超精密加工やマイクロリソグラフィーなどによる段差のある加工面や、深い穴などがある場合でも測定が可能である。光源としては波長可変のレーザーダイオードや OPO レーザーが用いられる．参照面から物体のある点までの距離をｄ、光源の波長をλ_0としたとき、観測される干渉縞の次数mは、$m=2d/\lambda_0$で表されるものとする。光源の波長が掃引速度$d\lambda/dt$で変化する場合、縞次数が１だけ変化する時間周期をTとすると、$m-1=2d/(\lambda_0+Td\lambda/dt)$　となる。従って、干渉縞の次数の変化の周期T（またはその周期$f=1/T$）と、距離dとの関係は次式で与えられる。

$$d=\frac{1}{2}\frac{\lambda_0^{\,2}}{\frac{d\lambda}{dt}}\frac{1}{T},\qquad(4.4.4.2)$$

２波長干渉計の最大測定レンジは，波長掃引干渉計の最小測定感度になるので，この２つの方法は補完的である．

白色光干渉計は，波長幅の大きな光源を用いた場合，光路差が０のところではビジビリティの高い干渉縞が得られるが，光路差が生ずると光源の各波長成分の位相差がずれてくるためビジビリティが低下する．それを利用して波長をこえる光路差（参照面が平面なら等高線になる）を絶対的に測定しようというものである．白色光干渉計で精度を向上させるために位相シフトを導入しようとすると，通常の位相シフトでは光路差を微小かつ精密に変化させているが，位相差と光路差の関係には波長依存性があるため，白色光干渉計ではアクロマチックな位相シフトが必要となる．これは偏光素子といくつかの波長板を組み合わせ，波長板の軸方向を変化させることによって達成できる[10]．図4.4.4.3の (a) では，完全にアクロマティックではないが，可視領域において位相誤差は最大５度程度である．しかし，光強度が10％以上変化する．(b) の配置では位相誤差0.3度以下，光強度変化0.6％以下でほぼ完全にアクロマティックである．

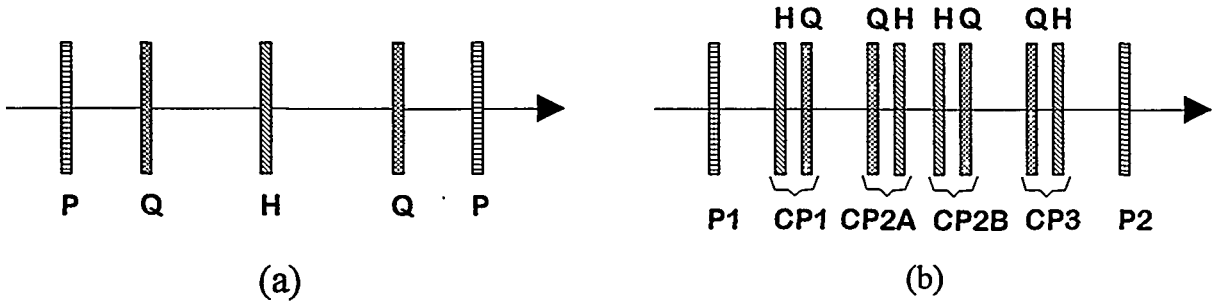


図4.4.4.3　幾何学的位相シフター

P: Polarizer,　Q: Quarter Wave Plate,　H: Half Wave Plate,

CP: Circular Polarizer

使用方法は，最初の偏光子Pで，白色光を直線偏光とし，その後 1/4波長板で円偏光とする．そして，1/2波長板を回転することによって任意の直交偏光状態として，もう一度1/4波長板で元の直線偏光状態にもどす．この時，1/2 波長板の回転量をθとすると，位相変化量は2θとなる．1/2波長板は液晶素子や電気光学素子でもよいので，高速でかつ可動部のない位相シフトが実現できる．

参考文献

1) N. A. Burnham, R. J. Colton, and H. M. Pollock, Nanotechnology, 64 (1993)

2) 山中，原子間力顕微鏡における振動を用いた材料評価技術，計測と制御，34[6](1995), 472-480.

3) L. W. Kessler, J. Acoust. Soc. Am., 55, 1974, 909.

4) K. Yamanaka, Y. Nagata and T. Koda, Appl. Phys. Lett., 58, 1991, 15.

5) W. Jhe, Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim, Makuhari 1995 145.

6) T. Pangaribuan, K. Yamada, S. Jiang, H. Ohsawa and M. Ohtsu, Jpn. J. Appl. Phys., 31, (1992), L1302.

7) 大津，フォトン走査トンネル顕微鏡技術，応用物理，65[1] (1996), 2-12.

8) M. Suematsu and M. Takeda, Wavelength-shift interferometry for distance measurement using the Fourier transform technique for fringe analysis, Appl. Opt., 30 (1991) 4046-4055.

9) P. Hariharan and M. Roy, White-light phase-stepping interferometry for surface profiling, J. Moder. Opt., 41[11](1994), 2197-2201.

10) P. Hariharan and P. E. Ciddor, An achromatic phase-shifter operating on the geometric phase, Opt. Comm., 100 (1994) 13-17.

4.4.5　まとめ

上では各項目毎に現状や問題点などを分析して述べたが，ここでは，これらの内，研究開発課題として取り上げられる問題点を，伝送システム，高品位フォトン計測制御技術に沿って，今一度整理して述べることとしたい．

光パワー伝送システムには，ファイバ伝送と空間伝送が考えられ，前者ではファイバ材料，光接続，カプリング技術などの問題，後者では，伝送に用いられる光学部品の問題がある．

光ファイバ伝送は，通信やセンサにおいて既に広く行われており，高エネルギーでも，伝送損失の少ないこと，機械的強度（可撓性，引っ張り強度）の高いことが要求されることは同様である．一方，これらと大きく異なる点は，使用する波長域が異なり，エネルギー密度が格段に高いことで，これらに起因する種々の課題がある．

ファイバ伝送では，可視，近赤外域では，純粋石英で 5×10^{6} W·mm^{-2}の比較的高いエネルギー密度を伝送できるが，さらに長波長の赤外（CO_2 レーザーなど）では，ガラスファイバ，結晶ファイバともに十分高いエネルギー密度に耐えるものや，機械的強度の高いものがなく，また，紫外域ではエネルギー密度が高くなるとソラリゼーションが生じるという問題がある．熱誘起光学歪みの少ない，機械的強度の高い材料開発が不可欠で，構造欠陥，不純物の極力少ない材料を製造，加工する技術の開発が要求される．

光ファイバ伝送においては，カプリング（ファイバへの導入と取り出し）の問題，光接続・分岐の問題がある．カプリングでは結合特性のよいビームの制御，レンズ系の材料，小型化が要求されるが，高エネルギー密度に適用できるものに改善する必要がある．一方，光接続においては，ワークの同時加工や光パワーの有効利用を実現するため，高エネルギーに耐える多分岐技術の開発が課題である．

空間伝送では，光学部品（レンズ，ビームスプリッタ，ウインドウ，鏡など）に対する課題がある．主たる問題は熱誘起光学歪みで，赤外で歪みの少ない材料 KCl の機械的強度，潮解性改善の課題の解決が要望される一方，究極の材料としてのダイアモンドに関して，大型結晶合成技術や加工，コーティング技術，さらには低価格化などが要求される．さらに，小型化，複合機能化と量産による低価格化の可能性などから，集光素子としての回折型部品の開発が望まれる．

高品位フォトン計測制御におけるビーム品質の計測では，出力パワー，発振波長等の測定は従来技術でほぼ間に合うが，レーザモード，ビーム広がり角，レーザビーム位置など空間的，時間的情報の獲得には，エリアセンサを用いるビームパターン測定が要求される．種々の波長域でビデオレート程度で観測のできるセンサの開発が課題である．

伝送に伴うビーム品質の劣化を回復するには，位相共役システムや補償光学システムが用いられる．前者では，実際に位相共役波を得るシステムの特性が十分には解明されておらず，安定な特性を実現するのに問題が残されている．特に高エネルギーの光について，高効率と安定性を満たす発生技術の開発が必要である．

一方，補償システムでは，光の波面形状，偏光状態の計測制御が課題である．前者では，波面形状誤差の正確な測定のため，新たな干渉計（位相共役干渉計など）の開発が要求される．また，それに基づく形状可変鏡の制御においては，早い応答，広いダイナミックレ

ンジが必要となる．反射型，透過型の空間光変調素子を用いる偏光状態の計測と制御では，冷却による素子の損傷回避が要求される．ただし，透過型（液晶）では，冷却が困難で，これに変わる新たな材料や技術が要求される．

研究課題を，物質，エネルギー，情報という視点からまとめ直すと，物質では，損傷・破壊閾値の高い，欠陥の少ない新材料の研究開発があり，エネルギーでは，アクチュエータと制御技術，および，超精密研磨などの加工技術，また，冷却技術の開発が要求される．一方，情報の観点からは，波面，偏光状態の測定技術，損傷閾値の標準化された測定方法の開発とそれに基づくデータベースの整備，新たな情報構造をもつ素子（回折型光学部品など）の開発，などが挙げられる．

上に示したように，多くの研究，開発課題があり，しかも開発に伴う大きな波及効果が期待できるという点で，早急に開発に取り組むべき時期である．

4．5　発生技術

4.5.1　はじめに

レーザープロセスに必要なレーザー技術とは何であるか．そして，新しく発展しつつあるレーザー技術は，それに答えうるのか．これが，調査報告書のテーマである．一方，今，発展しつつあるレーザー技術，特に半導体レーザー（ＬＤ）励起固体レーザーが内包する技術の方向は何か．これが第４章のテーマである．

発生部会には，わが国でレーザー開発の最前線に立っている大学，研究所，民間企業の多くの方々に参加してもらった．したがって，各委員が，日頃，抱えている問題点や技術開発の方向を率直に分析してもらえば，必要な答えは，自然と導出されると考える．情報交換の機会がきわめて多い現代社会では，情報の欠落が問題ではない．我々は，自分たちの研究環境や競争者達の研究状況を日常的によく知っている．したがって，本研究報告書のめざすものは，新しい情報をもたらすのではなく，それを解析し，方向性を分析することにある．むしろ，我々は自分自身がどちらに向かって進んでいるかを，はっきり認識していないことに問題があるのである．多忙な日常は，情報そのものを冷静に分析し，自らの状況を重ね合わせながら，方向性を明確化することを困難にしている．しかし，新しい研究のステップを，他人に先駆けて始めようとすれば，それには，自らの方向性を公言しなくてはいけない．方向性を発表し，公然として研究を開始するからこそ，新しい考え方が発展する．隠れて，良い結果が出れば発表しようといった姿勢では，これからの研究は発展しない．そこには研究のロジックが必要である．追いつくための研究では，研究のロジックを自ら明確化する必要はなかったが，これからの研究は，“他人には見えなかった価値を，自分たちの価値観で評価し",そこから研究を立ち上げるものでなくてはならない．

さらに強調されるべきなのは，新しい価値は，一見して質の差を感じさせるようなアイデアから生まれるわけでないということだ．完成した段階で質の差を生み出すアイデアは，未完成の段階では，単なる量の差や，組み合わせの差としか認識できないことが多い．しかし，外観にとらわれずに，その本質を抽出して，発展させるには，多少いびつであっても研究者個々人の意識，方向性を重ねて，色眼鏡で評価する必要がある．研究者の評価は，第３者評価ではない．研究は誰がやるかによって，成功，不成功が分かれる．誰がやっても成功する研究など存在しない．ならば，研究報告書の持つべき方向とは，“私たちがやるならば，こういう方向だ”，ということである．委員各位が，自由に分析し，その代わりに，私たちならこうやるのだ，という深い確信を持った報告書を作成されるように望んでいる．これは，本年度の発生部会の活動の基調であったし，そのような方向の議論が展開されたことを，全体として報告しておく．

発生部会が担当するレーザー技術の今後１０年間を展望すると，初期の５年はＬＤ励起固体レーザーが技術革新の中心を担うであろうが，２１世紀に入った後半５年間には，半導体レーザーの直接応用がかなりの部分を占めるようになることが確実だろう．しかし，このような変化は，単に，固体レーザーが半導体レーザーに変わるといった変化ではなく，これまで，単に強い光，エネルギー集中できる光というレーザー光の性質から，より高度

な光の制御ができるようになって，たとえば，光の波動性をよりよく利用するコヒーレント光としての利用が，エネルギー利用分野にも広がる，といった形になるべきだと考える．そのような段階で，ＬＤ励起固体レーザーは，半導体レーザーの本格応用の前に，良い品質をもったレーザー光では何ができるのか，といった将来のレーザー加工の本格的発展の実験段階となるかも知れない．問題は，単に，ＬＤ励起固体レーザーか半導体レーザーかの問題ではなく，“レーザー光の品質，レーザー光と呼ばれる光の中身”なのだ．そういう意味では，より重要な技術は，レーザー共振器の制御，時間，空間周波数の制御技術であり，そのためには，長い歴史をもつ光学技術の大きな革新を同時に伴わなくてはならない．この際，近年注目を浴びている非線形光学だけでなく，電子，機械制御技術と組み合わされて，人工的に光学特性に制御をかけることのできる，いわゆる古典光学的な分野も，革新的技術が生まれる素地を新しく生み出していることを指摘しておこう．今後１０年のレーザー技術の革新は，単にレーザー技術の革新以上に“光技術全般に関係した変化”であると，いう認識も重要である．

加工用レーザーの開発には，短期的な目標と長期的な目標が必要に思える．１０年を単位とした長期的な目標は，前述のとおり，大きな質的転換を伴うものでなくては，意味がないだけでなく，実際に存在し得ないだろう．一方，レーザー加工の応用分野では，そのようなレーザーが実現する前に，それらを使った応用分野を開拓している必要がある．そのためには，現状の技術を前提に，漸進的に応用研究を進めるためのレーザーが必要である．たとえば，現状のランプ励起固体レーザーでは，５００Ｗ級までは，熱レンズ効果も含めてある程度のビーム品質が実現可能である．一方，３ｋＷのレーザーのビーム品質は悪く，ファイバー伝送もままならない．その場合，５００Ｗレーザーを長パルス，またはノーマル発振状態で高繰り返しさせて，それらを６台チョッパー結合することがドイツなどでは行われている．このような試みは，最終的な解決策を与えはしないが，レーザー加工の問題点を実地に署名し，その解決策を学ぶ良い機会を与える．実際に，ものにしようと考えるならば，具体的な要求と，その要求に応えるための，現時点と将来の解決策を，短期と長期を両者，揃える計画としなくてはならない．そのためにも，単なる現状以上の，技術の本質から分析された方向性，特に将来のレーザー加工にとって必要な方向性を与えられれば，レーザーの発生部会はそれらに答えるべく，最善の努力をするだろう．なぜなら，この方向は，単にレーザー加工のみならず，レーザー技術そのものの発展方向と，完全にオーバーラップしているからである．

4．5．2 レーザー技術の現状と課題

レーザーは，無質量，高速，非接触，非アース性等の光の本来の特性と，可干渉性（コヒーレンス），指向性，エネルギー集中性，単色性等の他の技術では代替不可能な機能を持っている．そのため，出現（1960年）以来，機械，エレクトロニクス，医療，化学，材料，バイオ，エネルギー，環境等の広範な先端科学技術分野において，次代の技術革新を先導するキーテクノロジーとして活発な利用技術開発が行われ，レーザーが本質的に備えている優れた機能と多種多様なポテンシャルが実証されてきた．

表4.5.2.1は，主なレーザーの特徴と利用分野であり，後者については，基礎科学，生産技術，計測技術，通信・情報処理技術，並び医療関連技術に大別できる．周知の通り，光を情報の担体として利用する光通信・情報処理技術は，この20年余りの間に大きな産業分野を形成しており，そこでは，半導体レーザー (Laser Diode: LD) が中心的な役割を果している．一方，フォトンエネルギーを利用する生産技術や医療関連技術分野等では，著しく付加価値の高い一部の技術（高速切断・穴開け，レーザーメス等）を除くと，大きな潜在的ニーズにも係わらず，その利用技術は産業技術として充分に定着するには至っていない．

フォトンエネルギー利用技術に関するこの原因は明かである．即ち，フォトン発生源としての固体レーザー，気体レーザー，液体レーザー等のすべての高出力レーザーが「放電技術」（放電励起及びランプ励起）を基礎としており，その結果，低動作効率（2 ～ 3 %以下），短寿命，特性劣化，高電圧動作，大装置サイズ，低耐衝撃性等による「低信頼性」と「高フォトンコスト」が，産業技術としては致命的とも言える欠点となっていること，及びフォトンエネルギーが電気・力学エネルギー等とは全く異質のものであり，それを利用するための周辺関連技術が充分に成熟していないことのためである．

したがって，高出力レーザーの潜在的な能力を産業のための共通基盤技術へと高度化するには，「高効率・高出力・高品質ビーム特性」を備えた信頼性の高いレーザー技術と共に，同レーザーの「部品化・素子化技術」を確立すること，即ち，電子技術における「真空管からトランジスター・ICへ」に匹敵するブレークスルーを実現することが不可欠である．近年における高出力LDとLD励起レーザー技術の進展，必要な新レーザー材料・光制御材料の出現，及び高度な光学技術やマイクロエレクトロニクス等の周辺技術の高度化により，この技術革新を実現できる基礎は整っている．特に，LD励起固体レーザーを中心とする技術開発により，レーザーの飛躍的な高効率化，小型化，低電圧動作，耐環境性・衝撃性の向上，長寿命化とともに，その結果として，フォトンコストの低減はもちろんのこと，レーザー特性（表4.5.2.2)の著しい高度化が可能になり，フォトンエネルギーを電気エネルギー等と同等（以上）に扱えるレーザー制御技術も実現できるようになってきた．

本調査では，このような現状を背景にして，産業技術基盤としてのレーザー技術開発の方向を「完全固体化レーザー (All solid-state lasers) 技術」として集約化し，必要な要素技術（レーザー材料・光制御材料，光学素子等），デバイス技術（高出力LD等），並びにシステム技術 (LD励起固体レーザー，素子化レーザー等）について，具体的な研究開発課題を抽出すると共に，技術開発による波及効果等について考察した．

表4.5.2.1　主なレーザーとその用途

レーザー（発振波長）	特　徴	応　用　例
CO_2 (10.6 μm)	高効率，大出力，パルス／CW，赤外，長ガス寿命，安定	加工，計測，医療，CVD
Nd:YAG (1.064 μm)	良質ビーム，高出力，赤外，パルス／CW，ファイバー透過	加工，計測，医療，学術用，固体•液体レーザー励起
半導体 (0.6 - 1.6 μm)	小型，高効率，CW	光通信，各種情報処理，CD，VD，プリンター，計測
Ti:sapphire (0.7 - 1 μm)	波長可変，パルス／CW，高安定，超短パルス	分光，光化学，計測，学術用，半導体プロセス
ルビー (694 nm)	高出力，パルス，可視	医療，計測
Cu (511,578 nm)	可視，高繰り返し高出力，パルス	ウラン同位体分離，色素レーザー励起
Ar^+ (488,515 nm)	可視CW，小型，安定	プリンター，スキャナー，医療，計測，ディスプレー，学術用
He-Ne (633 nm)	小型，小出力，高安定	バーコードリーダ，計測，プリンター，ジャイロ，医療
$He\text{-}Cd^+$ (442,534,636 nm)	三原色，白色，CW，紫外CW	カラープリンタ，ホログラフィー，計測，グレーティング作製
色素 (0.32 - 1 μm)	波長可変，パルス／CW，高効率，超短パルス	同位体分離，分光，学術用，医療
エキシマ (193 - 351 nm)	短波長，高効率，高パルス出力，高繰返し，高尖頭出力	微細加工，医療，計測，半導体プロセス，学術用
F_2 (157 nm)	真空紫外，高パルス出力，大光子エネルギー	微細加工，半導体プロセス

表4.5.2.2　レーザーの主な特性とパラメータ

出力特性	パルスエネルギー (J)，平均出力 (W)，尖頭出力 (W)，強度 (W/cm^2)，効率 (%)，利得，出力安定性
時間特性	パルス幅 (sec)，パルス波形，繰返し周波数 (Hz)，CW，雑音，ジッター
スペクトル特性	発振波長 (nm)，スペクトル幅 (nm)，波長選択性，縦モード，スペクトル安定性
ビーム特性	コヒーレンス，発散角 (rad)，ビームサイズ，横モード，偏光特性，集光性，指向性，空間強度分布
運転•保守	寿命 (本体，部品，レーザー媒質)，価格，装置サイズ，重量
環境，他	耐振動•衝撃•温度•湿度•埃，安全性

4.5.3 レーザー・光制御材料

(1) 固体レーザー材料

a. 発振材料の現状

Nd^{3+}添加の多くの結晶（表4.5.3.1）[1]が提案されている．現在は実用上YAGがその代表であるが，近年発光断面積が大きく蛍光寿命の長い母材が報告されている．また最近Nd^{3+}より変換効率の高いYb^{3+}がLD励起用の発光イオンとして注目を集めている．波長可変結晶（表4.5.3.2）[2]では，高効率化のため母材中の発光イオン濃度を高くすると蛍光寿命が急速に低下するいわゆる濃度消光が問題とされてきた．Cr^{3+}:$LiSrAlF_6$ではそれが起こりにくいとされ注目されている．また高出力LDの発振波長域の拡大に伴い，LD励起波長可変レーザーが実現している．

b. 材料合成技術の現状

現在一般的なレーザー結晶の合成法は，原料融液からの固化を原理とし，チョクラルスキー(CZ)法とブリッジマン法である．得られる結晶は大型化が求められた結果，例えばCZでは，Nd:YAGで断面の直径が5インチ[3]まで到達している．しかしこれらの合成方法の問題点は，

1) 材料のマクロな光学的不均一性（結晶内にコアと呼ばれる屈折率や不純物濃度の異なる部分が存在），
2) 発光イオン濃度の不均一性，
3) 成長縞など局所屈折率変動の発生，

などがある．

発光イオンの不均一性は，Nd:YAG中のNdや$Ti:Al_2O_3$中のTiなどのように，発光イオンの母材への偏析係数が1から大きくずれると成長方向に顕著な濃度分布が発生する．またコア部は加工時に避けて加工される必要があり，そのため図4.5.3.1に挙げたような加工工程がとられる．このことは前出のYAGで5インチ断面全部は利用できないことになる．成長縞は製造条件の不安定，例えば設備電源の電圧変動や温度環境に大きく依存する．

新しい方法として，ファイバー型結晶の育成や導波路構造の合成の試みがある．図4.5.3.2は炭酸ガスレーザー加熱により引き上げられた結晶[4]の断面図である．ガラスファイバーなどと異なり単結晶ファイバーは結晶固有の異方性が出現し易く，断面形状の制御が難しい．まだ試行段階で工業的量産性/再現性を得るに至っていない．

全体としては，LD励起という励起法の革新にあわせた合成技術の検討が必要となっている．特に励起方法にあわせた形状制御合成技術の確立が求められる．

c. 具体的開発課題

ロッドやスラブ型など発振材料の形態は，主にランプ励起を目途に選ばれてきた形状である．しかしLD励起では光閉じこめ効果を持つ導波路やファイバーの重要性が増すであろうし，コンパクト化の為には，他の素子との一体化も検討される必要がある．また合成法も，これらの形状に合致した機能性結晶育成法が要求される．

材料開発は，システム化が必要である．理論分野では，バンド計算と配位子中における発光イオンの相互作用計算に基づいた新規材料探索，また実在結晶に含有される結晶欠陥と光の相互作用解明，そしてそれを実現する材料合成法の探索と有効な局所中心の評価技術開発など，理論/合成/評価が一体となって組織的に行う必要があろう．

表４．５．３．１　Ｎｄ添加結晶

結晶	熱伝導率 (W/cmK)	発振波長 (μm)	Nd濃度 ($x10^{20}cm^{-3}$)	誘導放出断面積 ($X10^{-19}cm^2$)	蛍光寿命 (μs)
$Y_3Al_5O_{12}$	0.13	1.064	1.4	6.5	230
$YAlO_3$	0.11	1.064	5.7	0.89	175
$LiYF_4$	0.06	1.047	2at%	1.8	500
LaF_3	0.05	1.064	10at%	0.2	735
YVO_4	0.05	1.064	1.1at%	20	92
$GdVO_4$		1.063	0.15	6	87
$Ca_3(NbGa)_{2-x}Ga_3O_{12}$		1.059	2.50%	0.65	161
La_2O_2S		1.075	1.13wt%	21	95
$Ca_5(PO_4)_3F$	0.023	1.065	0.1at%	5	256
$Sr_5(VO_4)_3F$	0.015	1.065	6	5	209
NdP_5O_{14}		1.051	39	1.13	115

表４．５．３．２　波長可変レーザー結晶

イオン	ホスト	吸収 (nm)	波長可変域 (nm)	蛍光寿命 (μs)
Ti^{3+}	Al_2O_3	400-600	680-1100	3.15
	$BeAl_2O_4$	400-650	750-950	5
Cr^{4+}	Mg_2SiO_4	800-1150	1130-1367	2.2
	$Y_3Al_5O_{12}$	800-1150	1360-1530	3.4
Cr^{3+}	$BeAl_2O_4$	500-700. 350-475	744-788	262
	$LiSrAlF_6$	380-520. 550-750	780-1010	67
Co^{2+}	MgF_2	1100-1600	1800-2450	40
Ni^{2+}	MgF_2		1600-1800	10msec
Ce^{3+}	$LiSrAlF_6$	250-280	(280-320)	30nsec

材料合成技術としては，従来のCZ法などの大型結晶育成技術から，2次元の薄膜，1次元の導波路やファイバー，また3次元では組成の傾斜化や形状コントロール技術が必要である．薄膜技術ではレーザー材料の長所を生かすためにも，従来のホモエピ成長から，ヘテロエピ成長の開発が課題となる．また成長法もミクロンオーダーの薄膜から厚膜化技術まで視野にいれる必要がある．またセラミックス合成法は，発光イオンの均一性が確保でき，また3次元形状コントロールが可能なことから注目される．図4.5.3.3[5]は杉本らによる，LPE法で合成されたYAG導波路の例，図4.5.3.4[6]は，池末らによる透過性セラミクスYAGの例を示す．

周辺技術としては，

1) ファイバーや薄膜材料への蒸着技術，

2) 原料と合成ルツボの高純度化，

3) 材料同士の光学接着法，

などの検討が必要である．特に加工研磨は，量産性確保のためにも自動化の検討が求められる．

d．産業科学技術への波及効果

形状制御育成技術は，共振器の小型化また発振器自体の小型化に寄与することができる．また従来別個に検討されてきた，個別部品を一体にすることも不可能ではなく，操作性の向上が期待できる．全体としてはハイブリッド型のレーザー発振器を提供できる．

また新材料合成技術への寄与も大きい．従来の発振結晶に用いられてきた酸化物やフッ化物結晶はバルク（大型結晶）からの加工（切断/研磨）という道筋がとられている．これに対し薄膜（エピ）成長技術はもともと材料の設計に適した方法である．半導体で行われているバンド構造や発光不純物の結晶中での理想的にとるべき配位状況などを計算で求めて新材料を実現するいわゆる材料設計法が，酸化物やフッ化物結晶を含む無機材料に適用できる大きな効果が期待できる．

参考文献

1) 例えば佐々木孝友,:“LD励起用Ndレーザー結晶” O plus E, No. 157(1992)94

2) 例えば 山岸喜代志,山崎貴史：“波長可変固体レーザー結晶”,レーザー研究, Vol. 23, No. 10(1995)814-821

3) 関野達夫,曽我部欣博：“YAGレーザー結晶育成技術の現状と動向”,レーザー研究, Vol. 21, No. 8(1993)3

4) R. S. Feigelson:"Pulling Optical Fibers", J. Cryst. Growth 79(1986)669- 680

5) 杉本,大石,加藤,館,下小園,須藤：“Yb, Nd共添加YAG埋め込み導波路型レーザーの作製”，信学技報，LQ95-33(1995-06) 103-108

6) A. Ikesue and I. Furumoto:J. Am. Ceram. Soc. , 78(1)(1995)225-228

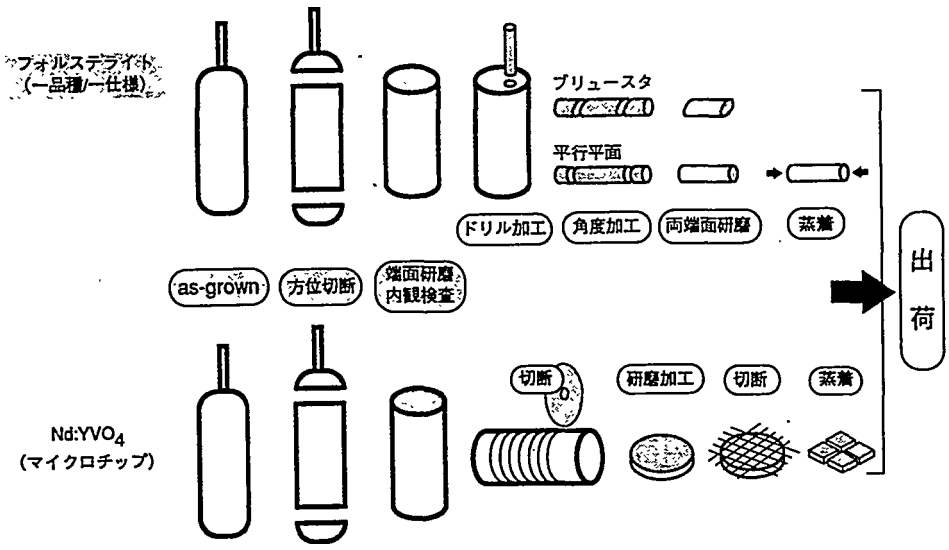


図４．５．３．１　ＣＺ育成結晶の後加工工程

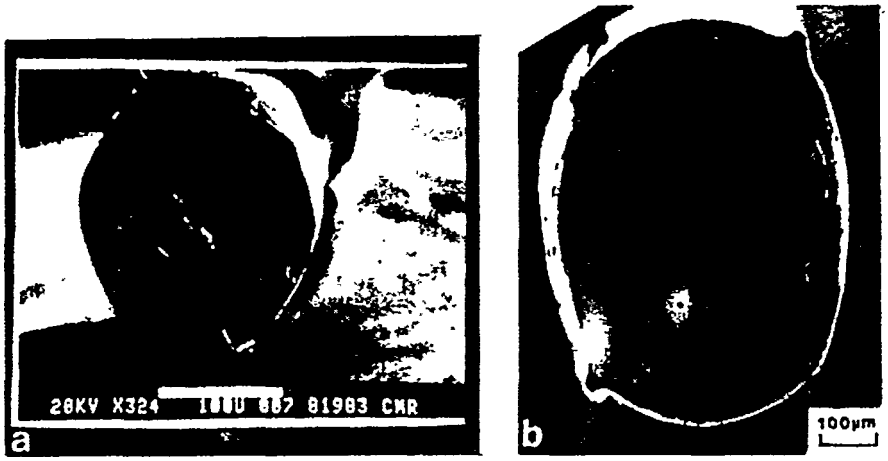
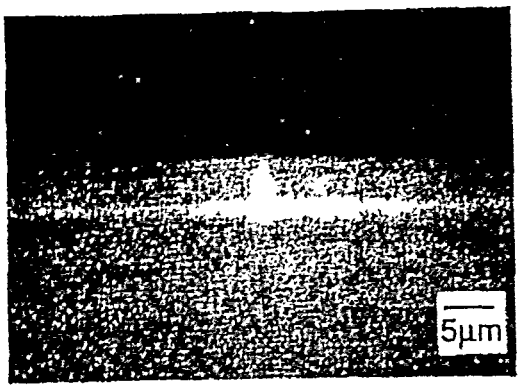
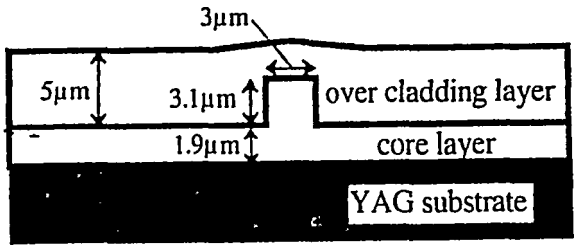


図４．５．３．２　レーザーペデストラル法で育成されたＹＡＧおよびＬＮ結晶[4)]



(a) Photograph



(b) Schematic sketch

図４．５．３．３
ＬＰＥ法とエッチング法の共用により
形成された導波路[5]

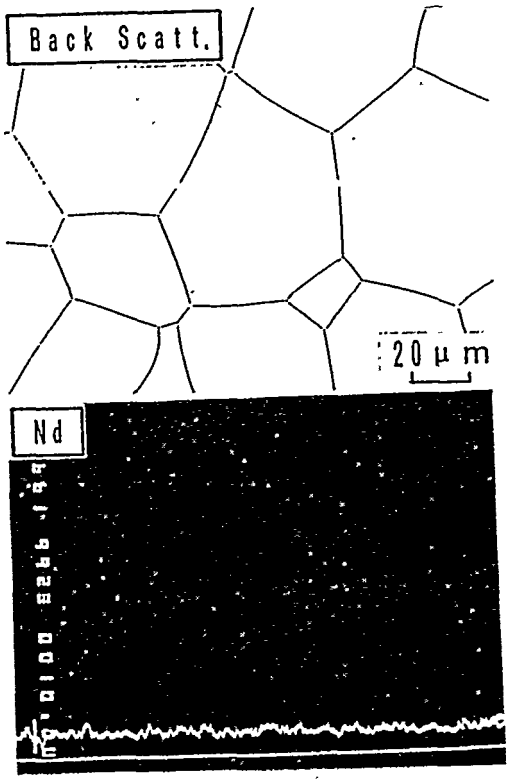


図４．５．３．４
ＹＡＧセラミックスの均一性
（ａ）は反射顕微鏡像
（ｂ）はＮｄのＥＰＭＡ像[6]

（2）　非線形光学材料

a．技術開発の必要性

1960年代に多くの光学用酸化物単結晶の研究開発が為され，その中のいくつかの結晶についてはその光学的非線形性から注目され，波長変換などの先端的な実験や光照射に伴って生じる屈折率の変化，いわゆる光損傷現象の解明などが試みられた．また，この光誘起複屈折変化現象を応用した例えばﾎﾛｸﾞﾗﾌｨｰなど先駆的な研究がこの時期になされた．しかし，時代の要求に対して先行しすぎていたことや周辺技術の未発達のため，これら非線形光学現象に関連した成果は，工業的な応用には結びつくことなくその後長いこと埋もれたﾃｰﾏになっていた．

表4.5.3.3にいくつかの主な非線形材料とその育成法をまとめて示す．これらの結晶の内いくつかは入手が困難，あるいは新規に報告された材料でその応用面からの評価が十分ではない．また，評価が進んでいる結晶においても，応用の観点から総ての条件が満たされている材料はほとんど無い．量産性に優れたＣＺ法で育成される$LiNbO_3$（ＬＮ）や$LiTaO_3$（ＬＴ）および$CsLiB_6O_{10}$（ＣＬＢＯ）[1]結晶などもあるが，非線形結晶の多くはＴＳＳＧ法などのﾌﾗｯｸｽを用いた育成が中心技術となっている．なお，非線形材料としてはこの他にかなり多くの有機材料と幾種類かの化合物半導体材料があるが，ここでは省いてある．

ＬＮやＬＴ結晶は光用途ではなかったが，SAW素子の基板として用いられたこともあり，これらの結晶に関しては結晶育成技術・加工技術など工業的な面での多くの技術的な改良が加えられ，実用に供されてきている．その後光通信が普及し，さらには画像ﾒﾃﾞｨｱの実現が予想されるとともに，特にＬＮ結晶はその電気・光学効果(EO効果)が大きなことから注目され，光ｽｲｯﾁや光変調器の研究・開発用に使用されるようになった．SAW用途で蓄積した育成技術を元に，光学用途のＬＮ結晶の改良が加えられ，光学的な意味での均質性に関してはほぼ要求を満たす水準を達成していると考えられる[2]．

しかし，例えばＳＨＧの一手法とされる擬位相整合（ＱＰＭ）用にＬＮ基板が用いられた場合に見られたように，より短波長の可視光での使用に際しては，光損傷の問題が出てき，耐光損傷性の向上が必要とされた[3]．光損傷は，結晶作製法にも依存するらしいとされていたが（ﾒｰｶｰ毎に，あるいは同じﾒｰｶｰでも結晶ﾛｯﾄ毎に耐光損傷性が異なると言われている），結晶中の遷移金属，特に鉄の不純物を低減することとＭｇやＳｃなどＬＮ結晶を構成する元素とは価数の異なる元素を添加することにより，ある程度以下の光量，あるいは800nm以上の長波長域であれば解決できる目処が付いたと考えられるが[4,5]，元素添加による結晶均質性の低下が新たな問題となっている[6]．また，非線形現象を応用する場合には，多くは短波長域での結晶特性が問題とされ，この点からも耐光損傷性はまだ不十分とされている．工業的利用があったために材料面で最も進んでいるとされるＬＮ結晶においてすら，光用途あるいは非線形用途という目で見ると，実用の水準からはほど遠いのが現状である．

一方，非線形結晶の主要な育成技術であるＴＳＳＧ法では，成長速度が遅くわずか数ｃｍサイズの結晶を育成するのに１～３週間を要することが多い．光学用途結晶の均質性に対しては通常10^{-5}程度以下の屈折率変動が要求され，このような均質性は，育成時にお

表4. 5. 3. 3　主な非線形光学結晶

結晶	略記号	育成法	供給元又は研究機関
$LiNbO_3$	LN	CZ	CTI、三井金属
$LiTaO_3$	LT	CZ	信越化学、山寿
$KTiOPO_4$	KTP	フラックス	CTI
$KTiOAsO_4$	KTA	フラックス	日立金属
$KNbO_3$	KN	フラックス	Casix、Sandotz
$KxNb1-xO_3$	KLN	フラックス、μPD	東北大、日本碍子
β-BaB_2O_4	BBO	フラックス	NEC、CTI他
LiB_3O_5	LBO	フラックス	Casix、日立金属他
$CsLiB_6O_{10}$	CLBO	CZ、フラックス	阪大、Airtron
CsB_3O_5	CBO	CZ	
$SrxBa1-xNb_2O_6$	SBN	CZ	DCI、日立金属
$BaTiO_3$		フラックス	藤倉電線他
$Bi_{12}SiO_{20}$	BSO	CZ	日本碍子
$Bi_{12}GeO_{20}$	BGO	CZ	
$Ba_2NaNb_5O_{15}$	BNN	CZ	
$KNbxTa1-xO_3$	KTN	フラックス	東北大、日立金属
$Bi_{12}TiO_{10}$	BTO	フラックス	

いて～0.5℃程度以下(育成結晶の相図にも依存するが)の温度安定性を保もちつつ，0.1～0.3℃／日程度の緩やかさで徐々に温度を下げていくことが必要である．育成に要する時間に渡ってこの精度で温度を制御することはかなり困難である．すなわち，育成時の融液の粘性，るつぼのサイズや形状，炉内耐火物などの保温構造，あるいは融液や雰囲気ガス対流など種々の物性や物理的条件が，温度変動に関与してくる上に，これらの変動要因同士が相互に作用し合うので現象はさらに複雑になる．

現在，このような複雑な系を制御する技術は確立されていないし，ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝを行うに際しても，融液粘性などの基礎的な入力ﾃﾞｰﾀが不足しており，精度の悪い計算ﾚﾍﾞﾙに留まっている．このため多くは研究者の感とﾄﾗｲ　ｱﾝﾄﾞ　ｴﾗｰで研究・開発が進められているのが現状であり，工業的製品にはなり得ていない．

ﾌﾗｯｸｽを用いる育成では，結晶を連続的に成長させていくために温度を降下する必要があるが，これは結晶の成長時間による，すなわち結晶の場所による組成変化を生じることになる．これを防ぐために大きなるつぼを用いるなどされるが，融液の温度慣性が大きくなるための温度制御性の問題や，るつぼが多くは白金などの貴金属製であるため安価性という工業的な面での問題もでてくる．これに対して，最近二重るつぼ法が試みられているが[7]，工業的な生産と言う観点からは未完の技術である．こう言った問題は，工業的観点からの結晶の大型化などとも関連しており，全固体ﾚｰｻﾞの実用性が問われつつある今，かなり現実的な解決されるべき問題点となっている．

育成に際してはこのほかに，例えばＬＮやＬＴ，$BaTiO_3$結晶と言った強誘電体結晶では，単分極化処理技術が必要とされる．また，$BaTiO_3$などのように育成温度から室温までの間でいくつかの相変化を起こす結晶もあり，これら結晶では育成後の冷却に特別の配慮が必要とされる[8]．これらの強誘電体結晶に特有の問題は，系統的に調べられている例は少なく，対症療法的な手法でとりあえず対処しているため，この面でも工業的な水準にはない．

SHGの一手法として，ﾐｸﾛﾝｵｰﾀﾞｰで分極を反転する技術，いわゆるＱＰＭ方式が最近注目されている．半導体プロセスが適用出来るので量産化に向いているし，小型化にも有利と云うことで高密度光記録用途の期待が大きく，特に日本の企業や大学などで精力的に研究が進められている．しかし，再現性よくこのような微細構造をＬＮなどの非線形材料基板上に造り込むことは，難しいとされている．基板材料と反転プロセス技術の両方からの問題解決が必要とされている．

育成された結晶は実験にせよ実用にせよ用いられる場合には，特定方位に切り出し，表面研磨や成膜などの加工を施すことが必要である．一般に非線形結晶は異方性が強いため，結晶方位や結晶面によって加工性が大きく異なることが多く，光学的に要求される精度での切り出しや研磨などの加工が困難であり，専門職人によるﾊﾝﾄﾞﾒｰﾄﾞな作業が行われており，これも工業的な観点からの問題点になっている．また，例えばLiB_3O_5（ＬＢＯ）結晶では軸方向によって熱膨張率の符号が異なるほどの異方性があり，こう言った結晶に光学的な反射膜や透過膜を安定に成膜する技術は確立されていない．

紫外域で有望視されているβ-BaB_2O_4（ＢＢＯ）やＬＢＯなどのﾎﾞﾚｰﾄ系の結晶には吸水性を示す材料が多く，これら結晶の切断・研磨加工は従来の水を用いた加工技術では対応できない．また，これら結晶が装置に組み込まれたとき，その吸水性のために時間の

経過とともに結晶劣化が起こることが予想され，このための耐水性のｺｰﾃｨﾝｸﾞ技術も実用的な観点から必須となっている．

いずれにせよ，これらの加工技術は，加工技術そのものの問題に加えて価格と量産性の点でも工業水準とはほど遠い状況にある．

大出力のレーザーを入力し，高出力の高次出力を得るような用途に用いられる場合には，レーザー損傷が問題になる．レーザー損傷は，先に述べた光損傷とは異なり，非可逆的な損傷で，材料そのものが破壊されてしまう現象である．レーザー損傷の原因の多くは表面欠陥や膜欠陥によることが多いとされているが，結晶の内部欠陥による場合も多いようである．前者に対しては結晶加工の，後者に対しては結晶の品質の改善が必要である．

ﾌｫﾄﾘﾌﾗｸﾃｨﾌﾞ効果を利用した実時間ﾎﾛｸﾞﾗﾌｨｰや非線形光素子が，次世代の光記録や光ｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞなどの観点から注目されており，特に米国で研究が活発化している．しかし，応答時間やﾗｲﾌﾀｲﾑ，増幅率などすべての要求を満たす材料はまだない．ﾌｫﾄﾘﾌﾗｸﾃｨﾌﾞ効果は光損傷と同じ光誘起屈折率変化に基づく現象で，光の照射により禁制帯にあるﾄﾞﾅｰ，あるいはｱｸｾﾌﾟﾀｰレベルからｷｬﾘｱが伝導帯あるいは価電子帯に励起され，このｷｬﾘｱが拡散してトラップされることにより，局所的に結晶内部に電場が形成され，ＥＯ効果により局所的な屈折率の変化を来す現象である．従って，結晶のﾌｫﾄﾘﾌﾗｸﾃｨﾌﾞ特性を制御するためには，ﾄﾞﾅｰやｱｸｾﾌﾟﾀｰ準位の位置や数の制御，トラップの位置や数の制御，ｷｬﾘｱ移動度の制御など非常に多くの材料的な面からの基礎的な研究が必要である．このような研究は，米国とフランスでは地道に行われているが[9,10]，日本では全く為されていない．

b．具体的な課題

以上に見たように，実用的ないし工業的な面からはもとより研究用途でも非線形結晶材料の技術課題は多く，短波長ﾚｰｻﾞｰやﾎﾛｸﾞﾗﾌｨｰ光記録など先端光技術が，実用化されるか否かは，実用に耐えるような非線形結晶材料が開発できるかどうか，さらに安定に供給できるかどうかにかかっているのが現状である．このような観点から非線形材料開発における具体的な課題をまとめると，以下の６項目になる．

１）耐光損傷性の向上，及びﾌｫﾄﾘﾌﾗｸﾃｨﾌﾞ材料の光物性制御

ＥＯ効果を持つ材料では光損傷の発生は本質的なものであり，光損傷発生を抑えるためには光励起キャリアの数や移動度，トラップの数や深さなどを制御する技術が必要である．また，フォトリフラクティブ材料の光物性制御にも，この光励起キャリアの種々の特性制御技術は共通する技術である．添加元素による不純物準位の制御，トラップ深さの制御など格子欠陥の制御技術が課題である．格子欠陥の制御のためには，これら欠陥の理論的な研究や高抵抗材の電気抵抗・ﾎｰﾙ効果測定，あるいは動的な光学測定などの評価技術の開発も必要である．

２）新結晶開発

紫外域で位相整合する非線形結晶の非線形係数は一般に小さく，変換効率が低いため高出力化が困難である．いくつかの共振器を光学的に結合させることで大出力化を目指す試みが為されているが，非線形係数の大きな材料を開発することも大きな課題である．また，

位相整合特性や温度特性でも使い勝手の良い非線形材料の開発が望まれている．中国では理論的手法で非線形性に優れたﾎﾞﾚｰﾄ系の材料を見いだし，例えばＬＢＯ結晶などのように実際育成し，その非線形特性を確認している．こう言った光学材料設計の手法は日本ではほとんど為されていなず，早急に取り組むべき大きな課題である．

３）均質性の向上

開発努力が最も払われたＣＺ法で育成されるＬＮ結晶に関してすら，光学的な均質性の技術は開発段階であり工業水準にはない．非線形結晶の多くはﾌﾗｯｸｽを用いたＴＳＳＧ法によっており，この育成法は成長速度が非常に遅いため，工業的な技術にしていくためには大きなﾌﾞﾚｰｸｽﾙｰが必要である．大きな粘性の融液から安定に育成する技術，長時間に渡る精密な温度制御技術，温度降下育成に伴う組成変化対策技術，結晶大型化技術が課題となる．これらの技術開発を効率よく進めるにはｼﾐｭﾚｰｼｮﾝが有効になると予想されるが，そのために必要な基礎ﾃﾞｰﾀの蓄積が急がれる．また，多くの因子が相互に作用し合う複雑な系に対するﾓﾃﾞﾙ化とｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ法も大きな課題となる．さらに，ＴＳＳＧ法に本質的な組成の不均一化の対策が必要であり，例えば工業的な面からの２重るつぼ育成法の改良が過大となる．

４）異方性材料の精密加工，光学被膜，及び吸湿性材料の精密加工技術

非線形材料は異方性の強いものが多く，加工特性に方位依存性が見られる．このため光学用途に耐えられるような例えばλ／10精度の加工が困難である．また，熱膨張率にも方位依存性があることが多く，このため光学的な各種の膜を加工表面に付けることが困難である．

このほかに特に紫外など短波長域で有用とされる非線形材料の多くは，ﾎﾞﾚｰﾄ系であり，これらの材料は吸湿性がある．このため従来の加工法では対応できない材料が多く，また材料の吸湿による経時変化を防止し，しかも光学特性を落とさずに材料全体をｺｰﾄするような被膜技術も必要である．

５）耐レーザー損傷性の向上

レーザー損傷の発生箇所は多くの場合表面膜と言われており，ニ)で述べた課題と同じである．一方，結晶内部でレーザー損傷が発生する場合も見られ，析出物などの結晶内欠陥の低減も，高出力用途では重要な課題である．

６）　分域の制御

光用途の強誘電体材料では，多くの場合単分域化する必要があるが，特に１８０度分域以外の分域が存在するときには，特別の工夫が必要である．

ﾊﾞﾙｸの結晶を使ったＳＨＧ方式では小型・軽量化が困難であるが，ＱＰＭ方式ではこの点で大きなﾒﾘｯﾄがある．しかし，ミクロンオーダーで分域を制御して形成する技術は，多くの努力が払われているが，必ずしも完成した技術とはなっていない．

ｃ．波及効果

前記課題が解決されることにより，短波長域での全固体ﾚｰｻﾞｰの実用化が進み，Ａｒｲｵﾝ

ﾚｰｻﾞｰやＨｅ－Ｃｄｶﾞｽﾚｰｻﾞｰなど，さらにはｴｷｼﾏﾚｰｻﾞｰなどとの代替が進むと考えられる．すなわち，全固体ﾚｰｻﾞｰの実現により，管寿命が短かい，変換効率が小さい，大電力を要する，大型装置で取り扱いが面倒であるなどの，ｶﾞｽﾚｰｻﾞｰの欠点が一挙に解消する．全固体ﾚｰｻﾞｰの長寿命・小型・軽量・低消費電力と言った特性により，ﾚｰｻﾞｰ光源の野外・宇宙等の特殊環境下での使用が可能になり，科学・技術分野や環境分野に大きな影響を与えよう．また，原子や分子の結合を直接切るようなエネルギーの高い，品質の良い短波長光が手軽に得られることになり，今後さらに進展することが予想される半導体プロセスなどの超精密加工や機能材料の開発に新分野を築くことが考えられる．

ＤＶＤ（ﾃﾞｨｼﾞﾀﾙ・ﾋﾞﾃﾞｵ・ﾃﾞｨｽｸ）も含めた光記録密度の大幅な向上が可能になり，長時間動画の記録・呼び出しが安価で小型の装置で出来るようになる．これにより動画像を各家庭で扱える真の意味でのﾏﾙﾁﾒﾃﾞｨｱｼｽﾃﾑの普及に役立つと予想されている．

光技術・産業分野では材料がとりわけ重要であるが，この非線形材料分野で日本は米国や中国，あるいはロシアの後塵を拝してきた．上記課題を日本の技術者・研究者が解決することで，材料面，さらにはその応用面の知的所有権で優位に立てるようになる．２１世紀には多くの産業領域に置いて光技術の位置づけがさらに高まる中で，こう言った面での優位性を確立することは，日本が高付加価値工業分野において主導権を確立することにもつながり非常に重要なことである．

参考文献

1）T. Sasaki, I. Kuroda, S. Nakajima, S. Watanabe, Y. Mori and S. Nakai:Dig. of Advanced Solid State Lasers Conf., Memphis, WD3, p270(1995)

2）光協会報告

3）北岡康夫，水谷公展，山本和久，加藤誠：ﾚｰｻﾞｰ研究　23，788，1995

4）Y. Furukaw, M. Sato, F. Nitannda and K. Ito:J. Crys. Growth, 99, 832(1990)

5）J. K. Yamamoto, K. Kitamura, N. Iyi, S. Kimura, Y. Furukawa and M. Sato:Appl. Phys. Lett., 61, 2156(1992)

6）古川保典，佐藤正純：日本結晶成長学会誌，17，277(1990)

7）K. Kitamura, J. K. Yamamoto, N. Iyi, S. Kimura and T. Hayashi:J. Crys. Growth, 116, 372(1992)

8）黒坂昭人：第1回位相共役・光波ミキシング研究会　p4(1993) 日本光学会編

9）L. Hesselink and M. C. Bashaw:Optical and Quantum Electronics 25, S611(1993)

10）Patricia A. Morris:Materials for Nonlinear Optics Chap. 25, American Chemical Society(1991)

（３）光制御材料

レーザーの応用において光の強度，位相，方向，周波数などの変調技術は重要である．外部の素子による外部変調にはミラーを動かす等の機械的な方法によるものと，電気光学効果，音響光学効果，磁気光学効果などを用いた方法がある．後者は制御に慣性力が働かないことから，高速，高効率の変調が可能であるが，レーザーの高出力化，短波長化に伴う光損傷の問題，高効率化のための損失の低減など材料に対する要求は大きい．また，光を空間的に，実時間で変調する空間光変調素子も情報処理，ディスプレイなどの用途で用いられているが，加工プロセスなどにおいてもビームの整形などで重要である．

ａ．電気光学材料

電気光学結晶による変調では広帯域でビームの方向が変化しない特長があるが，変調電圧が高いこと，光損傷が起きやすいなどの問題がある．高出力レーザーの場合，ビーム径を広げて光損傷を防ぐ必要があり，断面積を大きくとれる横型変調器の構成がとられる．ＩＴＯ透明電極の光損傷も問題であり，プラズマを電極として用いる場合も報告されているが，実用化のためには新規な透明伝道膜の開発が必要である．また，現在用いられているＫＤ*Ｐ，ＫＤＰ，ＬＮ，ＬＴ結晶の変調電圧は数ｋＶと高く，より低電圧で作動する結晶が求められている．ＳＢＮ結晶は変調電圧が数１０Ｖと低いが，結晶育成が難しく，光損傷が起きやすい．新しい結晶の開発が必要である．

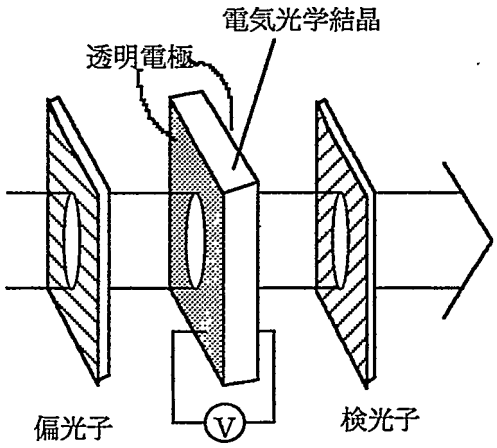


図4.5.3.5
高開口電気光学変調素子

ｂ．音響光学材料

音響光学材料を用いた変調では，超音波により物質内部に生じた屈折率の周期的変動が回折格子として作用し，光の進行方向を変化させる．材料として要求される特性は光透過性，高い回折効率，低い超音波減衰，耐レーザー損傷特性である．$PbMoO_4$ 結晶は回折格子が高く，超音波減衰も小さく，比較的大きな結晶も得られることから広く用いられているが，レーザー損傷耐性が低いという欠点を持つ．TeO_2 結晶は横波音速がきわめて遅いため，大きな偏向角が得られる．テルライトガラスは結晶に匹敵する性能を持つが，超音波減衰が大きく，高周波での使用は制限される．

高出力レーザーに対しては非線形光学効果による熱光学歪みや光損傷が問題となる．上記の材料ではＡｒレーザーに対してすう１００Ｗ/ｍｍ^{2}でビームが変形し，１ｋＷ/ｍｍ^{2}程度で表面が溶ける．高出力，短波長レーザーに対しては溶融石英を除いて，いずれの材料も非線形光学効果による熱光学歪みや光損傷の点で不十分である．回折効率が高く，熱光学的特性が溶融石英に近い材料の開発が強く望まれる．

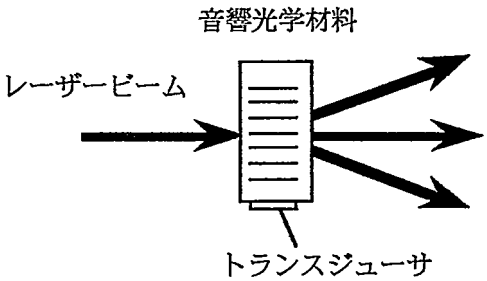


図4.5.3.6 高速･広角度偏向音響光学素子

c．空間光変調素子

電気アドレス式の空間光変調素子として液晶を用いたもの，液晶とＣＣＤを組み合わせたものが開発されている．後者ではＣＣＤに入力した二次元画像情報に対応した電荷分布が液晶に印加され，読み出し光が変調を受ける．フレームレートで１００Ｈｚが得られている．高出力レーザーに対しては透明電極の光損傷が問題となる．加工への応用では焦点位置を高速で移動できる空間光変調素子も望まれるところである．

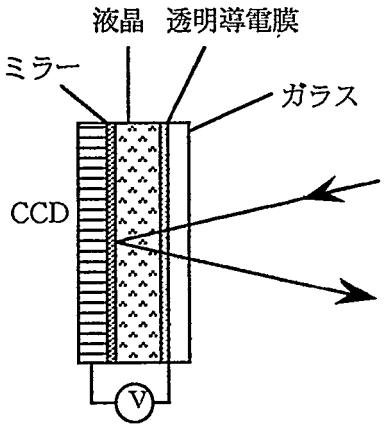


図4.5.3.7　空間光変調素子の例

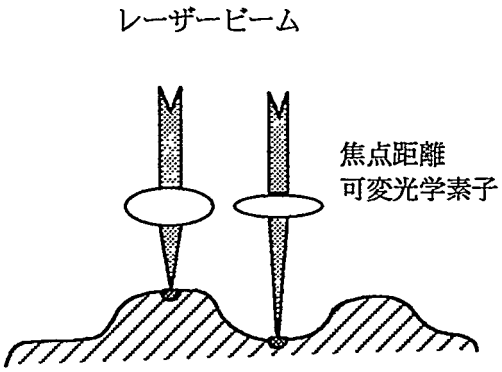


図4.5.3.8　焦点距離調節素子による加工

小型，全固体化，メンテナンスフリーの高品位，高出力レーザー装置の開発には，ここで述べたもの以外にアダプティブ光学素子，位相共役素子の一層の技術開発が必要である。

4.5.4　高出力半導体レーザー（LD）技術

(1)　高効率化・高出力化

a．まえがき

半導体レーザー（LD）はダブルヘテロ（DH）構造の導入，結晶成長技術の確立，新型構造の提案などの技術革新により高出力化，長寿命化が達成され，LDを励起光源とした固体レーザーが次世代の固体レーザーとして注目され，世界中で活発に研究，開発，製品化が行われている．

LDは1962年に実現された後，我が国においては光通信及び光ディスクの分野で急激に市場が拡大し，年間数100万個以上の生産量となり重要な工業分野が形成されている．しかし，これらのLDの光出力は高々数10mWである．このような我が国が得意とする低出力，高性能，大量生産が可能なLDは，固体レーザー励起用光源としては出力が非常に不足している．

一方固体レーザー励起に適した高出力LD及び固体レーザー材料の革新的な技術の大部分は米国により支えられており，最近ではフランス，ドイツ，中国も固体レーザーの重要性に鑑み，大型国家プロジェクトにより高出力LDの技術開発を積極的に進め，我が国を大きくリードしようとしている．

本章ではLDの高出力化の基本的な考え方と今後に残されている課題について記述する．

b．シングルLDの高出力化

LDの高出力化の主な制限要因は，LD共振器端面（ミラー面）での光学損傷と素子の温度上昇による光出力の飽和である．光学損傷に対する対策は，共振器端面での光スポットサイズの拡大である．これまでに垂直方向の光スポットの拡大については，Thin Active Layer構造，Separate Confinement Heterostructure構造等の共振器構造で対応し，水平方向については．ストライプ幅（発光部）の拡大で対応した．しかし，発光効率などレーザーの特性を落とさないで対応しなければならないので自ずと限界がある．この端面での光学損傷に対する対策の限界を越えるためには，端面窓構造化などの革新的な技術開発が必要である．

素子の温度上昇による光出力の飽和については，素子の熱抵抗の低減を図る必要がある．このためには最適な素子構造の検討，ヒートシンク材を含めた組立方法の検討，冷却方式の検討が必要である．

また，動作電流を低減することによって素子の温度上昇を抑えることも有効である．このためには発光効率（量子効率）の向上が必要である．量子効率を向上させるためには，量子井戸構造すなわち単一量子井戸，多重量子井戸，GRIN-SCH構造，歪量子井戸構造を再検討し，高出力LDに適したバンド構造を人工的に創生し，その最適化を図る必要がある．

c．アレイ化による高出力化

単一素子の高出力、高効率化を達成すると固体レーザー励起用光源として使用するために一次元及び二次元にアレイ化し，さらに高出力化を図らなければならない．このアレイ化に関しては，特に素子の冷却が重要な問題となる．この二次元にアレイ化した素子を冷

却する方式として，米国で開発されたものがある．図4.5.4.1.1に示したSiのマイクロチャンネル水冷方式がある[1]．この方式は素子の直下を冷却するため，冷却能力は非常に大きい．しかし，大量生産には不向きと考えられる，図4.5.4.1.2に代表的なヒートシンク材の熱特性を示す．現在のLDのヒートシンク材としては，銅，BeO，Si材などが使用されているが，今後はダイヤモンドをヒートシンク材料として積極的に開発し，シンプルで大量生産向きのLDアレイを開発しなければならない．

LDの放射パターンは他のレーザーと比較して広いのでLDアレイはマイクロレンズ系とハイブリッドに集積し，コリメートされたLD光出力を固体レーザーの励起にしなければならない．また高出力LDアレイをファイバーで伝送し，自由に使えるようにするために高出力LDアレイのPig Tail化を検討しなければならない．

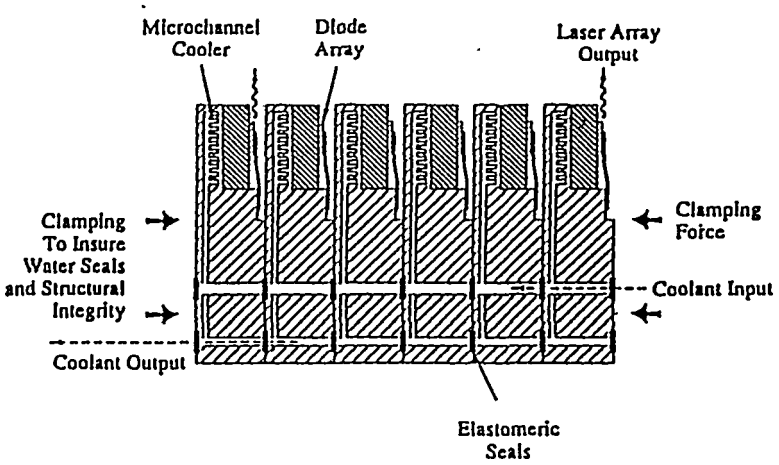


図4.5.4.1　二次元LDアレイ（マイクロチャンネル水冷）[1]

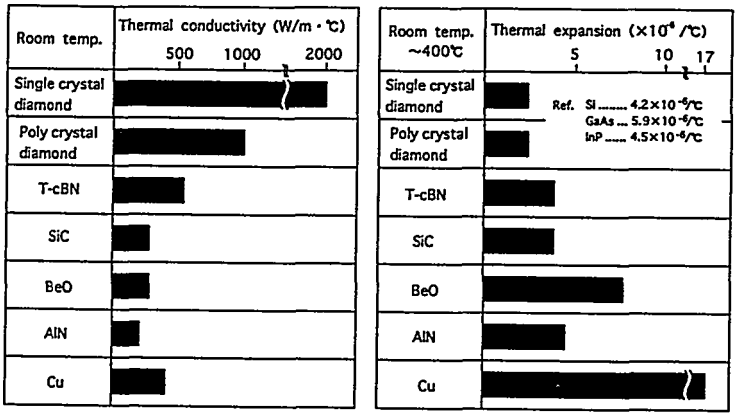


図4.5.4.2　主なヒートシンク材料の熱特性

d．将来の高品位、高出力LD

現在の高出力LDアレイは単にLDアレイの出力を大きくすることにのみ注目して，技術開発が進められている．単に光出力が大きいLDでは，固体レーザー励起用のLDとしてのみ使用可能で応用範囲が制限される．高出力LDで，しかもコヒーレンスの良いLDが可能であり，アレイ化した場合でも夫々のLDの位相が整合されているような二次元高出力LDアレイが完成すれば，LD単独でも十分民生用，産業用の応用が可能である．このようなLDとして，図4.5.4.1.3に示すようなLDと増幅器を集積したLD（MOPA）が研究されるようになってきた[2]．また図4.5.4.1.4に示した面発光型LD[3]は駆動電流が小さく，熱抵抗も小さくなると考えられる．新しい技術で位相同期が可能となるならば，大面積化することによって高品位，高出力面発光LDの可能性も考えられる．高品位，高出力LDアレイは，今後の大きな研究開発課題である．

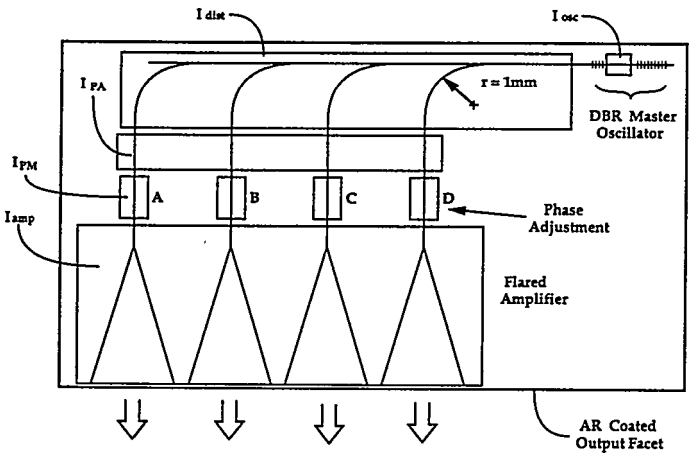


図4.5.4.3　集積化コヒーレントMFA-MOPA*システム[2]

(*Monolithic flared amplifiers-master oscillator/power amplifiers)

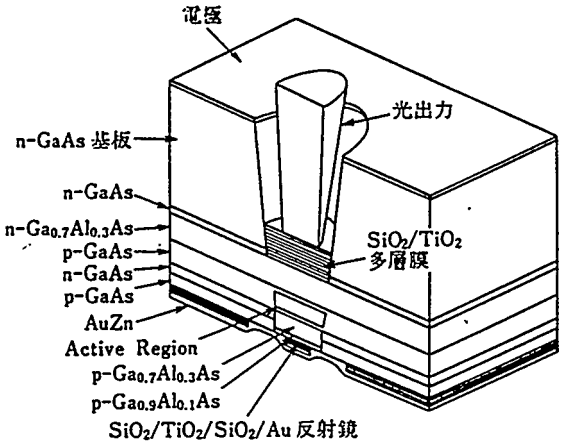


図4.5.4.4　面発光レーザーの一例[3]

e．産業への波及効果

低コストで固体レーザー励起に適した高出力LDが完成すれば，現在のガスレーザー，フラッシュランプ励起固体レーザは完全にLD励起固体レーザーに置き換わると考えられる．さらに相当な産業分野で高品位，高出力LD単独でも応用が可能となる．

以上のことより，高出力LDは新しい産業分野となると考えられる．

参考文献

1) J. G. Endriz et al. : IEEE J. Quantum Electoron, 28(1992)952

2) J. S. Qsinski et al. : Appl. Phys. Lett. 66(5)30(1995)556-558

3) K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita : IEEE J. Quantum Electron, QE-24.9(1988)1845

(2) 短波長化

短波長半導体レーザーが実用化されることによってもたらされる大きな効果は次の2点である．

・光ディスク等の高密度記録

・フルカラー表示

例えば400nmの半導体レーザーを用いると，現在CDで用いられている780nmの約3.8倍の記録が可能になり，12cmのディスクに5時間近くの音声信号を記録できる．また青色，緑色の半導体レーザーが実用化されると，既に実用化されている赤色半導体レーザーとあわせて光の3原色が揃い，フルカラー表示が可能になる．来るべき高度情報化社会を支える基盤技術として，短波長半導体レーザーの実用化は不可欠の課題である．

現在，短波長半導体レーザーの開発はII-VI族とIII-V族の二つで行われており，青色ではIII-V族，緑色ではII-VI族が主として研究されている．以下でそれぞれについて現状と今後の開発項目について述べる．

a．II-VI族

II-VI族(ZnCdSe/MgZnSSe系)ではCWで490～524nm，パルスで463～522nm，主に510nm付近の緑色での発振が得られている[1]．II-VI族での最大の問題点は寿命が短いことで，現時点では室温連続発振で数時間程度である[2]．短寿命の原因として，III-V/II-VIヘテロ界面から

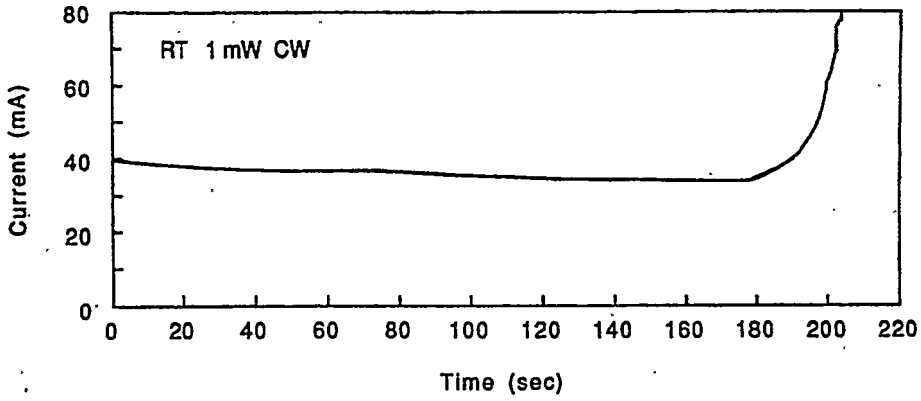


図4.5.4.5 室温連続発振におけるエイジング特性[2]

発生する積層欠陥が核となり急速劣化が起こることが明らかになっている.欠陥密度を1/10にすると寿命は約100倍になると言われており,良質な基板の開発や基板とクラッド層の間に別の層を挿入する事によって,格子欠陥を減少させる研究が進んでいる.また,動作電圧の低減化も必要である.

b．III-V族

III-V族(InGaN/AlGaN系)では410nmの青紫色での室温パルス発振が達成されている.今後,連続発振および寿命の評価が課題となる.III-V族では格子整合のよい適当な基板がないため,大きな格子定数差にもかかわらずサファイア基板が主に用いられている.サファイアには劈開性がなくGaNをエッチング加工して共振器を作成している.格子整合がよく,劈開性のある基板の開発も課題となると考えられる.

II-VI族,III-V族に共通して長寿命安定発振が必要である.そのために良質な基板と成長技術の開発が求められる.特に実用化に際しては低コストで大量に供給されることが要求され,工場レベルでの製造技術の開発が必要となる.

下表に予想される発振波長を示す[3].現時点では青色はIII-V族,緑色はII-VI族が主流で

ダブルヘテロ構造	基板	発光波長(μm) 0.4	0.5	0.6	0.7
GaInP/AlGaInP	GaAs			■	■
ZnCdSe/MgZnSSe	GaAs		■	■	
InGaN/AlGaN	Al_2O_3 SiC	■	■		

表4.5.4.1 高性能な可視光半導体レーザーの予測波長域[3]

ある.しかし短波長レーザー開発は急激に進歩しており,このまま棲み分けが行われるか,新たなブレークスルーにより一方もしくは全く新しい方式が決定的になるかは不明である.

参考文献

1) 中野　一志,石橋　晃 "ZnSSe系II-VI族半導体レーザーの現状と課題",光学,24[11](1995) 667-672

2)Satoshi Itoh , et. al "ZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSe SCH Laser Diode with a GaAs Buffer Layers" Jpn. J. Appl Phys. 33(1994)L938-L940

3) 岸野　克巳 "可視光半導体レーザーの物理",光学,24[11](1995)660-666

（3）高機能化

a．必要性

LD（半導体レーザー）の大出力化は，多数のW級LDを並列に作動させ kW級以上の出力を達成して，固体レーザー励起に使われている．この大出力LDをさらに高コヒーレント化できれば，固体レーザー励起用の集光系が飛躍的に改善されるのみならず，LD単体で従来のガスレーザーや固体レーザーに代わるコンパクトなレーザーになる．

高繰り返し化や短パルス化(ps)等の機能は，小出力LDでは達成されているので，大出力LD増幅技術ができれば，MOPA(master oscillator power amplifier)法で高出力かできる．従って，大出力化増幅に使える高コヒーレント大口径LD媒質を開発する必要がある．

b．開発の方向と開発課題

1）LDの原理的制約

LDは製造法の制約から約1μmの薄膜で，その両面に数μmの電流供給膜が必要であるが，膜の大きさへの制約は少ない．現在，幅 0.6mm，長さ 1.5mm程度の大型LDは試作されている[1]．

LDキャリアの励起寿命は約5nsで，Qスイッチで約psパルスはできるが，ns以上の長パルスでｃｗレベルより大きなピーク出力は出せない．

有効利得波長幅が約数nmであり，この範囲では波長可変レーザーとなる．

2）開発の方向

高コヒーレント化の研究例

- 位相同期並列LD[2]
  - 各LDを平行で波長程度の間隔に配置して光の滲みだしで各LDの位相をそろえる．
  - 発散角不均一，非円形断面出力パターン．
- 単一共振器内並列LD[3]
  - 多数のLDを外部共通共振器内に設定し，共振器内での光混合で位相をそろえる．
  - 発散角均一，円形断面出力パターン化可能
- 直列LD結合[4]
  - MOPA法で小型LDと大型LDを各膜に平行な光軸で結合する．
  - 発散角不均一，非円形断面出力パターン．
- 面発光LDの直列結合[5]
  - MOPA法で小型面発光LDと大型平面型LD増幅器を各膜に垂直な光軸で結合する．
  - 発散角均一，円形断面出力パターン化可能

高繰り返し，短パルス化，波長可変レーザーは小出力では通信や計測応用で使われている．従ってLD増幅器と組み合わせてMOPAを構成すれば高機能化できる．

小出力，psパルス nm波長可変LD発振器	＋	大口径（円形断面） LD増幅器

3）開発課題

国内のLDメーカは情報通信応用を念頭に置いた小出力LD開発が中心で，高出力，コヒーレントなLD開発は，米国のベンチャー企業(SDL等)や大学，国立研究所で行われ我が国は

遅れている．このような長期目標の開発は，我が国も国が主体になって開発を指導する必要がある．

①高コヒーレント化LD媒質の開発

単一共振器内並列LD動作(Talbot型共振器)技術の開発

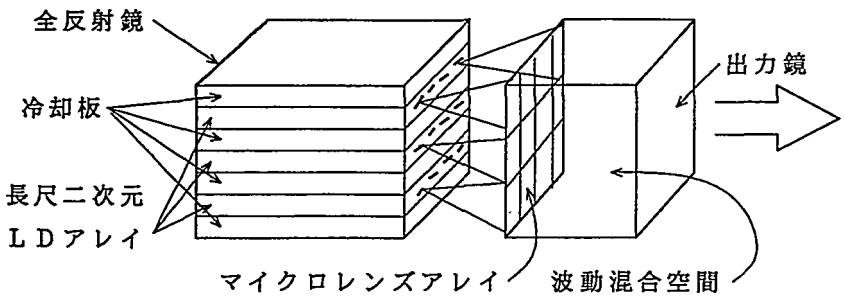


図4.5.4.6　Talbot型共振器[3]。各LDの光をマイクロレンズで集め波動混合空間にて各LDの位相同期を行う。付加光学系の損失低減が課題。

面発光LDの直列結合動作技術の開発

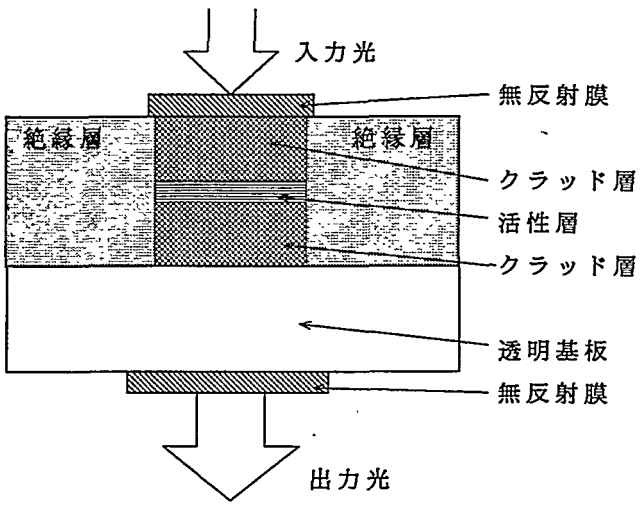


図4.5.4.7　平面型LDの光増幅器[5]。この増幅器を複数個並べてコヒーレント化レーザー媒質とする。最大口径は100μmまで試作されている[6]。課題はLD膜のミリサイズ大口径化と面内均一電流供給、レーザー光の横モード制御である。

②共振器型LD増幅技術の開発[7] 1パス増幅より大きな増幅率を得るための技術

③LD冷却技術の開発：高熱伝導の絶縁材料開発，及びLDの直接冷却技術の開発

c．産業分野への波及効果

従来のガスレーザーや固体レーザーの中小出力での利用はLD単体で代替され，且つコンパクト，高効率性から新しい適用先が増加する．計測，印刷，医用応用分野で広がる．

機械加工用固体レーザ励起用LDでも集光系が改善される．

参考文献

1) L.Goldberg,et al.,IEEE J.Quantum Electron. Vol.29(1993)2028.
2) C.Zmudzinski, et al.,Appl.Phys. Lett. Vol62(1993)2914.
3) S.Sanders, et al., Appl.Phys.Lett. Vol.64(1994)1478.
4) S.O'Brien, et al.,Elec.Lett.,Vol.29(1993)2109.
5) F.Koyama, et al.,Elec.Lett.Vol.27(1991)1093.
6) R.S.Geels et al.,IEEE J Quantum Electron.Vol.29(1993)2977.
7) 小山二三夫,応用物理 Vol.64(1995)13.

4．5．5 高機能光学素子技術

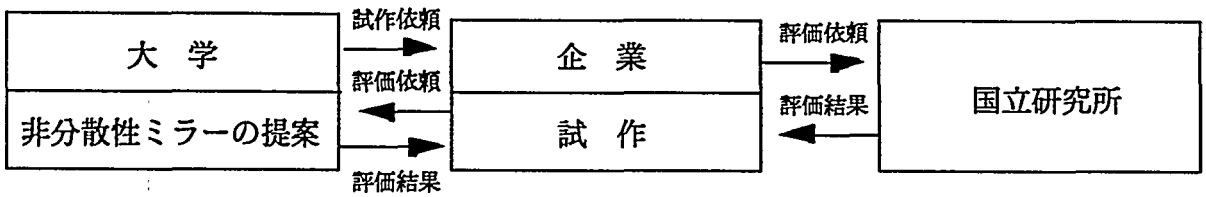
（1）高性能光学素子

産業界で利用されているCO_2レーザーは，金属の溶接，切断，焼き入れなどに，またＹＡＧレーザーは半導体分野で穴あけ，スクライビング，マイクロ溶接，トリミング，マーキングなどの微細加工などに活用されている．これらのレーザー装置で必要な光学素子の大部分は国産技術を用いて供給が行われている．

最近では，コンパクト，長寿命，メンテナンスフリーの全固体化紫外レーザーが産業，医学，生物学などの分野で期待されている．さらに，紫外～赤外域まで波長可変なレーザー，或いは超短パルスレーザーも出現している．これらのレーザーを構成するレーザー材料，波長変換材料，励起光源，ミラーなどは，その殆ど全てを輸入に頼っているのが現状である．このため，日本で開発中のレーザーは二番煎じとなり，諸外国を凌ぐことは不可能である．

なぜ，このような状態になっているか．その理由は，大量生産指向の日本の産業構造，さらにはこれを強力に支える国のプロジェクト推進の政策にあると言わざるをえない．21世紀は”光の時代”と良く言われている．真に，光の時代の先駆者となるためには，レーザーを支える最も基本的な光学素子開発を産官学の協力で遂行していく必要がある．

なぜ産官学の協力が必要であるのか．例えば，レーザーミラーを例にとって説明する．



超短パルスレーザーに用いる分散のないミラーを開発する場合，大学の研究者が企業に試作を依頼する．企業は試作品を評価するための十分な設備がないため，大学あるいは国立の研究所に試作品の評価を依頼する．テスト結果は，さらにミラーの開発にフィードバックされ，このフィードバックを何回か行うことによってようやく非分散性のミラーが完成するが，このための費用は膨大な金額となるため，国のプロジェクト以外では開発困難である．各方面への応用を目的とした新しいレーザー開発を行うためには，その構成要素である光学素子開発を産官学の協力によって推進すべき時代となっている．

ａ．現状とニーズ

１）紫外波長域用光学材料

最近，高出力紫外レーザーが大いに進展しており，レーザーＣＶＤ，加工，新素材製造，同位体分離，リソグラフィー，Ｘ線発生，医学，バイオテクノロジ，核融合などの各種分野で期待されている．この紫外域レーザーには，ウィンドー，ミラー，レンズ，位相差板，偏光子などの光学素子を必要とするが，これらの寿命やレーザー損傷などを考えた場合，現状では多くの問題がある．

<u>反射用基板材料</u>

高反射ミラー用の基板材料では化学的に安定，加工が容易，研磨による表面粗さが小，熱膨張が小さい材料を用いれば良いので，BK-7 を用いている．特別な場合として，温度

変化が問題となる時には，石英，Zerodur，ULE などを，熱伝導性が必要とされる場合はシリコン，SiC などを用いることができ，特に開発を必要とすることはない．

透過用基板材料

ウィンドー，半透過形ミラー，レンズ，偏光子，ビームスプリッターなどのように透過で用いる基板材料では，前述の反射用基板材料で必要とされる条件以外に，指定波長での吸収・散乱損失ができるだけ小，屈折率均質度が ±１０$^{-6}$以下，内部に泡や不純物の混入がない．レーザーによるソラリゼーションや損傷の発生がない材料が使われる．

紫外波長域で用いられる光学材料としては，図4.5.5.1で示したような分光透過率を有する石英ガラス，サファイヤ（Al_2O_3），CaF_2，MgF_2，LiF などがある．

Al_2O_3　波長２００nm 程度まで使用可能であるが，入手可能な寸法は４０mm ϕ くらいまでであり，屈折率均質度も余り良くないため，開発をする必要がある．

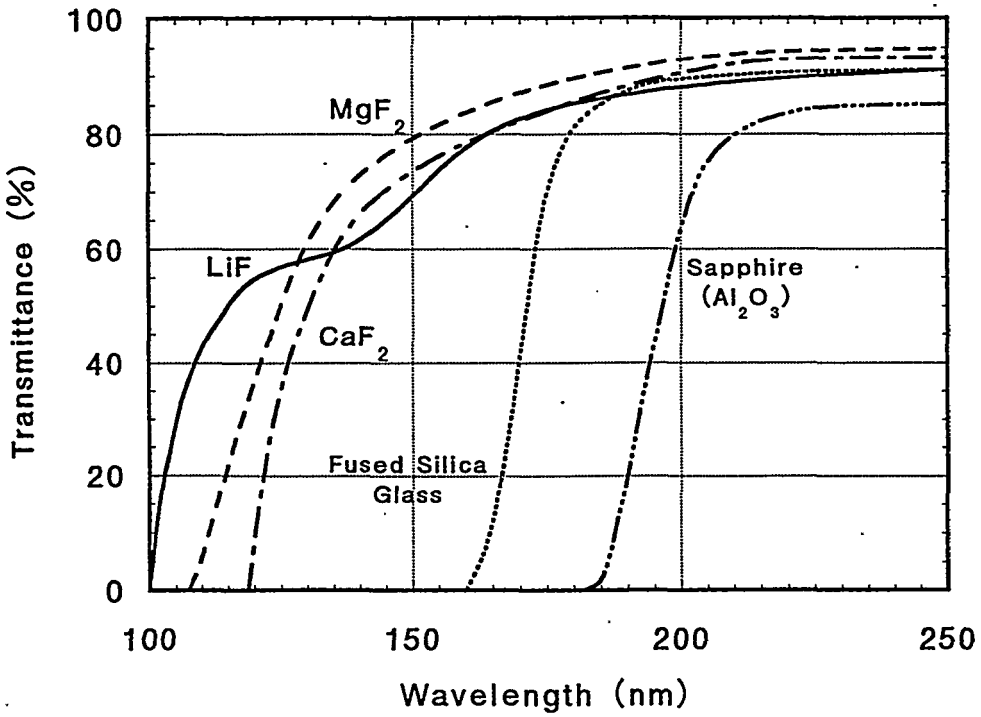


図４．５．５．１　各種紫外域用光学材料の分光透過率

MgF_2　MgF_2 は，波長１２０nm 付近まで光を透過するが，市販品の最大寸法が３０mm ϕ 程度であり，非常に高価であるため入手が困難な状況にある．この結晶は，製造メーカーによって透過率および屈折率均質度に大きな差があり，かつ同じメーカーの品物であってもバラツキがある．より大口径で，均質度が高く，透明度の高い結晶を開発する必要がある．この開発には，原材料メーカー，結晶製造メーカー，大学，国立研究所の共同開発が不可欠となる．

石英ガラス　このガラスは，一方向脈理なしの材料に関しては，直径１m程度までは屈折率均質度 ±２×１０$^{-6}$程度，紫外レーザー光による劣化のないものが入手可能である．

しかしながら，三方向脈理なしの材料，および波長２１３ nm （Nd：YAG レーザーの５倍高調波）以下の紫外レーザー光によるソラリゼーション損傷のない材料については開発する必要がある．

CaF_2 寸法２５０ mm ϕ までは市販品を入手できる．ところが，この結晶も屈折率均質度，透過率，カラーセンターの生成などが製造メーカーによって大きく異なる．これらは，結晶育成技術，原料の不純物含有率に依存するため開発を要する．

ＬｉＦ 波長１００ nm 付近まで光を透過し，大口径の結晶育成が可能である．この結晶は，真空紫外光照射によりカラーセンター（Ｆセンター）が容易に生成される結果として透過率が急激に悪くなるという欠点を有する．

前述の光学材料は，紫外レーザーにとって不可欠であり，現状では良質の材料を安価に入手することは不可能である．このため，国家プロジェクトで開発すべきだと考える．

２）加工技術

光学素子は，材料の切断，荒摺り，砂がけ，研磨，表面処理などの工程を経て完成する．光学素子としての精度を出す作業は，研磨および表面処理でほぼ決まってしまう．レーザー用の光学素子は，他の産業用光学機器に用いられている光学素子と比べて非常に高精度であり，平面度 $\lambda/5$ 以上，ディグ＆スクラッチフリー，表面粗さ５ Årms 以下であることが望ましい．この加工のためには，従来の横振り研磨方式では不可能となり，輪帯ラップ面を用いた遊星研磨が利用される．この方法では，平面については完全な等圧・等速弾性加工が可能で研磨剤の種類，粒度，ピッチの種類・硬度，研磨液の温度などに注意をすれば前述の精度を容易に達成することができる．

この遊星回転方式の研磨機はリングポリシャーと呼ばれており，Johanson が1896年に導入した遊星運動研磨法によるもので，その原理図を図4.5.5.2に示す．リング状で中心部の抜けたラップ面がその中心を軸として角速度Ωで回転する．ラップ面上にワークを置き，これを角速度 ω で回転させる．ω とΩとを等しくするとワークのすべての点とラップ面との相対速度が等しくなる．ラップ面が均一で圧力分布が一定であればワークの各点は同じ速度で研磨される．ドレッサーでリングポリシャーのラップ面を常に修正しながら研磨する．この方式を用いてもワークおよびラップが内部温度分布を持ち，サブミクロンオーダーの熱変形をする．この熱発生を最小とするにはリングポリシャーを低圧・低速で稼動し，温度制御した研磨液をうまく循環させるなどの注意を払って熱管理する．このリングポリシャーを用いれば，直径1m に近いワークを $\lambda/10$程度の精度で研磨できる．さらに，表面粗さを１ rms 以下とすることも可能である．今まで述べた研磨精度は，石英ガラス，BK-7ガラス，Zerodur，ULE，SiC などのように硬い材料に対するもので，水に溶けやすく，軟らかい KDP，BBO，LBO，CLBO，有機材料などの場合は前述の精度をだすのは困難である．

一般に，軟質性材料の平面度，表面粗さなどの光学精度は，オイルなどの液体にサブミクロンのダイヤモンドパウダーを懸濁した研磨液を用いて研磨するが，ワーク表面に多数

のスクラッチが発生する．図4.5.5.3は，CLBO結晶をダイヤモンド懸濁液で研磨した場合のノマルスキー顕微鏡写真を示す．図から明らかなように多数のスクラッチが見える．親水性の材料では，このスクラッチの部分が主に水和層を形成し，変質してくる．このため，このような材料表面にコーティングをしてレーザー光を照射し続けると，膜は白っぽくなり，ついには剥離してしまう．

スクラッチやディグのない研磨面を得るには，液体に分散しやすく，尖った部分がなく球状のサブミクロンサイズの微粒子の開発が急務である．また，λ/10以上の平面度はラップ盤に用いるピッチの種類・硬度で決まるため，ワークに適合したピッチが必要となる．

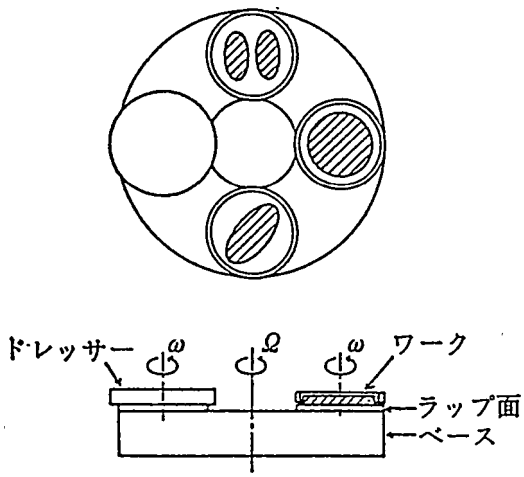


図４．５．５．２　リングポリシャーの概略図

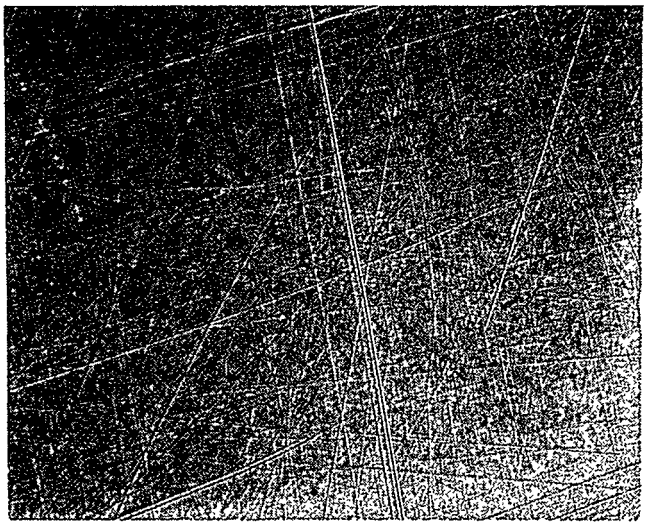


図４．５．５．３　光学研磨したＣＬＢＯ結晶表面のノマルスキー顕微鏡写真

3）コーティング技術

最近のレーザーは，励起用電源の高性能化，或いは強力な励起光源（高出力半導体レーザー，アルゴンイオンレーザー）の開発により，高尖頭・高平均出力，波長可変，超短パルスの出力ビームを発生できるようになってきた．また，非線形光学結晶を用いれば高出力紫外レーザー光を簡単に発生できる．このようなレーザーの実現，安定動作，および寿命はコーティング技術に大きく依存する．

従来の抵抗加熱や電子ビームを用いた蒸着膜は

①薄膜中に多数の小塊（module）が存在

②高散乱

③低付着力

④湿度変化による光学膜厚の変化

などが大きな問題となり，最近の高性能レーザーに用いられている光学素子用の蒸着膜としては十分に対応できなくなっている．

次に，蒸着物質を考えてみる．表4.5.5.1は，紫外波長域で使用可能な蒸着物質を示す．これらの物質中で，フッ化物で製作した膜は酸化物に比べて散乱が1桁以上も大きくなる

表4．5．5．1　紫外域レーザー用蒸着物質の透過帯域とその屈折率

蒸着物質	透過帯域（μm）	屈　折　率
CaF_2	0.15～12	1.23(0.546μm)
NaF	0.25～14	1.34(0.55 〃)
Na_3AlF_6	0.2 ～14	1.35(0.55 〃)
LiF	0.11～7	1.36～1.37(0.546〃)
MgF_2	0.11～4	1.38(0.55 〃)
SiO_2	0.2 ～9	1.46(0.5 〃)
ThF_4	0.2 ～15	1.48(0.5 〃)
Al_2O_3	0.2 ～7	1.62(0.6 〃)
ZrO_2	0.34～12	2.17(0.266〃)
HfO_2	0.22～12	2.15(0.25 〃)
Sc_2O_3	0.2 ～13	2.11(0.248〃)

ため，特別な場合を除いて使用されなくなってきた．したがって，Nd：YAGレーザーの4倍高調波までの蒸着物質としては，低屈折率物質が SiO_2，高屈折率物質は Al_2O_3，HfO_2，Sc_2O_3のみとなり，5倍高調波に対しては SiO_2，Sc_2O_3，Al_2O_3しかない．さらに，200 nm 以下ではフッ化物のみである．以上のように，コーティングに関しては問題が山積みしている．これらを解決するための研究開発課題は，以下のように考えられる．

<u>蒸着法</u>

イオンビームスパッター法，マグネトロンスパッター法，ゾル・ゲル法などを光学素子

ため，の用途，使用波長に応じて用いる．

蒸着物質

酸化物，フッ化物以外に，金属ターゲットを用いる．金属ターゲットは酸素を導入することにより容易に酸化物となるため，高純度の薄膜形成が可能となる．さらに，新しい蒸着物質の開発も行う．

コーティング

紫外波長域で高レーザー損傷，高付着力，長寿命のＡＲ膜，ＨＲ膜，偏光膜，回折格子を開発する．このためには，前項で開発された蒸着法，材料を活用する．回折格子に対しては，リソグラフィー技術も併用する必要がある．

（２）光学部品･素子の集積化･高機能化

レーザー･光制御における光学部品･素子は，以下の３点に大別できる．

a. 励起源とレーザー媒体，レーザーと光ファイバーあるいは，光ファイバーと光ファイバーを高効率に結ぶ結合光学素子

b. レーザー共振器内でのモード補正･選択素子

c. ビーム位置･形状を制御する空間変調素子

これらは，光の屈折あるいは，回折現象を利用し，光波面を空間的に制御することによって実現できる．

ａ．結合光学素子

励起源である半導体レーザーは，隣接した複数の光源（出射点）から構成され，出射された各々の励起光の形が縦横非対称である．この半導体レーザーとレーザー媒体を効率よく結ぶ結合光学系には，励起光とレーザー媒質内のレーザーモードを空間的に重ね合わせ高密度に集光することが求められる．

このためには，マルチアレー半導体レーザーあるいは，マルチアレーをスタックした半導体レーザーの光を高密度に集光する素子が必要となる．半導体レーザーの各々のアレーに対応したマイクロレンズアレーと全体を集光する通常のレンズを用いた場合，拡大光学系となり高密度に集光することは困難となる．これを解決する為には，各アレー間の光の位相関係を調整する機能を付加する事が求められる．また，これらの光学素子を半導体レーザーと一体化して形成することも試みられている[1]．

さらに進んだ形態として，半導体レーザーの出射する光波面の制御･アレー間の位相を同期する機能を集積化した半導体レーザー素子の開発が必要になる．

これらの技術は，励起源としての半導体レーザーのみでなく，半導体レーザー光をプロセスに直接用いる場合も重要な技術である．また，複数の光ファイバーから１本の光ファイバーへ高効率に結合する素子の開発も重要と考えられる．

また別の視点からは，集光したマルチアレーからのレーザー光をシングルモードに変換するモード変換材料（レーザー材料）としての半導体[2]も考えられる．

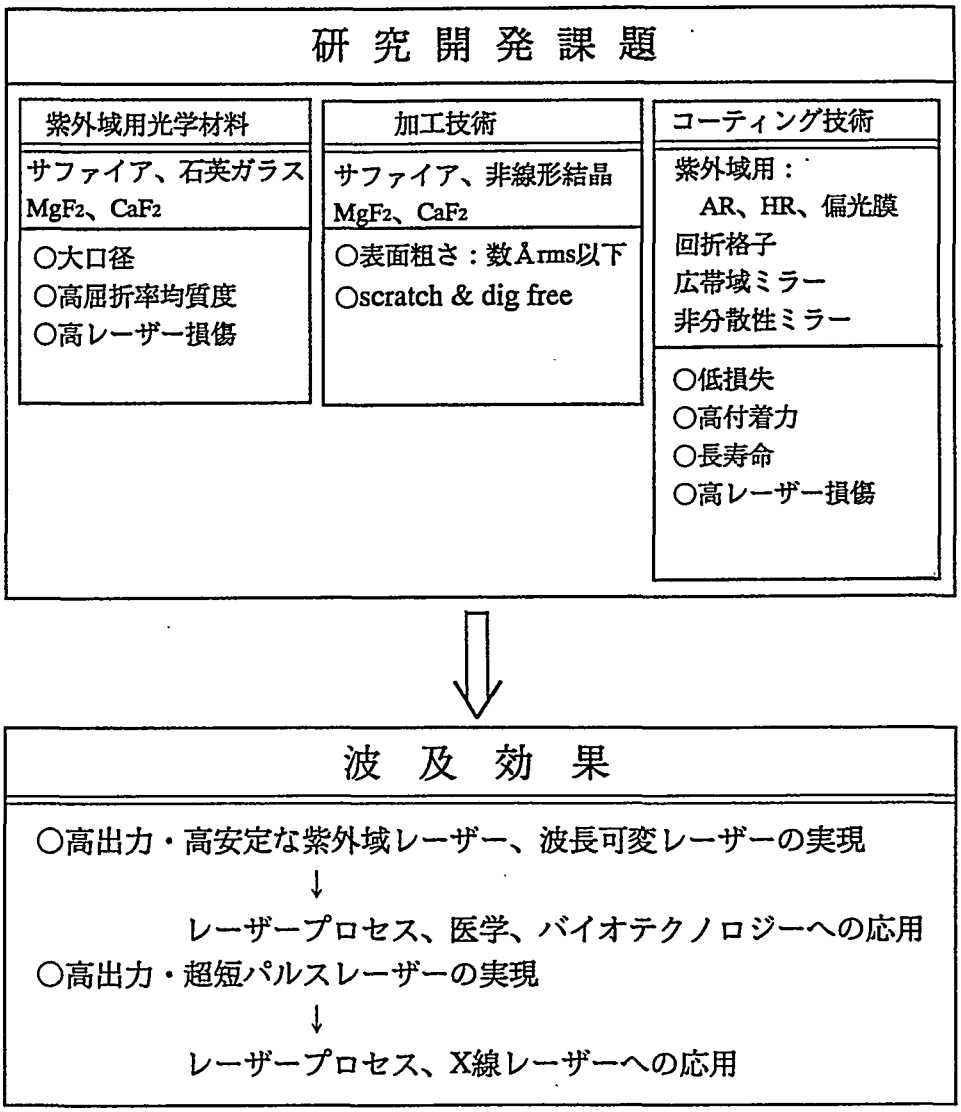
b．モード補正・選択素子

高出力の固体レーザーでは単一横モード発振を得ることは非常に困難である．これは，レーザー媒体の熱レンズ効果による横モードの乱れと，閾値を大きく上回る励起状態では高次横モードの利得が共振器損失を上回ることで発振可能となる為である．これらを補償する試みとして，共振器ミラーの曲率を外部から制御したアダプティブ光学素子[3]や，非線形媒体を用いた位相共役鏡[4)5)]がある．

横モードは，遠視野像では強度分布として，近視野像では光波面の歪として表される．光波面を変換・制御する方法として，光の回折現象を利用し，リソグラフィーによってガラスなどの表面に凹凸を作製したバイナリー光学素子[5)6)]がある．これを用いて共振器内の光波面を制御し高次横モード発振を制限できる可能性がある．

また，熱レンズ効果は，レーザー媒体の温度分布が安定するまで経時的に変化し，必ずしも軸対称とは限らない．このためレーザー発振初期と安定状態ではビーム品質が異なり，これを解消するためには能動的なモード補正・選択素子の開発が必要である．

表４．５．５．２　高性能光学素子の研究課題および波及効果



ｃ．空間変調素子

光の波面を制御することによって任意のスポット形状を任意の位置に作り出すことが出来る．弾性表面波によるグレーティングを使った可動部分がない光ピックアップは既に試作されている．

バイナリー光学素子の発展形として，電気光学効果を持つ材料，圧電性の材料を使い外部から制御することで最小限の機械的な可動部分によって短時間の内にスポット形状・スポット位置を変えることが可能になる．また，マルチモードレーザーに対しても，アダプティブ光学素子のような外部制御可能な能動光学素子の開発によってビームの方向，スポット位置を変えることができ，多彩なプロセス用途への適用が可能になると考えられる．

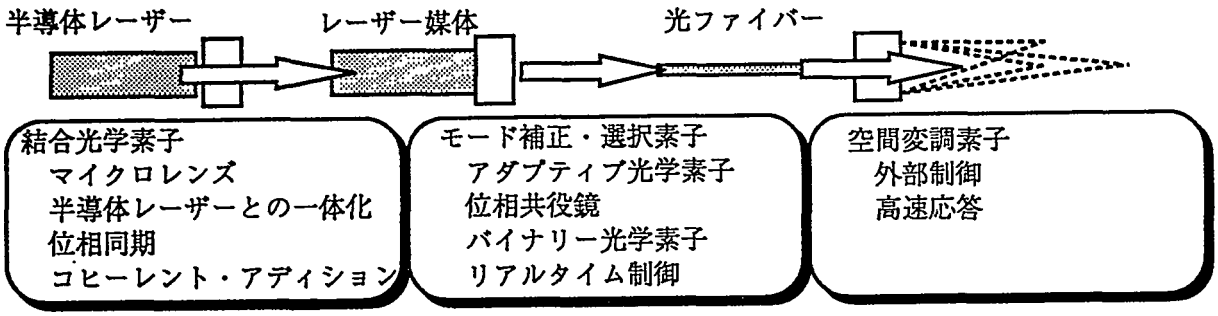


図４．５．５．４　各素子のキーワード

参考文献

1) 嶋田純一，大口脩，澤田廉士，"プレーナ技術で作製するマイクロレンズ（Ⅱ）-ＬＤとの一体化"，第37会応用物理学会関係連合講演会 28a-SA-17 pp-910(1990).

2) 例えば， USP-5461637(1994.03.16).

3) 鶴田匡夫："アダプティブ・オプティクス"，OplusE, No. 180, pp100-110(1994)11.

4) 吉田英次，吉田國雄，田中和夫："位相共役鏡による固体レーザーの高性能化"，電気学会・量子デバイス研究会資料，OQD-92-9(1992)1.

5) "光技術動向調査報告書ＸＩ"，光産業技術振興協会，7-002，(1995).

6) J. R. Leger, M. Hoiz, G. J. Swanson and W. B. Veldkamp, "Coherent Laser Beam Addition:An Application of Binary-Optics Technology", Lincoln Labratory Journal, 1(1988)225- 246.

4．5．6　LD励起固体レーザー技術

(1) 高効率化・高出力化

レーザーが産業界でより広く利用されるためには，コストパフォーマンスを改善する必要があり，レーザーのより一層の高効率化と高出力化が最重要課題となる．現状においては，図4.5.6.1に示されている通り，ランプ励起固体レーザーでの電気入力からレーザー光へのエネルギー変換効率は高々数％程度である．高出力レーザーとして知られているガスレーザーの励起には，放電や電子ビームによる電子衝突，化学反応や断熱過程を利用した熱平衡状態変化等が適用されているが，変換効率は20％に満たない．

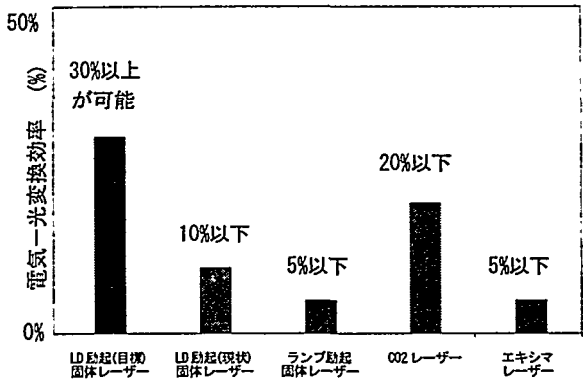


図 4.5.6.1　高出力レーザーの総合効率

高出力レーザーを更に高効率化するためには，電気入力からレーザー媒質へのエネルギー移行の高効率化と，レーザー媒質に吸収されたエネルギーの出力ビームへの変換の高効率化の双方が課題となる．半導体レーザー (LD) を利用した光励起は，注入電力の40～70％と，他の方法に比較してはるかに高効率で励起エネルギーを得ることが可能であるので，着目されている．さらに，LDは出力光の指向性とエネルギー密度が高く，波長をレーザー媒質の光吸収率が高い波長と一致させることが可能であるため，励起光のレーザー媒質中への移行の高効率化と，レーザー媒質中に移行した励起光のレーザー媒質への吸収の高効率化が同時に可能である．また，レーザー媒質の励起領域を固体レーザー出力の目的のビームモードの発振領域にあわせて制御できるため，高いビーム結合効率を得ることも可能である．結果として，図4.5.6.2に示す通り，総合効率がLDの利用によりランプ励起の数倍以上になる．現状では，励起源としてのLDの高効率化と，レーザー媒質が吸収したエネルギーの固体レーザー出力への変換の高効率化とが両立されていないため，高出力

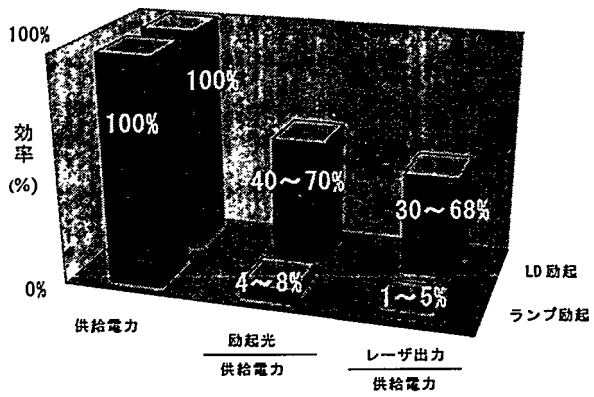


図 4.5.6.2　LD励起とランプ励起の比較

LD励起固体レーザーの総合効率は10%程度である．LDの高性能化，レーザー媒質の特性向上，励起方式の改良，共振器構造の改良等によりこれらを両立させることにより，総合効率で30%以上が可能となる．

LD励起固体レーザーの高出力化には，スケーラビリティの利用が可能である．つまり，励起エネルギーや励起体積を増加することでレーザーを高出力化できる．また，レーザーを高性能化，小型化するためには，レーザー媒質を高密度励起する必要がある．そのため，高励起密度下での熱複屈折や熱レンズ効果等による発振効率低下やビーム品質低下を，軽減もしくは補償できるレーザー共振器について，様々な考案がなされている．これらは，表4.5.6.1に示される通り端面励起方式と側面励起方式とに大別される．

端面励起方式では，レーザー媒質の高密度励起が容易であり，励起領域も容易に発振ビームに一致させることが可能であるため，高品質ビームを得やすい．しかしながら，本方式において励起体積や励起用LDを増加させることは，媒質端面からの励起であるため本質的に困難である．図4.5.6.3に端面励起方式のLD励起高出力固体レーザーの例を示す．本例では，固体レーザーユニットを共振器中に直列に2個配置してCW発振モードで出力92Wが得られている[1]．同ユニットにおいては，レーザー媒質の両端面に，出力15WのLDが円周上に4個ずつ設置されている．

側面励起方式では，励起体積を容易に大きくとれるため，励起用LDを増加させることによる大出力化が比較的容易に行える．一般的にビーム結合効率は端面励起よりは低いが，高出力化を行っても，レーザー媒質中の励起分布の制御や，熱歪みの補償等は端面励起方式の場合に比較して容易という利点がある．図4.5.6.4に側面励起方式での高出力固体レーザーの例を示す．本例においては，ロッド型レーザー媒質の側面から，出力10WのLDを均一に108個並べて励起することにより，CW発振モードで出力300Wが得られている[2]．国内独自の研究例では，仮想点光源励起方式(VPS)で，CW発振モードで出力81Wが得られている[3]．VPSでは励起系光学素子と集光系光学素子が分離されているため，レーザー媒質の励起領域の調節が可能であり，側面励起においても高品質ビームを得ることに成功している．また，パルス発振モードでは，熱歪みを補償するためにスラブ型レーザー媒質を用いて，同媒質の両側面から，尖頭出力100WのパルスLDを80個並べたユニット2個により励起して，平均出力1kWが得られている[4]．更に，高出力領域における高品質化を実現するため，位相共役鏡を用いた熱歪み補償や，LD励起アクティブミラーを用いた共振器構成等の研究が活発に行われている．

LD励起固体レーザーを種々の産業に適用する場合，必要とされるレーザー出力は10kWと予想される．図4.5.6.5に，本レーザーが産業応用されている将来像を示す．自動車分野では，スポット溶接機をレーザー溶接機で置換することが可能となる．レーザーによる高品質溶接で，車体の安全性向上と同時に重量軽減並びに強度増大が実現される．モデルチェンジもソフトウェアの入れ替えのみで対応可能となり，飛躍的に生産コストの低減がはかれる．板金加工分野では，高速レーザー加工機がパンチプレスを置換することが可能になる．その結果，金型をソフトウェアで代替することで多品種少量生産が実現されると同時に，加工のクリーン化により工場環境も大幅に改善される．

LD励起固体レーザーの高効率・高出力化により，個性的な製品が，高品質かつ安価に，安全で無公害な工場から生産されることが実現する．

参考文献

1) S. C. Tidwell et al. : IEEE J. Quantum Electron. 28 (1992) 977.

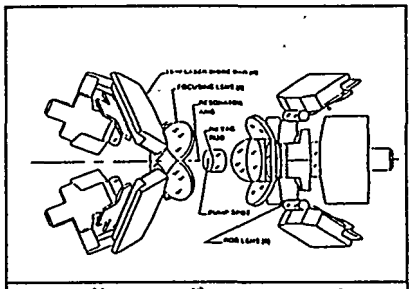
2) D. Golla et al. : Opt. Lett. 20 (1995) 1148.

3) N. Uehara et al. : Opt. Lett. 20 (1995) 1707.

4) R. Solarz et al. : US DOE Rep. (1992) 10.

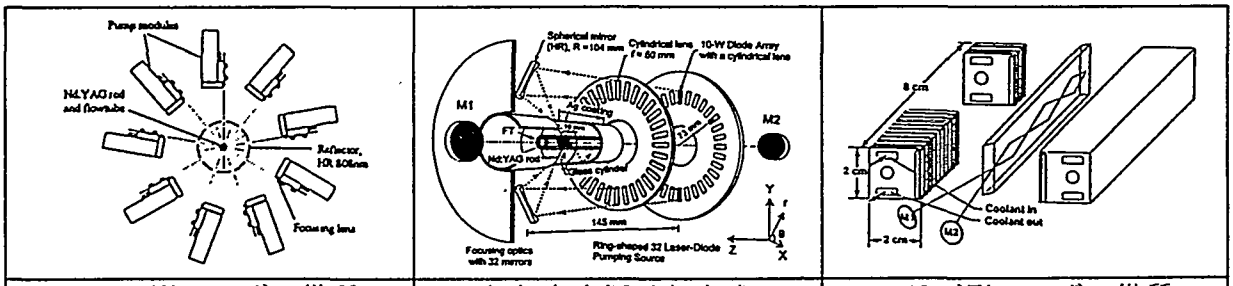
表4.5.6.1　励起方式の比較

方式名	端面励起方式	側面励起方式
構成	LDと固体レーザーの光軸が一致	LDと固体レーザーの光軸が直交
利点	高効率・高品位化が容易	高出力化が容易
難点	高出力化が困難	高効率・高品位化が困難



固体レーザーユニット

図4.5.6.3　端面励起方式の例



ロッド型レーザー媒質　仮想点光源励起方式　スラブ型レーザー媒質

図4.5.6.4　側面例起方式の例

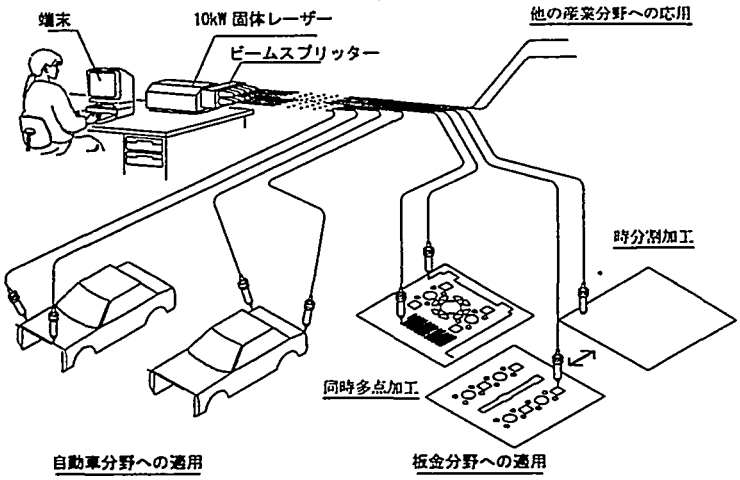


図4.5.6.5　ＬＤ励起固体レーザーの産業応用

(2) 広帯域波長可変レーザー

a．代表的な広帯域波長可変レーザー

広帯域波長可変レーザーとして代表的なものとして，1）色素（ダイ：Dye）レーザー，2）チタンサファイアレーザー，3）光パラメトリック発振(OPO：Optical Parametric Oscillator)レーザーがあげられる．図4.5.6.6にこれらのレーザーの波長可変域を示す．色素レーザーは開発の歴史は古く，完成された技術のもとに0.4～0.9μmの範囲で高出力が得られている反面，1種類の色素でカバーできる波長域が限られている．又，色素自身の劣化や液体試料の準備の煩雑さなどの問題がある．チタンサファイアレーザーは実用的な固体レーザーであるが，波長可変域が0.7～0.9μmと限られている．3倍高調波までの波長変換を用いて0.2～0.9μmをカバーしうるが可変波長域に切れ目がでてくる．OPOレーザーは前述の2つのレーザーとは全く異なったタイプのレーザーである．すなわち，前述のレーザーはレーザー発振において励起されたレーザー増幅媒質（色素やチタンサファイア結晶）内のエネルギー準位を用いており，利得が存在する波長域において波長可変であり，発生するレーザー光の性質は励起光よりも増幅媒質の特性に大きく依存する．これに対して，OPOレーザーは非線形結晶内において，エネルギー準位とは無関係に，連続的に波長変換を行い，発生するレーザー光は励起光の特性に強く依存する．レーザー光発生装置と言うよりはむしろ波長変換装置とみなすべきであろう．Nd:YAGレーザーの3倍高調波をOPOの励起光に用いた場合，波長可変域は0.4～2μmとなり，2倍高調波発生を併用すれば0.2～2μmを1台のレーザーでカバーしうる．広帯域の波長可変固体レーザーという意味ではOPOレーザーに勝るものはないと言える．本節では，特にOPOレーザーに焦点をしぼって調査を行なう．

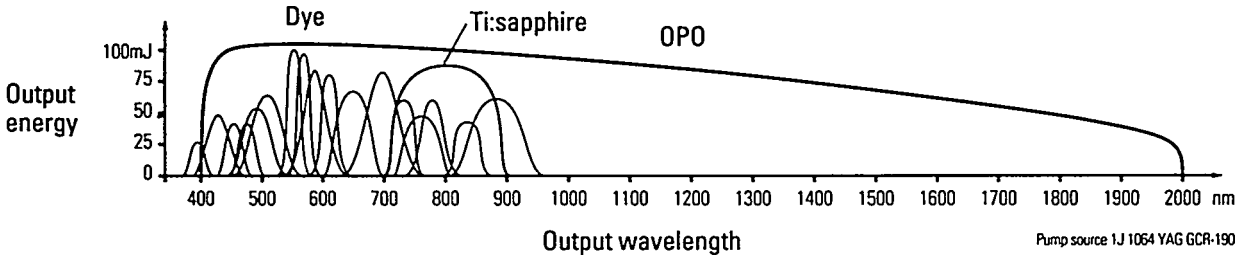
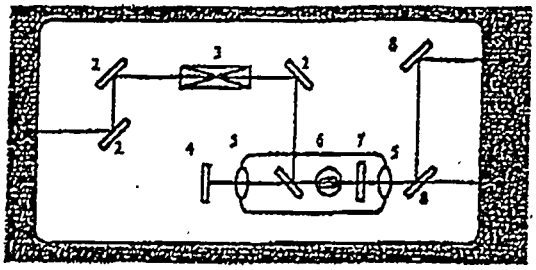


図4.5.6.6　代表的な波長可変レーザーの波長域の比較
（スペクトラフィジックス社レーザーカタログより引用）

b．OPOレーザーの現状と問題点

OPOレーザーの原理は約30年前に実証されたが，実用的なレーザーとなるためにはKTP，BBO，LBO等の非線形結晶の出現，良質の励起光源の実現を待たなければならなかった．励起光源としては通常Nd:YAGレーザーが用いられ，基本波や2倍波の波長変換にはKTPやKDP結晶，3倍波にはBBO結晶などが用いられ，変換効率は50%以上に達している．パルス幅は励起光源のパルス幅に対応し，Nd: YAGレーザーからのナノ秒，ピコ秒パルスやチタンサファイアレーザーからのフェムト秒パルスを用いて様々なパルス幅での波長変換が実用化されている．OPOレーザーはすでに，主要なレーザーメーカー（HOYAコンティニュアム，B.M.Indutries，スペクトラフィジックス等）から製品として売り出されており，基本的な技術開発は目処が立っていると考えてもよい．

OPO レーザーの波長を調整する方法には2通りある．その一つは結晶の角度を調整する方法であり，原理的にもわかりやすい．製品では，パソコン制御で結晶の角度を調整し波長をモニターに表示するようになっている．この方式の特徴は高速での波長制御のしやすさにあるが，結晶の温度制御への要求や微妙な光軸の変化が発生する．もう一つの方法は結晶の角度をある程度固定し，温度を変化させる．この方式では光軸の変化が起きない反面，結晶温度制御に工夫を要する．いずれの方法も製品化されている．図4.5.6.2.2-4に製品化されている OPO レーザー波長変換部の構成を示す．



OPO OPTICAL LAYOUT

1. 355 nm pump input
2. 355-nm dichroics
3. Telescope
4. Rear mirror
5. Hermetic window
6. Type I BBO crystal
7. Output coupler
8. Signal/Idler dichroics
9. Signal output
10. Idler output

図4.5.6.7　OPO 波長変換部光学配置図（例1）
Nd:YAG レーザーの3倍波を BBO 結晶 (6) に入射して波長変換を行ない，4と7のミラー間で発振させている．波長の選択は結晶の角度をパソコンで制御して行なう．（HOYA コンティニュアム社のカタログより引用）

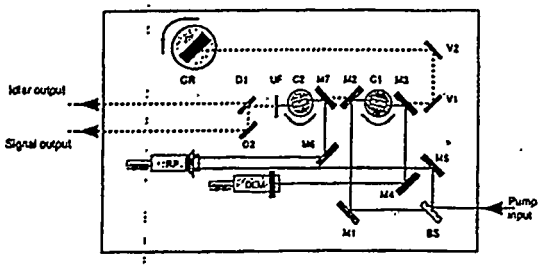


図4.5.6.8　OPO 波長変換部光学配置図（例2）
Nd:YAG レーザーの3倍波を2個の結晶 (C1，C2) て波長変換と増幅を行なっている．回折格子 (GR) を共振器ミラーとして用い，バンド幅を狭くする工夫がされている．波長の選択は結晶の角度をパソコンで制御して行なう．（B. M. Industries 社のカタログより引用）

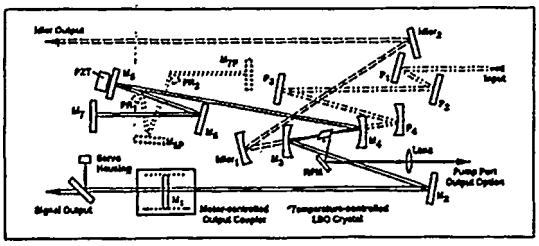


図4.5.6.2.4　OPO 波長変換部光学配置図
チタンサファイアレーザーからのフェムト秒パルスを励起光として LBO 結晶へ入射していの選択は結晶の温度をパソコンで制御して行なう．（スペクトラフィジックス社のカタログより引用）

これまでの OPO レーザーの最大の難点は，その光のバンド幅の広さにあった．これは波長変換において結晶の角度がある程度の許容幅をもっているため，必要な波長の近傍でも波長変換が起こるためである．波長可変という特徴を活かした分光学への応用においては致命的な短所であったと言える．この難点を克服するために幾つかの工夫が必要となる．代表的な方法は，発振器内部に回折格子を挿入し波長選択を行なう方法である．図4.5.6.2.5に回折格子を挿入した場合のバンド幅の変化を示す．この方法では，光学部品を挿入し不要な波長成分をカットするため効率の点で不利である．別の方法として，バンド幅の

狭い種光を励起光源に注入し単一波長で発振したレーザー光を用いることで波長変換後のバンド幅を狭くできる．この方法では種光源が別に必要ではあるが共振器構造が簡単で効率良く波長変換できる．最近の実験室レベルの成果では種光注入により，パルス幅で決まるフーリエ限界までバンド幅を狭くすることに成功している．（大阪大学レーザー核融合研究センター：山中正宣助教授のグループ）

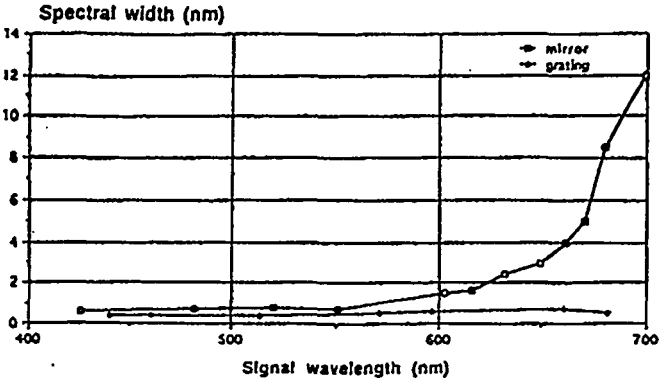


図4.5.6.10　OPOレーザーのバンド幅．白丸は通常のミラーだけを用いた場合，黒丸は回折格子を挿入した場合．（B.M.I.社のカタログより引用）

c．今後の研究開発課題

OPOレーザーの今後の研究開発課題として大まかに，1）波長域の拡張と2）レーザーシステムの固体化があげられる．波長域の拡張については，現在の波長域（0.2～2μm）を真空紫外から遠赤外（0.1～20μm）へ拡張することが重要となる．遠赤外域では炭酸ガスレーザーやラマン変換を用いたレーザーなどが存在するが波長が10μm近辺に限られたり，システムが複雑である．パルス幅もナノ秒程度である．簡単なシステムで2～20μmの間で連続的に波長が変えられるピコ秒の遠赤外OPOレーザーは分子分光学等に大きな影響を与えるものである．又，真空紫外用結晶が実現すれば，この領域に結合エネルギーを有する物質の化学的加工プロセスの基礎研究に大きく貢献することは言うまでもない．波長域の拡張には新しい非線形結晶の開発が不可欠となる．

OPOレーザーも他のレーザーと同様に安定化，高効率化を目指した固体化が望まれる．当面は励起光源の固体化が進められると考える．実験室レベルでの試作器は完成しており，ここ5年間で製品化が進むであろう．その後は，LDからの光を直接結晶で波長変換するOPOレーザーの開発が期待される．手のひら程度の半導体レーザーと指先程の結晶を組み合わせ，パソコンで遠隔制御できる小型の広帯域波長可変レーザーは利用者にとってはまさに夢のレーザーである．

d．広帯域波長可変レーザーの技術開発が産業界にもたらす波及効果

OPOレーザーに代表される広帯域波長可変レーザーは，加工プロセスへの直接的な応用よりも1）加工メカニズムの基礎的な研究や2）加工プロセスのインラインモニター光源，3）高付加価値材料の製造，性能評価に用いられるべきである．実際の加工において頻繁に波長を精密制御する必要性はなく，むしろ基礎研究段階において最適波長を選択するために用いられるべきである．いったん波長が決まればその波長での加工用高出力高効率レーザーを開発するべきである．ただし，加工プロセスのモニターにおいては様々な情報が必要となるであろうから，広帯域波長可変レーザーはモニター用光源として有用と考えられる．又，半導体内部のエネルギーレベルを調べるなどの性能評価や医療用，研究用非放射性同位体(C, N, O, P, B)の分離等，高付加価値材料の評価，製造への応用が重要である．

（3） 超短パルスレーザー

a．現状とニーズ

レーザーによってピコ秒 (psec:10^{-12} sec) からフェムト秒 (fsec:10^{-15} sec) 域の超短光パルスを発生できる．また，この超短パルスを増幅することによって10^{8} ～ 10^{10} V/cm の超高強度光電場を発生できる．フェムト秒という超高速時間域，並びにこの大きな光電場はレーザーによってのみ到達できる物理領域[1]であり，超高速光エレクトロニクス，原子・分子レベルでの高速フォトンプロセス，超微細加工，高速量子現象の発現と利用による新材料・デバイス創製等のための基礎技術として大きな期待が寄せられている．

超短パルスレーザーには利得幅の大きな波長可変レーザーが必要であり，Ti:sapphire レーザー等の波長可変固体レーザーの出現とチャープパルス増幅 (CPA) 技術の発明によって，fsec レーザーとその増幅技術は著しく進展した[1]．しかし，レーザー自身の問題により，現状では産業レベルでの利用に耐える技術とはなっていない．図4.5.6.11に，波長可変固体レーザーによる fsec パルス発生のための基本的な共振器構成，表4.5.6.2に代表的な波長可変固体レーザーによって得られている最短パルス幅を示す．また，図4.5.6.12はCPA の原理である．同技術により Ti:sapphire レーザーの尖頭出力2 ～ 4 TW (30 fsec, 120 mJ) や Nd:glass レーザーの～ 100 TW が実現している．

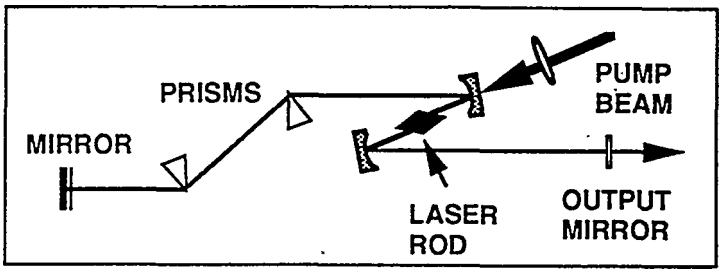


図4.5.6.11 フェムト秒レーザーの基本構成

表4.5.6.2 フェムト秒レーザーの現状

Laser	Wave-length	Pulse width	Pump laser	Mode-locking
Ti:sapphire	~800 nm	8 fsec	Ar (all lines: 5 W)	Kerr lens ML
Cr:LiSAF	~910 nm	18 fsec	LD (670 nm: 0.8 W)	Kerr lens ML
Cr:LiSrGaF	~ 845 nm	50 fsec	LD (670 nm: 0.8 W)	Kerr lens ML
Cr:forsterite	~1.27 μm	25 fsec	Nd:YAG (7 W)	Kerr lens ML
Cr:YAG	~1.54 μm	60 fsec	Nd:YAG (7 W)	Kerr lens ML

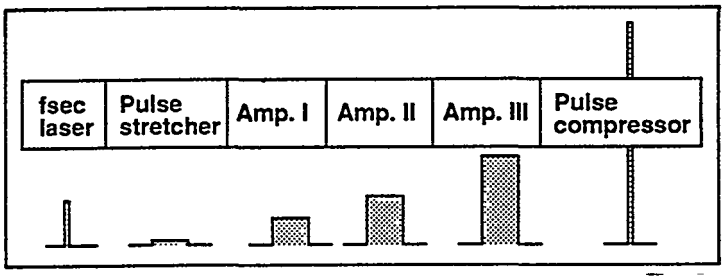


図4.5.6.12　フェムト秒レーザーのチャープパルス増幅

b．技術開発課題

大部分の波長可変固体レーザーの励起には高出力のArイオンレーザーやNd:YAGレーザーが用いられており，fsecレーザーの性能はその特性に大きく依存している．その結果，fsecレーザーとその増幅システムについて，低発振効率，大装置サイズ，短寿命等の多くの課題が存在する．表4.5.6.3にfsecレーザー及び増幅技術について開発すべき技術課題を示す．発振器と増幅器の高効率化・小型化には励起源の全固体化・高効率化が不可欠である．また，波長可変固体レーザーの発振しきい値が高いため，励起には高出力レーザーが用いられるが，低しきい値化のための技術開発も必要になる．また，表4.5.6.2のようにfsecレーザーの動作波長域が限られているため，利用に当たっての制限は大きい．fsecレーザーの波長域を拡大するための技術開発が期待される．fsecレーザーの増幅技術についても事情はほぼ同じであり，全固体化，高性能光学素子，新分散補償技術等の研究開発により増幅システムの小型化・高性能化を図る必要がある．また，fsec レーザーは通常80～100MHz程度の周波数で繰返し発振できるが，励起源の性能に制限されて増幅段では数10Hzにまで動作周波数を低下させざるをえない．増幅器の高繰返し動作技術開発も重要な課題である．

表4.5.6.3　主な技術開発課題

フェムト秒レーザー	増幅技術
* Nd:YAGレーザー等の励起源の全固体化 * 全固体化のための高出力LD及び短波長LDの開発 *レーザー媒質の高性能化による 低発振しきい値化 * 新共振器構成技術の開発 * 新波長可変レーザー媒質の開発 * 高効率波長変換、パラメトリック発振技術の開発	* 励起源要項出力レーザーの全固体化 * 励起用高出力及び短波長LD等の開発 * パルス拡大器や圧縮器等の光学システムの小型化 * 高性能光学素子の開発 * 新分散補償技術の開発 * 増幅システムの高繰返し動作技術の開発

c．波及効果

未踏の物理領域での新現象の探索・解明等による新産業技術基盤の開発が望まれている．fsec レーザーパルス発生及び超高強度光パルス発生は，光パルスと物質との相互作用を介して発現する極限時間域，並びに超高強度電磁場域での量子現象，超高速現象の解明・探索にとって代替不可能な技術である．fsec パルスで期待できる新現象を表4.5.6.4に示す[2,3]．いずれの現象も原子・分子レベルでの超高速相互作用によって発現し，それらを利用した新レーザープロセス技術や高速反応制御技術の進展が期待されている．固体表面原子層の活性化，超高速相転移による固体表面改質，超高速アブレーション現象や高速粒子・イオン等による新材料創製，高品質機能薄膜創製，新機能デバイスの作製等である．また，高強度 fsec レーザーパルスによって発生できる超短パルス X 線やコヒーレント軟 X 線を利用して新物質計測手法や X 線レーザー開発が試みられている[1]．

fsec レーザーは，その超短パルス機能により様々な科学技術分野において超高時間分解能計測や，位相計測のための代替不可能な手段を提供する。また，エレクトロニクスにおいて求められている高速高密度情報処理のための基盤技術としても有用なものとなろう．いずれも，高性能な全固体化 fsec レーザー技術開発がキーテクノロジーとなる．

表4.5.6.4　超短パルスレーザーと物質との相互作用

原子•分子	束縛電子の超高速ダイナミクス、電子のコヒーレンス制御、トンネルイオン化、高次高調波発生、選択的多価イオン生成、高速電子発生、選択的解離、Coulomb explosion
クラスター	高速解離、多価イオン生成、X線発生
固　体	表面原子層の活性化、超高速電子•フォノン開裂、超高速相転移、超高速アブレーション、固体密度プラズマ生成
プラズマ	硬X線発生、相対論的自己収束、航跡場発生、高エネルギー粒子発生、粒子加速、プラズマ導波路、高調波発生等

参考文献

1) 宮崎健創：レーザー研究，23 (1995) 846.
2) M. CD. Perry and G. Mourou: Science, 264 (1994) 917.
3) C. J. Joshi and P. B. Corkum: Phys. Today, Jan. (1995) 36.

（4）　短波長レーザー

a）現状とニーズ

レーザーの発振波長が短くなると光子ネルギーが大きくなって非熱的・化学的な反応性が増大すると共に，空間分解能も増大する．従来，λ＝190～400nmの紫外域における唯一の実用的な高出力紫外レーザーとしてエキシマレーザー (XeCl，KrF，及びArF等)が注目され，その高性能化技術開発と共に，同レーザーによる各種の微細加工や半導体プロセス技術の研究開発が進展した[1]．しかし，エキシマレーザーは反応性の高い高価なガスを用いるためガス寿命が短く動作コスト(フォトンコスト)が高いこと，レーザーの動作電圧 (20～30kV)が高くパルス動作しかできないこと，装置構成部品が高価なこと，装置サイズが大きいこと等の多くの欠点も持っている．もし小型高出力な紫外レーザーの開発によってこれらが克服できれば，エキシマレーザーによって実証されてきた各種の短波長レーザープロセス技術は加速度的に産業技術へと高度化されるばかりでなく，新たな短波長レーザー利用技術の発展も期待できる．

λ＝10～200nmの真空紫外 (VUV)域，さらにはλ＝10nm以下のX線域においては，F_2レーザー (157nm)以外に実用的なレーザーは皆無である．基礎的な研究が行われている段階であるが，VUV～X線レーザーは，その予想される短波長性と高空間分解能性により，様々な科学技術分野から実用技術の開発が待たれている．

b）技術開発課題

近年，BBO，LBO，CsLBO等の新しい高効率非線形光学結晶が相次いで誕生したこともあって高出力レーザーの波長変換技術が急速に進展した[2]．そのため，紫外域における高性能なレーザー開発には，当面，可視～近赤外域の高出力固体レーザーの波長変換が最も現実的なアプローチであろう．例えば，Qスイッチ Nd:YAGレーザー(λ＝1.064mm)を基本波とすれば，第三 (355nm)，第四 (266nm)，第五高調波 (213nm)発生等によって高出力紫外レーザーを実現できる．変換効率は，基本波レーザーのパルス出力，ビーム品質，非線形結晶等に大きく依存するが，個々の変換過程で50%以上を実現することは不可能ではない．ただ，従来のランプ励起固体レーザーでは，高繰返し動作が難しいため高平均出力は望めない．しかし，LD励起を採用した全固体化パルスレーザーによってこの課題は解決でき，その波長変換によってエキシマレーザーに比肩する高平均出力(～1kW以上)を実現することは原理的・技術的に可能である．

従来，Arレーザー等で～1W程度の出力しか得られなかった連続 (cw)紫外レーザー発振についても，共鳴共振器 (resonance cavity) 法[3]等の高効率な波長変換技術が開発されたことにより，著しい高出力化が図れる可能性がある．cw Nd:YAG レーザー等を基本波とした場合，共振器内SHGによる532nmへの変換，及び外部の共鳴共振器を用いたl=266nmへの変換により，～1.5Wの全固体化紫外cwレーザーが実現している[4]．高出力化には，高品質ビームを持った高出力全固体化cwレーザーの開発が不可欠である．

同様に，Ti:sapphire (650～1000nm)，Cr:LiSAF (750～950nm)，Cr:forsterite (1.15～1.35mm)等の波長可変固体レーザーの波長変換により，紫外域の高出力波長可変レーザーが実現できる．基本波用レーザーの全固体化技術開発が必須である．一方，近年，Ce:LiSAFやCe:LiCAF (280～320nm)，Ce:LaF(275～315nm)，Ce:$YLiF_4$や Ce:$LuLiF_4$ (305～320nm)等の紫外域の波長可変固体レーザー媒質が開発された[5]．Qスイッチ Nd:YAGレーザーの第四高

調波やKrFレーザー(248nm)が励起に利用されているが，励起源の制約によりパルス発振特性のみが調べられている．励起用高出力(パルス，cw)全固体化レーザーの開発により，紫外域の高効率な波長可変固体レーザーが誕生するはずである．

VUV～X線域のレーザーについては，産業技術応用を具体的に議論できるレベルにない．高調波発生や四光波混合等によるVUVレーザー，高次高調波発生やパルスレーザー励起軟X線レーザーの研究開発が進められているが，いずれも励起用高出力レーザーの高性能化が最重要課題である[6]．

表4.5.6.5に，短波長域における全固体化レーザー技術開発のための主な課題を示す．

表4.5.6.5 短波長レーザー開発の主な課題

紫外レーザー	1）基本波用高出力パルス及びcwレーザーの全固体化，2）同レーザーの高効率・高出力化，及び高ビーム品質化，3）高効率非線形光学材料，4）高効率波長変換技術，5）高性能UV光学素子，6）紫外固体レーザー媒質，7）新励起源
VUV～X線レーザー	1）基本波及び励起用レーザーの全固体化，高性能化，2）VUV域新非線形光学結晶，3）高効率波長変換技術，4）励起過程と高密度媒質生成，5）光学素子技術，6）VUV～X線レーザー発振技術

c）波及効果

短波長レーザーに特有の「大きな光子エネルギー」及び「高空間分解能」を基礎とした様々な利用技術が，エキシマレーザーやNd:YAGレーザーの第三及び第四高調波等を用いて試みられており，また，高性能な紫外レーザーの出現によって期待される新たな産業利用技術も議論されている．紫外レーザーの有用性は，レーザープロセシングや各種計測技術おいて最も特徴的に発揮でき，その主なものを表4.5.6.6にまとめた．エレクトロニクス分野では，短波長レーザー露光による高密度メモリー製造，高密度記録・再生技術，液晶製造・リペアー等，機械分野では，微細加工，マイクロマシーン製造，光造形技術等，計測分野では，各種の精密非破壊計測等が期待できる．その他，医療分野や材料分野においても高性能な短波長レーザーに対する期待は大きい．

表4.5.6.6 短波長レーザーの主な利用分野

	紫外レーザー	VUV～X線レーザー
レーザープロセシング	微細加工 高密度記録・再生 精密マーキング UVリソグラフィー UVレーザーCVD・MBE エッチング・ドーピング 光造形 低熱アブレーション 原子マニピュレーション 表面改質	VUVレーザーCVD 選択的分子反応制御プロセス 光イオン化プロセス 表面改質 超微細加工 X線リソグラフィー 表面励起反応プロセス 局所反応加工
計　測	非破壊精密計測 UVレーザーレーダ 環境計測 原子・分子分光分析 プロセス解析	原子・分子・イオン分析 VUV～X線光電子分光 高空間分解能計測 X線ホログラフィー・顕微鏡 精密構造解析

参考文献

1) 前田三男編，エキシマーレーザー（学会出版センター，東京，1993).
2) 佐々木孝友：応用物理，64(1995) 878.
3) see, e. g., Z. Y. Ou et al.: Opt. Lett. 17 (1992) 640.
4) 岡美智雄，久保田重夫：応用物理，64 (1995) 912.
5) C. D. Marshall et al.: J. Opt. Soc. Am. B11 (1994) 2054.
6) 宮崎健創：レーザー研究，23 (1995) 846.

(5) 超高品質ビームの発生

a．超高品質ビームとは

プロセスへの応用を目指すレーザービームの品質評価には，従来，集光点での輝度 (W/cm^2·sr) やビーム径 d とビーム発散角 θ の積 $d\theta$ (mm·mrad)，あるいは TEM$_{00}$モードのレーザーに対する $d\theta$ との比をあらわす無次元パラメータ M^{2}などが用いられてきた．すなわち小さなスポットにエネルギーを集中できることが品質の基準であった．将来のプロセス用レーザーとしてはこれだけでは十分ではない．超高品質ビームとは，高出力が得られ，しかも上記の性能に加えて，波長，線幅，パルス幅，パルス波形，ビームパターン，繰り返し周波数などを，時間的，空間的に自由に制御できる光パルス発生器あるいは光シンセサイザ的なものであると考えられる．パーツやユニットを挿入したり，取り替えたりするだけで，所要の性能のビームを取り出せるレーザー装置が望ましく，その実現に向けての開発努力が重要である．ここでは紙面の都合上，高出力固体レーザーで最大の課題である空間的なビーム品質に限って議論する．

留意すべきことはレーザービームの集光パターンと加工面のパターンとは必ずしも同じでないことである．レーザー集光点では物質の溶融・蒸発が起りプラズマが発生する．プラズマの屈折率は1より小さく，レーザー光はプラズマにより屈折される．プラズマの密度が高くなるとレーザーエネルギーは臨界密度（レーザー周波数がプラズマ振動数と等しくなる密度）領域で吸収され，加工面へは熱伝導で運ばれる．したがって吸収エネルギーの空間分布と加工面でのエネルギー分布は異なる．このような効果はレーザー光の波長が長いほど大きい．高精度の加工・プロセスにおいてはレーザーエネルギーの吸収から加工の進行に至るプロセス素過程の解明が重要である．

b．高品質化の現状と課題

LD 励起により固体レーザー媒質の熱負荷は1/3～1/5程度に減少するが，媒質内での発熱と冷却は不可避の過程であり，高品質化のためには発熱に伴う媒質の熱レンズ効果や熱複屈折効果などの光学的な歪みに対する対策が必要である．表4.5.6.7に最近の固体レーザーの報告例をまとめた．高品質化のためには

1) 熱伝導率が高く，線膨張係数が小さく，屈折率の温度依存性が少ない固体レーザー材料の開発，

2) 高速，高効率冷却技術の開発，

3) 熱的な光学歪みに強いレーザー共振器技術の開発，

4) 位相共役鏡，可変形鏡など光学歪みを補償する技術の開発

などが重要な開発課題となる．また加工プロセスを最適化するためには

5) レーザービームパターンを時間的，空間的に自由に制御しうる技術の開発

が必要である．以下，上記3)，4)，5) について現状と課題をまとめる．

1) レーザー共振器

指向性のよい均一な強度分布を持つ高出力，高品質ビームを得るためには光学歪みに強いレーザー共振器技術の開発が重要である．安定共振器では，出力鏡に反射率分布を与えたガウスコア型[13]，ホールミラー型[14]や片出し型共振器，非点収差補償型折り返し共振器[15]などが，また不安定型では，正枝型位相整合不安定共振器[16]，反射率分布鏡と組み

表4.5.6.7　最近の Nd:YAG レーザー報告例

形状	励起	出力形式	平均出力	モード	M^2	共振器	文献
スラブ	FL	QCW	2260W 1460W		24×296 4×4	MOPA 安定 MOPA 不安定	1
ロッド	LD	QCW (0.5J×400Hz) Qsw (0.8J×100Hz)	196W 70W		 2 XDL	 MOPA	2
ロッド	LD	CW	92W 60W	マルチ TEM_{00}	 < 1.3	 熱効果補償型	3
スラブ	LD	QCW (0.44J×2.25kHz)	1000W	マルチ		安定	4
スラブ	LD	Qsw (0.1J×2.5kHz)	250W	マルチ		安定	5
スラブ	FL	CW QCW	1000W 500W		< 63 < 12	安定 安定	6
ロッド	LD	CW Qsw (5.5mJ×20kHz)	170W 110W	マルチ	36	安定	7
ロッド	LD	CW	300W 200W 45W	マルチ マルチ TEM_{00}	90 15	安定 安定 安定	8
スラブ	LD	CW	72W 40W	マルチ TEM_{00}	 1.3×1.3	 folded	9
スラブ	LD	Qsw (10J×500Hz)	500W		< 1.5 XDL	MOPA+PCM	10
スラブ	LD	Qsw (0.38J×200Hz)	76W		2 XDL	MOPA+PCM	11
ロッド	FL	CW	500W		19	HIPER	12

FL：ランプ励起、LD：LD励起、QCW：準CW（長パルス）、Qsw：Qスイッチ（短パルス）、MOPA：増幅器付、
PCM：位相共役鏡使用、M^2欄の p×g はスラブの厚さ方向×幅方向、n XDLは回折限界のn倍

合わせた負枝型不安定共振器[17]，片出し負枝不安定-安定ハイブリッド共振器[18]などが提案され開発が進められている．この結果，表4.5.6.7に示したように回折限界の10倍以下で1kW級の出力が得られるようになってきた．Qスイッチレーザーでは位相共役鏡を用いてビーム発散角の改善が行なわれている[19]．

共振器内にレンズを挿入したり，ロッド端面に曲率をつけるなどによってもある程度熱レンズ効果を補償できる．同じ型のレーザー媒質を直列に2組配置し，その中央に水晶の偏光回転子と非球面レンズをおいて熱レンズ効果と熱複屈折効果を補償し，ほぼ回折限界に近い TEM_{00}発振で出力60W を得た例[3]もある．

2)位相共役鏡

位相共役鏡 (Phase Conjugate Miirror, 以下 PCM) は文字どおり入射波電界の位相を反転させた波，すなわち位相共役波を発生させて反射する鏡である[20]．光路に位相の揺らぎや収差があっても PCM からの反射光を逆進させることにより，位相の乱れを自動的に補正し，入射波と同じ波面を再生できる．位相共役波の発生には3光波混合，縮退4光波混合 (DFWM)，誘導散乱，フォトンエコーなどの方法があるが，高出力レーザービームの波面補正に用いられているのはほとんどが誘導ブリルアン散乱 (SBS) を利用する PCM である．

SBS の発生には100MW/cm^{2}程度の入射光強度が必要であり，Qスイッチレーザー用に開発が行なわれてきた．PCM としての重要な性能は反射率と波面をどれだけ正確に再生できるかの尺度となる忠実度 (fidelity) である．SBS 媒質として SF_6，CH_4などの気体や CS_2，CCl_4，$TiCl_4$などの液体で特性が測定され，媒質と入射光強度を選択することにより反射率90%以上で高い忠実度が達成されている．表4.5.6.7に示したように MOPA システムに

適用して500W の出力で回折限界の1.5倍以下の高品質ビームが得られている．

加工用長パルスレーザーへの適用を図るためにはSBS発生のしきい値を下げる工夫が必要である．ループ法によりしきい値を1/2.5に減少し，パルス幅1μsのレーザーに適用したとの報告がある[21]．また固体レーザー媒質自体[22]や液体の熱的非線[23]形性を利用したDFWMによるPCMの研究も進められている．

3)可変形鏡

可変形鏡は機械的あるいは電気的応力により鏡面の形状を変化させ波面補正を行なうもので，一体型と分割型がある[24]．一体型は鏡面基板の裏面に圧電素子などを2次元的に配置して接着し，電気的に鏡面の形状を連続的に変化させる．光量の損失はほとんどないが，それぞれの素子が鏡面によって相互に結合しているため，望ましい形の鏡面を作るためには結合効果を考慮しなければならない．分割型は素子のついた小さなセグメント鏡を2次元的に配置する構造で，鏡面変形は容易であるが，各セグメント鏡間隙によるエネルギー損失や鏡の端での回折効果が問題となる．

波面制御のためには波面検出法も重要である．シャリング干渉法，シャック・ハルトマン法，マルチディザ法などがある．シャック・ハルトマン法はビームを2次元マイクロレンズアレーに入射し，各レンズの焦点位置のずれから波面を測定する．マルチディザ法は個々の領域毎に位相変調したビームを送り，焦点面での信号強度から間接的に波面を検出する．

60から240個の圧電素子を用いた可変形鏡も開発されているが，多くは4～6次の波面収差までの補正で，高い空間周波数を持つ波面の乱れを補正するには素子の小型化が重要である．また，より効果的な静的，動的波面制御のためのアルゴリズムの開発も必要で，将来的にはλ/10（波長1μm）以下までの波面補正が可能になるものと期待される．

4)ビームパターンの制御

ビーム伝搬途中あるいは集光点でレーザービームパターンを自由に制御するため，回折光学素子の開発が期待される．回折光学素子は基板表面上に凹凸パターンや位相制御パターンを2次元的に配置し，ビームの集光・分岐などの複数機能を与えるもので，これまで単機能の光学素子を複数個用いて構成してきた光学系を大幅に単純化できる．1次元LDアレイからの出力光を整形しYAGレーザーを端面励起した例[25]や，レーザービームを3x3のスポット格子に分岐した例[26]が報告されている．Kinoformを用いると任意の集光パターンを形成できる．ただ，これらは全て静的な制御法であり，今後は動的な制御，すなわちビームパターンを瞬時に変化させうるような技術の開発が要求される．このため液晶技術の導入などが提案[27]されている．可変形鏡をパターンの制御に利用した例[28]もある．

レーザー核融合ではレーザー照射面での強度不均一性を1%以下に抑える必要があり，種々の開発が行なわれてきた[29]．周波数変調，偏光制御，ランダム位相板，部分コヒーレント光の利用などによりレーザー光のコヒーレンスを制御して，スペックルなどによる強度分布の微細構造を抑制し，任意のビームパターンが得られるようになりつつある．

c．波及効果

超高品質ビームの実現はレーザープロセスに対し次のような波及効果を及ぼす．

1)固体レーザーは炭酸ガスレーザーに比べて波長が1桁小さく，出力，ビーム品質が同

じであれば集光点での輝度を2桁大きくできる．したがって原理的には2桁小さいレーザー出力で同じ機能を有する加工が可能となる．

2) 波長が短いため集光径が1桁小さく，また，その分加工点で発生するプラズマの影響を受けにくいので，材料へのエネルギー注入効率が高く，しかもより高精度の微細加工が可能となる．

3) ビームパターンの動的制御により加工精度，加工速度を大幅に向上しうる．例えば，マーカーではビームの走査が不要となり，プロセスの高度化が図れる．

参考文献

1) N. Hodgson et al. : Opt. Lett. 18 (1993) 1727

2) R. Brunham et al. : SPIE 1865 (1993) 28

3) S. C. Tidwell et al. : Opt. Lett. 18 (1993) 116

4) B. Comansky et al. : CLEO'93 (1993)

5) S. P. Velsko et al. : OSA Proc. Adv. Solid-State Lasers 20 (1994) 308

6) 家久信明　他 :36回レーザ熱加工研究会誌 2 (1995) 125

7) T. Brand: Opt. Lett. 20 (1995) 1776

8) D. Golla et al. : Opt. Lett. 20 (1995) 1148, D. Golla et al. : CLEO'95, CTuC3(1995)

9) R. J. Shine et al. : Opt. Lett. 20 (1995) 459

10) R. J. St. Pierre et al. : CLEO'95 CPD30-1 (1995)

11) M. Hermann et al. : CLEO'95, CTuC5, CTuM4 (1995)

12) 安井公治 ：レーザー学会年次大会，24aVI7（平成8年1月）

13) Y. Takenaka et al. : Appl. Phys. Lett. 63 (1993) 2860

14) 田沼良平　他 ：40回応用物理学連合講演会，1aZ8 (1993, 11)

15) M. Ohmi et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) 2579

16) K. Yasui et al. : Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 530

17) K. Yasui et al. : Opt. Lett. 15 (1990) 110

18) K. Kuba et al. : Opt. Lett. 15 (1990) 121

19) H. I. Eichler et al. : Appl. Opt. 31 (1992) 5038

20) 吉田英二，吉田国雄 ：レーザー研究 22 (1994) 689

21) C. Brent et al. : CLOE'95, CMA1 (1995)

22) A. Brignon and J. -P. Huigonardo : CLEO'95, CMA4 (1995)

23) A. A. Betin et al. : CLEO'95, CMA7 (1995)

24) 光技術応用システムのフィージビリティ調査報告書，光産業技術振興協会 (1994), 高機能レーザー開発調査委員会報告書，ICF フォーラム・レーザー核融合技術振興会 (1995), 擾乱媒質中の波動伝搬と補償光学研究会資料，国立天文台（平成5年）

25) J. R. Leger and W. C. Goltsos:IEEE J. Quantum Electron. 28 (1992) 1088

26) 波多腰玄一 ：オプトロニクス，No. 1 (1993) 80

27) 椿本孝治 ：大阪大学博士論文（平成6年）

28) 根本孝七 他 ：電気学会光・量子デバイス研究会資料 QOD-93-1 (1993)

29) 宮永憲明 ：レーザー研究 22 (1994) 635

4.5.7 素子化レーザー技術

(1) ファイバーレーザー

a．加工用レーザーの要求とファイバーレーザー

溶接など熱加工用レーザーのあるべき姿を追求すると，ファイバーレーザーに到達する．

1) 冷却効率の拡大則 → ファイバー（空冷可能）

2) 光伝送手段 → 光ファイバー伝送が不可欠

3) ファイバーのエネルギー伝送能力 → 高出力ＣＷレーザーが好適

4) 必要な条件は空間的エネルギー密度で，周波数その他の制御は必要ない．

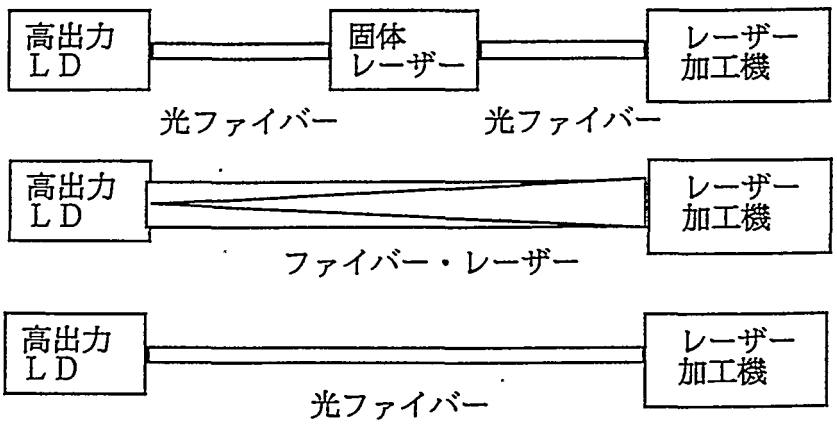
→ ファイバーの弱点は表面化しない．

5) 高効率変換が必要 → 閉じ込められた体積中の誘導放出と光伝播（ファイバー）

これらの要素を考慮すると，加工用レーザーにはファイバーレーザーが最適である．

b．加工用レーザーとファイバー伝送

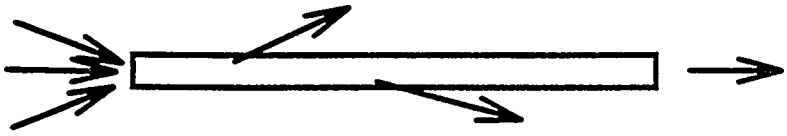
ファイバー結合型ＬＤで励起するのは，ＬＤ励起固体レーザーの典型的な励起方法のひとつである．高出力レーザーの励起では，単位面積当たりの照射強度を高め，設計の自由度を上げる重要な方法である．一方，固体レーザーの出力光を，レーザー加工などのエネルギー入射点，つまり，相互作用領域まで伝播させるにも，光ファイバーの利用が不可欠とされている．固体レーザーの励起部分と，出力光の伝播部分に光学ファイバーを使うならば，固体レーザーの役割は，レーザービームの品質変換素子でしかない．しかも，ストークスシフトのために，長波長化する事を考えると，空間的性質のみの変換を行う素子である．



c．ファイバーレーザーはレーザービームを効果的に空間圧縮する．

結局，将来のレーザー加工が要求するものは，高出力ＬＤアレイの直接エネルギー伝送であり，十分なエネルギー密度を位相ロックによってＬＤが実現するまで，ビーム品質を改善することが必要である．ファイバーレーザーは光エネルギーの伝送中に，第１クラッドに投入されたＬＤ光を，希土類イオンを添加したコアで，分布定数的に吸収，レーザー光に変換する．実際，高出力ＬＤの集光光能力からして，第１クラッド径を６００μｍ，コア径を６μｍ（単一モード）とした場合，断面積比は１００００倍に達し，ファイバーレーザーは実に見事なエネルギー集光能力の改善を成し遂げたことになる．光ファイバーは光の発生と伝播を閉じ込められた空間で行うので，エネルギー引き出し効率は極めて高

くすることが可能である．変換効率が６０％としても，エネルギー密度の改善からして，決して大きなコストということはない．



ファイバー伝送は空間的なフィルターとして働く。

ファイバーレーザーはビーム品質の変換器となる。
そのためには、光の吸収、誘導放出過程が不可欠である。

ｄ．空間モードの高品質化はファイバー伝送だけでは不可能である．

ファイバーレーザーでは，光ビームの横モードを高品質化させる．光ビームの輝度は保存量であるので，一旦，エネルギーを吸収し，それを新しいモードで再放出するファイバーレーザーのような過程は，ビーム品質の過程に不可欠である．単なる伝播を仲介する光ファイバー内では，いかに工夫を凝らせても，光品質を低下させることはできても，向上させることはできない．なぜなら，エントロピーの増大の法則に反するからである．したがって，光伝送中に空間的品質を改善するためには，ファイバーレーザーにおける吸収，誘導放出過程が不可欠であることが納得できる．

ｅ．ファイバーレーザーの限界出力密度は損傷強度で決まる．

ファイバーのエネルギー伝送の限界を決める要素は，ファイバー端面のレーザー損傷である．ファイバー内部の損傷強度ははるかに強い．その意味で，ファイバーレーザーは基本的にＣＷモードを考えるべきである．ＣＷ発振では熱的損傷以外には損傷しないので，もっとも大きなエネルギー伝送を実現できる．最近の超低損失コーティング技術を利用すると，損傷強度は１００ＭＷ／ｃｍ^{2}も可能で，１００μｍのコア系から１０ｋＷを出力することも夢ではない．ただし，このような超低損失ミラーはイオンビームコーティングでなくては，これまで実現されたことがない．考えてみれば，ファイバーレーザーの限界とは，ファイバー伝送の限界と何ら変わるところがない．ただし，ファイバー端面に高品質多層膜ミラーを形成することは，精力的に研究されるべき課題である．

ｆ．ファイバーレーザーはＣＷレーザーであるべきだ．

パルスレーザー，特にＱスイッチレーザーを伝送しようとすると，非線形吸収，電子雪崩による損傷がつけ加わるために，伝送可能なレーザーパワーは数桁も小さくなることが避けられない．基本的に，Ｑスイッチパルスの伝播は自由空間で，高平均出力のレーザー伝送は光ファイバーで行われるべきである．レーザー損傷が，熱的破壊からピークパワーに依存するようになるのは，これまでナノ秒，ピコ秒領域で研究されてきたが，パルス幅が数１００マイクロ秒以上の長いパルスについて，高繰り返しレーザー損傷の機構は必ずしも明らかでない．これは，今後の研究対象である．

g．ファイバーレーザーでは，クラッド伝播中でのモード変換が基礎である．

ファイバーレーザーの長さは１０ｍ～１００ｍ程度であり，通信用ファイバーのように伝送損失が性能を決定することはない．その意味で，ファイバーレーザーは低損失石英ファイバーである必要はなく，多成分系ガラスにより多様なデザインを考慮すべきである．一方，ファイバーレーザーでは，クラッドを伝播する励起光をいかに効率よくコア部分に吸収させるかが，中核技術となる．中心部分の光だけが吸収される空間的ホールバーニング効果を，伝播モードの非対称性を利用して，エネルギー緩和をさせることが最も重要である．これには，非円形クラッド構造，非中心コア構造，ファイバーの曲げ，ねじりなどが考えられ，もっとも効率よくモード変換を行う構造を開発する必要がある．このようなモード変換，エネルギー変換の基礎的研究は，これまで行われておらず，ガイドラインを作成する必要がある．

h．問題が見つからないテーマには，全力を尽くして取り組むべきである．

ファイバーレーザーは加工用レーザーとして，現時点で実現できない理由がない．周辺技術を含めて，すべて揃った状態にある．理屈で考えて，できるはずと判断すれば，全力で，しかも，他人に先駆けて研究することこそ，研究に必要な姿勢であり，今こそ，研究を始めるべき時であろう．クラッド励起からコア発振の過程で，高効率にレーザービームを空間的品質が改善できるとすると，，将来は半導体レーザーの直接伝送に変わるべきだ，ということは，常に正しい方向とはいえない．半導体レーザーそのものに，ファイバーレーザーが実現するビーム品質をそのまま実現させることが，もっともありうべき形態だ，ということは，現時点ではまだいえない．それは，レーザー技術そのものが，全体として大きく変化し，高品質のレーザー光が，その品質ゆえに，高出力化を実現する時代になったときの将来像なのだから．その意味で，ファイバーレーザーは，提出されている加工用レーザーの要求に，現時点で答えうるもっとも現実的な回答といえる．また，光の空間モードの制御という点からいえば，ファイバーレーザーは半導体レーザーより優れた側面をもっており，加工用レーザーに関する限り，将来に渡って，理想的なレーザーの形態であると主張することもできる．これらの主張は，むしろ研究主体の姿勢にかかわった問題で，我が国のレーザー関係者がその方向に進む可能性があれば，できるだけ早急に世界に向かって，我々の認識を発表するべきである．

（２）集積型レーザ

ａ．技術開発の位置付け

1）現状とニーズ

高出力ＬＤ（レーザダイオード）の出現によって，ニーズに対応した機能を実現させるためのレーザ構成法が格段に広がってはいるが，依然として，「装置が大きい，複雑である，波長・出力・モードの安定性がよくない」等の問題があり，実用からは遠いものが多い．

Ｑスイッチなどの機能を付加するとさらに実用化が難しくなるのが現状である．

2)具体的開発課題

具体的な開発課題は以下ｂ項に述べるが，開発の目的は集積化することによってこれらの問題を一挙に解決しようとするものである．

集積型レーザには，小型化（マイクロチップ化，ファイバーとの一体化など）を主眼としたものと，Ｑスイッチや波長変換等，機能の集積化を主眼とするものがある．

小型化によって可能になる「短共振器」は共振縦モード間隔の拡大と空間的ビームモードの縮小をもたらし，ビーム品質の向上や，波長変換などの機能付加には不可欠の構造要素である．

3) 産業科学技術への波及効果

マイクロチップ化の成果は，マイクロマシン，マイクロ外科医療，光ヘッドの直接駆動プロセッシングによる光加工機械の革新などに波及しうる．

さらにこれを複合機能化した機能集積マイクロチップレーザは計測・情報・通信・映像等の広範な分野へ光技術が浸透するためのキーデバイスになりうるものである．

ｂ．研究開発の内容

１）マイクロチップ化レーザ

マイクロチップ化と高出力，高集束性を両立させる試みの例を図4.5.7.1に示す．全部で６０個のＬＤ（５バー）を2次元的に配列し，サファイヤブロックで接触冷却された厚さ2ｍｍの Nd:YAG 平板に38.5ＷｃｗのＬＤ光を入射する．両端を平面共振器として，回折限界に近い9.8W の遠視野レーザ光を得た．１）

マイクロチップ化によって周波数の安定化を図った例を図4.5.7.2に示す．Nd:YAG と1/4波長板ブリュースター偏光板が光学接触で一体化され，ツイストモードの短共振器を構成する．ライン幅10ｋＨｚ，単一周波数のｃｗ80ｍＷの出力に成功している．

２）機能集積マイクロチップレーザ

Cr, Nd:YAG の短結晶を用い，Cr イオンの過飽和吸収による受動的Ｑスイッチによって単一縦モードの短パルスを得た例を図4.5.7.3に示す．ＬＤ250μＪのエンドポンプによって10μＪ，パルス幅3.5ns の単一縦モードが出力された．

ドメイン反転した Nd:LiTaO3結晶をレーザ媒質機能と E-O 素子機能を兼ね備えるものとしてとして用いた例を図4.5.7.4に示す．600Ｖの印加電圧でアクティブＱスイッチ動作をさせ，300ｍＷのＬＤ光で0.22ｍＷのパルス光（幅22ns，パルスピーク64W）を得ている．

波長変換の機能を集積化したマイクロチップレーザの例を図4.5.7.5に示す．NYAB（NdxY1-xAl3(BO3)4）の自己高調波発生作用を利用するもので，480ｍＷのＬＤ光入力で5.5ｍＷの531nm，単一波長レーザを得ている．

参考文献

1) C. D. Nabors :High power , continuous wave, Nd:YAG microchip laser array, Optics Letters 17, 22 (1992) 1587-1589

2) K. Wallmeroth :Monolithic integrated Nd-YAG laser, Optics Letters, 15, 6 (1990) 903

3) Y. C. Chen :Self-stabilized single -londitudinal-mode operation in a self-Q-switched Cr, Nd:YAG laser,

Optics Letters, 18, 17 (1993) 1418-1419

4) K. S. Abedin et. al :Integrated electro-optic Q switching in a domain-inverted Nd:LiTaO3 laser, Optics Letters, 20, 19 (1995) 1985-1987

5) 天野 :マイクロチップ NYAB グリーンレーザー, レーザー研究 20, 9, (1992) 723-727

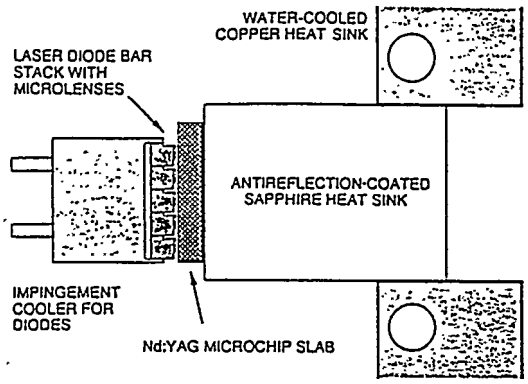


図4.5.7.1 高出力, 高集束性マイクロチップレーザ C. D. Nabors (1992) [1]

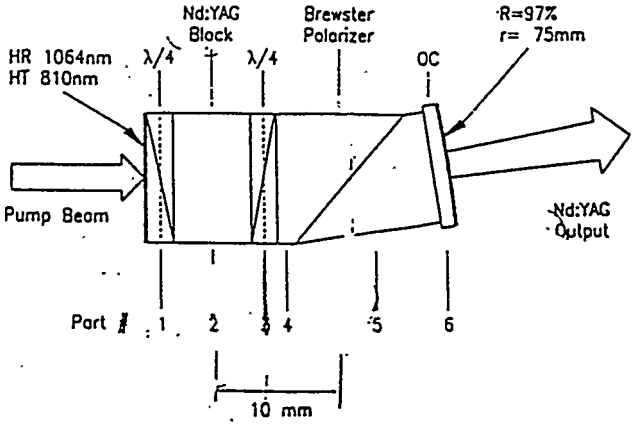


図4.5.7.2 周波数安定化マイクロチップレーザ K. Wallmeroth (1990) [2]

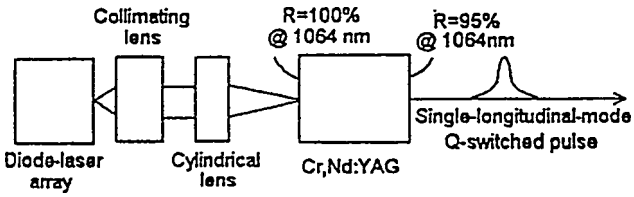


図4.5.7.3 受動的Qスイッチマイクロチップレーザ Y. C. Chen (1993) [3]

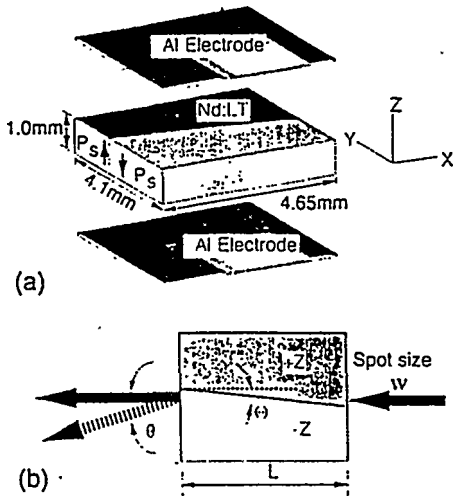


図4.5.7.4　ドメイン反転 Nd:LiTaO³結晶による能動的Qスイッチマイクロチップレーザ
K. S. Abedin et. al (1995) [4]

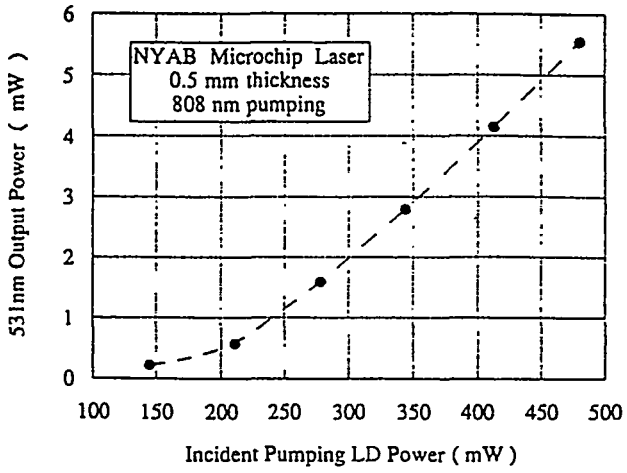


図4.5.7.5　NYABの自己高調波発生作用によるマイクロチップグリーンレーザ
天野　(1992) [5]

4.5.8 波長変換技術

材料の加工，合成，変成（プロセッシング）などを非接触で行うことを可能とするフォトン相互作用プッロセッシングにおいては，原子・分子のシステムのフォトンによる励起および励起状態の制御などがコアテクノロジーとなり，そのためには原子・分子の励起状態に適合する波長のフォトンを必要とする．今日では波長チューニング幅の大きなレーザーを用いて必要な波長を選択するか，レーザーの波長を必要な波長へ変換することでこれらのニーズに答えようとしているが，全固体レーザーで波長選択幅を広く取れるということでは固体レーザーの波長変換技術への期待が大きい．このような光源をプロセッシングに用いる場合，連続発振レーザーあるいはパルス発振レーザーのいずれに対しても大きなスループットが要求され，これは平均パワーの高出力化，および，パルスレーザーに対しては高繰り返し化，などが装置目標となる．更に，このようなレーザー装置を産業に広く普及させるためにはコンパクトかつ堅牢であり，メンテナンスフリーで低価格化が可能であることが要求され，その趣旨のシステムアーキテクチャーが技術開発の対象となるであろう．これらの要求に見合い産業応用の動きが見られる波長変換方式として，SHG（２倍波）レーザー，ＯＰＯ（オプティカルパラメットリック発振），などが開発されているが，出力，安定性，パルス繰り返し数ともに産業用プロセッシングに応用されるには至っていない．

（１） SHGレーザー技術

ＹＡＧレーザー共振器内部に非線形光学結晶を入れて，ＹＡＧレーザーの半分の波長(532nm)に変換されたレーザービームをパルス発振では５０Ｗ（パルス繰り返し数約５０kHz）程度あるいは，連続発振で５Ｗ程度が得られている(Clark Instrumentation MXR社製品）．また，ＹＡＧレーザーをLDで励起することで全固体化とし，同様の出力をコンパクトなサイズの装置で実現したものが市場に現われている(Light Wave, Spectra Physics社製品).

ａ．パルスレーザー

可視あるいは紫外でのパルスレーザービームを固体表面に集光照射することでスポット状の半導体などの変成層を形成でき，パルス繰り返し数を１MHz程度以上にすることで，多数の微細なスポット構造を大面積に短時間で安価に形成できるようになり，超大型ディスプレーなど新産業の創出が期待される．これを固体レーザーの波長変換（２倍波，３倍波，４倍波，etc.）で実現するためには，以下の要素技術開発が必要とされる．

「Ｑスイッチ技術」

繰り返し数１Mhz程度のＱスイッチ技術．ＡＯＱスイッチングの高度化．

「レーザービーム高品質化技術」

波長変換されるビームの高品質化（スペクトルバンド幅の狭帯域化，およびビーム広がり角の低減化）は，波長変換の効率を向上させるために不可欠であり，また，波長変換されたビームを高品質に維持することは応用上非常に重要である．バンド幅狭帯域素子とビーム高品質化のための位相共役素子およびレーザー媒質を一体的にインテ

グレートしたアーキテクチャーの開発を必要とする．

b．連続発振レーザー

連続発振レーザーでは，数ＷのSHG（２倍波）ビームおよびそのSHGであるFHG（４倍波）を出力１Ｗ以上で安定に発生させることが国内で発表された（ソニー）．紫外などの短波長フォトンは，金属やセラミックなどの個体表面で強く吸収されるため溶接や表面改質などで新規の方式を提供できる可能性があるが十分な出力の紫外線連続発振のレーザーが得られなかったためにその有用性が確認されていなかった．しかしながら最近になって，ファブリーペロー共振器内部のレーザー電場が非常に強くなることを利用した非線形光学結晶による波長変換技術が実証され，５０％を超える変換効率が実証されている．図4.5.8.1にはKozlovsky等によって実証された方式が示されているが[1]，連続発振ＹＡＧレーザービームをMgO:LiNbO3結晶に入射させ，その２倍波を発生させるものであり，断面が2.5mm x 2.5mmで長さ25mmの結晶の端面を曲率20mmの球面に研磨して結晶内部でリングキャビティを構成することで変換効率の向上を実現している．ＹＡＧレーザーをLD励起にすることで全体を非常にコンパクトにすることができると期待される．図4.5.8.2には，Liu等によりＹＡＧレーザーの２倍波をBBO結晶に入射することで４倍波（266 nm)を得る方式を示した[2]．BBO結晶はリング型の外部共振器の共焦点に置かれ3Wの入力で1.6Wの紫外出力を長時間安定に得ている．ＹＡＧレーザーをLD励起にしてあるので，システムのかなりのコンパクト化が実現されている(20cmx30cm)．これらの方式をたとえば出力数１００Ｗを発生する装置に適用する場合以下の要素技術開発が必要であろう．

「ポンプレーザービームの高品質化」

波長変換されるポンプビーム（出力１kW程度のスペクトルバンド幅を１MHz以内にし，これを長時間安定に維持しなければならない．また，ビームの広がり角を小さく維持するために当該波長および出力に耐える位相共役技術が必要とされる．

「結晶育成技術」

結晶による入射波の吸収を１ラウンドトリップあたり0.1%以下にすること，および，結晶寿命の延長のための超高純度高均質結晶育成技術の確立が必要である．

「ミラー技術」

波長変換用結晶を封入する共振器を構成するミラーの反射率（99.999%程度）を長時間一定に保つことが不可欠．反射率の1%以下の変動で波長変換されたビームの出力が数10%も変動する．そのためには，光学薄膜の形成技術としては，欠陥の減少，ストイキオメトリの改善，成膜後の処理法，膜材料としては，単純な酸化物以外の極低損失材料の探索（C_{60}のようなスカスカのものを用いるとか），また，超低損失多層膜の評価法の開発（構造解析，損失評価），ミラー形状の超精密評価法の開発，ミラーのレーザー入熱変形を補正する構造のミラーの開発など，技術的に難解なものが多い．

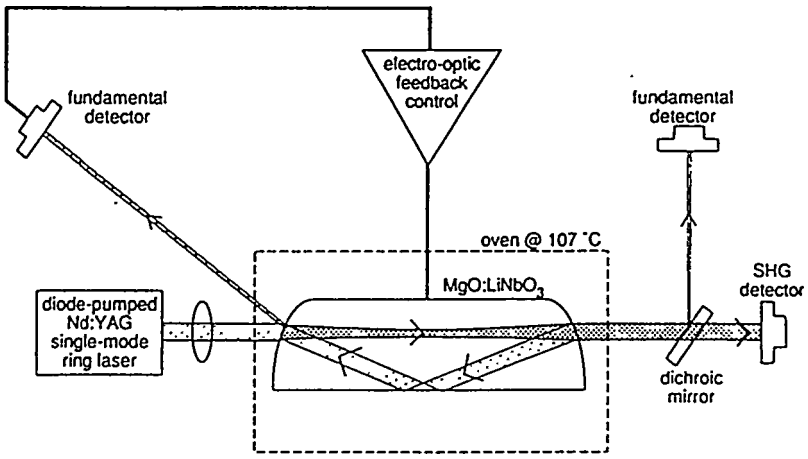


図4.5.8.1 MgO:LiNbO$_3$結晶内にリングキャビティを構成して
連続発振 YAG レーザーの 2 倍波を発生する例 (1)

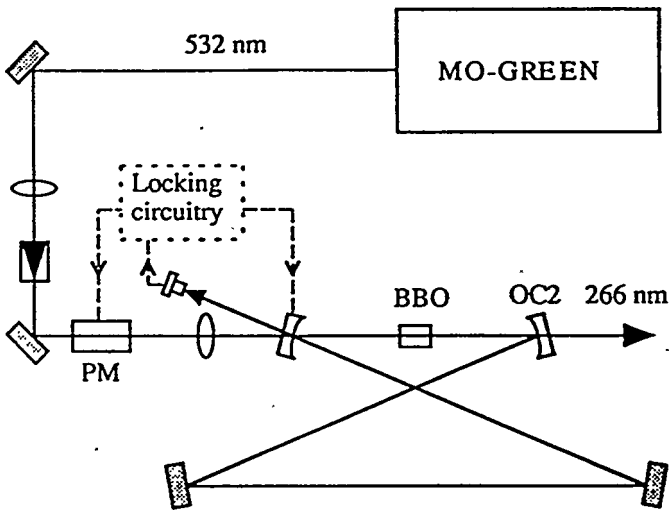


図4.5.8.2 BBO 結晶をリングキャビティに入れて連続発振 YAG
レーザーの 2 倍波の 2 倍波（4 倍波）を発生する例 (2)

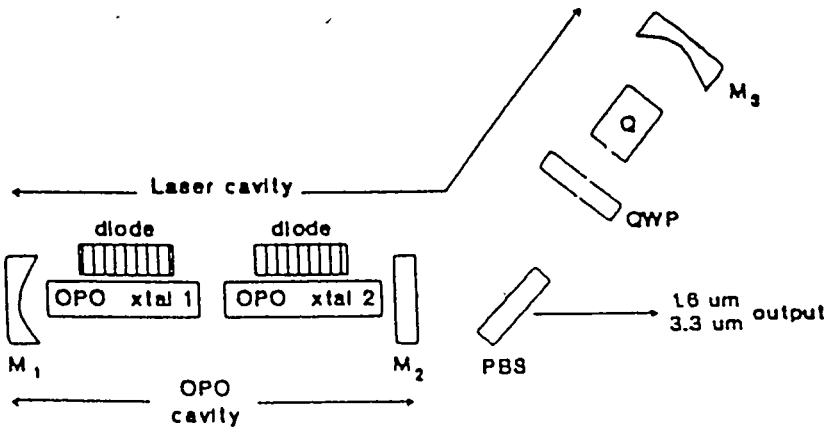


図4.5.8.3 レーザー発振器と OPO 発振器を一体にしたコンパクトな
アーキテクチャーの例 (3)

「位相整合技術」

波長変換結晶を含む共振器のモードと波長変換されるビームのモードを一致させるための実時間位相整合の技術が必要.

（２）ＯＰＯ

材料プロセッシングに於いて，フォトンの吸収にシャープな波長依存性を示す場合が多く，ＯＰＯによる任意波長ビームの発生技術はこれに答えるものである．表面改質などへの応用では，CWのＯＰＯで１００Ｗ程度必要であり，原子分子の量子状態を制御したプロセッシングに用いる場合は，大きなスループットを必要とするため，ある程度任意のパルス幅で１ MHz程度の繰り返しで発生できることが望ましい．現状では，パルス幅10ナノ秒から数10フェムト秒までのポンプ光を用いてパルスエネルギー数10mJのパルスを可視から赤外までの任意の波長で発生させる装置が理化学用として市販されている．産業用として高繰り返し高出力のレーザーに用いる場合，出力の長時間安定性が必要とされ，そのためにシグナル光，アイドラー光の位相整合を長時間正確に維持することが不可欠である．非線形光学結晶の温度上昇による位相の不整合を防止するために，レーザービームの吸収率のきわめて低い結晶の育成が必要であると同時に実時間で位相整合を調整する機構が必要である．連続発振のレーザービームを用いたOPOによる波長変換もSHGの場合と同様に行うことができ，ほとんど類似の要素技術開発が必要である．OPOをコンパクトなシステムで実現するアプローチが図4.5.8.3に示されている[3]．ここでは，レーザー媒質として Nd:MgO:$LiNbO_3$ が用いられているが，同時にOPO結晶としても作用し，レーザーキャビティと同軸にOPOのキャビティを構成することで全システムを高々３０ cmの長さに収めている．このようなアーキテクチャーの考案が必要であろう．

参考文献

1) W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, and R. L. Byer, "Efficient Second Harmonic Generation of a Diode-Laser-Pumped CW Laser Using Monolithic MgO:$LiNbO_3$ External Resonant Cavities", IEEE J. Quantum Electron. 24(1988)913.

2) L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann, and S. Kubota, "Longitudinally Diode-Pumped Continuous-wave 3.5W Green laser", Opt. Lett., 19(1994)189.

3) N. S. Prasad and A. R. Geiger"Highly Efficient Diode-Pumped Optical Parametric Oscillator", CLEO'95 paper CTul28.

4.5.9　新産業技術基盤としての期待

1）フォトンテクノロジーへの期待

レーザが発明されてから３５年，レーザは製造産業，情報産業，医療産業，アミューズメント産業，等の幅広い分野で応用されてきている．レーザを用いた機械加工の分野では既に溶接，切断で実績が評価され始め，一部電子部品，材料分野でもマーキング，アニーリング，等が，医療分野ではレーザメスの普及が始まっている．しかしながら，従来のレーザプロセスの応用はレーザが発生する熱による加工が主であり，フォトンを有効に使用するいわゆるフォトンプロセスには至っていない．図4.5.9.1に示すように，従来，機械産業が主であったレーザプロセスを，フォトンテクノロジーにより熱・機械の世界から量子・化学を融合したフォトンプロセスに展開できれば，革新的な新産業技術として機械産業，電子産業，素材産業，医療，通信産業，等で広く使われることになる．このためにレーザ発生技術では図中に示した高出力・高輝度，オールソリッド，等の革新的な技術開発が不可欠である．これらの技術開発によって，例えば「高安定高信頼の高出力レーザ」，「メンテフリーの高輝度小型レーザ」，「低フォトンコストの波長可変レーザ」等が実現可能になり，日本の産業界に国際競争力をもたらすインパクトのある技術として，さらに幅広く製造現場等に適用されるものと期待される．

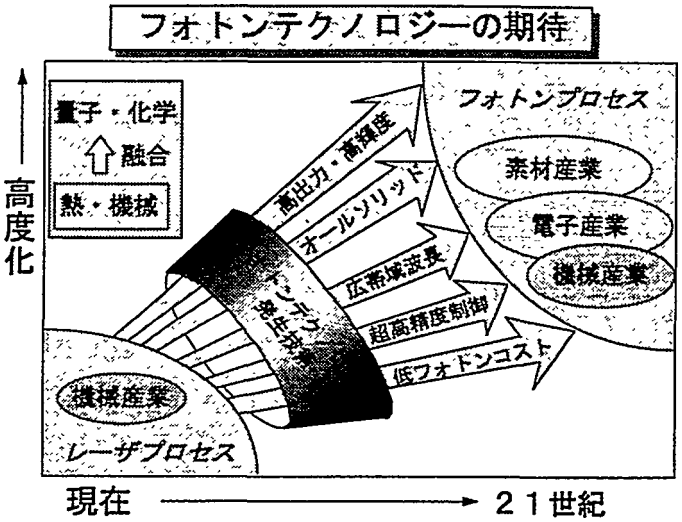


図4.5.9.1　フォトンテクノロジーへの期待

2）発生技術の開発課題

発生技術の要素技術と課題を図4.5.9.2に示す（詳細は4.5.3，4.5.4を参照）．
発生技術では主に励起光源，光学素子，結晶，共振器，システムから構成され，それぞれに図のような技術課題が上げられる．励起光源では実装方法も考慮した高効率・高出力ＬＤ技術，光学素子では高効率の結合素子技術，光制御素子技術，結晶では低熱歪み結晶技術，高効率波長変換素子技術，共振器では高出力・高品位ビーム技術，システムでは高安定発振・低フォトンコスト化技術，等の開発が必要である．これらの要素技術間では性能がトレードオフの関係に有るのもあり，技術開発はトータル性能のデザインに基づいた開発が必要である．

3）新産業技術基盤としての期待

上記技術課題をクリアしたレーザ発生装置は，表4.5.9.3に示す様な種々の産業プロセス産業の技術基盤として期待される．特に，材料・デバイス分野では特定波長の高輝度ビームによる脱真空・選択励起プロセスが実現でき，超微粒子を用いた機能構造体作成や高品位薄膜が可能になる．またインプロセスモニタやレーザハイブリッド（レーザアシスト

によるＭＢＥ等）も可能になる．機械加工では自動車工場での金型が不要の金属切断や３次元溶接ができるようになり，環境的に有害物質をまき散らさない光ファイバーネットワークのオール光加工工場が実現できる．また，紫外光レーザによる半導体露光や，光ＣＴ，癌治療等の医療・生体分野，また，高品質ビームによる大容量メモリや光ネットワークなどの通信情報機器分野，にも欠かせない技術基盤として期待される．

生産技術が「少品種大量生産」から「多品種少量生産」，「変機種変量生産」に移行するにつれて製造プロセスの質的転換が求められており，レーザ発生技術は高効率化，省力化，高付加価値，多機能，フレキシブル化，環境に優しい，といった将来のフォトンプロセスを実現する新産業技術基盤として期待できる．

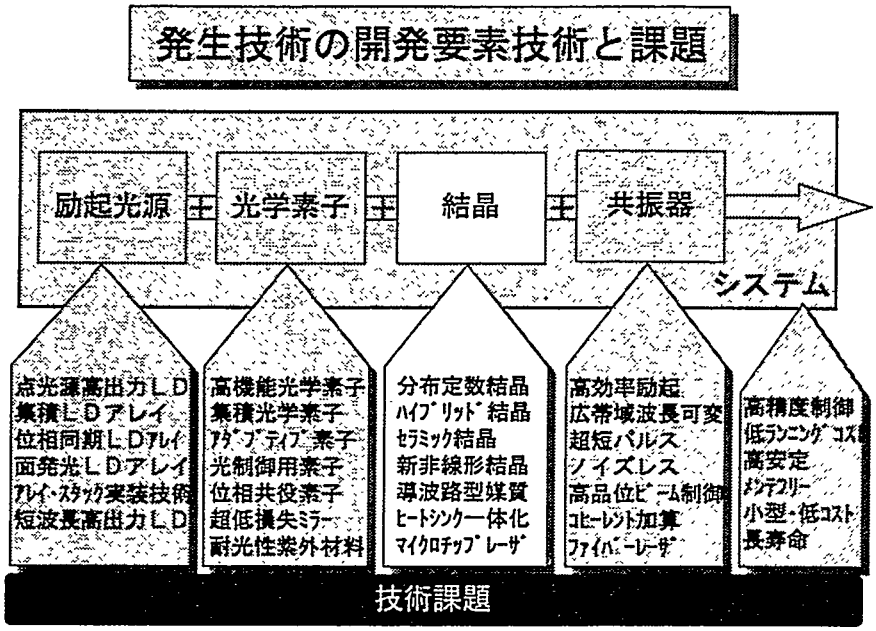


図4.5.9.2　発生技術の開発要素技術と課題

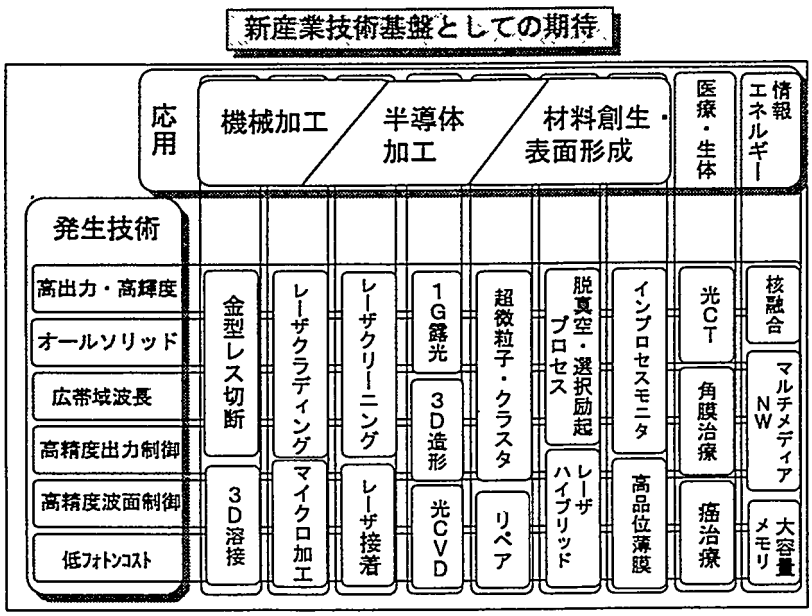


図4.5.9.3　新産業技術基盤としての期待

4.5.10 まとめ

完全固体化レーザー (all solid-state laser) 技術開発の目的は，柔軟で多機能な生産技術基盤として，高度なフォトンエネルギー発生・制御技術を確立することである．そのため，レーザー技術から，低信頼性と高フォトンコストの主要因であった放電技術を完全に排除し，高効率・高出力・高品質ビーム特性を備えた信頼性の高いレーザー技術を開発することが最重要課題である．

本調査研究で明らかにされているように，伝統的なランプ励起や放電励起レーザー技術に比べると，当該技術は次のような優位性を備えている．1) 励起源としての半導体レーザー (Laser Diode: LD) の発光効率が高く (30 ～ 80%,) そのスペクトルをレーザー媒質の吸収スペクトルに一致させることができるため 2) レーザーの高効率な発振が可能になる．それに伴い， 3) レーザーの飛躍的な小型化だけでなく，レーザー媒質中での発熱等の低下により4) 回折限界に近い高品質なビームの発生も著しく容易になる．また，完全固体化は，レーザーの 5) 低電圧動作化，6) 耐環境性・耐衝撃性の向上，及び 7) 長寿命化をもたらす．以上の結果として，8) フォトンコストの低減はもちろんのこと，9) レーザーの著しい高信頼性化を実現できる．

4.5.9に主な技術開発課題と新産業技術基盤としての期待がまとめられており重複する部分が多いが，ここでは，完全固体化レーザー技術開発に係わる具体的な課題を，レーザーシステム技術としての「LD励起高効率レーザー技術」，デバイス技術としての「高性能LD技術」，及び要素技術としての「高機能材料・光学技術」の面から要約すると共に，当該技術によって期待できる産業科学技術への波及効果についてまとめる．

(1) LD励起高効率レーザー技術

レーザー(システム)技術については，完全固体化による高効率・高出力レーザー技術，部品化・素子化レーザー技術，及び高品質ビーム発生技術の開発が主な課題である．

「高効率化」については，1) レーザー励起に寄与するLDスペクトルの高効率発生，2) レーザー媒質中へのLDエネルギーの高効率移行，及び3) 媒質中の蓄積エネルギーの高い取出し効率のための技術開発が重要になる．後述するLD技術に係わる課題を除くと，2) 及び 3) は主に励起光学系と共振器構成技術に関する課題である．例えば発振効率 1 ～ 2 %以下であったNd:YAGレーザーについては，全発振効率 ～ 30 %程度の実現が当面の目標となろう．LDと固体レーザー媒質の量子効率の積 (50 ～ 70 %) が上限となる．

「高出力化」については，レーザー出力についてスケーラビリティーのあるレーザーシステム技術開発が必須である．端面励起方式や側面励起方式等について新しいレーザー構成技術を開発することが必要であるが，同時に，レーザーの高出力化に伴うレーザー媒質の熱的複屈折や熱レンズ効果，それによる発振効率やビーム品質の低下等を解決することが必要になる．熱歪みの少ないレーザー材料や，空間モード補正機能を備えたレーザー共振器構成技術が開発できれば，平均出力～ 5 kW 以上の完全固体化レーザーの開発も可能である．一方，高出力化技術開発のアプローチとして「コヒーレント加算 (coherent addition) 技術」が重要である．例えば，cw出力10 ～ 100W程度の完全固体化レーザーの出力をコヒーレントに足し合わすことができれば，cw出力1 ～ 10 kWは容易に実現できる．そのためには高コヒーレンスと高品質ビームを備えたレーザーと，高度な位相・空

間・時間特性制御技術，及び高機能な光学素子技術等の開発が重要になる．

プロセス技術応用のためには，高出力な短波長レーザー，紫外から赤外域に至る広帯域波長可変レーザー，及びピコ秒からフェムト秒域の超短パルスレーザー等の「高機能レーザー技術」が重要な課題である．それには，LD励起固体レーザー技術と，パラメトリック発振や高調波発生等の波長変換技術，及びモード同期技術等のレーザー制御技術が高度に集約化される必要がある．

高出力レーザーの「部品化・素子化技術」については，励起源としてのLD，レーザー媒質，光学素子，光制御材料等のレーザー構成素子のモノリシック化（集積化）技術の開発，及び光ファイバーとの整合性に優れたLD励起ファイバーレーザー技術開発等が主な課題である．図4.5.10.1に，部品化・素子化レーザーの例（概念図）を示す．この技術については，レーザー構成部品の一体化・小型化によるマイクロチップレーザーと共に，レーザー構成素子の集積化のための新たなレーザー構成技術やデバイス技術を開発する必要がある．レーザー媒質中に蓄積できるエネルギーには限界があり，レーザーの高出力化には，必然的にレーザー媒質の増大とそれによるレーザーの大型化を伴うが，コヒーレント加算技術等が開発できれば，部品化・素子化レーザーを基礎とする高出力化も現実的になる．また，ファイバーレーザーは，フォトンエネルギーの伝送とレーザーの空間周波数制御を飛躍的に容易にする．高出力なcwレーザーを目的として，利得媒質としてのファイバー技術，高耐損傷技術，励起エネルギーのコアへの高効率移行とそのための新しいファイバー構成技術を開発することが重要になる．

「高品質ビーム発生技術」では，エネルギー集中性，指向性，単色性，コヒーレンス等（図4.5.10.1参照）のレーザー本来の特性を極限にまで高度化すると共に，空間・時間特性制御技術，位相・波面制御技術，スペクトル特性制御技術の研究開発により，フォトンエネルギー（及び光波）を電気・力学・熱エネルギー等と同等以上に制御できる技術を確立することが目標である．波面歪みの低減化・補正技術には，低熱歪みレーザー材料，新共振器構成技術，位相共役ミラー技術や能動光学素子技術等の開発が必要であり，空間ビームパターンの制御には，空間フィルター技術，回折光学系技術，及び各種光制御素子技術の開発が重要になる．また，時間特性の制御には，完全固体化レーザーに適した新しいQスイッチ技術やモード同期技術，及び関連変調素子技術等の開発が行われなければならない．レーザー共振器構成技術，レーザー材料・光制御材料技術，並びに光学素子技術を高度に集約化した取り組みが必要である．

(2)　高性能半導体レーザー技術

完全固体化レーザー技術は励起源となるLDの性能に大きく依存する．そのため，LDの高効率化・高出力化，短波長化，及び高機能化技術の開発が重要な課題である．

単一素子としてのLDについては，多重量子井戸構造や歪量子井戸構造等によるLD自身の「高効率発光技術」の開発，及び高効率化・高出力化に適した新半導体構造の開発が不可欠である．共振器端面での光損傷と素子温度の上昇が，高出力化の主な制限要因であり，LDの素子構造とデバイス構成技術に係わる課題が大きい．また，面発光LDも大きな可能性を秘めており，励起源としての視点からの取組みが行われるべきである．

一方，高出力化のための「アレー化技術」については，必要な新LD製造プロセス技術，

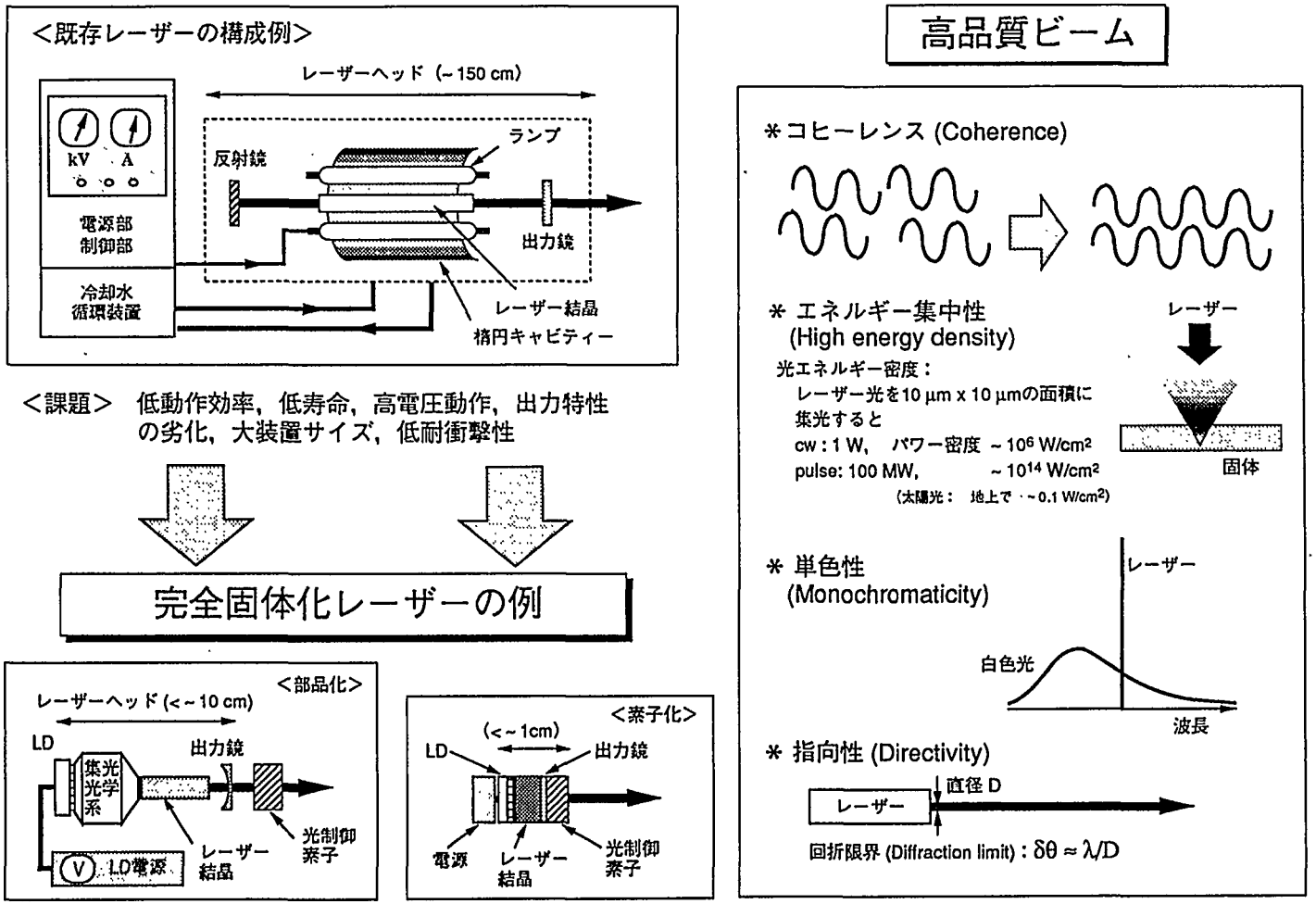


図4.5.10.1 完全固体化レーザーの例とレーザーの特性

アレーの二次元化，並びに高効率な素子冷却技術の研究開発を行う必要がある．中でもLD冷却技術は最も重要な課題であり，ヒートシンクのための材料（ダイヤモンド薄膜等）技術と高効率冷却のためのデバイス技術開発を行う必要がある．

他のレーザーに比べると，一般にLDビームの品質は著しく劣っており，主発振器・パワー増幅器構成 (Master Oscillator & Power Amplifiers: MOPA) 方式等を用いたLDビームの「位相制御技術」とそれによる「高ビーム品質化」技術の開発が重要である．同技術開発により，指向性，エネルギー集中性に優れた高品質なLD技術が確立できれば，生産プロセス技術への高出力LDの直接利用の可能性が大きく拓かれることになる．

現状では，～ 600 nm以下の波長域における高出力LDは存在せず，全固体化レーザー開発の大きな制約になっている．そのため，II-VI族半導体 (ZnCdSe/MgZnSSe系）やIII-V-nitride半導体 (InGaN/AlGaN系）等による緑から青，さらに紫外域における「短波長LD技術」の開発が必須である．この分野の技術開発は世界的にも草創期にあるものの，III-V-nitride LDのように我が国で開発 (1995年）された独自の技術が存在することから，是非とも取組むべき課題である．短波長LD技術の開発により，LD自身の直接利用と共に，高性能な完全固体化レーザー技術の可能性は飛躍的に拡大する．

なお，素子としてのLDの優位性は明らかであり，単に固体レーザー励起源としてだけでなく，上記のMOPA方式等によるビームの高品質化と共に，高繰返しパルス動作技術，位相同期技術，短パルス化技術，波長可変化技術等，将来のLDの直接利用を目指した高機能化技術開発を総合的に推進する必要がある．

(3) 高機能材料・光学技術

レーザー材料，光制御材料，及び光学（素子）技術はレーザーにとって不可欠な要素技術であり，レーザーの出力特性やビーム品質を決定的に左右する．

「レーザー材料技術」については，既存技術の高度化は必須であるが，同時に完全固体化レーザーの諸特性を念頭においた材料の「新育成技術」の開発が重要である．それらは，レーザー構成素子との一体化やレーザー形状に合致した機能性結晶育成技術，材料組成の傾斜化技術，形状制御合成技術等である．例えば，最近我が国で開発された「セラミック焼結法」によるNd:YAG育成技術は，レーザー媒質中の活性イオンの濃度分布や媒質形状を自由に制御できる可能性を秘めており，LD励起という新しい技術に対して，レーザー媒質の質及び形状の面から柔軟な対応が期待できる．また，材料技術から素子化レーザー技術へとアプローチするため，レーザー材料のエピタキシャル成長技術等により，ミクロンから厚膜化技術までを視野に入れたレーザー材料の「機能デバイス化技術」の研究開発が課題となる．

非線形光学材料等の「光制御材料」は，波長変換等による短波長レーザーや広帯域波長可変レーザー技術等を実現するためのキーテクノロジーである．光子欠陥の制御や光励起キャリア特性の制御による結晶・材料の耐光損傷性の向上，材料設計手法の開発による新結晶育成技術とそれによる結晶の均質性の向上や複屈折性の制御，さらには高効率変換のための疑似位相整合技術等の機能化・デバイス化技術の研究開発が重要な課題である．また，電気光学結晶，音響光学結晶，空間変調材料等についても機能の高度化と共に，レーザー構成素子との一体化・デバイス化技術の開発を行う必要がある．

「高性能光学素子技術」については，広帯域で高反射率を備えたミラー製作技術，結晶や基板の精密加工技術，高品質反射膜・無反射膜等のコーティング技術と共に，アクティブミラー，マイクロオプティクス，バイナリーオプティクス，さらにはレーザー構成要素間の結合素子，レーザー共振器内のモード補正・選択素子，ビーム位置・形状を制御する空間変調素子等の開発が重要になる．例えば，超高反射ミラーの開発により，ファブリーペロー・エタロン中にフォトンを長時間 (msec 以上) にわたって蓄積する技術（光コンデンサー）や，乱れた波面を自由に制御できるアダプティブ光学系技術が開発できれば，フォトン制御技術は全く新しい技術分野を開拓するであろう．

(4) 波及効果

すべての生産技術は，エネルギーをどのような形態で利用するかに大きく依存している．伝統的な電気・力学・熱エネルギーはそれぞれ代替不可能な特性を有しており，その利用形態によって生産技術の質は大きく変化してきた．完全固体化レーザー技術は，フォトンエネルギーを生産のための新しいエネルギー利用形態として確立するための「新生産技術基盤」であり，同時に「先端技術の融合化」を促進するためのキーテクノロジーとなる．

生産ツールとしてのレーザーは，複数の生産プロセス（材料合成，薄膜創製，切断，熔接，穿孔等）をフォトンのみによって実行できる「多機能性」を備えているばかりでなく，生産・加工工程の微細化（マイクロ化）を飛躍的に向上させる．高品質なレーザービームは，波長レベル (0.2 ～ 1 mm) の空間への「無質量」な「エネルギー集中」を可能にし，対象にほとんど依存しない柔軟な微細加工プロセス技術の開発を可能にする．さらに，レーザーに特有の「エネルギー単色性」は，原子・分子の内部量子状態を精密に制御する唯一の手段を提供する．この機能は，新材料や機能薄膜創製のためのプロセス技術を，原子・分子制御からさらには量子レベル制御へと発展させるはずである．

フォトンネルギーの「指向性」や「非接触性」は，個々の生産プロセスにおいて必要であった特種環境を著しく軽減する可能性を秘めている．例えば，超高真空や超高温が必要であった半導体や材料創製プロセスにおいては，非接触かつ高密度なエネルギー供給により，局所的な極限的物理環境（超高温，超高圧，超高電磁場等）を生成でき，蒸気圧の著しく異なる材料の合成も可能になる．また，真空中，水中，宇宙，放射線環境等の閉鎖環境・悪環境・極限環境下での多様な加工プロセス技術も開発できる．

完全固体化によるレーザーの「小型・低電圧動作」により，フォトンエネルギー源としての高出力レーザーと周辺先端技術との「整合性」は飛躍的に向上する．また，フォトン(光)が本質的に備えている「情報担体機能」により，生産情報の実時間計測やフィードバック制御も容易になるため，各種計測技術・情報処理技術とレーザーとの融合化によって，プロセス技術の「自律化（知能化）」を大きく進展させることができる．

すなわち，生産技術基盤としての完全固体化レーザー技術は，生産プロセスにおける「多機能化」，「微細化」，及び「自律化」を著しく促進し，伝統的な生産技術を質的に大きく変革する可能性を備えている．その結果，エレクトロニクスや機械技術分野においては，設計・生産工程の短縮，それによる生産設備の簡素化，無駄の排除やオイルフリー等の生産環境負荷の大幅な低減が可能になり，今後予想される多様なニーズに対して，柔軟かつ速やかに対応できる生産プロセス（変機種変量生産）技術の発展を大きく促すこと

が期待できる．両分野への波及効果の例を以下に要約する．

自動車，航空機，船舶等の機械構造物製造においては，鋼，鉄，アルミ，合金，セラミックス，プラスチック等の多くの異なる構造体材料について，多種多様な形状の切断，熔接，窄孔等の加工が要求される．その多くについて自動化・省力化が進んでいるとはいえ，設計，各種加工工程，加工ツール，加工設備の種類と数は，新素材・材料の出現やニーズの多様化によって増加の一途をたどっている．当該レーザー技術は，加工対象に依存することなく，精密切断・熔接・窄孔等をフォトンエネルギーだけで行うための多機能な技術を提供する．また，複数の従来技術に対する代替技術としてだけでなく，光の波長レベルでの微細加工機能，三次元加工機能，さらには表面改質機能等により，従来異種分野で開発されてきた加工プロセス技術を融合化し，生産プロセス自身の構造的な変革をも促すことが期待できる．また，上述のように，宇宙，水中，放射線環境（原子力発電所等），閉鎖環境等においては，各種構造体の加工・修理等に利用できるフレキシブルな技術が求められており，完全固体化レーザー技術は，そのために必要な遠隔操作，多機能，高効率，非接触・高速，小型・軽量等の諸性能を備えたエネルギー源とそれによるプロセス技術を提供する．

エレクトロニクス分野においても，各種デバイスの高速・高密度化の進展と共に，半導体製造，薄膜・結晶成長，その精密加工，デバイス化，システム化等の一連の工程において，様々な材料，物理・化学的微細加工プロセス，並びにそれぞれのプロセスのための超高真空，高温等の特種環境とその設備が極限化・増加の一途をたどっている．そのため，プロセス工程の短縮，高精度化，大面積化，並びに設備の簡素化等が大きな課題となっている．当該レーザー技術を利用したレーザーCVD，レーザーMBE，アブレーション等のドライプロセス，マスクレス露光，レーザー微細加工等の実用化により，各種のプロセス工程は著しく短縮できると共に，その設備も大幅に簡素化できる．また，当該技術により，量子状態制御，非破壊精密計測，電子材料の機能改質，原子・分子マニピュレーション等の多くの新しい微細加工プロセス技術も発展する．

完全固体化レーザー技術は，他の産業技術分野においても類似の効果をもたらし，次代の「新産業創出」に大きく寄与するはずである．図4.5.10.2に，当該技術によって高度化・実用化が期待できる産業技術の例を示す．

図4.5.10.2　期待される波及効果の例

第５章　プロジェクト化の向けての基本的構想

５．１ 研究目的

本研究開発では，高品質フォトン（コヒーレントな光）をツールとして，原子・分子レベル特有の機能を発見させる機能付与加工，機能構造体，新材料創製等の新加工技術（フォトンマシニング技術）の確立を図る．

本研究開発で開発する光のツールは，高エネルギーを微小領域に集中させ，超高温・高圧場を作り出し，プロセスを行う光のツールであり，単に光のエネルギーを利用するだけにとどまらず，光の波動性をも利用し高度に制御することができる．高エネルギーフォトンを物質に作用させた時に生ずるミクロな諸現象（プラズマの発生や光との相互作用）は，これまで殆ど解明されておらず，フォトンプロセスの視点から基礎的な解明を押し進め，プロセスに応用するための新たな展開を行う必要がある．そのために，フォトンの発生と伝送，計測制御の高度化を図り，高品質フォトンを得てフォトンと物質の関与した物理化学現象等の未解明な科学分野を明らかにする．そして21世紀には，このフォトンをツールとする革新的なプロセス技術である機能付与加工技術を実現させて新たな技術体系を構築し，得られた成果を応用することにより既存産業に貢献すると共に，新たな産業の創出に寄与することを目的とする．

５．２ 研究開発内容

本研究開発は，フォトンマシニング技術を開発することにある．フォトンマシニング技術は要素技術として（１）フォトンプロセス応用技術，（２）フォトン伝送・計測制御技術，（３）フォトン発生技術から構成される．

（１）フォトンプロセス応用技術

フォトンプロセス応用技術として，機能構造体，新材料の作成技術，新表面・被膜形成技術，機能回復技術等の超微粉クラスター・同素体技術と光切断・接合・熱処理技術を中心にプロジェクトを展開していく必要があるが，より高度な技術として実現するために，これらに共通した最も重要な研究課題はフォトンを物質に照射した時に生ずる原子・分子に係わる諸現象を解明することとインプロセスモニタリング技術に開発である．また，それぞれの技術の研究開発課題内容は，以下のようになる．

(1.1) 超微粉，クラスター・同素体技術

①機能構造体，新材料の作成技術

・気相中の超微粒子の成長機構解明

・超微粒子の凝縮・成長を包括するモデルの作成

・超微粒子による発光材料特性 等

②新表面・被膜形成技術

・光量子利用被膜形成技術

・真空紫外フォトンプロセスによるポリマー材料の高性能化・高機能性付与

・レーザーハイブリッド技術（レーザープラズマハイブリッドプロセス，レーザーアークハイブリッドプロセス，レーザーイオンビームハイブリッドプロセス）

(1.2) 光切断・接合・熱処理技術

①除去加工

・切断加工の安定性・切断品質保証・高速切断加工

・厚板切断加工・フレキシブルな切断加工技術，加工制御技術

②接合技術

・溶接加工の安定性，溶接品質保証，高速溶接，厚板溶接，フレキシブルな溶接加工，狭隘箇所溶接技術

③熱処理

・熱処理の安定性確保・熱処理の保証・狭隘箇所の熱処理技術

(1.3) インプロセスモニタリング技術

・インプロセスモニタリングのためのセンサー技術

・加工現象を予測する数学モデルと予測制御技術

（2）フォトン伝送・計測制御技術

フォトン伝送・計測技術として，高出力用光ファイバー技術，アダプティブオプティクス，を利用した波面計測制御システム，空間伝送用光学部品技術を中心にプロジェクトを展開していく必要がある．これらの技術は，これまで通信，画像処理，計測など一般的な光技術分野で開発されてきた技術で，一部で高出力用の重要性が認識され開発が進められているものもあるが，現状では殆ど高出力用に開発されたものは存在しない．

それぞれの技術の研究開発課題内容は，以下のようになる．

(2.1) 高出力用光ファイバー技術

・高出力光ファイバーの開発（石英系光ファイバー，Geドープファイバー，純粋石英コアファイバー）

・ファイバーカップリング（高出力のファイバー入射端，射出端）

(2.2) アダプティブオプティクス

・高効率，安定性を両立させる高出力用位相共役発生技術の開発（結晶，液体，気体）

・正確，迅速に動作し，耐熱性に優れた高出力用デフォーマブルミラーの開発

(2.3) 空間伝送用光学部品技術・最新計測評価技術

・熱誘起光学歪みが小さい高出力用光学部品の開発

(Zince Seleide，Potasiun Chloride，ダイヤモンド，DOE)

・加工表面評価（エバネッセント光検出走査型近接場光学顕微鏡）

（3）フォトン発生技術

フォトン発生技術として，LD励起個体レーザー，ファイバーレーザー，波長可変レーザーを中心にプロジェクトを展開していく必要がある．単にレーザー技術を開発するということではなくプロセスに応用するためのレーザー技術の開発が望まれる．そのような視点からLD励起個体レーザーは従来技術に比較して高品質，高出力，小型化が達成できる点で注目される．

また，産業応用の視点から重要なことはフォトンコストの低減であり，今後十分に検討していく必要がある．そしてそれぞれの技術の研究開発内容は，以下のようになる．

(3.1) LD励起個体レーザー

・連続発振，高出力，高品質LD励起個体レーザー技術（5 kW以上）

・高出力LD技術（高品質，高出力LDアレイ技術，位相同期による高品質化，高出力化）

・低熱歪み結晶技術（材料の合成技術，機能性結晶育成法，セラミックス合成法，LD　共振器端面での光学損傷，アダプティブ素子・位相共役素子技術の導入による結晶歪みの解消）

(3.2) ファイバーレーザー

・連続発振高品質，高出力ファイバーの開発

・ファイバー端面のレーザー損傷を防ぐ超低損失コーテイング技術の開発

(3.3) 波長可変レーザー

・高出力用 Optical Parametric Oscillator 技術（非線形結晶，結晶の角度及び温度調整による出力波長調整）

5.3 研究開発体制

フォトンマシニング技術は，幅広い分野にまたがる研究開発でありそれぞれの各グループが勝手に研究を進めると，全くまとまりのないばらばらなプロジェクトになってしまう危険性が高い．本プロジェクトでは，フォトンプロセス応用技術，フォトン伝送・計測技術，フォトン発生技術のそれぞれの担当する研究者がお互いに協力しあってお互いに研究を進めていくことが必要不可欠である．そのためには，技術開発の方向を議論し，情報交換する場（委員会，検討会等）を設定していく必要がある．

研究開発上の産学官の役割分担は大学，国研が具体的研究，民間が実用化のための開発研究であり，以下のようになる．

①フォトンプロセス応用技術

・フォトンに物質に照射した時の諸現象の解明：大学，国研

・超微粉，クラスター・同素体技術：国研，大学（基礎），民間（実用化）

・インプロセスモニタリング技術：大学，国研（基礎），民間（実用化）

・接合技術：大学（基礎），民間（実用化）

②フォトン伝送・計測制御技術

・ファイバー技術：大学（基礎），民間（実用化）

・アダプティブオプティクス及び位相共役技術：大学，国研

③フォトン発生技術

・発生の基礎研究：大学，国研

・発生の実用化のための開発研究：民間

第６章　まとめ

コヒーレントなフォトン（光子）を利用した材料創製，機能構造体造出，あるいは機能・形状賦与加工などのスケールはナノメートル（10^{-9}m）のオーダーに及び，実に10^{12}倍の広がりを持ったテクノロジーである．これはフォトンという特別な量子の有する特性を様々な側面から制御・利用することにより初めて達成される技術で，他の技術ではとうてい到達できない広範な応用技術である．このような技術を本報告書ではフォトンマシニングと定義している．

フォトマシニングはレーザーの発生技術，レーザービームの伝送・計測制御およびプロセス応用技術の３本柱から成り立っている．従来はここの要素技術を専門とする研究者および技術者がその専門の範囲で研究開発を行っており，他の要素技術との関連を深く考慮することは少なかった．レーザー応用プロセス技術の発展段階を振り返ると，初期の応用研究開発段階を第一世代とすると，現在産業界で一部実用化している段階を第二世代と位置づけることができる．この間レーザーの大出力化が進み，様々な応用技術が開発されてきた．しかし，ここに来て当初考えていた理想的レーザープロセス応用技術の前に高く聳える技術的・学術的バリヤーの存在が明らかとなってきた．

先ずレーザー発生技術に関しては，プロセッシング用高出力レーザーの空間的・時間的コヒーレンシーが理想的なレーザーから桁違いに大きくはずれていること，および時間的・空間的ビーム応答性が極めて劣っているために，考えうるプロセッシングが不可能になっていることが挙げられる．次に，レーザービームの伝送・集光および計測技術の面では，レーザーの大出力化に伴い光学素子の熱誘起歪みによるビーム品質のおよび集光性の劣化が著しいこと，およびビーム特性の計測技術と大出力レーザー用補償光学系開発が非常に遅れでいる事である．プロセス応用技術の面では，フォトンと物質の相互作用現象が従来考えられていたより遙かに複雑で物理学・化学的に解明されていない事象が多く，適応プロセス制御技術が全く確立されていないことが重大課題となっている．

以上の現状に鑑み（社）日本オプトメカトロニクス協会のフォトンテクノロジー（レーザー技術）委員会に委託されたＮＥＤＯの先導研究では３つの分科会，すなわちレーザー発生技術，ビーム伝送・計測制御およびプロセス応用技術の分科会を設け，我が国における各界の指導的人物の英知を集めてレーザー応用技術の飛躍的発展のための現状分析と課題発掘，および技術開発の方向設定について検討を進めてきた．本委員会のアプローチ法は，従来の上流に素材とツール（道具）が存在し，各種のプロセッシング技術を介して下流の製品を作るという発送を逆転して，科学技術的に実現できると確信できる構造体を造る加工技術開発に必要なツール開発およびそのハンドリング技術と情報処理技術の開発を求める手法を採用した．すなわち，いずれの要素技術においても上流・下流という上下関係を脱却し，要素技術間の相互的補完または異分野融合による革新的技術開発を目指した新しい試みである．

個々の要素技術分野における現状分析結果と将来課題の方向付けは本報告書の各章に詳細に記述されているので具体的な説明は省くが，２１世紀において最も重要な基礎技術である「電光石化」（電＝電気・電子，光＝レーザー，石＝新素材，および化＝バイオテクノロジー）の一つであるフォトマシニング技術を非常に高度な段階で実現化することは，

日本のみならず世界における産業の礎を構築するための最重要課題である．本先導研究で得られた提言および結論は科学技術的に広範かつ深淵なもので，単純明快に要約することは困難であるが，キーポイントとしてあえて平易に述べると次のようなものとなる．

材料プロセッシング用レーザーは理想に近いコヒーレンシーを有する高品位化と将来の適応制御のための高速度応答性，および全く新しいプロセッシングレーザーの開発が求められている．この要求を実現化するための主要提言は，大出力ＬＤレーザーの開発，大出力ＬＤ励起固体レーザーやファイバーレーザーの開発などである．一方，ビーム伝送・計測制御技術では高出力レーザーに耐えられる高性能光学素子および適応光学系の開発とビーム特性の高時間・空間分解能計測技術の開発が主題となっている．また，レーザー応用プロセス技術ではビームと物質の相互作用の学術的解明とそれに基づく全く新しい制御技術の確立，および高品位レーザーと高度な伝送・計測技術に支援されて初めて実現できる超高精密・高効率プロセッシング技術の開発が主要課題である．

フォトンマシニングが２１世紀における必要不可欠な基盤技術となるためには，本報告書で指摘されている学術・技術的なバリヤーに対して，明確な意志と目的を持って乗り越える事が寛容である．

APPENDIX

Appendix

A1．フォトンテクノロジー・ワークショップ('95)の報告

フォトンテクノロジー（(ハードフォトン技術)及び(レーザープロセス技術)）は，通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度の本格的なプロジェクトとして立ちあげる前の事前調査を行う「先導研究」を実施してきた．これと関連して，平成８年３月11日及び12日の２日間，工業技術院つくば研究センター共用講堂において，フォトンテクノロジーのワークショップを下記プログラムで開催した．招待講演12件(国内６件，海外６件)及び98件のポスター講演が行われ，314名(内，外国人15名)が参加して活発な討論が行われた．

フォトンテクノロジー・ワークショップ('95)プログラム

・第１日：３月１１日（月）

13:30　Opening Session　（座長：機技研　松田 浄史）

(1)主催者挨拶　新エネルギー・産業技術総合開発機構　理事　向井　保

(2)来賓挨拶　通商産業省工業技術院総務部　技術審議官　石川　洋一

(3)産業科学技術研究開発制度 先導研究「フォトンテクノロジー」
平成７年度成果報告

1)レーザープロセス技術委員会　委員長　辻内　順平

2)ハードフォトン技術委員会　委員長　難波　進

（座長：物質研　矢部　明）

14:00 I-1 : Trend of Laser Materials Processing and Future Subjects
大阪大学　松縄　朗

14:30 I-2 : High Power Laser Applications
Rofin-Sinar Laser GmbH, Germany　F. Bachmann

15:00 I-3 : A Study of Synthesis of Nanoparticles by Laser Ablation of Microspheres:Experiment and Theory
University of Texas at Austin, U.S.A.　J.R. Brock

15:30 [Coffee Break]

（座長：豊橋技科大　英　明）

16:00 I-4 : Diode Pumped Solid State Laser Driver for a Soft Xray Source
Lawrence Livermore National Laboratory　W.K. Krupke

16:30 I-5 : X-ray Production from Xe Clusters in Plasmas Channels
University of Illinois at Chicago, U.S.A.　C.K. Rhodes

17:00 I-6 : New Prospects of Hard-photon Processing
— Exploration of Intelligent Process —
分子科学研究所　宇理須　恒雄

18:00　【懇親会】（司会：電総研　坂本統徳）

・第２日：３月１２日（火）

（座長：姫路工大　千川 純一）

10:00 I-7 : Optical Elements for Hard-photon

ニコン　村上　勝彦

10:30 I-8：Projection Lithography using Soft X-ray with Wavelength of 5nm and 13nm　ＳＯＲＴＥＣ　阿刀田 伸史

11:00 I-9：Extreme Ultraviolet Lithography System　ＮＴＴ　竹中　久貴

（座長：東大　藤村 貞夫）

11:30 I-10：Form Birefringence of Volume Gratings in Photopolymers

University of California, Santa Barbara, U.S.A.　C.Yang

（座長：電通大　植田 憲一）

13:30 I-11：Overview of the Compact Diode-Pumped Solid-State lasers

福井大学　小林　喬郎

14:00 I-12：Laser Diode Pump Arrays for Industrial Applications

ＳＤＬ Inc, U.S.A.　N.W.Carlson

14:30 [Coffee Break]

[Poster Session]

17:00 終了

以下にレーザープロセス技術関係セッションの概要をまとめ報告する.

（１）オープニングセッションの概要

第一回のオープニングセッションでは，主催者側を代表して，新エネルギー・産業技術総合開発機構の向井保理事から挨拶，次に来賓挨拶として通商産業省工業技術院総務部石川洋一技術審議官より，フォトンテクノロジーの趣旨及び期待が述べられた.

次に産業科学技術研究開発制度の先導研究「フォトンテクノロジー」平成７年度成果報告が行われ，レーザープロセス技術委員会から辻内順平委員長(東京工業大学名誉教授)，ハードフォトン技術委員会から難波進委員長(長崎総合科学大学副学長)が，それぞれの委員会の本年度の調査内容を報告した．未踏領域を含む新たな展開の魅力的な研究内容が多く含まれており，プロジェクト化への大きな期待を抱かせるものであった.

（２）招待講演の概要

ａ．〈I-1〉Trend of Laser Materials Processing and Future Subjects

松縄 朗（大阪大学）

レーザーによる材料加工としての物質除去加工，接合加工，表面改質加工の３分野に対して，レーザー発振器の状況とから世界の最新動向を紹介した．これらの分野の動きを一言でいうと，薄板金属加工を中心にCO_2レーザーやYAGレーザーが産業界で採用されて来たが，近年は短パルス・短波長レーザーによるアブレーション加工が注目されてきている．しかし，実際には，レーザー発振器の高性能化とともに，ビーム伝送，集光光学系，加工テーブル，ロボット或いは制御技術にも種々の難問があり，次世代レーザー利用技術を確立するためには基礎研究からの抜本的な研究開発が要請されている．特に，複雑な加工現象を解明し，適応制御技術を開発するためのインプロセスモニタリング技術の開発を強調された．このような課題が達成されれば，通常のアーク溶接では熱変形が大きくて実用化が困難である計量・高強度パネル製作が可能となり，省資源・省エネルギープロセッシングとしてレーザー技術がまだまだ産業界で採用・拡大されるだろう．更に，最近の興味あ

る研究開発トピックスとして，キーホールダイナミックスの解明とレーザー加工現象の数学的モデル化，フォトンコストの低減策としてのハイブリッドレーザー加工の例が紹介された．

b．〈I-2〉High Power Laser Applications　Dr. F. Bachmann(Rofin-Sinar Laser GmbH)

1980年代後半にドイツ・ジーメンス社でエキシマレーザーによる電子回路基盤のアンホール加工を実用化した業績で注目されている著名なレーザープロセスの研究技術者であるが，講演では，現在の Rofin Sinar社でのCO_2とYAGレーザー加工機を中心としたものであった．切断加工における種々の材料をいかに高品位に仕上げるか，高速対応でフレキシブルな焦点制御の光学系の最適化について詳細な例が示された．レーザー溶接が最も活躍している自動車産業での注意すべきＲ＆Ｄ期の課題として，初期段階での欠陥の発見と分析法の確立を強調された．さらに，今後自動車産業からは，様々な厚さ，形状，材質を使用する２次元加工，最終的には３次元加工が要求されており，レーザープロセッシングの革新的な高度化が緊急課題である．レーザー表面処理分野では，現在未だ産業界での普及は乏しいが，大出力レーザーによれば，様々分野への利用が期待される．例えば，タービンブレードの長寿命化のための効果処理が興味ある．最後に，エキシマレーザー利用について，産業界での大規模利用には到ってないが，多層電子回路基盤のビアホール加工は，他の手法では困難であった加工がエキシマレーザーにより可能になった好例であり，品位の優れたプロセッシングを特徴づけるこのような特殊性がその使命ではないかと結語された．

c．〈I-3〉A Study of Synthesis of nanoparticles by Laser Abration of Microspheres: Experiment and Theory.

Prof. J. R. Brock(University of Texas , Austin)

ナノ超部粒子を作製する新しい手法として球状原料のレーザーアブレーションを紹介した．シリカ（20μm径）や金（２μm径）の球状粒子にクリプトンフッ素エキシマーレーザー（249nm）の高フルエンス（4.5～ 7.5Ｊcm^{-2}）照射により，非常に分布の狭いナノ超微粒子が作製された．シリカの場合には，60～80nm内であり，平均径はレーザーフルエンスと波長に逆比例する．金の場合も同様な結果が得られた．

アブレーションのプルーム中に置けるおけるナノ超微粒子の生成過程が１次元流体力学方程式であるEular式からシミュレイトされた．原料の微粒子がアブレーションされて，２つの衝撃波が発生し，強い第一波はレーザー方向へ向かい，第２波はレーザー方向から離れた影方向へと進むことが，計算結果と実験結果で一致した．結論として，ナノ微粒子はレーザー方向に向かった強い衝撃波の背後で生成することが判明した．

d．〈I-10〉Form Birefringence of Volume Gratings in Photopolymers

Dr. C. Yang (University of California , Santa Barbara)

光誘起された１次元と２次元の体積屈折率格子による形式上の複屈折についてデュポンの光ポリマーを用いて実験的に調べた結果の報告である．１次元の格子については，447nmの周期をもつ１次元の格子で，632.8nmの波長の光に対して-0.0012 の複屈折が得られたことが報告された．同時に，再生光の波長や格子の周期に対する分散に関する実験結果も示している．

さらに，２次元の体積格子による形式上の複屈折についても調べ，異なる波数ベクトルを持つ二つの体積格子を記録することで，正の複屈折や２軸性の複屈折を得ることができ

ることを示し，２次元の体積格子が存在する場合の媒体の主屈折率の測定結果についても報告している．

e．〈I-11〉 Overview of the Compact Diode-Pumped Solid-State Lasers

小林喬郎（福井大学）

半導体レーザー(LD)励起固体レーザーの基本特性と特徴，世界の最新動向，講演者のグループの最近の研究，並びに同レーザーの応用分野等がバランスよくレビューされた．

「固体レーザーのルネッサンス」と呼ばれた1980年代から90年代における新固体レーザー媒質の開発と高出力LD技術の進歩を背景として，レーザーの新時代が到来しつつある．LD励起技術を用いることによってレーザーの効率が飛躍的に改善でき，小型高出力で信頼性の高いレーザーが開発できると共に，高品質ビーム化，低雑音化，堅牢化等の産業応用にとって不可欠なレーザーの特性が実現できる．具体例として，単一周波数レーザー，マイクロチップQスイッチレーザー，注入期による高品質ビームレーザー，高性能アイセーフレーザー，小型高出力Nd:YAGレーザー，新高出力レーザーとしてのYb:YAGレーザー，２次元アレーレーザー等をあげることができる．高出力レーザーについては，CW出力100W程度のTEM00モード発振が実現されている．LD励起固体レーザー技術を利用することにより，レーザー医療技術，レーザーリモートセンシング技術，レーザー物質プロセシング等の飛躍的発展が期待できる．

f．〈I-12〉 Laser Diode Array for Industrial Applications

N.W.Carlson （SDL Inc.）

SDL社で進められている高出力半導体レーザー（LD)アレー技術の開発現状が，準定常(QCW)発振高出力アレー技術，CW発振アレー技術，及び低価格化の面から議論された．

QCWアレーの設計･製作技術，及びパッケージ技術等が進歩し，出力，効率，スペクトル特性，寿命，安定性等は飛躍的に改善された．その結果，著しく信頼性の高いLDバーと共に，kWを越える高出力バーを製作できるようになった．CWアレー技術についてもほぼ同様であり，バーを構成するLD間のスペクトルのばらつきを極めて小さく抑制できるようになると共に，寿命も 10,000時間を越えるようになった．そのため，LD アレーの信頼性は，CO_2レーザーやフラッシュランプ励起固体レーザーのそれを上回るレベルになりつつあり，固体レーザー励起源，あるいは直接的な工業応用に充分応えられるようになっている．
一方，低価格化については，原価（initial cost)と寿命の面から努力が続けられており，1995年における高出力LDの価格は，1989年のそれの10～20 %程度にまでなった．製造プロセス，デバイス構成，及びパッケージ技術等が進展すれば，一層の低価格化も可能であろう．

（３）ポスターセッション

ポスターセッションへの投稿数は，最初の予定（40件）より大幅に増加し49件となった．発表の内訳は，民間企業から18件，大学から18件，国立研究機関から13件．また，カテゴリー別では，レーザーに関するもの21件，レーザー光学に関するもの7件，レーザープロセスに関するもの21件であった．

ポスターセッション内容一覧表

Program No., Title of Paper, Affiliation, Authors

L-1 Nanosecond Pulsed All-Solid-State Laser Source at 1 kHz Repetition Rate
Lambda Physik Japan * Lambda Physik GmbH
B.Fechner W.Zschocke *, N.Deutsch *, U.Stamm * and D.Basting *

L-2 Laser-Diode-Pumpde Thermally-Induced-Birefringence-Compensated Nd:glass Rod Laser
Osaka University, Institute of Laser Engineering
* University of Osaka Prefecture, College of Integrated Arts and Sciences
H.kiriyama, T.Yoshida, N.Srinivasan, T.Kimura, K.Nishida *, S.Owaki *,
M.Yamanaka, Y.Izawa, T.Yamanaka and S.Nakai

L-3 LD-Pumped High-Average-Power Nd:YAG Laser
Japan Atomic Energy Research Institute
Y.Maruyama, M.Kato, M.Ohba, K.Akaoka, T.Muramatsu, T.Arisawa

L-4 Laser-Diode-Pumped Nd:YAG Active-Mirror Laser
NEC Corporation, Opto-Electronics Research Laboratories
Tadashi Kasamatsu and Hitoshi Sekita

L-5 All-Solid-State KTP Optical Parametric Oscillator Amplifier and its Applications
Osaka University, Institute of Laser Engineering,
* University of Osaka Prefecture, College of Integrated Arts and Sciences
**P institute for Laser Technology
N.Srinivasan, T.Kimura, H.Kiriyama,T.Yoshida, K.Nishida *, S.Owaki *,
M.Yamanaka, Y.Izawa, S.Nakai and C.Yamanaka **

L-6 Characteristics of an End-Pumped Solid-State Laser with a 1-cm Diode-Laser Bar
Keio University, Department of Electrical Engineering
Y.Akabane, K.Utoh, A.Nakanishi and F.Kannari

L-7 All Solid-State Forsterite Laser
Mitsui Mining & Smelting Co.,Corprate R & D Center,
* Electrotechnical Laboratory, Laser Section
T.Yamazaki, Y.Nobe, Y.Anzai, K.Yamagishi, S.Uemura * K.Miyazaki *

L-8 Millennia - The New Compact, Diode-Pumped, High Power, Visible CW Laser
Spectra-Physiscs Laser Inc., Scientific & Industrial System
Bruce Craig

L-9 High-Power-Diode-Laser Pumped Kerr-Lens Mode-Lock Cr:LiSAF Laser
Electrotechnical Laboratory, Laser Section, Optoelectronics Division
S.Uemura and K.Miyazaki

L-10 80W CW Operation of Solid State Laser of Virtual Point Source Pumping Geometry
University of Electro-Communications, Institute for Laser Science
J.Song, N.Uehara and K.Ueda

L-11 Spatial Hole Burning Effects in Laser-Diode-Pumped High-Power Fiber Lasers

University of Electro-Communications, Institute for Laser Science

A.Liu, K.Kametani and K.Ueda

L-12 Development of 2-D High Power LD Arrays

* Hamamatsu Photonics K.K.,

Osaka University, Institute of Laser Engineering

H.Kan *, T.Kanzaki *, H.Miyajima *, Y.Itoh *, K.Matsui *, T.Morita *, T.Hiruma *,

M.Yamanaka, H.Kiriyama, T.Yoshida, Y.Izawa and S.Nakai

L-13 Ultra-Short KrF Excimer Laser Source with Variable Pulse Width for Material Processing

Institute of Research and Innovation(IRI),Laser Laboratory

T.Yagi and Z.Zhang

L-14 The Development of Chemical Oxygen Iodine Laser for Material Processing

Kawasaki Heavy Industries Ltd., Opto Engineering Department,

Kanto Technical Institute

H.Fujii, F.Wani N.Naito, T.Nagai and T.Atsuta

L-15 Spectroscopy and Crystal Structures of Cr^{4+} Doped Crystals

Mitsui Mining & Smelting Co.,Corprate R & D Center

Y.Anzai, A.Sugimoto, T.Yamazaki, Y.Nobe, Y.Yamaguchi, K.Yamagishi

L-16 Fabrication and Optical Properties of Polycrystalline Nd:YAG Ceramics

Osaka Institute of Technology, * Kyosaki Corporation

Kunio Yoshida and Akio Ikesue *

L-17 Spectroscopic Properties of Yb^{3+} Doped Glasses

HOYA Corporation, R & D Center Xuelu Zou and Hisayoshi Toratani

L-18 Larser-Diode-Pumped 20W Intracavity Frequency-Doubled Q-Switched Green Laser

Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R & D Center

Susumu Konno and Koji Yasui

L-19 Spectroscopic Studies of Yb^{3+}:$LiYF_4$ Crystal for High Power and High Quality Lasers

University of Electro-Communications, Institute for Laser Science

* Central Glass Compony Y.Kubota *, N.Uehara and K.Ueda

L-20 Nonlinear Frequency Conversion in Laser Crystal Hosts

University of Electro-Communications, Institute for Laser Science

* The Russian Academy of Sciences, Institute of Crystallography

A.Kaminskii *, M.Tateno, S.Koh, J.Song and K.Ueda

L-21 Crystal Growth and Optical Characterization of Cr,Ca;$Y_3Al_5O_{12}$

Mitsui Mining & Smelting Co.,Corprate R & D Center

K.Yamagishi, A.Sugimoto, Y.Nobe and Y.Anzai

L-22 Intracavity Adaptive Optics for Powerful Nd:YAG Laser

University of Electro-Communications, Institute for Laser Science

*The Russian Academy of Sciences, General Physics Institute

S.Chetkin* and K.Ueda

L-23 Charactristics of Pure-Silica-Core Fiber for High Power Excimer Lasers

Fujikura Ltd., Opt-Electronics Laboratory, Applied Fiber-Optics Section

Naoki Shamoto, Tomoaki Toriya, Keiji Kaneda, and Takashi Tsumanuma

L-24 Optical Frequency Domain Reflectmetry for Surface Shape Measuremet

Mechanical Engineering Laboratory, Optical Engineering Division

* University of Auckland, Physics Department, New Zealand

Tomoaki Eiju, Kiyofumi Matsuda and Thomas H.Barnes *

L-25 Correlation-Induced Spectral Changes in Laser Light Scattering

Machinical Engineering Laboratory Tomohiro Shirai

L-26 Phase Conjugate Interferometer for Testing a Parabolic Mirror

Machinical Engineering Laboratory,Optical Engineering Division

* Tokai University, ** Kisan College, *** IIT, Dehli

K.Tenjimbayashi,M.Kawazoe *,A.K.Nirala **,K.Matsuda,C.Shakher ***,A.Ishizaki

L-27 Ultra-High Quality Mirror with 1.5 ppm Total Loss

University of Electro-Communications, Institute for Laser Science

A.Ueda, K.Uchisawa, A.Onizawa, N.Uehara, H.Sekiguchi * and K.Ueda

* Japan Aviation Electronics Industry Ltd.

L-28 Diagnostics of Laser-Induced Plasma in Welding of Aluminum Alloys

Osaka University, Welding Research Institute

* Osaka University, Graduate student

Jong-Do Kim *, Seiji Katayama and Akira Matsunawa

L-29 Numerical Simulation of Keyhole Dynamics in Laser Welding

Osaka University, Welding Research Institute

* University of Tennessee Space Institute

Vlad Semak * and Akira Matsunawa

L-30 High Speed and Precision Processing with Slab-Type YAG Laser

Fanuc Ltd., Laser Laboratory

Masao Sato, Yoshitake Furuya and Nobuaki Iehisa

L-31 Light Emitting Silicon Nanocrystallites Prepared by Excimer Laser Ablation in Inert Gas

* Universirty of Tsukuba Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.

Yuka Yamada, Takaaki Orii *, Shigeru Takeyama and Takehito Yoshida

L-32 Fabrication of Fresnel Lens using Excimer Laser Ablation Process

Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.

Nobuyasu Suzuki and Nobuaki Furuya

L-33 Surface Alteration of Crystalline Si_3N_4 with ArF Excimer Laser

Miyazaki University, Dept. Electrical and Electronic Engineering

* University of Osaka Prefecture, ** Osaka Electro-Communication University

Kazuo Nakamae *, Yasuo Takigawa **, Kou Kurosawa, Atsushi Yokotani and

Wataru Sasaki

L-34 Second-Harmonic Generation in Poled Glass

Miyazaki University, Dept. Electrical and Electronic Engineering

Akihiro Kameyama, Atushi Yokotani and Kou Kurosawa

L-35 Photo-etching of Polymers using Xenon Excimer Lamp

Miyazaki University, Dept. Electrical and Electronic Engineering

* Osaka Institute of Technology

Noritaka Takezoe, Atushi Yokotani, Kou Kurosawa, Wataru Sasaki and Y.Yoshida *

L-36 Laser Beam Cleanup with Photorefractive Two-beam Coupling

Toshiba Corporation, Manufacturing Engineering Research Center

Atsushi Takada

L-37 Amorphous Films of Ta-Ni Binary Alloy Deposited by Laser Ablation

Shikoku National Industrial Research Institute

T.Yano, T.Ooie, M.Yoneda and M.Katsumura

L-38 Laser Activated Joining Method of Metals and Ceramics

Shikoku National Industrial Research Institute

T.Ooie, T.Yano, M.Yoneda and M.Katsumura

L-39 Fabrication of CuPc Thin Films by Laser Ablation and Its Application for an Organic Electro-luminescence Device

Keio University, Department of Electrical Engineering

T.Fujii, N.Matsumoto, E.Ino and F.Kannari

L-40 Surface Reaction of Organic Polymer with Reactive Intermediates Produced by Laser Ablation of a Phenylazide

National Institute of Materials and Chemical Research (NIMC)

Hiroyuki Niino, Yoshinori Koga and Akira Yabe

L-41 Chemical Surface Modification of Flurocabon Polymer by Excimer Laser Processing

National Institute of Materials and Chemical Research

Hiroyuki Niino, Yoshinori Toga and Akira Yabe

L-42 Studies on Corrosion-Protective Coating by Laser CVD Method

National Institute of Materials and Chemical Research

Y.Imai and A.Watanabe

L-43 New Film Making Method Using Ultra Fine Particles -- Gas Deposition Method --

Vacuum Metallurgicl Co.,Ltd., UFP Division

Eiji Fuchita, Kazuhiro Setoguchi and Masaaki Oda

L-44 Utilization of Laser-Induced Plasm for Improving Residual Stress in Metal Surface

Toshiba Corporation, Nuclear Engineering Laboratory

K.Okazaki, N.Mukai, N.Aoki and Y.Sano

L-45 Synthesis of Diamond Film by DC Plasm Coating Method Using Ultra-Fine Carbon Particles Produced by Laser Sublimation

Mechanical Engineering Laboratory

Hirofumi Shimura, Yuji Kawakami and Shinya Sasaki

L-46 Development of Abrasion-Resistant Coating by Laser Assisted Plasma Spray

Ibaraki Prefecture Technology Center

* Mechnical Engineering Laboratory ** Sekiyu Sakuseiki Seisaku Co.,Ltd.

M.Shinotsuka, H.Nakajima, K.Koishikawa, S.Sasaki *, H.Shimura *, S.Yoshida **

L-47 Features of Various In-Process Monitoring Method and Their Applications to Laser Welding

Applied Laser Engineering Institute (ALERI)

* Nagaoka College of Technology, ** Osaka University

Masao Watanabe, Hideki Okada, Takashi Inoue, Susumu Nakamura * and Akira Matsunawa **

L-48 Open Air Fabrication Process of Cu Thin Films on Fluorocarbon-Resin Surface by Excimer Laser Irradiation

the Institute of Physical and Chemical Research (Riken), Laser Science Research Group, * Tokai University, Fuculty of Engineering

M.Okoshi, K.Toyoda and M.Murahara *

L-49 Time- and Space-Resolved Soft X-Ray Absorption Spectroscopy for Laser Plasma of Silicon

University of Tsukuba, Institute of Materials Science

Tetsuya Makimura, Tamaki Sakuramoto and Kouichi Murakami

Ａ２．レーザープロセス技術委員会活動状況

第１回の技術委員会において、本先導研究の経緯及び計画の説明がされ、レーザープロセス技術委員会の設置、平成７年度実施計画が検討・承認された。レーザープロセス技術について専門的見地から調査研究を実施するため、下記のように「発生技術分科会」、「伝送・計測制御技術分科会」、「プロセス応用技術分科会」を設置することが承認された。

レーザープロセス技術委員会構成（工技院研究所、大学関係、関連企業により構成）

レーザープロセス委員会
（委員長　辻内順平）
（幹　事　松田浄史）

- 発生技術分科会
  （分科会長　植田憲一）
  （幹　事　宮崎健創）
- 伝送・計測制御技術分科会
  （分科会長　藤村貞夫）
  （幹　事　黒沢富藏）
- プロセス応用技術分科会
  （分科会長　松縄　朗）
  （幹　事　志村洋文）

（１）本委員会の活動状況

第１回レーザープロセス技術委員会　平成７年９月１３日（機械振興会館Ｂ３研修２号室）

1)レーザープロセス技術委員会の設置について
位置づけ、審議事項、開催スケジュール、体制、委員名簿の確認など
2)平成７年度実施計画の確認
3)技術調査報告内容提案・検討

第２回レーザープロセス技術委員会　平成７年１１月２９日（機械振興会館Ｂ３研修２号室）

1)レーザープロセス技術の調査報告書の構成について
報告書の内容構成・目次案の検討、
各技術分科会への指示と意見交換・調整
2)ワークショップの開催について
提案と参加要請、案内先

第３回レーザープロセス技術委員会　平成８年２月１３日（機械振興会館Ｂ３研修１号室）

1)レーザープロセス技術の調査報告書の内容について
各技術分科会からの報告、調査報告書の取りまとめについて
2)ワークショップの開催について
準備状況、一般講演（ポスター）申し込み状況報告

（２）３技術分科会の活動状況

発生技術分科会

第１回　平成７年９月１３日（ＪＯＥＭ会議室）

1)発生技術分科会の設置、調査研究内容の検討・承認
2)発生技術分科会でカバーする技術分野について

第２回　平成７年１０月６日（ＪＯＥＭ会議室）

1)調査報告書の内容構成の検討
2)他の分科会との調整とレーザー発生技術分野の特徴

第３回　平成７年１１月２９日（機械振興会館Ｂ３　９号室）

1)調査研究報告書の構成及び執筆分担の最終調整

第４回　平成８年１月１２日（ＪＯＥＭ会議室）

1)調査報告書執筆者による執筆概要の報告と検討

伝送・計測制御分科会

第１回　平成７年９月１３日（機械振興会館６階６０号室）

1)伝送・計測制御技術分科会の設置、調査研究内容の検討・承認

2)レーザープロセス全技術の中での伝送、計測、制御技術の役割

第２回　平成７年１０月１７日（ＪＯＥＭ会議室）

1)伝送・計測制御技術の調査内容の検討

2)調査研究報告書の構成及び執筆担当者について

第３回　平成７年１１月２９日（機械振興会館Ｂ３　７号室）

1)調査研究報告書の構成及び執筆分担の最終調整

プロセス応用技術分科会

第１回　平成７年９月１３日（機械振興会館６階６２号室）

1)プロセス応用技術分科会の設置、調査研究内容の検討・承認

2)プロセス応用技術の捉え方、調査範囲について

3)他の分科会への要望

第２回　平成７年１０月１１日（機械振興会館Ｂ３　２号室）

1)レーザープロセス技術の意義について

2)調査研究報告書の構成及び執筆担当者について

第３回　平成７年１１月２９日（機械振興会館６階６１号室）

1)調査研究報告書の執筆担当者間の調整

2)フォトンマシニングという概念について

第４回　平成７年１２月２０日（機械振興会館Ｂ３研修１号室）

1)調査報告書執筆者による執筆内容案の検討

2)レーザープロセス技術の標語的な表現