平成４年度調査報告書
NEDO－IT－９２０７

重点研究領域探索のための研究動向調査

平成５年３月

新エネルギー・産業技術総合開発機構
株式会社三菱総合研究所

010006259-5

「重点研究領域探索のための研究動向調査」

株式会社　三菱総合研究所
平成５年３月　　３０７頁

調査目的

産業科学技術研究開発プロジェクトの新規テーマの方向性及び具体的研究開発課題の決定に資するため、産業科学技術における極限化、高機能化、複合化といった流れの把握に基づいて、産業科学技術研究開発の動向及び将来の重点研究領域を調査した。

F009

新エネルギー・産業技術総合開発機構
1993. 9. -2

15

90012-09.01

目　次

●まえがき ----------(i)
●調査委員名簿 ----------(i)
●調査実施者 ----------(i)
●概要 ----------(ii)

第Ⅰ部　政策・技術動向調査 ---------- Ⅰ－1
第１章　内外の技術政策動向 ---------- Ⅰ－1
1.1　日本 ---------- Ⅰ－1
1.1.1　マクロ動向と国際比較 ---------- Ⅰ－1
(1)　研究開発費 ---------- Ⅰ－1
(2)　特許 ---------- Ⅰ－13
(3)　論文 ---------- Ⅰ－24
(4)　技術貿易 ---------- Ⅰ－27
(5)　テクノストック ---------- Ⅰ－31
(6)　研究開発動向指数 ---------- Ⅰ－34
(7)　技術水準 ---------- Ⅰ－37
1.1.2　政策動向 ---------- Ⅰ－50
(1)　産業技術政策の流れ ---------- Ⅰ－50
(2)　産業科学技術研究開発（工業技術院） ---------- Ⅰ－53
(3)　科学技術振興調整費（科学技術庁） ---------- Ⅰ－56
(4)　創造科学推進事業（新技術事業団） ---------- Ⅰ－60
(5)　フロンティア研究システム（理化学研究所） ---------- Ⅰ－62
(6)　国立研究機関及び特殊/公益法人 ---------- Ⅰ－63
1.2　米国 ---------- Ⅰ－64
1.2.1　米国の科学技術政策の概要 ---------- Ⅰ－64
(1)　行政組織 ---------- Ⅰ－64
(2)　議会 ---------- Ⅰ－64
(3)　法案及び政策 ---------- Ⅰ－67
(4)　主要産業技術プログラム ---------- Ⅰ－69
1.2.2　最近の動向と今後の展望 ---------- Ⅰ－70
(1)　クリントン政権の科学技術政策について ---------- Ⅰ－70
(2)　国防技術から民生技術重視の方向 ---------- Ⅰ－73
(3)　米国製造業の空洞化について ---------- Ⅰ－73
(4)　米国の知的所有権戦略について ---------- Ⅰ－73
1.3　欧州（EC） ---------- Ⅰ－74
1.3.1　ECフレームワーク・プログラムの概要 ---------- Ⅰ－75
(1)　ESPRIT計画 ---------- Ⅰ－78
(2)　BRITE/EURAM計画 ---------- Ⅰ－78
(3)　RACE計画 ---------- Ⅰ－78
1.3.2　ECの人材開発政策 ---------- Ⅰ－79
(1)　Erasmus計画 ---------- Ⅰ－79
(2)　Comette計画 ---------- Ⅰ－79

第２章　産業技術の流れと今後の進展 ---------- Ⅰ－80
2.1　ヒアリング及びアンケート調査の概要 ---------- Ⅰ－80
2.1.1　ヒアリング調査の概要 ---------- Ⅰ－80
2.1.2　アンケート調査の概要 ---------- Ⅰ－81
2.2　技術をみる視点と方向性 ---------- Ⅰ－81
2.2.1　視点の定義 ---------- Ⅰ－81
(1)　極限化 ---------- Ⅰ－81
(2)　高機能化 ---------- Ⅰ－82
(3)　複合化 ---------- Ⅰ－82
2.2.2　その他の視点 ---------- Ⅰ－83
(1)　アンケート調査より ---------- Ⅰ－83
(2)　ヒアリング調査より ---------- Ⅰ－84
2.2.3　まとめ ---------- Ⅰ－86
2.3　産業技術の流れと今後の進展 ---------- Ⅰ－87
2.3.1　極限化の進展 ---------- Ⅰ－87
(1)　3次元空間（μ空間）の極限化 ---------- Ⅰ－88
(2)　場（Γ空間）の極限化 ---------- Ⅰ－109
(3)　時空間（ｔ空間）の極限化 ---------- Ⅰ－117
2.3.2　高機能化・インテリジェント化の進展 ---------- Ⅰ－124
(1)　生物の利用 ---------- Ⅰ－124
(2)　生物の模倣（バイオミメティクス） ---------- Ⅰ－134
(3)　計算機シミュレーションとCAE ---------- Ⅰ－151
(4)　多体問題の解明 ---------- Ⅰ－159
(5)　カオス・非線形現象の解明・利用 ---------- Ⅰ－160
2.3.3　複合化・融合化 ---------- Ⅰ－165
(1)　ヒアリング調査より ---------- Ⅰ－165
(2)　アンケート調査より ---------- Ⅰ－168

第３章　今後の重点研究領域・テーマ ---------- Ⅰ－174
3.1　物質・材料分野 ---------- Ⅰ－174
3.1.1　超時空間プロセシング ---------- Ⅰ－174
3.1.2　原子・分子操作 ---------- Ⅰ－175
3.1.3　アンケート結果 ---------- Ⅰ－175
3.2　電子・通信・情報分野 ---------- Ⅰ－177
3.2.1　柔らかい情報処理 ---------- Ⅰ－177
3.2.2　4次元デバイス ---------- Ⅰ－177
3.2.3　アンケート結果 ---------- Ⅰ－178
3.3　機械・航空・宇宙分野 ---------- Ⅰ－179
3.3.1　新形態エンジン ---------- Ⅰ－179
3.3.2　ジェットエンジン基盤技術 ---------- Ⅰ－179
3.3.3　宇宙関連技術 ---------- Ⅰ－179
3.3.4　ミリマシーン ---------- Ⅰ－180
3.3.5　アンケート結果 ---------- Ⅰ－180

3.4 バイオテクノロジー分野 ---------- Ⅰ－181
3.4.1 植物代謝・動物生体機能の解明 ---------- Ⅰ－181
3.4.2 有機電子論 ---------- Ⅰ－181
3.4.3 超微小流動 ---------- Ⅰ－181
3.4.4 アンケート結果 ---------- Ⅰ－182
3.5 人間・生活・社会分野 ---------- Ⅰ－183
3.5.1 都市/生活/交通環境 ---------- Ⅰ－183
3.5.2 アンケート結果 ---------- Ⅰ－184
3.6 資源・環境・エネルギー分野 ---------- Ⅰ－185
3.6.1 地球上の物質・エネルギーシステムの把握 ---------- Ⅰ－185
3.6.2 アンケート結果 ---------- Ⅰ－185
3.7 その他の分野（カオス・非線形工学、強相互作用システム等） ---------- Ⅰ－187
3.8 まとめ（第２章と第３章の総括表） ---------- Ⅰ－187

第Ⅱ部 研究動向調査委員会の意見・提言 ---------- Ⅱ－1
第１章 特に有望と考えられる技術領域・テーマ ---------- Ⅱ－1
1.1 非線形・カオス工学（合原助教授） ---------- Ⅱ－1
1.1.1 第1回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－1
1.1.2 第3回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－3
1.2 強相互作用系（岡部教授） ---------- Ⅱ－6
1.2.1 第1回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－6
1.2.2 第3回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－6
1.3 生体に学ぶ超構造工学（赤池教授） ---------- Ⅱ－10
1.3.1 第1回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－10
1.3.2 第3回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－10
1.4 アトムテクノロジー（田中総合研究官） ---------- Ⅱ－17
1.4.1 第3回委員会におけるお話 ---------- Ⅱ－17
1.5 その他の見解（自己組織化に関して） ---------- Ⅱ－33
1.6 まとめ（MRI） ---------- Ⅱ－33

第２章 融合研に学ぶ共同研究のあり方 ---------- Ⅱ－35
2.1 産業技術融合領域研究所の概要（田中総合研究官） ---------- Ⅱ－35
2.2 異分野の研究者間の共同研究の必要性 ---------- Ⅱ－39

第３章 我が国の技術戦略・政策のあり方 ---------- Ⅱ－40
3.1 日本の技術戦略のあり方 ---------- Ⅱ－40
3.2 日本の科学技術政策システムのあり方 ---------- Ⅱ－41
3.3 日米の研究プロジェクトの進め方の違い ---------- Ⅱ－41
3.4 研究開発制度のあり方と大学の役割 ---------- Ⅱ－42
3.5 国家プロジェクトのテーマ選定方法と評価システム ---------- Ⅱ－43
3.6 産学官交流のあり方と人の流動性 ---------- Ⅱ－44
3.7 発展途上国との技術交流のあり方 ---------- Ⅱ－44
3.8 人材育成のあり方 ---------- Ⅱ－44
3.9 研究支援の必要性 ---------- Ⅱ－45

●むすび

●付属資料 ----------付－1
1．個別ヒアリング記録（面会順） ----------付－1
1.1　ペンシルバニア州立大学　内野研二　教授----------付－1
1.2　東京大学教養学部　杉本大一郎　教授----------付－6
1.3　北海道大学工学部　伊藤精彦　教授----------付－9
1.4　東京大学生産技術研究所　荒川泰彦　助教授----------付－11
1.5　東京大学工学部　吉田豊信　教授----------付－14
1.6　東京大学農学部　別府輝彦　教授----------付－17
1.7　航空宇宙技術研究所熱流体力学部　蓑田光弘　部長----------付－20
1.8　T社技術研究所　K部長----------付－24
1.9　東京大学先端科学技術研究センター　河内啓二　教授----------付－27
1.10　帝人株式会社　内田盛也　顧問----------付－31
2．アンケート調査票 ----------付－37
3．アンケート回答者一覧 ----------付－41
4．アンケート結果一覧 ----------付－44
5．参考文献一覧 ----------付－56

図　目次

第１章

第1.1－１図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の推移（為替レート換算）.....Ⅰ－1
第1.1－２図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の推移（購買力平価換算）.....Ⅰ－2
第1.1－３図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の対GNP比率の推移.....Ⅰ－2
第1.1－４図　我が国の産・学・官の使用研究費（自然科学）の推移.....Ⅰ－3
第1.1－５図　我が国の政府と民間の使用・負担源別研究費（自然科学）の推移.....Ⅰ－4
第1.1－６図　主要国の政府支出研究費の全研究費に占める比率
（自然＋人文社会科学）.....Ⅰ－4
第1.1－７図　主要国の政府支出研究費（自然＋人文・社会科学）の対GNP比率の
推移.....Ⅰ－5
第1.1－８図　産業別研究費の構成比の推移（中分類）.....Ⅰ－6
第1.1－９図　特に研究費が多い産業（小分類）.....Ⅰ－7
第1.1－10図　産業別研究開発費と非本業比率.....Ⅰ－7
第1.1－11図　研究費の対売上高比が高い産業（小分類）.....Ⅰ－8
第1.1－12図　製品別の研究開発費（シェア）の推移.....Ⅰ－11
第1.1－13図　製品別の研究開発費と他業種からの参入（1989年度）.....Ⅰ－12
第1.1－14図　各国の特許出願件数の推移と主要な発明.....Ⅰ－13
第1.1－15図　先端科学技術の進化と21世紀の新産業分野.....Ⅰ－20
第1.1－16図　我が国における特許・実用新案の出願件数.....Ⅰ－21
第1.1－17図　我が国における分野別特許出願件数（構成比）の推移.....Ⅰ－21
第1.1－18図　米国における各国からの特許出願件数の推移.....Ⅰ－22
第1.1－19図　米国における特許登録件数シェアの推移.....Ⅰ－23
第1.1－20図　米国における特許の被引用度の推移.....Ⅰ－23
第1.1－21図　論文生産数の国別シェアの推移.....Ⅰ－24
第1.1－22図　主要国の論文被引用度の推移.....Ⅰ－25
第1.1－23図　日米の各分野における論文数シェアの推移.....Ⅰ－26
第1.1－24図　技術輸出入比の推移（総務庁統計）.....Ⅰ－27
第1.1－25図　我が国の技術貿易の国別内訳（総務庁統計）.....Ⅰ－27
第1.1－26図　先端技術分野の技術導入件数の推移（科技庁統計）.....Ⅰ－29
第1.1－27図　我が国の技術貿易世界地図（総務庁統計より）.....Ⅰ－30
第1.1－28図　日米の生産直結型テクノストックの推移.....Ⅰ－31
第1.1－29図　日本の生産直結型テクノストックの業種別シェアの推移.....Ⅰ－32
第1.1－30図　日米の科学蓄積型テクノストックの推移.....Ⅰ－33
第1.1－31図　R&D-D.I.（研究開発投入指数、成果指数）.....Ⅰ－34
第1.1－32図　累積R&D-D.I.（研究開発投入指数、成果指数）.....Ⅰ－35
第1.1－33図　投入/成果指数（累積D.I.）と実質GDPの関係.....Ⅰ－35
第1.1－34図　工業技術院における産業技術研究開発の歴史.....Ⅰ－55

第２章

第2.3－１図　３つの視点の関係……Ⅰ－87
第2.3－２図　微細加工技術の変遷……Ⅰ－89
第2.3－３図　薄膜化技術の分類……Ⅰ－92
第2.3－４図　薄膜化技術の変遷……Ⅰ－92
第2.3－５図　プラズマCVDに関するJICST登録文献数の推移……Ⅰ－96
第2.3－６図　MOCVDに関するJICST登録文献数の推移……Ⅰ－97
第2.3－７図　分子線エピタキシーに関するJICST登録文献数の推移……Ⅰ－97
第2.3－８図　ダイヤモンド薄膜に関するJICST登録文献数の推移……Ⅰ－97
第2.3－９図　原子・分子操作の概念図……Ⅰ－100
第2.3－10図　計測・評価対象の変化……Ⅰ－101
第2.3－11図　走査型トンネル顕微鏡（STM）のJICST登録文献数……Ⅰ－103
第2.3－12図　原子間力顕微鏡（AFM）のJICST登録文献数……Ⅰ－104
第2.3－13図　X線顕微鏡のJICST登録文献数……Ⅰ－104
第2.3－14図　マイクロマシン関連のJICST登録論文数……Ⅰ－107
第2.3－15図　高次構造制御融合無機材料の構造……Ⅰ－107
第2.3－16図　東北大・大見教授によるDRAMの容量、デザインルール、設備投資額の予測……Ⅰ－109
第2.3－17図　2001年のスーパークリーン・ルーム……Ⅰ－111
第2.3－18図　金属材料技術研究所によるMAFの概念図……Ⅰ－112
第2.3－19図　耐熱材料の最高使用温度の現状と見通し……Ⅰ－114
第2.3－20図　微小重力関連のJICST登録論文数……Ⅰ－116
第2.3－21図　量子構造の概念図とエネルギー準位……Ⅰ－117
第2.3－22図　量子デバイスで活用される量子効果・現象の例……Ⅰ－118
第2.3－23図　量子井戸レーザ関連のJICST登録論文数……Ⅰ－120
第2.3－24図　量子箱関連のJICST登録論文数……Ⅰ－120
第2.3－25図　先導研究「フェムト秒テクノロジー」の狙い……Ⅰ－122
第2.3－26図　生命工学材料への期待……Ⅰ－124
第2.3－27図　肝細胞特異性材料の設計原理と細胞工学・臓器工学への応用……Ⅰ－125
第2.3－28図　人工臓器関連のJICST登録文献数の発行年別推移……Ⅰ－126
第2.3－29図　蛋白質工学関連のJICST登録文献数……Ⅰ－127
第2.3－30図　「糖鎖工学」関連プロジェクトの全体計画……Ⅰ－128
第2.3－31図　「複合糖質生産利用技術」プロジェクトの概念図……Ⅰ－129
第2.3－32図　バイオテクノロジー（生体利用技術）の体系図……Ⅰ－130
第2.3－33図　遺伝子操作関連のJICST登録論文数……Ⅰ－132
第2.3－34図　遺伝子組変え関連のJICST登録論文数……Ⅰ－132
第2.3－35図　細胞融合関連のJICST登録論文数……Ⅰ－132
第2.3－36図　組織培養関連のJICST登録論文数……Ⅰ－133
第2.3－37図　大量培養関連のJICST登録論文数……Ⅰ－133
第2.3－38図　バイオリアクタ関連のJICST登録論文数……Ⅰ－133
第2.3－39図　インテリジェント材料の概念図……Ⅰ－134
第2.3－40図　入/出力の物理量から見た材料マトリクス（ただし磁性を除く）……Ⅰ－136

第2.3－41図　受動的スマート材料（アクチュエータ）の例
－　複合アクチュエータ構造「ムーニー」　－ ..... Ⅰ－137
第2.3－42図　能動的スマート材料（センサ＋アクチュエータ）の例
－　圧電バイモルフ　－ ..... Ⅰ－138
第2.3－43図　インテリジェント材料（センサ+アクチュエータ+ドライブ機能）の例
－　光歪アクチュエータを用いた光駆動微小歩行デバイス　－ ..... Ⅰ－138
第2.3－44図　スマート・スキンの例 ..... Ⅰ－139
第2.3－45図　微小流動プロジェクトの対象領域 ..... Ⅰ－141
第2.3－46図　バイオメカニクス関連論文数の推移 ..... Ⅰ－142
第2.3－47図　三菱電機中央研究所の光ニューロチップ ..... Ⅰ－143
第2.3－48図　ニューロチップの将来予測 ..... Ⅰ－144
第2.3－49図　ニューラルネットワークに関連する論文発表数の推移 ..... Ⅰ－144
第2.3－50図　DNAの複製モデル ..... Ⅰ－145
第2.3－51図　遺伝的アルゴリズムに関連する論文発表数の推移 ..... Ⅰ－146
第2.3－52図　ロボット関連の論文発表数の推移 ..... Ⅰ－149
第2.3－53図　風洞実験と流体数値実験 ..... Ⅰ－151
第2.3－54図　分子力学（MM）法の概略 ..... Ⅰ－155
第2.3－55図　非線形写像によるカオス系列の発生 ..... Ⅰ－160
第2.3－56図　ソリトン光通信の概念図 ..... Ⅰ－162
第2.3－57図　カオス関連の年別論文発表数 ..... Ⅰ－163
第2.3－58図　ソリトン関連の年別論文発表数 ..... Ⅰ－163
第2.3－59図　ウェーブレット関連の年別論文発表数 ..... Ⅰ－164

表　目次

第１章

第1.1－1表　基礎－応用－開発研究別の研究費比率（平成3年度）..... Ⅰ－9
第1.1－2表　主要国における産業別の研究費..... Ⅰ－10
第1.1－3表　1750年から1830年までの英国における主要な発明..... Ⅰ－14
第1.1－4表　1830年から1900年までの米国における主要な発明..... Ⅰ－15
第1.1－5表　1860年から1920年までのドイツにおける主要な発明..... Ⅰ－16
第1.1－6表　1890年から1940年までの日本における主要な発明..... Ⅰ－17
第1.1－7表　1940年から1959年までの世界における主要な発明..... Ⅰ－18
第1.1－8表　1960年から1985年までの世界における主要な発明..... Ⅰ－19
第1.1－9表　11の「基幹技術」（国防総省、1992）..... Ⅰ－38
第1.1－10表　「基幹技術」11分野の国際比較（国防総省、1992）..... Ⅰ－39
第1.1－11表　21の「重要技術」（国防総省、1991）..... Ⅰ－42
第1.1－12表　「重要技術」21分野の国際比較（国防総省、1991）..... Ⅰ－43
第1.1－13表　「有望技術」の国際比較（商務省、1990）..... Ⅰ－44
第1.1－14表　米国の「重要基盤技術」の国際的水準（競争力評議会、1991）..... Ⅰ－46
第1.1－15表　日米製造業の比較..... Ⅰ－47
第1.1－16表　EC産業の動向と日本との競争力比較..... Ⅰ－48
第1.1－17表　今後研究開発が期待される課題５５..... Ⅰ－52
第1.1－18表　工業技術院/NEDOの新たな「産業技術研究開発制度」の８分野..... Ⅰ－54
第1.1－19表　科学技術振興調整費の枠内の諸研究制度..... Ⅰ－56
第1.1－20表　科学技術振興調整費の各研究制度
第1.1－23表　創造科学技術推進事業における物質系プロジェクト..... Ⅰ－60

第２章

第2.2－１表　アンケートによる今後の産業技術の方向性（視点）..... Ⅰ－83
第2.3－１表　微細加工技術の原理と特徴..... Ⅰ－89
第2.3－２表　微細加工技術の極限化に関するアンケート結果..... Ⅰ－90
第2.3－３表　薄膜化技術（物理的方法）の原理と特徴..... Ⅰ－93
第2.3－４表　薄膜化技術（化学的方法とLB法）の原理と特徴..... Ⅰ－94
第2.3－５表　ALEと他の薄膜化技術の比較..... Ⅰ－95
第2.3－６表　超微粒子技術の原理と特徴..... Ⅰ－98
第2.3－７表　次世代プロジェクトにおける超微粒子/薄膜化技術の開発..... Ⅰ－99
第2.3－８表　原子・分子操作技術の進展時期とインパクト..... Ⅰ－101
第2.3－９表　代表的な材料計測・評価技術..... Ⅰ－102
第2.3－10表　材料計測・評価技術の極限化（アンケートより）..... Ⅰ－103
第2.3－11表　ミリ/マイクロ/ナノマシンの加工法等..... Ⅰ－105
第2.3－12表　マイクロマシンの実現時期とインパクト（アンケートより）..... Ⅰ－106
第2.3－13表　超高真空/高純度環境の極限化に関するアンケート予測結果..... Ⅰ－113
第2.3－14表　超高圧反応技術の進展予測（アンケート結果）..... Ⅰ－113

第2.3－15表　耐熱材料の使用温度の極限化（アンケートより）..... Ⅰ－114
第2.3－16表　バイオテクノロジーの今後の進展予測（アンケートより）..... Ⅰ－131
第2.3－17表　材料のインテリジェント化の進展（アンケート結果）..... Ⅰ－140
第2.3－18表　ロボットのインテリジェント化の進展..... Ⅰ－148
第2.3－19表　センサのインテリジェント化の進展予測..... Ⅰ－150
第2.3－20表　3種類の流体数値解法..... Ⅰ－152
第2.3－21表　各種汎用流体解析プログラムの特徴..... Ⅰ－152
第2.3－22表　計算物理学・計算化学の対象とする事象とシミュレーション手法..... Ⅰ－154
第2.3－23表　材料・触媒の設計の進展予測..... Ⅰ－156
第2.3－24表　代表的な並列コンピュータの概要..... Ⅰ－157
第2.3－25表　物質・材料分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－168
第2.3－26表　電子・通信・情報分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－170
第2.3－27表　機械・航空・宇宙分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－171
第2.3－28表　バイオテクノロジー分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－172
第2.3－29表　保健・医療・福祉分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－172
第2.3－30表　人間・生活・社会分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－173
第2.3－31表　資源分野の複合化の進展と新技術・コンセプト..... Ⅰ－173

第３章

第3.1－1表　物質・材料分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－175
第3.2－1表　電子・通信・情報分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－178
第3.3－1表　機械・航空・宇宙分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－180
第3.4－1表　バイオテクノロジー分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－182
第3.5－1表　人間・生活・社会分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－184
第3.6－1表　資源・環境・エネルギー分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－185
第3.7－1表　その他の分野の有望領域・テーマとキーパーソン..... Ⅰ－187

資料　目次

資料Ⅱ－1　カオスの工学的応用の可能性..... Ⅱ－2
資料Ⅱ－2　生体に学び生体を越える材料システム工学・情報工学・組織工学・
管理工学への期待..... Ⅱ－13
資料Ⅱ－3　生体プロセスに学ぶプロセスエンジニアリング..... Ⅱ－14
資料Ⅱ－4　生体防御反応システムに学ぶインテリジェントな危機管理..... Ⅱ－15
資料Ⅱ－5　生体システムと臓器間の役割分担に学ぶ組織論..... Ⅱ－16
資料Ⅱ－6　アトムテクノロジー・プロジェクトの概要..... Ⅱ－20～32

●まえがき

近年の産業技術の進歩は著しく、陳腐化のスピードも極めて速い。また同時に、電子技術と材料技術／機械技術／バイオテクノロジー等、異分野の技術間の融合化も急速に進展している。

このため、我が国の先導的な産業技術研究開発プロジェクトを実施するためには、産業技術の最先端の動向を常に把握するとともに、その将来の方向性を的確に見極めながら、時代を先取りした形で、既存プロジェクトの運営や新規プロジェクトの企画立案を行っていく必要がある。

本調査においては、新規テーマの方向性及び研究開発課題の具体的内容の決定に資することを目的として、工業技術院技術調査課資料、OECD資料、ＮＥＤＯ海外収集資料等も活用し、産業技術における極限化、複合化、高機能化といった流れの把握に基づいて、将来の産業技術研究開発の中心領域及び動向を調査した。

なお調査にあたっては以下に掲げる委員から構成される「研究動向調査委員会」を設け、調査に対する貴重な助言及びユニークな提言を頂いた。またヒアリング調査及びアンケート調査においては、各分野の専門家の方々から貴重な知見と情報を賜った。ご協力いただいた方々に深く感謝する次第である。

●調査委員名簿

委員長　赤池　敏宏　東京工業大学　生命理工学部生体分子工学科　教授
（財）神奈川科学技術アカデミー　第三研究室（高機能分子認識薄膜研究室）　室長

委　員　岡部　洋一　東京大学　先端科学技術研究センター　教授

委　員　田中　一宜　産業技術融合領域研究所　総合研究官

委　員　合原　一幸　東京大学　工学部計数工学科　助教授

（オブザーバ）

新エネルギー・産業技術総合開発機構　産業技術研究開発部

草部　博達　国際研究交流課　課長代理

石原　義光　研究開発課　課長代理

大平　英二　研究開発課

●調査実施者

㈱三菱総合研究所　産業技術部

服部　弘己　第一技術戦略研究室　室長・主任研究員　---　調査実施責任者

岸岡　三春　第一技術戦略研究室　研究員

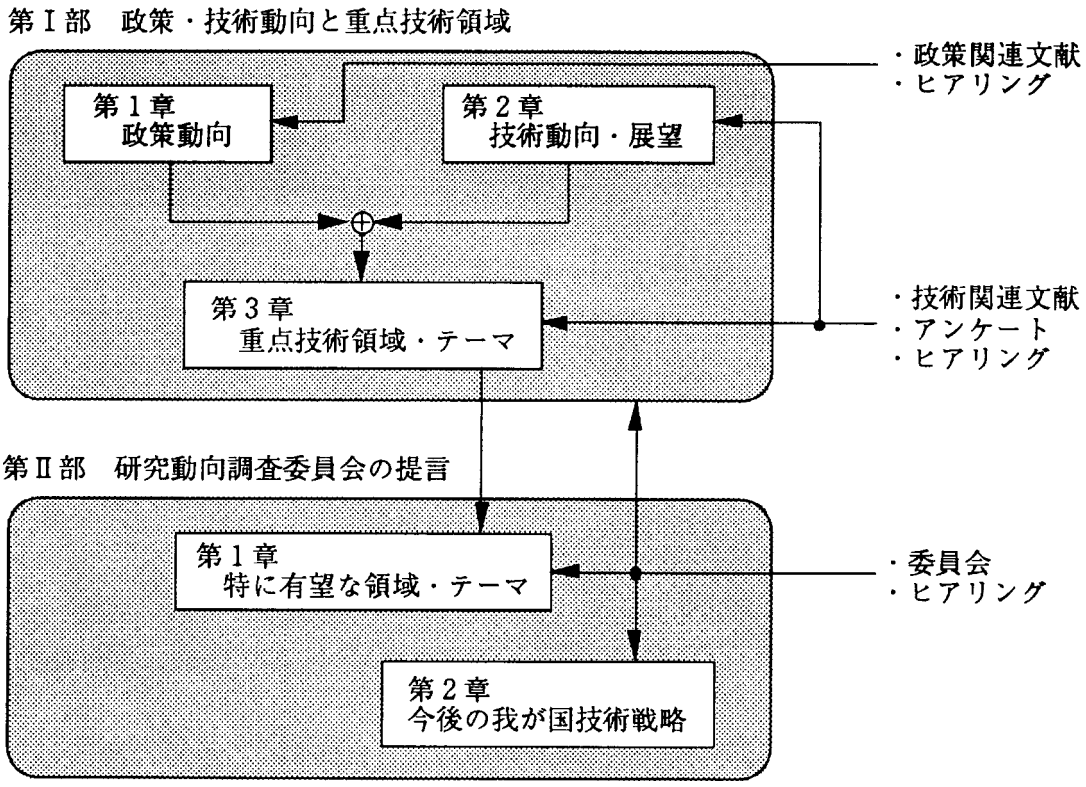
森田　栄二　第一技術戦略研究室　研究員　　他

●概　要

1．本報告書の構成と流れ

本報告書の構成と流れを以下に示す。

本報告書の構成と流れ



本報告書は第Ⅰ部（政策・技術動向調査）及び第Ⅱ部（研究動向調査委員会の提言）より構成される。

第Ⅰ部では、産業技術に関する内外の政策動向（第１章）、過去及び今後の技術動向（第２章）、及び今後の重点領域・テーマ（第３章）に関して、主として三菱総合研究所による文献/アンケート/ヒアリング調査の結果をとりまとめた。

第Ⅱ部では、主として研究動向調査委員会での議論・提言をもとに、第３章で探索した重点領域の中でも特に有望な技術領域をとりまとめた。

2．各章の要旨

第Ⅰ部　政策・技術動向調査

第１章　内外の技術政策動向

日本の研究開発に関するマクロ動向及び技術政策動向、米国の技術政策動向、及び欧州の技術政策動向を整理してとりまとめた。

1.1　日本

1.1.1　日本の研究開発マクロ動向

(1)　研究開発費

・我が国の産官学の研究開発費（自然+人文社会科学）は米国に次いで世界第２位、対GNP比（3%）は世界第１位の座にあり、急速に増加している。

・しかしこのうち８割は産業界の研究費であり、急成長しているのもまた産業界の研究費である。

・研究費（自然+人文社会科学）の政府負担比率は主要先進国中で最も低く、しかも減少傾向にある。政府負担研究費の対GNP比は0.55%と米・英・独・仏の47～67%に過ぎない。

・最も研究費の多い産業は、通信・電子・電気計測器工業（半導体素子等電子部品、通信機器、コンピュータ及び周辺機器など）であり、急成長している。第２位は自動車工業であるが、平成３年度は不況の影響か、停滞している。

・対売上高比が高いのは医薬品工業、通信・電子・電気計測器工業である。基礎研究比率が高いのもやはり医薬品工業であり、ここ10年間で急速に高まっている。基礎研究比率の高まりは製造業全体の平均的傾向でもある。

・製品別の研究費から多角化の動向がわかる。特に、電気機械器具工業（民生用/産業用電気器具・機械など）、精密機械工業、非鉄金属工業、窯業、石油・石炭製品工業、鉄鋼業、総合化学等工業の多角化が著しく、多角化分野は通信・電子・電気計測器分野が最も多い。

・業種別研究費を欧米主要国と比べると、米国は機械、精密機械、航空機等、ドイツは化学、自動車、フランスは航空機等、英国は化学、電気機械、航空機といった産業の研究費が高い。

(2)　特許

・英・米・独・日の1750年からの主要な発明をみると、英国の技術は機械/鉄道を中心に18世紀後半から、米国の技術は電気/精密機械を中心に1830年頃から、ドイツの技術は化学/内燃機関を中心に1860年頃から、日本の技術は磁性材料等を中心に1890年頃から立ち上がった。

・太平洋戦争以降は、米国を中心に日米欧が三つ巴となって、トランジスタ、IC、ﾏｲｸﾛﾌﾟﾛｾｯｻ、コンピュータ、レーザ等の電子・光・情報技術、航空・宇宙技術、原子力技術、ﾊﾞｲｵﾃｸﾉﾛｼﾞｰ等ハイテク隆盛時代を迎え、特に最近は日本の貢献度が高まっている。

・我が国の欧米への特許出願件数は急増しており、米国では米国人の約4割（第2位）の件数を出願している。米国における日本人の特許出願シェアも全体的に増大しているが、特に内燃エンジン、情報記憶、光技術、半導体においてシェアが高く、この分野の技術力の高まりを示している。一方米国人の特許出願も1983年までは微減傾向にあったが、それ以降再び急増しており、米国のここ10年間の技術力の高まりを示している。

(3) 論文

・世界全体の論文発表数に占める日本の割合も少しずつではあるが着実に高まってきており、一方米国のシェアは減少している。日本の論文の被引用回数のシェアも論文数のシェアに近付いてきており、日本の論文の質の高まりを示唆している。
・一方米国のシェアは発表数においても被引用回数においても低下しているが、依然として他国を大きく引き離しており、米国の基礎研究における底力が依然強大であることを示している。

(4) 技術貿易

・日本の技術輸出入額は依然として入超であるが、輸出入比は徐々に1に近付いている。国別にみると欧米に対しては大幅入超、アジア諸国に対しては大幅出超となっており、この点からみると日本は依然として欧米の技術に頼る点が大きいといえる。
・産業別にみると、入超の産業は航空機等、石油・石炭製品、非鉄金属、機械、電子・通信等であり、出超の産業は自動車、紙パルプ、窯業、鉄鋼、金属製品等であり、これらの産業の技術的国際競争力を示している。

(5) テクノストック

・テクノストックは国などの技術力を示す一つの指標である。我が国のテクノストックは急速に伸びているが、依然として米国の1/5程度に過ぎない。また科学蓄積型テクノストックの伸びは生産直結型テクノストックの伸びよりも遅い。
・テクノストックを用いた生産関数分析によれば、我が国製造業の研究開発の限界収益率は米国製造業よりも高く、特に加工組立型産業が高いが、80年代には70年代よりも収益率が悪化している可能性がある。

(6) 研究開発動向指数

・研究開発動向指数は投入指数と成果指数に分かれ、前者は研究開発努力、後者は研究開発成果の総合的水準の動向を示すものである。投入指数は第1次オイルショック以降堅調に推移しているが、成果指数は1986-87年に落ち込んでおり、日本の国際的技術水準の高まり、欧米におけるテクノナショナリズムの擡頭、画期的ブレークスルーの減少などに伴い、企業等の研究開発効率が悪化していることがここからも推察される。

(7) 技術水準

・米国国防総省の1992年「基幹技術計画」では、日本の技術力が高い分野として、センサー、通信制御、マイクロエレクトロニクス、電子・磁気・光学材料を挙げており、またソフトウェアの技術力も高まっているとしている。

・米国商務省の1991年「重要技術プラン」では、日本の技術力が高い分野として、半導体材料、マイクロエレクトロニクス、人工知能、ロボット、光技術、超電導、バイオテクノロジーを挙げている。
・米国商務省の1990年「有望技術」では、日本の技術力の高い分野として、先端材料、半導体素子、映像デジタル技術、高密度記録、光電子技術を挙げており、一方人工知能、バイオテクノロジー、高性能コンピュータ、診断・医療機器、センサー技術は米国より劣っているがこのうち人工知能以外は今後米国より優位に立つものと予想している。
・米国競争力評議会の1991年「重要基盤技術」では、米国の技術競争力の国際的水準を評価している。→　本文p45参照
・既存資料によれば、日本企業が米国企業に比べて競争力の高い分野は、鉄鋼、工作機械・ロボット、民生用電子機器、自動車、ファインセラミクスであり、弱い分野は、食料品、紙パルプ、化学、アルミ、コンピュータ、航空・宇宙、バイオである。

1.1.2　政策動向

(1)　産業技術政策の流れ

我が国の技術政策は以下の方向で進んでいる。

・基礎的独創的技術の重視（基礎シフト）
・国際研究協力・技術移転の拡大（国際化）
・地球規模・人類共通の課題への貢献（環境調和化等）
・人に優しい技術の重視（人間親和化）

(2)　代表的な国家プロジェクト

我が国の代表的な研究開発プロジェクト/制度としては、「産業科学技術研究開発制度」、「科学技術振興調整費」、「創造科学推進事業」、「フロンティア研究システム」などがある。

1.2　米国

1.2.1　米国の科学技術政策の概要

(1)　行政組織

米国の科学技術政策の特徴は大統領のイニシアティブが強いことであり、それを補佐する大統領補佐官、及び大統領科学技術諮問委員会が重要な役割を果たしている。米国版の科学技術庁ともいえるOSTP（科学技術政策局）は日本に比べ強力な調整権限を有している。

(2)　議会

科学技術政策に関しては、下院の科学・宇宙・技術委員会が強力な権限を有している。議会は多くのスタッフを抱え、法案作成能力と影響力が強い。

(3)　法案及び政策

現在の米国の科学技術政策の基本は1991年「米国技術卓越法」であり、商務省技術局の強化、先端技術計画（ATP）の強化等を図っている。また調達やATPへの外国企業の参加を制限する条項があり、注意を要する。

その他技術力・競争力強化のためのいくつかの重要な法案があるが、いずれも研究開発支出から教育、インフラ整備、貿易、税制に至るまで、関連する事項を幅広く取り扱っている点が特徴である。

(4) 主要産業技術プログラム

主要な産業技術プログラムとしては、ATP（先端技術計画）、HPCC（高性能ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ&ｺﾐｭﾆｹｰｼｮﾝﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ）、AMPP（先端素材ﾌﾟﾛｾｯｼﾝｸﾞﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ）、Sematechなどがある。

1.2.2 最近の動向と今後の展望

(1) クリントン政権の科学技術政策について

クリントン政権は技術を米国の経済力強化の手段として非常に重視しており、ATPの増額、情報ハイウェイ計画の加速化、NSFのR&Dプログラムの増額、HPCC計画の増額、国立研究所における民間企業との共同研究の拡大、研究・試験税制の延長等を計画している。

(2) 国防技術から民生技術重視の方向

ブッシュ政権時代から国防技術から民生技術へのシフトが図られ始めており、クリントン政権もこの方針を引き継ぐことは間違いない。産軍複合体は雇用調整、統合化を進めざるを得ないであろう。

(3) 米国製造業の空洞化について

米国の製造業は自動車を中心に再び復活の兆しがあり、クリントン政権による経済・産業・技術重視の政策により、この傾向はさらに強まるものと予想される。

(4) 米国の知的所有権戦略について

米国の知的所有権保護は、特にアジア諸国に対する国内産業保護政策の柱である。今後も米国は知的所有権の保護を強化し、また遺伝子情報やアルゴリズムの保護も強化される可能性が強い。

1.3 欧州（EC）

1.3.1 ECフレームワークプログラムの概要

ECの科学技術政策の中心は「フレームワークプログラム」である。現在第３次フレームワークプログラム（1990-94）が実施されており、電子・情報技術のESPRIT-III、先端材料/生産技術/航空技術のBRITE/EURAM-II、通信技術のRACE-IIなどの研究開発プログラムが実施されている。

1.3.2 ECの人材開発政策

ECは科学技術に関する人材の育成と加盟国間の交流に熱心であり、各加盟国の大学間の人材交流のためのErasmus計画、国境を越えた産学交流のためのComette-II計画が実施されている。

第２章　産業技術の流れと今後の進展

2.1　ヒアリング及びアンケート調査の概要

2.1.1　ヒアリング調査の概要

ヒアリング調査では、大学教授を中心とする10名の専門家の方々にお話を伺い、ご研究分野の概要と動向、ご研究分野・周辺分野における技術の極限化・高機能化・複合化の展望、今後の有望テーマなどに関して非常に有意義な知見を得た。

また帝人の内田顧問には欧米の技術戦略・政策等に関して貴重なお話を伺い、その結果を第１章などに反映した。

2.1.2　アンケート調査の概要

アンケート調査では産学官の492名の研究者に、ご専門/周辺分野における技術の極限化・高機能化・複合化の展望、及び今後の有望領域・テーマなどを伺い、うち132名から回答を得た。

2.2　技術をみる視点と方向性

技術の流れを分析するための３つの視点を次のように設定・定義した。なおアンケート調査からは環境調和化、人間親和化という二つのニーズ側からの視点が抽出されたが、本調査では技術指向型の以下の視点に絞った。

(1)　極限化　＝　量的な側面の進展

①　空間の極限化：微細化、小型化、巨大化など。

②　場の極限化　：高温、高圧力、高真空、無重力、強電磁場等を実現／利用する技術。耐熱材料等も含む。

③　時間の極限化：短時間化、高速化など

(2)　高機能化　＝　質的な側面の進展

ａ．インテリジェント化

①　生物の利用・解明：いわゆるバイオテクノロジーとライフサイエンス

②　生物の模倣　　：広義のバイオミメティクス。知能化を含む。

③　計算機シミュレーション・計算機支援設計：計算物理学、計算化学、材料/触媒設計

ｂ．その他

④　多体問題の解明

⑤　カオス・非線形現象の解明・利用

(3)　複合化

①　異分野の技術・知見の複合化（融合化）

②　異なる物質・材料の複合化

③　技術と応用先の複合化

2.3　産業技術の流れと今後の進展

極限化・高機能化・複合化といった技術オリエンテッドな視点に基づき、産業技術の流れと今後の進展を分析した。

2.3.1　極限化の進展

東京大学の吉田教授の３つの極限化の考え方を適用し、空間の極限化、場の極限化、時間の極限化に分けて動向を分析した。アンケート調査、ヒアリング調査、文献調査に基づき、以下の技術領域・テーマを取り上げた。

表1　極限化分析で取り上げた領域・テーマ

3次元空間（μ空間）	場（Γ空間）	時空間（ｔ空間）
微細加工技術 薄膜化・超格子化技術 超微粒子技術 原子・分子操作技術 微細領域計測・評価技術 ミリ/マイクロ/ナノマシン 材料のミクロ構造制御 巨大アクチュエータ・材料	半導体プロセス環境 極限反応技術（超高圧等） 耐熱材料 高温反応場の計測技術 微小重力利用技術	量子効果デバイス 超時空間制御ﾌﾟﾛｾｼﾝｸﾞ フェムト秒テクノロジー 光周波数計測技術 非定常状態の計測技術

出所）MRI

2.3.2　高機能化の進展

高機能化を以下の5種類に分けて分析した。

インテリジェント化に該当するもの
- ・生物の利用・解明
- ・生物の模倣（バイオミメティクス）
- ・コンピュータシミュレーション・設計

その他
- ・多体問題の解明
- ・非線形・カオス現象の解明・利用

アンケート調査、ヒアリング調査、文献調査、及び委員会意見に基づき、以下の領域・テーマを取り上げ、動向を分析した。

表2　高機能化分析で取り上げた領域・テーマ

生物の利用・解明	生物の模倣	その他
バイオマテリアル	ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ材料とｽﾏｰﾄｽｷﾝ	計算流体力学
蛋白質工学	バイオメカニクス	計算物理学・計算化学
糖鎖工学	ニューラルネットワーク	超並列コンピュータ
その他バイオテクノロジー	遺伝ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑと人工生命	多体問題の解明
	知能ロボット	非線形・カオス
	センサ・フュージョン	

出所）MRI

2.3.3　複合化・融合化

(1)　ヒアリング調査より

ヒアリング調査の結果抽出された以下の複合領域/テーマについて、その動向と今後の進展に関する専門家の意見を紹介した。

① 複合材料
② プラズマ材料科学
③ 量子マイクロレーザ
④ 新情報処理
⑤ エアターボラムジェットエンジン
⑥ 膜リアクタ
⑦ 微生物探索とバイオテクノロジーの組み合せ

(2)　アンケート調査より

アンケート調査の結果抽出された複合領域/テーマを、以下の分野別に整理した。

① 物質・材料分野
② 電子・通信・情報分野
③ 機械・航空・宇宙分野
④ バイオテクノロジー分野
⑤ 保健・医療・福祉分野
⑥ 人間・生活・社会分野
⑦ 資源分野

第3章　今後の重点研究領域・テーマ

ヒアリング調査及びアンケート調査より得られた今後の有望領域・テーマを分野別に整理し、最後に第2章・第3章で抽出された領域・テーマを総括表にまとめた。以下に重点研究領域・テーマの一覧表を示す。

表3 重点研究領域・テーマ一覧

分野 ＼ 方向性	極限化			高機能化			複合化
	空間	場	時間	生物利用	生物模倣・知能化	その他	
物質・材料	微細加工 (87) 薄膜化・超格子化 (90) c-BN/ﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄﾞ薄膜 (174) 超微粒子 (97) 原子・分子操作 (99) マイクロアナリシス (100) ミクロ構造制御 (106) 光直接加工 (174) ﾜｲﾄﾞｷﾞｬｯﾌﾟ半導体 (175) 有機強誘電体 (175)	超高圧等極限反応 (112) 耐熱材料 (113) レーザ光反応 (174)	超時空間制御ﾌﾟﾛｾｼﾝｸﾞ (119)		ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ材料 (133)	触媒/材料設計 (155) 非線形工学材料 (175) エコマテリアル (175)	複合材料 (164) プラズマ材料科学 (164) 無欠陥ｱﾓﾙﾌｧｽSi薄膜 (167) 選択的微細加工 (167) 結晶育成In-situ観察 (167) ｴﾈﾙｷﾞｰ制御CVD (167) グラニュラー物質 (168) 自然融合材料 (168) 有機・無機超構造結晶 (175) 有機・無機ﾅﾉｺﾝﾎﾟｼﾞｯﾄ (175)
電子・通信・情報	巨大アクチュエータ (107) 単原子・分子素子 (169)	半導体プロセス環境 (108)	量子効果デバイス (116) ﾌｪﾑﾄ秒ﾃｸﾉﾛｼﾞｰ (120) 光周波数計測 (121) 自由電子レーザ (174) 4次元デバイス (175)		ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸ (142) 遺伝的ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ (144) 人工生命 (144) ｾﾝｻ・ﾌｭｰｼﾞｮﾝ (149)	計算流体力学 (150) 計算物理学・化学 (153) 超並列ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ (156)	量子ﾏｲｸﾛﾚｰｻﾞ (165) 新情報処理 (165) バーチャル・ラボ (167) 室温動作PHBﾒﾓﾘ (168) マルチメディア (177)
機械・航空・宇宙	ﾐﾘ/ﾏｲｸﾛ/ﾅﾉﾏｼﾝ (103)	高温反応場の計測 (114) 微小重力利用 (115) ﾌｧﾝｼﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (178) ｽｸﾗﾑｼﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (178) ﾘﾌﾄﾌｧﾝｴﾝｼﾞﾝ (178)	非定常状態計測 (121)		バイオメカニクス (140) 知能ロボット (147) 閉鎖系環境制御 (179)		ｴｱﾀｰﾎﾞﾗﾑｼﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (165) 膜リアクタ (165) ｵﾌﾞﾄﾒｶﾄﾛﾆｸｽ (170) 省ｴﾈﾙｷﾞｰ高速船 (170)
バイオ				バイオマテリアル 123 蛋白質工学 125 糖鎖工学 127 その他バイオ 129		植物代謝解明 (180) 有機電子論 (180) 超微小流動 (180)	人工細胞 (171) 味覚/嗅覚ﾊﾞｲｵｾﾝｻ (171) ﾊﾞｲｵﾛﾎﾞﾃｨｸｽ (171) ｱﾄﾑﾊﾞｲｵﾛｼﾞｰ (171)
保健・医療・福祉						免疫制御 (181)	レーザ医療 (171) 人工臓器 (171) 極微量免疫検出 (171) SQUID-CT (171)
人間・生活・社会					ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ交通ｼｽﾃﾑ (182)	人間の知性の解明 (183) リサイクル技術 (183)	感性の定量化 (172) 人工現実感 (172)
資源・ｴﾈﾙｷﾞｰ・環境							エコ・エネ都市 (172) ｺﾝﾊﾞｲﾝﾄﾞｻｲｸﾙ発電 (172) 熱電変換素子 (184) 水の光触媒分解 (184)
その他						多体問題 (158) 強相互作用ｼｽﾃﾑ (158) カオス・非線形 (159) ソリトン (160) 非平衡熱力学 (186)	

注) カッコ内は参照ページを示す。
出所) MRI

第II部　研究動向調査委員会の意見・提言

第1章　特に有望と考えられる技術領域・テーマ

第I部で探索した今後の重点研究領域・テーマのうち、研究動向調査委員会の委員によって特に有望として提案された領域・テーマについて、各委員の見解を紹介し、最後にMRIの見解をとりまとめた。

1.1　非線形・カオス工学（合原助教授）
1.2　強相互作用システム（岡部教授）
1.3　生体に学ぶ超構造工学（赤池教授）
1.4　アトムテクノロジー（田中総合研究官）
1.5　その他の見解（自己組織化に関して）

1.6　まとめ（MRI）

以上の見解をとりまとめ、MRIとして以下の分野を特に有望分野として提言した。（なおアトムテクノロジーについては既に国家プロジェクトがスタートしているので、今回の有望分野からは省いた。）

① 生体に学び生体を越える超構造工学
② 多体相互作用システム
③ カオス／非線形工学
④ その他のバイオミメティクス分野

第2章　融合研に学ぶ共同研究のあり方

平成5年1月1日に誕生した工業技術院の産業技術融合領域研究所は共同研究に関する新しい試みとして注目を集めている。融合研の研究テーマは、1)アトム・テクノロジー、2)クラスター科学、3)バイオニック・デザインであり、田中総合研究官はアトム・テクノロジー・プロジェクト（産業科学技術研究開発制度）の実験面でのリーダーを務めている。

融合研が標榜する精神は、「開放性」「流動性」「国際性」及び「公正な評価による運営」であり、1)研究所員の半数以上を産学および海外から招聘、2)所員は大半が有限任期（最大5年）、3)「よい仕事をよいと認め勇気づける」評価システムの導入、等の画期的なシステムを国研に導入した最初の試みとして大いに評価されるべきである。

第II部第1章（第II部）で提案した新しい領域の研究のためには、工学、自然科学、社会科学等の異分野から幅広く研究者を集めて共同研究を行う必要があり、融合研のやり方に大いに学ぶ必要があろう。

第３章　我が国の技術戦略・政策のあり方

今後の我が国の技術戦略・政策のあり方（より具体的には下記の内容）について、ヒアリングにご回答いただいた専門家の方々、及び研究動向調査委員会の委員の方々の見解を抽出・整理した。

・日本の技術戦略のあり方
・日米の研究プロジェクトの進め方の違い
・国家ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄのﾃｰﾏ選定方法と評価ｼｽﾃﾑ
・発展途上国との技術交流のあり方
・研究支援のあり方
・日本の科学技術政策システムのあり方
・研究開発制度のあり方と大学の役割
・産学官交流のあり方と人の流動性
・人材育成のあり方

具体的には、欧米の政策動向を常時フォローしながらも、外圧に右往左往されない日本独自の技術戦略・政策やR&Dが必要であること、「知的資源立国」をベースとして科学技術で世界に貢献するためには対GNP比1%程度の科学技術予算が必要であること、日本の科学技術政策における総合調整機能を強化すべきこと、国家プロジェクトにおける大学の役割を強化すべきこと、独創的研究開発に対する支援の必要性、国家プロジェクトのテーマ選定等に関して公正な評価システムを導入すべきこと、などが提案された。

まとめ

第Ⅰ部第1章でみたように、我が国の技術力及びその国際的地位は着実に高まってきている。これに対して米国も民生技術の重視により経済力と産業競争力の建て直しを図り、各種技術プログラムの拡充、知的所有権の保護、通商法・技術卓越法等による国内産業保護等の施策を実施している。

我が国の研究開発費の約8割は産業が占めており、比較的オープンな正確を持つ大学・国研の比重が小さいことが、国際的な技術交流のアンバランスを招き、「技術ただ乗り」との批判を招いている。今後は大学・国研における基礎的独創的研究を拡充し、また国際的な共同研究・研究交流を拡大し、「科学技術による国際貢献」を目指す必要がある。地球環境問題やエイズのような人類共通の課題に技術面から貢献することも大切である。また、このような研究開発努力の拡充は「知的資源立国」をベースとした我が国の国民生活や産業自体の基盤ともなる。

本報告書では産業技術の流れを極限化・高機能化・複合化という視点で分析し、第Ⅰ部第2～3章に示したような今後の重点研究領域を探索した。特に空間の極限化（微細加工、原子・分子操作、マイクロアナリシス等）、時間の極限化（超時空間プロセシング、量子デバイス、フェムト秒テクノロジー、4次元デバイス等）、生物の模倣・知能化（インテリジェント材料、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、人工生命、センサフュージョン、知能ロボット等）に関して重要な領域・テーマが多数見受けられた。またこれらに加えて委員の方々から、1)「生体に学ぶ超構造工学」、2)「強相互作用システム」、3)「非線形／カオス工学」が有望分野として提案された。

微細加工や物質・材料分野のハードウェア技術は日本が伝統的に得意とするところであり、産学官の努力によりかなりの成果が期待できる。一方バイオミメティクス分野と委員の方々がご提案された3つの新しい領域の要素技術と応用分野は、ハードウェアや工学分野だけにとどまらず、生物学、経済学、組織論等に至るまで大きな広がりを持っている。このような学際的領域の研究においては、ともすれば蛸壺的に専門領域に閉じこもりがちな異分野の研究者を何等かの形で集めて共同研究を行うことが有意義であると考えられる。

第Ⅰ部　政策・技術動向調査

第Ⅰ部　政策・技術動向調査

第１章　内外の技術政策動向

本章では、今後の有望技術領域を探るためのバックグラウンドとして、日米欧の技術政策の動向を概説する。

1.1　日本

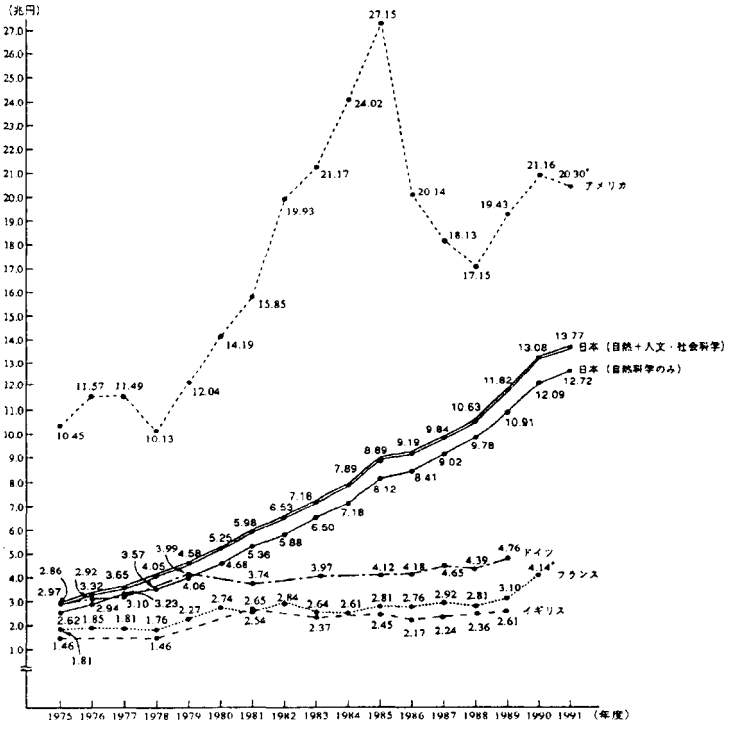
1.1.1　マクロ動向と国際比較

日本の技術政策動向に触れる前に、日本の研究開発の投入努力（Input）及び成果（Output）の全体的動向、分野別動向、及び欧米諸国との相対的位置について、統計や既存調査研究に基づき概観する。

(1)　研究開発費

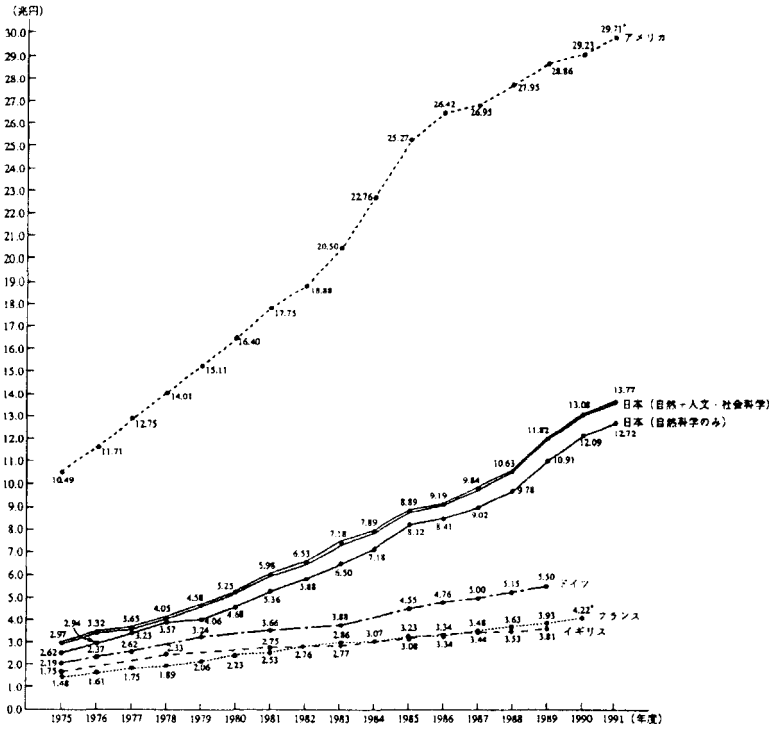
①　研究費総額のトレンドと国際比較

我が国の研究費総額（産・学・官における自然科学と人文・社会科学に関する使用研究費）は比較的順調に伸びており、1991年度においては伸び率がやや低下したものの、約13兆8千億円、対GNP比にして3.00%に達している。諸外国と比較すると、為替レート換算で米国の68%、購買力平価換算でも46%であり、英・独・仏を大きく抜いて世界第2位の規模にある。対GNP比においては米国の2.65%を上回っており、ドイツと並んでほぼ世界第1位の水準にあるものと推定される。



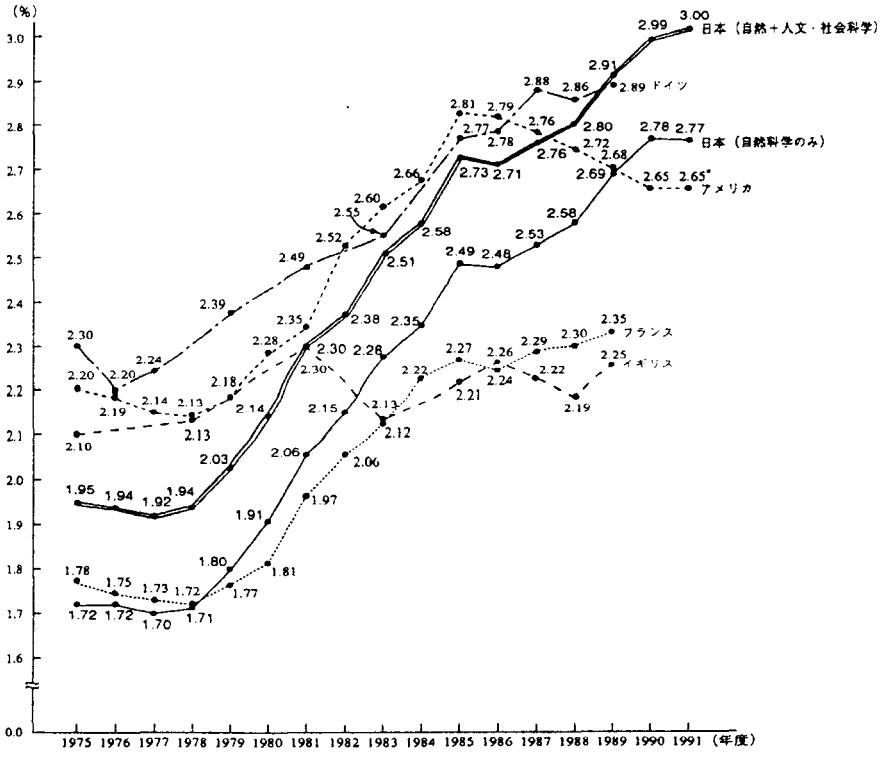
第1.1－1図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の推移
（為替レート換算）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p2



第1.1—2図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の推移
（購買力平価換算）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p3

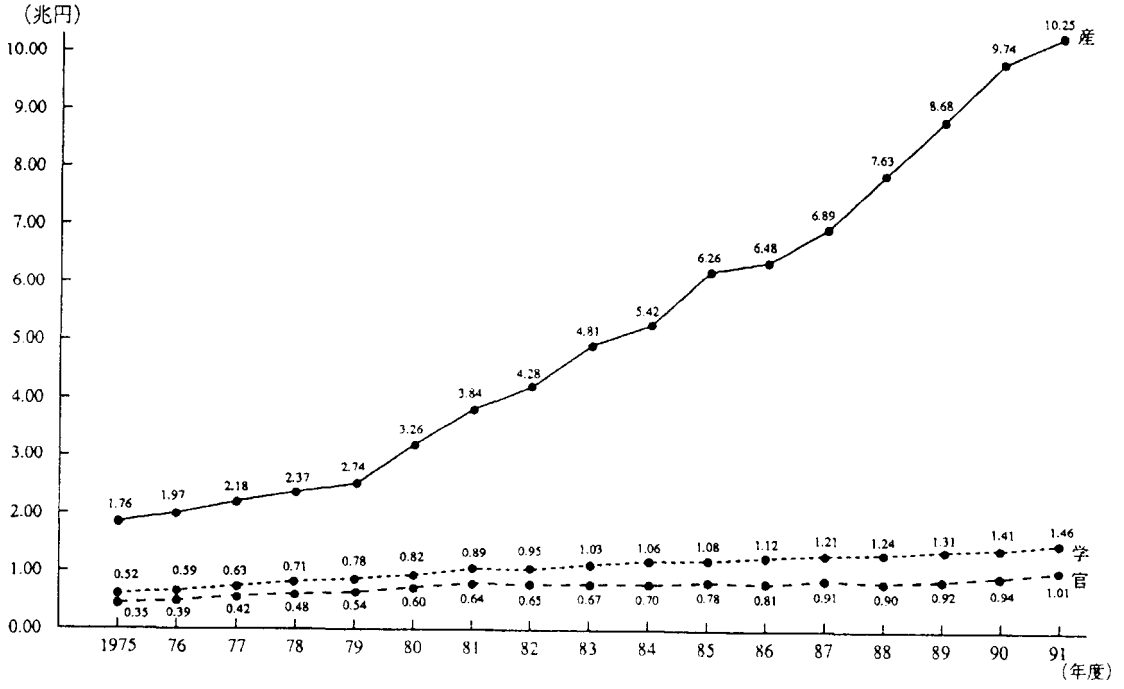


第1.1—3図　主要国の研究費（自然+人文社会科学）の対GNP比率の推移

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p4

しかしながら、大きな伸びを示しているのは産・学・官のうち産業界の研究費のみであり、自然科学分野の使用研究費の80.6%を占めるに至っている。負担額ベースの政府負担比率は年々減少しており、1991年度においてはやや持ち直したものの、自然科学で16.8%、人文・社会科学を含めて18.2%に過ぎない。これを諸外国と比較すると、米国が43.2%（1991年度）、英国が36.5%（1989年度）、ドイツが33.2%（1989年度）、フランスが47.9%（1990年度）（いずれも自然+人文・社会科学）であり、日本（18.2%）の政府負担比率がいかに低いかがわかる。米・英・仏では国防研究費の割合が多いが、これを除いた政府負担比率についても、21.6%（米）、21.9%（英）、29.9%（独）、33.0%（仏）であり、日本の17.5%は主要先進国中最も低い水準にある。

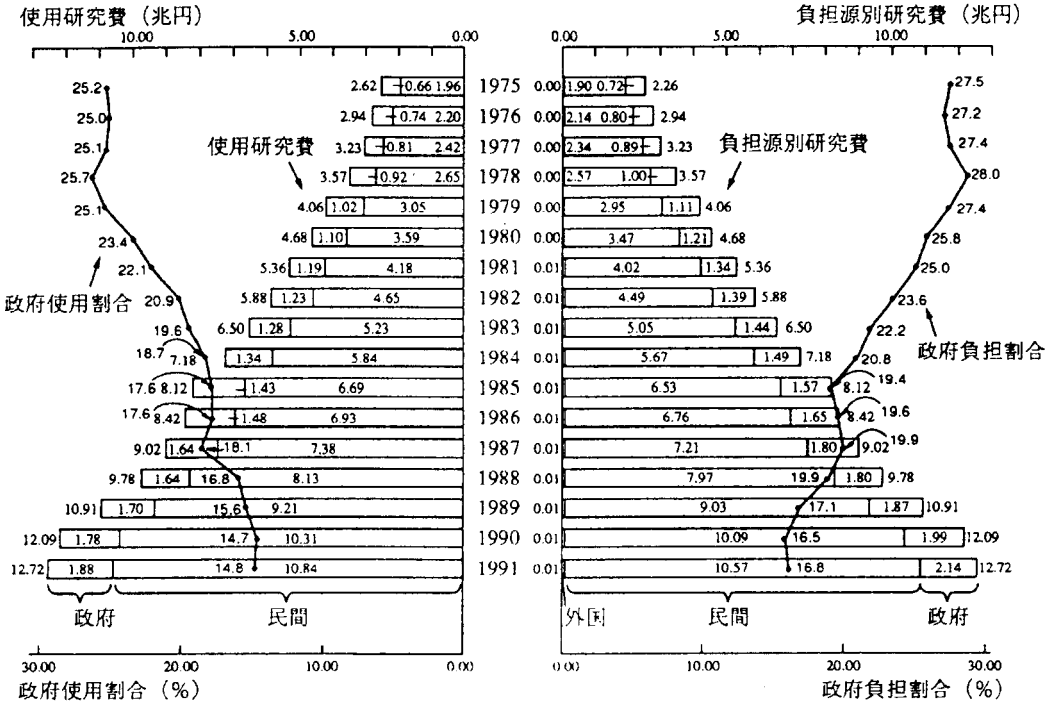
注）特に米国では国防研究費の対象が民生分野にも係わる広範な分野に及んでいる。この事実を勘案すると、日本と米国の民生分野の政府負担比率の格差は、21.6%と17.5%という数字以上にかなり大きいものと推定される。



第1.1－4図　我が国の産・学・官の使用研究費（自然科学）の推移

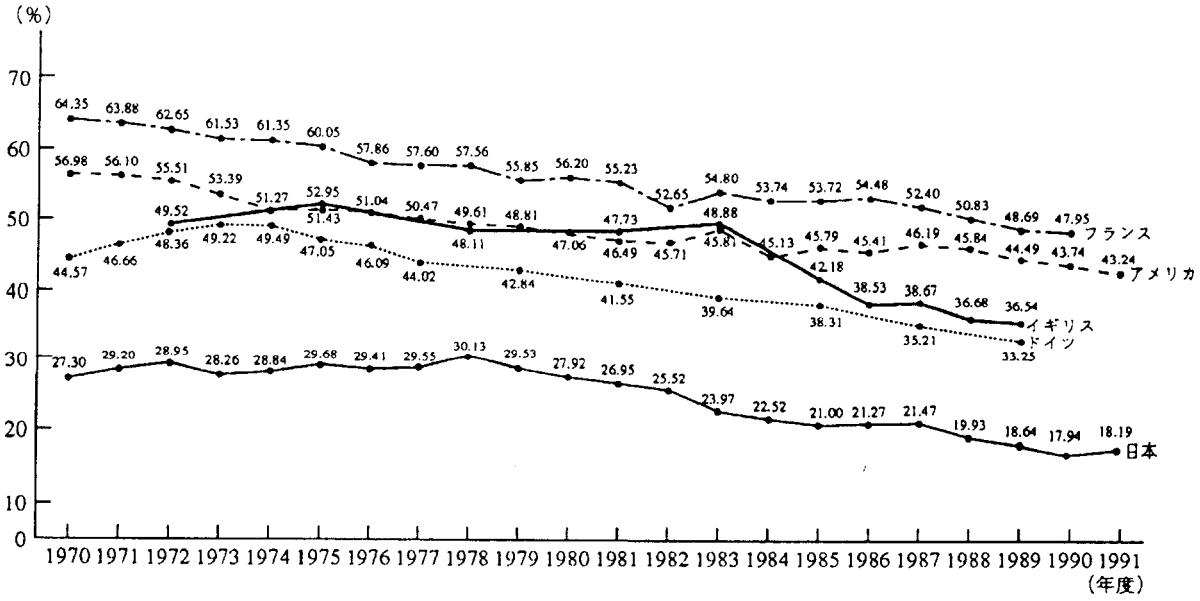
出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p13

この結果、我が国の政府支出研究費の対GNP比率は1991年度において0.55%であり、欧米主要国（米：1.15%、英：0.82%(1989年度)、独：0.96%(1989年度)、仏：1.15%(1989年度)）に比べてかなり少ない水準である。政府負担の対GNP比率が低いということは、民間企業に比べて比較的オープンな性格を持つ大学・国立研究所への支出が少ないということであり、海外との技術流通のインバランスを是正し国際貢献するという観点、及び我が国の将来のための基盤として基礎研究を充実させるという観点から、これを1%程度に増加させるべきである、との声が強い。



第1.1－5図　我が国の政府と民間の使用・負担源別研究費（自然科学）の推移

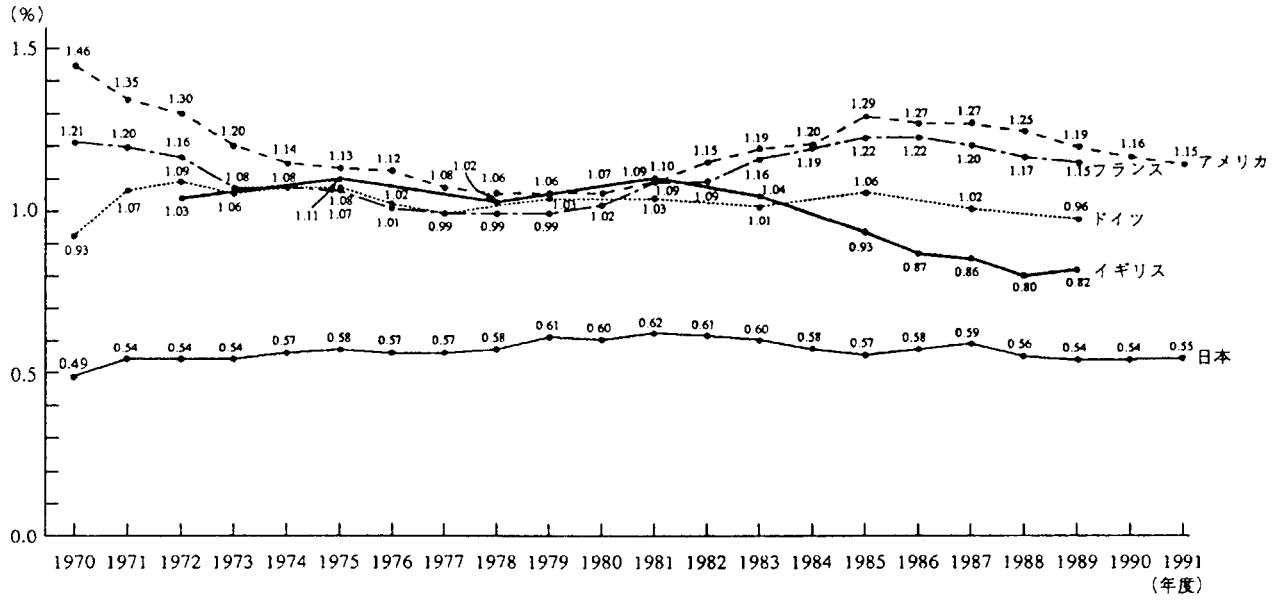
出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p12



第1.1－6図　主要国の政府支出研究費の全研究費に占める比率（自然十人文社会科学）

出所）

「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p18（図表2-7）



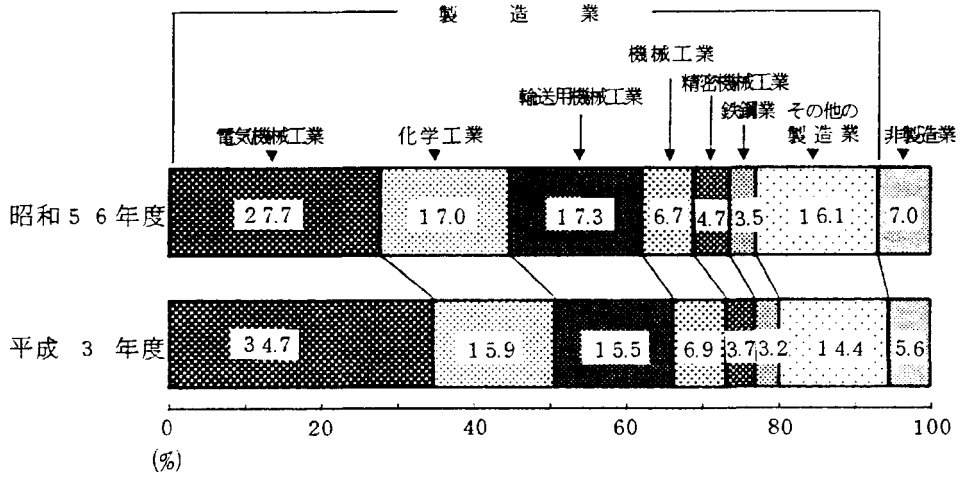
第1.1−7図　主要国の政府支出研究費（自然十人文・社会科学）の対GNP比率の推移

出所）

「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p18（図表2-6）

② 産業別動向

我が国研究費の8割を占める産業の研究費の業種別構成をみると、1991年度において最も研究費が多いのは電気機械工業で全産業の34.7%を占め、昭和56年度の27.7%から大きくシェアを伸ばしている。1991年度ではこれに化学工業（15.9%）、輸送用機械工業（15.5%）が続く。



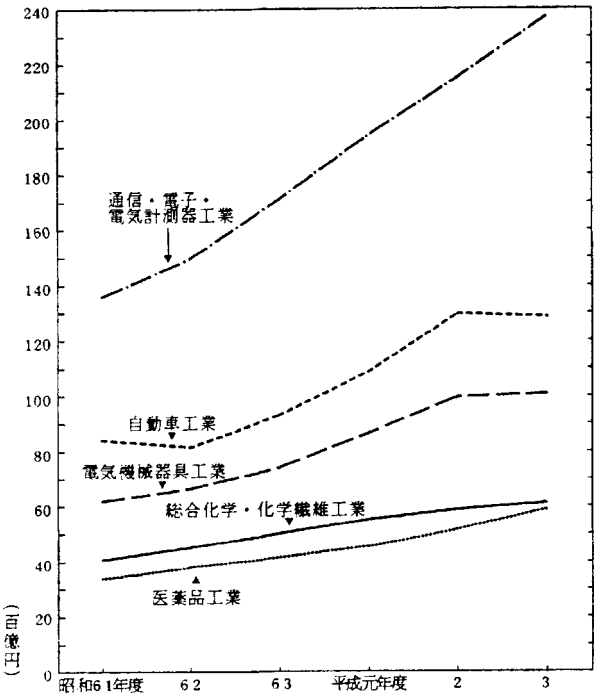
第1.1—8図　産業別研究費の構成比の推移（中分類）

出所）　「科学技術研究調査報告」、平成4年、総務庁統計局、p44

産業小分類でみると、通信・電子・電気計測器工業が他を引き離して多くの研究費を使用しており、伸び率も最も高い。金額ではこれに自動車工業、電気機械器具工業、総合化学・化学繊維工業、医薬品工業が続くが、自動車、電気機械器具、総合化学・化学繊維の研究費の伸びは、不況の影響を受けたためか、1990年度から91年度にかけて鈍化している。

また産業別・製品別の使用研究費により、当該産業（製造業）が本業以外の製品の研究開発にどの程度支出しているかをみると、非本業製品に対する研究費比率は電気機械器具工業（68.0%）が最も高く、次いで精密機械工業（58.1%）、非鉄金属工業（52.3%）、窯業（51.2%）、石油・石炭製品工業（51.1%）、鉄鋼業（50.2%）、総合化学・化学繊維工業（48.7%）、油脂・塗料工業（48.2%）となっており、研究開発の対象製品が多角化していることがわかる。鉄鋼業では本業に近い金属製品、非鉄金属製品、一般機械器具製品への投入比率がそれぞれ6.3%、3.4%、8.7%と小さいのに対し、通信・電子・電気計測器分野への投入が13.2%と多いが、これは鉄鋼業が半導体やコンピュータに事業分野を多角化していることと符号する（必ずしも成功しているとはいえないが）。

一方自動車工業、医薬品工業の非本業比率はそれぞれ4.3%、5.2%であり、ほとんどの研究費を本業分野に投入している。



第1.1−9図　特に研究費が多い産業（小分類）

出所）「科学技術研究調査報告」、平成4年、総務庁統計局、p45

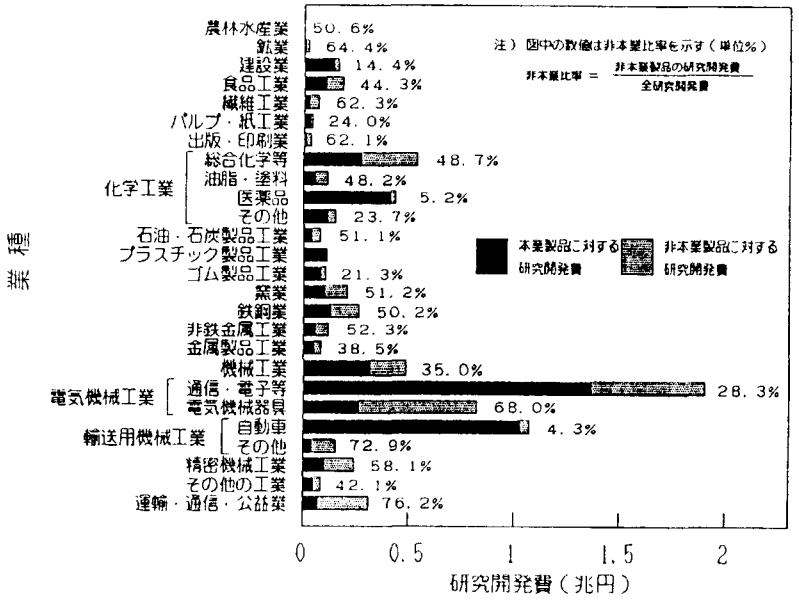


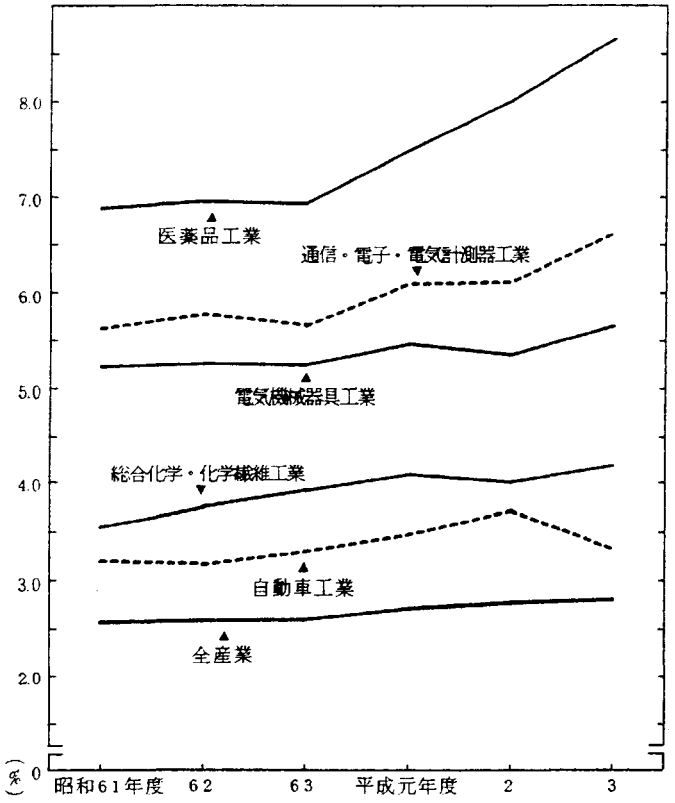
図1.1-10　産業別研究開発費と非本業比率

出所）　「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p171

売上高に対する研究費の比率をみると、医薬品工業が8.66%（1991年度）と最も高く、これに通信・電子・電気計測器工業（6.63%）、電気機械器具工業（5.66%）、油脂・塗装工業（4.20%）、総合化学・化学繊維工業（4.19%）、自動車工業（3.33%）が続く。このうち伸び率が最も高いのは医薬品工業で、全産業の伸び率（微増傾向）を大きく上回っている。

基礎研究、応用研究、開発研究別に各産業の研究費をみると、基礎研究比率の最も高いのは医薬品工業（22.0%）であり、これに鉄鋼業（14.8%）、食品工業（10.6%）、その他化学工業（10.0%）、繊維工業（9.5%）、総合化学・化学繊維工業（9.0%）が続く。医薬品工業では基礎研究比率が10年間で7.8ポイント上昇しており、総合化学・化学繊維工業、油脂・塗料工業、電気機械工業においても基礎・応用研究比率が10年前（昭和56年）より上昇している。基礎研究比率が上昇傾向にあるのは、製造業全体の平均的傾向でもある。

一方開発研究比率が最も高いのは自動車工業（84.7%）であり、これにゴム製品工業（81.4%）、金属製品工業（79.4%）、電気機械器具工業（76.0%）、通信・電子・電気計測器工業（75.4%）が続く。



第1.1-11図　研究費の対売上高比が高い産業（小分類）

出所）　「科学技術研究調査報告」、平成4年、総務庁統計局、p48

第1.1－1表　基礎－応用－開発研究別の研究費比率（平成3年度）

（単位　%）

産業	基礎研究	応用研究	開発研究
全産業	6.8	22.2	71.1
	(6.4)	(21.8)	(71.8)
農林水産業	9.5	26.9	63.5
鉱業	19.5	34.6	45.9
建設業	5.8	23.7	70.4
製造業	6.8	21.7	71.5
	(6.3)	(21.2)	(72.5)
食品工業	10.6	32.7	56.7
繊維工業	9.5	33.4	57.1
パルプ・紙工業	8.5	33.2	58.2
出版・印刷業	5.2	35.2	59.6
化学工業	14.0	29.2	56.8
総合化学・化学繊維工業	9.0	33.3	57.8
油脂・塗料工業	7.8	34.1	58.1
医薬品工業	22.0	27.4	50.6
その他の化学工業	10.0	18.0	71.9
石油製品・石炭製品工業	12.4	23.7	63.9
プラスチック製品工業	3.9	22.9	73.2
ゴム製品工業	3.4	15.2	81.4
窯業	8.2	24.0	67.8
鉄鋼業	14.8	18.6	66.6
非鉄金属工業	6.6	25.6	67.8
金属製品工業	2.4	18.1	79.4
機械工業	4.9	25.4	69.7
電気機械工業	4.3	20.2	75.6
電気機械器具工業	4.5	19.5	76.0
通信・電子・電気計測器工業	4.2	20.4	75.4
輸送用機械工業	4.3	13.2	82.4
自動車工業	4.1	11.2	84.7
その他の輸送用機械工業	5.6	24.9	69.5
精密機械工業	4.4	23.0	72.5
その他の工業	3.2	22.1	74.6
運輸・通信・公益業	6.0	33.2	60.8

注）（ ）内は，平成２年度の構成比。

出所）　「科学技術研究調査報告」、平成4年、総務庁統計局、p51

注）　総務庁「科学技術研究調査報告」における「産業小分類」と「日本標準産業分類」の対応関係（抜粋）

小分類	日本標準産業分類
総合化学・化学繊維工業	化学肥料製造業
	無機化学工業製品製造業
	有機化学工業製品製造業
	化学繊維製造業
電気機械器具工業	発電用・送電用・配電用・産業用電気機械器具製造業
	民生用電気機械器具製造業
	電球・電気照明器具製造業
	その他の電気機械器具製造業
通信・電子・電気計測器工業	通信機械器具・同関連機械器具製造業
	電子計算機・同附属装置製造業
	電子応用装置製造業
	電気計測器製造業
	電子機器用・通信機器用部分品製造業

一方、我が国と欧米主要国の産業別の研究費を比較してみると、以下の特徴が明らかになる。

・日本：　電気機械製造業、鉄鋼・非鉄金属製造業、自動車製造業の研究費の占める割合が比較的（他国と比較して）高い。
・米国：　機械製造業、精密機械製造業、航空機等製造業の割合が比較的高い。
・ドイツ：　化学産業、自動車製造業の割合が比較的高い。
・フランス：航空機等製造業の割合が比較的高い。
・英国：　化学産業、電気機械製造業、航空機等製造業の割合が比較的高い。

これらの特徴は、それぞれの国の産業の競争力を反映している。

第1.1－2表　主要国における産業別の研究費

（単位：研究費－億円，構成比－%）

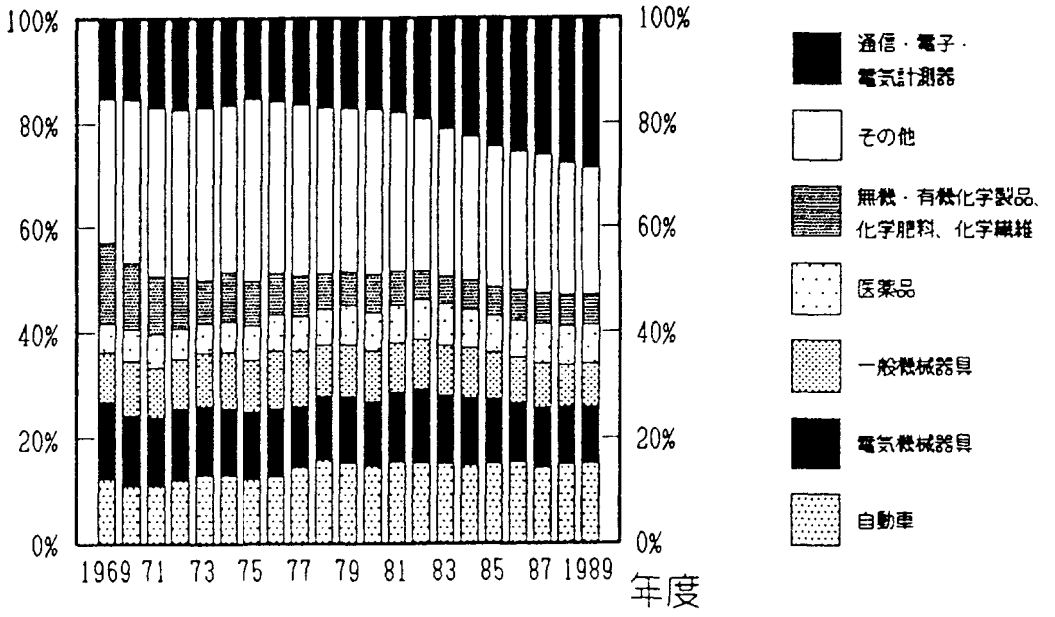
国名 / 年 / 業種別	日本	アメリカ	ドイツ	フランス	イギリス
	1991	1990	1987	1989	1989
全産業	97,430 (100.0)	151,090 (100.0)	35,633 (100.0)	18,728 (100.0)	17,191 (100.0)
化学	15,477 (15.9)	18,194 (12.0)	7,303 (20.5)	- (-)	3,828 (22.3)
化学製品	6,125 (6.3)	6,290 (4.2)	- (-)	1,782 (9.5)	- (-)
医薬品	5,901 (6.1)	- (-)	- (-)	1,353 (7.2)	- (-)
鉄鋼·非鉄金属	5,091 (5.2)	- (-)	633 (1.8)	367 (2.0)	- (-)
鉄鋼	3,601 (3.7)	- (-)	214 (0.6)	- (-)	- (-)
機械	6,744 (6.9)	21,286 (14.1)	3,672 (10.3)	522 (2.8)	465 (2.7)
電気機械	33,828 (34.7)	25,191 (16.7)	10,080 (28.3)	5,538 (29.6)	5,367 (31.2)
輸送用機械	15,087 (15.5)	51,983 (34.4)	- (-)	- (-)	- (-)
自動車	12,861 (13.2)	- (-)	5,612 (15.7)	2,132 (11.4)	1,141 (6.6)
航空機等	- (-)	36,717 (24.3)	2,076 (5.8)	3,445 (18.4)	2,421 (14.1)
精密機械	3,140 (3.2)	8,924 (5.9)	497 (1.4)	193 (1.0)	- (-)
非製造業	5,476 (5.6)	13,406 (8.9)	2,065 (5.8)	1,875 (10.0)	2,600 (15.1)

（　）内は構成比

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p47

③　製品別動向

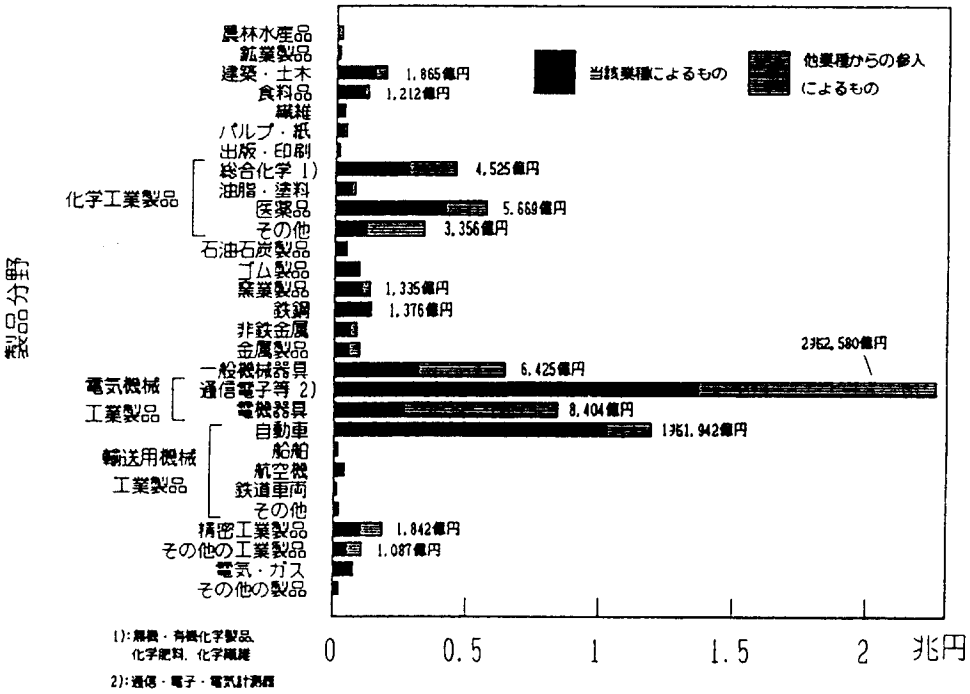
製品分野別に研究費をみると、通信・電子・電気計測器（製品）の割合が最大かつ1980年代以降大きく成長している。これに自動車、電気機械器具、一般機械器具、医薬品、総合化学・化学繊維製品が次ぎ、これら5業種の割合はそれほど大きな変化はないが、強いて言えば医薬品及び自動車が増加傾向にあり、その他3業種が減少傾向にある。



第1.1－12図　製品別の研究開発費（シェア）の推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p166

当該製品の研究開発を本業でない他業種が行っている場合の金額をみると、通信・電子・電気計測器製品の研究開発への参入が最も多く、次いで電気機械器具、一般機械器具、総合化学・化学繊維製品、自動車、及び医薬品となっており、研究開発の多角化の際にはこれら6製品分野への進出が多いことがわかる。これは鉄鋼業の多角化の最大分野が通信・電子・電気計測器製品であったこととも符号する。また、自動車及び医薬品分野の研究開発への参入が多いこと、自動車工業及び医薬品工業の本業比率が極めて高いことと考え合わせると興味深い。



第1.1－13図　製品別の研究開発費と他業種からの参入（1989年度）

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p165

④　補　足

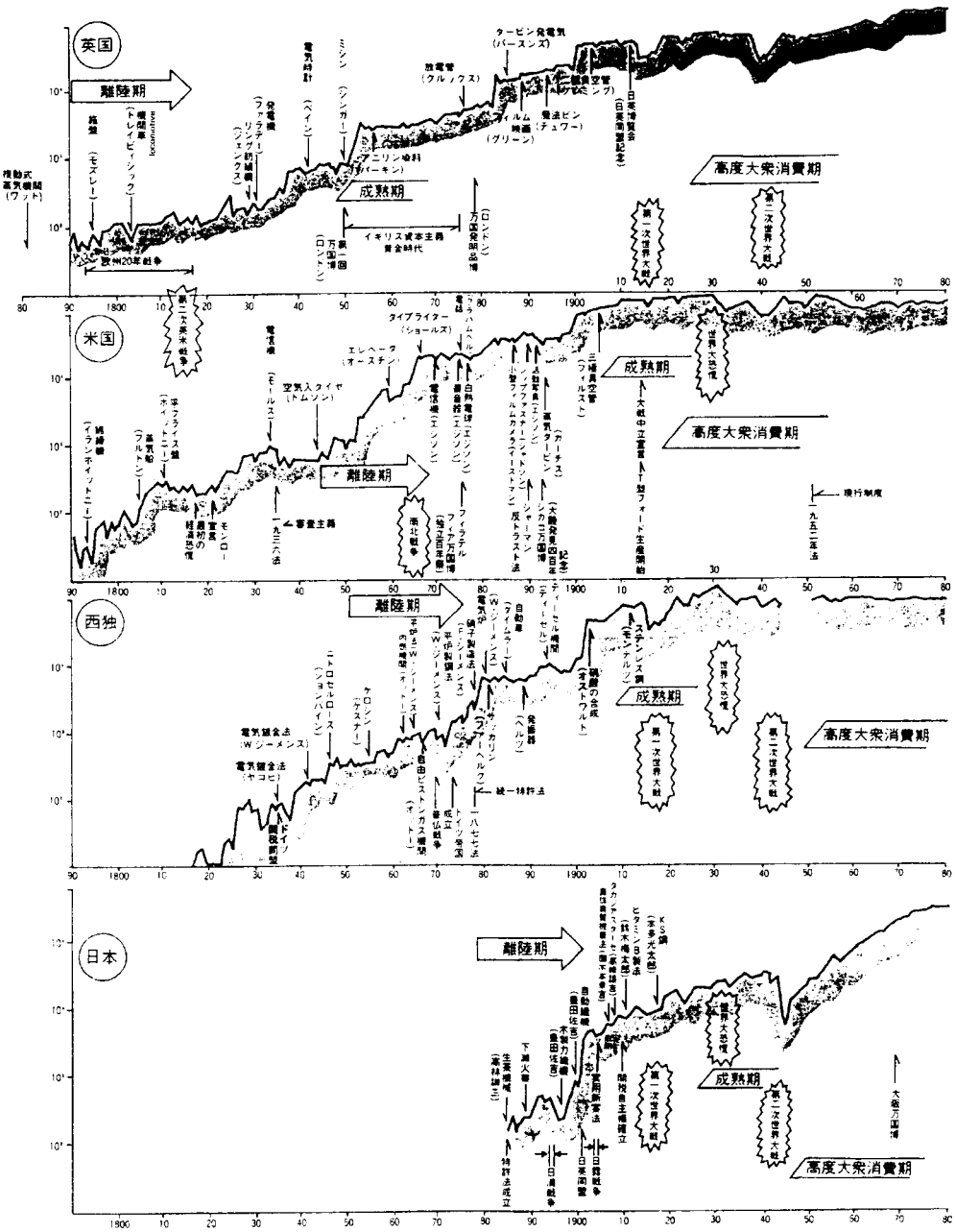
以上、研究費の動向を国別、産業別、製品別にみてきた。研究費は研究開発への投入努力の動向を定量的かつマクロに表すデータとして非常に有意義である。総務庁統計における「製品別研究開発費」は貴重なデータであるが、製品分類が荒いため、上記よりもミクロな動向分析は不可能である。今後より細かい製品分類ないし技術分野（例：JICSTの科学技術分類コード）ベースの研究費統計の整備が望まれる。

(2) 特許

研究開発の成果（Output）を示す指標としては、特許と論文がある。このうち特許は技術の工業応用に関する発明や改良の成果を示す指標として、また論文は基礎的/理論的/科学的な知見から応用技術に関する知見、さらには技術解説記事に至る幅広い知見のパブリケーションとして、どちらも非常に重要な成果指標である。ここでは我が国及び欧米諸国の特許に関する全体的/分野別動向を概観し、併せて国際比較を行うこととする。

① 日米欧における特許の歴史的推移

下図は英国、米国、ドイツ、及び日本における1790年から1980年に至る190年間の特許出願件数と主要な発明を記したものである。



第1.1－14図　各国の特許出願件数の推移と主要な発明

出所）「技術立国と特許」、特許庁編、発明協会発行、1985、p58～59

a．英国（1750-1830年）

英国では産業革命の頃、即ち18世紀後半に制定された特許制度に基づいて、既にその頃から年間50～100件程度の特許が出願されていた。18世紀後半から19世紀初頭までの間に、以下に示すような主として機械・金属材料関連の重要な発明があり、この時期を英国産業技術の離陸期とみることができる。このような技術力を背景として、その後19世紀半ばから後半にかけて英国はパックスブリタニカの時代を迎えるのである。

第1.1－3表　1750年から1830年までの英国における主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者
1756	人造セメント	スミートン
1765	蒸気機関の改良（分離凝結器）	ワット
1766	反射炉	クラネージ兄弟
1769	水力紡績機	アークライト
1775	シリンダー中ぐり機	ウィルキンソン
1779	ミュール紡績機	クロンプトン
1781	複動蒸気機関	ワット
1782	磁気製造用高温計	ウェッジウッド
1785	力織機	カートライト
1792	ガス照明	マードック
1797	送り台付き金属加工用旋盤	モーズレー
1799	漂白粉	テナント
1800	総鉄製印刷機	スタンホープ
1802	硝酸銀感光紙による写真プリント	ウェッジウッド
1804	軌道用蒸気機関車	トレヴィシック
1804	錬鉄製レール	ニクソン
1812	蒸気船コメット号製作	ヘンリー・ベル
1814	蒸気機関車ブリュッヘル号	スティーブンソン
1815	安全燈	デーヴィー
1818	シールド工法	ブルーネル
1822	活字鋳造機	チャーチ
1823	最初の実用的ガス機関	ブラウン
1824	ポルトランドセメント	アスプジン
1825	世界最初の貨物鉄道	スティーブンソン
1829	機関車ロケット号製作	スティーブンソン

出所）「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p152～p195をもとに、MRI作成

b．米国（1830-1900年）

一方米国においても、19世紀半ばになると電気関係の発明を中心に特許出願が急増し、米国の技術が離陸期を迎える。1830年から1900年までの米国における主要な発明は下表のとおりである。

英国のファラデー（1831年：電磁誘導電流の発見、1833年：電気分解の法則、1837年：電磁場理論の基礎、1839年：「電気学の実験的研究」）、マックスウェル（1864年：電磁場の基礎方程式、1871年：光の電磁波説、1873年：「電磁気学概論」）らの電気関係の科学的発見を基礎として、モールス、ベル、エジソンらの電気・通信関係の発明が目白押しとなっているほか、資源掘削技術やミシン、タイプライター、カメラ等の精密機械に関する発明もあらわれている。

このような技術力を背景として、19世紀後半から20世紀にかけてのパックス・アメリカーナの時代が到来する。

第1.1—4表　1830年から1900年までの米国における主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者
1838	電信の公開実験	モールス
1839	ゴム硬化法	グッドイヤー
1844	電信機実用化	モールス
1845	裁縫ミシン	ハウ
1849	水力タービン	フランシス
1849	蒸気削岩機	コーチ
1851	ミシン改良	シンガー
1859	綱掘式による石油掘削	ドレイク
1862	万能式フライス板	ブラウン
1868	タイプライター	ショールズ
1869	セルロイド	ハイアット兄弟
1871	印字電信機	エジソン
1876	電話器	グラハム・ベル
1877	畜音機	エジソン
1879	炭素線電球	エジソン
1881	火力発電所建設、電燈事業開始	エジソン
1886	電気溶接法	トムソン
1886	アルミニウムの電気精練法	ホール
1888	小型フィルムカメラ	イーストマン
1891	自動電話交換方式	ストロージャー
1893	テスラ変圧器	テスラ
1896	速度複式衝動タービン	カーティス
1899	硫黄採掘の新方法	フラッシ

出所）　「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p152～p195をもとに、MRI作成

c．ドイツ（1860-1920年）

ドイツでは英・米に遅れて1810年代に特許制度が制定されたが、その後まもなく特許出願の急増期を迎える。1860年から1920年までのドイツにおける主要な発明・発見を下表に示すが、化学プロセス及び医学・生理学に関する発明・発見が多いことが特徴であり、またジーメンスの発電機と電車、オットーのガス機関、ベンツの自動車、ディーゼルのディーゼル機関等、重機械分野においても重要な発明・開発が見受けられる。

第1.1—5表　1860年から1920年までのドイツにおける主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者
1856	発電機の改良（複T型電機子）	ジーメンス
1867	自励式発電機	ジーメンス
1868	アリザリン合成	ｸﾞﾚｰﾍﾞ、ﾘｰﾍﾞﾙﾏﾝ
1872	顕微鏡の油侵装置	アッベ
1872	光学用ガラス	ｱｯﾍﾞ、ｼｮｯﾄ
1872	ガス機関による飛行船	ヘンライン
1873	圧縮アンモニア冷凍装置	リンデ
1875	接触法による硫酸製造	ヴィンクラー
1876	4サイクルのガス機関	オットー
1878	細菌の染色法	エールリッヒ
1880	腸チフス菌の発見	エーベルト
1881	最初の電車路線敷設	ジーメンス
1882	結核菌の発見	コッホ
1883	ジフテリア菌の発見	クレープス
1885	3輪の2サイクルガソリン自動車	ベンツ
1890	電解ソーダ法	ｸﾞﾘｰｽﾊｲﾑ･ｴﾚｸﾄﾛﾝ社
1890	ツベルクリン創製	コッホ
1893	ディーゼル機関	ディーゼル
1893	チフスワクチンによる人工免疫	フレンケル
1894	テルミット溶接法	ゴルトシュミット
1895	石灰窒素の製造	フランク、カロ
1897	ブラウン管	ブラウン
1897	白金触媒接触法による硫酸製造	クニーチ
1900	硬式飛行船	ツェッペリン
1906	ジュラルミン	ヴィルム
1907	写真伝送の実験	コルン
1908	アンモニアの工業的合成法	ﾊｰﾊﾞｰ、ﾎﾞｯｼｭ
1909	油回転ポンプ	ゲーデ
1913	石炭の直接液化法	ベルギウス

出所）「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p152～p195をもとに、MRI作成

d．日本（1890-1940年）

一方我が国では明治維新（1868年）から17年後の1885年（明治18年）に特許制度（専売特許条例）が制定され、最初の年から既に500件程度の出願があった。このことは、その頃日本の技術力が既にある程度高まっていたことを示唆する。その後我が国は主として外国からの技術導入に頼って産業技術の近代化を進めるが、豊田佐吉の自動織機、御木本幸吉の真珠素質被着法、高峰譲吉のタカジアスターゼ、本多光太郎らのKS磁石鋼、鈴木梅太郎のオリザニン（ビタミンB1）や合成酒製造法、宮田聡のアルマイト、岡部金次郎のマグネトロンなど我が国独自の発明も多い。我が国の特許出願件数は1941年まで増加の一途をたどり、太平洋戦争の間出願が急減したものの、その後再び急上昇を始める。太平洋戦争以前の特許にみられるような製造技術の蓄積が、戦後の高度経済成長をもたらしたともいえるのである。下表に1890年から1940年までの我が国の主要発明を示す。

第1.1—6表　1890年から1940年までの日本における主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者
1891	下瀬火薬	下瀬雅允
1897	宮原式水管汽罐	宮原二郎
1902	世界初の乾電池試作	屋井先蔵
1907	自動織機	豊田佐吉
1908	空中窒素固定法	曾木電気
1908	真円真珠	御木本幸吉
1909	タカジアスターゼ	高峰譲吉
1909	サルバルサン創製	秦佐八郎
1910	オリザニン（ﾋﾞﾀﾐﾝB1）発見	鈴木梅太郎
1910	足踏み式回転脱穀機	福永章一
1912	TYK式無線電話	鳥潟、横山、北村
1914	ゐのくち式渦巻ポンプ	井口、畠山
1917	KS磁石鋼	本多、高木
1920	易反応性鉛粉製造法	島津源蔵
1921	合成酒	鈴木梅太郎
1922	赤褐鉄選鉱法	梅根常三郎
1923	タイガー計算機	大本寅治郎
1926	ピストンリング製作法	大河内、海老原
1926	八木アンテナ	八木、宇田
1926	アルマイト	宮田聡
1927	マグネトロン	岡部金次郎
1928	世界初の電子式テレビ	高柳健次郎
1928	NE式写真電送	丹羽、小林
1929	超不変鋼	増本量
1931	MK磁石鋼	三島徳七
1931	OP磁石	加藤、武井
1932	Rカット式水晶発振子	古賀逸策
1932	磁性合金センダスト	増本、山本
1934	クロム酸塩製造法	棚橋寅五郎
1935	新KS磁石鋼	本多光太郎ら
1936	大阪管（磁電管）	岡部金次郎
1936	超々ジュラルミン	北原五郎ら
1938	交流バイアス式磁気録音方式	永井健三ら
1939	合成繊維「合成一号」	桜田一郎ら

出所）　「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p68～p101をもとに、MRI作成

d．世界（1940-1985年）

下表は戦後の世界における主要な発明、発見、開発のリストである。中でも、半導体によるトランジスタとその集積化、及びそれを基盤としたマイクロプロセッサ等電子デバイスやコンピュータの進歩、メーザ・レーザの発明を基盤としたオプトエレクトロニクスの進展、第1～2次大戦における軍事技術を基盤とした航空・宇宙技術や原子力技術の進展、ワトソンらのDNA構造解明に端を発する遺伝子工学等バイオテクノロジーの進展などが重要である。この間の技術の牽引役は依然として米国であったが、我が国も製造技術を中心に技術力を向上させ、最近ではより革新的な発明・発見や開発に関しても徐々に貢献度を高めつつある。

第1.1―7表　1940年から1959年までの世界における主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者	国	分野
1940	DDT殺虫効果発見	ミュラー	スイス	ﾊﾞｲｵ・医学
1941	レーダ実用化	―	英	電気・電子
	チタン製造法（ｸﾛｰﾙ法）	クロール	独	材料・物性
1942	ヘリコプタ実用化	シコルスキー	米	航空・宇宙
	HO-2型電子顕微鏡完成	日立製作所	日	電気・電子
	ﾎﾟﾛﾋﾞﾆﾙｱﾙｺｰﾙ特許	桜田一郎	日	化学
1943	ﾀｰﾎﾞｼﾞｪｯﾄ機初飛行	グロスター社	英	航空・宇宙
	V2号製造	―	独	航空・宇宙
1944	ｽﾄﾚﾌﾟﾄﾏｲｼﾝ発見	ﾜｸｽﾏﾝ、ｼｬｳﾌﾞ	米	ﾊﾞｲｵ・医学
1945	塩素法による酸化チタン製法	ペチュカス	米	材料・物性
1946	最初の電子計算機ENIAC	ﾍﾟﾝｼﾙﾊﾞﾆｱ大	米	情報・計算機
1947	超音速実験飛行	―	米	航空・宇宙
	100KWｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ製作	エリコン社	スイス	機械
	ﾄﾖﾍﾟｯﾄSA乗用車生産開始	トヨタ自動車	日	機械
1948	トランジスタ発明	ｼｮｯｸﾚｰ、ﾊﾞｰﾃﾞｨｰら	米	電気・電子
1949	電気制御の工作機械	ﾒﾄﾛﾎﾟﾘﾀﾝ・ｳﾞｨｯｶｰｽ社	英	メカトロ
	コーチゾンの発見・合成	ﾍﾝﾁ、ｹﾝﾀﾞﾙ	米	ﾊﾞｲｵ・医学
	ナイロンの生産開始	東洋レーヨン	日	化学
1950	合金法によるpn接合	ホール	米	材料・物性
1951	最初の原子力発電	―	米	エネルギー
1952	ｼﾞｪｯﾄ旅客機の成層圏飛行	―	英	航空・宇宙
	ﾌｪﾉｰﾙ製造の工業化	スタンダード石油	米	化学
	フロンティア電子理論	福井謙一	日	材料・物性
	アミノ酸配列の決定法	赤堀四郎	日	ﾊﾞｲｵ・医学
1953	ｶﾗｰﾃﾚﾋﾞの実験放送	―	米	電気・電子
	低圧ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ合成法	チーグラー	独	化学
	小児麻痺ワクチン完成	ソーク	カナダ	ﾊﾞｲｵ・医学
	DNA2重らせんﾓﾃﾞﾙ提唱	ﾜﾄｿﾝ、ｸﾘｯｸ	米・英	ﾊﾞｲｵ・医学
1954	メーザ	タウンズ	米	電気・電子
	〃	ﾊﾞｿﾌ、ﾌﾟﾛﾎﾛﾌ	ソ連	電気・電子
1956	VTR	アンペックス社	米	電気・電子
	DNAの試験管内合成	コーンバーグ	米	ﾊﾞｲｵ・医学
1957	超電導理論	バーディーンら	米	材料・物性
	最初の人工衛星ｽﾌﾟｰﾄﾆｸ1号	―	ソ連	航空・宇宙
	エサキダイオード	江崎玲於奈	日	材料・物性
1958	ﾎﾛｸﾞﾗﾌｨｰ発明	ガボール	英	電気・電子
	最初の全ﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ計算機	IBM社	米	情報・計算機

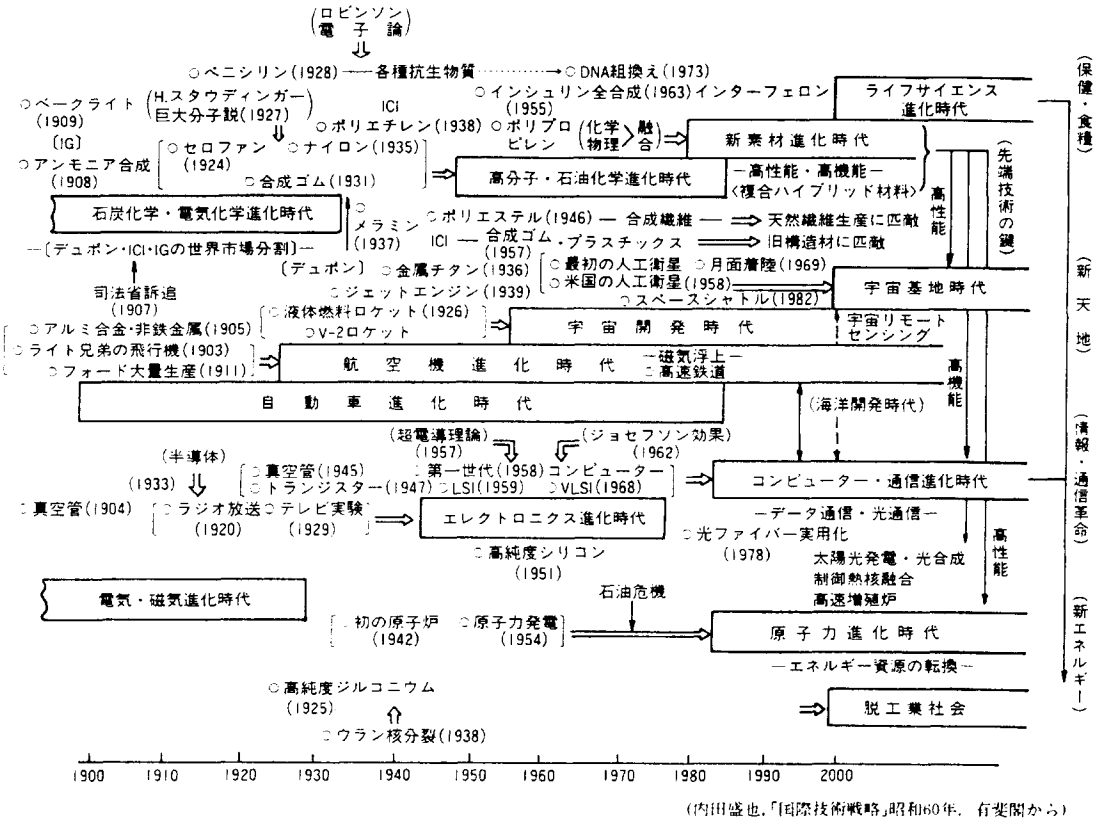
出所）「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p176～p195をもとに、MRI作成

第1.1－8表　1960年から1985年までの世界における主要な発明

年	発明／開発	発明／開発者	国	分野
1960	固体レーザ発明	メイマン	米	オプト
	世界初のトランジスタテレビ	ソニー社	日	電気・電子
1961	ｼﾘｺﾝﾌﾞﾚｰﾅ集積回路の開発	ノイス	米	電気・電子
	ボストーク1号地球一周	－	ソ連	航空・宇宙
	尿素法メラミン企業化	アライドケミカル社	米	化学
1962	超電導体のトンネル接合	ジョセフソン	英	材料・物性
	通信衛星ﾃﾙｽﾀｰ1号打ち上げ	－	米	航空・宇宙
	戦後初の国産旅客機YS-11飛行	－	日	航空
1964	MOS集積回路	TI社、GMI社	米	電気・電子
	東海道新幹線開通	－	日	鉄道
1965	m-RNAの遺伝情報解明	ニーレンバーグ	米	ﾊﾞｲｵ・医学
	初の宇宙遊泳	－	ソ連	航空・宇宙
	ｼｮｯﾄｷｰ・ｸﾗﾝﾌﾟﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ	TI社	米	電気・電子
	アジポニトリル企業化	モンサント社	米	化学
	RNA合成	春名一郎	日	ﾊﾞｲｵ・医学
1967	MNOSメモリ	ウォルマーク	米	電気・電子
	磁気バブルメモリ	ボベック	米	電気・電子
1968	MOS LSI試作	TI社	米	電気・電子
	ボーイング747完成	－	米	航空・宇宙
	超音速機TU-144初飛行	－	ソ連	航空・宇宙
	液晶ディスプレー	RCA社	米	電気・電子
	トリニトロン受像管	ソニー社	日	電気・電子
1969	アポロ11号月面軟着陸	－	米	航空・宇宙
	コンコルド1号機完成	－	英・仏	航空・宇宙
1970	DNA合成酵素発見	ﾃﾐﾝ、ﾎﾞﾙﾁﾓｱ	米	ﾊﾞｲｵ・医学
	世界初のLSI	電電公社	日	電気・電子
1972	ｱﾎﾟﾛ計画最後のｱﾎﾟﾛ17号	－	米	航空・宇宙
	4004マイクロプロセッサ	インテル社	米	電気・電子
1973	X線CTスキャナ開発	ｺｰﾏｯｸ、ﾊｳﾝｽﾌｨｰﾙﾄﾞ	米・英	ﾊﾞｲｵ・医学
1975	ウランのレーザ濃縮	－	米	エネルギー
1976	初の実用衛星「うめ」打上げ	－	日	航空・宇宙
	超LSI技術研究組合設立	－	日	電気・電子
1978	大腸菌によるｲﾝｼｭﾘﾝ創製	ギルバートら	米	ﾊﾞｲｵ・医学
	自動焦点カメラSX70	ポラロイド社	米	メカトロ
1980	有機物質で超電導実現	ジェローム	仏	材料・物性
	遺伝子組換によるｲﾝﾀｰﾌｪﾛﾝ生産	バイオジン社	米	ﾊﾞｲｵ・医学
1981	ｽﾍﾟｰｽｼｬﾄﾙ1号機飛行成功	－	米	航空・宇宙
	インターフェロンの大量生産法	ジェネンテック社	米	ﾊﾞｲｵ・医学
	CCDカメラ開発	ソニー社	日	電気・電子
1982	ICOT発足	－	日	情報・計算機
1983	遺伝子組換によるﾏﾗﾘｱﾜｸﾁﾝ量産	ニューヨーク大	米	ﾊﾞｲｵ・医学
1984	微生物による導電性ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ合成	ICI社	英	ﾊﾞｲｵ・医学
1985	STOL実験機「飛鳥」初飛行	－	日	航空・宇宙
	世界初の3次元回路素子開発	三菱電機	日	電気・電子
	バイオチップ・モデル提唱	軽部征夫	日	ﾊﾞｲｵ・医学
	DNAの直接観察（世界初）	京大、日本電子	日	ﾊﾞｲｵ・医学

出所）「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989、p176～p195をもとに、MRI作成

なお参考までに、帝人㈱の内田顧問による今世紀から来世紀にかけた産業技術の展開図を以下に示す。



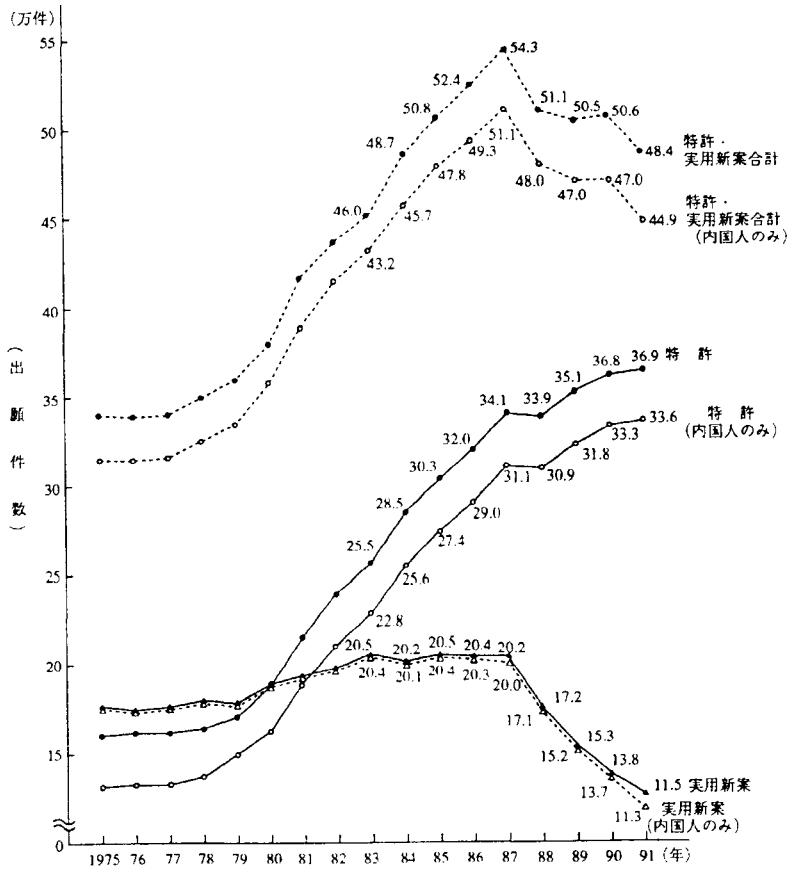
第1.1—15図　先端科学技術の進化と21世紀の新産業分野

出所）　”産業国際化と知的所有権”、「研究　技術　計画」Vol.3, No.1 1988、p5

②　統計からみた最近の特許動向

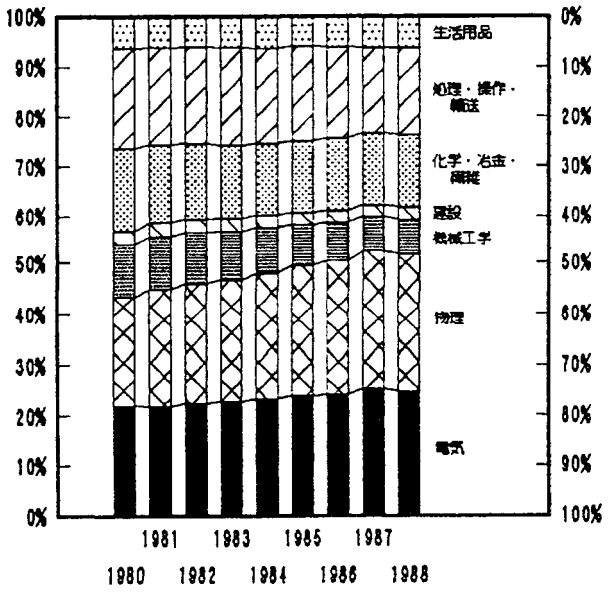
下図は1975年から1991年に至る我が国特許庁への特許・実用新案の出願件数を示すものである。1979年（昭和54年）頃から特許の出願件数は急激に増加したが、1987年以降は特許庁が実施している出願の最適化施策の影響により伸びが鈍化し、最近は頭打ち傾向にある。なお実用新案の場合は1987年以降出願件数が激減している。

我が国における特許出願件数を技術分野（IPC：国際特許分類）別にみると、物理分野（測定・試験、光学、写真・ﾎﾛｸﾞﾗﾌｨｰ、時計、制御、計数、信号、楽器・音響、情報記憶、及び原子核工学）、及び電気分野（電気素子、電力、電子回路、電気通信、及びX線・ﾌﾟﾗｽﾞﾏ等）のシェアが高く、特に物理分野の伸びが大きい。



第1.1－16図　我が国における特許・実用新案の出願件数

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p 28

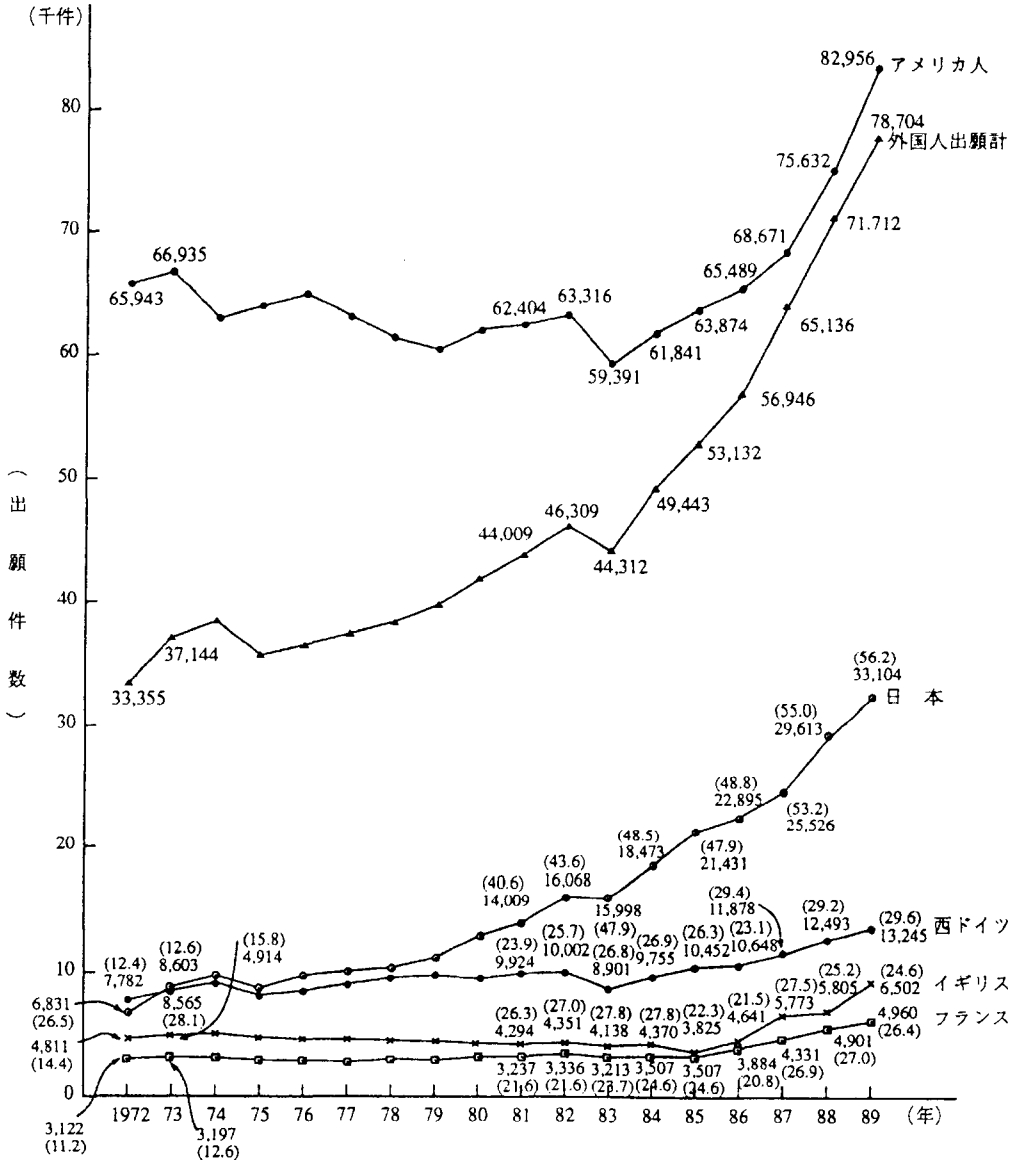


第1.1－17図　我が国における分野別特許出願件数（構成比）の推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p243

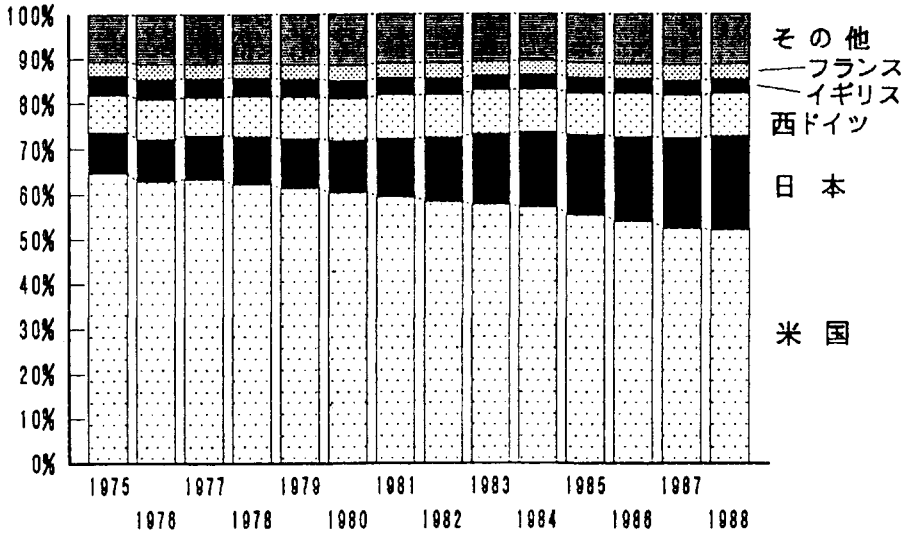
一方我が国の米国に対する特許出願件数は1980年代に急増しており、1989年現在で米国人に次いで第2位（米国人件数の約4割）に位置し、外国人出願の42%を占めている。また下図に示すように特許登録件数のシェアも年々増えている。特に内燃エンジンの特許では、日本のシェアは1975年の16.7%から1986年には43.9%まで増加しており、この期間に米国のシェアが大きく減少している（1975年に53.7%、1986年には28.2%）のと対照的である。そのほか、日本のシェアは情報記憶、光技術、半導体などの技術分野で高い。また特許の被引用度（被引用回数のシェア：当該国の特許が他の特許から引用される回数の国別シェア）は登録件数を上回る勢いで増加しており（米国は減少）、米国において日本が技術的に大きな地位を占めつつあることを示している。

なお、米国人の米国特許登録庁に対する特許出願件数は1983年までは微減傾向にあったが、1983年以降急激な増加をみせており、最近の米国の知的所有権重視戦略、及び製造業復活の動きと符号する。



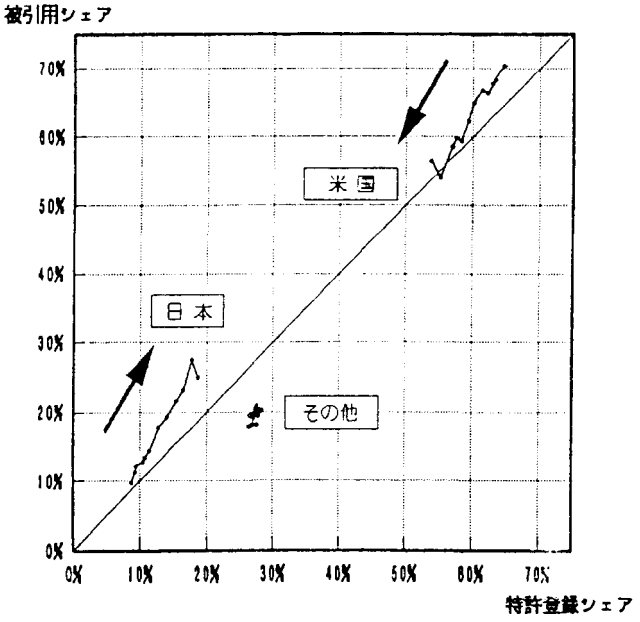
第1.1—18図　米国における各国からの特許出願件数の推移

出所）「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課、p31



第1.1－19図　米国における特許登録件数シェアの推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p251



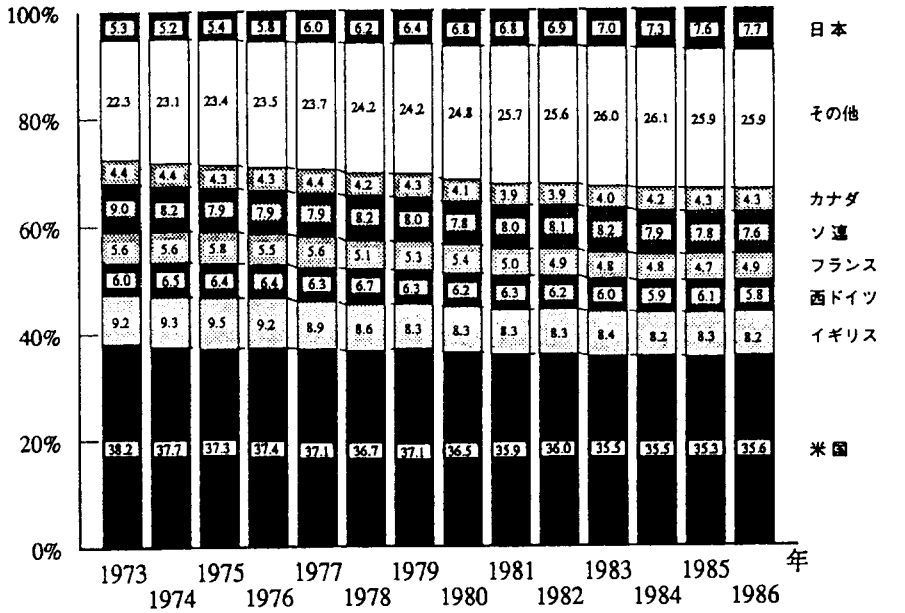
第1.1—20図　米国における特許の被引用度の推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p251

なお欧州への出願に関しては、1978年から欧州特許出願（EPC出願）の受付が始まり、以降欧州特許庁（EPO）への出願も対米出願と同じように急増し、1989年で対米出願件数の約1/3の件数をEPOに出願している。

(3) 論文

米国のCHI（Computer Horizons, Inc.）社では世界の学術論文に関するデータベースを作成しており、下図はこのデータベースに基づく論文生産数の国別シェアの推移を示すものである。本図によれば我が国の論文生産数シェアは1973年以降確実に高まってきており、1986年現在で米・英に次いで世界第3位となっている。これと対照的に欧米主要国（米、英、ソ、独、仏）のシェアは減少している。

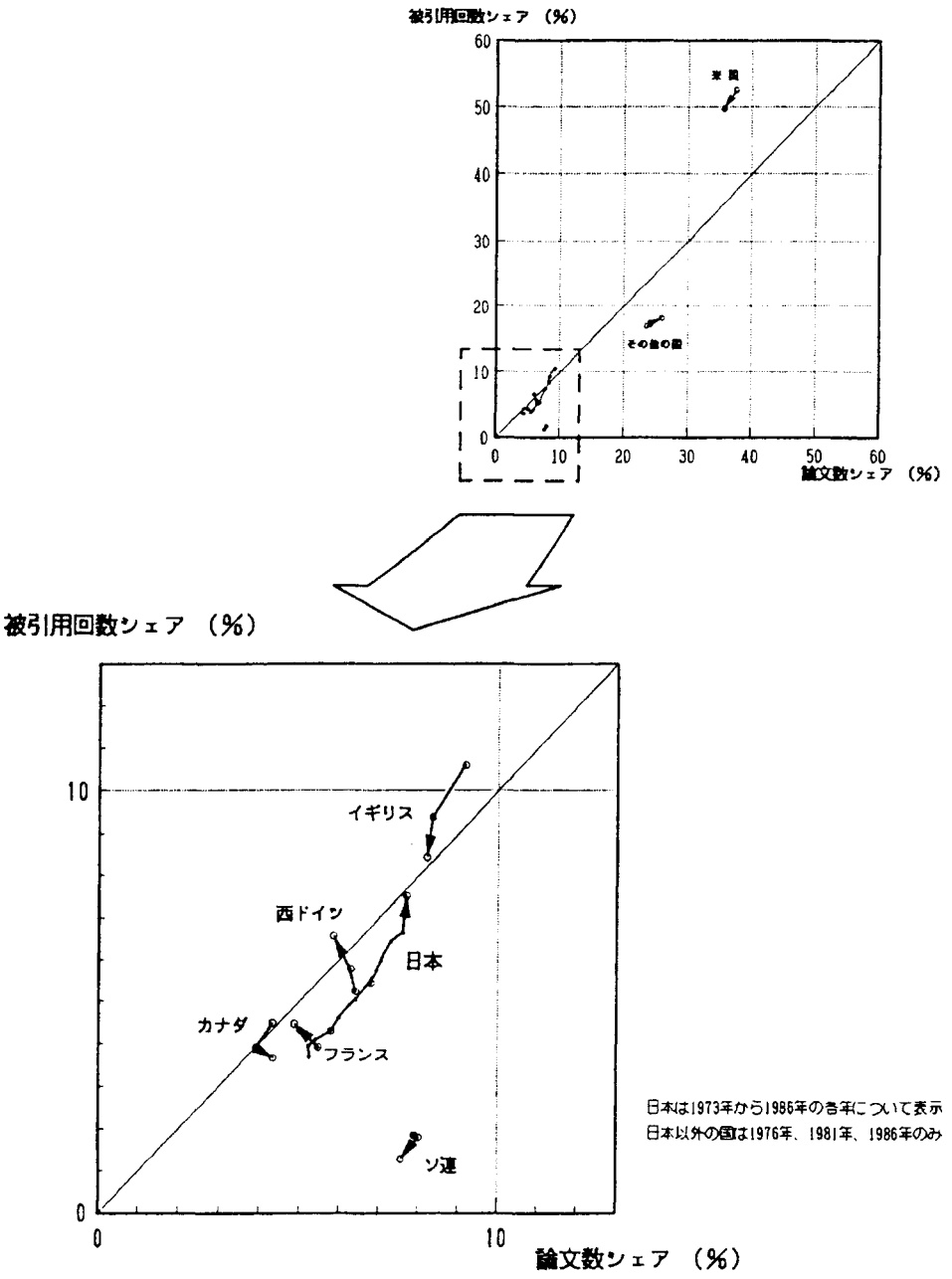


資料：Computer Horizons, Inc., "Science & Engineering Literature Data Base 1989."

第1.1—21図　論文生産数の国別シェアの推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p227

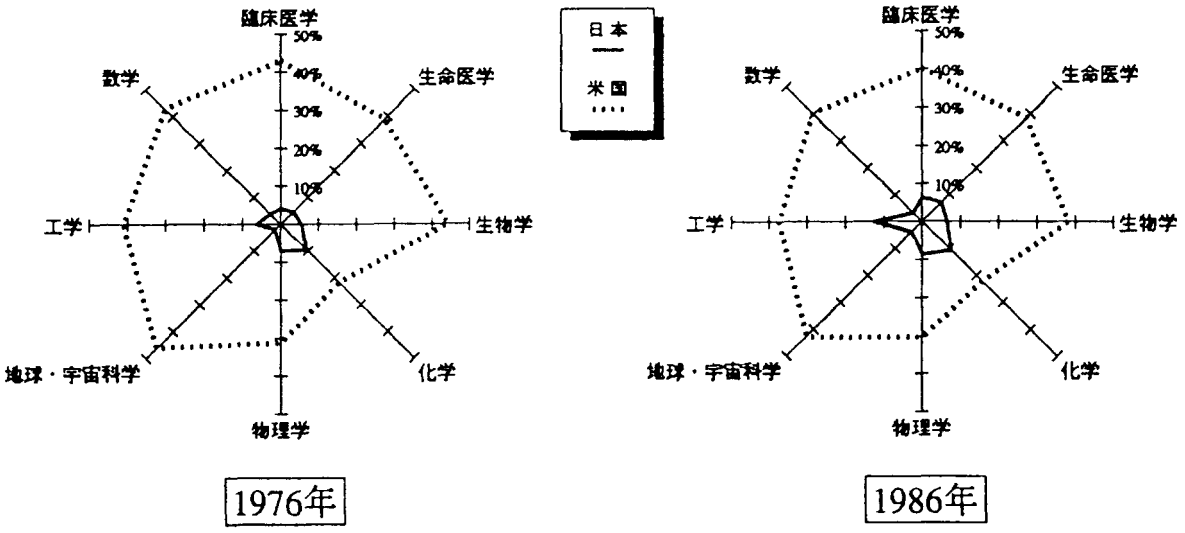
一方論文の被引用回数の国別シェアをみてみると、米国のシェアが圧倒的に高い（50%程度）が減少傾向にある。その他の主要国は3～10%のシェアであり、英国は減少、ドイツは増加傾向にあるが、それ以上に日本のシェアの急成長が目立つ。また論文数シェアに対する被引用回数シェアの比率（論文の影響度、ないし質の高さを示す）は米国、英国、ドイツが高いが、日本も上昇傾向にあり、1986年ではほぼ1に達している。これは世界的にみた日本の論文の質ないし影響度が年々高まっていること、及びそれが1986年時点では世界のほぼ平均レベルに達していることを示している。



第1.1—22図　主要国の論文被引用度の推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p230

日米の論文数を分野別にみると、我が国のシェアは全体としては米国に大きく劣るものの、化学、物理、工学では相対的に（米国に比べて）高いシェアとなっており、一方数学、地球・宇宙科学、医学、生物学では相対的に低いシェアとなっている。一方1986年の我が国の論文生産数の分野別シェアを1976年と比べると、工学分野の伸びが著しく、また医学・生物学分野の伸びも平均を上回っているが、数学分野ではシェアが減少している。

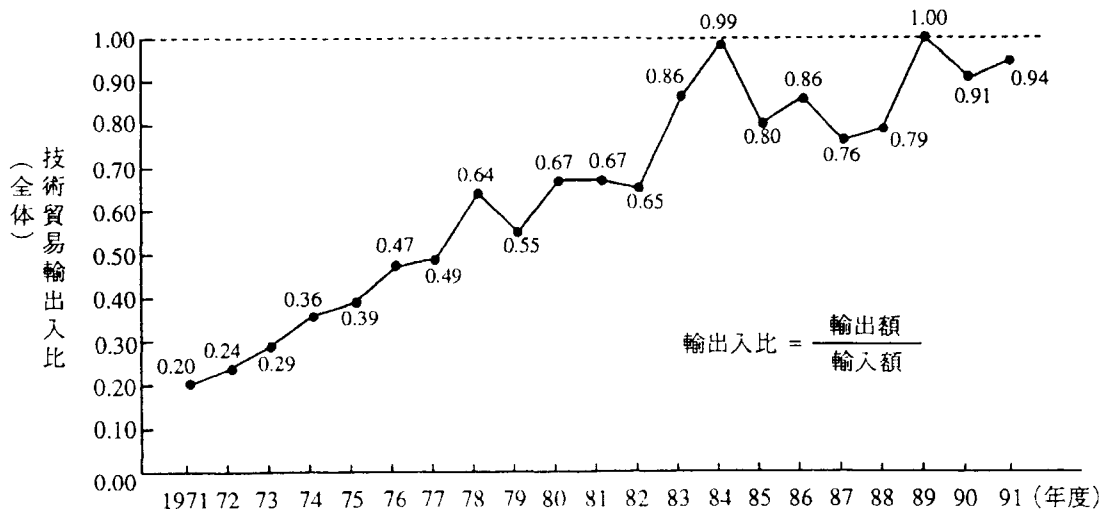


第1.1－23図　日米の各分野における論文数シェアの推移

出所）「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所、p227

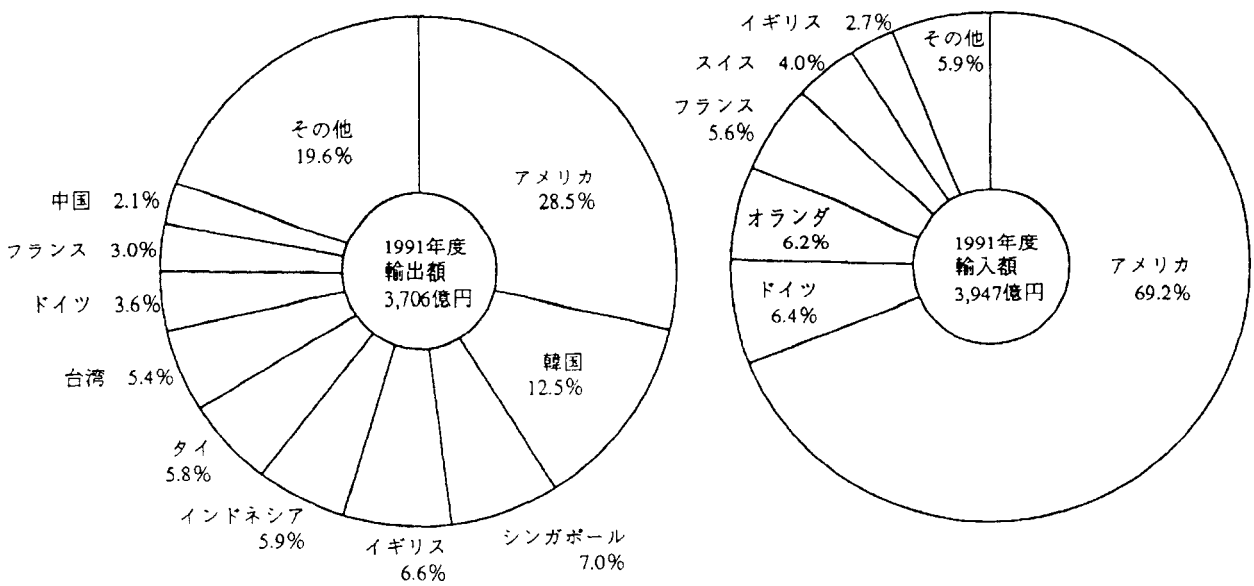
(4) 技術貿易

総務庁の「科学技術研究調査報告」によると、我が国の外国貿易額は輸出入ともに増加傾向にあるが、依然として入超ではあるものの、輸出入比は徐々に1に近付いている（下図参照）。輸入相手国は圧倒的に米国が多く（1991年度の構成比：69.2%）、これにドイツ（6.4%）、オランダ（6.2%）、フランス（5.6%）、スイス（4.0%）、英国（2.7%）等の欧州諸国が続く。輸出相手国も米国がトップ（28.5%）であり、これに韓国（12.5%）、シンガポール（7.0%）、英国（6.6%）、インドネシア（5.9%）、タイ（5.8%）、台湾（5.4%）等のアジア諸国が続く。結果として欧米に対しては大幅入超、アジア諸国に対しては大幅出超という状況が続いている。



第1.1—24図　技術輸出入比の推移（総務庁統計）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標」、1991年版、工業技術院技術調査課、p33



第1.1—25図　我が国の技術貿易の国別内訳（総務庁統計）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標」、1991年版、工業技術院技術調査課、p34

産業別にみると、技術輸出額の高い産業は自動車工業（1991年度：995億円）、通信・電子・電気計測器工業（735億円）、電気機械器具工業（323億円）、医薬品工業（285億円）、総合化学・化学繊維工業（249億円）であり、技術輸入額の高い産業は通信・電子・電気計測器工業（1296億円）、その他輸送機械工業（航空機等）（485億円）、機械工業（332億円）、電気機械器具工業（317億円）、医薬品工業（292億円）、総合化学・化学繊維工業（251億円）である。

輸出額を輸入額で割った輸出入比でみると、輸出入比の低い（入超）産業は、航空機等その他輸送機械工業（1991年度：0.05）、石油製品・石炭製品工業（0.07）、その他化学工業（0.26）、非鉄金属工業（0.40）、機械工業（0.46）、通信・電子・電気計測器工業（0.57）であり、一方輸出入比の高い（出超）産業は自動車工業（12.40）、パルプ・紙工業（2.69）、窯業（2.44）、鉄鋼業（1.77）、金属製品工業（1.17）であり、これらの産業の国際的にみた相対的な技術力の高さを示している。

以下は地域別に技術輸出入額の多い上位３産業を示したものである。

（技術輸出）

・アジアへの輸出の多い産業　：通信・電子等、自動車、電気機械器具
・北米（主として米国）への輸出の多い産業：自動車、医薬品、通信・電子等
・欧州への輸出の多い産業　：通信・電子等、自動車、医薬品

（技術輸入）

・北米からの輸入の多い産業　：通信・電子等、その他輸送機械、機械
・欧州からの輸入の多い産業　：通信・電子等、医薬品、総合化学等

注）通信・電子等　＝通信・電子・電気計測器工業
　その他輸送機械＝自動車以外の輸送機械工業（航空機等）
　総合化学等　　＝総合化学・化学繊維

外為法をベースとした科学技術庁科学技術政策研究所「外国技術導入の動向分析」によれば、技術分野別の技術導入件数は電気分野が最も多く、かつ増加傾向にある。これに次ぐのが機械、化学、金属であるが、これらの技術分野の導入件数は横ばいで、全体に占める構成比は減少傾向にある。

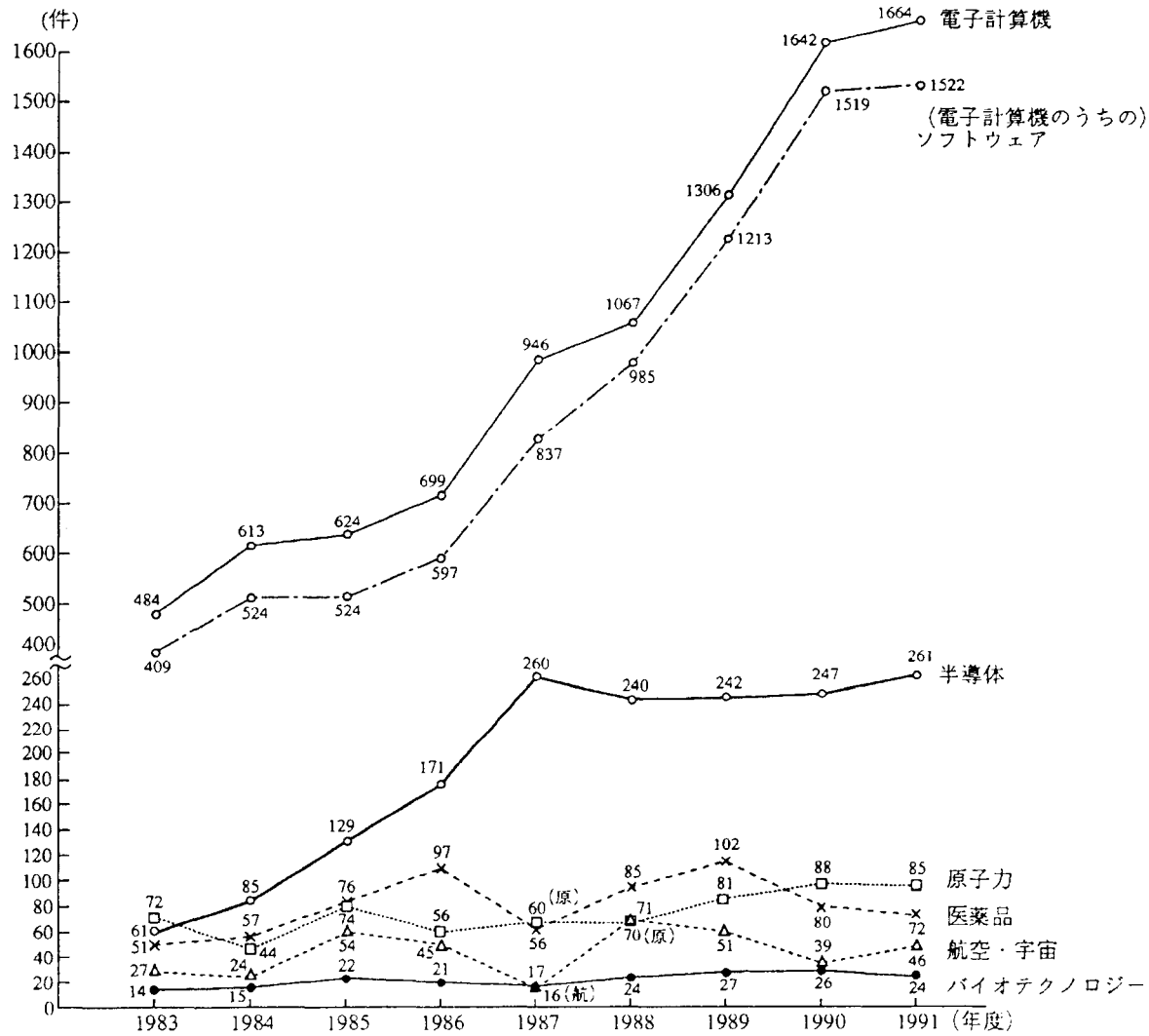
先端技術分野では、電子計算機のソフトウェアの導入件数が最も多く、1991年度において全件数の47.9%を占め、かつ増加傾向にある。これに次ぐのが半導体であり、1987年までは急速に増加していたが、1987年以降は横ばい傾向にある。これに電子計算機のハードウェア、原子力、医薬品、航空・宇宙、バイオテクノロジーが続く。これらの技術分野は日本が相対的に力の弱い分野とみることができる。

注）　総務庁統計と日銀統計の違い

技術貿易に関する統計は、上で挙げた総務庁統計と科技庁統計（技術導入件数のみ）の他に、日銀による「国際収支統計月報」があり、総務庁統計と日銀統計のデータは大幅にくい違っている。日銀統計の技術輸入額は総務庁統計の約2.2倍にも達し、技術輸出額では総務庁統計の約1.1倍である。この結果、総務庁統計による輸出入比（輸出額/輸入額）が0.94（1991年度）とわずかな入超であるのに対し、日銀統計によれば輸出入比は0.46（1991年度）と大幅な入超になっている。

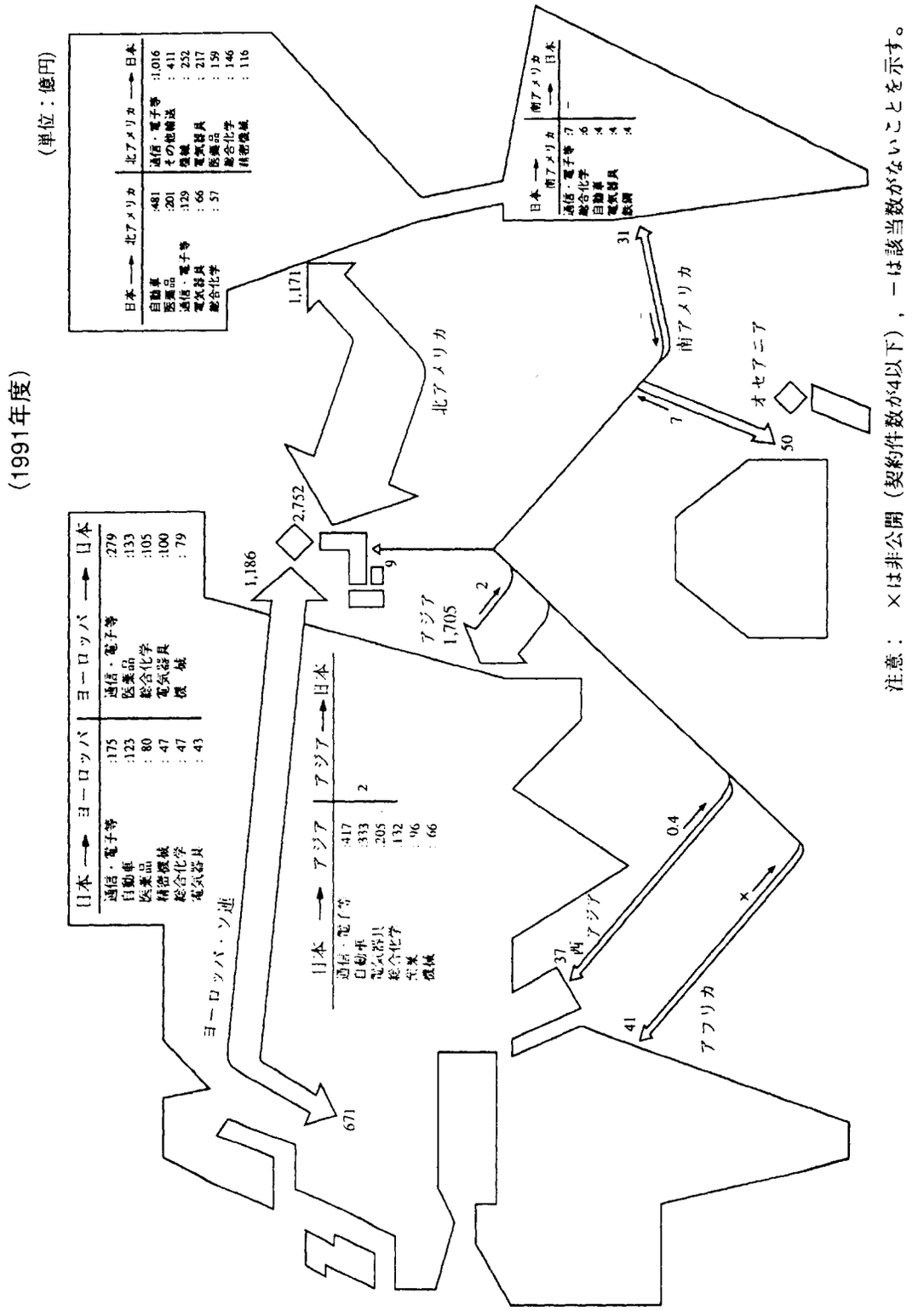
これは、総務庁統計は第1・2次産業を中心とする資本金500万円以上の企業及び一部の特殊法人に対する全ての技術交流（特許、ノウハウ、技術指導等の提供・受入）に関するアンケート調査を基にした推定値であるのに対し、日銀統計は外為法第15条に基づき300万円を超える全ての外国為替取引のうち送金目的が「特許権使用料等（特許、意匠・商標、ノウハウ、技術指導等）の支払・受取」であるものを集計したものである、という違いによる。

日銀統計の輸入額が総務庁統計を大幅に上回るのは、主として活発に技術導入を行っている百貨店や銀行等の第3次産業や特殊法人研究機関が含まれていること、及び全企業・全取引（ただし300万円以上）を対象にしていることによるものと推測され、にもかかわらず輸出額が両統計でほぼ同じなのは、第3次産業等は技術輸出をさほど行っていないと想像されるため総務庁統計の穴が輸入ほど多くないこと、さらにはこの穴をプラント輸出に伴う技術取引契約額（日銀統計では特許権使用料としては集計されていない）が埋めていることによるものと推測される。



第1.1—26図　先端技術分野の技術導入件数の推移（科技庁統計）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標」、1991年版、工業技術院技術調査課、p44



第1.1－27図　我が国の技術貿易世界地図（総務庁統計より）

出所）「我が国の研究開発活動主要指標」、1991年版、工業技術院技術調査課、p45

(5) テクノストック

テクノストックは "Technological Knowledge Capital"、" R&D Capital Stock"、「技術知識ストック」とも呼ばれ、労働、資本、エネルギー、原材料等の生産要素のうち「技術」の水準を表すものとして、米国で考案された概念である。

テクノストックは、以下の前提に基づき、実質研究開発投資額をある一定のタイムラグを伴って積算し、毎年ある一定の減耗率（技術陳腐化率）で減耗させることにより計算する。タイムラグ及び陳腐化率は恣意的に設定するか、またはアンケート/ヒアリング調査等による実証データに基づいて設定する。

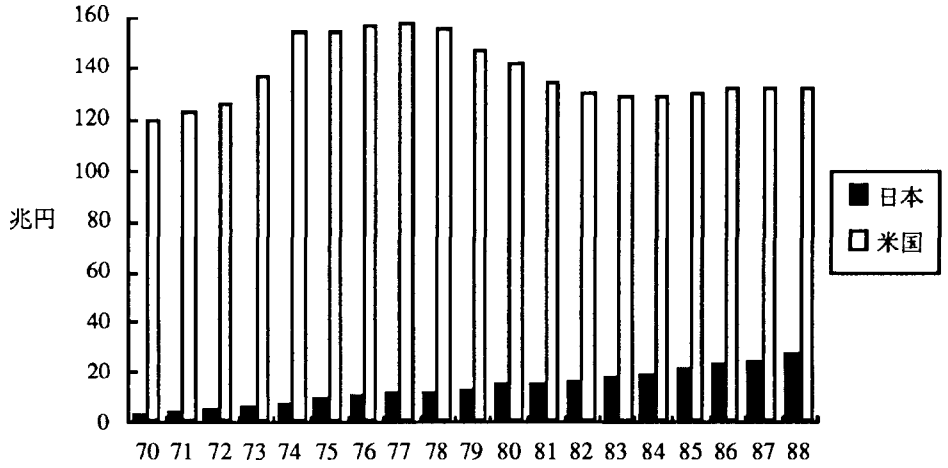
① 各年の研究開発努力量は各年の研究開発投資額に比例する。

② 各年の研究開発努力はある一定のタイムラグを伴って全て何等かの形で蓄積される。

③ この蓄積量は毎年ある一定の率で減耗（陳腐化）する。

研究開発費は優れた研究開発指標の一つだが、単年度の研究開発努力を示すのみで、国ないし企業の保有する技術力（ポテンシャル）をそれで測ることはできない。テクノストックは研究開発費のこうした欠点をカバーするものであり、研究開発費をストック化することにより、国ないし企業の技術力を投入（Input）の側から定量的に測るための一つの便法といえる。ただし、テクノストックは必ずしも真の技術力を示しているとは限らない。当然のことながら、研究開発にいくらお金を使ったかということと、研究開発成果の質がどれくらい優れているか、ということはミクロにみれば必ずしも比例しない。しかしながら、マクロにみれば研究開発費が多いほど多くの成果が出るという仮定は概ね妥当と考えられる。逆に言えばその仮説の上でテクノストック分析は成り立っており、テクノストックがTechno-Econometricsの手法として確立するためには今後の仮説検証の積み重ねが必要であろう。

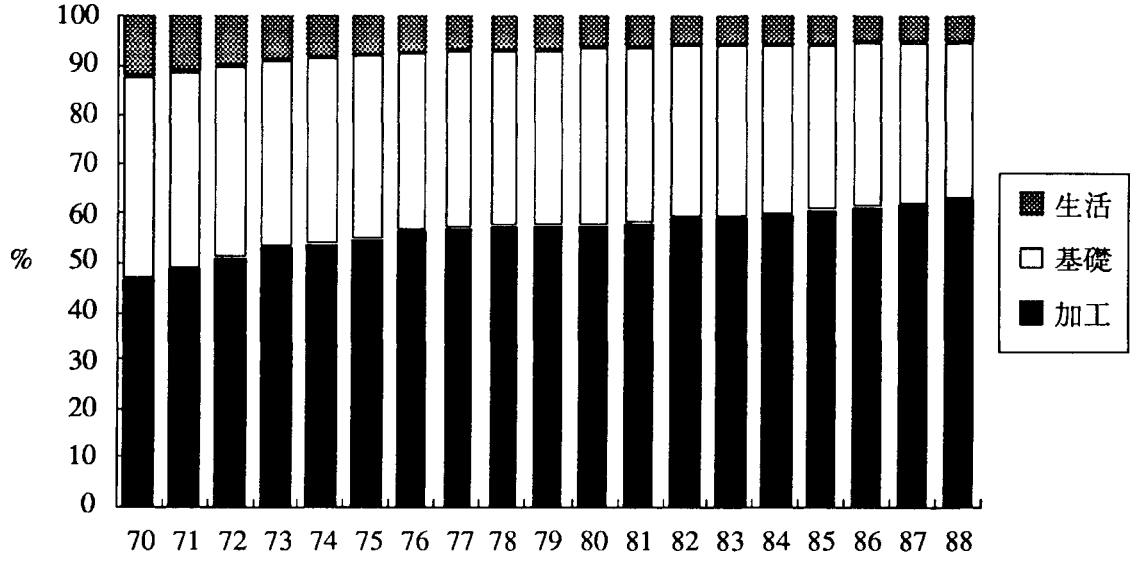
以下に三菱総合研究所が過去に行ったテクノストックの計測結果を示す。いずれも1985年基準の実質額であり、ドルから円の換算にはOECDの購買力平価を用いている。またCORは生産に直接結び付くテクノストック、NCORは純粋基礎研究による科学蓄積型のテクノストックを表す。



第1.1—28図　日米の生産直結型テクノストックの推移

出所）「日米ﾃｸﾉｽﾄｯｸの定量的比較に関する調査研究」、機械振興協会－三菱総合研究所、1991、p15

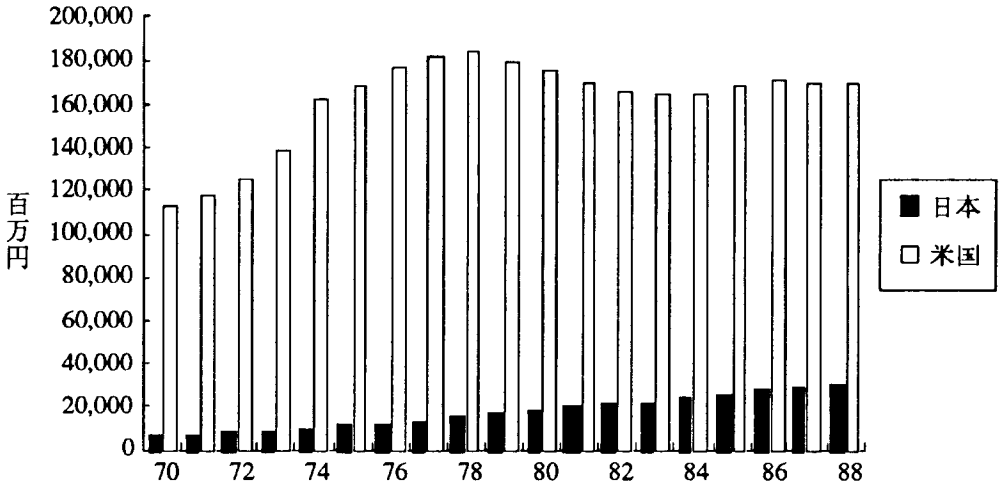
・日本のテクノストック（COR）は1970年においては約3.9兆円（1985年基準実質価格）であったが、年率平均11.5%で急成長を続け（特に最近数年間の伸びが著しい）、1988年には約27.6兆円となった。
・米国のテクノストックは1970年の約4670億USドル（1985年実質価格）から緩やかに成長し、1977～1981年において一時停滞がみられたものの、その後再び成長し、1988年には約6416億ドルとなった。
・一方米国のテクノストックを購買力平価(Purchasing Power Parity)によって円換算すると、1970年の119.6兆円から1974年にかけて急成長し、その後1978年まで停滞した後、1983年まで低下を続け、その後は微増して1988年には132.8兆円となった。
・この結果、米国と日本のテクノストックの比率（円ベース）をみると、1970年には約31倍であった格差が急速に縮まり、1988年には約5倍となっている。



第1.1－29図　日本の生産直結型テクノストックの業種別シェアの推移

出所）「日米ﾃｸﾉｽﾄｯｸの定量的比較に関する調査研究」、機械振興協会－三菱総合研究所、1991、p16

・日本の加工組立、基礎素材、生活関連産業のテクノストック（COR）のシェアは1970年においてそれぞれ47%,41%,13%であり、加工組立と基礎素材産業で日本のテクノストックをほぼ二分していたが、加工組立産業のテクノストックが年率13.4%の急　激な成長を示したため、1988年におけるシェアは63%、32%、5%となった。
・一方米国の加工組立、基礎素材、生活関連産業のテクノストックのシェアは1970年においてそれぞれ81%、17%、2%であり、加工組立産業が米国のテクノストックの大半を占めていたが、その後加工組立産業のシェアは若干低下し、1988年における業種別シェアはそれぞれ76%、21%、3%となった。
・日本と米国を比較すると、加工組立産業のシェア（1988年）は米国の方が高い（日本の約1.2倍）。一方金額伸び率の順位は日本が加工＞基礎＞生活であるのに対し、米国は生活＞基礎＞加工となっている。この結果日米の加工組立産業のシェアは年々接近している。



第1.1－30図　日米の科学蓄積型テクノストックの推移

出所）「日米ﾃｸﾉｽﾄｯｸの定量的比較に関する調査研究」、機械振興協会－三菱総合研究所、1991、p42

・日本のNCOR（1985年実質価格）は1970年においては約7,631億円であったが、年平均約8.3%で急成長を続け、1988年には約3兆1973億円となった。ただしこの伸び率はCOR（11.5%）よりも低く、CORに対する比率は1970年の約1/5.1から1988　年には約1/8.6とむしろ減少した。
・米国のNCOR（P.P.P.による円換算値）は、1970年の約11兆4294億円から1978年にかけて急成長し、その後1983年まで低下を続け、その後は微増して1988年には17兆969億円となった。この傾向はCORの場合とよく似ているが、ピーク時期はCORよりも3年前後遅れている。
・この結果、米国と日本のNCORの相対比は、1970年の約15倍から1988年には約5.3倍にまで縮小した。1988年の倍率はCORと同程度であるが、その縮小スピード（米国と日本の接近速度）はCORの方がNCORより速い。

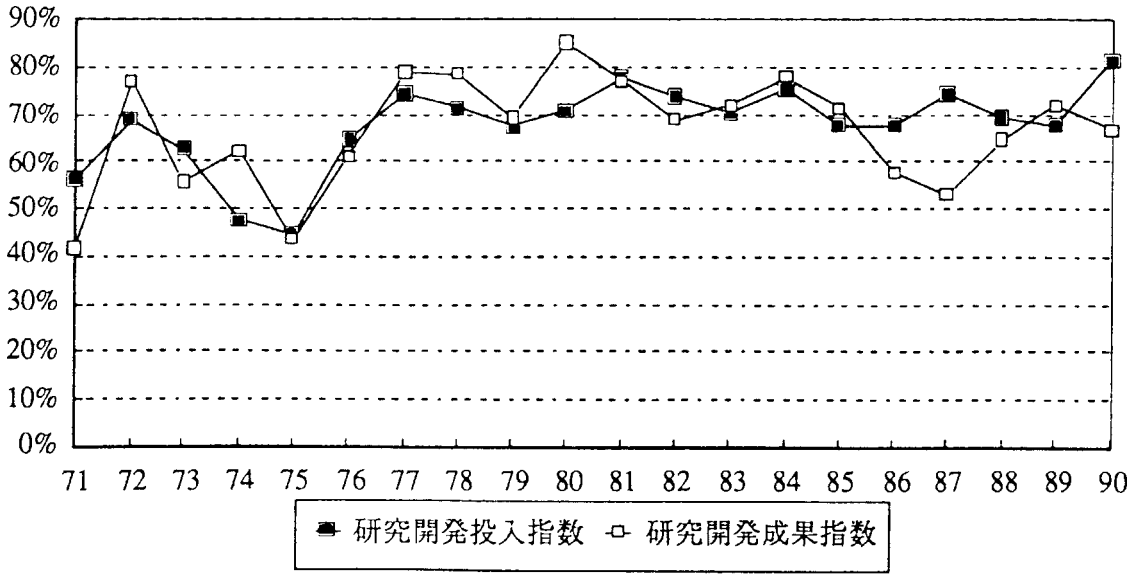
以上をまとめると、日本のテクノストックは1970年代から80年代にかけて急速に成長を続けているが、依然として米国との格差は約1/5と大きいこと、業種別には加工組立産業がシェア・伸びともに大きいこと、科学蓄積型テクノストックの伸びが生産直結型テクノストックよりも遅い、ということが明らかとなった。

また、三菱総合研究所の同研究ではテクノストックを生産関数に組み込み、研究開発の投資効果の推移を分析している。これによれば、70～80年代における日本の製造業の研究開発の限界収益率は米国のそれよりもかなり高く、特に加工組立産業が高いが、日本の製造業全体の80年代の収益率は70年代より低下している可能性が指摘されている。

(6) 研究開発動向指数

R&D-D.I.（Diffusion Index）は柳沼、藤井、菊地ら（「研究開発の統計指標の利用に関する調査研究報告書」、機械振興協会～全国統計協会連合会、平成3年4月）によって初めて提唱された手法で、米国のNBERが開発し日本の経済企画庁等が景気動向指数等に用いているD.I.（Diffusion Index）の手法を、研究開発動向に応用したものである。R&D-D.I.は研究開発に関連する様々な指標の前期からの増減を総合して正規化したもので、国際比較には向かないが、研究開発の全体的な時系列的動向を様々な観点から見るのに便利な指標である。R&D-D.I.が0%の時は全ての原指標が前年を下回ったことを、50%の時は上昇した指標と下降した指標が半々であったことを、100%の時は全ての指標が前年を上回ったことを意味する。なおR&D-D.I.を累積したものを累積R&D-D.I.と呼ぶ。

以下に、三菱総合研究所が上記研究を引き継いで平成3年度に行った研究の結果を示す。



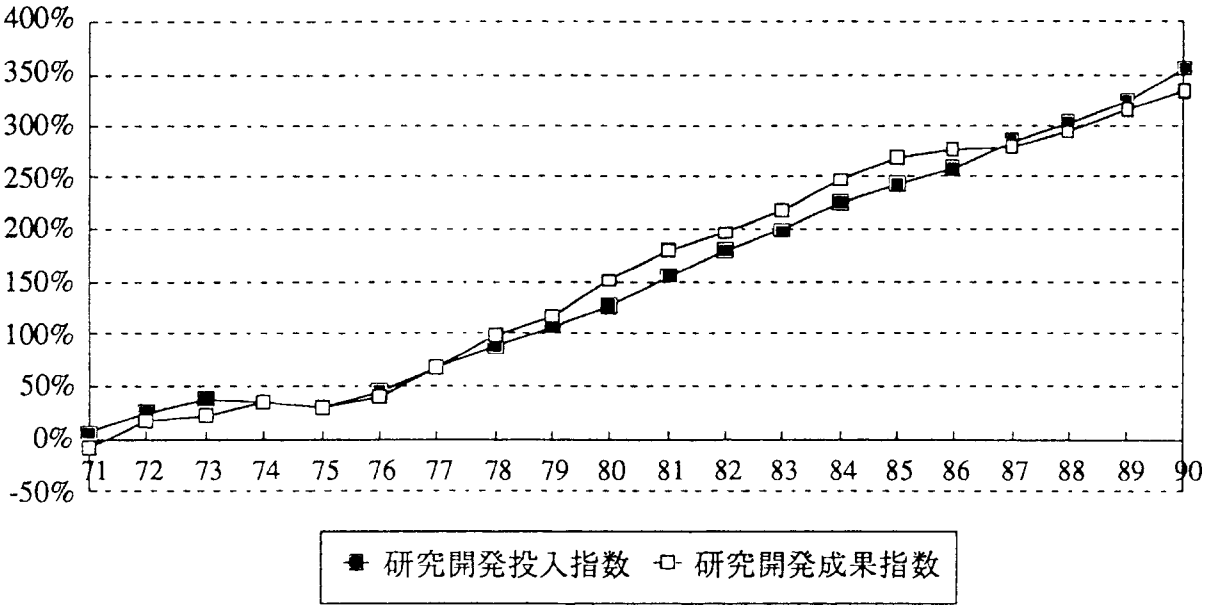
第1.1—31図　R&D-D.I.（研究開発投入指数、成果指数）

出所）「研究開発活動が経済活動に及ぼす影響の指標化に関する調査研究」、
（財）産業研究所～三菱総合研究所、平成4年3月、p19

研究開発への投入に関する前年と比べての総合的な動向を示す「研究開発投入指数（D.I.）」は、第1次オイルショックの1974年及びその直後の1975年で50%を切った（下降指標の数＞上昇指標の数）ものの、それ以外の年は60～80%前後で堅調に推移している。これは日本（研究費の7～8割は企業）の研究開発努力が、第1次オイルショックの時以外は順調に伸びていることを示している。

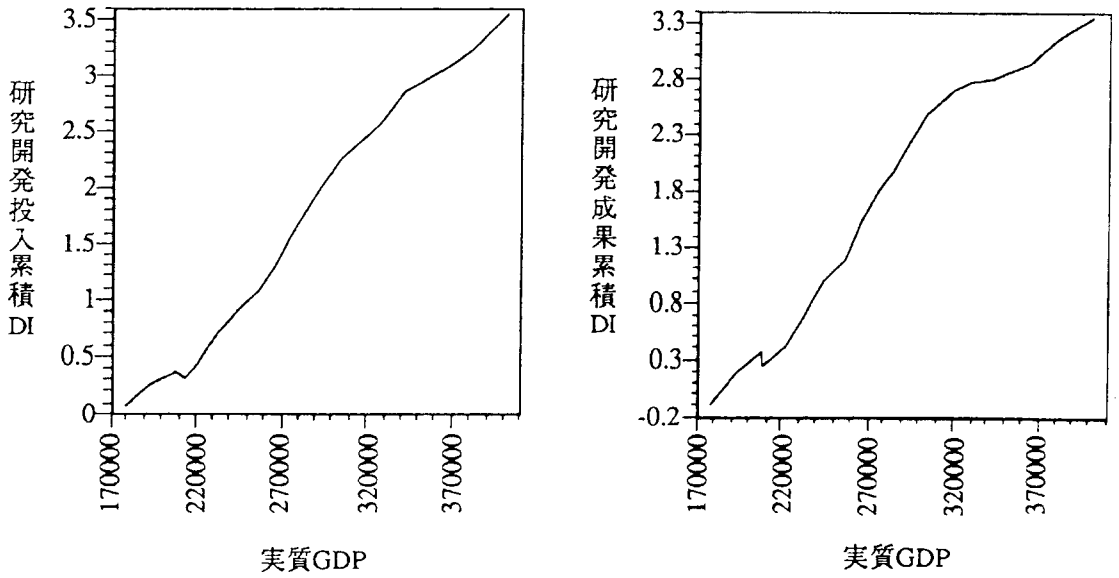
一方研究開発の成果に関する前年と比べての総合的な動向を示す「研究開発成果指数（D.I.）」は、第1次オイルショック直後の1975年に50%を割ったものの、その後1985年までは60～90%で堅調に推移したが、円高不況（1985～86年）後の1986、87年には60%を割り、その後は再び60%前後に回復している。研究開発の成果が1986年以降停滞したのは、次の理由が考えられる。

・日本の技術水準が国際的にみて高い水準に達した、以前より困難な研究開発に取り組まざるを得なくなったこと
・欧米におけるテクノ・ナショナリズムの擡頭
・電子技術等における画期的なブレークスルーや新しい製品コンセプトが少なくなってきていること



第1.1－32図　累積R&D-D.I.（研究開発投入指数、成果指数）

出所）「研究開発活動が経済活動に及ぼす影響の指標化に関する調査研究」、
（財）産業研究所～三菱総合研究所、平成4年3月、p20



第1.1－33図　投入/成果指数（累積D.I.）と実質GDPの関係

出所）「研究開発活動が経済活動に及ぼす影響の指標化に関する調査研究」、
（財）産業研究所～三菱総合研究所、平成4年3月、p30

一方、実質GDPと投入と成果に関する累積D.I.の推移を比べると、投入累積指数と実質GDPは比較的きれいな比例関係にあるのに対し、成果累積指数は円高不況の1985年以降実質GDPの伸びに比べて停滞しており、1985年以降（1990年まで）経済成長に対して技術（＝研究開発成果）以外の要因（＝バブル等）が高まっていたことを示唆する。

(7) 技術水準

(1)～(6)では研究開発費、特許、論文、技術貿易等の公開統計データ及びテクノストック等の加工データを基に我が国の動向及び日米欧の比較を行ったが、ここでは、より技術的側面に着目した総合的かつ定性的（主観的）な技術力比較に関する既存分析結果を紹介する。

① 米国国防総省の1992年「基幹技術計画」

米国国防総省は、1992年7月に「基幹技術計画」（Key Technology Plan）報告書を公表した。この計画は国防権限法に基づくもので、1989年、1990年、1991年と毎年発表されてきた「重要技術プラン」（Critical Technologies Plan）のいわば1992年度版といえる。本計画はポスト冷戦時代の最初の包括的科学技術戦略であり、国防科学技術戦略における重点事項の目標を達成するのに必要な技術を「基幹技術」（Key Technology）と定義し、11の基幹技術を選定し、併せてそれぞれの基幹技術に関する米国と海外主要国（日本、NATO諸国、ソ連、その他）との相対的な技術力比較（4段階評価）を行っている。

第1.1－9表に11基盤技術の内容を、第1.1－10表に技術力比較の結果を示す。表中の数字が大きいほど、当該国が米国に比べて技術力が高いことを表している。

本表によると、日本は特に以下の分野において技術力が高い（評価点：4）と評価されている。

・ソフトウェア及びソフトウェア・エンジニアリング（1991年重要技術での評価点：2）
・レーダー・センサー技術（同：3）
・通信制御技術
・マイクロ・エレクトロニクス（同：4）
・電子、磁気、及び光学材料

ソフトウェアの技術力が高いと評価されている点は、我々の一般認識とやや異なるところであるが、1991年「重要技術」と比べると2から4に評価点を上げており、本分野での日本の技術力の高まりを示す一つの例といえる。

一方、日本が全ての面で遅れている（評価点：1）と評価されている分野は「プログラマブル無線」の分野であり、また全般的に遅れているが特定分野で貢献の可能性あり（評価：2）と評価されている分野は以下のとおりである。

・スカラー並列高性能コンピュータ・システム
・リアルタイム及び無停止型システム
・高信頼性ソフトウェア
・電磁気及び装甲防護材料
・高エネルギー密度材料
・コンデンサ、誘導器、スイッチ、高電圧回転装置
・航空機用推進技術
・エネルギー変換及び発電
・設計統合及び分析
・設計及びライフサイクル支援
・人的資源及び訓練

第1.1—9表　11の「基幹技術」（国防総省、1992）

分　野	内　容
1．コンピュータ	ハードウェア、アーキテクチャ、ネットワーク及び計算方法の改良により計算及び通信能力を大幅に改善された高性能コンピューティングシステム（オペレーティングシステムを含む）
2．ソフトウェア	信頼性のあるアプリケーション・ソフトウェア、時宜を得た作成、メンテナンス及び改良を容易にするツールと手法。分散処理用ソフトウェア、データベースソフトウェア、人工知能及びニューラルネットを含む
3．センサー	アクティブ・センサー（レーダー、ソナーのような発信器付き）、パッシブ（サイレント）・センサー（たとえば熱画像装置、高感度TV、赤外線追尾装置）及び信号・画像連係処理
4．通信網	三軍連合の作戦計画、シミュレーション、演習及び遂行の支援のための、共用通信媒体及び共通ハードウェア・アプリケーション・ソフトウェアを使用した、情報の時宜を得た、信頼性のある、確実な作成と全世界の米軍への普及
5．電子デバイス	電子実装技術及びフォトニクスと結合した、高速コンピュータ、記憶装置、通信システム、先端センサー、信号処理、レーダー、画像システム及び自動操縦用の超小型（ナノ・スケール）電子及び光電子デバイス
6．環境の影響	大気、海洋、陸地、宇宙に対する自然及び人工の環境影響の研究、モデル化及びシミュレーション。兵器システムと兵器の使用媒体や戦場で見い出される蒙昧主義者のような人的に造られた現象との相互作用を含む
7．材料及び加工技術	改善構造、高温エンジン、シグネチャ・リダクション、エレクトロニクスのための人工材料（たとえば複合材、電子及びフォトニクス材料、スマートマテリアル）の開発及びそれらの応用に必要な合成及び加工技術
8．エネルギー蓄積	軍事システム用のエネルギー材料を含む安全でコンパクトな電気または化学エネルギーの蓄積装置
9．推進及びエネルギー変換	燃料効率のよい航空機用タービンエンジン及び超音速システムにおけるような蓄積エネルギーの利用可能形態への効率的な変換
10．自動設計	コンピュータ支援設計、コンカレント・エンジニアリング、シミュレーション、モデル化。数値流体力学、電磁気学、先端構造、構造力学及びその他の自動設計処理の計算面を含む
11．ヒューマン・インタフェース	機械によるデータの総合と判断及び操作員に便利な形態でのデータ表現。表示器。計算機器により真似られた人間の知能。シミュレーション及び合成の環境

出所）工業技術院技術調査課・国際技術調査室作成資料

第1.1－10表　「基幹技術」11分野の国際比較（国防総省、1992）

分　　野	NATO諸国	日本	CIS	その他
1．コンピュータ	2	3	2	1
スカラー並列ハイパフォーマンスコンピュータシステム	3	2	1	2 中国、インド、イスラエル、韓国を含む
特殊用途用コンピュータシステム	2	3	1	1
光処理	2	3	3	1 中国
2．ソフトウェア	3	3	1	2
ソフトウェア及びソフトウェアエンジニアリング	4	4	2	2 インド、イスラエル、スウェーデン、ハンガリーを含む
ヒューマンコンピュータインタフェイス	3	3	1	1
人工知能	3	3	2	2 中国、イスラエル、韓国、旧ユーゴスラビアを含む
パラレル及び非同次システム用ソフトウェア	3	3	2	2 中国、インド、南アフリカを含む
リアルタイム及び無停止型システム	2	2	1	1
高信頼性ソフトウェア	2	2	1	1
3．センサー	3	3	3	2
レーダーセンサー技術	4	4	4	2 スウェーデン、イスラエル
電子光学センサー技術	3	3	3	2
音響学	3		4	1 インド
マルチセンサーインテグレーション	3	3	2	2 スウェーデン、イスラエル
4．通信網	3	3	3	1
通信制御	3	4	3	2 中国、イスラエル、インド、韓国を含む
データ検索及び情報生成サブシステム	2	3	3	1
プログラマブル・ラジオ	3	1	3	1
5．電子デバイス	3	3	2	
マイクロエレクトロニクス	3	4	2	
高周波部品	3	3	2	
電子光学	3	3	2	
6．環境の影響	3	3	2	
環境センシング	3	3	2	
環境特性化及び予測	4	3	2	
状況生成及び環境意志決定支援	3	3	2	

4：広範囲な技術的成果。大きな貢献能力がある。
3：普通の技術能力。いくつかの小分野でリーダーシップをとる可能性あり。重要な貢献能力がある。
2：全般的に遅れている。特定分野で貢献できるかもしれない。
1：全ての重要な面で遅れている。2002年までに貢献できる見込みがない。

分　　野	NATO諸国	日本	CIS	その他
7．材料及び製法	3	3	3	2
構造材料、製法及び検査	3	3	3	2 中国、インド、イスラエル、韓国、スイス、スウェーデン
高温及び反徹甲材料	3	2	3	2 オーストリア、イスラエル、スウェーデン
電磁気及び装甲防護材料	3	2	4	2 中国、イスラエル
電子、磁気及び光学材料	3	4	2	2 オーストラリア、中国、インド、韓国、スウェーデン、スイス
特殊用途及び生分子材料及び製法	3	3	1	2 オーストリア、中国、スイス
8．エネルギー蓄積	3	2	3	
高エネルギー密度材料	3	2	3	
コンデンサ、誘導器、スイッチ、高電圧回転装置	3	2	2	
エネルギー源	2	3	3	
9．推進及びエネルギー変換	3	3	3	
航空機用推進	3	2	3	1 中国、インド
ミサイル、宇宙及び航空宇宙ビークル用推進	3	3	4	2 中国、インド
地上及び海底用ビークル用推進	3	3	3	2 スウェーデン
エネルギー変換及び発電	3	2	3	
10．自動設計	3	3	2	
設計統合及び分析	3	2	2	2 イスラエル
生産及び工程定義	3	3	3	
情報流通及び統合	3	3	2	
11．ヒューマン・インタフェース	3	2	3	2
コックピット及び装備	4	3	2	3 イスラエル
情報管理、意志決定支援	3	3	2	2 イスラエル
設計及びライフサイクル支援	3	2	2	1 イスラエル
人的資源及び訓練	3	2	3	3 イスラエル

4：広範囲な技術的成果。大きな貢献能力がある。

3：普通の技術能力。いくつかの小分野でリーダーシップをとる可能性あり。重要な貢献能力がある。

2：全般的に遅れている。特定分野で貢献できるかもしれない。

1：全ての重要な面で遅れている。2002年までに貢献できる見込みがない。

出所）工業技術院技術調査課・国際技術調査室作成資料

ちなみに、NATO諸国（欧州）の技術力が特に高い（評価点：4）のは次の分野である。

・ソフトウェア及びソフトウェア・エンジニアリング
・レーダー・センサー技術
・環境特性化及び予測
・コクピット及び装備

一方、NATO諸国が決定的に遅れている（評価点：1）分野はないが、やや遅れている（評価点：2）と評価されているのは次の分野である。

・特殊用途用コンピュータ
・光処理
・リアルタイム及び無停止型システム
・高信頼性ソフトウェア
・データ検索及び情報生成サブシステム
・エネルギー源

② 米国国防総省の1991年「重要技術プラン」

1992年「基幹技術計画」の前身といえる1991年「重要技術プラン」（Critical Technologies Plan）の内容を第1.1－11表に、重要技術21分野の国際比較結果を第1.1－12表に示す。

本資料によると、日本が明らかに先行している（評価点：4）と評価されているのは次の分野である。

・半導体材料とマイクロエレクトロニクス回路
・人工知能とロボット工学
・光技術
・超電導
・バイオテクノロジー

また、以下の分野については1990年「重要技術プラン」に比べ、「何らかの貢献が可能」（評価点：2）から「相当の貢献が可能」（評価点：3）にポイントを上げている。

・高感度レーダー
・パッシブ・センサー
・パルス電源

この他「相当の貢献が可能」（評価点：3）と評価されているのは以下の分野である。

・シミュレーションとモデル化
・高エネルギー密度素材
・複合素材

第1.1—11表　21の「重要技術」（国防総省、1991）

1	半導体材料とマイクロエレクトロニクス回路	高速コンピュータ、高感度受信機、自動制御のための超小型集積デバイスの製造と開発
2	ソフトウェアエンジニアリング	時代の流れに即した保全性／信頼性のあるソフトウェアの増強、作成、維持
3	高性能コンピュータ	1996年までに計算能力が1000倍、通信能力が100倍の高性能コンピュータを開発
4	人工知能とロボット工学	人の「知能」をコンピュータデバイスに移植し、機械デバイスを知能化すること
5	シミュレーションとモデル化	複雑な工程を視覚化すること、物理的に模型を作らずに概念とデザインを試験すること
6	光技術	超低損失光ファイバーと通信、航行のためのスイッチ、カプラー、マルチプレクサーのような光学部品
7	高感度レーダー	観測が困難な目標の探知が可能で、非協同的目標の分類・認識・特定が可能なレーダー・センサー
8	パッシブ・センサー	目標の検知、環境のモニター、装置の状態の決定のために信号の発生を必要としない（パッシブな）センサー
9	信号と映像の処理	目標の検知・分類・追跡をリアルタイムに近く自動で行うためのコンピュータ・アーキテクチャ、アルゴリズム、信号処理デバイスを結合させる
10	標識（信号）制御	目標の標識（信号）、（レーダー、音響、光学、その他）を制御する能力によって、輸送・武器システムの生存能力を高める
11	兵器システム環境	自然環境と、それが武器システムの設計や性能に与える影響を詳細に理解すること
12	データ融合	操作する人間にとって便利な形式でデータを機械に統合・翻訳・提示させる
13	数値流体力学	高価な実験設備を必要とせず、コンピュータで信頼できる予測をするために複雑な流体フローモデルを作ることによって経費と時間を節約する
14	空気推進装置	燃焼を促進させるため大気中の酸素を利用する、軽量・高効率燃焼エンジン
15	パルス電源	兵器やセンサーのために小型・軽量の装置で反復・短い持続時間・高ピークパルスを発生する
16	超高速弾と高速発射	通常の速度（2.0km/sec）以上で発射体を投射でき、そのような速度での発射体の動きと目標を理解すること
17	高エネルギー密度素材	高エネルギー密度物質は爆薬、推進薬、火工品として使用される高エネルギーの化学組成物
18	複合素材	複合素材は、合成された物質が個々の組成成分の性質に比べ、より優れた性質を持つように２～３個の組成を組み合わせたもの
19	超電導	超電導の抵抗がゼロの性質やその他の特異な性質を利用して、高性能センサー、エレクトロニクスデバイスとサブシステム、超電導磁石を作成
20	バイオテクノロジー	軍事技術と医療において最終的に利用するための生物学の組織的な応用
21	フレキシブル製造技術	最終製品の特性が急激に変化するのに合わせられ、効率的で低コストで操作できる生産工程エレメントの統合

出所）工業技術院技術調査課・国際技術調査室作成資料

第1.1－12表　「重要技術」21分野の国際比較（国防総省、1991）

重要技術	日本			NATO			ソ連		
	91	90	89	91	90	89	91	90	89
1. 半導体材料とマイクロエレクトエロニクス回路	4	4	4	3	2	2	1	1	1
2. ソフトウェアエンジニアリング	2	2	2	2	2	2	1	1	1
3. 高性能コンピュータ	2	2	2	2	2	2	1	1	1
4. 人工知能とロボット工学	4	4	4	3	3	3	1	1	1
5. シミュレーションとモデル化	3	3	2	3	3	2	2	1	1
6. 光技術	4	4	4	2	2	3	2	2	2
7. 高感度レーダー	3	2	2	3	2	2	2	1	1
8. パッシブ・センサー	3	2	2	2	2	2	2	2	2
9. 信号と映像の処理	2	2	-	2	2	-	2	2	-
10. 標識（信号）制御	2	2	-	2	2	2	2	2	1
11. 兵器システム環境	2	2	-	3	3	-	3	3	-
12. データ融合	2	2	2	2	2	2	1	2	2
13. 数値流体力学	2	2	2	3	2	2	1	1	1
14. 空気推進装置	2	2	2	3	3	3	2	2	2
15. パルス電源	3	2	2	2	2	2	4	4	4
16. 超高速弾と高速発射	2	2	2	2	2	2	3	3	3
17. 高エネルギー密度素材	3	3	-	3	3	-	3	3	-
18. 複合素材	3	3	3	3	3	3	2	2	2
19. 超電導	4	4	4	2	2	2	2	2	2
20. バイオテクノロジー	4	4	4	3	3	3	2	2	2
21. フレキシブル製造技術	2	-	-	2	-	-	1	-	-

注）＿＿＿ は前年に比べて変化があったもの

4段階評価　4：明らかに先行
3：相当の貢献が可能
2：何らかの貢献が可能
1：直ちに貢献できるものはない

出所）工業技術院技術調査課・国際技術調査室作成資料、「日米の技術競争力」（ハイテク戦略研究会編、日経サイエンス社）、及び「米国から見る日本の技術レベル」（川崎雅弘氏、「技術と経済」1991年7月号、p59）をもとに、MRI作成

③ 米国商務省の1990年「有望技術」

商務省が1990年5月に出した「有望技術」（Emerging Technologies）では、各分野の先端技術について1989年時点での日・米、及び欧・米比較を行っている。これによると、日本が米国に対して優位にある分野は先端材料、先端半導体デバイス、映像デジタル技術、高集積データ記録、光電子技術であり、このうち先端材料と映像デジタル技術については今後益々格差が広まるものと予想されている。また日米同水準にあるのは超電導分野であるが、今後日本がかなり優位に立つ可能性があるとしている。

一方日本が劣位にある分野は人工知能、バイオテクノロジー、高性能コンピュータ、診断・医療機器、センサー技術であるが、このうち人工知能を除いた4分野では今後日本が優位に立つものと予想されている。

第1.1－13表　「有望技術」の国際比較（商務省、1990）

	米日比較		米欧比較	
	1989年	今後の傾向	1989年	今後の傾向
先端材料	米＜日	米<<日	米＞欧	現状維持
先端半導体デバイス	米＜日	米＜日	米＞欧	現状維持
映像デジタル技術	米＜日	米<<日	米＜欧	米<<欧
高集積データ貯蔵	米＜日	米＜日	米＞欧	現状維持
光電子技術	米＜日	米＜日	米＞欧	現状維持
超伝導体	米＝日	米<<日	米＝欧	現状維持
人工知能	米＞日	現状維持	米＞欧	米>>欧
バイオテクノロジー	米＞日	米<<日	米＞欧	米>>欧
FCI生産技術	米＞日	現状維持	米＝欧	米<<欧
高性能コンピュータ	米＞日	米＜日	米＞欧	米>>欧
診断・医療機器	米＞日	米＜日	米＞欧	米＜欧
センサー技術	米＞日	米＜日	米＞欧	現状維持

＊1：「＜」は米国の水準が劣る状況
＊2：「＝」は米国と同水準にあること
＊3：「<<」は米国の水準が一段と劣る状況

原出所）米国商務省「Emerging Technologies Spring 1990」
出所）「米国から見る日本の技術レベル」、川崎雅弘氏、「技術と経済」1991年7月号、p60

④ 米国競争力評議会の1991年「重要基盤技術」

競争力評議会（Council on Competitiveness）は1986年に設立された非営利かつ超党派の団体であり、米国企業と労働者の世界市場における競争力を効果的に向上させる、という共通の目標を持った産業界・高等教育界・労働界の指導者により構成されている。同評議会は1991年3月に米国の重要基盤技術に関する報告書を公表し、その中では各技術に関する米国の国際的水準が評価されている。

これによると、米国が世界をリードしている技術（評価点：+1）は以下の通りである。

・バイオテクノロジー全般
・環境技術（排出削減、リサイクル・廃棄物処理）
・CAE
・システム工学
・マイクロプロセッサ
・磁気情報記録
・エアブリージング・ジェットエンジン
・ロケット・エンジン
・ソフトウェア全般
・コンピュータのうち、ニューラルネットワーク、操作システム、プロセス・アーキテクチャ
・ヒューマンインターフェースと映像化技術全般
・データベース・システム全般
・移動体通信の送受信技術

このように、比較的ソフトウェアに近い情報技術と航空宇宙用エンジン、バイオテクノロジーと環境技術が米国の優位分野と評価されている。

一方米国が「現在もしくは今後5年後に劣位になる」（評価点：－1）技術としては、次が挙げられている。

・先端金属
・膜
・精密コーティング
・先端科学機械
・商品化・生産システム全般（CIMを除く）
・高速マシニング、精密ベアリング、精密加工・成型
・アクチュエータ
・オプトエレクトロニクス部品
・ハードコピー技術
・高効率・高出力エンジン

また米国が「現在、もしくは今後5年以内に競争から脱落する」（評価点：－2）技術としては、次が挙げられている。

・セラミクス構造材
・電子・光材料のうち、ディスプレイ材料、電子セラミクス、パッケージ材料、

GaAs、シリコン

・IC製作・試験機器

・ロボット・自動化機械

・電子部品のパッケージとプリント基板

・ディスプレイ全般

・光情報記録

このように光・電子部品や先端材料、ロボット、精密加工、生産技術などが米国が劣位分野と評価されている。

第1.1—14表　米国の「重要基盤技術」の国際的水準（競争力評議会、1991）

	米国の水準		米国の水準
A.材料及び関連プロセス技術		2．電子制御	
1．先端構造材料		アクチュエータ	-1
先端金属	-1	センサー	0
金属複合材料	0	3．オプトエレクトロ部品	
高分子	0	レーザデヴァイス	-1
複合高分子	0	フォトニクス	-1
セラミックス構造材	-2	4．電子パッケージ・接続	
2．電子・光材料		多チップパッケージ	-2
ディスプレイ材料	-2	プリント基板技術	-2
電子セラミックス	-2	5．ディスプレイ	
電子パッケージング材	-2	電子発光	-2
GaAs	-2	液晶	-2
磁性材料	0	プラズマ・真空蛍光	-2
オプチカル材料	0	6．ハードコピー技術	
フォトレジスト	0	電子写真	-1
シリコン	-2	electrostatic	-1
超伝導体	0	7．情報貯蔵	
3．バイオテクノロジー		磁気情報貯蔵	+1
生物活性・生体適合材	+1	光情報貯蔵	-2
バイオプロセッシング	+1	D.パワートレイン・推進技術	
医薬発見技術	+1	1．パワートレイン	
遺伝子工学	+1	代替燃料エンジン	0
4．材料生産・加工		電気モータ・推進	0
触媒	0	電力貯蔵技術	0
化学合成	0	高燃料効率・高出力エンジン	-1
膜	-1	2．推進	
網状成型	0	エアブリージング推進	+1
精密コーティング	-1	ロケット推進	+1
プロセス制御	0	E.情報技術	
5．環境技術		1．ソフトウェア	
排出削減	+1	応用ソフト	+1
リサイクル・廃棄物処理	+1	AI	+1
B.エンジニアリング・生産技術		コンピュータモデリングとシミュレーション	+1
1．設計・エンジニアリング手法		エキスパートシステム	+1
CAE	+1	高級ソフト言語	+1
人間工学	0	ソフトウェア工学	+1
先端科学機械	-1	2．コンピュータ	
計測技術	0	ハードウェアインテグレーション	0
構造力学	0	ニューラルネットワーク	+1
システム工学	+1	操作システム	+1
2．商品化・生産システム		プロセスアーキテクチュア	+1
CIM	0	3．ヒューマンインタフェスと映像化技術	
製造設計	-1	アニメ・ルモーションビデオ	
製造工程設計	-1	CGハード・ソフト	+1
FM	-1	手書き・音声認識	+1
研究・設計・製造統合	-1	自然言語	+1
TQC	-1	光文字認識	+1
3．プロセス機器		4．データベースシステム	
新溶接	0	データ表現	+1
高速マシニング	-1	リトリーヴァル・更新	+1
IC製作・試験機器	-2	意味モデリング・説明	+1
ジョイント・留め技術	0	5．ネットワークと通信	
精密ベアリング	-1	高波帯域スイッチング	0
精密加工・成型	-1	デジタルインフラ	0
ロボット・自動化機械	-2	光ファイバーシステム	0
C.電子部品		多重化	0
1．マイクロエレクトロニクス		6．可搬型通信機器システム	
ロジックチップ	0	デジタル信号処理	0
メモリチップ	-2	スペクトラム技術	0
マイクロプロセッサ	+1	トランスミッタ・受信	+1
サブミクロン技術	0		

注）+1：米国産業が今後5年間は世界のリーダー
0：世界のトップと互角
-1：現在もしくは今後5年以内には劣位
-2：現在もしくは今後5年以内では競争から脱落

原出所）米国 "The Council of Competitiveness"の報告（1991年）

出所）「米国から見る日本の技術レベル」、川崎雅弘、「技術と経済」1991年7月号、p61

⑤ 製造業の日米比較

下表は日米製造業の競争力や技術力を業種別に比較したものである。少々古いが1986年頃の日米製造業の相対的位置を比較することができる。

第1.1—15表　日米製造業の比較

	生産コスト・企業力等	技術開発等	その他	米国の対日競争対策
食料品	米国企業は，日本企業と比較し規模が大きく，収益力も高い。米国は原料調達面に優位性をもつ。	日米ともバイオテクノロジーに力を入れている。	日米とも国際化をはかっているが，米国がリードしている。	バイオテクノロジー（ＩＰ）
繊維・衣服	エネルギー，原料面で米国有利。 企業規模は，米国のほうが大。 労働コストで日本有利だが日米格差縮小（日米とも発展途上国〈ＬＤＣ〉，NICsの追上げに苦しむ）。	日本は，自動縫製システムの開発等を実施。 日米ともファッション化（高付加価値化）を目指す。	米国は，多国間繊維協定（ＭＦＡ）により輸入制限を実施。 日本は中小企業を対象に構造改善等のための助成を実施。	通商規制
紙・パルプ	原木費・エネルギー費で米国有利（とくに針葉樹）。 売上高・純益等で米国企業の規模大。 米国は，木材からの一貫企業が多い。	米国は，木材の育成等についてバイオの利用を研究。	日本は，高加工品，多品種少量生産へと移行していく必要あり。	バイオテクノロジー（ＩＰ）
化学	原料面で米国（エタン使用）が日本（ナフサ使用）より有利。 米国のほうが企業規模大。	日米ともファインケミカル化をはかる。 また，電子部材，ファインセラミックス，新素材へ多角化をはかっている。	日米とも国際的展開をはかっているが，米国がリード。 日本は，設備処理により汎用品部門の縮小をはかっている。	バイオテクノロジー 新素材（ＩＰ）
鉄鋼	米国は，生産設備古く，賃金水準高い。	日本の技術は，世界のトップレベル。 米国は，研究者の高齢化進む。	米国は，輸入規制を実施。	通商規制
アルミニウム	日本は，電力の70－80％が石油火力，米国は80％が水力，石炭であり，生産コスト面で米国が圧倒的に有利。	日本は，電力を使用しない溶鉱炉法を研究中。	日本は1973年に164万トンを生産したが，88年には30万トンまで縮小。	—
工作機械・ロボット	右の得意分野の相違から世界生産におけるシェアは，日本が大。 ただし，米国も巻返しをはかっている。	日本は多品種少量生産に対応した高能力加工技術，米国は超精密な先端加工技術が得意。 また，米国は，トータル・システム・ソフトの設計も優れている。	米国は，ロボットについては軍事目的あり，研究開発資金大。	通商規制 ソフト（ＩＰ）
電子機械・コンピューター	民生用（ＣＴＶ，ＶＴＲ，ステレオ，ＣＤ等）は品質面で，日本有利。 コンピューターは，ＩＢＭが世界市場では圧倒的に強い。	コンピューターのハード面は，日米にそれほどの差はないが，ソフト面では米国が圧倒的に有利。	コンピューターは，日米とも官民共同の研究開発プロジェクトが実施されている。	通商規制 ソフト（ＩＰ）
自動車	品質管理面，生産コスト面（とくに賃金）で日本が有利。 日本車は，省エネの要請に対応。	米国企業は，ロボット等に多角化。 新素材の使用，カー・エレクトロニクス，新動力源等の研究を，日米とも実施中。	日米企業の提携，米国企業の海外部品調達，日本企業の対米直接投資等日米とも国際的展開をはかっている。 日本は対米輸出。	通商規制
航空・宇宙	日本は，市場および企業体力を有していない。	日本は，技術，情報等で弱体。研究者の確保が必要。	軍事面以外の民生産業化が進んでいる今日，日本はキャッチアップに努力することが必要。	国防 新素材
バイオテクノロジー		米国は，ベンチャーの巨大企業による研究開発，日本は大手企業によるが，醗酵技術を除き，米国依存型の研究体制となっている。 米国はとくに農業分野での研究が日本より進んでいる。	日米とも国の予算により研究が行われているが，米国の予算は日本の約4倍の大きさである。	バイオテクノロジー（ＩＰ）
ファインセラミックス		日本は，電子ファインセラミックス，米国は構造用ファインセラミックスを得意とする。 ファインセラミックスは，電気，物理，化学，窯業等の多面的知識を必要とすることから，日本の研究開発体制のほうが優れている。 米国は，国防上の要請があり，コスト無視となりやすい。	日本は「次期世代技術研究開発」を，米国は「高速道路用トラックエンジンの開発計画」を官民共同で実施中。	国防 新素材（ＩＰ）

（注）　IP：Intellectual Property（知的財産）.

原出所）経済企画庁調査局編「日本経済の状況」昭和61年版、288pに内田盛也氏が加筆。
出所）”産業国際化と知的所有権”内田盛也、「研究 技術 計画」、Vol.3, No.1,1988、p8

これによると、日本企業の競争力の高い産業は以下のとおりである。

・鉄鋼（技術、レベル、人ともにトップレベル）
・工作機械・ロボット
・民生用電子機器
・自動車（ただし最近再び日米の力が逆転したとの説あり）
・ファインセラミクス

また、米国企業の競争力の高い産業は以下のとおりである。

・食料品
・紙・パルプ（原材料・エネルギー面で米国有利）
・化学（原料面で米国有利）
・アルミニウム（電力コスト面で圧倒的に米国有利）
・コンピュータ（特にソフトウェアは圧倒的に米国優位）
・航空・宇宙
・バイオテクノロジー（ベンチャー中心型）

⑥ 製造業の日欧比較

下表はEC産業の競争力を日本と比較したものである。

第1.1—16表　EC産業の動向と日本との競争力比較

		産業動向			日本産業との競争力比較			
		内需	生産	輸出入	技術力・品質	生産性	収益力	総合評価
素材産業	鉄鋼	○	△	○	△	△	×	△
	化学・医薬	○	○	◎	◎	◎	◎	◎
	繊維	△	衣料× 紡績△	衣料× 紡績◎	(高級アパレル)◎	×	○	△
組立加工産業	自動車	○	○	△	(大型・大衆車)△	×	△	△
	民生用電子	△	×	×	△	×	×	×
	産業用電子	通信機器○ コンピューター○	○ ○	○ ×	通信機械◎ コンピューター○	○ △	○ △	◎ △
	電子部品	○	○	×	×	×	×	×
	事務機械	△	×	×	(小型・普及型)△	×	×	×
	工作機械	○	○	○	(大型・高速機)○	△	○	○
	建設機械	○	○	◎	○	△	○	○
凡例		◎大幅増加 ○増加 △停滞 ×減少	大幅増加 増加 横ばい 減少	出超進展 出超維持 輸出入均衡 入超進展	優位 同等 若干劣る 劣る	優位 同等 若干劣る 劣る	優位 同等 若干劣る 劣る	優位 同等 若干劣る 劣る

出所）「平成３年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　ベルギー王国及びオーストリア共和国」
平成4年4月、日本学術会議、p123

これによると、ECが日本に比べて優位または同等レベルにあるのは以下の産業である。

・化学・医薬（BASF、バイエル、ヘキスト、ICI等大企業が勢揃い）
・通信機器（市場の半分を占める交換機分野が官公需に支えられている）
・工作機械、建設機械（受注力が強い）
・食品（ネッスル、ユニリーバ等の多国籍企業が強い）
・高級アパレル

逆にECが日本より劣位に立っているのは以下の産業である。

・鉄鋼
・繊維（高級アパレルを除く）
・自動車
・電子部品、民生用電子機器、事務機械
・コンピュータ（IBMへの依存が大きい）

1.1.2 政策動向

ここでは日本の産業技術政策の流れ、及び産業技術に関連の深い代表的な国家R&Dプロジェクトについて述べる。

(1) 産業技術政策の流れ

① 現在までの歩み

近年の我が国の産業技術開発政策を見てみると、昭和41年度に発足した大型プロジェクト制度は国民生活及び社会における広範な課題の解決に必要な技術のうち、大型で民間のみではリスクの高い研究課題を行なう研究開発制度として、広範な分野の研究課題を対象として現在までに30テーマ（内終了プロジェクトは22テーマ）が行なわれており、その規模において最も大きなものといえる。最近ではより基礎技術開発指向のテーマも多くなり、研究開発費の増加、研究開発期間の長期化の傾向にある。続いてオイルショックを契機として、昭和49年に新エネルギー技術研究開発（サンシャイン計画）、昭和53年に省エネルギー技術開発制度（ムーンライト計画）が発足し、資源エネルギーの安定供給確保、公害防止対策などの課題が取り組まれた。また昭和56年には次世代産業基盤技術開発制度が発足し、10年程度将来に発展が期待される次世代産業技術の基盤を確立することを目的に、より先端的、基盤的な技術の開発が行なわれており、材料、バイオ、デバイスなどを主に、現在までに22テーマが行なわれている。

これら既存のプロジェクトはこれまでわが国の産業技術の育成に大きな貢献を果たしてきた言えるが、他方で時代に即した変革を迫られており、そのための一つの取り組みとして、平成５年度から大プロと次世代と医療福祉機器技術を統合して「産業科学技術研究開発制度」が発足することとなった。

エネルギー・環境分野においては、21世紀を見通した長期的かつ地球規模の視点に立った総合対策の必要性から、従来のサンシャイン計画、ムーンライト計画、及び地球環境産業技術開発制度を統合して、平成５年度からニューサンシャイン計画が発足する運びとなった。

またこのような制度改革と呼応して、筑波にある製品科学研究所、繊維高分子材料研究所等の４つの国立研究所を整理統合し、新たに産業技術融合領域研究所、物質工学工業技術研究所、及び生命工学工業技術研究所を発足させた。

② 今後の方向と課題

この様な背景のなかで近年、通産省工技院及び産業技術審議会を中心に産業科学技術の研究開発政策として今後取り組むべき重要な課題と方向性が示され、個々の対応策が現在検討されている。

a．「90年代の産業科学技術ビジョン」（通産省工業技術院、平成2年）では産業科学技術政策の今後の方向性として次を挙げている。

イ．テクノグローバリズムの推進

- 科学技術の国際的な流通移転
- 国際的なコンセンサスの形成の場の設定

ロ．科学と技術のバランスのとれた研究開発の推進

・　競争・連携、自由、多様性を持つ研究開発のあり方

・　基礎的独創的研究開発の推進、産学官のありかた

ハ．科学技術の発展のための基盤整備

・　人材の充実

・　標準化の推進

・　民間Ｒ＆Ｄの組織化

ｂ．「科学技術会議第18号答申」（科学技術会議、平成4年1月）にもこれとほぼ同様の内容が盛り込まれ、施策の推進のために政府の研究開発投資額の早期倍増が唱われている。

ｃ．「産業科学技術の動向と課題」（通商産業省、平成4年8月）では次の方向性が打ち出されている。

イ．テクノグローバリズムの推進

・　独創的科学技術知見の創出と科学技術基盤作り

・　積極的な国際情報発信及び技術移転、国際協力の実施

・　技術の流通・移転のための国際秩序作り

ロ．人と環境に優しい技術体系の構築

ｄ．「産業科学技術分野において研究開発が期待される課題」（産業技術審議会大型技術開発部会・次世代技術開発部会合同企画小委員会、平成4年6月）では、「技術開発を巡る環境変化の動向」として以下の項目を上げ、基礎的独創的技術の開発を重視した新たなコンセプトの構築の必要性が述べられている。

イ．基礎的独創的技術の重要性の高まり

ロ．地球規模、人類共通の問題の顕在化

ハ．民間部門における研究開発能力の高まり

ニ．国際的関心の高まり

ホ．センターオブエクセレンス（COE）への期待の高まり

また「今後研究開発が期待される技術」として以下のクライテリアを挙げ、具体的に新材料、バイオ、人間・生活・社会など8つの分野、55の研究課題を取り上げている。

イ．経済社会の新たな発展に資する研究開発

・　新たな技術体系の構築・育成に資する研究開発

・　飛躍的な機能の向上・発現をもたらす技術的ブレークスルーを実現する研究開発

ロ．科学技術が社会的に果たすべき種々の使命に応える研究開発

・　公共的色彩の強い研究開発プロジェクト

・　人間性の尊重やその自由な発露を支援する研究開発プロジェクト

・　地球規模、人類共通で取り組むべき研究開発

第1.1－17表　今後研究開発が期待される課題５５

	素材・要素的技術 ←→ システム・プラント技術							
	新材料	バイオテクノロジー	電子／情報・通信	機械	航空・宇宙	医療・福祉	人間・生活・社会	資源
1.経済社会の新たな発展に資する基礎的独創的な研究開発 ①新たな技術体系の構築・育成に資する研究開発 ～ ②画期的な機能の向上・発現をもたらす技術的ブレークスルーを実現する研究開発	高精密高分子材料 高次構造制御新機能有機・高分子 自律応答材料 有機磁性体 クラスター材料 環境適合材料 コンピュータ・ケミストリー 超信頼性無機融合材料 アモスタル材料	生物進化工学 RNA工学 自己組織化材料 バイオケミカルコンバージョン技術	バイオ・エレクトロニクス・インターフェース フェムト秒テクノロジー 情報場の理論に基づく情報処理技術 コールド・ビーム・アシスト・プロセス 適応型最適化問題解決システム 最適設計統合手法	人工分子機械 超先進トライボ・システム 超高信頼性設計生産システム 機能獲得型機械 ビーム応用新計測・加工技術	微小重力利用技術 環境適合型航空機の要素技術 超音速輸送機／極超音速輸送機 超高性能VTOLシステム	先進的診断治療技術 身体機能代行技術	異種感覚変換・感覚複合化技術	超深度掘削・探査・観測技術 原油強制回収・改質技術（バイオEOR）
2.公共・社会・福祉等に資する研究開発	高機能性炭素材料							
①公共的ニーズへの対応		共生工学	防災エレクトロニクス 新量子標準			先進的保健医療技術	ネームロボット技術	アーバンマイン開発技術システム 次世代海洋生産システム
②人間性・豊かさを求めるニーズへの対応			知覚獲得型能動的情報提供システム マルチモーダル情報環境提供システム	人間共援型知能機械		高齢者社会参加支援技術 高齢者等日常生活支援技術	次世代新自動車交通管制システム 最適地域情報提供技術 生涯技能学習支援システム	
③地球規模・人類共通のニーズへの対応		熱帯地域生物種利用高機能化学製品等製造法	スーパーネットワーキング技術	生態系調和型生産システム(エコ・ファクトリー)	地球環境監視システム		製品ライフサイクル環境・資源負荷評価技術 立体都市構造システム	

出所）
「産業科学技術分野において研究開発が期待される課題」、産業技術審議会大型技術開発部会・次世代技術開発部会合同企画小委員会、平成4年6月

③ 産業技術政策の流れ

以上から産業技術政策の流れを総括すると、以下のようになる。

イ．研究開発のグローバルな展開（国際化、地球規模の課題への取り組み）

- 先進国との技術協力・交流、共同研究の拡大
- 途上国への技術移転の推進

ロ．人と環境に優しい技術（人間親和性、環境親和性）

ハ．基礎的独創的研究開発の促進（基礎シフト）

以下、産業技術に関連の深い代表的な国家R&Dプロジェクトについて詳細に述べる。

(2) 産業科学技術研究開発（工業技術院）

通産省工業技術院は、昭和41年より大型工業技術研究開発制度（大プロ）、昭和51年より医療福祉機器技術開発制度、昭和56年より次世代産業基盤技術研究開発制度（次世代）を発足させ、それぞれシステム・プラント技術を中心とする先導的大型工業技術、高福祉化社会に向けた医療福祉機器技術、基礎的な要素技術を中心とする革新的基盤技術の研究開発を行ってきた。

しかしながら、近年の科学と技術の接近共鳴等の産業技術の進展に伴い、大プロ、次世代両制度を一体的に運営することが必要になるとともに、医療福祉機器技術分野においても基礎研究もしくは幅広い先端技術の活用が必要となった。このため平成５年度よりこれら３制度を統合し、「産業科学技術研究開発制度」としてスタートさせた。本制度は以下の両方の条件に当てはまる研究開発を対象としている。

① 新たな技術体系の構築・育成または技術的ブレークスルーにより、経済・社会の新たな発展に資する基礎的独創的研究開発。または、国民生活の向上、資本の安定供給の確保、科学技術の振興に必要な基盤の整備等の社会的使命に応える上で必要な研究開発。

② 研究開発に多額の資金及び長期の研究期間を必要とし、多大な危険負担を伴う等のために、その実施が産業界のみでは困難であり、産業界、学界、国等の研究開発能力を結集することが困難なもの。

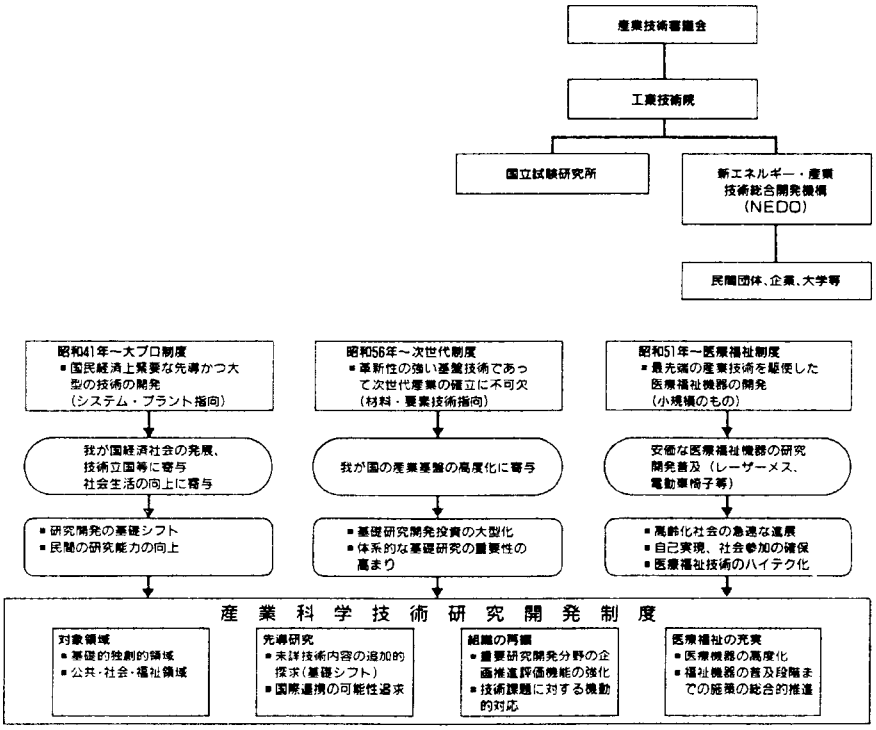
また、同じく平成5年度から「先導研究」として技術的成熟度等の問題から直ちにプロジェクト化することが困難なテーマについて、プロジェクト化の可否の検討を含め、予備的・基礎的な調査研究を行うこととなった。またプロジェクトの民間委託の実施・管理を行うNEDOにおいても、プロジェクト化のF.S.を行う事前調査を平成4年度から実施している。

次の表は、過去（～平成4年度）に行われた３制度、現行（平成5年度～）の産業科学技術研究開発制度、先導研究（平成5年度～）、及びNEDO事前調査（平成4年度）のテーマを8つの分野別に整理したものである。

第1.1—18表　工業技術院/NEDOの新たな「産業技術研究開発制度」の8分野

新体制の分野区分	終了プロジェクト	現行プロジェクト	先導研究	NEDO事前調査
超電導		超電導材料・素子		
新材料	高分子分離膜 導電性高分子 高結晶性高分子 複合材料 高性能結晶制御合金 光反応材料 ファインセラミクス	非線形光材料 ケイ素系高分子 超耐環境材料 先進機能創出加工	高次構造制御融合無機材料 自律応答材料	超高温物性計測 アモルファス合金 高温半導体材料 高機能表面創成
バイオ	アクアルネッサンス C1化学 オレフィン新製造法 重質油オレフィン 組換えDNA バイオリアクター 細胞大量培養	海洋バイオ 機能性蛋白質 複合糖質	熱帯生物機能利用技術	
電子・情報・通信	超格子素子 三次元回路素子 耐環境素子 インオペ スパコン 超高性能計算機 パターン情報処理 光応用計測制御	量子素子 バイオ素子 原子・分子極限操作 新ソフトモデル	フェムト秒テクノロジー	
機械・航空・宇宙	ジェットエンジン 資源探査観測ｼｽﾃﾑ 自動縫製 極限作業ロボット 直接製鉄 レーザー複合生産	超音速輸送機 マイクロマシン 超先端加工		
資源	資源再生利用 海底石油生産 大深度海底石油掘削 脱硫技術	マンガン団塊	エコ・ファクトリー	ケミカルコジェネ
人間・生活・社会	電気自動車 自動車総合管制 海水淡水化	人間感覚 大深度地下		ｳﾞｧｰﾁｬﾙ･ﾘｱﾘﾃｨｰ 寒冷地有効利用
保健・医療・福祉	レーザ骨手術 診断用立体視 動脈内レーザ手術 白血球型自動分類 免疫学的がん診断 光光学反応がん診断 免疫疾患用血液処理 高齢者体調監視 床ずれ防止用マット 義肢ソケット 体温自動調節器 介助移動装置 etc.	無侵襲血糖値測定 光断層イメージング 定位的がん治療 デジタル補聴器 歩行補助 次世代ｵｰﾗﾙﾃﾞﾊﾞｲｽ エバキュエーション 尿失禁防止訓練 排泄自立支援 盲人用三次元表示 車椅子総合支援 国際共同研究 基盤技術開発		

出所）MRI作成



第1.1－34図　工業技術院における産業技術研究開発の歴史

出所）「産業科学技術研究開発制度」、1993年、工業技術院産業科学技術研究開発室、3p

(3) 科学技術振興調整費（科学技術庁）

科学技術振興調整費は、昭和55年の科学技術関係閣僚連絡会議等において、科学技術会議が広い視野に立って科学技術政策の総合調整を行い、指導的役割を強化していくことの重要性が指摘されたことに鑑み、昭和56年度予算編成過程において従来の特別研究促進調整費を発展的に解消し、新たに科学技術会議の方針に沿って運用する予算として科学技術庁に計上されたものである。本調整費の方針については、科学技術会議本会議において「科学技術振興調整費活用の基本方針」（昭和56年制定、昭和59年修正）が定められ、以下の7項目を基本として運用を図ることとなっている。

① 先端的、基礎的な研究の推進
② 複数機関の協力を要する研究開発の推進
③ 産・学・官の有機的連携の強化
④ 国際共同研究の推進
⑤ 緊急に研究を行う必要が生じた場合の柔軟な対応
⑥ 研究評価の実施と研究開発の調査、分析
⑦ 国立試験研究機関における重点基礎研究の推進

これらの方針に従って、以下の諸研究制度が設けられている。

第1.1－19表　科学技術振興調整費の枠内の諸研究制度

Ⅰ．総合研究（昭和60年度～）
　1.　基礎的・先導的科学技術の推進
　　(1)　物質・材料系科学技術
　　(2)　ライフサイエンス
　　(3)　地球科学技術分野
　　(4)　その他の基盤的・先導的科学技術分野
　2.　国家的、社会的ニーズの強い研究開発

Ⅱ．人中心の基礎研究
　1.　省際基礎研究（昭和63年度～）
　2.　地域流動研究（平成2年度～）

Ⅲ．国際共同研究等の推進
　1.　個別重要国際共同研究（昭和62年度～）
　2.　重点国際交流（平成3年度～）

Ⅳ．重点基礎研究（昭和60年度～）

Ⅴ．調査、分析（昭和56年度～）
　1.　科学技術政策立案のための基礎調査
　2.　総合研究の課題設定等のための調査

Ⅵ．緊急課題等への留保
　1.　緊急研究（昭和56年度～）
　2.　緊急受託研究（昭和62年度～）

出所）「平成3年度　科学技術振興調整費　試験研究実施計画」（平成4年3月、科学技術庁）をもとに、MRI作成

以下に、Ⅰ．総合研究からⅣ．重点基礎研究までの諸研究制度の概要を示す。

第1.1−20表　科学技術振興調整費の各研究制度

	総合研究（昭和56年度創設）	人中心の基礎研究：省際基礎研究（昭和63年度創設）	人中心の基礎研究：地域流動研究（平成2年度創設）
1. 制度の概要	基礎的・先導的科学技術分野あるいは国家的・社会的ニーズの強い研究開発を，産学官の有機的連携のもとで役割を分担しつつ，総合的に推進	国研の優秀な研究リーダーのもとに，省庁の枠を超え，国際的にも研究者を結集し，人中心の研究運営による基礎的・先導的研究を推進	地域の産学官の研究機関に，地域内外の優れた研究者を結集し，地域中核オーガナイザーの指導のもとで基礎的・先導的研究を推進
2. 課題等の選定	各省庁　経団連等 ↓ 事務局：STA ↓ （研究調査小委員会） ↓ CST 各省庁等の提案を踏まえ，CSTにおいて研究課題を構築	研究リーダー ↓ 各省庁 ↓ 事務局：STA ↓ （研究調査小委員会） ↓ CST CSTが研究リーダー及び研究課題を選定	地域中核オーガナイザー ↓ 地方公共団体 ↓ 事務局：STA ↓ （研究調査小委員会） ↓ CST CSTが地域中核オーガナイザー及び研究課題を選定
3. 研究（運営）の体制	A省−B省−大学 C省−民間 大学 ↑↓（共同研究） 外国の研究機関 国際共同研究の場合 研究推進委員会	A省 a研究所 研究リーダー 研究者　研究者 b研究所 研究者 B省 研究者 民間・大学等研究者 外国人研究者	＜地域内＞ 地域中核オーガナイザー A国研 B公立試 C民間 ＜地域外＞ D国研 地域内外の研究者
4. 予算規模（／年・課題）	66億円 （2〜3億円）	12億円 （数千万円）	4億円 （数千万円）
5. 研究期間	5年間 （Ⅰ期：3年　Ⅱ期：2年）	3年間	3年間

STA：科学技術庁　CST：科学技術会議

	国際研究交流：個別重要国際共同研究（昭和62年度創設）	国際研究交流：重点国際交流（平成3年度創設）	重点基礎研究（昭和60年度創設）
1. 制度の概要	科学技術協力協定等において協力の推進が約束されている等，国際交流を進めるうえで重要性の高い国際共同研究を推進	効率的・効果的な国際交流の推進のため研究者等が直接意見交換を行うワークショップを実施	各国研において，将来の技術展開の柱となることが期待される革新的技術シーズの創出を図るための基礎的研究を推進
2. 課題等の選定	各省庁 ↓ STA ↓ CST 国際交流を進めるうえで重要性の高い研究課題をCSTが選定	事務局：STA ↓ CST CSTの方針に基づき，科学技術庁が調整したワークショップ開催の具体的分野から実施分野をCSTが選定	各国研所長 ↓ 各省庁 ↓ STA ↓ CST 各所長の裁量による課題選定を受け，科学技術庁が調整し，CSTが選定
3. 研究（運営）の体制	A省 a研究所 ↕（共同研究） B国 b研究所	ワークショップ ↑（招聘等）↑ 日本：A省 B省 大学 民間 相手国：X省 Y省 大学 民間	A省 a研究所 研究者　研究者 招聘：外国人研究者 派遣：国際研究集会
4. 予算規模（／年・課題）	4億円 （数百万円）	2億円 （約2千万円）	14億円 （数百万円）
5. 研究期間	単年度 3年度を限度として継続あり	単年度	単年度 （継続あり）

出所）「平成3年度　科学技術振興調整費　試験研究実施計画」、平成4年3月、科学技術庁、p6-7

以下に、科学技術振興調整費において特に産業技術と関連の深い「物質・材料系」と「ライフサイエンス」（総合研究）のテーマと期間、予算額を示す。

第1.1—21表　科学技術振興調整費（総合研究）の物質・材料系研究テーマ

（平成3年12月現在）

（単位：百万円）

		課題名	56年度	57年度	58年度	59年度	60年度	61年度	62年度	63年度	元年度	2年度	3年度
I 基礎的・先導的科学技術分野	(1) 物質・材料系科学技術	①大型超高圧力発生システムに関する研究（55～）	161	416	397	185							
		②高性能材料開発のための表面・界面の制御技術に関する研究	257	265	236	195	112						
		③超電導・極低温基盤技術の開発に関する研究		698	474	294	319	214					
		④構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究			193	226	141	174	102				
		⑤半導体の格子欠陥を利用した材料機能の制御に関する研究			61	63	46						
		⑥ハイブリッド化構造設計技術による新材料創製のための基盤技術に関する研究				386	311	174	234	105			
		⑦大出力・波長可変レーザー及びレーザープロセシング技術に関する研究				343	415	282	309	123			
		⑧超高温の発生・計測・利用技術の開発に関する研究					265	359	172	203	108		
		⑨新ビーム技術による高性能機能材料の分析・評価技術に関する研究						452	595	335	349	209	
		⑩レアメタルの高純度化による新機能創製のための基盤技術に関する研究							253	380	249	244	188
		⑪熱応力緩和のための傾斜機能材料開発の基盤技術に関する研究							257	308	199	270	181
		⑫極高真空の発生・計測・利用技術の開発に関する研究								245	226	180	184
		⑬真空紫外光の発生と利用技術に関する研究								277	247	180	181
		⑭物質・材料の極微小領域における素機能の計測・評価・制御に関する研究									299	300	278
		⑮超電導材料研究開発のためのデータベース構築に関する研究									85	86	81
		⑯新機能性材料創製のためのホスト・ゲスト反応活用技術に関する基盤的研究										161	193
		⑰理想表面創製によるマテリアル・インターコネクションの基盤技術に関する研究										141	242
		⑱高度信頼性を要する材料・構造物の定量的・知的非破壊評価法の基盤技術に関する研究											183
		小計	418	1,380	1,361	1,691	1,609	1,656	1,921	1,977	1,761	1,771	1,527

出所）「平成3年度　科学技術振興調整費　試験研究実施計画」、平成4年3月、科学技術庁、p20

第1.1−22表　科学技術振興調整費（総合研究）のライフサイエンス系研究テーマ

		課題名	56年度	57年度	58年度	59年度	60年度	61年度	62年度	63年度	元年度	2年度	3年度
I 基礎的・先導的科学技術分野	(2) ライフサイエンス	①組換えDNA技術の利用（大腸菌等によるワクチン生産）に関する総合研究　（55〜　）	51	50									
		②組換えDNA技術の安全性に関する総合研究　（55〜　）	70	61	51	47							
		③DNAの抽出・解析・合成技術の開発に関する研究	301	391	216								
		④実験動物の開発等に関する研究			148	127	112	104	93				
		⑤生体膜機能の解析・利用技術の開発に関する研究		521	413	242	219	244	187				
		⑥機能性蛋白質の解析・修飾・模擬技術の開発に関する研究			210	222	164	144	130	101			
		⑦新共生微生物の生産する生理活性物質の探索・利用技術に関する研究				82	82	55					
		⑧がん研究を支える共通基盤技術の開発に関する研究				703	633	463	281	263	231		
		⑨染色体の解析・利用技術の開発に関する研究					209	240	149	168	170	136	
		⑩脳機能解明のための基盤技術の開発に関する研究					266	250	152	245	253	165	
		⑪生体エネルギー変換機能利用のための基盤技術に関する研究						279	255	165	228	184	124
		⑫免疫の応答機構解明のための基盤技術の開発に関する研究							422	438	292	275	257
		⑬発生工学技術の開発等に関する研究								189	175	138	126
		⑭生体の分子レベルにおける高感度・高分解能非破壊計測技術の開発に関する研究								175	227	157	126
		⑮組換えDNA技術の開放系における安全性に関する基礎的研究								108	125	100	
		⑯生体情報伝達機構の解析・制御の開発に関する研究									223	213	139
		⑰新しい植物実験系開発のための基盤技術に関する研究										149	145
		⑱がん細胞の浸潤・転移機構解明のための基盤技術に関する研究										238	225
		⑲ヒト遺伝子地図作製技術の開発に関する研究											278
		⑳糖鎖の構造・機能解析のための共通基盤技術の開発に関する研究											176
		㉑新しい動物実験系開発のための基盤技術の研究											144
		小計	423	1,172	1,016	1,407	1,677	1,768	1,576	1,852	1,926	1,756	1,740

出所）「平成3年度　科学技術振興調整費　試験研究実施計画」、平成4年3月、科学技術庁、p21

(4) 創造科学推進事業（新技術事業団）

創造科学推進事業（ERATO）は、今後の革新技術の源泉となる科学技術の芽（シーズ）を探索するために、昭和56年に新技術事業団に創設された制度で、研究期間は５年、１プロジェクト当たりの研究費総額15～20億円、１プロジェクト当たりの研究者数15人を標準的な規模としている。

本制度が対象とする研究テーマは、「物質と生命という２つの極の間に存在する基本的ないくつかのかかわり合いの型に着目し、シーズの創出の可能性の高い主題」であり、物質や生物のミクロな現象・機構・相互作用の解明を主眼としている。

本制度の最大の特徴は「研究者」に着目した点にあり、産・学・官を問わず、当該研究を指揮するにふさわしい卓越した総括責任者（リーダー）を選抜し、その下に産・学・官及び海外から若手研究者を結集してプロジェクトチームを結成する。人選や研究の進め方は総括責任者に委ねられ、このような柔軟かつオープンな方式のため、各界からの評価が高まってきている。

本制度の平成4年度までの全研究テーマ（終了テーマを含む）を以下に示す。なお本制度では特に物質系と生物系を分けておらず、また両者の融合領域も多々あるが、整理のためにここでは両者を分けて示した。

第1.1－23表　創造科学技術推進事業における物質系プロジェクト

プロジェクト名	総括責任者	役　職	研究期間
超微粒子	林　主税	日本真空技術㈱会長	1981-86
特殊構造物質	増本　健	東北大学金属材料研究所教授	1981-86
ファインポリマー	緒方直哉	上智大学理工学部教授	1981-86
完全結晶	西澤潤一	東北大学学長	1981-86
ナノ機構	吉田庄一郎	㈱ニコン取締役	1985-90
固体表面	黒田晴雄	東京大学理学部教授	1985-90
磁束量子情報	後藤英一	東京大学名誉教授	1986-91
テラヘルツ	西澤潤一	東北大学学長	1987-92
量子波	榊　裕之	東京大学先端科学技術研究センター教授	1988-93
極微変換	増原　宏	大阪大学工学部教授	1988-93
位相情報	外村　彰	㈱日立製作所基礎研究所主管研究長	1989-94
原子制御表面	青野正和	理化学研究所主任研究員	1989-94
融液動態	木村茂行	科学技術庁無機材質研究所総合研究官	1990-95
包接認識	新海征治	九州大学工学部教授	1990-95
パイ電子物質	吉村　進	松下技研㈱取締役	1991-96
分子触媒	野依良治	名古屋大学理学部教授	1991-96
固液界面	板谷謹悟	東北大学工学部教授	1992-97

出所）「創造科学推進事業」（新技術事業団、1992）等より、MRI作成

第1.1ー24表　創造科学技術推進事業における生物系プロジェクト

プロジェクト名	総括責任者	役　職	研究期間
バイオホロニクス	水野傳一	帝京大学薬学部教授	1982-87
生物情報伝達	早石　修	（財）大阪バイオサイエンス研究所所長	1983-88
特殊環境微生物	堀越弘毅	東京工業大学生命理工学部教授	1984-89
超分子柔構造	宝谷紘一	帝京大学理工学部教授	1986-91
生物フォトン	稲葉文男	東北大学電気通信研究所所長	1986-91
発生遺伝子	古沢　満	第一製薬㈱取締役分子生物研究室長	1987-92
化学組織	国武豊喜	九州大学工学部教授	1987-92
植物情報物質	水谷純也	北海道大学農学部教授	1988-93
ゲノム動態	池田穣衛	農林水産省農業生物資源研究所所長	1989-94
たん白集積	永山国昭	日本電子㈱生態計測学研究室長	1990-95
食情報調節	鳥居邦夫	味の素㈱中央研究所主任研究員	1990-95
着生機構	伏谷伸宏	東京大学農学部教授	1991-96
細胞変換	岡山博人	大阪大学微生物病研究所教授	1991-96
微小流動	河内啓二	東京大学先端科学技術研究センター教授	1992-97
生体運動子	柳田敏雄	大阪大学基礎工学部教授	1992-97
再生機構	吉里勝利	広島大学理学部教授	1992-97

出所）「創造科学推進事業」（新技術事業団、1992）等より、MRI作成

(5) フロンティア研究システム（理化学研究所）

従来の研究組織の枠を超えた開かれた柔軟な研究体制によって、広範な分野の内外の研究者を流動的に結集しつつ、先端的な基礎研究（フロンティア研究）を推進するために昭和61年度に発足した制度で、理化学研究所及びフォトダイナミクス研究センター（仙台）において次の４つの分野で研究が進められている。

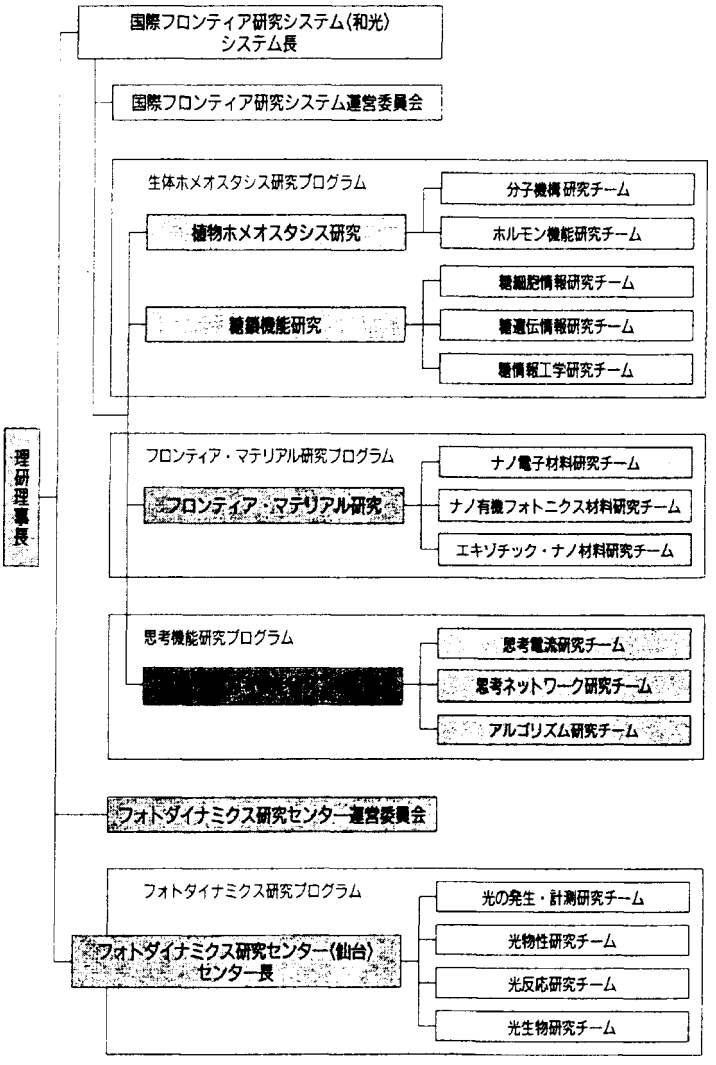
①生体ホメオスタシス研究プログラム
- 植物ホメオスタシス（分子機構、ホルモン機能）
- 糖鎖機能（糖細胞情報、糖遺伝情報、糖情報工学）

②フロンティア・マテリアル研究プログラム
- ナノ電子材料、ナノ有機フォトニクス材料、エキゾチック・ナノ材料

③思考機能研究プログラム
- 思考電流、思考ネットワーク、アルゴリズム

④フォトダイナミクス研究プログラム（ﾌｫﾄﾀﾞｲﾅﾐｸｽ研究ｾﾝﾀｰ）
- 光発生・計測、光物性、光反応、光生物

第1.1—35図　フロンティア研究システムの組織



出所）理化学研究所要覧、1992、19p

(6) 国立研究機関及び特殊/公益法人

以下の各分野において、以下の国立研究所/大学または特殊/公益法人が研究開発を行っている。最近の動きとして特筆に値するのは、通商産業省傘下の４つの研究所が整理統合され、1993年1月より新たに産業技術融合領域研究所、物質工学工業技術研究所、及び生命工学工業技術研究所が発足したことである。

① 物質・材料系技術（含む超電導）

科学技術庁関連：金属材料技術研究所、無機材質研究所、理化学研究所、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団、宇宙開発事業団　等

通商産業省関連：電子技術総合研究所、物質工学工業技術研究所、産業技術融合領域研究所、機械技術研究所、計量研究所、（財）国際超電導産業技術研究センター、NEDO（国際共同研究助成事業等）　等

郵政省関連　：通信総合研究所（電気通信フロンティア研究開発等）　等

運輸省関連　：（財）鉄道総合技術研究所　等

文部省関連　：各大学及び附属研究所（科研費、重点領域研究等）

② 情報・電子系技術

科学技術庁関連：金属材料技術研究所、無機材質研究所、理化学研究所　等

通商産業省関連：電子技術総合研究所、物質工学工業技術研究所、生命工学工業技術研究所、機械技術研究所、新情報処理開発機構（リアル・ワールド・コンピューティング）、情報処理振興事業協会（開放型基盤ソフトウェア研究開発）等

郵政省関連　：通信総合研究所

運輸省関連　：電子航法研究所

文部省関連　：各大学及び附属研究所（科研費、重点領域研究等）

③ 機械・航空・宇宙系技術

科学技術庁関連：航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団　等

通商産業省関連：機械技術研究所　等

運輸省関連　：電子航法研究所

文部省関連　：宇宙科学研究所、各大学及び附属研究所（科研費等）

④ バイオ・生命系技術

科学技術庁関連：理化学研究所、放射線医学総合研究所、日本原子力研究所、新技術事業団　等

通商産業省関連：生命工学工業技術研究所　等

農林水産省関連：農業生物資源研究所、農業環境技術研究所、蚕糸・昆虫農業技術研究所、食品総合研究所、森林総合研究所、水産研究所　等

厚生省関連　：国立公衆衛生院、国立予防衛生研究所、国立健康・栄養研究所、国立多摩研究所、国立衛生試験所

環境庁関連　：国立環境研究所

郵政省関連　：通信総合研究所

文部省関連　：各大学及び附属研究所（科研費等）

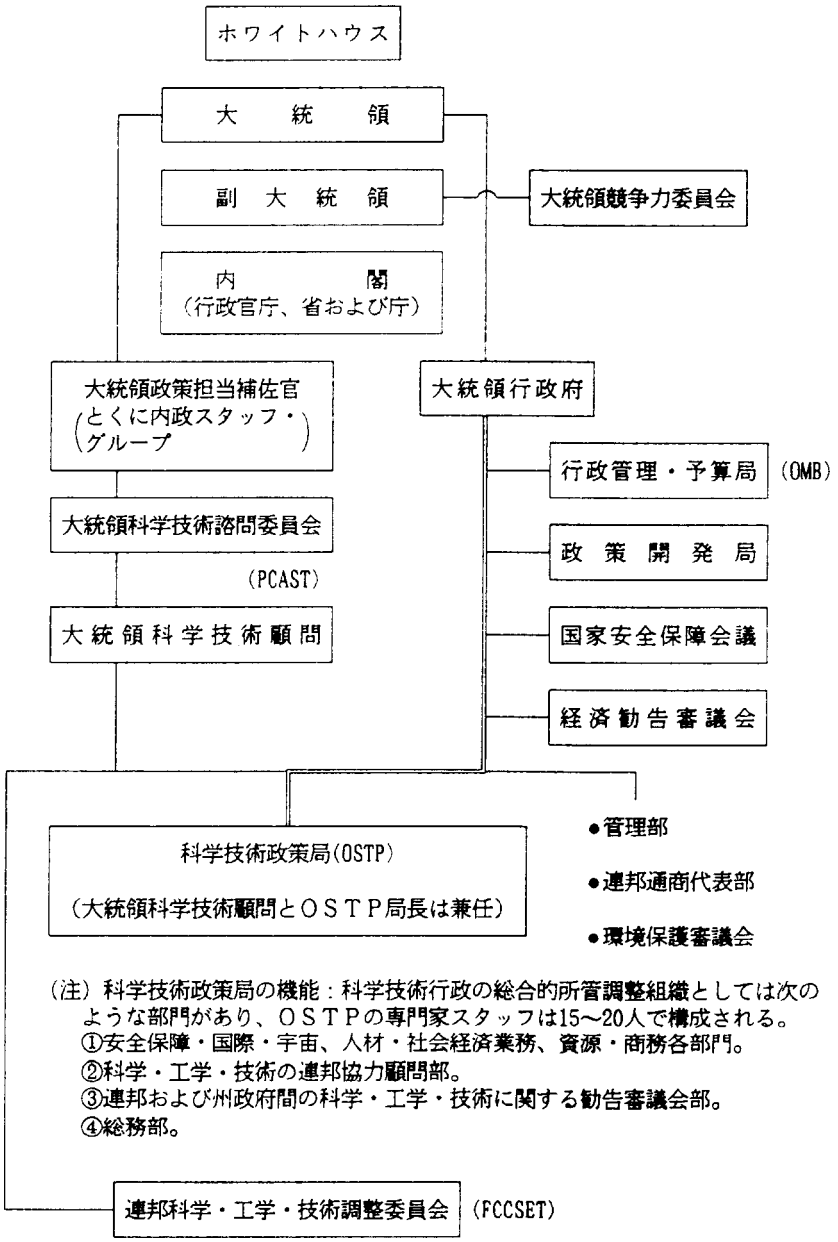
1.2 米国

本節では、我が国における国際技術戦略の第一人者である帝人㈱の内田顧問へのインタビュー結果（巻末附属資料参照）、既存文献、及びNEDOハイテク動向をもとに米国の科学技術政策・戦略の概要と動向をとりまとめた。

1.2.1 米国の科学技術政策の概要

(1) 行政組織

下図に米国の科学技術政策に関する行政機構図を示す。



第1.2—1図　米国の科学技術政策に関する行政機構図

出所）「平成４年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」、平成5年3月、日本学術会議、p51

米国の政策の特徴は（我が国と対照的に）大統領のイニシアチブが強いことであり、科学技術政策においても大統領及びそれを補佐する大統領科学技術補佐官（大統領への勧告権を有する）、大統領科学技術諮問委員会、大統領科学技術顧問が強いリーダーシップを発揮している。現在の大統領科学技術補佐官はD. Allan Bromley博士（元イエール大学物理学教授）であり、大統領科学技術諮問委員会委員長、大統領科学技術顧問、及びOSTP（大統領府科学技術政策局）局長を兼務している。

米国版の科学技術庁ともいえるOSTPは米国の科学技術行政を総括/調整しているが、日本の科学技術庁に比べて強力な調整権限を有する。OSTPのもとには「1990年国防権限法」に基づき、連邦政府6名（DOD, DOE, DOC, NASA, NIH, NSF）、学会・民間6名及び議長（OSTP副局長）の計13名の委員から成る「国家重要技術パネル」（Critical Technology Panel）が設けられており、米国の安全保障及び経済発展にとって重要な技術に関する報告書を2000年までの2年毎に提出することとなっている。第1.2－1表は本パネルの91年4月の報告で取り上げられた「国家重要技術」を、DOC（90年5月）、DOD（91年3月）、競争力評議会（91年3月）の同様の重要技術リストと比較したものである。OSTPのリストでは材料・素材分野に次いで第二優先分野として製造技術が挙げられている点が特徴である。

注）

1) 有望先端技術（Emerging Technology、商務省技術局、90.5）

2000年までに米国産業にとって相当の経済的利益が期待できる12の技術を選定。その市場予測と日本/ECとの技術水準を比較したもの。 → 本報告書1.1.1(7)参照

2) 重要基盤技術（Critical Generic Technology、米国競争力評議会(非営利団体)、91.3）

米国の将来の経済発展にとって重要な5技術分野94技術を選定し、その現状評価を実施。

→ 本報告書1.1.1(7)参照

3) 国家重要技術（National Critical Technology、OSTP国家重要技術パネル、91.4）

計13名の委員から成る「国家重要技術パネル」が、米国の安全保障及び経済発展にとって重要な技術に関する報告書を2000年までの2年毎に提出するもの。 → 上記参照

4) 国防重要技術（Defense Critical Technology、国防総省、89.3、90.5、91.5）

国防権限法に基づく議会への年次報告書（「重要技術プラン」）において、米国の安全保障にとって重要な21の技術を選定し、その現状を評価。これら21技術のうちの15の技術が両用（dual use）技術とされている。1992年からは「基幹技術」（Key Technology）に変更。 → 本報告書1.1.1(7)参照

第1.2−1表　OSTP及びその他の行政機関の重要技術リストの比較

国家重要技術（OSTP 91.4）	有望先端技術（DOC 90.5）	国防重要技術（DOD 91.3）	重要基盤技術（競争力評議会91.3）
材料 ・材料合成、加工技術 ・電子、光材料 ・セラミックス ・複合材料 ・高性能金属・合金	・先端材料 ・超電導材料 ・先端半導体素子	・複合素材 ・半導体材料とマイクロエレクトロニクス回路 ・超電導	・材料加工 ・電子、光材料 ・先端半導体素子 ・先端構造材料
製造技術 ・コンピュータによる統合生産技術 ・知能化加工技術 ・マイクロ・ナノ加工技術 ・システム管理技術	・コンピュータによる統合生産技術 ・人口知能	・フレキシブル製造技術 ・人口知能、ロボット工学	・設計及びエンジニアリングツール ・商業化、生産システム ・プロセス装置 ・マイクロエレクトロニクス
情報・通信 ・ソフトウェア ・マイクロエレクトロニクスと光エレクトロニクス ・高性能コンピュータとネットワーク ・高品位画像処理と表示装置 ・センサーと信号処理 ・データの記憶と周辺装置 ・コンピュータシミュレーションとモデルづくり	・高性能コンピュータ ・先端半導体素子 ・光エレクトロニクス ・デジタル画像処理 ・センサー技術 ・高密度データ記憶装置	・ソフトウェアエンジニアリング ・半導体材料とマイクロエレクトロニクス回路 ・高性能コンピュータ ・信号と映像の処理 ・データ融合 ・パッシブ・センサー ・人口知能、ロボット工学 ・光技術 ・シミュレーションとモデル化 ・数値流体力学	・ソフトウェア ・マイクロエレクトロニクス ・光エレクトロニクス部品 ・電子部品実装、インターコネクション ・コンピュータとネットワーキング ・ネットワーク・コミュニケーション ・移動通信機器システム ・表示装置 ・電子制御 ・ヒューマンインターフェース、映像技術 ・情報記憶装置 ・ハードコピー技術 ・データベースシステム ・ソフトウェア
バイオテクノロジーと生命科学 ・応用分子生物学 ・医療技術	・バイオテクノロジー ・医療機器及び診断技術	・バイオテクノロジー	・バイオテクノロジー
航空と地上輸送技術 ・航空技術 ・陸上輸送技術		・空気推進装置	・推進装置 ・動力
エネルギーと環境 ・エネルギー技術 ・汚染防止、復旧技術と廃棄物処理			・動力 ・環境技術
		国防重要技術に特有のもの ・パルス電源、超高速弾と高速発射、高エネルギー密度素材、兵器システム環境、標識制御高感度レーダー	

出所）「平成４年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」、平成5年3月、日本学術会議、p116

(2) 議会

議会の実質的な力（法案作成能力、影響力）が強いのも日本と比較した場合の米国政治の大きな特徴であり、米国議会の議員は１人当たり60人ものスタッフを持ち、総スタッフ数は1万人にも及ぶ。また議会はOTA（技術評価局）、CRS（議会調査局）を有し、それぞれ143名、及び860名の職員を抱えている。科学技術政策においては下院の科学・宇宙・技術委員会が強力な権限を有し、同委員会のGeorge E. Brown委員長（OTAの理事会議長を兼務）と技術競争力委員会のTim Valentine議長が米国の科学技術政策の方向付けに強い力を持っているようである。

(3) 法案及び政策

米国の科学技術政策の一つの大きな特徴は、第1.2－2表に示すように科学技術関連の法案/戦略（例：下院民主党の「米国技術競争力法案」、「1992年国家競争力法案」、下院共和党の「1992年基盤的競争力法案」、上院民主党の「経済リーダーシップ戦略」）が、研究開発支出、技術情報サービス、研究開発支援、教育、インフラ、行政、貿易ツール、税制、独禁法等の科学技術に関連する様々な政策を統括的/総合的に扱っている点である。

現在の米国の科学技術振興政策の基本を成す法律は、1992年2月にブッシュ大統領が署名した「1991年米国技術卓越法」である。同法の骨子は以下のとおりである。

① 商務省技術局及びNIST（米国技術・標準院）の強化

両者の予算による調達の際の"BUY AMERICAN"条項あり。

② ATP（先端技術計画：Advanced Technology Program）の強化

ATPの実施に当たり、「OSTP国家重要技術パネル」が隔年で作成する「国家重要技術報告」の勧告にできる限り沿うことを義務付け。

ATPへの企業の参加資格に関して外資系企業に対する制約的条項を規定。

③ 「重要技術資本費削減国家委員会」の設置

重要技術の競争力強化を資本費低減の観点から分析・勧告

④ 「高解像度情報システム諮問委員会」をOSTPに設置

米国のハイビジョン産業の発展支援に関する分析・勧告

⑤ 「技術と調達委員会」を商務省に設置

連邦政府の調達戦略を米国産業の競争力強化の観点から分析・勧告

⑥ 「国家重要技術報告書」の充実

⑦ 「重要産業」の同定と計画策定

第1.2—2表　米国の科学技術関連法案の比較

	米国下院・民主党 「米国技術競争力法案」 HR5230 ジョージ・ブラウン、ティム・バレンタインが提案	米国下院・民主党 「1992年国家競争力法案」 HR5231 ティム・バレンタインが提案	米国下院・共和党 「1992年基盤的競争力法案」 HR5229 フォーカー下院議員が提案	米国上院・民主党 「経済リーダーシップ戦略」 ジョージ・ミッチェルが提案
1. 研究開発支出	①国防研究開発予算の削減分は、民生研究開発予算の増加にまわすことを議会の意向として決定 ②エネルギー省に、傘下の連邦研所への研究開発予算総額の10%を民間部門との共同研究開発協定の実施に回すように指示			①連邦省庁による応用研究プログラムの拡張 ②連邦研究所予算の一定割合の民間企業との共同研究への割り当て ③製造技術に関する研究開発への連邦政府支援の拡大
2. 技術普及サービス A. 情　報	①企業に標準、品質、技術開発に関する情報を提供するためのコミュニケーションセンターのネットワーク開発と支援	①国際標準、商業化、技術開発に関する政府情報へのアクセスの改善		
B. 製造技能	①製造技術普及センター間のネットワークの構築	①製造技術センター間の全国ネットワークの構築	①商務省を製造・商務省に改組し、製造諮問委員会を設立	①商務省の製造技術センターと州の普及プログラムへの支援強化 ②国防総省の製造技術普及プログラムへの資金支出
C. 施　設	①国防総省を通じた先端製造技術装置リース会社の設立			
3. 支　援	①製造技術センター（MTC）と工学研究センター（ERC）の拡大 ②ベンチャー企業や大学が連邦の資金援助を適正な事業に振り向けることを許可 ③商務省に重要技術開発を目的とした少なくとも2つの新規のコンソーシアムを選定し、資金援助することを指示 ④商務省の先端技術計画(ATP)に基づく助成援助企業などの範囲と数を拡大 ⑤商務省に適正な企業に技術開発融資を行う権限を付与	①製造技術センター（MTC）と工学研究センター（ERC）の拡大 ②重要技術を開発している企業に対するベンチャー資金の利用性の改善 ③重要技術開発を目的とした少なくとも2つの新規のコンソーシアムを選定し、資金援助することを指示 ④商務省の先端技術計画(ATP)を拡大 ⑤ATPのもとで適正な企業に技術開発融資を行う権限を商務省に付与	①国家共同研究法を共同生産にまで拡大 ②1986年技術移転法の全ての連邦政府機関への一様な適用	①民生機関、特にNISTとその先端技術計画による企業の研究開発に対する支援拡大 ②DARPAによる両用技術開発への支援拡大 ③産業主導の製造技術計画に対する国防総省による支援拡大
4. 教　育	①NSFに先端技術産業における技術教育・訓練の促進のためのプログラムを設立 ②特に数学・科学の教師として民間部門に移りたいと考えている国防関係技術省に対する訓練とフェローシップのプログラムの設立		①教育機関に対する企業従業員によるサービスを促進するための税制優遇措置	①大学に行かない若者に対する学校から就職への移行法制の拡大 ②国防総省とNSFの製造工学教育プログラムへの予算の拡大 ③より高い教育水準の設定 ④職業訓練協力プログラムへの支援の拡大
5. インフラ			①高速コンピュータネットワークのような新技術基盤に対する投資を行う	
6. 行　政	①大統領府内に技術・競争力委員会の設立	①大統領府内に技術・競争力委員会の設立		
7. 貿易ツール A. 米国製品の輸出促進				①輸出入銀行の融資機能強化 ②輸出促進諮活動の調整 ③輸出管理を時宜を得たものにする
B. 市場開放に対する政府の役割の強化				①スーパー301条の延長 ②貿易協定遵守法の提案 ③閉鎖的な外国金融市場に対する報復権限を政府に付与
8. 税　制	①研究開発優遇税制の恒久化 ②キャピタルゲインのインフレによるスライド化 ③中小企業に対する税制上の優遇 ④稼働中の一定の資本装置に対する加速償却の許容		①研究開発優遇税制の恒久化 ②企業資産のインフレによるスライド化 ③長期投資家及びスタートアップ企業に対する税制上の救済措置 ④国内の製造企業による投資の促進のための資本損失に対する税務処理の改善 ⑤新しい製造措置に対する税制優遇措置の確立 ⑥納税者に納税額の10%までを負債削減に充てることを許容することによる公共債務の削減 ⑦企業の借り入れのインセンティブをなくすために株主への配当の控除対象化	①新規で雇用創出型のベンチャー企業に対する長期的な株式投資により得られた創業省利益の50%を控除する。 ②企業の新規の設備投資に対する110%の税控除 ③小企業に認められている2年間の経費規定（新装置に対する全額原価償却を許容）の対象額を2万ドルに倍増 ④研究開発優遇税制の延長 ⑤指定された雇用に対する税額控除及び試験税額控除
9. 反トラスト法の改革			①国内市場ではなく、世界のシェアを考慮するよう反トラスト基準の見直し	
10. 賠償責任の改革			①専門職業的業務に関する一律の賠償責任基準の確立及び賠償責任基準一般の改革	
11. 規則の改革			①連邦政府機関が規則を策定する際にその効果を分析し、規則がない場合のリスクと比較考量するよう義務づけ	
12. 状　況	今年中に通過する可能性は少ない。HR5230に類似しているが、小法案であるHR5321が通過する可能性が高いので、HR5321のほうをマークアップ	1992年7月1日、科学・宇宙・技術委員会によりmark-up され、下院本会議に上程。委員会は、8月中旬に本会議出書議を行うことを希望	科学・宇宙・技術委員会において、数週間のうちに公聴会が行われる予定。税制関連条項が含まれているので、いくつかの他の委員会にも付託する必要あり。	1992年7月1日に公表

出所）「平成4年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」、平成5年3月、日本学術会議、p66-68

(4) 主要産業技術プログラム

現在までに発足している主要な産業技術研究開発プログラムを以下に示す。

① NIST（国家標準技術院）先端技術プログラム

1988年の包括通商・競争法案は米国産業技術基盤の強化の為に官民共同技術開発の推進を商務省のNISTの役割・機能としている。この中のATP(Advansed Technorogy Program)では例えば以下のようなコンソーシアムが発足している。

a．MCC（Microelectoronics & Computer Technology Corp.)

大容量ホログラフィメモリーの開発

b．米国高度ディスプレイ製造研究コンソーシアム

(Advanced Display Munufactururers of American Research Consortium)

低コストフラットパネルディスプレイの製造技術開発

② 超電導パイロットセンター（SPC）

DOEのプロジェクトで国立研究所(ﾛｽｱﾗﾓｽ、ｱﾙｺﾞﾝﾇ、ｵｰｸﾘｯｼﾞ)を主体とする官民共同コンソーシアム

③ 高性能コンピュータ＆コミュニケーションプログラム（HPCC）

9省庁からなる省際的なプロジェクト。

大容量並列システム及び先端ソフトウエア　　93年予算（案）：8.3億ドル

④ 先端素材プロセッシングプログラム（AMPP）

10省庁の省際によるFCCSET（連邦科学・工学・技術調整委員会）によるプログラム。

93年予算（案）：18.2億ドル

⑤ 半導体開発のためのコンソーシアム（Sematech）

国防総省DARPA（国防先端研究計画局）及び米国半導体メーカ14社のコンソーシアム

95年に0.35ﾐｸﾛﾝを実現する製造技術の開発　　93年予算（案）：1.0億ドル

1.2.2 最近の動向と今後の展望

(1) クリントン政権の科学技術政策について

1993年1月20日、民主党のクリントン氏が合衆国大統領に就任した。1993年2月22日、クリントンはシリコンバレー遊説の際に、今後4年間の技術政策の枠組みとして、

「米国の経済成長のための技術：経済力強化のための新たな方向」

と題する技術イニシアティブを公表した。その主要点は以下のとおりである。

① 経済力強化（特に民間企業の製品開発の支援）のための技術

・国のR&D努力を、産業・経済成長にとって重要な技術（情報通信、FMS、環境技術等）に移行。

・産学官（連邦/州）の密接な連携を重視。

② 国のR&D努力の方向性

・長期的な経済成長にとって重要だが、一企業では資金的・期間的に開発できない技術

・生産性向上、環境負荷低減につながる技術

・労働者の技能向上

・外国の科学技術へのアクセスの向上

③ 3つの目標

・雇用を創出し、環境を保護する長期的経済成長

・より生産的で、国民ニーズにより対応した政府

・基礎科学、数学、工学において世界的なリーダーシップを発揮

④ 経済成長・技術革新の具体的手段

・研究・試験に対する税控除

・教育・訓練プログラム

・研究パートナーシップ等を通じた民間研究開発の支援

・中小企業のための「研究開発センター」や「製造技術普及センター」

・国家通信インフラその他の情報インフラへの支援

・革新的な製品やサービスの初期市場を促進するような国防総省等の調達政策

・基礎科学への強力かつ持続的な支援

・外国の科学技術へのアクセス向上、国際科学技術協力プロジェクト

・国防総省のデュアル・ユース技術開発プログラム

・SOR、中性子線装置等の共同利用施設

⑤ いくつかの新政策

・研究・試験に対する税控除の恒久化

・情報インフラへの投資

・先端的な製造技術の開発促進

・民間企業による次世代のクリーン・カーの開発

1993年2月17日、クリントン大統領は経済再建のための包括政策プラン「A Vision of Change for America」を発表した。ここでは科学技術・研究開発がトッププライオリティーで扱われており、具体的には以下の施策が盛り込まれている。

① 短期的施策（1993FY予算への追加投資）

・ATP（先端技術計画）の増額 (注)
・情報ハイウェイ計画（商務省・全米通信情報局による）の加速化
・NSFのR&Dプログラムへの追加支出
・NSF、NASA、NIST、NIHの情報へのアクセス改善のための新計画　　等

② 長期的施策（1994～1997FY）

・NSFによる競争的な科学・工学研究の増額
・NISTの民生研究開発予算の増額
・情報ハイウェイ計画の増額
・HPCC（高性能コンピューティング&コミュニケーション）計画の増額
・NASAの民間航空機研究及び短距離航空機研究の増額
・CRADA（国立研究所における民間企業との非国防分野の共同研究）　等

なお、これらの増額とは別に150件の予算削減を提案しており、科学技術関係では原子炉、戦略石油備蓄、海洋気象庁、スペースステーション、SSC関連が含まれる。

下表に同計画における今後5年間の技術分野の歳出計画を示す。本計画は1994年度予算案の骨子となるものと考えられる。

第1.2—3表　「技術とビジネスへの再投資、及び国防転換」分野の投資計画

単位：百万ドル

	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	94年～97年
ＮＡＳＡの民生航空	36	121	171	222	267	550
ＮＡＳＡの短距離航空機研究	3	10	17	20	20	50
国防の再投資及び移行のための両用技術（ＤＯＤ）	133	322	420	456	480	1,331
ＦＣＣＳＥＴ（研究イニシアティブ	100	266	383	457	514	1,206
分野横断高性能コンピューティング	53	156	253	320	362	784
ＮＩＳＴ増額	56	219	403	628	805	1,306
国立研究所（非国防）	14	35	47	50	50	148
情報ハイウェイ（ＤＯＣ）	6	42	98	129	150	275
ＮＳＦ	134	451	758	954	1,100	2,297
政府の自動化・効率化	204	652	850	943	735	2,649
研究・試験優遇税制の延長	1,207	1,503	1,750	1,977	2,200	6,437
合　計（%）	1,946（48%）	3,776（37%）	5,150（35%）	6,156（33%）	6,683（31%）	17,031（36%）
「米国再建」全体	4,013	10,086	14,826	18,617	21,383	47,542

出所）「平成４年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」、平成5年3月、日本学術会議、p88

以上から、クリントン大統領が民生技術を米国（特に米国産業）の基盤強化のための武器として、非常に重要視していることがわかる。ただし、上記のようなコミットメントが実際にどの程度実行に移されるかについては疑問の向きもある。

注）1993年1月7日付"FEDERAL TECHNOLOGY REPORT"によれば、NIST（米国標準・技術院）はATPの21プログラムを採択した。そのうち1月時点で判明している20プログラムの概要を以下に示す。

第1.2—4表　ATPの各プログラムの概要

（単位：$ Million）

テーマ名	参加企業	ATP助成額	総経費
イジェクタ拡張冷凍サイクル	Calman Manufacturing Corp.	0.729	1.1
無線通信のための厚膜超電導材料	Illinois Superconductor Corp.	1.9	3.5
半導体ウェハの乾燥ガスによる浄化	FSI International, Inc.	2	5.5
座標計測器の精度向上のための適応補償技術	Giddings & Lewis Measurement Systems	0.994	1.5
遺伝子センサー（DNAﾌﾟﾛｰﾌﾞ）技術	Genosensor Consortium	9.2	18.5
射出成形耐熱プラスチックの設計	General Motors Corp. / General Electric Co.	5.8	11.8
動画の修復のためのｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑとｿﾌﾄｳｪｱ	Mathematical Technologies, Inc.	0.997	1.1
光通信ｼｽﾃﾑのための波長分割ﾏﾙﾁﾌﾟﾚｷｼﾝｸﾞ	Accuwave Corp.	2	2.9
ｼﾘｶ中での微小光学素子の低ｺｽﾄ作製技術	Geltech inc.	1.3	2.8
蛍光体のための無水銀、低紫外線ﾌﾟﾗｽﾞﾏ技術	General Electric Co.	1.7	3.8
高速/高密度電子回路のための低誘電体技術	IBM Corp.	1.8	5.8
ﾎﾓｴﾋﾟﾀｷｼｬﾙZnSeﾍﾃﾛ構造による青/緑色発光	Eagle-Picher Research Laboratory	1.7	2.9
高電流/並列/広幅イオン注入装置	Diamond Semiconductor Group, Inc.	1.3	1.7
可塑性金属ガラスの高速製造技術	Allied-Signal, Inc.	2	4.2
電子トラッピング光メモリ	Optex Corp.	1.4	2.5
エレクトロクロミック材料	3M / Rutgers University Center for Ceramic Research	3.5	7.1
マイクロチャンネル・プレート	Galileo Electro-Optics Corp.	1.9	3.3
ﾊﾞｲｵﾏﾃﾘｱﾙによる生体材料作製技術	Tissue Engineering, Inc.	2	4.1
手術のための半導体ﾚｰｻﾞｱﾚｲの集光技術	Cynosure, Inc.	2	3.3
人工染色体による抗体作製	GenPharm International, Inc.	2	5.3

原出所）"FEDERAL TECHNOROGY REPORT", 7 Jan, 1993,

出所）NEDO Washington事務所資料より、MRI作成

(2) 国防技術から民生技術重視の方向

以上のような国防技術から民生技術へのシフトの傾向は、既にブッシュ政権時代に、DOD及びDOEの研究開発において民生比率を向上させることが決定されるなど、民生技術重視の方向が打ち出されていた。クリントン政権もこの路線を推し進めることは間違いなく、国防R&Dと民生R&Dの比率が50%：50%になることが期待されている。

冷戦が終結した現在、米国の産軍複合体は統合化・集中化・効率化を進めている。軍事技術の民生への転換は、一般に言われているほど容易ではないため、米国の軍需産業は今後も雇用調整（解雇）や統合化等により厳しい局面を乗り切らざるを得ないであろう。

(3) 米国製造業の空洞化について

米国産業の空洞化が言われて久しいが、最近米国では製造業が復活しつつあるとの説もある。例えばフォード、クライスラー等の米国メーカの一人当たり労働生産性は、日本の自動車メーカよりも高くなってきており、自動車では再び日米逆転が起こっていると言われている。ブッシュ～クリントン政権による「経済・産業強化のためのR&D」戦略により、今後益々米国製造業の復権の傾向が強まるものと予想される。

(4) 米国の知的所有権戦略について

米国にとってアジアの産業の成長は脅威である。しかし米国政府は憲法上産業に直接関係するR&Dに金を出せない。従って国内の知的所有権の強化保護と通商政策によって米国産業をガードせざるを得ない。ガードの相手として米国は今後経済成長の大きいアジアを重点的に狙っている。ミノルタ v.s. ハネウェルを始めとする最近の特許係争の頻発にはこのような背景がある。

最近では、NIHが人の遺伝子情報を特許化できるよう米国特許意匠登録庁に申請した。この申請は現行特許法に基づき却下されたが、これを契機としてこれから論議が始まり、今後はヒトゲノムの知的所有権を認める方向で展開するものと予測される。

このように知的所有権は米国にとって「最後の砦」ともいうべきものであり、今後も通商法による保護の強化、民間での特許訴訟の増加、さらには遺伝子やアルゴリズム等広義の知的財産の保護の動きが予想される。

1.3 欧州（EC）

本節ではECの産業技術政策の動向について述べる。なおここでは欧州各国の産業技術政策については特に触れないが、ドイツについてはJETRO技術情報No.326、1993.2（及びNo.328、315、307、303）、英国に関してついては同No.317が詳しいことを附記する。

現在、ECを中心とする欧州における共同開発計画には、次の4つの主要な流れがある。

① ECフレームワーク・プログラム

EC加盟国の競争前段階の技術に関する共同研究プログラムで、通常研究費用の50%までが支援される。プログラムのフレーム内容・予算等は、EC委員会が提案しそれをEC閣僚理事会・欧州議会が承認する、という形で決定される。

② EUREKA計画

EC及びEFTA加盟国を中心とする共同開発プラグラムで、市場指向型の研究をボトムアップ形式で企画し、参加国毎に独自の方法で費用助成を行う。プロジェクトによっては、米国、カナダ、アルゼンチン、イスラエル、旧ソ連、ユーゴスラビアといったEC/EFTA非加盟国が参加する場合もある。

③ COST

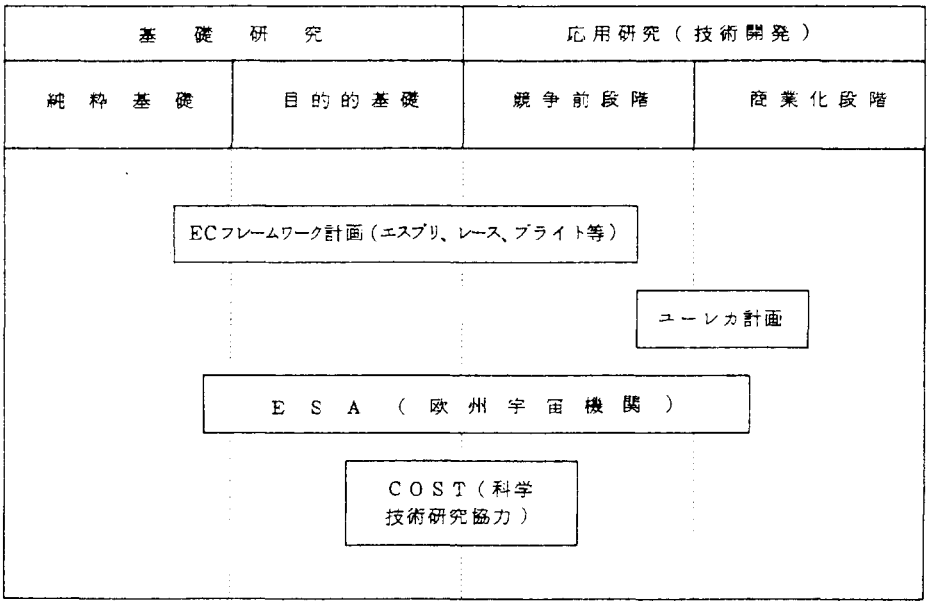
（European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research）

EUREKAよりもさらに広範囲な欧州諸国間の共同研究プログラム。ECフレームワーク・プログラムを補完する形で、欧州の科学技術研究者の協力を支援しており、欧州諸国の「科学研究クラブ」とも言われている。参加国が共通の関心を有する15の基礎的・基盤的研究分野に23ヶ国が参加。EC委員会が、運営・調整費用を負担する等、プロジェクト推進に大きな役割を果たしている。

④ ESA（欧州宇宙機関）

ESAは平和利用のための宇宙開発協力を推進するため、1975年に発足した。参加国は仏、独、英、伊、ベルギー、オランダ、デンマーク、スペイン、アイルランド（以上EC加盟国）、及びオーストリア、ノルウェー、スウェーデン（以上EFTA加盟国）の12ヵ国である。参加国のGNPに応じた強制拠出金と個別プロジェクトへの任意拠出金により運営されており、ハレー彗星探査機「ジオット」や実用衛星打ち上げ用ロケット「アリアンヌ」等のプロジェクトが進行中である。

第1.3－1図にこれら4つの共同研究制度を4つの研究ステージ（純粋基礎研究、目的的基礎研究、競争前段階応用研究、商業化段階基礎研究）のどれを対象としているかによって示した図を示す。



第1.3—1図　欧州の共同研究開発

出所）「平成3年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　ベルギー王国及びオーストリア共和国」、平成4年4月、日本学術会議、p126

以下ではECの技術開発計画の柱であるECフレームワーク・プログラムの概要について述べる。

1.3.1　ECフレームワーク・プログラムの概要

ECは1967年にEEC、ECSC（欧州石炭鉄鋼共同体）、EURATOM（欧州原子力共同体）が統合されてできたものである。このうちECSC、EURATOMにおいては、石炭、鉄鋼、原子力分野の共同研究が行われてきた。統合後のECが幅広く研究開発に取り組み出したのは、1973年に「科学技術政策に関する行動計画」が決定されてからである。

同計画の成果はさほど大きなものではなかったが、約10年を経過した1984年、ECは統合市場化を念頭におきつつ、より本格的な共同研究プログラムとして「科学技術と研究開発のための第１次フレームワーク・プログラム」（1984～87：4カ年計画）を発足させた。同計画の総予算額は37.5億ECU（注：92年1月時点で、1ECU＝161円。このレートで換算すると、約6,000億円）で、情報技術に関するESPRIT-Ⅰ、バイオテクノロジーに関するBEP等の研究開発プロジェクトが実施された。

その後1987年7月には、ECの基本法であるローマ条約を修正する「単一欧州議定書」が発効し、この中の「ECが、欧州産業の科学的・技術的基盤を強化し、欧州産業の国際競争力を高めるよう助成することを目的とする」という記述によって、加盟国間の共同研究開発は法的な正当性を与えられた。また同議定書に従って、従来の計画が見直され、第２次フレームワーク・プログラム（1987～91：5カ年計画）がスタートした。

同２次計画の総予算額は53.9億円（上記と同様の換算で、約8,700億円）で、情報技術のESPRIT-Ⅱ、産業技術のBRITE-Ⅰ、材料技術のEURAM-Ⅰ、通信技術のRACE-Ⅰ、コンピュータ教育のDelta、食品技術のFlair、バイオテクノロジーのBAP、海洋科学技術のMAST

等のほか、環境分野では、オゾン層問題等に関するSTEP、気象学に関するEpoch、エネルギー分野では、原子力（核融合／核分裂）分野の各種プロジェクト、非原子力・省エネルギー分野のJOULE等が実施されている。

以下に第２次フレームワーク・プログラムの詳細を記す。

第1.3—1表　第２次フレームワーク・プログラム（1987～91）の概要

（単位　100万ECU）

	予算 New Commitments
1. QUALITY OF LIFE（生活の質向上）	
1. 1 Health（保健）	80
1. 2 Radiation Protection（放射線防護）	34
1. 3 Environment（環境）	263
Total	375
2. TOWARDS A LARGE MARKET & AN INFORMATION & COMMUNICATIONS SOCIETY（情報と通信）	
2. 1 Information Technologies（情報技術）	1,600
2. 2 Telecommunications（電気通信）	550
2. 3 New Services of Common Interest (inc. Transport)（運輸と新しいサービス）	125
Total	2,275
3. MODERNISATION OF INDUSTRIAL SECTORS（産業分野）	
3. 1 Science & Technology for Manufacturing Industry（製造業）	400
3. 2 Science & Technology of Advanced Materials（先端材料）	220
3. 3 Raw Materials & Recycling（原材料）	45
3. 4 Technical Standards, Measurement Methods & Reference Materials（標準，測定法等）	180
Total	845
4. EXPLOITATION & OPTIMUM USE OF BIOLOGICAL RESOURCES（生物資源）	
4. 1 Biotechnology（バイオテクノロジー）	120
4. 2 Agro-Industrial Technologies（農工業技術）	105
4. 3 Competitiveness of Agriculture & Management of Agricultural Resources（農業）	55
Total	280
5. ENERGY（エネルギー）	
5. 1 Fission : Nuclear Safety（核分裂）	440
5. 2 Controlled Thermonuclear Fusion（核融合）	611
5. 3 Non-Nuclear Energies & Rational use of Energy（非核エネルギー）	122
Total	1,173
6. SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT（開発用科学技術）	80
7. EXPLOITATION OF THE SEABED & USE OF MARINE RESOURCES（海洋資源）	
7. 1 Marine Science & Technology（海洋科学技術）	50
7. 2 Fisheries（漁業）	30
Total	80
8. IMPROVEMENT OF EUROPEAN S/T CO-OPERATION（欧州科学技術協力）	
8. 1 Stimulation（活性化）	180
8. 2 Use of Major Installations（大型設備利用）	30
8. 3 Forecasting & Assessment & Other Back-up Measures (inc. statistics)（予測とアセスメント）	23
8. 4 Dissemination & Utilisation of S/T Research Results（成果の普及利用）	55
TOTAL	5,396

出典：'A Guide to European Community Grants and Loans' (Eurofi Plc)

出所）　研究・技術計画学会「研究　技術　計画」Vol.5, No.1 / 1990

注）　1ECU=1.06US^{ドル}（1989年6月末）

第３次フレームワーク・プログラム（1990～94：5カ年計画）に関しては、1990年4月のEC研究理事会において研究開発基本計画が定められ、今後5年間の基本方針と総費用57億ECU（約9,200億円）が認められた。これを受けてEC委員会は3分野15件の研究開発プログラムの具体的内容に関する提案を行い、1991年12月20日の閣僚理事会は概ねこの提案を承認した。

同計画では、情報技術の次期ESPRIT、産業技術・材料技術のBRITE/EURAM-Ⅱ、通信技術のRACE-Ⅱ、情報通信等の規格・標準仕様等に関するテレマテック・プログラム、バイオテクノロジーのBRIDGE等が提案されているほか、環境分野では安全基準や環境インパク

トの研究、エネルギー分野ではクリーンで安全なエネルギー技術の開発、地球温暖化や酸性雨問題に対応したエネルギーの有効利用等に関する研究開発プロジェクトが計画されている。

以下に第3次フレームワーク・プログラム（1991年12月EC閣僚理事会決定時点）の詳細を記す。

第1.3—3表　第3次フレームワーク・プログラム（1990～94）の概要

研究分野	予算（百万ECU）		比率%
I．技術の可能性の達成			
1．情報技術と通信技術	2198.79		38.96
＊情報技術		1338.48＋	
＊電気通信		484.11＋	
＊一般用テレマティックシステム開発		376.20＋	
2．産業秘術と材料技術	877.54		15.55
＊産業技術と材料技術		663.70	
△JRC		77.22	
＊計測と試験		47.52	
△JRC		89.10	
II．天然資源の管理利用			
3．環境	512.86		9.09
＊環境		261.40	
△JRC		148.50	
＊海洋の科学技術		102.96	
4．ライフサイエンスと技術	733.59		13.00
＊バイオテクノロジー		162.36	
＊農業と農工業（水産を含む）		329.67	
＊バイオ医学と保健		131.67＋	
＊開発途上国用ライフサイエンスと技術		109.89	
5．エネルギー	807.84		14.30
＊非核エネルギー		155.43＋	
＊核分裂		35.64＋	
△JRC		164.34	
＊核融合		411.84＋	
△JRC		40.59	
III．知的資源の管理			
6．人材資源と移動交流	512.82		9.09
△JRC		24.75	
合　計	5643.44		100.00

＋印　：　これ以外に，まだ閣僚会議で了解されていないプログラムの内容がある．
△ JRC：　合同研究センターの維持経費

出所）　JETRO技術情報 316 APRIL 1992、p2-3

以下、ECフレームワーク・プログラムにおける主要なサブ・プログラムについて簡単に述べる。

(1) ESPRIT計画

ESPRIT計画は、欧州の情報産業が世界市場において必要とされる新技術を獲得するのを支援すべく、競争前段階における先端的な情報技術の共同研究を助成するため、1984年2月に始まった。

これまで既に、ESPRIT-Ⅰ（1984～88、7億5000万ECU、220プロジェクト）とESPRIT-Ⅱ（1988～92、16億ECU、369プロジェクト以上）が第1次・第2次フレームワークの中で最大のサブ・プログラムとして実施され、現在第3段階のESPRIT-Ⅲが第3次フレームワークにおいて次の内容で実施されている。

・マイクロエレクトロニクス
・ソフトウェア・エンジニアリング、及び情報処理システム
・業務用/家庭用の先端的情報システム、及び周辺機器
・CIM
・基礎研究

(2) BRITE/EURAM計画

BRITE計画は、産業界支援のための基礎技術、応用技術の共同研究開発を目的として、第2次フレームワークにおいて1985年に開始された。一方EURAM計画は、金属材料、構造用セラミクス、複合材料の開発を目的として、同じく第2次フレームワークにおいて1986年に開始された。両計画は重複があったため、第3次フレームワークにおいてはBRITE/EURAM-Ⅱとして統合された。

同計画の特徴は参加企業における中小企業の比率が比較的高いことであり、主要研究分野は以下のとおりである。

a 先端材料

金属材料、金属複合材料、磁性材料、光学材料、電気材料、超電導、非金属耐熱材料、高分子材料、ポリマー基複合材料、特殊用途材料

b 製品・工程設計手法、品質管理、信頼性

c 製造工程の新手法、FMS

d 製造技術

表面技術、加工・組立、化学処理、粉末冶金

e 航空

空気力学、音響、飛行管制、推進システム

(3) RACE計画

RACE計画は電気通信分野のR&Dプログラムであり、第2次フレームワークにおけるRACE-Ⅰ（1987～）を経て、現在は第3次フレームワークにおいてRACE-Ⅱが実施されている。

RACE-Ⅰでは、総合広帯域通信（IBC）の実証装置及び規格の開発が行われ、RACE-Ⅱでは引続きIBCの研究が行われるとともに、次の研究開発が行われている。

・インテリジェント・ネットワーク
・移動体通信、パーソナル通信
・画像通信、データ通信

・総合サービス技術
・情報セキュリティー確保技術
・先進的通信の実験
・試験設備、その他のR&D支援

1.3.2 ECの人材開発政策

ECでは、科学技術に関連した施策として特に人材開発及び加盟国間の人材交流に力を入れている。代表的なプログラムは、Erasmus計画（EC域内の大学生の相互交流をはかるもの）やComett計画（大学と企業の交流・協力を促進するもの）などの人材育成・交流プログラムであり、この他にもPetra、Lingua、Youth of Europe、Exchanges of Young Workers、Arion、Cedefopなどのプログラムがある。以下Erasumus及びComette両計画について概要を述べる。

(1) Erasmus計画

ECの大学間の協力プログラムであり、EC加盟国間で大学生及び大学教官の相互交流を図ることを目的としている。ある国の大学生等がEC内の別の国に留学した時にかかる経費や授業料を補助し、また留学先で取得した単位を母国の大学においても認定できる、という制度である。

(2) Comette計画

Comette計画は産学間の国境を超えた協力の強化を目的としたプログラムとして、1986年に発足した。設立の背景には、ECの産業基盤を強化し、競争力を向上させる、という目的がある。同計画はパイロット・フェーズと第２フェーズの２段階に分かれ、それぞれComette-Ⅰ（1987～89）、Comette-Ⅱ（1990～94）と呼ばれ、現在は後者が実施されている。同計画の内容を以下に示す。

・産学パートナーシップ（UETPと呼ばれる）の創設
・産学共同研修プロジェクト
・産学間の人材交流の促進・援助
・産学間の情報や経験の交換の促進

なお欧州にはProfessional Engineerという資格があり（注：米国にもインターン制度及びP.E.制度あり）、P.E.になると高い社会的地位と給料が与えられる。これは日本の技術者が主として企業に育てられ、P.E.のような資格を持たず、地位や給与は欧米より劣る点と好対称である。

第２章　産業技術の流れと今後の進展

本章では、文献調査、10名の専門家からのヒアリング調査、及び132名の専門家からのアンケート調査に基づき、各分野の産業技術の流れと今後の進展について、極限化、高機能化、複合化という視点に沿って分析した。

2.1　ヒアリング及びアンケート調査の概要

2.1.1　ヒアリング調査の概要

ヒアリング調査の調査事項を以下に示す。

① ご専門分野及びその研究動向
② 将来の技術の方向性をみる視点
③ ご専門及び周辺分野における極限化の進展
④ ご専門及び周辺分野における高機能化・ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化の進展
⑤ ご専門及び周辺分野における複合化の進展
⑥ 今後の有望領域・テーマ
⑦ その他国の技術政策に対するご意見

また、ヒアリングにご協力いただいた専門家の方々の所属、お名前、役職、及び御専門分野を以下のとおりである（面会順）。なお、各個別のヒアリング記録を巻末に付したので参照されたい。

①	ペンシルバニア州立大学	内野教授（センサ、アクチュエータ）
②	東京大学教養学部	杉本教授（天文学、超並列計算機）
③	北海道大学工学部電子工学科	伊藤教授（衛星通信、太陽光発電衛星）
④	東京大学生産技術研究所	荒川助教授（量子効果デバイス）
⑤	東京大学工学部金属工学科	吉田教授（ﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄﾞ等薄膜、ﾌﾟﾗｽﾞﾏ材料科学）
⑥	東京大学農学部農芸化学科	別府教授（酵素、微生物利用、抗ガン剤）
⑦	航空技研熱流体力学部	蓑田部長（ジェットエンジンの基礎研究）
⑧	Ｔ社技術研究所	Ｋ　部長（化学プロセス、宇宙関連装置）
⑨	東京大学先端科学技術研究ｾﾝﾀｰ	河内教授（ﾊﾞｲｵﾒｶﾆｸｽ、流体力学、VTOL）
⑩	帝人㈱	内田顧問（知的所有権、技術戦略・政策）

注）1.　この他に、某自動車会社の方にもお話を伺った。
　　2.　内田顧問には、主として欧米の技術戦略・政策の動向に関してお話を伺い、その結果を第１章等に反映させた。

2.1.2 アンケート調査の概要

アンケート調査の概要を以下に記す。なおアンケート調査票、アンケート回答者一覧表、及びアンケート集計結果を巻末に付したので、参照されたい。

(1) 送付先及び回収数

部　門	主要対象	人　数
民間企業	1部上場企業の研究所長クラス	179名
国立研究所	部長クラス	134名
大　学	国立大学の主任教授クラス	179名
（計）		492名

回収数：132名（回収率27%）
（うち不明点につき、約3割（36名）の方に電話/直接ヒアリング実施）

(2) 質問事項

質問1　今後の産業技術の進展を占う上での視点
質問2　専門/周辺分野に関する極限化の進展予測
質問3　専門/周辺分野に関する高機能化（ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化）の進展予測
質問4　専門/周辺分野に関する複合化の進展予測
質問5　今後の有望技術領域と具体的R&Dテーマ

2.2 技術をみる視点と方向性

2.2.1 視点の定義

本報告書における「極限化」、「高機能化」、「複合化」という視点の定義は以下のとおりとする。実際の技術の進展はこれらの視点の組み合せで分析できる。

(1) 極限化

技術の量的な面での進展（大きい方向と小さい方向）の総称。以下の3種類に分類できる。

① 空間（サイズ）の極限化
例）微細化、微粒子化、小型化、巨大化など

② 時間の極限化
例）高速化、微小時間化など

③ 場の極限化
例）高圧化、高真空化、高純度化、強磁場化、強電場化、無重力化など

(2) 高機能化

技術の質的な面での進展の総称。インテリジェント化を含むが、より広い概念。生体の機能を模倣したり（バイオミメティクス）生体を利用したりする技術もこの範疇に含まれる。

例）自己組織化、自律分散化、環境適応化、自己修復化、自己診断化など

(3) 複合化

融合化、総合化等の類似概念を含む。なお、2つの技術の組み合せによって1+1>2となる場合を融合化という、という見方もある。

技術の進展においては、ほとんどの場合なんらかの意味での複合化が伴うものと考えられるが、ここでは以下の範疇に含まれる概念を複合化と定義し、特に①②③の範疇に焦点を当てることとする。

① 異分野の技術ないし知見の組み合せによって、新しいコンセプトが生まれるケース

例）バイオテクノロジー＋エレクトロニクス ➪ バイオ素子、バイオセンサ
神経生理学＋ソフトウェア技術 ➪ ニューラルネットワーク
神経生理学＋デバイス技術 ➪ ニューロチップ
遺伝アルゴリズム＋メカトロニクス ➪ 最適制御
遺伝アルゴリズム＋ソフトウェア技術 ➪ 人工生命

② 異なる物質・材料ないしハードウェアの組み合せによって、新しい物質・材料ないしハードウェアが生まれるケース

例）複合材料、超格子材料

③ 技術と応用先の組み合せによって、多様なアプリケーションが生まれるケース

例）アクチュエータ＋宇宙用 ➪ 巨大アクチュエータ
アクチュエータ＋医療用 ➪ 医療用マイクロマシン

④ 複数の技術ないし要素の組み合せによって、複雑ないし大規模なシステム/装置が構成されるケース

例）材料技術＋空気力学＋熱力学＋数値計算技術＋信頼性工学＋原動機工学＋人間工学＋電子制御技術 ➪ 航空機

2.2.2 その他の視点

(1) アンケート調査より

アンケート結果（質問１）より、今後の技術の方向性を占った。以下に質問１の集計結果（視点のみ抜粋）を記す。

第2.2—1表　アンケートによる今後の産業技術の方向性（視点）

分類	視点
極限化	超時空間制御化
	高速化
	マイクロ化
	大型装置の小型化、簡便化
	簡素化・単純化
複合化・融合化	統合化
	総合化、統合化
	融合化
	融合化
	総合化
	融合化
	融合化
	融合化
	総合化
	統合化
ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化	自律分散化
	オートモナス化
	フレキシブル化
	柔構造化
	生活性化
	無人化
	工程保証化
	複雑化、ネットワーク化

分類	視点
環境調和化	エコロジーとの調和
	環境適応化
	リサイクル化
	調和
	リサイクル化
	エコマテリアル化
	省エネ化
	自然化
	環境融和
	環境調和化
	地球環境
	適合化
	地球環境との融合化
	省資源化、リサイクル化
	復元化（又は再生化）
	リサイクル化
	リサイクル化
	エコマテリアル化
人間親和化	人間重視
	親人間性
	人にやさしい
	人間のとの整合性
	ヒューマンフレンドリー
	人間性の研究
	人間親和化
	ソフト化
ｲﾉﾍﾞｰｼｮﾝ	独創的発明・発見
	新知識
	科学上の新発見・新理論
	突発的
国際化	国際化
	国際化
その他	多様化
	標準化（標準化技術）
	マスター・スレイブ化
	電子化
	連続化
	定着化
	適材適所化
	価値の再評価
	新物質

出所）MRI

本質問は、極限化、高機能化（ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化）、複合化以外の視点について伺ったものだが、広義にとらえると高速化、小型化、融合化、総合化、自律分散化等の視点もこれら３つの視点に含めて考えることができる。

なお、画期的なイノヴェーションは、こういった連続的な視点ではなく、個人の独創的な能力や偶然により不連続ないし突発的に起こる、という意見もあり、傾聴に値する。

ニーズサイドからは、いわゆる「環境に優しい」という環境調和的な視点、及び「人に優しい」という人間親和的な視点が数多く見られ、最近よく言われていることではあるが、これらニーズサイドからの２つの視点の重要性を再確認する結果となった。

(2) ヒアリング調査より

ヒアリング調査では、技術の極限化、高機能化（ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化）、複合化という３つの視点は概ね妥当である、というご意見が多かった。以下、ヒアリング調査で得られたこれら３つ以外の視点ないし方向性を示す。

① 多様化

・杉本教授

これら３つの視点以外では、「多様化」の視点が重要かと思われる。例えば高速の超並列処理計算機を作る場合、何でもできる汎用の並列マシンを作ることも可能だが、無駄が非常に多い。それよりも例えば「多粒子系のシミュレーション」というように目的を限定してそれに向いたアーキテクチャとソフトウェアを設計したほうがはるかに安上がりで使えるマシンができる。そうなるといろいろな目的に応じた専用マシンを作る、即ち並列計算機の多様化（10数種類あればよい）が必要になる。

また「多品種少量生産システム」なども多様化の考え方の延長線上にある。

② 多体化

・荒川助教授

量子デバイスは、実際には電子／光子1個では機能しない。実用に供するためにはある程度のエネルギーが必要なため、10個～100個単位の電子／光子の制御が必要である（そのためには先ず1個単位で制御できることが必要←パチンコ玉をまとめて沢山の穴に入れるためには、先ず1個の穴への入れ方がわからなければならない）。しかしそうなると多体問題となり、難しい問題となる（1個の挙動ならわかる。また1万～100万個単位の通常レベルの電子なら統計力学的に扱える）。この多体問題を扱うための概念、理論、モデルが必要（確とした理論的背景があった方がデバイスを設計しやすい）。

③　ネットワーク化

・荒川助教授

量子効果デバイス実用化のポイントとして、性能の極限化も将来的には重要だが、実用化のためには、それぞれの量子箱のアレイをどうやってつなぐか、そして何を出力にするか、といったネットワーク化の問題（システム化技術）が重要になる。例えば個々のシナプスの機能は実現できても、脳の機能は実現が難しいように、このような多体問題は困難だが重要な課題である。

④　生態学的アプローチ

・別府教授

今まで実験生物屋はともすると生態学を毛嫌いする傾向にあったが、トリプトファナーゼ合成微生物の「共生」のような微生物同士のインタラクション、及び微生物と外部環境のからみ、といった生態学的アプローチも今後は重要と考える。例えば土を取ってきてその中のリボソームRNA（rRNA）を種にしてDNAを増殖させ、実際の環境においてどれくらいの種類・数の微生物がどれ位のスピードで進化しているのか、といったテーマも興味深い。

⑤　省エネルギー化

・杉本教授

限られたエネルギー資源を有効に使って人類が生存していくために、依然として省エネルギーの視点が重要である。

極限化を進めるのも良いが、極限化（特に大きい方への）は、えてしてエネルギーを喰うことも忘れてはならない。

⑥　地球環境調和化

・Ｔ社Ｋ部長

極限化・複合化・インテリジェント化はいずれも手段あるいは流れに過ぎない。その時代々々の価値観（大量生産、省エネ、対環境等）の変遷を正しく認識し、極限化、複合化、インテリジェント化によって人類にどのように貢献するのか将来に向って設定することが重要。これまでの価値観の変遷を見ると、水も空気も使い放題の大量生産の時代があり、その後省エネ・コストダウンの時代が到来し、現在では地球規模の環境への配慮が課題となっている。

極限化等は手段（あるいは流れ）に過ぎない。省エネ、地球環境問題等その時代時代の価値観の変遷を正しく認識し、将来に向って課題を設定することが重要。

2.2.3 まとめ

上記の視点のうち、「生態学的アプローチ」はバイオミメティック（生物の模倣）なアプローチの一種とみることができるため、広義の高機能化に含めることとする。また「多体化」と「ネットワーク化」も量的な側面というよりも質的な側面の進展であるため、高機能化に含めることとする。

また、「省エネルギー化」と「地球環境調和化」は「環境調和化」の一種とみることができる。

以上より、今後の技術の進展の方向性を整理すると以下のようになる。

(1) 技術サイドからの方向性

① 極限化

技術の量的な側面での進展を目指す方向性。

空間、時間、場の3種類に分類できる。

副次的に質的な進展を伴う場合あり。

② 高機能化

技術の質的な側面での進展を目指す方向性。

高機能化、インテリジェント化、知能化、自律分散化、生物への接近、生物の利用（バイオテクノロジー）、バイオミメティクス、生態学的アプローチ、ネットワーク化、多体問題、非線形問題への対応、等の概念を広く含む。

③ 複合化

異分野の技術・知見や物質・材料を組み合せて、新しいコンセプトや材料・素子を生み出す技術

(2) ニーズサイドからの方向性

① 環境調和化

環境や資源の制約に充分配慮した技術

② 人間親和化

人間の生理・心理・行動に充分配慮した技術

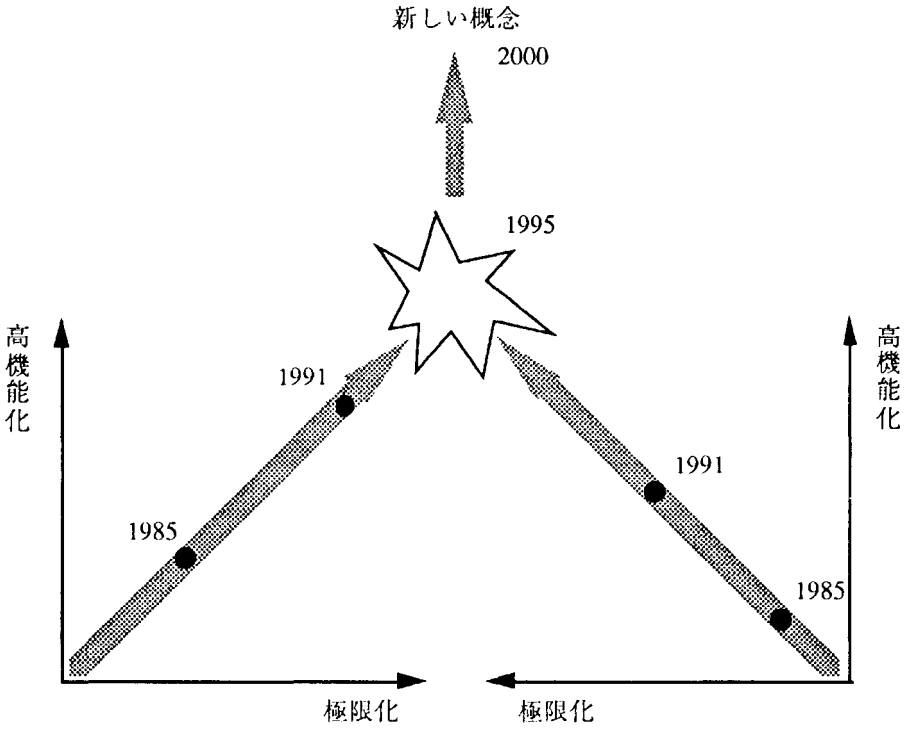
③ 多様化

人間の多様なニーズに最適・低コストかつ多様なオプションで対応する技術

2.3　産業技術の流れと今後の進展

本節では、2.2節で評価した6つの視点のうち、技術サイドからの3つの視点に基づき、各技術分野における極限化（量的側面の進展）、高機能化・ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化（質的側面の進展）、及び複合化の流れと今後の進展を分析した。下図はこれら３つの視点の関係を図示したものである。

第2.3－1図　３つの視点の関係



出所）MRI

2.3.1　極限化の進展

東京大学工学部金属工学科の吉田教授は、薄膜形成等の材料プロセシングの極限化を次のように3種類に分けて定義している。

吉田教授：

「いわゆる極限プロセシングといわれているものを統計力学用語で分類するとΓ空間での極限プロセシングとμ空間での極限プロセシングとに分類できる。

① Γ空間での極限プロセシングは、極限環境下でのプロセシングといえるもので超高低温、超高圧、超高真空、超高磁場、電場、無重力場などの熱力学的状態量、もしくは場の極限環境が利用される。

② 一方μ空間での極限プロセシングは、3次元的空間での極限制御を目指すプロセシングである。これは現在、超ＬＳＩやマイクロマシンにおいて発展しつつあるもので、ＭＢＥ法やMOCVD法を利用した超格子薄膜の堆積、ナノレベルエッチング、量子細線や量子ドットの形成やＳＴＭを利用した原子レベルでのプロセシングがあてはまる。

③　これに続く第3の極限プロセシングとして、t空間における”時空間制御プロセシング”が考えられる。これは言ってみれば外的作用を反応プロセスの時間と同期させるということで、究極的に言えば固体の格子振動の時間、つまりピコ秒オーダーでの外的刺激と固体表面の相互作用が考えられる。またそこまでいかなくても例えばプラズマ中での分子の励起緩和時間(～ns)や各種反応の緩和時間(～μs)など現在の技術でも対応可能な領域がある。

このプロセシングの制御には、連続的制御とパルス的制御が考えられる。前者では位相制御が考えられ、後者ではパルス的エネルギー供給としてパルスレーザーなどの適用が考えられるが、電子線やX線の利用も考えられる。

この”時空間制御プロセシング”の概念は現在の私のプラズマ研究から考えついたものであるが、この研究領域での内外の先進的な研究者の間では時空間制御によるプロセシングのブレークスルーが多く試みられている。まさしくプロセシングにおける第3の概念が芽生えているといえるかもしれない。

これまでの我々プロセス屋の本能的な固定観念として、時代の要請を満たす大量生産用プロセシングには大いなる定常状態が必要であるという根付いた常識があったともいえる。時間軸へのこだわりがおろそかであったことは事実であると思う。」

この分類方法は非常に卓見と思われるので、ここではこれに習って「極限化」を「3次元空間の極限化」、「場の極限化」、及び「時空間の極限化」に分け、それぞれの各分野における動向を追うこととする。なお3番目の「時空間の極限化」については、吉田教授の定義を拡大して、広く「高速化」、「短時間化」、「非定常現象の取扱い」という意味で用いることとする。

(1)　3次元空間（μ空間）の極限化

サイズの微細化と巨大化が考えられるが、主として微細化の方向が主流である。

①　微細加工技術

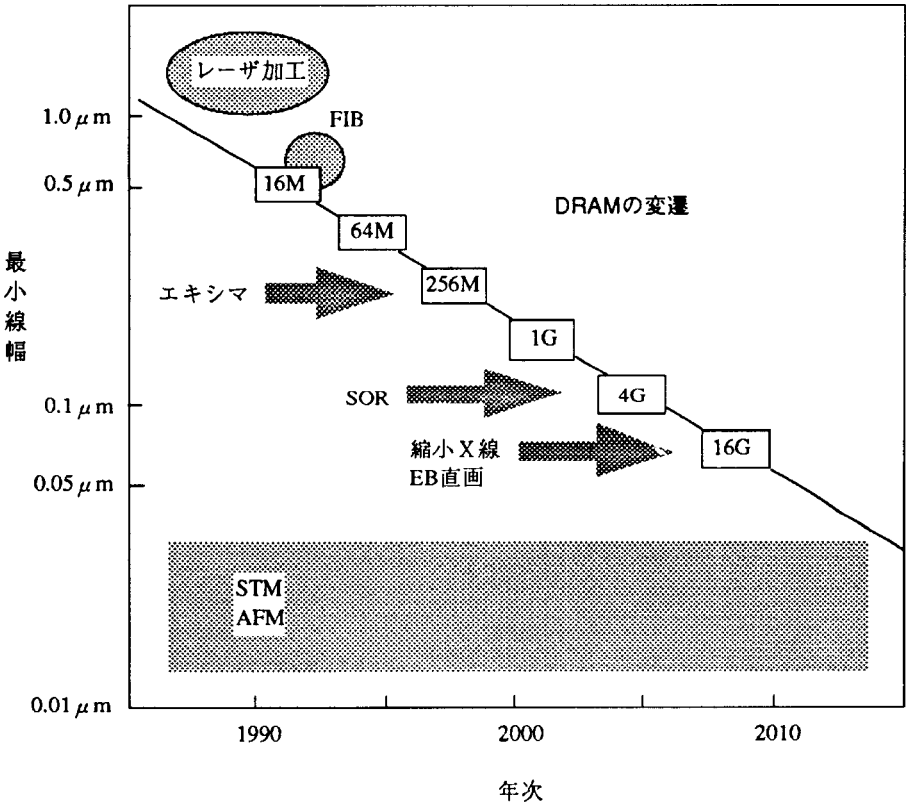
ここでの「微細加工技術」とは、リソグラフィ、ビーム加工等の技術を指す。

微細加工技術は、超LSI製造プロセスの要素技術として発展してきた。第2.3－1表に各微細加工技術の概要を、第2.3－2図にはその変遷をDRAMの容量の変遷とともに示した。なお、これらの加工技術は半導体等電子デバイスのみならず、将来的にはいわゆるマイクロマシンへの適用も期待されている（マイクロマシンについては後述）。

第2.3−1表　微細加工技術の原理と特徴

		原理	現状・特徴
リソグラフィ	エキシマ	エキシマレーザを利用した露光技術	KrFやArF等エキシマレーザ開発。レーザ寿命や信頼性が問題。波長に適合する高解像度、焦点深度余裕のあるレジスト開発難、実用的なものは現れていない。
	SOR	シンクロトロン放射光を利用した露光技術	解像度限界100nm。等倍近接露光方式採用。X線マスクの開発が問題。X線縮小露光も研究進展。
ビーム加工	EB	電子線照射による材料加工	解像度：8nmのコンタミネーションマスク。100nmのX線マスク修復やGaAsエッチングに応用。酸化膜上では帯電により解像度劣化。
	FIB	イオンビームを集束して照射することによる加工法	解像度50nm。LSI深さ方向の切断と断面観察、デバイス最適化配線形成に応用。損傷、低スループットが欠点。
	レーザ	レーザビーム照射による加工	結晶成長のための局部熱処理への応用
STM関連技術	原子・分子操作	ファン・デア・ワールス力を利用した原子分子の任意操作	4KのNi面上の吸着キセノン原子を操作、文字状に配列。
	局所溶融	局所電流によるジュール加熱での表面加工	アモルファス状Pd-S膜を局所加熱し、16nm径のドット形成。
	蒸発とスパッタ	ガス雰囲気中のティップ先端部でのプラズマ発生現象を利用した加工法	Si（111）表面のエッチング。TMA雰囲気でのグラファイト表面のイオン・ボンバードによる穴あけ。
AFM		ティップと試料との間に働く原子間力をモニターするSTM関連法	絶縁物加工。ゼオライト表面に観測時より強い原子間力を働かせてXの文字を描く。

出所）MRI



第2.3−2図　微細加工技術の変遷

出所）MRI

今回のアンケート調査結果によると、半導体の0.1μm（100nm）レベルの微細加工技術が1998～2000年頃に実現されると予測されている。それ以上の微細化は量子効果に阻まれてかなり困難とも考えられるが、2005年頃には0.01μm（10nm）レベルまで進展するとの予測もある。

この結果、256MbitDRAMの製造技術が1998年～2000年頃、1～4GbitDRAMの製造技術が2005年頃確立される。ただし、1Gbitクラスは設備投資額が膨大になるため、製造技術において相当のイノヴェーションがなければ経済ベースで対応可能な企業は限られるものと推測される。

半導体メモリのリソグラフィ技術としては、ArF等のエキシマレーザ（256M～1GbitDRAM）、さらにはSOR光源によるX線リソグラフィ（4GbitDRAM）が使われると予測されている。

第2.3—2表　微細加工技術の極限化に関するアンケート結果

技術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
半導体微細化技術	256Mbメモリ（1998）　⇨ 4Gbメモリ（2005）	メモリの増大は家電製品等のマルチメディア化に拍車をかける
機械加工	サブミクロンの精密加工（1998）	機械、電気産業以外にも、バイオ、原子力、医療など幅広い分野にインパクトを与える。
制御	サブミクロン～ナノオーダーの制御・ハンドリング（1998）	
（半導体）超微細加工技術	0.1μmレベル加工の実用化（1998）	1GDRAMの実用化のキー技術→マルチメディア技術、VR技術等の大幅進展
Lithography等加工精度	基本的には今までの予測に沿って進行する。	
ナノメータ微細加工	100ナノメータ（2000）　⇨ 10ナノメータ（2005）	ギガビットICメモリ、10ギガビットフラッシュメモリ等固体メモリの出現によるテープ、ディスク等磁気メモリの代替。
ナノテクノロジー	実験・研究レベルで一般化（2000）	現在の産業の技術革新の流れが止まらない進歩が続く→効率化
微細加工技術	0.1μmレベル（2000）	半導体プロセスの発展
ArFエキシマレーザ光透過材料技術	研究開発完了（2000）　⇨ 実用化（2005）	0.1μm以下の加工技術を加速する
X線マスク基板材料技術	研究開発完了（2005）　⇨ 実用化（2005）	0.1μm以下の加工技術を加速する
シリコンの微細加工技術	1Gbit　D-RAM（2005）	技術インパクトは大きいが経済インパクトはまだ疑問な所もある
マイクロエレクトロニクス微細加工技術	0.1μm（2000）	量子化素子等
加工寸法微細化		アプリケーションのニーズに引っ張られて極限化に向かうと考える
半導体技術	0.1μm加工技術（2000）	情報処理の質が大幅に向上し、全ての産業や技術のインフラとして有効
半導体技術	サイズで1/10（2010）　⇨ 機能で100～1000倍（2010）	情報機器の携帯パーソナル化に伴い情報産業の大変革がもたらされる
シリコン半導体微細加工技術	10ナノメータパターン加工（2005）	超高集積LSI（ギガビットメモリーなど）
加工寸法の微細化	0.1μmがLSIの主流、nm技術が部分的に利用される（2000）	大
表面反応を利用したソフトな微細加工技術	かなり進展する（1998）	LSIプロセスの次世代技術として不可避
加工寸法の微細化		
半導体製造技術	16Mbit（1996）　⇨ 256Mbit（2000）	256Mbitぐらいはいくでしょうが1Gbitは一企業ではできないだろう。
挿入光源利用材料創製・評価	選択的励起利用加工技術（1998）	低温プロセスが可能。電子材料、半導体、導波路等
LSI製造リソグラフィ技術（量産技術確立時期）	エキシマ光源（1024MDRAM以降）（1996）　⇨ SOR光源（16GDRAM以降）（2002）	超LSIによる情報化社会の加速
X線リソグラフィー	0.1μm幅のパターン転写実用化（1998）	4GビットのDRAMを製造することができ、情報化社会のあらゆる面にインパクトを与える
位置制御	1nmの形状制御システムの実用化（1998）	機械加工分野での加工精度を飛躍的に向上させることが期待でき、AVシステムやメカトロニクスの分野で扱う情報量が一段と向上する

出所）MRI

なお東京大学生産技術研究所の荒川教授は、シリコン等半導体電子デバイスの微細化における問題点・解決策に関して、以下の見解を持っている。

荒川助教授：

『シリコンデバイスでは近い将来1GbitクラスのDRAMが実用化されると思われるが、このようにチャンネルをどんどん狭くしていくと必然的に量子効果を考えなければならなくなる。究極的には不純物ゼロが目標であろうが、不純物が1個あるかないかで特性が全く変わってくる（従来のような1000～2000個単位の不純物なら統計的な扱いができた）。従って不純物の制御技術が極めて重要になる。またシリコンと配線の接点におけるオーミックコンタクト（オームの法則に則った線形な接触）が崩れ、電子がどのように伝わるか、といった問題が重要になってくる。

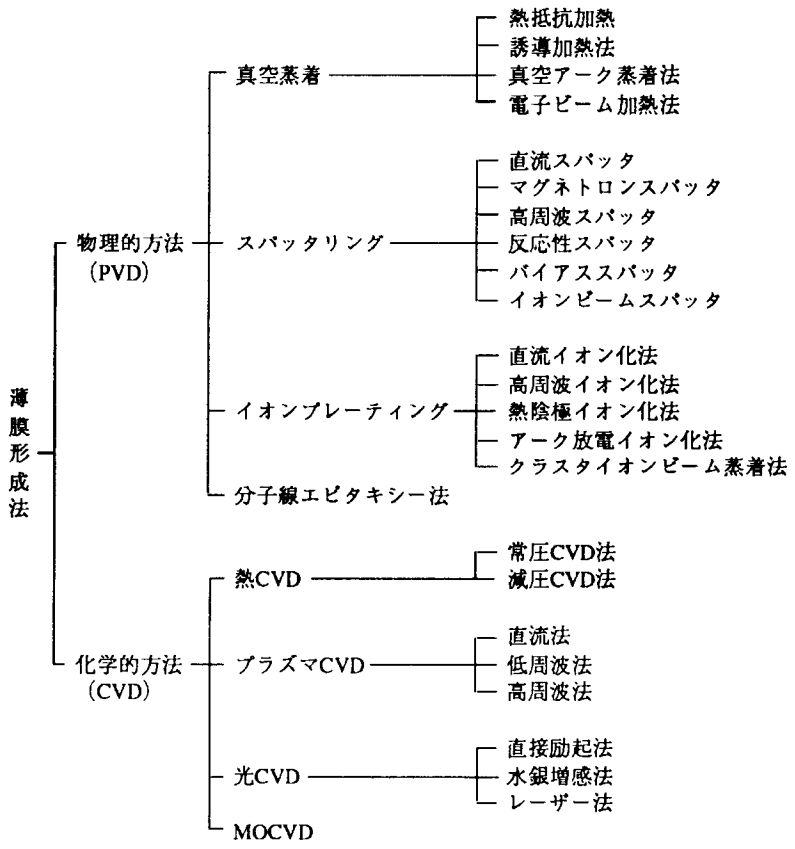
一方デバイスの量産を考えた場合、人間が1個1個原子・分子をハンドリングするSTM等の手法では時間と手間がかかり過ぎる。量産のためには、結晶成長（MOCVD等）の手法で、原子の自己組織性と相互作用を利用しつつ、大きい塊の単位で原子をきれいに並べる技術が必要になってくる。例えばある結晶面には原子が付きにくいとか、基板を傾けて結晶成長させると基板上にステップ状の構造ができそのステップの所に原子が付きやすい等の性質を利用したり、SiO2の300Åのパターンをシーズ（種、核）にして選択成長させる、といった手法である。このようにTop-down的にデバイスのミクロ構造を形成する必要があり、またこれは不可能なことではない。』

② 薄膜化・超格子化技術

薄膜形成技術は、次に示すような各種電子/光デバイス等のアプリケーションにとって必要不可欠な技術である（カッコ内は薄膜形成プロセス）。

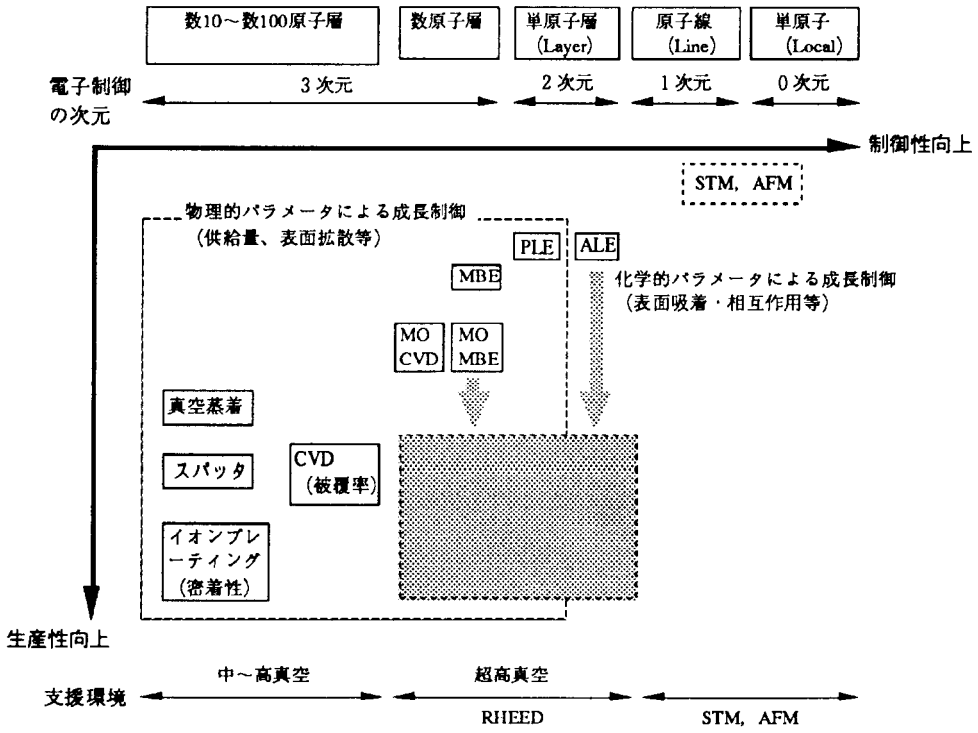
- 薄膜磁気ヘッド（スパッタリング）
- 光磁気ディスクの磁性媒体（スパッタリング）
- DRAM等シリコンデバイスの窒化シリコン保護膜（減圧CVD）
- 強誘電体薄膜（スパッタリング）
- フラッシュメモリの記憶固定用トランジスタ（プラズマCVD）
- 各種薄膜センサ（スパ）
- TFT液晶（プラズマCVD）
- アモルファスシリコン太陽電池（プラズマCVD）
- 感光ドラム（プラズマCVD）
- ICのアルミ配線（真空蒸着→スパ→プラズマCVDと変遷）
- 金属のセラミクスコーティング（イオンビーム、イオン注入）

また最近では薄膜を積層した超格子構造の形成手段として、MOCVD（有機金属化学気相成長法）とMBE（分子線エピタキシー）が用いられている。以下に、薄膜化技術の分類とその変遷、及びそれぞれの方法の原理と特徴を示す。



第2.3－3図　薄膜化技術の分類

出所）MRI



第2.3－4図　薄膜化技術の変遷

出所）MRI

第2.3—3表　薄膜化技術（物理的方法）の原理と特徴

分類			原理	特徴
物理的方法	真空蒸着		高真空中の材料加熱蒸発による成膜	材料蒸発法により抵抗加熱法、誘導加熱法、電子ビーム加熱法、レーザ蒸着等に分類。
	スパッタリング		不活性ガス雰囲気中のグロー放電でターゲットから粒子を叩きだし、対向基板上に成膜	殆どの物質に適用。基板への付着力大。
		直流スパッタ	直流電源による放電利用法	構造簡単。スパッタリング速度小。導電体に利用限定。
		マグネトロンスパッタ	マグネトロン放電利用	スパッタリング速度大。基板の損傷、温度上昇抑制。強磁性材料以外で主流。
		高周波スパッタ	高周波電源による放電利用	絶縁膜作製を目的として考案。現在は絶縁物から金属まで、あらゆる物質に適用。
		反応性スパッタ	スパッタ中にガスを封入、化学反応を利用した成膜	酸化物、窒化物、硫化物等の化合物薄膜の作製成膜に利用（SiO2，TaN，Si3N4等）。
		バイアススパッタ	基板上にバイアス印加、成膜と同時にスパッタエッチを行う	下地基板の段差を吸収した、平坦な薄膜と形成。
		イオンビームスパッタ	イオン源内で生成したイオンを電界加速により引き出し、利用する成膜法	高真空中の成膜可。不純物混入、膜や基板の損傷少。膜材料の制御性良好。
	イオンプレーティング		不活性ガスを導入、プラズマ化した中で蒸着する方法	蒸発物質もイオン化、膜の付着強度大。切削工具、金型、装飾品のコーティング等に利用。
		クラスタイオンビーム蒸着法	加熱蒸発した材料の高真空中過冷却によるクラスタをイオン化し、成膜に利用する	イオン化効率高、原子・分子の運動エネルギー大。高品質薄膜の高速低温形成。各種電子デバイス用に利用進展。
	分子線エピタキシ法（MBE）		超高真空下で分子線を発生、加熱基板上に照射しエピタキシャル成長	原子層膜厚制御、多元混晶組成制御、急峻界面の多層膜形成可。オプトエレクトロニクス、半導体レーザ、超格子素子等の超高速・高周波デバイスプロセスに使用。
		位相制御エピタキシ法（PLE）	RHEED振動の位相解析により結晶成長制御	原子層精度の成長制御に有効。半導体、金属、超電導材料薄膜の成長制御に応用。
		MEE	原料ガスを基板に交互に1原子層分ずつ供給、吸着Gaの表面移動距離の促進現象を利用。	層状成長維持による平坦なヘテロ界面
		MOMBE	固体原料をガス原料に置換え（MBEとMOCVDのハイブリッド化、別名CBE、ガスソースMBE）	膜厚制御性と、量産性（ガスソースにより加熱箇所減少）の両立。
		光MOMBE	光励起反応の利用	光照射による選択成長や組成制御、光制御による超格子構造の形成可。
		OMBE	有機物質を対象にしたMBE（対象物質は金属フタロシアニンM-Pc）	有機超薄膜への応用。感光体等に利用。

出所）MRI

第2.3－4表　薄膜化技術（化学的方法とLB法）の原理と特徴

分類			原理	特徴
化学的方法			反応ガスを基板上に供給、基板表面または近傍での気相化学反応により薄膜を形成する方法	超LSI製造に不可欠のキー技術。
	熱CVD		CVD励起エネルギーに熱エネルギー利用	
		常圧CVD法	大気雰囲気中で成膜	単結晶および多結晶Si膜、導体膜、絶縁膜。基板大量処理難、パーティクル発生、ガス消費量大。
		減圧CVD法	低圧下での成膜	温度制御性容易、膜均一性、生産性に優れる。
	プラズマCVD		反応ガスをプラズマ状態にしてイオンやラジカル等の反応種に分解、それらの化学反応により成膜	熱CVDに比べて低温薄膜形成可。絶縁膜、アモルファスSi膜（太陽電池）、導体膜。
		ECRプラズマCVD	ECR現象を利用	基板損傷、パーティクル発生が低減。より低温で良質薄膜形成可。
	光CVD		CVD励起エネルギーに光エネルギーを利用	プラズマCVDに比べ、低温で、損傷の少ない成膜。光の波長を選択し、特定反応の選択的促進可。アモルファスSi膜、SiO2膜、Si3N4膜等
	MOCVD		有機金属の熱分解反応を利用	原子成長制御、多元混晶組成制御、急峻界面の多層膜形成可。金属単体または化合物半導体膜。成長パラメータ制御性、界面特性の優秀さから、超格子素子、半導体レーザ、発光ダイオード、太陽電池等に利用。
		原子層エピタキシ法（ALE）	交互供給した原料ガスの成長表面での化学反応を利用、１原子層毎の成長停止を自動的に行う	自己停止機能。完全な単分子・原子層の急峻性。低温で、かつ均一性の高い成長可。成長速度遅。
LB法（液相法）			疎水基と親水基を共有する化合物を揮発性溶媒に溶かし水面上に滴下、溶媒揮発後に水面に単分子層が形成する。適当な表面圧を加えて基板を入れて引き出すと単分子膜が基板上に形成する。	有機有機薄膜に使用。超構造も形成可。電子デバイスへの応用期待（耐熱性高分子ポリイミドの研究中心）。

出所）MRI

薄膜化技術の変遷を示した第2.3－4図では、縦軸に生産性の良さ（下にいくほど生産性が高い）、横軸に制御性の良さ（右にいくほど原子1個1個の精密な制御が可能）をとり、それぞれの薄膜化技術の特徴を示している。スパッタリングやプラズマCVDは生産性は高いが、数10～数100原子層以下は制御できない。ただし、複雑な構造の薄膜形成のためにはスパッタリングよりもプラズマCVDが有利である。またMBEやMOCVDは制御性は良いが量産性が悪く、研究には良いが実用に向かない。ただしMBEやMOCVDの技術は発展途上にあり、今後生産性が改善される可能性がある。

超格子あるいは量子デバイスの作製には、数原子層から単原子層（量子井戸レーザ）、さらには原子線（量子細線デバイス）、単原子（量子箱デバイス）に至る超精密の原子制御が必要になる。このために、MBEを改良したPLE（位相制御エピタキシ）、MOCVDを改良したALE（原子層エピタキシ）などの手法が開発されている。ALEを他の薄膜化技術と比較すると、下表に示すとおり、特に膜厚や表面の均一性、選択成長性、膜厚の自己停止性において優れており、超格子デバイスや量子デバイスの研究開発に寄与することが期待されている。

第2.3−5表　ALEと他の薄膜化技術の比較

	スパッタ	MBE	MOCVD	ALE
自己停止機構	×	×	×	◎
選択成長	×	×	△	◎
膜厚均一性	○	○	○	◎
表面モホロジー	○	△	○	◎
立体構造基板上への成長	×	△	△	◎
多数枚成長	◎	○	○	−
結晶の質	○	◎	◎	△
多元結晶・ヘテロ構造	○	○	○	△

出所）MRI

超格子は半導体や磁性体で試みられているが、ペンシルバニア州立大学の内野教授は圧電体や強誘電体の超格子により新しい特性が生まれる可能性を次のように示唆している。

内野教授：

『圧電体や強誘電体ではまだ誰もやっていないことだが、半導体や磁性体で試みられているように、圧電体や誘電体の0.数μの薄膜を10層程度重ねると、「スーパーレイヤー」としての新しい特性が出てくるかもしれない。これは大変興味深い。』

なお最近の薄膜化技術の研究の例として、東大工学部の吉田教授の研究内容を以下に紹介する。

吉田教授：

『ＣＶＤやスパッタリング法による成膜技術、及び主に無機材料の熱プラズマプロセス技術など、プロセスプラズマ技術の応用とそのためのプラズマパラメータの診断技術、In-Situ計測技術等の開発を行なっている。現在行なっている主な研究は以下の通り。

① ハイブリッドプラズマ溶射法による高温固体電解質型燃料電池の一貫製造プロセス

従来の直流プラズマ法で得られる溶射皮膜の欠点である、内部空孔の問題を解決するため、ハイブリッドプラズマ溶射法（ＤＣ、ＲＦを重畳したプラズマ）を開発し、これを用いた燃料電池一貫プロセスについての研究を進めている。

② ハイブリッドプラズマによるセラミックスの超高速大面積被覆

ハイブリッドプラズマトーチを用いたＣＶＤ法によるSiC,Si3N4などの耐熱セラミックスの超高速堆積（10μm/min以上）、及びダイヤモンドの大面積堆積などを検討している。

③ 反応性スパッタリング法及びＩＣＰ－ＣＶＤ法によるc-BN膜堆積

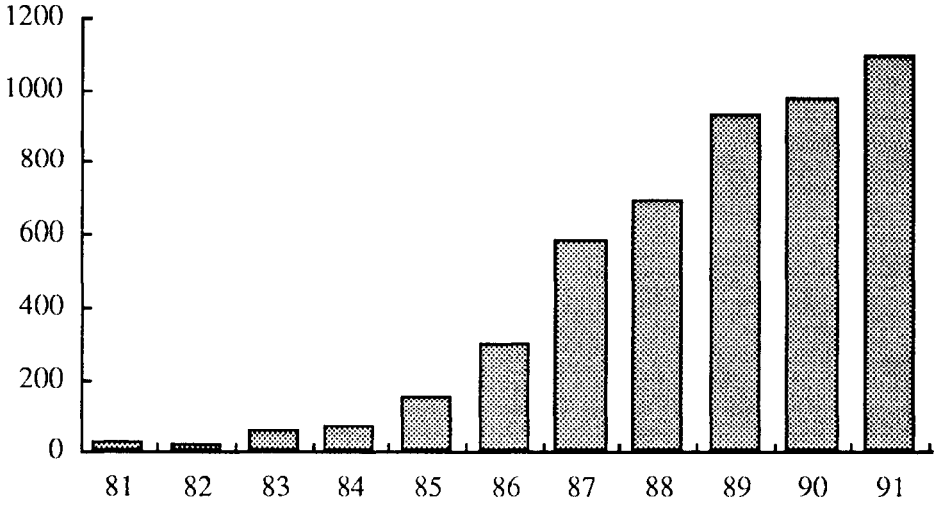
ダイアモンド薄膜の特性を凌ぐ、高圧高温相窒化ホウ素の低圧合成を研究している。反応性スパッタリング法では基板へのイオン照射が有効なことを見いだした。またＩＣＰ（誘導結合プラズマ）ＣＶＤ法との比較も行なっている。発光分光分析や質量分析によるIn-Situ計測により膜堆積過程の分析を行なっている。

④ トンネル電子線を利用したナノプロセシング開発

トンネル電子線源としてＳＴＭを使い、大気、ガス雰囲気下でのナノ領域における新しいプロセシング開発を目指している。例えばＳＴＭで局所プラズマを作りそこでの反応やプロセスの検討などである。現在、レーザー照射などができる専用チャンバーを作成しており、この装置により選択的核生成の可能性について調べその堆積メカニズムを解明することを狙っている。』

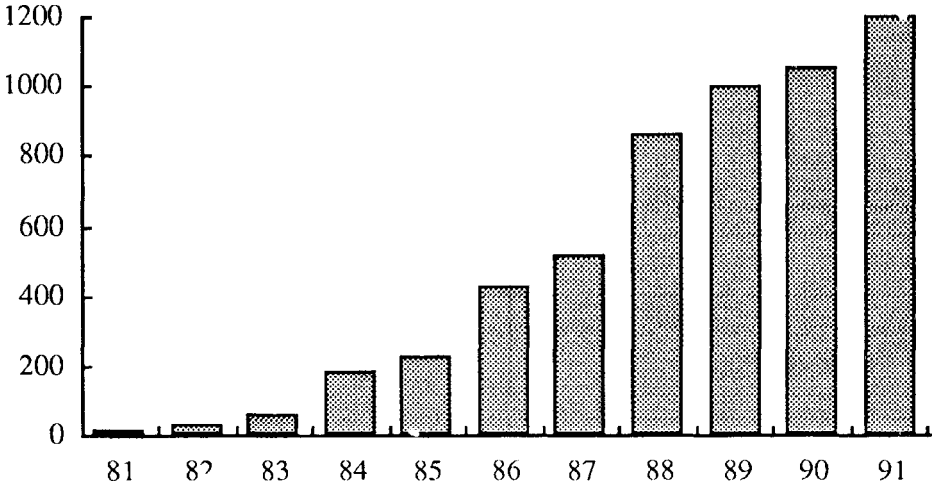
また参考までに、プラズマCVD、MOCVD、MBE（分子線エピタキシー）、及びダイヤモンド薄膜に関するJICST登録文献数の年ごとのキーワード検索結果を以下に示す。

第2.3－５図　プラズマCVDに関するJICST登録文献数の推移



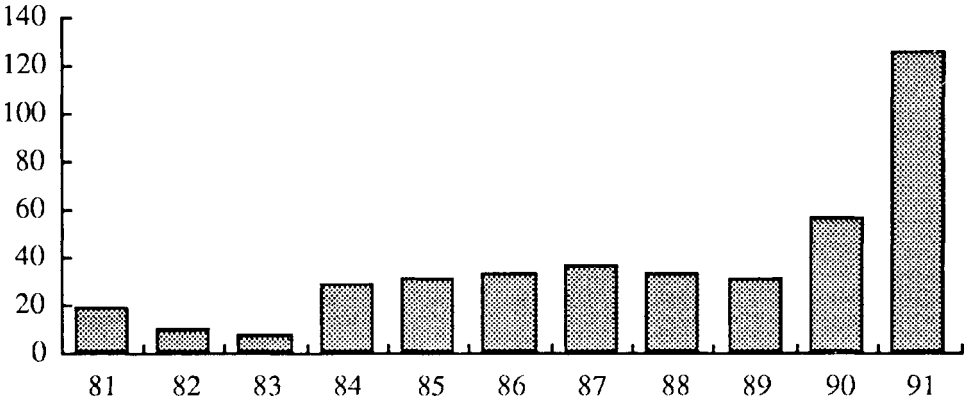
出所）JICSTデータベースの検索結果より、MRI作成

第2.3－6図　MOCVDに関するJICST登録文献数の推移



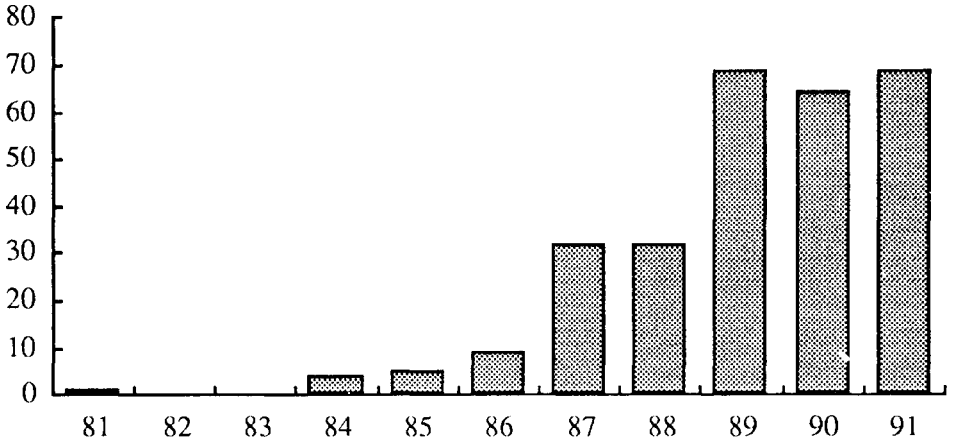
出所）JICSTデータベースの検索結果より、MRI作成

第2.3－7図　分子線エピタキシーに関するJICST登録文献数の推移



出所）JICSTデータベースの検索結果より、MRI作成

第2.3－8図　ダイヤモンド薄膜に関するJICST登録文献数の推移



出所）JICSTデータベースの検索結果より、MRI作成

③ 超微粒子技術

超微粒子技術は、既に磁気テープや磁気カード、あるいは化粧品、セラミクス材料等の製造に利用されている。バルク状態では見られない、磁性、導電性、光学特性、焼結性などの多様な特性を持った物質が得られることから、今後も電子材料、磁性材料、光学材料、焼結材料、触媒材料、生体材料、薬剤などへの応用が考えられており、材料特性や合成法に関する研究開発が盛んに行われている。

超微粒子の代表的な製造方法を第2.3－6表に示す。対象材料は金属からセラミクス、有機化合物や高分子に至るまで幅広いが、多くは研究用であり、現在の実用アプリケーションは限られている。酸化物高温超電導材料に関しては、プラズマ蒸発法をはじめとする各種の合成法が研究されている。

第2.3－6表　超微粒子技術の原理と特徴

分類	原理	特徴
化学的方法	主として気相または液相反応を利用した製造法	制御性、生産性が高い。反応副生成物や使用薬品などによる汚染防止が困難。
液相反応法	液体中のイオンや分子を固体状態に析出させ、超微粒子を合成する方法	現在の主流は沈澱法。高純度セラミックス超微粒子や磁気テープ用針状磁性粉の製造に適用。
沈澱法	成分原子を含んだ溶液へ適当な沈澱剤を加え、沈澱粒子を得る方法	粒径形組成の均一性の制御が困難。Al2O3，SnO2，SiO2，BaTiO3，BaSnO3，CaZrO3等
加水分解法	加水分解により極微細の結晶性水和微粒子が得られる現象を利用	酸化物、含水酸化物（SiO2，Al2O3，TiO2，Fe2O3等）。触媒、充填剤、表面コート剤、光導伝性材料等多方面の応用可能性。顔料への応用開花。
水熱合成法	高温高圧下の水、水溶液、蒸気等の存在下での化学反応促進現象を利用	粒径の小さい粒子が得られる。 Al2O3，ZrO2等の酸化物。
気相反応法	揮発性金属化合物の熱分解、揮発性金属化合物や金属蒸気と反応ガスとの反応利用	揮発性金属化合物は、金属塩化物の利用が多い。実験室規模だが、最近レーザを利用の合成法試行。
酸化物、含水酸化物の水素中還元法	α-FeOOHを水蒸気流中で数100度に加熱、還元	市販の磁気テープ用金属超微粒子は大半がこの方法による。
噴霧乾燥法	金属塩溶液をノズルよりスプレイし熱風乾燥	Fe2O3
レーザ合成法	反応ガスの光化学反応を利用	SiH4を使ってSi，SiC，Si3N4の合成試行。
物理的方法	物質の蒸発・凝縮現象を利用した製造法	高純度超微粒子の作製が比較的簡単。 制御性・生産性が低い。
ガス中蒸発法	低圧不活性ガス中で物質を蒸発、ガスとの衝突により冷却・凝縮させ生成する方法	蒸発源は誘導加熱、抵抗加熱、レーザ加熱、アークプラズマ加熱、電子ビーム加熱等、現在の主流は高周波誘導加熱。高融点・低蒸気圧の物質（例えばW，Mo，Ta等）の超微粒子化は困難。
プラズマ蒸発法	粉体または反応ガスを、アークプラズマジェットや高周波プラズマの超高温フレーム中に供給し、合成。	高融点金属超微粒子の作製に適。プラズマCVD法で、各種セラミックス超微粒子作製（TiO2，TiN，Si3N4，Al2O3等）。
	ハイブリッドプラズマ法（プラズマガンと高周波誘導加熱の組み合わせ）	無電極放電のため化合物超微粒子生成に適。金属超微粒子も生成。
スパッタリング法	スパッタ現象を利用した合成法。	高融点物質および化合物等の粒子生成に適。
流動油上真空蒸発法	オイル上への金属の真空蒸着による合成法	粒径50Å以下の極微細粒子。 Ag，Au，Pd，Cu，Fe，Ni，Co，Al，In等

出所）MRI

超微粒子に関連する代表的な国家プロジェクトとしては、創造科学（ERATO）の「林超微粒子プロジェクト」（1981-86）、次世代の「ファインセラミクス」（1981-92）、「非線形光電子材料」、「超電導材料・超電導素子」（1988-97）等があり、林プロジェクトではガス蒸発法が、次世代各プロジェクトでは下表に示す方法が研究されている。

第2.3−7表　次世代プロジェクトにおける超微粒子/薄膜化技術の開発

		超薄膜化	超微細化	材料設計技術	評価解析技術	その他
ファインセラミックス		[表面の強化] ・CVD被覆膜によるSiN_4の耐酸性、耐摩耗性向上	[材料のファイン化] ・超微粒子粉体（シリカ還元法、アンモニア気相法など） ・ウイスカー製造（高温析出）	[知識ベースに基づく設計技術] ・即時、時間依存破壊基準 ・弾性、応力解析、エキスパートシステム ・構造破壊データベースの構築	[微細構造、組成解析] ・不純物、酸化状態の分析（マイクロオージェ等） ・微細破壊解析（X線CT法、等）	・焼結技術（二段焼結法等） ・接合技術（活性金属法）
高機能性高分子	非線形光電子材料	[有機超格子化] ・有機MBE ・多元スパッタリング法 ・収束イオンビーム法 [有機結晶合成] ・LB法 ・エピタキシアル成長	[微粒子分散化技術] ・半導体超微粒子結晶 ・ガス拡散法	[分子レベルの構造設計] ・分子超分極率計算 ・超格子設計法	[超微細構造、分子結合状態解析] ・TEM、蛍光X線、X線回折等 [プロセスIn-Situ評価] ・RHEED	
	光反応性材料	[有機超格子化] ・LB法及びMBE法による会合体膜（PC材）	[レーザービーム記録] ・波長可変色素レーザ（PHB材）	[分子レベル構造設計] ・熱安定性（PC材）設計	[光学特性評価] ・フーリエ変換フォトンエコー分光法（PHB材）	
超電導		[素子化技術] ・レーザ・スパッタ ・多元蒸着スパッタ ・イオン注入MBE	[材料特性向上] ・超微粒子技術（酸化物セラミック、超電導体）	[理論解明とデータ蓄積] ・超電導理論 ・材料物性データベース	[マクロ及びミクロの評価技術] ・バルク評価技術 ・局所領域評価技術 ・特殊環境下評価技術 ・特性評価技術	[特殊環境材料合成] ・高圧合成 ・低温液相合成 ・微小重力環境合成
新機能性素子	超格子	[原子層レベル、結晶成長] ・MOCVD ・ACE ・MBE ・PLE	[素子化技術] ・セルフアラインプロセス ・原子層ドーピング技術	[新現象の発見とデータベース化] ・新機能材料等 ・設計パラメータDB化	[原子層レベル評価、局所評価、その場評価] ・STM,RHEED ・REM,表面敏感EXAFS ・in-situ 光電子分光法	
	三次元	[薄膜積層化] ・SO技術（結晶成長・再結晶化） ・多層薄膜技術	[微細加工] ・SOR露光技術 ・立体配線技術		[構造評価、局所評価] ・SEM ・TEM ・顕微ラマン	

出所）MRI

なおペンシルバニア州立大学の内野教授は、超微粒子技術はほぼ成熟段階に達しており、粒径の微小化という意味での極限化は限界に達しつつある、とみている。

内野教授：

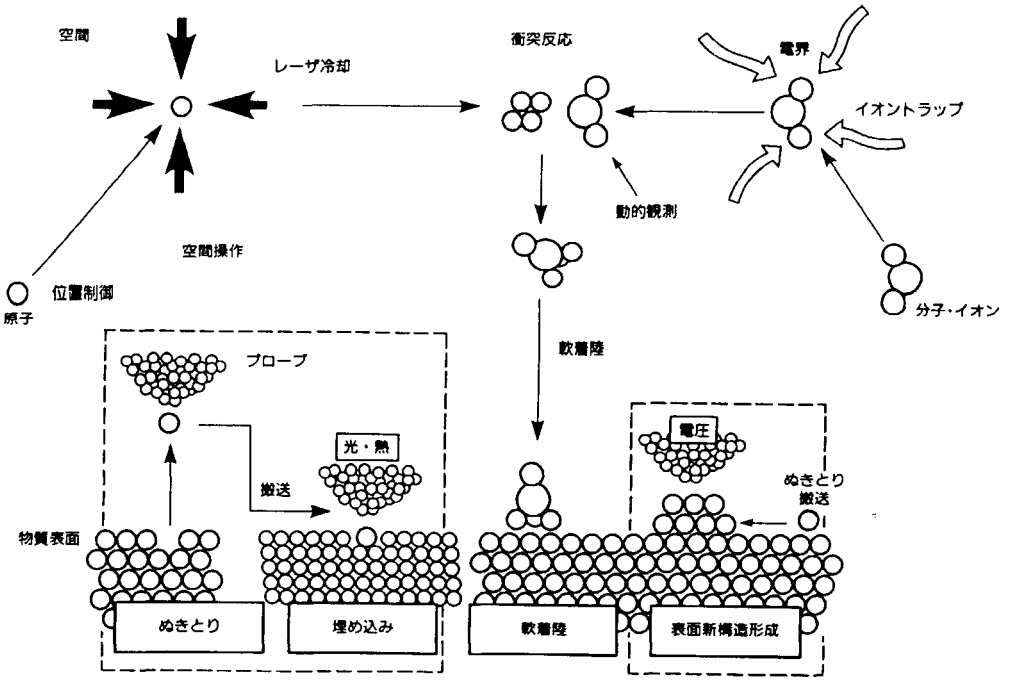
『10年程前にファインセラミクスがもてはやされ、材料の微粒子化が進展してきたが、細かい粉を作る時代はもうほぼ終った（限界に達しつつある）といえる。材料を細かくしていくと、ある所で強誘電性、圧電性等の特性が失われる。強誘電性は分子10個程度すなわち数十Åで失われてしまう。磁性体の場合はスーパー・パラマグネティック微粒子磁性体のように微粒子化しても特性が失われないが、誘電体の場合は一般に0.1μ（100A）程度が実用上の限界と考えてよい。』

④ 原子・分子操作技術

原子・分子操作技術は物質の表面上あるいは空間において原子・分子1個1個を精緻に観察・操作する技術で、21世紀の材料・デバイス技術や遺伝子工学を支援・加速する基礎技術として期待されている。周知のとおり平成4年度から大プロ（現：産業科学技術研究開発制度）の最後のテーマとして「原子・分子極限操作技術（アトムテクノロジー）」が10年計画でスタートした。本研究は1993年1月に発足した筑波の「産業技術融合領域研究所」を中心に実施されている。原子・分子操作の概念図を以下に示す。

なお「研究動向調査委員会」の委員の一人である田中一宜・総合研究官は本プロジェクトの実験面でのリーダーを務めており、委員会において融合研及びアトムテクノロジー・プロジェクトの概要を説明された。その記録を第Ⅱ部に掲載したので、詳細についてはそちらを参照されたい。

第2.3－9図　原子・分子操作の概念図



出所）「産業科学技術研究開発制度」、工業技術院、1993、p20

なお今回のアンケート調査結果によると、原子・分子操作技術は2000～2010年頃に実用化されると予測されている。

第2.3－8表　原子・分子操作技術の進展時期とインパクト

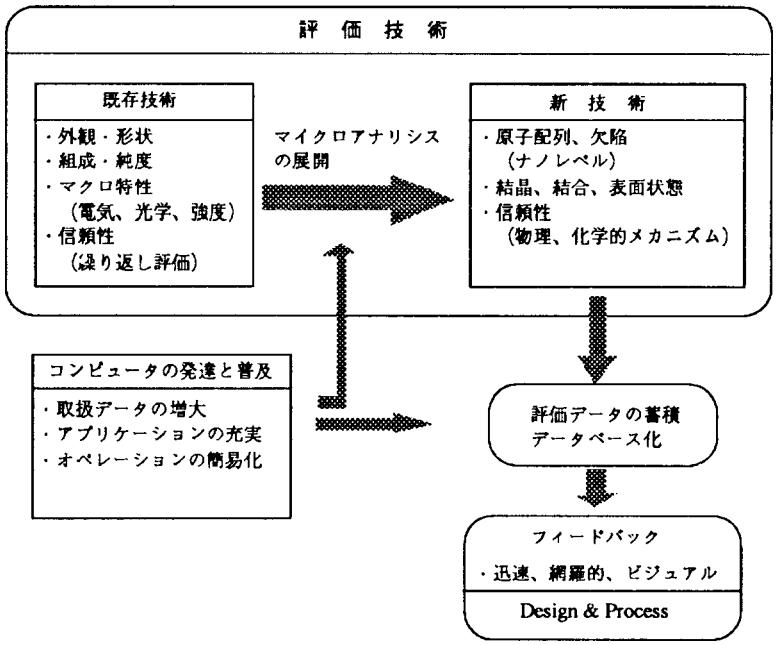
技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
原子・分子マニピュレータ開発	原子レベルデバイス（2005）⇨ 原子レベル遺伝子操作（2010）	半導体デバイス分野、バイオ分野
STM等の原子操作	実用化段階（研究面）（1996）⇨ 実用化段階（工業的）（2000）	材料開発研究
ナノスケールエンジニアリング	Åレベル（2000）	半導体製造
原子・分子制御	（2000）	AFMを使用したディスクや分子素子などが出現
原子分子操作技術	かなり進展する（2000）	半導体、バイオ等広範囲な分野へのインパクト大
アトムテクノロジー化学	数Å程度の空間での化学反応（2010）	化学反応の選択的制御

出所）MRI

⑤　微細領域計測・評価技術（マイクロアナリシス）

微細加工や薄膜形成、原子・分子操作において、加工や操作の対象が微細化すればするほど、配線パターンや膜の厚み・均一性、さらには格子欠陥や表面状態を計測・評価する技術にも極限的な性能向上が要求される。

従来の材料評価の項目は主に概観、形状、組成、純度、電気特性、光学特性、強度等のマクロな評価項目であったが、STMに代表されるマイクロアナリシスの進展により、ナノレベルの原子配列や結晶構造、格子欠陥、結合状態、表面状態の計測が可能になり、材料に関するより本質的な情報を得ることができるようになる。



第2.3－10図　計測・評価対象の変化

出所）MRI

第2.3－9表に代表的な材料評価・解析技術の概要を示す。なお本表に掲げたもの以外の最近の技術として、AFM（原子間力顕微鏡）やX線顕微鏡、フォトンSTMなどの装置も開発されている。

注）

AFM：

STMと同じプローブ当てて走査するタイプの走査型顕微鏡だが、STMがトンネル電流の流れない絶縁物の計測は出来ないのに対し、AFMは原子間力によるプローブの上下微動の検出によるため、絶縁物の計測が可能である。

X線顕微鏡：

X線を光源としているため、通常の電子顕微鏡が真空中でしか計測できないのに対し、液体や空気中の計測が可能なため、液体や生体（生きたまま）の観察が可能である。我が国においては長崎総合科学大学の難波教授（大阪大学名誉教授）がX線顕微鏡の権威である。

第2.3－9表　代表的な材料計測・評価技術

	測定内容	主な応用分野	最近の傾向	元素分析	形状分析	結晶構造	結合状態	深さ分析	表面分析	微少領域
2次電子顕微鏡（SEM）	2次電子像による表面形状観察	形状観察全般 特に斜め方向の観察	操作性が向上大面積試料対応		◎					○
透過型電子顕微鏡（TEM）	電子線の透過、回折による形状観察	内部構造、界面形状、欠陥	数Aの高分解能型（HRTEM）も一般化		○	◎				◎
走査型トンネル顕微鏡（STM）	微少短針のトンネル電流によりサブナノメータの表面凹凸を計測	原子レベルの解析及び、原子のハンドリングにも応用	原子間力顕微鏡（AFM）も開発		○	◎	◎		○	◎
X線回折（XD）	X線の回折像から格子定数、化合物の素成比	結晶、多結晶性の評価、結晶面方位	薄膜対応の高感度タイプの開発 超格子構造解析にも使用	○		◎				
ラザフォード後方散乱（RBS）	Hイオン等のRBS散乱エネルギーによる元素塑性と深さ分析	表面原子の配列状態 不純物の相対量		○				○	○	
高速反射電子線回折（RHEED）	高速電子線の回折による表面の2次元的な格子、周期構造	超格子構造の観察	分子線エピタキシーのモニターに利用			○			○	
電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）	電子線によって発生する特性X線強度による組成分析	簡易な組成分析が可能、但し炭素以下の軽元素には不可	エネルギー分散型はSEMと同時使用により効率化	○					○	○
オージェ電子分光（AES）	電子線によるオージェ電子の分光により、表面及び深さ方向の高分解能分析	超格子組成などの組成プロファイル、不純物分析	微少領域（～1μm）対応ポイントオージェが普及	○				◎	○	○
2次イオン質量分析（SIMS）	深さ方向の超高感度（～10ppb）組成分析	不純物深さ方向プロファイル、汚染分析		◎				◎		
光電子分光（ESCA）	X線照射による光電子分光により組成分析と表面準位測定	分子の化学結合状態の測定 表面分析	ポリイミドなど高分子の結合状態観察にも応用	○			◎	○	◎	
フォトルミネッセンス（PL）	レーザ光照射によるスペクトルによる組成分析	不純物、及び欠陥分析	化合物の組成分析にも適応	○		○				○
フーリエ変換赤外分光（FT－IR）]	赤外吸光による組成の定量分析	アモルハスSi薄膜中のH、Nの含有量の定量分析など	高感度高速化分析 微少領域分析が可能	○			○			○
核磁気共鳴（NMR）	強磁場印加による原子核スピンエネルギーによる分子構造の解析	主に生化学関係高分子の立体構造の解明	結晶化しにくいタンパク質、脂質の構造			◎	◎			

出所）MRI

以下に材料計測・評価技術に関するアンケートによる予測結果を示す。

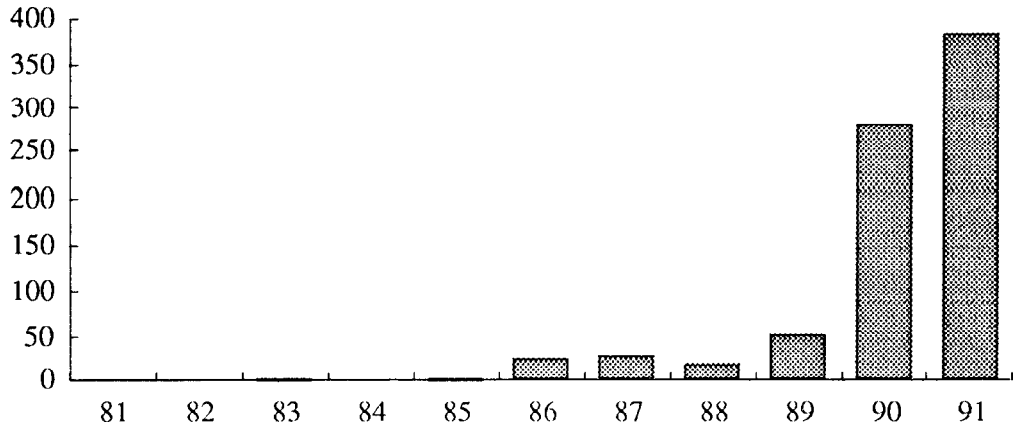
第2.3－10表　材料計測・評価技術の極限化（アンケートより）

技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
X線顕微鏡	サブミクロン実用機の出現（2000）⇨ オングストローム実用機の出現（2020）	非真空、非汚染、（生体も可）のサブミクロン顕微鏡、生体観察、電子製品生産制御に多用されよう
計測	サブミクロン～ナノオーダーの位置・姿勢計測（1998）	
レーザによるガスの状態の計測、画像処理	（2000）	
計測技術（常温～高温での寸法）	サブミクロンオーダー（2000）	製造プロセスの制御精度の向上、製品の信頼性向上
低エミッタンス電子顕微鏡	着手して5年で成果（1999）	電子線を小さい領域に絞る（△x）ことと、進む方向の拡がり（△θ）を小さくすることの両立は難しい。これを限界まで高めた電子顕微鏡は特別に研究開発の対象として価値があり、これができれば、結晶の大きさと方位を現状より1桁向上させて測定しうる。
非破壊計測		
陽電子消滅法による電子状態・欠陥構造の測定	ポジトロン・ファクトリー（陽電子源の高強度化）（2000）	陽電子消滅法は上記の測定法として非常に優れたポテンシャルをもつが、線源の高強度化によって初めて他の手法と比肩できる一般性をもつようになる現在高崎原研で計画中
物性評価技術	ナノメートル領域の分解能をもった（2000）⇨ 分析評価技術がルーテンリークとなる	

出所）MRI

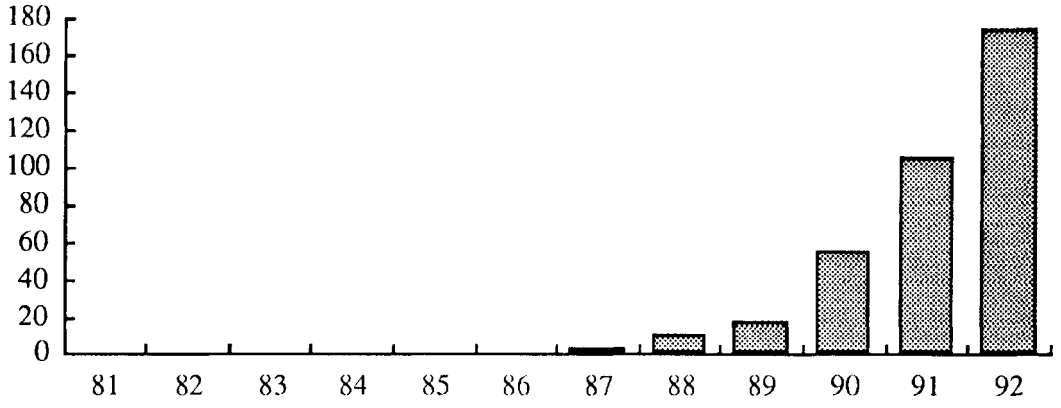
またSTM、AFM、X線顕微鏡に関するJICST登録文献数の推移を以下に示す。

第2.3－11図　走査型トンネル顕微鏡（STM）のJICST登録文献数



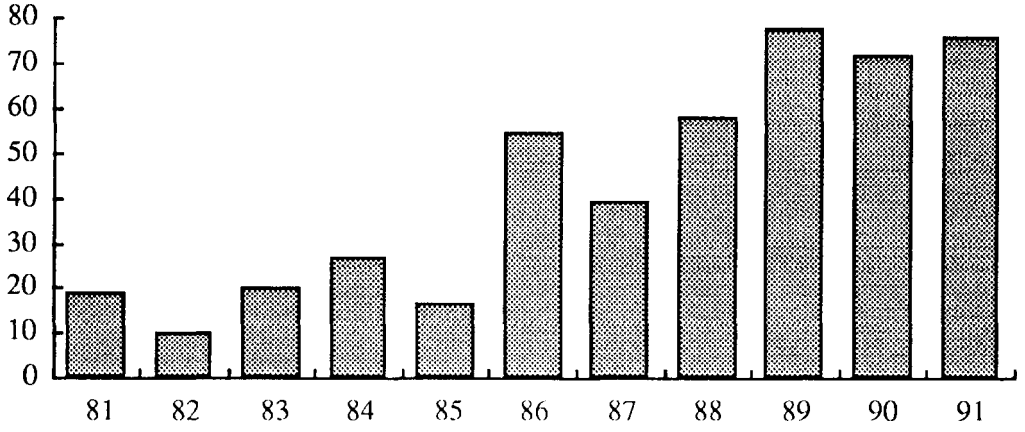
出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

第2.3－12図　原子間力顕微鏡（AFM）のJICST登録文献数



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

第2.3－13図　X線顕微鏡のJICST登録文献数



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

⑥　ミリ/マイクロ/ナノマシン

①で述べたような微細加工技術はmm～μm～nmオーダのいわゆるミリ/マイクロ/ナノマシン（cm～mmオーダの場合、ミリマシンと呼ぶことがある）に適用可能である。ミリ/マイクロ/ナノマシンはその大きさによって下表のように分類される。基本的には、mmオーダのミリマシンには従来の精密機械の加工技術が、μmオーダのマイクロマシンには半導体プロセスの微細加工技術が、nmオーダのナノマシン（分子機械）にはSTMや自己組織化を用いた原子・分子操作技術が適用できる。マイクロマシンについては平成3年度から大型プロジェクト（現：産業科学技術研究開発制度）がスタートし、発電プラントや航空機エンジンのメインテナンスや人体の治療・診断のできる微小機械の開発を目指して、10年計画で研究が行われている。

第2.3－11表　ミリ/マイクロ/ナノマシンの加工法等

	微小化機械	微小電気機械システム	分子機械
特性長	10mm～100 μm	1 mm～1 μm	1 μm以下
構造	立体的	平面～立体	分子構造
素材	金属、高分子など	Si、薄膜材料など	分子集合体、高分子
加工法	超精密加工 ・放電加工 ・ビーム加工 ・バルクエッチング	半導体プロセスの発展型 ・異方性エッチング ・表面ﾏｲｸﾛﾏｼｰﾆﾝｸﾞ ・LIGAプロセス	(分子・原子操作) ・化学反応 ・トンネル電流
組立法	精密アセンブリ	バッチ処理	自己組織化
力の取りだし	比較的容易	難しい	難しい
応用の可能性	半導体チップ操作 光・磁気ヘッド 能動内視鏡 マイクロサージェリ マイクロバルブ・ポンプ	知能化マイクロセンサ 細胞操作 トンネル顕微鏡ティップ 体内検査機器 体内薬物投与	極限プロービング 分子・原子操作

出所）MRI

東京大学先端科学技術研究センターの河内教授は、μmオーダの機械は人間に作用するには寸法が小さすぎ、それを補う数が必要になる（センサの場合は良いが、アクチュエータの場合問題となる）、との観点から、以下に示すようにmm～cmのミリマシンの重要性を強調している。

河内教授：

『マイクロマシーンの研究が盛んになりつつあるが、従来の機械（モータ、歯車等）を単に縮小すればよいという訳ではなく、微細な機械にはその大きさにふさわしい固有のメカニズムが必要である。物の大きさが3桁変わると性質がかなり変わる。人間の寸法はメートル・オーダであるから、マイクロとは6桁の開きがある。μmオーダの機械は人間に作用するには寸法が小さすぎ、それを補う多くの数が必要になる。このような観点から、昆虫の運動メカニズムを応用したmm（あるいはcm）サイズの「ミリマシーン」が有望と考えている。

ミリマシーンの応用用途については、メーカに聞くのが適切と思うが、掃除ロボット（家の壁にクモのような掃除ロボットが沢山生息し、常に動いて掃除をしている：常動・群ロボット）や静電除去ロボット（MITの先生が考えている微小ロボット：ディスプレイ上に生息し、ホコリや静電容量を喰う）などが考えられる。

動物（獣や鳥）の体は骨格構造であるが、昆虫の体はモノコック構造（中空）になっており、関節の代わりに弾性変形する。実際に子供のオモチャを見るとモノコック構造のものが多く、意外に良くできていることがわかる。ミリマシーンは今のオモチャを微小化して知性を持たせたものと考えればよい。

昆虫サイズ以下の微小機械になるとシリコンのような硬い材料は不適切で、高分子のような柔らかい材料が適する。ただしこのような柔らかい材料の微細加工は未知である。

ミリマシン、マイクロマシンにとって最大のネックはエネルギー供給とコントロールである。10μmのマシンが手の平の距離を移動するのは、200mのタンカーが地球を半周するのに匹敵し、そのために必要なエネルギーは莫大である。その意味では、電池のようなエネルギー内蔵型ではなく、赤血球や白血球のように外部の流体に駆動される方法が有利である。

赤血球や白血球がそうであるように、微小機械が人間に作用するためには数が必要であり、群ロボットの考え方が必要である。」

アンケート調査では、極限化の進展としてマイクロマシン関連の回答が多数あった。これによるとマイクロマシンの実現時期は回答者によって相当の開きがある。

・最も実現時期が早い回答：　1μm（1998）　0.1μm（2003）
・実現時期が中間の回答　：100μm（1995）　数10μm（2000）
・最も実現時期が遅い回答：　1000μm（2000）

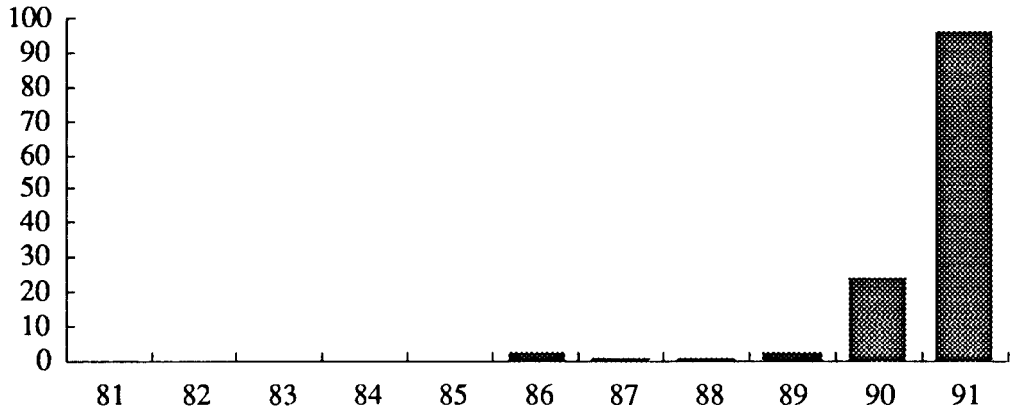
第2.3−12表　マイクロマシンの実現時期とインパクト（アンケートより）

技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
SR利用マイクロマシン（LIGAプロセス）	μmオーダ（1998）　⇨　サブμm（2003）	この技術は寸法よりもむしろ複雑なマシンを如何に作るかにある。現状でもある程度進んでいる。光導波路、マイクロ歯車等
マイクロマシン	微細加工と制御（2000）　⇨　微細加工及び制御（2005）	
マイクロアクチュエータ		マイクロマシン（微細作業、狭所作業）、柔らかな分散協調型機械
高感度マイクロセンサ		高機能ロボット、高度な運動制御
集積化マイクロシステム		電気、機械、光技術などの融合集積したシステム
微細作業技術	ナノメートルレベル（1998）　⇨　アトミックレベル（2003）	科学　産業用として大きなインパクトを与える
マイクロマシン	トップデータが普及状態になる（2010）	医療用に大きなインパクト、手術の概念が変わる
微小機械の製造	mmサイズの機械の誕生（2000）	日常的なロボットとの共存
マイクロマシン	マルチファンクションセンサ実用化（2000）	センサのインテリジェント化
超微細化技術、ナノ計測技術、マイクロマシン	具体的な製品の完成（2000）	分子（原子）単位での制御が可能となり、無限の応用をもたらす
マイクロマシン	強磁性体の応用技術（2000）　⇨　実用化レベル（2010）	機械を小型化することにより、設備の保守、メンテナンスを実施に対しオーバーホールをせずに細部の点検が可能
マイクロマシン技術	サブミリのマシン（1995）　⇨　数10μmのマシン（2000）	他の産業に対しても、微小化、微細化の波及効果を及ぼす。

出所）MRI

マイクロマシン関係のJICST登録論文数の推移を以下に示す。

第2.3－14図　マイクロマシン関連のJICST登録論文数



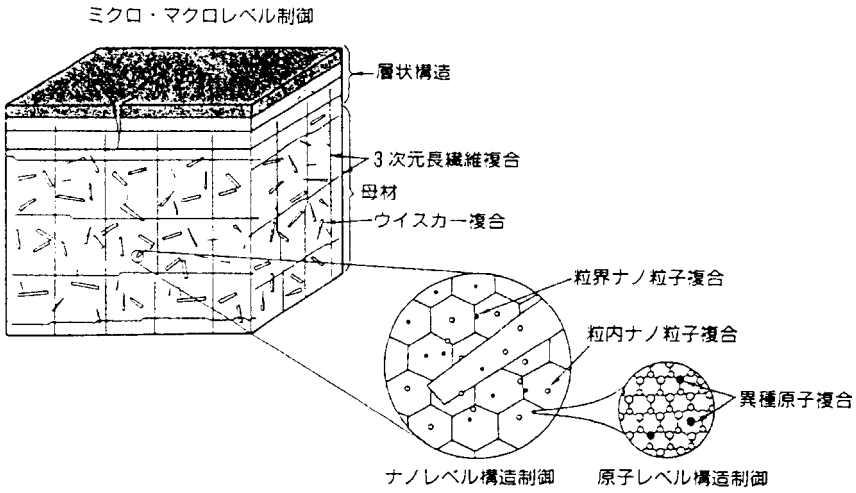
出所）JICSTデータベースの検索より、MRI作成

⑦　材料のミクロ構造制御

高分子材料の分子レベルでの構造制御方法が現在ポリマーメーカー各社で研究開発されている。アンケート調査では、汎用ポリマーの高性能・高機能化が進むものと予測されている。また高分子のミクロ構造制御が1998年には高分子材料の10%、2005年には50%程度を占めるようになる、との予測もある。

無機材料のミクロレベルの構造制御については、現在工業技術院の先導研究制度において「高次構造制御融合無機材料」のプレ・リサーチが行われている（下図参照）。

第2.3－15図　高次構造制御融合無機材料の構造



出所）「産業科学技術研究開発制度」、工業技術院、1993、p33

またヒアリング調査によれば、セラミクス膜の細孔径をミクロ構造制御して均一化すれば、膜の分離性が向上し、耐熱性・耐腐食性に優れたセラミクス膜のメリットが高まるものと予測されている。

Ｔ社Ｋ部長：

『セラミックス膜の細孔径の均一化（2005年頃）。現在セラミックス膜は耐薬品性、耐熱性（150℃以上でも使える）を持つ分離膜として既に実用化されている。高温ガスからCO_2を分離する場合など、一旦ガスを冷やす必要がないので有利。しかし、孔径が不均一なため分離性が悪い。今後はセラミックスのミクロ構造を自由に制御することにより、用途に応じた（例えば、H_2を透過してCO_2を透過しない膜、あるいはその逆）分離性の良いセラミックス膜が期待される。

高純度、高温（600℃まで）用の分離膜としては、以前からパラジウム等の金属膜が使われてきたが、値段が高いのが欠点である。』

⑧　巨大アクチュエータ・材料

米国ペンシルバニア州立大学国際アクチュエータ・トランスデューサ・センター所長の内野教授は、米国で宇宙用の巨大システムのためのアクチュエータ/センサや材料の研究を行っている。巨大システム用のアクチュエータや材料には、巨大サイズ特有のスペックが要求される。

内野教授：

『日本における極限化は小さい方を指向していることが多いが、米国では小さい方だけでなく大きい方（Big Science）の極限化にも熱心である。宇宙構造物には大きくて均質なセラミクスや20～30cmの大きなアクチュエータ（油圧アクチュエータは応答性－ｆ特が悪いので、圧電アクチュエータが有効）が必要になる。また模擬地震の発生・実験装置にも大きなアクチュエータが必要になる。メートル単位のセラミクスとなると、どうやって接着させるか、きれいに焼き上げるか、といった課題が出てくる。』

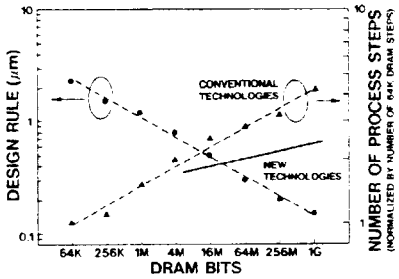
(2) 場（「空間）の極限化

ここでは、高真空、高純度、高圧、高温、微小重力等の極限場の実現技術とその周辺技術、及び極限場の測定技術を取り上げ、技術動向と今後の展開を分析する。

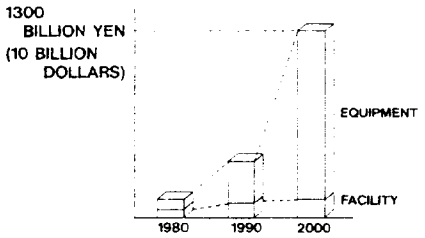
① 半導体プロセス環境（高真空、高純度）

DRAMを中心とする半導体デバイスの極限化（微細化、高集積化、大容量化）が進む中、2000年頃に実現が予想される1GbitクラスのDRAMにおいては、0.1～2μmレベルの超微細加工が必要と考えられている。このためには不純物の極限的な制御が必要となるため、メインとなるリソグラフィー等微細加工技術の進展に加えて、それを支える基盤としてウルトラ・クリーンなプロセス環境が不可欠となる。

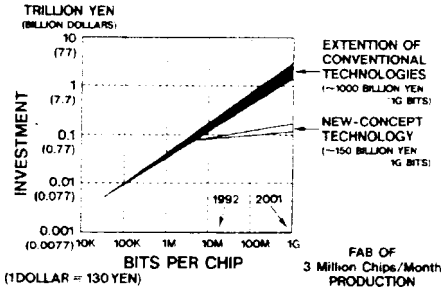
下図は、東北大学にクリーン・ルームを作って世界的な評価を得ている東北大学工学部電子工学科の大見忠弘教授による、DRAMのビット数、デザイン・ルールの進展予測と、そのために必要なプロセス工程数と設備投資額の予測を示したものである。



(a) 各世代におけるDRAMの集積度の推移



(b) 設備投資額の推移



(c) 設備投資額の内訳

第2.3－16図　東北大・大見教授によるDRAMの容量、デザインルール、設備投資額の予測

出所）「東北大学からの提案　－2001年の半導体技術」、大見、BREAK THROUGH、No.79、1993.1、p24-33

図に示される通り、2001年頃に実現が予想される1Gbit-DRAMでは、0.1μmオーダーの微細加工技術が要求され、同時に、直径10インチを越えるような第口径ウェハ上への均一な加工技術も必要である。その上、素子構造も複雑化の一途をたどっている。限られた面積に可能な限り大きな蓄積容量を実現するために、現状ではトレンチ構造やスタック構造を用いているからである。複雑な素子構造は工程数の増加をもたらす。工程数の増加は装置台数の増加を引き起こし、その結果、設備投資の高騰を招くことになる。現状のトレンドを外挿すると、1Gbiti-DRAMの製造に必要な設備投資額は、月産300万個規模の工場建設費

で1.3兆円にも達し（三菱電機の小宮、松川、石倉氏の試算）、仮にDRAM1個の工場出荷額が1万円であったとしても、生産額が建設費に到達するまで40～50ヵ月を要することとなり、産業として成り立たない額と成る。

生産性の観点からも、工程数の増加は好ましくない。最終的な歩留りは、個々のプロセスの歩留りを全て掛け合わせた積で決まるが、超微細化に伴い個々のプロセスの歩留りでさえ100%を維持することが非常に難しい。これに加えてプロセス数も激増するとあっては、高歩留りの維持は並大抵のことでは実現不可能である。

この問題に対して大見教授は次の解決策を提示している。

a．プロセス数の徹底的な削減

以下の新デバイス技術の採用により、デバイス構造を簡素化し、プロセス数を削減。

・高誘電体薄膜を用いたフラット・キャパシタ、強誘電体メモリセル等の新材料の採用
・高誘電体絶縁膜を用いたMOSFETによる完全CMOS構成
・将来的には、ニューロンMOS構成による回路の簡素化
・さらに将来的には、バイナリ・多値（・アナログ）融合LSI

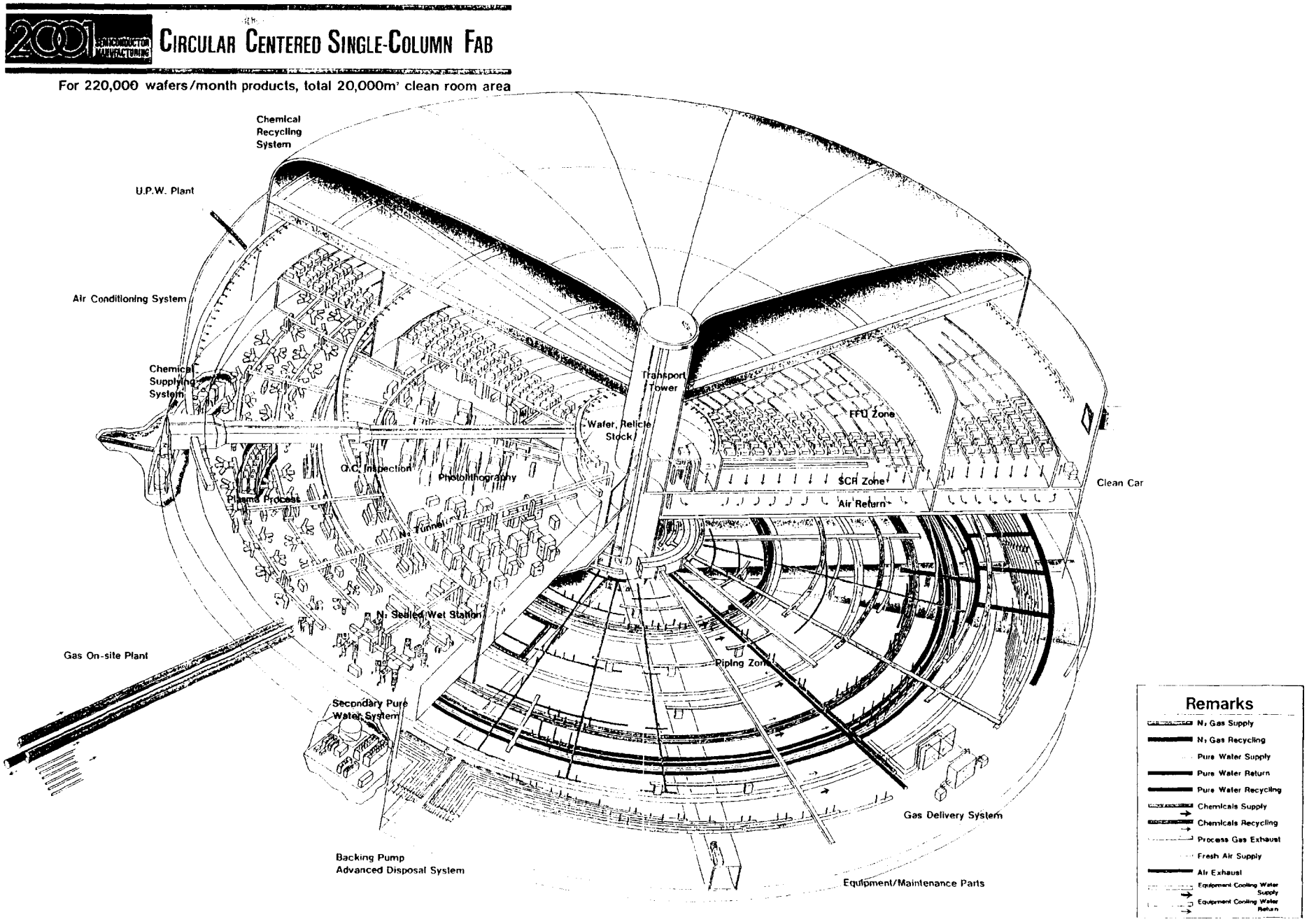
b．プロセスの高性能化

歩留り100%の生産ラインの実現のためには、次の3つの条件が必要。

・超清浄プロセス雰囲気
・超清浄ウェハ表面
・プロセスパラメータの完全制御

プロセス高性能化のための一提案として、大見教授は「クローズド・マニュファクチャリング・システム」を提唱している。プロセス全体を通じて常にウェハ表面を超清浄な状態に保つために、ウェハの移動はすべて、超高純度窒素ガス雰囲気中か、あるいは超高真空雰囲気中で行う。またプロセスパラメータの完全制御が可能なプロセス装置として、「2周波励起プラズマ・プロセス装置」の開発を行っている。またこの他に、in situクリーニング機能を備えた装置の導入による装置稼働率の向上、プラズマCVD、スパッタリング等プロセス装置の標準化が必要である、としている。

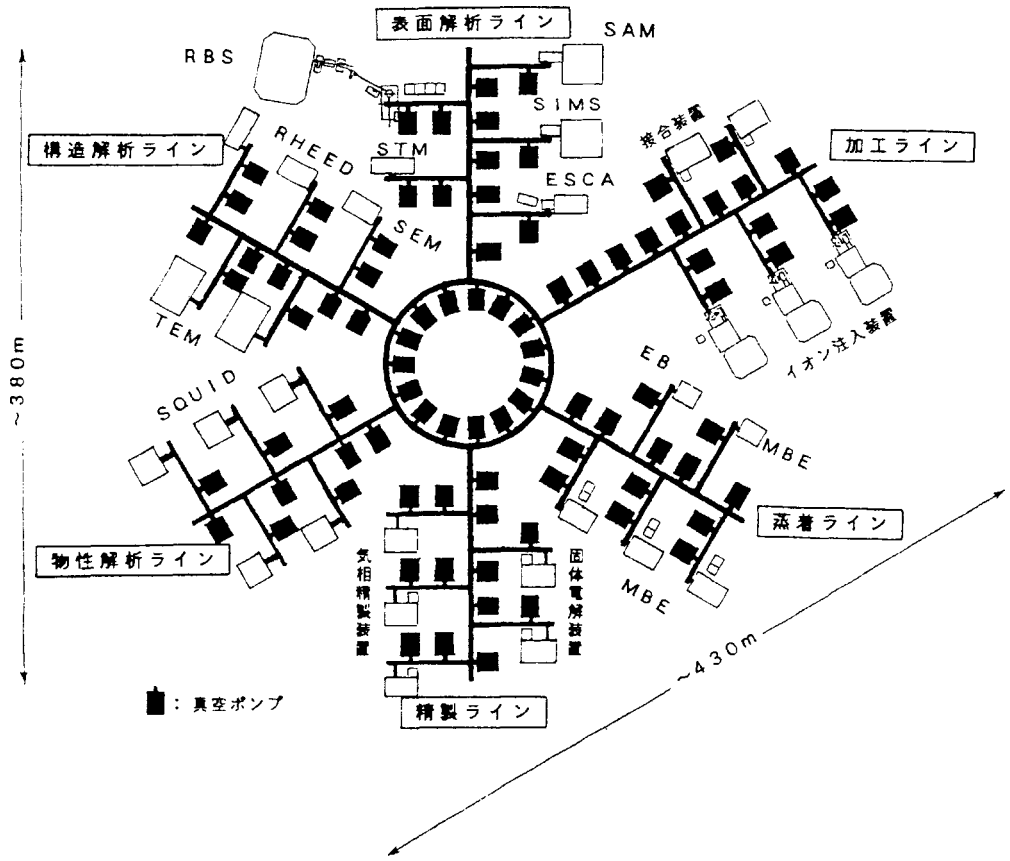
以下に、大見教授の提唱する2001年の半導体工場の姿を示す。



第2.3－17図　2001年のスーパークリーン・ルーム

出所）東北大学・大見教授資料

一方、金属材料技術研究所第4研究グループの吉原一紘総合研究官らは、次世代の単原子操作による材料創製のためのプロセス環境として、超高真空場ステーション、MAF（Material Art Factory）を構想している。以下にMAFの概念図を示す。



第2.3－18図　金属材料技術研究所によるMAFの概念図

出所）「金属材料技術研究所の極高真空場ステーション構想」、土佐・吉原、真空、Vol.35、No.6、 1992、p36-41

MAFはMBE等の蒸着ライン、イオン注入等の微細加工ライン、STM等の表面解析ライン、RHEED等の構造解析ライン、SQUID等の物性解析ライン、及び精製ラインを10-10Pa以下の極高真空空間（バルブ、真空ポンプ）で連結するものである。金属材料研究所では新たに国際共同研究センターの構築をめざしており、MAFをその基幹装置の一つと考えている。

なお、科学技術振興調整費では1988-1992年度に、「極高真空の発生・計測・利用技術の開発に関する研究」が行われている。

本調査における超高真空/高純度環境の極限化に関する予測結果を以下に示す。

第2.3－13表　超高真空/高純度環境の極限化に関するアンケート予測結果

技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
超高真空技術	大型の極高真空環境が実現でき多くの装置が組み込まれる（2000）	表面の理解が進み、表面機能材料が開発される
ガスの精製と微量不純物の定量	ガス吸脱着性のない接ガス素材と新規分析手段（2000） ➪ ゲッターや吸着剤（ゼオライト系）に代わる除去手段（2010）	半導体デバイス（シリコン系、化合物系）の高集積化に寄与、基礎科学（物理、化学）への貢献

出所）MRI

② 極限反応技術（超高圧反応）

極限反応技術は、超高温、超高圧、超強電磁場等を利用して、通常の条件では起こり得ない化学反応を起こしたり、通常の条件では得られない新材料を合成する技術である。ここでは超高圧反応について述べる。

超高圧反応については、物質工学工業技術研究所（極限反応部）や大学等で研究開発が行われているほか、科学技術振興調整費の「大型超高圧発生システムに関する研究」において1980～84年度に研究開発が行われている。

また東北大学薬学部の金子、片桐らは、10kbar以上の超高圧下では有機反応が加速され、常圧下では進行し得ない反応でも進行させることができると報告している（「ファルマシア」、Vol.27,No.6,1991,p547-551）。化学技術研究所（当時）の佐々木、蒲、安本、石上らも、超高圧下で有機反応の一種であるグリコシル化反応が効率よく進行することを確認した（日本産業技術振興協会技術資料、No.201、1990、p143-144）。また東北大学薬学部の片桐は、C-ヌクレオチドの超高圧下での合成法を開発した（有機合成化学協会誌、Vol.47、No.8、1989、p707-721）。また東京工芸大学工学部の倉林も、超高圧下でのラジカル反応、環化反応などの例を紹介している（「ペトロテック」、Vol.9、No.12、1986、p1086-1093）。

超高圧反応技術の進展予測に関する今回のアンケート結果を以下に示す。

第2.3-14表　超高圧反応技術の進展予測（アンケート結果）

技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
高圧反応技術	700MPa反応技術（2000） ➪ 1.5Mpa反応技術（2010）	生分解性プラスチックス、生理活性物質の効率的生産
超高圧反応場	1万気圧～5万気圧（2000） ➪ 50万気圧～100万気圧（2010）	新材料合成

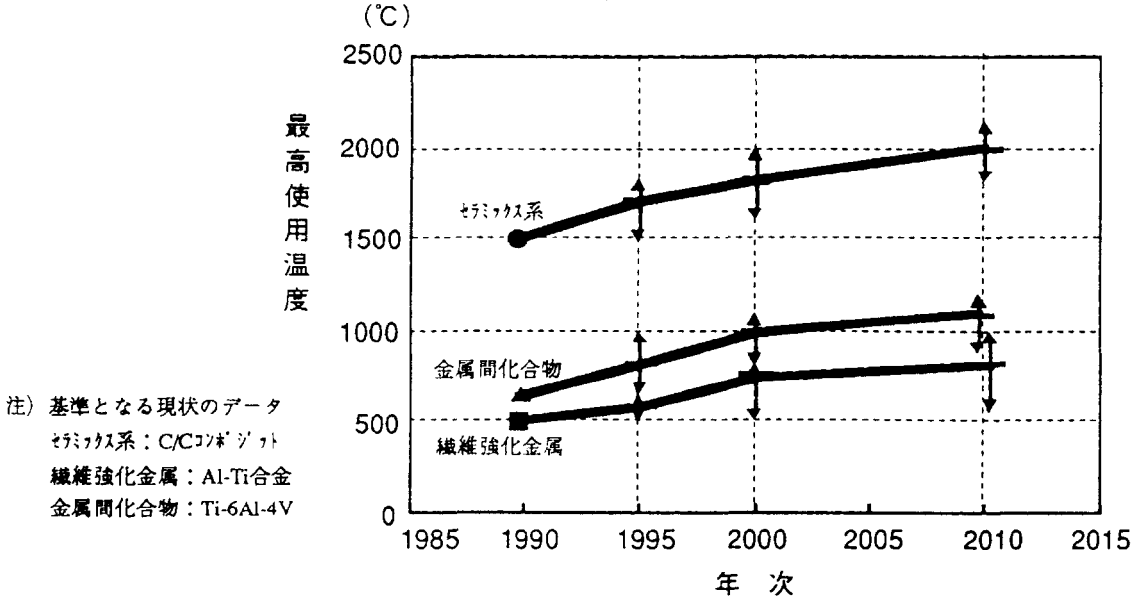
出所）MRI

③ 耐熱材料

耐熱材料は高温場の実現に不可欠な要素技術である。耐熱材料は、航空・宇宙、ガスタービン、自動車用エンジン、化学プラントなどの広範な分野で必要とされている。耐熱材料としてはセラミクス系材料、金属間化合物、繊維強化金属などが挙げられ、このうちセラミクス系の最高使用温度が最も高いが、脆性/疲労破壊の問題があり、現在各所でセラミクス－金属傾斜材料等に関する研究開発が行われている。

構造セラミクスについては国防/宇宙研究の成果もあって米国の技術力が高いが、我が国でも次世代プロジェクトの「ファインセラミックス」（1981-1992）、大型プロジェクトの「超音速輸送機用推進システム」や、大学、国立研究所、重電・重機械・自動車メーカなどによって研究開発が行われている。

耐熱材料の最高使用温度の現状と見通し（MRI既存調査資料による）を以下に示す。



第2.3－19図　耐熱材料の最高使用温度の現状と見通し

出所）MRI

また、今回のアンケート調査では以下の結果が出ている。

第2.3－15表　耐熱材料の使用温度の極限化（アンケートより）

技　術	進展度合とその時期		産業や他の技術へのインパクト
超高温耐熱材料の開発	酸化雰囲気2000℃に耐える材料の利用（2000）		エネルギー関連を主体に、一般工業用途にも広く利用される。
超高温構造材料	C/C複合材の表面コーティングで2000℃（2000）	➪ セラミック傾斜複合材で2500℃（2020）	宇宙航空機の性能向上に大きいインパクトあり
高温タービン材料	1750℃級（2000）	➪ 2000℃級（2010）	発電効率60%以上の高効率発電が可能
超高温セラミックス	1400℃級セラミックス（2000）	➪ 1500℃級セラミックス（2010）	セラミックス自動車、セラミックスガスタービンの実用化により省エネルギー、高性能化に貢献する

出所）MRI

ジェットエンジン等の原動機においては燃焼温度の上昇が効率に大きく寄与するため、材料の耐熱（及び耐腐食）性の向上が大きな課題となっている。ジェット/ロケットエンジンに関する基礎研究を行っている航空宇宙技術研究所・熱流体力学部の蓑田部長はエンジンの燃焼温度の向上に関して以下のように述べている。

蓑田部長：

「エンジンの基本的な設計目標は「小さくて高出力で高効率」である。このためには燃焼温度を上げれば良いが、燃焼温度は材料面の制約によりサチュレートしかけており、50℃上げるにも大変な努力が必要な状況である。実用機のジェットエンジンのタービン入口温度（＝燃焼器の出口温度）は約1300～1400℃であり、現在実験室レベルでは約1500℃が達成されているが、これを大プロ（超音速輸送機）のターゲットである1700℃まで持っていくのはかなり難しい課題である。

」

④　高温反応場の計測技術

高温反応場の計測技術とは、ジェットエンジン、ガスタービン、内燃エンジン等の原動機内部の燃焼ガスやプラズマ反応場におけるプラズマの温度・成分等をそのままの状態で計測（その場計測）する技術をいう。このような計測技術は原動機の燃焼効率の向上やプラズマ反応場の制御に不可欠である。

高温反応場の計測技術には、1）熱電対等の接触方式、2）赤外線スペクトル利用等の放射方式、3）密度計測方式、がある。密度計測により温度を測る手段としては、X線、電子線、α線吸収法、レーザビーム法、音響計測法などがある（"Meas Control", Vol.20, No.6, 1987, p19-22）。

千野製作所の菱刈、小針らは、放射温度計に都合のよい特性を備えた素子として、シリコン光電素子を紹介している（「計測技術」、Vol.12, No.4,1984,p51-62）。また耐熱性、耐電磁障害性、耐久性、分解能等の観点から、接触式/近接式/放射式温度センサからの光信号を光ファイバケーブルで伝送する方式が開発されている（日本鉱業・久保田氏、「熱処理」、Vol.30, No.1, 1990, p9-14）

科学技術庁では科学技術振興調整費において1985～89年度に「超高温の発生・計測・利用技術の開発に関する研究」を実施し、その成果を1990年の超高温シンポジウムで発表した。このうち「超高温場のその場計測技術に関する研究」の研究テーマ・発表者の一部を以下に示す。

・超高温反応場の流速の計測技術に関する研究（通信総研・磐本）

・超高温反応場の温度、密度の計測技術に関する研究（船舶技研・佐藤、天田）

・超高温反応場の化学種の計測技術に関する研究」（化技研・福田、丹羽、橋詰ら）

なおNEDOの平成4年度事前調査においても「超高温物性計測」に関するプレサーベイが行われている。

航空宇宙技術研究所・熱流体力学部の蓑田部長は、ジェットエンジン内の燃焼ガスの温度・成分の測定について以下のように述べている。

蓑田部長：

「現在タービン入口温度は直接測れないため、タービン出口温度（入口温度より200～300℃程度低い）から逆算している。2000℃にも達する燃焼器内の温度を直接測れればよいが、センサーが融ける、プローブを伝わって熱が逃げる、といった問題があり、今後の課題である。

また、燃焼ガスの成分（CO、NO2、OH等）を測る技術も、低NOx技術向上のために必要である。現在はガスをサンプリングして分析器にかけているが、ガスが冷えてしまう、化学反応により組成が変化してしまう、という問題がある。直接燃焼状態のガス成分を測るには、OHは特定波長で発光するといった特性を利用した光学的方法が有効である。レーザによる測定もやりかけているが、計測手段として活用するには至っていない。」

⑤ 微小重力利用技術

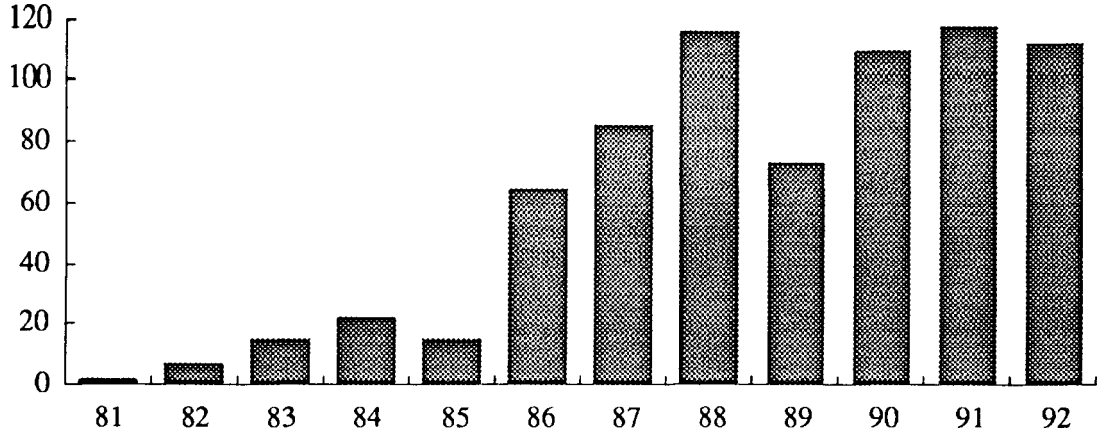
重力がゼロないし微小な環境下では、成分の均一な材料や高純度の材料の創製が可能であり、また蛋白質等の大型の結晶成長が可能である。液体・気体においては対流や沈降等の現象が生じないため、燃焼や溶融・凝固、化学反応に対し好影響を及ぼす可能性が強い。

このため世界各国で、政府の主導により微小重力の発生・利用・計測技術に関する研究開発が始まっている。米国ではNASA、大学、企業間の共同研究プログラムが進行中であり、欧州でもESA（欧州宇宙機構）を中心に研究開発が行われている。フランスではグルノーブル原子力研究センターの落下塔を利用して、金属材料の研究開発が行われており、ドイツでは1990年にブレーメンに大型落下塔が完成し、材料科学を中心に微小重力下での実験が進められている。ロシアでも宇宙ステーションのミールにおいて宇宙実験が続けられている。

我が国でも、宇宙開発事業団、宇宙科学研究所、電子技術総合研究所、大阪工業技術試験所、東京大学等で、微小重力下での諸現象の基礎的解明や無重力環境での新材料の創製に関する研究などが行われている。また本調査でヒアリングを行ったT社においても、微小重力実験装置の研究開発が行われている。

微小重力関連のJICST登録論文数（発行年別）の推移を以下に示す。

第2.3－20図　微小重力関連のJICST登録論文数



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

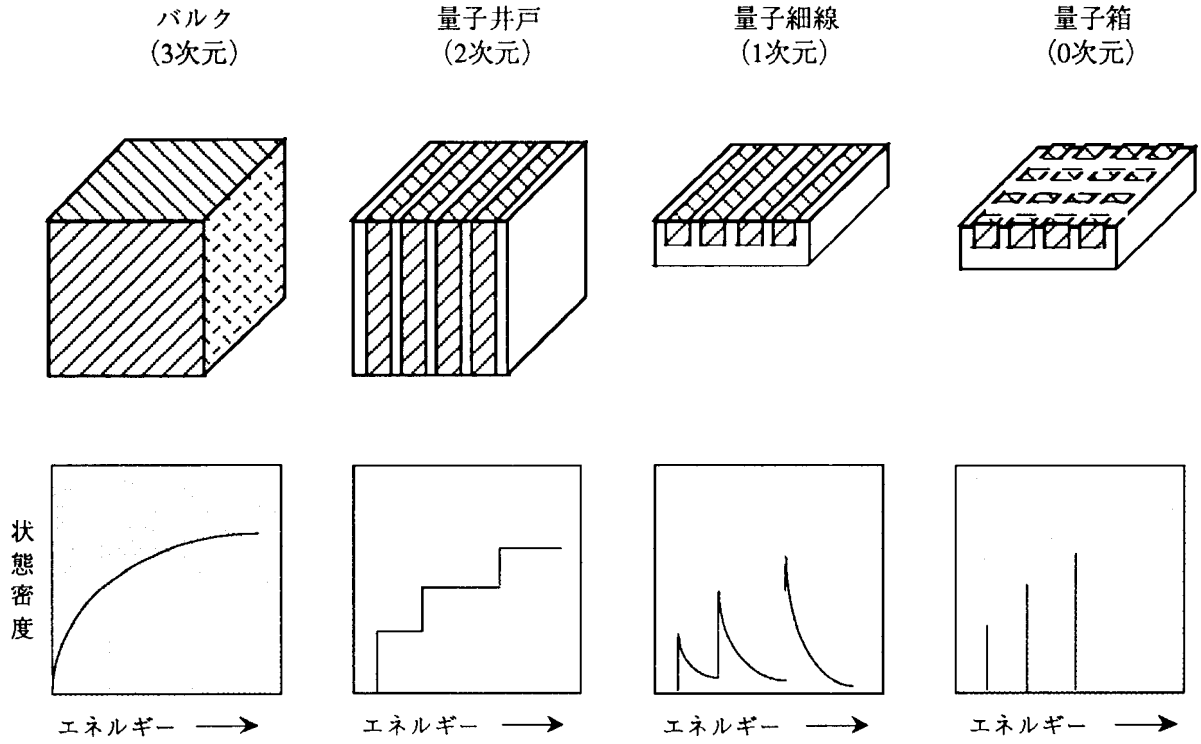
(3) 時空間（ｔ空間）の極限化

ここでは、吉田教授のｔ空間（時空間）における極限化を拡大解釈して、高速化、短時間化、及び非定常状態の計測・解明を目的とした技術について、その動向と今後の展開を述べる。

① 量子効果デバイス

MOCVD、MBE等の半導体薄膜結晶の形成法が急速に進歩したことにより、最近では１原子層の厚さ（0.3nm）を単位とした薄膜が得られている。このような超薄膜作製技術の進展により、HEMT、共鳴トンネル効果トランジスタなどの電子デバイスや、電子を２次元的に閉じ込めた「量子井戸」構造による量子井戸レーザ、量子井戸光変調器などが実用化されつつあり、特に量子井戸レーザの発展は光通信からの要請もありめざましい。これらの多くは種類の違う半導体（例えばGaAsとAlGaAsなど）を電子の波長と同程度の厚みで周期的に重ね合せて作る、いわゆる「超格子」構造をとっているため、超格子デバイスとも呼ばれる。

第2.3－21図　量子構造の概念図とエネルギー準位

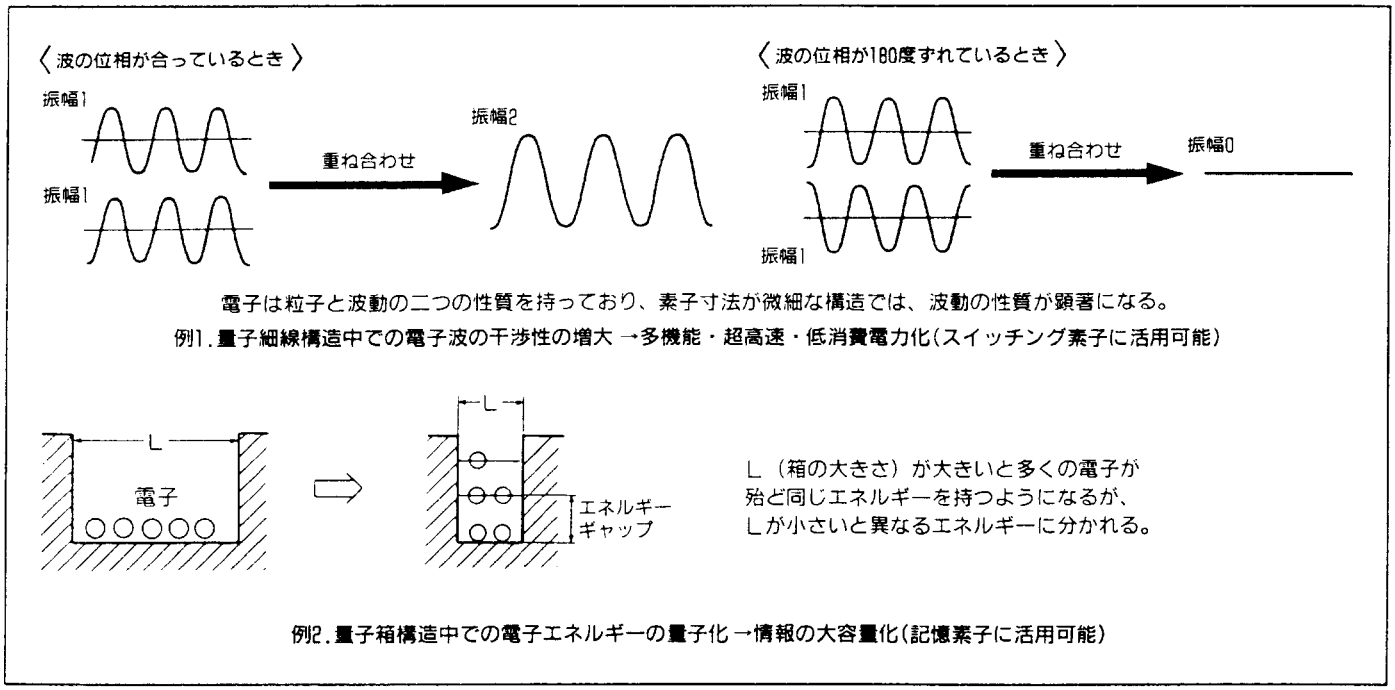


出所）各種資料を参考に、MRI作成

一方、平面内の加工に関しては、従来から、超LSI用に開発されてきた微細加工技術を利用すればサブミクロン精度の構造が作製できる。このような超微細加工技術と超薄膜作成技術を組み合せて、厚みと幅が半導体結晶中の電子の波長（通常、数10nm）以下の微細構造を作ると、１次元（量子細線）、０次元（量子箱）に閉じ込められた電子によって量子効果が現れる。具体的には、トンネル効果（構造内部と外部の電子エネルギーが一致した

時にのみトンネル電流が流れる現象）、電子の波動性（による干渉効果）、量子準位間の遷移現象、量子閉じ込めシュタルク効果等の効果であり、このような量子細線、量子箱中の電子の新しい現象を利用して、従来にない優れた特性を持つ電子デバイスや光デバイスの作製の試みが始まっている。次世代プロジェクトにおいても、主として電子デバイスとしての量子効果デバイスの実現を目指して、1991～2000年度の予定で「量子化機能素子」プロジェクトが始まっている。

第2.3－22図　量子デバイスで活用される量子効果・現象の例



出所）「産業科学技術研究開発制度」、工業技術院、1993、p19

東京大学生産技術研究所の荒川助教授は量子井戸（2次元）、量子細線（1次元）、量子箱（0次元）を用いた量子効果レーザの利点及び応用可能性について以下のように述べている。

荒川助教授：

『量子効果レーザは、その特性の良さから超高性能レーザとして高度な応用が期待される。

○狭スペクトル線幅、広帯域変調特性　➪　フェムト秒光パルス
（現在のトップデータは色素レーザを用いたAT&Tによる6fsec）
➪　超高速光通信デバイス
○低閾値電流（現在のトップデータは1mA）　➪　低消費電力デバイス
○超微細構造　➪　超高集積・大容量デバイス
➪　アレイ化　➪　ディスプレイ、超並列光デバイス　』

荒川助教授は、量子細線/量子箱の作製プロセスについて、以下のように述べている。

荒川助教授：

「量子細線／量子箱の構造を実現するための試みは微細加工（電子ビーム描画法、集積イオンビーム法、X線リソグラフィ、電子ビームエッチング等）による方法と結晶成長（ラテラル成長、オフ基板上へのステップフロー成長、レーザALE、電子ビーム選択成長等）による方法に分けられが、エッチング等の外部からの微細加工のみで量子効果を実現するのは、寸法上かなり困難である。

私はGaAs基上に電子ビーム描画技術でSiO2パターンを形成した後、MOCVD法によってGaAs及びAlGaAsを選択成長させることにより量子細線構造を作製した。このように、原子自体の何らかの自己組織性を使わなければこのような極微細で揺らぎの少ない構造は実現できないものと思われる。」

同助教授は、各種量子効果デバイスの実用化時期を次のように予測している。

荒川助教授：

「　各種量子効果デバイスの実用化時期：

(1)　波動の干渉を使ったもの（量子波干渉効果デバイス）　－　10～20年後に実用化

(2)　電子の低次元化によるもの

①　量子井戸（2次元）デバイス　－　下記は既に実用化

共鳴トンネル効果トランジスタ/ダイオード、量子井戸レーザ、量子井戸光変調器

②　量子細線（1次元）デバイス（レーザ等）　－　10年後に実用化

かなり良質な量子細線構造を作製できた（荒川）が、十分狭く（15nm以下）、一様で（寸法揺らぎ20%以下）、高密度な（実用のためには10～100個の量子細線が必要）構造を実現するには、なおさまざまな作製技術の追求が必要。

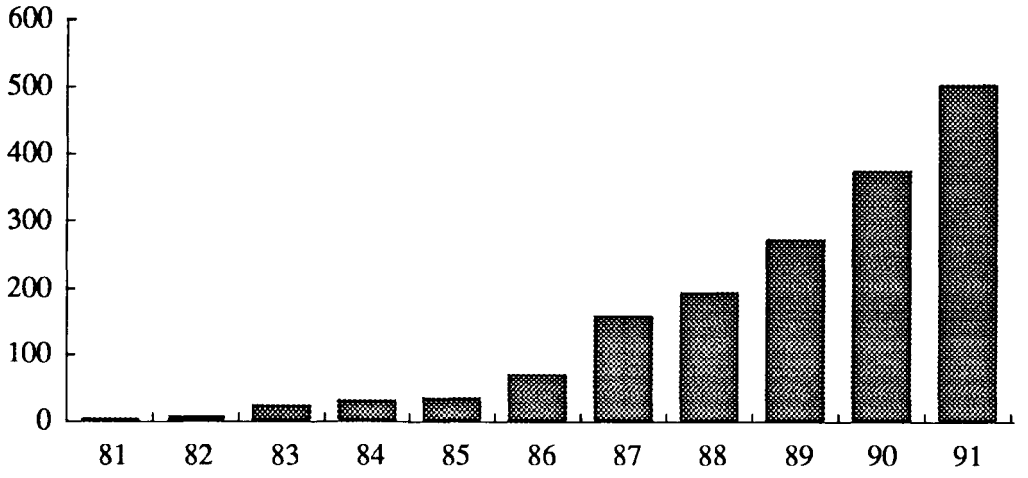
③　量子箱（0次元）デバイス（レーザ等）　－　15年後に実用化

各所（荒川、北大・福井等）で量子箱構造が試作されており、良好なフォトルミネッセンス特性が得られているが、実用デバイスレベルに至るまでには作製技術上のブレークスルーが必要。」

なお今回の極限化に関するアンケート調査では、超格子量子デバイスによって2000年に1TFLOPS、2005年に10TFLOPSの超高速コンピュータが実現する、と予測されている。

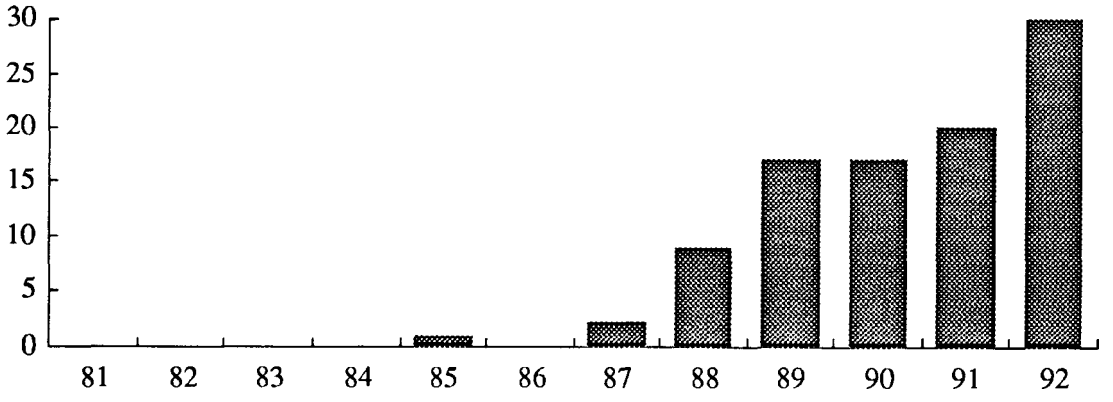
参考までに、量子井戸レーザ、及び量子箱に関するJICST登録論文数の発行年別推移を以下に示す。

第2.3－23図　量子井戸レーザ関連のJICST登録論文数



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

第2.3－24図　量子箱関連のJICST登録論文数



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

② 超時空間制御プロセシング

「超時空間制御プロセシング」は東京大学工学部金属工学科の吉田教授の新しい提案である。その概念を以下に示す（再掲）。

吉田教授：

「第3の極限プロセシングとしてｔ空間における”時空間制御プロセシング”が考えられる。これは言ってみれば外的作用を反応プロセスの時間と同期させるということで、究極的に言えば固体の格子振動の時間、つまりピコ秒オーダーでの外的刺激と固体表面の相互作用が考えられる。またそこまでいかなくても例えばプラズマ中での分子の励起緩和時間(～ns)や各種反応の緩和時間(～μs)など現在の技術でも対応可能な領域がある。

このプロセシングの制御には、連続的制御とパルス的制御が考えられる。前者では位相制御が考えられ、後者ではパルス的エネルギー供給としてパルスレーザーなどの適用が考えられるが、電子線やＸ線の利用も考えられる。

この”時空間制御プロセシング”の概念は現在の私のプラズマ研究から考えついたものであるが、この研究領域での内外の先進的な研究者の間では時空間制御によるプロセシングのブレークスルーが多く試みられている。まさしくプロセシングにおける第3の概念が芽生えているといえるかもしれない。」

なお吉田教授は、ナノ秒レベルでのプロセシングは2000年頃に、ピコ秒レベルのプロセシングは2005年頃に実現すると予測している。

③ フェムト秒テクノロジー

電子デバイスの高速化の進展は著しく、シリコンのECL（Emitter Coupled Logic）回路素子で最高24.3ピコ秒（pico=10^{-12}）というゲート遅延時間が実現されている。今後微細化、高集積化、高性能化に伴い、電子デバイスが扱う時間領域はますます短時間化していくものと予想される。

光通信の世界では現在1.6Gbps（bps=ビット/秒）の伝送システムが実用化され、2.4Gbpsの実用化に向けた開発が国内外で行われている。また将来のB-ISDN（広帯域ISDN）には10Gbpsの光伝送システムが必要であり、ピコ秒オーダーの光パルスを扱う技術が不可欠となる。

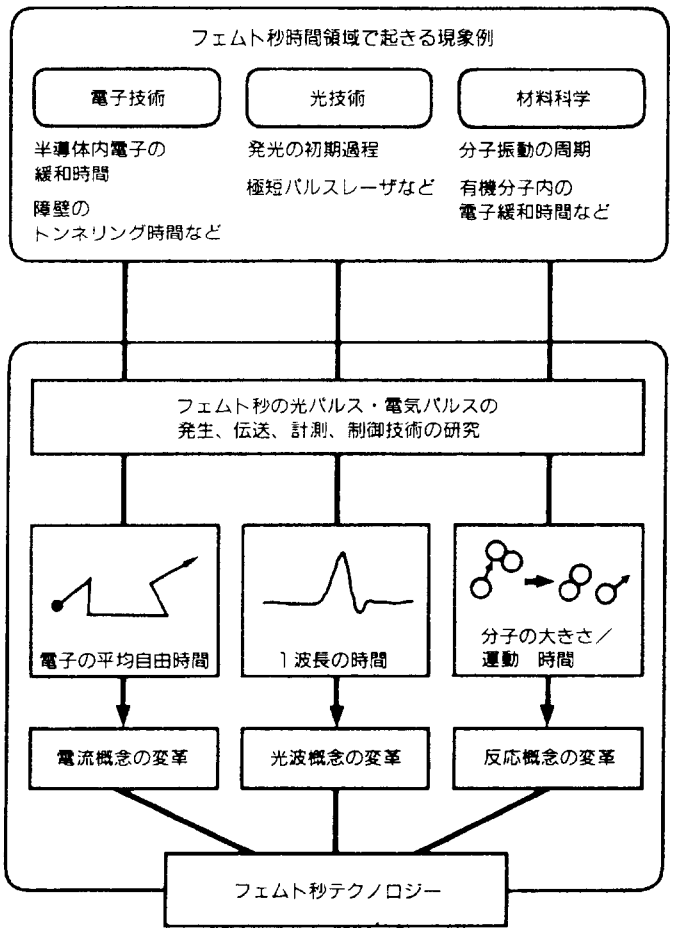
一方、フェムト秒オーダー（femt=10^{-15}）の事象は我々にとって未知の世界である。現在世界最短のパルス・レーザはベル研の６フェムト秒であり、我が国の大学（東京大学理学部等）においてもフェムト秒オーダーの光パルスを発生させて液体中の分子に当て、ラマン散乱スペクトル解析により液体中の分子の回転運動を計測・観察する、といった研究が行われている。

また東京大学生産技術研究所の荒川助教授は、電子の一波長分の空間分解能（100Å=10nm）、時間分解能（10fsec=100THz）、エネルギー分解能を持った4次元的な量子効果デバイスが出来ないか、と考えている。これができれば、非常に微細な半導体中に10fsecクラスのレーザ光パルスを発生させる機能を持たせることができる。

このようにフェムト秒テクノロジーは、極短時間のパルスレーザを発生させ、それを用いて現象を解明したり、アプリケーションに応用したりする技術であり、極短時間の物理/化学現象の解明、ひいては超高速の電子デバイスや光デバイスの実現につながる可能性がある。このような観点から工業技術院では平成5年度より「フェムト秒テクノロジー」に関する「先導研究」を実施している。

なお今回のアンケート調査では、ナノ～ピコ秒の短時間の化学反応を捉える高度分光技術が2000年頃に、またフェムト秒オーダーの超短時間の化学反応を捉える技術が2010年頃実現し、化学反応やその過程の遷移状態の観察・制御が可能となり、新材料、新触媒の合成、光化学反応装置の開発等に貢献するものと予測されている。

第2.3－25図　先導研究「フェムト秒テクノロジー」の狙い



出所）「産業科学技術研究開発制度」、工業技術院、1993、p34

④　光周波数計測技術

工業技術院計量研究所量子部では、電波から光に至る広い周波数領域（およそ10GHz～100THz）で、次世代を目指した波長・周波数標準や計測技術の研究を行っている。光の周波数を正確に計測する技術は光通信技術・光デバイス技術やフェムト秒テクノロジーの基盤技術であり、今回のアンケート調査でも光周波数計測技術が2000～2005年頃に飛躍的に進展し、光通信の進展を支え、また新しい物理現象の解明に貢献すると予測されている。

⑤　非定常状態の計測技術

短時間で大きく変動する非定常現象の計測は一般に困難を伴う場合が多い。ここではその事例として、「高速回転体中の流れ計測」、及び「ロボットアームなどの動的座標追跡」を紹介する。

a．高速回転体中の流れ計測

航空技術研究所熱流体力学部の蓑田部長は、ジェットエンジンのガスタービン中での流れ・乱れ計測の将来について、以下のようにみている。

蓑田部長：

『航空機のジェットエンジンの内部流れ（注：これに対して航空機の外部の流れを「外部流れ」という）の測定技術が進歩する。即ち、ガスタービンの羽根と羽根の間の数mmの狭い空間における複雑な流れの3次元的分布を、レーザ流速計（灯油蒸気等のシードを入れ、それにレーザを当てて散乱光を測定）等の光学的測定により、1998年頃にはある程度計測できるようになるであろう。（現在は回転体中の高速流体の流れは計測不可能）

さらに2003年頃には、内部流れにおける乱れ（乱流）の細かい計測が可能となろう。現在はピトー管や圧力計によって、平均化された流れを測っているが、レーザ・ドップラー流速計などで細かい乱れが測定できるようになるかもしれない。』

b．ロボットアームなどの動的座標追跡

工業技術院計量研究所のＲ部長は、ロボットアーム等の移動物体の動きをリアルタイムで追跡する動的座標計測技術について、以下の見解を持っている。

Ｒ部長：

『動いている物体の三次元座標の（実時間）計測技術はまだ十分なものができていない。現在は三角測量により角度を測っているが、測る位置によって精度が異なる（遠方になると誤差が大きくなる）。ロボットの腕の途中の動きは現在追跡が難しい。

我々は0.1μm単位の分解能を持つレーザ干渉計（現場に携帯可能）を用いた三辺計測（長さの計測）によりこれを実現しようと考えている。

もしこの技術ができれば、産業への波及効果は大きい。ロボットだけでなく、多軸の工作機械や自動溶接の精度/制御性の向上、建築関係（ブロックの積み上げ精度の向上、クレーンによる資材吊り上げの位置把握とタイミング制御、橋の建設など）、飛行機等大型工作物の組立、など幅広い分野で使える。

メーカや工業会（産業用ロボット工業会）は物を作る方は熱心だが、ロボット等の性能のチェックにはあまり熱心でない（位置のずれ等はフィードバック・ループで解決している）。性能のチェックや動作・位置の計測はロボット等の高度化に必要不可欠であるため、メーカもユーザも欲しがっているが、こういう共通基盤的な技術は1メーカでは開発が困難である。』

また同氏は、こうした共通基盤的な計測技術に関する国家的な取り組みの必要性について、以下のように考えている。

Ｒ部長：

『こうした計測技術は共通基盤的な技術であるが、1メーカではとても開発できないため、国が主導を取って研究開発すべきである。計測技術だけの国家プロジェクトは考えられないであろうか。現在の国家プロジェクトにもそれぞれ計測技術の研究開発が一応含まれている場合も多いが、位置付けはあくまで補足的な場合が多く、主体にはなっていない。

なお、計量研の役割として、標準関係が大事であることはもちろんだが、私としては、「全く新しい計測技術の開発」も計量研の重要な使命である、と考えている。』

2.3.2 高機能化・インテリジェント化の進展

2.3.1では技術の量的な進展（極限化）の動向について分析したが、ここでは技術の質的な進展、特にインテリジェント化の動向を分析した。技術のインテリジェント化は広義には「技術の機能を生物や人間の持つ高度な機能に近付けること」と定義できるが、ここでは便宜上以下の３つに分けて分析する。

(1)バイオテクノロジー（生物・生体・生体分子を利用・改変するもの）

(2)バイオミメティクス（生物に近付けたり模倣したりするが、生物や生体を利用しないもの）

(3)コンピュータによる設計・ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

またインテリジェント化には該当しないが、技術の質的な進展として、(4)多体問題の解明、及び(5)非線形/カオス現象の解明・利用を取り上げた。

(1) 生物の利用

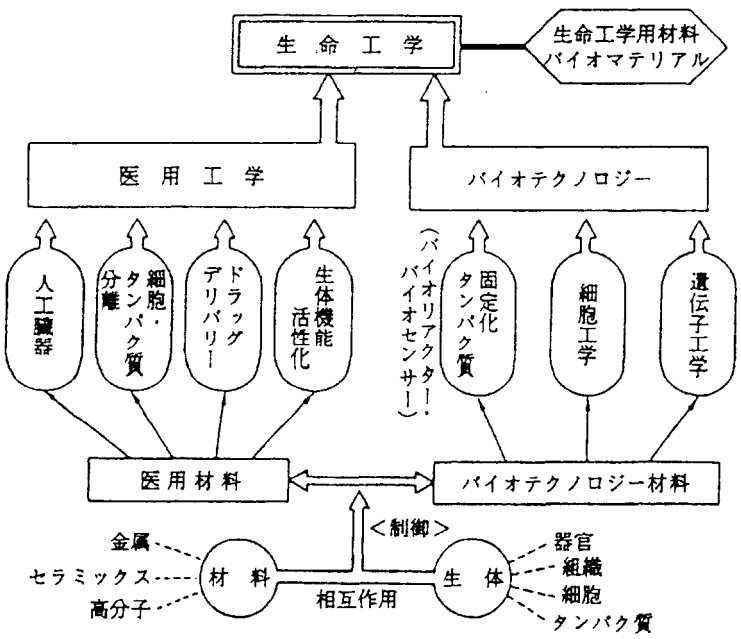
① 生命工学材料（バイオマテリアル）

生命工学材料（バイオマテリアル）とは、医療分野（医用工学）とバイオテクノロジー分野（生物工学）で使用される材料の総称である。

東京工業大学生命理工学部の赤池教授（神奈川科学技術アカデミー第三研究室長を兼任）は生命工学材料、特に生体適合材料、細胞特異性材料、それらを用いた人工臓器、及びドラッグ・デリバリー・システム（DDS）の研究などを行っている。

ここでは、KAST（神奈川科学技術アカデミー）の「平成三年度　研究報告書」を参考に、生命工学材料のうち特に細胞特異性材料の動向をまとめた。

第2.3－26図　生命工学材料への期待



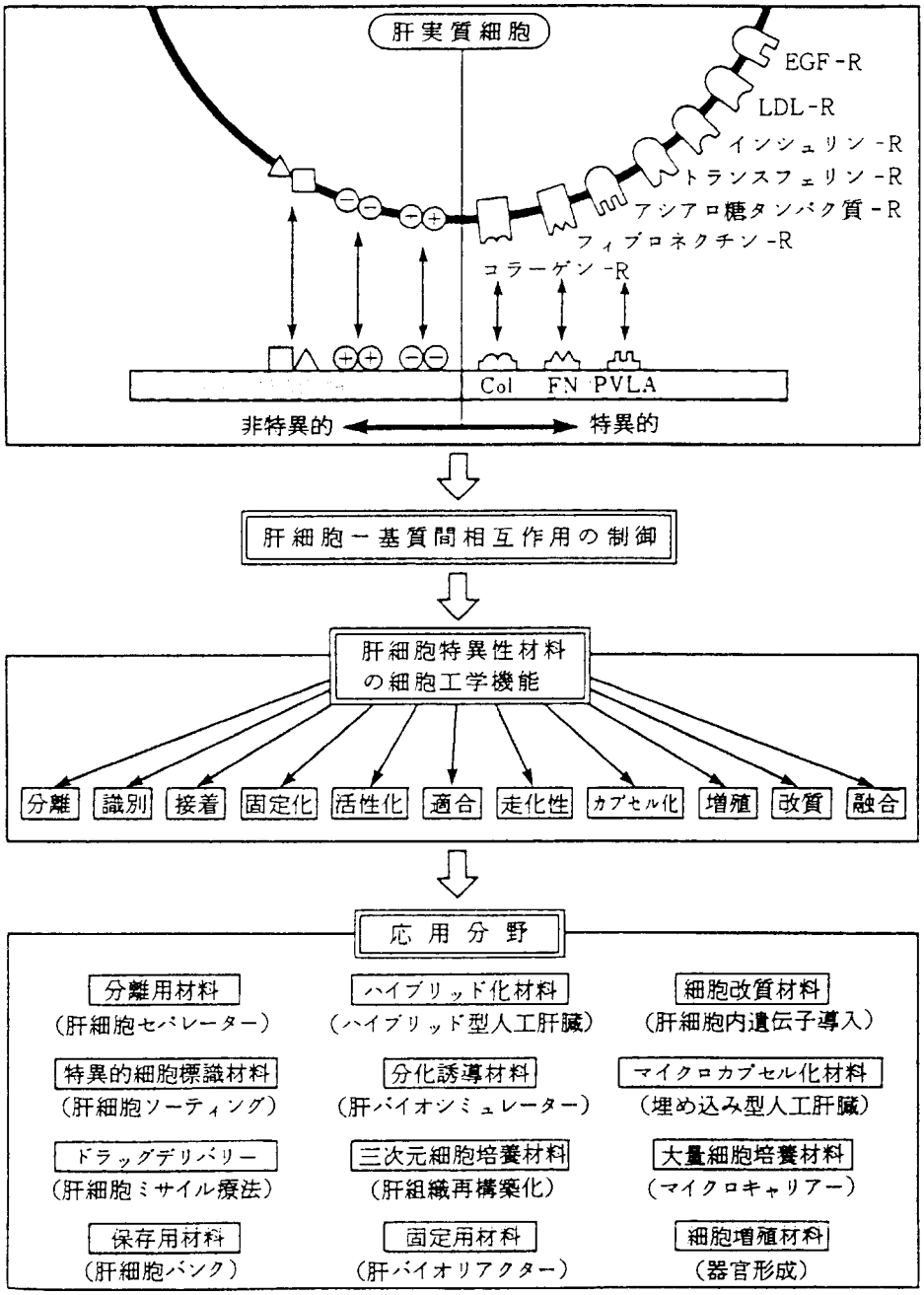
原出所）「生命工学材料の展望」、赤池・丸山、ケミカルエンジニアリング、1992年1月号、p41

出所）「平成三年度　研究報告書」、（財）神奈川科学技術アカデミー第三研究室（高機能分子認識薄膜プロジェクト）、p68

「細胞特異性材料」とは、細胞に対して認識・接着、分化誘導、増殖、分離などの機能を選択的に誘起する人工材料であり、赤池教授らは同材料の設計論を提唱してきた。同材料の設計においては、材料と肝細胞等の生体成分との相互作用を制御することが重要である。

このような細胞特異性材料は、ハイブリッド型人工臓器やバイオシミュレータ（薬物やホルモンに対する生体応答をシミュレートする）をはじめ、大量細胞培養材料、ミサイルドラッグ、細胞活性化材料、バイオリアクターなど幅広い分野に応用できる（第2.3－26図）。

第2.3－27図　肝細胞特異性材料の設計原理と細胞工学・臓器工学への応用



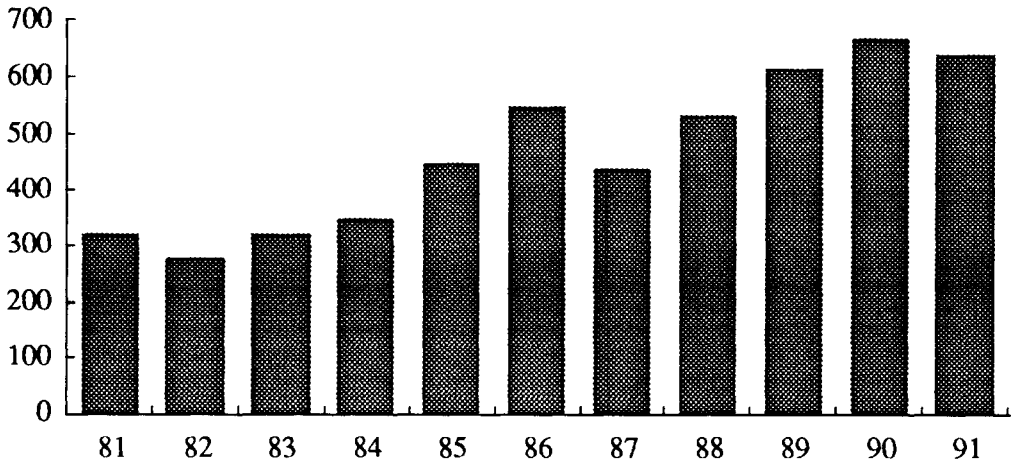
EGF：上皮成長因子、LDL：低比重リポタンパク質、Col：コラーゲン、FN：フィブロネクチン、PVLA：スチレン誘導体（ラクトース側鎖）ポリマー、-R：レセプター

出所）「平成三年度　研究報告書」、（財）神奈川科学技術アカデミー第三研究室（高機能分子認識薄膜プロジェクト）、p48

さらに赤池教授は、「生体に学び生体を越える」という考え方を材料工学だけでなく、情報工学、プロセス工学、組織工学、管理工学等にも適用することを提案されている。例えば、細胞と細胞や細胞外マトリクスや細胞増殖因子との相互作用に関する知見を組織工学や社会システム工学に適用したり、人体の循環系・呼吸系・消化系に関する知見をプロセス・エンジニアリングに適用したり、免疫等生体防御反応に関する知見を危機管理論に適用したりする考え方である。詳細については赤池教授のお話（第Ⅱ部）を参照されたい。

なお参考までに、人工臓器関連のJICST登録文献数の発行年別の推移を示す。

第2.3－28図　人工臓器関連のJICST登録文献数の発行年別推移



出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

② 蛋白質工学

蛋白質工学（プロテイン・エンジニアリング）は、理論的な設計に基づいて、目的とする蛋白質を人工的に改変・合成する技術である。

蛋白質は生体において酵素や抗体、ホルモン、ヘモグロビンあるいは筋肉や皮膚、毛髪として極めて重要かつ多様な役割を担っている。蛋白質はアミノ酸が数十から数百つながってできており、複雑な立体構造（三次構造）を形成している。蛋白質の有する様々な機能はこの三次構造に由来している。従ってあるアミノ酸配列をもつ蛋白質の立体構造と機能が予測できれば、望みの機能を有する蛋白質を設計し、遺伝子工学等によりその蛋白質を生産できる。

この技術を利用すれば、例えば天然の酵素の一部を改変（修飾、ハイブリッド化等）することによって、耐熱性・耐油性の高い高効率のバイオリアクタ用触媒に適用したり、生分解性を抑制することによって、医薬品としての効果持続時間を長くしたり、耐アルカリ性を付与することによって、洗剤用酵素に適用する、といったことが可能になる。また天然の蛋白質を改変するだけでなく、目的に合わせて新しい蛋白質を設計し合成することも可能になるであろう。

なおこれらとは異なるが、2種類の蛋白質をつなげることにより、隣接した蛋白質に歯車のように動きを伝える「プロテイン歯車」も研究されており、マイクロマシンへの応用が期待されている。

蛋白質工学はこのように無限ともいえる可能性を秘めており、遺伝子工学や細胞融合に次ぐ次世代のバイオテクノロジーとみられている。このため次世代プロジェクト（現：産業科学技術研究開発制度）では「機能性蛋白質集合体応用技術」プロジェクトを1989～98年度の予定で実施している。

蛋白質工学という言葉が提唱されたのは1983年のことであり、技術的にはまだ萌芽段階である。今後は遺伝子工学等のバイオテクノロジーや分子物性に関する理論的研究、コンピュータによる設計や3次元表示等の技術を集約して、天然蛋白質の改変、さらには人工蛋白質の合成ができるようになるであろう。

東京大学農学部の別府教授は蛋白質工学に関して以下のような見解を持っている。

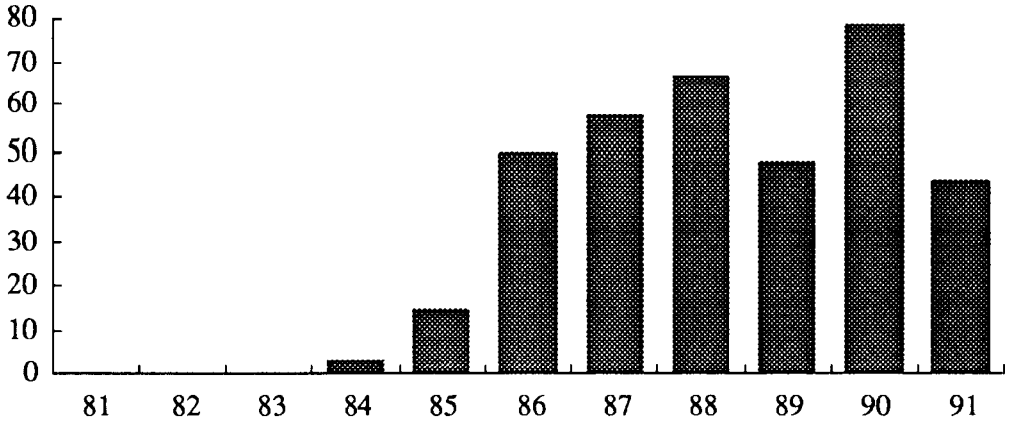
別府教授：

「蛋白質の構造と機能の相関関係を解明することは、従来はスローガン（夢物語）に過ぎなかったが、最近では蛋白質の3次元構造に関する情報集積が進み、その情報に基づき蛋白質を人工的に改変・デザインできるようになってきた。また蛋白質の機能もかなりわかってきた。今一番欠けているのは、構造と機能をつなぐ理論、例えば蛋白質分子中の有機電子論・反応論であり、今後の重要な研究課題である。

計算化学（コンピュータによるシミュレーション）も蛋白質工学の一つの重要な道具ではあるが、あくまで手段・インターフェース（コンピュータ・グラフィクス）に過ぎない。」

参考までに、蛋白質工学関連のJICST登録文献の発行年別件数推移を示す。

第2.3－29図　蛋白質工学関連のJICST登録文献数



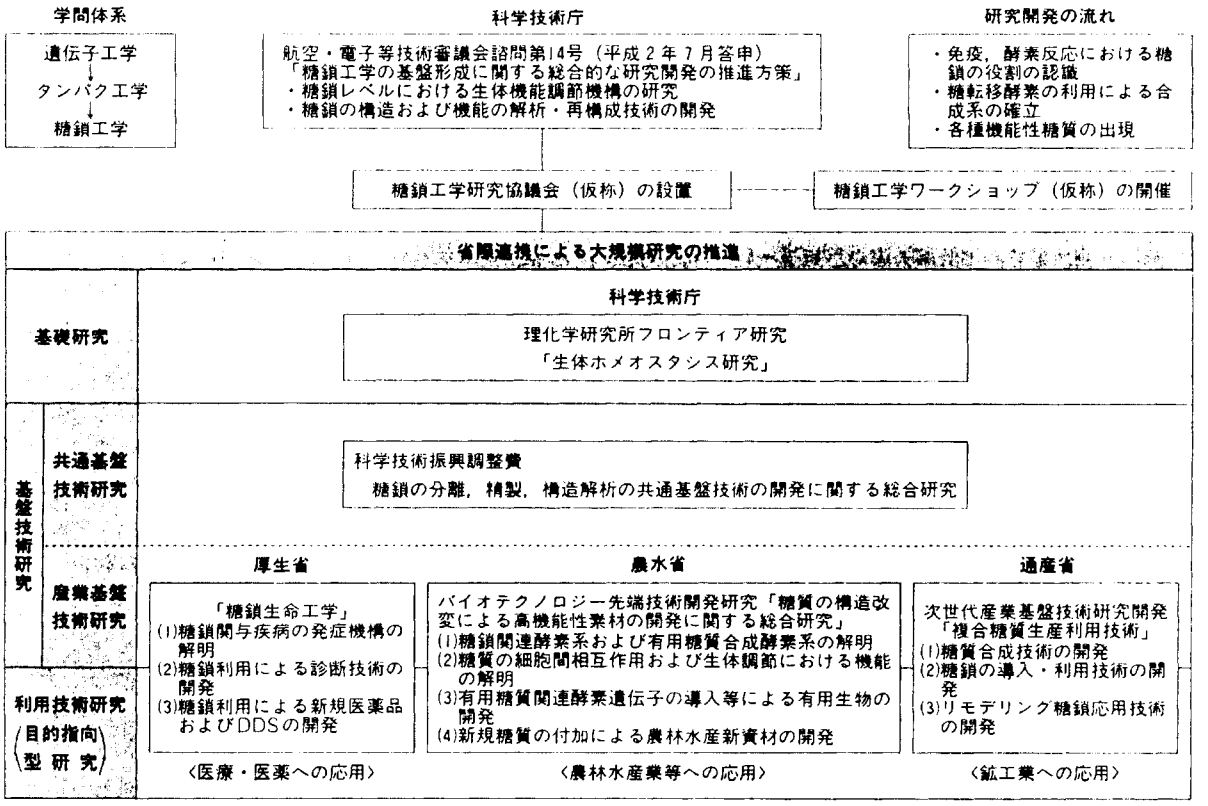
出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

③ 糖鎖工学

糖は蛋白質と並ぶ生体の基本的構成要素である。糖鎖は、単糖が配列して鎖状の分子となったものであり、近年になって、生体内で細胞の相互認識や機能調節に重要な役割を果たすことがわかってきた。

このため科学技術庁の航空・電子等技術審議会諮問第14号「糖鎖工学の基盤形成に関する総合的な研究開発の推進方策」（平成2年7月答申）に基づき、科学技術庁、厚生省、農林水産省、通商産業省４省庁が協調を図りつつ、省際連携による大規模研究が平成3年度よりスタートした。以下にその体制と通商産業省の「複合糖質生産利用技術」の概念図を示す。

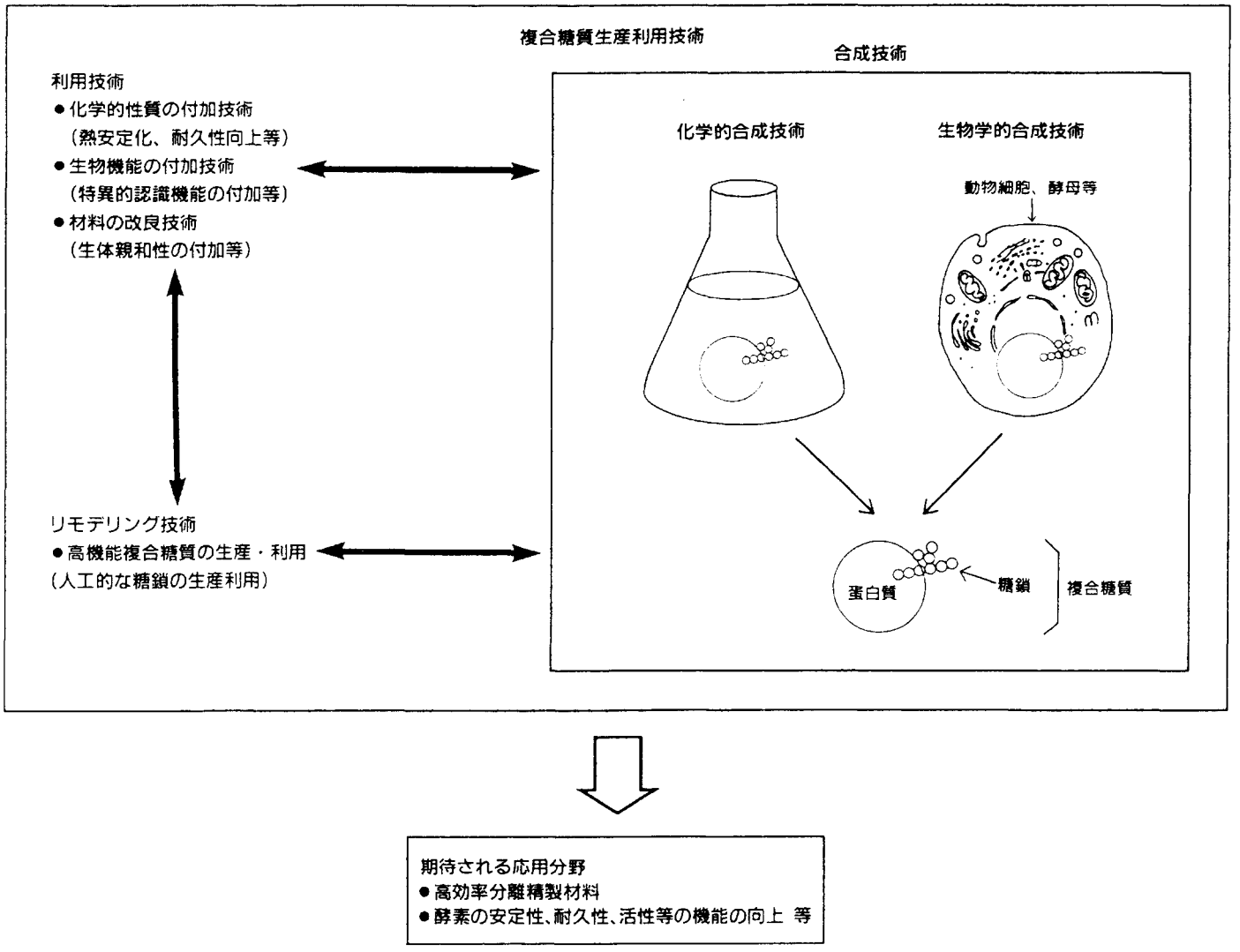
第2.3－30図　「糖鎖工学」関連プロジェクトの全体計画



原出所）「バイオテク便覧　1991」

出所）「全予測　先端科学技術」、MRI、1991、p121

第2.3－31図　「複合糖質生産利用技術」プロジェクトの概念図



出所）「産業科学技術研究開発制度」、工業技術院、1993、p16

④　その他のバイオテクノロジー

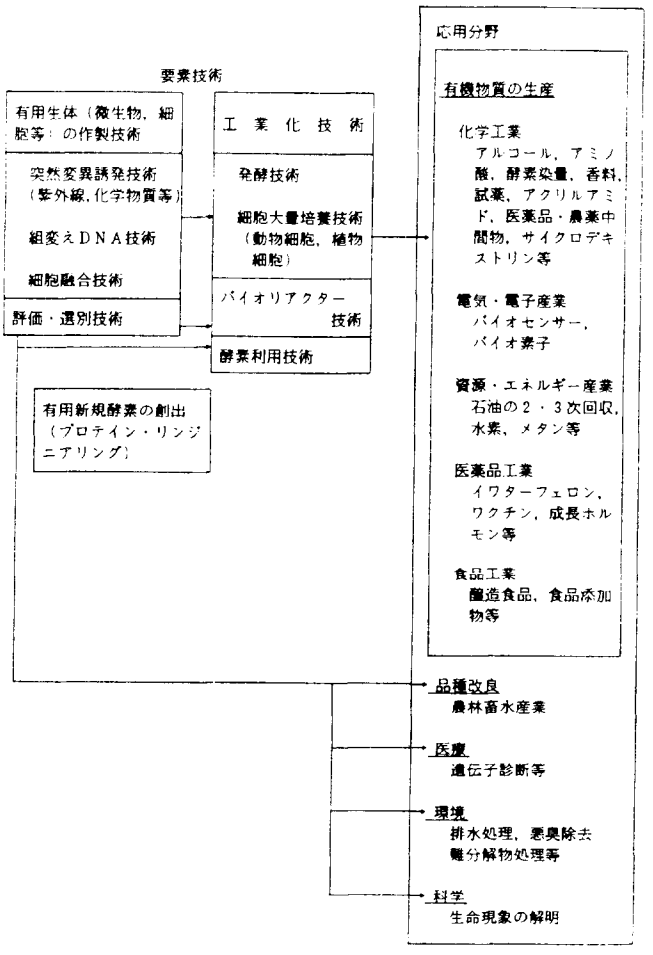
人類は古くから農業によって植物を、酪農・遊牧により哺乳類・鳥類を、養殖によって魚類を、発酵技術によって微生物をそれぞれ利用してきたが、それらはいずれも生物の個体の一部ではなく全体を利用するものであった。

生物利用技術のフェーズが大きく変わったのは、1944年にアベリーがDNAを発見し、1953年にワトソン、クリックがDNAの2重らせん構造を解明してからである。その後1957年に大阪大学の岡田善雄教授が細胞融合現象を発見し、1973年にコーエン、ボイヤーらが組変えDNA技術を開発し、1974年には細胞融合技術（ポリエチレングリコール法）が開発されたことによって、生物の種の壁を越えて育種・改良できることとなった。

この組変えDNA技術と細胞融合技術がバイオリアクター技術、細胞大量培養技術と結び付くことにより、生体内に微量しか存在しない生理活性物質を微生物または細胞を用いて大量に生産することが可能となり、バイオテクノロジーの産業や医療への応用が可能となった。

具体的には、遺伝子組変えによるインシュリン（血糖値抑制ホルモン）、エリスロポエチン（造血ホルモン）、TPA（血栓溶解酵素）の生産、微生物による各種抗生物質の生産や下排水の処理、洗剤・製紙工業・臨床検査等への酵素・補酵素の利用等が行われ、我々の生活に大きなインパクトを及ぼしつつある。

第2.3－32図　バイオテクノロジー（生体利用技術）の体系図



出所）「次世代産業技術への挑戦」、工業技術院監修、p258をMRI修正

最近のトピックスとしては、RNA操作技術がある。遺伝子操作技術はDNA操作を中心に進展してきたが、近年スプライシング（mRNAが、DNAから写し取った分子のうち不要部分を切りとり、必要部分のみをつなぎ合わせる過程）や翻訳プロセスで重要な役割を果たすRNAが注目され、RNA操作技術（RNA工学）という新しいキーテクノロジーが確立されようとしている。

1982年に、アルトマン、チェックらは酵素活性を持つRNAである「リボザイム」を発見し、「酵素は蛋白質である」という従来の常識をくつがえし、また「生命はRNAから」という新しい仮説（RNAワールド仮説）を導く根拠として注目された（この功績によりアルトマンらは、1989年度のノーベル賞を受けた）。

リボザイムはエイズウィルスなどの特定のRNA配列を切断できるため、医療面の期待が高まっており、近年では任意の基質特異性を持つリボザイムを人工的に合成する試みもなされている。またアンチセンスRNA（mRNAに相補的な配列を持つRNA）も、mRNAの働きを阻害するため、エイズウィルスの増殖の停止に有効と考えられている。

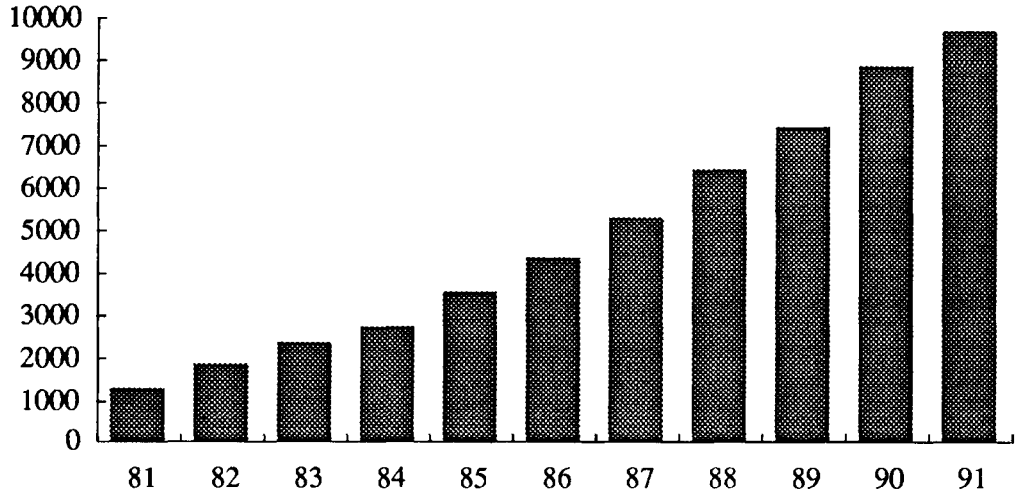
今回のアンケート調査では、バイオテクノロジーの将来について、下表のように予測されている。上記に説明した技術以外では、マイクロビームによる細胞加工に関して、1998年にはμmレベル、2003年にはnmレベルの加工ができるようになり、有用物質の大量生産などに利用できるようになる、と予測されている。

第2.3—16表　バイオテクノロジーの今後の進展予測（アンケートより）

分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
遺伝子工学	遺伝子工学	ヒト全遺伝子の解読（1998）⇨ 遺伝子治療の成功（2003）	癌や遺伝病に対して、遺伝子治療が試みられつつあり、そのいくつかは成功すると考えられる。
	遺伝子操作技術	農業、漁業、林業の効率化（生産性10倍）（2020）	産業就業比率の大幅な変化
蛋白質工学	蛋白質工学	耐熱性酵素の合成（1998）⇨ 耐塩性・耐乾性酵素の合成（2003）	上記性質をもった植物は砂漠などでも生育できるので、世界の食料問題に貢献できる。
細胞工学	人工細胞	単機能（タンパク合成 etc）（2000）	純粋なタンパク質を種類を問わずに高効率で製造できるようになる。
	マイクロビームによる細胞加工	ミクロンレベル（1998）⇨ ナノメータレベル（2003）	細胞の性質を変化させて、有用物質の大量生産などに応用できる
バイオセンサ	バイオセンサー	水中の微量有機成分の計測（2000）⇨ 生体分子識別センサーによる健康診断（2010）	家庭用品（家電、トイレ、空調機 etc）、医療機器分野に大きなニーズが展開する
バイオリアクタ	光バイオリアクター（CO2固定藻類高密度培養）	実証化プラントの稼動（2000）⇨ 普及（一般化）（2010）	南北問題解決の一端となりうる南への技術移転の有力候補である
生体計測	生物生体計測技術の極限化（微細化）	細胞レベル（2000）⇨ 細胞内オーガンレベル（2010）	バイオテクノロジー技術のブレークスルーが期待でき、医学のみならず、環境維持への応用に発展する可能性を含む

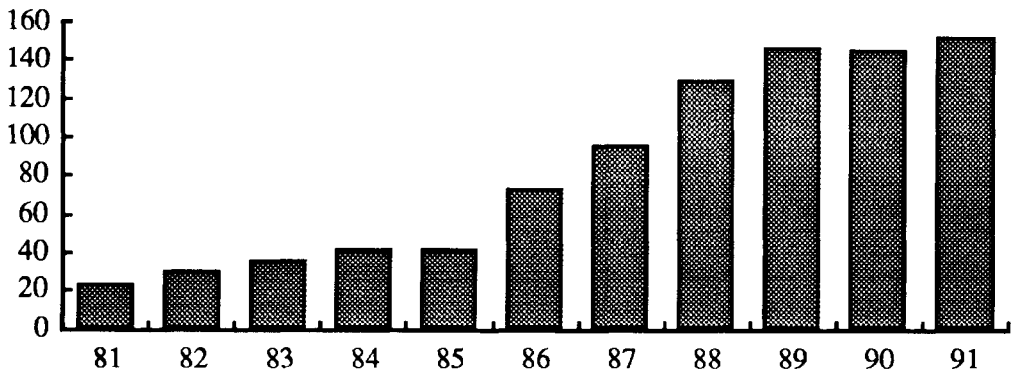
出所）アンケート結果より、MRI作成

なお参考までに、遺伝子操作、遺伝子組変え、細胞融合、組織培養、大量培養、バイオリアクタに関するJICST登録論文数の発行年別推移を示す。



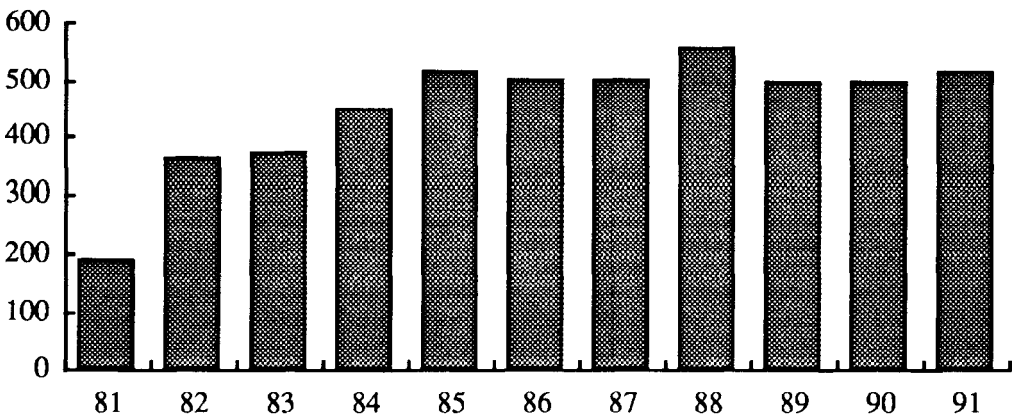
第2.3－33図　遺伝子操作関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



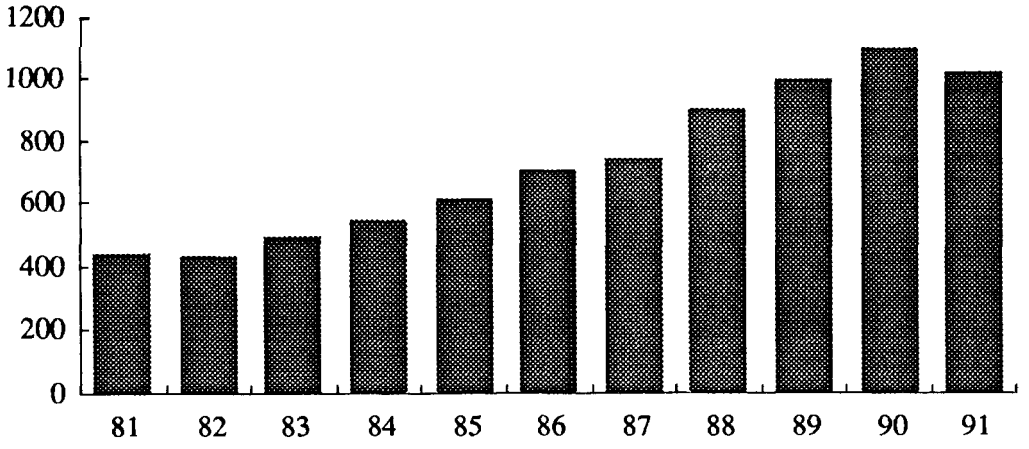
第2.3－34図　遺伝子組変え関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



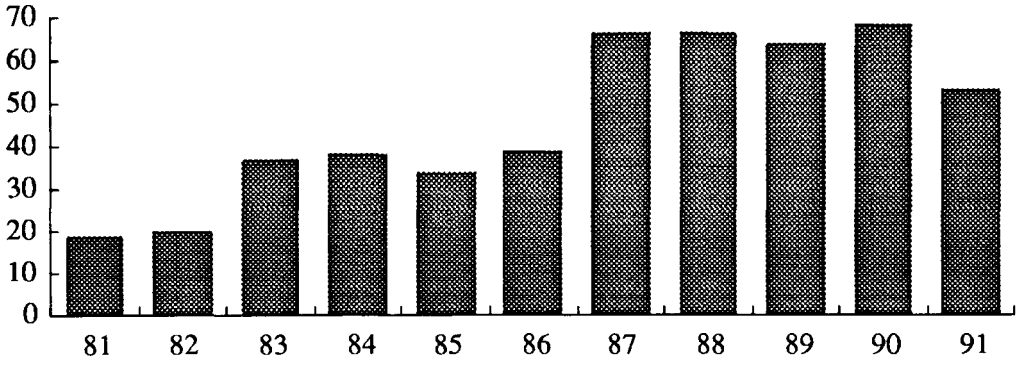
第2.3－35図　細胞融合関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



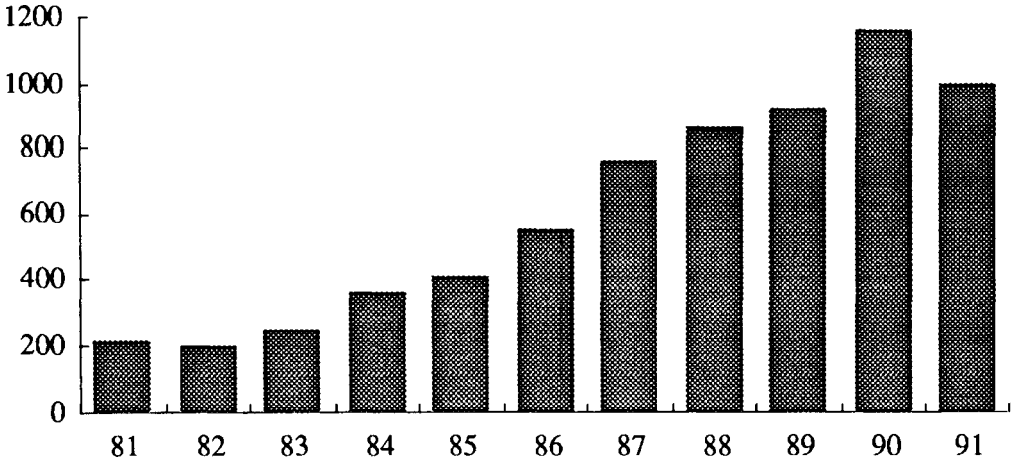
第2.3－36図　組織培養関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



第2.3－37図　大量培養関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



第2.3－38図　バイオリアクタ関連のJICST登録論文数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

(2) 生物の模倣（バイオミメティクス）

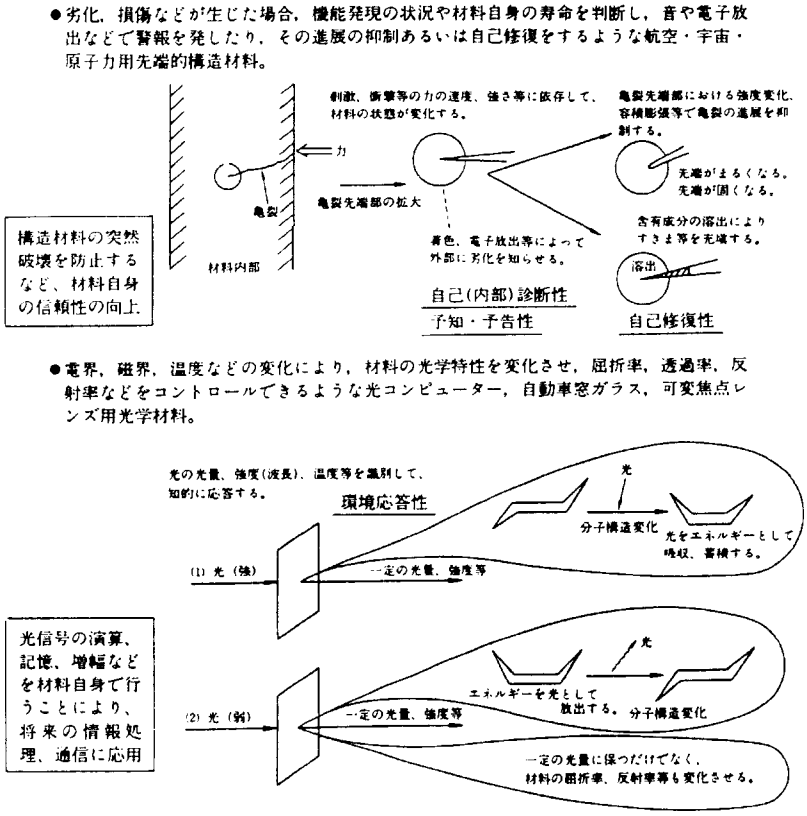
バイオミメティクスは生物の持つ多様かつ優れた機能（またはそれをもたらすメカニズム・原理）を模倣して（またはそこからヒントを得て）エンジニアリングなどに応用する技術の総称である。

模倣の対象となる生物の機能としては例えば以下の機能があげられる。

- ・エネルギー変換機能
- ・物質変換機能
- ・物質輸送機能
- ・物質識別機能
- ・情報処理・伝達・蓄積機能
- ・環境応答・適応機能
- ・自己診断機能
- ・自己組織化・修復機能

① インテリジェント材料とスマートスキン

インテリジェント材料（インテリジェントマテリアル）は我が国から世界に向けて提案された概念である。我が国におけるインテリジェント材料の提唱・推進者としては東京大学工学部の柳田博明教授が著名である。欧米でも日本とほぼ同時期に「スマート材料」という概念が独立に提唱されたが、これらの言葉はかなり意味が異なるので、注意して使わなければならない（後述）。



第2.3－39図　インテリジェント材料の概念図

出所）「科学技術庁年報　平成2年版」、p131

科学技術庁の航空・電子等技術審議会は、インテリジェント材料に関して1989年11月に第13号答申「環境条件に対し、知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質・材料の創製に関する能力を有する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について」をとりまとめた。第2.3－39図にそこでのインテリジェント材料の概念図を示す。

航空宇宙技術研究所の蓑田部長はこの図にあるような自己修復材料の可能性について以下のように述べている。

蓑田部長：

『耐熱材料においては、遮熱コーティングあるいは傾斜機能材料化によって材料を保護するが、コーティング部分にクラックが入った場合に、クラックを自己修復するような材料が今後開発される可能性がある。』

セラミクスは非常に耐熱性・耐腐食性に優れた材料であるが、いったんクラックが発生するとそこからカタストロフィー的に破壊してしまう。従って信頼性を要求されるジェットエンジンやガスタービンなどにセラミクスを用いるためには、自己修復性を持たせることが一つの解決策となる。

今回の調査でインタビューを行ったペンシルバニア州立大学の内野教授は、インテリジェント材料の用語と定義に関して以下のように考えている。

内野教授：

用語について

・インテリジェントという言葉は英語では「ずるがしこい」イメージがあるので、気を付けて（意味を明確にして）使った方がよい。

材料の定義と入出力マトリクスについて

・材料とは、「視覚サイズ領域で2つに割っても元の機能を失わない物」である。もしそうでなければ、それはストラクチャあるいはシステムと呼ぶことになる。従って普通のマイクロプロセッサは材料とは呼べないが、もし材料に非常に小さなマイクロプロセッサと電池（太陽電池など）を組み込み、エネルギーを自給自足できたなら、それは「材料」と呼べる。
・材料は、どの物理量をInputとしてどの物理量をOutputとするかのマトリクスによって、整理できる。非対角項が真に「機能性」と呼べる効果である。次世代の光歪材料は、複合効果の利用の一例である。

第2.3－40図　入/出力の物理量から見た材料マトリクス（ただし磁性を除く）

Output / Input	電　流 電　荷	歪	温度変化	光
電　圧	抵抗率 誘電率	逆圧電 効果	電気熱 量効果	
応　力	圧電効果	弾性率		
熱	焦電効果		比　熱	
光	光起電力 効果 光誘電 効果	光歪効果		屈折率

光音響素子・光話器（ﾌｫﾄﾌｫﾝ）への応用　　対角項はTrivial Material

出所）内野教授

インテリジェント化に関して

・私は材料をその進化の度合から次の4種類に分類している。

① Trivial Material（トリビアル材料）

ごく普通のインテリジェンスを持たない材料（上のマトリクスの対角項に相当）

② Smart Material（スマート材料）

・Passive Smart Material（受動的スマート材料）

上記入出力マトリクスの非対角項の物理量変換を行なう材料。

例：センサ（圧力等→電流/電圧）

アクチュエータ（電圧等→歪）

・Active Smart Material（能動的スマート材料）

センサとアクチュエータの機能を併せ持つ材料（単一又は複合材料）

③ Intelligent Material（インテリジェント材料）

（Intelligentという言葉も、このように位置付けをはっきりして使えば問題ない）

センサとアクチュエータに加えてドライブ／コントロール機能を併せ持つ材料。

例：光をセンス→状況に応じて電圧を変化→アクチュエータを駆動する光歪材料。

（これらをﾏｲｸﾛﾌﾟﾛｾｯｻを用いず材料自体で実現するような）

現在はそれほど多く見あたらない。

④　Wise Material（ワイズ材料）

Intelligent Materialに一種のモラルを持たせたもの。

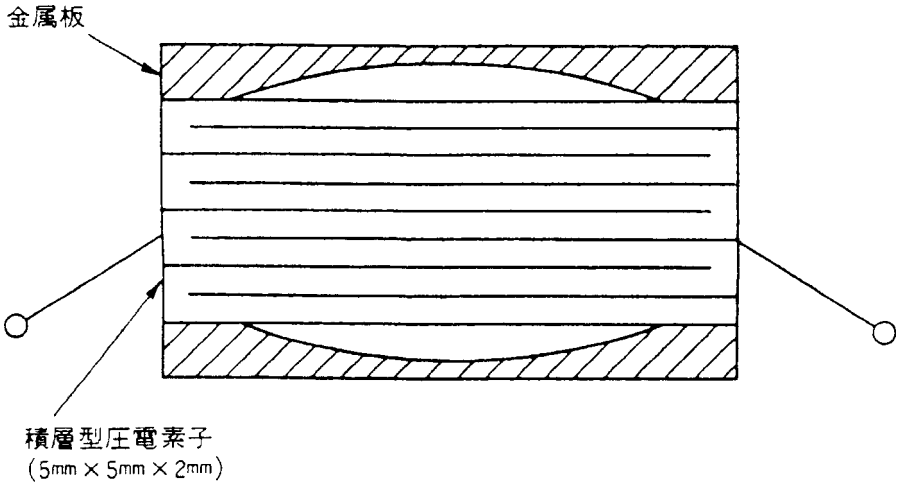
例：環境や社会秩序や公衆衛生や教育に悪影響をもたらす作用を判断して自発的に行なわない材料。

現在はまだない。

（以上、内野教授へのインタビュー記録より）

インテリジェント材料の定義は、一般には「環境条件に応じて機能を発現する能力を有する物質・材料」と言われている。この定義と内野教授の定義を比べると、日本で一般的に言われているインテリジェント材料とは、内野教授の定義における②（スマート材料）、③（インテリジェント材料）、④（ワイズ材料）を包含した概念と思われる。

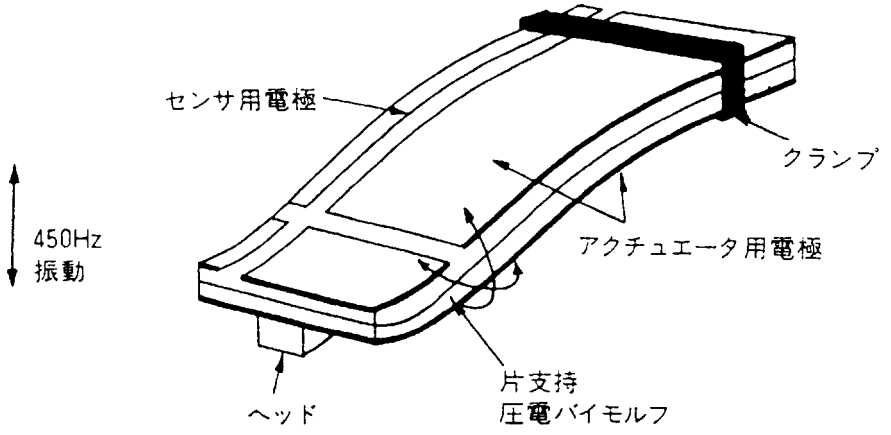
以下に内野教授の定義による、受動的・能動的スマート材料、及びインテリジェント材料の例を示す。



第2.3－41図　受動的スマート材料（アクチュエータ）の例
－　複合アクチュエータ構造「ムーニー」　－

出所）「圧電セラミックスのスマートアクチュエータ/システムへの応用」、日本工業教育協会誌、第40巻、第2号、1992.3、p29左

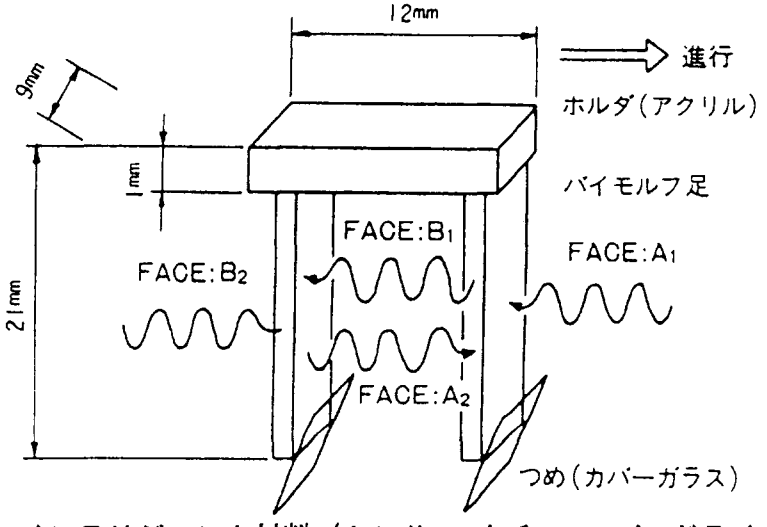
注）内部のセラミックス圧電素子に電圧がかかると、金属板はドームの天井が持ち上がるように屈曲する。コンパクトで大きな変位量、発生力、応答性が得られるので、レーザビームスキャナ用の駆動源としての応用が試みられている。



第2.3－42図　能動的スマート材料（センサ＋アクチュエータ）の例
－　圧電バイモルフ　－

出所）「圧電セラミックスのスマートアクチュエータ/システムへの応用」、日本工業教育協会誌、第40巻、第2号、1992.3、p29右

注）磁気ヘッドの位置決めに用いられるもので、同一の素子中にアクチュエータとセンサ用の電極が設けられている。電圧の印加によって素子が屈曲変形し、その変位量はセンサ部に発生した電圧によって検知される。



第2.3－43図　インテリジェント材料（センサ+アクチュエータ+ドライブ機能）の例
－　光歪アクチュエータを用いた光駆動微小歩行デバイス　－

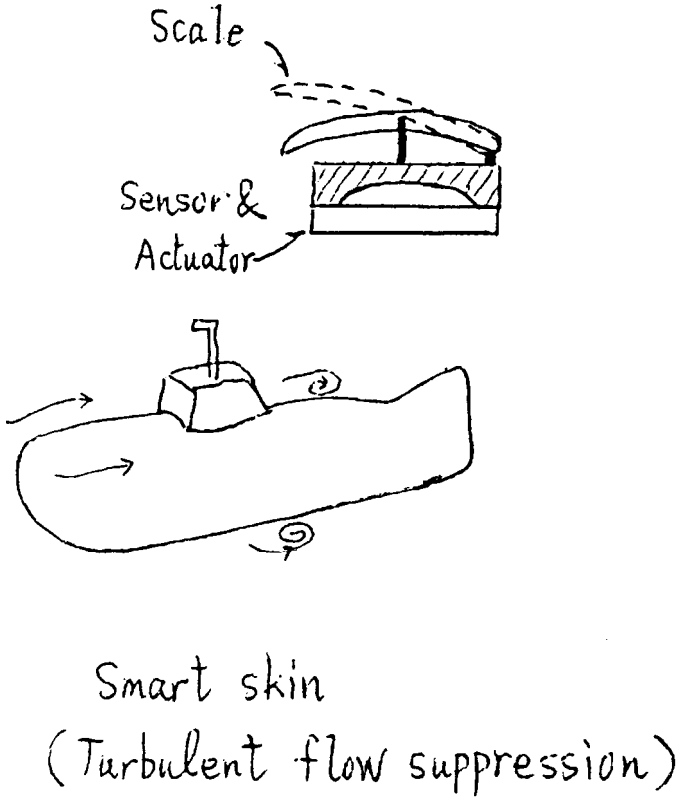
出所）「圧電セラミックスのスマートアクチュエータ/システムへの応用」、日本工業教育協会誌、第40巻、第2号、1992.3、p31左

注）ジルコン酸チタン酸ランタン鉛（PLZT）に紫色光を照射すると、0.1%程度の歪みを生ずる。これは光の照射により光誘起電力が生じ（センサ＋ドライブ機能）、これがセラミックスの圧電性（アクチュエータ機能）を介して歪みに変換されるものと推定されている。2つのPLZTバイモルフ足に交互に紫色光を当てることにより、デバイスはゆっくりと歩行する。

さらに内野教授はバイオミメティックなスマート材料（ないしインテリジェント材料）の例として、「スマート・スキン」をあげている。

内野教授：

『生物の模倣（バイオミメティクス）の例としては、スマートスキンがある。サメは横腹で発生する乱流を打ち消すように横腹の皮膚の形状を変化させる。これをセンサーとアクチュエータの組み合せで実現して潜水艦や船につけると乱流の発生が減ってスピードが速くなる。また、ソナーから送られてくる音波をセンシングして逆位相でアクチュエートすれば、ソナーにかからない潜水艦となる。後者は家/自動車の防音やビルの防振にも応用できる。また、戦車に柔らかくアダプティブな装甲板を付ければ、砲弾に強くなる。』



第2.3－44図　スマート・スキンの例

出所）内野教授資料

今回のアンケート調査からは今後の材料のインテリジェント化の進展に関して次の結果を得た。

第2.3—17表　材料のインテリジェント化の進展（アンケート結果）

分　類	既存技術	今後のインテリジェント化の進展
自己組織化/修復/強化	分子/繊維強化複合材料	自己強化型（応力に対応して、必要部位が強化される）複合材料
	遮熱コーティング（耐熱材への）	遮熱コーティングにクラックが入った場合クラックが自己修復可能
	ポリマーアロイ技術+無機合成技術	バイオミメティック的な自己組織化機能を有する高性能複合材料技術
	超分子技術	自己組織化技術がすすむ
	構造・組織制御	自動対応制御、自動選択制御、自動ファジー制御
自己情報処理/環境適応	半導体レベルでの情報認識	分子レベルでの情報認識
	形状記憶合金、ポリマーetc	環境適用自己制御材料
	セラミックス材料	自己情報処理機能
寿命判定/劣化検出	複合材料	自己劣化検出材料
	材料寿命判定技術	材料の性質の変化として外部から検出可
	寿命予測技術	寿命を自ら知り、その情報を外部へ発信する
	非破壊評価	破壊予知
生体機能模倣	生体機能の解明+有機無機複合化技術+結晶育成技術	生体機能を模倣した低エネルギー・高効率素材
形状記憶性、色彩可変性、生分解性	高分子、アロイ	形状記憶性向上、色彩可変、生分解制御
長寿命化	溶融加工	長寿命製品
ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化	インテリジェント材料開発	現在研究中であるが、ある程度のものは提案されるだろう。
	高分子材料	知的材料
人工合成/材料設計	リサイクル技術	解体性（分離性）をそなえた材料の設計
	経験を基にした有機合成	特定化合物合成の計算による最適化
	人工合成技術	複合機能化

出所）アンケート結果をMRIが整理

② バイオメカニクス

バイオメカニクスは生物の形態や運動メカニズムの原理を工学やロボット・輸送機械等の設計に応用しようとするものである。

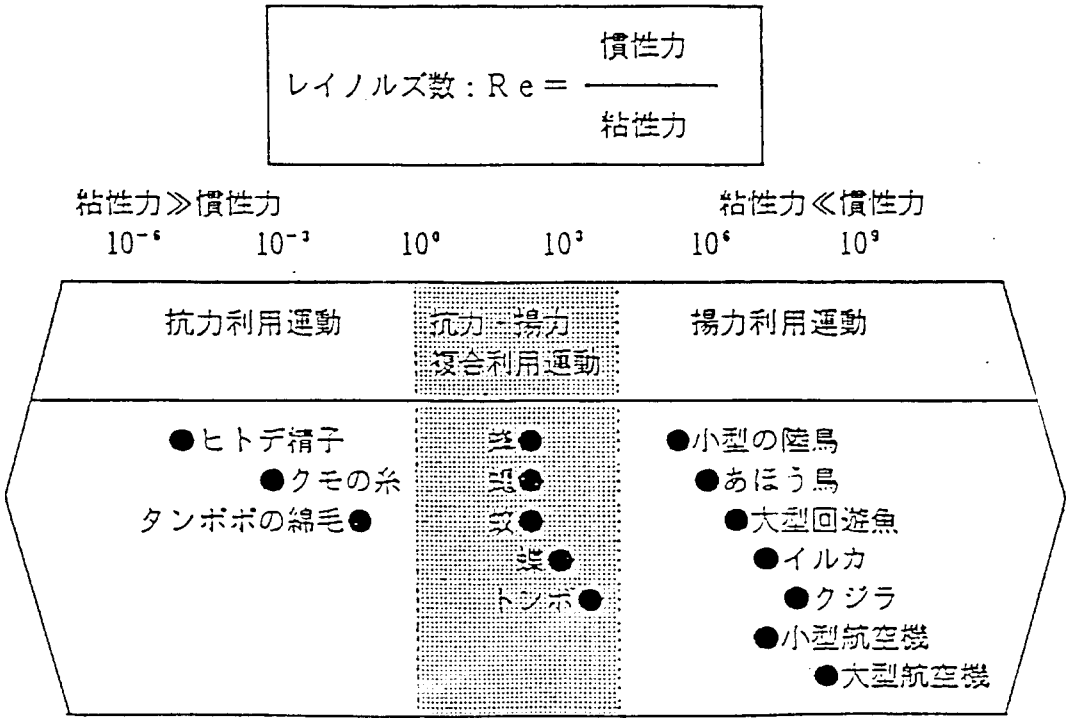
東京大学先端科学技術研究センターの河内教授は昆虫の運動メカニズムを応用して、cm～mmサイズの「ミリマシーン」の設計を考えている（本報告書2.3.1⑥ミリ/マイクロ/ナノマシンの項を参照）。同教授はバイオメカニクスについて以下の見解を持っている。

河内教授：

『生物の流体中での運動メカニズムと流体力学、制御工学との接点を探っている（バイオメカニクス）。バイオミメティクスという言葉があるが、単に形を真似るだけではうまくいかない。原理にさかのぼってそれを人間が使いやすい形で応用する必要がある。**』**

さらに同教授は平成4年度から新技術事業団の創造科学推進事業の「微小流動」プロジェクトの総括責任者を務めている。同プロジェクトの概要を以下に示す。

同プロジェクトは、以下に示すように、空気中で抗力と揚力の双方を利用して飛翔する蜂、蝿、蚊、蝶、トンボといった昆虫の流体力学的な運動メカニズムを調べ、翼の構造や制御方法を解明し、ミリマシーンの設計に必要なデータの取得や新しい理論の完成を目指している。

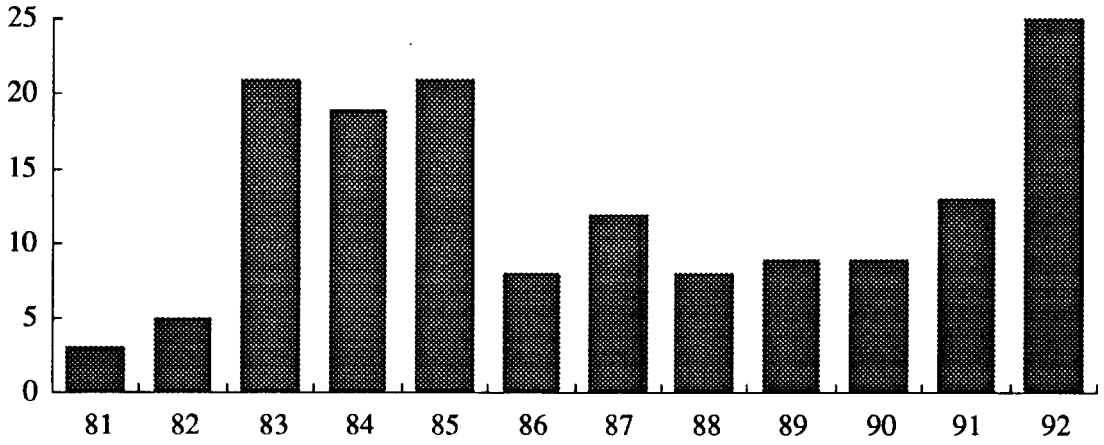


第2.3－45図　微小流動プロジェクトの対象領域

出所）ERATO「微小流動」プロジェクト資料

なお、参考までにバイオメカニクス関連のJICST登録論文の件数推移を示す。

第2.3－46図　バイオメカニクス関連論文数の推移



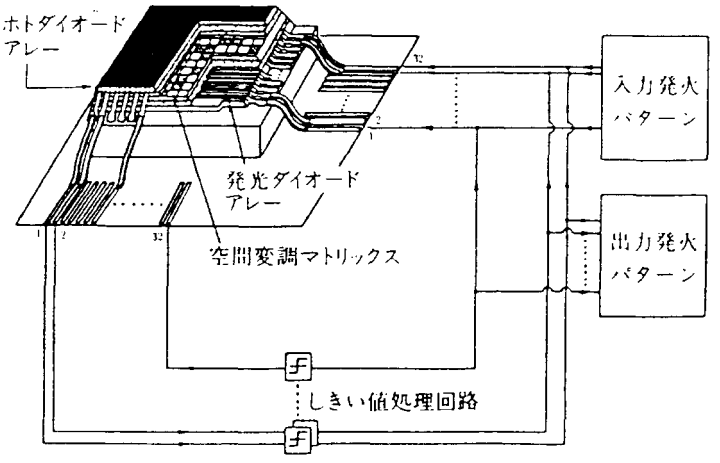
出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

③ ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは生物の脳・神経回路を模倣しようとする工学的試みである。

ニューラルネットワークのモデル構築は1943年にマカロックとピッツによって初めてなされ、1958年にはローゼンブラットがパーセプトロンを発表したが、ミンスキー、パパートらがパーセプトロンの限界を数学的に明らかにしてからニューラルネットワークの研究は下火となった。ところが1980年代前半にホップフィールドらが相互結合的なニューラルネットワーク（ホップフィールドモデル）を用いて「巡回セールスマン問題」等を解き、また1986年にルメルハルトらが学習機能を持った階層的ネットワーク（バックプロパゲーションモデル）を提唱してから、研究が再び活発化し、現在では家電製品の制御にも使われるようになってきた。

現在主流となっているモデルはホップフィールドモデルとバックプロパゲーションモデルが代表的であるが、この他に係数値が局所最適解に陥ることを防ぐため適当な「ゆらぎ」を導入したシミュレーテッドアニーリングモデルもある。また、実際の神経細胞がカオティックな応答を示すことから、カオスニューラルネットワークの試みもある。このような新しいニューラルネットワークの試みについては、第Ⅱ部の合原先生、岡部先生のお話を参照されたい。



第2.3－47図　三菱電機中央研究所の光ニューロチップ

原出所）太田、高橋、新田、田井、光永、久間、電子情報通信学会春季全国大会（1989）予稿集、4-437

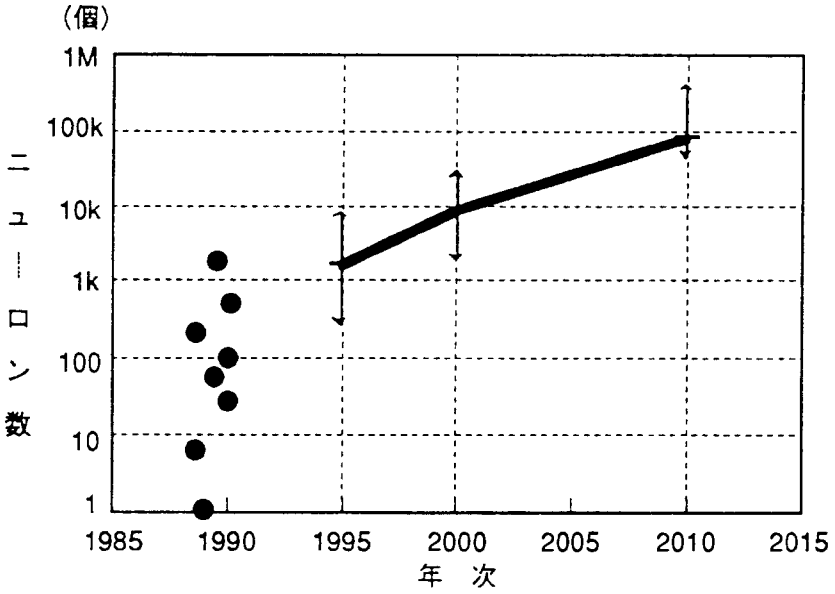
出所）「我が国における先端的な複合研究領域の現状と展開方向に関する調査　報告書」、平成4年3月、㈱日立総合計画研究所、p64

ニューラルネットワークを実現する方法としては、1）通常の逐次処理型のソフトウェア・プログラミング、2）トランスピュータ等並列マシンの利用、3）DSP（またはマイコン）の連結、4）専用LSIの利用、の4種類がある。このうち最も高速な手段である専用LSIは、電子デバイスとして 、1）デジタルチップ（日立製作所、東芝、米国HNC社等）、2）アナログチップ（松下電工、米国インテル社等）が開発されているほか、三菱電機中央研究所やAT&Tベル研究所の 3）光チップがある。一般にニューラルネットワークではニューロン間

の接続が膨大になるため（ホップフィールドモデルの場合、ニューロン数の2乗に比例）、結線の不要な光回路が有利だが、チップ外に配置されている空間変調素子を如何にして3次元構造でオンチップ化（ハイブリッド化）するかが今後の課題であり、これはなかなか困難であると考えられている。

第2.3－46図に三菱電機中央研究所のホップフィールドモデルによる光ニューロチップを示す。

以下に三菱総合研究所が過去に行ったニューロチップに関する予測結果を示す。

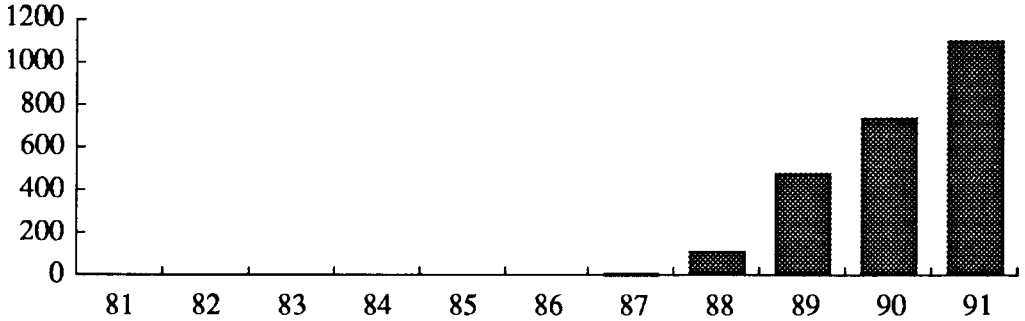


第2.3－48図　ニューロチップの将来予測

出所）MRI

また今回のアンケート調査では、2000年頃に1000ニューロン/1チップ程度の学習機能を持ったアナログニューロチップができ、様々なマシンのインテリジェント化に貢献すると予測されている。

参考までに、ニューラルネットワークに関連する論文数の推移を示す。



第2.3－49図　ニューラルネットワークに関連する論文発表数の推移

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

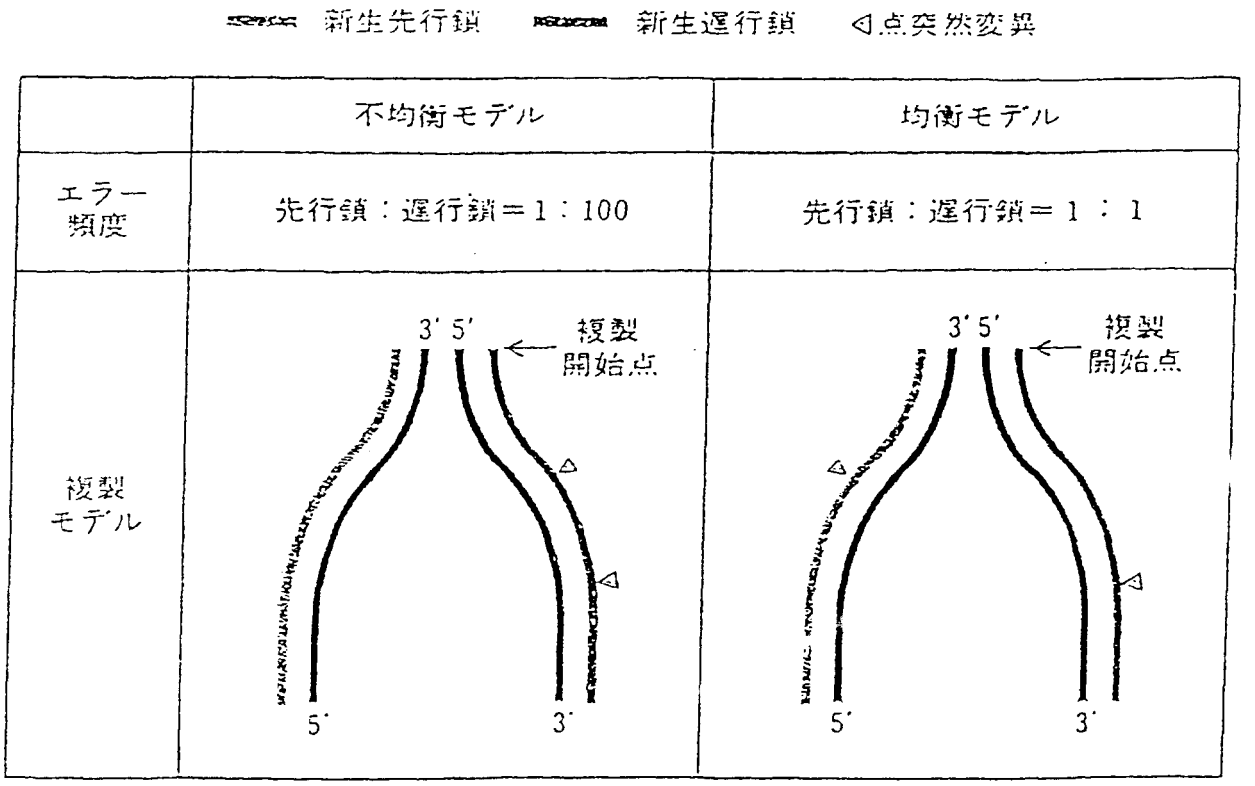
④ 遺伝的アルゴリズム（GA）と人工生命

遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm）は、生物進化（選択淘汰・突然変異）の原理に着想を得たアルゴリズムで、計算機科学者のJ. H. Hollandによって1975年に提案された。

生物の進化においては遺伝子が重要な役割を果たしている。遺伝子が複製されて子の遺伝子が生成し、そのときに（極めて低い確率で）遺伝子の複製に誤りが生じ、あるいは放射線等の影響で遺伝子に欠陥が生じ（突然変異）、親とは違った形質の子が生まれる。これが自然淘汰によって適応したものは生き延び、しないものは死滅する。このようなプロセスで進化がなされるが、進化の過程は一種の最適適応過程といえる。

GAは生物の進化のエッセンスをコンピュータ上に実現したアルゴリズムである。このアルゴリズムでは遺伝子の集団を一つの適応システムとしてとらえ、システムのパラメータを個々の遺伝子にエンコードしてこれらの遺伝子に対して評価を行って淘汰した後、突然変異や交叉・配位といった仮想的な遺伝子操作を行って次世代の子孫を生成する。この繰り返しによってシステム集団が適応進化していく。

GAは最適解への到達性能・速度が非常に優れているため、Hollandの提案以来、プラント制御、メカトロ制御、ロボティクス、画像処理、プロダクションシステム（エキスパートシステム）、ジェットエンジンや土木構造の設計等の多くの応用例に適用され、次第にその有効性が確認されてきた。最近ではニューラルネットワークの組み合せ最適化問題に適用され、大きな効果をあげている。



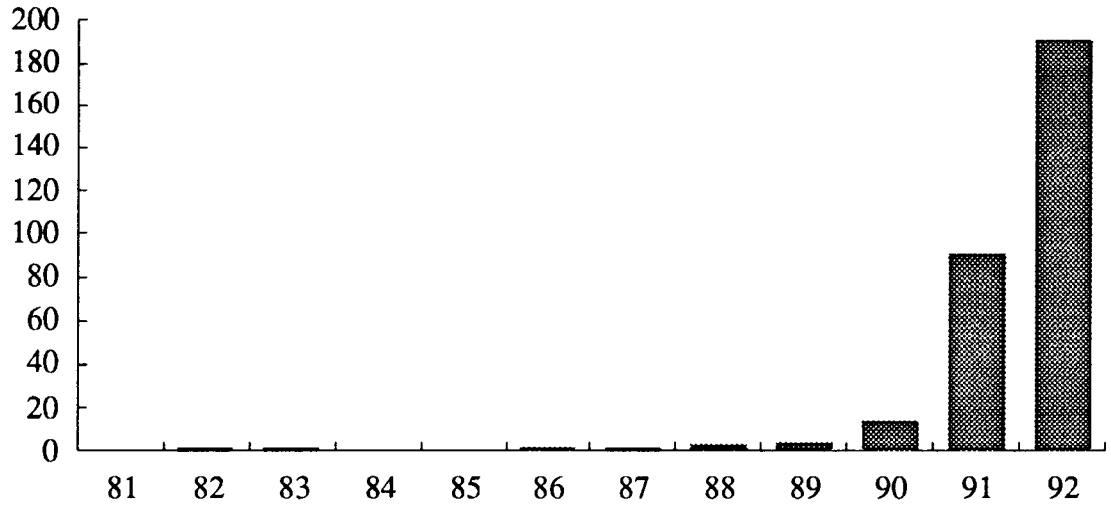
第2.3－50図　DNAの複製モデル

出所）現代化学、1993年2月、p8

GAに関係の深い話題として、第一製薬の古沢取締役（創造科学「古沢発生遺伝子プロジェクト」のリーダー）の最近の研究成果（M. Furusawa and H. Doi, J. Theor. Biol. (1992) 157, 127-133）を紹介する。古沢らはDNAの二つの複製過程に着目した。複製鎖の一方（先行鎖）は非常に複製誤りの少ない複製酵素が担当し、もう一方（遅行鎖）は誤り頻度の高い複製酵素が担当するため、遅行鎖の方が先行鎖よりも10^2～10^3倍程度誤り頻度が高い。このため突然変異の子孫（複製された子の遺伝子）への伝わり方に不均衡が生ずるため、世代を経るにつれて多様な遺伝子を持つ個体が増える。従って生物にとって不適な環境条件となった場合も、どれかは生き残る（適応する）確率が高くなる。

このような不均衡複製モデルをGAに適用すれば、より適応/問題解決能力の高いシステムが構築できるものと思われる。

以下に遺伝的アルゴリズムに関連する論文数の推移を示す。



第2.3－51図　遺伝的アルゴリズムに関連する論文発表数の推移

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

注）キーワード「遺伝ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ」と「遺伝的ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ」の和集合

一方、人工生命（Alife）はごく最近始まった研究領域であり、ルールベースとデータベースを用いた人工知能（第五世代コンピュータ）、ニューラルネットワークやファジィシステム等の柔らかい情報処理（第六世代コンピュータ）に次ぐ第七世代のコンピュータ技術と言われている。

人工生命の提唱者の一人であるサンタ・フェ研究所のLangtonは、人工生命を次のように定義している。

「人工生命は、自然な生命系の特徴を有する人工システムに関する研究であり、生命のような行動を計算機上などで合成しようとする中で、従来の分析を中心とした生命科学を補完するものである。」

またNEC・ソフトウェア生産技術開発研究所の北野宏明氏は、人工生命を次のように定義している（数理科学、No.353、1992.11、p24-31）。

『人工生命は、生命の計算としての側面に関する研究の分野である。科学の一分野としての人工生命研究は、生命を司るダイナミクスの計算的側面を抽象化し、そこにある法則を発見することにある。工学的側面としては、有用な適応・進化システムの構築方法の研究である。人工生命研究の基本的認識は、生命は計算（life as computation）であるという立場にある。』

このように人工生命の定義や範疇はまだ定まっていないが、人工生命の基本思想とキーコンセプトは明確である。それは「要素還元論的アプローチから統合的全体論的アプローチへ」というものである。すなわち人工生命システムを構築する場合、要素を組み合せて全体を合成するのではなく、システムにあらかじめ自律生成あるいは適応（進化）のメカニズムを組み込んでおき、そのメカニズムが自律的にシステム構築ないし環境適応するよう仕組んでおく訳である。そしてそのメカニズムの代表的なものが遺伝的アルゴリズム、セルラーオートマトン、そしてニューラルネットワークである。

人工生命が模倣しようとする生命現象には、以下のようなものがある。

人工生命が模倣しようとする生命現象

・自己再生	・進化
・自己複製／増殖	・共進化／共生
・自己組織化	・学習と発達
・多様性と複雑性の自律生成	・動物行動
・生命の起源	・集団行動／群知能
・胚形成／発生と分化	・生態ダイナミクス
・分子の自己組織化	・言語・社会文化的進化
・代謝と機能特化	・人工脳
・形態形成	

（ＡＴＲ視聴覚機構研究所　下原氏の資料による）

⑤ 知能ロボット

ロボットのインテリジェント化に関する今回のアンケート調査の結果を以下に示す。

第2.3−18表　ロボットのインテリジェント化の進展

既存技術	今後のインテリジェント化の進展
パターン認識	自律的動作がある程度可能なロボット
リモコン操作ロボット	テレオペレーション（バーチャルリアリティ技術などを含む）を用いた遠隔操作ロボット
ロボット	自己修復ロボット、自己組織ロボット、耐故障動作ロボット
ロボット	多自由度機械
ロボット	環境認識機能を持ち移動しつつ作業のできるロボット
ロボット	作業、巡視、点検等を行なうロボットのインテリジェント化
ロボット技術	人の周辺にいて人を助けるロボット
ロボット技術	ローコストな知能ロボット
ロボット技術	宇宙軌道上での無人サービスに対応する
ロボット工学	常動ロボット、群ロボット
現在はプログラム化しているもの	惑星上でのロボット技術（伝送に時間がかかるから指令なしに即判断がいる）
作業用ロボット	シェイクハンド（ネットワークによる相互通信）、自己判断
産業用ロボット	自律ロボット（自ら考え行動するシステム）

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

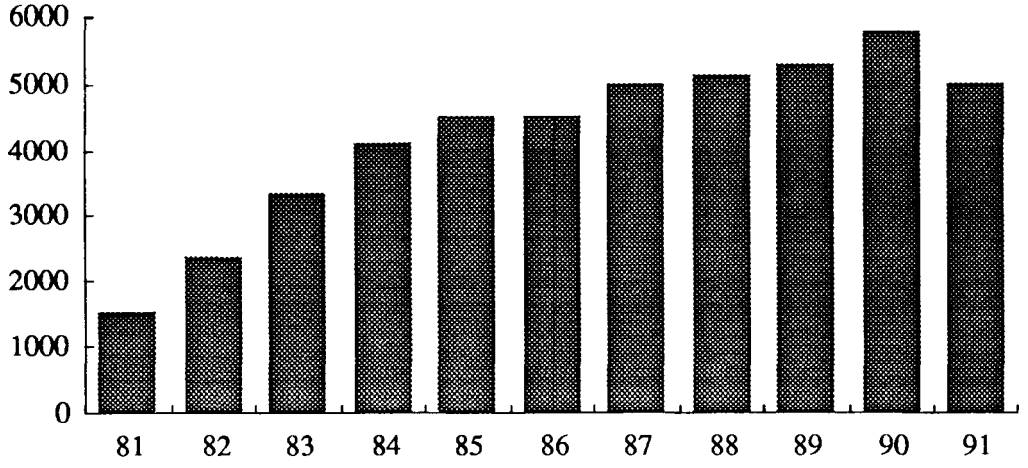
この表にみられる通り、自己修復、自己組織、自己診断、耐故障動作等の自律的動作のできるロボットの実現が予測されている。理化学研究所のA研究員は「自律分散型ロボット」の研究を行っている。自律分散型ロボットとは、自律動作が可能で、しかも分担・協調して大きなものを運んだり、競合した場合相手を優先したりできるロボットのことで、5年程前から研究が行われ始め、最近では多くの研究者がこのテーマに取り組んでいる。

MIT人工知能研究所のブルックス（Rodney Brooks）準教授は1986年に知能ロボットの新しいアーキテクチャとして「サブサンプション・アーキテクチャ」（SA：Sub-Sumption Architecture）を提案し、AI界の最高賞である「Computers and Thought賞」を1991年に受賞した。

SAはこれまでの知能ロボットにおける知識表現中心のトップダウン的アプローチと異なり、ロボットに発生する事象を水平方向に階層化して、各レベルに応じたタスクで制御するものである。階層の各レベルは下位レベルを含むため、各階層のセンサ情報のうち信頼性の高い情報のみをピックアップしたり各センサ情報を融合（センサ・フュージョン）したりできる。このため非常に柔軟で拡張性の高いロボット制御系を構築できる。

また、SAによる知能ロボットの機能をGA（遺伝的アルゴリズム）により自律的に進化できることが、スタンフォード大学のコーザ教授によって実証されており、英国サセックス大学、ブリュッセル自由大学、MIT、UCLA、サンタ・フェ研究所などで「進化ロボット」の研究が加速されつつある。

なお参考までに、ロボット関連の論文発表数の推移を以下に示す。



第2.3－52図　ロボット関連の論文発表数の推移

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

⑥ センサ・フュージョン

人間の五感に相当するセンサとして、視覚センサ、聴覚センサ、触覚センサ、温度センサ等があるが、人間等の生物はこれらの感覚情報を個別に利用しているのではなく、様々なセンサ情報を取捨選択あるいは総合的に加味して外界をとらえている。このような生物の総合的な外界認識能力・情報処理能力を模倣するのがセンサ・フュージョンである。

複数のセンサ情報を有機的に利用するメリットとしては、不確実性の減少、信頼性の向上、精度の向上、単一センサでは得られない高次元の判断等があげられる。

センサ・フュージョンの研究はまだ始まったばかりで理論的な枠組みも形成されていないが、科学技術庁の科学技術振興調整費において平成3年度から「センサーフュージョンの基盤的技術の開発に関する研究」が始まるなど、研究が活発化しつつある。

同プロジェクトでは能動的センサフュージョンのキーコンセプトとして「インテンショナル・センシング」がとりあげられており、それを支えるキーテクノロジとして「リアルタイム・パラレル・アーキテクチャ」が考えられている。実時間処理は能動的にセンシング戦略を変更していく上で重要な要素である。

センサ・フュージョンの研究の例としてはこのほかに、視聴覚情報の融合により自律的な信号選択性を有する音響センサを実現した東京大学工学部の高橋、山崎らの例（計測と制御、Vol.31、No.9、1992.9）などがある。

以下に、今回のアンケートより、センサのインテリジェント化に関する予測結果を示す。

第2.3—19表　センサのインテリジェント化の進展予測

既存技術	今後のインテリジェント化の進展
センサ	対称に近い末端部でのマルチセンシング、能動センシング、自己診断　→　これにより、中央部ではセンサフュージョンによる高度な判断
センサ技術	LSIの活性化により大幅に進む
センサ技術	自己情報処理機能
センシング	自律化
個別センサ素子	復数の情報を収集し、データの加工選択をして共通バスでのやりとりを可能とする。
薄膜作製技術	薄膜センサー

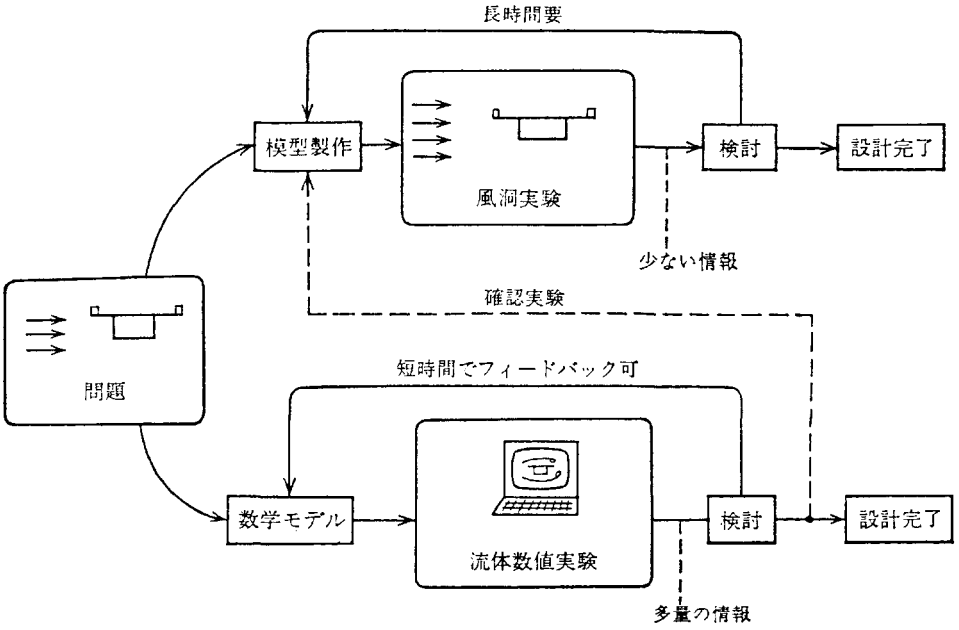
出所）アンケート結果より、MRI作成

(3) 計算機シミュレーションとCAE

コンピュータの性能（スピード、容量）・機能（ソフトウェア、OS、並列処理、プログラミング技術、ユーザ・インターフェース）の進展により、コンピュータを使った設計、解析、シミュレーションが様々な技術分野で浸透しつつある。これは設計、解析等の一種のインテリジェント化ととらえることができる。ここではこのようなコンピュータ支援設計・解析の動向と今後の展開を分析する。

① 計算流体力学（CFD）

計算流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics、数値流体実験、数値流体解析等ともいう）はコンピュータによってナヴィエ・ストークス方程式を近似的に解くことにより、流体の挙動を解析する手法であり、構造物や航空機、自動車等の回りの空力解析、ポンプ等の内部液体の流れ解析、気象シミュレーション等幅広く使われている。従来、航空機の翼などの設計では風洞実験が行われていたが、大規模な施設と長時間を要していた。これを計算機でシミュレーション（数値風洞実験）することにより、実際に翼を試作しなくても、形状等のスペックをパラメータとして与えるだけで繰り返し数値実験が可能となり、設計の効率化に大きく寄与している（第2.3－53図）。



第2.3－53図　風洞実験と流体数値実験

出所）「流体数値実験」、小林・和田・角湯、朝倉書店、1990、p3

計算流体力学の基礎となるナヴィエ・ストークス方程式の解法は大きく分けて差分法、有限要素法、境界要素法の3種類があり、いずれも流体を細かいメッシュに切って実際の流体を近似するものであるが、それぞれ以下の特徴を持っている。

第2.3−20表　3種類の流体数値解法

	差　分　法	有 限 要 素 法	境 界 要 素 法
メッシュ分割	規則的格子，最近境界に合わせて作られた格子が普及	三角形，四辺形，三角柱，六面体などの要素に自由に分割できる	境界のみパネルに分割
適用できる微分方程式と流れ	ほとんどすべてのものに適用できるスキームが用意されている	変分有限要素法では汎関数の存在が前提，WRMではほとんどすべてのものが扱える	ラプラス，ヘルムホルツなどの方程式，ポテンシャル，ストークスなどの流れに限られる
連立一次方程式の係数行列	大型，疎，帯行列	差分法に同じ	小型，成分の詰まっている行列
主な特徴	最も基本的かつ標準的な解法，精度の評価確立，目的に合ったスキームが用意されている	第二種境界条件が扱いやすい，高精度が得やすい，既存プログラムの活用に便，計算量は一般に多い	境界のみを対象に計算，第二種境界条件が扱いやすい，入力データが少ない，計算量が少ない？
適用性	最も適用性が広い，衝撃波を伴う遷音速流れ，超音速流れ，境界層流れ，LESの計算	複雑な形状の境界によく適合し適用性が広い，非ニュートン流れ	一様流中の物体，自由表面流れに有利

WRM：重みつき残差法，LES：large eddy simulation

出所）「流体数値実験」、小林・和田・角湯、朝倉書店、1990、p16-17

計算流体力学の計算は通常スーパーコンピュータや各種ワークステーションで行われるが、市販のソフトウェア・パッケージあるいはパブリック・ドメインのプログラムがかなり出回っている（第2.3−21表）。また最近ではスカラ型の並列コンピュータが使われる場合もある。

第2.3−21表　各種汎用流体解析プログラムの特徴

			FIDAP	NEKTON	FLOW-3D	FLUENT	FLUENT/BFC	HOTFLOW	PHOENICS	STREAM V2	SCRYU
形状近似	一般座標		—	○	○	×	○	○	○	×	○
	非構造格子		○	×	×	×	×	×	×	×	×
物性	過渡状態		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	圧縮性		×	×	○	○	○	×	○	×	×
手法	離散化法		FEM	SEM	FDM	FVM	FVM	FDM	FVM	FVM	FVM
	対流項風上スキーム		—	—	ドナーセル	QUICK	べき乗則	QUICK	QUICK	1次風上	KK/QUICK
	アルゴリズム		ペナルティ法	フラクショナルステップ法	MAC/SOLA	SIMPLE	SMAC	SMAC/SIMPLE	SIMPLE/SIMPLEST	SIMPLE	SIMPLE
乱流	k-ε		○	×	○	○	○	○	○	○	○
	Reモデル		×	×	×	○	×	×	○	×	×
	LES		×	×	×	×	×	○	×	×	×
他の現象との結合	熱解析	対流	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		ふく射	○	○	×	○	×	×	○	×	×
	自由表面		○	×	○	×	×	○	○	×	×
	化学反応		×	×	×	○	×	×	○	×	×
	2相流		×	×	○	×	×	×	○	×	×

FEM：有限要素法，FDM：有限差分法，FVM：有限体積法，SEM：スペクトラル・エレメント法

出所）「スーパーコンピュータ」、日経BP社、1989、p62

航空宇宙技術研究所の蓑田熱流体力学部長はジェットエンジンの設計・解析における計算流体力学の現状と今後の課題について、以下のように述べている。

蓑田部長：

『特にタービンに関しては、ブレード等の形状を与えれば、スーパーコンピュータ（FACOM：VP-400クラス×140ユニットの並列計算機）によるシミュレーション（ナヴィエ・ストークス方程式に基づいた数値流体実験）で特性の解析が可能である。ただし、計算機の答えが本当に正しいかどうかは実際に測定して検証する必要がある。また、必要な特性を持つような翼形の設計は今後の課題である。

圧縮機や燃焼器中の熱流体の数値解析は現在研究段階である。

プログラムによって、メッシュの切り方、メッシュの細かさなどが違い、計算結果が異なることが多い。信頼性の高い計算結果を得るためには、プログラムのクセを十分把握しつつ使う必要がある。現在は「彼が書いたプログラムなら信頼できる」ということで使っているが、この辺も今後の課題である。』

② 計算物理学・計算化学

コンピュータの重要な用途の一つにシミュレーションがあることは言を俟たない。上述の計算流体力学も流体のシミュレーションであるし、またその他の物理学や化学の世界でもシミュレーションは理論、実験に次ぐ第三の研究アプローチとなってきている。

基本的には自然界あるいは人間界の全ての事象・現象がコンピュータ・シミュレーションの対象となりうるが、特に物理学・化学の対象とする以下のような事象をシミュレートする手法を「計算物理学」「計算化学」と呼んでいる。

第2.3−22表　計算物理学・計算化学の対象とする事象とシミュレーション手法

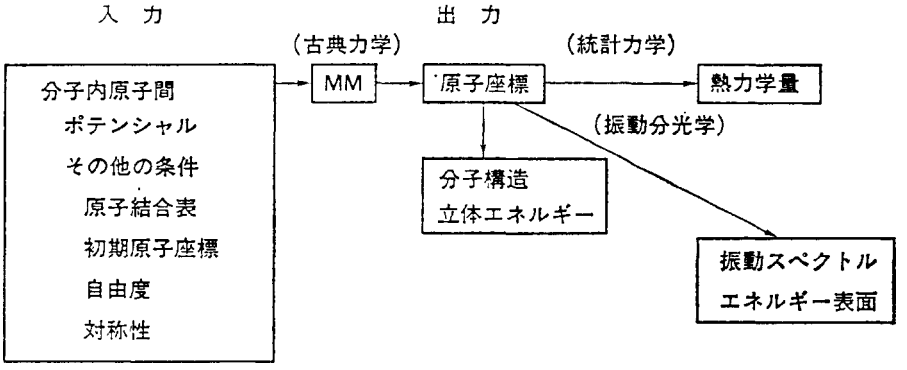
対　象	モデル／式	手　法
航空機や自動車のまわりの流れ	ナヴィエ・ストークス方程式	差分法、有限要素法など
磁性体（スピン系）の相転移現象	格子力学モデル	モンテカルロ法
神経回路網の学習過程	ホップフィールドネットワーク	モンテカルロ法
電子の確率分布	シュレディンガー方程式	モンテカルロ法
衝撃波	格子ガスモデル	オイラー法、up-stream差分法
ファンデルワールス気体分子運動	状態方程式	分子動力学法
銀河の形成	3次元ポアソン方程式	差分法
電子の加速運動	マックスウェル方程式	差分法
核融合燃料の爆縮	運動方程式、エネルギー方程式	差分法
プラズマ振動	1次元ポアソン方程式	差分法

出所）MRI

計算物理学と計算化学は必ずしも厳密に分離できないが、特に、分子軌道法、分子力学法、分子動力学法、モンテカルロ法による分子シミュレーションを計算化学と呼ぶことが多い。

分子軌道法（MO法：Molecular Orbital）は分子軌道、即ち分子の中の電子状態（を表す波動関数）を計算によってシミュレートするものである。分子軌道は原子軌道（孤立した原子中の電子の状態を表す波動関数。波動関数とは量子力学の基本方程式であるシュレディンガー方程式の解のこと）の一次結合で近似できる。この一次結合式は厳密には無限個の要素が必要であるが、実際の計算では展開を有限個で打ち切らなければならない。即ち分子を構成する原子の中の全ての電子を考慮するのではなく、経験あるいは理論に基づいて重要な電子のみを計算の対象とする。経験に基づいて化学結合に参加する「原子価電子」と呼ばれる電子のみを対象とするのが経験的、ないし半経験的方法と呼ばれる方法である。一方、経験に頼らず、原子価電子のみならず内殻電子も含めてab initio（from the begininng）に計算を行う方法（もちろんこの場合もある程度の近似は必要）を非経験的方法、ないしab initio法と呼ぶ。前者（半経験法）の手法としては、MINDO/3法、MNDO法などがあり、それぞれのプログラムがあるほか、両者を含むパッケージとしてMOPACがある。後者（ab initio法）のプログラムとしてはGAUSSIANの多様なバージョンがある。分子軌道法によって、はじめて原子間結合の角度が生まれるメカニズムが明らかにされ、理論や実験・計測では得られないような知見が得られた。

一方**分子力学法**（MM法：Molecular Mechanics）は、原子を球、原子間結合をバネというような古典力学的なモデルに置き換え、しかも相互作用のパラメータに量子力学の計算結果を使うことによって計算精度を上げた、分子エネルギーの計算方法である。分子力学法を分子軌道法と比較すると、より大きな分子を取り扱えるという点で優れており、ドラッグ・デザイン関係者など、現場の研究者たちの間で広く受け入られるようになった。例えば、構造式は既知であるがX線結晶解析等による実際の構造データがない分子の3次元構造を、分子力学法で推定することが試みられている。また、蛋白質のような大きな分子のダイナミクスを調べたり、生体分子と作用する薬物の構造を仮想的に変えてその作用を検討する、といった場合にも分子力学法が使われている。分子力学法のプログラムとしてはジョージア大学のAllingerによるMM2、MMP2などがよく知られている。



第2.3－54図　分子力学（MM）法の概略

出所）「分子シミュレーション入門」、岡田・大澤、海文堂、1989、p4

以上のように分子軌道法と分子力学法は**単一分子**の電子状態や立体構造等を明らかにするものである。

一方、**分子動力学法**（MD法：Molecular Dynamics）と**モンテカルロ法**（MC法：Monte Carlo）は液体や結晶、アモルファスなどの**多分子系（分子集合体）**のシミュレーションを行うための手法である。分子動力学法は分子一つ一つが古典力学即ちニュートンの運動方程式に従うと仮定して分子間力の計算によって分子集合体のシミュレーションを行うものであり、一方モンテカルロ法は分子一つ一つの挙動が確率過程に従うものと仮定している。

こうした分子シミュレーションは、計算機の性能・機能の進展、理論やシミュレーション手法面での進歩と相俟って今後着実に進歩するであろう。分子シミュレーションとX線解析等による3次元構造の計測技術の進歩が相俟って、我々は分子の実態により近付くことができるようになり、材料や触媒、薬剤などを分子レベルで設計できるようになるであろう。

触媒の設計に関してT社のK部長は以下のように述べている。

K部長：

『現在触媒は試行錯誤で探索しているが、よりシステマティックな方法が望まれる。どの原子とどの原子をどのように組み合せるとどのような機能を持つか、といったことに関する理論的な研究が必要で、大学での基礎研究に期待したい。将来はコンピュータ上の材料データベースを利用して、任意の反応を指定すると触媒を設計してくれるようなシステムが現れる可能性がある（2020年頃か）』

また今回のアンケート調査では材料や触媒の設計の進展に関して次の結果を得た。

第2.3－23表　材料・触媒の設計の進展予測

技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト
触媒設計	触媒開発に使われはじめる（2020）	現在、工業的に行なわれている反応について、更に適切な触媒が開発され、また、現在やられていない反応ルートが実現されることにより、収率向上、選択率向上、省エネルギー等が計られる。
科学的な材料設計技術	モデルによる設計がある程度可能（2010）	極限性能の設計可能となり開発スピードが早まる。
人工的合成による新材料の開発技術	実験段階から試験段階（2000）　➪ 応用化段階（2005）	新機能材料の創生にとって必要な技術、原子・分子レベルでの合成技術により、任意の新材料が作れるようになる。

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

③ 超並列コンピュータ

①、②で述べたような計算機シミュレーションは現在主として、ベクトル演算（パイプライン処理）型のスーパーコンピュータやグラフィック・ワークステーション（GWS）等の高速科学技術計算機で計算されているが、物理化学現象の多く、特に多粒子系の現象は本来並列事象であり、並列コンピュータで計算する方が自然である。逐次処理型のコンピュータでは事象数の増大は処理時間の増大に直結し、また事象間の相互依存関係の記述が複雑となってしまう。

このため、計算物理学・化学や画像処理の研究者・技術者にとって並列コンピュータ（パラレル・コンピュータ）のニーズは高い。CRAY等のヴェクトル演算型スーパーコンピュータでも最近はパラレル化の傾向があるが、特に256以上のプロセッサを備えた（スカラ型の）並列コンピュータを超並列コンピュータと呼ぶことが多い。代表的な並列コンピュータを以下に示す。

第2.3—24表　代表的な並列コンピュータの概要

構成	ネットワーク	会社名	製品名	発表年	標準価格（千ドル）	納入台数 世界	納入台数 日本	最大PE数
SIMD	X-net & Router	MasPar	MP-1100	1989	170～810	7	0	4,096
			MP-1200	1990	?			16,384
	HyperCube	Thinking Machine	CM-1	1986	1,000	>10	0	65,536
			CM-2	1987	1,000～6,000		1	64,000
			CM-2a Model 4	1989	500	—	0	4,096
			CM-2a Model 8	1989	1,060			8,192
MIMD	HyperCube	NCUBE	NCube 1(2-3200)	1989	495前後	200	>10	8,192
			NCube 2-6400	1989	300～18,000	20	2	8,192
		Intel	iPSC/1	1985	172～929	100	5～6	64
			iPSC/2	1988	165～2,014	100		64
			iPSC/860	1989	265～3,000	4	0	128

出所）MRI

東京大学教養学部の杉本教授は、ご専門は天文学であるが、天体及びその他の多粒子系のシミュレーションに用いるための超並列コンピュータ（ボード）を開発されている。

杉本教授：

・MD（Molecular Dynamics）を用いた計算化学（蛋白質の構造解析や薬の設計に使える）や天文系のシミュレーションができる多粒子系専用の高速かつ安価な超並列マシンを作ろうとしている。

・現在出来ているマシンは8mm角に12万トランジスタを収めたカスタムチップを48個使ったものである。これを将来は16mm角の32/64bitチップ（1個当たり0.6～0.8GFLOPS）を1000個つないで1TFLOPSのマシンを作ろうとしている。これをWSのバス（拡張ボード）に直結

し、ほとんどの処理はWSにやらせるが、並列処理で効果の上がる計算のみ並列マシンにやらせる（現在もこの方式）。

・予算は文部省の科研費を用いる。現在は5年プロジェクトの1年目であり、最初の3年（予算：1億6千万円）で並列計算機を作り、残り2年（4千万円）でそれを用いた天文学の研究を行なう予定。

・分子間クローン力は比較的遠距離まで作用するが、現在は10Å程度でカットしている。これを20Åまで拡大すると計算量は64倍（3次元：2^3倍→相互作用があるためこれを自乗→64倍）になってしまう。従って多粒子系専用の超並列マシンのニーズは高い。

・流体力学系を多数の渦で記述するとビオ・サバールの法則を適用できるが、これも一種の多粒子系になり、この計算機が使える。

・こうした取り組みは計算機科学としては面白くないと言われるかもしれないが、目的はあくまで天文学など、現場の科学の研究に役立てるためであり、他にも解きたい問題は沢山ある。計算機はあくまでそのための道具と考えている。

(4) 多体問題の解明

(3)で述べたように、自然界及び人間界は多数の構成要素から成っており、それらが自律的・並列的に運動しながら、互いに影響を及ぼしあっている。その最も複雑な例は自然界では気象系、人間界では経済システムであり、いずれも挙動が複雑で予測しにくい点が特徴である。これらは極端な例であるが、こうした多体問題は多かれ少なかれ自然界、人間界のあらゆる局面に現れる。今後は計算機シミュレーション技術や計算機自体の高速化・並列化によりこうした多体問題はある程度解決が進むものと予測されるが、一方で多体問題を扱う統一的・決定的な理論の構築が期待されている。

東京大学生産技術研究所の荒川助教授は量子効果デバイスにおける電子／光子の多体問題、及び量子箱のネットワーク化の問題に関して以下のように述べている。

荒川助教授：

電子/光子の多体問題

「量子効果デバイスは実際には電子／光子1個では機能しない。実用に供するためにはある程度のエネルギーが必要なため、10個～100個単位の電子／光子の制御が必要である（そのためには先ず1個単位で制御できることが必要←パチンコ玉をまとめて沢山の穴に入れるためには、先ず1個の穴への入れ方がわからなければならない）。しかしそうなると多体問題となり、難しい問題となる（1個の挙動ならわかる。また1万～100万個単位の通常レベルの電子なら統計力学的に扱える）。この多体問題を扱うための概念、理論、モデルが必要（確とした理論的背景があった方がデバイスを設計しやすい）。」

量子箱間のネットワーク

「量子効果デバイス実用化のポイントとして、性能の極限化も重要だが、実用化のためには、それぞれの量子箱のアレイをどうやってつなぐか、そして何を出力にするか、といったネットワーク化の問題（システム化技術）が重要になる。例えば個々のシナプスの機能は実現できても、脳の機能は実現が難しいように、このような多体問題は困難だが重要な課題である。」

また、東京大学先端科学技術研究センターの岡部教授（研究動向調査委員会・委員）は、自立した個体と個体が協力に相互作用を及ぼし合う「強相互作用系」に関して以下の見解を持っている。なおこの提案の詳細については第Ⅱ部を参照されたい。

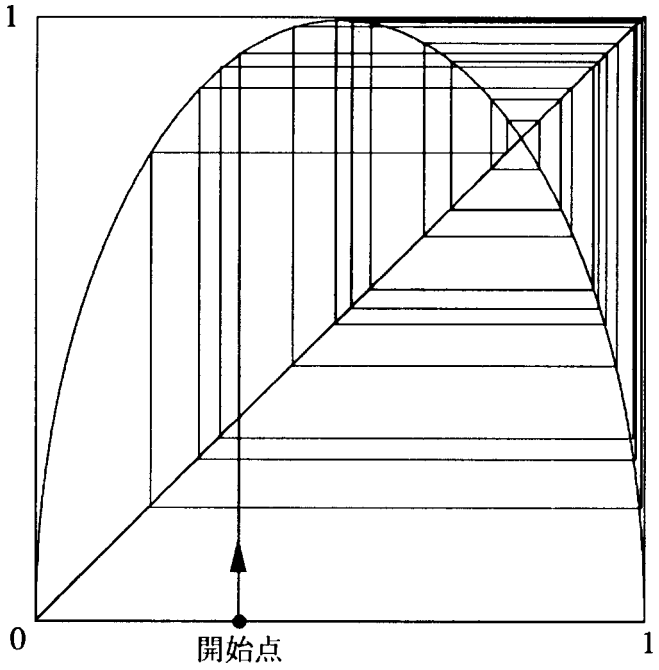
岡部教授：

「個体と個体が強力に相互作用しあうような強相互作用系に注目している。人間同士のコミュニケーションはこの典型的な例であり、自然界のみならず人間社会や経済の複雑な事象を説明するための手段にならないかと考えている。シンクロナイゼーション、共鳴、共振は自然界で日常的におこっている現象だが、生物や人間の場合だと、妥協・協調と対立、補完（コンプリメント）と競争（コンペティション）などのメカニズムが興味深い。」

(5) カオス・非線形現象の解明・利用

自然界の現象の多くは非線形現象である。しかしながら非線形現象は解析が困難であり、また非線形方程式は扱いが難しいため、フーリエが18世紀初頭にフーリエ変換を発明（「熱の解析的理論」、1822年）してから以降、18世紀末にポアンカレやアダマールが天体力学や力学的理論の分野で非線形現象に着目したものの、多くの自然科学者は非線形現象を意図的にあるいは無意識に無視してきた。

しかしながら1974年以降カオスあるいは非線形現象が再び自然科学者に注目され始めた。この背景には、従来の力学や制御理論における線形システムの限界が見え始めたことがある。カオスは下図のようなごく単純な非線形システムから生まれる。



第2.3－55図　非線形写像によるカオス系列の発生

出所）MRI

この非線形写像は「決定論的」であるにもかかわらず、ランダム的な系列を生む。初期値を微妙に変えるだけで全く異なる系列を生み出す。同じ初期値からは同じ系列しか生まれないが、写像（の関数式）を特定できない限り、系列の動きをみただけでは将来の系列を予測できない。これはカオスの典型的な例である。このような現象は線形システムでは生じない。

逆にこのことは、一見複雑に見える現象であっても、実はシンプルかつ非線形なシステムがこのような複雑な事象を引き起こしているのであり、そのシステムさえ同定できれば複雑系の予測が可能であることを示唆している。

実際、自然界には複雑で一見すると全くランダムな動きにしかみえない現象が多い。しかしこの背後には非線形性を持つシンプルな法則の存在が潜んでいる。カオスはこのようなパラダイムの転換を我々にもたらし、一見複雑に見える現象の解明に光明をもたらす可

能性を持っている。

最近では非線形現象に関する研究者も増え、ソリトンやウェーブレット変換といった非線形に密接な関連を持つ概念も注目され始めている。また生物の神経細胞における情報処理や、心拍に代表される「ホメオダイナミクス」に非線形ないしカオスが一役買っていることから、「バイオカオス」が注目されている。

東京大学工学部計数工学科の合原助教授（研究動向調査委員会・委員）はカオス及びフラクタルの工学的応用を目指す学問基盤を「カオス工学」と呼んでいる（数理科学、No.348、JUNE 1992、p5）。同助教授はカオスの工学的応用の可能性として、カオスニューラルネットワークをはじめとするカオスコンピューティング、経済予測や地震予知をはじめとする決定論的非線形予測、バイオカオス、カオスメモリ、カオス符号化、カオスパターン認識、カオスアート、カオスゆらぎ、ホメオダイナミック制御等を挙げている（数理科学、No.348、JUNE 1992、p6）。このようにカオスの応用分野は基礎科学から工学、経済学、芸術に至るまで実に幅広い。カオスが今後の科学技術基盤として重要たる由縁である。非線形/カオス工学については、第Ⅱ部の合原助教授のお話を参照されたい。

非線形に関連するテーマとして、「ソリトン」が注目を浴びている。ソリトンは孤立波とも呼ばれ、簡単に言うと「時がたっても崩れない波」即ち「粒子的性格を持つ波」のことである。ソリトンは多種多様な分野で観察される現象である。木星の大赤斑や地震の際の津波はソリトンであると言われている。波が海岸に近付く際に発生する浅水波ソリトン、温度差や塩分濃度差のある海水中で発生する内部密度波ソリトンなども知られている。理論物理学のフロンティアである「超弦理論」では、ソリトン的アプローチが強力な武器となっている。プラズマは「非線形波動の宝庫」と言われるが、プラズマ中における「イオン音波ソリトン」はソリトン方程式（非線形でKdV方程式と呼ばれる）によって理論的にその存在が予言され、実験によって検証された。ソリトン方程式が登場する分野は物理学に限っても、流体、プラズマ、非線形光学、磁性体、素粒子論、生物物理学など多岐にわたる。

特に実用の観点から注目を有望視されているのは「光ソリトン通信」である。「光ソリトン」を光ファイバー通信に使う考えは、AT&Tベル研究所に在籍していた長谷川晃氏（現在、大阪大学工学部通信工学科教授）が1973年にベル研の同僚タパートと共著で発表した論文において初めて理論的に提案された。この理論は発表当初は注目されなかったが、1980年にベル研のモレナワー、ストールンらが実験によって証明し、その後実験・理論両面で研究が急速に進展した。理論面では、ラマン効果による波形の整形、ガイディングセンター・ソリトン、固有値通信などの新しい概念が次々と提案された。技術面では、低損失分散シフトファイバーの開発、エルビウム・ファイバー光増幅器の発明が、ソリトン光通信の実用化研究の助けとなった。1992年初頭にはAT&Tベル研究所が、10ギガビット（1チャンネル5ギガビット×波長分割2チャンネル）の信号を1万1000kmもの距離を無中継で伝送する実験に成功し、NTTの中沢らも20ギガビット（1チャンネル）の信号を1000km以上伝送させることに成功した。

長谷川教授の見解によれば、ソリトン通信が今後解決しなければならない課題は以下の通りである。

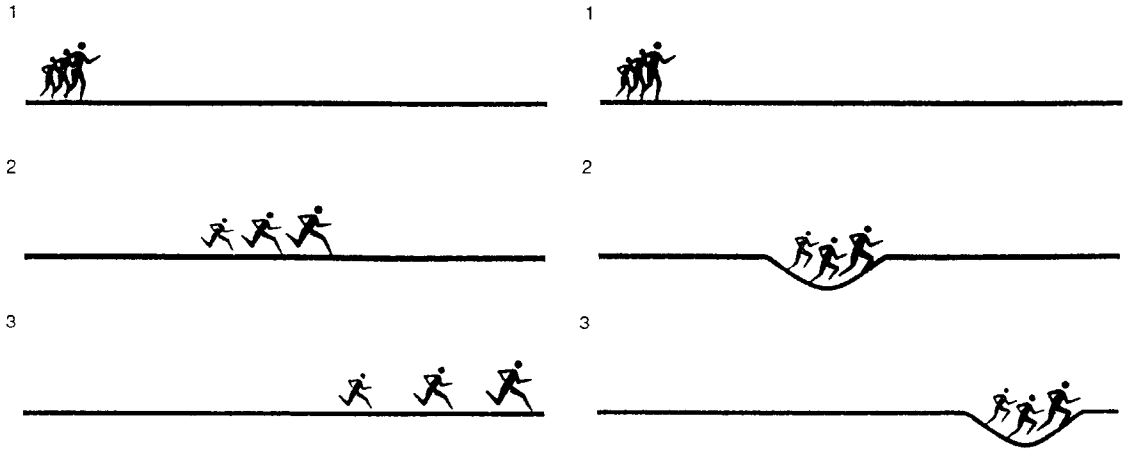
原理面：

・偏波分散によるソリトン波形の歪みをいかに克服するか？
・通信速度をどこまで上げることができるか？
・自己形成されたソリトンはどの距離まで安定か？
・波長分割多重通信を行う場合、ソリトン同士の衝突の問題をどう解決するか？

技術面：

・ソリトン列に信号を載せるため変調を加えた時、ソリトンのスペクトルが広がらないようにするためにはどうすればよいか？
・高速度の変復調をどのようにして行うか？

このような課題は残されているものの、ソリトン通信は、伝送速度と伝送距離の両方で、従来システムの記録を大幅に上回っている。従来システムでは、分散効果による歪みを除去するため、中継器を用いるか、信号波長で丁度分散がゼロになる分散シフトファイバーを用いる必要があるが、前者（中継器）の場合エレクトロニクスの応答時間の制限と製作コストから、1ギガビット以上のシステムはほとんど不可能である。後者（分散シフトファイバー）の場合、波長分割多重通信は不可能である。ところがソリトンを用いると分散をゼロとする必要がないため、1992年のAT&Tベル研の実験で証明されたように、波長分割多重通信が可能である。さらに、ソリトンの自己形成（self-organization）を用いると、各チャネルの利得の制御をしなくても、各チャンネルに安定なソリトン信号を作り出すことができる。このようなことから長谷川教授は、「次世代の高速光通信はソリトンをおいて他にない」、と考えている。



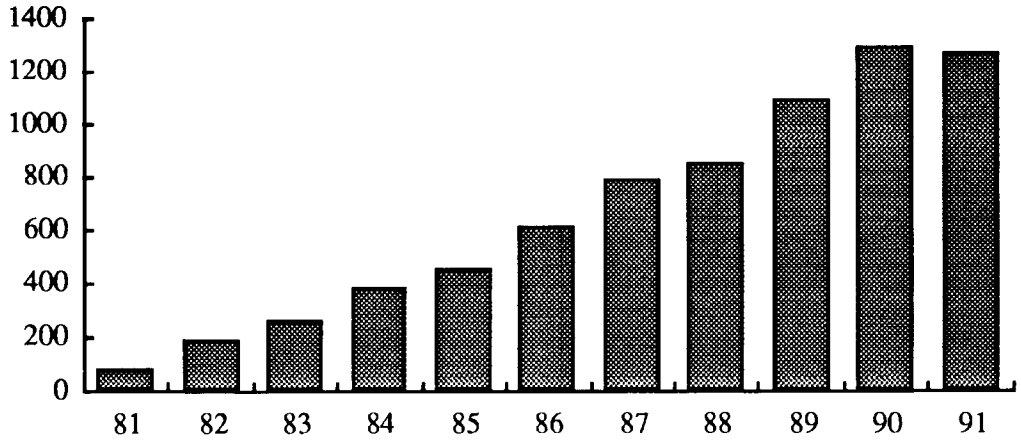
群速度分散と非線形効果　光ファイバー中のソリトンは、群速度分散と非線形効果によって作られる。この様子は、足の速い人と遅い人がいっしょに走る場合を考えると、直観的にわかる。非線形効果がないときは、上の図のように、集団はしだいにバラバラになっていく（光ファイバーでいえば、光パルスが伝搬速度に応じて広がってしまう）。非線形効果は、分厚いコムでできたレーストラックにたとえることができる。コムは人の重みで凹むため、下の図のように、常に足の速い人は登り坂、遅い人は下り坂を走ることになる。その結果、集団はいつも固まったままになる（光ファイバーでいえば、光パルスは常に同じ形を保ちながら進んでいく）。ただし、ここには位相の情報が入っていないため、完全に正しいとはいえない。

第2.3－56図　ソリトン光通信の概念図

出所）日経サイエンス、1992年12月号、p33

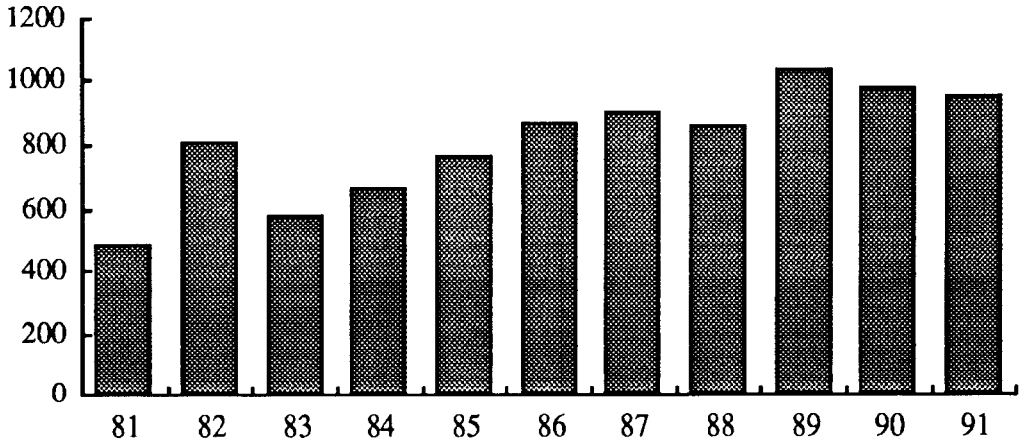
なお、今回のアンケート調査においても、ソリトンを用いた超高速通信が2000～2010頃に実現し、画像を含むマルティメディア通信が実現し、またソリトンの概念が一般に普及すると予測されている。

最後に非線形に関連の深いカオス、ソリトン、ウェーブレットに関する論文発表数の推移を以下に示す。



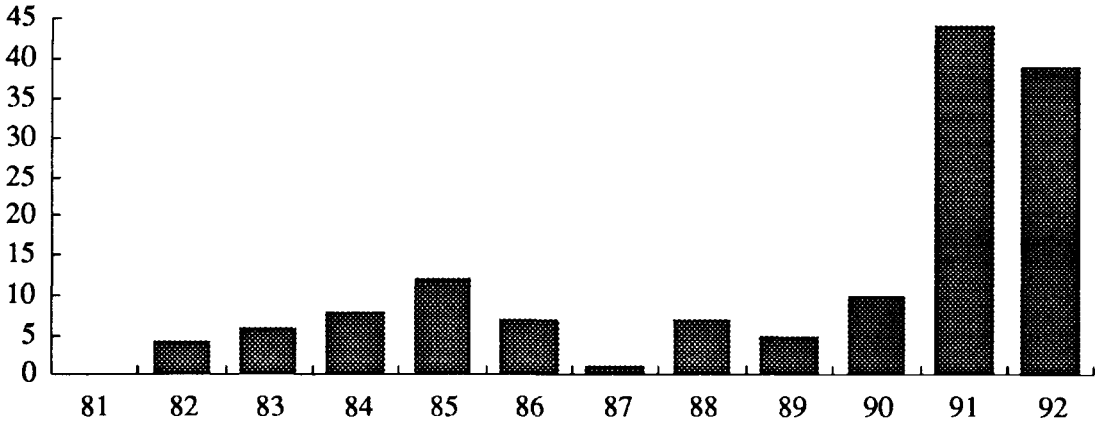
第2.3－57図　カオス関連の年別論文発表数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



第2.3－58図　ソリトン関連の年別論文発表数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成



第2.3－59図　ウェーブレット関連の年別論文発表数

出所）JICSTデータベースの検索により、MRI作成

2.3.3 複合化・融合化

技術の複合化・融合化（定義については2.2.1(3)参照）の流れと今後の展望について、ヒアリング調査及びアンケート調査を基に述べる。

(1) ヒアリング調査より

ここでは技術の複合化・融合化に関する各技術分野の専門家の見解を紹介する。

① 複合材料

内野教授：

「材料分野で複合化というと第一に考えられるのは「複合材料」である。 例：セラミクス（圧電性）とポリマー（フレキシビリティ）とカーボン（導電性）の複合化によって、圧電性とフレキシビリティーと導電性を併せ持つメカニカルダンパー材料が生まれる。

複合化の範囲に入るかどうかわからないが、例えばセラミック・アクチュエータならば、建築用（地震や風による振動を抑えるアクティブ・ダンパー等）、繊維用、精密機械用（モータの代替：超音波モータ/リニアモータ等、光学関係の位置決め、オートフォーカス機構等）、宇宙用（宇宙での振動は空気で減衰しないので、その振動を抑えるアクティブ・ダンパー、宇宙基地用巨大アクチュエータ等）、軍事用（潜水艦や戦車用のスマートスキン等）など幅広い応用があり、それぞれの応用先によってスペックが異なる。これなどはセラミック・アクチュエータと各用途の一種の複合構造とみることもできる。」

なお、アンケート調査結果でも有機・無機複合結晶等の複合材料の進展が予測されている。

② プラズマ材料科学

吉田教授：

「融合領域の研究会として私が世話人をやっているプラズマ材料科学シンポジウム（学振第153委員会）がある。88年に組織され毎年1回シンポジウムを行なっている（今年で6回目）。プラズマ研究者のみならず、無機、有機材料、半導体プロセス、化学反応論の研究者などが活発な討論を行なっている。私のほかには電総研の松田さん（材料科学部）、無機材研の守吉さん（超高温ステーション総合研究官）、広島大の堀池さん、新日鉄の武田さんなどが中心的な実行委員としてやっておられる。」

③　量子マイクロレーザ

荒川助教授：
『光と電子の融合化も有望な分野である。最近自然放出光のモード制御の観点からマイクロ共振器（現在は主として垂直共振器型レーザ）が議論されているが、この究極の姿である3次元共振器内では光の振動モードは完全に制御され、光の単一モード化が実現される。
一方量子箱構造では電子が3次元的に閉じ込められ、究極的には電子波の単一モード化が実現される。
このような3次元マイクロ共振器レーザと量子箱レーザの概念を融合し、電子波モードと光波モードが完全に制御されたレーザを実現することは、レーザの特性向上のために極めて重要になる。私はこれを「量子マイクロレーザ」と呼んでいる。』

④　新情報処理（硬い情報処理と柔らかい情報処理の組み合せ）

杉本教授：
『エレクトロニクスやメカニクスのような「硬い」テクノロジーと分子生物学のような「柔らかい」テクノロジーの結合（例：バイオセンサー、バイオチップ）は興味深い。
原子力発電などはあらゆる技術の集大成/複合化の産物である。こういった複合システムの場合、一般にシステムの性能は最も悪い要素により決まってくる。』
『ノイマンコンピュータのような硬い情報処理とニューラルコンピュータのような柔らかい情報処理を結合して、互いのメリットを活かしデメリットを補完するようなコンピュータシステムが望まれる。』

⑤　エアターボラムジェットエンジン

蓑田部長：
『航空機や宇宙往還機は、エンジン技術、空力技術、構造・材料技術、制御技術、数理解析技術等多くの技術の集大成である。
スペースプレーンに使われる可能性のある「エアターボラムジェットエンジン」は、ターボジェットエンジンとラムジェットエンジンを複合化（ハイブリッド化）したもので、低速時にはファン部で推力を発生し、高速時にはラム圧縮による燃焼により推力を発生する。』

⑥　膜リアクタ

K部長：
『①原料の前処理（分離・精製）、②反応、③生成物の分離・精製の３つの工程（または②、③の２つ）を同時に実行できる膜リアクタ。
例：メタンとスチームを混合し800℃で加熱するとH_2、CO、CO_2ができるが、400～500℃・数十気圧ではまだほとんどメタンのままで、H_2は少ししか出来ない。しかし、この反応装置に耐熱性のセラミックス膜（または金属膜）を入れて、出来たH_2を分離してやると、

見掛け上平衡点を越えて反応が進む。 ➪ 省エネ化、コンパクト化、コストダウンにつながる。

このような②、③の工程を複合化した膜リアクタは既に工技院・化学技術研究所、早稲田大学、東京農工大学等でかなり研究されている。①の前処理も複合化できれば、汚い原料を直接用いることができ、さらに省エネ化、コンパクト化、コストダウンにつながる。」

⑦ 伝統的な微生物探索と先端的バイオテクノロジーの組み合せ

別府教授：

「種の多様性は生物の最大の特徴である進化の結果であり、無限の宝庫である。高等動物の種の数は限られているが、微生物となるとその種の数は無限に近く、人類はその1万分の1を知っているに過ぎない。微生物の地道な探索を古くさいと軽視する人々もいるが、私はバイオテクノロジーや生物学、薬学、医学における最も正統的な手法の一つと考えており、遺伝子工学、蛋白質工学、細胞工学、といった先端的な技術と、伝統的な微生物探索とを組み合せて使っていくことが重要と考えている。ちなみに微生物探索に関しては、欧米の薬品会社がほとんど行なっていないのに対し、日本の薬品会社は伝統的に熱心であり、微生物から新しい抗生物質を発見している。」

(2) アンケート調査より

以下に、既存技術の複合化により将来どのような新しい技術やコンセプトが生まれる可能性があるかについて、アンケート調査の結果を示す。

① 物質・材料分野

第2.3−25表　物質・材料分野の複合化の進展と新技術・コンセプト（1）

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
微細加工	光電子機能性ポリシラン（高分子合成→キャスト法薄膜化）	アモルファスシリコン（CVD等による気相法薄膜化）		新規アモルファスシリコン薄膜（無欠陥＝ダングリングボンドフリー→高性能）（キャスト法薄膜→安価、大面積）
	自由電子レーザー	光化学反応	エッチング技術	選択的微細加工
	SR（シンクロトロン放射）技術	（挿入光源）	微細加工技術	選択的微細加工
	X線顕微鏡	結晶育成技術	結晶育成技術	結晶育成In·situ観察制御技術
	プラズマプロセシング	レーザプロセシング		反応設計・制御
	超高密度プラズマ	CVD	イオンビーム	エネルギー制御CVD
	超微細加工技術	結晶成長技術		構造自己組織化形成半導体プロセス
	微細加工	材料物性		量子加工
原子分子制御	プラズマプロセシング	STMプロセシング		原子レベルでの表面反応
	量子力学	熱工学	材料工学	材料特性の分子制御
反応制御	有機合成反応	微小空間創製（シクロデキストリン、ゼオライト、クラスターetc）		反応選択制御
材料設計	高分子		計算機	高分子計算機化学
	物質・材料設計			機能設計
バーチャルラボ	計算物理化学	超並列計算、CG	原子・分子制御技術	量子素子／バーチャルラボ
計測・評価	寿命予測	損傷評価	異常診断+データベース	総合コンピュータシステムによるエキスパート化の普及
	AE解析			劣化・損傷、非破壊評価
	陽電子消滅法	電子分光法	他の電子状態測定法	欠陥周りの電子状態の解析
	光を用いた分子・評価技術	粒子線を用いた分析評価技術		ナノメートル領域の非破壊分析評価
	レーザ分光技術	電子ビーム技術	計算画像処理技術	物質、材料、解析評価技術、微小欠陥評価技術

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

第2.3—25表　物質・材料分野の複合化の進展と新技術・コンセプト（2）

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
PHBメモリ	分子設計、配列制御技術	波長可変コンパクトレーザ		室温動作PHBメモリー
レーザ	レーザ技術			easy handling固体レーザ
有機・高分子材	有機合成技術	重合技術	コンピュータサイエンス	有機化合物、ポリマーの物性と化学構造の相関が明らかになる
	高分子合成	知覚機能	制御	インテリジェントな有機材料
	繊維成形	高分子開発	極限化技術	高機能繊維
	プラスチック精密加工技術	薄膜形成技術（プラズマCVD）		機能性材料の開発
	ポリマー		生物化学	易分解性ポリマー
	ポリマー合成		成型技術	超高耐熱、高強度材料
	有機合成反応	極限反応場（圧力、電磁場etc）		新材料合成
	有機電子写真感光体（DPC）	有機非線型工学材料		帯電プロセス不要な新型有機感光体
有機無機複合材	単分子膜技術	半導体エピタキシー技術	結晶成長技術	分子配向面上の無機結晶化制御
	ゾル・ゲル法による材料合成技術			有機・無機の複合機能材料
複合材料	カーボン/カーボン複合材料	ファインセラミックス		カーボン/セラミックス複合材。耐酸化性カーボンor靭性の高いセラミックス材料
	セラミックス	ポリマー	メタル	新複合材料（原子レベルでのハイブリッド）、グラニュラー物質、グラスティックス
自然融合材料	金属の内部組織の制御による性能付与	無機材料の内部組織の制御による性能付与	木材、骨などの細胞・繊維組織	自然融合物質材料。統一的視点で目標組織を合成する技術が生まれる
セラミクス触媒	触媒	セラミックス		貴金属触媒のセラミックス（無機化合物）による代替化
生体模倣材料	結晶育成技術	生体機能模倣技術	化学進化、原子地球科学	生体模倣素材（例えば光合成素子のような）
超高力材料	超急冷技術	粉末成形技術		超高力軽合金の開発と応用化
その他	材料設計技術	計測工学	情報処理工学	高機能材料及びその製造プロセス
	自由電子レーザ			マルチ材料処理
	フラーレン、ナノチューブ等の特殊構造炭素材料の開発	半導体、超伝導体等の電子材料の開発		電子材料の一層の高性能化によるマイクロエレクトロニクス技術の進展

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

② 電子・通信・情報分野

第2.3—26表　電子・通信・情報分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
新デバイス	磁性	半導体		磁性＋半導体
	メソスコピック物理	超伝導技術		コヒーレント電子波制御素子
	極限レーザ制御技術	原子分子ハンドリング技術		単原子・分子機能素子開発
	新機能デバイス	分子構造及び機能の制御		分子、原子レベルでの情報の記録と機能を有する分子レベルのデバイス
	半導体におけるIC技術	電子機器の磁性材料利用技術	超精密加工技術	超小形し素子化による電子機器の超小形化
光デバイス	半導体微細加工	新材料	光技術	集積化したマイクロシステム
	光導波路技術	マイクロ波技術	加工精度	光デバイスの高速化、低電力化、Low cost化
	光技術	電気技術		光LSI
	エレクトロニクス			オプトエレクトロニクス
新メモリ	磁気記録	光記録	半導体ICメモリ	固体記録の新方式
センサ	マイクロエレクトロニクス	マイクロマシン		インテリジェントセンサ
	センサー／アクチュエータ技術	マイクロコンピュータ	知能化技術	マイコンと一体化したセンサーフュージョン
	リソグラフィー技術	センサー技術		複合機能インテリジェントセンサ
情報機器	信号圧縮技術	蓄積技術（光ディスク）	カメラ技術（HDTV CCDカメラ）	・ディジタル、ハンディカムコーダ・長時間記録ディジタル、ディスクレコーダ
	半導体メモリ、磁性メモリ	無線通信	並列プロセッサ	家庭用情報端末
新計算機	マンマシンコミュニケーション			人に優しいコンピュータ
	マイクロエレクトロニクス	オプトエレクトロニクス		光コンピュータ
ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄ	情報処理	脳神経科学	分子遺伝学	高度ニューラルネットワーク新情報処理
	カオス			カオスニューロコンピューティング
画像処理	画像技術			大量画像、人間の視覚情報の多量性、多次元代、二次→三次へのeasy accessibility
情報処理	生体工学			人間の視覚野の知識を活用。非言語情報の処理についての知識
	情報処理	認知工学	メディア論	人間にとって違和感のない情報処理技術
	情報化			多次元情報化
回路設計	半導体IC技術	脳神経生理学	遺伝子工学	知的論理回路技術の出現
計測	光センサ	光・電子データ処理		インテリジェント光計測
通信	S/N比の改良			非線形波動（ソリトン）の有効性

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

③ 機械・航空・宇宙分野

第2.3—27表　機械・航空・宇宙分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
ｵﾌﾟﾄﾒｶﾄﾛﾆｸｽ	コンピュータ	メカニクス	オプトエレクトロニクス	インテリジェントオプトメカトロニクス
微小機械	生体超分子		マイクロマシン	素構造マイクロマシン
	ナノテクノロジ	知能情報処理		超微細作業技術
	設備保守技術	希土類の強磁性体応用によるマイクロマシンの発達		マイクロマシニング技術
知能機械/ﾛﾎﾞｯﾄ	バーチャルリアリティ	ロボット技術		擬似体験ロボット、極限作業ロボット
	AI技術			自己判断、学習機能、自己修復などの機能付機械
	高速パターン認識			人間並の条件の自動化技術
	触覚センサー			人間並の感覚を持った製造加工機械（特に食品加工製造など）
新製鉄プロセス	高炉	電炉		新製鋼プロセス鉄源の多様化
ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ加工	プラスチックフィルム延伸技術	X線回折（シンクロトロン放射）		延伸技術の発展
反応制御/設計	光反応技術（レーザ技術）	化学工学	材料技術	光反応プロセス技術
	化学反応、合成技術		コンピュータ	コンピュータを利用した化学反応予測、合成設計
	原料の前処理（分離・精製）	反応	生成物の精製（分離）	膜リアクター等、反応器と分離装置の一体化
故障/事故対策	人工知能技術	航空／宇宙機の無人操縦		航空宇宙機等の故障・事故に対応した緊急対策
船舶	高速船：原子・分子極限操作技術	表面精密加工技術	超撥水性材料	省エネルギー高速船の実現（超低摩擦船体の製造）
計測	ロボットの運動機能	座標計測技術		ダイナミックな新座標計測技術
その他	マルチメディア技術			高度ヒューマンインターフェース付属生産機械

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

④ バイオ分野

第2.3—28表　バイオテクノロジー分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
ﾊﾞｲｵﾏﾃﾘｱﾙ	バイオテクノロジ	高分子材料		バイオポリマー
	生体成分分析技術		ファインケミカルズ技術	合成バイオマテリアル
人工細胞	バイオエンジニアリング		リポソーム	人工細胞
バイオセンサ	バイオ技術	センサー技術（既存分析機器のマイクロ化を含む）	AI技術（複数センサー情報のAI処理）	高機能味覚センサー、嗅覚センサー
ﾊﾞｲｵﾛﾎﾞﾃｨｸｽ	ロボティクス	バイオテクノロジ	計算機科学（人工知能を含む）	バイオロボティクス
バイオリアクタ	石油精製技術	バイオ技術		バイオ精製等省エネ型＆環境対応型精製技術
遺伝子工学	遺伝子操作技術	流体力学・制御工学		DNAのlevelでの運動・反応のメカニズムが明らかになる
原子生物学	バイオテクノロジー	トンネル顕微鏡	レーザー技術	アトムバイオロジー
計算化学	染色体工学		コンピュータシミュレーション	三次元画像構築
その他	合成高分子	生体機能物質		画期的な融合が起こり得る
	半導体プロセス技術	バイオ技術		バイオ機能制御技術
	遺伝子関連技術	生体高分子合成		選択的分子認識により活性を発見する。ガン、エイズ薬

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

⑤ 保健・医療・福祉分野

第2.3—29表　保健・医療・福祉分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
レーザ医療	自由電子レーザー	光化学反応	医療技術	新レーザー医療
生体材料	材料強度論	高分子材料		耐熱ポリマー、新医用材料
	表面・界面計測技術	生体材料合成技術		生体活性評価技術／生体環境適合化概念
	流体工学	制御工学	材料工学	人工臓器
新薬	分子生物学	有機合成	高分子構造解析	新薬創製
計測・評価	抗体検出技術	蛍光法分析技術	光電子計測技術	極微量・短時間免疫検出技術
	超伝導エレクトロニクス	医学		SQUID-CT
	同位体濃縮技術	短寿命RI製造技術		超高比放射能化合物製造技術
その他	コンピュータ	画像・電子理論	新素材	新医療技術

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

⑥ 人間・生活・社会分野

第2.3—30表　人間・生活・社会分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
人間感覚定量	バイオテクノロジー	エレクトロニクス		味、香といった感性分野を定量化する技術
ﾋｭｰﾏﾝｲﾝﾀｰﾌｪｰｽ	人間の心理・制御	機械の制御		ヒューマンマシンコントロール
VR	論理IC・メモリIC	センサ・アクチュータ	ディスプレイ	人工現実感の進展（シミュレーション）
	遠隔制御	ITV又は画像処理技術	ロボティックス	臨場感遠隔制御
交通・物流	陸上輸送	海上輸送	航空機	新物流交通システム
	センシング技術（レーダ、画像等）	車両制御技術		運転支援制御
	情報	通信	画像処理	インテリジェントドライバー支援
その他	感性、人間工学	制御工学	AI	人と機械の融合、”仕事が楽しくなる機械”
	VR	品質評価（特性）		商品コンサルタント

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

⑦ 資源分野

第2.3—31表　資源分野の複合化の進展と新技術・コンセプト

分　類	既存技術1	既存技術2	既存技術3	新技術／コンセプト
生産システム	化学反応	エネルギー		物質・エネルギー併産
ｴﾈﾙｷﾞｰｼｽﾃﾑ	熱回収	熱輸送	熱利用	エコ・エネルギー都市
新エネルギー	電界の観測による地震・噴火予知	火力発電		高温岩体発電
核融合	核融合			D—3He核融合を用いた陽子工場
太陽エネルギー	太陽電池	断熱技術	制御技術	太陽エネルギーハウス
石炭ｴﾈﾙｷﾞｰ	石炭ガス化	コンバインドサイクル発電		石炭ガス化複合発電
ｴﾈﾙｷﾞｰ貯蔵	新型蓄電池技術		センサー技術	蓄電池の管理技術
ゴミ発電	都市ごみ焼却：還元ガス化	超耐熱ヒートパイプ	セラミックガスタービンエンジン	都市ごみを原料とした直接複合コンバインドサイクル発電
電力保安	劣化・余寿命診断	予測保全	巡視ロボット	電気所・送電線路総合監視システム
CO2処理	太陽エネルギー			太陽光によるCO2＋H2O→C2H4＋O反応を作りCO2のリサイクルと化学エネルギーの製産
	船舶技術	海上基地技術	深海探査検知技術	CO2深海貯留
	CO2固定化反応	太陽光利用水素製造		地球環境技術
環境創製	クリーン化技術	環境制御技術	省エネ技術	希望仕様の環境を局所的に実現する技術
その他	意識工学との融合による新エネルギー発電方式の開発			新発電技術

出所）アンケート調査結果より、MRI作成

第３章　今後の重点研究領域・テーマ

本章では、アンケート及びヒアリング調査の結果を基に、今後の重点領域・課題を探索した結果を分野別に示す。

本章の3.1～3.7節における分野別の技術領域・テーマは、第２章で極限化、高機能化、複合化といった視点別に取り上げた領域・テーマを補完するものであり、全ての重点技術領域・テーマを網羅している訳ではない。また第２章で取り上げた領域・テーマと重複しているものも一部ある。

本章の「まとめ」（3.8節）においては、第２章及び3.1～3.7節で取り上げた技術領域・テーマをとりまとめ、総括表を作成した。この総括表が本報告書の結論の一つである。

3.1　物質・材料分野

3.1.1　超時空間制御プロセシング

東京大学工学部金属工学科の吉田教授は薄膜形成等のプロセシングの極限化として、(1)極限場におけるプロセシング、(2)3次元空間での極限プロセシング、に次ぐ第３の極限プロセシングとして、(3)超時空間制御プロセシングを提唱している。

吉田教授（再掲）：

『いわゆる極限プロセシングといわれているものを統計力学用語で分類するとΓ空間での極限プロセシングとμ空間での極限プロセシングとに分類できよう。

前者は極限環境下でのプロセシングといえるもので超高低温、超高圧、超高真空、超高磁場、電場、無重力場などの熱力学的状態量、もしくは場の極限環境が利用される。

一方後者では3次元的空間での極限制御を目指すプロセシングである。これは現在、超ＬＳＩやマイクロマシンにおいて発展しつつあるもので、ＭＢＥ法やMOCVD法を利用した超格子薄膜の堆積、ナノレベルエッチング、量子細線や量子ドットの形成やＳＴＭを利用した原子レベルでのプロセシングがあてはまるといえる。

これに続く第3の極限プロセシングとしてｔ空間における”時空間制御プロセシング”が考えられる。これは言ってみれば外的作用を反応プロセスの時間と同期させるということで、究極的に言えば固体の格子振動の時間、つまりピコ秒オーダーでの外的刺激と固体表面の相互作用が考えられる。またそこまでいかなくても例えばプラズマ中での分子の励起緩和時間(～ns)や各種反応の緩和時間(～μs)など現在の技術でも対応可能な領域がある。

このプロセシングの制御には、連続的制御とパルス的制御が考えられる。前者では位相制御が考えられ、後者ではパルス的エネルギー供給としてパルスレーザーなどの適用が考えられるが、電子線やＸ線の利用も考えられる。

この”時空間制御プロセシング”の概念は現在の私のプラズマ研究から考えついたものであるが、この研究領域での内外の先進的な研究者の間では時空間制御によるプロセシングのブレークスルーが多く試みられている。まさしくプロセシングにおける第3の概念が芽生えているといえるかもしれない。

これまでの我々プロセス屋の本能的な固定観念として、時代の要請を満たす大量生産用プロセシングには大いなる定常状態が必要であるという根付いた常識があったともいえる。時間軸へのこだわりがおろそかであったことは事実であると思う。』

3.1.2　原子　分子操作

工業技術院産業技術融合領域研究所の田中総合研究官（研究動向調査委員会・委員）は、産業科学技術研究開発制度のアトムテクノロジー・プロジェクトの実験面のリーダーを務めている。氏の見解については第Ⅱ部を参照されたい。

原子・分子操作について帝人の内田顧問は以下のように述べている。

内田顧問：

『量子力学をベースとした材料の原子・分子レベルの操作・加工は日本のお家芸であり、今後技術・産業・社会に巨大なインパクトを与える。』

3.1.3　アンケート結果

第3.1－1表　物質・材料分野の有望領域・テーマとキーパーソン（1）

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
微細加工/薄膜形成	超時空間制御プロセシング	①位相制御プロセシング　②パルス制御プロセシング	東京大学教授　吉田豊信
	CBN薄膜	①CBNのエピ成長　②CBN/ダイヤモンド多層コーティング	東京大学教授　吉田豊信
	ダイヤモンドの高速・大面積コーティング	①成長モード　②光学特性	東京大学教授　吉田豊信
	微細加工	半導体の微細加工	東工大助教授　小田
	微細加工技術	①ナノメータ微細加工　②放射光露光技術　③マイクロマシニング技術	
	超微細化技術	マイクロ電極を用いる微細加工	職業訓練大学校　青柿良一
原子分子制御	超微細加工	単一原子レベル加工	NEC基礎研究所新機能素子研究部課長　松井　真二
	原子分子制御		
極限加工	極限条件での構造材料	①超高温セラミック材料　②超耐熱金属材料	
	超高圧力場利用技術	①テラパスカル発生技術　②凍結過程の解明と利用　③実時間分解計測	物質工学工業技術研究所極限反応部　吉田　正典
	極限反応利用新材料合成	①超高圧、超高温、超強電磁場利用　②新材料合成技術	物質研極限反応部高密度エネルギー課長　藤原　修三
光加工	光による直接加工法	①光による直接スパッタリング　②光による原子・分子操作	阪大産業科学研究所　川合知二
レーザ	自由電子レーザ	①短波長化、高出力化　②安定化、狭帯域化　③小型化	電子技術総合研究所量子放射部長　山崎鉄夫
	レーザー光反応技術	①レーザーアブレーション　②特異的光化学反応　③高効率反応技術	物質工学工業技術研究所　矢部　明
	極限レーザ制御技術	①フォトンSTM装置開発　②光周波数利用技術	東工大教授　大津　元一
	広帯域半導体ラマンレーザー		
評価・解析	小・中型SR発生技術	中型あるいは小型で従来の大型のリングと同程度の性能を持つリングを開発する	電子技術総合研究所放射線技術研究室長　三角智久
	挿入光源技術	①比較的小・中型のリングに挿入光源を入れて安定に動作させる。　②材料創製　③分析　④アンジオグラフィ	電子技術総合研究所光放射研究室長　小貫英雄
	SR利用技術	SRを単色化、マイクロビーム化、偏光を利用する選択的励起による分析・評価、材料創製技術	電子技術総合研究所放射線計測研究室長　鈴木功
	先進複合材料	非破壊材料評価	東大先端研　岸　輝雄
	先進複合材料	①材料のプロセッシング　②脆性材料の評価法　③非破壊評価	東大先端研　岸　輝雄
	陽電子消滅法による欠陥状態解析		東北大金研助教授　長谷川雅幸
	単一原子の検出並びに分析技術	レーザ励起原子蛍光法による超微量分析法	物質工学工業技術研究所(主研)　中村　進
	放射光	①放射光励起反応　②構造解析　③分析	
	高度分光技術	①ピコ、フェムト秒分光技術　②新素材製造加工プロセス技術　③新機能性薄膜プロセス技術	
	材料界面の非破壊的・選択的解析		

出所）アンケート結果より、MRI作成

第3.1−1表　物質・材料分野の有望領域・テーマとキーパーソン（2）

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
材料設計	バーチャルラボ	①仮想材料実験室の創成　②メゾスコピックデバイスの設計シミュレータ	東大生産技術研究所教授　山本　良一 東大人工物研究センター教授　岩田　修一
半導体	ワイドギャップ半導体技術	①W.G.Ⅱ-Ⅵ族化合物の材料化　②SiCの半導体材料化　③BN、ダイヤモンドの半導体材料化	京大工学部教授　松波　弘之
高分子	高分子構造制御	高分子の超格子配列−メゾスコピック・スケールの化学	Max-Plank-Institute（独）G.Wegner
	有機強誘電体材料（高分子）	①π電子水素結合系　②異種原子π共役高分子	東大理学部物理学科助教授　十倉　好紀
有機・無機複合	無機・有機超構造結晶		
	有機−無機物質の界面利用	分子配向面上の無機結晶化制御	①名大工学部教授　河本邦仁　②東大工学部教授　牧島亮男
	複合材料	無機・有機複合材料	
	有機ポリマー／無機フィラー系ナノコンポジット	有機／無機相分離制御技術	
	バイオミメテック構造材料	有機高分子中での無機結晶制御	
ｱﾓﾙﾌｧｽ金属	アモルファス金属の利用	①磁気部品の超小形化　②超高力軽合金の開発	東北大学金属材料研究所教授　増本　健
光学材料	非線形光学材料	各種波長の発生	東北大電気通信研究所教授　伊藤　弘員
	非線形光学	屈折率可変（光学素子）光物質の開発	
	ルミネッセンス技術	高効率なルミネッセンス光学材料の開発	物質工学工業技術研究所
触媒	触媒科学	高活性、高選択的触媒反応の開発	名大理　教授
ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ材料	インテリジェント化技術	①磁性流体　②有機磁性流体　③有機非線形光学材料	
	インテリジェントセラミックス材料		
環境調和材料	廃棄物処理技術又は予め廃棄を考慮した材料開発	①化学材料（プラスチック材料）　②金属材料	
	リサイカブル材料、環境調和材料		金属材料研究所部長　古林英一
超電導	超伝導		
	高温超電導技術	室温動作ジョセフソン素子	東大工学部教授　北沢　宏一
	超電導技術	リニアモーターカーの開発	
	超電導技術		
	超電導技術	Ｔｃのアップ	
	超電導応用技術	超電導発電機	
その他	新素材	①傾斜材料　②耐環境材料　③ダイヤモンド系材料（カーボンも含む）	電総研材料科学部長　田中一宜
	次世代エレクトロニクス材料		東大工学部物工教授　伊藤良一

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.2 電子・通信・情報分野

3.2.1 柔らかい情報処理

東京大学教養学部の杉本教授は以下のように述べている。

杉本教授（再掲）：

『ノイマンコンピュータのような硬い情報処理とニューラルコンピュータのような柔らかい情報処理を結合して、互いのメリットを活かしデメリットを補完するようなコンピュータシステムが望まれる。』

ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズム・人工生命も「柔らかい情報処理」の一種といえる。これらについては第２章を参照されたい。

3.2.2 4次元デバイス

東京大学生産技術研究所の荒川助教授は、電子の1波長分の時空間分解能を持つ極微小の「4次元デバイス」の可能性について以下のように述べている。

荒川助教授：

『電子の1波長分の空間分解能（100Å=10nm）、時間分解能（10fsec）、エネルギー分解能を持った4次元的な量子効果デバイスが出来ないか、と考えている（公式には未発表）。即ち、非常に微細な半導体中に10fsecクラスのレーザ光パルスを発生させる機能を持たせる。』

また同助教授は、電子波の単一モード化と光の単一モード化を同時に実現する「量子マイクロレーザ」を有望視している（第２章参照）。

3.2.3 アンケート結果

第3.2—1表　電子・通信・情報分野の有望領域・テーマとキーパーソン

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
ｾﾝｻ・ｱｸﾁｭｴｰﾀ	センサーフュージョン	①センサーの小型化　②アルゴリズムの構築　③アクチュエーターの高性能化	
計測	計測・センシング分野	①ホログラフィ計測　②導波路計測　③高分解能計測	機械技術研究所部長　松田浄史
量子デバイス	単量子デバイス技術	原子分子制御技術	東大教授　生駒　俊明
	三次元ポリシラン	高分子合成、湿式法によるquantum dot,quantum wire,quantum wellの調整	東大理学部物理学科助教授　十倉　好紀
有機デバイス	有機エレクトロニクス素子	強誘電性液晶のメモリー効果	
新デバイス	集積化マイクロシステム		東北大学工学部教授　江刺正喜
	新機能素子	①量子波素子　②バイオ素子	
	新機能デバイス		東大工学部物工教授　伊藤良一
光技術	高度光利用技術（又は高機能高出力レーザ技術）	レーザの固体化、高度化は新しい時代を迎えている。非常に広い分野に波及効果を生む。ことに生体と環境に対する応用に進められよう	光協会開発部長　佐藤　卓蔵
	オプトエレクトロニクスデバイス（ブルー光）	青色半導体レーザ	ソニー中研統括部長　森芳文
	光エレクトロニクス		
	光情報伝送、処理		
	フォトニクス		東大工学部物工教授　伊藤良一
ディスプレイ	三次元ディスプレイ		東工大助教授　本田　捷夫
移動通信	移動通信		
計算物理	計算物理	固体物性の大規模シミュレーション	NEC基礎研究所探索研究部主管　大西　樽平
CAD/CAE	インテリジェントCAE	①オブジェクト指向CAD　②インテリジェントCADデータ	コロラド州立大助教授　桜井
情報記録	超大容量ファイル	10Gbit/in2（現在の50～100倍程度はある）以上の記録面密度を実現するファイル技術（磁気/光媒体、記録再生技術、装置化技術）	
情報メディア	知能情報メディア	①環境理解　②マンマシンコミュニケーション　③マルチメディア技術	京都大学工学部教授　池田克夫
	コンピュータによる教育、ゲーム	マルチメディアソフトの効率的作成/編集技術	
	マルチメディア	①高速読み込み、読み出し光メディア　②3次元GOI、高速ネットワーク　③オブジェクト指向データ	図書館情報大学助教授　杉本

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.3 機械・航空・宇宙分野

3.3.1 新形態エンジン

航空宇宙技術研究所・熱流体力学部の蓑田部長は新形態のジェットエンジンとして、以下を有望視している。

蓑田部長：

① **スペースプレーンや極超音速機（ﾏｯﾊ5～6以上）のためのエアブリージングエンジン**
- エアターボラムジェットエンジン
- スクラムジェットエンジン（ラムジェットエンジンの一種であり、燃焼室内の流速を超音速に保ったままで超高速燃焼させるもの）

② **バイパス比の高いファンジェットエンジン（燃費/推力向上のため）**

③ **VTOL（垂直離着陸機）のためのリフトファンエンジン**

コアエンジンから排出される高圧空気を翼に組み込まれた数個のリフトファンエンジンに送り、機体を揚げる。ただし騒音、入口乱れ等の問題あり。

3.3.2 ジェットエンジン基盤技術

同じく蓑田部長は、ジェットエンジンの基盤技術して、以下を重要としている。

蓑田部長：

① **計測技術**
- 超高温（2000℃クラス）計測
- 燃焼ガス成分の直接計測
- 内部高速流体の3次元流れ/乱れ計測
- 非定常状態の計測

（1万rpm×ﾀｰﾋﾞﾝﾌﾞﾚｰﾄﾞ100枚＝1MHz程度のサンプリングが必要になり、センサのｆ特が追い付かない）

② **計算流体力学（CFD）**
- 特に圧縮機や燃焼系の数値シミュレーション

③ **材料評価技術**
- 材料の試験方法の確立・統一

3.3.3 宇宙関連技術

ペンシルバニア大学の内野教授は以下のように述べている。

内野教授：

『スペースシャトルに日本人が乗り込んでテレビ放映されたが、あれは日本の少年に大きな夢を与えた。現在理工系に進む人が減っており、理工系を出ても理工系の研究者やエンジニアにならない人が増えているが、これを直すには青少年に対して科学技術に関する「夢」を与えることが必要だ。その意味で、今後は日本もBig Scienceに取り組むべきである。』

またT社のK部長は、今後の有望テーマとして、微小重力実験装置、閉鎖系環境制御技術等の宇宙関連技術を挙げている。微小重力については第2章（場の極限化）を参照されたい。

3.3.4 ミリマシーン

東京大学先端科学技術研究センターの河内教授は、以下のような観点から「ミリマシーン」を有望と考えている（詳細については第2章を参照のこと）。

河内教授（再掲）：

『マイクロマシーンの研究が盛んになりつつあるが、従来の機械（モータ、歯車等）を単に縮小すればよいという訳ではなく、微細な機械にはその大きさにふさわしい固有のメカニズムが必要である。物の大きさが3桁変わると性質がかなり変わる。人間の寸法はメートル・オーダであるから、マイクロとは6桁の開きがある。μmオーダの機械は人間に作用するには寸法が小さすぎ、それを補う多くの数が必要になる。このような観点から、昆虫の運動メカニズムを応用したmm（あるいはcm）サイズの「ミリマシーン」が有望と考えている。』

3.3.5 アンケート結果

第3.3−1表　機械・航空・宇宙分野の有望領域・テーマとキーパーソン

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
ロボティクス	ロボティクス	①自律分散ロボット　②自己組織ロボット	理化学研究所研究員　浅間一
	ロボット	①非製造業ロボット（例えば宇宙、福祉等ロボット）（ソフトウェア技術、マニピュレータ技術、並列処理技術、ビジョン技術）	
計測	新座標計測技術	①直示形座標計測技術　②追尾式座標計測技術	計量研究所力学部機械計測研　後藤　充夫
微小機械	超微細作業	超高性能マシンや生命科学の進歩に寄与	東大工学部　畑村洋太郎
	ミリマシーン	①常動ロボット　②群ロボット	東大先端研教授　佐藤　知正
	マイクロマシン	マイクロセンサ、マイクロアクチュエータの集積化	東北大工学部教授　江刺正喜
	マイクロマシン	マイクロロボット	
航空・宇宙	宇宙	①微小重力実験　②閉鎖系環境制御技術　③月面基地	関連の研究会、委員会のメンバー多数
	航空・宇宙推進システム	新型態のエンジン研究・開発	航空宇宙技術研究所原動機部長　能瀬　弘幸
	超音速輸送機	①耐熱材料　②低騒音エンジン　③低燃費エンジン	
	次世代ロケット推進薬	①環境適応型推進薬　②高性能推進薬	物質工学工業技術研究所松永　猛裕
船舶	海上輸送の安全化及び高速化	①高速船の開発　②人工知能化船の開発	
CO2抑制製鉄法	大幅炭酸ガス発生抑制型製鉄法	H2還元製鉄法	

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.4 バイオテクノロジー分野

3.4.1 植物代謝・動物生体機能の解明

帝人の内田顧問は、植物代謝や動物の生体機能の解明を今後の重要課題としている。

内田顧問：

「分子生物学を基礎とした植物メタボリズム（代謝）の解明による新農業、動物の生体機能の解明の進展とヘルスケア分野が重要である。」

3.4.2 有機電子論

東京大学農学部の別府教授は、蛋白質工学の確立のためには、蛋白質の構造と機能をつなぐ有機電子論の確立が今後の課題であると考えている。

別府教授：

「蛋白質の構造と機能の相関関係を解明することは、従来はスローガン（夢物語）に過ぎなかったが、最近では蛋白質の3次元構造に関する情報集積が進み、その情報に基づき蛋白質を人工的に改変・デザインできるようになってきた。また蛋白質の機能もかなりわかってきた。今一番欠けているのは、構造と機能をつなぐ理論、例えば蛋白質分子中の有機電子論・反応論であり、今後の重要な研究課題である。」

3.4.3 超微小流動

河内教授は現在創造科学（ERATO）の「微小流動」プロジェクトのリーダーを務めており、飛翔昆虫の気体中での運動メカニズムやそのミリマシーンへの応用方法を研究しているが、将来的にはより微細な領域の流体運動メカニズムを探りたいと考えている。

河内教授：

「将来的には、もっと細かい領域の流体力学的な運動メカニズムを探っていきたいと考えている。即ち細胞内の拡散現象やDNAの運動メカニズムなど。」

3.4.4 アンケート結果

第3.4—1表 バイオテクノロジー分野の有望領域・テーマとキーパーソン

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
遺伝子工学	遺伝子関連技術	①遺伝子解析技術及び遺伝子診断への応用	京大化学研究所　金久実
	ライフサイエンス	遺伝子関連技術	
	バイオテクノロジー	遺伝子治療	
生体分子・材料	生体分子の電気力学的操作		成蹊大学電気工学科助教授　鷲津正夫
	生体超分子技術	①人工細胞　②超分子機械の構築　③超分子機械の動作原理を模索	愛知工業大学教授　大沢文夫
	生体材料		
	バイオミメティックス	①人工臓器　②人工生体機能膜	
	生体活性セラミックス		京大工学部教授　小久保正
生体情報科学	生体情報科学	分子遺伝学への情報科学的アプローチ	国立衛生試験所化学物質情報部長　神沼　二真
	脳神経回路	脳神経回路の自己組織化機構	NEC基礎研究所探索研究部主任　田中　繁
	脳機能		
	知覚メカニズム	立体知覚メカニズムの解明	
海洋生物利用	海洋産海洋産生体制御物質の開発	①海洋産抗腫瘍抗ウイルス等の活性　②物質の探索、合成、開発	
免疫制御	免疫の制御	①臓器移植　②リウマチの治療　③花粉症の治療	
その他	医薬品産業		
	バイオホトエレクトロニクス（生体ホトエレクトロニクス）	生体センシング、生物プロセシングに適合する高度な光技術を研究する。また水圏光LANなども含めてよいであろう	
	構造生物学		
	超高比放射能化合物製造技術を用いた生命科学	①超高比放射能化合物製造法の研究　②極微量領域における生命科学	放医研臨床研究部　主任研究官　井上　修

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.5 人間・生活・社会分野

3.5.1 都市/生活/交通環境

内野教授は都市環境・生活環境の改善に寄与する技術が今後重要であると考え、以下のように述べている。

内野教授：

「エコロジー（環境）問題は今後取り組むべき非常に重要な問題である。特に日本では生活環境、住宅環境、都市環境、交通ネットワークの改善が急務だ。都市環境がらみでは、住宅やビルの地震や風による揺れを吸収するアクティブ・ダンパー（現在横浜MM21にあるあるビルは、油圧アクティブ・ダンパーにより重心を移動させ、強風でも最大25cmしか揺れない）なども重要なテーマだ。自動車にしても、内部の音響や冷暖房は良くなったが、省エネや公害や安全性という意味ではまだまだ課題がある。」

また交通環境については、各省庁合同で国を挙げて「インテリジェント交通システム」に取り組むべきである、との見解があった（S氏）。

S氏：

「米国で提唱されているIVHSは道路と車を含めた交通システム全体のインテリジェント化による事故の予防を狙いとしている。日本でも通産省（機情局）のPVS、SSVS（Super Smart Vehicle System）、運輸省のASV（Advanced Safety Vehicle）等のプロジェクトがあるが、まだ大きな動きとはなっていない。

こうした交通システム全体のインテリジェント化による予防安全は自動車メーカだけでは限界があり、通産省、運輸省、建設省などが省庁間の枠を越えて共同で取り組むべきプロジェクトである。

このようなインテリジェント交通システムは安全のみならず、渋滞の減少による交通効率向上、省エネ、排ガス低減、人の肉体的・精神的負荷軽減、等社会全体の経済的・資源的・精神的コストの低減につながる。

これから益々環境規制が厳しくなった場合、自動車メーカだけに負荷が押し付けられるのは不合理であり、上のような観点からも、道路や信号等も含めた道路交通システム全体の整備を国主導で行なうべきである。

具体的なR&Dは多いが、自動車側では次のような課題がある。

① センシング技術 - レーダ、赤外線、超音波、レーザ等
② 演算・処理技術 - 画像認識等情報処理
③ 表示技術 - 違和感の無いヒューマン・インターフェース
④ アクチュエータ技術 - 自動運転制御、運転支援制御

現在の自動車に搭載されている（外界からの情報にアダプティブに反応する）自動運転制御としては、三菱自動車の例（前方の車両を検知してエンジンブレーキをかける）がある程度である。

自動運転制御は技術的にはかなり可能になってきたが、安全性をメーカ側でどれだけ保証できるか（万一事故が起きた場合どちらの責任になるか）、といったPLの問題があり、なかなか商品にはしにくい。

一方車と人とのヒューマン・インターフェースという観点からは、人間そのものの行動・認知特性を知るという観点から、高齢者の視覚認知の問題、見やすくわかりやすい表示・警報、操作性の良さ等に関する研究を行なっている。」

3.5.2 アンケート結果

第3.5—1表　人間・生活・社会分野の有望領域・テーマとキーパーソン

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
人間研究	人間の知性の研究	①知性のモデル　②メディアの知性に及ぼす影響	
交通・輸送	高効率輸送体系	①近中距離高速輸送体系（陸上）　②中長距離高速輸送体系（海上）　③都市内高効率輸送体系	
	自動車のインテリジェント化		
	完全自動運転自動車	①センシング技術　②自動運転技術	
	電気自動車	①リチウム電池（高性能電池）　②高速充電法	大阪工業試験所材料物理部長　高橋　祥夫
	予防安全技術	運転支援技術。具体的には周囲モニタ（センシング、表示技術）など	
ロボット	ヒューマノスフェアロボット（人間生活圏ロボット）	①ロボットマインド　②ソフトメカニズム　③人間心理適応技術	①電子技術総合研究所知能システム部　高瀬国光　②機械研　谷江和雄　③生命研　和田充雄
リサイクル	環境調和産業技術	①自動解体技術　②プラスチックリサイクル	
	リサイクル技術、廃棄物処理技術	環境調和型スクラップ溶解プロセス	
	環境問題への対応	①生分解性プラスチックの評価及びその応用　②プラスチックリサイクル技術	
	セラミックスのリサイクル	①住宅用セラミックス製品のリサイクル化　②自動車用セラミックス製品のリサイクル化	
その他	安全性・信頼性工学		
	生活向上領域	①生活環境の抜本的見直と改善　②人間にやさしい技術と製品の開発　③エネルギーの一元的供給体制	

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.6 資源・環境・エネルギー分野

3.6.1 地球上の物質・エネルギーシステムの把握

T社のK部長は、物質・エネルギーシステムに関する以下のテーマを重要と考えている。

(1) 製造装置の材料製造や処分までを含めた物質・エネルギーシステムの把握と望ましいプロセスの選定

(2) 日本あるいは世界を想定した、最も望ましくかつ現実的なエネルギーシステム（現状の置換型）のF.S.

3.6.2 アンケート結果

第3.6−1表　資源・環境・エネルギー分野の有望領域・テーマとキーパーソン（1）

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
ｴﾈﾙｷﾞｰｼｽﾃﾑ	地球上の物質・エネルギーシステムの把握	①製造装置の材料製造や処分までを含めた物質・エネルギーシステムの把握と望ましいプロセスの選定　②日本（出来れば世界）を想定した、最も望ましくかつ現実的なエネルギーシステム（現状の置換型）のF·S	
	地球環境保全技術	例えば、太陽電池と燃料電池、超電導エネルギー保存（SMES、フライホイール等）と既存の発電所を電力需要を予測し制御する高度なソフトウェアの融合	超電導工学研究所所長　田中昭二
	エネルギー・環境技術	①太陽光発電（低コスト・高効率太陽電池製造技術）　②エコエネ都市（エネルギー利用ネットワークシステム）　③CO2固定化・貯蔵・有効利用技術	
	高性能クリーンエネルギー分散システム	現在既に進められているものに対しての評価の手法開発をなすのかも知れぬ	
	エネルギーと環境技術	①高効率発電システムの開発　②再生可能エネルギーの有効利用技術開発　③CO2対策技術	
新ｴﾈﾙｷﾞｰ	クリーンエネルギーの開発	①太陽光・太陽熱の効率的エネルギー変換技術　②各種電池（例：燃料電池、2次電池）の開発　③水素エネルギーの開発	
太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ	太陽エネルギー利用	①宇宙空間からのエネルギー転送　②ソーラーカー	京大教授　松本　紘
	クリーンエネルギー	①高効率太陽電池を含むエネルギー効率50%以上のコンバータ	阪大教授　浜川　圭弘
	光エネルギーの有効利用		
水素ｴﾈﾙｷﾞｰ	水素エネルギー利用関連技術	①水素燃焼ガスタービンの開発　②液体水素の製造、運搬、貯蔵技術の開発	徳島大学機械工学科教授　竹矢一雄
	水の光触媒分解	①太陽光をエネルギー源として水の光分解　②触媒の開発	物質工学工業技術研究所　荒川　祐則
	H2製造及び利用	①H2O電解技術　②H2-O2タービン発電	
燃料電池	高温固体燃料電池	①高速製造技術　②高性能化　③高信頼性化	東京大学教授　吉田豊信
	燃料電池発電技術		
	燃料電池発電	①大規模リン酸型燃料電池　②溶融炭酸塩型燃料電池	
熱電変換	熱電エネルギー変換	①ナノ・マイクロ構造制御による変換効率改善　②新しい熱電材料の探索	山口大学教授　松原覚衛
	熱電変換素子の材料開発と実用化	①熱電素子材料の開発　②FeSi2素子の実用化	山口大工学部教授　松原覚衛
	熱の有効利用	熱電変換	

出所）アンケート結果より、MRI作成

第3.6—1表　資源・環境・エネルギー分野の有望領域・テーマとキーパーソン（2）

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
低温核融合	新エネルギー	低温核融合	
MHD発電	MHD発電	クローズドサイクルMHD発電	
高温岩体発電	化石燃料・放射性物質を用いない発電	高温岩体発電	郵政省通信総合研究所第二特別研究室長　高橋　耕三
蓄電技術	エネルギー材料	バッテリ	
	電力の蓄積技術	①大電力・長時間の電力蓄積　②小型・軽量の電力蓄積	
省エネ住宅	省エネルギーハウス	①太陽熱利用　②蓄熱システム　③節エネルギー制御	
環境対策	地球環境制御	①有害物質の無害化　②湖沼浄化	
	地球環境保全	①生分解ポリマー、技術　②廃油処理、浄化装置　③光エネルギー利用	
排ガス対策	廃棄ガスの低減技術	①Low Emission Vehicles　②高効率発電　③経済的な廃ガス処理	
CO2処理技術	CO2深海貯留技術	①深海貯留システム　②監視システム　③シミュレーション技術	
	CO2固定再資源化	①CO2植物固定　②CO2還元有機化	資源環境研究所　大内　日出夫
CO2処理技術	CO2処理技術		
その他	エネルギー環境工学	①D-3He核融合　②太陽エネルギーを用いた炭酸ガスのリサイクルと化学燃焼の生成	大阪大学教授　長谷川　晃
	エネルギー	エネルギー開発に対する指標（科学的、経済的、社会的）	
	海洋・地球・宇宙科学	地球環境	

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.7　その他の分野（カオス・非線形工学、強相互作用システム等）

3.1～3.6以外の分野としては、カオス・非線形現象の解明・利用、及び強相互作用系システムが重要である。これらの詳細については、第２章（インテリジェント化の項）及び第Ⅱ部における合原先生・岡部先生のお話を参照されたい。

3.7.1　アンケート結果

第3.7－1表　その他の分野の有望領域・テーマとキーパーソン

分類	有望領域	具体的テーマ	キーパーソン
非線形・カオス	非線形現象	①非線形数学（基礎）　②非線形物理（基礎）　③ソリトン通信（応用例）	大阪大学教授　長谷川　晃
	非平衡熱力学	①カオスの制御　②パターンとリズムの自発的形成の解明　③決定論的多様性発現の機構の解明	名大教養部教授　吉川　研一
	非線型問題適用技術	やや個別的課題になるかも知れないが（一般的方法論が未確定なので）複雑社会の解明については経済、社会学などの分野にも関係しよう	竹内　啓
	カオス		
	カオス工学	①時系列データ予測　②遺伝子アルゴリズムとの融合	
	非線形現象の解明		
	カオス工学	①非線形予測　②カオスコンピューティング	東大・工・計数　助教授　合原　一幸
強相互作用系	強相互作用システム（内部の要素が強く相互作用するシステムの研究）	①強相互作用系ニューラルネットワーク（あるいは工学）　②強相互作用系社会学　③強相互作用系経済学	無機材質研究所　千葉　利信
意識工学	意識工学	N-Machineの開発	電子技術総合研究所　猪股　修二

出所）アンケート結果より、MRI作成

3.8　まとめ（第２章と第３章の総括表）

今後の重点技術領域について、第２章及び3.1～3.7節で取り上げた領域を合わせ、それらを縦軸を分野、横軸を方向性とするマトリクス（第3.8－1表）に整理した。

保健・医療・福祉、人間・生活・社会、資源・ｴﾈﾙｷﾞｰ・環境といったニーズ指向型分野で空欄が多いのは、本調査の対象が主として要素技術であり、技術サイドから見た探索・予測アプローチをとったためである。

第3.8−1表　今後の重点技術領域・テーマ

分野＼方向性	極限化			高機能化			複合化
	空間	場	時間	生物利用	生物模倣・知能化	その他	
物質・材料	微細加工 (87) 薄膜化・超格子化 (90) c-BN/ﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄﾞ薄膜 (174) 超微粒子 (97) 原子・分子操作 (99) マイクロアナリシス (100) ミクロ構造制御 (106) 光直接加工 (174) ﾜｲﾄﾞｷﾞｬｯﾌﾟ半導体 (175) 有機強誘電体 (175)	超高圧等極限反応 (112) 耐熱材料 (113) レーザ光反応 (174)	超時空間制御ﾌﾟﾛｾｼﾝｸﾞ (119)		ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ材料 (133)	触媒/材料設計 (155) 非線形工学材料 (175) エコマテリアル (175)	複合材料 (164) プラズマ材料科学 (164) 無欠陥ｱﾓﾙﾌｧｽSi薄膜 (167) 選択的微細加工 (167) 結晶育成In-situ観察 (167) ｴﾈﾙｷﾞｰ制御CVD (167) グラニュラー物質 (168) 自然融合材料 (168) 有機・無機超構造結晶 (175) 有機・無機ﾅﾉｺﾝﾎﾟｼﾞｯﾄ (175)
電子・通信・情報	巨大アクチュエータ (107) 単原子・分子素子 (169)	半導体プロセス環境 (108)	量子効果デバイス (116) ﾌｪﾑﾄ秒ﾃｸﾉﾛｼﾞｰ (120) 光周波数計測 (121) 自由電子レーザ (174) 4次元デバイス (175)		ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸ (142) 遺伝的ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ (144) 人工生命 (144) ｾﾝｻ・ﾌｭｰｼﾞｮﾝ (149)	計算流体力学 (150) 計算物理学・化学 (153) 超並列ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ (156)	量子ﾏｲｸﾛﾚｰｻﾞ (165) 新情報処理 (165) バーチャル・ラボ (167) 室温動作PHBﾒﾓﾘ (168) マルチメディア (177)
機械・航空・宇宙	ﾐﾘ/ﾏｲｸﾛ/ﾅﾉﾏｼﾝ (103)	高温反応場の計測 (114) 微小重力利用 (115) ﾌｧﾝﾃﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (178) ｽｸﾗﾑﾃﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (178) ﾘﾌﾄﾌｧﾝｴﾝｼﾞﾝ (178)	非定常状態計測 (121)		バイオメカニクス (140) 知能ロボット (147) 閉鎖系環境制御 (179)		ｴｱﾀｰﾎﾞﾗﾑｼﾞｪｯﾄｴﾝｼﾞﾝ (165) 膜リアクタ (165) ｵﾌﾟﾄﾒｶﾄﾛﾆｸｽ (170) 省ｴﾈﾙｷﾞｰ高速船 (170)
バイオ				バイオマテリアル 123 蛋白質工学 125 糖鎖工学 127 その他バイオ 129		植物代謝解明 (180) 有機電子論 (180) 超微小流動 (180)	人工細胞 (171) 味覚/嗅覚ﾊﾞｲｵｾﾝｻ (171) ﾊﾞｲｵﾛﾎﾞﾃｨｸｽ (171) ｱﾄﾑﾊﾞｲｵﾛｼﾞｰ (171)
保健・医療・福祉						免疫制御 (181)	レーザ医療 (171) 人工臓器 (171) 極微量免疫検出 (171) SQUID-CT (171)
人間・生活・社会					ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ交通ｼｽﾃﾑ (182)	人間の知性の解明 (183) リサイクル技術 (183)	感性の定量化 (172) 人工現実感 (172)
資源・ｴﾈﾙｷﾞｰ・環境							エコ・エネ都市 (172) ｺﾝﾊﾞｲﾝﾄﾞｻｲｸﾙ発電 (172) 熱電変換素子 (184) 水の光触媒分解 (184)
その他						多体問題 (158) 強相互作用ｼｽﾃﾑ (158) カオス・非線形 (159) ソリトン (160) 非平衡熱力学 (186)	

出所）MRI

注）カッコ内は参照ページを示す

第Ⅱ部　研究動向調査委員会の意見・提言

第II部　研究動向調査委員会の意見・提言

第II部では、「研究動向調査委員会」における各委員の意見・提言及び今後の我が国技術戦略・政策に関する専門家の意見をまとめた。

第1章　特に有望と考えられる技術領域・テーマ

本章では、今後特に有望と考えられる技術領域・テーマについて、研究動向調査委員会の各委員の意見・提言をとりまとめた。なお、意見・提言中のアンダーラインはMRIが付したものである。

1.1　非線形工学・カオス（合原助教授）

本節では、非線形工学・カオスに関する東京大学工学部の合原助教授の見解を紹介する。

1.1.1　第1回委員会におけるお話

（記録作成：MRI）

合原助教授：

・一貫して非線形の研究を行なってきた。最近は主としてカオスを研究している。（社）日本電子工業振興協会（JEIDA）のバイオ情報応用システム調査委員会（メーカも参加）の委員長として、生体情報システム（カオス、バイオコンピュータ）の可能性を模索している。また（社）日本工業技術振興協会でもカオス工学に関して調査を行なっている。

・ニューラルネットワークの大家としては電総研の松本元先生（電総研・超分子部長）と東大の甘利俊一先生（東大工学部計数工学科・教授）のグループがある。私はイカの神経で世界で最初にカオスを見つけた。1個のニューロンがカオス的なダイナミズムを持つカオスニューラルネットワークにより、TSP（Traveling Salesman Problem）のような組合せ最適問題が解ける。私のモデルを基に、コロンビア大学では1チップに9個のニューロンを内蔵するカオスニューロチップをすでに作っている。

・本日、以前「数理科学」誌に載せた「カオスの工学的応用の可能性」に関する資料をお配りした。この中で特に面白いのは「決定論的非線形予測」の問題であり、これに興味を持つ企業も多く、共同研究を行なっている。また私としては、基礎理論とカオスとの係わりに興味を持っている。今後カオスが制御、計算、予測等の分野の基礎理論に揺さぶりをかける可能性があり、楽しみにしている。

・複合化に関しては、ちょっとニュアンスが違うかもしれないが、「複雑化」、「ネットワーク化」といった見方があると思う。

資料II－1　カオスの工学的応用の可能性

- **カオスコンピューティング**
  - カオスニューラルネットワーク
  - 一般化シフト写像
  - 最適化問題
  - 学習・自己組織化
  - 次世代アナログコンピュータ
- **決定論的非線形予測**
  - 気候，地球環境，生物資源などの変動予測
  - 経済予測
  - 地震予知
  - 感染症の流行予測
- **カオスの同定やモデリング**
  - 複雑な工学プラント(原子炉，電力系統など)のモニタリングや異常検出
  - 音声合成
  - フィルタリング
- **バイオカオス**
  - 脳波(EEG)，脳磁界(MEG)，心電図，脈波などの解析・診断
  - 麻酔や睡眠のモニタリング
  - 感性工学
  - ストレス工学
- **カオスメモリー**
  - 大容量メモリー
  - 動的連想メモリー
  - 高速メモリー検索
  - 動的シソーラス
- **カオス符号化**
  - 反復関数系のアトラクタによる画像圧縮
  - カオス暗号
  - カオス信号通信
- **カオスパターン認識**
  - フラクタル画像認識・特徴抽出
  - 微細な差異の高感度識別
  - センサー
  - 音声認識
- **カオスアート**
  - カオスCG(コンピュータグラフィックス)
  - フラクタルCG
  - カオス音楽
- **カオスゆらぎの利用**
  - カオス家電(カオスゆらぎのエアコン，扇風機，洗濯機などへの応用)
  - 音声合成
- **カオスの実装**
  - 電気・電子回路
  - 光電子回路
  - レーザー系
  - 人工膜
- **非線形工学システムにおけるカオス発生とその制御**
  - カオス振動の除去(弾性体や回転体などの機械系，発電機やモーターなどの電気系，船舶，関節形係留塔など)
  - 乱流や燃焼の制御
  - 核融合炉のプラズマ閉じこめ問題
  - ホメオダイナミック制御
  - カオス的共振
  - カオス的混合(化学プラント，熱交換機，燃焼など)
  - ロボット制御

出所)「カオス　―応用をめざして」、数理科学、No.348、June 1993、p6

1.1.2　第3回委員会におけるお話

（速記録より抜粋）

（合原）　基本的に私がいま考えているのは非線形工学ということです。つまり、工学における非線形問題の重要性をもっと危機感を持って取り組まなければいけないのではないかということを考えています。それはなぜかというと、工学の基礎理論は基本的に線形の話なのです。もちろん線形の話が使えるシステムはいっぱいあるけれども、まず、自然界のシステムはほとんどすべて基本的に非線形非平衡系なわけです。そのからくりは非線形の話がわからないと理解できないような話になっているわけです。

それから、工学的な基礎理論というのは線形ですが、エンジニアは理論がなくても物をつくるというところが当然あるわけで、実際、理論がなくてもいろいろなものをつくってきているわけです。特に巨大な複雑系をもつくっているわけで、原子炉とか溶鉱炉は厳密な数学モデルがないわけです。電力系統とかコンピュータ・ネットワークもそうだと思うのです。非線形で何が難しいかというと、電力系統を例にとると、発電機くらいだったらモデルはつくれるかもしれないけれども、そういうのがたくさんネットワークをつくったときにどう動くかというのは、エレメントがわかってもわからないわけです。人工システムを見ても既に人類は非線形なものを使っているし、自然界もほとんどのものは非線形なわけで、そうしたものを取り扱う工学理論が非常に寂しい状態なのです。

この前も言いましたけれども、私の学生のころは非線形理論は一般論がないからというエクスキューズで、そういうことは全然教えてくれなかった先生もいたわけです。しかし、その時点で既に数学の世界では、摂動論とか分岐理論とかちゃんと理論がつくられてきたわけで、そういう意味では危機感が足りないのではないかと思っています。

非線形がおもしろそうなテーマというのは既に幾らでもあるわけで、キーワードだけ挙げても、カオスとか複雑系とかフラクタル、ウェーブレット、ソリトンとニューロ、非常にたくさんあるわけです。その中で私はカオスが一番好きなので、その話だけ少しすると、カオスのコンセプトが工学の基礎理論にいま大きな影響を与えつつあります。予測理論を例に上げると、従来の予測理論は基本的に確率的な予測理論だったわけですけれども、それと同じぐらい広い研究分野で確定論的な予測という研究分野が手つかずで残っているのです。もしいろいろな実験データが示しているように、世の中にカオス現象が当たり前にあるのであれば、そういうものの予測は決定論的予測が重要な役割を果たせるわけで、そういう理論体系がまだ全然できてない。

（岡部）　決定論的な予測というのは、結果が決定してしまうという予測？

（合原）　決定論的ダイナミックスに従って動いていく。時系列だけ見るとノイズのように見えるのですけれども、それがもしカオスだとすると、その背後には決定論的な法則があるわけです。その法則をもしそういう立場で見れば……

（岡部）　結果はケイオティックになってもいいわけね。ちゃんとした方程式が存在して、結果はカオスになってしまう可能性はあるという意味ですね。

（合原）　そうです。もしそこに気づけば、その立場での予測理論がつくれるのです。ただ安直にＡＲＭＡを使ってみるのではなくて、状態空間も再構成できて、その中での予測という理論体系ができるわけです。そういう研究分野が全く手つかずに残っています。確率的な予測理論というのはものすごく広い分野で、ものすごいオーダーの研究者がいる

のですけれども、それに比べて研究者がほとんどいないのです。

制御もそうなのですけれども、いまの制御理論は基本的に一定の状態を維持しましょうという理論です。それに思想的に大きな影響を与えた生体のホメオスタシスという概念があって、生体というのは常に一定の状態を保っているというわけです。ところが、ここ5年ぐらい、本当にそうかというので生体のデータを見直してみると、全然そんなことはなくて、私はそれをホメオダイナミックスと言っているのですけれども、むしろ生体というのはいろいろな動的な状態を積極的につくり出すことによって機能を果たしている節があるのです。

一つの例を挙げると心拍がそうなのです。健康な人の心拍はもともとf分の1ゆらぎをしていると言われていたのですが、いろいろな解析をしてみるとカオス的な動きをしているわけです。ところが、ある種の心臓疾患になるとそれが周期的になったりするわけです。そうすると、健康な状態と動的にゆらいでいる状態というのが非常に対応がつくわけで、それが最近わかってきたわけです。

それ以前はホメオスタシスしかコンセプトがなかったから、そのような制御を考えるのは自然なわけで、私の恩師の宇都宮先生も、昔からホメオスタティック・コントロールということは言われていたのですけれども、私は宇都宮先生の弟子なのでそれを継承して、最近はホメオダイナミック・コントロールということの重要性があるのではないかということを言っています。従来の制御理論はこのような問題について、あまり研究していないわけです。つまり、基本的にホメオスタシスの概念で制御の理論体系がつくられているわけですが、そうではなくて、むしろ積極的にダイナミカルな状態をつくり出すことによって機能するようなシステムがあってもいいわけで、そのための理論がないわけです。それが制御の問題です。

（赤池）　変な質問かもしれませんが、心臓がパルス単位の拍動流をつくるような機能になっていますね。決して定常流を出すようなシステムになってない。ああいうのもある意味ではホメオダイナミックスの立場からすると合理的かもしれないというようなこともありますか。

（合原）　はい。揺らぐことによって安定なシステムになっている。

（赤池）　あれは揺らがないと自分の位置の確かさがわからなくなって、どんどん悪い方向へ行くかもしれませんね。ホメオスタシスといえども、年中微分係数をとっているような感じで、あれで修復しているかもしれませんね。

（合原）　そうなのです。予測を見ても、制御を見ても、そういう問題があって、計算に関してもそうなのですけれども、いまのコンピュータは基本的にすべてデジタルコンピュータで、そのもとにあるのはチューリングが出した整数の上でのチューリングマシンなのですけれども、カオスの本質というのはアナログにあるのです。その辺を追求していくと、カオスを使って新しい計算みたいなのができる可能性がある。だから、いまのデジタルコンピュータに対応してアナコンの復権みたいなことがあり得るのです。

そのときに理論的に何が要るかというと、従来の自然数の上のチューリングマシンを実数の上のチューリングマシンに拡張するような理論体系が要るのです。そういう意味で、予測とか制御とか計算みたいなものは工学の基礎理論の一番根幹にある部分なのですけれども、その部分ですら、非線形の問題をちょっと考えてみると、大きな重要な研究のテーマが手つかずで残っているわけです。その辺はちゃんとやるべきではないかという気がし

ます。

それから、もう少し視野を広げてみると、まず、人間というのは非線形でカオスの固まりなのです。そうすると、マンマシン・インターフェイスの問題は非線形な人間と従来の工学技術との非線形相互作用系なのです。それはやはり非線形問題になるわけで、環境問題もそうなのです。自然界というのは非線形システムなわけで、非線形非平衡なシステムと現代の科学技術文明の相互作用としてとらえなければいけない。それから、先ほどの融合研の研究者の間とか研究分野の相互作用というのも、まさに非線形システムになってしまうので、非線形問題は基礎工学の理論として重要だし、いろいろな分野に関してファースト・プリンシプルみたいなものを与える可能性があるわけです。だから、スーパーコンピュータ２台でできるとは思いませんが、そういう研究をやっていく必要があるし、ニュートン力学は三体問題で既に解けなくなっているのですけれども、案外ちゃんと研究すれば理論のほうでもブレイクスルーがないとは言えないわけで、その辺を私自身はやっていきたいと思っています。

1.2　強相互作用系（岡部教授）

本節では、強相互作用系に関する東京大学先端科学技術研究センターの岡部教授の見解を紹介する。

1.2.1　第1回委員会におけるお話

（記録作成：MRI）

岡部教授：

・超電導エレクトロニクスとニューラルネットワークを主として研究してきた。

超電導に関しては、高温超電導とニオブ系の堅実な超電導の２種類に取り組んできたが、ジョセフソン素子ですらまだ実用化には至っていない現状であり、超電導は集積回路には採用されないのではないかと思い始めている。超電導の応用としては素子よりもSQUID-CTが有望と考えている。脳の中の神経の興奮状態のCTを測る訳だが、外部磁場分布から脳の中の状態を推定する、即ち逆問題を解くことが必要になり、これが解決すべき課題である。もしこれができれば脳の研究は飛躍的に進展する。高温超電導はたとえお金をかけてもかなり難しいと考えており、むしろお金をかけない研究からぽろっと出てくるのを期待するしかない。

・ニューラルネットワークに関しては非常に研究人口が増えたが、入力→ニューラルネットワーク→出力という一方向のみのパターン認識屋が多い。私としては、状態に応じて出力を変える、即ち自己組織が行なわれるようなシステムが必要で、このためにはネットワーク内部のフィードバック・ループが必要と考えている。

・個体と個体が強力に相互作用しあうような強相互作用系に注目している。人間同士のコミュニケーションはこの典型的な例であり、自然界のみならず人間社会や経済の複雑な事象を説明するための手段にならないかと考えている。シンクロナイゼーション、共鳴、共振は自然界で日常的におこっている現象だが、生物や人間の場合だと、妥協・協調と対立、補完（コンプリメント）と競争（コンペティション）などのメカニズムが興味深い。

1.2.2　第3回委員会におけるお話

（速記録より抜粋）

（岡部）　いまの合原先生の話ですと、非線形相互作用の結果がどうなっていくかという話が出てきたのですけれども、私はむしろ相互作用そのものの研究に興味があって、実はオリジンはわりと近くて、まだ合原先生が学生時代に私はよく宇都宮先生の研究室に行ってワーワーしゃべって、先ほどのホメオスタシスの話を延々とやっているのです。　例えば、ホメオスタシスは合原先生は脈動のほうに興味を持ったのですけれども、私はホメオスタシスという言葉は妙だなと思ったのは、何かを一定にするためには何かを変えなくては一定にならないわけです。ですから、あるものは一定になっているかもしれないけれども、それを変えようとする努力をしているものは常に変動しているわけです。血圧を一定に保とうとすれば、血流はしょっちゅう変わっていないと一定にならないわけです。なぜ血流を一定にしなかった、なぜ血圧を一定にしたのだろうと、もう少し別の先ほどのファースト・プリンシプルがあるのではないかという気がしまして、その辺に興味を持ち

始めたということです。

それから、これは田中さんのお話にあったセルフ・オーガナイゼーションにも猛烈に興味がありまして、いまのような相互作用をして、それがわりと安定な系をつくるからには、もともとが簡単ではあるけれども賢いファースト・プリンシプルがあるのではないか。それがあるからセルフ・オーガナイゼーションするので、一体どんな原理を1個1個の個体が持っていたらうまくいくのだろうか。

例えば、人間社会で言うと、人間がどういう性質を持っていたら何人集まっても喧嘩もせず生き残れるかとか、ニューロンで言うと、ニューロン1個1個がどんな性質があったら壮大なシステムをつくっても、発信現象は起きるけれども、解が発散しないというのですか、人間の頭の中は、普通の脳でしたら爆発的な答えにならないわけです。ところが、我々が勝手にいろいろな素子を組み合わせて何か回路をつくると、ほとんどどっちかにザーッと飛んでいって、猛烈に全体が興奮してしまうか、全部がしょぼんとなってしまうかのどっちかしか答えがない。それが、適当に興奮していて、適当なリズムがあって、というようなことは非常にうまい仕掛けを1個1個の個が持っていなければいけない。しかし、そのうまい仕掛けというのはそんなに難しい原理ではないし、少なくとも相当小さなものにしても持てるぐらいの仕掛けだから、それがわかるとおもしろいというのがもともとの私のニューラルに対する興味のスタートになっているわけです。

そのときに、先ほどの合原先生の話で、カオスというのは基本的にアナログでなければいけないという話があったのですけれども、私のほうでは全然別のほうで出てきまして、デジタル素子だとそういうものがすごくつくりづらいみたいなのです。デジタル素子でシミュレーションはできるけれども、基本原則としてアナログという概念がないと、相互作用をしたときにお互いにうまくいくような仕掛けはどうもできないみたいだというので、私は何度か通産省に、アナログ回帰というような意味のプロジェクトをつくったらどうだと言っているのですが、なかなか認めてもらえない。

私はアナログ・ルネッサンスと言っているのです。かつてはみんなアナログだったが、デジタルがいいとダーッとデジタルに行って、いまこちらに振れ過ぎてしまった。もう一回アナログを見直して、それをエンジニアリングとして育て直すような時代にいま突入しつつあるのではないかということで、大分そういうことを言っているのですけれども、その辺が動機だったり、バウンダリーになっているわけです。

私自身はどういうことから研究をスタートしたかというと、大きなシステムを組んだときに、しかもそれが、いまの普通のニューラル・ネットワークは入力と出力が明白で、信号が片側から片側へ流れていく。こういうシステムは、大概のコネクションにしてもそんなに発信みたいなことは起きないし、発散みたいなことは起きないのですけれども、本当の人間の脳を見ますと、入力側でも網膜から最初の中枢まで上がっていった神経の約70%は戻ると言われているのです。70%も繊維があって、我々は電子ですから電子回路でそういうものをつくろうと思ってつくりますと、ほとんど発信してしまって、何も情報処理しない。それを抑える仕掛けを考えなければいけないだろう。それがわかると、もしかするとかなり巨大なシステムをつくったときにうまく情報処理をするという話とピタッとつながるのではないか。だから、ある程度の安定性を確保する。つまり、やたらに巨大な信号とか、やたらに信号がディケイしてしまわないような仕掛けを入れれば、それが脳が情報処理をするということにつながるのではないか。

ここから先は自分の仕事になり過ぎてしまうのですけれども、例えば、生物が明らかに持っている一番簡単な機能に反射というのがあるのです。例えば、どこかつっついたりすると「痛いッ」と逃げたりしますね。これはどうして起きるのだろうかというと、大方の人は、それは本能です、それがなければいまごろ人間は死んでいますと答えて、それは事実だと思うのですけれども、私はそれの解釈が少し変わっていて、もともとニューロンというのは巨大な信号を避けるように一生懸命回路の自分の持てる自由度というのですか、ニューロンの場合は結合度というのがあるのですけれども、結合度をいろいろ調整して、ともかく過去に大きな刺激が来たら次には来ないように一生懸命努力をした結果、避けるようになったのではないか。それは多分赤ん坊がまだ母親の体内にいるときに一生懸命努力をして、いろいろ動かしてみて、どういうことをすると刺激が増えてくる、どういうことをすると刺激が減り過ぎる、どのくらいのことをやっていると刺激が適当に来るのだということを一生懸命努力した結果、生まれてくると、強い刺激があるとパッと逃げる。だから、適当な刺激がいつも入りますよと、そういうようなことで考えたらいいのではないかというアプローチをとっています。

具体的に人間にパソコンをつなぎまして、人間に刺激を与えて、人間がそのときにどういうレスポンスをしたら、そのレスポンスに対してまたパソコン側が何か刺激を与える、そういう人工の環境の中で人間をトレーニングして、あるときに環境を変えるわけです。そうすると、いままでと同じようなレスポンスをするとすごく痛い目に遭ったりするわけです。そうした場合にどうやって自分のレスポンス系をだんだん変えていくのだろうかというのを観察したら、簡単な原理で、まさに私が先ほどから申し上げているように、生体はある一つの評価関数を持っていて、入力が好みのレベルがあって、それからずれることに対して評価が悪くなるのではないか。それから、猛烈に頑張って仕事をするということに対して、あまりし過ぎるのも嫌いだ、全然しないのも嫌いだ、適当に仕事をしているのは大好きという二つの評価の和をマキシマムにしているらしいというのがわかってきたのです。

だから、あまり努力をしないで適当に刺激が好みになるようにするのが生物らしいというのがわかってきまして、その辺からアプローチを開始して、ニューロンもそうやっているに違いないということをやってみたら、単純な反射活動は、人工の腕とか手とか体みたいなものを持ってきて、それをある狭い領域に閉じ込めておきますと、それは思考実験で計算機でシミュレーションしているだけですけれども、ガタガタ動く。動かしてみると、すごく強い刺激が来たりする。そのうちに、手ごろな刺激になるように自分のレスポンス系をつくってしまう。それから外へ出して、ちょっと刺激すると、痛いのが来るとパッと逃げるし、あまり痛くないとむしろ擦り寄ってくるとか、そういうことをやるようになったので、意外と簡単なルールかなといま思いつつあるのです。

本当に巨大なシステムができると、私はこれで脳の基本は完成したのではないかと思うけれども、残念ながら、巨大なシステムにするとうまく動かないものですから、まだまだ努力は要るのです。

そんなことをやっていてつくづく感じたのは、先ほどから申し上げているような単純な原則をうまく持たせたら、それで相互作用しているようなある程度大きなシステムは、みんな同じような原理で行くのではないかという気がしまして、ここから先は大風呂敷になってしまうのですけれども、人間関係の話とか、経済原理みたいな話とか、社会学にのっと

るような話とか、場合によると国と国のインタラクションとか、ああいうものも各エレメントがある程度うまい機能を持っている。その機能が集まれば集団としてもうまく動ける。その辺のメカニズムを調べるのが一番大事ではないかと思い出したのです。

今度は、そういうメカニズムを持っていたときに、さらにそれを放っておくとどのように解が動いていくかというのは多分ケイオティック・ビヘイビアでして、まさに合原先生の話のほうに移っていくと思うのですけれども、もう少し個のリレーションのあたりも研究すべきではないかと思っています。」

1.3　生体に学ぶ超構造工学（赤池教授）

本節では、「生体に学ぶ超構造工学」に関する東京工業大学生命理工学部の赤池教授の見解を紹介する。

1.3.1　第1回委員会におけるお話

（記録作成：MRI）

・生体の再組織化による人工臓器やバイオリアクターに関する研究を行なっている。

人間の肝臓には約2500億個の細胞があり、それらがネットワーク（パイプライン）で結ばれている。これらの細胞をばらして、足場の上で再構築する。今では肝細胞を自由に並べられるようになった。リソグラフィー技術を使って肝細胞をパターニングすることもできる。このような臓器工学の応用としては、①人工臓器と、②動物実験に代わるシミュレータがある。

・先ほどニューロンの話が出たが、機能の高さからみるとニューロン（高機能）と肝細胞（低機能）は対極的な関係にある。またニューロンにはヒエラルキーがあるが、肝細胞にはリーダーはない。しかし神経細胞と肝細胞とで共通する点も多い（例えばカルシウムによるオシレーションなど）。今では肝細胞も電極や半導体と同じように扱えるようになってきたから、基板上に1000万個の細胞を並べる、といったデバイスも夢ではない。

・最近は細胞と人間との類似性に注目している。「生体に学び生体を超える」ということで、建築設計や組織管理、人間関係などの分野でも生体に学ぶべき点が多いと考えている。

1.3.2　第3回委員会におけるお話

（速記録より抜粋）

（赤池）

お配りした資料は何人かの方にはかなり近いものをお渡ししてあったというわけで、有望テーマのところにバイオミメティクスと書いたのは一応私の提案だと思われるのですが、大分矮小化されているような気がします。単に生体を曲げてロートをつくるとかその程度ではちょっと……。むしろ社会科学だとか政治・経済まで全部ひっくるめてインターディシプリナリーなところがあるのではないかと言っているわけです。

今日配ったほうの各ページの左上のほうにタイトルが書いてありますが、私は材料の出身だったので、「生体に学び生体を越える材料システム工学」と書きましたけれども、情報工学、組織工学、管理工学、あるいは経営学、軍事論というような、生体の持っているメカニズムはまだわからないところもたくさんあるのですが、そういうことを知りながら、場合によればさらに生体を越えるものを、生体相手の領域の人は違うものでつくれないかもしれませんが、生体材料にこだわらない人は、思い切って、金属でつくったり、半導体でつくったり、人間社会の位置づけで位置づけてもいいわけで、それはケース・バイ・ケースで考えていただいたらいいのですが、とにかく生体を越える新しい体系を目指すためにはいろいろな人が集まってくるほうがいいというわけです。

それから、後ろのほうにも「生体プロセスに学ぶプロセスエンジニアリング」という書き方で、やや化学工学的な要素を書いてありますし、「生体防御反応システムに学ぶ危機管理」だとか、そういう意味でも生体が持っているいろいろな外敵・ノイズに対して身を守るシステムがありますから、そういうものを薬の開発に使うとか人工臓器の開発に使うのはもちろんのこと、うんと大胆に、会社のセルフガードシステムとか、国のガードシステムとか、エコノミーの変動に対する修復システムとか、そういうのに使っていただくこともできる。要は、こんなおもしろい現象が生体の中では行われているのかというのをヒントに、いろいろな立場で自分のシステムを構築していく。

一方では、生体のほうもただ学ぶ対象として明らかにするだけではなくて、こういう生体は進化の過程でかなり合理的な形で確立されてきたというか、そういうものを持ったものだけが生き残ってきたという点ではリーズナブルなメカニズムなのですが、それでも、何でこんなややこしい方法を持ったのかとか、ここまで複雑にしたら損しているのではないかという側面もありますから、生体屋さんは生体屋さんで生体のメカニズムを明らかにしながらその限界を明らかにしていたりする。そうすると、うっかりするとブラックボックスの部分は、人間が考えて、もっと合理的な方法があるのではないかと思ったら、その合理的な方法どおりに生体は動いていたということがわかるということにもつながるので、ライフサイエンスをやっている人たちが持ち出しばかりで、テイクするところがないというものでもないと思うのです。

それをヒントに、新しい作動原理やメカニズム発見のための手がかりにするというような意味でも、軍事理論のほうが先走っている場合もあるかもしれないし、エコノミーのほうが先走ってくれている部分もやっているうちには出てくる可能性があります。もしかしたら生体もそういうもので動いていたほうがいいのではないかと思いながら、そういう作業仮説で生体をもう一遍見直してみるとか解析してみるということでやれば、お互いに研究を推進する、発展させるという意味でも、相互作用系というのがいいだろう。

一番最初のほうには、セルフアセンブリーシステムで、これは遺伝子が決めていると言われて、発生学上きれいなすばらしい構造と機能を維持するための、発現するための構造や分子のオーダーから、オルガネラ、細胞、さらにはそれの超構造レベルでもよくできているわけです。これは一応遺伝子が決めていると言われているのですが、再構成はできない。一旦ばらしてしまうと、もちろん部品をばらして細胞をまた生かしたということはまだないわけです。セルフアセンブリーというところに何が欠けていて、何が必要なのかということも、部品から再び生き物をつくるという遠大なテーマに向かってやっていきますと、もしかすると思わぬインパクタブルな波及効果がいろいろな分野にあるという気もするのです。

そういうセルフアセンブリーのコンポーネントというか、部品を細胞レベルで見るか、分子レベルで見るか、尺度が違えばいろいろな見方がありますが、それぞれ部品を人間に例えて、それのアセンブリーシステムが社会であるとか、理想的なエコノミーの体制、政治体制、人間社会のあり方を追求するというようなところにまで行くかもしれないということを前回しゃべる機会があったときには申し上げたわけです。ですから、そういう目で見てほしい。

時間がありませんので、全部は網羅しませんが、2ページ目の右端に最近手に入れた図があるのです。薬を投与するという問題で整理した図があります。もともとは外国の人が

かいた図かもしれませんが、京大の薬学部の教授の著書から引用させていただいたものがあります。

左のほうに壁がかいてあって、左側が外の環境です。外から薬をどういう方法で投与するか。中のパイプライン、血管と臓器の相関図が書いてあるわけで、どのようにアクセスするとどのような運命を通っていくのかというフローチャートが書いてあります。　一方では、ここには書いてありませんが、そういう異物に対して生体は防御するという立場もあります。薬を投与するのを読みかえて、何か異物に触れさせると読みかえてもいいのです。ウイルスが、傷口を介して、あるいは消化器を介して口から入るとか、あるいは膀胱とかお尻から入る場合もあります。そういうのに対してそれぞれガードシステムがあるのです。それを見直してみて、それぞれに応じたリーズナブルな解剖学的な構築もしています。そうすると、セルフガードシステムも薬の投与で書いてある図を、もちろん免疫屋さんは免疫という立場で書くこともあるのですが、そういうふうに見るだけでも随分いろいろなヒントを与えるのです。

フローチャートを見ていただくと、いろいろな立場でほかの分野の人にも受けとめてもらえるのではないか。そういう点では総合的に解剖学まで考慮して書き直してみたいという気もするわけで、こんな作業もそういうプロジェクトの中では一つのテーマになるだろうという気がしています。

総括すると、バイオミメティクスという言い方もありますけれども、ある意味では生体に学ぶ超構造工学の提唱とか、それぐらいに言ったほうがありきたりのテーマでない感じがする。超構造というのは要素単位になっているような分子であったり細胞であるよりももう少し高次のアセンブリーがどうやってできていくのか、それを人と見立ててももちろんいいし、人の中の部品である蛋白と見てもいいし、細胞と見てもいいのですが、そういう生体に学び生体を越える超構造工学という中には、例えば、田中先生のああいう領域も入るし、先ほどの岡部先生や、場合によればそれを支配するダイナミックスというのはある意味ではスタティックなとらえ方ではなくてダイナミックなとらえ方が必要だという意味ではカオスの工学も接点は当然出てくる。

いままでの体系は、構造と機能の相関というのは分子のレベルでは大体整理されているのです。こういう分子の構造があるとこういう機能が出るとか、こういう半導体の結晶構造があればこういう機能になる。それをもう一次元上でアセンブルしたときの超構造機能相関というのはまだあまりはっきりしていないところが多い。そういうのを社会科学現象から自然科学現象、全部にまで見てみるというと、ある意味では先生方は同じことを違った角度から言っているという面も強いかと思います。

（以下の4つの図を次頁以降に掲載）

資料II－2　生体に学び生体を越える材料システム工学・情報工学・組織工学・管理工学への期待

資料II－3　生体プロセスに学ぶプロセスエンジニアリング

資料II－4　生体防御反応システムに学ぶインテリジェントな危機管理

資料II－5　生体システムと臓器間の役割分担に学ぶ組織論

出所）赤池先生資料

東京工業大学　生命理工学部　生体分子工学科　赤池敏宏

No. 1

①

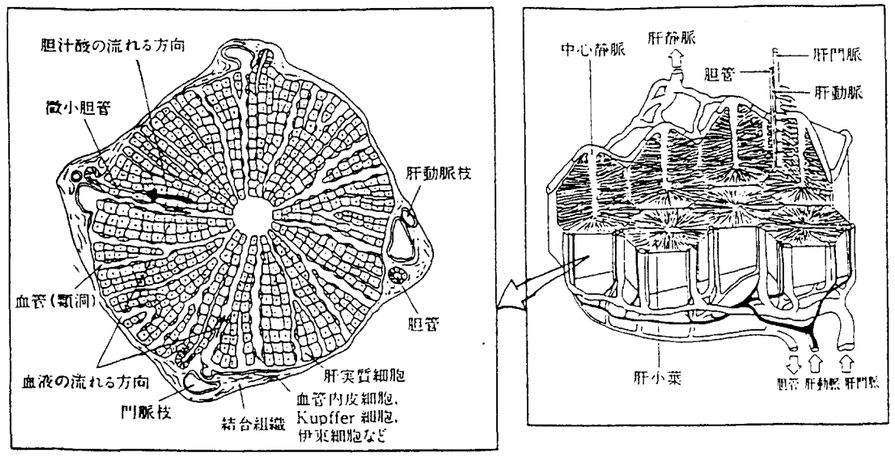


図3　肝臓（肝小葉）の二次元・三次元組織構造

②

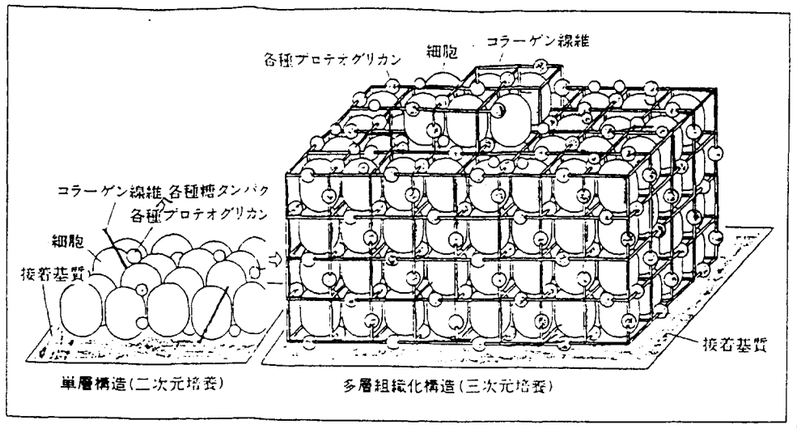


図4　生体組織化に学ぶ組織化機能材料の設計
（生体外における組織構造の再構築）

③

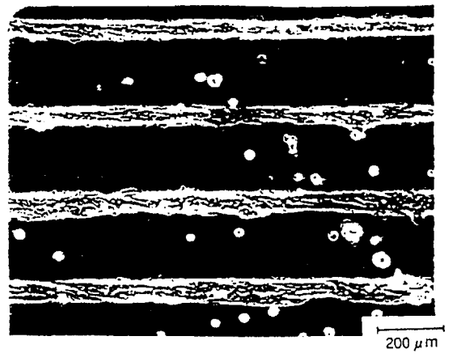


図5　リソグラフィー技術を利用した肝細胞の二次元パターニング

④

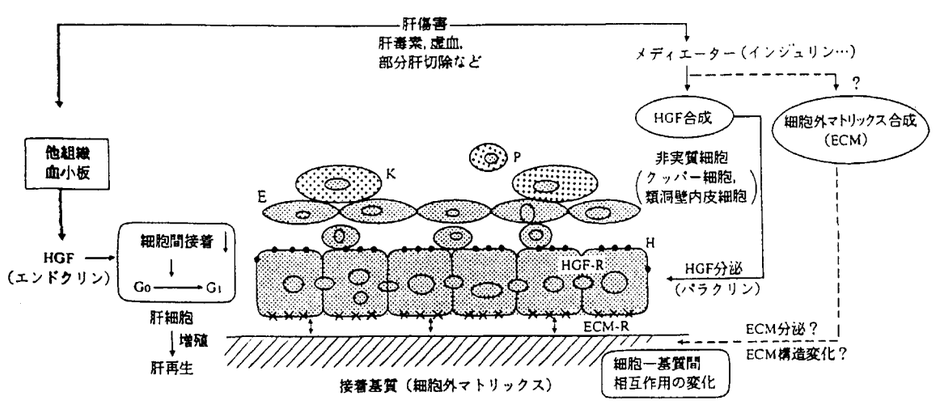


図5　肝再生における細胞−細胞間および細胞−基質間コミュニケーションの役割
P：ピット細胞，K：クッパー細胞，E：血管内皮細胞，H：肝実質細胞

⑤

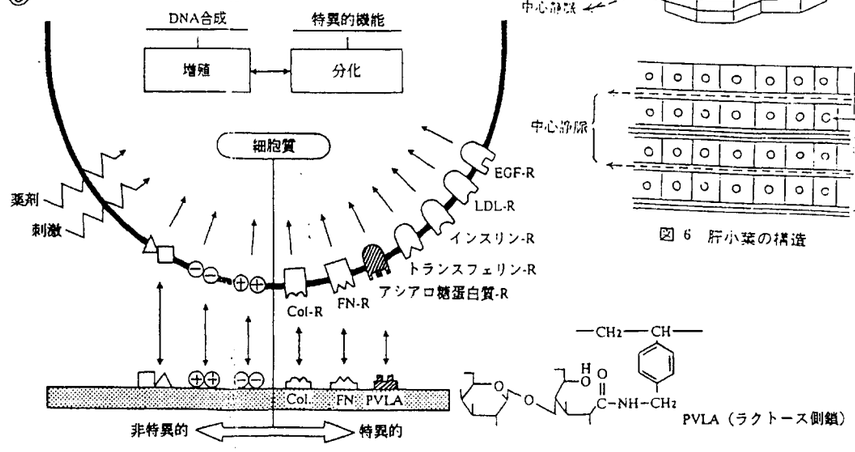


図3　肝細胞表面のレセプターとその機能
EGF：上皮増殖因子，LDL：低密度リポ蛋白質，Col：コラーゲン，FN：フィブロネクチン，PVLA：スチレン誘導体（ラクトース側鎖）ポリマー，-R：レセプター

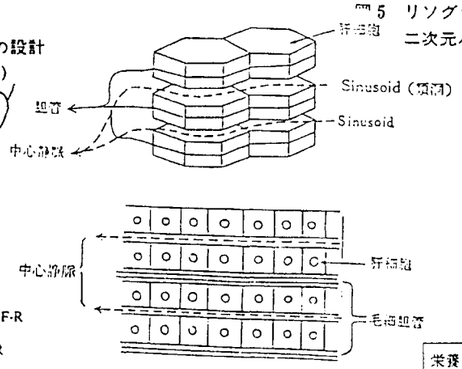


図6　肝小葉の構造

⑥

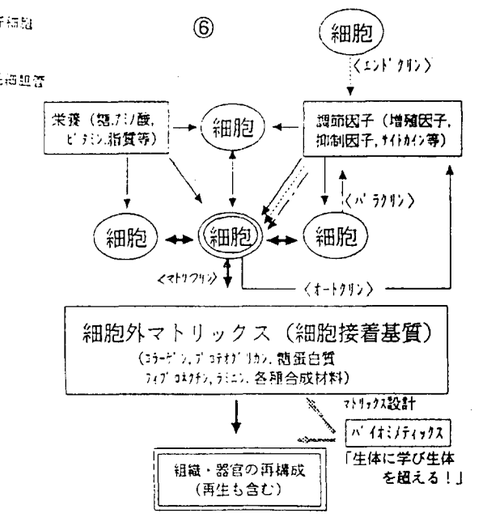
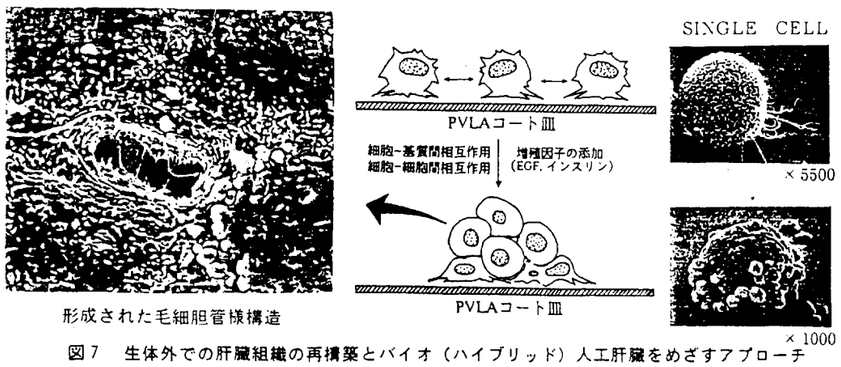


図8　細胞−調節因子−細胞外マトリックス間の三元的相互作用の制御による組織・器官の再構成（再生）

⑦



形成された毛細胆管様構造

図7　生体外での肝臓組織の再構築とバイオ（ハイブリッド）人工肝臓をめざすアプローチ

⑧

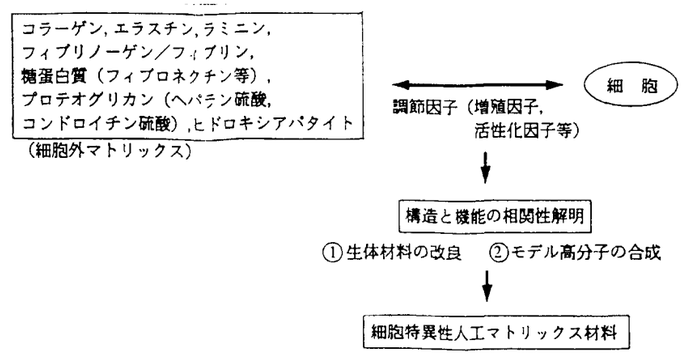
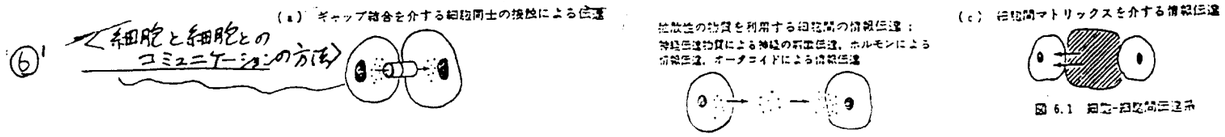


図9　生体の細胞外マトリックスに学びこれを越える細胞特異性人工マトリックス材料の設計・開発の指針

①細胞−細胞間相互作用
②細胞−マトリックス間相互作用
③細胞−細胞増殖因子（調節・活性因子を含む）間相互作用

組織工学・社会システム工学的方法論へのヒント

⑥'



東京工業大学 生命理工
奥池敏彦

No. 2

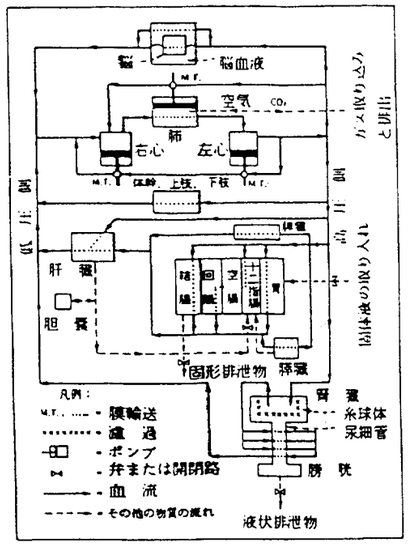


図 6.1 人体のプロセス流れ図。

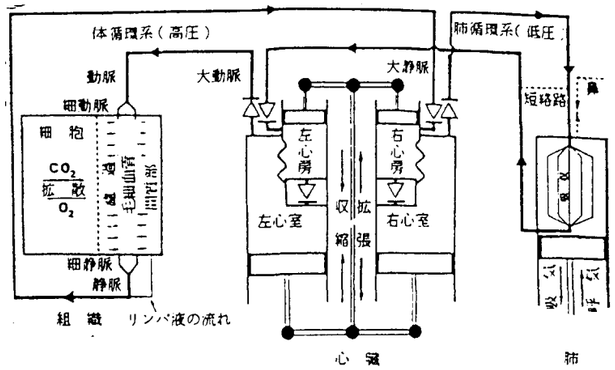
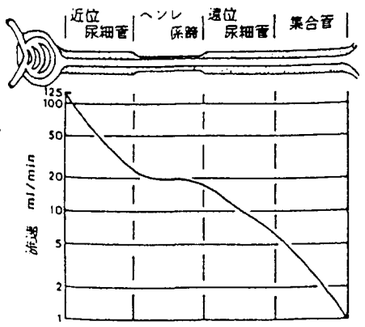
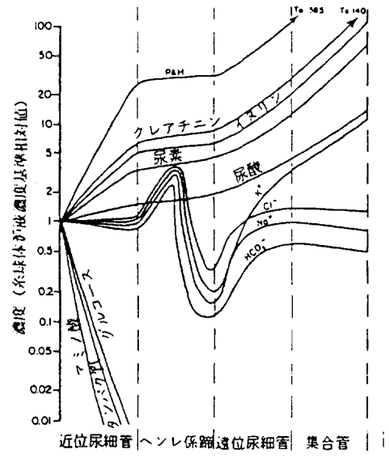


図 6.2 心臓性呼吸系の簡略化流れ図。 [Hills (1971).]



尿細管系統の各区間の毎分流速。[Guyton (1971)



尿細管系における各点での各物質濃度の平均的変化 [Guyton

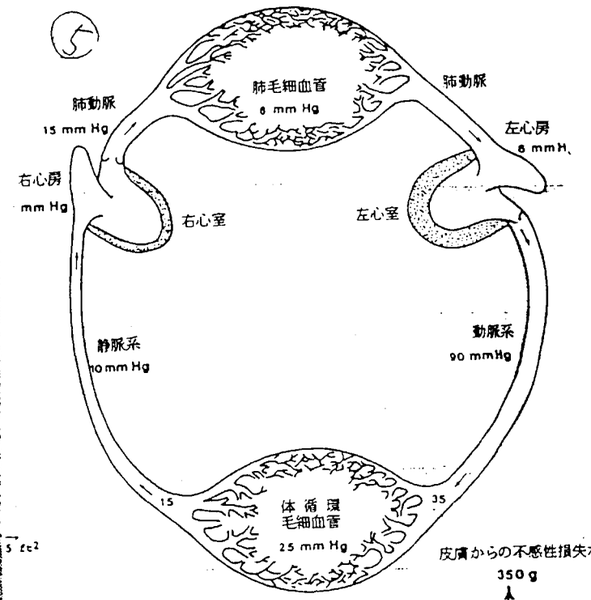


図 2.7 人の循環系

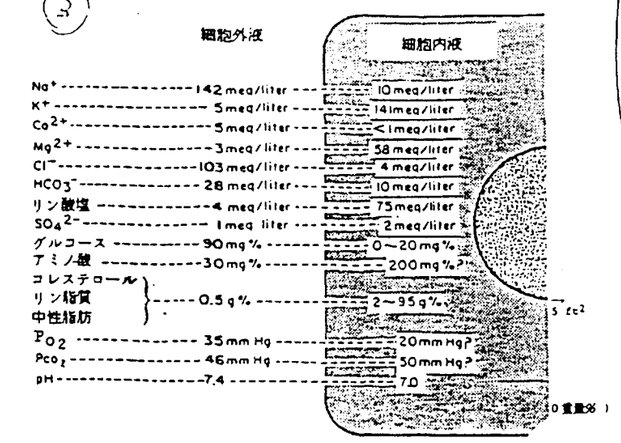


図 7.1 細胞外液および細胞内液の化学組成

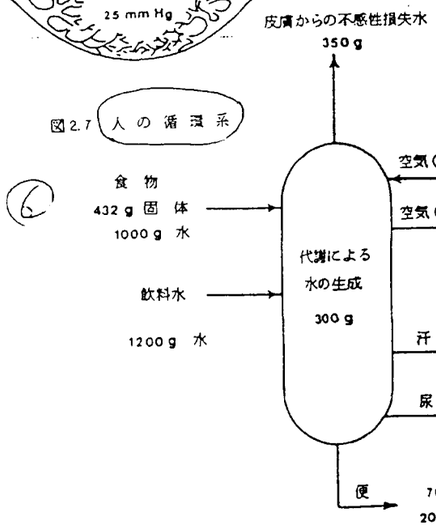
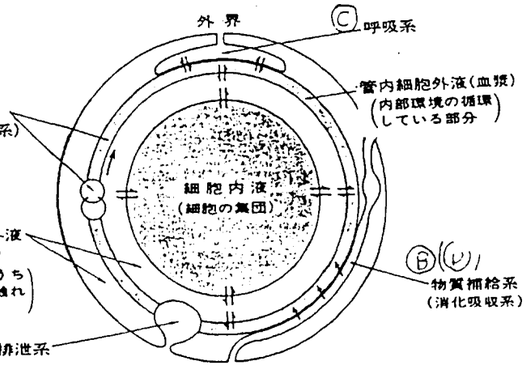


図 2.9 (休息時の平均的なヒトの定常物質収支（1日あたり）。汗の固体含有量（2 g未満）は無視。物質収支の一般式は，$\Sigma m_{in} - \Sigma m_{out} = dm_{tot}/dt$（定常状態では0）となり，$m$は質量流速，$m_{tot}$は時間$t$における体の全質量。物質収支に現れる各項の値としては一般に妥当な時間間隔について平均化した値を用いればよい。



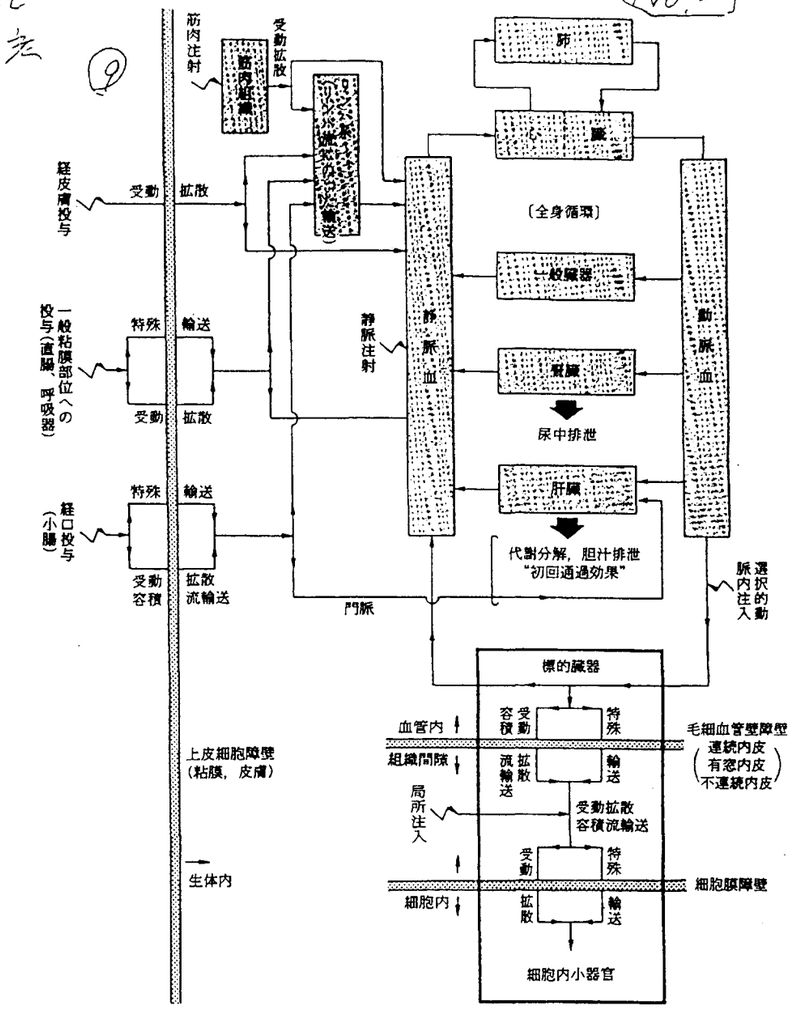


図 1 各種投与経路から投与された薬物の生体内移行過程とその機構

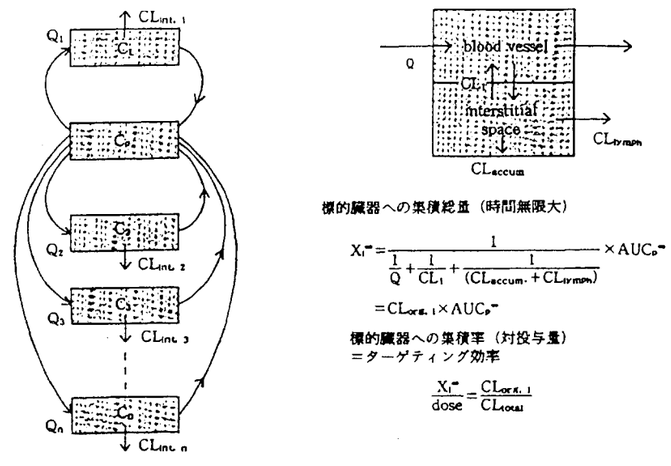


図 2 ターゲティング型 DDS のファーマコキネティクス評価

生体防御反応システムに学ぶ危機管理

東京工業大学 総理工 赤池敏宏

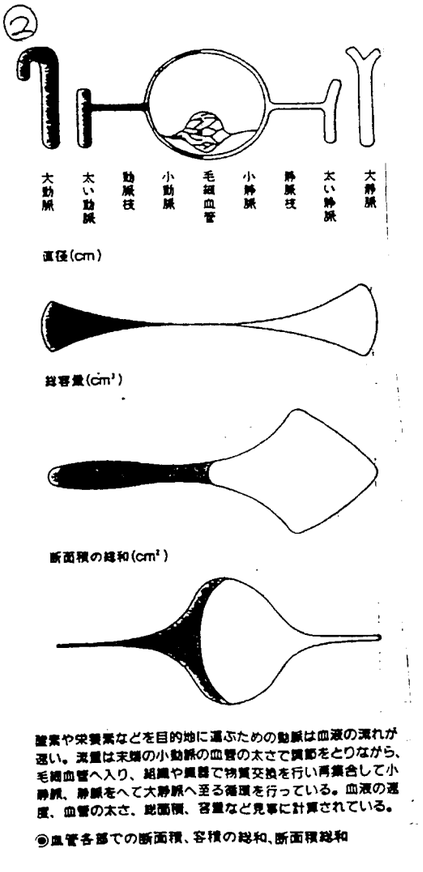
No.3

①

●血管
血管内腔面積 6300m²
血管総延長キロ数 90000km
毛細血管 直径8ミクロン 総数100億本
内皮細胞のすきま 100～200Å(オングストローム)

●血液
赤血球 密度450～500万/mm³
直径7.7ミクロン 厚さ2ミクロン
数 25兆個
寿命 120日
(毎秒300万個の再生)
血小板 密度 20～50万/mm³
大きさ 直径2～3ミクロン
厚さ 1ミクロン
数 1兆個以上
(1mm³中に10～40万個)
寿命 10～14日
(1日2000億個作られる)
白血球 密度 5000～9000/mm³
大きさ
好中球 直径14ミクロン
リンパ球 10～12ミクロン
単球 16～17ミクロン
好酸球 15ミクロン
好塩基球は不揃い
数 赤血球の700分の1
寿命 3～5日
出血致死量は2分の1
(25%で危険、50%で死亡)

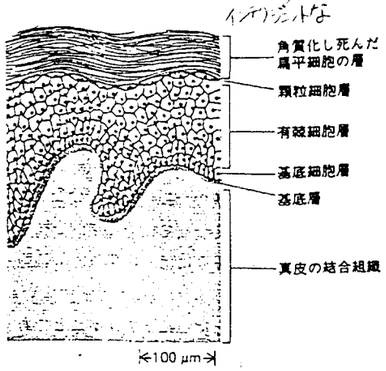
②



酸素や栄養素などを目的地に運ぶための動脈は血液の流れが速い。流量は末端の小動脈の血管の太さで調節をとりながら、毛細血管へ入り、組織や臓器で物質交換を行い再集合して小静脈、静脈をへて大静脈へ至る循環を行っている。血液の速度、血管の太さ、総面積、容量など見事に計算されている。

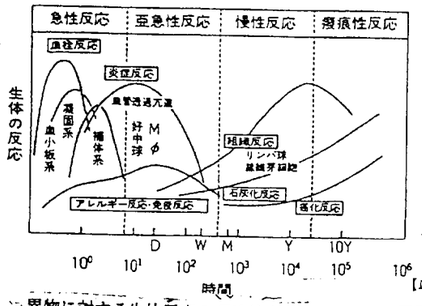
◎血管各部での断面積、容積の総和、断面積総和

③



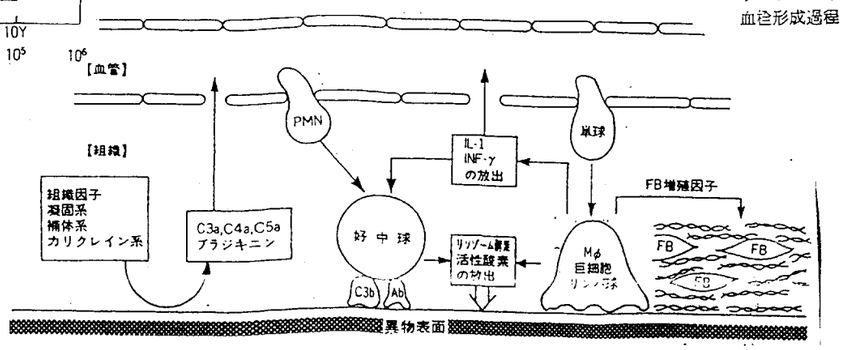
<皮膚組織の細胞構築>

④



異物に対する生体反応の経時的変化

⑤



炎症の原因	起炎物質の放出	炎症初期反応	単球・リンパ球遊走	組織修復・肉芽形成
・熱, 機械的刺激 ・代謝産物 ・微生物, ウイルス ・異物	・凝固系因子 ・補体系因子 (C3a,C4a,C5a) ・ブラジキニン	・血管透過亢進 ・好中球の反応 リソゾーム酵素放出 活性酸素攻撃	・貪食作用 ・巨細胞の出現 ・IL-1, TNFの放出	・FBの遊走, 増殖 ・コラーゲン, ムコ多糖合成

図3 炎症反応の機序

⑥

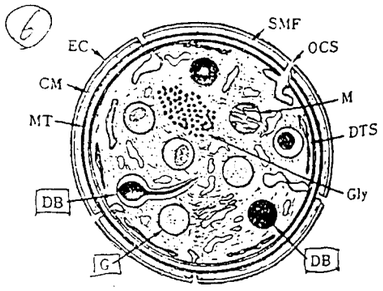


図1 血小板切片像(水平断像)

EC : exterior coat (外衣), CM : cell membrane (細胞膜), SMF : submembranous filaments (膜下小糸), OCS : open canalicular system (開放小管系), MT : microtubules (微小管), DTS : dense tubular system(暗調小管系), DB : dense granules (濃染顆粒), G : granules (顆粒) (α-granules etc., アルファ顆粒など), M : mitochondria (糸粒体), Gly : Glycogen (グリコーゲン)
[White, J. G., et al. : "Platelets——A Multidisciplinary Approach", ed. by Gioranni, D. G., et al., Raven (1978), p. 17 から引用][73]

⑦

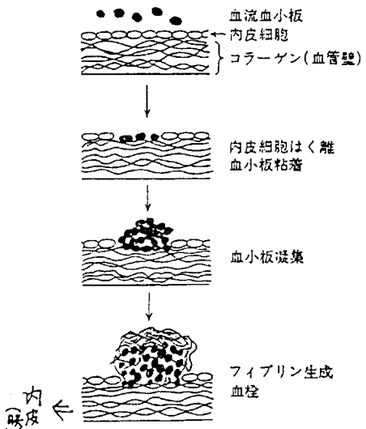


図1 血管内皮細胞剥離により露出したコラーゲンフィブリルとの反応による血栓形成過程

⑧

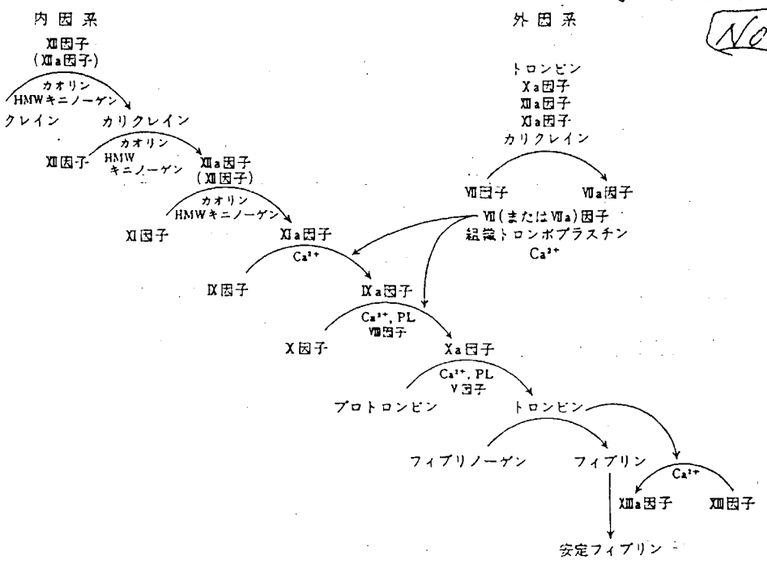


図1 血液凝固反応の機構

⑨

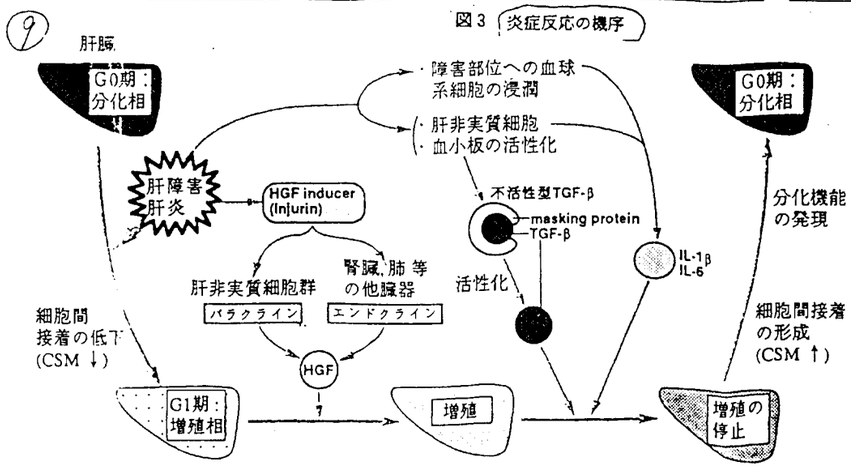


図2 肝再生の開始と停止の機構

⑩

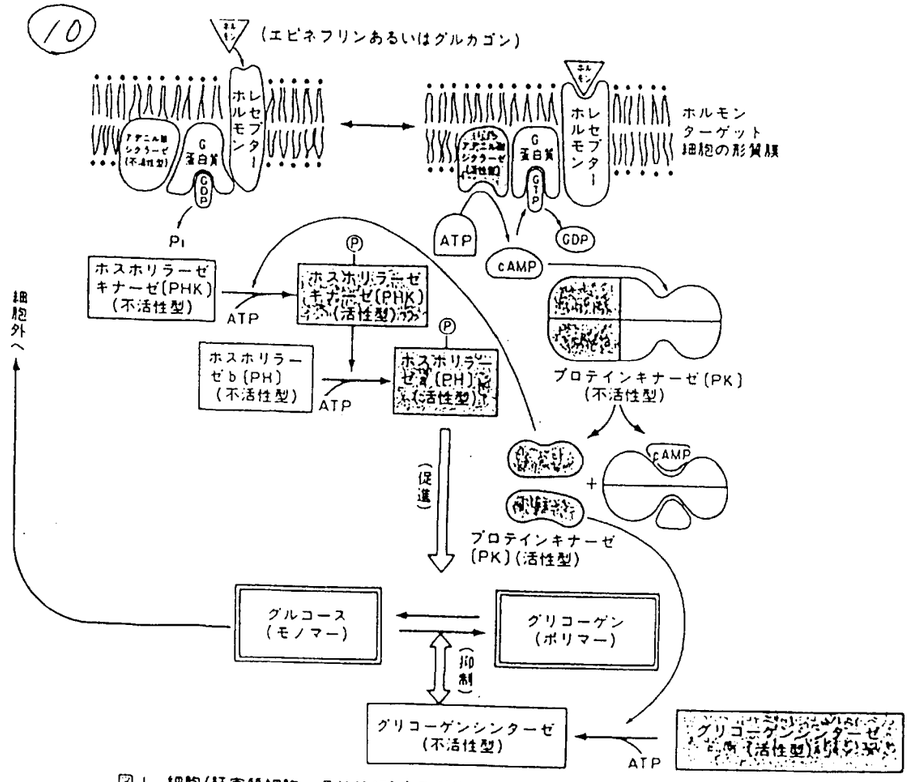
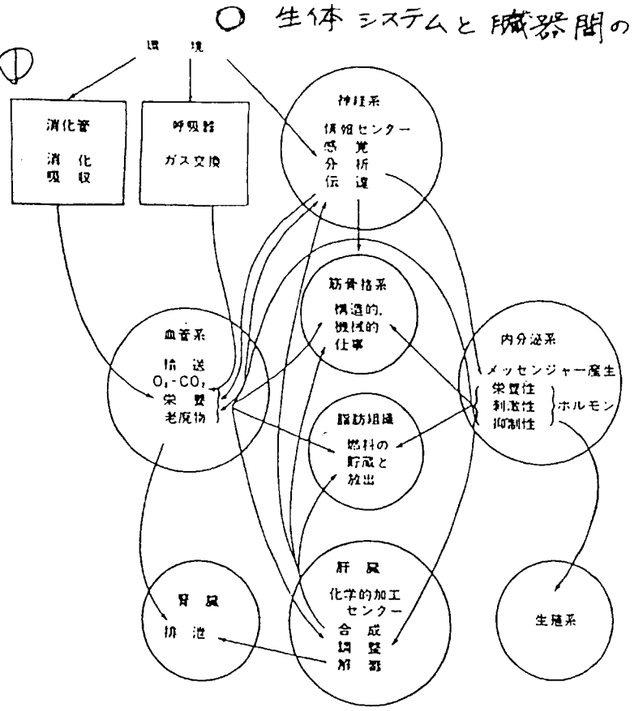


図1 細胞(肝実質細胞・骨格筋細胞)のグリコーゲン代謝にみられるバイオ素子機能
バイオ素子研究の目標の一つは、ここにみられるような高性能のセンサー、情報変換、増幅、エネルギー産生の機能を追求することにもおかれている。

○ 生体システムと臓器間の役割分担に学ぶ組織論

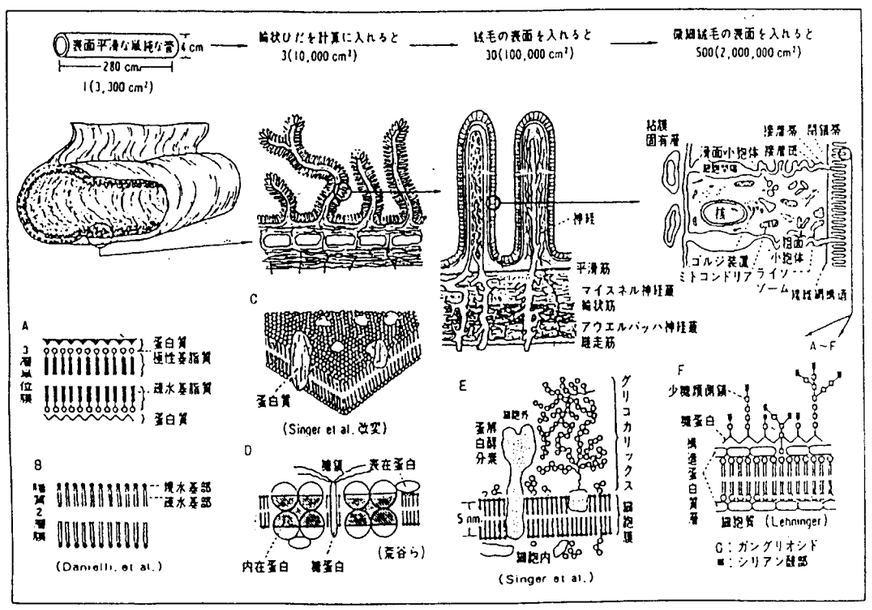
東京慈恵会医大 赤池 (特一)

①



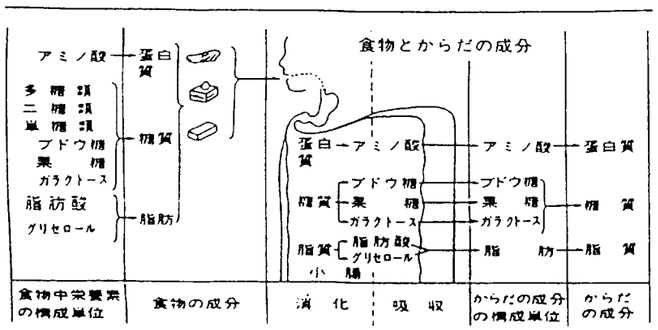
生体の代謝における神経系，内分泌系，血管系の統合作用

②



小腸壁の構造と粘膜細胞膜の構造

③



④

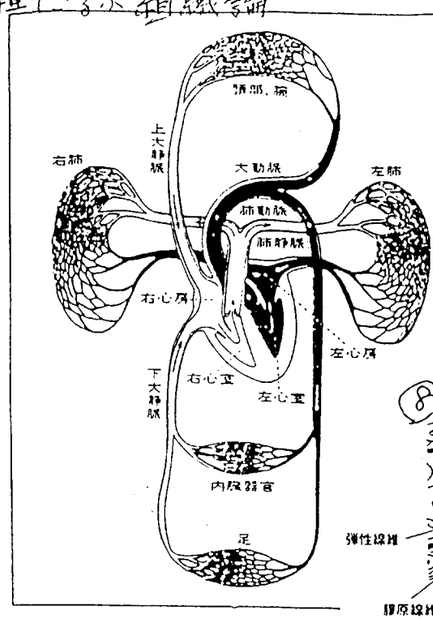
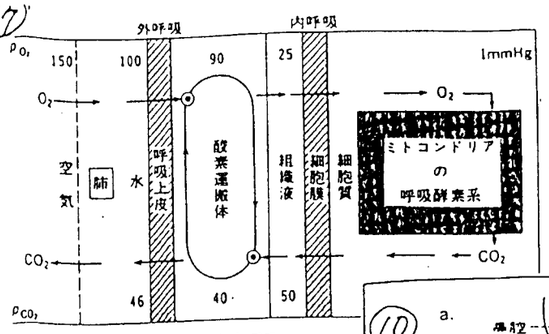


図 3-1 循環のあらまし

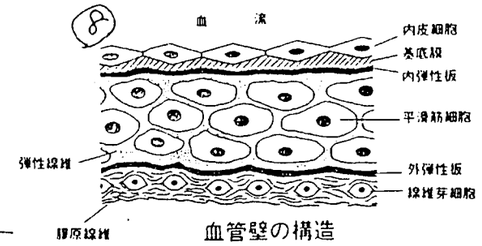
⑦



外呼吸と内呼吸

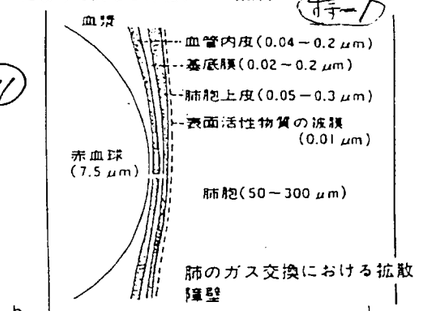
呼吸器官におけるガス交換（外呼吸）は，細胞呼吸（内呼吸）の準備であり，後始末である。ガスの輸送は血液の働きによる。血液中の酸素運搬体は O_2 分圧の高い条件で O_2 と結合し，低い条件でこれを放すが，また，その O_2 親和性は pH によって異なる特性(BOHR効果)を示す色素の一種である。

⑧



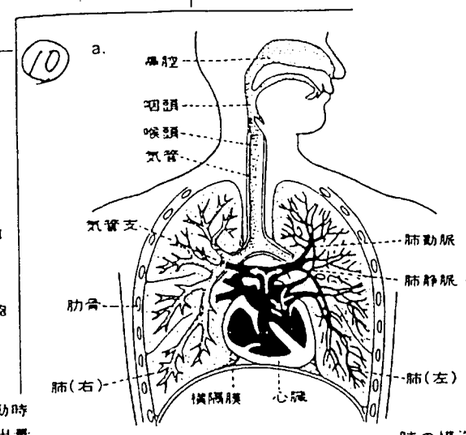
血管壁の構造

⑪



肺のガス交換における拡散障壁

⑩



肺の構造(a)とガス交換の機能的単位(b)

⑤

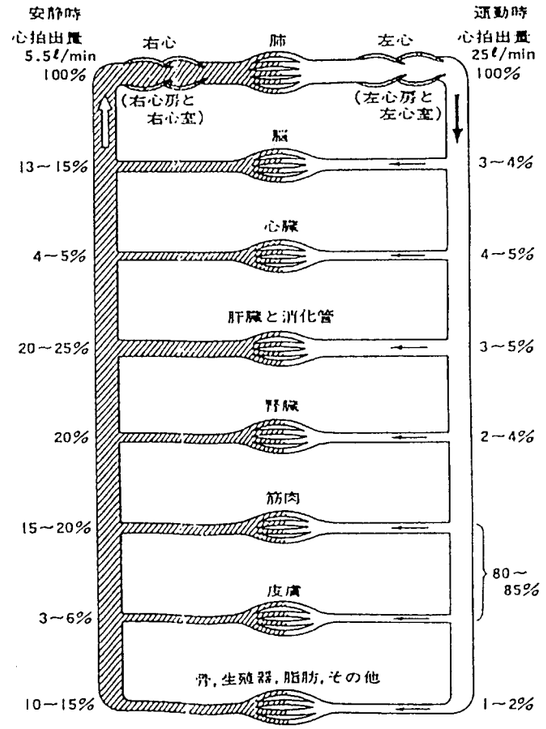
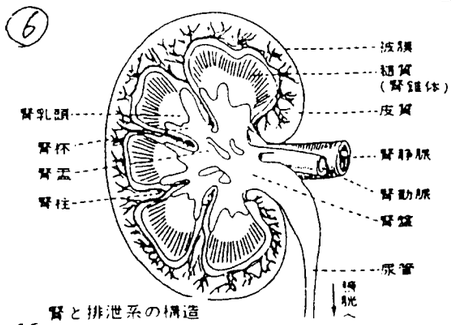


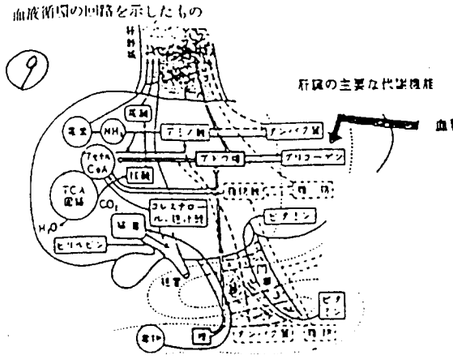
図1 血液循環の回路を示したもの

⑥



腎と排泄系の構造

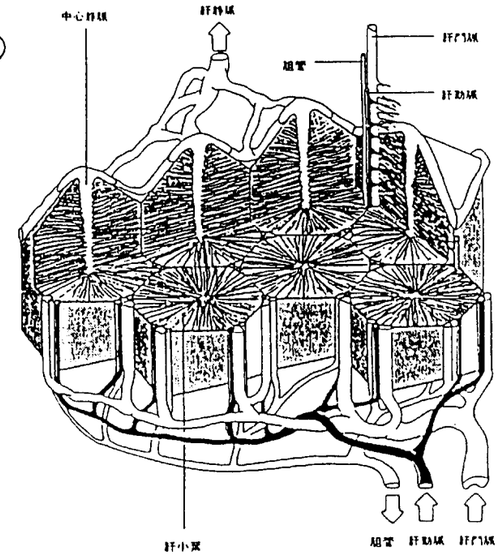
⑨



肝臓の主要な代謝機能

血糖量の調節のしくみ

⑫



肝小葉

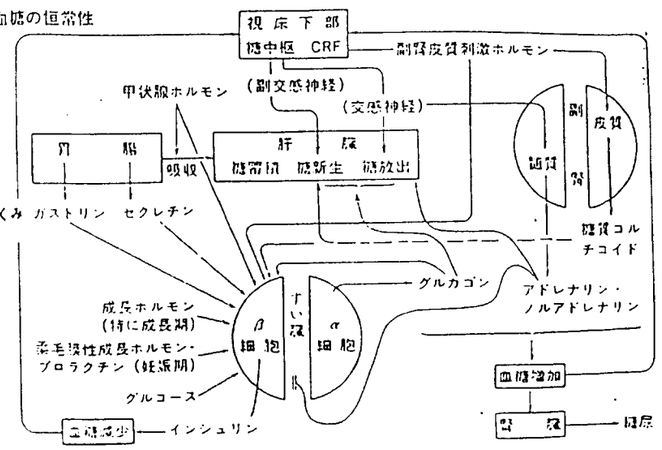
この模式図は肝小葉，血管系および胆管系の大まかな配列を示す。肝門脈と肝動脈は肝臓中で分枝を繰り返し，この枝は六角形の肝小葉の隅にある門脈索を通る。両血管系から供給される血液は肝細胞板の間にある類洞を経て中心動脈と流入する。中心静脈は合して肝静脈となり下大静脈へ流入する。

これに対し，胆汁は毛細胆管 bile canaliculus の微細な網工中へ分泌される。この網工は肝細胞板中にはりめぐらされている。毛細胆管はこの模式図中に示すには細すぎる。胆細管は集合管へ合する。この集合管は門脈索中にあるが二つの血流とは逆方向に流れる。胆管系はついで総胆管となり十二指腸へ流入する。

病理学的変化の場合には，肝臓を門脈小葉 portal lobule へと細区分することが有用である。門脈小葉は門脈系とこれに接する三つの肝小葉の部分でつくる概念である。門脈小葉の境界は周囲の中心静脈に合する線をひくことができる。

⑬

血糖の恒常性



1.4 アトムテクノロジー（田中総合研究官）

本節では、アトムテクノロジー（プロジェクト）に関する産業技術融合領域研究所の田中総合研究官の見解を紹介する。

1.4.1 第3回委員会におけるお話

（速記録より抜粋）

（田中）　お手元の“Background" と書いた資料は、融合研のセンタープログラムであるアトムテクノロジー・プロジェクトのバックグラウンドと、どういうニーズがあるかということをざっと書いたものです。　簡単に申し上げますと、エレクトロニクスの、デバイスであれ、マテリアルズであれ、
共通的に必要な一つの技術、将来必要になるであろう技術、それは原子・分子を単一にコントロールして扱うことではなかろうかと思います。例えば、素子をつくる場合ですと、大きなものをリソグラフィといってマクロを削っていってミクロに持っていくという話があるわけですが、そういうやり方ですと、今世末ぐらいには必ず限界が来るであろうというのは見えているわけです。ですから、発想を変えて一気にミクロの極限、アトムに遡って、アトムから始めてそれを積み上げていく、ミクロからマクロをつくっていくという発想に基づきましょうというわけです。そういうニーズは、デバイスであれ、マテリアルズであれ、必ずある。

次の“Common Needs”と書いてあるところを見ますと、もしそういうミクロのところからそういうものができたら、多分新たに出てくるであろうサイエンスの領域になるであろう。そういうものを葛藤させながらやっていく必要があるだろう。つまり、エレクトロニクスに限らず、ケミストリー、バイオテクノロジー、ジェネティック・エンジニアリングについても、形は変わっていても、共通のニーズとしてはあるだろうというわけです。だからこそ集中共同研究の大きな意味がある。異分野の人間が四六時中一緒にいて、リアルタイムでディスカッションを交わしながらこの分野を加速していくというシチュエーションができるというわけです。

次のページ、アトムテクノロジーのことになりますけれども、これが昨年やっとスタートしたわけです。形の上では大型プロジェクトという制度の最後のプロジェクトになるわけです。しかしながら、その精神とか運営方法はすべてのＭＩＴＩの指定研究の新しい衣がえが行われたわけですけれども、産業科学技術推進制度というようになりました。そこでは、いままでのキャッチアップの時代と全然違う基礎シフトについて、それを強く意識した新しい指定研究制度をやっていこうという形で衣がえしたわけですけれども、それの最初のモデルだろうと思います。

そこにお金が書いてあります。10年間で250億円。もちろん10数％は人件費です。性格は、これは長期基礎研究であるということ。それから、共通基盤技術として意識する。集中共同研究を通じて進めていくという特徴を持っています。

次のページに、これを展開していく新しい受け皿になるラボが、工技院のラボの再組織の中で生まれた“NEW LAB"と書いてあるところです。左側が旧ラボです。右側がリオーガナイゼーションされた結果のラボになっているわけですけれども、四つの研究所が二つの研究所にまとめられると同時に全く新しいラボが生まれた。それがＮＡＩＲ（融合研）

で、ここで展開していこうというわけです。

次のページを見ていただきますと、融合研は今年の１月１日にできまして、大越先生を所長に迎えたわけです。ＮＡＩＲの中では三つグループがあります。一つはアトムテクノロジーです。これはナショナルＲ＆Ｄプログラムで、産官学共同でやっていくという巨大なプロジェクトです。それから、クラスター・サイエンスとバイオニック・デザインがあります。これは区別すればインハウス・リサーチというわけで、従来の工技院内部の方が集まってやるグループです。これは将来の大きなプロジェクトをねらいたいというスタンスは持っているわけです。ただ、予算は恐らく一桁以上違うことになります。

次に、アトムテクノロジーについてどういう形で皆さんに来ていただくかという話になるわけです。ＮＡＩＲとＡＴＰというのが設立されました。次のページです。ＡＴＰというのは Angstrom Technology Partnershipです。パートナーシップというのは技術研究組合です。これが今年の２月16日に設立されました。これはアトムテクノロジーを遂行していくための技術研究組合、コンソーシアムみたいなものです。30社によって形成されています。その中の６社は外資系の企業が入っています。

次のページを見ていただきますと、どうやってこのプロジェクトを遂行するかが書いてあります。Research Body for Atom Technology と書いてありますが、これはアトムテクノロジーのための研究体という概念をつくります。それはＮＡＩＲとＡＴＰが共同研究契約を結びます。この共同研究契約の下に両者がイコール・パートナーシップが持てるようにそういう精神をお互いにうたい上げて共同研究契約を結びます。これはほぼひな形ができまして、間もなく契約が結ばれます。その下に研究体という形で、皆さん精神的に同じバッジをつけて研究をやっていこうというわけです。

国立研究所はＮＡＩＲに参集する。企業から来る場合にはＡＴＰという組合に来る。大学から参加する場合には両方の道があります。そういう形で二つの大学から融合研に来ていますし、正確に言うと三つぐらいになります。それから、五つの国立研究所からＮＡＩＲに来ています。ＡＴＰのほうは30社です。これが一緒になりましてリサーチ・グループを形成することになっています。　そのリサーチ・グループはいま形成されていますが、次のページを見ていただきますと

、これはアトムテクノロジーの最初の６年間のリサーチ・エリアが書いてあります。これは省略してもいいのですが、アトム・モレキュールを単一に観察させる技術。それは固体表面上、あるいは真空の３次元空間中でそれをやったり、柔らかいモレキュールあるいはバイオマテリアルズの中のものを見る。あるいはそれを実験だけではなくて、理論実験機械という形で攻めていく。理論と実験のドッキングをして考えていく。そういう四つのエリアが決められておりまして、これを七つのリサーチ・グループでやっていく。ＲＢＡＴというのは Research Body for Atom Technologyで、七つですけれども、実際にはいま八つです。これはもう公にしても構わないと思います。

次は人事です。人の構成ですが、これも融合研の中でやるプロジェクトですけれども、リーダーは産の人を選ぶようにしたわけです。所長は学から、プロジェクトリーダーは産から、国立研究所からは出ない、こういうことをやったわけです。リーダーは大変すばらしい人に来ていただいて、元日立基礎研の初代所長の丸山さんです。実は20年来の私の友達です。同じエリアのアモルファス半導体をやっていまして、私よりも大分年上ですが、すばらしい人です。サブリーダーは東大物性研の寺倉教授です。彼は融合研の併任になっ

ておりますが、来年の３月から、物性研の教授をやめまして、融合研の専任になります。彼は理論のヘッドになっております。私は実験のほうのサブリーダーで、そのヘッドになります。　グループリーダーについては、ＮＡＩＲから徳本さん、ＡＴＰは企業側で、市川さんは日立中研、尾関さんは富士通、岡田さんはオリンパス光学です。ＤＮＡの直読ができないかという話です。金山さんは融合研から行きます。彼はなかなかおもしろいアイデアを出しています。つまり、ＳＴＭはどこでもやっているわけで、我々はそれを中心にしたプロジェクトにはしたくない。しかし、それは避けて通ることはできないから、それはもちろん戦いながら新しいアイデアを出していくということです。私はちょっと違ったものをやります。寺倉さんは理論のほうを全部受け持ちます。先ほど８グループと言いましたけれども、８人目は分子操作です。分子のほうでどうしても有能な人が欲しいということで、これはほぼ決まって、いま話はどんどん進んでいますけれども、東大理物の十倉さんにグループを組んでもらうことになりました。彼はまだ若くて体力があるから、東大に本籍を置いておいていただいて、併任で来ていただきます。どういう人間が欲しいかということについても、我々はいま彼をバックアップする体制をとっています。現在のところ、約45名が決まっています。

内容のことについて、あと３枚ありますけれども、こういう中で何を重視していくか。

これは私の個人的な考えですが、大きなプロジェクトでいろいろなグループがいるわけですから、それを横糸でつなぐ一つの思想がどうしても欲しい。そういうディスカッションを仕掛けるために少しここに用意したところで、内部的には明後日から始まるのです。ＳＰＭ技術というのは Scanning Prove Microscopyというわけで、これは誰でも考えることです。企業のほうはみんなこれに集まっています。

しかし、これだけではない。実はそういう原子・分子プロセスをその場で、しかもダイナミックに見ていくことが重要です。

三つ目は、ミクロからマクロに持っていくことになりますと、原子で一つ一つ針で持っていって積み上げるわけにいかないわけで、生体の中でよく行われるセルフ・アセンブリーといったものを文字の世界にどうしても持ち込む必要があるわけです。それはどうやっていいかというのは、確たるものをいま持っているわけではないですけれども、これは絶対に重要です。これをどのように実現していくかということを考える。

さらに四つ目は第一原理計算。つまり、経験的パラメーターを使わないで第一原理から計算していく。これはいま実験屋として無視できない強力な結果を出しつつあります。計算機の演算能力がどんどん上がっていきますから、ますますこれは無視できない。ですから、実験と理論のドッキングはどうしても必要になります。

資料Ⅱ－6　アトムテクノロジー・プロジェクトの概要

（次頁以降）

出所）田中先生資料

The project "ATOM TECHNOLOGY" for the Coming Century

Kazunobu TANAKA

National Institute for
Advanced Interdisciplinary Research

- Background

  Needs for Nanotechnology
  Nanoscience

- The New Project entitled
  Ultimate Manipulation of Atoms and
  Molecules (Atom Technology)

  Organization - Implementation
  Research areas

- Scope

Background

- Electronic devices

  Post giga-chip technology
  Miniaturization down to nanometers
  Quantum-mechanical devices
  Molecular devices

- Materials

  Ultra thin films, Superlattices
  Synthesis (Assemblies) of nanostructures
  Clusters
  Porous Si

- Processes - dynamic atomic-scale observation and control
  - new chemical phenomena

- Structures - atomic-scale observation and identification
  - new nanostructures

- Properties - non-bulk properties
  - new physical phenomena

Common Needs

- To Develop Atomic-scale Technology
  (Observation and Manipulation)
  - Nanotechnology

  ↕

  To Explore Atomic-Scale Phenomena
  (Physics and Chemistry)
  - Nanoscience

- Electronics, Materials Science, Surface Chemistry & Physics, Biotechnology, Genetic Engineering

- SPM - STM, AFM, ------- (Rohrer & Binnig)
  Breakthrough Technology

  But, still far from maturity from an application point of view

ATOM TECHNOLOGY

Ultimate Manipulation of
Atoms and Molecules

- Initiated in 1992 FY
- National R&D Program sponsored by MITI

  ¥25 billion (~$210 millions) for 10 yrs

  ~¥1.1 billion for 1992 FY
  ~¥1.2 billion + α for 1993 FY

- Long - term fundamental research
- Generic technology

  Electronics
  Chemical Ind.
  Biotechnology

- Implemented through the concentrated joint research system

Reorganization of AIST Labs

Jan. 1st. 1993

Nat'l Res. Lab of Metrology →
Mechanical Eng. Lab →

Nat'l Chem. Lab for Industry	Nat'l Inst. of Bioscience and Human - technology
Fermentation Res. Lab.	Nat'l Inst. of Materials and Chemical Research
Res. Inst. for Polymers and Textiles	NEW LAB **Nat'l Inst. for Advanced Interdisciplinary Research (NAIR)**
Ind. Products Res. Inst.	

Geological Survey of Japan →
Electrotechnical Lab. →
Nat'l Res. Inst. for Pollution and Resources →
Gov. Ind. Dev. Lab.,
Hokkaido →
Tohoku, →
Nagoya, →
Osaka, →
Chugoku, →
Shikoku, →
Kyushu →

NAIR

National Institute for Advanced
Interdisciplinary Research
AIST, MITI

founded on the 1st of January, 1993

Prof. T. OKOSHI (Director-General)

Research Groups of NAIR

→ ATOM TECHNOLOGY
- National R&D Program

CLUSTER SCIENCE
- In - house Research

BIONIC DESIGN
- In - house Research

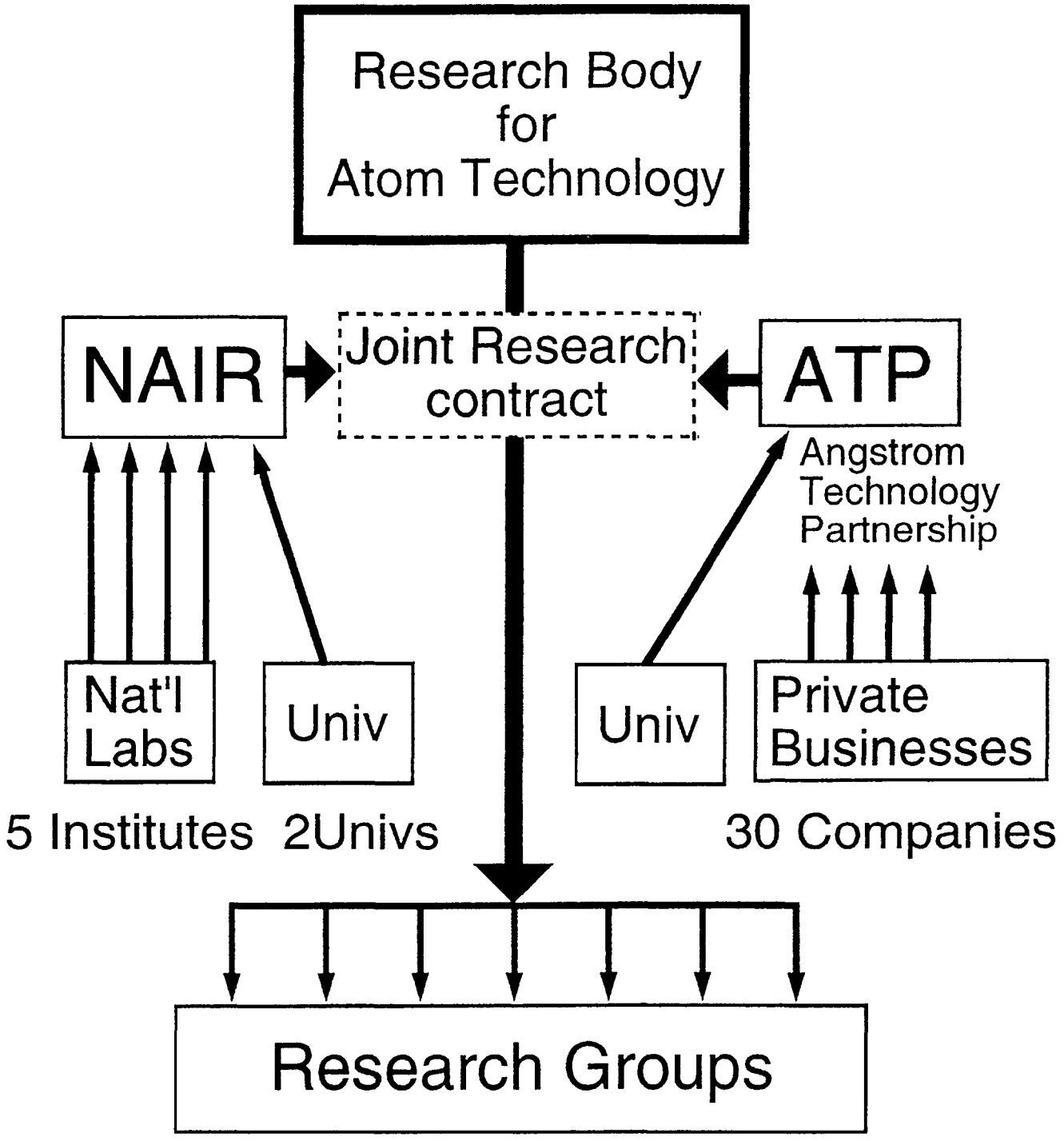
ATP

Angstrom Technology Partnership
founded on the 16th of February, 1993

Technology Research Consortium
commissioned the task of carrying out the
project "Atom Technology"

30 private companies
including overseas companies

Organization (in process)



ATOM TECHNOLOGY

Ultimate Manipulation of
Atoms and Molecules

RESEARCH AREAS
(The Phase I for first 6 years)

Atoms and molecules on solid surface
SPM, Beam techniques,
Nano-scale structures, Self limiting.

Atom clusters in 3-dimensional space
Ion trap, formation of nanostructure
Self organization

Molecules in organic and bio-materials
Atomic - level observation

Theories of atomic and
molecular processes
First - principle studies

↓

7 RESEARCH GROUPS of "RBAT"

Personnel

Research Body for
Atom Technology

Project Leader

E. Maruyama (ATP)

Sub - Leaders

K. Terakura (Univ. of Tokyo, NAIR)

K. Tanaka (NAIR)

Group Leaders

H. Tokumoto (NAIR)

M. Ichikawa (ATP)

M. Ozeki (ATP)

T. Okada (ATP)

T. Kanayama (NAIR)

K. Tanaka (Concurrently)

K. Terakura (Concurrently)

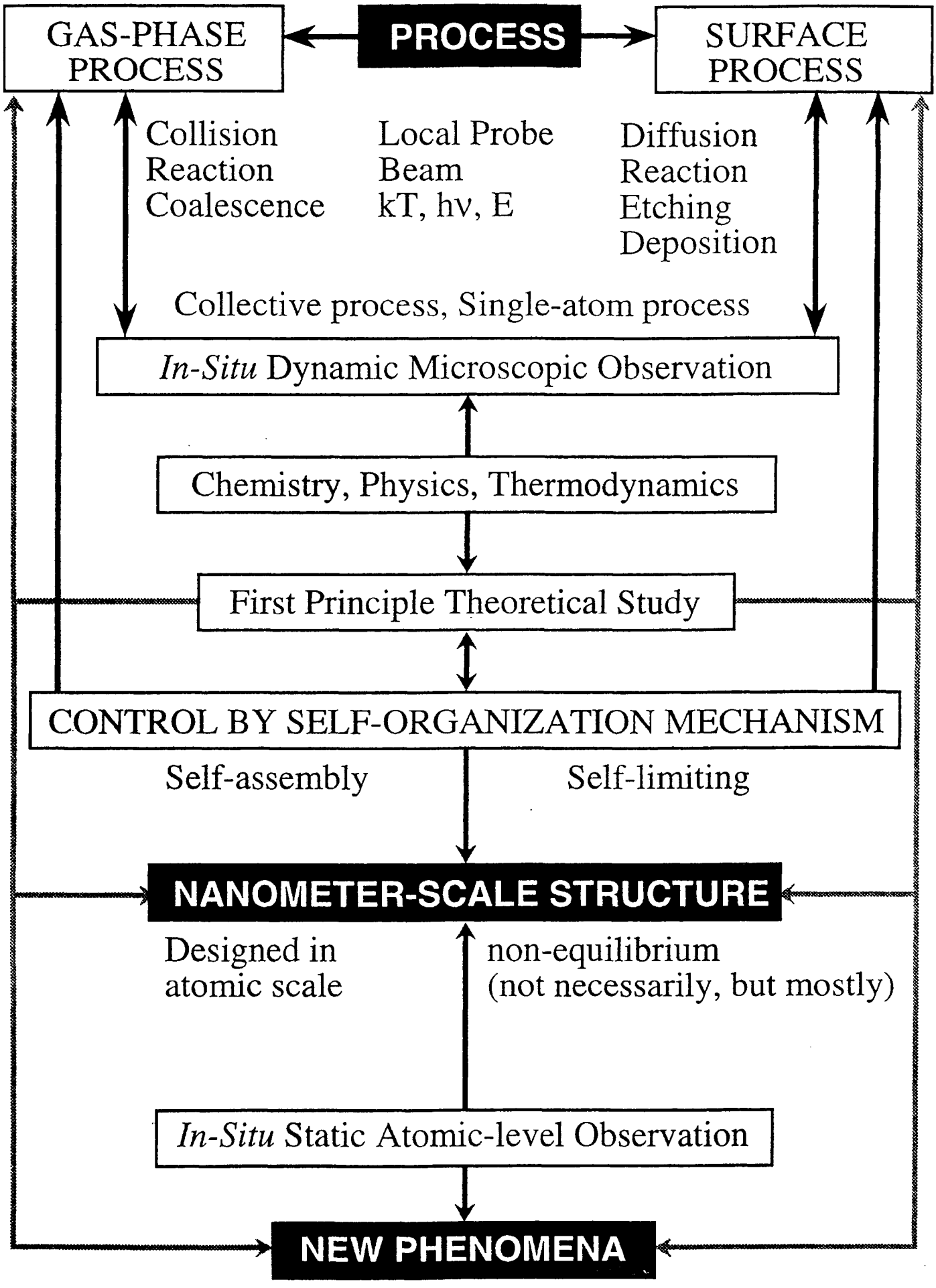
~ 45 people in total
(May, 1993)

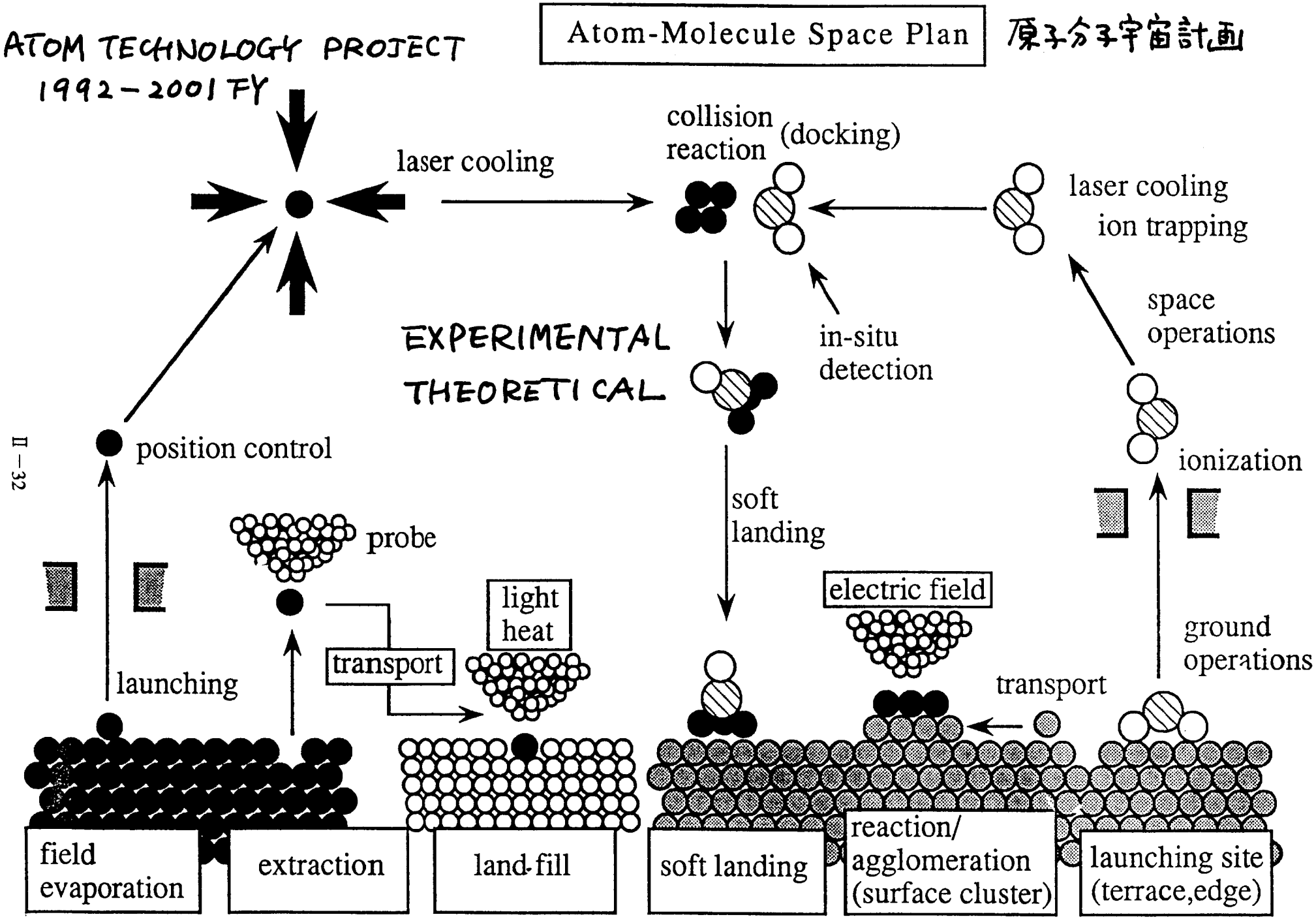
- SPM (STM, AFM, $\cdots$)

- In - situ, Dynamical Characterization

- Self - organization
  (micro $\longrightarrow$ macro)

- First Principle Studies


GAS-PHASE PROCESS
PROCESS
SURFACE PROCESS
Collision
Reaction
Coalescence
Local Probe
Beam
kT, hν, E
Diffusion
Reaction
Etching
Deposition
Collective process, Single-atom process
In-Situ Dynamic Microscopic Observation
Chemistry, Physics, Thermodynamics
First Principle Theoretical Study
CONTROL BY SELF-ORGANIZATION MECHANISM
Self-assembly
Self-limiting
NANOMETER-SCALE STRUCTURE
Designed in atomic scale
non-equilibrium (not necessarily, but mostly)
In-Situ Static Atomic-level Observation
NEW PHENOMENA


ATOM TECHNOLOGY PROJECT
1992 – 2001 FY
Atom-Molecule Space Plan
原子分子宇宙計画
laser cooling
collision
reaction
(docking)
laser cooling
ion trapping
space
operations
in-situ
detection
EXPERIMENTAL
THEORETICAL
position control
ionization
soft
landing
probe
light
heat
electric field
ground
operations
transport
launching
transport
field
evaporation
extraction
land-fill
soft landing
reaction/
agglomeration
(surface cluster)
launching site
(terrace,edge)

1.5 その他の見解（自己組織化に関して）

質疑応答における特筆すべきテーマの一つとして、「自己組織化」に関して次のような意見交換があった。

合原助教授：

『最近、自己組織的臨界現象という概念が提案されており、広範な大自由度系でその存在が示されつつある』

岡部教授：

『ICが高集積化すればするほど配線が大変になってきているので、配線が自動的にできるようになれば..と考えている。』

赤池教授：

『血管細胞と普通の細胞を混ぜ合わせると、血管細胞は必死になって血管を作ろうとする。胎盤が子宮にひっつくのもこのメカニズムによる。これは自己組織化の良い例である。』

また、田中総合研究官のアトムテクノロジー・プロジェクトでも、原子・分子の自己組織化を利用した制御が考えられている。

1.6 まとめ（MRI）

研究動向調査委員会の各委員の専門分野はそれぞれ異なるが、委員のお話及びその後の質疑応答の過程では、以外なほどの「共鳴」が生まれた。物質界、生物界（生理、生態）、人間界（人間関係、組織、社会、経済）における、非線形/カオス現象、ホメオダイナミクス、強相互作用、自己組織化現象、複雑系・ネットワーク系・多体問題等に関して様々なお話とディスカッションが持たれたが、それらは「生体に学び生体を越える」という赤池先生の標語に集約される。

生物及び生態系は我々人類にとって貴重な財産であり、無限の宝庫である。生物は絶妙なバランスを備えた機能と構造を持っているが、我々は生物の秘密を充分知っているとはいえない。従って生物や人間自身のメカニズムの解明が重要であると同時に、生物のメカニズムを工学やその他の分野（組織論、危機管理論、経済学、社会学等）にどう応用していくか、という視点が重要である。それは人間とハードウェア（機械、材料、素子等）の接近（ロボット、ヒューマン・インターフェース、インテリジェント材料、人工臓器等）につながるとともに、人間社会の様々な困難な問題に貢献する可能性がある。

以上の観点から、今後の有望技術領域として、以下の各領域またはこれらの融合領域を提案する。

① 生体に学び生体を越える超構造工学

（テーマ例）

- 生体組織化に学ぶ組織化機能材料の設計
- 生体の細胞外マトリックスに学びこれを越える細胞特異性人工マトリックス材料の設計・開発
- 生体プロセスに学ぶプロセスエンジニアリング

・細胞－細胞間相互作用、細胞－細胞増殖因子間相互作用等に学ぶ組織工学、社会システム工学
・免疫等生体防御反応に学ぶ危機管理論
・生体システムと臓器間の役割分担に学ぶ組織論

② 多体相互作用システム（複数の要素が互いに作用を及ぼし合うシステム）

（テーマ例）

・強相互作用系（多粒子系のほか、人間関係、社会組織、経済等）の解明
・多粒子系（複数の原子、分子、天体、量子箱等の相互作用系）の解明
・複雑系（気象、地震、経済、人間関係等非常に多くの要素が複雑に絡まりあう系）の解明
・ネットワーク・システム（ニューラルネットワーク、超並列コンピュータ等）の設計
・自律分散型群ロボットの制御

③ カオス／非線形工学

（テーマ例）

・バイオカオス（神経細胞、脳波、筋肉、心拍等）の解明
・生体のホメオダイナミクスの制御理論等への応用
・カオスの工学・経済学・生態学・気象学・医学・芸術等への応用
  - カオスコンピューティング
  - 決定論的非線形予測
  - カオスの同定・モデリング
  - カオスメモリ
  - カオス符号化
  - カオスパターン認識
  - カオスアート
  - カオスゆらぎの利用
  - カオスの実装
  - 非線形システムにおけるカオスの発生・制御

④ その他のバイオミメティックス

（テーマ例）

・生物の運動メカニズムの輸送機械、ロボット、アクチュエータ、マイクロマシン等への応用（バイオメカニクス）
・人間や高等動物の脳、神経系、感覚器系の情報処理メカニズムの制御系やコンピュータ、ロボット、センサ等への応用
・生物のエネルギー供給/代謝系のエネルギー供給/変換システム、マイクロマシン等への応用
・生物の遺伝メカニズムの制御系、メカトロニクス、構造設計、数理科学等への応用
・人工生命

第2章　融合研に学ぶ共同研究のあり方

前章で提案した学際的な技術領域の研究開発を行うためには、生体工学、情報工学、電子工学、材料・物性工学、システム工学、機械工学等の工学分野のみならず、生物学、生態学、経済学、社会学異分野、組織論、危機管理論等の幅広い研究者がなんらかの形で集まって共同研究を実施する必要がある。

本章ではこのような共同研究の一つの試みの例として、産業技術融合領域研究所を取り上げ、同所の田中総合研究官のお話を掲載する。また、あわせて異分野共同研究に関する各委員のご意見を紹介する。

2.1　産業技術融合領域研究所の概要（田中総合研究官）

（田中）　お手元の資料に従って簡単に説明させていただきます。もう少し資料があることはあるのですが、間に合いませんで、先週アメリカのワークショップで話したときに使いましたビューグラフの一部を引っ張り出して、それをコピーしております。一番上にありますのは、『日経サイエンス』に出したものですが、そこに端的に「融合研の目指すもの」という私なりの考えが書いてありまして、それから出発して、その融合研をどうやって展開していくかということを具体的なセンタープログラム、「アトムテクノロジー」というのがありまして、それとの関連でお話しさせていただこうと思います。

まず、融合研（産業技術融合領域研究所）は今年の1月1日に設立されたわけです。ここで何をやるかということですが、各技術・科学分野の融合領域をやることになっています。我々が考えているのは、領域の融合性はもちろんのこと、違う文化を持った組織から研究者に来ていただいて、そこで強いインタラクションを働かせて何か新しいものをやっていこう、むしろ研究を進める上での進め方とか、研究者をいかに刺激するかということをねらっているというのが本音です。

そこで、融合研のパンフレットもありますから、それも見ていただきたいと思いますが、開放性、流動性、国際性及び公正な評価による運営という四つのスローガンみたいなものを出しているわけです。この中で、国際性というのは、こういう新しいものをつくるときの枕詞みたいなもので、本来国際的でない研究所はあり得ないと思うので、国際性をあえて言うことは国際的でないということを認めたようなところがあって、どうしようかと考えたのですけれども、いまの日本の状況ではこれを入れないと通りにくいところもありまして、入れてあります。ですから、重要なのは、開放性、流動性、公正な評価による運営ということになると思います。

開放性、流動性ということですけれども、これについては、いろいろなところから研究者に来ていただく。非常に良いプロポーザルがあったらその方に来ていただいて研究していただく。つまり、組織のバリアを少なくいたしましょうということです。さらに言いますと、人事の開放性ということを我々は強く考えています。国研の場合は、新しい人を採ることは採りますけれども、リーダークラスの人を採ることはほとんどしない。室長から部長、所長は完全な内部昇格人事でありまして、そのために皆さん何もやらなくなってしまうというところがあるわけです。ですから、まず最初の人事で、所長は国立研究所からは採らない。東大先端研の大越先生を初代所長としてお迎えしたというのは、背景としてはそういうことがあります。

そのためにどうするかということですが、新しい制度ができればいいのですけれども、それを待っていてはしようがないので、共同研究規定、研究交流促進法、ポスドク制度、省庁間の交流人事、そういったものをフルに活用して、運用でどんどんやってしまおうということを組織としてエンカレッジする。普通、国立研究所は、制度がありますと、その制度の壁を厳しく解釈してなるべく固くやろうとするわけです。つまり、ノーミス主義がありまして、制度のすれすれのところは皆さんやりたがらないのですが、すれすれのところを組織としてどんどんやりましょうということですから、随分違うわけです。

私自身は電総研で制度すれすれ、規則すれすれのことをよくやってきたのですけれども、組織は決してそれをエンカレッジはしてくれなかった。組織と闘いながらやってきたわけですけれども、この組織は組織がエンカレッジする。工技院もエンカレッジする、こういう研究所である。そうすることによって、開放性、国際性を実現していこうというわけです。ですから、研究所員の半数以上を産・学及び海外から招くことを目標にしています。実質的には既にそういう状況が実現しつつあります。後でお話しいたします。

それをどういう形でやるかというのは、一つは融合研のセンタープログラムと我々は考えているのですが、旧大型プロジェクトの「アトムテクノロジー」が昨年の4月から発進いたしました。このアトムテクノロジーの運営方式を融合研の目的とぴったりと合うような形でやってみましょうというわけです。そうすることによって皆さんに集まっていただく。この大型プロジェクトは、従来は全体の予算の8割強は企業への補助金になるわけですけれども、それをそちらに分散しないで、融合研にお金を全部集めて、企業から人をよこしてもらう、また、大学からも入ってきていただくというわけで、プロジェクト全体の人間が物理的な同じ空間の中で一定研究をやっていただく。集中共同研究の場を融合研が提供するというわけです。

次の特徴は、所員は大半が有限任期制にしてあります。これは流動性を高めようというわけです。国立研究所から来る方も最長5年契約です。実はこれは我々に自由度があったのですけれども、そのようにいたしました。5年たって我々がいていただきたいという場合には契約をリニューいたします。いてくださいと言います。そうでない場合には、ご苦労さまでしたと一言言う。アクティブな人にいていただくというシステムにしてあります。企業から来られる方は、なかなか難しいのですが、3年ぐらいです。5年いますと帰りにくいというところがあります。ただ、リーダークラスの方には企業に帰らないということを覚悟して来ていただく。そんなことはオフィシャルには何も言っていません。実際に後で出てきますけれども、私はその方たちは帰らないと思っています。しかしながら、いずれも有限任期です。

それから、融合研自身が独自に定員を少し持っていまして、自分で雇用することができるわけです。いまのところ大半は周辺国研から定員ごと移動してきてもらっています。我々が持っている定員は任期制の公務員です。これは日本人であれ、外国人であれ、全く変わりません。第1号は中国人を採りました。理研の特別研究員を3年終わって、非常に良い仕事をしたので彼を採りました。

そういうわけで、有限任期ということは原則的にすべての場合について守られております。そういうことによって流動性を刺激する。エラート（創造科学推進事業）とか分子研も似たようなものかもしれません。そういうところとリンクして、少しずつ国内でも流動性を高めていく。国際的にはそれが当然のことですから別に問題はないと思いますけれど

も、ここは一番難しいところです。我々のインフラストラクチャーは大体終身雇用となっていますから、まだまだこういう制度はマイノリティにすぎないので、いろいろ難しい問題はあるかもしれません。しかし、やっていこうと。

評価システムについては、とにかくやってみようということです。評価は難しいことはわかるのですけれども、評価は難しいということをエクスキューズしまして、ほとんどのマネジャーは評価しない。何もしない。ロボットと同じで、人数割りして均等に予算を分けるということをやっているわけで、日本では研究所のマネジャーが育たない。そういうポテンシャリティを持っている有能な人でも、発揮する場がないというところもあります。企業でもそうだと思います。能力のある人はいると思いますけれども、経験を積む場がない。これは評価をしようというわけです。

外部評価委員会を設けます。いま人選を進めております。外国の評価委員、日本の評価委員、この人たちの前で我々はプレゼンテーションをし、いろいろコメントしていただく。これも国立研究所としては初めての試みです。我々自身も評価をする。評価しようとしますと、リーダーがそれだけ自己研鑽を積まないとできないわけですから、評価される側も評価する側も大きな緊張感を持つ。私はむしろ評価する側に大きな緊張感が出てくるだろうと思います。よほど一生懸命勉強しない限り、それはあらわれるだろうと思います。そういうねらいがあって、とにかく評価をする。そして、良い仕事をした人はどんどんエンカレッジしていこうというわけです。

また、外部評価委員から痛烈なコメントがついた場合、しかもそれが適当なコメントであった場合は、融合研の所長は、外部の評価委員会のサジェスチョンに基づいて何かやろうとする場合はやりやすいです。自分がやろうとしますとなかなか大変ですけれども、外部の方がこう言っているから変えましょうと言えばやりやすい。そういうことをやりやすくするために、この研究所には部・研究室は一切ありません。グループリーダーです。私は、前は部長とか室長とか呼ばれたけれども、いまは「田中さん」と呼ばれている。これは呼ばれてみて初めてわかったのですが、ものすごく精神衛生に良いです。呼ぶほうも呼ばれるほうも、日本のシニョリティシステムといいますか、儒教的な長幼の序といいますか、そういうものを意識するとイコール・ディスカッションができませんから、そういう意味では健康的に良いということを、始めてみて私もこの半年間で感じています。

なぜ国立研究所かということですが、これは仕方がない、いろいろな条件があってそうなったというところがあるわけです。しかしながら、産・学に比べると研究の長期計画性が予算的に保証されているというところはあります。10年計画というのは幾らでも通産のプロジェクトではあるわけです。それが基礎シフトになったわけですから、そのお金をうまく使っていただくために、大学の人にも入ってきていただこうというのが趣旨です。ただ、10年ありますと、通った、通ったというわけで、その後10年、リーダーは勉強しないのです。これがまた実に大きな問題で、不滅の組織ですから、そんなものやらなくても仲良くやっていきましょうという話になるわけです。そういうインセンティブが全然ないわけで、それはまずい。ですから、評価することによってリーダーにも勉強していただくということが重要ではないかと思います。

そして、流動性、開放性というやり方で一番効果があるのは、リーダークラスにほかの人をどんどん呼んでくることです。そうしますと、このグループでそこそこ論文を出していて自分が年上だと、次はこのグループのリーダーになれるという期待感は抱くことはで

きない。

こういうやり方が本当に良いのかどうかわかりません。しかしながら、そこに「健全な競争原理」と書いてあるように本当に健全になるかどうかわかりませんが、いままでと違ったやり方をすることによって、試行錯誤の中で日本的なものを見つけていく良い機会にはなるだろうと思っています。ですから、こういうやり方はもちろん良い面・悪い面、光と影は必ずあるわけですから、どっちがうまくいくかわかりませんけれども、重要なのは、それを展開していく人ですから、最初の融合研の人事については絶対に妥協しないという方針で臨みました。こんなところが融合研のねらいということです。本音です。

2.2 異分野の研究者間の共同研究の必要性

研究動向調査委員会の各委員は、異分野の共同研究について以下のように述べている。

赤池教授：

「東工大（生命理工学部）にはバイオミメティックケミストリの研究者が集まっているが、この他にもバイオミメティクスや河内先生のようなバイオメカニクスの分野の研究者の組織や集まりがあると面白い。」

岡部教授：

「バイオミメティクス分野では先般同分野関連の研究者が集まってシンポジウムが開催された。そこでは計算機上で生物を飼う大須賀さんの試みなどが報告された。プラズマ分野では以前から異分野の研究者が集まって研究交流している。」

赤池教授：

「今日集まった異分野の委員の方々から出た話は不思議と相い通ずる（共鳴、共振する）ところがあった。一つは生体に学ぶ（例：生体の自己組織化→組織管理や社会システムへの応用）ということ、一つはネットワーク、強相互作用系、複雑系、といった多体問題に関する認識、そしてこれらは生物系科学や理工学にとどまらず社会科学の世界にも広がりをもっている、ということ。こういった問題を解決するために、社会科学の研究者も含めた異分野の研究者による今までなかったようなプロジェクトもあり得るのではないか。こういった大胆な提案をこの委員会でも行なっても良いのではないか。」

第Ⅱ部第１章で提案した有望領域（生体に学ぶ超構造工学、多体相互作用システム、カオス/非線形工学、その他のバイオミメティクス分野）はいずれも学際領域であり、幅広い工学分野や物理学・生物学等自然科学分野、さらには経済学、社会学、組織論、危機管理論といった社会科学にも応用可能な研究領域である。このような学際領域の研究には当然のことながら幅広い分野の研究者の集積が必要であり、異分野の研究者が何等かの形で集まって共同研究を行う必要があると思われる。異分野の頭脳を集積し、互いに触発し情報交換することのメリットは計り知れないほど大きい。従って第Ⅱ部第１章で提案した新領域の研究の際には、工学、物理学、化学、生物学、医学、経済学、社会学、政治学等異分野の研究者を集めて共同研究を実施することを提案したい。

第３章　我が国の技術戦略・政策のあり方

本章では、我が国の技術戦略・政策のあり方について、研究動向調査委員会メンバーの意見及びヒアリング調査の結果を整理した。

3.1　日本の技術戦略のあり方

欧米の技術戦略への対応のあり方について委員会で討議が持たれ、次のような議論の上、本調査においては、欧米の技術政策動向を充分把握しつつも、欧米の政策動向に左右されず、主として技術オリエンテッドな見方で今後の研究開発の領域やあり方を考えてゆくこととした。

赤池教授：

海外の政策動向も重要だが、外圧に右往左往しない日本独自の戦略が必要である。この委員会としては、政治的な視点よりはむしろ技術オリエンテッドな視点でとらえてはどうか。

またヒアリングを行った帝人の内田顧問からも次のような意見をいただいた。

内田顧問：

・これからの日本の科学技術政策は外圧に右往左往するようであってはならない。

・米国が日本を叩くのは、日本を悪者にしておくのが一番無難だからである。国民の不満を日本に向けているのである。しかし日本の技術戦略が外圧に動かされるのは望ましい姿ではない。今後は科学技術大綱でうたわれているように「知的資源立国」をベースとして、科学技術で世界に貢献する、国はそのためにはGNPの1%（日本は現在0.43%、米国は1%）の科学技術予算が必要である（日本の研究開発費の政府負担比率は米国に比べて格段に少ない）。

・実際に科学技術を発展させていくのは政府ではなく科学者自身である。政府の仕事はどこで誰がどのようにして研究を行なうかを考えお膳立てすることである。科学技術はグローバルなものである。世界中の科学者が協力して、世界で一番研究に適した場所で、効率よく国際共同研究をするような枠組みが必要である。例えば天体観測では、ハワイ島マウナケア火山の頂上に各国が天文台を作っているのはその例といえよう。

3.2　日本の科学技術政策システムのあり方

内田顧問：

・日米の科学技術政策システムを比較すると、行政府、議会、学会いずれを取っても日本が見劣りがする。米国の大統領科学補佐官（勧告権を有する）に相当する役職は日本に無いし、日本の科学技術庁は米国のOSTP（科学技術政策局）に比べて調整権限が弱い。議会の科学技術関連委員会にしても日本の国会の委員会は実力が無い。また米国の全米科学アカデミー（1863年設立）やその傘下の全米工学アカデミー（1964年設立）に比べると、日本の学術会議は個人というよりも多くの学協会の集まりである。従って日本の方が、日本全体の科学者・技術者の代表機関として活動できる筈である。日本の科学技術行政においては各省庁の力が強いが、各省庁の行政の調整を図る機関として科学技術庁は、省庁の枠をはずれた機能となるべきと考える。

・日本として学術国際貢献の新しいシステムの必要性について学術会議４月総会で決議（総理に説明済み）。

・日本においては科学技術政策において総理のイニシアチブが発揮されていない。米国の大統領が国民の直接選挙で選ばれるのに対し、日本の総理が直接選挙では選ばれないこともこの一因である。

3.3　日米の研究プロジェクトの進め方の違い

内野教授：

・日本の国家プロジェクトでは一般に参加企業間の連携が強く、横の情報伝達が十分で、歩調を揃えて研究する「隣組」的な進め方である。一方米国のNASA方式と通称される研究推進方式では、複数の企業が独立に同じテーマに取り組み、1年ごとにどちらの成果が優れているか評価する、という競争方式がとられている。

・その他日米の科学技術に関連する考え方には例えば次のように違いが多い。

	日　本	米　国
教　育	反復記憶重視	理解重視
研究体制	グループ型	一匹狼型
研究評価	積分値の評価	微分値の評価
大型ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ	官公庁主導	軍主導
	隣組方式	競争方式
経　営	おみこし型	競艇型

3.4 研究開発制度のあり方と大学の役割

荒川助教授：

・大学の研究費が少ないのは周知の事実であるが、一律にばらまくのではなく、限られた大学（優秀な学生のいる大学）への傾斜配分が必要である。また現在は省庁間の仕切りが高いため実現されていないが、通産省や科技庁等の研究開発プロジェクトにも大学の先生が参加しやすくなってほしい。また、米国のNSFのような省庁の枠を超えた予算配分組織も必要である。

河内教授：

・国の産官学共同プロジェクトでは学の役割が小さいものが多い。大学での新しいユニークな研究に対して、通産省や科技庁から研究費が入る仕組みがもっと必要ではないか。

・創造科学（新技術事業団の創造科学推進事業）は素晴らしい制度である。この制度の発足・運営は千葉（玄彌）理事の尽力によるところが大きい。

・研究開発の予算制度には多様性が必要である。主流の研究に対する科研費のようなバランスを考えた分配制度と、主流からはずれていてもユニークで独創的な研究に対する創造科学のような制度が両方必要だと考える。

伊藤教授：

大学も次第に変わってくると思う。現在、重点大学構想を文部省では検討している。これは旧帝国大を中心とした10校程度を選び、大学を差別化して重点的に資源を配分しようというものであり論争を生んでいる。国のＣＯＥ構想とも通ずるところがあるだろう。私個人は推進すべしと考えている。優先順位をつけ、あまりにも弱体化した現在の大学の研究体制を再構築し、自ら外に向かって門戸を開く研究機関として確立すべきであろう。
民間との共同研究も必然の流れだと思う。基礎から応用まで行なえる共同研究制度が望まれる。期間として3～5年、予算として20億円程度の幅広い研究分野を対象とした制度が良いのではと思う。ミリ波通信技術開発として私案だが、無響室、測定器、リソグラフィの設備などを備えた、この程度の規模の研究プランを持っている。

大学としてはやはり基礎研究に特色を出したい。基礎研究をやるには伝統がいるとよく言われるが、北大は電波研究では伝統がありこの分野での実績をこれまで述べたような変化の中で今後も積み重ねていきたいと考えている。

3.5 国家プロジェクトのテーマ選定方法と評価システム

杉本教授：

・通産省/NEDOでやるからには、大学の基礎研究と異なり、やはりあくまで将来産業や社会や人間生活のために役立つ（可能性のある）プロジェクトに取り組むべきだ。原子分子極限操作（アトムクラフト）などは将来大いに応用が開ける可能性がある。

一方例えば統一理論の研究などは、１０^{15}GeVレベルのエネルギー状態（ビッグバンレベル）で初めて有効になるもので、日常生活や産業のレベル（せいぜいMeVレベル）には直接の応用はない。

・目新しいものを追いかけるばかりでなく、流行に流されずに、泥臭い地道なことをきちんとする努力こそ必要である。

河内教授：

・日本の大学・国研における研究開発の最大の問題点は、専門の評価者が予算を配る側にいない点にある。米国のNSFなどでは評価の専門家であるレビューアがおり、プロジェクトがうまくいかない場合はレビューアも交替し、成功したレビューアは残るシステムなので、優秀な専門家が多い。日本でも例えばNEDOのような所でもっと専門のレビューアを育てるべきだと思う。

・研究開発プロジェクトに失敗はつきもの（特に難しい研究開発ほど）であり、全体的・長期的な視点から見て、多少の失敗は許されるべきだと思う。ところが、企業が国家プロジェクトに参加する場合はそうはいかないことが多い。プロジェクトの成功/失敗は企業から参加したエンジニアの企業内評価に即つながってしまうからである。

吉田教授：

・これまでの国家プロジェクトは、どちらかというと大蔵省にうまく説明できる絵が書けるプランが採択される傾向が強いように見受けられる。しかし、今後は利害関係の無い第三者による公平な評価に基づく決定プロセスが不可欠と考える。専門のレビューアを擁するＮＳＦの評価システムを見習ってはどうか。

岡部教授：

日本の研究開発の一番の問題点は公平な評価システムが無い点である。

赤池教授：

日本の研究開発予算は、素人にわかる絵が上手に描ける人、ないしプロジェクトになりやすいテーマにお金が出る傾向があるが、キーワードの良さで予算が付くのはおかしい。

可能性がよくわからない分野のオリジナリティー溢れる若い人の研究にお金を出す制度があってもよいのではないか。またそうした研究者やテーマを見つけるために全国を水戸黄門のように行脚する人がいると良い。

NEDOでそのような専門のレビューアを育ててはどうか。

3.6 産学官交流のあり方と人の流動性

田中総合研究官：

➪ 第Ⅱ部第2章参照

河内教授：

・創造科学の微小流動プロジェクトをやる上で、工技院の研究所のある優秀な研究者の協力がどうしても必要なため、出向を依頼したところ、いろいろ問題があり、うまく研究協力が行なえず困っている。

内田顧問：

・企業はもっと大学に協力しなければならない。学生は未来からの留学生である。有能な学生を育てることが次の世代の企業の基盤となる。

・研究だけでは国家及び国民は食べていけない。研究成果を産業に移転して、雇用の拡大と生活水準の向上に寄与してこそ意味がある。

・また人類の直面する困難を克服するために、新知識が生かされることが必要である。

3.7 発展途上国との技術交流のあり方

内田顧問：

・先日、アジア太平洋科学技術協力高級事務レベルの会議があった。こういう場を日本は放っておけないし、逆にしゃしゃり出てもいけない。日本のアジアにおける立場とはそのような微妙な立場である。

・中国の酸性雨問題やロシアの核廃棄問題への援助・協力は、お金をドブに捨てるようなものと思われるかもしれないが、結局は将来日本自身にはねかえってくる問題である。相手のために、というよりも自分のために必要なのである。ちなみに、ロシアは都市国家であるから、地域ごとにどうすればよいか考え、地域の実態に即したプランで協力すればうまくゆくであろう。

3.8 人材育成のあり方

内田顧問：

・欧州ではProfessional Engineerという資格があり、米国にはインターン制度及びProfessional Engineer制度（試験がある）がある。P.E.になると高い社会的地位と給料が与えられる。一方日本の技術者は専ら企業が育てる。従って給料も安い。また海外で仕事をする時に資格が無いと問題が出てくる。日本にも技術士制度があるが、P.E.に比べるとコンサルタント的であり、また社会的地位も無い。日本においてもP.E.のような制度が必要である。

3.9 研究支援の必要性

杉本教授：

・カスタムチップを作るには約2000万円かかる。しかし大学で自由に使えるお金といえば100～200万円程度である。最近は実験/測定設備類に多額の資金が必要になってきており、共同で利用できるサポート体制及びインフラストラクチャの整備が必要である。

●むすび

本報告書の第Ⅰ部では、1)日本の研究開発のマクロな動向を分析し、2)日米欧の技術力を様々な観点から比較し、3)日米欧の技術政策の概要を整理し（以上第1章）、4)極限化、高機能化、複合化といった観点から様々な分野の産業技術の流れと今後の動向・課題を分析し（第2章）、5)今後NEDOとして取り組むにふさわしい研究領域をできるだけ網羅的に抽出した（第3章）。

次に第Ⅱ部では、主として研究動向調査委員会におけるご講演・議論及び各分野の専門家の見解をとりまとめ、1)同委員会独自の提案としての４つの有望分野を提案し（第1章）、2)今後の我が国技術戦略のあり方を考察した（第2章）。

本報告書の主目的に対する結論は、第Ⅰ部第２・３章（産業技術の流れと今後の重点研究領域）、第Ⅱ部第１章（独自の有望領域提案）に盛り込まれている。

従来、材料・電子・情報・機械、といった技術分野別に動向を分析したり将来予測を行ったりする調査研究例は数多いが、本報告書のように極限化、高機能化、インテリジェント化といった技術オリエンテッドかつマクロな視点で網羅的に動向分析・将来予測を行った例は見当たらない。実際にこの手法で整理分析を行ったところ、技術の流れをとらえる上で非常に有意義であった。

周知のとおり現代の産業技術は非常に多様な分野にわたっており、これら全ての領域の動向を把握するには非常な労力を要する。本報告書で取り上げることができなかった領域にも有望なものが存在すると思われるが、そのような領域の動向分析は今後の課題としたい。

最後に、ご協力いただいた全ての方々に深く感謝いたします。

付 属 資 料

●付属資料

1．個別ヒアリング記録（面会順）

1.1　内野教授

1.1.1　プロフィール

ペンシルヴァニア州立大学教授（国際ｱｸﾁｭｴｰﾀ・ﾄﾗﾝｽﾃﾞｭｰｻ・ｾﾝﾀｰ所長）
NF ELECTRONIC INSTRUMENTS, INC. 副社長
内野（うちの）　研二（けんじ）　氏（Ph.D.）

［経歴］
1950年東京生まれ、東京工業大学理工学研究科電子物理工学専攻修了、東京工業大学工学部助手、米国ペンシルヴァニア州立大学材質研究所研究員、上智大学理工学部物理学科助教授を経て、現ポジションに就任。
センサー、アクチュエータ、材料（特にセラミクス）の国際的権威。

1.1.2　ヒアリング結果

3つの視点について

・極限化、複合化、インテリジェント化という視点は概ね良いと思う。ただしインテリジェントという言葉は英語では「ずるがしこい」イメージがあるので、気を付けて（意味を明確にして）使った方がよい（➪インテリジェント化の項参照）。

極限化について

・日本における極限化は小さい方を指向していることが多いが、米国では小さい方だけでなく大きい方（Big Science）の極限化にも熱心である。宇宙構造物には大きくて均質なセラミクスや20～30cmの大きなアクチュエータ（油圧アクチュエータは応答性－f特が悪いので、圧電アクチュエータが有効）が必要になる。また模擬地震の発生・実験装置にも大きなアクチュエータが必要になる。メートル単位のセラミクスとなると、どうやって接着させるか、きれいに焼き上げるか、といった課題が出てくる。
・10年程前にファインセラミクスがもてはやされ、材料の微粒子化が進展してきたが、細かい粉を作る時代はもうほぼ終った（限界に達しつつある）といえる。材料を細かくしていくと、ある所で強誘電性、圧電性等の特性が失われる。強誘電性は分子10個程度すなわち数十Åで失われてしまう。磁性体の場合はスーパー・パラマグネティック微粒子磁性体のように微粒子化しても特性が失われないが、誘電体の場合は一般に0.1μ（100A）程度が実用上の限界と考えてよい。n（ナノ）サイズまでいくとアクチュエータも全ての機能を失う。

・一方圧電体や強誘電体ではまだ誰もやっていないことだが、半導体や磁性体で試みられているように、圧電体や誘電体の0.数μの薄膜を10層程度重ねると、「スーパーレイヤー」としての新しい特性が出てくるかもしれない。これは大変興味深い。

複合化について

・材料分野で複合化というと第一に考えられるのは「複合材料」である。　例：セラミクス（圧電性）とポリマー（フレキシビリティ）とカーボン（導電性）の複合化によって、圧電性とフレキシビリティーと導電性を併せ持つメカニカルダンパー材料が生まれる。
・複合化の範囲に入るかどうかわからないが、例えばセラミック・アクチュエータならば、建築用（地震や風による振動を抑えるアクティブ・ダンパー等）、繊維用、精密機械用（モータの代替：超音波モータ/リニアモータ等、光学関係の位置決め、オートフォーカス機構等）、宇宙用（宇宙での振動は空気で減衰しないので、その振動を抑えるアクティブ・ダンパー、宇宙基地用巨大アクチュエータ等）、軍事用（潜水艦や戦車用のスマートスキン等）など幅広い応用があり、それぞれの応用先によってスペックが異なる。これなどはセラミック・アクチュエータと各用途の一種の複合構造とみることもできる。

生物の利用または模倣に関して

・複合化に含めることもできるかもしれないが、生物の利用または模倣という視点もある。
・生物の利用の例としては、軽部先生（現東大先端研教授）のバイオセンサー（バクテリアを用いるものなど）や、MITで研究している生物アクチュエータ（大腸菌の集合体の動きを用いる）などがある。
・生物の模倣（バイオミメティクス）の例としては、スマートスキンがある。サメは横腹で発生する乱流を打ち消すように横腹の皮膚の形状を変化させる。これをセンサーとアクチュエータの組み合せで実現して潜水艦や船につけると乱流の発生が減ってスピードが速くなる。また、ソナーから送られてくる音波をセンシングして逆位相でアクチュエートすれば、ソナーにかからない潜水艦となる。後者は家/自動車の防音やビルの防振にも応用できる。また、戦車に柔らかくアダプティブな装甲板を付ければ、砲弾に強くなる。

材料の定義とマトリクスについて

・材料とは、「視覚サイズ領域で2つに割っても元の機能を失わない物」である。
もしそうでなければ、それはストラクチャあるいはシステムと呼ぶことになる。
従って普通のマイクロプロセッサは材料とは呼べないが、もし材料に非常に小さなマイクロプロセッサと電池（太陽電池など）を組み込み、エネルギーを自給自足できたなら、それは「材料」と呼べる。
・材料は、どの物理量をInputとしてどの物理量をOutputとするかのマトリクスによって、整理できる。非対角項が真に「機能性」と呼べる効果である。次世代の光歪材料は、複合効果の利用の一例である。

図　入/出力の物理量から見た材料マトリクス（ただし磁性を除く）

Output / Input	電　流 電　荷	歪	温度変化	光
電　圧	抵抗率 誘電率	逆圧電 効果	電気熱 量効果	
応　力	圧電効果	弾性率		
熱	焦電効果		比　熱	
光	光起電力 効果 光誘電 効果	光歪効果		屈折率

光音響素子・光話器（ﾌｫﾄﾌｫﾝ）への応用　　対角項はTrivial Material

インテリジェント化に関して

・私は材料をその進化の度合から次の4種類に分類している。

① Trivial Material

ごく普通のインテリジェンスを持たない材料（上のマトリクスの対角項に相当）

② Smart Material

・Passive Smart Material

マトリクスの非対角項の物理量変換を行なう材料。

例：センサ（圧力等→電流/電圧）

アクチュエータ（電圧等→歪）

・Active Smart Material

センサとアクチュエータの機能を併せ持つ材料（単一又は複合材料）

③ Intelligent Material（Intelligentという言葉も、このように位置付けをはっきりして使えば問題ない）

センサとアクチュエータに加えてドライブ／コントロール機能を併せ持つ材料。

例：光をセンス→状況に応じて電圧を変化→アクチュエータを駆動する光歪材料。

（これらをﾏｲｸﾛﾌﾟﾛｾｯｻを用いず材料自体で実現するような）

現在はそれほど多く見あたらない。

④ Wise Material

Intelligent Materialに一種のモラルを持たせたもの。

例：環境や社会秩序や公衆衛生や教育に悪影響をもたらす作用を判断して自発的に行なわない材料。

現在はまだない。

今後の有望領域について

・この前スペースシャトルに日本人が乗り込んでテレビ放映されたが、あれは日本の少年に大きな夢を与えた。現在理工系に進む人が減っており、理工系を出ても理工系の研究者やエンジニアにならない人が増えているが、これを直すには青少年に対して科学技術に関する「夢」を与えることが必要だ。その意味で、今後は日本もBig Scienceに取り組むべきである。

・エコロジー（環境）問題は今後取り組むべき非常に重要な問題である。特に日本では生活環境、住宅環境、都市環境、交通ネットワークの改善が急務だ。都市環境がらみでは、住宅やビルの地震や風による揺れを吸収するアクティブ・ダンパー（現在横浜MM21にあるあるビルは、油圧アクティブ・ダンパーにより重心を移動させ、強風でも最大25cmしか揺れない）なども重要なテーマだ。自動車にしても、内部の音響や冷暖房は良くなったが、省エネや公害や安全性という意味ではまだまだ課題がある。

日米の国家プロジェクトの進め方の違いについて

・日本の国家プロジェクトでは一般に参加企業間の連携が強く、横の情報伝達が十分で、歩調を揃えて研究する「隣組」的な進め方である。一方米国のNASA方式と通称される研究推進方式では、複数の企業が独立に同じテーマに取り組み、1年ごとにどちらの成果が優れているか評価する、という競争方式がとられている。

・その他日米の科学技術に関連する考え方には例えば次のように違いが多い。

	日　本	米　国
教　育	反復記憶重視	理解重視
研究体制	グループ型	一匹狼型
研究評価	積分値の評価	微分値の評価
大型ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ	官公庁主導	軍主導
	隣組方式	競争方式
経　営	おみこし型	競艇型

その他

・最近の日本企業のR&Dは沈滞しているようにみえる（R&Dだけでなく活力が全体的に低下している印象）。またこの先何をやってよいか見えていない企業が多いのではないか。

現在の日本企業の経営者層は60歳前後が多い。ソニー等の創業者は75歳前後が多く、この層は先を見る力があり自分で自分の道を切り開いた。現在の60歳前後の経営者は創業者の下でひたすら馬車馬のように働き、会社の発展及び日本の高度経済成長を支えてきたが、自分がトップに立った場合、視野が狭く、新しい境地を開くようなヴァイタリティーやオリジナリティーに乏しいように思われる。それが「何をやったらよいかわからない」現象につながっているのではないか。

・私は会社に30年の周期があるとみている。あと15年して創業者（現在75歳前後）の息子（現在45歳前後）の時代になれば再び盛り返し、現在の経営者層（60歳前後）の息子（現在30歳前後）の時代になるとまた駄目になる、といった展開になるかもしれない。現に30歳前後の人達は、命令には素直に従って仕事を行なうが、命令が出されないと漫画等を読んで過ごしている風が多く見受けられる。受験地獄の弊害とも言える。

[参考資料]

（和文）

1．「日米の技術開発の考え方」、内野、ソフィア162号、1992夏

2．「15年かけて切り開いたセラミック圧電アクチュエータの世界」、内野、週間朝日、1992.5.29

3．「圧電セラミックスのスマートアクチュエータ/システムへの応用」、内野、日本工業教育協会誌第40巻第2号、1992.3

（英文）

4．講演資料「ピエゾ圧電/電歪アクチュエータ」

5．NAVY、ARMY関係の関連研究

6．"TWO-DIMENSIONAL DISPLAYS USING TRANSPARENT PLZT CERAMICS",UCHINO-TOKIWA-GINIEWITZ,Ceramic Transactions,Vol. 14, The American Ceramic Society,1990

7．SMART MATERIALS & STRUCTURES,Vol. 1,No. 1, March 1992, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHINGより抜粋

8．"APPLICATIONS OF PIEZOELECTRIC CERAMICS IN SMART ACTUATORS AND SYSTEMS",UCHINO

9．その他セミナー資料より抜粋

[既存参考文献]

1．講演資料「電子セラミックの基礎と応用」、内野、1985

2．「圧電／電歪アクチュエータ」、内野、日本工業技術センター編、森北出版、1986

1.2 杉本教授

1.2.1 プロフィール

東京大学教養学部宇宙地球科学教室 杉本（すぎもと） 大一郎（だいいちろう） 教授
（専門：天文学）

1.2.2 ヒアリング記録

ご自身の研究について

・MD（Molecular Dynamics）を用いた計算化学（蛋白質の構造解析や薬の設計に使える）や天文系のシミュレーションができる多粒子系専用の高速かつ安価な超並列マシンを作ろうとしている。
・現在出来ているマシンは8mm角に12万トランジスタを収めたカスタムチップを48個使ったものである。これを将来は16mm角の32/64bitチップ（1個当たり0.6～0.8GFLOPS）を1000個つないで1TFLOPSのマシンを作ろうとしている。これをWSのバス（拡張ボード）に直結し、ほとんどの処理はWSにやらせるが、並列処理で効果の上がる計算のみ並列マシンにやらせる（現在もこの方式）。
・予算は文部省の科研費を用いる。現在は5年プロジェクトの1年目であり、最初の3年（予算：1億6千万円）で並列計算機を作り、残り2年（4千万円）でそれを用いた天文学の研究を行なう予定。
・分子間クローン力は比較的遠距離まで作用するが、現在は10Å程度でカットしている。これを20Åまで拡大すると計算量は64倍（3次元：2^3倍→相互作用があるためこれを自乗→64倍）になってしまう。従って多粒子系専用の超並列マシンのニーズは高い。
・流体力学系を多数の渦で記述するとビオ・サバールの法則を適用できるが、これも一種の多粒子系になり、この計算機が使える。
・こうした取り組みは計算機科学としては面白くないと言われるかもしれないが、目的はあくまで天文学など、現場の科学の研究に役立てるためであり、他にも解きたい問題は沢山ある。計算機はあくまでそのための道具と考えている。

3つの視点について

・いずれも良く使われる言葉であるが、抽象的な言葉の遊びにならないよう、標語（キーワード）が先走りしないよう、具体的事例に即して技術の実態を把握して欲しい。

その他の視点について

（多様化）
・これら3つの視点以外では、「多様化」の視点が重要かと思われる。例えば高速の超並列処理計算機を作る場合、何でもできる汎用の並列マシンを作ることも可能だが、無駄

が非常に多い。それよりも例えば「多粒子系のシミュレーション」というように目的を限定してそれに向いたアーキテクチャとソフトウェアを設計したほうがはるかに安上がりで使えるマシンができる。そうなるといろいろな目的に応じた専用マシンを作る、即ち並列計算機の多様化（10数種類あればよい）が必要になる。
・「多品種少量生産システム」なども多様化の考え方の延長線上にある。

（省エネルギー化）
・限られたエネルギー資源を有効に使って人類が生存していくために、依然として省エネルギーの視点が重要である。
・極限化を進めるのも良いが、極限化（特に大きい方への）は、えてしてエネルギーを喰うことも忘れてはならない。

インテリジェント化について

・インテリジェント化の定義をはっきりさせた方が良い。材料自体がインテリジェントな場合と、外から材料にインテリジェンスを与える場合とがある。ヒータに使われるセラミックは温度が上がると抵抗が上がるがこれをインテリジェントととらえるかどうか。
・インテリジェンスを付け加えれば付け加えるほど良いというものではない。逆に使わないインテリジェンス、即ち無駄が増えてしまうことになる（多様化と関連あり）。何を人間にやらせ、何を機械にやらせるか...やはり機械には定型的な作業が向いており、創造的な作業は人間の領域である。
・四次元コンピュータ・プロジェクトでは、脳のシミュレーションを目指しているが、人間の脳では膨大な計算能力が無駄になっており、これをシミュレーションするのは無駄が多く、高くつくように思われるが、その点についても十分検討する必要があろう。
・目的にとって必要最小限の最適なインテリジェント化が必要である。
・ノイマンコンピュータのような硬い情報処理とニューラルコンピュータのような柔らかい情報処理を結合して、互いのメリットを活かしデメリットを補完するようなコンピュータシステムが望まれる。

複合化について

・エレクトロニクスやメカニクスのような「硬い」テクノロジーと分子生物学のような「柔らかい」テクノロジーの結合（例：バイオセンサー、バイオチップ）は興味深い。
・原子力発電などはあらゆる技術の集大成/複合化の産物である。こういった複合システムの場合、一般にシステムの性能は最も悪い要素により決まってくる。

極限化について

・並列計算機のノード数を増やすのも一種の極限化といえるが、並列計算機で一番難しいのは統合制御（全体のオーケストレーションを司るソフトウェア）であり、また数に比例して故障も多くなるため、限界がある。

その他の見解

（国家プロジェクトにおける有用性について）

・通産省/NEDOでやるからには、大学の基礎研究と異なり、やはりあくまで将来産業や社会や人間生活のために役立つ（可能性のある）プロジェクトに取り組むべきだ。原子分子極限操作（アトムクラフト）などは将来大いに応用が開ける可能性がある。
一方例えば統一理論の研究などは、１０^{15}GeVレベルのエネルギー状態（ビッグバンレベル）で初めて有効になるもので、日常生活や産業のレベル（せいぜいMeVレベル）には直接の応用はない。

・目新しいものを追いかけるばかりでなく、流行に流されずに、泥臭い地道なことをきちんとする努力こそ必要である。

（計算機屋とユーザのミスマッチ）

・計算機工学を専門とするいわゆる計算機屋はオールマイティーな汎用マシンを作りたがり、そのために脳の仕組みの解明などに取り組んでいる。一方科学技術計算機のユーザ（研究者）側は特定の問題を解くため専用でもよいから手頃な価格で超高速のマシンを望んでおり、両者の間でミスマッチがある。
　同じ多体問題を解くのに汎用マシンだと300億円かかり、氏の専用マシンなら1億円で作れるとすれば、ユーザ側からみれば専用マシンに歩があると考えざるを得ない。

・このようなミスマッチは数値実験を行なう理論屋・ソフト屋とハード屋の間にもある。このミスマッチを埋める（両者をうまく結び付ける）ことが必要だ。

（研究における支援の必要性）

・カスタムチップを作るには約2000万円かかる。しかし大学で自由に使えるお金といえば100～200万円程度である。最近は実験/測定設備類に多額の資金が必要になってきており、共同で利用できるサポート体制及びインフラストラクチャの整備が必要である。

1.3　伊藤教授

1.3.1　プロフィール

北海道大学工学部電子工学科電波伝送工学　伊藤（いとう）　精彦（きよひこ）　教授

［　経歴・専門分野　］

1939年札幌生まれ、北海道大学工学部電気工学科修士課程終了、同大学助手、講師、助教授、米国シェラキース大学研究員を経て、現在に至る。

アンテナ研究の第一人者で現在、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員長、文部省宇宙科学研宇宙工学委員会委員、郵政省電気技術審議会ＣＣＩＲ専門委員を努める。主な研究としては平面アンテナに関する研究、太陽光発電衛星（ＳＰＳ）に関する研究を行なっている。

1.3.2　ヒアリング記録

ご自身の研究について

・衛星通信における次世代技術開発としては現状の技術レベルとして10ギガ、Ｓバンドまでは実用化のメドがついてきたといえ、その先を狙ってミリ波通信技術の開発に取り組んでいる。

コアとなる技術はアンテナ及び増幅器・変復調回路を構成する素子の技術で、これを基盤的に支えるのはやはり半導体の微細加工技術である。超高周波、高速素子の技術としては、ＧａＡｓが有力技術であるが、技術的にも経済的にもミリ波通信用素子においてＳｉ技術が望ましいと考える。ＮＴＴ厚木研の酒井氏の研究などが進んでいる。

この他要素技術としては地味ではあるがアンテナ及びシステムの性能を評価する技術があり、無響室や電磁波測定技術など高度なノウハウが必要となる。

・太陽発電衛星（ＳＰＳ）の研究については約10年前に文部省の科研費で開始した。この時の研究は欧米の研究動向調査が主で、フィージビリティ研究のみを行なった。米国では70年ごろからいわゆるポストアポロ計画として研究が始まり当時もＮＡＳＡを中心にさかんに研究されていた。プリントアンテナなどの技術もここから出てきた。

3つの視点について

・私の研究分野でいうと、まさしく無線技術の極限化に取り組んでいるが、極限化といっても一言では言い表せないだろう。例えば無線技術においては、ミリ波通信など高性能、高機能化、あるいはアンテナの超小型化、またＳＰＳの様なビッグプロジェクトなど、い

ろいろな極限化の捉え方が可能だと思う。

次に複合化であるが、今後マクロエンジニアリングを要する産業技術開発の重用度はますます増加する、この様な面から複合的な視点は必然的に要求とされよう。従来日本（及び日本の研究者）はこういったマクロエンジニアリングを要する研究開発を推進していくことがあまりなかったせいか、得意ではないといえる。しかし昨今はビッグプロジェクトが目白押しであり、プロジェクト全体を通してシステムディフィニションできる能力を持った研究者が必要とされる。

同じ様なことは大学のシステムについてもいえると思う。現状の大学の工学部を医者に例えると病理をやるものはたくさんいても、臨床をやるものがあまりにも少ない。大学の制度面で改善していくこともちろん必要だが、研究者自身も幅広い視野を備えるべきだ。

その他の見解

大学も次第に変わってくると思う。現在、重点大学構想を文部省では検討している。これは旧帝国大を中心とした10校程度を選び、大学を差別化して重点的に資源を配分しようというものであり論争を生んでいる。国のＣＯＥ構想とも通ずるところがあるだろう。私個人は推進すべしと考えている。優先順位をつけ、あまりにも弱体化した現在の大学の研究体制を再構築し、自ら外に向かって門戸を開く研究機関として確立すべきであろう。
民間との共同研究も必然の流れだと思う。基礎から応用まで行なえる共同研究制度が望まれる。期間として3～5年、予算として20億円程度の幅広い研究分野を対象とした制度が良いのではと思う。ミリ波通信技術開発として私案だが、無響室、測定器、リソグラフィの設備などを備えた、この程度の規模の研究プランを持っている。

大学としてはやはり基礎研究に特色を出したい。基礎研究をやるには伝統がいるとよく言われるが、北大は電波研究では伝統がありこの分野での実績をこれまで述べたような変化の中で今後も積み重ねていきたいと考えている。

1.4 荒川助教授

1.4.1 プロフィール

東京大学生産技術研究所　荒川（あらかわ）　泰彦（やすひこ）　助教授

［ 経 歴 ］

1952年愛知県生まれ、東京大学工学部電子工学科卒、同大学院工学系研究科電気工学専攻科博士過程終了、1981年同大学助教授、1984年から2年間カリフォルニア工科大学で在外研究、東京大学先端科学技術研究センター助教授を経て、1992年より現職。日本IBM科学賞を受賞。

1.4.2 ヒアリング記録

極限化に関して

・シリコンデバイスでは近い将来1GbitクラスのDRAMが実用化されると思われるが、このようにチャンネルをどんどん狭くしていくと必然的に量子効果を考えなければならなくなる。究極的には不純物ゼロが目標であろうが、不純物が1個あるかないかで特性が全く変わってくる（従来のような1000～2000個単位の不純物なら統計的な扱いができた）。従って不純物の制御技術が極めて重要になる。またシリコンと配線の接点におけるオーミックコンタクト（オームの法則に則った線形な接触）が崩れ、電子がどのように伝わるか、といった問題が重要になってくる。

・デバイスの量産を考えた場合、人間が1個1個原子・分子をハンドリングするSTM等の手法では時間と手間がかかり過ぎる。量産のためには、結晶成長（MOCVD等）の手法で、原子の自己組織性と相互作用を利用しつつ、大きい塊の単位で原子をきれいに並べる技術が必要になってくる。例えばある結晶面には原子が付きにくいとか、基板を傾けて結晶成長させると基板上にステップ状の構造ができそのステップの所に原子が付きやすい等の性質を利用したり、SiO2の300Åのパターンをシーズ（種、核）にして選択成長させる、といった手法である。このようにTop-down的にデバイスのミクロ構造を形成する必要があり、またこれは不可能なことではない。

量子効果デバイスについて

・単一電子／光子の制御・ハンドリングを目指している。電子の方は「次世代プロジェクト」でやられているが、光子の方の単一制御も有望である（量子箱レーザ等）。

・不確定性原理の問題（位置×運動量の両者を確定できない）はあるが、位置か運動量のどちらかは完全制御できる。

・実際には電子／光子1個では機能しない。実用に供するためにはある程度のエネルギーが必要なため、10個～100個単位の電子／光子の制御が必要である（そのためには先ず1個単

位で制御できることが必要←パチンコ玉をまとめて沢山の穴に入れるためには、先ず1個の穴への入れ方がわからなければならない）。しかしそうなると多体問題となり、難しい問題となる（1個の挙動ならわかる。また1万～100万個単位の通常レベルの電子なら統計力学的に扱える）。この多体問題を扱うための概念、理論、モデルが必要（確とした理論的背景があった方がデバイスを設計しやすい）。

・各種量子効果デバイスの実用化時期（予測）

(1) 波動の干渉を使ったもの（量子波干渉効果デバイス） － 10～20年後に実用化

(2) 電子の低次元化によるもの

① 量子井戸（2次元）デバイス － 下記は既に実用化

共鳴トンネル効果トランジスタ/ダイオード、量子井戸レーザ、量子井戸光変調器

② 量子細線（1次元）デバイス（レーザ等） － 10年後に実用化

かなり良質な量子細線構造を作製できた（荒川）が、十分狭く（15nm以下）、一様で（寸法揺らぎ20%以下）、高密度な（実用のためには10～100個の量子細線が必要）構造を実現するには、なおさまざまな作製技術の追求が必要。

③ 量子箱（0次元）デバイス（レーザ等） － 15年後に実用化

各所（荒川、北大・福井等）で量子箱構造が試作されており、良好なフォトルミネッセンス特性が得られているが、実用デバイスレベルに至るまでには作製技術上のブレークスルーが必要。

・量子細線／量子箱の作製プロセスについて

量子細線／量子箱の構造を実現するための試みは微細加工（電子ビーム描画法、集積イオンビーム法、X線リソグラフィ、電子ビームエッチング等）による方法と結晶成長（ラテラル成長、オフ基板上へのステップフロー成長、レーザALE、電子ビーム選択成長等）による方法に分けられが、化学エッチング等の外部からの微細加工のみで量子効果を実現するのは、寸法上かなり困難である。

私はGaAs基上に電子ビーム描画技術でSiO2パターンを形成した後、MOCVD法によってGaAs及びAlGaAsを選択成長させることにより量子細線構造を作製した。このように、原子自体の何らかの自己組織性を使わなければこのような極微細で揺らぎの少ない構造は実現できないものと思われる。

・量子効果レーザの応用可能性について

量子効果レーザは、その特性の良さから、超高性能ﾚｰｻﾞとして高度な応用が期待される。

－狭スペクトル線幅、広帯域変調特性 ➪ フェムト秒光パルス（現在のトップデータは色素レーザを用いたAT&Tによる6fsec） ➪ 超高速光通信デバイス

－低閾値電流（現在のトップデータは1mA） ➪ 低消費電力デバイス

－微細構造 ➪ 超高集積・大容量デバイス

➪ アレイ化 ➪ ディスプレイ、超並列光デバイス

・量子効果デバイス実用化のポイント

性能の極限化も将来的には重要だが、実用化のためには、それぞれの量子箱のアレイをどうやってつなぐか、そして何を出力にするか、といったネットワーク化の問題（システム化技術）が重要になる。例えば個々のシナプスの機能は実現できても、脳の機能は実現が難しいように、このような多体問題は困難だが重要な課題である。

・4次元デバイスの提案

電子の1波長分の空間分解能（100Å=10nm）、時間分解能（10fsec）、エネルギー分解能を持った4次元的な量子効果デバイスが出来ないか、と考えている（公式には未発表）。即ち、非常に微細な半導体中に10fsecクラスのレーザ光パルスを発生させる機能を持たせる。

複合化について

・光と電子の融合化も有望な分野である。最近自然放出光のモード制御の観点からマイクロ共振器（現在は主として垂直共振器型レーザ）が議論されているが、この究極の姿である3次元共振器内では光の振動モードは完全に制御され、光の単一モード化が実現される。

一方量子箱構造では電子が3次元的に閉じ込められ、究極的には電子波の単一モード化が実現される。

このような3次元マイクロ共振器レーザと量子箱レーザの概念を融合し、電子波モードと光波モードが完全に制御されたレーザを実現することは、レーザの特性向上のために極めて重要になる。私はこれを「量子マイクロレーザ」と呼んでいる。

その他

・最近日本酸素のMOCVD装置を購入したが、装置と周辺込みで1億5千万円程度かかった。このように最近の研究に必要な装置類は高額なものが多いため、1人年間1億円弱、5年で3億円程度の研究費が適正と考える。

ただし、研究費が多すぎると次にどの装置を買おうか、という感じになってしまい、問題がある。やはりどうしてもこの装置が欲しい、といった切迫したニーズが必要である。また1つの装置を使いこなすには2～3年かかる。研究費の規模としては科研費の特別推進研究ぐらいが丁度良いのではないか。

なお、氏の研究費は科研費、及び民間企業との共同研究費により賄われている。

・大学の研究費が少ないのは周知の事実であるが、一律にばらまくのではなく、限られた大学（優秀な学生のいる大学）への傾斜配分が必要である。また現在は省庁間の仕切りが高いため実現されていないが、通産省や科技庁等の研究開発プロジェクトにも大学の先生が参加しやすくなってほしい。また、米国のNSFのような省庁の枠を超えた予算配分組織も必要である。

※　本記録は、荒川助教授へのインタビューを元に、以下の文献を参考に、MRIで若干の編集を加えた。

* 「量子細線レーザ・量子箱レーザ」、荒川：OPTRONICS No.9、p67 (1990).
* 「選択成長を利用した量子細線・量子箱」、福井／安藤（北海道大学量子界面エレクトロニクス研究センター／NTT基礎研究所）：応用物理 61、p141 (1992).
* 「有機金属気相選択成長による量子細線の作製とその光物性」、荒川：応用物理 61、p800 (1992).
* 「半導体量子マイクロ構造の独創的研究で、光量子情報デバイスの実現に迫る」、360 November (1992).

1.5　吉田教授

1.5.1　プロフィール

東京大学工学部金属工学科　吉田（よしだ）　豊信（とよのぶ）　教授

［　経歴・専門分野　］

1948年生まれ、東京大学工学部冶金工学科卒業、同金属工学科博士課程修了、同助教授を経て、現在に至る。

熱プラズマ、低圧プラズマのプロセシングに関する、基礎現象の解明、プラズマ診断技術とモデル化などの研究に従事。

日本金属学会論文賞、同功績賞などを受賞

日本学術振興会第153委員会（プラズマ材料科学）委員長を務める。

1.5.2　ヒアリング記録

ご自身の研究について

ＣＶＤやスパッタリング法による成膜技術、及び主に無機材料の熱プラズマプロセス技術など、プロセスプラズマ技術の応用とそのためのプラズマパラメータの診断技術、In-Situ計測技術等の開発を行なっている。現在行なっている主な研究は以下の通り。

①ハイブリッドプラズマ溶射法による高温固体電解質型燃料電池の一貫製造プロセス

従来の直流プラズマ法で得られる溶射皮膜の欠点である、内部空孔の問題を解決するため、ハイブリッドプラズマ溶射法（ＤＣ、ＲＦを重畳したプラズマ）を開発し、これを用いた燃料電池一貫プロセスについての研究を進めている。

②ハイブリッドプラズマによるセラミックスの超高速大面積被覆

ハイブリッドプラズマトーチを用いたＣＶＤ法によるSiC,Si3N4などの耐熱セラミックスの超高速堆積（10μm/min以上）、及びダイヤモンドの大面積堆積などを検討している。

③反応性スパッタリング法及びＩＣＰ－ＣＶＤ法によるc-BN膜堆積

ダイアモンド薄膜の特性を凌ぐ、高圧高温相窒化ホウ素の低圧合成を研究している。

反応性スパッタリング法では基板へのイオン照射が有効なことを見いだした。またＩＣＰ（誘導結合プラズマ）ＣＶＤ法との比較も行なっている。

発光分光分析や質量分析によるIn-Situ計測により膜堆積過程の分析を行なっている。

④トンネル電子線を利用したナノプロセシング開発

トンネル電子線源としてＳＴＭを使い、大気、ガス雰囲気下でのナノ領域における新しいプロセシング開発を目指している。例えばＳＴＭで局所プラズマを作りそこでの反応やプロセスの検討などである。現在、レーザー照射などができる専用チャンバーを作成してお

り、この装置により選択的核生成の可能性について調べその堆積メカニズムを解明することを狙っている。

3つの視点について

・極限化といえるかもしれないが”時空間制御プロセシング”を提唱している。
いわゆる極限プロセシングといわれているものを統計力学用語で分類するとΓ空間での極限プロセシングとμ空間での極限プロセシングとに分類できよう。
前者は極限環境下でのプロセシングといえるもので超高低温、超高圧、超高真空、超高磁場、電場、無重力場などの熱力学的状態量、もしくは場の極限環境が利用される。
一方後者では3次元的空間での極限制御を目指すプロセシングである。これは現在、超ＬＳＩやマイクロマシンにおいて発展しつつあるもので、ＭＢＥ法やMOCVD法を利用した超格子薄膜の堆積、ナノレベルエッチング、量子細線や量子ドットの形成やＳＴＭを利用した原子レベルでのプロセシングがあてはまるといえる。
これに続く第3の極限プロセシングとしてｔ空間における”時空間制御プロセシング”が考えられる。これは言ってみれば外的作用を反応プロセスの時間と同期させるということで、究極的に言えば固体の格子振動の時間、つまりピコ秒オーダーでの外的刺激と固体表面の相互作用が考えられる。またそこまでいかなくても例えばプラズマ中での分子の励起緩和時間(～ns)や各種反応の緩和時間(～μs)など現在の技術でも対応可能な領域がある。
このプロセシングの制御には、連続的制御とパルス的制御が考えられる。
前者では位相制御が考えられ、後者ではパルス的エネルギー供給としてパルスレーザーなどの適用が考えられるが、電子線やＸ線の利用も考えられる。
この”時空間制御プロセシング”の概念は現在の私のプラズマ研究から考えついたものであるが、この研究領域での内外の先進的な研究者の間では時空間制御によるプロセシングのブレークスルーが多く試みられている。まさしくプロセシングにおける第3の概念が芽生えているといえるかもしれない。
これ以上言うといささか夢想的になるのでやめるが、これまでの我々プロセス屋の本能的な固定観念として、時代の要請を満たす大量生産用プロセシングには大いなる定常状態が必要であるという根付いた常識があったともいえる。時間軸へのこだわりがおろそかであったことは事実であると思う。

・融合領域の研究会として私が世話人をやっているプラズマ材料科学シンポジウム（学振第153委員会）がある。88年に組織され毎年1回シンポジウムを行なっている（今年で6回目）。プラズマ研究者のみならず、無機、有機材料、半導体プロセス、化学反応論の研究者などが活発な討論を行なっている。
私の他には電総研の松田さん（材料科学部）、無機材研の守吉さん（超高温ステーション総合研究官）、広島大の堀池さん、新日鉄の武田さんなどが中心的な実行委員としてやっておられる。

その他の見解

・これまでの国家プロジェクトは、どちらかというと大蔵省にうまく説明できる絵が書けるプランが採択される傾向が強いように見受けられる。しかし、今後は利害関係の無い第三者による公平な評価に基づく決定プロセスが不可欠と考える。専門のレビューアを擁するＮＳＦの評価システムを見習ってはどうか。

1.6 別府教授

1.6.1 プロフィール

東京大学農学部農芸化学科発酵学研究室　別府（べっぷ）　輝彦（てるひこ）　教授

［ 経 歴 ］

1934年東京都生まれ。東京大学農学部農芸科卒。1961年、同大学化学系大学院農芸化学専門課程終了後、同大学農学部助手。1969年、同助教授。1977年、同教授。

1972年、日本農芸化学会奨励賞、1986年、日本農芸化学会賞を受賞。

1.6.2 ヒアリング記録

代表的研究テーマ

① 蛋白質分解酵素（プロテアーゼ）の研究：

微生物探索の結果、牛乳の蛋白質を凝集させる蛋白質分解酵素を持つ毛カビを発見（先代の有馬教授）。→世界のチーズ生産の5割に用いられている。

キモシン（蛋白質分解酵素の一種）の遺伝子を大腸菌に組み込むことにより、同様の効果（蛋白質凝集）を実現。

蛋白質工学的アプローチにより、酵素と生理活性の関係を解明し、蛋白質分解酵素を改良。

② 有用微生物の研究：

放線菌がホルモンを持ち、ホルモンによって抗生物質産出がコントロールされていることを発見。→抗生物質の生産効率向上や新抗生物質の発見につながる可能性あり。

また放線菌が作る抗生物質の中にガン細胞増殖の休止期に作用するものがあることを発見し、基礎的な研究も行なっている。

③ 抗ガン剤の研究：

細胞増殖メカニズムの研究により、細胞増殖の周期は増殖阻害剤によってかなりコントロールできることがわかり、ガン細胞増殖の制御・停止の手法を研究中。

研究テーマの選定方法について

・たまたまぶつかった興味深い現象に着目し、そこから新たな方向に向けて研究を進めていく、といった形でこれまで研究を行なってきた。特に国とか社会ニーズのため、という目的で研究を行なったことはない。

・例えば、耐熱性トリプトファナーゼ（必須アミノ酸の酵素合成に使える）を生産する好熱性微生物は永らく単離（単独に分離すること）できなかったが、研究を始めてから7年

後に、その微生物がもう1種類の微生物と一緒でないと生存できない、即ち二つの微生物が共生（シンビオシス：symbiosis）している、という事実を発見した。このようなたまたま見つけた微生物や酵素の不思議な性質（宝石にたとえられる）にヒントを得て、そこから研究を発展させてきた。

蛋白質工学における今後の課題について

・蛋白質の構造と機能の相関関係を解明することは、従来はスローガン（夢物語）に過ぎなかったが、最近では蛋白質の3次元構造に関する情報集積が進み、その情報に基づき蛋白質を人工的に改変・デザインできるようになってきた。また蛋白質の機能もかなりわかってきた。今一番欠けているのは、構造と機能をつなぐ理論、例えば蛋白質分子中の有機電子論・反応論であり、今後の重要な研究課題である。

・計算化学（コンピュータによるシミュレーション）も蛋白質工学の一つの重要な道具ではあるが、あくまで手段・インターフェース（コンピュータ・グラフィクス）に過ぎない。

先端的手法と伝統的手法（微生物探索）の組み合せ（複合化）について

・種の多様性は生物の最大の特徴である進化の結果であり、無限の宝庫である。高等動物の種の数は限られているが、微生物となるとその種の数は無限に近く、人類はその1万分の1を知っているに過ぎない。微生物の地道な探索を古くさいと軽視する人々もいるが、私はバイオテクノロジーや生物学、薬学、医学における最も正統的な手法の一つと考えており、遺伝子工学、蛋白質工学、細胞工学、といった先端的な技術と、伝統的な微生物探索とを組み合せて使っていくことが重要と考えている。ちなみに微生物探索に関しては、欧米の薬品会社がほとんど行なっていないのに対し、日本の薬品会社は伝統的に熱心であり、微生物から新しい抗生物質を発見している。

・バイオテクノロジーにはソフト（酵素など、ひいてはそれを生み出す微生物）とハード（例：酵素を用いたバイオリアクタ等）があるが、先ず大事なのはソフトであり、ハードは後で付いてくるものと考えている。

生態学的アプローチについて

・今まで実験生物屋はともすると生態学を毛嫌いする傾向にあったが、トリプトファナーゼ合成微生物の「共生」のような微生物同士のインタラクション、及び微生物と外部環境のからみ、といった生態学的アプローチも今後は重要と考える。例えば土を取ってきてその中のリボソームRNA（rRNA）を種にしてDNAを増殖させ、実際の環境においてどれくらいの種類・数の微生物がどれ位のスピードで進化しているのか、といったテーマも興味深い。

工学における生物の模倣について

・バイオミメティクス（生物の模倣）は工学分野のアプローチとして非常に意義があると思う。

ゲノム・プロジェクト及び遺伝子的アプローチについて

・ゲノム・プロジェクトはそれなりに評価しているが、生物学というよりも一種の情報学（遺伝子の持つ情報を集めることが主眼）であり、生物は情報のみには還元できないから、あれで生物の全てが解明される訳ではない。とはいえ、遺伝子的なアプローチは今後益々重要になることは確かである。

※　本記録は、別府教授へのインタビューを元に、JICSTによる別府教授の執筆文献の検索及び雑誌記事を参考に、MRIで若干の編集を加えたものである。

1.7 蓑田部長

1.7.1 プロフィール

航空宇宙技術研究所熱流体力学部 蓑田(みのた) 光弘(みつひろ) 部長

1.7.2 ヒアリング記録

研究所及び熱流体力学部の研究内容

・研究所全体の予算は約115億円（平成5年度）であり、特に重点研究として、次の課題に取り組んでいる。
- スペースプレーン（有人宇宙往還機）の研究（ラムジェットエンジンの研究など）
- HOPE（宇宙輸送用の無人有翼機）の研究
- 革新航空技術（空力、構造、制御、推進系、システム）の研究
- ロケットエンジンの研究
- 衛星基礎技術の研究
- 宇宙環境利用実験技術（微小重力環境、ロボットによる遠隔操作、水ガス再生処理技術、集光型太陽熱発電技術等）の研究
- 数値シミュレーション技術の研究

・通産省関連では、次の研究開発を行なっている。
- 大型プロジェクト：超音速輸送機用推進システム（平成5年度予算：約1.8億円）
- ムーンライト計画：セラミックガスタービン（同：約5千万円）

・熱流体力学部では、原動機部（主としてエンジンのハードウェア開発を担当）等と協力しつつ、航空機及び宇宙往還機の推進技術に関する基礎的な研究（流体騒音、非定常流体、燃焼現象、伝熱、数値実験等）を行なっている。また大プロ（現：産業科学技術研究開発制度）の「超音速輸送機用推進システム」の基礎技術に関する研究も行なっている。

技術の極限化について

・航空機のジェットエンジンの内部流れ（注：これに対して航空機の外部の流れを「外部流れ」という）の測定技術が極限化する。即ち、ガスタービンの羽根と羽根の間の数mmの狭い空間における複雑な流れの3次元的分布を、レーザ流速計（灯油蒸気等のシードを入れ、それにレーザを当てて散乱光を測定）等の光学的測定により、1998年頃にはある程度計測できるようになるであろう。（現在は回転体中の高速流体の流れは計測不可能）

・さらに2003年頃には、内部流れにおける乱れ（乱流）の細かい計測が可能となろう。現在はピトー管や圧力計によって、平均化された流れを測っているが、レーザ・ドップラー流速計などで細かい乱れが測定できるようになるかもしれない。

・エンジンの基本的な設計目標は「小さくて高出力で高効率」である。このためには燃焼温度を上げれば良いが、燃焼温度は材料面の制約によりサチュレートしかけており、50℃上げるにも大変な努力が必要な状況である。実用機のジェットエンジンのタービン入口温度（＝燃焼器の出口温度）は約1300～1400℃であり、現在実験室レベルでは約1500℃が達成されているが、これを大プロ（超音速輸送機）のターゲットである1700℃まで持っていくのはかなり難しい課題である。

・現在タービン入口温度は直接測れないため、タービン出口温度（入口温度より200～300℃程度低い）から逆算している。2000℃にも達する燃焼器内の温度を直接測れればよいが、センサーが融ける、プローブを伝わって熱が逃げる、といった問題があり、今後の課題である。

・燃焼ガスの成分（CO、NO2、OH等）を測る技術も、低NOx技術向上のために必要である。現在はガスをサンプリングして分析器にかけているが、ガスが冷えてしまう、化学反応により組成が変化してしまう、という問題がある。直接燃焼状態のガス成分を測るには、OHは特定波長で発光するといった特性を利用した光学的方法が有効である。レーザによる測定もやりかけているが、計測手段として活用するには至っていない。

・バイパスエンジン（ファンジェットエンジン：ターボジェットエンジンの高圧タービンの後ろに低圧タービンを付け、その力で圧縮機の前にある大きなファンを回し、大量の空気を圧縮機を通さずにバイパスさせて後ろに吹き出し、大きな推力を得るようにしたジェットエンジンで、ジャンボジェットやエアバスに使われている）のバイパス比を上げれば上げるほど燃費が向上する。現在実用化されているファンジェットエンジンのバイパス比は5～6（圧縮機を通る空気の5～6倍がバイパスする）であり、現在9程度のものを開発中であるが、将来は15～20のものができる可能性がある。

技術の複合化について

・航空機や宇宙往還機は、エンジン技術、空力技術、構造・材料技術、制御技術、数理解析技術等多くの技術の集大成である。

・スペースプレーンに使われる可能性のある「エアターボラムジェットエンジン」は、ターボジェットエンジンとラムジェットエンジンを複合化（ハイブリッド化）したもので、低速時にはファン部で推力を発生し、高速時にはラム圧縮による燃焼により推力を発生する。

技術のインテリジェント化について

・耐熱材料においては、遮熱コーティングあるいは傾斜機能材料化によって材料を保護するが、コーティング部分にクラックが入った場合に、クラックを自己修復するような材料が今後開発される可能性がある。

技術移転について

・航空機用のガスタービンの技術は発電用タービンの技術に多大なる波及効果を与えている。

計算流体力学（CFD）について

・特にタービンに関しては、ブレード等の形状を与えれば、スーパーコンピュータ（FACOM：VP-400クラス×140ユニットの並列計算機）によるシミュレーション（ナヴィエ・ストークス方程式に基づいた数値流体実験）で特性の解析が可能である。ただし、計算機の答えが本当に正しいかどうかは実際に測定して検証する必要がある。また、必要な特性を持つような翼形の設計は今後の課題である。

・圧縮機や燃焼器中の熱流体の数値解析は現在研究段階である。

・プログラムによって、メッシュの切り方、メッシュの細かさなどが違い、計算結果が異なることが多い。信頼性の高い計算結果を得るためには、プログラムのクセを十分把握しつつ使う必要がある。現在は「彼が書いたプログラムなら信頼できる」ということで使っているが、この辺も今後の課題である。

今後の有望テーマについて

(1) 新形態のエンジン

① スペースプレーンや極超音速機（マッハ5～6以上）のためのエアブリージングエンジン
- エアターボラムジェットエンジン
- スクラムジェットエンジン（ラムジェットエンジンの一種であり、燃焼室内の流速を超音速に保ったままで超高速燃焼させるもの）

② バイパス比の高いファンジェットエンジン（燃費/推力向上のため）

③ VTOL（垂直離着陸機）のためのリフトファンエンジン
コアエンジンから排出される高圧空気を翼に組み込まれた数個のリフトファンエンジンに送り、機体を揚げる。ただし騒音、入口乱れ等の問題あり。

(2) 基盤技術

① 計測技術

- 超高温（2000℃クラス）計測
- 燃焼ガス成分の直接計測
- 内部高速流体の3次元流れ/乱れ計測
- 非定常状態の計測

（1万rpm×ﾀｰﾋﾞﾝﾌﾞﾚｰﾄﾞ100枚＝1MHz程度のサンプリングが必要になり、センサのｆ特が追い付かない）

② 計算流体力学（CFD）

- 特に圧縮機や燃焼系の数値シミュレーション

③ 材料評価技術

- 材料の試験方法の確立・統一

［ 参考資料 ］

・「航空と宇宙」、蓑田、日本機械学会講演会資料、92.11.17-18

・「ジェットエンジンのしくみ」「いろいろなジェットエンジン」「ジェットエンジンのいろいろな試験」、航空宇宙技術研究所・原動機部

・「NATIONAL AEROSPACE LABORATORY」（航空宇宙技術研究所パンフレット）、航空宇宙技術研究所

1.8　K部長

1.8.1　プロフィール

T社技術研究所　K部長

1.8.2　ヒアリング記録

T社における研究開発について

・プロセス及び新規分野関連の研究・開発を行う技術研究所の他に、メカトロニクスや応用解析関連のエンジニアリング研究所、及び事業部に属する産業システム研究所がある。技術開発研究所の研究開発概要は以下のとおり。

(1)　プロセス関連

①　プロセス開発

化学プロセスの実験室規模での開発（触媒の探索・評価を含む）

②　プロセス技術

自社プロセスを中心とする化学プロセスの技術維持・改良（実務寄り）

(2)　材料関連

化学プラント用構造材料（防食/セラミクス等）の研究開発、安全性診断等

(3)　新規分野関連

①　バイオ関連

・RITEのために藻類による炭酸ガス固定化等を研究。藻類の探索・培養・遺伝子組換え等を実施。

・発酵プロセスの制御、バイオリアクター技術の研究

・ライフサイエンス事業本部で水処理（アオコ除去）装置を実用化

②　ラボシステム

分析（社内サンプル）、LA（ラボラトリ・オートメーション：自動分析システム、LAN等）、試験設備設計、プラント試運転分析立会・指導

・超電導材料サンプルの自動供給ラインを開発納入

・石油精製会社と共同で石油製品の自動分析装置を開発

③　宇宙関連

・無重力実験装置の開発

・宇宙用の閉鎖系環境制御の研究

3つの視点について

・極限化・複合化・インテリジェント化はいずれも手段あるいは流れに過ぎない。その時代々々の価値観（大量生産、省エネ、対環境等）の変遷を正しく認識し、極限化、複合化、インテリジェント化によって人類にどのように貢献するのか将来に向って設定する

ことが重要。これまでの価値観の変遷を見ると、水も空気も使い放題の大量生産の時代があり、その後省エネ・コストダウンの時代が到来し、現在では地球規模の環境への配慮が課題となっている。

技術の高度化について

・セラミックス膜の細孔径の均一化（2005年頃）。現在セラミックス膜は耐薬品性、耐熱性（150℃以上でも使える）を持つ分離膜として既に実用化されている。高温ガスからCO_2を分離する場合など、一旦ガスを冷やす必要がないので有利。しかし、孔径が不均一なため分離性が悪い。今後はセラミックスのミクロ構造を自由に制御することにより、用途に応じた（例えば、H_2を透過してCO_2を透過しない膜、あるいはその逆）分離性の良いセラミックス膜が期待される。

・高純度、高温（600℃まで）用の分離膜としては、以前からパラジウム等の金属膜が使われてきたが、値段が高いのが欠点である。

・現在触媒は試行錯誤で探索しているが、よりシステマティックな方法が望まれる。どの原子とどの原子をどのように組み合せるとどのような機能を持つか、といったことに関する理論的な研究が必要で、大学での基礎研究に期待したい。将来はコンピュータ上の材料データベースを利用して、任意の反応を指定すると触媒を設計してくれるようなシステムが現れる可能性がある（2020年頃か）。

技術の複合化に関して

・①原料の前処理（分離・精製）、②反応、③生成物の分離・精製の３つの工程（または②、③の２つ）を同時に実行できる膜リアクタ。

例：メタンとスチームを混合し800℃で加熱するとH_2、CO、CO_2ができるが、400～500℃・数十気圧ではまだほとんどメタンのままで、H_2は少ししか出来ない。しかし、この反応装置に耐熱性のセラミックス膜（または金属膜）を入れて、出来たH_2を分離してやると、見掛け上平衡点を越えて反応が進む。 ➪ 省エネ化、コンパクト化、コストダウンにつながる。

このような②、③の工程を複合化した膜リアクタは既に工技院・化学技術研究所、早稲田大学、東京農工大学等でかなり研究されている。①の前処理も複合化できれば、汚い原料を直接用いることができ、さらに省エネ化、コンパクト化、コストダウンにつながる。

C1化学について

・10数年前に盛んに叫ばれたが、その後下火になり、また近年注目されているようである。一つには、東南アジアなどで眠っている天然ガス（OPECの影響が弱い）の利用、という観点がある。天然ガス（メタン）からメタノールあるいは直接又は間接的にエチレンを

合成する、というプロセスだが、メタノール化学の方が可能性があるように思う。現状では経済性は難しいとは思うが、フォローはしておきたい。

・CO2の利用（C1化学への組み込み等）については、どんな形にするにせよ結局は相応のエネルギーが必要になる。太陽エネルギーや常温核融合を使うのならよいが、それ以外だと結局トータルなエネルギー収支比がマイナスになってしまう。

今後の有望領域について

・宇宙関係：微小重力実験装置、閉鎖系環境制御技術等

・地球上の物質・エネルギーシステムの把握
- 製造装置の材料製造や処分までを含めた物質・エネルギーシステムの把握と望ましいプロセスの選定
- 日本あるいは世界を想定した、最も望ましくかつ現実的なエネルギーシステム（現状の置換型）のF.S.

1.9 河内教授

1.9.1 プロフィール

東京大学先端科学技術研究センター　河内（かわち）　啓二（けいじ）　教授

［経歴］

1947年生まれ、東京大学工学部航空学科卒業。1975年、同大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了、工学博士。1990年10月まで同大学先端科学技術センター・バイオメカニクス分野・助教授。1990年10月より同大学工学部航空学科・教授。1992年4月より同大学先端科学技術研究センター・教授。

1.9.2 ヒアリング記録

ご研究内容について

・東大工学部大学院及び航空宇宙技術研究所を通じて、主としてヘリコプタ、ティルト・ロータ（垂直上昇時にプロペラ・エンジンを90℃回転させる有翼航空機）、ティルト・ウィング（離陸時に羽根自体を傾ける有翼航空機）などのVTOL（垂直離着陸機）の研究を行なってきた。（なお、メーカサイドで優秀な若手研究者が育ってきたので、メーカの取り組みが遅れているオペレーションや騒音・振動の問題に研究をシフトさせた。）

・東大先端研では生物の流体力学的な運動メカニズムの原理を工学に応用するバイオメカニクス分野の研究を行なっている。

・平成４年度（正確には平成4年10月）から、新技術事業団のERATO（創造科学推進事業）の「微小流動」プロジェクト（別紙参照）の総括責任者として、流体（特に気体）中で活動する微小な生物（特に抗力・揚力複合利用運動を行なっている飛翔昆虫に焦点を当てる）の運動メカニズムの解明を通じて、抗力・揚力の発生メカニズム・制御方法の研究を行なっている。

技術のインテリジェント化について

・生物の流体中での運動メカニズムと流体力学、制御工学との接点を探っている（バイオメカニクス）。バイオミメティクスという言葉があるが、単に形を真似るだけではうまくいかない。原理にさかのぼってそれを人間が使いやすい形で応用する必要がある。

技術の極限化について

・マイクロマシーンの研究が盛んになりつつあるが、従来の機械（モータ、歯車等）を単に縮小すればよいという訳ではなく、微細な機械にはその大きさにふさわしい固有のメカニズムが必要である。物の大きさが3桁変わると性質がかなり変わる。人間の寸法はメートル・オーダであるから、マイクロとは6桁の開きがある。μmオーダの機械は人間に作用するには寸法が小さすぎ、それを補う多くの数が必要になる。このような観点から、昆虫の運動メカニズムを応用したmm（あるいはcm）サイズの「ミリマシーン」が有望と考えている。

・ミリマシーンの応用用途については、メーカに聞くのが適切と思うが、掃除ロボット（家の壁にクモのような掃除ロボットが沢山生息し、常に動いて掃除をしている：常動・群ロボット）や静電除去ロボット（MITの先生が考えている微小ロボット：ディスプレイ上に生息し、ホコリや静電容量を喰う）などが考えられる。

・動物（獣や鳥）の体は骨格構造であるが、昆虫の体はモノコック構造（中空）になっており、関節の代わりに弾性変形する。実際に子供のオモチャを見るとモノコック構造のものが多く、意外に良くできていることがわかる。ミリマシーンは今のオモチャを微小化して知性を持たせたものと考えればよい。

・昆虫サイズ以下の微小機械になるとシリコンのような硬い材料は不適切で、高分子のような柔らかい材料が適する。ただしこのような柔らかい材料の微細加工は未知である。

・ミリマシン、マイクロマシンにとって最大のネックはエネルギー供給とコントロールである。10μmのマシンが手の平の距離を移動するのは、200mのタンカーが地球を半周するのに匹敵し、そのために必要なエネルギーは莫大である。その意味では、電池のようなエネルギー内蔵型ではなく、赤血球や白血球のように外部の流体に駆動される方法が有利である。

・赤血球や白血球がそうであるように、微小機械が人間に作用するためには数が必要であり、群ロボットの考え方が必要である。

・将来的には、もっと細かい領域の流体力学的な運動メカニズムを探っていきたいと考えている。即ち細胞内の拡散現象やDNAの運動メカニズムなど。

VTOLについて

・ヘリコプタ等のVTOLでは、プロペラによって発生する騒音と風の問題が最大のネックとなる（特に都市では）。ヘリコプタはプロペラ径が10m以下に抑えられているが、径が小さくなればなるほど風速と騒音が増し、ホバリング時の効率も悪化する。ヘリコプタやティルト・ロータで発生する風速は10m/sec程度、ティルト・ウィングでは30m/sec程度だが、航空技研で構想・研究中のVTOLでは100m/secもの風が発生し、都市では使いにくいだろう。

・ヘリコプタ等のVTOLは今でも高山や離島用、報道・捜査、救助・保安、観光用、企業のVIP用（ソニーなど）に使われているが、今後は企業内コミュータやエア・タクシーとしての用途が広がるであろう。米国のような自家用機の普及は、所得や人口密度を考えると、日本では難しいであろう。（この分野については、技報堂「東京の交通問題」が詳しい。）

国の研究開発制度について

・日本の大学・国研における研究開発の最大の問題点は、専門の評価者が予算を配る側にいない点にある。米国のNSFなどでは評価の専門家であるレビューアがおり、プロジェクトがうまくいかない場合はレビューアも交替し、成功したレビューアは残るシステムなので、優秀な専門家が多い。日本でも例えばNEDOのような所でもっと専門のレビューアを育てるべきだと思う。

・研究開発プロジェクトに失敗はつきもの（特に難しい研究開発ほど）であり、全体的・長期的な視点から見て、多少の失敗は許されるべきだと思う。ところが、企業が国家プロジェクトに参加する場合はそうはいかないことが多い。プロジェクトの成功/失敗は企業から参加したエンジニアの企業内評価に即つながってしまうからである。

・国の産官学共同プロジェクトでは学の役割が小さいものが多い。大学での新しいユニークな研究に対して、通産省や科技庁から研究費が入る仕組みがもっと必要ではないか。

・創造科学（新技術事業団の創造科学推進事業）は素晴らしい制度である。この制度の発足・運営は千葉（玄彌）理事の尽力によるところが大きい。

・創造科学の微小流動プロジェクトをやる上で、工技院の研究所のある優秀な研究者の協力がどうしても必要なため、出向を依頼したところ、いろいろ問題があり、うまく研究協力が行なえず困っている。

・研究開発の予算制度には多様性が必要である。主流の研究に対する科研費のようなバランスを考えた分配制度と、主流からはずれていてもユニークで独創的な研究に対する創造科学のような制度が両方必要だと考える。

[　参考資料　]

・「研究主題『微小流動』の概要」、新技術事業団
・「生物の運動メカニズムを明らかにし、航空・流体力学など工学のさまざまな分野に応用する」、360 December 1992
・「東京の交通問題」、河内他、技報堂
・「ゾウの時間　ネズミの時間」、本川達雄、中公新書

1.10　内田顧問

1.10.1　プロフィール

帝人株式会社　内田（うちだ）　盛也（もりや）　顧問　（工学博士、日本学術会議会員）

1.10.2　ヒアリング記録

(1)　米国の科学技術政策・戦略について

米国の科学技術政策の概要

・1992年9月から10月にかけて日本学術会議のアメリカ合衆国派遣代表団の一員として訪米し、科学技術関係の議会関係者、行政機関、国立研究所、及び大学を訪問し、その結果を「平成４年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」（平成5年3月、日本学術会議）にとりまとめた。この報告書にクリントン政権の政策を含む米国の科学技術政策・組織の全貌及び最新動向をまとめてあるので、是非ご一読いただきたい。

・この訪米時に、科学技術政策において強力な権限を有する科学・宇宙・技術技術委員会（連邦議会下院）のGeorge E. Brown委員長（米国議会技術評価局理事会議長を兼任）に会ってきた。この人と技術競争力委員会議長のTim Valentine議員が米国の科学技術政策のキーマンであり、この二人（あるいは委員会）は米国の科学技術政策の方向付けに強い力を持っているようである。

・また、大統領の科学技術補佐官であるD. Allan Bromley博士（大統領科学技術顧問、大統領科学技術諮問委員会委員長、及びOSTP－大統領府科学技術政策局－局長を兼務。元イエール大学物理学教授）にも会ってきた。会談内容は前出報告書p117を参照。

・米国の科学技術政策の一つの大きな特徴は、科学技術関連の法案/戦略（例：下院民主党の「米国技術競争力法案」、「1992年国家競争力法案」、下院共和党の「1992年基盤的競争力法案」、上院民主党の「経済リーダーシップ戦略」）が、研究開発支出、技術情報サービス、研究開発支援、教育、インフラ、行政、貿易ツール、税制、独禁法等の科学技術に関連する様々な政策を統括的/総合的に扱っている点にある（前出報告書p66-68の表を参照）。

・米国の科学技術政策の基本は1991年米国技術卓越法（1992年2月成立、前出報告書p74参照）である。

科学技術政策システムの日米比較

・日米の科学技術政策システムを比較すると、行政府、議会、学会いずれを取っても日本が見劣りがする。米国の大統領科学補佐官（勧告権を有する）に相当する役職は日本に無いし、日本の科学技術庁は米国のOSTP（科学技術政策局）に比べて調整権限が弱い。議会の科学技術関連委員会にしても日本の国会の委員会は実力が無い。また米国の全米科学アカデミー（1863年設立）やその傘下の全米工学アカデミー（1964年設立）に比べると、日本の学術会議は個人というよりも多くの学協会の集まりである。従って日本の方が、日本全体の科学者・技術者の代表機関として活動できる筈である。日本の科学技術行政においては各省庁の力が強いが、各省庁の行政の調整を図る機関として科学技術庁は、省庁の枠をはずれた機能となるべきと考える。

・日本として学術国際貢献の新しいシステムの必要性について学術会議４月総会で決議（総理に説明済み）。

・日本においては科学技術政策において総理のイニシアチブが発揮されていない。米国の大統領が国民の直接選挙で選ばれるのに対し、日本の総理が直接選挙では選ばれないこともこの一因である。

・米国議会には議員１人当たり60人ものスタッフ持ち、総スタッフ数は1万人にも及ぶ。また議会はOTA（技術評価局）、CRS（議会調査局）を有し、それぞれ143名、及び860名の職員を抱えている。一方日本の国会議員のスタッフは量・質ともに貧弱である。

クリントン政権の科学技術政策について

・クリントン大統領は前出報告書p85にあるような意欲的なプログラムを掲げているが、これがどの程度実行に移されるかについては疑問がある。クリントン大統領はまだ勉強中の学生という印象が強く、むしろゴア副大統領の方がしっかりしたポリシーを持っている。

軍事技術から民生技術重視の方向

・既にブッシュ政権時代に、DOD及びDOEの研究開発において民生比率を向上させることが決定されるなど、民生技術重視の方向が打ち出されていた。クリントン政権もこの路線を推し進めることは間違いない。

産軍複合体の今後について

・冷戦が終結した現在、米国の産軍複合体はガタガタになっている。関連企業などはゼイ肉を落すために統合化・集中化・効率化を進めている。産軍複合体の今後の方針は雇用調整（解雇）と民生への転換だが、民生転換はなかなかうまくいかないであろう。よく

spin-offということがいわれるが、実際には民生から軍事へのspin-onの方が容易である。ミサイルの命中精度が上がったのも民生技術からのspin-onである。米国は今後も金と人を民生（分野のハイテク）にシフトさせていくであろう。その場合落ちこぼれる人も出てくるのは当然であり、他の衰退産業と事情は同じである。

米国製造業の空洞化について

・米国では製造業が復活しつつある。フォード、クライスラー等の米国メーカの一人当たり労働生産性は、日本メーカよりも高くなってきている。自動車メーカの場合再び日米逆転が起こっている。半導体も力を付けているが、いかんせん米国の半導体メーカは少ししか残っていない。米国政府はSEMATECはうまくいっているといっているが、米国企業は自社のことしか考えない傾向があり、たいしたことはない、との説もある。

米国の政策における多国籍大企業の位置付けについて

・米国では産業と大学は国から独立していることが憲法で定められている。これは連邦制度が出来る前から、大学は宗教とも関連しつつ成立しており、産業はグローバルに活動してきたためであり、米国に国立大学が無いのはこのためである。米国では政府が産業に干渉するのは独禁法に触れる場合である（この唯一恐かった独禁法も緩められた）。

・一方日本の産業界は明治維新以来「富国強兵」の旗頭のもとに中央官庁の指導を受けてきた。この結果日本にはほとんど全ての業種があり、また国民の所得レベルも欧米に比べてはるかに平等である。皮肉なことに旧ソ連など社会主義国の理想とする状態を実現したといえる。ただし、最近では産業界は国の指導を離れ、逆に政府へ社会の変化に合致する行政を行うように物申すことが増えてきた。

・米国の多国籍大企業は政府をいかにコントロールするかを考えている。IBMが司法省にソフトウェアの知的所有権を認めさせたのもその一例である。逆に日本の企業は官庁の傘下にあり、米国から外圧がかかると日本の役所が企業を巧みにまとめて対処してくれるので、米国政府にとっては有難い話であった。しかし、最近では政府の指導を受けない企業が増えている。

・メイフラワー号に乗って米国に真っ先に来たのはユダヤ系の人々である。そして、彼らは階層社会を形成し、その上層部は目に見えない莫大な資産を形成してきた（それらの多くは使わずに、いざという時のために眠らせてある）。ユダヤ系の資産家は日本の株式を暴落させたり円を高下させることもできる。

・米国の大資本家は表には顔を出さないが、見えないところで国策をコントロールしている。モルガンとロックフェラーが米国企業の６割を動かしている。かつての日米繊維摩擦は沖縄返還とのバータで方が付いたが、実はノースカロライナ州のある資本家が動かしていたことがわかった。

米国の知的所有権戦略について

・米国にとってアジアの産業の成長は脅威である。しかし米国政府は憲法上産業に直接関係するR&Dに金を出せない。従って国内の知的所有権の強化保護と通商政策によって米国産業をガードせざるを得ない。ガードしている間に国内の人材を育成しようという戦略である。ガードの相手として米国は今後経済成長の大きいアジアを重点的に狙っている。知的所有権で戦う場合、ミノルタ v.s. ハネウェルのように「儲かる所から取る」のは当然の戦略である。相手企業がつぶれないギリギリの線で戦うのである。

・帝人は30数年前、ポリエステルのライセンスのために約10億円を払った。今の金にしたら巨額のものである。富士通はIBMに1000億円払った。富士通の年間の研究開発費は3000億円であり、自分で開発することを考えれば安いものである。

・NIHは1兆円という莫大な予算を投じてヒトゲノムを解析している。この成果を全くの無償で提供するのではあまりにももったいない。成果はオープンにするがパテントは許し、莫大なR&D投資の一部を（安価な）ロイヤルティーによって回収し、それを再びR&Dや産業振興に振り向けるのは賢明な方策と考える。米国の特許意匠登録庁が今回NIHの申請を却下したのは、あくまで現行の特許法に触れる、という判断である。これを契機としてこれから論議が始まり、今後はヒトゲノムの知的所有権を認める方向で展開するであろう。

・マイクロソフトのような企業が他社を押しのけて排他的に利益を得ようとするのは、企業の論理としては当然である。一方独禁法に触れる行為を規制するのは公共の論理として当然である。要すれば、国益・社益とフェアな精神とのバランスが重要である。

・米国において知的所有権に関する裁判で戦うには、当然のことながら陪審員制度等の米国の制度を熟知すべきである。陪審員制度の裁判で先ず重要なのは、ダーティー・ハンドでない（悪意がない）ことである。特許担当部長・役員ではなく、社長あるいは副社長（米国では特許担当重役がNo.2の座にある企業が多い）自らが裁判に乗り込んで、いかに自社に悪意がなく（＝クリーン・ハンド）、フェアで、社会に貢献しているかを主張しなければならない。

(2) ECの科学技術及び人材育成政策について

・ECの科学技術政策については、「平成３年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　ベルギー王国及びオーストリア共和国」（平成4年4月、日本学術会議）を参照されたい。ECの科学技術政策で最も重要なのは「第3次フレームワーク・プログラム」である。

・特筆すべきは、Erasmus計画（EC域内の大学生の相互交流をはかるもの）やComett計画

（大学と企業の交流・協力を促進するもの）などの人材育成・交流プログラムである。なお日本でも人材育成・交流について先般科学技術会議に諮問（第20号）され、検討が開始された。

・欧州ではProfessional Engineerという資格があり、米国にはインターン制度及びProfessional Engineer制度（試験がある）がある。P.E.になると高い社会的地位と給料が与えられる。一方日本の技術者は専ら企業が育てる。従って給料も安い。また海外で仕事をする時に資格が無いと問題が出てくる。日本にも技術士制度があるが、P.E.に比べるとコンサルタント的であり、また社会的地位も無い。日本においてもP.E.のような制度が必要である。

(3) 日本の技術戦略のあるべき姿について

・これからの日本の科学技術政策は外圧に右往左往するようであってはならない。

・米国が日本を叩くのは、日本を悪者にしておくのが一番無難だからである。国民の不満を日本に向けているのである。しかし日本の技術戦略が外圧に動かされるのは望ましい姿ではない。今後は科学技術大綱でうたわれているように「知的資源立国」をベースとして、科学技術で世界に貢献する、国はそのためにはGNPの1%（日本は現在0.43%、米国は1%）の科学技術予算が必要である（日本の研究開発費の政府負担比率は米国に比べて格段に少ない）。

・実際に科学技術を発展させていくのは政府ではなく科学者自身である。政府の仕事はどこで誰がどのようにして研究を行なうかを考えお膳立てすることである。科学技術はグローバルなものである。世界中の科学者が協力して、世界で一番研究に適した場所で、効率よく国際共同研究をするような枠組みが必要である。例えば天体観測では、ハワイ島マウナケア火山の頂上に各国が天文台を作っているのはその例といえよう。

<u>日本のR&D重点領域について</u>

・日本は伝統的に材料等ハードウェアに強く、一方米国はソフトウェア、コンピュータ、宇宙、ライフサイエンスに強い。

・量子力学をベースとした材料の原子・分子レベルの操作・加工は日本のお家芸であり、今後技術・産業・社会に巨大なインパクトを与える。分子生物学を基礎とした植物メタボリズム（代謝）の解明による新農業、動物の生体機能の解明の進展とヘルスケア分野が重要である。

・今後は材料・機械等のハードウェアの上にファッションやプログラム等のソフトウェアが乗っかり、人間や社会とのインターフェースを取り持つ「新産業革命」が起こる。従って今後は広義のソフトウェアに関する知的所有権の保護が対米戦略上も益々重要になる。

産学交流について

・企業はもっと大学に協力しなければならない。学生は未来からの留学生である。有能な学生を育てることが次の世代の企業の基盤となる。

・研究だけでは国家及び国民は食べていけない。研究成果を産業に移転して、雇用の拡大と生活水準の向上に寄与してこそ意味がある。

・また人類の直面する困難を克服するために、新知識が生かされることが必要である。

アジアとの技術交流について

・先日、アジア太平洋科学技術協力高級事務レベルの会議があった。こういう場を日本は放っておけないし、逆にしゃしゃり出てもいけない。日本のアジアにおける立場とはそのような微妙な立場である。

中国やロシアに対する技術協力について

・中国の酸性雨問題やロシアの核廃棄問題への援助・協力は、お金をドブに捨てるようなものと思われるかもしれないが、結局は将来日本自身にはねかえってくる問題である。相手のために、というよりも自分のために必要なのである。ちなみに、ロシアは都市国家であるから、地域ごとにどうすればよいか考え、地域の実態に即したプランで協力すればうまくゆくであろう。

日本企業の対米戦略について

・スーパー301条等の米国の対日通商戦略は政府間ではゆゆしき問題であろうが、日本企業にとってみればさほど憂慮には当たらない。米国内で生産や研究開発を行ない、米国企業として逆に通商法を利用すれば良いのである。

バイ・ジャパニーズについて

・日本は自由貿易で生きている国である。バイ・アメリカンに対抗してバイ・ジャパニーズは絶対にできない。モンロー主義になって一番困るのは日本である。欧州（EC）や北米（NAFTA）ではブロック経済化の動きがあるが、多様な民族・国家の集まりであるアジアではブロック経済圏は不可能だ。日本はあくまでGATTの枠組みの中で自由貿易をモットーに進むべきである。

2．アンケート調査票

Q1　過去及び将来の産業技術の流れをとらえる上で、技術の「極限化」、「複合化」、「インテリジェント化」といった視点の他に有効な視点がもしあれば、ご教示下さい。

＿＿＿＿＿＿＿＿（コメント：　　）

Q2　ご専門分野またはその周辺分野に関して、技術の極限化（加工寸法の微細化、計測精度の向上、実験／生産環境の極限化等）が今後（今後５年後、10年後）どの程度進展するとお考えですか？　（該当する番号に○をお付け下さい）

1．飛躍的に進展する。
2．ある程度進展する。
3．あまり進展は期待できない。

→具体的に、いつ頃どの程度進展し、産業や他の技術などに及ぼすインパクトはどのようになるでしょうか？　（進展度合についてはできれば定量的にお答え下さい）

技術名　：＿＿＿＿＿＿＿＿
進展度合　：＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
インパクト：

技術名　：＿＿＿＿＿＿＿＿
進展度合　：＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
インパクト：

技術名　：＿＿＿＿＿＿＿＿
進展度合　：＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
＿＿＿＿＿＿＿＿（西暦　　年頃）
インパクト：

Q3　ご専門分野またはその周辺分野の技術が、将来（今後５年後、10年後程度）他の技術と複合／融合する可能性はありますでしょうか？

1．おおいに可能性がある。
2．もしかしたらあるかもしれない。
3．あまり可能性はない。

→ 具体的に、どの技術とどの技術が複合／融合し、どのような既存技術の発展、あるいは新技術やコンセプトの生成が考えられますか？

既存技術：　　新技術／コンセプト：

既存技術：　　新技術／コンセプト：

既存技術：　　新技術／コンセプト：

Q4　ご専門分野またはその周辺分野に関して、技術のインテリジェント化（自己組織化機能、自己修復機能、自己情報処理機能、環境適応機能等）が進む可能性はどの程度あるとお考えですか？

1．かなり進む
2．ある程度は進む
3．進まない

→ その内容はどのようなイメージでしょうか？

既存技術：　　インテリジェント化の内容

Q5　今後５年後、10年後に有望となりそうな技術の領域についてご教示下さい。

この領域を有望とお考えになる理由について、以下より複数選択し○を付けて下さい。（複数回答）

① 産業や社会へのインパクトが大きい。

② 他の技術への波及効果が大きい。

② 何に使えるかわからないが、未知の分野へのチャレンジとして意味がある。

④ 技術トレンドからみて、実現の可能性が高い。

⑤ 産業や社会からのニーズが強い。

⑥ 科学技術による我が国の国際貢献の観点から意義がある。

有望領域

_____

理　由（複数）

1、2、3、4、5、6

具体的R&Dテーマ（複数可）

_____

_____

_____

NEDOの役割（複数）

1、2、3、4、5

（その理由：複数）

1、2、3、4、5

キーパーソン（同領域の研究者または見識をお持ちの方：ご自身を含む）

所属・役職 _____ 氏名 _____

分類　1．同領域の研究者　2．同領域について見識をお持ちの方（いずれかに○）

この領域の研究開発における今後のNEDOの役割について、下記のうちあてはまるご意見を複数選択し、○を付けて下さい。（複数回答）

① NEDOとして（委託、ｸﾞﾗﾝﾄ等により）積極的に取り組むべきである。

② NEDOよりもむしろ民間企業で取り組むべきである。

③ NEDOよりもむしろ大学で取り組むべきである。

④ NEDOよりもむしろ国公立研究所で取り組むべきである。

⑤ NEDOよりもむしろ他の特殊法人等で取り組むべきである。

①とご回答の場合は、NEDOとして取り組むべき理由について下記より複数選択し○を付けて下さい。

① （民間企業等では）必要資金が大き過ぎるため取り組みにくい。

② 〃　研究開発に時間がかかり過ぎるため取り組みにくい。

③ 〃　利益性が薄いため取り組みにくい。

④ 〃　景気に左右されやすいので取り組みにくい。

⑤ 「次世代」「大プロ」のような共同研究ﾌﾚｰﾑﾜｰｸの中で取り組むのにふさわしい。

有望領域　　*理　由（複数）*

1、2、3、4、5、6

具体的R&Dテーマ（複数可）　　*NEDOの役割（複数）*

1、2、3、4、5

（その理由：複数）

1、2、3、4、5

キーパーソン（同領域の研究者または見識をお持ちの方：ご自身を含む）

所属・役職　　氏名

分類　1．同領域の研究者　2．同領域について見識をお持ちの方（いずれかに○）

有望領域　　*理　由（複数）*

1、2、3、4、5、6

具体的R&Dテーマ（複数可）　　*NEDOの役割（複数）*

1、2、3、4、5

（その理由：複数）

1、2、3、4、5

キーパーソン（同領域の研究者または見識をお持ちの方：ご自身を含む）

所属・役職　　氏名

分類　1．同領域の研究者　2．同領域について見識をお持ちの方（いずれかに○）

有望領域　　*理　由（複数）*

1、2、3、4、5、6

具体的R&Dテーマ（複数可）　　*NEDOの役割（複数）*

1、2、3、4、5

（その理由：複数）

1、2、3、4、5

キーパーソン（同領域の研究者または見識をお持ちの方：ご自身を含む）

所属・役職　　氏名

分類　1．同領域の研究者　2．同領域について見識をお持ちの方（いずれかに○）

3．アンケート回答者一覧

所属機関	部署名	役職	氏名
慶応大学	理工学部 電気工学科	教授	森　真作
金属材料技術研究所	第4研究グループ	総合研究官	吉原　一紘
新日鐵化学㈱	技術研究所	部長研究員	藤本　研一
大阪大学	工学部 通信工学科	教授	長谷川　晃
電子技術総合研究所	量子放射線部	部長	山崎　鉄夫
東京工業大学	工学部 生産機械工学科	教授	小泉　堯
㈱日立製作所	中央研究所 企画室	室長代行	金久　修
無機材質研究所	第15研究グループ	総合研究官	中沢　弘基
東京工業大学	工学部 情報工学科	教授	志村　正道
理化学研究所	化学工学研究室	研究員	浅間　一
京都大学	工学部 機械工学科	教授	嶋本　譲
東洋エンジニアリング㈱	技術研究所 プロセス開発部	部長	菊地　克俊
㈱ナカヨ通信機	情報技術研究所	所長	中澤　始
東京大学	工学部 金属工学科	教授	吉田　豊信
新日本製鐵㈱	技術開発本部 鉄鋼研究所	所長	伊藤　亀太郎
金属材料技術研究所	損傷機構研究部	部長	西島　敏
三菱レイヨン㈱	中央研究所	所長	寺田　拡
住友電気工業㈱	開発企画部	主査	中川　正広
名古屋大学	工学部 物質化学科	教授	河本　邦仁
金属材料技術研究所	反応制御研究部	部長	古林　英一
東京大学	工学部	教授	井口　雅一
東京工業大学	工学部	教授	安部　明廣
キリンビール㈱	基礎技術研究所	主幹研究員	池永　裕
東邦レーヨン㈱	研究所	所長	佐治　安夫
スタンレー電気㈱	技術研究所 技術戦略部	部門長	柏原　鳳一郎
第一製薬㈱	開発研究所 代謝分析研究センター	センター長	伯水　英夫
東北大学	工学部 機械電子工学科	教授	江刺　正喜
帝京大学	理工学部	教授	宝谷　紘一
名古屋大学	工学部 応用物理学科	教授	前川　禎通
機械技術研究所	生産システム部	部長	井上　英夫
京都大学	工学部	教授	池田　克夫
放射線医学総合研究所	障害基礎研究部	部長	佐藤　弘毅
九州大学	工学部	教授	貴島　勝郎
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	佐藤　知正
名古屋大学	工学部	教授	築島　隆繁
三菱電機㈱	情報電子研究所	所長	曾我　正和
放射線医学総合研究所	物理研究部	部長	川島　勝弘
金属材料技術研究所	力学特性研究部	部長	河部　義邦
電子技術総合研究所	知能システム部	部長	高瀬　國克
通信総合研究所	第一特別研究室	室長	恩藤　忠典
興亜石油㈱	大阪研究所	研究員	渡辺　浩一
東京大学	生産技術研究所 人工格子材料研究室	教授	山本　良一
航空宇宙技術研究所		部長	海老原　正夫
㈱クボタ	技術開発研究所 企画部	課長	今村　公男
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	岸　輝雄

所属機関	部署名	役職	氏名
帝人㈱	繊維研究所 第一研究室	研究主幹	松井　亨景
三菱マテリアル㈱	中央研究所 粉末冶金研究部	室長	杉原　忠
無機材質研究所		総合研究官	石井　紀彦
無機材質研究所	第14研究グループ	総合研究官	千葉　利信
物質工学工業技術研究所		極限反応部長	河村　光隆
日本電気㈱	基礎研究所	所長	覧具　博義
鐘紡㈱	生産技術研究所 研究管理グループ	主席研究員	和田　吉弘
㈱富士電機総合研究所	研究管理部	主席	永沢　郁郎
大阪大学	工学部 応用物理学科	教授	中島　信一
三菱油化㈱	四日市総合研究所 物性分析研究所	主任研究員	宇佐美　隆生
㈱ニコン	開発本部 筑波研究所	副所長	飯塚　清
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	センター長	南篠　基
計量研究所	量子部	部長	大石　忠尚
(財)電力中央研究所	企画部	次長	福島　充男
川崎製鉄㈱	技術研究本部 鉄鋼研究所	取締役　所長	中西　恭二
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	河内　啓二
理化学研究所		主任研究員	桜井　成
三菱樹脂㈱	長浜研究所	所長	富岡　秀雄
NEC㈱	機能ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所	所長代理	福地　弘道
通信総合研究所	総合通信部	部長	横山　光雄
東京大学	工学部	教授	堀江　一之
機械技術研究所	物理情報部	部長	松田　浄史
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	岡部　洋一
工業技術院　計量研究所		首席研究官	作間　英一
トヨタ自動車㈱	技術管理部	課長	小寺　晃
TDK㈱	開発研究所	主任研究員	南波　憲良
金属材料研究所		総合研究官	永田　徳雄
三菱電線工業㈱	中央研究所 基礎技術研究部	部長	伊藤　弘孝
航空宇宙技術研究所	空気力学部	部長	野村　茂昭
三菱重工業㈱	技術本部 長崎研究所	所長	朝鍋　定生
九州大学大学院	総合理工学研究科 材料開発専攻	教授	荒井　弘通
九州大学	応用力学研究所	教授	高橋　清
東京大学		教授	氏平　祐輔
㈱コマツ　研究本部	中央研究所 基礎技術研究所　基盤	GM.	石井　哲
松下電工㈱	研究管理部 技術企画グループ	技術企画担当課	酒井　茂行
横河電機㈱	技術開発部門 技術企画本部	課長	大矢　彰
東洋酸素㈱	技術研究所	所長	荻野　博
三洋電機㈱　筑波研究所	分子デザイン研究室	室長	鈴木　茂雄
日立化成㈱	筑波開発研究所	部長	須佐　憲三
松下電器産業㈱	中央研究所 企画室		高尾　正敏
㈱豊田中央研究所	研究企画室・研究管理部	主任研究員	矢作　嘉章
アイシン精機㈱	技術開発研究所	課長	曽我　浩典
東洋電機製造㈱	技術統括室		川島　宣雄
アンリツ㈱	研究所 第3研究部	部長	野村　稔
九州電力　総合研究所	研究企画室	主査	牟田　信次

所属機関	部署名	役職	氏名
放射線医学総合研究所	臨床研究部	部長	舘野　之男
九州大学	工学部 応用物質化学科	教授	中塩　文行
㈱東京精密	技術研究所	所長	亀井　明敏
物質工学工業技術研究所	有機合成化学部	部長	白田　利勝
日立工機㈱	勝田研究所	所長	後藤　達生
京都大学		教授	渡部　良久
東京大学	工学部	教授	大園　成夫
㈱神戸製鋼所	鉄鋼技術研究所		片桐　望
金属材料技術研究所	材料設計研究部	部長	辻本　得蔵
沖電気工業㈱	研究開発本部 総合システム研究所	所長	羽下　雄之輔
太陽酸素㈱	技術研究所	所長	市田　泰三
NEC㈱	ﾏｲｸﾛｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所	所長	渡辺　久恒
航空宇宙技術研究所	熱流体力学部	部長	蓑田　光弘
金属材料技術研究所	第1研究グループ	総合研究官	前田　弘
三井造船㈱	技術本部 つくば研究センター	センター長	石崎　三喜夫
東京工業大学	工学部	教授	神沢　淳
日本化成㈱	研究所	主任研究員	亀山　昭憲
九州大学	工学部	教授	加藤　昭夫
東京理科大学	理工学部	教授	飯田　貢
日産自動車㈱	技術開発企画室		三枝　省五
理化学研究所		主任研究員	中田　忠
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	白木　靖寛
三菱重工業㈱	基盤技術研究所 研究企画・推進室	室長	小野　修二
東京大学	生産技術研究所	教授	棚澤　一郎
大阪大学	工学部 電子工学科		尾浦　憲治郎
通信総合研究所	第二特別研究室	室長	高橋　耕三
日本合成化学工業㈱	中央研究所 研究管理部	部長	大社　彰
無機材質研究所		総合研究官	門間　英毅
九州大学	工学部 航空工学教室	教授	難波　昌伸
東京理科大学	工学部 第一部電気工学科	主任教授	遠藤　三郎
放射医学総合研究所	内部被曝研究部	部長	稲葉　次郎
北陸電力	技術研究所	所長	瀬川　栄一
三菱石油㈱	開発研究所	所長	土本　皓二
東北大学	工学部	教授	八田　有尹
東京大学	生産技術研究所	教授	瓜生　敏之
東京大学	工学部	教授	藤野　正隆
㈱日本触媒	中央研究所	主席研究員	藤原　晃明
東京大学	工学部	助教授	合原　一幸
無機材質研究所		特別研究官	江良　皓
東北大学	金属材料研究所	所長	増本　健
計量研究所	力学部	部長	谷村　吉久
大阪大学	工学部 船舶海洋工学科	教授	浜本　剛実

4．アンケート結果一覧

注）視点、複合化、及び今後の有望領域・テーマに関するアンケート結果については本文第2・3章にほとんど全てを掲載したので、そちらを参照されたい。

4.1 極限化に関するアンケート結果一覧

分野	分類	技術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
新材料	微細加工	ダイヤモンド及びCBNデバイス開発	ダイヤモンドのエピ成長（2000） ➪ デバイス試作（2005）	高温半導体分野、レーザー分野	14
		超時空間制御プロセシング	ナノ秒レベルでのプロセシング（2000） ➪ ピコ秒レベルでの〃（2005）	新現象の出現	14
		半導体微細化技術	256Mbメモリ（1998） ➪ 4Gbメモリ（2005）	メモリの増大は家電製品等のマルチメディア化に拍車をかける	7
		機械加工	サブミクロンの精密加工（1998）	機械、電気産業以外にも、バイオ、原子力、医療など幅広い分野にインパクトを与える。	10
		制御	サブミクロン～ナノオーダーの制御・ハンドリング（1998）		10
		（半導体）超微細加工技術	0.1μmレベル加工の実用化（1998）	1GDRAMの実用化のキー技術→マルチメディア技術、VR技術等の大幅進展	51
		Lithography等加工精度	基本的には今までの予測に沿って進行する。		68
		ナノメータ微細加工	100ナノメータ（2000） ➪ 10ナノメータ（2005）	ギガビットICメモリ、10ギガビットフラッシュメモリ等固体メモリの出現によるテープ、ディスク等磁気メモリの代替。	71
		ナノテクノロジー	実験・研究レベルで一般化（2000）	現在の産業の技術革新の流れが止まらない進歩が続く→効率化	78
		微細加工技術	0.1μmレベル（2000）	半導体プロセスの発展	83
		ArFエキシマレーザ光透過材料技術	研究開発完了（2000） ➪ 実用化（2005）	0.1μm以下の加工技術を加速する	84
		X線マスク基板材料技術	研究開発完了（2005） ➪ 実用化（2005）	0.1μm以下の加工技術を加速する	84
		シリコンの微細加工技術	1 Gbit D-RAM（2005）	技術インパクトは大きいが経済インパクトはまだ疑問な所もある	85
		マイクロエレクトロニクス微細加工技術	0.1μm（2000）	量子化素子等	86
		加工寸法微細化		アプリケーションのニーズに引っ張られて極限化に向かうと考える	89
		半導体技術	0.1μm加工技術（2000）	情報処理の質が大幅に向上し、全ての産業や技術のインフラとして有効	100
		半導体技術	サイズで1/10（2010） ➪ 機能で100～1000倍（2010）	情報機器の携帯パーソナル化に伴い情報産業の大変革がもたらされる	102
		シリコン半導体微細加工技術	10ナノメータパターン加工（2005）	超高集積LSI（ギガビットメモリーなど）	110
		加工寸法の微細化	0.1μmがLSIの主流、nm技術が部分的に利用される（2000）	大	112
		表面反応を利用したソフトな微細加工技術	かなり進展する（1998）	LSIプロセスの次世代技術として不可避	115
		加工寸法の微細化			126
		半導体製造技術	16Mbit（1996） ➪ 256Mbit（2000）	256Mbitぐらいはいくでしょうが1 Gbitは一企業ではできないだろう。	131

分野	分類	技術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
新材料	微細加工	挿入光源利用材料創製・評価	選択的励起利用加工技術（1998）	低温プロセスが可能。電子材料、半導体、導波路等	5
		LSI製造リソグラフィ技術（量産技術確立時期）	エキシマ光源（1024MDRAM以降）（1996） ⇨ SOR光源（16GDRAM以降）（2002）	超LSIによる情報化社会の加速	52
		X線リソグラフィー	0.1μm幅のパターン転写実用化（1998）	4GビットのDRAMを製造することができ、情報化社会のあらゆる面にインパクトを与える	56
		位置制御	1nmの形状制御システムの実用化（1998）	機械加工分野での加工精度を飛躍的に向上させることが期待でき、AVシステムやメカトロニクスの分野で扱う情報量が一段と向上する	56
	原子分子制御	原子・分子マニピュレータ開発	原子レベルデバイス（2005） ⇨ 原子レベル遺伝子操作（2010）	半導体デバイス分野、バイオ分野	14
		STM等の原子操作	実用化段階（研究面）（1996） ⇨ 実用化段階（工業的）（2000）	材料開発研究	16
		ナノスケールエンジニアリング	Åレベル（2000）	半導体製造	30
		原子・分子制御	（2000）	AFMを使用したディスクや分子素子などが出現	42
		原子分子操作技術	かなり進展する（2000）	半導体、バイオ等広範囲な分野へのインパクト大	115
		アトムテクノロジー化学	数Å程度の空間での化学反応（2010）	化学反応の選択的制御	94
	創製/実験環境	超高真空技術	大型の極高真空環境が実現でき多くの装置が組み込まれる（2000）	表面の理解が進み、表面機能材料が開発される	2
		ガスの精製と微量不純物の定量	ガス吸脱着性のない接ガス素材と新規分析手段（2000） ⇨ ゲッターや吸着剤（ゼオライト系）に代わる除去手段（2010）	半導体デバイス（シリコン系、化合物系）の高集積化に寄与、基礎科学（物理、化学）への貢献	101
	自由電子レーザ	自由電子レーザー	紫外（1998） ⇨ 真空紫外～極短紫外（2003）	微細加工、選択的加工等、コヒーレント光源でインパクト大（波長不要、大出力）	5
	極限反応	高圧反応技術	700MPa反応技術（2000） ⇨ 1.5Mpa反応技術（2010）	生分解性プラスチックス生理活性物質の効率的生産	50
		超高圧反応場	1万気圧～5万気圧（2000） ⇨ 50万気圧～100万気圧（2010）	新材料合成	94
	計測・評価	X線顕微鏡	サブミクロン実用機の出現（2000） ⇨ オングストローム実用機の出現（2020）	非真空、非汚染、（生体も可）のサブミクロン顕微鏡、生体観察、電子製品生産制御に多用されよう	8
		計測	サブミクロン～ナノオーダーの位置・姿勢計測（1998）		10
		レーザによるガスの状態の計測、画像処理	（2000）		11
		計測技術（常温～高温での寸法）	サブミクロンオーダー（2000）	製造プロセスの制御精度の向上、製品の信頼性向上	15
		低エミッタンス電子顕微鏡	着手して5年で成果（1999）	電子線を小さい領域に絞る（△x）ことと、進む方向の拡がり（△θ）を小さくすることの両立は難しい。これを限界まで高めた電子顕微鏡は特別に研究開発の対象として価値があり、これができれば、結晶の大きさと方位を現状より1桁向上させて測定しうる。	20
		非破壊計測			45

分　野	分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
		陽電子消滅法による電子状態・欠陥構造の測定	ポジトロン・ファクトリー（陽電子源の高強度化）（2000）	陽電子消滅法は上記の測定法として非常に優れたポテンシャルをもつが、線源の高強度化によって初めて他の手法と比肩できる一般性をもつようになる現在高崎原研で計画中	49
		物性評価技術	ナノメートル領域の分解能をもった（2000） ⇨ 分析評価技術がルーテンワークとなる		54
		極微量物質追跡技術	研究遂行上実用的な１手段（2000）	極低濃度領域における生化学的、化学的諸現象が解明される可能性あり	91
		高度分光技術	ナノ～ピコ秒の超短時間の反応を捉える技術（2000） ⇨ フュムト秒超短時間の反応を捉える技術（2010）	化学反応やその過程中の遷移状態の観察制御が可能となり、新材料、新触媒の合成、光化学反応装置の開発へ貢献	113
	材料設計	触媒設計	触媒開発に使われはじめる（2020）	現在、工業的に行なわれている反応について、更に適切な触媒が開発され、また、現在やられていない反応ルートが実現されることにより、収率向上、選択率向上、省エネルギー等が計られる。	12
		科学的な材料設計技術	モデルによる設計がある程度可能（2010）	極限性能の設計可能となり開発スピードが早まる	15
		人工的合成による新材料の開発技術	実験段階から試験段階（2000） ⇨ 応用化段階（2005）	新機能材料の創生にとって必要な技術、原子・分子レベルでの合成技術により、任意の新材料が作れるようになる	130
	高温半導体	高温半導体技術	ある程度進展する（2000） ⇨ あまり進展は期待できない（2010）	内燃機関の電子制御の高度化。原子力技術へのインパクト	129
	人工格子	磁性金属人工格子	新しいデバイス（2000）		29
	光反応材料	ホトケミカルホールバーニング	１０11ビット/cm2の光メモリ（2005）	画像記録の大量記録が可能となり光ディスクVTRテープなど旧来型のメモリが置き替る	71
		感光性材料の高解像度化		電子技術の高密度化	117
	有機・無機複合	有機・無機（複合）超構造結晶（分子原子レベル複合化）	出現（2000） ⇨ 役に立つ結晶の出現（2010）	生体レベルの低エネルギー・高効率で動作する結晶が得られよう	8
	高分子	ポリマーの高強度化	350℃で使用可能（2000）	材料の軽量化が進み、エネルギ消費、小型化などに役立つ	6
		炭素繊維の製造	繊維系の制御、強度等物性の向上（2000）		41
		ポリマーの重合段階での分子構造制御	現在、ポリマーメーカー各社で開発中	汎用ポリマーの高性能化による利用分野の拡大	63
		極低温下におけるプラスチックの物性解析		極低温で使用に耐えるプラスチック材料の実現	63
		中性子回折利用によるポリマーの構造解析	実用化（1997）	ポリマーブレンド系の相構造解析技術が発達し、構造制御する事により新規な材料開発が可能になる	63
		生分解性ポリマー	ポリマーの30%位置き換えられている（2000）	自然環境保護に対応するもの	127
		高分子のミクロ制御	高分子の中で10%位占める（1998） ⇨ 高分子の中で50%位占める（2005）	超立体規則性を利用し、高機能材料として実用される	127
	セラミックス膜	セラミックスミクロ構造のコントロール	均一な細孔径を有するセラミックスの製造（2005）	目的の反応系に適切な触媒担体を使うことにより触媒性能が向上する。セラミックス膜による分離の性能向上	12

分　野	分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
	微粒子	超微粒子	飛躍的（2010）	色彩、コンパウンドなどに新商品	46
		超微粉化			117
	耐熱材料	超高温耐熱材料の開発	酸化雰囲気2000℃に耐える材料の利用（2000）	エネルギー関連を主体に、一般工業用途にも広く利用される。	24
		超高温構造材料	C/C複合材の表面コーティングで2000℃（2000） ➪ セラミック傾斜複合材で2500℃（2020）	宇宙航空機の性能向上に大きいインパクトあり	74
		高温タービン材料	1750℃級（2000） ➪ 2000℃級（2010）	発電効率60%以上の高効率発電が可能	75
		超高温セラミックス	1400℃級セラミックス（2000） ➪ 1500℃級セラミックス（2010）	セラミックス自動車、セラミックスガスタービンの実用化により省エネルギー、高性能化に貢献する	113
	超高強力材	超高強力軽合金の開発	実験段階から試験段階（2000） ➪ 応用化段階（2005）	省エネルギー化、小形化に対し強くて軽いAlやMg合金の開発が要求され、車両、自動車、船舶、機器の小形化、軽量化が計れる	130
	その他	材料の複合化			45
バイオ	遺伝子工学	遺伝子工学	ヒト全遺伝子の解読（1998） ➪ 遺伝子治療の成功（2003）	癌や遺伝病に対して、遺伝子治療が試みられつつあり、そのいくつかは成功すると考えられる。	32
		遺伝子操作技術	農業、漁業、林業の効率化（生産性10倍）（2020）	産業就業比率の大幅な変化	102
	蛋白質工学	蛋白質工学	耐熱性酵素の合成（1998） ➪ 耐塩性・耐乾性酵素の合成（2003）	上記性質をもった植物は砂漠などでも生育できるので、世界の食料問題に貢献できる。	32
	細胞工学	人工細胞	単機能（タンパク合成etc）（2000）	純粋なタンパク質を種類を問わずに高効率で製造できるようになる。	28
		マイクロビームによる細胞加工	ミクロンレベル（1998） ➪ ナノメータレベル（2003）	細胞の性質を変化させて、有用物質の大量生産などに応用できる	32
	バイオセンサ	バイオセンサー	水中の微量有機成分の計測（2000） ➪ 生体分子識別センサーによる健康診断（2010）	家庭用品（家電、トイレ、空調機etc）、医療機器分野に大きなニーズが展開する	105
	バイオリアクタ	光バイオリアクター（CO2固定藻類高密度培養）	実証化プラントの稼動（2000） ➪ 普及（一般化）（2010）	南北問題解決の一端となりうる南への技術移転の有力候補である	105
	生体計測	生物生体計測技術の極限化（微細化）	細胞レベル（2000） ➪ 細胞内オーガンレベル（2010）	バイオテクノロジー技術のブレークスルーが期待でき、医学のみならず、環境維持への応用に発展する可能性を含む	62

分　野	分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
電子・通信・情報	量子デバイス	超格子量子デバイス	1T FLOPS（2000）　⇨ 10T FLOPS（2005）	ピュセカンドオーダの超高速デバイスの出現による超音速コンピュータの実用化。	71
	ニューロチップ	アナログニューロチップ	1チップ上に1000ニューロン程度の学習ネットワーク（2000）	様々なマシーンのインテリジェント化	128
	ﾏｲｸﾛ磁気素子	マイクロ磁気デバイスの開発	まだ実験段階から試験段階（2000）　⇨ 応用化段階（2010）	ICの発展に対して付属部品の小形化が送れている。マイクロ磁気デバイス化により、電源が超小形化し、電子機器の全体の超小形化ができる。	130
	レーザ	ワイドギャップ半導体レーザー技術	ある程度進展する（1998）　⇨ 飛躍的に進展する（2000）	現CD、LD方式の光記憶の高密度化	129
	メモリ	超々LSI	256MBit（1998）　⇨ 1GBit（2005）	超小型（パームトップ）コンピュータ、マンマシンインターフェース	31
		1GDitメモリ	普及化（2000）	情報端末のメモリーカードとして	64
		磁気記憶メモリ	実用化（2000）	マッチ箱程度の装置に500MB～1GB、マルチメディア用記憶ファイル	64
	センサ	センサー技術			33
	ICカード	光カード、ICカード	特殊な領域で実用化（1997）　⇨ 銀行カードやクレジットカードがこれに置き換えられる。（2000）	磁気を用いる銀行カードやクレジットカードにかわって光カードが使われる。特殊外部磁気によりメモリーが破壊されず、しかもメモリ容量が大きい。1枚数百円、一般に普及。	67
	光ディスク	光磁気ディスク	90mm以下の小型磁気ディスクが実現（1997）　⇨ 1千億円以上の生産額（2000）	一般に普及される。（10年後）	67
		テラバイト光ファイル	実用化（2010）	大容量データベース	81
	情報機器	大画面表示	実用化（2000）	・メータサイズのカラーPDP（壁掛けTV）・30～50サイズのフラットCRTディスプレイ（HDTV用）	64
		立体テレビ	立体テレビの可能性、原理的に可能。（2010）　⇨ 一般にも普及し始める。（2020）	特殊なものに利用される。例えば、手術用、人工現実感、教育用、ゲーム、訓練用	67
	計測	光周波数計測技術	ある程度進展（1998）　⇨ 飛躍的に進展（2005）	光通信の本格化	58
		光周波数計測技術	飛躍的に進展する（2000）	基礎物理定数の再測定と新しい物理現象の発見、通信容量の飛躍的拡大	69
	通信	移動通信	かなり進む（1995）　⇨ ほとんど完成（2000）	電池が最大のネックであるが、これが解決すれば世界中の個人間で情報交換が出来る	1
		超高速通信（ソリトンを用いた）	10倍（2000）　⇨ 100倍（2010）	画像を含むマルチメディア通信の実現、ソリトン概念の一般化	4
		広帯域光通信ネットワーク	広帯域有線系の加入者系ネット実現（2005）	画像情報伝達、HDTV画像伝達等の急伸→医学等への応用拡大	51
	自動制御	アクティブ制御	（1996）	一般プロセスコントロールへの適用、普及	16
		自動化技術（知能化含む）			33
	情報処理	情報処理技術	リアルタイムに科学技術計算可能（2005）	大巾な知的労働力の生産性向上	15
		大容量情報利用技術	（2000）	256Mが常用化され、人間の生存にとって本質的にmeritを得るものが社会を制する	57

分野	分類	技術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
機械・航空・宇宙	微小機械	SR利用マイクロマシン（LIGA・プロセス）	μmオーダ（1998） ⇨ サブμm（2003）	この技術は寸法よりもむしろ複雑なマシンを如何に作るかにある。現状でもある程度進んでいる。光導波路、マイクロ歯車等	5
		マイクロマシン	微細加工と制御（2000） ⇨ 微細加工及び制御（2005）		17
		マイクロアクチュエータ		マイクロマシン（微細作業、狭所作業）、柔らかな分散協調型機械	27
		高感度マイクロセンサ		高機能ロボット、高度な運動制御	27
		集積化マイクロシステム		電気、機械、光技術などの融合集積したシステム	27
		微細作業技術	ナノメートルレベル（1998） ⇨ アトミックレベル（2003）	科学　産業用として大きなインパクトを与える	34
		マイクロマシン	トップデータが普及状態になる（2010）	医療用に大きなインパクト、手術の概念が変わる	53
		微小機械の製造	mμサイズの機械の誕生（2000）	日常的なロボットとの共存	61
		マイクロマシン	マルチファンクションセンサ実用化（2000）	センサのインテリジェント化	81
		超微細化技術、ナノ計測技術、マイクロマシン	具体的な製品の完成（2000）	分子（原子）単位での制御が可能となり、無限の応用をもたらす	82
		マイクロマシン	強磁性体の応用技術（2000） ⇨ 実用化レベル（2010）	機械を小型化することにより、設備の保守、メンテナンスを実施に対しオーバーホールをせずに細部の点検が可能	90
		マイクロマシン技術	サブミリのマシン（1995） ⇨ 数10μmのマシン（2000）	他の産業に対しても、微小化、微細化の波及効果を及ぼす。	131
	極限作業ﾛﾎﾞｯﾄ	超真空・超高圧環境下での作業ロボット	10,000m以深の有人・無索作業ロボット（2010） ⇨ 宇宙での組立作業ロボット（2000）	海洋開発、宇宙利用の進展に寄与大	105
	生産システム	実験/生産環境の極限化	実験/生産の無人化（2000）	省力化、精度向上	3
		生産システムの無人化	溶接、切断といった３Ｋ職場の無人化（2000） ⇨ 組立の無人化（2010）	生産にかかわる直接工が不要となる。生産技術者、システム管理者の養成が必要となる	79
		無人化24H稼動工場の実現	５年後に位に実現	雇用減。自動監視、自己修復	80
	製鉄技術	板厚公差の減少	±50μ→±30μ（1998） ⇨ →±10μ（2005）	ユーザーのコストダウン	98
		高速高炉操業技術	2.2→3.0（t/m3·day）（2000） ⇨ 3.0→4.0（2010）	出銑比を4.0とすることにより高炉２基を１基にできる	98
		高速連鋳技術	2.0→3.0	連鋳技速度を現状2.0m/minを4.0とすることにより２基を１基にできる	98
	航空機	超・極超音速輸送機	マッハ３超音速（2000） ⇨ 極超音速（2020）	材料、制御技術の革新をもたらす	119
	船舶	海上交通・輸送の高速化	（2000）	陸上交通・輸送の緩和	132
	計測	感圧塗料による圧力計測	今世紀末までに実用化	流体現象に関する知見を飛躍的に高める	43
		内部流れの測定技術（光学的測定）	３次元計測が可能（1998） ⇨ 乱れ測定が可能（2003）	ガスタービンエンジン等の設計技術の向上	103
		燃焼ガスの測定技術（光学的測定）	高温ガス温度の測定可能（1998） ⇨ ３次元的な測定が可能（2003）	低NOx化、CO2削減（高効率化）に有効	103
		動的座標計測技術	（1997） ⇨ （2005）	静的な計測主体の高精度化ではなく、動的、すなわち実時間計測の高度化した技術。	131

分　野	分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
人間・生活・社会	道路交通	道路交通のインテリジェント化	インテリジェント警告（2000）⇨ 自動運転（2050）	安全性向上、自動化技術の発展、パーソナルモビリティー向上	21
資源・ｴﾈﾙｷﾞｰ・環境	食糧生産	無飢餓技術（食糧生産保存技術）	（2005）	人類の生存にとって不可欠な栄養自然物の現在技術の延長上にニューバイオを少しだけ付与した技術	57
	合成化学・触媒	高温触媒燃焼（低NOx）	実用化（1000kW）テストプラント（1996）	日本のエネルギーシステムが大きく変わる。低NOx発電システムにより分散型現地での発電可能	76
		環境にやさしい合成化学：1例としてベンゼンのニトロ化	混酸（H2SO4/HNO3）を用いない ⇨ 新ニトロ化反応の実用化（2005）	現行法は大量のH2SO4が廃棄物として生じ、これに代わるニトロ化法の開発は急務である。	96
		環境にやさしい触媒化学：高活性高速選択的触媒反応の開発		骨核形成、官能基変換など新規革新的な触媒の開発は新しい技術の鍵である	96
	ｽｸﾗｯﾌﾟ溶解	環境調和型スクラップ溶解プロセス	要素研究（1995） ⇨ 実用化のメド	再生不能資源の節約省エネ	60
	太陽エネルギー	マイクロ波送電技術	⇨ 宇宙太陽発電システム（2020）	宇宙太陽発電衛星、宇宙飛翔体への送電技術などによる関連技術を含めた技術進歩及び代替エネルギー源としてクリーンエネルギー	90
		高効率太陽電池	低コスト化（2010）	再生可能エネルギーの利用拡大	75
		太陽高発電の高効率化	10年後		107
		太陽電池の高効率化	効率20%セルの実用化（2000）	太陽光発電のコスト低減、普及に寄与する	122
	新エネルギー	クリーンエネルギー技術	（2000～2005）	現在より２桁価格が安くエネルギーシステムができあがる地球化がおこる	57
		発電技術	核融合発電スタート（2010） ⇨ 太陽光発電の本格的普及（2005）	エネルギー供給世界体制が変わり始め日本の外交力が高まる	102
	燃料電池	燃料電池機能材	耐久性、生産性向上（2000） ⇨ 低コスト化（2010）	高効率発電の実現	75
		固体電解質燃料電池	実用化（100kW）テストプラント（1995） ⇨ 商業化（5000kW）（2000）	高効率エネルギー変換システムでCO2の発生を削減できる	76
	ｴﾈﾙｷﾞｰ集積・貯蔵	低密度エネルギーの集積・貯蔵	自然エネルギーの集積・高密度貯蔵（2005） ⇨ エネルギーの低損失伝送（2015）		87
	電力変換素子	交直変換素子の高性能化	自己消弧形大容量高性能素子の開発（2000）	高電圧化、大電流化、高スイッチング周波数化により、電力変換機器の高性能化が実現し、制御が高度化可能となる。	122
	内燃機関	動力源の効率向上	内燃機関の超希薄燃焼（2000） ⇨ 超耐熱材料を用いた内燃機関（2010）		87
	排ガス処理	NO分解		酸性雨、オキシダントが減り、地球環境に大きな効果を与える	76
保健・医療・福祉	非侵的診断治療	非侵的医学診断（2000）			78
		非侵的医学治療			78
	新薬	画期的な新薬創製	飛躍的（2000）	分子生物学の進歩、国際的情報交換の進展	26
	医療器具	新医療器具	飛躍的（2010）	コンピュータの進歩、素材の進歩	26
	放射線治療	高精度放射線治療	ほぼ完成（2010）	3D画像処理、宇宙開発における放射線障害	37

分　野	分　類	技　術	進展度合とその時期	産業や他の技術へのインパクト	No.
超電導	材料	超電導臨界温度の高温化、電流密度の増大	高温超電導物質材料の実用化（2000）	超電導機器（電磁石、発電機、変圧器、SMES等）の開発を進展し、高効率化に寄与する。	122
	デバイス	超伝導	新しいデバイス（2000）		29
	貯蔵技術	超電導エネルギー貯蔵技術	小規模SMES（超電導、エネルギー貯蔵）（2010） ➪ 大規模SMES（超電導エネルギー貯蔵）（2020）	エネルギーの出し入れ速度が速く（数十msec）、エネルギー貯蔵効率が高い（70～80%）ことから、電力の系統安定化（周波数、電圧）や、電力貯蔵に対する信頼度の向上を図れる	90
	超電導利用機器	超伝導核磁気共鳴装置（NMR）	750MHzを超す装置開発（2000）	構造解析、生体機能の解明	111
	その他	超電導技術	実用化のレベル（2000）	非常に大きい	92
その他		計測精度の向上			126
		インテリジェント化	～20%（2000） ➪ ～50%（2010）	省力、省エネルギー、省資源に資する	124
		複合化	～20%（2000） ➪ ～50%（2010）	省力、省エネルギー、省資源に資する	124
		極限化	～10% ➪ ～20%（2010）	宇宙科学産業の進展、地球資源（地熱など）の有効利用に役立つ	124
		技術全般		技術は進展するが、いわゆる技術の問題で革命が起こるような思想は含まれない	99

4.2 インテリジェント化に関するアンケート結果一覧

4.2.1 物質・材料分野

分 類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
自己組織化/修復/強化	分子or繊維強化複合材料	自己強化型（応力に対応して、必要部位が強化される）複合材料	24
	遮熱コーティング（耐熱材への）	遮熱コーティングにクラックが入った場合クラックが自己修復可能	103
	ポリマーアロイ技術+無機合成技術	バイオミメティック的な自己組織化機能を有する高性能複合材料技術	55
	超分子技術	自己組織化技術がすすむ	28
	構造・組織制御	自動対応制御、自動選択制御、自動ファジー制御	124
自己情報処理/環境適応	半導体レベルでの情報認識	分子レベルでの情報認識	125
	形状記憶合金、ポリマーetc	環境適用自己制御材料	84
	セラミックス材料	自己情報処理機能	126
寿命判定/劣化検出	複合材料	自己劣化検出材料	45
	材料寿命判定技術	材料の性質の変化として外部から検出可	20
	寿命予測技術	寿命を自ら知り、その情報を外部へ発信する	50
	非破壊評価	破壊予知	19
生体機能模倣	生体機能の解明+有機無機複合化技術+結晶育成技術	生体機能を模倣した低エネルギー・高効率素材	8
形状記憶性、色彩可変性、生分解性	高分子、アロイ	形状記憶性向上、色彩可変、生分解制御	46
長寿命化	溶融加工	長寿命製品	6
ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ化	インテリジェント材料開発	現在研究中であるが、ある程度のものは提案されるだろう。	16
	高分子材料	知的材料	6
人工合成/材料設計	リサイクル技術	解体性（分離性）をそなえた材料の設計	20
	経験を基にした有機合成	特定化合物合成の計算による最適化	3
	人工合成技術	複合機能化	130
その他	SR	ビーム・パラメータ指定の自動運転ビーム制御	5
	自由電子レーザー	波長強度の指定のみで発振、フィードバック等安定化、高性能化	5

4.2.2 電子・通信・情報分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
センサ	センサ	対称に近い末端部でのマルチセンシング、能動センシング、自己診断　→　これにより、中央部ではセンサフュージョンによる高度な判断	27
	センサー技術	LSIの活性化により大幅に進む	112
	センサ技術	自己情報処理機能	19
	センシング	自律化	30
	個別センサ素子	復数の情報を収集し、データの加工選択をして共通バスでのやりとりを可能とする。	71
	薄膜作製技術	薄膜センサー	2
回路設計・製作	リソグラフィ技術	判断結果・学習機能を持たせた回路設計・製作	131
情報機器	AV・OA機器	言葉で対話可能となる（音声、文字）	71
	IDカード	すべての個人・社会情報をまかなえる処理機能付のIDカードの出現	71
計算機	コンピュータ	自らデータを集め利用するアクティブコンピュータ	39
	情報処理（ハード）	課題適応型コンピュータ技術	51
ソフトウェア	ソフトウェア	ソフトウェアモジュールが他のソフトモジュールと適合して変化する	100
情報認識・処理	AI技術	自律化	30
	ニューラルネットワーク		68
	音声・画像・パターン認識技術	学習機能の獲得	102
	画像認識技術	人間の認識能力に近い高速認識技術	110
	様々な既存技術とニューロコンピューティングとの組み合せ	学習・自己組織化機能	128
自動制御	コンピュータ制御	ファジー制御を伴った制御技術	23
	古典制御技術	ファジー／ニューロ理論などを用いたヒューリスティックな制御技術	110
	光エレクトロニクス	最適動作点追従	89
	制御技術	知的制御（人に限りなく近い制御）	79

4.2.3 機械・航空・宇宙分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
ロボット	パターン認識	自律的動作がある程度可能なロボット	31
	リモコン操作ロボット	テレオペレーション（バーチャルリアリティ技術などを含む）を用いた遠隔操作ロボット	110
	ロボット	自己修復ロボット、自己組織ロボット、耐故障動作ロボット	10
	ロボット	多自由度機械	30
	ロボット	環境認識機能を持ち移動しつつ作業のできるロボット	52
	ロボット	作業、巡視、点検等を行なうロボットのインテリジェント化	122
	ロボット技術	人の周辺にいて人を助けるロボット	34
	ロボット技術	ローコストな知能ロボット	64
	ロボット技術	宇宙軌道上での無人サービスに対応する	74
	ロボット工学	常動ロボット、群ロボット	61
	現在はプログラム化しているもの	惑星上でのロボット技術（伝送に時間がかかるから指令なしに即判断がいる）	40
	作業用ロボット	シェイクハンド（ネットワークによる相互通信）、自己判断	44
	産業用ロボット	自律ロボット（自ら考え行動するシステム）	39
自動車	ビークル	ATV（走行面を判断し、対応する）、自己診断、修復	44
船舶	人工知能化技術+制御工学+システム工学	船舶の知能化	33
	船舶操船・操縦	自動航行・離着機の自動化	132
農機	農業用機械	システム化（各作業間の情報交換）、市場とのリンク（セリ売り、気象情報の利用）	44
流体機械	流体工学・音響工学	流体機械の不安定作動の自動制御	119
エンジン	内燃機関	最適運動制御	11
製鉄	圧延技術	板厚制御	60
生産システム	分散処理システム	自律的負荷／資源配分、耐故障性、自律的データ整合	36
製品検査/修理	製品表面きずの全数冷間検査、きずとり	自動検出→自動きずとり→フィードバック	98
	サービスマンの修理	機械システムの自己判断、自己修復	56
その他	モニタリング+自己診断	インテリジェントモニタリング	21

4.2.4 バイオテクノロジー分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
自己組織化/修復/強化	DNA複製	修復機能内蔵DNA複製	32
	生体機能の利用技術	自己組織化機能、自己修復機能	130
生体適合	高分子科学×バイオ	皮膚、human joint	86
	生体組織－人工材料不活性安定界面	生体組織－人工材料動的活性界面	118
その他	化学合成反応	化学合成反応の高度化	111
	生体機能物質合成	生体機能活性発現機構解析技術の高度化	111
	染色体分析	染色体自動標本作製、自動分析	32

4.2.5 保健・医療・福祉分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
新薬	ガン、エイズ薬	相手を分子レベルで認識した上での活性発現	125
	高分子応答性ゲル	薬学、生体適合性の技術。必要なときに必要な部分だけに効く薬	127
検査/計測	視覚検査システム	自己情報処理、修復機能	80
	短寿命RI製造技術	高品質化、短時間処理	91
	同位体濃縮技術	小型化、高出力化	91
	インビボ・ドシメトリ（体内放射線量計測）	３Ｄ照射	37

4.2.6 人間・生活・社会分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
自動運転ｼｽﾃﾑ	車輌制御技術（ブレーキ、サスペンション制御等）	自動危険回避、自動運転	87
ｲﾝﾃﾘｼﾞｪﾝﾄ住宅	電化住宅	電力有効利用制御やHA、セキュリティシステム等によるインテリジェント・ハウス	122
	家屋、各種センサ	完全省エネルギー家屋	75

4.2.7 資源・ｴﾈﾙｷﾞｰ・環境分野

分　類	既存技術	インテリジェント化の内容	No.
電力系統制御/保護	大規模集中制御所の運転	事故・作業時における運転支援	107
	電力の品質管理	分散電源の配電線連系技術	107
	電力系統制御	AI適用や自律分散制御、FACTSなど	122
	電力系統保護技術	万能補償リアクトルの実現化	90
その他	エネルギー	環境適応	106

5．参考文献一覧

●マクロ動向

・「我が国の研究開発活動主要指標の動向」、平成5年6月、工業技術院技術調査課
・「科学技術研究調査報告」、平成4年、総務庁統計局
・「体系科学技術指標」、1991年版、科学技術庁科学技術政策研究所
・「技術立国と特許」、特許庁編、発明協会発行、1985
・「コンサイス科学年表」、湯浅、三省堂、1989
・「産業国際化と知的所有権」、研究　技術　計画、Vol.3、No.1、1988
・「平成3年度　科学技術の将来展望に関する基礎調査」、機械振興協会～三菱総合研究所、1992年3月
・「日米ﾃｸﾉｽﾄｯｸの定量的比較に関する調査研究」、機械振興協会－三菱総合研究所、1991
・「研究開発活動が経済活動に及ぼす影響の指標化に関する調査研究」、（財）産業研究所～三菱総合研究所、平成4年3月
・「科学技術要覧　平成5年版」、科学技術庁科学技術政策局編
・「産業技術ダイナミズムの創出」、村田、化学経済、1992.6

●国内技術政策

・「科学技術会議第18号答申」（科学技術会議、平成4年1月）
・「90年代の産業科学技術ビジョン」（通産省工業技術院、平成2年）
・「産業科学技術の動向と課題」、通商産業省編、1992、通商産業調査会
・「産業科学技術分野において研究開発が期待される課題」、産業技術審議会大型技術開発部会・次世代技術開発部会合同企画小委員会、平成4年6月
・「産業科学技術研究開発制度」、1993年、工業技術院産業科学技術研究開発室
・「平成3年度　科学技術振興調整費　試験研究実施計画」（平成4年3月、科学技術庁）
・「創造科学推進事業」（新技術事業団、1992）
・　理化学研究所要覧、1992
・　計量研究所パンフレット
・「科学技術白書　平成4年版」、科学技術庁
・「科学技術庁年報　平成2年版、平成3年版」
・「次世代産業技術への挑戦」、工業技術院監修
・「世界に翔たく次世代プロジェクト」、1992、ケイブン出版
・「融合研がめざすもの」、田中、日経サイエンス、1993年2月号
・「科学技術立国、そのあるべき姿を求めて」、大見、BREAK THROUGH、1992.1

●海外技術政策
・「平成４年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　アメリカ合衆国」（平成5年3月、日本学術会議）
・「日米の技術競争力」、ハイテク戦略研究会（乾ほか）、1990、日経サイエンス社
・「日米の技術開発の考え方」、内野、ソフィア162号、1992夏
・「米国における知的財産権保護政策動向」、JETRO技術情報、303、MARCH 1991
・「米国における共同研究開発の動向と評価」、JETRO技術情報、308、AUGUST 1991
・「米国技術政策の新しい枠組み」、JETRO技術情報、323、NOVEMBER 1992
・「米国の産業技術開発政策の動向と関連主要企業の開発動向（Ⅰ）」、JETRO技術情報、327、MARCH 1993
・「米国の産業技術開発政策の動向と関連主要企業の開発動向（Ⅱ）」、JETRO技術情報、328、APRIL 1993
・「ECにおける科学技術開発計画とその展開」、竹下、「研究　技術　計画」Vol.5、No.1 / 1990、研究・技術計画学会
・「平成３年度　二国間学術交流派遣代表団報告書　ベルギー王国及びオーストリア共和国」（平成4年4月、日本学術会議）
・「ECの産業技術開発政策の動向」、JETRO技術情報、316、APRIL 1992
・「米国から見る日本の技術レベル」、川崎雅弘、「技術と経済」、1991年７月号
・工業技術院技術調査課国際技術調査室資料
・NEDO資料

● 材料
・「フォトン走査トンネル顕微鏡とその理論的解釈」、榊、応用物理、Vol.61、No.6、1992
・「光による原子レベルの計測と制御」、大津・堀、計測と制御、Vol.31、No.9、1992.9
・「超時空間制御プロセシング」、吉田、日本金属学会会報、Vol.32、No.1、1993
・「ダイヤモンド半導体」、ガイス＆アンガス、日経サイエンス、1992.12
・「イオン工学技術の基礎と応用」、平尾・新田・三小田・早川、1992、工業調査会
・「次世代素材　インテリジェントマテリアル」、柳田、1993、講談社
・「ファイン・セラミクス」、柳田、1992、講談社
・「エコマテリアル　－21世紀に向けた材料の新しい課題－」、原田、日本金属学会会報、Vol.31、No.6、1992
・「人と地球にやさしいエコマテリアル」、工業材料、1992.4 & 1992.9
・「電子セラミックの基礎と応用」（講演資料）、内野、1985

●電子/光デバイス
・「量子細線レーザ・量子箱レーザ」、荒川：OPTRONICS No.9、p67 (1990).
・「選択成長を利用した量子細線・量子箱」、福井／安藤（北海道大学量子界面エレクトロニクス研究センター／NTT基礎研究所）：応用物理 61、p141 (1992).
・「有機金属気相選択成長による量子細線の作製とその光物性」、荒川：応用物理 61、p800 (1992).
・「半導体量子マイクロ構造の独創的研究で、光量子情報デバイスの実現に迫る」、360 November (1992).
・「量子波素子」、日経サイエンス、1992.12

・「2周波励起装置、インサイチュ・クリーニングで高性能化、低コスト化を両立」、大見、日経マイクロデバイス、1992.7
・「0.15μmLSIを22万枚/月生産　2001年のスーパークリーン・ルーム」、大見、日経マイクロデバイス、1992.8
・「マスク共通化と構造簡略化を提言、0.15μm世代の製造コスト削減」、大見、日経マイクロデバイス、1992.9
・「シリコンテクノロジーの展望」、大見、電子情報通信学会誌、1992.11
・「Gbit時代に思いを馳せて」、大見、BREAK THROUGH、No.79、1993-01
・「東北大学からの提案　－2001年の半導体技術」、大見、BREAK THROUGH、No.79、1993.1
・「金属材料技術研究所の極高真空場ステーション構想」、土佐・吉原、真空、Vol.35、No.6、1992
・「特集　誘電体セラミックがLSIに載る」、日経エレクトロニクス、1993.5.24（No.581）
・「圧電／電歪アクチュエータ」、内野、日本工業技術センター編、森北出版、1986
・「15年かけて切り開いたセラミック圧電アクチュエータの世界」、内野、週間朝日、1992.5.29
・「圧電セラミックスのスマートアクチュエータ/システムへの応用」、内野、日本工業教育協会誌第40巻第2号、1992.3
・「ピエゾ圧電/電歪アクチュエータ」（内野教授講演資料）
・"TWO-DIMENSIONAL DISPLAYS USING TRANSPARENT PLZT CERAMICS",UCHINO-TOKIWA-GINIEWITZ,Ceramic Transactions,Vol. 14, The American Ceramic Society,1990
・ SMART MATERIALS & STRUCTURES,Vol. 1,No. 1, March 1992, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING
・"APPLICATIONS OF PIEZOELECTRIC CERAMICS IN SMART ACTUATORS AND SYSTEMS",UCHINO

●情報処理

・「視覚と聴覚のセンサフュージョンシステム」、高橋・山崎、計測と制御、Vol.31、No.9、1992.9
・「センサフュージョン」、浅田、電子情報通信学会誌、1992.7
・「平成2年度　科学技術振興調整費　センサフュージョンのための基盤的技術に関する調査　報告書」、平成3年3月、科学技術庁研究開発局

●計算物理学／化学

・「流体数値実験」、小林・和田・角湯、朝倉書店、1990
・「特集　数値流体力学」、数理科学、1989.8
・「スーパーコンピュータ」、日経BP社、1989
・「分子シミュレーション入門」、岡田・大澤、海文堂、1989
・「入門分子軌道法」、藤永、講談社、1990
・「シミュレーション物理入門」、矢部・川田・福田、1989、朝倉書店
・「計算物理学と計算化学　－分子動力学法とモンテカルロ法－」、田中・山本、1990、海文堂出版
・「計算化学ガイドブック」、大澤・田辺・水野・杉江、1988、丸善
・「分子を描く」、神沼・鈴木、1988、啓学出版

●バイオテクノロジー／ライフサイエンス

・「生命工学材料の展望」、赤池・丸山、ケミカルエンジニアリング、1992年1月号
・「平成三年度　研究報告書」、（財）神奈川科学技術アカデミー第三研究室（高機能分子認識薄膜プロジェクト）
・「バイオテクノロジー」、石川、1988、電気書院
・「日本のヒトゲノム解析計画」、日経サイエンス、1992.9
・「古沢発生遺伝子プロジェクト　ー発生・分化の遺伝子を求めてー」、古沢
・"Promotion of Evolution: Disparity in the Frequency of Strand-specific Misreading Between the Lagging and Leading DNA Strands Enhances Disproportionate Accumulation of Mutations", M. Furusawa and H. Doi, J. theor. Biol. (1992) 157, 127-133

●バイオミメティクス

・「研究主題『微小流動』の概要」、新技術事業団
・「生物の運動メカニズムを明らかにし、航空・流体力学など工学のさまざまな分野に応用する」、360 December 1992
・「ゾウの時間　ネズミの時間」、本川達雄、中公新書
・「遺伝的アルゴリズム」、ホランド、日経サイエンス、1992.9
・「特集　遺伝的アルゴリズムと免疫システム論」、数理科学、1992.11
・「積木問題を遺伝的アルゴリズムで解く」、平野、インターフェース、1992.2
・　国際シンポジウム「知的ロボットから人工生命へ」パンフレット、三菱商事、1993.3
・「遺伝的アルゴリズムとマイクロロボットの設計」、ホルザ・下山・三浦、第10回日本ロボット学会学術講演会（1992.10-11）予稿集
・「遺伝的アルゴリズムによるロボット群の学習」、堀内・谷、第10回日本ロボット学会学術講演会（1992.10-11）予稿集
・「サブサンプションアーキテクチャーを用いた組立作業システムの制御」、吉田・浅田、第10回日本ロボット学会学術講演会（1992.10-11）予稿集

●感性工学

・「本格化した感性品質の科学的分析」、日経メカニカル、1992.4.20
・「特集　人工五感への挑戦」、数理科学、1993.2

●非線形・カオス工学

・「カオス　—応用をめざして」、合原、数理科学、No.348、June 1993
・「カオス・フラクタル・ウェーブレット」、山口、数理科学、1992.12
・「カオスの現在、カオス工学の可能性」、合原、数学セミナー、1992.12
・「ダーウィンを超える”カオス進化論”」、カウフマン、日経サイエンス、1991.10
・「新しい自然観を切り開くソリトン」、日経サイエンス、1992年12月号

●機械・航空・宇宙

・「東京の交通問題」、河内他、技報堂
・「航空と宇宙」、蓑田、日本機械学会講演会資料、92.11.17-18
・「ジェットエンジンのしくみ」「いろいろなジェットエンジン」「ジェットエンジンのいろいろな試験」、航空宇宙技術研究所・原動機部
・「NATIONAL AEROSPACE LABORATORY」（航空宇宙技術研究所パンフレット）、航空宇宙技術研究所

●その他

・「全予測　先端科学技術」、MRI、1991
・「第5回科学技術庁技術予測調査　2020年の科学技術」、NISTEP＆未来工学研究所編、1992
・「我が国における先端的な複合研究領域の現状と展開方向に関する調査　報告書」、平成4年3月、㈱日立総合計画研究所
・「非・常識の技術」、日経産業消費研究所、1991、日経サイエンス社
・「エンロトピー入門」、杉本、1985、中公新書774

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ新エネルギー・産業技術総合開発機構産業技術研究開発部の許可を受けてください。

電話　03-3987-9355
9356
9357