昭和51年度 サンシャイン計画委託研究開発成果報告書

「太陽光発電システムの研究開発(新型式太陽電池の研究開発)」

昭和52年 5 月30日

シャープ株式会社

NEDO 図書・資料室
0100178 78-9

「新型式太陽電池の研究開発
太陽電池製造工程基本技術の開発
集光型太陽電池装置の開発
パッケージ構成材料の研究」

シャープ株式会社
昭和52年3月　142ページ

研究目的：太陽電池モジュール製造工程（素子工程とパッケージング工程の自動化に適した製造工程を開発して労務費の低減を図ること、集光装置の開発で素子の有効利用を行なうこと、及びパッケージ材料，集光器材料の信頼性試験により装置の長寿命を保証することによって、商用電源と同程度の価格の電力を供給し得る太陽電池発電装置を実現する技術を確立することを目的とする。

目　　次

Ⅰ　概　　要…… 1

Ⅱ　研究担当者氏名…… 2

Ⅲ　研　究　内　容…… 3

1.　太陽電池製造工程基本技術の開発…… 3

1.1　接　合　形　成…… 3

1.2　電　極　形　成…… 18

2.　集光型太陽電池装置の開発…… 38

2.1　集光型太陽電池素子の最適設計…… 38

2.2　集光方法の検討…… 58

2.3　構成方法の検討…… 89

3.　パッケージ構成材料の研究……108

3.1　材　料　試　験……108

3.2　パッケージ構造設計の検討……136

I　研究計画

リボン結晶、薄膜等新規の半導体結晶を太陽電池材料として用いることを前提として以下の研究開発を行なう。

(1)　太陽電池製造工程基本技術の開発

太陽電池の変換効率の向上および低価格化を図ることを目的にして塗布法による接合形成、印刷焼成法による電極形成を中心に太陽電池の新しい製造技術の研究を行ない、自動化技術開発に必要な基礎データの収集を行なう。また薄膜太陽電池に適したショットキー障壁接合法、電極形成法についての検討を行なう。

(2)　集光型太陽電池装置の開発

太陽電池の有効利用による低価格化を図ることを目標にして、昭和５０年度に行なった素子構造および集光装置の基本検討の結果に基づいて集光度５０以下の集光装置数種の試作を行ない、実動状態での諸データを把握し、経済性の確認をする。

(3)　パッケージ構成材料の研究

1.　パッケージの耐久性（寿命・信頼性）の向上と低価格化を図ることを目的として昭和５０年度に引き続きガラス、合成樹脂等の材料について屋外暴露試験、加速耐候性試験、集光暴露試験等の環境試験を実施する。

2.　低価格化を図るため、自動生産に適したＦＲＰ使用のパッケージを開発し、同時に自動生産のための基礎的データを得る。

Ⅱ　研究担当者氏名

研究項目	担当者氏名	
	51年5月～6月	51年7月～52年3月
研究実施責任者	辻　高輝	辻　高輝
太陽電池製造工程基本技術の開発	鈴木皓夫、沢井啓安 芝田　章	鈴木皓夫、沢井啓安 布居　徹、芝田　章
集光型太陽電池装置の開発	平野泰三、中田行彦	鈴木皓夫、中田行彦
パッケージ構成材料の研究	平野泰三、渋谷典明	鈴木皓夫、渋谷典明

Ⅲ 研 究 内 容

1. 太陽電池製造工程基本技術の開発

1.1 接合形成

1.1.1 塗布法による接合形成

(1) 概　　要

太陽電池製造における主要工程の一つである接合形成の自動化を考えると、現状の熱拡散法をそのまま移行するには種々の問題点がある。

現在、シリコン太陽電池の拡散法として、P^+／N素子にはBN法（活性化された窒化ホウ素板を用いる方法）、$SiH_4-B_2H_6-O_2$系等のCVD法、一方N^+／P素子にはオキシ塩化リン$POCl_3$での気相拡散法、$SiH_4-PH_3-O_2$系等のCVD法がある。

しかし、自動化の究極の目標は再現性良く、能率的に生産する事であり、BN板、$POCl_3$を拡散源とする気相拡散は，不純物ガス流の制御の難しさもさることながら　拡散炉内の石英管の短期的洗浄を余儀なくされ，その保守が極めて煩雑である。

CVD法も前述と同様の欠点を有し，特にドープドオキサイド膜の生成速度が低いことなどは生産性を著しく損う原因となり易い。

これら現状の拡散技術の問題点を認識し，我々は昭和50年度に塗布法による接合形成が有望である事を提案する一方で回転塗布法により試作した素子の基本的特性評価を行い、本塗布法が太陽電池の接合形成に適用できる事を確認した。

しかし回転塗布法はリボン結晶には適用が困難であるため，本年度はリボン結晶に適した新規なスプレイ塗布法により，連続的にシリコン結晶表面にドープドオキサイド膜を形成する方法を検討した。

また、塗布液の低価格化にも検討を加え，シリコンリボン結晶を前提に自動化に適した接合形成法及び材料の確立を目的に研究開発を行なっている。

(2) 試料作製

(a) 塗布液の作製

現在市販されている塗布液（純度5N）の価格には経済的な問題があり、また変換効率の向上を図るための一連の実験を遂行する上で塗布液の試作が必要となった。そこで液の構成成分を調査し、その純度，不純物濃度等を考慮して塗布液を試作した。

塗布法によって得られる塗布膜はSiO_2に不純物を添加したドープドオキサイド膜である。SiO_2膜を生成するにはケイ酸$Si(OH)_4$を使用すればよいが、$Si(OH)_4$

単独では

$$Si(OH)_4 \rightarrow SiO_2 + 2H_2O$$

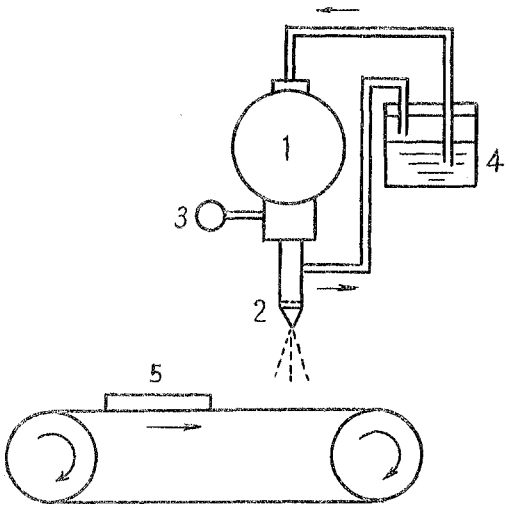
の反応が起こり液状で安定に存在しえないため，エチルアルコール等の溶媒中に$Si(OH)_4$を生成させるための材料を分散させておき、最終段階でＳｉ基板上に酸化物膜として生成させる必要がある。

本実験で試作した塗布液には溶媒のエチルアルコール中に不純物と、$Si(OH)_4$を生成するための有機ケイ素化合物および有機酸を含んでいる。不純物として、Ｎ型用塗布液には五酸化リンP_2O_5、Ｐ型用には酸化ホウ素B_2O_3を選んだ。これらの薬品を容器内に混入し適当な時間攪拌して安定な塗布液を得た。なおＰ型用塗布液にエチレングリコールを添加すれば、ホウ酸H_3BO_3の析出が阻止され、なめらかな塗布膜が得られることが判った。

(b) 塗布法による太陽電池の作製

リボン結晶を前提に結晶表面に連続的にドープドオキサイド膜を形成する目的でベルト式塗布装置を試作し、スプレイガンを用いて塗布膜を形成した。

本装置の基本構成を図1.1に示す。



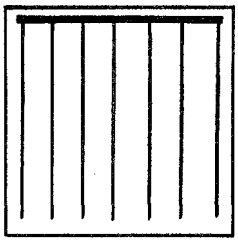
1. 電磁ポンプ
2. ノズル
3. 圧力計
4. 塗布液容器
5. シリコンウェハ

図1.1 スプレイ塗布装置の構成

本方式はエアレススプレイ法であり、電磁ポンプが容器から液を吸い上げ同時に加圧してステンレス製ノズルから塗布液を噴霧する。塗布膜の均一性は加圧圧力を大きくし霧滴粒径を小さくした方がよいが、本実験では圧力と噴霧量あるいはノズル口径との相関関係を考慮して口径約２７０μm，噴霧角度６０°のノズルを，圧力５Kg/cm²で使用した。この時の噴霧量は約0.２５cc/秒である。またウェハを搬送するベルト速度は約１０cm/秒、

基板とノズル間の距離は１２㎝である。

塗布後、２００℃で乾燥し、所望の温度で拡散して太陽電池を作製した。使用した結晶の規格，拡散条件は次に述べるプレーナ型素子と同じである。図 1.2 は試作太陽電池の外観図である。ところで、ＰＮ接合の特性評価法として、逆方向電流密度の測定がある。しかし、通常の太陽電池の様に接合が周囲で露出していると種々の原因でその部分によるリーク電流の増加，逆耐圧の低下を起こし、接合本来の電気的特性評価が困難となる。それゆえ、プレーナ型素子を作製し、逆方向電流密度の測定により、塗布法の接合特性を調べた。



基板面積 4㎠

電極面積 約 0.36㎠

図 1.2 試作太陽電池

次に素子作製の主要工程を示す。

i）基　板：比抵抗　Ｐ型 0.82Ω−㎝，濃度$C_B=2\times10^{16}cm^{-3}$

Ｎ型 0.72Ω−㎝，濃度$C_B=8\times10^{15}cm^{-3}$

寸法　２０×２０×0.4㎜

ii）エッチング：HNO_3：ＨＦ＝３：１の混酸でエッチング。

iii）酸　　化：１１００℃，６０分，Wet O_2 流量２ℓ／分，H_2O ３０℃の条件でSiO_2膜生成。

iv）フオトエッチ：フオトレジストを回転塗布機（５０年度専用機械装置）を用いて回転塗布しフオトエッチを行なう。

v）拡　　散：スプレイ塗布または回転塗布後２００℃で塗布膜を乾燥し、N^+／P素子は８７５℃１３分，一方P^+／N素子は１０００℃４５分ともに窒素雰囲気中で拡散装置（５０年度、専用機械装置）を用いて拡散。

iv）電極蒸着：不要のドープドオキサイド膜をＨＦで除去し、真空蒸着機（４９年度、委託研究専用機械装置）を用いて電極を蒸着する。

(3) 測定法

(a) 塗布液の熱分析

試作液と市販液によって形成された塗布膜の性質を比較するために熱分析装置ＤＴ−３０（５１年度専用機械装置）を使って塗布液の示差熱分析を行なった。測定試料は塗布液を加熱して得たガラス質白色粉末であり、基準物質は$\alpha-Al_2O_3$の粉末である。両物質をアルミセルに入れ窒素雰囲気中、昇温速度１０℃／分で測定した。

(b) 塗布法太陽電池の出力特性と逆方向特性

試作した太陽電池の電流電圧特性（２８℃±１）をＡＭＯ（１４０㎽／㎠）のソーラーシミュレータで測定した。

次にSiO_2膜を拡散マスクとするプレーナ型素子の逆方向電流密度の測定により、接合特性を評価する場合、あらかじめ膜内のNa^+等の可動イオン数を調べておく必要がある。この値が異常に大きいと、逆方向電流密度が増加し本来の特性評価が困難となる。イオン数は酸化膜の厚み，基板不純物の種類による影響は少なく、酸化条件，基板洗浄処理等に依存する。

この実験で使用した洗浄水の比抵抗は１８MΩ－cmであり、直径0.5μm以上の固形物用フィルター付の純水精製装置によって得たものである。

酸化膜内の可動イオン数は図1.3(a)に示すＭＯＳ構造の熱処理（Ｂ．Ｔ．処理と言い、一定の温度に保った状態で表面電極にプラス電圧を印加し、膜内に散在するN_a^+等をSiO_2膜とＳｉとの界面に移行させる処理法）前後の容量電圧曲線（同図(b)）の電圧移行分△Ｖから次式を用いて求められる。

$$N_S = \frac{\varepsilon_{ox}}{q \cdot t_{ox}} \cdot \Delta V \qquad (1.1)$$

N_S ：可動イオン数　　q ：電子の電荷量

ε_{ox} ：SiO_2膜の誘電率　　t_{ox} ：SiO_2膜の厚み

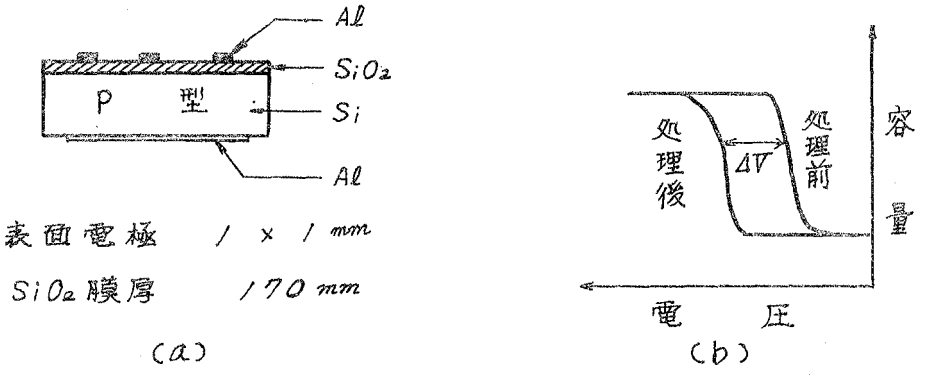


図1.3　ＭＯＳ構造とＣ－Ｖ特性

SiO_2膜の厚み（t_{ox}＝１７０nm）はエリプソメータ（λ＝５４６.１nm）で、素子の容量はデジタルＬＣＲメータ４２７１Ａ（５０年度、専用機械装置）で測定した。Ｂ．Ｔ．処理条件は温度２００℃，印加電圧プラス２０Ｖ，時間３分～５０分の範囲である。

以上の予備実験を行い、プレーナ型素子（面積6.１５mm²）の逆方向電流密度の測定をした。理想的にはこの値は逆電圧に依存しないが、現実には電圧とともに増加する。ここでは逆印加電圧は－１Ｖとした。なお通常この電流値は極めて小さいため、電流計の精度，電気

回路系のシールドに十分注意して行なった。

(4) 結　　果

(a) 塗布液の熱分析

試作塗布液の示差熱分析結果を図1.4に示す。五酸化リンP_2O_5を含む液では50℃～120℃と200℃～300℃の二つの温度域で吸熱反応が観測できる。一方酸化ホウ素B_2O_3を含む液では50℃～200℃で幅広い吸熱反応，400℃～470℃の温度域で発熱反応が認められる。これらの反応は市販の塗布液でも認められることより、試作液と市販液で形成される塗布膜の熱的特性は同じであると考えられる。

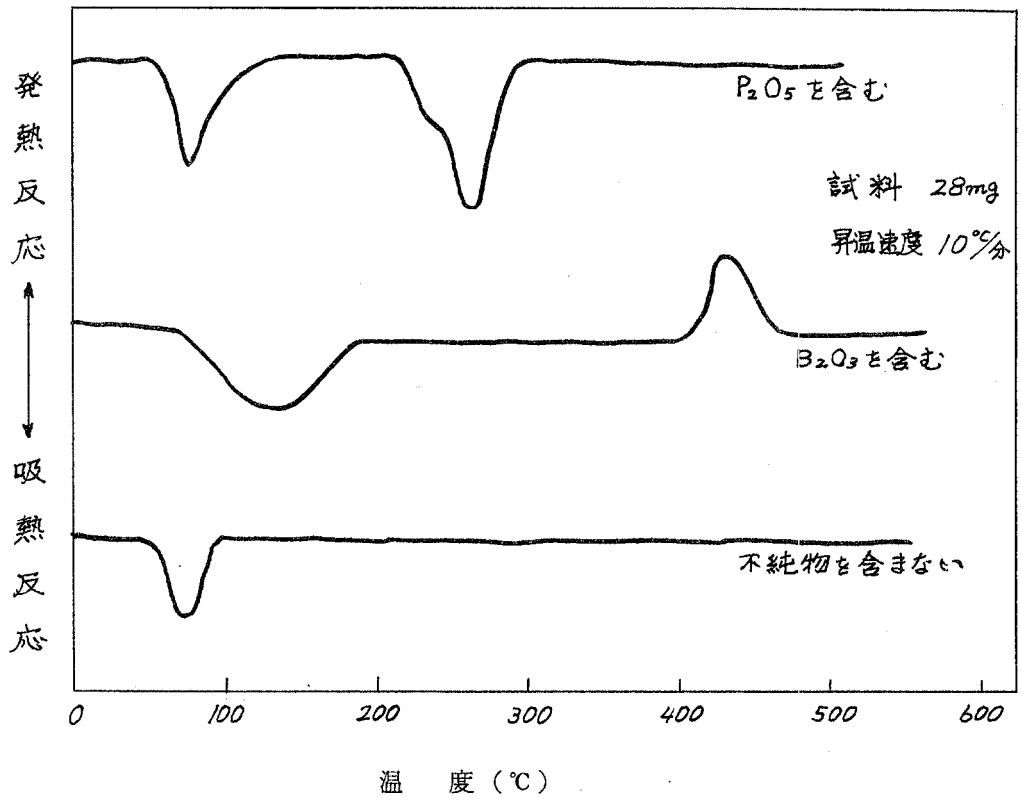


図1.4　試作塗布液の示差熱分析

(b) 塗布法太陽電池の出力特性と逆方向特性

AMOにおける塗布拡散法の出力特性を表1.1に示す。

ただし、反射防止膜はつけていない。表面濃度はステイン法で求めた接合深さと、四探針比抵抗計で測定したシート抵抗の値を用いて、Irvin曲線より算出した。

同表にBN板、$POCl_3$を用いた気相拡散の特性を比較して示す。

表 1.1　各種拡散法の出力特性

（反射防止膜なし）

構造	拡散	方法	拡散源	シート抵抗 ρ_s (Ω/□)	表面濃度 ×10^{20} C_s (cm^{-3})	開放電圧 Voc(mV)	短絡電流密度 Jsc (mA/cm^2)	曲線因子 F. F.	真性変換効率 η (%)
N^+/P	塗布法	回転	市販液	73～80	1.3～2.1	560～565	27.4～28.0	0.75～0.78	8.4～8.6
		回転	試作液	49～56	3.0～3.5	571～578	29.9～30.8	0.74～0.76	9.4～9.6
		スプレイ	試作液	54～61	2.8～3.1	575～582	28.8～29.6	0.71～0.76	8.6～9.1
	気相		$POCl_3$	40～43	4.2～4.5	589～590	28.6～29.1	0.75～0.78	9.0～9.5
P^+/N	塗布法	回転	市販液	18～21	3.1～3.4	570～586	23.0～25.3	0.73～0.81	7.5～8.4
		回転	試作液	25～29	2.2～2.5	545～555	20.6～21.4	0.68～0.73	5.6～6.1
		スプレイ	市販液	22～27	2.3～3.0	528～545	20.3～23.6	0.62～0.69	5.1～5.6
	気相		BN	22～24	3.8～4.1	553～579	25.4～26.0	0.77～0.78	8.0～8.2

この表から以下の事が理解される。

i）N^+／P素子では方法および拡散源の違いに顕著な差がない。

ii）P^+／N素子では方法および拡散源の違いによる差が大きくスプレイ法では市販液（純度5N）を使用しても良好な結果が得られなかった。また試作液では、回転塗布法でも開放電圧，曲線因子等の低下により十分な特性は得られていない。

図1.5にSiO_2膜中の可動イオン数を求めるために測定したMOS構造素子の容量電圧曲線を示す。時間とともに電圧移行が増加し、約20分で飽和している事が判る。この結果より得られるイオン数$N_s = 2.7 \times 10^{11} cm^{-2}$は通常の熱酸化膜生成工程中に含まれるオーダーであり、PN接合の特性評価には影響しないものと考えられる。

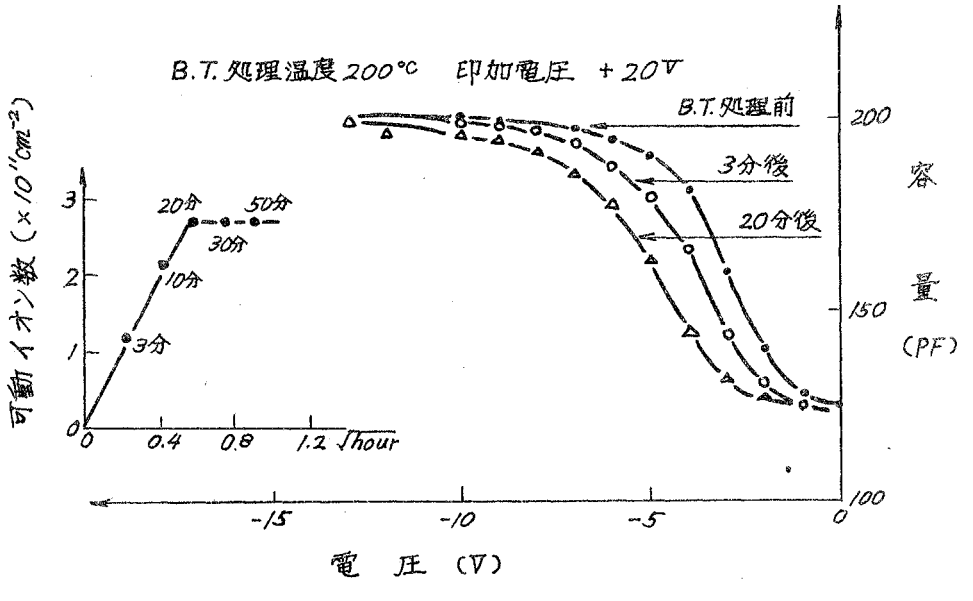


図1.5　MOS構造電圧容量曲線

図1.6はN^+／P，P^+／Nプレーナ型素子の逆方向電流密度の分布を示す。

この結果と前述の表1.2より以下の事が理解される。

i) N^+／P素子では市販液と試作液での特性上の差はない。スプレイ塗布法は回転塗布法と比較して、幾分バラツキがあり、平均して電流密度が大きい。しかしこのオーダでのバラツキはAMOの太陽電池の特性にほとんど影響しないものと考えられる。

ii) P^+／N素子では試作液を用いると市販液よりも電流密度が大きい。スプレイ塗布法は市販液を用いても電流密度が大きい。

一般に、逆方向電流密度が大きくなると、太陽電池の開放電圧、曲線因子が低下し、変換効率が減少する。この事から試作液を用いた回転塗布法および市販液を用いたスプレイ塗布法で作製したP^+／N素子の変換効率の低い原因は逆方向電流密度が大きいためであると考えられる。

(5) 考　　察

(a) 塗布膜の性質について

塗布法によって得られるドープドオキサイド膜の熱的性質は、示差熱分析結果より次のように考えられる。P_2O_5を含む塗布液を室温で塗布すると、$Si(OH)_4$の大部分がSiO_2とH_2Oに分解し、この状態で形成された膜中にはSiO_2，P_2O_5，残存$Si(OH)_4$と溶媒等が含まれている。この塗布膜を加熱すると120℃近辺までに溶媒等が蒸発し、200℃～300℃においてP_2O_5が関与した吸熱反応が起る。

一方、B_2O_3を含む塗布膜は200℃近辺までに溶媒、エチレングリコール等が蒸発し、400℃～470℃においてB_2O_3が関与した発熱反応が起る。

これらの昇温過程で溶媒の蒸発等によって塗布膜中にピンホールの発生が考えられるが、拡散温度では膜の緻密化や不純物の融解（B_2O_3の融点450℃、P_2O_5の融点565℃）が起こるため、拡散層抵抗等の素子特性に影響しないものと考えられる。またN^+／P素子については、スプレイ法で形成した膜厚のむらによる素子特性の顕著な差異も認められなかった。

それゆえスプレイ法の性質上、回転塗布法と比べある程度の膜厚の不均一性は避けられないが、形成された塗布膜が所望の拡散温度，時間に最小限必要な厚み以上のものであれば、厚みむら等によって素子特性が損なわれることはない。

一方、塗布液中の不純物濃度を極端に高くすれば、拡散後フッ酸で不要のドープドオキ

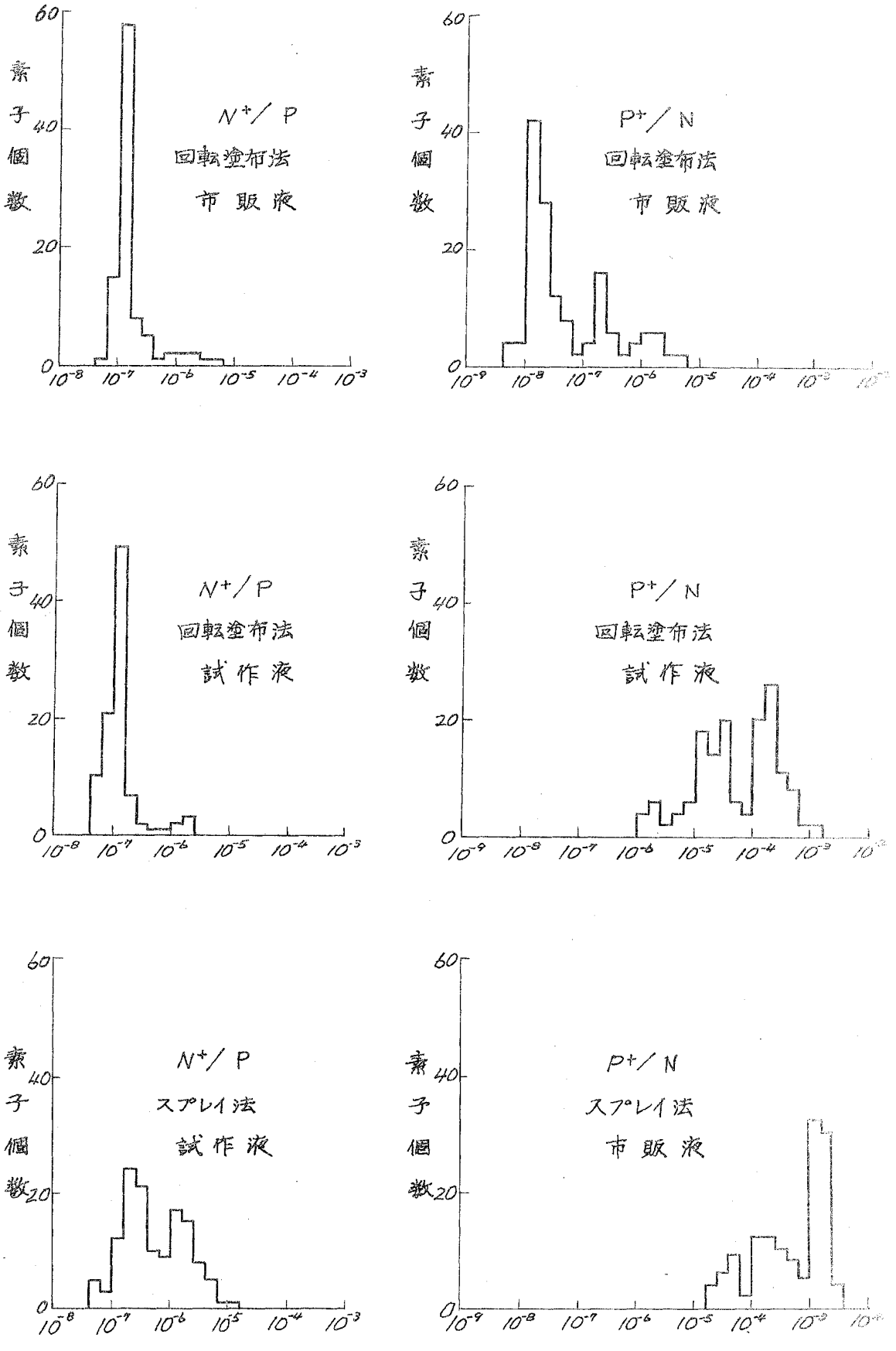


図 1.6　プレーナ型素子の逆方向電流密度の分布

サイド膜を除去しても、後に残るＳｉB_4等によりシリコン表面が着色し反射防止膜のむらの原因となり問題である。

(b)　出力特性について

P^+／N素子において試作液を用いた場合の特性がN^+／P素子より劣る原因は次のように考えられる。試作液は一般に言われている１級あるいは特級の試薬で調合したものであり、接合特性に悪影響を与えるC_u，F_e等の有害不純物を含み、またP^+／N素子の拡散温度はN^+／P素子の温度より高いので、有害不純物が拡散されやすいこと、およびリンケイ酸ガラス（ＰＳＧ）に比べホウ素ケイ酸ガラス（ＢＳＧ）のゲッター効果が少ないことなどより、P^+／N素子の方が有害不純物の影響が著しいと考えられる。

またスプレイ法で市販液（純度５Ｎ）を用いてもP^+／N素子の特性が十分でない原因は今回検討したスプレイ装置の材料からの汚染が考えられる。

(c)　自動化について

リボン結晶を用いた接合形成の自動化は、リボンの特徴を生かし長い形状のままで拡散を行なう方が得策であると考えられる。その場合の拡散方法として現在の気相拡散法を用いると、イ)長い形状のリボン結晶で拡散層抵抗等のバラツキをおさえるためには、キャリアガスの流れの制御が困難となる、ロ)不純物ガスの生成物が石英管内に堆積し、２次的な拡散源となって長期的な再現性維持が困難となる、ハ)石英管の寿命の短縮化、洗浄といった保守上のチェックが煩雑になる、等の点で不利であると思われる。またＣＶＤ法は気相拡散法に比べ拡散層抵抗等のバラツキは少ないが、やはり保守上のチェック，有害ガスの管理、膜の生成速度などの点に問題があると考えられる。

このような観点から、塗布法は原理的にはＣＶＤ法と類似であり再現性が高く、ＣＶＤ法よりも膜の生成速度，設備の簡易さ等といくつかの点で自動化には有利である。

素子構造について、自動化にはP^+／N素子よりN^+／P素子の方が次に述べる点で適している。

通常の拡散温度では、ホウ素よりリンの拡散係数および固溶限が大きい。それゆえ、N^+／P素子ではP^+／N素子より低い拡散温度，短い拡散時間でも素子特性を損うほど、直列抵抗の増加、開放電圧の低下が生じない。またP^+／N素子は拡散時間を短かくするために温度を高くすると拡散後の冷却過程に注意を払わないと基板のライフタイムの低下によって素子特性が損われる等の扱いにくい性質を有する。

一方、低価格太陽電池をめざす場合、素子特性を損わない範囲内で塗布液の純度を下げ、低価格化をはかる必要がある。たとえば、今回試作した塗布液の価格を便宜上、２インチ基板４枚（１Ｗ相当分）にスプレイガンで１ccの液を吹付けたとして試算すると、試作液

で約2円/W，市販液で約80円/Wとなり、その経済的効果は大きい。

その他、リボン結晶を対象とした場合、拡散炉の改善も必要である。現在の拡散炉は大型であり、必要な温度分布を得るのに数十KWにもおよぶ電力が消費されている。

それゆえ、リボン結晶の厚み，幅を考慮して炉心管内空間を有効に使えるように管の形状を検討し、電力量の節減，装置の小型化をはからねばならない。

以上の様にリボン結晶での接合形成の自動化を考えると、従来の円形ウエハーを対象としたプロセスではなく、リボン結晶に適した新規なプロセスの開発が必要であると思われる。

(6) 結　論

スプレイ塗布法で試作した太陽電池の出力特性は、N^+/P素子については回転塗布法、気相拡散法で作製したものと同等であり、市販液の約1/40の低価格（約2円/W）液でも満足な結果が得られる事を確認した。しかしP^+/N素子での変換効率は十分でなかった。その他、シート抵抗，拡散後のドープドオキサイド膜の除去，表面の汚れ等の処理面にも問題がない事を確認した。

また塗布法はアウト拡散が少ないので石英管の汚染がほとんど認められず、長期間再現性よく素子の製造が可能であり、従来の拡散法より設備保守が簡単である事を確認した。

我々は既に回転塗布法によりサンシャイン計画の主要テーマである集光型太陽電池素子を作製し、歩留り、変換効率の面で良好な結果を得ている。

(7) 今後の課題

イ) P^+/N素子の特性が十分でなかった原因を究明し変換効率の向上を図ること。

ロ) 塗布液中の不純物濃度を最適にし、変換効率の向上を図ること。

ハ) 加圧圧力と噴霧量、ベルト速度等の相関関係を調べ効率的なスプレイ条件を決めること。

1.1.2 ショットキー障壁による多結晶シリコン薄膜評価法の検討

(1) 概　要

太陽電池の低価格化のひとつの方向である多結晶薄膜太陽電池のP－n接合形成には、多結晶層の成長時にドーパントを反転させる方法や、多結晶層形成後に表面から不純物を熱拡散させる方法がある。しかしながら、多結晶でのP－n接合では多結晶成長時のオートドーピングの問題、また不純物が結晶粒界へ選択的に拡散する傾向があり、リーク電流の激増を招く可能性があること、また結晶粒界でのキャリアに対する障壁効果やトラップ効果など、結晶構造に特性が大きく左右される。ここでは、接合形成時の温度上昇による影響を薄膜に与えることの少ないショットキー障壁を使った多結晶シリコン薄膜評価法を検討した。

(2) 実験方法

カーボンあるいはグラファイト基板上に、多結晶シリコン層を四塩化ケイ素の熱還元により気相成長させ素子基板とした。表1.2において素子基板No.1−1，1−2はカーボン基板をNo.2−1～5−1はグラファイト基板を用いた。多結晶シリコン層の成長条件は、1−1，1−2においては多結晶シリコン層全体を約0.7μm/分の成長速度で作製したのに対し、2−1～5−1は多結晶シリコン層低部を反応ガス濃度の高い状態下で約1.2μm/分の成長速度で成長させ、基板上に結晶粒径は小さいが緻密な結晶層を形成し、その上に反応ガス濃度が低くまた低部の成長時よりも高温で結晶粒径の大きい層を形成した。多結晶シリコン層はN型で比抵抗は0.1～17Ω−cm，膜厚は20～28μm，表面付近の結晶粒径は 1−1，1−2が7μm以下で平均約3μm，2−1～5−1は10μm以下で平均約6μmである。

これらの素子基板に金を20～45nmの膜厚で真空蒸着し（真空蒸着装置，49年度専用機械装置）ショットキー障壁太陽電池とした。電極は裏面においてはカーボンあるいはグラファイトをそのまま用い、表面は低温焼成型銀ペーストを約90℃で40分間焼成して作製した。図1.7に試作したショットキー障壁太陽電池の断面構造を示す。素子基板は30mmφあるいは20mmφで、同一基板内に有効受光面積が0.15～0.16cm²の素子を4～10個，あるいは1cm²を越える素子を1個作製した。

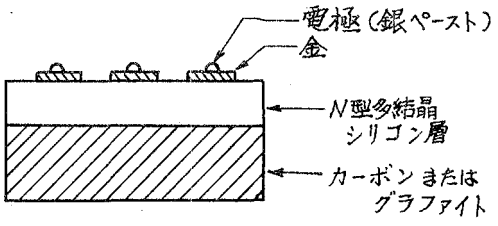


図1.7　ショットキー障壁太陽電池

また、ショットキー障壁太陽電池に用いたのと同一条件で作製した素子基板の一部でP−n接合太陽電池を試作し、ショットキー障壁太陽電池との比較検討用とした。図1.8にその断面構造を示す。P−n接合は、ボロンを含んだ接合形成用塗布液を用いて、素子表面から窒素雰囲気中で1,000℃20～30分間ボロンの熱拡散を行って形成した。さらにフォトエッチングにより、同一基板内を3×3mmのメサ形素子に分割した。

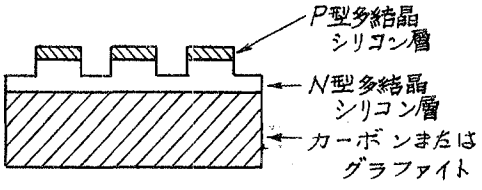


図1.8　P−N接合太陽電池

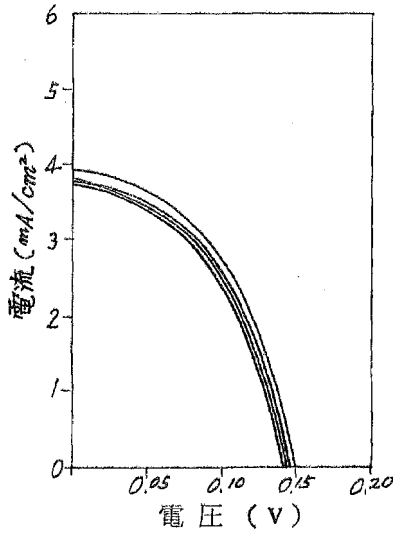
素子特性は、ソーラーシミュレーター（AMO，140mW/cm²）を用いての光照射時の電流電圧特性，Dark時の電流電圧特性，短絡電流の分光特性の各項目について測定した。

(3) 結　果

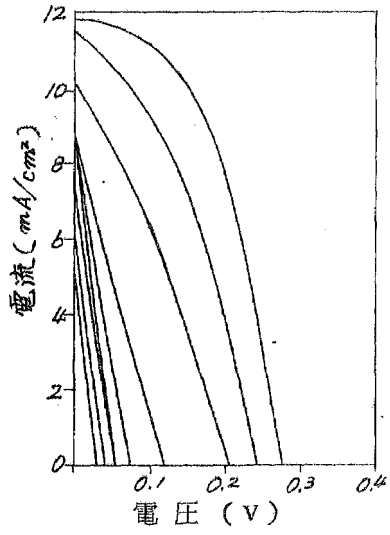
表1.2に光照射時（AMO，140mW/cm²）の電流電圧特性の測定結果を示した。各数値は同一基板内に作成した4～10個の素子の平均値を示し、（　）内はそのばらつき範囲を示している。図1.9には光照射時の電流電圧曲線を、図1.10にはDark時の電流電圧曲線を、図1.11には短絡電流の分光特性を示す。

表1.2　試作薄膜太陽電池の作製条件と諸特性

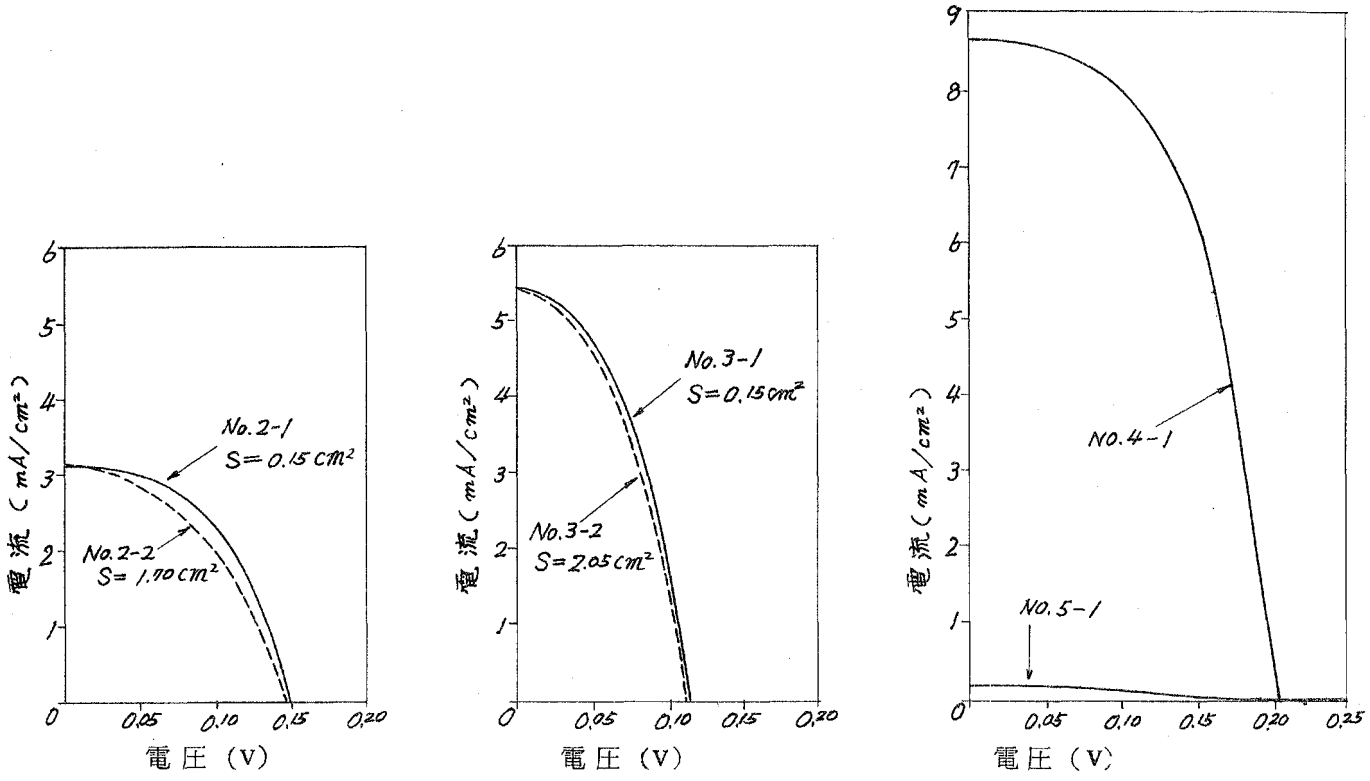
素子基板 No.	光照射時(AMO, 140mW/cm²) I－V特性 開放電圧 Voc(mV)	短絡電流密度 Jsc (mA/cm²)	フィルファクター F.F.	有効受光面積 (cm²)	Dark時逆方向電流 (at－0.5V) (A/cm²)	素子個数 n	多結晶基板比抵抗 (Ω-cm)	多結晶基板膜厚 (μm)	接合方式	金層膜厚 (nm)
1－1	144 (142～149)	3.81 (3.72～3.91)	0.48 (0.48～0.49)	0.16	1.5×10^{-4}	4	0.1	20	ショットキー	35～40
1－2	123 (32～275)	7.90 (5.6～11.8)	0.30 (0.25～0.49)	0.09	—	9	0.1	20	P－n 1,000℃ 20分	—
2－1	149	3.13	0.52	0.15	1.5×10^{-4}	10	0.1	28	ショットキー	40～45
2－2	146	3.12	0.50	1.70	—	1	0.1	28	ショットキー	40～45
2－3	280 (276～290)	13.8 (13.3～14.7)	0.47 (0.45～0.48)	0.09	7.0×10^{-4}	7	0.1	28	P－n 1,000℃ 30分	—
3－1	114	5.40	0.48	0.15	—	8	7	24	ショットキー	30～35
3－2	110	5.37	0.47	2.05	—	1	7	24	ショットキー	30～35
4－1	203	8.66	0.55	0.16	9.0×10^{-6}	7	11	20	ショットキー	25～30
5－1	160	0.19	—	0.16	—	5	17	22	ショットキー	20～25



a）基板素子No. 1－1（ショットキー）
（Au：35～40nm）



b）基板素子No. 1－2（P－n）

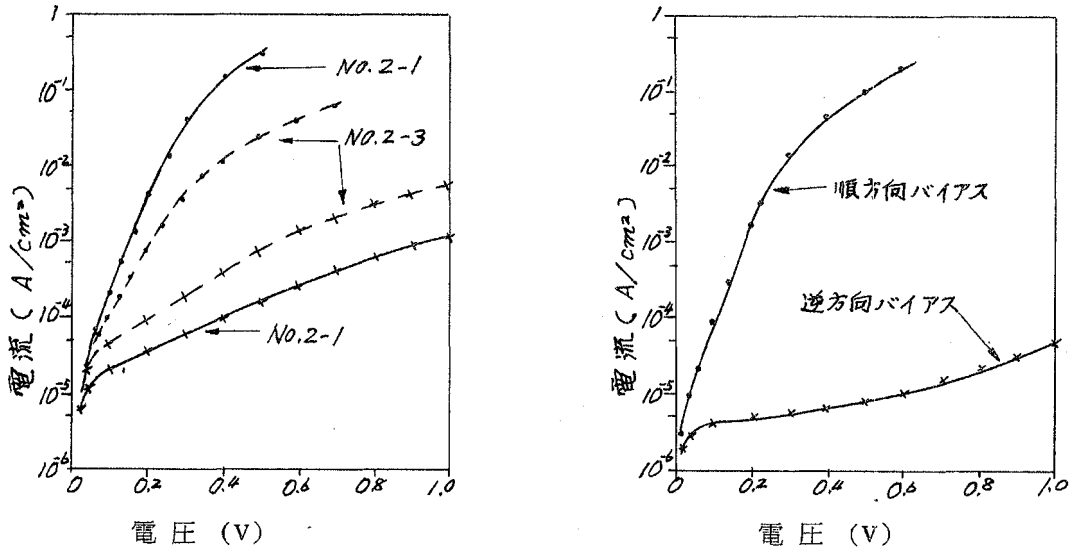


c）基板素子№2－1（ショットキー）
№2－2（ショットキー）
（Au：40～45 nm）

d）基板素子№3－1（ショットキー）
№3－2（ショットキー）
（Au：30～35 nm）

e）基板素子№4－1（ショットキー）
（Au：25～30 nm）
№5－1（ショットキー）
（Au：20～25 nm）

図 1.9　光照射時（AMO，140mW/cm²）の電流電圧特性
（S：有効受光面積）



a）素子基板№2－1（ショットキー）
№2－3（P－n）

b）素子基板№4－1（ショットキー）

図 1.10　Dark 時の電流電圧特性

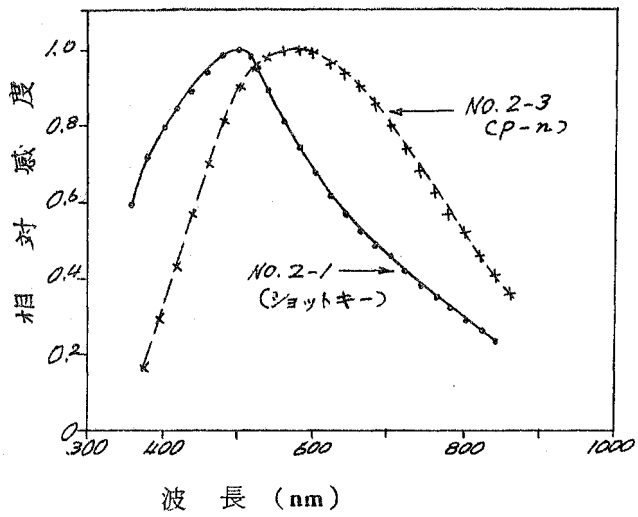


図1.11 短絡電流の分光特性

(4) 考察

表1.2において、素子基板No.1－1，1－2はカーボン基板上に多結晶シリコン層を同一成長条件で作製した素子基板を用いているが、ショットキー障壁太陽電池1－1に比べて、P－n接合太陽電池1－2の特性が悪い。1－2の素子では図1.9 b）に示されるように同一基板内での位置による特性のばらつきが大きく、また激しいリーク電流がみられる。このような素子は、素子面積を大きくした場合良好な特性は望めない。これに対して、1－1の素子は図1.9 a）に示すように同一基板内での位置による特性のばらつきが小さく、またフィルファクターが0.48～0.49であり、1－2に比べて良好である。

またNo.2－3はP－n接合太陽電池であるが、激しいリーク電流はなく同一基板内での位置による特性のばらつきが小さく、1－2に比べて良好である。これはNo.2－1～5－1においては1－1，1－2の素子基板とその作製方法を変え、多結晶シリコン層低部に結晶粒径は小さいが緻密な結晶層を設けてあるのでその効果と考えられる。2－1，2－2はショットキー障壁太陽電池で2－1は0.15cm²、2－2は1.70cm²の有効受光面積であるが、面積を大きくしても開放電圧（Voc），短絡電流密度（Jsc），フィルファクター（F.F.）ともに急激な悪化はみられない。〔図1.9 c）及び d）〕

このように、多結晶におけるP－n接合では、不純物が結晶粒界に沿って選択的に拡散する傾向にあるため、リーク電流が激増する可能性があり結晶構造に特性を大きく影響される。これに対してショットキー障壁は、半導体表面と金属との接触による障壁の応用であるため、結晶層にピンホールがない場合大きなリーク電流は容易に防げると考えられる。

図1.10のDark時の電流電圧特性において、－0.5V印加時の逆方向電流はショットキ

ー障壁太陽電池２－１，４－１の各素子において各々1.5×１０$^{-4}$，９×１０$^{-6}$A／㎠で、比抵抗の高い素子が良好な逆方向特性を示している。またＰ－ｎ接合太陽電池２－３は、−0.5V印加時の逆方向電流が７×１０$^{-4}$（A／㎠）であり、同一条件で作製した素子基板のショットキー障壁太陽電池２－１よりも悪い。

図1.11のJscの分光特性において、相対感度のピーク値はショットキー障壁太陽電池２－１が５００nm，Ｐ－ｎ接合太陽電池２－３が５８０nmであり、ショットキー障壁太陽電池の方が短波長側にピーク値を持っている。これはショットキー障壁が金の薄膜層の光線透過率やキャリアに対する鏡像力効果等を無視すれば、Ｐ－ｎ接合において接合深さを零と仮定した場合とほぼ同様と考えられるためである。また分光特性のピークが鋭く長波長域では感度が落ち込んでおり、キャリアの拡散長がかなり短いものと思われる。

表1.2及び図1.9 c),d),e)に示されるように、ショットキー障壁太陽電池のJscは金の膜厚に直接影響されている。３－１，４－１，５－１の各素子は、金の膜厚がそれぞれ30〜３５，２５〜３０，２０〜２５nmで、対応するJscはそれぞれ5.40，8.66，0.19mA／㎠である。膜厚を小さくすれば金の層の光線透過率が増大し、Jscが増大するはずであるが、膜厚の最も薄い５－１の素子ではJscが極端に小さくなっている。これは多結晶表面の凹凸が激しいために、膜厚がある程度小さくなると膜抵抗が急増しさらに金層が不連続になるためと考えられる。このことは多結晶表面の形状が金層の光線透過率と膜抵抗との関係に大きく影響することを示しており、膜厚の最適化は反射防止膜とともに今後の大きな課題のひとつであろう。

(5) 結　論

イ）多結晶におけるＰ－Ｎ接合太陽電池では、大面積の素子を作製する場合、その結晶構造が全面にわたって緻密でなければリーク電流の激増する可能性があり、良好な特性は期待しにくいのに対し、ショットキー障壁太陽電池では、比較的容易に特性の悪化を招かずに大面積の素子を得ることができる。

ロ）Jscの分光特性は５００nm前後に鋭いピーク値を持つ。また長波長域では急激に感度が落ち込むが、これはキャリアの拡散長が短いためで多結晶層の粒界密度を小さくするなどの結晶性の改善が必要である。

ハ）金の膜厚は、多結晶の凹凸が激しいために、比較的平たんな表面を有する単結晶表面の場合に比べて、ある程度厚くしないと膜抵抗が急増し良好な特性は得られない。

(6) 今後の課題

本報告ではショットキー障壁の多結晶シリコン薄膜評価法への応用について、定性的な把握にとどまった。今後は、多結晶の結晶性と太陽電池特性の関連の把握、さらに金の膜厚の

最適化及び反射防止膜の検討による光電流の増大化、多結晶表面における酸化膜等の絶縁膜をキャリアのトンネル効果を期待できる程度の膜厚にした場合の効果の検討、さらに低価格太陽電池の目的に適した金以外の金属材料の検討などが必要であると考えるが、現在のところ他の受託研究会社よりシリコン多結晶薄膜基板が供給される見込みがないので供給された時点で研究を再開する予定である。

1.2 電極形成

1.2.1 概要

主として、シリコン太陽電池の電極作製は多層の金属薄膜を真空中で蒸着形成することにより行なわれて来ている。この方法は、高真空装置中に清浄化したシリコン基板を装着して加熱し、電子ビーム加熱により金属を溶融蒸発させるものである。この蒸着工程は複雑で、かつコスト面でも太陽電池価格の多くを占めている。我々の目的とする超低価格太陽電池の自動生産化という立場からこの電極形成方法を考えれば、この方式では、材料の損失が大きく、かつ自動生産化への移行は全く不可能であると結論できる。

我々は、このような点を考慮し、シリコン太陽電池の製作には新規な方法である印刷による電極形成について研究開発を行なっている。

そこで49年度では、半導体－金属接触の理論的背景の確立及び金属とシリコンとの接触の基本特性の把握を、真空蒸着法による実験で行なった。更に、接触抵抗の測定法を確立した。

50年度においては安価な導電性ペーストの開発に先立って、種々の既製導電性銀ペーストを用いて電極を形成し、シリコンとの接触抵抗，引張強度の測定および断面の観察などを行ない、既製ペースト材料の電極としての特性把握を行なった。

51年度においては、前年度の既製銀ペーストの特性結果を基盤にして、さらに金属元素としては銀よりも低価格であるAl，Cu，Niを使ったペーストについても、研究対象を広げて特性把握を行なった。また前年度研究成果の確認として、既製銀ペースト中特性の優れたものを用いて太陽電池の試作を行ない、蒸着形成電極に近い変換効率の素子が得られた。

一方本年度においては、これまでの成果を基礎にして、安価なペースト材料開発の第一歩である電極用ペーストの作成方法の研究を開始した。その結果、諸特性において既製銀ペーストを凌ぐ特性の試作ペーストが得られた。

今後、これらの成果を基盤にして、より低価格な材料を用いて、低接触抵抗で高信頼性のシリコン太陽電池電極に適した印刷用ペーストを研究開発してゆく方向にある。

1.2.2 理論

太陽電池素子においては、光照射により生じる光電流をシリコン結晶内から外部へ取り出す必要があり、この目的でシリコン表面には、導電性の優れた種々の金属が単独あるいは複合し

て取り付けられている。通常このシリコン－金属の界面には抵抗成分を生じる。太陽光のエネルギーを効率よく電気に変換させるには、この抵抗成分を極力小さくすることが必要で、現状の太陽電池においてもこのことに多くの努力が払われて製品化されている。我々の目的である低価格太陽電池の開発においても、この点に特に留意して研究を行なって来ている。すなわち４９年度の電極形成の研究開発においては、太陽電池の直列抵抗と変換効率の関係を明らかにし、その結果直列抵抗の成分中特に重要な金属と半導体間に生じる接触抵抗に着目し、大型コンピューターにより理論計算を行なった。また同時に、安価と考えられる金属材料を用いて実際の接触抵抗を測定し、数値計算結果との対応を行ない、理論計算の正しい事が確認できた。

５０年度においては、蒸着法に代わる新規な電極形成方法として、導電性ペーストの印刷法に着手した。

印刷法における電極形成では、接触抵抗の測定方法に関し、４９年度と異なった方式を採用した。その理由としては、ＴＬＭ法やＴＷＣ法による接触抵抗の測定では、印刷法における最小パターン精度がプレーナ方式による測定パターンよりも若干悪くなる為前者の方法が困難であり、後者においては試料の製作が繁雑となる為である。Ｐ．Ｈ．Cox らによって提案された測定方法は、これらの欠点がより少ない。この方法は、印刷により比較的簡便に測定試料の作成が可能である特徴を持っている。

本年度においても、この方法を継続して用いているが測定上特に支障はない。

５１年度においても、全般的に見ればこれまで報告して来た理論的な背景や接触抵抗の測定方法には変更がない。

ここでは、焼成後のペーストとシリコンの接触について述べる。

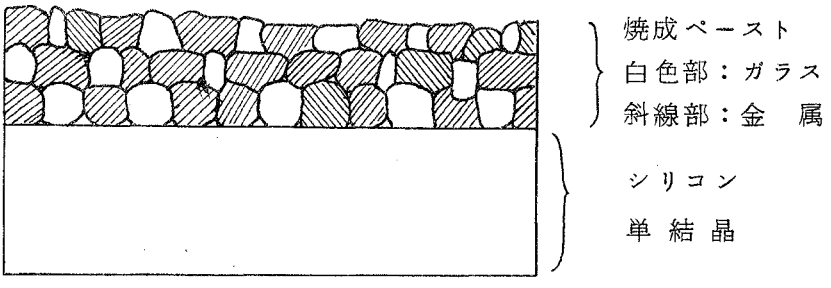


図 1.12　半導体基板上のペースト電極

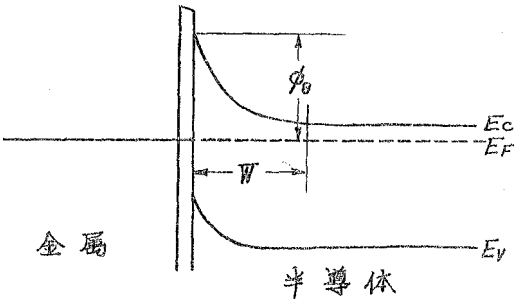


図1.13　金属とN型半導体の接触

本来、蒸着方法等により半導体基体に電極を形成した場合、金属－半導体の接触抵抗は、微視的に見ても電極部分全域でほぼ同一になっていると考えられる。

しかし、本報告の研究対象としているペースト焼成電極においては、最終的にはガラスと金属の混成体と半導体基体の接触した状態となる。この状態を図1.12に示す。この図における斜線部金属と半導体基体の接触部分においては、図1.13のようなエネルギーバンド図が考えられる。接触抵抗を小さくする目的からは、半導体と金属の種類により決まる障壁高さ（ϕ_B）を小さくすることが必要である。また空乏層厚さ（W）は半導体不純物濃度により決まり、同じ目的からはWを小さくすればよい。一方図1.12中のガラスと半導体の接触部分について考える。ガラスは通常良好な絶縁体であるので、図1.13に類似したバンドモデルを考えれば、実際の半導体表面での障壁高さは金属のみの場合よりもさらに高くなり、電極として作用するような電気伝導は考え難い。このように、焼成ペースト電極による電極としての電気伝導の機構は、通常の電極よりも複雑である。

1.2.3　実験方法

(1)　ペーストについて

５０年度に於いては、研究対象ペーストとして、市販の銀系ペーストで樹脂接着型ペースト（低温用）やガラスフリットボンドペースト（中温用、高温用）を用いたが、電極としての諸特性から特にその接触抵抗値の点で後者の高温用ペーストが優れていた。本年度においては、この市販銀系ペーストを含め、Ag以外のAlペースト，Cu-ペースト，Niペーストについて研究した。一方、銀粉末，ガラスフリット，樹脂等を用いて、シリコン太陽電池に適した銀ペーストの試作を行なった。

(a)　Ag，Al，Cu，Niペーストについて

研究に用いた既製ペーストについて以下に述べる。

これらはいずれもガラスフリットボンドによる接着ペーストで、焼成温度は約８００℃である。この検討の目的は、同じような構成のペーストで、その主金属成分の違いによる電極ペーストとしての特性比較を行なうことである。ここで用いた各種ペーストのカタログ資料を表1.3に掲げる。

表1.3　既成ペースト試料のカタログデータ

試　料	金属成分	焼成温度	雰囲気	用　途	備　考
Ag ペースト	銀	750～800℃	Air	圧電素子，アルミナコンデンサー	
Cu ペースト	銅	800～1000	N_2	アルミナ　石英　単結晶サファイヤ	比抵抗 $5\times10^{-6}\Omega$-cm
Ni ペースト	ニッケル	800～1000	N_2	アルミナ　石英　単結晶サファイヤ	
Al ペースト	アルミニウム	800～950	Air	アルミナ　石英	比抵抗 $2.5\times10^{-5}\Omega$-cm

これらのペーストについての熱特性分析装置（５１年度専用機械装置）による分析結果を以下に略述する。この装置においては、試料の熱異常（材料の各種反応）と熱－重量変化を検出することが可能である。これらペーストにおける測定データの一例を図1.14に示す。

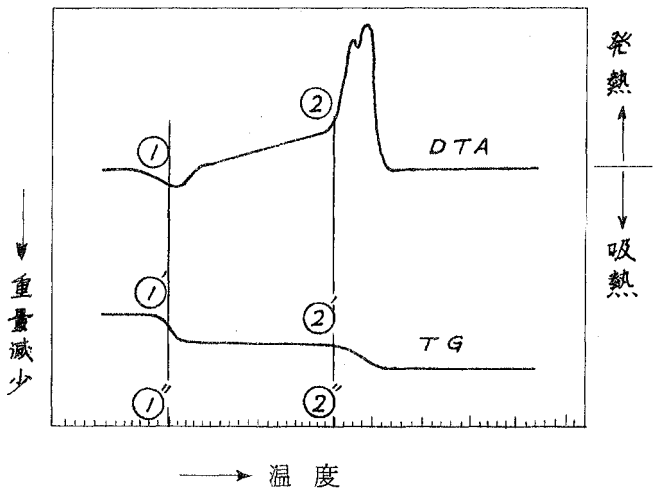


図1.14　ペーストの示差熱重量変化

図1.14において、上側の曲線は示差熱を表しており、①においてペースト成分中の溶剤揮発による試料の吸熱反応を生じている。同時に下側曲線の重量変化においても①′の重量減少が見られる。その時の温度が①″で示される。さらに試料を加熱してゆくと、②の所でペースト成分中の樹脂材料の燃焼を生じ、重量にも②′の変化を示す。この時の温度は②″で測定できる。このような測定から、ペースト中の溶剤，樹脂成分，固型成分の重量比率や、溶剤の揮発温度および樹脂の燃焼温度が明らかになり、本研究上有効なデータを提供

する。これらの測定結果を表1.4に示す。

1.4　ペーストの示差熱・重量変化測定結果

試　料	各成分系の組成比(%)			熱異常点(℃)	
	溶　剤	樹　脂	固型量	揮発完了	樹脂発火
銀ペースト	30.0	5.2	64.8	155	225
銅ペースト	14.2	1.1	84.7	137	* —
ニッケルペースト	17.7	1.4	80.9	137	* —
アルミペースト	29.5	3.8	66.7	157	243

＊分解して飛散する樹脂であり発火は起らない

(b)　試作ペーストについて

51年度より、シリコン太陽電池に適するペーストの製作に着手した。今年度における主な目的は、まず基本的な材料即ち、銀粉末，ガラスフリット，溶剤，樹脂材料を用いたのペースト作成方法の確立である。

以下にペーストの作成について述べることにする。

金属材料としては、50年度の既製ペーストと同じ成分である銀を用いることにした。銀粉末は、純度99.9％，粒径3μmを使用した。ガラスフリット材料としては、低軟化点をもつ2種類のガラスフリットを用いた。これらガラスフリットの前述の熱特性分析装置（示差熱分析装置）による測定結果を表1.5に示す。表1.5中にカタログデータについても記す。

表1.5　試作ペーストに用いたフリット特性

試料	示差熱による実測		カタログデータ	
	転移点	軟化点	熱膨張率	比　重
A	310℃	370℃	9×10^{-6}/℃	6.0
B	525℃	609℃	4×10^{-6}/℃	4.0

樹脂材料については、種々の合成樹脂やセルロース系の樹脂を焼成状態や印刷性等の点から予備実験した結果、セルロース系で若干の合成樹脂と油脂による変性を行なったものが電極用ペーストとしての特性に優れていることが判明したので、これを用いることにした。

溶剤については、ブチルセルソルブとブチルカルビトールアセテートを比較検討した結果、後者の方が印刷性に優れているのでこれを用いた。以上の材料を、通常の攪拌装置や

より十分に攪拌混合してペーストを作成した。

表1.6に試作した2種類の銀ペーストの成分と組成を示す。

表1.6　試作銀ペーストの成分と組成

試　料	金属成分	ガラスフリット	樹脂成分	溶剤成分
試　作 ペースト1	銀粉末 65%	フリットA 9 %	変性セルロース 4 %	BCA 22%
試　作 ペースト2	銀粉末 65%	フリットB 9 %	変性セルロース 4 %	BCA 22%

(2)　試料作成法

ここでは、既製Ag，Al，Cu，Niペーストおよび試作ペースト1と2の各種ペーストについて、シリコン太陽電池電極に必要と考えられる特性を調査する為の試料の作成方法について述べる。

(a)　シリコン基板の準備

シリコン単結晶基板は、CZ引上によるものでその導電型はP型とN型の両方を用いた。シリコン基板の準備の方法は以下の通りである。図1.15にこの工程を示す。

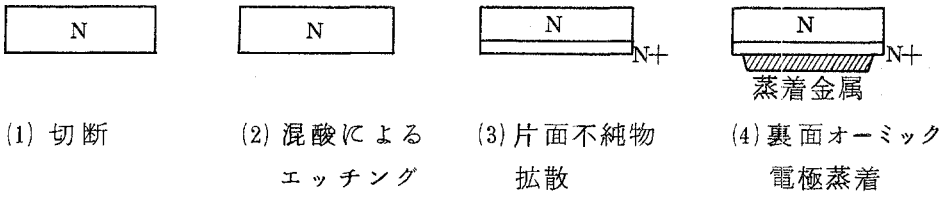


図1.15　シリコン基板の準備

図1.15(1)はラッピングしたシリコンウエハーを示し、その不純物濃度は、P，N型とも約$3\times10^{19}\sim1\times10^{16}\ cm^{-3}$で厚さ400μm、直径50㎜であり、図はN型について示したが、P型の場合も同様である。(2)では、混酸による数十μmの破砕層除去を行なう。(3)では、裏面にオーミック電極を設けるために、高不純物濃度の拡散層を形成する。(4)では、拡散側に蒸着法によってオーミック電極を形成する。

(b)　ペーストの印刷と印刷パターンについて

ペーストの印刷は、上記準備したシリコン基板と、通常のセラミック基板（厚膜IC用、Al_2O_3 96%）に行なう。

印刷装置は、スクリーンプリンタ（50年度専用機械装置）を用いた。接触抵抗の測定，接着強度の測定等には、シリコン基板を用いその印刷パターンは円形で大きさは直径0.5

～5㎜φである。またペーストの比抵抗の測定には、セラミック基板を用いその印刷パターンは抵抗体の形状とした。形状の詳細については図1.18に示す。

(c) 焼成条件

焼成は、コンベア雰囲気炉（50年度専用機械装置）を用いた。焼成雰囲気は、Ag，Al，及び試作ペーストは空気で、CuとNiペーストは窒素である。又、焼成条件は、Cu，Ni，Alの各既製ペーストではピーク温度が600から900℃であり、試作ペーストは760℃である。図1.16に，既製ペーストと試作ペーストの焼成温度プロファイルを示す。但し、既製ペーストはピーク温度が800℃の場合のみ示した。

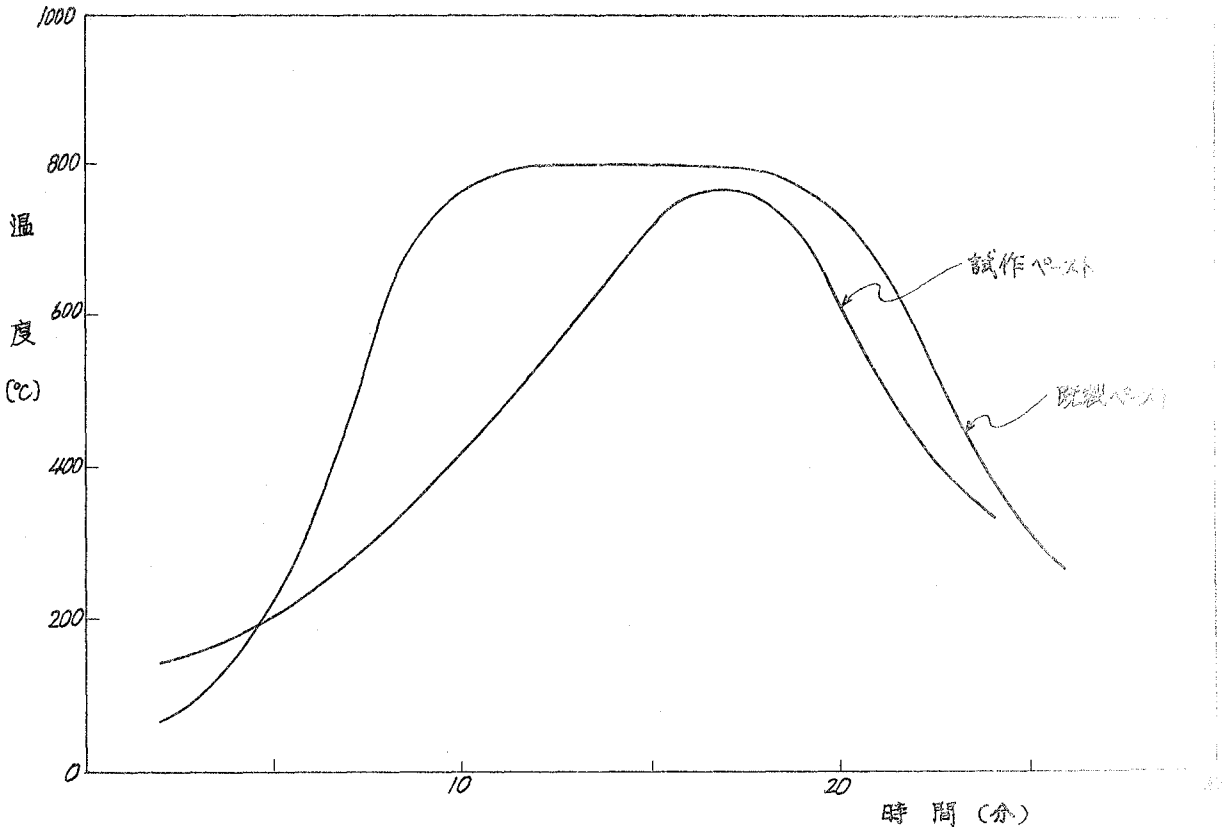


図1.16 焼成温度プロファイル

(3) 断面の観察

焼成ペーストとシリコン基板の断面の観察は電極用ペーストの開発にとって重要な情報を与える。つまり、ペースト中の金属成分の焼結状態やガラスフリットの分布状態、シリコン基板とペースト成分の反応状態などを知ることができる。

試料の作製方法は次の通りである。ペーストを塗布・焼成したシリコン基板を、数㎜角で切断して、樹脂中に埋込み硬化させる。次に研摩紙上で、シリコン面に直交する平面を研磨する。その後回転バフ面で、0.25μm径のダイヤモンドペーストによる仕上研摩をし、水洗・燥乾させて断面観察用の試料とする。

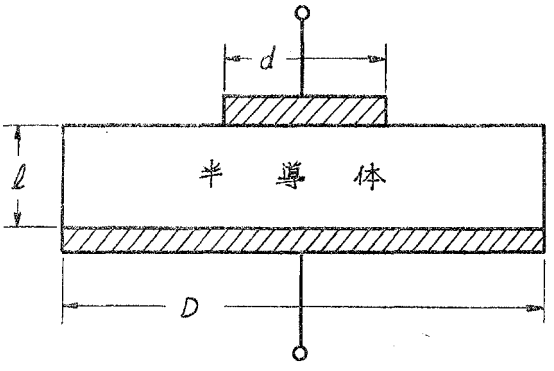
検鏡観察は、カールツアイス製金属顕微鏡と付属のポラロイド製写真撮影装置（５０年度、専用機械装置）を用いた。また走査電子顕微鏡用試料としては、同上の工程後さらにAu 薄膜を蒸着により形成したものを用いた。装置は、日立製Ｓ－５００ＳEM装置（工技院所有、東芝電子部品研究所設置）を借用した。

(4) 評価方法

(a) 接触抵抗

詳しくは５０年度成果報告書に述べているので、本報告では測定試料と求めた計算式のみ記す。

図1.17に示す様な試料を考えた場合、全抵抗R_Tは広がり抵抗，接触抵抗及び残余抵



d：接触部の直径

ℓ：半導体の厚さ

D ≫ d

図 1.17　接触抵抗測定試料

抗から成っている。残余抵抗は裏面の接触抵抗，金属部の抵抗，プロービングの際に生じる抵抗等から成っているが、本検討では無視できるほど小さな値となった。

従って全抵抗は次式で表わされる。

$$R_T = \frac{\rho_B}{d\pi}\tan^{-1}\left(\frac{4\cdot l}{d}\right) + \frac{4\rho_C}{\pi d^2} \qquad (1.2)$$

ρ_B：半導体の比抵抗

ρ_C：接触抵抗

l を決めR_T, ρ_B，d を測定すれば、上式より接触抵抗は計算により求まる。

(b) ペーストの比抵抗

セラミック基板上に図 1.18 の様なパターンでペーストを印刷・焼成した。

パターン両側の端子部より電流 I を流し、電位降下 V を測定すれば比抵抗 ρ_M は次式により求まる。

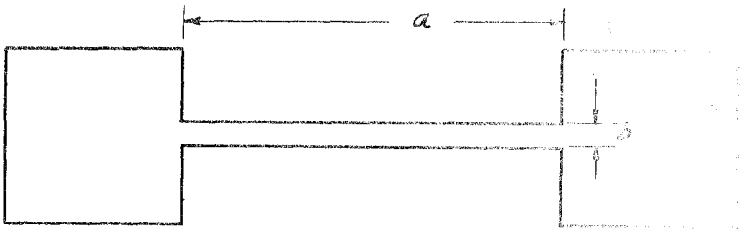


図 1.18　比抵抗測定パターン

$$\rho_M = \frac{V}{I} \frac{b \cdot t}{a} \qquad (1 \cdot 3)$$

t ：ペーストの膜厚

(c) 接着強度

太陽電池電極の特性の一つとして、電極のシリコンに対する接着強度が重要である。換言すれば、優れた電気的特性を有する電極でも、機械的強度がなければ太陽電池としての実用化は不可能である。

従って印刷法による電極の接着強度試験装置として、引張試験機（５０年度専用機械装置）を用いて、各ペーストのシリコンに対する接着強度を測定した。本装置は５グラムの引張強度に対して最大１％の誤差内で測定可能であり、引張方向としては０～１８０°の角度で引張りが出来る。

実験は、シリコン基板上へ直径 2.5 mm の円形に印刷・焼成されたペーストに 0.5 mmφ の銅線をハンダ付けし、９０°引張試験を行なった。なおペーストに直接ハンダ付けが不可能なものは、銅メッキを施した上にハンダ付けをした。概略を図 1.19 に示す。

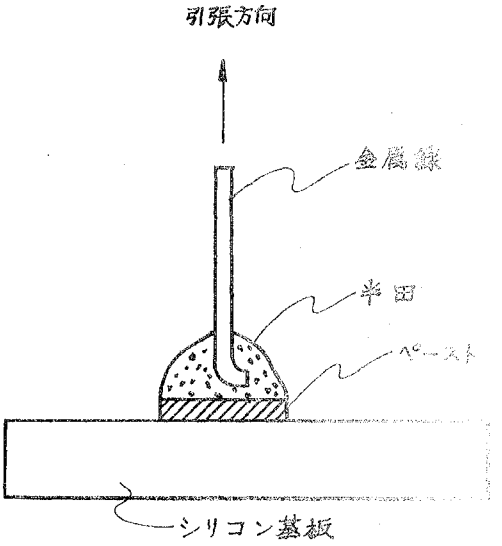


図 1.19　９０°引張試験概略

(d) ペースト浸入深さの測定

太陽電池の接合深さは変換効率を決める最も大きな要因の１つであり、一般には浅い方が効率は高い。従って印刷電極を太陽電池の電極として用いる場合、この浅い接合に対して印刷電極が悪影響を及ぼさないことは重要な問題である。印刷電極がシリコンに対してどの程度の深さまで影響を及ぼしているかを測定するには光学顕微鏡，SEM などを用いて断面又は角度研摩によるペースト－シリコン反応状況の観察、ペースト－シリ

コン深さ方向の成分分析、ダイオードを用いた電気的特性の測定などが考えられる。

本検討では、種々の接合深さを持ったダイオードの拡散面にペーストを塗布・焼成してこのダイオードの電流電圧特性を測定することにより、深さに対する影響度合を調べた。

測定用試料は1Ω－cmのP型シリコン基板にPOCl$_3$によりリン拡散を行ったN$^+$／Pプレーナ型で、ダイオードの大きさは2.4×2.5㎜である。接合深さは0.65から3.0μmの間の数種で、拡散面に手塗りによりペーストを塗布し焼成した。又測定は、カーブトレーサにより逆方向電流電圧特性を調べた。

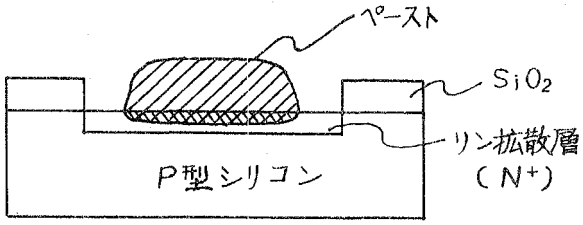


図1.20　測定試料

(5)　印刷電極による太陽電池試作

50年度の研究成果をもとにして印刷電極による太陽電池の試作を行なった。

用いたシリコン基板はn型，比抵抗1Ω－cmで、直径50㎜の円形である。又厚みは400μmでCZ法により作られたものである。

拡散は回転塗布法により行ない、接合深さは1.5μmである。なお裏面にはN型高濃度層を形成した。

印刷電極に用いたペーストは銀ペーストで、印刷パターンは裏面が全面電極，表面が櫛形となっており、電極部が占める面積は全受光面積の6.2％である。

焼成雰囲気は空気組成の酸素－窒素の混合ガスで温度は760℃である。

図1.21に試作太陽電池の構造を示す。

なお今回の試作太陽電池には反射防止膜は付けなかった。又測定はAMO 140mW/cm^{2}のソーラシュミレータにより行なった。

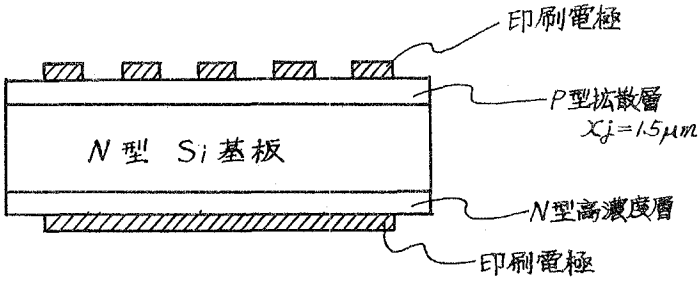


図1.21　試作太陽電池

1.2.4　結　果

(1)　焼成温度とペースト特性

既成ペーストを用いて焼成温度と特性の関係を求めた。図1.22から図1.25にAg，Cu，Ni，Al各ペーストの焼成温度に対する比抵抗，接触抵抗，引張強度の変化を示す。図中ρ_Cは接触抵抗でN，N$^+$，P，P$^+$はそれぞれ基板を表わしている。従ってたとえばρ_{CN^+}はN型高濃度基板に対する接触抵抗である。又、ρ_Mはペーストの比抵抗、S_Pは引張強度である。

(a)　Agペースト

比抵抗は$10^{-6}\Omega$-cmオーダで800℃では$4.0\times10^{-6}\Omega$-cmと低く、純銀の[illegible]3倍程度である。接触抵抗は焼成温度が高くなるにつれて小さくなり、850℃[illegible]なる。P・N型共高濃度基板に対する接触抵抗は$10^{-2}\Omega$-cm²オーダと実用可能な値[illegible]が、低濃度基板に対してはP型で$3\times10^{-1}\Omega$-cm²というやや高い値を示し、[illegible]6Ω-cm²という非常に高い値となり根本的な改善を必要とする。

引張強度は、850℃までの温度では70～90Kg/cm²と非常に強くシリコンの場[illegible]度と同程度であるが、さらに高温になると低下する。又接合深さは850℃の焼成[illegible]3μm必要である。

(b)　Cuペースト

比抵抗はAgペーストと同程度で、800℃の焼成では$4.6\times10^{-6}\Omega$-cmである。[illegible]抵抗はAgペーストと比較すると高濃度基板に対してやや高く、$10^{-2}\Omega$-cm²オーダ[illegible]らない。

引張強度は比較的小さく、800℃では27Kg/cm²である。又シリコンに対する[illegible]ペーストよりもやや大きく、800℃で3μm以上の接合深さが必要である。

(c)　Niペースト

比抵抗は$10^{-4}\Omega$-cmオーダと高く、800℃でも純ニッケルに比べて5倍程[illegible]い。接触抵抗は前二者に比べて小さく、最小値を示す800℃の焼成では高濃度基板[illegible]P型低濃度基板に対して$10^{-3}\Omega$-cm²オーダとなった。しかし引張強度は小さく、750[illegible]までの焼成では接着力はほとんどなく、800℃でも6.2Kg/cm²と小さい。又シリコ[illegible]対する侵入深さは大きく、800℃の焼成で3μmの深さでは接合はほとんど破壊[illegible]いる。

(d)　Alペースト

比抵抗は比較的大きく、700℃では$9.0\times10^{-5}\Omega$-cmと純アルミニウムに比[illegible]34倍である。接触抵抗は焼成温度に対して変化は少なく、温度が高くなるにつれ[illegible]大きくなる傾向である。アルミニウムはシリコンに対してはP型不純物となるため[illegible]板に対する接触抵抗は小さく、700℃で高濃度基板に対して$4\times10^{-3}\Omega$-cm²、低[illegible]基板に対してでも$4.5\times10^{-3}\Omega$-cm²と低い値を示した。しかしN型に対しては高く[illegible]濃度基板でも$2.5\times10^{-1}\Omega$-cm²となった。又接合に対しては、今回測定した[illegible]プでは影響が大きく3μmの深さの接合は完全に壊されている。

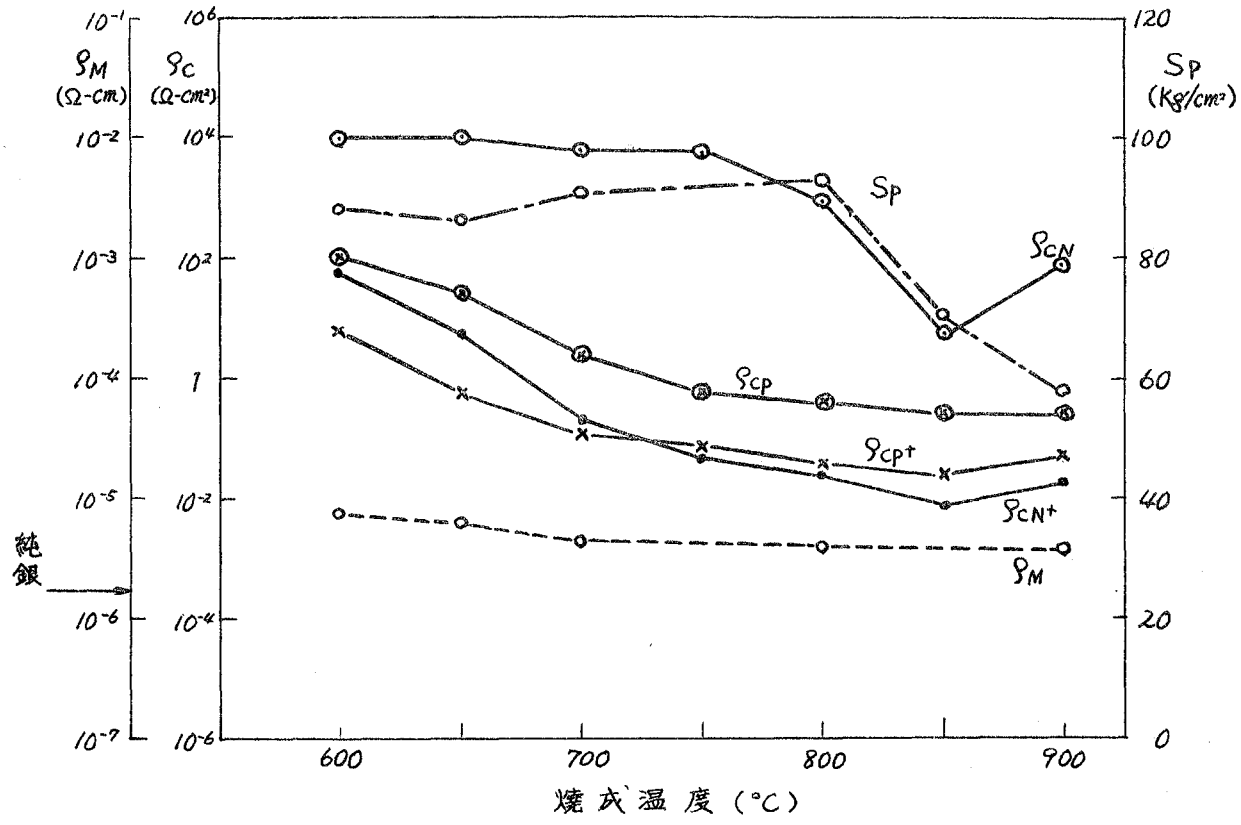


図 1. 22　Ag ペーストの特性

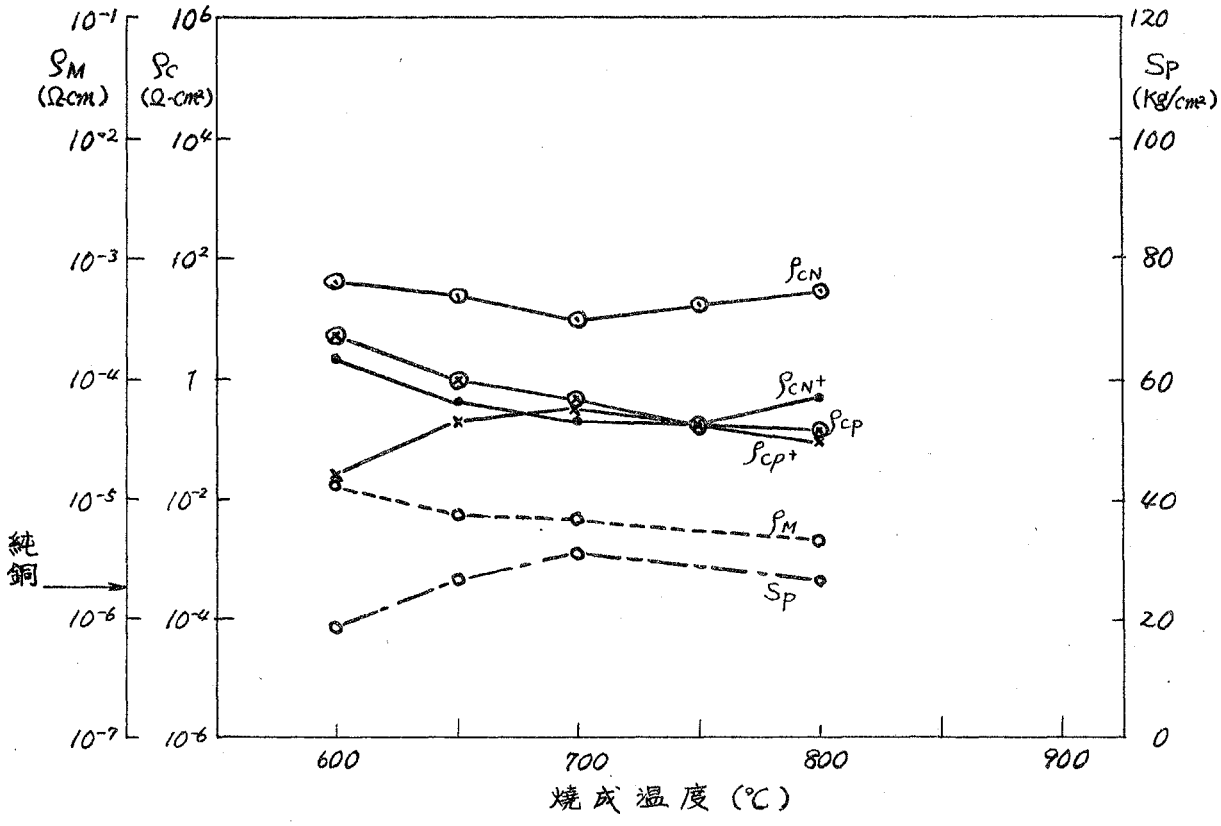


図 1. 23　Cu ペーストの特性

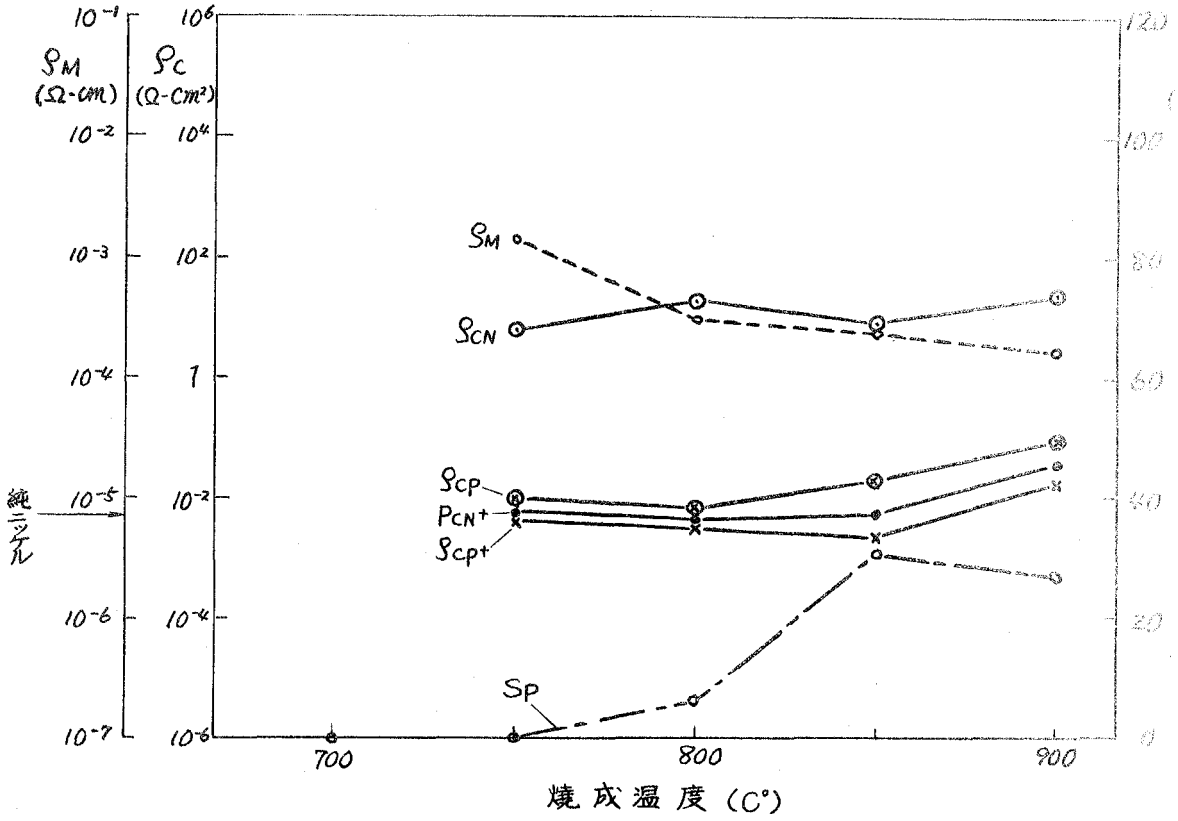


図 1.24　Ｎｉペーストの特性

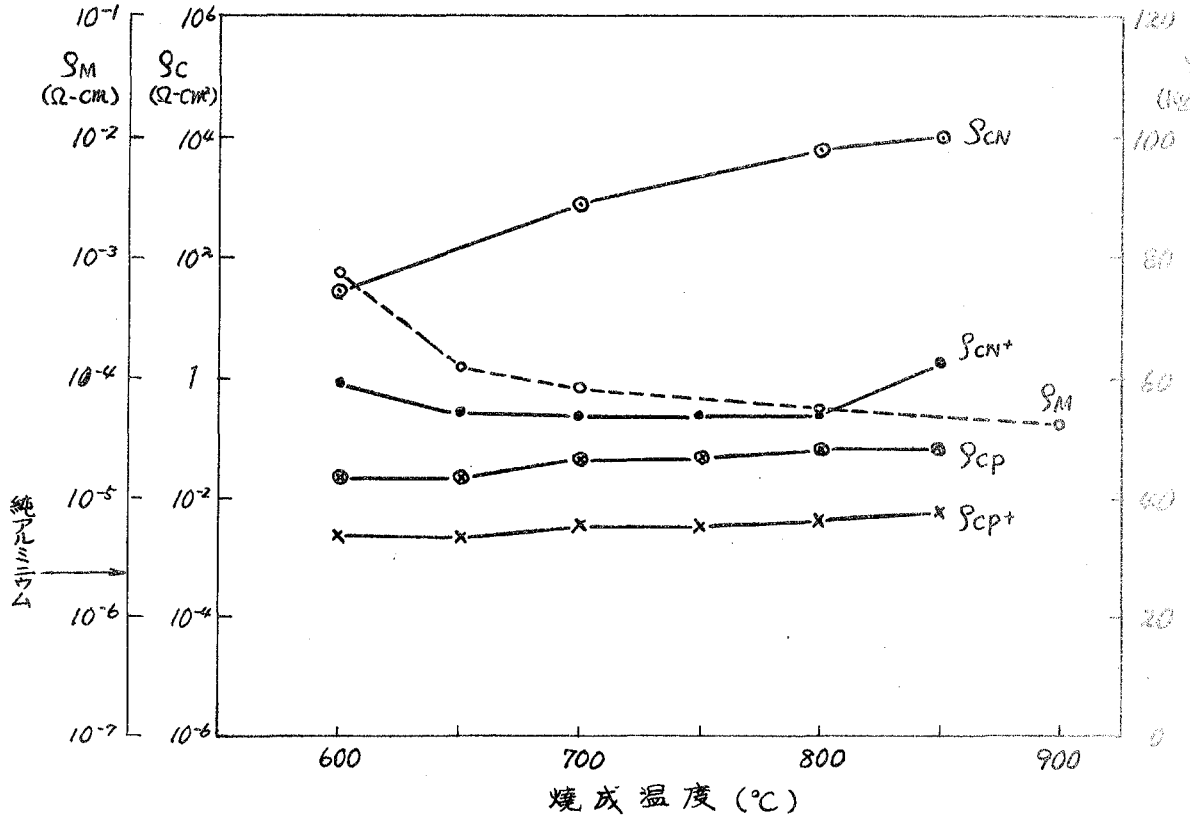


図 1.25　Ａℓペーストの特性

(2) 断面観察

図 1.26 から図 1.30 に、各既製ペーストの最適温度で焼成した場合の断面顕微鏡写真を示す。

Ag と Cu ペーストでは、ペースト中の金属成分の焼結が進み、均一な金属層が出来ておりガラス成分がところどころに点在している。しかし Ni と Al ペーストでは、金属成分の焼結は不充分で、粒状の状態のままが大部分を占めている。シリコン面は、Cu , Ni ペーストは平坦であり、Ag ペーストではやや凹凸状でガラスとシリコンが反応した形跡が見られる。Al ペーストではシリコン面の凹凸が大きく、ペーストとシリコンの反応が大きかったことが伺える。この事はＳＥＭ写真を見るとよりはっきり理解できる。又、Cu ペーストでは1～2 μm の厚みでペーストとシリコンの反応により生じた層が見える。

試作ペースト 1 と 2 の断面検鏡写真を図 1.31 , 図 1.32 に示す。図 1.31 のペースト部分にはガラスが微細に分布しており、シリコンとの界面ではガラスとシリコンの反応が見られる。この反応部分では、最初平坦であったシリコン表面が凹凸になっている。同じく、図 1.32 のペースト部分では、白い銀部分とガラスが混在している。このペーストでは、シリコンとペーストの界面は平坦である所が前者のペーストと異なる点である。

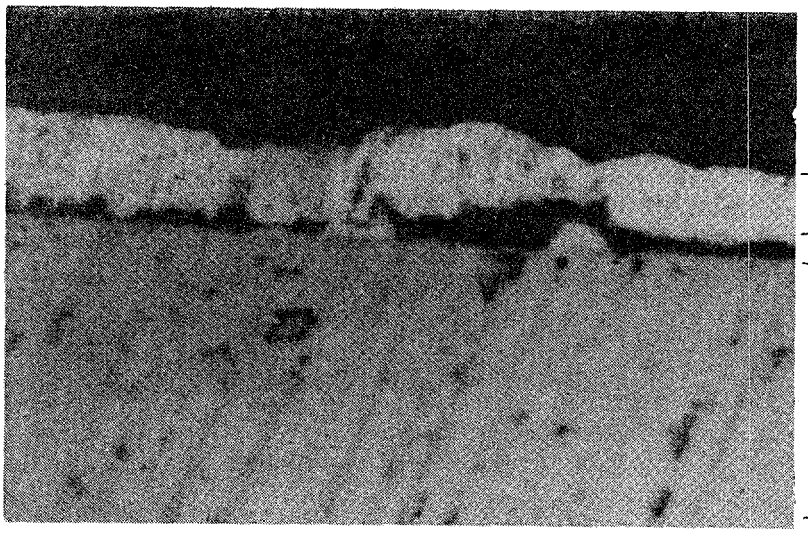


図 1.26　Ag ペースト断面　（倍率：８７０）

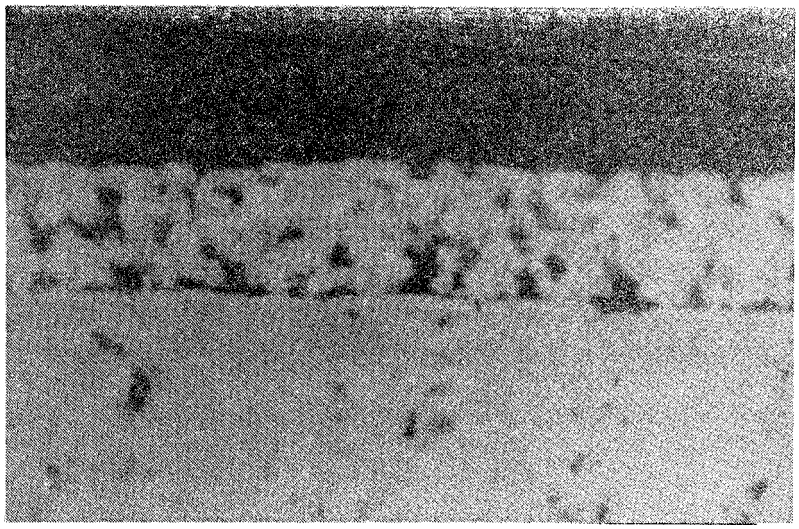


図 1.27　Cu ペースト断面　（倍率：870）

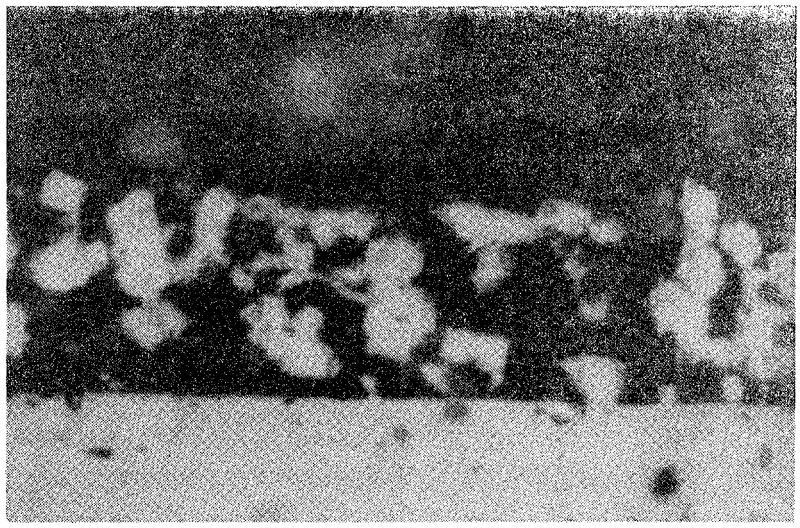


図 1.28　Ni ペースト断面　（倍率：870）

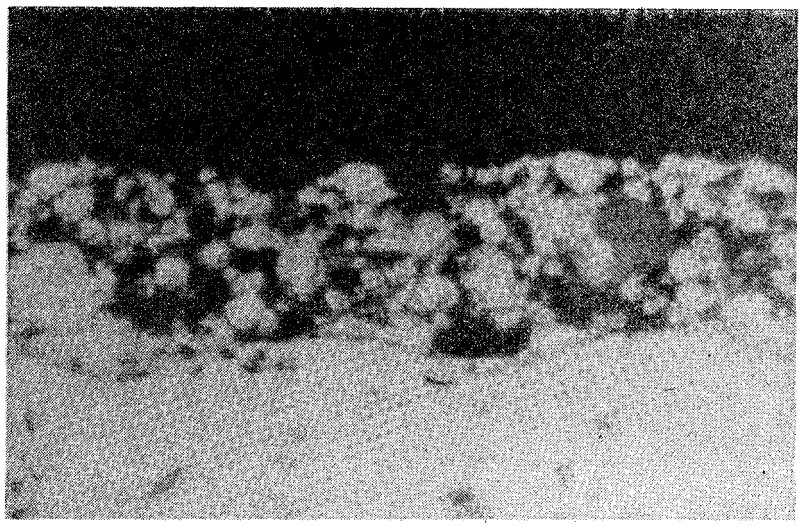


図 1.29　Al ペースト断面　（倍率：870）

図 1.30　ＳＥＭによる Al ペースト断面

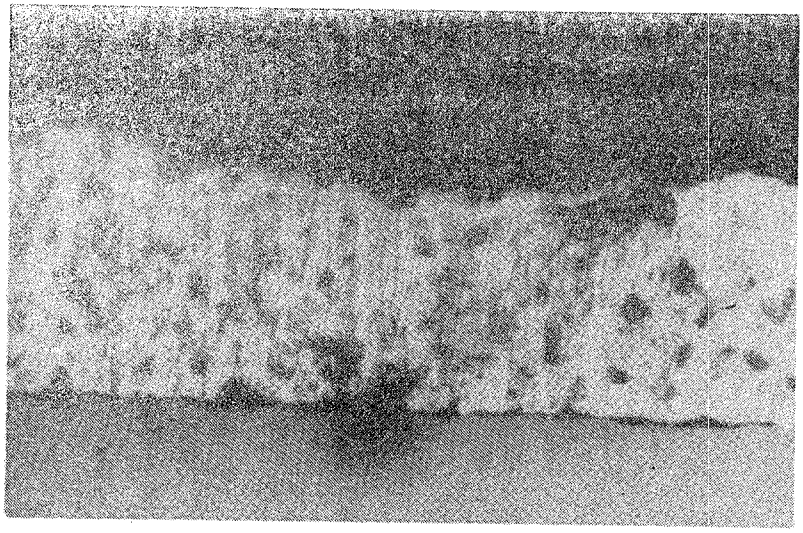


図 1.31　試作ペースト 1 （倍率：870）

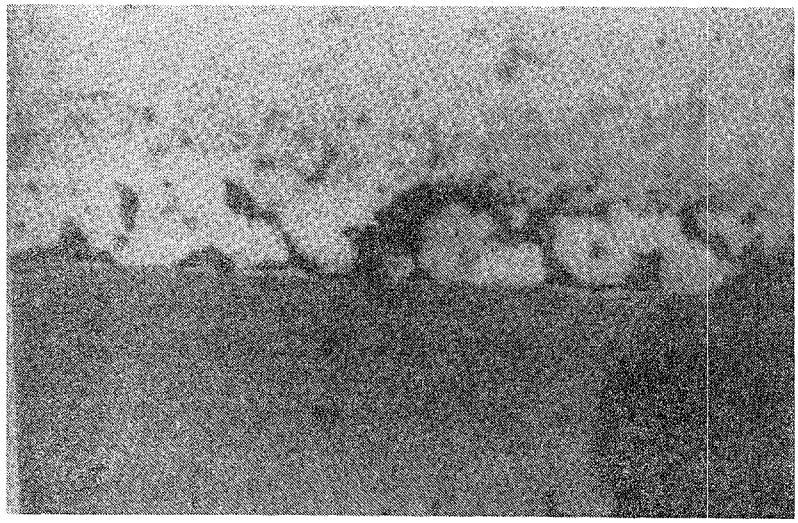


図 1.32　試作ペースト 2 （倍率：870）

(3) 電極特性の総合結果

既製Agペースト、同じくCu，Ni，Alの各ペーストおよび試作Agペースト1と2について、シリコン太陽電池電極として必要と考えられる諸特性の測定結果を表1.7に示す。各ペーストの焼成温度と雰囲気は同一ではないが、既製ペーストについては前項の焼成条件の検討から、また試作ペーストに対しては種々の予備実験より、各ペーストに最適と考えられる焼成条件による結果について述べる。

表1.7中、接触抵抗値に関してみると、N型高濃度層に対しては、低い方からNiペースト，Agペースト，試作ペースト2の順であり、N型低不純物濃度層に対しては、同じくAgペースト，試作ペースト2，Niペーストの順である。P型高濃度層に対しては、低い方からNiペースト，Alペースト，Agペーストの順になり、低濃度層に対しては、Niペースト，Alペーストの順である。比抵抗値に関しては、接触抵抗値の優れたNiペースト，Alペーストが逆に高くなっている。引張強度については、Agペースト，試作ペーストが優れている。Alペーストについては、ハンダ付あるいはメッキとハンダ付が困難であった為、測定不可能であった。界面の状態の項では、断面検鏡写真でのシリコンとペーストとの界面の状態を示している。

備考欄には、シリコン太陽電池の受光面拡散層を考慮した場合の各ペーストの適用可能な接合深さを示している。

表1.7　ペーストの特性

ペーストの種類	焼成温度(℃)	焼成雰囲気	平均接触抵抗値 (Ω−cm²)				比抵抗(Ω−cm) ×10⁻⁶		引張強度(Kg/cm²)	ハンダ付性	界面の状態	備考
			N^+ cm^{-3} 3×10^{19}	N cm^{-3} 1×10^{17}	P^+ cm^{-3} 3×10^{19}	P cm^{-3} 9×10^{16}	焼成膜	純金属				
Agペースト	850	Air	8×10^{-3}	6×10^{0}	3×10^{-2}	3×10^{-1}	4.0	1.62	71	不可	平坦	3μm
Cuペースト	800	N_2	5×10^{-1}	3.5×10^{1}	1×10^{-1}	1.5×10^{-1}	4.6	1.67	27	可	平坦	3μm
Niペースト	800	N_2	4×10^{-3}	2×10^{1}	3×10^{-3}	8.5×10^{-3}	350	6.84	6.2	不可	平坦	Siとの反応大
Alペースト	700	Air	2.5×10^{-1}	7×10^{2}	4×10^{-3}	4.5×10^{-2}	90	2.66	—	不可	凹凸	Siとの反応大
試作1(Ag)	760	Air	6.8×10^{-2}	1.2×10^{2}	1.1×10^{-1}	2.3×10^{0}	4.5	1.62	34	不可	凹凸	3μm
試作2(Ag)	760	Air	1.2×10^{-2}	1.0×10^{1}	8×10^{-2}	1.5×10^{-1}	10.6	1.62	71	可	平坦	1μm

(4) 印刷電極による太陽電池試作

Agペーストによる印刷電極を用いて50㎜φ $P^+/N/N^+$ 構造で真性変換効率が最高7.2%のものが得られた。なお、この素子には反射防止膜は付けていない。又光源はAMO 140mW/㎠のソーラシミュレータであり、その電流電圧特性を図1.33に示す。

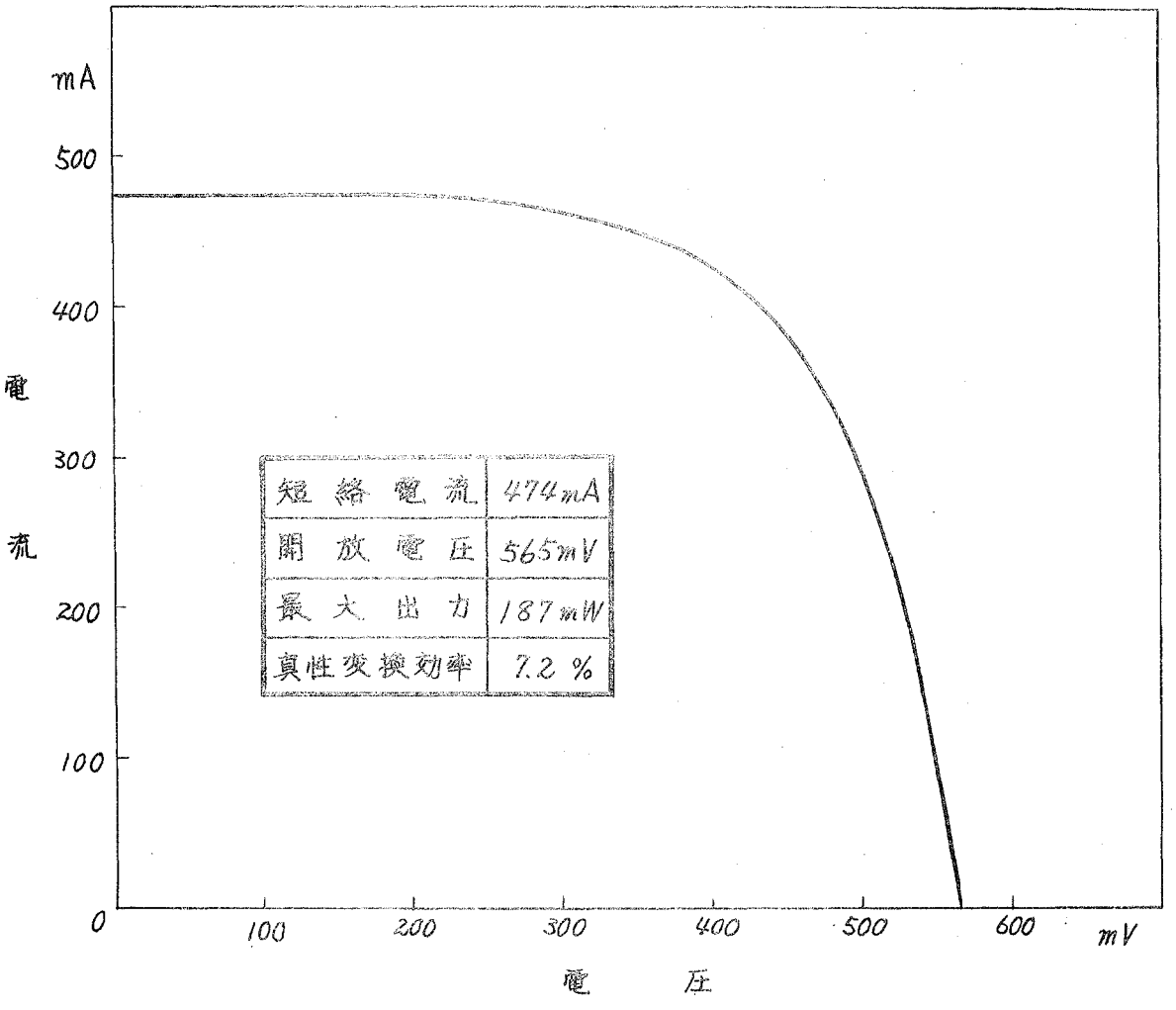


図1.33 印刷電極による試作太陽電池の電流電圧特性

1.2.5 考　　察

ペーストとシリコンの接触抵抗は、焼成温度が高くなるにつれて低下し、ある温度で最小となり、さらに高温になるとやや高くなる傾向がある。元来接触抵抗は、金属の種類が決ればペーストとシリコンとがどういう状態で接着しているかにより決まると考えられ、理想的にはペースト中の金属成分とシリコンとが全面積にわたって接着しているのが望ましい。この場合は純金属とシリコンとの接触に準じた取扱いが可能で、49年度報告書に記した理論計算に則った挙動が期待できる。しかし、実際のペーストでは接触抵抗は純金属に比べて全般的に大きく、特に高濃度基板に対しては顕著な差を示すものが多い。

理論の項でも述べた様に、焼成後のペーストは金属成分とガラス成分が混った状態であり接触部分では必ずしも金属成分がシリコンと接しているとは限らない。特に焼成温度が低い場合は、ペースト中の金属成分の焼結が充分進んでおらず、ごくわずかな金属成分しかシリコンと接していないことが考えられる。焼成温度が高くなるに従って、金属の焼結が進み、ペーストの導電性も増し、ペースト中の金属とシリコンとの接触も良好な状態に進行して接触抵抗は低下する。しかし最適な状態でも、断面の観察より理解できる様に必ずしも金属成分とシリコンが全面にわたって接していない。以上がペーストとシリコンの接触抵抗の焼成温度による変化及びその値が純金属との接触と異なることの主たる原因と推測できる。

以上の考察より低接触抵抗を得るには、ペースト中の金属成分とシリコンとが出来るだけ多きな面積で接触する様なペースト材料や焼成条件の開発が有効であることが考えられる。

又Alペーストは P型基板に対しては低接触抵抗となった。これはアルミニウムはシリコンに対しては P型ドーパントであり、ペーストでもこの効果のあることが裏付けされた。従って低接触抵抗を得る他の方向として、N型基板に対しては N型ドーパント、又 P型基板に対しては P型ドーパントとなる金属を含むペーストが有効であると考えられる。

引張強度についても接触抵抗とほぼ同様な傾向がある。ペーストとシリコンの接着にはペースト中のガラスがその役割を果しており、焼成温度が低い場合は接着力は充分でなく、高温になるにつれて接着力は増す。しかしあまり高温になると逆に弱くなる。又ペーストの種類により引張強度も大きな差がある。たとえば 8 0 0 ℃の焼成温度では Ag ペーストは 8 7 Kg/cm² であるのに対し、Cu ペーストでは 2 7 Kg/cm²、Ni ペーストでは 6.2 Kg/cm² しかない。これはペースト中に含まれているガラスの違いに起因すると考えられる。ガラスには種類も多く、含まれる成分により軟化点，シリコンとの反応性等が異なる。しかしシリコンとの反応性や接着のメカニズムについての詳細はまだ明らかでない。

1.2.6 結　論

銀，銅，ニッケル，アルミニウムの各金属成分を有する既製ペーストを種々の焼成温度で検討を行い、その結果各ペーストの特質が明確になった。

シリコン太陽電池の電極として用いる場合に要求されるペーストの特性は、接触抵抗や比抵抗が充分に低いこと、接着強度は蒸着法により形成した金属電極と同程度であること、3.8 μm 以下の浅い接合に対して適用可能であること、ハンダ付けが出来ること等を同時にすべて満足することである。検討した既製ペーストにおいては、これらの項目をすべて満たしているものはないが、Ag ペーストでは高濃度基板に対する接触抵抗，比抵抗及び接着強度の点で、Cu ペーストは比抵抗とハンダ付けの点、Ni ペーストは高濃度と P型低濃度基板に対する接触抵抗の点、又 Al ペーストは P型基板に対する接触抵抗の点でそれぞれ優れていることがわかった。

これらの中でAgペーストを用いて印刷電極による太陽電池の試作を行ない、AMO 140mW/cm² ソーラシミュレータ下で反射防止膜をつけない状態で真性変換効率が最大7.2％のものが得られた。これは従来より行なわれている真空蒸着法によるものとほぼ同等であり、基本的に印刷法が太陽電池の電極形成法として使用可能であることが確認できた。

一方ペーストの試作研究については、次のような事が結論として言える。太陽電池電極用として開発検討した試作Agペーストにおいては、市販のAgペーストを用いた場合にほぼ匹敵する特性が得られた。特に通常の太陽電池接合深さ（約1 μm）に対して、このペーストの侵入深さはそれ以下であり、この点に関しては市販ペーストよりも優れていることが確認できた。

本年度の種々の金属成分を持った既製ペーストの特性研究より得られた成果とペースト試作研究で確立した基本的なペースト作製技術は、来年度からのシリコン太陽電池により適する低価格ペーストの開発研究の重要な基礎になると考えられる。

1.2.7 今後の課題

本年度の研究で、低不純物濃度基板に対して低接触抵抗を実現するために必要なペースト構成材料，処理条件等の見通しが明らかになった。又、浅い接合に対しても使用可能なペースト材料が明確になった。

従って次年度では、本年度に得られた研究成果をもとにして、低濃度基板に対し良好な接触抵抗を得るためにシリコンに対して高不純物層を形成する様な金属元素などを添加したペーストの開発を行なう。

又同時に現在継続中である既製ペーストの信頼性試験及び新規開発予定のペーストに関する太陽電池の電極としての必要な信頼性試験を行なっていく。

2. 集光型太陽電池装置の開発

2.1 集光型太陽電池素子の最適設計

2.1.1 概　　要

昭和５０年度に櫛型電極を備えた集光用素子構造について、常温での最適化設計を行ない、その結果に従って素子を試作した。さらに試作素子の集光下での特性を常温より１１０℃までの温度範囲で測定し、常温特性については理論検討の結果とよく一致する事を確認した。

本年度はこれに引き続き、温度特性を左右する素子の物性パラメータを詳細に検討し解析した後、温度特性の理論計算を行ない、同時に計算結果を確かめるため自然光及びソーラーシミュレータを用いて素子特性の温度変化を測定した。又素子特性上最も重要なパラメータの一つである少数キャリアの拡散長について温度変化の実測を行ない、理論値と比較した。素子の電流電圧特性の計算に反映し、実測値の正当性を確かめた上、最適化計算を行なった。

2.1.2 理　　論

昭和５０年度に行なった常温での最適化計算の結果は、浅い接合（～0.3 μ）、高密度グリッド（１５～２０本／2 cm）、低抵抗基板（0.1～1 Ω－cm）が、集光比５０以下の集光的低密度集光に適しているというものであった。集光による素子温度上昇を考慮して素子設計を行なう際にも、上記構造が基本になるが、昭和５０年度に採用した理論の一つの欠点は拡散層を支配するパラメータ―― ライフタイム，易動度，内部電界等―― を均一パラメータとしたため温度上昇に伴う光発生電流、逆飽和電流の変化を精度よく予想できない事であった。この欠点を補うため拡散層内の各パラメータを、不純物濃度の変化方向すなわち深さ方向に対し変化するものとして、数値計算により電流寄与分を計算した。

図 2.1 に素子の基本構造を示す。

拡散層における光発生電流及びダイオード電流は、次の少数キャリア連続の方程式より得られる。

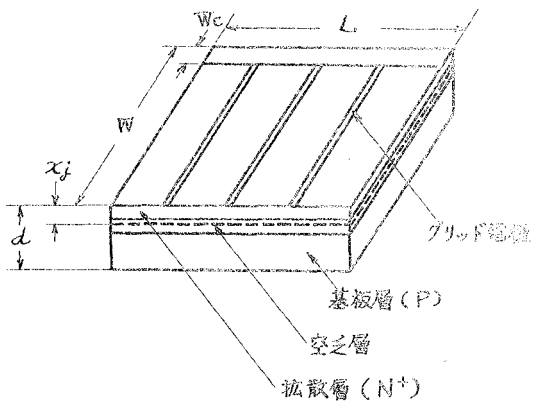


図 2.1　素子の基本構造

〔光発生電流密度〕

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_p(x)}{dx}+\frac{p_n(x)-p_{n0}(x)}{\tau_p(x)}-G_p(x)=0 \qquad (2.1)$$

$$J_p = -q D_p(x) \frac{dp_n(x)}{dx} + q\mu_p(x) E_p(x) p_n(x) \qquad (2.2)$$

$$G_p(x) = \int_0^\infty \alpha(\lambda) N(\lambda) \{1 - R(\lambda)\} e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \qquad (2.3)$$

境界条件

$$s_p \{p_n(0) - p_{no}(0)\} = J_p(0) \qquad (2.4)$$

$$p_n(x_{d1}) - p_{no}(x_{d1}) = 0 \qquad (2.5)$$

光発生電流密度

$$J_{pL} = J_p(x_{d1}) \qquad (2.6)$$

〔ダイオード電流〕

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p(x)}{dx} + \frac{p_n(x) - p_{no}(x)}{\tau_p(x)} = 0 \qquad (2.7)$$

$$J_p(x) = -q D_p(x) \frac{dp_n(x)}{dx} + q\mu_p(x) E_p(x) p_n(x) \qquad (2.8)$$

境界条件

$$s_p \{p_n(0) - p_n(0)\} = J_p(0) \qquad (2.9)$$

$$p_n(x_{d1}) = p_{no}(x_{d1}) \exp\left(\frac{qVj}{kT}\right) \qquad (2.10)$$

ダイオード電流密度

$$J_{pD} = J_p(x_{d1}) \qquad (2.11)$$

素子はN^+/P構造とし、パラメータが深さ方向に一定な基板層の寄与は昭和49年度成果報告書と重複するので省略した。ここで$p_n(x)$、$p_{no}(x)$は非平衡、熱平衡状態の正孔密度，$\tau_p(x)$は正孔のライフタイム，$G_p(x)$は光発生関数，$\alpha(\lambda)$, $N(\lambda)$, $R(\lambda)$は各波長λでのSiの吸収係数，入射フォトン数，反射率，$\mu_p(x)$は正孔の易動度，$E_p(x)$は内部電界，s_pは表面再結合速度，x_{d1}は拡散層側の空乏層端，Vjは接合にかかる電圧，qは単位電荷，kはボルツマン定数，Tは絶対温度である。

熱平衡少数キャリア濃度pno(x)は、拡散したドナー濃度$C_D(x)$，基板のアクセプター濃度C_A，ドナー準位，アクセプター準位及び素子温度Tよりフエルミーディラックの統計を解くことにより得られる。この導出に用いる電子と正孔の有効質量の電子静止質量に対する比はSiでは1.0以下とされているが、[1),2)]ここでは1.0とし、又SiのバンドギャップE_gは次の様に仮定した。[3),4)]

$$E_g = 1.171 - 5.025\times10^{-7}\cdot T^2 - 0.45\times\sqrt{C_D(x)/10^{21}} \qquad (2.12)$$

式（2.12）の第2項は、温度上昇によりE_gが減少する項、第3項は高濃度ドーピングによるBand Gap Shrinkage [4)]の項である。

Siのライフタイムは一般にShockley-Readのトラップを介した再結合理論[5)]により説明される。ここでは、"Silicon Semiconductor Data" [1)]中のライフタイム値をこの理論により近似し、トラップ準位を求めた。

$$\tau = \tau_{po}\frac{no+n_1}{no+po} + \tau_{no}\frac{po+p_1}{no+po} \qquad (2.13)$$

式（2.13）において少数キャリアライフタイムτは、高濃度N型不純物ドープライフタイムτ_{po}，高濃度P型不純物ドープライフタイムτ_{no}，熱平衡電子濃度no，熱平衡正孔濃度po，フエルミ準位がトラップ準位にきた時の電子及び正孔濃度n_1及びp_1により決まる。トラプ準位は、バンドギャップの中心より−0.36eV，300°Kにおけるτ_{po}，τ_{no}はそれぞれ0.36μsec，1.10μsecと決め、τ_{po}，τ_{no}はT^2に比例するとした。[6)]これらのパラメータはすべて温度依存性を持ち、拡散層内ではドナー濃度$C_D(x)$の変化によって深さ方向の関数ともなっている。

易動度μは、不純物散乱と格子散乱の2つの要素からなり、

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_L} \qquad (2.14)$$

の関係が得られている。不純物散乱易動度は、理論式よりキャリアの有効質量を1.0とすれば、

$$\mu_I = \frac{4.17\times10^{17}T^{3/2}}{C_B\ln(1+4.5\times10^8T^2/C_B^{2/3})} \qquad (2.15)$$

が得られる。[1),2)] ここでC_Bは不純物濃度の総和である。

格子散乱易動度は、実験式より電子、正孔に対してそれぞれ

$$\mu_{Ln} = 2.1\times10^9T^{-2.5} \qquad (2.16)$$

$$\mu_{Lp} = 2.3\times10^9T^{-2.7} \qquad (2.17)$$

で与えられる。[7)]拡散定数Dはアインシュタインの関係式より

$$D = \frac{kT}{q} \mu \qquad (2.18)$$

である。

拡散層の内部電界Ｅｐは、熱平衡状態で流れる電流はＯであることから式（２.２）又は（２.８）に代入して

$$E_p(x) = \frac{kT}{q} \frac{1}{p_{no}(x)} \frac{dp_{no}(x)}{dx} \qquad (2.19)$$

が得られる。

吸収係数αは、波長の関数であるとともに温度に関する増加関数であり、

$$\alpha(\lambda, T) = \alpha(\lambda, 300°K) \cdot \left\{ \frac{1+3.323 \exp(-\frac{702.6}{T})}{1.319} \right\} \qquad (2.20)$$

の近似式を採用した。[8]

以上の考察から、拡散層においてはほとんどすべてのパラメータが温度依存性を持つと同時に深さ方向の関数であり、連続の方程式（２.１），（２.７）が解析解を持たないため数値解を求める必要が生じる。基板層においては、各パラメータが空間的に一定とみなされるため、温度依存性のみを考慮すればよい。

光発生電流は、式（２.６）で与えられる拡散層寄与分 J_{pL} と、空乏層寄与分 J_{DL}、基板層寄与分 J_{nL} の和から次式で求められる。

$$I_L = A_L J_L = A_L (J_{pL} + J_{DL} + J_{nL}) \qquad (2.21)$$

ダイオード電流は、式（２.１１）で与えられる拡散層寄与分 J_{pD} と、基板層寄与分 J_{nD} の和から次式で与えられる。

$$I_D = A_o J_D = A_o (J_{pD} + J_{nD}) = A_o J_o \left\{ \exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right\} \qquad (2.22)$$

ここで A_L，A_o はそれぞれ素子の有効受光面積，素子の全面積であり、接合にかかる電圧 V_j と端子間電圧Ｖの間には、

$$V_j = V + IR_s \qquad (2.23)$$

の関係があるので、素子の電流電圧特性は、

$$\begin{aligned} I &= I_L - I_D \\ &= CA_L J_L - A_o J_o \left\{ \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{kT}\right) - 1 \right\} \end{aligned} \qquad (2.24)$$

で与えられる。Ｃは集光比であり，直列抵抗Ｒｓは、拡散層、基板層、グリッド電極の各抵抗

要素の和として

$$R_s = R_{Diff} + R_{Bulk} + R_{Grid} \qquad (2.25)$$

で与えられ、各要素はそれぞれ次の関係式がある。

$$R_{Diff} = \frac{\rho_s (L - N_G T_G)}{8 N_{G_2} (W - W_c)} \qquad (2.26)$$

$$R_{Bulk} = \frac{\rho_B (d - x_{d_2})}{L W} \qquad (2.27)$$

$$R_{Grid} = \frac{\rho_{Grid} (W - W_c)}{2 N_G H_G T_G} \qquad (2.28)$$

ここでρ_s，ρ_B，ρ_{Grid}は拡散層のシート抵抗、基板比抵抗、グリッド電極材料の抵抗率である。L，Wは素子の長さ、幅、Wcはコレクターグリッドの幅であり、d，x_{d_2}は拡散層厚及び基板層側の空乏層端である。N_G，H_G，T_Gはグリッド数，グリッド電極の高さ及び幅を表わす。基本的にはL＝W＝2 *cm*，Wc＝0.1 *cm*，H_G＝5μm，T_G＝100μmとした。電極材料は銀とし、$\rho_{Grid} = 1.62 \times 10^{-6}\ \Omega\text{-}cm$とした。

昭和50年度において集光下での電流電圧特性を計算する際、拡散層について分布定数回路を適用し高密度グリッドが高効率を示すことを示した。その結果各抵抗要素の値が接近してきたので、今回の理論計算では分布定数を用いず従来の直列抵抗モデルによった。なお基板の抵抗は

$$\rho_B = \frac{1}{q(n_o \mu_n + p_o \mu_p)} \qquad (2.29)$$

で与えられるので、温度上昇により増加する量として考慮した。ρ_s，ρ_{Grid}も若干増加するパラメータであるが、温度に関し一定であると仮定した。

2.1.3 計算法

(1) 光発生電流密度の計算

拡散層については、式（2.1）（2.2）が2階常微分方程式なのでルンゲークッタ法により過剰少数キャリアの分布及び光発生電流密度を計算した。不純物としてのドナー濃度分布は簡単のためガウス分布に従うとし、指定温度での各位置のフェルミ準位，少数キャリア濃度，内部電界，易動度，ライフタイムを求める。次に入射光（AMO[9]，AM2[10]）により発生したキャリヤの発生関数Gp(x)を各位置で求める。反射率は0とした。表面（x＝0）での境界条件（式（2.4））及び仮定したキャリヤ濃度より順次空乏層端（x＝x_{d_1}）まで電流を求める

リヤ濃度 p_n を求めながら進み、空乏層端での境界条件（式（2.5））を満たせばその位置での J_p が拡散層での光発生電流になる。表面キャリヤ濃度は $p_n(0)_{min}=10^{10}$，$p_n(0)_{max}=10^{15}$（cm^{-3}）を対数的に10分割し、空乏層端でのキャリヤ濃度の正負の符号が逆転する場合には、その前後の初期値を $p_n(0)_{min}$，$p_n(0)_{max}$ として再定義し、さらに対数的に10分割して同様の事を繰り返す。$p_n(x_{d1})$ が $p_n(0)$ の1／100以下になれば計算を終了する。なお分割数は200とし、$x=0$ より x_{d1}／200ずつ変位して微分方程式を解いてゆく。空乏層、基板層の寄与は昭和49，50年度に行なった計算法と同様である。なお基板のライフタイムについては、SPV法による測定結果を入れた計算も行ない、文献値による結果と比較した。

(2) 逆飽和電流密度の計算

光発生電流の解法と同じであるが、発生関数 $G_p(x)$ がないこと、境界条件が異なることが両者の相違点である。$x=0$ での初期値を $p_n(0)_{min}=10^0$，$p_n(0)_{max}=10^{15}$（$-cm^{-3}$）とし $x=x_{d1}$ での過剰キャリヤ濃度と熱平衡キャリヤ濃度の誤差が1／100以下になれば計算を終了する。

(3) 電流電圧特性の計算

式（2.24）～（2.28）より短絡電流 Isc，開放電圧 Voc，フィルファクターF．F．，最大出力 P_{max}，実用変換効率 ηpr を求める。式（2.24）で $A_oJ_o=I_o$ とおき直すと、最適動作電流 Iop，最適動作電圧 Vop には次の2式が成り立つ。

$$V_{op}=\frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{I_L+I_o-I_{op}}{I_o}\right)-I_{op}R_s \qquad (2.30)$$

$$V_{op}=I_{op}\left\{R_s+\frac{kT}{q(I_L+I_o-I_m)}\right\} \qquad (2.31)$$

この2式よりニュートン法を用いて Iop，Vop を決定する。この計算では、相対誤差を 10^{-10} とした。

2.1.4 測 定 法

(1) ソーラーシミュレータでの素子温度特性の測定

昭和50年度に試作した集光用素子，市販の地上用及び宇宙用素子について、ソーラーシミュレータを光源として素子温度27℃より110℃までの温度範囲で電流電圧特性の測定を行った。素子は銅板上にマウントしたコバール板上にハンダ付けし、測定用のリード線と素子温度測定用の銅－コンスタンタン熱電対を受光面側電極にハンダ付けした。ソーラーシミュレータは140 mw／cm^2（AMO）の入射エネルギーに校正し、素子温度の測定精度は±1.0℃以内とした。

集光用素子は素子面積2×2cm^2，15本グリッド、宇宙用素子は2×2cm^2，6本グリッド地上用素子は直径2.28cmの半円径，裏まわし電極である。試料はすべて反射防止膜（SiO）を蒸着したものである。

(2) 自然光での素子温度特性の測定

昭和50年度に試作した集光用素子の短絡電流を昭和51年5月下旬、自然光の下、30℃～150℃の温度範囲で測定した。試料はソーラーシミュレータでの測定で用いたもので、入射エネルギーは全天日射計により同時に測定し、100mw／cm^2のエネルギーで規格化した。

(3) Surface Photovoltage（SPV）法による拡散長の温度依存性測定

a) SPV法の理論

表面近くに再結合領域を持つ半導体試料に光を当てると、表面で生成される過剰少数キャリヤは次式の様になる。

$$\triangle n = \frac{\gamma \varnothing (1-R) \alpha L}{(D/L + S)(1+\alpha L)} \qquad (2.32)$$

ここで△nは過剰少数キャリヤ濃度、Dは拡散定数，Lは拡散長，Sは表面再結合速度，αは吸収係数，γは量子効率，$\varnothing$は入射フォトン数，Rは反射率である。SをPN接合における再結合速度と考えると、PN接合を持つ素子にも式（2.32）は成立する。[11] ただし式（2.32）は次の5式を満足する必要がある。

$$\alpha x j << 1 \qquad (2.33)$$

$$d >> L \qquad (2.34)$$

$$p >> \triangle n \qquad (2.35)$$

$$x j << L \qquad (2.36)$$

$$\alpha d > 1 \qquad (2.37)$$

ここでdは素子厚，x jは表面層の接合深さ，Pは多数キャリヤ濃度である。光により誘起されるSurface Photovoltage（Vsp）は△nの一意関数と考えられるので、吸収係数αを変化させて（単色光の波長を変化させて）Vspを一定に保ちその入射フォトン数$\varnothing$を測定すれば、式（2.32）より$\varnothing$と1／αに直線性が成り立ち、拡散長は1／α軸切片で与えられる。

b) 測　定

図2.2にSPV法の測定系を示す。

式（2.33～2.37）をほぼ満足する長波長光として0.90，0.95，0.97，0.99，1.00，1.01，1.02，1.03，1.04μの波長を選んだ。各波長で一定のVspとなる

より光源の電源電圧を調節し、ミラーを切換えることにより入射エネルギーをサーモパイルで測定し相対入射フォトン数を得る。素子温度は温度調節器により制御し、試料上にハンダ付けした熱電対により温度を測定した。温度は室温，５０，７０，９０，１１０，１３０，１５０℃とし、試料は基板比抵抗０.１，１，１０Ω－cmの反射防止膜のない太陽電池を用いた。測定結果は、試料番号、測定温度、Ｖｓｐ，及び各波長でのサーモパイル出力V_{TP}のデータをデータ記録処理装置ＮＯＶＡ０２／３０（５１年度専用機械装置）に入力し、あらかじめ組込んだ吸収係数及び反射率の値を用いて最小自乗法による直線近似を行ない、拡散長と標準偏差を求め出力させた。

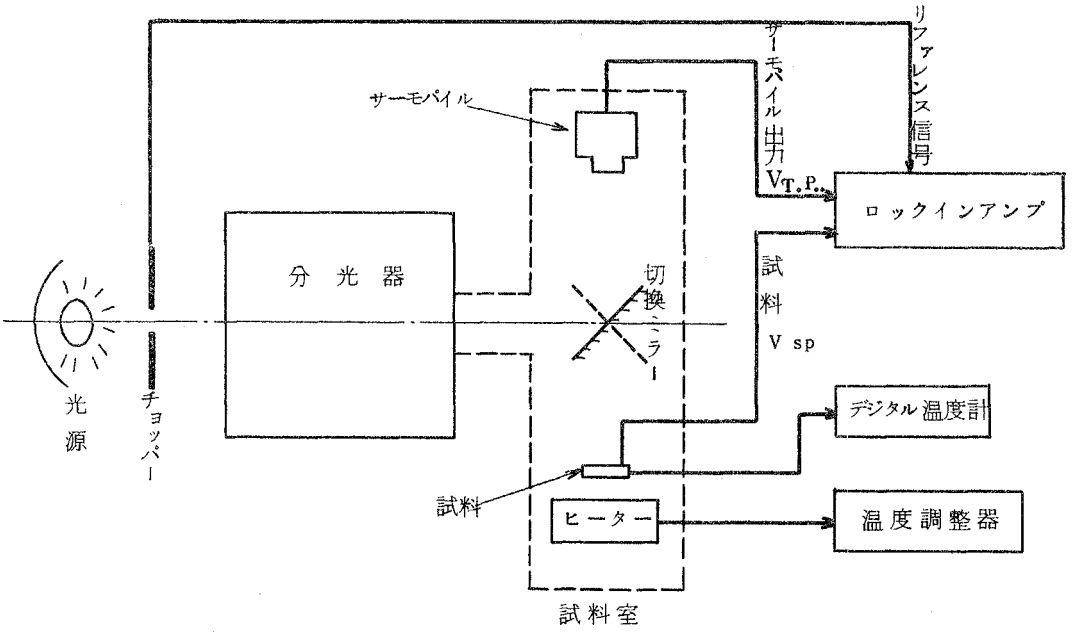


図２.２　ＳＰＶ法の測定系

２.１.５　測　定　結　果

(1)　ソーラーシミュレータでの素子温度特性の測定

図２.３に測定結果を示す。地上用素子の温度特性については、現在検討中の集光用素子の形状とは大きく異なるため図には入れなかった。宇宙用素子と集光用素子の違いは、グリッド電極が６本と１５本であるため有効受光面積が約１０％異なり、Ｉｓｃ，η_{PR}を同レベルで比較するには集光用素子を約１０％上乗せする必要がある。図２.３(a)はＩｓｃの変化を示したが、０.１Ω－cmの集光用素子の増加率は大きく、１０Ωcmの宇宙用素子の増加率の２倍近い値を示した。Ｖｏｃの減少は効率の減る最も大きな原因となっているが、集光用素子の減少率は小さく、Ｆ.Ｆ.においても明らかに集光用素子の減少率が小さくなった。従って(d)に示したη_{PR}の温度変化について、０.１Ω－cmの集光用素子の方が１０Ω－cmの宇宙用素子より低下しない裏付けとなっている。

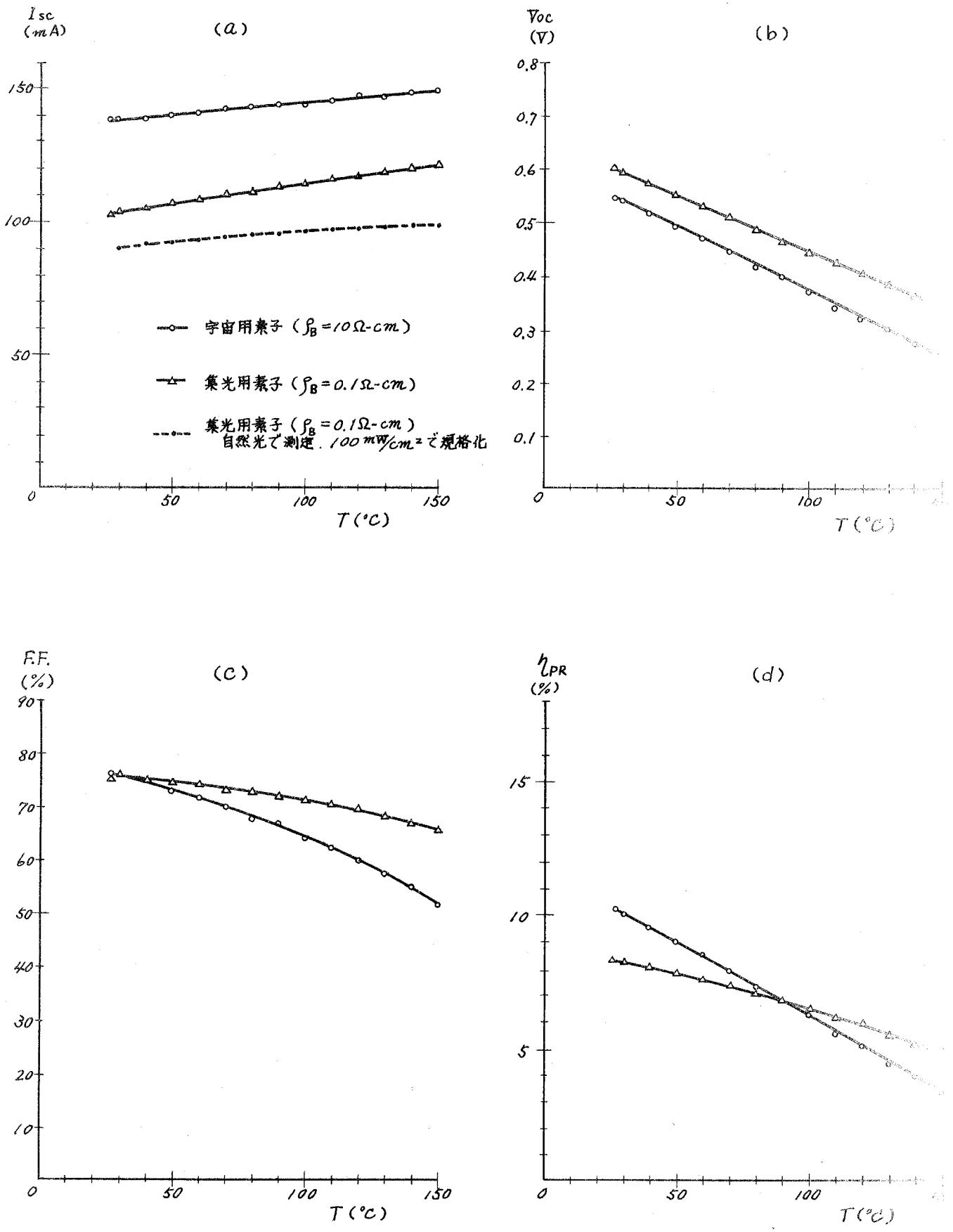


図2.3　素子温度に対するＩｓｃ，Ｖｏｃ，F.F.　η_{PR} の変化（AMO ソーラーシミュレーターによる測定）

(2) 自然光での素子温度特性の測定

図2.3(a)に、自然光の下で測定したＩｓｃの温度特性を示す。自然光でのＩｓｃの増加率はソーラーシミュレータの結果より小さかった。

(3) ＳＰＶ法による拡散長の温度依存性測定

図2.4にＳＰＶ法の測定例を示す。測定点に対して最小自乗法で求めた直線より拡散長は122.4μmと計算され、標準偏差が8.85μmあることから誤差をその値程見込んでおく必要がある。図2.5には0.1，1，10Ω－cmの素子について測定した拡散長の温度依存性を示す。ライフタイムの文献値を[1]をShockley－Read理論により近似した時の温度依存性計算曲線を比較として示した。0.1，10Ω－cmの測定値は計算値よりかなり低く、1Ω－cmは若干高くなった。なお3種の比抵抗の測定から、拡散長をアクセプター濃度C_A（cm^{-3}）と素子温度Ｔ（℃）の関数として多項式で近似した。その曲線を図2.5中の実線で示した。

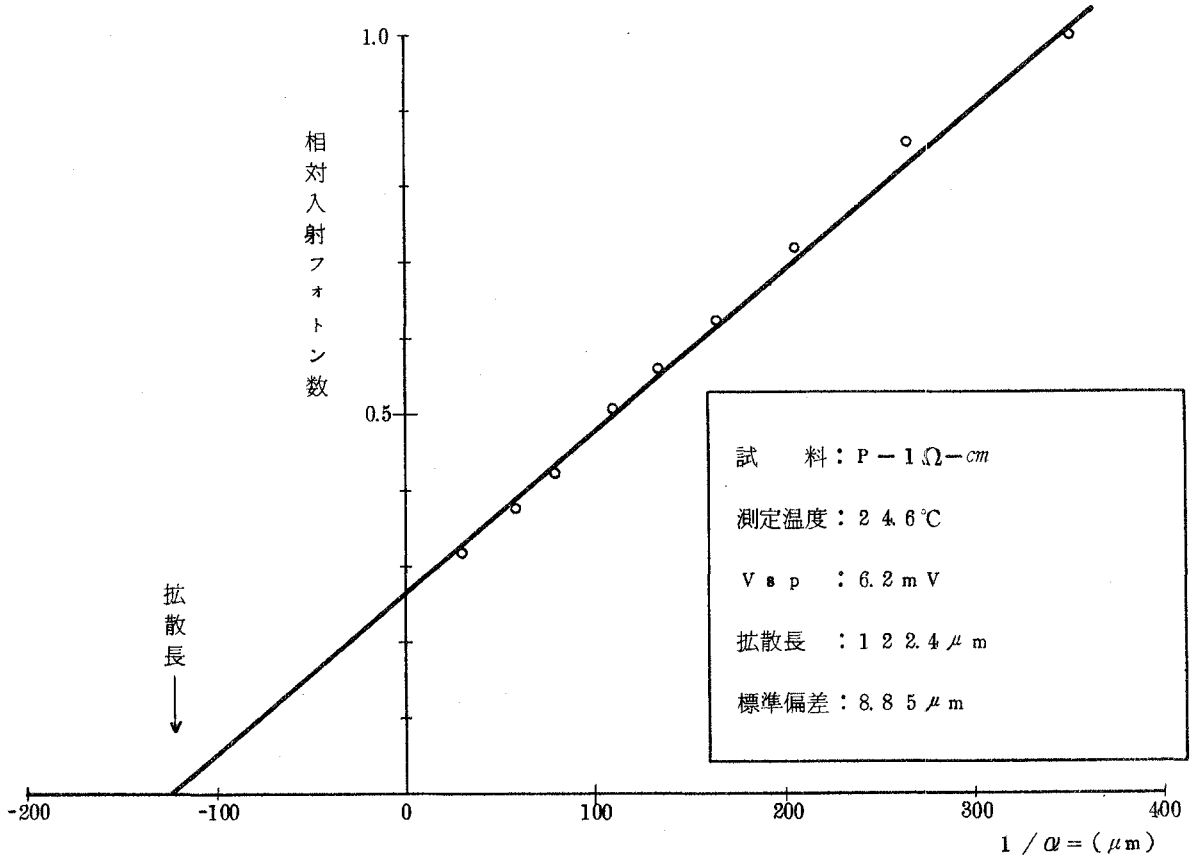
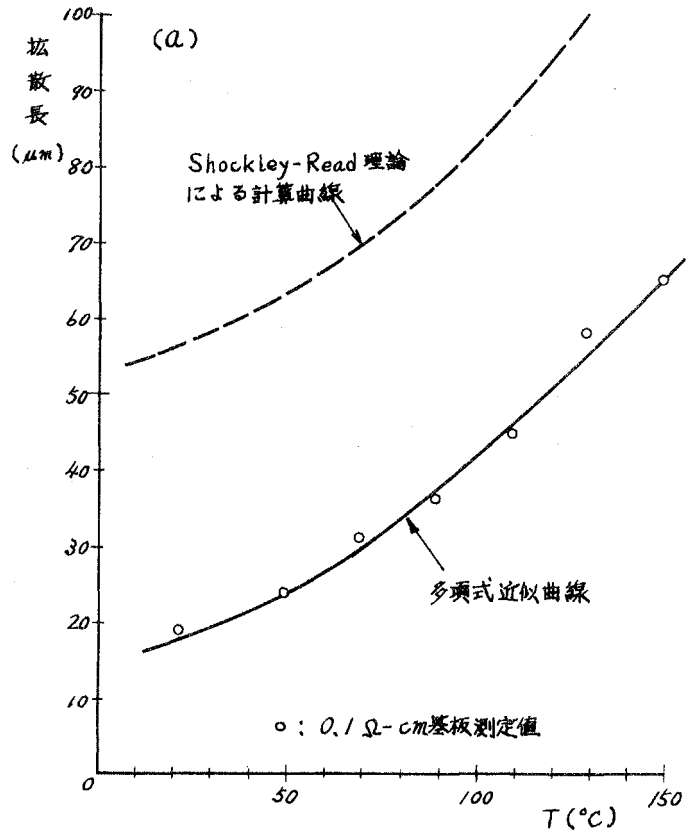


図2.4　ＳＰＶ法の測定例



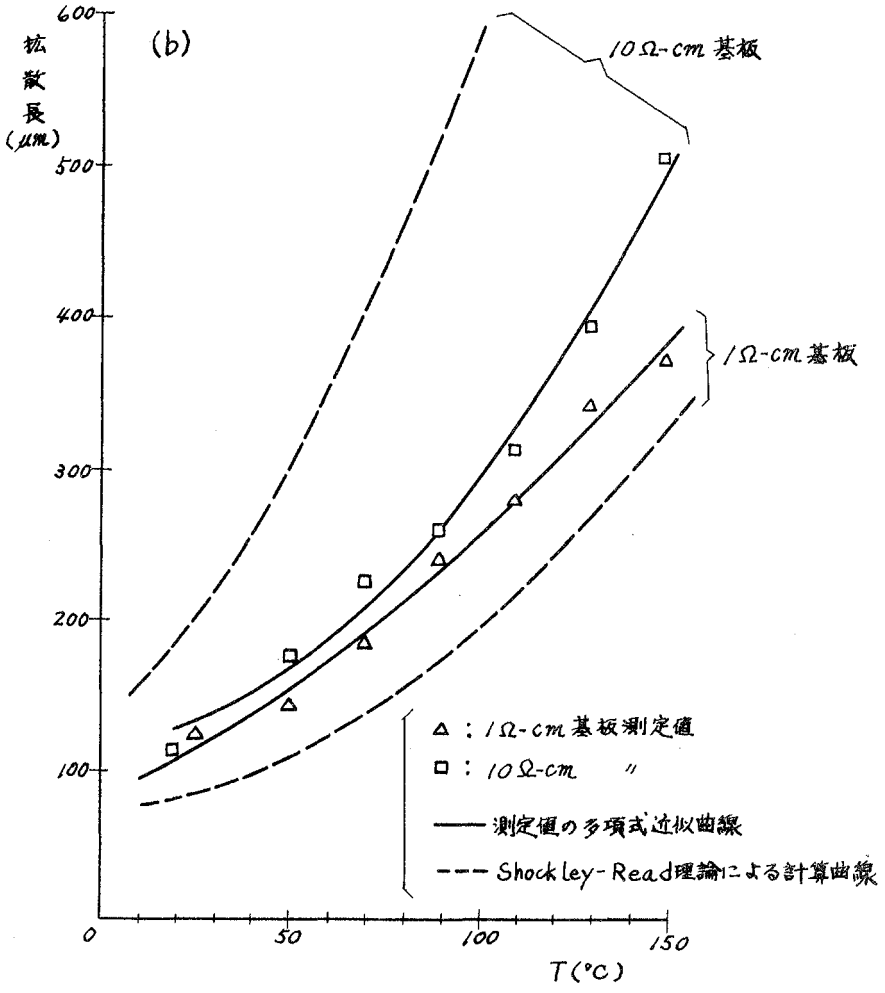


図 2.5　ＳＰＶ法による少数キャリヤー拡散長の測定結果と理論曲線

2.1.6 計 算 結 果

基板比抵抗の違いが温度特性にどう影響するか、集光比を上げた時にどう推移するか、AMOとAM2の違い等について検討した。なお、以下の計算において特に明記しない限り、入射光AMO，接合深さ$X_j = 0.3\mu m$，表面不純物濃度$C_s = 10^{20} cm^{-3}$，表面再結合速度$s_p = 10^5 cm/sec$，Siの表面反射なしとする。

(1) 基板比抵抗の影響

図2.6に基板比抵抗と光発生電流密度の関係を27℃について示した。

破線は、"Silcon Semiconductor Data"[1]中のライフタイムデータをShockley−Readの理論により近似した値を採用して計算したもので、実線はSPV法により今回測定した拡散長の値を基板層の計算式に入れて計算したものである。Shockley−Read理論近似の光発生電流は基板比抵抗の減少に伴いゆるやかに減少したが、実測拡散長での光発生電流は1Ω−cmを下がると減少の度合が大きくなった。

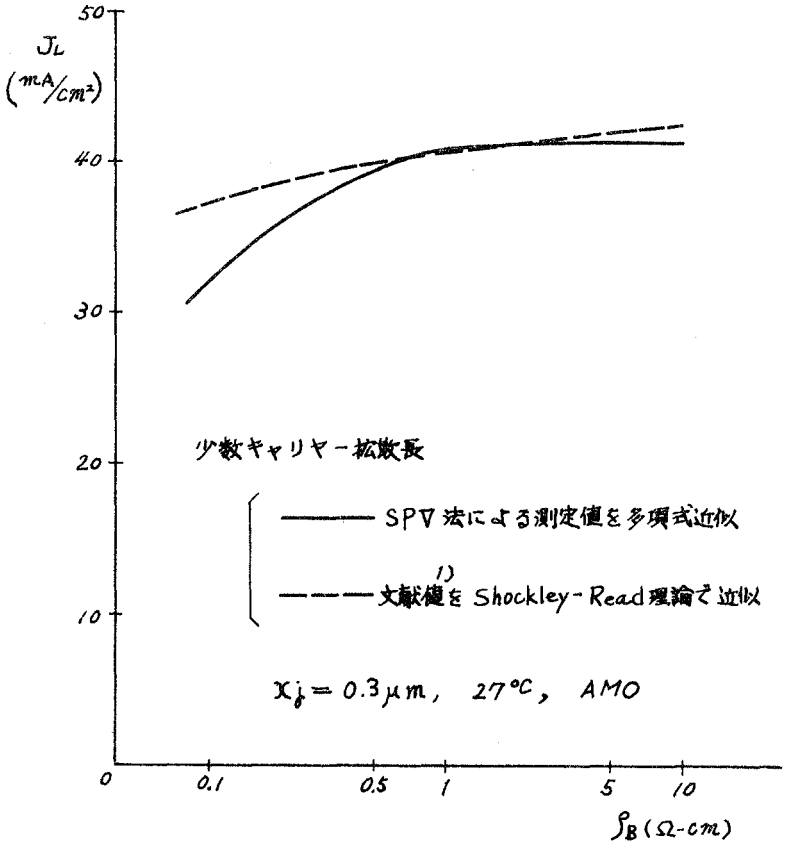


図2.6 光発生電流と基板比抵抗の関係

図2.7は素子温度に対して、Isc，Voc，F.F.，η_{PR}がどの様に変化するかを見たもので、基板比抵抗0.1，0.3，1.0，10 Ω−cm，入射光はAMO，グリッド数15本である。

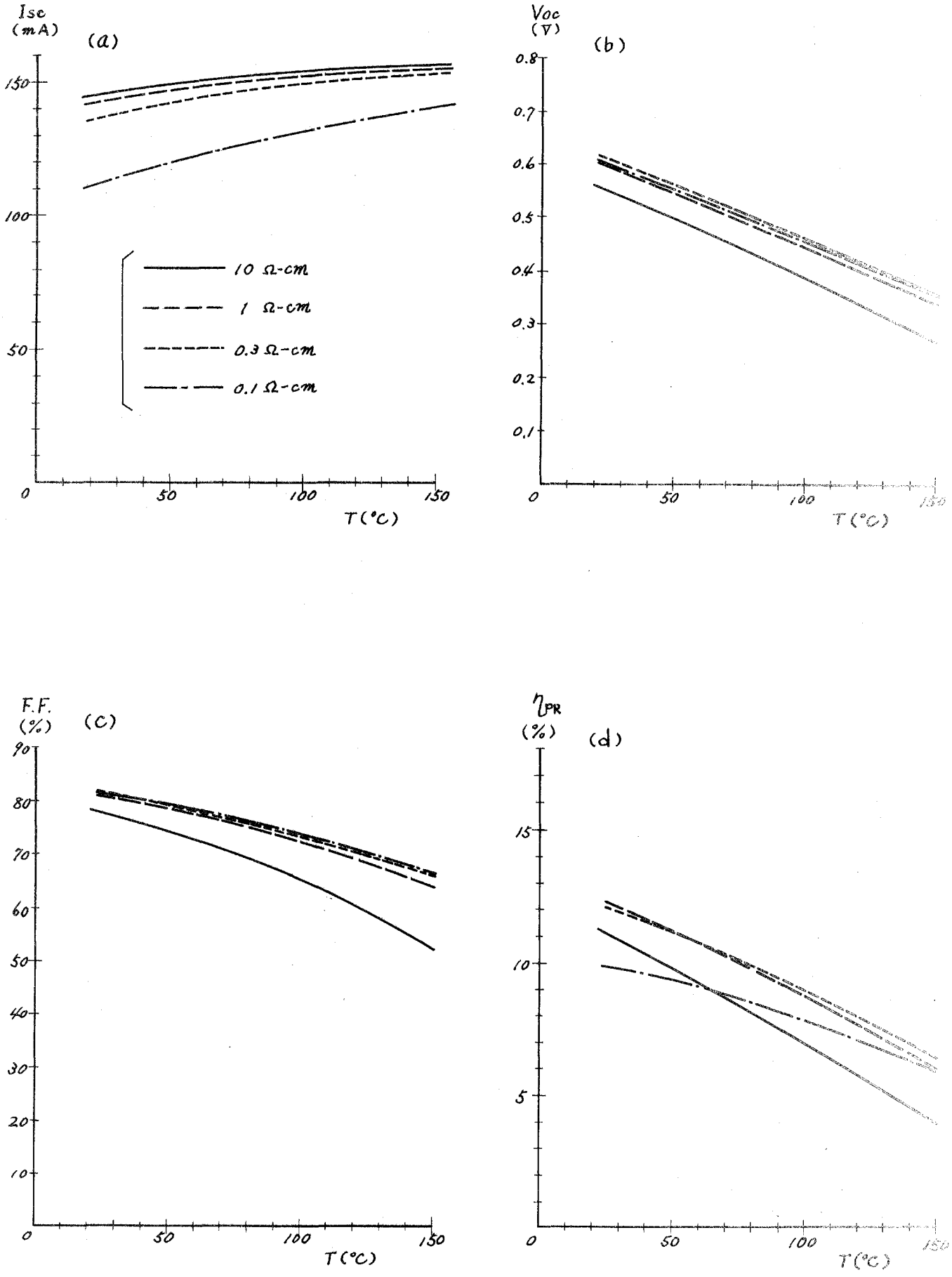


図 2.7　素子温度に対するＩｓｃ，Ｖｏｃ，Ｆ．Ｆ．，η_{PR}の変化（ＡＭＯでの計算値）

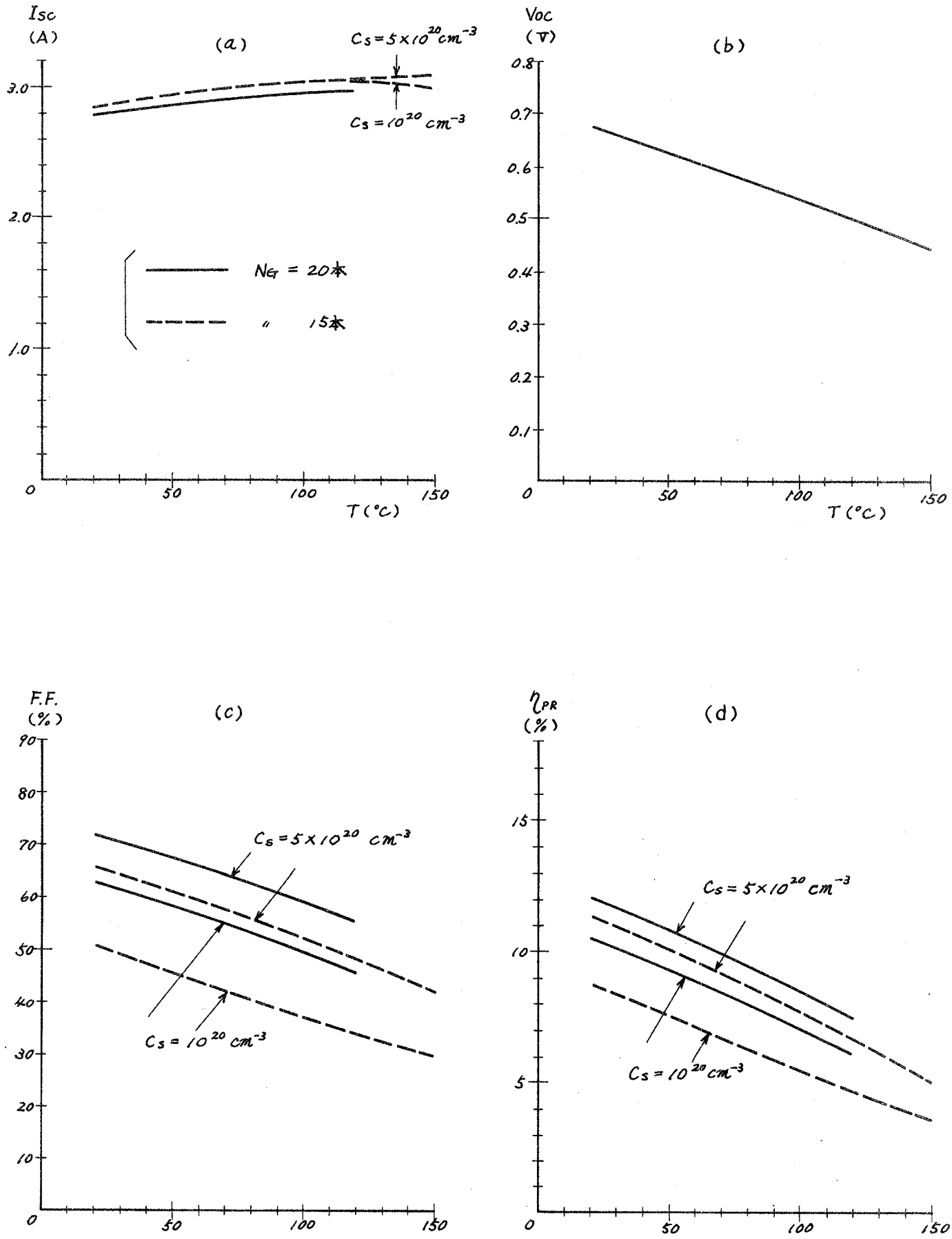


図2.8　集光比20（AMO）での素子温度とIsc，Voc，F.F.，η_{PR}の関係

なお、基板拡散長はＳＰＶ実測データの多項式近似値である。Ｉｓｃに関しては、0.1Ω－cmが値は低いものの増加率が大きく、比抵抗が大きくなるにつれ増加率の減少があらわれている。さらにＩｓｃは高温で飽和する傾向を見せている。Ｖｏｃに関しては、１０Ω－cmが５０ｍＶ以上他の比抵抗より低い値を示し、高温になるとその差は開く方向にある。なおわずかではあるが0.3Ω－cmの方が0.1Ω－cmよりＶｏｃの値が高い。F. F. については１０Ω－cmが初期値、減少率ともに大きい。η_{PR}になると、0.3，１Ω－cmが高く、次いで１０Ω－cm，0.1Ω－cmの順となるが、６５℃付近で１０Ω－cmと0.1Ω－cmの順位が入れかわり、１５０℃付近では１Ω－cmと0.1Ω－cmがほぼ同じ位になる。η_{PR}の減少率は比抵抗の大きいもの程大きい。以上述べたように、温度上昇による効率低下は、基板比抵抗による低下率の違いはあるものの非常に大きなものであり、１Ω－cm，0.3Ω－cmで２７℃，η_{PR}＝１２％程度あったものが１５０℃ではη_{PR}＝6～6.5％と半減する。

図2.8は、ＡＭ０での集光比２０における素子温度とＩｓｃ，Ｖｏｃ，F. F.，η_{PR}の関係を計算したものである。パラメータは表面不純物濃度Ｃｓ＝10^{20}，$5\times10^{20}cm^{-3}$、グリッド数N_G＝１５，２０本をとった。基板は１Ω－cmである。表面不純物濃度の影響はシート抵抗を大きく左右し、Ｃｓ＝10^{20}，$5\times10^{20}cm^{-3}$でシート抵抗はそれぞれ１２3.5，４2.7Ω／口であり、この影響がF. F. とη_{PR}に影響している。シート抵抗値により、最適なグリッド数が変化することも昭和５０年度報告に述べた通りであり、図2.8(d)にも１５本グリッドと２０本グリッドの各温度での効率のＣｓ値による重なりが見られる。

図2.9は、ＡＭ値による効率の変化を示している。ＡＭ２の場合ＡＭ０に比べてスペクトルの違いにより、１０～１５％の効率向上が期待されることは従来から言われてきたことである。ここでは集光比２０と５０について各ＡＭ値での効率変化を２０本グリッド，Ｃｓ＝$2\times10^{20}cm^{-3}$の構造について求めた。素子温度を２７℃に保てば集光度２０ではＡＭ０でη_{PR}＝１１％，ＡＭ２で１3.6％、集光度５０ではη_{PR}はＡＭ０で7.8％，ＡＭ２で１1.2％となる。素子温度を１１０℃とするとη_{PR}は、集光度２０ではＡＭ０で7.3％，ＡＭ２で9.1％、集光度５０ではＡＭ０で4.6％，ＡＭ２で7.1％となり、ＡＭ値の増大とともに効率の向上が期待されるが、温度上昇に伴う効率の低下は避けがたいものとなっている。

2.1.7 考　　察

(1) 少数キャリヤ拡散長について

Shockley－Read理論を用いたライフタイムの解析に関して、基本とした３００°Ｋでのデータ[1]は、基板比抵抗の変化に対して大きく変化せず、一方ＳＰＶ法により測定した拡散長は図2.5にみるように0.1Ω－cmと１Ω－cmの間で大きく変化した。太陽電池の光発生

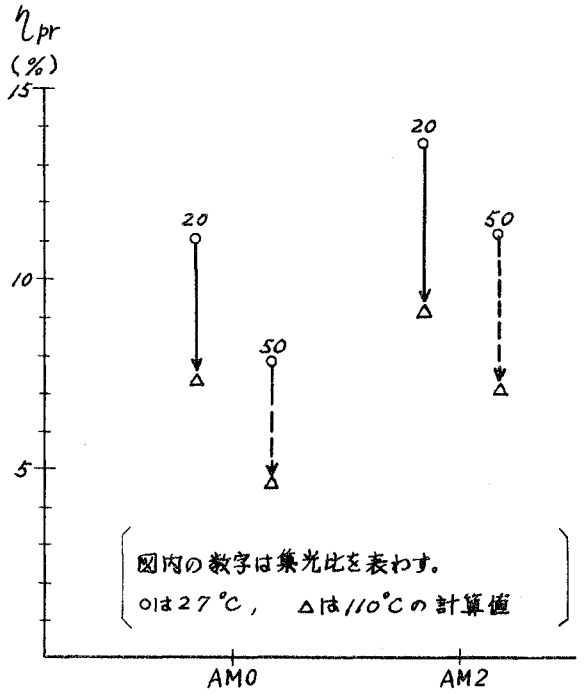


図 2.9　ＡＭ値による効率の変化

電流の面からみると、基板の拡散長が１００μｍ以下で変化するとき光発生電流が大きく変化し、１００μｍ以上の大きさになると拡散長の増加分程に光発生電流の伸びが期待できない傾向をもっており、文献データでは太陽電池のＩｓｃの絶対値及び温度変化に対するＩｓｃの変化量（図 2.3 (a)）を説明することが難しい。一方ＳＰＶ法による実測拡散長を基板層に適用した計算結果（図 2.7 (a)）に、反射損失やグリッド数の違いによる有効受光面積の補正を考慮すれば、0.1Ω－cm，１０Ω－cmともかなりの精度で測定結果を説明することができる。

拡散長の理論予想値と実測値との違いについては、以下のように考えられる。Shockley－Read理論におけるライフタイムは、式（2.１３）に見るようにトラップ準位の位置と、Ｎ型及びＰ型に高濃度ドープした時のライフタイムτpo及びτnoの値を用いて、フェルミ－ディラックの統計を解くことにより得られるが、τpo，τnoはトラップ濃度Ｎｔとそれぞれの平均捕獲確率〈Ｃｐ〉，〈Ｃｎ〉より

$$\tau_{po} = 1 / N_t \langle C_p \rangle, \quad \tau_{no} = 1 / N_t \langle C_n \rangle \qquad (2.38)$$

で定義される。不純物濃度を加えて比抵抗を変化させる場合に、式（2.３８）で与えられるＮｔ，〈Ｃｐ〉，〈Ｃｎ〉は変化しないことが前提となっているが、実際のＳｉ結晶作成時にはトラップ中心を形成する金属の混入度合が比抵抗値毎に変化する可能性があり、式（2.

３３）の仮定が成立しなかったと考えられる。特に比抵抗0.1Ω－cmのＳｉで、トラップ密度の増加等ライフタイムを減少させる要素が大きく影響したと思われる。

ＳＰＶ法による拡散長測定値の精度については、相対入射フォトン数ϕと吸収係数の逆数１／αの間に直線性のあることが前提であり、測定データについては直線性を確認した。ＳＰＶ法の仮定（2.33）～（2.37）のうち、素子厚が拡散長より十分大きい仮定（2.34）を満たさない場合があるが、ＳＰＶ法が結果的にほとんど素子厚によらないことが報告されており[11]、あまり影響がないと判断した。　吸収係数と素子厚の積が１より大である仮定（2.37）を満足する限界波長（1.04μm近く）光については、測定値の直線性より判断して採用可能とした。

(2)　素子の電流電圧特性の温度変化について

太陽電池のＩｓｃの温度や基板比抵抗による変化は、少数キャリヤ拡散長を検討すれば良く説明できることを先に示した。Ｖｏｃについては、逆飽和電流Ｉｏが支配的であり、温度上昇により飛躍的に増大しＶｏｃを減少させてしまう。さらに、Ｉｏ成分のうち、拡散層を数値解析した結果では、Ｉｏの拡散層側寄与に下限があり、それによりＶｏｃは上限を規定されることがわかった。Ｉｏの下限値は２７℃でおよそ2×10^{-12} A/cm^2　である。拡散層は高濃度であり、Ｉｏに寄与しないという従来の考え方では、基板の比抵抗を下げれば下げる程Ｖｏｃを上げられるが、今回の計算によると、集光しない状態で２７℃の時に得られるＶｏｃは、どんな比抵抗を用いてもせいぜい0.65Ｖまでである。図2.7(b)において、0.1，0.3，1.0Ω－cmのＶｏｃが接近しているのは、限界値が近いことを表わしている。温度上昇に伴うF. F.の減少は、上記Ｉｏの飛躍的増大と、直列抵抗成分によりおこる。Ｉｓｃ，Ｖｏｃ，F. F.の積で与えられるη_{PR}の計算結果は、比抵抗の大きい素子が高温での低下率の大きいことを示しており、この傾向が実験的にも正しいことを確認した。（図2.7(a)と図2.3(d)の比較）集光高温状態では、非集光高温状態に比べて直列抵抗での電圧降下分が大きくなるため、常温による設計よりさらに直列抵抗を小さくする努力が必要となってきた。

図2.10に直列抵抗各要素の比較を示した。(a)はN_G＝１５本，x_j＝0.3μm，C_s＝10^{20} cm^{-3}での、基板比抵抗ρ_B及び温度と直列抵抗Ｒｓの比較である。ρ_B＝１０Ω－cmのＲｓは大きく、特に基板層の抵抗がきいており、温度上昇によりさらに増大する。

(b)は表面不純物濃度ＣｓによりＲｓが小さくなることを示したもので、(c)はグリッド数N_Gの増加によりＲｓが小さくなることを示したものである。その他Ｒｓを下げる方法としては、接合深さx_jを大きくとること、グリッド電極を厚くすることなどがある。

従って２０～５０倍の集光を目的とする場合、集光による温度上昇でF. F.，Ｖｏｃの低下が生じる以上、できる限りＲｓを減らす努力をすべきで、メタルマスクによる電極付けを

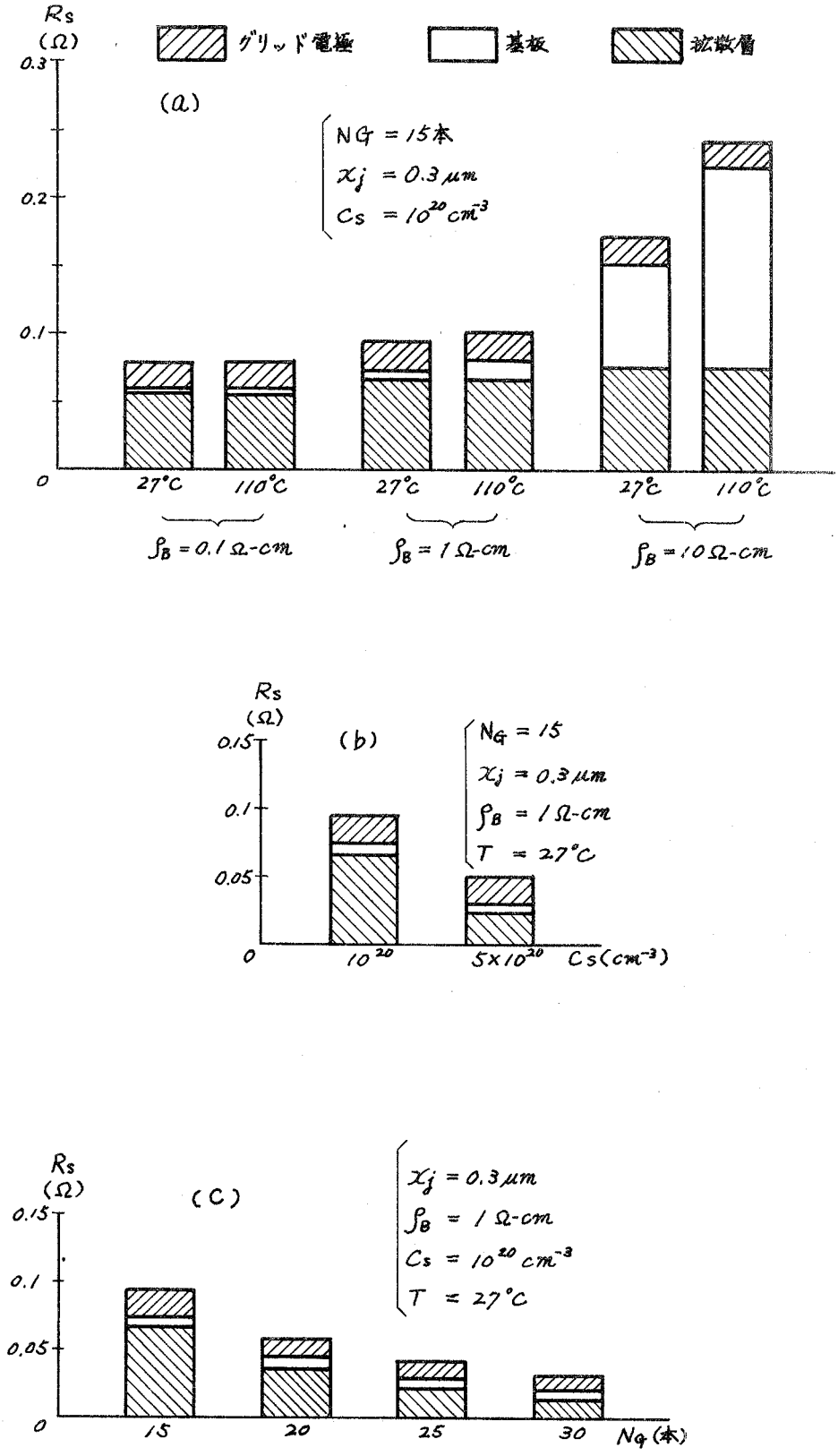


図 2.10　直列抵抗の変化

前提としてほぼその限界といわれる２０本を採用すると、残された課題は拡散層のシート抵抗を下げるため、Ｃｓを５×１０^{20} cm^{-3} 程度に上げる努力をする、あるいは光発生電流の若干の減少を許して x_j を0.３μより少し深くする、グリッド電極を１０μｍ程度の厚さに蒸着するかハンダ盛りをする、などである。なお、基板の比抵抗 ρ_B は、これまでの検討結果から0.３～１Ω－cmが適当である。

(3) ＡＭ値による効率向上について

図2.9に示したように、ＡＭ0の入射光を集光した場合に比べてＡＭ２の入射光を集光した場合では実用変換効率で２～2.5％上昇する。入射スペクトルの違いによりＡＭ２では光発生電流の出る割合が１０～１５％上昇するのが一因である。又ＡＭ０とＡＭ２の入射エネルギーは１３9.5 mw／cm²[9]，７4.9 mw／cm²[10] であり、同じ集光比ではＡＭ２の方が光発生電流が小さいのでＲｓでの電圧降下が小さく、効率がより高く出る結果となっている。

2.1.8 結　　論

集光型太陽電池素子の温度特性を測定解析した結果、以下の事柄がわかった。

1）太陽電池の短絡電流は温度とともに増加する。増加の割合は基板比抵抗の小さいもの程大きい。

2）太陽電池の開放電圧は、温度の増加に伴い急激に減少する。その原因は逆飽和電流の急激な増加にある。逆飽和電流は拡散層側の寄与による下限値があり、基板の比抵抗をむやみに下げても開放電圧は上がらない。

3）フィルファクターも温度の増加に伴い減少するが、その割合は基板比抵抗が低い程小さい。

4）従って実用変換効率も温度の増加に伴い減少する。比抵抗0.３～1.０Ω－cmの基板を用いた素子が各温度で高効率を示す。

5）集光用素子では、温度上昇に伴う効率の減少に加えて直列抵抗の影響が加算されるため、特に直列抵抗を低く設計する必要がある。従って各直列抵抗を下げる努力をすべきで、メタルマスクにより２０本グリッドの素子を作る場合、表面不純物濃度を上げるか又は接合を0.３μｍより若干深くしてシート抵抗を下げ、グリッド電極を厚くする等の方法を講ずる必要がある。

6）素子温度が上がること自体素子効率の下がる原因なので、できる限り素子を冷す努力をすべきである。

7）ＡＭ０にくらべＡＭ２の方が効率の上がることが集光用素子についてもいえる。同じ集光比では発生電流が小さいだけ効率が余計に上がる。温度上昇に伴う光発生電流の増加率は、ＡＭ０よりＡＭ２の方が小さい。

2.1.9　今後の課題

集光用素子の温度特性を解析し、常温特性における直列抵抗値以上に高温状態では直列抵抗値を下げる努力をしなければならないことがわかった。素子の動作特性に関する理論解析はこれで完了したので、今後素子製作にこの研究成果を反映してゆく。

参考文献

1) H.F.Wolf; Silicon Semiconductor Data Pergamon Press (1969)

2) W.Shockley; Electrons and Holes in Semiconductor D.Van.Nostrand Company,Inc. (1950)

3) G.G.Macfarlane; Phy.Rev. 111 1245 (1958)

4) P.M.Dunbar,J.R.Hauser; "Efficiency of Silicon Solar Cells as a Function of Base Layer Resistivity" Proc.11th Photovoltaic Specialist Conference,p.13 (1975)

5) W.Shockley,W.T.Read,Jr.; "Statistics of the Recombination of Holes and Electrons" Phys.Rev.87. 835 (1952)

6) D.J.Sandiford; "Temperature Dependence of Carrier Lifetime in Silicon" Proc.Phys.Soc.71. 1002 (1958)

7) E.M.Conwell; "Properties of Silicon and Germanium:II" Proc.IRE 46 1281 (1958)

8) M.J.Barrett,et al; "Solar Cell Performance Mathematical Model" Final Report,NASA Contract NAS 7-100, June 15, (1970)

9) F.S.Johnson; Journal of Meteorology 11 431 (1954)

10) H.Brandhorst et al; "Interim Solar Cell Testing Procedures for Terrestrial Applications"NASA,July, 1975. (NASA TMX-71771,1975)

11) E.Y.Wang,et al; "Surface Photovoltage Method Extended to Silicon Solar Cell Junction" J.Electrochem.Soc.:Solid-State Science and Technology,121 973 (1974)

2.2　集光方法の検討

2.2.1　概　　要

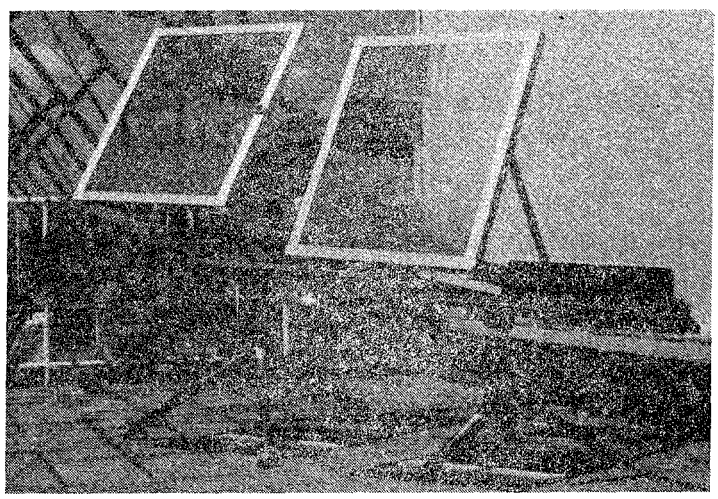
昭和５０年度に、コンピュータによる集光器開口部に入射する日射量のシミュレーションのほか樋型平面鏡集光装置、線型フレネルレンズ集光装置、樋型放物面鏡を平面鏡で擬似した集光器（円筒フレネル反射型集光器）の試作および理論検討を行なった。

本年度は線型フレネルレンズと樋型平面鏡とを組合せた複合集光装置（無追尾），線型フレネルレンズ集光装置（追尾）、及び樋型放物面鏡集光装置（追尾）の三種を設計・試作し実動試験および理論検討を行なった。このほか試作集光装置のフィールドデータ収録、日射量データ収録とそれらデーターの処理を目的に多点データ収録処理装置（５１年度専用機械装置）を購入整備し稼動を開始した。

2.2.2　線型フレネルレンズ・樋型平面鏡複合集光装置

(1)　設計・試作

本装置はデモンストレーション用携帯装置を目的として設計したものであるため、小型・軽量並びに組立容易な事が特徴となっている。試作装置は２台でうち１台は分解組立が容易な構造とした。両者共基本設計は同一である。図2.1 1.(a)，(b)に本装置の組立時及び分解時の外観を，また図2.1 2.(a)，(b)，に構成並びに寸法を示す。



← 組立時

分解時 →

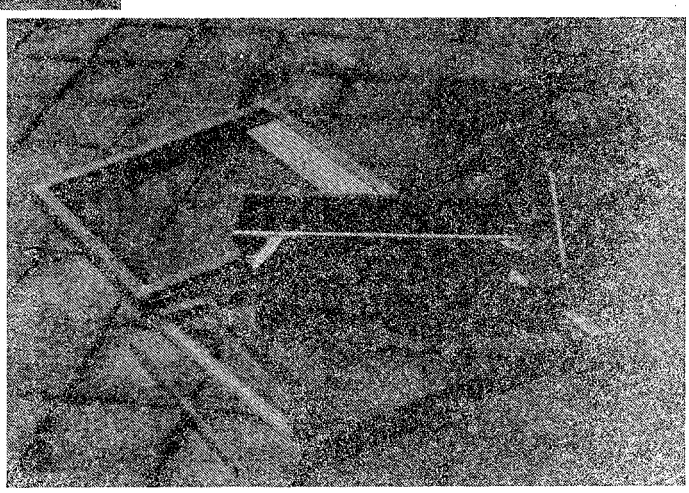


図2.1 1　複合型集光装置の外観

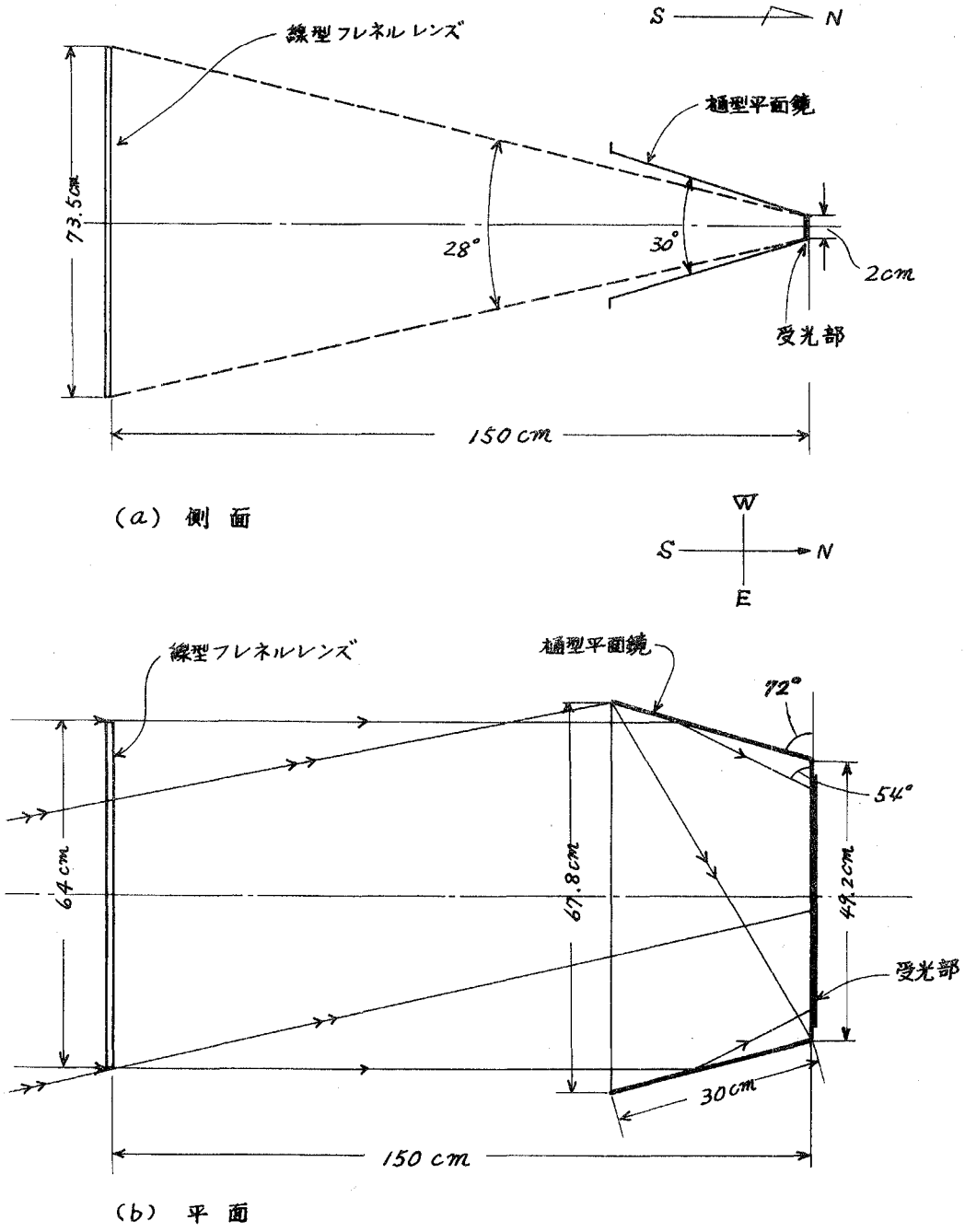


図2.12　複合型集光装置の構成

レンズ部分は、70cm×70cm線型フレネルレンズの端部を切り落として40cm×70cmとしたものを2枚組合わせた構成となっている。なお本装置に使用した線型フレネルレンズは1枚が口径に対して半分に分割されており、これを2枚合わせて1組のレンズになるよう作られている。レンズ面に刻まれているプリズムのピッチは1mm，焦線距離は150cm，レンズ材質はメタクリル酸樹脂（アクリル）で厚さは6mmである。

一方、樋型平面鏡にはアルミ板を用い、反射面は電解研摩により鏡面に仕上げられており、その反射率は約65%である。

図2.12(b)からも判るように入射角が時刻とともに変化してもある時間内は受光部へ光が入射するよう設計した。

受光部に使用した太陽電池素子は、集光用として設計されたものであり、大きさが2cm×2cm，基板の比抵抗0.1Ω−cm，グリッド本数15本あるいは20本のN^{+}／P素子である。この素子を用い22枚直列配線したものをアルミ冷却フィンに埋め込んでモジュールとした。なお、直列配線の際に入射光の極端な不均一分布（たとえば受光部への遮光物の付着など）で発電量が大きく減少してしまうのを防ぐために、各素子毎にバイパス回路を設けた。

(2) 集光実験

実験は全て太陽光が集光器（フレネルレンズ）へ垂直に入射するようにして行なった。図2.13に直達光比(α)等諸パラメーターの算出手順を示す。各パラメーターの定義は以下のとおりである。

$$\text{直達光比}(\alpha) = \frac{\text{直達日射量}}{\text{全天日射量（追尾）}} \tag{2.39.a}$$

$$\text{平均直達光比}(\bar{\alpha}) = \frac{\text{ある期間の平均直達日射量}}{\text{ある期間の平均全天日射量（追尾）}} \tag{2.39.b}$$

$$\text{全天日射集光比}(K_T) = \frac{\text{受光部へ入射する全天日射量}}{\text{開口部へ入射する全天日射量}} \tag{2.40.a}$$

$$\text{平均全天日射集光比}(\bar{K}_T) = \frac{\text{ある期間受光部へ入射する全天日射量の平均}}{\text{ある期間開口部へ入射する直達日射量の平均}} \tag{2.40.b}$$

$$\text{直達光集光比}(Kdir) = \frac{\text{受光部へ入射する直達日射量}}{\text{開口部へ入射する直達日射量}} \tag{2.41.a}$$

$$\text{平均直達光集光比}(\bar{K}dir) = \frac{\text{ある期間受光部へ入射する直達日射量の平均}}{\text{ある期間開口部へ入射する直達日射量の平均}} \tag{2.41.b}$$

$$\text{集光面積比}(K_G) = \frac{\text{開口部面積}}{\text{受光部面積}} \tag{2.42}$$

K_T とKdirの間には次の関係がある。ただしKdifは散乱光集光比である。

$$K_T = \alpha Kdir + (1-\alpha)Kdif \tag{2.43}$$

$$\text{光学系効率}(\eta opt) = \frac{Kdir}{K_G} \times 100\ (\%) \tag{2.44}$$

なおK_Tの算出に当っては、あらかじめ校正したモニター用素子で開口部への入射エネルギ

量を測定し、受光部への入射量はモジュールへ逆バイアスを印加し光発生電流を測定して求めた。

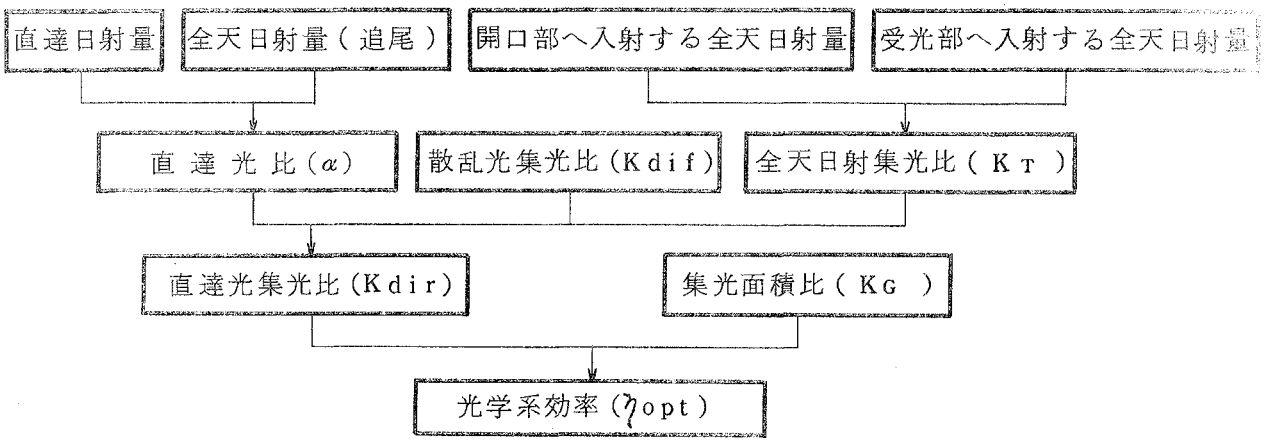


図 2.13　パラメーターの算出手順

(3)　実験結果

表 2.1 に実験結果の代表値を示す。

表 2.1

項　　目	集光器のない場合	線型フレネルレンズだけの場合	複合型にした場合
開口部への入射エネルギー密度（mw/cm^2）	108.4	107.6	106.0
短絡電流 Isc（A）	0.0996	1.09	1.33
開放電圧 Voc（V）	12.2	12.3	12.5
最大出力 Pm（W）	0.862	8.28	9.55
直達光比 α	0.6257	0.6536	0.6629
全天日射集光比 K_T	1	10.9	12.5
直達光集光比 Kdir	1	16.2	18.4
光学系効率 ηopt（%）	――――	37.2 44.0 *	42.3

ただし、K_G = 43.5，Kdif = 0.95 である。

＊　これは東西方向の受光部長さを線型フレネルレンズと同一にした場合に達成される効率

である。表から樋型平面鏡の効果はＫｄｉｒで1.１４倍である。これは図2.１2.(b)でも明らかなように東西方向の側面鏡の効果によるものである。

(3) 考　　察

複合型にすることにより、太陽の時角変化に対してある程度集光比を一定値に保つことができるばかりか、垂直入射時においても表2.１で示したように効果があることが判る。しかし、太陽の時角変化で生ずる焦線のレンズ側への移動による入射光量の減少防止にも限度があり、さらに、ＥＷＶ角（East West Vertical Angle）の時刻変化による入射光量の減少も無視できない。このため樋型平面鏡の効果について理論検討を行なった結果、樋型平面鏡をフレネルレンズ方向に長くし、かつ、受光部をレンズ側へ移動させて最も改善した場合でも１日の積算エネルギー値で２８％の改善にしかならないことがわかった。ＥＷＶ角の影響については2.2.４で詳しく述べる。

このように複合型でも簡易追尾が必要であることがわかった。次に直達光比(α)による集光比の減少の検討をおこなった。直達光比(α)の長期間の平均値を求めるため、昭和５１年５月の２１日間に、太陽追尾を行なった全天日射量と、直達日射量の測定を行なった。

その結果、全天日射量5.８４KWH／m^2・day 直達日射量 2.７８KWH／m^2・dayの値が得られた。これより平均直達光比($\overline{\alpha}$)は0.４７６となり予想外に低い値であった。

どのような集光装置でも本質的に散乱光は集光することができず、従って、散乱光集光比Ｋdifは１以下である。このため全天日射集光比K_Tは式2.４３であたえられるが、αの影響により長期にわたっては直達光集光比の約１／２の全天日射集光比K_Tしか期待できない。

αによる影響は集光装置に本質的なものであるため、この点も考慮して集光装置の設計をおこなわなければならない。

2.2.3　線型フレネルレンズ集光装置

(1) 設計・試作

本装置は大口径線型フレネルレンズを用いた集光装置の特性を総合的に把握するために設計・試作されたものである。光学系，受光・冷却系，追尾系，架台から構成されており、各部とも多目的な実験が行なえるよう工夫設計されている。

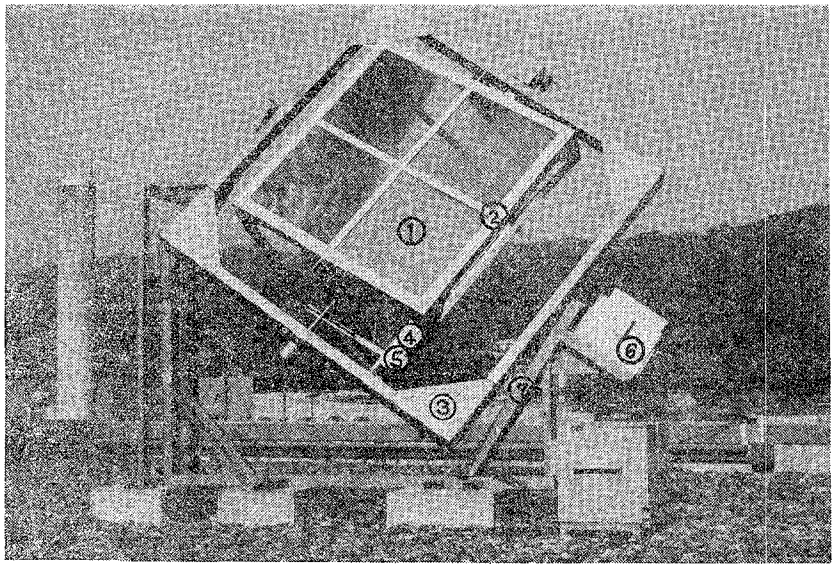
本装置の概略仕様を表2.２に、また外観を図2.１４に示す。

赤緯調整に関して回転の支点はモジュール支持棒のレンズとモジュールの重心位置にありこの支点を中心に緯度角から±23.5°回転できる。

追尾回転枠の回転範囲は水平から±90°（12時間分）の回転はもちろんであるが、設計では±180°が可能である。

表2.2　線型フレネルレンズ集光装置の仕様

構成	仕様
フレネルレンズ	材質：メタクリル酸樹脂，寸法：700×700×6㎜×4枚 重量：約2.7Kg／枚，プリズムピッチ：1㎜
レンズ枠	材質はアルミで4枚のレンズを保持する。
追尾回転枠	材質はアルミで、設置場所の緯度（天理では34°37′）に傾けて取り付ける。
受光・冷却部	集光型太陽電池素子を冷却フィンに埋め込みモジュールとする。 1モジュールの重量は約950gである。
モジュール支持棒	フレネルレンズの焦線位置に受光部を固定保持するようレンズとモジュールを連結している。ただし焦線位置の調整のため受光部は可動である。
追尾ユニット	減速機，クラッチ，モータ，制御回路等より成る。
架台	材質は鉄でアンカーボルトにて基礎に固定されており、集光装置が真南に向くよう配置されている。



①フレネルレンズ（4枚）　②レンズ枠　③追尾回転枠　④受光・冷却部　⑤モジュール支持棒
⑥追尾ユニット　⑦架　台

図2.14　線型フレネルレンズ集光装置

集光装置の配向精度（設計値）は東西及び南北方向に対して、風速１０ｍ／sec程度の風で±0.5°以内とした。一方本装置の光学系には、４枚（２組）のフレネルレンズを使用しているが、レンズ枠の構造が着脱容易にしてあるため、東西型から南北型への変更が可能である。（東西型，南北型とはそれぞれ焦線を東西，南北に向けるような配置を言う。）これと同時に、モジュール支持棒をレンズ枠に対して９０°回転させることにより、受光部も焦線の向きに合わせることができる構造となっている。図2.１４は東西型の場合を示している。これにより、１台の集光装置で２つのタイプの集光実験が可能である。また回転及び配向精度を出すために集光装置全体の重量バランスには特に注意した。受光部には６コのモジュールを取り付けたが、その構成はモジュールへの入射エネルギー量モニター用として１コ，発電量モニター用として１コ，素子温度フィン根元温度モニター用として１コ，残りの３コはデモンストレーション用である。埋め込んだ太陽電池素子は、2.2.2同様集光用として設計し製作したものである。

(2) 集光実験

前年度は線型フレネルレンズの光学特性を理論で解析し、同時に3 cm×6 cm×1 mm，プリズムピッチ0.5 mm，焦線距離9.1 cmという小さなフレネルレンズを用いて実験を行ない評価した。

しかし理論検討したものと実験で使用したものとでは、寸法その他が大きく異なり、（理論検討したものは、１５０cm×７５cm×５mm，プリズムピッチ２mm，焦線距離１５０cmである）実際に我々が目指している集光装置の特性を全て把握したとは言えなかった。すなわち、今回の実験で明らかになったことであるが、口径の受光部幅に対する比が大きくなるとどんなに精密に作ったレンズでも、色収差、太陽視半径等の影響が無視できなくなる。したがって今年度の実験では、前年度の理論検討に近い寸法のレンズを用いて、その特性を正確に知ることを目的とした。

実施した測定項目を以下にあげ、簡単に説明する。

(a) レンズの透過率の測定

光線透過量の検出には太陽電池素子を用い、光源にはソーラーシミュレーター（ＡＭＯ，１４０ｍＷ／cm^2）を使った。光線の入れ方としては、プリズムが刻んである側及びその反対側の２通りを行なった。

(b) レンズ裏面から受光部までの距離に対するＫdirの測定

この測定から、レンズが設計値どうりの焦線距離を持っているか、またレンズ枠への取り付け具合がうまくいっているか否かが判る。

(c) エネルギー分布の測定

検出用素子として1.5㎜×5㎜P／N素子を用い、これを焦線の幅方向に動かしその時の光発生電流の変化からエネルギー分布を求めた。

(d) 赤緯入射角に対するKdirの測定

赤緯入射角の変化は東西方向に焦線がある場合、入射光の動きは焦線の幅方向となるので、わずかな角度の変化がKdirに大きな減少をもたらす。素子への入射エネルギー量の変化は、受光部へ取り付けたモジュールで測定した。

(e) 時角入射角に対するKdirの測定

時角入射角の変化は、焦線の軸方向となるため、赤緯入射角の場合と違ってKdirはある程度一定値を保つ。しかし、素子への入射光がレンズによる屈折光であるため、時角が変化するにしたがい焦線がレンズ側へ移動し、結局焦線がボケてしまうこととなり、ある角度からはKdirが急激に減少してゆくことになる。測定方法は、赤緯変化の場合と同様である。

(f) 集光装置のブレの影響の測定

集光装置のねじれあるいは減速機のバックラッシュによる集光装置のブレがひどい場合には風等の力を受けると、追尾回転枠あるいはレンズ枠がゆれ、受光部から焦線がはずれる場合がある。実験では一番影響の大きい、赤緯方向について強制的に力を加え、正規の位置からの焦線のずれ具合とKdirの減少の度合を測定した。

以上いくつかの測定項目を説明してきたが、いずれの場合も入射エネルギー量の算出に当っては素子温度による補正を行なった。温度上昇に伴う光発生電流の増加は、本実験で使用した素子では1mA／10℃の程度である。

(3) 実験結果

(a) レンズの透過率

測定はプリズムが刻んである側から光を入れる場合、反対側から入れる場合の2通りを行なった。いずれの場合もレンズの中心付近及び端の方の2ケ所を測定し平均した。結果を表2.3に示す。

表 2.3

項　　目	レンズの中心	レンズの端	平　均
プリズム面から光を入れる場合	88.7%	90.8%	89.8%
プリズムと反対の面から入れる場合	90.1%	89.2%	89.7%

(b)　レンズ裏面から受光部までの距離に対するＫｄｉｒの変化

測定結果を図２.１５に示す。

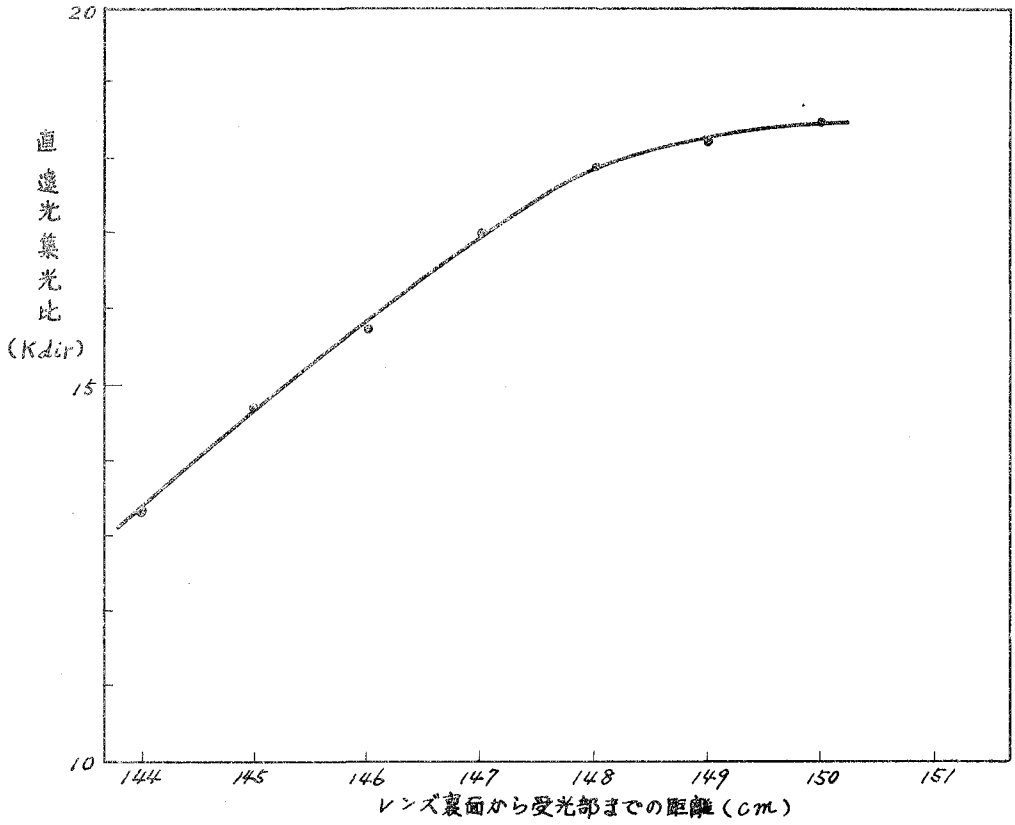


図２.１５　レンズ裏面から受光部までの距離に対するＫｄｉｒの変化

図２.１５からＫｄｉｒのピークはほぼ１５０cmのところにあり、その値は約１８.５である。

(c)　エネルギー分布

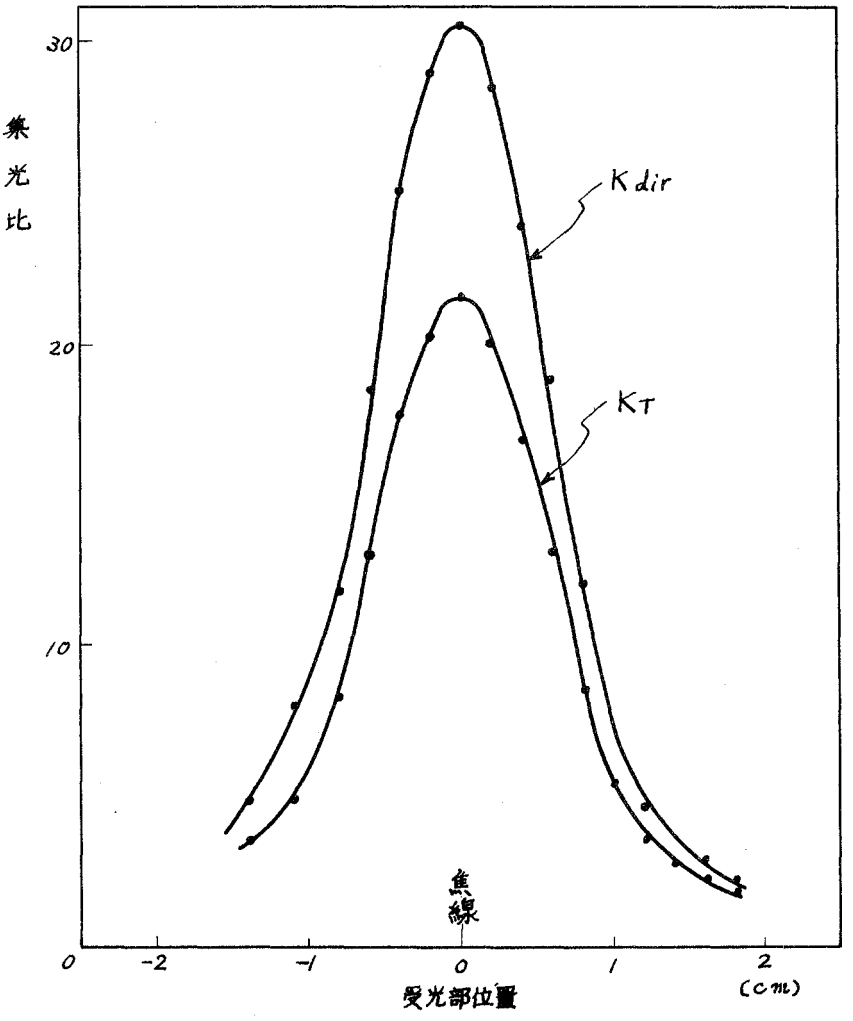


図 2.16　焦線におけるエネルギー分布

図 2.16にはエネルギー分布に対応する集光比の変化の測定結果を示した。これからKdirのピーク値は30.5であり、また測定時のαは0.6892であった。

(d)　赤緯入射角に対するKdirの変化

測定結果を図 2.17に示す。

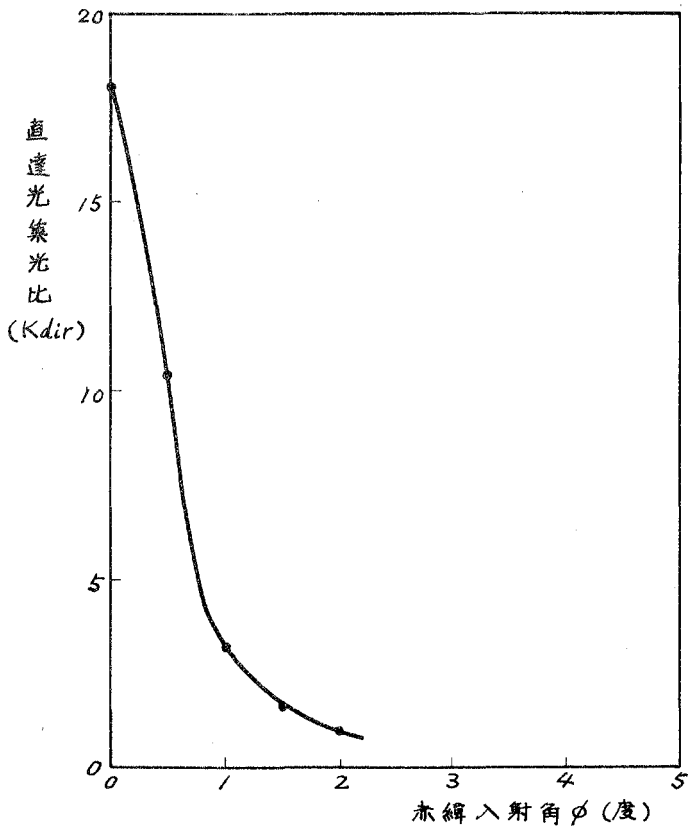


図 2.17　赤緯入射角に対するKdirの変化

図 2.17から入射光線のわずかな変化でKdirが大きく減少することが判る。ちなみに垂直入射時に約18であったKdirは、0.5°赤緯入射角が変わると約10に、さらに1°で約3、2°で非集光状態とほぼ同一レベルまで落ちてしまう。この赤緯入射角の影響によるKdirの減少は、無風状態で追尾している時にはほとんど起きないが、風が強い場合だと集光装置が振動し問題となってくる。

(e)　時角入射角に対するKdirの変化

結果を図 2.18に示す。

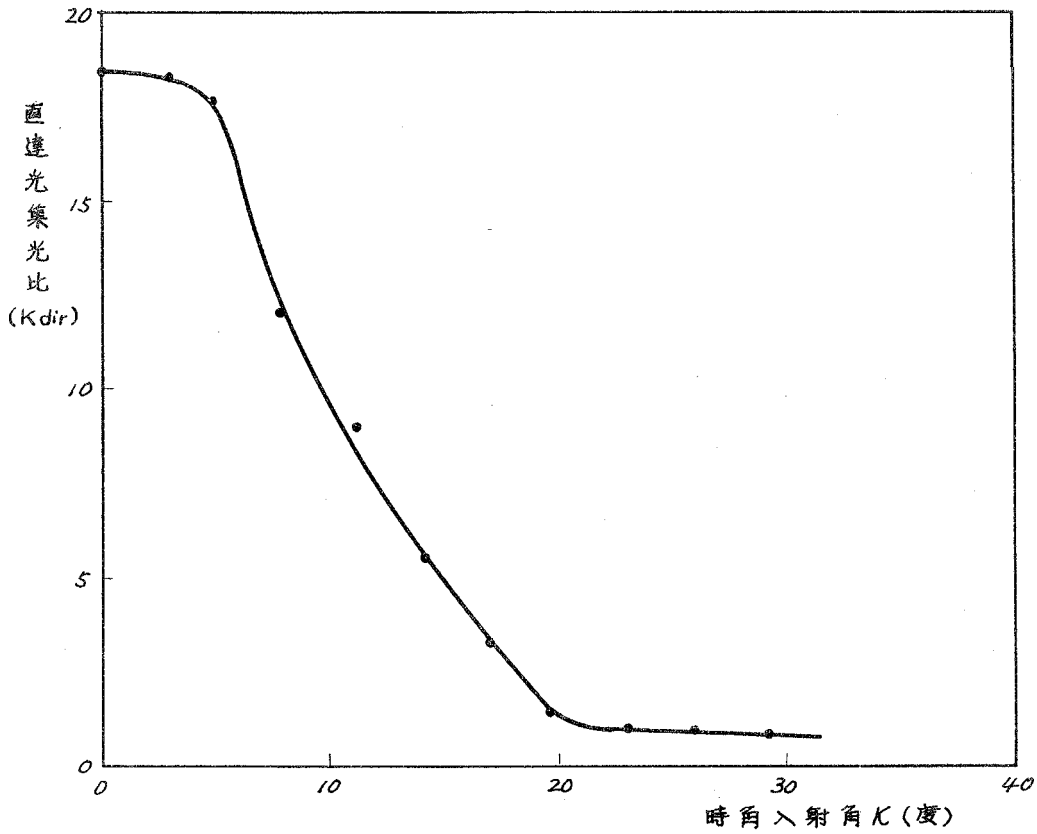


図2.18　時角入射角に対するKdirの変化

赤緯入射角の場合と異なり角度の変化に対するKdirの減少の度合は小さくなっているが、焦線のレンズ側への移動によりほぼ4°付近から急激に落ち込み始める。したがって集光装置をある基準内で働かせようとした場合、何分かに1回は調整してやらねばならない。たとえばKdirが最高値から1以内の減少ですむようにするには、図2.18から最低30分に1回は調整が必要であることが判る。

(f)　集光装置のブレの影響

測定は、赤緯方向のブレに対して行なったため、その結果は、赤緯入射角の場合と同一である。赤緯方向のブレ角は、最大で±0.75°であったが、これはかなり強制的に力を加えた場合であり、通常では、ほぼ±0.5°以内のブレであった。実際の風による影響具合は2.3.2でフィールド試験のデータとして示してある。ブレの原因としては、集光装置を多目的に設計したため、東西型、南北型いずれも最適な構造とはなっておらず、レンズ枠及び受光部を支えている軸のねじれのせいであると考えられる。

(3) 考　　察

以上の実験結果から線型フレネルレンズ集光装置の特性をまとめ表2.4に示す。

表2.4　線型フレネルレンズ集光装置の寸法と性能

構　　成	値	構　　成	値
焦線距離(cm)	150	レンズ1枚の大きさ	70cm×70cm
有効開口面積(m^2)	1.80	素子部幅(cm)	2.0
直達光集光比(Kdir)	18	光学系効率 η_{opt}(%)	26.9
透過率(%)	89.8		

線型フレネルレンズ集光装置の光学系効率の悪い原因を明らかにするためレンズの透過率、太陽視半径、レンズの製作誤差および色収差について検討した。

レンズの透過率の測定値は前述のように89.8%でありレンズの屈折率1.48として各プリズムの前面および裏面での反射による損失の計算値91.2%とよく一致しており、レンズ内での吸収はほとんどないことがわかる。

次に太陽視半径の影響について検討した。太陽は約16′の視半径をもっており、このため焦線距離が長くなるほど光が分散される。図2.19に焦線距離1.5m，口径1.4m，屈折率1.48の線型フレネルレンズに垂直入射した場合の焦線上での強度分布の計算値を示す。これは太陽が均一な強度をもつ円板と仮定し図2.20に斜線で示すように入射角に対し面積に比例した強度で線型フレネルレンズに入射すると仮定し、焦線での強度をプリズム毎に計算したものである。

この場合では焦線距離が1.5mと比較的短かいため、太陽視半径による影響はほとんどなくレンズを透過した光の約2%が太陽電池よりはずれるだけである。タワー集光のような焦点距離の大きな場合には、この太陽の視半径による影響は大きい。

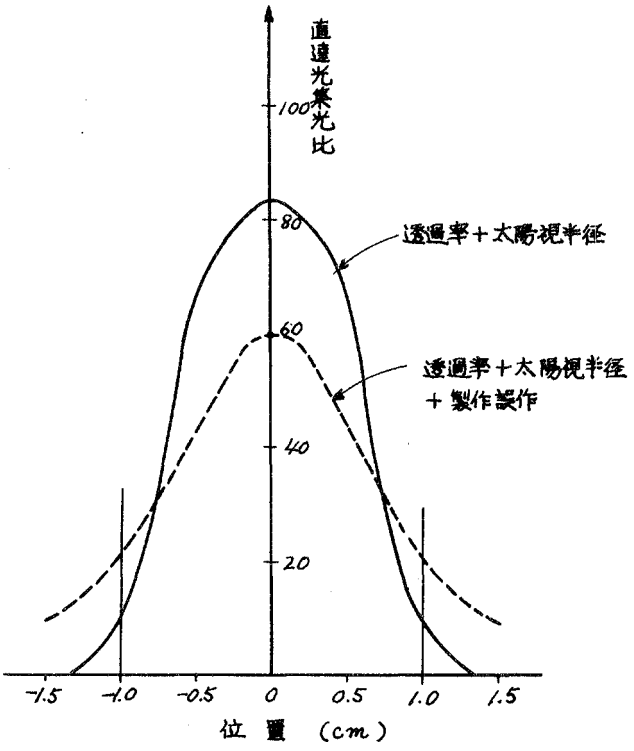


図 2.19　線型フレネルレンズの強度分布

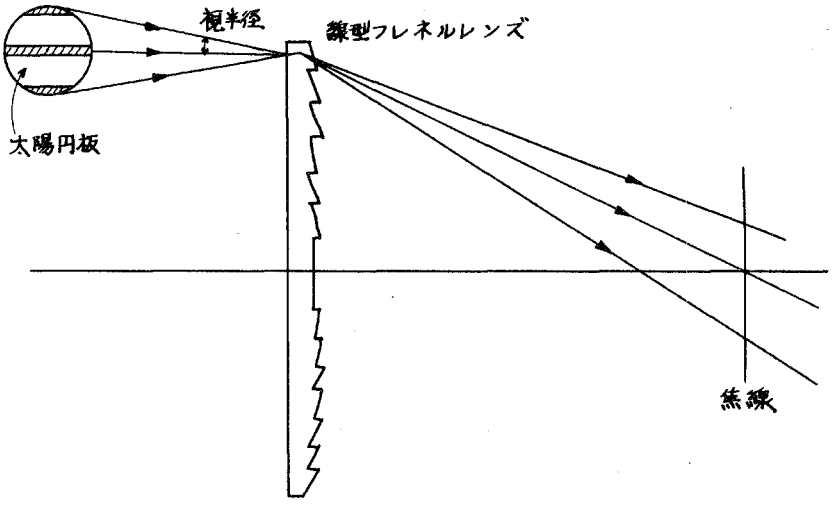


図 2.20　線型フレネルレンズ

次に線型フレネルレンズの製作誤差の検討を行なった。

線型フレネルレンズの製作誤差をレーザー光源を平行移動させた場合の焦線のずれにより測定した。その結果を図2.2 1に示す。また別の方法として線型フレネルレンズの軸方向の変化はないと考えて図2.2 2に示すように、幅約5㎜のスリット部を除いて線型フレネルレンズを覆い、垂直に太陽光を入射させて焦線での像を見た。この結果を図2.2 3に示す。

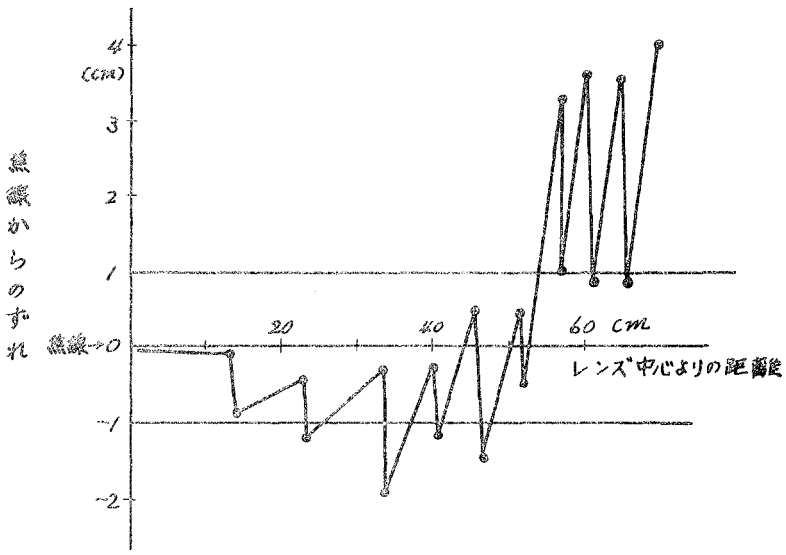


図2.2 1　線型フレネルレンズの製作誤差

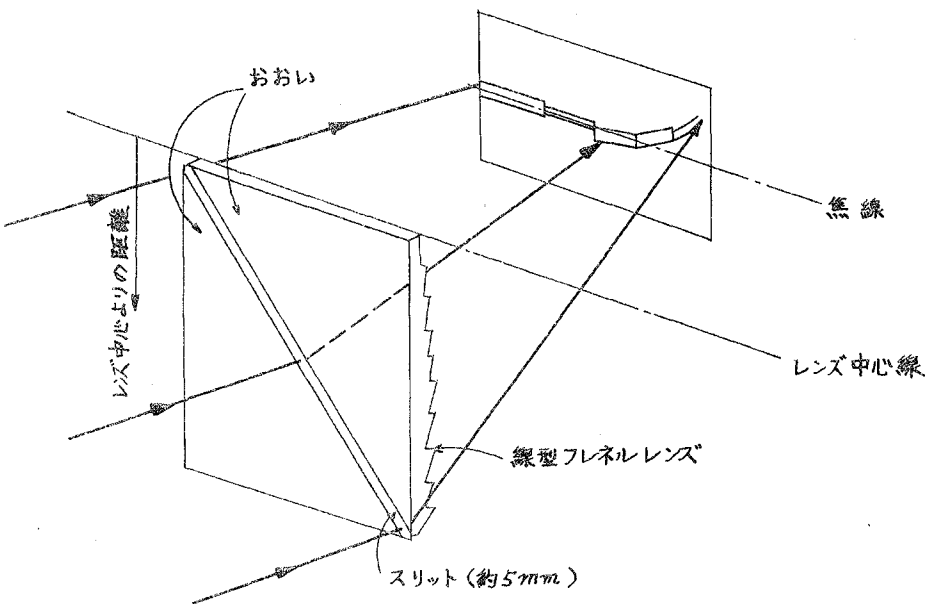


図2.2 2　線型フレネルレンズの製作誤差の測定法

図2.23は、レーザ光源を用いた測定とたいへんよく一致し、不連続なずれが起っている。この不連続なずれは金型をおこす時に球面収差を除去する目的で、ゾーン毎に非球面レンズに近似したためである。太陽光を集めるという目的には近似的に非球面にしたことは有効ではなかった。

表2.5に焦線距離1.5m、ピッチ1mm、屈折率1.48で設計したプリズム角を示す。

図2.23　線型フレネルレンズの焦線上の像

表2.5　線型フレネルレンズのプリズム角（設計値）

プリズム番号	プリズム角	プリズム番号	プリズム角	プリズム角度差
1	0.0398°	2	0.1194°	0.0796°
101	7.8924	102	7.9688	0.0764
201	15.165	202	15.233	0.068
301	21.468	302	21.526	0.058
401	26.658	402	26.704	0.046
501	30.778	502	30.815	0.037
601	33.970	602	33.998	0.028

このようにレンズの中心より離れたプリズム番号の大きいプリズムほど次のプリズムとの角度差は小さく精度が要求される。

レンズ中心より離れるほどずれが大きい原因の1つはこのように要求される精度がきびしくなるためである。

金型を製作する場合の機械精度は絶対角度設定精度として±0.03°であり、これを基準に微小角を設定する精度として正接で10000分の1であった。

口径が大きい場合、金型製作時に数回バイトを変える必要があるため、絶対角度設定精度により決まる製作誤差はさけられず、特にレンズの中心より離れたプリズムでは、離れれば離れるほど、機械精度が問題となり最終的には設定誤差が必要値を上回ってしまう。

口径が小さい場合は、このような設定精度はあまり問題とならない。口径が大きい場合、各々のプリズム角度の精度が要求され、また焦線距離が長いため少しの製作誤差が大きく影響を及ぼすことがわかる。

このような製作誤差の影響で、どれくらい光学系の効率が減少するのかを解析するため、前述と同じく、太陽が均一な強度をもつ円板と仮定し、図2.21の製作誤差に起因する実測結果を用い、図2.19に実線で示した場合（製作誤差なし）からのずれを各プリズム毎に計算して焦線での強度分布を求めた。

その結果を図2.19に点線で示した。このように光はかなり分散し製作誤差なしの場合の98%に比べてレンズを透過した内の約77%しか太陽電池に入射しなくなり、製作誤差が大きく影響していることがわかった。

次に色収差による影響について検討した。メタクリル酸樹脂の屈折率は常温でナトリウムのD線に対して1.49で普通ガラス（1.52）よりわずかに低い。メタクリル酸樹脂の屈折率は図2.29に示すように波長の増加と共に低下する。

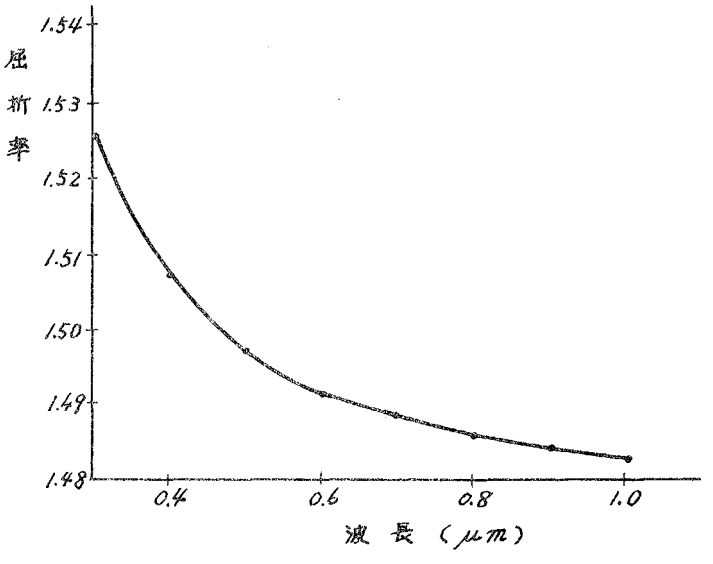


図2.24　メタクリル酸樹脂の屈折率

この関係を式であらわすと次のようなCauchyの式で表わされる。

$$n = 1.4779 + \frac{5.0496 \times 10^{-3}}{\lambda^2} - \frac{6.9486 \times 10^{-5}}{\lambda^4} \qquad (2.45)$$

λ:波長（μm）

このように波長により屈折率がちがい、ある波長に対応する屈折率をもとにプリズム角を決定しても、他の波長の光は集らず色収差がおこって太陽電池よりはずれてしまう。太陽電池の分光感度のピークである0.7μmの波長に対する屈折率1.488をもとにレンズを設計した場合、屈折率の違いにより各波長の光がどのようにずれるかを、レンズの中心からの距離に対して計算した結果を図2.25に示す。レンズ中心付近では色収差は小さくずれないが、中心より離れるに従いずれが大きくなり、中心より70cm付近では2cm幅の太陽電池より大きくずれることがわかる。

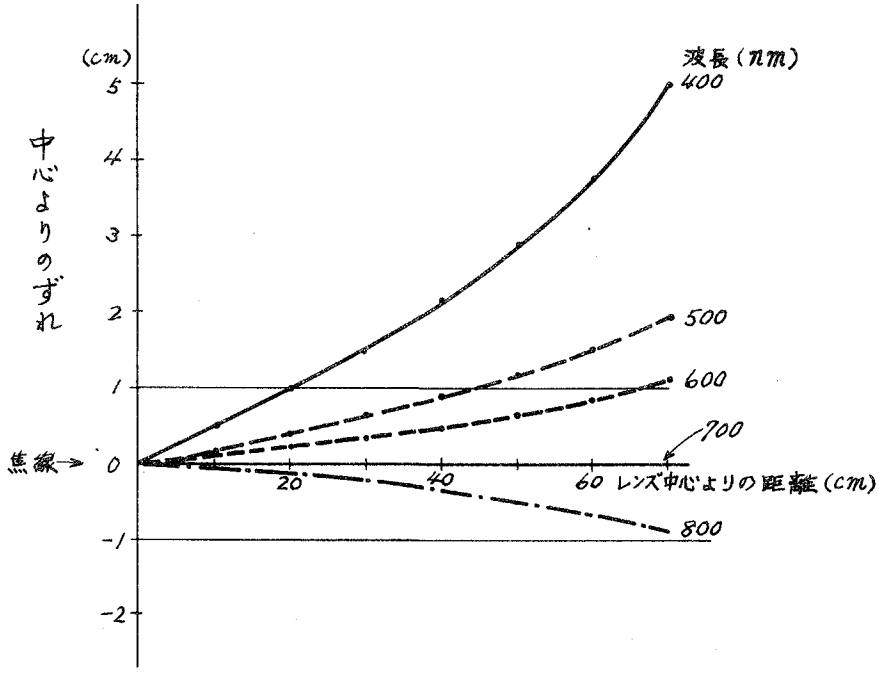


図2.25　線型フレネルレンズの色収差

前述の図2.23の結果も、この理論計算結果と一致し中心附近では色収差が小さく白色であるが、中心より離れるにしたがって色収差により赤から青にわかれその幅も大きくなるのがわかる。

次にAMO，AM2の太陽光の場合、2cm幅の素子に対する入射エネルギー比について、レンズ中心よりの距離を7cmごとに区切り計算した結果を図2.26に示す。たとえばAM2の場合中心より21cmまではほぼ100%のエネルギーが入射するが65cm以上離れた所では約55%のエネルギーしか入射せず、全体では85%しか入射しないことがわかった。

次に素子幅を2cmより増加させた場合、素子に入射するエネルギーの割合がどのように改善されるかを計算し、その結果を図2.27に示す。たとえばAM2の場合、素子幅2cmで、85%のエネルギーが入射するが、素子幅を4cmにすると95%まで改善される。しかし集光比は1／2となるため経済性を考慮して素子幅を決定する必要がある。

また屈折率は温度、湿度等による体積膨張により変化し常温における屈折率n＝1.490

を基準に±0.002程度の違いは常にあり、ロットによっても変化する。

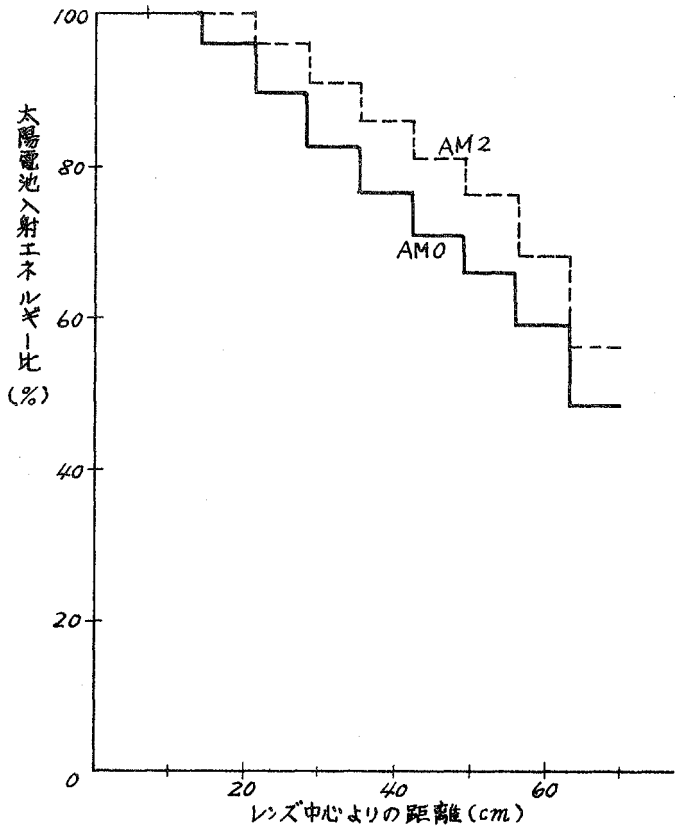


図2.26　レンズ中心よりの距離に対する入射エネルギー比

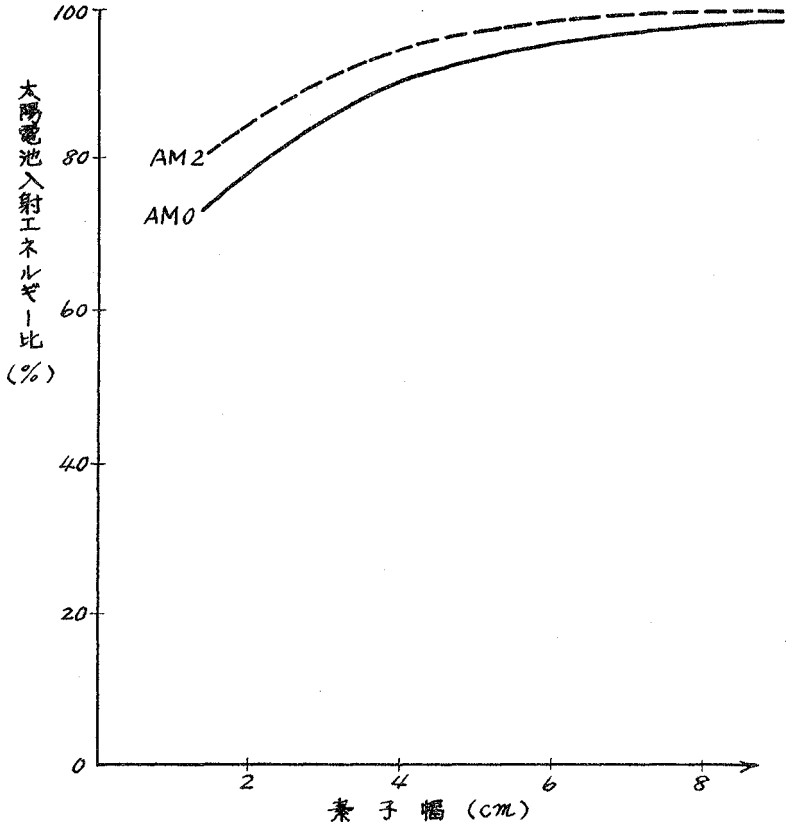


図2.27　素子幅に対する入射エネルギー比

また、線型フレネルレンズ集光装置の光学系効率の悪い原因としてこれらの他に切削時に金型にできる表面粗さに起因するプリズム面の粗さにより光が分散されることがあげられる。レンズの製作誤差および色収差ともレンズの中心より離れた部分ほど影響が大きく太陽電池よりはずれやすいことがわかる。このことより光学系効率を減少させずに口径を大きくして集光比をあげることは急激に難しくなることがわかる。レンズの中心から離れた部分を切り落して40cm×70cmとして2枚組合わせた、前述の複合型で線型フレネルレンズのみの場合の光学系効率が44.0%であるのに対し、70cm×70cmのものを2枚組合せたこの光学系効率が26.9%と悪いのはこのためである。

以上、検討を行なってきた光学系効率の減少する原因のうちレンズの加工精度については現状の技術限界に近くまた色収差についても本質的なもので避けられないから大幅な改善は期待できないと考えられる。

これに対し反射型の集光器では本質的に色収差はなくこの点では有利である。

円型フレネルレンズの場合には、2次元的に集光するため集光比があがり、このため口径が小さくてよく光学系効率もよくなると考えられる。

2.2.4 樋型放物面鏡集光装置

(1) 設計・試作

本装置は樋型放物面鏡集光装置の基本的な特性を把握するとともに、線型フレネルレンズ集光装置と比較検討することを目的として設計・試作されたものである。したがつて架台，駆動追尾系，受光・冷却系等は線型フレネルレンズ集光装置と同一仕様である。特徴としては、放物面鏡の曲率が比較的容易に変えられるようにしてあるため、何種類かの放物面鏡の集光実験が出来るだけでなく、フレネルレンズの場合と同様に東西型から南北型への変更も容易であることがあげられる。表2.5に線型フレネルレンズ集光装置と異なる部分の仕様を示す。

表2.5　樋型放物面鏡集光装置

構　成	仕　様
放物面鏡	材質はメタクリル酸樹脂板でその裏面にアルミを蒸着し反射板としている。寸法は700×1470×5mm×2枚である。
放物面鏡枠	材質はアルミで側面に放物面鏡支持棒を可変支持する穴が開けてある。
放物面鏡支持棒	反射板を支持固定する棒で材質はアルミである。この棒を動かすことにより曲率の変更や調整ができるようになつている。

本装置の光学系には表2.4の反射板を2枚使用しているが、これに曲率を持たせ放物面鏡とした場合、その有効開口面積は約1.8㎡となり、線型フレネルレンズ集光装置のそれとほぼ同一となる。また表中で反射板の厚さは5㎜であるが、これは2㎜の反射板と3㎜の保護板とを重ねて構成した。たゞしどちらも材質は同じである。保護板を使用しているのは、アルミ蒸着面の保護と（反射板は反射面の表面が樹脂層で覆われている構造となつている）放物面鏡の強度を持たせるためである。

樋型放物面鏡集光装置において、同じ投影入射角でも焦線距離が長いと焦線位置で分散し、また焦線距離が短かいと太陽電池に大きな角度でななめ入射するため分散してしまう。
このため最適な焦線距離を次のように決定した。

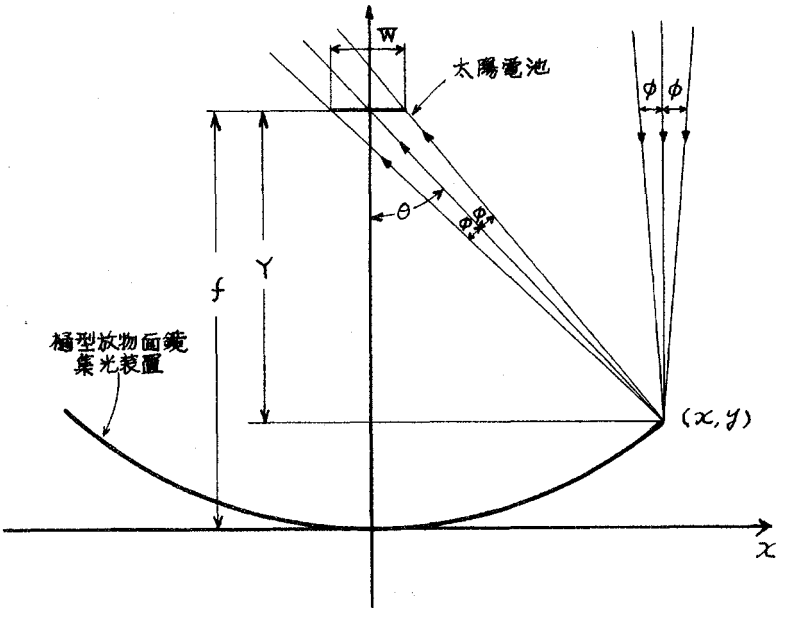


図2.28　樋型放物面鏡集光装置

図2.28に示す樋型放物面鏡集光装置の断面図より次の式が成り立つ。

$$\begin{cases} y = \dfrac{x^2}{4f} & (2.46) \\ \tan\theta = \dfrac{x}{f-y} = \dfrac{x}{Y} & (2.47) \\ \tan(\theta+\phi) = \dfrac{x+\frac{W}{2}}{f-y} = \dfrac{x+\frac{W}{2}}{Y} & (2.48) \end{cases}$$

f：焦線距離　　θ：リムアングル　　φ：投影入射角　　W：素子幅

式2.42と式2.43より次の関係がまとまる。

$$Y = \frac{\frac{W}{2} \pm \sqrt{\frac{W^2}{4} - 4x\left(x+\frac{W}{2}\right)\tan^2\phi}}{2\tan\phi} \qquad (2.49)$$

W及びxを与えた場合、太陽電池に入射可能な投影入射角ϕが最大となるように焦線距離を決定するのが、太陽電池より光がはずれにくくてよい。その最大投影入射角をϕmaxとすると式2.49の判別式＝0より次式で表わされる。

$$\phi max = \tan^{-1} \frac{W}{\sqrt{8x(2x+W)}} \qquad (2.50)$$

これより次の関係がもとまる。

$$Y = \frac{\frac{W}{2}}{2\tan\phi max} = \frac{\sqrt{2x(2x+W)}}{2} \qquad (2.51)$$

またYとfには次の関係がある。

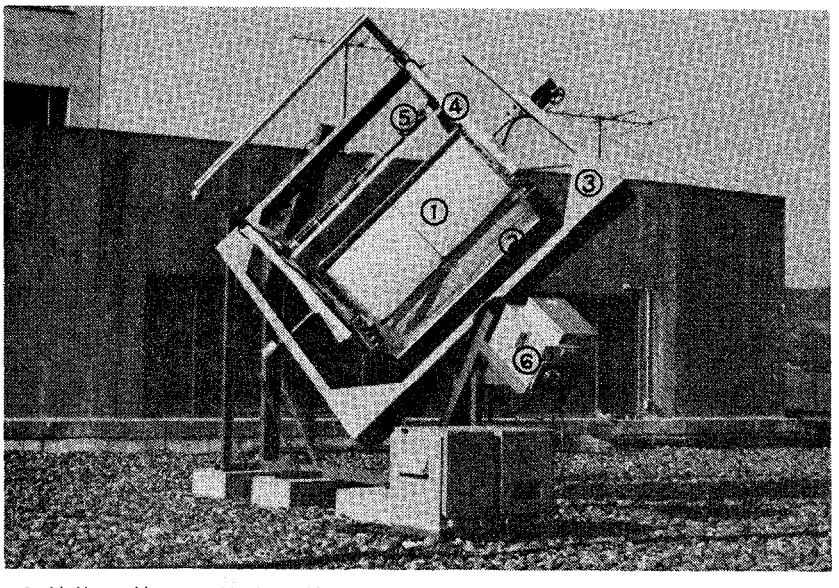
$$f = \frac{Y + \sqrt{Y^2 + x^2}}{2} \qquad (2.52)$$

このためx及びWをあたえると式2.51よりYがもとまり式2.52より 最適な焦線距離fがもとまる。

W＝2㎝，x＝75㎝として最適な焦線距離を求めるとf＝90.96㎝ となり、これより実験では焦点距離を91㎝とした。太陽視半径の16′まで投影入射角ϕを許すとすると焦線距離は56.1㎝より191.2㎝までの範囲が許される。

以上の結果をもとに本装置の焦線距離を80㎝から160㎝まで変えられるように設計した。また受光部の構成は線型フレネルレンズ集光装置の場合と同じである。

図2.29に樋型放物面鏡集光装置を示す。



①放物面鏡　②放物面鏡枠　③追尾回転枠　④モジュール支持棒
⑤受光・冷却部　⑥追尾ユニット

図2.29　樋型放物面鏡集光装置

(2) 集光実験

実験のやり方その他は複合型及び線型フレネルレンズの場合と同様である。焦線は東西方方向とし実施した測定の項目は次のとうりである。

(a) 反射面から受光部までの距離に対する直達光集光比（Kdir）の変化

この測定で、放物面鏡の曲率の精度が判る。

(b) 赤緯入射角に対する直達光集光比（Kdir）の変化

線型フレネルレンズの場合と同様な結果が予想されるが、Kdir のピーク値が大きいため、かなり急激な変化が起こると思われる。

(c) 時角入射角に対する直達光集光比（Kdir）の変化

これは、上記(b)の場合と異なり、かなりの角度までKdirが一定になると予想される。樋型放物面鏡では受光部への入射光線が線型フレネルレンズの様な透過屈折光でないため、焦線の反射面側への移動は起きない。したがつて反射鏡が無限長に作られていればKdir は一定値を保ち続けるはずである。しかし本装置のように一般には反射板は有限であるから、ある角度からは光が入射してこなくなり、結局Kdir の減少は避けられなくなる。

(d) 集光装置のブレの影響

前節同様一番影響の大きい赤緯方向に力を加えそのブレ具合を測定した。

(3) 実験結果

(a) 反射面から受光部までの距離に対する直達光集光比（Kdir）の変化

図2.30に結果を示す。図からKdir のピークが87㎝に現われているが、これは設計値91㎝とは一致していない。曲率の調整には、別に用意した焦線距離91㎝のゲージを用いたが、15本の放物面鏡支持棒を全て正確に調整することはむずかしく、さらに支持棒自身のたわみ、反射板の熱膨脹による歪なども不一致の原因と考えられる。本集光装置の開口径を実測すると143.3㎝であり、この値を用いて焦線距離が91㎝、87㎝の時の反射板端部の座標（図2.28を参照）を求めると、それぞれ（71.65㎝，14.1㎝），（71.65㎝，14.75㎝）となる。したがつて反射板端部においてy方向に6.5㎜曲率が狂つた場合に相当することになる。なお、本実験でのKdir のピーク値は約35であつた。

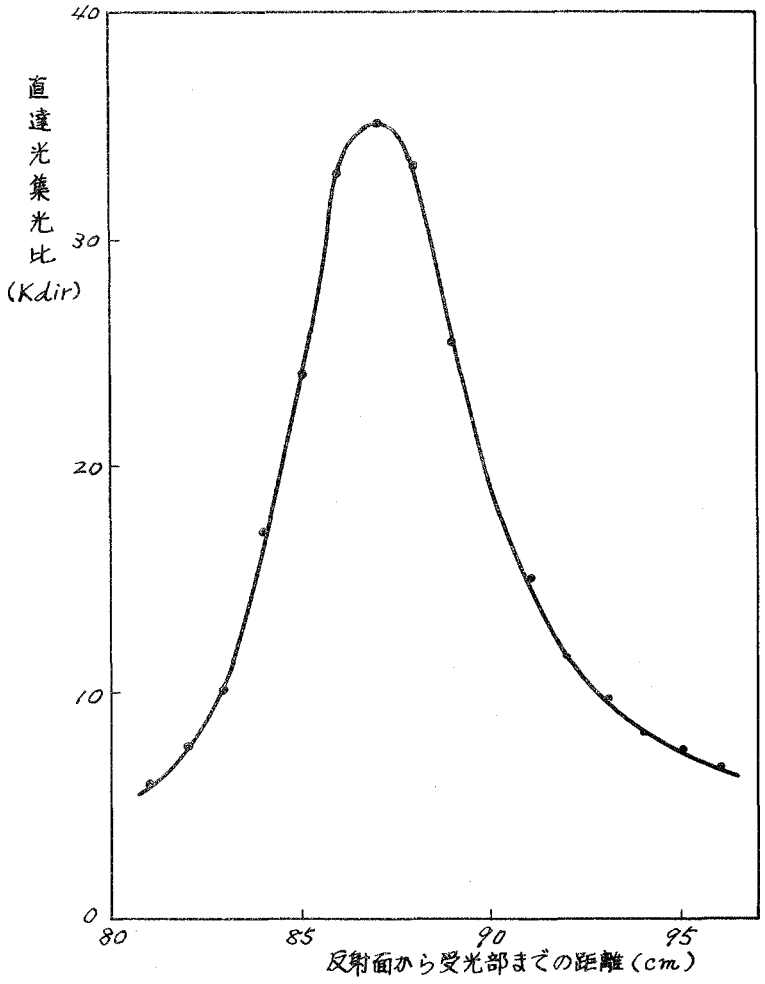


図2.30　反射面から受光部までの距離に対するKdir の変化

(b)　赤緯入射角に対する直達光集光比（Kdir）の変化

図2.31に結果を示す。Kdir のピーク値で35であつたものが、0.5°の変化で約半分の15まで減少し2°でほぼ非集光状態の値となつている。

(c)　時角入射角に対する直達光集光比（Kdir）の変化

図2.32に結果を示す。図から約15°までKdir は一定値を保ち、ここを境にして減少してゆくのが判る。15°は時間にして1時間であり、垂直入射時をはさんで約2時間Kdir が一定値となる。Kdir の減少理由は反射板が有限の長さであることはもとより、受光部を支えている支柱，追尾回転枠などの影による入射光量の減少、反射光の光路の増加による太陽視半径の影響なども考えられる。

(d)　集光装置のブレの影響

線型フレネルレンズの場合同様、ブレは最大で±0.75°程度、通常±0.5°以内であつた。

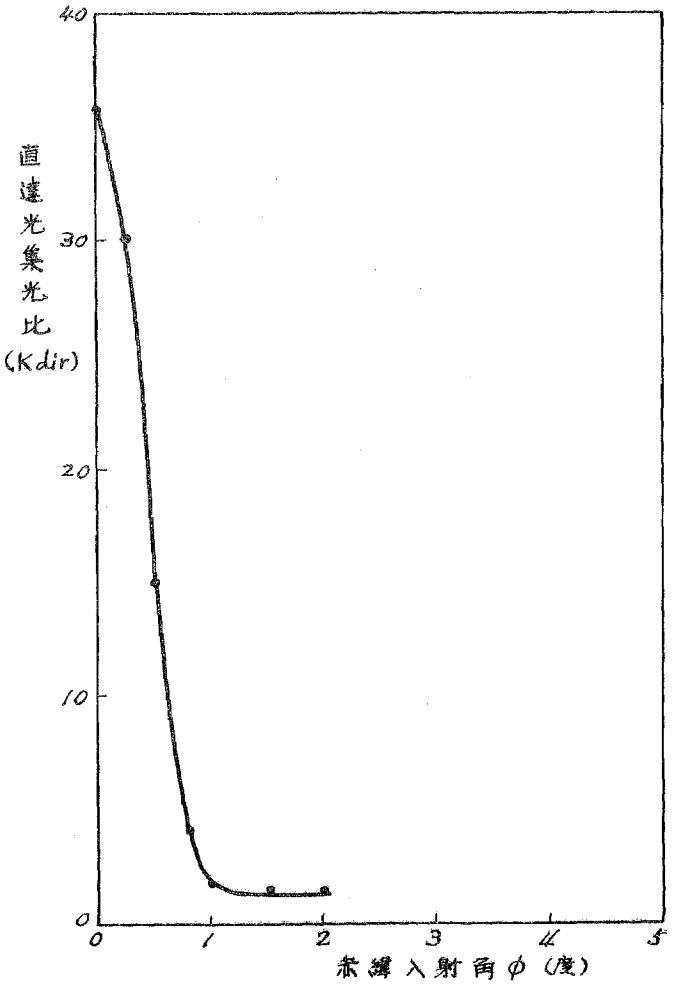


図2.31　赤緯入射角に対する
Kdir の変化

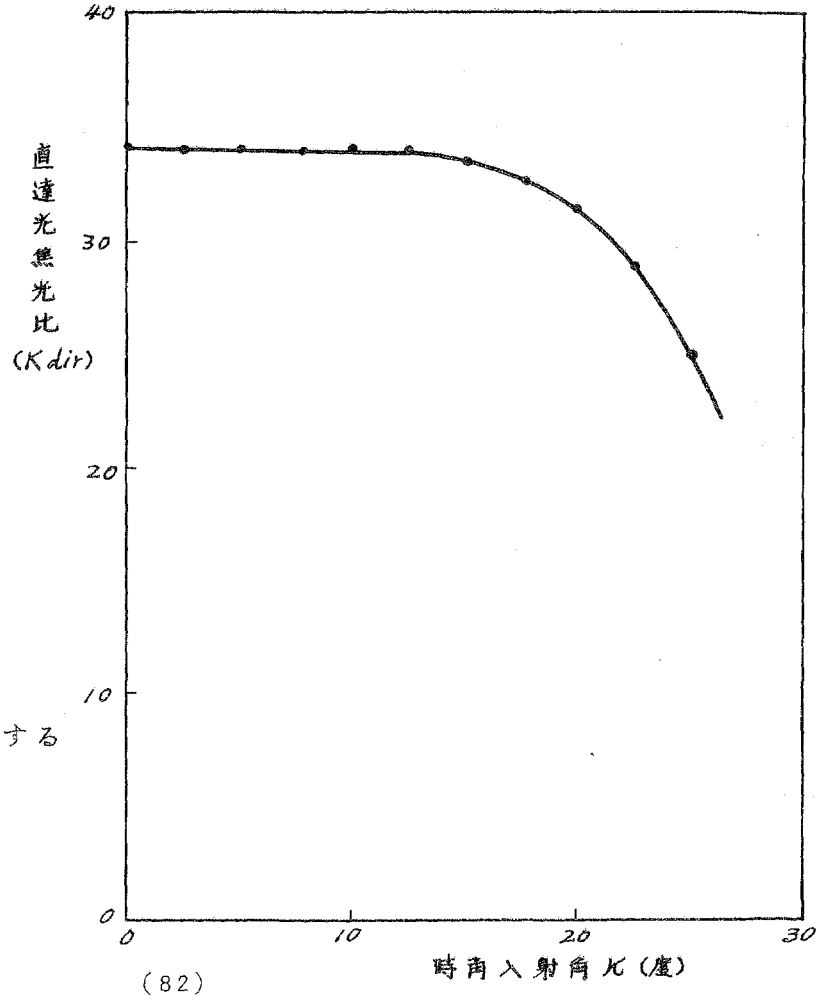


図2.32　時角入射角に対する
Kdir の変化

(3) 考　　察

以上の実験結果から樋型放物面鏡集光装置の特性をまとめて表2.5に示す。

表2.5　樋型放物面鏡集光装置の寸法と性能

構　　成	値	構　　成	値
焦線距離 (cm)	87	反射板1枚の大きさ	147cm×70cm
有効開口面積 (m^2)	1.80	素子部幅 (cm)	2.0
直達光集光比 (Kdir)	35	光学系効率 ηopt (%)	55
反射率 (%)	83		

樋型放物面鏡集光装置は線型フレネルレンズ集光装置と比較した場合、光学系効率，直達光集光比とも約2倍よい。この原因として反射型の場合屈折型のような色収差による入射光量の減少がないことおよび線型フレネルレンズでは金型の表面粗さに起因するプリズム面の表面粗さにより光が分散されるが放物面鏡として使用したメタクリル酸樹脂板では表面粗さが小さいことが考えられる。

また時角入射角に対する直達光集光比の減少が小さいのは線型フレネルレンズ集光装置のような屈折型の集光装置は、時角変化により焦線がレンズ寄りに移動するが、樋型放物面鏡集光装置のような反射型の集光装置では時角変化による焦線移動が起らないためである。しかし図2.33に示すように、毎日、南中時のEWV角θに合わせて受光面傾斜角を調整（$90°-\theta$）しても春分，秋分以外は、EWV角の時刻による変化（南中時からの）と同じだけ集光装置への入射角が斜めになるため、反射型集光装置でも集光比が減少する原因となる。

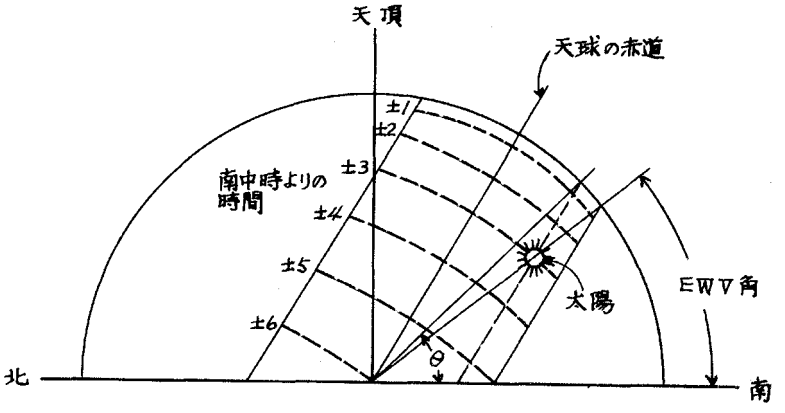


図2.33　E W V 角

このため一般的な反射型集光装置を東西軸配置にし時角追尾は行なわず南中時仰角調整のみ行なつた場合を考え、ＥＷＶ角の影響による年平均直達光集光比の減少を検討した。

今、図２.３４に示す３種類の赤緯入射角一直達光集光比特性をもつ反射型集光装置があると図２.３５に示すようにＥＷＶ角の影響により年平均直達光集光比が最高直達光集光比より減少する。

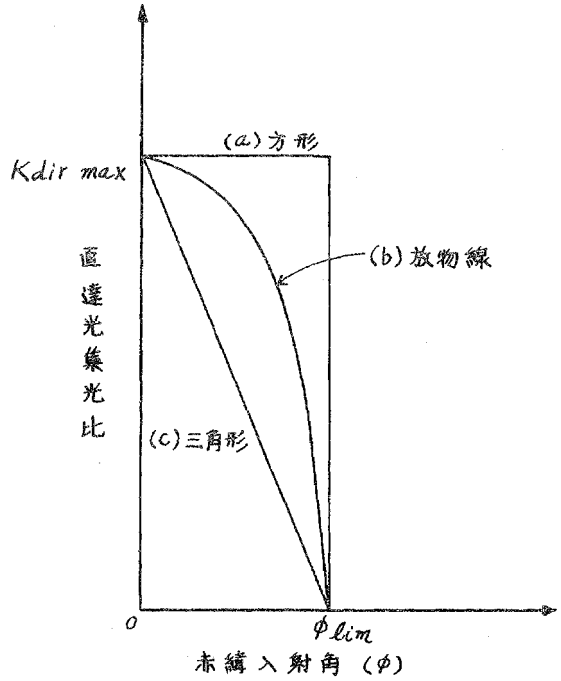


図２.３４　集光装置特性

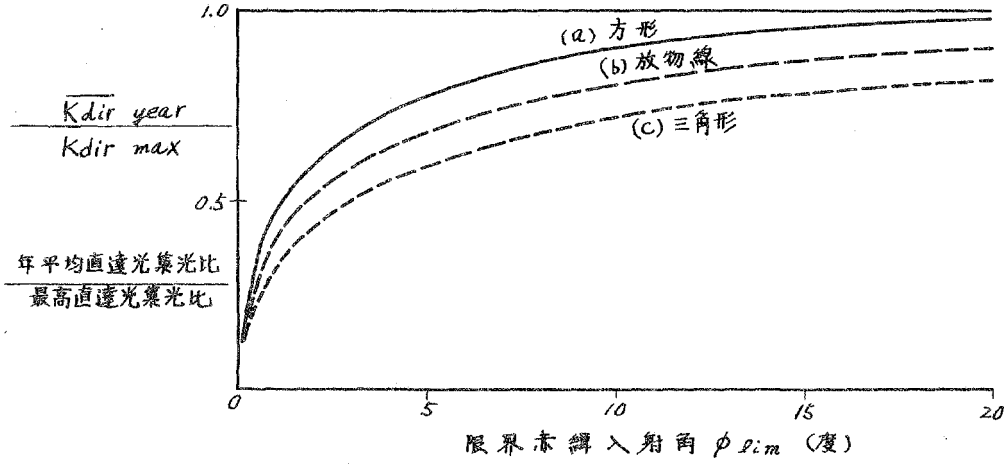


図２.３５　ＥＷＶ角による年平均直達光集光比の減少

この図２.３４と図２.３５よりたとえばKdirmax＝３５，φlim＝１°で(c)に示す三角形に近い特性をもつ反射型集光装置は年平均直達光集光比$\overline{K}$diryear＝３５×０.３３５＝１１.７ となり$\frac{1}{3}$と大きく減少する。このように時角変化による焦線移動のない反射型集光装置でさえ東西軸配置にし時角追尾を行なわず南中時仰角調整のみを行なつた場合、ＥＷＶ角の影響で年平均

直達光集光比は大きく減少する。これを防ぐには時角追尾を行なうか、またはKdirmax を減少させてもφlim を増加させる必要がある。

時角追尾を行なう場合には、線型フレネルレンズ集光装置でも樋型放物面鏡集光装置でも、ＥＷＶ角の影響が除かれ、光学系の効率を一定に保つことができる。

2.2.5 データ収録処理

試作集光装置のフィールドデータ収録、日射量データー収録とそれらの処理を目的に多点データー収録処理装置を（昭和５１年度専用機械装置NOVA 02/30）購入整備し稼動を開始した。このシステムのハード構成を図２.３６に示す。図２.３７に多点データ収録処理装置本体，図２.３８に多点データーＡＤ変換装置および電送装置を示す。

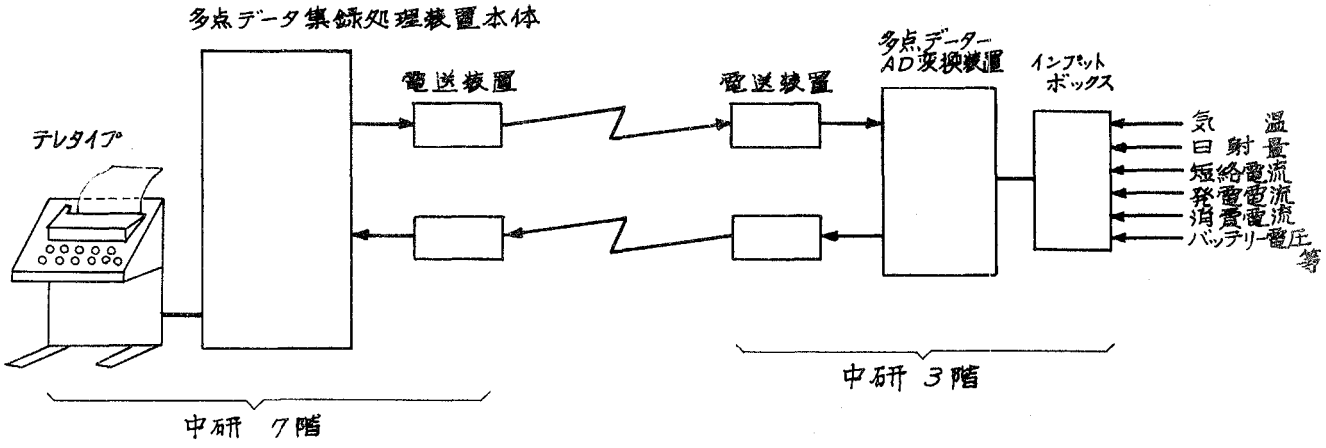


図２.３６　多点データ収録処理システムのハード構成

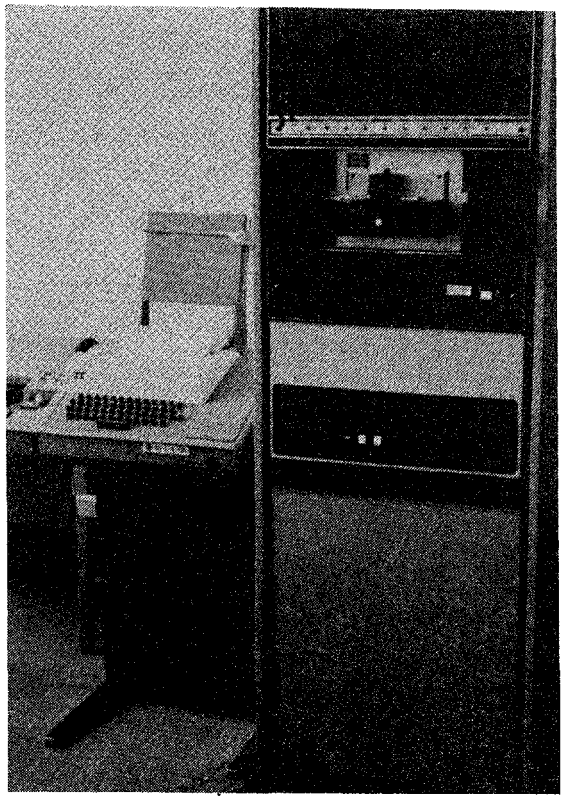


図２.３７　多点データー収録処理装置（システム本体）
←　（５１年度専用機械装置）

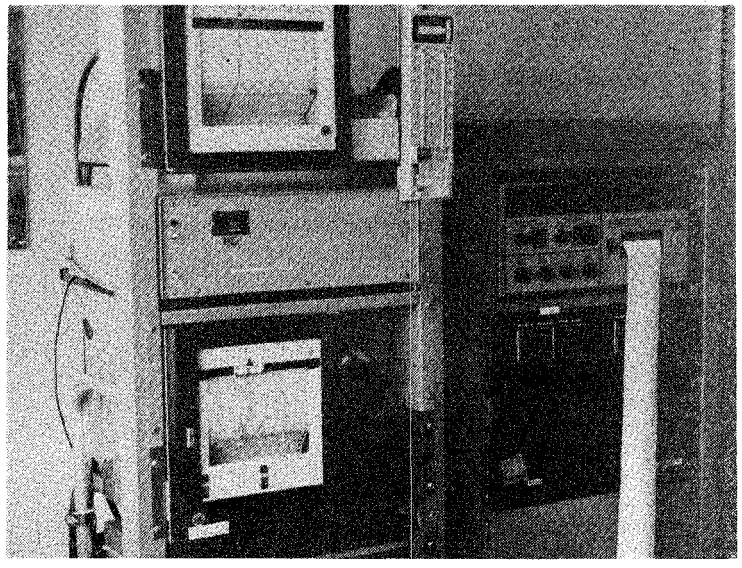


図２.３８　多点データーＡＤ変換装置および電送装置

試作集光装置および気象測定装置を中央研究所2階屋上に設置しており、各種信号を多心ケーブルで約60m離れた中央研究所3階室内の多点データーAD変換装置に導いている。中央研究所7階に設置した多点データー収録処理装置本体より電送装置を通して測定チャンネルを指定して多点データーAD変換装置に起動をかけ、信号をデイジタル化して電送装置を通して多点データ集録処理装置に送りかえす。1チャンネルの測定が終ると次のチャンネルに更新して測定することにより、各種の信号を任意の順序で収録することができる。これらのデータは磁気デイスクに書きこまれ、必要な時に磁気デイスクよりデータを読み出し、必要な処理をしてテレタイプに出力する。

このシステムのソフト構成を図2.39に示す。

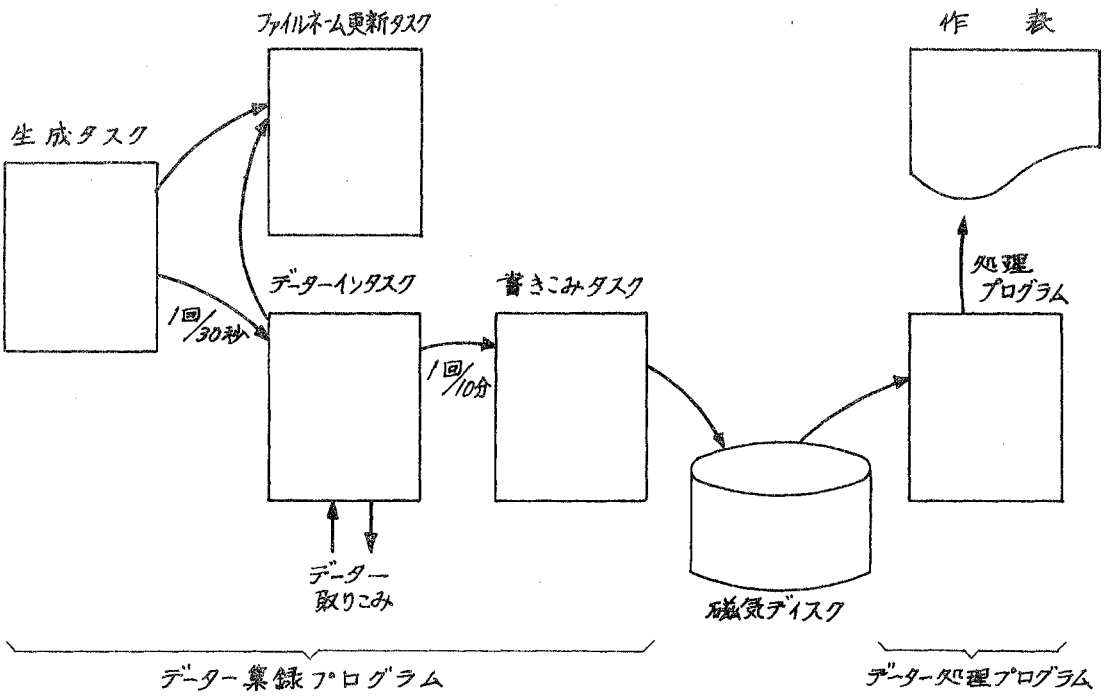


図2.39　多点データ収録処理システムのソフト構成

データー収録プログラムはマルチタスクとなつており、各タスクを生成するタスク，気象データおよび2台の集光装置のデーターを毎日各々別の磁気デイスクファイルに整理して入力するためのファイルネーム更新タスク、30秒に1回多点データーAD変換装置を起動してデーターを取りこみ積算するためのデータインタスク、および10分に1回値を変換して磁気デイスクに書きこむための書きこみタスクからなる。各々のタスクはオーバーレイとなつており、コアメモリーを削減している。データ処理プログラムは必要な時に磁気デイスクよりデーターを読み出し、必要な処理を行なつてテレタイプに出力する。その出力例を表2.6に示す。磁気デイスクは4.8MWの容量をもつており1年以上のデーターを記憶しておけるので、後で必要な時に必要な処理を行なうことができる。

このシステムの特長をあげると次のようになる。

(1) ２４時間データを連続して収録出来、積算もできる。

(2) 任意のチャンネルを指定してデータ収録出来る。

(3) 電送ライン等にノイズがのつても影響されずノイズに強い。

(4) 気象データおよび２台の集光装置のデータを毎日各々別の磁気ディスクファイルに整理しているため、後の処理がやりやすい。

(5) データ収録プログラム，データ処理プログラムともオーバーレイとなつているためコアメモリーが削減できる。

(6) 一年間のデータが記憶できるので、後で必要な場合に必要な処理ができる。

(7) デュアルプログラミングが可能で、多点データ収録処理をおこないながら同時に別の技術計算に使用できる。この装置はこのほか集光素子設計，集光装置入射光量シミュレーション，光学系の設計解析のための理論計算にも使用して有効活用されておりほゞ１００％の稼動率である。

表2.6　多点データ収録処理装置出力例

MONTH 3　　DAY 17　　YEAR 77

TIME	TEMP (C)	WIND SPEED (M/S)	WIND ORI.	DIR. RAD.	GLOBAL RADIATION HOL (MW/CM**2)	TRAK (MW/CM**2)	LAT (MW/CM**2)	10MIN INTEGRATION VAL DIR. RAD (MWH/CM**2)	GLOBAL RADIATION HOL (MWH/CM**2)	TRAK (MWH/CM**2)	LAT (MWH/CM**2)
				AIR MASS	DIR/ /GLO	TRANS MIS.					
8: 0	12.1	1.7	SSW	4.9	20.0	25.5	15.6	0.70	4.27	4.25	3.20
				1.97	0.192	0.186					
8:10	17.4	1.4	WSW	0.8	17.6	13.8	17.9	0.05	1.82	1.74	1.36
				1.86	0.058	0.064					
8:20	14.3	0.7	SSW	0.4	19.0	16.2	15.3	0.23	3.84	3.88	3.29
				1.76	0.025	0.037					
8:30	13.4	0.5	S	19.8	55.5	57.5	37.4	0.88	4.85	5.24	4.10
				1.68	0.344	0.320					
8:40	14.4	1.3	WSW	24.6	48.6	52.5	40.6	2.38	6.76	7.84	5.51
				1.61	0.469	0.347					
8:50	7.9	0.9	S	24.0	50.8	57.1	41.2	1.95	6.34	6.74	5.09
				1.54	0.420	0.327					
9: 0	20.0	2.2	SSE	3.2	33.2	34.5	32.9	2.92	7.77	8.30	6.62
				1.48	0.093	0.080					
9:10	19.3	1.5	ESE	47.7	78.1	84.6	67.4	3.75	8.67	9.42	7.47
				1.43	0.564	0.485					
9:20	20.6	1.4	ESE	12.4	50.7	47.7	39.2	2.25	7.98	7.92	6.86
				1.38	0.260	0.179					
9:30	10.3	1.0	SE	0.8	33.6	29.4	25.0	1.24	7.30	6.74	6.05
				1.34	0.027	0.022					
9:40	20.4	1.7	SSE	11.7	52.9	46.9	45.5	0.88	7.00	6.17	5.93
				1.31	0.249	0.154					
9:50	19.3	2.3	E	2.4	36.8	30.0	30.1	0.59	6.58	5.92	5.60
				1.27	0.080	0.042					
10: 0	12.4	0.6	SE	9.1	47.7	47.9	45.6	0.96	6.95	6.35	6.00
				1.24	0.190	0.115					
10:10	14.5	1.0	SE	34.3	72.6	74.2	60.7	3.22	9.56	9.52	8.39
				1.22	0.462	0.327					
10:20	21.1	1.6	S	18.4	60.3	56.2	56.2	5.26	11.91	11.76	10.77
				1.20	0.327	0.190					
10:30	11.8	0.3	SSE	24.0	67.8	68.1	58.9	2.73	9.72	9.33	8.61
				1.18	0.352	0.231					
10:40	14.3	0.9	S	10.2	52.5	52.5	43.5	1.99	9.45	8.95	8.31
				1.16	0.194	0.108					
10:50	19.0	1.6	S	1.0	38.4	31.3	31.3	1.03	7.75	7.12	6.76
				1.14	0.032	0.014					
11: 0	14.7	1.8	WSW	54.7	102.1	100.9	92.7	4.16	10.97	10.60	9.98
				1.13	0.542	0.452					
11:10	17.6	0.5	SW	15.6	60.7	53.6	56.0	4.28	11.66	11.26	10.73
				1.12	0.291	0.147					
11:20	22.2	1.7	SSW	11.6	55.1	50.1	47.3	2.32	9.70	9.26	9.03
				1.11	0.232	0.111					
11:30	11.5	1.0	WSW	27.9	76.3	69.6	68.0	1.96	9.25	8.44	8.24
				1.11	0.401	0.242					
11:40	18.4	0.6	W	48.6	89.7	86.5	80.2	4.78	11.68	11.39	11.12
				1.10	0.562	0.398					
11:50	13.6	1.2	SW	0.6	35.4	32.4	33.6	4.24	10.86	10.35	10.13
				1.10	0.019	0.007					
12: 0	11.5	0.6	WSW	40.0	82.5	78.7	76.5	3.01	9.87	9.25	9.13
				1.10	0.508	0.332					

2.2.6 結　論

線型フレネルレンズ・樋型平面鏡複合集光装置の直達光集光比は１８.４、光学系効率は４２.３％であった。複合型にすることにより太陽の時角変化およびＥＷＶ角の時刻変化に対してある程度の効果があるが限界があり、簡易追尾が必要であることがわかった。

線型フレネルレンズ集光装置の直達光集光比は１８、光学系効率は２６.９％であった。光学系効率がわるいためその原因としてレンズの透過率、太陽視半径、レンズの製作誤差および色収差について検討した。その結果レンズの製作誤差および色収差により光学系効率が大きく減少することがわかった。またレンズの製作誤差および色収差ともレンズの中心より離れた部分ほど影響が大きく光学系効率を減少させずに口径を大きくして集光比をあげることは難かしい。

樋型放物面鏡集光装置の直達光集光比は３５、光学系効率は５５％であり、線型フレネルレンズ集光装置と比較して約２倍よいことがわかった。

時角入射角に対する焦線移動のない反射型集光装置でも、ＥＷＶ角の影響により年平均直達光集光比は大きく減少することがわかった。一方、多点データ収録処理装置の稼動により気象因子と集光装置特性、あるいは素子特性等のデータ間の相関関係を有機的に評価することが可能となり、又、素子や集光装置等の理論計算や設計も迅速に行え、今後の研究に資するところは甚大である。

2.2.7 今後の課題

本年度作製した集光装置のフィールド試験を継続してゆく。また、光学系効率および集光比のよい集光装置の検討をひきつづき行なう予定である。

本年度は集光装置の基礎データを得ることを第一の目的として種々の変更が可能なように集光装置を設計し実験したが、今後は経済性を重視して設計，試作，実験を行なう方針である。

2.3 構成方法の検討

昭和５０年度は主に冷却方法について検討を行ない、自然風冷のフィンについて設計方法を確立し実測によって冷却能力を確認した。本年度は、追尾系についても設計試作を行った。試作した追尾装置はＡＣシンクロナスモータによる連続追尾とＤＣモータによる間次追尾の二種で、追尾に必要な電力測定も行った。

更に、冷却方法については、５０年度の結果を用いてモジュールを作製し、実動時の諸データを収集した。

2.3.1 追尾方法の検討

(1) 概　　要

高密度太陽光のもとで作動する集光型太陽電池において、高集光度を長時間維持するには追尾が必要となる。

一般的な追尾方法としては、モータを用いることが考えられるが、本年度はモータによる追尾のうち、前述の如くシンクロナスモータによる連続追尾と、直流モータによる間欠追尾の二種の装置を作製した。一般に前者の方法は、モータの回転速度が負荷に対して変らないので追尾の機構は簡単になるが、モータの効率が低い。逆に後者の場合は、モータの回転速度が負荷により変化するため、太陽を正確に追尾させるには何らかの制御が必要となり、追尾機構は複雑となるが、モータの効率はかなり高いと言える。そこで我々は追尾機構を検討するとともに、モータの消費電力を測定し、追尾方法の評価を行なった。

(2) 実験方法

(a) 追尾装置の設計・製作

概要で述べたように、本実験の目的は追尾機構の検討とモータの消費電力の評価であり、このため追尾装置の設計を以下の要素に分けて検討し、試作装置を作製した。

イ) 風荷重の検討

集光装置の光学系は 1.5 m × 1.5 m のフレネルレンズおよびパラボラ反射鏡であり、これらの面に当たる風の影響をまず検討してみる。図2.40に示すように、軸を中心として両側面に風が均等に当たる場合はトルクは生じないが、今風の不均一等により片側だけに風が当たった場合、一般に風圧力P（Kg/m^2）は建築基準法施行令によると次のように求められる。

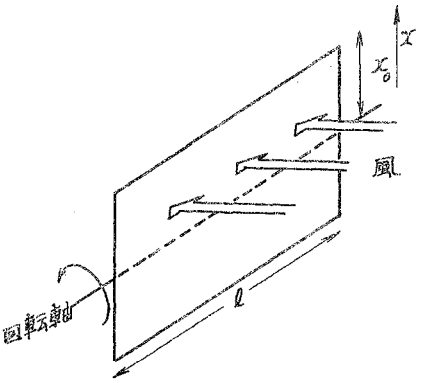


図2.40　風荷重の影響

$$P = C \cdot q \qquad (2.53)$$

$$q = 0.058\ V^2 \sqrt{h/15} \qquad (2.54)$$

ここでqは風速度圧（Kg/m^2），Vは風速（m／sec），hは地上よりの高さ(m)，Cは風力係数である。Cは、本集光装置の様な場合は1.2の値と考えられる。

今hを3 m、Vは集光器の回転軸を中心として両側に当たる風の風速の差をとり、最大の場合として30 m／secとしたときに生ずる風圧力Pは 2.53式，2.54式より

２３.３Kg／m^2となる。トルクＴｃは2.５５式で表される。

$$Tc = \int_0^{x_0} X \cdot P \cdot \ell \, dx \qquad (2.55)$$

図2.４０の装置ではx_0 = 0.75(m)，ℓ = 1.5(m)およびP = ２３.３（Kg／m^2）であるのでTcは約１１.８Kg・mとなる。

実際にこの様な場合は、定常的には考えにくいが、瞬間的には起こり得るので、必要なモータ出力の計算の基礎とした。

ロ）減速機の検討

一般にモータの回転数は毎分数千回転であり、これを一日一回転に減速するには、数百万分の一の減速比の減速機が必要である。平歯車は、効率は極めてよい（0.９５～0.９９）が減速比が小さい（１～１／１０）ため多段となり、全体として効率が低下し、また装置の容積が増大する。ウォームギヤは、減速比は大きい（１/数十～１/数百）が効率が低い（0.４～0.５）。一方減速機では、数百万分の一という大きな減速比と良好な伝達効率を必要とする以外に、集光装置のバックラッシュや逆回転を止めることなどが必要であり、これらを合わせて検討し次の様な構成とした。

i）モータギャヘッド

シンクロナスモータの場合、ギヤヘッドでの出力軸の回転数が４rpmとなるように減速比を選んだ。直流モータの場合は定格時において、シンクロナスモータの場合の１０倍程度となるようギヤヘッドを選んだ。なおこれらは共に平歯車で構成されている。

ii）ウォーム減速機

モータの回転に対して逆方向の回転の力を防止するために用いる。（減速比１/６０）

iii）ハーモニックドライブ減速機

小容積で大きな減速比（１／９８）と良好な効率（約0.９）を得る目的で用いる。なおバックラッシュも非常に小さい利点もある。

ハ）モータの検討

モータの選択については、回転数の一定なものと、モータ効率のよいものの二種を考えた。前者としてはシンクロナスモータやパルスモータがあるが、消費電力を考慮して制御回路を必要としないシンクロナスモータを選んだ。後者には、直流モータ，誘導モータなどがあるが、太陽電池が直流電源であることを考慮して直流モータを選んだ。

図2.41は、市販のシンクロナスモータおよび直流モータについて、モータの入力と効率の関係を比較したものである。

これからわかるようにシンクロナスモータは、直流モータにくらべ極めて効率が低い。しかし後述する様に追尾機構としては、シンクロナスモータの方が簡単で信頼性に富む。

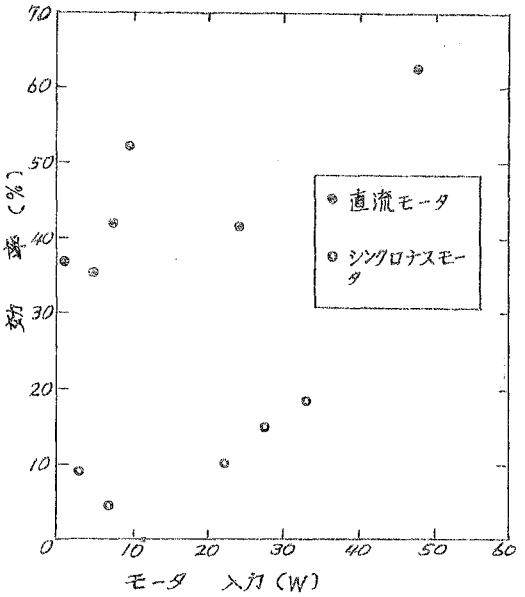


図2.41　市販モータ入力と効率の関係

次にモータの必要な出力を見積ってみる。減速機の効率ηを約0.3（ギヤヘッド0.8，ウォーム減速機0.4，ハーモニックドライブ減速機0.9）とし、集光装置にかかる風荷重の最大をTc＝12 Kg－m、そして安全率αを3倍とすると、モータの出力P_Mは、

$$P_M = \frac{\alpha}{\eta} \times 1.027 \times \frac{1}{24 \times 60} \times Tc \qquad (2.56)$$

となり約0.09W必要となる。

実際に使用したモータの定格を次に示す。

シンクロナスモータ　：電圧100VAC，入力3W，出力約0.3W，ギヤヘッド出力軸回転数4rpm。

直流モータ　：電圧6VDC，入力4.2W，出力約1.5W，ギヤヘッド出力軸回転数45rpm。

なお直流モータについて出力の大きいものを選んだのは、モータギャヘッドの出力軸の回転数がシンクロナスモータにくらべ10倍以上大きいためである。

ニ）追尾の機構

シンクロナスモータの場合は、集光装置の回転軸が1日1回転するように減速比を選べばよいので機構は非常に簡単である。ただ、一方向にのみ回転を続けると信号ケーブル等がからまることになり、180°回転後、逆転させる方法を採っている。追尾機構を図2.42に示す。

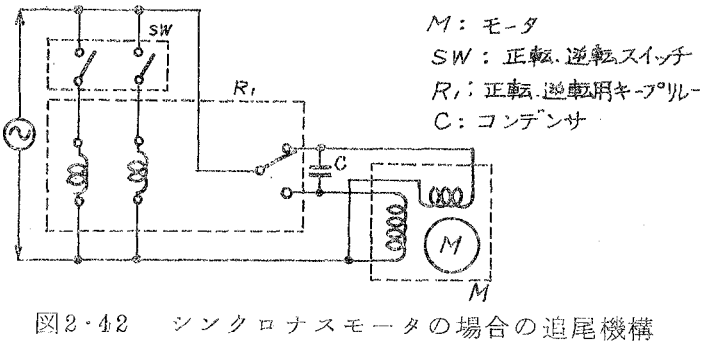
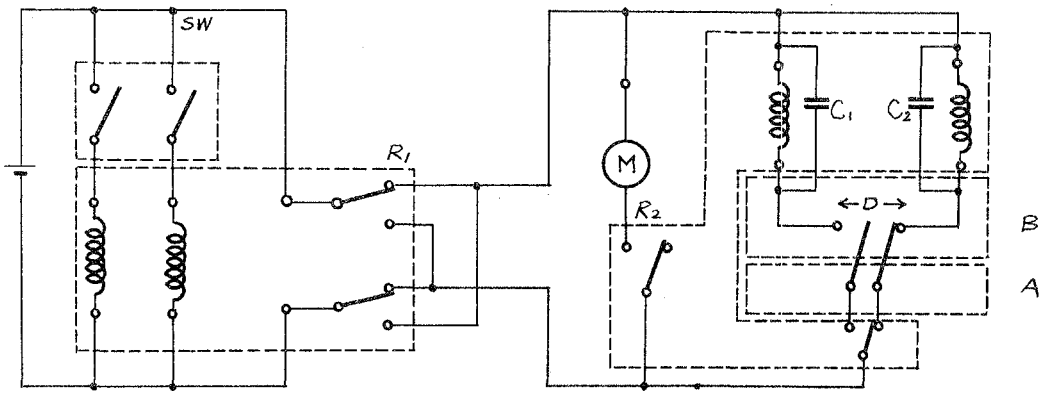


図2・42　シンクロナスモータの場合の追尾機構

直流モーターの場合は、上記の逆転に加えて、間欠追尾に必

要なモータのON－OFF操作が必要となる。追尾機構を図2.43に示す。この場合には、追尾モータ以外に位置制御用のモータ（1日1回転のシンクロナスモータ）を必要とするが、これに要する電力は複数台の集光装置を並列駆動させることにより1台当りについては無視できると考えられるため考慮に入れていない。



M ：	直流モータ	A ：	集光装置の回転軸に接続している
SW ：	正転．逆転スィッチ	B ：	制御用モータにより1日1回転する
R_1 ：	正転．逆転用キープリレー	C_1C_2：	キープリレーR_2のチャタリングを防ぐ
R_2 ：	モータスィッチ用キープリレー	D ：	追尾間隔を決定する

図2.43　直流モータの場合の追尾機構

追尾は次のような間欠方式で行なわれる。即ち上記位置制御用モータで位置を設定し、これを直流モータで追尾し、追尾完了すれば止まり、またある程度の差（図2.43中のDで決まる間隔）が開けば追尾するというものである。本実験では約5分間の追尾間隔を直流モータがその1／10程度の約20秒で追尾するようにした。夜間の逆転時は連続運転し逆転に要する時間は約1時間である。

ホ）追尾装置

追尾装置の内部を図2.44に示す。図には直流モータが設定してあるが、これをシンクロナスモータで駆動するには、モータとリレーを交換すれば良い構造とした。

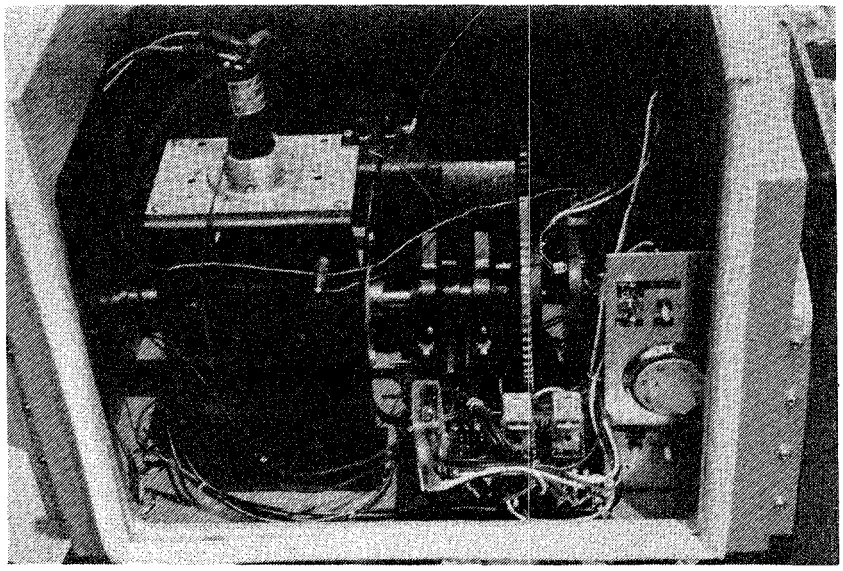


図2.44　追尾装置の内部

(b)　測定装置の製作

本実験に用いるシンクロナスモータおよび直流モータの入力は、それぞれＡＣ１００Ｖで２０～３０ｍＡ，ＤＣ６Ｖで５０ｍＡ～３Ａ（負荷により変動する）となり電圧，電流とも広範囲である。これらの消費電力を精度よく測定し、かつ電力値と積算電力値の双方を同時測定できる装置は、市販にはないため、これを満たす装置を作製し、測定に用いた。

回路の基本構成を図２.４５に示す。

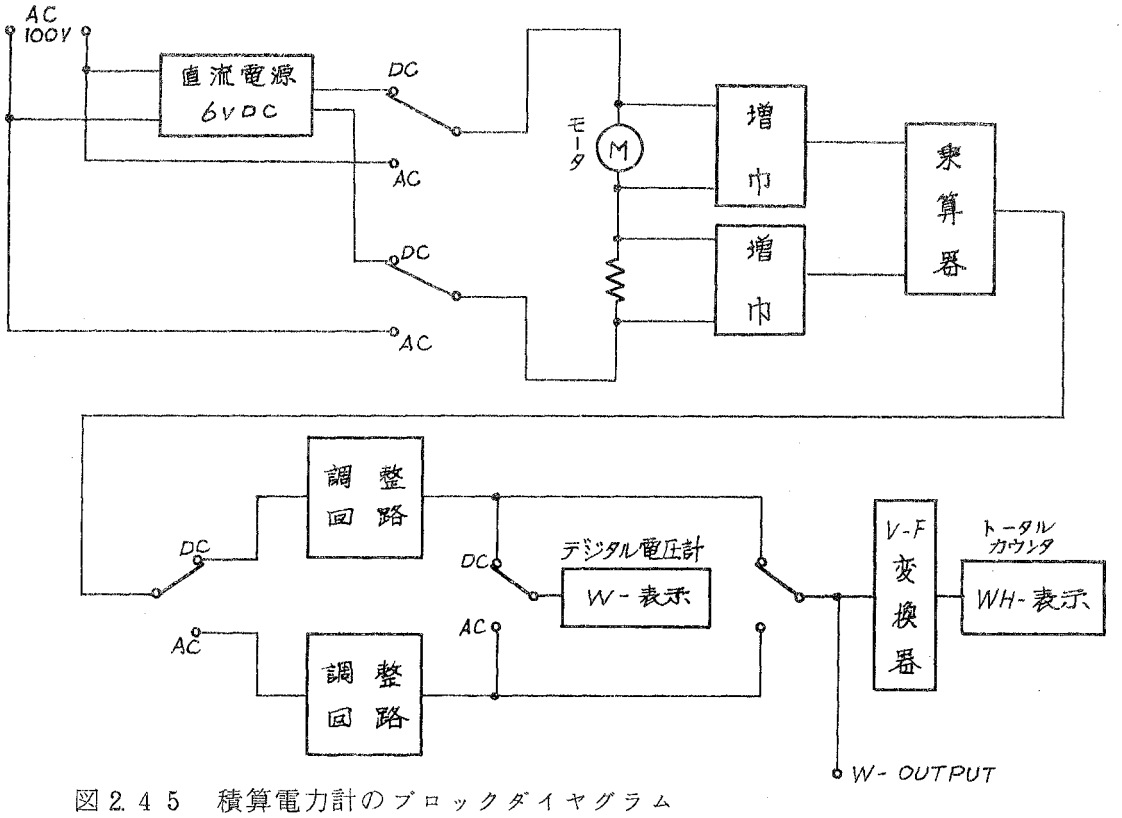
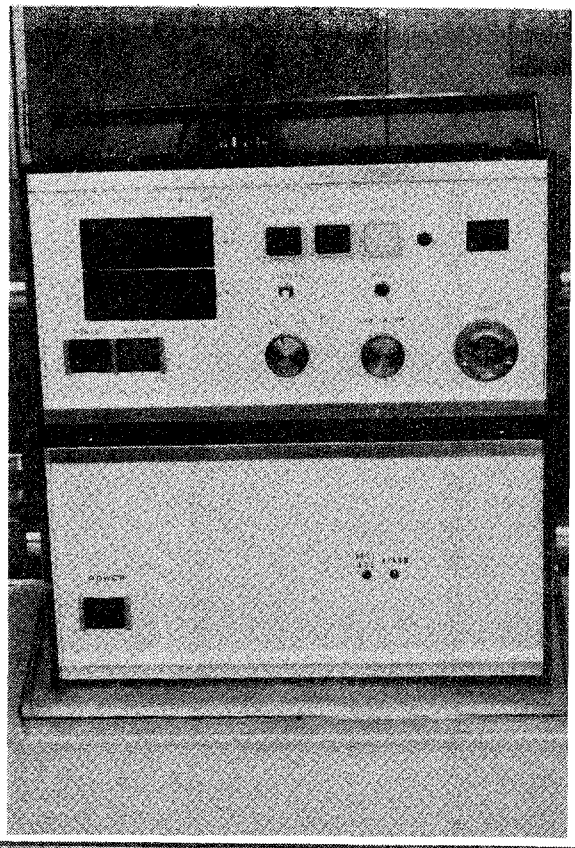


図２.４５　積算電力計のブロックダイヤグラム

作製した測定装置の校正は、一定の負荷に対する電力をこの装置で測定すると同時に、二台のデジタルマルチメータで電流，電圧を測定し、乗算したものと比較して行なった。精度は直流の場合で±０.５％以内、交流の場合で±２％程度であった。なお装置は電源部と測定部に分かれており、それぞれの外観および内部を図２.４６～２.４８に示す。



① 電力測定部

② 電　源　部

図 2.4 6　測定装置の外観

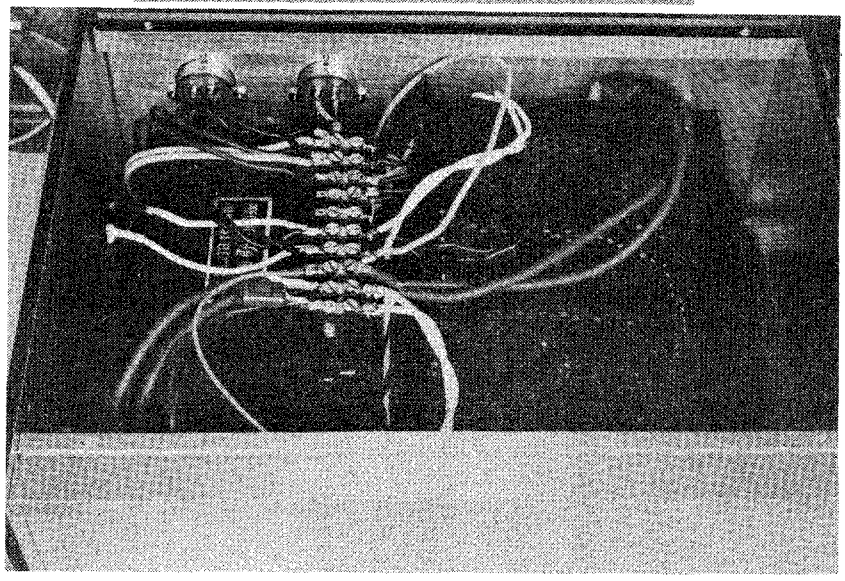


図 2.4 7　電源部内部

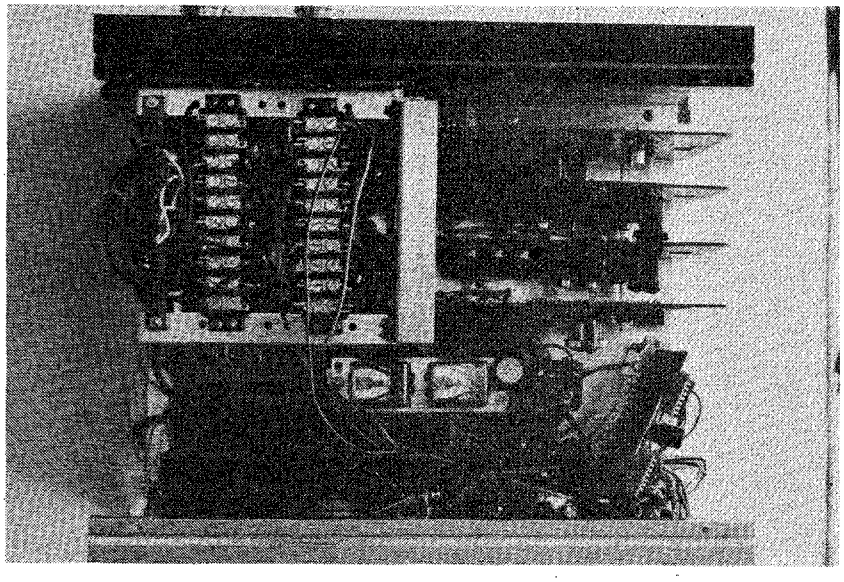


図 2.4 8　測定部内部

(c) 測定方法

イ) 追尾装置の負荷の影響

追尾装置の基本的な負荷によるモータの消費電力への影響を次の様に測定し検討した。すなわちモータ単独(ただしギヤヘッドを含む)にくらべて、ウォーム減速機を接続することによりどの程度消費電力に影響するか、また平常運転時はどうか、更に直流モータの場合には、集光装置の片側におもりをつけ5Kg－mおよび10Kg－mのトルクを加えた状態ではどうかということを、各段階でモータ消費電力を測定することにより検討した。測定は各々3分間でその間の積算電力値を読みとりまた電力値をアナログ記録した。

ロ) 風荷重の影響

前記(2).(a).イ) で検討した風荷重の影響については、シンクロナスモータ、直流モータの双方について、3時間又は30分間風速の変化の激しい時に、集光装置の回転に要するモータの電力値と風速を対比して測定した。

ハ) 追尾に要するエネルギー

集光装置の平常運転におけるモータ消費電力を、積算電力計で積算値を読みとりまた電力値をレコーダーに記録した。

(3) 実験結果

(a) 追尾装置の負荷

図2.49は追尾装置の負荷を変えた時のシンクロナスモータの消費電力の変化であり図2.50は同様に直流モータの場合である。

図2.49, 2.50 共に(a)はモータ単独(ただしギヤヘッドを含む)の場合であり、(b)はこれにウォーム減速機を接続した場合、また(c)は集光装置全体を定常動作した場合である。

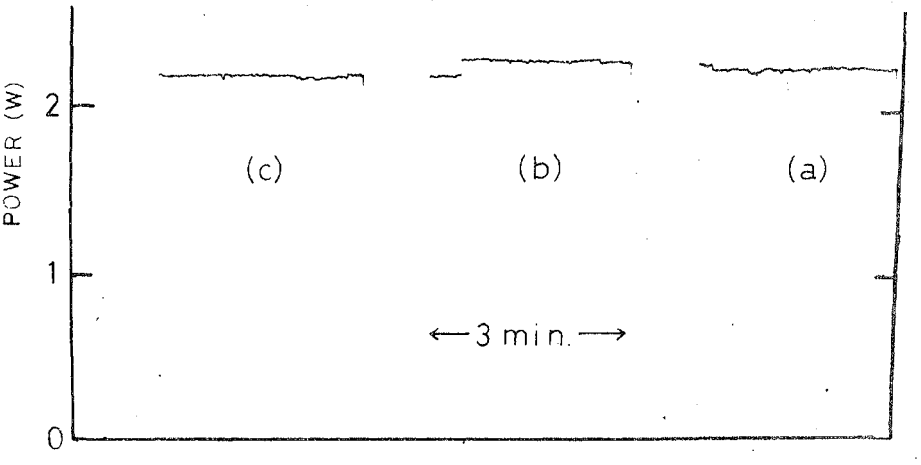


図2.49 シンクロナスモータの場合

又、図2.50の直流モータの場合の(d)(e)は集光装置に5Kg－mおよび10Kg－mのトルクを加えた場合である。

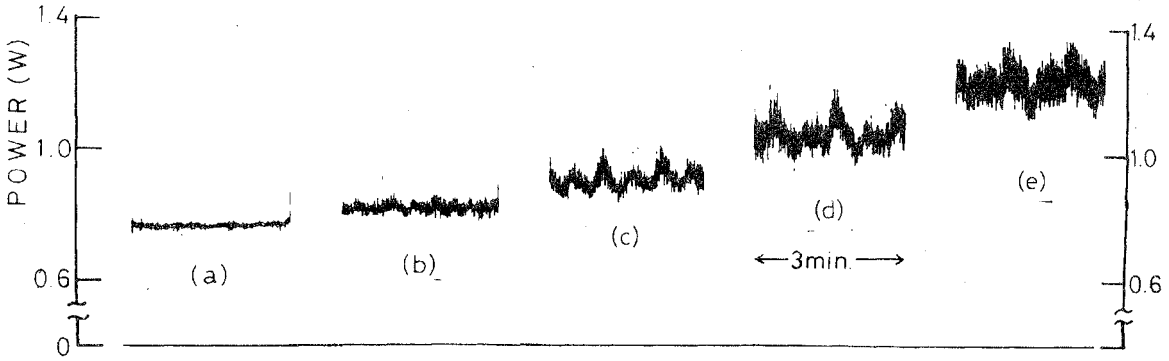


図2.50　直流モータの場合

表2.7　積算電力値

	シンクロナスモータ		直流モータ	
	積算電力 (WH)	電力 (W)	積算電力 (WH)	電力 (W)
(a)	0.115	2.30	0.049	0.98
(b)	0.116	2.32	0.053	1.06
(c)	0.113	2.26	0.059	1.18
(d)			0.068	1.36
(e)			0.079	1.58

また表2.7には各々の場合の積算電力値およびその値を電力に換算した値をまとめてある。これらの結果よりシンクロナスモータによる駆動では、多少の負荷変動によっても殆んど消費電力は変らずほぼ2.3Wであるが、直流モータ駆動では、負荷に応じて消費電力は変化し通常の動作時で1.2W程度であることが確認された。

(b) 風荷重の影響

図2.51は集光装置の受ける風の速度と追尾用シンクロナスモータの消費電力の関係であり、図2.52は同様に直流モータの場合である。

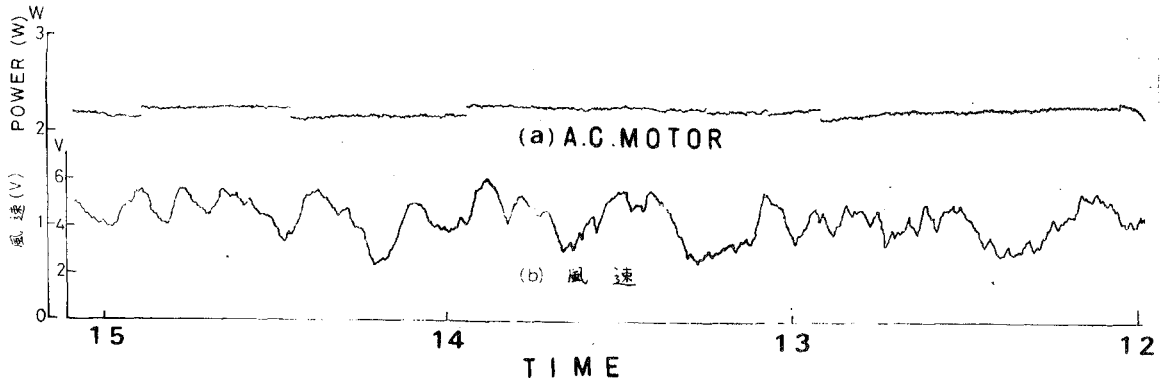


図2.51　シンクロナスモータの消費電力と風速の関係

風速の変化は約２ｍ／ｓｅｃから６ｍ／ｓｅｃであり、この様な範囲の風速では、両モータへの消費電力に殆んど影響を及ぼさないと言える。

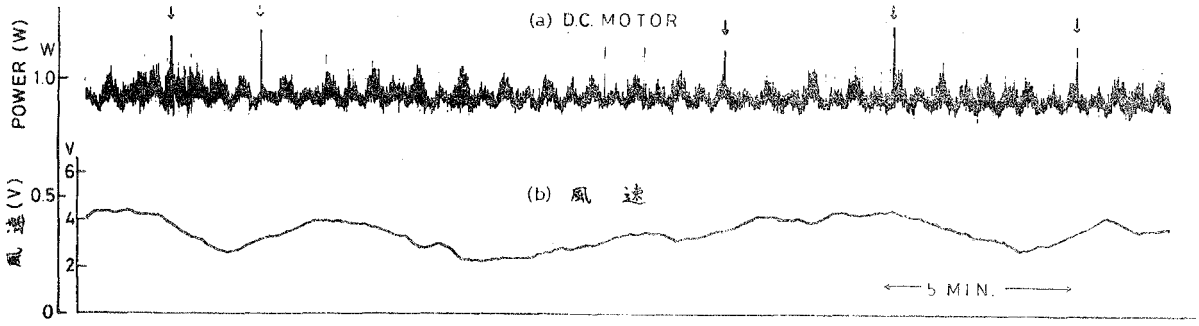


図２.５２　直流モータの消費電力と風速の関係

ただ瞬間的な強風により集光装置が若干軸を中心に揺れるが、その際に生じるトルクにより負荷が極めて増大し、直流モータの場合にはそれに対応して消費電力が増加する。

図２.５２内の矢印の部分がこれに相当する。

(c)　追尾に要するエネルギー

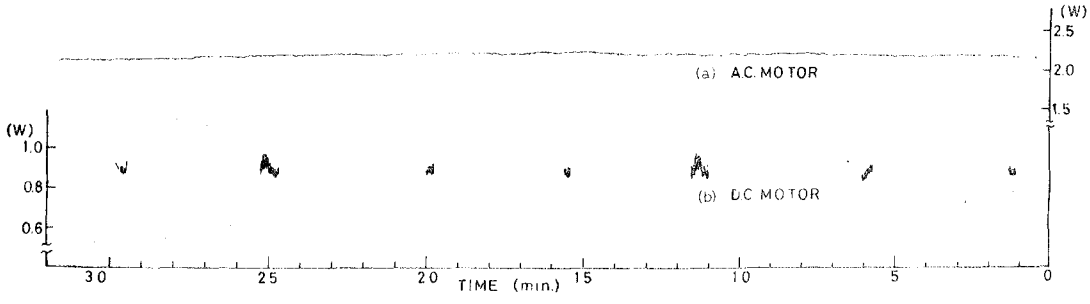


図２.５３　追尾に要するエネルギー

図２.５３は、集光装置をシンクロナスモータおよび直流モータのそれぞれで平常運転した時の消費電力を表わしたものである。記録の都合上いずれも３０分間の測定であるが、この間の積算電力値は(a)のシンクロナスモータの場合には１.１９ＷＨ、(b)の直流モータの場合は０.０４７ＷＨであった。また直流モータの場合、間欠追尾なのでモータが実際に動作した時間は３０分間のうち１４４秒間であった。つまり平均して、約５分間に一度２０秒間程度動作するだけである。

この結果より、本装置において、直流モータ駆動の場合はシンクロナスモータの場合にくらべ約１／２４の消費電力ですみ、平均の消費電力は０.０９４Ｗ程度となる。これは、用いた集光型太陽電池装置のピーク出力の $\frac{1}{700}$ 程度である。

(4)　考　　察

シンクロナスモータと直流モータの両駆動方法を比較すると、実験結果からも明らかな様に、前者の方がはるかに消費電力が大きい。これは、モータ効率の著しい差に起因している

が、それのみならずシンクロナスモータが負荷に対して消費電力があまり変らないという点も考慮する必要がある。つまり、シンクロナスモータの場合には、最大限の負荷に対しても集光装置の回転が維持できる入力を常時加えざるを得ないので、経済性に乏しい。

一方直流モータによる間欠追尾の問題点は、現状では、小型直流モータが高価であり、特に刷子モータの場合、寿命が連続定格運転で２０００時間程度であること、追尾機構の複雑化とそれに伴うイニシャルコストの増大が予想されることである。これについては、集光装置を多数台並列運転させることにより、１台当りのコストアップを押さえる等の対策が必要である。

なお、本実験の場合の追尾間隔５分は太陽の時角にして１.２５度にあたり、本装置の様に太陽電池素子を東西に並べる方式においては太陽電池の出力に殆んど影響を及ぼさない。しかし、素子を南北に並べる場合は、追尾間隔は１～２分あるいはそれ以内に短縮する必要がある。

(5) 結　　論

本年度作製した光学系の大きさが１.５ m × １.５ m 程度の集光型太陽電池装置の追尾に必要なエネルギーは、直流モータを用い間欠追尾した場合、１日当り２.２６ＷＨ程度となり、これは平均すると入力０.０９４Ｗのモータを連続運転させるエネルギーと等しく、この意味で本方法は集光型太陽電池のピーク出力の数百分の一以下のエネルギーで追尾が可能であると言える。

シンクロナスモータによる追尾は機構は簡単であるが、追尾エネルギーは、直流モータによる間欠追尾にくらべ２０倍以上必要である。

また、日常経験する程度の風速の風では、追尾エネルギーに殆んど影響を与えない。

(6) 今後の課題

本年度は追尾方法の一つとして、モータによる追尾をシンクロナスモータによる連続追尾と、直流モータによる間欠追尾との二種に分けて検討し、上記の様な結論を得たが、これらはいわゆる追尾装置の基本データである。今後は、長期間にわたっての継続データの取得、及び複数台の集光装置を並列駆動させるシステムの検討などを予定している。

2.3.2 集光型太陽電池モジュールのフイールド試験

(1) 概　　要

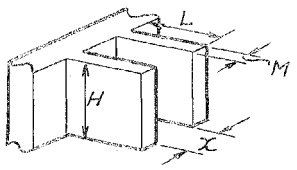
昭和５０年度は冷却フィンの最適構造並びに放熱特性を検討し、設計方法を確立した。あわせて、集光型太陽電池モジュールとして適切な実装構造も検討した。本年度はこれらを参考にしてモジュールを作製しフイールド試験を行なった。

(2) 集光型太陽電池モジュールの作製

(a) 冷却フインの選定

実際にモジュールを作製するに当り現状では最適構造の冷却フインを入手するのは困難である。したがって既存の冷却フインで目的に叶うものを探し採用した。表2.8に採用した冷却フインの放熱特性を示す。ただし表に示した値は理論計算により求めたものであり外気温（$\theta\infty$）は27℃、無風状態と仮定した。

表2.8 冷却フインの放熱特性

素子への入射エネルギー Q（W／cm^2）	素子温度 θc（℃）	フインの寸法（cm）
0.7	50	
1.5	70	
2.4	90	
2.9	100	$L=6.8$
3.4	110	$X=1.2,\quad M=0.5,\quad H=7.0$

計算のやり方、諸物性値などは昭和50年度検討内容と何ら変わるところはない。

(b) モジュールの作製

実装構造は昭和50年度報告内容と同様、受光面を耐熱性ガラスで保護し、熱伝導性樹脂にて冷却フインに埋め込んでいる。1モジュールには、2cm×2cmの集光型太陽電池素子が8枚直列配線され封入してあり、受光部への入射エネルギー量をモニターするモジュールを除き、8枚の素子おのおのにバイパスダイオード回路を設けた。一方素子温度をモニターするモジュールでは、素子裏面へ半田付けした熱電対を実装構造を変更することなく外部へ導くよう工夫した。図2.54に外観を示す。

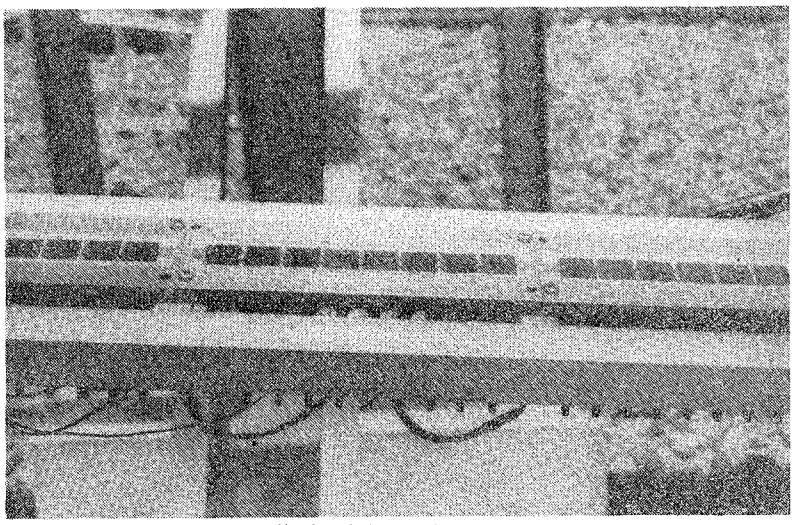


図2.54 集光型太陽電池モジュール

(c) 測定方法

温度測定は全て、銅・コンスタンタン熱電対で行ない、また、素子への入射エネルギー量の測定は、モニタ用モジュールへ逆バイアスを印加しその時の光発生電流の値を換算して行なった。なお、気象データも含め、これらのデータの測定は、データ収録用として整備した多芯通信ケーブルを利用して行なったものである。

(2) 試験結果

図2.55～図2.59にフイールド試験の代表例を示す。いずれも同じ日のデータである。図2.55で、8時頃の乱れは集光装置及び直達日射計の方位を調整したために起ったものである。

図2.55および図2.56から、この日の直達光比(α)は12時頃で0.75、又、素子への入射エネルギー量の最大値は、樋型放物面鏡、線型フレネルレンズ共12時頃でそれぞれ、2.27 W／cm^2、1.32 W／cm^2 である。

図2.57～図2.59には、気温、素子温度等、測定を実施している温度のデータをまとめて記録してある。図中素子温度に(1)、(2)とあるのはそれぞれ、モジュールの一番端、中央の素子温度を表わしており、フイン根元温度とは(2)の素子の真下のフイン根元を測定したものである。(1)と(2)で温度差が生じるのは、モジュールの構造に起因すると考えられる。尚、この日の最高素子温度は樋型放物面鏡集光装置の場合77℃、また線型フレネルレンズ集光装置の場合64℃であった。

(3) 考　　察

フイールド試験の結果から、樋型放物面鏡の方の光発生電流と素子温度(1)にある規則性を持ったバラつきが見られるが、この原因として追尾方法、放物面鏡の精度、風による集光装置のブレなどが考えられる。追尾は直流モータを約5分に1度、20秒間程度動作させて行なっている。しかし、本来樋型放物面鏡集光装置は、前節で見たように、時角入射角の変化に対してはかなりの安定度を持っていた。にもかかわらず入射エネルギー量が変化し、このため光発生電流並びに素子温度がバラつくのは、反射板の曲率が支持棒のたわみや反射板自身の熱膨張などによるゆがみで部分的に狂っているからだと考えられる。

一方、規則性を持っている原因は、今回の試験結果からだけでは正確につかむことはできず、追尾方法、放物面鏡の精度、風による集光装置のブレなどが複合して作用した結果と思われる。

温度の試験結果から、樋型放物面鏡集光装置の方の素子温度(1)を除き、他は気温の変化とほぼ同様な傾向を示している。素子温度(1)が気温に関係なく特異な変化をしている原因は、素子とフインの間の熱抵抗が他より高く、このため入射エネルギー量の増減の影響をより多

く受けているからと考えられる。全般に今回作製したモジュールは素子とフィン間の熱伝導性樹脂層が厚いため熱抵抗が高く、満足のいく放熱特性を示していない。たとえば今実験の日中平均風速5 m／secの風では、両集光装置ともせいぜい40℃位の素子温度であろうと理論計算から予想したが、結果は60～70℃とかなり高い値となった。

(4) 結　　論

素子への入射エネルギー量の変化は予想していたほど風の影響を受けていない反面、特に樋型放物面鏡の方に関して反射板の曲率の狂いにより若干の影響を受けていることが判った。しかし、素子とフィンとの間の熱抵抗が大きく放熱特性が予想以上に悪かった。

(5) 今後の課題

素子とフィン間の熱抵抗を極力なくすような構造、作製方法などを再検討する必要がある。

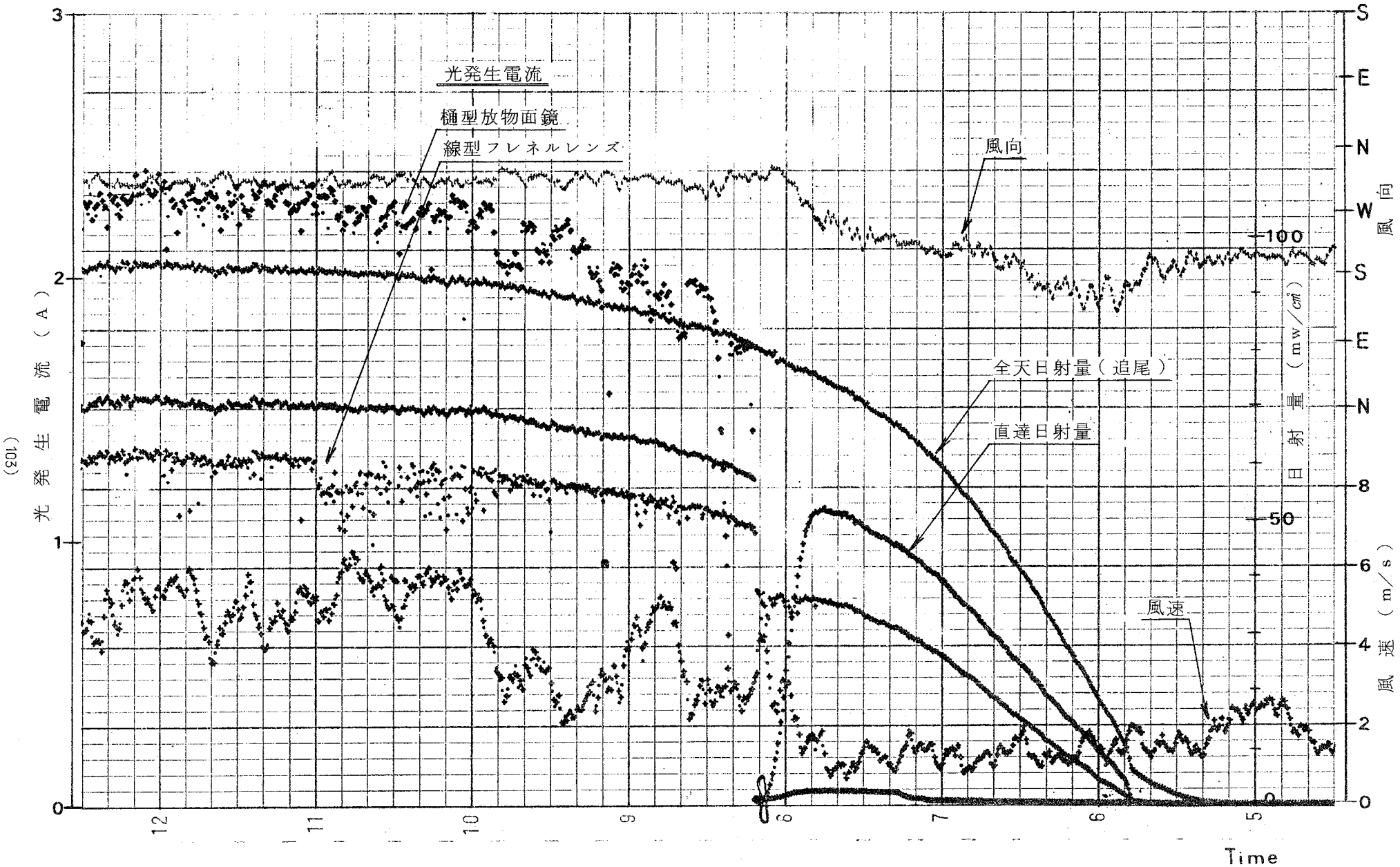


図2·55　フィールド試験(1)

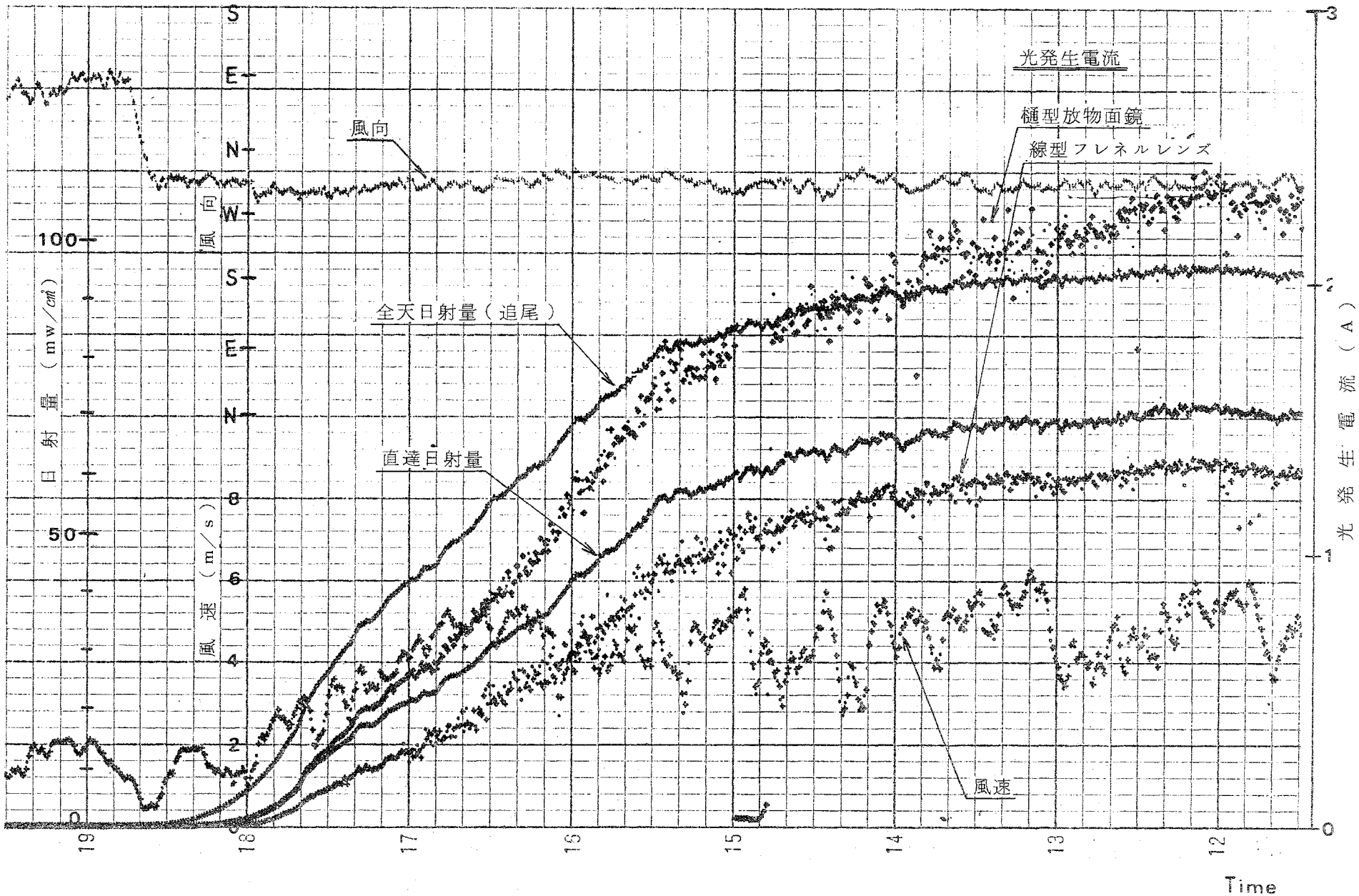


図2・56　フィールド試験(2)

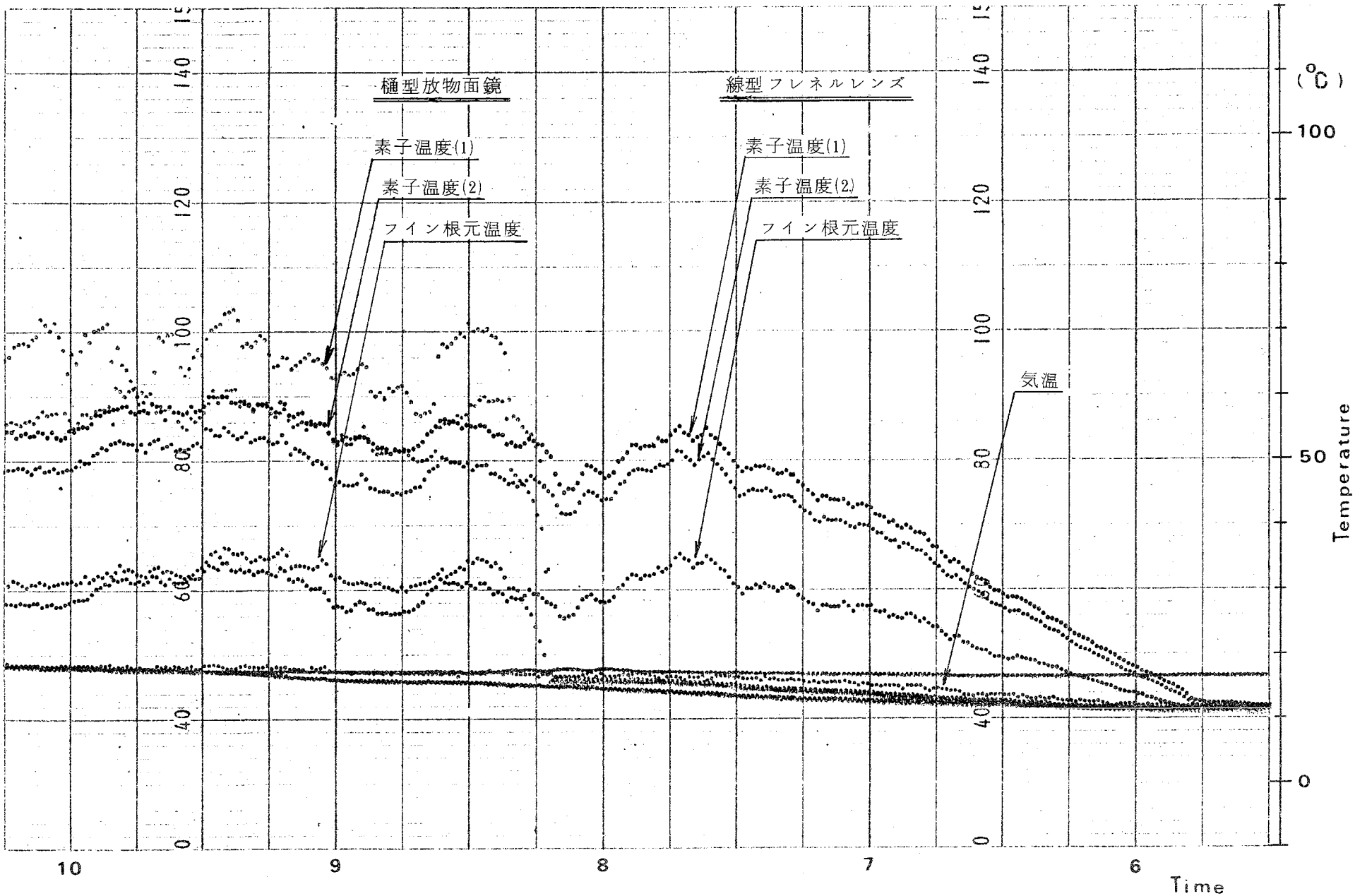


図2・57　フィールド試験(3)

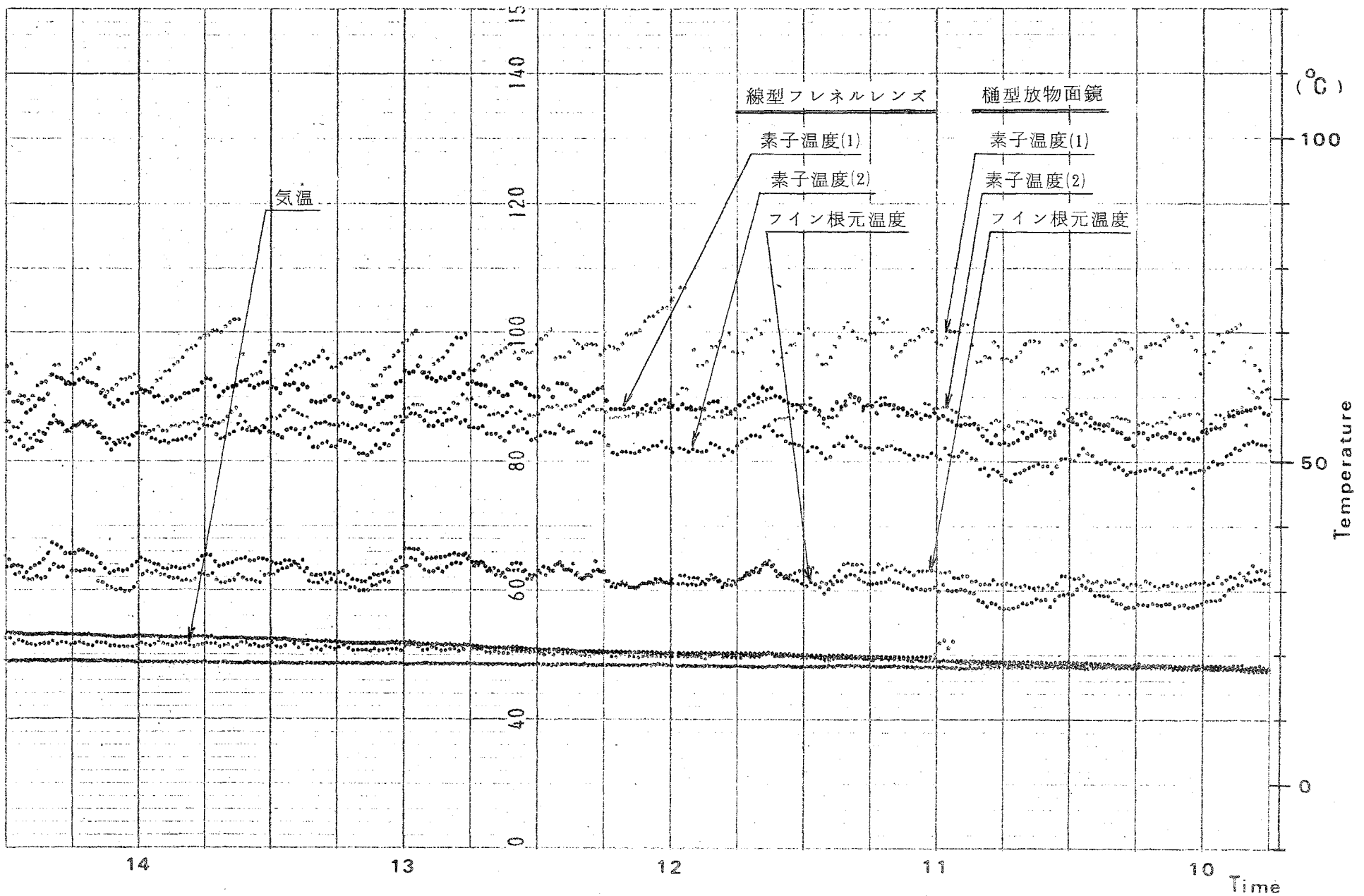


図2・58　フィールド試験(4)

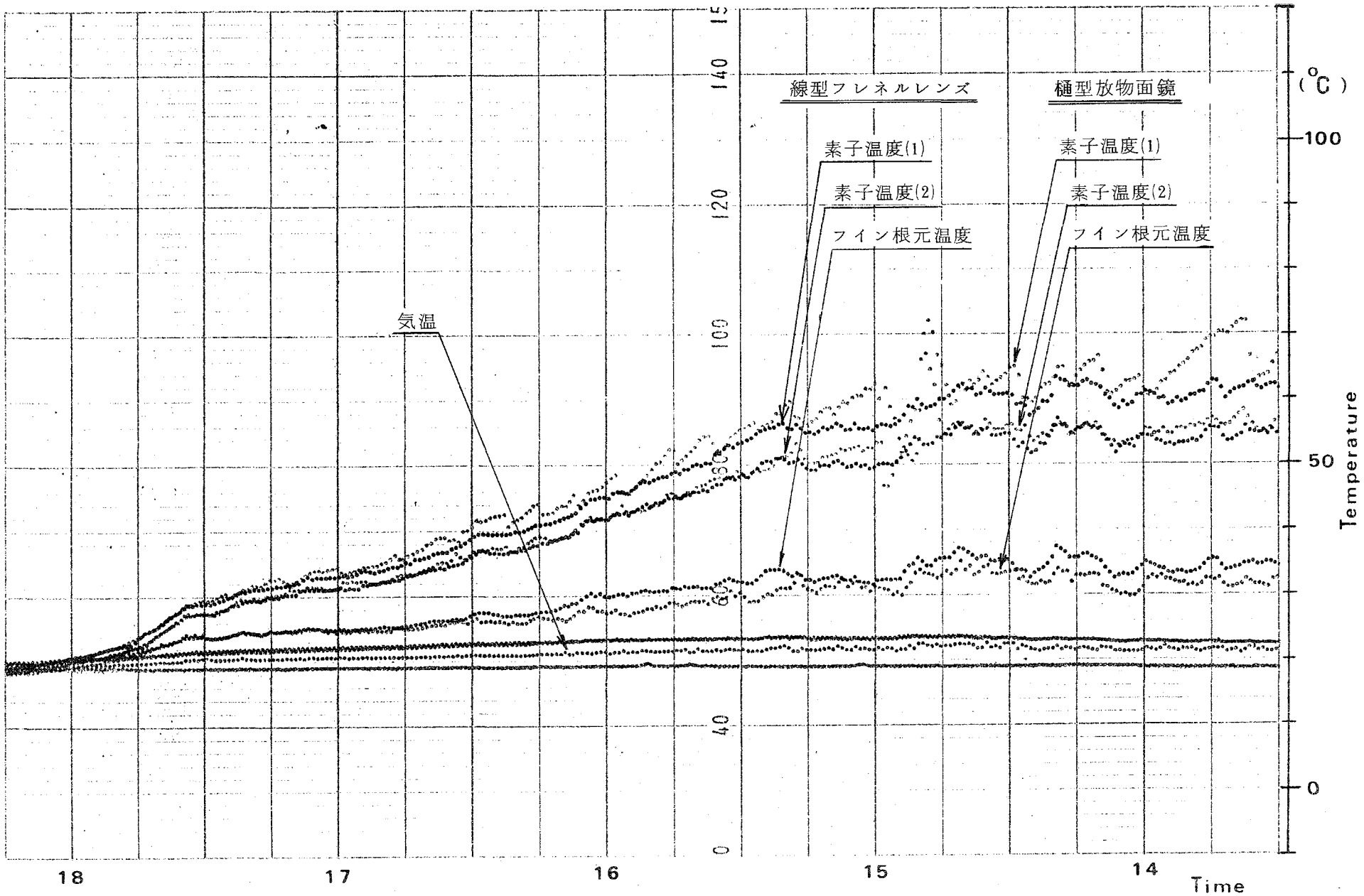


図2・59　フィールド試験(5)

3. パッケージ構成材料の研究

高品位・低価格太陽電池パッケージを開発するためには、長期の寿命を保証する材料を選択すると共に、それらの材料を用いた量産化構造を開発する必要がある。各種材料の試験では前年度に引続き屋外暴露試験，促進暴露試験を行い、本年度は新たに集光暴露試験を開始する一方、量産化に適したＦＲＰ太陽電池パッケージの最適構造を見出すための構造検討と試作サンプルの環境試験を開始した。

3.1 材料試験

3.1.1 材料の屋外暴露試験

(1) 概　　要

太陽電池パッケージを構成するプラスチック，ガラス材料の屋外暴露試験を継続し、寸法，そり，重量，光線透過率の特性測定を行ない評価した。屋外暴露試験は昭和５０年２月に開始し、既に１ケ月，３ケ月，６ケ月，１２ケ月後の中間測定結果は５０年度成果報告書に示したが、その後、１６ケ月後，２０ケ月後の中間測定を完了した。

さらに試験を継続し、最適な太陽電池パッケージ材料の選択を行なってゆく。

(2) 試験及び試験結果

(a) 試験評価法

イ) 寸　　法

板状物の中心部に描かれた互に直角な２つの寸法線の長さを測定する。又、フィルムにおいては４周辺の長さを測定し、寸法変化率を算出して評価した。

ロ) そ　　り（JIS.K-6911に準ずる）

試験片を平面板上に載せ、各四辺の最大へだたりを測定し、この中の最も大きい値を最大そりとし、そり率を算出して評価した。

ハ) 重　　量

試験片の重量を測定し、重量変化率を算出して評価した。

ニ) 光線透過率

タングステン標準光源を用い、各試験片内の４ケ所における光線透過量を４個の基準太陽電池の短絡電流で測定し、光線透過率を算出して評価した。

ホ) 外　　観

外観の変化、着色度等の状態を目視で把握して評価した。

(b) 結　　果

表3.1に試験材料の初期値，１６ケ月後，２０ケ月後の測定結果を示す。

表３・１　屋外暴露試験の測定結果

試験材料	暴露期間	寸法変化率〔%〕	そり率〔%〕	重量変化率〔%〕	光線透過率〔%〕
ＭＭＡ１	初期値	0	0.395	0	91.50
	１６ケ月	0.390	0.250	0.910	90.67
（５ｍｍ）	２０ケ月	0.380	0.240	0.843	90.97
ＭＭＡ２	初期値	0	0.795	0	91.15
	１６ケ月	0.365	0.315	0.905	90.64
（５ｍｍ）	２０ケ月	0.304	0.350	0.854	90.98
ＭＭＡ３	初期値	0	0.605	0	91.25
	１６ケ月	0.331	0.295	0.741	90.74
（５ｍｍ）	２０ケ月	0.300	0.105	0.632	90.96
ＭＭＡ４	初期値	0	0.250	0	92.30
	１６ケ月	0.370	0.815	0.998	91.76
（３ｍｍ）	２０ケ月	0.334	0.175	0.580	92.24
ＭＭＡ５	初期値	0	0.240	0	93.20
	１６ケ月	0.410	11.02	1.184	92.84
（１ｍｍ）	２０ケ月	0.289	0.150	0.931	92.98
ＰＣ１	初期値	0	0.430	0	88.95
	１６ケ月	0.290	0.255	0.125	87.40
（５ｍｍ）	２０ケ月	0.209	0.295	0.062	87.73
ＰＣ２	初期値	0	0.210	0	90.55
	１６ケ月	0.230	0.310	0.095	89.23
（２ｍｍ）	２０ケ月	0.180	0.260	0.026	89.59
ＰＣ３	初期値	0	36.1	0	91.70
	１６ケ月	0.299	35.0	−0.106	90.57
（0.4ｍｍ）	２０ケ月	0.255	30.1	0.531	90.00
ＰＣ４	初期値	0	34.1	0	91.80
	１６ケ月	0.331	64.1	−0.054	90.09
（0.4ｍｍ）	２０ケ月	0.355	53.9	0.542	90.15
ＰＣ５	初期値				88.75
	１６ケ月				87.49
（７ｍｍ）	２０ケ月				87.70
ＰＣ６	初期値				90.25
	１６ケ月				88.51
（３ｍｍ）	２０ケ月				89.25
ＰＣ７	初期値				91.75
	１６ケ月				90.86
（１ｍｍ）	２０ケ月				91.08
ＦＲＰ１	初期値	0	2.405	0	
	１６ケ月	0.100	1.940	0.310	
（３ｍｍ）	２０ケ月	0.115	1.995	0.252	
ＦＲＰ２	初期値	0	3.530	0	83.30
	１６ケ月	0.261	1.685	0.402	78.52
（２ｍｍ）	２０ケ月	0.214	1.975	0.284	77.59
ＦＲＰ３	初期値	0		0	89.90
	１６ケ月	0.062		0.529	86.48
（0.7ｍｍ）	２０ケ月	0.099		0.634	85.89
ＦＲＰ４	初期値	0	21.0	0	89.05
	１６ケ月	0.044	8.5	0.786	86.83
（0.7ｍｍ）	２０ケ月	0.037	9.8	1.030	86.66
ＰＰＯ１	初期値	0	0.650	0	
	１６ケ月	0.206	0.810	−0.375	
（５ｍｍ）	２０ケ月	0.205	0.750	−0.370	
ＧＬ１	初期値	0		0	84.50
	１６ケ月	0.037		0.074	85.34
（３ｍｍ）	２０ケ月	0.055		0.024	85.65
ＦＥＰ１	初期値	0		0	95.35
	１６ケ月	0.181		1.520	94.58
（0.125ｍｍ）	２０ケ月	0.174		2.275	94.46
ＰＥＴ１	初期値	0		0	86.65
	１６ケ月	0.604		1.796	86.89
（0.25ｍｍ）	２０ケ月	0.704		1.796	84.65
ＰＥＴ２	初期値	0		0	89.75
	１６ケ月	3.718		2.774	88.92
（0.1ｍｍ）	２０ケ月	4.210		2.960	87.01

（注）　ＭＭＡ：アクリル樹脂

ＰＣ　：ポリカーボネート樹脂

ＦＲＰ：ガラス繊維強化樹脂

（ＦＲＰ～３：一般用，ＦＲＰ４：耐候用）

ＧＬ　：ソーダ石灰ガラス

ＦＥＰ：フッ素樹脂

ＰＥＴ：ポリエステル樹脂

ＰＰＯ：ノリル樹脂

寸法は、ポリエステル樹脂（ＰＥＴ）で2.5％の変化を生じたが、他の試験片ではほとんど変化がなかった。

そりは、アクリル樹脂（ＭＭＡ）の1㎜板とフィルムの各試験片で増減が著しいが、他の試験片はほとんど変化がなかった。

重量は、フッ素樹脂（ＦＥＰ），ＰＥＴで2％の増加を示し、ノリル樹脂（ＰＰＯ）では、0.4％の減少を示した。他の試験片ではほとんど変化がなかった。光線透過率は初期値を１００％として一般用ＦＲＰで5.6％、耐候性ＦＲＰでは2.7％、ポリカーボネート樹脂（ＰＣ）フィルムでは1.8％、ＰＥＴフィルムでは2.7％それぞれ低下した。

他の試験片ではほとんど変化がなかった。外観は、ＰＰＯで強度の茶かっ色化が見られ、ＦＲＰ，ＰＣフィルム，ＰＥＴでは黄変化がやや増してきた。更にＰＥＴでは白濁も見られる。

なおポリミイド樹脂（ＰＩ）は、１６ケ月後に試験片が破断したため、屋外暴露試験から除外した。

図3.1に寸法変化率、図3.2に最大そり率、図3.3に重量変化率、図3.4に光線透過率の夫々の特性変化を示す。

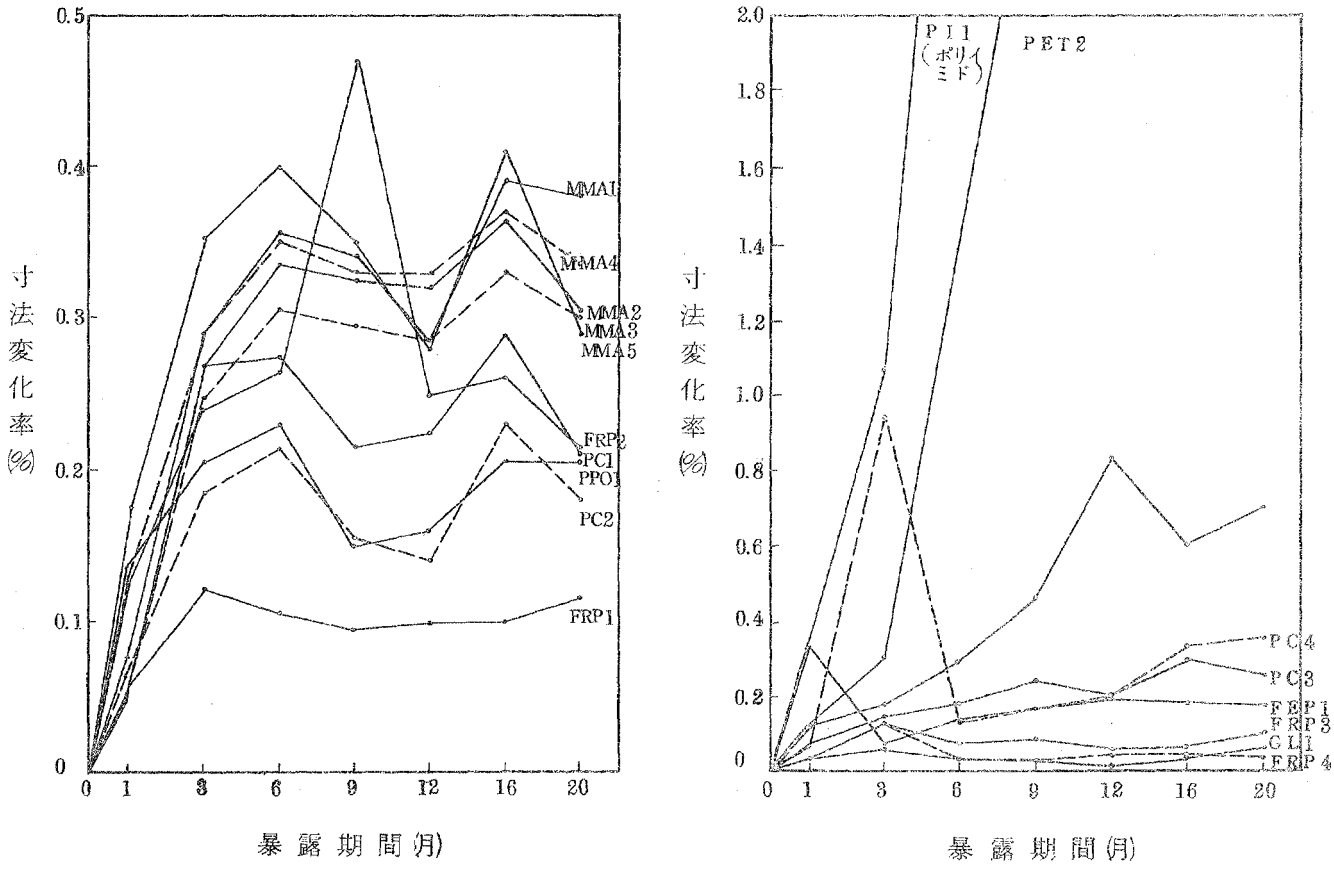


図3.1　屋外暴露試験における寸法変化

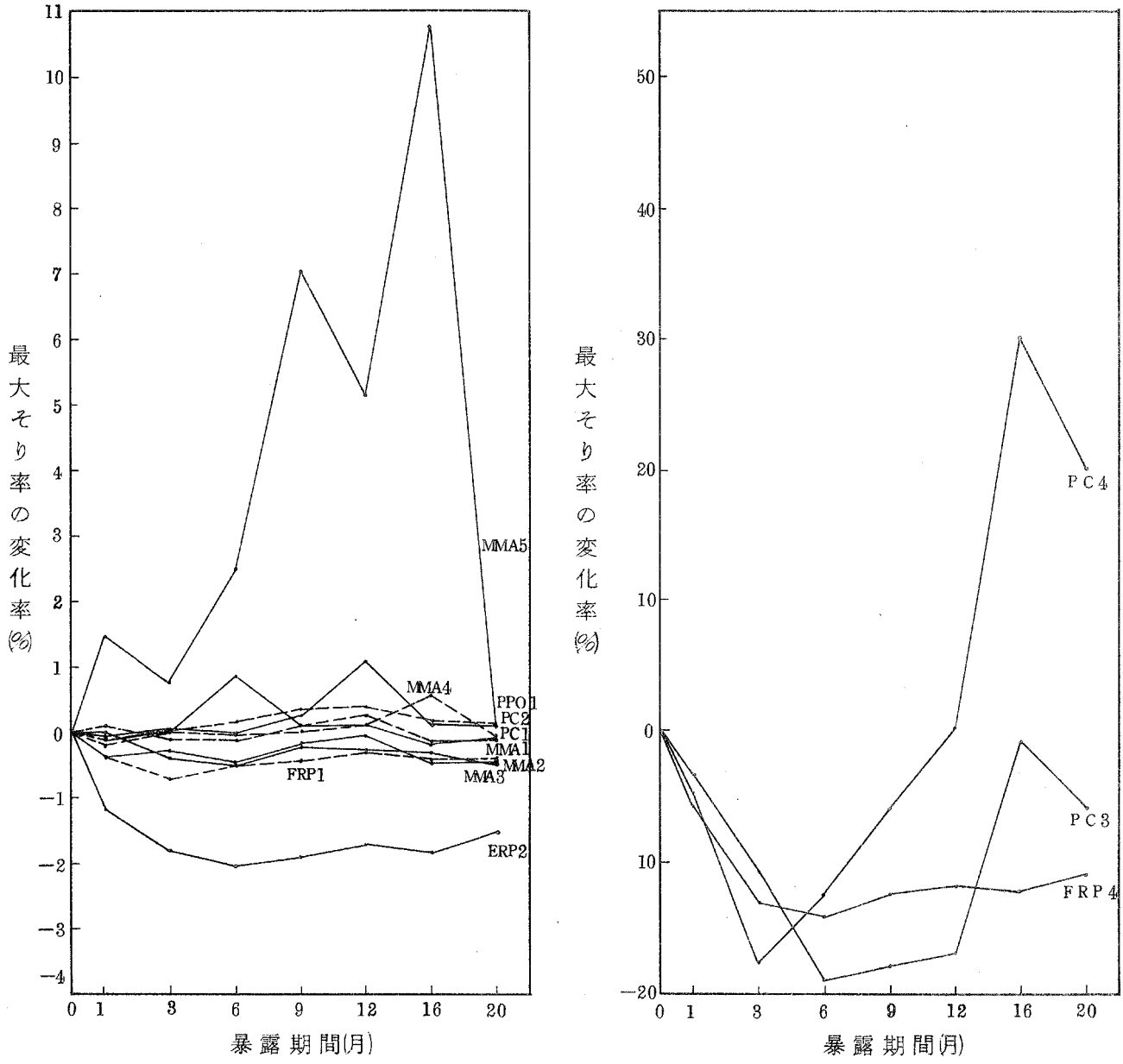


図 3. 2　屋外暴露試験における最大そり率の変化

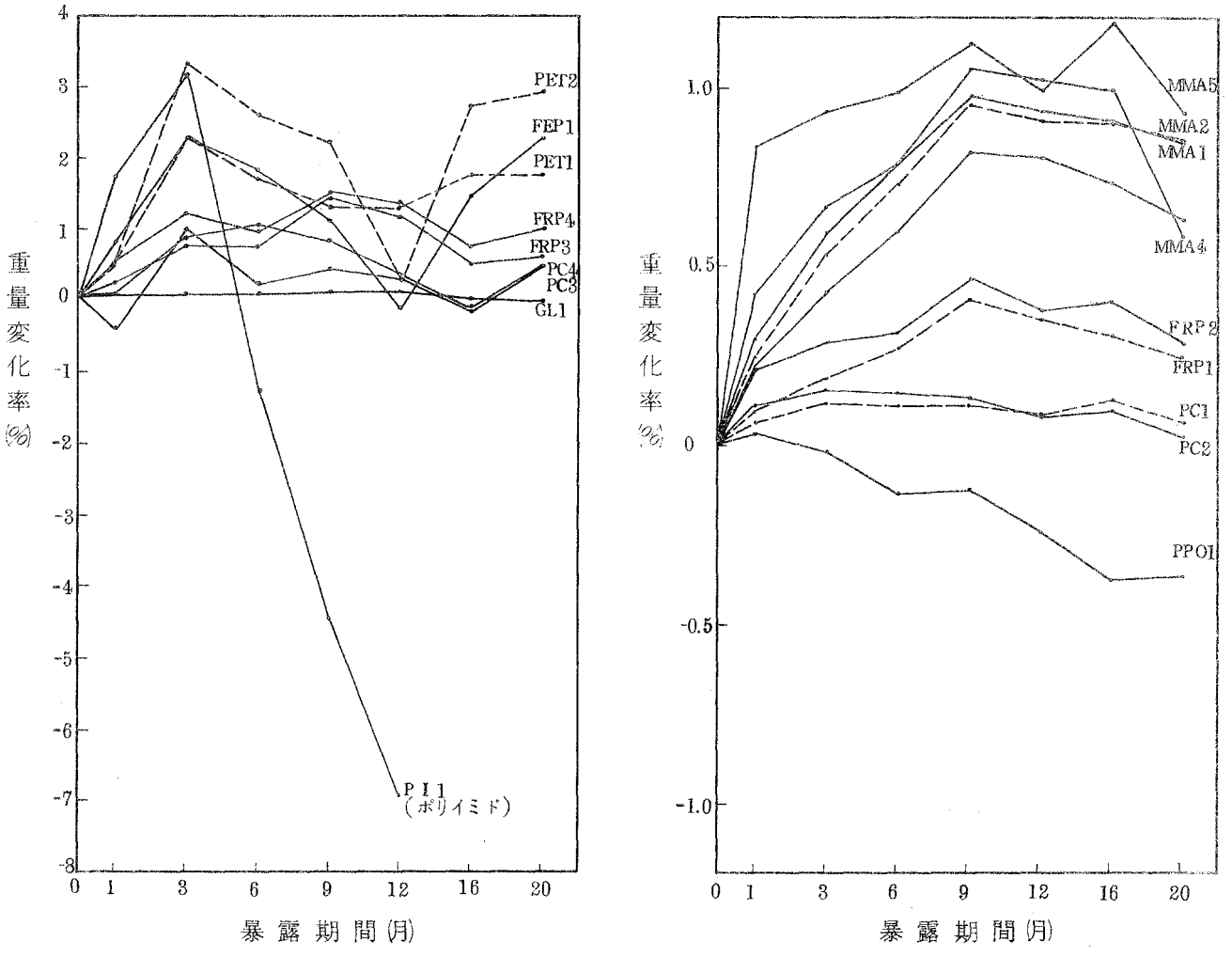


図 3. 3　屋外暴露試験における重量変化

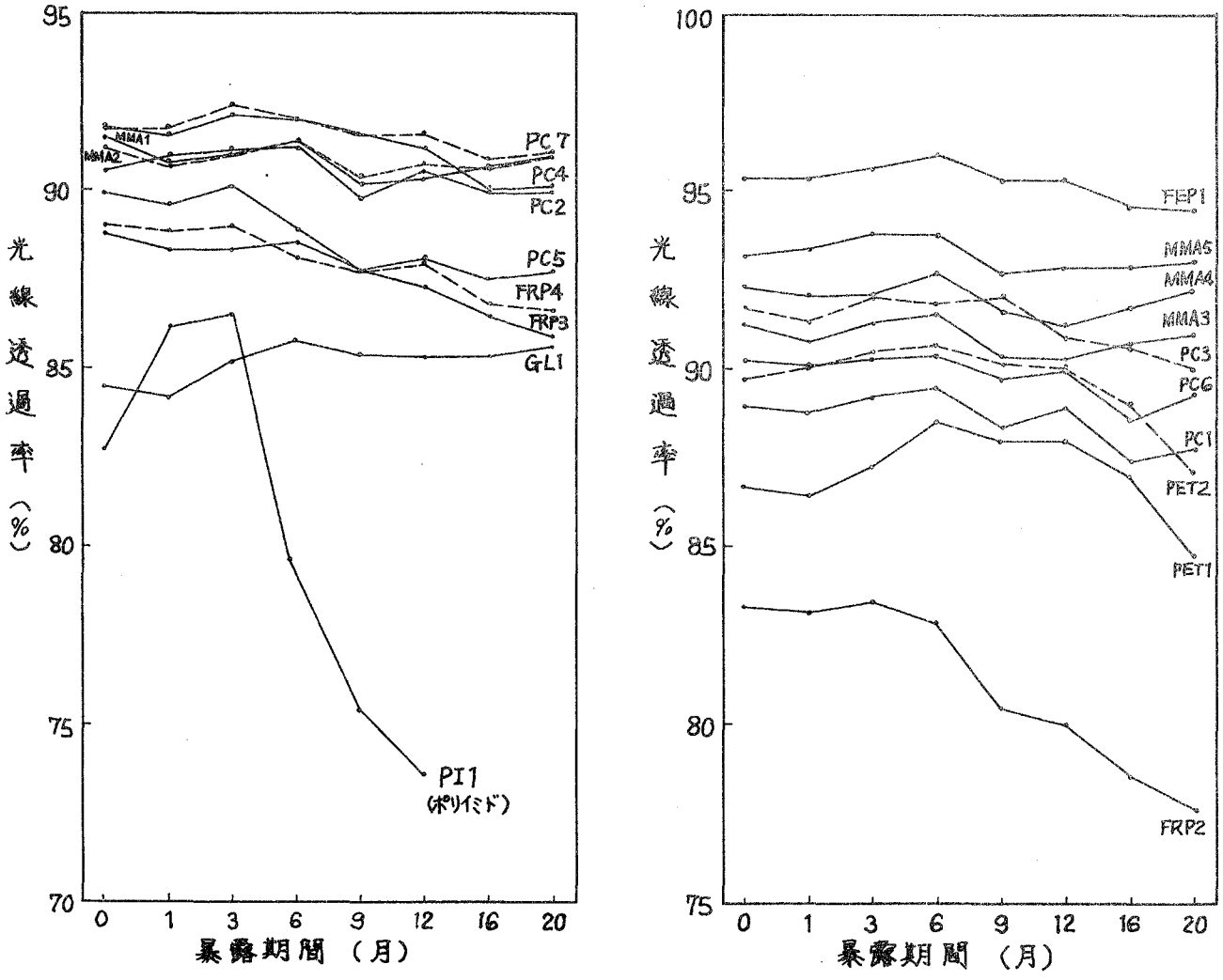


図 3. 4　屋外暴露試験における光線透過率の変化

(3) 考　　察

寸法変化において、ＰＥＴの変化は試験片自身のそりによるものである。そり変化においては、試験片の厚みが薄くなるとそりの増減が著しくなった。これは、当然の結果である。

重量変化におけるＦＥＰの増加は表面にほこりの付着が、ＰＥＴの増加は吸水が、又ＰＰＯの減少は表面層の加水分解による溶出が、夫々主な原因である。

光線透過率において、ＦＲＰ樹脂の低下は表面層の加水分解による樹脂の溶出と、続いて起るガラス繊維の浮き出しによる水の浸入とそれに伴うガラス繊維表面処理剤の劣化が、ガラス繊維と樹脂間に剥離を生じる原因でありこれを防止するためにはゲルコート，サーフェイシングマットの使用やフィルムコート処理等の表面保護を施す必要がある。ＰＣは、厚みが0.45㎜以上あれば吸水に伴う加水分解や黄変度は著しく減少し、抗張性も低下しにくいと言われている。本試験では、0.4㎜のフィルムと5㎜の板を夫々試験したがやはり0.4㎜のフィルムでは予想通りの傾向が確認され、パッケージに用いる場合は厚みの選択が必要不可欠であるとの知見を得た。ＰＥＴの低下は吸水に伴う白濁が原因である。

(4) 結　　論

ＦＥＰ，ＭＭＡ　ＰＣ板（５ｔ）及びガラスはほとんど変化がなく現在最も有望な材料である。又、ＰＣフィルム（0.4ｔ），ＦＲＰにはやや劣化が見られるが引続き試験を行い判断する。ＰＰＯ，ＰＥＴ及びＰＩは顕著な劣化が発生しており、太陽電池パッケージ材料として不適当であると判断する。

(5) 今後の課題

ＦＲＰでは、光線透過率の試験材料に表面保護を施した試料を追加し、耐候性の確認が必要である。他の材料においても引続き試験を行い、最適な太陽電池パッケージ材料の選択にあたる。

3.1.2 材料の促進暴露試験

(1) 概　　要

屋外暴露試験と並行して、５０年１２月よりプラスチック，ガラス材料の促進暴露試験を継続し、光線透過率を中心とした特性の評価を行なった。

既に５回の中間測定結果は５０年度成果報告書に示したが、新たに１５００Hr，２０００Hr，２５００Hr，３０００Hr後の中間測定を行なった。

屋外暴露試験と対比して早期に材料の耐候性を検知し、最適な太陽電池パッケージ材料を選択してゆくことを目的としている。

(2) 試験及び試験結果

(a) 試験方法

サンシャイン・ウェザーメータ（５１年度専用機械装置）を使用し、条件は１２０分毎に１８分間のスプレー（降雨）の繰返しとした。光線透過率の測定は、タングステン標準光源を用い各試験片内の４ケ所における光線透過量を４個の基準太陽電池の短絡電流で測定し、光線透過率を算出して評価した。

その他に、外観の変化、着色度等の状態を目視で把握して評価した。

(b) 結　　果

表3.2及び図3.5に試験材料の３０００Hr後までの測定結果を示す。

表3.2　促進暴露試験の測定結果

試験材料	促進暴露試験経過時間及び光線透過率測定結果〔％〕						
	0 Hr	500Hr	1000Hr	1500Hr	2000Hr	2500Hr	3000Hr
MMA1（5mm）	91.52	91.17	91.35	91.38	91.15	91.16	91.16
MMA2（5mm）	91.37	91.18	90.99	91.15	91.05	91.15	91.42
MMA3（5mm）	91.48	91.76	91.13	91.28	90.23	91.10	91.12
MMA4（3mm）	92.51	92.54	92.21	92.40	92.16	91.09	92.00
MMA5（1mm）	93.37	93.63	93.00	93.39	93.15	93.24	93.15
PC 1（5mm）	89.18	89.13	89.07	89.43	88.70	88.68	89.11
PC 2（2mm）	90.92	90.74	91.41	91.95	90.34	88.60	88.09
PC 3（0.4mm）	91.93	92.43	91.67	89.89	90.42	88.69	89.42
PC 4（0.4mm）	91.99	92.48	92.50	91.16	89.93	87.00	89.72
PC 8（3mm）	90.31	90.82	90.21	90.47	89.15	88.09	88.16
PC 9（2mm）	90.53	91.08	91.09	90.72	89.46	89.00	88.90
FRP 2（2mm）	79.90	77.30	74.70	73.05	66.71	63.32	61.29
FRP 4（0.7mm）	88.24	87.63	85.67	83.28	77.18	74.14	73.82
GL 1（3mm）	85.66	87.02	86.81	86.60	86.29	86.05	86.30
FEP 1（0.125mm）	95.92	96.17	96.11	95.82	95.51	96.13	96.00
PET 1（0.25mm）	86.78	88.95	88.27	82.71	77.43	78.02	77.70
PET 2（0.1mm）	90.10	91.64	91.50	84.88	79.75	77.32	破損
PI 1（0.125mm）	83.61	87.73	84.60	82.54	79.51	破損	

光線透過率は、初期値を１００％として一般用ＦＲＰで２３.３％、耐候性ＦＲＰで１６.３％、ＰＣフィルムで平均２.６％、ＰＥＴフィルムで約１２％それぞれ低下した。他の試験片はほとんど変化がなかった。

外観は、ＦＲＰ及びＰＣで黄変化が相当増している。又、ＦＲＰ及びＰＥＴフィルムは黄変化と共に光照射側表面が光沢を失い、白亜化が見られた。ＭＭＡは極くわずか黄変化している。又、全部の試験片にスプレー（降雨）のためと思われる白い斑点が付着していた。

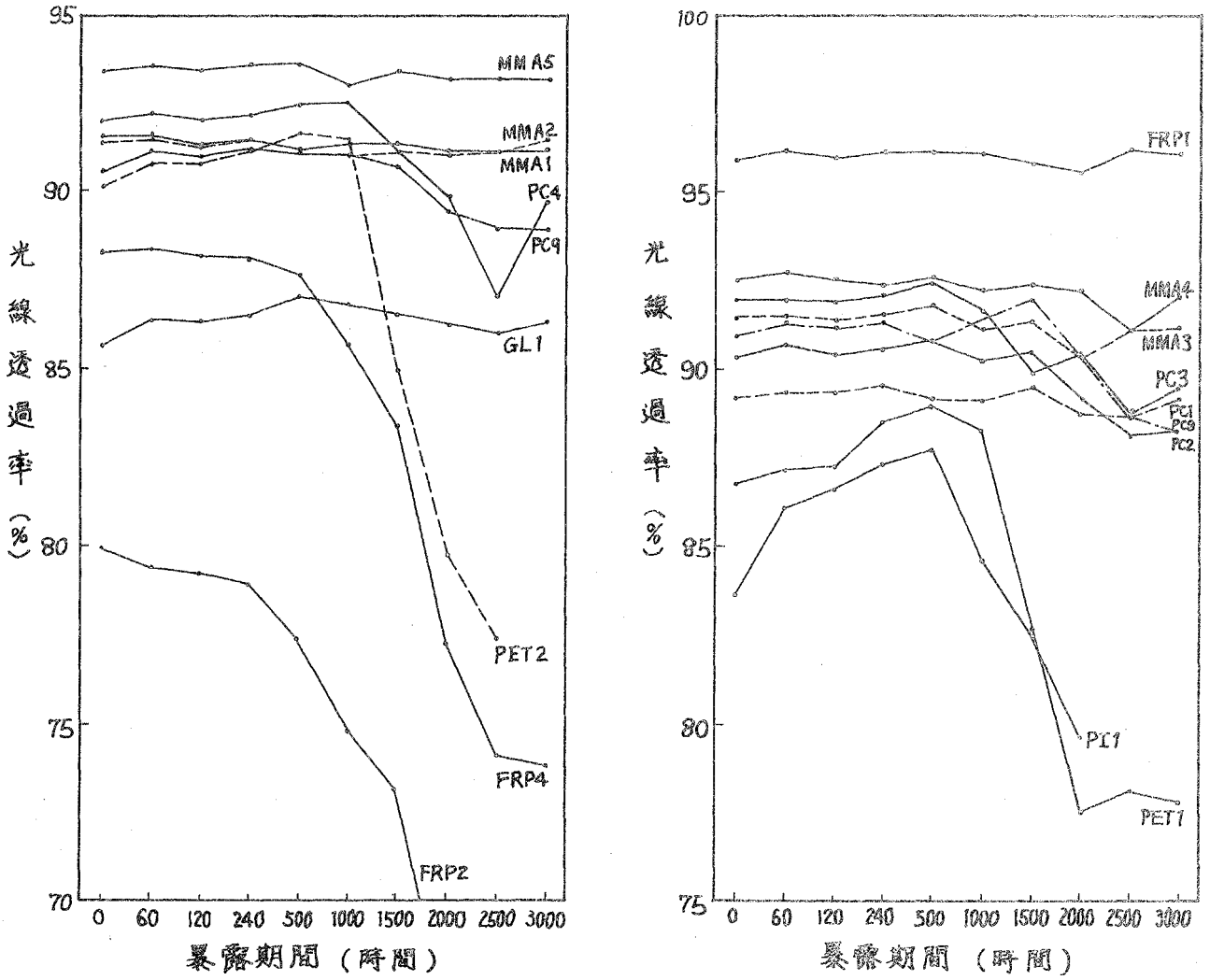


図３.５　促進暴露試験の光線透過率の変化

(3) 考　　察

ＰＥＴフィルムでは、表面層の溶出と共に光沢が失われてゆき、これと並行して表面層の白亜化（表面層が微粉末化する）が進んでいる。同様の傾向は、不飽和ＰＥＴを用いたＦＲＰにも見られ、これらが光線透過率を低下させる主な原因となった。更にＦＲＰでは表面層の溶出によりガラス繊維が露出し、この露出部から水が内部へ浸透してゆくことにより光線透過率の低下傾向が助長される。

従って、一般に不飽和ＰＥＴを用いているＦＲＰで耐候性を改善するには、表面の溶出や白亜化を防ぐための表面保護処理が必要である。又、不飽和ＰＥＴ以外の耐候性の良好な樹脂を用いたＦＲＰの開発も必要であろう。

ＰＣでは、屋外暴露試験でも述べたが、フィルム，板共に同様の結果となった。従って、パッケージ用として用いる場合は、厚みを考慮する必要がある。

(4) 結　　論

屋外暴露試験結果とほぼ同様の結論が得られた。即ちＦＥＰ，ＭＭＡ，ガラスにはほとんど変化がなく現在のところ最も有望な材料である。一方屋外暴露試験では光線透過率の低下が見られなかったＰＣ板（５㎜ｔ）には、本促進暴露試験では光線透過率の低下が１５００時間ごろから生じはじめており、従って屋外暴露試験でもいずれ低下しはじめることが予想される。

ＦＲＰの光線透過率の低下は、ＰＥＴフィルムやＰＩフィルムと同様に非常に顕著に現われている。ＦＲＰについては、既に報告し或は後述する様に、低価格パッケージ材料として特に注目中のものであり、その材料である不飽和ＰＥＴが光線透過率の点で劣化が顕著であったことは大きな問題である。考察の項でも述べたが、原因は樹脂表面層の加水分解による溶出と白亜化にあるので表面を保護した上で再度試験を行うと同時に、耐候性の良いＦＲＰの開発を行う必要がある。尚、ＰＩフィルムは、パッケージ用材料としては不適当であると結論した。

(5) 今後の課題

ＦＲＰ，ＰＣ等には、光線透過率の低下が見られたが、他の材料と共に引続き試験を行ない屋外暴露試験結果と比較してゆく。

更に、ＦＲＰには、表面保護処理を施した試験片等を追加して、劣化の進行メカニズムを明らかにしてゆくと共に耐候性の良いＦＲＰの開発への基礎検討を進めてゆきたい。

尚、新材料で有望なものが入手されれば、従来通り随時試験に追加してゆく予定である。

3.1.3 集光用材料の試験

(1) 概　　要

高密度太陽光の照射を受けることにより生ずる材料の加速度的な機能劣化を予測し、最適な集光型太陽電池パッケージ材料を選択するために、５０年度の中間測定に引続き最終測定を行ない、集光型太陽電池を構成する透過層樹脂及び熱伝導性樹脂に適する材料の選択を完了した。

集光用材料については、集光暴露装置（５０年度専用機械装置）による集光暴露試験，低温恒温恒湿槽（４９年度専用機械装置）による温湿度サイクル試験，冷熱衝撃試験機（４９年度専用機械装置）による熱衝撃試験及び耐熱性試験を行ない特性を評価した。

(2) 研究成果

(a) 試験方法

イ）透明層樹脂の試験

２枚の５cm×５cmパイレックスガラス板を、被試験用の透明樹脂（厚さ２mm）で接着し、周辺を封止樹脂（シリコーン系，SE−1700）で封着して試験片とした。

本試験片について集光暴露，温湿度サイクル，熱衝撃，耐熱性の各試験を行ない、光線透過率の変化，外観変化，着色等を観察し評価した。表3.3に試験樹脂材料を示す。

表3.3　透明樹　試験材料

種　類	試験樹脂名		特　　性
	主　剤	硬化剤	
シリコーン系	DC,CX−52−003	CX−52−003	２液性、耐熱性、接着性に富む
エポキシ　系	ペルノックス,ME−105	ペルキュア,HY−309	２液性、耐湿性
エポキシ　系	ペルノックス,MG−151	ペルキュア，Y−306	２液性、可とう性、耐熱衝撃性

ロ）熱伝導性樹脂の試験

図3.6に示す試験片を製作し、集光暴露，温湿度サイクル，熱衝撃，耐熱性の各試験を行ない、熱伝導率を測定し評価した。

熱伝導率の測定は、集光した太陽光に相当するエネルギーを素子に逆方向電流を印加して生じるジュール熱により与え、この熱量を変化させた時の素子とアルミ間の温度差を測定し熱伝導率を算出しているが、初期値の測定時に、熱量を変化させても一定であべき熱伝導率に大きなばらつきを生じる試験片が現れた。これは接着状態の一様性や厚みなどのバラツキが原因と考えられる。そこで熱伝導率の初期値安定性の良い試験片とあまり良くない試験片とをあらかじめ分類し、各試験を行なった。

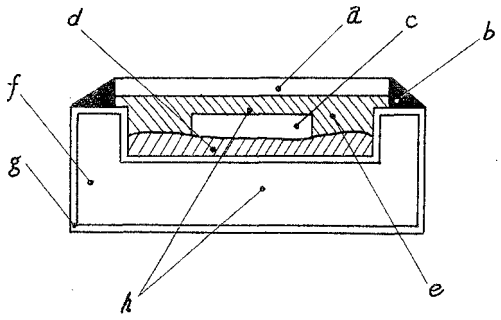


図 3. 6　熱伝導性樹脂試料

a. パイレックスガラス　e. 透明層樹脂
b. シーリング樹脂　f. アルミニウム
c. 太陽電池素子　g. アルマイト処理
d. 熱伝導性樹脂　h. 熱電対

表 3. 4 に試験樹脂材料を示す。

表 3. 4　熱伝導率試験用樹脂材料

種類	試験樹脂		特性
	主剤	硬化剤	
シリコーン系	DC, 96－080－LTV	96－080	1液性，耐熱衝撃性
シリコーン系	DC, 96－069－LTV	96－069	2液性，耐熱衝撃性，耐熱性
エポキシ系	キャストール, 1520	RT－7	2液性，耐熱衝撃性，弾力性
エポキシ系	ペルノックス, XM－1608－2	ペルキュア, XH－1655	2液性，耐熱衝撃性，接着性に富む
エポキシ系	ペルノックス, XM－1606	ペルキュア, XH－1538	2液性，耐熱性

(b)　試験結果

イ）透明層樹脂

表 3. 5 に光線透過率の測定結果を、図 3. 7、図 3. 8、図 3. 9、図 3. 10 にそれぞれ各試験における光線透過率の変化を示す。

CX－52－003は温湿度サイクル，熱衝撃試験で試料2個中1個に夫々剥離を生じたが、その程度が激しい温湿度サイクル試験の試料では、透過率が低下している。

ME－105は耐熱性試験で茶褐色に変色し、光線透過率の低下が著しい。一方、熱衝撃試験では、300サイクルで剥離が発生しはじめ、1500サイクル時には実質上使用不可能の状態にまで剥離が進行したため以後試験を中止した。

MG－151は耐熱性試験で茶褐色の変色に伴い、2000時間経過時には、光線透

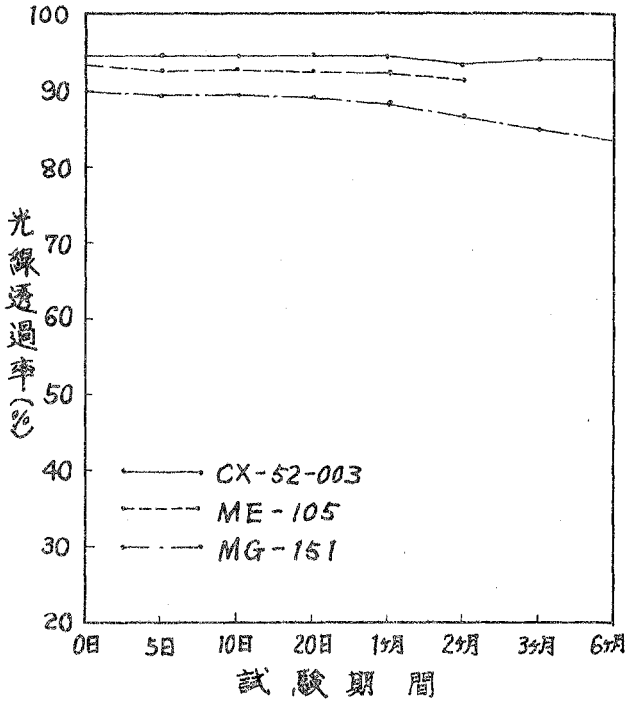


図 3.7　集光暴露試験における
光線透過率の変化

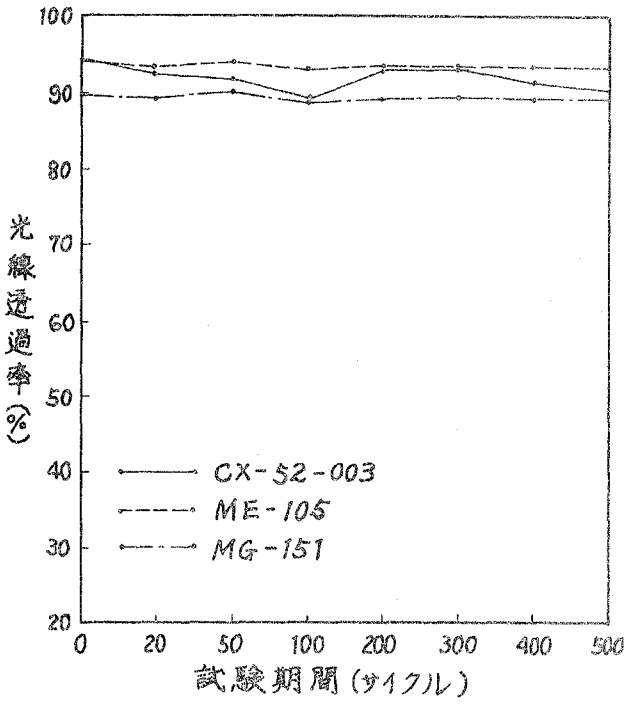


図 3.8　温湿度サイクル試験における
光線透過率の変化

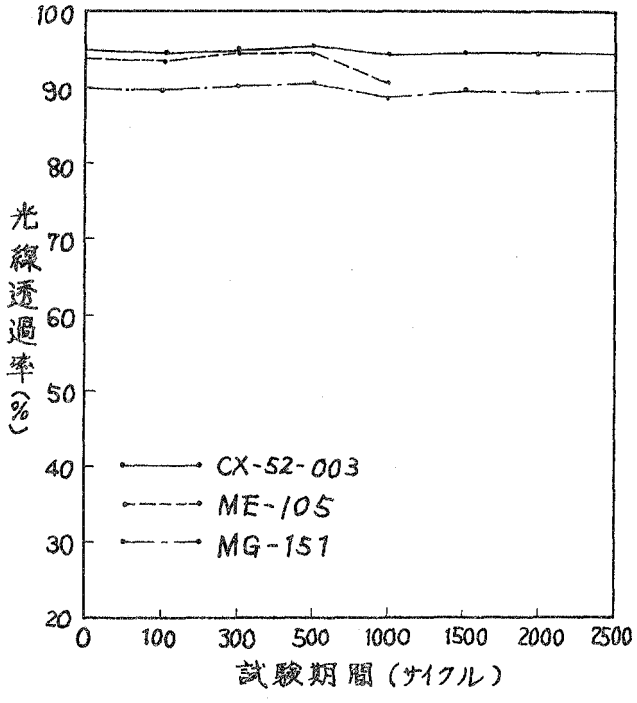


図 3.9　熱衝撃試験における
光線透過率の変化

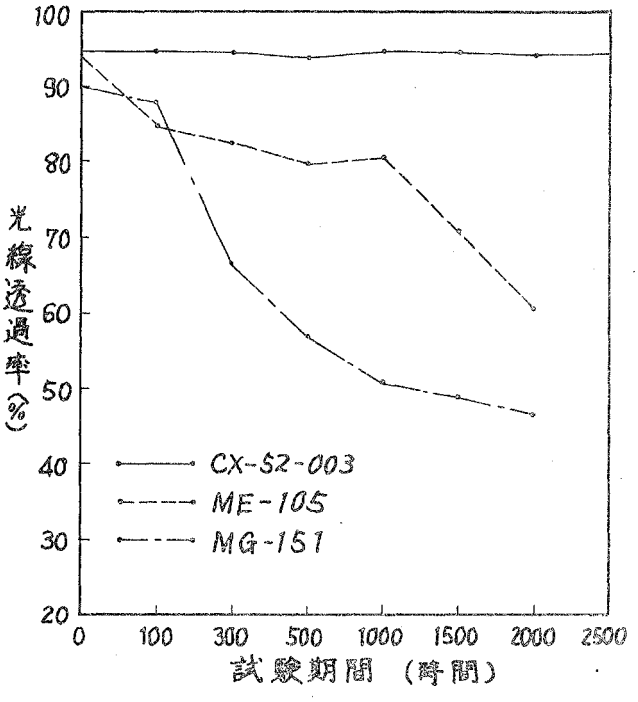


図 3.10　耐熱性試験における
光線透過率の変化

過率は初期値の約５２％にまで低下した。これはＭＥ－１０５の場合と同じく、実質上使用不可能な材料と判断し以後の試験を中止した。

集光暴露試験では、黄変化に伴い初期値の７％光線透過率が低下した。

表 3.5　光線透過率の測定結果

単位〔％〕

			0 日	5 日	10日	20日	1ケ月	2ケ月	3ケ月	6ケ月
集光暴露	CX−52−003	No.1	94.47	94.53	94.83	94.73	94.90	93.81	94.12	94.50
		No.2	94.64	94.63	94.55	94.61	94.70	93.72	94.13	94.29
	ME−105	No.1	93.14	92.68	92.86	92.33	92.52	91.66		
		No.2	93.60	92.84	93.08	92.80	92.52	91.44		
	MG−151	No.1	89.70	89.30	89.59	89.08	88.44	86.89	85.79	83.00
		No.2	90.03	89.47	89.75	89.25	88.40	86.57	84.52	84.00
			0サイクル	20サイクル	50サイクル	100サイクル	200サイクル	300サイクル	400サイクル	500サイクル
温湿度サイクル	CX−52−003	No.1	94.47	93.24	93.82	92.22	94.24	94.45	92.31	92.16
		No.2	94.64	91.36	90.07	86.53	91.21	91.96	90.49	88.87
	ME−105	No.1	94.51	93.26	94.24	93.04	93.97	94.02	93.57	93.76
		No.2	94.31	93.78	93.89	93.03	93.65	93.60	93.57	93.59
	MG−151	No.1	89.70	89.58	89.87	88.59	89.49	89.69	89.19	89.34
		No.2	90.20	89.98	90.55	89.21	89.82	89.69	89.40	89.42
			0サイクル	100サイクル	300サイクル	500サイクル	1000サイクル	1500サイクル	2000サイクル	2500サイクル
熱衝撃	CX−52−003	No.1	94.93	94.51	94.72	95.27	94.21	94.31	94.46	94.53
		No.2	94.84	94.42	94.92	95.27	94.04	94.63	94.63	94.40
	ME−105	No.1	93.84	93.52	93.69	94.15	92.35			
		No.2	93.85	93.44	94.88	95.01	89.21			
	MG−151	No.1	89.70	89.49	90.02	90.61	88.81	89.46	89.23	89.48
		No.2	90.11	90.06	90.31	90.87	88.89	89.46	89.31	89.48
			0 Hr	100 Hr	300 Hr	500 Hr	1000 Hr	1500 Hr	2000 Hr	2500 Hr
耐熱性	CX−52−003	No.1	94.52	94.46	94.37	93.55	94.56	94.11	93.82	94.05
		No.2	94.68	94.63	94.62	93.74	94.43	94.53	94.23	94.28
	ME−105	No.1	93.60	83.31	81.22	78.98	79.83	65.84	46.32	
		No.2	94.18	85.62	83.28	79.99	81.08	75.69	74.61	
	MG−151	No.1	89.95	87.07	60.58	56.14	51.50	49.44	47.83	
		No.2	89.99	88.44	71.68	57.62	49.48	48.15	45.15	

ロ）熱伝導性樹脂

表 3.6 に熱伝導率の測定結果を、図3.11、図 3.12、図 3.13、図 3.14 にそれぞれ各試験における熱伝導率の変化を示す。

表 3.6　熱伝導率の測定結果

単位〔Kcal/m・h・°C〕

試験名	試験期間	DC96−080−RTV		DC96−069−LTV		キャストール 1520		ペルノックス XM−1608−2		ペルノックス XM−1606	
集光暴露	0 日	No. 1	1.101	No. 3	1.271	No. 5	0.322	No. 7	0.484	No. 9	0.761
	1 ケ月		1.031		1.285		0.285		0.394		0.624
	3 ケ月		1.021		1.082		0.264		0.371		0.532
	6 ケ月		1.047		1.282		0.300		0.325		
	0 日	No. 2	0.810	No. 4	0.641	No. 6	0.606	No. 8	0.509	No. 10	0.611
	1 ケ月		0.781		0.699		0.532		0.383		0.480
	3 ケ月		0.785		0.688		0.633		0.329		0.464
	6 ケ月		0.758		0.683		0.572		0.310		0.412
温湿度サイクル	0 サイクル	No. 1	1.004	No. 3	0.176	No. 5	0.192	No. 7	0.974	No. 9	0.502
	100サイクル		0.802		0.152		0.180		0.745		0.401
	300サイクル		0.744		0.156		0.206		0.758		0.399
	500サイクル		0.707		0.157		0.168		0.660		0.403
	0 サイクル	No. 2		No. 4	1.599	No. 6	0.603	No. 8	0.885	No. 10	
	100サイクル				2.213		0.263		0.342		
	300サイクル				2.285		0.247		0.319		
	500サイクル				0.609		0.251		0.315		
熱衝撃	0 サイクル	No. 1	0.379	No. 3	0.717	No. 5	0.374	No. 7	0.351	No. 9	0.455
	200サイクル		0.389		0.630		0.342		0.278		0.406
	500サイクル		0.430		0.682		0.368		0.280		0.405
	1000サイクル		0.378		0.653		0.315		0.232		0.399
	2000サイクル		0.372		0.703		0.306		0.257		0.380
	0 サイクル	No. 2	2.069	No. 4	0.737	No. 6	1.051	No. 8	0.800	No. 10	0.506
	200サイクル		1.508		0.695		0.904		0.738		0.445
	500サイクル		2.143		0.685		0.773		0.696		0.422
	1000サイクル		1.550		0.652		0.523		0.659		0.404
	2000サイクル		1.060		0.649		0.318		0.714		0.381
耐熱性	0 Hr	No. 1	1.095	No. 3	0.133	No. 5	0.482	No. 7	0.351	No. 9	0.670
	500 Hr		1.604		0.118		0.201		0.196		0.411
	1000 Hr		1.884		0.120		0.200		0.177		0.300
	2000 Hr		1.863		0.118		0.191		0.150		0.248
	0 Hr	No. 2		No. 4	0.180	No. 6	0.111	No. 8	0.642	No. 10	
	500 Hr				0.178		0.067		0.353		
	1000 Hr				0.185		0.064		0.330		
	2000 Hr				0.187		0.062		0.281		

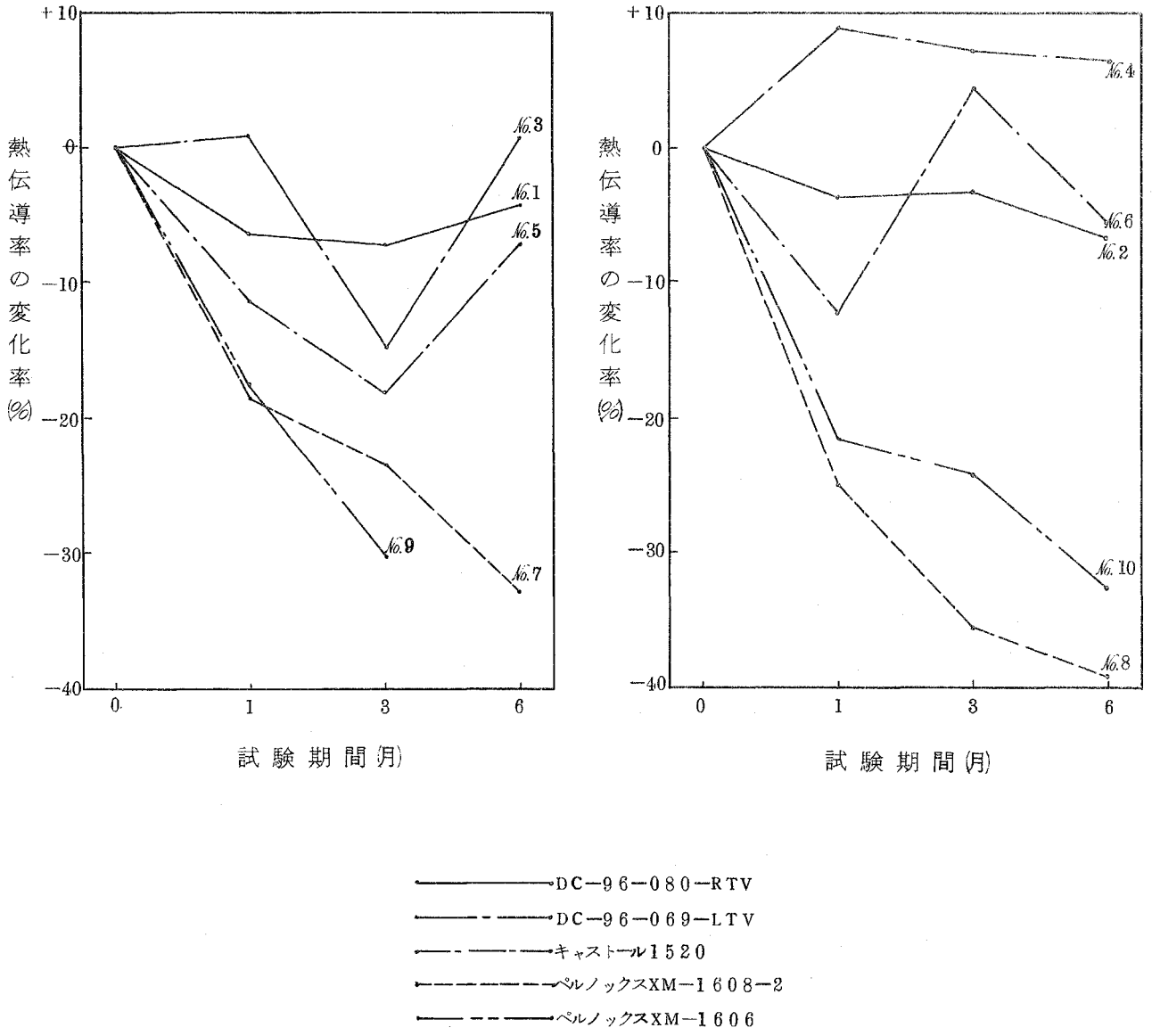


図 3.11　集光暴露試験における熱伝導率の変化

（すべて良好な試験片を使用）

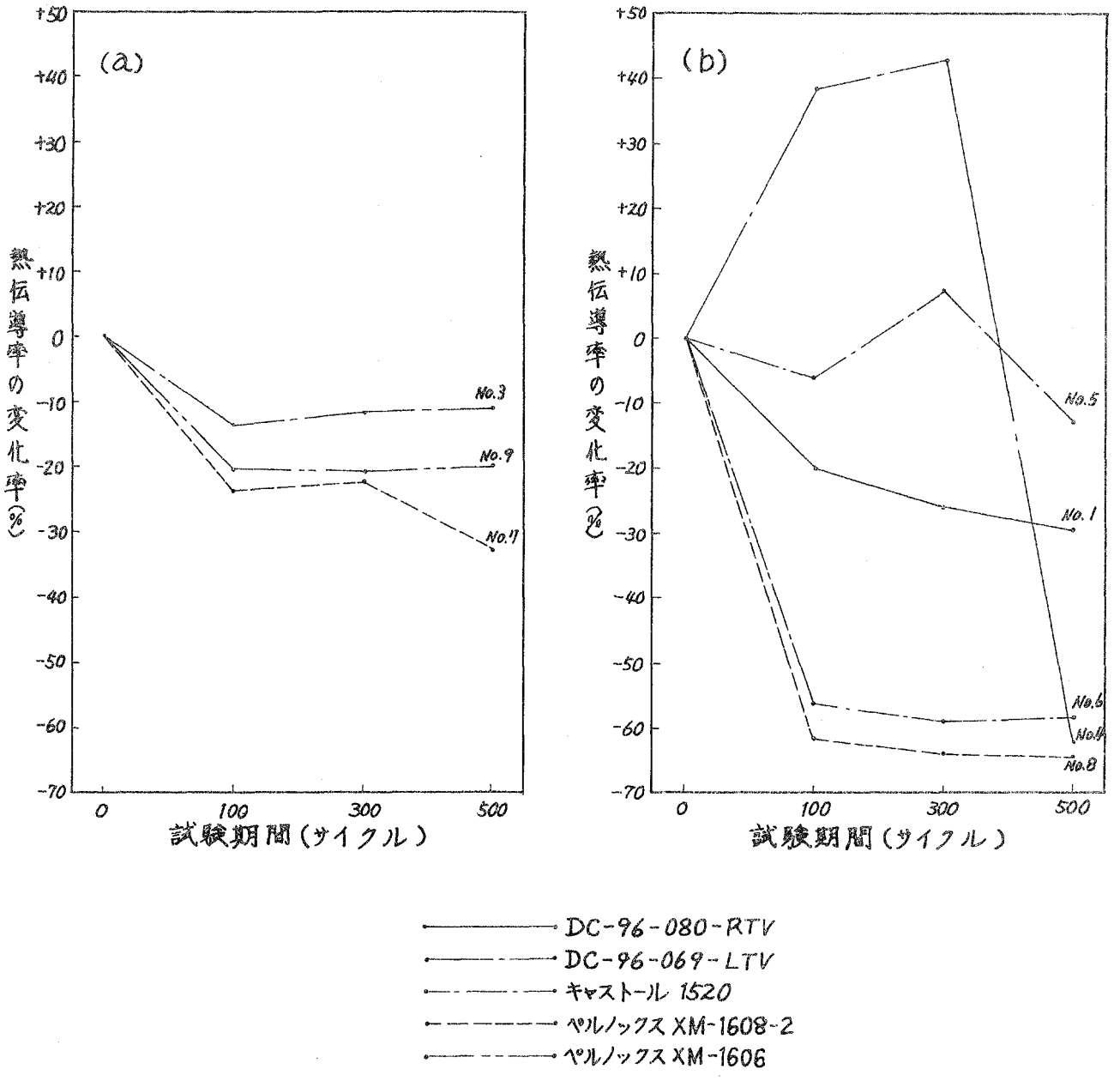


図 3.12　温湿度サイクル試験における熱伝導率の変化

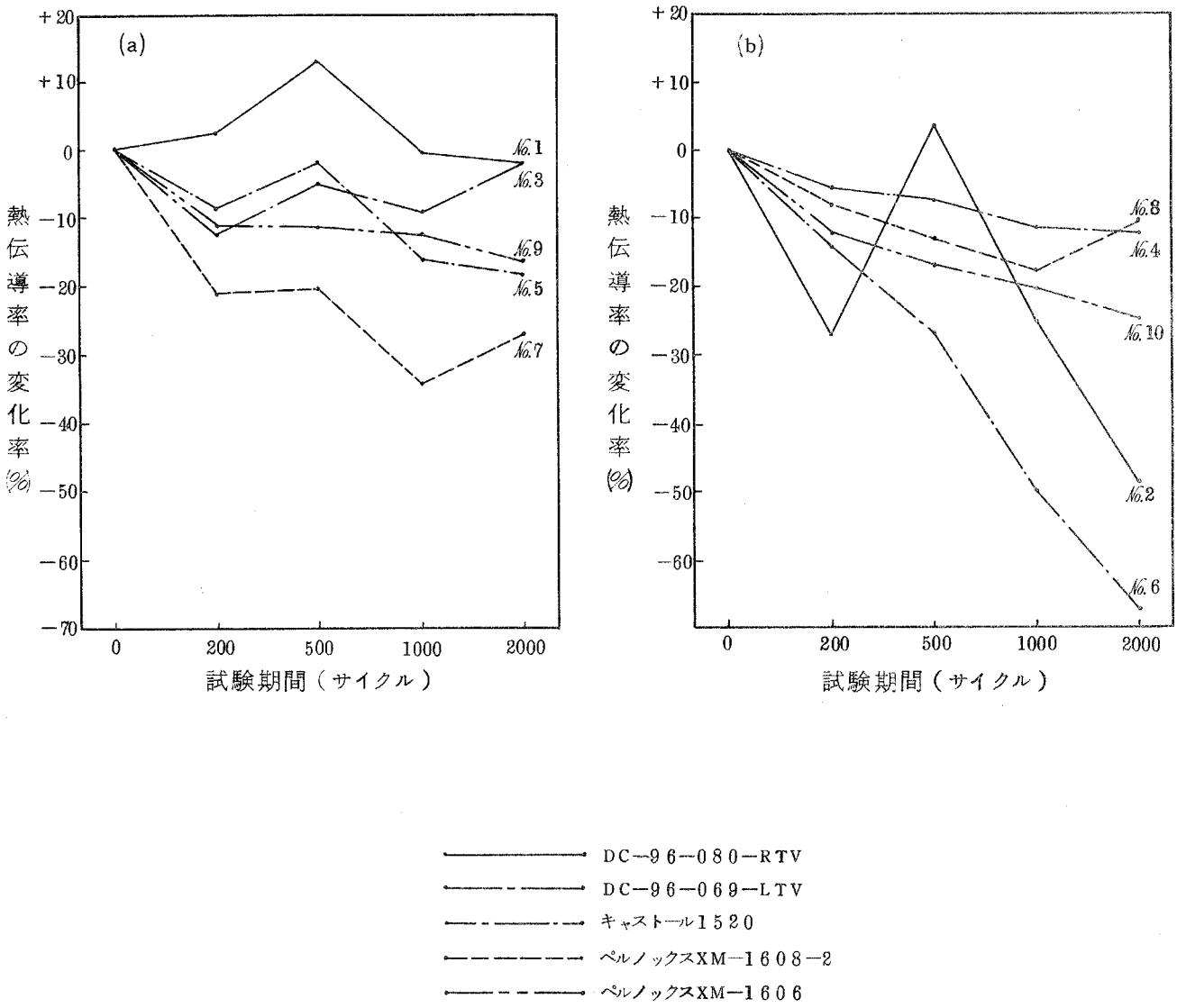


図 3.13　熱衝撃試験における熱伝導率の変化

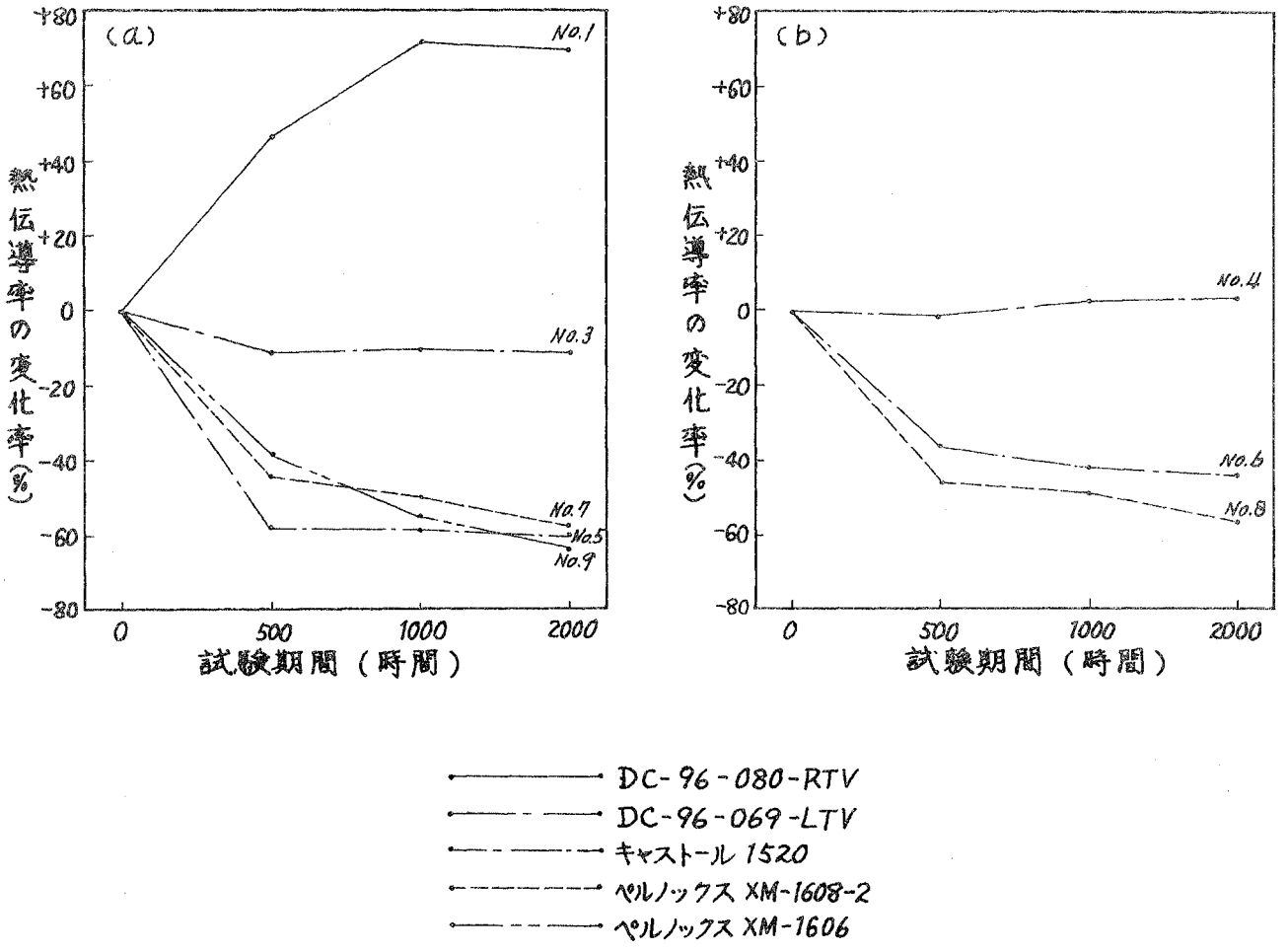


図 3.14　耐熱性試験における熱伝導率の変化

なお前述した理由により、図中(a)、(b)は熱伝導率の初期値安定性の良い試験片を(a)、あまり良くない試験片を(b)と分けて示してある。

シリコーン系は、各試験共初期値に対して試験完了時の熱伝導率が平均１０％程度しか減少していないが、エポキシ系では平均３５％程度の減少を示した。

又、エポキシ系は、各試験共に初期値より徐々に熱伝導率が減少しており、特に耐熱性試験では減少量が大きかった。一方シリコーン系はＤＣ－９６－０８０ＲＴＶが熱衝撃試験で、ＤＣ－９６－０６９－ＬＴＶが温湿度サイクル試験で、熱伝導率の増減が初期値安定性の悪い試験片で顕著に見られた。

以上の結果を表 3.7 にまとめて示す。

表３・７　集光用材料試験評価一覧表

試験項目	試験方法	試験条件	試験結果及び評価 試験材料	試験期間	総合評価
集光暴露		１０倍程度に集光追尾された太陽光の照射	透明層樹脂	50年度成果報告 ◀▶ ５１年度成果報告 0　5日　10日　20日　1ケ月　2ケ月　3ケ月　6ケ月	
			ＣＸ－５２－００３	3 ―― 3	3
			ＭＥ－１０５	3 ―― 3 ―― ×	3
			ＭＧ－１５１	3 ―― 2 ―― 2	2
			熱伝導性樹脂	0　1　3　6ケ月	
			ＤＣ９６－０８０－ＲＴＶ	3 ―― 3	3
			ＤＣ９６－０６９－ＬＴＶ	3 ―― 3	3
			キャストール１５２０	3 ―― 3	3
			ペルノックスＸＭ－１６０８－２	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０６	3 ―― 2 ―― 2	2
温湿度サイクル	ＪＩＳ－Ｃ５０２４ ＭＩＬ－２０２Ｄ－１０６Ｃに準ずる	７０℃（９５％ＲＨ）～－２０℃ 各1.5時間 移行 1.5時間	透明層樹脂	50年度成果報告 ◀▶ ５１年度成果報告 0　20　50　100　200　300　400　500サイクル	
			ＣＸ－５２－００３	3 ―― 2 ―― 2	2
			ＭＥ－１０５	3 ―― 3	3
			ＭＧ－１５１	3 ―― 3	3
			熱伝導性樹脂	0　100　300　500	
			ＤＣ９６－０８０－ＲＴＶ	3 ―― 2 ―― 2	2
			ＤＣ９６－０６９－ＬＴＶ	3 ―― 2	2
			キャストール１５２０	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０８－２	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０６	3 ―― 2 ―― 2	2
熱衝撃	ＪＩＳ－Ｃ５０３０ ＭＩＬ－２０２Ｄ－１０７Ｃに準ずる	１００℃～－４０℃ 各３０分間 移行 数秒	透明層樹脂	50年度成果報告 ◀▶ ５１年度成果報告 0　100　300　500　1000　1500　2000　2500	
			ＣＸ－５２－００３	3 ―― 2 ―― 2	2
			ＭＥ－１０５	3 ―― 1 ―― 1 ―― ×	0
			ＭＧ－１５１	3 ―― 3	3
			熱伝導性樹脂	0　200　500　1000　2000	
			ＤＣ９６－０８０－ＲＴＶ	3 ―― 2 ―― 2	2
			ＤＣ９６－０６９－ＬＴＶ	3 ―― 3	3
			キャストール１５２０	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０８－２	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０６	3 ―― 2 ―― 2	2
耐熱性	ＪＩＳ－Ｃ５０２２に準ずる	１３０℃ 連続放置	透明層樹脂	50年度成果報告 ◀▶ ５１年度成果報告 0　100　300　500　1000　1500　2000　2500	
			ＣＸ－５２－００３	3 ―― 3	3
			ＭＥ－１０５	3 ―― 2 ―― 1 ―― ×	0
			ＭＧ－１５１	3 ―― 2 ―― 1 ―― ×	0
			熱伝導性樹脂	0　500　1000　2000	
			ＤＣ９６－０８０－ＲＴＶ	3 ―― 3	3
			ＤＣ９６－０６９－ＬＴＶ	3 ―― 3	3
			キャストール１５２０	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０８－２	3 ―― 2 ―― 2	2
			ペルノックスＸＭ－１６０６	3 ―― 2 ―― 2	2

透明層樹脂	ＣＸ－５２－００３	１０
	ＭＥ－１０５	６
	ＭＧ－１５１	８
熱伝導性樹脂	ＤＣ９６－０８０－ＲＴＶ	１０
	ＤＣ９６－０６９－ＬＴＶ	１１
	キャストール１５２０	９
	ペルノックスＸＭ－１６０８－２	８
	ペルノックスＸＭ－１６０６	８

〔注〕

(1) 熱伝導性樹脂は初期値のみ５０年度成果報告

(2) 評価値　３　優
　　２　良
　　１　可
　　０　不可

(3) ×は、劣化が著るしいため試験を中止

(3) 考　　察

イ) 透明層樹脂

ＣＸ－５２－００３の１部が温湿度サイクル試験で剥離を生じたが、これは封止部からの水分の浸入が原因で、封止樹脂の厚みを増やすことで解決出来た。

ＭＥ－１０５が熱衝撃試験で剥離を生じたのは、苛酷な温度変化に伴う応力集中が原因で集光型太陽電池においては致命的な欠陥である。又ＭＧ－１５１では、耐熱性試験で光線透過率が約５２％減少したが、この樹脂の最高使用温度が１３０°付近であったのが原因で、１００℃に降下させて試験するとほとんど低下はなかった。従ってこの樹脂を用いる場合は、集光型太陽電池素子部の温度は１００℃以下程度とする必要がある。

ロ) 熱伝導性樹

エポキシ系の熱伝導率が徐々に減少しているのは、少しずつ劣化しているためと考えられる。シリコーン系の熱伝導率が増減し、しかも温湿度サイクル、熱衝撃試験の様に湿気を伴う試験にその傾向が著しいことから判断すれば、水蒸気の透過により熱伝導性樹脂中に微量の水分が残り、これが熱伝導率を増減させている原因と考えられる。又、図3.6に示した試験片の製作では、図中ｄで示した熱伝導性樹脂の厚みの制御や、Ｃ或いはｇとの接着状況が把握し切れず、これらが測定結果の初期値等のバラツキの原因になったものと考えられる。従って、絶対値のバラツキそのものより各試験中における熱伝導率の経時安定性を考慮するとＤＣ－９６－０８０－ＲＴＶ，ＤＣ－９６－０６９－ＬＴＶ共に初期値安定性のあまり良くない試験片において熱伝導率の増減が著しいが、安定性の良い試験片では増減が少なく、中でもＤＣ－９６－０６９－ＬＴＶは各試験で熱伝導率の変化が少ない。

(4) 結　　論

透明層樹脂は、シリコーン系のＣＸ－５２－００３が最適な材料である。エポキシ系のＭＧ－１５１は、使用温度が１００℃以下であれば適当な材料であると判断する。

熱伝導性樹脂は、シリコーン系，エポキシ系共使用可能な材料であるが、本試験結果と作業性等を考慮すれば、シリコーン系のＤＣ９６－０６９－ＬＴＶが最適な材料であると判断する。

(5) 今後の課題

透明層樹脂としてＣＸ－５２－００３を使用する場合は、ＣＸ－５２－００３が直接外気に触れる構造は避け、ＣＸ－５２－００３の周辺をシーリング樹脂で付着する場合も、その厚みを考慮することやガラス等水蒸気の透過しにくい材料を用い、シーリング樹脂といえども外気と接触する表面積を出来るかぎり少なくするなどのパッケージ構造を開発する必要が

ある。

本報告で、現在、市販されている樹脂材料のうち、集光型太陽電池の透明層及び素子と放熱器との間の伝熱部に用いる樹脂材料の選択が完了した。今後は、新たな材料で有効と考えられるものが出現した場合に限って、補足試験を行なってゆく予定である。

3.1.4 集光器材料の試験

(1) 概　　要

集光器の効率を左右するレンズ及び反射板の光学器材料の屋外暴露試験を、前年度に引続き行ない評価した。

レンズあるいは反射板を構成するガラス，アクリル樹脂等の透明材料については、前述した屋外暴露試験で行なった試験結果を参照して評価した。

反射板の暴露試験は昭和５１年２月に開始し、既に１ケ月後の中間測定結果は５０年度成果報告書に示したが、測定結果の処理に不都合な点があったので、これを修正し新たに３ケ月，６ケ月，１２ケ月後の中間測定結果を加えた。なおアクリミラーは昭和５１年８月に開始し、初期値と６ケ月後の中間測定を行なった。

今後、さらに試験を継続し、最適な集光器材料の選択を行なってゆく。

(2) 試験及び試験結果

a）試　験　方　法

分光器を用い、３３０～９８０〔nm〕の波長領域における波長別反射率を各試験片と標準試験片とを一組として測定し相対反射率を求め、さらに標準試験片の絶対反射率を、各試験片の相対反射率に掛けて絶対反射率として評価した。

外観においては、外観の変化や反射面の剥離状態を目視で把握して評価した。

表3.8に反射板の試験材料とその断面図を示す。

表3.8　反射板の試験材料

No.	試験材料名	断面図	No.	試験材料名	断面図
A	ガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）	ガラス 銀 銅 第1塗料 第2塗料	D	アルミ反射板（1080）	電解研摩 アルミ
B	ガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）	ガラス 銀 塗料	E	アクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）	トップコート アルミ アクリル
C	アルミ反射板	電解研摩 アルミ	F	アクリミラー	アクリル アルミ 塗料

b）結　　果

表3.9に試験材料の初期値，3ケ月，6ケ月，12ケ月後の測定結果を示す。

絶対反射率で、初期値と12ケ月後ではガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）とガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）はほとんど変化がなかったが、アクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）は各波長共2％，アルミ反射板は25％，同じくアルミ反射板（1080）は31％それぞれ減少した。アクリミラーは逆に2.5％絶対反射率が増加した。

外観において、ガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー），アクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り），アクリミラーは、ほとんど変化がなかった。ガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）では反射面の構成材料に一部剥離が発生している。アルミ反射板，同じくアルミ反射板（1080）は反射面の腐食が激しく表面の光沢がほとんどなくなっている。

図3.15はガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）、図3.16はガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）、図3.17はアルミ反射板、図3.18はアルミ反射板（1080）、図3.19はアクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）の夫々の初期値と12ケ月後の反射率の変化を示す。図3.21に12ケ月後の上記5種類の反射率をまとめて示した。

又、図3.20はアクリミラーの初期値と6ケ月後の反射率の変化を示す。

(3) 考　　察

アルミ反射板の減少量が共に大きいのは、アルミ板が腐食したのが原因であり、集光器の反射板として実用不可能な値に達した。従って、アルミを反射鏡として用いる場合は、少くとも反射面に陽極酸化や樹脂コート等の表面保護を施す必要がある。アクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）のわずかな減少は、トップコート材料の劣化が原因と思われ、今後の劣化度合いに十分注意する必要がある。

逆にアクリミラーのわずかな増加は、材料の屋外暴露試験での図3.4光線透過率の変化から判る様に、一部の材料は暴露当初表面の光沢が良くなるため光線透過率が増加し、その後劣化と共に減少する傾向があり、アクリル樹脂においても6ケ月後に光線透過率が最大を示し、従って反射面への入射光量増加と反射光の減衰が少くなり結果として、反射率の増加となって現われたと考えられる。図3.4の如く今後透過率が低下してゆくものとすれば、反射率も徐々に減少するものと推察できる。

又、反射率の減少量が著しいアルミ反射板以外の試料は、長波長領域800nm付近から初期値に対して増加が見られるが、これは試料の反射面の状態の変化等、何らかの原因で長波長領域だけがその影響を受けたためと思われるが明確ではない。

(4) 結　　論

ガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）及びアクリミラーはほとんど変化がなく現在最も有望な材料である。ガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）とアクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）は、12ケ月の段階では集光器の反射鏡として使用可能であるが、引続き試験を行ない判断する。又、50年度成果報告書で述べたアクリルアルミ蒸着鏡（トップコート無し）及び2種のアルミ反射板は不適当な材料であると結論出来る。

(5) 今後の課題

試験はこのまま継続してゆくが、アクリミラーでは強度を高めるため裏面に樹脂コートしたものやアクリル板を張り合せたものを、又アルミ反射板では、表面を陽極酸化や樹脂コート等により保護した反射鏡を検討する必要がある。

新たに、クロームメッキ鏡等の材料を加えてゆく予定である。

表 3.9　反射板材料の絶対反射率測定結果

単位〔％〕

波長(nm)	試料	A	B	C	D	E
330	初期値	20.08	19.55	53.34	57.06	77.42
	3ケ月	17.58	17.22	68.08	71.22	95.95
	6ケ月	16.92	18.62	52.30	55.88	72.25
	12ケ月	16.62	16.57	28.84	23.03	81.12
350	初期値	58.64	62.56	56.65	60.53	81.95
	3ケ月	54.20	57.47	60.85	63.25	86.66
	6ケ月	52.59	57.15	55.20	58.78	75.77
	12ケ月	51.61	54.90	29.42	23.78	79.08
400	初期値	84.60	91.17	63.07	65.39	86.46
	3ケ月	89.20	92.59	67.11	66.95	90.15
	6ケ月	86.70	92.66	60.22	63.22	79.55
	12ケ月	87.25	90.45	35.33	29.70	84.07
500	初期値	93.41	94.39	67.16	68.27	87.02
	3ケ月	95.10	95.92	67.73	68.48	88.49
	6ケ月	94.35	95.61	62.22	64.82	79.53
	12ケ月	93.85	95.23	38.83	33.73	81.89
600	初期値	92.92	92.55	63.48	64.23	85.35
	3ケ月	93.21	92.78	64.14	64.45	86.29
	6ケ月	92.25	92.88	59.36	61.74	78.85
	12ケ月	92.31	92.43	37.48	33.49	79.20
700	初期値	88.68	89.24	62.15	63.70	83.75
	3ケ月	89.42	89.42	63.50	63.61	84.26
	6ケ月	88.62	89.57	59.12	61.48	77.46
	12ケ月	89.61	89.79	38.38	34.94	78.37
800	初期値	82.59	83.14	62.01	63.24	80.28
	3ケ月	83.33	83.85	62.87	63.06	79.65
	6ケ月	82.85	83.83	58.77	60.84	73.84
	12ケ月	85.13	85.27	39.33	36.33	75.77
900	初期値	77.28	77.56	60.60	61.83	83.19
	3ケ月	79.04	79.57	62.27	62.33	83.39
	6ケ月	78.59	79.29	58.22	59.86	77.41
	12ケ月	83.29	83.18	39.67	36.60	81.58
980	初期値	74.37	74.28	60.08	61.53	83.80
	3ケ月	76.89	77.61	61.64	61.21	86.08
	6ケ月	76.62	77.32	57.87	59.01	79.34
	12ケ月	84.01	83.69	36.51	30.66	90.54

A；ガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）　　D；アルミ反射板（1080）

B；ガラス裏面鍍銀鏡（普　通　鏡）　　E；アクリルアルミ蒸着鏡・トップコート有り

C；アルミ反射板

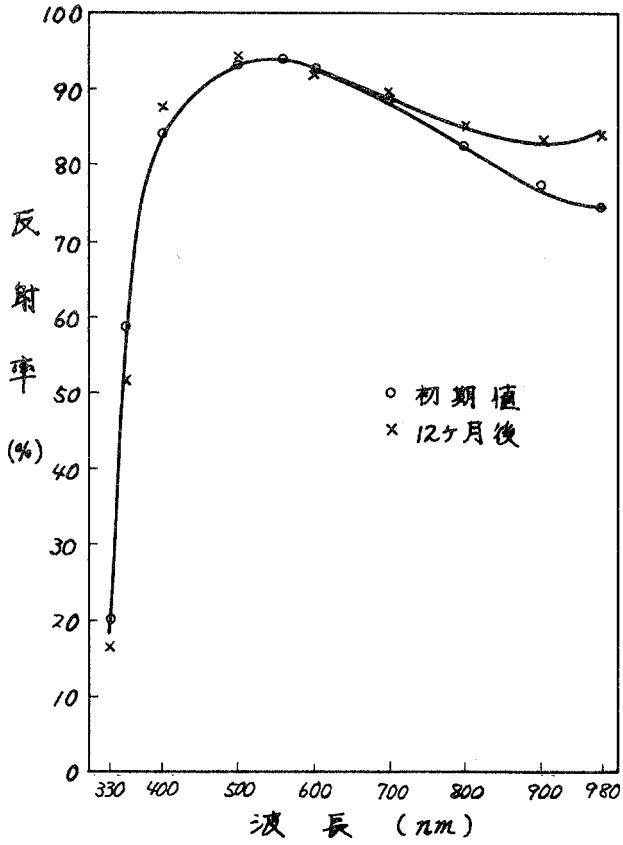


図３・１５　ガラス裏面鍍銀鏡（ミエミラー）の反射率の変化

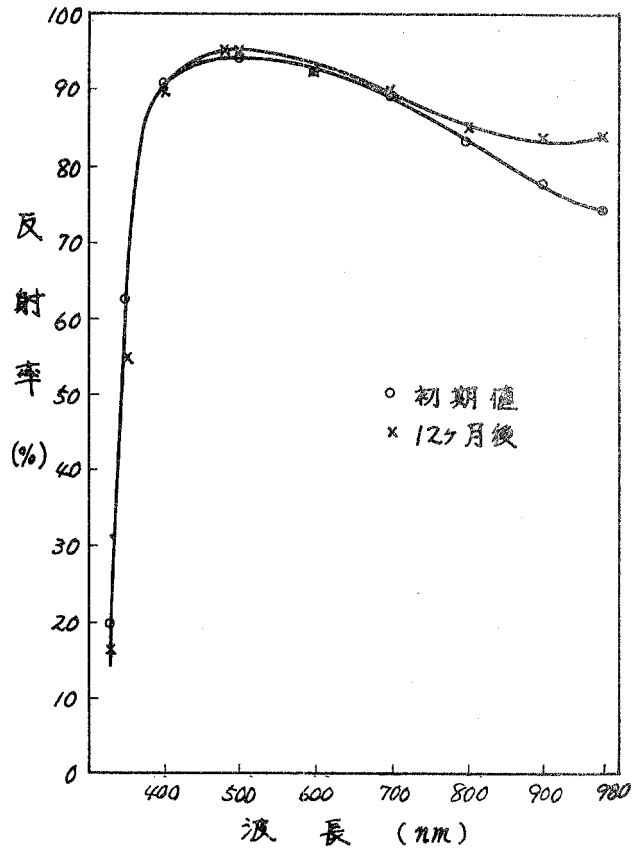


図３・１６　ガラス裏面鍍銀鏡（普通鏡）の反射率の変化

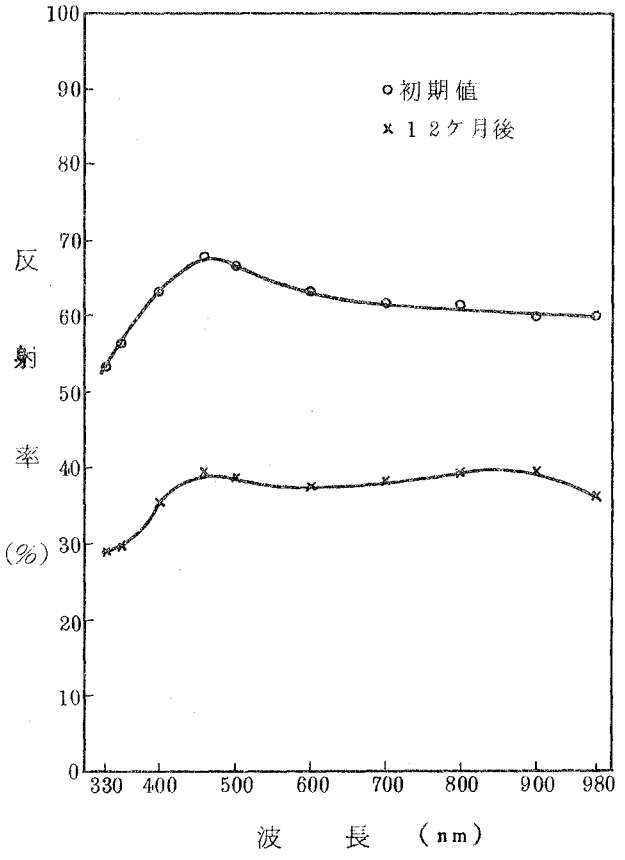


図3・17 アルミ反射板の反射率の変化

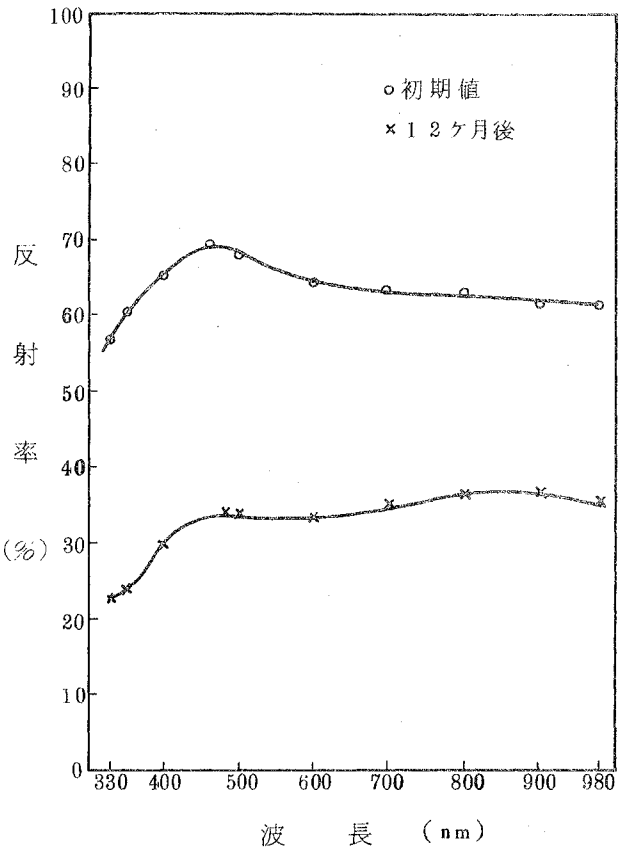


図3・18 アルミ反射板(1080)の反射率の変化

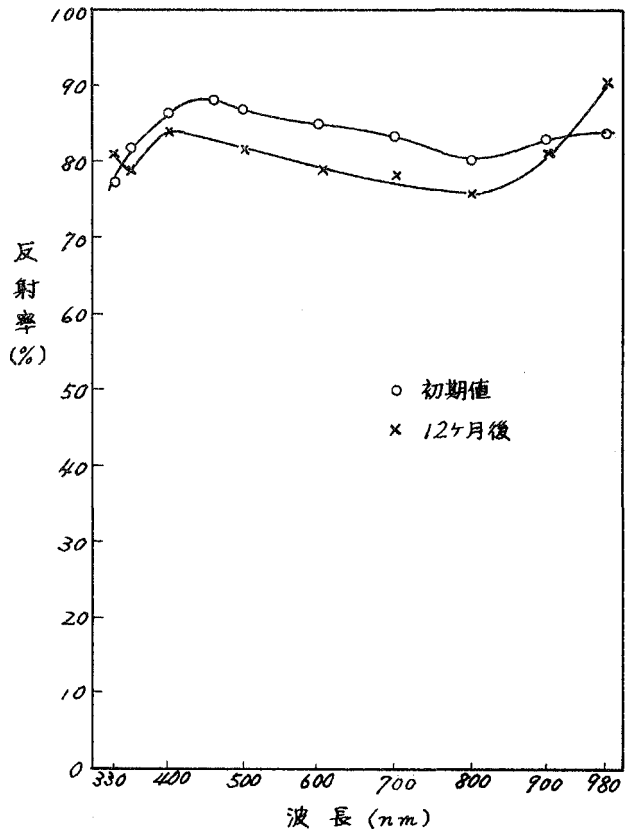


図３・１９　アクリルアルミ蒸着鏡（トップコート有り）の反射率の変化

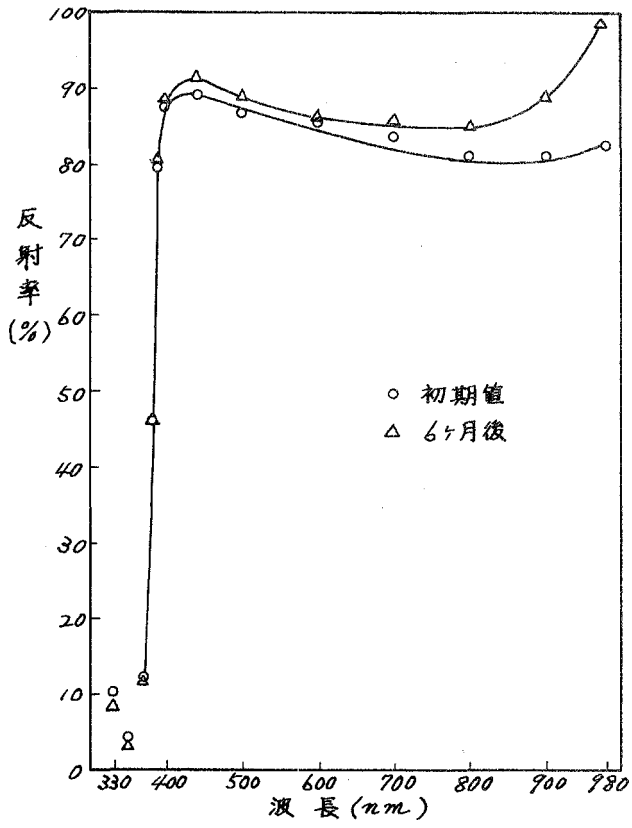


図３・２０　アクリミラーの反射率の変化

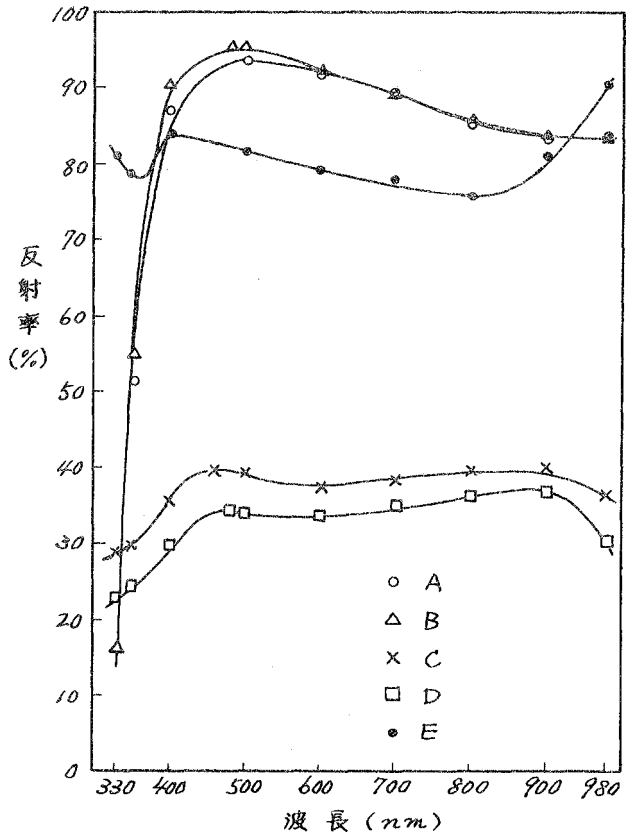


図3・21　12ケ月後の試験片A・B・C・D・Eの反射率

3.2　パッケージ構造設計の検討

3.2.1　概　　要

５０年度は自動生産に適した構造を考え、ＦＲＰを用いた埋込構造太陽電池の試作を行なったが、５１年度は更にＦＲＰ埋込構造太陽電池を主体にパッケージの構成材料であるガラス繊維，樹脂等の選択と構成材料の組合せ法を検討する一方で、本構造の信頼性を確認するため種々のパッケージを試作して概要を把握するための予備環境試験を開始した。

今後、この予備試験の結果をもとに構造の最適化を図ると共に安価な太陽電池装置及び自動生産装置開発のための基礎資料を得てゆく。ＦＲＰ（ガラス繊維強化プラスチックス）は、ガラス繊維を強化基材とし、これに主として不飽和ポリエステル樹脂，エポキシ樹脂等の熱硬化性樹脂で強化成形したプラスチック材料のことで、又アクリル樹脂等の熱可塑性樹脂を対象とした物をＦＲＴＰ（ガラス繊維強化熱可塑性樹脂）と呼ぶ場合もあるが、ここではすべてFRPと呼ぶ。ＦＲＰは、一般にプラスチック単体に比べて機械的強度に優れ、しかも耐候性劣化が少いことから長期間の屋外使用を行なう太陽電池パッケージ用材料として優れた特徴を有して

いる。さらにＦＲＰ埋込構造パッケージは、構造が簡単でかつ量産性があり、材料価格も安いことから安価なパッケージの製造が期待できる。

3.2.2　パッケージ構造

ＦＲＰを用いる場合考慮しなければならない構造上の要点は次の通りである。

i）機械的強度のバランスと長期間の形状安定性を考慮して、太陽電池素子を境界とした受光面側の部分と裏面側の部分におけるガラス含有率（ガラス繊維と樹脂との単位面積当りの重量比）を同一とする。

ii）膨張率の差による応力を緩和するため、素子表面部にはサーフェイシングマットを用いて樹脂リッチな層を設ける。

iii）同様の理由から、素子表面を応力吸収用の軟質透明樹脂であらかじめ被覆する。

iv）ＦＲＰ表面部は、耐候性を考慮して樹脂リッチとするため、サーフェイシングマット等を用いる。

v）更に耐候性を向上させるため、表面を弗素樹脂フィルム等で被覆する。

vi）光線透過率を良くするためには、ガラス繊維中に気泡を残さない事が必要であることより受光面側は樹脂の浸透を考慮したガラス繊維布等の構成とする。

以上の各要点を考慮した上で３種類のパッケージを試作し、試験を開始した。

(1)　不飽和ポリエステル樹脂によるＦＲＰ埋込構造

太陽電池素子をガラス繊維と不飽和ポリエステル樹脂とで一体成形する方法で、図３．２２に断面構造を示す。

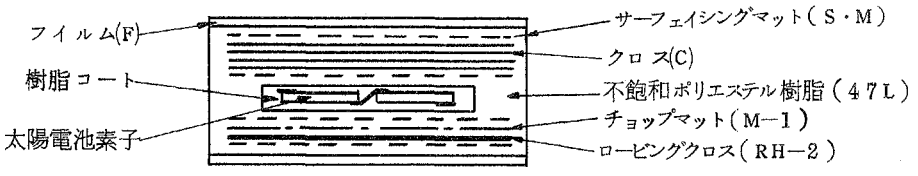


図３．２２　不飽和ポリエステル樹脂によるＦＲＰ埋込構造

又、使用した構成材料を表３．１０に示す。

表３．１０　ガラス繊維及びフィルム

記　号	構　成　材　料	重量又は厚み
F	１フッ化ビニールフイルム（テドラ１００ＢＧ１５ＵＴ）	t＝２５〔μm〕
S・M	サーフェイシングマット　（ＳＭ３６００Ｅ）	３０g／m²
C	クロス　（ＭＳ２５３Ｃ）	２０８g／m²
M－1	チョップマット　（Ｍ４５５ＦＡ）	４５０g／m²
RH－2	ロービングクロス　（ＲＨ６００ＡＡ）	６００g／m²

なお、樹脂コート用樹脂として、不飽和ポリエステル樹脂（軟質・ＦＷ－３１Ｘ，超軟質・７０Ｆ，硬質・４７Ｌ）、エポキシ樹脂（軟質・ＭＧ－１５１，硬質・ＸＭ－１４０１－１）シリコーン樹脂（軟質・ＣＸ－５２－００３）の６種類を用いた。

(2) アクリル樹脂によるＦＲＰ埋込構造

太陽電池素子をガラス繊維とアクリル樹脂とで一体成形する方法で、図３．２３に断面構造を示す。

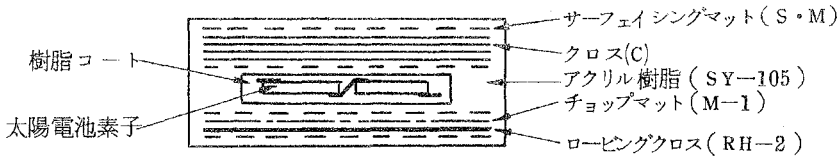


図3.2 3　アクリル樹脂によるＦＲＰ埋込構造

なお、樹脂コート用樹脂として、シリコーン樹脂（軟質・ＣＸ－５２－００３），アクリル樹脂（硬質・ＳＹ－１０５）の２種類を用いた。

(3) ＦＲＰ裏打ち構造

太陽電池素子をガラスに透明軟質樹脂で接着させた後、軟質樹脂全体を不飽和ポリエステル樹脂を用いたＦＲＰで裏打ちし、一体成形する方法で、図３．２４に本構造の断面図を示す。

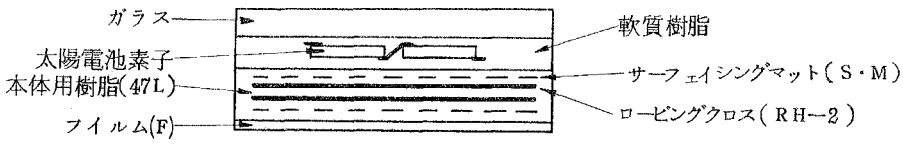


図3.2 4　ＦＲＰ裏打ち構造

なお、軟質樹脂として、不飽和ポリエステル樹脂（軟質・ＦＷ－３１Ｘ，超軟質・７０Ｆ）、エポキシ樹脂（軟質・ＭＧ－１５１）、シリコーン樹脂（軟質・ＣＸ－５２－００３＋カップリング剤，軟質・ＣＸ－５２－００３）の５種類を用いた。

3.2.3　試験及び試験結果

(1) 試験条件

下記に示す様な４種類の試験を行なった。

(a) 屋外暴露試験（ＪＩＳ．Ａ－１４１０に準ずる）

暴露面は正南面とし、水平に対して３３°傾斜させ、屋外の自然条件下に暴露した。

(b) 温湿度サイクル試験（ＪＩＳ．Ｃ－５０２４ ／ ＭＩＬ－２０２Ｄ，１０６Ｃに準ずる）

最高温度を７０℃（９５％ＲＨ）最低温度を－２０℃とし、各1.5時間保持移行1.5時間を１サイクルとした。

(c) 熱衝撃試験（ＪＩＳ．Ｃ－５０３０ ／ ＭＩＬ－２０２Ｄ，１０７Ｃに準ずる）

最高温度を７０℃最低温度を－２０℃とし、各３０分間保持移行数秒を１サイクルとした。

(d) 耐熱性試験（ＪＩＳ．Ｃ－５０２２に準ずる）

８０℃の一定温度下に放置した。

(2) 試　　料

試料は前記３種類の各パッケージ構造に対して、屋外暴露，温湿度サイクル，耐熱性試験用としては図３．２５(a)に示す様に３０cm×２５cm×４mmのＦＲＰ中に太陽電池素子５枚直列のものを１組埋込んだものを用い又、熱衝撃試験用としては、同図(b)に示す様な１５cm×１０cm×４mmのＦＲＰ中に太陽電池素子２枚直列のものを１組埋込んだものを用いた。

なお、各パッケージの周辺はシーリング樹脂（ＳＨ－７８０）を介してシリコーンテープで周辺を封着した。

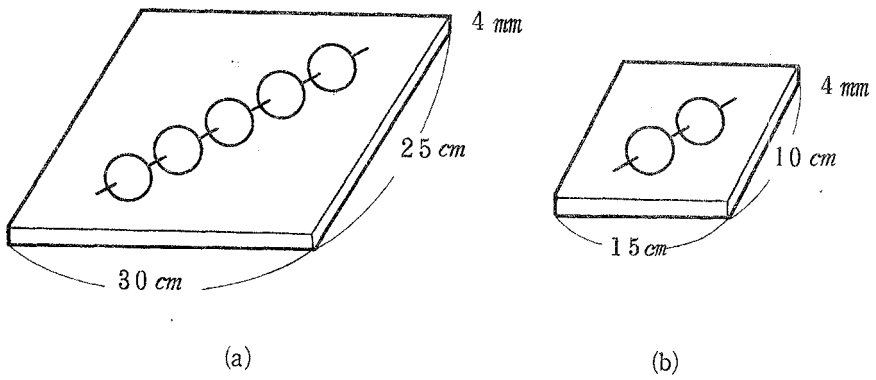


図３．２５　試料外観

(3) 評　価　方　法

各試験項目に対して表３．１１に示す様な試験期間毎に評価する予定で予備試験を開始した。

表３・１１　ＦＲＰパッケージ予備試験予定期間表

屋外暴露試験〔ケ月〕	1	3	6	9	12
温湿度サイクル試験〔サイクル〕	12	50	100	250	500
熱衝撃試験〔サイクル〕	30	80	200	500	1000
耐熱性試験〔Hr〕	30	80	200	500	1000

今回の評価方法は予備試験という性質上外観チエックのみを基準とし

i）材料間及び材料・太陽電池素子間の剥離

ii）材料の変色

iii）材料のクラック・亀裂・気泡・割れ

iv）ガラス繊維の露出状態

以上４項目を重点的に目視観察し、状態を把握した上で評価する。

(4) 試 作 結 果

3.2.2で述べた3種類のパッケージ構造のうちＦＲＰ埋込構造では樹脂コート用樹脂を、又ＦＲＰ裏打ち構造では軟質樹脂を用いたが、その中で数種類は剥離，白濁等の根本的な欠点を生じたため、表3.12に示す様な材料にあらかじめ絞り込んだのち、各試験項目毎に試料を各1個作成し、試験を行なった。

表3.12 試料一覧表

不飽和ポリエステル樹脂によるＦＲＰ埋込構造			アクリル樹脂によるFRP埋込構造			ＦＲＰ裏打ち構造		
樹脂コート用樹脂	No. 1	不飽和ポリエステル樹脂（軟質、FW−31X）	樹脂コート用樹脂	No. 4	アクリル樹脂（硬質、SY−105）	軟質樹脂	No. 5	エポキシ樹脂（軟質、MG−151）
	No. 2	不飽和ポリエステル樹脂（硬質、47L）					No. 6	シリコーン樹脂（軟質、CX−52−003 カップリング剤）
	No. 3	エポキシ樹脂（軟質、MG−151）					No. 7	シリコーン樹脂（軟質、CX−52−003）

(5) 結 果

ＦＲＰ埋込みパッケージでは、樹脂コート用樹脂と太陽電池素子間に剥離が見られ、特に温湿度サイクル，熱衝撃試験に著しい傾向が見られた。しかし、ＦＲＰ本体部分の変化はほとんど見られなかった。

ＦＲＰ裏打ちパッケージでは、軟質樹脂ＣＸ－５２－００３にカップリング剤（ガラスとの接着を改善する処理剤）を混合した試料のみに太陽電池素子表面への白濁が、温湿度サイクル耐熱性試験で見られた。他の試料は極めて良好であった。

表３．１３ に試験評価一覧表を示す

表３．１４ に総合評価を示す

3.2.4 考 察

ＦＲＰ埋込パッケージにおける剥離現象は、温度変化に伴なうガラス繊維，樹脂，太陽電池素子の膨張係数の違いによる応力集中が原因であり、太陽電池素子面はストレスを極めてよく吸収するシリコーン樹脂等で保護被覆を行なった上で一体成形する必要がある。

ＦＲＰ裏打ちパッケージにおける白濁現象は、裏打ちする不飽和ポリエステル樹脂が硬化する際発生するスチレンガスがシリコーン樹脂中に透過し、通常の場合なら太陽電池素子裏面にしか白濁が達していなかったものが表面にまで現われたのが原因であり、これは試料作成後50℃で4日間アフターキュアーすることによって解決できた。

3.2.5 結 論

以上の予備試験結果から、ＦＲＰ埋込，ＦＲＰ裏打ち構造共に、素子表面近傍の透明樹脂層の処理法に改善の余地が残ることが明らかとなった。表３．１３，３．１４に見るように、信

頼性の点ではＦＲＰ裏打ち構造が優れていると思われるが、経済性や自動生産性を考慮すればＦＲＰ埋込構造が最も有望と考えられるので、素子表面の処理用材料の組合せ法や処理条件などを、この予備試験結果を参考に再検討した上で、次の本試験用試料を作成する。

3.2.6　今後の課題

結論でも述べたように、素子表面付近の透明樹脂層用材料或いは処理法などが、ＦＲＰ埋込構造の実用化に当っては、最も重要な課題として明らかになった。今後は、ＦＲＰ用樹脂材料と表面層樹脂材料との組合せを各種の材料について検討し、その得失を把握し、最も適した材料を選択してゆくと共に、耐候性を改善するためのフィルムコート、更には自動生産を考慮した電極用端子取出し方法等の検討も行なってゆく。

表 3.13　試験評価一覧表

単位〔点〕

		0 1 〔ケ月〕	評価			0 12 50 100 〔サイクル〕	評価
屋外暴露試験	No.1	5 5	5	温湿度サイクル試験	No.1	5 4 4 3	3
	No.2	5 4	4		No.2	5 4 3 2	2
	No.3	5 5	5		No.3	4 4 3 3	3
	No.4	5 5	5		No.4	4 4 3 2	2
	No.5	5 5	5		No.5	5 5 5 5	5
	No.6	5 5	5		No.6	5 4 4 4	4
	No.7	5 5	5		No.7	5 5 5 5	5
		0 30 80 200 500〔サイクル〕	評価			0 30 800 200 500〔Hr〕	評価
熱衝撃試験	No.1	5 5 4 4 3	3	耐熱性試験	No.1	5 5 5 5 5	5
	No.2	5 5 5 5 5	5		No.2	5 5 5 5 5	5
	No.3	4 4 4 3 3	3		No.3	4 4 4 3 2	2
	No.4	4 4 3 2 2	2		No.4	4 4 4 3 3	3
	No.5	5 5 5 5 5	5		No.5	5 5 5 5 5	5
	No.6	5 5 5 5 5	5		No.6	5 5 4 4 4	4
	No.7	5 5 5 5 5	5		No.7	5 5 5 5 5	5

5点　：　優

4点　：　良

3点　：　可

2点　：　不可

表 3.14　総合評価

資料	総合評価〔点〕
No. 1	16／20
No. 2	16／20
No. 3	13／20
No. 4	12／20
No. 5	20／20
No. 6	18／20
No. 7	20／20

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ
工業技術院の許可を受けて下さい。