

高効率アモルファスシリコン太陽電池と その応用に関する研究

1992年1月

岸 靖 雄

高効率アモルファスシリコン太陽電池と その応用に関する研究

目 次

第 1 章 序章	1
第 2 章 アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池の高効率化	5
2. 1 緒言	5
2. 2 高効率 a-Si 太陽電池へのアプローチ	6
2. 2. 1 理論解析に基づく高効率化の検討	6
2. 2. 2 高効率化の指針	6
2. 3 a-Si の高品質化による変換効率向上	9
2. 3. 1 i 層の高品質化	9
2. 3. 2 p 層の高品質化	13
2. 3. 3 太陽電池特性	19
2. 4 結言	19
第 3 章 新しい集積型アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池の形成法	
-LWS 法(Laser Welding and Scribing method)-	24
3. 1 緒言	24
3. 2 集積型 a-Si 太陽電池における	
高能率パターンニング形成の必要性	24
3. 2. 1 集積型 a-Si 太陽電池モジュールの特徴	24
3. 2. 2 新方式レーザパターンニングによる	
高能率モジュール化の必要性	25
3. 2. 3 LWS 法の概要	31
3. 3 有限要素法による LWS 法の理論解析	35
3. 3. 1 多層薄膜構造体へのレーザ照射時の温度分布解析	35
3. 3. 2 導電層上でのレーザビーム溶着	42
3. 3. 3 絶縁層上での多層薄膜のレーザビーム切断	43
3. 4 LWS 法による集積型 a-Si 太陽電池の作製	46

3. 4. 1	実験装置と実験方法	46
3. 4. 2	実験結果及び考察	49
3. 5	LWS法による集積型 a-Si 太陽電池の評価	57
3. 5. 1	LWS法による集積型 a-Si 太陽電池の特性	57
3. 5. 2	LWS法による集積型 a-Si 太陽電池の信頼性評価	57
3. 6	結言	60
第4章	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の開発	62
4. 1	緒言	62
4. 2	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の構造	62
4. 3	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の作製	65
4. 3. 1	透明ポリイミドフィルム上への 高品質 a-Si 膜の形成	65
4. 3. 2	LWS法による集積型構造の形成	74
4. 4	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の特性	76
4. 5	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの作製	76
4. 5. 1	モジュール構造およびモジュール化プロセスの検討	76
4. 5. 2	信頼性評価	79
4. 6	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの応用	80
4. 6. 1	新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの特長	80
4. 6. 2	携帯用電源への応用	80
4. 6. 3	ソーラープレーンへの応用 ーアメリカ大陸横断飛行ー	84
4. 7	結言	92
第5章	新光透過型 a-Si 太陽電池の開発	96
5. 1	緒言	96
5. 2	新光透過型 a-Si 太陽電池の構造	96
5. 2. 1	光透過型 a-Si 太陽電池の従来構造	96
5. 2. 2	新光透過型 a-Si 太陽電池の構造	98

5. 3	新光透過型 a-Si 太陽電池の作製	100
5. 3. 1	ホール形状の検討	100
5. 3. 2	レーザービームによるホール形成	102
5. 4	新光透過型 a-Si 太陽電池の評価	102
5. 4. 1	Sun BIC 法の概要	105
5. 4. 2	Sun BIC 法による発電分布の解析	105
5. 4. 3	特性解析	108
5. 5	新透過型 a-Si 太陽電池の応用	108
5. 5. 1	太陽電池式自動車用サンルーフのモジュール構造	108
5. 5. 2	太陽電池式自動車用サンルーフの応用	110
5. 6	結言	114

第 6 章 建材一体型 a-Si 太陽電池モジュールの開発

	および住宅への応用	117
6. 1	緒言	117
6. 2	個人住宅における日射量のシュミレーション	119
6. 2. 1	日射量の計算方法	119
6. 2. 2	垂直面への日射量シュミレーション	124
6. 2. 3	屋根への日射量シュミレーション	124
6. 2. 4	設置場所の検討	128
6. 3	大面積光透過型 a-Si 太陽電池モジュール (窓一体型モジュール)	134
6. 3. 1	モジュール構造の検討	134
6. 3. 2	大面積モジュールの作製	134
6. 3. 3	大面積モジュールの評価検討	136
6. 3. 4	ビルの窓への設置	136
6. 4	スレート式太陽電池瓦	140
6. 4. 1	スレート式太陽電池瓦のモジュール構造の検討	140
6. 4. 2	スレート式太陽電池瓦の作製	142
6. 4. 3	スレート式太陽電池瓦の評価	142

6. 4. 4	個人住宅屋根への設置	151
6. 5	建材一体型 a-Si 太陽電池モジュールの応用	161
6. 5. 1	ソーラーエアコンシステム	161
6. 6	結言	165
第 7 章	総括	167
謝辞		173

第1章 序 章

最近、化石燃料の大量消費による世界的な地球環境問題のため、クリーンで無尽蔵なエネルギー源の開発が強く求められている。特に、太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換する太陽電池にはその期待が大きい。

太陽電池の開発は、1954年のPearsonらの単結晶シリコン太陽電池の開発により始まり¹⁾、人工衛星、灯台などの電源として利用されてきた。しかし、単結晶シリコン太陽電池は、複雑な製造プロセスやスライス工程などでの材料の未利用部分が多いため、価格が高く、限られた所でしか利用されなかった。

太陽電池の実用化のため、結晶系半導体材料と薄膜半導体材料を組み合わせた超高効率太陽電池を開発するという流れがある一方²⁾、低コスト化のため半導体材料自体を結晶シリコンとは異なり薄膜化するという方向がある。その代表例が、アモルファスシリコン(a-Si)太陽電池である。

a-Siの形成法として従来スパッタ法、真空蒸着法が知られていたが、これらの方法による膜は禁止帯中の局在状態が多いためにpn制御ができず、太陽電池の用途には適さないと考えられていた。しかし、シランのグロー放電分解によるa-Siは、水素を含むことによってその欠陥密度が下がり、pn制御ができるという報告が、1975年Spearらによりなされた。³⁾

a-Si太陽電池は1976年にCarlsonらによって初めて開発されたが、数mm角程度の小面積で変換効率はガラス基板上のpin型で2.4%⁴⁾、ショットキー型で5.5%⁵⁾であった。また、浜川らは1978年にステンレス基板上のpin型で変換効率4.5%を達成している。⁶⁾

a-Si太陽電池は、結晶系太陽電池に比べ、次のような特長がある。

- ①簡単な製造プロセスである。
- ②製造エネルギーが少ない（低温で形成できる）。
- ③必要膜厚が1 μm 以下と薄膜でよい（光吸収係数が大きい）。⁷⁾
- ④基板材料が安価である（ガラス、金属、樹脂などが利用できる）。
- ⑤ガス反応であるので大面積化が容易である。

a-Si太陽電池の工業化のための二つの技術が、筆者のグループによって1979年に開発された。一つは、一枚の基板から高い電圧が取り出せる集積型構造⁷⁾

で、もう一つは、不純物の混入が防がれ生産性を上げられる連続分離形成法⁸⁾である。これらの技術の開発によって 1980年に世界で初めてa-Si太陽電池を電源とする電卓が発売された。⁹⁾それ以降、腕時計、ラジオ、バッテリーチャージャーなど数多くのa-Si太陽電池搭載民生用機器が発売されてきた。

しかしながら、a-Si太陽電池を電力用として使用するには、高効率化、低コスト化、新型モジュールの開発がさらに必要である。

高効率化については、形成法、材料、セル構造の検討が進められている。形成法については、連続分離形成法が大きく寄与した。材料については、1981年に開発されたa-SiCが非常に有効であった。¹⁰⁾また、a-SiGe膜の研究も進められている。¹¹⁾さらに、セル構造についてはショットキー型⁵⁾, pin型⁴⁾, 逆pin型¹²⁾, スタック型¹³⁾などの研究が進められてきたが、現在ではpin型が主に用いられている。

このように高効率化のための多くの研究が進められてきたが、まだ変換効率は結晶系太陽電池の約半分程度で、電力用としては結晶系太陽電池が主流である。そのため、a-Si太陽電池の変換効率向上は必要不可欠である。

高効率化、低コスト化のためには、モジュール構造およびモジュール形成法の検討も非常に重要である。集積型構造は、これに大きな役割を果たしてきたが、形成法としてメタルマスク法やフォトリソグラフィ法が用いられてきた。

しかしこの方法の場合、工程数が多く大面積化ができないこと、有効面積が大きく取れないなどの問題があり、革新的な形成法が求められていた。

また、現時点では変換効率の点で結晶系太陽電池に劣るa-Si太陽電池を実用化していくには、さらなる低コスト化も重要であるが、a-Si太陽電池の薄膜であるという特長を活かしたモジュールの開発も重要である。筆者らによって通常の電力用太陽電池が開発されているが、さらに太陽電池の用途拡大のためには光透過型の太陽電池やフレキシブル太陽電池及び太陽光発電システム全体を考慮した新型太陽電池モジュールの開発が必要である。さらに、こうした新型太陽電池を用いた応用システムの開発も重要な課題である。

本研究は、以上の問題・課題を解決するため、a-Si太陽電池の変換効率の向上、集積型a-Si太陽電池の革新的形成法の開発、新型太陽電池モジュールの開発およびその応用開発を目的とするものである。

以下、第2章ではa-Si太陽電池の高効率化のため理論解析を行い、それを基に

i 層および p 層の高品質化を計る。i 層の高品質化においては不純物の低減を計るため分離形成UHV反応装置（スーパーチャンバ）の検討を進める。さらに p 層の高品質化のために新ドーパント材としてトリメチルボロンを用い、従来のジボランに比べ高品質化が可能なことを明らかにする。

第 3 章では、集積型構造の革新的な形成法としてハイパワーレーザを用いたパターンニング法が最適であることを明らかにし、工業的に有用なLWS法(Laser Welding and Scribing method)の提案を行う。さらに、有限要素法を用いて理論的解析を行うことによりLWS法の有用性について定量的な裏付けを試みる。

第 4 章では、太陽電池のさらなる実用性の拡大をめざしてa-Siの薄膜であるという特長を活かしたフィルムタイプのa-Si太陽電池について、その構造、形成プロセスについて検討を行うと共に、プラスチックフィルム上のa-Si膜の高品質化の方法について論ずる。さらに、その特長を生かした応用について検討する。

第 5 章では、太陽電池の多機能化、実用性の拡大をめざした新光透過型の太陽電池について、その構造および形成法について検討を進め、さらにSun BIC法により発電分布について解析を行う。また、自動車用サンルーフへの応用を検討する。

第 6 章では、個人住宅における日射量のシュミレーションを行い、新型太陽電池モジュールとして建材（瓦，窓）と太陽電池を一体化した建材一体型太陽電池の開発の必要性について論ずるとともに、その構造、設置法について検討を加え特性評価および信頼性評価を行う。さらに、建材一体型太陽電池の応用としてソーラーエアコンシステム等、個人住宅用太陽光発電システムの提案を行う。

第 7 章では、本研究を総括し結論を述べる。

参考文献

- 1) D.M. Chapin, C.S. Fuller and G.L. Pearson : J.Appl. Phys. 25
(1954) 676
- 2) 梅野 正義, 曾我 哲夫 : 応用物理 第55巻第8号 (1986) 791
- 3) W.E. Spear and P.G. Lecomber : Solid State Comm. 17 (1975) 1193
- 4) D.E. Carlson and C.R. Wronski : Appl. Phys. Lett. 28(1976) 671
- 5) D.E. Carlson : IEEE Trans. on Electron Devices ED-24 (1977) 449.
- 6) H.Okamoto, Y.Nitta, T.Adachi and Y.Hamakawa : Proc. Int. Conf.
Solid Films and Surfaces, Tokyo, (1978) 486
- 7) Y.Kuwano, T.Imai, M.Ohnishi and S.Nakano : Proc. 14th IEEE
Photovoltaic Specialists Conf., San Diego, (1980) 1408.
- 8) Y.Kuwano, M.Ohnishi, : S.Tsuda, Y.Nakashima and N.Nakamura :
Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 413.
- 9) Y.Kuwano, M.Ohnishi : Proc. 3rd E.C. Photovoltaic Solar Energy Conf.,
Cannes, (1980) 309.
- 10) Y.Tawada, K.Tsuge, M.Kondo, H.Okamoto and Y.Hamakawa :
J. Appl. Phys. 53(7) (1982) 5273.
- 11) G.Nakamura, K.Sato, Y.Yukimoto and Shirahata : Proc. 3rd E.C.
Photovoltaic Solar Energy Conf., Cannes, (1980) 835.
- 12) D.E. Carlson : J. Non-Crys. Solids 35 & 36 (1980) 707.
- 13) Y.Hamakawa, H.Okamoto and Y.Nitta : Appl. Phys. Lett. 35 (1979) 187.

第2章 アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池の高効率化

2. 1 緒 言

太陽光を直接電気エネルギーに変換する太陽電池は、石油ショックを契機としたエネルギー問題に加え、最近の地球環境問題により新しいエネルギー源として注目されている。特にアモルファスシリコン(a-Si)太陽電池は、低コスト太陽電池の本命として大きな期待が寄せられ、我が国では1980年から通産省工業技術院の「サンシャイン計画」のもとで電力用としての研究が精力的に進められている。

実用化における課題である変換効率の向上に関しては、研究開始当初は2mm角程度の小面積のpin型セルで2%程度と極めて低かったが、その後、形成法の改善、太陽電池構造の最適化、新材料の採用などを行うことにより、最近では小面積(1cm²)のシングルセルで11%を越える変換効率を得られている。しかし、電力用としての実用化をはかるためには、より一層の高効率化が必要であり、理論解析及び形成法や新材料の開発を基に、太陽電池を構成する各層の高品質化を更に進めていく必要がある。

a-Si太陽電池の高効率化における材料サイドからのキーポイントは、活性層であるi層の高品質化(低欠陥密度、正孔拡散長の改善)と太陽電池の窓層であるp層の高品質化(広バンドギャップでかつ高導電性化)である。これら膜質の改善に関しては、p, i, n各層をそれぞれ別の反応室で形成し、不純物の相互混入を低減した分離形成法や、広いバンドギャップ材料であるp型a-SiC膜の開発により、改善されたもののまだ十分とは言えない。

本章では、光学的、電氣的な理論解析に基づく高効率化の検討を行い、それに基づいて高効率化のための指針をまとめた。さらに、i層及びp層の高品質化を図り、変換効率の向上について論ずる。

2. 2 高効率a-Si太陽電池へのアプローチ

2. 2. 1 理論解析に基づく高効率化の検討

a-Si太陽電池の高効率化のためには、太陽電池内部でのエネルギー損失の解析とその低減が必要である。図2. 1に太陽電池の構造と各部でのエネルギー損失を示す。これらのエネルギー損失を数値解析した結果について以下に述べる。

光学的な損失について、図2. 1のp, i, n各層における吸収、反射、屈折を考慮して解析した。図2. 1の各層における膜厚、吸収係数、屈折率、内部量子効率、入射光及び反射光の複素振幅を、それぞれ d , α , n , η , a^* , b^* とすると、収集効率スペクトル $\eta_{coll.}(\lambda)$ は、

$$\eta_{coll.}(\lambda) = \sum_{k=p,i,n} \left\{ \eta_k \times \frac{n_g}{n_k} \{ |a_k^*(\lambda)|^2 + |b_k^*(\lambda)|^2 \} \cdot \exp(-\alpha_k(\lambda)d_k) \right\} \dots (2.1)$$

但し、 λ : 波長, n_g : ガラスの屈折率

と表される。 $\eta = 1$ の場合の計算結果を図2. 2に示す。

図2. 2から明らかなように、a-Si太陽電池の高効率化にはp層, i層の高品質化及びR(反射及び非吸収損失)を少なくするための透明電極の高品質化が重要であることが分かる。

電氣的な解析についても、内部電場分布の詳細な計算に基づく理論変換効率の算出¹⁾や、収集効率の計算機解析による深さ方向の特性の分布の評価(DICE法)²⁾などを行った。

これらの解析結果を総合し、図2. 1の①～⑦のエネルギー損失に対応する高効率化のポイントを表2. 1にまとめた。次に、このことについて詳述する。

2. 2. 2 高効率化の指針

表2. 1において、特に重要な点は、図2. 2からも明らかなように、i層とp層の高品質化である。

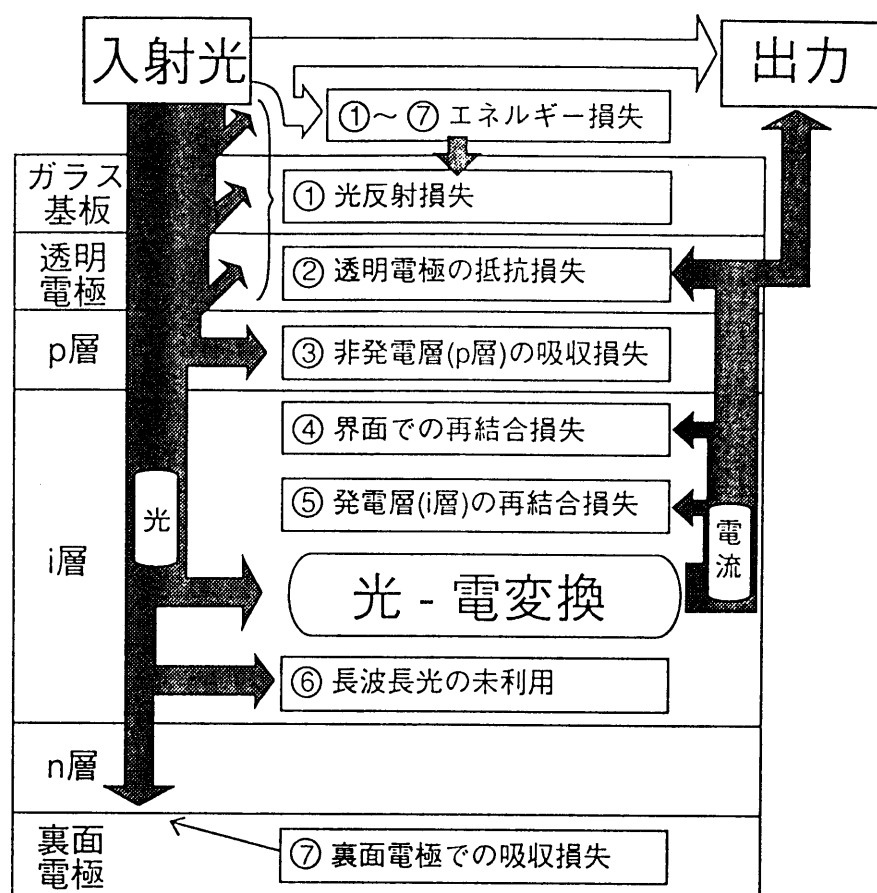


図 2. 1 a-Si太陽電池各部のエネルギー損失

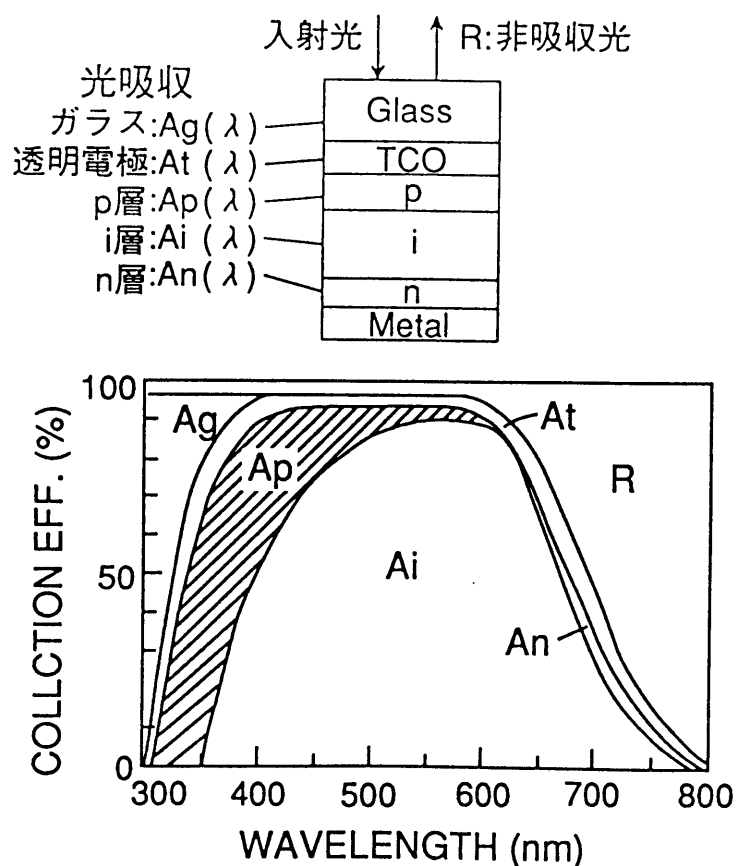


図 2. 2 pin型a-Si太陽電池の理論収集効率

表 2. 1 アモルファス太陽電池各部のエネルギー損失と改善手段

エネルギー損失	改 善 手 段
①光反射損失	テクスチャ構造(光閉じ込め効果)
②透明電極の抵抗損失	集積型構造(高電圧化による損失低減)
③非発電層(p層)の吸収損失	窓効果の大きい材料の開発, 非発電層の発電化
④界面での再結合損失	高品質グレーデッド層(接合状態の改善)
⑤発電層(i層)の再結合損失	高品質i層(移動度向上, 内部ポテンシャル向上)
⑥長波長光の未使用	高品質ナローギャップ材料
⑦裏面電極での吸収損失	高反射裏面電極(裏面光反射率向上)

(1) i 層高品質化の考え方

通常 a-Si 膜中には、酸素、炭素などの不純物が $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ と多量に含まれており、これらの不純物は太陽電池特性を低下させるばかりでなく、信頼性を悪化させる。したがって i 層の高品質化のためには、これらの不純物の低減が重要である。このために、製法面からのアプローチとして、装置の高真空化、低リーク化したスーパーチャンバを開発した。

(2) p 層高品質化の考え方

太陽電池の窓層である p 層は、広バンドギャップ ($E_{\text{opt}} > 2.0 \text{eV}$) でかつ高導電性であることが要求されると同時に、透明電極上に直接形成されるので、形成時の透明電極へのダメージも低減する必要がある。

これらの要求を満たすため、膜形成時のダメージの少ない光 CVD 法を検討した。また、膜の欠陥密度低減を目的とし、原料ガスの分子構造に着目したアプローチを進めた。

2. 3 a-Si 膜の高品質化による変換効率向上

2. 3. 1 i 層の高品質化

(1) 形成法および不純物濃度

a-Si 太陽電池の開発初期に用いられた製造装置は、図 2. 3 (a) に示すように p, i, n 各層を同一反応室で形成する単室反応炉であった。ところが、p 層形成時には B を、n 層形成時には P をそれぞれドーピングするため、この装置では残留不純物の相互混入が生じ、そのため膜質が悪く、高い変換効率を得られなかった。さらに、再現性、生産性にも問題があった。

そこで、図 2. 3 (b) に示すような p, i, n 各層を別々の反応室で形成する連続分離形成装置が開発された³⁾。この方法により、残留不純物の影響を除去でき、高効率な太陽電池を再現性よく形成できるようになった。また、この方式は量産性に富むため、現在の a-Si 太陽電池の量産機はほとんどすべて基本的にこの

方式を採用している。しかし、更に変換効率を向上するためには、膜中に $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 含まれる酸素、炭素などの不純物を低減する必要があった。

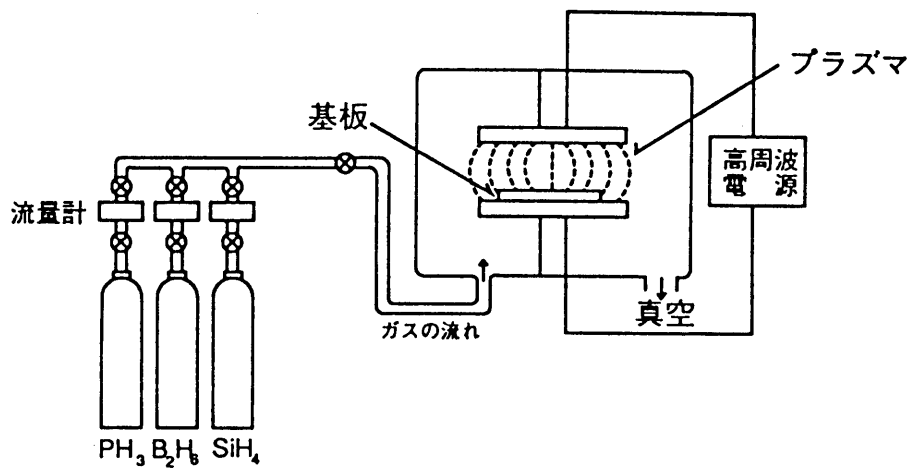
このために、連続分離形成装置をさらに高真空化したスーパーチャンバを初めて開発した⁴⁾。図 2. 3 (c)に示すように、ガス供給系、反応室、排気システムはすべてベーキング可能であり、チャンバ壁からの放出ガスを低減しているほか、これらの系について各々低リーク化を行い、超高真空対応となるように工夫している。スーパーチャンバを用いることにより、到達真空度は 10^{-9}Torr と従来の分離形成装置に比べて 2 ～ 3 桁向上し、脱ガス・リーク量も約 2 桁改善できた。スーパーチャンバにより形成した a-Si 膜中に含まれる酸素、窒素、炭素の濃度を SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) により測定した結果、スーパーチャンバで形成した a-Si 膜では、酸素及び炭素濃度が $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、窒素濃度が $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であり、従来装置に比べ不純物濃度を 1/10 ～ 1/3 に低減できた。

(2) 膜特性

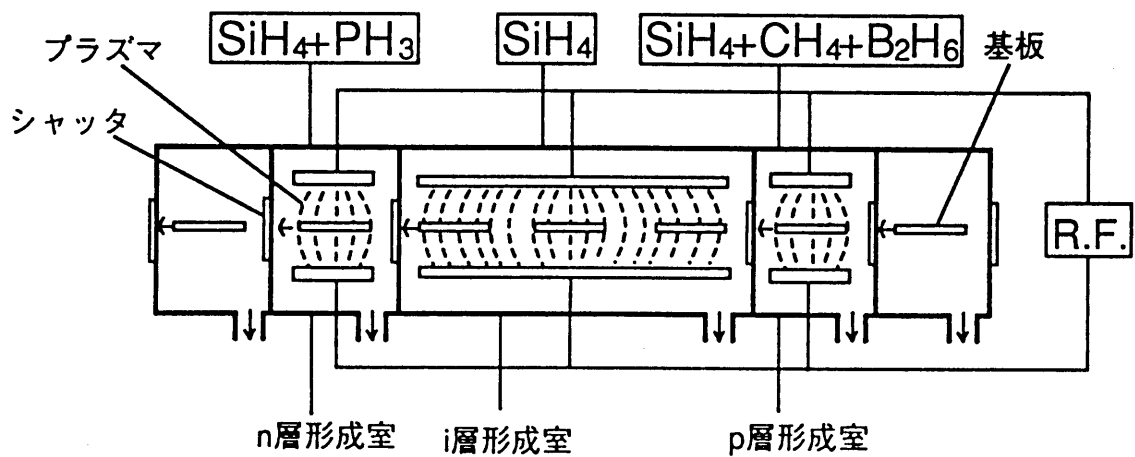
上述のように、スーパーチャンバにより a-Si 膜中の不純物濃度を低減できるため、膜特性の改善が期待される。

スーパーチャンバにより形成した a-Si 膜の C-V 特性により求めた空間電荷密度、電子スピン共鳴 (ESR) によるスピン密度、表面電位法 (SPV 法) による正孔拡散長などの膜特性を従来の分離形成装置で形成した a-Si 膜と比較して、表 2. 2 に示す。スーパーチャンバにより形成した a-Si 膜では、従来の分離形成装置により形成した a-Si 膜に比べ、空間電荷密度及び ESR スピン密度が約 1/2 に減少している。このことは、膜中のダングリングボンドなどの欠陥が減少しており、スーパーチャンバを用いることにより高品質な a-Si 膜が得られることを示している。また、太陽電池に应用する場合に重要な正孔拡散長も、表 2. 2 に示すように約 $1 \mu\text{m}$ と従来方式に比べ約 6 割改善されている。

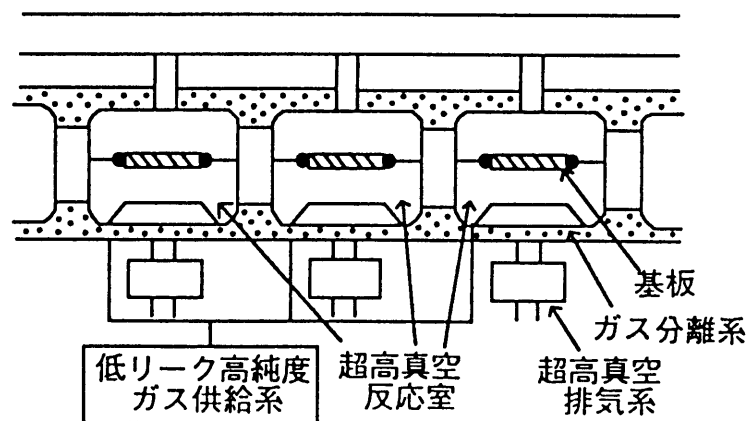
以上のように、スーパーチャンバ方式により a-Si 膜の高品質化が可能となり、a-Si 太陽電池の特性改善が期待される。



(a) 単室方式



(b) 連続分離形成方式



(c) スーパーチャンバ

図 2. 3 a-Si太陽電池の形成法

表 2. 2 スーパーチャンバ及び従来装置によるa-Si膜特性

		スーパーチャンバ	従来型形成装置
不純物濃度 (cm^{-3})	O	2×10^{18}	2×10^{19}
	N	1×10^{17}	2×10^{17}
	C	2×10^{18}	4×10^{18}
空間電荷密度 $\text{Ni}(\text{cm}^{-3})$		5×10^{14}	1×10^{15}
スピン密度 $\text{Ns}(\text{cm}^{-3})$		2×10^{15}	4×10^{15}
正孔拡散長 (μm)		1	0.6

2. 3. 2 p層の高品質化

(1)背景及び形成法

a-Si太陽電池の高効率化のためには、窓層であるp層の高品質化、特に広バンドギャップ($E_{opt} > 2.0\text{eV}$)でかつ高導電性のp層の開発が必要である。

従来のp型ドーパントであるジボラン(B_2H_6)は、図2. 4(a)に示すように、分子結合中にB-B結合を持つために、このB-B結合が膜中に取り込まれ易い。従来の B_2H_6 を用いたp型a-SiC膜の特性がよくない原因の一つは、膜中のB-B結合が欠陥密度を増加させるためと考えられる。そこで、図2. 4(b)に示す分子結合中にB-B結合を持たないトリメチルボロン($\text{B}(\text{CH}_3)_3$)を初めてp型ドーパントとして用いた。⁵⁾表2. 3に、今回の実験に用いた形成条件を光CVD法とグロー放電法に対して示す。光CVD法は低圧水銀灯を用い、グロー放電法は容量結合型の平行平板型電極を用いた。

(2)光CVD法によるp型a-SiC膜の特性

①欠陥密度とB-B結合

まず、膜の欠陥に関する評価を行うため、フォトルミネッセンス(PL)、光熱偏光分光(PDS)の測定を行った。

図2. 5に、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜と B_2H_6 ドーパ膜のPLスペクトルを示す。2つの膜は両方ともガス流量比で1%ドーピングし形成した。 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜のPL強度は、 B_2H_6 ドーパ膜のPL強度に比べ約10倍大きく、ノンドーパ膜のPL強度とほぼ同じPL強度を示す。このことは、 B_2H_6 は膜中に欠陥密度が多いため非輻射再結合準位を形成するのに対し、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ はほとんど非輻射再結合準位を形成しないことを示している。図2. 6に、低エネルギー領域の光吸収係数をPDSにより測定した結果を示す。膜中のB量は $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜及び B_2H_6 膜ともほぼ同じで、 $\sim 2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ である。この図から、0.9~1.5eVのエネルギー範囲で $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜は吸収係数が B_2H_6 ドーパ膜に比べ約1桁小さく、欠陥密度が少ないことがわかる。

以上のように、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ は B_2H_6 に比べ、膜中に欠陥を形成する度合いが少な

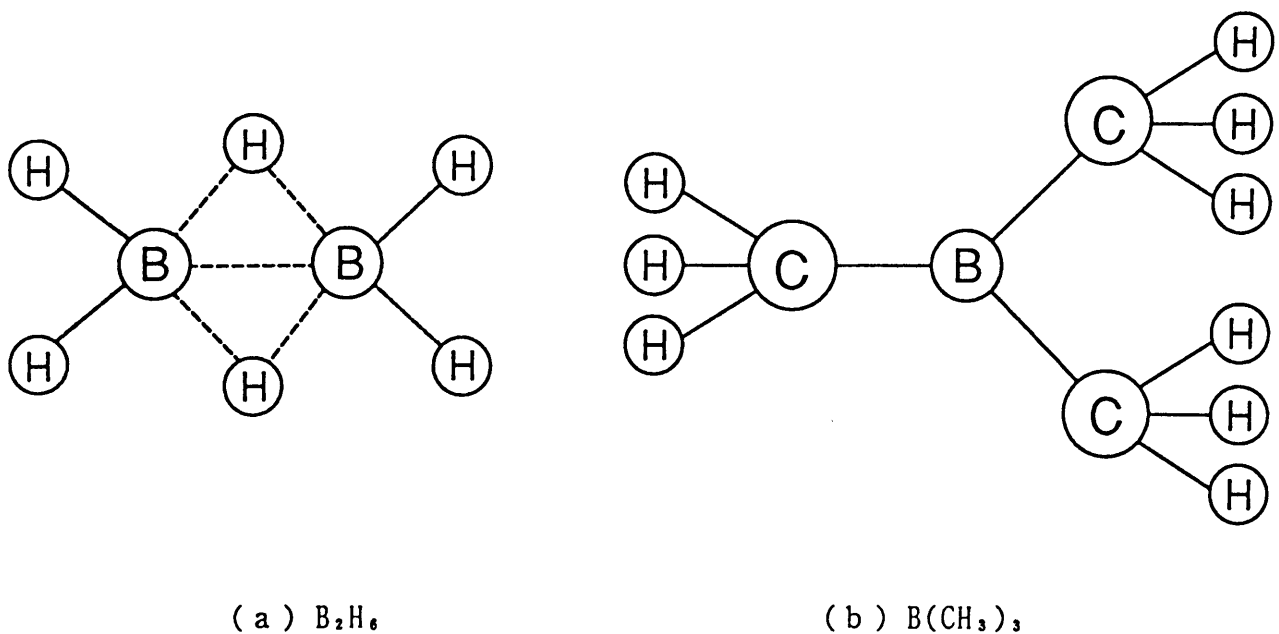


図 2. 4 ドーパントとして用いた分子の構造

表 2. 3 a-SiC 膜の反応条件

	Photo-CVD	Glow discharge
Material gas	Si_2H_6 C_2H_2 $B(CH_3)_3$ or B_2H_6	Si_2H_6 CH_4 $B(CH_3)_3$ or B_2H_6
Doping ratio	0.1 ~ 3%	0.1 ~ 3%
Substrate temperature	150°C ~ 300°C	150°C ~ 300°C
Deposition	Direct photolysis	C-coupled parallel electrode
Power	184.9nm 5mW/cm ² 253.7nm 30mW/cm ²	13.56MHz 20 ~ 50mW/cm ²

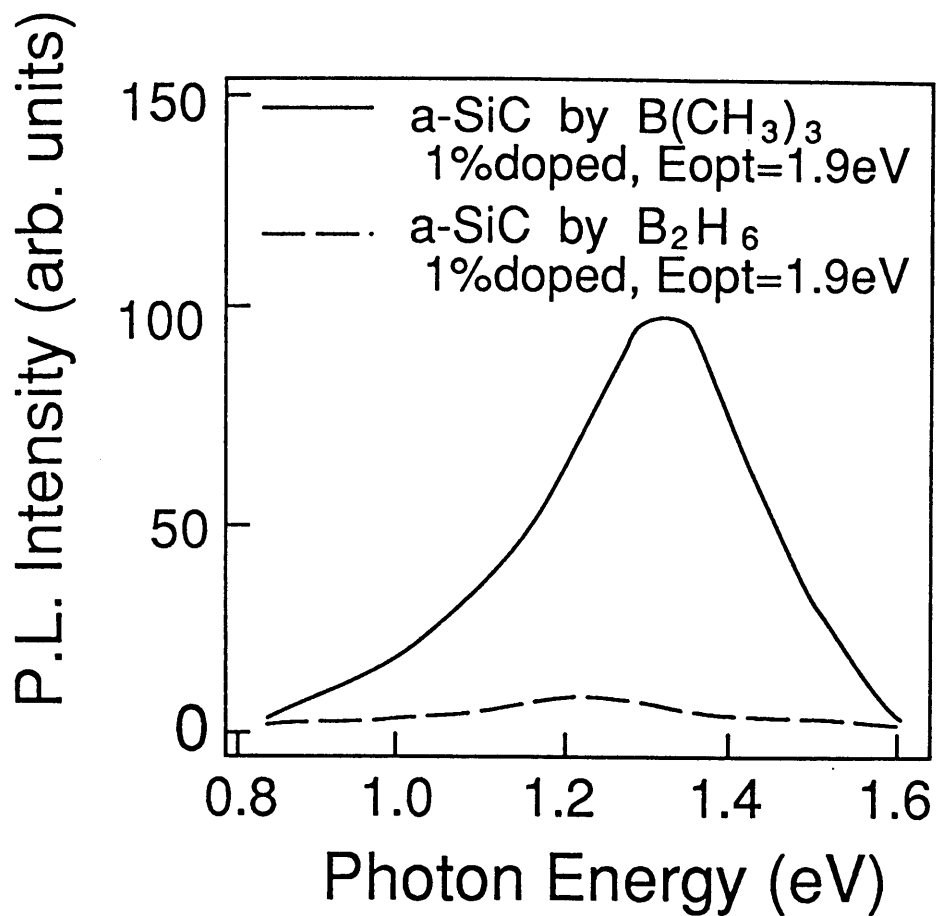


図 2. 5 p 形 a - S i C 膜の P L スペクトル

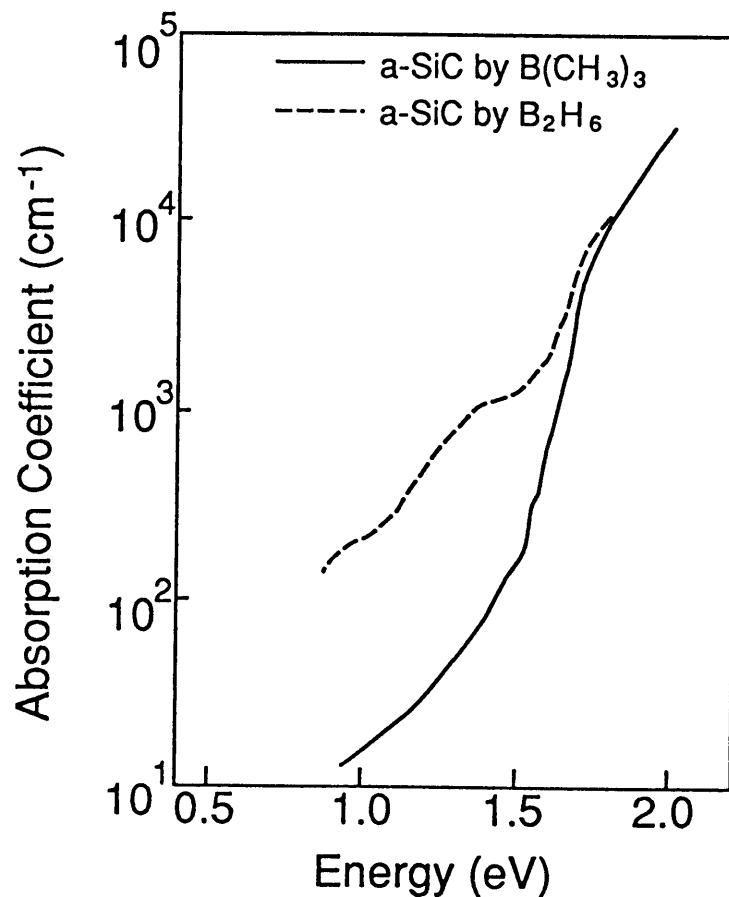


図 2. 6 p 型 a - S i C 膜の光吸収係数

く、優れた p 型ドーパントであることがわかった。この理由を調べるために、SIMS により膜中の B-B 結合の濃度を測定した。B-B 量は $^{21}(\text{B-B})^-$ により評価した。図 2. 7 に、 B_2H_6 ドーパ膜と $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜の膜中の B 量に対する B-B 量の比を示す。 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜の方が、膜中の(B-B 量/B 量)が約 1 桁小さくなっている。これは、図 2. 4 に示した分子構造の差によるものと考えられる。また、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜のほうが、 B_2H_6 膜に比べて欠陥密度が少ないのは、膜中の(B-B 量/B 量)が小さいことに起因していると考えられる。

②電気的特性

膜中の B 量に対する暗導電率の変化を、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜及び B_2H_6 ドーパ膜について図 2. 8 に示す。 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜は同量の B 量の B_2H_6 ドーパ膜に比べて暗導電率が約 2 桁向上しており、良好なドーピング特性が得られている。これは、前節で述べたように、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパした a-SiC 膜は欠陥が少ないため、ボロンが有効にドーパントとして働くためである。

図 2. 9 に、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜と B_2H_6 ドーパ膜の光導電率(σ_{ph})と光学的バンドギャップ(E_{opt})の関係を示す。 E_{opt} が 1.8~2.1 eV の範囲内で $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜は B_2H_6 ドーパ膜に比べて、 σ_{ph} が 1 桁以上向上している。特に $E_{\text{opt}} > 2.0$ eV の広バンドギャップ領域では、従来の B_2H_6 ドーパ膜の σ_{ph} が急激に低下していたのに対し、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜では σ_{ph} の低下は小さく、広バンドギャップ領域で今までにない高い光導電率を示している。このことより、新型ドーパントである $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ を用いることにより、従来になくバンドギャップが広く、かつ高光導電率の p 型 a-SiC 膜が開発でき、太陽電池用 p 層として有効であることがわかった。

(3) グロー放電法による p 型 a-SiC 膜の特性

前節で、光 CVD 法において $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ を用いることにより、高品質の p 型 a-SiC を形成できることを報告した。ここでは、 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ がグロー放電法においても有効かどうかを調べた結果について述べる。

$\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜と B_2H_6 ドーパ膜の光吸収係数を光熱偏光分光 (PDS) により測定した結果を、図 2. 10 に示す。 $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ ドーパ膜の 1.5 eV 以下の低エネルギー領域の光吸収係数は、 B_2H_6 ドーパ膜に比べて約 1 桁小さい。これから、

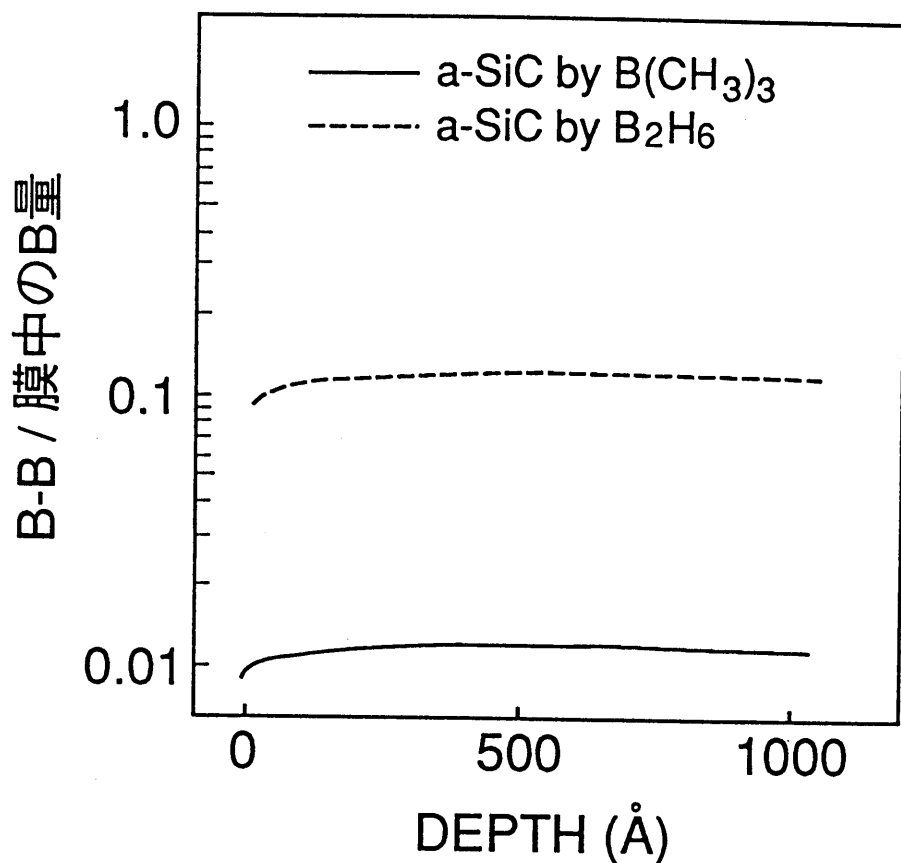


図 2. 7 p 形 a - S i C 膜の B - B 結合の解析

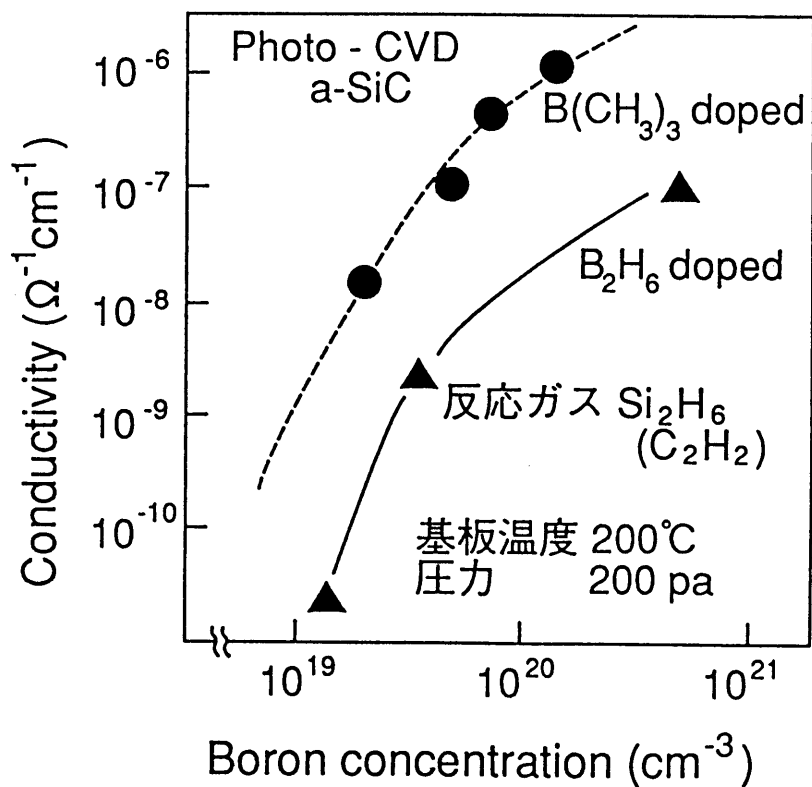


図 2. 8 p 形 a - S i C 膜のドーピング特性

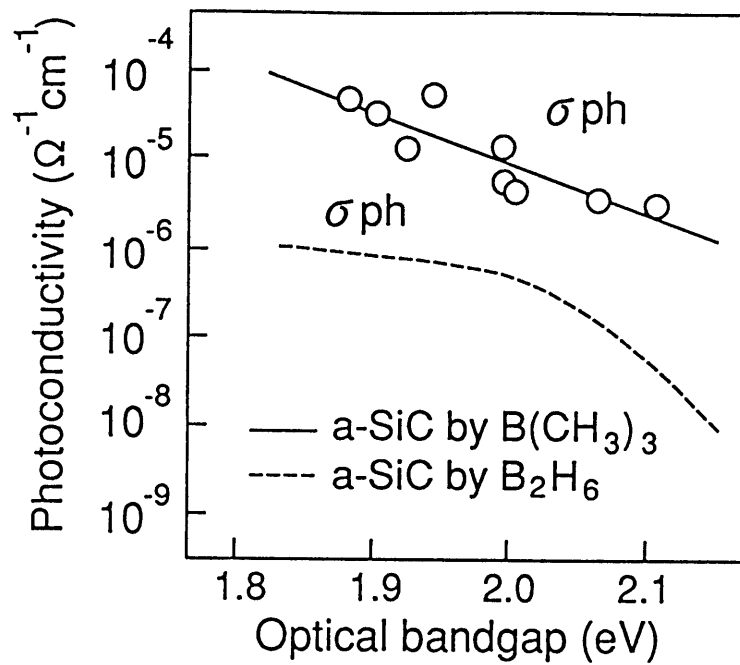


図 2. 9 光学的バンドギャップと光導電率との相関図

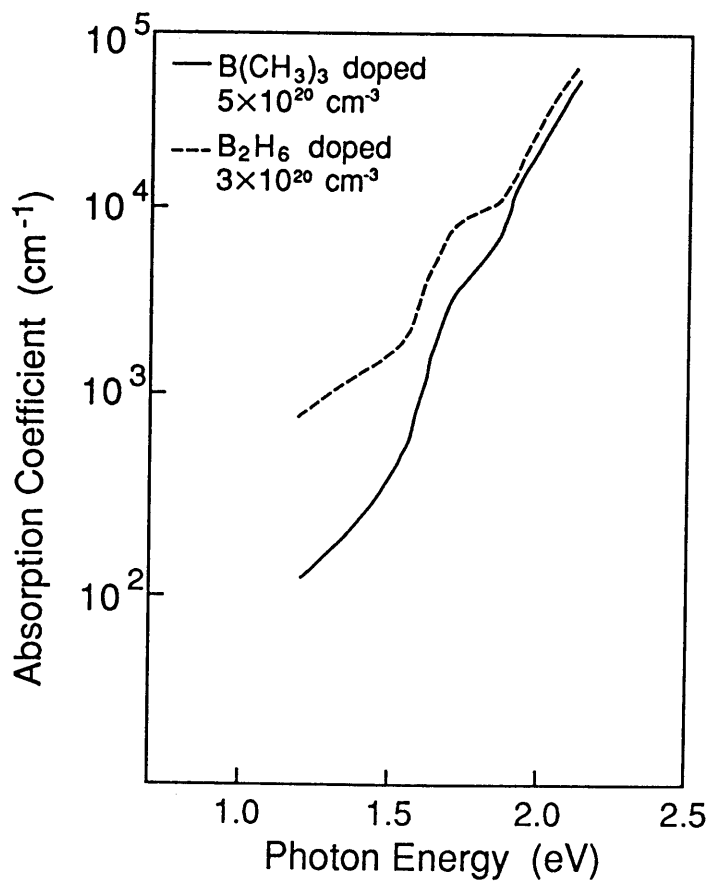


図 2. 10 p 型 a - S i C 膜の光吸収係数

$B(CH_3)_3$ を用いることにより、 B_2H_6 に比べドーピングによる欠陥密度を低減できることが分かる。

また、 B_2H_6 を高ドーピングした時に一般に観測されていたバンドギャップのナローイングが、 $B(CH_3)_3$ を用いることにより防げることがわかった。この結果を、図2. 11に示す。 B_2H_6 ドーピング膜では膜中のB量が $\sim 10^{21} \text{cm}^{-3}$ で E_{opt} が約0.1eV小さくなっているのに対し、 $B(CH_3)_3$ ドーピング膜では E_{opt} はほとんど変化していない。

以上のような結果に加え、 $B(CH_3)_3$ ドーピング膜は B_2H_6 ドーピング膜に比べて、広バンドギャップ領域で高い光導電率を有しており、グロー放電法においても $B(CH_3)_3$ を用いることにより、従来の B_2H_6 に比べ高品質なp型a-SiC膜が得られることがわかった。⁵⁾

2. 3. 3 太陽電池特性

以上に述べてきたように、製法面、材料面からのアプローチによりi層及びp層の高品質化を可能とし、a-Si太陽電池特性を向上できることが分かった。

図2. 12に、スーパーチャンバ方式を用いて作製した高品質i層やトリメチルボロンをドーピングしたp層などの技術を用いて形成したa-Si太陽電池の特性を示す。小面積(1 cm^2)で、世界最高レベルの変換効率である11.7%という変換効率を得た⁴⁾。

大面積太陽電池の場合は、小面積の場合に比べ、透明電極、a-Siの不均一性や集積型構造における接続部の電力損失や、集積型構造における無効部分などのため、通常、変換効率は2～3割低下する。しかし、上記の技術の採用に加えP/I界面及びI/N界面に欠陥を減少するためのバッファ層を形成することにより、図2. 13に示すように、10 cm角集積型サブモジュールで実効変換効率11.1%と、世界最高の値を得た⁶⁾。

2. 4 結 言

a-Si太陽電池の高効率化のために、理論解析を行い、それを基にi層及びp層の高品質化を行い、以下の結論を得た。

- (1) スーパーチャンバ（分離形成 U H V 反応装置）により、従来よりも膜中の不純物濃度及び欠陥密度の少ない高品質な a-Si 膜を形成できることを示した。
- (2) $B(CH_3)_3$ を初めて p 型ドーパントとして用い、従来の B_2H_6 を用いた場合に比べ、高品質な p 型 a-Si 膜の形成を可能にした。
- (3) 上記の技術を用い、小面積 (1 cm^2) で 11.7%，また 10 cm 角集積型サブモジュールで実効変換効率 11.1%（世界最高）を得た。

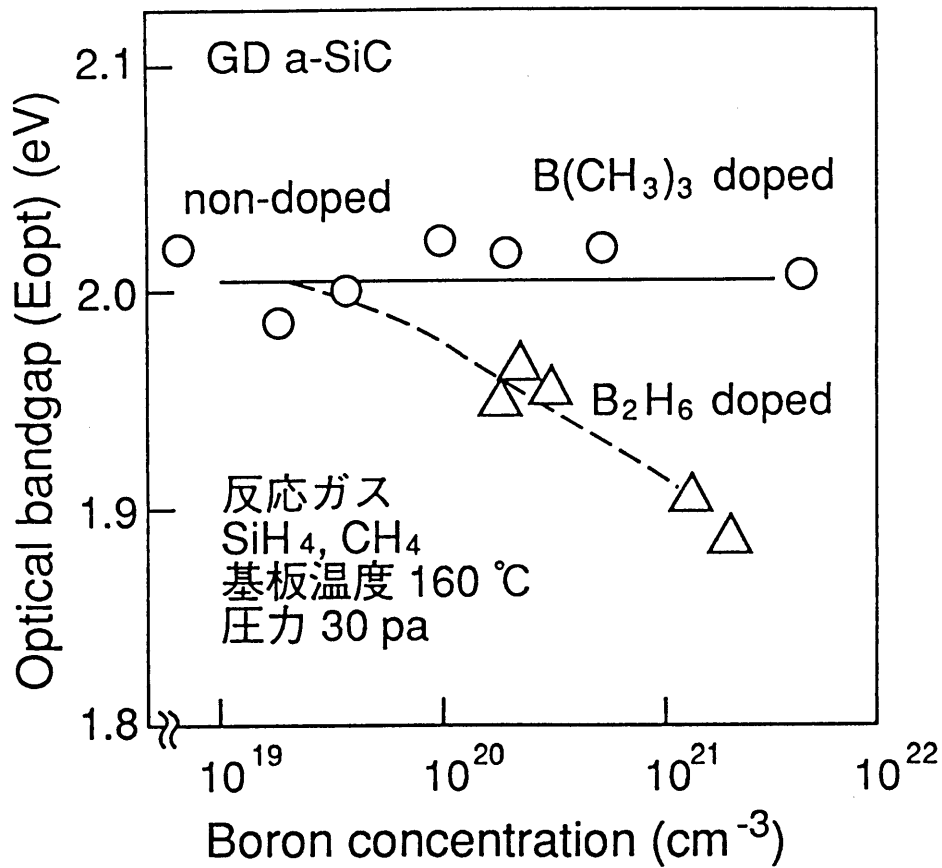


図 2. 11 光学的バンドギャップの膜中の B 量依存性

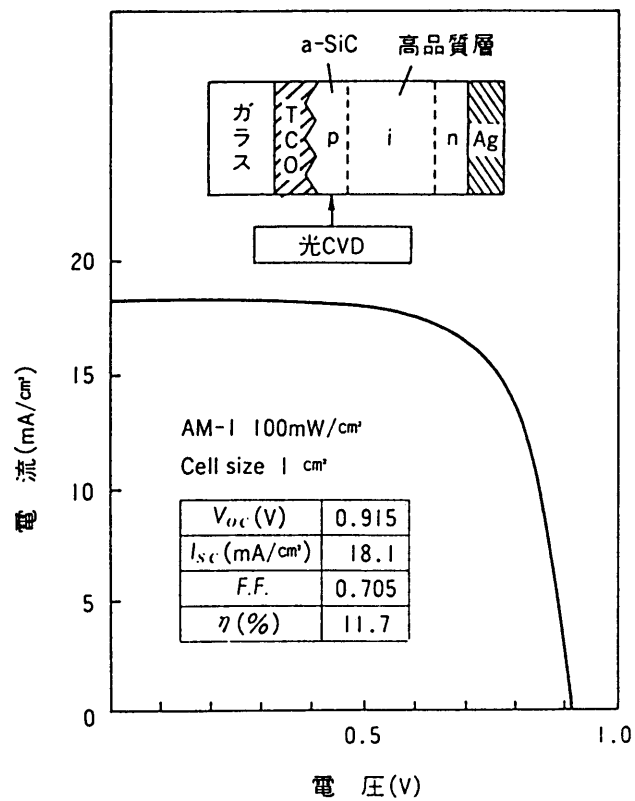
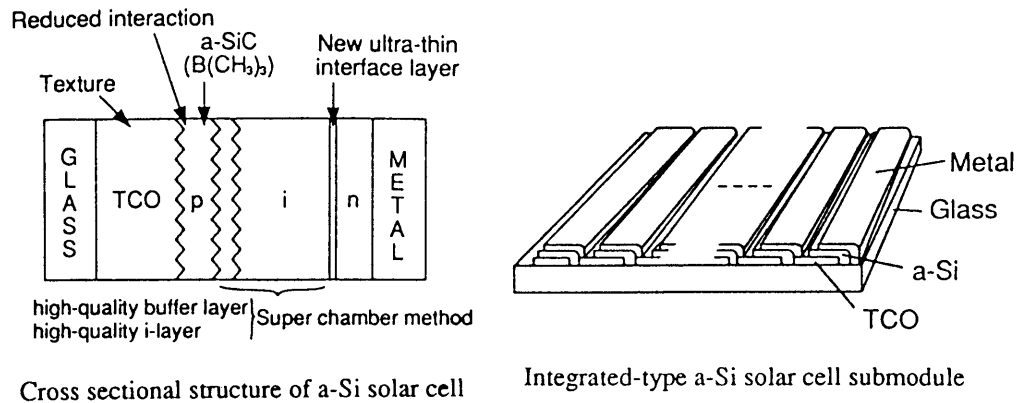


図 2. 12 a-Si太陽電池の出力特性



Module size ($10 \times 10 \text{ cm}^2$)
Integrated-type (14 cells in series)

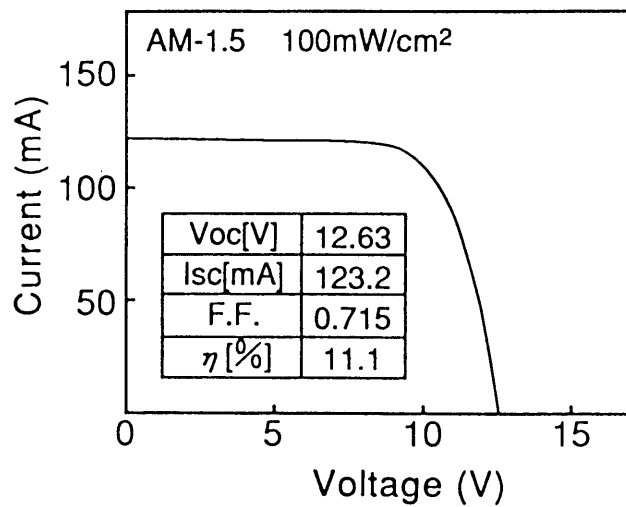


図 2. 13 集積型太陽電池サブモジュールの出力特性

参考文献

- 1) Y.Kuwano, S.Tsuda and M.Ohnishi : Jpn. J Appl. Phys. 21 (1982) 235.
- 2) T.Takahama, M.Isomura, S.Tsuda, H.Tarui, Y.Hishikawa, N.Nakamura, Y.Nakashima, T.Matsuoka, H.Nishiwaki, M.Ohnishi, S.Nakano and Y.Kuwano : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) 1538.
- 3) Y.Kuwano, M.Ohnishi, S.Tsuda, Y.Nakashima and N.Nakamura : Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 413.
- 4) S.Nakano, T.Takahama, M.Isomura, M.Nishikuni, K.Watanabe, N.Nakamura, S.Tsuda, M.Ohnishi, Y.Kishi and Y.Kuwano : 2nd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Beijing, China(1986)
- 5) S.Tsuge, Y.Hishikawa, N.Nakamura, S.Tsuda, S.Nakano, Y.Kishi and Y.Kuwano : Technical Digest of the International PVSEC-5, Kyoto, Japan (1990)
- 6) K.Wakisaka, H.Haku, M.Taguchi, K.Sayama, S.Tsuge, H.Dohjoh, Y.Hishikawa, M.Isomura, N.Nakamura, S. Tsuda, S. Nakano, Y.Kishi and Y. Kuwano : Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Las, Vegas, USA, (1991)

第3章 新しい集積型アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池の形成法 － LWS法(Laser Welding and Scribing method)－

3. 1 緒 言

集積型a-Si太陽電池は工業的に多くの利点を有するが、さらに一層の出力向上及び低コスト化をはかるには、高能率なパターニング技術の確立が最も重要である。本章では、この点を実現できる新しい方法としてのレーザパターニング技術について論じる。

従来、集積型a-Si太陽電池のパターニングはメタルマスク法またはフォトリソグラフィ法によって行われていた。メタルマスク法では有効面積が小さくa-Siのにじみがあること、フォトリソグラフィ法ではウェットプロセスがあるため、出力特性の低下を招くa-Si膜中のピンホールが発生しやすいこと、大面積化にも限界がある等の問題があった。これらの点を解決する新しいパターニング法としてレーザを用いてa-Si太陽電池を複数個のセルに分割し且つこれらのセルを互いに直列に接続し、集積型a-Si太陽電池を作製する加工方法を開発したので以下に論述する。¹⁾

3. 2 集積型a-Si太陽電池モジュールにおける高能率パターニングの必要性

3. 2. 1 集積型 a-Si 太陽電池モジュールの特徴

本研究で対象としている電力用太陽電池は、一般に面積が大きく入射光量も強いいため出力電流が大きくなり電極の抵抗による電力損失が問題となる。a-Si太陽電池の場合、ITO (Indium Tin Oxide) や SnO_2 などからなる透明電極はAlなどからなる金属電極に比べてかなり高抵抗であるため、大面積になるとこの透明電極による電力損失が大きいと考えられる。

従って、電力用a-Si太陽電池の高効率化には透明電極による電力損失を低減するため、出力電流が透明電極を流れる距離をできるだけ短くすることが重要である。

a-Si太陽電池の場合は、ガラス基板上に形成すること、a-Siがプラズマ反応で形成されてしかも薄膜であること等の特長を生かした集積型構造にすることにより、透明電極の電力損失を低減させることが可能と考えられ、筆者らのグループが図3. 1に示す集積型a-Si太陽電池を開発した。²⁾ この構造は一枚のガラス基板上に多数のセルをカスケード接続したものであり、ガラス基板上に形成されたセルはICの製造工程と同じような適当なパターンニングによって透明電極と金属電極を通じて、隣接するセルとそれぞれ直列に接続されている。

集積型a-Si太陽電池は、以下のような特長を持つ。

- ①一枚の基板で高い電圧を発生させることができる。
- ②高電圧、小電流動作であるため、透明電極による電力損失を小さくすることができる。
- ③冗長性をもたせたモジュール設計ができる。
- ④モジュールの組立工程を簡易化できる。

3. 2. 2 新方式レーザパターンニングによる高能率モジュール化の必要性

(1) 従来のマスク方式による集積型a-Si太陽電池のパターンニング法の問題点

集積型a-Si太陽電池の形成には透明電極、a-Si、金属電極のパターンニングが必要であり、パターンニング技術の確立が集積型a-Si太陽電池の実用化に大きく寄与するものと考えられる。

従来からのパターンニング法としては、図3. 2の工程に示すメタルマスク法またはフォトリソグラフィ法があった。代表的な工程をあげると、まずガラス基板上の透明電極をスクリーン印刷法と化学的エッチングによって分離する。次にレジストを除去し洗浄、乾燥した後、メタルマスク法の場合は、メタルマスクを基板にセットしa-Siを形成する。フォトリソグラフィ法の場合は、a-Siを基板の全面に形成し、レジスト、フォトマスクを用いてパターンニングを行い、a-Siをエッチングする。最後に金属電極も同様にパターンニングを行って完成する。

これらマスクを用いたパターンニング方法には次のような問題点があった。

- ①両方法とも、多くの形成プロセスを必要とし、しかも取扱いうる基板寸法に制約がある。

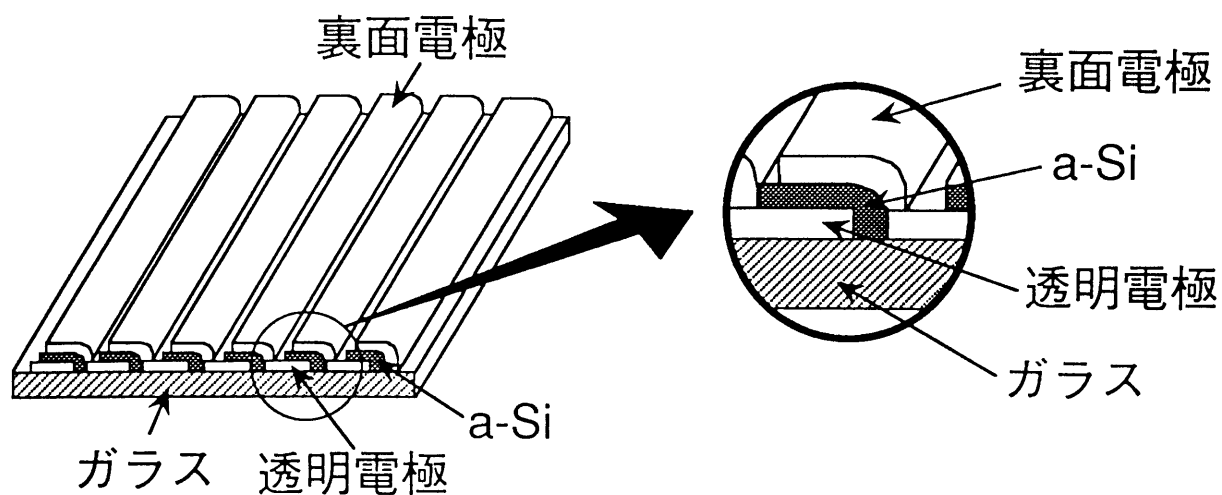


図 3. 1 集積型 a-Si 太陽電池の構造

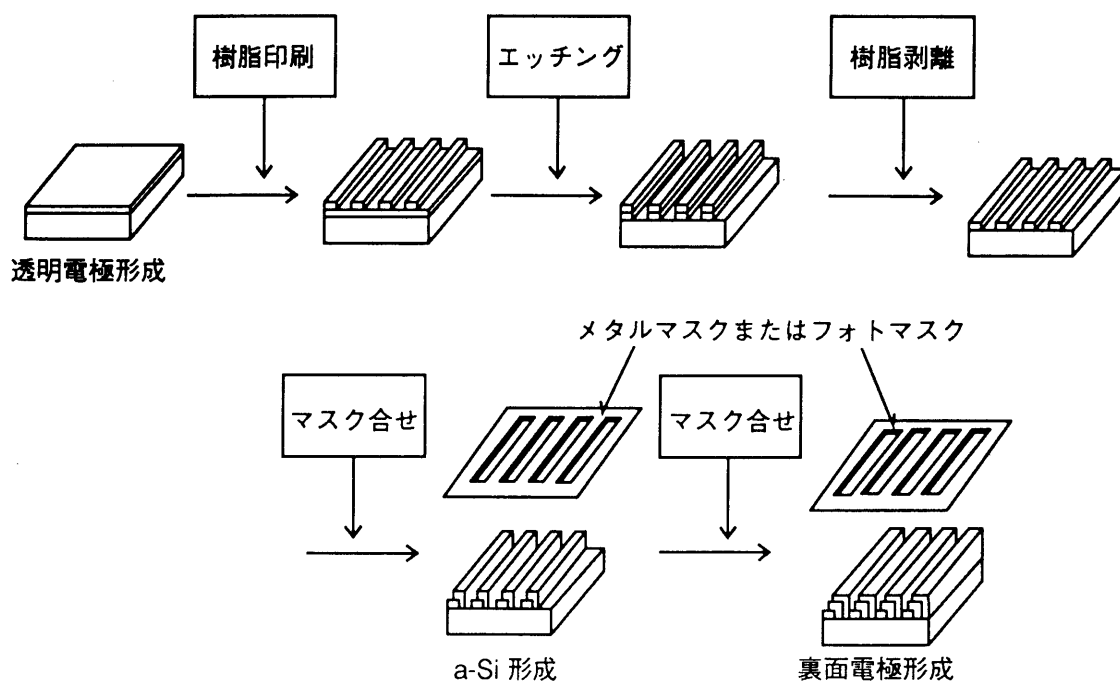


図 3. 2 集積型 a-Si 太陽電池の形成方法
(メタルマスク及びフォトリソグラフィ法)

②メタルマスク法では、基板内の太陽電池の有効面積が小さく、a-Siのにじみがある。

③フォトリソグラフィ法では、工程中にウェットプロセスがあり、そのため出力特性の劣化を招きやすく、また、a-Si膜中にピンホールが発生しやすい。

従って、以上の点を解決するために新しいパターニング技術を開発する必要があった。

(2) 従来のレーザパターニング法の特徴と問題点

筆者等のグループは、これまでにマスク法による問題点を解決するために図3.3に示すような薄膜形成とレーザビームによるパターニングを交互に行うマスクレスの集積型a-Si太陽電池の形成法を提唱してきた。³⁾

集積型a-Si太陽電池をレーザパターニング法によって形成することにより、次のような利点が考えられる。

- ①形成プロセスの減少
- ②基板内の有効面積の増大
- ③大面積及び任意形状のモジュールの作製
- ④完全ドライプロセスの確立
- ⑤連続一貫生産及び自動化生産

①の形成プロセスの減少については、従来の12プロセスから6プロセスへ大幅に低減することができ、低コスト化につながる。

②の有効面積の増大について、集積型太陽電池では、短冊状のセルが直列に接続されており、透明電極に起因する電力ロスセルを多段にするほど少ないが、一方セルの接続に要する発電に寄与しない無効面積は増大する。一般に、メタルマスク方式では接続に要する幅は3mm程度となるが、レーザパターニング法では1mm以下にすることができるので、有効面積が増加し出力を向上させることができる。

③の大面積化に関しては、レーザパターニングでは本質的に基板寸法を制約する要素がなく、40cm角以上のモジュール形成も可能である。

このように、レーザパターニング法は従来のパターニング法に比べて多くの利点を持つ。しかし、a-Si太陽電池にレーザパターニング技術を応用する場合には、

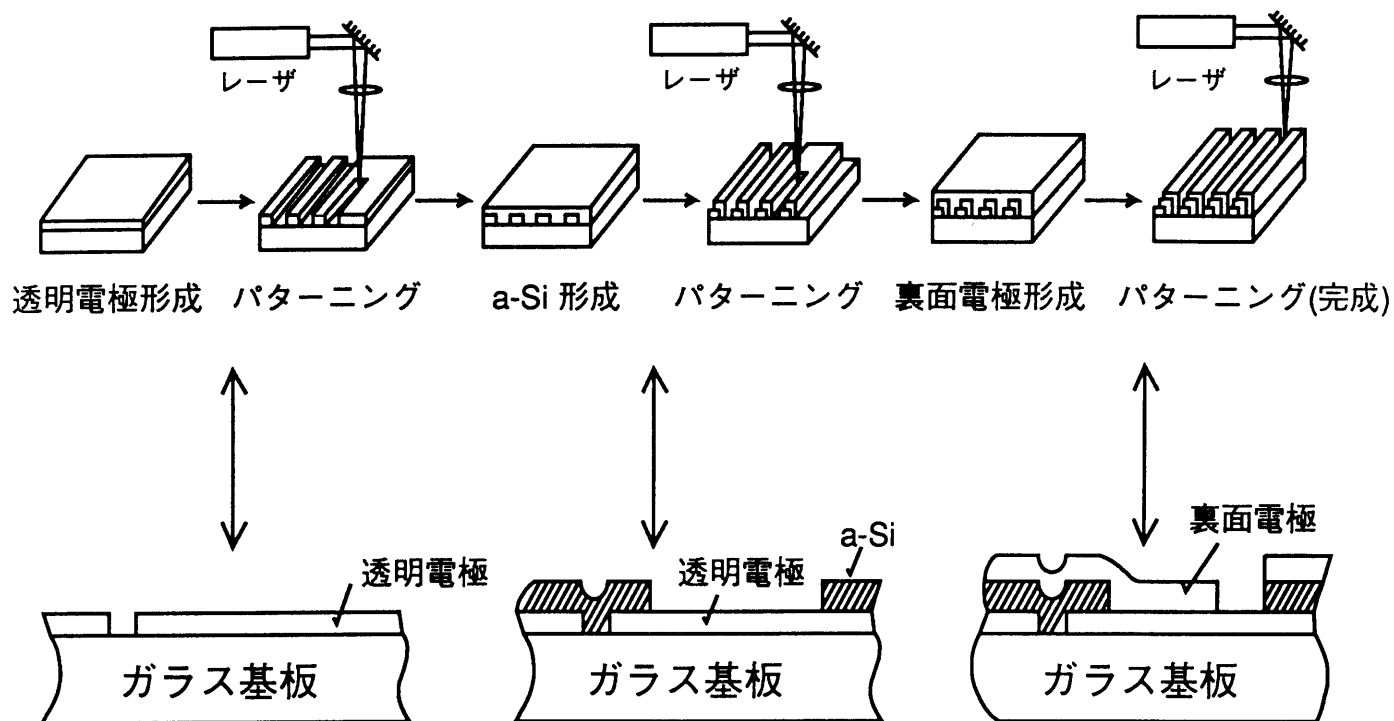


図 3. 3 レーザパターニング法による集積型 a-Si 太陽電池の形成

以下の点で困難な問題が存在する。

①異種物質の加工

一般的なレーザ加工技術においては通常一種類の材料をカットするのが主であったが、集積型a-Si太陽電池のレーザパターニングでは図3. 4に示すように透明電極、a-Si層、金属電極という全く性質の異なる材料をそれぞれのパターンに応じて順次パターニングしていく必要がある。そのために、熱的特性や光学的特性の相違により、各層ごとの加工特性が異なり、レーザ加工条件の精密なコントロールが要求される。

②薄膜性

一般にレーザ加工を行うと加工部分の端部は、図3. 5のように盛り上がった加工された物質の飛沫が飛び散って加工物体上に付着する。a-Si太陽電池では各層がいずれも0. 3 ~ 1 μm の薄膜であるため、上記のような加工部の盛り上がりや飛沫が特性に悪い影響を及ぼすので、それらが生じないような高精度な加工が必要である。

③選択性

集積型a-Si太陽電池は図3. 6に示すように多層構造であるため、1つの層を加工する時に他の層の膜質を劣化させないように各薄膜に対し選択性のある加工が必要となる。すなわち、a-Si層を加工する際には透明電極にダメージを与えない条件で、また金属電極を加工する際にはa-Si層を変質させない条件（金属電極を加工する際の熱影響でa-Si層が多結晶化すると、導電率が上がりリーク電流が生じる）で加工しなければならない。

そのため、従来の集積型a-Si太陽電池のパターニングにおいてはレーザ照射パワーの精密なコントロールや周辺技術の改良の必要性など、量産性の妨げとなる多くの問題があった。

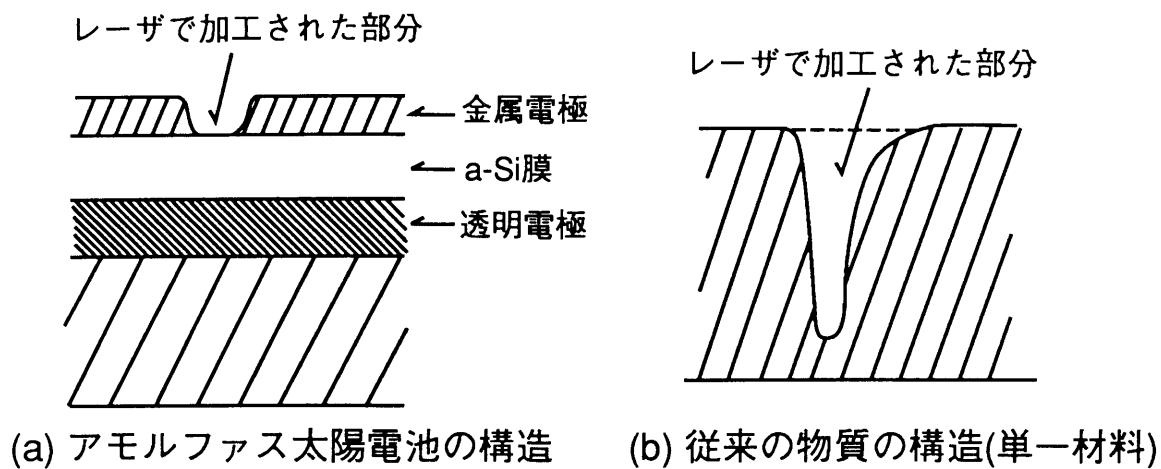


図3. 4 レーザで加工される材料の構造

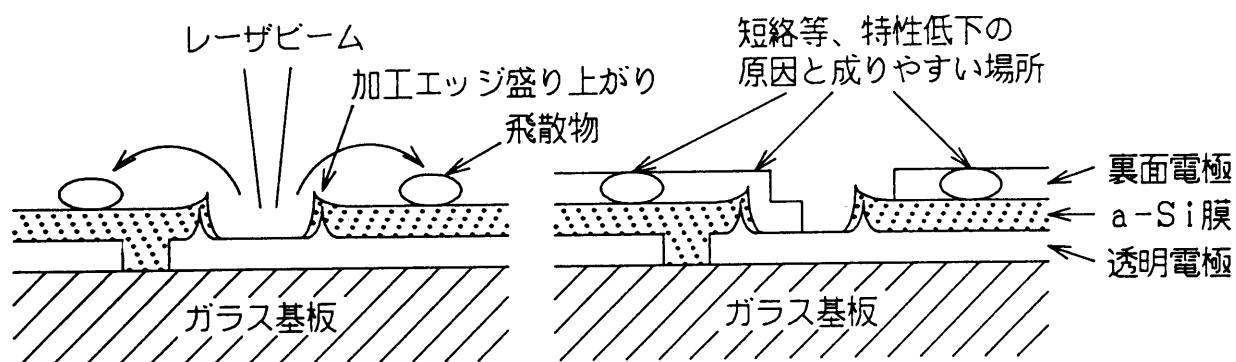


図3. 5 集積型 a-Si 太陽電池の薄膜性

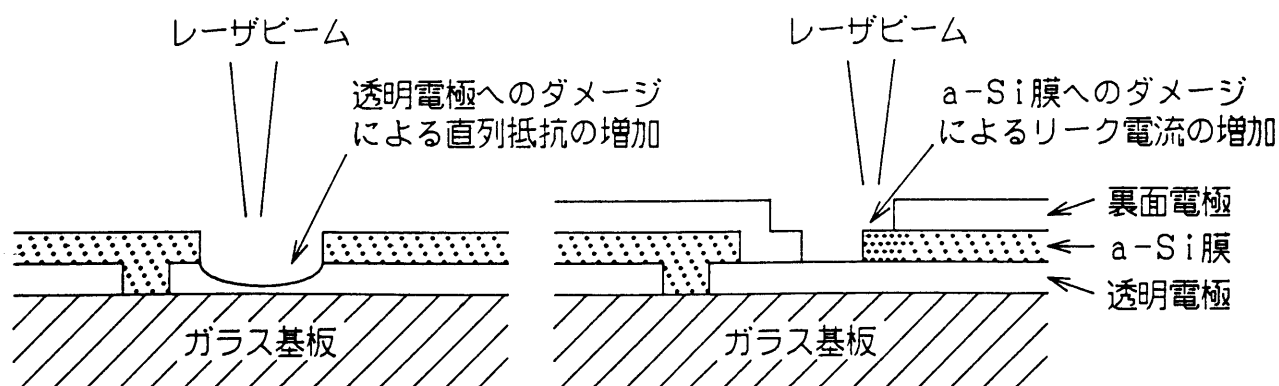


図3. 6 集積型 a-Si 太陽電池の選択性

3. 2. 3 LWS法の概要

3. 2. 2章に示した従来のレーザパターニング技術の問題点を解決するために、筆者等のグループは新しいレーザパターニング技術としてLWS法(Laser Welding and Scribing Method)を開発した。¹⁾

(1) LWS法の構造と特長

レーザパワーの変動に対しても太陽電池を構成する各層にダメージを与えず、確実にセルの分割とセル間直列接続を行うために、LWS法では透明電極とa-Si層との間に厚膜の導電層と絶縁層を形成した。

図3. 7はLWS法によるセル間接続部の模式図であるが、ここに示す導電層及び絶縁層は共に10~50 μm の膜厚があり、金属電極、a-Si層、透明電極の膜厚が1 μm 以下であるのに比べ10倍以上厚い。

太陽電池セルの分割には透明電極と金属電極の分割が必要であるが、透明電極の分割に関しては従来通りのレーザスクライブを行う。過剰なレーザパワーで加工しても透明電極の下層はガラス基板のみであるため、多少ダメージがあっても太陽電池の特性を低下させるには至らない。

LWS法の特長は以下の金属電極分割方法とセル間の接続方法にある。

①精密なレーザパワー制御なしで金属電極の分割が可能

金属電極の分割に関しては、下層にa-Si層及び透明電極が存在するため従来のレーザパターニング技術では下層にダメージを与えないようにレーザパワーの精密な制御が必要であった。これに対し、LWS法ではa-Si層と透明電極の間に厚膜の絶縁層が存在するため、過剰なレーザパワーで加工しても絶縁層の途中までがダメージを受けるだけで透明電極への影響は防止できる。

さらに、レーザ照射の熱的影響によりレーザ加工部の周囲のa-Si層が微結晶化し導電率が上がったとしてもa-Si層の下層に絶縁層が存在しているので、微結晶化領域における金属電極と透明電極との間のリーク電流も発生しない。

②セル間接続にレーザパワーの精密な制御が不要で界面の汚染もない。

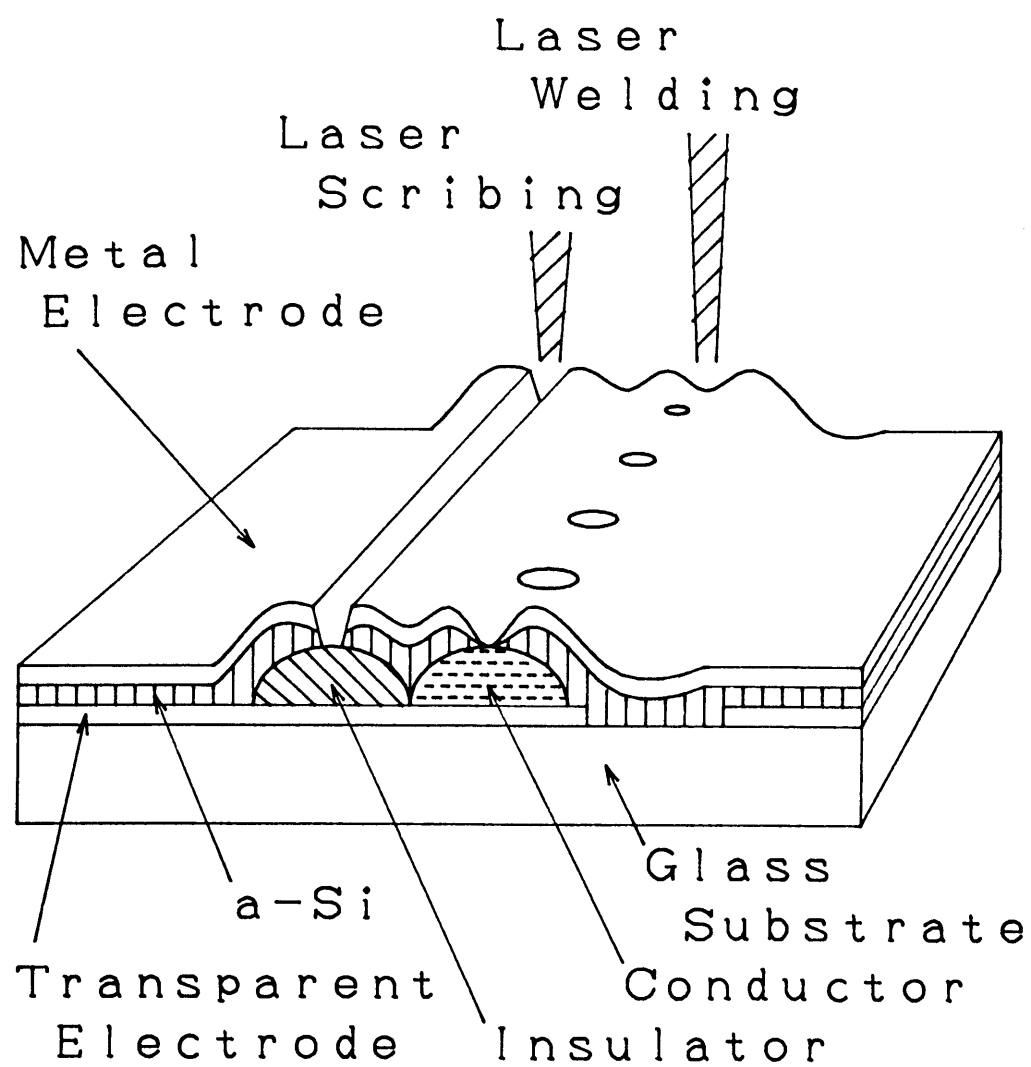


図 3. 7 LWS法によるセル間接続部構造

LWS法によるセル間接続では、透明電極上に厚膜の導電層を形成しa-Si層、金属電極を連続して形成後、レーザ照射により金属電極、a-Si層、導電層を熔融し、金属電極と導電層を電氣的に接続することで、導電層を介して金属電極を透明電極とを電氣的に接続することになる。したがって、a-Si層と金属電極は連続して形成するのでa-Si層と金属電極間への異物の混入やa-Si層表面の酸化等による太陽電池特性の低下はないと期待できる。

また、過剰なレーザパワーにより透明電極までダメージがあったとしてもレーザスポット径（10~100 μ m）よりも幅の広い導電層を用いることで、透明電極の被ダメージ領域を導電層が囲む構造となり、電氣的な断線や直列抵抗の増加にはつながらないと考えられる。

（2）LWS法による集積型a-Si太陽電池形成プロセス

LWS法による集積型a-Si太陽電池の形成は図3. 8に示す様に、以下の手順で行った。

①透明電極形成，分割

ガラス基板上に透明電極を形成した後、レーザ照射により透明電極を各セル毎に分割する。

②導電層，絶縁層形成

透明電極スクライブラインに沿って導電層をライン状に形成する。導電層，絶縁層はそれぞれペースト状の材料をスクリーン印刷等の手法で塗布し、これを焼成することで形成する。

③a-Si層，金属電極形成

透明電極，透明電極スクライブライン，導電層，絶縁層を含む全面にa-Si層，金属電極を連続して形成する。

④レーザ溶着，レーザ切断

導電層ライン上に金属電極側からレーザをスポット状に照射することにより、

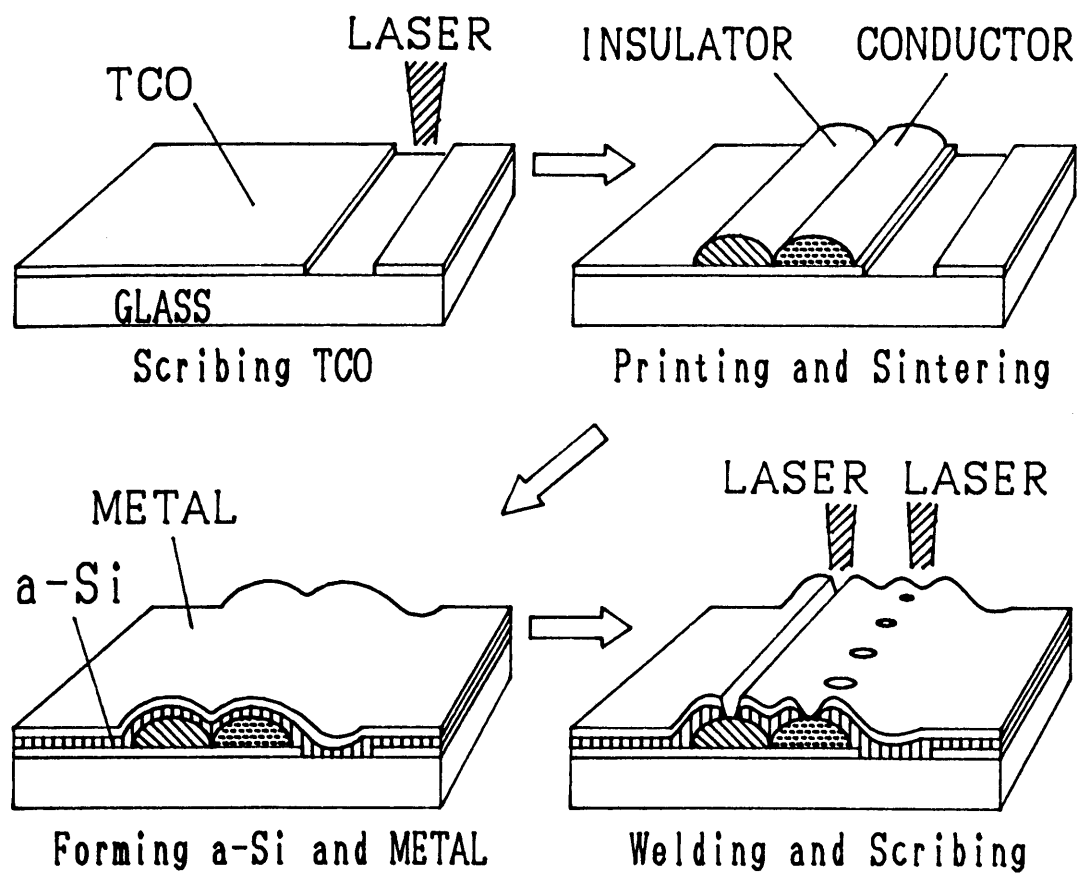


図 3. 8 LWS法による集積型 a-Si 太陽電池作製プロセス

金属電極と導電層とを溶着する。また、絶縁層ライン上に金属電極側からレーザーをライン状に照射することにより金属電極を切断し各セルに分割する。

LWS法による太陽電池形成プロセスは、従来技術のレーザーパターニングプロセスと比較し導電層，絶縁層形成プロセスが追加されている。しかしながら、このプロセスはスクリーン印刷及び焼成という単純で自動化が容易なプロセスであるため、それほど工数増加にはならない。逆に、a-Si層形成以後のプロセスを比較するならば、従来技術がa-Si層形成，a-Si層レーザーパターニング，金属電極形成，金属電極レーザーパターニングと、成膜，パターニングを交互に行うのに対しLWS法ではa-Si層，金属電極の連続形成，レーザー溶着，レーザー切断の連続加工を行うので、基板セット取り外しの工数を半減することが可能となる。

従って、LWS法は従来報告されているレーザーパターニング技術と比較して、工業的量産性から見ても工数増加等のデメリットはないといえる。

3. 3 有限要素法によるLWS法の理論解析

3. 3. 1 多層薄膜構造体へのレーザー照射時の温度分布解析

(1) レーザー照射時の多層薄膜温度分布解析の基本概念

多層薄膜構造体にレーザー加工を行う場合、レーザー条件を最適に制御し、それぞれの材料特性をよく把握した上で、各因子と加工特性との相関が明確にされなければならない。

そこで、レーザー加工が光の吸収による熱的加工法であることに着目して、多層薄膜のレーザー加工における温度分布解析の計算機シミュレーションを行った。

図3. 9に、多層薄膜レーザー加工温度分布解析モデルを示す。直角座標系(x , y , z)において時間とともに変化する強度 $I(x, y, t)$ のレーザービームを多層薄膜構造に照射すると仮定した。

図3. 10に、本多層薄膜温度分布解析のシステム構成を示す。まず、光学的解析部で多層薄膜構造にレーザービームを照射した場合の各層内での光の挙動を多重干渉理論より導き、次に熱的解析部で各層内での吸収された光による熱の発生

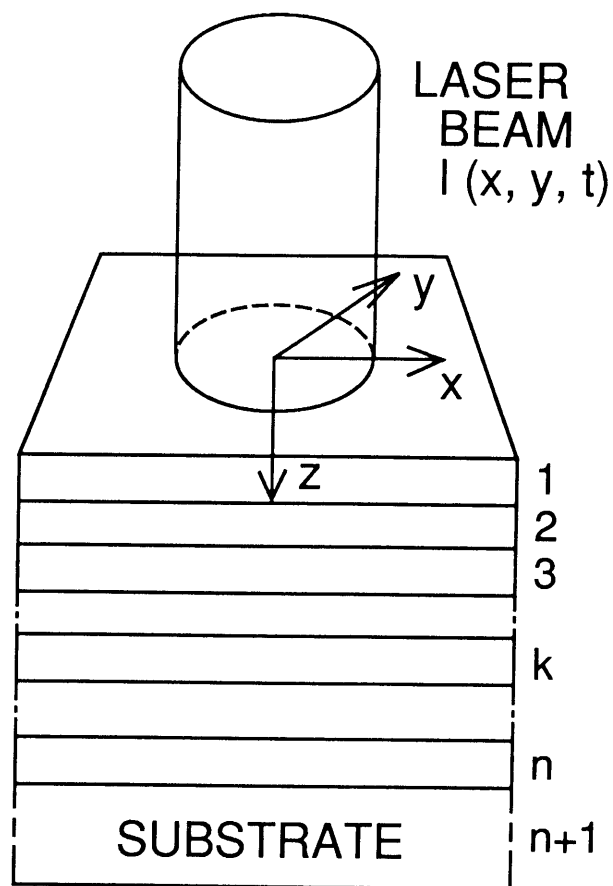


図 3. 9 多層薄膜構造へのレーザ照射時の温度分布解析モデル

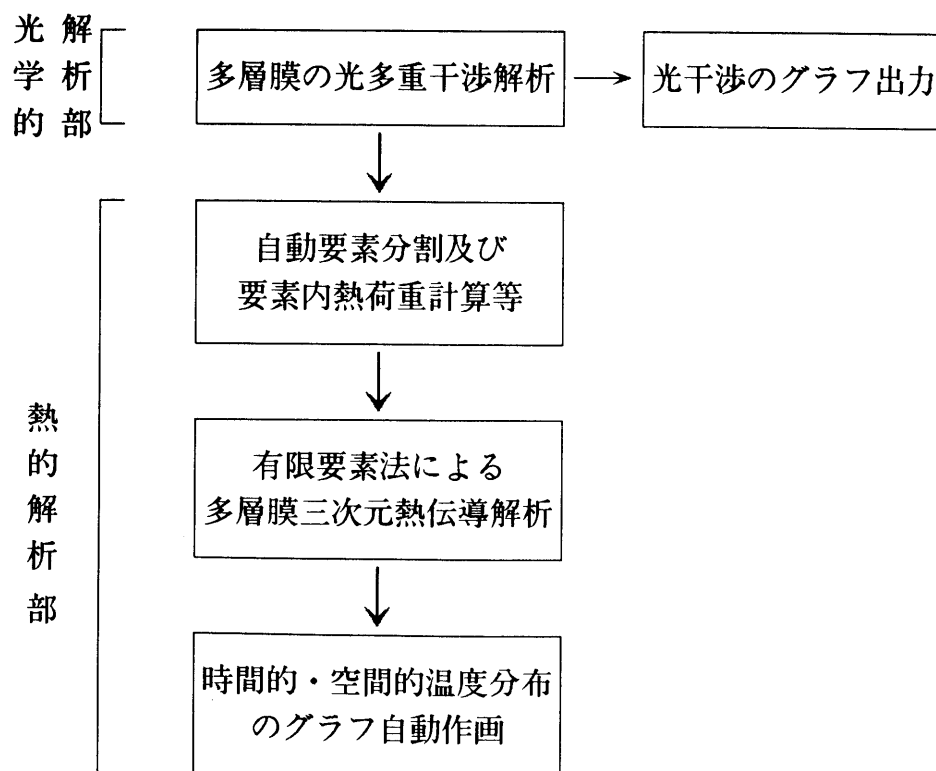


図 3. 10 多層薄膜構造へのレーザ照射時の温度分布解析システム構成

を考慮に入れた三次元熱伝導方程式を有限要素法を用いて解くことにより、多層薄膜構造の空間的・時間的温度分布を求めることができた。

(2) 多層薄膜における光多重干渉理論を用いたレーザビーム強度解析

レーザ加工は、加工物表面でレーザビームの一部が反射し、残りの光エネルギーが加工物中に入射して順次吸収され、熱エネルギーに変換され発熱し、物質変化を起こす機構よりなる。そこで、多層薄膜における光エネルギーの反射, 吸収, 透過の挙動を解析する。

図 3. 11 に示すような屈折率 n_j^* 、厚さ $d_j (j=0, 1, \dots, n+1)$ の多層薄膜に電磁波が入射した場合、Maxwell の電磁方程式に境界条件を与えて解けば多層薄膜のくり返し反射（多重干渉）を全部考慮した解が得られる。薄膜を重ね合わせることは四端子回路を縦続接続することに対応するので、多層薄膜の計算はマトリックスの積を求める計算になる。²⁾ 計算の手法を以下に示す。

n 層膜構造に対しては、電界 E_{n+1}^+ と E_0^+ の関係で透過係数、 E_0^- と E_{n+1}^+ との関係で反射係数が求まる。そこで、図 3. 11 より n 層の多層薄膜の場合、これに対応するマトリックスの形は、

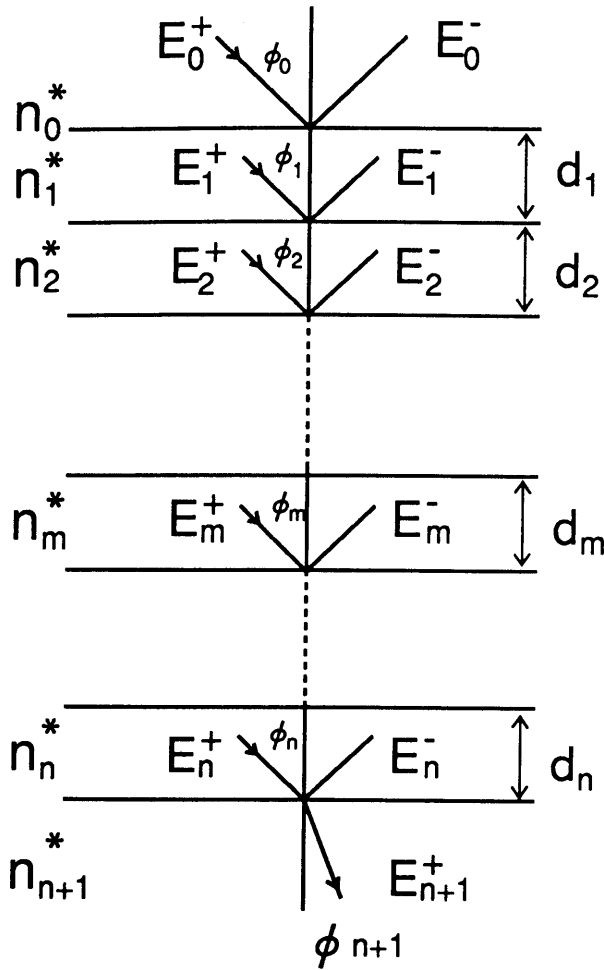
$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{(C_1)(C_2) \cdots (C_{n+1})}{t_1 t_2 \cdots t_{n+1}} \begin{pmatrix} E_{n+1}^+ \\ E_{n+1}^- \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ここで、

$$(C_m) = \begin{pmatrix} e^{i\delta_{m-1}} & r_m e^{i\delta_{m-1}} \\ r_m e^{-i\delta_{m-1}} & e^{-i\delta_{m-1}} \end{pmatrix}$$

の関係が成り立つ。ここで、 $n+1$ 番目の媒体では、負方向の波が存在しないため $E_{n+1}^- = 0$ となる。これより、 E_{n+1}^+ によって E_0^+ と E_0^- を表すことができ、反射、透過係数は簡単な形となる。

式のマトリックスを次のように書き換えると、



t_j : 透過率
 r_j^* : 反射率
 n_j^* : 複素屈折率
 d_j : 膜 厚
 ϕ_j : 入射角
 $(j=0, 1, \dots, n+1)$

$\frac{E_0^-}{E_0^+}$: 反射係数

$\frac{E_{n+1}^+}{E_0^+}$: 透過係数

$\delta_j : 2\pi n_j^* d_j \cos \phi_j / \lambda$

図 3. 1 1 多層薄膜における光多重干渉モデル

$$(C_1)(C_2) \dots (C_{n+1}) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

即ち、(3.1)，(3.2) 式より振幅反射率及び振幅透過率は

$$R = \frac{E^-_0}{E^+_0} = \frac{c}{a}, \quad T = \frac{E^+_{n+1}}{E^+_0} = \frac{t_1 t_2 \dots t_{n+1}}{a} \quad (3.3)$$

となる。また、エネルギー反射率、エネルギー透過率は、

$$\bar{R} = \frac{(E^-_0)(E^-_0)^*}{(E^+_0)(E^+_0)^*} \quad (3.4)$$

$$\bar{T} = \frac{n_{n+1}(E^+_{n+1})(E^+_{n+1})^*}{n_0(E^+_0)(E^+_0)^*}$$

となり、即ち次式として表される。

$$\bar{R} = \frac{cc^*}{aa^*}$$

$$\bar{T} = \frac{n_{n+1}}{n_0} \frac{(t_1 t_2 \dots t_{n+1})(t_1^* t_2^* \dots t_{n+1}^*)}{a a^*} \quad (3.5)$$

また、エネルギー吸収率 \bar{A} は、

$$\bar{A} = 1 - (\bar{R} + \bar{T}) \quad (3.6)$$

で表されるので、(3.5), (3.6)式を用いて多層薄膜内のレーザービームの強度分布を解析することができる。

(3) 多層薄膜へのレーザー照射時の熱伝導解析

図3.12にレーザービーム強度が多層薄膜内部で変化してゆく様子を示す。照射したレーザービームは第1層目の表面で、Maxwellの電磁方程式を用いた多層薄膜の多重干渉計算から求まる反射率Rで一部反射し、残りは多層薄膜に入射した後、吸収により指数関数的に減衰する。⁴⁾ 故に、第k層目の面Zにおけるレーザービーム強度は次式で表される。

$$W(x, y, z, t) = (1-R)I(x, y, t) \exp \left(- \sum_{i=1}^{k-1} (\alpha_i d_i + \alpha_k z) \right) \quad (3.7)$$

ここで、 $I(x, y, t)$: 照射レーザービーム強度

α_i : 第i層の吸収係数

d_i : 第i層の膜厚

従って、各薄膜内部で単位時間、単位体積あたり発生する熱量 $Q(x, y, z, t)$ は

$$Q(x, y, z, t) = - \frac{\partial W(x, y, z, t)}{\partial z} \quad (3.8)$$

また、本解析では照射レーザービーム強度(密度)は、時間依存であると考えており、時間軸に対してガウス分布でも、一様分布でも取り扱うことが可能である。

多層薄膜へのレーザー照射による内部発熱や熱伝導に起因する熱エネルギー収支を表す三次元熱伝導方程式は、(3.9)式で表される。⁴⁾

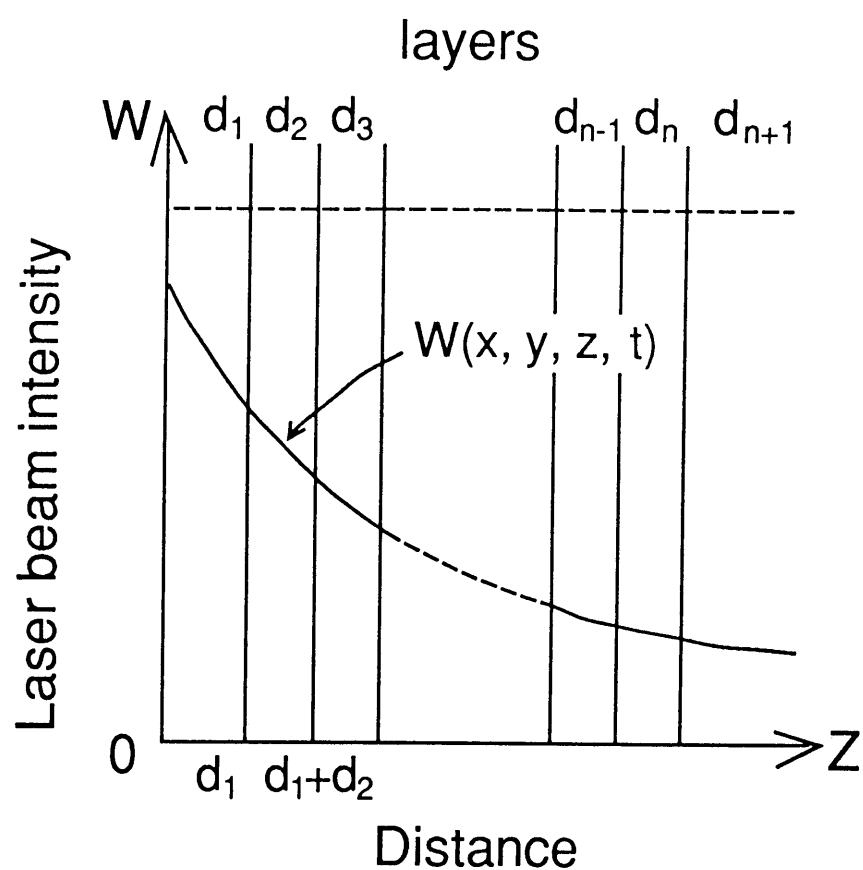


図3. 1 2 多層薄膜におけるレーザ強度分布解析モデル

表3. 1 各材料の物性値

	比 熱 (J/g·k)	密 度 (g/cm ³)	熱伝導率 (J/cm·K·scc)	融 点 (K)	屈折率 (at1.06μm)	吸収係数 (cm ⁻¹) (at1.06μm)
ガラス	0.711	2.50	0.0126	1113*	1.46	——
T C O	0.418	6.64	0.624	1898	1.95+0.002i	250
a - S i	0.929	2.33	0.255	1200	3.8+0.008i	1000
A l	0.937	2.70	2.23	933	2.0+12.0i	——
導電層	0.410	5.65	0.0144	823	——	——
絶縁層	0.278	9.53	3.22	1153	——	——

*軟化点

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3.9)$$

$T = T(x, y, z, t)$: 温度 C : 比熱
 ρ : 密度 t : 時間
k : 熱伝導係数 $Q = Q(x, y, z, t)$: 発熱量

熱放射、対流熱伝達はないと考えると、(3.9)式に課せられる境界条件は

$$(i) \text{ 温度固定境界において } T = T_0 \quad (3.10)$$

(ii) 熱流束の指定されている境界において

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0(x, y, z, t) = 0 \quad (3.11)$$

のいずれかを考慮することになる。

また、初期条件は、領域内、 $t = 0$ において

$$T = \phi_0 \quad (3.12)$$

とした。ここで、 T_0 は固定温度、 q_0 は境界熱流束、 ϕ_0 は初期温度である。

3. 3. 2 導電層上でのレーザビーム溶着

有限要素法による三次元熱伝導方程式により、レーザ溶着領域の熱解析を行った。計算には表 3. 1 の多層薄膜、導電層及び基板の材料物性値を用いた。

Al(5000 Å)/a-Si(5000 Å)/導電層(12 μm)/TCO(2000 Å)/ガラス構造にパルス半
値幅90 nsecでスポット半径15 μmのガウス分布レーザービーム（波長1.06 μm）を照射
した時のレーザーパワー密度とレーザー照射120 nsec後のビーム中心部の深さ方向温

度分布の関係を図 3. 1 3 に示す。

計算結果より $5.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上のレーザパワー密度のレーザビーム照射で表面の Al が溶融し始め $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上のレーザパワー密度で Al, a-Si, 導電層が溶融することが分かった。

また、導電層の熱伝導率は $3.222 \text{ J/cm} \cdot \text{K} \cdot \text{S}$ と大きいためレーザビーム照射時には導電層の深部までが融点に達しやすく、金属電極と導電層とを溶着するのに理想的な状態が得られるものと予想される。

$1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上のレーザビーム照射により溶解した Al, a-Si 及び導電層は溶融状態で混合し冷却されて凝固することで金属電極である Al と導電層とが電氣的に接続されるものと考えられる。

3. 3. 3 絶縁層上での多層薄膜のレーザビーム切断

前項のレーザ溶着と同様にレーザ切断領域の熱解析を行った。

多層薄膜、絶縁層及び基板の材料物性値は表 3. 1 の値を用いた。

Al (5000 \AA)/a-Si (5000 \AA)/絶縁層 ($27 \mu\text{m}$)/TCO (2000 \AA)/ガラス基板にパルス半値幅 90 nsec でスポット半径 $30 \mu\text{m}$ のガウス分布レーザビーム (波長 $1.06 \mu\text{m}$) を照射した時のレーザパワー密度とレーザ照射 140 nsec 後のビーム中心部の深さ方向の温度分布の関係を図 3. 1 4 に示す。

計算結果より $2.9 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上のレーザパワー密度のレーザビーム照射で Al が溶融し始め、 $4.8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上のレーザパワー密度で Al, a-Si, 絶縁層が溶融することが分かった。

ここで、絶縁層の熱伝導率は $0.0144 \text{ J/cm} \cdot \text{K} \cdot \text{S}$ でありレーザ溶着の際の導電層の熱伝導率 $3.222 \text{ J/cm} \cdot \text{K} \cdot \text{S}$ と比較して非常に小さい。このことはレーザビームを照射した際に絶縁層の深い部分までは熱が伝わりにくく表面近傍の温度上昇率が大きいことを示している。

すなわち、絶縁層の下層の透明電極へはダメージが発生しにくく表面の金属電極及び a-Si 層は分割されやすくセルの分割に適した条件を満たしていると考えられる。

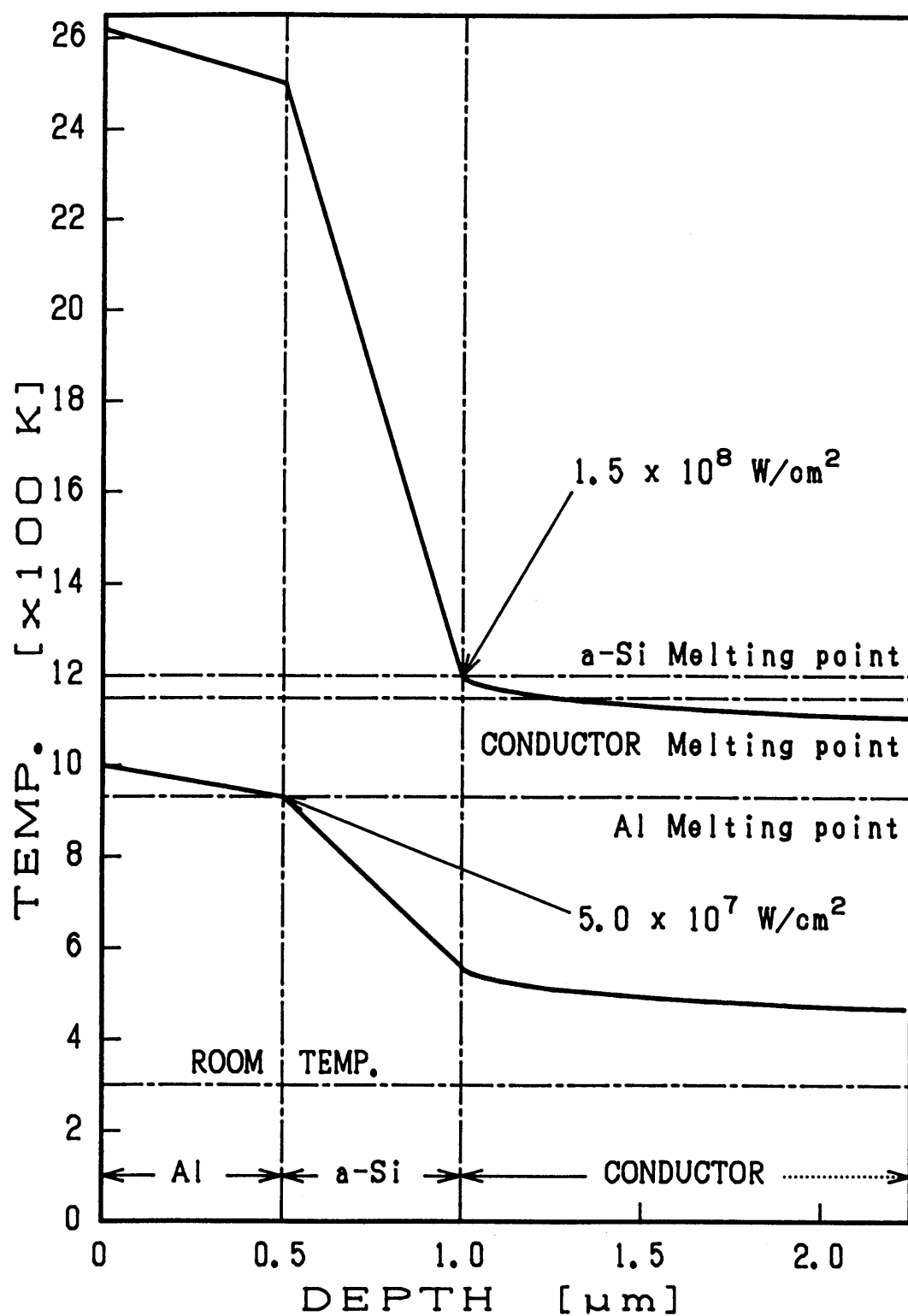


図3. 13 レーザビーム溶着部における照射レーザーパワー密度と深さ方向温度分布との相関

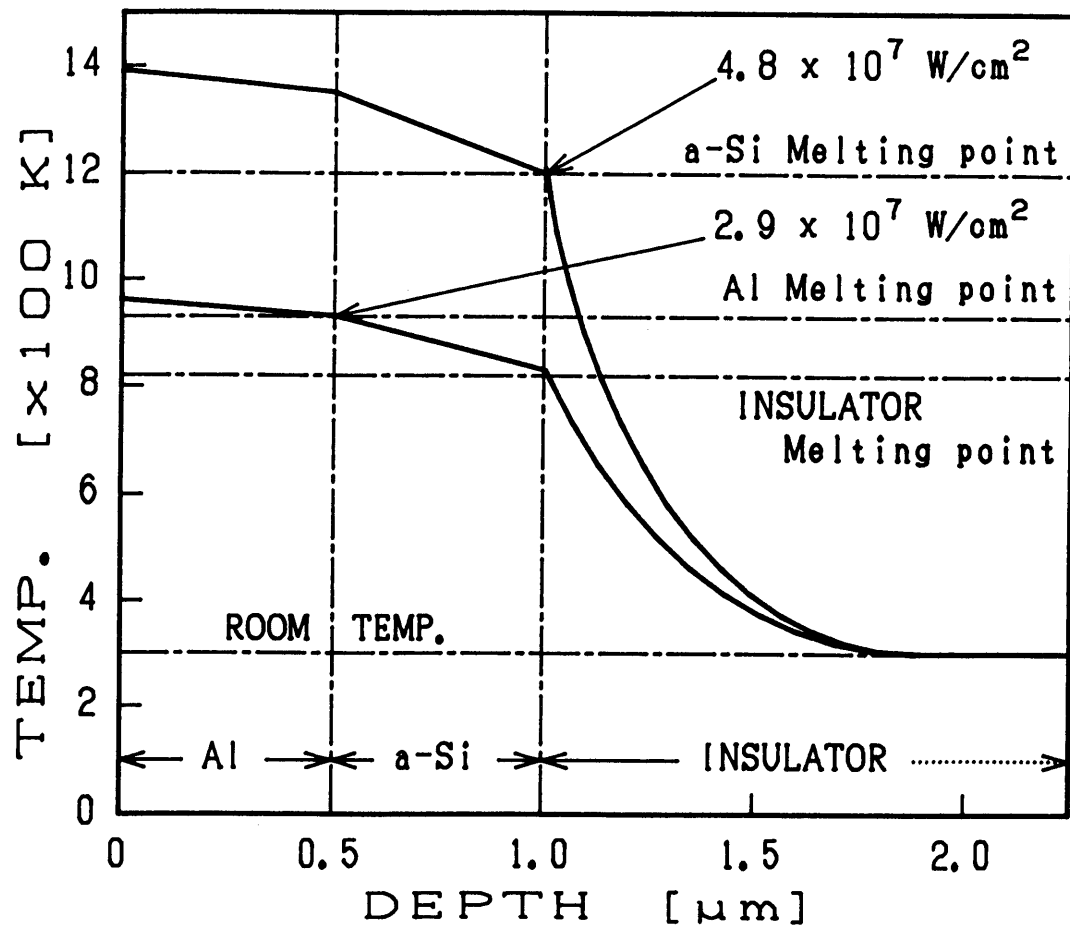


図3. 14 レーザビーム切断部における照射レーザーパワー密度と深さ方向温度分布との相関

3. 4 LWS法による集積型a-Si太陽電池の作製

3. 4. 1 実験装置と実験方法

(1) 実験の必要性

3. 3章では計算機シミュレーションがレーザ加工のプロセス制御に重要な役割を果たすと考え、多層薄膜構造に関するレーザ加工の温度分布解析を行ったが計算機シミュレーションのみでレーザ加工の現象を論じるのは次の2つの理由により不十分であり実験による確認が必要である。

①溶着、切断の確認が必要

計算機シミュレーションはあくまでも積層薄膜が溶融することすなわち加工すべき各層が融点に達することで溶着及び切断が成立するという仮定のもとに行っている。そのため、実際にレーザビームを照射した領域がどのような構造になっているか、また溶着及び切断が完全に行なわれているかを実験により確認する必要がある。

②レーザパワー密度の高出力側敷居値の確認が必要

3. 3章の計算機シミュレーションは積層薄膜へのレーザビーム照射の熱伝導現象を論じるものである。従って、溶着及び切断を行うためのレーザパワー密度の低出力側敷居値すなわち最小限必要なレーザパワー密度の近傍を扱うには非常に有効であるが、厚膜である導電層及び絶縁層をレーザビームが突き抜け、下層にダメージ与える様な高出力側敷居値に関しては、今回の計算機シミュレーションをもって論じるのは難しい。従って、LWS法の最適レーザパワー密度範囲を求めるためには実験による確認が必要である。

(2) 実験装置

図3. 15に実験に用いたレーザ装置の概略を示す。試料はXYZステージ上に固定され、ステージコントローラでコンピュータ制御される。レーザ発振部には波長 $1.06\mu\text{m}$ Qスイッチ付きNd:YAGレーザを用い、TEM₀₀モードガウシアンビー

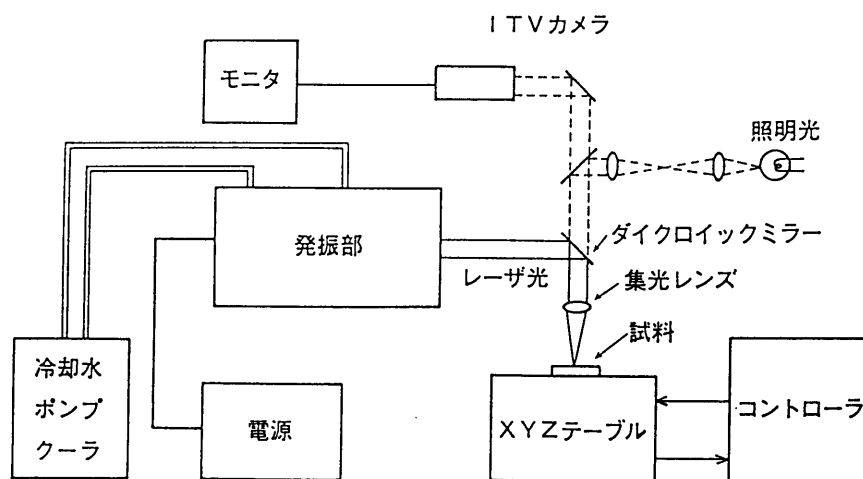


図 3. 1 5 レーザ加工実験装置

ムによりパルス繰り返し数 $Q = 1 \sim 20 \text{ kHz}$, 走査速度 $v = 10 \sim 100 \text{ mm/sec}$ で加工実験を行った。

(3) 実験サンプル

実験サンプルは、ガラス基板上に以下の薄膜及び厚膜を形成したものを使用した。

①透明電極(TCO)(2000 Å)

熱CVD法により形成した SnO_2 膜

②導電層(12 µm)

Agを主成分とする導電性ペースト材料をスクリーン印刷で塗布した後、550℃で焼成したもの。

③絶縁層(27 µm)

Al_2O_3 を主成分とする絶縁性ペースト材料をスクリーン印刷で塗布した後、550℃で焼成したもの。

④a-Si層(5000 Å)

SiH_4 のグロー放電により形成したp層(Bドーピング100~200 Å), i層(ノンドーピング3000~5000 Å)及びn層(pドーピング300~500 Å)。

⑤金属電極(5000 Å)

蒸着により形成したAl膜

(4) 実験方法

①レーザー溶着

導電層上に金属電極側より異なるパワー密度のレーザービームの照射を行い、金属電極と透明電極との間の抵抗値の変化を測定した。

使用した実験サンプルは、導電層の長さ方向の金属電極および透明電極の幅を10mm、導電層から測定点までの距離を2mm(金属電極側, 透明電極側共)とした。

②レーザー切断

絶縁層上に金属電極側より異なるパワー密度のレーザービームの照射を行い絶縁

層ラインに隔てられた両サイドの金属電極間の抵抗値及び透明電極間の抵抗値の変化を測定した。

使用した実験サンプルは、絶縁層の長さ方向の金属電極および透明電極の幅を10mm、測定点の間隔を金属電極上で4mm、透明電極上で10mmとした。

3. 4. 2 実験結果及び考察

(1) レーザビーム溶着

①レーザパワー密度と溶着部の抵抗値

実験の結果得られたレーザパワー密度と金属電極－透明電極間の抵抗値の関係を図3. 16に示す。

$1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上のパワー密度のレーザ照射により金属電極と透明電極が電氣的に接続されることが実験により確認され、この値は3. 3. 2章で計算機シミュレーションにより求めた金属電極, a-Si, 導電層の熔融レーザパワー密度とよく一致している。また、 $2.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 以上のパワー密度のレーザ照射により透明電極にダメージが発生したが、金属電極－透明電極間の抵抗値は $2.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 未満のレーザ照射における抵抗値と差異は見とめられなかった。

このことにより、本構造においては過剰なパワー密度のレーザ照射で透明電極にダメージが生じてても、これにより太陽電池の特性を低下させることはないことが分かった。

②SEM観察

次にレーザ溶着部の形状を確認するために、SEM観察を行った。

図3. 17は異なるパワー密度のレーザを照射した時のレーザ溶着部のSEM像である。レーザパワー密度の大きさにより、加工形状は次の4段階に分けることができる。

(I) 表面のAlが融点に達しないレベルのレーザ照射により形状に変化は見られない。

(II) Alは熔融するがa-Siは融点に達しないレベルのレーザ照射では表面

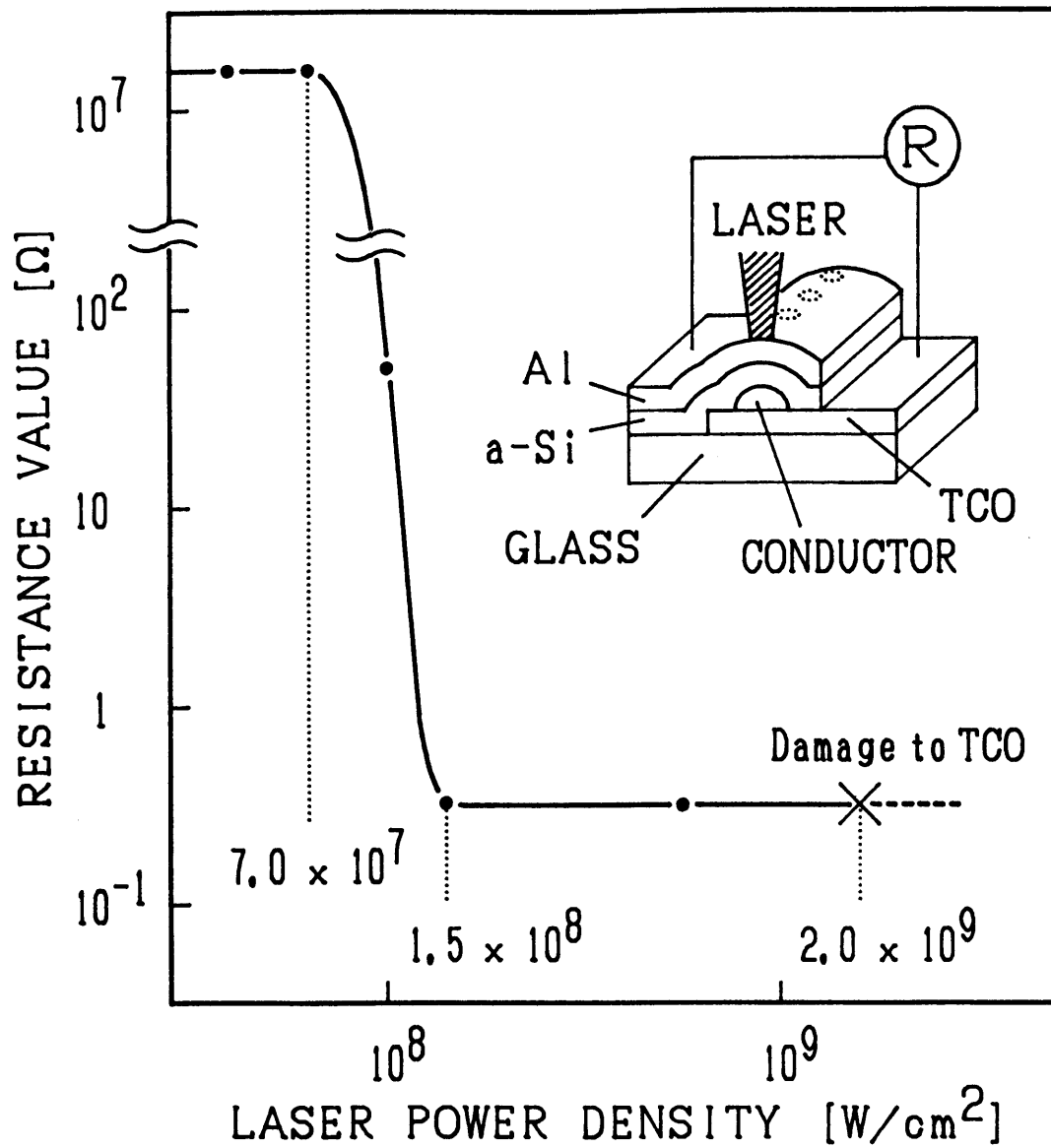


図3. 16 レーザビーム溶着部における照射レーザーパワー密度と電気抵抗値との関係

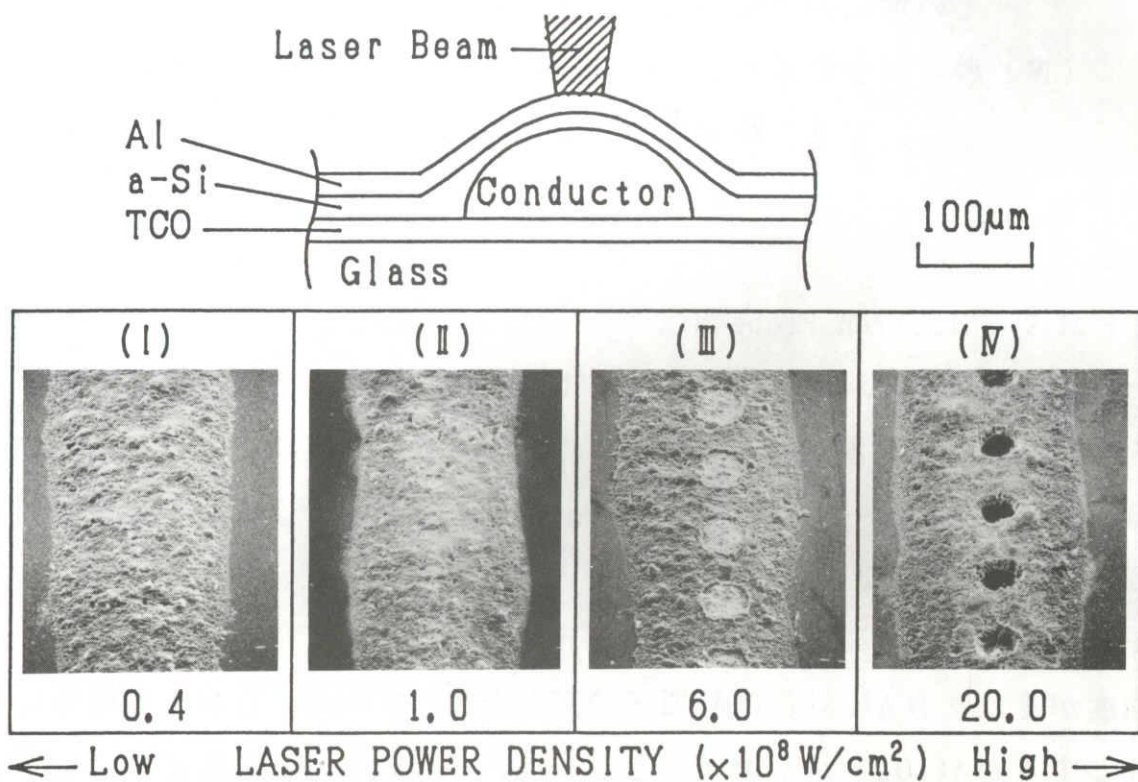


図3. 17 レーザビーム溶着部における照射レーザーパワー密度と
レーザー照射領域形状との関係 (SEM)

近傍にわずかに形状変化が見られる。抵抗値の変化も生じており、不完全ではあるが金属電極と透明電極が電氣的に接続されている。

(Ⅲ) Al, a-Si, 及び導電層が熔融するレベルのレーザ照射により導電層の途中までレーザ加工され形状が変化している。金属電極と透明電極との電氣的接続は完全に行われている。

(Ⅳ) 導電層を貫通するレベルのレーザ照射により透明電極にダメージが生じ、ガラスが露出する部分もある。電氣的接続は完全に行われている。

③ E P M A (Electron Probe Micro Analysis) 観察

レーザ溶着部の形状は S E M 観察により確認したが、電氣的接続のメカニズムをさらに詳細に調べるためにレーザ溶着部の E P M A 観察を行った。

図 3. 1 8 はパワー密度 $6.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ のレーザ照射により溶着した部分の断面の E P M A 像である。

(a) は断面形状を確認するための S E M 像で (b), (c) 及び (d) の白色の強度がそれぞれ Al, Si 及び Ag 原子の存在を示している。なお、導電層は Ag を主成分とするが Al_2O_3 をバインダーとして混入している為、導電層中にも Al 原子が含まれている。

レーザ照射の中心部においては Al, Si は、ほぼ完全に除去されておりレーザスポットの周囲部近傍で Al と導電層中の Ag とが電氣的に接続されていることが分かる。

S E M 観察と E P M A 観察の結果より L W S 法によるレーザ溶着はレーザスポットの中心領域ではなく、周囲領域で電氣的接続を行うものであり、従って過剰なパワー密度のレーザ照射で導電層が貫通しても太陽電池の特性を低下させることなく、良好なセル間接続ができることが確認できた。

(2) レーザビーム切断

① レーザパワー密度と切断部の抵抗値

図 3. 1 9 はレーザ切断部の金属電極間の抵抗値 (R 2) と絶縁層の下層の透

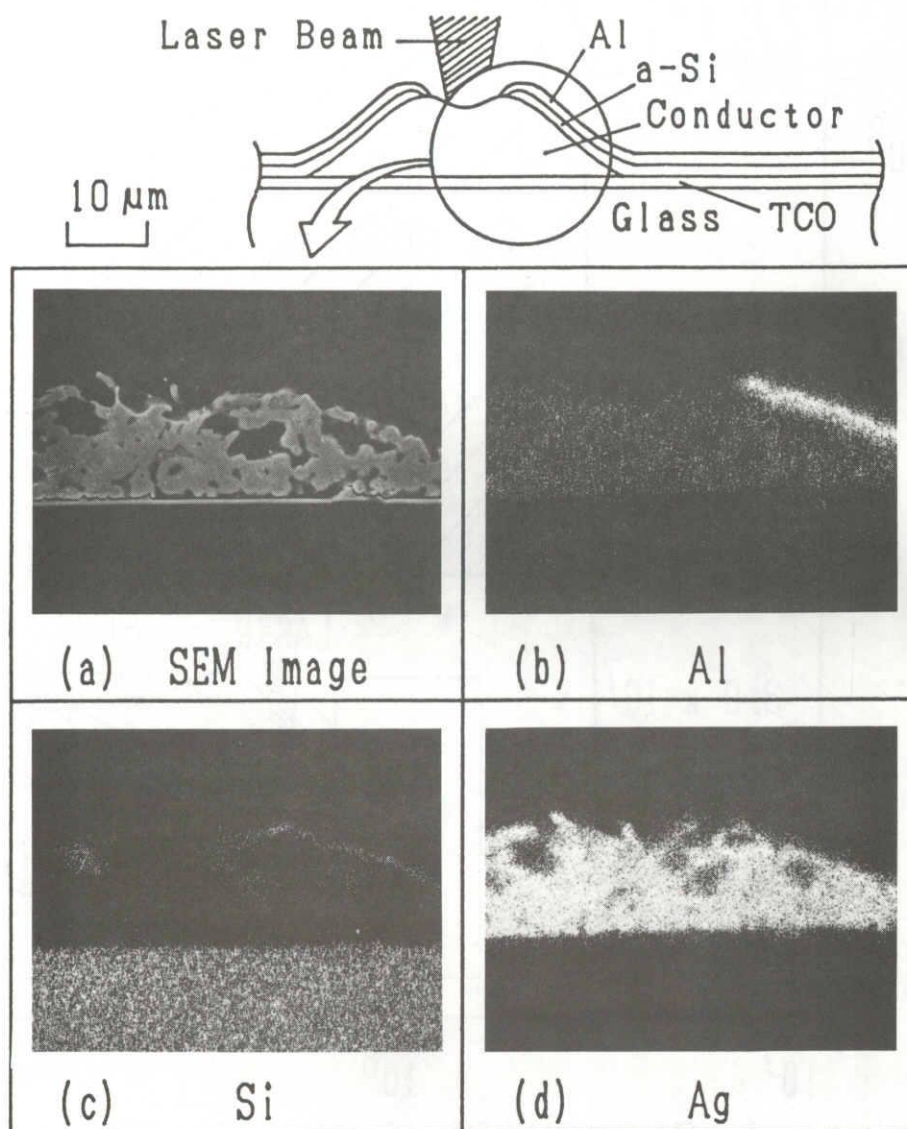


図3. 18 レーザビーム溶着部の断面EPMA像

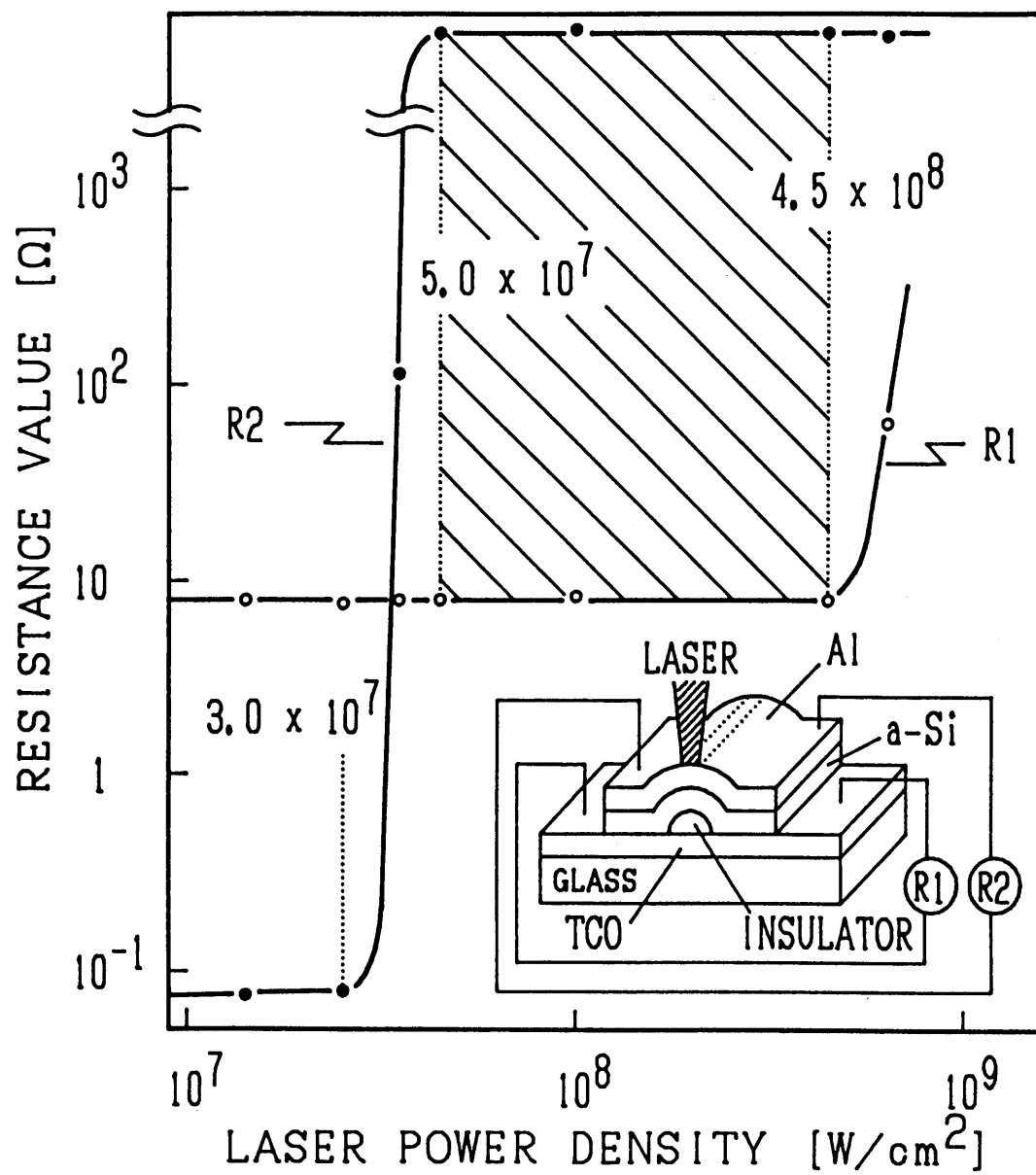


図3. 19 レーザビーム切断部における照射レーザーパワー密度と電気抵抗値との関係

明電極間の抵抗値（ R_1 ）を照射するレーザパワー密度をパラメータとして測定した実験結果である。

$5.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上のパワー密度のレーザ照射により金属電極が電氣的に分割されており、この値は3.3.3章で計算機シミュレーションにより求めたAl, a-Siを溶融するレーザパワー密度 $4.8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ とほぼ一致する。

また、レーザパワー密度を上げていくと $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上で絶縁層ラインの両サイドの透明電極間の抵抗値が増大した。

これは、過剰なパワー密度のレーザ照射により絶縁層を貫通し、透明電極にダメージが生じたものと考えられる。このことより、今回の実験サンプルにおいてLWS法によるレーザ切断のレーザパワー密度の最適値は $5.0 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ であることが分かった。

②SEM観察

レーザ切断部の構造を確認するためにSEM観察による形状解析を行った。異なるパワー密度のレーザビームを照射したレーザ切断部のSEM像を図3.20に示す。レーザパワー密度の大きさにより加工形状は次の4段階に分けることができる。

- (I) 表面のAlが融点に達しないレベルのレーザ照射により形状に変化は見られない。
- (II) Alは溶融するが、a-Siは融点に達しないレベルのレーザ照射では表面近傍のAlに形状変化が見られる。レーザビーム照射ラインの両サイドの金属電極間の抵抗値は増大しているが、完全には絶縁されていない。
- (III) Al, a-Si, 絶縁層が溶融するレベルのレーザ照射により絶縁層の途中までレーザ加工されている。レーザビーム照射ラインの両サイドの金属電極は電氣的に分割されており、下層の透明電極はダメージがなく、抵抗値の変化も見られない最適加工領域である。
- (IV) 過剰のパワー密度のレーザ照射により絶縁ペーストを貫通し、透明電極にダメージが生じている。

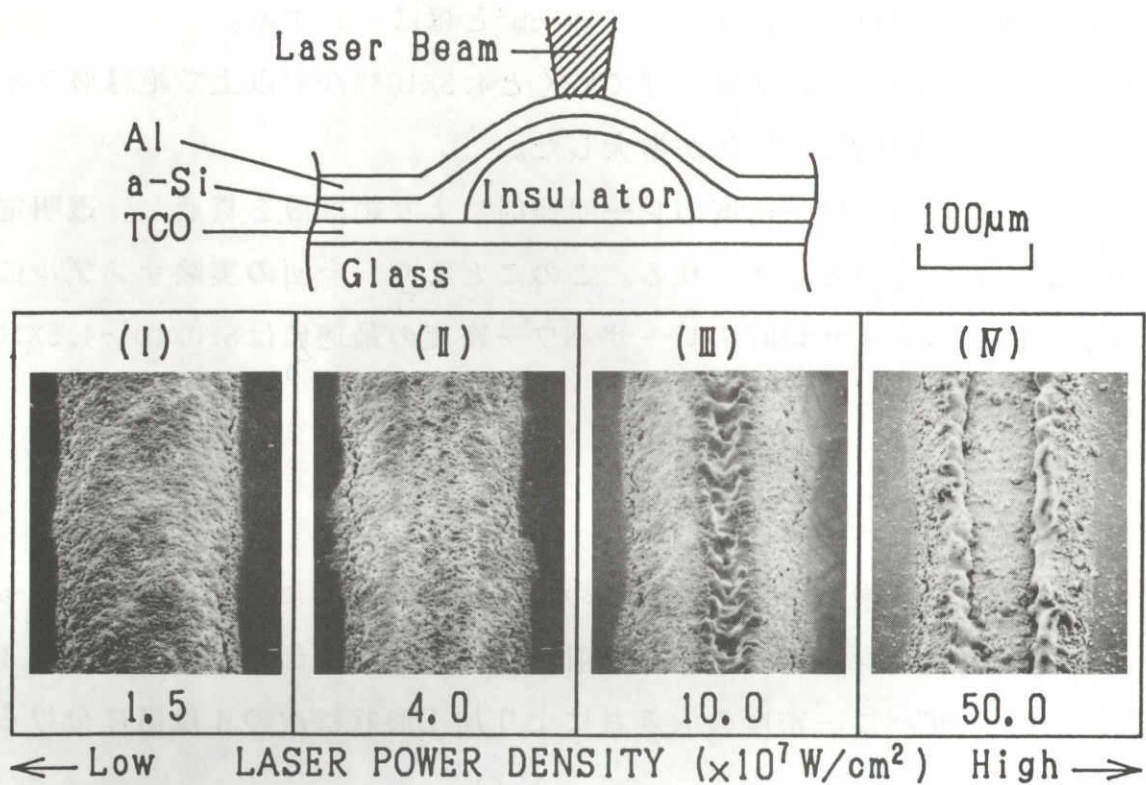


図3. 20 レーザビーム切断部における照射レーザーパワー密度と
レーザー照射領域形状との関係 (SEM)

以上の結果より、LWS法によるレーザ切断のレーザパワー密度最適値は絶縁層の金属電極側が加工され始めるレーザパワー密度から絶縁層が貫通するレーザパワー密度までの間であり、今回の実験サンプルにおいては、 $5.0 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ であることを確認した。LWS法の場合、レーザ切断の可能なレーザパワー密度の最大値 $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ は最小値 $5.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ の9倍であり、従来報告されている金属電極のレーザ切断可能条件 $6.5 \times 10^6 \sim 9.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ が1.4倍⁵⁾であるのと比べ非常に広い範囲のレーザパワー密度で加工できることが分かった。

3. 5 LWS法による集積型a-Si太陽電池の評価

3. 5. 1 LWS法による集積型a-Si太陽電池の特性

LWS法によるパターニングで精密なレーザパワー密度の制御なしで10cm角(14セル)集積型a-Si太陽電池サブモジュールの作製を行った。

図3. 21はその出力特性であり、開放電圧12.64V, 短絡電流120.7mA, 曲線因子0.696, 最大出力1060mWで、10cm角サブモジュールの最高変換効率10.6%が得られた。⁶⁾

なお、第2章で述べた様にi層とp-i間のバッファ層はスーパーチャンバーを用いて形成し、p層は $\text{B}(\text{CH}_3)_3$ をドーピングガスとして使用したa-SiCであり、透明電極はテクスチャー化したものを用いた。

3. 5. 2 LWS法による集積型a-Si太陽電池の信頼性評価

LWS法で作製した集積型a-Si太陽電池の信頼性を確認するために、高温放置試験(90℃), 低温放置試験(-40℃), 温度サイクル試験(-25~105℃), 耐湿試験(60℃, 95%)及び屋外暴露試験を行った。図3. 22にその結果を示すが、2000時間経過後、屋外暴露試験以外は全く変化なく、屋外暴露試験も従来のa-Si太陽電池の光劣化と同レベルでありパターニングに起因する出力低下は認められなかった。

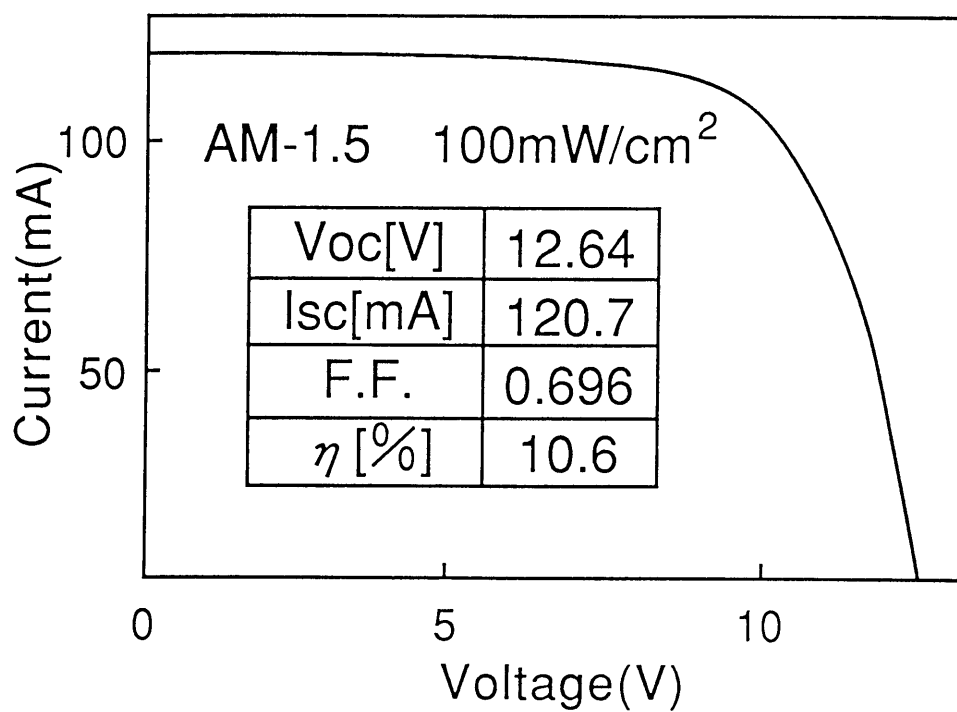
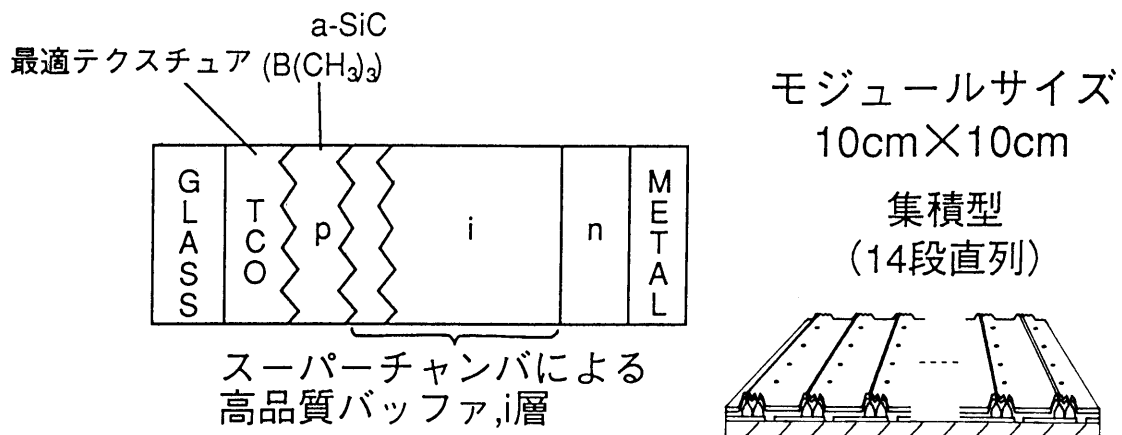


図 3. 2 1 LWS法により作製した10cm角集積型a-Si
太陽電池の出力特性

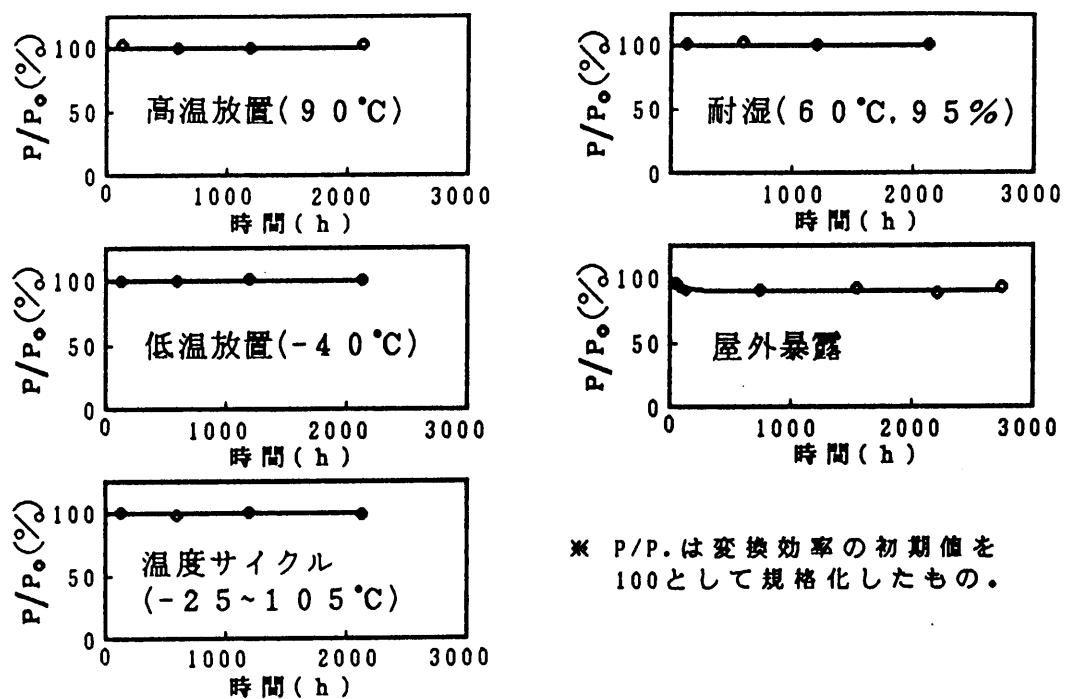


図 3. 2 2 LWS法により作製した a-Si 太陽電池モジュールの信頼性試験結果

3. 6. 結言

集積型a-Si太陽電池の新しいパターンニング方法としてLWS法の開発を行い、以下の結論を得た。

(1) a-Si太陽電池の多層薄膜のパターンニングに厚膜材料である導電層と絶縁層を付加することで、精密なレーザパワーの制御なしにレーザ加工できるLWS法を開発した。

(2) LWS法はa-Si層と金属電極を連続して形成するので、a-Si層と金属電極との界面の汚染や異物の混入及びa-Si層表面の酸化等による太陽電池特性の低下がなく、また金属電極の分割とセル間の電氣的接続を連続したレーザ加工プロセスで行えるので太陽電池作製工程の簡略化を可能とした。

(3) LWS法によるレーザ溶着に関して行った三次元温度分布解析シミュレーションの計算結果は実験結果とよく一致し、 $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上のパワー密度のレーザビーム照射により隣接するセルの金属電極と透明電極とを電氣的に接続できることを確認した。

(4) レーザ溶着による電氣的接続は照射したレーザビームスポットの周囲領域で行われているので、過剰なパワー密度のレーザビーム照射により透明電極までダメージが及ぶ場合でもレーザビーム照射の周囲領域で十分な接続が得られるので、このダメージによる太陽電池の出力特性の低下はなく、実質的にレーザ溶着のレーザパワー密度の制御はほとんど不要であることを確認した。

(5) LWS法による金属電極のレーザ切断に関して行った三次元温度分布解析シミュレーションの計算結果は実験結果とよく一致し、 $5.0 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ の範囲のパワー密度のレーザビーム照射により透明電極にダメージを与えずセル分割ができることを確認した。このレーザ切断可能なレーザパワー密度の最大値 $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ は最小値 $5.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ の9倍であり、従来報告されているLWS法

以外の金属電極レーザー切断可能パワー密度条件 $6.5 \times 10^6 \sim 9.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ の場合が1.4倍⁵⁾であるのと比較し加工可能な条件範囲が非常に広く、従ってLWS法によるレーザー切断には精密なレーザーパワー制御が不要であることを確認した。

(6) LWS法により10cm角集積型a-Si太陽電池を作製し、精密なレーザーパワー制御なしに変換効率10.6%を得た。また、各種信頼性試験を行い、実用に耐える充分高い信頼性を持っていることを確認した。

参考文献

- 1) Y.Kishi, K.Murata, H.Inoue, S.Kiyama, M.Ohnishi, S.Nakano, and Y.Kuwano : Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) 1628.
- 2) Y.Kuwano, T.Imai, M.Ohnishi and S.Nakano : Proc. 14th IEEE PV Specialists Conf., San Diego, (1980) 1408.
- 3) S.Nakano, H.Kawada, T.Matsuoka, S.Kiyama, S.Sakai, K.Murata, H.Shibuya, Y.Kishi, I.Nagaoka and Y.Kuwano : Tech. Digest 1st Int. PVSEC Kobe (1984) 583.
- 4) O.Heavens : Optical Properties of Thin Solid Films, Butterworths Scientific Publications, London (1955) 66.
- 5) S.Nakano, T.Matsuoka, S.Kiyama, H.Kawata, N.Nakamura, Y.Nakashima, S.Tsuda, H.Nishiwaki and Y.Kuwano : Jpn. J. Appl. Phys. 25(1986) 1936.
- 6) S.Tsuge, Y.Hishikawa, N.Nakamura, S.Tsuda, S.Nakano, Y.Kishi and Y.Kuwano : Technical Digest of the International PVSEC-5, Kyoto, Japan (1990)

第4章 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の開発

4. 1 緒 言

現在、a-Si太陽電池は次世代のクリーンなエネルギー源として期待されており既に工業化されているが、そのほとんどはガラスを基板としている。しかしながら太陽電池の応用製品の開発を考えた場合、ガラス基板a-Si太陽電池は重く、また割れやすいといったいくつかの欠点がある。このため、従来からステンレス^{1) 2)}あるいは不透明な有機フィルムを基板とした^{3) 4)}フレキシブルa-Si太陽電池の開発が進められている。しかし、これらのフレキシブルa-Si太陽電池は変換効率、光劣化の面あるいはフレキシビリティーに関し多くの課題が残されており、まだ普及していない。

前章までにおいてガラス基板a-Si太陽電池の高効率化の手法について論じ、更にレーザを用いた新しい集積型構造のパターニング法を提唱し、良好にパターニングが可能なことを実証した。本研究では、これらの技術を応用し透明ポリイミドフィルムを基板とした新しい構造のフィルムタイプa-Si太陽電池の研究開発を行った。この新フィルムタイプa-Si太陽電池は高いフレキシビリティーを持ち、超軽量で薄いといった優れた特長を持っている。^{5), 6), 12)}

本章では、透明ポリイミドフィルム上への高品質a-Si膜形成について述べるとともにLWS法の新フィルムタイプa-Si太陽電池への応用について論ずる。

4. 2 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の構造

図4.1にステンレス等の金属基板及び不透明プラスチックフィルムを基板とした従来のフレキシブルa-Si太陽電池のセル構造を示す。金属基板a-Si太陽電池は基板上へ SiO_2 , Al_2O_3 等の無機絶縁膜あるいはポリイミド等の耐熱性有機絶縁膜を形成し、その上に裏面金属電極, nip層からなるa-Si層, TCOを順次形成した構造である。一方、不透明プラスチックを基板としたa-Si太陽電池の場合、基板が絶縁性を有しているため基板上へ直接裏面金属電極, nip層からなるa-Si層, TCOを順次形成した構造となっており、基本的には金属基板a-Si太陽電池と同一セル構

造である。これらのフレキシブルa-Si太陽電池においてはTCO形成技術が変換効率向上のキーポイントとなる。

TCO形成法には蒸着、スパッタ、熱CVD等の方法があるが熱CVD法は500℃近い反応温度が必要とされるためa-Si上にTCOを形成する場合には使用できない。また、蒸着、スパッタいずれの方法においても高光透過率、低シート抵抗のTCOを得るためには高温形成することが望ましいが、TCOを高温形成した場合a-Si層に熱的ダメージが加わりa-Siの膜特性が変化しセル形成した場合に光電変換効率の低下を招く。更に、a-Si上へTCOを形成する場合高エネルギー粒子がa-Si膜に衝突するため、この衝突のエネルギーによりa-Siがダメージを受け同様に特性低下を招くという問題がある。このため、図4.1の構造のフレキシブルa-Si太陽電池においては比較的低パワー、低温でTCOを形成しなければならないが、高品質のTCOの形成が困難で、通常ガラス基板a-Si太陽電池と比較すると変換効率が低いという問題があった。

今回、これらの問題を解決し、高効率でかつフレキシビリティを有するa-Si太陽電池を得るために新構造を開発した。⁶⁾ 図4.2に新フィルムタイプa-Si太陽電池の構造を示す。膜厚20μmの耐熱性を有する透明ポリイミドフィルムを基板としその上にTCO, pin層からなるa-Si層, 金属裏面電極を順次形成した構造となっている。

本構造は基本的にはガラスを基板としたa-Si太陽電池と同じであり光は基板側から入射する。このため、従来のステンレス等の金属あるいは不透明プラスチックを基板としたフレキシブルa-Si太陽電池と異なりTCO形成時にa-Si層へのダメージがないため高い変換効率が期待できる。また、基板である透明ポリイミドフィルムの膜厚は20μmと薄いため従来の太陽電池では達成できない高いフレキシビリティを得ることが可能である。

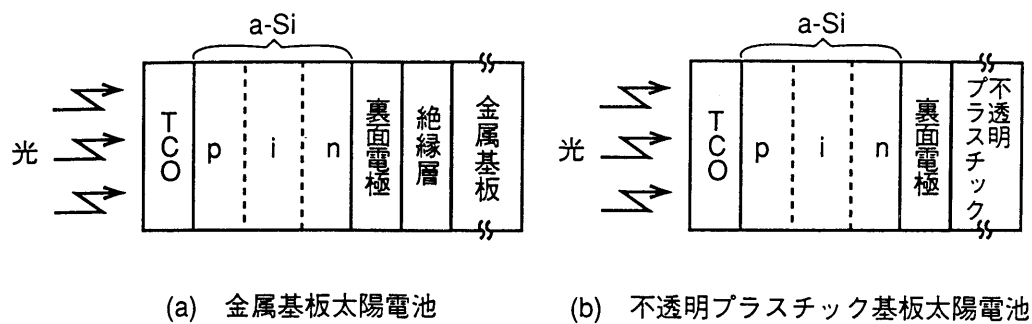


図 4. 1 従来構造フレキシブル a-Si 太陽電池

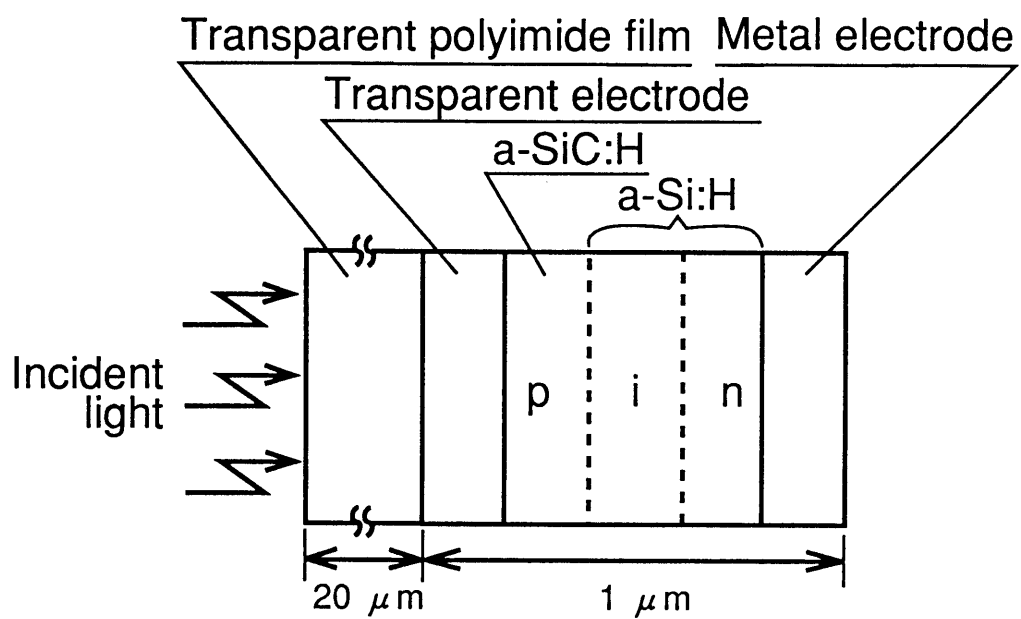


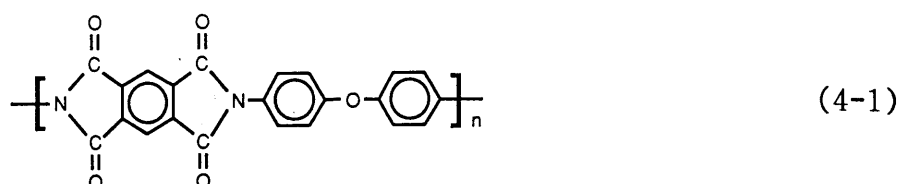
図 4. 2 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の構造

4. 3 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の作製

4. 3. 1 透明ポリイミドフィルム上への高品質 a-Si 膜の形成

1) 透明ポリイミドフィルムの特性

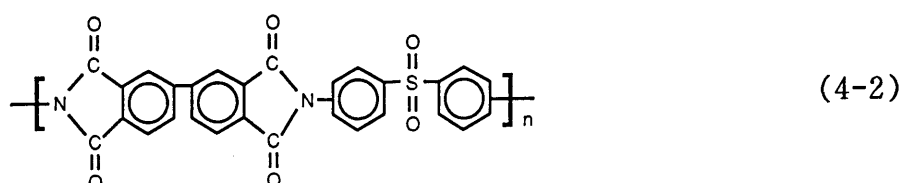
まず、基板である各種のポリイミドフィルムの特性について検討を行った。カプトンで代表される芳香族ポリイミドは、一般に(4-1)式で表わされるように一次構造的に分子をみると1つの繰り返しユニットの中に2個のイミド環と最低2個の芳香環があり、これに種々の官能基が連結されている。



これらのポリイミドは高いガラス転移点を持つため、優れた耐熱性を有している。しかしながら、これらのポリイミドは褐色に着色しており550nm以下の可視光の透過率が低いため、a-Si太陽電池の光入射側基板としては適さない。そこで、分子構造の異なる様々なポリイミドの光透過率について検討を行った。

図4.3にビフェニルテトラカルボン酸二無水物とオキシジアニリンからなりジアミン残基の置換位置の異なる3種のポリイミドの透過スペクトルを示す。⁷⁾ 図4.3よりm-, m-置換の構造が最も光透過率が高いことが判る。

また、酸二無水物残基の電子吸引性の強さによってCT錯体の形成度合が変化しこれに伴い光透過率が変化する。図4.4にm-, m-置換構造のジアミン残基をもつポリイミドの酸二無水物残基の種類による透過率の変化を示す。図4.4よりビフェニルタイプの酸二無水物残基を持つポリイミドが最も光透過率が高いことが判る。そこで、基板として(4-2)式の分子構造を持つポリイミドフィルムを用いた。



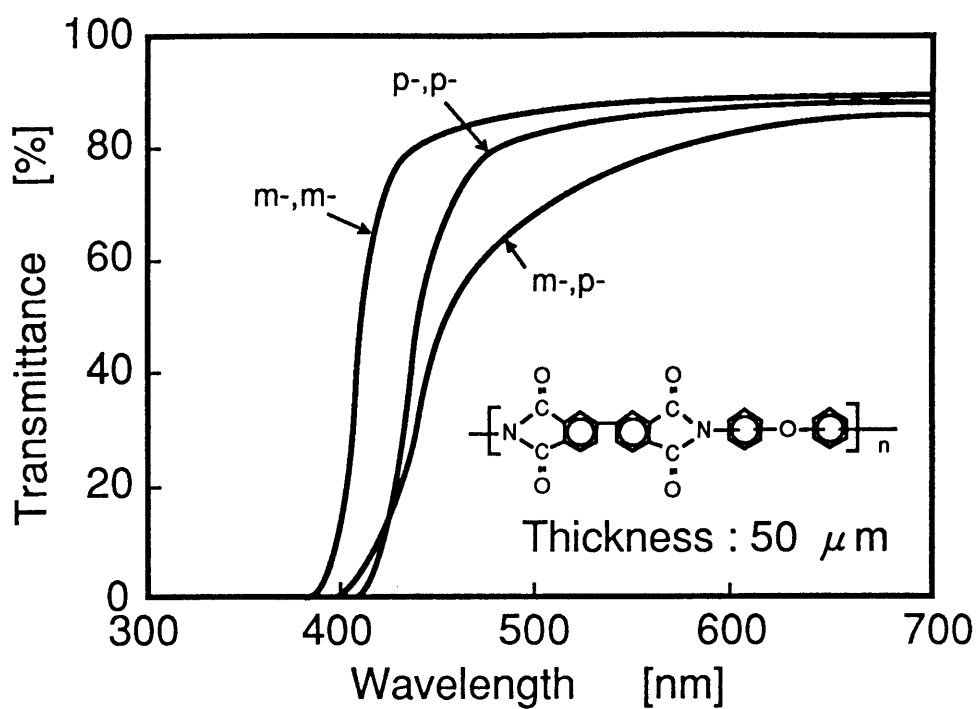


図 4. 3 ジアミン残基の置換位置による光透過率の変化

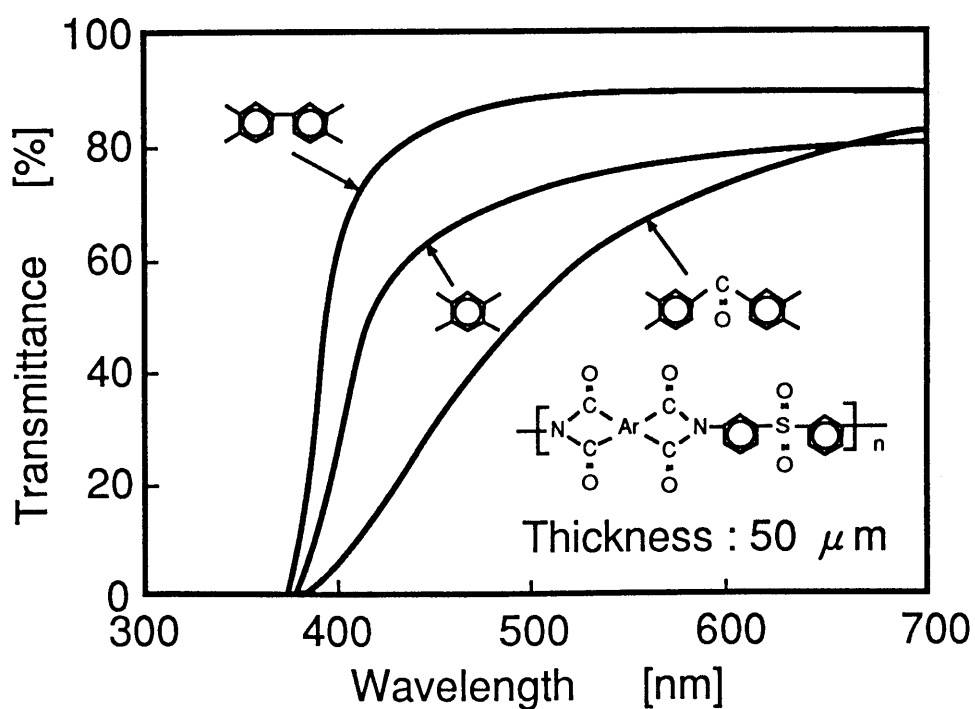


図 4. 4 酸二無水物残基の種類による光透過率の変化

この透明ポリイミドは図4.4に示すように、400nm以下の光はほとんど透過しないが、420nm以上の波長領域においては85%以上の高い可視光透過率を有しており、ポリイミドフィルム表面での光の反射を考慮すると実際のポリイミドフィルムによる光の吸収は3%以下でありa-Si太陽電池の光透過基板として優れた特性を持っていることが判る。

しかしながら、この透明ポリイミドフィルムは加熱すると光透過率が変化する。図4.5に透明ポリイミドフィルムの加熱温度による光透過率の変化を示す。300℃まで加熱してもその光透過率はほとんど変化しないが、300℃以上に昇温すると400nmから550nmの波長領域において透過率が徐々に低下してくる。

このため、このポリイミドフィルムをa-Si太陽電池の光入射側基板として使用する場合ポリイミドフィルムの可視光透過率の低下によるa-Si太陽電池の変換効率の低下を防ぐためにTCO, a-Si, 裏面電極の形成はそれぞれ300℃以下で行わなければならないことが判る。

次に、透明ポリイミドフィルムを真空中で加熱した時のガス放出特性の評価を行った。透明ポリイミドフィルムを真空中で10℃/minの割合で昇温し、放出ガスを質量分析法により測定した。その結果を図4.6に示す。透明ポリイミドフィルム基板を真空中で昇温していくと、70℃付近でポリイミド内に吸蔵されていたH₂Oの放出に相当する信号のピークが見られる。また、ポリイミドフィルムの熱分解に起因すると思われる有機ガスは200℃付近から急激に放出量が増加している。また、同様にポリイミドフィルムの熱分解に起因すると考えられるCO₂の放出も200℃付近から始まり温度上昇に伴い増加している。

これらの放出ガスはa-Si形成時にa-Si膜中に不純物として取り込まれa-Si膜質の低下を招く可能性がある。そのため、a-Si形成は極力低温で形成することが望ましく、特にポリイミド基板の熱分解による有機ガスの発生を抑制するためには200℃以下でa-Si膜を形成する必要があることが判った。

2) 水素希釈による高品質 a-Si 膜の形成

a-Si形成温度を低温化した場合、a-Siの膜質が低下することが懸念される。そこでまず、低温形成時のa-Si膜質を評価するために、Siウェハ上にa-Si膜を形成

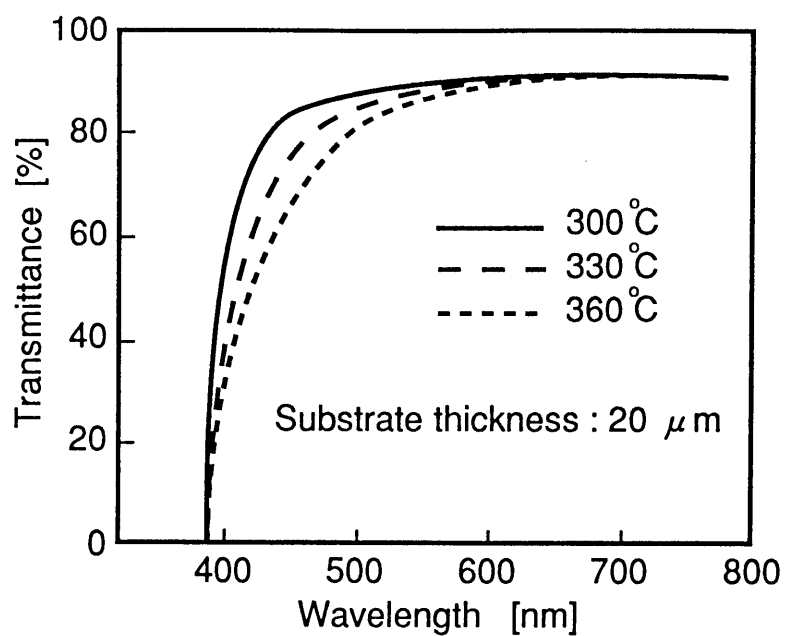


図 4. 5 温度による透明ポリイミドフィルムの透過率の変化

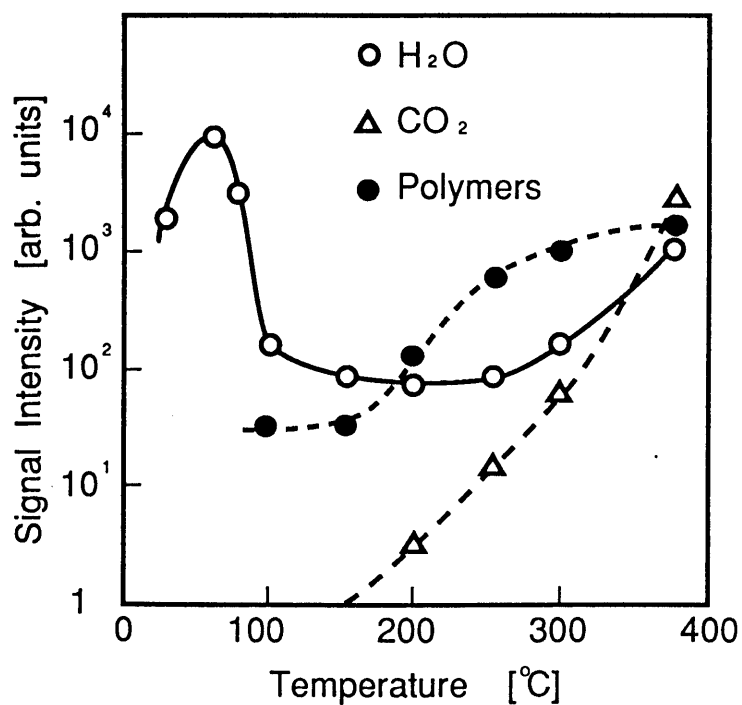


図 4. 6 真空中で昇温(10°C/min)した時の透明ポリイミドフィルムからのガス放出特性

しa-Si形成時の基板温度とa-Si膜中の SiH_2/SiH 結合比の関係について検討を行った。 SiH_2/SiH の結合比の測定は赤外吸収スペクトルの $2000\sim 2100\text{cm}^{-1}$ 付近に見られるstretching modeにより求めた。図4.7にその結果を示す。基板温度が 200°C 以下になると急激に SiH_2/SiH 結合比が増加していることが判る。一般に SiH_2/SiH 結合比が増加すると膜中のスピン密度が増加し膜質が大きく低下することが知られている。この結果から、基板温度が 200°C 以下になると膜質が急激に低下することが判った。

そこで、 200°C 以下で形成したa-Si膜の膜質向上のため原料ガスである SiH_4 の H_2 による希釈の検討を行った。図4.8に基板温度 180°C の場合のa-Si形成時の H_2/SiH_4 流量比とa-Si膜中の SiH_2/SiH 結合比の関係を示す。a-Si膜形成時の H_2/SiH_4 流量比が増加するに従ってa-Si膜中の SiH_2/SiH 結合比が減少し膜質が向上している。これは SiH_4 を H_2 で希釈することにより水素のラジカル種が多量に生成され、このラジカル種がa-Si膜表面の SiH_2 結合に衝突して膜中の水素が水素分子となって離脱することによると思われる。 H_2/SiH_4 流量比が3以上においては SiH_2/SiH 結合比は0.03程度となり 200°C 以上の高温で形成した場合と同程度の値となることが明らかになった。

そこで、実際に透明ポリイミド基板上に基板温度 180°C の条件で SiH_4 の H_2 希釈を行いa-Si膜を形成し、その膜質の評価を行った。図4.9にa-Si形成時の H_2/SiH_4 流量比と σ_{ph} , σ_{d} の関係を示す。 H_2/SiH_4 流量比が増加するに従って、 σ_{ph} は向上し H_2/SiH_4 流量比5において $2 \times 10^{-5} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ の良好な値が得られた。また、 $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{d}}$ に関しても $\sim 10^6$ と良好な値を得ることができた。以上の結果から、 180°C の比較的低温で透明ポリイミド基板上へa-Siを形成しても原料ガスである SiH_4 を H_2 で5倍以上希釈することによって高品質のa-Si膜が得られることが判った。

3) 基板フィルムのベーキングによる脱ガス処理

次に、 SiH_4 を H_2 希釈し 180°C の基板温度で成膜したa-Si膜をi層に用いてa-Si太陽電池セルの形成を行った。

a-Siの形成温度を 180°C 以下で行う場合、ポリイミド基板の熱分解による有機ガスの放出は少ないがポリイミド基板内に吸蔵されていた H_2O が放出され分解さ

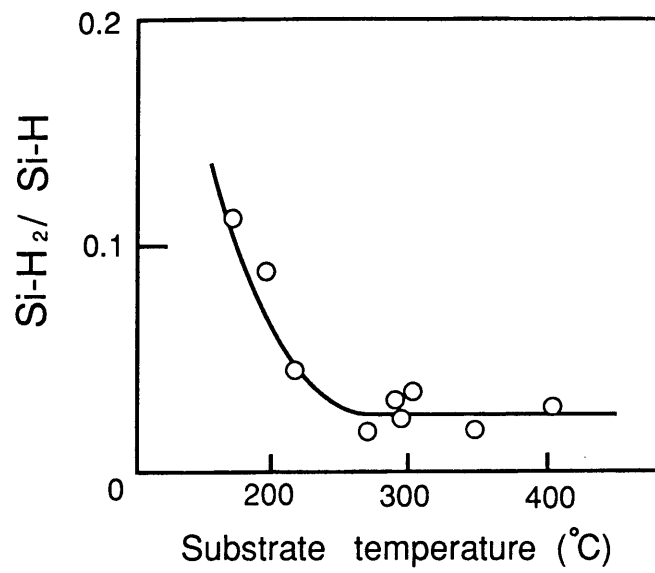


図 4. 7 a - S i 形成時の基板温度と膜中の SiH_2/SiH 結合比の変化

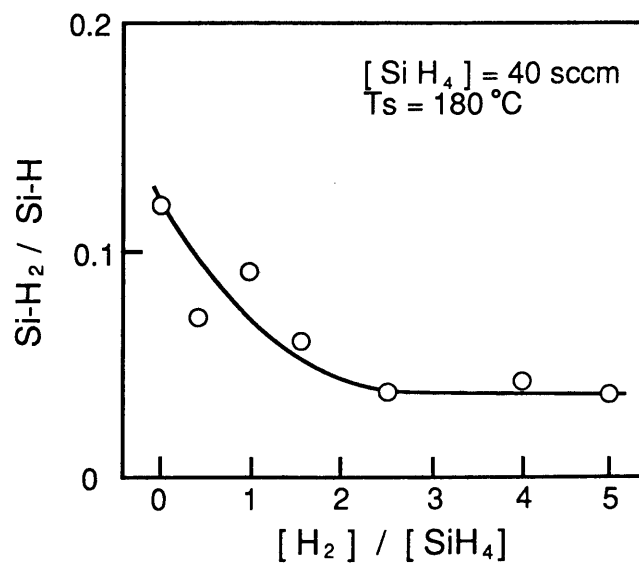


図 4. 8 a - S i 形成時の H_2/SiH_4 流量比と a - S i 膜中の SiH_2/SiH 比の関係

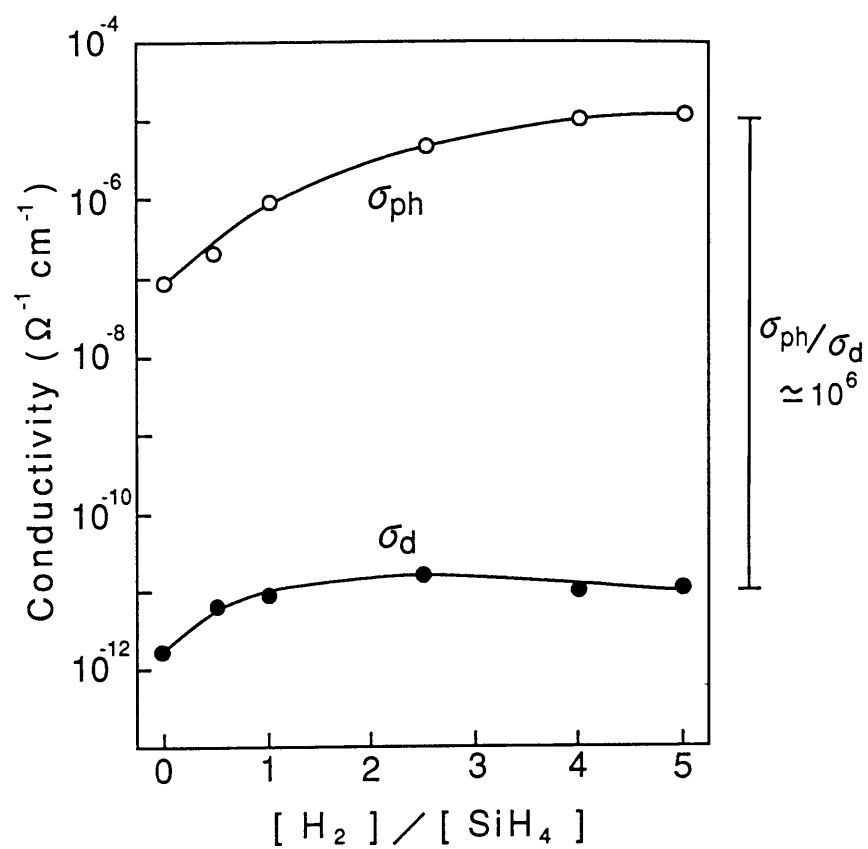


図 4. 9 a - S i 形成時の H_2/SiH_4 流量比と $\sigma_{\text{ph}}, \sigma_{\text{d}}$ の関係

れて、a-Si膜中へO原子が不純物として取り込まれる可能性がある。しかしながら、透明ポリイミド基板からのH₂Oの放出は図4.6で示したように徐々に昇温していくと70℃付近にそのピークがあり、更に昇温すると低下する傾向にある。このことは、透明ポリイミドを真空中である程度加熱すると、ポリイミド内に吸蔵されていたH₂Oがほとんど放出されてしまうことによると思われる。

そこで、a-Si形成時のポリイミドフィルム基板からのH₂Oの放出を低減するためにa-Si形成の前処理として、基板をa-Si形成温度よりも高い温度でプリベークすることを検討した。図4.10に基板を真空中240℃でプリベークした時間とその上に形成したa-Si太陽電池セルの諸特性との関係を示す。

V_{oc}, I_{sc}, FF, η については、それぞれプリベークを行わなかった透明ポリイミド基板上に形成したa-Si太陽電池セルの特性で規格化している。図4.10から明らかなようにV_{oc}, I_{sc}はプリベークによりほとんど変化しないが、FFはプリベーク時間が長くなるにつれて増加し10時間以上のプリベークにより20%以上向上し、これに伴い η も20%向上している。この結果からプリベークによりa-Si形成時に透明ポリイミド基板からのH₂Oの放出が低減されa-Si膜中のO濃度が減少したことが推察される。

そこで、プリベークによる特性向上の要因を確認するため、15時間プリベークを行った透明ポリイミド基板上に形成したa-Si太陽電池セルとプリベークを行わなかった透明ポリイミド基板上に形成したa-Si太陽電池セルのそれぞれについてSIMSにより膜中のO原子濃度の分析を行った。図4.11にSIMSによるa-Si太陽電池セルの膜中のO原子濃度プロファイルを示す。この図から明らかなように、真空中240℃で15時間プリベークした透明ポリイミド基板上に形成したa-Si太陽電池セルは、プリベークしなかった透明ポリイミド基板上に形成したa-Si太陽電池セルに比べて、p層からi層へかけて膜中のO濃度が減少していることが判る。この結果から、透明ポリイミド基板のプリベークによる特性の向上は、基板からのH₂Oの放出が低減され膜中のO濃度が減少したことによるものであることが明らかになった。また、a-Si膜中のC,N濃度についてもSIMSにより分析したがプリベークの有無による差は見られず180℃の基板温度においては透明ポリイミド基板の熱分解による有機ガスの放出はほとんど無いことが確認された。

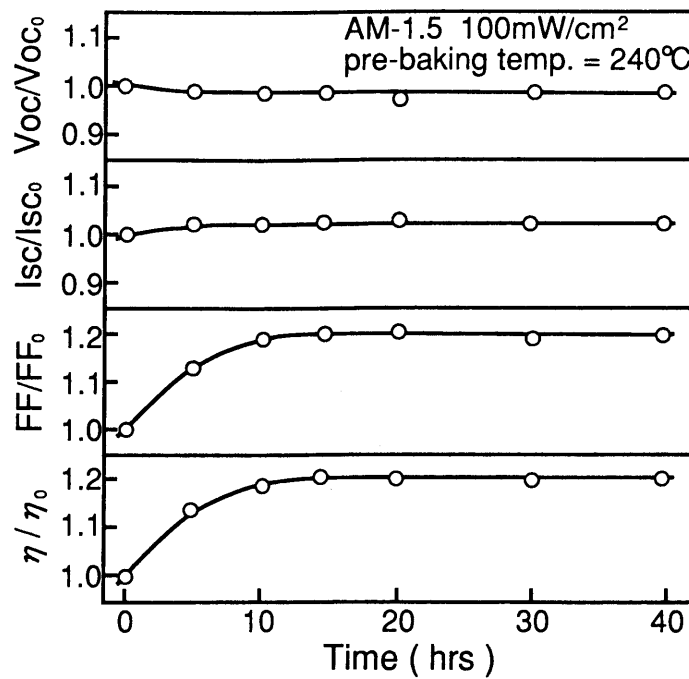


図 4. 10 基板のプリベーキングによる a - S i 太陽電池セルの諸特性の変化

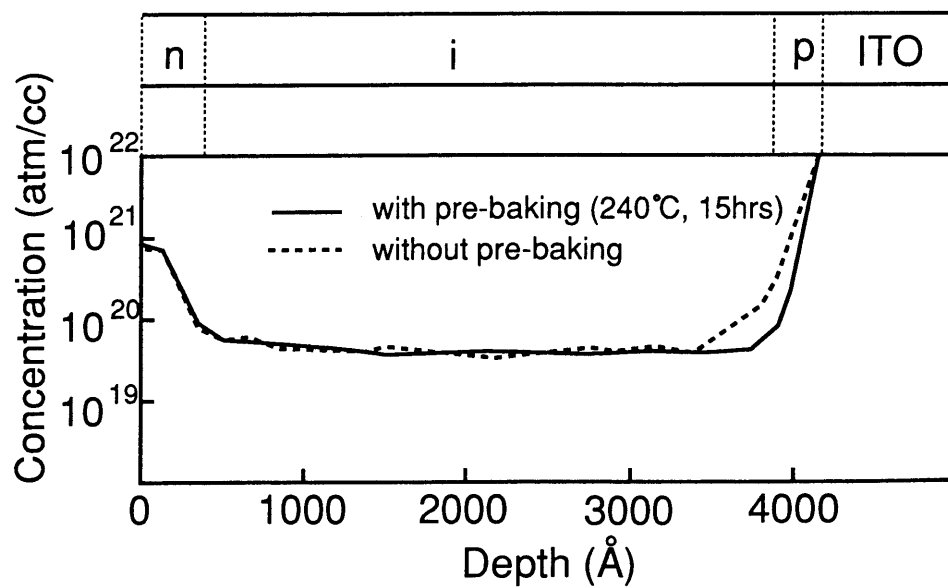


図 4. 11 S I M S による a - S i 太陽電池セルの膜中酸素濃度プロファイル

4. 3. 2 LWS法による集積型構造の形成

第3章で述べたように、集積型a-Si太陽電池の新しいパターニング法としてLWS法を開発した。そこで、透明ポリイミドを基板とした新フィルムタイプa-Si太陽電池にこのLWS法の応用を試み、集積型サブモジュールの開発を行った。

通常ガラス基板a-Si太陽電池において使用される導電層及び絶縁層はいずれも高温焼成タイプのペーストであり、550℃の高温で焼成しなければならない。しかしながら、透明ポリイミド基板は300℃以上に昇温すると前述したように可視光透過率が低下し、更に高温になると熱分解を起こすためこれらの焼成型ペーストを利用することはできない。また、基板がフレキシビリティを有するためこれらの絶縁層及び導電層にもフレキシビリティがあることが要求される。

そこで、有機系の絶縁ペースト及び導電ペーストを270℃で硬化することにより絶縁層及び導電層を形成し、第3.3.3章に示したようにレーザによるセル分割及びセル間溶着のテストを行った。

図4.13に透明ポリイミド基板/TCO/絶縁層(30 μ m)/a-Si(5000 Å)/Al(3000 Å)の構造においてセル間分割のレーザパワー密度と分割されたAl電極間及び絶縁層下部のTCO間の抵抗値との関係を示す。図4.12より明らかなように5.0 $\times 10^7$ W/cm²以上のレーザパワー密度でAl電極は分割されており、また絶縁層下部のTCOはレーザパワー密度が2.0 $\times 10^8$ W/cm²以下ではダメージがないことが判る。この結果からレーザパワー密度は5.0 $\times 10^7$ W/cm² ~ 2.0 $\times 10^8$ W/cm²の条件で良好にAl電極の分割が可能ことが確認された。また、このレーザパワー密度領域ではTCOとAl電極とのショートは発生しない。

図4.13に透明ポリイミド基板/TCO/導電層(20 μ m)/a-Si(5000 Å)/Al(3000 Å)の構造においてセル間溶着のレーザパワー密度とAlとTCO間の抵抗値との関係を示す。レーザパワー密度が1.5 $\times 10^8$ W/cm²以上の領域においてAlとTCOは電氣的に接続される。一方、レーザパワー密度が6.0 $\times 10^8$ W/cm²以上においてはTCO及び透明ポリイミド基板へのダメージが発生する。これらの結果から、レーザパワー密度が1.5 $\times 10^8$ ~ 6.0 $\times 10^8$ W/cm²の条件で良好にセル間の溶着が可能ことが確認された。

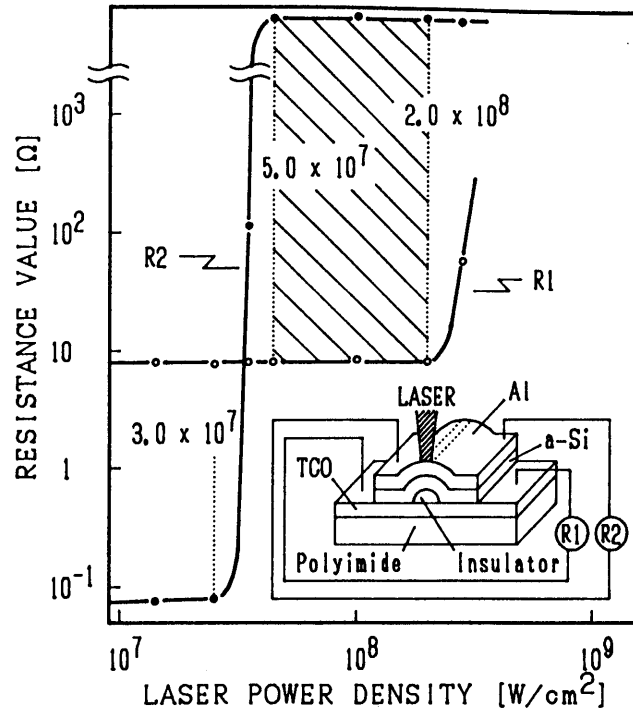


図 4. 12 レーザビーム切断部におけるレーザパワー密度と電気抵抗の関係

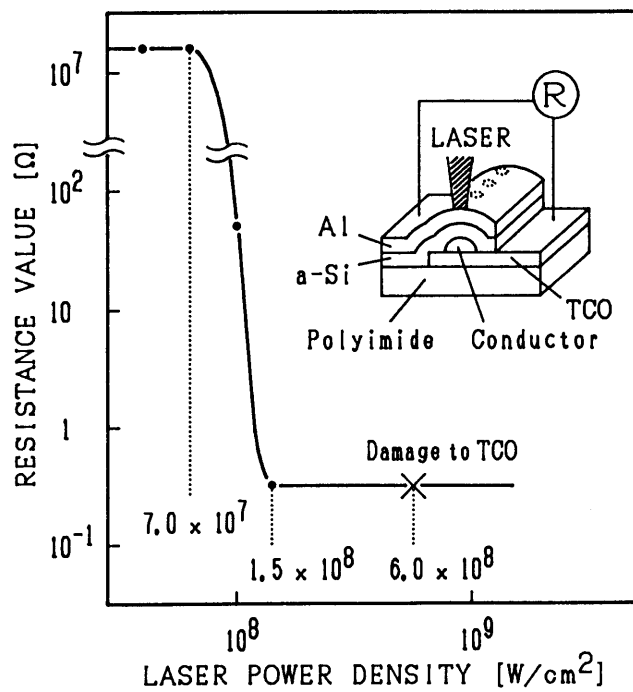


図 4. 13 レーザビーム溶着部におけるレーザパワー密度と電気抵抗の関係

4. 4 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の特性

図4.14にLWS法を用いて形成された集積型新フィルムタイプa-Si太陽電池サブモジュール(110mmX115mm, 17段セル直列)のI-V特性を示す。最大出力は $V_{oc}=14.0V$, $I_{sc}=62.9mA$, $FF=0.625$, $P_{max}550.7mW$ が得られた。^{5) 8)} このサブモジュールの重量はわずか2gであり単位重量当り出力は275mW/gと世界最高の値を得ることができた。この単位重量当り出力は地上用結晶シリコン太陽電池モジュールの約10倍, 宇宙用GaAs太陽電池の約2倍である。また、優れたフレキシビリティを有しており集積型接続部構造に関しても曲げに対して全く問題なかった。

4. 5 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの作製

4. 5. 1 モジュール構造及びモジュール化プロセスの検討

新フィルムタイプa-Si太陽電池の信頼性向上並びに実用性向上を図るにはモジュール化が不可欠である。従来、ガラス基板a-Si太陽電池や結晶系太陽電池のモジュールは常時屋外固定設置が主流であり長期の耐候性確保を主眼とした構造のものであった。⁹⁾

今回、新フィルムタイプa-Si太陽電池の軽量且つフレキシブルな特長を生かすことに主眼を置き、モジュール化の検討を行った。新フィルムタイプa-Si太陽電池モジュールの基本的な構造を図4.15に示す。モジュールの表面及び裏面の保護フィルムにはPET(Polyethylene Terephthalate:ポリエチレンテレフタレート)フィルムを、透明接着剤にはポリエステル系の熱可塑性の接着剤を用い加熱圧着することにより新フィルムタイプa-Si太陽電池のモジュール化を行った。モジュールの外観を図4.16に、モジュール化の手順を図4.17に示す。

まず、熱可塑性接着剤が塗布されたPETフィルムの接着剤上に太陽電池の受光面が位置するように太陽電池を配置し、次に熱ローラーにより加熱圧着を施し一体化を行い、最後に太陽電池間を半田及び銅箔を用いて接続し半田部及び太陽電池の周辺部に熱可塑性接着剤が塗布されたPETフィルムを配置し、再び熱ローラーにより加熱圧着を施し太陽電池を封止した。

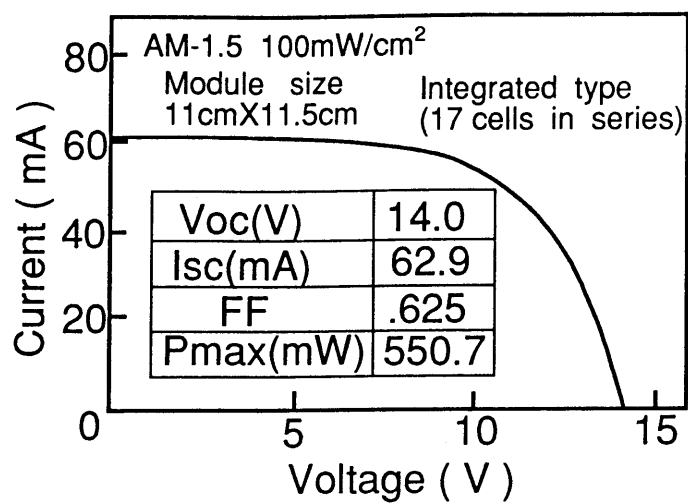


図 4 . 14 集積型新フィルムタイプ a - S i 太陽電池の I - V 特性

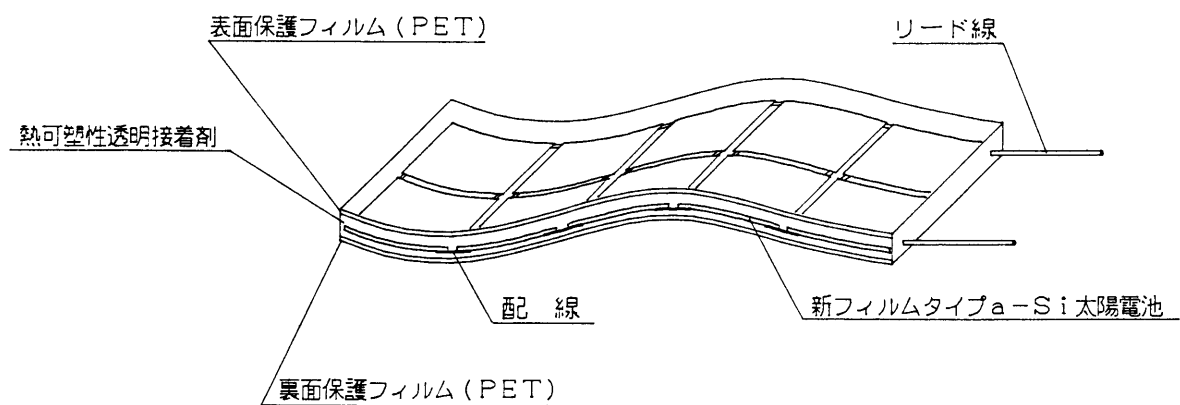


図 4 . 15 新フィルムタイプ a - S i 太陽電池モジュールの構造

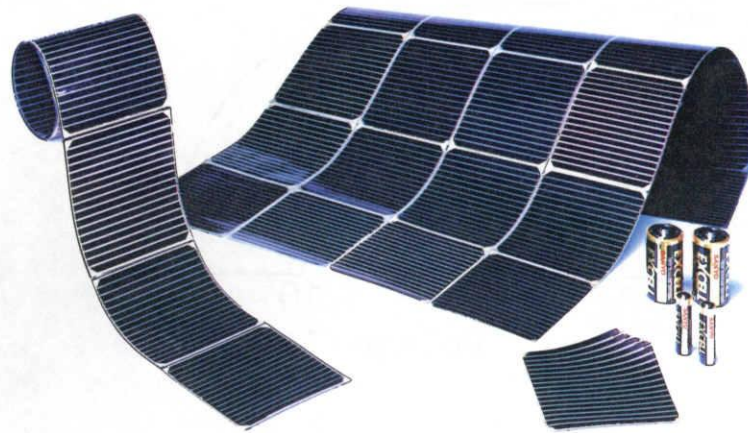


図 4. 16 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュール

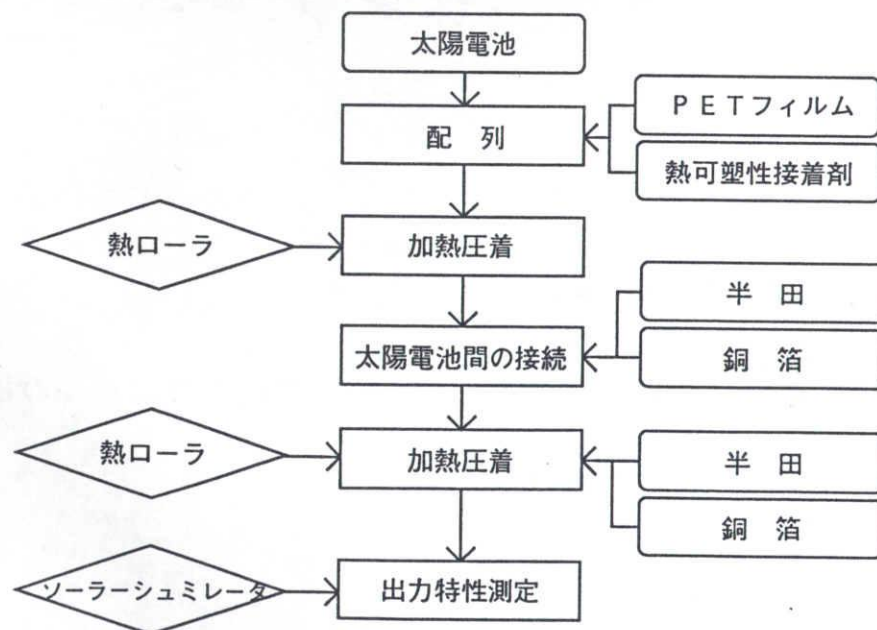


図 4. 17 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュール化の手順

こうして一体化された新フィルムタイプa-Si太陽電池モジュールは、太陽電池の周囲のすべてがPETフィルムで覆われ耐候性に優れたものとなると考えられる。その信頼性テスト結果については次節で述べる。

4. 5. 2 信頼性評価

新フィルムタイプa-Si太陽電池モジュールに対して各種信頼性評価を行った。以下に各試験項目の目的及び条件について示す。

1) 低温保存試験

この試験は、低温の状態で使用および貯蔵されるモジュールの適正を調べることを目的とする。

条件 温度 : -40°C
試験時間 : 2500時間

2) 高温保存試験

この試験は、高温の状態で使用および貯蔵されるモジュールの適正を調べることを目的とする。

条件 温度 : 85°C
試験時間 : 1000時間

3) 耐湿性試験

この試験は、高温高湿の状態で使用および貯蔵されるモジュールの適正を調べることを目的とする。

条件 温度 : 85°C
相対湿度 : 90%
試験時間 : 1000時間

4) 温度サイクル試験

この試験は、モジュールが急速な温度変化の繰り返しを受ける場合の適正を調

べることを目的とする。

条件 高温側 90℃ 及び低温側 -40℃、低温から高温及び高温から低温をそれぞれ 1.5 時間でサイクル 6 時間とし、連続して 200 サイクルを実施する（図 4.18）。

5) 屋外暴露試験

この試験は、屋外で使用するモジュールの適正を調べることを目的とする。

以上の試験結果を図 4.19~図 4.23 に示す。いずれの環境試験においても太陽電池出力に変化はなく、また、屋外暴露試験においてもガラス基板上に形成された通常の a-Si 太陽電池と変わらない良好な結果が得られた。

4. 6 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの応用

4. 6. 1 新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの特長

新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの特長を以下に挙げる。

- 1) 太陽電池モジュールの厚さはわずか 0.12 mm
- 2) フレキシビリティに優れ半径 5 mm の曲率まで曲げることが可能
- 3) 単位重量当りの出力は世界最高の 275 mW/g
- 4) 用途に応じた大きさのモジュールが作製可能

この新フィルムタイプ太陽電池は、以上のような従来の太陽電池に比べ卓越した特長を生かし、携帯用電源、人工衛星、自動車、航空機等の分野への応用が期待できる。

4. 6. 2 携帯用電源への応用

新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの軽量且つフレキシブルな特長を生

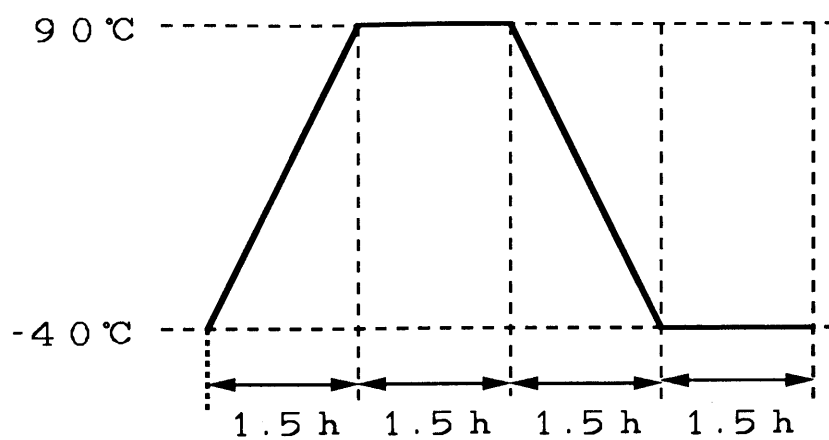


図 4. 18 温度サイクル試験条件

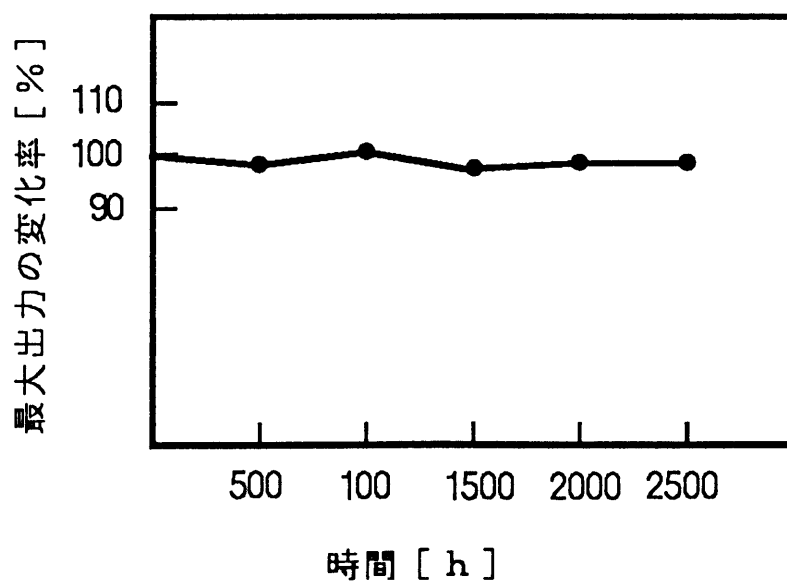


図 4. 19 低温保存試験結果

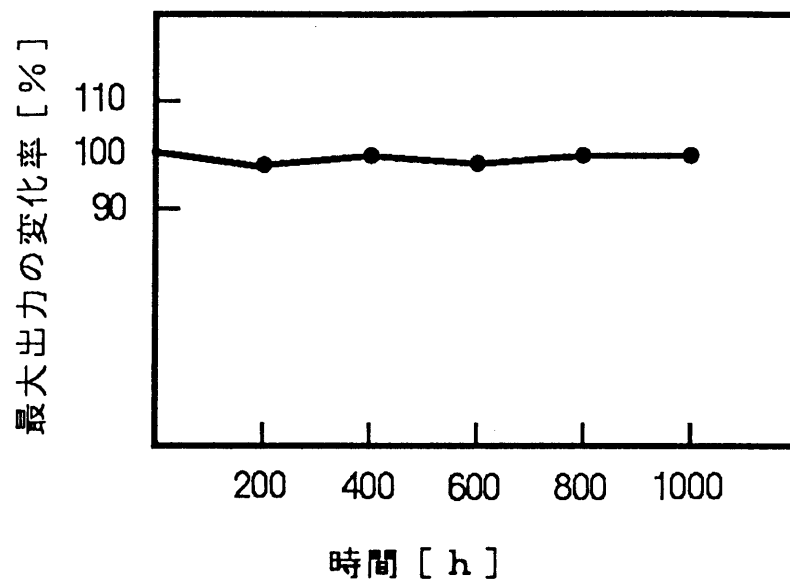


図 4 . 20 高温保存試験結果

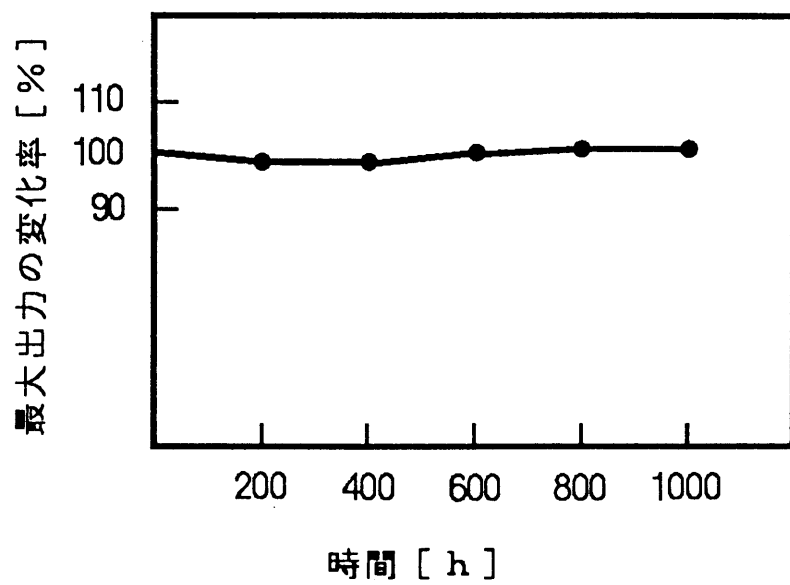


図 4 . 21 耐湿性試験結果

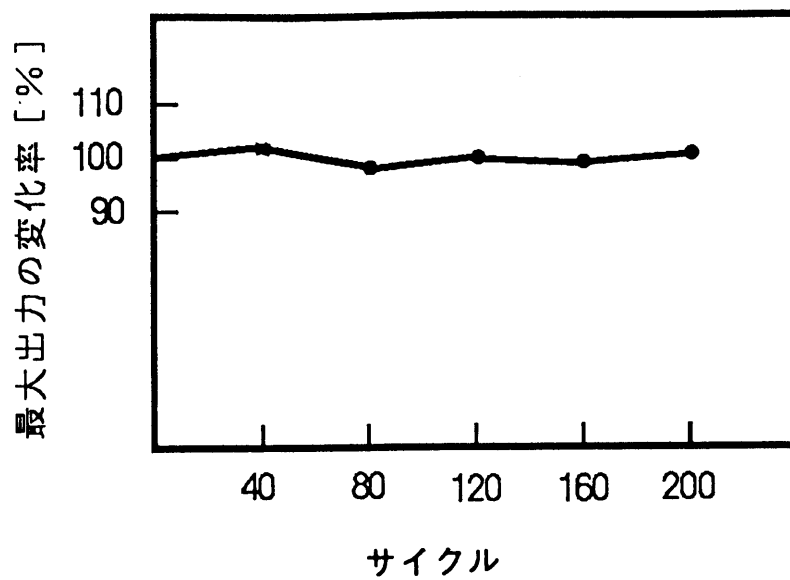


図 4. 22 温度サイクル試験結果

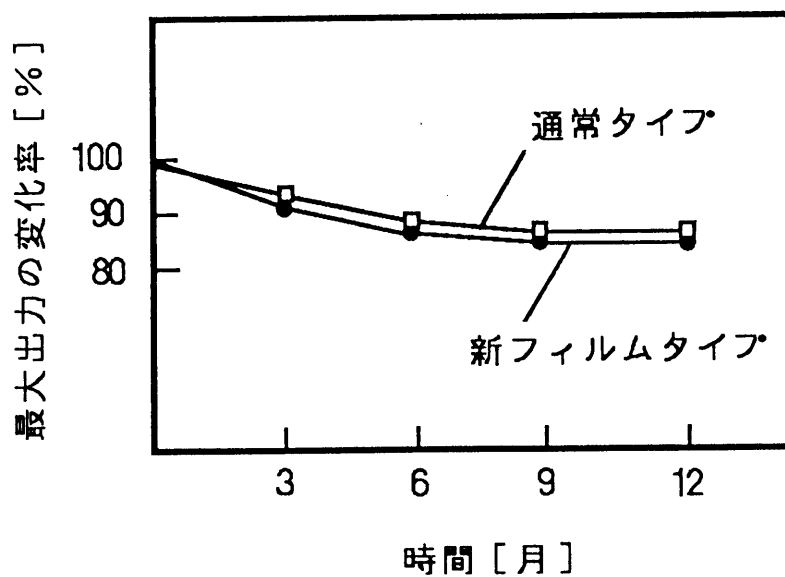


図 4. 23 屋外暴露試験結果

かし携帯用電源への応用を試みた。

今回試みた応用例及びその概略について述べる。

1) テント

キャンプ等で使用されるテントの傾斜面のテント生地もしくはテントの上部に設置するフライシートと新フィルムタイプa-Si太陽電池とを一体化したものである。寸法は、1.4mX1.0mである。I-V特性を図4.24に、外観写真を図4.25に示す。

2) パラソル

海水浴や庭先で使用されるパラソルの屋根部の生地と新フィルムタイプa-Si太陽電池とを一体化したものである。I-V特性を図4.26に、外観写真を図4.27に示す。

3) ジャケット

釣りや登山等で使用されるジャケットの背中面及び胸面の生地と新フィルムタイプa-Si太陽電池とを一体化したものである。広げた状態でのI-V特性を図4.28に、外観写真を図4.29に示す。

4. 6. 3 ソーラープレーンへの応用ーアメリカ大陸横断飛行ー

新フィルムタイプa-Si太陽電池モジュールの応用として、米国Solar Flight Research社のEric Raymondらと共にソーラープレーンを開発した。^{11), 12)}これまでのソーラープレーンの記録としては米国のPaul MacCreadyらが1981年にドーバー海峡横断飛行(約300km)を行っている。¹⁰⁾しかし、宇宙用の単結晶Si太陽電池を用いていたので非常に高価で、また割れやすいといった問題があり実用機には程遠いものであった。

今回開発したソーラープレーンは、Paul MacCreadyらのものとは全くコンセプトが異なり超軽量、高空力特性のグライダー機である。その構成を図4.30に、仕様を表4.1に示す。

主翼, 水平尾翼, ブーム上面に110mmX115mmサイズの新フィルムタイプa-Si太陽

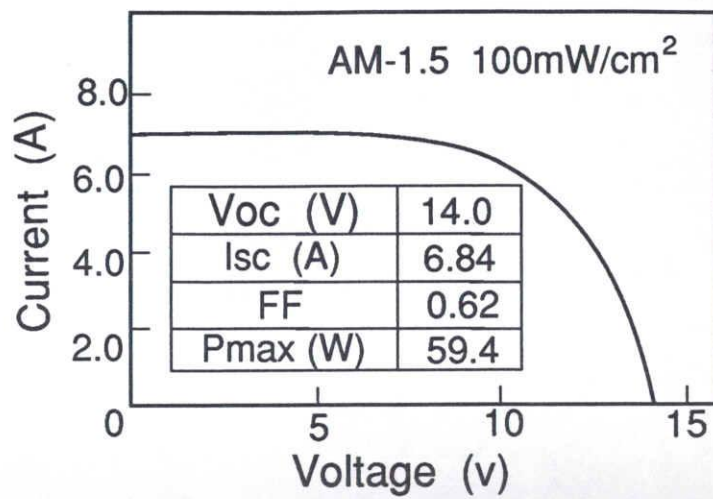


図 4. 24 テントと一体化した新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の I-V 特性



図 4. 25 テント

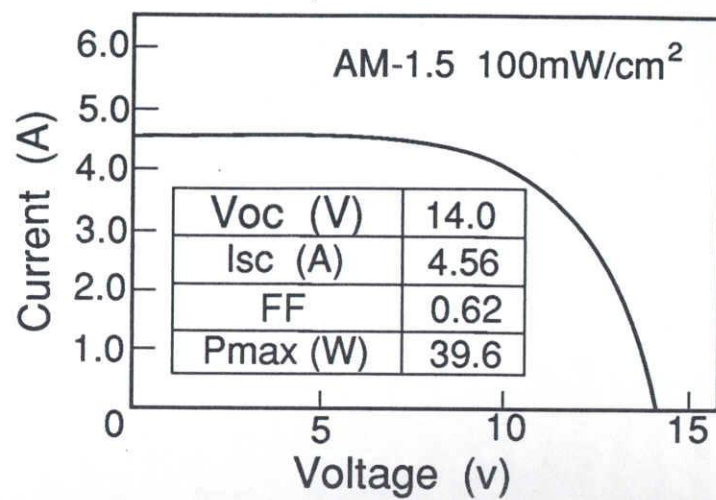


図 4. 26 パラソルと一体化した新フィルムタイプ a-Si 太陽電池の I-V 特性



図 4. 27 パラソル

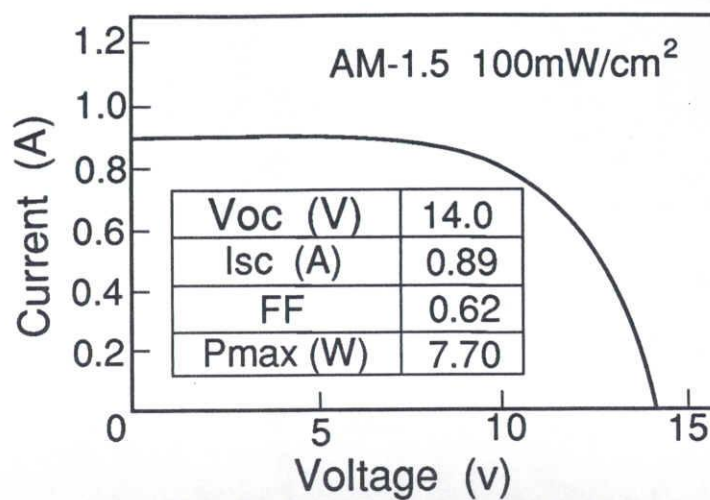


図 4. 28 ジャケットと一体化した新フィルムタイプa-Si太陽電池のI-V特性



図 4. 29 ジャケット

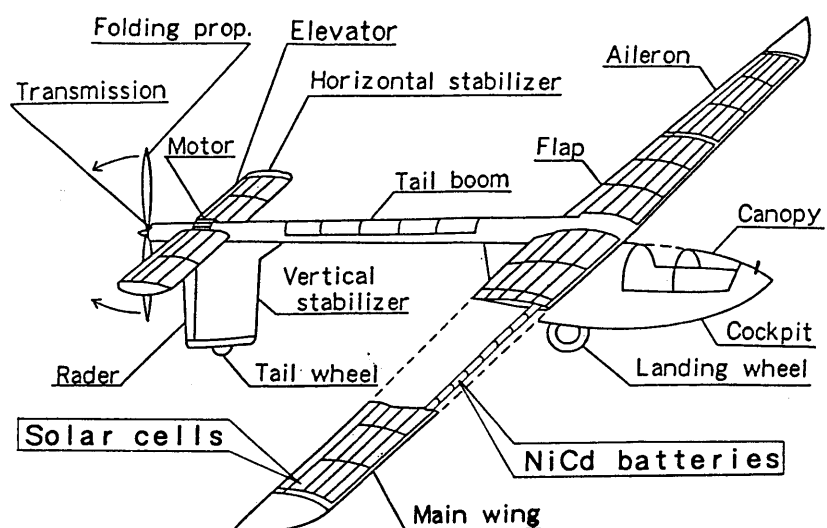


図 4. 30 ソーラープレーンの構成図

寸 法	全長 7 m, 全高 1.3 m 翼長 17.5 m, 翼面積 11 m ²
重 量	90 kg
ス ピ ード	巡航速度: 64 km/h 最高速度: 160 km/h
モ ー タ	DC ブラシレスモータ 電圧: 120 V 出力: 3 hp
太 陽 電 池	フィルム太陽電池 貼付面積: 8 m ² 重量: 1.5 kg 最大出力: 約 300 W
二 次 電 池	Ni-Cd 電池 120 V 4 AH

表 4. 1 ソーラープレーンの仕様

電池が約650枚配置されており、約300Wの出力が得られた。この新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールの総重量はわずか1.5kgと超軽量であり、またフレキシブルなため機体の曲面に凹凸無く取りつけることが可能で、太陽電池モジュールによる空気抵抗の増加を最小限に抑えることができた。また、2次電池としては急速充電及び大電流放電が可能なNi-Cd電池を主翼、水平尾翼、垂直尾翼の中に収めた。

図4.31にソーラープレーンの電気系統図を示す。新フィルムタイプ a-Si 太陽電池モジュールによって発電された電力をNi-Cd電池に一旦充電し、その電力によりモータを回転しプロペラを駆動する。

次にソーラープレーンの飛行パターンについて述べる。ソーラープレーンの飛行パターンを図4.32に示す。まず、離陸前に機体に取りつけたフィルム太陽電池で約2時間かけNi-Cd電池を充電する。そしてその蓄電された電力を用いて約10分間プロペラを回転させて離陸する。高度が100~300mまで達した後、上昇気流をとらえプロペラを停止し、旋回しながら高度1000~4000mに達する。次に高度を下げながら直線飛行を行う。高度が下がったところで再び上昇気流をとらえて旋回するか、もしくはパワーフライトにより高度をかせぐ。つまり、高さのエネルギーを距離にかえながら飛行するのである。飛行中はプロペラを使用しないので太陽電池による充電を再開することができる。このように、ソーラープレーンは太陽電池によって発電された電力のみを動力として飛行することができる。従って、エンジンを用いた通常の飛行機のように騒音や排気ガスを発生しない。飛行中のソーラープレーンの写真を図4.33に示す。

さらに我々は、実証試験として昨年の7月中旬から9月初旬にかけてソーラープレーンによって北米大陸横断飛行を行った。¹¹⁾

図4.34に今回の飛行ルートを示す。7月16日にカリフォルニア州のデザートセンターを出発し、アリゾナ、ニューメキシコ、テキサス、オクラホマ、カンサス、ミズリー、イリノイ、インディアナ、ケンタッキー、テネシー、バージニアの各州を経て、9月3日にノースカロライナ州のキティーホークに到着した。実際には悪天候の日は飛行しなかったため、全3,967kmの行程を飛行するのに計23日、飛行時間にして121時間を要した。

この間にPaul MacCreadyらのソーラープレーンの記録を塗り換え、ソーラープ

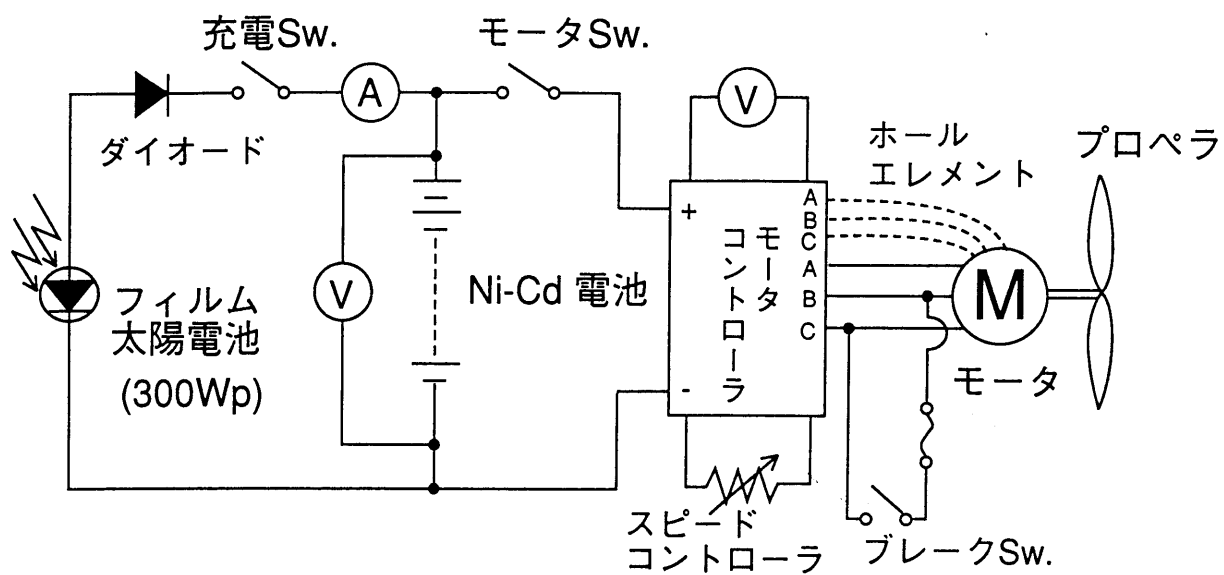


図 4. 31 ソーラープレーンの電気系統図

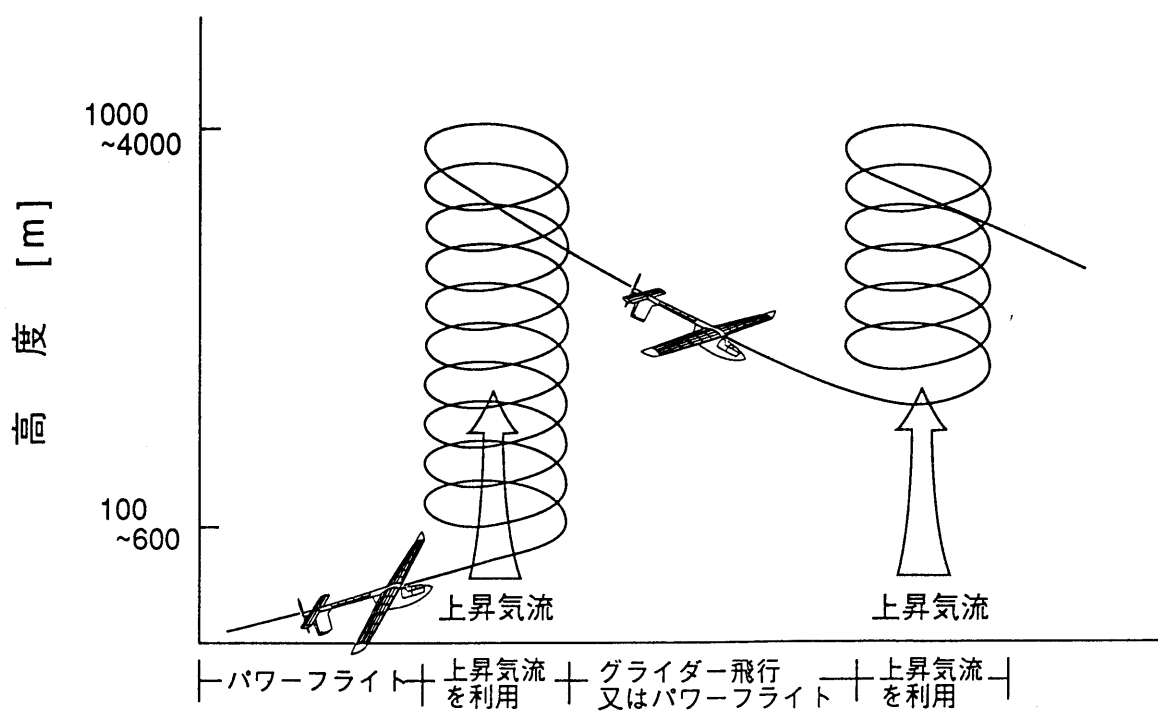


図 4. 32 ソーラープレーンの飛行パターン



図 4. 33 飛行中のソーラープレーン

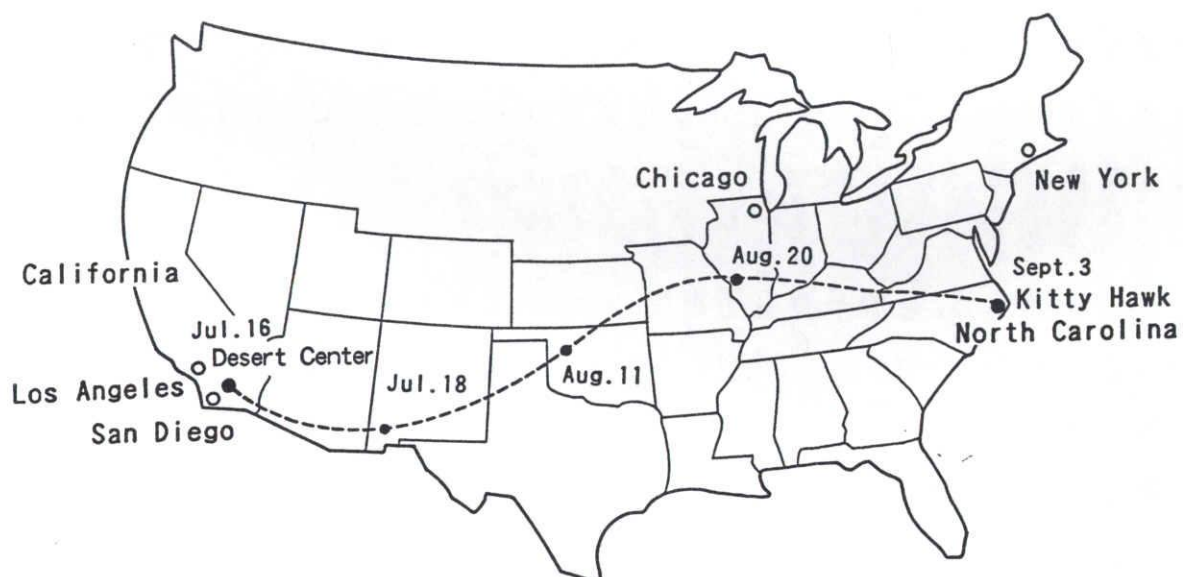


図 4. 34 北米大陸横断の飛行ルート

レーンとして次のような世界記録を達成することができた。

- 1) 無着陸飛行時間：7 時間 3 5 分
- 2) 無着陸飛行距離：3 9 4 . 3 k m
- 3) 最 高 飛 行 高 度：1 3 , 0 0 0 f t

4. 7 結 言

a-Si太陽電池の応用分野を拡大するために、透明ポリイミドフィルムを光入射側基板とした新フィルムタイプa-Si太陽電池を開発し以下の結論を得た。

1) 透明ポリイミド基板は200℃以上に昇温すると熱分解により有機ガスを放出するため、200℃以下の基板温度でa-Si膜形成を行わなければならないことを明らかにした。

2) 比較的低温で透明ポリイミドフィルム上へa-Si膜を形成する場合には、 SiH_4 ガスの H_2 希釈が高品質の膜を得るために有効な手段であることが判り、 H_2 により SiH_4 を5倍以上希釈することにより180℃の基板温度で $\sigma_{\text{ph}}=2 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$, $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{d}} \sim 10^6$ の値が得られた。

3) 透明ポリイミド基板を真空中で10時間以上プリベークすることにより、透明ポリイミド基板からの H_2O の放出が低減されa-Si膜中のO濃度が減少し、a-Si太陽電池特性が向上することが明らかになった。

4) 有機系絶縁層,有機系導電層を用いたLWS法を開発し透明ポリイミド基板にダメージを与えることなく、集積型パターニングが可能となった。

5) 集積型サブモジュール (110X115mm)を試作し、最大出力550mW,単位重量当り出力として世界最高の275mW/gと高い出力を得ることができた。

6) 新フィルムタイプa-Si太陽電池をPETフィルムで封止した薄く(厚さ0.12mm)、フレキシビリティに優れた(半径5mmの曲率まで曲げることが可能)新フィルム

タイプa-Si太陽電池モジュールを開発し、高い信頼性を有していることを確認した。

7) 新フィルムタイプa-Si太陽電池の応用としてソーラープレーンを開発し、世界で初めて北米大陸横断飛行に成功した。

参考文献

- 1) P.Nath, K.Hoffman, J.Call, C.Vogeli, M.Izu and S.R. Ovshinsky :
Tech. Digest 3rd Int. PVSEC, Tokyo (1987) 395.
- 2) K.Hoffman, P.Nath, J.Call, G.DiDio, C.Vogeli and S.R. Ovshinsky :
Proc. 20th IEEE PV Specialists Conf., Las Vegas (1988) 293.
- 3) H.Okaniwa, K.Nakatani, M.Yano, M.Asano and K.Suzuki : Jpn. J. Appl.
Phys. 21 (2) (1982) 239.
- 4) M.Yano, K.Suzuki, K.Nakatani and H.Okaniwa : Thin Solid Films, 146
(1987) 75.
- 5) Y.Kishi, H.Inoue, K.Murata, H.Tanaka, S.Kouzuma, M.Morizane, Y.Fukuda
H.Nishiwaki, K.Nakano, A.Takeoka, M.Ohnishi and Y.Kuwano : Tech.
Digest 5th Int. PVSEC, Kyoto (1990) 645.
- 6) Y.Kishi, H.Inoue, K.Murata, S.Kouzuma, M.Morizane, H.Sibuya,
H.Nishiwaki and Y.Kuwano : to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- 7) 中島 登志雄, 東 一美, 藤田 和秀 : ポリイミド樹脂, 技術情報協会
(1991) 103.
- 8) 田中 博之, 上妻 信一, 田中 俊哉, 邑田 健治, 井上 浩,
深津 猛夫, 武岡 明夫, 大西 三千年, 岸 靖雄, 桑野 幸徳 :
日本太陽エネルギー学会 (1990).

- 9) Y.Kishi, H.Shibuya, H.Kishi, T.Ueda and A.Mizukami : Sanyo Tech.
Review, Vol.17, No.2 (1985).
- 10) M.Cowley : Aeromodeller June, (1981).
- 11) Y.Kishi, H.Inoue, K.Murata, H.Tanaka, S.Kouzuma, M.Morizane,
Y.Fukuda, H.Nishiwaki, K.Nakano, A.Takeoka, M.Ohnishi and Y.Kuwano :
Tech. Digest 5th Int. PVSEC, Kyoto (1990) 1038.
- 12) Y.Kishi, H.Inoue, H.Tanaka, S.Kouzauma, K.Murata, S.Sakai,
M.Nishikuni, K.Wakiwaka, H.Shibuya, H.Nishiwaki, A.Takeoka and
Y.Kuwano :
Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference,
Las Vegas, (1991)

第5章 新光透過型 a-Si 太陽電池の開発

5. 1 緒 言

国土が狭く土地が高価な日本のような国において、広く太陽光発電システムを普及させるためには、一般の住宅やビルの屋根や窓に太陽電池を設置するのが最良の方法である。こういった観点から我々は、第6章で述べる太陽電池と屋根瓦を一体化した建材一体形 a-Si 太陽電池を開発しているが、¹⁾ さらに最近住宅の窓としても使用できる新光透過型 a-Si 太陽電池の開発に成功した。^{2) 3)} この新光透過型 a-Si 太陽電池は、発電と同時に採光もでき、これまで設置が不可能とされてきた住宅やビルあるいは車の窓に設置できるもので、将来広く太陽光発電を普及させていく上で極めて重要なものである。

本章では新光透過型 a-Si 太陽電池の構造、形成法及びその特性について示し、更にその応用について論じている。

5. 2 新光透過型 a-Si 太陽電池の構造

5. 2. 1 光透過型 a-Si 太陽電池の従来構造

従来から図5.1に示すように裏面電極として透明電極を用いたガラス/TCO/a-Si (p-i-n)/TCO構造の光透過型 a-Si 太陽電池が提案されていた。⁴⁾ この構造においては、a-Si膜中で吸収しきれなかった入射光の一部が太陽電池の裏面側へ透過する。しかしながら、その透過光は図5.2に示すように波長500nm以上の長波長光だけであるため赤茶けた色となる。また、この構造の光透過型 a-Si 太陽電池の光透過率 $\tau(\nu)$ は(5-1)式で表される。

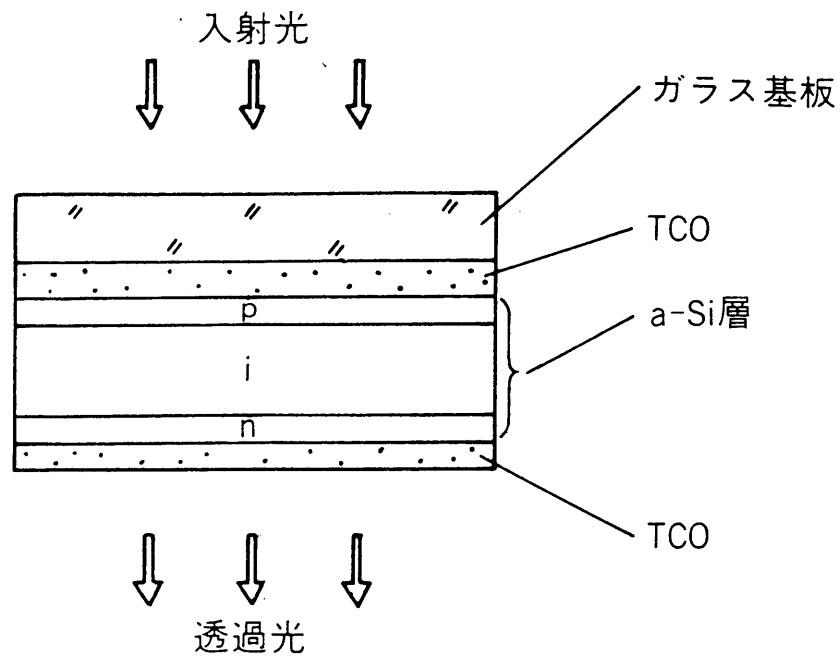


図 5. 1 従来構造光透過型a-Si太陽電池の構造

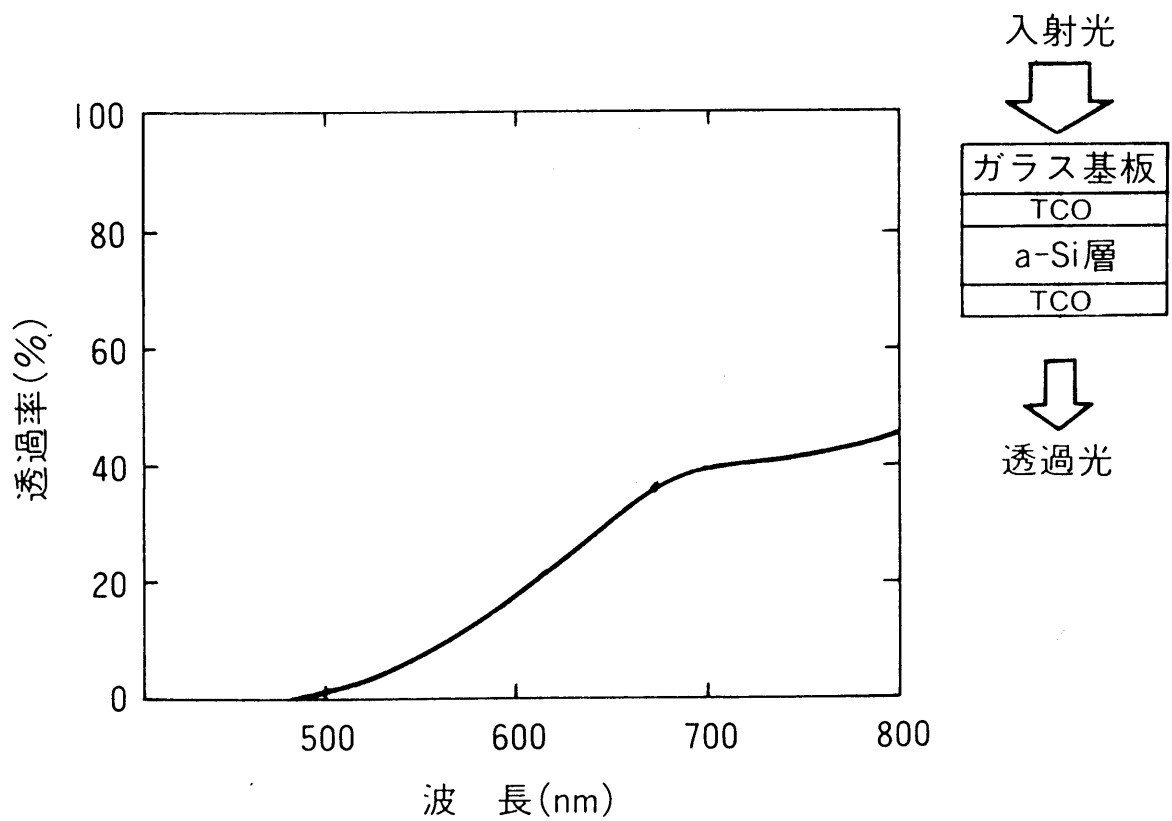


図 5. 2 従来構造光透過型a-Si太陽電池の透過光の分光スペクトル

$$\tau(\lambda) = \frac{\sum_{380}^{780} D_{\lambda} \cdot V_{\lambda} \cdot \tau_1(\lambda)}{\sum_{380}^{780} D_{\lambda} \cdot V_{\lambda}} \quad (5-1)$$

$\tau_1(\lambda)$: a-Si 膜の分光透過率

D_{λ} : 標準光源 D_{65} の分光放射束の相対値

V_{λ} : CIE 明所比視感度

(5-1)式を用いて、この光透過型a-Si太陽電池の光透過率を計算すると、a-Si層の膜厚が5000Åの場合、その光透過率は10%未満で極めて低いことが判る。また、その光透過率を変化させるには、a-Si層膜厚、特にi層の膜厚を変化させるしかないが、高光透過率を得るためにi層膜厚を減少させると変換効率が著しく低下する。そのため、光透過率を任意に設置することが困難である。

さらにこの構造の光透過型a-Si太陽電池においては、a-Si膜上に裏面電極としてTCOを形成しているが、TCO形成時にa-Siにダメージを与えるとa-Si膜質が低下する。そのため、裏面電極としてTCOを形成する際には、スパッタ法、真空蒸着法いずれにおいてもa-Si層に熱的あるいはイオンや電子衝撃によるダメージを与えないように低温、低パワーで成膜を行う必要がある。しかし、TCOの形成を低温、低パワーで行った場合TCOのシート抵抗が高くなり、この抵抗成分による発電ロスが生じ、高い効率を得ることが困難であるという問題があった。

5. 2. 2 新光透過型 a-Si 太陽電池の構造

図5.3に今回開発した新光透過型a-Si太陽電池のセル構造を示す。²⁾ 基本的には通常のa-Si太陽電池と同じガラス/TCO/a-Si(p-i-n)/金属裏面電極を積層した構造であり、その発電領域にa-Si層及び金属裏面電極を除去した $\phi 0.1 \sim 1.0$ mm程度の微小なホール(透光部)を均一に多数分散配置している。入射光の一部がその微小なホールを透過して裏面に達する。

この構造においては、透過光はa-Si膜で吸収されないため着色されることなく図5.4に示すように入射光とほぼ同一のスペクトルを有している。また、この新光

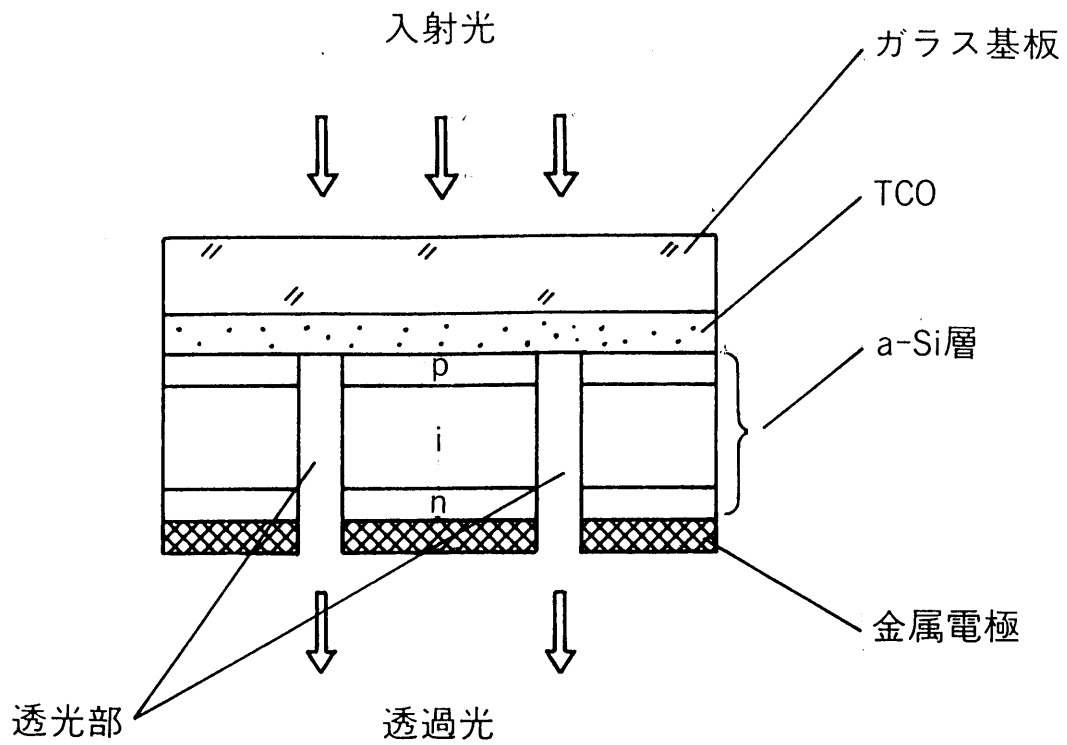


図 5. 3 新光透過型a-Si太陽電池セル構造

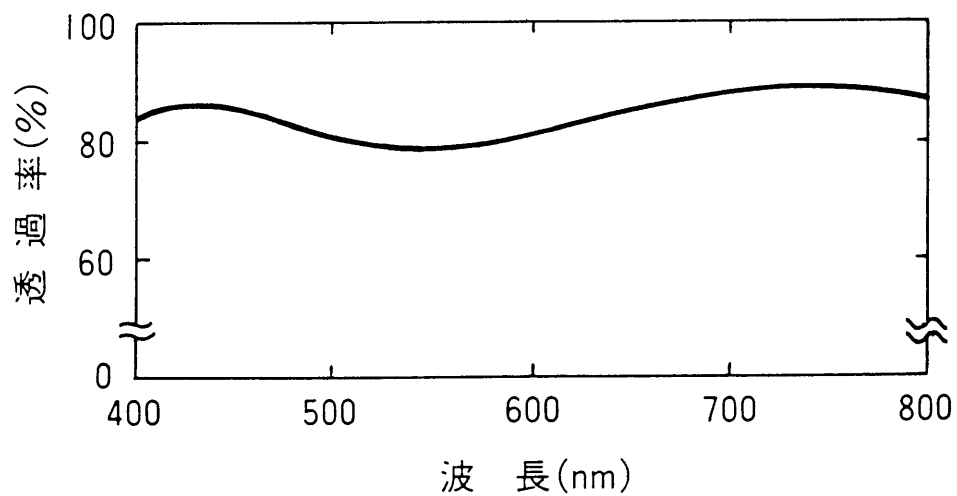


図 5. 4 新光透過型a-Si太陽電池の透過光の分光スペクトル

透過型a-Si太陽電池の光透過率は(5-2)式で表される。

$$\tau(v) = \frac{\sum_{380}^{780} D_{\lambda} \cdot V_{\lambda} \cdot \tau_2(\lambda)}{\sum_{380}^{780} D_{\lambda} \cdot V_{\lambda}} \cdot \frac{n S_H}{S_T} \quad (5-2)$$

$\tau_2(\lambda)$: ガラス基板およびTCOの分光透過率

n : ホールの数

S_H : 単位ホールの面積

S_T : 太陽電池の総面積

ここで $\tau_2(\lambda)$ はガラス基板及びTCOの材質、膜厚によって一定であるため、(5-2)式からホールの数あるいは単位ホールの面積を変化させることにより、任意の透過率が得られることが判る。また、基本的セル構造は通常のa-Si太陽電池と同じであるため、従来の光透過型a-Si太陽電池と異なり高い効率が期待できる。また、図5.5に示すように通常のa-Si太陽電池と同様に集積型サブモジュールを作製することも可能である。

5. 3 新光透過型 a - S i 太陽電池の作製

5. 3. 1 ホール形状の検討

新光透過型a-Si太陽電池においては、(5-2)式から高い光透過率を得るためにはホールの数を増加させるか、単位ホールの面積を増加させれば良いことが判る。しかしながら、透過光の均一性を考慮した場合、微小なホールを多数分散配置することが望ましい。また、単位ホールの形状あるいはその配置も透過光の均一性に大きな影響を及ぼす。

そこで、高光透過率及び透過光の均一性を得るためにホール形状の最適化を行った。⁵⁾ ホールの形状及びその配置を検討する場合、ホール間の有効部の幅を考慮する必要がある。即ち、極端に有効部の幅を狭くすると裏面電極の抵抗による

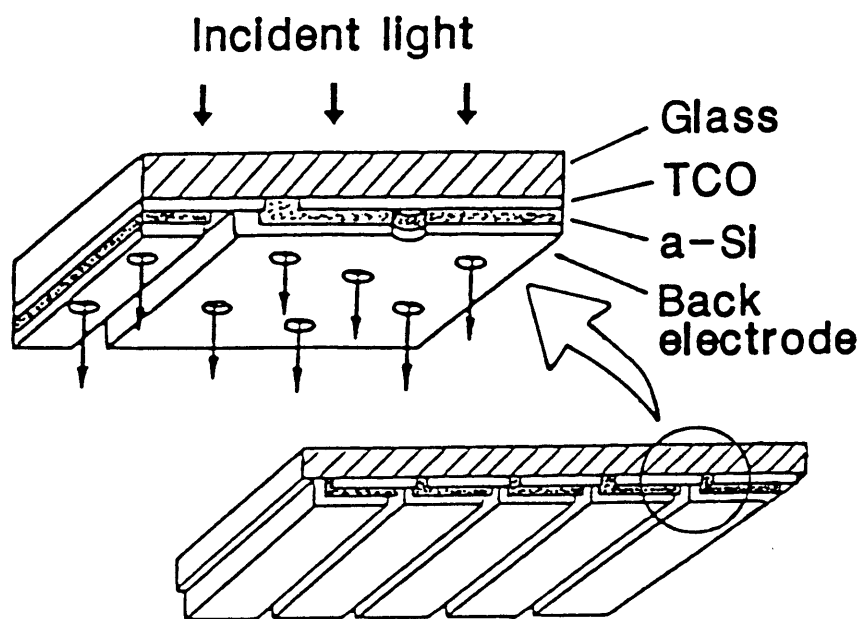


図 5. 5 集積型新光透過型a-Si太陽電池サブモジュールの構造

出力の損失が発生し、また製造歩留りも低下する。そこで、有効部の幅を0.3mmと一定にしてホール形状の検討を行った。図5.6に4つの透光部パターンにおけるホール間の有効部の幅が0.3mmの時の単位ホールの面積と透過率の関係を示す。図5.6において斜線部が有効部に相当する。図5.6から有効部の幅が0.3mmの時、単位ホールの面積が一定の場合、六角形のホールパターンが他のパターンに比べて最も高い透過率が得られることが判る。逆に言えば、透過率が一定である場合、六角形のホールパターンが単位ホールの面積を最小にすることが出来る。これらの結果から、六角形のホールパターンが高透過率と透過光の均一性を得るために最も適していることが判った。

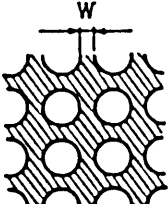
5. 3. 2 レーザビームによるホール形成

新光透過型a-Si太陽電池のホール形成法としてレーザによるa-Si膜パターンニング技術を応用した。⁶⁾レーザによって微小なホールを形成する場合、ホールの周辺部にダメージを与えないようレーザ加工条件を最適化する必要がある。そこでレーザの最適加工条件を見い出すため、第3.3章で述べた3次元熱解析法により、多層薄膜へのホール形成のシュミレーションを行った。

図5.7にガラス/SnO₂(5000 Å)/a-Si(5000 Å)/Ag(3000 Å)構造にパルス幅90n secのYAGレーザの第2高調波(波長0.53μm)を照射した時のレーザパワー密度とビーム中心部の深さ方向温度分布の関係を示す。レーザパワー密度 I_0 が $3.7 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ の時、Agとa-Siは溶融しているがSnO₂は溶融しないことが判る。この結果から、レーザパワー密度を正確にコントロールすることにより多層膜の選択的加工が可能であることが判る。これらの結果に基づいて、光透過型a-Si太陽電池のホールの形成をYAGレーザの第2高調波を用いて行った。

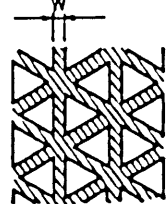
5. 4 新光透過型 a - S i 太陽電池の評価

5.3.2章の3次元熱解析法で得られたレーザ条件でホールの形成を行い、次節で述べるSun BIC法等により光透過型a-Si太陽電池の特性解析を行った。



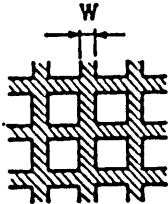
$$T = \frac{S}{(2\sqrt{\frac{S}{\pi}} + W)^2}$$

Circular hole



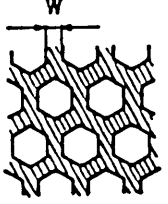
$$T = \frac{\sqrt{3}S}{9(\sqrt{\frac{3}{9}}S + \frac{W}{2})^2}$$

Triangular hole



$$T = \frac{S}{(\sqrt{S} + W)^2}$$

Square hole



$$T = \frac{2S}{\sqrt{3}(2\sqrt{\frac{3}{6}}S + W)^2}$$

Hexagonal hole

T: Total transmittance

S: Area of unit hole

W: Minimum width of photovoltaic area between each hole

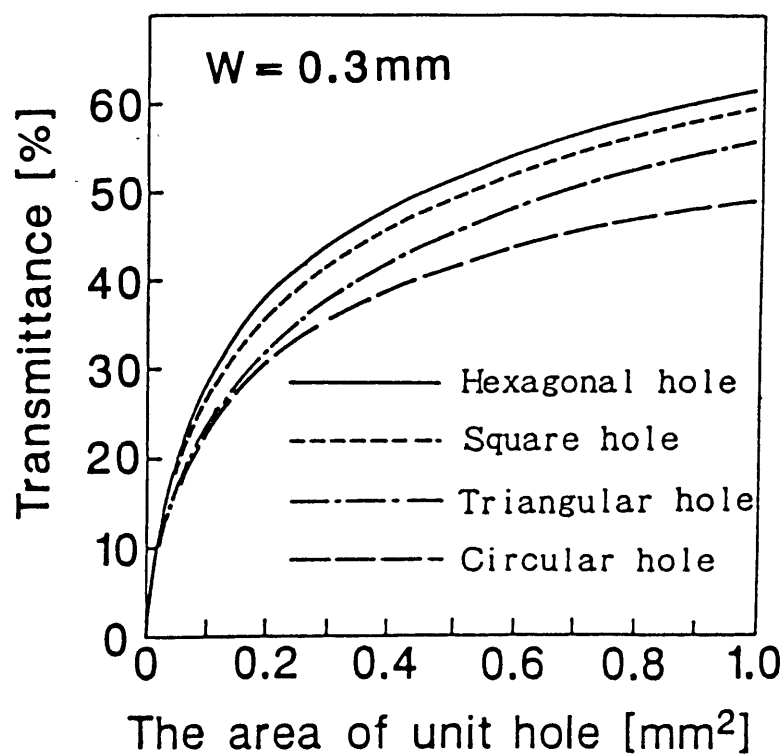


図 5. 6 透光部パターンの相違による光透過率と単位ホールの面積の関係

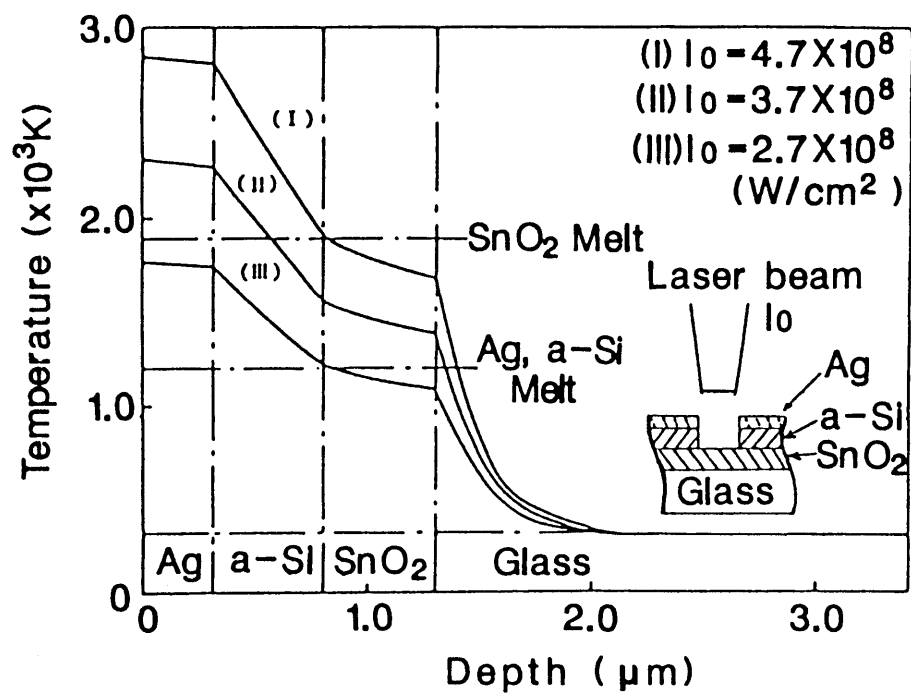


図 5. 7 多層薄膜上にレーザビームを照射した時のレーザパワー密度と
 ビーム中心部の深さ方向温度分布

5. 4. 1 Sun BIC法の概要

レーザでホール形成を行った場合、ホールの周辺部のa-Si層へ熱的ダメージが発生したり、ホールのエッジ部でTCOと裏面電極がショートし、特性が低下することが懸念される。そこで、レーザで形成したホール及びその周辺部の膜特性について、Sun BIC法 (Sun Beam Induced Current Method) を用いて発電分布の評価を行った。⁵⁾

Sun BIC法は、微小領域での発電電流を検出することにより、a-Si膜の光電変換特性分布を評価する方法である。図5.8にSun BIC法による太陽電池特性分布測定装置のブロック図を示す。

太陽光に近いスペクトルを持つソーラーシュミレータ(AM-1.5)光を集光し、試料に照射する。次にX-Yコントローラを用い照射光をスキャンしながら、その各位置での短絡電流を電流アンプで電圧信号に変換しADコンバータを用いて、その電流値と位置をコンピュータのメモリに取り込む。そのデータを処理することにより発電領域の特性分布が3次元像として得られる。

照射するビームの径は任意に設定することが可能でビーム径を絞り込むことによって微小領域の特性分布を検出することも可能である。

また、集積型a-Si太陽電池の特性もマルチプレクサによって各段を切り換えることにより可能である。

5. 4. 2 Sun BIC法による発電分布の解析

図5.9に六角形のホールパターンを持つ新光透過型a-Si太陽電池のSun BIC法によって得られた発電分布の解析結果を示す。図5.9よりホール以外の有効部が良好に発電しており、レーザを用いたホール形成によるホール周辺部へのダメージが無く、良好にホールがパターンニングされていることが確認できた。

更にSEMによってホールのエッジ部の加工状態について評価を行った。その結果、図5.10に示すようにホールのエッジ部はシャープに加工されており、TCOと裏面電極とのショートも無いことが確認された。

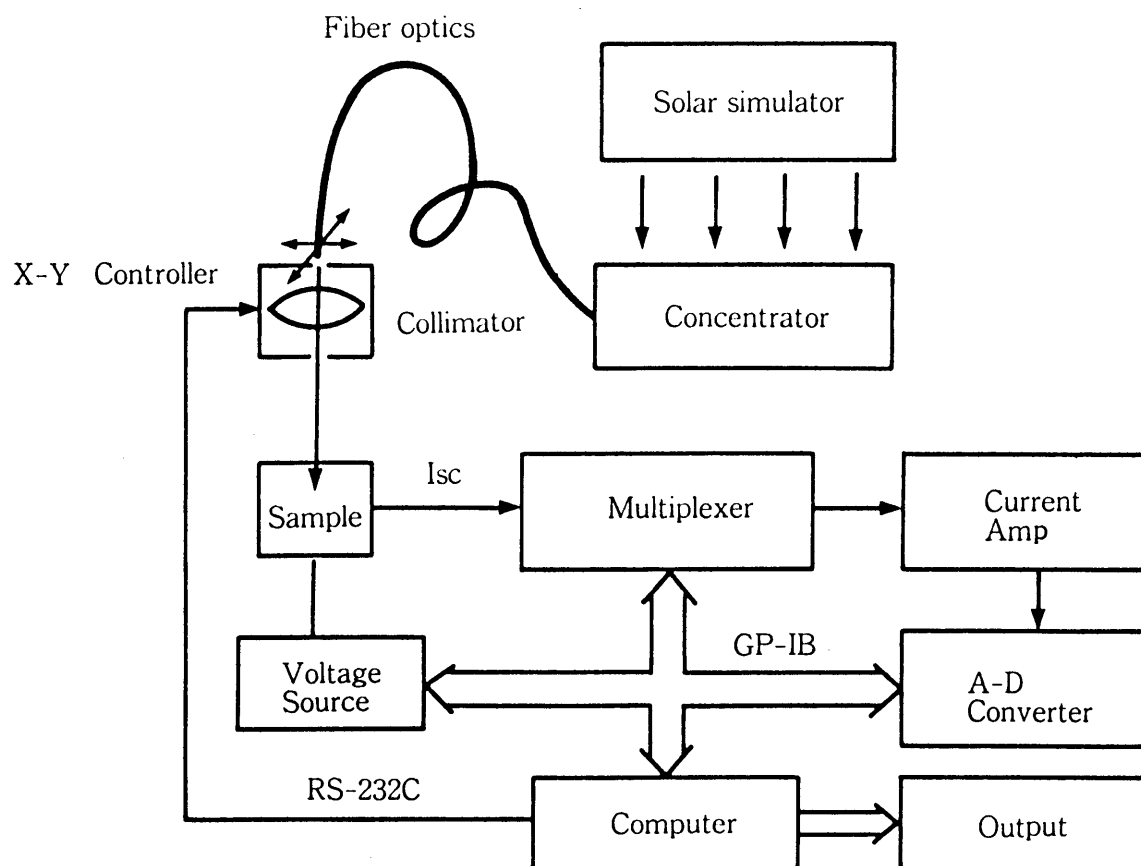


図 5. 8 Sun BIC法による太陽電池特性分布測定装置のブロック図

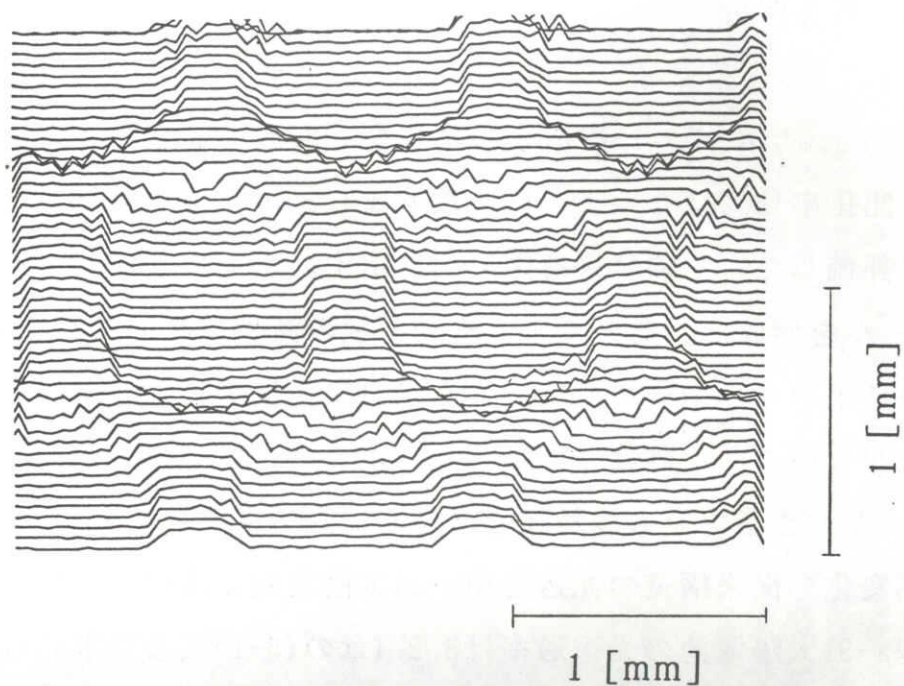


図 5. 9 六角形ホールのSun BIC像

裏面電極

~ 3000 Å

a-Si

~ 5000 Å

TCO

~ 2000 Å

ガラス

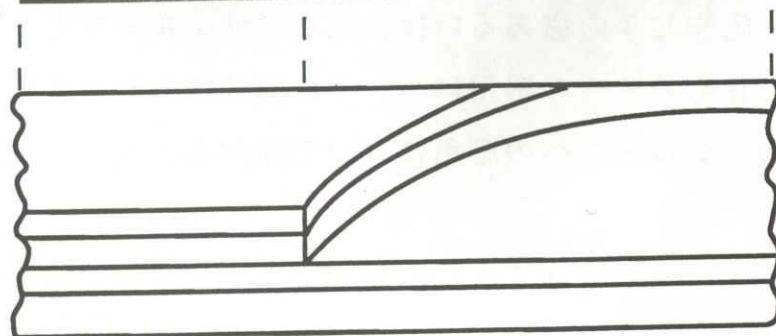
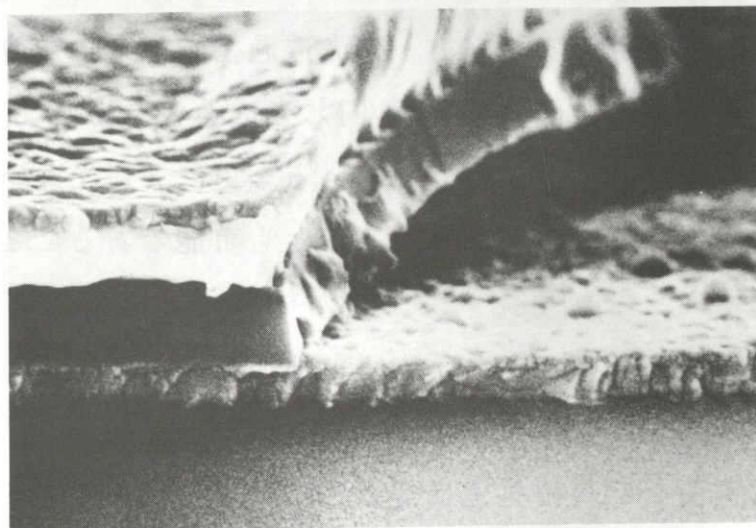


図 5. 10 ホールエッジ部のSEM像

5. 4. 3 特性解析

117.8×124.5mmサイズの13段直列の集積型a-Si太陽電池へレーザにより六角形のホールを開孔率15%になるように多数形成し、ホール加工による出力特性の変化について評価した。その結果を図5.11に示す。ホール形成によって V_{oc} , FFは変化せず、ホールを形成したことによる有効面積の減少分だけ I_{sc} と P_{max} が低下している。この結果から、ホール形成による出力損失はホールの面積分だけであり、余分な損失がないことが確認された。

更に、様々な光透過率をもつ新光透過型a-Si太陽電池を試作し、光透過率の変化による特性変化を従来構造の光透過型a-Si太陽電池と比較して評価した。従来構造光透過型a-Si太陽電池の光透過率は5.2.1章の(5-1)式より求められる。図5.12にその結果を示す。図5.12より従来構造光透過型a-Si太陽電池においては、光透過率を向上させるためにはi層の膜厚を減少させなければならないため、光透過率の増加に伴い急激に出力が低下し、50%以上の高い光透過率を得ることは不可能に近いことが分かる。一方、新光透過型a-Si太陽電池においては光透過率の増加と出力の減少は比例しており、同じ光透過率の場合、従来構造の光透過型a-Si太陽電池よりも高い出力が得られている。更に、新光透過型a-Si太陽電池においては50%以上の高い光透過率を得ることも可能であることが判った。

5. 5 新光透過型 a - S i 太陽電池の応用

新光透過型a-Si太陽電池は発電と同時に採光ができるもので、5.1章でも述べた様に住宅やビルの窓あるいは自動車のサンルーフとして用いることができる。このうち住宅の窓への応用については第6章に詳しく述べることにし、本章では自動車のサンルーフへの応用について述べる。

5. 5. 1 太陽電池式自動車用サンルーフのモジュール構造

新光透過型a-Si太陽電池の応用として、自動車用サンルーフとの一体化を試みた。一体化を行った太陽電池式自動車用サンルーフのモジュール構造を図5.13に

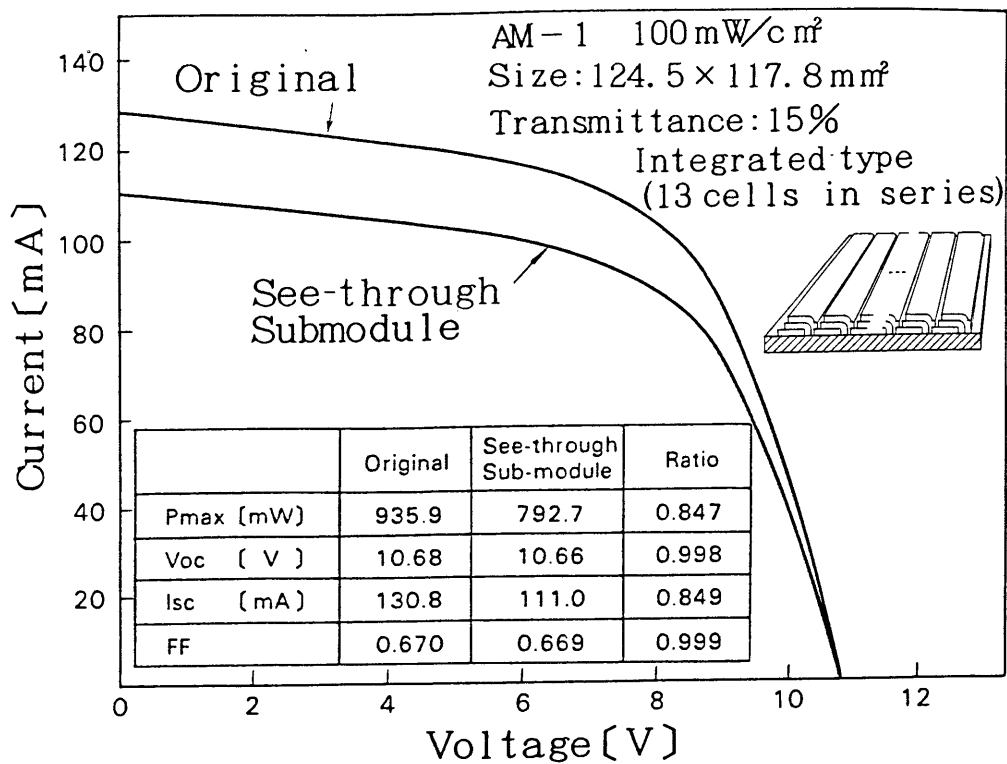


図 5. 11 ホール形成によるa-Si太陽電池特性の変化

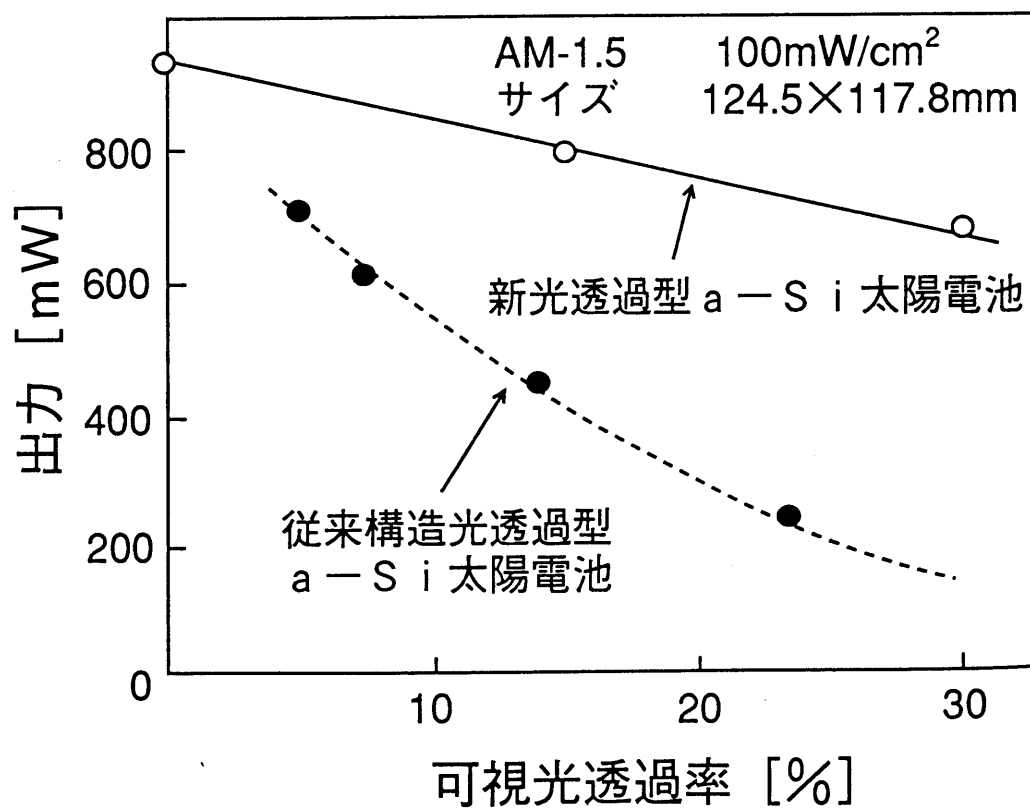


図 5. 12 光透過型a-Si太陽電池の光透過率の変化による出力特性の変化

示す。

モジュールは受光面側からサンルーフガラス、EVA（エチレンビニルアセテート）、太陽電池、EVA、PET（ポリエチレンテレフタレート）フィルムで構成した。特に、EVAにおいては車内の過酷な状況に耐え得るため耐熱性向上・耐紫外線向上・対ガラス接着力向上等の安定剤が混入されているものを用いた。また、PETフィルムにおいても車内側からの耐摩擦性向上のためPETフィルムにハードコーティングがされているものを用いた。このように耐久性に優れた素材で構成することにより自動車部品に要求されるすべての耐久性を十分に満足することが可能となった。

5. 5. 2 太陽電池式自動車用サンルーフの応用

太陽電池式自動車用サンルーフの応用として以下のようなものが挙げられる。

1) 換気システム

換気システムのシステム構成図を図5.14に示す。

温度センサにより車内と車外の温度差を感知し、ある一定の温度差以上になった場合、駆動回路の補助により換気ファンを駆動させる。

いったん駆動したファンの風量は、太陽電池の出力の変化すなわち日射量の変化に伴い変化する。こうして車内温度の上昇を防ぐことができる。換気の効果を図5.15に示す。図からも明らかなように、この換気システムにより車内温度を約17℃も低減することが可能となった。しかも車内温度の低減によりエアコン駆動後の冷却時間も大幅に短縮することが可能となった。

2) バッテリー充電システム

バッテリー充電システムのシステム構成図を図5.16に示す。

近年の乗用車は電装部品の多種多様化が進み、それに伴い消費電力が増加しバッテリーあがりの要因となっていた。本システムにより日中に太陽電池によりバッテリーの補充電を行い、バッテリーあがりを防ぐことが可能となった。

図5.17にこれらのシステムを搭載し、今年5月に発売された乗用車の外観を示

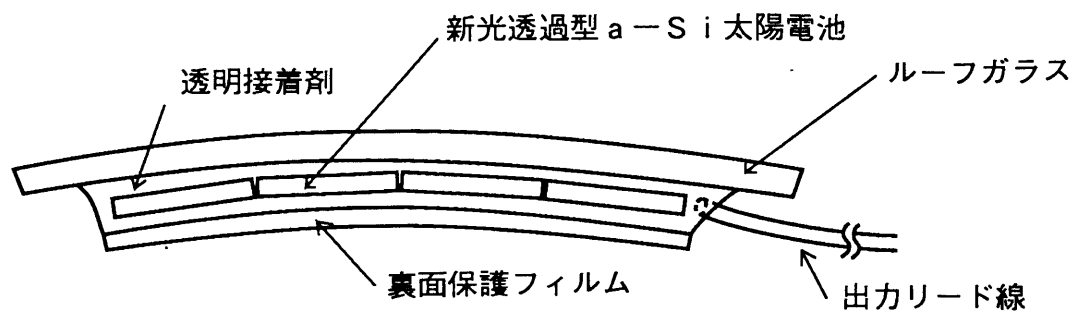


図 5. 13 太陽電池式自動車用サンルーフの構造

太陽電池式自動車用サンルーフ

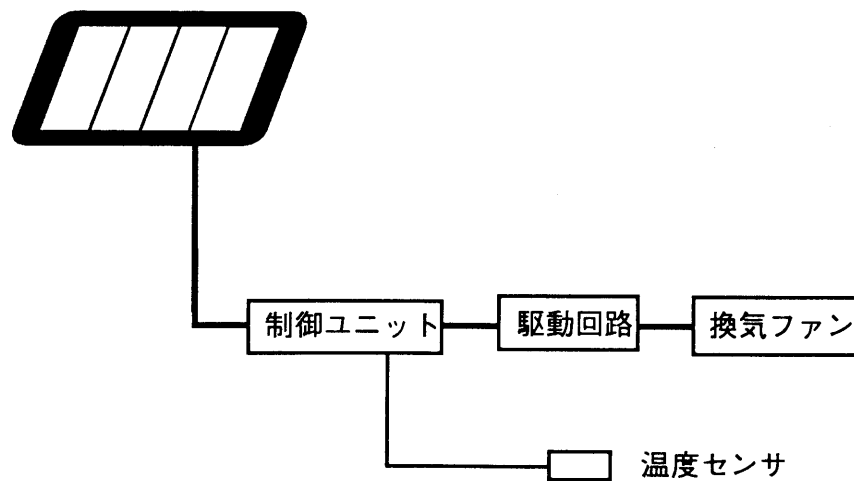


図 5. 14 換気システムブロック図

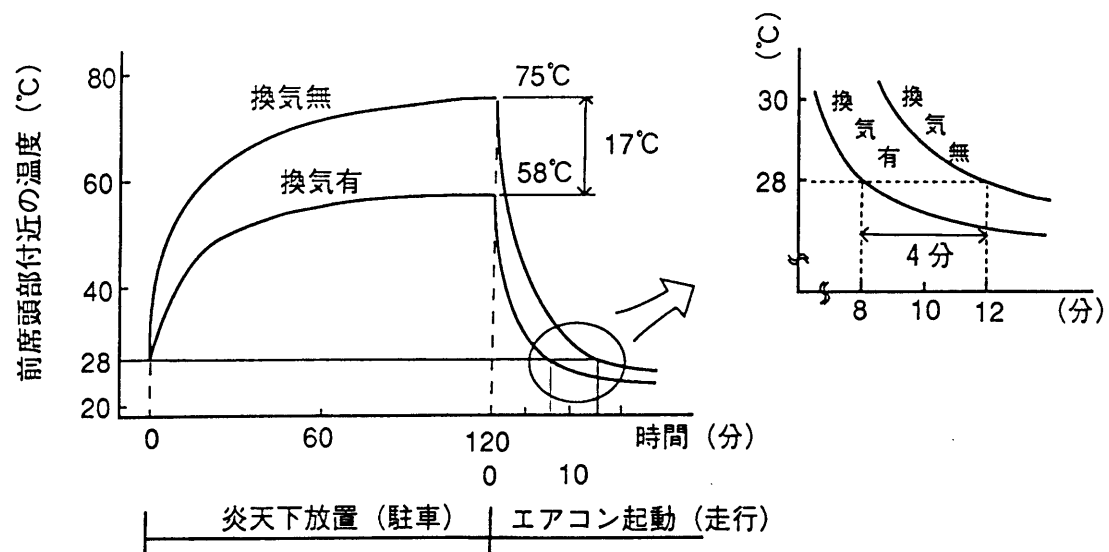


図 5. 15 換気の効果

太陽電池式自動車用サンルーフ

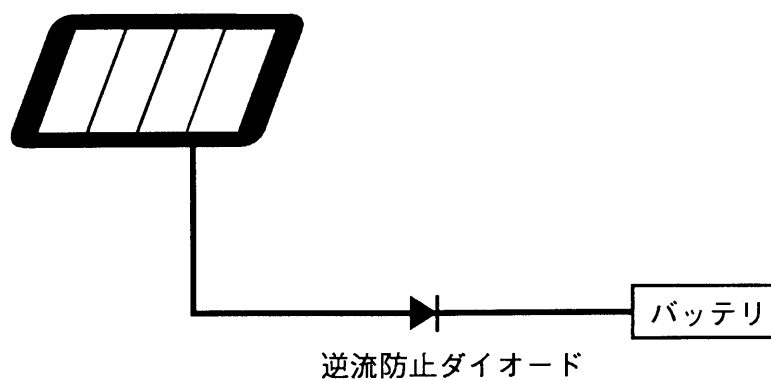


図 5. 16 バッテリー充電システムブロック図



図 5. 17 太陽電池式自動車用サンルーフ搭載車

す。サンルーフには透過率10%の新光透過型a-Si太陽電池を用いている。

3) その他の応用

太陽電池式自動車用サンルーフのその他の応用として

- ・保冷库　・ハンドルウォーマ　・シートの暖房
 - ・ウインド凍結防止　・カーオーディオ
- などが挙げられる。

太陽電池式自動車用サンルーフの応用の特長として従来車載バッテリーにより駆動していたすべての電装部品の電源として利用できると言える。

5. 6 結言

a-Si太陽電池を新しい分野に応用するために、レーザによる微小ホール形成技術を開発し、発電と同時に光を透過する新光透過型a-Si太陽電池を開発し、以下の結論を得た。

- 1) 新光透過型a-Si太陽電池は、従来構造光透過型a-Si太陽電池のように透過光が着色されることなく、入射光とほぼ同じスペクトルの光が得られることを示した。
- 2) 透光部であるホール形状の最適化の検討を行い均一な透過光を得るためには六角形のホールパターンが最適であることを明らかにした。
- 3) レーザによる多層薄膜へのホール加工の3次元熱解析を行い、YAGレーザの第2高調波(波長0.53 μ m)を用い、パワー密度を正確にコントロールすることにより多層薄膜の選択加工が可能であることを確認した。
- 4) Sun BIC法により発電領域分布の評価を行い、ホール形成によるホール周辺部へのダメージがなく、またホールエッジにおけるTCOと裏面電極とのショート

の発生もないことを確認した。

- 5) 集積型新光透過型a-Si太陽電池を試作し、ホール形成による出力の低下はホールの面積分だけであり、余分な電力損失がないことを明らかにした。
- 6) 新光透過型a-Si太陽電池は、従来構造光透過型a-Si太陽電池と比べて同一光透過率の場合、高い出力が得られることを確認した。
- 7) 新光透過型a-Si太陽電池と自動車用サンルーフガラスを一体化した太陽電池式自動車用サンルーフモジュールを開発した。更に、本サンルーフを応用した換気システムを開発し、自動車内の温度上昇の抑制に有効であることを立証した。

参考文献

- 1) T.Matsuoka, H.Yagi, M.Waki, K.Honma, H.Hashimoto, S.Nakano and Y. Kuwano : Tech Digest 3rd Int. PVSEC, Tokyo (1987) 565.
- 2) Y.Kishi : J. Electronic Engineering, Vol.24, No.245(1987) 70.
- 3) Y.Kishi, H.Inoue, H.Tanaka, M.Morizane, H.Shibuya, M.Ohnishi and T.Yazaki : Tech. Digest 3rd Int. PVSEC, Tokyo (1987) 569.
- 4) H.Nakabayashi, A.Takeuchi, S.Yamaguchi and Y.Hamakawa : Tech. Digest 3rd Int. PVSEC, Tokyo (1987) 701.
- 5) H.Inoue, S.Kohzuma, H.Tanaka, Y.Kishi and Y.Kuwano : ISES Solar World Congress, Kobe (1989).
- 6) M.Ohnishi, H.Shibuya, N.Okuda, H.Inoue, Y.Kishi, S.Kiyama, H.Kawata, S.Okamoto, S.Tsuda, S.Nakano and Y.Kuwano : Proc. 21th IEEE PV Specialist Conf., Florida (1990).

第6章 建材一体型 a-Si 太陽電池モジュールの開発および住宅への応用

6. 1 緒言

太陽光発電は、クリーンで無尽蔵、長寿命、メンテナンスフリーなどの優れた特長を持っている。しかしながら、太陽電池を一般に広く普及させるためには、性能の向上、低コスト化に加えて、太陽電池応用システムの低コスト化も図る必要がある。太陽光発電システムは、一般に太陽電池とそれを設置する架台にバッテリー、インバータ等の周辺機器を組み合わせで構成されるが、そのコストの半分以上は太陽電池以外のコスト、すなわち架台、バッテリー、インバータ、工事費等の周辺コスト(Balance of System:BOS)となっておりBOSコストの低コスト化が強く望まれている。太陽光発電システムのコスト見通し(バッテリーなし)として図6.1に示す結果が報告されているが、架台コストは西暦2000年にはBOSコスト(バッテリー等含む)の30~40%に達すると予測されている。したがって、架台を用いない太陽電池の設置法の開発が望まれる。また、日本は土地が狭く高価なため地上設置型の太陽光発電システムはコスト高になる。したがって、住宅の屋根や窓への太陽電池の設置が我が国においては最も適した普及形態と言える。そこで本章では、住宅の建材としても使用できる建材一体型の太陽電池モジュールについて研究を行った。

建材一体型太陽電池には、以下の利点がある。

- 1) 住宅の屋根もしくは壁に直接設置できるため、従来必要であった設置のための土地が不要である。
- 2) 建材と一体化しているので太陽電池を支えるための架台が不要である。
- 3) 建材一体型太陽電池モジュールを設置した箇所には、従来の建材が不要になり、そのコストが省ける。

本研究では、窓建材として使用できる光透過型 a-Si 太陽電池モジュール、およびスレート瓦と太陽電池を一体化したスレート式太陽電池瓦について検討を行った。

本章では、個人住宅における日射量シミュレーションを行い、屋根設置の有効性について明らかにするとともに、両タイプの建材一体型太陽電池モジュールの

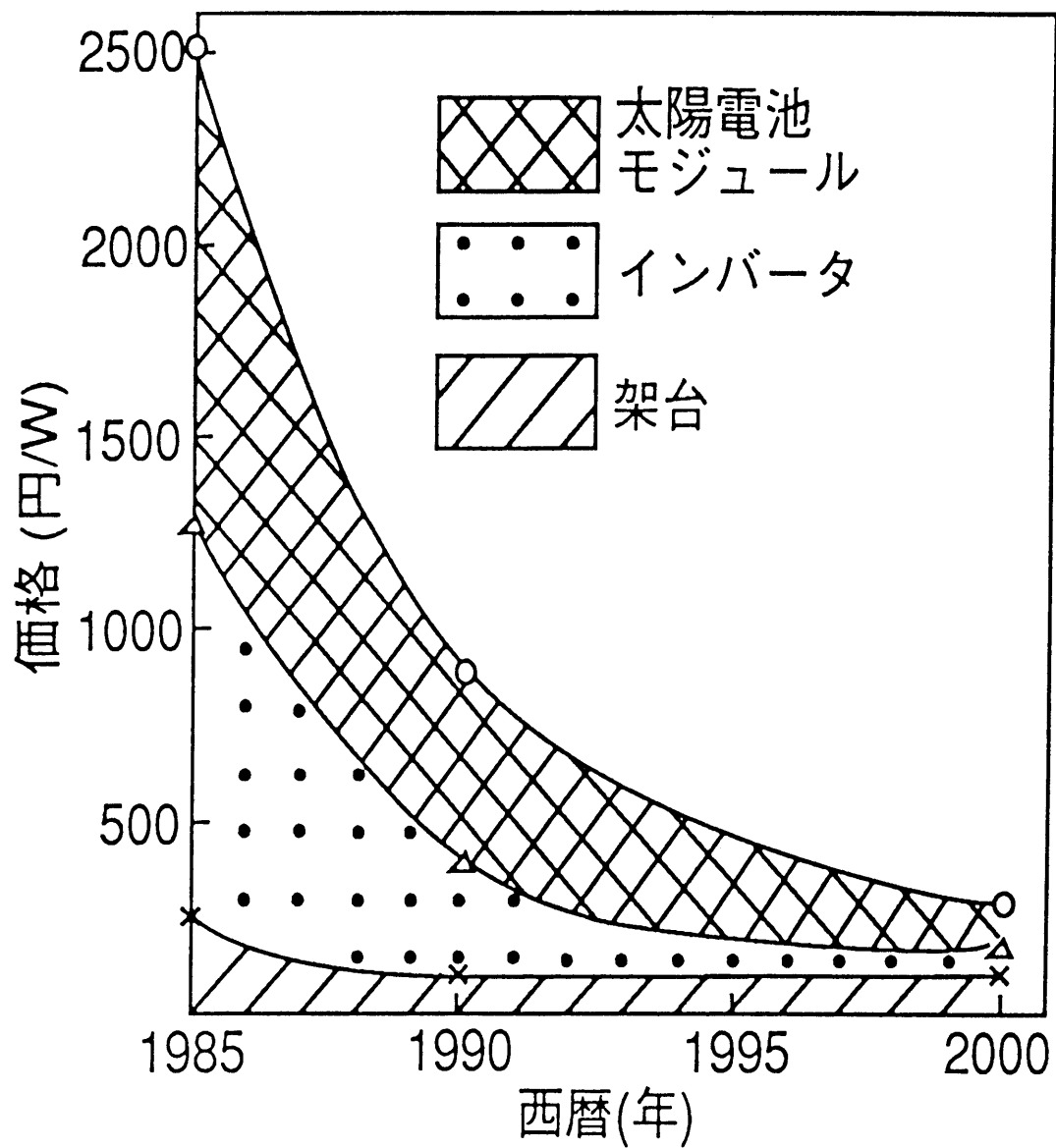


図 6. 1 太陽光発電システムのコスト将来見通し（土地代を除く）

構造，作製法などの検討結果および信頼性評価結果について論じる。また、その応用例についても示す。

6. 2 個人住宅における日射量のシュミレーション

個人住宅に太陽電池を設置する場合、一般的に屋根が良いと言われているが、それを確認するためH A S P (Heating, Air-conditioning and Sanitary engineering Program)気象データ（東京）を用いて、屋根および壁への単位面積当りの日射量（ $Wh/m^2 \cdot \text{日}$ ）を計算した（以下、日射量とは、単位面積当りの日平均の日射量（ $Wh/m^2 \cdot \text{日}$ ）とする）。H A S P気象データは、空調調和学会が気象庁の10年間の観測結果の標準データを1時間単位で1年間にまとめたものであり、空調負荷計算用に広く用いられている。

6. 2. 1 日射量の計算方法

日射には、太陽から直接に受光面に届く直達日射と、大気，雲，空気中の塵，地面などで散乱されて間接的に受光面に達する散乱日射の二種類がある。

日射量を計算するためには、この二つの日射量の和を求めなければならない。

（1）直達日射量の求め方

傾斜面への直達日射強度（傾斜面直達日射強度）は、直達太陽光の傾斜面への垂直入射成分を求めることによって得られる。図6. 2に、傾斜面への日射に関する各種角度を示す。

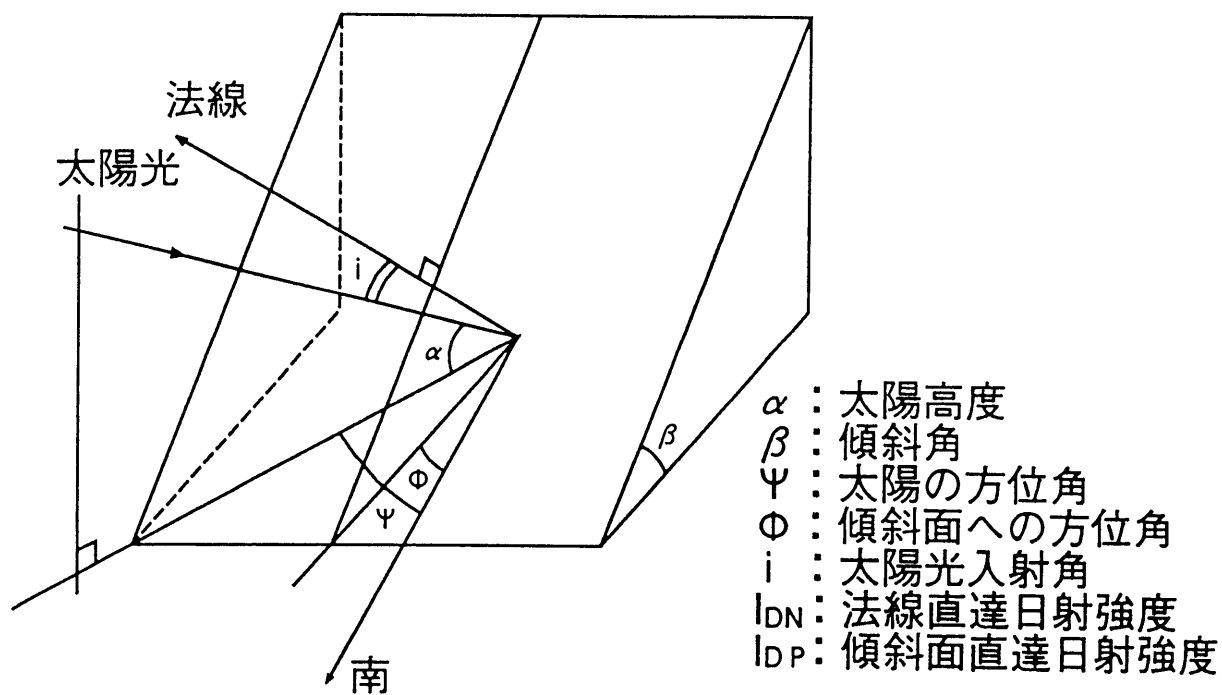
直達太陽光の日射強度（法線直達日射強度）を I_{DN} 、太陽光の傾斜面への入射角を i とすると、傾斜面直達日射強度 I_{DP} は次のようになる。

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot \cos i$$

太陽入射角 i は、太陽位置を設置条件によって変化し、太陽角度 α ，太陽の方位角 Ψ ，傾斜面の方位角 Φ ，傾斜角 β によって以下の関係式で表される。

$$\cos i = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos (\Psi - \Phi)$$

さらに、太陽高度，太陽方位角は、緯度 θ ，太陽の赤緯 δ ，時角 T [$15^\circ \times (\text{時刻} - \text{南中時刻})$] により以下のように表される。



$$I_{DP} = I_{DN} \cdot \cos i$$

$$\cos i = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos (\Psi - \Phi)$$

図 6. 2 傾斜面への日射に関する各種の角度

$$\sin \alpha = \cos \theta \cdot \cos \delta \cdot \cos T + \sin \theta \cdot \sin \delta$$

$$\sin \Psi = \cos \delta \cdot \sin T / \cos \alpha$$

屋根が南北、窓（以後垂直面とする）が東西南北の方位にある住宅を考えると、屋根、垂直面への日射量は、以下のように表される。

南屋根

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \Psi)$$

北屋根

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \Psi)$$

南向き垂直面

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \Psi$$

東向き垂直面

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot \cos \alpha \cdot \sin (-\Psi)$$

西向き垂直面

$$I_{DP} = I_{DN} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \Psi$$

北向き垂直面

$$I_{DP} = -I_{DN} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \Psi$$

但し、北屋根、東、西、南、北向きの垂直面は、太陽の位置によっては、太陽光が届かず陰になる（ $\cos i < 0$ ）。

（２）散乱日射量の求め方

図 6. 3 に傾斜面に入射する散乱日射を示す。散乱光は、全天空から均一に入射しているものと仮定すると、傾斜面への散乱日射強度は全天球面積に対して、傾斜角 β の分だけ減少することになる。傾斜面への散乱日射強度を I_{SP} 、水平面への散乱日射強度を I_{SH} とすると、 I_{SP} は以下のようにになる。

$$I_{SP} = I_{SH} \cdot (1 + \cos \beta) / 2$$

これにより、屋根および垂直面の散乱日射強度は以下のように表せる。

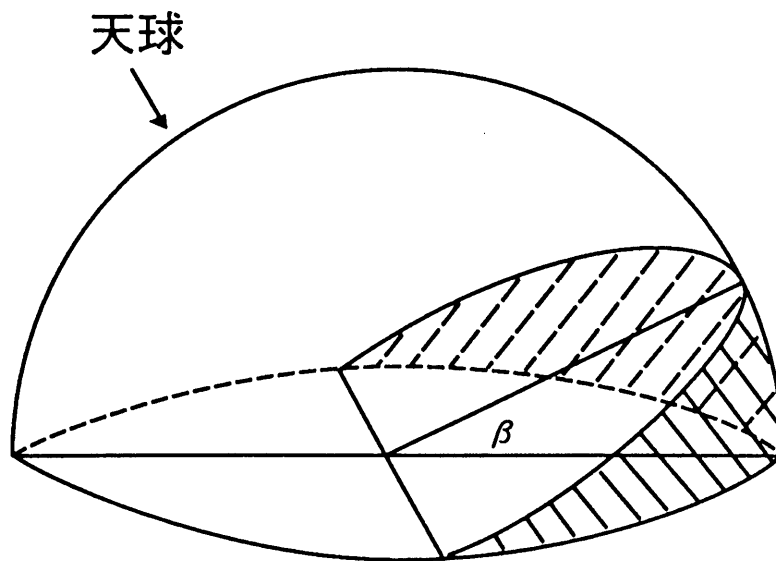
屋根

$$I_{SP} = I_{SH} \cdot (1 + \cos \beta) / 2$$

垂直面

$$I_{SP} = I_{SH} / 2$$

I_{SH} : 水平面への散乱日射強度
 I_{SP} : 傾斜面への散乱日射強度



$$I_{SP} = I_{SH} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

図 6. 3 傾斜面に入射する散乱日射

これらにより、屋根および垂直面への1日の日射量は、以下に示す式で求めることができる。なお、各時刻における法線直達日射量 I_{DN}^t および水平面散乱強度 I_{SH}^t は、HASP 気象データに基づいた。

i) 屋根の場合

$$I_{total} = \sum_t \left\{ I_{DN}^t (\sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\Psi) + I_{SH}^t \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \right\} \cdot S_r$$

$$+ \left\{ \sum_t^{\cos i > 0} I_{DN}^t \cdot (\sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\Psi) + \sum_t I_{SH}^t \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \right\} \cdot S_r$$

ii) 垂直面の場合

$$I_{total} = \sum_t \left\{ I_{DN}^t \cdot \cos\alpha \cdot \cos\Psi + I_{SH}^t / 2 \right\} \cdot S_w$$

$$+ \sum_t \left\{ I_{DN}^t \cdot \cos\alpha \cdot \sin|\Psi| + I_{SH}^t / 2 \right\} \cdot S_w$$

太陽高度の関係式

太陽方位角の関係式

$$\sin\alpha = \cos\theta \cdot \cos\delta \cdot \cos T + \sin\theta \cdot \sin\delta \quad \sin\Psi = \frac{\cos\delta \cdot \sin T}{\sin\alpha}$$

なお、記号の意味は次の通りである。

I_{total} : 一日の総日射量, I_{DN}^t : 各時刻の法線直達日射強度

I_{SH}^t : 各時刻の水平面散乱日射強度, i : 太陽光と照射面の法線のなす角

α : 太陽高度, β : 屋根の傾斜角, Ψ : 太陽の方位角

δ : 赤緯, t : 時間 (時), T : 時角 ($= 15 \times (t - 12)^\circ$)

θ : 緯度, S_r : 屋根の面積, S_w : 垂直面の面積

6. 2. 2 垂直面への日射量シミュレーション

東, 西, 南, 北向き垂直面への日射量を、6. 2. 1 に従って算出した。

図 6. 4 に東, 西, 南, 北向きの垂直面への月別日射量を、また図 6. 5 に各垂直面への年間の平均日射量を示す。

以上の検討により次の結果が得られた。

- ①垂直面への年間平均日射量は南, 東, 西, 北向きの順で少なくなる。
- ②南向きの垂直面はもっとも年間平均日射量が多いが、年間の変動も大きく、冬季のほうが、夏季より日射量が多くなる。

(1 月 : $3.1\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{H}$, 6 月 : $1.2\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{H}$)

- ③南向き垂直面の年間の平均日射量は、約 $2.0\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{H}$ で南向き 30° 傾斜面の場合と比べて約 $2/3$ 程度であり (傾斜面は $3.3\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{H}$)、充分発電システムの設置場所として使用できる。

6. 2. 3 屋根への日射量シミュレーション

東, 西, 南, 北のそれぞれの屋根への単位面積当りの日射量を傾斜角度 $0^\circ \sim 80^\circ$ (10° ごと) をパラメータとして、HASP 気象データ (東京) をもとに 6. 2. 1 に示した計算方法により算出した。

図 6. 6 ~ 6. 9 に、各傾斜角度における東, 西, 南, 北屋根への各月の日射量を示す。同図より東, 西, 北のそれぞれの屋根への日射量は、屋根の傾斜角度の低いほど多くなる傾向があり、季節には無関係であることが分かる。しかし、南屋根においては、春から夏にかけては屋根傾斜角度の低いほど、秋から冬にかけては屋根傾斜角度が $40 \sim 60^\circ$ の時に、日射量が多くなる。

図 6. 10 に、各傾斜角度における東, 西, 南, 北屋根への各月の日射量の合計を示す。東, 西, 北屋根では傾斜角度 10° 、南屋根では傾斜角度 30° において、年間の日射量が最大になる。

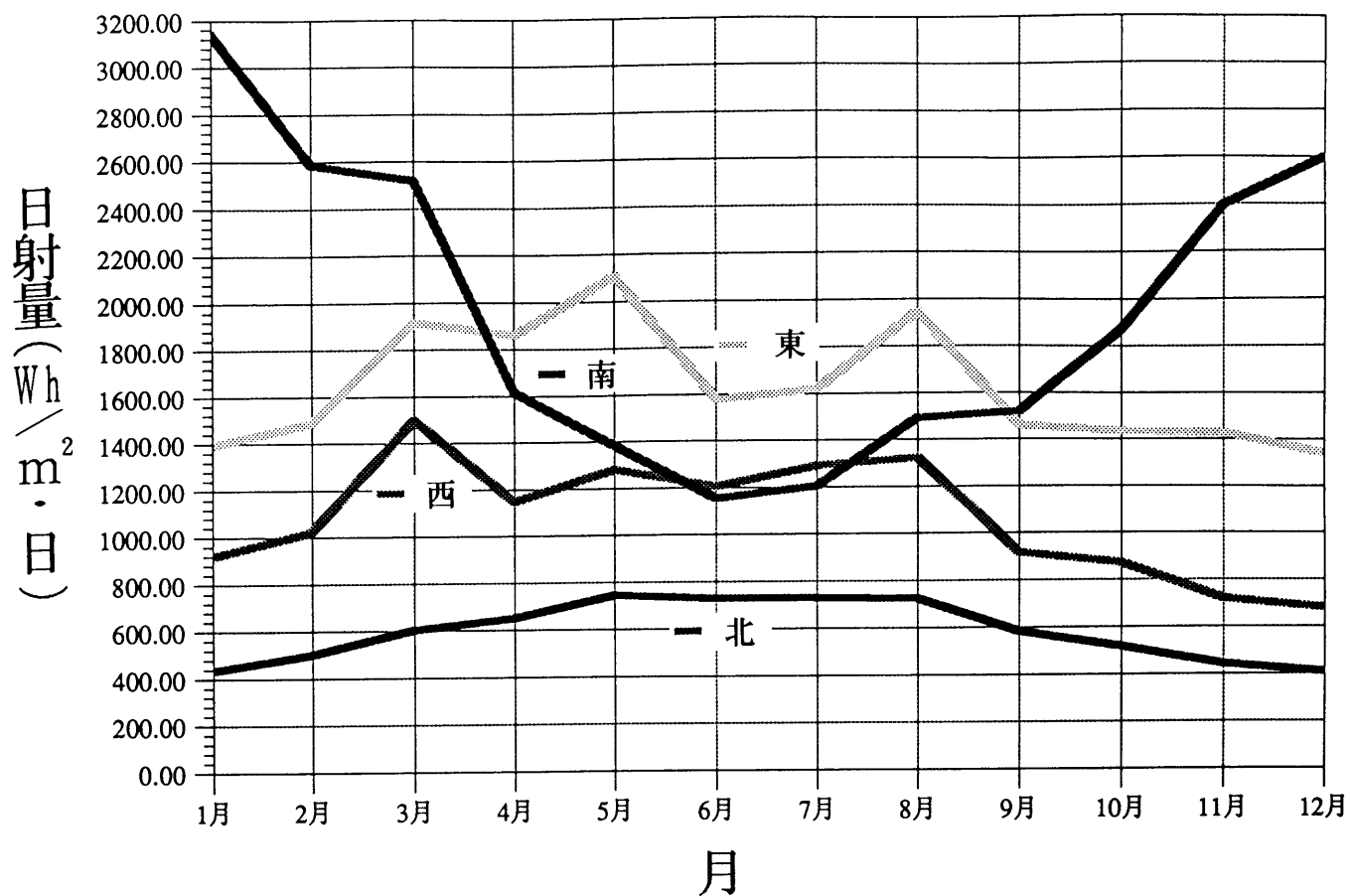


図 6. 4 東, 西, 南, 北垂直面への月別日射量

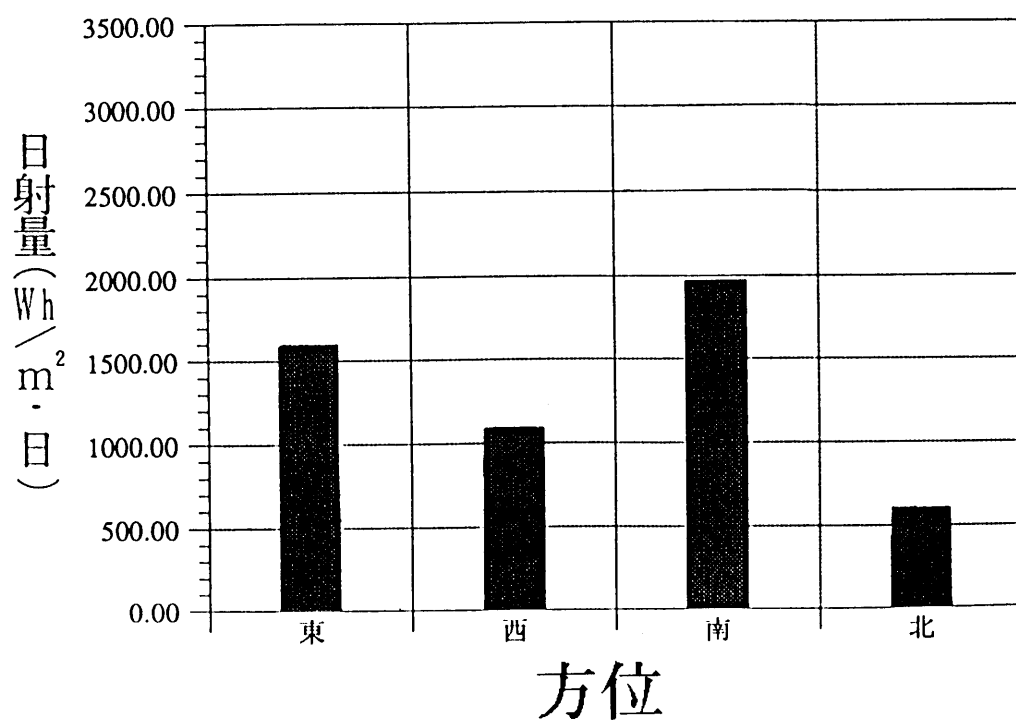


図 6. 5 東, 西, 南, 北垂直面への年間平均日射量

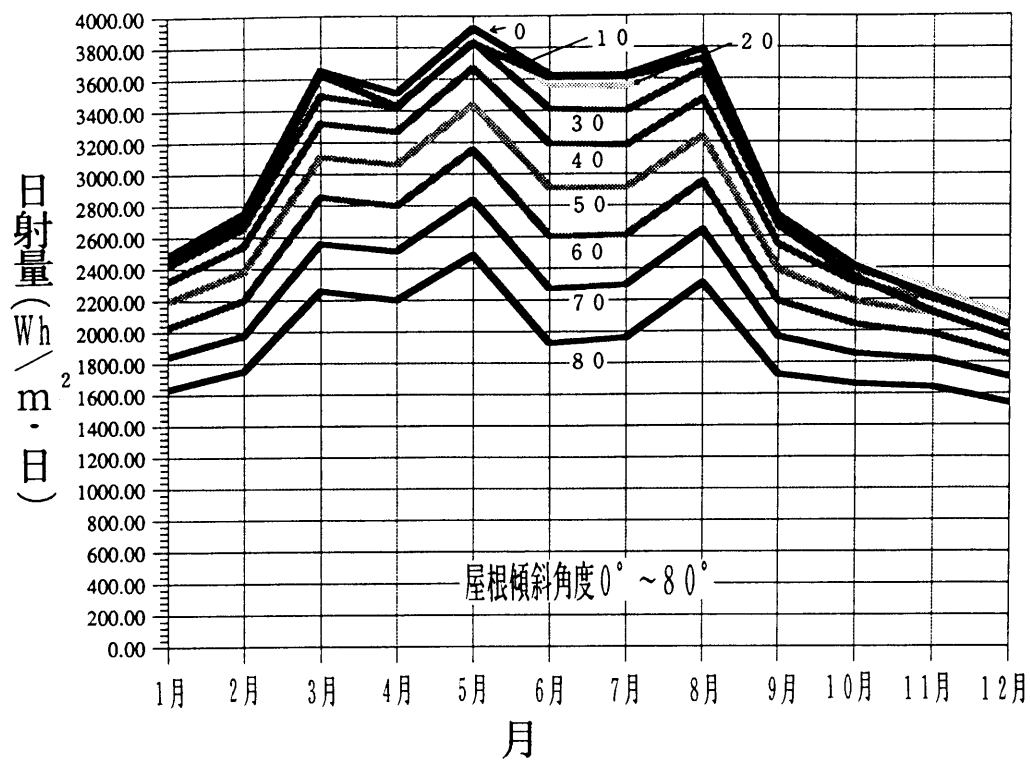


図 6. 6 東屋根への日射量

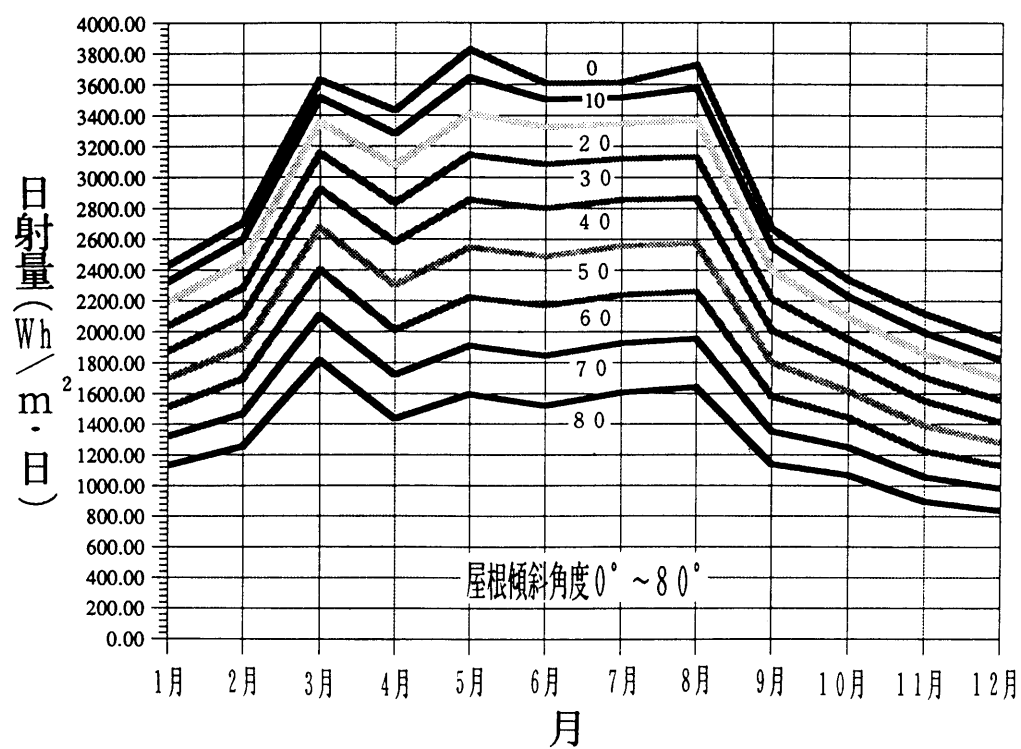


図 6. 7 西屋根への日射量

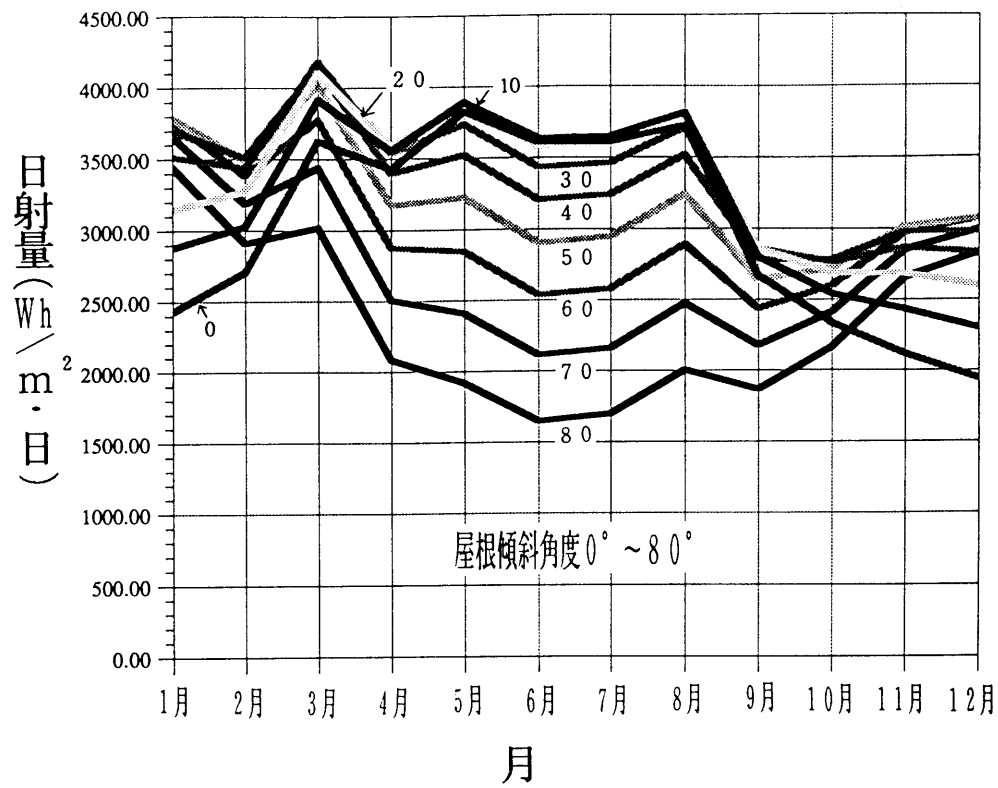


図 6. 8 南屋根への日射量

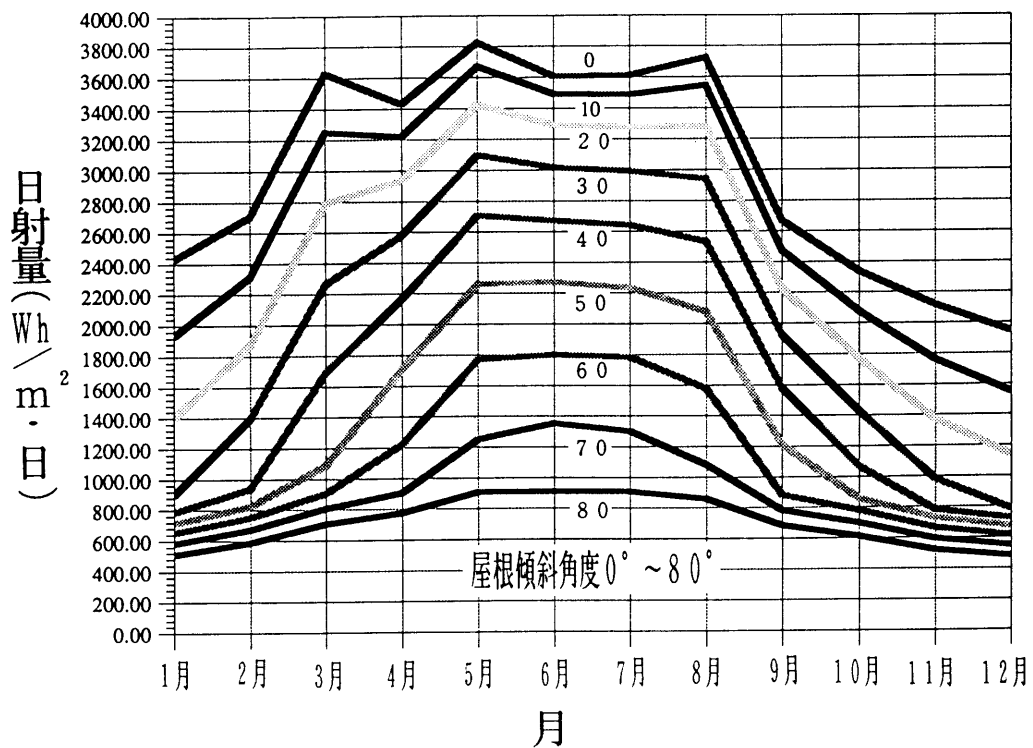


図 6. 9 北屋根への日射量

図 6. 11に、屋根傾斜角度 30° における東、西、南、北屋根への日射量を示す。屋根傾斜角度 30° においては、5月から8月にかけて、北屋根への日射量は南屋根へのその約8割である。

図 6. 12に、屋根傾斜角度 30° における東、西、南、北の屋根への日射量の合計の月変化を示す。東、西、南、北の屋根への日射量の合計の月変化は、一般家庭の電力需要パターンと似ており、傾斜角度 30° で東、西、南、北の屋根すべてに太陽電池を設置すれば、その電力で夏場の消費電力ピークをカットできる可能性がある。

図 6. 13に、屋根傾斜角度 30° における東、西、南、北の屋根への年間の平均日射量を示す。屋根傾斜角度 30° において、北屋根の年間の日射量は南屋根のその約60%である。

6. 2. 4 設置場所の検討

スレート式太陽電池瓦を住宅屋根に設置する場合、その優先順位は図 6. 10より、①南屋根 ②東屋根 ③西屋根 ④北屋根 と考えられる。

しかし、実際の住宅は、その屋根形状は様々であり、それに応じた設置優先順位があると考えられる。そこで、日本の代表的な屋根形状である切妻屋根と方形屋根を例に、太陽電池を設置する場合の優先順位を検討した。図 6. 14に切妻屋根および方形屋根の形状を示す。

(1) 切妻屋根の場合

切妻屋根の方向が、東西方面の場合と南北方面の場合を考えた。

東屋根と西屋根（東西屋根）の年間の日射量の和と、南屋根と北屋根（南北屋根）の年間の日射量の和を比較した。

図 6. 15に、屋根傾斜角度 10° , 20° , 30° の東西屋根と南北屋根の年間の日射量を示す。図より、屋根傾斜角度 10° の場合は、南北方面の切妻屋根の方が、東西方向のそれに比べ約2%日射量が多い。しかし、屋根傾斜角度 20° 及び 30° においては、東西方向の切妻屋根の方が、南北方向のそれに比べて、

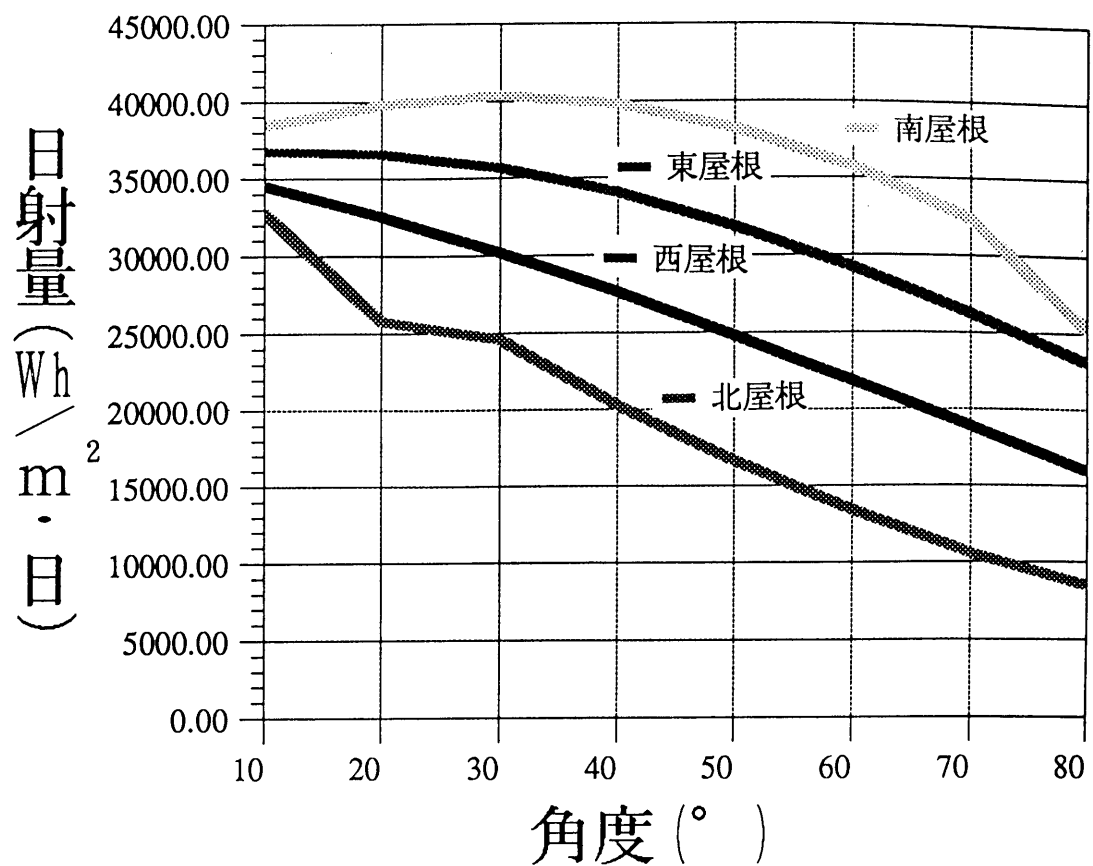


図 6. 1 0 各傾斜角度における東，西，南，北屋根への各月の日射量の合計

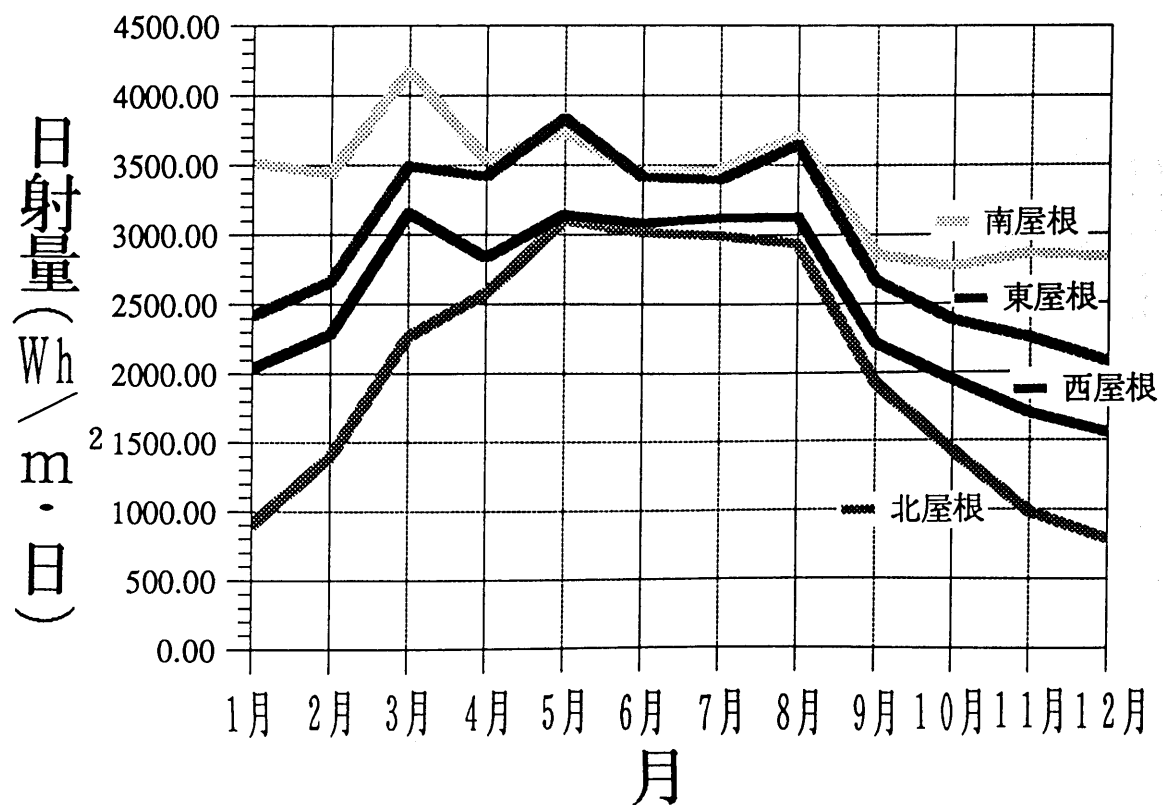


図 6. 1 1 屋根傾斜角度 3 0 ° における東，西，南，北屋根への日射量

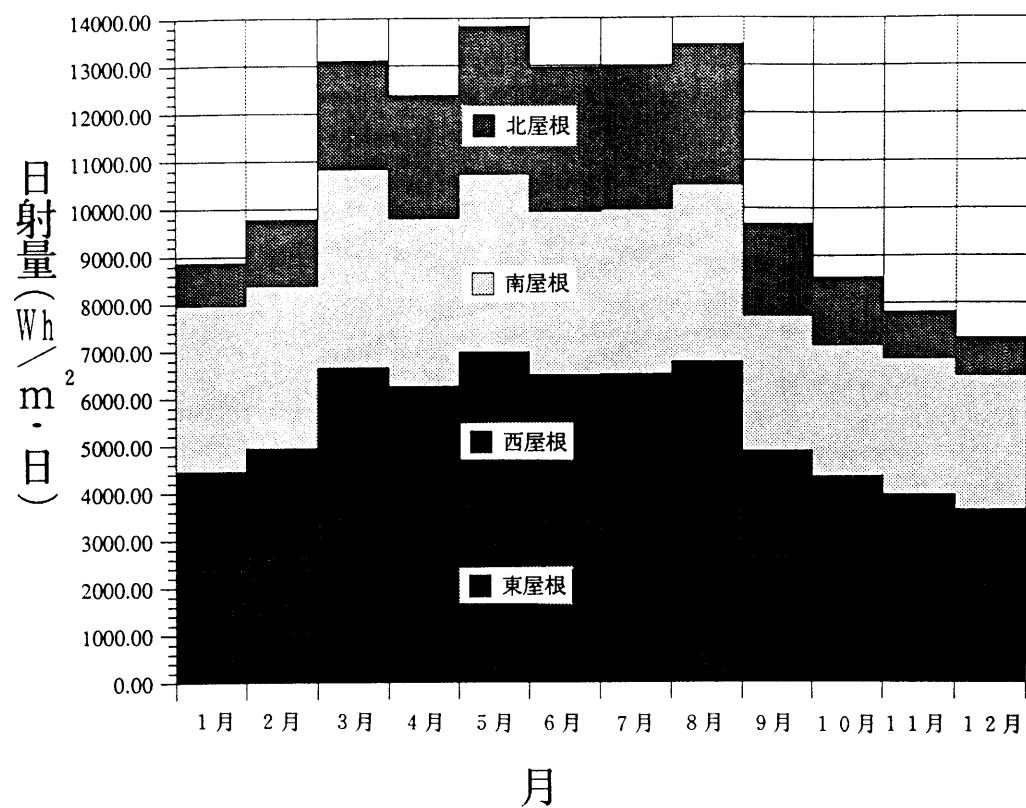


図 6. 1 2 屋根傾斜角度 3 0° における東, 西, 南, 北屋根への日射量合計の月変化

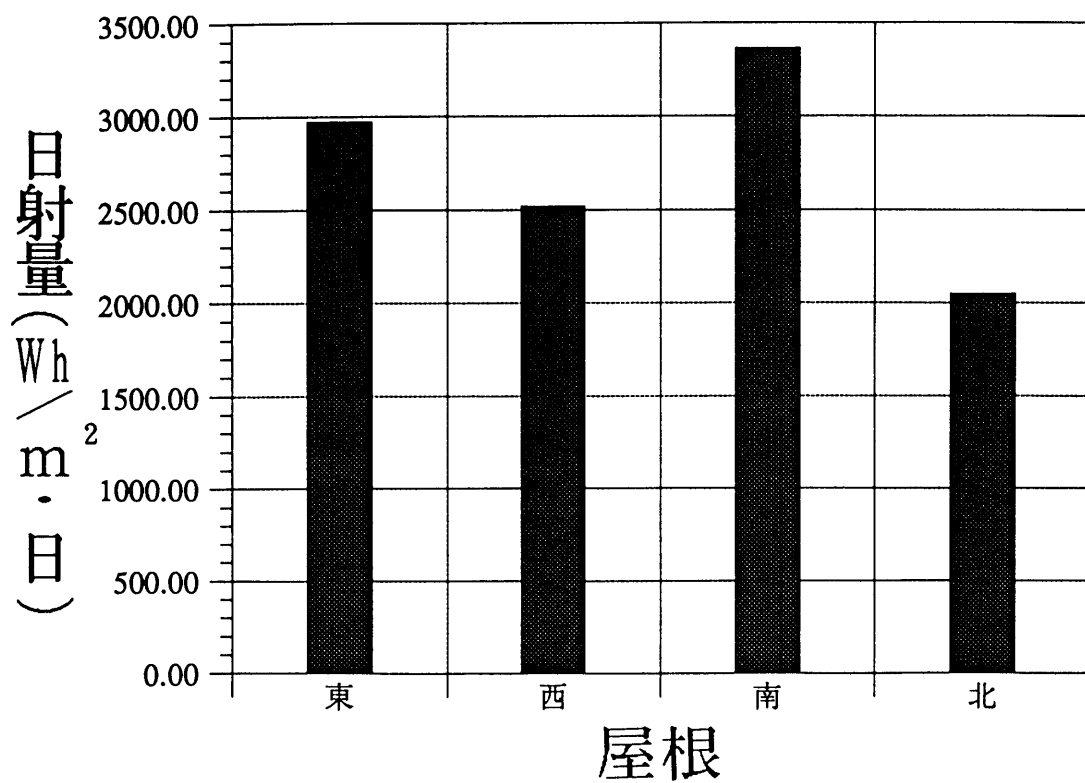
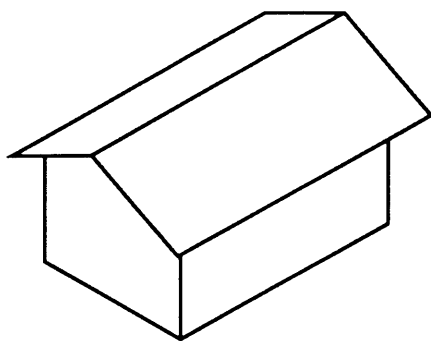
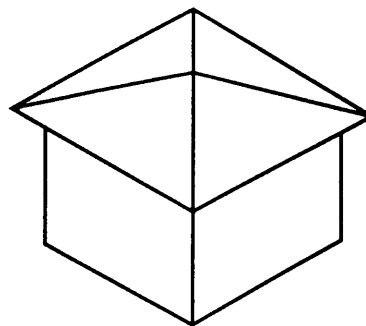


図 6. 1 3 屋根傾斜角度 3 0° における東, 西, 南, 北屋根への年間の日射量



切妻屋根



方形屋根

図 6. 1 4 切妻屋根と方形屋根

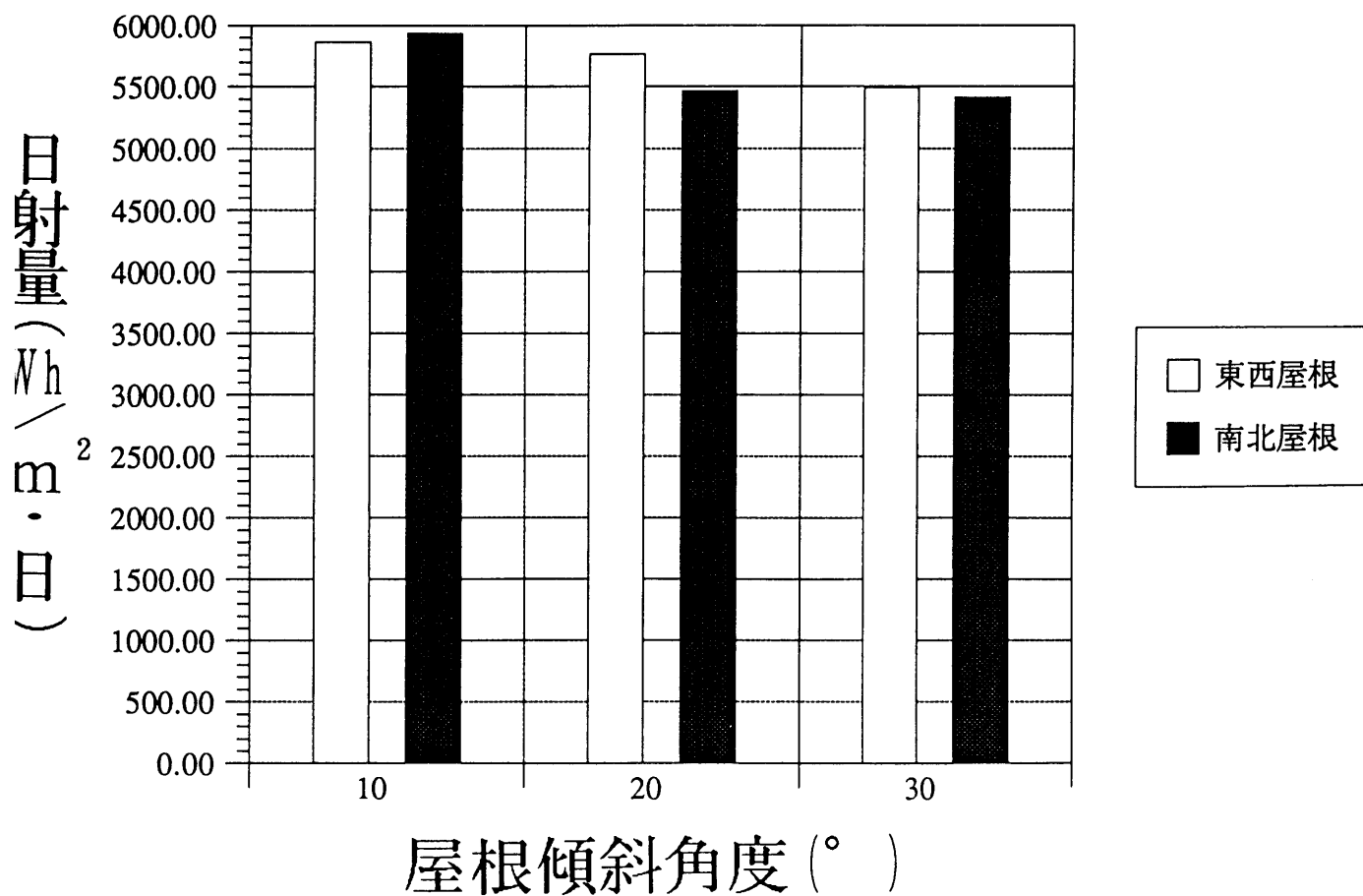


図 6. 1 5 東西屋根と南北屋根への年間日射量

日射量はそれぞれ約 5 % 及び約 2 % 多いことが分かった。

したがって、日本の住宅の屋根傾斜角度（約 20° ～約 30° ）においては南北方向の切妻屋根全体に設置するよりも、東西方向の切妻屋根全体に設置する方が約 2 % ～ 5 % 有利であることが分かった。

（２）方形屋根の場合

方形屋根の場合は、東西南北に同面積の屋根があるため、太陽電池の設置場所としての優先順位は図 6. 11 より、

①南屋根 ②東屋根 ③西屋根 ④北屋根 と考えられる。

また、これに、壁の優先順位も考慮すると、図 6. 16 に示すように屋根傾斜角度 30° では北屋根の方が南壁よりも日射量は多くなるが、屋根傾斜角度 40° では南向き垂直面の方が北屋根よりも日射量は多くなる。従って、太陽電池の設置場所としての優先順位は図 6. 16 より、

屋根傾斜角度 30° では、

①南屋根 ②東屋根 ③西屋根 ④北屋根 ⑤南向き垂直面 ⑥東向き垂直面

屋根傾斜角度 40° では、

①南屋根 ②東屋根 ③西屋根 ⑤南向き垂直面 ④北屋根 ⑥東向き垂直面

であることが分かった。

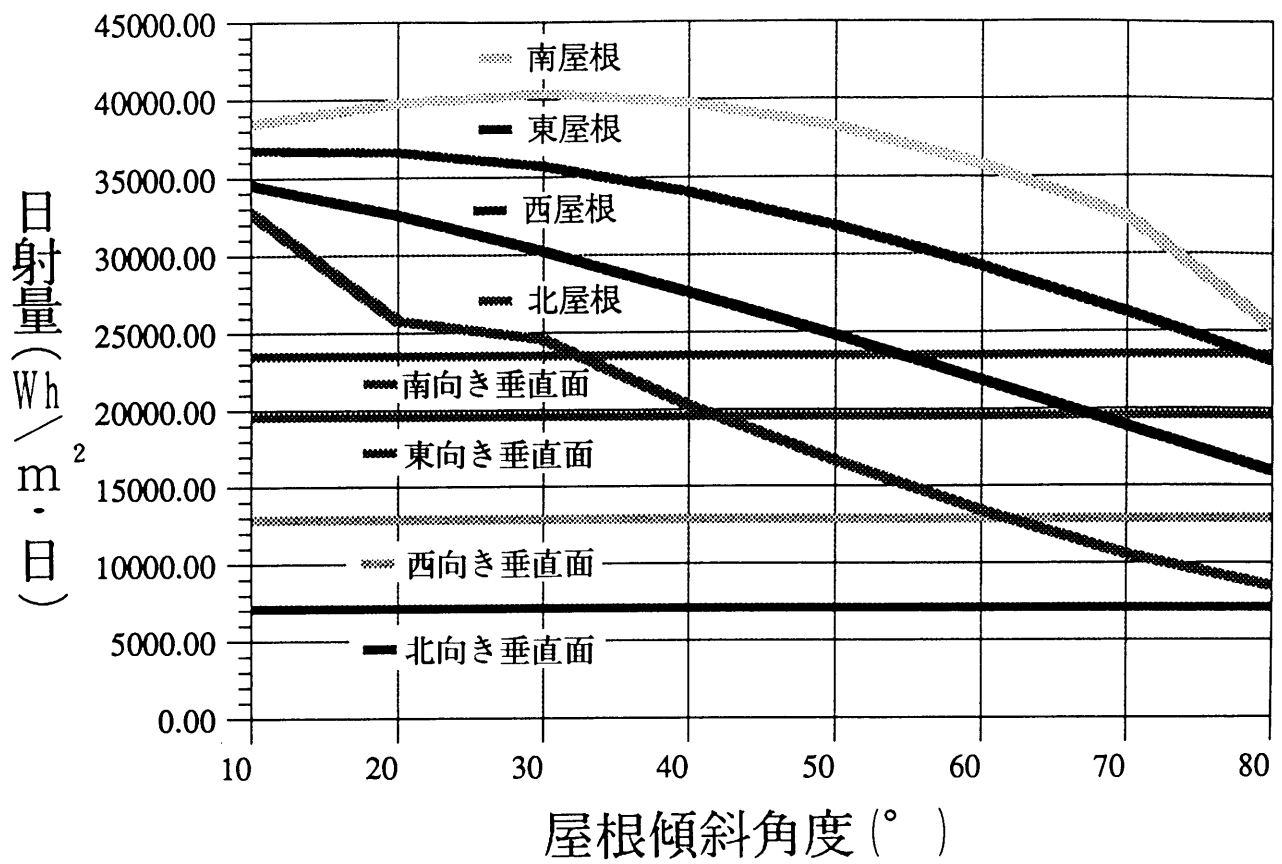


図 6. 1 6 東, 西, 南, 北屋根および垂直面への年間総日射量

6. 3 大面積光透過型 a-Si 太陽電池モジュール（窓一体型モジュール）

第5章で述べた光透過型 a-Si 太陽電池は、発電と同時に採光もできる多機能太陽電池である。第5章では、自動車のサンルーフとしての応用について述べたが、本章では、住宅の窓への応用について述べる。

6. 3. 1 モジュール構造の検討

太陽電池を建材として使用するには、20～30年の寿命が要求される。ところが屋外でのモジュール使用環境は、夏季の炎天下の温度上昇、梅雨時期などの高温高湿な状態、冬季の低温環境、雹などによるモジュールへの衝撃など屋内使用の場合と比べて非常に過酷である。そこで、これらの環境条件をクリアするために図6. 17に示すモジュール構造を検討した。モジュールの受光面側には風冷強化ガラスを用いた。これにより、雹などによる衝撃にも耐えられ、雨などの水分の浸入も防ぐことができる。また、裏面側を透明樹脂フィルム（ポリカーボネート、ポリエステルなど）もしくはガラスで保護することにより裏面からの湿気の浸入を防いだ。封止剤としては、透明で熱可塑性の樹脂；EVA（ethylene vinyl acetate copolymer:エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂）を用いた。また、モジュールの端部にはフレームを取りつけ、端部からの水分の浸入防止および衝撃による破損防止を図った。¹⁾この構造の信頼性評価については、6. 3. 3にて詳述する。

6. 3. 2 大面積モジュールの作製

大面積光透過型 a-Si 太陽電池モジュールの一体化は、図6. 18に示す真空熱圧着装置（ラミネータ）により行った。

装置は、サンプルを加熱するヒータ部と上下2つ（蓋部、底部）に分けられた真空室から成り立っている。真空室は、シリコンゴム等の弾力のあるダイヤフラムで仕切られている。ヒータの上にモジュールの構成材料（受光面側強化ガラス/EVAフィルム/a-Si太陽電池/EVAフィルム/裏面保護材）をセットし、約150℃まで加熱しながら蓋部、底部をロータリーポンプで真空引きし、脱ガスを行う。EVAが軟化、溶融した頃を見はからって蓋部の真空引きを停止し、リークを行

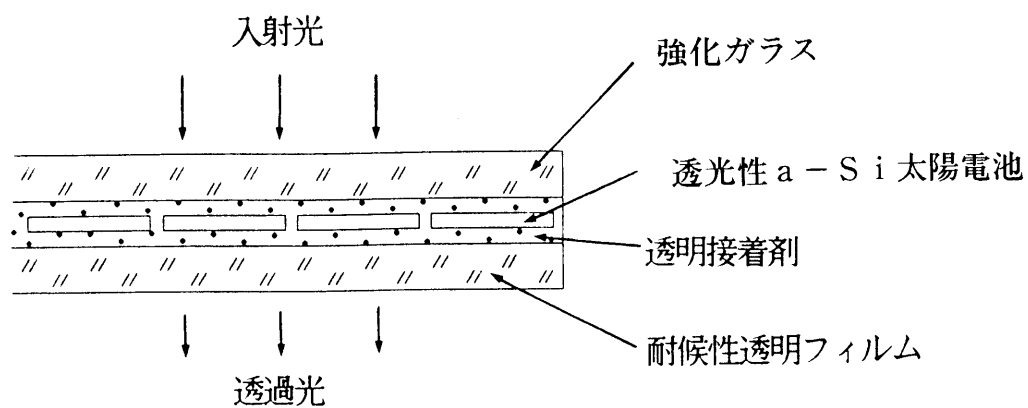


図 6. 17 大面積 a-Si 太陽電池モジュールの構造

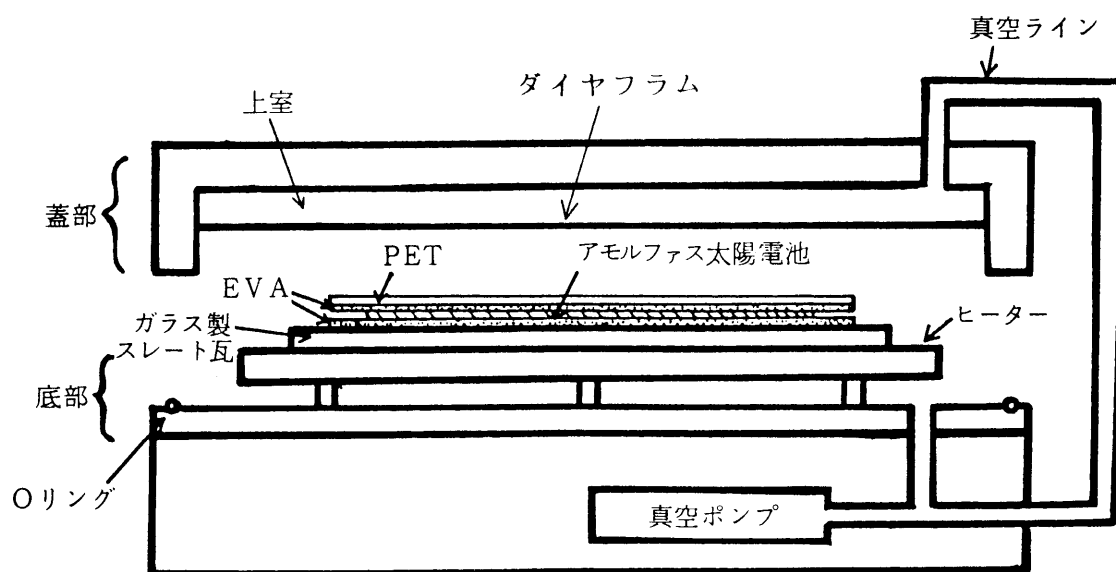


図 6. 18 太陽電池モジュール作製装置

う。そうすると真空室を仕切っているダイヤフラムは大気圧により下方向にのび、サンプルを大気圧で押すことになり、受光面側強化ガラスとEVAおよび裏面保護材とEVAを強く接着することができる。150℃で約40分加熱することによりEVAは熱可塑反応を起こし、再び加熱されても軟化しなくなる。以上の方法により大面積光透過型a-Si太陽電池モジュールの一体化を行った。この様にして一体化したモジュールの外観を図6.19に示す。

6. 3. 3 大面積モジュールの評価検討

(1) 特性評価

図6.20に、この様にして作製した透過率30%のモジュールの電流-電圧特性を示す。測定は、ソーラーシミュレータ(AM-1.5, 100m/cm²)により行った。モジュール寸法は、52.5cm×38cmである。

(2) 信頼性評価

大面積光透過型a-Si太陽電池モジュールの屋外での耐久性を評価するために以下に示す4種類の試験を行った。表6.1に各試験の内容を示す。

- | | |
|------------|----------|
| ① 高温放置試験 | ③ 恒温恒湿試験 |
| ② 温度サイクル試験 | ④ 低温放置試験 |

図6.21に最大出力 P_{max} の変化を初期値 P_{max0} で規格化したグラフを示す。

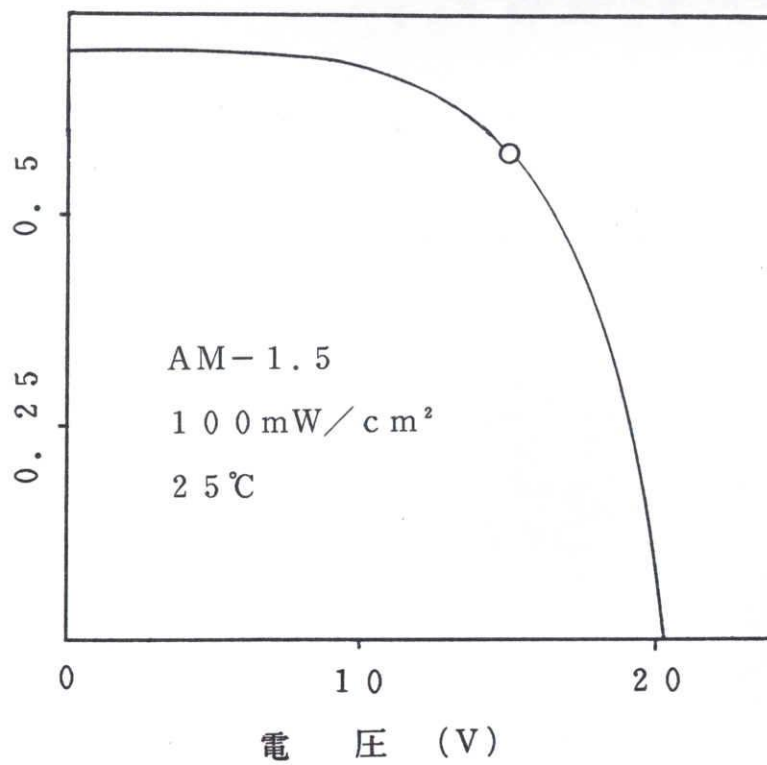
また、表6.2に P_{max} , I_{sc} , V_{oc} , FFおよび外観について試験終了後(約1300時間)の結果を示す。いずれも変化は見られず、大面積光透過型a-Si太陽電池モジュールが高い信頼性を有していることが確認できた。

6. 3. 4 ビルの窓への設置

大面積光透過型a-Si太陽電池モジュールは発電と同時に光を透過することができる。そのため、従来は使用できなかった透光性あるいは透視性を要求される用途に応用することができる。特に、ビルなどの窓への応用が非常に有望である。²⁾ 図6.22に窓への設置例を示す。



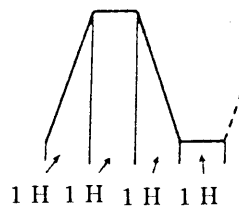
図 6. 19 大面積 a-Si 太陽電池モジュールの外観写真



出 力	8.4 (Wp)
開放電圧	20.8 (V)
短絡電流	0.684 (A)
曲線因子	0.590
最適動作電圧	14.8 (V)
最適動作電流	0.568 (A)
透過率	30 (%)

図 6. 20 大面積 a-Si 太陽電池モジュールの出力特性例

表 6. 1 信頼性試験の内容

試験名	試験条件
高温放置	$T = 90^{\circ}\text{C}$
温度サイクル	$T = -25 \sim 80^{\circ}\text{C}$ (1サイクル4H) 
恒温恒湿	$T = 40^{\circ}\text{C}$ RH = 90%
低温放置	$T = -40^{\circ}\text{C}$

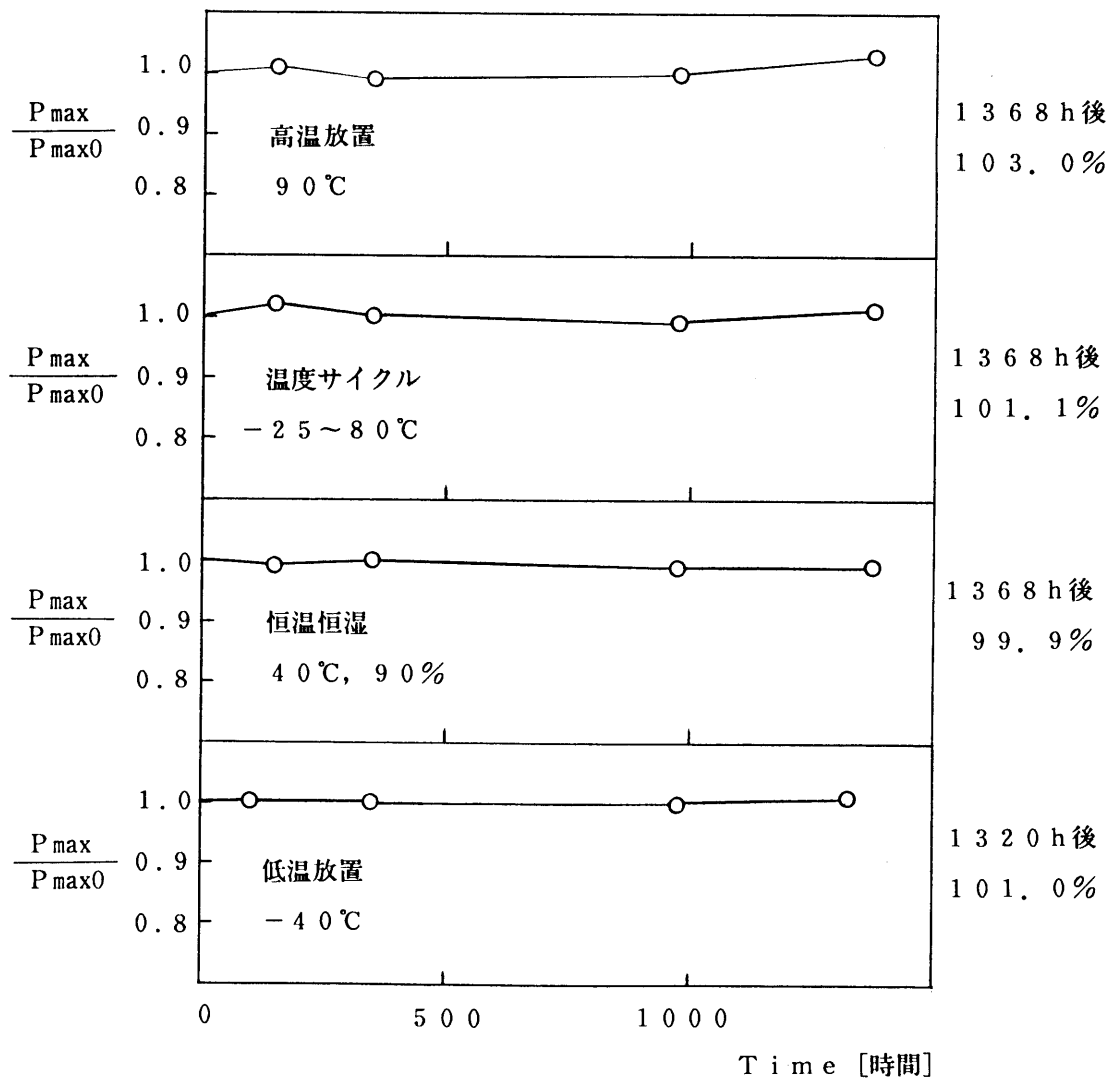


図 6. 2 1 信頼性試験結果 (P_{max})

表 6. 2 信頼性試験結果 (Pmax, Isc, Voc, FF, 外観)

	試験結果	$\frac{\text{試験前}}{\text{試験後}}$ (%)
高温放置 90℃	Pmax	103.0
	Voc	99.3
	Isc	98.9
	FF	105.3
	外 観	異常なし
温度サイクル 25～80℃	Pmax	101.1
	Voc	99.3
	Isc	99.0
	FF	103.2
	外 観	異常なし
恒温恒湿 40℃, 95%	Pmax	99.9
	Voc	99.3
	Isc	97.9
	FF	102.5
	外 観	異常なし
低温放置 -40℃	Pmax	101.1
	Voc	100.8
	Isc	101.0
	FF	99.7
	外 観	異常なし

試験時間：低温放置 1320時間
 その他は 1368時間



図 6. 2 2 窓への設置例

6. 4 スレート式太陽電池瓦

次に、屋根建材と太陽電池を一体化したスレート式太陽電池瓦について、そのモジュール構造の検討および性能評価を行った。

6. 4. 1 スレート式太陽電池瓦のモジュール構造の検討

スレート式太陽電池瓦は、屋根建材と太陽電池を一体化したものである。まず、従来からある屋根建材として、石綿スレート瓦、金属屋根材およびガラス建材を選び、太陽電池との一体化が可能かどうか検討を行った。石綿スレート瓦もしくは金属屋根材と太陽電池を一体化した場合、建材が不透明であるため表面を透明フィルムで保護した構造になる。この場合、モジュールの衝撃強度や耐湿性、耐光性が低下するなど信頼性に問題があることが分かった。それに対してガラス建材の場合は、一体化が容易である上に（従来モジュールと同じ構造がとれる）表面側をガラス建材で保護できるため、より信頼性が高いことが考えられる。³⁾

図 6. 23に今回検討を行ったガラス建材と一体化したスレート式太陽電池瓦の構造を、図 6. 24にその外形図を示す。まず外形寸法は、互換性をもたすため従来のスレート式瓦と同一寸法とした。a - S i 太陽電池としては、寸法 175mm × 300mm × 1.8tのサブモジュールを 3 枚使用し、直列または並列接続を行った。受光面側には光の直接反射を低減するため、表面に凹凸のある型板強化ガラスを用いた。a - S i 太陽電池サブモジュールを表面の強化ガラスと一体化するために、従来の太陽電池モジュールと同じく、接着剤として E V A (Ethylene-Vinyl Acetate copolymer: エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂) を用いた。また、裏面側は保護フィルム (P E T / A l / P E T 複合フィルム) により防水を行った。太陽電池からの出力は耐熱性のリード線により取り出し、その先端に太陽電池瓦の間を電氣的に接続するための防水式コネクタを設けた。また、スレート式太陽電池瓦の屋根への固定のため、防錆処理を施した金属製の固定具を、図 6. 23に示した様に表面ガラスの裏面に接着剤により固定した。この固定具をビスまたは釘で屋根材 (棧) に固定し、スレート式太陽電池瓦を屋根に固定した。

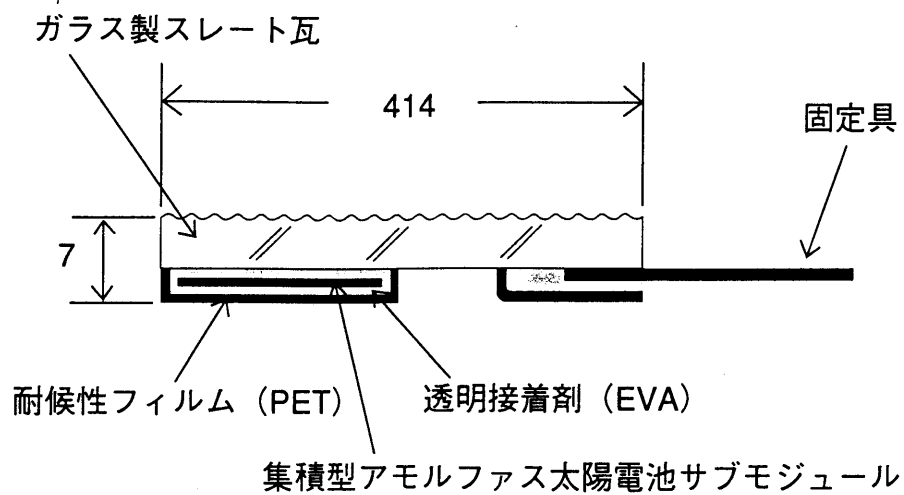


図 6. 2 3 スレート式太陽電池瓦の構造

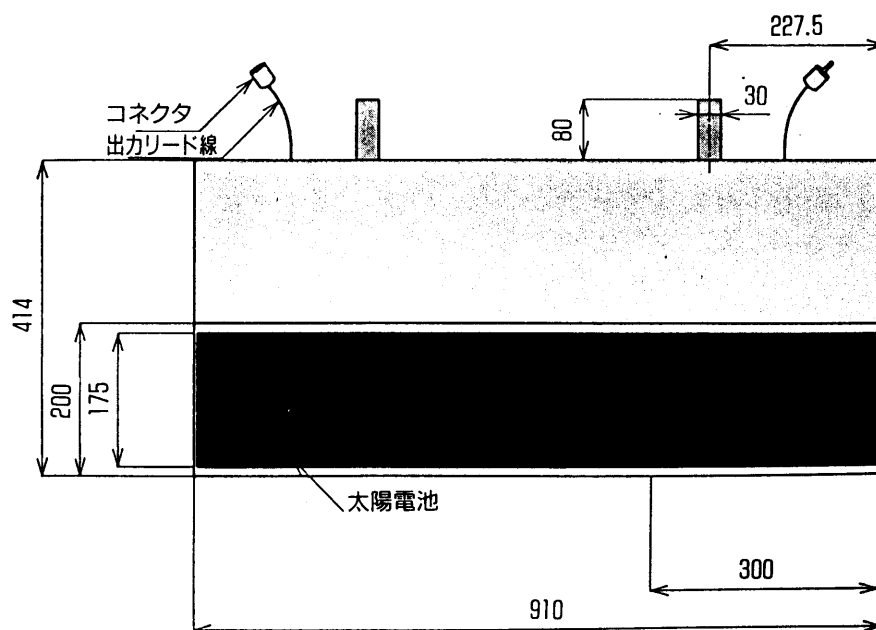


図 6. 2 4 スレート式太陽電池瓦の外形図

6. 4. 2 スレート式太陽電池瓦の作製

スレート式太陽電池瓦の一体化は、6.3.2で示した大面積 a-Si 太陽電池モジュールの作製法と基本的に同じである。

ラミネータのヒータ上に配線を行ったスレート式太陽電池の構成材（ガラス製スレート瓦/EVAフィルム/a-Si太陽電池サブモジュール/EVAフィルム/PET・Al・PET複合フィルム）をセットし、加熱しながら真空引きし脱ガスを行った。さらに大気圧で加圧しながら、150℃、約40分の条件で加熱することによりEVAの硬化を行った。図6.25にこのようにして完成したスレート式太陽電池瓦の外観写真を示す。

6. 4. 3 スレート式太陽電池瓦の評価

（1）出力特性

スレート式太陽電池瓦の出力特性は、a-Si太陽電池を直列、並列に接続することによって任意の電圧、電流を得ることができる。図6.26に、a-Si太陽電池サブモジュール3枚をすべて並列接続したときのスレート式太陽電池瓦の出力特性を示す。測定には、ソーラーシミュレータ（AM-1.5, 100mW/cm²）を用いた。

（2）信頼性評価

スレート式太陽電池瓦は、屋外での環境に充分耐える電気特性としての信頼性を有することが必要であると同時に、屋根建材としての信頼性も有する必要がある。そこで、両方を確認するため、以下の信頼性試験を行った。

まず、太陽電池としての信頼性については以下に示す6種類の試験を行った。

①温度サイクル試験

④高温放置試験

②湿度サイクル試験

⑤低温放置試験

③熱衝撃試験

⑥恒温恒湿試験

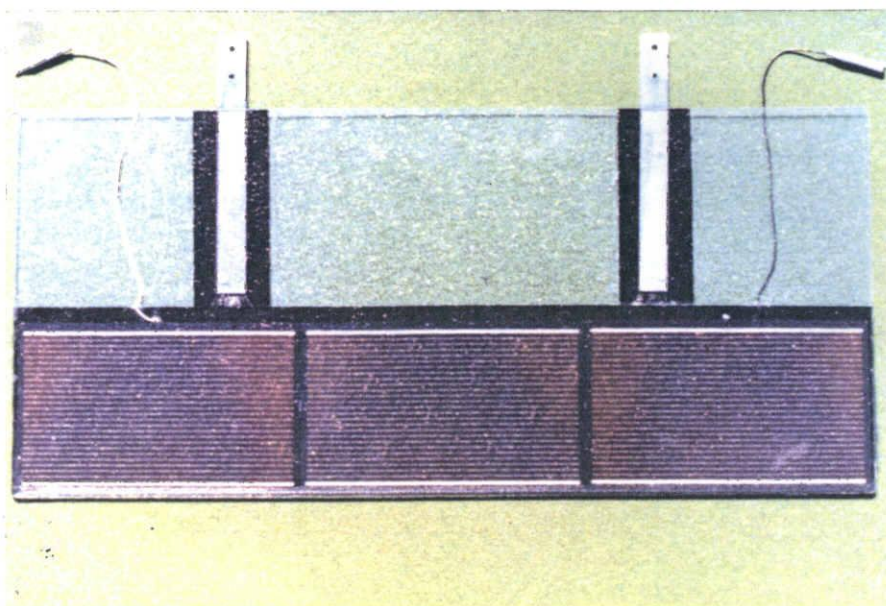
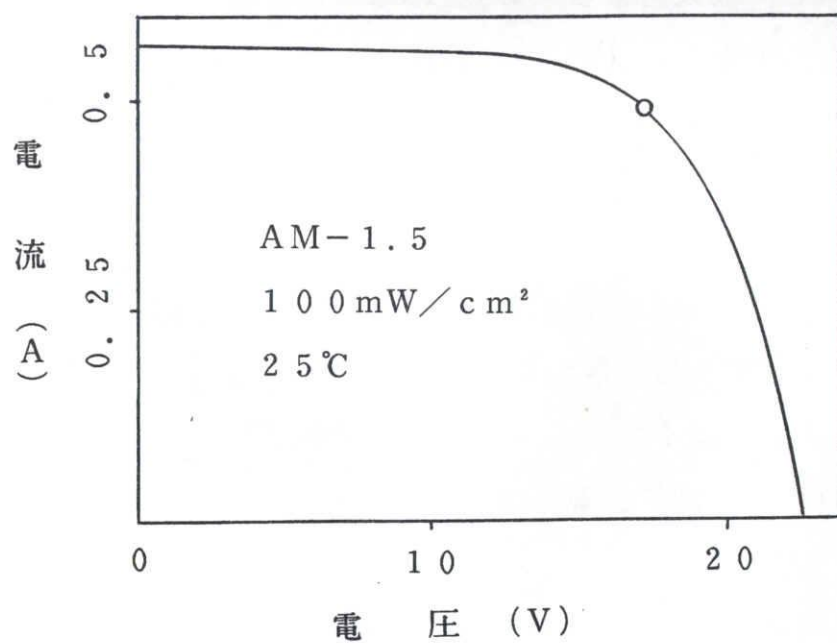


図 6. 2 5 スレート式太陽電池瓦の外観写真



出力	8.56 [Wp]
開放電圧	22.7 [V]
短絡電流	0.571 [A]
曲線因子	0.660
最適動作電圧	17.4 [V]
最適動作電流	0.491 [A]

図 6. 2 6 スレート式太陽電池瓦の出力特性例

各試験の条件および試験結果を表 6. 3 に示す。表 6. 3 に示した様にいずれの試験も問題ないことを確認した。

次に、建材としての性能を確認するために以下に示す試験を実施した。試験はスレート式太陽電池瓦の単体に対して行い、項目は曲げ試験、軸方向圧縮試験、衝撃試験、耐候性試験、冷結融解性試験、温冷繰返し試験および繰返し曲げ試験の 7 種類について行った。なお、試験項目、試験方法については、建材の J I S (JIS A 1408-1977, JIS A 1421-1981, JIS A 1415-1977, JIS A 5422-1987) によった。試験の目的を表 6. 4 に示す。また、以下に各試験項目の詳細を示す。

① 曲げ試験

試験体が曲げ荷重を受けたときの最大荷重および切断する時の曲げたわみ量を求めるため、JIS A 1408-1977「建築用ボード類の曲げ試験方法」に基づき試験体表面からの曲げ試験を行った。試験時には試験機付属荷重-変形自動記録装置により荷重-たわみ量曲線を記録し、最大荷重(P_{max})及び最大荷重時のたわみ量(δ_{max})及び最大荷重確認後さらに加力し、太陽電池の特性変化時のたわみ量を求めた。なお、試験にはインストロン万能試験機(使用レンジ: 50kgf又は500kgf, 載荷速度: 2 mm/min)を用いた(図 6. 27)。

② 軸方向圧縮試験

試験体とその軸方向より外力を受けた時の最大荷重および特性変化を調べるため試験体の軸方向に一軸漸増圧縮荷重を加え最大荷重を求めるとともに、試験後の特性変化を測定した。なお、試験にはインストロン万能試験機(使用レンジ: 10tf, 載荷速度: 0.5mm/min)を用いた(図 6. 28)。

③ 衝撃試験

試験体が飛来物等により衝撃荷重を受けた時の破壊状況および特性変化を調べるため、JIS A 1421-1981「建築用ボード類の衝撃試験方法」による試験を行った。質量500gのなす形おもりを試験体表面中央部に自然落下させ、目視観察による異常の有無を確認するとともに、太陽電池の出力を測定した。なお、おもりの落下高さは20cmより順次20cmずつ増加し、最大200cmまでとした(図 6. 29)。

表 6. 3 太陽電池の信頼性試験

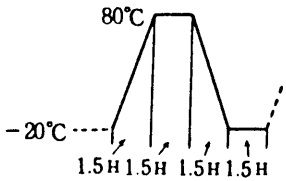
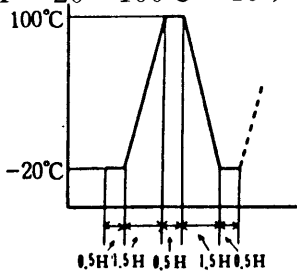
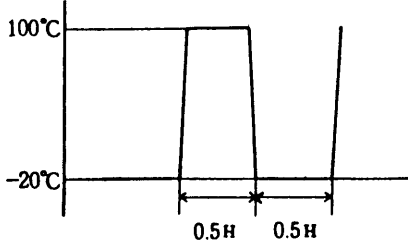
試 験 名	試 験 条 件	試 験 結 果
温湿度サイクル	RH 95%以上 10サイクル 	・ 特性低下なし ・ 外観の異常なし
温度サイクル	T=-20~100°C 10サイクル 	同 上
熱衝撃試験	T=-20~100°C 10サイクル 	同 上
高温放置試験	T=80°C 500h	同 上
低温放置試験	T=-40°C 500h	同 上
恒温恒湿試験	T=60°C RH=90% 500h	同 上

表 6. 4 建材試験項目とその目的

名 称	目 的
曲 げ 試 験	建材一体形太陽電池の屋根面における信頼性を確認するために、曲げ荷重を受けた時の最大荷重および特性が変化する時の曲げたわみ量を求める。
軸方向圧縮試験	建材一体形太陽電池の屋根面における信頼性を確認するために、その軸方向より外力を受けた時の最大荷重および特性が変化する時の荷重を求める。
衝 撃 試 験	建材一体形太陽電池の運搬・設置作業時の信頼性を確認するため、建材一体形太陽電池が飛来物等により衝撃荷重を受けた時の破壊状況および特性変化を求める。
耐 候 性 試 験	屋外における建材一体形太陽電池の長期信頼性を確認するため、サンシャインウェザーメーターによる劣化加速試験を行う。
凍結融解性試験	建材一体形太陽電池が冬期や寒冷地において、凍結と融解の繰り返し作用を受けた時の外観変化および、強度低下を調べるため、気中凍結水中融解後の目視観察と特性測定を行う。
温冷繰り返し試験	建材一体形太陽電池が自然環境下で温湿度変化の繰り返しを受けた時の外観変化および、強度低下を調べるため、温冷繰り返しサイクル後の目視と特性測定を行う。
繰り返し曲げ試験	建材一体形太陽電池が曲げ繰り返し荷重を長時間受けた時の強度低下を調べるため、最大荷重の60%の荷重の繰り返し曲げ後の目視検査と特性測定を行う。

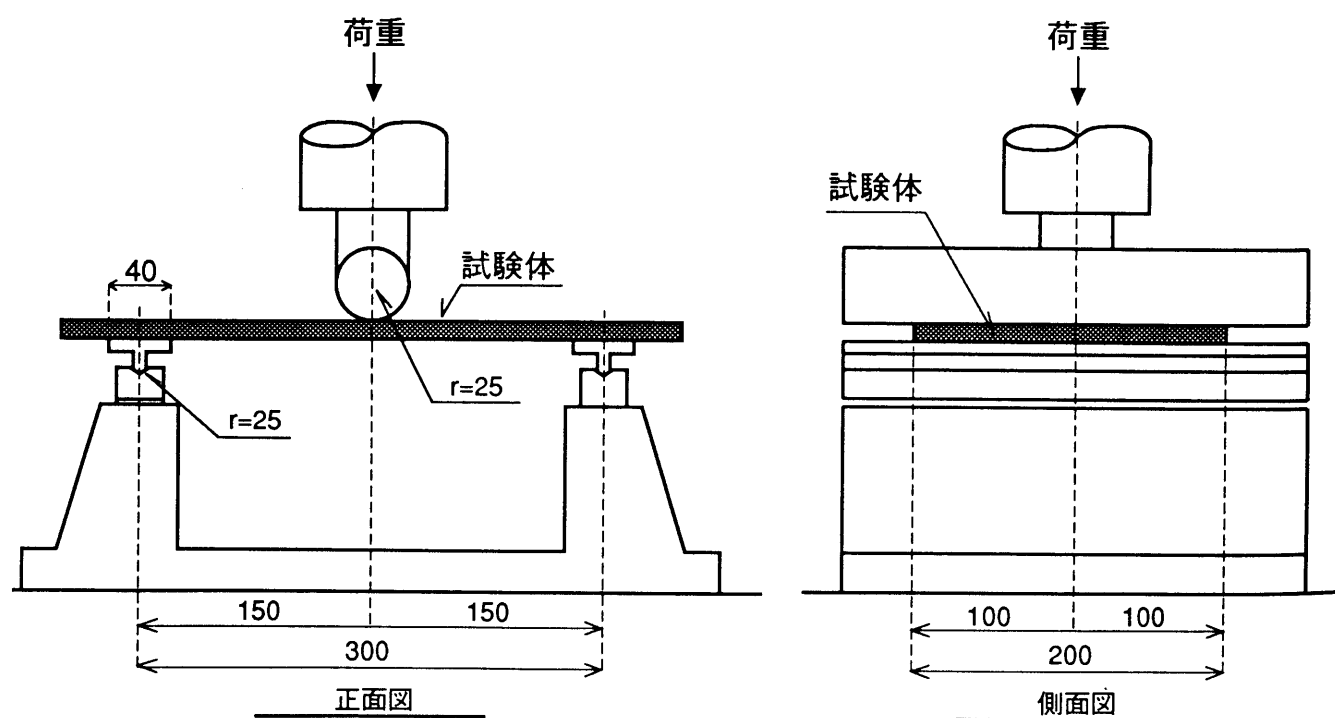


図 6. 2 7 曲げ試験方法

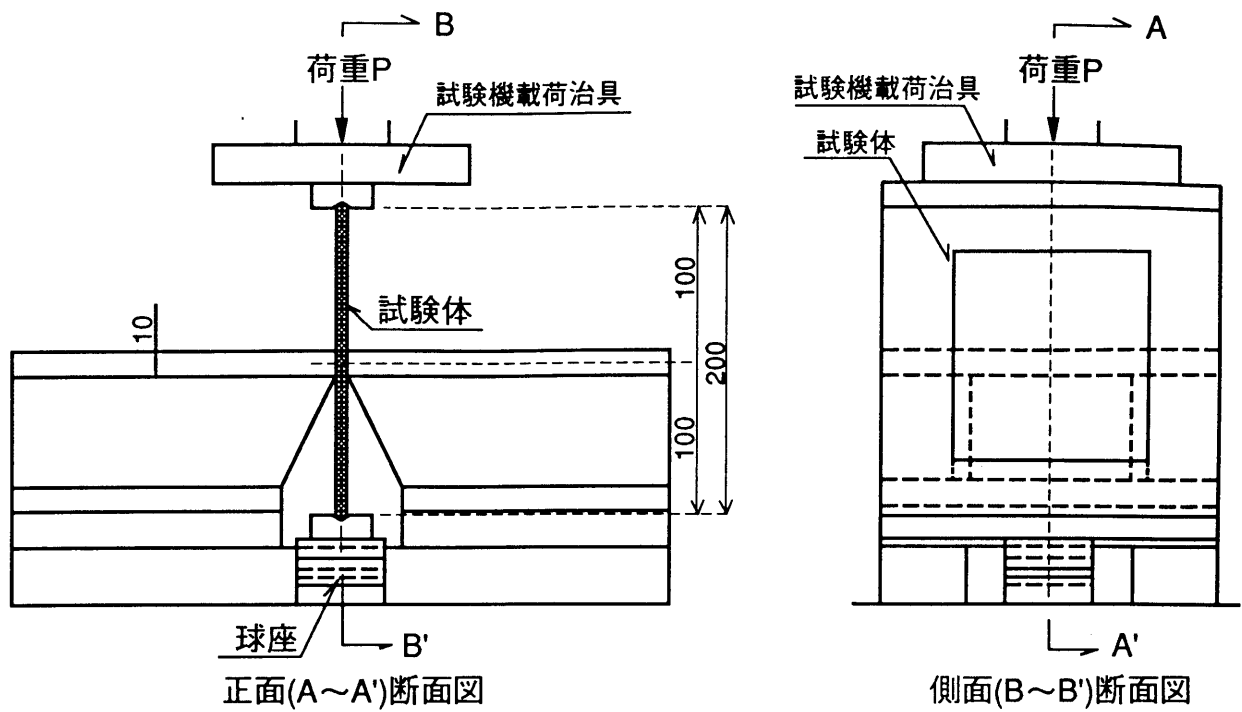


図 6. 2 8 軸方向圧縮試験方法（寸法単位：mm）

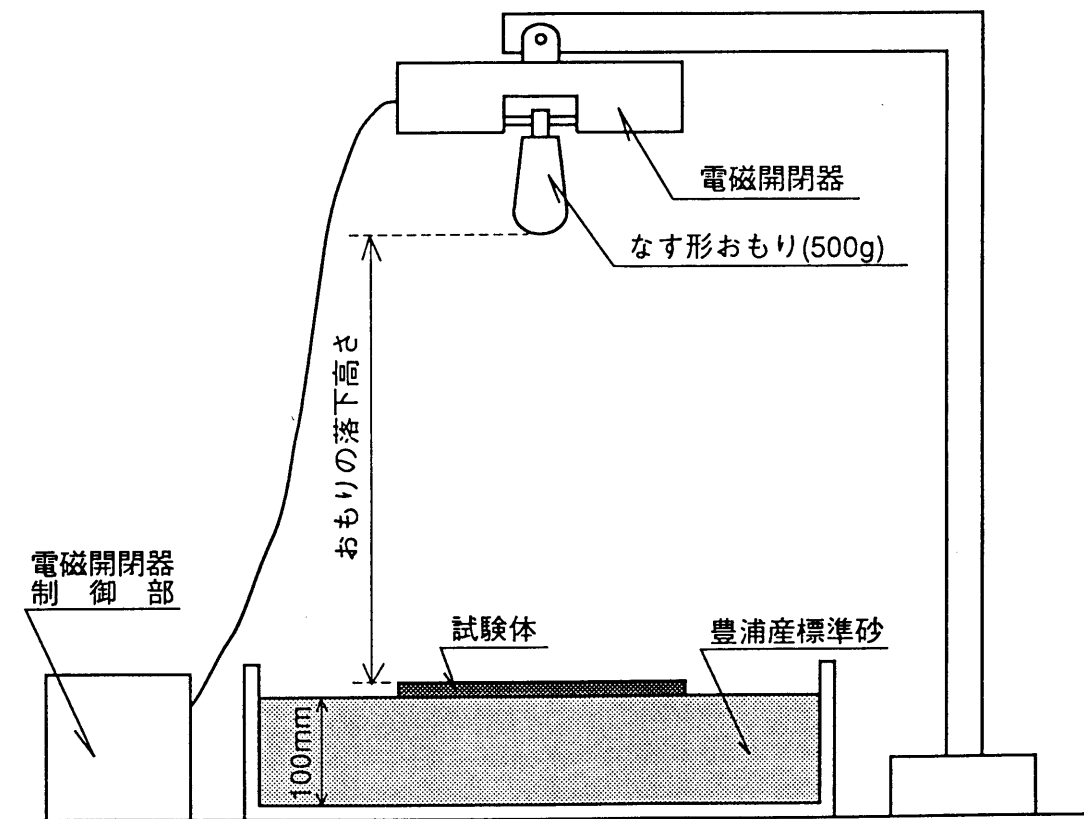


図 6. 2 9 衝撃試験方法

④ 耐候性試験

試験体が太陽光や降雨の気象的外力を受けた時の外観変化および強度低下を調べるため、JIS A 1415-1977「プラスチック建築材料の促進暴露試験方法」に規定するWS形促進暴露試験装置（サンシャインカーボンアーク灯を光源とするもの）により3000時間の促進暴露を行い、途中250時間毎に目視観察および太陽電池の出力測定を行った。3000時間の促進暴露を終えた試験体は ① 曲げ試験と同様の方法で曲げ試験を行った。

⑤ 凍結融解性試験

試験体が冬期や寒冷地において凍結と融解の繰り返し作用を受けた時の外観変化及び強度低下を調べるため、JIS A 5422-1987「石綿セメントサイディング」の耐凍結融解性試験により300サイクルの気中凍結水中融解を行い、100サイクル終了毎に目視観察および太陽電池の出力測定を行った。300サイクルの凍結融解を終えた試験体は ① 曲げ試験と同様の方法で曲げ試験を行った。なお、凍結融解試験期槽内温度と経過時間の関係を図 6. 30に示す。

⑥ 温冷繰り返し試験

試験体が自然環境下で温湿度変化の繰り返し作用を受けた時の外観変化および強度低下を調べるため、試験体を温度 $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$ で4時間冷却し次に温度 $80 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $50 \pm 2\%$ で乾燥する操作を1サイクルとし、これを50サイクル又は100サイクル行った。規定の温冷繰り返しサイクルを終えた試験体は目視観察及び太陽電池の出力の測定を行った後、① 曲げ試験と同様の方法で曲げ試験を行った。なお、温冷繰り返し試験器槽内温度と経過時間の関係を図 6. 31に示す。

⑦ 繰り返し曲げ試験

試験体が曲げ繰り返し荷重を長期間受けた時の強度低下を調べるため、① 曲げ試験と同様の方法にて規定荷重を載荷した後、ゼロ荷重まで除荷する操作を1サイクルとしてこれを1000回行った。繰り返し曲げを終えた試験体は目視観察及び太陽電池の出力の測定を行った後、① 曲げ試験と同様の方法で曲げ試験を行った。なお、規定荷重は110kgf, 載荷・除荷速度は200mm/minである。

参考規格はJISから選びそれぞれについて合否判定を行った結果、表 6. 5に示す様にいずれの試験においても異常は見られず、本構造のスレート式太陽電池瓦は高い信頼性を有することが分かった。

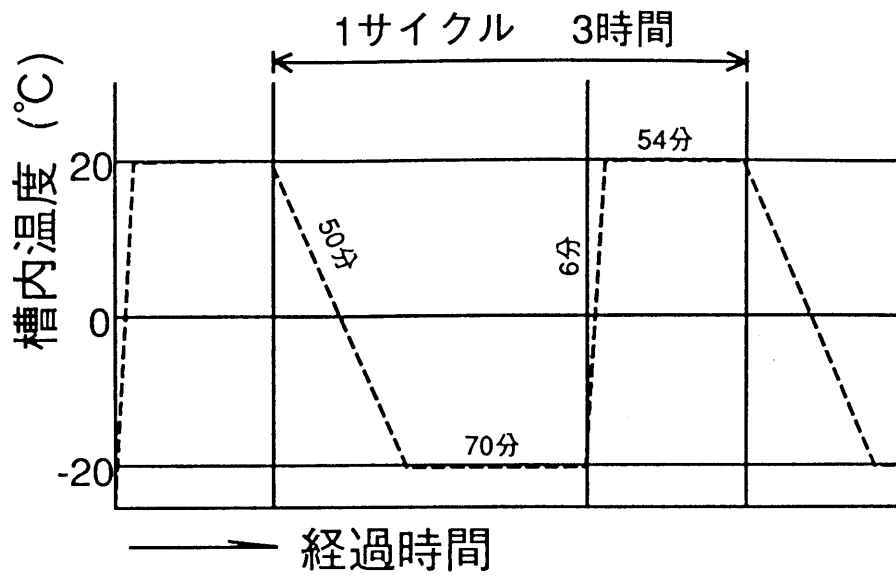


図 6. 3 0 凍結融解性試験における槽内温度と経過時間の関係

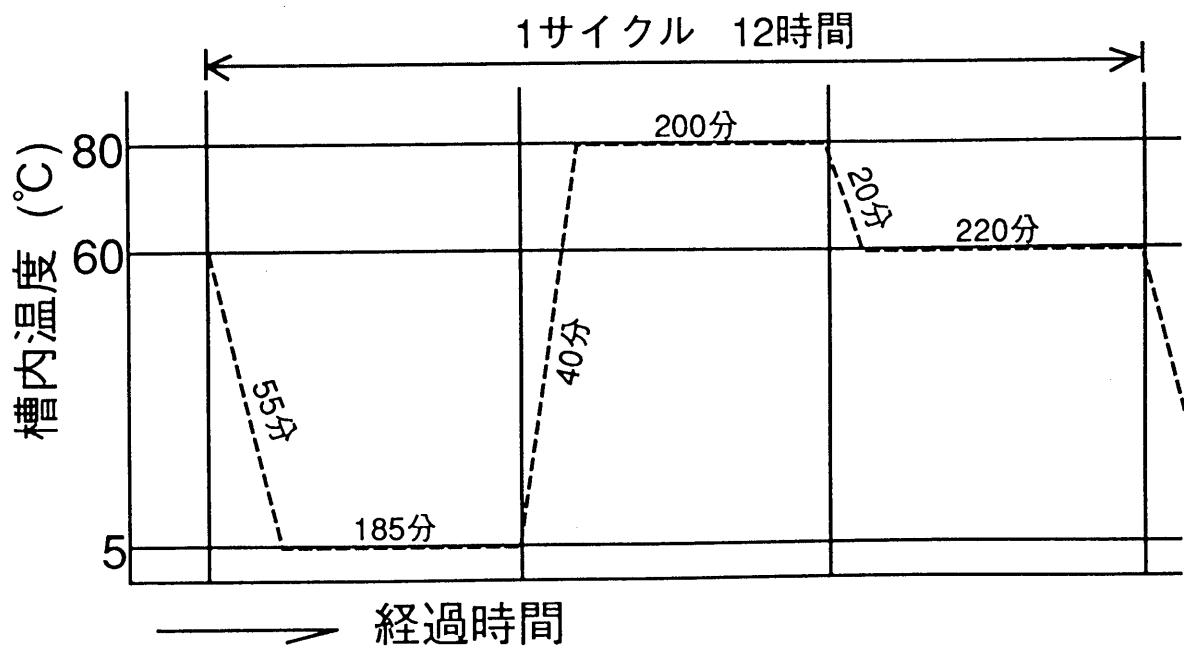


図 6. 3 1 温冷繰り返し試験における槽内温度と経過時間の関係

表 6. 5 建材試験結果

試 験	参 考 規 格	判 定 基 準	判 定 結 果
曲げ試験	J I S A 1 4 0 8 建築用ボード類の 曲げ試験方法	曲げ最大荷重 $\geq 25\text{kgf}$ 及び 特性変化がないこと	183kgf 特性変化なし 合
注1) 圧縮強さ (軸方向)	注2) *	曲げ試験における曲げ 最大荷重 $\geq 25\text{kgf}$ 及び 特性変化がないこと	6117kgf 特性変化なし 合
衝撃強さ	J I S A 1 4 2 1 建築用ボード類の 衝撃試験方法	おもりの落下高さ50cm において亀裂,剥離,貫 通孔及び割れがなく、 特性変化がないこと	異常なし 特性変化なし 合
耐候性	J I S A 1 4 1 5 プラスチック建築 材料の促進暴露 試験方法	サンシャインウエサメーター3000時 間後において、剥がれ、 ひび割れ,膨れがなく、 光沢・色調の低下が著 しくないこと及び特性 変化がないこと	異常なし 特性変化なし 合
凍結 融解性	* J I S A 5 4 2 2 石綿セメントサイディングの 耐凍結融解性試験	凍結融解300サイクル 後、外観の著しい変化 及び層間剥離, 特性変 化がないこと	異常なし 特性変化なし 合
温冷 繰り返し	* J I S A 6 9 1 0 複層仕上塗材の 試験方法	繰り返し100サイクル 後、剥がれ,ひび割れ, 膨れがなく,光沢・色調 の低下が著しく、特性 変化がないこと	異常なし 特性変化なし 合
繰り返し 曲げ	*	曲げ疲労繰り返し1000 回後曲げ最大荷重 ≥ 25 kgf及び特性変化がな いこと	187kgf 特性変化なし 合

注1) 試験体平面に垂直方向の圧縮については予備試験の結果、10tfまで荷重したが異常はなかった。

注2) *印については参考とする屋根材のJ I Sがないため、壁材のJ I Sを参考とした。

6. 4. 4 個人住宅の屋根への設置

(1) 設置方法の検討

スレート式太陽電池瓦の屋根への設置方法として、ストレート葺きと千鳥葺きの2方式について検討を行った。

①ストレート葺き

図6. 32に示すように、屋根の野地板上に下から順次重ねながら上に葺いていく。固定は、棧の上にビスまたは釘によって行った。列と列の継ぎ目には、野地板上に水切り金物を取りつけ、屋内への水の浸入を防いだ。

②千鳥葺き

①と同様に、野地板の棧上に固定していくが、図6. 33に示すように上側のモジュールは1/2ずつずらして重ね合わせた。この方式の場合、断面図に示すように列の継ぎ目の下側には、下の段のモジュールがあり、①の方式のように水切り金物を取りつける必要がない。

以上の検討の結果、水きり金物が不要でない分、千鳥葺きの方が簡単で低コストで設置できることが分かった。

(2) 特性評価

スレート式太陽電池瓦の屋外における信頼性を確認するために、75枚のスレート式太陽電池瓦を用いて屋根を葺いたモデルハウスを建設し、太陽光発電システムを構築した。図6. 34に、モデルハウスの外観を示す。また、表6. 6にこのモデルハウスの仕様を、表6. 7に設置初期の出力特性を示す。

このモデルハウスを用いて、太陽電池出力の一日の変化および長期間における出力の経時変化などについて解析を行った。図6. 35、に特性評価システムの構成概略を示す。

①出力データ解析（日変化）

図6. 36に、各種測定データの日変化の一例を示す。出力の変化は日射量の変化とよく対応しているが、太陽電池温度の変化は、ガラス製スレート瓦の熱容量が大きいため、太陽電池出力の変化より遅れている。

出力およびモジュール温度と風速の関係を調べるため、外気温度と日射量がほ

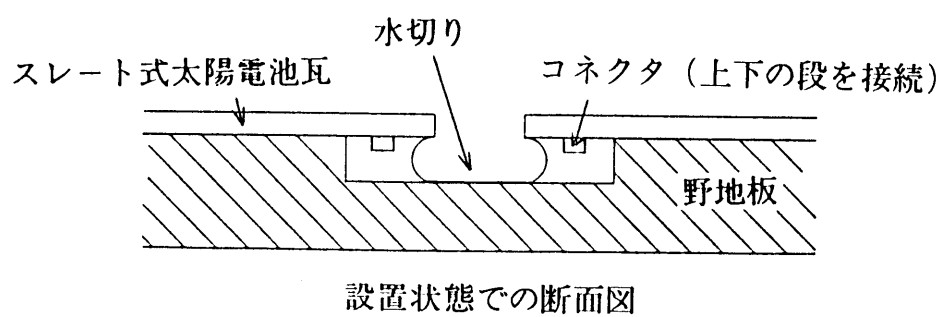
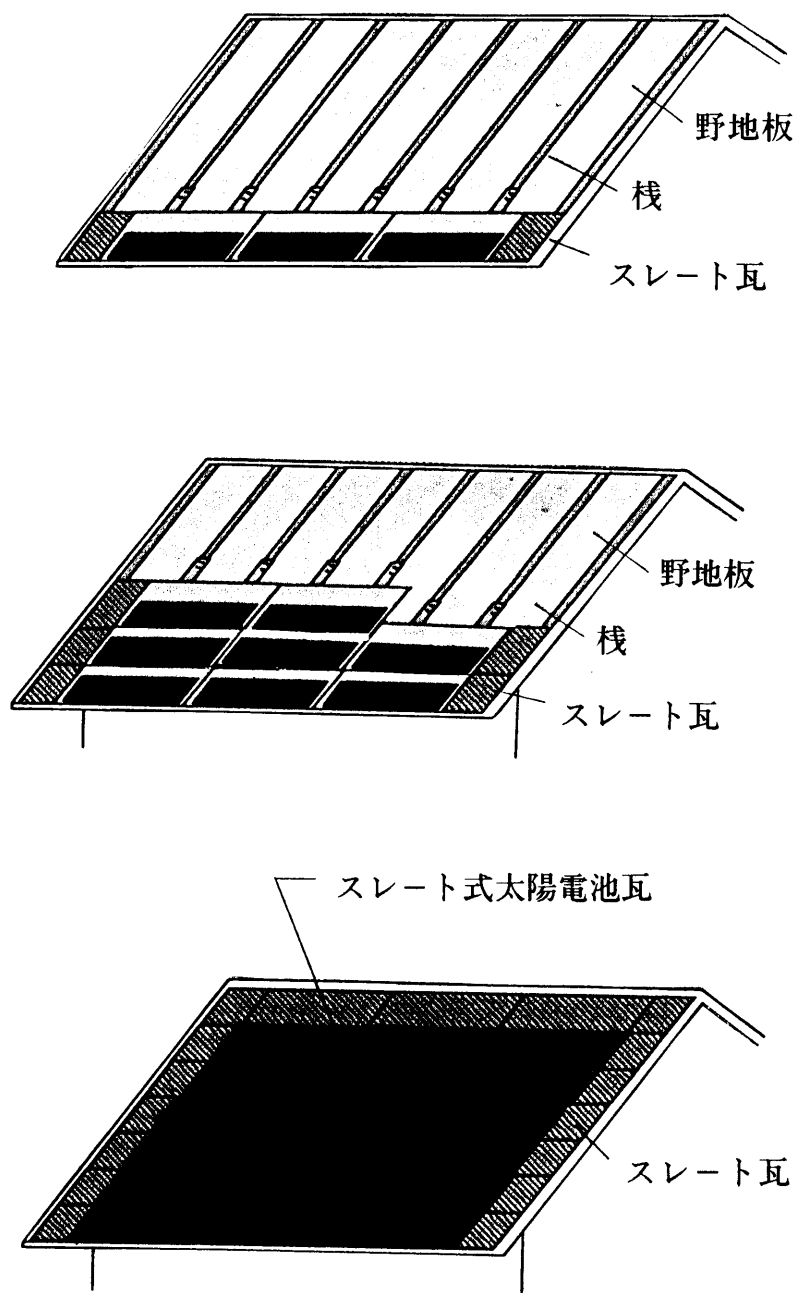


図 6. 3 2 スレート式太陽電池瓦の設置法 (ストレート葺き)

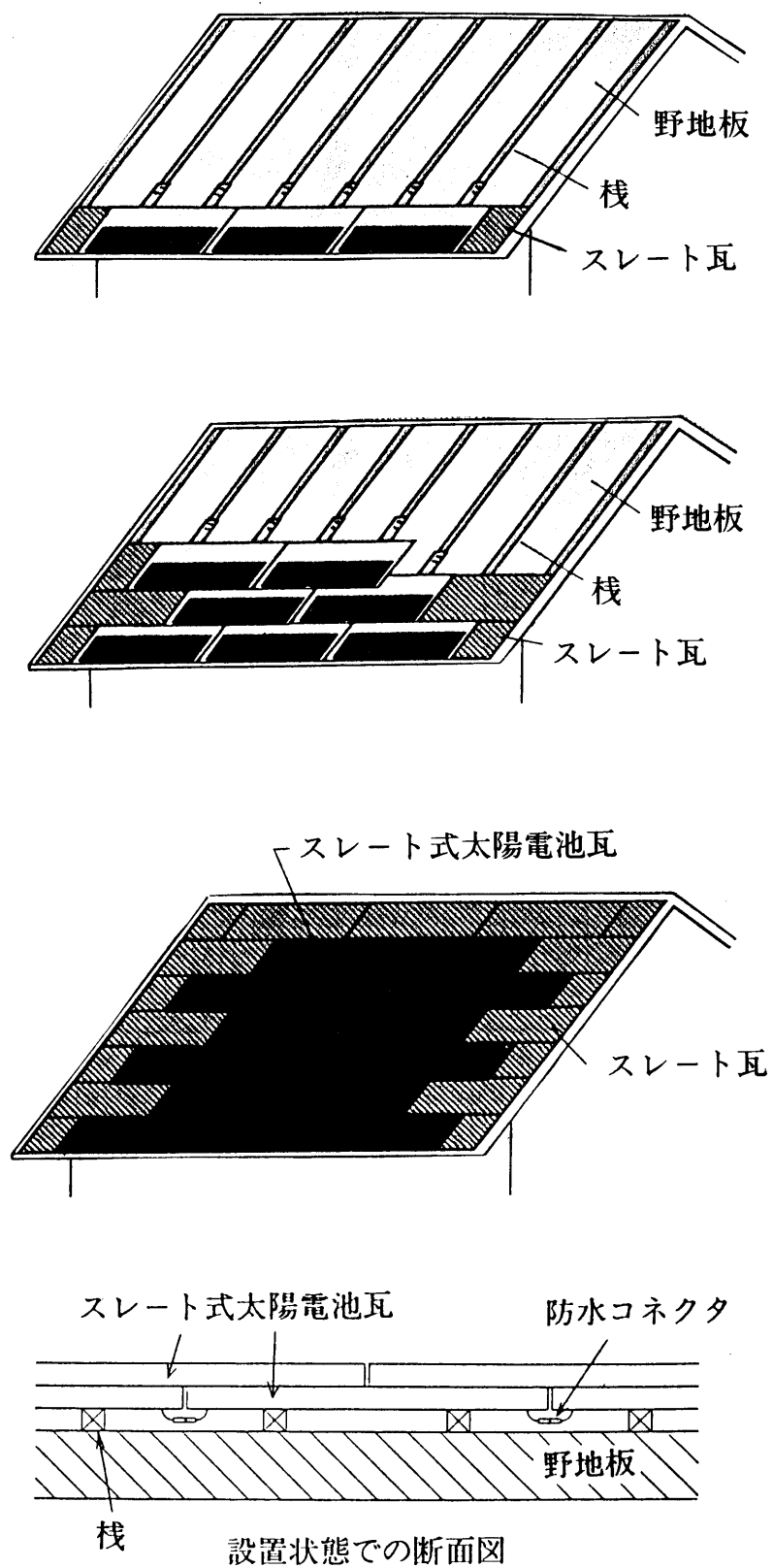


図 6. 3 3 スレート式太陽電池瓦の設置法（千鳥葺き）



図 6. 3 4 モデルハウスの外観

表 6. 6 モデルハウスの仕様

床 面 積	9. 9 m ²
屋 根 面 積	2 2. 3 m ²
屋 根 の 向 き	南北方向
屋 根 傾 斜	南：3 6. 5 6°
屋 根 構 造	二重屋根

表 6. 7 モデルハウスの出力特性

出 力	1 1 0 0 W
開 放 電 圧	1 2 0 V
短 絡 電 流	1 6. 6 A
曲 線 因 子	0. 5 5 3

屋外測定（10月）初期値，1 0 0 mW／c m²換算

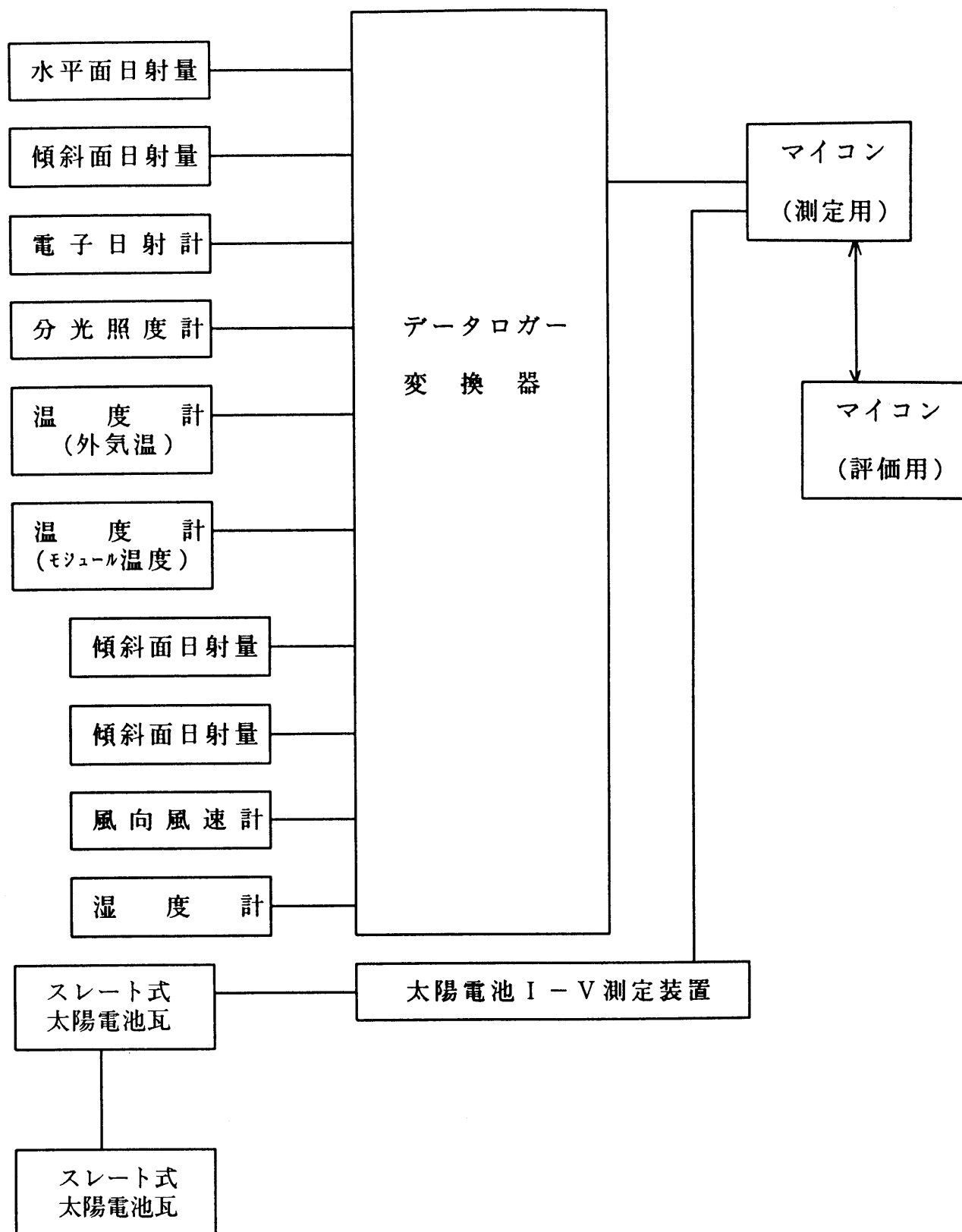


図 6. 3 5 太陽電池評価システムの構成概略図

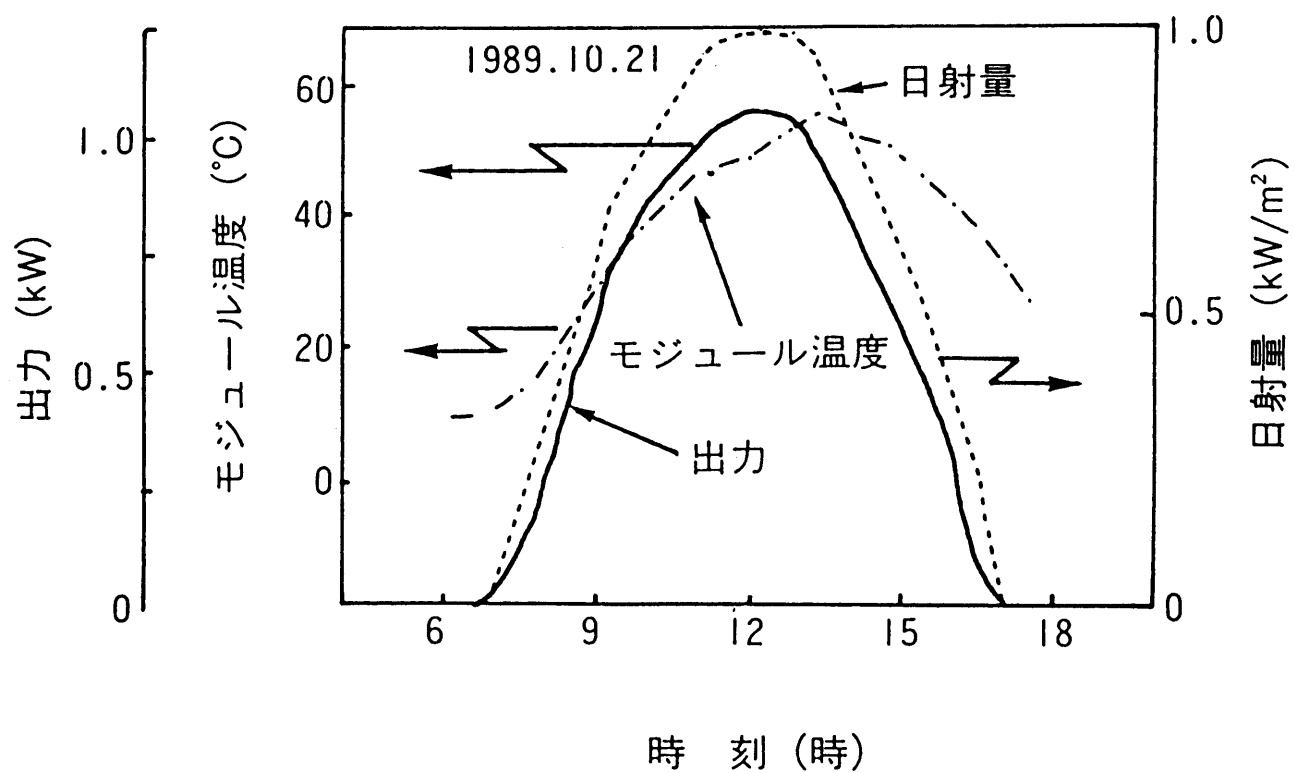


図 6. 3 6 太陽電池温度，出力および日射量の日変化

は同じで、風速の異なる日を選び、それぞれの日における出力およびモジュール温度の変化を比較した。図 6. 37 に日射量、外気温度および出力の日変化を、図 6. 38 に出力、モジュール温度および風速の日変化を示した。図 6. 37 に示した出力の変化は、ほぼ日射量の変化に対応しているが、図 6. 38 に示したモジュール温度の変化は日射量の変化にやや遅れており、午前 9 時から午後 1 時までは風の影響を受け、10 月 21 日の方が 10 月 22 日より低くなっている。

図 6. 39 に、月別の総発電量の変化を示す。モデルハウスに設置したスレート式太陽電池瓦 75 枚のうち 18 枚は北屋根に設置しており、それらの発電量は南屋根に設置した太陽電池瓦と比較し、約 50 % である。図より、一年間の総発電量は 765 kWh であった。

②出力経時変化解析（長期間）

モデルハウスにおけるスレート式太陽電池瓦の出力の経時変化を、図 6. 40 に示す。出力（ P_{max} ）が季節により変動する原因としては、季節による太陽光スペクトル成分の変化、a-Si 太陽電池の出力変化および夏季における外気温の上昇によるアニール効果が考えられる。これらを考慮すると設置以来、いわゆるステブラー・ロンスキー効果による約 10 % の光劣化以外に出力特性に大きな変化は見られない。また、スレート式太陽電池瓦の外観についても、ガラス製スレート瓦の割れや裏面保護フィルムの剥離などの異常は見られず、高い信頼性を有していることが分かった。⁴⁾

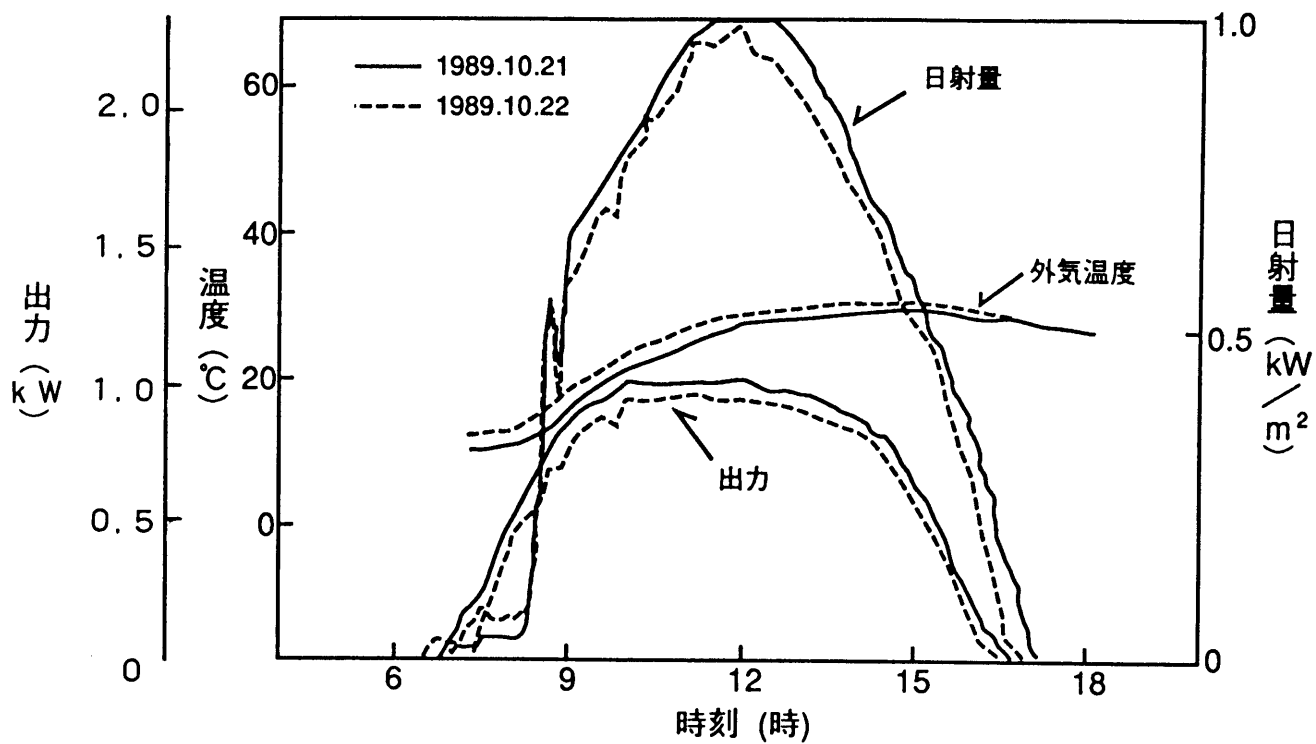


図 6. 3 7 日射量, 外気温および出力の日変化

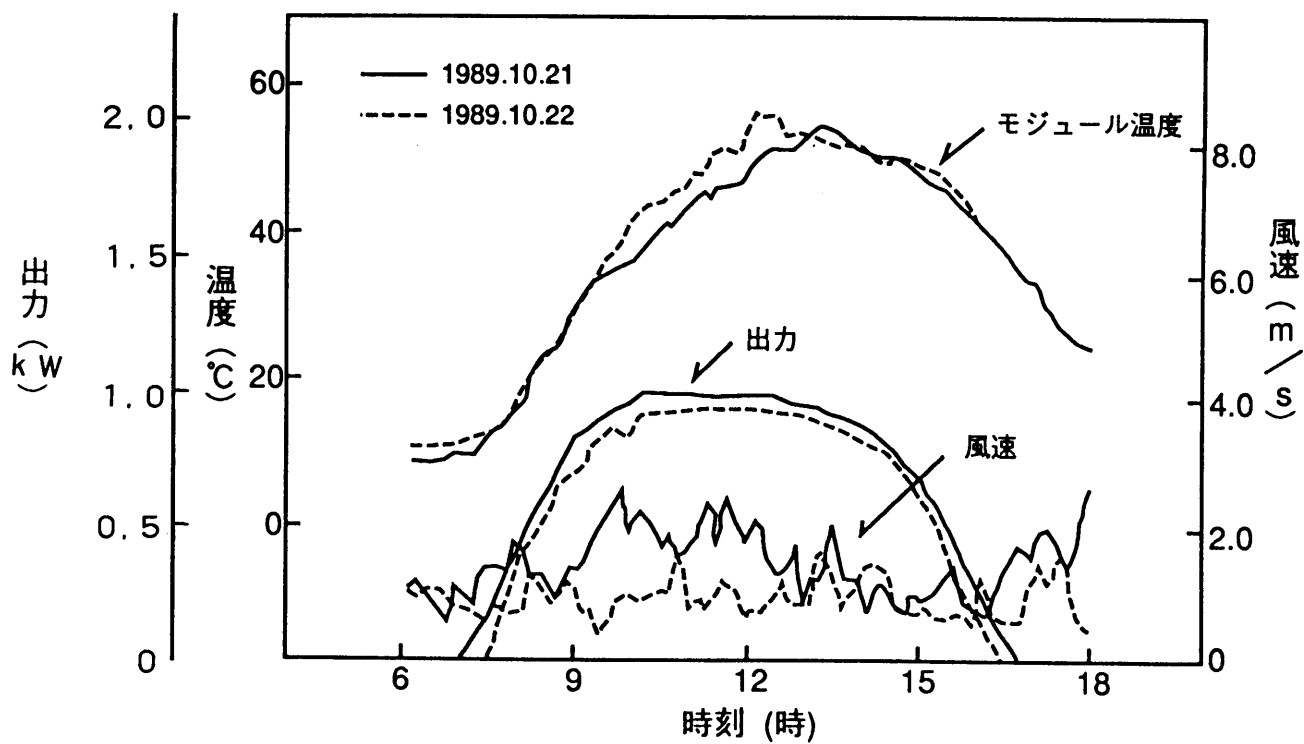


図 6. 3 8 出力, モジュール温度および風速の日変化

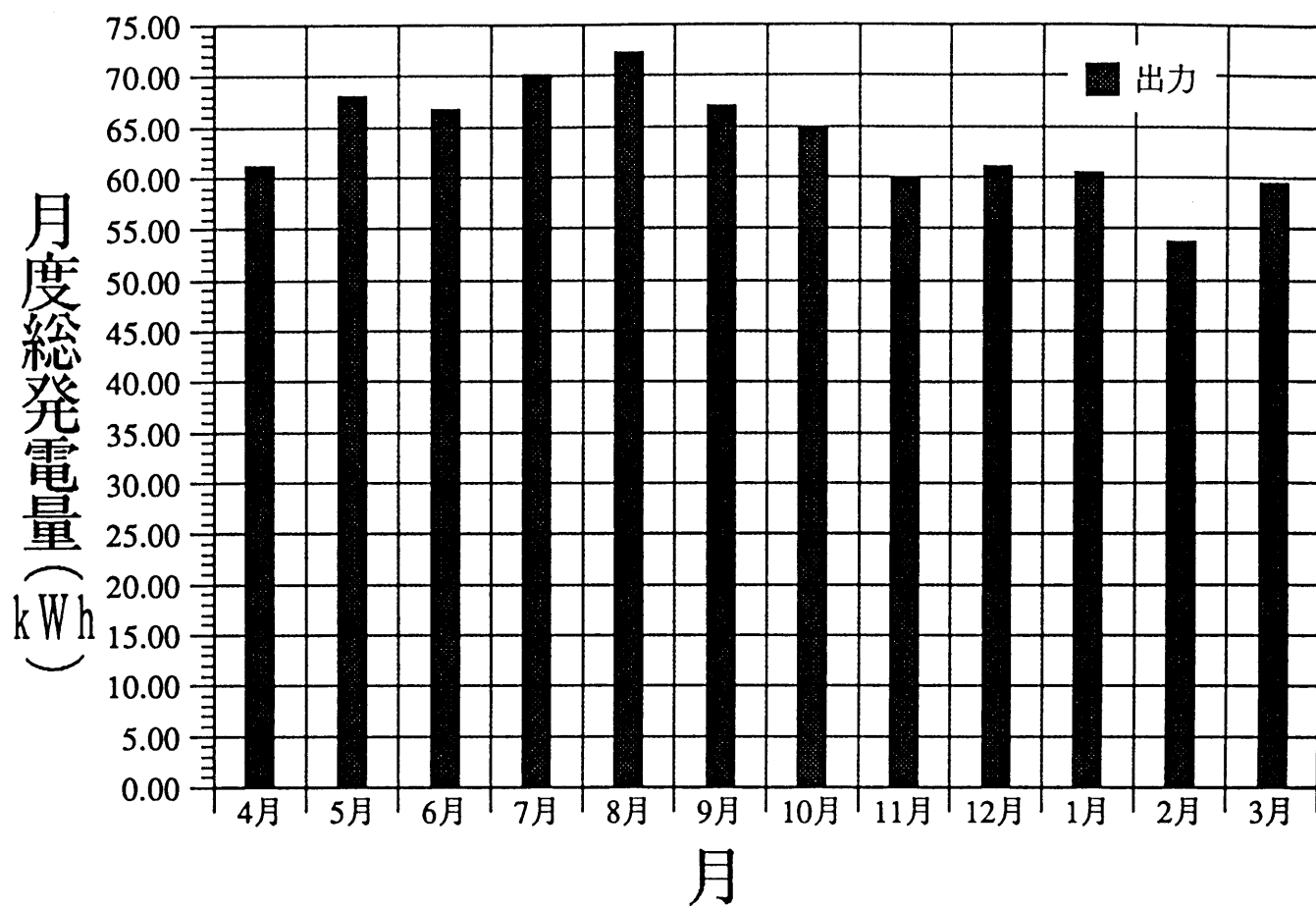


図6. 39 モデルハウスの月別総発電量（1989年4月～1990年3月）

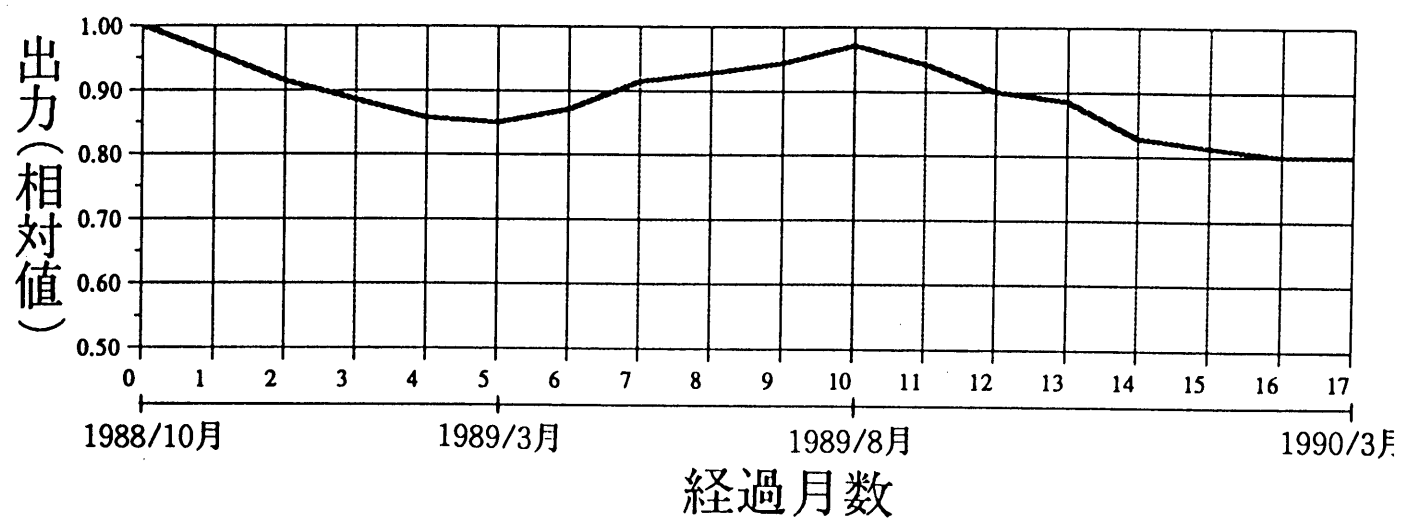


図 6. 4 0 モデルハウスの出力変化

(* : 日射量 0.8 kW/m^2 時の P_{max} で規格化した。)

6. 5 建材一体形 a - S i 太陽電池モジュールの応用

6. 5. 1 ソーラーエアコンシステム

建材一体形 a - S i 太陽電池の応用としてインバータエアコンを用いた空調システムの検討を行った。図 6. 41 にソーラエアコンシステム（太陽電池 500 W p, エアコン冷房能力 2240 k c a l / h）の構成を示す。インバータエアコンは、交流 100 V の商用電源を整流、平滑化して直流に順変換した後、インバータで交流に逆変換してモータの駆動を行っている。太陽電池の出力は、DC/DC コンバーターにより電圧が変換され、直流回路部に接続されている。このようにインバータエアコンは、交流の商用電源と直流の太陽電池が併用でき、しかも、負荷パターンが太陽電池の発電パターンと一致しているので、太陽電池の負荷としては最適である。日中は、太陽電池の出力を主に使用し、不足分を商用電源から補うことにより省エネルギーが可能である。^{5), 6)} 図 6. 42 にソーラエアコンの外観を示す。また、図 6. 43 にソーラーエアコンシステムの運転データを示す。図 6. 43 より次のことが分かる。

- ①夏季の晴天時では、エアコン消費電力の約 60 % をまかなうことができる。
- ②曇天日でも約 60 % の消費電力ををまかなうことができる。
- ③夏季の晴天時におけるエアコンの消費電力パターンと太陽電池の出力パターンはよく一致しており、ピーク電力の抑制にも有効である。

将来的にはインバータを用いて、商用電源と太陽電池の出力を併用して、家庭内の全負荷の消費電力をまかなう図 6. 44 に示すような個人住宅用システムへの応用も提案できる。

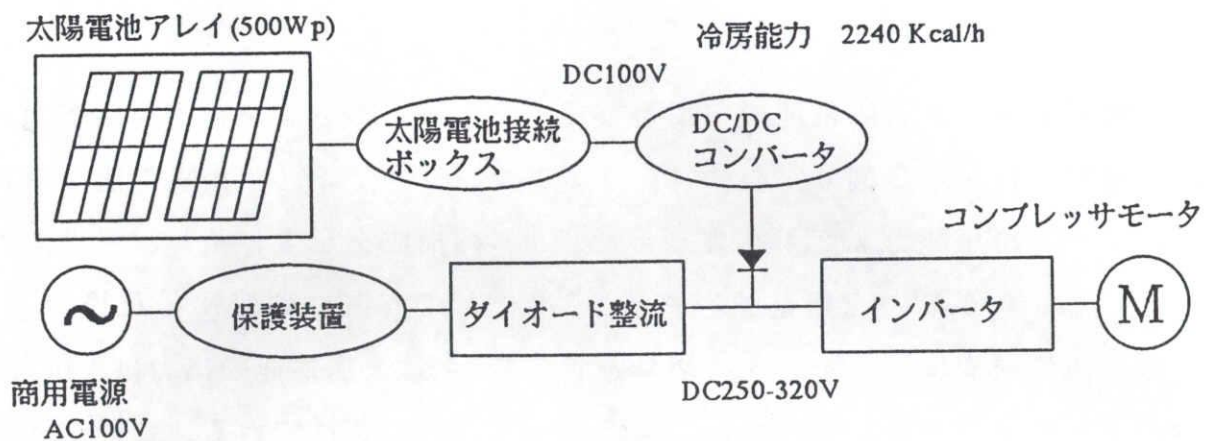
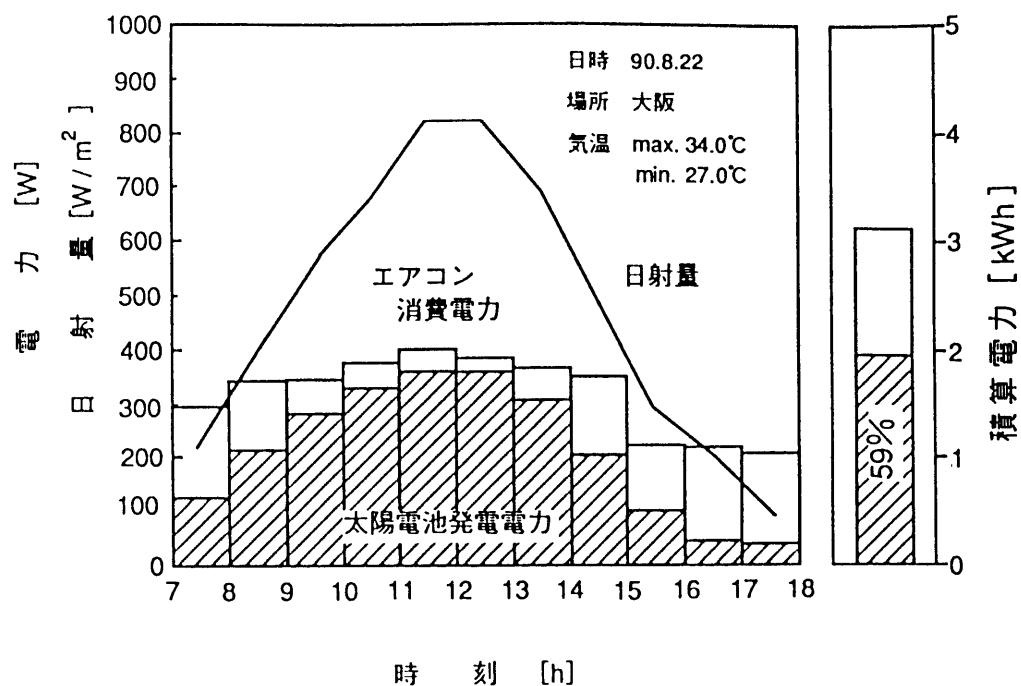


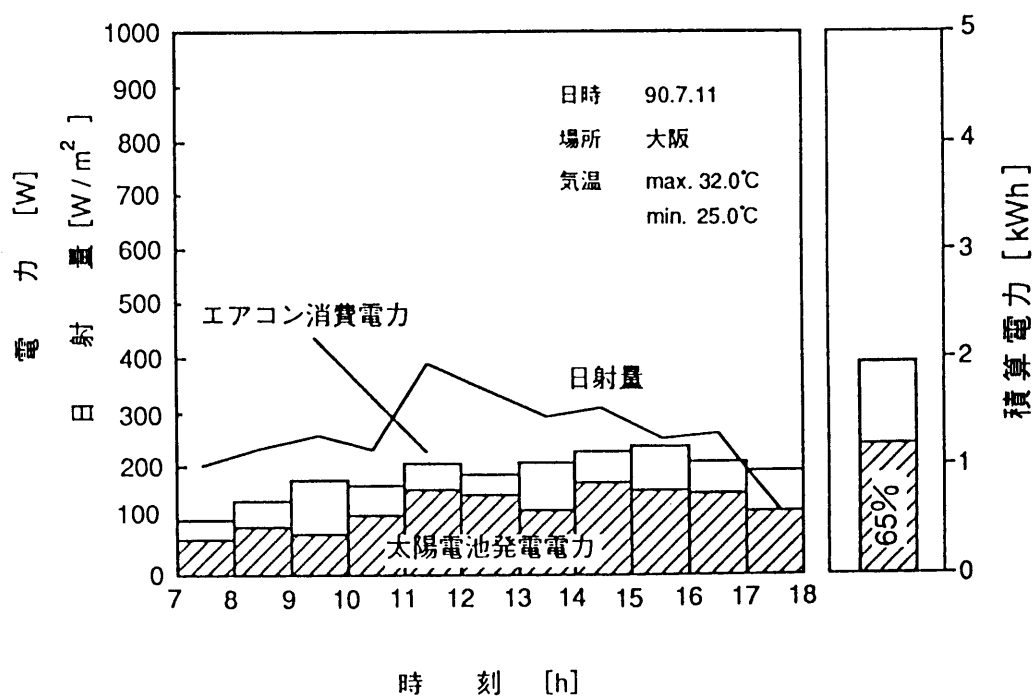
図 6. 4 1 ソーラーエアコンシステムの構成



図 6. 4 2 ソーラーエアコンシステムの外観



晴天日における運転結果



曇天日における運転結果

図 6. 4 3 ソーラーエアコンシステムの運転データ

個人住宅用システムへの応用

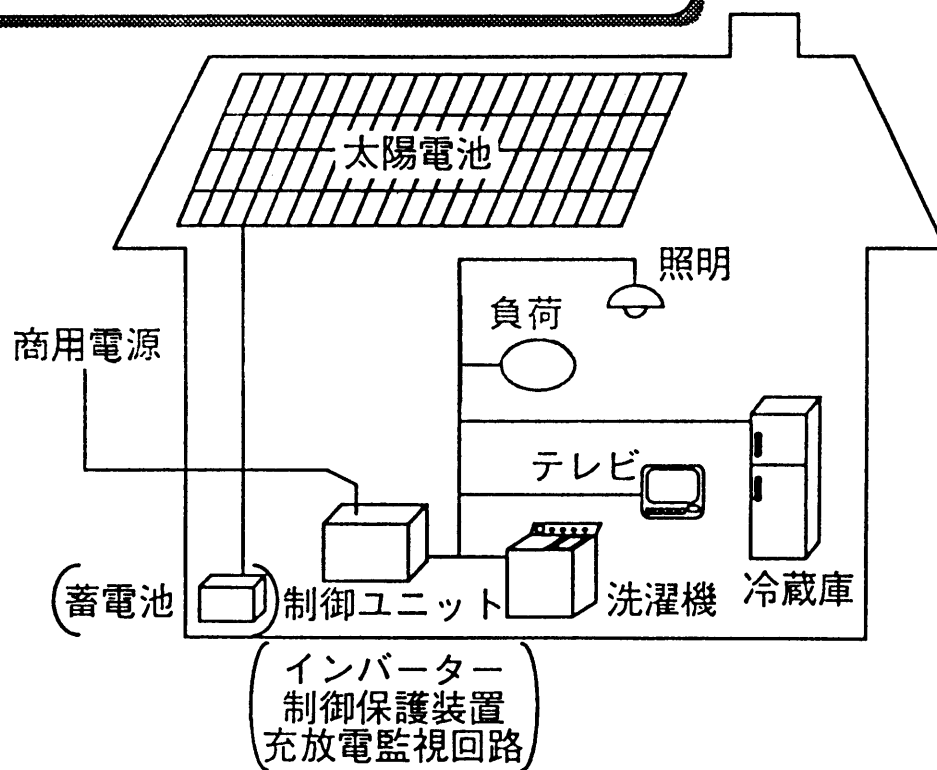


図 6. 4 4 個人住宅用システムの概要

6. 5 結 言

a-Si 太陽電池を用いた太陽光発電システムの低コスト化および新しい応用展開を図るため、屋根建材や窓として使用可能な建材一体型 a-Si 太陽電池モジュールを開発し、以下の結論を得た。

(日射量シミュレーション)

- 1) H A S P 気象データを用いて、屋根に設置した場合を想定し、日射量の試算を行った結果、北、西、東、南の順序で日射量が大きくなること、年間平均日射量は南屋根の場合は、 $3.3 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{日}$ であり、北屋根は南屋根の約 60% であることが分かった。
- 2) 窓に設置した場合を想定し、垂直面の日射量の試算を行った結果、南側垂直面の日射量は傾斜面に設置した場合の約 2/3 であることが分かった。

(大面積光透過型 a-Si 太陽電池モジュール)

- 1) 強化ガラス/EVAフィルム/光透過型a-Si太陽電池/EVAフィルム/裏面保護材(透明フィルム)の構造を検討し、屋外の使用に耐え得る高い信頼性を有することを確認した。

(スレート式太陽電池瓦)

- 1) 屋根設置用のモジュールとして、強化ガラス/EVAフィルム/太陽電池/EVAフィルム/裏面保護フィルムの構造を検討し、本構造が建材および太陽電池の両方の観点から高い信頼性を有していることを確認した。
- 2) スレート式太陽電池瓦を設置したモデルハウスにより、屋外での信頼性評価を行った結果、出力特性に大きな変化は見られず、また、外観についても割れ、剥離などの異常は発生せず、高い信頼性が確認できた。
- 3) スレート式太陽電池瓦の応用として、ソーラーエアコンシステムを開発し、エアコン消費電力の 60% をまかなえること、ピーク電力の抑制に有効であることを確認した。

参考文献

- 1) Y. Kishi, H. Inoue, H. Tanaka, M. Morizane, H. Shibuya, M. Ohnishi, and T. Yazaki
:3rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference
(1987).
- 2) H. Inoue, S. Kohzuma, H. Tanaka, Y. Kishi, and Y. Kuwano
:ISES Solar World Congress, Kobe (1989).
- 3) T. Matsuoka, H. Yagi, M. waki, K. Honma, H. Hashimoto, S. Nakano, and Y. Kuwano
:3rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference
(1987).
- 4) T. Matsuoka, H. Yagi, M. waki, K. Honma, S. Nakano, Y. Kishi, and Y. Kuwano
:ISES Solar World Congress, Kobe (1989).
- 5) 八木啓吏, 岸靖雄 : 住生活 90年 7月号
- 6) K. Tanaka, T. Toyoda, M. Waki, E. Sakoguti, M. Yamada, A. Takeoka, Y. Kishi,
T. Sakai, and Y. Kuwano
:Technical Digest of the International PVSEC-5, Kyoto, Japan (1990)

第7章 総括

アモルファス(a-Si)太陽電池は製造エネルギーおよび使用原料が少なく、将来大幅な低コスト化の可能性を秘めているところから、その実用化が最近のエネルギー問題、地球環境問題の解決の手段として有力視されている。しかし、その実現のためにはa-Si太陽電池の高効率化、低コスト化、用途に応じた最適モジュールの開発が強く求められている。

本研究は、これらの課題を解決するためにa-Si太陽電池の変換効率の向上、集積型a-Si太陽電池の革新的形成法の開発、新型太陽電池モジュールおよびその応用の開発を目的とした。

a-Si太陽電池の高効率化のため、理論解析を行いi層およびp層の高品質化を検討した。i層の高品質化のために分離形成UHV反応装置を開発し、さらにp層の高品質化のために新ドーパント材としてトリメチルボロンを用い、従来のジボランに比べ高品質化を可能にした。

集積型a-Si太陽電池の革新的な形成法としてハイパワーなレーザを用いて、溶着、切断分離を行うLWS法(Laser Welding and Scribing Method)を開発した。

本方法は、Qスイッチ付きYAGレーザを用いて隣接するa-Si太陽電池セルを直列接続する方法で、従来法より大幅に工業的に有利で集積型a-Si太陽電池の高効率化、低コスト化を可能とした。

また、a-Si太陽電池の薄膜であるという特長を活かした従来にない、全く新しいタイプの太陽電池として新フィルムタイプa-Si太陽電池、新光透過型a-Si太陽電池および建材一体型太陽電池の開発を行い、これまでにない新しい太陽電池の応用分野を切り開いた。

以下に、本研究における主な結論を述べる。

第2章では、a-Si太陽電池の高効率化を図るために理論解析を基にi層及びp層の高品質化を行い、以下の結論を得た。

(1) スーパーチャンバ(分離形成UHV反応装置)により、従来よりも膜中の不純物濃度および欠陥密度の少ない高品質なa-Si膜を形成できることを示した。

(2) $B(CH_3)_3$ を初めてp型ドーパントとして用い、従来の B_2H_6 を用いた場合に比べ、高品質なp型a-Si膜の形成を可能にした。

(3) 上記の技術を用い、小面積(1 cm^2)で11.7%また10cm角集積型サブモジュールで実効変換効率11.1%(世界最高)を得た。

第3章では、集積型a-Si太陽電池の新しい形成法としてLWS法の開発を行い以下の結論を得た。

(1) a-Si太陽電池の多層薄膜のパターニングに厚膜材料である導電層と絶縁層を付加することで、精密なレーザパワーの制御なしにレーザ加工できるLWS法を開発した。

(2) LWS法はa-Si層と金属電極を連続して形成するので、a-Si層と金属電極との界面の汚染や異物の混入及びa-Si層表面の酸化等による太陽電池特性の低下がなく、また金属電極の分割とセル間の電氣的接続を連続したレーザ加工プロセスで行えるので太陽電池作製工程の簡略化を可能とした。

(3) LWS法によるレーザ溶着に関して行った三次元温度分布解析シミュレーションの計算結果は実験結果とよく一致し、 $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上のパワー密度のレーザビーム照射により隣接するセルの金属電極と透明電極とを電氣的に接続できることを確認した。

(4) レーザ溶着による電氣的接続は照射したレーザビームスポットの周囲領域で行われているので、過剰なパワー密度のレーザビーム照射により透明電極までダメージが及ぶ場合でもレーザビーム照射の周囲領域で十分な接続が得られるので、このダメージによる太陽電池の出力特性の低下はなく、実質的にレーザパワー密度の精密な制御はほとんど不要であることを確認した。

(5) LWS法による金属電極のレーザ切断に関して行った三次元温度分布解析シミュレーションの計算結果は実験結果とよく一致し、 $5.0 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ の範囲のパワー密度のレーザビーム照射により透明電極にダメージを与えずセル分割ができることを確認した。このレーザ切断可能なレーザパワー密度の最大値 $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ は最小値 $5.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ の9倍であり、従来報告されているLWS法以外の金属電極レーザ切断可能パワー密度条件 $6.5 \times 10^6 \sim 9.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ の場合が⁴⁾1.4倍であるのと比較し加工可能な条件範囲が非常に広く、従ってLWS法によるレーザ切断には精密なレーザパワー制御が不要であることを確認した。

(6) LWS法により 10 cm^2 角集積型a-Si太陽電池を作製し、精密なレーザパワー制御なしに変換効率10.6%を得た。また、各種信頼性試験を行い高信頼性であることを確認した。

第4章では、a-Si太陽電池の応用分野を拡大するため透明ポリイミドフィルムを基板とした新フィルムタイプa-Si太陽電池を開発し以下の結論を得た。

(1) 透明ポリイミド基板は 200°C 以上に昇温すると熱分解により有機ガスを放出するため、 200°C 以下の基板温度でa-Si膜形成を行わなければならないことを明らかにした。

(2) 比較的低温で透明ポリイミド基板上へa-Si膜を形成する場合には、 SiH_4 ガスの H_2 希釈が高品質の膜を得るために有効な手段であることが判り、 H_2 により SiH_4 を5倍以上希釈することにより 180°C の基板温度で $\sigma_{\text{ph}} = 2 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$, $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{d}} \sim 10^6$ の値が得られた。

(3) 透明ポリイミド基板を真空中で10時間以上プリベークすることにより、透明ポリイミド基板からの H_2O の放出が低減されa-Si膜中のO濃度が減少し、a-Si太陽電池特性が向上することが明らかになった。

(4) PI系絶縁層, PI系導電層を用いたLWS法を開発し、透明ポリイミド基板にダメージを与えることなく集積型構造のパターニングが可能となった。

(5) 集積型サブモジュール($110 \times 115 \text{ mm}$)を試作し、最大出力550mW, 単位重量当り出力として世界最高の 275 mW/g と高い出力を得ることができた。

(6) 新フィルムタイプa-Si太陽電池をPETフィルムで封止した薄く(厚さ0.12mm)、フレキシビリティに優れた(半径5mmの曲率まで曲げることが可能)新フィルムタイプa-Si太陽電池モジュールを開発し、高い信頼性を有していることを確認した。

(7) 新フィルムタイプa-Si太陽電池の応用としてソーラープレーンを開発し、世界で初めてソーラープレーンによる北米大陸横断飛行に成功した。

第5章では、従来の太陽電池では不可能であった窓材としての応用を図るため、発電と同時に採光ができる新光透過a-Si太陽電池を開発し以下の結論を得た。

(1) 新光透過型a-Si太陽電池は、従来構造光透過型a-Si太陽電池のように透過光が着色されることなく、入射光とほぼ同じスペクトルの光が得られることを示した。

(2) 透光部であるホール形状の最適化の検討を行い、均一な透過光を得るためには六角形のホールパターンが最適であることを明らかにした。

(3) レーザによる多層薄膜へのホール加工の三次元熱解析を行い、YAGレーザの第二高調波(波長0.53 μ m)を用い、パワー密度を正確にコントロールすることにより多層薄膜の選択加工が可能であることを確認した。

(4) Sun BIC法により発電領域分布の評価を行い、ホール形成によるホール周辺部へのダメージがなく、またホールエッジにおけるTCOと裏面電極とのショートが発生もないことを確認した。

(5) 集積型新光透過型a-Si太陽電池を試作し、ホール形成による出力の低下はホールの面積分だけであり、余分な電力損失がないことを明らかにした。

(6) 新光透過型a-Si太陽電池は、従来構造光透過型a-Si太陽電池と比べて、高い出力と高い透過率が得られることを確認した。

(7) 新光透過型a-Si太陽電池と自動車用サンルーフガラスを一体化した太陽電池式自動車用サンルーフモジュールを開発した。更に、本サンルーフを応用した換気システムを開発し、自動車内の温度上昇の抑制に有効であることを立証した。

した換気システムを開発し、自動車内の温度上昇の抑制に有効であることを立証した。

第6章では、太陽電池の応用分野として本命視される住宅分野への応用を図るため、屋根建材や窓として使用可能な建材一体型a-Si太陽電池の開発を行い、以下の結論を得た。

(日射量シミュレーション)

1) H A S P 気象データを用いて、屋根に設置した場合を想定し、日射量の試算を行った結果、北、西、東、南の順序で日射量が大きくなること、年間平均日射量は南屋屋根の場合は、 $3.3\text{kWh/m}^2\cdot\text{H}$ であり、北屋根は南屋根の約60%であることがわかった。

2) 窓に設置した場合を想定し日射量の試算を行った結果、南側垂直面の日射量は傾斜面に設置した場合の約2/3であることがわかった。

(大面積光透過型 a - S i 太陽電池モジュール)

1) 強化ガラス/EVAフィルム/光透過型a-Si太陽電池/EVAフィルム/裏面保護材(透明フィルム)の構造を検討し、屋外の使用に耐え得る高い信頼性を有することを確認した。

(スレート式太陽電池瓦)

1) 屋根設置用のモジュールとして、強化ガラス/EVAフィルム/太陽電池/EVAフィルム/裏面保護フィルムの構造を検討し、本構造が建材および太陽電池の両方の観点から高い信頼性を有していることを確認した。

2) スレート式太陽電池瓦を設置したモデルハウスにより屋外での信頼性評価を行った結果、出力特性に大きな変化は見られず、また、外観についても割れ、剥離などの異常は発生せず、高い信頼性が確認できた。

3) スレート式太陽電池瓦の応用としてソーラーエアコンシステムを開発し、エアコン消費電力の60%をまかなえること、ピーク電力の抑制に有効であることを確認した。

最後に、以上の研究成果がa-Si太陽電池の実用化に大きく寄与できることを強く希望する。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、終始暖かい御指導、御鞭撻を賜りました名古屋工業大学 電気情報工学科 梅野 正義教授に深甚なる感謝の意を表します。

また、名古屋工業大学 電気情報工学科 佐治 學教授、中嶋 堅志郎教授には、本論文の内容に関して有益な御討論と御助言をいただきました。深く感謝いたします。

本研究の一部は、工業技術院サンシャイン計画の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構（N E D O）から委託され行れたもので、関係各位に感謝いたします。

また、本研究は三洋電機株式会社で実施されたものであり、本研究の遂行に当り、多くの御指導、御支援を頂きました三洋電機株式会社 研究開発本部 大原省爾本部長、機能材料研究所 桑野 幸徳所長、中野 昭一部長、津田 信哉室長、制御システム研究所 酒井 貴史所長、大隅 正人部長、鈴木 龍司部長、河田 宏室長、裕口 悦男室長に心から謝意を表すとともに、本研究の遂行に適切な御助言と御協力を頂きました機能材料研究所 大西 三千年課長、武岡 明夫課長、西脇 秀則課長、深津 猛夫主管研究員に深く感謝いたします。

また、本研究の遂行に対して御協力、御助言をいただきました三洋電機株式会社 機能材料開発センター 井上 浩氏、邑田 健治氏、八木 啓吏氏、森実昌史氏、大川 節雄氏、岡田 耕一氏、蓮沼 正彦氏、福田 雄二氏、酒井総一氏、奥田 信宏氏、田中 俊哉氏、田中 博之氏、上妻 信一氏、堂城 浩嗣氏、橋本 治寿氏、松見 伸氏はじめ機能材料開発センターの諸氏ならびに本部室 松岡 継文氏に厚く感謝します。さらに、本研究の遂行に対して多大なる御協力をいただきました三洋電機制御システム研究所 木山 精一氏はじめ精密技術研究室の諸氏、機能材料研究所 電子材料研究部 薄膜材料研究室 中村昇氏、田中 誠氏、脇坂 健一郎氏、菱川 善博氏、白玖 久雄氏、高浜 豪氏、樽井 久樹氏、松山 隆夫氏の各氏に心より感謝の意を表すとともに、東 由美子女史、吉田 晴美女史はじめ機能材料開発センター 開発企画課の諸氏に厚く感謝いたします。