I. 太陽光発電の可能性—2—

太陽電池技術開発の現状および将来展望

キーワード

太陽電池, 薄膜太陽電池, 高効率太陽電池, 太陽光発電, エネルギー変換効率

小長井 誠

東京工業大学

1. はじめに

もともと Si 太陽電池がアメリカ・ベル研究所で提案され、試作されたのは 1954 年のことである。その年に J. Appl. Phys. 誌に掲載された論文ではエネルギー変換効率 6% と記されている⁽¹⁾。1960 年代, Si 太陽電池の応用は、宇宙空間での発電用に限られていた。また、我が国でも、1955 年ころから一部の大学の研究室で Ge 太陽電池の研究が行われていた。一方、地上での電力用途として我が国で太陽電池の開発が本格的に開始されたのは、1974 年ころの石油危機を契機にしてからである。1980 年代になると、遠隔地用電源として、あるいは民生機器用電源として太陽電池が広く応用されるようになった。特にこの時代は、民生機器用としてアモルファス太陽電池が広く実用化され、一般の人の目にとどくところ太陽電池が進出した意義は高く評価される。

我が国の太陽電池開発は、石油資源の枯渇を補うための新エネルギー源としてスタートしたが、現在では地球環境問題を解決する手段としての期待が極めて高くなっている。例えば、2 年前に地球サミットで締結された地球温暖化防止条約では、2000 年の二酸化炭素の排出量を 1990 年の水準に抑制することが約束されており、二酸化炭素排出量抑制の手段として太陽光発電に寄せる期待が高まっている。通産省資源エネルギー庁は、長期エネルギー需給見通しで、太陽光発電を 1,000 倍に増やす省エネ対策を立てている。ひとくちに 1,000 倍といっても、そう簡単に生産量は増えない。太陽電池産業を現在の 1,000 倍に育てるには、太陽光発電システムを導入するための思いきった普及促進策が望まれる。

こうしたなかで、1994 年度、住宅用太陽光発電システムモニタ事業がスタートした。これは、システムの設置者に国が設置費用の 1/2 に相当する金額を補助するというものである (1 kW 当たり 90 万円を上限とし、5 kW まで、1994 年度は 700 件まで)。このようにして、太陽電池が実

際の住宅に設置されるようになると、思いがけない開発課題も生まれてきた。これまでは高効率、低コスト化などが大きな開発課題であったが、いわゆるハウスメーカーの関心が高まるにつれ、モジュールのデザインという新たな開発テーマが浮かび上がってきた。

ニューサンシャイン計画という国家プロジェクトのほかにも、2000 年までに太陽電池を 50 MW 導入するという電力会社のプロジェクトなども進められており、まさにこれから加速度的な普及が始められる段階にきている。

ここでは、太陽電池技術に焦点をあて、高効率化、低コスト化、大面積化技術などの現状を紹介するとともに、西暦 2000 年に向けた開発の方向などを展望する。

2. 太陽電池産業の現状と開発目標

現在、開発が進められている太陽電池は、表 1 に示すようにバルク形太陽電池と薄膜太陽電池に分類される。バルク形太陽電池は、更に単結晶 Si 太陽電池、多結晶 Si 太陽電池、III-V 族化合物半導体太陽電池に分類される。一方、薄膜太陽電池の代表がアモルファス Si 太陽電池であり、その他、カルコパイライト薄膜太陽電池、CdTe 薄膜太陽電池が開発途上にある。これらの太陽電池の開発の現状、ならびに特徴をまとめて表 1 に示す。

1993 年における各種太陽電池の全世界の総生産量は 60 MW となっている。現状では、電力用途に用いられているのは、単結晶 Si 太陽電池とキャスト Si (多結晶 Si) 太陽電池である。一方、アモルファス太陽電池は、生産量は多いが、このほとんどが民生機器用電源として用いられてきた。しかし、最近になって、ビルの壁用にアモルファス太陽電池が用いられる例も出てきた。また、これまで民生用途は、ほぼアモルファス太陽電池が独占してきたが、この 1~2 年の間に CdTe 薄膜太陽電池が民生用マーケットに食い込んできている。

太陽電池の販売価格は購入量にも依存するので、ひとくちでは言い表せないが、ニューサンシャイン計画で国がシステム研究のために購入するときの価格が、1 W 当たり換算して 600 円程度となっている。これを kWh 当たりの発電コストに換算すると、まだたいへん高いものになってしまう。そこで、変換効率何%の太陽電池を、1 W 当たりいくらで製造すれば、現在の商用電源と競合できるか

The Present Condition and the Future of Photovoltaic Generating Systems.

I. Challenge for Photovoltaic Generation —2— Present Status and Future Prospects of Solar Cell Technologies.

By Makoto Konagai (Tokyo Institute of Technology).

が議論され、太陽電池の開発目標が定められた。

表 2 は、太陽電池を年間 100 MW 生産して、建材一体化型（後述）として用いた場合の発電コストを解析したものである⁽²⁾。解析には周辺機器などのコストもすべて含まれている。もし同表に示されているように、西暦 2000 年までにキャスト Si 太陽電池のコストが 210 円/W まで低減できれば、発電コストは 30 円/kWh となる。一方、2000 年をめどにモジュール効率 10% の薄膜太陽電池を 170 円/W で製造できるようになったと仮定すると、発電コストは 25 円/kWh となり、現在の電力料金と同程度となる。更に 2000 年初頭に、薄膜太陽電池モジュールの変換効率が 12% まで向上し、更に太陽電池コストが 150 円/W まで低下すれば、発電コストが 20 円/kWh となる。

以上の解析をもとに、キャスト多結晶 Si 太陽電池でモジュール効率 15%、太陽電池コスト 210 円/W、薄膜太陽電池でモジュール効率 10%、太陽電池コスト 170 円/W（いずれも 100 MW/年の生産時）を達成するのが当面の

開発目標となっている。

3. 太陽電池の変換効率

3.1 エネルギー変換効率

太陽電池の基本構造は、半導体 pn 接合である。太陽電池に太陽光を照射したときの電流-電圧特性を図 1 に示す。

変換効率 η は、図中の短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、曲線因子 FF を用いて、以下の式で表される。

$$\eta = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \div (\text{入射エネルギー}) \times 100(\%)$$

ここで、短絡電流は光照射により発生する光電流であり、10 cm 角の Si 太陽電池で約 4 A である。太陽電池から取り出せる出力は動作点で異なる。最大出力が取り出せるように最適負荷を接続したときの動作電流、動作電圧を、それぞれ I_{op} 、 V_{op} とすると、曲線因子 FF は、

$$FF = (I_{op} \times V_{op}) \div (I_{sc} \times V_{oc})$$

で定義される。太陽電池の高効率化を図るには、いうまでもなく短絡電流、開放電圧、曲線因子の各パラメータを向上させる必要がある。

3.2 短絡電流

短絡電流の限界値は、太陽光スペクトルから容易に計算することができる。図 2 は、禁制帯幅よりも高エネルギーの光子がすべて吸収され、光電流として寄与すると考えた場合の短絡電流密度を表している。計算では、AM 1.5 の太陽光スペクトルを用いている。一般的には、これを越す短絡電流は得られない。

図 1 光照射下の太陽電池の電流-電圧特性

図 2 各種太陽電池の短絡電流の理論限界と実測値

表 1 太陽電池の種類と開発の現状、特徴

	材 料	開発の現状、特徴
バ ル ク	単結晶 Si、多結晶 Si（キャスト）	電力用として、年間 45 MW の生産量。 20 年間の使用可能。市販レベルでモジュール効率：13～14% オフグレイド Si 使用で低コスト化を実現。 将来的には低コスト原料の開発が必要不可欠。
	III-V 族化合物 GaAs InP	一部、集光用、宇宙用として実用化。 放射線損傷が少ない。研究段階。 30～40% の超高効率に期待。
	アモルファス Si	民生機器や車のサンルーフ用電源として実用化。一部、電力用として実用化。量産化が容易。シースルーなどのデザイン性に富む。信頼性が課題。年間生産量 12.6 MW。
薄 膜	CdTe	民生機器用として年間 1 MW の生産量。 Cd の安全性の実証が課題。低コストが特徴。
	カルコパイライト (CuInSe ₂ など)	アモルファス以上の高効率、高信頼性が特徴。 研究段階。大面積での効率向上が鍵。 もうすぐ製品出荷の段階
	多結晶 Si 薄膜 厚さ 10 μm 前後	豊富な資源を利用可能。急速な関心の高まり。 薄膜での高効率化技術開発が課題。 研究段階。一部製品として出荷。

備考：生産量は 1993 年の統計

表 2 発電コストの試算と開発目標

	2000 年の目標	
	多結晶 Si （キャスト）	薄 膜
太陽電池コスト（円/W）	210	170
周辺コスト（円/W）	110	90
全システムコスト（円/W）	320	260
前提条件		
モジュール効率（%）	15	10
アレイ効率（%）	13	8
発電コスト（円/kWh）	30	25

図2には、各材料系での短絡電流の実測値（論文として掲載されたものの中でのトップデータ）も示されている。

よくいわれるように、Si 太陽電池に対しては、ほとんど理論限界に近い短絡電流がすでに得られている。一般の Si 太陽電池の厚さは約 400 μm である。現在、数十 μm の薄膜にした場合の光電流の増加が重要な技術課題となっている。Si は間接遷移型の吸収を示すため、100 μm 以上の膜厚が必要であるといわれていた。しかし、吸収係数が小さくても光路長を長くする工夫をすれば、大きな短絡電流が得られる。Si の表面を凹凸化すれば、厚さが 10 μm でも 38 mA/cm^2 という理論限界に近い短絡電流が期待できる。

理論限界を超える新しいアイデアも提案されている。禁制帯中に欠陥が作る準位を利用して、マルチフォトンプロセスで電子-正孔対を生成可能であれば、短絡電流の限界は図2に示したものより向上するが、現状では実際にこのような励起過程が存在する証拠は示されていない。このほか、紫外光を用いた衝突励起を用いれば、1 フォトンから電子-正孔対を2組生成可能であることは知られているが^[2]、この現象は紫外線領域であることから、太陽電池応用にはむりがある。III-V 族化合物半導体では、量子井戸を用いれば吸収係数が増大するとの報告もあり、今後の展開に期待が寄せられる^[4]。

3.3 開放電圧

開放電圧は、暗電流と光電流のバランスで決まるので、暗電流が流れる経路を制御すれば開放電圧は向上する。一般的には、禁制帯幅が大きいほど開放電圧は高くなる。単結晶を用いた太陽電池では、図3に示すように禁制帯幅から 0.4 eV を引いた程度の開放電圧となっている。CdTe や Cu(InGa)Se₂ などの多結晶薄膜では、禁制帯幅から 0.5 あるいは、0.6 eV を差し引いた程度の値となっている。これは、多結晶では、もともと単結晶ほど膜質が優れないこと、結晶粒界など暗電流が流れる要因が多いためである。

アモルファス太陽電池では、開放電圧は欠陥準位（ダングリングボンド）を介した再結合と、順方向バイアスでの光電流の減少によって決まっている。アモルファス太陽電

図3 禁制帯幅と開放電圧の関係

池の禁制帯幅は約 1.7 eV であるのに対して、開放電圧は 0.9 V 程度である。今後、欠陥準位が一桁減少すれば、1 V を超す開放電圧も期待される。

3.4 曲線因子

曲線因子は、0 から 1 までの値を取りうるが、一般に高効率太陽電池では、0.7 以上となっている。直列抵抗や漏れ電流が存在しない場合には、曲線因子は開放電圧とダイオード因子 (n 値) のみによって決まる。図4は、曲線因子を開放電圧と n 値の関数として表したものである。図には実測値も示されている。理論的には、開放電圧が高いほど、同じ n 値でも曲線因子は高くなる。開放電圧が 0.4 V しかでない材料系では、どう頑張っても曲線因子は 0.8 以上にはならない。一方、GaAs 系では、 n 値の小さいセルができれば、0.85 以上の曲線因子も期待できる。

3.5 変換効率の限界

太陽電池の変換効率は、どこまで向上するであろうか。図5は、変換効率の理論値（一例）と最近の実績をまとめたものである。また同図には、多結晶太陽電池を想定して計算した理論値も示されている。多結晶系では、単結晶に比べると暗電流が流れやすい状況になっているので、開放電圧が低くなる。そこで同図では、多結晶系の変換効率が単結晶系の 80% と仮定している。これらの図から、まだ

FF は、開放電圧と n 値の関係から直列抵抗を無視して導いた。太陽電池の暗電流 I は順方向電圧 V と $I \propto \exp(qV/nkT)$ の関係にある。

図4 開放電圧 V_{oc} と曲線因子 FF の関係

実線と破線は理論値

図5 禁制帯幅と変換効率の関係

まだ変換効率の向上が期待されることがわかる。ただし、単結晶 Si では、26～28%が理論限界といわれており、効率向上の余地はあまり多くない。また、同図では、結晶系を対象としているのでアモルファス材料には適用できない。これは開放電圧の扱いが全く異なるためである。禁制帯幅が 1.7 eV 程度のアモルファス Si では、変換効率 14～15%が理論限界である。しかし、Geなどを添加して、もう少し小さい禁制帯幅のアモルファス材料を用いれば変換効率の限界は 15%以上と高くなる。

4. 各種太陽電池の開発動向

4.1 単結晶、多結晶 Si 太陽電池

既に述べたように、現在、電力用には単結晶 Si かキャスト法による多結晶 Si が用いられている。これらの太陽電池が広く用いられているのは、モジュール効率 14%程度が得られ、しかも信頼性が高いなどの理由による。しかし、これらの結果を細かく分析してみると、現在はオフグレイド Si (LSI の規格外品) が低コストで入手できるためであることがわかる。オフグレイド Si で生産可能な太陽電池は 50～100 MW 程度と見積もられる。従って、今後の結晶系 Si の展開には、低コストで高品質の原料開発が大きな鍵を占めている。かつては、太陽電池用であれば、質はあまり高くなくてよいという考えもあったが、現在では、高効率化のためには、原料の高品質化は必要不可欠との認識に変わりつつある。質が高い原料を低コストで製造できるかどうか、結晶 Si 太陽電池の将来を決することとなる。

一方、単結晶 Si を用いるかキャスト Si を用いるかの判断は、現在、Si 太陽電池を生産している企業の歴史的背景と深く関係している。将来的には、キャスト Si 太陽電池のほうがコスト的に有利とみられているが、現在、アメリカのシーメンスソーラ社は、1社で年間 12.5 MW の単結晶 Si 太陽電池を生産している。これは、単結晶からキャストへと移行しても、そのメリットがあまり大きくないためである。最初からキャスト Si 太陽電池を生産しているところは、引き続きキャスト Si 太陽電池の生産を増やす方向である。新規に参入する企業は、多くの場合、キャスト Si 太陽電池を選択している。これは、現状では、もっともコスト的に有利で変換効率も高いためである。

結晶系 Si 太陽電池の研究開発は、(i)キャスト Si 太陽電池のセル効率やモジュール効率を向上させるものと、(ii)単結晶 Si 太陽電池でいっそうの高効率化を図るものとに分類される。まず、キャスト Si 太陽電池の性能は、鋳造法による Si インゴットの品質に大きく作用される。これまでの研究開発により高品質化という点では、ほぼ要求を満たすものが得られており、10 cm 角のセルで変換効率 17.2%が達成されている。図 6 に 10 cm 角キャスト Si 太陽電池の変換効率推移を示す。このように、キャスト Si 太陽電池の変換効率は順調に向上してきたが、最近はやや飽和の傾向にある。今後、18%程度までの効率向上が

図 6 我が国における単結晶 Si、キャスト Si 太陽電池の変換効率推移

期待できる。

キャスト Si 太陽電池は、そろそろ研究レベルを離れ、本格的な量産期を迎えている。国内の太陽電池関連企業はキャスト Si 太陽電池の生産量を急速に伸ばしつつある。

一方、単結晶 Si 太陽電池の高効率化に関する研究は急速に進展しつつある。変換効率が高ければ、同一設置面積からより大きな電力を得ることができ、太陽電池そのものが少々高くても、結果として発電コストが下がるからである。このような単結晶 Si 太陽電池の高効率化の動きは、オーストラリアの M. Green らの研究成果に刺激を受けたところが大きい。現在、世界で最も効率の高い単結晶 Si 太陽電池は、PERL セルと呼ばれており、面積 4 cm² で変換効率 23.5%となっている⁽⁴⁾。

また最近では、ソーラカーレース用に効率の高い Si 太陽電池が開発されており、862 cm² のモジュールサイズで変換効率 21.6%が実現されている⁽⁵⁾。

4.2 アモルファス Si 太陽電池

アモルファス太陽電池は、1 μm 以下の薄い層が何層も積層された構造となっており、高効率化には、透明導電膜 (TCO)、p,i,n 各層の改善などが決め手となる。短絡電流の向上には TCO の表面形状の最適化が重要である。現在、TCO として用いられている SnO₂ の表面は凹凸形状になっている。これは屈折によって光路長を長くしたり、反射率を減らすなどして有効に入射光を吸収するためである。p 層に関しては、SiC や SiO によるワイドギャップ化が図られている。i 層に関しては、プラズマ内でのラジカル制御や超高真空チャンバの導入が行われている。これらの高効率化により面積 1 cm² セルで 12.5～13.2%の変換効率が得られている。

一方、10 cm 角以上の大面積太陽電池では、1枚のガラス板上に、いくつかの太陽電池を直接接続した集積形太陽電池が開発されている。集積化のためには、各セルを分離するためのレーザ加工技術、大面積基板上への均一な膜形成などの課題が加わる。図 7 に示すように、これまでに 12%の変換効率を得られている。また最近では、低コスト化に向けて、ガラスに代わり高分子や薄いステンレス鋼板なども基板材料として採用されている。

アモルファス太陽電池を電力用途に用いる際の最も重要な課題は、劣化の防止である。アモルファス太陽電池は、光照射下で劣化する。現在のシングル接合形セルは、測定条件にもよるが、20年間の使用に対して30%程度は劣化する。特に最初の1年間で劣化が起き、その後、安定化する。そこで、最初の1年間に起きる劣化を初期劣化、また初期劣化後の変換効率を安定化効率と呼んでいる。

アモルファス太陽電池の劣化を防止するため、劣化を起こさない材料開発、ならびに劣化が起きにくいデバイス構造の開発の両面から対策が講じられている。特にデバイス面では、従来のp,i,nからなるシングル接合構造よりも、p,i,n/p,i,nというように太陽電池を積み重ねたタンデム構造にしたほうが劣化の少ないことが見いだされ、研究開発の方向はタンデム形に移行しつつある。表3は、各種太陽電池の安定化効率を示したものである。3層タンデム形モジュールでは、安定化効率10%以上が達成されている。

アモルファス太陽電池の形成には、大面積製造に有利なプラズマ法が用いられており、製造条件が確定できれば、量産化は早いと考えられる。既にいくつかの企業では、アモルファス太陽電池の一貫生産装置（年産1MWから10MW規模）を完成させている。これらの量産装置では、ガラス板の大きさが30cm角のものから75cm×150cmのものまで用いられている。また、ステンレス鋼板を巻き取って連続形成する方式も採用されている。

アモルファスの特徴を最大限に利用したものに三洋電機で開発されたシースルー太陽電池がある。アモルファスSiは、通常ガラス板上に形成されているが、アモルファ

図 7 我が国におけるアモルファス Si 太陽電池の変換効率推移

構 造	面 積 (cm²)	安定化効率 (%)	研究機関
a-Si シングル接合	1	8.5	東工大
2 層タンデム a-Si/a-Si	1,200	8.9	富士電機
3 層タンデム a-Si/a-Si/a-SiGe	3,600	8.2	Solarex 社
a-SiC/a-SiGe/a-SiGe	900	10.2	USSC 社
a-SiC/a-SiGe/a-SiGe	1	10.2	シャープ

ス層に1mmφ以下の小さい穴を多数設けると、自然光が透過してくる。太陽電池に穴を開ければ、吸収される光が減少するので出力は低下するが、窓ガラスや車のサンルーフに用いると、外部の景色を見ながら出力もとれるという利点が生ずる。既にシースルー形アモルファス太陽電池は実用化されている。

4.3 その他の材料系

最近、特に注目を集めるようになったのが、CuInSe₂などのカルコパイライト系である。CuInSe₂のみでは禁制帯幅が1.0eVと小さいので、GaやSを添加して禁制帯幅を大きくする方向にある。カルコパイライト系の特徴は、アモルファスでは達成できない高効率の実現と高信頼性である。高効率という点では、小面積ながら既に16%を超える値が得られている（表4）。また信頼性にはまったく問題がないのも大きな特長である。ただ、これらの太陽電池はまだ市販されていない。これは変換効率は向上したものの、生産技術として眺めると、まだまだ未熟であることによる。特に大面積基板の上に形成する場合の、各構成元素比の均一性向上や再現性向上などが今後の課題となろう。アモルファス太陽電池と比べると開発のテンポが遅くなっており、アモルファスの次をねらう材料として位置付けられている。

同じ化合物薄膜系でも、CdTeはこれまでの開発の歴史が長く、ほぼ製造プロセスも確立されつつある。現在、民生用として市場に出回っているのは、印刷方式により製造されたCdS/CdTe薄膜太陽電池である。印刷方式で製造されるため低コストが特徴となっている。今後、建材用として実用化するため、Cdが環境に及ぼす影響などが議論されている。また、火災時にもCdが外部に漏れないための工夫なども凝らされている。今後の環境試験などにより、CdTe系の安全性が実証されれば実用化は早い。

表 4 各種太陽電池の変換効率の現状（研究レベル）

構 造	面積 (cm²)	変換効率 (%)	研究機関
Si 結晶系			
単結晶 Si	4	23.5	南ウエールズ大
キャスト Si	100	17.2	シャープ
多結晶 Si 薄膜			
液相成長	225	10.3	AstroPower 社
固相成長	1	8.5	三洋電機
アモルファス系			
a-Si	1	13.2	三井東圧
a-Si/a-Si	1,200	10.5	富士電機
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	900	11.4	USSC 社
カルコパイライト系			
Cu(InGa)Se ₂	0.4	17.6	SIM, RIT
Cu(InGa)(SeS) ₂	69	12.7	Siemens Solar
CuInSe ₂	3,916	9.7	Siemens Solar
CdTe 系			
近接法	1	15.8	南フロリダ大
印刷法	1,200	8.7	松下電池工業

備考：アモルファス太陽電池の変換効率は初期値

一方、最近になって、多結晶 Si 薄膜太陽電池を手がける研究機関が増えている。Si は吸収係数が小さいため、薄膜構造は不利であると考えられてきたが、Si でも屈折や反射を利用して光路長を長くすれば 10 μm 程度の厚さでも高効率を得られるとの認識に変わりつつある。現在は、高品質の Si 薄膜を得るための製膜技術開発が中心になっている。

このほかにも III-V 族化合物半導体を用いて 30~40% という超高効率をねらう動きがある。これらの太陽電池も次世代を担うものであり、現状では、小面積での超高効率の実証に的がしぼられている。これまでに GaInP/GaAs 系で 30% 近い変換効率が得られている。また、集光動作させると更に変換効率が向上することが知られており、これまでに GaAs/GaSb タンデム太陽電池で 35.8% (集光下) という変換効率が得られている⁽⁶⁾。この値が、これまで太陽電池で得られた世界最高のエネルギー変換効率である。

5. 今後の展望

太陽光発電の本格的実用化を間近にひかえ、いま、いちはん話題になっているのが太陽電池モジュールのデザインである。これまでは、モジュールの高効率化、高信頼化、ならびに低コスト化というハード面での研究開発が主流であった。これからは目的に合ったモジュールのデザインが重要であり、消費者の心をつかむかどうかは、性能いかなより、その商品としてのデザイン性にあるといっても過言ではない。事実、この分野へのハウスメーカーの参入により、従来とは異なる価値観が出てきた。例えば、従来、デバイス屋は、キャスト Si 太陽電池の変換効率を向上させるため、表面に多層の反射防止膜を施していた。そのため、Si 表面はほぼ真っ黒く見える状態となっていた。一方、ハウスメーカーの側から商品として眺めてみると、反射防止膜のない、むき出しのキャスト Si のほうが好まれるという。これは、Si 表面の金属光沢が高級感を与えるためである。

また、住宅の屋根やビルの窓、壁などに用いる場合は、建材としてのモジュールの構造が大きく変わってくる。特に建材と太陽電池モジュールを一体化した建材一体型太陽電池モジュールは、低コストという観点だけでなくデザイン性という点でも大きな研究課題となっている。太陽光発電の普及促進のため、建材一体型モジュール開発を急ピッチで進める必要がある。(平成 6 年 8 月 23 日受付)

文 献

- (1) D. M. Chapin, C. S. Fuller & G. L. Pearson: "A new Silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", *J. Appl. Phys.*, **25**, 676 (1954)
- (2) 埴岡公孝: 「太陽光発電とソーラーエネルギーの普及促進策について」, *太陽エネルギー*, **19**, No. 4, 15 (平 5)
- (3) K. W. J. Barnham, B. Braun, J. Nelson, M. Paxman, C. Button, J. S. Roberts & C. T. Foxon: "Short-circuit current and energy efficiency enhancement in a low-dimensional structure photovoltaic device", *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 135 (1991)
- (4) M. A. Green, S. R. Wenham, J. Zhao, Z. Shi, & C. B. Honsberg: "Recent improvements in Silicon solar cells", *Proc. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Amsterdam **4A**, 24 (1994)
- (5) P. J. Verlinden・R. A. Crane・R. M. Swanson・岩田孝弘・判田圭・小笠博司・D. L. King: 第 4 回高効率太陽電池ワークショップ (奈良), III-6 (平 6)
- (6) L. M. Fraas, J. E. Avery, V. S. Sundaram, V. T. Dinh, T. M. Davenport, J. W. Yerkes, J. M. Gee & K. A. Emery: "Over 35% efficient GaAs/GaSb stacked concentrator cell assemblies for terrestrial applications", *Proc. 21st IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 190 (1990)

小 長 井 誠 (正員) 1949 年 9 月 19 日生。1972 年 3 月東京工業大学工学部電子工学科卒業。1977 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年同大学工学部助手, 1981 年同助教授, 1991 年同教授。現在に至る。専門は半導体物性, デバイス。特に太陽電池, 半導体超格子の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 応用物理学会, 太陽エネルギー学会, IEEE, MR 会員。