フィルム基板太陽電池の特徴と展望

鴨下　友義（かもした　ともよし）

1　まえがき

太陽電池は1950年代後半に人工衛星に搭載されてその利用が始まり，電卓用などの民生用機器や遠隔地での通信用などに利用され，近年は環境問題への認識の高まりを背景に再生可能な自然エネルギー源として電力用途への適用が進んでいる。

太陽電池生産量の推移（**図1**）を見ると，特に1997年以降急速に増加しており，日本での2002年の生産量は251 MWで1999年以降4年連続して世界第一位である。[(1), (2)] これは，生産量の拡大とも連動して生産技術の進歩によるコスト低減が進み，並行して政府が住宅への設置補助をはじめとする導入促進政策を実施してきたことによるものである。また，2001年からは海外，特にヨーロッパを中心とする旺盛（おうせい）な需要と円安を背景とした輸出の増加が顕著となっている。

このように生産量は順調に増加しているが，一方，2001年に総合エネルギー調査会新エネルギー部会がまとめた報告書によると，2010年における太陽光発電の累積導入目標が4,820 MWに設定されており，2000年までの累積導入量が320 MWであることを考えると，現在は本格的な導入（生産）のための助走時期であるともいえる。**図2**は今後の国内市場の予測を示したものである。将来的にはコスト低減の進展に伴い国内公共・産業分野の割合が高くなっていくと予想されるが，当面は電力料金が高く設定されている住宅向けが市場の中心となると考えられる。

現在，世界の太陽電池生産量の85 %以上は結晶シリコン系材料によって占められている。結晶シリコン太陽電池は，原料を溶融・固化してインゴットを作り，スライスして基板とするため原料使用量が多い。これに対して富士電機では，原料の使用量が少なく大面積化も容易である利点を持つアモルファスシリコン（a-Si）太陽電池の開発を進め，1980年には世界に先駆けて電卓用a-Si太陽電池を製品化した。以後，ガラスを基板とした電力用大面積太陽電池の開発に注力し，1993年には30 cm × 40 cmサイズで安定化効率[〈注1〉] 9 %を達成した。これは，民生用途が主体であったa-Si太陽電池の電力用途への適用見通しを世界に示す成果として大きな注目を集めた。[(3)]

1994年からは，これらの成果も生かしてプラスチックフィルムを基板とするa-Si太陽電池の開発を行っている。プラスチックフィルム基板タイプは，すべての製造プロセ

〈注1〉安定化効率：a-Si太陽電池は，光照射により初期に特性が低下し，その後安定化する性質がある。光照射後の安定したエネルギー変換効率を安定化効率と呼ぶ。

図1　太陽電池生産量の推移

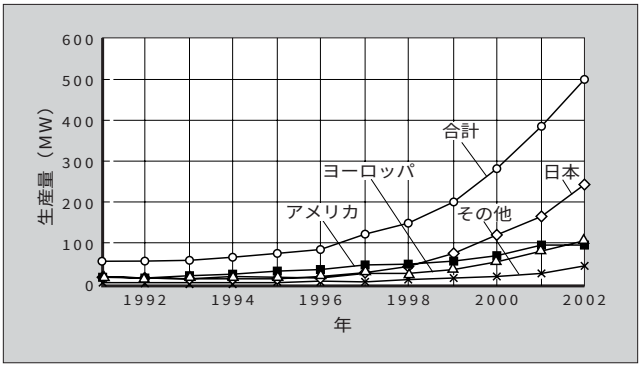
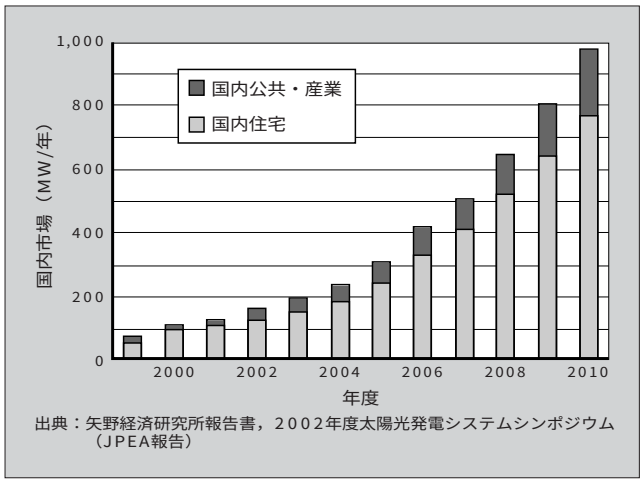


図2　国内市場の予測



出典：矢野経済研究所報告書，2002年度太陽光発電システムシンポジウム（JPEA報告）

鴨下　友義

工業用計測発信器の設計，燃料電池の開発，クライオクーラの開発，太陽電池の開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所太陽電池開発部長。

スにロールツーロール方式を適用することにより低コスト量産化が可能となるとともに[4]，軽量，フレキシブル，建材との一体化が容易などの特徴を生かして応用製品形態の多様化も期待できる[5]。

以下に富士電機で開発を進めているフィルム基板太陽電池の特徴と展望について報告する。

2　高スループット製造技術

太陽電池の開発は，従来の研究開発から事業化へ向けたフェーズへと移行している。事業化へ向けての最も大きな課題として，低コスト化が挙げられる。薄膜太陽電池の量産プロセスでは，大型の真空製膜装置を用いることによる初期投資（設備費）が大きい。特に a-Si およびアモルファスシリコンゲルマニウム（a-SiGe）層を堆積（たいせき）する装置の設備全体に占める割合が大きく，画期的なスループット改善が必要となる。そこで富士電機では，前述したように高スループット化に非常に有効なプラスチックフィルム基板太陽電池製造プロセスの開発を 1994 年に着手し，それまでに蓄積してきたガラス基板太陽電池の開発技術をプラスチックフィルム基板太陽電池へ適用してきた[4], [5]。

絶縁体であるプラスチックフィルム基板の特徴を最大限に生かすために，**図 3** に示す SCAF（Series Con-nection through Apertures formed on Film）と称するまったく新しい太陽電池構造を開発した。この太陽電池は，基板の一方の面に金属電極/a-SiGe 発電層（ボトムセル）/a-Si 発電層（トップセル）/透明電極層を形成した多層構造から成る。また基板の反対面には，背面電極が形成される。ボトムセルおよびトップセルの発電層は，およそ 100 nm の厚さとなっている。基板は厚さ数十 μm のポリイミドなどの耐熱性プラスチックフィルム基板である。この構造の特徴は，基板に多数あけられた直径 1 mm 程度の穴にある。これらの穴は 2 種類に分類され，それぞれ異なった働きをする。透明電極が形成されている発電領域に形成されている穴は，透明電極と基板の反対面に形成された背面電極とのスルーホールコンタクトを行う「電流収集穴」である。一方，発電領域の外側に形成されている穴は，金属電極と背面電極を接続する「直列接続穴」である。プラスチックフィルム基板を採用することで，この接続穴の形成がパンチングなどにより容易に行える。また，この穴を介して絶縁性基板上に直列接続構造が形成できるため，高い電圧を取り出すことが可能となる。

製造プロセスにはロール状のフィルム基板を装置入口側にセットして装置に供給し，装置出口側で再びロール状に巻き取る量産性の高いロールツーロールプロセスを採用している。このため，装置にフィルム基板ロールを一度セットするだけで，キロメートルオーダーの長さのフィルムを連続して一括処理することができるため，搬送工程の簡略化が図れる。このフィルム基板 1 ロールを処理すると，100 kW レベルの太陽電池が一気に製造できることになる。

上述したロールツーロールプロセスの採用による高スループット化以外にも，例えば積層構造の高速形成という面からの高スループット化へのアプローチについても検討している。これまでの研究開発から，a-Si 層および a-SiGe 層の形成速度を 30 nm/min 程度まで増加させても，プラズマ化学気相成長（CVD）法の放電条件の一つであるピークツーピーク電圧（V_{pp}）を低く抑える工夫を施すことにより，性能を維持できることが分かってきている。V_{pp} はプラズマポテンシャルと正の相関を持つため，製膜中に発生するイオンダメージの指標となっており，太陽電池特性に影響を与えていると考えている。タンデム型太陽電池のトップセルである a-Si シングル接合太陽電池のみを抜き出した構造を形成し，V_{pp} とこのトップセル構造太陽電池の安定化効率の関係を求めたデータを**図 4** に示す。V_{pp} を制御できるパラメータには多くのものが存在するが，一例としてプラズマ生成のために供給する高周波電力の周波数が挙げられる。**図 4** に示すように，高周波電源の周波数を従来の 13.6 MHz から 27.1 MHz に増加させることで[6]高速製膜条件でも効果的に V_{pp} を低減することができ，結果として太陽電池の変換効率が向上している。

各種の低 V_{pp} 化技術を統合することにより，高品質 a-Si

図 3　SCAF 構造太陽電池の概念図

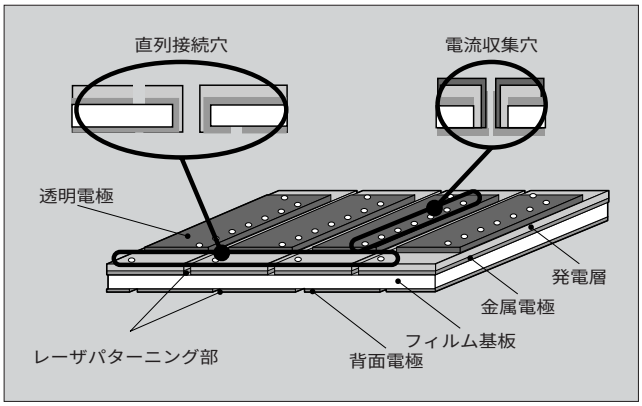
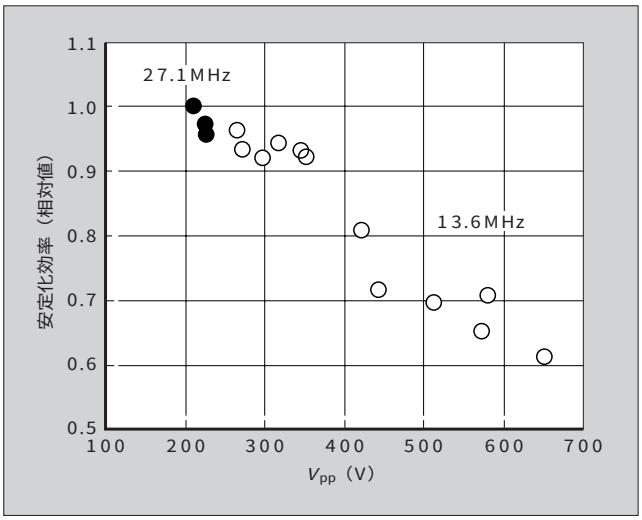


図 4　a-Si トップセル高速形成時の V_{pp} とトップセル構造太陽電池の安定化効率の関係



層および a-SiGe 層を 30 nm/min 程度の製膜速度において形成できるようになり，SCAF 太陽電池の安定化効率 8 % 以上が達成されたため，量産化のめどがついた。

3　フレキシブルモジュール

技術開発の進展や国の補助金政策により，個人住宅を中心に太陽電池の導入が進み，最近では太陽電池を取り付けた住宅を目にする機会が多くなってきた。しかしこれまで導入されている太陽電池の多くは屋根上に設置された架台に固定する据置型であり，架台の費用や設置工事費用などの追加的費用が発生するうえ，周囲との調和の点でもさらに工夫が必要である。また，今後は低コスト化の進展に伴い公共・産業分野への導入も増加するものと想定されるため，この分野に適用するモジュール開発も重要である。

そこで富士電機では，意匠性に優れる建材一体型モジュールに的を絞り，独自の SCAF 構造セルを用いたモジュールを開発している。富士電機のモジュールには以下のような特徴がある。

(1)　独自の SCAF 構造の採用で，最少の直列接続でシステムに必要な電圧が得られる。

(2)　プラスチックフィルムを基板とする薄膜太陽電池であるため，従来にはない軽量で大面積のモジュールが構成できる。

(3)　さまざまな材料と張り合わせることが可能であることから，従来の据置型モジュールに加え，屋根材や壁材などの建材と一体化させた周囲と調和する建材一体型太陽電池モジュールが実現できる。

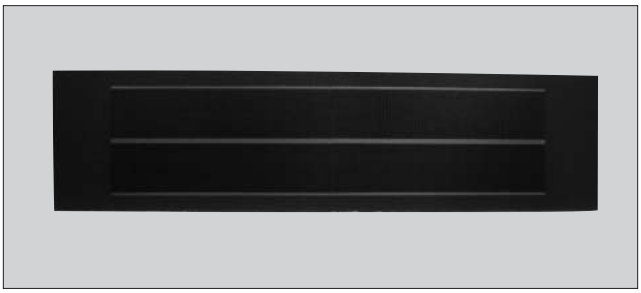
以下に富士電機における太陽電池モジュールの開発例を紹介する。

3.1　鋼板張付型モジュール

太陽電池を鋼板表面に直接張り付ける鋼板張付型モジュールでは，鋼板部分を除く太陽電池モジュールの質量が約 1 kg/m^2 であり，鋼板を含めても総質量は 4 ～ 8 kg/m^2 程度となり，従来の据置型と比較して約半分の質量のモジュールが実現できる。したがって，太陽電池を搭載しても，構造物の耐荷重設計を大きく見直す必要も少なく，しかも通常の鋼板屋根と同じ方法で施工できるため低コストで意匠性に優れた太陽電池付き鋼板屋根が実現できる。

図 5 は開発中のモジュールの外観を示したもので，幅が約 0.5 m，長さが約 2 m の鋼板に太陽電池を張り付けたもので，周囲に曲げ加工を施すことで太陽電池付き鋼板屋根にすることができる。このタイプの太陽電池モジュールでは，受光面に耐候性フィルムを用いているため，耐久性を検証する加速試験やフィールドテストなどを進めており，実用化への技術的なめどが立ったと考えている。

図５　鋼板張付型モジュール



3.2　瓦一体型モジュール

富士電機では，より洗練された製品として瓦一体型太陽電池モジュールを建材メーカーと共同で開発している。**図 6** に開発中の瓦一体型モジュールを，**表 1** にモジュールの開発仕様を示す。

開発中の瓦一体型太陽電池モジュールは，太陽電池を瓦にはめ込む構造を採用しており，太陽電池を搭載していない通常の瓦と同様な工法で屋根に固定できる。また，周囲部分には同系統の瓦を配置することができるため違和感もなく美観に優れている。これからの太陽電池の導入にあたっては，費用の観点のほかに設置した場合の美観も製品選択の大きな因子になると考えられる。

3.3　フレキシブルモジュール

冒頭にも述べたが，富士電機で開発しているセルはフレキシブルなプラスチックフィルムを基板として用いているために，ガラスカバーやフレームなどの形状を拘束する部材を用いなければ，ある程度の曲面に対応してモジュールを設置することが可能である。特に，デザイン性を優先する建築物においては，この機能はこれまでの太陽電池モジュールにない大きな利点であると考えており，この分野への用途開発も進めている。**図 7** はその例を示すもので，セルを樹脂で封止し，その表面を耐候性樹脂で覆ったフレキシブルモジュールであり，建物の曲面部分への適用を想定して開発している。

図６　瓦一体型モジュール

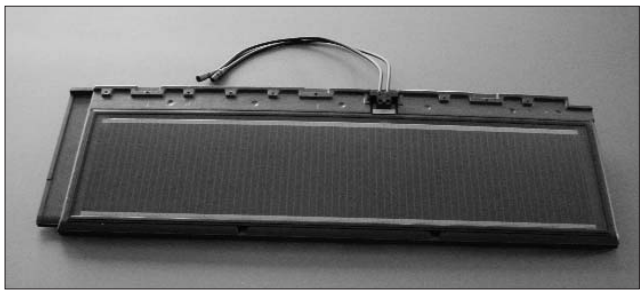


表１　モジュールの開発仕様

形　　態	鋼板張付型	瓦一体型	フレキシブル
外形寸法（mm）	500×2,000	300×950	1,000×2,000
出　　力（W）	48	12	96
質　　量（kg）	8*1	7*2	2*3

＊1：鋼板（厚さ＝0.8 mm）質量含む　＊2：瓦材質量含む
＊3：補強材含まず

図７　フレキシブルモジュール

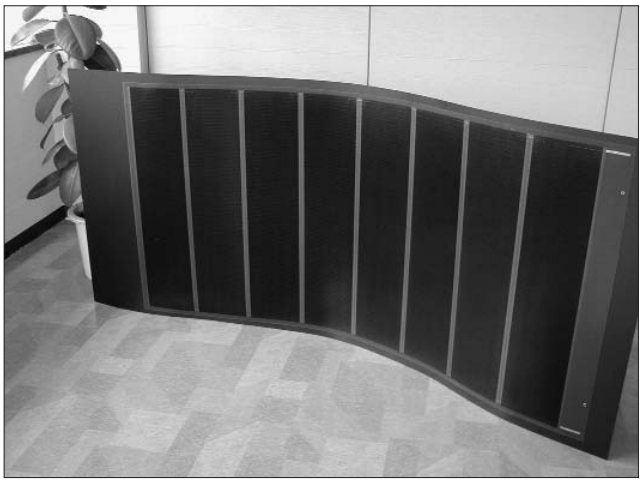
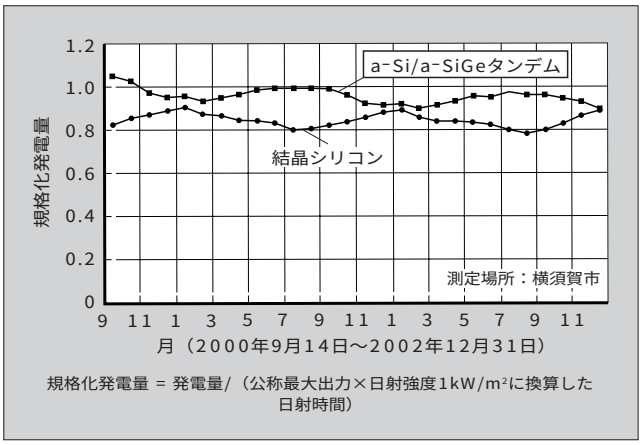


図８　発電特性の月変化



4　屋外設置発電量比較

これまでに開発した a-Si/a-SiGe タンデム型太陽電池のフィールドテストを(株)富士電機総合研究所横須賀地区で行い，結晶シリコン太陽電池と比較した。[7] **図８**に発電特性の月変化の様子を示す。図中の規格化発電量は，太陽電池が常に標準条件[〈注2〉]のエネルギー変換効率で動作したと仮定した場合の発電量と，実際の屋外環境での発電量との比率を表す。一般に太陽電池の性能は標準条件での出力で表されるが，フィールドでの実際の発電性能は標準条件との環境の違いを反映して変化する。図から，富士電機で開発した a-Si/a-SiGe タンデム型太陽電池は結晶シリコンに比べて規格化発電量の値が大きく，特に温度の上昇により結晶シリコンの性能が大きく低下する夏季にはその差が 20 %程度に達している。

表２に年間総発電量を示す。特定の場所（横須賀市）ではあるが，2001 年，2002 年とも出力 1 W（標準条件）あたりの総発電量（Wh）を比較すると，a-Si/a-SiGe タンデム型太陽電池の出力が結晶シリコンに比べて 10 %以上大きい結果となり，その分ユーザーにとって有利となることが分かる。

表２　標準条件での出力（定格）１Wあたりの発電量

種　類	2001年		2002年	
	Wh/W	相対値	Wh/W	相対値
a-Si/a-SiGeタンデム	1,540	114	1,505	112
結晶シリコン	1,350	100	1,341	100

測定場所：横須賀市

5　あとがき

富士電機におけるフィルム基板太陽電池の特徴と展望について述べてきた。富士電機の開発している太陽電池は，従来の太陽電池にはない特徴を有しており，周囲の景観にマッチした形態で設置でき，しかも量産に適したプロセスが構築できることから，需要家に大きな経済的負担を強いることなく市場への普及が期待できるポテンシャルを有していると考えている。

太陽電池生産量は年率 30 %の増加を続けており，2020 年には 1 兆円産業になると見込まれている。このような追い風の中でタイムリーな市場参入と的確な事業展開を通し，地球環境に確実に貢献していくことが使命であると考えている。

ここで紹介した技術の一部は，新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託研究により得られた成果を適用したものであり，関係各位に感謝する。

〈注 2〉標準条件：25 ℃，日射強度 1 kW/m²，太陽光スペクトル エアマス 1.5

参考文献

(1) PV News. PV ENERGY SYSTEMS. 2003-2 and 2003-3.
(2) 太陽光発電情報．資源総合システム．2003-3.
(3) Ichikawa, Y. et al. Large-Area Amorphous Silicon Solar Cells with High Stabilized Efficiency and their Fabrication Technology. Proc. of 23rd PV Specialists Conf. USA. 1993, p.27.
(4) Ichikawa, Y. et al. Production Technology for Amorphous Silicon Based Flexible Solar Cells. 11th Int'l Photovoltaic Science and Engineering Conference. Sapporo, Japan. 1999, p.49.
(5) Ichikawa, Y. et al. Flexible a-Si Based Solar Cells with Plastic Film Substrate. Mat. Res. Soc. Symp. Proc.557. 1999, p.703.
(6) Takano, A. et al. Excitation Frequency Effects on Large-Area Hydrogenated Amorphous Silicon Film Deposition Process Using Flexible Film Substrate. Jpn. J. Appl. Phys. vol.41, no.2, L323, 2002.
(7) 井原卓郎，西原啓徳．アモルファスシリコン太陽電池の屋外発電特性．富士時報．vol.75, no.5, 2002, p.272-276.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。