

# 宇宙線から太陽電池を守るカバーガラス

宇宙開発事業団 技術研究本部 電子・情報系技術研究部

松田 純夫

## Coverglasses protected solar cells from cosmic rays

Sumio Matsuda

Electronic and Information Technology Department,  
Office of Research and Development, NASDA

### 1. はじめに

軌道上の太陽電池は、主に電子線と陽子線等の宇宙線の照射効果により半導体中に格子欠陥が生じ、出力が低下する。太陽電池の放射線損傷を防止するために、太陽電池の光入射側に薄いカバーガラスをシリコン系の接着剤で太陽電池に貼付し、カバーガラスの質量阻止効果によって宇宙線を阻止している<sup>1)</sup>。

現在、世界で人工衛星用太陽電池のカバーガラスとして使用されているのは、ソーダライム系または珪酸系のガラスにシリコン系接着剤が紫外線で着色することを阻止するため、 $\text{CeO}_2$  を5%程度ドープしたもので、可視域での透過率を上げるため、表面に反射防止膜が施されているものと、石英ガラスをスライスし、研磨して、光入力側に可視光の反射防止膜、反対面に紫外線防止膜を蒸着したものがある。厚さは、一般的には、 $100\ \mu\text{m}$ ~ $150\ \mu\text{m}$ で、面積は、太陽電池の大きさに依存するが、現在は、約 $4 \times 7\ \text{cm}^2$ のものが主流となっている。カバーガラスの製造技術から言えば、20 cm角でも問題なく製造できると言われており、将来、薄

膜で大型の太陽電池が出現してもそれに対応できる技術は、既に確保されている。

### 2. 宇宙放射線環境<sup>2)~6)</sup>

宇宙には、図-1に示すように銀河宇宙線、太陽宇宙線（太陽フレア粒子）、Van Allen帯（放射線帯粒子）の捕捉粒子等による放射線が存在する。銀河宇宙線は、その名の通り太陽系外から飛来してきてエネルギーは、 $10^8$ ~ $10^{20}$  eV くらいの高エネルギー領域にまで及んでいる。組成は、大部分が陽子であり $\alpha$ 粒子、C、N、O等の原子核は10%程度となっている。太陽宇宙線は太陽の活動状況により突発的に放出

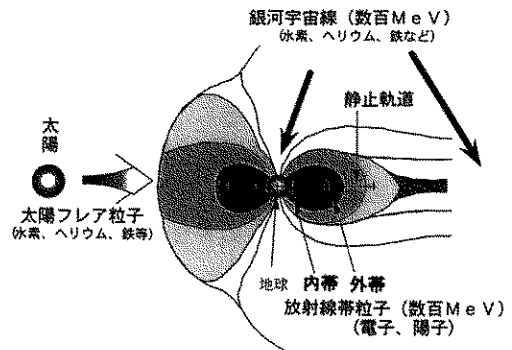


図-1 地球近傍の宇宙放射線環境

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
TEL 0298-52-2295  
FAX 0298-50-2750  
E-mail: Matsuda Sumi@nasa.go.jp

されるものである。太陽面上でフレアが発生すると高速プラズマ雲と X 線が爆発的に宇宙空間に飛び散り太陽磁場と共に地球に達する。X 線は  $10 \text{ \AA}$  以下の波長で陽子は  $1 \sim 100 \text{ MeV}$  のエネルギーを持ち銀河宇宙線の 1,000 倍の密度になることもある。Van Allen 帯は赤道上 1,000 km から地球半径の約 8 倍くらいの高さにまで広がり地球をドーナツ状に囲んでいる領域で 1958 年に Explorer-1 号により発見された放射線帯である。その放射線は、 $100 \text{ KeV} \sim 1 \text{ MeV}$  の電子、 $10 \sim 100 \text{ MeV}$  の陽子で代表され地球半径の 3~5 倍の高さで密度は極大になる。太陽活動が活発な時期には電子密度の中心が地球に近い方に移るなどその分布は常に変化している。

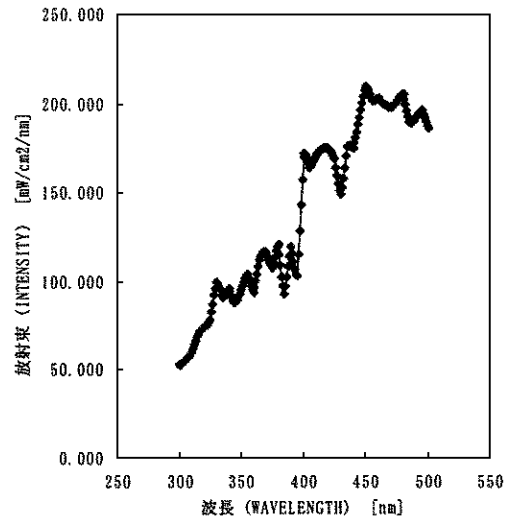


図-2 Air Mass Zero (AM0) における 300~500 nm の太陽光スペクトル

### 3. カバーガラスの性能

カバーガラスに要求される性能は、第一にロケットの積載荷重を減らし、人工衛星の設計寿命にあった発生電力を確保できる範囲で厚みが薄いこと、第二に、太陽光発電に有効な可視域の波長は透過させること、そのためには可視域に吸収帯をもつ成分の混入を避けること、宇宙空間の放射線および紫外線によりカバーガラス自身が着色せぬこと、表面に可視域の反射防止膜を設けること、第三に、宇宙空間の紫外線は地上の約 20 倍の強度でありそのスペクトルは図-2 に示すが、シリコン接着剤は紫外線により着色することが知られており<sup>1)</sup>、可視域の透過性を妨げない条件で、紫外線遮断波長（透過率が 50% になるときの近紫外域の波長）がより長波長側のガラスであること<sup>2)</sup>、第四に、カバーガラスにわずかでも太陽電池を覆わない部分があると、主に低エネルギーの陽子線の照射効果により太陽電池が劣化するため<sup>3)</sup>、打ち上げ時の衝撃などによって破損する可能性が少ないガラスであること、第五に、宇宙用に使用されている太陽電池は、温度が上がるほど発生電力が減少するので熱放散が良いこと、更に

$-140^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$  の温度サイクル 1,000 サイクルに耐えること（静止軌道 10 年の場合）などが求められる。

カバーガラスに保護されている太陽電池自身の劣化メカニズムは、主にカバーガラスを通過してくる電子線、陽子線による照射効果により半導体中に格子欠陥を生じ、少数キャリアの寿命が次式に従い減少することによる<sup>1),8)</sup>。

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K\tau\Phi$$

ここに、 $\tau_0$ ：照射前の少数キャリアの寿命

$\Phi$ ：照射線量

K：損傷係数

$\tau$ ：照射後の少数キャリアの寿命

ところで、通信放送技術試験衛星（Communication and Broadcasting Engineering Test Satellite: COMETS（かけはし））は、平成 10 年 2 月 21 日に H-II ロケットにより打ち上げられ、静止軌道での実験を行う予定であったが、H-II ロケットの不具合により静止軌道への投入に失敗し、バンアレン帯を通過する楕円軌道（近地点約 500 km、遠地点 17,700 km）を周回する結果となった。当初投入予定だった静止軌道では、太陽フレアを除いては電子線による

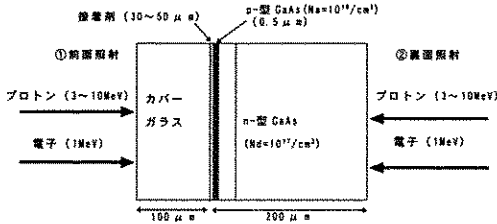


図-3 GaAs太陽電池セル構造(寸法は概略である。)

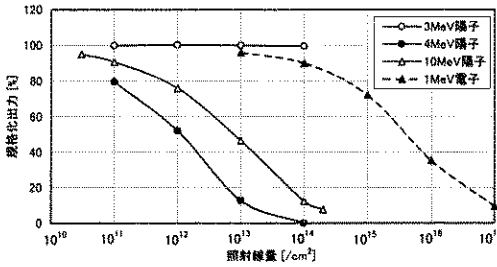


図-4 太陽電池前面からの照射結果

劣化が支配的であるのに対し、楕円軌道を周回するCOMETSは、陽子線による劣化が支配的であり、搭載機器の実験を効率的に実施するため、衛星の電力源である太陽電池の劣化予測を早急に行う必要が生じた。

COMETSの太陽電池パドルには宇宙用GaAs太陽電池が使用されており、放射線照射実験にはこれと同構造のセルを用いた(図-3)。照射エネルギーは、陽子線3 MeV, 4 MeV, 5 MeV, 6 MeV及び10 MeVで、セルの表面または、裏面より垂直に照射を行った。なお、陽子線照射には日本原子力研究所 高崎研究所に設置されているTIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) 設備のタンデム加速器 (3, 4, 5, 6 MeV), サイクロトロン加速器 (10 MeV) を用いた。

図-4に太陽電池セル前面からの照射試験結果を示す。図中の規格化出力とは、初期電力を100%とした場合の変化の割合である。図より、4 MeVの陽子線を照射した場合が最も劣化が大きいことが分かる。この結果を考察するため

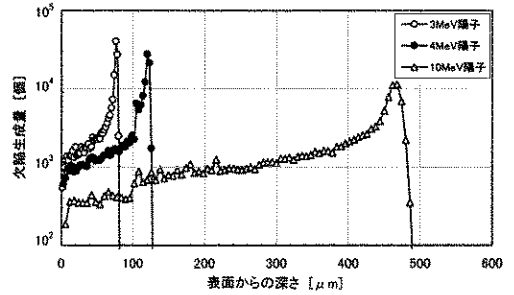


図-5 TRIMによる太陽電池前面からの注入粒子評価結果

に、TRIMコード<sup>9)</sup>により太陽電池中での欠陥の分布を計算した。図-5に計算結果を示す。図-5より、4 MeVの陽子は表面より約120 μm付近に分布する事が分かる。照射による欠陥もこの付近に主に発生すると考えられることより、4 MeVの陽子線の劣化がもっとも大きかった原因は4 MeV陽子線照射による損傷の中心がカバーガラス及び接着剤を通過した後の太陽電池の表面から0.5 μmに形成されているpnジャンクション付近にあるためと考えられる。また、表面からの照射で、3 MeV以下のエネルギーの陽子線では劣化が見られないことについても、TRIMの結果を考えると100 μm厚みのカバーガラスにより陽子線が遮蔽され太陽電池まで到達できなかったためと言える。

尚、カバーガラスがない場合は、低エネルギーの陽子線によりpnジャンクションが損傷を受けリーク電流が増えることから急激に劣化することが、昭和62年に打ち上げられた技術試験衛星V型 (Engineering Test Satellite-V: ETS-V (きく5号)) に搭載したSCM (Solar Cell Monitor) のデータから確認されている<sup>10)</sup>。

#### 4. おわりに

人工衛星用太陽電池を宇宙線から守るカバーガラスの性能とその重要性について概説した。具体的なカバーガラス特有の性質について詳述することは次の機会に譲ることとしたい。最近

では、太陽電池の温度を低く押さえるためにBRR (Blue Red Reflector) 機能のついたカバーガラスも使用され始めてきている。宇宙開発事業団では、平成12年秋期に打ち上げを予定しているADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite-II) にこのカバーガラスを採用した。又、太陽電池もシリコン系からIII-V族 (GaAs系) のマルチジャンクション型やCuInSe<sub>2</sub>等の薄膜系へとシフトしてきており、それらの太陽電池の分光感度にマッチする機能が付加されたカバーガラスもそろそろ視野に入れなければならないようになってきている。更に、人工衛星の開発では、パソコンや携帯電話の普及に見られるようにエレクトロニクスが急速に進歩しており、小型高機能化を目指す新しい流れが出てきている。そしてミッションの要求によっては、半導体エレクトロニクスが放射線にセンシティブであることを承知の上でバンアレン帯を通過する軌道に投入せざるを得ない小型人工衛星が出現する可能性もある。その心臓部となる太陽電池とそれを守るカバーガラスはこの高機能な人工衛星を実現させるためのキーとなる要素技術である。加えて、太陽電池にカバーガラス機能を持たせた新しいタイプの太陽電池の研究にも着手する必要がある、日本の宇宙

開発の自主性・自在性を確保するためにもさらなる研究・開発の継続が望まれている所である。

#### 参考文献

- 1) 高橋 清, 浜川圭弘, 後川昭雄編著, “太陽光発電”, (1980), 森北出版.
- 2) 永田 武, 等松隆夫, “超高層大気物理学”, (1973), 裳華房.
- 3) 大林辰蔵, “宇宙空間物理学”, (1970), 裳華房.
- 4) 小田 稔, “宇宙線”, (1972), 裳華房.
- 5) 朝永振一郎, “宇宙線の話”, (1960), 岩波書店.
- 6) 山田弘善, 松田純夫, “電子機器に対する宇宙環境”, (1983) 電子通信学会誌, 第66巻3号.
- 7) 松田純夫, 木村暁夫, 春山勝宏, 木島 駿, 森口良夫, 玉村 亮, “人工衛星用太陽電池カバーガラスの紫外線照射試験法” (1986), 電子情報通信学会, 信頼性研究会.
- 8) Tada, H. Y., Carter, J. R., Jr., Anspaugh, B. E. and Downing, R. G., “Solar Cell, Radiation Handbook, 3rd Edition”, (1982) NASA/JPL.
- 9) J. F. Ziegler, “Handbook of ion implantation Technology”, (1992), Elsevier, Amsterdam.
- 10) Uesugi, M., Matsuda, S., “Flight Data of Solar Cell Monitor on Engineering Test Satellite-V (ETS-V)”, (1992), PVSEC-7.