

# 宇宙機用太陽電池カバーガラスのコーティング剤が帯電に与える影響

○東山直紀, 渡邊力夫, 三宅弘晃(東京都市大学), 高橋真人, 奥村哲平(JAXA)

Influence of space solar cell coverglass coatings for charging  
Naoki Higashiyama, Rikio Watanabe, Hiroaki Miyake (Tokyo City University),  
Masato Takahashi, Teppei Okumura (JAXA)

Key Words: space, charging, solar cell, coverglass, electron beam

## Abstract

Spacecraft are charged under plasma environment and radiation environment in space, and it may lead failures and anomalies of spacecraft when discharge on the spacecraft surface occurs. One of the most important surface materials is cover glass for solar-cells which is a source of an electrical power. The purpose of this paper is to investigate surface-potential characteristics of coverglasses with coatings after electron irradiation. We found that the surface potential on coverglasses becomes positive within a few hours after irradiation. Comparing the surface potential histories of coated coverglass and silica glass revealed that the positive potential of coverglass is due to ionization of metallic atoms in surface coating material. The positive potential is relaxed over several days which will increase a risk of discharge. We conclude it is necessary to select coating materials with lower secondary emission coefficient.

## 1. 研究背景

人工衛星はプラズマ環境及び放射線環境下で帯電し、帯電に起因する静電放電により搭載機器の故障や衛星システム全体の機能を喪失する事故を引き起こした例が多く報告されている<sup>1)</sup>。よって、宇宙機は設計段階から正確に帯電解析を行う必要がある。人工衛星電位を決定づけるものは、本体及び表面の絶縁体に流入する正負電荷の収支である。衛星表面の絶縁体は二次電子放出係数の違いなどから本体とは異なる電位を持つ場合があり、これらの電位差が大きくなると放電が発生する<sup>2)</sup>。人工衛星表面材料には、衛星本体表面の熱制御を行うために張り付ける高分子材料膜や電力源となる太陽電池セルの熱制御および放射線防護のためのカバーガラスなどがある。衛星事故の3分の1以上が太陽電池において発生し、さらに全事故の半数以上が帯電・放電現象に起因する<sup>3)</sup>ため、太陽電池パネルにおける帯電・放電現象の特性を理解することは非常に重要である。

図1にサブストーム発生時のカバーガラス電位と衛星構体電位の時間履歴を示す<sup>4)</sup>。通常環境では衛星構体電位 $\Phi_s$ とカバーガラス電位 $\Phi_{cg}$ はほぼ0である。サブストーム発生時には高エネルギーの電子により2つの電位は急激に負に陥る。しかし、絶縁体であるカバーガラス表面では二次電子放出が発生し、正電荷が蓄積する。この時、太陽電池側面には電界 $E=(\Phi_{cg}-\Phi_s)/d$ がかかる。この式から距離 $d$ が小さいほど電界は強められることが分かるが、代表的な $d$ の小さい箇所がカバーガラスとインタコネクタ近傍で

ある。この箇所が絶縁体、導体、真空の3つが接するトリプルジャンクションとなり、最も強電界がかかる。このトリプルジャンクションで電界がある一定の閾値を超えると金属から電界放出が発生し電子が放出される。この時放出された電子はカバーガラス側面に衝突しながら上昇し、更に二次電子を放出させ側面の正電荷の帯電が加速していく。この帯電により更に電界も加速的に強められ、更に電子を放出していく。側面をたたく電子の増加に伴いカバーガラス側面に吸着していたガスも脱離されていき、ガスの層の中で電離が起き放電に至る。これが放電発生メカニズムである。

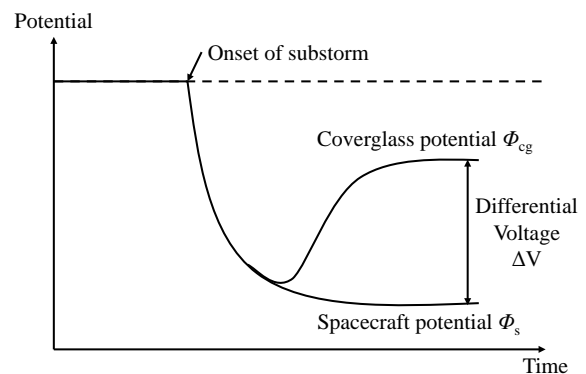


図1 サブストーム発生時のカバーガラス電位と衛星構体電位の時間履歴<sup>4)</sup>

現在までに、太陽電池クーポン（試験片）を用いた帯電に関する調査は多く行われている。具体的に

は、太陽電池セルの放電による損傷の調査が挙げられる<sup>5)</sup>。また、カバーガラス単体での電子線照射実験も行われてきたが、二次電子放出係数の評価<sup>6)</sup>のために数 eV 程の低エネルギーの電子線を照射する実験が散見される。極軌道や静止軌道では、keV オーダーの高エネルギー粒子が支配的な領域であるので、地上実験においてカバーガラス単体に対して keV オーダーの電子線を照射することで、表面電位特性の理解を深めることができる。宇宙機の帯電解析を行う上では、宇宙機表面の電位を知ることは重要である。

## 2. 研究目的

本研究では真空中でカバーガラスに電子線を照射し、照射後のカバーガラスの表面電位履歴を取得することにより、カバーガラスの表面電位特性を解析することを目的とする。

## 3. 計測システム

計測システムの構成は、表面電位計、表面電位計測プローブ、オシロスコープ、ファンクションジェネレータ、微小電流計、試料台、真空チャンバ、電子銃、表面電位測定プローブおよび試料台を移動させるための電動リニアドライブ、ペルチェ素子、ペルチェコントローラ、白金測温抵抗体、水冷ヒートシンク、冷却水循環装置である。図 2 にその計測システム構成図を示す。

表面電位計測は次の流れで行われる。まず、真空チャンバ内の試料台に計測試料を固定し、油回転真空ポンプおよびターボ分子ポンプを用いて真空引きを行う。真空チャンバ内圧力が  $10^{-4}$  Pa 以下まで低下した後、電子銃を用いて試料に電子線を照射し、帯電させる。電子線照射終了後、真空チャンバ外部からリニアドライブを操作し、真空チャンバ内部の表面電位計測プローブを試料前面に移動させ、表面電位の計測を行う。この表面電位計での測定データをオシロスコープで適宜サンプリングを行い、表面電位の時間履歴を得る。

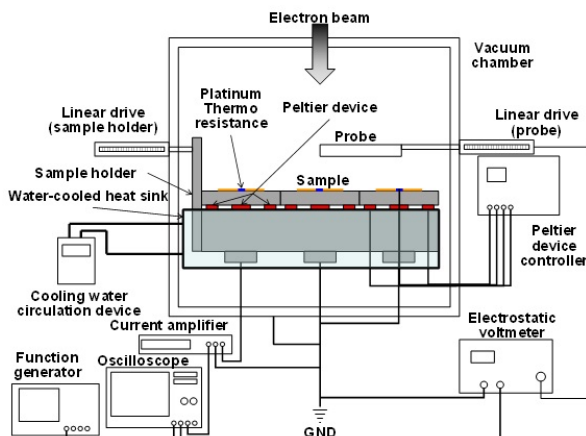


図 2 計測システム

## 4. 表面電位計測実験

### 4.1 実験条件

実験対象試料はポリイミドフィルム Kapton<sup>®</sup> 200H、表面コーティングが施された太陽電池カバーガラス 3 種および合成石英ガラスである。表 1 に実験条件を示す。No. 2 - 5 が太陽電池カバーガラスである。

### 4.2 ガラス試料について

#### 4.2.1 BRR/s 0213<sup>®</sup>

BRR/s 0213<sup>®</sup>は、JDSU (旧 OCLI) 社の製品であり、表面に BRR コーティングが施されている<sup>7)</sup>。BRR とは Blue and Red Reflective (あるいは Blue and Red Reflector) の略であり、紫外光と赤外光を反射する。これらの長波長は太陽電池の光電変換に寄与せず、BRR コーティングで反射することで太陽電池セルの温度上昇を抑えている。フッ化マグネシウム (MgF<sub>2</sub>) の多層コーティングが施されており、最表面のコーティング剤は酸化ジルコニウム (ZrO<sub>2</sub>) である。

0213 とは Corning 社のガラスの名称であり、セリウム添加ホウケイ酸ガラスを示す。これは ETS-VIII の太陽電池パドルに採用された製品でもある<sup>7)</sup>。

#### 4.2.2 CMG 100 AR<sup>®</sup>および CMX 100 AR<sup>®</sup>

CMG 100 AR<sup>®</sup>および CMX 100 AR<sup>®</sup>は、Qioptiq (旧 Thales) 社の製品であり、表面に AR コーティングが施されている<sup>8)</sup>。CMG および CMX とは Pilkington 社のガラスの名称であり、搭載された太陽電池セルの熱膨張係数に合わせたガラスを示す<sup>9)</sup>。紫外線、電子、放射線から太陽電池素子を保護し、低体積抵抗率タイプである。

AR とは Anti-Reflection の略であり、反射を防止する。フッ化マグネシウム (MgF<sub>2</sub>) の多層コーティングが用いられている<sup>10)</sup>。

#### 4.2.3 合成石英ガラス

合成石英ガラスとは、化学的に合成した不純物の少ない、ほぼ 100% の二酸化珪素 (SiO<sub>2</sub>) から成る石英ガラスを指す。通常、液体材料 (SiCl<sub>4</sub> 等) から作られる。光学的な均質性や紫外線域や近赤外線域の透過特性に優れるが、熔融、成型が困難であるという難点がある<sup>11)</sup>。そのため、一般的には金属不純物などを添加したガラスが用いられることも多い。今回使用したのは旭硝子株式会社製の合成石英ガラス "AQ" である。

## 4.3 実験結果

図 3 に Kapton<sup>®</sup> 200H と BRR/s 0213<sup>®</sup> の表面電位の時間履歴を示す。また、図 4 に Kapton<sup>®</sup> 200H と太陽電池カバーガラス 3 種に対する表面電位の時間履歴を示す。どちらも縦軸は試料表面電位 V [V] を、横軸は電子線照射後の経過時間 t [hour] を示す。

表 1 実験条件

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Sample	Kapton <sup>®</sup> 200H	BRR/s 0213 <sup>®</sup>	BRR/s 0213 <sup>®</sup>	CMG 100 AR <sup>®</sup>	CMX 100 AR <sup>®</sup>	Synthetic Quartz Glass
Sample thickness [μm]	50	100	100	100	100	1.13[mm]
Irradiation	Energy [keV]	15	20	20	20	20
	Time [sec]	60	60	60	60	60
Current density [μA/cm <sup>2</sup> ]	49	64	64	64	64	64
Vacuum level [Pa]	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>

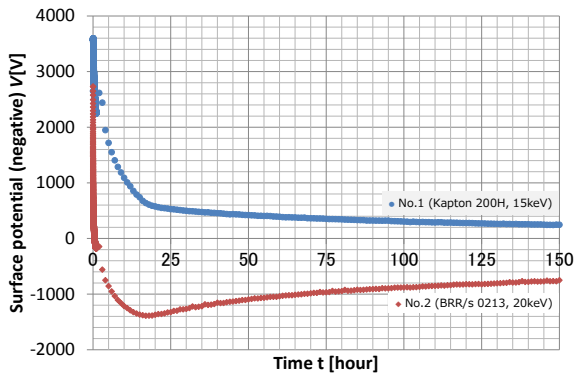


図 3 Kapton<sup>®</sup> 200H と BRR/s 0213<sup>®</sup> の表面電位の時間履歴

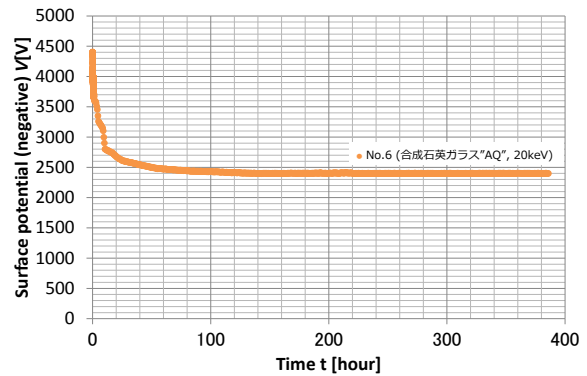


図 5 合成石英ガラスの表面電位の時間履歴

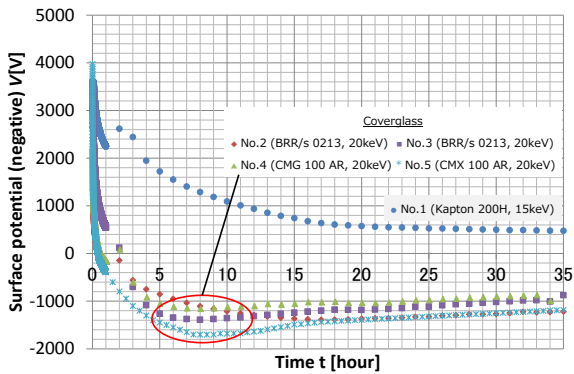


図 4 Kapton<sup>®</sup> 200H と太陽電池カバーガラス 3 種に対する表面電位の時間履歴

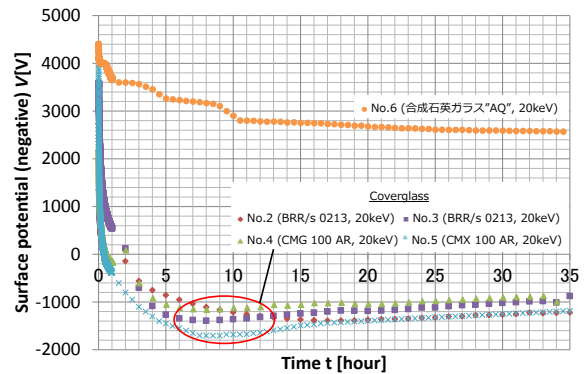


図 6 合成石英ガラスと太陽電池カバーガラス 3 種に対する表面電位の時間履歴

Kapton<sup>®</sup> 200H の表面電位は、計測を開始して数時間は急激に電位が減衰し、その後は減衰が緩やかとなっている。また、太陽電池カバーガラス 3 種は電子線照射後の数時間のうちに正側の電位に遷移していることがわかる。

当研究室では、これまでに電荷蓄積法<sup>12)</sup>を用いて宇宙機用材料の体積抵抗率の取得を行ってきた。電荷蓄積法とは試料表面に誘起した電位の時間履歴を指数近似し、その減衰時定数から体積抵抗率を求める手法である。この理論によれば、Kapton<sup>®</sup> 200H の減衰時定数は  $8.3 \times 10^5$  [sec]、体積抵抗率は  $2.8 \times 10^{16}$  [ $\Omega \cdot m$ ] となり、体積抵抗率はメーカー公称値<sup>13)</sup>である  $10^{15}$  [ $\Omega \cdot m$ ] より一桁大きい値となった。

また、太陽電池カバーガラスの表面電位は正側に遷移しているため、電荷蓄積法の理論が適用できず指数減衰曲線近似による体積抵抗率の取得には至っていない。試料 No.2 の BRR/s 0213<sup>®</sup> に注目すると、電子線照射の約 17 時間後に正電位が最大となり、その後は徐々に電位が 0[V] になるように緩和している。この緩和領域が指数近似できると仮定して緩和時定数を求めたところ、緩和時定数は  $8.3 \times 10^5$  [sec] となった。ここで、緩和時定数とは電荷蓄積法の減衰時定数と区別するために用いた言葉である。

次に、表面コーティング剤の影響を把握するために、コーティングの施されていない合成石英ガラスと比較をする。図 5 に合成石英ガラス“AQ”の表面電

位の時間履歴を示す。また、図 6 に合成石英ガラス“AQ”と太陽電池カバーガラス 3 種に対する表面電位の時間履歴を示す。どちらも縦軸は試料表面電位  $V$  [V] を、横軸は電子線照射後の経過時間  $t$  [hour] を示す。

合成石英ガラス“AQ”の表面電位は、太陽電池カバーガラスのように数時間のうちに電位が正側に遷移することなく、徐々に電位が減衰しているのがわかる。同様に減衰時定数および体積抵抗率を求めたところ、合成石英ガラス“AQ”の減衰時定数は  $2.2 \times 10^8$  [sec]、体積抵抗率は  $6.1 \times 10^{18}$  [ $\Omega \cdot m$ ] となった。製造元である旭硝子株式会社の資料<sup>11)</sup>によれば、体積抵抗率は  $200^\circ C$  のとき  $3 \times 10^{10}$  [ $\Omega \cdot m$ ]、 $300^\circ C$  のとき  $3 \times 10^8$  [ $\Omega \cdot m$ ] とあるが、室温でのデータがなく単純には比較ができない。そこで、一般的な石英ガラスの体積抵抗率と比較することにする。文献値<sup>14)</sup>より、石英ガラスの体積抵抗率は室温で  $10^{16}$  [ $\Omega \cdot m$ ] とあり、電荷蓄積法で求めた値は文献値より二桁大きい値となった。

## 5. 考察

図 4 および図 6 より、表面コーティングが施された太陽電池カバーガラスの表面電位の時間履歴は、3 種類・4 試料とも電子線照射の数時間のうちに正側の電位に遷移している点で類似性がある。また、コーティング剤の施されていない合成石英ガラスは、正帯電していないことから、カバーガラスが正帯電するのは表面コーティング剤が大きく関与していると考えられる。

カバーガラスが正帯電する理由として以下の仮説を考えた。電子線照射により、コーティング剤に含まれる金属元素 (Mg) が電離を起し、二次電子を放出する。電子線照射直後は、供給され続けていた入射電子が観測され負電位となる。電子線照射終了直後に急激な電位減衰が起き、電位が正側に遷移しているのは、放射線誘起伝導<sup>15)</sup> (Radiation Induced Conductivity: RIC) の効果により電子線照射領域の導電率が上昇し、試料表面に存在する電子が表面ないしは内部を通過しグラウンドへと流出し、二次電子の放出により残された正孔が観測されたためだと考えられる。

ここで、電子の飛程 (最大到達深度) について考えてみる。なお、飛程計算においては(1)式に示すフェーザの実験式を利用し算出した。フェーザの実験式自体はアルミニウムを試料として電子の最大飛程を実験的に求めた式であるが、今回の試料に付与されているコーティング剤である  $MgF_2$  の密度を用いて換算した。

$$R = \frac{0.407E^{1.38}}{\rho} \quad (1)$$

(1)式において、 $R$  は飛程[cm]、 $E$  は照射する電子のエネルギー[MeV]、 $\rho$  は透過する物質の密度[g/cm<sup>3</sup>]を示している。

本実験では、電子の照射エネルギー  $E = 0.020$  [MeV]、透過する物質、つまり  $MgF_2$  の密度  $\rho = 3.15$  [g/cm<sup>3</sup>] であるので、これらを(1)式に代入したところ電子の飛程  $R$  は  $R = 5.8$  [ $\mu m$ ] と求めた。

コーティング剤の付与厚さに関する資料は見つけることはできなかったが、多層コーティングされていることから  $1$  [ $\mu m$ ] 程であるとしても、コーティング剤の領域を電子は通過し、ガラス層に到達していると考えられる。

カバーガラスの正電位が緩和されていく理由として、ガラス層にトラップされた電子が印加電界に沿って表面側へと移動し、正孔と結合したためだと考える。

太陽電池カバーガラスである BRR/s 0213<sup>®</sup> (試料 No.2) の正電位の緩和時定数は  $8.3 \times 10^5$  [sec]であったが、日数に直すと約十日である。照射エネルギーが  $20$  [keV] の電子線を 1 分間照射するだけで、正電位が緩和されるのに十日以上かかることがわかる。カバーガラスが正帯電することは、衛星電位とカバーガラス電位の間で逆電位勾配が形成されやすくなり、放電に至るリスクを高めてしまう。光学的特性を失わず、かつ荷電粒子によって電離しにくいコーティング剤の選定が必要であると考えられる。

## 6. まとめおよび今後の予定

高分子材料膜 Kapton<sup>®</sup> 200H、表面コーティングが施された太陽電池カバーガラス 3 種および合成石英ガラス“AQ”に対して電子線照射を行い、表面電位を計測した。これにより以下の結論を得た。

- 表面コーティングが施された太陽電池カバーガラスの表面電位の時間履歴は、4 試料とも電子線照射の数時間のうちに正側の電位に遷移している点で類似性がある。
- 電子線照射により、コーティング剤に含まれる金属元素 (Mg) が電離を起し、二次電子の放出により残された正孔が観測され正帯電となる。

これまでの実験では再現性の確認を重視していたため、パラメータを統一して実験を行ってきた。今後は実験パラメータを変化させ、パラメータによる表面電位履歴への影響を明らかにする。実験パラメータとして、照射エネルギー、照射時間、電流密度などを考えている。特に電流密度を変化させる点に関しては、急務の課題として取り組んでいる。

JAXA の制定した帯電・放電設計標準では基本設計

要求として keV 電子による最悪時電流密度に  $1[\text{nA}/\text{cm}^2]$  を統一的に採用している<sup>16)</sup>。当研究室の実験系では、表 1 に示すように電子線照射エネルギーが  $20[\text{keV}]$  の場合で電流密度は  $64[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$  である。この値は設計標準の 64000 倍の値である。電流密度の大きさが表面電位履歴に与える影響を評価するためにも、電流密度を変化（減少）させ実験する必要がある。

#### 参考文献

- 1) H. C. Koons. et al., “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, 2000, Air Force Research Laboratory, pp. 7-11
- 2) M. Cho and H. Fujii, “Review on Charging and Discharging Phenomena in Space Environment: Arcing on High Voltage Solar Array and Future Issues”, Aeronautical and Space Sciences Japan, 2003, vol. 51, pp. 140-145
- 3) 豊田裕之ら, “EL イメージングによる太陽電池セルの劣化評価”, Proceedings of the 3rd Spacecraft Environment Symposium, 2007, pp. 99-104
- 4) Nitta. K, “Discharge Phenomena and the Countermeasure for Spacecraft”, The journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2011, vol. 131, no. 6, pp. 359-362,
- 5) 豊田裕之ら, “プラズマ環境における太陽電池セルの放電による劣化”, 第 50 回宇宙科学技術連合講演会, 2006, pp. 1979-1984
- 6) Kawakita, S. et al., “Influence of high energy electrons and protons on secondary electron emission of cover glasses for space solar cells”, Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2002, 2002. 20th International Symposium on, pp. 84- 87
- 7) JDSU, “Solar cell coverglass, radiation-resistant glass”
- 8) Qioptiq Space Technology, “Solar cell cover glasses”
- 9) Kitchen, C.A., “Teflon bonding of solar cell assemblies using Pilkington CMZ and CMG coverglasses-now a production process”, Photovoltaic Energy Conversion, 1994, vol. 2, pp. 2058-2061
- 10) Ianno, N.J., “Atomic oxygen induced degradation of MGF2 anti-reflective coatings”, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE, 2008, pp. 1-5
- 11) 小林重義ら, “合成石英ガラス”AQ”の特性”, 旭硝子研究報告, 1986, vol. 36, no. 1, pp. 149-154
- 12) John R. Dennison et al., “Methods for High Resistivity Measurements Related to Spacecraft Charging”, Plasma Science, 2006, vol. 34, pp. 2191-2203
- 13) 東レ・デュポン株式会社, “カプトン総合カタログ”
- 14) 国立天文台, “理科年表平成 22 年(机上版)”, 丸善株式会社, 2009, 1041p
- 15) Yang, G.M., Sessler, G.M., “Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films”, Electrical Insulation, IEEE Transactions on , 1992, vol. 27, no. 4, pp. 843-84
- 16) 宇宙航空研究開発機構, “帯電・放電設計標準”, 2010, 88p