

電子線照射した太陽電池カバーガラスの 表面電位特性に関する研究

○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)

The study on the surface-potential characteristic of the solar-cell cover glass irradiated by electron beam
Naoki Higashiyama, Rikio Watanabe, Hiroaki Miyake (Tokyo City University),
Masato Takahashi, Teppei Okumura (JAXA)

Key Words: space, solar cell, cover glass, electron beam

Abstract

Spacecrafts are charged under plasma environment and radiation environment in space, and it may lead failures and anomalies of spacecrafts 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 cover glasses with coatings after electron irradiation. We found that the surface potential on cover glasses becomes positive within a few hours after irradiation. Comparing the surface potential histories of coated cover glass and silica glass revealed that the positive potential of cover glass 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 difficult to ionization by charged particles.

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、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¹⁾。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出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から本体とは異なる電位を持つことができ、これらの電位差が大きくなると放電が発生する²⁾。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³⁾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。

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⁴⁾。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⁵⁾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し、表面電位特性を理解することは重要である。

2. 研究目的

そこで、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1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。

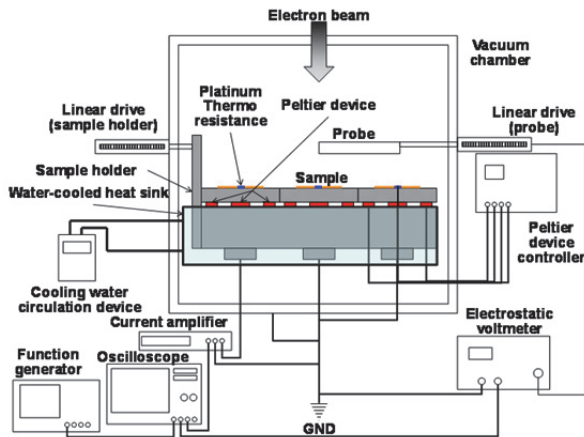


図1 計測システム構成図

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[®] 200H、表面コーティングが施された太陽電池カバーガラス 2 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.2-4 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[®]

BRR/s 0213[®]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⁶⁾。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。これらの長波長光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(MgF₂)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(ZrO₂)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⁶⁾。

4.2.2 CMG 100 AR[®]

CMG 100 AR[®]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⁷⁾。CMGとは Pilkington社のガラスの名称であり、ガリウムヒ素太陽電池の熱膨張係数に合わせたガラスを示す⁸⁾。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(MgF₂)の多層コーティングが用いられている⁹⁾。

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(SiO₂)から成る石英ガラスを指す。通常、液体材料(SiCl₄ 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¹⁰⁾。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 2 に Kapton[®] 200H と BRR/s 0213[®]の表面電位の時間履歴を示す。また、図 3 に Kapton[®] 200H と太陽電池カバーガラス 2 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(負電位)V[V]を、横軸は電子線照射後の経過時間 t[hour]を示す。

Kapton[®] 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 2 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。

表 1 実験条件

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Irradiation	Energy [keV]	15	20	20	20	20
	Time [sec]	60	60	60	60	60
Vacuum level [Pa]		10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Current density [nA/mm ²]		485	639	639	639	639
Sample		Kapton [®] 200H	BRR/s 0213 [®]	BRR/s 0213 [®]	CMG 100 AR [®]	合成石英ガラス
Sample thickness [μm]		50	100	100	100	1.13[mm]

当研究室では、これまでに電荷蓄積法¹¹⁾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[®] 200Hの減衰時定数は 8.3×10^5 [sec]、体積抵抗率は 2.8×10^{16} [$\Omega \cdot m$]となり、体積抵抗率はメーカー公称値¹²⁾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体積抵抗率の取得には至っていない。試料 No.2 のBRR/s 0213[®]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 8.3×10^5 [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。

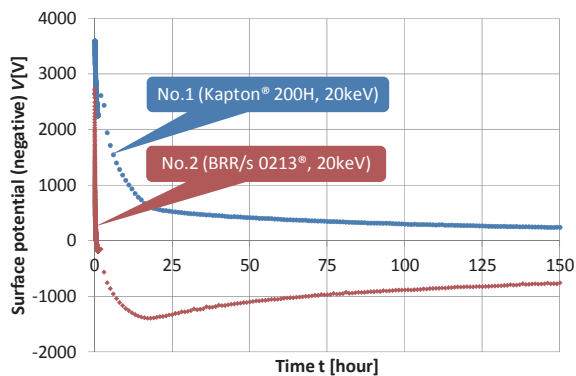


図2 Kapton[®] 200H と BRR/s 0213[®]の表面電位

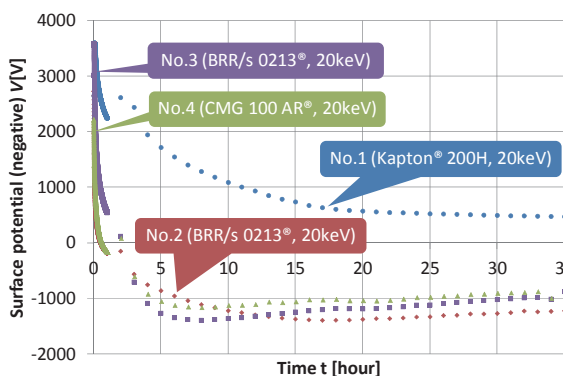


図3 Kapton[®] 200H と太陽電池カバーガラス2種の表面電位の時間履歴

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4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5に合成石英ガラス”AQ”と太陽電池カバーガラス2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(負電位)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 2.2×10^8 [sec]、体積抵抗率は 6.1×10^{18} [$\Omega \cdot m$]となった。製造元である旭硝子株式会社の資料¹⁰⁾によれば、体積抵抗率は200℃のとき 3×10^{10} [$\Omega \cdot m$]、300℃のとき 3×10^8 [$\Omega \cdot m$]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¹³⁾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。

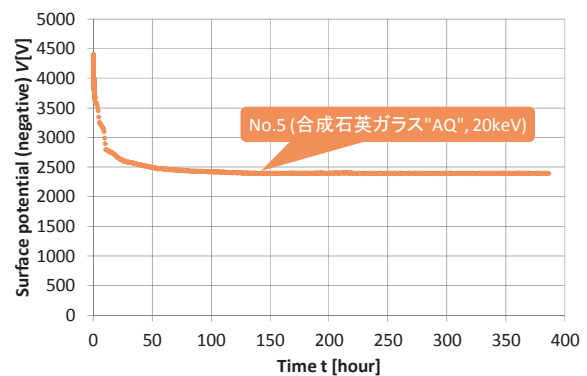


図4 合成石英ガラス”AQ”の表面電位の時間履歴

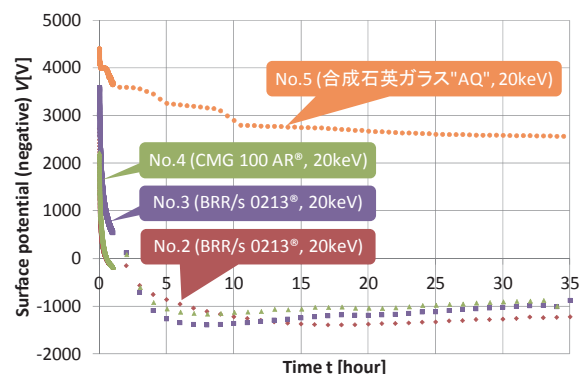


図5 合成石英ガラス”AQ”と太陽電池カバーガラス2種に対する表面電位の時間履歴

5. 考察

図3および図5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 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。

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)が電離を起こし、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。また電子線照射により、放射線誘起伝導¹⁴⁾(Radiation Induced Conductivity: RIC)が促進され、導電率が上昇する。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、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。

太陽電池カバーガラスである BRR/s 0213[®](試料 No.2)の正電位の緩和時定数は 8.3×10^5 [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

高分子材料膜 Kapton[®] 200H, 表面コーティングが施された太陽電池カバーガラス 2 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、3 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)が電離を起こし、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。
- RIC による導電率の上昇によって、表面コーティングが施された太陽電池カバーガラスの正帯電が促進される。
- 試料 No.2 の BRR/s 0213[®]は、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。緩和時定数は 8.3×10^5 [sec]となった。

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) 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
- 5) 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
- 6) JDSU, “Solar cell coverglass, radiation - resistant glass”
- 7) Qioptiq Space Technology, “Solar cell cover glasses”
- 8) Kitchen, C.A., “Teflon bonding of solar cell assemblies using Pilkington CMZ and CMG coverglasses-now a production process”, Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on, 1994, vol.2, pp.2058-2061
- 9) Ianno, N.J., “Atomic oxygen induced degradation of MGF2 anti-reflective coatings”, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE, 2008, pp.1-5
- 10) 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
- 11) John R. Dennison et al., “Methods for High Resistivity Measurements Related to Spacecraft Charging”, Plasma Science, 2006, Vol.34, pp.2191-2203
- 12) 東レ・デュポン株式会社, “カプトン総合カタログ

グ”

- 13) 国立天文台, “理科年表平成 22 年(机上版)”, 丸善株式会社, 2009, 1041p
- 14) 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