

宇宙用太陽電池カバーガラスの帯電特性評価

○宮本直典・山中直輝・松原貴幸・藤井治久(奈良高専)、大平正道・奥村哲平(JAXA)

1. はじめに

1990年代より、宇宙機単体の大型化、大電力化が顕著になり始めた。宇宙環境には荷電粒子や紫外線などが存在し、これらが宇宙機との相互作用を引き起こし、安定運用に大きな影響を与える。そのため、宇宙機には、電気・電子機器を熱真空環境から保護する目的で宇宙機表面に熱制御材料が取り付けられ、電力源となる太陽電池の表面には放射線などを防ぐためにカバーガラスが取り付けられている。しかし、1997年にアメリカの100Vバス電圧放送衛星Tempo-2において、静止軌道上で発電電力が低下するという事象が確認された。その原因として、プラズマ粒子によるカバーガラス上の静電気放電とそれに基づくアレイ回路の持続放電現象が考えられている¹⁾。そのメカニズムについては十分理解されているとは言えず、太陽電池セルにおける帯電放電現象のメカニズムを解明することが非常に重要な課題となった。また、そのような宇宙機の帯電現象を防止するためには、予め帯電解析する必要がある。わが国においては、宇宙機の帯電解析プログラムMUSCATが開発された²⁾。そのプログラムには、表面材料の各種物性パラメータを予め入力しておく必要があり、その代表的な体積抵抗率や2次電子放出係数の取得が要請されている。著者らは、これまで高分子フィルムのパラメータを取得してきた³⁾が、今回、太陽電池のカバーガラスの二次電子放出特性、体積抵抗率の検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験試料

実験試料はARコートカバーガラス単体3種類、ARコートのないカバーガラス単体1種類、シリコン接着剤で貼り付けたカバーガラス1種類である。表1に実験試料の諸元を示す。

図1にCMXカバーガラスを使用した実験試料の構成を示す。カバーガラスは厚さ0.1mmである。表面はARコーティングされている。図1(a)は、カバーガラス単体の特性を評価するため、カバーガラス裏面にアルミ蒸着した試料で、アルミ板に銀ペーストで貼り付けた。図1(b)は、実際のカバーガラスの貼りつけ状態を模擬するため、カバーガラスをシリコン接着剤(Dow Corning Toray, SE9186 clear)⁴⁾を使用してアルミニウム板に貼り付けた試料である。

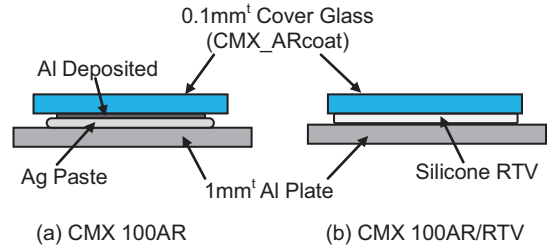


図1 実験試料構成図

表1 実験試料の諸元

試料	カバーガラス厚さ[mm]	ARコート	シリコン接着剤
CMX500AR	0.5	あり	なし
CMX100AR	0.1	あり	なし
CMX100AR/RTV	0.1	あり	あり
CMX100NC	0.1	なし	なし
CMG100AR	0.1	あり	なし

2.2 実験方法

図2に実験系の概略図を示す。

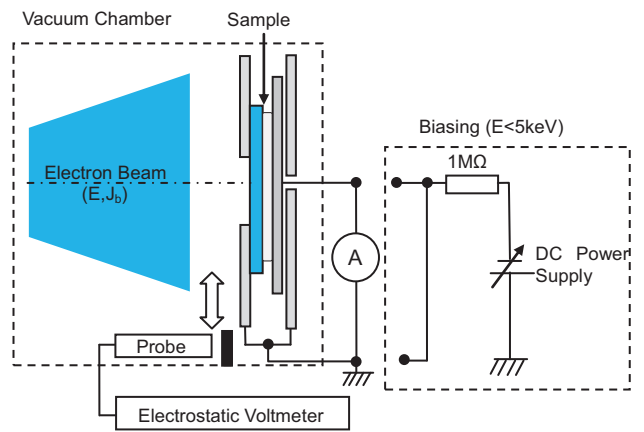


図2 帯電計測実験系概略図

宇宙環境を模擬するため試料を真空チャンバ内に設置し、ロータリーポンプとターボ分子ポンプを使用してチャンバ内の圧力を 1×10^{-6} Torr程度にした。電子銃で加速された電子ビーム(エネルギーE、電流密度 J_b)を試料に照射した。その時の表面電位は、試料上をプローブ(TREK、Model 3455E)で挿引することにより非接触表面電位計(TREK、Model 341B)で測定した。また、試料に流れる電流はペンレコーダ(横河電機、LR8100)で測定した。電

電子ビームのエネルギーE(keV)は 0.2~7keV の範囲で設定し、数分おきに試料の表面電位を測定した。照射時間は10~60分とし、室温にて行った。なお、電流密度 J_b はほぼ一定(0.1nA/cm²)とした。照射領域は、カバーガラスのサイズが 60×43mm² の場合は 18cm²、76.2×37.3mm² の場合は 14cm² である。

E<5keV の場合は、直流電源(菊水電子,PHS10K)を使用して試料に負の DC 電圧をバイアスすることで、試料に照射されるエネルギーを減速させた。

3. 実験結果

3.1 CMX 100AR

まず、カバーガラス単体の特性の例として CMX100AR の結果について述べる。図 3 に E=5keV の時の表面電位と電流の時間特性、図 4 に 0.2keV ~7keV のエネルギーの電子ビームを照射した時の表面電位の時間特性を示す。

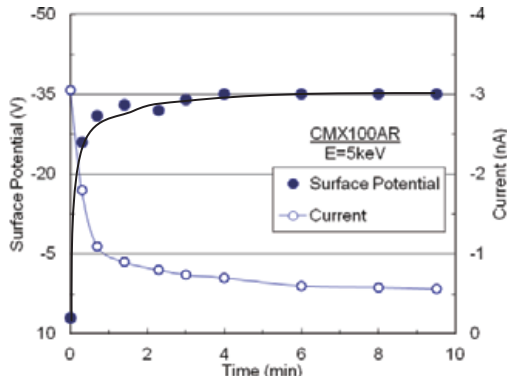


図 3 E=5keV、 $J_b=0.22nA/cm^2$ で電子ビームを照射した時の電流、表面電位の時間特性

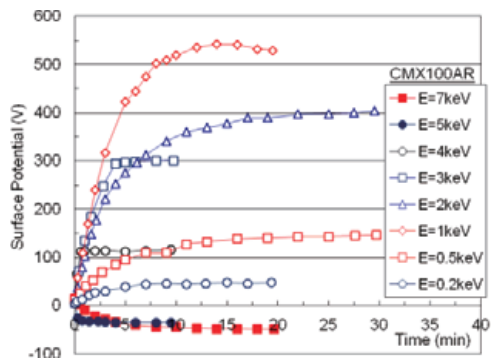


図 4 照射エネルギーを変化させた時の表面電位の時間特性

図 3 より電流は時間と共に急激に減少し、ほぼ一定の値になる。また、表面電位は時間と共に増加し-35Vほどで飽和した。図 4 において、5keV 以上では負に帯電し、4keV 以下では正に帯電することがわかる。そして、負帯電時は照射エネルギーが大きくなるにつれ表面電位が高くなり、正帯電時では照射エネルギーが小さくなるにつれ表面電位が高くなることわかる。

図 5 に飽和表面電位の照射エネルギー依存性を示す。図 5 より正帯電の閾値エネルギーは約 4.5keV であることがわかった。

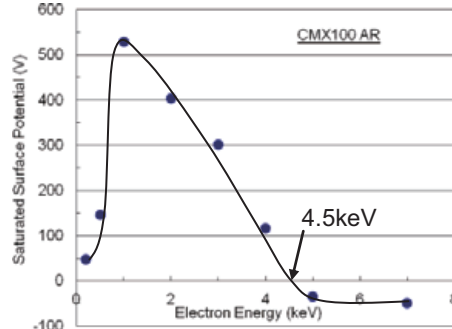


図 5 飽和表面電位の照射エネルギー依存性

次に、図 6 に正帯電時と負帯電時の電子ビーム照射停止後の電位減衰特性の例を示す。

図 6 より負帯電時、正帯電時共に減衰速度が速いことがわかる。また、照射エネルギーE=5keVの時、約10分で表面電位が負極性から正極性に変化した。

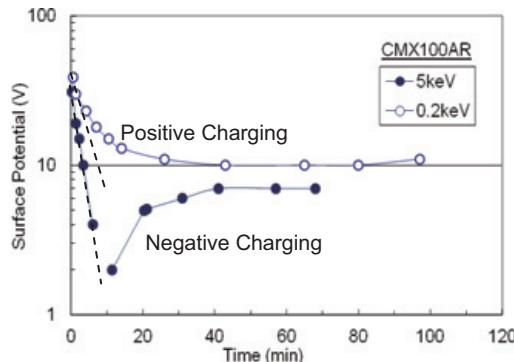


図 6 CMX100AR における電位減衰特性の例

3.2 CMX 100AR/RTV

次に、接着剤 RTV で貼り付けた CMX100AR/RTV の結果について述べる。図 7 に E=5keV の時の表面電位と電流の時間特性、図 8 に各エネルギーの電子ビームを照射した時の表面電位の時間特性を示す。

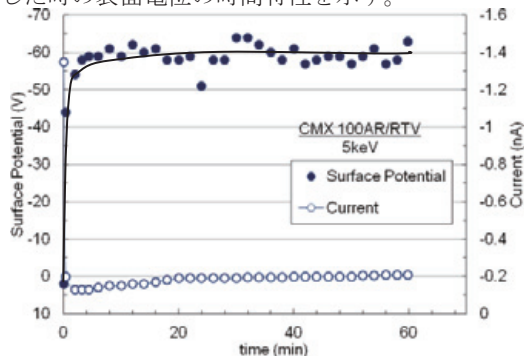


図 7 E=5keV、 $J_b=0.08nA/cm^2$ で電子ビームを照射した時の電流、表面電位の時間特性

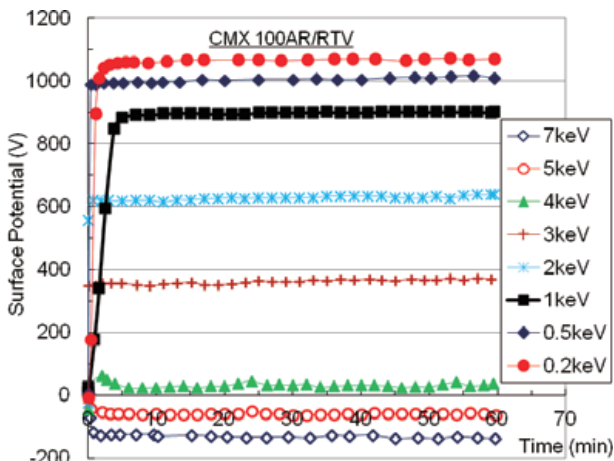


図 8 照射エネルギーを変化させた時の表面電位の時間特性

図 7 より電流は時間と共に急激に減少し、約 5 分から緩やかに上昇していることがわかる。表面電位は時間と共に増加し-60V ほどで飽和した。図 8 において 5keV 以上では負に帯電し、4keV 以下では正に帯電することがわかる。そして、負帯電時は照射エネルギーが大きくなるにつれ表面電位が高くなり、正帯電時には照射エネルギーが小さくなるにつれ、表面電位が高くなることわかる。同図の結果から、表面電位 60 分値の照射エネルギー依存性を示すと図 9 のようになる。

図 9 より、正負帯電の閾値エネルギーは約 4.5keV であることがわかった。

次に、図 10 に正帯電時と負帯電時の電位減衰特性を示す。

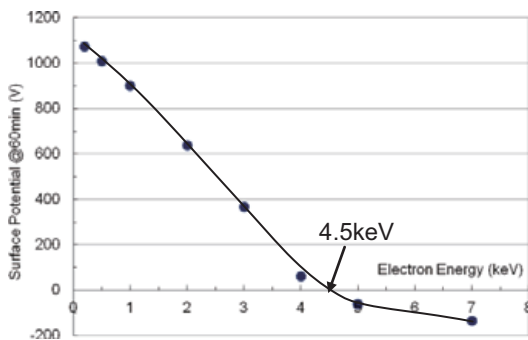


図 9 表面電位 60 分値の照射エネルギー依存性

図 10 より負帯電時、正帯電時共に図 5 に示した CMX100AR の電位減衰速度より減衰が遅いことがわかる。また、照射エネルギー $E=5\text{keV}$ の時、約 170 分で表面電位が負極性から正極性に变化した。

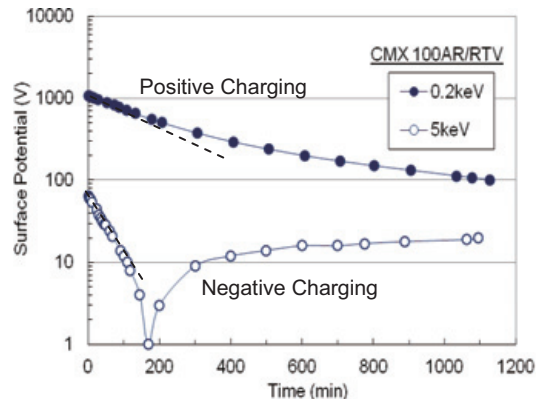


図 10 CMX100AR/RTV における電位減衰特性の例

4 実験結果の検討

4.1 二次電子放出特性の検討

節 3.1 と 3.2 で述べた CMX100AR と CMX100AR/RTV の飽和電位の照射エネルギー依存性において、いずれも $E=4.5\text{keV}$ において表面電位が 0 になるということがわかった。このエネルギーの電子を照射すると、帯電が生じない。このことは、入射電子数に対して放出する二次電子の数が等しいことを示している。つまり、この $E=4.5\text{keV}$ が、二次電子放出係数が 1 になるエネルギーであることを示している。

次に、厚さ 0.5mm の CMX500AR の飽和表面電位の電子エネルギー依存性を図 11 に示す。これより CMX500AR の閾値エネルギーも約 4.5keV であることがわかる。

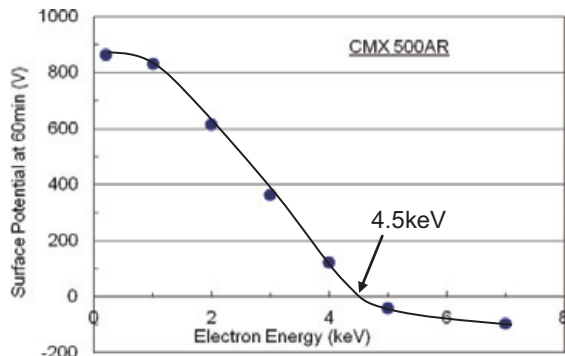


図 11 $J_b=0.1\text{nA/cm}^2$ の条件における CMX500AR の飽和表面電位の照射エネルギー依存性

次の図 12 に AR コートのない CMX100NC の飽和表面電位のエネルギー依存性を示す。CMX100NC の閾値エネルギーも約 4.5keV であり、CMX100AR、CMX500AR とほぼ同じであることがわかる。ただ、正帯電時、図 5 に示した CMX100AR に比べると表面電位が小さいことがわかる。このことは、AR コートが二次電子を放出しや

すくしていると考えられる。

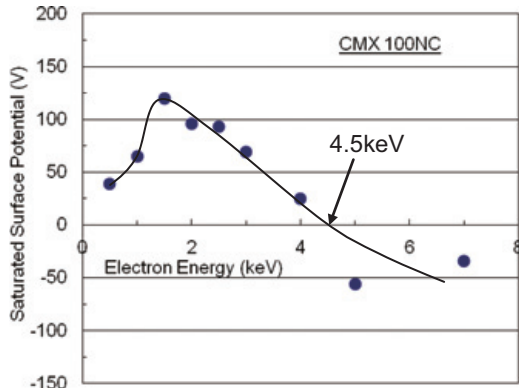


図 12 $J_b \doteq 0.1 \text{ nA/cm}^2$ の条件における CMX100NC の飽和表面電位の照射エネルギー依存性

次の図 13 に CMG100AR の飽和表面電位のエネルギー依存性を示す。図 13 より CMG100AR の閾値エネルギーは約 4.8keV であり、若干 CMX よりも高いエネルギーとなり、閾値エネルギーは母材の影響を受けると考えられる。

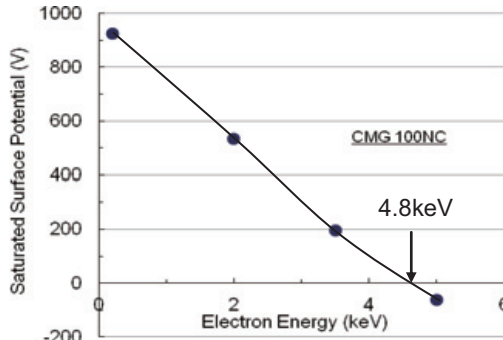


図 13 $J_b \doteq 0.1 \text{ nA/cm}^2$ の条件における CMG100AR の飽和表面電位の照射エネルギー依存性

4.2 体積抵抗率の評価

次に電位減衰特性の結果から体積抵抗率を検討する。一般に表面電位 V_s の減衰は次式で表される。

$$V_s = V_0 \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (1)$$

(1)式において、 V_s は減衰時の表面電位(V)、 V_0 は電位初期値(V)、 t は減衰中の時間(sec)、 τ は減衰時定数(sec)を示している。この時定数 τ は次式で表される。

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \rho_v \quad (2)$$

(2)式において、 ϵ_0 は真空の誘電率($=8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)、 ϵ_r は各カバーガラスにおける比誘電率、 ρ_v は体積抵抗率である。また、各カバーガラスの比誘電率 ϵ_r は LCR メ

ータ(Agilent U1733C)を使用して測定した。表 2 に各カバーガラスの比誘電率 ϵ_r を示す。また、シリコン接着剤の比誘電率は $\epsilon_{9186} = 2.7$ である⁵⁾。

表 2 各カバーガラスの比誘電率

カバーガラス	比誘電率
CMX500AR	9
CMX100AR	9
CMX100NC	10
CMG100AR	8.6

シリコン接着カバーガラスはカバーガラスと接着剤の二重構造であるため複合誘電体として考えることができる。(3)式に複合誘電体の比誘電率を表わす式を示す。

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (d_1 + d_2)}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} \quad (3)$$

(3)式において、 ϵ_1 はカバーガラスの誘電率、 ϵ_2 は接着剤の誘電率、 d_1 はカバーガラスの厚さ、 d_2 は接着剤の厚さである。

なお、CMX100AR/RTV の接着剤の厚さは 0.45mm であり、(3)式より比誘電率は 3.1 である。

これらの式を使って、各カバーガラスの表面電位減衰特性から、体積抵抗率を評価し、照射エネルギーの関数として表わすと図 14 のようになる。図 14 中には、RTV 単体の体積抵抗率の測定値を示している。

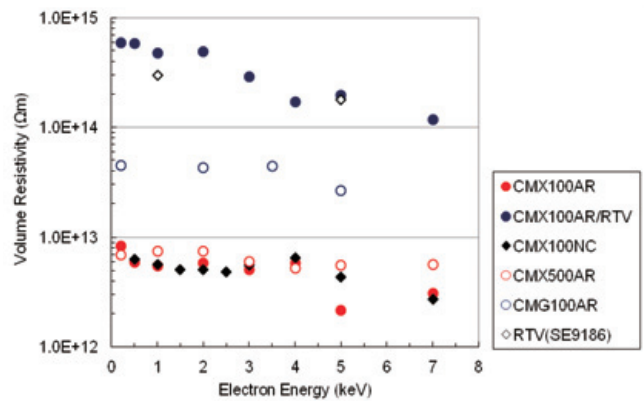


図 14 各試料での体積抵抗率の照射エネルギー依存性

図 14 から各試料の体積抵抗率は各照射エネルギーに対してほぼ一定である。

CMX 100AR/RTV は CMX 100AR より約 2 桁大きいことがわかる。この抵抗値は接着剤単体の体積抵抗率とほぼ等しいので、接着剤の体積抵抗率による影響であると考えられる。

CMX500AR と CMX100AR の体積抵抗率はほぼ同じ $(5 \sim 7) \times 10^{12} \Omega \text{ m}$ であることがわかる。このことは、体積抵抗率は厚さによらないと考えられる。

CMX100NC の場合も各照射エネルギーに関係なく体積抵抗率は約 $6 \times 10^{12} \Omega \text{m}$ である。このことは、体積抵抗率は AR コートの影響を受けないと考えられる。

しかしながら、CMG100AR の体積抵抗率は約 $4 \times 10^{13} \Omega \text{m}$ であり、CMX100AR より 1 桁ほど大きい。これは、ガラス組成が異なるためであると考えられる。

最後に図 15 に、CMX100AR の体積抵抗率を各照射エネルギーでの飽和表面電位の関数として示す。

体積抵抗率は表面電位に対してほぼ一定であることがわかる。そのため、体積抵抗率はバルク電界強度による影響がないと考えられる。

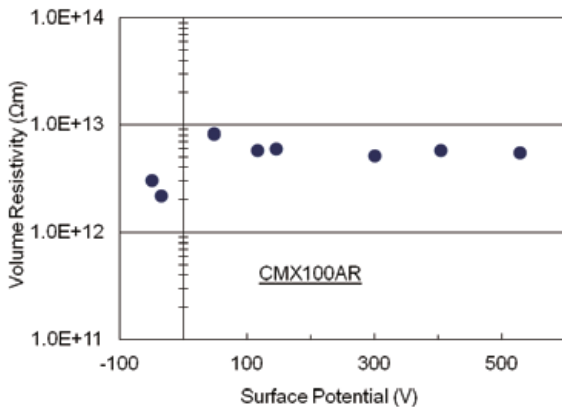


図 15 CMX100AR における体積抵抗率の表面電位特性

5 まとめ

本研究では AR コーティングされたカバーガラス 3 種類、コーティングされていないカバーガラス 1 種類、シリコン接着剤を貼り付けたカバーガラス 1 種類の帯電特性を 7keV 以下の電子ビームを照射し、照射中の帯電特性と照射後の電位減衰特性から二次電子放出特性と体積抵抗率の検討を行った。その結論を以下に示す。

- (1)カバーガラス単体においては、CMX では二次電子放出係数が 1 になる照射エネルギーは約 4.5keV で、CMG では約 4.8keV である。
- (2)AR コートは二次電子を放出しやすくしている。
- (3)CMX100AR と CMX500AR の体積抵抗率は(5~7)× $10^{12} \Omega \text{m}$ であり、厚さによる影響をほぼ受けないと考えられる。
- (4)CMX100NC の体積抵抗率は約 $6 \times 10^{12} \Omega \text{m}$ で CMX100AR とほぼ同じであり、AR コートの影響を受けないと考えられる。
- (5)CMX100AR/RTV は CMX100AR より体積抵抗率は約 2 桁大きい。このことは、接着剤の体積抵抗率が支配的であると考えられる。
- (6)CMG100AR の体積抵抗率は約 $4 \times 10^{13} \Omega \text{m}$ であり、CMX100AR より約 1 桁大きい。これは、ガラス組成が異なるためと考えられる。

- (7)体積抵抗率はバルク電界強度による影響がない。

参考文献

- 1)趙孟佑・藤井治久：『宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題,第 2 回宇宙環境と宇宙機の帯電電位』,日本航空宇宙学会誌,51 巻,592 号,pp139~145(2003)
- 2)趙孟佑：『宇宙太陽光発電の高電圧化に向けた課題』,電気学会誌, 121 巻, 6 号, pp.381~383(2001)
- 3)T.Muranaka, S.Hosoda, J.Kim, S.Hatta, K.Ikeda, T.Hamanaga, M.Cho, H.Usui, O.Ueda, K.Koga and T.Goka : "Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)",IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.36, pp.2094-2102(2008)
- 4)藤井・奥村・高橋：『電子ビーム照射による帯電計測から宇宙機表面材料の物性評価について』,第 9 回宇宙環境シンポジウム講演論文集, pp.119-126(2012)
- 5)Dowcorning Toray, "Electronics- Silicone- Catalog 2010"