

低エネルギー電子線照射による Ag 蒸着テフロン劣化について

柴野 靖子, 浅村 和史, 豊田 裕之, 小川 博之 (JAXA)

1. はじめに

ジオスペース探査衛星 ERG (Energization and Radiation in Geospace) は小型科学衛星標準バスを用いた衛星であり, 2015年にイプシロンロケットでの打上げが予定されている. ミッションの目的は宇宙嵐に伴うジオスペースの大変動とそれに伴う相対論的粒子生成の物理プロセスを探ることである. このため, ERG 衛星は放射線帯において広いエネルギー範囲の粒子と広帯域の電磁場・波動観測を行う^[1]. 従って, 放射線環境がとても厳しく, その環境に耐える材料の選択が必要とされる. また, 搭載される粒子系の観測要求として, 衛星表面の導電性の確保がある. そのため ERG の熱設計を進めるうえで, 上記の要求を満たす熱制御材選択が重要となる.

衛星表面の導電性対策は, MLI の最大層を Black Kapton にする処置を行った. 放射線による影響は, その軌道によって異なるため, ERG 軌道で与えられる陽子線と電子線の fluence をそれぞれ見積もり, 試験を実施した. 本稿では電子線照射試験の結果について得られた結果を報告する.



2. 銀蒸着 Teflon について

ERG の衛星構体に使用する材料について Electron 照射試験を実施した. 特に放熱面材料として使用を検討している銀蒸着テフロンは, ハッブル宇宙望遠鏡^[2]や LDEF^[3]などの軌道上実績や地上試験^[4]において, 電子線に弱いことが明らかになっている. その劣化は, 表面熱光学特性には大きな影響を与えないものの, Teflon に機械的な劣化を与える. ERG では銀蒸着テフロンを構体パネルに接着して使用するため, 亀裂等が生じてパネルに接着されていれば放熱面としての役割を十分に果たす. 放熱面の材料としては, 放射線耐性のある OSR が候補に挙げられるが, 銀蒸着テフロンと比較すると施工に時間を要し, コストやスケジュールにインパクトを与える. そこで, 銀蒸着 Teflon が ERG の軌道上でミッションライフの 1 年間にどの程度の劣化を受けるのかを明らかにし, 放熱面材料として適切かどうか判断したい. また, 銀蒸着 Teflon 表面は導電性を確保する必要があるため, 最外層に ITO (Indium Tin Oxide) 層をコーティングする必要がある. この層が劣化すると表面導電性が確保できなくなるため, この層自身の劣化の有無も調べる必要がある.

そこで, 本試験においては飛程の短い低エネルギーの電子線照射 (10keV) と飛程の長い高エネルギー (1MeV) で電子線照射試験を行った. 10keV 電子は数ミクロンの飛程であるため, ITO 層と Teflon 表面のみに

影響を与えることが予想され、1MeV 電子は数mmの飛程のため銀蒸着 Teflon 全体への劣化を観察することができることを予想している。

3. 低エネルギー電子線照射試験

サンプル表面に及ぼす劣化について調べるため、共同利用の施設を使用させて頂き、低エネルギー電子線での試験を実施した。照射 fluence は Polar 衛星の観測結果を用いて ERG 軌道上における電子フラックスを推定することで設定した。できる限り表面のみの劣化を観察するため、装置が安定して使用できる 10keV のエネルギーを照射して試験を行った。試験の setup を Fig.1 に示す。

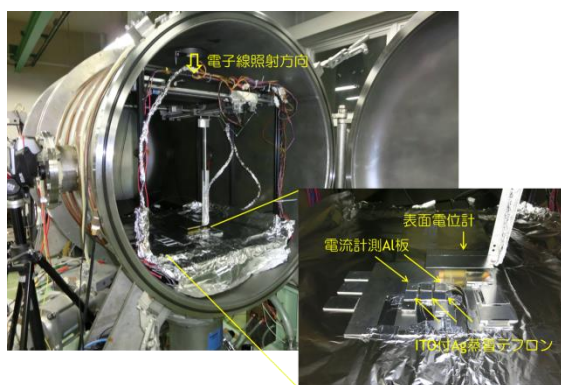


Fig.1 低エネルギー照射試験 Set up

3-1. 試験条件

試験前にファラデーカップを用いて電子ビームの照射範囲を確認した。また、照射中は Al 板を用いて電子電流密度をモニターしながら試験を実施した。定期的にサンプル自体への電子電流密度も確認し、均一に電子線が照射されるように配慮したが、若干の時間変化が生じたため、同じ値での照射は難しかった。試験は必要な個体数を

得るために 3 回実施した。

その際の電子電流密度は、試験#1, #2 で約 $100\text{nA}/\text{cm}^2$ のち約 $1.25\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、試験#3 は約 $100\sim 170\text{nA}/\text{cm}^2$ で試験を実施した。Total としては ERG の軌道上で約 2 年分の照射量になるように試験を実施した。但し、試験#3 では電子電流密度が安定しなかったため、平均値で計算して 2 年分程度と計算した。電子線はサンプルに対して垂直方向に照射される。電子線を照射することによってサンプルの温度が上昇することを懸念していたが、 10°C 程度の範囲内に収まっていた。

3-2. 試験結果

照射中はチャンバーの窓から動画を撮影し、その変化を観察した。その結果、ある一定の照射後に銀蒸着テフロン表面に白色の斑点が現れた。その斑点はサンプル一面に散在し、ある一定の照射量までは増えるが、途中からは増加しなかった。照射後に顕微鏡で観察したところ、斑点部分は円形の放電痕が見られた (Fig.2)。放電痕がいつか重なり合った場所も観察された。また、サンプル表面は若干黄色に変色し、表面全体に伸縮が生じて凹凸した様子と、さらに硬化して硬くなったような様子が観察された。

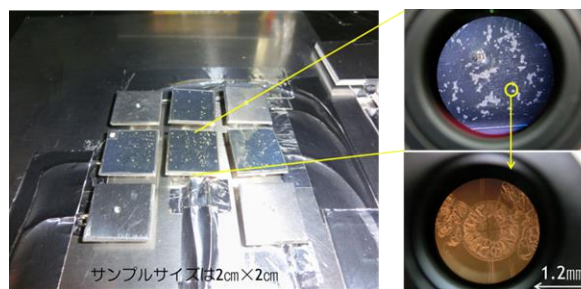


Fig.2 照射後サンプル配置図(左)と
サンプル表面の顕微鏡観察(右)

一方で、表面光学特性を前後で測定したところ、その変化はほとんど見られなかった(Table.1)。表面熱光学特性の変化は熱制御材としては重要な値であるが、電子線による影響は小さいため、放熱面として問題なく使用できると考えられる。

Table.1 表面光学特性の変化

熱光学特性	α	ϵ
試験前	0.10	0.79
試験後	0.12	0.76

*試験#2の前後で測定を実施

また、表面導電性についても試験前後で測定を実施したが、変化はあるものの ERG の規定値内に十分に納まる(Table.2)。#3の試験後のサンプルでは、表面の傷がたくさんある場所で測定すると、値は大きくなり、比較的表面の滑らかな箇所で測定すると値が小さくなることが分かった。そのため、表面の傷の有無が表面抵抗の変化と関係していることが明らかになった。

Table.2 表面抵抗値の変化

表面導電性	表面-表面 (Ω/sq)	表面-Al板 (Ω/sq)
#2 試験前	3×10^3	3×10^3
#2 試験後	3×10^3	—
#3 試験前	4.5×10^3	2.8×10^4
#3 試験後	1.8×10^4 $\sim 1.7 \times 10^7$	2.3×10^4 $\sim 1.2 \times 10^6$

これらの結果から、低エネルギーにおいて2年分の電子線を照射した場合、劣化は生じるものの、その影響は衛星の放熱面と

しての機能を失わせるようなものではないことが明らかになった。

4. 照射レートによる変化

試験#1, #2においては1250倍程度、試験#3においては100倍程度の加速試験を実施した。Totalの照射量も3回の試験で全く同じにはできなかった。但し、低レートで長時間照射した試験#3の際に、放電痕の丸い斑点に対して一つの軸方向に線状の亀裂が発達する様子が観察された(Fig.3)。そのため、照射レートの異なるサンプルと比較すると、一つの放電痕のサイズが大きいように見える。またこの線状の劣化は一枚のサンプルでほぼ同じ方向に向いて形成されている。一方で、低レートのサンプルには、高レートの照射時に見られた全体に生じる細かい傷は少なくなっている。

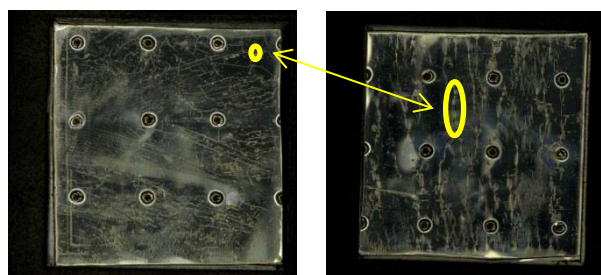


Fig.3 高電子電流密度で照射(左), 低電子電流密度で照射(右). 黄色の円の中は1つの放電痕を囲う。

5. 高エネルギー電子線照射試験

サンプル全体への電子線による劣化の影響を調べるため、原子力研究所(高崎)の1号加速器を用いて電子線照射試験を実施した。

5-1. 試験条件

電子線が均一に照射される位置にサンプルを配置し試験を実施した。サンプルが高

温にならないように水冷板の上に、フィルターをはさんでサンプルを取り付けて試験を実施した。電子線によって空気中の酸素がオゾンとなり、サンプルに影響を与える可能性が考えられるため、N₂フロー下で照射を実施した。アルミ板に貼りつけたサンプルの厚さ以上の飛程がある 1MeV の電子線を用いて、ERG の 1.5 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月、12 ヶ月、24 ヶ月分の予測値を基に試験を実施した。

5-2. 試験結果

1.5 ヶ月分の照射時から、Ag 蒸着テフロンを接着しているアクリル系両面テープに浮きが発生した。さらに 6 ヶ月後からはテフロン自身の劣化が始まり、表面の亀裂・破損が発生する。一連の試験結果を Fig.4 に示す。また、表面熱光学特性と表面抵抗値は大きく変化しなかった。

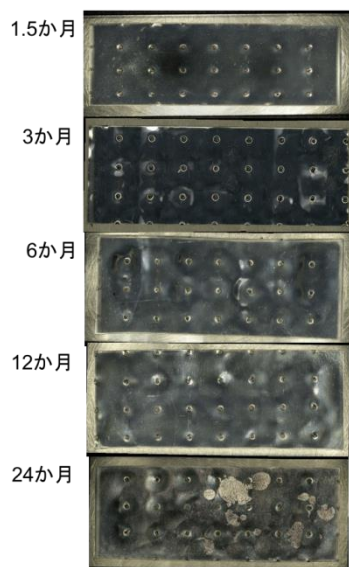


Fig.4 各期間の電子線照射後の銀蒸着テフロン
(規則的な孔はパーフォレーション)

実際に衛星で接着剤の浮きが生じた場合、構体パネルとの間の熱コンダクタンスが悪

くなり、実効放射率が減少する。またテフロンの劣化によって、表面が剥がれると放熱面積が減少することになる。また、表面の亀裂や破損はパーフォレーションで十分に導通を確保していた構造の保証が難しくなる。

6. 結論

本稿では ERG の放熱面材料として使用を検討している銀蒸着テフロンに対して低エネルギー電子線、高エネルギー電子線を照射した。その結果は以下となった。

- 低エネルギー電子線照射による劣化は表面に傷がつく程度に留まった。熱光学特性、表面抵抗値にも大きな変化は見られず、熱制御材としては採用できる結果となった。
- 高エネルギー電子線照射では、接着剤への影響とテフロンへの影響がそれぞれ生じた。どちらの劣化によっても放熱面の実効放射率の低下が懸念される。また、テフロン表面の劣化は導電性にも影響を及ぼす。但し、熱光学特性への影響はほとんど見られない。

これらの結果から、ERG の熱設計としてはリスクを考慮した上で、放熱面材料として使用するか検討が必要であると考えている。

謝辞

大学共同利用の中型チャンバーと電子銃、顕微鏡を利用させて頂きました。顕微鏡の使用に当たっては、宇宙科学研究所長谷川直氏、鈴木洵子氏にご支援頂きました。また、原子力研究所での試験を行うにあたり、JAXA 開発研究本部電源 G の今泉充氏、

JAEA の佐藤真一郎氏, AES の原田次郎氏
に多大なるご支援を頂きました。ここに感
謝の意を表します。

Reference

[1] Y. Miyoshi et al., “The Energization and Radiation
in Geospace (ERG) Project,” American Geophysical
Union, 10.1029, 2012GM001304.

[2] Joyce A. Dever et al., “Mechanical Propertied
Degradation of Teflon[®] FEP Returned From the Hubble
Space Telescope,” AIAA-98-0895, NASA/TM-
1998-206618.

[3] David G. Gilmore, 2nd ed., The Aerospace Press, EL
Segundo, California, 2002, Chaps. 4.

[4] H. Gary Pippin et al., “Analysis of Metallized
Teflon[™] Thin-Film Materials Performance on
Satellites,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41,
No. 3, May-June. 2004, pp., 322, 325.