

# 衛星帯電・放電現象に関わる絶縁物材料の表面・体積抵抗の測定

## Measurements of Surface and Volume resistivity of Insulator Materials Used for Artificial Space Satellite under Vacuum Condition

小林 信一<sup>1\*</sup>、山納 康<sup>1</sup>、仁田 工美<sup>2</sup>  
Shinichi Kobayashi<sup>1</sup>, Yasushi Yamano<sup>1</sup>, Kumi Nitta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学大学院 理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA

### Abstract

This paper investigates surface and volume resistivity of UV-irradiated or EB-irradiated insulator materials used for the artificial satellites. Measurements were carried out under vacuum conditions. The measured materials are a glass which is used for the cover glass of solar panel and a polyimide film which is used for the thermal control material on the satellite. It was confirmed that the surface resistivity and volume resistivity had no difference regardless of UV or EB irradiation. But the chemical surface state of UV-irradiated polyimide film was changed according to irradiance level. The change in surface state of UV-irradiated polyimide film was bigger than EB-irradiated one.

**Key Words:** Insulator material, Surface resistivity, Volume resistivity

### 1. はじめに

熱制御材料のポリイミドフィルムや太陽電池パネルのカバーガラスなど、宇宙機の設計に必要な絶縁材料の選定には、機械的特性、熱光学特性、そして電気的特性などの物性値が必要である。また、宇宙環境下では真空であると共に、厳しい放射線環境にあり、電子線などの放射線によって絶縁材料の分子鎖が架橋、切断などを起こし、電気的特性が変化することが考えられる。そこで宇宙機の運用期間の長期化を図るためにも、衛星用絶縁材料の電気的な劣化に関するデータが必要になってくるが、まだ十分にデータがあるとはいえない。

本研究では、太陽電池パネルのカバーガラスやポリイ

ミドフィルムの紫外線照射試料、電子線照射試料の表面および体積抵抗率を真空中で測定し、紫外線照射、電子線照射が与える影響を調査した。

### 2. 測定試料

測定試料は、ポリイミドフィルム、反射防止膜付ガラスの2種類の衛星用絶縁材料を用い、それぞれ未照射試料、紫外線照射(UV照射)試料、電子線照射(EB照射)試料を用意した。ポリイミドフィルム(PI)、反射防止膜付ガラス(Glass A)の特徴を表1に示す。紫外線の照射条件は、波長閾が200nm~400nm、照射率が10ESD/day(ESD: Equivalent Solar Day, 1ESD=8.7×10<sup>2</sup>mJ/cm<sup>2</sup>)で、照射量は80ESD, 240ESD, 400ESDの3種類である。なお、照射源はキセノンランプを用いている。電子線の照射条件は線源加速電圧が500kV、線源電流が0.2mAで、照射量は300kGy, 900kGy, 1500kGyの3種類である。

---

\* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255  
電話: 048-858-3469, FAX: 048-855-7832  
Email: s.kobayashi@ees.saitama-u.ac.jp

表 1 各絶縁体の厚さおよび用途

名称	用途	厚さ[μm]
PI	熱制御材料	25
Glass A	太陽電池パネルのカバーガラス	111

### 3. 実験方法・装置

実験で使用した大気圧から  $10^{-3}$ Pa 程度の真空環境下で表面抵抗・体積抵抗測定試験を行える抵抗率測定容器の概略図を図 1 に示す。

また、抵抗率測定容器内に作成した表面抵抗・体積抵抗の測定回路を図 2、図 3 に示す。これらの回路により、試料表面に流れる電流  $I_s$  および試料内部を流れる電流  $I_b$  を測定し、表面抵抗率・体積抵抗率を算出した。

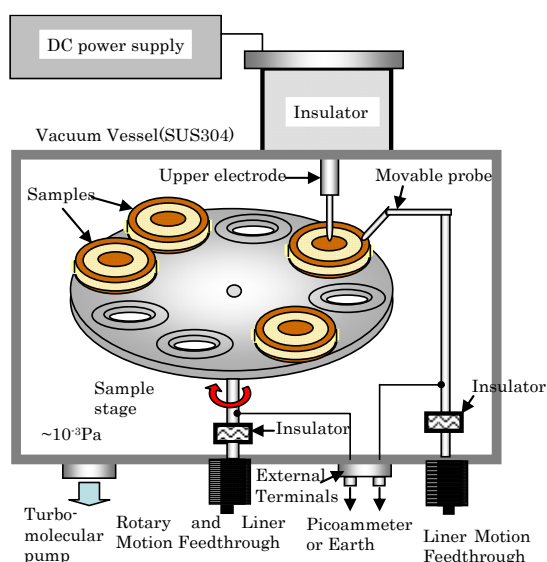


図 1 抵抗率測定容器の概略図

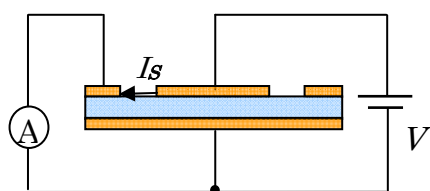


図 2 表面抵抗測定用回路

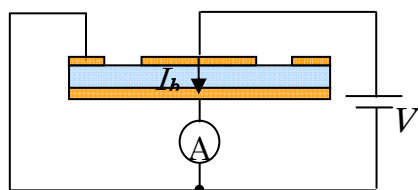


図 3 体積抵抗測定用回路

表面抵抗率  $\sigma$  [ $\Omega$ ] は、印加電圧  $V$  [V]、塗料表面に流れた電流値  $I_s$  [A] を用いて、(1) 式に従って算出する<sup>(1)</sup>。

$$\text{表面抵抗率} \quad \sigma = \frac{P}{g} \frac{V}{I_s} \quad [\Omega] \quad \cdots (1)$$

ここで  $g$  は電極間隔、 $P$  は有効円周長であり、(2) 式および(3) 式で表される。

$$\text{電極間隔} \quad g = R_2 - R_1 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ [m]} \quad \cdots (2)$$

$$\text{有効円周長} \quad P = 2\pi \times \frac{R_1 + R_2}{2} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ [m]} \quad \cdots (3)$$

また体積抵抗率  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] は、測定した電圧  $V$  [V]、塗料内部を流れた電流値  $I_b$  [A] を用いて、(4) 式に従って算出する<sup>(1)</sup>。

$$\text{体積抵抗率} \quad \rho = \frac{A}{t} \frac{V}{I_b} \quad [\Omega\text{m}] \quad \cdots (4)$$

ここで  $t$  は塗料の膜厚、 $A$  は有効面積である。各塗料の膜厚を表 1 に示す。また有効面積  $A$  は(5) 式で表される。

$$\text{有効面積} \quad A = \pi \times \frac{R_1 + R_2}{2}^2 = 1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \cdots (5)$$

本実験では各試料に対して、抵抗率測定用に金蒸着または銀ペーストを用いて電極を形成した。

### 4. 結果および考察

図 4 に PI の UV 照射試料、図 5 に PI の EB 照射試料の真空中における体積抵抗率測定時の電流電圧特性を示す。印加電圧の増加とともに、内部電流が増加する傾向が見られた。表 2 に PI の UV 照射試料、表 3 に PI の EB 照射試料の真空中における 500V 値の表面および体積抵抗率を示す。PI は表面抵抗率、体積抵抗率ともに、今回の照射条件では UV 照射、EB 照射されたことによる大きな変化は見られなかった。

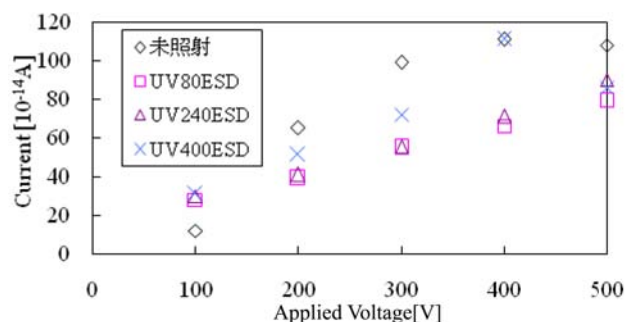


図 4 UV 照射された PI の内部電流と印加電圧の関係

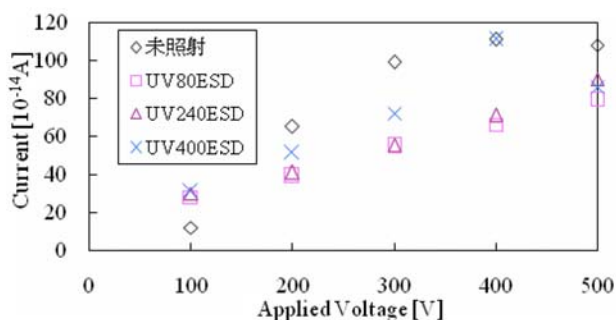


図5 EB 照射された PI の内部電流と印加電圧の関係

表2 UV 照射された PI の表面および体積抵抗率

測定試料	表面抵抗率[Ω]	体積抵抗率[Ωm]
PI (未照射)	$7 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{15}$
PI (80ESD)	$4 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{15}$
PI (240ESD)	$3 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{15}$
PI (400ESD)	$4 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{15}$

表3 EB 照射された PI の表面および体積抵抗率

測定試料	表面抵抗率[Ω]	体積抵抗率[Ωm]
PI (未照射)	$7 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{15}$
PI (300kGy)	$4 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{15}$
PI (900kGy)	$5 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{15}$
PI (1500kGy)	$4 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{15}$

図6にGlass AのUV照射試料、図7にGlass AのEB照射試料の真空中における体積抵抗率測定時の電流電圧特性を示す。印加電圧の増加とともに、内部電流が増加し、オーミックな導電性を示した。表4にGlass AのUV照射試料、表5にGlass AのEB照射試料の真空中における300V値の表面および体積抵抗率を示す。Glass Aも表面抵抗率、体積抵抗率ともに、今回の照射条件ではUV照射、EB照射されたことによる変化はほとんど見られなかった。

試料の中には放射線照射によって化学反応を起こし、恒久的変化が起こるものがある。特に有機絶縁材料においては、分子鎖が切断、架橋などを起こし、電気的特性が変化することがある。今回の測定では、表面及び体積抵抗率に対し、紫外線照射や電子線照射による影響はみられなかった。ポリイミドは耐放射線性が高いことを考慮すれば、照射による影響は少なかったと考えられる。しかし、試料が電子線照射後に大気曝露されると、大気

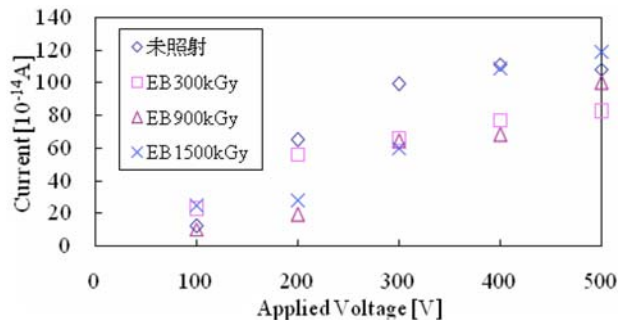


図6 UV 照射された Glass A の内部電流と印加電圧の関係

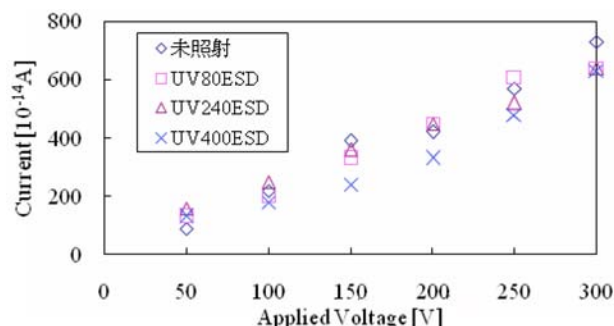


図7 EB 照射された Glass A の内部電流と印加電圧の関係

表4 UV 照射された Glass A の表面および体積抵抗率

測定試料	表面抵抗率[Ω]	体積抵抗率[Ωm]
Glass A (未照射)	$2 \times 10^{17}$	$4 \times 10^{13}$
Glass A (80ESD)	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$
Glass A (240ESD)	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$
Glass A (400ESD)	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$

表5 EB 照射された Glass A の表面および体積抵抗率

測定試料	表面抵抗率[Ω]	体積抵抗率[Ωm]
Glass A (未照射)	$2 \times 10^{17}$	$4 \times 10^{13}$
Glass A (300kGy)	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$
Glass A (900kGy)	$3 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$
Glass A (1500kGy)	$4 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{13}$

中の酸素などの影響により物性が変化したり、照射前の特性に回復したりする場合もあることが報告されている<sup>(2)</sup>。そこで、抵抗率測定に用いた試料と同じ条件で照射、保管されたポリイミド試料について XPS 分析を行い、表面状態を調べた。

図 8 にポリイミドの化学構造を示す。ここで各部分の元素にふられている番号は、以下で述べるピークフィットの結果に用いられている番号である。図 9 に UV 照射された PI の元素組成比を示す。未照射試料と比較すると、C の比率が上昇、O の比率が低下、N の比率は変わらない結果となった。N の比率が変わっていないことから、C の比率が上昇したのは表面汚染による影響ではなく、表面の化学構造の変化が原因であると考えられる。図 10 に同試料の  $C_{1s}$  のピークフィットの結果を示す。未照射試料に比べ、ベンゼン環の存在を示す C(Shake Up) ピークの比率が低下し、C(1, CHx) の比率が上昇する結果となった。ベンゼン環が減少したことから、CHx もしくは C-C 結合が増加している可能性が考えられる。図 11 に同試料の  $N_{1s}$  のピークフィットの結果を示す。未照射試料に比べ、N(C-N, C=N) の比率が上昇した。ポリイミドの構造中の N は、一つの化学状態しか存在しないため、UV 照射によって PI 中の N の結合が変化したと考えられる。以上から PI に UV 照射を施すと、表面の化学状態に変化が起きる可能性が高いことが判明した。しかし、今回の UV 照射による化学状態の変化は表面及び体積抵抗率に影響を与えるほどのものではなかったということがいえる。

図 12 に EB 照射された PI の元素組成比を示す。照射前後で特に大きな変化はみられなかった。図 13 に同試料の  $C_{1s}$  のピークフィットの結果を示す。未照射試料と比べると、300kGy 試料はほぼ同じ比率となり、900kGy 試料と 1500kGy 試料は C(1, CHx) の比率が上昇し、C(Shake Up) の比率が低下した。以上から、300kGy 試料は変化が起きておらず、900kGy、1500kGy 試料は化学状態が変化した可能性があるが、表面に汚染物質が堆積し、変化が起きたように見える可能性も考えられる。いずれにせよ、今回の EB 照射による化学状態の変化は、表面及び体積抵抗率に影響を与える程ではなかったということが言える。また、今回の照射条件では、紫外線照射の方が電子線照射よりも PI に対して影響を与えたということがわかった。

また、比較的短時間に起こる照射後効果として、高分子材料の照射直後の電気的特性の変化がある。特に絶縁特性や導電率は、照射中に生成した電子やイオンなどの

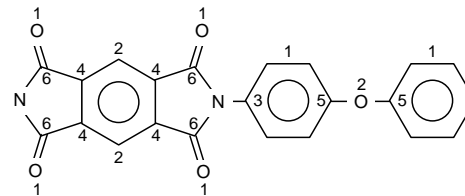


図 8 ポリイミドの化学構造

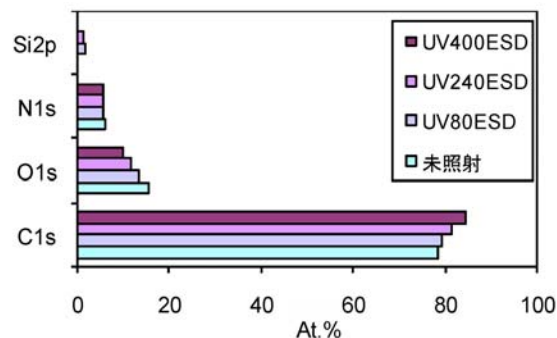


図 9 UV 照射された PI の元素組成比

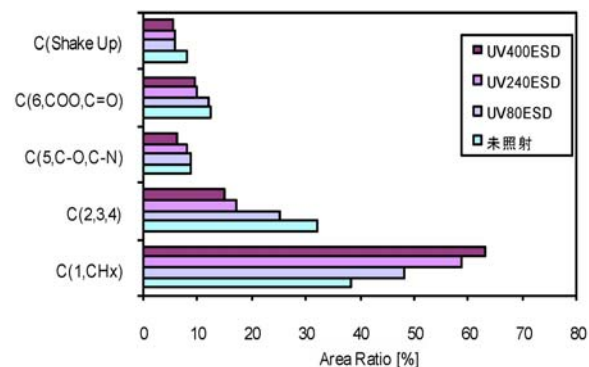


図 10 UV 照射された PI の  $C_{1s}$  のピークフィット結果

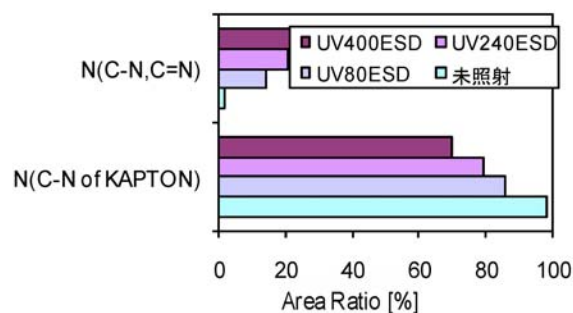


図 11 UV 照射された PI の  $N_{1s}$  のピークフィット結果

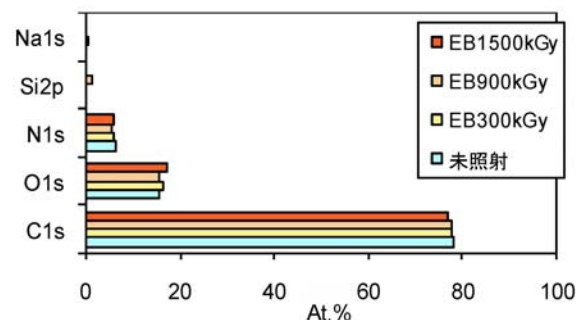


図 12 EB 照射された PI の元素組成比

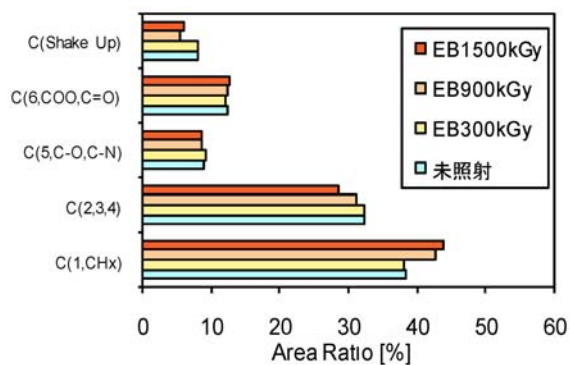


図 13 EB 照射された PI の  $C_{1s}$  のピークフィット結果

キャリアが電界や分子運動により、移動したり、消滅したりすることによって変化する<sup>(3)</sup>。そのため、電子線照射中と照射停止後しばらくの間は、試料の体積抵抗率が一時的に変化することが予想される。今回の測定は、試料の恒久的変化が及ぼす抵抗率への影響を調べたことになるが、今後は一時的変化による抵抗率への影響も調べる必要がある。

## 5. まとめ

本実験においては、ポリイミドフィルム、反射防止膜付ガラスとも、紫外線または電子線照射前後で表面及び体積抵抗率に変化は見られなかった。ポリイミドフィルムは、紫外線照射により表面の化学構造が変化する可能性が高いことがわかった。今回の照射条件では、電子線照射よりも紫外線照射の方がポリイミドフィルムに対して影響を与えたことがわかった。

### 文 献

- (1) 電気学会編：「電気絶縁材料の絶縁抵抗試験方法通則」pp.1-35, 電気書院(1998)
- (2) 岩田稔, 趙孟佑：「宇宙環境技術センターにおける材料研究」, 第2回宇宙環境シンポジウム講演論文集, pp.107-110 (2005)
- (3) 電気学会電気規格調査会：「電気絶縁材料の耐放射線性試験方法通則」, pp.53 (1996)