

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
研究期間： 2007～2009
課題番号： 19760191
研究課題名 (和文)
極限環境下における真空中の絶縁体表面の暗電流測定と実時間帯電測定
研究課題名 (英文)
Measurement of surface and volume resistivity for several insulators under vacuum condition
研究代表者
山納 康 (YAMANO YASUSHI)
埼玉大学大学院・理工学研究科・准教授
研究者番号： 30323380

研究成果の概要 (和文)：

真空環境や宇宙で使用される絶縁材料について、真空中において表面または内部に流れる暗電流を測定し、体積抵抗率および表面抵抗率を求めた。特に特殊極限環境として、宇宙環境を模擬した紫外線や電子線が照射されたポリイミドフィルム、反射防止膜付ガラスについて調査した。その結果、3年間を宇宙環境で飛翔したと同等量の紫外線または電子線が照射された試料においても、表面及び体積抵抗率に変化は見られないことが明らかになった。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。

研究成果の概要 (英文)：

Surface and volume resistivity of UV-irradiated or EB-irradiated insulator materials used for the artificial satellites were measured in vacuum condition. 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 the surface state of UV-irradiated polyimide film was bigger than the EB-irradiated one.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	660,000	3,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学

キーワード：真空，表面抵抗，暗電流，体積抵抗

1. 研究開始当初の背景

真空絶縁方式は、電力用真空遮断器、宇宙機器、高エネルギー粒子加速器などの電力・先端科学機器に幅広く利用されている。これら機器においては、直流電圧を印加する場合も数多くあり、その場合において暗電流の発生が様々な問題を引き起こしている。また、機器においては、極限環境下で運転されており、これらの外的環境が電圧印加状態における暗電流の特性を大幅に劣化させることがあり、沿面放電の発生や場合によっては致命的な機器の故障に至る場合もある。

真空中における絶縁体の表面抵抗値は明確には示されたものが数少なく、通常は大気中のものが表示されるものが多い。これは、真空中において絶縁体表面電流を定量的に測定するためには、絶縁体への測定用電極の取り付けや真空中での電圧印加と微小電流測定が困難であったこと、さらに、表面抵抗率は絶縁体の化学的表面状態によって大きく異なることが考えられ、その状態を把握することが困難であったことが挙げられる。そこで本研究では、絶縁体の化学的表面状態を観測した上で、専用の暗電流測定チャンバを用意して、真空環境下で表面やその内部に流れる暗電流を測定し、表面抵抗率・体積抵抗率を求めることとした。

2. 研究の目的

本研究では、真空環境や宇宙で使用される絶縁材料について、真空中において表面および内部に流れる暗電流を測定し、体積抵抗率および表面抵抗率を求めることを目的とする。その代表例として、宇宙機で熱制御材料として使用される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を供試材料とした。宇宙機の絶縁や帯電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。

3. 研究の方法

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)の用途と試料厚さを表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=8.7×10²mJ/cm²)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。

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	太陽電池パネルカバーガラス	111

実験で使用した大気圧から10⁻³Pa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実験装置の概略図を図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および試料内部に流れる電流I_vを測定し、

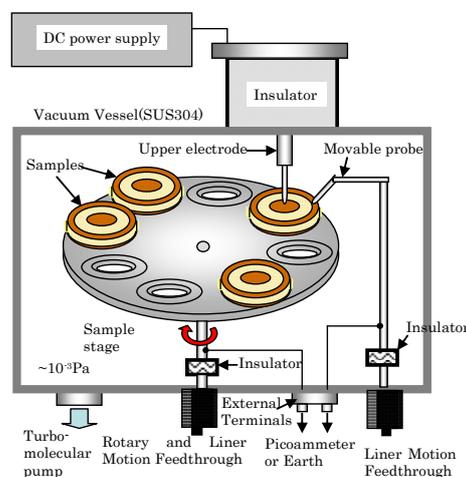


図1 抵抗率測定容器の概略図

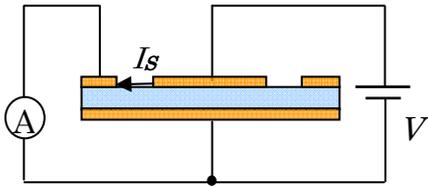


図2 表面抵抗測定用回路

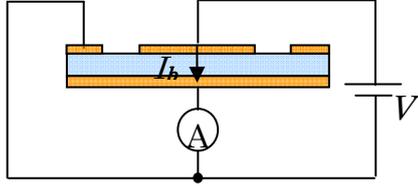


図3 体積抵抗測定用回路

表面抵抗率・体積抵抗率を算出した。

表面抵抗率 σ [Ω]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。

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

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。

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

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

また体積抵抗率 ρ [Ωm]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。

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

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。

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

本実験では各試料に対して、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. 研究成果

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。

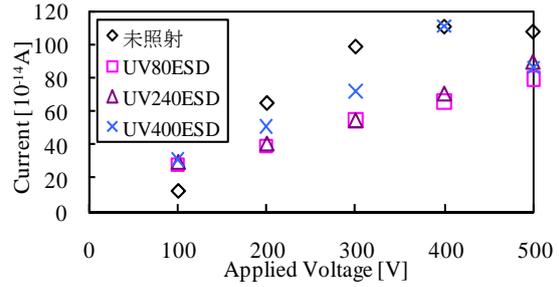


図4 UV照射されたPIの内部電流と印加電圧の関係

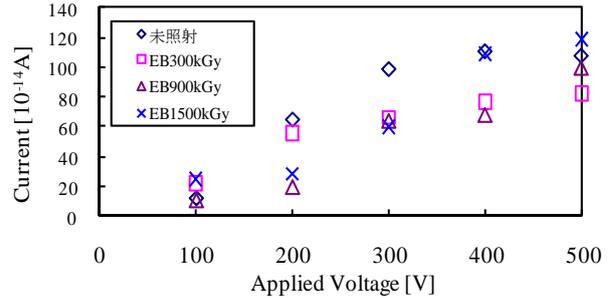


図5 EB照射されたPIの内部電流と印加電圧の関係

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)	7×10^{17}	2×10^{15}
PI (80ESD)	4×10^{17}	3×10^{15}
PI (240ESD)	3×10^{17}	3×10^{15}
PI (400ESD)	4×10^{17}	3×10^{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)	7×10^{17}	2×10^{15}
PI (300kGy)	4×10^{17}	3×10^{15}
PI (900kGy)	5×10^{17}	2×10^{15}
PI (1500kGy)	4×10^{17}	2×10^{15}

れなかった。

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、照射による影が電子線照射後に大気曝露されると、大気中

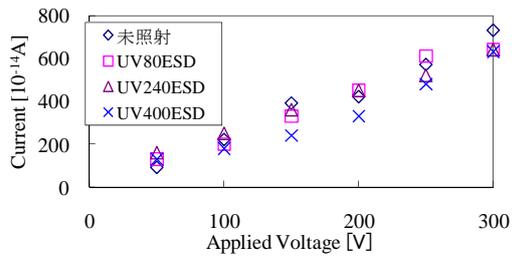


図6 UV照射されたGlass Aの内部電流と印加電圧

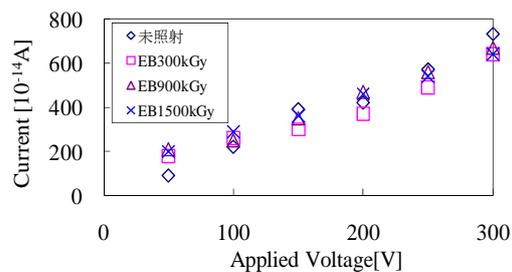


図7 EB照射されたGlass Aの内部電流と印加電圧

表4 UV照射されたGlass Aの表面・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)	2×10^{17}	4×10^{13}
Glass A (80ESD)	2×10^{17}	5×10^{13}
Glass A (240ESD)	2×10^{17}	5×10^{13}
Glass A (400ESD)	2×10^{17}	5×10^{13}

表5 EB照射されたGlass Aの表面・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)	2×10^{17}	4×10^{13}
Glass A (300kGy)	2×10^{17}	5×10^{13}
Glass A (900kGy)	3×10^{17}	5×10^{13}
Glass A (1500kGy)	4×10^{17}	5×10^{13}

響は少なかったと考えられる。しかし、試料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。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

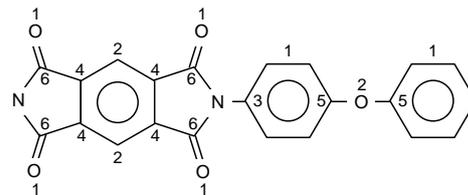


図8 ポリイミドの化学構造

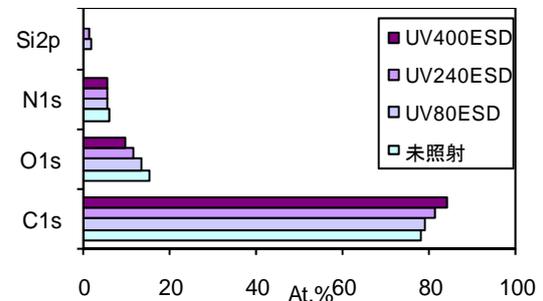


図9 UV照射されたPIの元素組成比

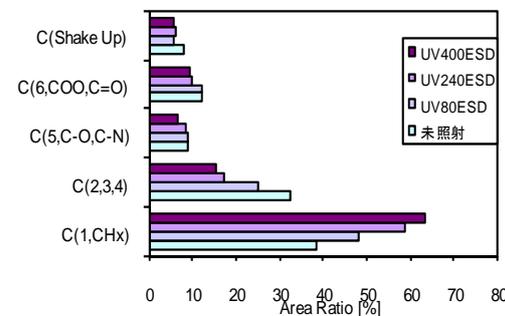


図10 UV照射されたPIのC1sのピークフィット結果

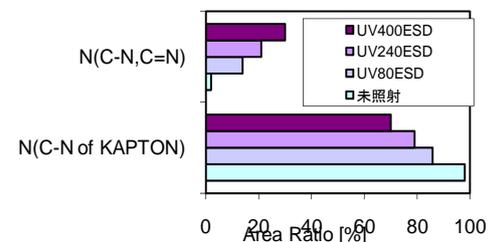


図11 UV照射されたPIのN1sのピークフィット結果

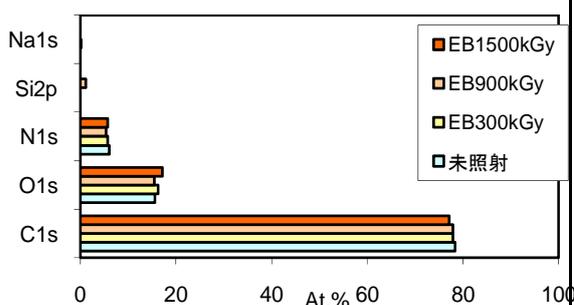


図 12 EB 照射された PI の元素組成比

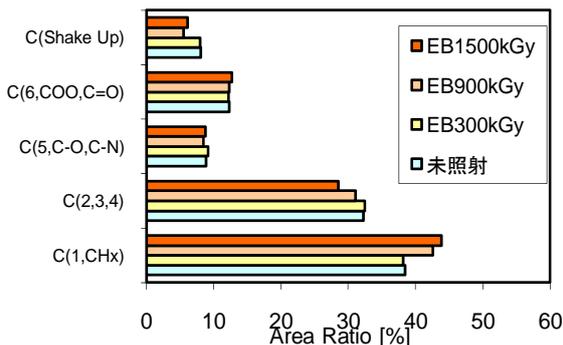


図 13 EB 照射された PI の C_{1s} のピークフィットしている番号である。図 9 に UV 照射された PI の元素組成比を示す。未照射試料と比較すると、C の比率が上昇、O の比率が低下、N の比率は変わらない結果となった。N の比率が変わっていないことから、C の比率が上昇したのは表面汚染による影響ではなく、表面の化学構造の変化が原因であると考えられる。図 10 に同試料の C_{1s} のピークフィットの結果を示す。未照射試料に比べ、ベンゼン環の存在を示す C(Shake Up) ピークの比率が低下し、C(1, CH_x) の比率が上昇する結果となった。ベンゼン環が減少したことから、CH_x 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, CH_x) 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。特に絶縁特性や抵抗率は、照射中に生成した電子やイオンなどの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⁽³⁾。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. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Y.Yamano, T.Komiyama, M.Takahashi, S.Kobayashi, K.Nitta (JAXA), Y.Saito (KEK), "Measurement of Surface and Volume Resistivity for Alumina Ceramics under Vacuum Condition", Proc. of the XXIIIrd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum A1-P04-ASN 172(2008)
- ② 小宮山丈行, 山納康, 小林信一 (埼玉大学), 馬場勸* (*AES), 宮崎英治*, 仁田工美* (*JAXA), 紫外線または電子線が照射された衛星用絶縁材料の表面および体積抵抗率の測定, SP-08-018 第 5 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, pp. 98 ~101(2008)

[学会発表] (計 2 件)

- ① T.Komiyama, Y.Yamano, S.Kobayashi,

K.Nitta(JAXA), S.Michizono(KEK), Y.Saito (KEK), “Surface and volume resistivity of various insulator materials in atmospheric and vacuum condition”, Proc. of the Regional Inter-University Graduate Conference on Electrical Engineering, pp.B-76(2008.7, China)

- ② 小宮山丈行, 仁田工美*(*JAXA), 山納 康, 小林信一, 各種絶縁材料の真空中, 大気中における表面抵抗率・体積抵抗率測定, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集 [1], pp. 79-80(2008. 3, 福岡)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山納 康 (YAMANO YASUSHI)

埼玉大学大学院・理工学研究科・准教授

研究者番号 : 30323380

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し