

電子線照射による衛星用絶縁材料の絶縁特性への影響

林 寛、宮崎 英治、國中 均、佐藤 哲夫 (JAXA)
吉田 禎二 (NT Space)、藤井 治久 (奈良高専)、村上 洋一 (三菱電機)

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構では、宇宙機の高電圧絶縁に関する設計標準の制定を目的としたワーキング・グループ (WG5) を設置し、現在 12 種類の衛星用絶縁材料を対象として絶縁破壊特性データの取得・蓄積を実施している⁽¹⁾。取得する絶縁破壊特性データは、大別して絶縁材料の電気物性を評価する短時間破壊特性 (厚さ、温度、周波数) と絶縁材料の各種環境要因による絶縁特性の劣化を評価する絶縁劣化特性 (電子線照射、課電劣化) である。この中で電子線照射特性は、軌道上での絶縁材料への電子線照射を想定し、電子線照射の有無と照射線量による絶縁破壊特性の変化を評価する。

電子線などの放射線が絶縁材料に及ぼす影響としては絶縁材の分子が架橋または切断される事によって、その絶縁破壊特性が変化する事が考えられる。特に宇宙環境下では、バン・アレン帯領域での高エネルギー電子が影響を与えていると言われている。これまで電子線照射による衛星用絶縁材料への影響については、主に絶縁材料の帯電・放電現象に関しては盛んに研究されている一方で、電子線照射に伴う絶縁破壊電圧への影響に関する研究例は極めて少ない。国内の研究例では、宇宙開発事業団が日本原子力研究所との共同研究として宇宙ステーションの配線用ケーブルとして用いられているフッ素樹脂/ポリイミド絶縁耐燃ケーブルに電子線を照射して、その絶縁破壊特性の変化について報告している⁽²⁾。

現在、宇宙機は運用期間の長期化や信頼性の向上が望まれる一方で、宇宙放射線による衛星用絶縁材料の絶縁劣化に関するデータの取得

や蓄積は十分であるとは言えない。そこで本ワーキング・グループでは、衛星設計標準の制定に際して宇宙放射線 (電子線) による絶縁劣化も考慮して、これまでに 7 種類の電子線照射試料の絶縁破壊試験を実施し、現在は取得データの評価を行っている。

本稿ではこれまで実施してきた電子線照射試料の絶縁破壊試験の結果を報告し、電子線照射が衛星用絶縁材料の絶縁破壊特性に与える影響について評価する。

2. 試験方法

2-1 試料

本稿では表 1 に示す衛星用絶縁材料の特性について報告する。その内訳は、絶縁テープ 2 種 (Kapton、PTFE)、塗布剤 2 種 (ソリタン、パリレン)、円板状試料 3 種 (コ・サーム、マイカ、ガラスエポキシ) の計 7 種類である。これらの材料は実際に宇宙機への採用実績を有する材料であり、いずれも国内の衛星メーカーによって選定、提供されたものである。表中の絶縁テープの厚さは、粘着剤の厚さも含めた総厚である。塗布剤は、直径 25mm の電極上に塗布された状態で試験に供した。塗布剤、マイカに関しては製造過程で厚さにバラツキが生じるため、厚さがほぼ同じ試料を選んで試験に供した。絶縁テープ以外の試料については試験の際に高圧側電極周辺の部分放電による試料の損傷が懸念されるため、高圧電極と試料の接触部分の周辺をエポキシ系樹脂で封入した。試料は大気中で保管しており、照射から破壊試験までの期間は最長で 5 ヶ月であった。なお、今後引き続き ETFE ケーブルや RTV などの電子

表 1 絶縁破壊試験用試料

試料名	形状・サイズ	用途
Kapton テープ	30x110mm、厚さ 0.08mm	絶縁テープ
PTFE テープ	55x150mm、厚さ 0.09mm	絶縁テープ
ソリタン	φ 25 電極に塗布、厚さ 0.1mm	塗布剤
パリレン	φ 25 電極に塗布、厚さ 0.02mm	塗布剤
コ・サーム	円板状、φ 30x0.1mm	クールシート
マイカ	円板状、φ 30x0.075mm	絶縁材、コンデンサ
ガラスエポキシ	円板状、φ 30x0.2mm	絶縁材、構造材

線照射特性の取得を予定している。

2-2 電子線照射

試料への電子線照射は、JAXA 筑波宇宙センターに設置されている真空複合環境試験設備（設備 D）を用いて行った³⁾。電子線の照射条件は、線源加速電圧が 500kV、線源電流が 0.2mA であり、試料への照射量は 5kGy、50kGy、500kGy の 3 パターンである。電子線照射時は、三酢酸セルロース（CTA）フィルム線量計で照射量を計測しており、本試験ではその計測値を基準とした。ちなみに照射量（吸収線量）の単位である Gy は、放射線の作用によって 1kg の物質に 1 J のエネルギーを与える吸収線量を示しており、1Gy=100rad である。吸収線量 D は次式で示されるように試料の阻止能 S に依存するので、同じフルエンス F（試料への単位面積当りの入射粒子数）でも試料によって異なってくる。

$$D[\text{kGy}] = S[\text{MeVcm}^2 / \text{g}] \cdot F[\text{cm}^2] \cdot 1.6 \times 10^{-13}$$

絶縁材料は主に宇宙機内部で使用されることが想定されることから、本試験では照射量の少ない領域でのデータを取得する事として電子線照射設備の性能とメーカーからの要望などを考慮したうえで上記の照射量を選んだ。

2-3 破壊試験の方法

図 1 に本試験で用いた試験系の構成を示す。

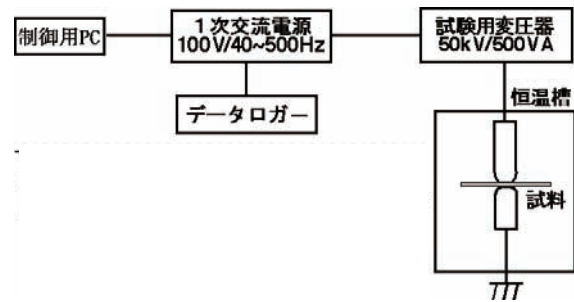


図 1 絶縁破壊試験の構成

本試験では試料を 6mm 径の黄銅製電極で挟み込み、これに 50Hz の交流電圧を印加する事により絶縁破壊電圧を計測し、これを試料厚さで除して絶縁破壊の強さを算出した。試料に対する電極の圧着力（1 N）を一定にするために、高圧側電極におもりを取り付けている。（但し、塗布剤の場合は、電極形態が若干異なる。）印加電圧は試験用変圧器（最大出力 50kV、容量 500VA）を用いて発生させ、コンピュータ制御により初期値から 20 秒毎に破壊が生じるまで一定間隔ずつ昇圧させる段階破壊試験方法によって計測を行った。試験は各照射量で 3 回ずつ行い、その平均値を測定値とする。計測値のうち、その平均値の±15%の範囲に入らない場合は、その計測値を除外した。なお、本試験は室温大気中で実施した。

3. 試験結果

図 2、図 3、図 4 にそれぞれ電子線を照射し

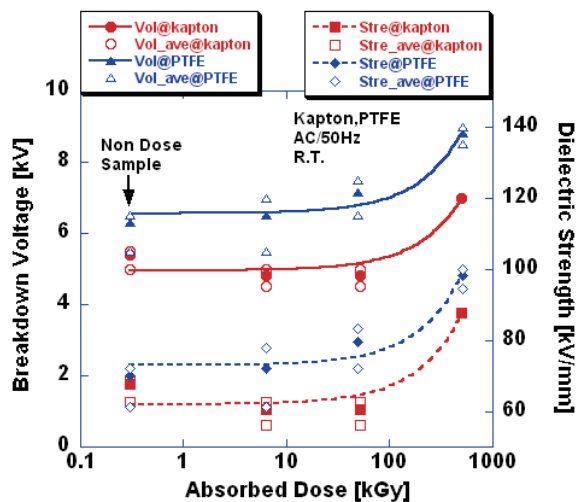


図 2 絶縁テープの電子線照射特性

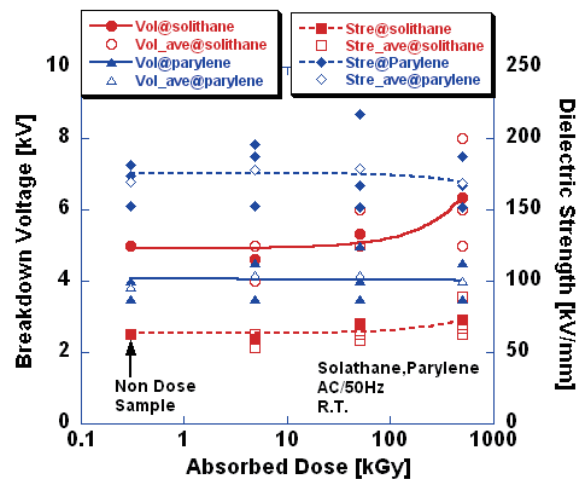


図 3 塗布剤の電子線照射特性

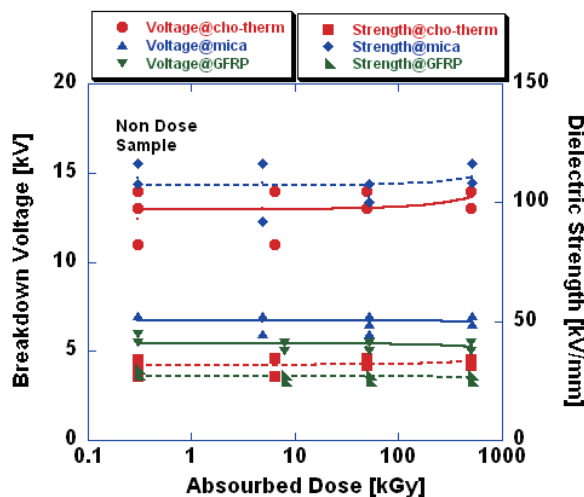


図 4 円板状試料の電子線照射特性

た絶縁テープ、塗布剤、円板状試料の絶縁破壊特性を示す。既述のように図中の吸収線量（横軸）は、CTA フィルム線量計による計測値である。

絶縁テープは、電子線照射により変色などの外観の変化は見られなかったが、PTFE テープは照射量が増えるにつれて、機械的強度が非常に低下しており、その分子鎖が著しく切断・分解している事を覗かせた。その一方で図 2 に示されるようにカプトン及び PTFE のいずれも照射量の増大に伴い、破壊電圧が増大した。

塗布剤は、外観及び絶縁破壊特性に電子線照射による影響は認められなかった。なお、図 3 においてソリタンが 500kGy で破壊電圧が上昇

しているが、これは 500kGy 試料の厚さが他の照射試料と比べて、やや厚かったためと推測される。

円板状試料は、コ・サームとマイカについては電子線照射による影響は見られなかった。これに対して、ガラスエポキシは電子線の照射量が増加するに伴い、次第に淡い黄緑色から黄色に変色している事が確認された。絶縁破壊特性も、電子線照射試料の方が未照射試料に比べて破壊電圧が僅かに低下した。この事からガラスエポキシは電子線の照射により、その特性が変化するものと思われる。

4. 検討考察

本試験により7種類の衛星用絶縁材料の電子線照射特性データが取得された。しかしながら、これらのデータは評価・検討はこれからであり、まずはその妥当性や正当性の裏づけを早急に行う必要がある。絶縁材料の化学構造や分子の状態はその絶縁特性に密接に関係するので、今度は試料分子の結合状態などをXPSやFT-IRなどを用いて分析し、その分析結果と絶縁破壊特性を照らし合わせるにより、今回取得されたデータの妥当性などを確認できるものとする。又、一部の試料では電子線照射後に大気中に放置すると、大気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する可能性がある事が報告されており⁽⁴⁾、今回の試験で電子線の影響が認められなかった試料についても慎重に評価する必要がある。

今回報告した試験結果の中で、最も検討を要するものは図2に示した絶縁テープの電子線照射特性であろう。カプトンは耐放射線特性に優れ、架橋型材料に分類されることを考慮すると今回の結果も一応理解できるが、今後架橋の有無を確認する必要がある。一方、PTFEに関しては、分子鎖が切断されている事が推測されるにも関わらず、絶縁破壊特性が向上した。本来なら破壊電圧は低下すると考えられるが、上昇した理由については、まだ明らかにはなっていないものの次のような理由が考えられる。

- ① 電子線照射時に試料温度が上昇し、架橋が生じた。
- ② 大気曝露により物性が変化した。
- ③ 粘着剤による影響を受けた。
- ④ 試料中にボイド（空隙）が生じる事によって試料が厚くなり、見かけ上の破壊電圧が上昇した。

このうち、①に関しては試料の状態を踏まえると可能性が極めて低い。今後、試料の化学分析や粘着剤を除去した試料による比較試験を実施することにより、原因究明を進めていく予定である。

今回取得された試験データは、今後衛星設計標準の制定に活用されていく予定であるが、そのためには既述のように試験データの正当性の裏づけ以外にもいくつかの課題が残されている。例えば、本稿でCTAフィルム線量計による計測値で試料への吸収線量を評価しているが、今後は各試料の阻止能を考慮して、実際の各試料への吸収線量を求めたうえで、データの評価を行う必要がある。試料の阻止能の値については、今回報告した試料の中でカプトンとPTFEについてはすでに公表されているが⁽⁶⁾、他の試料については今後調査が必要である。

今後はこれらの検討課題に対して万全に対処していきながら、他の衛星用絶縁材料に対する電子線照射特性の取得・蓄積を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 林寛、國中均、佐藤哲夫、吉田禎二、藤井治久、村上洋一：衛星設計標準の制定に向けた宇宙用絶縁材料の絶縁破壊試験、第50回宇宙科学技術連合講演会講演集、pp.1323-1328 (2006)
- (2) 宇宙開発事業団：宇宙用電線材料・熱制御材料の耐放射線性の研究、宇宙開発事業団技術報告、NASDA-TMR-000009 (2000)
- (3) 今井文一、岩田稔、中山陽一、今川吉郎：真空複合環境試験設備の開発と性能評価、第45回宇宙科学技術連合講演会講演集、pp.1221-1224 (2001)
- (4) 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)
- (5) ICRU Report-37, Bethesda, Maryland, USA (1984)