

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19206090

研究課題名（和文） 受動的電界電子放出素子による静止軌道衛星帯電防止法の開発

研究課題名（英文） Development of Mitigation Method of GEO Spacecraft Charging using a passive field-electron emitter

研究代表者

趙 孟佑 (CHO MENGU)

九州工業大学・工学研究院・教授

研究者番号：60243333

研究成果の概要（和文）：

静止軌道衛星の帯電・放電による事故を防止するために、衛星が帯電すると自動的に電子を放出する受動型電子放出素子の開発を行なった。銅とポリイミドの積層フィルムにマイクロエッチングを施した試作品について、改良と評価を繰り返し、必要な電子放出性能を発揮できること、宇宙環境に長期間曝露されても地上実験で確認した。また放出の物理的メカニズムの解明と軌道上での動作時のシミュレーションを行なった。

研究成果の概要（英文）：

Passive electron emission device that can emit electrons automatically from a satellite to prevent accident due to charging and arcing in Geosynchronous Orbit. Prototypes were made via micro-etching of laminar film made by copper and polyimide. Design modification and evaluation were repeated. It was confirmed that the emitter has a sufficient electron emission performance and strength against long-time exposure to space environment. Physical mechanism of electron emission was studied. Computer simulation showed that the emitter could mitigate the charging in orbit.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2007 年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2008 年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2009 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総 計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体・構造・航法・制御・推進・衛星帯電

## 1. 研究開始当初の背景

10kW 超の電力が主流となった現在の静止軌道通信放送衛星では、ケーブル重量軽減の

ため発電電圧や衛星内配電電圧(バス電圧)を 100V 以上にする必要があり、それまでの 50V バスから 100V バスを採用する衛星が 90

年代末以降急増した。しかしながら、100V 化に伴い太陽電池アレイを中心とした不具合が頻発している。97 年の Tempo-2(米国)が衛星電力の 20%以上を失った短絡事故を始めとして、衛星の表面帯電に起因した放電事故が多発しており、現在も放電事故は止まっていない。静止軌道衛星ではないが、2003 年 10 月に地球観測衛星みどり 2 号がオーロラ粒子によって帯電し、ケーブル間の放電によって全機能を喪失したことも記憶に新しい。

衛星表面の放電事故は、衛星の絶縁体表面と衛星構体（金属製で衛星回路の接地点として働く）との間の電位差（乖離電圧）が放電発生のおしきい値を超えることが引き金となる。電位差発生は磁気圏嵐と呼ばれる高エネルギー(数 10keV 程度)電子群に遭遇した時の帯電によって衛星構体と絶縁体が共に負に帯電しながらも、表面での電荷の流出入バランスの違いによって両者が異なった電位を持つことによる。特に絶縁体が構体より正に帯電すると、太陽電池アレイの場合を例にとると 400V 程度の電位差で放電が発生することが知られている。

衛星の放電事故を防ぐためには衛星構体の電位をゼロ付近に保つことが有効である。この時、絶縁体表面はゼロか負になる（正側に数 10V 以上の電位を持つことは殆どありえない）。絶縁体表面が負の場合は、放電発生には数 kV 以上の電位差が必要であり、それによって放電発生確率を大幅に減らすことができる。

電子ビーム放出によって衛星電位の制御が可能であることは 70 年代から国内外で実証されており、最近では、米国空軍でフィールドエミッタアレイ等の能動的電子放出デバイスが検討されている。しかしながら、これらの手法は(a)電子を放出するための電源と(b)衛星帯電を検知して機器を作動させるためのセンサーを必要とし、電源や質量の限られた衛星に搭載する上で大きな問題を抱えている。

申請者等が過去に静止軌道衛星の表面帯電緩和法について研究を行なった際に、炭素系接着剤（導電体）と高分子フィルム（絶縁体）を隣接させることで、フィルムが高エネルギー電子によって帯電すると同時に両者の境界（三重接合点と呼ばれる）付近の電界が高まって、炭素系接着剤から電子が放出されることを見いだした。これは一種の電界電子放出素子であるが、電子放出のための強電界はフィルムの帯電によるので電源は一切必要としない。また、衛星表面の絶縁体と構体の電位差が開き始めると同時に作動を開始するので、センサーも必要としない。よって、この電界放出素子は全く受動的なものである。実験室では 3cm 角の供試体（重量 1g

以下）から 5 分以上に亘って 0.15mA の安定的な電流放出を確認していた。大型 GEO 衛星に対して、このような素子を衛星全体で 100 個も装着すれば十分である。100 個の素子は各所で衛星構体に炭素系接着剤で貼られるだけでよく、面倒な配線も一切必要としない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、この電界放出素子について(1)動作原理の詳細な解明と(2)軌道上実証用素子の開発を行なうことである。研究期間(3 年)中に以下の事項を行なう。

1. これ迄の実験では数 cm 角の供試体中の限られた箇所からしか電子放出が確認されていない。高精度で放出点を同定し、放出点の微視的な特徴を明らかにする。
2. 高分子フィルムと金属の積層材の微細加工を得意とする企業と連携して、再現性のある素子を試作する。
3. 衛星の典型的運用期間である 15 年に予想される延べ数百時間の動作が可能かどうか耐久試験を行なう。
4. プラズマ・紫外線・熱サイクル・高温・低温等に対する耐性を評価する。
5. 耐久性性能・耐宇宙環境性能・電子放出性能等々を加味した上で、軌道上実証に向けた最終的な仕様を確定する

## 3. 研究の方法

1. 電界放出の微視的構造を明らかにするために In-situ 電界電子放出プローブを開発し、 $\mu\text{m}$  オーダーの分解能で電界放出点を特定すると共に、各点の電界増倍係数  $\beta$  を測定する。
2. 観察や数値計算に適した形状の電界放出素子を、エッチング技術に優れた協力企業に試作してもらい、性能評価を繰り返す。
3. 素子の耐久性を評価するために、静止軌道のプラズマ環境を模擬した真空容器内に供試体を設置し、電子ビームで帯電させた状態で長時間に亘って電子放出性能が維持されるかを調べる。
4. 衛星各所に放出素子を貼り付けたと仮定して、磁気圏嵐到来時の衛星電位の変動を計算する。計算には汎用衛星帯電解析ツール(MUSCAT)を使用する。軌道上でも電子放出によって衛星電位が上昇し、絶縁体面がより衛星構体より負になって、放電発生しきい値を大幅に引き上げることができることを実証する。
5. 静止軌道上で遭遇するプラズマ・放射線・紫外線・熱サイクル・高温・低温状態に対する耐性を評価する。放射線試験は原子力研究所にて行なうが、それ以外は九工大の既設の装置を使用して実施する。

#### 4. 研究成果

1. 30 分以上に亘って 0.035 から 0.05mA の電子放出を確認した。理論解析の結果、一個の放出点につき空間電荷制限によって  $0.1 \sim 10\text{mA}$  程度で電流値が制限されることが明らかにされ、これらの電流値は実際に実験で観察され  $0.05 \sim 0.7\text{mA}$  に非常に近い値となっている。
2. 軌道上での表面汚染に耐えられるかどうかを調べるために、汚染模擬装置を開発した。同装置を使用して実験したところ、宇宙ステーションのコンタミネーション規定値の 50 倍のコンタミ量をつけた供試体において、電子放出性能が失われないことを確認した。
3. 供試体作成時にエミッタ素子にひび割れが発生することが確認されたため、製造工程を改善し、高温焼成することによってひび割れを防止した。
4. 真空容器内で連続動作試験を行い、素子が安定して 100 時間動作することが確認できた。現状の開発品では当初予定していた突起周辺部分の幾何学的相関関係がほぼ達成されていることも考え合わせ、加工精度は十分であると考えられる。
5. エミッタ素子製作時の歩留まりを測定するために、24 個の供試体に対して性能評価試験を実施し、22 個の素子から電子放出を確認した。
6.  $-150^{\circ}\text{C}$  から  $+150^{\circ}\text{C}$  の温度サイクルを 1000 回印加した供試体からも、電子放出を確認した。
7. 静止軌道で 10 年分に相当する  $10\text{MeV}$  の陽子線並びに  $1\text{MeV}$  の電子線を照射した後でも電子放出を確認した。
8. 供試体に静止軌道 4 年分相当の紫外線を照射した。
9. ELF 表面の状態を  $2\mu\text{m}$  の空間分解能をもつ電界電子放出顕微鏡で観察し、数 100 倍の電界増倍係数をもつ電界放出点が金属表面に多数存在することを確認した。
10. エミッタ表面の絶縁体をより高抵抗の物質に置き換え、低密度の帯電電子電流環境であっても、動作することを確認した。
11. エミッタ表面に特殊なコーティングを施すことで、性能が向上することを確認した。
12. 上記 10, 11 を可能にしたエミッタを軌道上実証素子の最終仕様として確定した。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 17 件)

1. 澄田貴大、Arifur Khan、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑、藤田辰人、水口善文、八田真児、「衛星帯電防止用受動型電子エミッタの研究開発と性能改善」、第 29 回宇宙エネルギーシンポジウム、2010 年 2 月、宇宙科学研究本部、相模原
2. Arifur R. Khan, Takahiro Sumida, Minoru Iwata, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho and Tatsuhito Fujita, “Development of Electron-emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation: Environment Exposure Tests”, 48th Aerospace Science Meeting, Orlando, USA, January 2010.
3. 澄田貴大、Arifur Khan、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑、藤田辰人、水口善文、八田真児、「衛星帯電防止用受動型電子エミッタの熱サイクル及び陽子線に対する耐性評価」、日本航空宇宙学会西部支部講演会(2009)、p. 57-60、2009 年 12 月、北九州国際会議場
4. Arifur R. Khan, Hideyuki Igawa, Teppei Okumura, Minoru Iwata, Kazuhiro Toyoda, Shinji Hatta, Tatsuhito Fujita, Mengu Cho, “Electron-emitting Film an Effective Mitigation of Spacecraft Charging”, IAC-09. C2.6.7, 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, October 2009.
5. 藤原慶彦、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑、藤田辰人、「帯電抑制電子エミッタ (Electron-emitting Film) の電界放出電子分布測定の実験的研究」、第 53 回宇宙科学技術連合講演会、p. 216、2009 年 9 月、京都大学 吉田南キャンパス
6. Arifur Khan, Hideyuki Igawa, Teppei Okumura, Minoru Iwata, Kazuhiro Toyoda, Shinji Hatta, Tatsuhito Fujita, Yoshifumi Mizuguchi, Mengu Cho, “Spacecraft Charging Mitigation through the Field Emission by Electron-emitting Film”, 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, July 2009.
7. M. Cho, T. Okumura, M. Iwata, K. Toyoda, H. Igawa, Y. Fujiwara, S. Hatta, T. Satou, T. Fujita, “Development of Electron-emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation: Observation,

- Endurance and Simulations”, AIAA-2009-560, 47th AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, Jan 2009.
8. 野村正行、園田薫、澄田貴大、藤原慶彦、二ノ宮隼一郎、趙孟佑、「小型衛星 Qsat ミッションであるプラズマ測定機器開発について」、日本航空宇宙学会西部支部講演会(2008)、講演集 p. 29、2008 年 11 月、九州大学 伊都キャンパス
  9. 坂本武蔵、井川秀幸、増井博一、岩田稔、趙孟佑、「新規開発および民生用帯電防止コーティングの宇宙環境適用性の評価」、日本航空宇宙学会西部支部講演会(2008)、講演集 p. 69-72、2008 年 11 月、九州大学
  10. 井川秀幸、原口裕樹、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑 (九工大)、藤田辰人、久田安正 (JAXA)、佐藤哲朗 (株式会社 潤上ミクロ)、八田真児 (MUSE)、「静止衛星の帯電抑制用受動型電子エミッタに関する実験的研究」、第 49 回真空に関する連合講演会、講演予稿集 28 連合 P-17、p. 27、2008 年 10 月、松江くにびきメッセ
  11. M. Iwata, H. Igawa, T. Okumura, K. Toyoda, M. Cho, T. Sato, S. Hatta, T. Fujita, and Y. Hisada, “Development of Electron Emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation II. Improvement of Performance”, the 59th International Astronautical Congress, Glasgow, Oct 2008.
  12. Musashi Sakamoto, Hideyuki Igawa, Hirokazu Masui, Minoru Iwata, Mengu Cho, “The Selection and Development of Antistatic Coating for Space Applications”, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, June 2008.
  13. Yoshihiko Fujiwara, “Measurement system of field emission on a Electron-emitting Film”, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, June 2008.
  14. 坂本武蔵、井川秀幸、増井博一、岩田稔、趙孟佑、「帯電防止コーティングの宇宙適用試験」、平成 20 年電気学会全国大会、2008 年 3 月 福岡工業大学 講演論文集 pp. 83
  15. 井川秀幸、原口裕樹、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑、藤田辰人、久田安正 (JAXA)、佐藤哲朗 (株式会社 潤上ミクロ)、八田真児 (MUSE)、「静止軌道衛星の帯電・放電抑制電界放出素子の研究」、第 51 回宇宙科学技術連合講演会

アブストラクト集, 2H02, p.154, 2007 年 10 月, 札幌市

16. Minoru IWATA, Hideyuki IGAWA, Takayuki OSE, Yuki HARAGUCHI, Yuya SANMARU, Hirokazu MASUI, Satoshi HOSODA, Kazuhiro TOYODA, Mengu CHO, Tatsuhiro FUJITA, “Development of Electron Emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation,” 58<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Hyderabad, India, September 24<sup>th</sup> to 28<sup>th</sup> 2007
17. M. Iwata, H. Igawa, T. Ose, Y. Haraguchi, Y. Sanmaru, H. Masui, S. Hosoda, K. Toyoda, M. Cho, and T. Fujita, “Mitigation of Surface Charging on Solar Array in Geostationary Earth Orbit,” 10<sup>th</sup> Space Charging Technology Conference, Biarritz, France, June 18<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup> 2007

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

〔その他〕

<http://laseine.ele.kyutech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

趙 孟佑 (CHO MENGU)

九州工業大学・工学研究院先端機能システム工学研究系・教授

研究者番号 : 60243333

### (2) 研究分担者

豊田 和弘 (TOYODA KAZUHIRO)

九州工業大学・工学研究院電気電子工学研究系・准教授

研究者番号 : 10361411

### (3) 研究分担者

岩田 稔 (IWATA MINORU)

九州工業大学・工学研究院先端機能システム工学研究系・助教

研究者番号 : 80396762