

衛星システム設計における帯放電対策

Robust Design of Satellite Systems against Spacecraft Charging

小野寺範義^{*1}・村上洋一^{*1}・小坪秀明^{*2}

Noriyoshi Onodera, Yoichi Murakami and Hideaki Koakutsu

Key Words: Satellite systems design and manufacturing, Electrostatic discharges, Electromagnetic compatibility, Electromagnetic interference

Abstract: The spacecraft charging is one of major concerns of satellite systems. Space plasma can build up high differential voltages resulting in electrostatic discharges (ESD), sometimes causing anomalous behavior of spacecraft systems. We have studied the influence due to charging phenomena on satellite systems and mitigation techniques to control charging, electromagnetic interference propagation and electronics immunity. Standardized guidelines for designing satellite systems against ESD are needed. On the other hand, it is desirable that the requirements shall be appropriate and practical for satellite systems design, manufacturing and testing.

1. はじめに

本稿では、軌道上の衛星表面での帯電、静電放電 (Electrostatic Discharge, ESD) が衛星システムへ与える影響、及び弊社における帯放電対策設計の例を紹介する。併せて、設計・開発を行うにあたっての課題についても述べているが、メーカー単独での解決が難しいものも含まれており、今後、課題の共有化と産官学の枠を超えた取組みを提案させて頂く。

2. 帯放電の衛星システムへの影響、設計への反映

2.1 概要

ここでは、帯電・ESD に対する衛星システム設計の一般論を述べる。尚、帯電・ESD 発生のメカニズムについては、文献 1~4 で詳述されておりこちらを参照されたい。

帯電・ESD に対する設計は、基本的にはプロジェクトごとに設けられる設計基準書や要求仕様に従い実

施されるが、機能・クリティカルと判断される部位においては、必要な処置を施工することとしている。一方で、多岐にわたる設計制約・製造制約もあり、コストや施工の実現性を考慮しながら総合的に最適な解を見つけるのは困難なケースが少なくない。

図 2.1-1 に帯放電に関する一般的なシステム設計項目とその課題を、図 2.1-2 に典型的な帯放電対策設計のシーケンスを示す。



図 2.1-1 帯放電に関する衛星システムの一般的設計例及び課題

設計基準書に関して、衛星システムにおける表面帯電、ESD 現象の衛星への影響及び設計について記述し

*1 三菱電機 (株) 鎌倉製作所宇宙システム部

*2 三菱電機 (株) 鎌倉製作所 相模工場

ているものは、各国で設けられており、表 2.1-1 のようなものがある。文献 5～7 については、いずれも電磁適合性（Electromagnetic compatibility: EMC）設計基準書であり、その中の一項目として、帯放電に関わる設計基準が設けられている。いずれも帯電防止の基準が書かれている。例として、外部表面接地に関する記述例を表 2.1-2 にまとめる。

2.2 ESD の衛星システムへの影響

表 2.2-1 は、帯放電現象がシステムに与える影響、弊社での取組みと課題をまとめたものである。次項より弊社での取組み、課題について、それぞれ概説する。

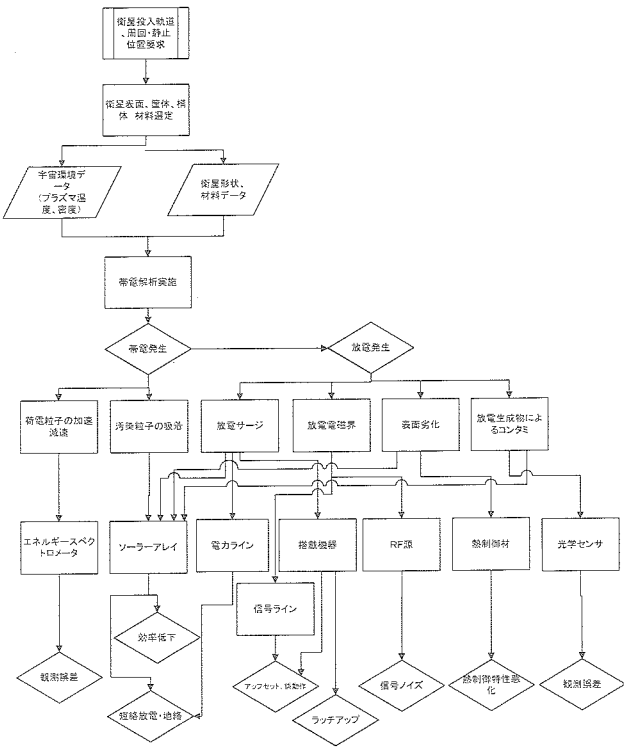


図 2.1-2 帯放電対策設計シーケンス

表 2.1-1 帯放電設計ガイドライン

文献 No.	基準書名	内容
5	ECSS-E-20A	ESA 電気設計基準
6	MIL 規格 MIL-STD-461E（* MIL-B-5087）	EMC 設計基準（*ボンディング規定）
7	JERG-0-028	JAXA EMC 設計基準
8	Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects	NASA-GEO 帯電放電設計ガイドライン
9	Low Earth Orbit Spacecraft Charging Design Guidelines	NASA-LEO 帯電放電設計ガイドライン
10	Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects	NASA 内部帯電設計ガイドライン

備考 1) ISO：帯放電に関する基準を策定中（尚、EMC ISO: ISO 14302 は制定済）
2) ECSS：帯放電に関する基準（ECSS-E-20-06: Space Charging-Environment-Induced Effects on the Electrostatic Behaviour of Space Systems）を策定中

表 2.1-2 各 EMC 設計基準における外部表面接地に関する記述例

文献 No.	基準書名	記述内容
5	ECSS-E-20A	すべての導体はいずれの 2 点間も 0.1Ω になるように接地させること 誘電体上の 10μm 以下の薄い導電性表面は 10Ω 以下で構体へ接地させること すべてのケーブルは、放電から放射させる電磁界（100k～1GHz）を少なくとも 40dB ま で減衰させるようシールド処置を施すこと。
(6)	MIL-B-5087B	Class S bonding (static charge) : （アンテナをのぞく）衛星外部にある 3 インチ以上の独立した導電体部材は、構体へ 1Ω 以 下で接地すること。
7	JERG-0-028	同上
8	NASA-TP-2361	外部表面について：10 ⁹ Ω 以下とすること

表 2.2-1 帯放電による衛星システムへの影響と対策

故障モード	故障箇所	影響	対策設計指針	対策設計検証	製品検証
放電のサージ、誘導電磁界の影響	電力ライン	連結機器へのサージ、損傷、カップリングによる誤動作	ボンディング（帯電箇所の排除）、シールドリング（カップリング排除） 放電に sensitive な部位の積極的接地	筐体設計、ボンディング、シールド設計、等 MIL-STD-1541（30cm 離れた部位でのアーク放電）耐試験を実施し認定する。 弊社実施のアーク試験例としては、1982 年に静電放電干渉感度試験（主に、CS,RS）が実施されている。 ＜参考＞30cm で約 10kV 放電させたときに機器の誤動作を確認した例もある ¹¹⁾ 【課題】内部帯電	電磁適合性試験、放電試験（EM 相当品を供する）にて検証： 伝導感受性（CS）、ボンディング要求（BR）
	信号ライン				N/A
	電子機器（内部回路、半導体素子など）	筐体への直接放電（回路への漏洩）、カップリングによる誤動作、2 次アーク、等			
	火工品	EED ラインへの突入電流、爆管の誤動作			
放電電流のジュール熱による表面劣化、汚染、溶融	カバーガラス、OSR、アンテナアパーチャカバーなど	機能損傷／劣化、熱特性の低下	文献 12 など	放電試験	N/A
放電雑音	電子機器、RF 給電部	ノイズ重畳	MIL-STD-461E MIL-STD-1541 （筐体設計、ノイズフィルタ、シールド設計、等）	MIL-STD-1541 アーク放電耐試験を実施し Qualify する。	電磁適合性試験、放電試験（EM 相当品を供する）にて検証： 放射感受性（RS）、放射雑音限界（RE）
	信号ライン				
電力ライン短絡、地絡放電	SAP セル面	持続放電→地絡	列間電位、距離の見直し。絶縁層強化。	帯放電試験 【課題】試験設備、解析ツール、データベース	絶縁／耐圧試験
	電力ライン	地絡：ケーブルの損傷 or 劣化に伴う曝露ケーブルと構体との接触・地絡	ケーブル耐性確認、ケーブル絶縁強化	絶縁層の特性取得試験、熱解析、複合環境試験 【課題】社内/外試験・解析によるデータ蓄積	外観検査
構体内部への荷電粒子侵入、内部放電	筐体内電子部品	機能損傷、誤動作	放射線解析、内部帯電解析 →必要シールド厚処置	地上試験、軌道上実証（電位モニタ等） 【課題】解析手法確立、電子侵入への対策 vs. 構体質量増	N/A
帯電電位自体の影響	センサー類（観測衛星）	誤データ	センサー部の積極的なボンディング	軌道上実証	N/A

RS: Radiated susceptibility, RE: Radiated emissions, CS: Conducted susceptibility, CE: Conducted emissions, BR: Bonding requirements

2.3 ESD のシステムラインへの影響と課題

電力又は信号を伝送するワイヤは絶縁被覆として誘電体を使用しており、この誘電体表面での帯電の問題がある。ESD に対する一般的な設計ガイドライン（文献 5～7 等）はワイヤ設計の場合も同様であり、主に以下を考慮した設計としている。

(a)接地

浮遊電極（金属）は設けないこととし、ワイヤのシールドは必ず衛星構体に接地している。

(b)材料の選定

帯電の影響を抑えるために誘電体は絶縁破壊電圧が大きいこと、抵抗率が小さいこと、放電が発生した場合の耐コロナ性等を考慮して選定している。

(c)実装

衛星構体はファラデーケージとして機能するため、ワイヤは構体内部に実装し、構体外部に実装されるものは最小限としている。また、衛星構体外から直接衛星構体内に実装するようなコンフィギュレーションは避けているが、このような場合も中継コネクタによる接続を行い衛星構体内外の誘電体の分離を図っている。

衛星構体内部について、ワイヤとコネクタ接続部などのワイヤの実装においては、ポッティング、カプトン貼付けなどにより露出電極がない設計を基本としている。

2.3.1 電力ラインへの影響

電力ラインはインピーダンスが低く ESD のサージによる直接的影響はないが、ワイヤ実装設計上の配慮としては短絡防止がある。ワイヤ被覆への帯電、放電が繰り返されることにより、被覆の絶縁耐圧の低下による短絡（持続放電）の防止が必要である。このために大きな耐電圧を有する誘電体を選定すること、万一にも誘電体の絶縁破壊が生じた場合でも HOT/RTN 間の持続放電に至らない絶縁距離の確保などが必要である。

サージによる直接的影響としては、ハーネス被覆を貫通した直接的な放電と過電圧による機器のラッチアップ、アップセットが想定されるが、当該ラインは、テフロン（ETFE）及びガラス繊維テープにより 2 重の絶縁被覆を施工、耐電圧を確認し、サージの直接的影響がないような設計となっている。

2.3.2 信号ラインへの影響

信号ラインへの ESD によるサージの影響としては、特に誘導電界による機器の誤動作が想定されるが、当該ラインは、シールド線（必要に応じ、Double Jacket 化）によりシールドされており誘導電界の影響を低減するとともにコネクタ付近でワイヤへの帯電・放電によるサージ電流が機器内への影響を極力小さくするためにコネクタ取付け部に近い所で衛星構体へのボンディングを行う等の設計上の配慮がなされている。

2.4 ESD の太陽電池パドルへの影響

太陽電池パドルへの影響としては、その表面積の大半を占めるカバーガラスの帯電に起因する太陽電池セル間の持続放電による地絡故障が考えられる。宇宙環境との相互作用によりカバーガラスが帯電すると、カバーガラスと太陽電池セル回路間で ESD(トリガ放電)が発生し、これにより発生したプラズマを介して太陽電池セル間で放電が発生する。太陽電池セル自身の発電によりエネルギーが供給され続けると、太陽電池セル間の放電は持続的なものとなり、放電による発熱によってサブストレートの絶縁材料が劣化し、太陽電池セル回路の地絡故障が発生する可能性がある。この事象は、1997 年に静止軌道上の TEMPO-2 衛星において発生した電力低下不具合の推定原因として注目され¹³⁾、以来本問題がクローズアップされてきた。

弊社では、太陽電池セル間放電の発生メカニズム及びその特性を把握するために、太陽電池セル間近傍の電位分布解析(図 2.4-1)や、電子ビーム照射帯放電試験(図 2.4-2)を実施し、図 2.4-3 に示すような放電電流波形と放電時の発光を取得している¹⁴⁾。

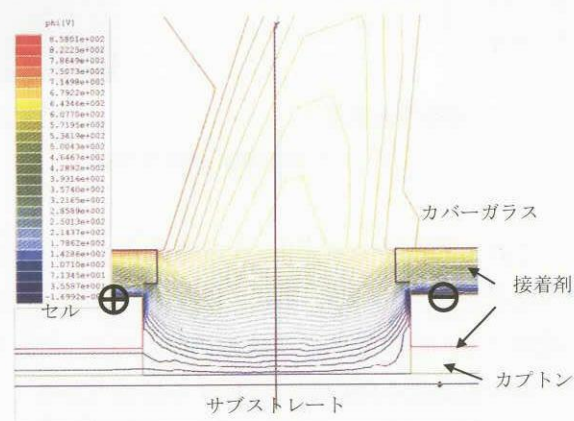


図 2.4-1 太陽電池セル間電位分布解析結果

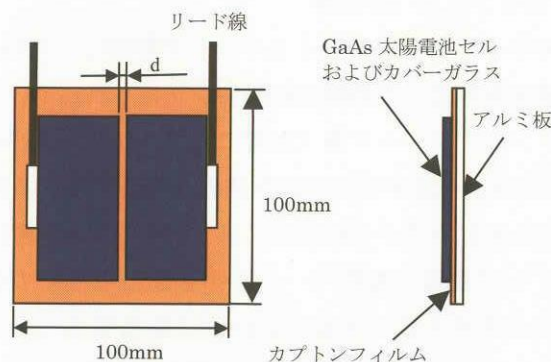


図 2.4-2(a) 帯放電試験供試体(例)

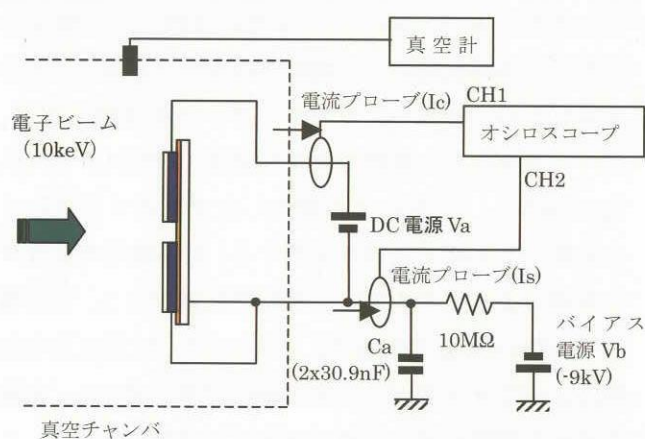


図 2.4-2(b) 帯放電試験系(例)

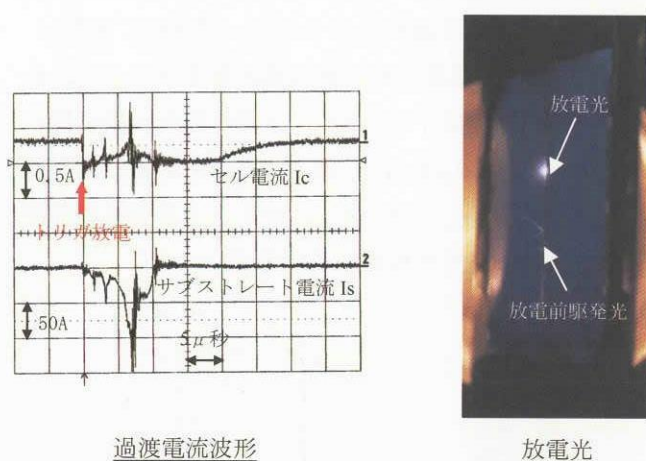


図 2.4-3 帯放電試験結果(例)

これらの結果に基づき、太陽電池パドルの設計の妥当性を評価している。更に、将来の高電圧バス用太陽電池パドルの設計への反映も見据えつつ、今後も解析や帯放電試験を継続的に実施する計画である。

2.5 ESD の電子機器及び RF 源への影響

ESD が電子機器へ妨害を及ぼすメカニズムとしては、直接的なものとして放電の電子機器へのサージ、間接的なものとして放電電磁界のカップリングがあるが、これらの結合は、導電性の筐体を GND 電位に接地することで防止している。

放射電磁界とのカップリング評価として、弊社では、MIL-STD-1541 のアーク源に晒しても機能、性能の劣化がないことを試験により確認している。本規格は、30cm 隔離した点でのアーク放電により劣化しないことを規定しているがより近傍での放電については、言及されていない。

より近傍での放電について、RE および CE の影響がある。典型的な ESD の放射電磁界として、図 2.5-1 に示すような周波数特性が得られている^{8), 15)}。特に、この放射電磁界がほぼホワイトノイズに近いことから、RF 源にとってはノイズ源となる可能性がある。また、商用通信衛星で使用される Ku 帯や Ka 帯といった高周波域では、公表されている ESD 放射電磁界データが少ないことも課題である。図 2.5-2 は、ESD 放射電磁界の参考データとして高周波域まで取得した結果である。本結果より、ESD により放射される電磁界が、機器に対し規定される RS 規定に対して十分小さいことを確認しているが、試験系を整備し、より正確なデータを取得・蓄積していく必要があると考えている。

一方、アンテナの給電部に取り付ける熱制御材（アパーチャカバー）については、通信性能及びマルチパクタ放電の防止といった観点から、誘電体の使用が求められる帯電対策と相反する制約がある。実際には解析上放電が予想される場合においても、放電の規模が小さいこと、またノイズがパルス的に検知されるものの恒久的に故障にはつながらない、など総合的に判断し、誘電体を使うケースが多い。

ノイズおよびサージの影響は、機器毎に上記のような試験要求が規定され試験的に製品検証される。一方、RF 源への影響などを実際に評価するためにはシステムレベルでの確認試験が必要であるが、放電源のほか、大規模なシールドルームを必要とし（場合によっては真空環境が要求されるかもしれない）、検証が難しいという課題もある¹⁶⁾。

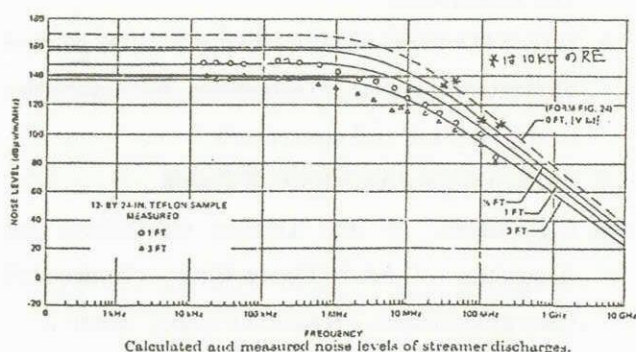


図 2.5-1 ESD 放射電磁界計測結果【文献 15】

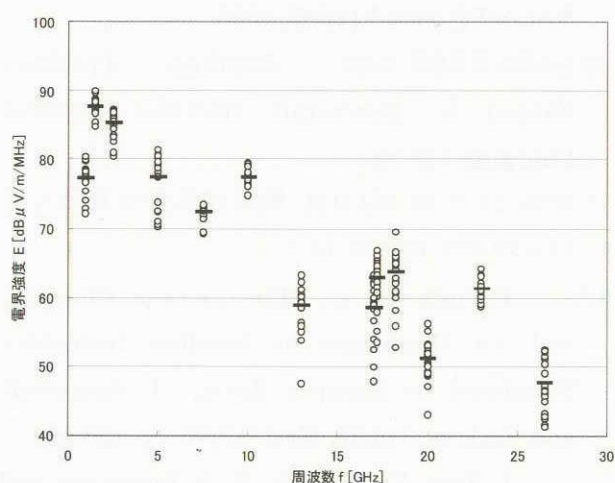


図 2.5-2 ESD 放射電磁界計測結果【弊社実施】

2.6 ESD によるその他の影響

2.6.1 熱制御材、ミラー等の劣化

ESDにより解放されるエネルギーは数mJ程度と小さいものであるが、放電電流が局所集中しジュール加熱により表面材の昇華、劣化等の影響が起り得る¹³⁾。特に、太陽電池パドルのカバーガラスの劣化や熱制御材の特性劣化が問題となる。図 2.6-1 は、弊社で実施した ESD 試験において確認された OSR (Optical Solar Reflector) 表面の蒸着層溶融の例である。本試験は、針電極によって ESD を発生させているため局所的に大電流が流れるといった過剰な試験であった。衛星寿命における総放電数の模擬も含め、より軌道上放電に近い形での実験（電子ビーム照射）、熱制御特性の評価が必要である。



図 2.6-1 OSR 表面の損傷例（OSR 蒸着層が昇華し下面に塗られていた接着剤が見えている）

2.6.2 内部帯電の影響^{11,17)}

内部帯電は衛星構体を貫通した放射線帯外帯の約 1MeV 以上の電子等が内部基板間やハーネス被覆等の誘電部に帯電し、その耐圧の弱い箇所（材質の欠陥、針状突起部位含む）で耐電圧を超え放電して破壊、もしくは生じたパルスが最も耐性の弱い電子部品を破損させるといった事象であるが、メカニズムが複雑であり、明確な設計指針が規定されていない。通常の放射線対策（DOSE, SEU 対策）として、必要構体厚、筐体厚を求め設計しているが、内部帯電を防ぐためには更にこれらの厚みを増す必要があり、衛星質量・コストに大きく影響してくる。物理現象の究明、リスクの見極めをし、設計・製造に反映していく必要がある。

3. おわりに

世界においては、EMC に関する ISO¹⁸⁾ が制定されるとともに、帯放電対策に関しても ISO 策定の動きがある。また国内においても、2005 年 4 月に筑波で第 9 回衛星帯電技術国際 会議 (9th Spacecraft Charging Technology Conference) を主催 することが決定しており、更には 2004 年度より国産衛星帯電解析ソフトの MUSCAT(Multi-utility Spacecraft Charging Analysis Tool)開発を、九州工業大学殿を中心としたグループによりスタートしている。このような国内外の動向を

真摯に受止め、衛星メーカーとしてもこの方面で積極的に参画して行きたいと考えている。

本稿で述べてきたように、近年、弊社としても帯放電に関わる対策を重視し、特に以下を目標として活動を進めている：

■地上における帯放電試験条件の設定及び技術評価能力の向上

■帯電環境を継続的にモニタし、太陽活動を予報、運用へ展開可能な社外組織・体制への積極的参加

■国内外の研究・技術動向の継続的な調査

しかしながら、未だに物理的に明らかにされていない事象も多く、またシステム全体での想定事象再現には大規模な研究設備を必要とすることから、メーカー単独での研究・評価にはハードルが高いのが事実である。また、軌道上実証・データの取得が必要であることから、産官学の枠を越えた国家ぐるみでの取組みが必須である。

最後に、これまでの研究、ならびに本発表において多大なるご支援とご協力を戴いた奈良工業高等専門学校藤井治久博士に深く謝意を表したい。

参考文献

1. 西本博信・藤井治久・阿部俊雄、人工衛星の帯電放電と帯電防止技術、三菱電機技報、Vol.61 (1987) pp.234-237
2. 趙孟佑・藤井治久、宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題 第1回 宇宙環境と宇宙機の帯電電位、日本航空宇宙学会誌、Vol.51 (2003) pp.109-117
3. 趙孟佑・藤井治久、宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題 第2回 高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題、日本航空宇宙学会誌、Vol.51 (2003) pp.139-145
4. H.Fujii, A.Palov and T.Abe, "Research Activity in Mitsubishi Electric on Spacecraft Charging," Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conf., ESA SP-476(2001); pp.89-94.
5. ECSS-E-20A: Space Engineering Electrical

- and Electronics
6. MIL-STD-461E: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment
 7. JERG-0-028: JAXA EMC 設計基準
 8. C.K.Purvis, *et al*, "Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects," NASA-TP-2361, 1984.
 9. D.C.Ferguson, *et al*, "Low Earth Orbit Spacecraft Charging Design Guidelines," NASA-TP-2003-212287, 2003.
 10. NASA-HDBK-4002: Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects
 11. 昭和 53 年度 NASDA 殿委託業務成果報告書 TK6-79-023, 1978 年 10 月.
 12. H.Fujii, *et al*, "Electrostatic Charging and Arc Discharges on Satellite Dielectrics Simulated by Electron Beam," J. Spacecraft and Rockets, Vol.25, No.2 (1988), pp.156-161.
 13. I. Katz, V. A. Davis, E. A. Robertson and D. B. Snyder, "ESD Initiated Failures on High Voltage Satellite, Space Environments and Effects," Flight Experiments Workshop, 1998.
 14. H.Fujii and H. Koakutsu, "Electron-beam-induced ESD triggering discharge tests of solar arrays for space use," 8th Spacecraft Charging Technology Conference, NASA/CP-2004-213091 (2004)
 15. "Interference Characteristics of Streamer Discharges," IEEE Trans. EMC, Vol. EMC-12, No.2, 1970.
 16. J.P.Catani, "Electrostatic Discharges & Spacecraft Anomalies," Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conference, Nov. 2001, pp.33-43.
 17. 五家建夫、「衛星の帯電障害：この古く新しい問題への挑戦（基調講演）」、第5回宇宙飛翔体研究会報告書、平成14年11月
 18. ISO-14302: Space systems – Electromagnetic compatibility requirements