

# 宇宙機最悪帯電プラズマ環境の国際標準化

豊田 和弘 (九州工業大学)

## 1. はじめに

1997年の静止衛星TEMPO 2の放電事故<sup>1)</sup>をきっかけに、宇宙機帯電放電に関する研究が盛んになり、打ち上げ前には地上での帯電放電試験が行われるようになった。これに伴い、人工衛星搭載太陽電池パネルの帯電放電試験方法がISO-11221として日本から提案されて国際標準化し、各国の研究機関で使用されている。しかし、帯電プラズマ環境に関する国際標準は2012年の時点で存在しておらず、平成24年度国際標準開発事業として宇宙機帯電電位見積りに関する国際標準化を開始した。

ここでは国際標準化活動の背景、概要と経緯、また期待される効果について述べる。

## 2. 国際標準化活動の背景

宇宙機の設計初期段階で宇宙空間での帯電を見積もっておくことは放電事故を回避するために重要である。宇宙機の帯電状態はその軌道によってことなり、それは軌道によりプラズマ環境が異なることが原因である。低地球軌道 (LEO) では宇宙機の電位はプラズマ環境ではなく発電電圧に依存する。そのため宇宙機は放電閾値以上の発電電圧にならないように設計されている。一方、静止軌道 (GEO) では宇宙機の発電電圧によらずプラズマ環境によって電位が決まる。そのため宇宙機電位シミュレーションソフトで電位を見積もる必要がある。

宇宙機の電位を見積もるためには宇宙機の

表面材料の帯電物性のような宇宙機側のデータの他に、GEOプラズマ環境データが必要になる。設計初期段階では最悪な帯電状態を生じるようなプラズマ環境を入力することが望まれるが、どのようなプラズマ環境が最悪環境であるかは定まっていない。そのため宇宙機の最悪帯電状態をもたらすプラズマ環境をISO\_TC20 (航空機及び宇宙) / SC14 (宇宙システム及び運用) / WG4 (宇宙環境) に提案し、国際標準として策定することを目指した。

## 3. 国際標準の概要

現在までに様々なGEOプラズマ最悪環境が観測され発表されているが、プラズマ環境の分布関数は電子と陽子それぞれに対して、以下の式のようにダブルマクスウェル分布またはマクスウェル分布で表されている。

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi}\right)^{3/2} \left[ \frac{n_1}{(kT_1)^{3/2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_1}\right) + \frac{n_2}{(kT_2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_2}\right) \right]$$

$n$ は密度を、 $T$ は温度を示しており、 $v$ は荷電粒子の速度である。ダブルマクスウェル分布の場合は2つの密度、2つの温度で表現する。密度、温度が1つだけの環境はマクスウェル分布である。

本標準化活動では、実際にこれまで人工衛星で計測されているプラズマ環境の中で、人工衛星が最も帯電する環境を提供することが目的である。この最悪帯電環境を選定するため、最悪環境だと考えてられていたプラズマ

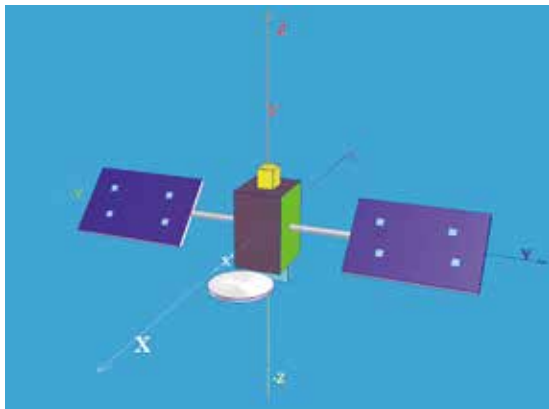


図1 帯電解析に用いられた衛星モデル

環境をリストアップし、複数の宇宙機電位帯電解析ソフトで計算して最悪環境を決定した。用いたソフトはMUSCAT、NASCAP-2k、SPIS、COULOMB-2の4つの帯電解析ソフトに入力し、同じ衛星モデル（図1）を使ってラウンドロビン解析を行った。<sup>2)</sup>

太陽光は太陽電池パネルに垂直に照射されており、太陽光ありの場合、なしの場合で解析が行われた。その結果、絶縁体と導体の間で電位差が一番大きくなるプラズマ環境を最悪環境として提案した。宇宙機帯電で最も事故が発生しやすいのは太陽電池パネル上での放電であり、太陽電池セルのカバーガラスと衛星構体電位に近い太陽電池との間で電位差が大きくなることで放電が発生することになる。

## 4. 活動の経緯

### 4.1. 平成24年度の活動

- (1) 宇宙プラズマ環境調査を行った。
- (2) 帯電解析ソフトによるワーストケースの評価を行うため、あらかじめNASCAP-2kで計算されていた衛星モデル、プラズマ環境を用いてMUSCATを使って計算を行った。これにより2つの帯電解析ソ

フトで同様の結果を得ることができ、ラウンドロビン解析へ進むことができた。

- (3) 東京で国内外から専門家を集めワークショップを開催した。ここでラウンドロビン解析のモデル、プラズマ環境を決定した。またISO草稿の目次について議論し、決定することができた。

### 4.2. 平成25年度の活動

2回目のワークショップを開催し、MUSCAT、NASCAP-2k、SPIS、COULOMB-2によるラウンドロビン解析を行うことを決定した。ISO草稿の作成を行った。

### 4.3. 平成26年度の活動

- (1) 平成26年4月に新業務項目提案（NWIP：New Work Item Proposal）を提出し、投票の結果、新規プロジェクトとして平成26年7月にNP 19923として登録された。プロジェクトにはエキスパートが最低4カ国から参加する必要があるが、これまでのワークショップで呼びかけていたこともあり、日本、アメリカ、ロシア、中国からエキスパートが入りNPとして認められることとなった。
- (2) WG4国際会議でCDへ移行することが認められた。
- (3) 3回目のワークショップを開催した。ここでMUSCAT、NASCAP-2k、SPIS、COULOMB-2によるラウンドロビン解析の結果が出揃い、最悪帯電プラズマ環境を決定した。またISO草稿の作成を行った。



図2 第3回ワークショップ

#### 4.4. 平成27年度以降の活動

- (1) CDCを行って得られたコメントをCDに反映した。
- (2) CD投票の結果、平成28年4月にDISへ移行することが認められた。
- (3) DIS投票の結果、FDIS投票を行うことになり、得られたコメントを草稿に反映させた。
- (4) FDIS投票の結果、平成29年5月3日付けでIS 19923 “Space environment (natural and artificial) -- Plasma environments for generation of worst case electrical potential differences for spacecraft” が成立した。

#### 5. 本国際標準に期待される効果

また、衛星の帯電状態のワーストケースを正しく評価する事で、起こり得る放電事象に備えることができ、地上帯電放電試験で確認を行うことで衛星の不具合削減に大きく寄与することができる。この結果、衛星の信頼性が向上し、利用拡大につながることにより宇宙産業の発展に寄与する。

#### 6. おわりに

本標準化活動は、経済産業省の国際標準開発事業として、平成24年度から平成26年度まで3年間の支援を受けて行われ、平成29年5月に無事IS 19923として国際標準化することができた。これは毎年国内外から専門家を招いてワークショップを計3回開催することができたことが大きく、海外の意見を草稿に反映することでスムーズに標準化まで進めることができたと考える。

また日本航空宇宙工業会の皆様、国内WG4委員長および委員の皆様のご協力無くしては標準化を成し遂げることは困難であり、この場を借りて感謝を申し上げたい。

#### 参考文献

- 1) Katz, I. , Davis, V.A. and Snder, D.B. : “Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO” , AIAA 98-1002, 36th Aerospace Sci. Meeting (1998)
- 2) K. Toyoda and D.C. Ferguson, “Spacecraft potential estimation in worst case environment,” 13th Spacecraft Charging Technology Conference, 2014.