

### 5.3. システム熱真空試験と放電現象


三菱電機株式会社 鎌倉製作所

宇宙システム部 機械技術課

田中 好和 氏

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better


第9回 試験技術ワークショップ


家族から宇宙まで、エレクトロニクス 

# システム熱真空試験と放電現象

## ～システム熱真空試験環境での内部圧力把握について～

2011.11.10 宇宙システム部 田中 好和

 三菱電機株式会社



COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

## 目次

- 1: はじめに
- 2: (システム)熱真空試験の概要
- 3: チャンバ内部と宇宙機内部の圧力環境
- 4: チャンバ内での放電現象
- 5: 熱真空試験における放電回避対策
- 6: 放電回避対策の問題点
- 7: 今後の技術課題
- 8: まとめ

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

1

## 1. はじめに

宇宙機に搭載された各種電子機器は、打上げ前の地上検証試験から軌道上における寿命末期までの期間において、様々な環境下に曝される。ここでは、地上検証試験(熱真空試験)における環境について考える。

具体的には、宇宙機のシステム熱真空試験において注意すべき現象として、搭載機器の放電現象が挙げられる。打上げ時の環境とは異なり、熱真空試験の圧力環境においては、特に搭載電子機器(特に「放電注意機器」と呼ばれる高電圧機器や高周波機器等)に対する配慮が重要である。

本講演では、熱真空試験における放電現象の概要と留意すべき課題について述べる。

## 2. (システム)熱真空試験の概要

衛星を打上げる前の地上検証試験としては、衛星をスペースチャンバに収納して宇宙の熱真空環境を模擬して実施する熱真空試験がある。

この熱真空試験は、衛星構体や搭載機器の耐環境性や電気性能の総合的な認定試験として位置付けられる。

### ■ 熱平衡試験 (Thermal Balance)

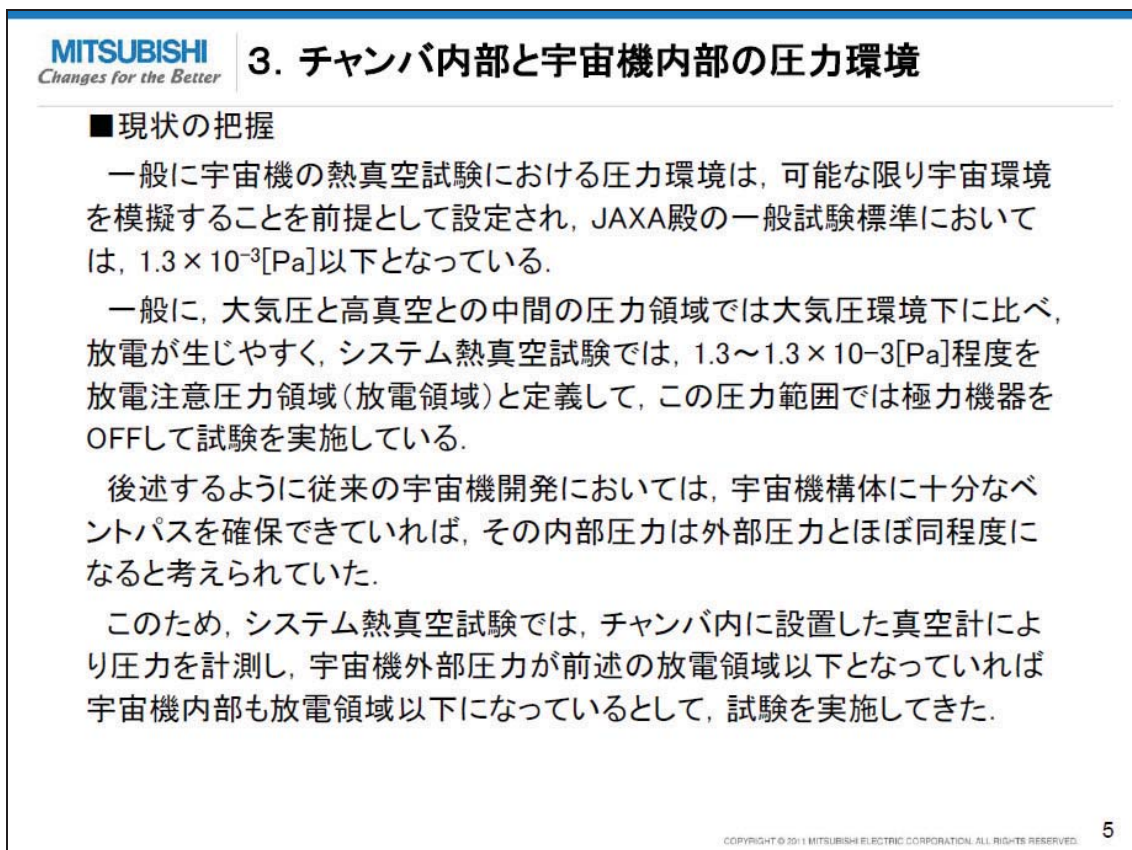
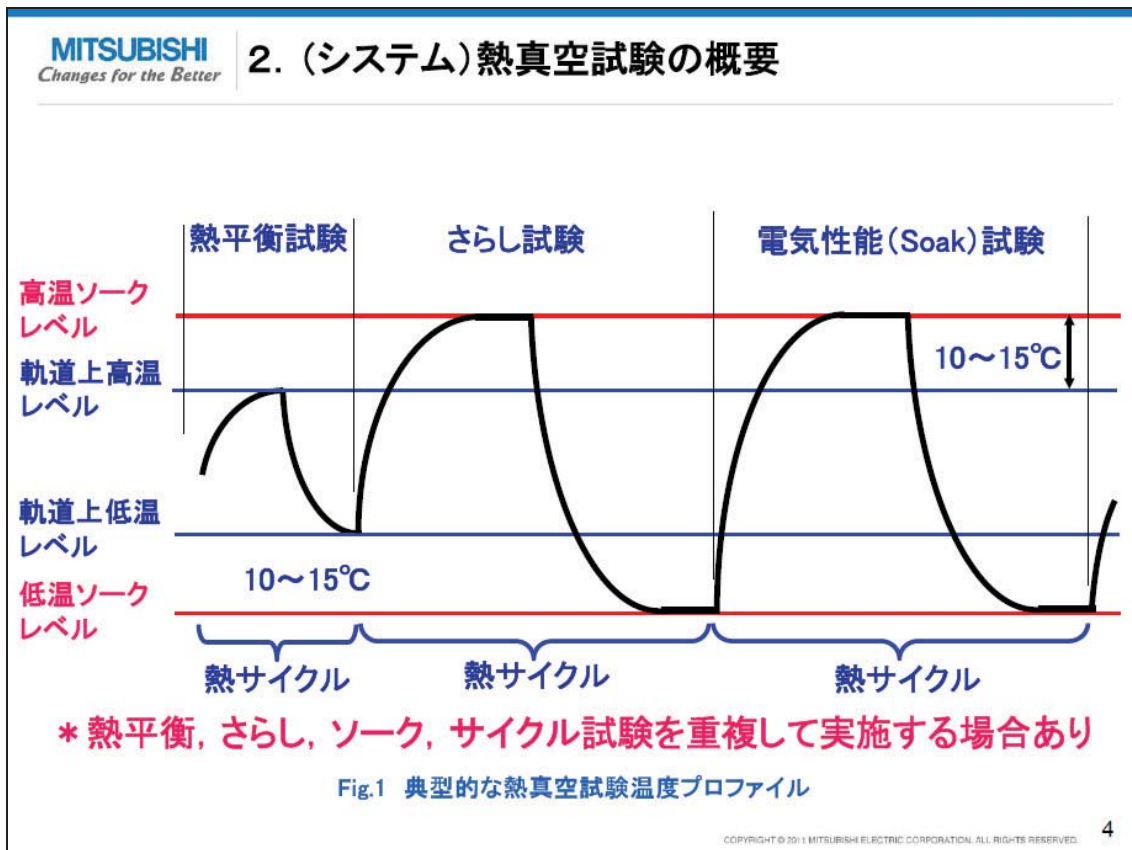
- ・熱平衡試験では衛星搭載機器の軌道上運用と放熱面への軌道上熱環境を模擬し、通常、高温ケース/低温ケースで熱平衡状態のデータを取得し、衛星熱制御系の健全性を確認する。

### ■ さらし/熱サイクル試験 (Thermal Expose/Thermal Cycle)

- ・さらし試験では、通常、軌道上最大予測温度範囲の10~15°C外側の温度レベルに衛星を一定期間さらし、また高温/低温の熱サイクルを数回繰り返すことにより、熱制御材をはじめとする衛星各部の機能、性能の健全性を確認する。

### ■ 電気性能 (Soak) 試験 (Thermal Soak Electric Performance)

- ・電気性能 (Soak) 試験では、通常、軌道上最大予測温度範囲の10~15°C外側の温度レベルに衛星あるいは搭載機器を一定期間ひたし、軌道上よりも厳しい環境における搭載機の電気性能の健全性を確認する。



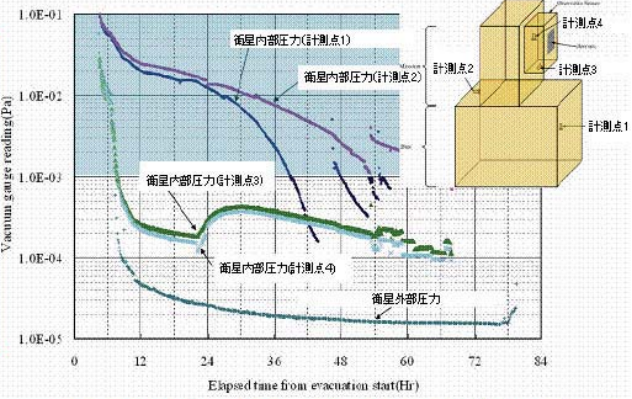
**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

### 3. チャンバ内部と宇宙機内部の圧力環境

【チャンバ内と宇宙機内部の実際の圧力】

熱真空試験時のチャンバ内圧力と供試体(宇宙機)内部圧力の把握については、『宇宙機の放電防止対策』を目的として、2006年にJAXA殿が地球観測衛星システム開発試験(熱真空試験)にて供試体内部に設置した真空計による計測・評価結果により、**宇宙機内部の圧力は外部(チャンバ内部)圧力に対して、最大3オーダー近く高いことが確認され、報告された。**[文献1]

上記報告により、宇宙機のシステム熱真空試験時のチャンバ内の圧力と宇宙機内部圧力との関係については、**チャンバ内部圧力が放電領域を通過していても宇宙機内部圧力は放電領域内に維持されている場合があり得ることが示唆された。**



試験時の内部圧力の把握は重要！

Fig.2 地球観測衛星 システムSTM熱真空試験での衛星内外圧カプロフィール[文献2]

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 6

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

### 3. チャンバ内部と宇宙機内部の圧力環境

■システム熱真空試験における内部圧力把握の重要性

これまで、宇宙機内外の圧力差に起因する放電不具合は報告されてない。  
⇒これまでの宇宙機の使用電力が小さく放電に対してクリティカルな機器がほとんどなかった？

近年の宇宙機の開発されている傾向として、下記が挙げられる。

①高電力・高周波数の電子機器が多数搭載された高密度実装  
②宇宙機自体の高電力化

上記の傾向から、システム熱真空試験における真空放電の可能性は高くなる傾向にあると考えられる。

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 7

### 3. チャンバ内部と宇宙機内部の圧力環境

#### 【供試体(宇宙機)内部圧力停留の要因】

前述の報告において推定された内部圧力停留の主要因として下記を挙げる.

#### ■ 宇宙機構体内部からのOut Gas

⇒ Out Gas放出源: Thermal Coating, Adhesive, Wire Insulation, etc

#### ■ 宇宙機構体のVent Pass

⇒ 宇宙機内部と外部間の排気Conductanceの確保(\*)

(\*)十分なVent Passと排気Conductanceの確保は、宇宙機内部圧力の予測には必要であるが、実際には関係するParameterが多く、正確な予測は難しい。

### 3. チャンバ内部と宇宙機内部の圧力環境

#### 【システム熱真空試験における圧力】

■ 真空領域:  $1.33 \times 10^{-3}$ [Pa]以下

■ 放電領域:  $1.33 \sim 6.65 \times 10^{-3}$ [Pa]

一般にコロナ放電は、上記放電領域よりも高い102[Pa]程度の圧力領域で発生する危険性がある。これは、上記放電領域と齟齬があるように見られる。

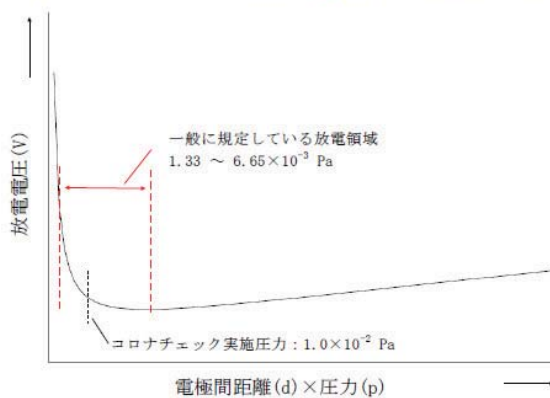


Fig.3 パッシェンの法則による電極間距離と圧力との積と放電電圧との関係

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

## 4. チャンバ内での放電現象

【チャンバ内での放電現象】

- 一般の宇宙機では、大気圧下ならびに高真空下では放電電圧は非常に高く、ほとんどの機器がDC100[V]以下の電圧しか印加されないため、放電現象はほとんど発生しない。
- 一般に熱真空試験時のチャンバ内において、大気圧～高真空環境に至る圧力領域(例えば、微量なGasが残存した状態である「低真空領域」: $1.33 \times 10^{-3} \sim 10^4$ [Pa])では、放電電圧が低下するため、高電圧・高周波が印加されるような機器に対しては、**放電が起こりやすい環境**が存在する場合があります。
- 機器の近傍において放電が生じると機器の『性能劣化』や『故障』等を誘発  
⇒放電が生じる可能性のある機器(前出の放電注意機器)では、**設計段階から『放電防止対策』を考慮し、ハードウェア製造にも対処を実施。**
- 放電が危惧される熱真空試験での運用上の対策  
⇒高電圧・高周波が印加される機器は、この領域では回避策として『ONしない』場合が多い。

10  
COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

## 4. チャンバ内での放電現象

【(システム)熱真空試験における問題点】

前述の宇宙機内部圧力の測定結果報告により、熱真空試験中のチャンバ内においても宇宙機内部圧力は、外部圧力と比較して高い場合があります。このため、宇宙機の熱真空試験において、宇宙機外部と比較して内部圧力が高い場合、宇宙機内部に搭載された**放電注意機器(高電圧・高周波機器等)**近傍の圧力値を把握した上で、Turn Onの可否を判断する必要があります。

Table1. 放電現象と発生時の影響

	放電の概要	発生箇所	放電の種類	代表的な放電不具合	機器への影響
DC放電	直流電場で加速された電子が気体分子と衝突し電離することで引き起こされる	DC電圧が印加される機器の内部にある電極間等で発生する。	コロナ放電	・ショート ・機器の損傷 ・誤動作	・動作不良 ・動作不能
RF放電	電極間を通過する電子が振動し、両電極を往復して衝突することで引き起こされる	RFを通過させるデバイス注の電極間及びフィルタ等の導波管で発生	・コロナ放電 ・マルチパクション	・ショート ・機器の損傷	・動作不能 ・性能劣化 ・消費電力増 ・ノイズ増

11  
COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

### 4. チャンバ内での放電現象

【宇宙機で生じる主な放電現象】

熱真空試験において発生し得る放電現象として主なものを挙げる。

(1) コロナ放電・・・ $1.33 \sim 1.33 \times 10^2$  [Pa]程度の真空環境下において気体中の平均自由行程が数[mm]程度となる場合に発生。

● 電子  
● 気体分子  
● 正イオン  
● 2次電子

Fig.4 コロナ放電の発生イメージ

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

12

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

### 4. チャンバ内での放電現象

(2) マルチパクション・・・ $1.33 \times 10^{-1}$  [Pa]を超えるような真空環境下で電子の平均自由行程が[cm]オーダーとなり、電子が電極間の他の分子に衝突することなく電極に到達するような場合に発生。

(注) マルチパクションは、何らかの原因により電極間に高周波電圧が印加された場合に発生。

上部電極の電位  
電極  
● 電子  
● 2次電子  
電極  
下部電極の電位

Fig.5 マルチパクションの発生イメージ

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

13



**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

## 5. 熱真空試験における放電回避対策

【高電力宇宙機のシステム熱真空試験を実施するに当たって】

■これまでの背景から、今後の(高電力)宇宙機のシステム熱真空試験を実施するに当たり、**宇宙機の内部と外部との圧力差を考慮した搭載電子機器の放電を回避する方法が求められている。**

【回避策】

- ①宇宙機内部の圧力を計測して内部圧力を把握・・・
- ②宇宙機内部の確実な排気を促進するためのベント設計・・・

➡

【課題は多い・・・】

- ①宇宙機内部に真空計を設置した場合の放電誘発リスク・・・
- ②大きなベントホール設置による内部熱環境への影響・・・

↓

これまで実施された熱真空試験の放電対策について再整理が必要では？  
JAXA 環境試験技術センター殿と2010年度に熱真空試験の円滑な運用を目的として過去の試験について調査を実施した。

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 14

**MITSUBISHI**  
Changes for the Better

## 5. 熱真空試験における放電回避対策

【システム熱真空試験における放電注意機器の取り扱い】

●その前に・・・

- ・打上げ以降 ⇒一般に軌道投入後に十分な時間を経過させてON.
- ・システム熱真空試験 ⇒放電領域内ではONしないことを基本とし、通過後に注意機器をON.

(\*)システム熱真空試験では、打上げ時にON状態のものは、その状態で放電領域を通過させ、OFFの機器については放電注意機器に限らずOFF状態で通過させている。

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 15

**MITSUBISHI** Changes for the Better | **6. 放電回避対策**

**【機器設計での放電対策】**  
 ●一般的な設計方針  
 一般的な機器の設計において対策をおこなった圧力領域

圧力(Pa)	>10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Hot Launch	←—————→									
Cold Launch	←—————→									

試験で放電発生の有無を確認している圧力領域

圧力(Pa)	>10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Hot Launch	←—————→									
Cold Launch	←————→								←————→	

機器の放電設計方針

	Hot Launch(*1)	Cold Launch(*2)
設計方針	全ての圧力領域において放電が発生しないように対策	
試験	全ての圧力領域においてONし、放電しないことを確認している	大気圧および軌道上圧力環境 (1.3 × 10 <sup>-3</sup> [Pa]以下)で試験を実施

(\*1)打上げ時に動作状態の機器. (\*2)打上げ時は非動作状態で軌道到達後に動作させる機器.

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 16

**MITSUBISHI** Changes for the Better | **6. 放電回避対策**

**【各放電対策方法】**  
 一般的な放電防止設計において有効とされている手法を挙げる.

- (1)電子の平均自由行程を小さくする.
- (2)二次電子放出を抑制する.
- (3)電極間距離を大きくする.
- (4)電極表面等をできるだけ滑らかにする.

The diagram shows four methods for discharge prevention:

- (1) 誘電体を入れる (Add dielectric):** Shows a dielectric material between electrodes to reduce the mean free path of electrons.
- (2) コーティングする (Coating):** Shows a coating on the electrode surface to suppress secondary electron emission.
- (3) 電極を離す (Increase electrode distance):** Shows increasing the distance between electrodes to prevent discharge.
- (4) 電界集中面取り (Smoothing electrode surfaces):** Shows smoothing the electrode surfaces to reduce electric field concentration.

Legend:  
 ● 電子 (Electron)  
 ○ 気体分子 (Gas molecule)  
 ⊕ 正イオン (Positive ion)  
 ● 2次電子 (Secondary electron)

**Fig. 6 放電対策法の概略**

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 17

## 7. 今後の技術課題

■今後の技術課題として、下記を挙げる。

(1)ベント解析による宇宙機内部圧力の予測精度向上手法の確立

⇒これまでの有効な実測データ等から宇宙機構体の解析モデル等を作成し、宇宙機構体内部の圧力予測を補完するデータベースを作成・蓄積することで、概略の技術検討が行える手法の確立。

(2)宇宙機内部に真空計を設置した場合の放電誘発リスク回避

⇒放電誘発リスク回避するための手順等の確立

(3)宇宙機外部に設置した真空計をモニタすることにより、宇宙機内外の圧力差を考慮した試験運用の確立

⇒宇宙機内外の圧力差と宇宙機構成を対応させたデータ整理を行うことにより、宇宙機内部と外部の圧力差の関係を評価することで試験運用を確立する。

(4)放電領域の再吟味

⇒現状用いられている放電領域は、放電注意機器の仕様等によるが、実際の宇宙機搭載機器がどの程度の放電領域を必要とするかについて整理する必要がある。

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 18

## 8. まとめ

■熱真空試験における内部圧力に対する考え方は、宇宙機内外の圧力差が3オクタード程度高いことが判明した時期を境として大きく異なった。但し、放電領域は宇宙機外部の圧力を参照して評価し、特に注意の必要な機器だけを個別に規格を定めて対応するというシステム熱真空試験における基本的な放電防止策は従来とあまり変わっていない。

■宇宙機の構成および内外の圧力差を定量的に評価することで、宇宙機内部と外部との圧力の関係を把握することは可能である。これにより、宇宙機内部と外部との圧力差を考慮することで、従来どおり、宇宙機外部に設置した真空計により、放電注意圧力領域を推定することは可能である。

■機器の放電に関する調査を実施した結果、基本的に機器設計において全ての圧力領域において放電が発生しないような何らかの対策を施している。

但し、Hot LaunchもしくはCold Launchのどちらかで試験方法は異なる。

■Cold Launchの搭載機器については、 $10^{-2} \sim 10^4$  [Pa]程度の圧力領域で放電の確認試験を実施していないため、放電が発生しないことを確認していない領域がわずかながら残ることになる。このため、システム側において、放電に対して注意を払う必要がある機器については、機器側より個別に圧力を含めた規格を提示してもらい、その圧力規格を守ることで放電発生を回避している。

COPYRIGHT © 2011 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 19

## 9. 参考文献

本講演資料作成にあたり参考とした文献を下記に挙げる。

- (1) 猿渡, 「人工衛星内部の圧力」J.Vac.Soc.Jpn. Vol.51, No.5, 2008
- (2) JAXA (JAXA-SP-08-007) 第5回試験技術ワークショップ特別資料(2008)

## 質疑応答

### 質問者①

放電を起こす機器（高周波や高電圧機器）は、当然単体で試験されているわけですよね。そこで放電しないということを確認していて、その場合の試験のときの背圧等の条件は全部提示されているわけですよね。

### 発表者

はい。そういう条件では問題なかった（放電しなかった）という条件は出ています。

### 質問者①

ただ、その場合に「コンポーネントの試験をどの圧力までやりなさい」という要求はされていないのでしょうか？

### 発表者

実際の機器に対してスペックをどこまで書くのかにもよりますが、基本的に「ある圧力範囲で放電しないこと」は、最小限要求しています。

### 質問者②

放電については、ベントホールとアウトガスの影響とどちらが効いてくるのでしょうか？

### 発表者

アウトガスはゼロとは言いませんが、個人的にはベントのほうが効いているのではと思います。昔の衛星に比べるとアウトガスが出ない材料や部品が使われてきているということもありますし、衛星の放熱面の熱制御材の軌道上でのテレメトリ評価をしていると、昔はアウトガス等の影響によるイニシャルジャンプというトレンドが見られたのですが、最近のものではあまり見られなくなってきています。ですので、アウトガスそのものは昔のものに比べると少なくなっているのではないかと思います。ただし、今回の発表のように圧力が高くなっているのは、アウトガスではなくて、ベント設計にもう少し工夫が必要なのではないかと考えています。

質問者③

今はシステムのお話だったのですが、コンポーネントそのものは密封タイプのものとベントするタイプのものが混在しているのでしょうか。

発表者

基本的にはコンポーネントもベントホールがあると聞いております。密封タイプがあるかはよく存じ上げておりませんが、だいたいベントホールがあるものを使っていると認識しております。

質問者③

そうすると、コンポーネント内部そのものはもっと圧力が高くなっているのではと思います。それが時間が経過して放電しやすい領域に達するということかと思いますが、コンポーネントでこれまで放電するようなことはありませんでしたか？

発表者

我々はシステム試験をやっているので機器単体レベルでの試験は詳しく存じませんが、機器の試験では放電が無いようにきちんと試験を実施して性能を確認していると聞いております。

質問者③

それと、やはりガスの成分を調べたほうがいいのではと思います。最近のデータを見ると水分が多い衛星があったり少ない衛星があったりします。水分が徐々に熱真空試験の間に減っていくということがありますので、できればアウトガスは何の成分が多いのかというのも見たら良いのではないかと思います。

発表者

水が多いというお話は非常に参考になりました。このようなデータの蓄積は重要だと思っておりますので、いただいたコメントを踏まえて今後考えていきたいと思っております。