

穀山 渉

坪野研究室 M2

WEB公開版

©JAXA/NHK  
(c) JAXA/SELENE



# はじめに：今回の発表の目的

## ■ 超小型重力波検出器 SWIM $\mu$ v

08春の物理学会 スライドより

### SWIM $\mu$ vの目的・特徴

地上のレーザー干渉計に比べ感度は悪い( $h \sim 10^{-7}/\text{Hz}^{1/2}$  @1Hz)  
が、宇宙空間で重力波探査を行う**世界初**の検出器となる

**衛星の振動環境**を高精度で測定できる

DPF に向け、衛星製作・打ち上げの**経験と実績**を蓄積

DECIGO Pathfinder のさらに前のステップ

SWIMmnを開発・製作していく中で、多くの経験を得てきた(得ている)。

今後DPF計画が本格化する中、衛星開発に特徴的な考え方や  
どういうトラブルに見舞われたかなどの経験を、皆様にお伝えし、  
今後の糧としたい。

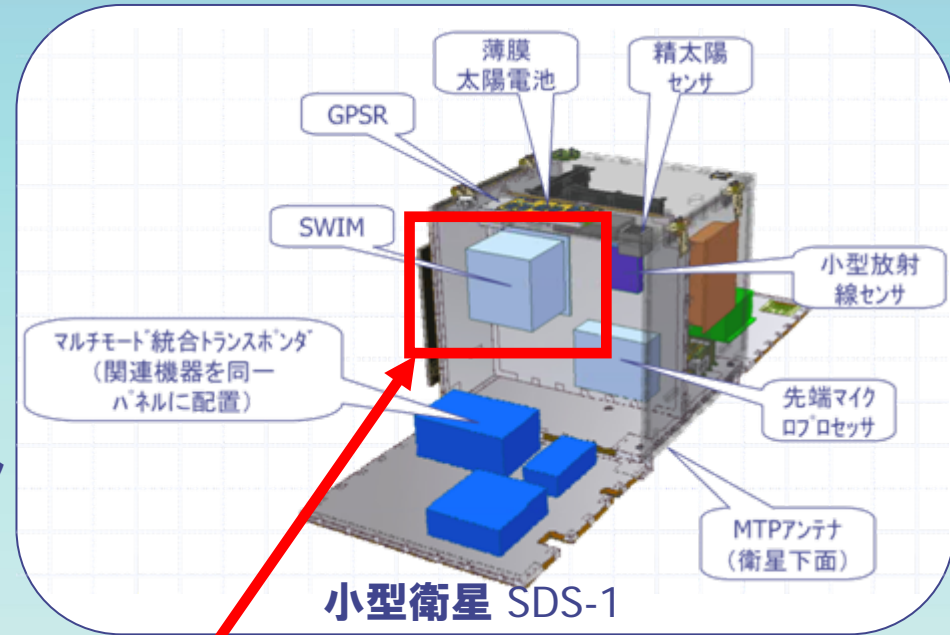
- **SWIMの概要・現状**
- **環境試験の結果**
  - 振動試験
  - 熱真空試験
  - 衛星への取り付けと噛み合わせ
- Lessons Learned
- **衛星搭載機器の開発について:私見**

# SWIM $\mu$ v の概要と現状 (1)

## ■ SWIM の目的と概要



2008年度打ち上げ GOSAT のピギーバック  
小型実証衛星 SDS-1  
高度670km 太陽同期軌道  
サイズ: 70×70×60 cm、重量: 約100kg



SpaceWire Interface demonstration Module (SWIM)

構成 : SpaceCube II ・ センサ部(重力波検出器SWIM $\mu$ v・MHIモジュール)

目的 : 新しい宇宙機用通信規格「SpaceWire」の実証

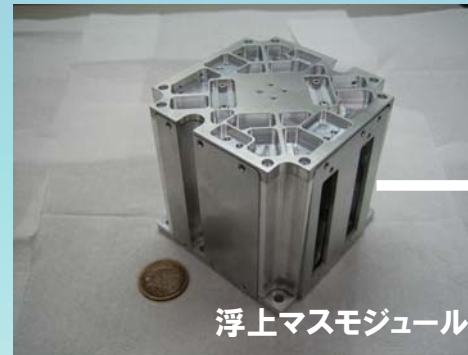
→ ローコスト・高速・高信頼性・柔軟なネットワークポロジィ・高いスケーラビリティ  
をもつ宇宙機用シリアル通信規格 NeXTやMMO、小型衛星標準バスで採用予定

## SWIM $\mu$ v の概要と現状 (2)

### ■ 超小型重力波検出器 SWIM $\mu$ v

#### 構成要素

- ・ 浮上マスモジュール(ねじれ型重力波検出器)  
× 2セット(互いに直交する方向)
- ・ アナログエレクトロニクス部
- ・ デジタルエレクトロニクス部(FPGA搭載ボード)



浮上マスモジュール



Proof Mass

動作原理を後述



SpaceCube II と SpaceWire を通じ接続

### 目的・特徴

地上のレーザー干渉計に比べ感度は悪い( $h \sim 10^{-7}/\text{Hz}^{1/2}$  @1Hz)  
が、宇宙空間で重力波探査を行う**世界初**の検出器となる

**衛星の振動環境**を高精度で測定できる

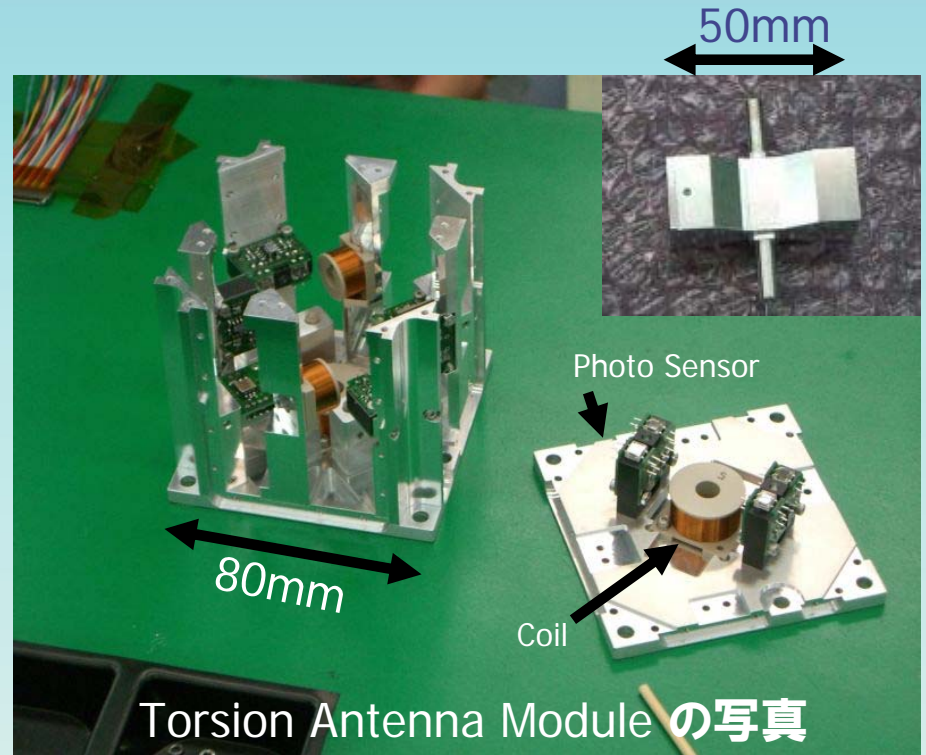
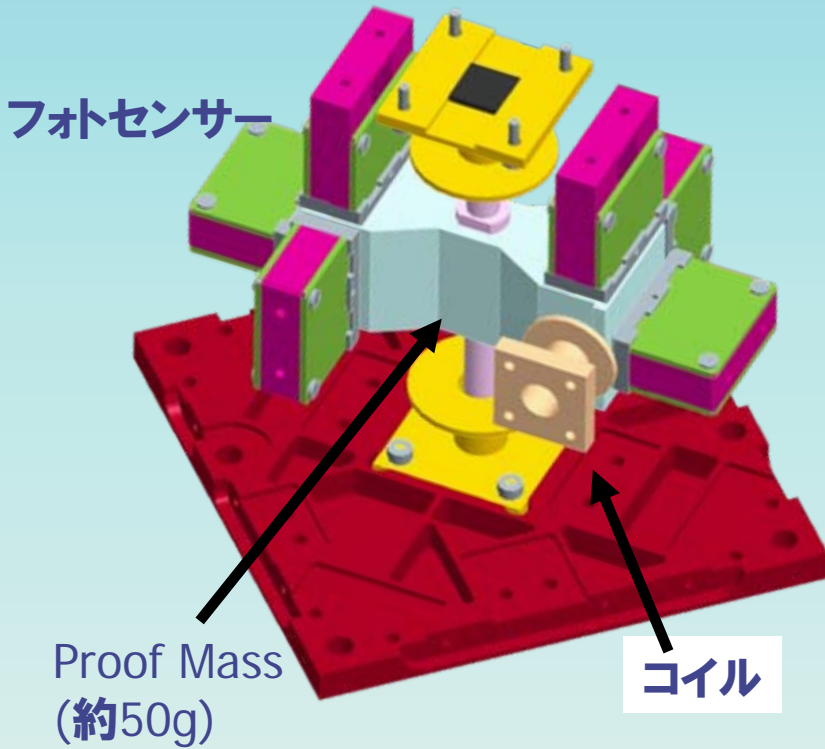
DPF に向け、衛星製作・打ち上げの**経験と実績**を蓄積

DECIGO Pathfinder のさらに前のステップ

同時に、SpaceWire の開発にも**成果をフィードバック**し協力している

# SWIM $\mu$ v の概要と現状 (3)

## ■ SWIM $\mu$ v の動作原理



- Proof Mass は衛星内で**非接触支持**される

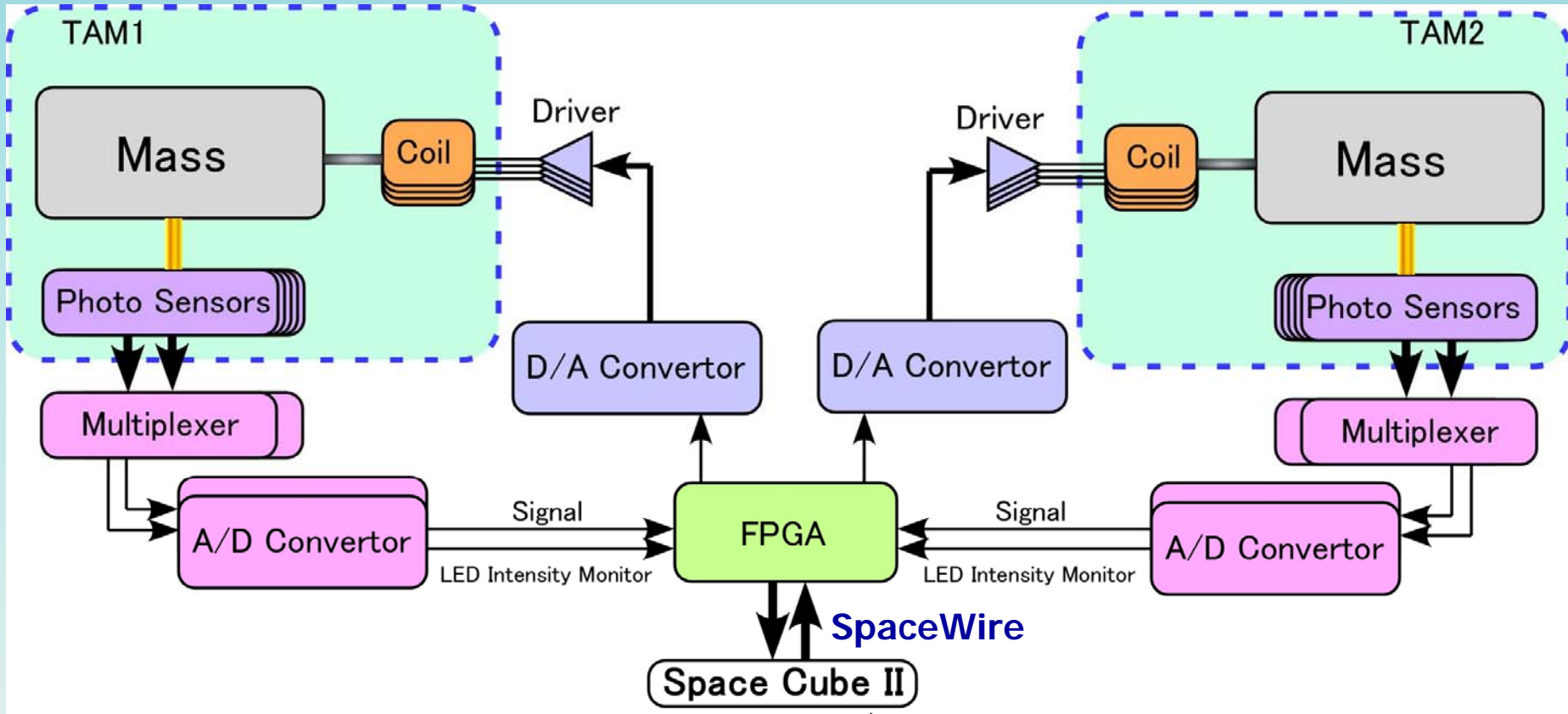
軸周りにねじれる自由度を観測

Torsion Antenna Module 2つを搭載し、差動成分をみる  
**高精度加速度計にもなる**

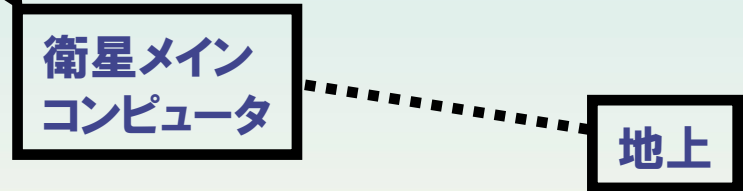
**フォトセンサノイズ**  
 $10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$

# SWIM $\mu$ v の概要と現状 (4)

## ■ SWIM $\mu$ v ブロック図



フォトセンサ / コイル-磁石アクチュエータ /  
FPGA によるデジタルフィルター を用いて制御  
観測帯域 : 主に 0.1~1Hz



## ■ 開発の現状

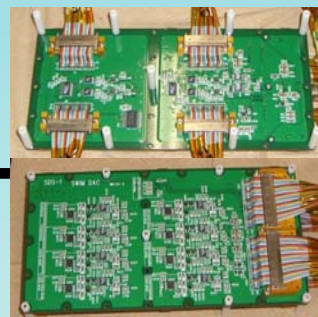


SpaceCube II 試験品

SpW



デジタルエレキ



アナログエレキ



アンテナモジュール  
(マス・センサ・コイル)



SpaceCube 2

SpW

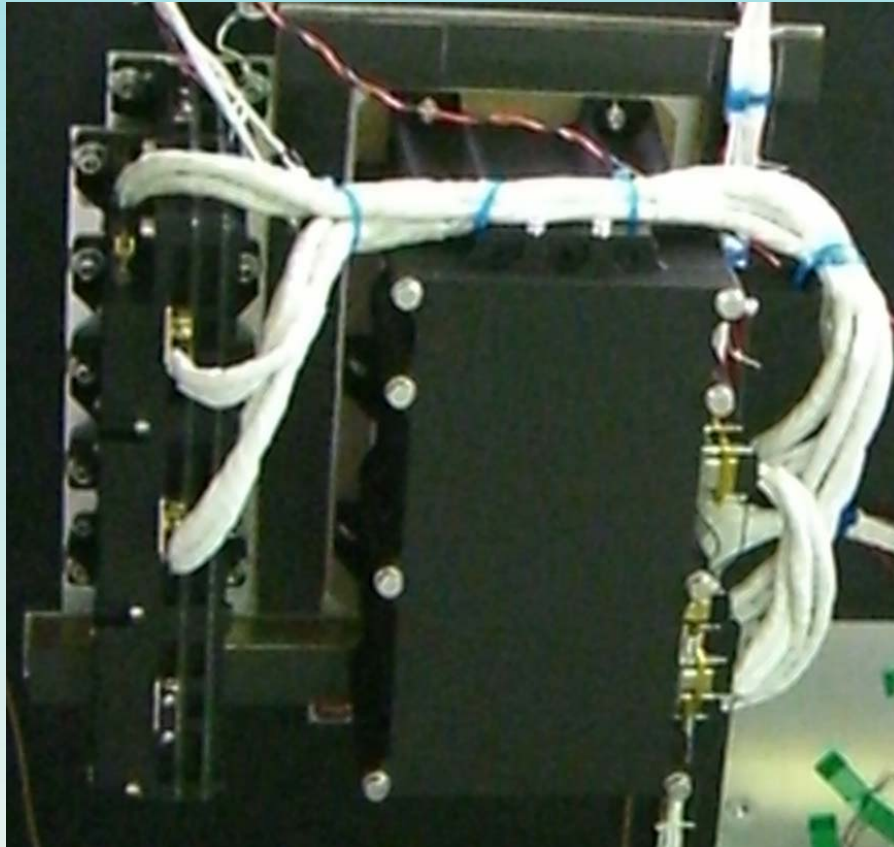


SWIMmn



## ■ 現状

すでにSDS-1衛星に取り付けられている！



ケーブルは、ガラステープが巻かれている  
(振動で擦り切れるのを防ぐ)

↑  
SpC2

↑  
SWIMmn

## ■ 引渡し状態

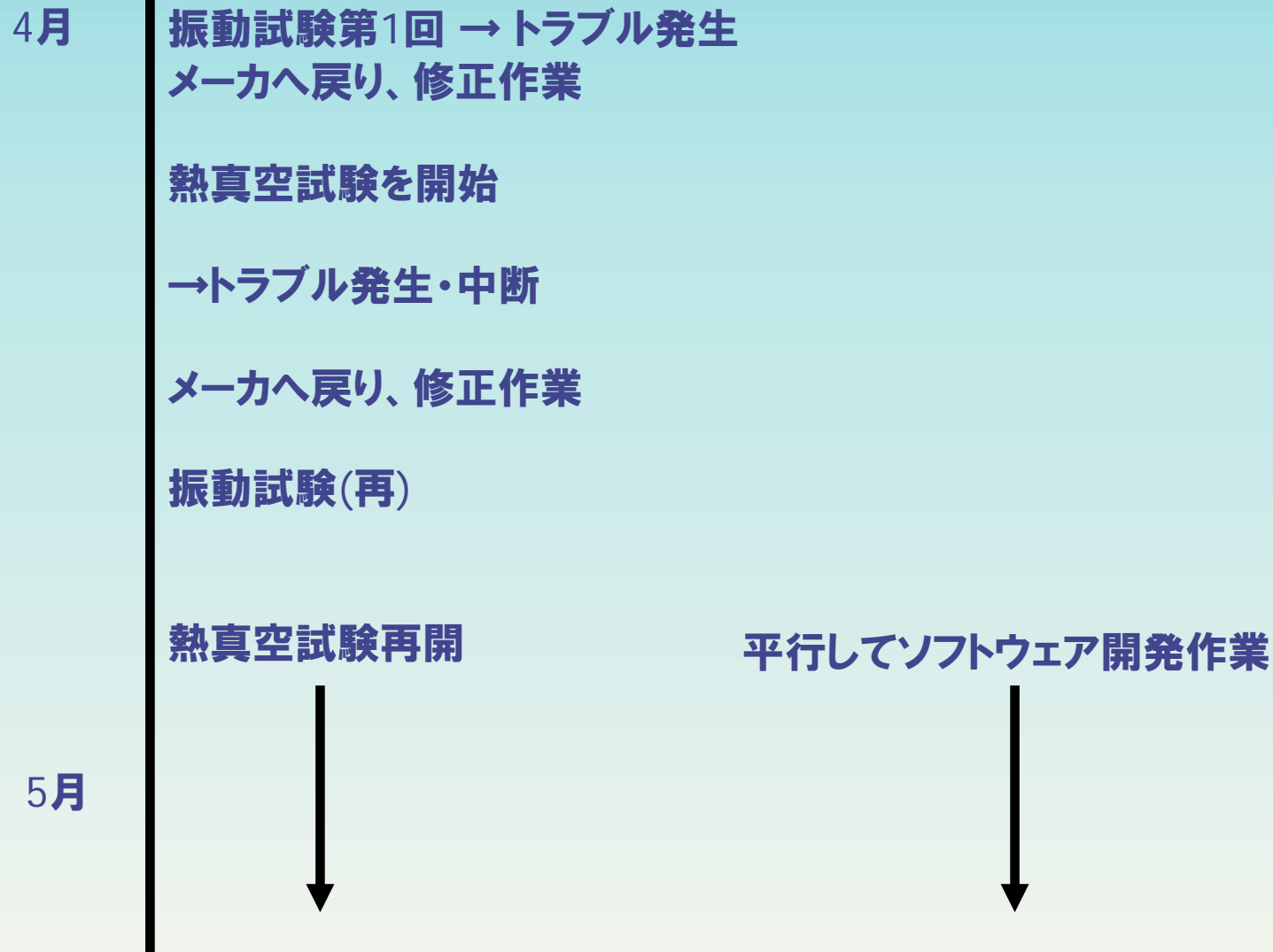


---

他の機器が写っているので、  
衛星全体の写真は  
ファイルには載せられません。  
画面上でお見せします

# SWIMの現状

## ■ 前回の学会(3月末)以来の進展



5月

熱真空試験終了・衛星引渡し → 噛み合わせでトラブル発覚

6月

筑波での試験この間3回

修正を完了、SWIMグループの手を離れる

- SWIMの概要・現状
- 環境試験の結果
  - 振動試験
  - 熱真空試験
  - 衛星への取り付けと噛み合わせ
- Lessons Learned
- 衛星搭載機器の開発について:私見

## ■ 環境試験

すべての衛星搭載機器は、以下の試験を通過しなければならない  
(一部省略されることもある・順番は変わりうる)  
コンポーネントの各レベルで行ったり、省略したりする

### ■ 温度サイクル試験

- ◆ 部品の温度特性や、機能が保たれるかどうか評価
- ◆ 温度サイクルによって障害が発生しないか(主に部品やハンダ不良)評価

### ■ 振動試験

### ■ 熱真空試験

### ■ 電気試験(噛み合わせ試験)

このほかにも、磁気特性測定、放射線試験、重心測定などがあるが触れない

# 環境試験と今後の予定

## ■ 温度サイクル試験 (2008年2月5日、東大本郷 牧島研 恒温槽)

目的: 衛星の温度環境で  
装置が正常に動作するか  
大気圧中での試験

### 試験項目:

- 0°Cで動作 → OK
- 一晩 -30°C にさらして戻す → OK
- 40°Cで動作 → OK

試験は無事完了した

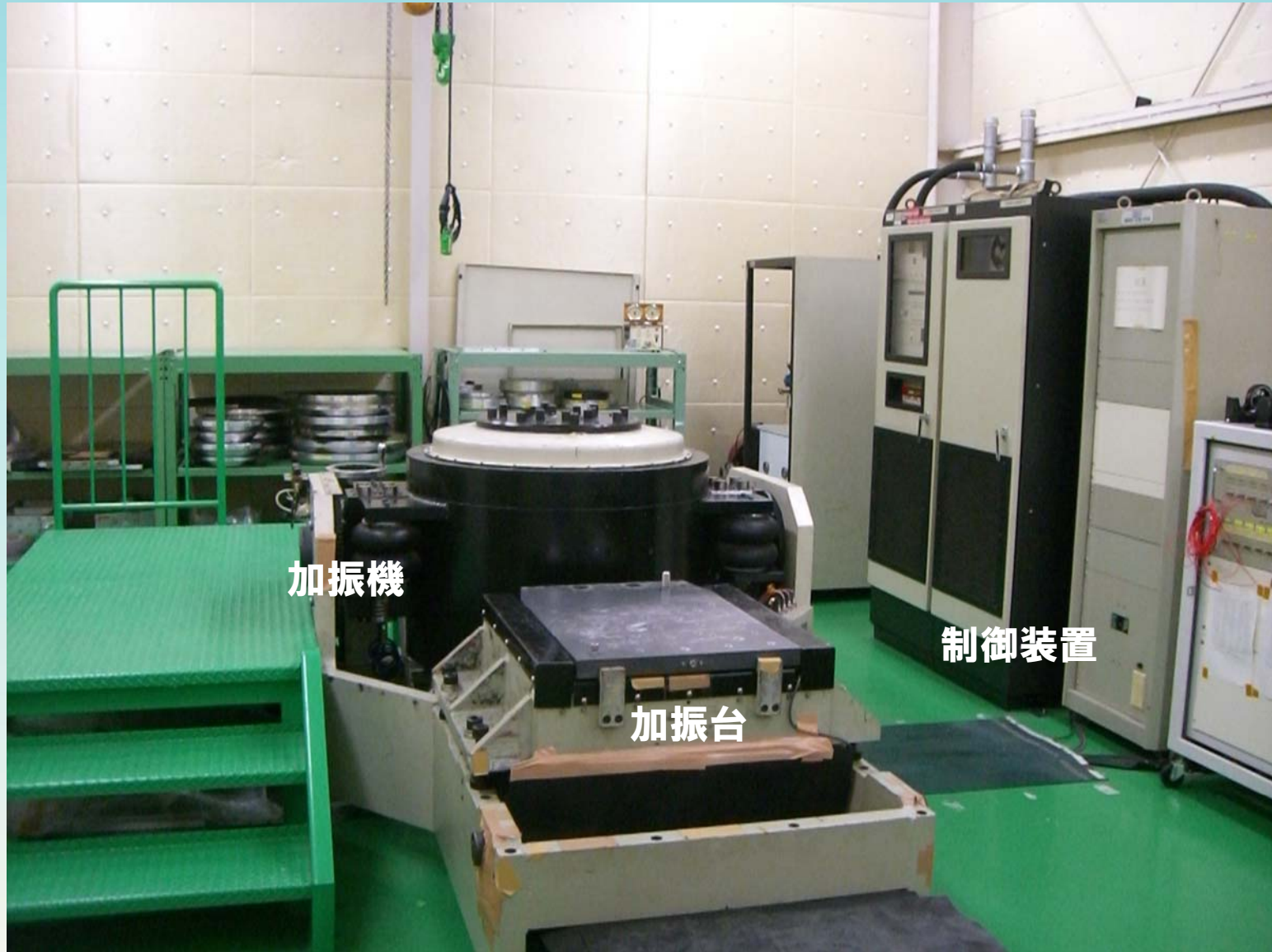


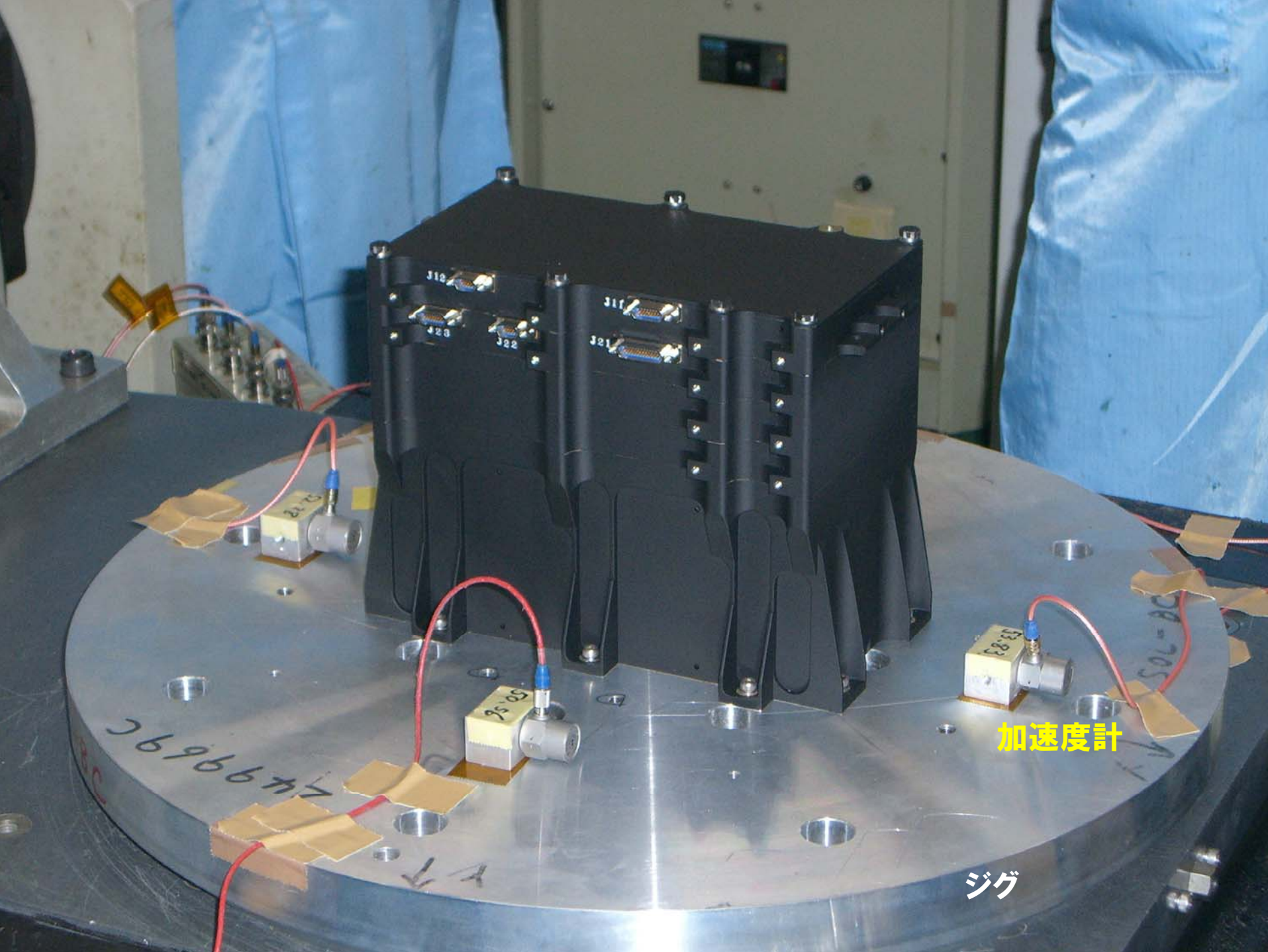
その時の消費電流が、正常値に収まることを確認



## ■ 振動試験

明星電気@群馬県伊勢崎市





加速度計

ジグ

## ■ 試験

- 前モーダル(弱いホワイトな加振で共振点を見る)

動画あり

- サイン波加振

→ X,Y,Z 3軸について、このセットを繰り返す  
各加振後に、機能試験を行って正常を確認する

- 中モーダル

- ランダム加振

ランダム加振:  $15.3G_{\text{rms}}$

正弦波加振:  $22G_{0-p}$

- 後モーダル

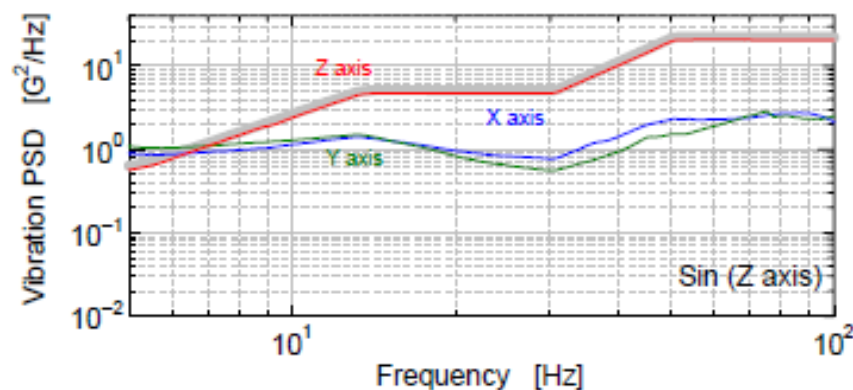
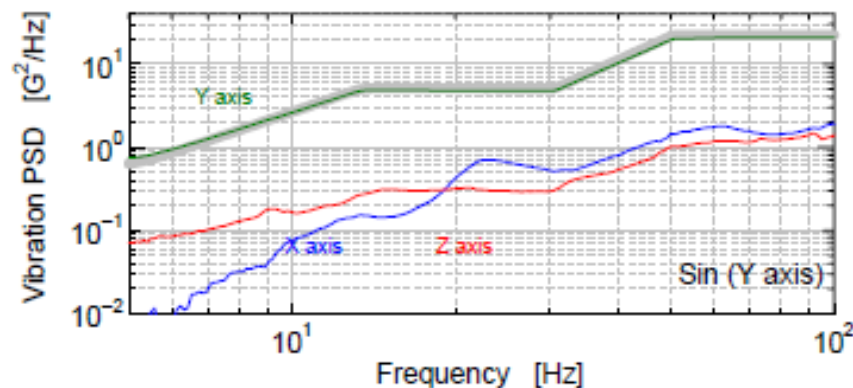
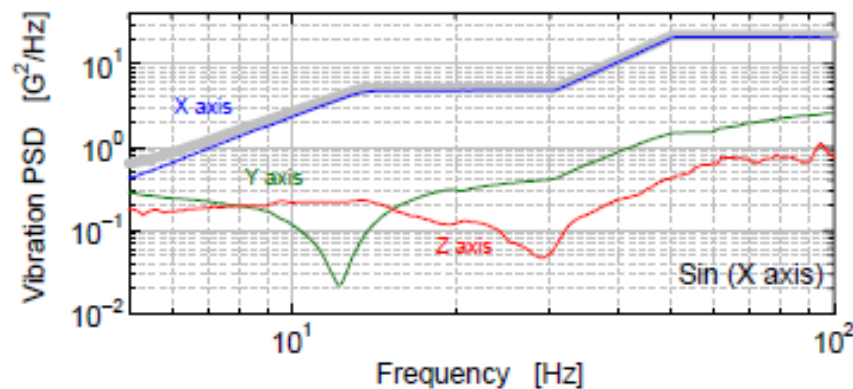
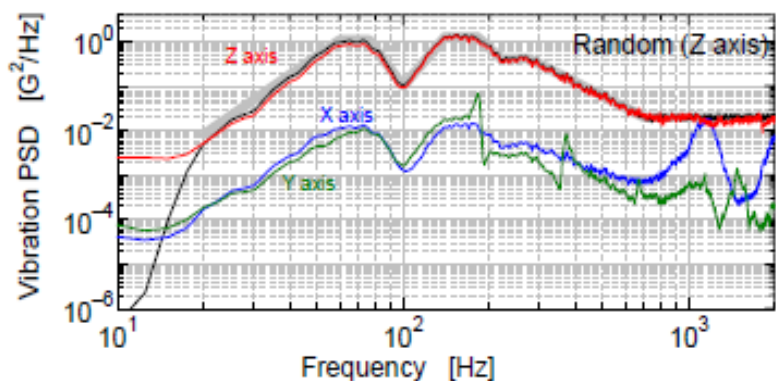
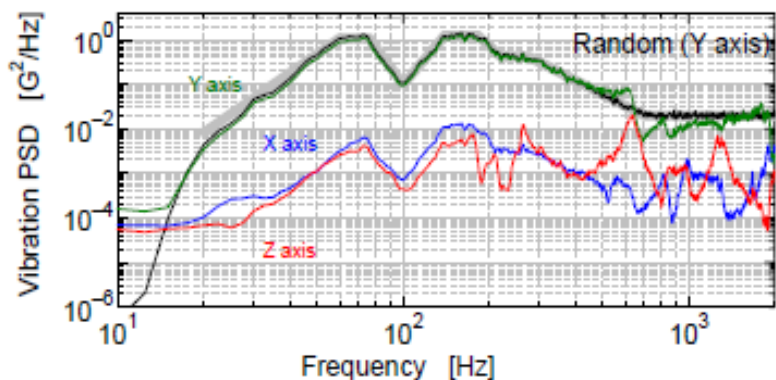
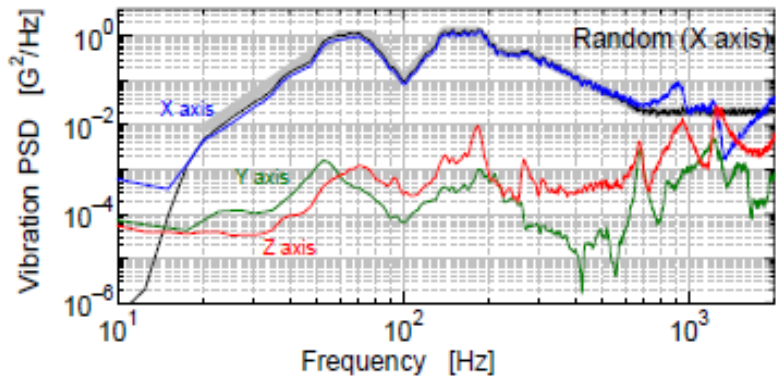


図 2: ランダム加振試験時の振動レベル。  
X 軸加振時(上段), Y 軸加振時(中段), Z 軸加振時(下段)

図 3: 正弦波加振試験時の振動レベル。  
X 軸加振時(上段), Y 軸加振時(中段), Z 軸加振時(下段)

## ■ 熱真空試験

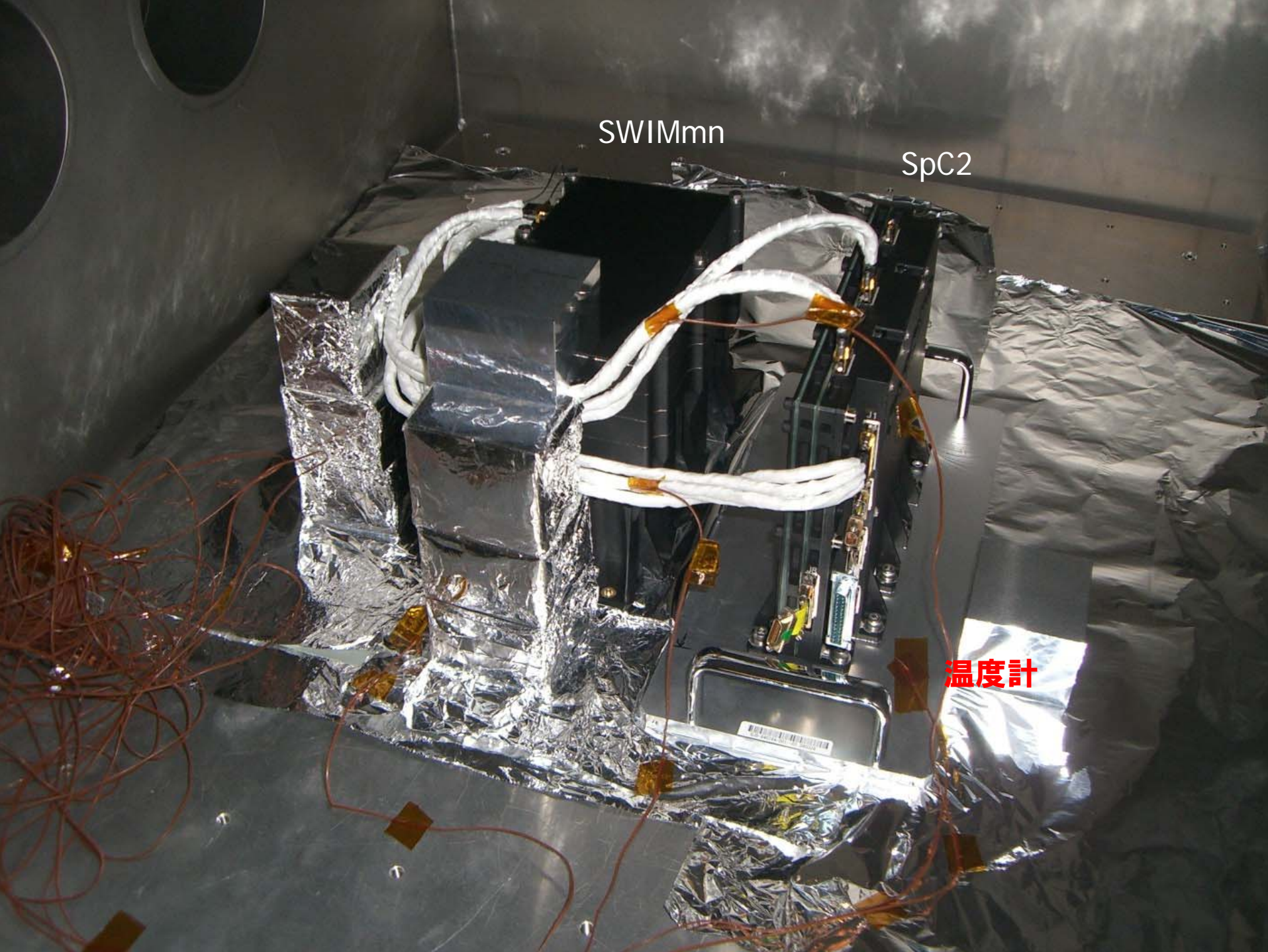
宇宙研 D棟 熱真空試験室



SWIMmn

SpC2

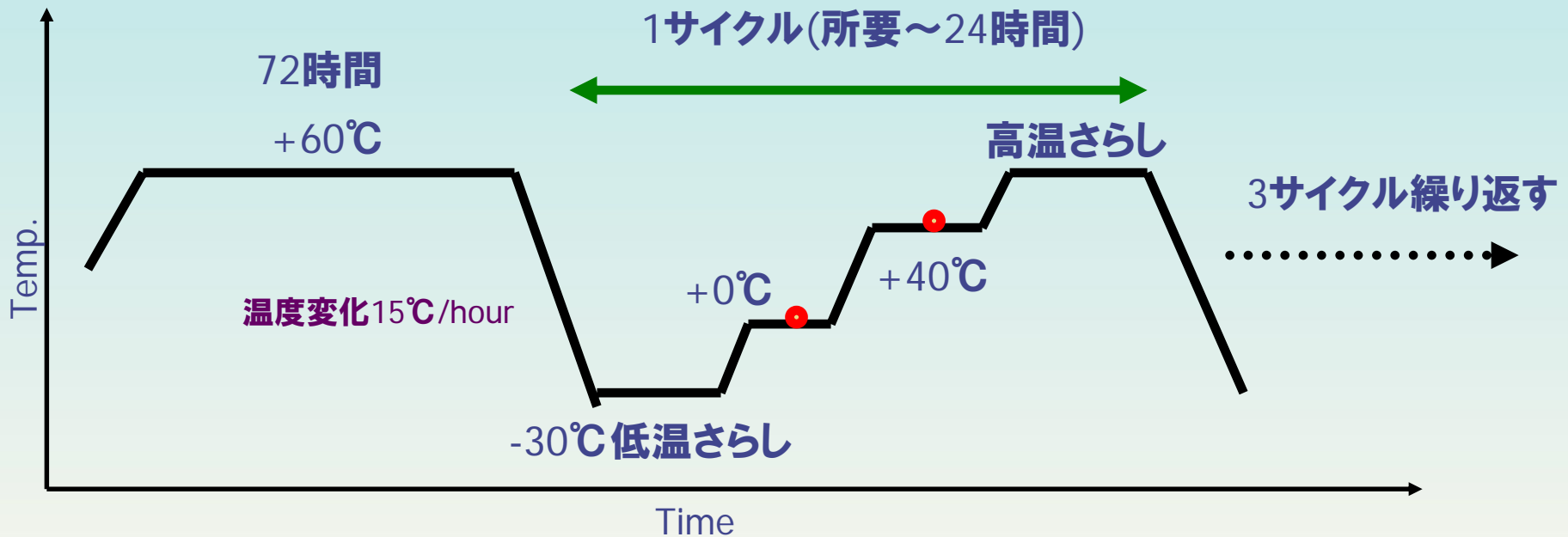
温度計



## ■ シーケンス(環境試験条件書に記載されている。)

- ベーキング(60°C、72時間)
- 低温(-35°C)さらし
- 低温(0°C)ターンオン試験
- 高温(40°C)ターンオン試験
- 高温(60°C)さらし

システム(衛星)側から今回もらった環境条件:  
保管温度 -35°C ~ +60 °C  
ターンオン温度 0 °C ~ +40 °C



---

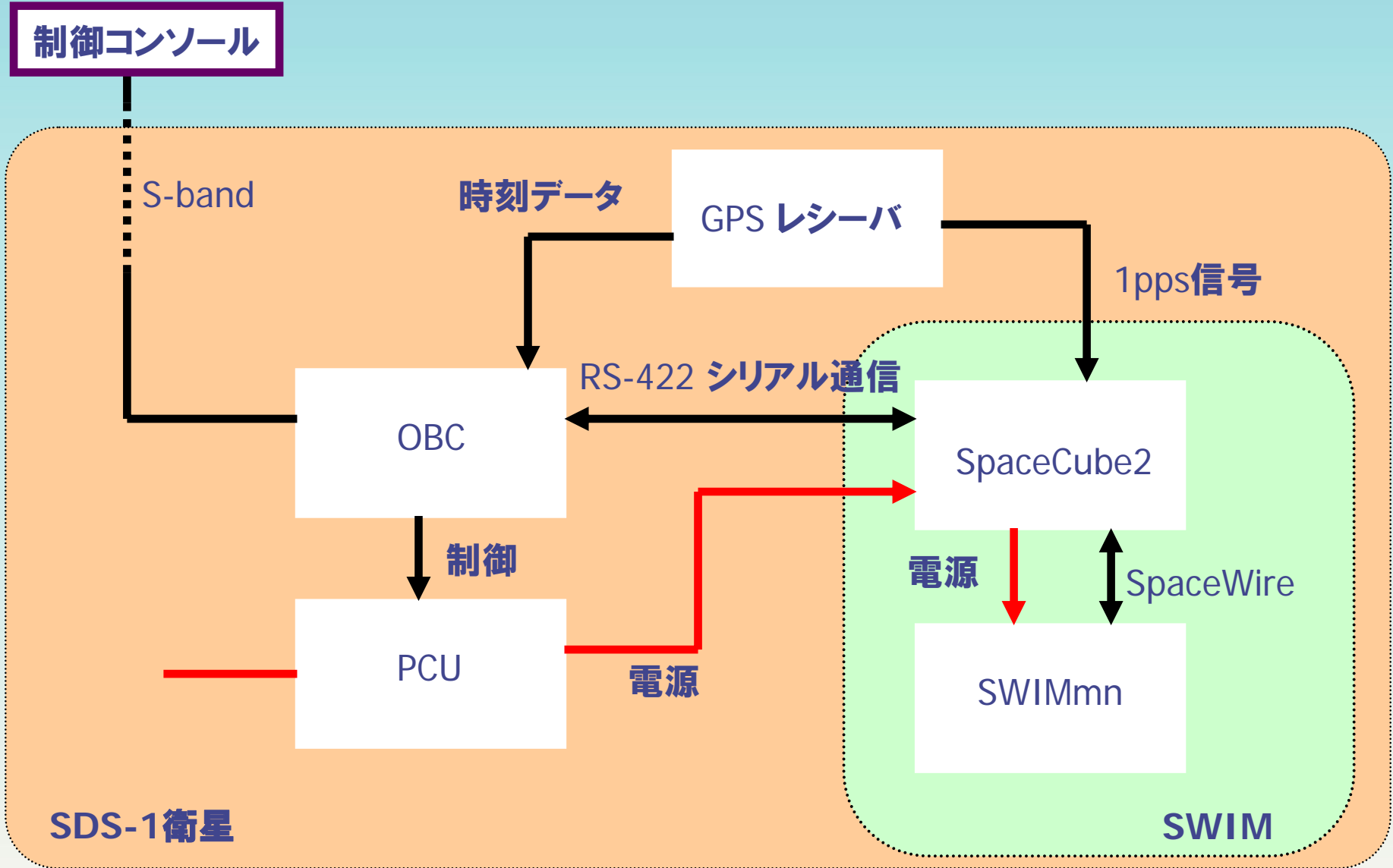
- **衛星への引渡し・噛み合わせ試験**

- **トラブルを何とか解決し、筑波で衛星側へ引き渡しを実施(5月7日)**

制限区域内の写真



## ■ 衛星との接続ブロック図



- SWIMの概要・現状
- 環境試験の結果
  - 振動試験
  - 熱真空試験
  - 衛星への取り付けと噛み合わせ
- Lessons Learned
- 衛星搭載機器の開発について:私見

以下、穀山の私見をかなり含みます。議論の種としてください。  
(自分が2年前に聞いておきたかった、という観点から書きます)

## ■ SpaceWire開発の背景

### ■ 衛星:宇宙という特殊な環境に置かれる機器

- ・小型 ・軽量 ・低消費電力 ・耐振動性 ・耐故障性 ・高信頼性  
・真空対応 ・耐温度環境 ・耐放射線 ・自律動作 ・細いダウンリンク

これらすべてを同時に満たさねばならない



ほとんどの衛星機器は、少量生産品  
利用可能な部品種も少ない

トラブル発生時、修理するわけにはいかない



開発のたびに、入念な試験と調整が必要



膨大な手間と時間(=費用)

再利用性にも問題

## ■ SpaceWire開発の背景(2)

衛星コンポーネント間には

- ・熱的接触
- ・機械的接触
- ・電源の接続
- ・通信系の接続

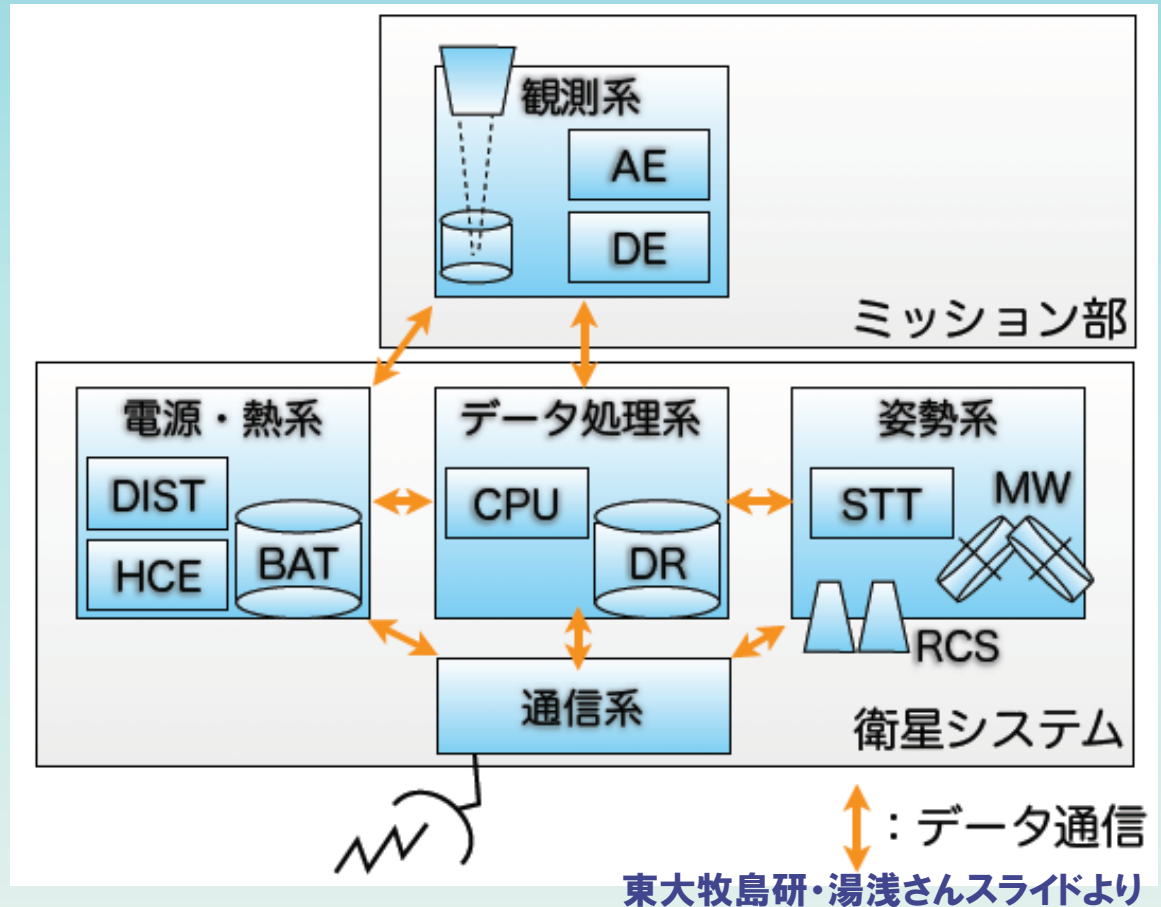
がある



通信系の共通規格化  
でかなり簡素化が図れる



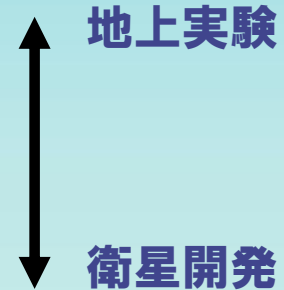
「USBを挿すと周辺機器が動く」  
「S-ATAと電源でPCにHDDを追加できる」のイメージ



## ■ 衛星開発の労力

何に気をつけているのか？

性能向上 …「感度を上げる」「安定運転させる」  
運用性向上 …「使いやすい」「性能向上しやすい」  
信頼性向上 …「壊れない」「ミッションが破綻しない」



設計・製作・試験の各段階:

信頼性を考えることと、試験のたびの機能確認にかなりの労力を費やす



例: 部品を選定・設計するときに…

- 宇宙仕様であることが保証されているか？
- 実績があるのか？
- 故障した時にどうなるか？

を常に考える(ミッション機器の重要度にもよる)

# 衛星搭載機器の開発について:私見

## ■ データ取得系の重要性

穀山は、気球・航空機実験やSWIMフライトモデルでデータ取得系にかなり携わる

→ 本来我々のやることではないのでは？と思うこともあった

衛星実験の特徴:

「非常に限られたリソース」・「細いダウンリンク」・「限られた運用時間」  
「運命共同体」

最終的には、すべての実験はデータ取得系を通じて行われる  
(プローブをあてたり、スペアナを接続することは不可能)



「どの信号」を「どのように」、「どんな優先順位で」取得するのか、  
検出器について明確に理解して、判断できないと、適切なDAQ系を作れない  
→ 検出器チームが担当するほかない

## ■ 大体どのようにして進んでいくのか:SWIMの来た道を参考に

1. ミッションをコンポーネントへ分割し、各部分の要求・目標値を設定。  
それらの性能が出る(あるいはきちんと出せそうか)どうかを検討
2. 各コンポーネントにリソースをざくっと割り振る
3. 割り振られたリソースをもとに、宇宙で使えそうか(使えるものを入手できるか)を考慮しつつ部品選定を行う。設計を固めていく。
4. コンポーネントを試作する(この時点では、振動や熱などをあまり意識せず、電力とサイズについては意識する。性能や、放射線による悪影響を考えておく。→ BBM [もちろん、ものによって意識するポイントは違う。])  
割り振られたリソースについて、議論を行い、収束させていく。
5. 要求値が出せるようなエレキやメカの大まかな設計を行ったうえ、衛星のノウハウのあるメーカーと一緒に詳細設計を行っていく。  
(振動、熱やフェイルセーフはこの時点で十分に考える)

6. 詳細設計したものを、地上用部品で製作してもらい、その評価・バグ出しを行う。  
(十分に性能試験を行い、設計に見落としがないか確認する。これ以後、性能を上げることはほとんど不可能) → EM/PFM  
フライト品製作にGOを出す
7. 製作されたフライト品の振動試験・熱真空試験・電気試験を行い、徹底的に確認を行う → FM

宇宙研に伝わるジンクス:

「地上試験でトラブルを起こさなかった機器は、上空でトラブルが起こる」



---

## 補遺

GOSAT

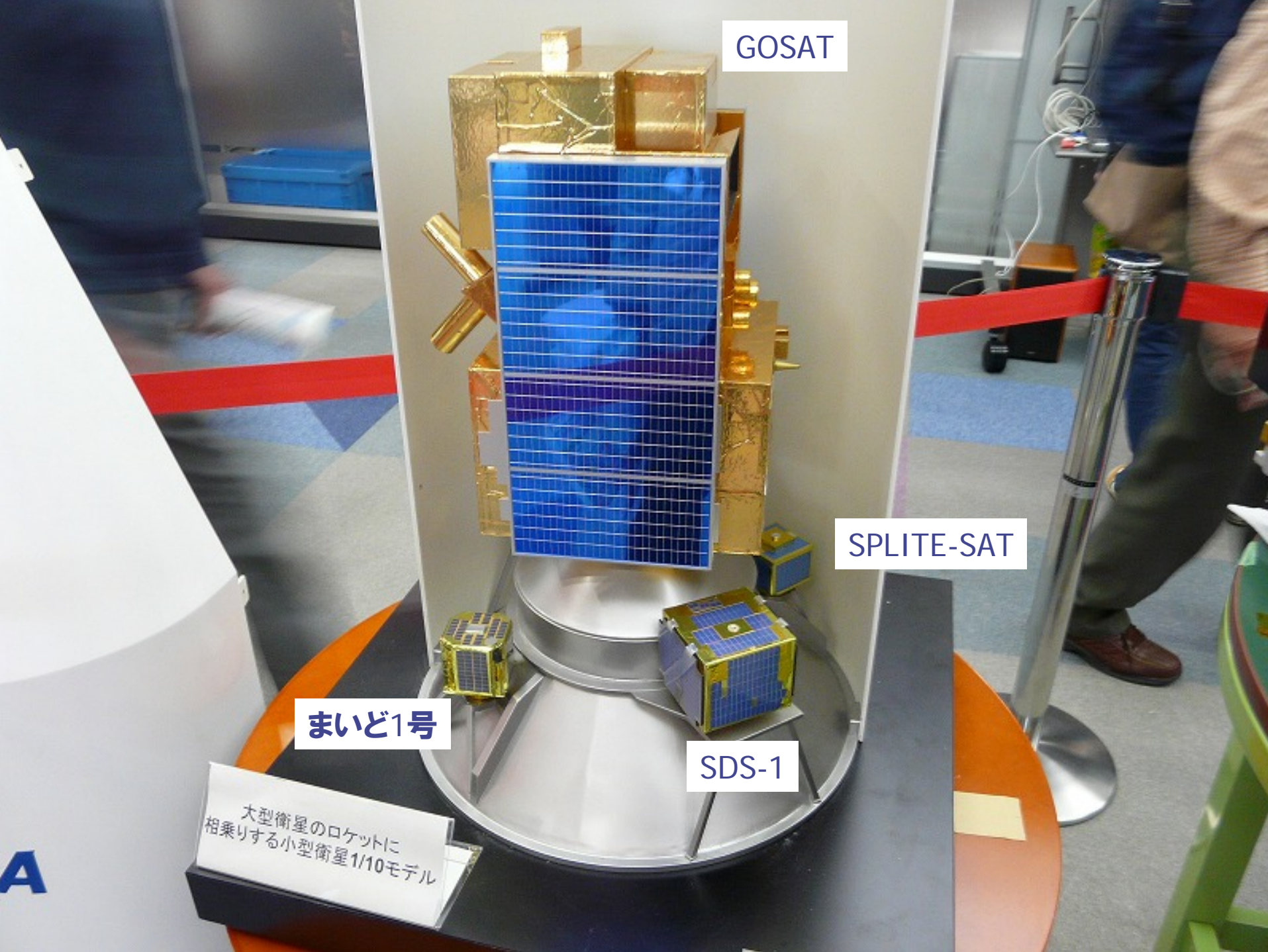
SPLITE-SAT

まいど1号

SDS-1

大型衛星のロケットに  
相乗りする小型衛星1/10モデル

A



## ■ Tips

- 振動試験では「耳を澄ませる」。変な音がしたら、部品の脱落/破壊の可能性があるので、即緊急停止。
- 熱真空試験のときは高温側に注意 → 機器の発熱により温度上昇
- 熱真空槽のオーバーシュートにより温度範囲を逸脱することがある
- 低温側で恒温槽を絶対にあけてはならない → 結露を起こしたら致命的
- 衛星基板に取り付けられるコネクタは必ず「ソケット」である
  - 「ピン」だと折れ曲がるリスクがある
  - 実験時に「ピン-ソケット」の不適合で困ったことが何回もある
- モノに触る前には、必ずアースに触れるくせをつけるようにする。ESD障害を起こさないよう細心の注意を払う。
- 宇宙仕様の「紐の結び方」があるらしい

- 
- **搭載ソフトウェア開発の話題**