

## 5.6. 超小型衛星の環境試験の実績解析と 試験標準化について

九州工業大学

宇宙環境技術ラボトリー 教授

趙 孟佑 氏



# 超小型衛星環境試験の 実績解析と試験標準化について

趙孟佑  
九州工業大学

2012年11月15日  
第10回試験技術WS  
筑波宇宙センター

1

---

## 内容



- 超小型衛星試験標準化プロジェクトの現状
- 超小型衛星聞き取り調査
- 鳳龍貳号について

2



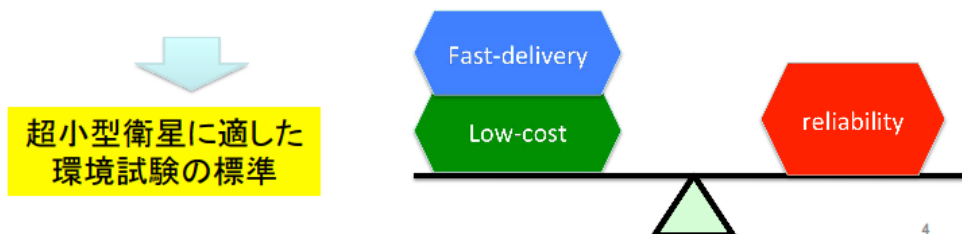
## 標準化プロジェクトについて

3

### ニーズ



- ・ 超小型衛星の低い成功率
  - － ある程度までは許容できる。しかし、
- ・ 商用であれば、信頼度を無視できない
  - － 一機数億円
  - － “Failure is not an option”
- ・ 低い成功率は超小型衛星の信用を傷つける
  - － 超小型衛星利用を考える新たな投資家に悪影響
- ・ 「低コスト」・「短納期」と均衡した「信頼性」



## NETSプロジェクト



- ・ 「超小型衛星の耐宇宙環境性評価基準の構築」プロジェクト
  - “Nanosatellite Environment Test Standardization” (NETS)
    - 経済産業省の「アジア基準認証推進事業費補助金」事業の一環
    - 事業者
      - ・ 基準認証イノベーション技術研究組合(IS-INOTEK)
      - ・ 国立大学法人九州工業大学(KIT)
      - ・ 社団法人日本航空宇宙工業会(SJAC)
      - ・ 宇宙開発合同会社(AstreX)
    - 期間
      - ・ 2011年9月～2014年3月

5

---

## 目標



- ・ 以下の3項目についてISO規格を作る
  - Environment Tests of Nanosatellite System
  - Documentation of Nanosatellite Environment Tests
  - Environment Tests of Nanosatellite Components

Target date of completion: 2015

Definition of “nanosatellite” here;  
A satellite mostly made of non-space qualified COTS components,  
typically less than 50kg, 50cm

## 試験標準の範囲



- 超小型衛星の信頼性を向上するための試験要求や方法

- 初期不良の防止

重要

- ・打ち上げてすぐに壊れない

- 軌道上でのミッションサクセスを確実にする

- ・寿命を保証

- 新たな発明を阻害しない

重要

- 試験

- 開発

Affordable and reliable

Key

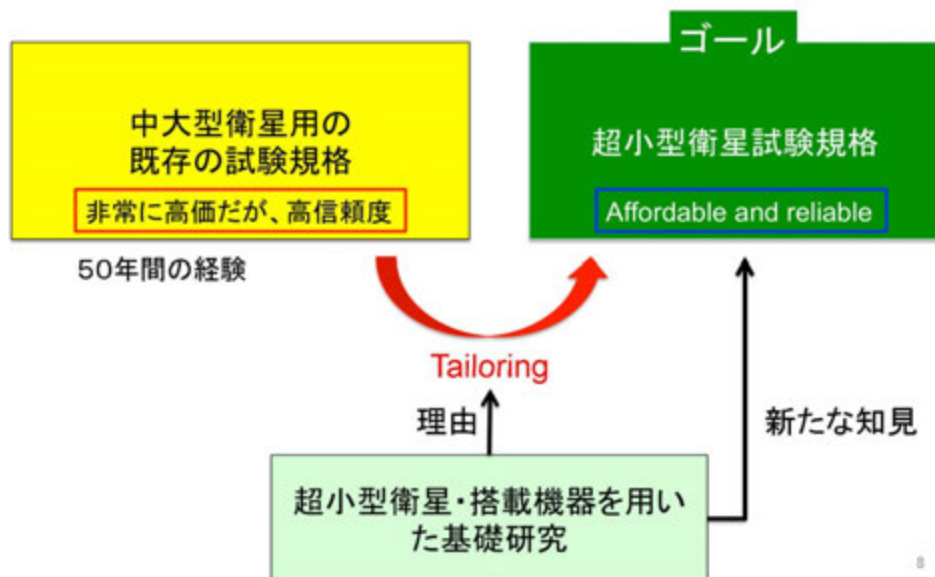
- 認定

- 受け入れ

- 射場

7

## アプローチ



8

## アプローチ



- 調査
  - 現状の規格
  - 超小型衛星の試験の実態
- 基礎研究
  - 標準の基礎となるデータ取り
- コンセンサス作り
- 規格式作成

9

## ワークショップ



- International Workshop on Micro/Nano Satellite Testing Standardization
- 2012年12月10~14日
- 試験デモ(2日) @ 九工大
- 研究発表(1日) @ 北九州国際会議場
- 規格式審議(2日) @ 北九州国際会議場



Thermal vacuum

Vibration

PCU & RF<sub>0</sub>

## Working draft ver.1



- **Space systems —Design Qualification and Acceptance Tests of Micro/Nano Satellite and Units**
  - Released October 23, 2012
  - Available online at [http://cent.ele.kyutech.ac.jp/nets\\_web.html](http://cent.ele.kyutech.ac.jp/nets_web.html)
1. Scope
  2. Normative references
  3. Terms and definitions
  4. Symbols (and abbreviated terms)
  5. Design, Verification and Testing Philosophy of Mirco/nano Satellites
  6. General Requirement
  7. Satellite System Tests
  8. Unit Tests
  9. Test Requirements
  10. Appendix

11



## 調査結果

12

## 聞き取り調査



- ・ 国内15団体（18衛星）

	Cubesat	10kg	30kg	50kg	100kg
Full success	2	1		1	1
Partial success*	2	1		1	
Total loss*			1		
To be launched		2		4	

- ・成功しなかった5機は全て初期不良
- ・成功しなかった5機のうち4機が展開機構を搭載

13

## 聞き取り調査からの気づき事項(1/2)



- ・ 熱真空の必要度は衛星サイズによる
  - － 衛星内の温度差
- ・ 衛星の高温・低温での動作確認は必要
  - － ?kg or ?cm以下 (?kg/m3以下?)は熱真空の代わりに熱サイクル（恒温槽）でOK?
- ・ 放射線試験
  - － シングルイベントは3団体のみ
    - ・ 試験ノウハウ、設備、スケジュール、費用の問題
    - ・ “宇宙実績がある”がしない理由の多さ
      - － 民生品では“宇宙実績がある”は理由にならない?
  - － TIDは8団体
  - － 鳳龍式号と同様の不具合例も
    - ・ 過電流保護回路が動かない弱いラッチアップでじわじわと壊れる

14



## 聞き取り調査からの気づき事項(2/2)



- 振動試験で多くの不具合を発見
  - 振動試験はどちらにせよ、やらないといけない
- 展開試験は必要
  - 展開の一連のシーケンスをハードウェアで実証
  - 真空、可能なら低温である程よい?

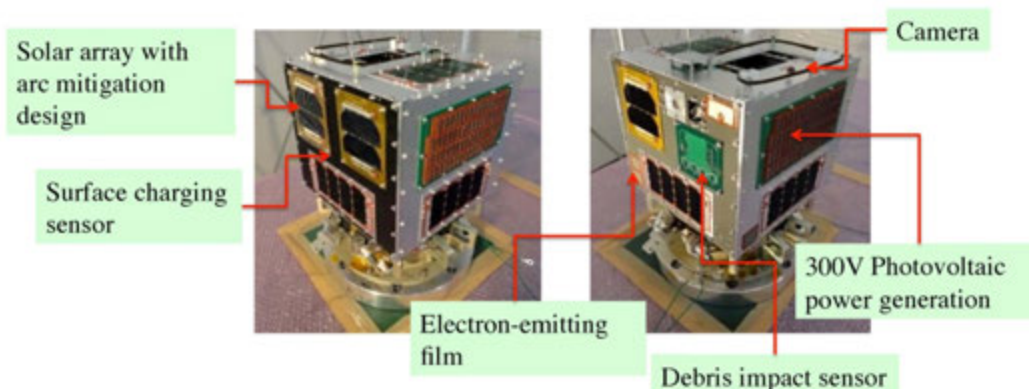
15



## 鳳龍弐号について

16

## 高電圧技術実証衛星「鳳龍弐号」



九州工業大学の学生による開発(教育目的)

30cm cube, 7kg 680km, 太陽同期

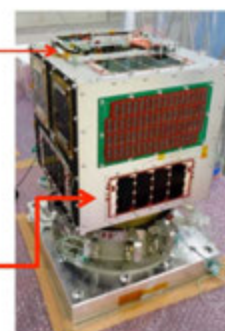
高電圧技術(300V太陽光発電等)、衛星帯電観測・防止、  
デブリ観測、地球撮影

アマチュア無線バンド、受動的姿勢制御

## 鳳龍弐号の開発方針 (1/2)



- 鳳龍1号の設計をできるだけ引き継ぐ
  - ある程度は実証済みで細かいところまで理解
- 学生の技術レベル
  - 受動的制御
  - 最低限の展開
    - アンテナのみ
  - 外注
    - 電子部品のハンダ付け
    - 構造部品の機械加工
    - 設計と組立は学生
  - 太陽電池は宇宙用太陽電池メーカーから調達
    - 予め4直列につなぎかばーをつけてもらう



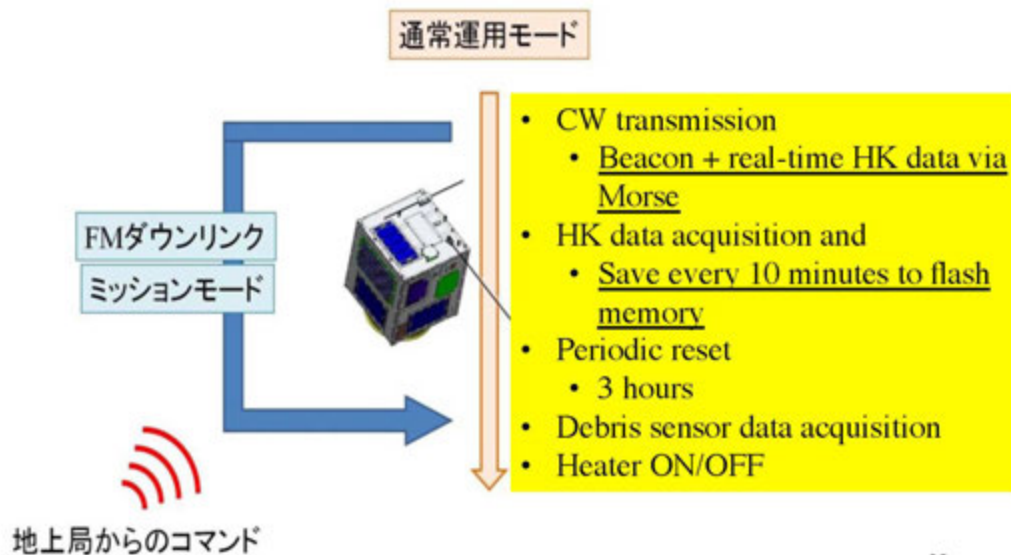
## 鳳龍式号の開発方針(2/2)



- スケジュールをコストに優先させる
  - 複数部品を購入して、同時並行の開発
    - 各段階で3枚の基板
- できるだけ試験
  - 九工大の試験設備
  - 放射線試験はしない
- リスク管理
  - できる限り衛星喪失につながる単一故障点は避ける
    - 限界あり
- 検証要求を設計要求と同時に策定

19

## 運用モード



20

## 試験実績



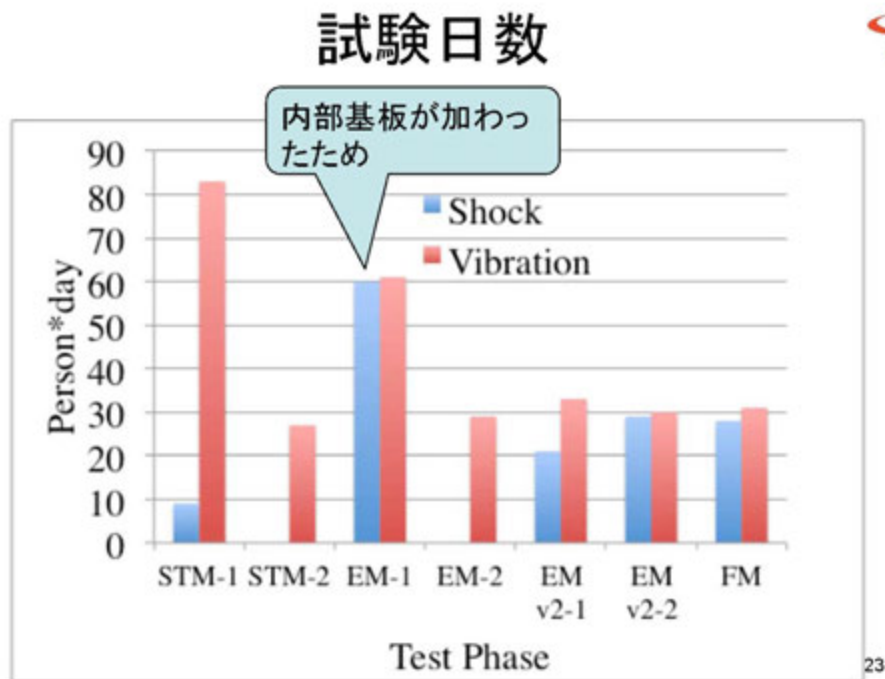
Tests	Total numbers	STM	EM	EM ver.2	FM
Antenna Pattern	1	1			
Vibration	7	2,3	8,11	16,18	27
Electrical Interface	3		4	13	20
Communication	3		5	17	23
Thermal balance	1		6		
Shock	6	7 <sup>*b</sup>	10 <sup>*b</sup>	15 <sup>*b</sup> ,19 <sup>*b</sup>	28 <sup>*b</sup> ,29 <sup>*a</sup>
Thermal vacuum	4		9	14	22,24
Function	3		12 <sup>*b</sup>		26 <sup>*b</sup>
Baking	1				30
End-to-End	1				31
Inspection	2				21,25

a\* Pyro-shock test for separation, b\* Hammer shock test for fairing opening  
c\* Used different test articles

## 試験延べ日数（人x日）



Tests	Total	STM	EM	EM ver.2	FM
Antenna Pattern	90	90			
Vibration	294	110	90	63	31
Electrical Interface	45		5	26	14
Communication	124		89	23	12
Thermal balance	120		120		
Shock	185	9	60	50	66
Thermal vacuum	492		74	169	249
Function	31		8		23
Baking	59				59
End-to-End	81				81
Inspection	51				51
Mission Payload	577				
Components	78				
Ground Station Operation Rehearsal	62				
Total	2289	209	446	331	586



23

## 不具合発生(6月5日)



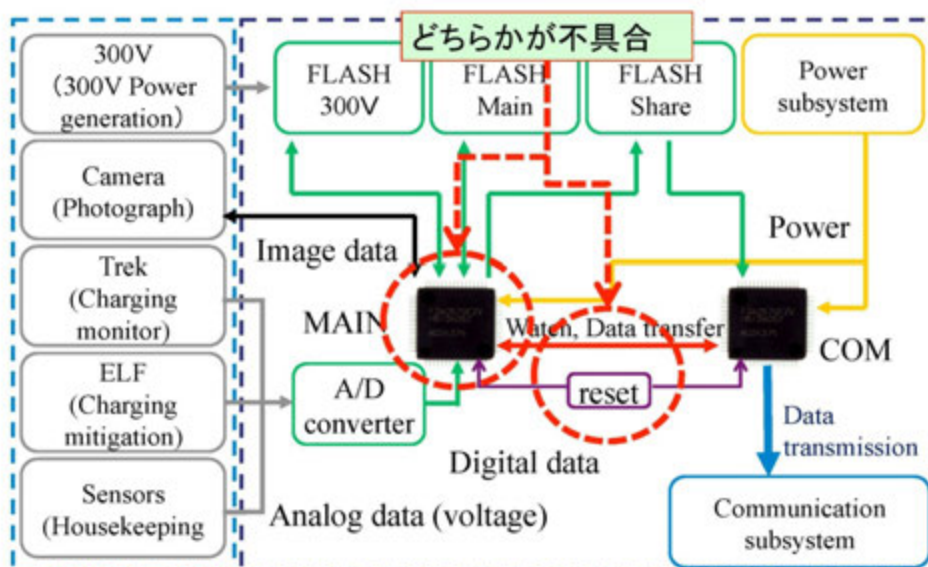
- リアルタイムHKデータの内容が更新されない。
- リアルタイムHKデータに含まれるキルスイッチのステータスの一つがONを示す
- 詳細センサデータ等をダウンリンクさせようと地上からコマンドを送っても、コマンドの受信を確認する信号が返ってくるのみで、データが送られてこない。
- 地上から強制リセットコマンドを送っても、上記の事象が変化しない。

JG6YBW HORYU	123456789ABCDEF
Call sign	Housekeeping data

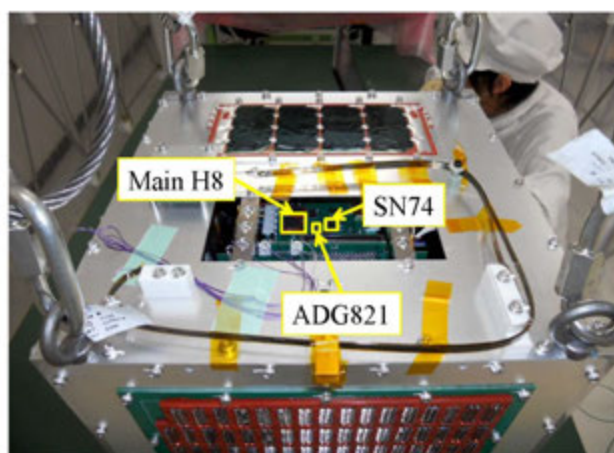
24



## OBC subsystem



## 故障発生箇所



MPU or parts related to resetting

## 不具合発生地点

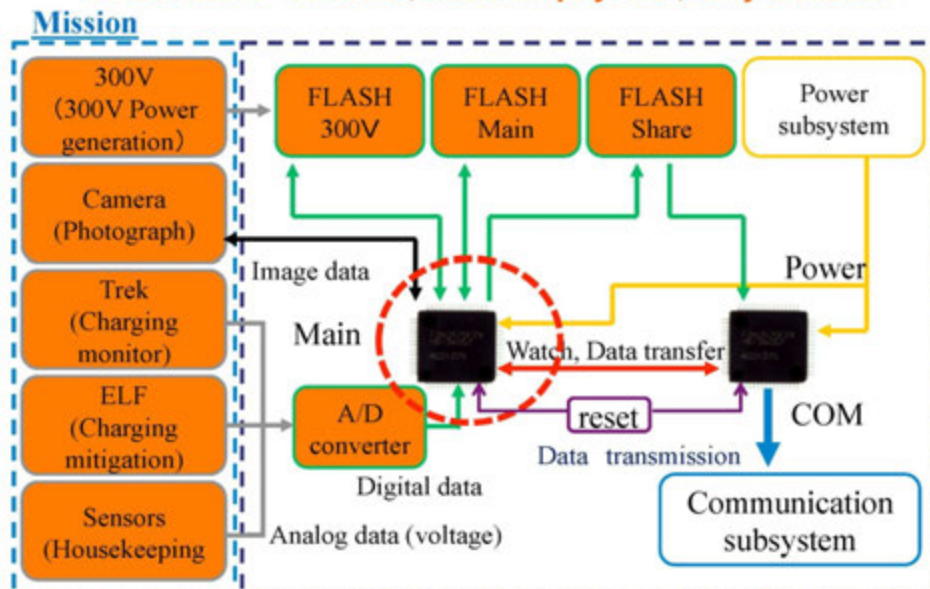


- 不具合は 01:08 2012/06/05 と 02:35 2012/06/05の間で発生
- 固定されたリアルタイムHKデータは蝕明け後10~20分を指し示す



## OBC subsystem

No access to sensors, mission payload, only beacons





## 推定故障原因

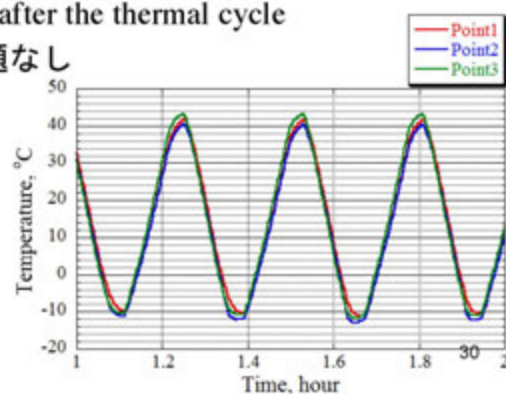
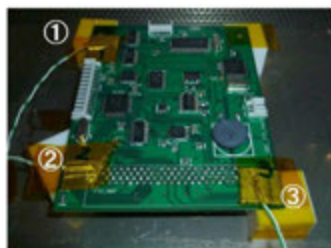
- 熱サイクルによる素子ハンダ部で不良が発生
  - 熱サイクル試験で確認
- 内部帯電によってOBC基板上で放電が発生
  - 帯電試験
- 外部から異物が混入し、基板上で短絡が発生
- リセット素子が放射線の影響を受けて故障
  - シングルイベント試験
- マイコンがシングルイベント(SE)により暴走
  - シングルイベント試験
- その他

29

## 熱サイクル

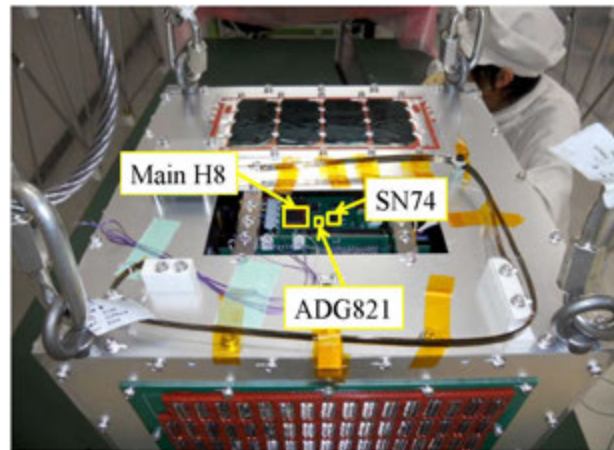


- 予備基板を使用
  - 軌道上データは-5~25°C、殆どが0~20°Cで300サイクル
- 試験条件
  - 600サイクル、15分/サイクル
  - -10°C ~ +40°C
  - 窒素ガスElectrical check after the thermal cycle
  - 外観、電気性能とも問題なし





## 内部帯電



OBC基板は1mm厚のアルミ板で守られているだけ

Lesson: Place OBC board deep inside the satellite body

31

## 内部帯電



### CHARGED PARTICLE INTERACTIONS PROTON/ELECTRON ENERGY vs PENETRATION DEPTH FOR AL

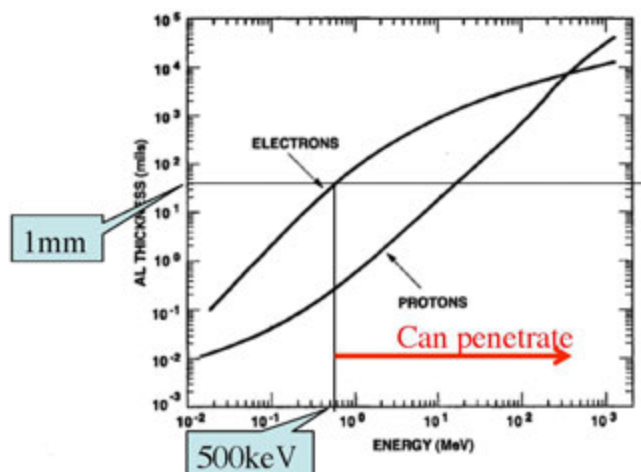
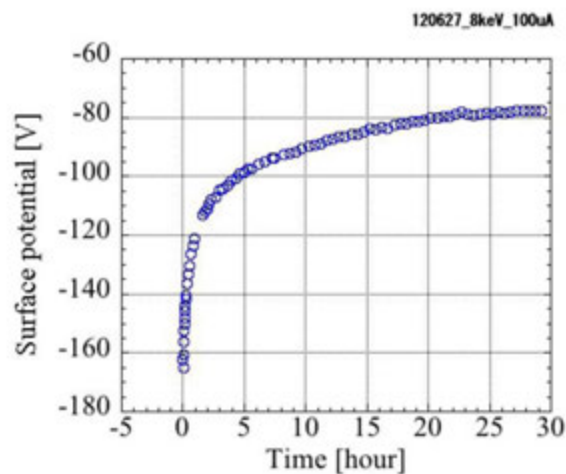


Figure 6.4. Minimum Penetration Energy for Electrons and Protons Relative to Shield Thickness.

Hastings and Garret, "Spacecraft Environmental Interactions", Cambridge University Press

32

## 帯電試験

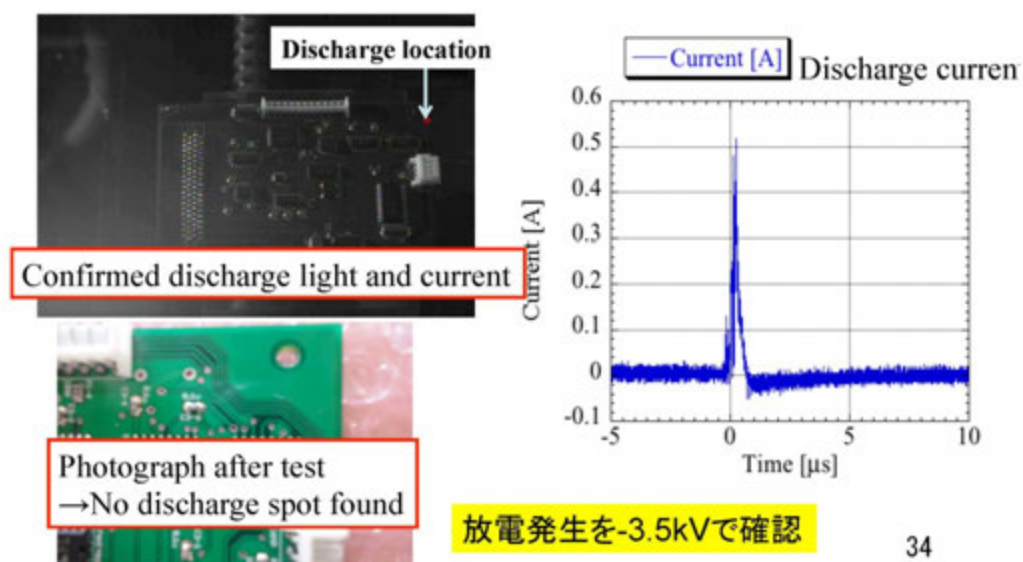


Charge decay is very slow (~hours)

帯電粒子との繰り返しの遭遇により、帯電していく可能性

33

## 放電の確認



34



## 内部帯電

- GOSATが同様の軌道を飛行
- 500keV~1.6MeVの電子フラックスを測定
- 平均の電流密度は $1 \times 10^{-10} \text{ A/m}^2$  (5/18~6/5)
- -3.5kVまでは帯電できない (1桁は足りない)
  - 基板の容量による( $4.4 \times 10^{-7} \text{ F/m}^2$ と仮定)

35



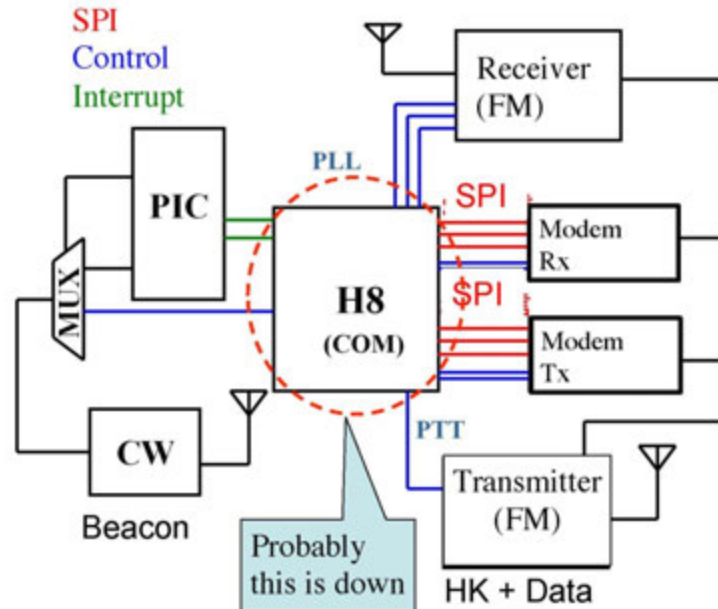
## 状況の悪化と復活

- 6/5以降、衛星にダウンリンクコマンドを送ると、コマンドの受け取りを確認する信号だけは来ていた (COMマイコンが担当)
- 13:04 2012/06/30
  - リアルタイムのHK信号が返ってこず、コールサインのみ
  - 地上からのコマンドへの応答信号も来ない
- 02:01 2012/07/03
  - リアルタイムHK信号が復活
    - データも更新される
  - 衛星からの詳細センサデータも取得可能
    - バッテリーがほぼ枯渇状態で充電中
  - これ以降、衛星は正常な状態に復活

JG6YBW HORYU	123456789ABCDEF
Call sign	Housekeeping data

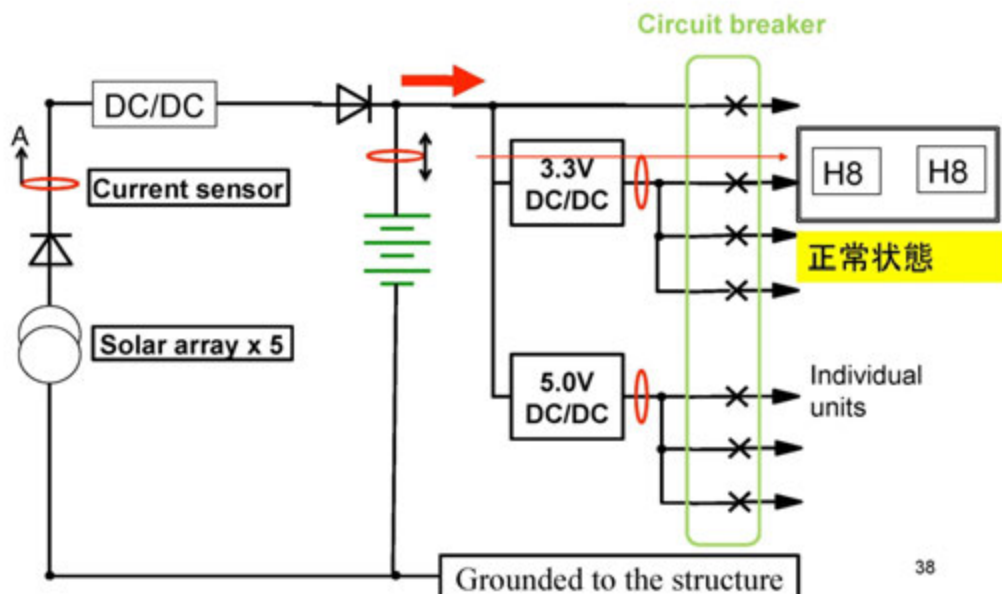
36

## Communication subsystem



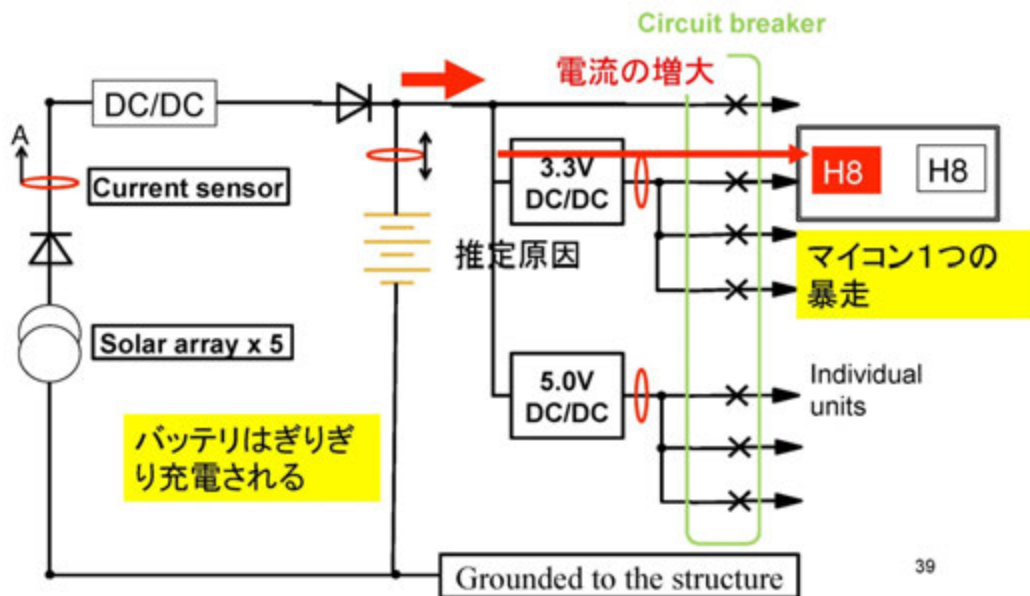
37

## 推定原因



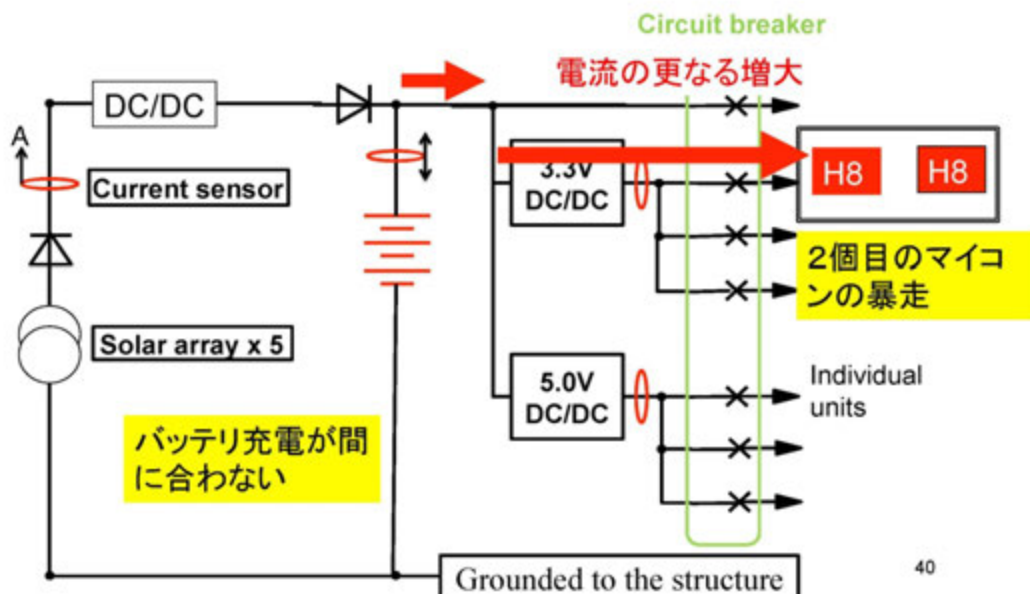
38

## 推定原因



39

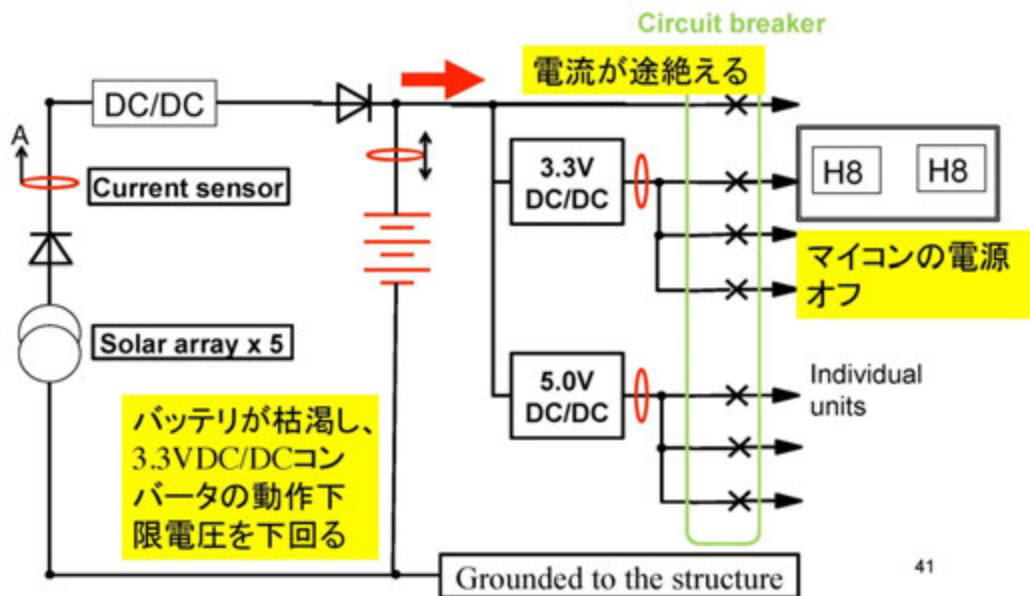
## 推定原因



40



## Possible cause

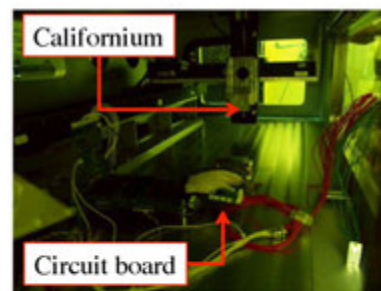
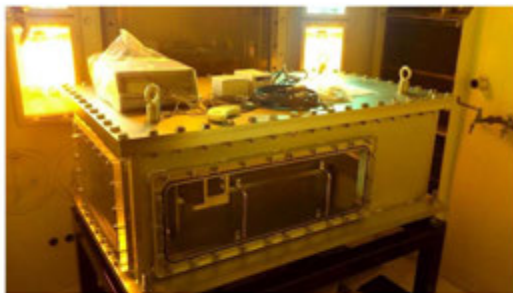


41

## シングルイベント試験



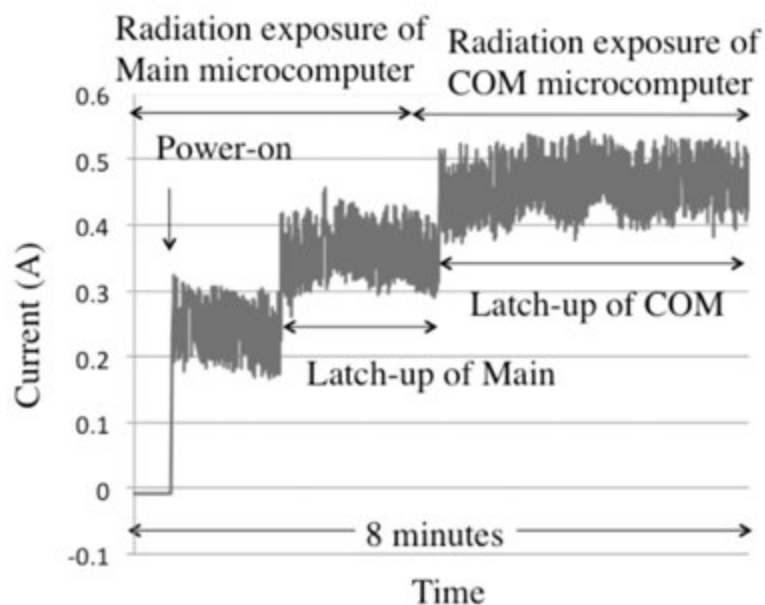
- 予備基板のセット（OBC+通信+電源+通信機）を使用
  - シングルイベントが起きるか？
  - シングルイベントが発生しても、リセットかかるか？
  - ラッチアップが起きると、どれくらいの電流が流れるか？



京都大学原子炉実験所のカリフォニウム照射試験装置

42

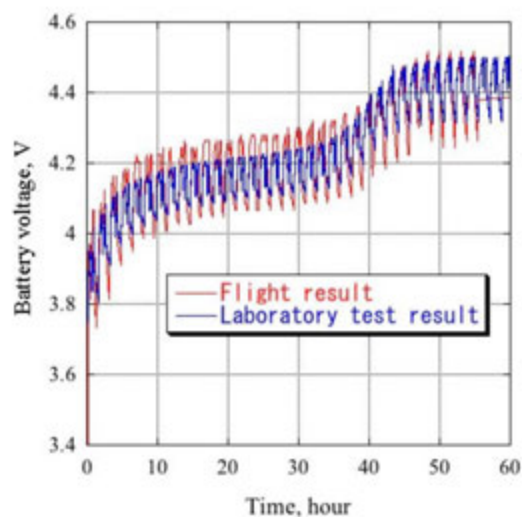
## シングルイベント試験



## 復活後



- 復活後、約2日で衛星は通常状態に復帰
  - ほぼ、地上試験結果通りにバッテリーが枯渇状態から復帰



## 鳳龍貳号の経験の反映(1/3)



- 民生品衛星でも、クリティカルなコンポーネントの製造を民生技術分野で良いので熟練者に委託し、振動・熱サイクル試験等でワークマンシップレベルを確認しておけば、充分に動作する。
- 試験経験者がいないと、最初の試験では時間が倍かかることもある
- 新規開発衛星では、EM試験は設計の不具合を洗いだすのに有効
  - 大学衛星のような未熟練者の開発チーム程、有効？
  - QTはATのリハーサルとしても有効
- End-to-End試験は、運用リハーサルとしても、ソフトウェアのバグだしのためにも有効

45

---

## 鳳龍貳号の経験の反映(2/3)



- EM熱真空試験で露見した不具合
  - 全系組み合わせ+低温で見つかった可能性
- FM熱真空試験で露見した不具合
  - 全系組み合わせで見つかった可能性
- 熱真空試験の実施前に、全系組み立てた状態での機能試験を十全に行なうことが、結局は時間を節約。
- 全系組み合わせての低温・高温試験は大事
- Cubesatのような1節点でも模擬できるような衛星
  - 機能試験+恒温槽試験
- 衛星内の温度分布が大きい衛星（温度分布~TBD）
  - 機能試験+熱真空試験
- コンポーネント(Electrical & Electronics)
  - 熱サイクル試験（恒温槽）+真空中動作試験でも充分？

46



## 鳳龍貳号の経験の反映(3/3)



- 少なくとも、バス基板レベルでのシングルイベント試験を行なって、SE発生時のバス系の挙動を把握し、耐放射線設計の有効性を検証すべき
- 不具合発生時に対応できる様々なサバイバルモードを用意し、実際に検証しておくことが大事
  - ビーコン+最低限のHKの確保
  - バッテリゼロからの復活
  - セーフモード？
- 薄板一枚で覆われる超小型衛星では内部基板が帯電する可能性あり

## 質疑応答

### 質問者①（JAXA 安倍部加藤氏）

超小型衛星試験標準の活動でご苦労されていることがあればお教え下さい。また、ISO 及び JAXA 宇宙機設計標準の活動について、超小型の観点からご提言があればお伺いしたいと思います。

### 発表者

超小型衛星試験標準の活動については来週（11/20）大分で行われる宇科連で発表があります。大学の自由な衛星製作活動に「タガをかける」わけではないことをご理解いただけるよう注意しています。試験標準に従って衛星を作れと言っているわけではありません。ただ、今後超小型も商用利用されることを考えるとある程度の信頼性が必要で、信頼性を確保するための参考にしていただきたいと考えています。

JAXA 標準との協力ですが、JAXA 標準と超小型の標準は寄って立つところが違います。（JAXA で募集する）相乗り衛星にも適用するかどうかは、大学の自由な衛星づくりの考え方もあり、難しいところがあります。ただ、協力できるところは十分あると思っています。

### 質問者②（HIREC 角市氏）

軌道上の不具合は再現が難しいが、（鳳龍の不具合については）かなり詳しく解明されており、非常に良いデータになったと思います。今後、不具合の経験と分析結果はどのように反映されていくのでしょうか。

### 発表者

絶対にアクセスポートは上にしないことです。また、大学衛星はリソースが少なくて難しいですが、サバイバルモードを用意しなければなりません。むやみにつけると逆に危ないですが、電源をきちんと切れる機能をつけておき、電源をオフにして初期化できるようにしておく必要があります。