

## 第五章 環境試験

### 5.1 環境試験概要

環境試験は振動・衝撃、熱真空試験、熱サイクル試験を各開発フェーズで実施した。図 5.1-1 に電源系が関係する環境試験の実施履歴を示す。振動試験は打ち上げ時のロケットの振動レベルを衛星に加え、耐えられるか検証する。衝撃試験は衛星の分離衝撃に衛星が耐えられることを検証する。熱真空試験は軌道上の熱真空環境を模擬し、正常に衛星が動作することを検証する。外部コンポーネント熱サイクル試験は、衛星外面パネルに設置するコンポーネントが熱環境に耐えられることを検証する。下図 () 内の QT と AT は試験レベルを示しており、AT はその環境の実レベルであり、QT は AT にマージンを加えたレベルである。従って QT レベルの方がより厳しい試験レベルである。

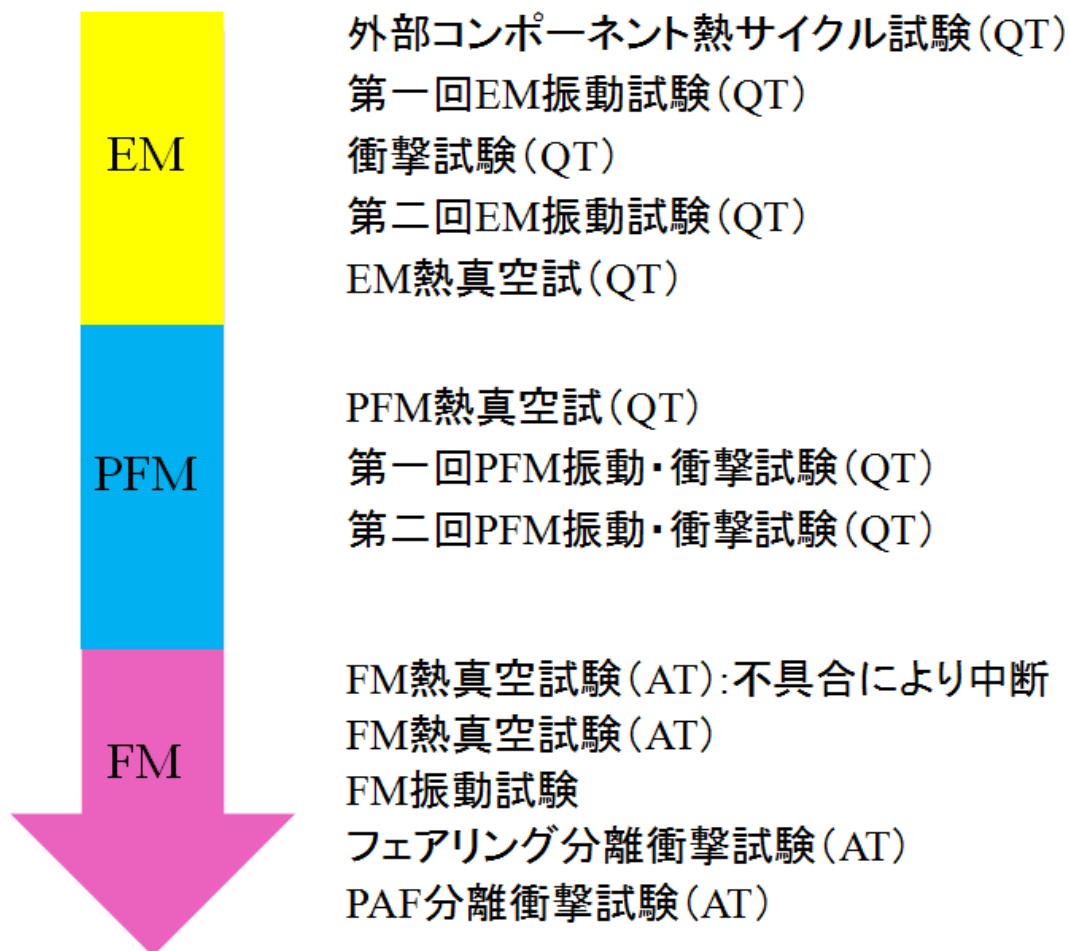


図 5.1-1 環境試験実施履歴  
 Fig. 5.1-1 Environmental test process

## 5.2 外部コンポーネント熱サイクル試験

本試験は衛星外部に搭載されるコンポーネントについて、他の環境試験より先行して個別に熱サイクルに耐えられるか確認するために実施した。電源系の外部コンポーネントはバス系太陽電池である。試験は以下の流れで実施した。熱サイクルに耐えられるかは、熱サイクル試験前後に実施する光 V-I 特性を比較、また外観検査により判断する。以下詳細を述べる。

### 試験の流れ

- ①太陽電池の光 V-I 特性測定
- ②熱サイクル試験
- ③太陽電池の光 V-I 特性測定

はじめに、試験方法について述べる。太陽電池の光 V-I 特性測定については 2.3.1 太陽電池で記載した方法と同じであるためここでは省略する。熱サイクル試験は図 5.2-1 に示す、恒温槽（デスパッチ社製、タイプ：925E）を使用した。温度環境は±100°Cの熱サイクルをかける。サイクル数は14サイクルである。供試体はEMバス系太陽電池（2直列セル、FMとは異なる）である。供試体には熱電対を設置し、温度を計測した。



図 5.2-1 恒温槽外観図

Fig. 5.2-1 Thermostatic chamber overview

以下に試験時のバス系太陽電池温度を示す。太陽電池温度はほぼ±100℃で熱サイクルをかけることができていることが分かる。

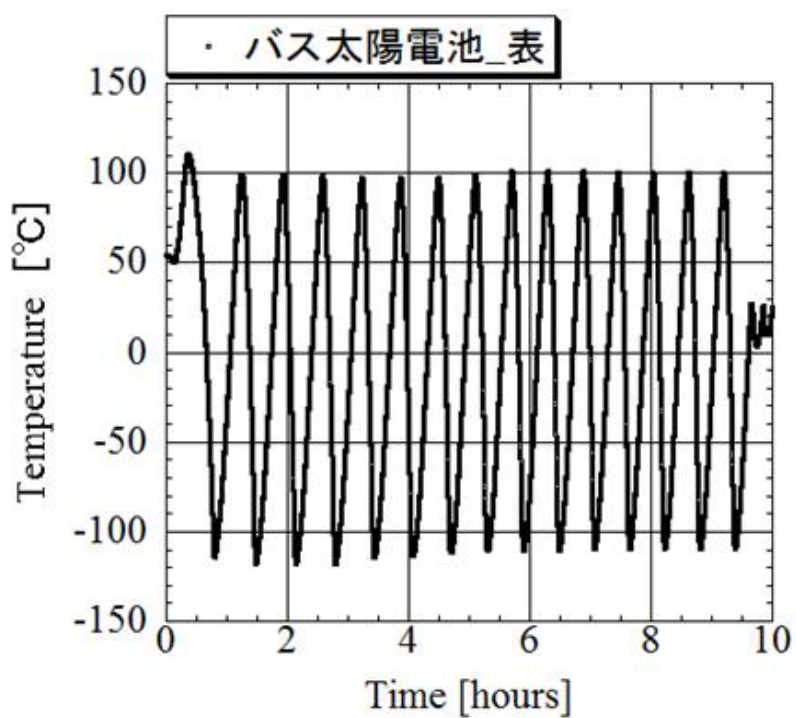


図 5.2-2 試験時の太陽電池温度（表面）

Fig. 5.2-2 SC Temperature (top)

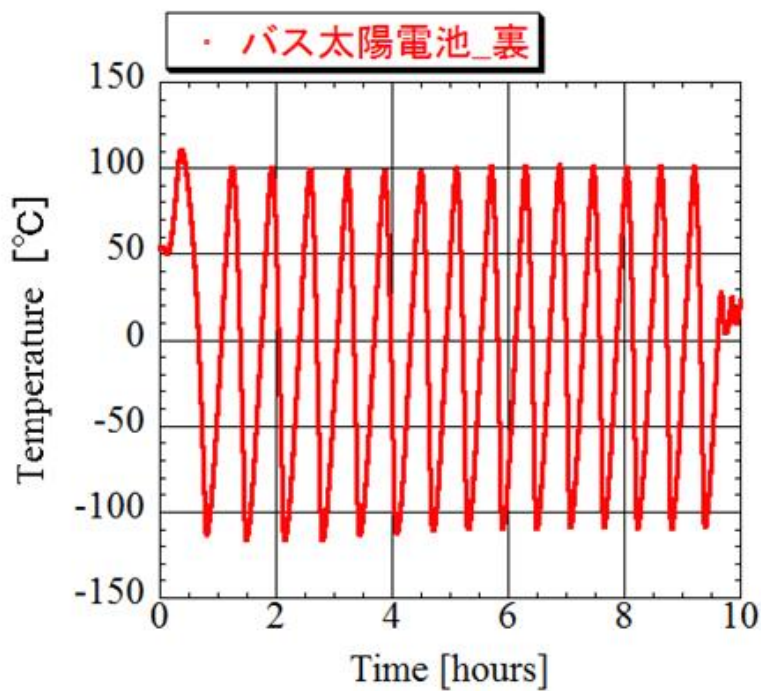


図 5.2-3 試験時の太陽電池温度（裏面）

Fig. 5.2-3 SC Temperature (bottom)

図 5.2-4 に試験前後のバス系太陽電池の光 V-I 特性測定結果を示す。熱サイクル試験後に太陽電池最大出力が約 15%低下した。さらに、2 週間後、熱サイクルをかけた太陽電池とかけていない太陽電池の光 V-I 特性を同時に測定した。その結果を図 5.2-5 に示す。熱サイクル試験後の太陽電池はセルが 2 直列になっているが、そのうち 1セルが短絡故障した。この結果から、 $\pm 100^{\circ}\text{C}$ の熱サイクルによって太陽電池が故障する可能性があることがわかった。しかし、軌道上の衛星の熱解析による太陽電池最高温度は  $50^{\circ}\text{C}$ 、最低温度は  $-24^{\circ}\text{C}$ であるため、高温側で  $50^{\circ}\text{C}$ 、低温側で  $-73^{\circ}\text{C}$ 厳しい条件であった。結論として、このような短絡故障の原因として試験条件の過負荷とセルの不良が考えられる。そこでスクリーニングして全セルを検査し、セルの直列数を増やす対策を行った。

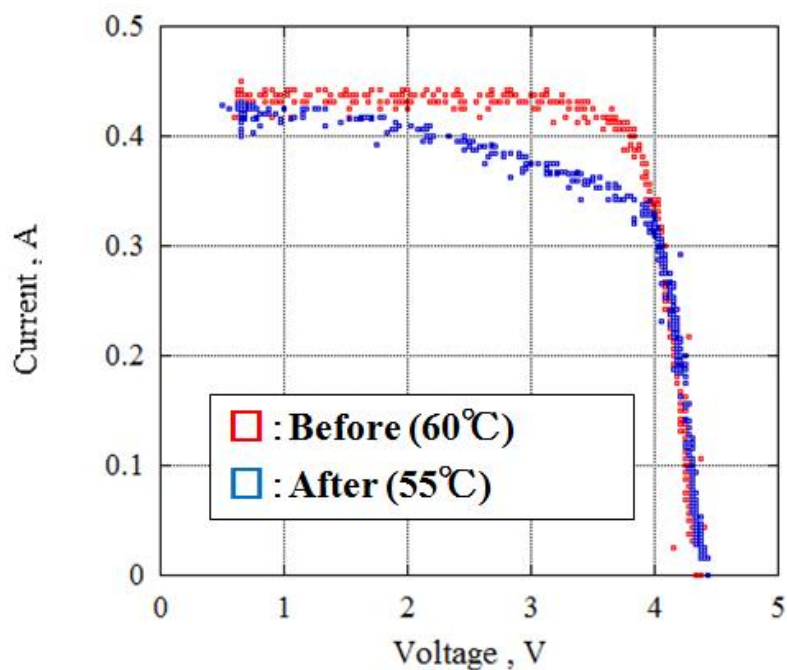


図 5.2-4 熱サイクル試験前後のバス系太陽電池光 V-I 特性  
 Fig. 5.2-4 Measured result of V-I curve

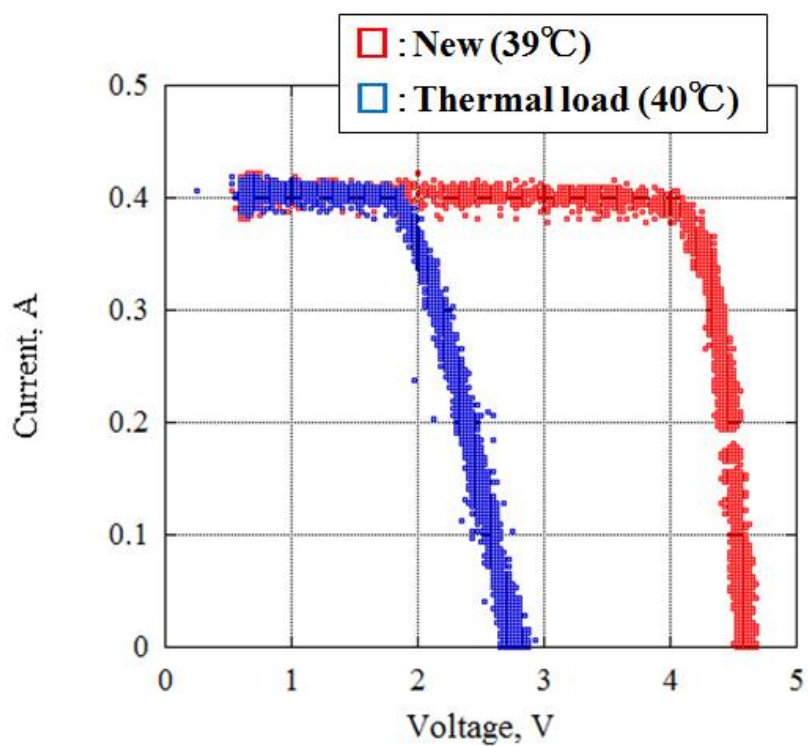


図 5.2-5 熱サイクルあり・なしバス系太陽電池光 V-I 特性  
 Fig. 5.2-5 Measured result of V-I curve

### 5.3 振動・衝撃試験

本試験の目的は振動・衝撃試験に衛星が耐えられることを検証することである。基本的な試験フローを以下に示す。電源系では振動・衝撃を加える前の電源基板の詳細な電気性能試験と統合状態での簡易システム試験と外観検査を行う。振動又は衝撃試験中は分離検知スイッチの機械式スイッチ部のチャタリング検出を行う。そして振動・衝撃環境を加えた後に統合状態での簡易システム試験と外観検査、電源基板の詳細な電気性能試験を行い、振動・衝撃試験前後で性能の変化がないことを確認する。これら全ての環境試験は九州工業大学内で行った。次に振動試験、衝撃試験環境について以下に述べる。

#### 振動・衝撃試験の流れ

- ①電源基板の単体での詳細電気性能試験  
～ 衛星統合 ～
- ②統合状態での簡易システム試験と外観検査
- ③振動試験  
チャタリング検知
- ④統合状態での簡易システム試験と外観検査
- ⑤衝撃試験
- ⑥統合状態での簡易システム試験と外観検査  
～ 衛星分解 ～
- ⑦電源基板の単体での詳細電気性能試験

#### 5.3.1 振動試験環境

振動試験は図 5.3.1-1 に示すように、衛星を加振機に取り付け、表 5.3.1-1 に示す振動種類とレベルでそれぞれ加振した。衛星各所に加速度ピックアップを取り付け、要求されている振動レベルが得られていることを確認している。この振動試験の詳細なコンフィギュレーションについては参考文献 [11] に記載されている。

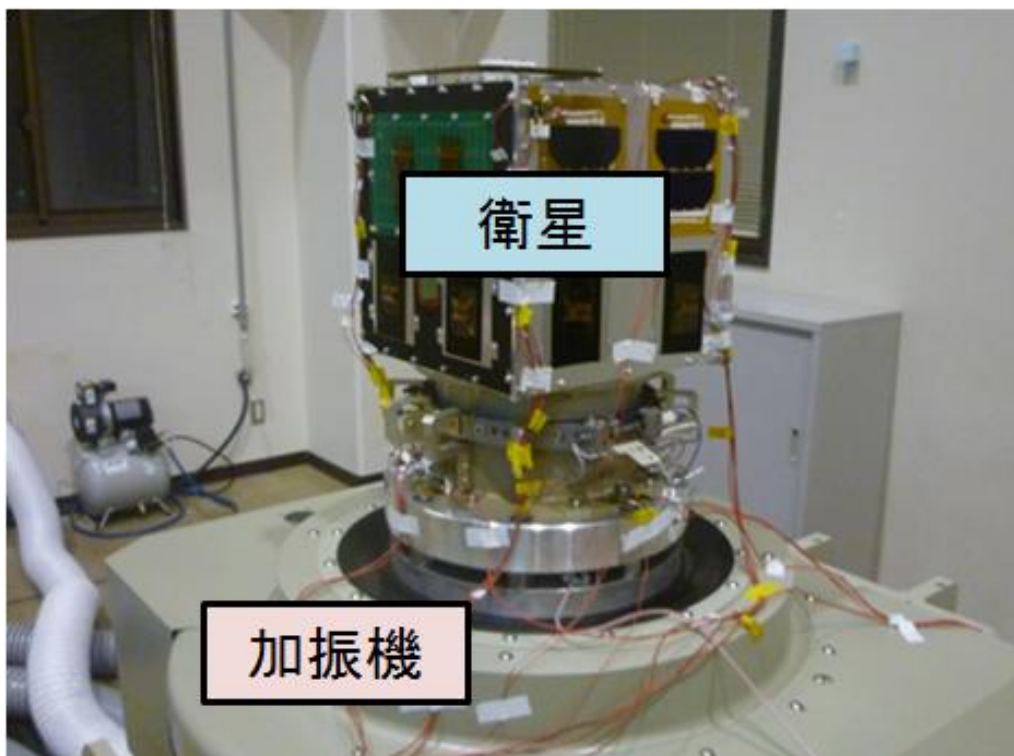


図 5.3.1-1 振動試験の様子

Fig. 5.3-1 Vibration test overview

表 5.3.1-1 振動試験レベル

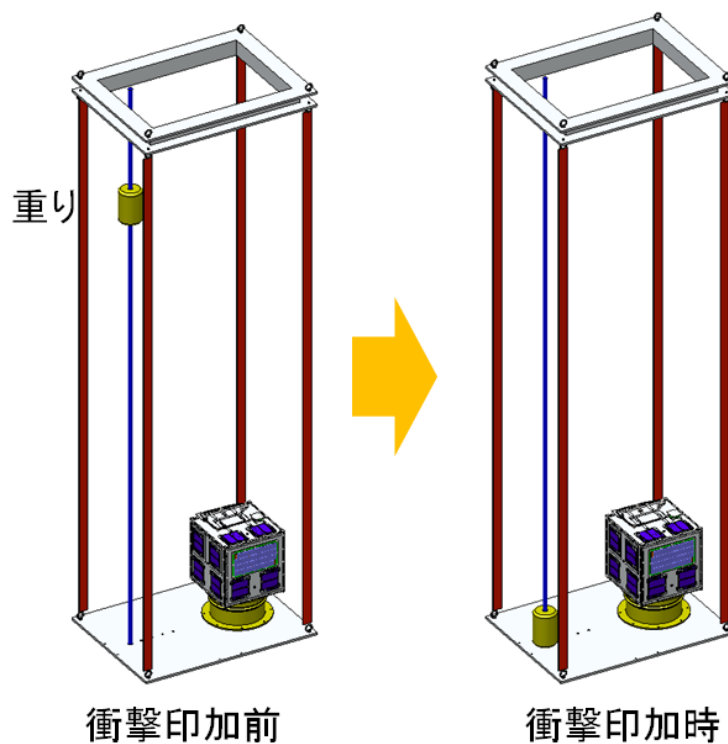
Table 5.3.1-1 Vibration level

種類	試験レベル	加振方向	周波数 [Hz]	レベル		実効値 [Grms]	加振時間 [sec]		
							掃引速度 [oct/min]		
正弦波	QT	X 軸	5~7.1	0.02m <sub>0-P</sub>			2oct/min (UP and DOWN)		
			7.1~100	30.7(m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> ) 3.13(G <sub>0-P</sub> )					
		Y-Z 軸	5~6.3	0.02m <sub>0-P</sub>					
			6.3~100	24.5m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> 2.50 (G <sub>0-P</sub> )					
	AT	X 軸	5~100	24.52m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> 2.5(G <sub>0-P</sub> )			4oct/min (UP and DOWN)		
				Y-Z 軸	5~100			19.62m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> 2.0 (G <sub>0-P</sub> )	
		X 軸	20					58.8m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> 7.5 (G <sub>0-P</sub> )	
				Y-Z 軸	20			49.0m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup> 6.25(G <sub>0-P</sub> )	
準静的荷重	AT	X 軸	0~5			圧縮	-58.84m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup>		
				-6.0 (G <sub>0-P</sub> )					
				引張	49.04 m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup>				
					5.0 (G <sub>0-P</sub> )				
	Y-Z 軸	0~5	圧縮	±49.04 m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup>					
				5.0 (G <sub>0-P</sub> )					
			引張	±49.04 m/s <sub>0-P</sub> <sup>2</sup>					
				5.0 (G <sub>0-P</sub> )					
ランダム(モーター)	低レベル	3 軸共通	20~2000	1.16E-4 G <sup>2</sup> /Hz		0.5	60sec		
ランダム	AT	3 軸共通	20~200	+3dB/oct		7.8	60sec		
			200~2000	0.032 G <sup>2</sup> /Hz					
	QT	3 軸共通	20~200	+3dB/oct		11.0-	120sec		
			200~2000	0.064G <sup>2</sup> /Hz					

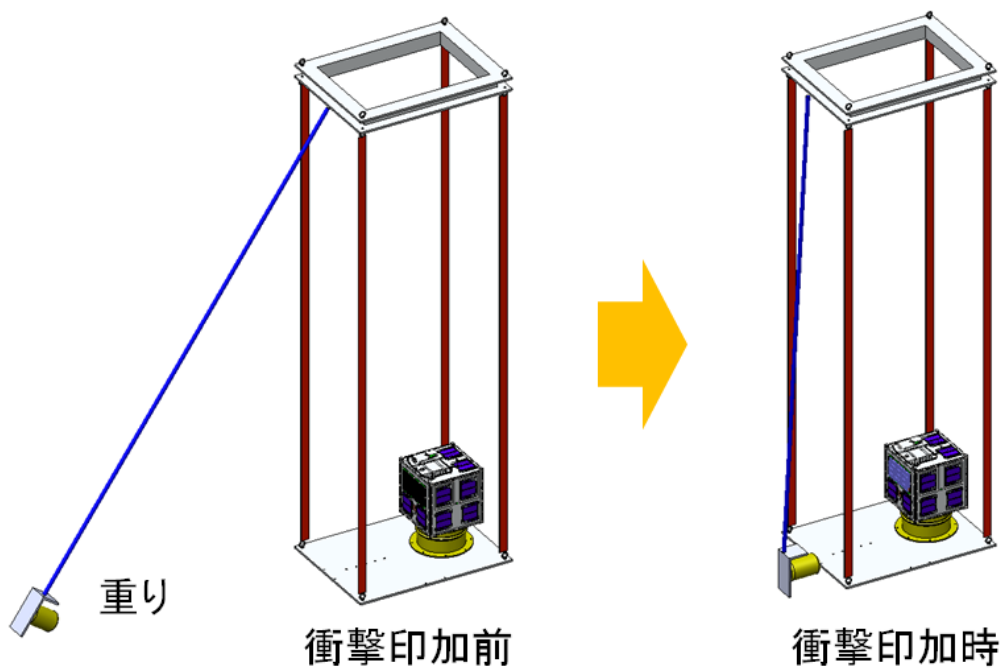


### 5.3.2 衝撃試験環境

衝撃試験は、釣りあげた台の上に衛星を設置し、重りを放ち、台に当て衛星に衝撃を加える。衝撃は水平 (X, Y 方向) と垂直 (Z 方向) のそれぞれを印加した。図 5.3.2-1 に試験方法、図 5.3.2-2 に衝撃レベルを示す。衝撃レベルは PAF239M レベル、フェアリング分離レベルの SRS 値を満たすレベルを、STM (構造熱モデル) を用いて出し供試体衛星で本試験を行う。衛星各所には加速度ピックアップを取り付け、要求されている衝撃レベルが得られていることを確認している。AT レベルはこの衝撃レベルを 1 回、QT レベルは 2 回衛星に与える。この振動試験の詳細なコンフィギュレーションについては参考文献 [11] に記載されている。



(a) 垂直方向  
(a) Vertical direction



(b) 水平方向

(b) Horizontal direction

図 5.2.2-1 衝撃試験方法

Fig. 5.2.2-1 Mechanical shock testing method

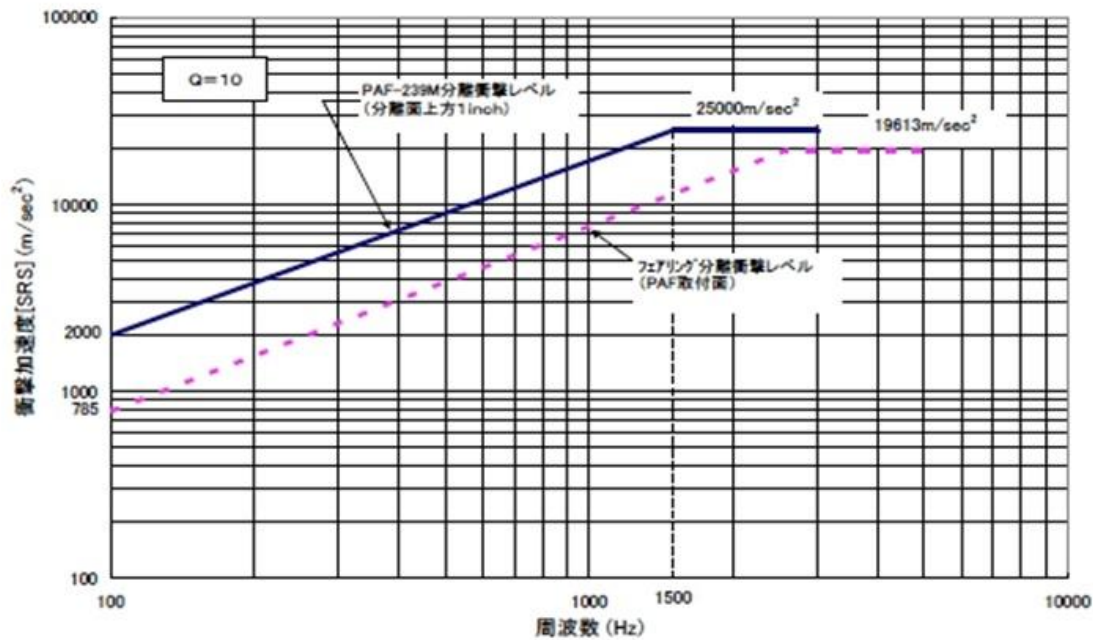


図 5.2.2-2 衝撃レベル

Fig. 5.2.2-2 Mechanical shock level

### 5.3.3 EM 振動・衝撃試験

EM 開発フェーズでは、振動試験 1 回と振動&衝撃試験を 1 回実施した。振動試験を 2 回実施した理由は、1 回目の振動試験でミッション系の一部パーツが外れたため、対策を行い、再試験をしたためである。以下に詳細を述べる。

#### (i) EM 振動試験 (1 回目)

EM 振動試験の流れと日時・場所、供試体を以下に示す。電源系では、以下の供試体の外観と試験前後の電気性能の確認、振動試験中の機械式スイッチのチャタリング検出を行った。

供試体：EM ver2.0 電源基板、太陽電池、分離検知スイッチ、EM バッテリ

日時： 2011年3月12日 電源基板電気性能確認

2011年3月22日 EM振動試験、チャタリング検出、外観検査

2011年3月29日 電源基板電気性能確認、太陽電池特性測定

場所： 九州工業大学 SVBL棟3階衛星開発室 電源系単体での電気性能確認  
SVBL棟1階 EM振動試験、チャタリング検出

試験結果を以下に示す。全ての電源系のコンポーネントの外観に異常がなく、電気的な性能の健全性を確認することができた。また、分離検知スイッチに使用されている機械式スイッチのチャタリングが起きないことを確認した。よって、振動に耐えることを検証できた。

#### ①試験後の外観検査

電源基板、バッテリー、分離検知スイッチに有害な変形、損傷がないことを確認した。

#### ②チャタリング

チャタリングの検出には専用の検出器を作製し、試験した。図 5.3.3-1 にチャタリング検出回路を示す。この検出器を用いて、図 5.3.3-2 に示す計測点の機械スイッチのチャタリングを検出する（計 3 つの分離検知スイッチすべて検出）。スイッチ ON の際に、緑色の LED が点灯し、機械スイッチでチャタリングが起きなければ緑色の LED が点灯状態を保持しつづける。機械スイッチがチャタリングを起こし図中のホット側とリターン側が短絡するとラッチ回路の出力が反転するため点灯が赤色の LED に反転しチャタリングを検知できる。この試験装置は金属ケースで覆い、衛星と検出器を繋ぐケーブルはシールド線を使用した。

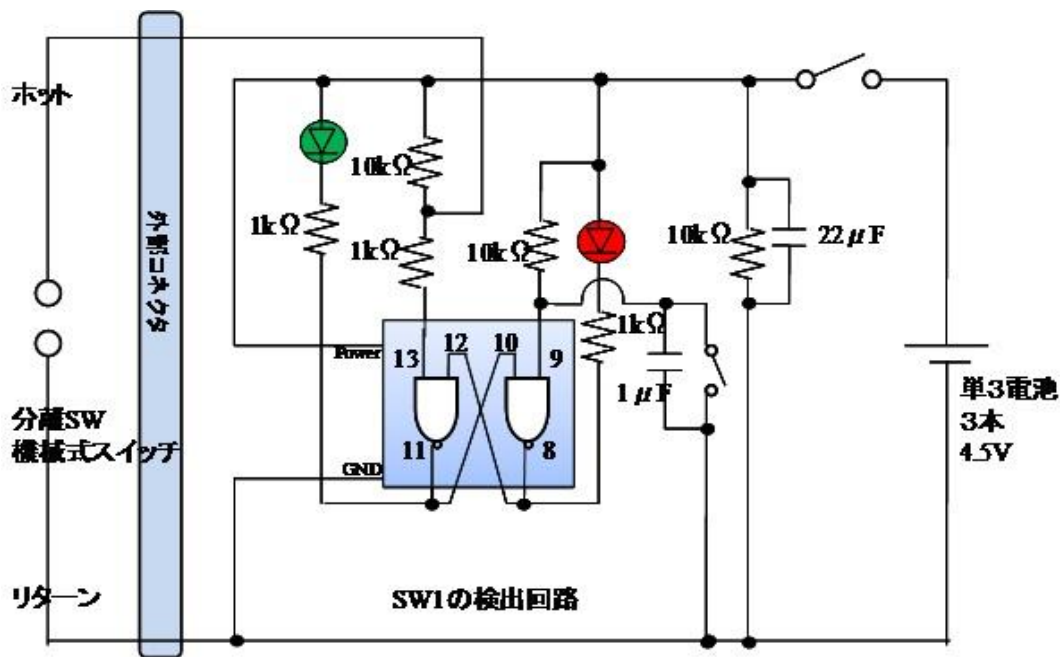
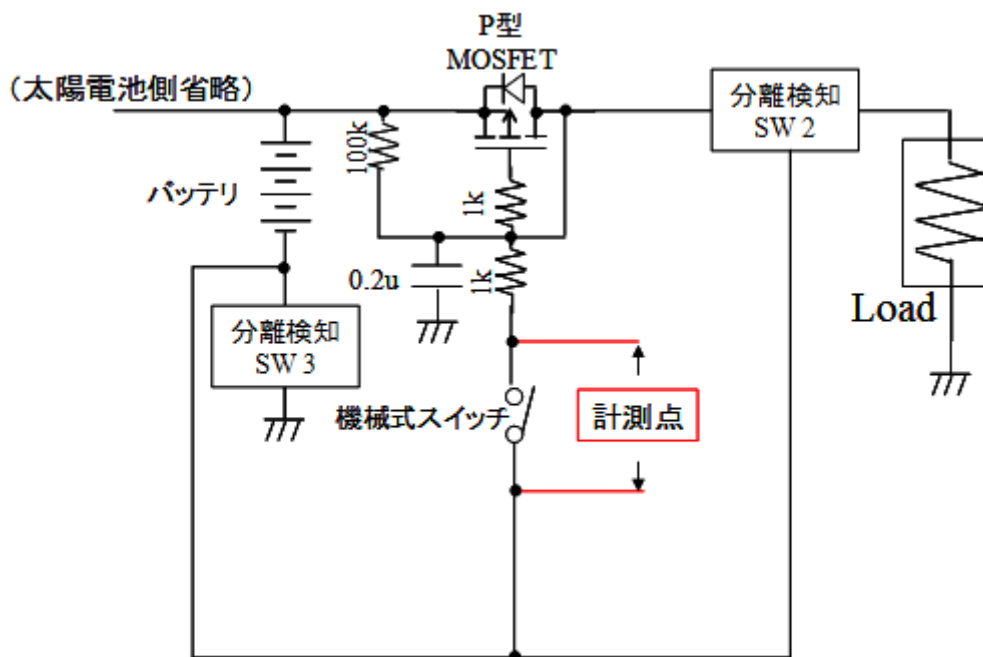
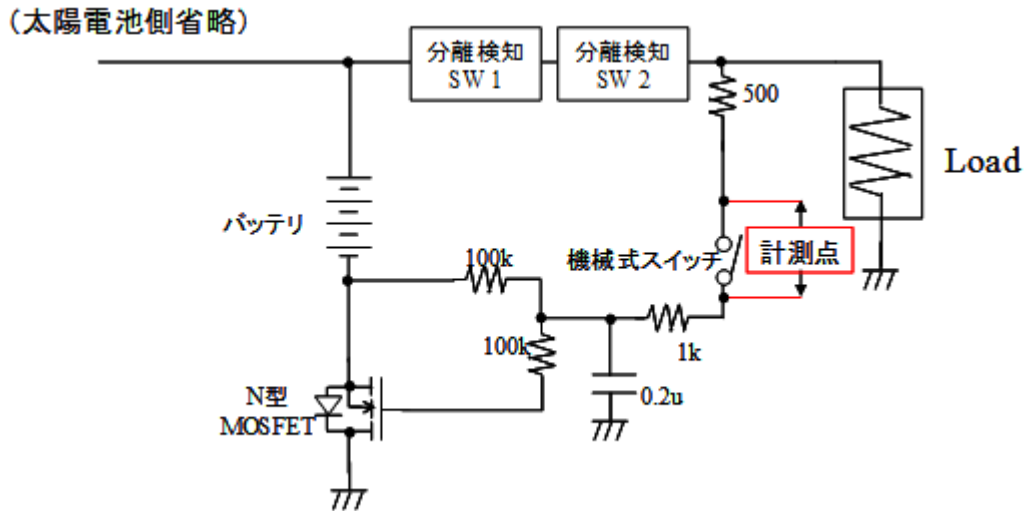


図5.3.3-1 チャタリング検出回路  
Fig. 5.3.3-1 Chattering detection circuit



(a) バッテリホット側分離検知スイッチの検出箇所  
(a) Location of detecting separation detection switch side of positive electrode



(b) バッテリリターン側分離検知スイッチの検出箇所

(b) Location of detecting separation detection switch side of negative electrode

図5.3.3-2 チャタリング検出箇所

Fig. 5.3.3-2 Chattering detection point

表5.3.3-1にチャタリング検出結果を示す。作業番号2-4と2-20でチャタリングを検知したが、ノイズによる誤作動であった。振動試験機は大きなコイルで振動を発生させているため、非常に強いノイズが発生する。また、上記の検知回路は非常に繊細であるため、ノイズに反応し易い。ノイズ対策としてあらかじめ、回路をGND構体で密閉し、ケーブルはシールド線を使用していたがそれでも不十分であった。そこで振動試験の途中でノイズ対策1,2を施した結果、チャタリング検出器は誤反応しなくなり、機械式スイッチのチャタリングは発生しなかった。

表 5.3.3-1 試験結果  
Table 5.3.3-1 Test results

加振方向	作業番号	試験	チェック欄		
			初期状態	対策1後	対策2後
X 軸加振	2-1	X 軸モーダル	無	/	/
	2-2	X 軸ランダム AT	無	/	/
	2-3	X 軸モーダル	無	無	/
	2-4	X 軸正弦波 QT	SW2	無	/
	2-5	X 軸モーダル	/	無	/
	2-6	X 軸準静的荷重 QT	/	無	/
	2-7	X 軸モーダル	/	無	/
	2-8	X 軸ランダム QT	/	無	/
	2-9	X 軸モーダル	/	無	/
Y 軸加振	2-10	Y 軸モーダル	/	無	/
	2-11	Y 軸ランダム AT	/	無	/
	2-12	Y 軸モーダル	/	無	/
	2-13	Y 軸正弦波 QT	/	無	/
	2-14	Y 軸モーダル	/	無	/
	2-15	Y 軸準静的荷重 QT	/	無	/
	2-16	Y 軸モーダル	/	無	/
	2-17	Y 軸ランダム QT	/	無	/
	2-18	Y 軸モーダル	/	無	/
Z 軸加振	2-19	Z 軸モーダル	/	無	無
	2-20	Z 軸ランダム AT	/	SW2	無
	2-21	Z 軸モーダル	/	/	無
	2-22	Z 軸正弦波 QT	/	/	無
	2-23	Z 軸モーダル	/	/	無
	2-24	Z 軸準静的荷重 QT	/	/	無
	2-25	Z 軸モーダル	/	/	無
	2-26	Z 軸ランダム QT	/	/	無
	2-27	Z 軸モーダル	/	/	無

以下に分離検知スイッチ誤作動の詳細について述べる。図5.3.3-3,4に初期状態のチャタリング検知装置ケーブルと衛星の接続図を示す。初期状態は図5.3.3-3の様にコネクタを接続し、この上からカプトンテープで絶縁し、図5.3.3-4に示すようにアルミテープを巻いていた。この状態でX軸方向の加振中に検知装置が誤作動した。このとき、振動試験機の電源を待機状態（電源ON、振動なし）にしただけでチャタリング検知装置が反応した。そこで対策1として、図5.3.3-5に示すように、衛星上面開放部をアルミテープで覆いノイズを遮蔽した。すると、振動試験機の待機状態でのチャタリング検知装置の反応がなくなり、加振しても誤反応は起こらなかった。次にチャタリング検知装置の誤作動が発生したのはZ軸方向の加振中である。このときも振動試験機の電源を待機状態（電源ON、振動なし）にしただけでチャタリング検知装置が反応した。このとき、衛星の+Y面の300V発電用太陽電池取り付け面には太陽電池は設置されておらず、122×214mmの大きな穴が空いていた。そこで対策2として、図5.3.3-6に示すように、空いていた取り付け部をアルミテープで遮蔽したところ、振動試験機の待機状態でのチャタリング検知装置の反応がなくなり、加振しても誤反応は起こらなかった。



図5.3.3-3 初期状態の接続図 1

Fig. 5.3.3-3 Initial states 1

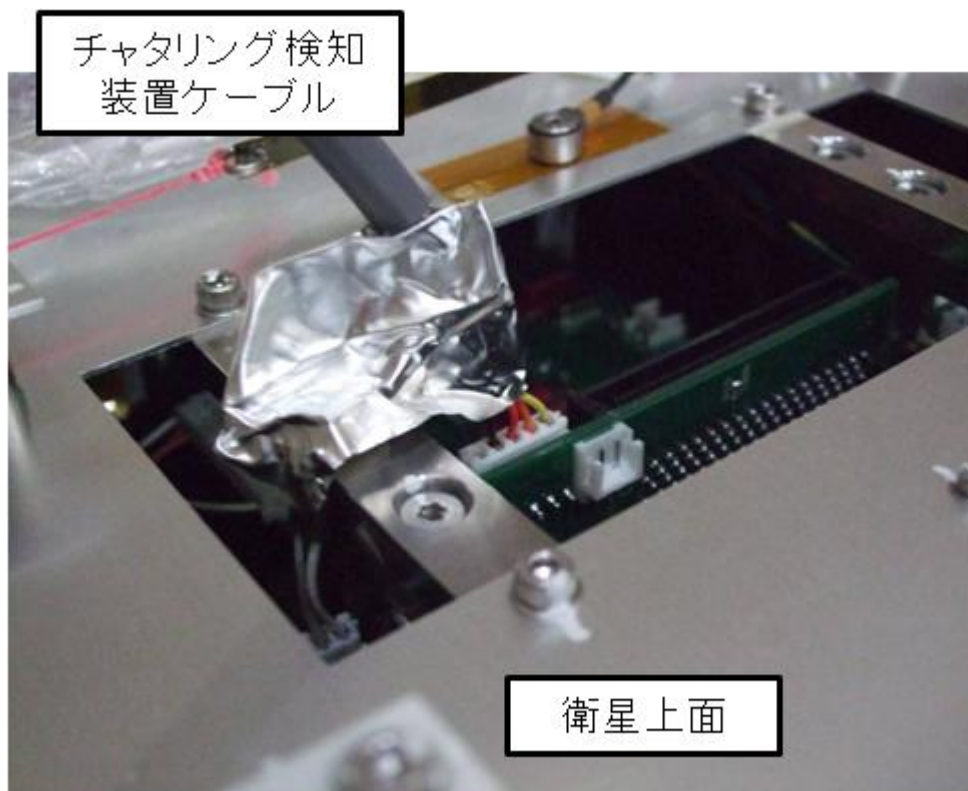


図5.3.3-4 初期状態の接続図 2

Fig. 5.3.3-4 Initial states 2

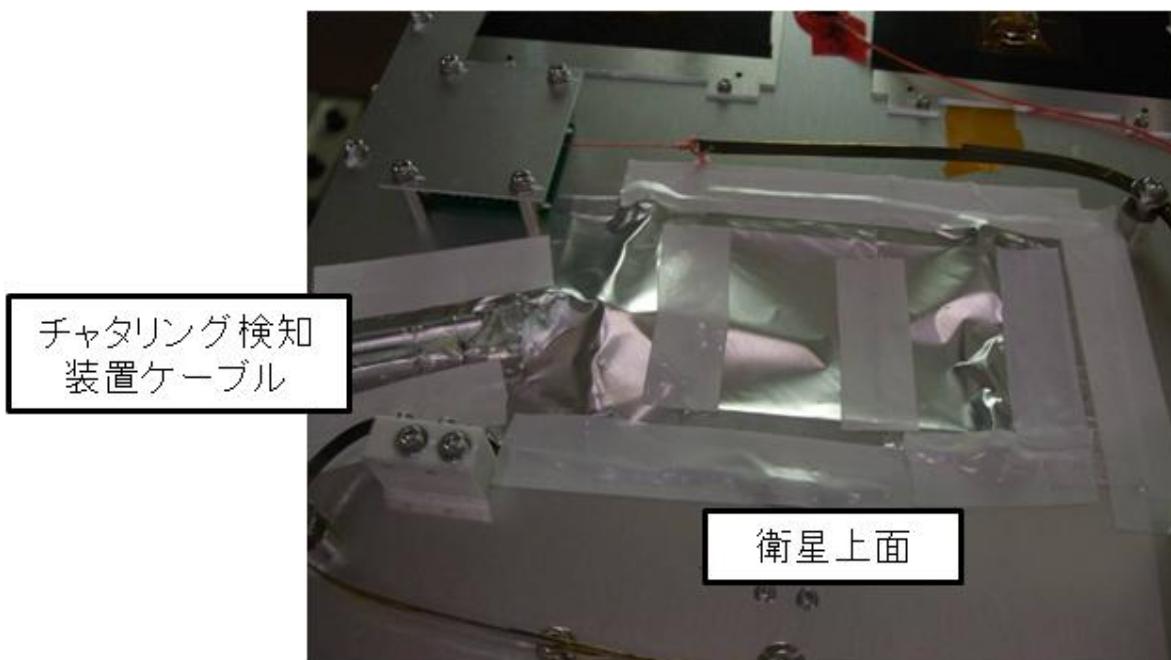


図5.3.3-4 対策1の処理

Fig. 5.3.3-4 Protection against noise 1



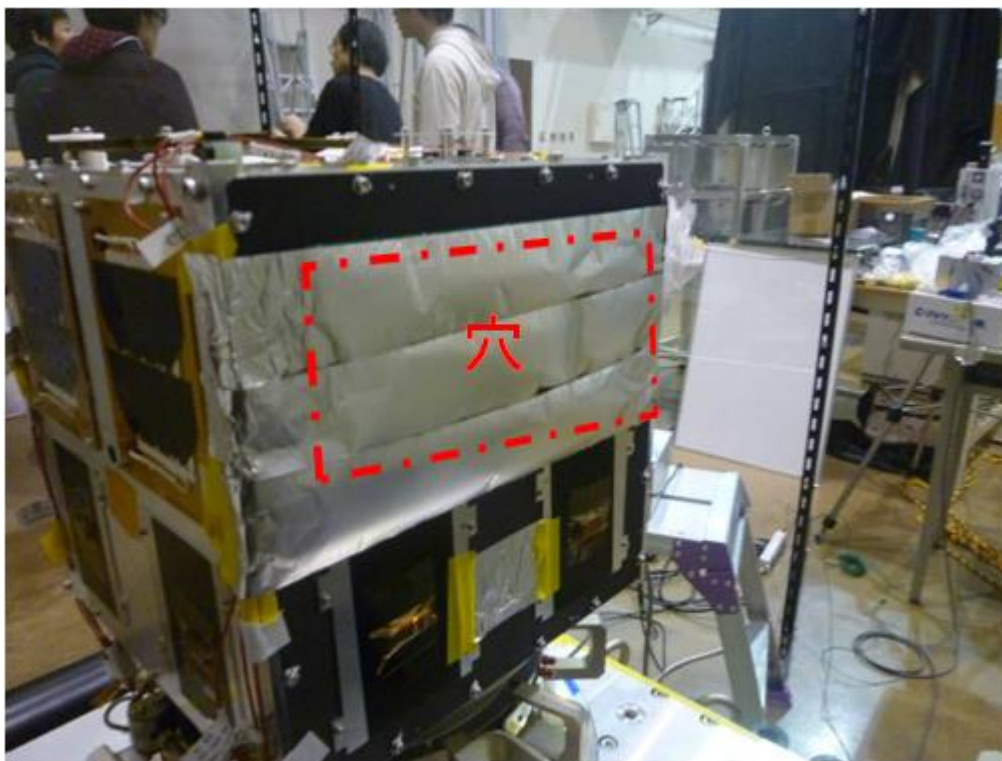


図5.3.3-6 対策2の処理

Fig. 5.3.3-6 Protection against noise 2

以下に考察を述べる。上記より、振動試験機から非常に強いノイズが発生していることがわかる。X軸方向の加振では、図5.3.3-7に示す方向、Z軸方向の加振では図5.3.3-8に示す方向に放射ノイズが出ているのではないかと考えられる。また、ノイズの混入経路として、チャタリング検知装置の衛星側接続部と外面パネルの穴であると考えられる。とりわけ基板の穴からのノイズ混入については、底面基板又は電源基板のチャタリング検出ライン又はその他ラインからのノイズ回り込みによってチャタリング検出器が反応すると考えられる。今後の振動試験において、衛星パネル開放部はアルミで遮蔽することが必要である。

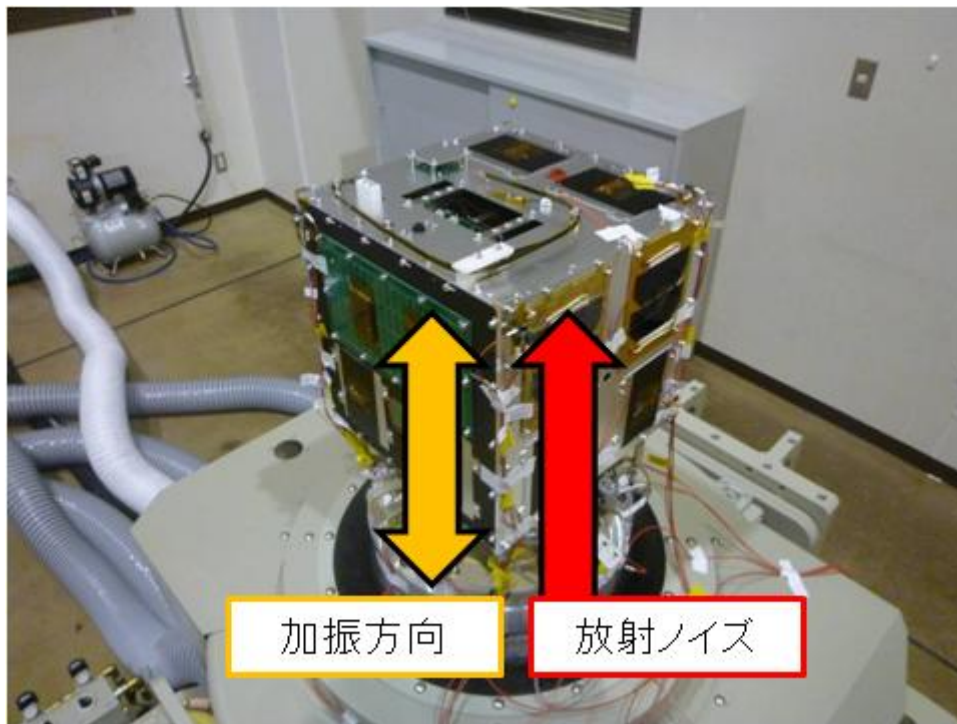


図5.3.3-7 X軸加振時  
Fig. 5.3.3-7 Vibration of X axis

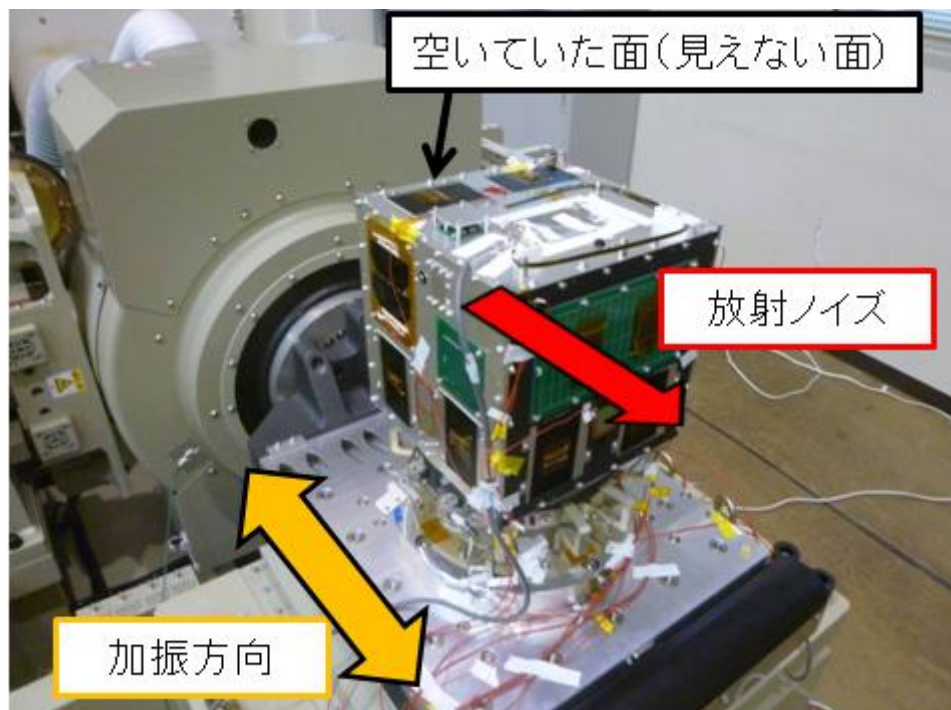


図5.3.3-8 Z軸加振時  
Fig. 5.3.3-8 Vibration of X axis

③電源基板電気性能の評価

(a) 太陽電池逆流防止ダイオードの性能

ここで評価するのはダイオードの逆流防止性能と、順方向電流性能である。合計10個ある逆流防止ダイオードが正常であることを確認した。また、ダイオードの漏れ電流は160mA程度で、試験前後で変化がなかった。

(b) キルスイッチの性能

試験前後でキルスイッチの動作は以下の様になった。試験前後共にキルスイッチは制御信号により正常に動作することを確認した。

表5.3.3-2 キルスイッチ試験結果

Table 5.3.3-2 Kill switch test result

キルスイッチ 1		キルスイッチ 2		電力の導通・遮断	
セット信号	リセット信号	セット信号	リセット信号	試験前	試験後
Low	High	Low	High	導通	導通
High	Low	Low	Low	導通	導通
High	Low	High	Low	遮断	遮断
Low	High	High	Low	導通	導通

(c) 分離検知スイッチの性能

試験前後で分離検知スイッチの動作は以下の様になった。試験前後共に分離スイッチは正常に動作することを確認した。

表5.3.3-3 分離検知スイッチ試験結果

Table 5.3.3-3 Separation detecting switch test result

分離スイッチ 1	分離スイッチ 2	分離スイッチ 3	電力の導通・遮断	
			試験前	試験後
OFF	OFF	OFF	遮断	遮断
OFF	OFF	ON	遮断	遮断
OFF	ON	OFF	遮断	遮断
OFF	ON	ON	遮断	遮断
ON	OFF	OFF	遮断	遮断
ON	OFF	ON	遮断	遮断
ON	ON	OFF	遮断	遮断
ON	ON	ON	導通	導通

(d) 電流センサの性能

電流センサは試験前後で正常動作することを確認した。

(e) 過電流防止回路の性能

合計3つある過電流防止回路は試験前後共に正常動作することを確認した。

(f) リファレンスICの性能

試験前後共に2.06Vで電圧の変動はなかった。

(g) バッテリの短絡

試験前後共にバッテリーと衛星GNDの短絡はなかった。

(h) 太陽電池電力ラインの短絡

試験前後共に太陽電池電力ラインの衛星GNDとの短絡はなかった。

(i) 太陽電池光V-I特性

振動試験後に取得した太陽電池特性を下図に示す。図より正常に動作していることが分かる

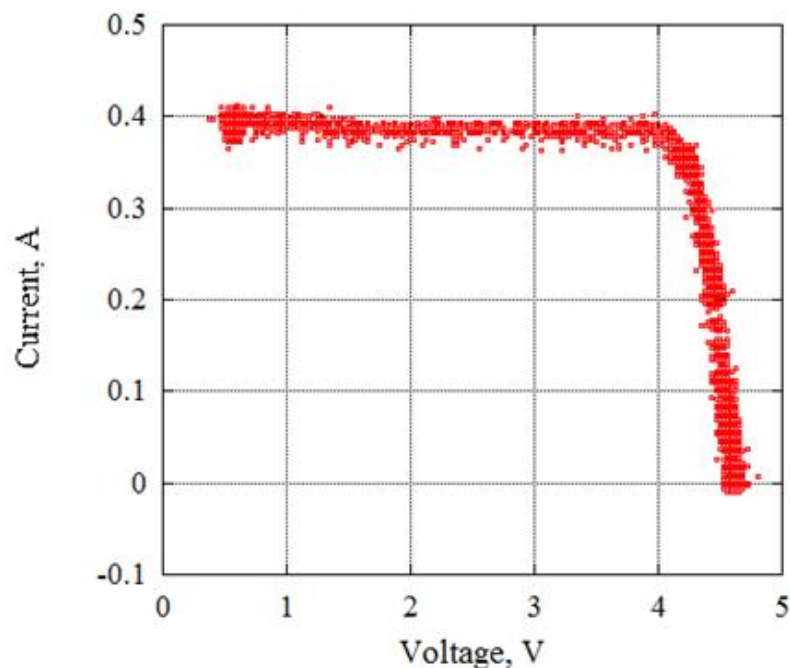


図5.3.3-9 振動試験後の太陽電池特性

Fig 5.3.3-9 SC characteristic after vibration test

以上、電源系の機能が全て正常に動作することを確認した。

## (ii) EM 振動 (2 回目)・衝撃試験

EM 振動&衝撃試験の流れと日時・場所、供試体を以下に示す。電源系では、以下の供試体の外観と試験前後の電気性能の確認を行った。衛星の統合状態でのシステム検査では電源系はキルスイッチの状態を確認した。

供試体：EM 電源基板.ver2.0 (環境負荷なし)、EM バッテリ、EM 太陽電池、分離検知スイッチ

日時：2011年4月19日 電源基板電気性能確認、外観検査

EM衝撃試験、チャタリング検出、外観検査

2011年4月25日 統合状態での簡易動作チェック (キルスイッチのみ)

EM振動試験、チャタリング検出、外観検査

2011年5月29日 電源基板電気性能確認

場所：九州工業大学 SVBL棟3階 衛星開発室

SVBL棟1階 衝撃試験、振動試験、チャタリング検出

以下に試験結果を示す。結果は、キルスイッチは 1 つ反転したものの故障することではなく、電源系の全ての機器が振動・衝撃に耐えられることができた。また、チャタリングは検出することがなく、健全性を検証することができた。

## ①統合状態でのキルスイッチ確認

衝撃試験により、2個あるキルスイッチの内1つのラッチングリレーが反転しON状態になっていた。ラッチングリレーは電気駆動の機械式スイッチであるため、衝撃により機械スイッチ部が反転したと考えられる。振動試験による反転はなかった。また、衝撃・振動試験によるキルスイッチの故障がないことを確認した。

## ②試験後の外観検査

電源基板、バッテリー、分離検知スイッチに有害な変形、損傷がないことを確認した。

## ③チャタリング検出

本試験で使用したチャタリング検出器の回路図を以下に示す。EM振動試験(1回目)で使用した検出器からの変更点はノイズ対策として0.1 $\mu$ Fのキャパシタを追加した。このキャパシタは分離検知スイッチの機械式スイッチ部に設置しているキャパシタの半分の容量であるため、検出周波数を考えると許容できる。検出器の接続点はEM振動試験とまったく同じである。

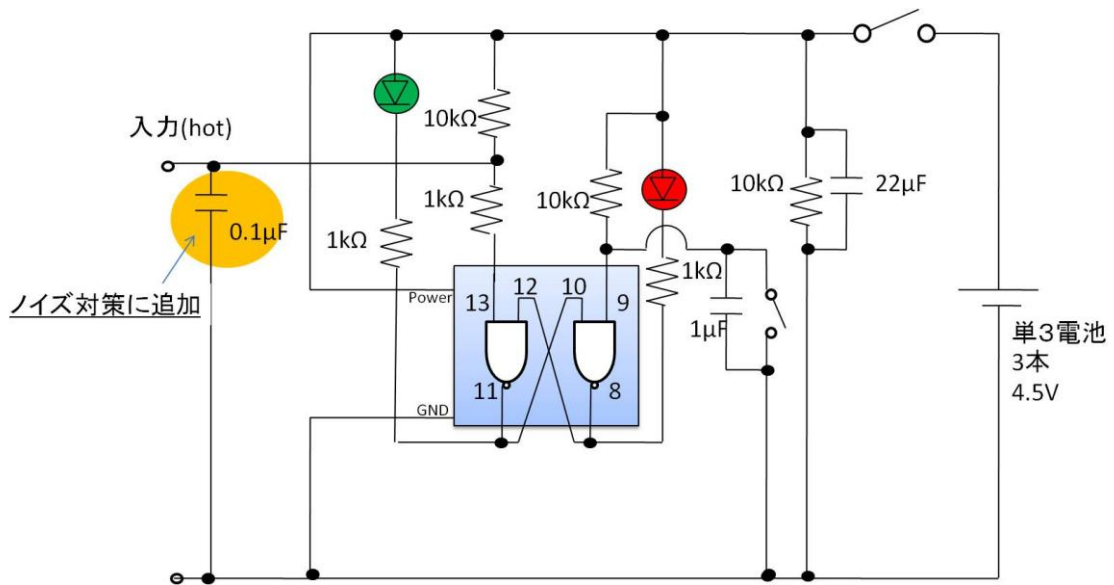


図5.3.3-10 EM衝撃・振動（2回目）で使用したチャタリング検出器回路  
 Fig 5.3.3-10 Chattering detection circuit at 2nd EM mechanical shock and vibration test

(a) 衝撃試験チャタリング検出

衛星にチャタリング検出器を接続した様子を図5.3.3-11に示す。また、チャタリング検出器の設置点を図5.3.3-12に示す。

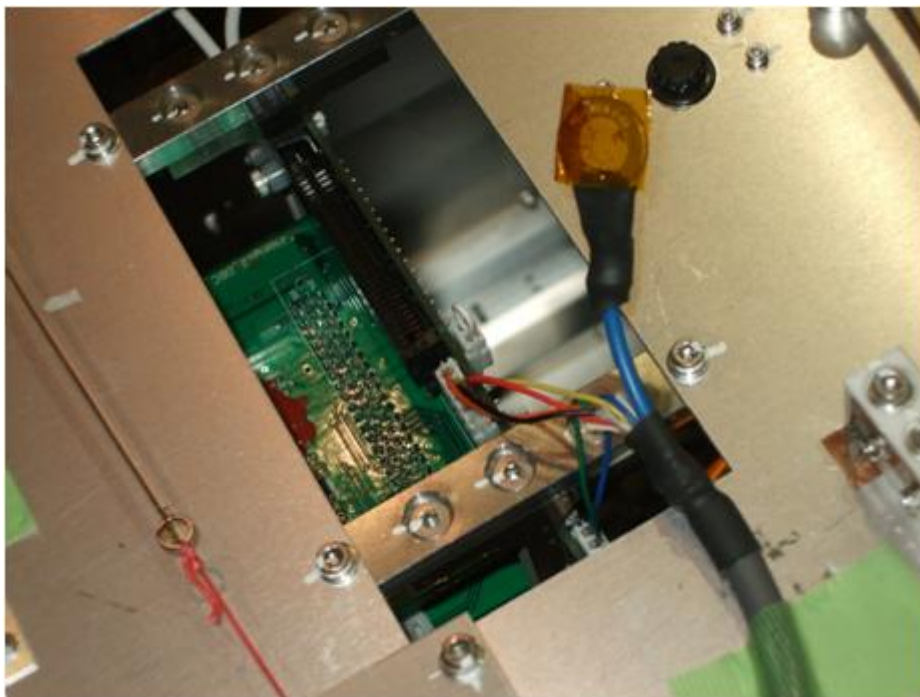


図5.3.3-11 衛星側のチャタリング検知装置接続図  
 Fig 5.3.3-11 Connection of chattering detection side of satellite



図5.3.3-12 チャタリング検知装置接地点  
Fig5.3.3-12 Ground point of chattering detection

衝撃試験中の試験結果を以下に示す。衝撃試験の全試験ケースにおいて分離検知スイッチの機械式スイッチ部のチャタリングは発生しなかった。

表5.3.3-4 衝撃試験中のチャタリング試験結果

Table 5.3.3-4 Chattering detection test result in mechanical shock test

衝撃印加方向	試験	チャタリングの有無
Y 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 1 回目	無
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 2 回目	無
Z 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 1 回目	無
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 2 回目	無
X 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 1 回目	無
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、チャタリング検知 2 回目	無

(b) 振動試験チャタリング検出

図5.3.3-13にチャタリング検知装置の接地状態を示す。この状態で振動試験機の電源を入れた状態（振動していない状態）でチャタリング検知スイッチはチャタリング検出LEDが点灯し、誤作動した。そこで、検出装置のコネクタ部（入力HOT端子）をオシロスコープで測定すると図5.3.3-14に示すようにノイズが発生していた。

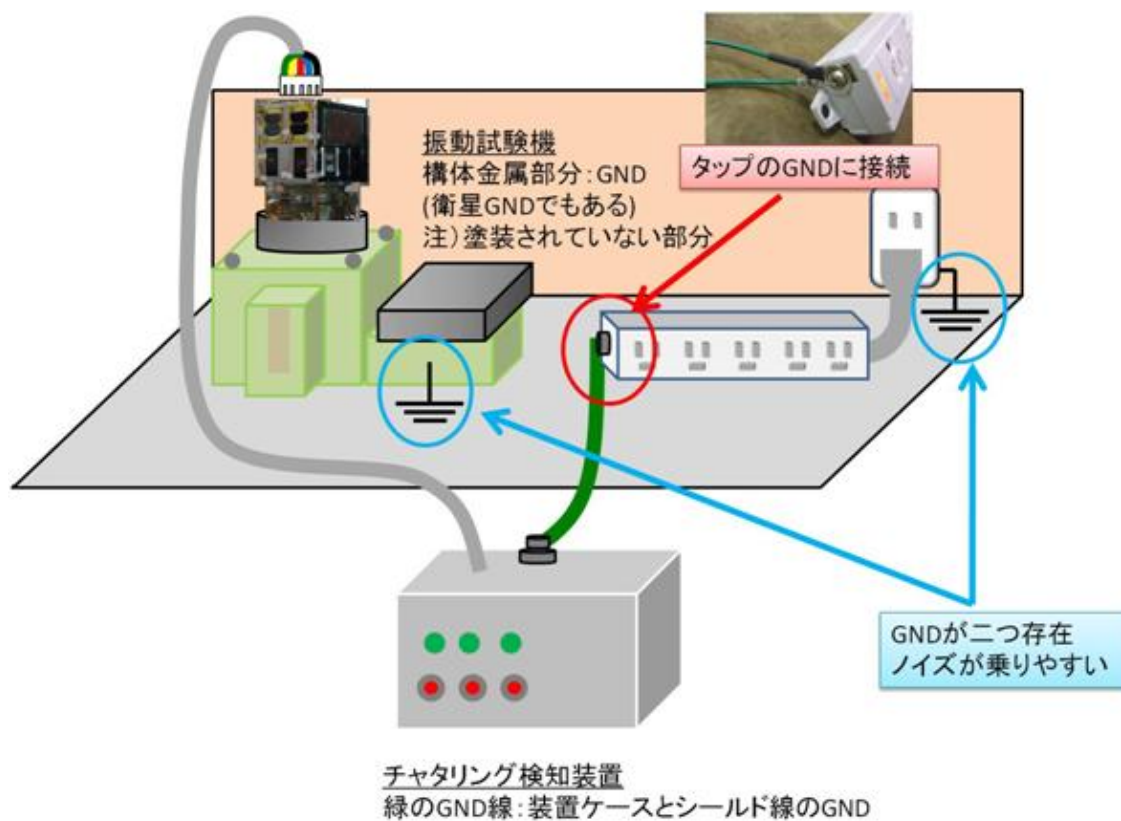


図5.3.3-13 チャタリング検知装置の接地（初期）

Fig 5.3.3-13 Ground of chattering detection (initial)



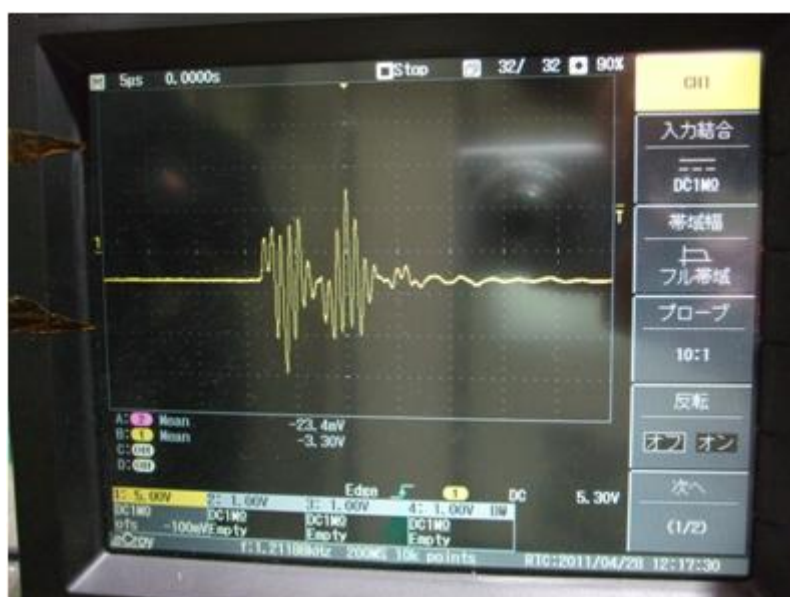


図5.3.3-14 チャタリング検知装置コネクタ部のノイズ  
Fig 5.3.3-14 Noise from chattering detection connector

前回のEM振動試験で誤作動が起きた時の対策は行っていたため、別のノイズ混入経路を考え、接地点を図5.3.3-15の様に変更すると、振動試験機の電源を入れただけの状態（振動していない状態）での誤作動はなくなった。

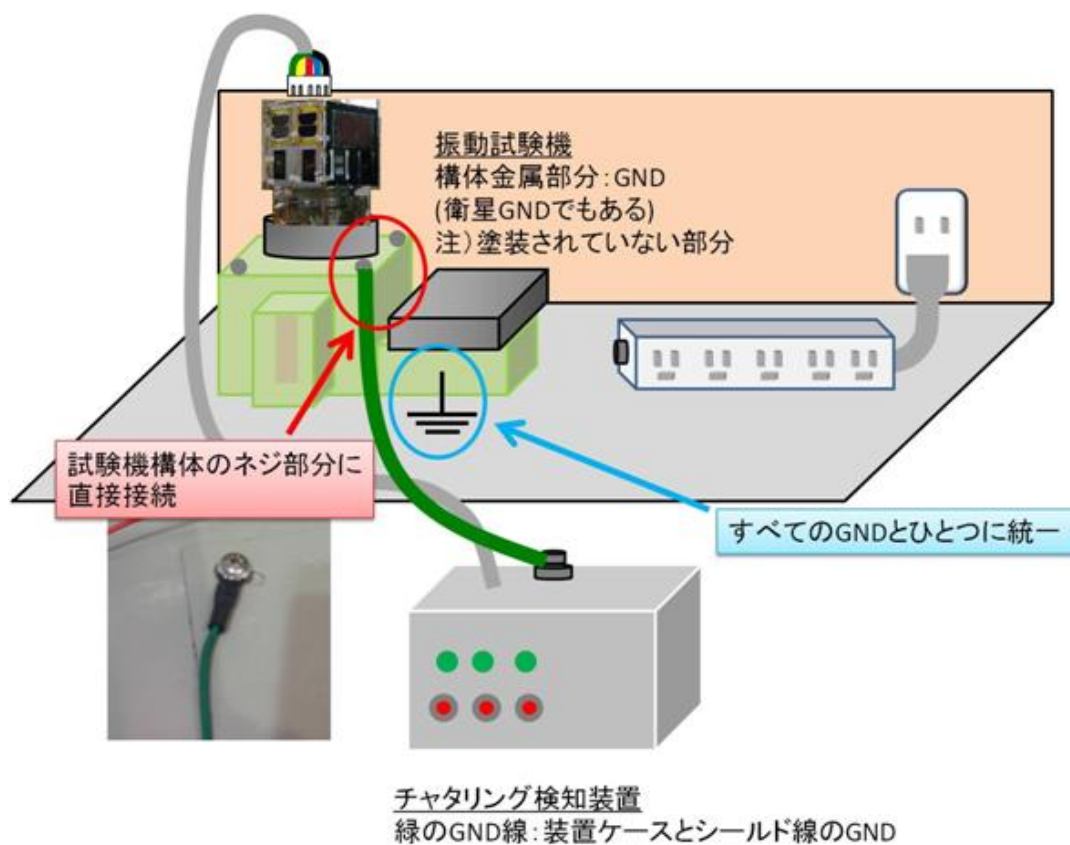


図5.3.3-15 チャタリング検知装置の接地 (変更後)  
Fig 5.3.3-15 Ground of chattering detection (after change)

以下に試験結果を示す。本振動試験の全試験ケースにおいて、分離検知スイッチの機械式スイッチ部のチャタリングは発生しなかった。

表5.3.3-5 EM振動試験（2回目）時のチャタリング試験結果

Table 5.3.3-5 Chattering detection test result at 2nd EM vibration test

加振方向	作業番号	試験	チャタリングの有無
X軸加振	2-1	X軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-2	X軸正弦波QT、チャタリング検知	無
	2-3	X軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-4	X軸準静的荷重QT、チャタリング検知	無
	2-5	X軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-6	X軸ランダムQT、チャタリング検知	無
	2-7	X軸モーダル、チャタリング検知	無
Y軸加振	2-8	Y軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-9	Y軸正弦波QT、チャタリング検知	無
	2-10	Y軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-11	Y軸準静的荷重QT、チャタリング検知	無
	2-12	Y軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-13	Y軸ランダムQT、チャタリング検知	無
	2-14	Y軸モーダル、チャタリング検知	無
Z軸加振	2-15	Z軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-16	Z軸正弦波QT、チャタリング検知	無
	2-17	Z軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-18	Z軸準静的荷重QT、チャタリング検知	無
	2-19	Z軸モーダル、チャタリング検知	無
	2-20	Z軸ランダムQT、チャタリング検知	無
	2-21	Z軸モーダル、チャタリング検知	無
Y軸加振	2-22	Y軸モーダル、チャタリング検知	無
X軸加振	2-23	X軸モーダル、チャタリング検知	無

④電源基板電気性能の評価

(a) 太陽電池逆流防止ダイオードの性能

ここで評価するのはダイオードの逆流防止性能と、順方向電流性能である。合計10個ある逆流防止ダイオードが正常であることを確認した。また、ダイオードの漏れ電流は160mA程度で、試験前後で大きな変化はなかった。

(b) キルスイッチの性能

試験前後でキルスイッチの動作は以下の様になった。試験前後共にキルスイッチは制御信号により正常に動作することを確認した。

表5.3.3-6 キルスイッチ試験結果

Table 5.3.3-6 Kill switch test result

キルスイッチ 1		キルスイッチ 2		電力の導通・遮断	
セット信号	リセット信号	セット信号	リセット信号	試験前	試験後
Low	High	Low	High	導通	導通
High	Low	Low	Low	導通	導通
High	Low	High	Low	遮断	遮断
Low	High	High	Low	導通	導通

(c) 分離検知スイッチの性能

試験前後で分離検知スイッチの動作は以下の様になった。試験前後共に分離スイッチは正常に動作することを確認した。

表5.3.3-7 分離検知スイッチ試験結果

Table 5.3.3-7 separation detection switch test result

分離スイッチ 1	分離スイッチ 2	分離スイッチ 3	電力の導通・遮断	
			試験前	試験後
OFF	OFF	OFF	遮断	遮断
OFF	OFF	ON	遮断	遮断
OFF	ON	OFF	遮断	遮断
OFF	ON	ON	遮断	遮断
ON	OFF	OFF	遮断	遮断
ON	OFF	ON	遮断	遮断
ON	ON	OFF	遮断	遮断
ON	ON	ON	導通	導通

## (d) 電流センサの性能

電流センサは試験前後で正常動作することを確認した。また、その出力特性を以下に示す。

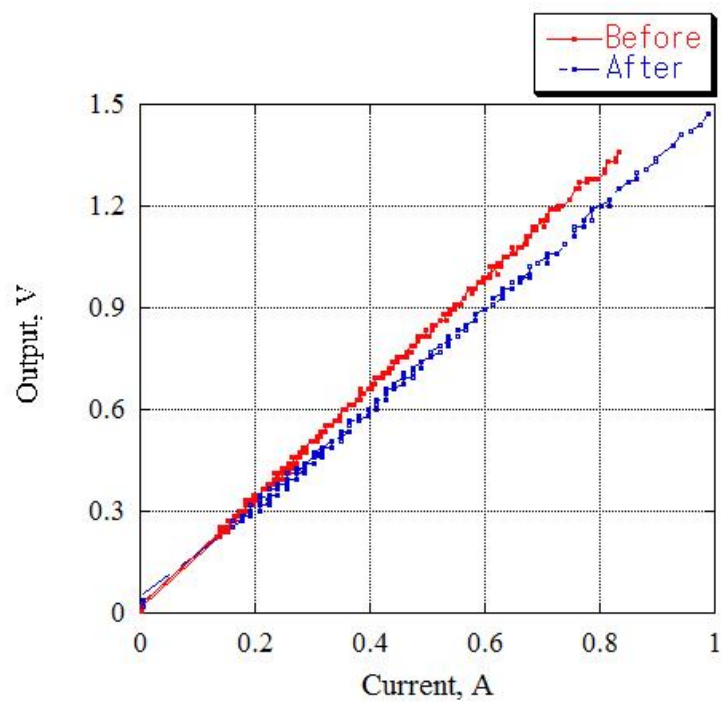


図5.3.3-16 DCDC3.3V電流センサ出力比較

Fig 5.3.3-16 Comparison of DC3.3V current sensor

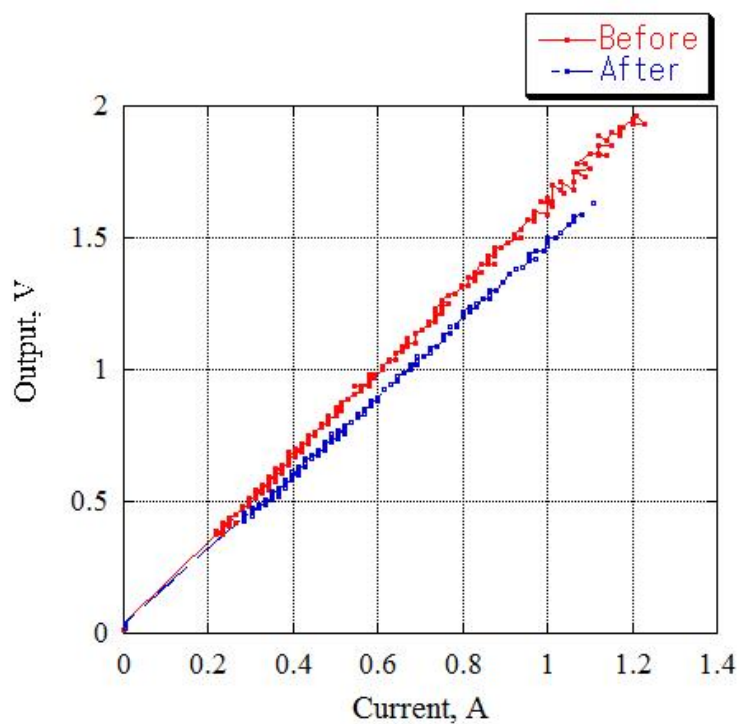


図5.3.3-17 DCDC5V電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.3-17 Comparison of DC5V current sensor

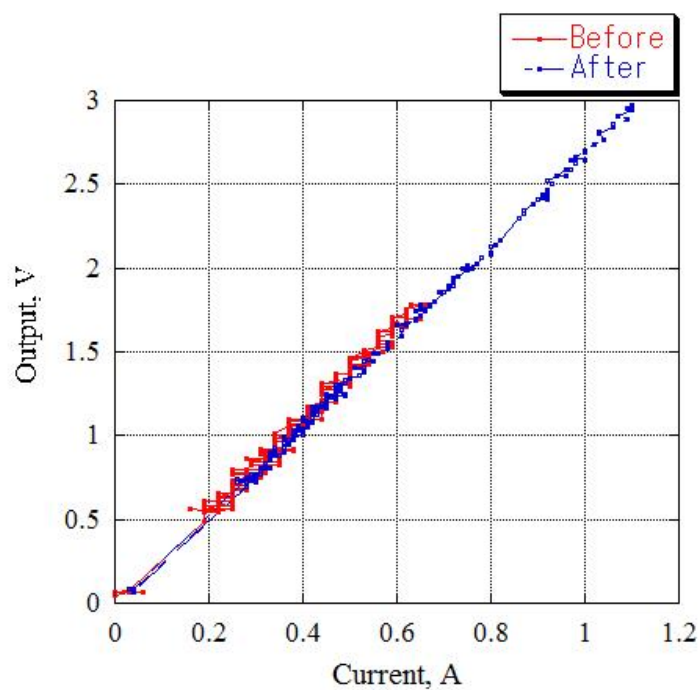


図5.3.3-18 太陽電池-X面電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.3-18 Comparison of SC current sensor at X panel

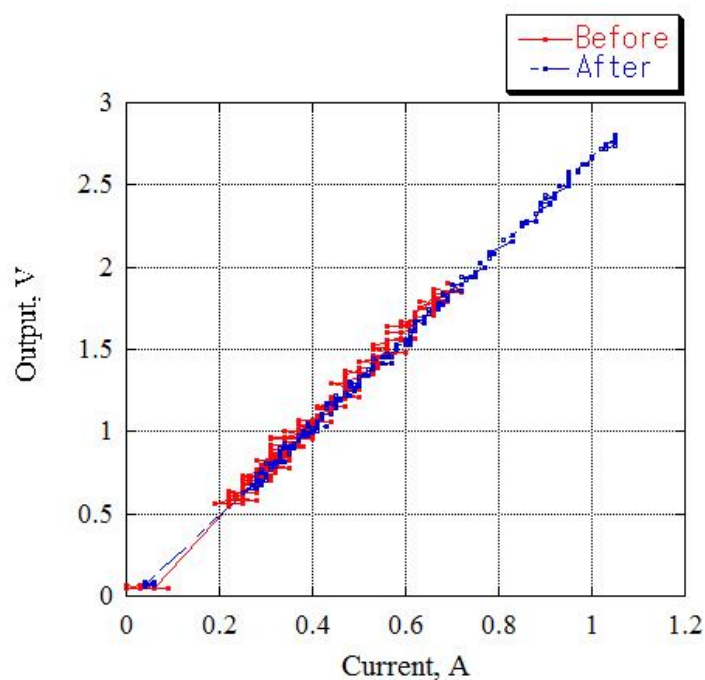


図5.3.3-19 太陽電池+Y面電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.3-19 Comparison of SC current sensor at Y panel

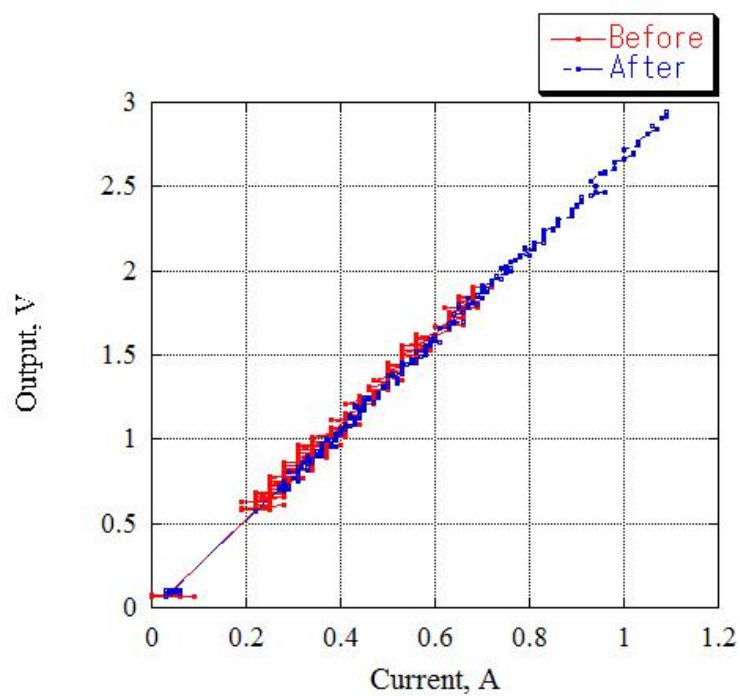


図5.3.3-20 太陽電池 -Y面電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.3-20 Comparison of SC current sensor at -Y panel

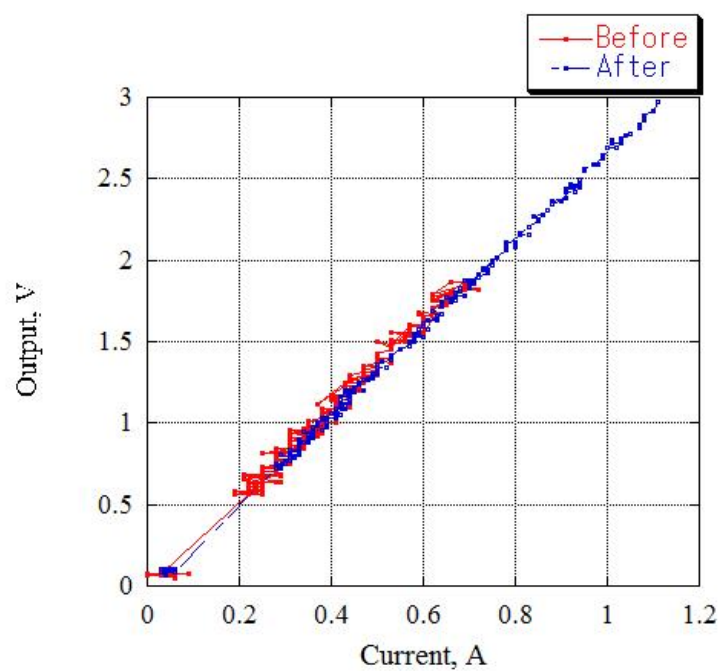


図5.3.3-21 太陽電池 +Z面電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.3-21 Comparison of SC current sensor at Z panel

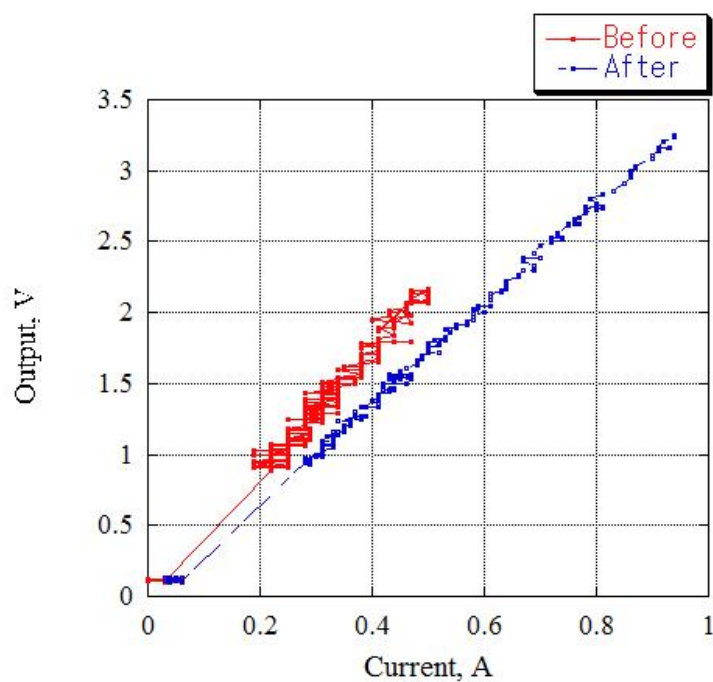


図5.3.3-22 太陽電池 -Z面電流センサ出力比較



Fig 5.3.3-22 Comparison of SC current sensor at -Z panel

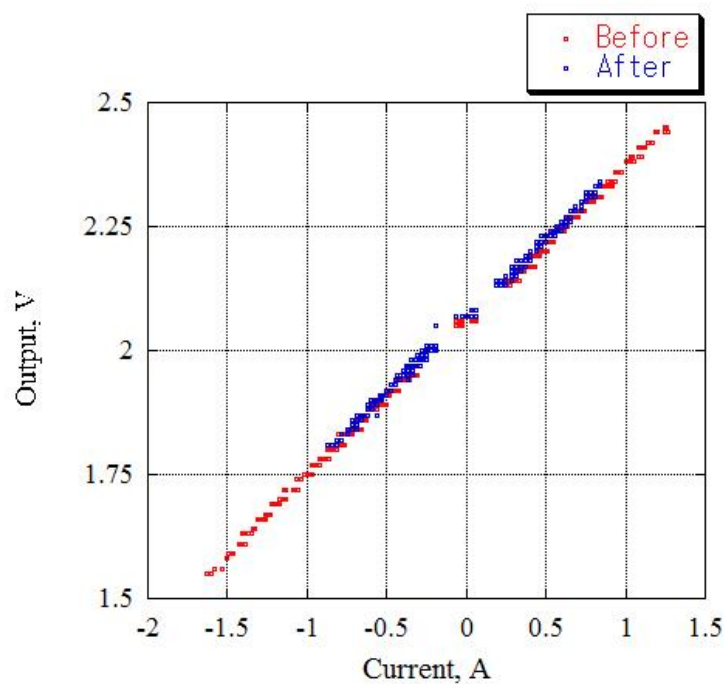


図5.3.3-23 バッテリ電流センサ出力比較

Fig 5.3.3-23 Comparison of battery current sensor

DCDCコンバータ部分と太陽電池-Z面部分に設置されている電流センサの特性に少し差が出た。これは試験前後の比較で同様の出力特性傾きの変化が見られていること、測定方法の違いから測定誤差だと考えられる。他の電流センサは試験前後で出力特性の変化が見られなかった。今後、PFM環境試験時には測定誤差が出ないように計測機器と電流検出抵抗を統一する必要がある。

(e) 過電流防止回路の性能

合計3つある過電流防止回路は試験前後共に正常動作することを確認した。また、動作時の波形を以下に示す。

表5.3.3-8 過電流防止回路動作閾値電流

Table 5.3.3-8 Threshold current for operation of circuit breaker

	試験前遮断閾値 [A]	試験後遮断閾値 [A]
PS-3.3 電力ライン	0.835	0.926
PS-5-S 電力ライン	1.061	1.001
PS-5-O 電力ライン	1.130	1.060

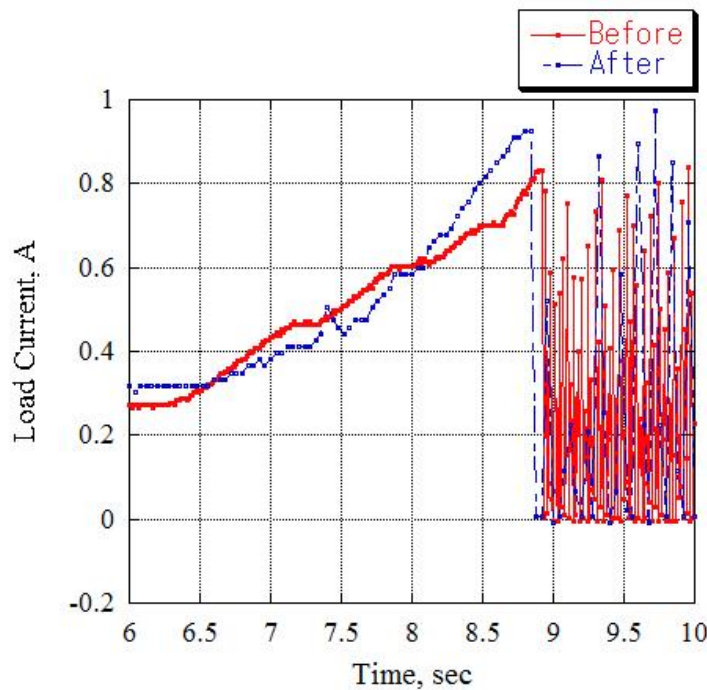


図5.3.3-24 PS-3.3電力ライン過電流防止回路動作比較

Fig 5.3.3-24 Comparison of operation of PS-3.3 power line circuit breaker

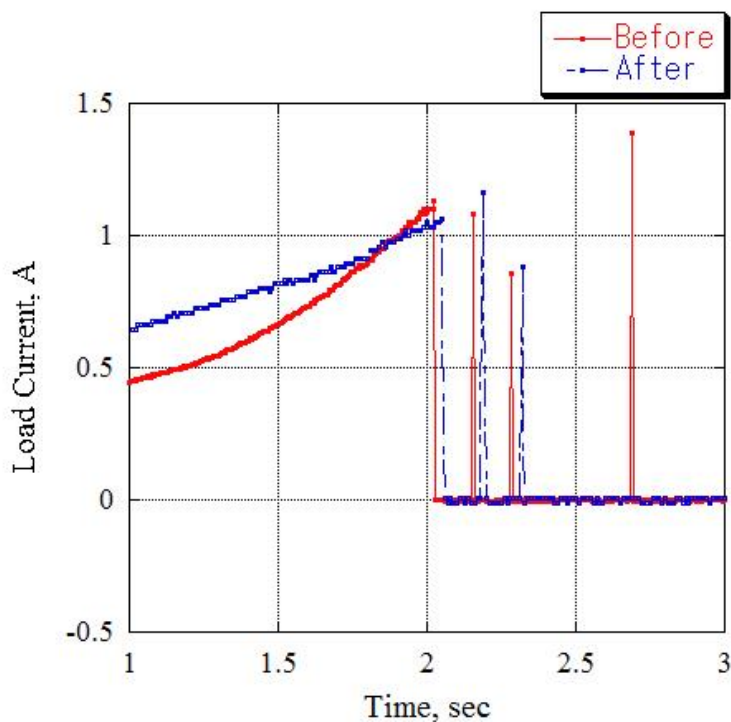


図5.3.3-25 PS-5-S電力ライン過電流防止回路動作比較

Fig 5.3.3-25 Comparison of operation of PS-5-S power line circuit breaker

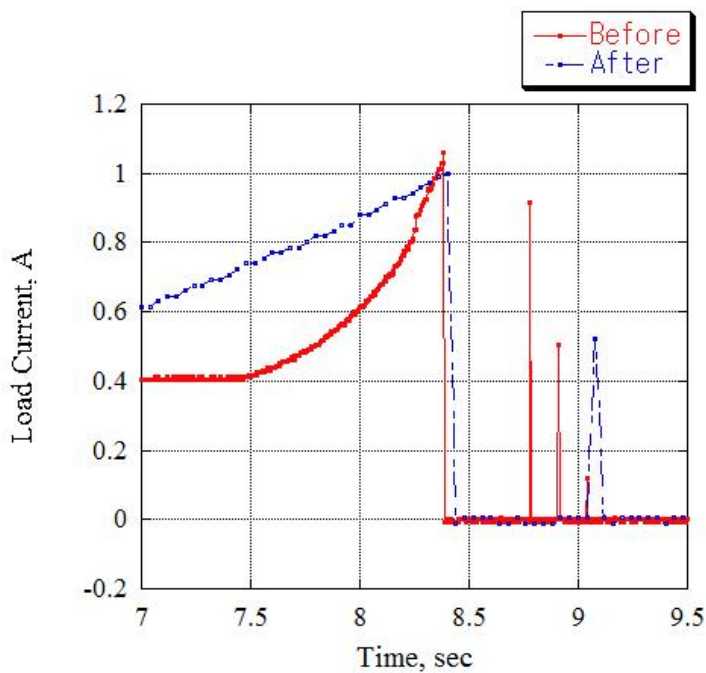


図5.3.3-26 PS-5-O電力ライン過電流防止回路動作比較

Fig 5.3.3-26 Comparison of operation of PS-5-O power line circuit breaker

電力ラインPS-5-O, PS-5-Sではほとんど閾値の変動はなかったが、電力ラインPS-3.3では閾値が0.1A程度高くなった。この原因は電流センサと同様に計測誤差を考慮する。今後、PFM環境試験時には測定誤差が出ないように計測機器と電流検出抵抗を統一する必要がある。

(f) リファレンスICの性能

試験前後共に2.08Vで電圧の変動はなかった。この結果より正常に動作していることがわかる。

(g) DC/DCコンバータ電圧

DC/DCコンバータ出力電圧の試験前後の比較を行った。試験前後で出力電圧の大きな変動はなく、正常に動作していることがわかる。

表5.3.3-9 DC/DCコンバータ電圧測定結果

Table 5.3.3-9 DC/DC converter voltage measurement result

	試験前 出力電圧	試験後 出力電圧
3.3V DC/DC	3.27	3.26
5V DC/DC	5.05	5.02

(h) バッテリの短絡

試験前後共にバッテリーと衛星GNDの短絡はなかった。

(i) 太陽電池電力ラインの短絡

試験前後共に太陽電池電力ラインの衛星GNDとの短絡はなかった。

上記すべての電源基板の電気性能は正常に動作することを確認でき、QT 振動・QT 衝撃環境に耐えることができた。課題として、後に行う環境試験において、電源基板電気性能で電流センサ、過電流防止回路の測定系の精度を管理する必要がある。

### 5.3.4 PFM 振動・衝撃試験

PFM 開発段階では2回振動・衝撃試験を実施した。1回目は衛星全体の PFM 振動・衝撃試験、2回目はバッテリー BOX、アンテナ展開検証用振動・衝撃試験である。1回目の振動・衝撃試験はこれまでと同様で、外観検査、電源基板電気性能、衛星統合状態での簡易システム検査（電源系はキルスイッチの確認のみ）を実施した。チャタリング検出については検出回路設計変更により、2回目の振動・衝撃試験で実施した。2回目の振動・衝撃試験はバッテリーとバッテリーボックスの仕様が変更となったため実施した。試験ではチャタリング検出とバッテリー、バッテリー BOX の外観検査とバッテリーの健全性を確認した。以下に試験の流れと日時・場所、供試体を示す。

供試体：振動・衝撃試験 1回目

PFM 電源基板、EM バッテリー、PFM 太陽電池、分離検知スイッチ

振動・衝撃試験 2回目

PFM 電源基板、PFM バッテリー、分離検知スイッチ

日時： 振動・衝撃試験 1回目

2011年7月09日 電源基板電気性能確認

衛星統合状態での簡易システム検査、外観検査

7月20, 21日 振動試験（1回目）

衛星統合状態での簡易システム検査、外観検査

7月27, 28日 衝撃試験（1回目）

衛星統合状態での簡易システム検査、外観検査

8月29日 電源基板電気性能確認

振動・衝撃試験 2回目

8月15~20日 振動・衝撃試験、チャタリング検知

外観検査、バッテリーチェック

場所： 九州工業大学 SVBL棟3階 衛星開発室（電源基板電気性能確認）

SVBL棟1階 振動、衝撃試験、チャタリング検査

以下に試験結果を示す。結果は、キルスイッチは1つ反転したものの故障することではなく、電源系の全ての機器が振動・衝撃に耐えることが確認できた。2回目の振動・衝撃試験では PFM バッテリーとバッテリーボックスが振動・衝撃にたえられること、分離検知スイッチの機械式スイッチ部がチャタリングを起こさないことを確認できた。

#### ①統合状態でのキルスイッチ確認

キルスイッチは衝撃試験により2つの内、1つのラッチングリレーが反転した。振動試験による故障・反転はなかった。

②試験後の外観検査

1回目振動・衝撃試験

電源基板、バッテリー、分離検知スイッチに有害な変形、損傷がないことを確認した。

2回目振動・衝撃試験

バッテリー、バッテリーBOXに有害な変形、損傷がないことを確認した。

③チャタリング

チャタリング検出器は、これまでの環境試験でノイズに弱いことがわかった。そこで、図5.3.4-1に示す検出回路に変更した。衛星への接続点やケーブルなどは同じである。この検出器の健全性を確認するために、検知装置の最小検出パルス幅を計測した。その方法を図5.3.4-2に示す。図に示すように、検出器をディレイパルスジェネレータ (DPG) に接続し、DPGで方形波パルスが発生させた。結果を表5.3.4-1に示す。チャタリングの検出は70usec以上のパルス幅であれば、可能ということがわかった。このパルス幅では機器の電源がONになることはなく、検出器の性能としては十分であることが確認できた。以下、この検出器を使用し、振動・衝撃試験時のチャタリング検出を行った。

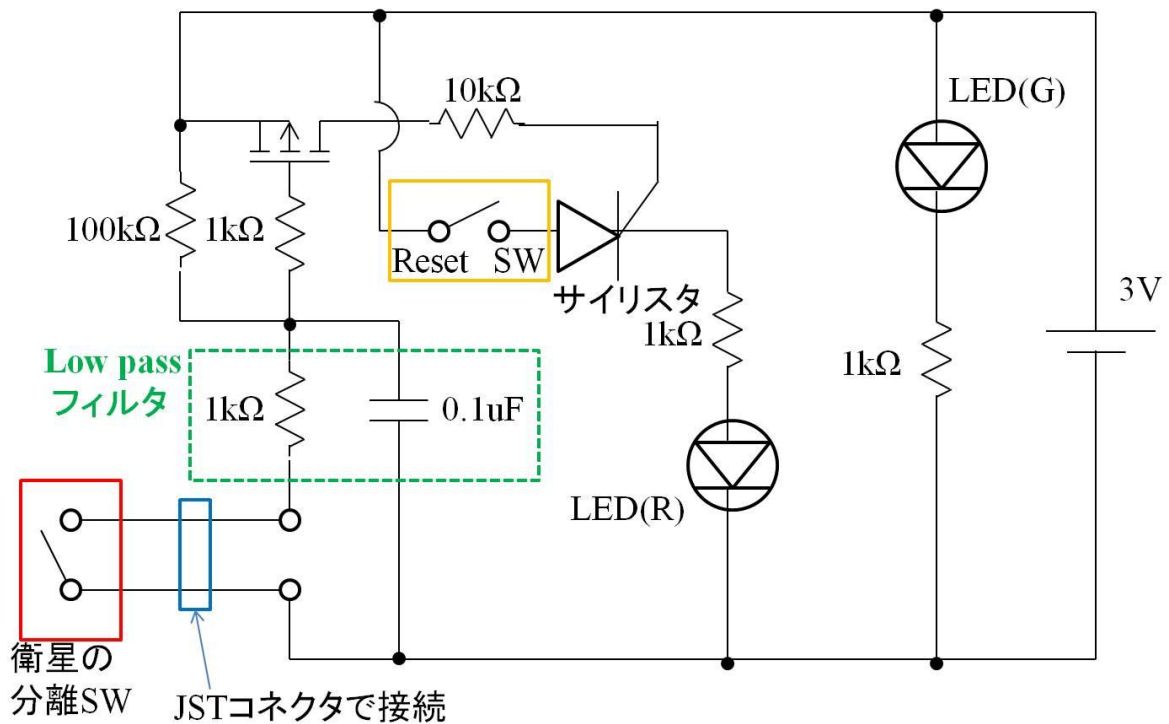


図5.3.4-1 PFMチャタリング検出回路  
Fig 5.3.4-1 PFM chattering detection circuit

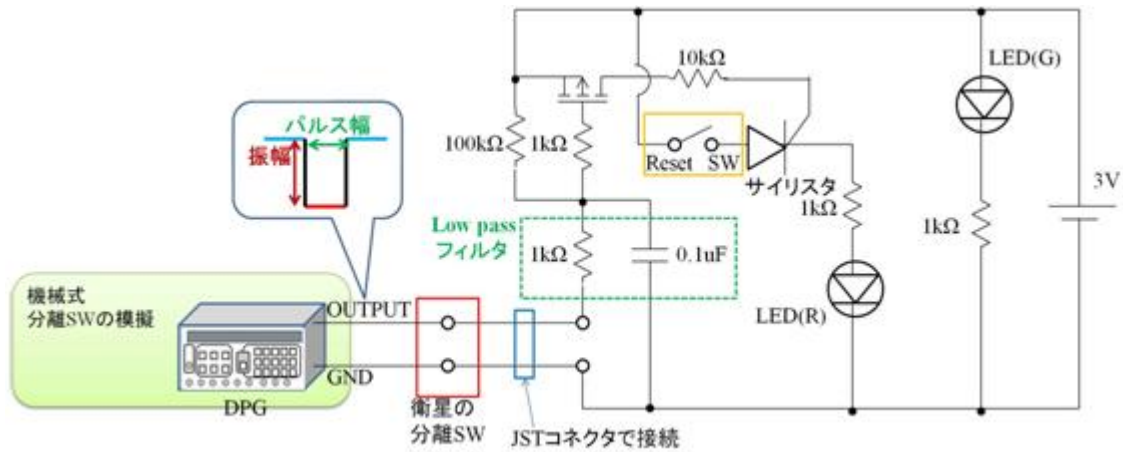


図5.3.4-2 PFMチャタリング検出器検証方法

Fig 5.3.4-2 PFM chattering detection verification method

表5.3.4-1 PFMチャタリング検出器の検出パルス幅

Table 5.3.4-1 Detection pulse amplitude of PFM chattering detection

パルス幅	SW1 用検知回路	SW2 用検知回路	SW3 用検知回路
1s	○	○	○
500ms	○	○	○
100ms	○	○	○
50ms	○	○	○
10ms	○	○	○
1ms	○	○	○
500us	○	○	○
100us	○	○	○
70us	○	○	○
60us	×(65us まで○)	×(62us まで○)	×(67us まで○)
表記	○：検知可能 ×：検知不可能		

(a) PFM振動試験 (2回目)

以下にPFM振動試験 (2回目) のチャタリング検出結果を示す。全ての加振ケースにおいて、分離検知スイッチのチャタリングは発生しなかった。

表5.3.4-2 PFM振動試験（2回目）のチャタリング検出結果

Table 5.3.4-2 Chattering detection result at 2nd PFM vibration test

加振方向	作業番号	試験	チャタリング有無
X 軸加振	2-1	X 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-2	X 軸正弦波 QT、チャタリング検知	無
	2-3	X 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-4	X 軸準静的荷重 QT、チャタリング検知	無
	2-5	X 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-6	X 軸ランダム QT、チャタリング検知	無
	2-7	X 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
Y 軸加振	2-8	Y 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-9	Y 軸正弦波 QT、チャタリング検知	無
	2-10	Y 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-11	Y 軸準静的荷重 QT、チャタリング検知	無
	2-12	Y 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-13	Y 軸ランダム QT、チャタリング検知	無
	2-14	Y 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
Z 軸加振	2-15	Z 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-16	Z 軸正弦波 QT、チャタリング検知	無
	2-17	Z 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-18	Z 軸準静的荷重 QT、チャタリング検知	無
	2-19	Z 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
	2-20	Z 軸ランダム QT、チャタリング検知	無
	2-21	Z 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
Y 軸加振	2-22	Y 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無
X 軸加振	2-23	X 軸モーダル、異常音チェック、チャタリング検知	無



(b) PFM衝撃試験（2回目）

以下にPFM衝撃試験（2回目）のチャタリング検出結果を示す。全ての衝撃試験シーケンスにおいてチャタリングは発生しないことが確認できた。

表5.3.4-3 PFM衝撃試験（2回目）のチャタリング検出結果

Table 5.3.4-3 Chattering detection result at 2nd PFM mechanical shock test

衝撃印加方向	試験	チェック欄
Y 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(1 回目)
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(2 回目)
Z 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(1 回目)
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(2 回目)
X 軸	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(1 回目)
	フェアリング分離レベルの衝撃印加、 チャタリング検知	○(2 回目)

④電気性能の評価

(a) 太陽電池逆流防止ダイオードの性能

ここで評価するのはダイオードの逆流防止性能と、順方向電流性能である。合計10個ある逆流防止ダイオードが正常であることを確認した。

(b) キルスイッチの性能

試験前後でキルスイッチの動作は以下の様になった。試験前後共にキルスイッチは制御信号により正常に動作することを確認した。

表5.3.4-4 キルスイッチ試験結果

Table 5.3.4-4 Kill switch test result

キルスイッチ 1		キルスイッチ 2		電力の導通・遮断	
セット信号	リセット信号	セット信号	リセット信号	試験前	試験後
Low	High	Low	High	導通	導通
High	Low	Low	Low	導通	導通
High	Low	High	Low	遮断	遮断
Low	High	High	Low	導通	導通

## (c) 分離検知スイッチの性能

試験前後で分離検知スイッチの動作は以下の様になった。試験前後共に分離スイッチは正常に動作することを確認した。

表5.3.4-5 分離検知スイッチ試験結果

Table 5.3.4-5 Separation check switch test result

分離スイッチ 1	分離スイッチ 2	分離スイッチ 3	電力の導通・遮断	
			試験前	試験後
OFF	OFF	OFF	遮断	遮断
OFF	OFF	ON	遮断	遮断
OFF	ON	OFF	遮断	遮断
OFF	ON	ON	遮断	遮断
ON	OFF	OFF	遮断	遮断
ON	OFF	ON	遮断	遮断
ON	ON	OFF	遮断	遮断
ON	ON	ON	導通	導通

## (d) 電流センサの性能

電流センサは試験前後で正常動作することを確認した。また、出力特性に変化がないことを確認した。以下に試験前後の各電流センサの出力測定結果を示す。

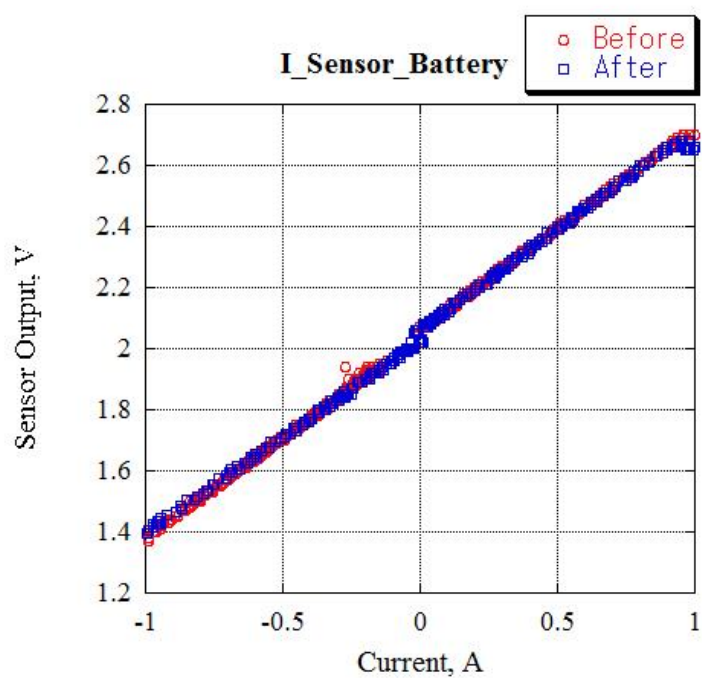


図5.3.4-3 バッテリ電流センサ出力比較  
 Fig 5.3.4-3 Comparison of battery current sensor

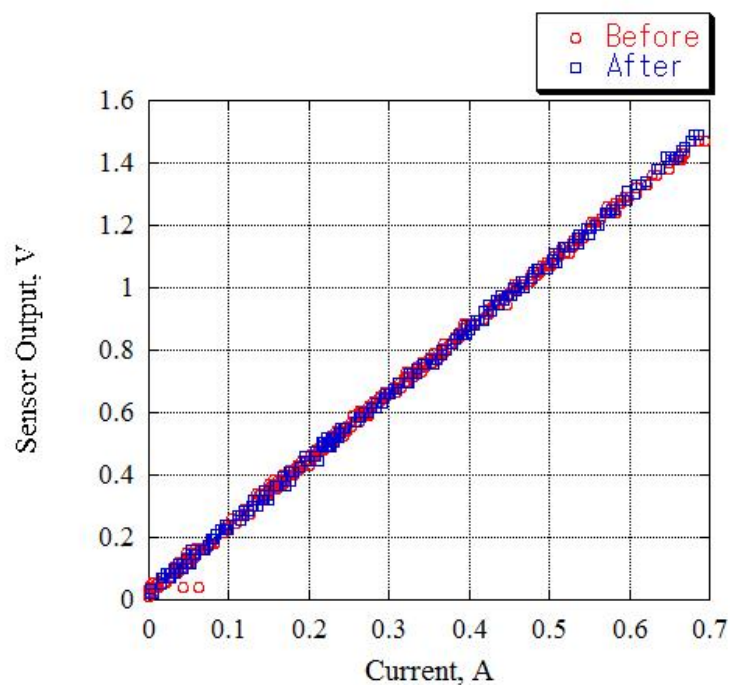


図5.3.4-4 3.3VDC/DCコンバータ出力電流センサ出力  
 Fig 5.3.4-4 Comparison of 3.3V DCDC converter current sensor

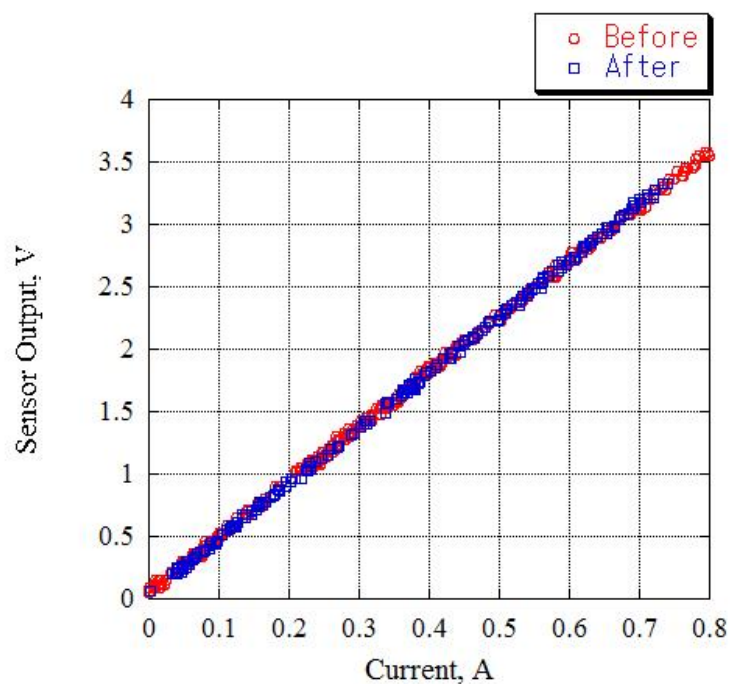


図5.3.4-5 5VDC/DCコンバータ出力電流センサ出力  
 Fig 5.3.4-5 Comparison of 5V DCDC converter current sensor

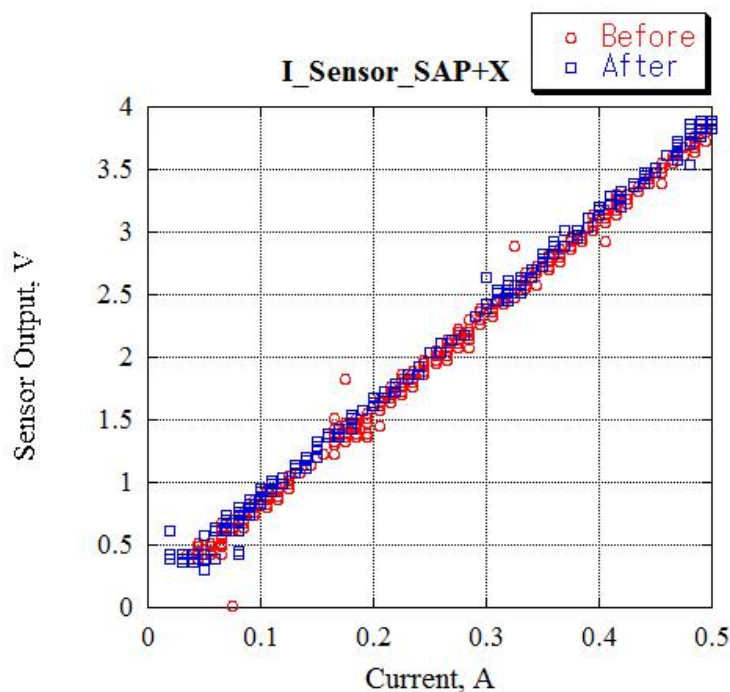


図5.3.4-6 +X面太陽電池電流センサ出力  
 Fig 5.3.4-6 SC current sensor output at X panel

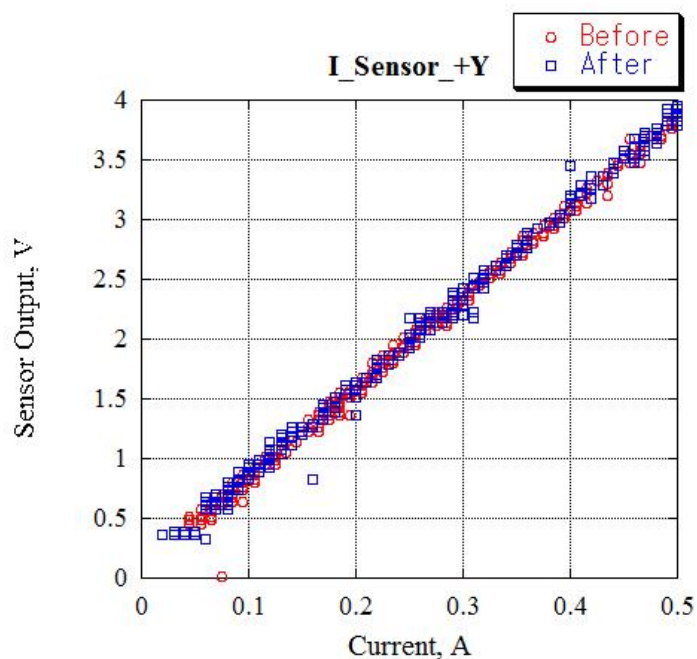


図5.3.4-7 +Y面太陽電池電流センサ出力  
Fig 5.3.4-7 SC current sensor output at Y panel

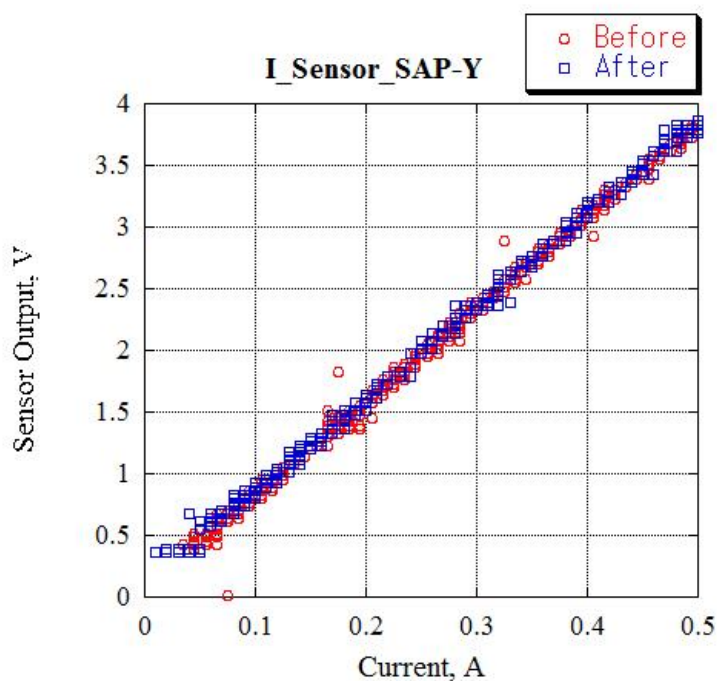


図5.3.4-8 -Y面太陽電池電流センサ出力  
Fig 5.3.4-8 SC current sensor output at -Y panel

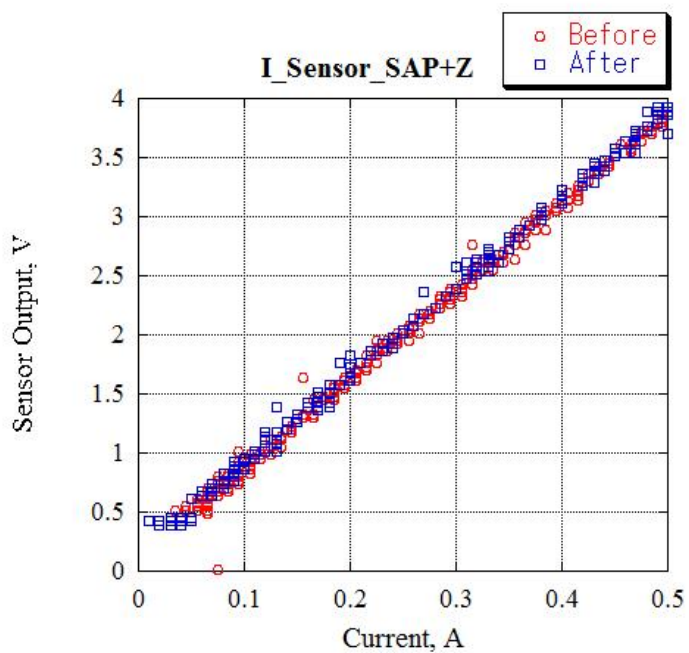


図5.3.4-9 +Z面太陽電池電流センサ出力  
Fig 5.3.4-9 SC current sensor output at Z panel

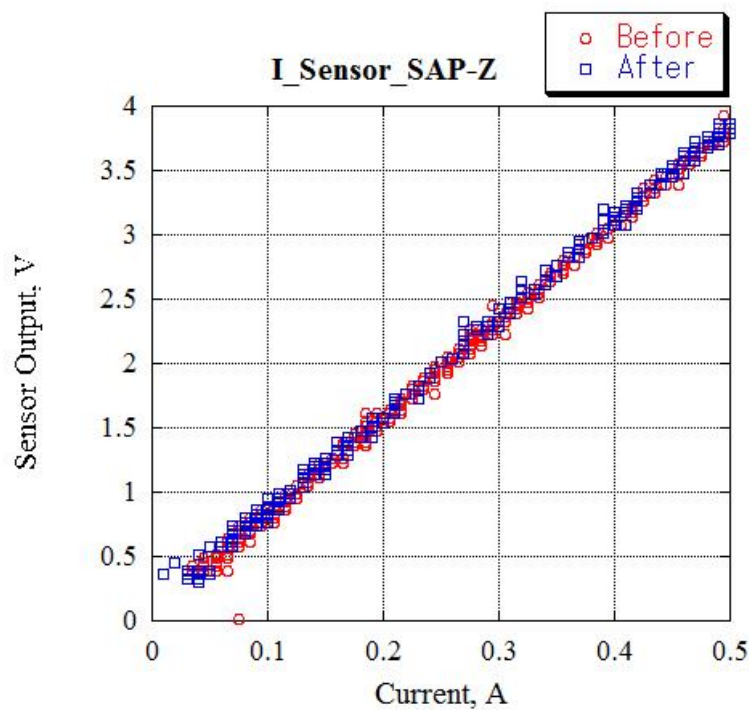


図5.3.4-10 -Z面太陽電池電流センサ出力  
Fig 5.3.4-10 SC current sensor output at -Z panel

(e) 過電流防止回路の性能

合計3つある過電流防止回路は試験前後共に正常動作することを確認した。試験前後の遮断電流閾値をまとめた表を以下に示す。表より遮断電流閾値に変化がないことがわかる。

表5.3.4-6 過電流防止回路試験結果

Table 5.3.4-6 Breaker circuit test result

電力ライン名称	遮断電流閾値 [A]	
	試験前	試験後
PS-3.3	0.699	0.686
PS-5-O	0.992	0.972
PS-5-S	0.992	0.960

以下に過電流防止回路動作時の波形を示す。以下の波形を見ても、正常に動作していることがわかる。

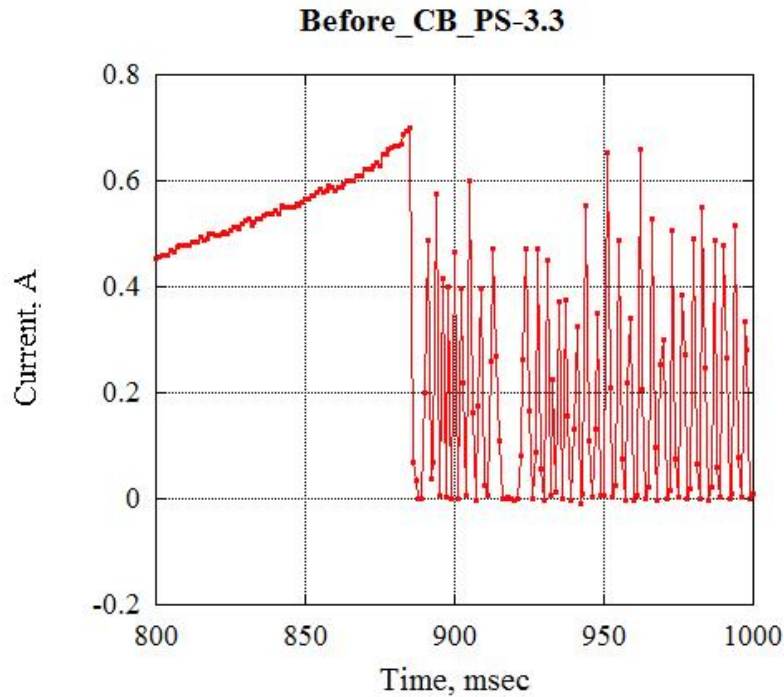


図5.3.4-11 試験前PS-3.3過電流防止回路動作

Fig 5.3.4-11 PS-3.3 circuit breaker operation before the test

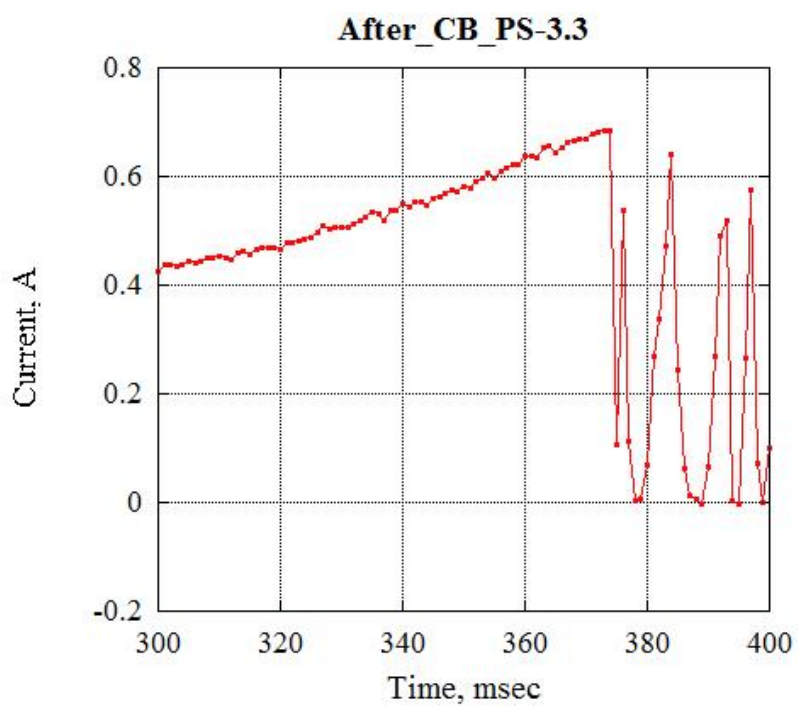


図5.3.4-12 試験後PS-3.3過電流防止回路動作  
 Fig 5.3.4-12 PS-3.3 circuit breaker operation after the test



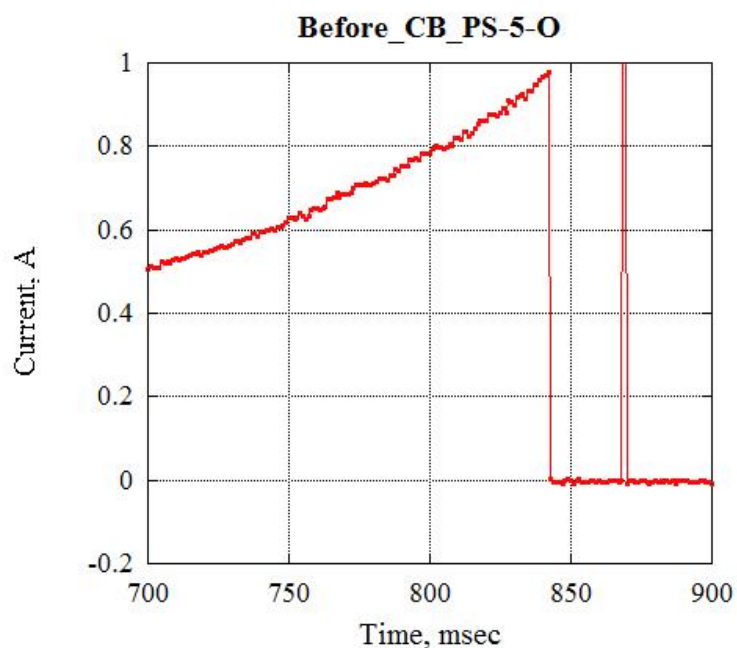


図5.3.4-13 試験前PS-5-O過電流防止回路動作  
Fig 5.3.4-13 PS-5-O circuit breaker operation before the test

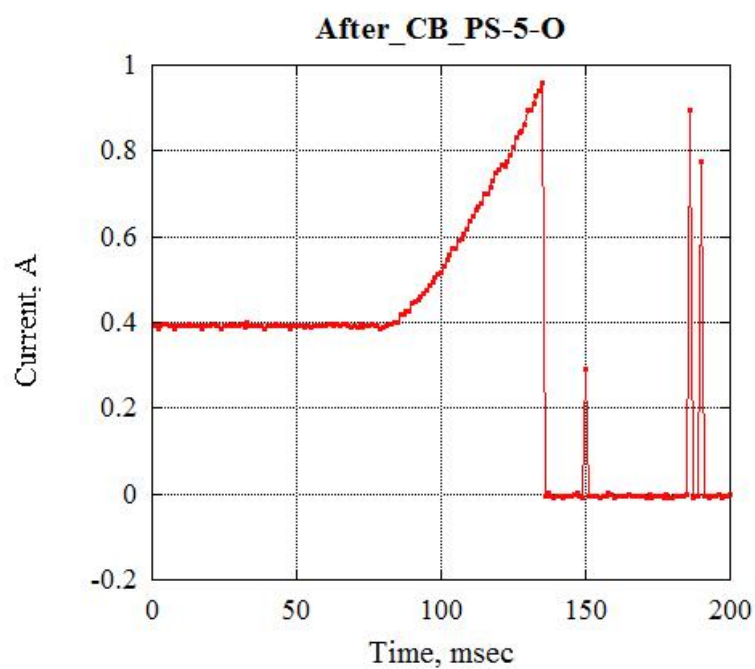


図5.3.4-14 試験後PS-5-O過電流防止回路動作  
Fig 5.3.4-14 PS-5-O circuit breaker operation after the test

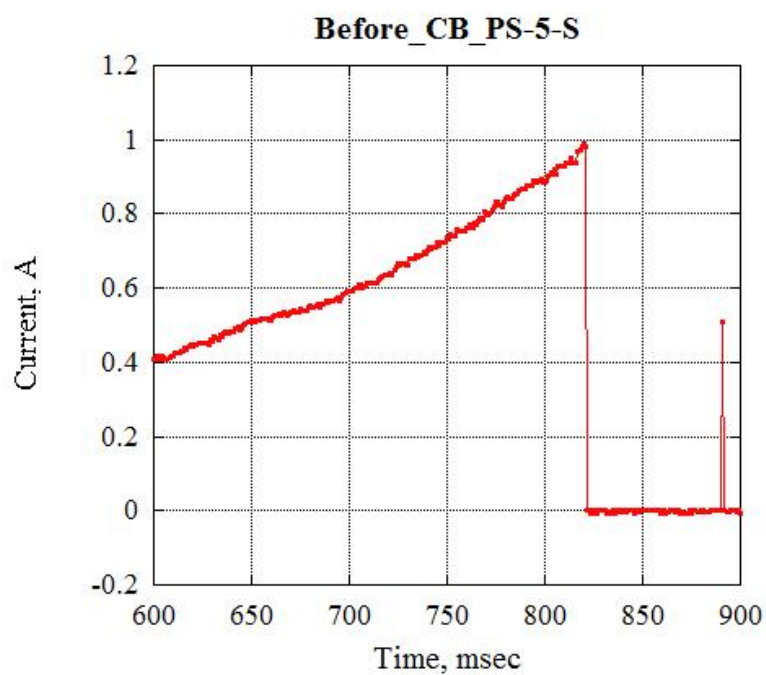


圖5.3.4-15 試驗前PS-5-S過電流防止回路動作  
Fig5.3.4-15 PS-5-S circuit breaker operation before the test

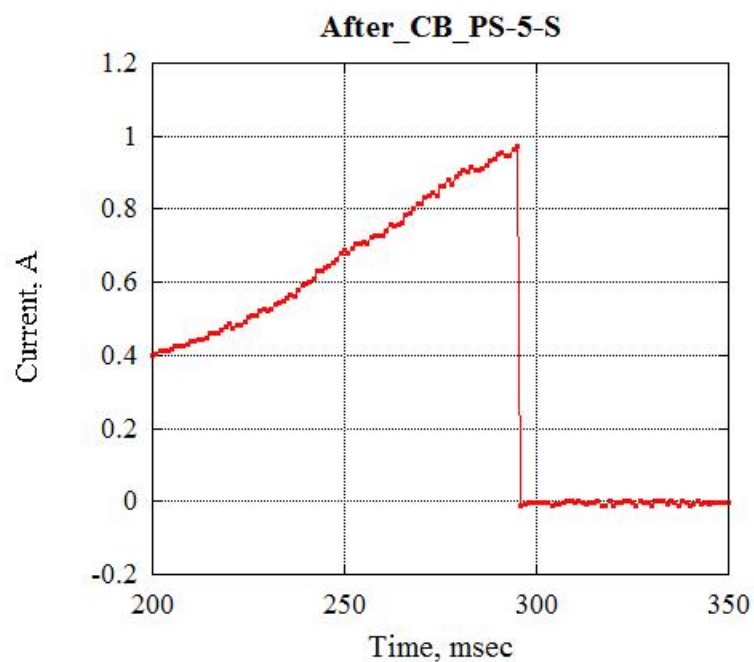


圖5.3.4-16 試驗後PS-5-S過電流防止回路動作  
Fig 5.3.4-16 PS-5-O circuit breaker operation after the test

## (f) リファレンスICの性能

試験前後共に2.082Vで電圧の変動はなく、正常に動作している。

## (g) DC/DCコンバータ電圧

DC/DCコンバータ出力電圧の試験前後の比較を行った。試験前後で出力電圧の大きな変動はなく、正常に動作していることがわかる。

表5.3.4-6 DC/DCコンバータ電圧測定結果

Table 5.3.4-6 DC/DC converter voltage measurement result

	試験前 出力電圧	試験後 出力電圧
3.3V DC/DC	3.27	3.28
5V DC/DC	4.98	5.02

## (h) バッテリの短絡

試験前後共にバッテリーと衛星GNDの短絡はなかった。

## (i) 太陽電池電力ラインの短絡

試験前後共に太陽電池電力ラインの衛星GNDとの短絡はなかった。

上記すべての電源基板の電気性能は正常に動作することを確認でき、QT 振動・QT 衝撃環境に耐えられることが検証できた。



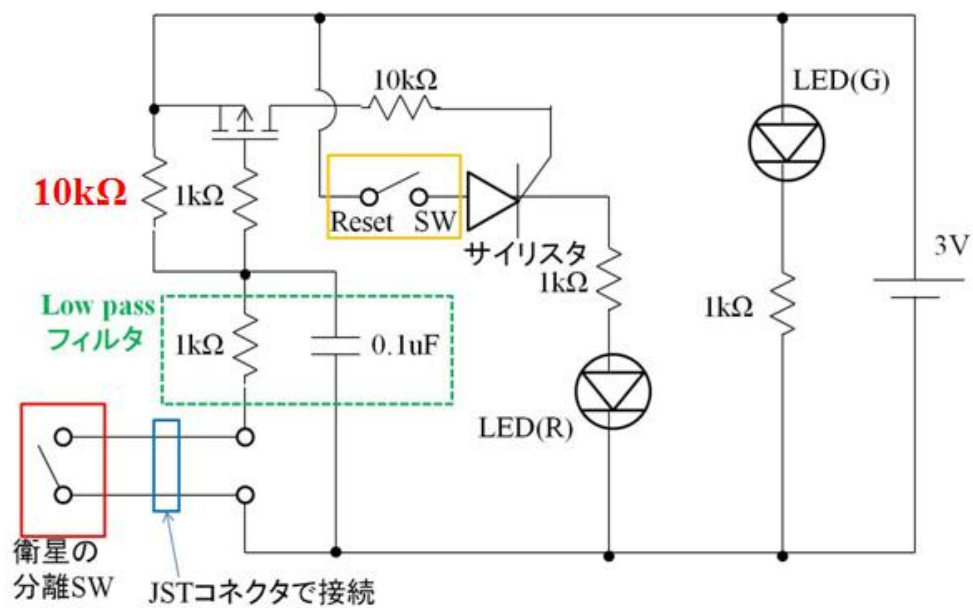


図 5.3.5-1 チャタリング検出回路

Fig 5.3.5-1 Chattering detection circuit

表 3.5.3-1 試験手順と結果  
Table 3.5.3-1 Test process and result

加振方向	作業番号	試験	チャタリング有・無
X 軸加振	2-1	X 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-2	X 軸正弦波 AT	無
	2-3	X 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-4	X 軸準静的荷重 AT	無
	2-5	X 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-6	X 軸ランダム AT	無
	2-7	X 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
Y 軸加振	2-8	Y 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-9	Y 軸正弦波 AT	無
	2-10	Y 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-11	Y 軸準静的荷重 AT	無
	2-12	Y 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-13	Y 軸ランダム AT	無
	2-14	Y 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
Z 軸加振	2-15	Z 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-16	Z 軸正弦波 AT	無
	2-17	Z 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-18	Z 軸準静的荷重 AT	無
	2-19	Z 軸モーダル、異常音、外観チェック	無
	2-20	Z 軸ランダム AT	無
	2-21	Z 軸モーダル、異常音、外観チェック	無

## 2. システム検査結果

### ◆ バッテリー絶縁チェック

#### [検査手順]

- ① PBSW3 と GND、PB-と GND の絶縁をテスターで確認する

**[評価]**

- PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上である。

振動試験前

確認事項	抵抗値 (PBSW3 と GND)	抵抗値 (PB-と GND)
PBSW3 と GND、PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上であることを確認した	フライトピン挿入しているため導通	Over Lange

振動試験後

確認事項	抵抗値 (PBSW3 と GND)	抵抗値 (PB-と GND)
PBSW3 と GND、PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上であることを確認した	フライトピン挿入しているため導通	Over Lange

衝撃試験後

確認事項	抵抗値 (PBSW3 と GND)	抵抗値 (PB-と GND)
PBSW3 と GND、PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上であることを確認した	フライトピン挿入しているため導通	Over Lange

◆ インヒビット確認

**[検査手順]**

- ① インヒビットチェック用回路を用いて、外部コネクタのインヒビットチェック端子電圧を確認する。

**[評価]**

- ◆ インヒビット確認

分離検知スイッチ 1 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 A 端子と検出器+端子、B 端子と-端子をケーブルで接続し検出器の 1kΩ 抵抗の両端電圧をテスターで計測する。計測電圧値が 150mV 以下

であればインヒビットが健全であると判断する。(MOSFET のドレイン遮断電流が最大-10uA であるため)

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
結果	23.6mV	20.5 mV	19.7mV
検証	○	○	○

#### 分離検知スイッチ 2 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 B 端子と検出器+端子、C 端子と-端子をケーブルで接続し検出器の 1kΩ 抵抗の両端電圧をテスターで計測する。計測電圧値が 100mV 以下であればインヒビットが健全であると判断する。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
結果	23.8mV	20.5 mV	19.8mV
検証	○	○	○

#### 分離検知スイッチ 3 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 D 端子と E 端子の両端をテスターで導通チェックを行う。導通していなければ健全であると判断する。(PFM での検査ではスイッチ 3 に MOSFET を用いているため上記のスイッチ 1、2 と同様の方法で検査を行う)

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
結果	Over Lange	Over Lange	Over Lange
検証	○	○	○



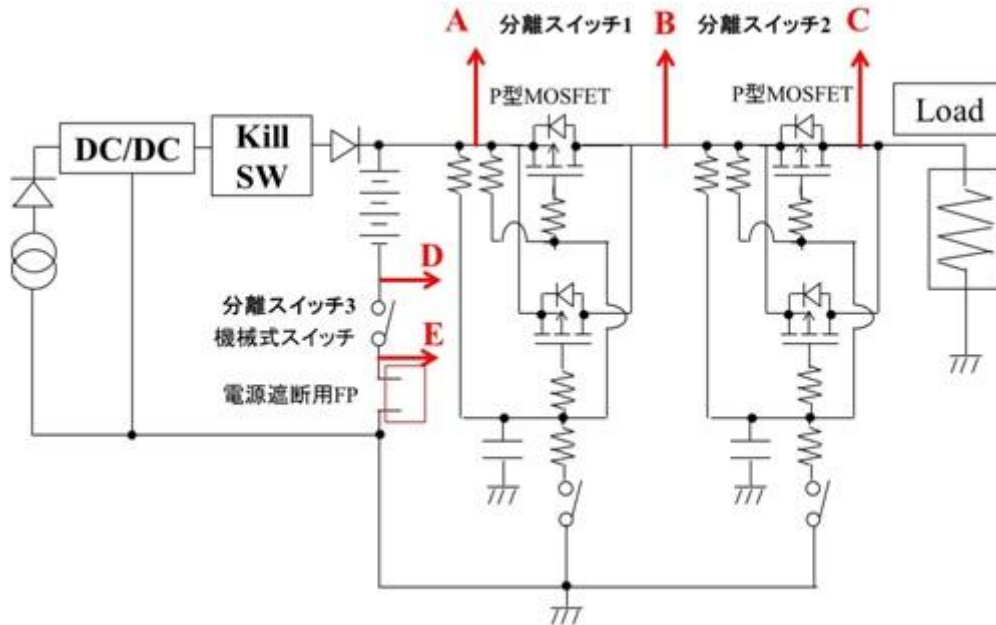


図 5.3.5-2 インヒビット確認回路接続先  
Fig 5.3.5-2 Destination of inhibit check circuit

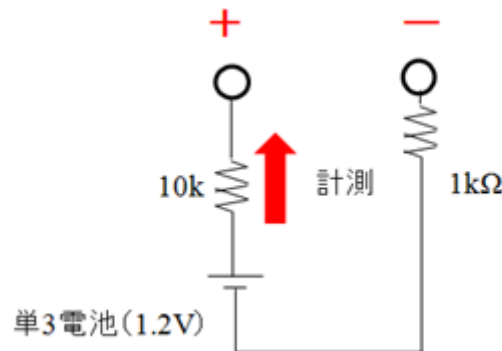


図 5.3.5-3 インヒビット確認回路図  
Fig 5.3.5-3 Inhibit check circuit

◆ 外部電源動作・キルスイッチ初期状態確認

[検査手順]

- ① OBC 配線を行い、PC でモニタリングできる状態にする。
- ② 直流電源の設定を電圧 3.8V、電流 1.8A にする。
- ③ 直流電源を接続し、出力を ON にする。
- ④ OBC が正常にモニタリングできていることを確認する。
- ⑤ 起動時のキルスイッチ状態を確認する。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
キルスイッチ 1	OFF	OFF	OFF
キルスイッチ 2	OFF	OFF	OFF

※キルスイッチ ON になっていた場合、衛星起動時に OFF に戻ることを確認する。

**[評価]**

- 外部電源で衛星を起動することができる。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	○	○	○

- キルスイッチが ON していた場合、OFF 状態に戻ることができる。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	—	—	—

- ◆ キルスイッチ動作・太陽電池電圧・電流センサ動作確認・DC/DC コンバータ電流センサ動作確認

**[検査手順]**

- ① OBC をモニタリングできる状態にし、キルスイッチが OFF であることを確認する。
- ② アップリンクコマンドによりキルスイッチを ON にする。
- ③ この状態（キルスイッチ ON、外部電源駆動）で、ADC1 と ADC2 の値を全て記録する。
- ④ バス系太陽電池+X 面にハロゲンランプ光を照射したときの ADC1 と ADC2 の値を全て記録する。
- ⑤ +Y、-Y、+Z、-Z 面について手順④を行う。
- ⑥ アップリンクコマンドによりキルスイッチを OFF にする。

**[評価]**

以下に取得したデータを示す。キルスイッチを ON 状態でハロゲンランプ光を照射しているため、発電した太陽電池は ADC 値 3000 程度の電圧、200~400 の値を出力していれば、キルスイッチの電力遮断能力の健全性、センサ健全性、太陽電池健全性が確認できる。太陽電池電圧センサ出力をみると、光を照射した面の ADC 値が全て 3000 以上であり、太陽電池・電圧センサ・キルスイッチが正常に動作していることが分かる。また、太陽電池電流センサも光を照射した面が 300 程度の ADC となり、光を照

射していない面は 100 程度であることから、太陽電池・電流センサ・キルスイッチが正常に動作していることがわかる。DC/DC コンバータ出力電流センサ、バッテリー電流センサ、基準電圧の ADC はほぼ一定であり、また、出力値も適切な ADC 値であった。

振動試験前

			ハロゲンランプ照射面					
			なし	+X 面	+Y 面	-Y 面	+Z 面	-Z 面
A D C 値	太陽電池電圧	+X 面	518	3293	1262	1235	1238	1240
		+Y 面	511	2012	3396	1538	1966	1868
		-Y 面	510	2021	1844	3321	2088	2070
		+Z 面	514	2064	1602	1617	3339	1432
		-Z 面	511	1526	1651	1598	1439	3409
	太陽電池電流	+X 面	602	375	121	116	117	121
		+Y 面	628	113	356	113	113	108
		-Y 面	593	116	115	359	117	115
		+Z 面	624	67	69	65	257	68
		-Z 面	582	134	131	132	134	381
	DC/DC 電流	3.3V	187	190	187	182	185	184
		5V	120	117	117	121	119	120
	バッテリー電流		2166	2153	2153	2166	2163	2163
	リファレンス電圧		3344	3345	3343	3343	3344	3344

振動試験後

			ハロゲンランプ照射面					
			なし	+X面	+Y面	-Y面	+Z面	-Z面
A D C 値	太陽電池電圧	+X面	551	3271	1969	1942	2012	1998
		+Y面	545	1760	3346	1575	2096	2000
		-Y面	545	2140	1030	3300	2175	2175
		+Z面	546	1764	1702	1577	3293	1437
		-Z面	549	1593	1821	2061	1716	3374
	太陽電池電流	+X面	684	366	117	120	119	119
		+Y面	523	112	360	113	111	112
		-Y面	504	116	113	359	115	116
		+Z面	497	65	64	67	249	64
		-Z面	492	132	130	134	135	385
	DC/DC電流	3.3V	167	182	182	184	184	182
		5V	143	145	145	144	144	146
	バッテリー電流		2132	2145	2140	2148	2134	2147
	リファレンス電圧		3345	3345	3345	3344	3346	3345

衝撃試験後

			ハロゲンランプ照射面					
			なし	+X面	+Y面	-Y面	+Z面	-Z面
A D C 値	太陽電池電圧	+X面	588	3239	1914	1930	1987	1083
		+Y面	584	1746	3338	1573	1930	1871
		-Y面	580	2063	1864	3292	2153	2351
		+Z面	580	2084	1607	1590	3283	1393
		-Z面	584	1650	1956	1899	1649	3359
	太陽電池電流	+X面	450	362	121	122	121	117
		+Y面	339	110	366	115	113	112
		-Y面	336	116	114	369	116	116
		+Z面	294	67	65	65	245	65
		-Z面	333	134	135	134	132	384
	DC/DC電流	3.3V	185	185	185	184	183	185
		5V	121	121	120	120	119	121
	バッテリー電流		2164	2167	2168	2169	2170	2170
	リファレンス電圧		3344	3344	3343	3343	3343	3343

- キルスイッチをアップリンクコマンドにより ON・OFF できる。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	○	○	○

- 太陽電池電圧・電流センサ、バッテリー電流センサ、DC/DC 電流センサ
  - A：光照射面の太陽電池電圧センサの ADC 値：3000~3500
  - B：光照射面以外の全ての太陽電池電圧センサの ADC 値が A の ADC 値以下である。
  - C：光照射面の太陽電池電流センサの ADC 値：200~400
  - D：光照射面以外の全ての太陽電池電流センサの ADC 値が C の ADC 値以下である。
  - E：光を照射していない時の太陽電池電圧センサの ADC 値：1000 以下
  - F：手順③④⑤で取得した全てのバッテリー電流センサ ADC 値：2000~2200
  - G：3.3V・5VDC/DC コンバータ出力電流センサ ADC 値：100~200

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	○	○	○

◆ DC/DC コンバータ電圧・バッテリー電圧（電源）

[検査手順]

- ① 外部コネクタに出力されている 3.3V と 5V、バッテリー電圧をテスターで計測する。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
3.3VDC/DC 出力電圧	3.265	3.264	3.264
5VDC/DC 出力電圧	5.01	5.00	5.01
バッテリー電圧	4.02	4.02	4.03

[評価]

- 3.3V 出力電圧が 3.2~3.3V、5V 出力電圧が 4.95~5.05V の電圧値である。
- バッテリー電圧が 3.9~4.1V の電圧値である。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	○	○	○

◆ バッテリ補充電チェック・外部電源動作チェック（電源）

[検査手順]

- ① 直流電源出力を 0.1A, 5V に設定し出力状態にする。
- ② 外部コネクタのバッテリ充電端子に直流電源を接続する。
- ③ 0.1A の CC モードで直流電源が動作していることを確認する。
- ④ 充電電流を徐々に上げ、0.5A にする。
- ⑤ このとき直流電源電圧が徐々に上昇することを確認する。
- ⑥ 直流電源を OFF にし、配線を取り外す。
- ⑦ 直流電源の設定を 3.8V の定電圧モードにする。
- ⑧ 直流電源を外部コネクタの外部電源動作ラインに接続する。
- ⑨ 直流電源を ON し、OBC 出力が外部 PC に表示されることを確認する。

[評価]

- ◆ 補充電動作チェック
  - フライトピンなし、分離検知スイッチすべて OFF 状態でバッテリに充電できる。直流電源電圧の上昇を確認できる。

	振動試験前		振動試験後		衝撃試験後	
	直流電源電圧 [V]	充電電流 [A]	直流電源電圧 [V]	充電電流 [A]	直流電源電圧 [V]	充電電流 [A]
接続時	4.08	0.1	4.09	0.1	4.10	0.1
充電開始時	4.36	0.5	4.36	0.5	4.37	0.5
充電終了時(充電時間: 約 3 分)	4.39	0.5	4.38	0.5	4.39	0.5
検証	○		○		○	

- ◆ 外部電源動作チェック
  - 補充電後に外部電源により衛星を動作させることができる。

	振動試験前	振動試験後	衝撃試験後
検証	○	○	○

◆ 電力計測（電源）

[検査手順]

- ① 各動作モードにおいて、外部電源の電圧値と電流値を以下の表に記録する。
- ② 電圧×電流により消費電力を計算し、以下の表に記録する。

動作モード	振動試験前			振動試験後			衝撃試験後		
	電圧 [V]	電流 [A]	電力 [W]	電圧 [V]	電流 [A]	電力 [W]	電圧 [V]	電流 [A]	電力 [W]
通常運用	3.8	0.21	0.80	3.8	0.20	0.76	3.8	0.20	0.76
FM ダウンリンク	3.8	1.46	5.55	3.8	1.43	5.43	3.8	1.36	5.17
300V	3.8	0.41	1.56	3.8	0.38	1.44	3.8	0.38	1.44
ELF	3.8	0.32	1.22	3.8	0.31	1.18	3.8	0.30	1.14
Trek	3.8	0.57	2.17	3.8	0.56	2.13	3.8	0.55	2.09
ELF+Trek	3.8	0.67	2.55	3.8	0.67	2.55	3.8	0.66	2.51
Scamp	3.8	0.31	1.18	3.8	0.31	1.18	3.8	0.31	1.18

[評価]

- ◆ 電力計測
- 振動試験前の消費電力と比較し、振動試験後、衝撃試験後の消費電力の変動が 10% 以下である。

検証	○
----	---

## 5.4 熱真空試験

本試験の目的は熱真空環境に衛星が耐えられることを検証することである。熱真空試験は熱解析から得られた軌道上の衛星の熱環境を真空チャンバー内で模擬する。電源系では熱真空環境下における電源システムの機能の健全性を確認する。熱真空試験環境について以下に述べる。

### 5.4.1 熱真空試験環境

熱真空環境試験システムを図 5.4.1-1 に示す。直径 1.0×奥行き 1.2 [m]の円筒形の真空チャンバー内にシュラウドを設置し、シュラウド内に衛星を設置する。チャンバーの排気には、ULVAC 社製のロータリーポンプ (D-950DK)、ターボ分子ポンプ (UTM300M) が装備されており、その最大到達真空度は $1 \times 10^{-3}$  Pa 程度である。低温環境にするために、シュラウド配管には液体窒素をチャンバー外部から導入している。高温環境はシュラウド又は衛星パネルに取り付けたヒーターにより加熱する。ヒーターはチャンバー外部の直流電源で電力を調整する。衛星各部の温度計測には熱電対を使用し、衛星の各基板やパネル、バッテリーなどの温度を計測する。試験のセッティング写真を図 5.4.1-2 に示す。

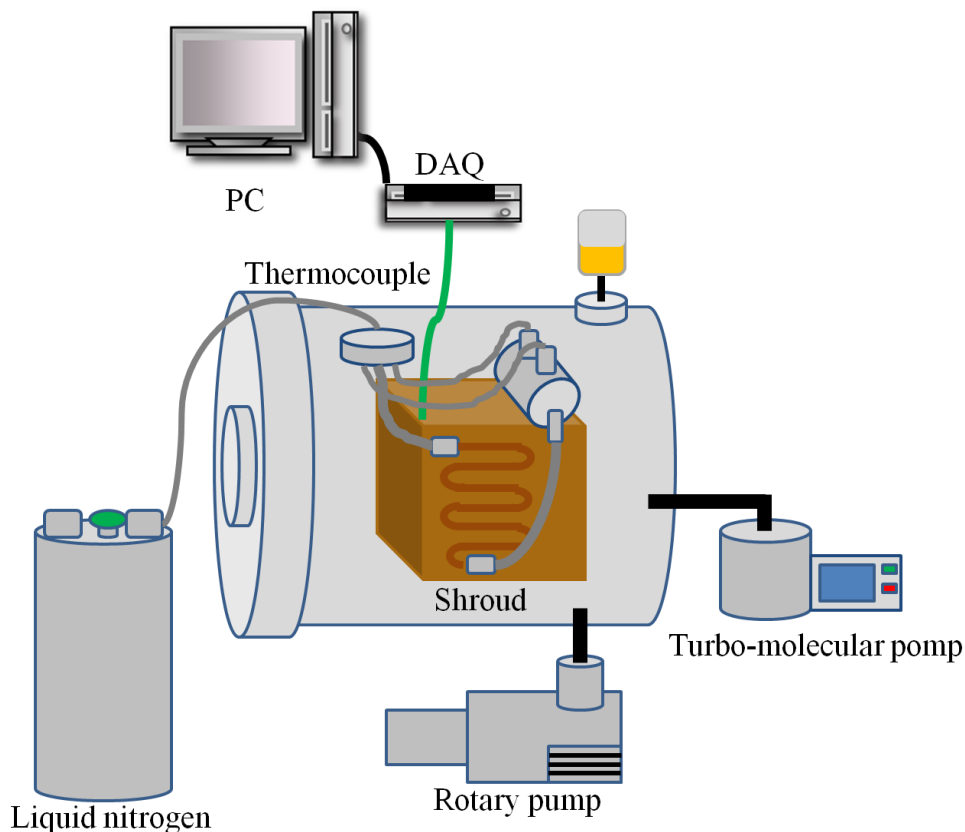


図 5.4.1-1 熱真空試験システム図

Fig 5.4.1-1 System diagram of thermal vacuum test



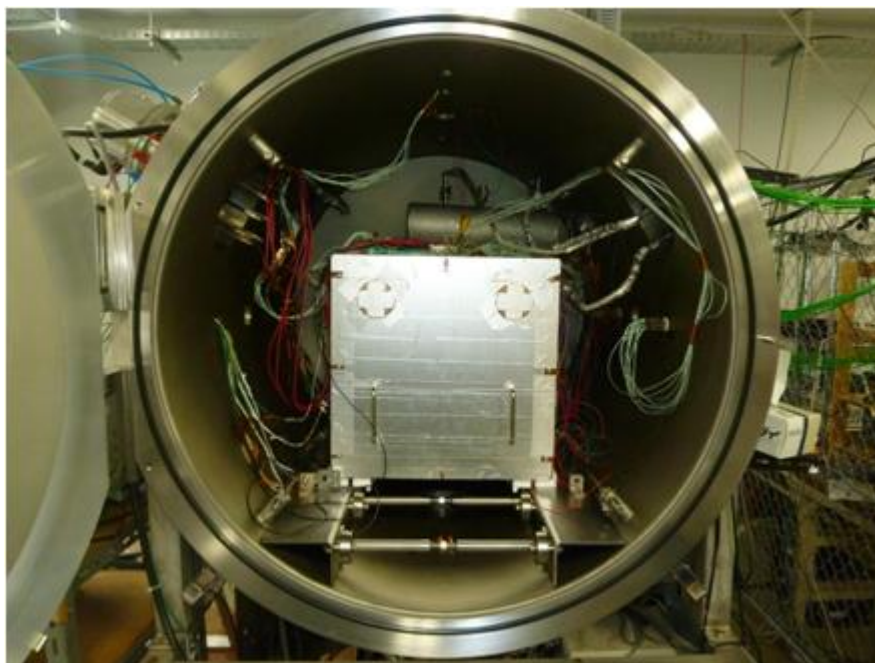


図 5.4.1-2 試験セッティング写真 (PFM 熱真空)

Fig 5.4.1-2 Picture of setting (PFM thermal vacuum test)

図 5.4.1-3 に基本的な試験の流れを示す。衛星は低温環境で起動し、その後熱サイクルを行う。各基板やパネルが目標温度に達してから 6 時間のさらしを高温側・低温側共に行っている。大気常温、真空常温、真空低温、真空高温環境でそれぞれ電気性能試験を行い、性能の評価を行う。また、昇温又は降温時には簡易検査を行い、特定の機能の温度特性などを測定する。

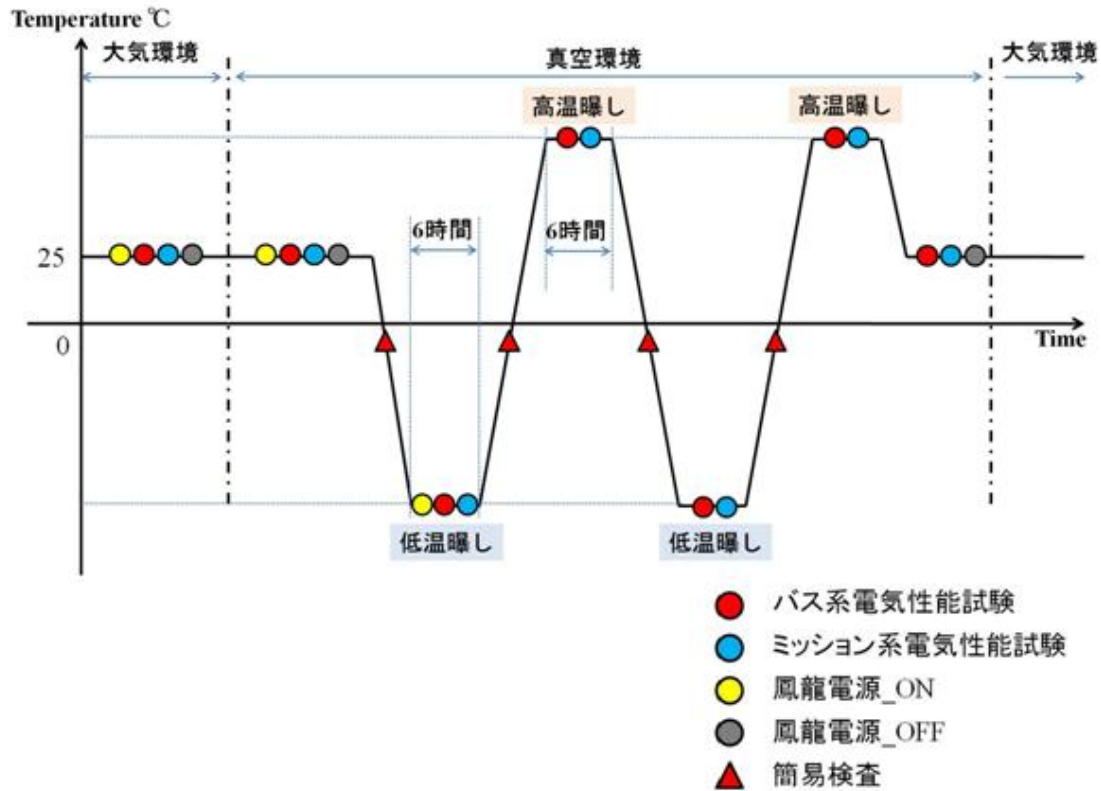


図 5.4.1-3 基本的な試験の流れ

Fig 5.4.1-3 Flow of test

### 5.4.2 EM 熱真空試験

EM 熱真空試験の試験日と内容、供試体、試験条件を以下に示す。温度環境は AT に約  $15^{\circ}\text{C}$  のマージンを持たせた QT レベルである。試験は大気常温、真空常温、真空低温、真空高温の各環境で電気性能試験を行った。衛星へのコマンド・状態監視は PC を衛星 OBC に接続し行った。

電源システムからチャンバー外部に出したラインを図 5.4.2-2 に示す。太陽電池電力は SAS で模擬し、 $0.1\Omega$  抵抗を SAS 出力に挿入し、出力電圧・電流を DAQ で計測した。また、バッテリー電圧・電流も同様に測定した。この計測データから各モードの消費電力を計測した。分離検知スイッチは機械式スイッチを取り外し、その両端端子をチャンバー外部で短絡・開放することで操作した。キルスイッチはテレメトリを出し、テスターで状態を計測できるようにした。キルスイッチの制御は OBC が行い、キルスイッチ ON 状態のとき SAS からの電力を遮断できることを確認する。電力ラインは PS-3.3 と PS-5-S を出し、それぞれの DC/DC コンバータ電圧をモニタした。また、電力ラインに可変抵抗と電流検出用抵抗 ( $1\Omega$ ) を接続し、負荷電流を増加させることで過電流防止回路の動作を確認した。

供試体：EM 電源基板 ver2.0、EM バッテリ  
 日時：平成23年4月8日（金）～4月11日（月）  
 場所：九州工業大学 宇宙環境技術ラボラトリ

表 5.4.2-1 試験条件  
 Table 5.4.2.1 Test condition

真空チャンバー		LEO
真空度		10 <sup>-3</sup> [Pa]
熱サイクル数		1
低温環境温度	電源基板	-15 [°C]
	バッテリー	-13 [°C]
高温環境温度	電源基板	51 [°C]
	バッテリー	48 [°C]

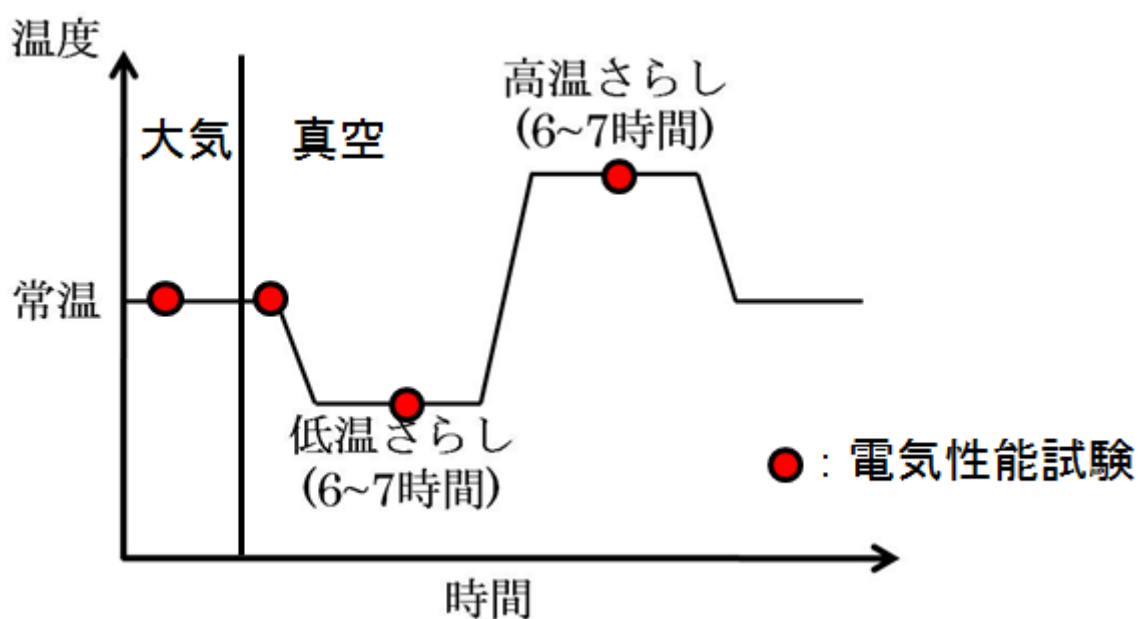


図 5.4.2-1 試験の流れ  
 Fig 5.4.2-1 Flow of test

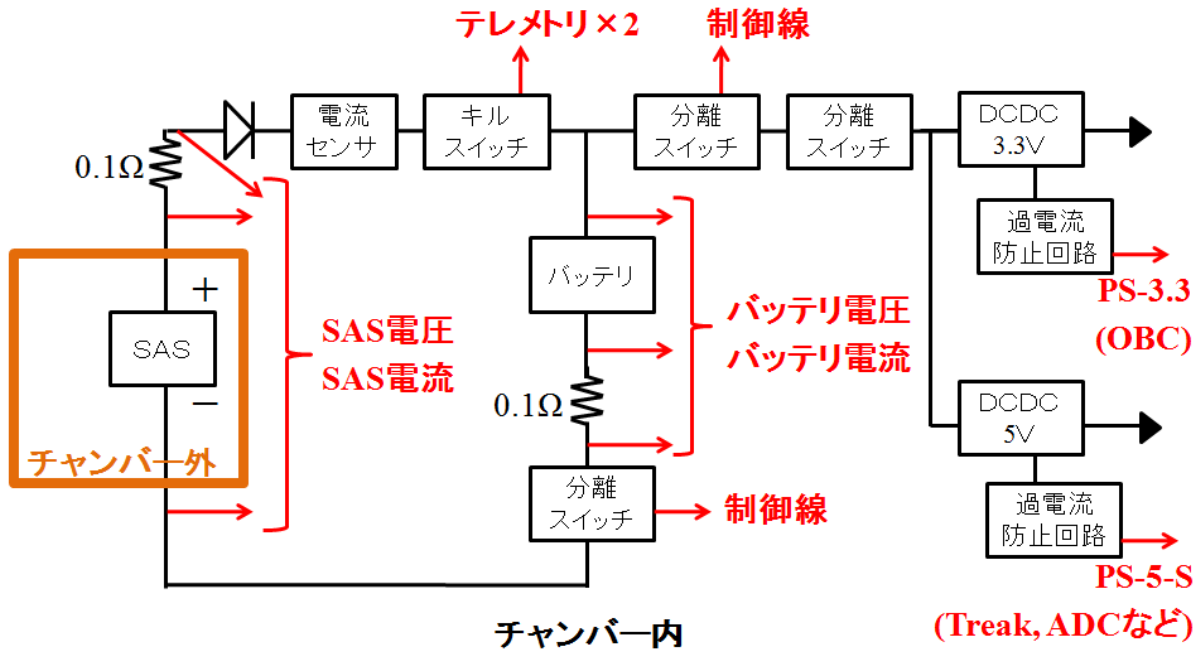


図 5.4.2-2 電源システムのチャンバー外配線

Fig 5.4.2-2 Connected line of power system

試験結果を以下に述べる。電源系の各機能は、熱真空環境において正常に動作することを検証することができた。

(a) 分離検知スイッチ

大気常温、真空常温、真空低温、真空高温の全ケースで下記の分離検知スイッチ動作を確認した。分離検知スイッチは機械スイッチ部分を除いたものであり、ここでは PMOS 部分の動作確認を行った。結果を以下の表に示す。全ての試験ケース(大気常温、真空常温、真空低温、真空高温)において同様の結果となり、分離スイッチ (MOSFET スイッチ) の正常動作が確認できた。

表 5.4.2-2 分離検知スイッチ動作時の電源状態

Table 5.4.2-2 Power state during separation check switch operation

分離スイッチ 1	分離スイッチ 2	電源状態
OFF	OFF	OFF
OFF	ON	OFF
ON	OFF	OFF
ON	ON	ON

(b) キルスイッチ

キルスイッチは OBC から ON/OFF 操作し、テレメトリを確認することで動作を確認した。また、このとき SAS から 0.2A の電流を衛星に入力し、キルスイッチ発動時にその電流が遮断できるか確認した。テレメトリは、OBC のモニタと直接テレメトリラインの電圧を計測の 2 通りで確認した。その結果をまとめた表を以下に示す。全ての試験ケース（大気常温、真空常温、真空低温、真空高温）において、以下の表と同じ結果となり、キルスイッチは正常に動作することを確認できた。

表 5.4.2-3 キルスイッチ動作シーケンスとテレメトリ対応結果

Table 5.4.2-3 Kill switch operation sequence and telemetry result

キルスイッチ 1	OBC テレメトリ 1	テレメトリ電圧計測 1	キルスイッチ 2	OBC テレメトリ 2	テレメトリ電圧計測 2	太陽電池電力
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	導通
ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	導通
ON	ON	ON	ON	ON	ON	遮断
OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	導通
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	導通

(c) DC/DC コンバータ

大気常温、真空常温、真空低温、真空高温の全ケースで下記の DCDC コンバータ出力電圧を確認した。計測はテスターと OBC の A/D コンバータの両方で行った。結果を以下の表に示す。全ての試験ケースにおいて両 DC/DC コンバータは安定した電圧で電力を供給できていることが確認できた。

表 5.4.2-4 DCDC コンバータ試験結果

Table 5.4.2-4 DCDC converter test result

	テスター		ADC2 出力		
	3.3V 出力	5V 出力	CH1 (3.3V)	CH2 (4.096V)	CH3 (バッテリー電圧)
大気・常温	3.263V	5.036V	2654	3328	3254
真空・常温	3.263 V	5.037 V	2654	3329	3204
真空・低温	3.258 V	5.018 V	2669	3343	3000
真空・高温	3.266 V	5.051 V	2649	3318	3116

(d) 過電流防止回路

各試験ケースにおける過電流防止回路の発動閾値を以下の表に示す。発動閾値は、温度の影響により若干の変動が見られたものの、許容できる範囲であった。

表 5.4.2-5 過電流防止回路試験結果

Table 5.4.2-5 Circuit breaker test result

	PS-3.3 [A]	PS-5-S [A]
大気・常温	0.78	0.97
真空・常温	0.78	0.97
真空・低温	0.79	0.97
真空・高温	0.77	0.98

(e) 消費電力計測

EM 熱真空試験は各系の進捗状況の違いにより、バス系と 300V ミッションのみ衛星に搭載されている。従って、各試験ケースにおいて通常運用モード、FM ダウンリンク、300V ミッションモードの消費電力を計測した。以下の表に結果を示す。消費電力は高温ケースで若干増加することを確認することができた。

表 5.4.2-6 消費電力計測結果

Table 5.4.2-6 Power consumption measurement result

	通常運用 モード [W]	FM ダウンリンク モード [W]	300V モード [W]
大気・常温	0.458	1.265	1.230
真空・常温	0.451	1.131	1.243
真空・低温	0.498	1.041	1.232
真空・高温	0.504	1.204	1.639

### 5.4.3 PFM 熱真空試験

PFM 熱真空試験の試験日と内容、供試体、試験条件を以下に示す。温度環境は AT に約 15°C のマージンを持たせた QT レベルである。試験は大気常温、真空常温、真空低温、真空高温の各環境で電気性能試験を行った。EM 熱真空環境との違いは、サイクル数を 2 サイクルに増やしたことと、最後の試験シーケンスに真空常温での電気性能試験を追加したことである。また、衛星は低温状態での起動が想定されるため、1 回目の低温環境では衛星の軌道シーケンスを模擬した。図 5.4.3-2 に衛星の試験コンフィギュレーションを示す。衛星へのコマンドは地上局からアップリンクコマンドで行い、OBC の状態は PC でモニタリングした。

供試体：PFM 電源基板、EM バッテリ、PFM 太陽電池

日時：平成23年7月3日（日）～7月6日（水）

場所：九州工業大学 宇宙環境技術ラボラトリ

表 5.4.3-1 試験条件

Table 5.4.3-1 Test condition

真空チャンバー		LEO
真空度		10 <sup>-3</sup> [Pa]
熱サイクル数		2
低温環境温度	電源基板	-15 [°C]
	バッテリー	-10 [°C]
	太陽電池	-32 [°C]
高温環境温度	電源基板	55 [°C]
	バッテリー	53 [°C]
	太陽電池	30 [°C]

表 5.4.3-2 試験手順  
Table 5.4.3-2 Test process

作業 No.	作業	作業内容 No.	作業内容
1	試験準備	1.1	試験環境のセッティング
2	動作確認試験	2.1	鳳龍式号の電源をON
		2.2	大気常温環境：バス系電気性能試験
		2.3	大気常温環境：ミッション系電気性能試験
		2.4	鳳龍式号の電源をOFF
3	真空引き	3.1	真空引き
4	真空環境試験①	4.1	鳳龍式号の電源をON
		4.2	真空常温環境：バス系電気性能試験
		4.3	真空常温環境：ミッション系電気性能試験
		4.4	鳳龍式号の電源をOFF
5	降温	5.1	液体窒素を導入し低温環境を模擬
6	真空低温環境試験①	6.1	鳳龍式号の電源をON
		6.2	真空低温環境：バス系電気性能試験
		6.3	真空低温環境：ミッション系電気性能試験
7	昇温	7.1	ヒーターの電力供給を調整し、高温環境を模擬
8	簡易検査（※3）	8.1	昇温中、10分おきに簡易検査
9	真空高温環境試験①	9.1	真空高温環境：バス系電気性能試験
		9.2	真空高温環境：ミッション系電気性能試験
10	降温	10.1	ヒーターの電力供給を調整
		10.2	液体窒素を導入し低温環境を模擬
11	簡易検査	11.1	降温中、10分おきに簡易検査
12	真空低温環境試験②	12.1	真空低温環境：バス系電気性能試験
		12.2	真空低温環境：ミッション系電気性能試験
13	昇温	13.1	ヒーターの電力供給を調整し、高温環境を模擬
14	簡易検査	14.1	昇温中、10分おきに簡易検査
15	真空高温環境試験②	15.1	真空高温環境：バス系電気性能試験
		15.2	真空高温環境：ミッション系電気性能試験
16	降温	16.1	ヒーターの電力供給を調整
		16.2	液体窒素の導入を止め、シートヒーターで温調
17	真空環境試験②	17.1	真空常温環境：バス系電気性能試験
		17.2	真空常温環境：ミッション系電気性能試験
		17.3	鳳龍式号の電源をOFF
18	大気解放	18.1	大気解放、衛星の取り出し



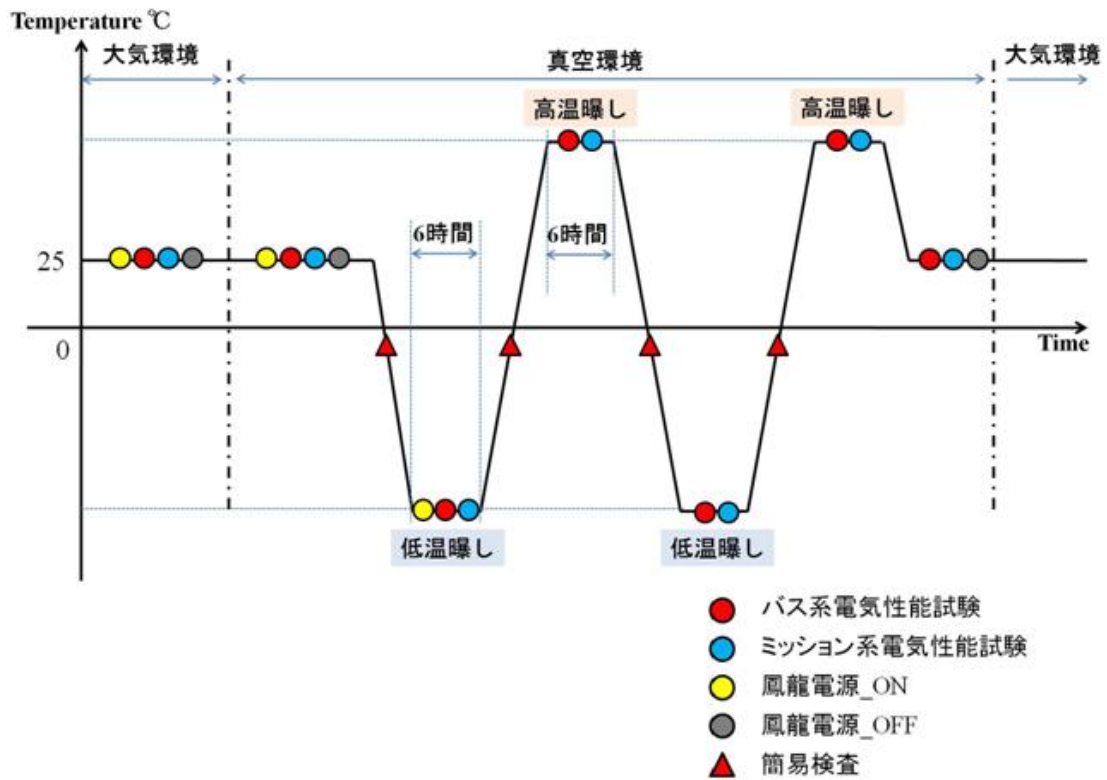


図 5.4.3-1 試験の流れ

Fig 5.4.3-1 Flow of test

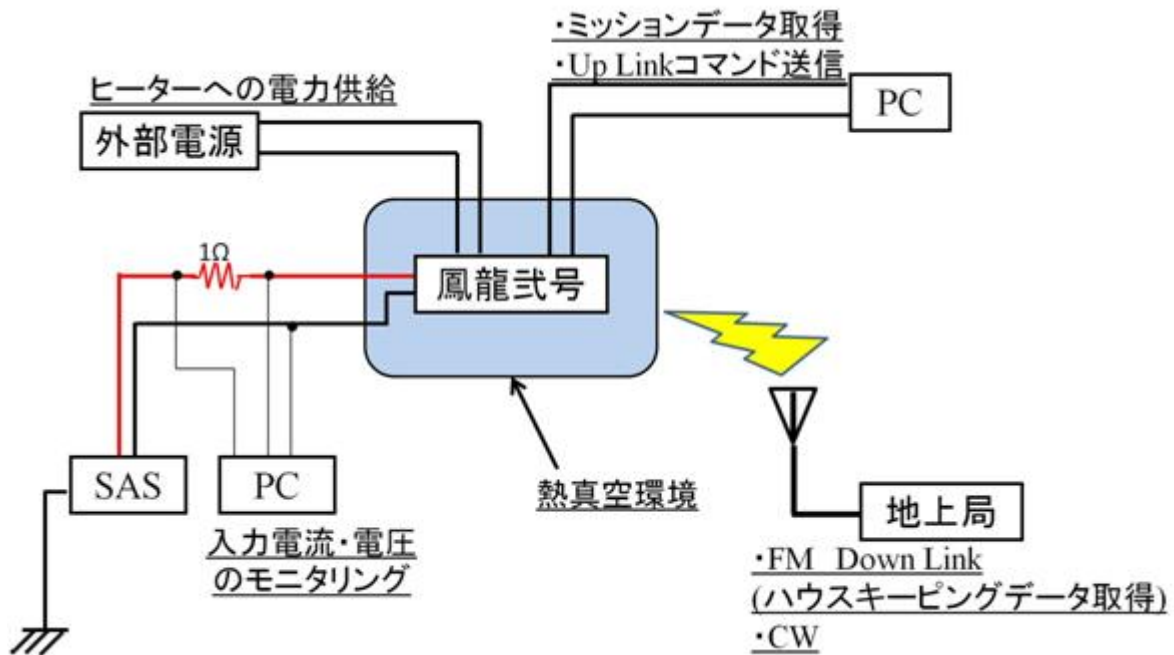


図 5.4.3-2 衛星コンフィギュレーション

Fig 5.4.3-2 Satellite configuration

電源システムからチャンバー外部に出したラインを図 5.4.3-3 に示す。太陽電池電力は SAS で模擬し、 $0.1\Omega$  抵抗を SAS 出力に挿入し、出力電圧・電流を DAQ で計測した。また、バッテリー電圧・電流も同様に測定した。この計測データから各モードの消費電力を計測した。分離検知スイッチは機械式スイッチを取り外し、その両端端子をチャンバー外部で短絡・開放することで操作した。キルスイッチはテレメトリを出し、テスターで状態を計測できるようにした。キルスイッチの制御は OBC が行い、キルスイッチ ON 状態のとき SAS からの電力を遮断できることを確認する。電力ラインは PS-3.3 と PS-5-S を出し、それぞれの DC/DC コンバータ電圧をモニタした。また、電力ラインに可変抵抗と電流検出用抵抗 ( $1\Omega$ ) を接続し、負荷電流を増加させることで過電流防止回路の動作を確認した。

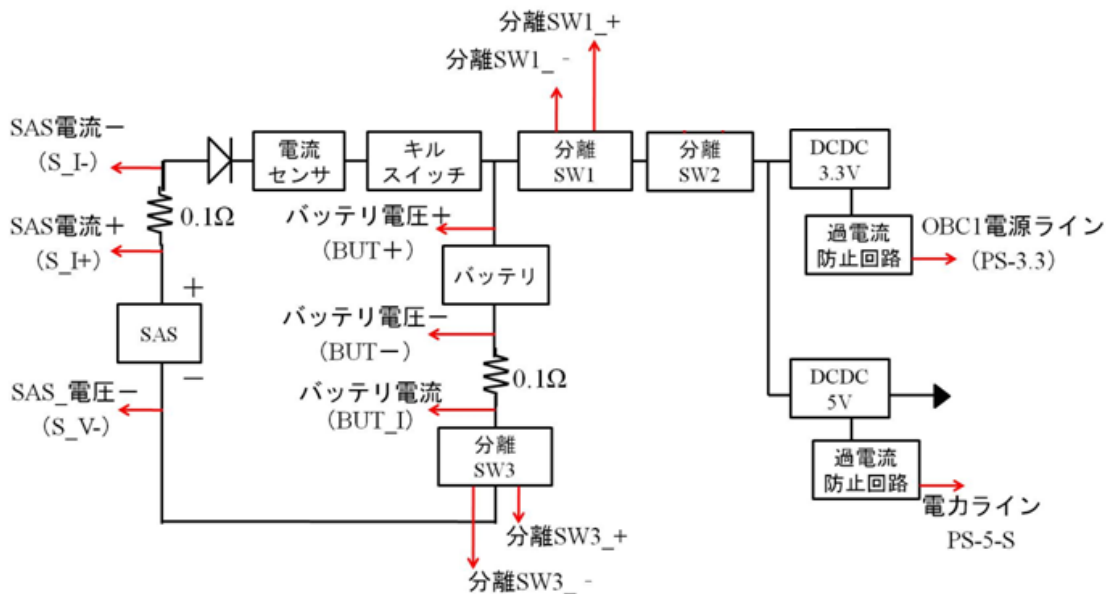


図 5.4.3-3 電源系の外部配線

Fig 5.4.3-3 Line of power system

以下に試験結果を述べる。

(a) 分離検知スイッチ

真空①②、低温①②、高温①②の全ケースで下記の分離検知スイッチ動作を確認した。分離検知スイッチは機械スイッチ部分を除いたものであり、ここでは PMOS 部分の動作確認を行った。

表 5.4.3-3 分離検知スイッチ試験結果

Table 5.4.3-3 Separation check switch test result

分離スイッチ 1	分離スイッチ 3	電源状態
OFF	OFF	OFF
OFF	ON	OFF
ON	OFF	OFF
ON	ON	ON

全試験ケースでの分離スイッチ（MOSFET スイッチ）の正常動作が確認できた。

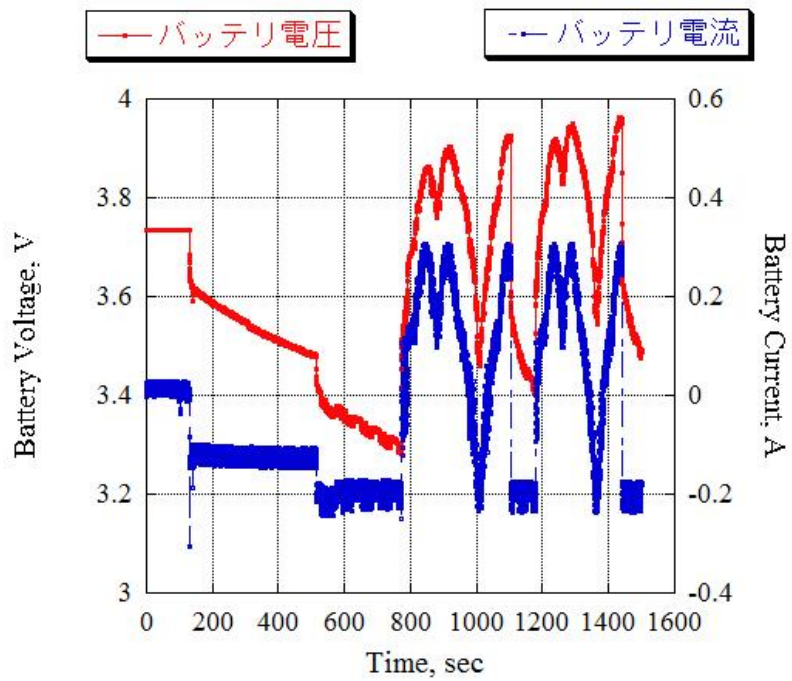
評価項目	判定
全試験ケース（真空常温・低温・高温）で分離スイッチの正常動作（分離検知スイッチが3つとも ON になったときだけ電力を供給する）を確認する。	○

**(b) 低温での衛星起動**

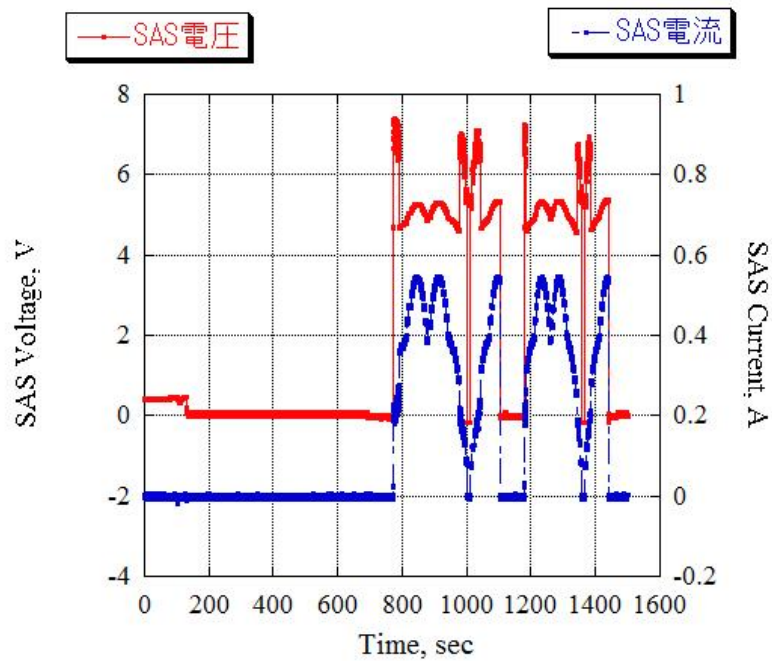
バッテリーが-10℃に冷えた状態から衛星が起動することができるかを確認した。試験は衛星起動、通常運用動作、充電動作のシーケンスで行った。また、試験ケースはバッテリー残量によって以下の2通り行った。

試験ケース①：低温①の時バッテリー電圧 3.6V (-10℃、0.2 A 放電時)

このケースでは、SAS の電力変化時間は短縮している。下図に起動時のバッテリー、SAS の状態をモニタした結果を示す。



(a) バッテリ電圧・電流  
(a) Battery voltage and current



(b) バッテリ電圧・電流  
(b) Battery voltage and current

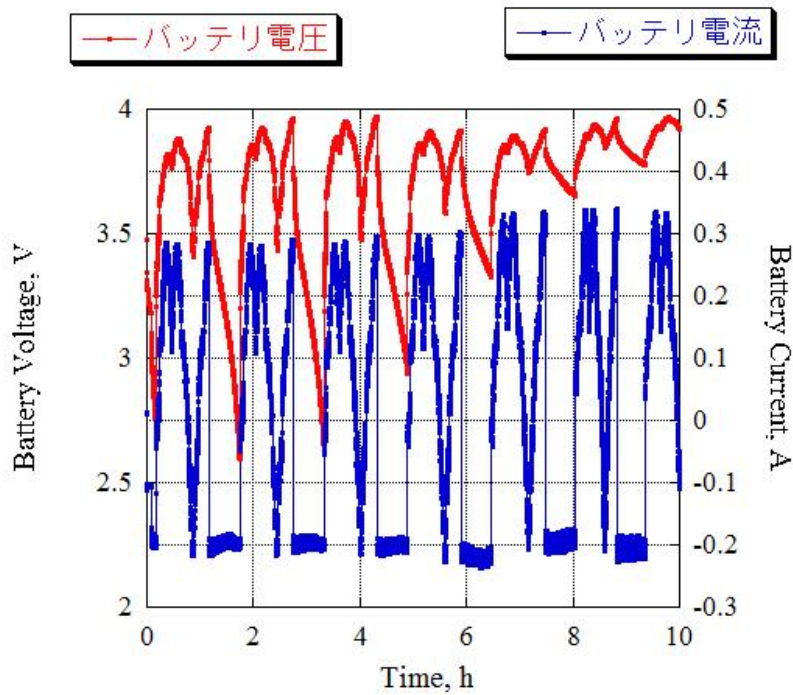
図 5.4.3-4 試験ケース① 衛星起動時のバッテリー・SAS 状態  
Fig 5.4.3-4 Case① battery and SAS state at the time of satellite start-up

図より約 100 秒の時に分離スイッチが ON になり衛星に電力が供給されていることがわかる。そして電源 ON から約 400 秒後に通信機の電源が入り CW 送信を開始し、通常運用を開始していることを確認した。

次に上図約 800 秒時点で SAS を ON し、太陽電池発電電力を SAS で模擬して入力した。バッテリー電流より正常に充電できていることが分かる（バッテリー電流は充電が正側で放電が負側）。

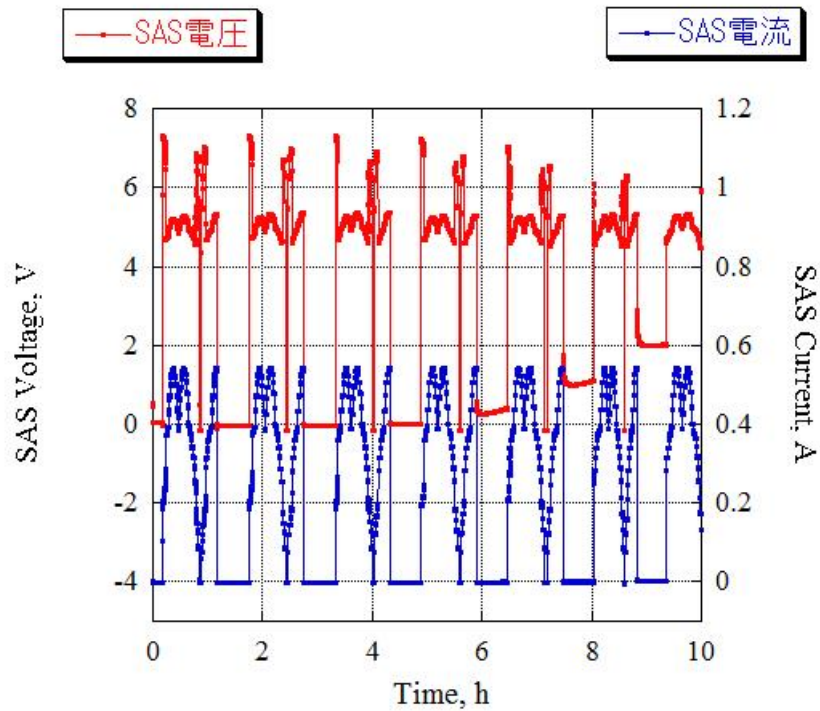
試験ケース②：低温②の時バッテリー電圧 3.0V (-10°C、0.2A 放電時)

このケースは、昇温時も続けて試験を行った。下図に起動時のバッテリー、SAS の状態をモニタした結果を示す。



(a) バッテリー電圧・電流

(a) Battery voltage and current



(b) SAS 電圧・電流

(b) SAS voltage and current

図 5.4.3-5 試験ケース② 起動時のバッテリー・SAS 状態

Fig 5.4.3-5 Case② battery and SAS state at the time of start-up

図では読み取れないが、衛星起動 10 分後に SAS から太陽電池発電電力を入力している。図より、正常に充電動作ができていることが確認できる。しかし、衛星-X面が日照初期、蝕の初期の約 2 分間程度 CW 送信の音がおかしくなった。これは、過去の試験よりバッテリー電圧の低下と発電電力が減少することで、太陽電池側から負荷へ電流を流そうとするためバッテリー充電用 DC/DC コンバータの入力電圧（太陽電池出力電圧）が低下し、一瞬 DC/DC コンバータの電源が OFF になることで発生する現象である。この現象は通常バッテリー残量が回復することでなくなることを過去の試験で確認している。本試験ではこの現象が発生する時間がサイクル数を重ねることで短くなっていることを確認している。(FM では充電回路の出力電圧の最適化と MPPT 制御を加える設計変更を行い、バッテリー残量低下時の不安定動作は大きく改善し、太陽電池の発電点効率の向上によりバッテリー充電量が増加している。)

評価項目	判定
衛星低温最悪ケース時に衛星の起動が正常にできる。 (バッテリー電圧：3.0V 以上)	○

(c) DCDC コンバータ出力電圧の温度特性

低温①~高温①の昇温時に電源基板温度と DC/DC コンバータ出力電圧をテスターで計測した。下図に DC/DC コンバータの温度特性を示す。

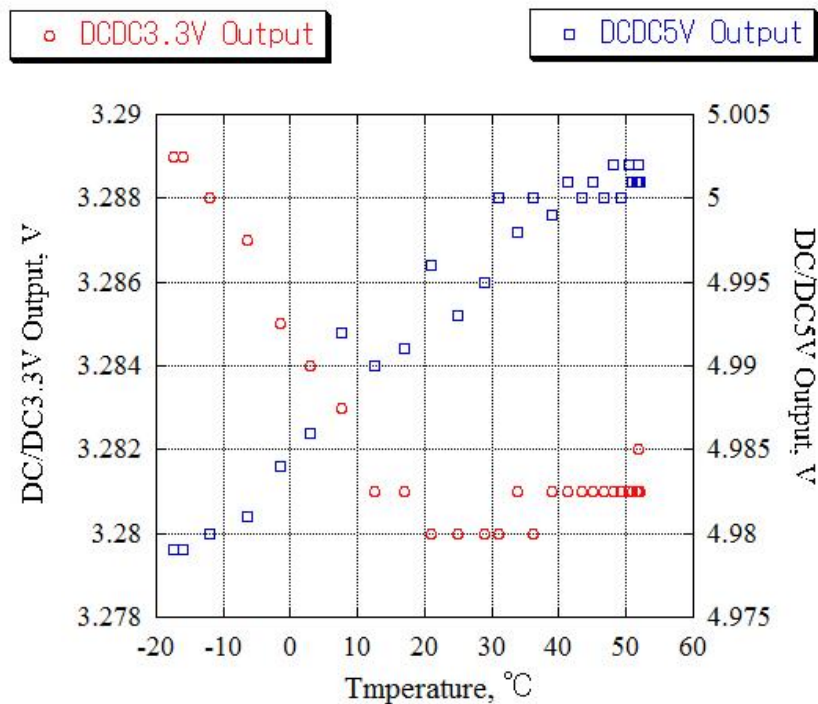


図 5.4.3-6 DC/DC コンバータ出力の温度特性

Fig 5.4.3-6 Temperature characteristic of DCDC converter output

DC/DC3.3V は温度が高いほど出力電圧が低下、DC/DC5V は温度が高いほど出力電圧が上昇する傾向にあることが分かった。評価基準は常温時（20℃）に比べて低温（-20℃）・高温（+40℃）時共に±5%以下の変動であれば合格であり、本試験ではこの基準を満たし、低温・高温時でも負荷側にほとんど影響がない供給電力の電圧変動であることが確認できた。

評価項目	判定
DC/DC コンバータ出力電圧のが常温時（20℃）に比べて低温（-20℃）・高温（+40℃）時共に±5%以下の変動である	○

(d) 電力測定

真空①②、低温①②、高温①②の全ケースにおいて動作モード別にバッテリーの消費電力を計測した。但し、ミッション系のデブリは動作時間が1秒以下かつ消費電力が非常に小さいため測定していない。モード別の電力測定結果を以下の表に示す。

表 5.4.3-4 消費電力計測結果

Table 5.4.3-4 Power consumption measurement result

	通常運用	FM 送信	300V	Trek+ELF	Scamp
真空①	0.72	1.66	1.45	2.86	0.93
低温①	0.79	1.31	1.44	2.91	0.92
高温①	0.75	1.46	1.43	2.92	0.95
低温②	0.74	1.30	1.37	2.90	0.87
高温②	0.81	1.50	1.49	2.94	1.00
真空②	0.80	1.44	1.45	2.98	1.02

単位：[W]

FM 送信モードは低温で消費電力減少、高温で増加傾向があることがわかった。真空①の時の FM 送信は、アンテナ展開していない状態であるため、消費電力は若干大きくなる。その他のモードは消費電力に一定の傾向が見られないが、小数点第二位の値以下は計測誤差範囲内であるため（各モードで CW 送信が行われているため動作タイミングによって消費電力が変化）、温度によって消費電力がほとんど変化しないことを確認することができた。

評価項目	判定
消費電力の増加が真空常温時に比べ以下の条件以内である 1W 以下：+15% 1~2W：+10% 2W 以上：+5%	○

(e) キルスイッチ動作確認

キルスイッチは全試験ケースにおいて FM アップリンクコマンドにより ON, OFF 動作できることを OBC の受信データによって確認した。同時に、SAS により太陽電池ラインから電力を入れ ON 時にはその電力を遮断、OFF 時には電力がバッテリー、負荷に供給できることを確認した。（キルスイッチ 1, 2 はアップリンクコマンドにより 2 つのスイッチは一緒に動作する）



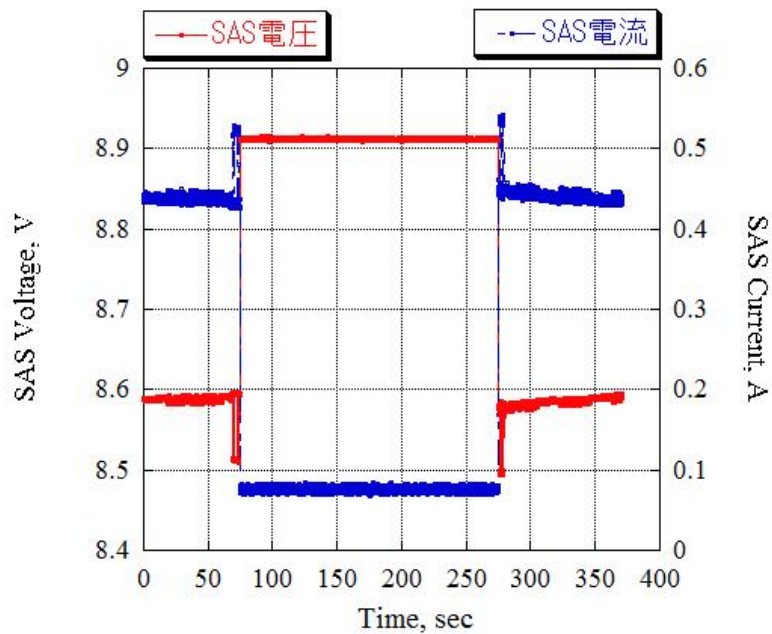
表 5.4.3-5 キルスイッチ動作シーケンスとテレメトリ対応結果

Table 5.4.3-5 Kill switch operation sequence and telemetry result

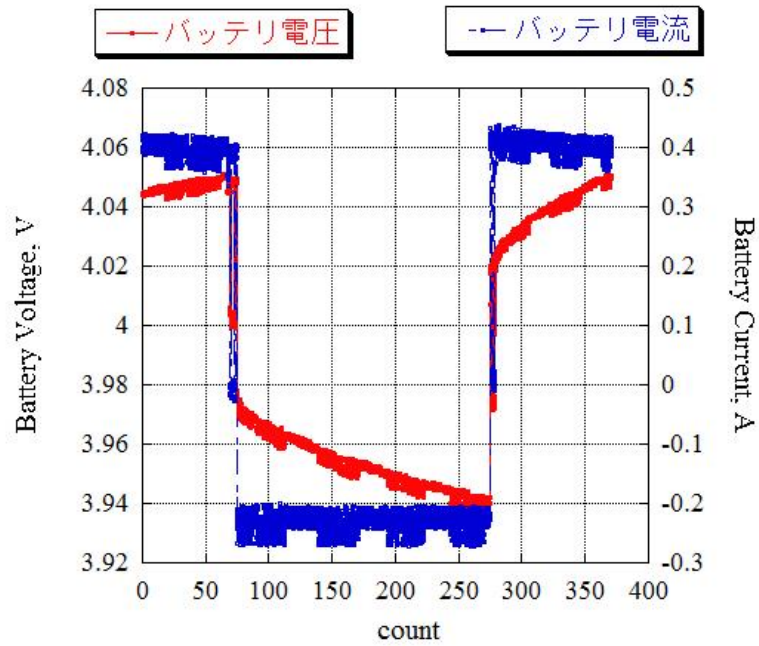
コマンド	キルスイッチ 1	キルスイッチ 2	電力の遮断
OFF	OFF	OFF	導通
ON	ON	ON	遮断

※真空①②、低温①②、高温①②の全ケース、同じ

下図に、測定した SAS 電圧・電流、バッテリー電圧・電流波形を示す。キルスイッチは OFF→ON→OFF に切り替えた。



(a) SAS 電圧・電流  
(a) SAS voltage and current

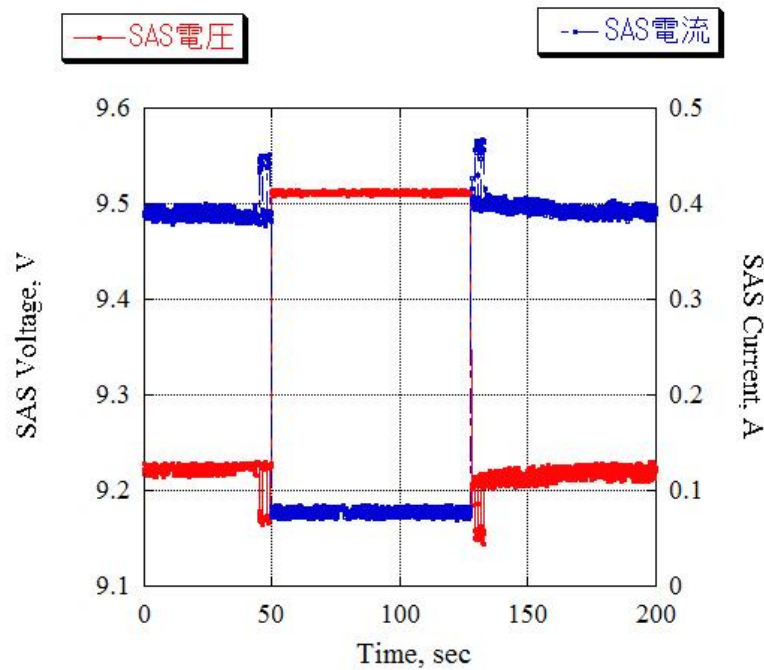


(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

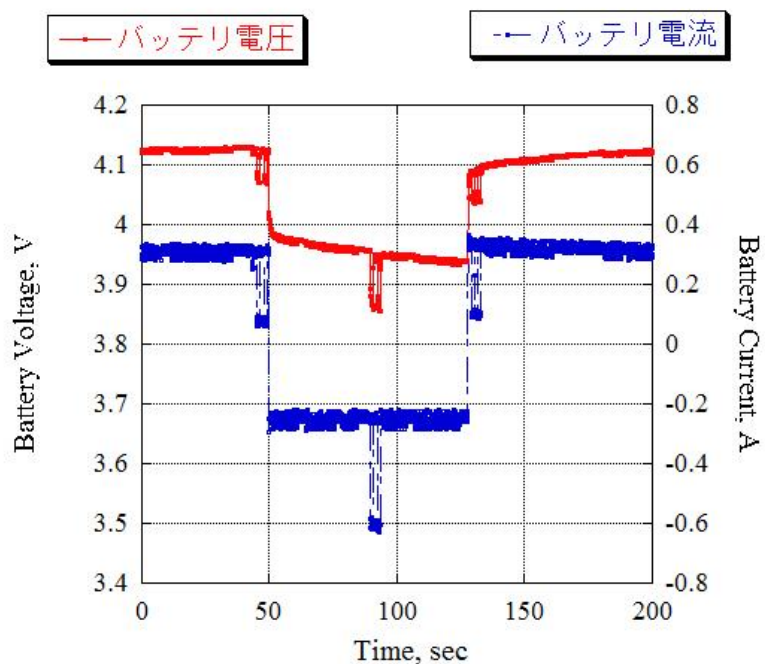
図 5.4.3-7 真空①時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-7 Kill switch operation at the time of vacuum ①



(a) SAS 電圧・電流

(a) SAS voltage and current

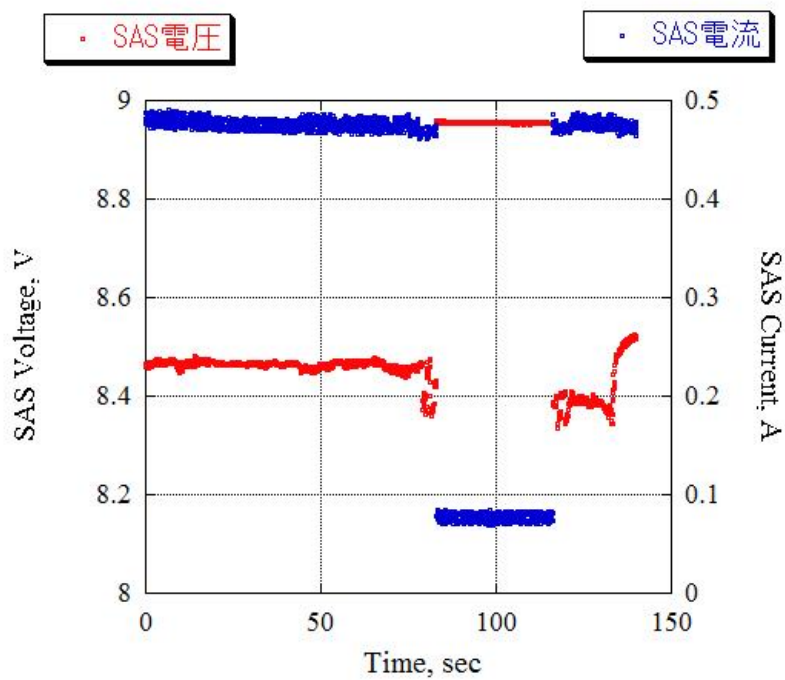


(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

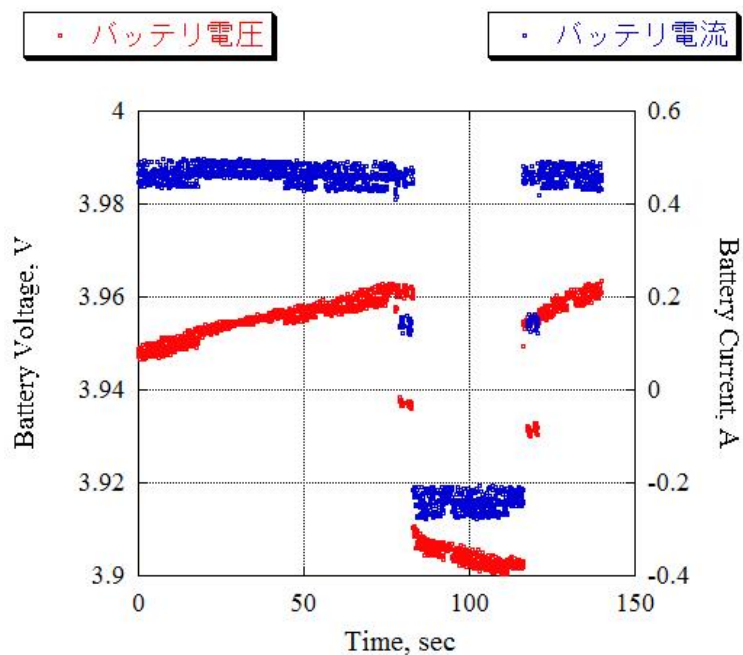
図 5.4.3-8 低温①時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-8 Kill switch operation at the time of low temperature ①



(a) SAS 電圧・電流

(a) SAS voltage and current

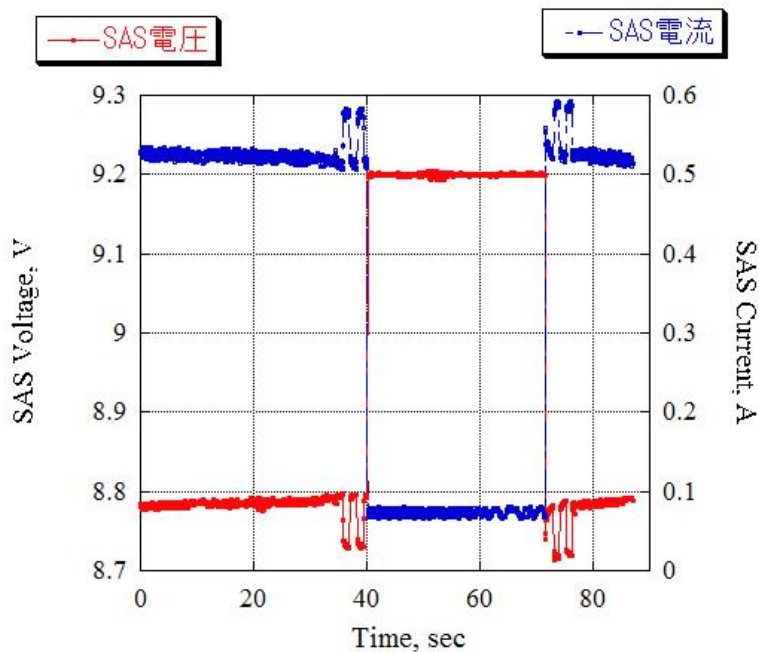


(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

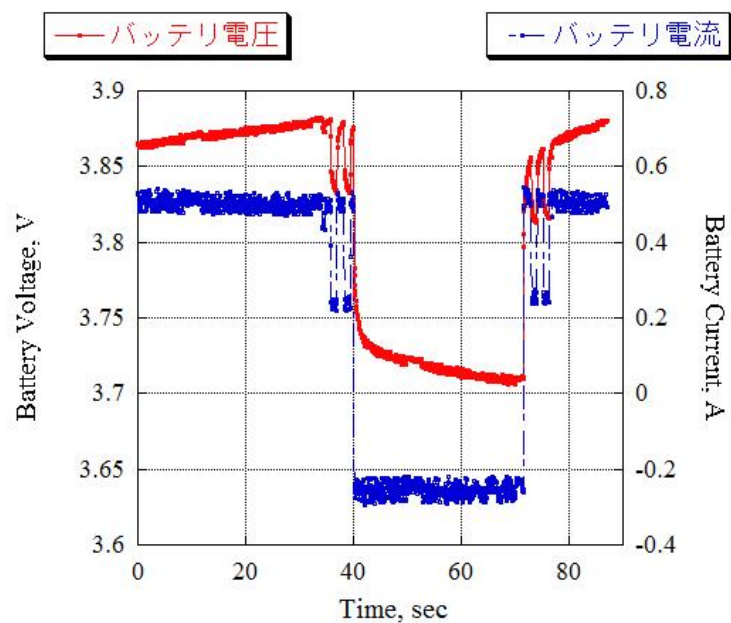
図 5.4.3-9 高温①時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-9 Kill switch operation at the time of high temperature ①



(a) SAS 電圧・電流

(a) SAS voltage and current

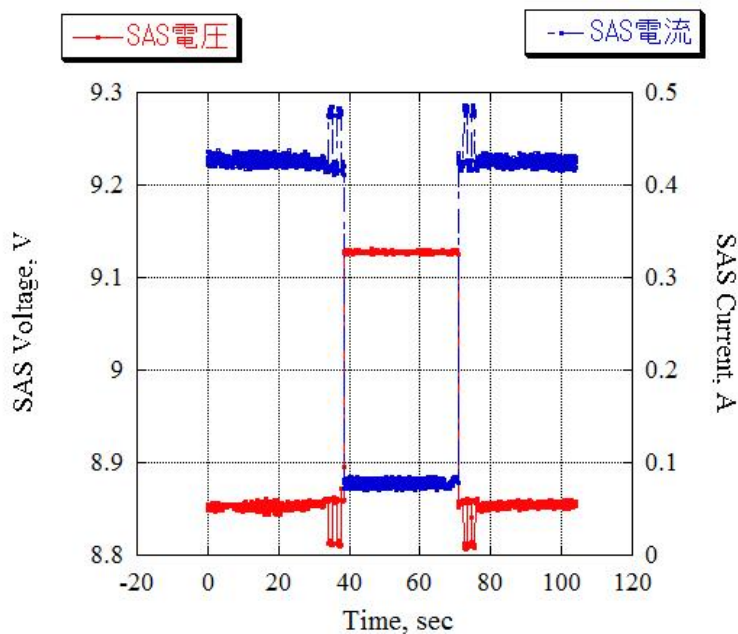


(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

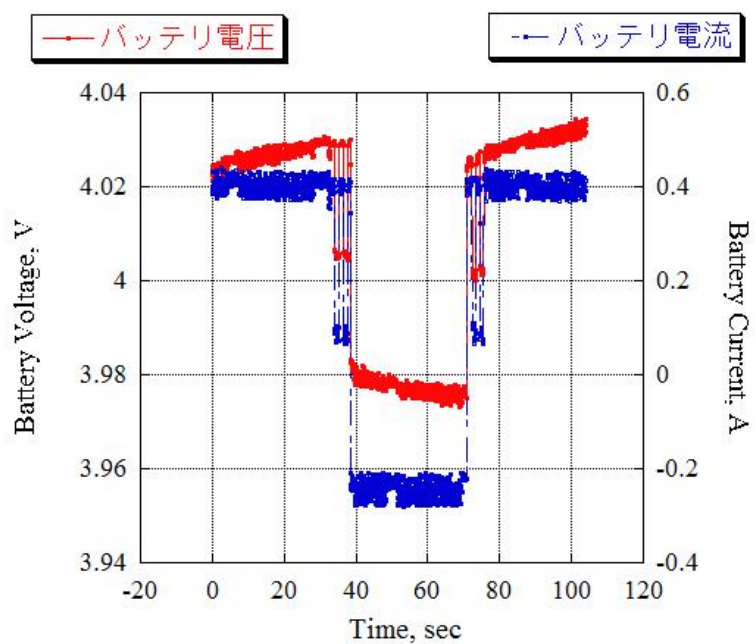
図 5.4.3-10 低温②時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-10 Kill switch operation at the time of low temperature ②



(a) SAS 電圧・電流

(a) SAS voltage and current

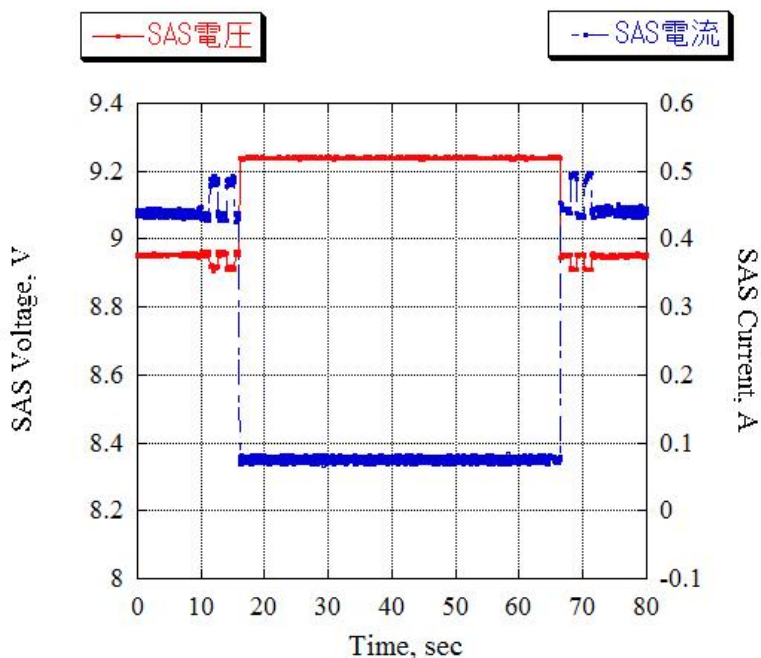


(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

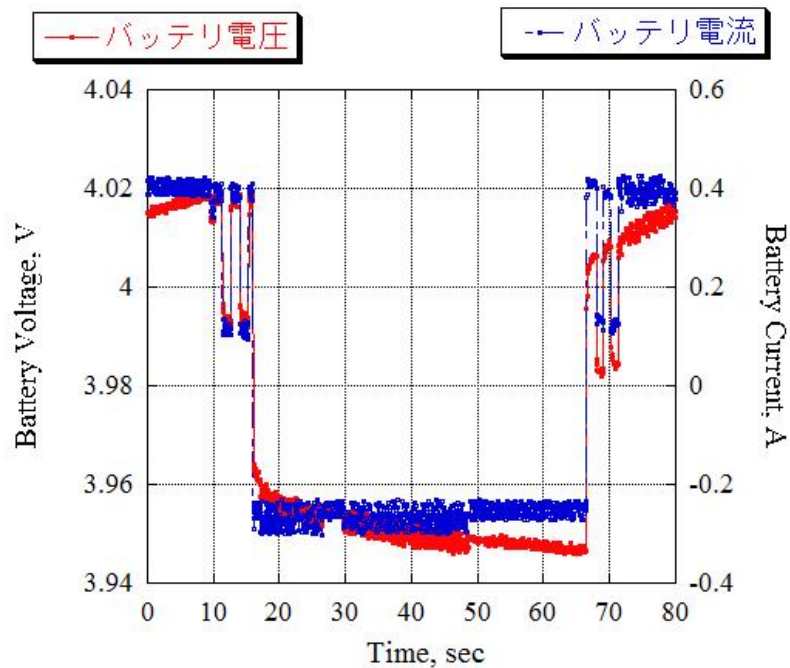
図 5.4.3-11 高温②時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-11 Kill switch operation at the time of high temperature ②



(a) SAS 電圧・電流

(a) SAS voltage and current



(b) バッテリ電圧・電流

(b) Battery voltage and current

図 5.4.3-12 真空②時のキルスイッチ動作

Fig 5.4.3-12 Kill switch operation at the time of vacuum ②

全ケースにおいて、SAS から電流が 80mA 程度漏れていることが分かる。これは充電用 DC/CD コンバータモジュールでの消費電力である。従ってバッテリーには充電されていないためキルスイッチの能力は正常であると考えられる。

評価項目	判定
地上からのアップリンクコマンドによりキルスイッチの発動・解除動作ができることを確認する。また、発動時は太陽電池発電電力がバッテリーに充電されないことを確認する。	○

(f) 過電流防止回路動作

過電流防止回路は全試験ケースにおいて正常に過電流防止回路が動作すること、またその発動閾値が常温時に比べ±10%以下の変動以内に収まっていることを確認した。但し、電力ライン PS-5-O については外部出力が難しいため評価していない。

表 5.4.3-6 過電流防止回路の試験結果

Table 5.4.3-6 Circuit breaker test result

	PS-3.3 閾値電流 [A]	PS-5-S 閾値電流 [A]
真空①	0.66	0.93
低温①	0.68	1.00
高温①	0.65	0.98
低温②	0.70	0.94
高温②	0.64	0.98
真空②	0.67	0.97

全試験ケースにおいて過電流防止回路は正常に動作した。また、温度による過電流防止回路の発動閾値変動の影響は見られなかった。上記の閾値差は誤差範囲内であると考えられる。

評価項目	判定
全試験ケースにおいて過電流防止回路の正常動作を確認する。 また、過電流防止回路の発動閾値電流が常温時に比べて±10% 以下であることを確認する。	○



## (g) ヒーター動作確認

ヒーターはハード設計により 27℃以下のとき OBC のコマンドで ON することができ、27℃以上の時は OBC のコマンドを ON にしてもヒーターは ON にならない。本試験では、低温時にヒーターが OBC の ON コマンドにより ON、OFF コマンドにより OFF、高温時には OBC のコマンドに関わらず OFF であることを確認する。また、ヒーターが ON になった時消費電流が 0.1A 程度上昇すること、バッテリー BOX 内の温度を確認する。

以下に動作結果まとめ表を示す。低温時はコマンドによりヒーターを ON/OFF することができ、高温時は ON/OFF コマンドに関係なくヒーターは OFF のままであることを確認した。

表 5.4.3-7 ヒーター動作結果

Table 5.4.3-7 Heater operation result

	OBC コマンドによる ON/OFF 動作によるヒーター動作	消費電流
低温①	動作	約 0.1A 増加
高温①	無効	変化なし
低温②	動作	約 0.1A 増加
高温②	無効	変化なし

下図にヒーター ON 時のバッテリー消費電流の変化を示す。図より、ヒーターが ON になった時、バッテリーの消費電流が約 0.1A 程度上昇することが確認できる。

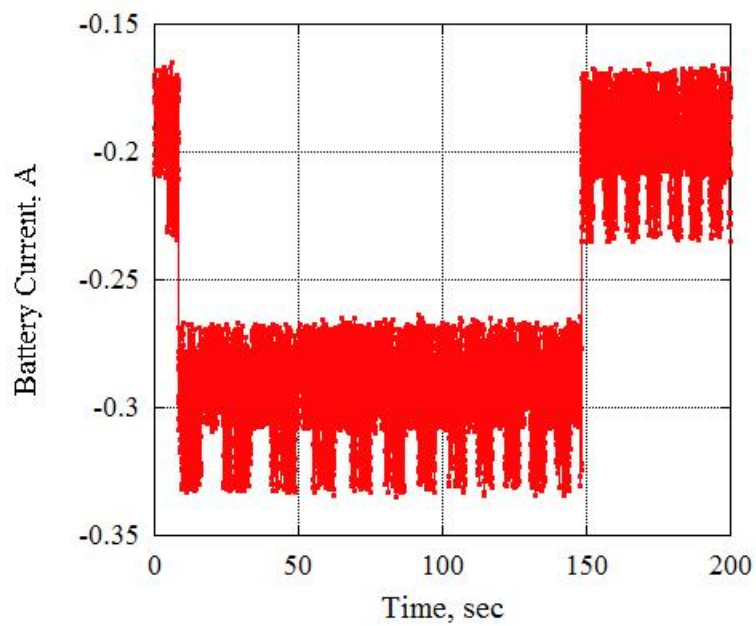


図 5.4.3-13 低温①バッテリー電流

Fig 5.4.3-13 Battery current at low temperature ①

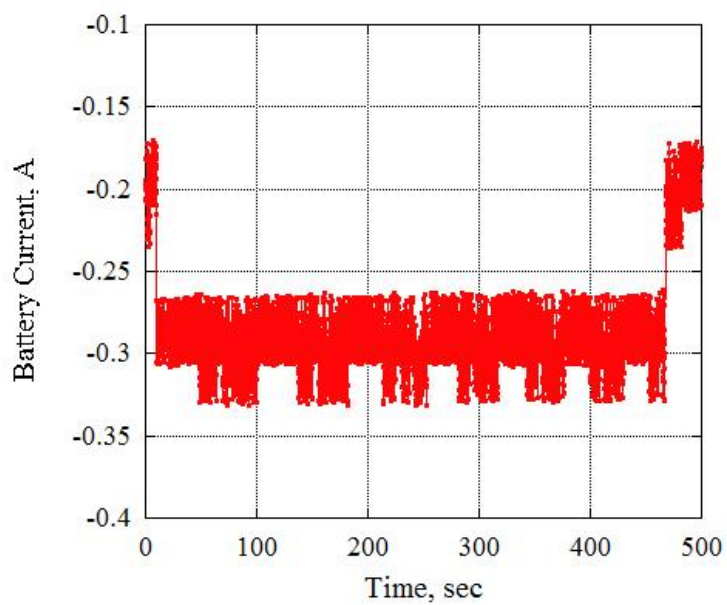


図 5.4.3-14 低温②バッテリー電流

Fig 5.4.3-14 Battery current at low temperature ②

次にヒーターON時のバッテリー温度の変化について結果を示す。ヒーターをONしても3℃程度しかバッテリー温度が上昇しなかった。

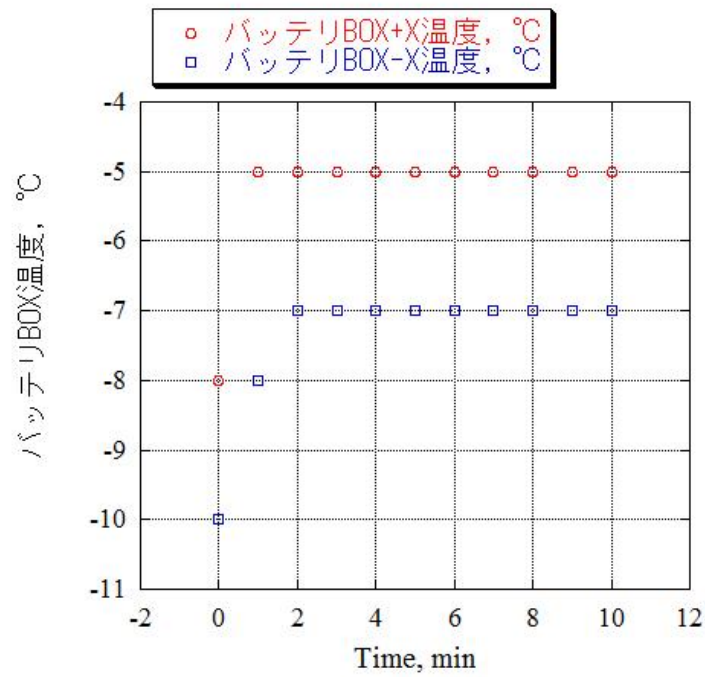


図 5.4.3-15 低温①ヒーターONによる温度上昇

Fig 5.4.3-15 Temperature increase by heater ON (low temperature ①)

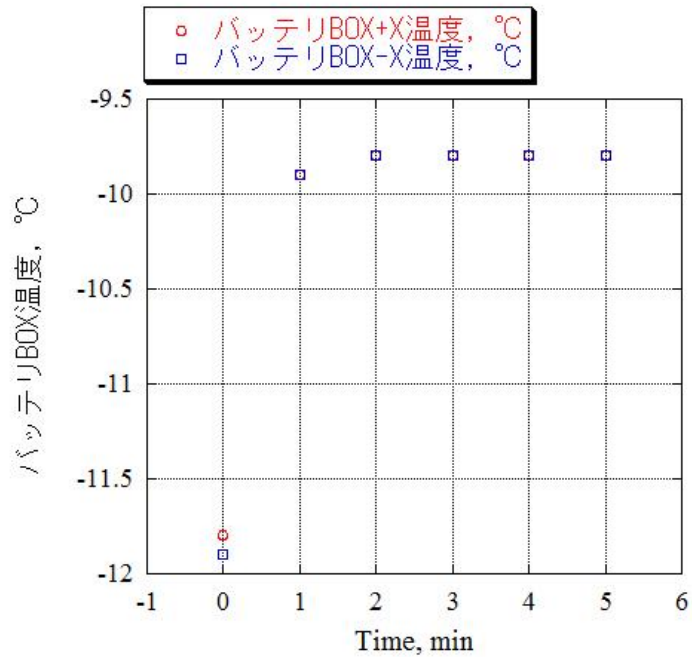


図 5.4.3-16 低温②ヒーターONによる温度上昇

Fig 5.4.3-16 Temperature increase by heater ON (low temperature ②)

全試験ケースにおいてヒーターの正常を確認することができたが、ヒーターによりバッテリーが約 4 度しか温度上昇しなかった。このことから、フライトモデルではバッテリーの断熱効果を上昇させるために、バッテリー BOX と支柱の間にガラスエポキシを挟み、またバッテリー BOX 内の断熱材をテフロンからガラスエポキシに変更した。

評価項目	判定
低温ケース時、ヒーターが ON になりバッテリー BOX 内の温度が上昇することを確認する。 高温ケース時、ヒーターが ON にならないことを確認する。	○

#### (h) 熱真空試験前後の PFM 太陽電池光 V-I 特性

熱真空試験前後の太陽電池光 V-I 特性測定を行い、比較した。熱真空試験での太陽電池最高温度は 30°C、最低温度は-32°Cである。特性太陽電池の光 V-I 特性測定については 2.3.1 太陽電池で記載した方法と同じであるためここでは省略する。図 5.4.3-17 に測定結果を示す。試験前の V-I 特性は太陽電池が光源に対して少し斜めになっていたため、5~8V 付近の出力電流値が低下している。それを考慮すると、熱真空試験前後で太陽電池の光 V-I 特性に変化がないことが確認できた。ただし、熱真空試験での太陽電池最高温度は 30°C、最低温度は-32°Cであるが、太陽電池の熱解析結果では太陽電池最高到達温度 50°C、最低到達温度-24°Cであることから、高温側の最高温度を満たしていない。

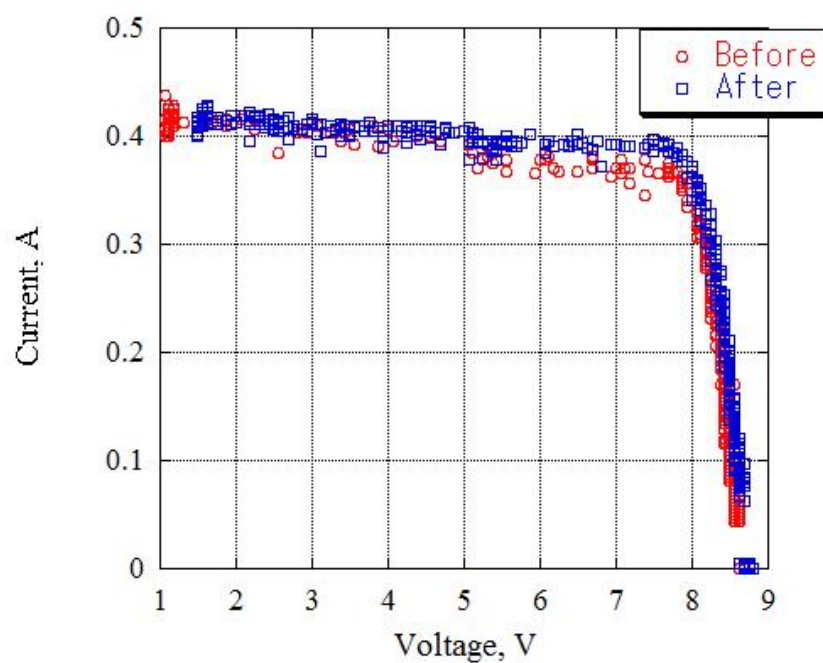


図 5.4.3-17 光 V-I 特性

Fig 5.4.3-17 V-I curve

評価項目	判定
熱真空試験前後で太陽電池光 V-I 特性に変化がないことを確認する。	○

## 5.4.4 FM 熱真空試験

FM 熱真空試験の試験日と内容、供試体、試験条件を以下に示す。FM 熱真空試験の目的は衛星の組み立ての健全性を確認することである。試験は PFM 熱真空試験同様、気常温、真空常温、真空低温、真空高温の各環境で電気性能試験を行った。本試験は PAF を取り付けた状態で試験を行うため、分離検知スイッチの操作ができない。そのため衛星の動作はすべて外部電源駆動にした。また、充電回路やバッテリー電圧センサなどは本試験では動作させることができないため、そのような機能は、熱真空試験前後のフライト品検査で動作を確認する。

供試体：FM 電源基板、FM バッテリ、FM 太陽電池、FM 分離検知スイッチ

日時：平成24年1月10日（火）～1月15日（日）

場所：九州工業大学 宇宙環境技術ラボラトリ

表 5.4.4-1 試験条件

Table 5.4.4-1 Test condition

真空チャンバー		LEO
真空度		$10^{-3}$ [Pa]
熱サイクル数		2
低温環境温度	電源基板	-8 [°C]
	バッテリー	-1 [°C]
	太陽電池	-11 [°C]
高温環境温度	電源基板	41 [°C]
	バッテリー	36 [°C]
	太陽電池	47 [°C]

表 5.4.4-2 試験手順  
Table 5.4.4-2 Test process

作業 No.	作業	作業内容 No.	作業内容
19	試験準備	1.2	試験環境のセッティング
20	動作確認試験	2.5	鳳龍式号の電源をON
		2.6	大気常温環境：バス系電気性能試験
		2.7	大気常温環境：ミッション系電気性能試験
		2.8	鳳龍式号の電源をOFF
21	真空引き	3.2	真空引き
22	真空環境試験①	4.5	鳳龍式号の電源をON
		4.6	真空常温環境：バス系電気性能試験
		4.7	真空常温環境：ミッション系電気性能試験
		4.8	鳳龍式号の電源をOFF
23	降温	5.2	液体窒素を導入し低温環境を模擬
24	真空低温環境試験①	6.4	鳳龍式号の電源をON
		6.5	真空低温環境：バス系電気性能試験
		6.6	真空低温環境：ミッション系電気性能試験
25	昇温	7.2	ヒーターの電力供給を調整し、高温環境を模擬
26	簡易検査（※3）	8.2	昇温中、10分おきに簡易検査
27	真空高温環境試験①	9.3	真空高温環境：バス系電気性能試験
		9.4	真空高温環境：ミッション系電気性能試験
28	降温	10.3	ヒーターの電力供給を調整
		10.4	液体窒素を導入し低温環境を模擬
29	簡易検査	11.2	降温中、10分おきに簡易検査
30	真空低温環境試験②	12.3	真空低温環境：バス系電気性能試験
		12.4	真空低温環境：ミッション系電気性能試験
31	昇温	13.2	ヒーターの電力供給を調整し、高温環境を模擬
32	簡易検査	14.2	昇温中、10分おきに簡易検査
33	真空高温環境試験②	15.3	真空高温環境：バス系電気性能試験
		15.4	真空高温環境：ミッション系電気性能試験
34	降温	16.3	ヒーターの電力供給を調整
		16.4	液体窒素の導入を止め、シートヒーターで温調
35	真空環境試験②	17.4	真空常温環境：バス系電気性能試験
		17.5	真空常温環境：ミッション系電気性能試験
		17.6	鳳龍式号の電源をOFF
36	大気解放	18.2	大気解放、衛星の取り出し

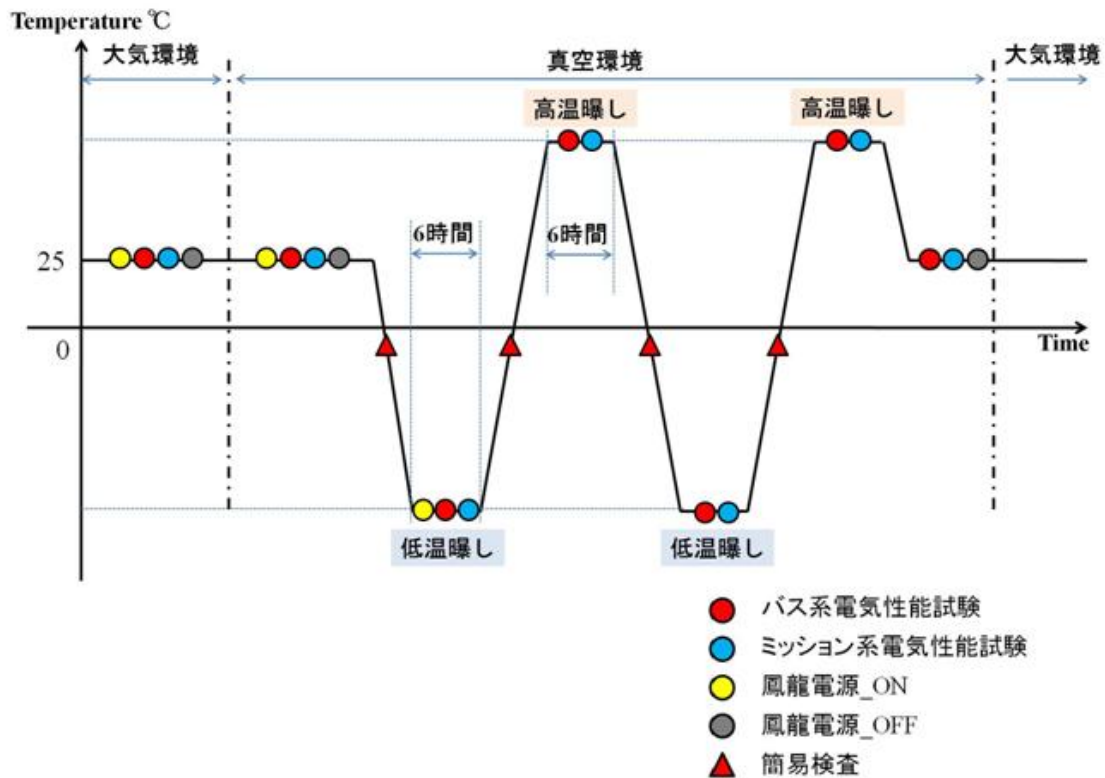


図 5.4.4-1 試験の流れ

Fig 5.4.4-1 Flow of test

図 5.4.4-2 に電源システムの外部配線を示す。衛星外部ポートにあるバッテリー充電ライン、キルスイッチテレメトリ、外部電源接続ライン、PS-3.3-O、PS-5-S 電力ラインをチャンバ外部に配線した。バッテリー充電ラインはバッテリー電圧をモニタするためである。キルスイッチテレメトリは OBC のモニタリングによって状態を見ることができ、確実に切り替わっていることを確認するために外部に配線し、テスターで状態を確認する。また、外部電源接続ラインは分離スイッチの負荷側に接続されており、このポートに 3.8~4.5V の定電圧源を接続し、電力を供給した。このとき、電流計測用の 0.1Ω 抵抗を電力供給ラインに設置し、DAQ で電源電圧と電流を測定し、消費電力を算出した。PS-3.3-O と PS-5-S 電力ラインはテスターで電圧計測し、DC/DC コンバータの出力の健全性を確認する。本試験では衛星に負荷をかけたくないため、過電流防止回路の動作確認は行わない。



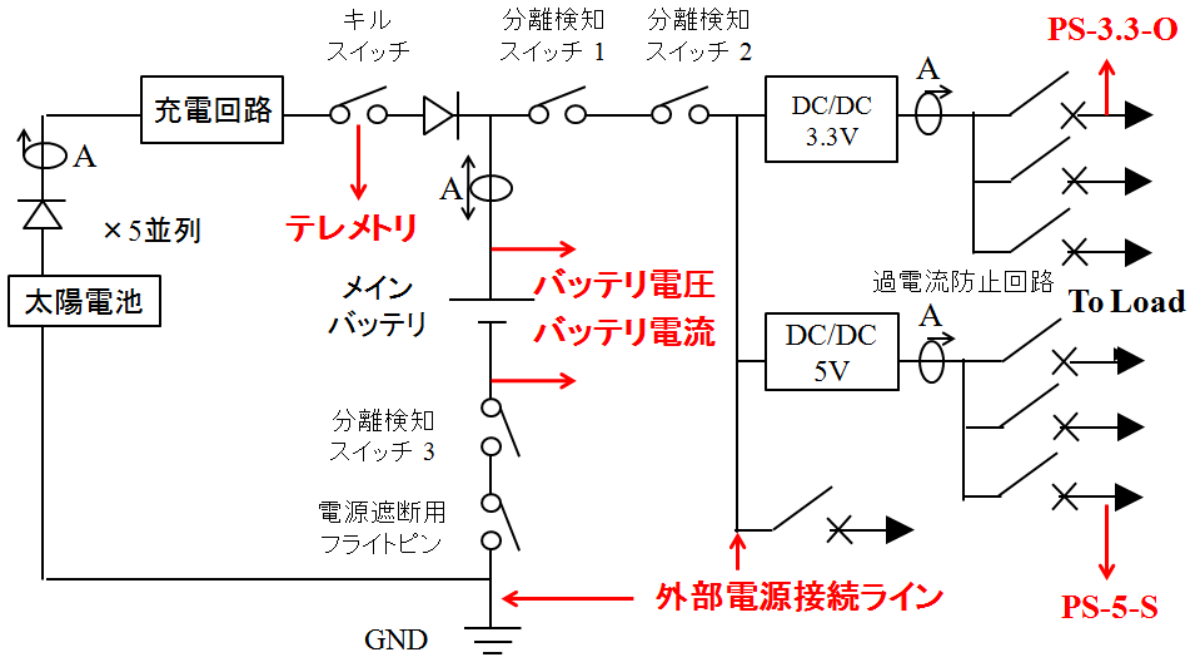


図 5.4.4-2 電源システムのチャンバー外部配線

Fig 5.4.4-2 Line of power system

以下に試験結果を示す。本試験で動作確認した電源システムの機能は全て正常に動作し、衛星組み立ては健全であることを確認できた。

(a) DCDC コンバータ出力電圧

試験前大気常温、真空①②、低温①②、高温①②の全ケースにおいて DC/DC コンバータ出力電圧をテスターで計測した。その結果を以下の表に示す。

表 5.4.4-3 DC/DC コンバータ電圧計測結果

Table 5.4.4-3 DC/DC converter voltage measurement result

	3.3V DC/DC コンバータ [V]	5V DC/DC コンバータ [V]
大気常温	3.274	5.011
真空①	3.270	5.013
低温①	3.279	5.002
高温①	3.279	5.020
低温②	3.274	4.997
高温②	3.268	5.020
真空②	3.278	5.014

低温②~高温②の昇温時に電源基板温度と DC/DC コンバータ出力電圧をテスター

で計測した。下図に DC/DC コンバータの温度特性を示す。

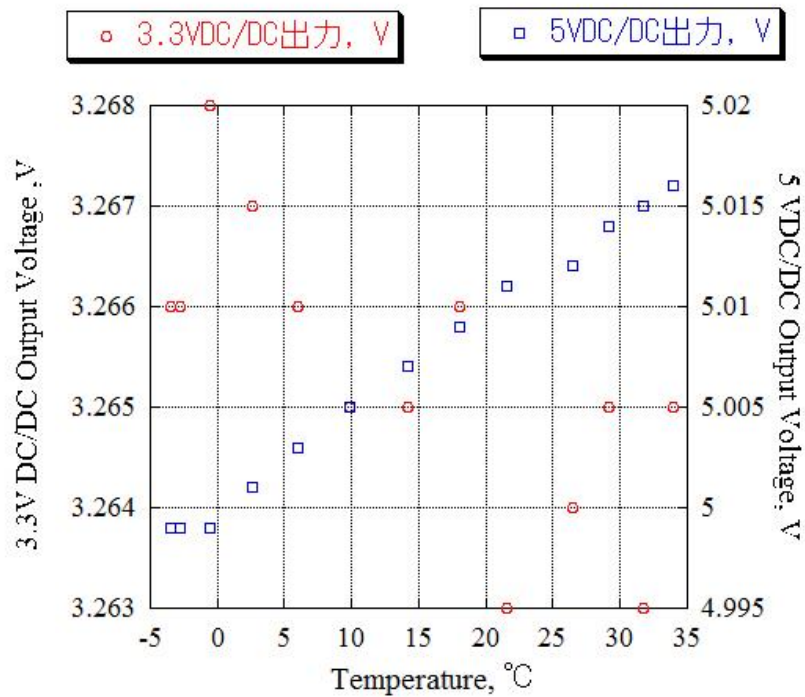


図 5.4.4-3 DC/DC コンバータ出力の温度特性

Fig5.4.4-3 Temperature characteristic of DC/DC converter output

DC/DC3.3V は温度が高いほど出力電圧が低下、DC/DC5V は温度が高いほど出力電圧が上昇する傾向にあることが分かった。これは PFM の結果と等しく、正常に動作していると判断できる。

**(b) 電力測定**

試験前大気常温、真空①②、低温①②、高温①②の全ケースにおいて動作モード別にバッテリーの消費電力を計測した。但し、ミッション系のデブリは動作時間が 1 秒以下かつ消費電力が非常に小さいため測定していない。モード別の電力測定結果を以下の表に示す。電力の小さい方が FM アップリンク待ち、大きい方が CW ダウンリンク時の消費電力である。

表 5.4.4-4 消費電力計測結果

Table 5.4.4-4 Power consumption measurement result

	通常	FM 送信	300V	Trek+ELF	Trek	ELF	Scamp
大気 常温	0.85~ 1.10	5.77	1.57~ 1.83	2.48~ 2.80	2.17~ 2.38	1.23~ 1.46	1.08~ 1.30
真空 ①	0.86~ 1.12	5.72	1.53~ 1.80	2.54~ 2.75	2.18~ 2.38	1.25~ 1.50	1.10~ 1.30
低温 ①	0.85~ 1.10	5.70	1.53~ 1.78	2.60~ 2.83	2.22~ 2.47	1.22~ 1.48	1.05~ 1.30
高温 ①	0.86~ 1.13	5.66	1.53~ 1.75	2.52~ 2.70	2.12~ 2.34	1.22~ 1.46	1.04~ 1.30
低温 ②	0.85~ 1.11	5.69	1.52~ 1.74	2.60~ 2.85	2.22~ 2.45	1.22~ 1.47	1.08~ 1.30
高温 ②	0.81~ 1.08	5.64	1.53~ 1.77	2.54~ 2.77	2.10~ 2.36	1.23~ 1.49	1.03~ 1.19
真空 ②	0.87~ 1.13	5.74	1.61~ 1.82	2.61~ 2.83	2.20~ 2.45	1.27~ 1.52	1.11~ 1.34

単位：[W]

小数点第二位の値以下は計測誤差範囲内であるため、温度によって消費電力がほとんど変化せず、安定して動作していることを確認できた。

### (c) バッテリ電圧

本試験では衛星のバッテリー駆動は行わない。バッテリーは全ての分離検知スイッチ OFF 状態、電源遮断用フライトピン開放状態であるため、試験中は充電されることも放電することもない。ここでは、バッテリーの監視として各試験ケースで電圧をテスターで計測した。以下にその結果を示す。バッテリー電圧はほぼ一定に保たれており、電力を消費、充電していないことが確認できる。

表 5.4.4-5 バッテリ電圧計測結果

Table 5.4.4-5 Battery voltage measurement result

	バッテリー電圧 [V]
大気常温	4.041
真空①	4.040
低温①	4.037
高温①	4.041
低温②	4.031
高温②	4.040
真空②	4.031

(d) キルスイッチ動作確認

キルスイッチは全試験ケースにおいて FM アップリンクコマンドにより ON, OFF 動作できることを OBC の受信データと衛星外部テレメトリをテスターでチェックすることで確認した。以下に結果を示す。

表 5.4.4-6 キルスイッチ動作シーケンスとテレメトリ対応結果

Table 5.4.4-6 Kill switch operation sequence and telemetry result

コマンド	キルス イッチ 1	キルスイッ チ 2	キルスイッチ 1 テレメトリ	キルスイッチ 2 テレメトリ	OBC 表示
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
ON	ON	ON	ON	ON	ON

※大気常温、真空①②、低温①②、高温①②の全ケースにおいて同様の結果

全ケースにおいて、キルスイッチは正常に動作することを確認できた。

(e) センサデータ

取得したセンサデータを以下の表に示す。バッテリー電流センサ、3.3V と 5V 用 DC/DC コンバータ出力電流センサ、基準電圧 IC は低温・高温に関係なく一定の値を出しており、正常に動作していることがわかる。バッテリー電圧は分離検知スイッチが OFF 状態なのでマイナス端子が浮いているため、このコンフィギュレーションでは正常に測定することができていない。太陽電池の電圧、電流センサは高温時に出力が大きくなり、低温で小さくなる現象がみられた。このとき、太陽電池は発電していないため理論的には 0 になるはずである。しかし、電流センサ

は最大 469mV、電圧は 395V の出力があった。出力値を実電圧・電流値に変換すると、太陽電池電流は約 0.08A、太陽電池電圧は約 0.97V である。この原因の詳細は不明であるが、熱真空試験前後のフライト品検査で一面の太陽電池の光を当てると、光を当てた面の電流センサ出力は上昇し正常動作、光が当たっていない面の電流センサの 469mV 出力は 100mV 程度に減少した。全ての面の太陽電池で同様の光の照射を行い、すべて同じ動作となることを確認した。従って、太陽電池電流センサについては問題ないことがわかった。太陽電池電圧センサも熱真空試験後のフライト品検査で光を照射し、正常に動作していることが確認でき、上記の微小出力は問題ないことがわかった。

表 5.4.4-7 センサデータ取得

Table 5.4.4-7 Sensor data

センサ		試験ケース毎の AD コンバータ出力値						
		大気	真空①	低温①	高温①	低温②	高温②	真空②
太陽電池電圧	+X 面	123	81	0	217	0	395	176
	+Y 面	130	80	0	215	0	393	175
	-Y 面	126	80	0	215	0	393	175
	+Z 面	119	80	0	215	0	394	175
	-Z 面	123	81	0	216	0	395	176
太陽電池電流	+X 面	1	1	2	1	1	469	1
	+Y 面	1	2	1	1	2	461	1
	-Y 面	2	2	1	2	2	376	1
	+Z 面	1	2	2	1	2	466	2
	-Z 面	2	2	2	2	2	364	2
バッテリー電圧		2560	2729	2659	2652	2596	2687	2771
バッテリー電流		2083	2083	2080	2084	2079	2084	2083
3.3VDC/DC 出力電流		163	163	165	162	161	169	162
5VDC/DC 出力電流		115	113	111	149	141	121	150
基準電圧		3349	3350	3357	3344	3355	3340	3344

## (f) ヒーター動作確認

ヒーターはハード設計により 27℃以下のとき OBC のコマンドで ON することができ、27℃以上の時は OBC のコマンドを ON にしてもヒーターは ON にならない。本試験では、低温時にヒーターが OBC の ON コマンドにより ON、OFF コマンドにより OFF、高温時には OBC のコマンドが無効になり OFF であることを確認した。また、ヒーターが ON になった時消費電流が 0.1A 程度上昇することを確認した。以下に動作結果まとめ表を示す。

表 5.4.4-8 ヒーター動作結果まとめ

Table 5.4.4-8 Heater operation result

	バッテリー温度 [℃]	OBC コマンドによる ON/OFF 動作によるヒーター動作
大気常温	18.0	動作
真空①	18.4	動作
低温①	1.9	動作
高温①	28.6	無効
低温②	3.3	動作
高温②	34.9	無効
真空②	16.5	動作