

第4章 環境試験・検証試験

4.1 高電圧印加試験

この試験は表面電位計プローブ先端に $\pm 3\text{kV}$ の高電圧を印加し、表面電位計基板内で放電を生じることなく、電圧測定ができることを確認するための試験である。

<試験セッティング・試験条件>

図4.1に示すような試験回路を組む。真空容器内に表面電位計基板、プローブ、バイアスプレートを設置し、外部の直流電源からバイアスプレートに高電圧を印加できるようにする。表面電位計の出力はデジタルマルチメーターで計測する。図4.2に真空容器内のセッティングを示す。高電圧印加試験の試験条件を表4.1に示す。

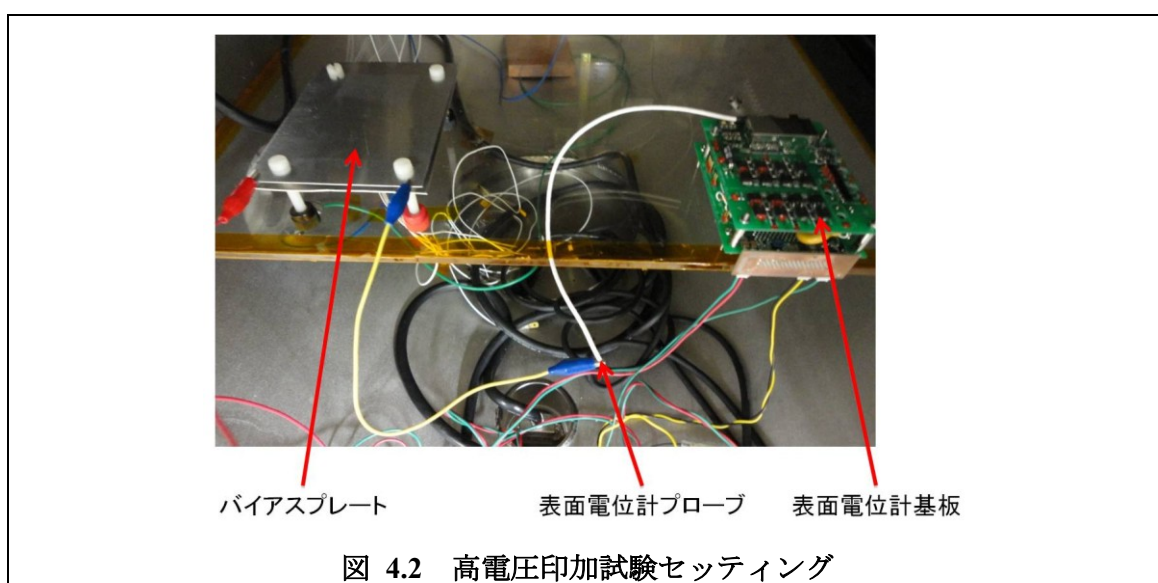
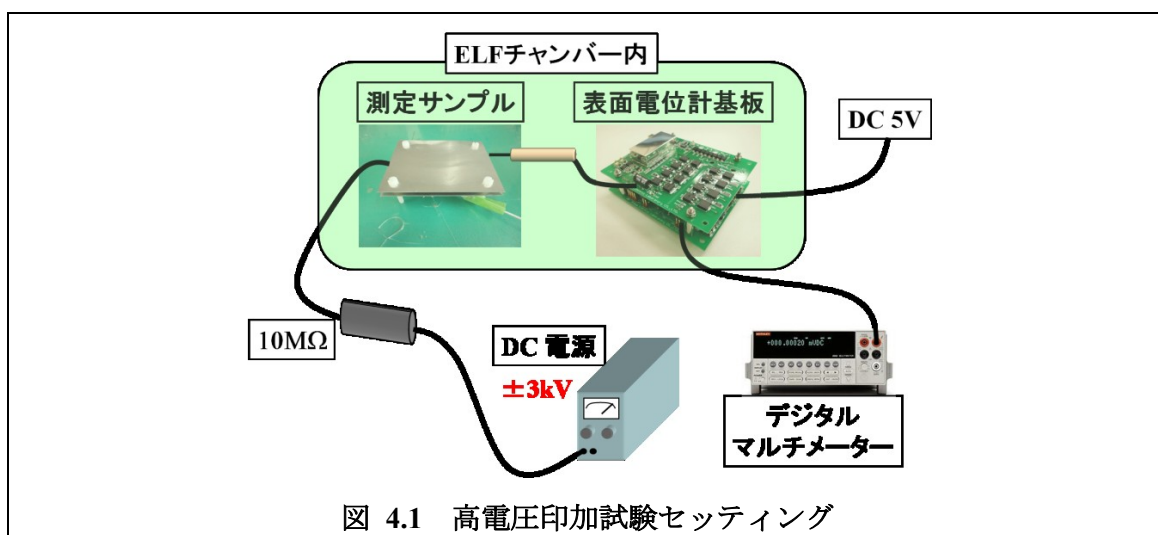


表 4.1 高電圧印加試験条件

使用チャンバー	ELFチャンバー
真空度	2×10^{-4} Pa
試験温度	常温 (25 ~ 30°C)
バイアス電圧	± 3 kV

<試験方法>

真空容器内の真空度が表 4.1 に示す値まで達したことを確認し、表面電位計を動作させる。外部の直流電源からバイアスプレートに電圧を印加し、表面電位計の出力をモニタリングする。直流電源の電圧値を+3kV まで 500V 刻みで上昇し、正常に電圧計測がなされていることを確認する。その後、同様に直流電源の電圧値を-3kV まで降下し同測定を行う。

<評価基準>

表面電位計が正常に動作していることを判断する評価基準として、表面電位計の出力がプローブへのバイアス電圧に比例していること、そして表面電位計の出力倍率が $1/(600 \pm 20)$ 以内に収まっていることが挙げられる。

<試験結果>

プローブ先端に ± 3 kVのバイアスを行い、表面電位計で電位を計測した。その結果を図4.3、表4.2に示す。図からも明らかなように、表面電位計の出力はバイアス電圧に比例しており、表面電位計が正常に動作していることを確認することができた。表面電位計の主力倍率（近似直線の傾き）は表4.2にまとめており、3回の測定で全て同じ結果となった。また基板上での放電も確認されなかった。このことから、本研究で用いる表面電位計は内部放電を起こすことなく、高電圧測定が正常に行えることを確認した。

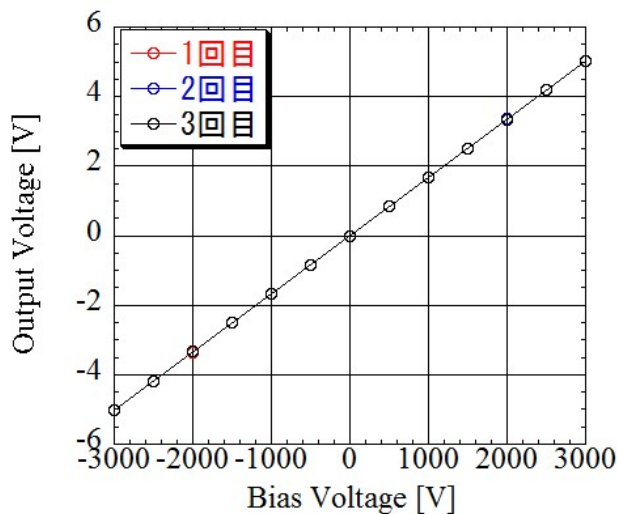


図 4.3 高電圧バイアス試験結果

表 4.2 得られた近似直線の傾き

	傾き
1回目	1/598
2回目	1/598
3回目	1/598

4.2 振動環境試験

この試験では表面電位計システムのロケット打ち上げ振動環境への耐性を確認することを目的としている。本試験は表面電位計システムを衛星システムに統合した状態で実施した。

<試験セッティング・試験条件>

図 4.4、4.5 に振動試験の様子を示す。図に示すように機軸方向（X 軸）と機軸直交方向（Y 軸、Z 軸）の 3 方向に対して加振する。加振条件を表 4.3 に示す。振動の種類はランダム振動、サイン振動、準静的加重、モーダルサーベイの 4 種類でこの 4 種類を表 4.4 示す加振スケジュールに沿って実施する。ランダム、サイン、準静的加重のそれぞれの加振の間にモーダルサーベイ加振を行い、衛星に取り付けた加速度センサ出力から衛星構造に異常が生じていないかを判断する。表 4.3 中の AT は受け入れ試験レベル、QT は認定試験レベルの意味で、AT 試験はフライトモデルの試験時に適用され、実運用で受ける負荷と同レベルの負荷を与え、不具合が起きないことを確認する。この試験は人的ミスや素子の初期不良などがなく、正常に組み上げられていることを確認する目的で実施される。それに対し QT 試験では実負荷の 1.5 倍の負荷を与え、システムが十分な環境耐性を確認する目的で実施される。この試験は STM や EM 段階で適用される。これは衝撃試験についても同様である。

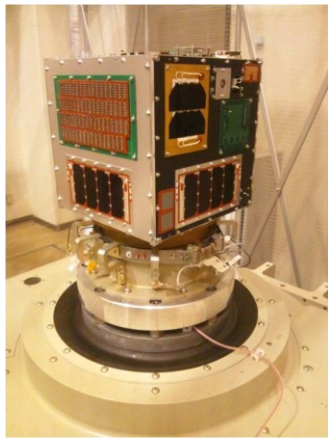


図 4.4 振動試験（機軸方向）

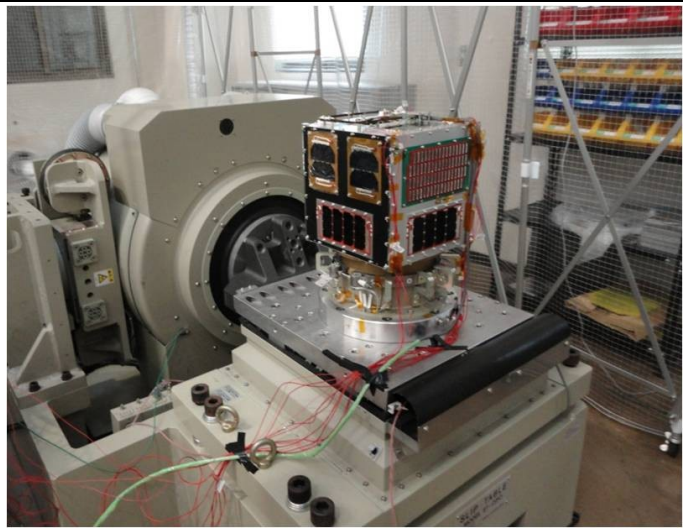


図 4.5 振動試験（機軸直行方向）

表 4.3 振動試験加振条件

種類	試験レベル	加振方向	周波数[Hz]	PSD[G ² /Hz]		実効値 [Grms]	加振時間 [sec]
				加速度[G _{0-P}]			掃引速度 [oct/min]
正弦波	AT	X 軸	5~100	24.52m/ s _{0-P} ²			4oct/min (UP and DOWN)
				2.5(G _{0-P})			
		Y-Z 軸	5~100	19.62m/s _{0-P} ²			
				2.0 (G _{0-P})			
	QT	X 軸	5~100	30.7(m/ s _{0-P} ²)			2oct/min (UP and DOWN)
				3.13(G _{0-P})			
		Y-Z 軸	5~100	24.5m/s _{0-P} ²			
				2.50 (G _{0-P})			
準静的荷重 (サインバースト)	AT	X 軸	0~5	圧縮	-58.84m/s _{0-P} ²		6sec
					-6.0 (G _{0-P})		
				引張	49.04 m/s _{0-P} ²		
		5.0 (G _{0-P})					
		Y-Z 軸	0~5	圧縮	±49.04 m/s _{0-P} ²		
					5.0 (G _{0-P})		
	引張			±49.04 m/s _{0-P} ²			
		5.0 (G _{0-P})					
	QT	X	20	圧縮	58.8m/s _{0-P} ²		6sec
					引張		
		Y-Z	20	圧縮		49.0m/s _{0-P} ²	
					引張	6.25(G _{0-P})	
ランダム (モーダルサーベイ)	低レベル	3 軸 共通	20~2000	1.16E-4 G ² /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 ² /Hz			
	QT	3 軸 共通	20~200	+3dB/oct		11.0-	120sec
			200~2000	0.064G ² /Hz			

表 4.4 加振スケジュール

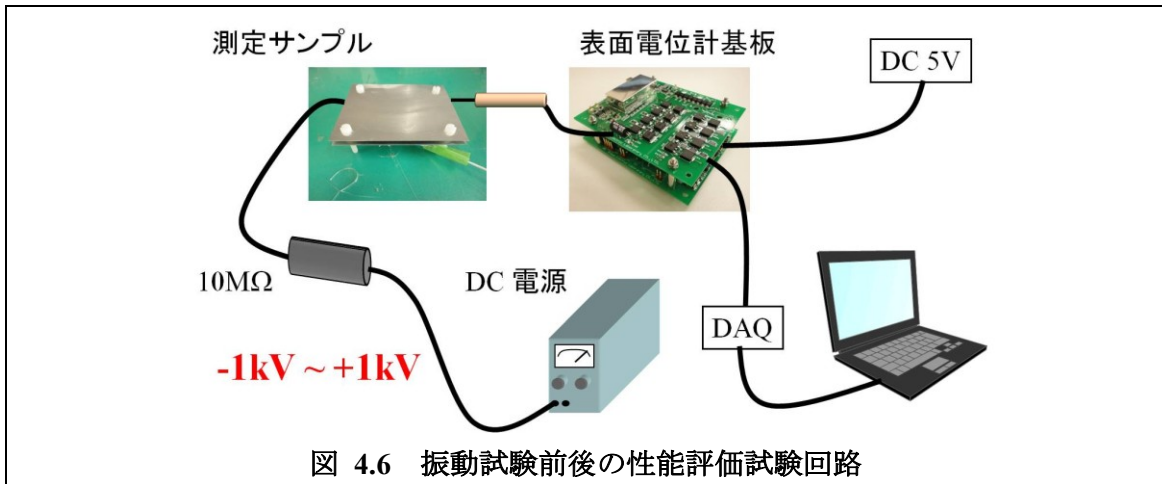
加振方向	作業番号	試験
X 軸加振	2-1	X 軸モーダル
	2-2	X 軸正弦波 QT
	2-3	X 軸モーダル
	2-4	X 軸準静的荷重 QT
	2-5	X 軸モーダル
	2-6	X 軸ランダム QT
	2-7	X 軸モーダル
Y 軸加振	2-8	Y 軸モーダル
	2-9	Y 軸正弦波 QT
	2-10	Y 軸モーダル
	2-11	Y 軸準静的荷重 QT
	2-12	Y 軸モーダル
	2-13	Y 軸ランダム QT
	2-14	Y 軸モーダル
Z 軸加振	2-15	Z 軸モーダル
	2-16	Z 軸正弦波 QT
	2-17	Z 軸モーダル
	2-18	Z 軸準静的荷重 QT
	2-19	Z 軸モーダル
	2-20	Z 軸ランダム QT
	2-21	Z 軸モーダル

<試験方法>

表面電位計システムの振動環境への耐性を評価するため、振動試験前後で評価試験を実施し、その結果を比較する。振動試験前後の性能評価試験は図 4.6 に示す回路で実施する。バイアスプレートに直流電源で±1kV を印加し、表面電位計を用いて印加されている電圧を測定する。振動試験前後で表面電位計の出力倍率が 1/600 から変化していないことを確認し、振動環境への耐性とする。

<評価基準>

振動試験前後の性能評価試験の評価基準は高電圧印加試験と同様であるため省略する。



<試験結果>

振動試験前後でプローブ先端に±1kVの電圧を印加し、表面電位計により計測を行った。試験前後の測定結果を図4.7、4.8に示す。振動試験前は装置の都合上、正側のみのバイアス試験しか実施できなかったが、振動試験前後でその性能に差は生じていないことが確認できる。基板には振動対策を施し基板上の素子の脱落等に備えた。このことから、本研究で用いる表面電位計基板が振動環境への耐性を有していることを確認した。

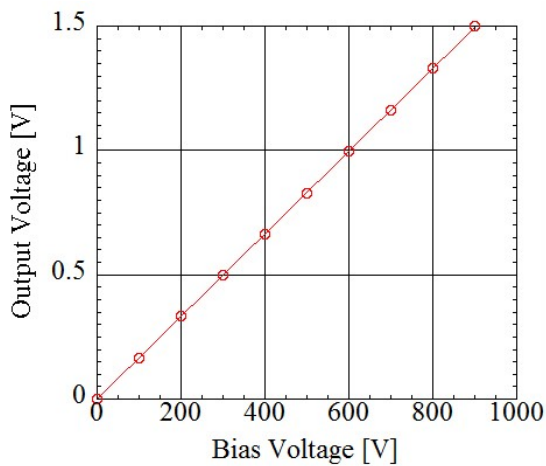


図 4.7 振動試験前
(出力倍率：600)

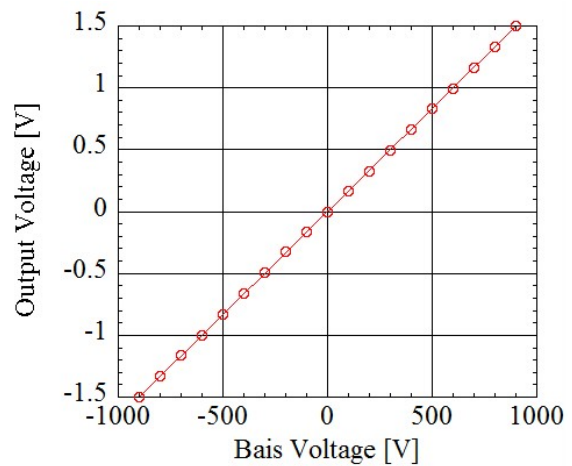


図 4.8 振動試験後
(出力倍率：602)

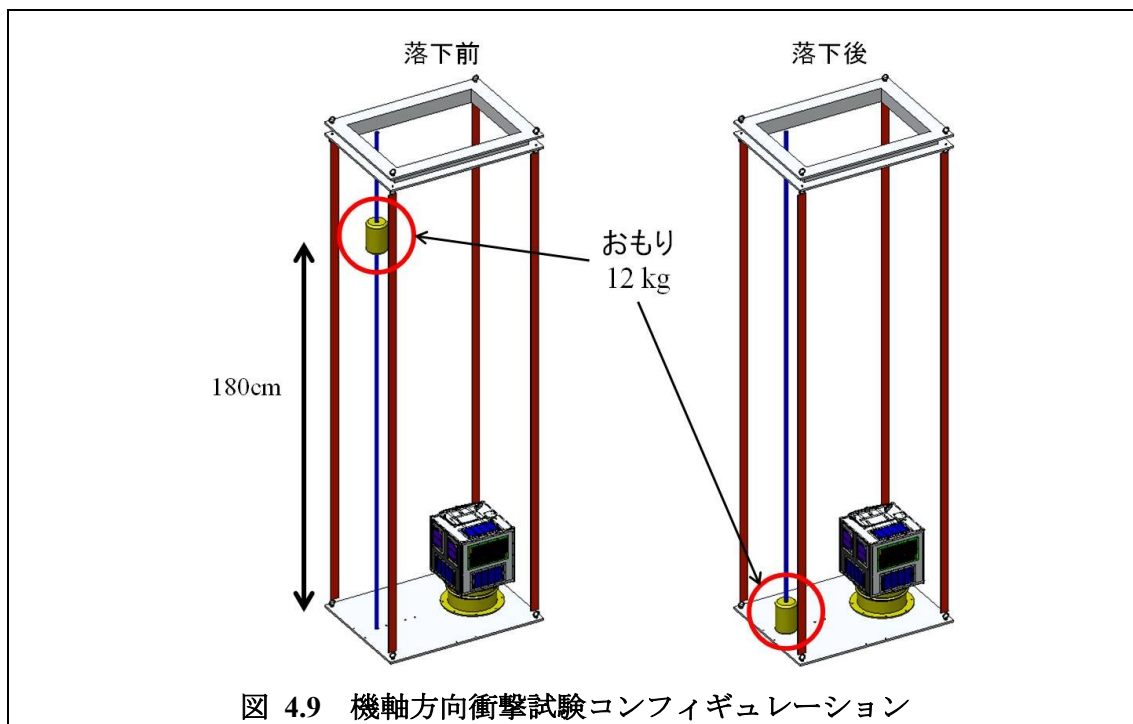
4.3 衝撃環境試験

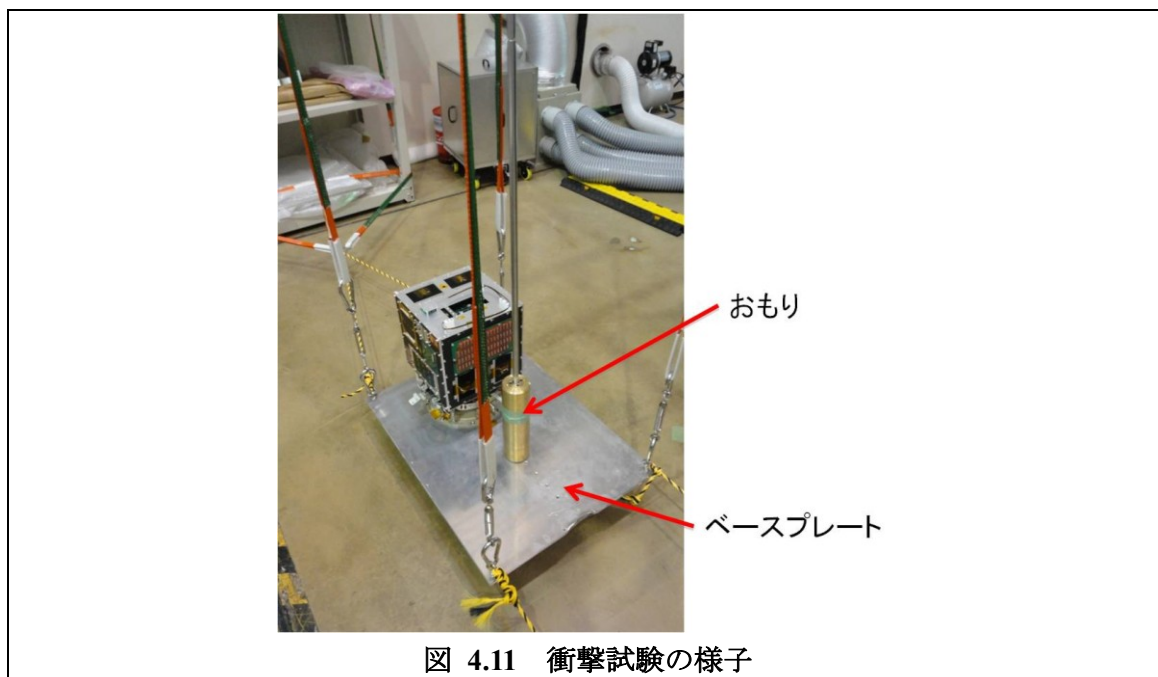
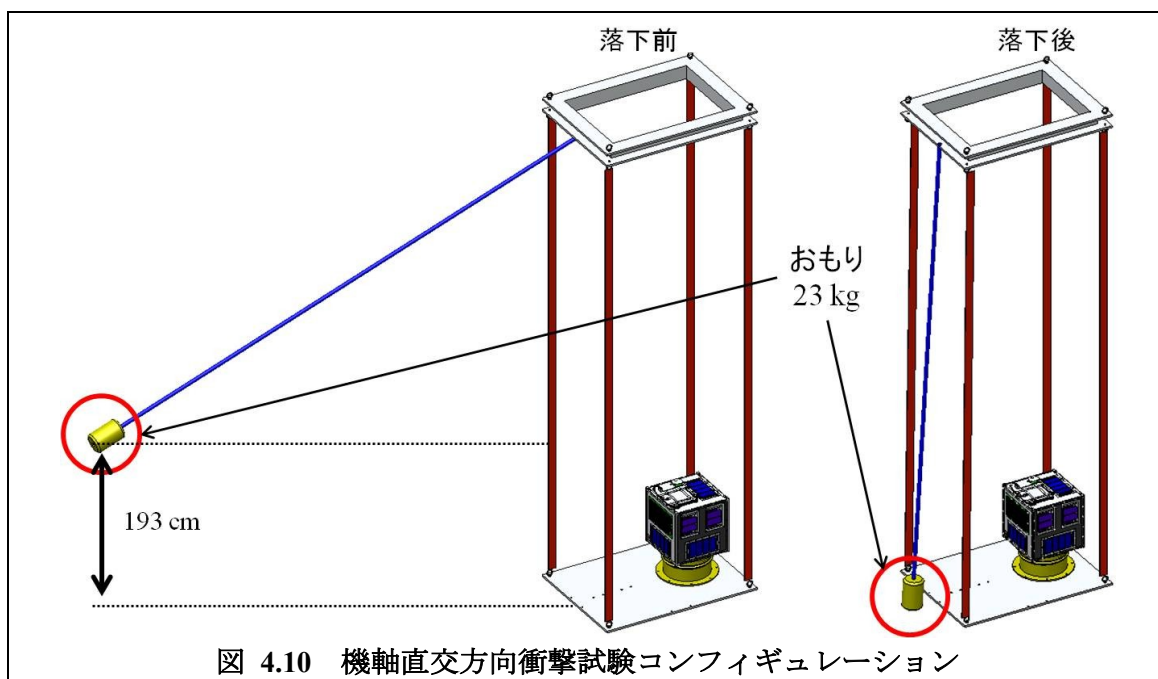
この試験では表面電位計システムの衛星分離衝撃環境への耐性を確認することを目的としている。本試験は表面電位計システムを衛星システムに統合した状態で実施した。

<試験セッティング・試験条件>

図 4.9、4.10 に衝撃試験の様子を示す。衝撃試験も振動試験と同様に 3 軸方向の試験

を実施する。衛星を固定したベースプレート上に錘を落下させロケットからの分離衝撃を模擬する。機軸方向の試験では図 4.9 に示すように重量 12kg の錘を垂直にベースプレートに落下させる。機軸直行方向の試験の場合は、図 4.10 のように重量 23kg の錘を振り子運動で落下させ、ベースプレートに衝撃を与える。AT 試験では錘の落下は各軸 1 回ずつであるが、QT 試験の場合は各軸 2 回落下させ、衛星に十分な衝撃耐性が備わっていることを評価した。図 4.11 に実際の衝撃試験の様子を示す。





<試験方法>

表面電位計システムの衝撃環境への耐性を評価するため、衝撃試験前後で評価試験を実施し、その結果を比較する。衝撃試験前後の性能評価試験内容は振動試験と同様であるためここでは省略する

<評価基準>

衝撃試験前後の性能評価試験の評価基準は高電圧印加試験と同様であるため省略す

る。

<試験結果>

衝撃試験前後でプローブ先端に±1kVの電圧を印加し、表面電位計により計測を行った。試験前後の測定結果を図4.12と4.13に示す。試験前後のグラフからその性能に差は生じていないことが確認できる。このことから、本研究で用いる表面電位計基板が衝撃環境への耐性を有していることを確認した。

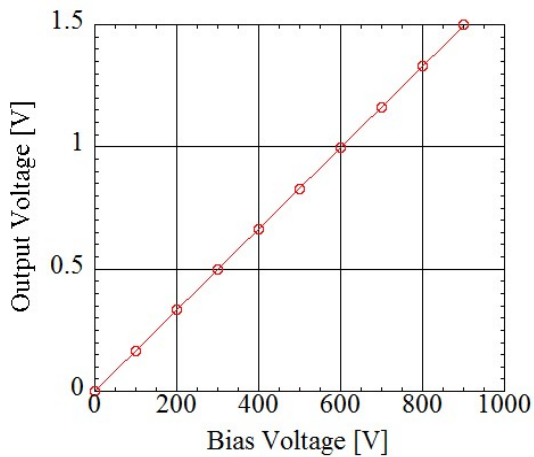


図 4.12 衝撃試験前

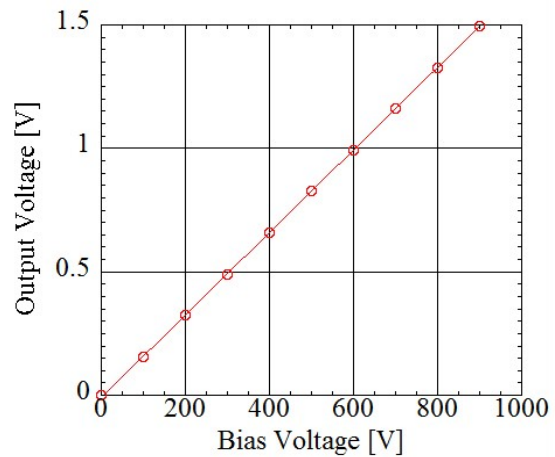


図 4.13 衝撃試験後

4.4 熱真空環境試験

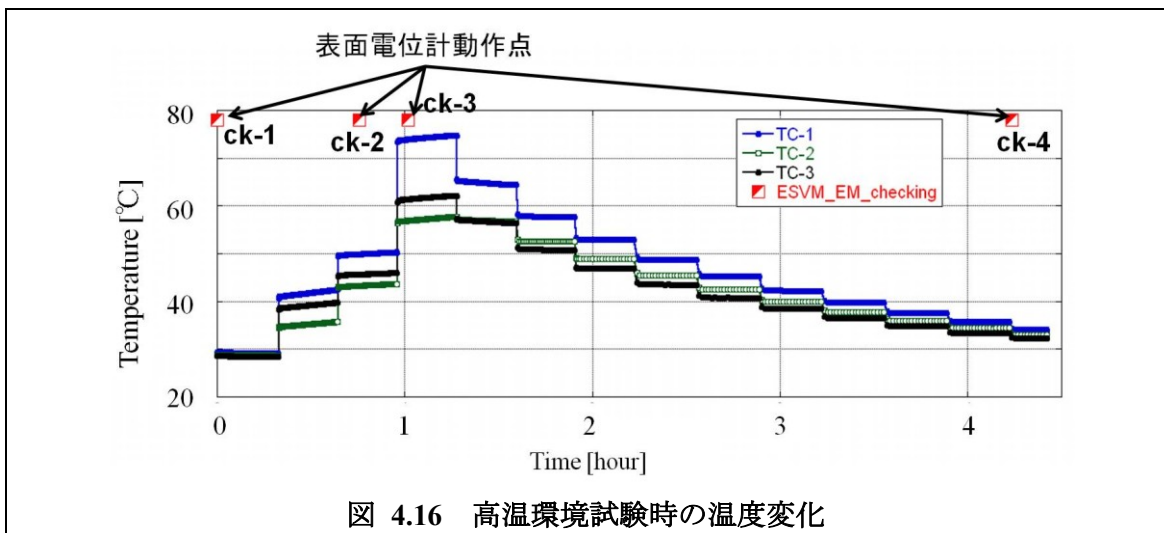
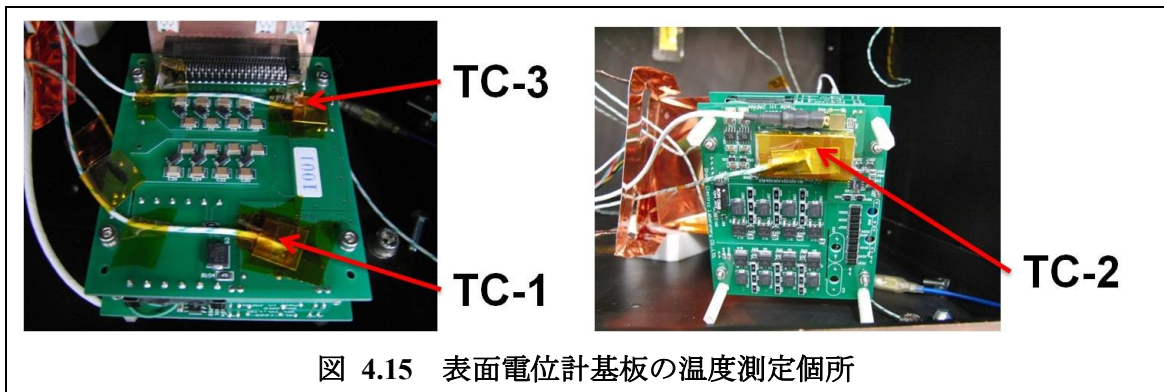
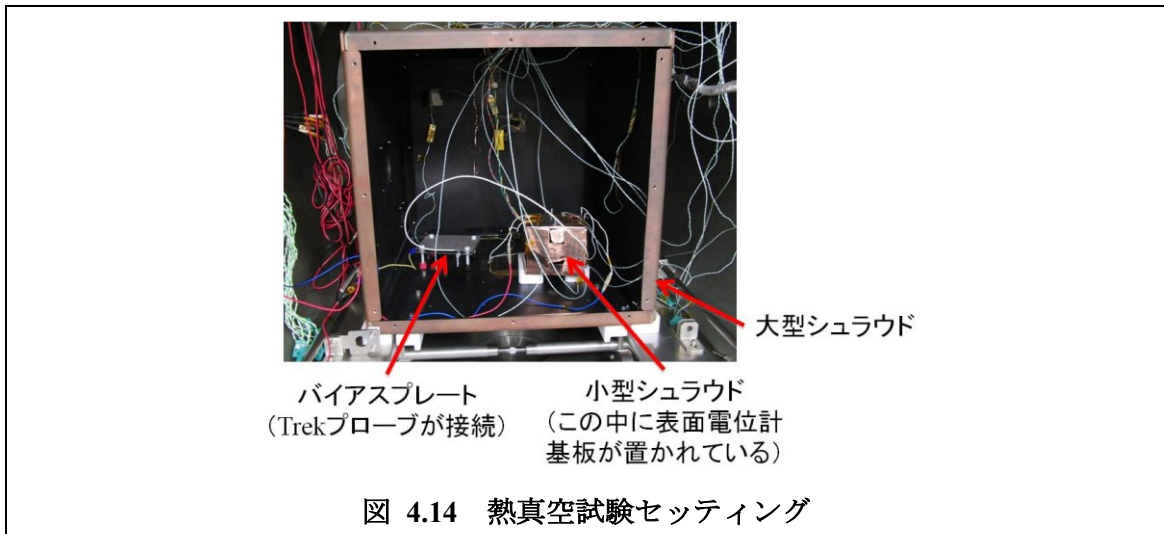
この試験では真空低温・高温環境への耐性を評価することを目的としている。

<試験セッティング・試験条件>

図 4.14 に示すように真空容器内に大型シュラウドを設置し、その中に小型シュラウドを置く。表面電位計基板は小型シュラウドの中に設置されており、高温および低温環境を模擬する。大型シュラウド内のバイアスプレートには表面電位計プローブが接続されており、このバイアスプレートに外部から高電圧を印加し、印加したバイアス電圧を表面電位計の出力から見積もる。熱真空試験は表 4.5 に示す試験環境を模擬して実施した。基板の温度測定は熱電対によって行い、図 4.15 に示す 3 カ所に熱電対を取り付けた。高温環境試験および低温環境試験時の基板の温度変化を図 4.16、4.17 に示す。

表 4.5 熱真空試験環境

	真空度	基板表面温度
高温環境	3×10^{-4} Pa	60~75°C
低温環境	1.6×10^{-4} Pa	-40 ~ -60°C



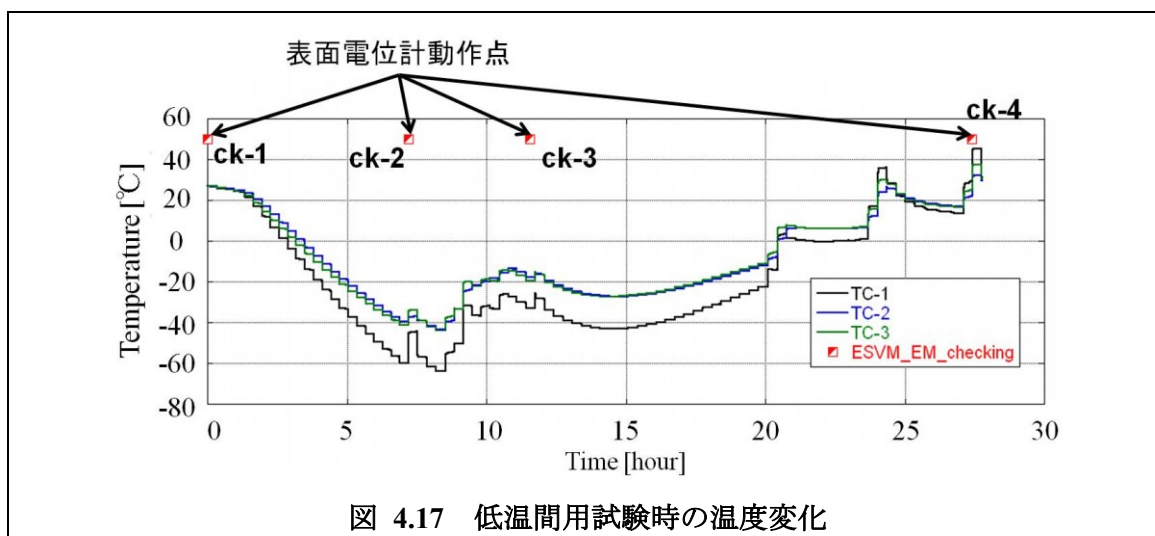


図 4.17 低温間用試験時の温度変化

<試験方法>

まず基板温度が常温時に表面電位計を動作させ、バイアスプレートに印加した電圧を計測する。その後基板温度を変化させ、基板に取り付けた3つの熱電対が、表4.5に示した温度範囲に収まった時に再び表面電位計基板を動作させる。各温度環境下でバイアスプレートにバイアスした電位を測定し、表面電位計の出力倍率が温度環境によって変化しないことを確認する（※基板上に温度差が生じるため、厳密には全ての熱電対が表4.5に示す温度条件を満たしているわけではない）。熱真空試験の流れを表4.6に示す。

表 4.6 試験の流れ

試験環境	詳細
大気常温	大気常温
真空低温	真空常温
	真空低温①
	真空低温②
	真空常温
真空高温	真空常温
	真空高温①
	真空高温②
	真空常温
大気常温	大気常温

<評価基準>

熱真空試験の評価基準は高電圧印加試験と同様であるため省略する。

<試験結果>

高温環境、低温環境下でともにプローブ先端に0~1 kVのバイアスを行い、表面電位計で帯電電位を計測した。その結果を図4.18、4.19に示す。図からも明らかなように、表面電位計の出力はバイアス電圧に比例しており、表面電位計が正常に動作していることを確認することができる。表面電位計の主力倍率（近似直線の傾き）は表4.7にまとめられており、基板の温度環境によらず、ほぼ一定（1/600）であることを確認した。このことから、本研究で用いる表面電位計基板が熱真空環境への耐性を有していることを確認した。

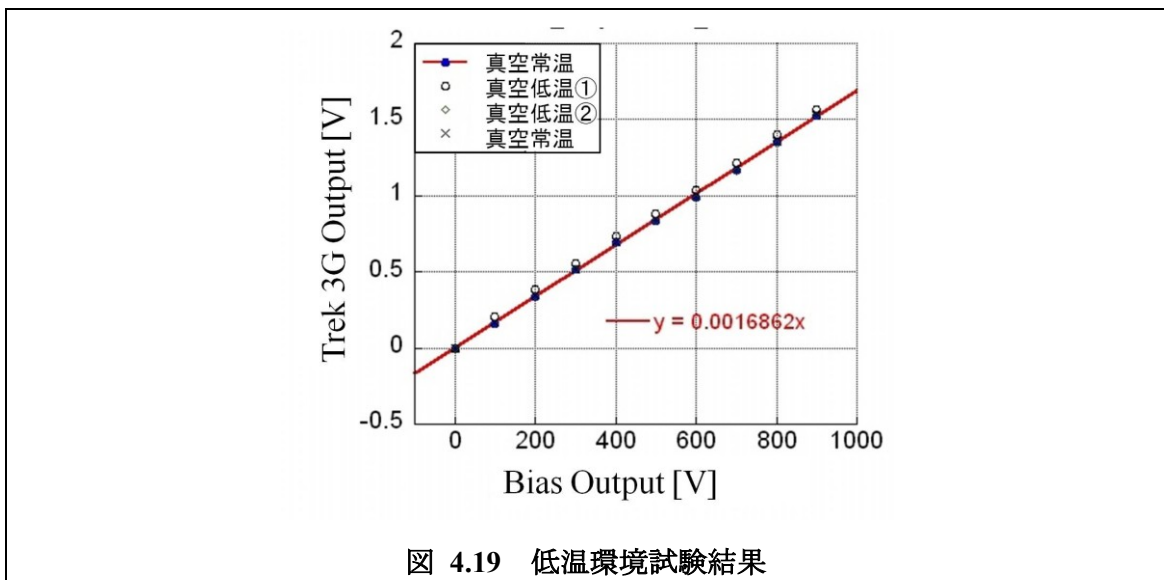
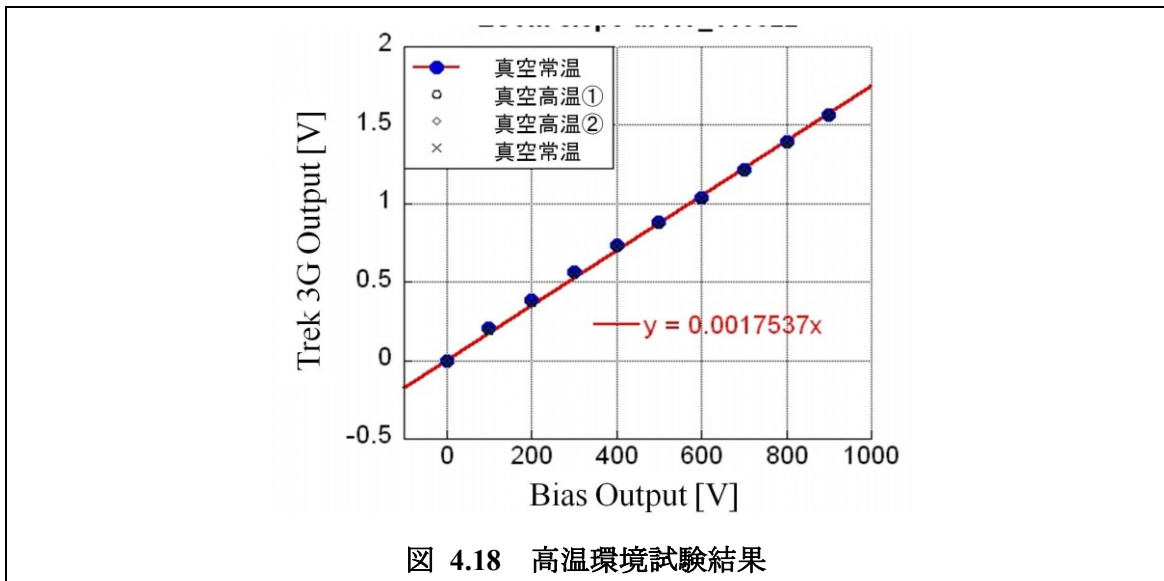


表 4.7 熱真空試験の出力倍率の変化

	表面電位計の出力倍率（グラフの近似直線の傾き）
試験前_大気常温測定	1/596
真空高温測定	1/590
真空低温測定	1/593
試験後_大気常温測定	1/593

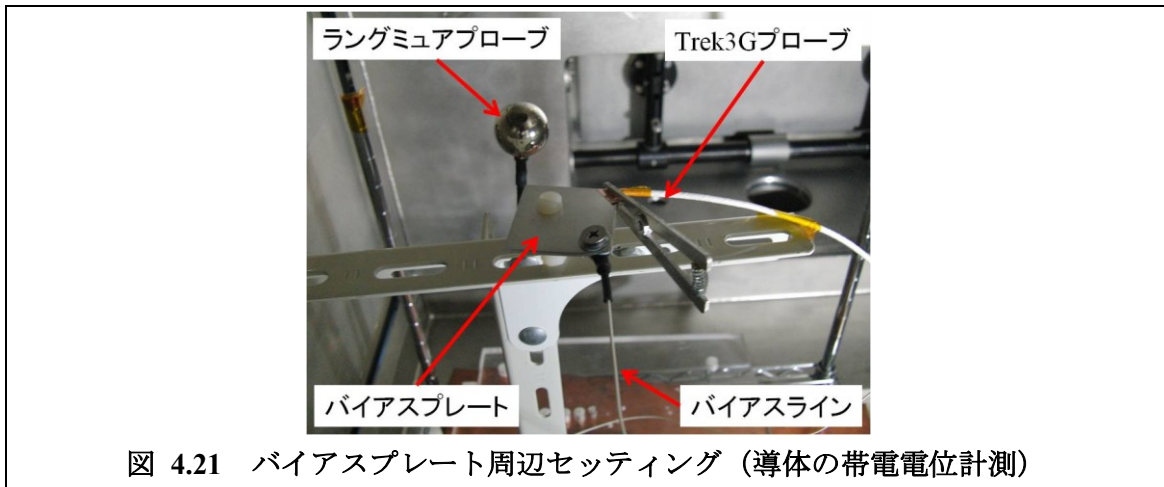
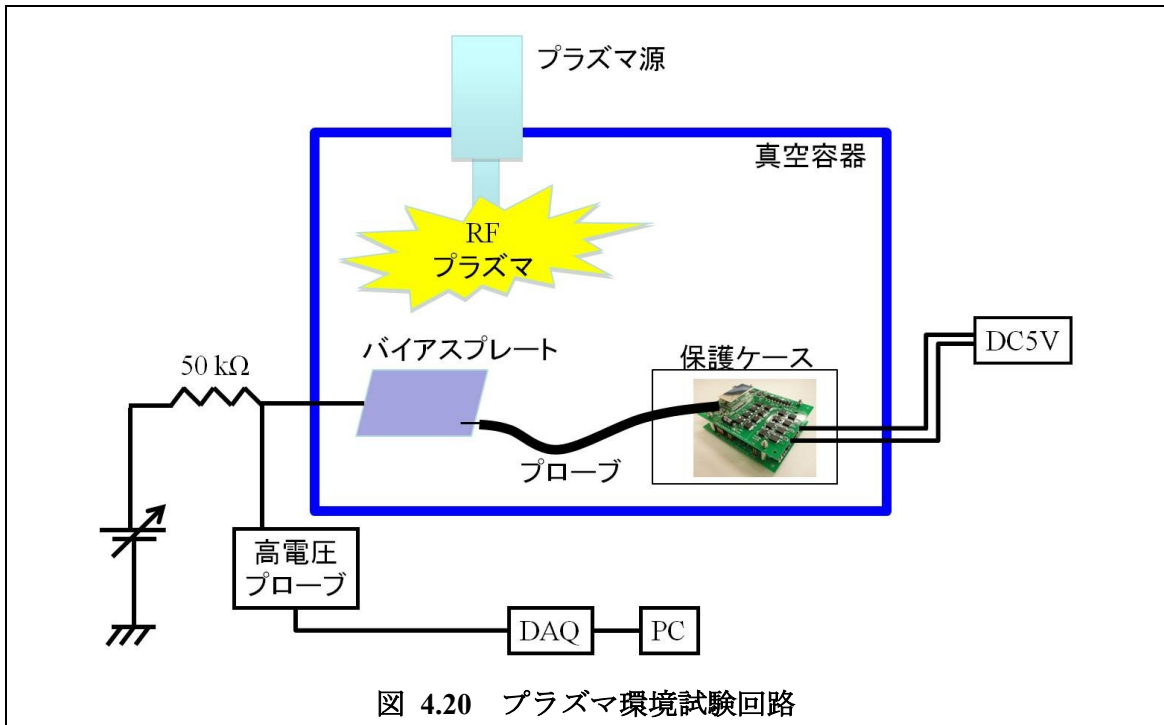
ここでは表面電位計単体での熱真空試験について記述したが、衛星システムに統合した状態でも同様の試験方法で熱真空試験を実施し、正常にバイアス電圧を測定できることを確認している。

4.5 プラズマ環境試験

鳳龍式号は低軌道を周回する。低軌道は高密度プラズマに満たされておりプラズマ環境下でも正常に帯電電位の測定が出来ることを確認しなければならない。プラズマ環境への耐性を評価するためにプラズマ環境試験を実施した。

<試験セッティング・試験条件>

図 4.20 にプラズマ環境試験時の試験回路を示す。真空容器内に表面電位計基板とバイアスプレートを設置し、プローブを接触させる。プラズマ源の下にバイアスプレートが位置するようにセッティングし、表面電位計基板はアルミで出来た保護ケース内に設置する。図 4.21 に示すようにバイアスプレート付近にリングミュアプローブを設置し、バイアスプレート付近のプラズマパラメータを測定する。図 4.22 と表 4.8 にプラズマパラメータと試験条件を示す。また絶縁体の帯電電位測定の際の試験サンプルや各種試験条件は図 4.23、4.24、表 4.9 に示している。



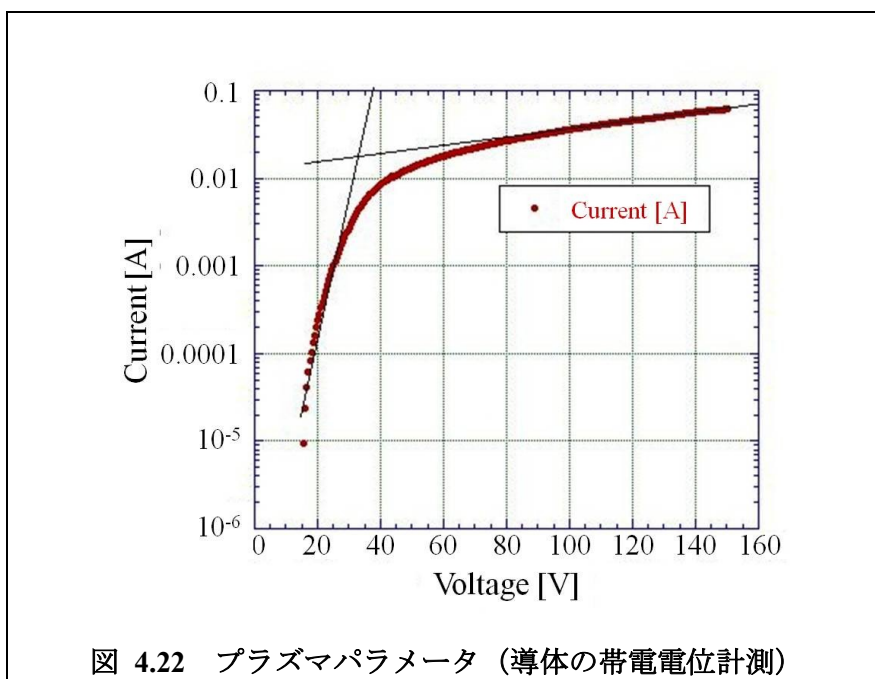


図 4.22 プラズマパラメータ (導体の帯電電位計測)

表 4.8 プラズマパラメータ (導体の帯電電位計測)

電力	20W
プラズマ温度	2.3 eV
プラズマ密度	$5.5 \times 10^{13} / \text{m}^3$
デバイ長	1.5 mm
アルゴンガス流量	6 ccm
真空度	$4.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$



図 4.23 バイアスプレート周辺セッティング (絶縁体の帯電電位計測)

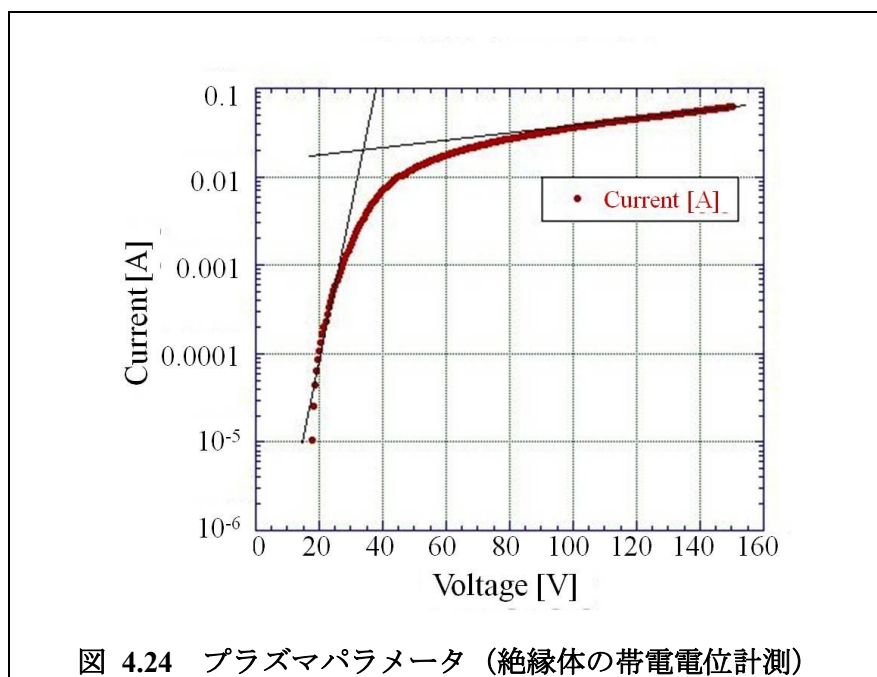


図 4.24 プラズマパラメータ（絶縁体の帯電電位計測）

表 4.9 プラズマパラメータ（絶縁体の帯電電位計測）

電力	20W
プラズマ温度	2.1 eV
プラズマ密度	$6.5 \times 10^{13} / \text{m}^3$
デバイ長	1.4 mm
アルゴンガス流量	4 ccm
真空度	$3.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$

<評価基準>

プラズマ環境試験の評価基準は高電圧印加試験と同様であるため省略する。

<試験方法>

上述した試験環境下でバイアスプレートに電圧を印加する。表面電位計の出力電圧をモニタリングし、正常に動作していることを確認する。この試験では初めプラズマ環境下で導体の帯電電位を測定する。その後、サンプルを絶縁体に変更しプラズマ環境下で絶縁体の帯電電位を測定できることを確認する。

<試験結果>

図4.25にプラズマ環境下における導体の帯電電位測定結果を、図4.26に絶縁体の測定結果を示す。青いプロットがバイアスプレートへの印加電圧、赤いプロットが表面電位計の出力電圧、黒いプロットが表面電位計の出力倍率を表している。両者のグラフともにバイアス電圧と表面電位計出力電圧が対応しており、出力倍率は1/600で一定であ

ることが確認できる。本研究で用いる表面電位計基板はプラズマ環境下で導体、絶縁体の帯電電位の測定が可能であり、このことからプラズマ環境への耐性を有していると評価した。

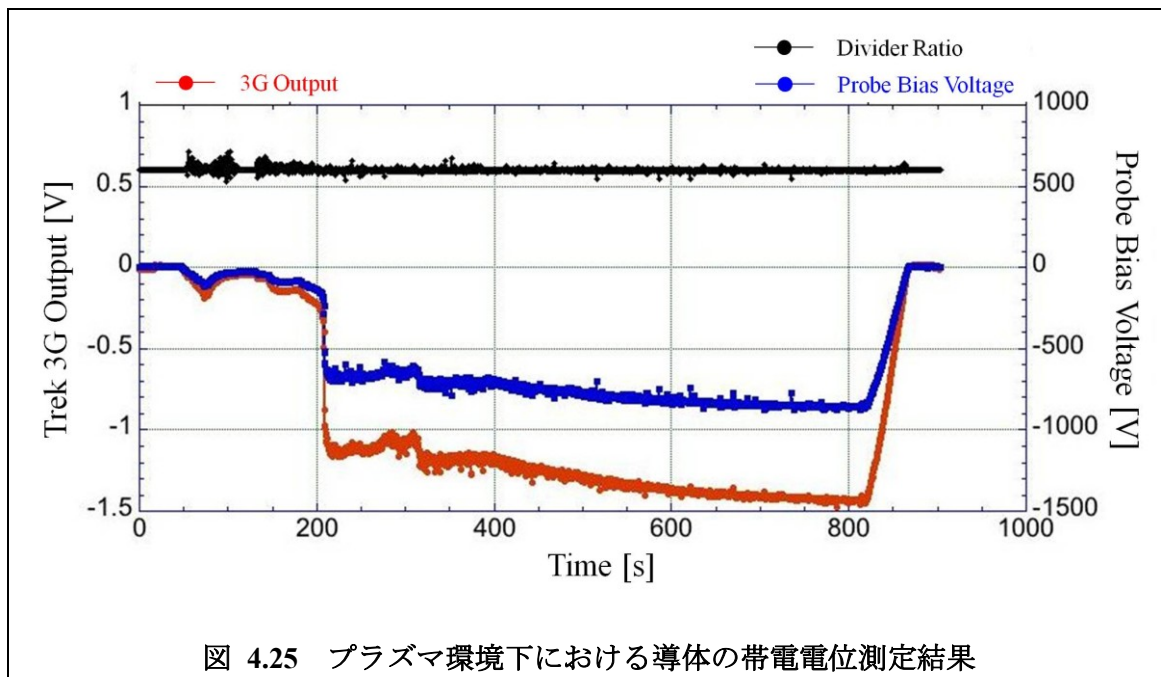


図 4.25 プラズマ環境下における導体の帯電電位測定結果

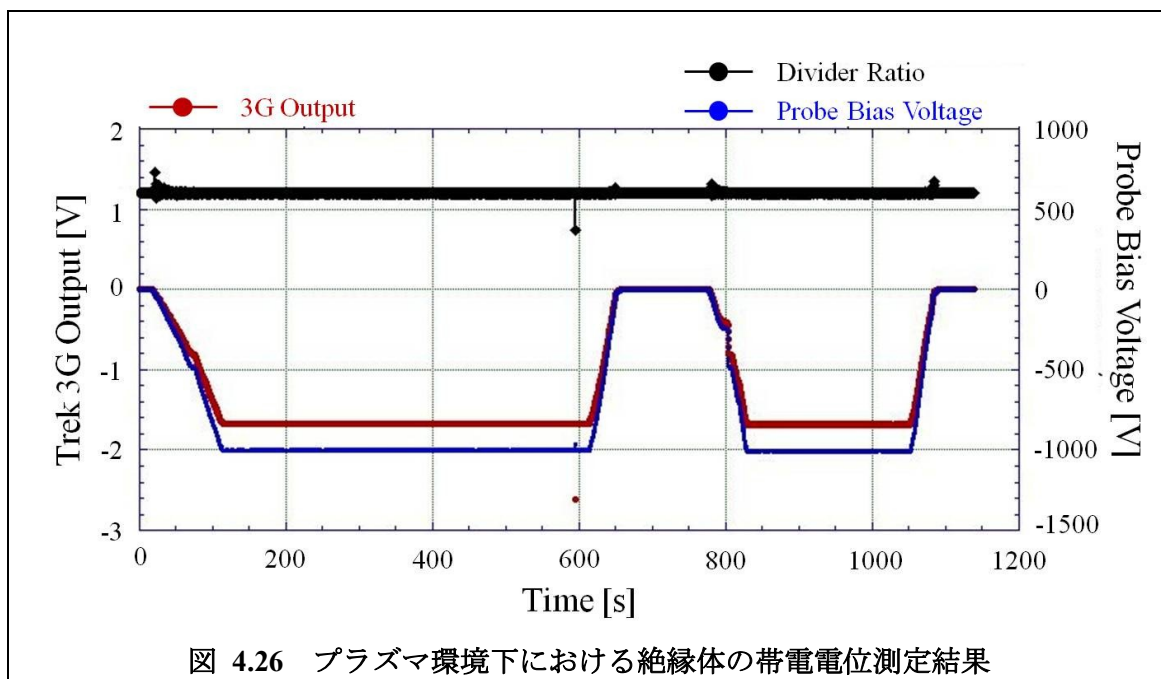
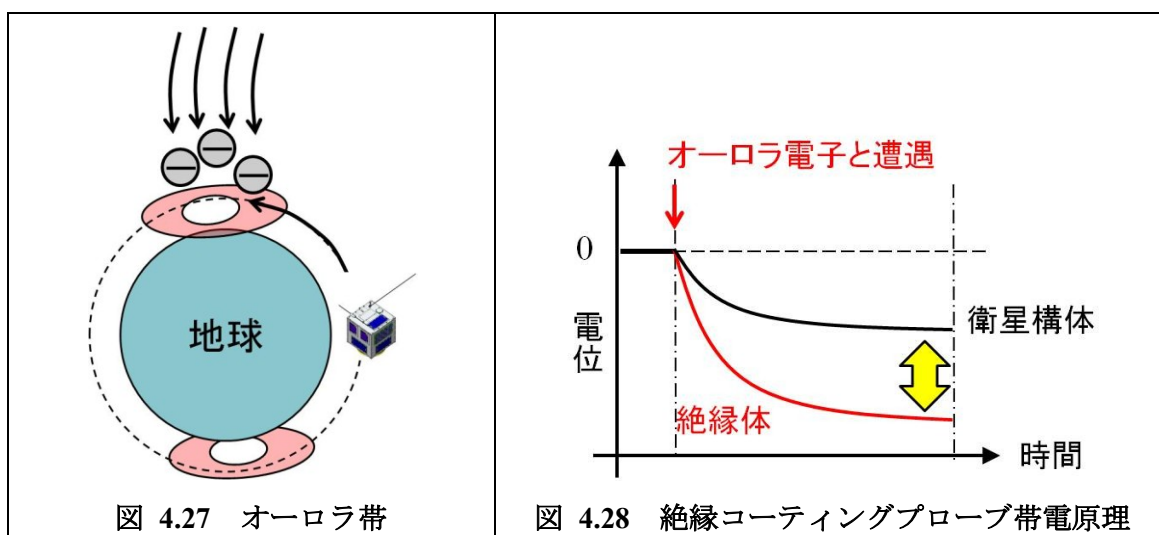


図 4.26 プラズマ環境下における絶縁体の帯電電位測定結果

4.6 高エネルギー粒子環境試験

プローブ先端に施した絶縁体コーティング部分は、図 4.27 に示すオーロラ帯を衛星が通過する際にオーロラ電子によって帯電する。表面電位計は図 4.28 のように衛星構体電位を基準にした絶縁体の帯電電位を測定する。この試験では、オーロラ電子を模擬した高エネルギー粒子をプローブに照射し、プローブ先端の絶縁体コーティング部分が帯電することを表面電位計の出力から確認する。表面電位計の健全性の確認は鳳龍式号に搭載されている SCM (Surface Charging Monitor) という機器で行う。SCM も衛星構体電位を基準とした絶縁体の帯電電位を計測し、既に軌道上で実証が確認されている SCM^[7]と表面電位計の両方で積もった絶縁体の帯電電位を比較し、両ミッションの健全性を評価する。



<試験セッティング・試験条件>

図 4.29 に表面電位計の絶縁コーティングプローブの構造を示す。プローブ先端にフッ素樹脂コーティングを施し、この部分にオーロラ電子を模擬した高エネルギー粒子を照射することで帯電させる。高エネルギー粒子照射試験で使用した試験サンプルを図 4.30 に示す。実際に衛星に搭載される条件を模擬するために搭載面は Z306 コーティングによって絶縁処理が施されている。そのパネル上に表面電位計プローブと SCM サンプルを設置した。SCM サンプルは図 4.30 に示す構造をしている。表面電位計プローブの帯電電位は表面電位計基板 (Trek3G) の出力から見積もり、SCM サンプルの帯電電位は試験装置に備え付けてある電位表面電位計 (Trek341) で測定する。本試験の試験条件を表 4.10 に示す。

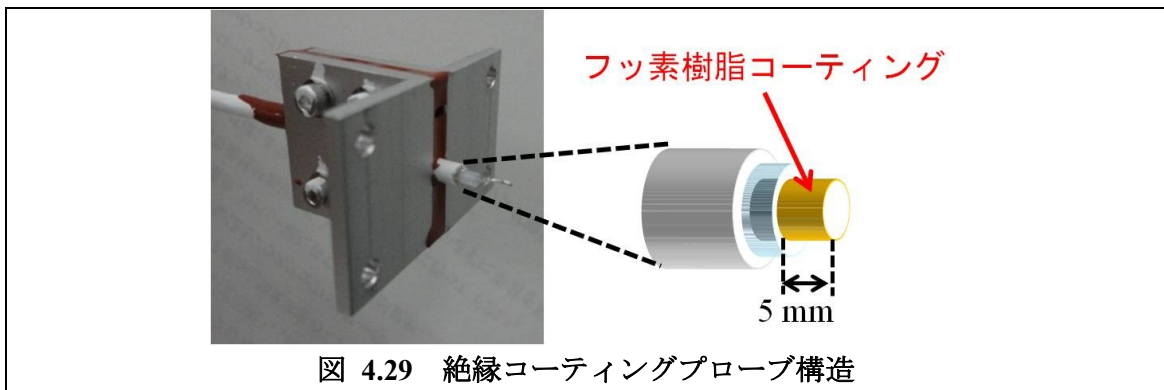


図 4.29 絶縁コーティングプローブ構造

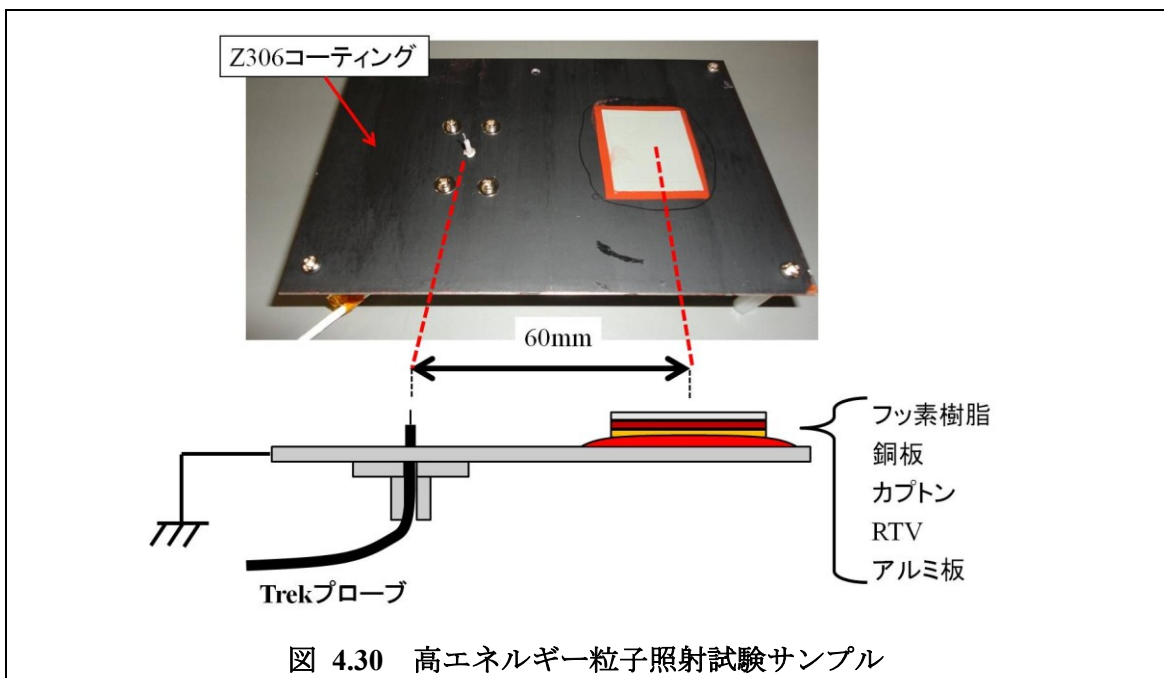


図 4.30 高エネルギー粒子照射試験サンプル

表 4.10 試験条件

真空度	2×10^{-3} Pa
ビームエネルギー	2.5~4.0 keV
ビーム照射時間	5 分
エミッション電流	20 μ A

<試験方法>

高エネルギー粒子照射試験では、表 4.10 に記載した条件でビーム照射を行い、5 分間の照射が終了後、表面電位計プローブと SCM の帯電電位を計測する。両サンプルの帯電電位の緩和をモニタリングしながら帯電電位の関係性を確認する。帯電電位の緩和が飽和したら表面電位計のスイッチを OFF にして測定を終了する。ビームエネルギーは 2.5keV から 0.5keV 刻みで順に照射する。

<試験結果>

高エネルギー粒子試験の結果を図4.31に示す。Time0で高エネルギー粒子ビームの照射を開始し、5分後にビームを停止した。ビーム停止後の表面電位計（Trek3G）の出力電圧からプローブ先端の帯電電位を見積った。プローブの帯電電位は照射ビームのエネルギーに依存していることは図からも明らかである。プローブは最大で-1.2kV程度の帯電を示し、帯電後も電位が維持されており、電荷の抜けが非常に遅いことが確認できた。

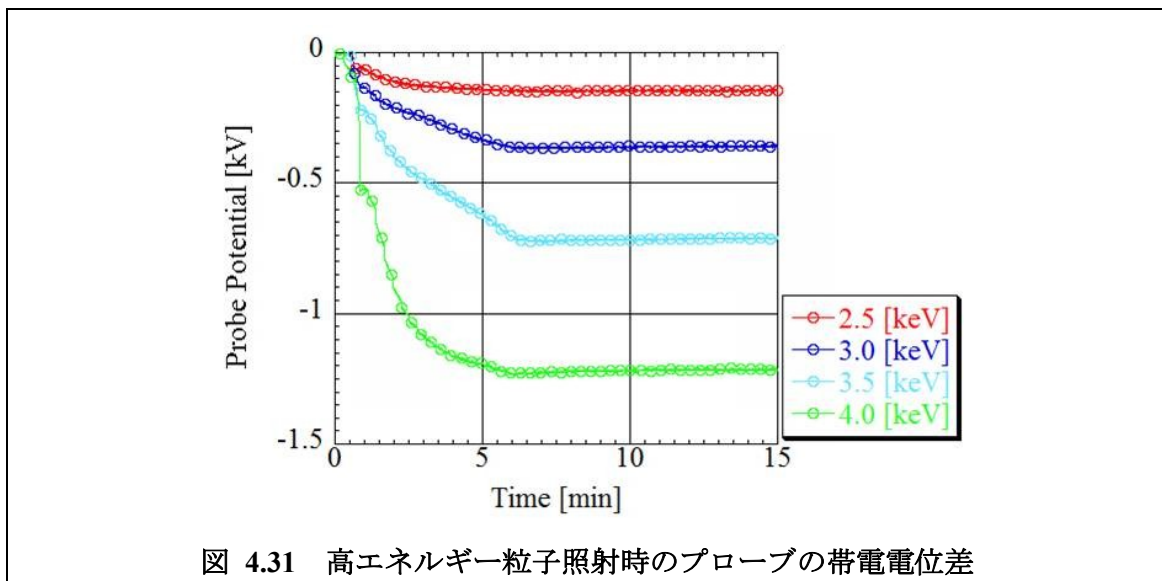


図 4.31 高エネルギー粒子照射時のプローブの帯電電位差

次に表面電位計プローブと SCM の帯電電位を比較する。図 4.32、4.33 に両者の比較結果を示す。この図からプローブと SCM サンプルの帯電電位には大きな差が生じていることが確認できる。この帯電電位の差については後ほど考察を行う。なお、図 4.33 においては、5 分間のビーム照射を行ってから表面電位計で測定を行っているため、約 6 分後に電位が下がっている。

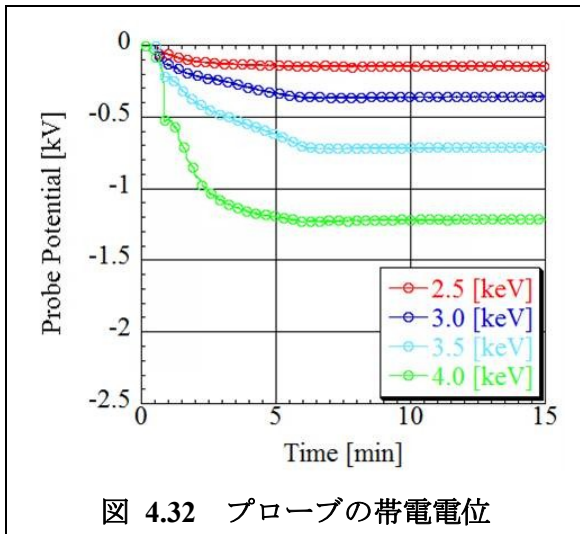


図 4.32 プローブの帯電電位

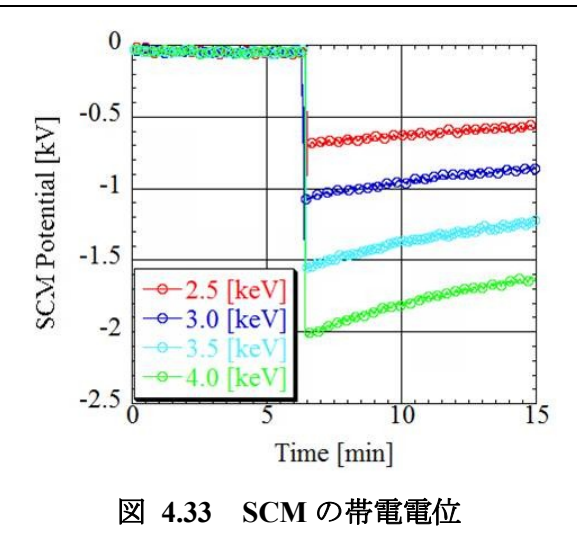


図 4.33 SCMの帯電電位

両者の帯電電位からプローブと SCM の帯電電位の関係性を確認する。図 4.34 にプローブと SCM のビームエネルギーによる帯電電位の違いを示す。両サンプルともに帯電電位はビームエネルギーに比例して大きくなり、プローブと SCM の帯電電位の差はビームエネルギーによらず一定であることが確認できる。このグラフを X 軸にプローブ、Y 軸に SCM の帯電電位として変換したものが図 4.35 である。このグラフがプローブと SCM の帯電電位の関係を示す。両者の帯電電位の間には以下のような関係を確認することができた。

$$\text{SCM} = 0.95 \times \text{Probe} - 0.87 \quad \dots (4.1)$$

表面電位計の出力電圧から見積もったプローブの帯電電圧と SCM の帯電電圧が上記の関係式で表すことが出来れば、両者の健全性を確認することが出来る。しかしこの試験では SCM の帯電電位を Trek341 で測定している。実際には SCM 素子に接続されている電子回路によって電位を算出する。したがって表面電位計と SCM の出力電圧から絶縁体の帯電電位を見積もり、両者の見積もり結果が一致することを確認しなければならない。

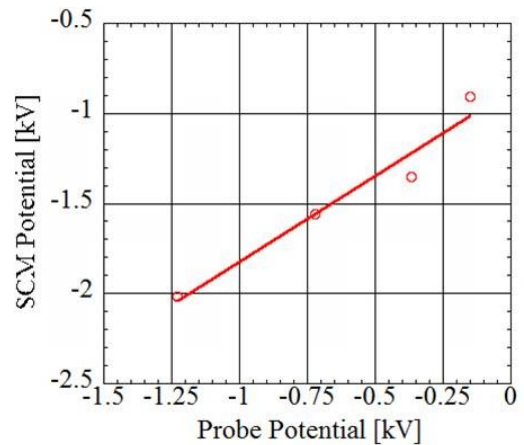
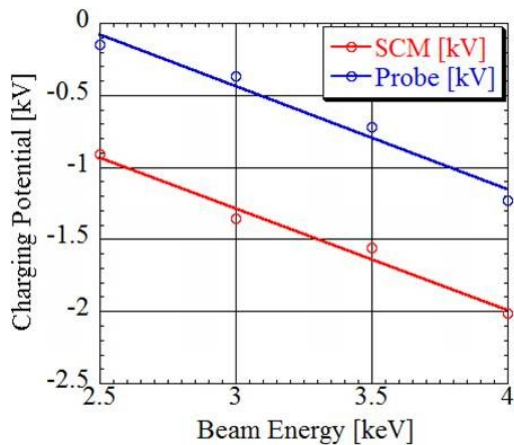


図 4.34 ビームエネルギーと帯電電位比較 図 4.35 プローブと SCM の帯電電位比較

<プローブと SCM の帯電電位の差について>

ここではプローブと SCM の帯電電位の差について考察する。まず1つの原因として、帯電電位面の違いが挙げられる。図 4.36 に試験サンプルと帯電時の模式図を示す。Trek341 は SCM の帯電電位を帯電面側から測定しているのに対し、Trek3G はプローブの帯電電位を帯電面の裏面から測定していることがわかる。この帯電面の違いにより、両者の帯電電位の計測値に差が生じたと考察できる。SCM の帯電測定に Trek341 を用いず、電子回路によって SCM の裏面から帯電電位を見積もると、両サンプルともに裏面からの電位計測を行うこととなるため、ここで生じた差の要因は改善されることが考えられる。

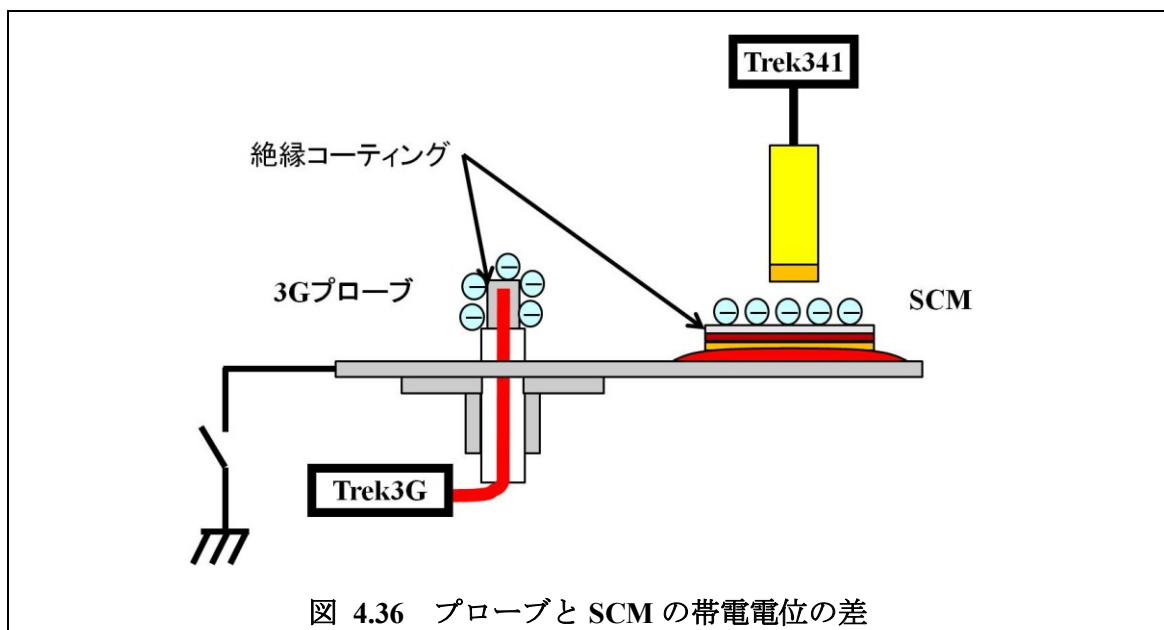
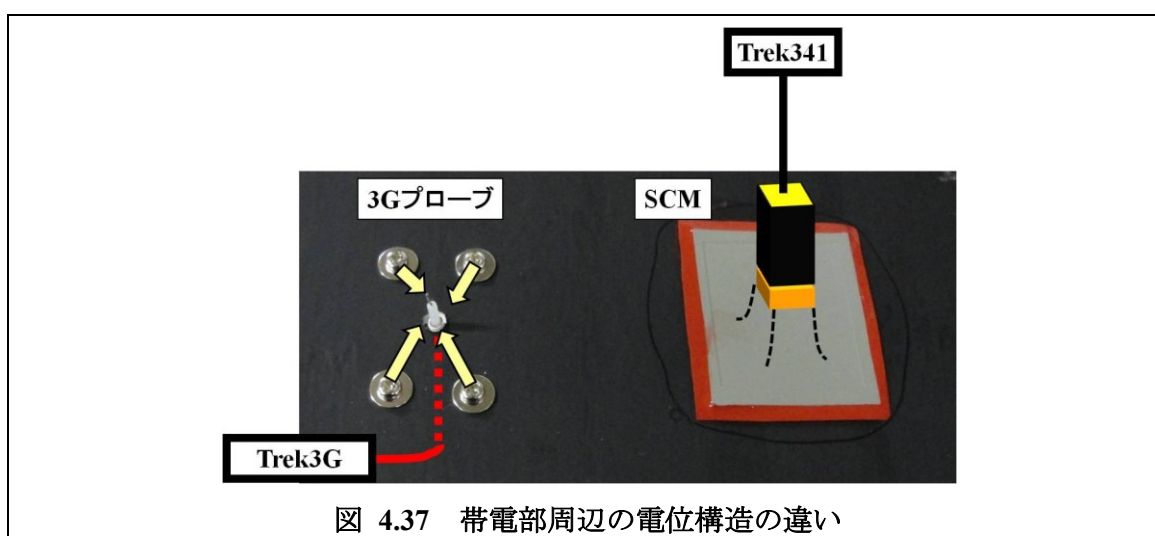


図 4.36 プローブと SCM の帯電電位の差

帯電電位に差が生じたもう 1 つの理由として考えられるのが、帯電部周辺の電位構造の違いである。図 4.37 に両サンプルの周辺構造について示す。Trek341 が SCM の帯電電位を測定する際に、Trek341 が測定する電位に影響を与える要因は何も存在しない。しかし、Trek3G の場合はプローブ周辺に固定用のネジ、ワッシャーが存在し、これらは GND 電位を持っている。そのためプローブ周辺に存在する GND 電位の影響を受けて、Trek341 で測定した SCM の帯電電位より低い電位を見積もったと考察することができる。これは SCM とプローブの固定方法が異なることが要因であり、軌道上も同コンフィギュレーションであるため、この条件で両者の帯電電位の関係性を確認する必要がある。



4.7 絶縁体測定試験

この試験では表面電位計システムを使用して絶縁体の帯電電位の計測が行えることを確認する。

<試験セッティング・試験条件>

図 4.38 に試験回路を示す。アルミ板上に絶縁体（セロハンテープ、フッ素樹脂コーティング）を固定し、固定した絶縁体上から表面電位計のプローブを接触させて帯電電位を計測する。

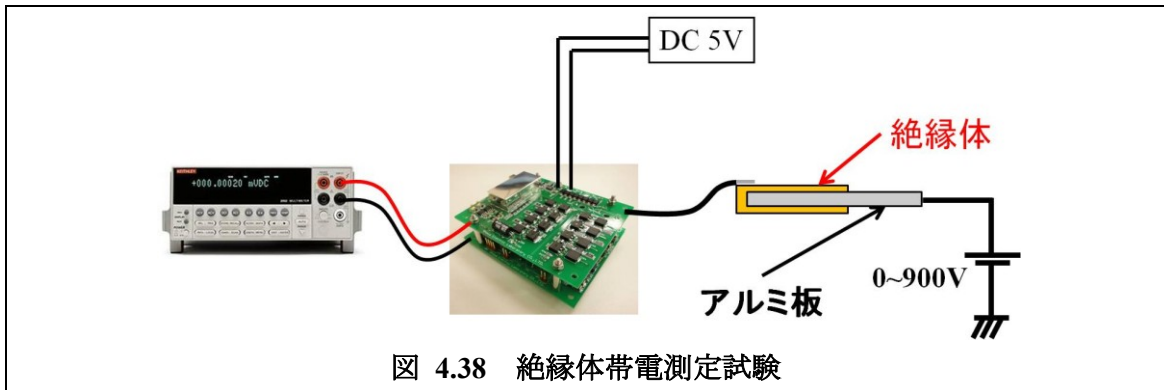


図 4.38 絶縁体帯電測定試験

<試験方法>

表面電位計の出力電圧をデジタルマルチメーターでモニタリングし、正常に絶縁体の帯電観測が行えていることを確認する。アルミ板へのバイアス電圧は0~1kVである。

<評価基準>

絶縁体測定試験の評価基準は高電圧印加試験と同様であるため省略する。

<試験結果>

絶縁体の帯電電位測定結果を図4.39に示す。測定したサンプルはアルミ板、厚さの異なる2種類のセロハン、フッ素樹脂コーティング材料である。図からも明らかなようにすべてのサンプルにおいて表面電位計の出力電圧が一致していることが確認できる。表面電位計の出力電圧はバイアス電圧に比例し、その出力倍率は1/598であった。このことから、本研究で用いる表面電位計基板が、正常に絶縁体の帯電電位を計測できることを計測できることを確認した。

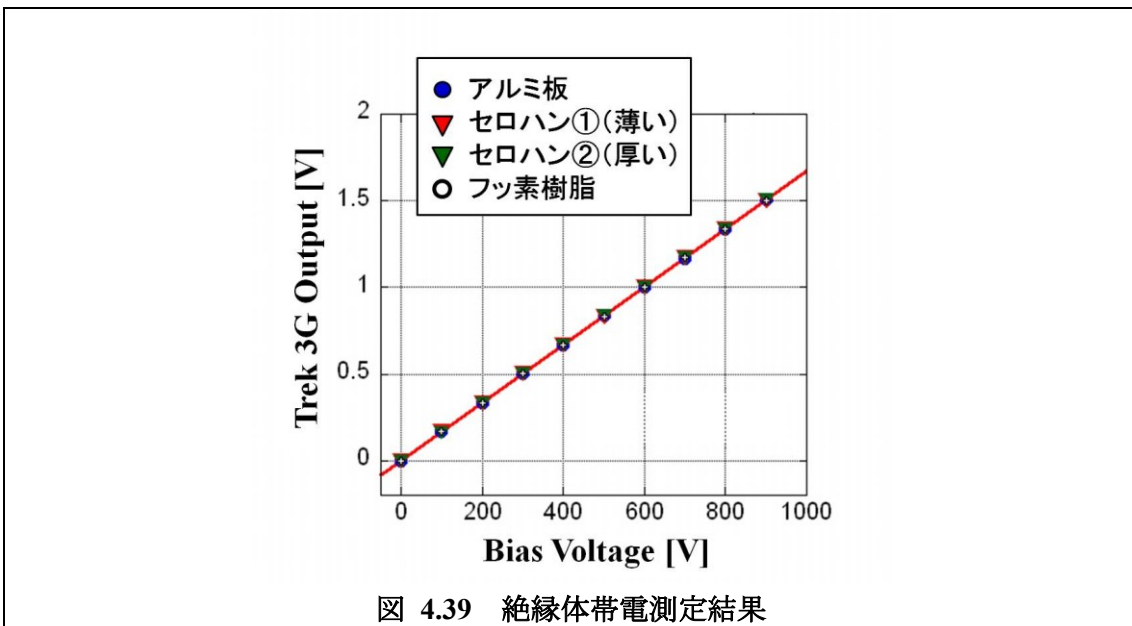


図 4.39 絶縁体帯電測定結果