

第2章 原理

2.1 民生用表面電位計

本研究ではトレック・ジャパン株式会社から提供して頂いた地上民生用表面電位計を用いて、超小型衛星にも搭載可能な表面電位計を開発することを目的としている。図 2.1 にトレック・ジャパン株式会社が開発している製品版の表面電位計を、また表 2.1 にその仕様をまとめる。表中にも示したように、この表面電位計の入力インピーダンスは非常に大きく、この特徴により帯電物質に影響を及ぼさない測定が可能になる。



図 2.1 製品版表面電位計

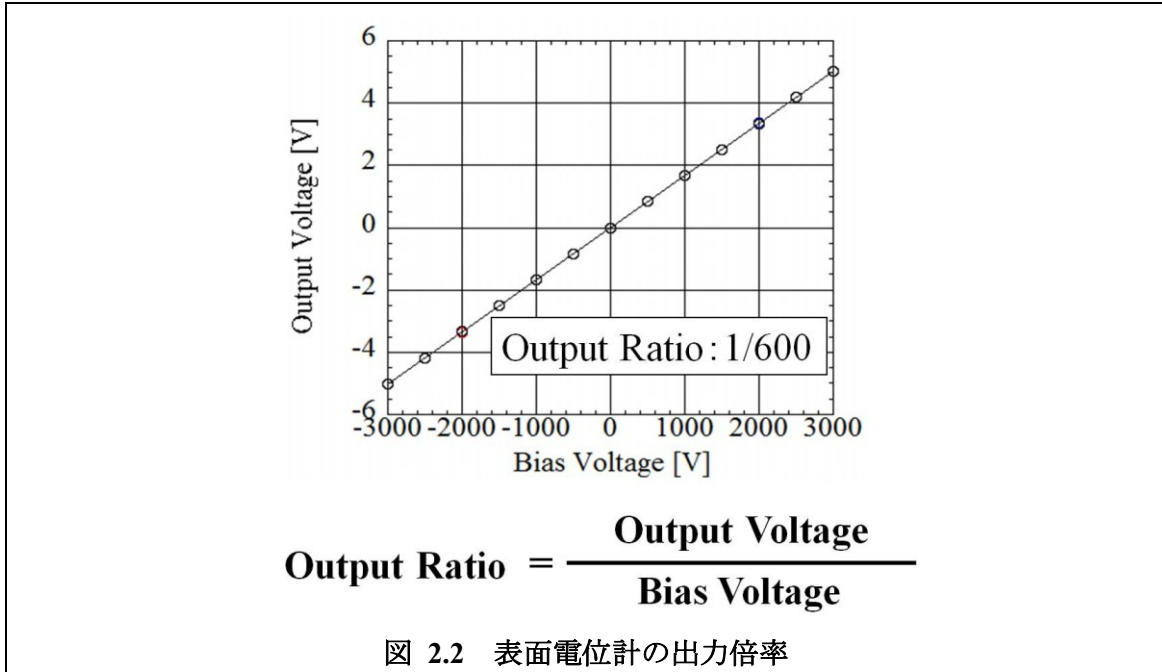
<http://www.incom.co.jp/productnavi-image/incom20094/T0905371.jpg>

表 2.1 製品版表面電位計の仕様

動作電圧	AC100V
測定レンジ	±2kV
測定精度	±0.1% [F.S]
動作温度	-15 ~ 90℃
応答速度	100ms
出力倍率	1/600
入力インピーダンス	$3 \times 10^{16} \Omega$ 以上
入力キャパシタンス	10^{-16}F 以下

本研究で用いた表面電位計ではセンサの出力電圧は測定電圧に比例する。両者の間には出力倍率である 1/600 の関係があり、測定電圧を 1/600 倍した値をセンサの出力電圧として出力する。図 2.2 では X 軸がプローブへのバイアス電圧、Y 軸が表面電位計の出力電圧である。センサ出力電圧がバイアス電圧に比例していることは図からも明らかであり、バイアス電圧を 1/600 したものが表面電位計の出力電圧となっていることも確認できる。本研究ではこの表面電位計を宇宙環境を模擬した様々な宇宙環境下で動作させ、宇宙環境への耐性を評価する。その際の評価基準として用いるのがこの出力倍率であり、環境試験前後、または環境試験中に 1/600 という出力倍率が変化しないことを確認する。

この表面電位計の測定レンジは±3kV であり、測定誤差を±100V とすると、許容される出力倍率の範囲は 1/(600±20)となる。これを各試験前後に行う特性評価の評価基準として用い、耐宇宙環境性を評価する。



2.2 軌道上実証方法

ここではトレック・ジャパン株式会社製の民生用表面電位計の軌道上実証方法について述べる。宇宙空間では宇宙機の周辺プラズマや極域（図 2.3 中の北極、南極の上空）を通過する際に遭遇する高エネルギー粒子との相互作用により宇宙機が帯電することが知られている。また宇宙機の帯電電位は宇宙機表面を覆っている表面材料により異なり、同じ衛星でも部位によって電位差が生じる。図 2.4 に極域通過時の宇宙機構体電位と衛星表面の絶縁体電位の関係を示す。図中のオーロラ電子というのが極域を通過する際に遭遇する高エネルギー電子である。オーロラ電子と遭遇すると衛星構体電位と衛星表面の絶縁体の電位は共にマイナス側に帯電する。しかしある閾値を越えると、両者の二次電子放出係数の違いにより絶縁体の電位が衛星構体よりも正側にシフトし、衛星構体と衛星表面の絶縁体間に電位差が生じる。この電位差は大きい時で数 kV にもなり、この電位差が放電事故や衛星の不具合の原因になりうる。

本研究では、宇宙機が極域を通過する際に起こす帯電をモニタリングすることを目的としており、図 2.4 中の衛星構体電位を基準とした絶縁体の帯電電位を表面電位計で計測する。

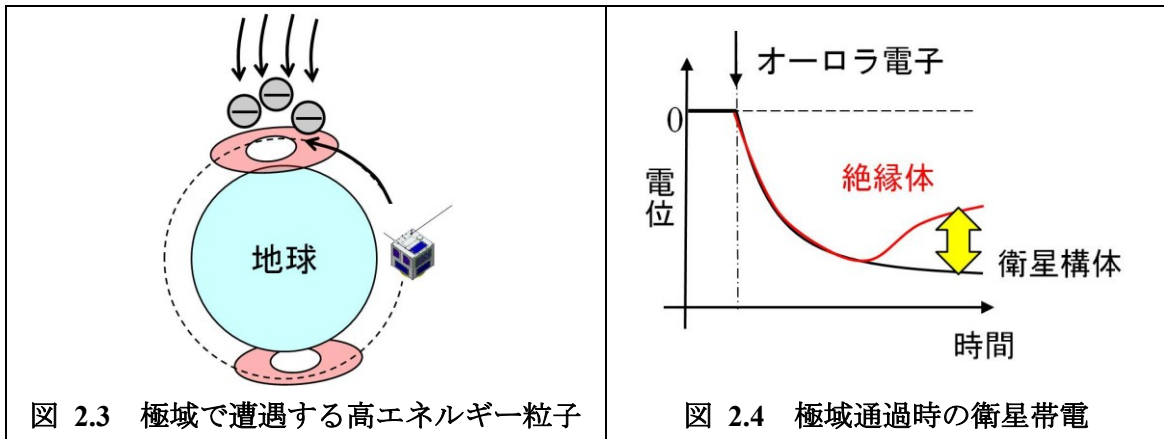


図 2.3 極域で遭遇する高エネルギー粒子

図 2.4 極域通過時の衛星帯電

2.3 鳳龍式号搭載に向けた開発

2.1 節で紹介した民生用表面電位計を鳳龍式号に搭載するために課せられる要求仕様を表 2.2 に示す。この表に示してあるような要求をさらに詳細に列挙したものが RAS (Requirement Allocation Sheet : 要求割当表) である。表面電位計を開発する上で作成した RAS を図 2.5 に示す。我々のプロジェクトでは、この RAS によって各系のタスクを列挙し、検証方法や検証済みかどうか、報告書の管理などを行っている。これについては第 2 部、鳳龍プロジェクトのマネージメントで詳細を述べる。

表 2.2 鳳龍式号に搭載するための要求仕様

基板サイズ	100mm×100mm の基板 2 枚
動作電圧	5V
消費電力	1.5W 以下
動作温度範囲	-5°C~42°C (熱解析による基板温度予測)
測定レンジ	±3kV
データ量	2 byte
サンプリングレート	1~2 秒
耐宇宙環境性	振動・衝撃環境 熱真空環境 プラズマ環境 高エネルギー粒子環境
動作方法	OBC からの信号を受けて X 分後に ON、Y 分後に OFF

8	表面電位計	SR19	衛星表面の絶縁体の帯電電位を測定する	DR19.1	熱真空環境下で正常に動作する	VR19.1.1	熱真空環境下で正常に動作し、試験前後で性能に変化がないことを確認する
						VR19.1.2	プローブがLEO環境における熱サイクルに耐えることを確認する
				DR19.2	プラズマ環境下で正常に動作する	VR19.2	プラズマ環境下で正常に動作し、試験前後で性能に変化がないことを確認する
				DR19.3	高エネルギー電子環境下で正常に動作する	VR19.3	高エネルギー電子環境下で正常に動作し、試験前後で性能に変化がないことを確認する
				DR19.4	衛星に搭載可能である	VR19.4.1	基板サイズが8×8cmの基板2枚に収まるサイズであることを確認する
						VR19.4.2	プローブが衛星構体に固定され、打ち上げ振動に耐えることを確認する
						VR19.4.3	振動試験前後で表面電位計の動作に異常が発生していないことを確認する
						VR19.4.4	衝撃試験前後で表面電位計の動作に異常が発生していないことを確認する
						VR19.4.5	OBCからの信号で動作することを確認する
				DR19.5	衛星の電源システムを用いて動作可能である	VR19.5.1	5Vの動作電圧で動作可能であることを確認する
						VR19.5.2	衛星の発電電力で動作可能であることを確認する
						VR19.5.3	電源システムが供給する電流で表面電位計を動作させることができることを確認する
				DR19.6	絶縁体の帯電電位と表面電位計の測定レンジがマッチしている	VR19.6.1	軌道環境でプローブの絶縁コーティング部分が帯電することを確認する
						VR19.6.2	絶縁体の帯電電位を測定することができることを確認する
						VR19.6.3	絶縁体の帯電電位と表面電位計の測定レンジがあっていることを確認する
				DR19.7	表面電位計の出力電圧から絶縁体の帯電電位を見積もることが可能である	VR19.7.1	宇宙環境における表面電位計の出力倍率を確認する
						VR19.7.2	ADコンバータを介して取得したデータから絶縁体の帯電電位を見積もることができることを確認する
						VR19.7.3	表面電位計の出力をOBCのADコンバータで扱える電圧値に変換する
				DR19.8	衛星システムと統合して帯電電位を測定することが可能である。	VR19.8	OBC、電源、底面基板を統合して表面電位計を起動させ、帯電電圧を測定することができることを確認する
				DR19.9	表面電位計のハザードに対してインヒビット回路を構成する	VR19.9	3インヒビット回路により、ハザード制御がされていることを確認する
				DR19.10	表面電位計の基板内部で放電が起きない設計にする	VR19.10	基板上の高電圧印加部にRTV接着剤による絶縁コーティングを施し、基板上の放電が起きないことを確認する

図 2.5 表面電位計システムの RAS

上述した要求を達成するために図 2.6 のような流れで表面電位計の開発を行った。我々が第 1 世代と呼んでいるのが 2.1 節でも紹介した製品版の表面電位計である。その後、第 2 世代、第 3 世代と回路の小型・軽量化をすすめた。表 2.3 に第 1 世代から第 3 世代までの簡単な仕様をまとめる。図 3 からも明らかであるように、第 3 世代と第 1 世代を比較すると、サイズは約 3 分の 1 に、重量は約 5 分の 1 になっている。また第 1 世代は動作電圧が AC100V であるのに対し、第 3 世代は DC5V と乾電池でも動作可能である。基板の小型化は昭和電気研究所を中心に進められ、コネクタのピン配置や ON/OFF スイッチなど、衛星システムとのインターフェイス仕様を九工大から提示し、インターフェイス調整を進めた。第 3 世代が実際に鳳龍弐号に搭載できるインターフェイスを持った基板であり、表面電位計システムと衛星システムのインターフェイスと、インターフェイス調整については第 3 章で記述する。

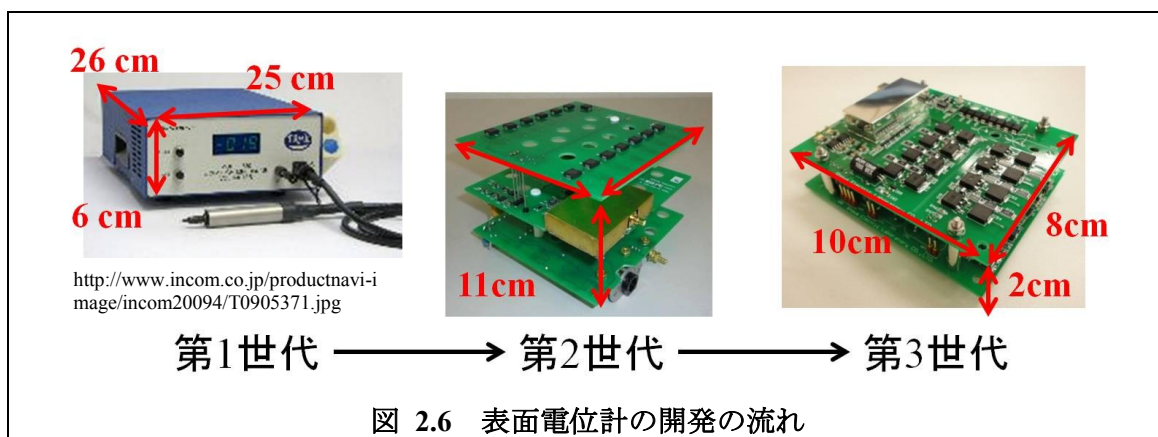


表 2.3 各表面電位計の仕様

	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代
入力電圧	AC100V	DC24V	DC5V
消費電力	—	1.5W	1.3W
重量	1kg	400g	182g
測定レンジ	±2kV	±3kV	±3kV

2.4 表面電位計フライトモデル

2.3 節で示した要求仕様に沿って表面電位計の開発および衛星システムとのインターフェイス調整を進め、表面電位計のフライトモデルが完成した。ここでは表面電位計の最終設計について述べる。図 2.7 に表面電位計基板の写真を示し、表 2.4 に表面電位計の最終設計についてまとめる。

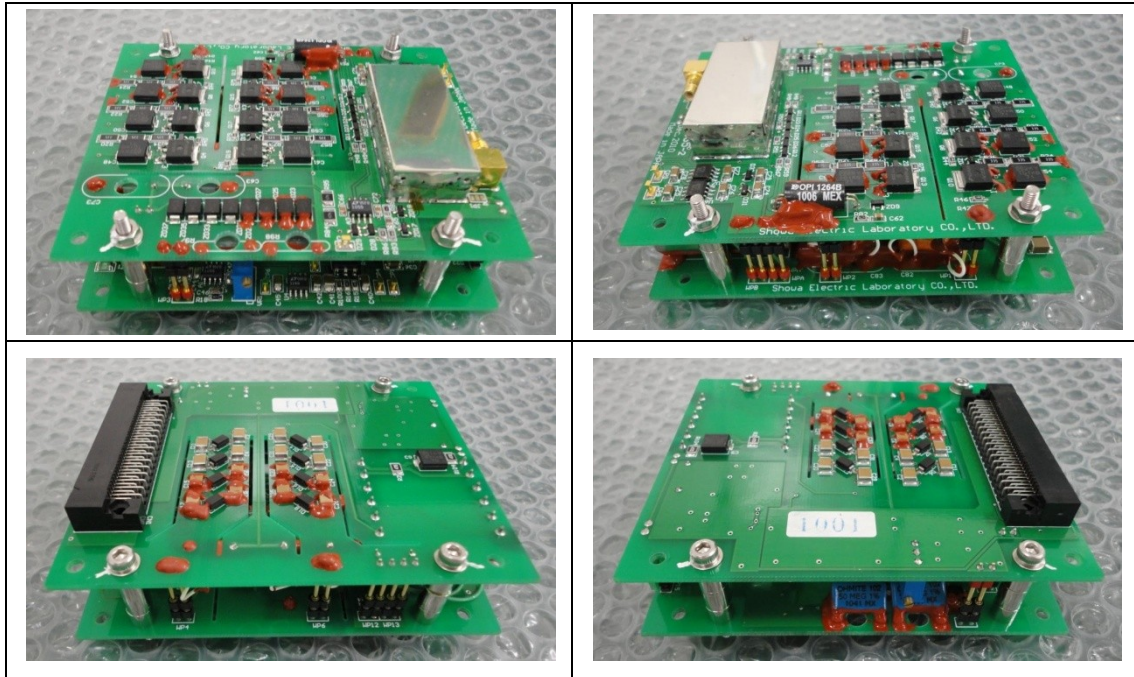


図 2.7 表面電位計基板フライトモデル

表 2.4 表面電位計最終設計

基板サイズ	82mm×102mm 基板 2 枚
プローブ寸法	φ5mm×20cm
重量 (基板のみ)	182g
重量 (固定ジグ含む)	20g
動作電圧	5V
入力電流	0.35A
消費電力	1.3W
動作時間	15 分
動作温度範囲	-40℃~60℃
データ量	2 byte
サンプリングレート	4 秒
センサ出力電圧(ADC 入力)	0~5V
測定レンジ	±3kV
出力倍率	1/600

またロケットの打ち上げ振動やロケットからの分離衝撃といった機械的負荷に対しても堅牢でなければならないため、機械的負荷に弱い設計は極力排除する必要がある。これまで軌道上で実証された表面電位計は衛星構体に絶縁プレートを設置し、絶縁プレ

ートの裏側から表面電位計のプローブによって電位計測を行っていた。しかしこのような設計の場合、絶縁プレートとプローブの固定方法が重要であり、特に今回のように接触型の表面電位計を使用する場合、その設計は非常に困難である。この問題を改善するための設計として採用したのが、プローブ先端への絶縁コーティングである。図 2.8 に電位計測で使用する表面電位計プローブとその拡大図を示す。図のようにプローブは4層構造になっており、最下層のアルミ芯線部分を帯電面に接触させることで電位計測を行う。今回はこのアルミ芯線部分に絶縁体であるフッ素樹脂をコーティングし、この絶縁コーティング部分を宇宙環境に暴露する。宇宙空間に暴露された絶縁コーティングプローブは衛星が極域を通過する際に高エネルギー電子によって帯電する。衛星構体電位を基準とした絶縁コーティングプローブの帯電電位を表面電位計により計測する。なお、表面電位計プローブは図 2.9 に示すようなL字固定ジグを用いて衛星パネルの裏側から固定され、コーティング部分のみが宇宙空間に曝される。

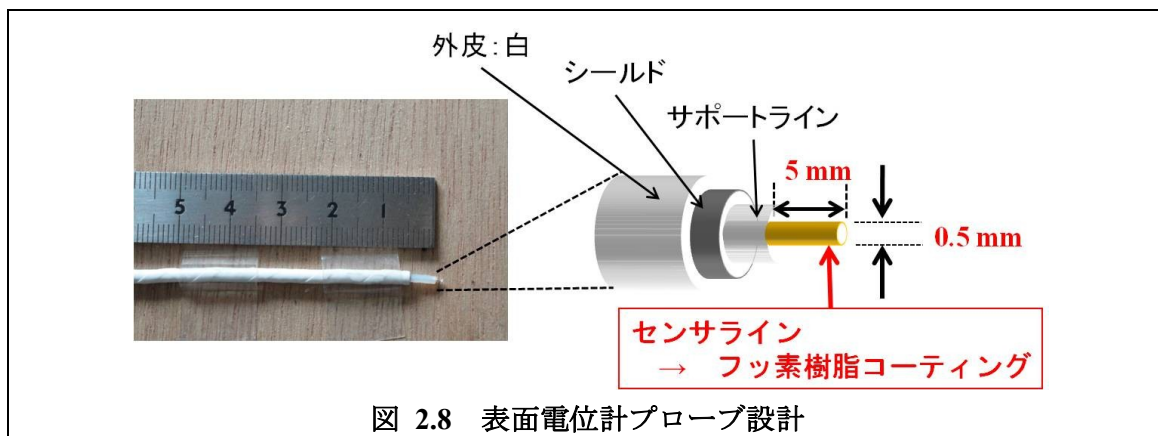


図 2.8 表面電位計プローブ設計

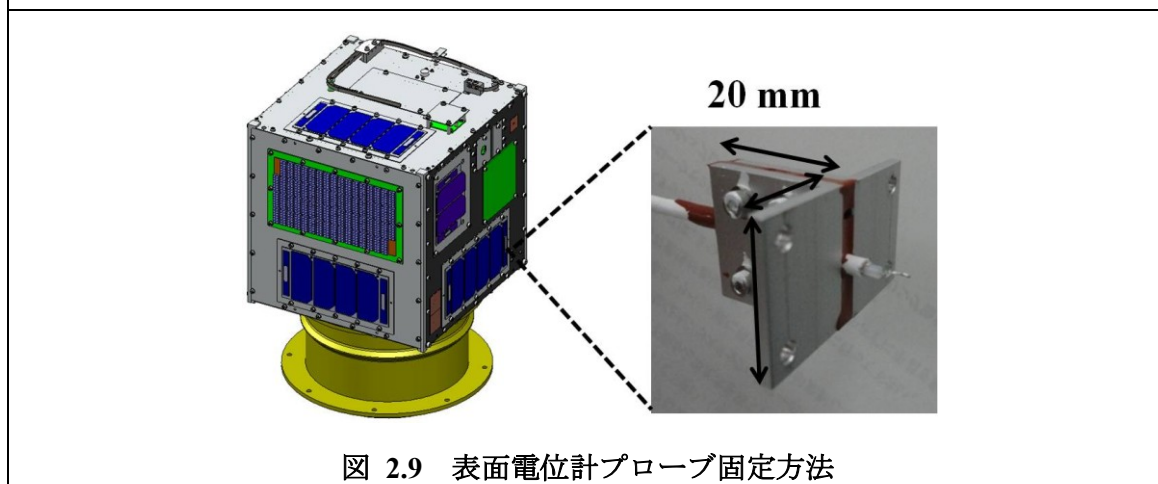


図 2.9 表面電位計プローブ固定方法