

WNI 気象文化創造センター「第10回気象文化大賞」助成 報告書

地震先行現象検出特化型 CubeSat のエンジニアリング・モデル製作

研究代表者：山崎 政彦

(日本大学工学部)

2022年2月

1. プロジェクト目的と意義

地震先行現象は1980年代に入ると電離圏でも観測されるようになってきた。地震先行現象に批判的な意見がある一方で、近年の研究では、電離圏の先行異常現象が統計的に有意であることが示されるようになった。これらの異常と地震との因果関係ないしは相関関係が定量的に確定できれば、短期地震予測研究に大きく寄与するものとなると考えている。

電離圏で測定可能な先行現象のうち、夜間 VLF 帯電波強度減少現象は、数百を超える事例で統計的に示された現象として最も有望なものとされている。この結果は2004年6月にフランス宇宙機関 CNES によって打ち上げられた地震電磁気観測衛星：DEMETER によって得られた。この夜間 VLF 帯電磁波強度減少は、VLF 帯が電離圏 D 領域の影響を受けることからそこに電波強度減少の起因があるとみているがどのような変動(サイズ、電子密度量など)が発生しているかは DEMETER のローサンプリングのスペクトルデータだけでは検証できない。地震準備の過程が電離圏に影響を与えるとするならば、どのような D 領域変動が発生しているかを今後同定する必要がある。本研究では、現象の解明および短期地震予測の実現に向けたこの現象に特化した専用超小型衛星を開発する。

2. プロジェクト背景

2011年マグニチュード(M)9.0東北地方太平洋沖地震をはじめとした巨大地震による災害は大きな脅威であり、減災は現代社会における喫緊課題である。その中で防災と予測(予知)は共に重要な役割を果たす。防災は技術的にも大きな進歩を遂げており、一般社会への普及も進んでいるが、予測については最先端の地震学でも見通しが立っていない。リードタイム数週間から数分の短期直前予測は、少なくとも地震学的手法では極めて困難と言われている(Geller, Nature, 2011)。一方、地震先行現象は1980年代に入ると電離圏でも観測されるようになってきた。近年の研究では、電離圏の先行異常現象が統計的に有意であることが示されるようになった(Kamogawa, Eos, 2006)。これらの異常と地震との因果関係ないしは相関関係が定量的に確定できれば、短期地震予測研究に大きく寄与するものとなるであろう。電離圏で測定可能な先行現象のうち、夜間 VLF 帯電波強度減少現象(Nemec et al., Geophys. Res. Lett., 2008)は、100を超える事例で統計的に示された現象として有望である。この結果は2004年6月にフランス宇宙機関 CNES によって打ち上げられた地震に先行する電離圏変動検知衛星 DEMETER によって得られた。解析では、6年間の全球の M5 以上の地震に対して先行現象の統計的有意性が得られている。先行現象は、地震発生前4時間かつ衛星直下点からの震央距離500 km 以内に顕著にみられている。申請者らは、Nemec らとは独立に DEMETER の6年分の全データを解析してより明瞭に本先行現象を確認し、D 領域で先行現象が発生している見込みを得たが、正確な現象解明には目的にあった専用衛星が必要であることがわかった(Kamogawa et al, IAA books, 2012; Togo et al, IAA books, 2016)。

初期段階に開発された衛星のブレッドボード・モデル(BBM, 新規技術要素を有する開発において、設計の実現性を確認するために高価な宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作・試験されるモデル)に基づき、前年の活動によって開発が進んでいる衛星のエンジニアリング・モデル(EM, 衛星の打ち上げ実機の前の段階のモデル。衛星の重量、寸法、所要電力および搭載機器などの設計を評価する)とそれに関わる詳細設計を本申請では、製作・各種衛星試験をする。

3. プロジェクト手法と成果

(1) 地震先行現象検出特化型 CubeSat の運用シーケンスの詳細化

初期運用フェイズと定常運用フェイズから構成される。両フェイズの詳細化と設計・開発との整合性確認を実施した。

【初期運用時】ロケットから放出後、太陽電池パネルを展開し、地上局指向制御の完了後に、初期動作確認を実施。地上局からのコマンドにより伸展ブームを両側に伸展し、

動作確認を実施。地上局からのコマンドにより地球中心制御を完了し VLF 波データの観測の定常運用に移行。

【定常運用時】基本的に日陰時に観測を実施し、地上局の可視範囲には観測データの送信を実施。

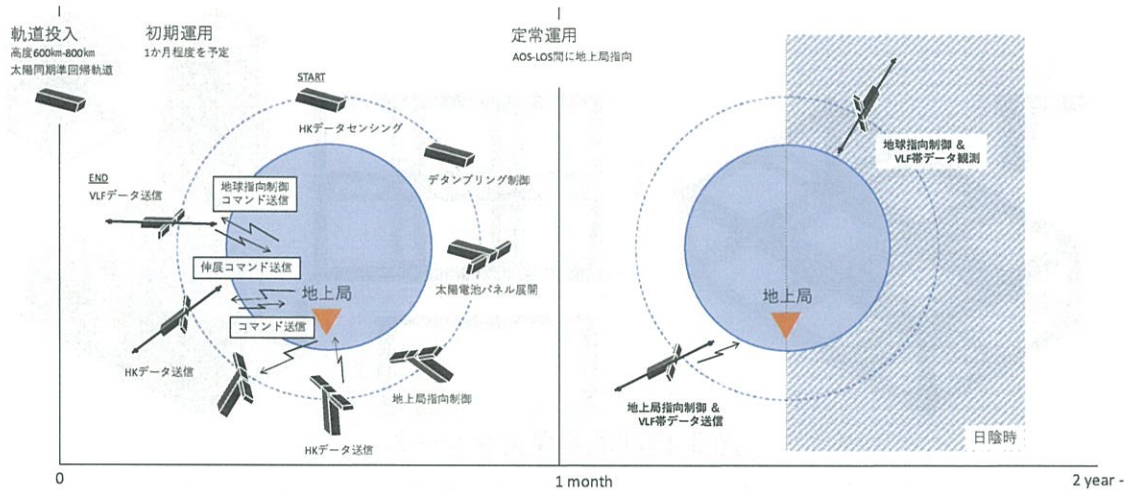


図1 初期・定常シーケンス

(2) エンジニアリング・モデル機器配置の詳細化

6Uの衛星構造の中に、図2のようにバス機器とミッション機器を配置した。特に図2の下部の3U部分にはVLF電波計測用の電極ブームユニットが二本、ブームユニットの間に観測データ処理装置を配置した(電極ブームユニットおよび観測データ処理装置は、単体でも宇宙実証が可能ないようにインターフェース設計を実施した)。図2の上部は姿勢制御系ユニット(リアクションホイール、磁気トルカ、制御IC)、GNSSデータ受信装置、電源系ユニット(バッテリー、ヒータを含む)、通信系ユニット(Sband送受信機を含む)を配置した。衛星表面には、太陽電池、夜間観測用のスターセンサ、GNSSアンテナ、太陽センサ、Sbandアンテナ、観測精度を向上させるための電子放出機、地球センサ、太陽電池パネル保持開放用のヒンジおよび電極ブーム保持開放用のヒンジを配置した。

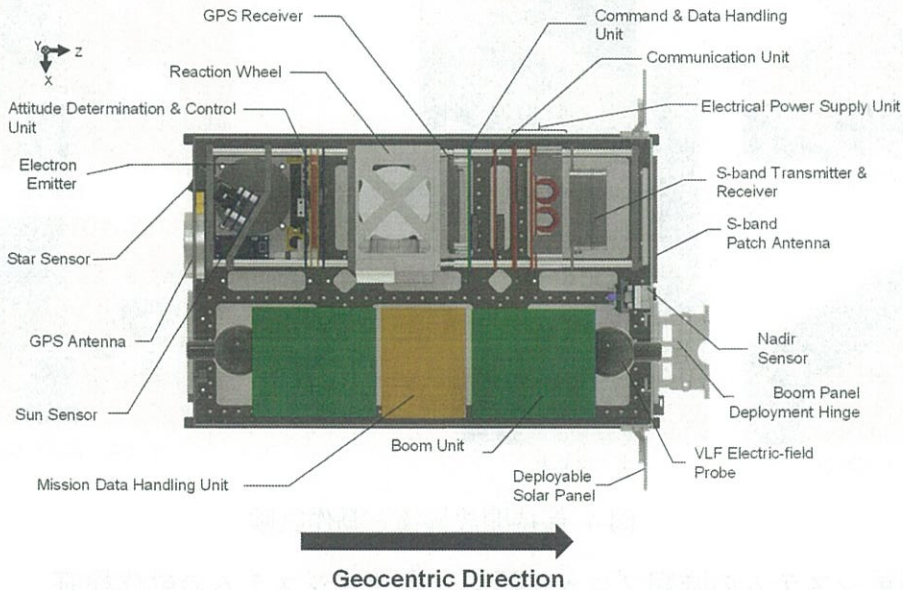


図2 機器配置詳細図

(3) 内部機器保持フレームの詳細設計

打ち上げ時、運用時にバス機器、ミッション機器を保持し、地上での検証時に簡易に組立・検証が可能とするために図3に示すような内部機器保持フレームを設計・製造を行った。

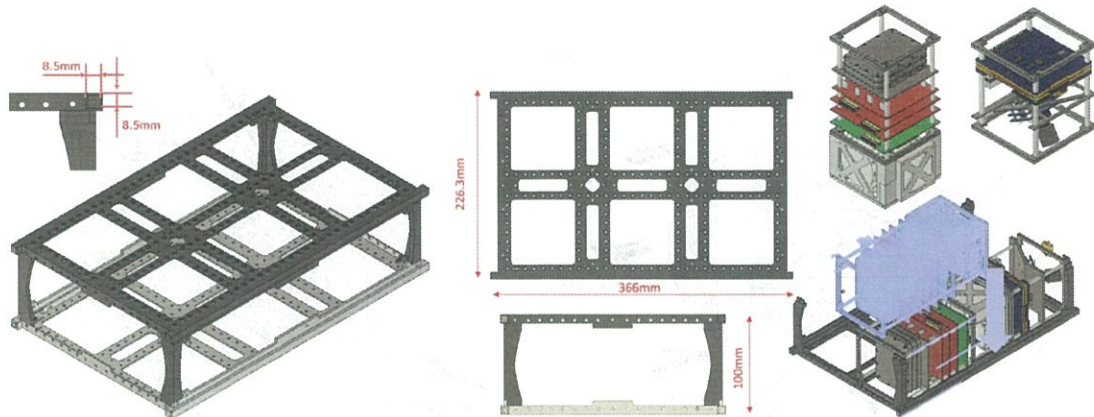


図3 内部機器保持フレーム

(4) VLF 観測用ブーム電極ユニットおよび太陽電池パネル保持開放機構の設計

ブーム・電極、太陽電池パネルの保持開放のために、ダイニーマ線溶断機構と展開ヒンジを用いた保持開放機構を設計・製造・試験を行った(図4)。

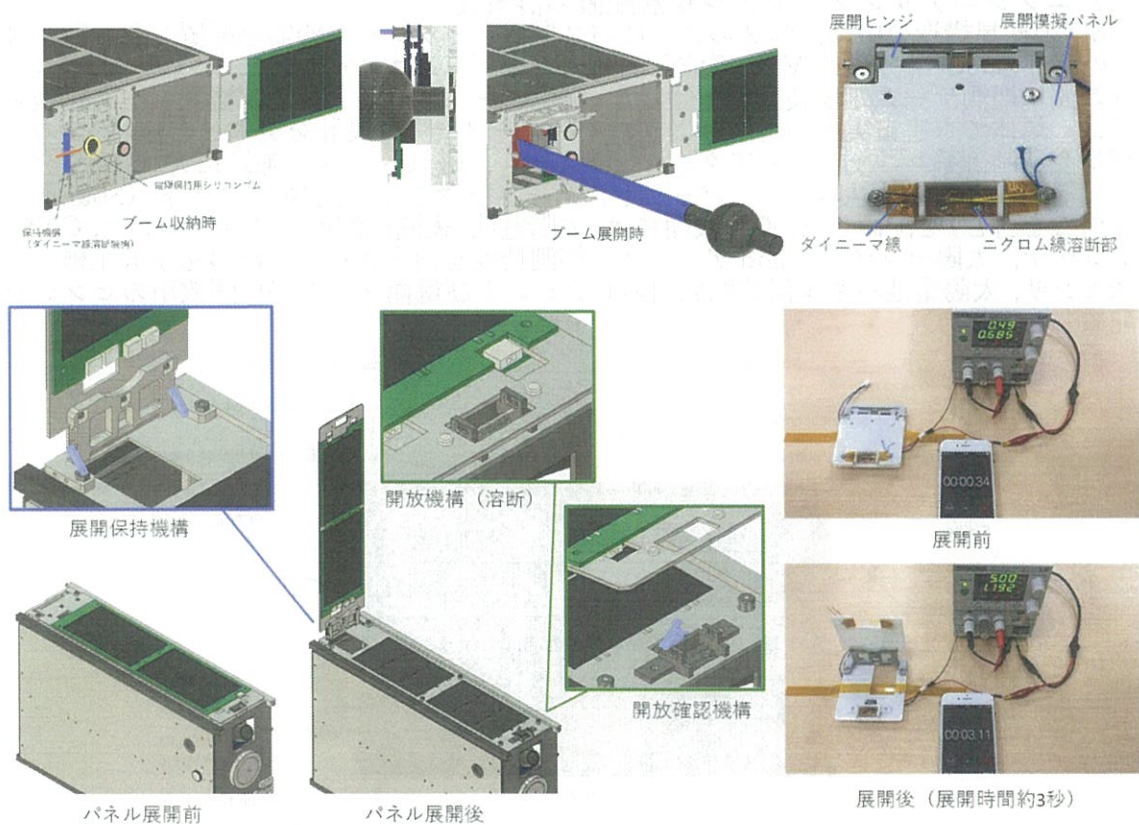


図4 保持開放機構と動作試験

(5) 衛星システムの詳細ブロック設計と各サブシステムの動作検証

【起動までの流れ】ロケットからの放出を検知後(Deployment SW), Inhibit MPUにより3-インヒビットスイッチをONにする。C&DH系(コマンド・データ処理サブシ

システム)を起動後、C&DH系によりEPS系(電力制御サブシステム)を起動、EPS系からその他サブシステムに電力を供給する。

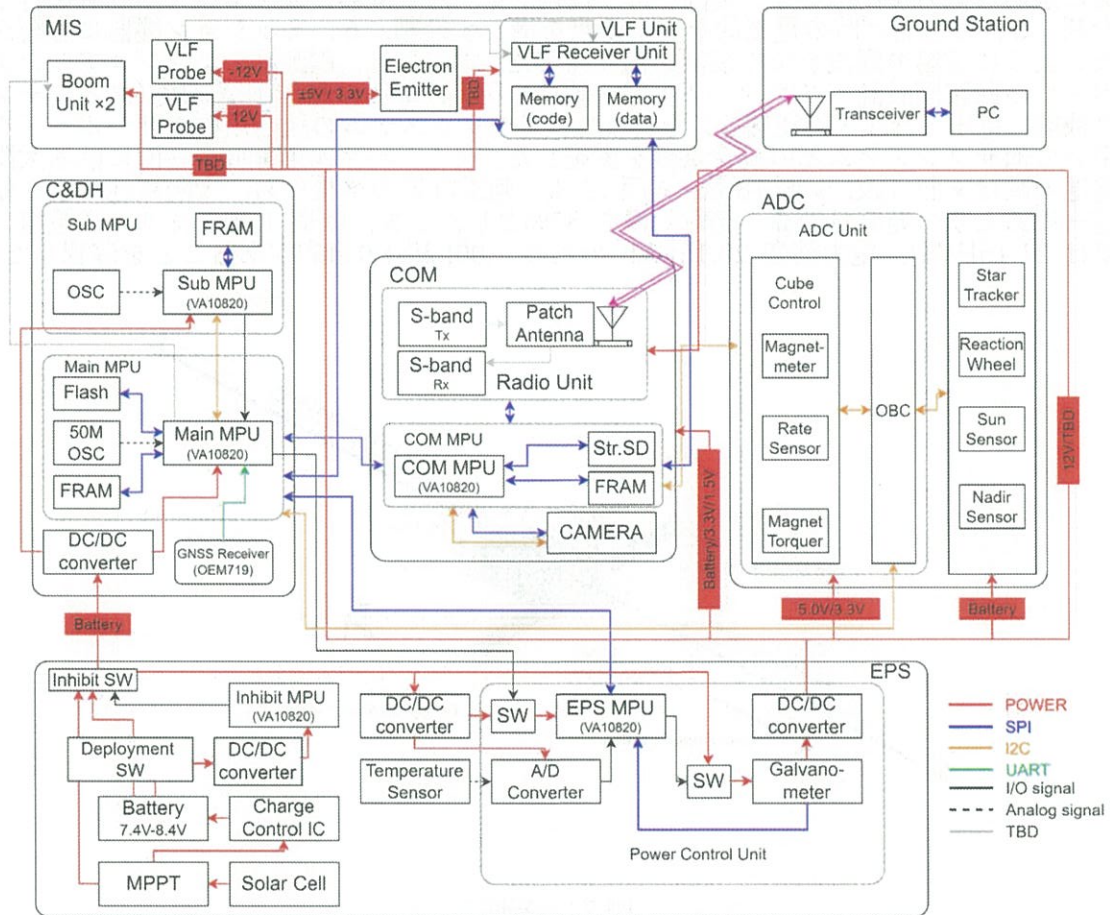


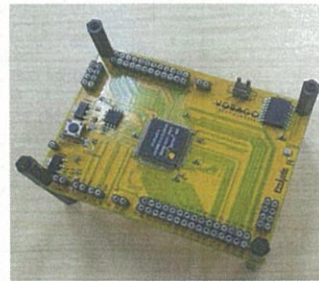
図5 システムブロック図

【コマンドデータ処理系の設計と試験】コマンドデータ処理系には、1. 衛星の運用モードやフェーズを管理し、衛星内部で自律的にコマンドを実行し、サブシステムを動作させる役割、2. 地上局からのコマンドを実行し、サブシステムを動作させる役割、3. House Keeping データの収集・管理する役割、4. 各サブシステムの健康状態を監視する役割、5. 衛星時刻のカウント/同期、6. ソーラーパネル・ブームパネルの展開と検知の役割を割り当てた。本年度は、コマンドデータ処理系のエンジニアリングボードの回路図設計・PCB ボード設計・製造を行った。内部機器との通信インターフェースの検証のため、各サブシステムとのコマンドとデータの取得確認を行った。コマンドデータ処理系と電源系、通信系間には、SPI通信、姿勢制御系間にはI2C通信を実施した。

```

[001]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[002]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[003]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[004]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[005]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[006]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[007]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[008]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[009]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[010]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[011]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[012]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[013]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[014]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[015]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[016]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[017]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[018]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[019]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[020]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[021]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[022]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[023]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[024]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[025]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[026]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[027]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[028]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[029]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[030]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[031]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[032]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[033]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[034]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[035]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[036]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[037]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[038]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[039]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[040]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[041]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[042]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[043]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[044]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[045]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[046]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[047]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[048]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[049]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[050]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[051]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[052]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[053]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[054]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[055]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[056]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[057]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[058]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[059]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[060]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[061]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[062]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[063]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[064]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[065]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[066]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[067]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[068]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[069]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[070]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[071]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[072]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[073]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[074]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[075]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[076]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[077]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[078]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[079]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[080]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[081]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[082]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[083]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[084]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[085]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[086]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[087]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[088]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[089]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[090]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[091]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[092]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[093]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[094]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[095]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[096]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[097]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[098]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[099]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
[100]SPINCA_180104_M_...E_M_7_...74
  
```

傾度取得結果



Pre-EMボード

図6 コマンドデータ処理系の動作検証

【電源系の設計と試験】電源系には、1. 衛星に安定化した電力を供給する役割、2. バッテリーの容量に応じて、消費電力を制御し、バッテリーを保護する役割、3. 各機器に適切な電力を供給でき、制御を行う役割、4. 搭載機器の温度監視・熱制御を行う役割、5. 打ち上げ時の電氣的な安全要求を満たす役割、6. ミッション機器に影響がないように電場の漏洩を防ぐ役割を割り当てた。本年度は、電源系のエンジニアリングボードの回路図設計・PCBボード設計・製造を行い、単体の動作確認試験（スイッチング機能、電圧の昇圧・降圧機能）を行った。各サブシステムの統合用のマザーボードを用いて他サブシステムとの統合試験を実施した。また、パネル展開時、各面に貼る太陽電池の数はx面6枚、y面18枚、z面12枚。軌道計算の結果から、太陽電池による軌道一周あたりの発電量計算。発電効率を85%としたとき、軌道1周あたりの発電電力量は21.15[Wh]、電力消費20.15[Wh]のため1.00[Wh]の余剰があることを確認した。

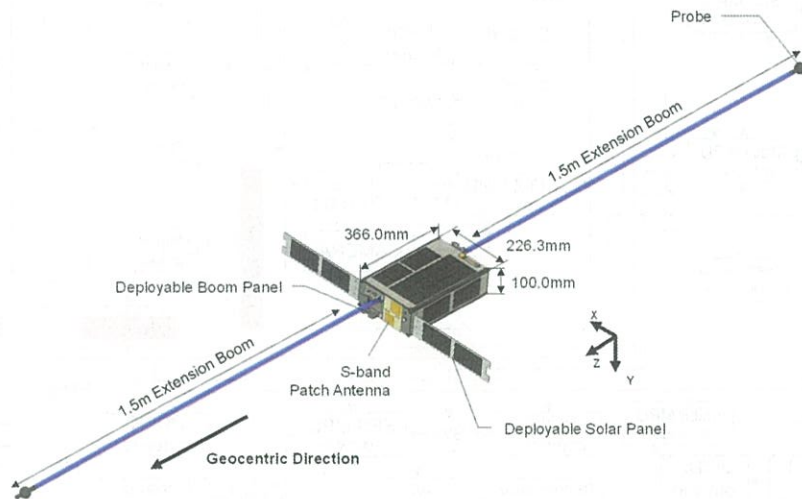


図7 外観図

【通信系の設計と試験】通信系には、地上局との通信及び各システムとの内部通信により各データ（HK, Mission Data, Attitude Data）を管理する役割を割り当てた。通信-地上局系の要求に関する、ミッションデータおよびハウスキーピングデータの概要は以下の通りである。

表1 ミッションデータおよびハウスキーピングデータ表

名称	種別	データ量	合計データ量	備考
VLF電場強度データ (Survey Mode)	MIS	Max:48.07 [MByte/day] Min:5.03 [MByte/day] Max:71.26[MByte/day] Min:8.93[MByte/day]	Nighttime Max:60.0 [MByte/day] Min:12.9 [MByte/day]	FFT解析済みデータ、分解能は複数準備
VLF電場強度データ (Burst Mode)	MIS	Max:11.2 [MByte/day] Min:6.72 [MByte/day]		生データ、分解能は複数準備
ラングミュアプローブデータ	MIS	Max:19.8 [KByte/day] Min:10.04 [KByte/day] Max:28.9[KByte/day] Min:15.0[KByte/day]		VLFプローブで取得
全電子数データ(TEC)	MIS	Max:704 [KByte/day] Min:70.4 [KByte/day] Max:1.05[MByte/day] Min:105[KByte/day]	Daytime Max:83.6 [MByte/day] Min:15.8 [MByte/day]	GNSSのTECデータ
姿勢・時刻データ	MIS	Mode1 Max:995.8 [KByte/day] Min : 99.58 [KByte/day] Mode2 1.68 [MByte/day]	Mode1 Max:995.8 [KByte/day] Min : 99.58 [KByte/day] Mode2: 1.68 [MByte/day]	Mode1: クォータニオン、緯度・経度、高度、時刻 Mode2: クォータニオン、角速度、地磁気、スターセンサ、太陽センサ、高度、緯度・経度、時刻 *サンプリング周波数: 1Hz
撮影データ	MIS	4 [MByte/picture]	4[Mbyte]	ブーム展開/軌道上画像
ハウスキーピングデータ群	HK	①: 99 [Byte/packet] ②: 47 [Byte/packet] ③: 145 [Byte/packet] ④: 10.63 [MByte/day] ⑤: 9.50 [MByte/cycle]	①: 99 [Byte/packet] ②: 47 [Byte/packet] ③: 145 [Byte/packet] ④: 10.63 [MByte/day] ⑤: 9.50 [MByte/pass]	①リアルタイムHK (通常)、②リアルタイムHK (省電力:<Vbat7.0V)、③リアルタイムHK (詳細)、④1日分(通常)、⑤軌道1周分(初期・動作確認用)

【姿勢制御系の設計と試験】夜間ミッション時の姿勢安定および通信時の姿勢安定のため、姿勢制御 Unit の開発を行った。OBC, 3 軸角速度センサー, サンセンサ(粗 x10, 高精度 x1), nadir センサ, リアクションホイール x3, 磁気トルカ x3 と、夜間での姿勢決定精度の達成のために、スターセンサから構成。

【ミッション系の設計】本年度は 1) 地震発生前の電離圏 D 領域での電子密度変化モデルの検討, 2) 地震発生前の大気中ラドン娘核種に起因する空間 γ 線のドローンを用いた観測, 3) 地震先行現象としての電離圏全電子数 異常の有用性の検討, 4) 地震短期予測実現に向けた電場に含まれる雷ノイズの除去, 5) b 値を利用した 最大前震と本震 の判別 の可能性の検討, 6) 超小型人工衛星用の電場・プラズマ計測ハイブリッドセンサシステムの開発, 7) 人工 VLF 電波を用いた地震先行現象の評価の 7 つテーマを検討を実施し、ミッション系のエンジニアリング・モデルの設計を実施した。

