

K-37

地震先行電離圏変動現象観測衛星 PRELUDE の構造設計・開発

軌道上で電場を測定するための構造的特徴

Structure Design of PRELUDE, Satellite for Observing the Fluctuation of Ionosphere Before Earthquake

Characteristic of Structure to Observe Electric Field in Orbit

○中村駿作¹, 山崎政彦², 中泉健太郎³*Shunsaku Nakamura¹, Masahiko Yamazaki², Kentaro Nakaizumi³

Nihon university and University of Shizuoka are developing a 6U size CubeSat "PRELUDE" for observing the fluctuation of ionosphere before earthquake occurs. It observes the electric field of ionosphere and to achieve this mission, it loads the 3U size compact sensor unit which has Z folded extension boom and use electron emitter to release the electron from satellite that come into it when observing electron. Also, by analysis, vibration test and pyroshock test, it is confirmed that PRELUDE can endure rocket launch.

1. はじめに

近年, 人工衛星を用いた産業化も活発化するのと同時に, かつては大型衛星が一般的であった宇宙業界も数 kg 級の超小型衛星にサイズがシフトし, 衛星の運用の敷居は民間, 大学が行えるところまで大きく下がっている. 超小型衛星の中でも1ユニット(1U)のサイズが10cm立方のキューブサットという規格は, 世界中で普及しており, 活発に打ち上げ・運用がされるようになっている. 日本大学と静岡県立大学では, 地震先行現象の解明を行うために超小型人工衛星 PRELUDE の開発を行っている. 過去には100 kg級の仏の小型衛星 DEMETER が運用され地震に先行して電離圏の電子密度増加が起こることが報告されている^[1]. PRELUDE は, DEMETER で搭載されていたセンサを小型化し搭載した超小型人工衛星であり, 先行研究の DEMETER では部分的にしか得られていないハイサンプリング VLF 帯電波波形データを解析対象地震全てに対し取得, 雷放電起源 VLF 帯電波を信号源とした下部電離圏(D領域)観測を行う超小型の人工衛星である.

この現象の観測を行うためには, 数100kg級で実現されていた観測を, 超小型衛星の限られたリソースで実現する必要があり, 衛星の電源, 通信, データ処理, 姿勢制御などのバス機器, 電場・プラズマ観測ユニットの搭載, 電場観測への影響を抑える構造等の課題を解決し, 観測要求を満たす衛星を設計・開発する必要がある. 本稿では電離圏観測を超小型衛星で行うための構造設計の方法及び開発について報告する.

2. 電離圏変動現象観測衛星概要

PRELUDE は, 1Uサイズの人工衛星約6個分の超小型人工衛星であり, 地震発生前に生じるとされている

電離圏の電子密度増加を観測を目的としている(Figure1). 軌道は太陽同期軌道で, 後述する伸展ブームに取り付けた2個の観測センサ(3m間隔)を地心に向けながら軌道上プラズマ電位を測定してセンサ間電位差を計算することで, センサを結ぶ線分に沿う方向の電場強度を観測する.

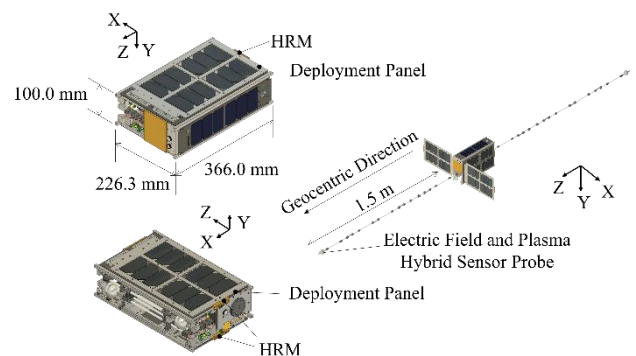


Figure1. Overview of PRELUDE

3. 構造の設計

PRELUDE 衛星の構造は, 汎用性と構造強度を高め, ロケットの打ち上げ荷重に耐えられるように衛星の荷重を受け持つ部材を A7075-T7351 にして, メインフレームには多くの皿ざぐりを入れる設計とした. これにより, ミッション機器やバス機器のサイズ要求や, 機器要求, 熱要求, 姿勢制御要求からくる配置に柔軟に対応が可能な構造とした(Figure2).

また, 電場観測を行うために衛星の電位の安定性を高める必要があり, 構造外面は導電性アルマイト, 外面基板や太陽電池には ITO (透明導電膜) 加工を施すことで衛星電位の変化を防ぐ設計とし, 衛星構造と電子回路の GND を接地させ, 全体の GND を統一した. PRELUDE では衛星の電力を確保するために太陽電池パネルを展開する. パネルは軌道投入前は, 展開保

1 : 日大理工・学部・航宇, 2 : 日大理工・教員・航宇, 3 : 日大理工・博士(前)・航宇

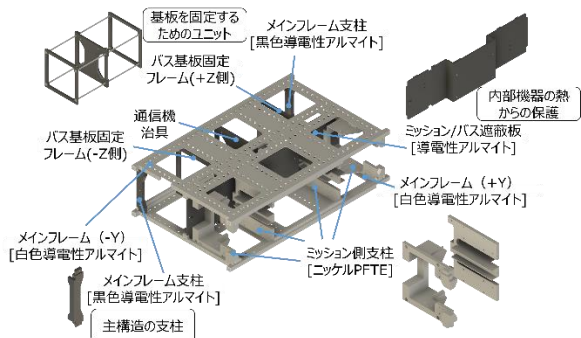


Figure2. Main Structure of PRELUDE

持機構 (HRM) にあるダイニーマ線により保持されており、衛星からの信号によりニクロム線に電気が流れることでダイニーマ線を溶断することで展開する機構を設計した。ニクロム線の熱が熱伝導性の低いアルミ部材に逃げないように、ニクロム線を熱伝導性の高いセプラ材 (超耐熱ポリイミド成形体) で覆う (Figure1, 3)。

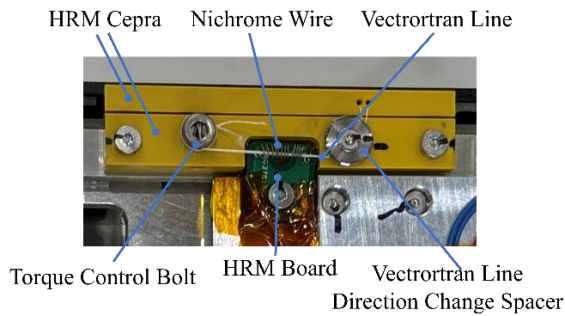


Figure3. Overview of Panel HRM

電場・プラズマを観測するためのユニットとして、3U サイズ (100 mm×100 mm×366 mm) の伸展ブームユニットを搭載している (Figure4)。伸展ブームはコンパクトでありながらも電場観測センサを片側 1.5 m ずつ展開するために蛇腹機構を採用しており、Figure2. のミッション側支柱の伸展方向は衛星が開口構造となっている。なお、開口面の強度を確保するために開口面には支柱を設けている。また、開口面から衛星内部に熱が入射するのを防ぐために遮蔽板を設けるのに加え、開口部のメインフレームに白色導電性処理を施した。

4. ロケット打ち上げ環境の耐性評価

衛星構造がロケット打ち上げ環境に耐えうるかを検証するため、構造解析と振動・衝撃試験にて評価した。

4.1. 構造解析

Autodesk の 3DCAD ソフトである Fusion を用いて固有振動数解析および静荷重解析 (打ち上げ時の静荷重, ランダム振動荷重, 正弦波振動荷重) を実施した。その結果、衛星固有振動数は X 軸 : 399.44 Hz, Y 軸 : 220.41 Hz, Z 軸 : 705.29 Hz となった。また、強度解析は静荷重の加速度, ランダム振動による加速度, 正弦

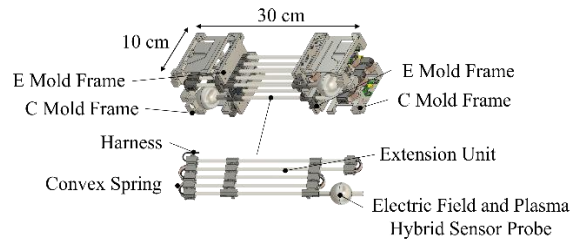


Figure4. Mechanism of Extension Boom

波による加速度を組み合わせた加速度を静荷重として解析した。その結果最小安全余裕は 3.66 となり、ロケット打ち上げ環境に対して十分な強度を持つことを確認した。

4.2. EM 衝撃試験および EM 振動試験

ロケットの分離による衝撃に耐えうるかを確認するために衝撃試験を実施した。試験は質量を調整した飛翔体を衛星取付治具に印加する方法で行い、試験後に構造外観確認および電気確認, パネルとブームの展開確認を行い、構造破壊, 内部機器の損傷がないことを電気試験により確認した。

また、日本高度信頼性評価試験センターにある加振機を利用して Figure1. に示した衛星各軸毎に、搭載予定のイプシロン S ロケットの加振条件を基にしてモーダルサーベイ試験, サインバースト試験, ランダム振動試験, 正弦波振動試験を行い、各種試験前後でのモーダルサーベイ波形の比較, 外観確認, 電気確認, パネル展開試験により、破損がないことを確認した。また、衛星固有振動数は X 軸 : 360 Hz, Y 軸 : 220 Hz, Z 軸 : 400 Hz となり、ロケット振動環境に対して十分な剛性を有していることが評価できた。

5. おわりに

PRELUDE は 3U サイズの小型電場・プラズマ観測センサユニットを用いて電場を観測するために、衛星電位が安定するような設計となっている。そして、ロケット打ち上げに耐えうるかを検証するために解析や試験を実施したところ、PRELUDE は打ち上げに耐えることが分かった。

また、本研究においては、東京大学地震研究所共同利用 (2024-KOBO31), 並びに WNI 気象文化創造センター 2024 年度国内助成からのご援助を賜りました。

6. 参考文献

[1] M. Kamogawa, S. Togo and H. Nitta, Practical nano-satellite monitoring of ionospheric earthquake precursors, Proc. 7th Nano-Satellite Symposium, Oct. 18-21, Kamchia, Bulgaria, 2016.