

超小型衛星による電離圏観測と地上観測網を融合した早期地震警戒システムの研究

Early warning system of impending earthquake observing earthquake precursor - Development of CubeSat dedicated to precursor monitoring -

○山崎政彦¹, 青木義男², 吉開範章³

*Masahiko Yamazaki¹, Yoshio Aoki¹, Noriaki Yoshikai¹

In this project, a nano-satellite PRELUDE (Precursory electric field observation CubeSat Demonstrator) was designed and developed to clarify the physical mechanism of seismic precursor ionospheric phenomena that have been reported to have statistical significance. This report describes the design and development of the PRELUDE satellite and its future plans.

1. はじめに

古来より大地震の先行現象とされるものが多数報告されているが、客観的な評価・選別の結果、有意とされたものは少数である。相関を評価するのに必須である「4象限の窓」、『異常ありー地震あり, 異常なしー地震あり, 異常ありー地震なし, 異常なしー地震なし』の全ての割合を示している報告は多くはない。しかし、近年地震発生の時間的・空間的相関が特に高いとみられる電磁気学的現象（電離圏電子密度変動）が有望視されている。もし、人工衛星でこれらの観測をすると全球の地震に対して短期間で調査できるため、先行的に研究が進んでいる力学的・地球化学的な先行現象と並んで、地震発生予測に早期に貢献するようになる。

本研究では、人工衛星が取得する4つの割合を用いて、地震先行的電離圏変動が統計的に地震の前兆であることを示すことを目指し、1) 統計的有意性が報告されている地震先行電離圏現象の物理機構解明のために超小型衛星の PRELUDE の設計と開発^[1]と、2) 現象の物理を探り予測の確度を上げるため、異常が見られた地域にドローンによる機動的観測^[2]を即時的に行えるような体制づくりを行った、本報告では衛星の設計と開発の結果を報告する。

2. 地震に先行する電離圏変動現象

2004年からフランス国立宇宙研究センター (CNES) によって DEMETER 衛星が6年間運用された。観測データから、夜間時に1.7kHz (地球-電離圏導波管の遮断周波数に対応する) 近傍の VLF 帯電場強度は、地震発生の4時間前以内に震央距離約500 km 以内で大きく減少 (VLF 帯電磁波強度の電場成分が数 dB 減) することがみられた^[3]。これらは、 $M \geq 4.8$ の300弱の対象地震に対して、2割程度の地震に先行現象がみられたという統計的評価された成果であり^[4]、最も有望な地震先行電離圏変動の現象とされている。以後も、諸外国が同種の衛星を計画した。中国地震局は2018年に中国

地震電磁観測衛星群(CSES)の1号機を打ち上げて現在も運用中である。この減少の物理的メカニズムは、対流圏の雷放電起源の電磁波を調べることで高度80 km 程度の D 領域の電子密度増加が原因であることが分かった^[4]。換言すれば、全球で発生する地震に起因する D 領域の変動に関連していると予想された。

3. 地震先行電離圏変動現象検知衛星 PRELUDE

統計的有意性が報告されている地震先行電離圏現象の物理機構解明のために、PRELUDE (Precursory electric field observation CubeSat Demonstrator) の設計と開発を行った。PRELUDE は地震に先行する電離圏の変動現象の検知と検証をメインミッションとしており、VLF 帯電波の観測に特化し、電場センサ及びラングミュアプローブの機能を持ったハイブリッド型超小型センサユニット (ハイブリッドセンサ) 搭載する。夜間の地震に先行する電離圏高度(90km 付近)の電子密度変動の影響を受ける VLF 帯電磁波の信号強度や電離圏の全電子数を観測することで先行現象の物理機構の解明を目指す。人工衛星が取得したデータはクラウド型の地上局にダウンリンクし地上で解析を実施する (Figure 1)。



Figure 1. Mission overview of PRELUDE

本研究でシステムの設計と開発を行った超小型衛星 PRELUDE の主要諸元を Table 1 に、衛星の構造概観を Figure 2 (上: 軌道投入時, 下: 運用時) に示した。

1: 日本理工・教員・航宇, 2: 日本理工・教員・精密, 3: 日本理工・教員・数学

Table 1. PRELUDE 衛星の主要諸元

サイズ	X:100 × Y:366 × Z:226.3 mm
質量	9.4 kg
軌道	540 ± 15 km
降交点地方時	15:30
通信方式	S 帯
最大発生電力	約 20W
ミッション期間	2年3ヵ月+α

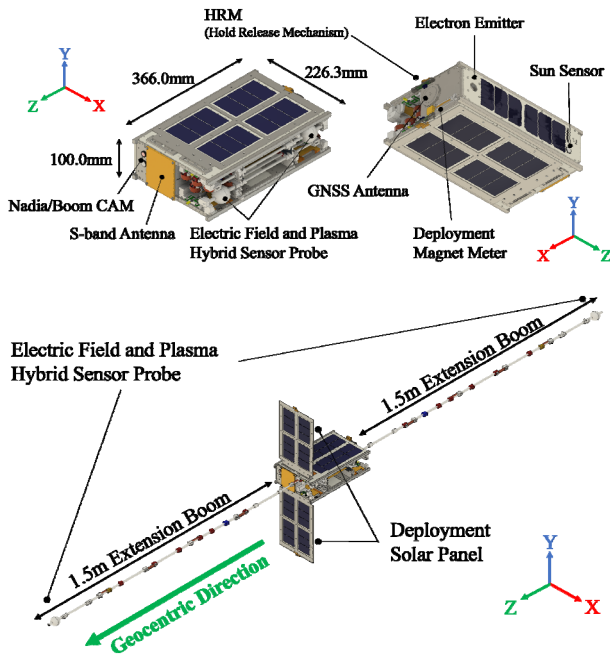


Figure 2. Overview of PRELUDE

衛星は CDH (コマンド・データ処理) 系, COM (通信) 系, EPS (電源) 系, ADC (姿勢決定制御) 系, 熱・構造系, ミッション系の主に 6 つのサブシステムで構成される. 耐放射線性の高いマイコンを CDH 系に置き, 各系の最上位として各系機器の監視と命令, リセット (電氣的・ソフト的) としている. BUS 部(-X 側)と Mission 部(+X 側)を物理的・電氣的に分離し, 汎用性を持たせた設計としている (Figure 3).

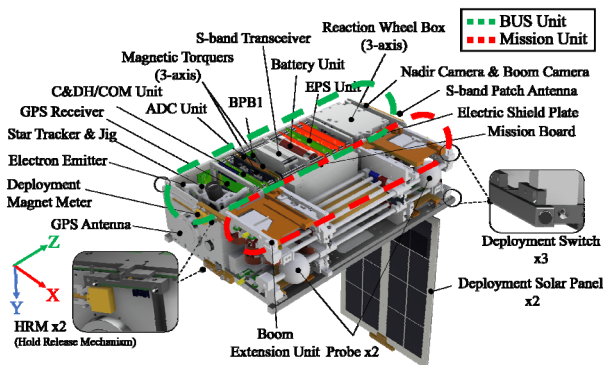


Figure 3. Internal equipment layout of PRELUDE

ミッション実施 (電場観測) に必要となる搭載機器として, 軌道投入の収納時に 3U サイズ規格 (約 30 cm x20 cm x10 cm), 展開時に 1.5m ずつ衛星から展開する伸展ブーム, 伸展ブームの先端に取り付けた電場・プ

ラズマハイブリッドセンサプローブ, ミッション処理ボード, 仏) 大気環境宇宙観測研究所 (LATMOS) が開発中の電子放出機 (Electron Emitter) を搭載した. Figure 4 にブーム伸展機構と実験の結果を示す

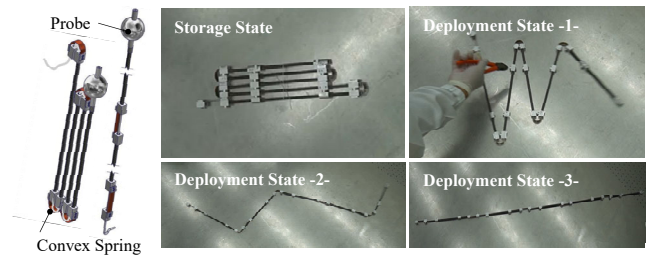


Figure 4. Internal equipment layout of PRELUDE

4. おわりに

PRELUDE は, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の革新的衛星技術実証プログラム 4 号機のテーマ公募に応募し, 令和 4 年 10 月に実証テーマとして選定して頂いた. 令和 6 年度中の打ち上げを目指してフライトモデルの開発を完了させる予定である. また, 開発したハイブリッドセンサユニットは, 小型衛星以上でなければ搭載できなかった二つの観測機器をハイブリッド化し, 世界最小のセンサとしてキューブサットに搭載することが可能なものを開発した. 同センサは, 宇宙天気, 大気電気など幅広い研究用途に使用できる汎用性の高い測定器である. さらに, 地上観測評価を行うため, 電場・ラドン観測用のドローン観測機を新たに開発した. 衛星, ドローン観測の両面から研究を継続し, 国内外での発表・論文の投稿を進めていく.

本研究は理工学研究所プロジェクト研究助成金, 東京大学地震研究所共同利用(2023-KOBO31), Yahoo! 基金「2023 年度 防災減災活動支援助成プログラム」, WNI 気象文化創造センター2023 年度国内助成の援助を受けました. また, 静岡県立大学の鴨川仁先生にはミッション設計に関して, 仏) 大気環境宇宙観測研究所 (LATMOS) の Jean-Jacques Bethelier 博士, Leblanc Francois 博士, 両氏には電子放出機や衛星設計において多くのご意見を頂きました, 感謝申し上げます.

5. 参考文献

[1] T. Iida, M. Yamazaki, M. Kamogawa, Development of a Prelude Satellite Equipped with Electric Field and Plasma Measurement Sensors Based on Statistical Evaluation of Seismic Precursors Using Artificial VLF Radio Waves Obtained from In-Orbit Observations, 2022, SSC22-WKP1-14, pp.1-7, 2022.
 [2] F. Němec, O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier, Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity. Geophys. Res. Lett., 35, L05109, 2008.
 [3] 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.