

2018年 WNI 気象文化創造センター「気象文化大賞」報告書.

地震先行現象研究のための超小型衛星のブレットボードモデルの開発

研究代表者： 山崎政彦 (日本大学理工学部航空宇宙工学科)

Asia-Pacific region project furtherance
WNI WxBunka Foundation 報告書

Cube Sat observing atmospheric and space electricity for the earthquake
prediction

研究代表者： Masashi Kamogawa
Director, Specified Nonprofit Corporation
“University Space Engineering Consortium (UNISEC)”

2019年12月2日

*本2つの助成は親和性が高い研究であるため報告書は合併したものとして作製した。

1. 目的と意義

本研究は、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の解明を目的とした超小型衛星-地上局システムの設計・開発を行う。この目的のために、VLF帯（超長波帯）電波の観測に特化した超小型衛星（CubeSat）を設計し、最終段階ではフライトモデル（システム試験後のロケット搭載モデル）の製作・打上げ・運用を目指す。さらに発生機構解明のため、先行研究の衛星（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すべてに対し取得し、雷放電起源 VLF帯電波を信号源とした下部電離圏（D領域）モニタリングを行う。一方、設計・開発情報は、準オープンソース化し、地震災害国を中心とした諸外国のグループにも衛星開発参画を容易にし、衛星群を構築できる環境を提供する。短期直前予測技術につながる地震先行現象研究は controversial な分野であるが、近年世界各国で様々な取り組みが活発に行われ顕著な成果が出始めている。日本では顧みられていない分野ではあるが、この衛星の実現で世界最高の成果が得られると予想される。

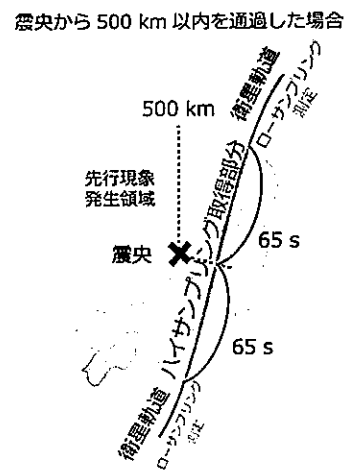
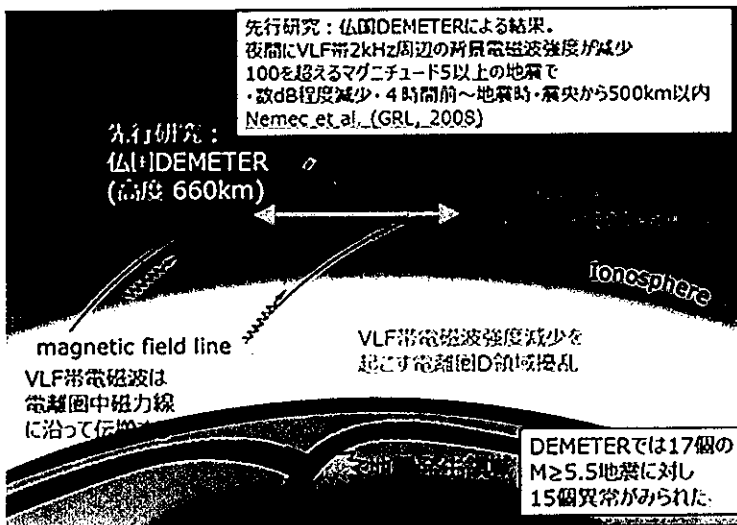


図 1 地震に先行する VLF 帯電磁波強度減少現象の概念図 図 2 データ取得のイメージ

統計的に有意とされる地震発生の直前から 4 時間前にかけての VLF 帯電波強度現象の原因は、VLF 帯の特性により、D 領域に電波強度減少の起因があると考えた (図 1)。雷放電起源のホイスラー波 (寿命が 100 ms 程度) の衛星高度における強度観測および地上観測網 (全球落雷観測ネットワーク:WWLLN, <http://wwlln.net/>) による落雷電流強度を調べ、ホイスラー波の電磁波伝搬のレイトレーシングにより、D 領域の電子密度の上昇を推定した [Kamogawa et al., 3th CSES worksyop, 2018]。その結果、一例ながら、地震に関係ない時に発生した同程度の落雷エネルギーの雷のホイスラーと相対比較すると、6 dB 程減少することが判明した。これは D 領域における電子密度が 20~30% 上昇することを意味する。

以上のことから地震前の数十 kHz のハイサンプリングデータが多数存在すれば、雷起源

ホイスラー波の解析で発生領域の同定や物理機構解明に近づける見込みができた。この成果を用いると、将来的には予知率・適中率向上のための現象判別技術が格段に向上することが見込まれる。しかし、ハイサンプリングデータは膨大なデータ量で連続データのダウンリンクは大きな衛星や多数の地上局が必要となり、現状ではこの条件を満たした環境を得ることは難しい。

現在、日本を含む世界各国で打上げ・運用されている衛星を衛星群として運用することにより、安価に短期間で宇宙からの地震先行現象の集積が可能となることは明らかである。しかしながら、100 kg 級の小型衛星は数十億円以上のコストがかかり、衛星群にするには百億円以上が必要となり、今これをプロジェクト化するにはハードルが高い。この問題を解決するには、本提案のような目的に特化し、高精度測定ながらも安価に短期間で宇宙からの地震先行現象の集積が必要となる。つまり、衛星は格安の超小型衛星にし、搭載する機器は、DEMETER が報告した地震 4 時間前の VLF 電波強度を観測した電場センサ 1 成分のみ搭載し、大きな地震（例えば $M>5$ ）以上の地震が発生すると、地上からコマンドを送出することにより、大地震 6 時間前からの震央周辺データ(図 3)のみ、地上局に伝送する機能を持たせ(図 3)、データ記憶装置及びデータ伝送量の削減により、6U の超小型衛星 (PRELUDE) で実現可能なレベルに設計した(図 4)。

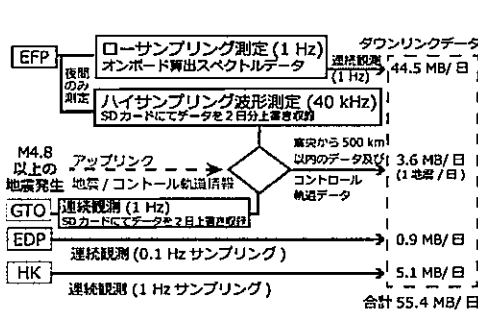


図 3 データ取得のフローチャート

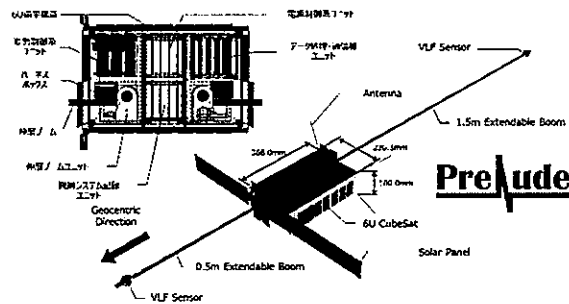


図 4 本テーマ設計された PRELUDE 衛星

2. 地震先行現象検知のための衛星観測のトレンド

超小型衛星群によりハイサンプリングデータが得られれば、衛星と雷放電地上同時観測により、D 領域の電子密度領域等の詳細な構造が明確になり、先行現象発生機構の解明のみならず、地震発生予測に必要な適中率向上が期待できる。2010 年の DEMETER の運用終了後も、各国が宇宙からの地震先行現象の研究目的とした衛星を計画した。中国地震局は 2018 年 2 月、中国地震電磁観測衛星群 (CSES) の初号機を打上げ、12 月にはカザフスタンが磁力計を搭載した 3U の超小型衛星 KazSciSat-1 を打上げた。特筆すべきは表 1 に示されるように、CSES は DEMETER の上位的機能衛星であるのに対し、本提案の Prelude は DEMETER データを使った科学的成果に基づき、物理機構解明に特化した衛星であり、観測も測定項目は限定しているが CSES より詳細なものが短期間で得られる。

概念設計を完了した衛星の特徴は次の通りである。

1) ドライブレコーダ的（上書き記録と、ある一定期間のみのオンボードデータ保存）な新しいアイデアによるデータ記録方式の採用（図 3, 4）：VLF 帯波形データは巨大なデータサイズであり、宇宙機関が使用するような X 帯などの地上局ですら地球の一部の領域だけしか取得できない。本衛星では、地震前軌道および比較対象（コントロール）軌道のみ VLF 波形データを取得し、解析に耐えうるだけの最小限のデータ量に絞りこむ。

2) UHF 通信を採用：低容量通信であるが極めて安価（巨大な高価なパラボラアンテナではなく八木アンテナが使用できる）ですむ UHF 帯通信を用いる。この安価な地上局を多数グローバルに配置し、ダウンリンク量の増加を可能とするのみならず事実上の即時ダウンリンクによる準リアルタイム信号受信を可能とする。なお、準リアルタイム信号受信は、本研究の最終の目的である短期直前予測の実用化に求められる技術であり、その実証実験も兼ねる。

※なお本助成実施後に UHF 通信による観測は衛星通信の国際規約の変更のために困難であることが判明したため、報告書では UHF 通信で執筆しているが現時点では S-BAND 通信で行うこととしている。

3) 観測対象の先行現象を特化：現時点では未解明の先行現象であることから、統計的有意性のみならず物理機構を明確にすることが急務である。そのため、観測対象を特化し、目的達成のためだけの衛星を設計することで、安価な衛星を開発する。なお、安価であるゆえ将来的に衛星群での展開も容易にさせる。

表 1. 諸外国の地震先行現象観測衛星の比較

	重量	打上げ費	コスト	通信・地上局	特徴
DEMETER (フランス CNES)	130kg	30 億円 (Dnepr)	30 億円	X 帯・フランス国内に 1 局。 高コストなパラボラアンテナ	初の本格的衛星(2004-2010) 初の統計的有意性のある先行現象を発見
CSES (中国地震局・ 国家航天局・イ タリア宇宙機 関)	730kg	20-40 億円 (長征 2 号 D)	100 億円 以上	X 帯・中国国内に 4 局。高コストなパ ラボラアンテナ	5 機打上げ予定であり衛星 群を構築(1 号機は 2018 年 2 月打上げ完了、2~5 号機 は 2021 年以降打上げ予定)
KazSciSat-1 (カザフスタン 宇宙機関)	5 kg	ライドシェ ア (Falcon-9)	不明	UHF 帯	先行現象観測のために磁力 計を搭載
Prelude 【本計画】	10 kg	無償を予定 (イプシロ ン相乗りを 想定)	数千万	UHF 帯・八木アン テナで受信・全世 界に既存アンテナ 多数あり	超小型衛星だが有望な先行 現象だけにミッションを特 化し、高成果を得る。低コ スト故に稠密衛星群が容 易。

3. 成果の概要

本助成以前においては単一成分電場観測プローブを搭載した 3U Cubesat : Prelude (Precursory electric field observation CubeSat demonstrator) の設計を開始したが、シ

システム成立性に欠けるため、6U サイズの Cubesat での設計に変更した。フランスの小型衛星 DEMETER (130kg) が観測した地震電離圏先行現象を、わずか 6U (10 kg 程度) の CubeSat で実証することは極めて挑戦的であり、宇宙実証がされれば次の段階として本格的な小型衛星群をより安価な超小型衛星群で構築できる可能性を秘めており、従来の小型衛星群より遥かな低コストでより稠密衛星観測の実現が可能となる (2018 年 2 月に初号機が打上げられた中国地震電磁観測衛星群は 700kg 以上の衛星で構築される)。本助成ではミッションデザインおよび概念設計に基づき、実現性を確認するためのブレッドモードモデル (BBM) の製作を行った (図 5)。DEMETER (130 kg) で得られた成果を超えるミッションを、6U (10 kg 程度) の CubeSat で実現できることが確認できた。本稿執筆時時点では、衛星の 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) の設計・製作は完成まで 70% の段階にある。

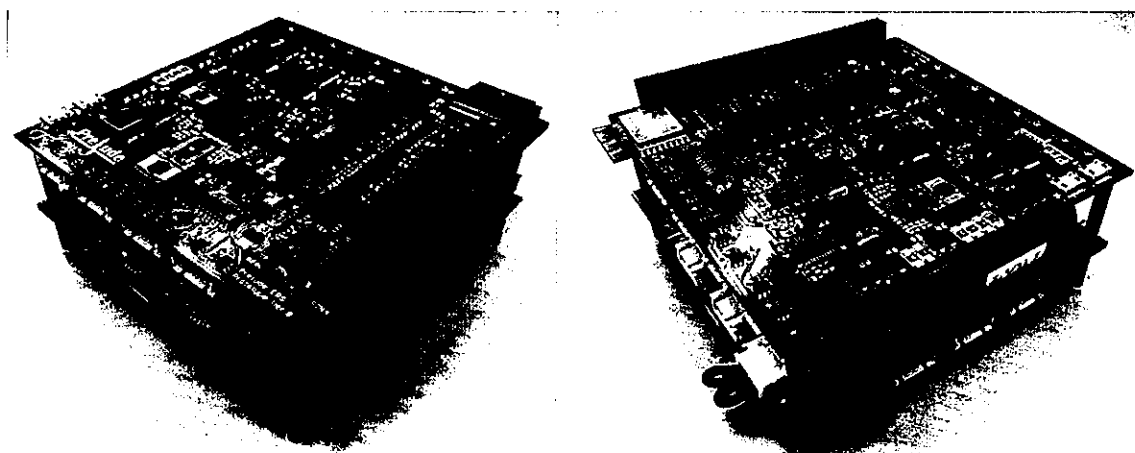


図 5 製作した BBM モデル

4. 主要業績

児玉哲哉, 新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立, パリティ 33, 5 (2018)

菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 地震先行現象検証衛星 PRELUDE の自動運用システムの研究開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, pp. 1-6 (2018)

鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋宏之, 児玉哲哉, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, 宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト (2018)

児玉哲哉, 山崎政彦, 鴨川仁, 地震先行現象検証超小型衛星: Prelude の現状, 第 16 回宇宙環境シンポジウム, JAXA (2019)

鴨川仁, The 3rd International Workshop of CSES Mission 参加報告, 日本大気電気学会誌 94 (2019)