

2019年11月12～13日
第16回宇宙環境シンポジウム
東京都市大学 横浜キャンパス

地震先行現象検証衛星：Preludeの現状

Precursory electric field observation CubeSat demonstrator

児玉 哲哉 (JAXA)
山崎 政彦 (日本大学)
鴨川 仁 (静岡県立大学)

1

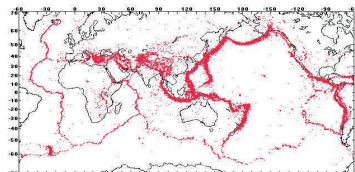
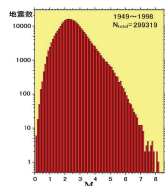
地震予知研究の歴史

- ・ 日本地震学会設立 (1880)
- ・ 電気学会設立 (1888)
- ・ 震災予防調査会設立 (1891)
- ・ 国際測地学及び地球物理学連合(IGGU)設立 (1919)
- ・ 東京帝国大学地震研究所設立 (1925)
- ・ 前田：赤道異常発見 (1935)
- ・ 地球電磁気学会誕生 (1947)
- ・ 第一次地震予知計画開始 (1965)
- ・ 旧ソ連で地震電磁気研究・ギリシャでVAN開始 (1980s)
- ・ 宇宙開発事業団諮問委員会・地球観測委員会に地球電磁場サブグループ設置 (1994)
- ・ 理化学研究所・宇宙開発事業団：地震フロンティア研究開始 (1996)
- ・ IUGGに地震・火山噴火に関する電磁気的研究ワーキンググループ：EMSEV設立 (2002)
- ・ フランスがDEMETER打上げ (2004)
- ・ JAXA第1回地震電磁気観測衛星国際ワークショップ (2008)
- ・ 上田：どうする日本の地震予知 (2011)・JpGU:地震学への提言 (2012)
- ・ 地震火山噴火予知計画で大学連携電磁気的予知研究開始 (2014)
- ・ 日本地震予知学会設立 (2014)
- ・ 中国地震電磁気観測衛星初号機打上げ (2018)

何故衛星観測が有効か？

→グーテンベルク・リヒター則 (頻度と大きさがべき乗)

コスト：地上 衛星
M7以上の地震 1億円@100箇所 100億円
10年に1回 年平均16回

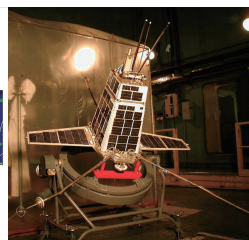
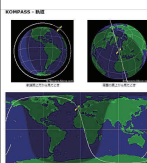


1地震あたり 1000億・年 6.25億・年

地上より衛星観測は「ミッションライフ×160倍」以上効果的

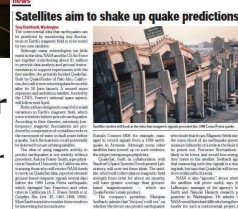
[加えて地震以外の科学研究・工学利用に有用な大気圏・電離圏観測情報を取得]

世界初の地震電磁気観測衛星 Kompas: 2001.12.10



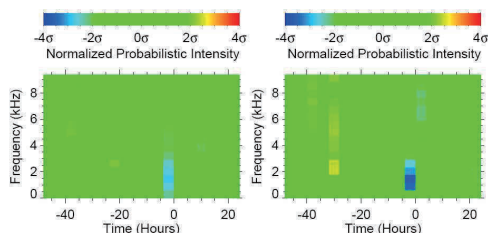
2番目は米民間会社Quakefider Quakesat: 2003

<http://www.quakefinder.com/research/quakesat-ssite/>



DEMETERによる統計的観測結果 (電波強度低下)

Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier (2008), Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05109, doi:10.1029/2007GL032517.

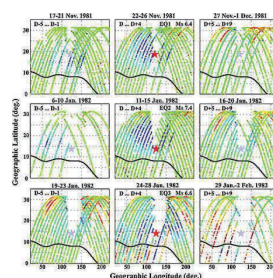


左: M>4.8, 深さ40km以下の9000回の地震との統計解析結果, 右: M>5.0

太陽観測衛星ひのとり： 高度600km電子温度低下



ISASトピックス > 2008年 > 地震が電離圏に及ぼす影響を「ひのとり」のデータで研究



Electron temperature decrease:
It Starts 5 days before EQ
Returns 5 days after EQ
Electron density is not so sensitive

Oyama, Kakinami, Liu, Kamogawa and Kodama (2008), *J. Geophys. Res.*, 113, A11317, doi:10.1029/2008JA013367.

世界の地震先行現象観測ミッション

2001.12.10	Kompass (IZMIRAN:Russia)	2001-056B
2003.06.30	Quakesat (Quakefinder:USA)	2003-031F
2004.06.29	DEMETER (CNES:France)	2004-025C
2004.12.24	Variant/ Sich-1M (NKAU:Ukraine)	2004-052A (decayed)
2005.02.28	LAZIO-SiRad (INFN:Italy)	ISS搭載機器
2006.05.26	Kompass-2 (IZMIRAN:Russia)	2006-019A (decayed)
2006.06.15	Arina/ Resurs-DK1 (RKA:Russia)	2006-021A
2006.09.18	Vsplek (Energia:Russia)	ISS搭載機器 (投棄)
2011.08.17	Potential/Sich-2 (NKAU:Ukraine)	2011-044G
2012.07.22	Kanopus-Vulkan 1 (Russia)	2012-039A
2013.11.26	Seismoprognoz (IZMIRAN:Russia)	ISS搭載機器
2014.07.08	TechDemoSat-1 (SSTL:UK)	2014-037H
2016.09.26	Pratham (IIT Bombay:India)	2016-059A
2017.08.25	Formosat-5 (NSPO:Taiwan)	2017-049A
2017.10.17	ICARUS (MaxPrank:Germany)	ISS搭載機器
2018.02.02	CSSES (CEA:China·ASI: Italy)	2018-015C

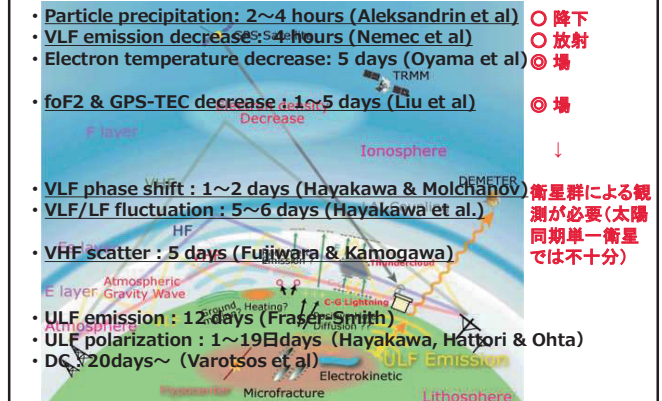
*太字は300kg以上の衛星、下線は運用中

【問題点：ほとんどの衛星は太陽同期軌道の単一衛星】

地震先行現象の先行時間 (Kodama & Oyama, 2011)

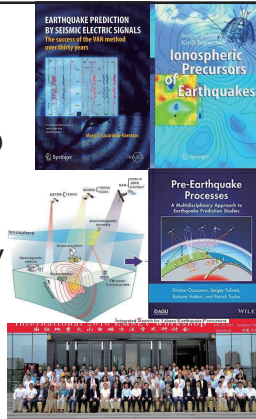
* 下線は統計的結果

- **Particle precipitation: 2~4 hours (Aleksandrin et al)**
- **VLF emission decreases: 4 hours (Nemec et al)**
- **Electron temperature decrease: 5 days (Oyama et al)**
- **foF2 & GPS-TEC decrease: 1~5 days (Liu et al)**
- **VLF phase shift: 1~2 days (Hayakawa & Molchanov)**
- **VLF/LF fluctuation: 5~6 days (Hayakawa et al.)**
- **VHF scatter: 5 days (Fujiwara & Kamogawa)**
- **Alf emission: 12 days (Fraser-Smith)**
- **ULF polarization: 1~19 days (Hayakawa, Hattori & Ohta)**
- **DC: 20 days~ (Varotsos et al)**



世界の地震予知研究

- ギリシャ: VAN (地電位観測)
- ロシア: 超小型衛星・高エネルギー粒子 (ISS)
- フランス: DEMETER (Myliade小型バス)
- 台湾: iSTEP (台湾版地震フロンティア)
- EU: Pre-Earthquakes (ロシアは衛星)
- イタリア: Swarm for Earthquake Study
- 中国: イタリアと協力して2018年から
電磁観測試験衛星群を構築
APSCO・IAAでもプロジェクト化



【地上一衛星連携観測が主流となっている】

電磁監测试験衛星

Electromagnetic Monitoring Test Satellite



電磁監测试験衛星、是要建立一个监测全球空间电磁场、电磁波、电离层等离子、高能粒子沉降等物理量的空间试验平台、为探索地震前兆信息、空间环境监测预报和地球系统科学研究提供新的技术手段服务、为未来建立地震前兆电磁监测卫星业务化系统提供技术准备。

卫星以CAST2000小卫星平台为技术基线进行设计、姿态三轴零动量稳定控制。卫星总设计质量630kg、设计总功耗405W、设计寿命5年。

The Electromagnetic Monitoring Test Satellite aims at establishing a space test platform for monitoring the physical quantities such as global space electromagnetic field, electromagnetic wave, ionospheric plasma and energetic particle precipitation to provide a new technical means for earthquake precursor detection, space environment monitoring and forecast. The Earth system scientific research, thus making technical preparation for building an operational earthquake precursor monitoring satellite system in the future.

The satellite uses CAST2000 small satellite platform as its technical baseline and adopts three-axis zero-momentum attitude stabilized control with a total design satellite mass of 630kg, total power consumption of 405W and design lifetime of 5 years.

中国は2003年より国家863計画の一環として、中国地震電磁衛星の開発を開始
2009年には中国地震局と国防科学工業局が共同で中国地震電磁層観測試験観網を設置

2018年2月2日：張衡一号打上げ成功

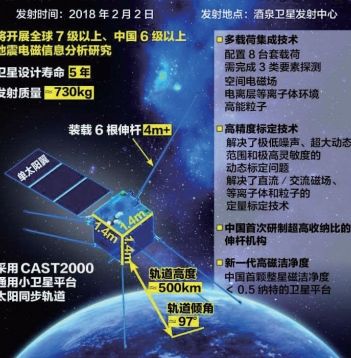
副省级城市“四套班子”首次纳入巡视

中国地震电波监测卫星“张衡一号”成功发射

“张衡一号”升空后，将开展全球7级以上、中国6级以上地震电磁信息分析研究。卫星设计寿命5年，发射质量730kg。

采用CAST2000通用小卫星平台，太阳同步轨道。

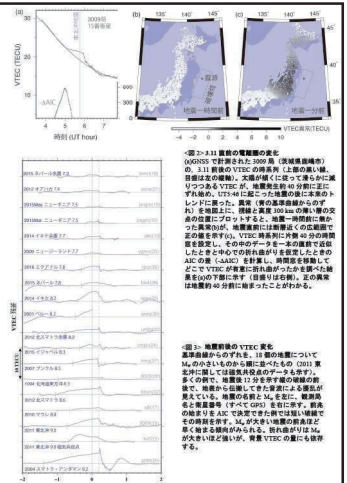
图解 电波监测试验卫星张衡一号

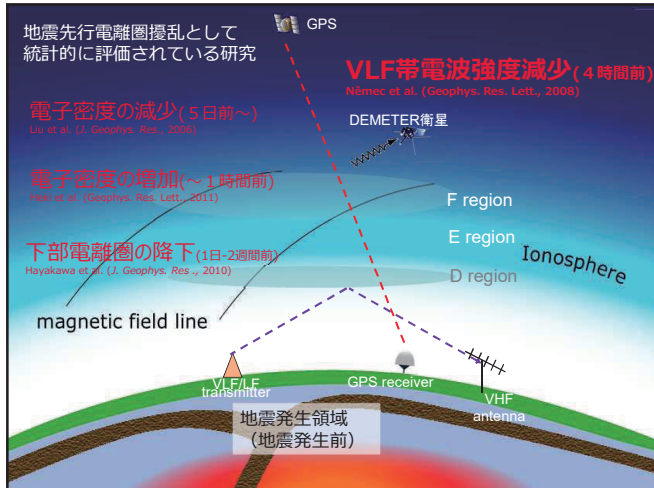


バリエーション連載 (2018) 地震のメカニズム解明—本当に地震予知はナンセンス？

地震直前の電離圏変化 日置幸介 (2018.2)

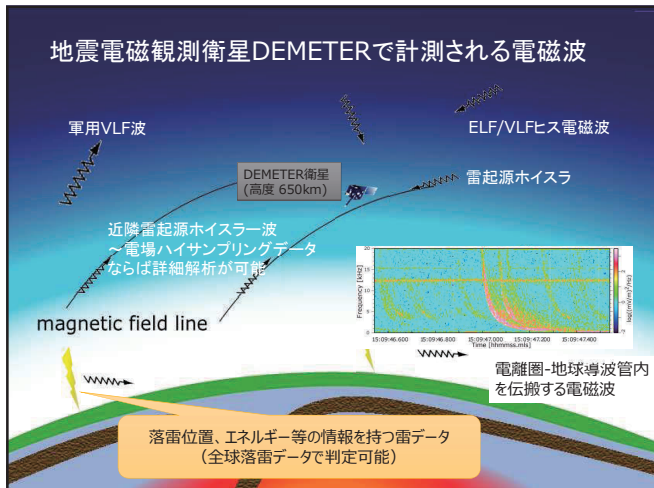
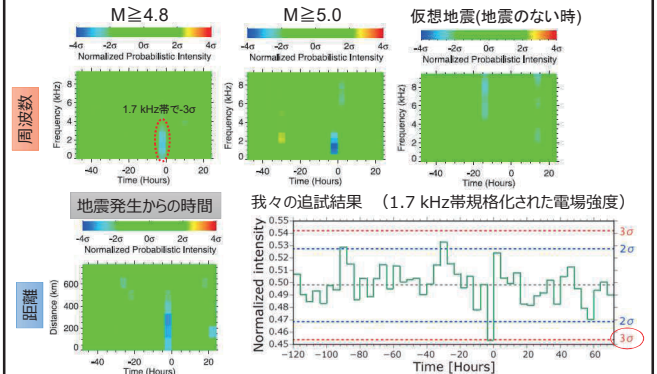
新世紀地震フロンティア研究：地上—衛星連携による地震先行現象の確立 児玉哲哉 (2018.5)



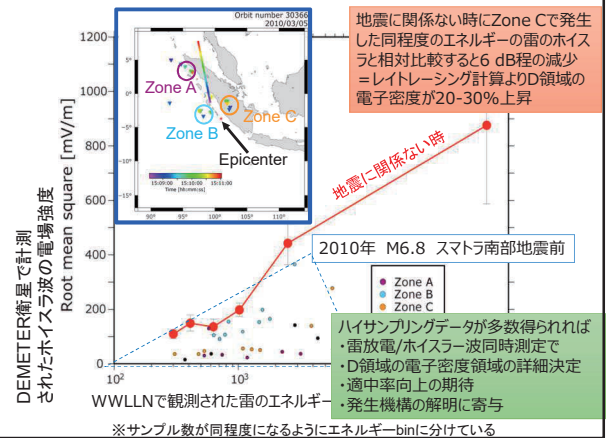


先行研究：夜間VLF帯電場強度減少 ～仏DEMETER電場データによる解析

Nemec et al. (Geophys. Res. Lett., 2008)



事例解析：地震前電離圏D領域電子密度20-30%上昇

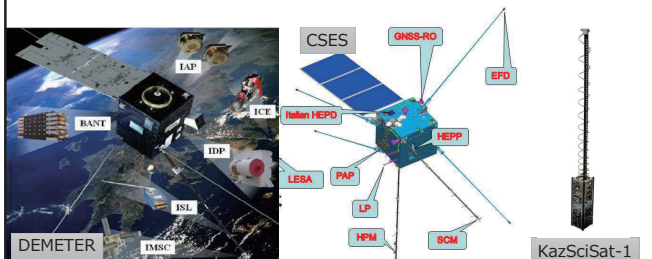


衛星観測のstate-of-the-art

Prelude

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2016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。



衛星観測のstate-of-the-art

Prelude

CSESはDEMETERの上位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。

	重量	打上げコスト	衛星コスト	通信・地上局コスト	特徴
DEMETER (仏CNES)	130 kg	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) 初の統計的に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)	730 kg	20-40億円 (長征2D)	100億円以上	X帯・中国国内に1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月打ち上げ完了、2〜5号機は2021年以降順次打上げ予定)
KazSciSat-1 (カザフスタン宇宙機関)	5 kg	ラドシア (Falcon-9)	不明	UHF帯	先行現象観測のために磁力計を搭載・観測成果は不明
Prelude (本計画)	10 kg	無償 (イプソン相乗)	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。低コスト故に観測衛星群が容易。

Preludeの特徴

Prelude

- 1) ドライブレコーダ的記録(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:
→ 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バンド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限定
- 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
→ 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。
→ 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、その実証実験も行う
- 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
→ 観測対象を特化し、目的達成のための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

20

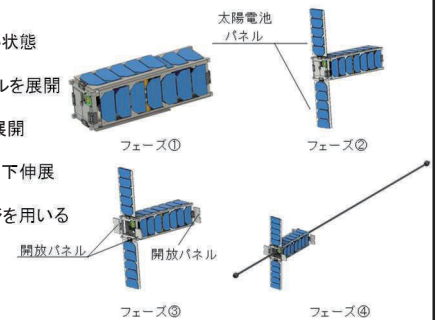
Preludeミッションシーケンス

Prelude

展開フェーズ

- フェーズ①: 展開していない状態
↓
フェーズ②: 太陽電池パネルを展開
↓
フェーズ③: 開放パネルを展開
↓
フェーズ④: VLFセンサを上下伸展

※各パネルの展開にヒンジを用いる



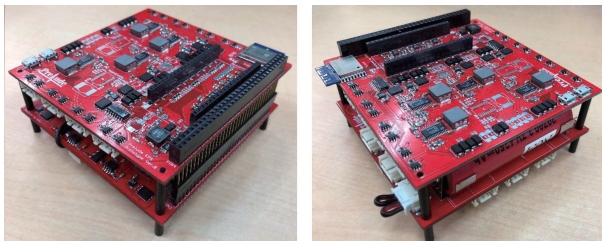
21

進捗状況

Prelude

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ボードモデル(BBM)の製作を行ない、目的を達成するには6Uサイズ(10 × 20 × 30cm)のCubeSatで実現可能

【DEMETER(130 kg) 同等ミッションを6U(10 kg) CubeSat で実現】



21

今後の展開

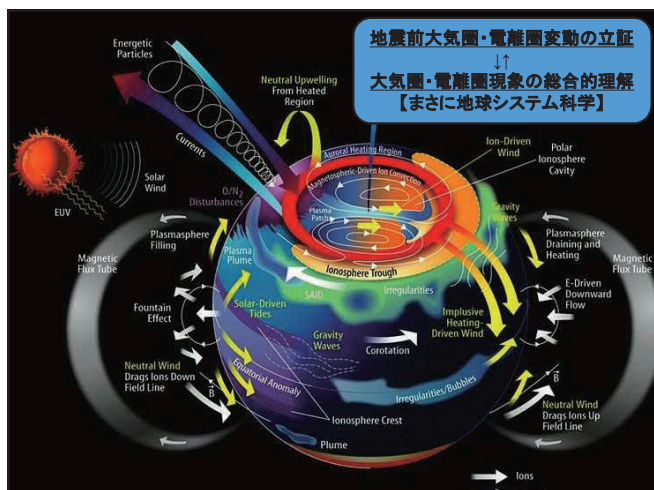
Prelude

- 来年度からエンジニアリングモデル製作に着手
- 資金集め
- 公募型小型提案準備中: 地圏-大気圏-電離圏結合観測小型衛星システム Lithosphere-Ionosphere-Atmosphere Coupling Small Satellite System (LAICS³)

高精度測位・宇宙状況把握(飛翔体監視) 大気海洋相互作用
電離圏物理・宇宙環境・宇宙天気 気象学
超高層大気 地震先行現象 GNSS掩蔽・数値予報
電波伝搬 津波・火山噴火大気変動(早期警戒)
地球電磁気 GPS海面反射
地震学 海洋学

LAICS³のミッションコンセプト

22



謝辞

Prelude



本研究は、東京大学地震研究所共同利用「地震先行VLF帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星のブレッドボードモデル及びエンジニアリングモデルの製作[2019-Y-地震(中短期予測)1]」の助成を頂きました。ここに御礼申し上げます。

23