

PARM 計画: LAMP 観測ロケット実験による脈動オーロラに伴う 高エネルギー電子マイクロバースト現象の研究

浅村和史(1)、三好由純(2)、細川敬祐(3)、滑川拓(1)、三谷烈史(1)
川村美季(4)、吹澤瑞貴(4)、坂野井健(4)
野村麗子(1)、能勢正仁(2)、寺本万里子(5)、小川泰信(6)

(1) JAXA、(2) 名大、(3) 電通大、(4) 東北大、(5) 九工大、(6) 極研

1. PARM 計画

極域の高度 100 km 付近に出現するオーロラの中に「脈動オーロラ」と呼ばれる数秒ごとに明滅する性質を持つものが存在する。この脈動オーロラは、数 keV から数十 keV のエネルギーを持つ電子が、数秒ごとに超層大気に降り込むことによって起こる発光現象であり、一連のオーロラ現象の中で、最もエネルギーが高く、また発光高度が低いことが知られている [Brown+, 1976]。脈動オーロラを起こす降下電子スペクトルの微細構造はれいめい衛星によって観測され、数秒ごとの間欠的な降り込みに加え、数 Hz の降り込み強度の変調があること、また数 keV 以上の高エネルギー電子は間欠的に降り込むものの、1keV 程度の電子にはそのような変調が見られないことなどが明らかにされている [Miyoshi+, 2010, 2015a, Nishiyama+, 2011]。また、THEMIS 衛星と地上光学観測の連携によって、コーラスと呼ばれるプラズマ波動とオーロラの明滅により対応があること [Nishimura+, 2010]、理論的な検討により脈動オーロラを含む高エネルギー電子によって起こるオーロラはコーラス波動が主要因であることが指摘され [Thorne+, 2010]、さらにあらせ衛星と地上光学観測の連携によってこの脈動オーロラを起こす電子は、コーラス波動によるピッチ角散乱であることが実証された [Kasahara+, 2018, Hosokawa+, 2020]。

一方、マイクロバーストと呼ばれる、1 秒以下の時間スケールで放射線帯の数百 keV から数 MeV の相対論的高エネルギー電子が磁気圏から電離圏に向かって大量に降り込む現象の存在が知られている [Nakamura+, 1994]。このマイクロバーストも、コーラス波動によって起こされている可能性が指摘されている [Breneman+, 2017, Miyoshi+, 2020 など]。近年、欧州非干渉散乱レーダー(EISCAT)による脈動オーロラ観測により、脈動オーロラ時に、高度 70km 以下の中間圏における電子密度の急増が発見された [Miyoshi+, 2015b, Oyama+, 2017]。この電子密度の急増は、高エネルギー電子の降り込みに伴うものであり、インバージョン解析により約 200keV 以上のエネルギーを持つ電子、すなわち放射線帯の電子が脈動オーロラ時に降り込んでいることが指摘されている。さらに、2020 年に入ると、本研究グループは、コーラス波動によって脈動オーロラ発生時にマイクロバーストが同時に発生することを説明する新たな理論を提唱し [Miyoshi et al., 2020]、計算機シミュレーション [Saito+, 2012] を用いて脈動オーロラと EPP が不可分の関係であることを指摘した。

脈動オーロラとマイクロバーストを統一的に説明する機構として、Miyoshi+ (2010, 2015a, 2020) は、1) コーラス波動が磁気赤道面で数 keV の電子と共鳴し、ピッチ角散乱された電子が大気に降り込んで脈動オーロラを引き起こす。2) コーラス波動が高緯度に伝搬し、数百 keV から数 MeV の電子と共鳴し、ピッチ角散乱によって低高度まで降り込むことが可能な軌道に電子が投入されることでマイクロバーストが起こるというモデルを提唱している。しかし、これまでの観測ロケット実験、科学衛星では、脈動オーロラ時に ~140 keV の電子が数十 keV の電子と同調して降り込んでいることは示されているものの [Sandahl+, 1980]、MeV にいたる広いエネルギー帯をカバーしたエネルギースペクトルは、未だ観測されていない。

そこで私たちは、脈動オーロラ時の数十 keV から数 MeV におけるエネルギースペクトルの観測を中心として、光学観測および磁場観測による電離圏電流観測を実施する PARM (Pulsating Aurora and Microbursts) と呼ばれる実験プランを提案し、脈動オーロラ時の降下電子エネルギースペクトルの全貌と関連現象の解明を目指している。そして、科学研究費補助金・基盤研究 S および国際共同研究強化 B の支援をうけ、海外の観測ロケット実験への提案を行い、PARM1 観測器パッケージを RockSat-XN 観測ロケットに搭載し、2019 年 1 月 13 日に北欧・アンドーヤから打ち上げた。また、2022 年冬季にアラスカ・ポーカーフラットから打ち上げ予定の LAMP 観測ロケット実験に PARM2 観測器パッケージを搭載する計画を進めている。

本稿では、以下、PARM1/RockSat-XN および PARM2/LAMP 計画について述べる。

2. ROCKSAT-XN 観測ロケット

RockSat-XN は NASA および Colorado Space Grant Consortium (COSGC) が主導した観測ロケット計画であり、アンドーヤ(ノルウェー)から打ち上げられた。計画統括は COSGC が行い、機体製造、試験、運用などは NASA Wallops Flight Facility (WFF) が担当している。RockSat-XN は学生が主体となって搭載観測器開発、試験、運用を行うプログラムであり、観測器公募に対する応募を経て、PARM 観測器パッケージも採択された。

2.1 機器構成、観測計画

PARM1 は表 2.1-1 に示す 4 台の観測器とロケットとの電気的インターフェースを持つ共通エレキ部 (COMMON-E) で構成される。

表 2.1-1: PARM1 構成機器

HEP	高エネルギー電子観測器	エネルギー範囲: 0.2 - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: 0.8 cm ² sr
AIC	オーロラカメラ	観測波長範囲: 665-1000nm 感度範囲: 1-100 kR FOV: 75deg x 96deg 角度分解能: 4.7deg x 3deg (ビニング後) 時間分解能: 0.1s
MED	中間エネルギー帯電子観測器	エネルギー範囲: 20 - 100keV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: 2e-5 cm ² str
AFG	磁力計	レンジ: ±70000nT 分解能: 20bit (=0.013nT) サンプリングレート: 200Hz
COMMON-E		ロケットインターフェース

図 2.1-1(左) は RockSat-XN の機器搭載状況を示している。PARM1 はロケット最上部に位置する top-deck と、システム機器部を挟んで下部に配置された計器板に搭載された。HEP はマイクロバーストによって降りこんでくる高エネルギー電子を観測するため機軸上方に視野を持つ必要がある。このため、top-deck に上向きに搭載されている。また、AFG についても、他機器との電磁的干渉をできるだけ避けるため、top-deck に搭載した。なお、top-deck には同じく機軸上方に視野を持つ必要がある SPID (Smoke Particle Impact Detector; トロムソ大) も搭載された。一方、AIC, MED, COMMON-E については下部計器板に搭載した。両計器板間には PARM1 専用の段間接続ケーブルを引き通し、

COMMON-E から HEP, AFG を制御した。

図 2.1-1(右) は観測概念図を示している。打ち上げ後、ノーズコーン開頭を経て、AIC によるオーロラ撮像観測が行われる。そして、粒子観測器検出部に高電圧が印加され、高エネルギー電子観測を開始する (HEP, MED)。磁場観測 (AFG) は飛翔終了まで継続される。また、打ち上げ時には EISCAT レーダー、MAARSY レーダー (中層大気レーダー) による共同観測のほか、多点光学観測も実施された。

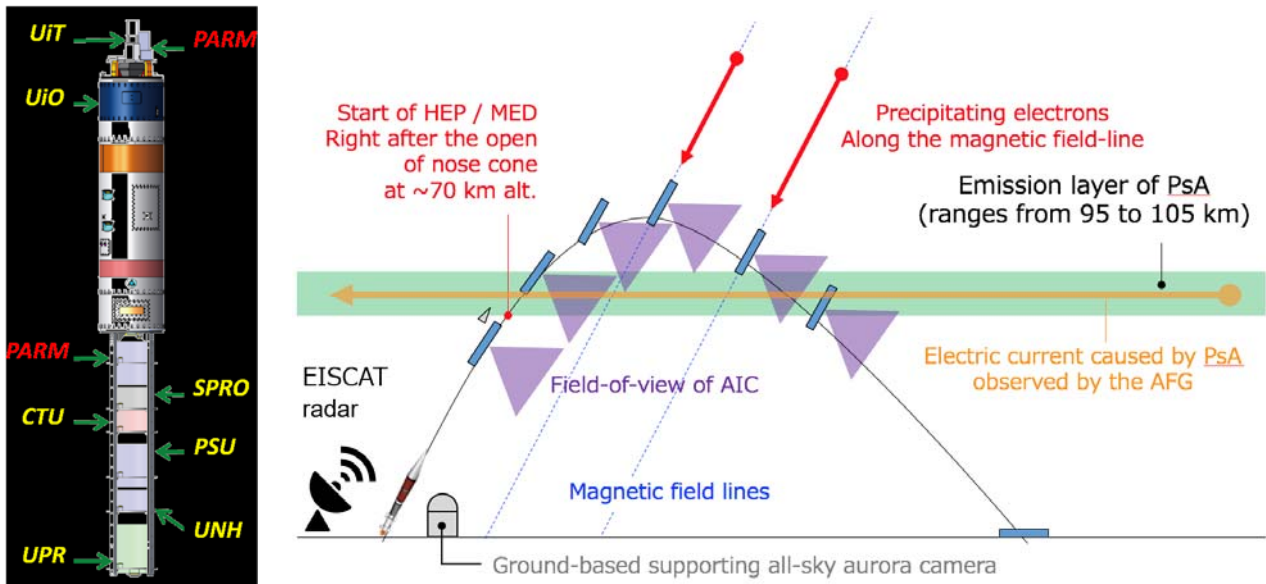


図 2.1-1: (左) RockSat-XN 機器配置。PARM1 は最上部計器板とシステム機器部を挟んだ下部計器板に搭載した。(右) RockSat-XN 観測概念図。

2.2 観測結果

RockSat-XN は 2019 年 1 月 13 日 09:13UT (地方時 10:13) に打ち上げられた。PARM1 はすべて正常動作したもの、残念ながらロケットが日照領域を飛翔することとなったため、飛翔領域におけるオーロラ活動は確認できていない。一方、オーロラ活動度を示す指標の一つである AE (Auroral Electrojet) 指数などから、飛翔時における地磁気活動が静穏な状態にあったことが分かっている。このため、ロケット飛翔時に活動的な脈動オーロラが発生していた可能性は低い。一方、RockSat-XN に搭載された高エネルギー電子観測器 (PARM1/HEP) 及び中間エネルギー帯電子観測器 (PARM1/MED) は、それぞれ 30-100keV 帯および 100keV-1MeV 帯の電子の弱い降り込みを検出した。そして、打ち上げ点近くの VLF 帯電波観測点 (Lovozero) では、コーラス波動と考えられる磁界波動が観測されていること、また RockSat-XN 打ち上げ時に近くを飛翔していた POES18 衛星が磁気圏におけるコーラス波動の強度との関連が指摘されている 30keV 以上の降り込み電子 [Chen+, 2014] を観測していることから、磁気圏におけるコーラス波動による電子ピッチ角散乱が電子の降り込みを引き起こしたとの結論を得て、学術誌に発表した [Sugo+, 2021, Namekawa+, submitted]。

3. LAMP 観測ロケット

LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsation) 観測ロケット実験は脈動オーロラ発生時にその場プラズマ観測と高速地上光学観測を同時に行い、高エネルギー電子マイクロバースト現象に注目しながら脈動オーロラに伴う降下電子エネルギー分布とその変動を解明しようとする NASA 観測ロケット実験計画である。LAMP 計画は Dr. Sarah Jones (NASA GSFC) が主導しており、コロナウイルスの影響などに

より打ち上げ時期が延期されたものの、2021 年度冬季にアラスカ・ポーカーフラットから打ち上げられる予定となっている。私たちはこの計画にも参画しており、PARM2 観測器パッケージを開発・供給する。表 3-1 は LAMP 搭載機器リストである。PARM2 には HEP, AIC1, AIC2, MIM が含まれている。以下、各機器の開発状況について述べる。

表 3-1: LAMP 搭載機器

HEP (PARM2)	高エネルギー電子観測器	エネルギー範囲: 0.2 - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: 0.8 cm ² sr
AIC1 (PARM2)	オーロラカメラ	観測波長範囲: N2 1PG nm 感度範囲: 1 - 100kR FOV: 16x21deg ピクセル数: 75 x 48 (ビニング後) 時間分解能: 0.1s
AIC2 (PARM2)	オーロラカメラ	観測波長範囲: O 845nm 感度範囲: 1 - 100 kR FOV: 75x96deg, slant looking ピクセル数: 75 x 48 (ビニング後) 時間分解能: 0.1s
MIM (PARM2)	磁力計	レンジ: ±80,000nT 分解能: 24 bit サンプリングレート: 200 Hz
EPLAS (ニューハンプ シャー大)	低エネルギー電子観測器	10eV - 20keV
ESST (NASA GSFC)	中間エネルギー電子観測器	20-600keV
PIPs (ダートマス大)	熱的イオン観測器	イオン温度/ドリフト速度計測
ERPA (ニューハンプ シャー大)	熱的電子観測器	0.06 - 3eV
MAG (ニューハンプ シャー大)	磁場観測器	±60000nT

3.1 HEP

HEP は高エネルギー電子マイクロバーストを観測するための高エネルギー電子観測器である。本機器は電子エネルギー測定用の固体検出器 (SSD)、貫通粒子評価のための反同時計数部と、信号処理部で構成される。SSD としては 600 μm 厚のシリコン半導体を 8 層積層し、0.2 - 2MeV の範囲の電子エネルギーを計測することができる。反同時計数部は、コリメータ視野外から筐体を通ってくる銀河宇宙線などの高エネルギー粒子によるバックグラウンドを除去するためのものであり、積層された半導体検出器の周囲をプラスチックシンチレータで囲う。高エネルギー粒子がプラスチックシンチレータを通過する際に発せられる光を Si アバランシェフォトダイオード (APD) 素子 4 個にて検出し、視野外からの混入粒子であるかどうかを判定する。信号処理部においては、SSD で検出された粒子エネルギーを 2 層ごとに積算し、4 チャンネル並列に A/D 変換する。同時に APD 4 個からの信号も並列に A/D 変換する。その後 8 チャンネル分のデータには、1 粒子ごとに時刻タグ (単位: 0.1 ms) を付与して、1 粒子によるイベントデータとしてダウンリンクする。本機器はロケットの最上段にロケット機軸方向に向けて取り付けられる。角度分解能は持たないが、22.6°×22.6° の視野角を持っている。機器の g-factor は 0.8 cm² sr である。本機器は現在開発途中であるが、RockSat-XN に搭載された本機器の最初のモデル

の観測性能は、エネルギー分解能が $\sim 4\%$ @2MeV, $\sim 5\%$ @1MeV, $\sim 22\%$ @300keV、1粒子検出イベントを処理するのに必要な時間が $\sim 5\mu\text{s}$ であった。HEP全体の重量は4kg、電力は8.5Wである。

3.2 AIC1 および AIC2

AICは2台のCMOS検出器(AIC-S1、AIC-S2)と信号処理エレクトロニクス(AIC-E)から構成される。CMOS検出器には低ノイズ(1.6 e-RMS)かつ広いダイナミックレンジ(12bit A/D)に特徴があるZWO社ASI-183MMを採用した。AIC-S1はE領域のN2 1PG発光(中心波長670 nm, FWHM 20 nm)を視野29 deg x 29 deg(対物レンズSpace Com JF17095M, $f = 17$ mm, F/0.95)で撮像する。また、AIC-S2はF領域のOI発光(中心波長846.1 nm, FWHM 4.4 nm)を広角視野106 deg x 106 deg(対物レンズSpace Com HF3.5M-2, $f = 3.5$ mm, F/1.6)で撮像する。カメラはロケットスピンを打ち消すデスパン部に搭載され、姿勢制御を組み合わせる視野の制御を行う。具体的には、S1は磁力線フットプリント周辺のN2オーロラ微細構造(Apex高度450kmにおける空間分解能 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$)を捉え、オーロラ発光と粒子の同時観測を行う。また、S2は磁力線フットプリント(Apex高度450kmにおける直下方向の空間分解能 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$)からリムまでを広くカバーし、脈動オーロラの広域分布に加えて発光高度分布(最大の高度分解能2 km)を得る。2台のカメラは10 frames/sで同時撮像する。CMOS検出器の元々の画素は $3660\text{ pix} \times 3660\text{ pix}$ だが、S/N向上とデータ通信レート条件を満たすためにオンボードで1bin = $60\text{ pix} \times 60\text{ pix}$ ビニング処理し、 $60\text{ bin} \times 60\text{ bin}$ 空間分解画像(1binあたりビット深さ16)とする。AIC-Eは2台のボードコンピュータNanopi M4V2と2台のFPGA搭載基板、電力供給回路等で構成される。AIC全体の重量は2.6kg、電力は20Wである。Nanopi M4V2基板上で局所的に高温になるCPUの冷却には自励振動ヒートパイプ(OHP)を用いている。

3.3 MIM

近年、センサーデバイスの高性能化・低価格化・省電力化・軽量小型化が進んでいる。私たちは、宇宙空間の電磁気的変動を知る上で最も重要な物理量である地球磁場(地磁気)に着目し、比較的高性能ながら廉価である磁気インピーダンス(Magneto-Impedance (MI))センサーを使った磁力計「MIM (MI Magnetometer)」の開発を行っている。今回、LAMP観測ロケットにMIMを搭載して、高度約400 kmにおける地磁気観測を行い、飛翔体におけるMIセンサーの有効性を検証することを目的としている。MIMのセンサー部およびアンプ部(MIM-S)は合わせて、大きさが $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 程度、重さが約500 g、消費電力は約3 Wである。50万円程度の費用で製作することができ、従来の磁場センサーに比べて小型・軽量・省電力・廉価である。そのため、同じ研究費であっても多くの計測装置を準備することができ、今回のロケット実験の結果・データを元に、将来的に多数の超小型人工衛星による地磁気観測への展開を目指している。

MIM-Sからの $\pm 15\text{ V}$ のアナログ信号は、Raspberry Piを含む電子回路部・データ処理部(MIM-E)に取り込まれ、そこでデジタル信号への変換やダウンサンプリング(平均化処理などにより3200 Hzから200 Hzへ変換)、共通バス部へのデータ引き渡しが行われる。また、センサー感度の温度依存性を補正する目的で、センサー近くの温度を計測し同様に共通バス部へデータを送る。MIM-Eは、大きさが $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 44\text{ mm}$ 、重さが約1.5 kg、消費電力は約6 Wである。Raspberry Pi基板上で局所的に高温になるCPUの冷却には薄型のループヒートパイプ(LHP)を用いている。

2020年9月に、これまでに制作したMIM-SとMIM-Eのかみ合わせ試験および熱真空試験を、宇宙航空研究開発機構にて行った。温度 $+50^\circ\text{C}$ から -10°C の範囲において、正常に動作することを確認し、センサーの温度特性を導出した。また、2020年12月に、茨城県石岡市にある柿岡地磁気観測所の施設を利用して直交度較正試験を行った。外部からヘルムホルツにより既知の磁場を印可し、その応答を見ることで、センサー各軸間の角度を推定した。引き続き、MIM-SとMIM-Eの振動試験などを実施しゆく予定である。

参考文献

- Breneman, A.W. et al., Observations Directly Linking Relativistic Electron Microbursts to Whistler Mode Chorus: Van Allen Probes and FIREBIRD II, *JGR*, doi:10.1002/2017GL075001, 2017.
- Brown, N.B., T.N. Davis, T.J. Hallinan, and H.C. Stenbaek-Nielsen, Altitude of pulsating aurora determined by a new instrumental technique, *GRL*, 403-404, 1976.
- Castagnoli, G. and D. Lal, Solar modulation effects in terrestrial production of carbon-14, *Radiocarbon*, 22(2), 133-158, 1980.
- Chen, Y. et al., Global time-dependent chorus maps from low-Earth-orbit electron precipitation and Van Allen Probes data. *Geophys. Res. Lett.* 41, 755–761, doi:10.1002/2013GL059181, 2014
- Hosokawa, K. et al., Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves, *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-020-59642-8, 2020.
- Kasahara, S. et al., Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation, *Nature*, doi:10.1038/nature25505, 2018.
- Miyoshi, Y. et al., Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves, *JGR*, doi:10.1029/2009JA015127, 2010.
- Miyoshi, Y. et al., Relation between fine structure of energy spectra for pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler mode chorus waves, *JGR*, doi:10.1002/2015JA021562, 2015a.
- Miyoshi, Y. et al., Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations, *JGR*, doi:10.1002/2014JA020690, 2015b.
- Miyoshi, Y. et al., Relativistic electron microburst as high-energy tail of pulsating aurora electrons, *GRL*, doi:10.1029/2020GL090360, 2020
- Nakamura, R. et al., Relativistic electron precipitation enhancements near the outer edge of the radiation belt, *JGR*, 1129-1132, 1995.
- Nishimura, Y. et al., Identifying the driver of pulsating aurora, *Science*, 330, 81–84, 2010.
- Nishiyama, T. et al., The source region and its characteristic of pulsating aurora based on the Reimei observations, *JGR*, doi:10.1029/2010JA015507, 2011.
- Oyama, S. et al., Energetic electron precipitation and auroral morphology at the substorm recovery phase, *JGR*, doi:10.1002/2016JA023484, 2017.
- Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki, Relativistic electron microbursts associated with whistler chorus rising tone elements: GEMSIS-RBW simulations, *JGR*, doi:10.1029/2012JA018020, 2012.
- Sandahl, I., L. Eliasson, and R. Lundin, Rocket observation of precipitating electrons over a pulsating aurora, *GRL*, 309-312, 1980.
- Sugo, S. et al., Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30-100keV by a sounding rocket associated with dayside chorus waves, *JGR*, doi:10.1029/2020JA028477, 2021.
- Thorne, R.M. et al., Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation, *Nature*, doi:10.1038/nature09467, 2010.