

## PARM 計画: RockSat-XN 及び LAMP 観測ロケットによる脈動 オーロラに伴う高エネルギーマイクロバースト現象の研究

浅村 和史(JAXA)、細川 敬祐(電通大)、三好 由純(名大)、三谷 烈史(JAXA)  
滑川 拓(JAXA)、坂野井 健(東北大)、吹澤 瑞貴(東北大)、八木 直志(東北大)  
笠原 慧(東大)、菅生 真(東大)、川島 桜也(東大)、野村 麗子(JAXA)  
寺本 万里子(名大)、能勢 正仁(名大)

### 1. PARM 計画

オーロラは、宇宙空間から降り込んでくる電子が超高層大気と衝突して起こる発光現象である。オーロラには、カーテン状のもの、渦巻き状のものなどさまざまな形態があり、時間的に激しく変化している。また、サブストームと呼ばれる磁気圏でのエネルギー解放現象に対応して、しばしばオーロラ爆発と呼ばれる全天がオーロラで輝く現象も存在する。オーロラ爆発は 30 分~1 時間程度の現象であるが、オーロラ爆発の発生直後より、脈動オーロラと呼ばれるパッチ状の明滅するオーロラが出現する。この脈動オーロラは、数キロ電子ボルトから数十キロ電子ボルト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、もっと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, GRL]。近年のいろいろな衛星の観測 [Miyoshi+, 2010, 2015a, Nishiyama+, 2011, JGR] により、この脈動オーロラを起こす降下電子スペクトルの微細構造が明らかにされ、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、また数キロ電子ボルト以上の高エネルギー電子は間欠的に降り込むものの、1 キロ電子ボルト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。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, Science]、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が主要因であること [Thorne+, 2010, Nature] が指摘され、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、コーラスよるピッチ角散乱であることが初めて実証された [Kasahara+, 2018, Nature]。このように、現在、脈動オーロラの基本的な性質の解明が飛躍的に進みつつある。

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キロ電子ボルトから数メガ電子ボルトの電子が大量に降り込んでくることが知られている [Nakamura+, 1994, GRL]。このマイクロバーストも、コーラスによって起こされている可能性が指摘されている [Breneman+, 2017, JGR]。近年、欧州非干渉散乱レーダー (EISCAT) による脈動オーロラの観測によって、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, JGR]。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 200 キロ電子ボルト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。中間圏で電離が進むと窒素化合物 (NO<sub>x</sub>)、水酸化化合物 (HO<sub>x</sub>) が増加し、その結果、オゾンが減少する可能性が指摘されている。上記の EISCAT の観測時について、シミュレーションによってオゾン層の減少を推定したところ、10% 以上の中間圏オゾンが減少するという結果が得られており [Turunen+, 2016, JGR]、脈動オーロラが中間圏の化学組成に大きな影響を及ぼしていることが指摘されている。

この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, JGR] は、1) コーラスが磁気赤道面で数キロ電子ボルトの電子と共鳴し、電子が大気に降り込んで脈動オーロラが起こる。2) コーラスがさらに高緯度に伝搬し、数百キロ電子ボルトから数メガ電子ボルトの電子と共鳴し、マイクロバーストが起こるというモデルを提案している。このモデルは、Saito+ [2012, JGR] によるシミュレーションによって検証され、脈動オーロラとマイクロバーストが同一なものであることが指摘されている。しかし、これまでの観測ロケット実験、科学衛星においては、脈動オーロラ時に ~140 キロ電子ボルトの電子が数十キロ電子ボルト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, GRL]、メガ電子ボルトにいたる広いエネルギー帯でのエネルギースペクトルは、まだ観測されていない。

そこで、本研究グループでは、脈動オーロラ時の数十キロ電子ボルトから数メガ電子ボルト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。現在、科学研究費補助金・基盤 S(代表：藤井良一名古屋大学名誉教授)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 (RockSat-XN ロケット実験において、2019年1月に北欧・アンドーヤから打ち上げ)、PARM2 (LAMP ロケット実験において、2019年12月-2020年1月にアラスカ・ポーカーフラットから打ち上げ)の計画を進めている。

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

## 2. 観測ロケット実験

### 2.1 RockSat-XN 観測ロケット

PARM1 を搭載する観測ロケット RockSat-XN は、Colorado Space Grant Consortium が出資し、NASA の観測ロケットで観測器を打ち上げる RockSat-X プログラムの1つであり、2019年1月にノルウェー・アンドーヤから打ち上げられる予定である。また、RockSat-XN はノルウェー及び米国 NASA が軸となって進めている Grand Challenge Initiative (GCI) Cusp プロジェクトの観測ロケット部門の一部である G-CHASER 観測ロケット計画を構成するミッションでもある。RockSat-X プログラムでは、搭載観測機器は公募によって選択される。今回の RockSat-XN では PARM1 を含め、8 機器/パッケージが搭載されることとなっている。

PARM1 を構成する機器を表 2-1 に示す。PARM は 4 台の観測機器 (HEP, AIC, MED, AFG) と共通エレキ部 (COMMON-E) で構成される。この中で、COMMON-E のみがロケットとの電気的インターフェースを持つ。各観測器と COMMON-E の間は宇宙研観測ロケットのテレメータ/電源/タイマーインターフェースと同等とし、各観測器の開発に際し RockSat-XN インターフェースを考慮しなくて良い設計とした。

表 2-1: PARM1 構成機器

HEP	高エネルギー電子観測器	エネルギー範囲: 100keV - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: ~1 cm <sup>2</sup> str
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 <sup>2</sup> 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	共通エレキ	ロケットとのインターフェース

図 2-1 は RockSat-XN の頭胴部の機器搭載状況を示している。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、最上部の計器板 (nosecone 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、nosecone deck に搭載した。なお、nosecone 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) も搭載される。一方、AIC, MED, COMMON-E については後段の計器板 (PARM aft. deck) に搭載した (図 2-2)。PARM aft. deck と nosecone deck 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 を制御している。

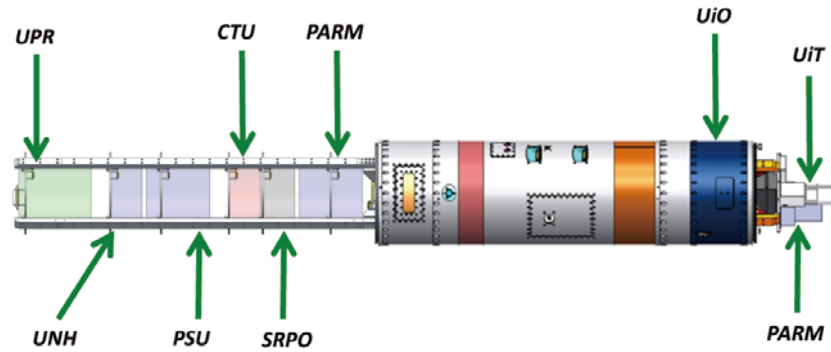


図 2-1: RockSat-XN への各機器搭載状況。右側がロケット機軸上方向である。PARM1 機器は最上部計器板 (nosecone deck) と後段部の計器板の一つ (PARM aft. deck) に搭載される。

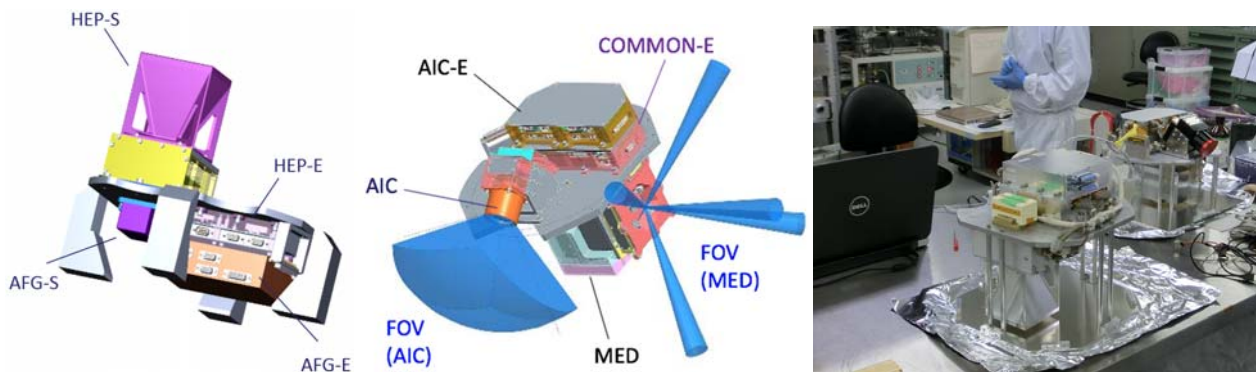


図 2-2: (左) PARM nosecone deck、(中) PARM aft. deck、(右)JAXA における米国持込前の電気試験

PARM1 観測器パッケージは既に開発を終えており、2018年8月に NASA Wallops Flight Facility にて他機器とともにロケット頭胴部に組み込み、全体噛みあわせ試験を行った。環境試験、動釣合試験などを含め、これまでのところ改修を要するような問題は見つかっていない。今後、ノルウェー・アンドーヤへロケットとともに輸送され、機能確認試験、ノンフライトアイテム外しなどのフライト前準備を行った後、打ち上げられる予定である。なお、打ち上げの際には北欧に展開する地上光学観測網によるオーロラ高速撮像、EISCAT レーダーによる電離層電子密度の高度プロファイルの取得などを準リアルタイムで行い、サポート観測に供することとしている。また、名古屋大学水野教授のグループによって、地上からのミリ波電波観測による中間圏の窒素化合物の変動量等の観測も実施される予定である。

## 2.2 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、2019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 2-2 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。

LAMP は計画が採択され、始まった段階であり、PARM2 としては機器設計段階にある。今後 NASA によるデザインレビューなどを経て製作、試験などを行ってゆく。

表 2-2: 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: 100keV - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: ~1 cm <sup>2</sup> str
AIC1 (PARM2)	オーロラカメラ	観測波長範囲: 665-800 nm 感度範囲: 1 - 100kR

		FOV: $2\pi$ str (魚眼)(TBD) 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: 290-340nm 感度範囲: 1 – 100 kR FOV: $2\pi$ str (魚眼) (TBD) 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: $\pm 70000$ nT (TBD) 分解能: 18bit (=0.5nT) (TBD) サンプリングレート: 200Hz
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	$\pm 60000$ nT

## 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.
- 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.
- 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.
- Thorne, R.M. et al., Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation, Nature, doi:10.1038/nature09467, 2010.
- Turunen, E. et al., Mesospheric ozone destruction by high-energy electron precipitation associated with pulsating aurora, JGR, doi:10.1002/2016JD025015, 2016.