

PARM 計画: RockSat-XN および LAMP 観測ロケット計画による 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(1,4)、三谷烈史(1)
八木直志(5)、吹澤瑞貴(5)、坂野井健(5)、菅生真(4)、川島桜也(4)、笠原慧(4)
野村麗子(6)、能勢正仁(2)、小川泰信(7)、齊藤慎司(8)

(1) JAXA、(2) 名大、(3) 電通大、(4) 東大、(5) 東北大、(6) 国立天文台、(7) 極地研、(8) NICT

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、数秒ごとに超高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、また数千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[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い対応があること[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、コーラスよるピッチ角散乱であることが実証された[Kasahara+, 2018]。

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 の電子が大量に降り込んでくることが知られている[Nakamura+, 1994]。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]。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。中間圏で電離が進むと窒素化合物(NO_x)、水酸化化合物(HO_x)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]、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。

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]は、1)コーラスが磁気赤道面で数 keV の電子と共鳴し、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)コーラスがさらに高緯度に伝搬し、数百 keV から数 MeV の電子と共鳴し、マイクロバーストが起こるといモデルを提案している。このモデルは、Saito+[2012]による計算機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 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実験プラン(PARM:

Pulsating Aurora and Microbursts) 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 の支援を受け、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、2020 年 12 月にアラスカ・ポーカーフラットから打ち上げる予定の 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: 200keV - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: 0.85 cm ² 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 ² str
AFG	磁力計	レンジ: ±100000nT 分解能: 20bit (=0.19nT/digit) 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 によるオーロラ発光観測が行われる。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。

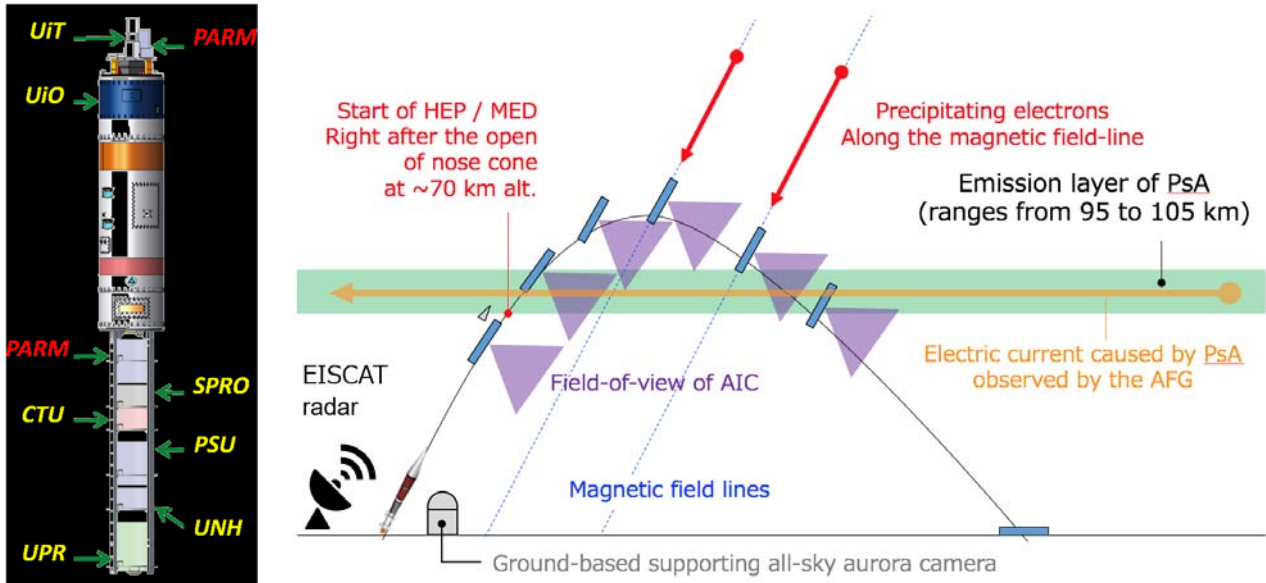


図 2.1-1: (左) RockSat-XN 機器配置。PARM1 は最上部計器板とシステム機器部を挟んだ下部計器板に搭載した。(右) RockSat-XN 観測概念図。

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。残念ながらロケットが日照領域を飛行することとなったため、飛行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、飛行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、ロケット飛行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。

2.2.1 HEP

HEP によって得られた電子エネルギースペクトル (ただし未校正) を図 2.2-1 に示す。HEP は半導体検出器 (SSD: Solid State Detector) を用いて粒子検出、エネルギー弁別を行うが、SSD の有感領域で入射粒子の全エネルギーがデポジットされるとは限らないため、観測結果を入射時のエネルギースペクトルに変換する処理が必要となる。また、SSD は銀河宇宙線などの高エネルギー粒子・光子にも感度を持つ。このため、HEP 筐体構造などを考慮した計算機シミュレーションによって銀河宇宙線起源のノイズを見積もり、図 2.2.1-1 にオーバープロットした。1MeV 以上の検出カウントはほぼ銀河宇宙線によるものと考えられるが、1MeV 以下では降り込み電子成分が含まれているものと推測される。

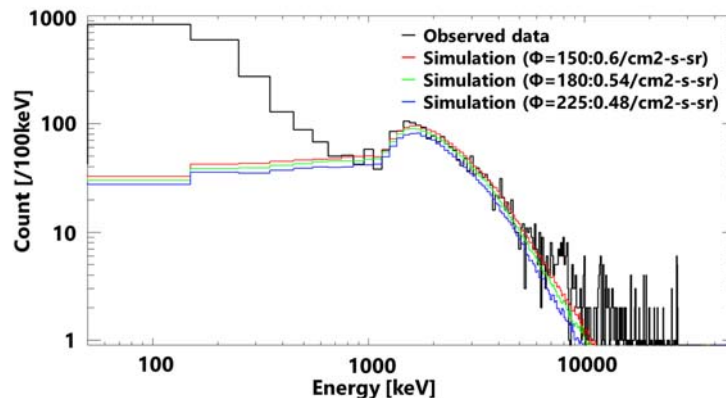


図 2.2.1-1: (黒線) HEP によって得られた電子エネルギースペクトル (未校正値)。09:14:39.6 UT から 274.4 秒間の積分カウントで示されている。(赤、緑、青線) 計算機シミュレーションによって見積もった HEP が検出する銀河宇宙線起源による疑似エネルギースペクトル。銀河宇宙線フラックスは Castagnoli and Lal [1980] によって与えた。

2.2.2 MED

MED は 20 – 100keV の電子を APD (Avalanche Photo Diode) によってエネルギー弁別する観測器である。5 方向の視野チャンネルを持ち、上昇電子、降下電子を区別した観測が可能となっている。図 2.2.2-1 は MED によって観測された 35keV – 160keV の電子カウントレートを示している。この図では、AFG による磁場観測結果を用い、ピッチ角 0-90 度 (降下方向、赤線)、90-180 度 (上昇方向、青線) に分けてプロットしている。図 2.2.2-1(a) から、打ち上げ後 220-270 秒の区間で下降電子成分が卓越していることが分かる。一方、図 2.2.2-1(b) は Neher [1971] による銀河宇宙線フラックスを用い、銀河宇宙線によって MED が誤検出してしまふカウントレートを見積もったものを緑点線で示している。MED によって検出された上昇電子カウントレートは銀河宇宙線によるノイズであると考えられる。また、銀河宇宙線は機器筐体を貫通して検出器に到達するため、MED 方向チャンネルによる差は小さいと考えることができる。このため、下降電子成分においても、打ち上げ後 220-270 秒の区間以外の検出カウントは電子起源ではなく、ノイズによるものと考えられる。

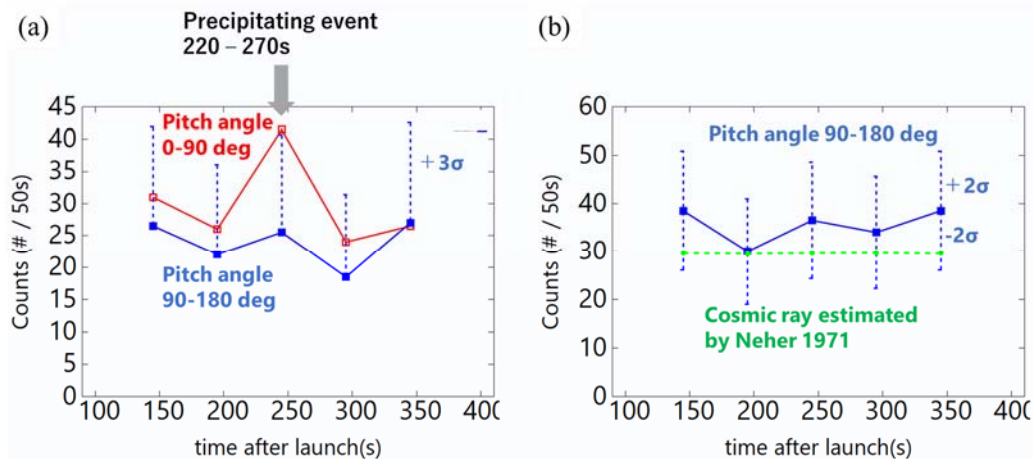


図 2.2.2-1: MED の観測結果。(a) 35-160keV の範囲のカウントレート。赤線: ピッチ角 0-90 度 (下降成分)、青線: ピッチ角 90-180 度 (上昇成分)。(b) 青線: 上昇成分のカウントレート (13keV 以上)、緑点線: Neher [1971] による銀河宇宙線フラックスを用いて見積もった MED カウントレート。

2.2.3 AFG

AFG はフラックスゲート磁力計である。センサーが出力する信号の処理部の一部とフィードバック信号生成部分が ASIC で実現されている。これまでの日本の科学衛星、観測ロケットに搭載された磁力計では ASIC は使用されておらず、RockSat-XN / AFG が初めてのフライト実証機会となった。図 2.2.3-1 に AFG の観測結果を示す。詳細は解析中であるが、ロケットのスピン、コーニングなどが捉えられている。

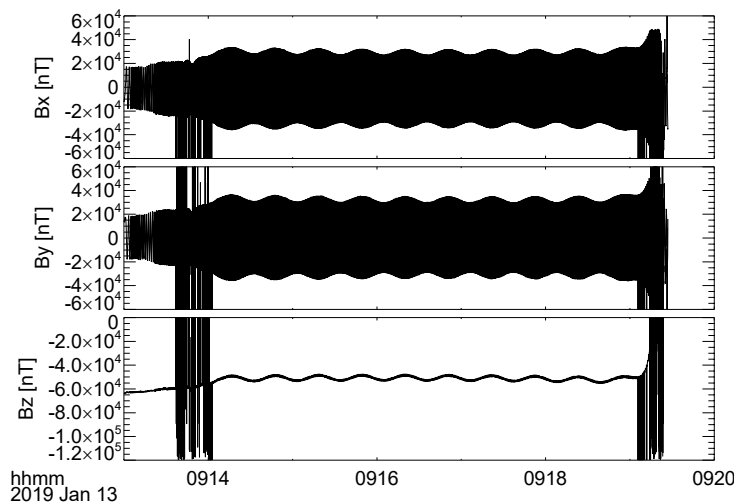


図 2.2.3-1: AFG の観測結果。

2.2.4 AIC

AIC は 665-1000nm の波長範囲に感度を持ったオーロラカメラである。RockSat-XN は日照中に打ち上げられることとなったため、オーロラ観測を想定して高感度に設定された AIC では観測データが飽和し、観測困難な状態となった。ただし、ノーズコーン開頭前のタイミングでは、ノーズコーンによって太陽光入射が遮られ、迷光によるカウントがロケットのスピンの同期して検出された。図 2.2.4-1 に示す結果のとおり、打ち上げ時からノーズコーン開頭（高度 82km）まではノーズコーン内部の画像取得ができ、特に高度 15km より高高度で日照領域に入った後明確なカウント増加が見られた。このため、AIC 自体は正常に動作したと考えられる。RockSat-XN は学生教育を主要な目的の一つとする観測ロケット計画であり、ロケット打ち上げタイミングの設定自由度に制限があったとはいえ、AIC の観測に適さない条件下でのロケット打ち上げとなってしまったことは残念である。

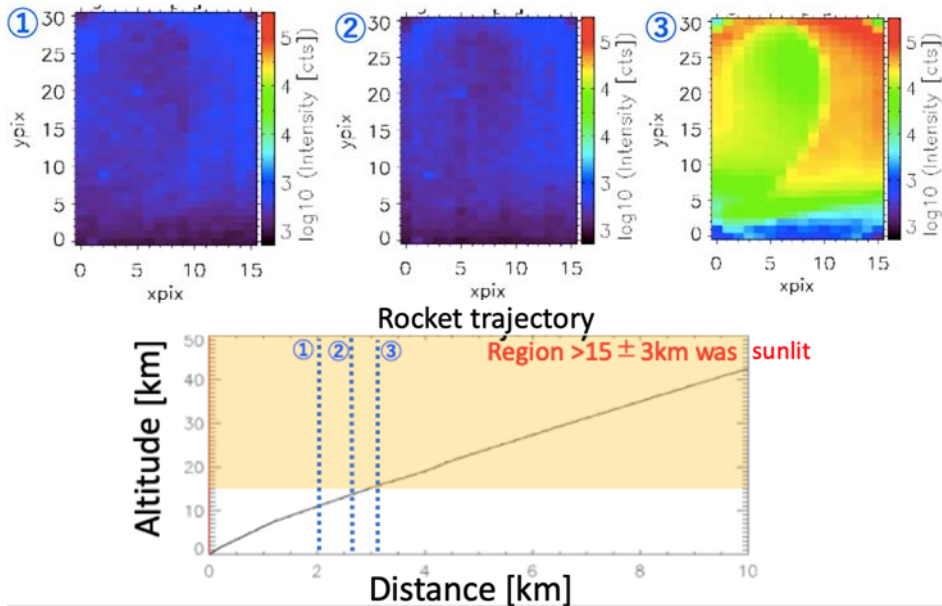


図 2.2.4-1: AIC の観測結果。下段はロケット飛行距離と高度の関係で、オレンジ色の部分が日照領域を示す。

2.3 機器開発

PARM1 観測器パッケージは 4 台の観測器から構成されるが、そのうちの 3 台については PARM1 開発チームの教員やメーカー技術者の指導・支援の下、複数の大学院生が機器設計、製作、試験、打ち上げ場における運用の全般にわたって主導した。観測ロケット搭載観測器の開発では、必要とされる観測性能を実現するだけでなく、電気的・機械的インターフェースの整合性、視野干渉に関する調整、機器の頭銅部搭載後の制限された条件下での機器性能確認、機械環境などへの耐環境性能、テレメトリデータの即時確認などが必要であり、機器開発にあたった大学院生たちは宇宙用観測器の開発にあたって有用な経験と知識を得ることができた。

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、2020 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。

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 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: 200keV - 2MeV エネルギー分解能: ~0.2 G-factor: ~1 cm ² str
AIC1 (PARM2)	オーロラカメラ	観測波長範囲: 667-680 nm 感度範囲: 0.1 - 100kR FOV: 28 deg. x 28 deg. ピクセル数: 60 x 60 (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: 844-848nm 感度範囲: 0.1 - 100 kR FOV:106 deg. x 106 deg. (魚眼) ピクセル数: 60 x 60 (ビニング後) 時間分解能: 0.1s
MIM (PARM2)	磁力計	レンジ: ±80000nT 分解能: 24bit (=0.01nT) 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	±60000nT

4. まとめ

RockSat-XN は学生教育を主要な目的の一つとする観測ロケット計画であるために、ロケット打ち上げタイミングの設定自由度に制限があった。一方で、PARM1 パッケージに含まれる搭載機器の開発や噛み合わせ、打ち上げ運用は、複数の大学院生が主体的に関わる形で行われ、今後の観測ロケットや衛星搭載機器開発を担っていく人材の育成に大きく貢献するものであったと考えられる。また、PARM1/RockSat-XN で機器開発に取り組んだ大学院生の一部は、来年度打ち上げの PARM2/LAMP に搭載される機器開発にも参画しており、PARM1 で培った経験を次の打ち上げに活かしている。宇宙研の観測ロケット実験事業においても、このような形でロケットの打ち上げ機会を継続的に確保し、大学院生が機器開発に主体的に参加できる仕組みを作っていくことは有用であると考えられる。

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.
- 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.
- Neher, H.V., Cosmic rays at high latitudes and altitudes covering four solar maxima, JGR, 76(7), 1637-1651, 1971.
- 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.