

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：82645

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0100

研究課題名（和文）国際共同による観測ロケット実験を軸とした脈動オーロラ降下電子の研究

研究課題名（英文）Study of microburst electron precipitations during pulsating aurorae by a sounding rocket

研究代表者

浅村 和史 (Asamura, Kazushi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50321568

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：脈動オーロラ発生時の高エネルギー電子マイクロバースト現象の観測を実現するため、米国 NASA の観測ロケット計画（LAMP）に提案段階から参画した。本研究では高エネルギー電子観測器、オーロラカメラ(2台)、磁力計からなる観測機器パッケージ（PARM2）を開発し、LAMP 観測ロケットに搭載した。LAMP は 2022年3月5日に米国アラスカ州ポーカーフラットから打ち上げられた。打ち上げのタイミングは地上光学観測網で得たオーロラ発生状況のモニタリング結果を参照して決定しており、脈動オーロラ発光領域中の観測に成功した。そして、搭載観測器は高エネルギー電子マイクロバーストの検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した LAMP 観測ロケット実験は脈動オーロラ現象に伴って大気に降りこむ相対論的高エネルギー電子の生成機構を明らかにすることを目的としている。一方、近年、宇宙から高エネルギー電子が中層大気に貫入することによるオゾン破壊の可能性と、その結果として起こる地球大気全高度領域における力学・温度変化についての関心が高まっている。本研究の成果は高エネルギー電子が降りこむ原因の解明にとどまらず、その結果として引き起こされる中層大気変動の解明にもつながるものである。

研究成果の概要（英文）：We have participated in the LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsation) sounding rocket mission led by NASA. The scientific purpose of the LAMP mission is to reveal generation mechanisms of microburst precipitation of sub-relativistic electrons during pulsating aurorae. We have developed an electron sensor covering from approx. 100keV up to 2MeV, two high frame rate auroral imagers, and a three-axes magnetometer. LAMP was launched from Poker Flat Research Range, Alaska, USA at March 5th, 2022. We have also established auroral observation stations located just below the predicted rocket trajectory for ground-based optical measurements. The launch timing of the rocket was determined by using auroral monitoring data provided by these ground stations. As a result, LAMP successfully passed through pulsating auroral patches and a number of electron microburst precipitations were detected.

研究分野：太陽惑星系物理学

キーワード：観測ロケット 脈動オーロラ 高エネルギー電子降りこみ

1. 研究開始当初の背景

極域の超高層 100 km 高度付近に出現するオーロラの中には「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。2000 年代以降、我が国の「れいめい」衛星や、地上からの高速カメラによる新しい観測が行われ、その時間変動を制御するメカニズムが解明されつつある。特に、脈動の起源として、コーラス波動と呼ばれる宇宙の電波との関連性が指摘され、注目を集めている (Nishimura et al., Science, 2010; Kasahara et al., Nature, 2018)。また、国内での「脈動オーロラ研究集会」の開催、国際学会での「脈動オーロラ」特別セッション、地球惑星科学分野におけるトップジャーナルである JGR 誌での特集号が相次いで企画され、国際的にも、多くのグループによって競争的に研究が行われている。このような取り組みを日本の研究グループが取り仕切る流れの中で、私たちを含むグループは、科研費基盤研究 S「極限時間分解能観測によるオーロラ最高速変動現象の解明 (名古屋大学藤井良一代表) の枠組みの中で、衛星・地上・ロケット・数値実験を組み合わせた脈動オーロラ研究を国内外の研究者と広く連携する形で推進し、脈動オーロラを直接計測するための観測ロケット実験 (RockSat-XN 実験) を 2019 年 1 月に北欧で実施するための準備を進めていた。

一方で私たちは、磁気赤道域で発生するコーラス波動が高緯度域に伝搬し、共鳴条件が変化することによって放射線帯内に存在する相対論的高エネルギー電子が散乱され、磁力線に沿って低高度にまで降りこむとする理論を提案した (Miyoshi et al., 2015a, 2015b; Hosokawa and Ogawa, 2015)。コーラス波動には数 Hz 程度の高速変動が存在することが知られており、散乱された高エネルギー電子のフラックスも変動することが予想される。実際に低高度衛星によって突発的に、そして繰り返して起こるマイクロバーストと呼ばれる高エネルギー電子降りこみ現象が観測されており、コーラス波動、そして脈動オーロラ発光現象との関連が強く示唆されることとなった。しかし、本研究の開始時点では、数 MeV に達する高エネルギー電子を高い時間分解能で観測する計測機器が低高度を飛翔する科学衛星に搭載されておらず、脈動オーロラ発生時に相対論的高エネルギー電子が実際に降り込んでいるかどうかの観測的実証はなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では高エネルギー電子観測器、オーロラ高速撮像観測器などを搭載した観測ロケットを脈動オーロラの中に打ち上げる。そして、脈動オーロラ発生時に放射線帯から大気に入り込んでくる相対論的高エネルギー電子を直接計測する。私たちの開発した計測器は、100keV から数 MeV に至る幅広いエネルギー帯をカバーし、高時間分解能で観測できるという特徴を持っており、脈動オーロラ時の降下電子の全体像、特に相対論的高エネルギー電子の同時降下現象を世界で初めて観測することができる。一方、観測ロケットによる粒子計測だけでは、降下電子と脈動オーロラの対応を取ることが難しい。このため、観測ロケットにはオーロラ高速撮像機器と磁力計を追加搭載し、脈動オーロラの同定を行うこととした。また、高速撮像カメラなどによる地上サポート観測を国際共同の枠組みで実施し、脈動オーロラと放射線帯電子消失過程の関連性を理解することとした。

3. 研究の方法

本研究では米国の大学、NASA と連携し、米国・アラスカにて脈動オーロラ発光時の高エネルギー電子降りこみ現象の観測に特化した観測ロケット実験を行った。この観測ロケット実験は LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsation) と呼ばれ、NASA の Sarah Jones 博士、Marc Lessard 博士らが主導する研究グループに本研究グループが参画し、NASA 観測ロケット公募に提案が採択されたものである。

私たちは、高エネルギー電子観測器、オーロラ高速撮像カメラ、磁力計を開発し、LAMP に搭載することとした。また、オーロラ発光現象は地上からも観測が可能であ

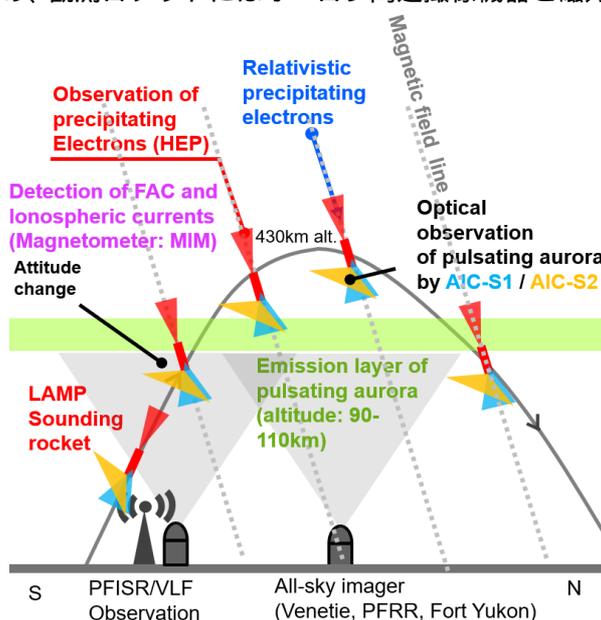


図 1: LAMP 観測ロケットによる観測の模式

る。この利点を利用し、LAMP の飛翔軌道直下付近に複数の拠点を立ててオーロラ高速撮像カメラを設置し、LAMP の打ち上げタイミングの決定に用いるほか、観測ロケット飛翔時、およびその前後の科学解析に用いることとした。図 1 は LAMP の飛翔中の観測コンフィギュレーションを模式的に示したものである。LAMP は打ち上げ後、上昇中にロケットモーター部を分離し、頭胴部（パイロード搭載部）最後尾に下向きに搭載したカメラのオーロラ撮像観測を可能にする。また、ロケットの機軸を地球磁場方向に向ける姿勢制御が行われ、磁力線に沿って降りこんでくる高エネルギー電子の観測に適した姿勢とする。一方で地上には射場（アラスカ州 Poker Flat Research Range）のほか、観測ロケット軌道の最高高度到達点直下付近に観測拠点を 2 か所設営し、オーロラ全天高速光学撮像を行った。

4. 研究成果

私たちは高エネルギー電子分析器（HEP）、オーロラ構造撮像カメラ 2 式（AIC1, AIC2）、磁力計（MIM）を開発し、LAMP 観測ロケットに搭載した。開発した機器は 2021 年 12 月から翌 1 月にかけて米国バージニア州ワロップスで行われた噛み合わせ試験に供された。噛み合わせ試験では観測機器がロケット頭胴部に組付けられ、各種電気試験・環境試験を行い、成功裏に終了した。なお、新型コロナウイルス蔓延の影響などにより、LAMP の打ち上げが当初より 2 年延期となったため、それに合わせて噛み合わせ試験も遅れて実施された。



図 2: 脈動オーロラに向かって飛翔する LAMP 観測ロケット。(Justin Hartney 氏提供)

2022 年 2 月、LAMP は射場に輸送され、打ち上げ運用が始まった。これに合わせ、日本チームも射場に行き、打ち上げ準備を開始したほか、地上観測網の設営・運用を開始した。そして、LAMP は 2022 年 3 月 5 日 2 時 27 分 30 秒（アラスカ現地時間）に打ち上げられた（図 2）。打ち上げタイミングの決定には私たちが設置し、現地で運用したオーロラ全天高速撮像カメラの画像が大いに役立ち、ロケットは高速変調する脈動オーロラ発光領域の飛翔に成功した。このことは搭載オーロラカメラ（AIC1）画像からも、地上光学観測からも確認されている。また、まだ打ち上げから間もないため初期的な解析結果ではあるが、HEP はマイクロバーストと思われる高エネルギー電子の降りこみ現象を検出した。今後、米国側搭載機器、地上観測機器のデータも含めた解析を実施し、電子マイクロバースト現象の解明につなげてゆく。

私たちは LAMP の準備研究として、脈動オーロラと高エネルギー電子の降りこみについて 2019 年に北欧で打ち上げた観測ロケット RockSat-XN や低高度衛星、オーロラ光学観測網などの観測データ解析も進めた。そして、地磁気静穏期においてコーラス波動によって散乱され、低高度に降りこんだ高エネルギー電子を同定した (Namekawa et al., 2021; Sugo et al., 2021) ほか、粒子計測と光学観測データの比較手法を確立した (Kawamura et al., 2021)。さらに、コーラス波動によって引き起こされたマイクロバーストでは、相対論的高エネルギー電子が低高度域に降り込むとともに 10keV 程度の電子も降り込むものの、降りこむタイミングが異なることを計算機シミュレーションによって示した (Miyoshi et al., 2020) ほか、北欧の大型大気レーダー (EISCAT) を用いて脈動オーロラ発生時の相対論的高エネルギー電子の降りこみを同定し、中間圏オゾン破壊への影響を指摘した (Miyoshi et al., 2021)。また、脈動オーロラ発光の合間の消光時に背景発光も含めた減光が起こっていることを観測的に捉え、降りこみ電子フラックスを過剰に減少させるメカニズムが存在することを報告し (Hosokawa et al., 2021)、脈動オーロラに伴って低高度に降りこむ電子のエネルギーにおける磁気地方時依存性を異なる波長のオーロラ発光強度比から導出するなどした (Nanjo et al., 2021)。

< 引用文献 >

- Hosokawa, K. and Y. Ogawa, Ionospheric variation during pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2015JA021401, 2015
- Hosokawa, K., Y. Miyoshi et al., Over-darkening of pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2020JA028838, 2021
- Kasahara, S. et al., Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, *Nature*, doi: 10.1038/nature25505, 2018
- Kawamura, M., T. Sakanoi, M. Fukizawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, F. Tsuchiya, Y. Katoh, Y. Ogawa, K. Asamura et al., Simultaneous pulsating aurora and microburst observations with ground-based fast auroral imagers and CubeSat FIREBIRD-II, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2021GL094494, 2021
- Miyoshi, Y. et al., Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van

Allen Probes observations, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2014JA020690, 2015a

- Miyoshi, Y., S. Saito, K. Seki, T. Nishiyama, R. Kataoka, K. Asamura et al., Relation between energy spectra of pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler-mode chorus waves, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2015JA021562, 2015b
- Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, K. Hosokawa, T. Sakanoi, T. Mitani et al., Relativistic Electron Microbursts as High-Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2020GL090360, 2020
- Miyoshi, Y., K. Hosokawa et al., Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae, *Sci. Rep.*, doi: 10.1038/s41598-021-92611-3, 2021
- Nishimura, Y. et al., Identifying the drive of pulsating aurora, *Science*, doi: 10.1126/science.1193186, 2010
- Sugo, S., O. Kawashima, S. Kasahara, K. Asamura, R. Nomura, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, K. Hosokawa, T. Mitani et al., Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30-100 keV by a sounding rocket associated with dayside chorus waves, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2020JA028477, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Namekawa T., Mitani T., Asamura K., Miyoshi Y., Hosokawa K., Ogawa Y., Saito S., Hori T., Sugo S., Kawashima O., Kasahara S., Nomura R., Yagi N., Fukizawa M., Sakanoi T., Saito Y., Matsuoka A., Shinohara I., Fedorenko Y., Nikitenko A., Koehler C. | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Rocket Observation of Sub Relativistic Electrons in the Quiet Dayside Auroral Ionosphere | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JA028633 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Nanjo Sota, Hozumi Yuta, Hosokawa Keisuke, Kataoka Ryuho, Miyoshi Yoshizumi, Oyama Shin ichiro, Ozaki Mitsunori, Shiokawa Kazuo, Kurita Satoshi | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Periodicities and Colors of Pulsating Auroras: DSLR Camera Observations From the International Space Station | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029564 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Asamura, K., Y. Miyoshi, K. Hosokawa, T. Mitani 他11名 |
| 2. 発表標題 Sounding rocket missions (RockSat-XN, LAMP, and SS520-3) for ionospheric and magnetospheric explorations |
| 3. 学会等名 JpGU2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yagi, N., T. Sakanoi, M. Kawamura, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, S. L. Jones, M. Lessard |
| 2. 発表標題 Observation plan of pulsating aurora by the multi-spectral auroral camera on the LAMP rocket |
| 3. 学会等名 JpGU2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Namekawa, T., T. Mitani, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S. Saito, Y. Saito |
| 2. 発表標題 PARM-HEP observations of microburst precipitation over pulsating aurora |
| 3. 学会等名 JpGU2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Asamura, K., Y. Miyoshi, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, T. Sakanoi, N. Yagi, M. Fukizawa, G. Ishizawa, S. Kasahara, S. Sugo, O. Kawashima, R. Nomura, M. Nose, M. Teramoto, Y. Ogawa, S. Saito, R. Fujii |
| 2. 発表標題 PARM: Investigation of precipitating high-energy electrons into the auroral ionosphere with sounding rockets |
| 3. 学会等名 2019年地球惑星科学関連学会合同大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 浅村和史、三好由純、細川敬祐、三谷烈史、滑川拓、坂野井健、吹澤瑞貴、八木直志、笠原慧、菅生真、川島桜也、野村麗子、寺本万里子、能勢正仁 |
| 2. 発表標題 PARM計画：観測ロケットRockSat-XNによる高エネルギー電子マイクロバースト現象の観測 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 八木直志、坂野井健、吹澤瑞貴、浅村和史、細川敬祐、津田卓雄、三好由純 |
| 2. 発表標題 PARM計画：脈動オーロラ観測ロケット RockSat-XN搭載オーロラカメラの開発 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 滑川拓、三谷烈史、浅村和史、齋藤義文 |
| 2. 発表標題 観測パッケージPARM-HEPによる脈動オーロラ現象に伴う高エネルギー降り込み電子の観測 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 坂野井健、浅村和史、平原聖文、山内正敏、Sergienko Tima、齋藤義文、大山伸一郎、三好由純、細川敬祐、八木直志、吹澤瑞貴、小嶋浩嗣、北村成寿、津田卓雄、松岡彩子 |
| 2. 発表標題 脈動オーロラロケットRockSat-XNとLAMPの開発ならびに将来超高層大気観測衛星計画FACTORS |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 野村 麗子 (Nomura Reiko) (30637690) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・国際宇宙探査センター・研究開発員 (82645) | |
| 研究分担者 | 三谷 烈史 (Mitani Takefumi) (70455468) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 (82645) | |
| 研究分担者 | 細川 敬祐 (Hosokawa Keisuke) (80361830) | 電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|--------------|-----------------------------|-----------------------------------|------|
| 米国 | NASA | University of New Hampshire | University of Alaska Fairbanks | 他3機関 |
| 米国 | NASA | University of Colorado | University of New Hampshire | 他2機関 |
| ノルウェー | Andoya Space | University of Oslo | University of Tromso | |