

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：30115

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03954

研究課題名(和文) 衛星軌道を乱す極域熱圏大気密度上昇の解明 - 国際共同観測ロケット

研究課題名(英文) Investigation of anomalous neutral density enhancement disturbing satellite orbits in the cusp using international sounding rockets

研究代表者

柿並 義宏 (Kakinami, Yoshihiro)

北海道情報大学・情報メディア学部・教授

研究者番号：00437758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：極域に存在する地球カスプ領域の高度400 kmで、これまで知られていなかった局所的な中性大気密度の増加が見つかった。成因を明らかにするためにはその場の中性大気風及びイオンドリフトを計測する必要がある。そこで、本研究ではロケットから発光するガス(バリウム・ストロンチウム)を放出することで、それらを計測し、極域熱圏大気密度上昇の解明することを目的とする。コロナ禍の下、ロケット実験は2度実施され、そのうち、1回は十分に計測ができた。しかし、対象領域から外れた場所にガスが放出されたため、成因を明らかにするまでには至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

民間を含め、多くの人工衛星を利用するようになった現在、衛星の軌道や姿勢に影響を与える熱圏の大気密度を正確に予測することは、安全な衛星運用に必要不可欠である。衛星が飛び交う高度に、これまで知られていなかった大気の構造が存在することは、衛星運用にとって大きな影響を与える。成因を明らかにすることで、コンピュータシミュレーションに物理プロセスを組み込むことができ、大気密度の予測を正確にすることで安全な宇宙利用が可能となる。

研究成果の概要(英文)：It has been found that a regional enhancement of thermospheric density at 400 km altitude in a polar cusp region. To clarify the cause of the enhancement, it is necessary to measure the neutral atmospheric wind and ion drift there. In this study, we aim to measure them by emitting gases scattering the sun light (barium and strontium) from sounding rockets and reveal the enhancement in the density of the polar thermosphere. Two rocket experiments were conducted under the COVID-19 pandemic, and one of them was successful. However, because the gas was released outside the target region, the cause of the increase could not be clarified.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：宇宙天気 カスプ 極域熱圏中性大気密度異常 観測ロケット 宇宙花火 共鳴散乱 中性大気風 プラズマドリフト

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

極域に存在する地球カスプ領域は地球の磁極に相当し、磁力線が宇宙に対し開いている唯一の場所である。カスプは宇宙が嵐の状態(磁気嵐)の時、カスプ領域に大きなエネルギーが流入し、地球全体の熱圏・電離圏(超高層大気)を大きく変貌させ、全球測位衛星システムによるナビゲーションや、熱圏領域を飛翔する衛星の姿勢・軌道、宇宙ゴミ(デブリ)の軌道に影響を与える。2000年にはX線天文衛星「あすか」の姿勢が熱圏中性大気密度の変化により乱され、制御不能に陥った。また、デブリの正確な軌道予測は安全な宇宙活動実施のために重要な情報である。衛星事故を回避し、安全に宇宙活動を行うためには熱圏中性大気密度を正確に予測する必要がある。特に、エネルギーの流入口となっているカスプ極域における加熱機構を理解することは地球全体の超高層大気変動の理解につながり、宇宙利用時代の宇宙天気予報精度向上に寄与する。

このカスプ領域の高度 400 km で中性大気密度の上昇が衛星により発見された¹。この密度変動は全球的な数値実験では再現できていない現象であるため、衛星軌道の計算では考慮されていない。磁場の同時観測から中性大気密度の上昇が存在する場所では強い沿磁力線電流が流れていることが分かった。これらの観測からジュール加熱による中性大気の上昇流が高度 400 km 付近での密度上昇を生むと考えられている。下層の高度 200 km 付近で中性大気密度の低下が見つかっているため、中性大気密度上昇が見つかった F 層領域でジュール加熱が起こっているのではなく、オーロラ発生時に最も強いジュール加熱が起こる E 層でジュール加熱が起こっていると予想されている。

この中性大気密度上昇の原因を確かめるための数値実験が行われてきた。主な要因として考えられているのが降下電子によるジュール加熱増加、カスプからのイオン流出によるジュール加熱、粒子による直接加熱とジュール加熱の組み合わせなどであるが、地球全球モデルではいずれも十分な上昇流が得られていない²。領域を限ったモデルでは再現されるものの、通常観測されるものより大きな電場を要求される³。一方、水平解像度 20 km の高解像度領域モデルにおいて、100 km 以下の小さなスケールの電場揺らぎを再現すると、観測に合致するような中性大気密度上昇が再現されることが示された⁴。Hurd and Larsen⁵は観測ロケットから放出したバリウムを用いて、小さなスケールの電場によるジュール加熱を見積もり、上昇流を生み出すのに十分大きな加熱を得られる可能性を指摘した。しかし、この研究は 1980 年代にフィルムカメラを用いて撮影したデータを用いているため精度が十分でなく、小さなスケールの電場の議論は十分にできていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は地球カスプ領域に見つかった中性大気密度上昇の成因を明らかにすることである。これを明らかにするためには 100 km 以下の小さなスケールの電場揺らぎを計測することが重要である。ジュール加熱は電場の 2 乗に比例するため、たとえ平均電場がゼロであっても、変動成分が大きな役割を果たす。地上観測ではオイラー的な観測しかできないため、小さなスケールの電場揺らぎの計測は難しい。小さなスケールの電場を計測するためには、観測ロケットから発光するガスを放出し、地上から観測することで、流れに乗ったラグランジュ的な観測をすることが必須である。

このラグランジュ的な観測を実施するために、観測ロケットからバリウム(Ba)およびストロンチウム(Sr)を放出し、その発光雲を地上から観測する。Ba は極端紫外光を受け、イオン化(Ba⁺)する一方、Sr はイオン化しない。Ba⁺と Sr はともに共鳴散乱光を発する。これらを地上から観測することで、Ba⁺のイオンドリフト速度から電場、Sr の動きから中性大気風を見積もり、地球カスプ領域に見つかった中性大気密度上昇の成因を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) フィルタの開発と検定

同時にガス化した Ba/Sr を放出し、それらを地上から観測するために、これらの発光雲を分離して観測する必要がある。また、極域ではオーロラの発光も存在する。これらを分離するために、バンドパスフィルタを開発した。Ba⁺は 455.4 nm および 614.2 nm で発光する。一方、Sr の発光は 460.7 nm である。Ba⁺の一番明るい発光は 455.4 nm であるが、Sr の発光と近いため、分離するためには半値幅が 4 nm 程度のバンドパスフィルタが必要となる。次に明るい 614.2 nm は Sr の発光と十分離れているため、分離が容易である。以前実施した実験結果より、614.2 nm の

発光でも十分観測可能であることが分かっているため、Ba⁺用として中心614.2 nm(半値幅6 nm)のフィルタ、Sr用として中心460.7 nm(半値幅6 nm)フィルタを開発した(図1)。開発したフィルタをカメラに取り付け、国立極地研究所の積分球を使って、カメラ画像の輝度値を計測した。積分球では正確な明るさを再現できるため、この実験結果を用いることで、発光雲の実際の明るさを見積もることができる。

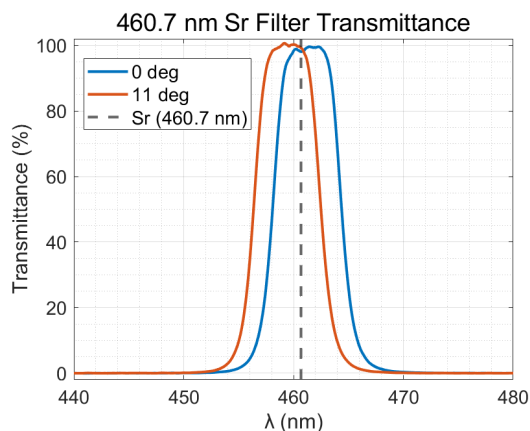


図1 開発したSr用フィルタ 文献6より転載。

(2) 観測

米国アラスカ大 Conde を PI とし実施する実験 (the Cusp Region Experiment 2, 以下 CREX-2) および米国クレムソン大 Larsen を PI とし実施する日米共同実験 (The Joint Japan-

U.S. Cusp Heating Investigation, 以下 CHI) のそれぞれからロケットを1機ずつ同時に発射して行われる予定であった。CREX-2ではノルウェー・アンドーヤから、CHIではスヴァールバル諸島ニーオルスンからロケットを同時に発射し、カスプ領域広範囲にガスを放出することで確実にカスプを捉え、カスプでの中性大気風、電場の計測を実現させる。しかしながら実験条件が合わず、CHIのみ2019年12月10日に実施された。CREX-2は2021年12月1日に延期された。

観測はロングイェールピーンおよびニーオルスンで実施した。CHIの実験では、2地点からの観測に成功した(図2)。

延期された CREX-2 はコロナ禍で実施された。ノルウェーの入国条件、日本への帰国条件が厳しい時期であったため、現地代表者が行う観測を断念した。その代わりに、共同研究機関である米国アラスカ大学に観測を依頼し、実施した。CHIと同じ2観測点から観測したが、ニーオルスンは天候が悪く、雲がかかっており、観測はできなかった。

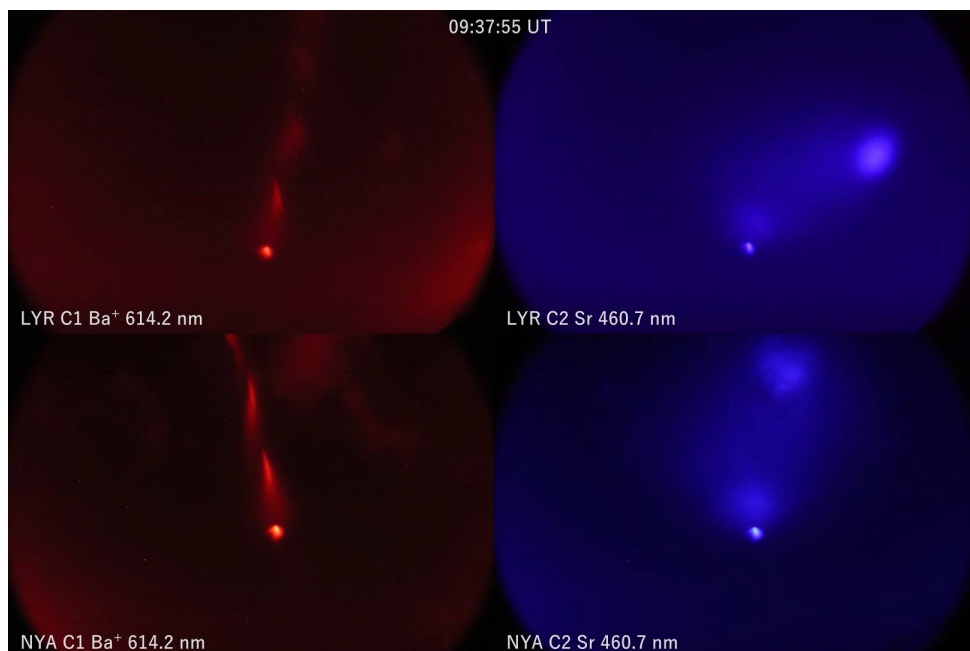


図2 ロングイェールピーン(上)およびニーオルスン(下)から観測した発光雲。左がBa⁺、右がSr。

(3) 解析

観測データが十分にそろっている CHI について、2 地点からの観測結果を用い、Ba+および Sr の発光雲の軌跡を計算した。まず、画像に写っている星の情報から画像内の方位角・仰角を得る。次に、レンズのゆがみ、カメラの回転等も考慮し、正確な角度を得た。これを 2 地点で行い、三角測量を用いて、発光雲の位置を決定した。これを各観測時間を実施し、その位置の移動から発光雲の移動を求めた(図 3)。Sr は背景の中性大気風によって運ばれ、Ba+は電場によりドリフトするため、これらの動きから両者を求めることができる。Ba+は北東から東北東方向に 170~1200 m/s で移動し、Sr は北西から西方向に約 170 m/s で移動していることが分かった。

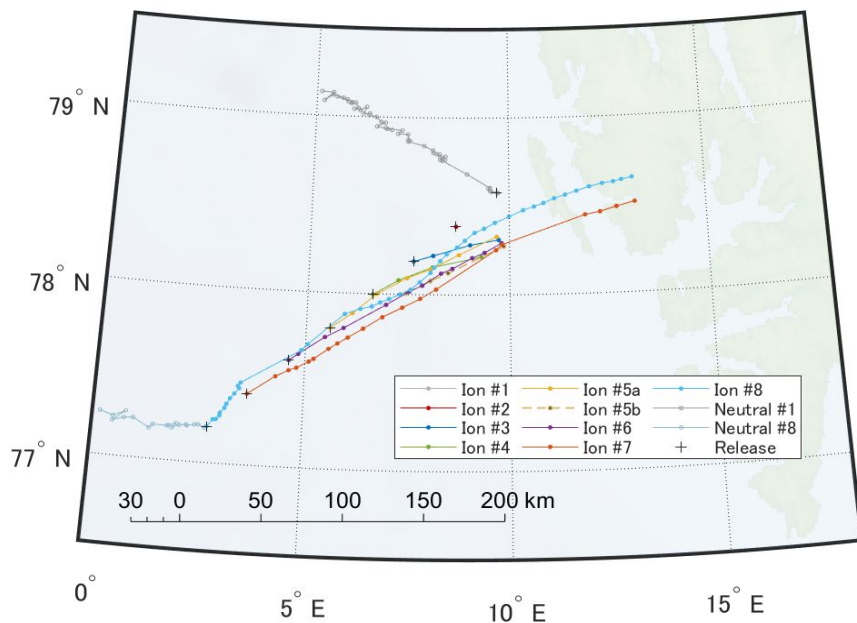


図 3 中性大気風とイオンドリフトの解析結果

4. 研究成果

カस्प領域に存在する中性大気密度の局所的な上昇の成因を調べるために観測ロケットを打ち上げた。ロケットからは Ba および Sr を放出し、その発光雲を調べることで、中性大気風、電場を計測した。ロケットは 2019 年 12 月にスヴァールバル諸島ニールスンから、2021 年 12 月にノルウェー・アンドーヤから打ち上げられた。前者は 2 地点から発光雲が観測できたが、後者は 1 地点からのみ観測できた。三角測量で発光雲の位置を決めるためには 2 観測点必要であるため、前者のデータを利用して、発光雲の動きを調べた。イオン (Ba+) は北東から東北東方向に 170~1200 m/s で移動し、中性大気 (Sr) は北西から西方向に約 170 m/s で移動していることが分かった。この結果は SuperDARN (極域オーロラ観測レーダー網) の結果と整合的である(図 4)。発光雲をカस्प領域に放出できなかったことから小さな電場変動の存在を確かめることはできなかった。一方で、高度 100 km 付近の中性大気風と電場を同時に計測できる有効な手段が他にないため、この発光雲を利用する方法の有効性が改めて示されたと言える。

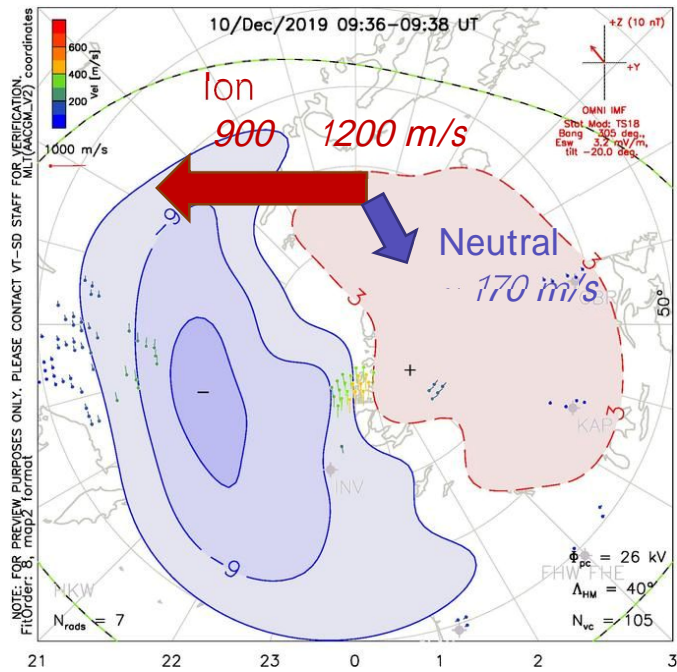


図 4 SuperDARN による極域電場ポテンシャルと本研究で得られたイ
 オンドリフト及び中性大気風

<引用文献>

1. Lühr et al., 2004, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2003GL019314.
2. Schlegel et al., 2005, Ann. Geophys., doi:10.5194/angeo-23-1659-2005.
3. Deng et al., 2013, J. Geophys. Res., doi:10.1002/jgra.50197.
4. Brinkman et al., 2016, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2015JA021658.
5. Hurd and Learsen, 2016, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2015JA021868.
6. 柿並他, 2020, 北海道情報大学紀要 32(1) 75-84.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 柿並 義宏, 渡邊 太郎, 佐藤 隆雄, 嘉賀 雄一, 嘉賀 多賀子, 山本 真行	4. 巻 32(1)
2. 論文標題 宇宙花火実験で用いる光学フィルタ・観測システムの開発と検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 北海道情報大学紀要	6. 最初と最後の頁 75-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoshihiro Kakinami, Shigeto Watanabe, Masa-yuki Yamamoto, Takumi Abe, Hiroto Habu, Taro Watanabe, Mark Conde, Miguel Learsen
2. 発表標題 Chemical releases from the sounding rockets - old but new technique to observe thermosphere and ionosphere
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Watanabe, Yoshihiro Kakinami, Masa-yuki Yamamoto, Miguel Larsen, Mark Conde, Takao M. Sato, Yuuichi Kaga, Takako Kaga
2. 発表標題 Investigating of cusp heating process by using chemical releases of Ba/Sr: Initial result of CHI rocket experiment
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Watanabe, Masa-yuki Yamamoto, Yoshihiro Kakinami, Miguel Folkmar Larsen, Mark Conde, Takao M Sato, Yuuichi Kaga, Takako Kaga
2. 発表標題 Measurement of thermospheric neutral wind and ion drift velocities by using chemical releases of Ba/Sr operated by CHI rocket experiment
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柿並 義宏, 渡部 重十, 阿部 琢美, 羽生 宏人, 白澤 秀剛, 石坂 圭吾, 山本 衛, 斎藤 亨, 津川 卓也, 吉川 顕正, 山本 真行
2. 発表標題 バリウム・リチウム発光雲を使ったダイナモ領域大気プラズマ結合過程の可視化実験
3. 学会等名 第2回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taro Watanabe, Masa-yuki Yamamoto and Yoshihiro Kakinami
2. 発表標題 Basic development of accurate position analytical method for artificial illuminating cloud for Barium and Strontium chemical release rocket experiment
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柿並 義宏
2. 発表標題 観測ロケットを用いた電離圏観測- chemical release を中心に
3. 学会等名 太陽地球惑星圏の研究領域 将来衛星計画ロードマップ策定に向けた勉強会
4. 発表年 2019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
研究協力者	渡部 重十 (Watanabe Shigeto)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	山本 真行 (Yamamoto Masayuki)		
研究協力者	野澤 悟徳 (Nozawa Satonori)		
研究協力者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu)		

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	Clemson University	University of Alaska Fairbanks	
ノルウェー	University of Oslo		