

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400479

研究課題名(和文)カスプ領域での中性大気風およびプラズマドリフトの同時観測

研究課題名(英文)Simultaneous observation of neutral wind and plasma drift in the cusp region

研究代表者

柿並 義宏(Kakinami, Yoshihiro)

苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：00437758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：カスプ領域で中性大気密度増加の成因を調べるために、共鳴散乱光を発するバリウム(Ba)・ストロンチウム(Sr)をトレーサとしたロケット実験を実施した。発光雲を地上からすることで位置を推定し、背景風を測定する。Baは極端紫外光を受け、電離するので中性Srと同時観測することで熱圏風とプラズマドリフトを同時計測できる。解析の結果、熱圏風とプラズマドリフトは大きく異なる方向に吹いており、熱圏風には強いシアアがあることが分かった。本実験ではガス放出がカスプ中心部で実施できなかったことから中性大気密度増加の成因解明には至らなかったが、熱圏風・プラズマドリフト同時計測の手法を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：An experiment of barium (Ba) and strontium (Sr) release from rocket was executed to investigate neutral density enhancement in the cusp region. Ba is ionized by extreme ultraviolet light. The resonance scattering light from Ba, Ba+ and Sr work as tracers of background neutral wind and plasma drift. From the observation, direction of neutral wind and plasma drift was different. Furthermore, strong neutral wind shear was found. The mechanism of the neutral density enhancement was not addressed because the chemicals was released out of the center of the cusp. However, the scheme of simultaneous observation of neutral wind and plasma drift was established.

研究分野：超高層物理学

キーワード：熱圏風 熱圏大気 電離圏プラズマ カスプ プラズマドリフト サウンディングロケット 化学物質
放出 海外学術調査

1. 研究開始当初の背景

下部熱圏（高度 80~100 km 付近）は電離圏の構造に大きく影響を与える強い電流が流れるダイナモ領域であるにもかかわらず、観測の困難さから、研究が十分に発展していない領域である。この領域は電波を利用したプラズマ観測は可能であるが、中性大気の観測は非常に難しく、衛星観測では高度 200 km 程度以上、気球による観測は 50 km までが限界である。こうした観測の困難さから、この領域では理論的には予想されていない速度の強い高度差を持つ層が観測されており¹、下部熱圏ダイナモ領域の物理の理解が十分進んでない。

熱圏の中性大気観測の手法として、1950 年代からロケットからトレーサを放出し、地上からの光学観測によりそれらの時間変化を観測し、風速を求める実験が行われてきた。代表者らのグループでは国内外で JAXA/ISAS の観測ロケットを用い、複数のロケット・地上同時観測を実施し、超高層大気観測について大きな成果を上げてきた。米国クレムソン大学他と共同でのロケット実験も実施しており、ロケット放出トリメチルアルミニウム (TMA) 雲の観測から中性大気速度の見積りに成功している。これらの経験を生かし、日本独自にリチウム放出装置を開発し、2007 年にはリチウム放出実験に国内で初めて成功した。この技術を利用し、2011 年 1 月鹿児島県内之浦、2013 年 4 月マーシャル諸島、2013 年 7 月米国ワロップスにおいて、それぞれ明け方、夕方、日中のリチウム雲の観測に成功した。2013 年 8 月には月明を利用した夜間のリチウム雲観測に世界で初めて成功し、すべての時間帯で観測できることを実証した。

2. 研究の目的

研究目的は 2 つに分類される。1 つ目は宇宙空間に対し、地球磁場が開いた状態にあるカスプ領域の高度 400 km で観測された中性大気密度の増加の成因を探ることである。もう 1 つ目は、前述の大気密度増加成因を調べるために必要なバリウム (Ba) およびストロンチウム (Sr) をトレーサとした超高層大気観測手法を確立することである。

(1) カスプ領域の高度 400 km で中性大気密度の増加が衛星観測により見つかっている²。磁場の同時観測から強い電流が流れていることが推定され、観測高度より下で起こったジュール加熱による中性大気風の上昇流により密度増加が引き起こされていると考えられている。一方、下層の高度 200 km 付近では上昇流の結果と思われる中性大気密度の低下が見つかっている³。これらの観測では中性大気風は測られておらず、密度上昇・低下の原因が中性大気風上昇流によるものかは未だ定かではない。日本の技術により発展してきたリチウム放出実験をカスプ領域へ応用することで中性大気速度を直接観測し、カスプ領域での中性大気密度増加の成因を明らかにする。

(2) これまではリチウムをトレーサとした超高層大気観測を実施してきた。共鳴散乱光が非常に明るい点にリチウムの利点があるが、電氣的に中性であるために電離圏プラズマの運動を計測することはできなかった。一方、バリウムは放出後、一部がイオン化（イオン化時定数~20 秒）し、バリウムイオンとなる。中性バリウム (Ba) とバリウムイオン (Ba+) は異なる波長で共鳴散乱発光をする。発光波長は Ba が 554 nm, Ba+ が 455 nm である。また中性ストロンチウムは 461 nm で発光する。これらの発光を分離し、ガスをトレーサとし、別々のカメラで撮像することで、中性大気風

速およびプラズマドリフト速度を同時に見積もることができる。この観測はカスプ領域での中性大気密度異常の成因を探る手立てとなる。ここで得られた知見は今後、赤道域での中性大気・プラズマ大気相互作用の研究を実施する際にも有効である。

3. 研究の方法

(1) 中性バリウム・バリウムイオン共鳴散乱光観測用フィルタの開発およびフィルタ絶対光度測定

カスプ領域ではオーロラ発光があるため、観測対象となる光のみを選択的に撮像する必要がある。そのため、Ba, Ba⁺, Sr の共鳴散乱光のみを通過させるバンドパスフィルタを開発した。開発したフィルタは、Ba 用中心波長 552.5 nm, Ba⁺および Sr 用中心波長 454.5 nm で、バンド幅は 12 nm である (図 1)。バリウム放出実験は過去に行われているが、Ba および Ba⁺の発光強度は分かっていない。そのため、狭帯域 (~2 nm) のバンドパスフィルタを用いると十分な明るさを得られず、観測が困難になる可能性があるため、それぞれの共鳴散乱光の波長を中心とした 12 nm の透過幅を持つバンドパスフィルタを開発した。

Sr (460.7 nm) と Ba⁺ (455.4 nm) は波長が非常に近いため、このフィルタは両方の光を通す。

今後のバリウム放出実験の定量的な基礎データを得るためにはバリウムの発光強度を知る必要がある。バリウム雲の発光強度が見積もれるようになれば露出時間等、観測条件を正確に決定することができ、次回の実験での成果を最大化させることができる。それらを実現するために、バンドパスフィルタ完成後、ロケット実験の前に国立極地研所有の積分球 (光源の明るさを正確に再現できる装置)

を用い、測光を行った。今後リチウムに代わり主体となっていく可能性の高いバリウム放出実験の基礎的なデータを今回の実験で得ることは、今後のバリウムを用いた中性大気風、プラズマドリフト速度計測実験の発展に重要である。

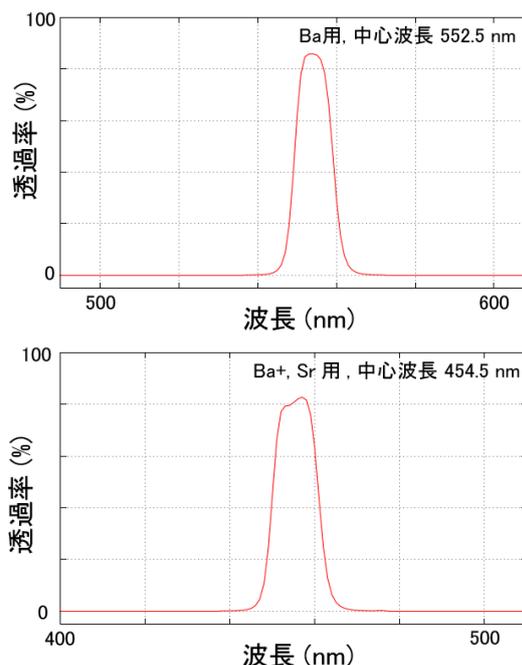


図 1 開発したフィルタの透過率特性。

(2) ノルウェーでのバリウム・ストロンチウム雲観測

ロケットからのバリウム・ストロンチウムを放出し、それらのガスの共鳴散乱光を地上で観測することで、発光雲の動きから熱圏風、プラズマドリフトの直接観測を行う。バリウム・ストロンチウム放出装置は日本独自開発のリチウム放出装置を発展させたものである。放出され発光雲の光学観測はスヴァールバル諸島のロングヤービンおよびニーオルスンで実施した。ニーオルスンでは極地研究所ラッベン観測所を利用した。

2 地点での観測画像を用いることで、三角

測量により、発光雲の位置を決定でき、その時間変化から速度計測を計算できる。それぞれの画像上での方位角・仰角は星の位置から補完して決定する。

Sr, Ba および Ba⁺の発光強度は分かっていたため、事前に分からなくてもガス雲の撮影できるように工夫した。露出時間の長さに幅を持たせ、様々なパターンを用意することで、明るい場合から暗い場合のいずれの場合でも観測できるように工夫した。露出時間のパターンを増やすため、観測間隔が犠牲になる欠点があるが、風計測が不可能な場合でも、最低限発光強度を見積もれる。

4. 研究成果

ロケットは2014年11月24日8時5分世界標準時にノルウェー・アンドーヤ基地から打ち上げられた。24個のガス放出機構のうち10個からガスが放出され、スヴァールバル諸島ロングヤービンおよびニーオルスンで観測に成功した(図2, 3)。回折格子を用いて発光のスペクトルを観測することにも成功した

(図4)。解析の結果、予想された波長帯に強い発光があることが分かり、Ba, Ba⁺, Srが確実に発光していることが確かめられた。



図2 Baの観測画像。ガス放出直後の様子。



図3 Sr および Ba⁺の観測画像。筋状に見えるものが Ba⁺。

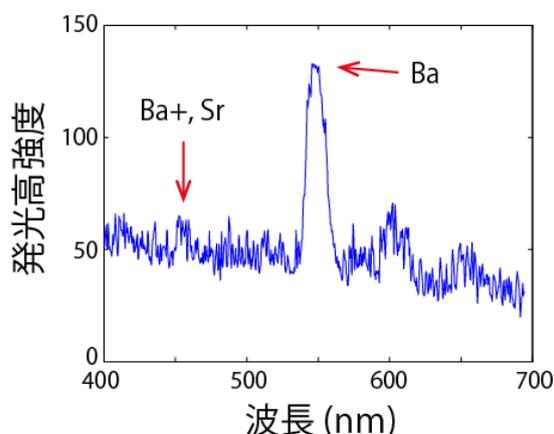


図4 回折格子を用いた発光のスペクトル。

フィルタ観測画像を用いて、発光雲の高度および位置推定を行った(図5)。それぞれの時間ごとに位置を推定することで、発光雲の動きをとらえることができる。電的に中性な Sr および Br の発光雲は背景の熱圏風、プラズマの Br⁺は地球磁場とカスプ領域の電場による力によって流される(プラズマドリフトと呼ぶ)ので、発光雲の動きからそれぞれの速度を計測した。その結果、熱圏風が高度200 km付近では北西方向に100~140 m/s、高度240 km付近では北西方向に54 m/sでふいていることが分かった。高度方向に強い風の風速差があることがわかった。一方、プラズマドリフトは高度200~340 kmにおいて東北

東方向に 320~470 m/s でドリフトしていることが分かった。高度 400 km の地点ではほとんど動かず、北東方向に 6.6 m/s であった。地上レーダによるプラズマドリフト観測の結果と比較すると、これは高度によるものではなく、カスプ領域の電場構造によるものと結論付けられた。

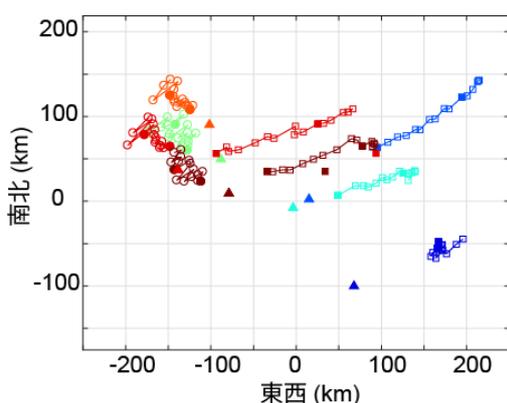


図5 発光雲推定位置。△：最初の発光地点
○：中性風，□：プラズマドリフトを表し，高度の違いを以下の色で表す。赤：199 km，臙脂：199 km，オレンジ：201 km，緑：240 km，シアン：269 km，水色：342 km，青：393 km，

Ba は放出直後，3 MR で発光していたが，すぐに暗くなり，1 分後には 300 kR 以下となった。Ba⁺，Sr は放出直後は 300 kR 程度の明るさであった。1 分後にはともに 150 kR 程度となり，その後はほぼ同じ明るさを保って移動していることが分かった。

(3) まとめと今後の展開

Sr および Ba を用いた熱圏風速およびプラズマドリフト計測に初めて成功した。熱圏・電離圏領域では中性大気とプラズマ大気の相互作用が電離圏の構造に大きく影響を与えるため，熱圏風とプラズマドリフトの同時計測はこの領域での物理を理解するために非常に重

要である。これまでは Li を用いた熱圏風速のみ実施できていたので，新たにプラズマドリフトを計測できる手法を確立できた意義は大きい。一方，ガスがカスプ中心部で放出できていなかったことが解析で分かった。本研究の目的の一つであったカスプ領域での密度異常の物理過程を理解するための観測は十分に行えなかったと言える。そのため，追加の実験を現在計画中である。

<引用文献>

- ① Learsen 2002, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2001JA000218.
- ② Lühr et al., 2004, Geophys. Res. Lett., 31, L06805, doi:10.1029/2003GL019314.
- ③ Clemmons et al., 2008, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2008GL035972.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計8件)

- ① Y. Kakinami, M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, D. Kihara, M. Larsen, and M. Conde, Recent experiments of Lithium release and future experiment of Barium release from the sounding rocket in the cusp region, 136th Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences Fall Meeting, 31 October-3 November 2014, Kissei Bunka Hall, Matsumoto, Nagano, Japan.
- ② M. Conde, M. Larsen, D. Hampton, M. Dhadly, J. Ahrns, A. Aruliah, Y. Kakinami, B. Barker, A. Kiene, F. Sigernes, and D. Lorentzen, The C-REX Sounding Rocket Mission, European Geosciences Union

General Assembly 2015, 12-17 April 2015, Vienna, Austria.

③ Y. Kakinami, D. Kihara, S. Watanabe, M.-Y. Yamamoto, M. Conde and M. Larsen, Measurements of neutral wind and plasma drift with chemical release in the cusp region - preliminary results, Japan Geoscience Union Meeting 2015, 24-28 May 2015, Makuhari, Chiba, Japan.

④ K. Saitou, M.-Y. Yamamoto, and Y. Kakinami, Spectral analyses of weak illumination by Resonance scattering of Sr, Shikoku-section Joint Convention of the Institutes of Electrical and related Engineers 2015, 26 September 2015, Kochi University of Technology, Kochi, Japan.

⑤ Y. Kakinami, S. Watanabe, M.-Y. Yamamoto, D. Kihara, M. Conde, and M. Larsen, Measurements of thermospheric wind and plasma drift by using Barium and Strontium release in the cusp region, 138th Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences Fall Meeting, 31 October-3 November 2015, the University of Tokyo, Tokyo, Japan.

⑥ S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M. Larsen, R. Pfaff, M. Yamamoto, and M.-Y. Yamamoto, Neutral Wind Observations below 200 km altitudes, American Geophysical Union, Fall meeting, 14-18 December 2015, San Francisco, USA.

⑦ M. Conde, M. Larsen, D. Hampton, M. Dhady, M. Ahrns, A. Aruliah, Y. Kakinami, B. Barker, A. Kiene, F. Sigernes, and D. Lorentzen, Winds and Ion Drifts Measured in the Thermospheric Footprint of Earth's

Northern Magnetic Cusp During the C-REX Sounding Rocket Mission, American Geophysical Union, Fall meeting, 14-18 December 2015, San Francisco, USA.

⑧ K. Saito, Y. Kakinami, and M.-Y. Yamamoto, Spectral analyses of resonance scattering of Sr and Ba for determination of thermospheric neutral wind, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 22-26 May 2016, Makuhari, Chiba, Japan.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~kakinami/profile/research/spaceFireWork.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿並義宏 (KAKINAMI, Yoshihiro)

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号 : 00437758

(2) 連携研究者

渡部重十 (WATANABE, Shigeto)

北海道情報大学・経営情報学部・教授

研究者番号 : 90271577

山本真行 (YAMAMOTO, Masa-yuki)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号 : 30368857

(3) 研究協力者

Miguel Larsen

米国クレムソン大学・教授