

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18651

研究課題名（和文）青いオーロラの高分解能分光観測に基づく地球大気窒素分子イオン流出の計測

研究課題名（英文）Observation of escaping Nitrogen molecule ions based on high-resolution spectral measurements of blue aurora

研究代表者

塩川 和夫（Shiokawa, Kazuo）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：80226092

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ノルウェーのシーボトン観測点に設置したファブリ・ペロー干渉計（FPI）により、波長427.8nmの窒素分子イオンの発光を分光観測し、そのドップラーシフトから窒素分子イオンの磁力線方向の速度の計測に挑戦した。この波長に合わせた焦点の設定や適切な観測シーケンス、系統ノイズの除去等の工夫により、2024年3月13日の晩に、世界で初めて、この波長のオーロラ発光のFPI分光観測に成功した。初期的な解析から磁力線方向上向きで100-300 m/sのイオン速度が、標準偏差200-400 m/sで得られている。また窒素分子イオンの複数のバンド発光輝線の干渉縞のイオン温度依存性に関するモデル計算も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン化した地球大気の流出は主に地上からの大型レーダーと地球電磁気圏を飛翔する人工衛星で計測されてきた。しかしこれらの機器では、イオン種ごとに分別した計測は難しい。本研究による窒素分子イオン発光の高分解能分光計測は、人工衛星や大型レーダーに比べて、100分の1から1000分の1の予算で整備できるファブリ・ペロー干渉計（FPI）を用いて、イオン種を同定した上でその上昇速度を計測する可能性を開く。まだ改良の余地はあるが、この計測による地上観測手法が確立されれば、将来、地上の多点にこのFPIを展開して様々な場所でイオン流出を計測するなど、大気流出の研究に新たな画期的な手法が加わることが期待される。

研究成果の概要（英文）：A Fabry-Perot Interferometer (FPI) at Skibotn, Norway, was used to observe the Doppler shift of auroral emission from the nitrogen molecular ions at a wavelength of 427.8 nm. By adjusting the optical focus to match this wavelength, setting an appropriate observation sequence, and eliminating systematic noise, we succeeded in the world's first FPI spectroscopic observation of auroral emission at this wavelength on the evening of March 13, 2024. The initial analysis yielded ion velocities of 100-300 m/s in the upward direction of the magnetic field lines with a standard deviation of 200-400 m/s. Model calculations were also performed on the ion temperature dependence of the interference fringes of the multiple band emission lines of the nitrogen molecular ions.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：大気流出 窒素分子イオン オーロラ ファブリ・ペロー干渉計 427.8nm 超高層大気 地球電磁気圏
地上観測

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

(1) 地球周辺の宇宙空間から極域に降り込んでくる電子やイオン(オーロラ粒子)によって、高度 90 - 600 km 付近の超高層の大気が励起されて発光するオーロラは、通常はこの高度の大気の主成分である酸素原子が光る緑や赤が主体だが、窒素分子イオンによる青色も光る。この発光波長は 427.8 nm で、紫色とも呼ばれる。窒素分子イオンは高度 100 km 以下で酸素原子よりも密度が大きくなるため、エネルギーの高いオーロラ粒子が降り込んだ際だけに、オーロラの下辺が高度 100 km 以下で青く光る。しかしこれとは別に、図 1 のようにオーロラの上辺である高度が 400 - 600 km 付近でも青く光るオーロラがあることが 1960 年代から知られていた [IUGG, International Auroral Atlas, 1963]。このオーロラは、オーロラ粒子の降り込みによって低い高度で生成された窒素分子イオンが、何らかの機構によって高い高度まで上昇し、この高い高度を照らしている薄明(日出前・日没後)の太陽光を共鳴散乱して光っていると考えられてきた。



図 1. 高い高度で発光する青いオーロラの写真 [Shiokawa et al., 2018]。

(2) しかしこのメカニズムは実際の観測で詳しく検証されたことがなく、近年の研究代表者らの観測では、薄明太陽光の当たらない遮蔽高度以下の高度でも、オーロラの上辺で青いオーロラが発光している例があることが示唆されている [Shiokawa et al., 2020]。また、このメカニズムが正しいとしても、質量の比較的重い窒素分子イオンがなぜ高い高度に上昇するか、その機構はよくわかっていない。このような大気分子イオンの上昇は、地球大気の宇宙空間への流失を引き起こしており、地球大気の長期変遷を探るという視点でも、その計測は重要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、この高高度で発光する青いオーロラを、ファブリ・ペロー干渉計を用いて世界で初めて高分解能分光することにより、発光している窒素分子イオンの上昇速度を計測し、高高度の青いオーロラ発光の発生メカニズムを探ることである。さらに、青いオーロラ発光の分光計測というこれまで行われなかった新しい手法で、地球大気の宇宙空間への流出過程の解明にも貢献する。

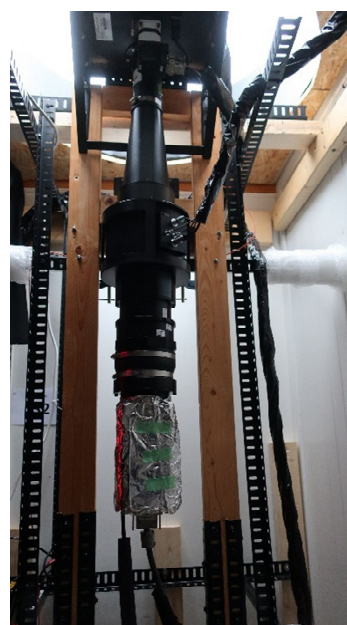


図 2. ノルウェーに設置されているファブリ・ペロー干渉計 (FPI)。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者・分担者(塩川・大山)は、ノルウェー・トロムソ観測点で、酸素原子のオーロラ発光を通して超高層大気の風速・温度を測定するために、図 2 に示すファブリ・ペロー干渉計 (FPI) を 2009 年から運用してきた。本研究により、この FPI で波長 427.8nm の青いオーロラ発光を観測できるように、この波長のみを透過するバンドパスフィルターを装着するなどの改造を行った。ドップラー効果によるこの青い発光の波長のずれを高分解能分光することで、発光している窒素分子イオンの上向

き速度を計測した。

(2) 同じ観測点で研究分担者の小川が2016年から運用する427.8nmの発光を観測する高感度全天カメラから、この青いオーロラ発光の空間構造や特徴を同定した。

(3) 427.8nmのオーロラ発光のFPIによる計測はこれまで報告例がないが、窒素分子イオンの発光は酸素原子と異なり、分子構造が複雑なために、発光輝線が427.8nm付近に複数存在しており、それぞれの輝線に対する干渉縞が重なって、複雑な干渉縞が現れると予想された。これを干渉縞のモデル計算により再現し、風速計測への影響を評価した。

4. 研究成果

(1) まず令和3年度に、波長427.8nmの青いオーロラ発光を観測できるように、この波長のみを透過するバンドパスフィルターを米国のフィルター製造会社から購入した。しかし、コロナウイルスの拡大のために現地に行ってこのフィルターを設置することができなかったため、以前からFPIに装着している波長732nmの酸素原子イオンの発光を観測するフィルターを使って、酸素原子イオンの干渉縞の計測を令和3年度後半の9-12月に実施した。この中で、特に2021年9月28日、9月30日のデータを詳細に解析し、干渉縞がイオンのdoublet構造により2重になっていることを確認するとともに、鉛直方向のイオンの速度を試験的に求めた。また、電離圏・磁気圏の分子イオンの人工衛星による観測の過去の論文をレビューし、これまでに得られている知見をまとめて、今回の観測の新規性をよりはっきりさせた。

(2) 令和4年度は、ノルウェー・トロムソ観測点を研究協力者(菊池)が訪問し、現地で運用しているファブリ・ペロー干渉計(FPI)に、前年度に購入した波長427.8nmの青いオーロラ発光を観測するためのバンドパスフィルターを設置した。これにより、この青いオーロラの分光観測を2022年9月から2023年3月までの冬季期間の極夜に実施した。得られた干渉縞の強度が非常に弱く、強いオーロラが現れた2022年12月や2023年3月の磁気擾乱時のデータを中心に解析を行った。その結果、得られたイオン速度は、同じ時刻に得られた異なる干渉縞同士で大きく異なる値を示すことが多く、何らかのノイズが干渉縞に重なっていることが想定された。

(3) これらの解析と並行して、窒素分子イオンのバンド発光輝線の波長・強度の理論データを文献等から探した。この結果、観測された干渉縞には複数のバンド発光輝線が含まれること、この発光輝線同士との強度比は発光体である窒素分子イオンの温度によって変化することが分かった。このイオン温度依存性を計算するプログラムを研究協力者(栗原)が開発し、予測される干渉縞をモデル計算で再現した。その結果、観測された干渉縞は理論的に予測される干渉縞よりも構造が少なく、ピントのずれにより、細かい構造が見えなくなって干渉縞が弱くなっていることが推定された。

(4) このモデル計算から、FPIの受光部であるCCDカメラの位置が、装置較正に用いている波長632.8nmのHe-Neレーザーの焦点位置に合っており、波長427.8nmの焦点位置に合わせるためには、そこから0.75mmずらさなければならないことが分かった。このため、2023年10月に大山・菊池らがノルウェーを訪問し、FPIをトロムソ観測点から晴天率の高いシーボトン観測点に移設するとともに、CCDカメラの焦点位置を波

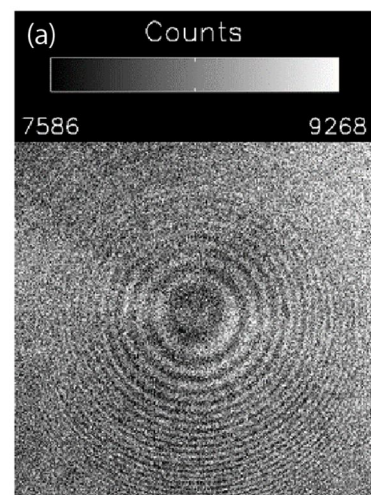


図 3. 2023 年 10 月 14 日 20:07:50UT に観測された干渉縞画像 [Kikuchi, T., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Ogawa, J. Kurihara, in preparation, 2024].

長 427.8nm に合わせて観測を行った。その結果、3 個程度しか得られていなかった干渉縞が、図 3 に示すように、CCD の視野範囲すべてで 14 個得られるようになり、感度を約 5 倍に上げられることがわかった。しかしこの 10 月の滞在期間中は、晴れた夜がほとんどなく、磁力線方向とそれから 45 度方向を交互に見る標準観測モードのデータが得られなかった。

(5)そこでさらに 2024 年 3 月に、研究代表者(塩川)と研究協力者(菊池)がシーボトン観測点を訪問し、現地の FPI で 427.8nm の集中観測を行った。その結果、2024 年 3 月 13 日の晩に、晴れてオーロラが現れ、標準観測モードで波長 427.8nm の干渉縞の連続観測に成功した。初期的な解析から、図 4 に示すように、この時は窒素分子イオンの速度として、磁力線方向上向きで 100-300 m/s の運動速度が、標準偏差 200-400 m/s で得られた。今後、この結果を FPI による世界初の窒素分子イオンの発光のドップラーシフトの観測として、論文にまとめていく予定である。

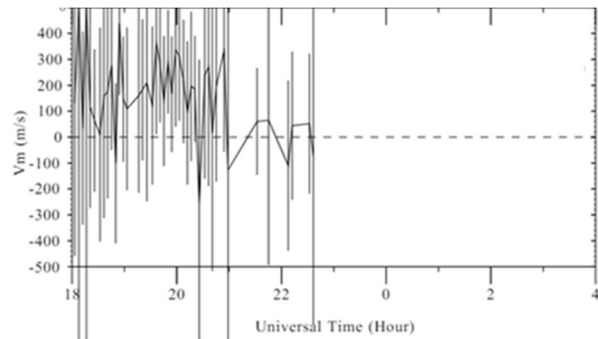


図 4. 2024 年 3 月 13-14 日に観測された波長 427.8nm に対して得られた磁力線方向イオン速度 (正が上向き) とその統計誤差 [Kikuchi, T., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Ogawa, J. Kurihara, in preparation, 2024]。

(6)これらの解析と並行して、窒素分子イオン複数のバンド発光輝線の干渉縞が、イオンの温度によってどのように変化するか、のモデル計算も行った。こちらについても今後、さらに検討を進め、論文化していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuo Shiokawa, Yuichi Otsuka, and the PWING Team
2. 発表標題 Current status of the ground-based multi-point network from subauroral to equatorial latitudes by the Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs) and the PWING Project
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuo Shiokawa
2. 発表標題 Outstanding topics and predictability of the variable solar-terrestrial coupling
3. 学会等名 The 9Th International Seminar on Aerospace Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塩川和夫、大塚雄一、西谷望、能勢正仁、野澤悟徳、大山伸一郎、吉川顕正、藤本晶子、横山竜宏、山本衛
2. 発表標題 地上多点ネットワークに基づく超高層大気変動の緯度間結合の観測的研究計画
3. 学会等名 第15回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiki Kikuchi, Kazuo Shiokawa, Shin-ichiro Oyama, Yasunobu Ogawa, Junichi Kurihara
2. 発表標題 Spectroscopic measurement of ion upflow through Doppler shift of auroral 427.8-nm molecular nitrogen ion emission using a Fabry-Perot interferometer at Tromsø, Norway: preliminary analysis
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菊池大希、塩川和夫、大山伸一郎、小川泰信、栗原純一
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソ어의ファブリ・ペロー干渉計で2023年3月24日に観測された427.8nm窒素分子イオンオーロラを通したイオンアップフローの分光計測
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Optical Mesosphere Thermosphere Imagers https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/omti/index.html Optical Mesosphere Thermosphere Imagers https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/omti/index.html
--

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	大山 伸一郎 (Oyama Shin-ichiro) (20444424)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師 (13901)	
研究分担者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu) (00362210)	国立極地研究所・国際北極環境研究センター・教授 (62611)	

	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	菊池 大希 (Kikuchi Taiki)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・大学院生 (13901)	

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	栗原 純一 (Kurihara Junichi) (00578479)	北海道情報大学・経営情報学部システム情報学科・教授 (30115)	

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			
ノルウェー	EISCAT科学協会	The Arctic University of Norway		
スウェーデン	EISCAT科学協会			
ノルウェー	ノルウェー北極大学			