

地球型惑星における超高層プラズマ大気計測のための短波長赤外イメージャの開発および自由曲面オプティクス光学系の基礎検討

代表者 西山尚典 国立極地研究所 先端研究推進系
共同研究者 鍵谷将人 東北大学大学院 理学研究科 附属惑星プラズマ・大気研究センター

【目的】

太陽系惑星の超高層プラズマ大気の発光現象（オーロラ・大気光・共鳴散乱光など）は大気中の組成や密度（混合比）、その時空間変化を遠隔で推定するための重要な現象である。これらを高分散分光観測する事により温度やドップラー速度、さらにリム観測やリトリーバル法を用いる事で鉛直分布を導出する事が可能となるため、惑星大気のダイナミクスの理解にとって極めて有用な手法である。また、イメージング観測は発光現象の時空間変動を切り分けることが可能で、分光観測と相補的な観測手法である。そこで本共同研究では、地球の超高層プラズマ大気を対象に、短波長赤外に感度を有し背景光の影響を低減可能な高分散分光器と、相補的な単色カメラを用いた観測を実施し、その性能を評価することを目的とした。

【方法】

2022年11月に短波長赤外(1.1-1.3 μm)に感度を持つ高分散分光器を、ロングイヤビエンの The Kjell Henriksen Observatory (KHO)の光学ドームへの設置を完了した。また、分光観測の補完のため波長1.1 μm における単色イメージャも分光器と同じドームに設置・観測を開始している。設置終了後から、2023年3月末現在で大きなデータ欠測なく運用しており、分光器は2023年5月初頭、イメージャは2023年4月初頭まで観測継続予定である。また、2023年1月22日および23日にはEISCAT Svalbard Radar (ESR) 特別実験を実施し、光学機器との同時観測を行った。分光器は観測波長と波長分解能の異なる4つのモード（表1に示す）を有しており、3つのモードにおいてオーロラ発光を合計10例程度観測することに成功している。表1. 分光器における4つの観測モードと観測対象と観測実績

Mode	Target: Aurora and Airglow	
Mode-1: Aurora fine	Success: N_2^+ (0,0)	Success: OH (5,2), He
Mode-2: Aurora wide 1	Not yet: N_2 1P(0,0), N_2^+ (0,0)	Success: OH (4,1), (5,2), (6,3), He
Mode-3: Aurora wide 2	Success: N_2^+ (0,0), N_2 1P(0,1)	Success: OH (5,2), (6,3), (7,4), He
Mode-4: OH	Success: N_2 1P(0,1), OI-	Success: OH (7,4), (8,5), O_2 IR

【結果・考察】

2023年1月21日オーロラ:

分光器の高分散モード（表1のMode-1）による N_2^+ (0,0)バンドの観測例について示す（図1）。18:45UT前後にオーロラの活動度が上昇し、分光器では時間分解能30秒で非常に強い N_2^+ (0,0)バンドのオーロラ発光が観測された。発光強度は最大で40kRを超えており、イメージャで撮像されたバンド状のオーロラ発光の時間発展や絶対強度と整合的である。短波長赤外オーロラにおける分光及び単色イメージングの同時観測例は今まで無く、現在初期結果として論文執筆中である。また、オーロラ発光スペクトル中に

N₂⁺分子イオンの回転運動に起因する微細構造が見えており、今後 N₂⁺分子イオンの回転温度の導出に取り組む予定である。

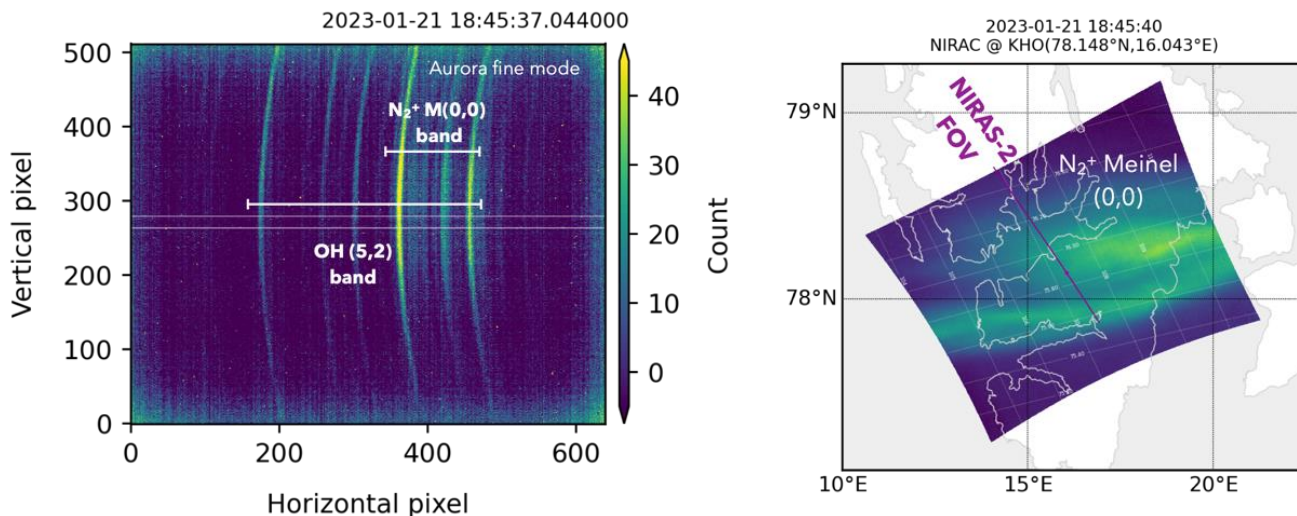


図1 (左)分光器におけるオーロラ観測データ (右)イメージャーで撮像されたバンド状オーロラ

2022年11月24日大気光:

分光器の低分散での大気光観測モード (表1の Mode-4) による観測例について示す (図2)。この観測モードでは、OH 大気光の (7, 4) 及び (8, 5) バンドに加えて、O₂ の IR バンド (1.27 μm) の観測が可能であり、OH 大気光はこの分光器で観測できる中で最も明るいバンドのため、OH 回転温度を最も精度良く導出できる。図2の例では、1晩平均温度の推定における観測誤差は、OH(7, 4) で 16.5K 程度、OH(8, 5) で 2.0K 程度であった。

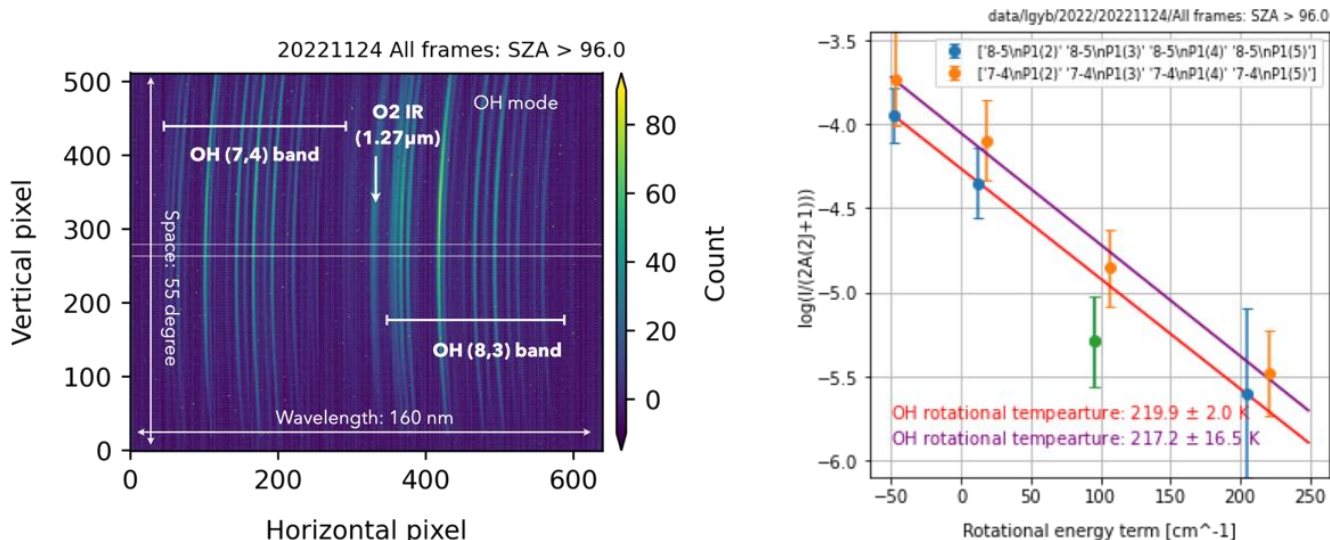


図2 (左)分光器における1晩平均の大気光観測データ (右)回転温度導出のための Boltzmann プロット

また、この日における OH 大気光強度および回転温度の時間変化を導出した結果を図3に示す。解析上の時間分解能は10分で設定しており、OH(8, 5)バンドについては、5K程度の誤差で温度導出が可能である。また同時に導出される OH(7, 4)バンドについても示しているが、両者の回転温度の変動特性は非常に良く一致するものの、絶対値を比較すると最大で±10 K程度の差が生まれている。両者の絶対値の差を生んでいる要因については、①水蒸気による吸収の影響、②アクリルドームの透過率の非一様性の影響、

③時間と共に変動する暗電流ノイズの影響，などが考えられる。

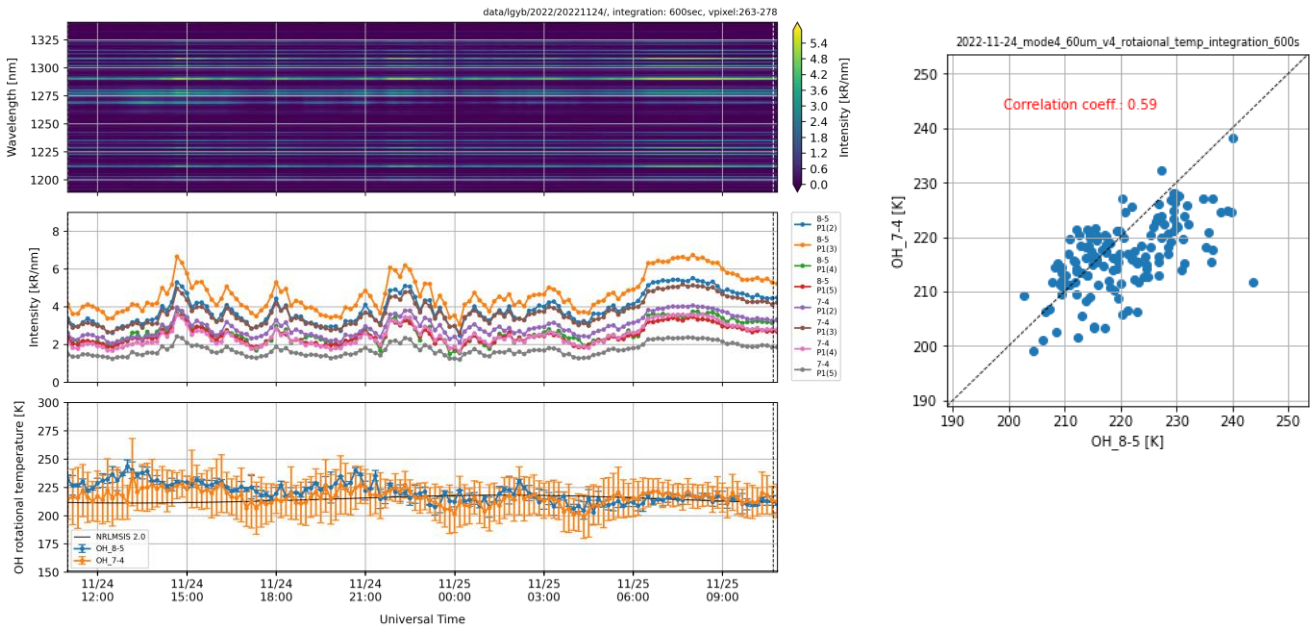


図3 (左)2022年11月24日における上からダイナミックスペクトルと、OH(7,4)および(8,5)バンドの代表的な回転線の強度，そして両バンドで導出された回転温度，それぞれ時間分解能は10分。(右)両バンドで導出した回転温度の Scatter プロット

これらの温度バイアスを生む要因について，特に項目③については，図4に示すように暗電流によるカウント値が観測ドーム内の温度とよく対応することが分かっており，かなり高い頻度でダークフレームを取得し，解析に使用する必要があることが確認できた。残りの項目①についてはロングイアビンに設置されたSTレーダーのデータを参照し成層圏までの水蒸気量との対応を調査する，項目②についてはドームの透過率データの提供を依頼中である。これらの補正を進めるとともに，KHOに設置されている他のOH大気光観測による温度導出との比較を実施する予定である。

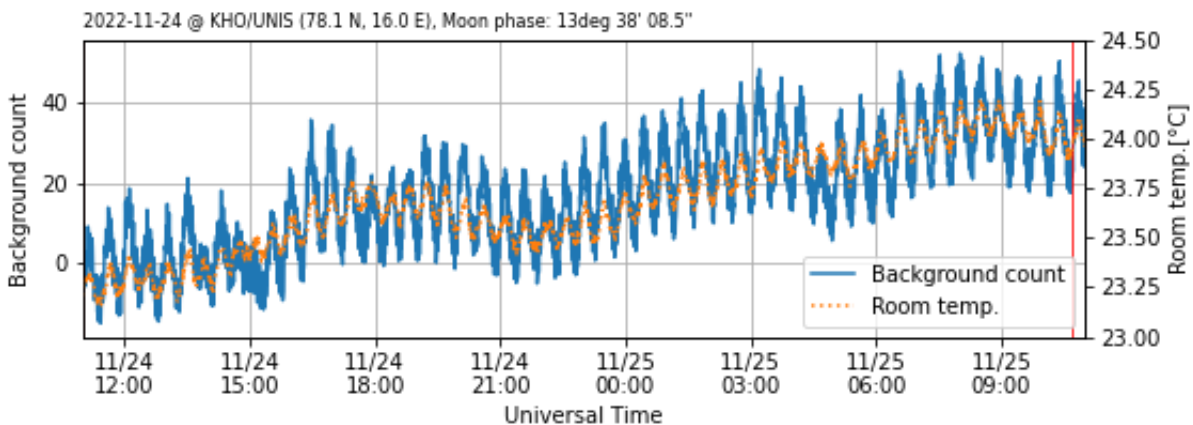


図4 暗電流のカウント値の時間変化と分光器の設置してある観測ドーム内の室温の変化。両者の変化がよく対応していることが明らかである。

【まとめ】

2022年11月に分光器及びイメージャーをロングイアビンに設置し，概ね順調に運用を続けている。これまでに，分光器の異なるモードにおいて夜間オーロラ (N2+分子イオンやN2分子，O原子) を30秒の

時間分解能で取得できている。大気光については、 $1.3\mu\text{m}$ 付近の OH(8, 5)バンドを中心に運用しており、10分時間分解能で5K程度の誤差で中間圏温度を導出可能である。イメージャーは $1.1\mu\text{m}$ のオーロラ発光に加えて、発光強度の弱いOH大気光の変動も撮像可能である。今後はESR同時観測イベントに着目し、分光器のデータにおける薄明時の背景光の除去手法を確立させ、薄明時/日照時のオーロラ検出に取り組む。

【成果】

[1] Nishiyama et al., Spectroscopic and imaging observations of short-wavelength infrared (1.1-1.2 μm) aurora and airglow at Longyearbyen (78.2°N, 16.0°E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, JpGU Meeting 2022, Hybrid, May 25, 2022

[2] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observations of short-wavelength infrared (1.1-1.3 μm) aurora and airglow at Longyearbyen (78.2°N, 16.0°E) coordinated with EISCAT Svalbard radar: Ionospheric-atmospheric coupling in polar region, COSPAR 2022, Hybrid, 16-24 July, 2022

[3] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observation of SWIR aurora and airglow (1.1-1.3 μm) at Longyearbyen with EISCAT Svalbard radar, SGEPPS 秋学会, 相模原, 2022年11月4日

[4] Nishiyama et al., A plan of new spectroscopic and imaging observation of short-wavelength infrared aurora and airglow (1.05-1.35 μm) at Longyearbyen (78.1°N, 16.0°E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, The 13rd Symposium on Polar Science, Online, Nov. 15-18, 2022

[5] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observation of short-wavelength infrared aurora and airglow (1.00-1.35 μm) at Longyearbyen (78.1°N, 16.0°E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, ISAR-7, Hybrid, Mar. 6, 2023