

SDI-EISCAT_3D による次世代極域熱圏 – 電離圏観測に向けた解析研究

代表者	大山伸一郎	名古屋大学宇宙地球環境研究所
共同研究者	坂野井健	東北大学・理学研究科
	Mark Conde	米国・アラスカ大学フェアバンクス校
	Anita Aikio	フィンランド・オウル大学
	Heikki Vanhamäki	フィンランド・オウル大学
	Lei Cai	フィンランド・オウル大学

1. 研究背景、目的ならびに意義

惑星の磁気圏起源のエネルギーやプラズマは超高層大気の高緯度に集中的に流入する。その結果引き起こされる様々な時間・空間スケールの極域変動の中でもメソスケール変動（数～数十分、数～数百 km 規模）はエネルギーと擾乱大気の中・低緯度へ輸送するプロセスの起動として重要な役割を担うことが計算機実験で指摘されている。しかし計算機実験の結果と比較できるほど精度の高い観測は十分に行われていない。我々は地上から熱圏風速と温度の二次元分布を測定できる Scanning Doppler Imager (SDI) を用いた観測 (SDI-3D プロジェクト) を、2023 年秋に北欧で開始する。同時期に同域で稼働を始める EISCAT_3D レーダーによる電離圏観測、日本が主体的に展開・運用している光学カメラ群によるオーロラ観測と連携し、メソスケール変動の発生メカニズムの解明を目指している。本共同研究は、その準備研究として、これまでに北欧で取得した観測データを解析し、SDI と EISCAT_3D による新観測体制を見据えた科学課題の検証・評価を行うことを目的としている。

2. 成果

トロムソ（ノルウェー）のファブリペロー干渉計（FPI）で測定した熱圏風を中心に、北欧にある全天カメラ、ダイナゾンデ、Swarm 衛星などで取得した電離圏、オーロラの観測データを組み合わせた極域電離圏 – 熱圏結合に関する研究を二つ実施した。

（1）pseudo breakup に伴う電離圏と熱圏の変動

光学・電波・衛星の同時観測データを用いて、pseudo breakup に伴うイオン速度の変動と熱圏風の応答を調べた。本イベントが発生したときの地磁気活動度はかなり静穏 (K_p 指数は 0+) であったものの、北緯 74-75° 付近で pseudo breakup が発生し、北緯 71° 付近に電離圏トラフが現れ、電子密度の緯度分布が極小となるトラフミニマムには Stable Auroral Red (SAR) arc が出現した。さらに、トラフ内部には極向き電場の発達に伴うイオン速度の増加が観測され、いわゆる subauroral polarization stream (SAPS) の成長も確認された。オーロラ breakup、電離圏トラフの成長、SAR arc と SAPS の出現は、磁気嵐発生時などの地磁気擾乱時における一連の高緯度電離圏現象として知られている。しかし、 $K_p=0+$ という地磁気静穏時に、同じ一連の現象が発生した報告例はない (Oyama et al., 2020)。pseudo breakup に伴うイオン速度は東向きから西向きへ反転した。この現象は、substorm onset に普遍的にみられる電離圏変

動である。このイオン速度の反転に伴い、熱圏風もイオン速度と同じタイミングで西向き加速を開始するものの、反転するまでにイオン速度よりも約 10 分遅れることが、FPI 風速の解析によって示された (Oyama et al., 2022)。熱圏の慣性がその原因であると考えられる。また地磁気静穏時においても、磁気圏からのエネルギーインプットがあると電離圏と熱圏はすぐに変動を開始することが示された。

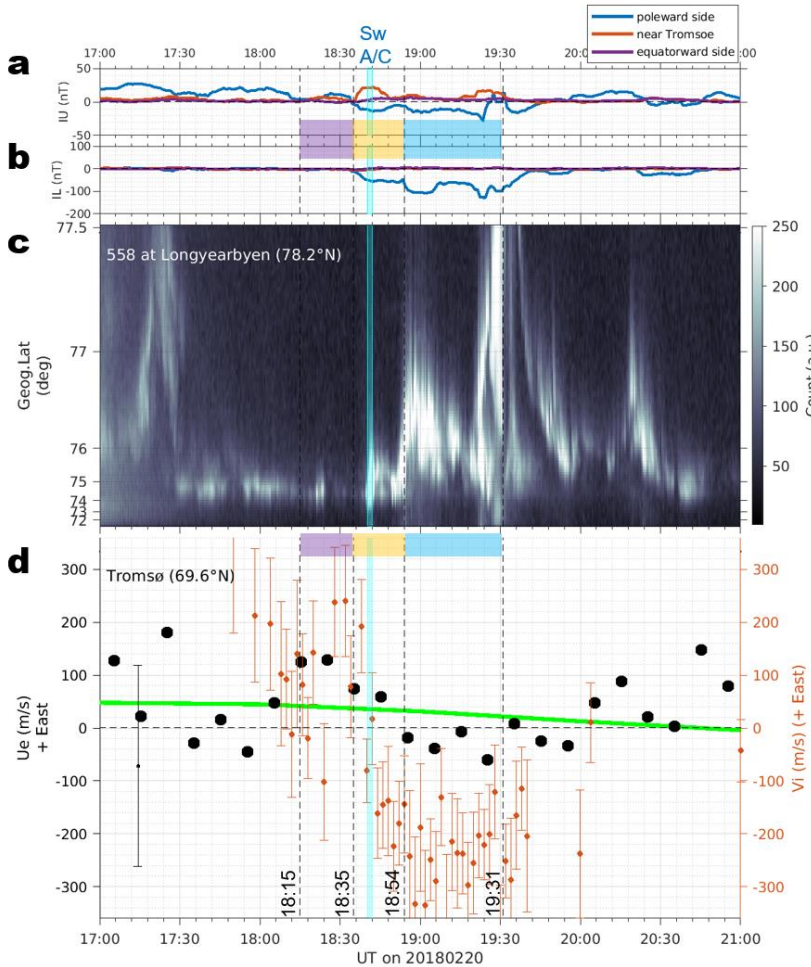


図 1 : pseudo breakup 発生前後の (a, b) 磁場変動、(c) Longyearbyen の全天カメラ画像から作成した keogram、(d) Tromsø で観測されたイオン速度 (オレンジ) と熱圏風 (黒丸) の東西成分 (緑線は HWM14 モデルで計算した熱圏風)。pseudo breakup の前 (紫色でハッチされた時間帯) は、イオン速度と熱圏風はともに東向きであったが、pseudo breakup の発生 (紫色ハッチと黄色ハッチの時間帯の境目) に伴い、北緯 74-75°でオーロラが増光し、イオン速度と熱圏風が西向きに加速を始めた。イオン速度はすぐに西向きに反転したが、熱圏風の反転は約 10 分遅れた。(Oyama et al., 2022)

(1) 極域熱圏風の地磁気活動依存性と朝夕非対称性

オーロラ帯緯度の熱圏風は、太陽光照射による昼夜半球間の圧力勾配をベースに、磁気圏からのエネルギーインプットに起因したイオンドラッグとジュール加熱が作用する力学場によって決まる。地磁気活動の活発化に伴い磁気圏インプット量が増え、極域熱圏風は大きく変動する。しかし、その特性は十分にわかっていない。特に熱圏風の測定手段が限られているため、観測情報を基にした知見は限定的である。そこで、2009 年から 2017 年にトロンソ FPI (630 nm) で観測された熱圏風 (高度 240 km 付近) の統計解析を行った。本研究では、地磁気活動度の指標として SuperMAG が提供する指数の一つである SME を使った。まず、昼夜半球間の圧力勾配による熱圏風を、地磁気活動が静穏な時 (SME ≤ 40 nT) の FPI 測定値から導出した (図 2 の左パネル)。次に、SME で分類した FPI 測定値の 1 時間平均値を求めた (図 2 の中央パネル)。地磁気活動が上がるにつれて (濃紺から赤への変化)、夕方側の熱圏風は東向きから西向きに回転することがわかる。これは、電離圏プラズマ対流の発達に伴う西向きイオンドラッグが主な原因と考えられる。一方、真夜中から明け方にかけては赤道方向が卓越し、風速が大きくなる。この時間帯、電離圏プラズマ対流は東向きが卓越することから、東向きのイオンドラッグが熱圏に作用するはずだが、熱圏風が東向きになることはない。しかし、この 1 時間平均値から静穏時の熱圏

風を差し引いた変動成分 ($d\mathbf{U}$) を求めたところ、午前側で東向き成分を抽出することに成功した (右パネル)。この東向き熱圏風の変動が観測値から示されたのは、世界で初めてである (Oyama et al., submitted to EPS, 2022)。さらに、夕方と朝の $d\mathbf{U}$ を比較すると、夕方側の振幅が明らかに大きい。朝夕非対称性は電離圏プラズマ対流にも見られる現象であり、イオン速度の非対称性が反映されている可能性がある。

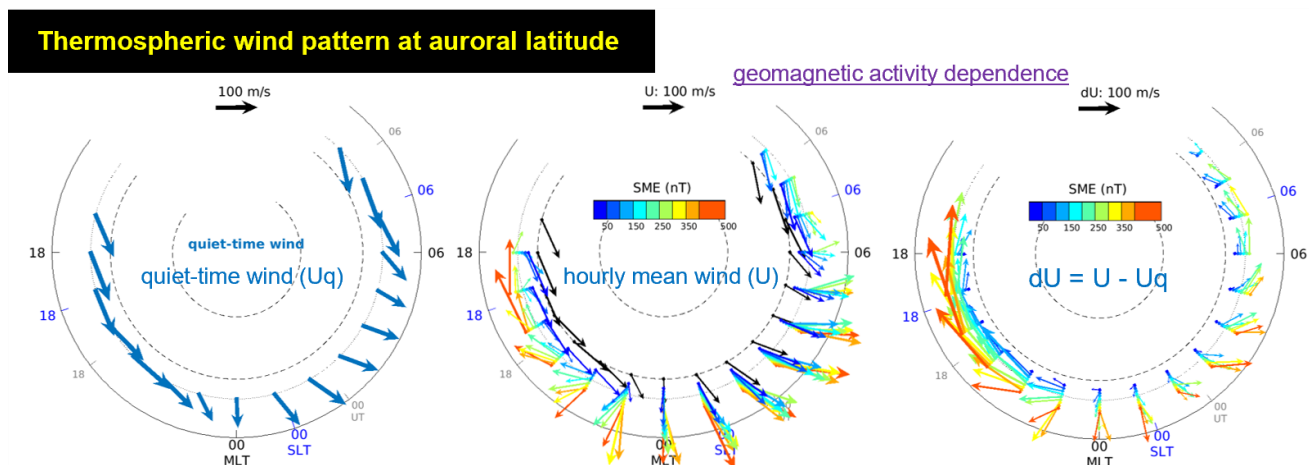


図 2 : トロムソ FPI (630 nm)で測定した熱圏風 (高度 240km 付近) の統計解析結果。(左) 地磁気静穏時 (SME \leq 40 nT) の熱圏風速場。(中) SME で分類された熱圏風速場。(右) 各 SME レベルにおける熱圏風と静穏時の熱圏風との差分。(Oyama et al., submitted to EPS, 2022)

熱圏風と電離圏プラズマのデータ解析や将来のファブリペロー干渉系開発について、本共同研究経費を活用いたしました。この場をお借りして、感謝いたします。

参考文献

- Oyama, S., Shinbori, A., Ogawa, Y., Kellinsalmi, M., Raita, T., Aikio, A., et al. (2020). An ephemeral red arc appeared at 68° MLat at a pseudo breakup during geomagnetically quiet conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020JA028468. <https://doi.org/10.1029/2020JA028468>
- Oyama, S., Vanhamäki, H., Cai, L., Aikio, A., Rietveld, M., Ogawa, Y., Raita, T., Kellinsalmi, M., Kauristie, K., Kozelov, B., Shinbori, A., Shiokawa, K., Tsuda, T. T. and Sakanoi, T., Thermospheric wind response to a sudden ionospheric variation in the trough: event at a pseudo-breakup during geomagnetically quiet conditions. *Earth Planets Space* 74, 154 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01710-6>
- Oyama, S., A. Aikio, T. Sakanoi et al., Geomagnetic activity dependence and dawn-dusk asymmetry of thermospheric winds from 9-year measurements with a Fabry-Perot interferometer in Tromsø, Norway, submitted to *Earth, Planets and Space*, 2022.