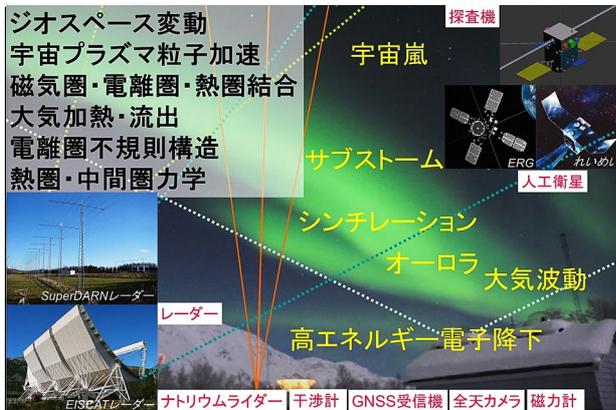


電磁気圏研究部



研究テーマ・キーワード

- 太陽風エネルギーの磁気圏・電離圏への輸送機構の解明
- 磁気圏・電離圏・熱圏の相互作用の解明
- 地上拠点・ネットワーク観測
- 宇宙惑星空間探査

太陽風から地球磁気圏・電離圏に流入してくるプラズマとエネルギーは、地球周辺の宇宙空間（ジオスペース：Geospace）におけるプラズマの力学的変動を引き起こし、極域のオーロラ発光や超高層大気の擾乱を誘起する。一方、下層大気から伝搬してくる大気波動は、超高層大気内でエネルギーと運動量を放出しながら熱圏・電離圏まで侵入し、中間圏・熱圏・電離圏の大気・プラズマダイナミクスに大きな影響を与えている。電磁気圏研究部は、太陽風エネルギーの磁気圏・電離圏への輸送メカニズム、磁気圏・電離圏・熱圏の相互作用の解明を目指し、高層大気の風や地球磁場の観測、世界的規模の電波観測、オーロラや大気光などの発光現象の観測を国内外の研究者と共同で行っている。また、人工衛星による宇宙空間の探査計画に向けた搭載用機器開発・地上実験設備の整備および地上・衛星観測とデータ解析を進めている。

2022 年度の主な活動

サブオーロラ帯でのオーロラと電磁波動の観測（PWING プロジェクト）

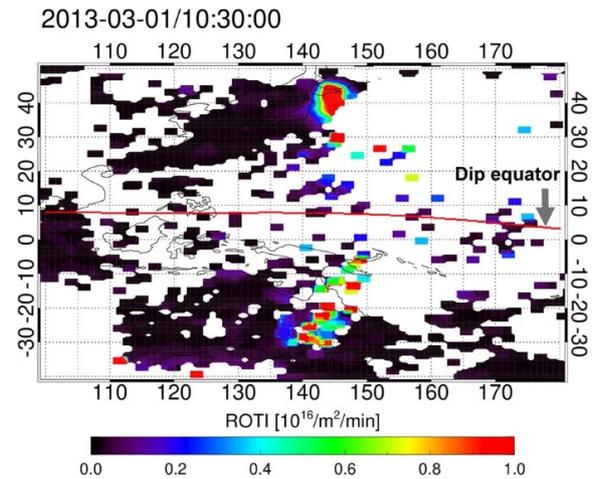
特別推進研究である PWING プロジェクトでは 2016 年度より、磁気緯度 60 度付近のサブオーロラ帯のカナダ、アラスカ、ロシア、フィンランド、アイスランドの 8ヶ所に、地球を一周するようにオーロラと電磁波動の観測機器を整備し、自動定常観測を継続してきた。このプロジェクトは 2022 年度で終了したが、2022 年度後半に新たに採択された国際先導研究（PBASE プログラム）により、この地上観測は今後も維持・継続され、さらにこの地上観測と衛星観測・モデリングとの比較解析が進むことになった。2022 年度の成果として、サブオーロラ帯で観測される Pc1 地磁気脈動の経度方向の拡がりを経度的に明らかにしたり、Pc1 地磁気脈動に伴って発生する高エネルギー粒子降込みにより、成層圏上部でスポット状にオゾンが減少していることが発見されたりしている。さらに夜間に観測される中規模伝搬性電離圏擾乱（MSTID）の内部磁気圏衛星あらせとの同時観測を 8 例について行い、MSTID の電場や電子密度変動が磁気圏に伝搬する条件を明らかにした。これらのように、主に人工衛星と地上の同時観測を通して、数多くの成果が得られている。

超高層大気イメージングシステムによる中間圏・熱圏・電離圏の研究

超高層大気イメージングシステム（OMTIs）はファブリ・ペロー干渉計（FPI）5 台、全天カメラ 21 台、掃天フォトメータ 3 台、分光温度フォトメータ 4 台で構成され、高度 80-350 km の夜間大気光を通して、この高さの大気光の輝度分布、風速、温度を計測し、中間圏・熱圏・電離圏を含む超高層大気・プラズマの力学変動を調べている。2022 年度は、8 年ぶりに北海道の陸別観測点で低緯度オーロラの観測に成功したり、オーストラリアのダーウィンや鹿児島県の佐多観測点での 10 年以上の長期にわたる大気光撮像のデータから、中間圏大気重力波や MSTID の伝搬特性を明らかにしたりするなど、数多くの成果が得られている。

GNSS 受信機データを用いた電離圏変動の研究

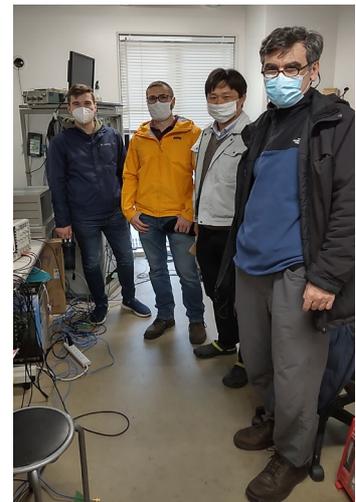
世界中に設置された約 9000 台の Global Navigation Satellite System (GNSS) 受信機のデータから全電子数を導出し、全球にわたる全電子数の高時間・高分解能二次元分布データを整備している。このデータを用い、2013 年 3 月 1 日に発生した磁気嵐において、プラズマバブルが磁気共役性を持って南北両半球の中緯度域まで拡大することを明らかにした。加えて、北半球の電離圏電子密度が急速に消滅することにより、中緯度まで拡大したプラズマバブルが北半球側で消滅し、南北半球間で非対称になり得ることを示した。また、2017 年 5 月 27-28 日に発生した磁気嵐について、GNSS データに加え、Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) レーダー観測データを用いた事例解析を行い、SuperDARN レーダーによって初めてプラズマバブルに伴う不規則構造が捉えられたことを示した。



電離圏擾乱指数 (Rate Of TEC Index; ROTI) の分布。磁気嵐中に発生したプラズマバブルが南北磁気共役性を持っていることが分かる (Sori et al., 2022)。

大型短波レーダーによる研究

SuperDARN 北海道-陸別第一・第二短波レーダーは、第一レーダーの観測開始後約 16 年が経過し、SuperDARN 広域観測ネットワークの一員として磁気圏から電離圏・熱圏および上部中間圏にわたる領域および領域間結合の研究で着実に成果を上げている。2022 年度は、トンガ火山噴火によって引き起こされる電離圏擾乱を解析し、GNSS 全電子数と比較した結果、ダイナモ電場の反対半球側への投影により、気圧波の到達より早く北半球で擾乱が観測されていることを示した。また、Pc5 帯磁気流体波動の諸パラメータの統計的特性を求め、45-55 度帯で観測される Pc5 波動が昼間側の太陽風擾乱等で引き起こされるグローバル波動の可能性を示した。一方、SuperDARN レーダーのイメージング化を実現する装置の開発を進め、2022 年度は本格建設に着手した。さらには、5 名の外国人研究者が研究所に滞在し、複数のテーマについて共同研究を進めた。



International Technical Exchange Program 等で滞在したカナダの研究者とのイメージング装置に関する技術交流の様子。

EISCAT レーダーを中心とした北欧拠点観測と EISCAT_3D 計画

北欧にて EISCAT レーダーを中心に、複数の観測装置による電離圏・熱圏・中間圏の観測研究を実施している。太陽風-磁気圏-電離圏-熱圏-中間圏相互作用の理解の深化のため、複数の光学・電波観測装置を、EISCAT レーダートロムソ観測所 (69.6°N, 19.2°E) を中心としたスカンジナビア半島北部に集約し、拠点観測を実施している。2022 年度、トロムソ MF レーダー、アルタ流星レーダーは自動観測を実施し、5 波長フォトメータ、デジタルカメラなどの光学観測装置は、冬期自動定常観測を実施した。トロムソナトリウム (Na) ライダーは、2023 年 2 月にレーザーの整備を行い、観測を再開できた。これらの観測装置により取得されたデータを用いて、極域中間圏における大気安定度、大気ダイナミクス、大気波動 (12, 8, 6 時間) の研究を、EISCAT レーダーデータを用いて極域下部熱圏における半日大気潮汐波の研究を実施した。トロムソ Na ライダーの性能改善のため、望遠鏡の整備、昼間観測用フィルター開発実験、新ライダーレーダーの基礎開発を、理研・信州大・電通大の共同研究者と実施した。

電通大の共同研究者と共同で、2011 年から 2021 年にデジタルカメラにより取得された画像データを自動分類することで、オーロラの発生率の長期変動を詳細に明らかにした。さらに、オーロラ発生状況をリアルタイムに

通知するシステムを開発した。

EISCAT レーダーを用いた共同利用・共同研究を国立極地研究所と連携して実施した。2022 年度は 10 件の EISCAT 特別実験が採択され、10 件全て国立極地研究所および EISCAT 科学協会と連携協力して実施した。また、EISCAT_3D 計画を国立極地研究所と連携して推進した。2022 年 5 月に開催された日本地球惑星科学連合(JpGU) 講演会において、EISCAT_3D 計画が関係する国際セッション「Study of coupling processes in solar-terrestrial system」を京都大学生存圏研究所、国立極地研究所、九州大学の共同研究者と共に企画・開催した。

トロムソナトリウムライダーデータを用いた北極域上部中間圏の大気安定度

2010 年 (2012 年) 10 月から 2019 年 12 月までにトロムソ Na ライダーにより取得された 339 夜 (210 夜) データを用いて高度 80–100 km における大気の静的安定度 (動的安定度) を調べた。大気温度および風速データを用いて、プラントバイサラ周波数およびリチャードソン数を求め、それらを用いて、どの程度大気不安定が発生するのかを調べた。その結果、平均で 9% および 10% の領域 (高度および時間) で、それぞれ静的不安定および動的不安定が発生していることが分かった。高度 94–100 km における静的不安定確率は、地磁気擾乱指数と相関があることが分かった。これは、オーロラ活動が、この高度の温度構造に影響を与えていることを示唆する。また、動的不安定確率が、半日大気潮汐波の振幅強度と太陽活動度 (F10.7) と相関があることが分かった。

SDI-3D プロジェクト

Scanning Doppler Imager (SDI) は、輝線発光しながら移動する地球熱圏大気 (高度 90–400 km) の風速と温度を、ドップラーシフト現象を応用して、地上から測定する光学装置である。直径 1000 km 圏内を分単位で、かつ、水平面内を細かく測定できる。我々は日本・北欧・米国の研究者からなる国際チームを 2018 年に結成し、3 台の SDI を製作して、EISCAT_3D レーダーが稼働 (2023 年開始予定) する北欧に導入する SDI-3D プロジェクトをスタートさせた。このプロジェクトを推進するために、名古屋大学初となる海外大学とのクロスアポイントメントを 2018 年にオウル大学 (フィンランド) と締結し、2022 年に計 3 ヶ月間、職員を派遣した。米国 NSF 予算 (2020 年採択) を用いた装置開発を推進し、北欧 3 地点 (フィンランドに 2 ヶ所、スウェーデンに 1 ヶ所) への設置に向けて準備を進めている。SDI-EISCAT_3D 同時観測に向けた準備研究として、光学装置 (FPI、全天カメラ)、ダイナゾンデ、Swarm 衛星による同時観測データを解析し、電離圏トラフ近傍におけるイオン速度の反転に伴い熱圏風も反転するものの、約 10 分の遅れがあることを示した (Oyama et al., 2022)。

宇宙地球結合系の編隊飛行による直接観測を実現する次期探査衛星計画「FACTORS」の提案・再検討

我々の主導による 2016 年 12 月打ち上げの地球放射線帯探査科学衛星「ERG (あらせ)」に次ぐ将来の宇宙空間・地球超高層探査衛星計画として、複数衛星により同時多点観測を実現する「FACTORS」計画をミッションコンセプト提案書にまとめ、JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型衛星計画に申請したが、2 機の衛星を同時開発し本格的な科学観測機器を搭載する計画であるため、必要経費の超過が懸念され採択されなかった。今後は経費の更なる削減に向けての対策と編隊飛行衛星間距離として 1–50 km を維持するための地球大気からの空力抵抗を積極的に用いる方式に関する検討を深化させる予定である。

フローティング式 APD による宇宙プラズマ電子の検出エネルギー下限の拡張実験

アバランシェフォトダイオード (APD) に正極の高電圧を印加し、入射する電子を加速させる電位フローティング式手法によって、通常の APD では検出できない数 keV 以下の電子を検出することを目的として真空内電子検出実験を行った。+5 kV の電位フローティングによって電子を加速し、数 keV 以下 10 eV 程度のエネルギー電子まで検出することに成功した。さらに静電型エネルギー分析器の出口に APD を取り付け、エネルギー分析された電子をフローティング式 APD で検出する実験も行った。フローティング式 APD は静電型エネルギー分析器のエネルギー・角度特性を変化させることなく 10 eV 電子まで検出できることを確認した。これらの成果は、現在学

術雑誌に投稿中である。

静電型エネルギー分析器との併用によるイオン質量分析技術開発

静電型エネルギー分析器と組み合わせた APD を用いてイオン質量分析を目標として実験を行った。本実験では 5–80 keV/q の H^+ 、 He^{2+} 、 He^+ 、 N^+ (O^+ の代用) の検出を行い、10 keV/q 以上の入射エネルギーにおいては H^+ と He^{2+} 、20 keV 以上の入射エネルギーにおいては H^+ と N^+ を識別できる可能性が高いことが分かった。また、APD 全体を -5 kV 電位でフローティングすることによりイオンを加速する実験も行い、フローティング式とすることで 5 keV の H^+ を検出することに成功した。これらの成果をとりまとめ学術雑誌に投稿した。

科学観測ロケットに搭載した磁力計による脈動オーロラ中の磁場変動観測

2022年3月5日にアラスカ・ポーカーフラットから打ち上げられた科学観測ロケット LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsations) に磁気インピーダンスセンサーを用いた磁力計を搭載し、脈動オーロラに伴う磁場変動観測を行った。ロケットが高度 200–250 km に達した時に、15–25 nT の磁場変動が観測された。地上のオーロラカメラによる撮像データから、この変動は、高度 100 km で発光していた脈動オーロラパッチの中心近くを通る磁力線上で起こったものであることが確認できた。この観測結果と、薄層近似した電離圏に電子降下がり降り込んで楕円形のオーロラパッチを生じさせるという簡単なモデルに基づく計算結果を比較した。その結果、脈動オーロラパッチは、極側に下向き、赤道側に上向きの 1 対の沿磁力線電流を伴い、この電流により磁場変動が生じていると結論付けた。

磁気インピーダンスセンサーを用いた低コスト地磁気観測システムの開発とフィールド展開

磁気インピーダンスセンサーを地磁気計測用に改良し、Raspberry Pi や市販の AD コンバーター、電子部品などを使って、低コスト (フラックスゲート磁力計の 10 分の 1 程度) の地磁気観測システムを製作した。この地磁気観測システムを用いて数ヶ月にわたってフィールド観測を行った結果、磁気インピーダンスセンサーでもフラックスゲート磁力計に匹敵するような精度で、 S_q 変動や長周期地磁気脈動、磁気嵐などの地磁気現象がきちんと計測できることが分かった。MIM-Pi と名付けられたこのシステムを、2022 年秋に宮城県・川渡および青森県・白神に設置し、定常磁場観測を開始した。将来的には、関東・東北地域に広がる稠密磁場観測ネットワークを構築し、内部磁気圏プラズマ質量密度診断への応用を計画している。この観測システムの基礎原理は、*Journal of Geophysical Research* 誌に掲載された。(Nosé et al., 2022)

観測データのアーカイブ

磁気圏・電離圏の研究に関連した取得データはデータベース化し、ウェブページで公開して共同利用・共同研究に供している。データベースと Web サイトは下記の通り。

データベース名	Web サイト
超高層大気イメージングシステム	https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/omti/
GPS シンチレーション	https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/QL-S4/
SuperDARN 北海道-陸別 HF レーダー	https://cicr.isee.nagoya-u.ac.jp/hokkaido/
210 度磁気子午面地磁気データ	https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/mm210/
ISEE 磁力計ネットワークデータ	https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/magne/
ISEE VLF/ELF データ	https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/vlf/
EISCAT レーダー、ナトリウムライダー、MF/流星レーダー、光学装置	https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~eiscat/data/EISCAT.html
れいめい衛星データ	http://reimei.isee.nagoya-u.ac.jp/
Wp 地磁気指数	https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nose.masahito/s-cubed/