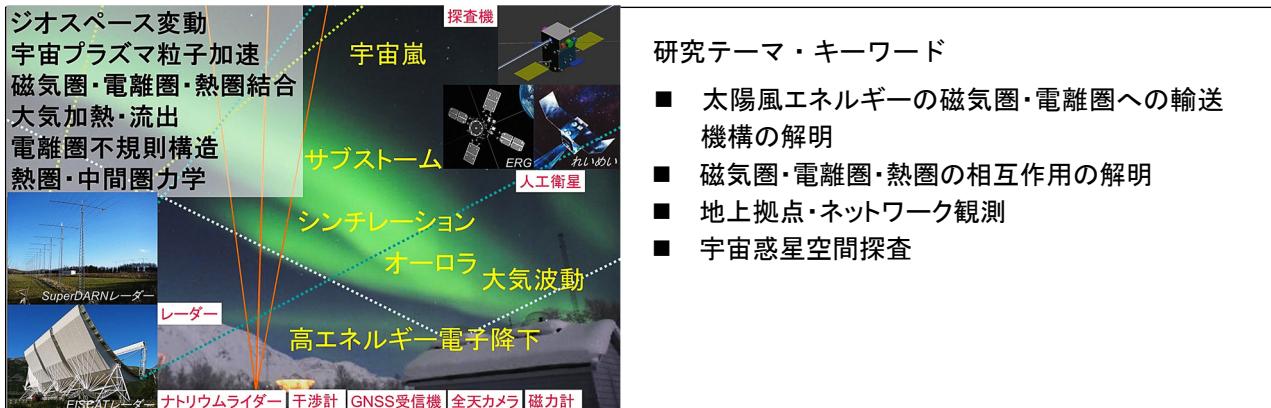


電磁気圏研究部



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。

2021 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）

電磁気圏研究部では 2016 年度より PWING プロジェクトとして、オーロラ帯よりも少し低緯度側の磁気緯度 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いる。2021 年度の成果として、サブオーロラ帯で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行い、MSTID の電場や電子密度変動が磁気圏にまで伝搬している様子を世界で初めて明らかにした。また、Pc1 地磁気脈動に伴って発生する孤立プロトンオーロラや、オーロラ帯から分離してくるオーロラアークについて、あらせ衛星や放射線帯嵐探査機「RBSP」衛星での同時観測に成功し、その磁気圏ソース領域の特性を明らかにするなど、主に内部磁気圏衛星と地上の同時観測を通して、数多くの成果があげられている。

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。2021 年度も数多くの成果が得られている。その一例として、東南アジアとアフリカで観測された赤道域プラズマバブルの経度方向の伝搬に関して、背景の熱圏の風や地磁気変動と比較し、その移動メカニズムの詳細をそれぞれの経度で明らかにしている。また、上記の PWING プロジェクトに関連して、サブオーロラ帯での光学観測を人工衛星のデータと比較することにより、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。約 20 年間の全電子数データを用い、磁気嵐に対する電離圏応答について、極冠域における電子密度増大や中緯度電子密度トラフの季節依存性や、電離圏電子密度が減少する負相嵐が始まる位置、赤道域において発生する電離圏擾乱であるプラズマバブルの特性を統計的に明らかにした。

大型短波レーダーによる研究

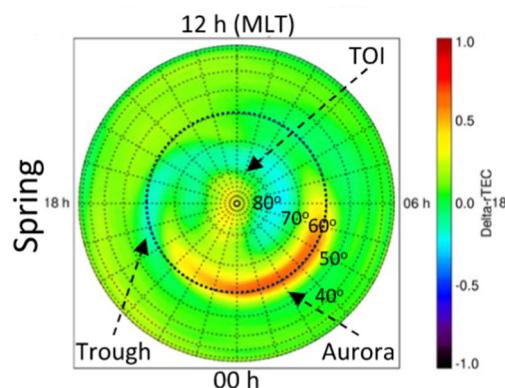
SuperDARN 北海道-陸別第一・第二短波レーダーは、第一レーダーの観測開始後約 15 年が経過し、SuperDARN 広域観測ネットワークの一員として磁気圏から電離圏・熱圏および上部中間圏にわたる領域および領域間結合の研究で着実に成果を上げている。2021 年度は、3D-FFT データ解析手法を活用し、夜側中規模 TID に伴う分極電場の特性を研究し、特に太陽活動度依存性を初めて明らかにした。またサブオーロラ帯高速プラズマ流とイオン流出との関連性を統計解析により示した。一方、SuperDARN レーダーのイメージング化を実現する装置の開発を進め、2022 年度からの本格建設のための準備態勢を整えた。なお、2019 年に出版した中緯度 SuperDARN のレビュー論文が PEPS Most Cited Paper Award 2021 を受賞した。

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」の推進

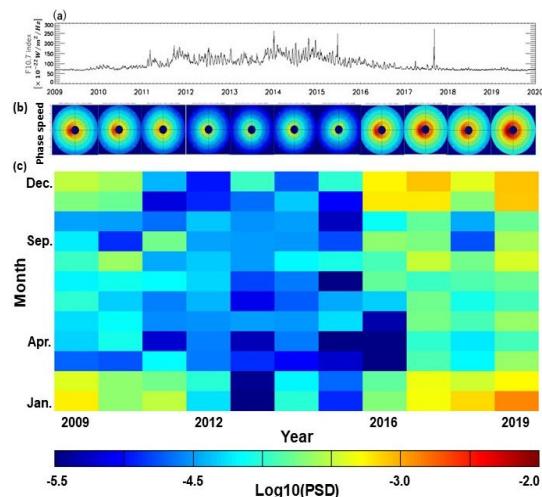
我々のグループが主導し、2016 年 12 月に打ち上げられた「あらせ衛星」に次ぐ将来の宇宙空間・地球超高層探査衛星計画として、複数衛星による同時多点観測を実現する「FACTORS」計画を推進しつつある。高度約 350–3500 km において編隊飛行衛星間距離として 1–50 km を維持するために化学推薦・スラスターを用いる従来方式と近地点通過時の地球大気からの空力抵抗を積極的に用いる方式を採用する。本年度は化学推進システムの詳細検討を行い、推薦タンクからスラスターまでの配管・バルブ位置を設計した。また、大量の理学観測データの機上処理のための高速演算・大容量ストレージを特徴とする宇宙計画対応回路システムの検討を実施した。

将来の探査衛星計画に適応可能な半球視野式静電型分析器の開発と TOF 型質量分析器に向けたフォイル実験

イオンと電子の同時観測が可能である上、三軸制御衛星への搭載を想定した半球視野を有する二重殻静電型エネルギー分析器の試作器の設計・製作、数値シミュレーションによる特性取得、較正試験結果との比較を行った結果、数値計算結果に近い性能が確認され、要求仕様を満たしていることを確認した。また、イオンの質量分析を行う飛行時間 (TOF) 型質量分析器の設計とその分析器で広く用いられる極薄カーボンフォイルが衝突するイオンにもたらす特性（主に角度散乱特性・中性粒子化特性）を確認するためのフォイル試験を実施した。



春において小規模の磁気嵐により Dst 指数が極小になった時の電離圏全電子数変動の分布。20 年間のデータを統計解析したもの。オーロラ、電離圏トラフ、TOI(tongue of ionization) が見られる (Shinbori et al. 2022)。



F10.7 指数でみた太陽活動の長期変動(上段)と、北海道-陸別第一 HF レーダーで見た平均的な夜側 MSTID の伝搬方向の確率密度分布(中段)および、月ごとの夜側 MSTID の強度分布の関係(Hazeyama et al., in press)。

電位フローディング式 APD のビームライン・電子銃試験と MCP+APD ハイブリッド検出器の基礎開発

アバランシェフォトダイオード（APD）を使用した電子エネルギー分析器の基礎開発として、APD に正の高電圧を印加して電子を加速させる電位フローディング式手法およびマイクロチャンネルプレート（MCP）と組み合わせたハイブリッド型検出手法の実験を行っている。フローディング式では検出できるエネルギーの下限を引き下げることを目的とし、APD の最低検出エネルギーを先行研究より 4 keV 以上低減することに成功した。ハイブリッド型では主に低エネルギー（数 eV-数十 keV）電子の検出に用いられる MCP と組み合わせることで観測可能なエネルギー範囲を広げる（数 eV-100 keV 以上）ことを目的としており、現在は MCP の基本的な特性と MCP からの出力の APD による検出が確認されている。

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。2021 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。これらの観測装置により取得されたデータを用いて、極域下部熱圏における半日大気潮汐波の研究、および極域下部熱圏・上部中間圏における大気力学過程（大気安定度）および大気波動（12, 8, 6 時間）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、理化学研究所・信州大学・電気通信大学の共同研究者と実施している。

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。2021 年度は 12 件の EISCAT 特別実験が採択され、うち 11 件を国立極地研究所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。2021 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。

ジオスペースにおける酸素イオン高密度領域の形成原因の解明

内部磁気圏を飛翔する「あらせ衛星」の観測により、サブストームが起った時に、真夜中のオーロラ帯から非常に多くの低エネルギー O⁺ イオン (~10 eV) が地球の磁力線に沿ってジオスペースに向かって流れ出していることを明らかにした。このような観測例は、「あらせ衛星」が夜半球を飛翔している 14 ヶ月分のデータから 55 例見つかっており、一般的に起こっている現象と考えられる。さらに、計算機シミュレーションを実施することにより、内部磁気圏に供給されたこれらの O⁺ イオンはゆっくりと朝側にドリフトして行き、その空間分布は、これまでに報告してきたような O⁺ イオン高密度領域の朝夕非対称形状と非常に似ていることが分かった。この結果は、Journal of Geophysical Research 誌に掲載された。(Nosé et al., 2022)

磁気インピーダンスセンサーを用いた低成本地磁気観測システムの開発

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、低成本（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、愛知県豊田市および茨城県石岡市において数ヶ月にわたってフィールド観測を行った。その結果、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、Sq 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。また、センサーが小型・軽量・省電力であることを活かし、電離圏高度に打ち上げられる科学観測ロケット搭載用の磁力計を開発した。

日露二国間交流事業

あらせ衛星を始めとする磁気圏衛星との同時観測を目的に、名古屋大学を含む国内の複数の研究機関がスカンジナビア半島北部に光学・電波観測装置を展開している。この同時観測領域を拡大しつつ、ロシアの磁気圏-電離圏研究者との共同研究を促進させるために、アパチートウイ（ロシア・ムルマンスク州）を拠点とする Polar Geophysical Institute (PGI)との日露二国間交流事業を、日本学術振興会予算を基に推進した。これによりスカンジナビアの地上観測網を東側に拡大させ、あらせ衛星との数多くの同時観測に成功した。日本から学生を含む計 13 名とロシアから計 10 名が本事業に参加した。遠隔研究集会（2022 年 3 月）を開催し、その議論を含む学術成果を複数の論文に発表した。例えば、脈動オーロラのパッチ化に伴い、オーロラ降下電子のエネルギーfluxが増加するエネルギー帯に緯度依存性があることが初めて観測的に示された。本結果を *Journal of Geophysical Research Space Physics* に発表した (Miyamoto et al., 2021)

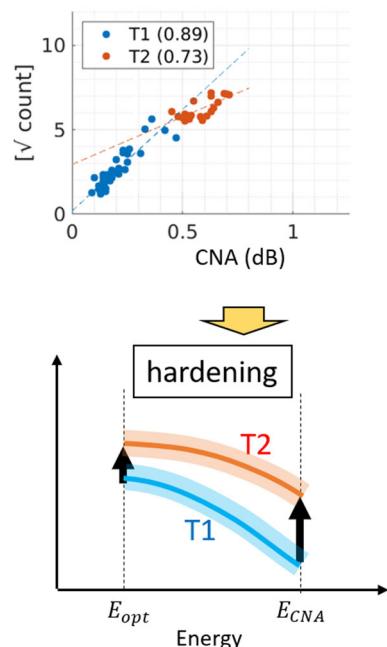
SDI-3D プロジェクト

熱熱圈大気プロファイラ (SDI) は、輝線発光しながら移動する地球熱圈大気（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。1 台で、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 台の熱圈大気プロファイラを製作して、EISCAT_3D レーダー（2022 年に稼働開始予定）が設置される北欧に導入する 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マポイントメントを 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、職員を派遣する計画である。米国 NSF 予算（2020 年採択）を用いた装置開発は順調に進んでいる。装置の設置場所を 2021 年に決定した（フィンランドに 2 ヶ所、スウェーデンに 1 ヶ所）。SDI に搭載するエタロンを日本から米国へ輸送した。

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.stelab.nagoya-u.ac.jp/ (旧) http://reimei.isee.nagoya-u.ac.jp/ (新)
Wp 地磁気指数	https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nose.masahito/s-cubed/



(上段) 脈動オーロラ発生時に測定された光強度(縦軸)と中間圈電離強度(横軸)の関係。オーロラのパッチ化の前(青点)と後(橙点)で傾きに違いがある。(下段) 傾きの変化を説明するオーロラ降下電子のエネルギーfluxの変化。