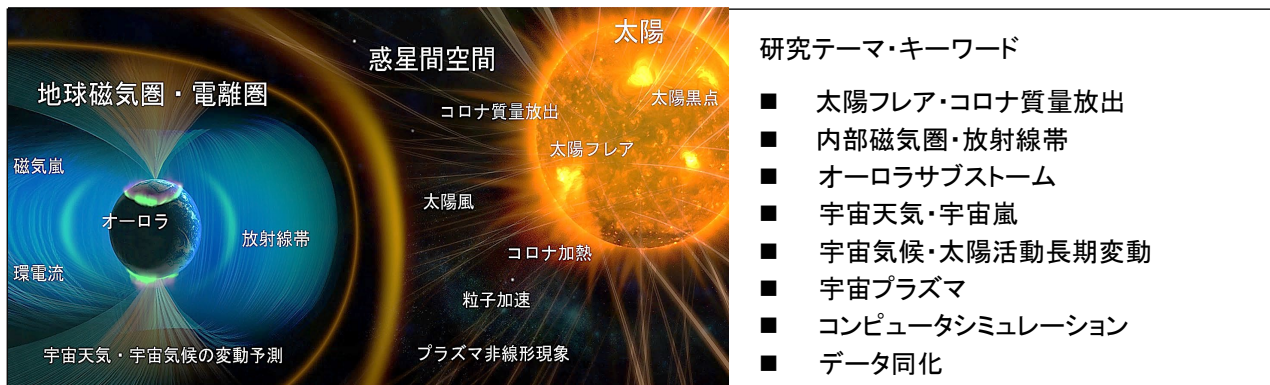


総合解析研究部



総合解析研究部では、太陽から惑星間空間と地球へのエネルギーと物質の流れのなかで発生する様々な現象の包括的な理解と変動予測を目指した研究を、最新のコンピュータシミュレーションや観測データの総合的な解析を通して進めている。特に、非線形過程や領域間相互作用の結果として起こる諸現象（太陽黒点周期活動、太陽フレア、コロナ質量放出（coronal mass ejection：CME）、磁気嵐、オーロラなど）の機構解明につながる研究を推進するとともに、これらの現象が社会に及ぼす様々な影響を定量的に予測する研究を、国内外の研究者との幅広い共同研究を通して展開している。また、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所や自然科学研究機構国立天文台と協力し、太陽地球環境を観測する衛星ミッション（あらせ衛星、ひので衛星）の科学プロジェクトの拠点としての活動も担っている。総合解析研究部に在籍する教員は、名古屋大学理学研究科あるいは工学研究科の協力講座教員として大学院教育も担っており、両研究科の大学院生、学部生が一つの研究室で学び合う理工融合型の教育研究活動を実践している。

2022 年度の主な活動

歴史文献・アナログ記録を用いた過去の太陽地球環境の復元

太陽地球環境の長期変動や激甚太陽嵐の理解について、過去のアナログ観測記録や歴史文献は現代観測の時間幅を過去に向けて大幅に延伸し得る手がかりとなる。本研究チームは、過去の太陽嵐や太陽活動の長期変動について、このような歴史的な文献記録を手掛かりに分析を進めている。本年度、当研究チームは過去の黒点記録を分析し、これまでデータの極めて少なかった 1727-1748 年について黒点群数を改訂し、黒点座標を初めて導出した（Hayakawa et al., 2022, *ApJ*）。当研究チームはまた、川口市立科学館所蔵の 1972-2013 年の黒点観測記録についてそのデータの安定性を評価した（Hayakawa et al., 2023, *GDL*）。また当チームは日蝕記録をもとに、4-7 世紀の地球の自転速度変化、ダルトン極小期付近のコロナ構造などについて検討を進めた（Hayakawa et al., 2022, *PASP*; Hayakawa et al., 2022, *PASJ*）。当チームも参加した黒点数再校正の国際共同研究について、最新の進展を踏まえた総説論文も刊行された（Clette et al., 2023, *Solar Physics*）。

太陽活動領域における磁気ヘリシティ形成機構に関する数値シミュレーション研究

太陽表面の活動領域は太陽内部で形成された磁束が太陽表面に上昇することで形成され、しばしばフレア爆発を引き起こす。これは活動領域に蓄積された磁場の捻じれ（磁気ヘリシティ）を伴うエネルギーが突発的に解放されるためと考えられているが、太陽活動領域での磁気ヘリシティの形成機構は十分に解明されていない。総合解析研究部の研究チームはロッキード・マーティン太陽天体物理学研究所、千葉大学、JAXA 宇宙科学研究所と共同で太陽内部の複雑な対流中の磁束上昇過程をスーパーコンピュータ「富岳」で系統的に計算することで、太陽表面に現れた捻じれ磁束の一部が太陽内部の下降流の影響で沈下する場合、大型フレアを発生させる磁気ヘリシティが形成されることを明らかにした（Kaneko et al., 2022, *MNRAS*）。これは、下降流による磁束管の沈下に伴い、太陽表面の正と負の磁極が衝突し、磁気ヘリシティが磁束管内部の磁力線の絡みから磁束管の変形に変換されるためである。一方、捻じれのない磁

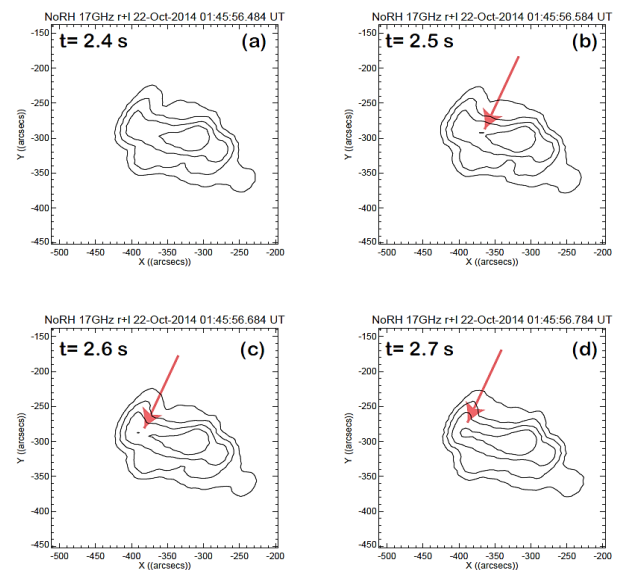
束管が太陽表面に上昇した場合でも、磁極の衝突に伴って正と負の磁気ヘリシティが対生成されるため、小型から中型のフレアを発生させるに足る磁気ヘリシティが形成され得ることも明らかにした (Toriumi et al., submitted to *Sci. Rep.*)。

太陽活動領域の新しい AIA データベースを構築

太陽活動領域に関する新しいデータベース「AIA Active Region Patches」を構築した。これは Solar Dynamics Observatory (SDO) 衛星に搭載されている観測装置 AIA が 8 年間に亘って観測した 256,000 イメージから、太陽活動領域に関する太陽コロナと彩層の時系列データを抽出したものだ。このデータベースは、微分放射速度 (DEM) 反転用に整理され、機械学習や他の太陽周期長の大規模なサンプルの解析にも容易に適用できる (Dissauer et al., 2023, *ApJ*, 942, 83)。このデータベースを用いて、全サンプルの太陽コロナと彩層を特徴づける (高周波ダイナミクスと長期変動を含む) 活動領域の特徴パラメータを求めた。これらのパラメータからノンパラメトリック判別分析法を用いて「フレア発生前の領域をコロナと彩層の挙動から判別できるか？」という問題に取り組んだところ、光球磁場データを使って得られる判別能力 (例えば、TSS=0.68–0.82 の判別能力; Leka et al., 2023, *ApJ*, 942, 84) と同等の判別が可能であることを見出した。これらの結果は、機械学習の利用なども含めて今後の研究の進展により、コロナ観測と光球磁場のデータを組み合わせて、太陽フレアの予報を改善することができる可能性を示唆している。

太陽フレアループ中における加速電子のバウンス運動の観測

太陽フレアにおける粒子加速機構の解明は、太陽物理学に未だに残された課題である。加速電子のピッチ角分布の情報は、加速機構を特定する上で重要な情報である。この情報を得るために、野辺山電波ヘリオグラフで観測された 2014 年 10 月 22 日の M クラスのフレア中に見られるマイクロ波の高速伝搬現象の解析を行った。そして、極端紫外線や硬 X 線などの多波長観測データ解析および非線形フォースフリー磁場モデルで得られたコロナ磁場の情報を通じて、加速電子のピッチ角を推定した。また、加速電子が磁気ループの一方向に注入され、それらの加速電子がループ内をバウンス運動していることを示唆する結果を得た (Matsumoto et al., submitted to *ApJL*)。



0.1 秒ごとの電波画像(等高線レベルは、輝度温度=10⁵, 10^{5.5}, 10⁶, 10^{6.5} K)。ループに沿って、加速電子起源の電波源が高速伝播していく様子が観測された。

星震学的解析を用いた太陽型星全球熱対流計算の検証

太陽と似た特徴 (重さや年齢など) を持つ星を太陽型星と呼ぶが、近年は星震学により、太陽とは異なる様相の差動回転を示す太陽型星が報告されている。このことは太陽型星の多様なダイナミクスのあり方を示唆しており興味深い。本研究では、堀田・草野 (2021) の計算レジームから得られた理論的な太陽型星内部自転分布を、従来の観測から示唆されている自転分布と比較し、理論計算の検証を行った。その結果、基本的には理論と観測との間に大きな矛盾は見られなかった。ただし自転が遅い場合は、観測誤差が特に大きいため明確な結論は出せなかった。今後の観測数増大が望まれる。

スーパーコンピュータ「富岳」による太陽風の第一原理的シミュレーション

太陽内部の乱流とダイナモ作用は、太陽風の直接的な駆動源と目されてきた。しかし、時空間スケールの顕著な違いにより、この問題に対して経験的仮定を用いずに取り組むことはこれまで困難であった。我々は理化学研究所「富岳」の大規模計算により、ほぼ経験的な仮定を置くことなく対流層から太陽風までの包括的シミュレーションを実施することに成功した。実現された太陽風は、光球・コロナから太陽風までの様々な観測的制約と一定の整合性を示しており、この計算が現実の太陽風加速過程の一端を反映していることを示唆する。詳細な解析から、アルフベン波が主体と考えられてきたエネルギー輸送過程において、磁気再結合が定量的に重要であることを示した。

複数探査機のデータを用いた太陽風磁気ロープ磁場構造の推定

太陽表面から噴出した磁気フラックスロープ (MFR) の軸磁場の向きが内部太陽圏を伝搬中にどのように変化するかを理解することを目的とし、2021 年 10 月 9 日に発生した M1.6 フレアと付随する CME を解析した。まず太陽観測 (SDO 衛星) データより MFR の形成・噴出過程および太陽表面における MFR 軸磁場の向きと対掌性を推定した。次に内部太陽圏におけるその場観測データ (BepiColombo, Solar Orbiter, STEREO-A, ACE) に対し、MFR モデルフィッティング (Marubashi & Lepping, 2007) を適用することで、各地点において観測された MFR 様構造の幾何学的構造 (軸磁場の向き・MFR 半径・対掌性など) を推定した。これらの結果に基づき、太陽表面から内部太陽圏における軸磁場の回転について考察した。

高次精度 FDTD 法の開発

電磁界シミュレーション手法である時間領域有限差分 (FDTD) 法について、陽的かつ無散逸な新たな数値解法を開発した。従来の時間 2 次精度、空間 4 次精度の FDTD (2, 4) に対して高階微分項を付加し、数値分散関係から得られる位相速度の誤差が最小となる係数を探索した。その結果、従来の FDTD (2, 4) に対してより高精度であり、かつクーラン条件を緩和することに成功した。

酸素原子のイオン-中性衝突断面積：電離圏温度での関数フィット

酸素原子とそのイオンは、地球・金星・火星の電離圏を構成する主要な粒子種である。両粒子間の衝突は、衝突断面積モデルとして表現される。最近、教科書的な high-energy タイプのモデルでなく、wide-energy タイプのモデルが正しいことが示された。この wide-energy タイプのモデルの、有効な温度範囲は 300–2000 K 程度である。本研究で、カーブ軌道効を考慮することにより、関数フィットの基底関数を改良した。この結果、有効温度範囲は 75–9000 K と広がり、地球・金星・火星の電離圏に十分となった。

地磁気誘導電流観測データに現れる気象条件依存性

GIC 長期観測データを用いて、宇宙天気や地上気象に関する各種パラメータとの比較を行った。日本の GIC は主に太陽風速度と太陽風中の磁場など宇宙天気条件で増減するものの、気温と降雨により GIC の大きさが最大 50% 変動していることが分かった。この発見は他国の観測やモデル研究では全く報告のない内容で日本特有の効果であると予想している。これらの効果を考慮にいった、実用的な GIC の予測モデルとハザードマップを作成することを目指す。

電磁イオンサイクロトロン波による地球プラズマ圏の熱的イオンフラックス形成への影響

電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波は地球内部磁気圏において高エネルギープロトンとのサイクロトロン共鳴によって励起する。EMIC 波は磁気圏において主にプラズマ圏に存在する低エネルギーイオンの加熱によって数 10 eV の熱的なイオンを形成することができると考えられているが、直接的な証拠やそのインパクトについては明らかになっていない。我々が開発を進めている波動粒子相関解析 (WPIA) によって、直接的に波動のエネルギーが粒子に与えられていることを定量的に解析することが可能である。あらせ衛星で観測された 4.5 年間分のデータを用いて WPIA が可能な EMIC 波動イベントを抽出し、内部磁気圏において効率よくイオン加熱が起きている領域の空間特性を調べた。また、熱的なイオンフラックスの形成に必要なエネルギーを見積った結果、ほとんどの場合において EMIC 波は十分なエネルギーをイオンに寄与できていないことが示唆された。

サブオーロラ帯電離圏高速西向きプラズマ流に対応する内部磁気圏内の電場と粒子境界との位置関係

夜側サブオーロラ帯電離圏で磁気擾乱時にサブオーロラ帯分極流 (SAPS) と呼ばれる高速の西向きプラズマ流が観測される。あらせ衛星および SuperDARN レーダーのデータを用いて、磁気圏側の環電流及びプラズマシート境界と、SAPS に対応する強い電場との位置関係について解析を行った。その結果、SAPS 電場の地球側境界よりも、さらに内側まで環電流イオンがしばしばみ出して分布していることが分かった。このことから、SAPS 形成より以前に注入された環電流イオンと、現在進行形で SAPS を形成している環電流イオンがしばしば共存し得ることが示唆される。

非線形波動粒子相互作用による脈動オーロラ発生の数値計算

脈動オーロラは、コーラス波動による波動粒子相互作用によってピッチ角散乱を受けた電子が間欠的に熱圏に降りこむことによって起こる。コーラス波動と電子の相互作用は、しばしばきわめて強い非線形性を有するため、波動の強度と降り込み電子のフラックス、そしてオーロラ発光強度の間の関係は複雑になることが予想される。本研究では、テスト粒子計算にもとづく波動粒子相互作用の計算コードと、オーロラ発光計算コードを結合させ、コーラス波動の強度に応じて、オーロラ発光がどのように変化するかを調べた。その結果、波動強度が強くなると、Phase Trapping や Dislocation と呼ばれる非線形現象が発生し、Phase Trapping が有力な場合には、降りこみ電子の量が抑制され、オーロラの発光強度が低下すること、一方 Dislocation が起こる場合には、降りこみ電子の量が大きく増加して、オーロラ発光強度が増加することが明らかになった。この結果は、オーロラの発光強度とコーラス波動の強度は単純な相関関係を持つのではなく、非線形波動粒子相互作用によって複雑な変化を示すことを意味している。本研究で得られた結果は、プラズマ波動に対して多様な応答を示す脈動オーロラの性質解明に大きく貢献することが期待される。

あらせ衛星による内部磁気圏イオンおよび EMIC 波動に関する研究

2017 年 3 月から 2021 年 12 月までの Arase 衛星観測データを用いて、1) 地磁気活動に依存する高エネルギーイオン (H^+ 、 He^+ 、 O^+)、2) 内部磁気圏における EMIC 波の特徴という 2 つの統合的研究を行った。最初の研究では、異なるエネルギー帯の 4 つの異なるイオン集団：(1) $L < 5$ のプラズマ圏 ($E < 30$ eV) イオン、(2) 10s eV-数 keV のエネルギーのプラズマクローク、(3) ノーズ構造を持つリングカレント ($E = 1$ keV–10s keV)、(4) MLT で対称な分布を持つ高エネルギーリングカレント ($E > 30$ keV) についての研究を行い、これらの分布は、 K_p が高くなるにつれて、エネルギーごとに異なる挙動を示していることを明らかにした。第二の研究では、EMIC 波の励起に適した条件を発見した。これらの EMIC 波は、磁気緯度 20 度以上の、磁気圏昼側で主に観測される。解析の結果、これらの EMIC 波は、その発生の直前に太陽風の動圧が上昇することが明らかになった。また、昼側の EMIC 発生時における背景磁場の形状についての解析を行い、太陽風動圧に伴う磁力線の変形によって、赤道付近に様な磁場構造が存在することを発見した。この結果は、様な磁場構造が形成されることによって、広い磁気緯度にわたって非線形 EMIC 波の励起に関する敷居値が小さくなり、より非線形 EMIC 波動が励起しやすい条件が形成されていることを示すものと考えられる。

2017 年 5 月 27 日磁気嵐におけるサブオーロラ帯のプロトン降り込みのモデリング

近年の研究では、EMIC 波によって引き起こされるイオン降り込みが電離圏に対する全エネルギーフラックスに大きく寄与し、磁気圏-電離圏カップリングに大きな影響を与えることが示されている。2017 年 5 月 27 日に発生した磁気嵐では、DMSP 衛星と NOAA METOP 衛星が、磁気嵐の主相において、夕方側から夜側でプロトンの降り込みを観測した。また、あらせ衛星と RBSP-A 衛星は、内部磁気圏で EMIC 波を観測し典型的なシグネチャを観測した。本研究では、電離圏へのプロトン降り込み、EMIC 波の励起、プロトンの持つ温度異方性について理解するために、BATSUS+RAMSCBE モデルで EMIC 波を含む場合と含まない場合の 2 つのシミュレーションを行った。あらせおよび RBSP-A 衛星の測定で、EMIC 波が観測された領域においては、プロトンおよびヘリウムバンドの EMIC 波の成長率の増加が示された。このプロトンバンドとヘリウムバンドの EMIC 波は、プラズマポーズ近傍のプロトンの温度異方性が強い領域で励起されており、これまでの研究と整合的である。また、シミュレーションされた降下イオンのフラックスは、DMSP や NOAA MetOP 衛星の観測結果とよく一致することが分かった。これらの結果は、RAM-SCBE モデルが、EMIC 波の変化とイオンの降り込みを定性的に再現できることを示唆している。

あらせ衛星によって観測された CIR 駆動ストーム時の内部磁気圏におけるイオン・電子のプラズマ圧力分布

磁気嵐時のリングカレントは、内部磁気圏のプラズマ圧力によって駆動される。プラズマ圧力は、主に数から数百 keV のエネルギー範囲のプロトンの寄与が大きい。また、地磁気活動期には、酸素イオンの寄与も増加する。一方、リングカレントへの電子の寄与は、これまであまり研究されていない。本研究では、あらせの打ち上げ以降の期間において発生した 26 回の CIR 磁気嵐 ($Sym-H < -40$ nT) の解析を行い、磁気嵐前、主相、回復相初期、回復相後期のイオン (H^+ 、 He^+ 、 O^+) と電子の圧力発展を L 値と磁気地方時について調べた。その結果、主相と回復相初期には、磁気圏内部でイオン圧力が経度方向に非対称になり、強い部分リングカレントが発生することが分かった。また、エネルギー 約 55 keV のプロトンが、主相における圧力に大きく寄与し、酸素イオンは、10–20 keV のエネルギーで、主相と回復相に大きく寄与した。また、全体として、主相と回復相初期の環電流全体に対する電子の寄与は約 11% であることが分かった。しかし、朝側では主相と回復相初期に、電子の寄与が 22% 程度と大きくなることも明らかになった。この結果は、リングカレントの発達において、電子が重要な役割を果たしていることを示している。