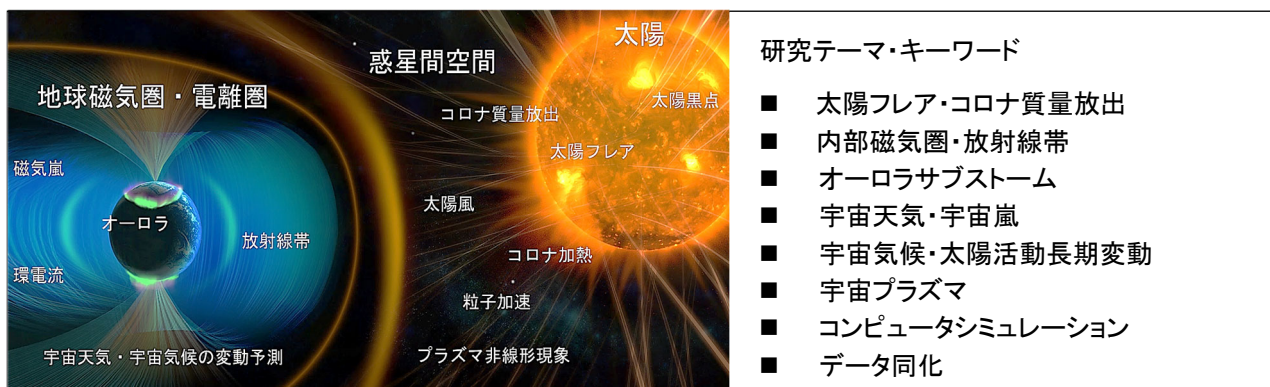


総合解析研究部



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、工学部の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。

2021 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当たり、過去のアナログ観測記録や歴史文献など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、本研究チームは 1859 年 9 月、1940 年 3 月、1957–1958 年の太陽嵐について、太陽面爆発現象、地磁気擾乱、低緯度オーロラの報告記録に基づき定量的な復元・分析を行った。また、太陽活動の長期変動については、ダルトン極小期の Prantner、マウンダー極小期や直後の Fogelius, Siverus, Müller などの観測記録を分析した。（Hayakawa et al., *MNRAS*, 2021, 2022; *GDJ*, 2022; *ApJ*, 2021, 2022; *PASJ*, 2021; *Solar Phys.*, 2021）

スーパーコンピュータ「富岳」で太陽の特異な自転分布を世界で初めて再現

千葉大学大学院理学院の堀田英之准教授と本研究所総合解析研究部の草野完也教授は、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した超高解像度計算によって、太陽内部の熱対流・磁場を精密に計算することにより、太陽の特異な自転分布を再現することに世界で初めて成功した。太陽は赤道が極域よりも速く自転する自転構造を持つことが古くから知られているが、そのメカニズムは未解明であり、これまで計算でも再現することができなかった。本研究では「富岳」の強力な計算力を駆使し、54 億点の計算格子点で太陽対流層を精密に分解することで、電磁流体力学に基づく第一原理より太陽の特異な自転の再現に成功したものである。太陽の自転構造は黒点の形成の主要な要因であると考えられていることから、本研究の成果は天文学における歴史的課題でもある太陽黒点周期（シュワーベ周期）のメカニズムの解明に大きく貢献することが期待される。（Hotta and Kusano, *Nature Astronomy*, 2021）

p 太陽コロナにおけるエネルギー損失の適切な数値解法の提案

太陽コロナにおけるエネルギーの大部分は、遷移層と呼ばれる大気層で失われる。熱伝導と放射冷却の急峻な温度依存性のため、遷移層は非常に薄くなる。そのため、遷移層を数値的に分解し、太陽コロナからのエネルギー損失を正確にモデル化するためには、多数の格子点が必要となる。我々は、太陽コロナからのエネルギー損失をモデル化するための新しい数値計算法を提案した。提案方法では、熱伝導と放射冷却の間のエネルギーバランスを保ちながら、遷移領域を数値的に広げることができる。本手法により、本来必要な値の約 1000 倍の格子幅で、遷移層をモデル化することが可能となった。これは 3 次元大気モデルの計算コストを、約 1 兆倍削減することが出来ることを意味する。(Iijima and Imada, *ApJ*, 2021)

太陽フレア発生頻度分布の統計解析によるコロナ加熱機構に関する研究

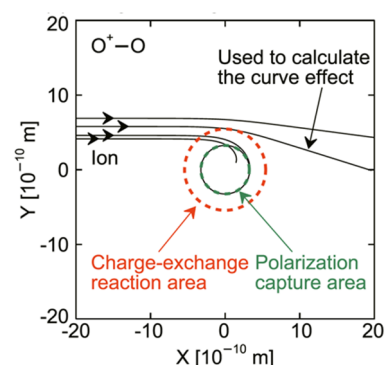
従来のコロナ加熱研究では観測装置で識別できないナノフレアの寄与が十分に考慮されていないと共に、フレアの解放エネルギー量を見積もる際に熱以外のエネルギーが考慮されていない等の問題があった。これらの問題点を克服するため、ひので衛星と SDO 衛星の観測データと数値計算を融合させた新たな解析手法を開発し研究を実施した。結果は、活動領域におけるナノフレア仮説の妥当性を支持するものであった。(Kawai and Imada, *ApJ*, 2021a, 2021b; Kawai, *PhD thesis*, Nagoya University, 2022)

太陽フレア活動を理解するための磁気ヘリシティに関する研究

太陽大気構造の観測より、太陽の北半球には左手系のヘリカル構造が、南半球には右手系のヘリカル構造が現れる傾向があることが分かっている。これは太陽磁場の磁気ヘリシティにおける「半球符号傾向 (hemispheric sign preference: HSP)」と呼ばれている興味深い性質である。我々は NASA の太陽観測衛星「Solar Dynamics Observatory (SDO)」が観測した太陽磁場データを利用し、HSP と太陽フレアの長期的活動との関係を解析した。その結果、太陽表面のキャリントン座標において HSP が特徴的に低い (約 40%以下) 特定の領域があることを見出した。興味深いことに、この低い HSP を示す領域は第 24 太陽活動周期において最も活発なフレア活動を示した領域と一致した。この HSP とフレア活動の関係は、太陽対流層の深部構造に起因すると考えられるフレア活動領域の形成と発展を理解するために重要であり、今後の太陽周期と活動領域の観測を通して継続して研究する必要がある。(Park et al., *ApJ*, 2021)

地球電離圏の電荷交換衝突におけるカーブ軌道効果

電離圏と磁気圏の結合を理解するためには、電離圏電気伝導度を定量的に把握することが必要である。電気伝導度の主体は、イオンと中性粒子の衝突断面積である。この断面積は、電荷交換衝突と分極衝突の 2 つの成分を持つ。両成分が等しくなる遷移温度は、電離圏温度 (200–2000 K) 付近である。これまでの電離圏研究では、遷移温度付近における両成分の結合を、誤解により無視してきた。本研究では、両成分の結合をカーブ粒子軌道効果 (粒子軌道が曲がることにより電荷交換衝突断面積が実効的に増大する効果) により表現した。その結果、遷移温度において、トータルの断面積は電荷交換成分から 22% 増大することを見いだした。(Ieda, *JGR*, 2022)



酸素原子イオンと酸素原子の衝突。分極衝突と電荷交換衝突が結合することにより、衝突断面積が最大 25% 増大する。

あらせ衛星と EISCAT 観測による磁気圏高エネルギー電子降り込みによるオゾン破壊

2017 年 3 月に発生した磁気嵐時において、地上 EISCAT、光学同時キャンペーン観測からオメガバンドに付随する脈動オーロラの発生に伴い、~3 MeV に至る相対論的な電子の降り込みが観測された。このとき、磁気圏側では「あらせ」衛星によって、強いコーラス波動が観測されていた。あらせ衛星の観測を入力としたシミュレーションを行ったところ、あらせ衛星が観測したコーラス波動によって、EISCAT で観測されたような高エネルギー

ギー電子降り込みが再現された。さらに大気化学に関するコンピュータシミュレーションによって、この高エネルギー電子の降り込みによって、中層大気に強い電離が起こり、その結果、中間圏オゾンが 10%以上、破壊されていることが示された。この結果は、コーラス波動と磁気圏粒子の相互作用を通じた磁気圏と大気圏の新たな結合過程を示すものである。(Miyoshi et al., *Scientific Reports*, 2021)

2017 年 11 月 7-8 日の磁気嵐時の RAM-SCB シミュレーションとあらせ観測によるリングカレントと地上磁場変化への電子の影響について

地磁気嵐は宇宙天気現象において、最も重要な一つである。強い磁気嵐は、人工衛星や通信、送電線に深刻な被害を与える。磁気嵐は主にリングカレントの増強によって引き起こされる。内部磁気圏におけるリングカレント粒子の時間変化は、電場や磁場中の輸送過程に強く依存する。本研究では、観測とシミュレーションにより、リングカレント粒子の変動を調べた。あらせ衛星の観測から得られたイオン (H^+ , He^+ , O^+) と電子のフラックスとプラズマ圧力の変動を、内部磁気圏モデル RAM-SCB と比較した。その結果、リングカレントに寄与するプラズマ圧力に対して、イオンが約 88%の寄与を、電子は約 12%の寄与をしていることが分かった。また、磁気嵐の主相では、電子の寄与は、特に朝側において無視できない寄与を示す(約 18%)ことが分かった。これらの結果は、磁気嵐時のリングカレントに電子も重要な寄与をしており、無視できないことを示している。(Kumar et al., *JGR Space Phys.*, 2021)

あらせ衛星と地上電磁場観測を用いた EMIC ドリフトホールの解析

散発的な電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波によって、数百 keV 以上の電子のみが磁気圏からロスし、磁気圏中に高エネルギー電子が極端に少ない領域が形成される「ドリフトホール」について解析した。ドリフト周期はエネルギーに依存するため、ドリフトホールには明瞭なエネルギー分散が見られ、数回地球を周回して拡散し消失する。ドリフトホール一つは局所的な粒子フラックス減少に対応するが、ドリフトホールが繰り返された数時間後に放射線帯全体のフラックスが 10%程度に減少することが分かった。(Nakamura et al., *GRL*, 2022)

あらせ衛星で観測された EMIC 波と関連するプロトン分布の統計的研究

EMIC 波は、磁気圏プラズマのダイナミクスを制御する上で重要な役割を果たしている。特に、EMIC 波と粒子の相互作用は、地球磁気圏において高エネルギー陽子と相対論的電子の消失を引き起こすとともに、散乱した陽子は、サブオーロラ帯で孤立プロトンオーロラを発生させる。内部磁気圏における EMIC 波と高エネルギープロトンの結合を理解するために、あらせ衛星によって得られた 4 年間のデータから、EMIC 波と結合したプロトン分布の統計的研究を行った。その結果、EMIC 波と高エネルギープロトン分布の特徴が大きく異なる 4 つの領域を特定した。サイクロトロン不安定性の閾値付近の EMIC 波は磁気赤道で左偏波を示し、発生した波は高緯度へと伝播することが分かった。さらに、観測されたピッチ角散乱のエネルギー範囲は、プロトンの最小共鳴エネルギーと一致することも明らかになった。これらの観測結果は、EMIC 波の空間分布に新たな知見を与えるものである。

波動粒子相関解析法による低エネルギーイオン加熱の空間分布と分類

1 keV 以下のエネルギーを持つイオンの観測において、“指”の形のようなエネルギースペクトルが観測される。EMIC 波動による低エネルギーイオンの影響が、そのようなスペクトル構造が形成される一因となっていることが考えられている。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約 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、WPIA によって“指”のスペクトル形成が、EMIC 波による加熱が原因であるもの、エネルギーの授受が発生しない Sloshing 運動によるもの、EMIC 波の存在が無関係なものに分類した。

あらせ衛星高エネルギー電子観測器によって計測された電子フラックスの誤差評価

あらせ衛星高エネルギー電子（HEP）観測器による地球内部磁気圏での電子フラックス観測に関して、計測フラックス値の誤差評価を行った。HEP 観測器ではカウント値からフラックス値への変換にエネルギーチャンネル間の畳み込み計算が必要となるため、フラックス誤差についても、観測器で直接計測される生カウント値に計数統計を仮定した上で、同様の畳み込み計算を行うことで、フラックス値の誤差推定を行った。結果として、高エネルギーかつピッチ角範囲が 0° または 180° に近くなると誤差レベルがかなり大きくなり、統計的に有意なフラックス値を得るためには数分程度の積分が必要となることが分かった。

太陽内部対流がフレア発生型黒点の形成とエネルギー蓄積に与える影響の解明

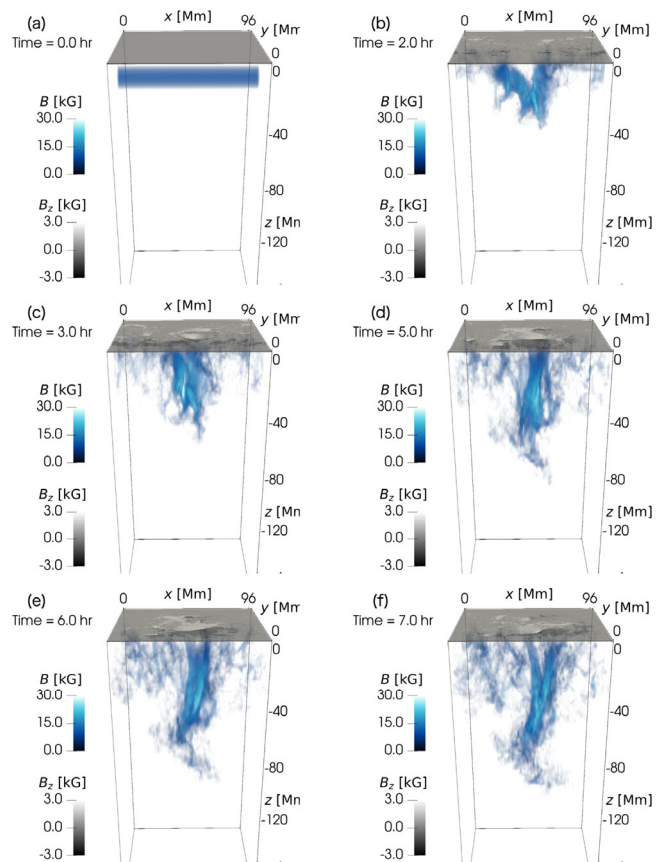
太陽フレアのエネルギー源は、黒点に蓄積された磁気エネルギーである。本研究の目的は、フレア発生型黒点の形成と磁気エネルギーの蓄積に対する対流の影響を解明することである。我々は輻射磁気流体コード R2D2 とスーパーコンピュータ富岳を用いて、太陽内部対流層から表面までの磁場輸送と黒点形成を再現した。磁束管の初期位置を変えて 93 通りの計算を実施した。結果、太陽表面の磁気自由エネルギーの分布と太陽内部の下降流の分布の間に強い相関が認められた。対流層内部の下降流を検出することで、フレアエネルギーの蓄積領域を事前に予測できる可能性がある。(Kaneko et al., submitted to *MNRAS*)

複数探査機を用いた太陽風磁気ロープ磁場構造の推定

地磁気嵐をもたらす南向き惑星間磁場を予測するためには、太陽から噴出する磁気ロープが内部太陽圏を伝播するときに時間的・空間的にどのように進化するかを理解することが重要である。このため本年度我々は、惑星間空間における太陽風磁場・プラズマのその場観測データから、モデルフィッティングにより太陽風磁気ロープの磁場構造を推定する解析ツールの整備を行った。また、この解析ツールを使用して、2014 年 4 月に発生し Venus Express（金星軌道）・WIND（地球軌道）・MAVEN（地球-火星間）・Mars Express（火星軌道）により順に観測された太陽風磁気ロープの解析を開始した。

豊川強度偏波計データベースの整備

豊川強度偏波計（1, 2, 3.75, 9.4 GHz）の 1958 年から 1978 年のデータが記録されたマイクロフィルムを全てスキャンして、デジタル画像ファイル化したデータベースを構築した。このデータベースは、太陽フレア規模の指標として広く使われている GOES 衛星軟 X 線観測の無い時代の巨大フレアの規模推定や、過去の太陽周期での太陽フレアの特徴の研究などの利用が期待される。



輻射磁気流体シミュレーションにより再現された太陽黒点磁場の形成と時間発展。上面およびボックス内のグレースケールは、それぞれ太陽表面鉛直磁場および太陽内部の磁場強度を表す。