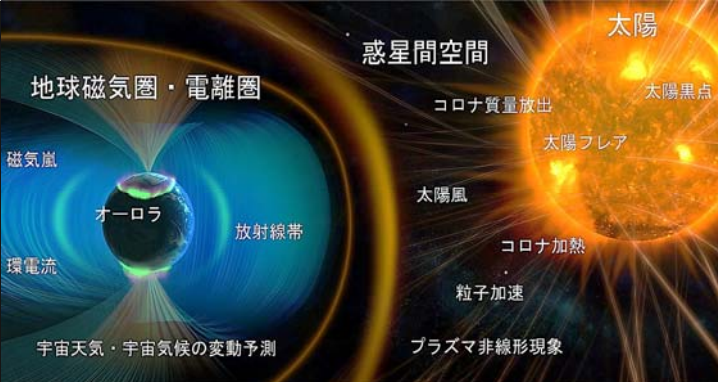


総合解析研究部



研究テーマ・キーワード

- 太陽フレア・コロナ質量放出
- 内部磁気圏・放射線帯
- オーロラサブストーム
- 宇宙天気・宇宙嵐
- 宇宙気候・太陽活動長期変動
- 宇宙プラズマ
- コンピュータシミュレーション
- データ同化

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と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共に、これらの現象が社会に及ぼす様々な影響の定量的な把握と予測につながる研究を文部科学省新学術領域研究などの全国プロジェクトとして実施している。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も推進している。総合解析研究部に在籍する教員は、名古屋大学の理学研究科あるいは工学研究科の協力講座教員として、大学院教育を担っている。両研究科の大学院生、工学部の学部生が互いに一つの研究室で学び合う理工融合型の研究教育活動を実践している。

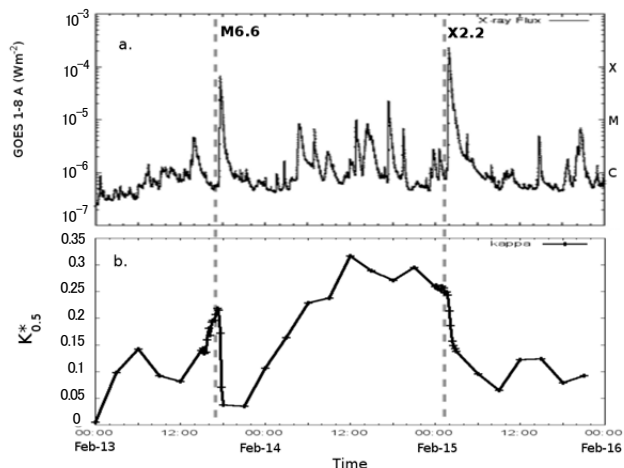
2018 年度の主な活動

次期太陽周期活動予測のための太陽表面速度場検出

太陽活動は約 11 年の周期で変動することが知られている。この周期活動を予測することは宇宙天気研究において非常に重要であり、これまで次期太陽周期活動を予測するモデル計算コードの開発および実装、そして計算に必要なパラメタの観測精度の向上を行ってきた。本年度は特にこのモデル計算に必要なパラメタである速度場について、衛星観測を用いて算出することを行った。結果、磁場の強い領域での子午面方向の流れは、磁場の弱い領域に比べて遅いことが分かった。（Imada and Fujiyama, *ApJL*, **864**, L5, 2018）

太陽フレアの発生条件に関係した特徴的な磁場構造に関する研究

太陽コロナ磁場は太陽フレアなどの太陽面爆発現象の駆動源である。しかし、磁場のどのような構造が太陽面爆発の発生条件となっているかは未だに明確に理解されていない。そこで、本研究では Ishiguro & Kusano (2017) によって最近提案された κ パラメタをもとにフレア発生に関係した特徴的な磁場構造の特定を試みた。そのため、光球面ベクトル磁場から数値的に外挿した非線形フォースフリー磁場を使って κ パラメタの代替量として κ^* パラメタを新たに導入し、活動領域

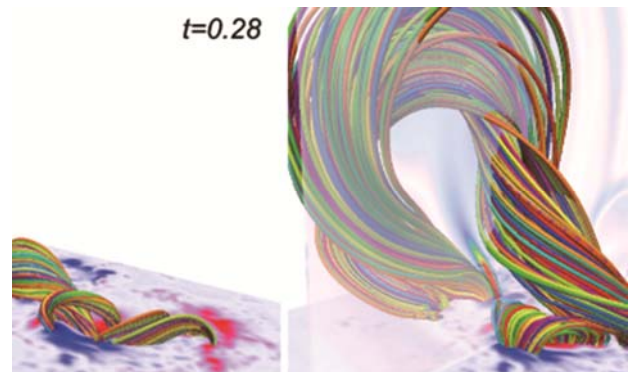


2011 年 2 月 13 日から 15 日までの (a) GOES X 線流束と (b) κ^* の時間変化。2 つの破線は活動領域 NOAA 11158 で発生した大型フレアの時間を示す。

NOAA11158 におけるフレア発生前後のその変化を調べた。その結果、 κ^* はフレア発生前に一定値を超えて増加し、フレア発生後に急激に減少することを見出した。この結果は κ^* がフレア発生の必要条件に関係していることを示唆しており、この結果よりフレア発生条件の評価を行う新たな方法論を提案した (Muhamad, et al., *ApJ*, 2018)。

太陽サイクル 24 最大の太陽フレアの電磁流体力学シミュレーション

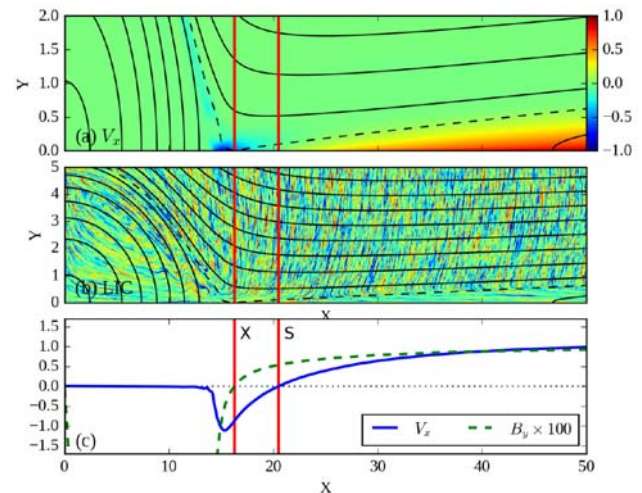
2017 年 9 月 6 日に観測された、太陽サイクル 24 最大の X9.3 フレアの電磁流体力学シミュレーションを実施した。右図が示す様に、複数のねじれた磁力線群（磁気フラックスロープ）が初期に存在し、その一部が不安定（あるいは非平衡）に陥ると、全体の構造が平衡状態を失い、磁気リコネクションを介することで巨大な磁気フラックスロープを形成し、その結果、噴出することが明らかになった。放出される磁気フラックスロープの下には、電流シート構造やポストフレアループが再現された。また、磁気フラックスロープが回転していく様子も再現され、地球の電磁場環境に多大な影響を与えた南向き磁場の形成に寄与している可能性も示唆された。(Inoue et al., *ApJ*, 867, 83, 2018)



噴出する磁気フラックスロープのダイナミクスの時間発展。線は磁力線を表しており、断面図には電流値を磁場で割った値 ($|J|/|B|$) をプロットしている。

非定常ペッチェク型磁気リコネクションの自発的高速化メカニズムに関する研究

磁気リコネクションは宇宙および実験室における様々なプラズマにおける高速なエネルギー解放過程で重要な役割を果たす。しかし、一様抵抗下では Petschek 型の高速リコネクションの実現は困難であると考えられてきた。これに対し、Shibayama et al. (2015) は一様抵抗であっても Petschek 型の高速リコネクションが非定常状態として自発的に現れることを見出した。本研究では、この「動的 Petschek 型のリコネクション」の高速化機構を探るため、新たなシミュレーションを行った。その結果、プラズモイドの成長の結果、磁場と流れの対称性が破れ、磁場の X 点と流れの淀み点 (S 点) の位置がずれることが、磁気リコネクションの高速化の原因となることを見出した。この結果は拡散領域内部の局所的な流れが磁気リコネクションの高速に重要であることを意味することから、太陽フレアのような大規模システムでも実現すると考えられる (Shibayama, et al. 2019)。



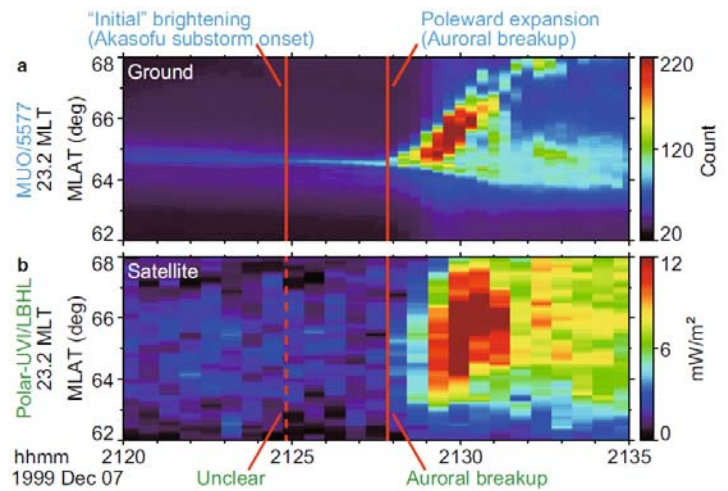
シミュレーション結果における、(上) 水平流速 (v_x)、(中) LIC (line integral convolution) 法で可視化したプラズマの流れ、(下) 水平流速とリコネクションによる磁場 (B_x) を水平座標 (x) の関数として示す。2 つの実線は X 点と S 点の位置を示す。参照：裏表紙カラー図(上段左)。

磁場を横切るドリフトをするプラズマのための新しい線形分散ソルバの開発

プラズマ中の様々な状況下において磁場を横切るドリフト運動が発生する。このようなドリフト運動はいろいろなプラズマ不安定のエネルギー源となるが、従来の線形分散解析方法では磁場を横切るドリフトをするプラズマは扱えなかった。本研究グループでは、一様プラズマ中を仮定し、磁場を横切るドリフトを考慮した新しい線形分散の開発に成功した。(Umeda and Nakamura, *Physics of Plasmas*, 25, 10, 102109, 2018)

オーロラ爆発の衛星画像と地上画像における相違

地上 1 点からの光学観測は狭視野であるため、サブストームの開始が視野内か視野外か断定できない。この観点から、サブストーム開始時刻の同定には広視野の衛星画像が最も信頼されてきた。その際、衛星画像が低感度であることによる遅れは無視できると考えられてきた。その根拠は、衛星画像でのサブストーム開始は Pi2 地磁気脈動と同時あるいはむしろ数分前に観測されることである。本研究では、衛星画像と地上画像を初めて直接比較した。その結果、衛星画像でのサブストーム開始および Pi2 地磁気脈動は、地上画像でのサブストーム開始ではなく、第 2 段階（極方向拡大）に対応することを明らかにした。(Ieda et al., *EPS*, 70:73, 2018)



サブストーム開始時のオーロラ。(a)地上観測、(b)衛星観測。オーロラ画像からオーロラ爆発開始経度を抜き出して時系列に並べたキオグラム形式で表示。サブストーム開始の本来の定義である「Akasofu initial brightening」は、地上画像では観測されているが、衛星画像ではされていない。一方、オーロラ極方向拡大は両画像で同時に観測されている。

あらせ衛星データを用いた非線形 EMIC 放射の周波数変動特性の解明

内部磁気圏において、イオン・相対論的電子の消失過程に寄与すると考えられている電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動について、あらせ衛星が観測した電磁場データを用いて解析を行った。Hilbert-Huang 変換と呼ばれる非線形信号解析手法を導入し、瞬時周波数と瞬時振幅の時間変化を求め、Fourier スペクトル解析では捉えられない速い周波数変化を解析した。結果として、EMIC 波動とイオン粒子が非線形サイクロトロン共鳴を起こす際の変化を周波数変化から読み解くことに成功し、そこから粒子の位相空間での運動を議論した。この解析から理論解析に対して、これまで考慮していなかった非一様な位相分布の重要性を示唆した。(Shoji et al., *GRL*, 2018)

あらせ衛星高エネルギー電子観測器におけるチャンネル間相対検出効率の評価

あらせ衛星高エネルギー電子観測器 (HEP 観測器) に関して、実際に軌道上で取得された電子データを用いて、各方向チャンネル間の相対的な電子検出効率の評価解析を行った。HEP 観測器の各半導体検出器 (SSD) を共有する 5 つの方向チャンネルについて相互比較を行ったところ、SSD 両端の 2 チャンネルのみ、他チャンネルの検出カウンタ数に対する線形応答から外れる特性を示すことが分かった。詳細な統計解析からは、その非線形性が、検出器への電子の斜め入射効果や、検出器前に設置されたアルミニウム板による方向・エネルギー散乱効果などの複合的な要因で生じているということが示唆される。

モード変換をよるプラズマ圏 EMIC 波動生成過程

あらせ衛星と Van Allen Probes 衛星のプラズマ波動観測データのデータ解析によって、近地球において、背景のイオン組成比が変化することによって、Equatorial Noise と呼ばれる X モードのホイッスラーモード波動が、EMIC 波動へと変換され、プラズマ圏 EMIC 波動の起源の一つとなることを見出した。このモード変換過程は、質量電荷比 (M/Q) が 2 のイオンの割合が、地球に近い場所で増加することによって発生する。Equatorial Noise および EMIC 波動の周波数スペクトルにみられる特性周波数を解析することによって、この M/Q=2 イオンの存在比を同定したところ、最大 10% 程度の割合で存在することが明らかになった。

EMIC 波による放射線帯電子消失過程の研究

EMIC 波動は、磁気圏に存在するイオンによって励起される電磁波であり、MeV 電子に対して効率的なピッチ角散乱を起こすことが理論的に知られている。EMIC 波動の活発化に伴い、MeV 電子の降り込みが観測された事例が報告され、仮説は実証されているが、放射線帯電子変動への影響を議論した研究は極めて少ない。本研究では、JAXA のあらせ衛星と NASA の Van Allen Probes に加え、本研究所が展開する地上誘導磁力計ネットワークにより得られたデータを用いて、EMIC 波動が捕捉された MeV 電子を数十分以内に消失させることを示した。本研究で見積もられた消失時定数は、先行研究に比べ最も速いものである。

噴出型プロミネンス内部速度場変化に関するシミュレーション研究

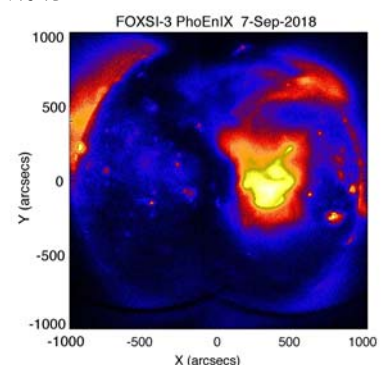
近年、飛騨天文台 SMART/SDDI の観測により、プロミネンス内部の速度分散が噴出前に上昇することが確認され、噴出予測スキームへの応用が期待されている (Seki et al., 2017)。この現象を物理的に解明するため、放射冷却と熱伝導を考慮した 3 次元磁気流体シミュレーションを実施した。本シミュレーションでは、先行研究で提案されている理論モデル (Kusano et al., 2012; Kaneko & Yokoyama, 2018) を組み合わせ、複雑な速度場を持つプロミネンスの形成および噴出を再現した。結果、観測された速度分散の上昇を定量的に再現することに成功し、速度分散の上昇は磁場の力に起因することが分かった。プロミネンス内部のプラズマ流が局所的に電流を強め、磁気流体不安定性を駆動しやすくする可能性がある。

太陽周期活動に関する数値的研究

太陽周期活動に関する数値的な研究を行った。太陽表面磁束輸送 (SFT) モデルは周期活動の予測に度々利用されるモデルであるが、表面付近で大域的磁場が鉛直向きであるという大きな仮定を持つ。その妥当性を調査するため、3 次元磁気流体計算を行い、鉛直方向の乱流輸送係数を直接評価した。その結果、SFT モデルの妥当性を支持する結果を得た。次に、黒点の非対称性が極磁場に与える影響を SFT モデルを利用して調査した。先行黒点と後行黒点の空間サイズは非対称であることが知られているが、その極磁場や周期活動予測に対する影響は知られていなかった。研究の結果、黒点サイズの非対称性は極磁場の形成を大きく妨げることが分かった。

観測ロケット実験 FOXSI-3 による世界初の太陽軟 X 線撮像分光観測に成功

2018 年 9 月 8 日 (現地時間 9 月 7 日)、米国ニューメキシコ州ホワイトサンズ・ロケット実験場より、太陽 X 線観測ロケット実験 Focusing Optics Solar X-ray Imager の 3 号機 (FOXSI-3) の打ち上げに成功した。FOXSI は X 線集光光学系により高感度の撮像分光観測を実現する国際共同ロケット実験であり、日本チームは焦点面検出器を担当している。FOXSI-3 は約 15 分間の弾道飛行中に、地球大気圏外から太陽を予定通り約 6 分間観測した。FOXSI-3 には、本研究所の石川真之介研究員が中心となって開発した高速 X 線 CMOS カメラが新たに搭載され、0.5–5 キロ電子ボルトの軟 X 線帯域において世界初の太陽撮像分光観測を実現した。このデータは従来の観測データと比べて質的に新しく、コロナの物理状態を詳細に調べることが可能となった。



FOXSI-3 によって取得された太陽の軟 X 線画像。単に画像が得られたのみでなく、画像上の各点で X 線スペクトルを作成することができる。

野辺山電波ヘリオグラフと中国の新太陽電波望遠鏡の国際共同研究

近年、中国で建設され、観測が開始された新太陽電波望遠鏡 (MUSER) と野辺山電波ヘリオグラフの共同研究が本格的に始動した。日本と中国の研究者がお互いに相手国を訪問し、装置の詳細やデータ解析手法を学び、まずは、これら 2 つの装置で同時観測された太陽フレアのデータ解析を始めた。また、本研究所に MUSER のデータ解析環境を整える計画についても議論を重ねている。