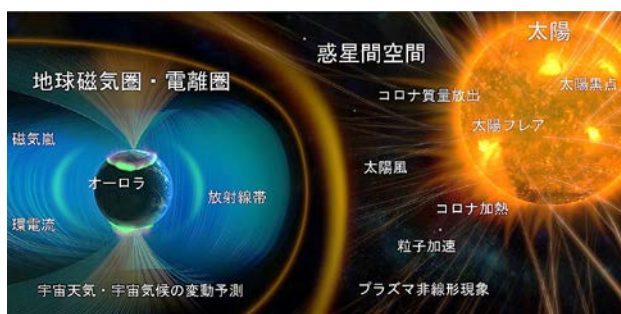


9-1. 基盤研究部門 | 総合解析研究部



総合解析研究部の研究テーマ・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

総合解析研究部の紹介

総合解析研究部（Division for Integrated Studies）では、太陽から地球までのエネルギーと物質の流れの解明と太陽地球環境の変動予測を目指します。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（太陽フレア、コロナ質量放出（coronal mass ejection: CME）、磁気嵐、オーロラなど）の解明とその発生予測につながる研究を推進すると共に、これらの変動現象が社会に及ぼす様々な影響を定量的に明らかにしていくことに重点をおいた研究を行っています。総合解析研究部に在籍する教員は、理学研究科あるいは工学研究科の協力講座教員として、大学院生の教育に関わっています。両研究科から配属された修士・博士学位取得を目指す大学院生に卒業研究のために配属された工学部生も合流し、一つの研究部の中で、文字通り理学と工学を融合させた研究教育活動を展開しています。2017年度は日本地球惑星科学連合2017年大会学生優秀発表賞（学生2名）、地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞（教員1名）などの実績を挙げました。

2017年度 総合解析研究部の主要な成果

1. 噴出する太陽磁気フラックスロープの非線形ダイナミクス

太陽から噴出する磁気フラックスロープ（螺旋状にねじれた磁力線群）のダイナミクスを数値的に調べた。コロナの磁場環境によっては、フラックスロープの不安定性の成長を阻む領域が理論的に予言されており、その領域ではフラックスロープの上昇は減速、あるいは抑制されると考えられてきた。しかし我々の結果は、その領域においてもフラックスロープは急激に加速され、その結果、コロナ質量放出へと成長する可能性を指摘した。詳細な解析から、フラックスロープの不安定性の成長だけではなく、磁気リコネクションとの非線形相互作用がフラックスロープの加速を促進させるのに重要であることを明らかにした。本研究結果は、Inoue et al. *Nature Communications*, 9, 174 (2018) にまとめられた。

2. 凝縮過程を含めたプロミネンス噴出メカニズムの数値的研究

太陽地球圏環境予測研究の一環として、コロナ質量放出の前駆現象であるプロミネンスの噴出を、熱伝導と放射冷却を考慮した磁気流体シミュレーションにより再現した。本研究では、プロミネンス形成モデル(Kaneko & Yokoyama, 2017) とフレアトリガモデル (Kusano et al., 2012) を組み合わせ、プロミネンスへの質量凝縮まで含めた噴出モデルの研究を行った。結果、質量凝縮に伴いコロナ内の運動量もプロミネンス内へ集積し、噴出の駆動源である電磁流体 (Magnetohydrodynamics: MHD) 不安定が励起されやすくなることが分かった。また、観測により噴出の前兆現象であることが示唆されているプロミネンス振動も、本シミュレーションで再現することができた。

3. 太陽面爆発の発生機構の解明とその予測に関する研究

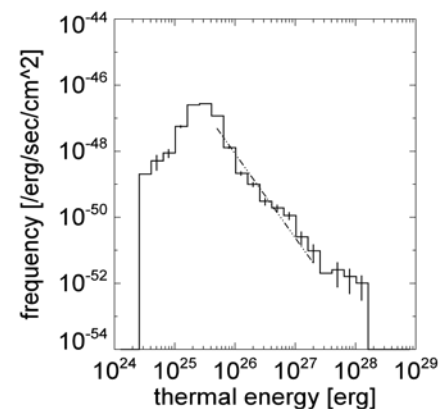
太陽フレアや CME などの太陽面爆発の発生条件の解明と新しい発生予測スキームの開発のため、活動領域 NOAA11158 の 3 次元磁場を SDO 衛星が観測した太陽面磁場データと非線形フォースフリー磁場モデルを用いて計算した。これにより、ダブルアーク不安定性の臨界パラメータの推定値である κ^* の時間変化を求めた。その結果、2 つの大型フレア発生の前に κ^* が一定値を超えて増加し、フレアの直後に急激に減少することを見出した。この結果は、ダブルアーク不安定性がフレア発生機構に重要な役割を果たすとする Ishiguro & Kusano (2017) の結果を支持すると共に、新たなフレア発生予測の可能性を示すものである。

4. 活動領域上空の磁場構造とフレア活動度の関係についての統計的研究

活動領域上空の磁場の構造を知ることは太陽フレアの物理を理解するうえで重要であるが、コロナ中の磁場は直接観測ができないため、そこでのエネルギーの蓄積とフレア発生の関係については未だ十分に理解されていない。我々は 2010 年 6 月から 2016 年 2 月までの期間に出現した活動領域について、太陽表面磁場の観測データと Non-linear force free field model を用いて上空の磁力線構造を再構築し、磁場エネルギーの蓄積とフレア活動度の関係を統計的に調査した。解析から、フレア活動度は活動領域上空の磁場の余剰エネルギーよりも磁気ねじれが大きい磁力線の量との相関がよいことが分かった。また、100 以上の活動領域についてコロナ磁場パラメータのカatalog作製も行った。

5. Hinode/XRT を用いた活動領域マイクロフレアの統計解析

太陽コロナがなぜ太陽表面より高温か、というコロナ加熱問題に対し、微小フレアによる加熱という観点から観測的研究を行った。まず、Hinode 衛星搭載の X 線望遠鏡のデータを用い、太陽活動領域で起きる多数の微小フレアを自動検出することに成功した。そして、これまでに無い低いエネルギー域において、エネルギー頻度分布がべき乗型 ($dN/dE = A \times E^{-\alpha}$) をしており、そのべき指数 α が 2 より大きいという結果を得た。これは、この頻度分布がさらに低いエネルギー域まで延びているとすると、微小フレアによってコロナ加熱を説明できる可能性を示した新しい研究成果である。



Hinode/XRT により検出された活動領域マイクロフレアのエネルギー頻度分布。

6. 波動加熱で維持されたコロナループの熱応答

MHD の動的な加熱によって維持されているコロナループの熱応答を調べるため、3 次元 MHD シミュレーションを行った。ループの足元にランダムな力を加え続けると、MHD 波動が励起され上空に磁気・運動エネルギーを運ぶようになる。運ばれたエネルギーが熱エネルギーに変換されることで、高温のコロナが自然に形成されることを実証した。励起された波動が上空に伝播するにしたがって非線形化することで、より小さな空間構造へとエネルギーをカスケードされる。コロナ中ではアルフベン波の衝突によって、局所的で間欠的な温度上昇が発生する。これにより波動加熱機構によってもナノフレア的な加熱が起こることを実証できた。

7. 太陽彩層ジェットの領域依存性に関する数値的研究

スピキュールに代表される太陽彩層における微小ジェット構造の領域依存性に関して検討を行った。輻射輸送方程式と磁気流体方程式を結合させた大気モデルを利用し、光球磁場とコロナ温度をパラメータとすることで、太陽の活動領域と静穏領域をそれぞれ模倣した数値計算を実施した。その結果、観測させる彩層ジェットの領域依存性と定量的に整合的な結果を得た。その起源を調査した所、彩層ジェットがアルフベン波の非線形発展によって駆動すると考えると、シミュレーションのパラメータ依存性をよく説明できることを発見した。この結果は観測されるスピキュールの起源の候補として、アルフベン波モデルが有力な候補であることを示す。

8. 次期太陽周期活動予測研究

太陽極域磁場から次期太陽周期活動を予測するため、表面磁束輸送モデル（SFT モデル）を用いて極域磁場強度を求めるモデルの開発に成功し、予測計算を実施した。その結果、極小期の約 3 年前から極磁場の予測が可能であることを示すと共に、次期サイクルは、現サイクルに比べて数十%弱くなるという予測結果を得た（Iijima et al., 2017）。さらなる予測精度の向上を目指して、太陽磁場精密観測データの詳細解析を行い、SFT モデルに必要な太陽表面の速度場の長期変動や磁場依存性など興味深い結果が得られた。

9. オーロラ爆発の衛星画像と全天画像による同時観測

全天画像でのオーロラサブストームの開始（オンセット）は、経度方向に長い「initial brightening」と、その数分後に始まる、極側に拡大する「オーロラ爆発」との 2 つのステージを持つと考えられている Polar 衛星がフィルタを固定した高時間分解観測（37 秒毎）を行っていた期間を調べた結果、オーロラ爆発は衛星画像と全天画像で同時に観測されていたが、その 2 分前に開始した initial brightening は全天画像でのみ観測されていた。本研究では高時間分解の衛星画像を用いたため、衛星画像で initial brightening が観測されなかった原因は空間分解能にあると考えられる。

10. MMS 衛星データを用いた昼間側磁気リコネクションの研究

地球の磁気圏界面での磁気リコネクションについて、磁気中性線近傍の構造と物理過程を MMS 衛星のデータに 2 流体方程式を適用することによって解析を行った。その結果、磁気中性線を取り巻くイオン磁気拡散領域において、波動と電子の相互作用の結果生じる衝突項の大きさと、低域混成波の強度の間に強い相関関係のあることが示された。このことは、励起波動によって異常抵抗が発生していることを強く示唆する。

11. ERG（あらせ）衛星による電子のピッチ角散乱の実証

2016 年 12 月に打ちあがった ERG 衛星は、従来の衛星よりも角度分解能の高い電子観測器を搭載している。2017 年 3 月に ERG 衛星と北米の地上光学観測との同時観測が成立しており、地上では活発な脈動オーロラが観測されていた。このとき、ERG 衛星は磁気圏赤道面付近において、強いコーラス波動を観測しており、このコーラス波動の強度の変動にあわせて、ロスコーンの内部の電子のフラックスが変調していることが発見された。宇宙空間でプラズマ波動によって電子がロスコーンに降り込むことは予想されていたが、観測的に実証されたのは、本研究が初めてである。また、このロスコーンの中のフラックスの変調は、地上で観測された脈動オーロラの強度変調ときわめてよく一致することが明らかになり、脈動オーロラを起こす電子の変調過程の特定にも成功した。以上の結果は、ERG 初の科学成果論文として Nature に報告された。

12. Sudden Commencement 時の放射線帯電子加速

本研究では磁気圏グローバル MHD シミュレーションとテスト粒子シミュレーションの連成計算によって、Sudden Commencement（SC）時の放射線帯電子加速の詳細を調べた。その結果、SC によって励起する Fast mode 波とドリフトする電子との相互作用の結果、MeV 帯の広いエネルギー帯にわたって電子の加速が起こることが明らかになるとともに、被加速電子の最低エネルギーの条件を新たに導出した。また、この結果は ERG 衛星や Van Allen Probes 衛星による観測結果と整合するものであった。

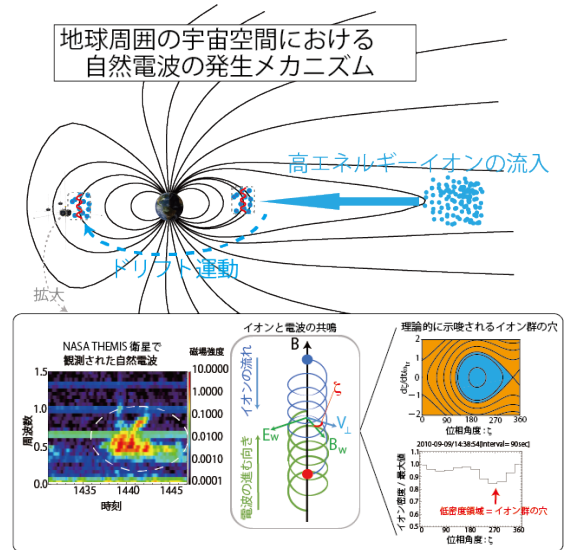
13. ERG 衛星で観測される磁場変動を伴わない高エネルギー電子の準周期的な変動

磁気圏に広範囲でおきる ULF 波動は放射線帯を形成する高エネルギー電子に影響を及ぼす。ULF に影響を受けた高エネルギー電子の空間・時間発展を調べるため、ERG 衛星、RBSP 衛星がそれぞれ朝・夕側に位置しているときの、高エネルギー電子フラックスに観測される周期的な変動について調べた。電子フラックスの dispersion 構造から変動

の生成領域を推定したところ、昼-夕方側に位置することが分かった。また、昼-夕側には ULF が観測されるが、朝側では ULF は観測されない。以上より、昼-夕側で局所的におきた ULF が、電子フラックスを変動させた後に、東方向にドリフトし朝側に到達することを明らかにした。

14. 衛星データによる EMIC 波の非線形相互作用の実証

電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動による非線形相互作用は磁気圏における広いエネルギー帯のイオン、相対論的な電子に対して影響を及ぼすと考えられている。この非線形相互作用を、波の電磁場と粒子の速度の位相差情報から直接計測する手法を開発した。THEMIS 衛星のデータから非線形相互作用の実証を試みた。イオンの位相角分布の歪み、エネルギー授受を示す電場とイオン速度の内積、および周波数変化を示す磁場とイオン速度の内積を波動励起中の短い時間内で得ることが可能となった。これにより、イオンのエネルギーが波動の成長に寄与していること、理論的に示唆されているメカニズムによって周波数が上昇していることが実証できた。



上：地球内部磁気圏の概略図。
下：左から THEMIS 衛星で観測された電磁イオンサイクロトロン波動のスペクトル、イオンと波動のサイクロトロン共鳴の概略図、および理論的に示唆されるプロトンホール(イオン群の穴)の様子。

15. ERG衛星によって観測された EMIC 波動の初期統計解析

EMIC 波動は、内部磁気圏における波動粒子相互作用を担う重要なプラズマ波動の一種である。本研究では打ち上げ後、9 ヶ月間の ERG 衛星による観測データを用いて EMIC 波動の励起・伝搬特性について統計解析を行った。プラズマ波動観測器(PWE)では、スペクトル構造の特徴が異なる 2 種類の EMIC 波動がしばしば観測されており、それらの空間分布が大きく異なることを明らかにした。伝搬特性が磁気赤道域から低・中緯度帯に及ぶ波動の分布解明は、ERG 衛星の独特な軌道を生かした解析といえる。

16. レイリー・テイラー不安定性における非 MHD 効果

無衝突プラズマ中のレイリー・テイラー不安定性 (RTI) の非線形発展について、実空間 2 次元・速度空間 2 次元の Vlasov シミュレーションにより研究を行った。MHD スケールの RTI は、MHD シミュレーションで見られるように重力に平行な軸に対称に発達する。一方でイオン慣性長スケールの RTI は、重力に平行な軸に非対称に発達する。これは、RTI で生じる指構造の先端において Hall 効果により反磁性電流に非対称な $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ の力が発生するのが原因である。イオンジャイロ半径スケールの RTI では、小スケールの RTI が二次的不安定として成長する。この二次的 RTI では、電子の応力項が Hall 電場と強く結びついており、また熱輸送フラックスも支配的であった。一方で、これまでの流体理論で考えられてきたようなイオンの応力項による粘性効果はほとんど寄与しないことが明らかとなった。