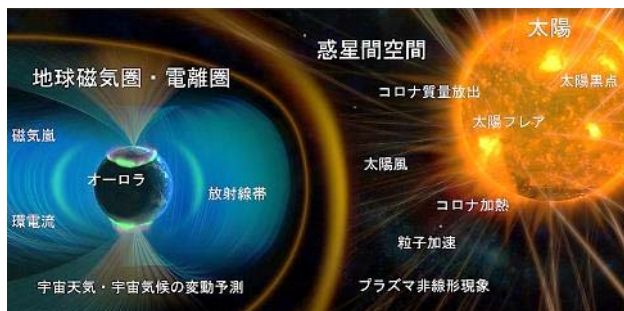


9-1. 基盤研究部門 | 総合解析研究部



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、人工衛星や地上観測によって得られたデータの解析と、コンピュータシミュレーション/モデリングを組み合わせた太陽地球環境システムの総合解析研究を行っています。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。

総合解析研究部に所属する教員は、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。2016年度は地球電磁気・地球惑星圏学会学生発表賞 (オーロラメダル)、日本地球惑星科学連合 2016 年大会学生優秀発表賞、名古屋大学学術奨励賞、IEEE Excellent Student Award の受賞などの実績を挙げました。

2016 年度 総合解析研究部の主要な成果

1. 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機構を理論・シミュレーション・観測の比較を通して探る総合解析研究を進めた。第 1 に、電流を伴う 2 つの磁気ループのリコネクション (繋ぎ替え) で生じるダブルアーク型電流ループの安定性を調べることで、磁力線のねじれと繋ぎ替わった磁束の相対量のからなる新たなパラメタ κ が太陽面爆発の原因となる不安定性に関する臨界パラメタとなることを理論的に求めた。さらに計算機シミュレーションの再解析を通して、 κ パラメタの有効性を検証した。また、太陽面磁場観測データに基づく非線形フォースフリー (NLFF) 磁場を使って κ パラメタの上限値を求めることで、 κ パラメタによるフレア発生予測の可能性を探る研究を行った。このほか、ビッグベア天文台 (アメリカ) との共同研究として、世界最大の太陽望遠鏡ニューソーラーテレスコープを使い、太陽フレアの前兆現象の詳細観測を行なうことで、反極性磁場がフレア発生のトリガとなるとするモデルの観測的証拠を得た。

2. 磁気流体シミュレーションを用いた太陽風速度モデルの評価およびコロナ質量放出形成過程における磁場構造の変動の研究

地球に到来する太陽風の変動や CME は宇宙天気擾乱の主要因であり、それらの到来予測は宇宙天気予報にとって非常に重要な課題である。近年我々のグループでは太陽風・CME の伝搬到来の予測を可能にするシステム SUSANOO を開発した。SUSANOO では境界条件として用いる太陽風速度は、太陽光球磁場と過去の観測から得られたモデルを用い

て計算する。本研究では太陽風グループによって考案された新しいモデルに置き換えた時の結果を、太陽風その場観測と比較して評価した。また CME がコロナ領域で太陽風中を伝搬するときの磁場構造の変化と CME の初期パラメータの関係を調べ、CME 内部の磁場構造の回転は CME が通過している領域の背景磁場強度に比例していることが分かった。

3. 次期太陽周期活動予測研究

太陽活動は約 11 年の周期で変動し、その変動に伴い太陽の大局的な磁場構造が変化することが知られている。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ータの観測精度の向上を行っている。本年度は、開発した表面磁束輸送モデルを用いて、観測される太陽光球付近のマグネトグラムを初期条件として極磁場の予測可能性を検証した。その結果、極小期の約 3 年前から新たな浮上磁場が、ほぼダイポールモーメントに寄与しなくなることを発見した。これにより、浮上磁場の詳細なモデリングに依存しない新たな予測スキームを提案することができた。予測された極磁場を用いて次期太陽周期の振幅を予測した結果、次期サイクルは現サイクルに比べて数十%程度弱くなるという結果が得られた。現在、この予測結果を論文にまとめるとともに、さらなる予測精度の向上を目指して、観測のデータ解析なども含めて検討している。

4. 国際コンソーシアムによる野辺山電波ヘリオグラフの運用

2015 年度より国際コンソーシアムによる野辺山電波ヘリオグラフの科学運用が開始された (<https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON/>参照)。2 年目の 2016 年度も装置自体は大きな問題もなく運用された。リモートサイトからの web を介した運用システムは、順調に動作しており、前年度より 1 ケ国増えて、アメリカ、イギリス、中国、韓国、ロシア、ドイツ、日本の 7 ケ国の研究者 (計 30 名) が運用に参加した。現在データは、国立天文台および本研究所で保存・管理・公開が行われており、国際的な研究に広く活用されている。

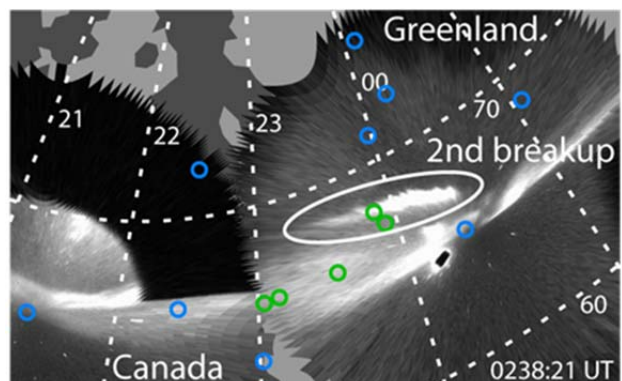
5. THEMIS 衛星データを用いたサブストームの発展条件に関する研究

大学院生と共同で THEMIS 衛星 (アメリカ) で取得されたデータを、サブストームと擬似サブストームが発生した時に分けて解析した。その結果、両者において近尾部で磁気リコネクションが発生することが明らかになった。しかし、サブストームの発生時は、地球半径の 7-8 倍程度の夜側磁気圏のプラズマ圧が擬似サブストームの発生時に比べて 1.4 倍ほど大きく、地球近傍の磁気圏のプラズマ圧の空間勾配に起因するバルーニング不安定などのプラズマ不安定性が、サブストームに発展するか否かを分ける鍵を握っていることが解明された。

6. 磁気リコネクションの尾部方向への階段状移動：

THEMIS によるオーロラサブストームの観測

オーロラ爆発が 10 分間隔で生じ、極方向へ階段状に発達する現象について事例解析を行った。THEMIS 編隊衛星の磁気圏尾部観測と、北アメリカ、グリーンランドの地上オーロラ全天観測を用いた。全天カメラでオーロラが時間空間的に階段状に極方向へ拡大した時、尾部側 24 地球半径において、THEMIS-1 衛星は、プラズマ流が尾部向きから太陽向きへ 10 分程度のタイムスケールで反転し、さらに 10 分後に強まることを観測した。この観測などを、オーロラ観測と比較することにより、オーロラが階段状に拡大する時、磁気リコネクションの位置が尾部側に階段状にジャンプしていることを見いだした。



カナダとグリーンランドにおける地上全天オーロラ観測。2 番目のオーロラ爆発は、最初のオーロラ爆発よりも高緯度で生じた。

7. 実時間データ同化によりオーロラ活動指数の予測

オーロラ活動指数 (AU index) に予測するための SUSANOO-SW の計算する太陽風データを入力とするシステムを新たに構築した。システムでは予測精度の向上を図るために、ハインドキャスト、フォアキャストの2ステージの構成とし、ハインドキャストステージにおいて粒子フィルタにもとづくデータ同化を行うことで、AU 指数を高精度で予測するためのパラメータの推定を行い、そのパラメータを用いてフォアキャストステージでの予測計算を行う。開発したシステムは、現在 SUSANOO システムで運用されており、AU 指数の予測を日々行っている。

8. 電離圏レーダーを用いた磁気嵐中の大規模電離圏 ULF 波に関する特性に関する研究

2015 年 3 月に発生した大規模な磁気嵐中に、国際的な電離圏短波レーダー網である Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) によって北アメリカから太平洋に及ぶ広い領域で、電離圏プラズマ対流に重畳された mHz 帯の Ultra Low Frequency (ULF) 波動が観測された。詳細な解析の結果、経度幅 90° 以上にわたって西向きに伝搬しており、また波動の伝搬速度・空間構造から、内部磁気圏中をドリフトしている数十 keV のエネルギーを持つイオンと電磁場との相互作用により波動が励起されているということが示唆された。

9. 地球内部磁気圏における酸素圧増加現象に関する観測的研究

磁気嵐発生時に地球内部磁気圏で圧力が水素イオンよりも増加する酸素イオンについて、Van Allen Probes 衛星による直接観測で得られたデータを用いて、圧力に寄与する高エネルギー (10–1000 keV 酸素イオンの生成過程の解明を目指している。複数の事例解析を行った結果、酸素イオン圧増加は突発的かつ局所的であることが再確認された一方で、磁気嵐の前半に酸素/水素圧力比が 1 に達する場合があること、磁気嵐前に内部磁気圏に供給された中エネルギー (0.1–10 keV) 酸素イオンが酸素圧増加の源になっている可能性があることが示された。磁気嵐発生前や初期の電離圏からの供給が重要な役割を担っていることが示唆されるため、原因となる磁気圏急圧縮やサブストーム活動との関連性を調査している。

10. 地球内部磁気圏における高エネルギーイオンと長周期磁場変動の相互作用に関する観測的研究

磁気嵐発生時にプラズマシートから内部磁気圏に輸送される高エネルギーイオンの輸送特性を調べるため、Van Allen Probes 衛星データを用いた観測的研究を行った。2013 年 4 月 23 日の磁気嵐が最大となる時間帯で、高エネルギー酸素イオン (数百 keV) が同じ μ 値 (第一断熱不変量) の水素イオンよりも地球側に輸送されており、同時に長周期 (<50 mHz、ポロイダル) 磁場変動が Van Allen Probes で観測され、またその Footprint 付近にあたる北極地磁気観測網 (IMAGE チェーン) でも同周波数帯の地磁気脈動が観測された。地上観測から見積もられた波数 (5–10) から、0.3–1.0 keV/nT では酸素イオンのみがドリフト・バウンス共鳴を受けることが分かった。この共鳴が酸素イオンの選択的輸送の原因と考えられる。

11. 磁気嵐時におけるコーラス波動による放射線帯電子加速・消失の関係性とフラックス変動への寄与に関する研究

近年の Van Allen Probes 衛星の観測により、コーラス波動による MeV 帯電子の内部加速が、磁気嵐時の放射線帯外帯再形成に重要な役割を果たしていることが指摘されている。一方で、コーラス波動によるピッチ角散乱が引き起こす降下電子生成過程は、放射線帯に存在する高エネルギー電子の消失過程の一つとされており、低高度衛星で観測される放射線帯電子のバースト状降り込み (マイクロバースト) は、高緯度まで伝搬したコーラスによるピッチ角散乱によって起こると考えられている。そこで、磁気嵐時の放射線帯電子変動に対して、マイクロバーストによる放射線帯電子消失が担う役割を調べるために、SAMPEX と Van Allen Probes 衛星のデータを用いて放射線帯電子加速と消失のバランスに関する事例解析を行った。その結果、500 keV から数 MeV 帯の放射線帯電子が増加するのに対応して 1 MeV 帯の電子の降り込みが増大していることが分かった。このことから、コーラス波動による加速は大気への降り

込みによる消失に比べて極めて効率的であり、コーラスとの波動粒子相互作用の結果、正味として放射線帯電子は増加する傾向にあることが示唆された。また、1 MeV 以下の電子が増加するが 1 MeV 以上では顕著な増加が見られない場合には、1 MeV 電子の降り込みが観測されないことから、マイクロバーストを引き起こすことができるコーラス波動が、500 keV から数 MeV にわたる広いエネルギー帯の放射線帯電子を加速されることが示唆された。

12. 多点衛星によるその場観測データを用いた波動ベクトル推定

フォアショックやマグネットシースにおける低周波波動の波動ベクトルを直接推定するために、Cluster や Magnetospheric Multiscale (MMS) といった多点衛星のその場観測データを用いた wave telescope 手法の検証とパラメータの最適化を行った。各パラメータに対する推定精度の依存性を、疑似観測データを用いて明らかにした。相互相関スペクトル密度行列の平均時間や拡張 MUSIC の n 値といったパラメータは、波の持続時間に適したものを選ぶ必要があることを示した。実際の MMS の観測データの解析にも着手しており、マグネットシースにおけるイオンサイクロトロン波や地磁気脈動といった特徴的な低周波波動の周波数-波数ベクトル空間の分布の傾向を明らかにした。

13. ERG 衛星による内部磁気圏プラズマ波動観測に向けた研究

地球をトラス状に囲む放射線帯のダイナミクスを明らかにするため、2016 年 12 月に ERG (あらせ) 衛星が打ち上げられ、これから定常観測が本格化しようとしている。「コーラス波動」や「電磁イオンサイクロトロン (electromagnetic ion cyclotron : EMIC) 波動」と呼ばれるプラズマ波動現象は、放射線帯の消長に重要な役割を持つ可能性が示唆されており、ERG に搭載されたプラズマ波動観測器 (Plasma Wave Experiment : PWE) はその観測を主目的としている。本研究所では複数名がサイエンスとエンジニアリングの両方の観点から PWE の開発・運用に携わっており、今年度は軌道上での初期観測データの取得と、定常運用に向けた観測計画の立案を実施した。

14. 電磁イオンサイクロトロンフォーリングトーン放射の再現

内部磁気圏において、周波数上昇・下降を起こす EMIC 放射がしばしば観測されている。本研究では非線形波動粒子相互作用によって周波数が降下する EMIC 放射 (フォーリングトーン放射) に関するイオン・ハイブリッドシミュレーションを行った。先にシミュレーション空間に生成される静電場によって背景の低エネルギーイオンの分布を強く歪める力が働き、後から励起する EMIC 波動が、空間的に歪められて励起され、細かな空間パケット構造の集合として現れる。これらのパケットの空間長は EMIC の一波長程度しかないため、高エネルギープロトンとの相互作用で、波のフレームにおいて相対的にサイクロトロン補足されるものが強く見える。非線形成長理論において、強く粒子捕捉が起きた場合には周波数下降を起こす共鳴電流が現れ、その後周波数下降しながら非線形成長を起こす。以上のプロセスによって、EMIC フォーリングトーン放射がシミュレーション空間内で励起された。強い非線形相互作用を起こした高エネルギーイオンは、速度分布関数上においてプロトンヒルと呼ばれる分布関数上の膨らみとして現れる。EMIC 波の共鳴速度の増加に伴い、このヒルが移動する様子が再現された。

15. MHD スケールのレイリー・テイラー不安定性に関する運動論シミュレーション

レイリー・テイラー不安定性の非線形発展について、2次元プラソフシミュレーションにより研究を行った。磁気流体力学 (MHD) スケールのレイリー・テイラー不安定性 (Rayleigh-Taylor instability) は、重力と平行な軸に対して対称に成長することが、これまでの流体シミュレーションにより分かっており、運動論シミュレーションにおいても同様の結果が得られた。一方、非線形発展で形成した電流層で成長する 2 次的不安定性は、重力と平行な軸に対して非対称に成長することが分かった。この不安定性は、速度場の渦度と磁場との内積の符号によって成長が制御されている電子スケールのケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性であることを示唆した。