

新学術領域「太陽地球圏環境予測」我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成

PSTEP Newsletter

No.16 最終号
Mar.2020

INDEX

領域代表挨拶：草野 完也（名古屋大学）	p. 1
計画研究 代表挨拶（AO1-AO4）	p. 2
【計画研究：総括報告】	
AO1：予報システム班 / 石井 守（情報通信研究機構）	pp.3-4
AO2：太陽嵐班 / 一本 潔（京都大学）	pp.5-6
AO3：地球電磁気班 / 三好 由純（名古屋大学）	pp.7-8
AO4：周期活動班 / 余田 成男（京都大学）	pp.9-10
【会議報告】	
PSTEP-4 & ISEE-2 国際シンポジウムを実施	pp.11-12
【会議報告】	
PSTEP・ISEE 研究集会「第4回太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」	p. 13
Q&A 宇宙と地球のなぜ？どうして？「これまでで一番大きかった宇宙天気現象ではどんなことがあったの？」	p. 13
PSTEP Newsletter 編集後記	p. 14

Project for
Solar-Terrestrial
Environment Prediction

領域代表挨拶

草野 完也 Kanya Kusano

名古屋大学 宇宙地球環境研究所
所長・教授



本領域もついに終了を迎えました。この5年間に太陽地球環境とその社会影響の予測を大きく発展させることができたことを、領域代表としてとてもうれしく思います。本領域を大きな成功に導いて頂いた関係者のみなさんの献身的な努力と貢献に感謝と敬意を表します。

本領域の検討は、2013年夏に名古屋大学で開催されたワークショップ「宇宙天気予測可能性と将来展望」を契機として開始されました。当初から本領域では、基礎科学と社会に役立つ宇宙天気予報を相乗的に発展させることを基本理念としてきました。このワークショップを私は以下のようにまとめています。「宇宙天気・宇宙気候は予測課題の宝庫であり、複雑力学系の優れた研究課題である。それゆえ、operationとscienceの間に依然として横たわる『死の谷』を埋め、それらの相乗的發展を目指すべきである。そのためには、予測性を客観的かつ定量的に評価し、何故予測できないかを真剣に考える必要がある。」この思想は本領域を継続して支えてきたものであり、私自身の研究の指針でもあり続けています。

本領域の研究期間である2015年からの5年間は太陽地球環境の研究にとってとても重要な出来事が数多く起きました。中でも2017年9月6日（偶然にも本領域の中間評価ヒアリングの前日！）に巨大太陽フレアが発生し、GPSなどに影響が現れたことは本領域にとってとても重要な出来事でした。我が国の太陽観測衛星「ひので」をはじめ多くの観測装置がこのイベントのデータ取得に成功したことは、本領域研究の推進に大きな意味を持ちました。特に、本領域が開発した太陽フレア理論予測モデル「Kスキーム」の優れた予測能力をこのフレアによって実証できたことは、従来の経験的予測を超える新たな物理予測を切り拓くエポックとなりました。さらにこのフレアとその社会影響は日本のみならず世界で大きく報

道され、宇宙天気予報の重要性に対する社会的認識をこれまでになく高める役割を果たしました。

2016年には「あらせ（ERG）衛星」の打ち上げが成功し、それによって本領域の地球放射線帯変動予測研究は飛躍的に進展しました。また、我が国で初めて実際の電力網の地磁気誘導電流（GIC）を予測するモデルを開発し、電力会社とも協力して実証的研究を進めることができました。さらに、太陽フレア時の航空機被曝をリアルタイムで推定する警報システムWASAVIESの開発と運用の開始、全大気圏電離圏結合モデルGAIAを用いた赤道プラズマバブルの発生予測の実証、静止軌道衛星のリアルタイム帯電リスク評価システムの開発、データ駆動型シミュレーションによる次期太陽周期活動の予測など、（紙面の都合でとても書ききれませんが）本当に数多くの研究成果を生み出すことができました。

本領域では活発な国際共同研究も展開してきました。4回の国際シンポジウムを開催すると共に、欧州宇宙天気会議での独自セッションの実施、数多くの国際ワークショップと共同研究を実現しました。それによって宇宙天気研究における我が国のプレゼンスを着実に高めることができたと考えています。

本領域を通して天文学、地球科学、社会工学など幅広い研究者が真に協力し、新しい学術を切り拓くことができたことは、我が国の太陽地球系科学の歴史に大きな役割を果たすものになると信じています。本領域が爽やかな真夏の北海道で実施した「PSTEPサマースクール陸別2017」では100名を超える様々な分野の大学院生と若手研究者が一堂に会し、熱い議論を展開しました。その参加者をはじめ本領域に参加された多くの若いみなさんが、本領域が蒔いた種を大きく育て花開かせてくれることを願っています。

本領域を支えていただいた全ての皆様に改めて心から感謝いたします。

計画研究 代表挨拶

A01 予報システム班 / 石井 守（情報通信研究機構）

PSTEP 期間中の 5 年間は、宇宙天気予報の大きな転換点であったと後世から認められる時期だったと思います。特に PSTEP 中間評価ヒアリングの直前に発生した X9.3 フレアは多くの報道がなされ、宇宙天気についての人々の関心を集めました。PSTEP によって日本の総力を挙げて開発されてきた「電波伝搬シミュレータ HF-START」や「航空機被ばく被害推定システム WASAVIES」等の情報提供システムが公開できたのは正に時機を得た活動でした。NICT の宇宙天気予報業務も 24 時間運用、国際民間航空機関（ICAO）へのサービス開始など新たな局面を迎えつつあり、PSTEP で培ったネットワークを今後とも生かしていきたいと思います。草野先生をはじめ諸先生方、また名古屋大学のスタッフの方々には、これまで支えていただき有難うございました。心から御礼申し上げます。



A02 太陽嵐班 / 一本 潔（京都大学）

PSTEP の 5 年間、A02 班は観測チームとモデルチームが一緒になって、太陽面爆発の発生から地球に到来する太陽嵐の予測手法の研究に取り組んできました。国内の関連グループが 1 つの目標に向かって継続的に顔を合わせ議論できたことは、太陽関連分野の宇宙天気研究にとって大変有意義であったと思います。そして、予報システム班 A01 や地球電磁気圏班 A03 との連携で、宇宙天気予報の社会的ニーズ等について共有できたことは、私たちの研究に新しい視点をもたらしてくれるものでした。当初の目標をほぼ達成できたことは大変うれしい限りです。私の怠慢でやり残したことも多々ありますが、PSTEP で得た資産は必ず次の時代に生かされていくものと確信しています。最後に草野領域代表はじめ、名大のみなさまには大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。



A03 地球電磁気班 / 三好 由純（名古屋大学）

地球電磁気圏班では、太陽、太陽風がジオスペースに作り出す変動過程において、特に私たちの生活にも影響が深い 3 つの事象：放射線帯、電離圏、地磁気誘導電流に焦点を当てて研究を進めてまいりました。多くの難しい課題があったにも関わらず、領域代表の草野先生のリーダーシップのもと、計画班のサブグループリーダーである塩川先生、大塚先生、海老原先生、研究員の松村さん、中村さん、メンバーのみなさんのたいへんな尽力によって、当初の想定を遥かに上回る成果を創出することができました。改めてみなさまにお礼を申し上げます。太陽活動は時々刻々と変化し、それに呼応してジオスペースの変動過程も変化します。次期太陽活動期がまさに始まろうとしています。継続した研究こそが、太陽地球系システムの理解に欠かせないものと思います。今後も本計画班で培った研究体制が継続していけるように、力を尽くしたいと思います。



A04 周期活動班 / 余田 成男（京都大学）

周期活動班では、太陽周期活動の予測と太陽活動変動の気候影響の二つに焦点を当て、太陽物理学から気象学まで様々な分野の研究者が連携して、最新の観測と先進的な数値シミュレーションを融合した研究を推進してきました。関係者のホームグラウンドとなる学会也多岐にわたり、この 5 年間はまさに多様性に富む計画班活動となりました。PSTEP の領域会議や国際会議では、他班も含めて様々なバックグラウンドの皆さんと議論し、まさに新たな学術的交流が生まれました。どうも有り難うございました。特に 2017 年陸別でのサマースクール合宿は、若い世代の皆さんともたつぷりとお話する機会があり、楽しい思い出として残っています。これで一区切りとなりますが、5 年間の活動で生まれた研究者の繋がりがこれからの新たな学術分野の発展の核となることを期待します。今後ともどうぞよろしくお願い致します。



【はじめに】

A01 班は、情報通信研究機構が行う宇宙天気予報業務を基盤として、A02-04 班の挙げる最新の成果を予報に展開するための活動を行ってきました。また、宇宙天気情報ユーザーのニーズを調査し、そのニーズにこたえるため「宇宙天気ユーザー協議会」を設立し、議論を重ねてきました。この議論の過程で、「電波伝搬」「衛星帯電」「航空機被ばく」について情報提供のためのコンテンツ開発を検討してきました。

また、ニーズ・シーズマッチングの議論の過程で、宇宙天気現象の社会影響について定量的に検討する必要性、特に我が国において起こりうる最大の宇宙天気現象がどの程度であり、その社会インパクトはどのようなものが考えられるのかを議論してきました。その結果は「宇宙天気ハザードマップ」として取りまとめてきました。それぞれの成果について、以下に報告します。

【電波伝搬】

電波伝搬サブグループでは、電離圏擾乱による長波・短波・マイクロ波を中心とした電波障害の予測推定のための電波伝搬シミュレータを開発し、通信、測位に対する影響を推定するとともに、観測に基づいた検証を行うことを基本目標としました。また発展目標として、A02～04 班の成果として出力される太陽・惑星空間・磁気圏及び電離圏超高層大気モデル・シミュレーションコードと結合し、電離圏電波伝搬障害予報システムの構築を目指すとしてしました。特に周波数帯としては電離

圏変動の影響を受けやすい HF 帯および L 帯にターゲットを絞り検討してきました。

HF 帯については、HF 電波伝搬シミュレータ“HF-START”を開発してきました。（図 1）基礎アルゴリズムとしてレイトレーシングを用い、様々な 3 次元電子密度分布に対応することができる点が特色です。特に、地上の電子基準点網で得られた電離圏情報をもとにトモグラフィ手法を用いて計算される電離圏リアルタイム 3 次元電子密度分布を使うことで、ユーザーは現状に近い形で電波伝搬状況を推定することができます。

HF-START は日本国内で短波放送波を用いた検証実験を行いその精度の検証を進めています。また、2019 年度の公開を目指して Web 版の構築を進めています。

L 帯については、現在フランスの CNES との共同研究のもとに開発を進めており、プラズマバブルの精細モデルの結果を用いることで、その衛星測位への影響を推定することができると期待しています。

【衛星帯電】

衛星帯電サブグループでは、衛星帯電に影響を与える静止軌道用環境予測モデルを開発し、その環境から典型的な衛星の表面、内部帯電の脅威レベルを提示するシステムを構築することを基本目標とし、その開発を進めてきました。

表面帯電については、磁気圏 MHD シミュレーションコードをより現実に近いものに改良および評価を行い、MUSCAT や SPIS 等の衛星帯電モデル

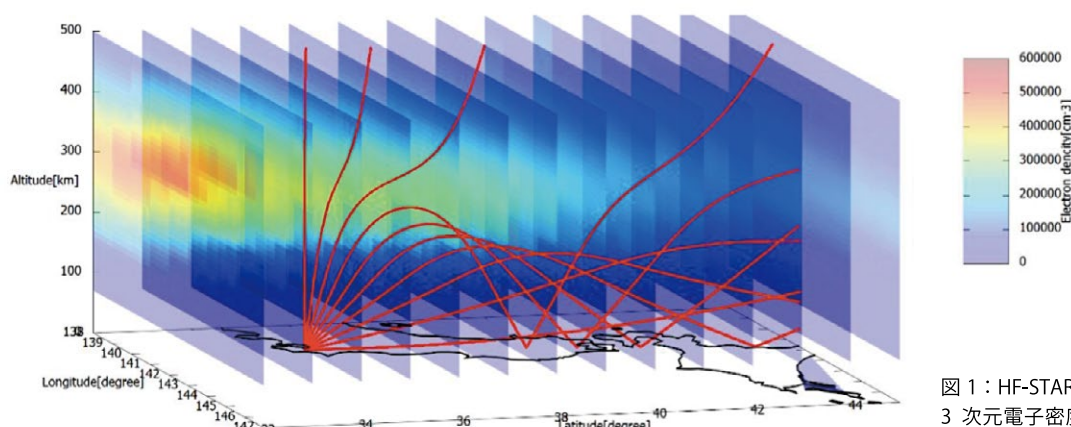


図 1：HF-START でリアルタイム 3 次元電子密度分布を用いた計算例

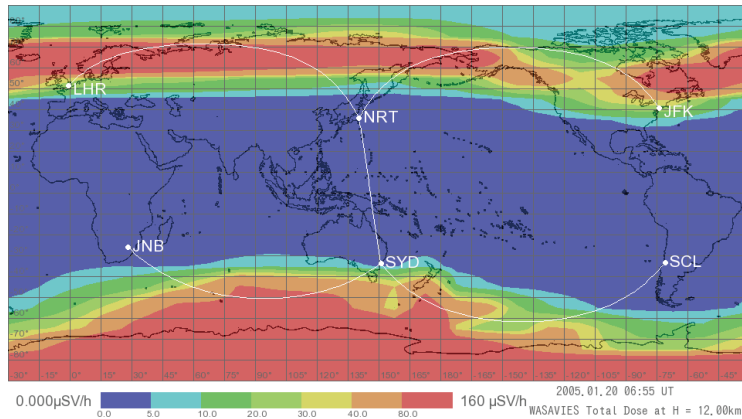


図 2：WASAVIES により推定された過去の大規模太陽フレア時の航空機高度における宇宙・太陽放射線による被ばく線量分布。白い線は被ばく線量を特に詳細に推定する航空路を表す。

への入力環境を算出可能にしました。同時に人工衛星の例として、みちびき初号機、Van Allen Probes の衛星形状モデルを作成し衛星表面帯電の評価を行ってきました。これらの結果から衛星帯電評価リアルタイム表示システムを開発中であり、今年度末には完成する見込みとなっています。

深部帯電については、ひまわりおよび DRTS 衛星について比較および評価を行うとともに DRTS について ESA モデルと環境予測値による深部帯電の再現性の評価を行ってきました。現在、ESA モデルによる再現性を高めるとともに単純なモデルによる深部帯電時系列 (Q,V) 情報提供システムの年度内の構築を目指しています。

【航空機被ばく】

航空機被ばくサブグループでは、基本目標として、高エネルギー太陽陽子イベント (SPE) が発生したときの航空機被ばく警報システムを開発し、宇宙天気情報の一環として発信すること、また発展目標としては基本目標を宇宙飛行士にも適用可能なものにすることを目標に研究を進めてきました。

具体的には、航空業界からのニーズ調査を行うとともに、航空機乗務員 SEP 被ばく予測モデルを開発し、2017 年 9 月イベントなどいくつかの GLE に対して解析を進めてきました。また、リアルタイムで航空機被ばく線量を発信する Web システム (WASAVIES) を開発し、2019 年 11 月 7 日に報道発表を行うとともに公開を開始しました。(図 2) 更に、宇宙飛行士の SEP 被ばく線量予測モデル (WASAVIES-EO) の開発を行いました。ただし、宇宙飛行士に対するリアルタイム情報発信システム開発については、現状ではニーズがなかったため

モデル開発のみで完了としました。

【宇宙天気ハザードマップ】

ハザードマップサブグループでは、各班のメンバーからなる編集委員会を編成しその作成に当たってきました。構成としては、「宇宙天気とは」から始まる定性的な説明を行い、現象規模について実際にどの程度の現象が起こりうるかについて推定を行いました。その後、その推定に基づいて電力、衛星運用、航空運用、通信・放送、有人宇宙活動および地上生活の各分野における社会影響を検討してきました。本文は今年度末に公開される見込みとなっています。

【宇宙天気モデル統合】

宇宙天気モデルサブグループは、宇宙天気の太陽・惑星間空間・磁気圏および電離圏の各領域のモデルおよびシミュレーションコードについて実利用の観点から統合を検討するとともに、改善すべきパラメータを抽出し A02-04 班にフィードバックすることで研究目標の具体化につなげることを目標として活動してきました。この議論を進めるためこれまでモデル研究会を 4 回にわたって開催してきました。2018 年には、PSTEP のメンバーが開発したモデルを整理し、その一覧をウェブサイトにて公開しました。

【おわりに】

上記のように、それぞれのサブグループで当初非常に高い目標を設定しながら、それらを達成する結果を得られたことは各メンバーの努力によるものであり、敬意を表します。ここで得られた有用なコンテンツや情報は、宇宙天気予報業務において実際に使われ、フィードバックを掛けることでより良いものに進化していくと期待しています。

本計画研究では、太陽面爆発に至るまでの光球・彩層磁場の発達過程と噴出したフィラメントの運動、およびそれに伴って発生するコロナ中の衝撃波とコロナ質量放出（CME）の伝播を、全国の関連研究機関や大学の施設を活用して総合的に観測し、電磁流体方程式に基づく数値モデルでこれらを再現することによって、以下の基本目標を達成することに取り組んできました。すなわち、1. フレアのトリガ機構を特定して従来の経験予測モデルより確度の高いフレア発生予測スキームを開発すること、2. 地球を襲う太陽嵐の重要度を爆発の発生から数時間以内に確率予測する方法論を開発すること、です。さらに、3. 観測とモデルの同化によって大型フレアの発生と地球影響までを定量的に予測するスキームを構築することを発展目標としています。

観測については、宇宙科学研究所が「ひので」衛星を用いて世界最高精度の光球面磁場観測を行い、観測開始以来蓄積されたデータも含めて活動領域のベクトル磁場マップのデータベースを構築しました。国立天文台（NAOJ）ではフレアや質量放出の温床となるダークフィラメントの磁場観測を行うと同時に、観測の高精度化にむけて新しい大フォーマット赤外カメラの開発を行いました。京都大学飛騨天文台では地球に向かって噴出するフィラメントの速度を 400km/s まで測ることのできる世界で初めての観測装置、SDDI（Solar Dynamic Doppler Imager）を完成させ、2016 年 5

月から H α 線による太陽全面観測を開始しました。情報通信研究機構（NICT）の山川観測所では、新たに高性能化された電波スペクトル計を立ち上げ、2017 年よりコロナ中の衝撃波から放射される電波バーストの定常観測を開始し、名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）では惑星間シンチレーション観測システム（IPS）による太陽風およびコロナ質量放出に伴う太陽風擾乱の観測を実施しました。そして、名古屋大学、東京大学、NAOJ、NICT、海洋研究開発機構、広島大学等からなるモデル開発グループは、電磁流体方程式による活動領域磁場モデル、フレア爆発の再現モデル、フィラメントの不安定化モデル、コロナ質量放出の伝搬モデル等を開発し、図 1 に示す各観測グループとの連携により、フレアの発生および、地球を襲う電磁放射、高エネルギー粒子、太陽風擾乱の予測手法の開発に取り組みました。

まずフレア発生予測に関しては、光球面磁場データと非線形フォースフリー磁場モデルに基づいて算出される、磁気中性線上の磁場捻れに関連したパラメータが、数時間のリードタイムで大規模フレアの発生予測に有効であることを見だし、予測システムに実装する道筋を明らかにしました。また、磁場観測データをつかった深層学習によるフレア発生予測システムを開発し、NICT で運用を開始しました。これらはいずれもこれまでのフレア予測精度を有意に高めることが実験的に検証されており、基本目標 1 を達成したと言えます。コ

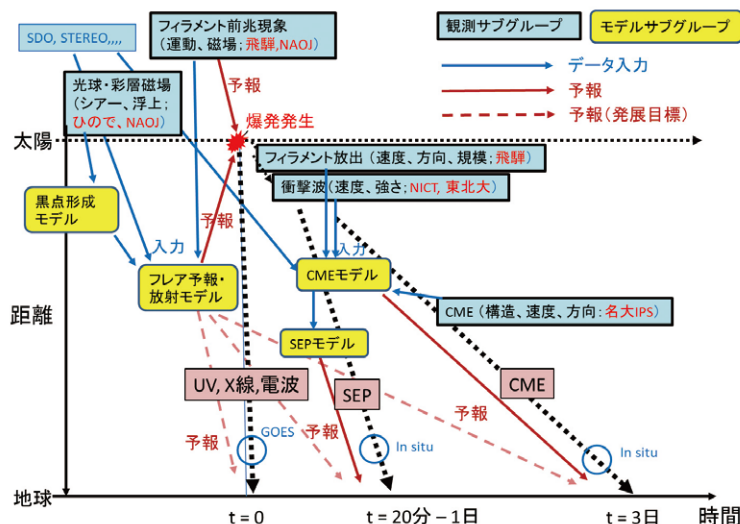


図 1: A02 太陽嵐班の観測・モデル開発サブグループの連携

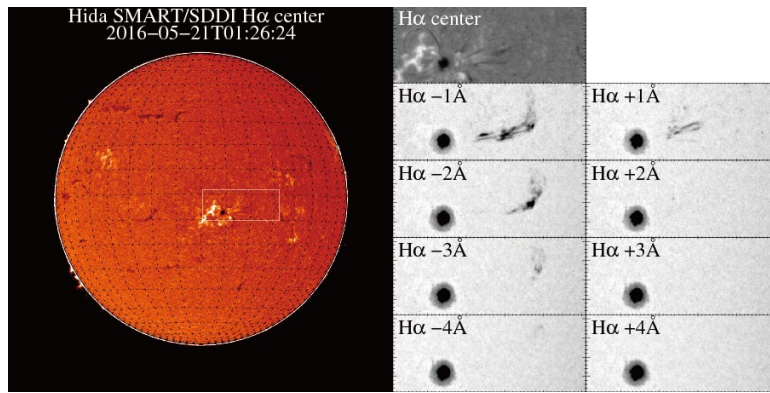


図 2: SDDI で観測された噴出現象。マイナスの波長は太陽から地球に向かう速度に対応し、 $-4\text{\AA}$ は約 200km/秒 である。

コロナ磁場モデルのさらなる高精度化を目的として、光球磁場の観測データを逐次入力するデータ駆動型シミュレーションや、より現実的な光球の物理状態を組み込んだ非フォースフリー磁場計算といった新たな手法の開発にも取り組んでいます。質量放出の予測についても、フィラメント噴出の引き金となる光球面局所的磁場構造や、噴出に先立つフィラメント内のプラズマ運動の活性化を確認し、これらを磁気流体モデルで再現することに成功しました。また、X 線コロナ画像に見られる S 字構造（シグモイド）が CME の発生予測に有効であることを見だし、その自動検出アルゴリズムを開発しています。これらによって質量放出の発生を予測する新たな可能性を開きました。

太陽嵐の実時間予測に関しては、連携観測システムが整ってまもなく、太陽活動の低下に伴い太陽嵐現象の発生頻度が極度に下がってきましたが、この期間に得られたデータを用いて、以下のような太陽嵐予報への実用化に向けた研究を進展させました。まず飛騨天文台の SDDI では 40 数例のフィラメント噴出の観測に成功し、噴出速度やフィラメントの規模が CME の発生予測に有用であることを見だしました。また NICT では山川で観測される II 型電波バースト、すなわちコロナを伝搬する衝撃波を自動検出するアルゴリズムを開発し、さらに名古屋大学と共同して IPS による太陽風擾乱の観測データを CME 伝搬モデルに入力することによって CME 到達予測精度の向上を図り、それぞれ NICT の実時間太陽嵐予報システムへの実装準備を整えました。これらの成果から基本目標 2 もほぼ達成できたと言えますが、CME 地球影響の予測精度をより定量化するための解析を現在も進めています。また、NAOJ で開発した大フォー

マット赤外カメラについては、太陽光を用いた試験観測によって世界で初めて高速赤外偏光計測機能を実証し、フィラメント磁場観測の高精度化への道を開きました。

本研究ではこれらに加えて、大規模電磁流体シミュレーションによる黒点形成モデル、活動領域の特徴量からフレアの放射スペクトルを再現するフレア放射モデル、CME 伝搬モデルをベースとした太陽高エネルギー粒子（SEP）の伝搬モデルの開発も行いました。これらを前述した観測・モデル開発の成果と合わせることで、発展目標である大型フレアの発生と地球影響までを定量的に予測するスキームを構築することができ、次世代宇宙天気予報の基盤形成に繋げていくことが可能です。

これらの成果を総括し、本計画研究から A01 班と A03 班に提供する具体的な貢献についてとりまとめを行います。

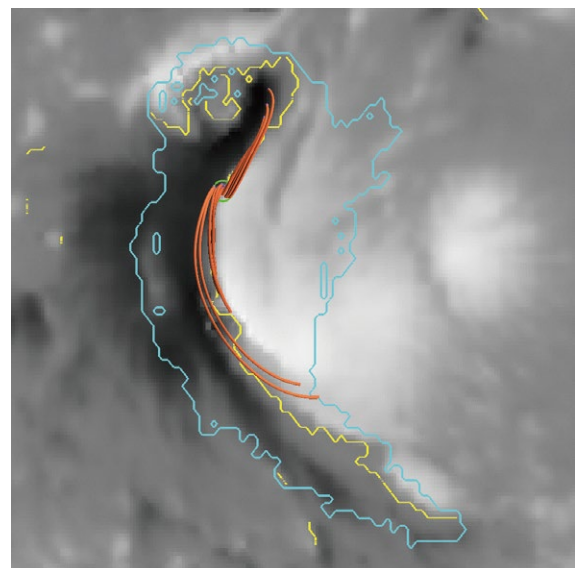


図 3: 2017 年 9 月 6 日に第 24 太陽サイクル最大の太陽フレアが発生した活動領域において、新たに開発したフレア予測スキーム (κ -scheme) によって見出された初期不安定磁束 (橙色) の構造。グレースケールは太陽表面磁場の鉛直法線成分、黄色は磁気中性線、水色は高自由エネルギー領域の境界をそれぞれ表す。

A03 班では、ジオスペースに正規する様々な宇宙天気現象のうち、特に人間活動に大きな影響を及ぼす放射線帯変動、電離圏変動、そして地磁気誘導電流について、3 つのサブグループで研究活動を進めてきました。ここでは、各サブグループのリサーチハイライトをご報告いたします。

【放射線帯サブグループ】

放射線帯サブグループでは、2016 年に打ちあがった「あらせ」衛星の観測データ解析、およびモデリングにもとづく研究を進めてきました。「あらせ」衛星の観測データの解析については、放射線帯電子の加速や消失、また関連するプラズマ波動やプラズマ粒子群の変動過程について様々な成果をあげてきています。特に、MHD 波動による電子加速領域の特定や、ホイッスラー波動による加速過程および散乱過程の同定など、これまで報告されていなかった事象について多くの研究を進めてきました。また、データ解析を通して、太陽風 - 放射線帯応答の新たなモデルを提案し、到来する太陽風に対して放射線帯の応答過程を予測するための知見を構築いたしました。また、モデリングについては、準線形過程にもとづく放射線帯電子の輸送や加速に関するシミュレーションを開発いたしました。計算結果は、A01 班との連携による帯電タスクチームにおいて、帯電予測計算の入力として用いられています。また、A01 班と連携して、太陽風予測数値シミュレーション SUSANOO-SW とのコード結合計算を実時間で実施し、計算結果を Web から発信しています。また、非線形波動粒子相互作用に関するシミュレーション研究については、実パラメータによるコーラス

波動の励起計算に成功し、またコーラス波動のスペクトルの変化を生み出すパラメータの特定に成功しました。さらに、コーラス波動と電子との非線形相互作用に関する長時間計算にも成功し、「あらせ」衛星によって観測されている電子の加速や散乱過程の再現に成功しました。

【電離圏サブグループ】

電離圏サブグループでは、A01 班、A04 班と連携して大気圏 - 電離圏結合モデル GAIA のリアルタイム化を行い、前日までの気象再解析データを入力として用いて、1-2 日先の電離圏変動を予測できるようになりました。現在、赤道域におけるプラズマバブルや中緯度におけるスポラデック E 層の発生確率を 1-2 日前に予測するシステムを構築中です。また、GAIA を用いて、数 100km スケールの電子密度変動である中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) や、電離圏 Sq 電流系を再現することに成功しました。さらに、磁気圏からの電場や降り込み粒子の影響をモデル化して GAIA に入力することにより、電離圏嵐の再現も可能となりました。太陽フレア時の極端紫外線、X 線の影響については、既存のフレアスペクトルモデルを GAIA に入力して電離圏変動の再現を行うとともに、A02 班、A04 班で開発中の新たなスペクトルモデルを用いたシミュレーションも行う予定です。そのほか、局所高精度電離圏モデルを用いた研究も行い、鉛直中性風の速度と空間スケールがプラズマバブルの発生及び成長に強く関わっていることを明らかにしました。(図2)一方、観測の方では、既存の国内・海外観測の維持に努めるとともに、磁力計や GNSS 受信機、FM-CW レーダーなどを東南アジア

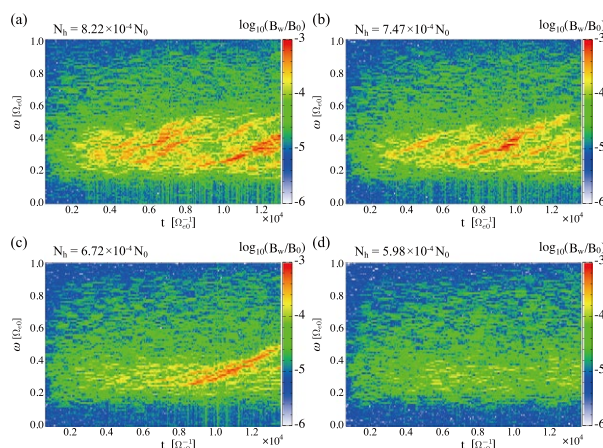


図 1：計算機実験によって示された様々な高温電子密度環境下におけるコーラス波動の励起

[引用文献]

Katoh et al., J. Geophys. Res., 2018.

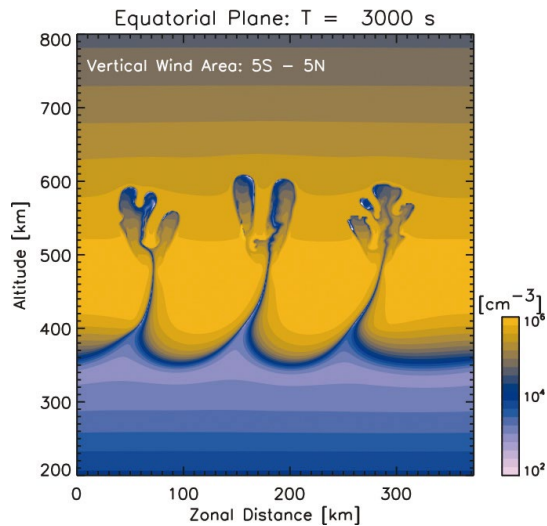


図 2: 局所高精度電離圏モデルで再現されたプラズマバブル
[引用文献]
Yokoyama et al., Geophys. Res. Lett., 2019.

や西アフリカ、南米などの赤道域に設置し、定常観測を実施しました。その結果、下層大気から超高層大気に伝搬する大気波動を発見し、大気波動がプラズマバブルや MSTID などのメソスケールの電離圏擾乱の原因となっている証拠を得ました。

【GIC サブグループ】

地磁気誘導電流 (Geomagnetically Induced Current: GIC) サブグループでは、電力会社の協力を得て 4 カ所の変電所で GIC を測定するとともに、日本の送電網を流れる GIC のモデル化を行い、物理シミュレーションによる予測精度の向上を実現しました。GIC は地表に誘導される電流の一部が送電線などの長大な導電体に流れるもので、GIC を精確に求めるためには地電場の分布と送電網のモデルが必要です。私たちは地質学的手法で推定した地下電気伝導度 3 次元分布をシミュレーションに与え、日本列島の地電場分布を求めました。当初予想された海岸線付近だけでなく、北海道の中央部や関東平野などで局所的に地電場が高まることが分かりました。この地電場の分布を公開情報にもとづき構築した送電網モデルに与え、全国の送電網を流れる GIC を計算しました。結果

を図 3 に示します。複雑な地下構造を有すると思われる変電所 SFJ については、一様な地電場を仮定した場合 (青色の線) と比べ、物理シミュレーションで得られた地電場を用いることで再現性が大幅に向上することが分かりました (赤色の線)。物理シミュレーションは計算に時間を要します。全国の変電所を流れる GIC と地磁気の関係性を物理シミュレーションの結果から予め求めておき、地磁気の入力として与えれば全国の GIC が瞬時に得られるスキームの開発にも成功しました。また、A02 班と連携し、太陽を起点として日本の GIC を予測する実験も実施しています。PSTEP の目標のひとつは激甚事象時の予測です。1859 年に発生したキャリントン事象が現在の日本で再来した場合を想定し、全国の送電網を流れる GIC を計算しました。A01 班と連携して電力会社と意見交換を行い、A04 班と連携して激甚磁気嵐の発生頻度を歴史文献から調査しました。GIC の原因となる磁気圏・電離圏電流発生仕組みについてその基礎過程の理解を深め、物理シミュレーションによって実際のオーロラジェット電流をよく再現できることを確かめました。

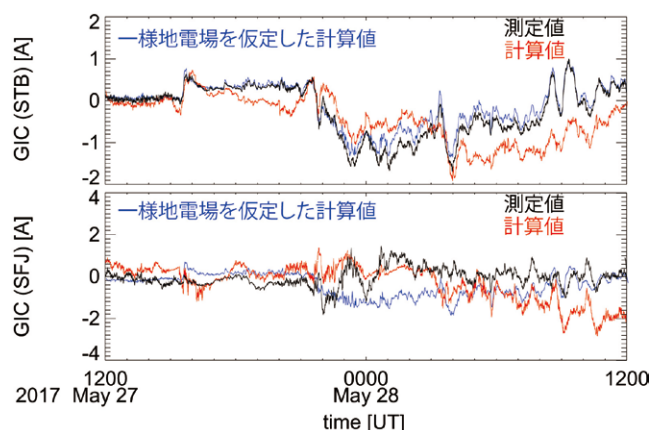


図 3: 日本の変電所 (STB と SFJ) を流れる GIC の測定値 (黒) と計算値 (赤)。

本計画研究班では、太陽周期活動の予測と太陽活動変動の気候影響の二つに焦点を当て、A 次期太陽周期予測、B 太陽放射・宇宙線変動、C 太陽活動気候影響の各課題ごとにそれぞれ二つのグループに分けて、様々な分野の研究者が連携して最新の観測と先進的な数値シミュレーションを融合した研究を推進してきました。5年間の研究で、①太陽活動の精密な観測と新たな太陽ダイナモモデルによる次期太陽活動サイクルの予測、②太陽物理学と気象学・気候学の連携による太陽活動の気候影響過程の特定、という基本目標を達成し、さらに太陽活動長期変動の機構解明や太陽影響を組み込んだ地球システムモデルの開発と長期変動再現という発展課題に取り組んでいます。各サブグループの研究報告を次に記します。

【A1 太陽磁場精密観測グループ】

国立天文台（三鷹）の赤外スペクトロポリリメータによる太陽全面の磁場精密観測を実施したほか、ひので衛星のスペクトロポリリメータ（SOT-SP）のデータを用いた、太陽活動領域のヘリシティの研究を行いました。また、黒点相対数の定義が2015年に大幅改訂されたことに対応し、国立天文台の黒点データの再較正を実施しました。太陽放射・紫外線変動グループとの共通テーマとして、Ca II K線写真のデジタル化を完了しデータ解析を進めています。プロミネンスのH α 観測から過去80年にわたる緯度分布変化（蝶形図）を作成し、プロミネンスの極方向移動と極磁場反転の関連についても考察を進めています（図1）。

【A2 次期太陽周期予測グループ】

これまでの研究により、一般に太陽活動極小期

の極域磁場強度と次期太陽周期活動には正の相関があることが経験的に知られています。この関係を用いて、当グループでは次期太陽サイクル25を予測することを試みました。太陽活動極小期の3年前に、太陽活動極小期の極域磁場強度を見積もるため、太陽表面の磁束輸送を数値的に計算するコードを開発しました。そのモデルを用いて2020年における極域の磁場を求め、サイクル25の予測を行なった結果、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が得られました（Iijima, et al, ApJ, 2017）。さらに、予測精度の向上を目指し、太陽磁場精密観測データの詳細解析を行い予測モデルで用いているパラメータの改善を行いました。今後、精密太陽観測がない時代の太陽周期活動に関して、我々のモデルを適用し昔の太陽の理解につなげていこうと考えています。

【B1 太陽放射・紫外線変動グループ】

太陽紫外線は彩層から主に発せられており、主にプラージュ領域の変動がその長期変動に効いていると考えられます。私たちは、京都大学飛騨天文台のH α 線彩層画像からプラージュ面積の指標「プラージュ・インデックス」を導出する手法を確立し、その変動を調べました。また、より古くから京都大学や国立天文台（三鷹）、インド・コダイカナル観測所に所蔵されているCa II K線ガラス乾板データのアーカイブ化を行い、それらからもプラージュ・インデックスの長期変動を導出しました（図2）。また、ガラス乾板上の濃度を輝度に変換する新たな手法の開発も行いました。さらに、飛騨天文台において彩層分光観測を行い、

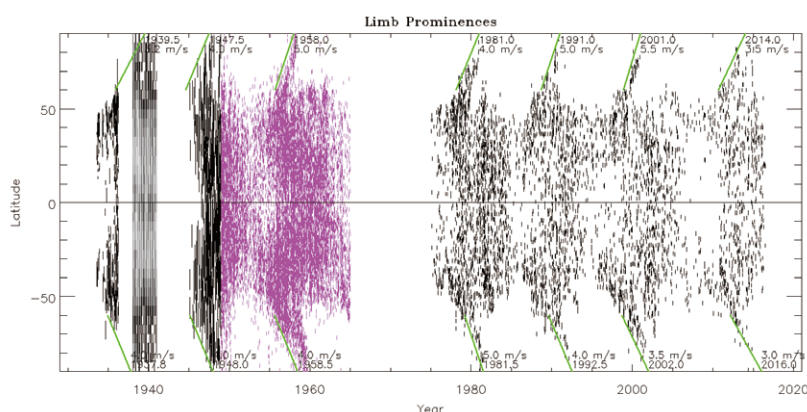


図1：プロミネンスのH α 観測データから作成した過去80年にわたる緯度分布変化（蝶形図）。

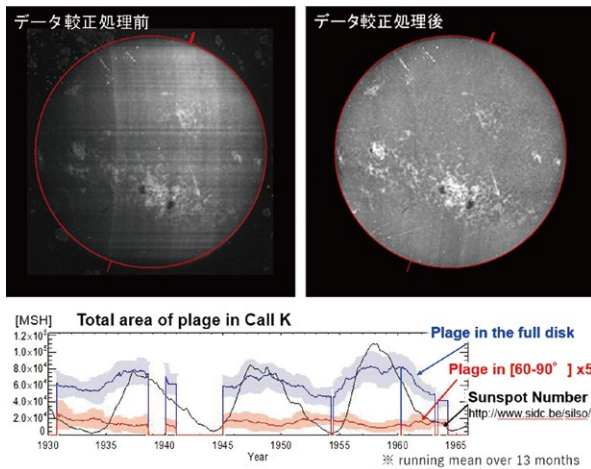


図2：所蔵する Ca II K 線ガラス乾板データの校正処理前後の画像と、校正処理後画像から導出したブラージュ・インデックスの長期変動。

Ca II K線の変動と紫外線の間接関係を探りました。

【B2 宇宙線変動グループ】

宇宙線生成核種の1年分解能での分析により、太陽活動極小期の太陽活動と宇宙線変動の研究に取り組みました。樹木年輪の炭素14の高精度分析により、シュペラー極小期が30年以上の準備期間を経て発生していたという示唆を得ました (Moriya et al., 2019)。また、樹木年輪の安定同位体の分析により、小氷期において、特に末期にかけて日本が湿潤化していたことも明らかとなりました (Sakashita et al., 2017)。太陽活動が気候システムに影響するプロセスの理解につなげるため、気象データの解析も進めました。その結果、太陽の自転周期が日本の雷活動に影響を及ぼしていることも明らかとなりました (Miyahara et al., 2017a, b; 2018)。また、影響が低緯度側から伝搬している様子も捉えられました。

【C1 地球システムモデルグループ】

気象研究所地球システムモデルMRI-ESM2.0の大気化学過程に高エネルギー粒子降下に伴うHO_x、NO_x生成の効果を導入するなど、従来より太陽変

動影響を詳細に取り扱えるモデルを開発し (Yukimoto et al., JMSJ, 2019; 図3)、IPCC第6次評価報告書の気候変動評価に用いる第6次結合モデル相互比較プロジェクトに参加しました。同モデルを用いて、最終氷期最大期など軌道要素変化を通して太陽強制が変動する際に、オゾンに関連する大気化学過程を陽に計算するかどうかで古気候の地表応答が大きく異なることを示しました (Noda, et al., JGR, 2017, 2018)。また、雲の帯電を考慮した粒子ベース雲モデルを開発し、宇宙線等が雲微物理過程の変調をもたらす可能性を示唆する結果を得ました。

【C2 超高層大気モデルグループ】

大気圏・電離圏結合モデルGAIAは、当初下層大気と上層の電離圏・熱圏との結合過程の研究に主眼を置いて開発されましたが、近年では観測される現象の解釈や数値予測など幅広い研究に利用されるようになりました。そこで、より多くの研究に有効に寄与するため、モデル内の化学・物理過程の改良やパラメータの調整等による改良を行いました。旧バージョンに対して再現性能が大きく向上したことが確認できています。また、太陽活動等による地球環境変動の理解を深めるため、中間圏・熱圏領域におけるH₂O、HO_xおよびNO_xの化学過程・輸送過程を導入し、変動の解析を進めています。

本計画研究班では、各グループの研究を推進するとともに、グループ間研究や計画研究班間の連携研究を展開してきました。また、国際活動支援班の支援も得て、国際的な研究者ネットワークの構築にも積極的に取り組んでいます。

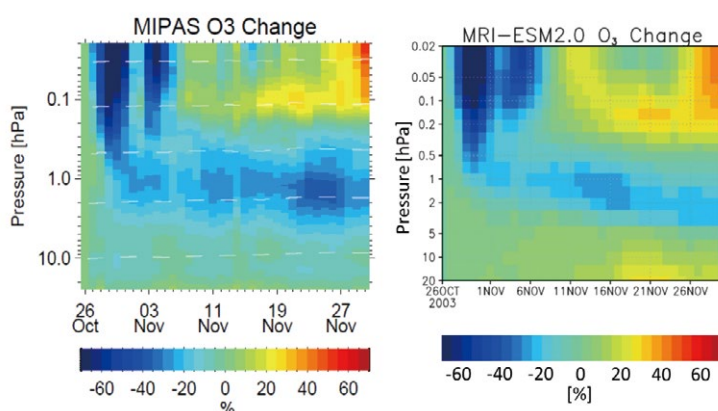


図3：2003年のハロウィンイベント時の10月26日を基準日とした北極域（北緯70-90度）オゾン変化率。（左）衛星観測MIPAS (Funke et al., ACP, 2011)、（右）気象研究所地球システムモデルMRI-ESM2.0のシミュレーション結果で3メンバーアンサンブル平均。

PSTEP-4 & ISEE-2 国際シンポジウムを実施

2020 年 1 月 28 日（火）～ 30 日（木）、名古屋大学 坂田・平田ホールにて、第 4 回 PSTEP 国際シンポジウム（PSTEP-4）を、名古屋大学宇宙地球環境研究所の ISEE シンポジウム（ISEE-2）との合同で実施しました。このシンポジウムは本領域が実施する最後の国際シンポジウムとして、本領域の研究成果を発信すると共に、それをもとにして今後の新たな研究の方向を国際的な立場から議論する目的で開催したものです。新型コロナウイルスの影響により、大変残念ながら中国からの参加が直前でキャンセルされましたが、本シンポジウムには日本、米国、英国、ドイツ、イタリア、カナダ、ベルギー、メキシコ、インド、ペルーから 100 名を超える研究者が参加しました。

本シンポジウムでは、PSTEP の 4 つの計画研究（A01 ～ A04）に関係する口頭セッションとポスター発表が実施されました。口頭セッションでは、国外からの招待講演者と領域関係者による講演 48 件が、ポスターセッションでは 59 件の発表がなされました。シンポジウムのアジェンダは WEB ページ <http://www.pstep.jp/news/20200127.html> をご参照ください。

セッション A01 では、A01 予報システム班の研究活動として電波伝搬シミュレータ、衛星帯電、航空機被ばく管理システム、宇宙天気ハザードマップおよび AI を用いた太陽フレア発生予

測システムについての研究結果を紹介しました。また、Onsager 博士、Talaat 博士（米国）、Gonzalez-Esparza 博士（メキシコ）、Andries 博士（ベルギー）による招待講演を頂き、A01 班の活動とのこれまでの協力および今後の連携の可能性について検討を進めました。

セッション A02 では、A02 太陽嵐班の研究活動として、太陽面磁場観測と電磁流体モデルに基づくフレア発生予測スキームの開発、太陽嵐の連携観測による地球影響の実時間予測、および次世代宇宙天気予報の基盤形成に関する成果を紹介しました。また、Leka 博士、Berger 博士、八代博士、Martinez Pillet 博士（米国）をお招きし、A02 班の活動に関係する米国の最新動向や将来計画に関するご講演をいただき、今後の連携の可能性について議論を行いました。

セッション A03 では、A03 地球電磁気班の活動成果に関する報告を口頭およびポスター発表で行い、宇宙放射線、電離圏、GIC 研究の進展のハイライトをご紹介いたしました。また、Fuller-Rowell 博士、Knipp 博士、Huba 博士、Love 博士（米国）、Horne 博士（英国）、Connors 博士（カナダ）をお招きし、A03 の活動に関わる宇宙放射線、電離圏、GIC 研究に関する欧米の最新の動向についての講演をいただき、新たな連携研究の可能性についての議論も深めました。



PSTEP-4&ISEE-2 国際シンポジウム 参加者集合写真（坂田・平田ホール前にて）



Terry Onsager 博士（米国）による招待講演の様子

セッション A04 では、A04 周期活動班の研究活動として、太陽周期活動の観測・解析・予測、および、太陽活動変動の気候影響に関するモデル予測についての成果を紹介しました。また、Chatzistergos 博士（ドイツ）、および、Marsh 博士（米国）、Spiegl 博士（ドイツ）には、それぞれ対応する課題に関して海外の最新動向について招待講演をいただきました。新型ウィルスの影響で Zhou 博士（中国）が参加できなかったのは残念ですが、これまで築いてきた共同研究をさらに発展できればと思います。

本領域は太陽地球圏環境予測に関する基礎科学と予報運用との間の「死の谷」を克服し、両者の相互発展を目指して進められてきました。本シンポジウムでも、この点に焦点を当てた議論が展開されました。本領域では、太陽フレア、コロナ質量放出、地球放射線帯変動、電離層擾乱、地磁気誘導電流、太陽放射線被曝、人工衛星帯電、電波伝搬障害、次期太陽周期活動予測、太陽気候影響に関する様々な研究が展開され、5 年前には考えられなかった新世代の予測研究を、分野を超えた連携によって実現することができました。本シン

ポジウムでは、こうした新しい学術の開拓につながる本領域の研究成果が、海外の研究者からも高く評価されました。このシンポジウムでの活発な議論を通して、本領域の研究成果がさらに発展することを強く願っています。

なお、このシンポジウムの成果を中心として、Earth, Planets and Space (EPS) 誌に Special Issue “Solar-Terrestrial Environment Prediction: Toward the Synergy of Science and Forecasting Operation of Space Weather and Space Climate” を出版する予定で、4 月 30 日まで論文投稿を受け付けています。本領域に限らず多くの研究論文が投稿されることを期待しています。投稿方法などの詳細は <https://earth-planets-space.springeropen.com/pstep> をご覧ください。

また、本シンポジウムは名古屋大学宇宙地球環境研究所の ISEE シンポジウムと合同で実施されて、ISEE Award (宇宙地球環境研究所賞) の授賞式も併せて行われました。この賞は宇宙地球環境研究の発展と宇宙地球環境研究に関わる分野融合及び新分野開拓を目的として、宇宙地球環境研究所の共同利用・共同研究に基づく優れた研究活動に授与されているものです。今回は、本領域とも関係が深いカリフォルニア大学サンディエゴ校 IPS 研究グループに ISEE Award が授与され、同グループの代表者である B. V. Jackson 博士が受賞記念講演 “Global Heliospheric Remote Sensing: A Brief Recent History” を行いました。（領域代表：草野 完也／名古屋大学、研究代表：石井 守／NICT、一本 潔／京都大学、三好 由純／名古屋大学、余田 成男／京都大学）



ISEE Award(宇宙地球環境研究所賞)授賞式の集合写真

PSTEP・ISEE 研究集会「第4回太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」

2019年12月26日～27日の日程で、名古屋大学宇宙地球環境研究所にて表題の研究集会を開催しました。本研究集会は、太陽・太陽圏・地球電磁気圏・大気圏からなる連続的で複雑なシステムである太陽地球圏を対象とするモデル研究の現状と課題および予測へむけた展望を、分野を超えて広く議論することを目的としています。2017年1月の第1回、2018年2月の第2回では、太陽地球圏の多岐にわたるモデルについて、基礎から最先端の研究開発状況を各専門家から紹介いただき、課題や展望を議論しました。2019年1月の第3回では、宇宙天気情報利用状況調査報告会を受けるかたちで開催し、調査結果を踏まえて課題を整理し、各モデル研究の対応状況やPSTEPの残された期間で取り組むべき課題を議論しました。

PSTEP最終年度である今回は、当該分野の展望を共有するとともに次の研究計画等へ発展させる土台作りの機会となればとの考えから、講演者の方々には、PSTEPで達成したことよりもむしろ、新たに見えてきた課題・今後取り組むべき研究課題に重点を置いて講演いただきました。PSTEPの重点課題（被ばく・衛星帯電・GIC・電波伝搬）に関連したセッションでは、どの講演も次に向けた問題意識が明確に示され、これはPSTEPのもう一つの大きな成果であると強く

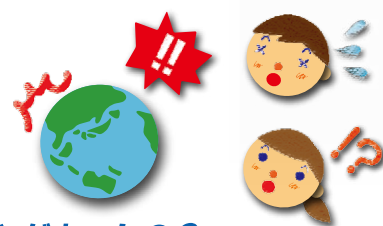
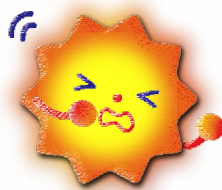
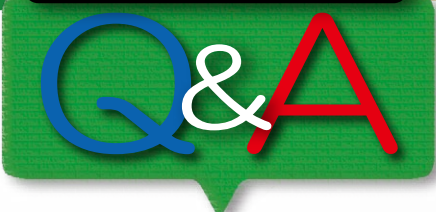
感じました。加えて、大規模計算サイエンスのセッションでは、計算機科学の観点も交えた最先端の話題提供があり、異なるモデルを結合する際の現実的問題を克服する可能性を議論しました。最後に将来課題セッションでは、PSTEP課題にとらわれず、各専門家から問題意識が示され活発な議論が展開されました。年末の慌ただしい日程でしたが、多数の現地参加に加えて、企業からの参加、Web会議による参加もあり、参加者皆様にはあらためてお礼申し上げます。

手探りで始まった当集会ですが、モデル研究をキーワードにこのように多分野の研究者が一同に議論できる貴重な場となりましたので、今後も継続していきたいと考えています。

（中溝 葵 / 情報通信研究機構）



『宇宙と地球のなぜ？ どうして？』



Q. 「これまでで一番大きかった宇宙天気現象ではどんなことがあったの？」

A. 「ふだんはオーロラを見ることができない地域で夜中に新聞が読めるほどのオーロラが輝いたり、電報システムが停止したりしました(1859年当時)」

「キャリントン・イベント」と呼ばれる1859年に発生した有名な太陽嵐は今のところ最大級の宇宙天気現象の一つとされています。キャリントンという名称は、イギリスの天文学者リチャード・キャリントンが目視で黒点スケッチをしている最中に、突然明るく光る領域が現れ、これが歴史上初めての太陽フレアの発見になったことに由来します。この太陽フレアの発生から18時間後に世界の各地でオーロラの観測が記録されており、フレアに伴って発生した太陽コロナからのプラズマ放出（CME）が、太陽地球間の距離1億5千万kmを18時間で伝搬し地球に到来したことで、猛烈な磁気嵐が発生したと推定されています。ふだんオーロラを見ることができないアメリカ・アラバマ州などではオーロラが頭上に広がり、真夜中に新聞が読めるほどの明るさになったという逸話が残っていたり、電報網に電流が流れて電報システムが停止などの影響を受けたことが記録されています。

もし今、このような規模の現象が発生したらどうなるでしょうか？160年前の被害が電報にとどまったのは、当時の社会インフラでもっとも進んだ技術が電報であったからともいえます。現代の私たちの生活は160年前からは比べられないほど便利になっていますが、これは高度な社会インフラによってもたらされています。緻密に張り巡らされた電

力網、宇宙空間を飛行する人工衛星を用いた測位/放送システム、世界各地を結ぶ航空網、それらを支える通信技術。今後も技術開発が進み新しい社会インフラも生まれてくることでしょう。逆に言えば、これら高度な社会インフラすべてが影響を受ける可能性があるということです。（詳しくはNo.15はじめ既刊号のQ&Aをご覧ください。）

実は2012年に、キャリントン・イベント級の太陽嵐が発生しました。幸いCMEの放出方向が地球とは反対側であったため大事には至りませんでした。もし地球を襲っていたら、世界規模で社会インフラが損傷し、何十兆円もの経済損失に及んだ可能性が試算されています。また、その規模については完全には解っていませんが、西暦774年～775年と993年～994年頃に超巨大な太陽嵐が発生した可能性を強く示唆する痕跡が屋久杉の年輪や極域の氷床などで確認されています。

大規模な太陽嵐は今後も発生する可能性が十分にあります。自然現象の発生を止めることはできませんが、発生した際に被害を軽減する準備をすることはできます。PSTEPでは、巨大な太陽嵐の社会インフラへの影響などを研究者が持ち得る知識を総動員して調査してきました。PSTEPは今年度で終了しますが、今後もさらに研究を重ねることで、宇宙天気災害リスクに備える社会体制を整えていくことが必要です。

PSTEP Newsletter 編集後記

※敬称略・順不同



草野 完也
(編集長 / 名古屋大学)

季刊発行はとても大変でしたが、PSTEP 広報グループのみなさんのすばらしい努力のおかげで、最終号までたどり着きました。分野と組織を超えた新学術領域の発展に大きな役割を果たしたと思います。どうもありがとうございました！



成瀬 千恵代
(副編集長 / 名古屋大学)

Newsletter の副編集長として至らぬ点が多々あったかと思いますが、みなさまのご尽力でなんと No.1 ~ No.16 の計 16 冊を無事に発行することができました。とても貴重な経験をさせて頂き本当にありがとうございました！



國枝 素子
(名古屋大学)

私がお手伝いしたのは少しですが、隣の成瀬さんの苦悩を見ているだけで随分関わった気持ちになった4年間でした。成瀬さん、皆様、大変お疲れ様でした。ここから発信したことが今後の皆様のご活躍の小さな片になればと願っております。



浅井 歩
(京都大学)

ロゴ作成、Web ページ作成、ニュースレター編集委員とPSTEPの広報活動に関わらせていただきました。熱意ある草野編集委員長(領域代表)や、素晴らしい編集委員・執筆者の方々、そして成瀬さんと共に楽しく活動できました。PSTEP の魅力発信の一助となっていれば幸いです。



中田 裕之
(千葉大学)

PSTEP の関連分野はとても広く、身近でない分野の推敲作業は大変な時もありましたが、勉強になりました。素人のコメントで筆者の方々にご負担をお掛けしたことも多かったかもしれませんが、素人にもわかりやすい文章になったと思っていただければ幸いです。



余田 成男
(京都大学)

本新学術領域研究のカバーした領域は、太陽内部から地球表面まで、多様な空間・時間にわたる新領域でした。参加メンバーの認識を共通化する手段として、このニュースレターの役割は重要だったと思います。編集スタッフの皆さんの5年間のご尽力に感謝します。



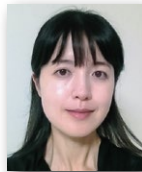
塩田 大幸
(情報通信研究機構)

No.2 から編集委員を務めて参りました。草野編集長、成瀬副編集長のお二人を初め編集委員・執筆者の皆さんの御尽力で、PSTEP 内外に情報発信できた素晴らしい活動でしたし、私にとっても大変貴重な経験になりました。皆様、本当にお疲れさまでした。



大塚 雄一
(名古屋大学)

松村さんの後任として、最後の一年間、編集委員を務めさせて頂きました。私が加わった時には機能的な編集方法が確立されていて、あらためてPSTEPの組織力を感じました。



中溝 葵
(情報通信研究機構)

Web やセミナー 立上げ、Newsletter 編集委員、それなりに大変でしたが広報皆さんとの議論や校閲を通して学ぶこともあり良い経験となりました。皆様ありがとうございました。PSTEP でできた繋がりが今後も発展していけばと思います。



金子 岳史
(名古屋大学)

編集作業を通して PSTEP 研究の最前線に触れることができ、私自身も楽しく取り組むことができました。ニュースレターを手にとっていただいた方々、お忙しい中 快く原稿執筆を引き受けていただいた方々、編集委員の方々に御礼申し上げます。



阿南 徹
(National Solar Observatory)

1 年間という短い間でしたが、編集作業を通して、多くの人に読んでいただく文章の書き方を学ぶことができました。ありがとうございます。編集作業をされた皆様、長い間お疲れ様でした。



海老原 祐輔
(京都大学)

編集委員MLで交わされたメールは4821通。膨大なトラフィックにかかわらず的確な指示を出された草野先生、見事な交通整理と芸術的センスが光る成瀬さん、質向上に尽力された編集委員、貴重な時間を割いて原稿を用意してくださった皆様、ありがとうございました。



今田 晋亮
(名古屋大学)

編集作業をされた皆様、お疲れ様でした。皆様の努力で素晴らしい Newsletter シリーズになったと思います。たくさんの方に読んでいただけたと思います。ありがとうございました。



宮原 ひろ子
(武蔵野美術大学)

新学術領域ならではの幅広い成果の発信に携われたことは、とても貴重な経験となりました。草野先生、成瀬さん、編集委員の皆さん、お疲れ様でした。この Newsletter が今後の連携強化の手がかりになればと願っています。

最後に、PSTEP 広報グループとして参加されていた松村充さん、Newsletter の校正や発送など様々な形で関わっていただいたスタッフの方々、そしてこの Newsletter を手に取り読んでいただいた皆様方に深く感謝いたします。ありがとうございました。





PSTEP Newsletter

No.16 最終号 Mar. 2020

<http://www.pstep.jp/>

発行日：2020年 2月 29日

発行所：新学術領域「太陽地球圏環境予測」事務局

編集委員：草野 完也（領域代表・編集長）、成瀬 千恵代（副編集長・デザイン）、海老原 祐輔・金子 岳史・塩田 大幸（校閲責任者）

〒464-8601 名古屋市千種区不老町

TEL 052-747-6333（名古屋大学宇宙地球環境研究所） E-mail：newsletter@pstep.jp