

機関番号：13901
領域設定期間：平成27年度～令和元年度
領域番号：2708
研究領域名（和文） 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
研究領域名（英文） Solar-Terrestrial Environment Prediction as Science and Social Infrastructure
領域代表者
草野完也（Kanya Kusano）
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
研究者番号：
交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）649,400,000円

研究成果の概要

太陽と地球、それらを包括する宇宙空間から成る「太陽地球圏環境」の変動は地球環境と高度に情報化した現代社会にも大きな影響を与える。本領域はその変動メカニズムの基礎的理解と宇宙天気災害を未然に防ぐための予測の相乗的な発展を、4つの研究班（A01-A04）の連携を通して展開した。その結果、Science誌2編、Nature誌1編を含む500編以上の査読付き論文を出版するなど、当初の基本目標を超える多くの成果を得ることができた。

予報システム班（A01）では宇宙天気情報を社会にきめ細かく伝える体制を整えると共に、「宇宙天気ハザードマップ」を作成し広く公開する準備を整えた。また、電波伝搬、航空機被ばく推定システムなど次世代宇宙天気予報システムの開発を進めた。太陽嵐班（A02）では、巨大フレアを発生位置までも正確に予測する世界初の物理モデルを開発し（Kusano et al. 2020 Science）、宇宙天気予報への応用を進めた。また、太陽フィラメント噴出を捉えるユニークな観測システムを整備し、次世代宇宙天気予報の為に要素開発を進めた。地球電磁気班（A03）では、放射線帯の変動を高精度で予測するモデルを提案すると共に、あらせ衛星による非線形波動粒子相互作用の実証に初めて成功した（Kasahara et al. 2018 Nature）。また、地磁気誘導電流モデルを開発し、電力会社と協力して実測値をよく再現することを実証した。さらに、全球大気圏-電離圏結合モデルを用いて電離圏擾乱の発生予測を実現した。周期活動班（A04）では、次期太陽周期活動の予測を実現すると共に、世界最高精度計算により太陽内乱流中での大規模磁場形成の可能性を初めて指摘した（Hottat 2016 Science）。また、シュペーラー極小期直前の太陽周期長伸張や、ミランコビッチ周期における太陽紫外線変調を通じた地球気候への影響等を明らかにした。

本領域ではまた、大学院生を対象としたサマースクール、本格的な国際シンポジウム（全4回）、インターネットを利用した全国ランチセミナー（全40回）、分野交流と情報発信を目指したニューズレターの季刊発行（全16刊）、多数の報道発表（全128件）、オープン・テキストブックの作成、一般講演（全128件）などを行い、従来の専門分野を超える若手研究者の育成と幅広い情報発信に積極的に取り組んだ。

研究分野：数物系科学、天文学、超高層物理学、気象・太陽物理・陸水学

キーワード：太陽物理学、太陽地球システム・宇宙天気、地球環境システム

1. 研究開始当初の背景

太陽と地球とそれらを包括する宇宙空間は、地球環境と人間社会にも大きな影響を与える「太陽地球圏環境」を形作っている。それゆえ、太陽で発生する巨大な太陽フレア爆発は現代文明にとって潜在的なリスクでもある。また、太陽活動の長期変動が地球の気候に影響を与えるメカニズムは未だに明確ではない。このため、気候変動予測における太陽影響の評価には依然として大きな不確実性が残っている。こうした事実は、太陽に起因する惑星規模の環境変動は人類が想定すべき危険な自然現象であると共に、その発生と影響を正確に予測するための科学的な基盤を確立する必要があることを我々に教えている。

しかし、基礎科学としての宇宙研究と社会基盤としての宇宙天気予報の間には「死の谷」と評さ

れる隔たりが存在している。これは、科学研究が社会に役立つ予報へ応用できる水準に達していない一方で、アドホックな予報は現象の科学的理解に貢献できないという相互に否定的な認識によるものである。この状況の改善のためには、関連する諸分野の専門家が密接に連携し、科学研究と予測研究を相乗的に発展させる新しい学術領域を構築することが必要となる。本領域はこうした背景のもとに実施された。

2. 研究の目的

本領域は太陽地球圏環境の理解と予測を相乗的に発展させることで、既存の学問分野の枠に収まらない新たな学術の創成を目指すものである。それ故、本領域の目的は以下の2点である。

【目的1】科学的重要な課題の抜本的解決：物理モデルによる現象の予測を行なうと共に、予測結果の定量的な検証を通して太陽フレアの発生とそれに伴う地球電磁気圏擾乱及び、太陽周期活動の変動とその影響などの科学的重要な課題を解決する。

【目的2】社会基盤としての宇宙天気予報の飛躍的な発展：太陽地球圏環境変動が社会システムに与える影響を予報すると同時に、予報の定量的検証からモデルの改善にフィードバックする双方向システムを構築する。これによって宇宙天気予報を飛躍的に発展させる。さらに、現代文明が経験したことのない激甚宇宙天気災害の宇宙天気ハザードマップを作成し公開する。

3. 研究の方法

領域の目的を実現するため、以下の4つの計画研究班を組織し、総括班及び公募研究との有機的な連携を通して、以下に示す基本目標を達成すると共に、発展目標に挑戦する研究を実施した。

予報システム班(A01)：物理モデルと社会が必要とする宇宙天気予報情報を得ることで、社会が必要とする宇宙天気情報をきめ細かく伝える体制を整える。また、発展目標として物理モデルに基づく精密な予報をリアルタイムで実現する次世代宇宙天気予報システムの開発を進める。

太陽嵐班(A02)：太陽磁場観測と物理モデルの連携により太陽フレアのトリガ機構を解明することで、より確度の高いフレア発生予測スキームを開発すると共に、地球を襲う太陽嵐の重要度をフレア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。発展目標として適切な同化手法を開発し、大型フレアの発生前にその影響を定量的に予測するスキームを構築する。

地球電磁気班(A03)：①従来の放射線帯モデルでは捉えられない過渡的な変動過程を明らかにすると共に、ERG衛星の観測との比較によって予測精度を向上させる。②領域連結シミュレーションによって地磁気誘導電流(GIC)を予測するとともに、観測による検証によって予測精度を向上させる。③熱圏密度・電離圏電子密度変動の現況推定と数時間先予測を行う。また、プラズマバブルなどの電離圏メソスケール擾乱現象の発生確率予測と到来予測を行い、観測による検証を基に予測精度を向上させる。発展目標として、磁気嵐時の宇宙放射線、GIC、熱圏密度・電離圏電子密度変動を予測する方法論を確立すると共に、激甚宇宙天気災害を精密に予測する為に必要な新たな知見を獲得する。

周期活動班(A04)：①精密な観測と新たな太陽ダイナモモデルにより次期太陽周期活動の予測を行うと共に、②太陽物理学と気象学・気候学の連携により太陽活動の気候影響メカニズムの特定を行う。発展目標として数百年スケールの太陽活動長期変動の機構解明、太陽影響を組み込んだ地球システムモデルによる長期変動再現に取り組む。

4. 研究の成果

本領域ではScience誌2編、Nature誌1編を含む500編以上の査読付き論文を出版し、下記の通り基本目標を超える多くの成果を得た。さらに、発展目標についても十分な成果を得ることができた。

(1) 予報システム班【A01】

宇宙天気ユーザー協議会を設立し、宇宙天気情報のニーズ・シーズマッチングを詳細に検討し、社会に役立つ研究戦略を策定すると共に宇宙天気情報の新たな情報発信を進めた（基本目標A01-1:達成度Sⁱ）。また、我が国初の「宇宙天気ハザードマップ」を完成させた（基本目標A01-2:達成度Aⁱ）。さらに発展目標としたリアルタイムで実現する次世代宇宙天気予報システムの開発を行い、以下の成果を得た。①電波伝搬の様々な電離圏影響を予測するHF帯電波伝搬シミュレータHF-STARTを開発した(図1)。短波放送波を用いた精度検証を進め、2020年度8月に公開を予定している。L帯の伝搬シミュレータをフランスCNESと共同開発し、プラズマバブル予測モデルと連携して衛星測位への影響を予測するための研究を実現した。②衛星表面帯電を予測するため磁気圏MHDシミュレーションを改良し、その結果を衛星帯電モデルMUSCAT及びSPISに入力するシステムを開発した。これを用いて、みちびき初号機、Van Allen Probesの衛星表面帯電の評価を行った。これによる衛星帯電評価リアルタイム表示システムを2020年度内に公開する。深部帯電時系列情報提供システムを開発し

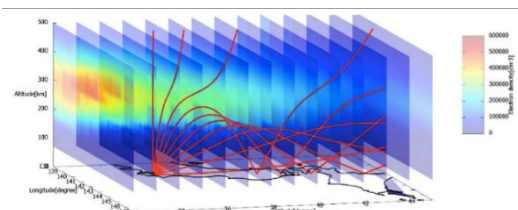


図1：HF-STARTの出力例。赤線が電波伝搬経路、色の3次元分布は電離圏電子密度を表す。

2020 年度末までに構築する。③A03 班及び電力会社と共同で変電所内の GIC の継続的な計測を行った。その結果、地磁気と地電流の実際の応答関数を求めることに成功し GIC 予測に貢献した。④航空機被ばく警報システム WASAVIES を開発し、2019 年 11 月に公開した。宇宙飛行士の SEP 被ばく線量予測モデル (WASAVIES-E0) の開発も行った。⑤太陽・惑星間空間・磁気圏および電離圏の各領域のシミュレーションモデル連結のための基礎設計を行った。さらに、A03 班による「あらせ」衛星データを用いた放射線帯予測を NICT 宇宙天気予報で利用開始した。また、A02 班による惑星間シンチレーション観測による太陽風擾乱データと CME モデル (Shiota and Kataoka 2016) の結合による CME 到達予測モデルを NICT 宇宙天気予報で利用開始した。

(2) 太陽嵐班【A02】

電磁流体力学不安定性としてフレア発生機構を説明する理論モデル (Ishiguro & Kusano 2017) を構築すると共に、世界で初めて理論モデルに基づく太陽フレア予測スキーム (κ スキーム) を開発した。これを用いて巨大フレアの位置まで正確に予測できることを実証し (図 2)、NICT 宇宙天気予報に応用する取り組みを開始した (Kusano et al. 2020 Science)。ひので衛星データ等から、大型フレアのトリガとなる磁気中性線上的特徴的な磁場構造とプレフレア現象の解析を行った (Bamba et al. 2017, 2018, 2020)。深層学習によるフレア発生予測システムを開発し (Nishizuka et al. 2018)、予報運用を開始した。光球磁場データを使ったデータ駆動型シミュレーション (Inoue et al. 2016, 2018) 及び現実的な 3 次元磁場の再現のための研究も進めた (Miyoshi et al. 2020, Kawabata et al. 2020)。さらに、世界各国のフレア予測を初めて定量比較する国際ワークショップを開催し、その結果を 3 編の国際共著論文 (Leka et al. 2019a, 2019b, Park et al. 2020) として出版した (基本目標 A02-1: 達成度 Sⁱ)。

コロナ質量放出 (CME) の原因となる太陽フィラメント放出の運動を連続観測できる装置 (SDDI) を開発し、連続観測を開始した。その結果、40 数例のフィラメント噴出の観測に成功し、噴出速度等が CME の発生予測に有用であることを見出した (Seki et al. 2020, in prep)。また、噴出前フィラメントの内部運動の活性化を発見し (Seki et al. 2017, 2019)、磁気流体モデルで再現することに成功した (Kaneko 2020 in prep)。NICT 山川の電波スペクトル計で観測される II 型電波バーストを自動検出するアルゴリズムを開発した。名古屋大学における惑星間シンチレーション観測による太陽風擾乱データを、本領域で開発した CME 伝搬モデル (Shiota and Kataoka 2016) に入力することにより CME 到達予測精度の向上を図り実時間太陽嵐予報システムへの実装準備を整えた (Iwai et al. 2019)。国立天文台の彩層磁場観測では、フィラメントの磁場方向が南北両半球で系統的に異なるという法則性を明らかにした (Hanaoka and Sakurai, 2017)。JAXA 宇宙研では 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出し (Kawabata et al. 2018)、その自動検出アルゴリズムの開発を進めた。国立天文台で開発した大フォーマット赤外カメラによっ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いた (基本目標 A02-2: 達成度 Aⁱ)。

さらに、発展目標達成のためフレア黒点の形成過程を理解するため、太陽対流層と太陽表面を共に含むフレア黒点形成シミュレーションに初めて成功した (Toriumi and Takasao 2017, Toriumi and Hotta 2019)。また、フレアの紫外線放射スペクトルを、X 線衛星観測や活動領域の特徴量から予測するフレア放射モデルを開発した (Kawai et al. 2020, Nishimoto et al. 2020)。太陽高エネルギー粒子 (SEP) についても、CME 伝搬モデルをベースとした SEP 輸送モデルを開発すると共に、SEP に関する二度のデータ解析ワークショップを開催し、CME と SEP 生成・到来について調査をおこなった。その結果、II 型電波バーストのスペクトル構造と SEP エネルギーとの間に強い相関があること (Iwai et al. 2020)、SEP の強度や伝搬方向が CME の特徴量と関連付けられること (Kihara et al. 2020 under review) 等、予測につながる新たな知見を得ることができた。

(3) 地球電磁気斑【A03】

あらせ衛星データやシミュレーション等によって放射線帯の高エネルギー粒子の生成、消滅に関する研究を推進した。その結果、放射線帯電子加速に関するモデルを提案すると共に (Miyoshi et al. 2016, 2018)、プラズマ波動によって電子が加速される様子の直接観測に成功し、非線形の波動粒子相互作用が加速に本質的

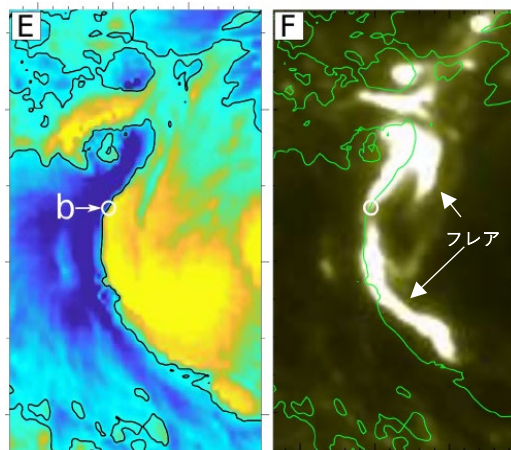


図 2: 2017 年 9 月に発生した巨大フレアの予測: 左図は太陽表面磁場分布と κ スキームによるフレア発生予測点 b、右図は実際のフレア発光。予測点よりフレアが拡大したことが分かる (Kusano et al. 2020 Science)。

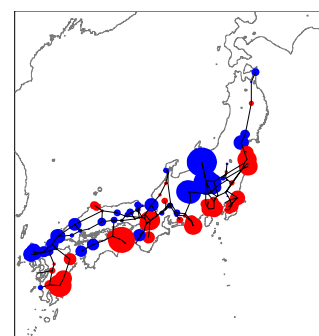


図 3: 現実的な地下抵抗と日本の電力網を考慮した地磁気誘導電流の計算結果。

な役割を果たしていることを見出した(Kurita et al., 2018)。また、ロスコーンに降下する電子の直接検出に成功し、宇宙空間でプラズマ波動によるピッチ角散乱が有効に働いている実証的な結果を得た(Kasahara et al. 2018 Nature)。さらに、あらせ衛星と他衛星との連携観測から、MHD 波動によって電子が変調されている様子や、複数の異なる種類のプラズマ波動が消失に寄与していることも実証した。プラズマ波動による粒子加速や散乱に関する非線形シミュレーションを進め、現実的な波動の励起過程や粒子の散乱過程を再現した(Saito et al. 2016, Katoh et al. 2018)。また、A01 班との連携によって太陽風シミュレーションと放射線帯シミュレーションの実時間連成計算を行い、一週間先までの放射線帯変動予測を行い、週間予測について Brier Score で平均 0.18、良好な予測の際に 0.09 程度の精度を達成した(基本目標 A03-1:達成度 Sⁱ)。

電離圏から地下に至る電磁場伝播の時間発展を解くことができるシミュレーションモデルを開発した。さらに、日本の超高圧送電網(737 経路)のモデルと 3 次元物理シミュレーションモデルを組み合わせることで、全国の送電網を流れる GIC を初めて計算した(図 3: Nakamura et al. 2018)。同時に電力会社と協力し 4 カ所の変電所で GIC を測定し、モデルを検証した。さらに、大気、地面、送電線が一体となった物理シミュレーションから、これまで不明瞭であった GIC の基本的な性質を明らかにすると共に、現実的な地下電気伝導度を考慮することで GIC の再現精度を高められることを実証した。また、この手法を地磁気誘導電流の影響を強く受けるカナダに应用展開した(基本目標 A03-2:達成度 Sⁱ)。

下層大気から超高層大気に伝搬する大気波動の観測データから大気波動がプラズマバブルなど電離圏におけるメソスケール擾乱の原因となっている証拠を得た。大気圏-電離圏結合数値モデル GAIA の高精度化を実現し、スポラディック E 層発生の季節・経度変化を再現することに初めて成功した(Shinagawa+ 2017)。GAIA により、プラズマバブル発生の日々変動を再現し(Shinagawa+ 2018)、プラズマバブルの発生と成長過程を再現することにより鉛直中性風の速度と構造がプラズマバブルの発生・成長に強く関わっていることを明らかにした(Yokoyama+ 2019)。さらに、GAIA をリアルタイム化し、前日までの再解析データを用いることにより、数日先の電離圏変動を予測するシステムを構築し予測精度の検証を行った。このモデルを用いてプラズマバブルとスポラディック E 層の発生をそれぞれ 73%以上、86%以上の精度で予測した。磁気嵐時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、電離圏嵐の再現を可能にした(基本目標 A03-3:達成度 Sⁱ)。

さらに、磁気嵐時の放射線帯、電離圏変動、地磁気誘導電流の変動過程の予測手法をそれぞれ提示した。特に、発展目標とした大規模な CME に起源をもつ激甚磁気嵐状態の予測を定量的に進め新たな地磁気変動指数 IpsDst を提案し、その有効性を検証した (Balant, 2017, 2019a, b)。

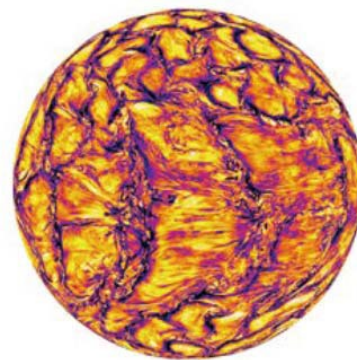


図 4: 太陽対流層上部境界付近での動径方向速度(Hotta et al. 2016 Science)。

(4) 太陽周期活動班【A04】

次期太陽周期活動を予測するため表面磁束輸送モデルを開発し 2020 年代における第 25 太陽周期が第 24 周期より十数%弱くなる結果を得た (Iijima et al. 2017)。また、スーパーコンピュータ「京」を用いて太陽対流層全球数値計算を超高解像度で行い (図 4)、太陽ダイナモ過程における乱流の役割を明確にした (Hotta et al. 2016 Science)。国立天文台では偏光観測データから磁場を導出する手法を開発した(Sakurai et al. 2018)。ひので衛星可視光望遠鏡の広領域磁場モザイク観測に基づく電流ヘリシティの波数スペクトル解析の新結果を得て、ひので衛星観測 11 年間のまとめ論文を発表した(Hinode Review Team et al. 2019)。黒点相対数、H α 線による太陽縁プロミネンス観測、国立天文台と京都大学所蔵のアナログ乾板 Ca II K 線太陽画像データ (1929 年~1969 年)、飛騨天文台フレア監視望遠鏡による H α 線画像 (1992~2012 年)、インド・コダイカナル観測所における過去 100 年の太陽観測データ (Shimojo et al. 2017) と飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡での彩層 Ca II K 線の分光撮像観測及び SDO 衛星による紫外線撮像データとの比較によって長期的太陽活動変動再現を行った(基本目標 A04-1:達成度 Sⁱ)。

太陽気候影響研究に関しては、高エネルギー粒子による NO_x, HO_x 生成過程を新たに導入した地球システムモデルを開発し (Yukimoto et al. 2019)、2003 年 10 月の巨大フレアに伴うオゾン減少の再現実験を行った。同モデルを用いて IPCC 第 6 次評価報告書における結合モデル相互比較に貢献した (Kageyama et al. 2017 など)。また、ベルリン自由大学の化学気候モデルを用いた 775 年の宇宙線急増現象 (三宅イベント) の 10Be 大気中移流実験を実施しその季節依存性を明らかにした (Spiegel et al. 論文投稿済) (基本目標 A04-2:達成度 Aⁱ)。

発展目標達成のため、14C および 10Be 解析からシュペーラー極小期直前に太陽活動周期長が延びていたことを発見し、大極小期と子午面循環の速度低下の関係を指摘した (Moriya et al. 2019)。樹木年輪の酸素同位体比から小氷期における太陽活動低下の後の日本域の相対湿度増加を明らかにし、太陽活動による海水温や大気循環への影響の可能性を指摘した (Sakashita et al. 2017)。また、海外図書館書籍資料を解析し、過去の特徴的な太陽表面磁場の再現を試みた (Hayakawa et al. 2020)。さらに、地球システムモデルを用いて完新世中期および最終氷期最大

期の古気候再現実験を行い、ミランコビッチ周期に伴う太陽紫外線スペクトル変動が成層圏オゾン光化学を通して地表気候に影響を及ぼすことを初めて指摘した(Noda et al., 2017, 2018)。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

*Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., Inoue, S., A physics-based method that can predict imminent large solar flares, Science, in press.

*Iwai, K., Yashiro, S., Nitta, N. V., Kubo, Y., Spectral Structures of Type II Solar Radio Bursts and Solar Energetic Particles, The Astrophysical Journal, 888, 50 (2020)

*Hayakawa, H. et al., Thaddaus Derfflinger's sunspot observations during 1802—1824: A primary reference to understand the Dalton Minimum. The Astrophysical Journal, 890, 98 (2020)

*Leka, K. et al., A Comparison of Flare Forecasting Methods. III. Systematic Behaviors of Operational Solar Flare Forecasting Systems, The Astrophysical Journal, 881, 101 (2019)

*Yokoyama T., Jin, H., Shinagawa, H., Liu H., Seeding of Equatorial Plasma Bubbles by Vertical Neutral Wind, Geophysical Research Letters, 46, 7088 (2019)

*Moriya, T. et al., A study of variation of the 11-year solar cycle before the onset of the Spoerer Minimum based on annually measured 14C content in tree rings. Radiocarbon, 61, 1749-1754 (2019)

*Inoue, S., Kusano, K., Büchner, J., Skala, J., A Formation and Dynamics of a Solar Eruptive Flux Tube, Nature Communications, 9, 174, (2018)

*Kasahara, S. et al., Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, Nature, 554, 337 (2018).

*Nakamura S. et al., Time Domain Simulation of Geomagnetically Induced Current (GIC) Flowing in 500-kV Power Grid in Japan Including a Three-Dimensional Ground Inhomogeneity, Space Weather, 16, 1946 (2018)

*Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., Den, M., Ishii, M., Deep Flare Net (DeFN) Model for Solar Flare Prediction, The Astrophysical Journal, 858, 113, (2018)

*Katoh, Y. et al., Dependence of Generation of Whistler Mode Chorus Emissions on the Temperature Anisotropy and Density of Energetic Electrons in the Earth's Inner Magnetosphere, Journal of Geophysical Research, 123, 1165 (2018)

*Kurita, S. et al., Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper-band chorus observed by the Arase satellite, Geophysical Research Letters, 45 (2018)

*Shinagawa, H. et al., Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA, Journal of Geophysical Research, 122, 4450 (2017)

*Kageyama et al., The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 4: Scientific objectives and experimental design of the PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments and PMIP4 sensitivity experiments, Geosci. Model Dev., 10, 4035-4055, (2017)

*Hanaoka, Y., Sakurai, T., Statistical Study of the Magnetic Field Orientation in Solar Filaments, Astrophysical Journal Letters, 851, 130 (2017)

*Iijima, H., H. Hotta, S. Imada, K. Kusano, and D. Shiota, Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment. Astronomy & Astrophysics, 607, L2 (2017)

*Noda, S. et al., Impact of interactive chemistry of stratospheric ozone on Southern Hemisphere paleoclimate simulation, J. Geophys. Res., 122, 878-895 (2017)

*Shiota, D., Kataoka, R., Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME), Space Weather 56-75, 14, (2016)

*Miyoshi, Y., Kataoka, R., Ebihara, Y., Flux Enhancement of Relativistic Electrons Associated with Substorms, in Waves, Particles, and Storms in Geospace, edited by G. Balasis, I. A. Daglis, and I. R. Mann, Oxford Press. 333 (2016)

*Hotta, H., M. Rempel, and T. Yokoyama, Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations. Science, 351, 6280, 1427-1430 (2016)

主な受賞

柴田一成：チャンドラセカール賞、大村善治：URSI Appleton Prize、坂本尚義：国際隕石学会レオナードメダル、天野孝伸・堀田英之：AAPS-DPP 2018 Young Researcher Award、高棹真介：IAU PhD Prize、宮原ひろ子：第1回米沢富美子記念賞、石井守：日本ITU協会賞【全48件】

ホームページ等

- ・新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」ホームページ <http://www.pstep.jp/>
- ・航空機被ばく警報システム WASAVIES <https://wasavies.nict.go.jp/>
- ・Deep Flare Net データベース http://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/solarflare/index_j.html

ⁱ 達成度の評価は以下の通り。S:目標を超える特に大きな成果を得た。A:目標を達成する成果を得た。B:目標達成には至らなかったが有益な成果を得た。C:十分な成果を得ることができなかった。