

領域略称名：太陽地球環境予測  
領域番号：2708

令和2年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「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」

領域設定期間  
平成27年度～令和元年度

令和2年6月

領域代表者 東海国立大学機構 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・  
教授・草野 完也

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3	交付決定額	6
4	研究領域の目的及び概要	7
5	審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6	研究目的の達成度及び主な成果	11
7	研究発表の状況	16
8	研究組織の連携体制	21
9	研究費の使用状況	22
10	当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11	若手研究者の育成に関する取組実績	25
12	総括班評価者による評価	26

**研究組織** (令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X01 総括	15H05812 総括班（太陽地球圏環境予測）	平成 27 年度 ～ 令和元年度	草野 完也	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 所長・教授	11
Y01 支援	15K21709 太陽地球圏環境予測における国際連携研究の推進	平成 27 年度 ～ 令和元年度	草野 完也	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 所長・教授	6
A01 計画	15H05813 次世代宇宙天気予報のための双方向システムの開発	平成 27 年度 ～ 令和元年度	石井 守	情報通信研究機構・ 電磁波計測研究所宇宙環境 インフォマティクス 研究室・室長	8
A02 計画	15H05814 太陽嵐の発生機構の解明と予測	平成 27 年度 ～ 令和元年度	一本 潔	京都大学 理学研究科 教授	8
A03 計画	15H05815 地球電磁気圏擾乱現象の発生機構の解明と予測	平成 27 年度 ～ 令和元年度	三好 由純	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授	13
A04 計画	15H05816 太陽周期活動の予測とその地球環境影響の解明	平成 27 年度 ～ 令和元年度	余田 成男	京都大学 理学研究科 教授	10
総括・支援・計画研究 計6 件					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公募	16H01176 電離圏擾乱が衛星搭載合成開口レ ーダー観測へ与える影響の評価と 補正	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	齊藤 昭則	京都大学 大学院理学研究科 准教授	1
A01 公募	16H01180 太陽地球圏における宇宙線被ばく に関するリアルタイムデータの提 供	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	保田 浩志	広島大学 原爆放射線医科学研究所 教授	1
A02 公募	16H01177 コロナ磁場モデリングに最適なス ペクトル線の選定	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	阿南 徹	京都大学 理学研究科 研究員	1
A02 公募	16H01187 太陽フレア多波長スペクトルモデ ルの構築	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	渡邊 恭子	防衛大学校 地球海洋学科 講師	1
A03 公募	16H01171 電離圏擾乱予測に資する金属イオ ン・原子層の動態研究：高エネル ギー粒子に対する応答	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	津田 卓雄	電気通信大学 大学院情報理工学研究科 助教	1
A04 公募	16H01173 湖成年縞から探る白亜紀の太陽活 動周期と十年規模気候	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	長谷川 精	名古屋大学 名古屋大学博物館 特任准教授	1
A04 公募	16H01181 中間圏・下部熱圏 H <sub>2</sub> O・ HO <sub>x</sub> 光化学モデルの開発研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	藤原 均	成蹊大学理工学部 教授	1
A04 公募	16H01184 太陽活動が海洋変動と気候に与え る影響の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	黒田 友二	気象庁気象研究所 気象研究部 室長	1
B01 公募	16H01169 太陽対流層大規模数値計算を用い た平均場パラメタ推定の精密化	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	堀田 英之	千葉大学 大学院理学研究院 特任助教	1
B01 公募	16H01170 大規模運動論的シミュレーション で解き明かす内部磁気圏の物理素 過程	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	天野 孝伸	東京大学 大学院理学系研究科 理学部 准教授	1
B01 公募	16H01172 プラズマ波動の伝搬特性を利用し た地球磁気圏環境の解析システム の開発	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	笠原 禎也	金沢大学 総合メディア基盤センター 教授	1
B01 公募	16H01174 回転磁気流体波動に注目した太陽 周期活動の多様性の究明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	堀 久美子	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 研究員	1

B01 公募	16H01175 太陽活動から地球環境への影響予測のための数理モデル	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	木村 芳文	名古屋大学 多元数理科学研究科 教授	1
B01 公募	16H01179 地球電磁気環境じょう乱ー 衛星表面相互作用に基づく衛星帯電の数値モデリング	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	三宅 洋平	神戸大学 計算科学教育センター 准教授	1
B01 公募	16H01182 適合格子細分化法を用いた太陽圏磁場の動的モデルの構築	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	松本 倫明	法政大学 人間環境学部 教授	1
B01 公募	16H01183 化学気候モデルを用いた太陽プロトイベントのオゾンと気候に及ぼす影響に関する研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	秋吉 英治	国立環境研究所 地球環境研究センター 室長	1
B01 公募	16H01185 深層学習を利用したリアルタイム太陽フレア予報システムの開発	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	村主 崇行	理化学研究所 計算科学研究機構 特別研究員	1
B02 公募	電波観測を用いたデータ同化型太陽嵐到来予測モデルの構築	平成 30 年度 ～ 令和元年度	岩井 一正	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 太陽圏研究部 准教授	1
B02 公募	プラズマ波の伝搬パラメータの精密推定に基づく地球磁気圏環境解析システムの開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	笠原 禎也	金沢大学 総合メディア基盤センター 教授	1
B02 公募	太陽活動とその影響を明らかにする数理モデルの開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	木村 芳文	名古屋大学 多元数理科学研究科 教授	1
B02 公募	大気粒子の帯電が雲に及ぼす影響の原理的雲解像モデルによる評価	平成 30 年度 ～ 令和元年度	島 伸一郎	兵庫県立大学 シミュレーション学研究科 准教授	1
B02 公募	高エネルギー荷電粒子降り込みに伴う影響の下方伝播・増幅メカニズムの解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	富川 喜弘	国立極地研究所 宙空圏研究グループ 准教授	1
B02 公募	ホイッスラーコーラス波動による放射線帯電子散乱過程の数理モデル	平成 30 年度 ～ 令和元年度	成行 泰裕	富山県立大学 学術研究部教育学係 准教授	1
B02 公募	太陽衛星画像の機械学習による太陽風起因の宇宙嵐予測モデル開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	西塚 直人	情報通信機構 テニユアトラック 研究員	1
B02 公募	合成開口レーダー干渉法 InSAR で見える大気圏の極端現象	平成 30 年度 ～ 令和元年度	古屋 正人	北海道大学 理学研究院 地球惑星科学部門 教授	1

B02 公募	スプラディックE層が航空航法に与える影響を広域にモニタリングするシステムの構築	平成 30 年度 ～ 令和元年度	細川 敬祐	電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授	1
B02 公募	世界最高解像度の計算で迫る太陽活動 11 年周期の物理機構	平成 30 年度 ～ 令和元年度	堀田 英之	千葉大学 大学院理学研究院 特任助教	1
B02 公募	適合格子細分化法を用いた太陽圏の高解像モデルの構築と銀河宇宙線の変調	平成 30 年度 ～ 令和元年度	松本 倫明	法政大学 人間環境学部 教授	1
B02 公募	平均場理論に基づく 3 次元太陽全球ダイナモモデルの開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	政田 洋平	愛知教育大学 教育学部 准教授	1
B02 公募	大気大循環モデルによる中間圏・熱圏下部 H <sub>2</sub> O・HOX 変動の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	三好 勉信	九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門 准教授	1
B02 公募	宇宙プラズマ環境変動を考慮した衛星帯電現象の数値モデリング	平成 30 年度 ～ 令和元年度	三宅 洋平	神戸大学 計算科学教育センター 准教授	1
B02 公募	太陽風回収試料の直接原子分析による 2003 年ハロウィン太陽嵐の解析	平成 30 年度 ～ 令和元年度	塚本 尚義	北海道大学 理学研究院 教授	1
B02 公募	太陽フレア多波長スペクトルと地球環境への影響	平成 30 年度 ～ 令和元年度	渡邊 恭子	防衛大学校 地球海洋学科 准教授	1
B02 公募	熱圏直接観測による中規模大気重力波と電離圏プラズマバブルの発生関係の検証	平成 30 年度 ～ 令和元年度	Liu HuiXin	九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門 准教授	1
公募研究 計 33 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	201,420,000円	153,600,000円	47,820,000円
平成 28 年度	185,010,000円	139,800,000円	45,210,000円
平成 29 年度	158,780,000円	119,600,000円	39,180,000円
平成 30 年度	160,600,000円	121,000,000円	39,600,000円
令和元年度	153,320,000円	115,400,000円	37,920,000円
合計	859,130,000円	649,400,000円	209,730,000円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

**1) 研究の学術的背景と応募領域の着想に至った経緯：**急速な宇宙探査と宇宙開発の進展の結果、宇宙空間が従来考えられていたより遥かに激しく変動する世界であると共に、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**」を形作っていることが分かってきた。特に、太陽で発生する巨大な爆発現象である太陽フレアとコロナ質量放出（CME）は文明にとって大きな脅威となる可能性がある。また、太陽活動の長期変動が地球の気象・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早急に確立する必要があることを我々に教えている。しかし、太陽地球圏環境の十分な予測能力を人類は未だ獲得していない。

一方、太陽地球圏環境の研究において、我が国はその最先端にある。特に、我が国の太陽観測衛星「ひので」とジオスペース探査機「あらせ（ERG）」は太陽地球圏の精密な観測を可能とした。また、大規模シミュレーションによる非線形現象の再現研究も近年急速に発達している。しかし、それにも関わらず太陽地球圏環境変動の理解と予測能力は未だ十分ではない。その理由として以下の2点を挙げる事ができる。

第1に、本格的な分野横断研究の欠如がある。太陽地球圏環境の変動は太陽、宇宙空間、地球及び社会システムに跨る複合現象であるが、これまでそれらは個別の学問領域で取り扱われ、現象の全体像を把握する試みは十分でなかった。第2の理由として、科学研究と予測研究の乖離を挙げる事ができる。現在、太陽地球圏環境の監視とその変動予測は各国の政府機関により「**宇宙天気予報**」として運用されている。しかし、現在の宇宙天気予報は限定された過去の経験に依拠する段階に留まっており、物理法則に基づく精密かつ堅強な予測の段階には至っていない。この状況は、最先端の宇宙科学と社会基盤としての宇宙天気予報の間に、「**死の谷**」と評される隔たりを生んでおり、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留まらせている。

以上の背景より、我々が生きる太陽地球圏環境を正確に理解すると同時にその変動を正しく予測することは、科学的にも社会的にも重要かつ緊急の課題であることが分かる。その解決のためには、太陽物理学、地球電磁気学、気象学・気候学及び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である。本領域はこうした認識の上に、様々な分野の研究者の危機感と強い意志に基づいて提案された。

**2) 本領域の目的：**上述した通り、本領域が対象とする学問分野は、天文学、太陽・太陽圏物理学、地球電磁気学、気象学・気候学、古気候学、電気工学、宇宙放射線医学など幅広い。本領域はこれらの分野の連携をもとに科学研究と予測研究の相乗的な発展を展開することで、既存の学問分野の枠に収まらない太陽地球圏環境予測研究の創成を目指すものである。このため、本領域では以下の2つの目的を掲げ、これを達成することで、革新的・創造的な学術研究の発展を実現する。

**【目的1】 科学的重要課題の抜本的解決：**最新の観測とシミュレーションを融合することで、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気象気候影響などの科学的重要課題を解決する。

**【目的2】 社会基盤としての宇宙天気予報の飛躍的な発展：**分野横断研究を通して複合現象である太陽地球圏環境変動が社会システムに与える影響を具体的に予報すると同時に、予報の定量的検証から観測システムと物理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。これによって社会基盤とし



ての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無い激甚宇宙天気災害に関する宇宙天気ハザードマップを作成し、これを広く社会に公開する。

**3) 本領域の概要：**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する。

**予報システム班 (A01)：**A02-A04班が開発する物理モデルと社会が必要とする宇宙天気予報情報を相互に連結することで、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ことを基本目標とする。また、宇宙天気ハザードマップを作成し、広く公開する。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)：**ひので衛星等による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、太陽フレアからコロナ質量放出に発展する過程を観測し、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ことを基本目標とする。発展目標として、観測とモデルの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)：**基本目標として、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太陽フレアによる熱圏密度・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)：**基本目標として、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り次期太陽活動サイクル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を解明し、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を行う。

#### **4) 本領域において期待される革新的・創造的な学術研究の発展：**

- ①世界的な社会基盤構築への貢献：惑星規模の激甚宇宙天気災害は将来必ず発生すると考えられるが、本領域はそれに対応する社会基盤の構築に貢献することが期待できる。
- ②科学的重要課題の抜本的解決：科学研究と予測研究の相乗的發展を通して、太陽フレアの発生機構や地球放射線帯の変動機構等、これまで長い間未解明であった太陽地球圏の科学的重要課題を抜本的に解決することが期待できる。
- ③宇宙における生存環境の普遍的な理解：本領域の成果は地球以外の惑星や系外惑星にも応用できるため、宇宙における生存環境の普遍的な理解のための基盤を与えることが期待できる。
- ④国際共同研究のリーダー：当該分野における我が国の先進性を活かすことで、国際プロジェクトVarSITIを始めとした国際共同研究をリードする役割を果たすことが期待できる。
- ⑤分野融合型の若手人材育成：多様な分野の研究者が共に参加する包括的な研究ネットワークを構築し、太陽地球圏環境を基軸とした分野融合型の若手人材育成を実践的に進めることが期待できる

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### (審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

#### <審査結果の所見において指摘を受けた事項>

本研究領域は、太陽を起源とする惑星規模の環境変動について、その発生と影響を予測する科学的な基盤を確立することを目指す提案である。物理モデルによる予測と、その定量的な検証を通して、次世代宇宙天気予報の基盤を構築し、宇宙天気予報を社会的基盤にまで高めようという取組の意義は大きい。また、次世代宇宙天気予報の基盤提供に関連して様々な技術開発の展開が予想され、一定の波及効果も期待される。

各計画研究には、太陽物理学、地球電磁気学、気象学・気候学など、幅広い分野の実績ある研究者が参画しており、これらの計画研究の連携によって新しい学術領域の形成が期待できる。また、領域代表者には十分なマネジメント実績が認められ、広い視野に立った領域全体の推進が期待できる。

一方で、各計画研究が孤立することがないように、有機的な連携の強化が必要である。

#### (留意事項)

1. 各計画研究はこれまでの研究を個別に深化させようとするものが多いように見える。領域代表者及び総括班が中心となって相互の連携を密に行い、狭い研究に落ち込まないようにする工夫が必要である。
2. 研究項目A01、A03、A04では旅費が多く計上されているが、その妥当性・必要性が不明瞭であるため、エフォートとの整合性も踏まえて、旅費の積算を見直した上で交付申請されたい。

上記の所見と留意事項1.に対応するため、特に各班の連携強化について以下の対応を実施した。

1. **課題解決型の連携タスクチーム体制の強化**：計画班を横断して課題解決を目指す下記の連携タスクチームを組織し、複数の研究班が協力する体制を強化した。
  - ・ **統合モデルタスクチーム (A01+A02+A03+A04+B01連携)**：太陽地球圏環境の要素モデルと宇宙天気エンドユーザーモデルの統合開発を推進した。研究会集「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」を毎年(全4回)開催すると共に、開発した様々なモデルに関する積極的な情報発信をWEB(<https://www.pstep.jp/model>)を通して行った。
  - ・ **衛星帯電タスクチーム (A01+A03連携)**：宇宙放射線変動から人工衛星の帯電評価を実現することを目的として、宇宙環境の予測と衛星帯電シミュレータ(MUSCADT)の連携により衛星帯電リスクを予測するモデル開発を行うと共に、JAXAの衛星を使った実証実験を進めた。
  - ・ **地磁気誘導電流(GIC)タスクチーム (A01+A03連携)**：磁気圏・電離圏モデル、地下構造を考慮した電磁場伝搬モデル、電力網モデルを連結し地磁気誘導電流を評価すると共に、国内電力会社と協力し商用電力網2箇所におけるGICのリアルタイム測定を開始し、予測の実証的検証を行った。
  - ・ **降下電子大気応答タスクチーム (A03+A04連携)**：大気電子降込みの大気化学的影響を予測するモデル開発を行うと共に、降下電子による中間圏オゾン影響についてフィンランドとの国際共同研究を推進した。
  - ・ **電離圏タスクチーム (A01+A03連携)**：電離圏擾乱から電波伝播障害の予測システムを開発した。さらに、GNSSに対するプラズマバブルの影響予測についてフランスとの国際共同を推進した。
  - ・ **太陽放射大気影響予測タスクチーム (A02+A03+A04連携)**：フレア及び太陽周期変動に伴う太陽放射スペクトルを再現し、その超高層大気に対する影響を解析した。
  - ・ **ハザードマップ作成タスクチーム (A01+A02+A03+A04連携)**：極端宇宙天気現象の発生頻度と社会インパクトの検討を検討し、ハザードマップとしてまとめた。
2. **領域会議及びPSTEP国際シンポジウムの開催**：領域全体の連携を強化し、課題を明確化する為、領域会議を毎年度実施すると共に、全4回の国際シンポジウムを開催した。
3. **PSTEPセミナーによる分野融合の拡大**：インターネットを利用して全国の関連機関をつないで太陽地球圏環境に関する様々な情報交換を行なうPSTEPセミナーを2016年4月より毎月全40回実施した。本セミナーは分野を超えた議論を展開する場として大きな役割を果たしており、2020年4月からはさらに拡大した全国オンラインセミナー(Space-Sun-Earth(SSE)セミナー)として永続的に継続されている。
4. **PSTEPニュースレターの定期発行**：2016年4月より年4回(全16刊)ニュースレターを発行し、研究成果と領域活動を領域内外に分かりやすく伝える活動を拡大することで、分野を超えた相互理解と領域としての情報共有に大きな成果を上げた。また、全計画研究班で構成された編集委員会の活動は、分野を超えた相互理解の深化にもつながった。

## (中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

### ＜中間評価における所見＞

本研究領域は、太陽地球圏環境の変動を太陽・宇宙空間・地球の3つの領域にまたがる現象として把握しようとする取組みがなされており、次世代宇宙天気予報の社会基盤の形成に向けてはまだ課題が残るものの、研究領域の設定目的に照らして、期待通りの進展が認められ、今後のより一層の進展が期待される。

所見において指摘された計画研究間の連携強化の点については、計画研究をまたがる課題解決型の連携タスクチームを組織するなど適切に対応がなされている。研究成果の内、特に、宇宙放射線・電離圏電子密度変動・地磁気誘導電流を対象とした発生機構の解明と予測モデルの開発や、観測された太陽光球付近の磁場情報を初期条件とした次期太陽周期活動の予測スキームの開発は注目に値する。また、宇宙天気予報の社会実装を促進するための宇宙天気ユーザー協議会設立とそれによる宇宙天気情報ニーズとシーズのマッチングを図る取り組みや、若手研究者支援プログラムによる人材育成は評価できる。

一方で、次世代宇宙天気予報の社会基盤形成に向けて、研究項目間の連携強化や、ユーザーニーズとのギャップを埋めるための一層の工夫が望まれる。

### (留意事項)

1. 次世代宇宙天気予報の社会基盤の形成に向けた分野融合的な成果を出すために、個別の研究課題の連携をより意識して本研究領域全体の推進を図っていくことが望まれる。
2. 宇宙天気ユーザー協議会によるニーズとシーズのギャップ解析は個別の課題への対応にとどまっているように見受けられる。次世代宇宙天気予報の社会実装に向けて、予報の信頼性や社会経済的な影響などを具体的に明確に示す必要があると考えられる。
3. 研究項目A01の成果が、研究内容の性格上、これまで少なかった。科学論文や当該研究に相応しい形での成果の着実な公表が望まれる。

1. 上記の所見と留意事項1.に対応するため、以下の取り組みをさらに強化継続し、領域全体が有機的に研究活動を推進するための環境を整えた。

・課題解決型の連携タスクチーム体制の強化：上記した7つのタスクチームの活動を継続拡大し、研究班を超えて目的を共有した研究を実施した。特に、統合モデルタスクチームでは毎年度、分野を超えた全国研究集会を開催し、共通モデルの開発と整備を進めた。

・領域会議及びPSTEP国際シンポジウムの開催：名古屋大学宇宙地球環境研究所とも協力し、領域全体会議と国際シンポジウムを毎年度開催した。

・PSTEPセミナーによる分野融合の拡大：上記中間評価所見への対応参照。

・PSTEPニュースレターの定期発行：上記中間評価所見への対応参照。

・オープン・テキストブック「太陽地球圏環境予測」の製作：全計画班の協力により、若手研究者と大学院生が分野横断型の研究を進めるためのオープン・テキストブック「太陽地球圏環境予測」を製作中であり、2020年度内に名古屋大学レポジトリより公開する。

2. 留意事項2.に対応するため、宇宙天気予報を実社会で利用するユーザーとその研究者が相互に議論することができる「宇宙天気ユーザー協議会」を組織し、合計8回開催した。また、その活動を通して宇宙天気予報のニーズ・シーズギャップを解析し、実社会に役立つ予測研究の課題を明確にすることで、領域研究の方向性を明確にする努力を行った。宇宙天気の社会影響は幅広い範囲に及び、その影響の現れ方および程度はそれぞれの分野で大きく異なる。そのため、利用目的に分けて議論する必要があるが、これまで宇宙天気研究から社会へのアプローチの多くは太陽・太陽風・磁気圏・電離圏といった従来の専門領域で区分されていた。それに対し、今回の宇宙天気ユーザー協議会では、ユーザーの立場から問題点を明らかにし、そのための研究戦略を従来の専門分野を超えて策定した。その点においてこれまでにない画期的な取り組みといえる。それにより、例えば、利用分野としての電波伝搬の課題を太陽・太陽風・磁気圏・電離圏それぞれの専門家の知見を結集して議論を進めることができた。

3. 留意事項3.に対応し、上記した「宇宙天気ユーザー協議会」での検討を基に、宇宙天気予報ユーザーにとって有用なコンテンツを開発すると共に47編の査読付き論文と2編の書籍を発表した。さらに、そうした研究を総括し、一般社会に的確かつ分かりやすい伝えるため、「宇宙天気ハザードマップ」をA01班が中心としてとりまとめた。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

本領域ではScience誌3編、Nature誌1編を含む500編以上の査読付き論文を出版し、基本目標(表1)を超える多くの成果を得た。さらに、発展目標(表2)についても十分な成果を得ることができた。以下に各項目の達成度と重要な成果について報告する。

表1：基本目標の達成度と成果概要 (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。)

計画班と項目	基本目標	達成度 <sup>1</sup>	主要な成果の概要
A01 基本1	A02-A04班が開発する物理モデルと社会が必要とする宇宙天気予報情報を相互に連結することで、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。	S	宇宙天気ユーザー協議会を設立し、これまでセキュリティ上議論が困難だった電力・航空分野を含めた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。
A01 基本2	宇宙天気ハザードマップを作成し、広く公開する。	A	我が国初の包括的な「宇宙天気ハザードマップ」を完成させた。2020年内に公開・報道発表する。
A02 基本1	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。	S	巨大フレアの発生をその位置までも正確に予測する世界初の物理モデル( $\kappa$ スキーム)の開発と実証に成功し、宇宙天気予報に応用するための基礎研究を開始した(Kusano+ 2020 Science)。
A02 基本2	太陽フレアからCMEに発展する過程を観測し、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。	A	太陽フィラメント噴出の全貌を捉える世界的にユニークな観測システムを整備し(Ichimoto+ 2017)、CMEの地球到来を観測と数値モデルを結合して予測するシステムを開発した(Iwai+ 2019)。
A03 基本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。	S	太陽風に伴う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ともに、「あらせ」衛星による非線形波動粒子相互作用の実証に世界で初めて成功した(Miyoshi+ 2018, Kasahara+ 2018 Nature)。
A03 基本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)を予測すると共に、観測による検証によって予測精度を向上させる。	S	3次元モデルと送電網モデルを組み合わせた世界初の地磁気誘導電流シミュレーションモデルを開発し、電力会社と協力し実際の変電所での実測値をよく再現することを実証した(Nakamura+ 2018)。
A03 基本3	太陽フレアによる熱圏・電離圏密度変動の現況推定と数時間先予測を行う。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。	S	観測による検証を通して全球大気圏-電離圏結合モデルGAIAの高精度化を実現し、電離圏擾乱現象の発生確率予測に成功するとともにリアルタイム予測スキームを国内で初めて確立し、予測運用への応用に着手した(Shinagawa+ 2017, 2018)。
A04 基本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り次期太陽活動サイクルの予測を行う。	S	精密観測に基づき太陽表面磁場変動を計算する物理モデルを開発し、次期太陽周期活動が現周期より十数%低下することを予測した(Iijima+ 2017)。「京」による世界最高精度シミュレーション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(Hotta+ 2016 Science)。
A04 基本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。	A	高エネルギー粒子化学過程を組み込んだ地球システムモデルを開発し(Yukimoto+ 2019)、太陽フレアに伴うオゾン減少の影響を検証した。結合モデル相互比較国際プロジェクトに参画し、世界の気候変動評価に貢献した(Kageyama+ 2017など)。

表2：発展目標の達成度と主要な成果（<sup>2</sup>：発展目標に着手できなかった。+：発展目標に着手した。++：発展目標に着手し、一定の成果を得た。+++：発展目標に着手し、十分な成果を得た。）

計画班と項目	目標内容	達成度 <sup>2</sup>	主要な成果
A01 発展	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。	+++	電波伝搬、航空機被ばく推定システムを構築し一部公開した (Sato+, JSWSC, Hozumi+, Air Traffic Manage. Sys.)。MHDモデル(SUSAN00)、あらせ衛星放射線帯予測を予報業務で利用開始した。
A02 発展	観測とモデルの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。	++	フレア高活動黒点の形成を再現する初のMHDモデル、フレア放射スペクトルの予測モデル等、次世代宇宙天気予報に必要なコンポーネントを開発した (Toriumi+ 2017, Inoue+ 2018)。
A03 発展	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。	++	磁気嵐時の各変動を予測する方法を提示した。また、激甚宇宙天気災害を予測するための地磁気変動指数である IpsDst 指数を新たに提案し、その有効性を検証した (Balan+ 2017, 2019a, 2019b)。
A04 発展	数百年スケールの太陽活動長期変動の機構を解明し、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を行う。	+++	古気候データの超高精度分析により、シュペーラー極小期発生直前の太陽周期長の伸長を発見した (Moriya+ 2019)。古気候再現実験を行い、ミランコビッチ周期による太陽紫外線変動がオゾン層の光化学過程を通して地表気候に影響する過程を明らかにした (Noda+ 2017, 2018)。

**A01-基本1（宇宙天気予報のニーズ・シーズマッチング）**：2016年2月に宇宙天気ユーザー協議会を設立し、通信・測位・衛星運用・電力・航空等それぞれの分野の事業者と共に8回検討会を開催した。この中で、事業者および研究者からの綿密なヒアリングを行い、宇宙天気情報に関するニーズとシーズを抽出、そのギャップ解析を行った。その結果はA02-04 班に今後の研究目標として展開された。また、A01班で開発してきた電波伝搬シミュレータや航空機被ばく推定システム（発展目標）について、関連事業者とインターフェースについて検討を重ね、実際に使用されるコンテンツとすることに成功した。一方、電力および衛星運用については、高度なセキュリティを要する分野であること、利用者が限定されることから、当初想定した公開・可視化は行わなかった。この分野については今後、ニーズに即した情報提供の在り方を検討する。

**A01-基本2（宇宙天気ハザードマップ）**：本領域の全計画班からなる編集委員会を編成し、我が国初の「宇宙天気ハザードマップ」を作成した。誰にでもわかる宇宙天気の説明と実際に起こり得る災害推定について解説した。特に、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科学的に評価し説明した。2020年度中に公開する。

**A01-発展（次世代宇宙天気予報システム）**：①レイトレーシング法を用いて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）。地上の電子基準点網で得られた電離圏情報をもとにリアルタイムに近い電波伝搬状況を推定することが可能となった。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。一方、L帯の伝搬シミュレータをフランスのCNESと共同開発中であり、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。また、r粒子シミュレーションにより衛星周辺のプラズマ環境の変化を調べた【公募研究】。これらを用いて、みちびき初号機、Van

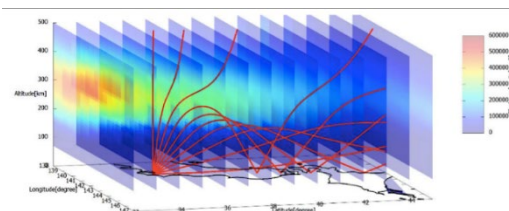


図1：HF-STARTの出力例。赤線が電波伝搬経路、色の3次元分布は電離圏電子密度を表す。

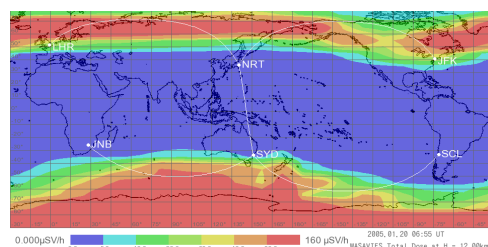


図2：WASAVIES 出力例：色は各地の被曝線量を表す。



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。深部帯電については、DRTSについてESA帯電モデルの再現性の評価を行った。深部帯電時系列情報提供システムを2020年度末までに構築する。③ A03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。これにより、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。また、我が国の宇宙天気モデルをリスト化しWEBで公開した(<https://www.pstep.jp/model>)。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。

**A02-基本1 (太陽フレア予測)** : 電磁流体力学不安定性から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、衛星データから再現した太陽コロナの3次元磁場にこのモデルを適用することで、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( $\kappa$ スキーム)を開発した。さらに、 $\kappa$ スキームが過去10年間に発生した9つの巨大フレアのうち、7フレアをその位置まで正確に予測できることを実証し(図3)、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)。ひので衛星やSDO衛星データから、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【公募研究】)、NICTで運用を開始した。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)及びより現実的な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)。一方、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。

質量放出の発生予測について、京大ではフィラメント噴出の前兆現象を発見するとともに(後述)、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だし(Kawabata et al. 2018)、その自動検出アルゴリズムの開発を進めた。これらにより質量噴出の発生や磁場の方位角を事前予測するための新たな可能性を開くことができた。さらに、国立天文台で開発した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初の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。

**A02-基本2 (太陽嵐のリアルタイム予測)** : 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観測装置(SDDI)を開発し、2016年5月より京大飛騨天文台で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(図4)、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いだした(Seki et al. 2020, in prep)。また、CME発生予測に繋がる噴出前フィラメント内でのプラズマ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では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、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た。また、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、NICTの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【公募研究】)。

**A02-発展 (フレア発生前太陽嵐予測)** : フレアを発生する黒点がそもそもどのように形成されるのかを理解するため、太陽対流層と太陽表面を共に含む初めてのフレア黒点形成シ

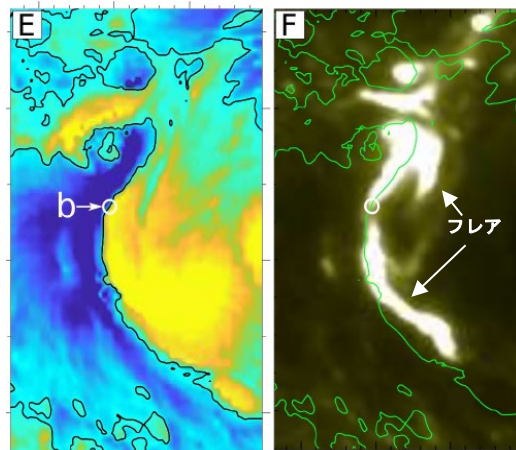


図3 : 2017年9月に発生した巨大フレアの予測 : 左図は太陽表面磁場分布と $\kappa$ スキームによるフレア発生予測点b、右図は実際のフレア発光。予測点よりフレアが拡大したことが分かる。

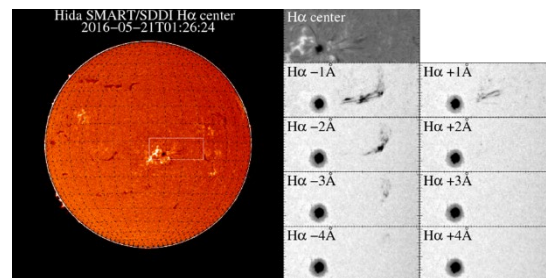


図4 : 飛騨天文台SDDIで2016年に観測されたフィラメント噴出現象。右下は-200km/sから+200km/sまでの各噴出速度分布の観測結果。

ュレーションに成功した (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GOES X線フラックスや活動領域の特徴量から再現・予測するフレア放射モデルを開発した (Kawai et al. 2020, 【公募研究】Nishimoto et al 2020 in prep.)。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京都大学と東北大学で開催し、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) 等を予測につながる新たな知見を得ることができた。

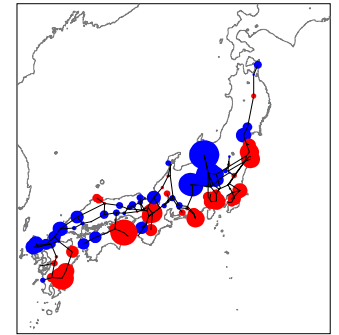


図5：現実的な地下抵抗と日本の電力網を考慮した地磁気誘導電流の計算結果。

**A03-基本1 (放射線帯変動予測)**：「あらせ」衛星を中心とした衛星データ解析、新たに開発したシミュレーションによって、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。放射線帯電子加速に関するモデルを提案するとともに (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世界で初めて成功するとともに (Kasahara et al. 2018 Nature)、宇宙空間でプラズマ波動と粒子の相互作用の直接検出にも世界で初めて成功した (Kitamura et al. 2018 Science)。さらに、「あらせ」衛星と他衛星との連携観測のデータ解析から、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。シミュレーションについては、プラズマ波動励起および波動による粒子加速や散乱に関する非線形過程のシミュレーション研究を進め、現実的なプラズマや磁場パラメータにおける計算によって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うシステムの運用を開始し、予測された確率と実際の結果の差で評価するBrier Scoreで0.09の精度を達成した。

**A03-基本2 (地磁気誘導電流予測)**：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3次元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) のモデルを開発し、3次元物理シミュレーションモデルと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5: Nakamura et al. 2018)。同時に電力会社の協力を得て4カ所の変電所でGICを10 Hzで測定した。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モデルを開発し、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、日本列島直下の抵抗分布を整理しデータベースを開発した。これを用いて現実的な地下電気伝導度を考慮することで、実測値の再現精度を高めることができることを実証した。さらに、本研究手法を地磁気誘導電流の影響を強く受けるカナダに応用展開した。

**A03-基本3 (電離圏変動予測)**：地上及び人工衛星観測により得られた電離圏・熱圏データを解析し、下層大気から超高層大気に伝搬する大気波動を見出し、大気波動がプラズマバブルなどのメソスケール擾乱の原因となっている証拠を得た。これらの観測結果をもとに、大気圏-電離圏結合数値モデルであるGAIAの精度を検証し、モデル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)。また、GAIAにより、プラズマバブル発生の日々変動を再現したことに加え (Shinagawa+ 2018)、局所高精度電離圏モデルを用いて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た (Yokoyama+ 2019)。さらに、GAIAをリアルタイム化し、前日までの気象再解析データを入力として用いることにより、数日先の電離圏変動を予測するシステムを構築し、観測結果と比較することにより予測精度の検証を行った。このリアルタイム版GAIA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%以上の精度で予測するスキームを開発した。磁気嵐時の電離圏・熱圏変動予測に関しては、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、電離圏嵐の再現が可能になった。

**A03-発展 (激甚宇宙天気災害の精密予測)**：地球電磁気圏の最大の擾乱現象である磁気嵐を対象として、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観測的、理論的研究を進めるとともに、それぞれの予測に関する手法の提示を行った。また、特に大規模なCMEに起源をもつと考えられる激甚磁気嵐状態の予測を定量的に進めるために、新たな地磁気変動指数であるIpsDst指数の提案を行い、その有効性を検証した (Balan+, 2017, 2019a, b)。

**A04-基本1 (次期太陽周期予測)**：①観測された太陽光球付近の磁場情報を初期条件として極磁場が



予測可能であることを示し、浮上磁場の詳細に依存しない太陽周期活動予測用表面磁束輸送モデルを開発して次期太陽周期の振幅を予測した結果、2020年代に現れる第25太陽周期は第24周期より十数%弱くなるという結果を得た(Iijima et al. 2017)。また、予測に必要な太陽表面速度場を最新観測から推定する磁気要素追跡法を開発導入した(Imada & Fujiyama 2018)。②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従来にない高解像度で実行し(図6)、小スケールの磁場破壊運動が抑制され大スケール磁場が強くなることを発見して、太陽ダイナモにおけるスケール間相互作用を通じた磁場維持メカニズムを提案した(Hotta et al. 2016 Science)。堀田氏はその成果によりアジア太平洋物理学会プラズマ物理部門・若手研究者賞を受賞した。さらに、「富岳」による研究の準備を進めた。③国立天文台・三鷹の磁場観測装置を継続運用し、偏光観測データから磁場を導出するデータ処理法を開発して装置論文として出版した(Sakurai et al. 2018)。また、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いて電流ヘリシティの波数スペクトルという新たな結果を得たほか、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)。また、1930年代からの蓄積データをもとに、改訂後の黒点相対数の比較検証、H $\alpha$ 線観測した太陽縁プロミネンスの極方向移動(子午面環流速度)の推定を行った。④国立天文台・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)のデジタル化、較正処理を行い、データベースを作成した。また、飛騨天文台フレア監視望遠鏡によるH $\alpha$ 線画像(1992~2012年)を加えて、これらの期間のプラージュ領域を導出し、「蝶型図」を作成して20世紀前期から現在に至る期間の太陽彩層活動変動を明らかにした。さらに、インド・コダイカナル観測所との国際共同研究によりさらに古くからの乾板データのデジタル化を行い、乾板上濃度を輝度に変換する新手法を開発して過去100年にわたる太陽紫外線放射の長期変動を解析した(Shimojo et al. 2017)。飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で彩層Ca II K線の分光撮像観測を行い【公募研究】、SDO衛星など近年の人工衛星による紫外線撮像データと直接比較して、過去の乾板データから紫外線スペクトルを推定できる可能性を示した。

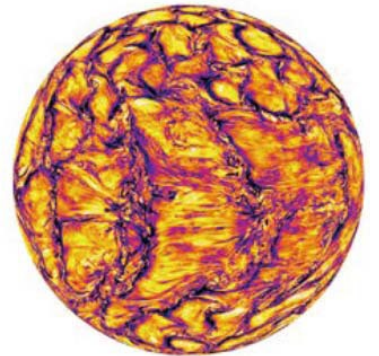


図6：太陽対流層上部境界付近での径方向速度(Hotta+ 2016 Science)。

**A04-基本2 (太陽気候影響) :** ①太陽や宇宙線に伴う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気象研究所地球システムモデルMRI-ESM2.0を開発し(Yukimoto et al. 2019)、2003年10月末の巨大フレアに伴うオゾン減少の再現検証実験を行った。同モデルを用いてIPCC第6次評価報告書作成に資する第6次結合モデル相互比較プロジェクトCMIP6に準拠した実験を遂行し、実験結果を提出して世界の気候変動評価に貢献した(Kageyama et al. 2017など)。②国際活動支援班との連携により、ベルリン自由大学の化学気候モデルを用いた775年三宅イベント(完新世最大の太陽高エネルギー粒子イベント)の10Be移流実験を実施し、成層圏-対流圏交換および地表面沈着過程の季節依存性を明らかにして地質学的試料分析の制約条件を限定した(Spiegl et al. Nat. Comm. 投稿済)。これは、最終年度に実施した新たな国際共同研究であるが、分野連携により新奇性が高い結果を得ることができた。

**A04-発展 (長期変動の解明と予測) :** ①樹木年輪中14Cおよび氷床コア10Beをプロキシとし、太陽活動極小期における宇宙線強度変動特性の詳細解析を行い、太陽周期長の変動を復元した。シュペーラー極小期発生直前の2周期にわたる周期長の伸長を発見し、太陽活動低下と子午面循環速度低下の関係性を指摘した(Moriya et al. 2019)。また、樹木年輪の酸素同位体比から小氷期における日本域の乾湿環境を復元して、太陽活動の低下に遅れて相対湿度が増加していたことを明らかにし、海水温や大気循環への影響を介する形で太陽活動変動が日本域の降水に影響を及ぼした可能性を指摘した(Sakashita et al. 2017)。②17世紀のマウンダー極小期など過去の太陽活動の情報を得るため海外図書館書籍資料を解析し、過去の特徴的な太陽サイクルの太陽表面磁場の再現を試みた(Hayakawa et al. 2020)。③開発した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の地球軌道要素変動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まで影響を及ぼすことを初めて指摘し、影響遠隔伝播の力学・光化学・海水結合過程を明らかにした(図7: Noda et al. 2017, 2018)。

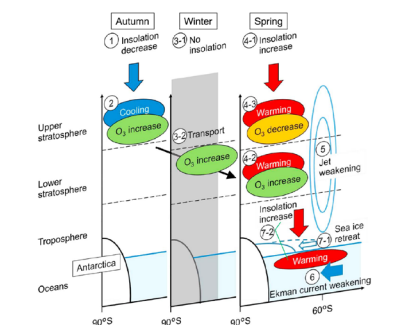


図7: ミランコビッチ周期による太陽紫外線スペクトル変動が、成層圏オゾン光化学を通して南極域の地表気候にまで影響を及ぼす力学・光化学・海水結合過程の概念図(Noda+ 2017)。



## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### A. 雑誌論文

#### 【予測システム班：A01（全47編）】

- \*Kubota Y., T. Nagatsuma, A. Nakamizo, K. Sakaguchi, M. Den, H. Matsumoto, N. Higashio, and T. Tanaka  
Comparison of Magnetospheric Magnetic Field Variations at Quasi-Zenith Orbit Based on Michibiki Observation and REPPU Global MHD Simulation, IEEE Trans. Plasma Sci., 47, 8, 3937-3941 (2019)
- \*Nakamizo, A., and Yoshikawa, A., Deformation of ionospheric potential pattern by ionospheric Hall polarization. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124, 7553–7580 (2019)
- \*Sato, T., Kataoka, R., Shiota, D., Kubo, Y., Ishii, M., Yasuda, H., Miyake, S., Miyoshi Y., Ueno H., Nagamatsu A., Nowcast and forecast of galactic cosmic ray (GCR) and solar energetic particle (SEP) fluxes in magnetosphere and ionosphere? Extension of WASAVIES to Earth orbit, Journal of Space Weather and Space Climate A9, 9, (2019)
- \*Sato, T., Kataoka, R., Shiota D., Kubo, Y., Ishii, M., Yasuda H., Miyake S., Park I. C., Miyoshi Y., Real Time and Automatic Analysis Program for WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles, Space Weather 924-936, 16 (2018)
- \*Nagatsuma, T., H. Matsumoto, Y. Kubota, A. Nakamizo, K. Koga, Comparison between Surface Charging Event from MICHIBIKI (QZS) Satellite and Space Environment Data from Global MHD Simulation, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 16, 157-160 (2018)
- \*Saito, S., Yamamoto, M., Maruyama T., Arrival Angle and Travel Time Measurements of HF Transequatorial Propagation for Plasma Bubble Monitoring, Radio Science 1304-1315, 53, (2018)
- \*Tsunoda, R. T., Saito, S., Nguyen T. T., Post-sunset rise of equatorial F layer? or upwelling growth?, Progress in Earth and Planetary Science 5, (2018)
- \*Bumrungrit A., Supnithi P., Saito S., Statistical Analysis of Separation Distance Between Equatorial Plasma Bubbles Near Suvarnabhumi International Airport, Thailand, Journal of Geophysical Research: Space Physics 7858-7870, 123 (2018)
- \*Budtho J., Supnithi P., Saito S., Analysis of Quiet Time Vertical Ionospheric Delay Gradients Around Suvarnabhumi Airport, Thailand, Radio Science 1067-1074, 53, (2018)
- \*Li, G., Ning B., Abdu M. A., Wang C., Otsuka, Y., Wan, W., Lei J., Nishioka, M., Tsugawa T., Hu, L., Yang, G., Yan, C., Daytime F-region irregularity triggered by rocket-induced ionospheric hole over low latitude, Progress in Earth and Planetary Science, 5, (2018)
- \*Buhari, S. M., Abdullah, M., Yokoyama, T., Otsuka, Y., Nishioka, M., Hasbi, A. M., Bahari S. A., Tsugawa T., Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, (2017)
- \*Wichaipanich, N., Hozumi, K., Supnithi, P., Tsugawa, T., A comparison of neural network-based predictions of foF2 with the IRI-2012 model at conjugate points in Southeast Asia, Advances in Space Research 2934-2950, 59, (2017)
- \*Ishii, M., Japanese space weather research activities, Space Weather 26-35, 15, (2017)
- \*Ishii, M. et al., Physics- Based Modeling Activity from the Solar Surface to the Earth's Atmosphere Including Magnetosphere and Ionosphere at NICT. Proceedings of the International Astronomical Union, 13(S335), 284-287 (2017)
- \*Kubota, Y., T. Nagatsuma, M. Den, T. Tanaka, and S. Fujita, Polar cap potential saturation during the Bastille Day storm event using global MHD simulation, J. Geophys. Res. Space Physics, 122 (2017)
- \*Nishioka, M., Tsugawa, T., Jin, H., and Ishii, M., A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics Space Weather 228-239, 15, (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)
- \*Sato, T., Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World, Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE, 10, 12, (2015)
- \*Kubo, Y., Kataoka, R., Sato, T., Interplanetary particle transport simulation for warning system for aviation exposure to solar energetic particles, Earth, Planets and Space, 67, 117 (2015)
- \*Kataoka, R., Nakagawa, Y., Sato, T., Radiation dose of aircrews during a solar proton event without ground-level enhancement, AnGeo Comm. 75-78, 33, (2015)

【太陽嵐班：A02（全120編）】

- \*Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., Inoue, S., A physics-based method that can predict imminent large solar flares, Science, in press.
- \*Kawai, T., Imada, S., Nishimoto, S., Watanabe, K., Kawate, T., Nowcast of an EUV dynamic spectrum during solar flares, Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 205, 105302 (2020)
- \*Miyoshi, T., Kusano, K., Inoue, S., A Magnetohydrodynamic Relaxation Method for Non-force-free Magnetic Field in Magnetohydrostatic Equilibrium, ApJS, 247, 6M (2020)
- \*Kawabata, Y.; Inoue, S.; Shimizu, T., Extrapolation of Three-dimensional Magnetic Field Structure in Flare-productive Active Regions with Different Initial Conditions, The Astrophysical Journal, 895, 105 (2020)
- \*Bamba, Y., Inoue, S., Imada, S., Intrusion of Magnetic Peninsula Toward Neighboring Opposite Polarity Region that Triggers Largest Solar Flare in Solar Cycle 24, The Astrophysical Journal, 894, 29 (2020)
- \*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)
- \*Leka, K. D., Park, S., Kusano, K., et al., A Comparison of Flare Forecasting Methods. III. Systematic Behaviors of Operational Solar Flare Forecasting Systems, The Astrophysical Journal, 881, 101 (2019)
- \*Sekii, D., Otsuji, K., Isobe, H., Ishii, T. T., Ichimoto, K., Shibata, K., Small-scale motions in the solar filaments as the precursors of the eruptions, PASJ, 71, 56 (2019)
- \*Inoue, S., Kusano, K., Büchner, J., Skala, J., A Formation and Dynamics of a Solar Eruptive Flux Tube, Nature Communications, 9, 174, (2018)
- \*Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., Kubo, Y., Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, Earth, Planets and Space, 71, 39 (2019)
- \*Toriumi, S., H. Hotta, H., Spontaneous Generation of  $\delta$ -sunspots in Convective Magnetohydrodynamic Simulation of Magnetic Flux Emergence, The Astrophysical Journal, 871, 187 (2019)
- \*Kaneko, T. and Yokoyama, T., Reconnection-Condensation Model for Solar Prominence Formation, The Astrophysical Journal, 854, 12 (2018)
- \*Tei, A., Sakaue, T., Okamoto, T. J., Kawate, T., Heinzel, P., UeNo, S., Asai, A., Ichimoto, K., Shibata, K., Blue-wing enhancement of the chromospheric Mg II h and k lines in a solar flare, PASJ, 70, 100 (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)
- \*Kawabata, Y., Iida, Y., Doi, T., Akiyama, S., Yasiro, S., Shimizu, Statistical relation between solar flares and coronal mass ejections with respect to sigmoidal structures in active regions, The Astrophysical Journal, 869, 99 (2018)
- \*Anan, T., Huang, Y.W., Nakatani, Y., Ichimoto, K., Ueno, S., Kimura, G., Ninomiya, S., Okada, S., Kaneda, N., PASJ, 70, 102 (2018)
- \*Sekii, D., Otsuji, K., Isobe, H., Ishii, T. T., Sakaue, T., Hirose, K., Increase in the amplitude of line-of-sight velocities of the small-scale motions in a solar filament before eruption, The Astrophysical Journal, 843, L24 (2018)
- \*Ishiguro, N., Kusano, K., Double arc instability in the solar corona, The Astrophysical Journal, 843, 101 (2017)
- \*Bamba, Y., Lee, K. S., Imada, S., Kusano, K., Study on the Pre-flare Activity of the X1.6 Flare in the Great AR 12192 with SDO, IRIS, and Hinode, The Astrophysical Journal, 840, 116, (2017)
- \*Hanaoka, Y., Sakurai, T., Statistical Study of the Magnetic Field Orientation in Solar Filaments, Astrophysical Journal Letters, 851, 130 (2017)
- \*Ichimoto, K. et al., A New Solar Imaging System for Observing High Speed Eruptions: Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI), PASJ, 292, 63 (2017)
- \*Tokumaru, M., Satonaka, D., Fujiki, K., Hayashi, K., and Hakamada, K., Relation between Coronal Hole Areas and the Solar Wind Speeds Derived from Interplanetary Scintillation Measurements, Solar Physics, 292, 41 (2017)
- \*Toriumi, S. and Takasao, S., Numerical Simulations of Flare-productive Active Regions:  $\delta$ -sunspots, Sheared Polarity Inversion Lines, Energy Storage, and Predictions, The Astrophysical Journal, 850, 39 (2017)
- \*Watanabe, K., Kitagawa, J., Masuda, S., Characteristics that Produce White-light Enhancements in Solar Flares Observed by Hinode/SOT, The Astrophysical Journal, 850, 204 (2017)
- \*Kawabata, Y., Inoue, S., and Shimizu, T., Non-potential field formation in the X-shaped quadrupole magnetic field configuration, The Astrophysical Journal, 842, 106 (2017)
- \*Lee, K.S., Imada, S., Watanabe, K., Bamba, Y., Brooks D. H., IRIS, Hinode, SDO, and RHESSI Observations of a White Light Flare Produced Directly by Nonthermal Electrons, The Astrophysical Journal, 836, 150 (2017)
- \*Kawate, T.; Ishii, T. T.; Nakatani, Y.; Ichimoto, K.; Asai, A.; Morita, S.; Masuda, S., Temporal Evolution and Spatial Distribution of White-light Flare Kernels in a Solar Flare, Astrophysical Journal, 833, 50 (2016)
- \*Takasao, S., Matsumoto, T., Nakamura, N., and Shibata, K., Magnetohydrodynamic Shocks in and above Post-flare Loops: Two-dimensional Simulation and a Simplified Model, Astrophysical Journal, 805, 135 (2015)
- \*Shibayama, T., Hada-Muranushi, Y., Isobe, H., Nemoto, S., Komazaki, K., Shibata, K., UFCORIN: A fully automated predictor of solar flares in GOES X-ray flux, Space Weather, 13, 778 (2015)

【地球電磁気斑：A03（全355編）】

- \*Hosokawa, K., Miyoshi, Y., Kurita, S., Kasahara, Y., Shiokawa, K., Takashima, T., Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves, *Scientific Reports*, 10, 3380 (2020)
- \*Balan, N., Zhang, Q. H., Shiokawa, K., Skoug, R., Xing, Z., Tulasi Ram, S., Otsuka, Y., IpsDst of Dst storms applied to ionosphere-thermosphere storms and low latitude aurora, *J. Geophys. Res.*, 124 (2019a)
- \*Balan, N. et al., Capability of Geomagnetic Storm Parameters to Identify Severe Space Weather, *Astrophysical Journal*, 887:51 (2019b)
- \*Miyoshi, Y., Matsuda, S., Kurita, S., Shiokawa K. et al., EMIC waves converted from equatorial noise due to M/Q=2 ions in the plasmaphere: Observations from Van Allen Probes and Arase, *Geophysical Research Letters*, 46 (2019)
- \*Tanaka, T., Ebihara Y. et al., Development of Magnetic Topology During the Growth Phase of the Substorm Inducing the Onset of the Near-Earth Neutral Line, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 124, 5158 (2019)
- \*Yokoyama, T., Jin, H., Shinagawa, H., Liu H., Seeding of Equatorial Plasma Bubbles by Vertical Neutral Wind, *Geophysical Research Letters*, 46, 7088 (2019)
- \*Nakamizo, A., Yoshikawa A., Deformation of Ionospheric Potential Pattern by Ionospheric Hall Polarization, *Journal of Geophysical Research*, 124, 7553 (2019)
- \*Watari S., Intense Geomagnetic Storms Associated with Coronal Holes Under the Weak Solar-Wind Conditions of Cycle 24, *Solar Physics*, 293 (2018)
- \*Katoh, Y., Takashima T., Miyoshi Y., et al., Software-type Wave Particle Interaction Analyzer on board the Arase satellite, *Earth Planets Space*, 70 (2018)
- \*Shinagawa, H., Otsuka Y. et al., Daily and seasonal variations in the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor instability in the ionosphere obtained with GAIA, *Progress in Earth and Planetary Sciences*, 5 (2018)
- \*Shiokawa K. et al., Purple Auroral Rays and Global Pc1 Pulsations Observed at the CIR-Associated Solar Wind Density Enhancement on 21 March 2017, *Geophysical Research Letter*, 45 (2018)
- \*Kurita, S., Miyoshi, Y., Shiokawa, K., Mitani T., Takashima T., Otsuka Y., Rapid Loss of Relativistic Electrons by EMIC Waves in the Outer Radiation Belt Observed by Arase, Van Allen Probes, and the PWING Ground Stations, *Geophysical Research Letters*, 45 (2018)
- \*Kurita, S., Y. Miyoshi, S. Kasahara, et al., Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper-band chorus observed by the Arase satellite, *Geophysical Research Letters*, 45 (2018)
- \*Kasahara, S., Miyoshi, Y. et al., Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, *Nature*, 554, 337 (2018).
- \*Miyoshi Y et al., Geospace exploration project ERG, *Earth Planet Space*, 70 (2018)
- \*Miyoshi, Y. et al., The ERG Science Center, *Earth, Planets, Space.*, 70 (2018)
- \*Kasahara, Y., Miyoshi, Y., Katoh, Y. et al., The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite, *Earth Planets Space*, 70 (2018)
- \*Nakamura S., Ebihara Y., 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)
- \*Katoh, Y., Omura 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)
- \*Kitamura, N., Y. Miyoshi, S. Nakamura, Y. Katoh, et al., Direct measurements of two-way wave-particle energy transfer in a collisionless space plasma, *Science*, 361, 1000 (2018)
- \*Balan, N. et al., A scheme for forecasting severe space weather, *J. Geophys. Res.*, 122, 3 (2017)
- \*Shinagawa H., Miyoshi Y., Jin, H., Fujiwara, H., Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA, *Journal of Geophysical Research*, 122, 4450 (2017)
- \*Ebihara, Y., Tanaka, T., Why does substorm-associated auroral surge travel westward?, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 60, 014024 (2017)
- \*Shoji M., Miyoshi Y., Katoh Y. et al., Ion hole formation and nonlinear generation of electromagnetic ion cyclotron waves: THEMIS Observations, *Geophysical Research Letters*, 44, 8730 (2017)
- \*Shiokawa, K., Nose M., Nagatsuma T., Otsuka Y., Miyoshi, Y. et al., Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network, *Journal of Geophysical Research*, 69 (2017)
- \*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)
- \*Nakamura, S., Omura Y., et al., Observational evidence of the nonlinear wave growth theory of plasmaspheric hiss, *Geophysical Research Letters*, 43, 10040, (2016)
- \*Ebihara, Y., Tanaka, T., Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, *Journal of Geophysical Research*, 121, 1201 (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)

- \* Kurita, S., Y. Miyoshi, B. Blake, G. Reeves, and C. Kletzing, Relativistic electron microbursts and variations in trapped MeV electron fluxes during the 8-9 October 2012 storm: SAMPEX and Van Allen Probes observations, *Geophysical Research Letter*, 43, 3017 (2016)
- \* Horne R., Miyoshi, Y., Propagation and linear mode conversion of magnetosonic and electromagnetic ion cyclotron waves in the radiation belts, *Geophysical Research Letters*, 43, 10034 (2016)
- \* Saito, S., Miyoshi, Y., Seki, K., Rapid increase in relativistic electron flux controlled by nonlinear phase trapping of whistler chorus elements, *J. Geophysical Research*, 121, 6573 (2016)
- \* Miyoshi, Y., Saito, S., Katoh, Y. et al., Relation between energy spectra of pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler-mode chorus waves, *Journal of Geophysical Research*, 120, 7728 (2015)
- \* Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, *Journal of Geophysical Research*, 120, 7270 (2015)

#### 【周期活動斑 : A04 (全141編)】

- \* Hayakawa, H. et al., Thaddeus Derfflinger's sunspot observations during 1802—1824: A primary reference to understand the Dalton Minimum. *The Astrophysical Journal*, 890, 98 (2020)
- \* Yukimoto, S. et al., The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 931–965 (2019)
- \* Hinode Review Team et al., Achievements of Hinode in the first eleven years. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 71, id.R1, 118pp (2019)
- \* Hotta, H., Iijima, H. & Kusano, K. Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface. *Sci Adv* 5, 1, eaau2307 (2019)
- \* Moriya, T., H. Miyahara, M. Ohyama, M. Hakozaiki, M. Takeyama, H. Sakurai, and F. Tokanai, A study of variation of the 11-year solar cycle before the onset of the Spörer Minimum based on annually measured <sup>14</sup>C content in tree rings. *Radiocarbon*, 61, 1749-1754 (2019)
- \* Imada, S., and M. Fujiyama, Effect of magnetic field strength on solar differential rotation and meridional circulation. *The Astrophysical Journal Letters*, 864, L5 (2018)
- \* Noda, S., K. Kodera, Y. Adachi, M. Deushi, A. Kitoh, R. Mizuta, S. Murakami, K. Yoshida, and S. Yoden, Mitigation of global cooling by stratospheric chemistry feedbacks in a simulation of the Last Glacial Maximum, *J. Geophys. Res.*, 123, 9378–9390 (2018)
- \* Sakurai, T. et al., Infrared spectro-polarimeter on the solar flare telescope at NAOJ/Mitaka. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, id.58, 17 pp (2018)
- \* 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)
- \* Kageyama, M. 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)
- \* Noda, S., K. Kodera, Y. Adachi, M. Deushi, A. Kitoh, R. Mizuta, S. Murakami, K. Yoshida, and S. Yoden, Impact of interactive chemistry of stratospheric ozone on Southern Hemisphere paleoclimate simulation, *J. Geophys. Res.*, 122, 878-895 (2017)
- \* Sakashita, W., H. Miyahara, Y. Yokoyama, T. Azee, T. Nakatsuka, Y. Hoshino, M. Ohyama, H. Yonenobu, and K. Takemura, Hydroclimate reconstruction in central Japan over the past four centuries from tree-ring cellulose  $\delta^{18}O$ . *Quaternary International*, 455, 1-7 (2017)
- \* Shimojo, M., K. Iwai, A. Asai, S. Nozawa, T. Minamidani, and M. Saito, Variation of the solar microwave spectrum in the last half century. *The Astrophysical Journal*, 848, id.62 (2017)
- \* Hotta, H., M. Rempel, and T. Yokoyama, Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations. *Science*, 351, 6280, 1427-1430 (2016)

#### B. 書籍

- Kornyanat, H., Ishii, M., Saito, S., Maruyama, T., Nakata, H., Tsugawa, T., HF-START: Application in Aid of Radio Communications/Navigation, *EIWAC 2017: Air Traffic Management and Systems III* 274-287, 3 (2019)
- Ishii, M., *Extreme Space Weather Research in Japan, Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences* Ch. 31, Ed. N. Buzulukova, Elsevier Inc. 2018, ISBN:978-0-12-812700-1
- 桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成 (編), 2018: シリーズ現代の天文学第10巻「太陽」改訂第2版. 日本評論社, 362pp.
- 宮原ひろ子, 2019: 「太陽ってどんな星？」. 新日本出版社, 160pp.

#### C. 産業財産権

〔出願〕 計 1 件

産業財産権の名称： 予測システムおよび予測方法／産業財産権の種類、番号： 特許、G06F 19/24  
発明者： 杉浦孔明, 西塚直人, 河井恒, 石井守／権利者： 同上  
出願年： 2018年／国内・外国の別： 国内

#### D. ホームページ

新学術領域研究「太陽地球環境予測」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特徴量データベース [http://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/solarflare/index\\_j.html](http://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/solarflare/index_j.html)  
SMART (京都大学飛騨天文台) <http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/SMART/T1.html>

#### E. 主催シンポジウム

- ・新学術領域PSTEP国際シンポジウム  
第1回：2016年1月13～14日（名古屋大学）、第2回：2017年3月23～24日（京都大学）  
第3回：2018年5月16～18日（情報通信研究機構）、第4回：2020年1月28～30日（名古屋大学）
- ・宇宙天気ユーザー協議会（開催地はすべて情報通信研究機構）  
第1回：2016年2月5日、第2回：2016年7月21日、第3回：2016年9月30日、第4回：2017年2月15日  
第5回：2017年9月25日、第6回；2018年3月28日、第7回：2019年3月19日、第8回：2020年2月21日
- ・Hinode-13/IPELS2019. Sep. 2-6, 2019, Hongo Campus, The University of Tokyo
- ・ISEE/PSTEP 国際ワークショップ「次期太陽周期活動予測のモデル間比較」2017年11月27日～12月2日（名古屋大学）
- ・ISEE/PSTEP 国際ワークショップ「太陽フレア予報の国際ベンチマーク」2017年10月31日～11月2日（名古屋大学）
- ・ISEE/PSTEP 研究集会「第3回太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」（名古屋大学）  
第1回：2017年1月26～27日、第2回：2018年2月26～27日、第3回：2019年1月17～18日、  
第4回：2019年12月26～27日
- ・インターネットPSTEPランチセミナー 全40回（2016年4月～2020年4月）
- ・PSTEPサマースクール陸別2017 2017年7月30日～8月4日（北海道陸別町）
- ・WCRP/SPARC SATIO-TCS joint workshop on Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in the Tropics. 2020年2月21-25日（京都大学）

#### F. 一般向けアウトリーチ活動

- ・宇宙天気ユーザーズフォーラム 2016年6月14日、2017年7月5日（国立科学博物館）、2018年8月30日、2019年11月11日（日本科学未来館）
- ・新聞報道・放送：読売新聞「宇宙嵐の中へタグ」2015年7月14日、中日新聞「宇宙のさえずり、瞬くオーロラ」2015年10月8日、NHK BSプレミアム「コズミック フロント☆NEXT 太陽の脅威 巨大フレア」2016年1月14日、朝日新聞「太陽磁場増減メカニズムに迫る」2016年3月25日、読売新聞「8世紀後半のオーロラの絵？発見…世界最古か」2017年6月27日、京都新聞「太陽フレア、海側に停電リスク 京大が数理モデル」2018年10月19日、読売新聞「雷の発生増 27日周期…武蔵美大や極地研チーム」2018年7月5日、読売新聞「太陽放射線からパイロット守れ 予測システム開発」2019年11月8日等（全128件）
- ・一般講演会 第7回陸別スターライトフェスティバル（2015年7月11日）、愛知県立半田高校SSHサイエンスコミュニケーション（2016年2月6日）、国際文化交友会 月光天文台-講演会「太陽研究最前線：ひので、そしてSOLAR-Cへ」（2015年5月9日）、NPO花山星空ネットワーク・第58回花山天体観望会（2015年11月1日）、神奈川IBMユーザー研究会 新春例会（賀詞交換会）特別講演（2017年1月12日）、日本科学未来館、サイエンティストクエスト（2017年7月9日）、NHK文化センター2016年大河講座「ひとの大学」（2016年9月28日）、SCOSTEP/ISWI International Space Science School（2016年11月7日）、オーロラと宇宙特別講義（2018年2月16日）、富山高校SSH研修（2019年7月23日）等（全141件）

#### G. 受賞

柴田一成：チャンドラセカール賞、大村善治：URSI Appleton Prize、塚本尚義：国際隕石学会レオナードメダル、天野孝伸・堀田英之：AAPPS-DPP 2018 Young Researcher Award、高棹真介：IAU PhD Prize、堀久美子：IUGG the Doornbos Memorial Prize、早川尚志：EPS Young Researcher Award、穂積Kornyanat・北原理弘：URSI AT-RASC Young Scientist Award、宮原ひろ子：第1回米沢富美子記念賞、片岡龍峰・峠千尋：文部科学大臣表彰若手科学者賞、石井守：日本ITU協会賞 等（全48件）

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

1. 共通タスクに対応する連携タスクチーム体制の強化：「5. 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項」で記した通り、本領域では領域全体の目的を達成するために必要な共通タスクに計画研究・公募研究で連携して取り組むため、表3のようなタスクチームを構成し、連携を強化した体制によって研究を進めた。これにより基礎研究を担うA02～A04班と予報運用を担うA01班の連携をスムーズに進めることができた。

2. PSTEP Models：予測統合モデルタスクチームが中心となり、本領域の各班が開発した予測モデルを集約したモデル群 PSTEP Modelsを整備し、ホームページ (<https://www.pstep.jp/model>) より日英併記で公開した。これにより各研究班が相互にモデルを利用できると共に、本領域の成果を国際的に広く利用することが可能になった。

3. PSTEPセミナー：2016年4月より2020年3月まで毎月1回インターネットを利用して全国の関連機関を結んだランチセミナーを全40回開催し、分野を超えた相互理解に大きく貢献した (<https://www.pstep.jp/pstep%e3%82%bb%e3%83%9f%e3%83%8a%e3%83%bc>)。この活動は研究期間終了後、さらに多くの組織が参加するSpace-Sun-Earth (SSE) ランチセミナーとして発展している (<https://www.pstep.jp/template/20200511.html>)。

4. PSTEPニュースレター：各班からの編集委員会を構成し、領域全体の相互理解と情報発信を強化させるために、PSTEPニュースレターを全16刊、季刊発行した (図8)。ニュースレターのみならず、編集作業が領域の連携強化に大きな役割を果たした。 (<https://www.pstep.jp/publications-2>)

5. 定期的な領域会議・総括班会議：領域の全体会議を毎年度1～2回開催すると共に、総括班会議を各年度4回実施し、領域活動の把握と課題の明確化、将来戦略の策定を柔軟に行うことで領域運営を推進することができた。

6. 国際シンポジウム・シリーズ：領域関係者全員が参加した国際シンポジウムPSTEPシリーズを4回開催し、国際的な視点から領域全体の連携を強化した。

- ・ 第1回国際シンポジウムPSTEP-1：2016年1月13-14日、名古屋大学、参加者98名
- ・ 第2回国際シンポジウムPSTEP-2：2017年3月23-24日、京都大学、参加者80名
- ・ 第3回国際シンポジウムPSTEP-3：2018年5月16-18日、情報通信研究機構、参加者71名
- ・ 第4回国際シンポジウム PSTRP-4/ISEE-2：2020年1月28-30日、名古屋大学、参加者101名

表3: 共通タスクと連携体制 (○の班で各タスクチームを構成し連携を強化した。)

共通タスク	A01	A02	A03	A04
予測統合モデル	○	○	○	○
衛星帯電予測	○		○	
地磁気誘導電流予測	○		○	
降下電子大気応答予測	○		○	
電離圏変動影響予測	○		○	
太陽放射大気影響予測		○	○	○
フレア・CME 予報応用	○	○		
宇宙天気ハザードマップ	○	○	○	○



図8：インターネットを利用したPSTEPセミナーのネットワーク



図9：季刊発行 (全16刊) されたPSTEPニュースレター



## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度に繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### 【A01】

主な設備費：

・ クランプメータ、2015、2017 200万円（情報通信研究機構）

人件費：

・ 研究員雇用、2015-2019 3,400万円（情報通信研究機構）

・ 調査補助、2015-2019 2,415万円（情報通信研究機構）

クランプメータは東京電力との共同研究として空いた方の変電所に発生している地電流を定常的に監視するために設置した。人件費は宇宙天気情報のニーズ・シーズマッチングとして事業者への聞き取りに関する実務（コンタクト・会合設定・ヒアリング資料準備・記録）等のために調査補助として使用した。また研究員を宇宙天気情報のニーズ・シーズマッチングおよびハザードマップ作成のために雇用した。

### 【A02】

主な設備費：

・ 計算機サーバー、2015、2016 276万円（名大）

・ 速度場観測装置光学部品、2015 1,250万円（京大）

・ データ蓄積装置、2016 110万円（京大）

・ 赤外線カメラ、2016 1,260万円（国立天文台）

人件費：

・ 研究員雇用、2016-2019 1,800万円（京大）

・ 研究員雇用、2016-2019 1,500万円（宇宙研）

計算機サーバー（名大）は本研究でおこなった数値モデルの開発に活用され、その後も本計画で構築した数値モデルデータベースと合わせて内外の研究者に利用されている。京大の速度場観測装置はデータ蓄積装置と合わせて、太陽フレアや質量放出現象のユニークなデータを取得し続けており、ネットワークを介して世界に発信されている。国立天文台の赤外線カメラは、高精度偏光計測にむけた実験プラットフォームとして今後も活用され、本研究で開発した一部技術は天文学の他分野への応用も検討されている。本計画研究では2人の研究員を雇用した。京大では観測システムの開発とデータ配信に中心的な役割を果たし、計画班のミーティングの連絡やとりまとめをおこなった。宇宙研では磁場データベースの整備に中心的な役割を果たすとともに若手の育成にも大きな貢献をした。いずれも本計画の遂行になくてはならない役割を果たした。

### 【A03】

主な設備費：

・ サーバー/ストレージ 2015 2,030万円（名大）

・ ファイルサーバー 2015 266万円（京大）

・ 冷却 CCD カメラ 2 式 2015 792万円（名大）

・ GNSS 受信機 3 式 2015 809万円（名大）

人件費：

・ 研究員雇用 2016-2019 2,400万円（京大）

・ 研究員雇用 2016-2018 1,800万円（名大）

サーバーおよびストレージは本研究でのシミュレーションの実施、シミュレーション結果および観測結果の蓄積、またデータ解析とシミュレーションの比較を行う上で活用している。冷却CCDカメラ、GNSS受信機は中低緯度における電離圏・熱圏変動の観測に用いている。また、本計画研究では2人の研究員を雇用した。京大では地磁気誘導電流の研究に中心的な役割を果たし、また、名大では電離圏モデリングおよび

A02、A04班との連携においても重要な役割を果たした。また、計画班のミーティングのとりまとめや、領域のサマースクール等にも重要な貢献を行い、本計画の遂行になくはならない役割を果たした。

#### 【A04】

主な設備費：

・サーバー 2015, 2016	294万円 (京大)
・ストレージ 2015	272万円 (京大・気象研究所)
・コンパイラ 2015, 2016, 2017, 2019	347万円 (京大)
・ドラフトチャンバー	328万円 (武蔵野美大)

人件費：

・研究員・技術補佐員雇用等、2015	575万円 (京大・名大)
・研究員・技術補佐員雇用等、2016	1,249万円 (京大・名大)
・研究員・技術補佐員雇用等、2017	1,253万円 (京大・武蔵野美大)
・研究員・技術補佐員雇用等、2018	1,066万円 (京大・武蔵野美大)
・研究員・技術補佐員雇用等、2019	630万円 (京大・武蔵野美大)

サーバーおよびストレージは本研究課題の数値シミュレーションの実施、および、シミュレーション結果・データ解析結果の蓄積に活用している。また継続的なコンパイラの購入は、既存の計算機サーバーを再活用するためのものである。2018年度には、武蔵野美術大学にドラフトチャンバー一式を導入し、アイスコアやトラバーチンなどの宇宙線生成核種分析を小スペースながらも自研究室内で実施できる状況とし、国際共同研究を効率的に推進できる環境を整えた。人件費・謝金で支出した研究員等の雇用経費は各年上記のとおりである。本研究課題で外国人研究者の雇用も行ったが、長期の出張旅費として支出した場があり、必ずしも上記の一覧に含まれていない。

#### 【総括班】

主な設備費

・PC、共通データ格納用ストレージサーバー	539万円 (名大)
-----------------------	------------

人件費

・総括班研究支援員(2名) 2015-2019	875万円
-------------------------	-------

その他

・ニュースレター制作・発送費 2016-2019	234万円
・ホームページ制作費、ロゴデザイン等 2015	74万円
・国際シンポジウム・領域会議等開催費 2016-2019	710万円
・旅費 2016-2019	2,086万円
・レンタルサーバー料他運営諸経費	36万円

人件費は名古屋大学における研究支援員及びニュースレター編集要員の雇用費である。ニュースレター制作・発送費は全16刊発行したPSTEPニュースレターの制作費及び発送費など。国際シンポジウム・領域会議等開催費はそれぞれの会議開催のための会議費であり、主にPSTEP国際シンポジウム全4回の開催のために使われた。また、それらの国際会議実施のために必要な旅費が利用された。物品費は名古屋大学宇宙地球環境研究所に設置して運用した領域全体のデータストレージサーバー、研究支援員・ニュースレター変種委員、領域代表者のPCの購入に利用された。

#### 【国際活動支援班】

旅費総額：4,616万円

招聘：60名(うち若手研究者21名) 1,502万円

派遣：109名(うち若手研究者37名) 3,113万円

多数の若手研究者を中心として海外への派遣及び海外からの招聘を行い、本領域の活発な国際共同研究を発展させるために本予算を利用した。主な派遣先は米国、中国、イギリス、ドイツ、フランス、スペイン、ポルトガル、イタリア、シンガポール、韓国、フィンランド、ブルガリア、ナイジェリア、インドネシア、インドなど



## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域は「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択している。すなわち、宇宙と地球が織りなす複合システムの理解と予測の革新的な進展と宇宙環境変動の予測を通して現代社会を守る社会基盤の形成を目指した分野横断研究である。本領域は、天文学、太陽・太陽圏物理学、地球電磁気学、気象学・気候学、古気候学、電気工学、宇宙放射線医学など幅広い学問分野のみならず、航空・衛星・通信・測位・電力など情報化社会を支える事業活動に深くかかわっている。本領域はこれら個々の分野と業界の連携のもと、科学研究と予測研究の相乗的な発展を展開することで、既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域としての「太陽地球圏環境予測」領域の創成を目指した。

A01班では、実社会の宇宙天気予報ユーザーとのきめ細かな議論により、共同実験や共同コンテンツ開発などこれまでなかった枠組みでの研究の場が創成された。電力や航空、衛星運用といった、高度なセキュリティを求められる事業者も含めて宇宙天気予報ユーザーとの連携に着実な変化が見られた。また、2017年9月6日に発生した今周期最大のX9.3太陽フレアにおいては、続く2日間で60件のTVニュース、271件の新聞報道を行い、社会に宇宙天気災害の重要性を浸透させる契機となった。さらに、本研究で培った産官学連携した宇宙天気研究体制は、2018年の国際民間航空機関（ICAO）の宇宙天気グローバルセンター審査においても高く評価され、日本がその一翼を担う助けとなった。

A02班では、これまで謎であった太陽フレアの発生機構の理解を大きく進めた。その結果、これまで経験的手法に依存していた太陽フレア予測を不安定性理論に基づいてその発生位置までも正確に予測することを可能にした。これは、プラズマ安定性理論と太陽物理学の融合によってもたらされた画期的な成果である（Kusano et al. Science, in press）。この知見は宇宙に普遍的に存在する磁気プラズマ現象へも適用可能であることから、天体物理学と宇宙天気予報の相乗的な進展に大きく貢献する。また、A01・A03班と協力し、CMEの観測とモデルを融合することで太陽嵐の到来をより正確に予測する方法を開拓したことは、分野融合による次世代宇宙天気予報へ繋がる成果である。同様に本研究で構築したフレア放射モデル、高エネルギー粒子伝搬モデルもA01・A03班と共に、電離圏変動影響や衛星被爆の予測に貢献することが期待できる。本計画で整備した太陽質量放出の観測装置群は次期太陽活動周期の研究で成果をあげることが期待できる。さらに、ひので衛星をはじめとする観測衛星のデータに基づく太陽フレア研究は、我が国の次期太陽観測衛星Solar-C（EUVST）計画の創出に貢献した。

A03班では、各サブテーマについて当該学問分野および関連学問分野に貢献した。宇宙放射線研究では、日本による新しい科学衛星のデータとシミュレーションを融合させた研究を推進し、観測された現象の定量的な理解を進めた。さらに、A01班との連携によって、太陽風シミュレーションを入力とした放射線帯予測モデルを構築し、宇宙放射線予測の研究を推進した。電離圏変動では日本が得意とする超高層大気の上観測網で得られたデータを活用することにより、日本独自に開発した全球大気圏-電離圏結合モデルGAIAの高精度化を実現した。さらにGAIAをリアルタイムで運用することにより、数日先の電離圏状態を予測することが可能となり、航空航法システムなど現業分野に応用する準備を整えることができた。地磁気誘導電流予測に関しては、従来、独立に研究が行われてきた超高層研究分野と固体地球分野の連携を実現し、太陽から地下に至るエネルギーの流れを連続的に理解する新しい研究体制を構築することができた。

A04班では、先端的な観測データを利用して新たな解析結果を得ると共に、日本とインドの歴史的観測資料をデジタルデータベース化して、過去100年にわたる太陽活動変動の解析を可能とする研究基盤を構築した。次期太陽周期活動予測のために表面磁束輸送モデルを開発し、いち早く予測結果を公表するとともに2017年11月にISEE /PSTEP国際ワークショップ「次期太陽周期活動予測のモデル間比較」を主催して、国際的な研究ネットワークの構築に貢献した。また、我が国を代表する気象研究所地球システムモデルを整備し、国際的なモデル相互比較プロジェクトに参画し世界の気候変動評価に貢献した。さらに、ベルリン自由大学との共同研究として完新世最大の太陽高エネルギー粒子イベント時の $^{10}\text{Be}$ 移流実験を実施した。この研究では宇宙放射線予報モデルWASAVIESモデルを利用し、予報から科学研究へのフィードバックを実現した。発展目標とした数百年スケールの太陽活動長期変動の機構解明のため、高精度試料分析方法を確立し太陽活動極小期における宇宙線強度変動特性を明らかにした。さらに、ミランコビッチ周期に関わる古気候再現実験により成層圏オゾン光化学を通して太陽活動が地表気候に影響を及ぼす可能性を初めて指摘した点は、古気候変動の理解にインパクトを与えるものである。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 1. 本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者の育成とキャリアアップへの取り組み

A01班により情報通信研究機構に専攻研究員として有期雇用された2名については、その後、同機構のテニュアトラック研究員およびパーマネント研究員として採用され、研究を継続して発展させている。

A02班では、特にデータ解析やモデリングにおいて若手研究者の果たした役割が大きい。若手研究者がさらに若い学生を指導・教育した実績も見逃すことはできない。本計画で雇用した若手研究員の一人は、その業績により自然科学研究機構の助教に採用された。研究協力者として本計画の研究遂行に携わった若手研究者のうち5名は、国立大学の教員や研究機関の研究員として採用されている。その他15名は国立大学や国立研究機関に新たな任期付き研究員として採用された。

A03班では、若手研究者に計画班や領域活動に責任ある立場で参加いただき、領域での活動を通して若手研究者が異なる分野の研究者と積極的にかかわり、研究分野および研究者間の人的つながりの幅が広がる機会となることを意識してきた。中心的に関わった若手研究者の進路は、領域期間中に民間の研究職に就職したもの(1名)、大学教員として就職したもの(2名)であり、いずれも大学や民間機関において研究・開発活動に従事している。

A04班では、十数名の研究協力者のうち約半数が若手研究者であり、そのうち本経費で雇用した研究者は2名程度である。若手研究者のうち3名が国立大学法人特任助教、1名が国立研究開発法人研究員、3名がポスドク研究員(国立研究開発法人1名、海外大学2名)、1名が民間企業に就職した。海外からのポスドク研究者を短期および長期で雇用したが、母国に帰国後は教員(インド)、ポスドク(中国、ドイツ)として研究を継続している。うち、一名は名大ISEEの国際共同研究代表者となっており、今後の国際共同研究強化への貢献が期待されている。

### 2. PSTEP若手支援プログラム、若手海外派遣プログラム

大学院博士後期課程学生ならびに30歳未満の若手研究者を対象とする、公募に基づいた研究資金の若手支援を本領域独自のプログラムとして2015年度～2016年度に実施し、それぞれ11件及び9件を実施した。また、国際活動支援班経費を利用して若手研究者37名を海外に派遣し、国際共同研究を展開した。

### 3. PSTEPサマースクール陸別2017

本領域の全ての研究班の協力によって、本領域に関わる様々分野の大学院生100名が全国から参集した分野横断型サマースクールを2017年7月30日～8月4日に北海道陸別町の全面的な協力のもと同町で開催した。本スクールではその運営も本領域各班の若手研究者が協力して担うことにより、若手研究者の相互理解と育成に役割を果たした。それにより様々な分野が連携したこれまでにないプログラムが構成され、分野融合の観点から大きな成功を収めた。

### 4. 太陽地球圏環境予測 オープン・テキストブック

本領域の成果を次世代の若手研究者に継承するため、大学院生及び若手研究者を対象とした太陽地球圏環境予測に関する包括的な教科書(全60項目)を本領域の研究者が製作中である。この教科書はインターネットから誰でも自由にアクセス可能なオープン・テキストブックとして名古屋大学レポジトリより2020年度中に公開する。さらに、2021年度中に英訳しSpringer-Natureより出版することを計画している。



図10：国際活動支援班による若手海外派遣プログラムの一例（PSTEPニュースレターNo. 10より）



図10：PSTEPサマースクール陸別2017のポスター

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 小原隆博（東北大学大学院理学研究科・教授、副研究科長，教育研究支援センター長）

5年の研究期間を有効に使い、500編を超える論文出版をはじめ、世界の多くの参加者を迎えての4回の国際シンポジウム開催など、研究面の多大な成果創出は、特筆に値する。宇宙天気予報への実装についても、当初から出口を強く意識し、太陽観測データベース駆動による太陽エネルギー現象発生予測の実現、MHDシミュレーションと観測の同化によるCME予測及び地磁気誘導電流（GIC）予測、また、宇宙飛行士や人工衛星の放射線被曝を起こすSEPのリアルタイム警報システム、通信に悪い影響を及ぼす赤道域プラズマバブルの発生予測など宇宙天気予報の精度向上に大きく貢献した。こうした成果は、私が議長を務めていた国連宇宙空間平和利用委員会・宇宙天気専門家会合にて、適宜、成果に関する情報提供が行われ、世界の宇宙開発機関、及び、宇宙天気予報担当機関の日常業務に、多くが取り込まれて行ったことを報告した。また、将来の人材を養成すべく、教育面においても顕著な活動が行われた。例として大学院生100名が参加した陸別サマースクールを開催、さらに、合計40回にわたる毎月のオンラインセミナーを実施した。多くの修士論文・博士論が提出され、上記宇宙機関にて、実務に携わる若手も多く輩出した。出版についても配慮が行われ、ニュースレターを季刊発行（全16刊）するとともに、本研究から創出された成果を含んだ「オープン・テキストブック」を刊行するなど、情報の外部発信も達成された。以上から、非常にうまく運営されたプログラムとして、大きく評価したい。

### 星野真弘（東京大学大学院理学系研究科・教授・理学系研究科長・理学部長）

本領域では太陽地球圏物理学分野における電磁環境予測に焦点をあてて、基礎から応用まで数多くの研究テーマが展開された。またそれらの基盤研究の速やかな社会実装を行うために、官学での宇宙天気予報の研究および広報活動も推進した。太陽で起きる爆発現象から、惑星間空間、地球磁気圏、そして地球上層大気までの一連の電磁環境変動について、それぞれ異なる領域での物理特性を抽出した研究が精力的に行われたことを評価する。また長期的な太陽活動変動やそれに伴う宇宙線や地球の気候変動についての研究も推進され、幅広いスコープを有する総合的な電磁環境予測として本領域は成果を挙げたと言える。中間評価の時には、4つの研究班の連携がやや弱いのではないかとコメントをさせていただいたが、5年間を終えて、太陽物理から磁気圏・電離圏物理までの研究をシームレスにつなげる試みが、特に若手研究者を中心に進展したようである。本領域の目的は当初の計画通りに達成されたと見做しているが、社会実装を目指すという観点では産学官の連携、特に産業界からの協力関係が見えてこなかったように思われる。最後に、プロジェクト終了後にもZOOMで全国の大学などをつないだセミナーが継続して行われているが、今回の新学術領域研究が更なる太陽地球圏環境物理の研究へと発展していくことを期待している。

### 保田浩志（広島大学原爆放射線医科学研究所・教授）

本領域では、我が国が有する先端的な観測システムや物理モデルを扱う研究者らが一同に会し、その効果的な融合を図ることにより、太陽地球圏環境の変動機構を解明しその変動の予測を可能とする分野横断的な研究を精力的に展開してきた。領域全体の有機的な連携を図り、太陽フレアの発生機構や地球放射線帯の生成機構等についての基礎科学研究とそれらの変動を予測する応用研究を相乗的に発展させるとともに、将来起き得る巨大な太陽面爆発に起因した激しい宇宙環境変動が現代社会にもたらす潜在的なリスクを推定し低減するための実用的手法の開発に取り組んできた。その研究開発の成果は、500編を超える学術論文などで国際社会に発信され、数多くの学術表彰を受けていることから、対外的に高く評価されていることがうかがえる。また、4回の国際シンポジウムの開催、40回のオンラインセミナーの定期開催、大学院生約100名が参加したサマースクールの実施など、同分野における国内外の専門家との交流や優れた若手研究者の育成にも大きく寄与している。なかでも特筆すべきものとして、A01班を中心に様々な分野の研究者が連携して我が国のモンテカルロ型粒子輸送計算コードPHITSをベースにした航空機搭乗者の安全確保に資する太陽放射線被ばく警報システムを開発し、実際に2019年11月からICAO宇宙天気センターが提供する宇宙天気情報の一部として配信サービスを開始したことは、本プロジェクトの狙いに合致する、社会的意義の極めて高い成果と言える。これに限らず、本プロジェクトで実施された研究開発はいずれも科学的な質が高く、国際的にも注目されている。今後、本プロジェクトの優れた科学研究の成果を社会に実装させるための研究開発がさらに進展することを期待したい。

### 上出洋介（名古屋大学名誉教授、元太陽地球環境研究所所長）

多くのハイレベルの学問的成果を上げられたことと思います。ただし、論文リストを拝見しますと、正直なところ全部の発見が本領域だからこそできたとはいえませんが、優秀な論文が世界で注目されています。特に、フレアの理論・モデル・観測を融合したアルゴリズム、ERGの新しいデータを取り組む放射線帯予測の新機軸は世界で長く残る結果だと思えます。また、歴史的に日本が世界の知見をリードしてきた、太陽活動の長期変動が地球の気候変動をコントロールするメカニズムについては、本領域からの新しいデータや解釈がこれから暫くの間、国際コミュニティで指導的役割を果たすものと期待されます。しかし、私がこの領域に最も強く期待したのは、この程度の成果ではありませんでした。これらの成果は、本領域の優秀なメンバーであれば、特別に大きな組織でなくても得られたであろうことが容易に想像されます。私が最も期待したのは、領域代表が随所で解説している、「太陽地球間現象の科学的理解」と「オペレーション、すなわち宇宙天気予報」の同時発展でした。太陽地球現象は、基礎科学と宇宙天気予報の間に、「死の谷」と称される、何となくイメージの悪い空間があり、本領域では両者の相乗的發展を目指したのです。しかし、具体的には、3つの研究領域からオペレーション班へのアイデアやデータの提供は沢山ありましたが、オペレーション側から研究サイドへの定常的な呼びかけは残念ながら実現しませんでした。しかし、敷石は敷けたようです。一方、太陽地球系分野の50年の発展が本領域で総括されたような気がしております。サマースクール陸別2017では、それぞれの分野が独立に話をする従来の習慣とは一味違ったやり方がとられ、そこで育った若手が将来どのように学問を推し進めていくのか今から楽しみです。Solar terrestrial processesを学ぶことは、人間が太陽地球間空間で生きていく意味を学ぶことです。

### 日江井榮二郎（東京大学名誉教授、国立天文台名誉教授、明星大学名誉教授）

本領域は太陽地球間空間に起こる現象の研究に素晴らしい貢献をしたという印象を持ちました。太陽の研究者と、地球並びに地球環境の研究者とが一同に会して議論をするだけではなく、それらの研究成果を必要としている実社会で活躍している工学者も加わり、広い視野からの議論が交わされ、それが研究の駆動力となったと思われまます。A02班（太陽嵐）に関しては、観測的に様々な装置の増強が行われました。しかし太陽極小期近くであったために、十分それらの装置が活躍できなかったものもあるが、これは次期太陽サイクルには活躍が期待されます。今回の研究により、ますます彩層やコロナの微細磁場のデータ等の必要性が高まったと思われまます。フレアは微細な構造（10kmサイズ）が光ると考えていますが、観測的にも高解像度計算によっても確かめられることを期待しています。理論的な面で注目すべきは本領域の最重要課題の1つである太陽面で起こるフレア発生の研究です。従来の発生予報はempiricalな研究が多かったが、今回フレア発生のトリガーとなる不安定性を理論的に調べ、フレア発生の予報精度を一段と高めたことは特記に値する。CME発生の研究も行われたが、次期太陽サイクルには、プロミネンスの速度場、電波バースト、彩層磁場、などのデータの蓄積により更に進んだ研究が期待されます。

### 大村善治（京大大学生存圏研究所、教授）

世界的に波動粒子相互作用とそれに関与する波動粒子加速現象を線形・準線形理論の枠組みで捉えることが標準的になってきていた中であって、非線形プロセスの基礎過程を定量的に明らかにし、準線形過程では説明ができない観測現象があり、非線形過程が決定的に重要な役割を果たしていることを観測データでもって検証することができたこと、さらにその効果を取り入れた新しい数値モデリングを実現できたことは大きな成果である。しかし、この手法が世界標準として宇宙気象の分野で使われるような実用化に至らなかったことは事実であり、準線形拡散モデルを置き換えるような非線形波動粒子相互作用を含むモデリングを実現できる標準ソフトウェアを開発・公開してゆくことが今後の課題として残されている。

### 柴田一成（京都大学名誉教授、同大学院理学研究附属天文台元台長）

A02班で太陽・太陽風に関するわが国の世界レベルの観測機器・装置・データをより良く活用できるようにするための試みが十分になされたことを評価したい。とりわけ、京都大学飛騨天文台で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初の装置（SDDI）が完成され、観測が開始されことは特筆に値する。太陽活動の低下のため、地球影響イベントが少なく、まだその性能が十分発揮しきれていないのが残念であるが、今後の活躍が期待できる。今のうちにしっかりと人材育成を行い、コロナ質量放出の観測とつなげる研究方法論を確立することが重要である。フレア発生予測スキームの開発についても、大きな進展が見られたことは、高く評価できる。中でも、光球面磁場観測を用いて大規模フレアの発生予測に有効なパラメータを見出したことは、素晴らしい成果である。A04班について分野横断的な共同研究を本格的に進めたことをまず評価したい。ただし、太陽物理学者と地球物理学者の交流が、どれほど活発に行われたのか、つまり研究者が他分野の学問の中身をどれほど深く理解し、新しい方法論を生み出すことができたのか、やや不明瞭なところがあるのが残念である。今後の課題であろう。