太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表

（2025 年版）

2025 年 6 月 24 日

太陽研究者連絡会
（略称：太陽研連、英文名称：Japan Solar Physics Community）
代表　下条圭美（国立天文台）

(空きページ)

目次

改版履歴.....5

2025 年度版　改訂履歴.....5

2025 年度改訂版における執筆者および協力者.....5

1.　目標（将来ビジョン）.....6

1.1 日本の戦略・狙うサイエンス.....6

1.2 背景となる世界の動向（サイエンスとプロジェクト）.....

1.3 期待される成果.....9

2.　研究ロードマップ.....12

2.1 現在までの観測研究基盤.....12

2.2 今後 10-20 年間の長期的研究戦略.....12

2.3 長期的研究戦略を実施するための研究活動.....15

2.3.1 上空大気の分光診断による研究.....15

2.3.2 光球・彩層磁場診断による研究.....17

2.3.3 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究.....19

2.3.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究.....21

2.3.5 太陽圏科学における太陽研究.....22

2.3.6 恒星研究と連携した太陽研究.....24

2.3.7 太陽内部・太陽活動周期についての研究.....25

2.3.8 理論シミュレーション研究.....27

2 .4 今後 10-20 年間における日本の太陽物理学の研究ロードマップ.....30

3.　既存大型計画の将来.....33

3.1 SOLAR-C 時代に向けた「ひので」の位置付けと観測運用方針.....33

4.　早期具体化させる大型計画の概要.....35

4.1 次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C.....35

5.　検討中の大型計画の概要.....41

5.1 衛星計画 PHOENIX (PHYSICS OF ENERGETIC AND NON-THERMAL PLASMAS IN THE X-REGION).....41

6.　2020 年代での具体化を目指し開発中または検討中の中型計画.....45

6.1 次世代太陽風観測装置.....45

6.2 次世代国際ネットワーク計画 NGGONG 49
6.3 次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置 NIRTF 51

7. 実施中の小規模計画 53

7.1 SUNRISE 気球実験 53
7.2 日米共同・太陽フレア X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 54

8. 2030 年代以降に向けたアイディア 56

8.1 太陽多点観測ミッション 56
8.2 次世代大型宇宙望遠鏡 59

改版履歴

初版	2015 年 1 月 31 日	宇宙科学研究所に提出
2019 年版	2019 年 11 月 5 日	大幅改訂; 宇宙科学研究所理工学委員会に提出
2022 年版	2022 年 6 月 9 日	大幅改訂
2023 年版	2023 年 10 月 10 日	改訂
2024 年版	2024 年 5 月 31 日	改訂
2025 年版	2025 年 6 月 24 日	改訂

2025 年度版　改訂履歴

2024 年 11 月 29 日	改訂案募集を太陽研連メーリングリストにてアナウンス
2025 年 1 月 31 日	改訂案募集　締め切り
2025 年 4 月 20 日	太陽研連運営委員・著者にドラフトを公開
2025 年 5 月 22 日	会員向けドラフト公開およびコメント募集開始
2025 年 6 月 20 日	コメント募集　締め切り
2025 年 6 月 23 日	太陽研連運営委員会にて公開を承認
2025 年 6 月 24 日	太陽研連ホームページにて一般公開

2025 年度改訂版における執筆者および協力者

（敬称略・あいうえお順）

浅井歩（京都大学）・石川遼子（国立天文台）・今田晋亮（東京大学）・岩井一正（名古屋大学）・大辻賢一（NICT）・勝川行雄（国立天文台）・久保雅仁（国立天文台）坂尾太郎（JAXA/ISAS）・塩田大幸（NICT）・清水敏文（JAXA/ISAS）・下条圭美（国立天文台）・鳥海森（JAXA/ISAS）・行方宏介（京都大学）・成影典之（国立天文台）・野津湧太（コロラド大学）・堀田英之（名古屋大学）・渡邉恭子（防衛大学校）

1. 目標（将来ビジョン）

この章では、日本の太陽物理学コミュニティが今後 10-20 年間に狙うサイエンス課題と実際の研究戦略を掲げ（1.1 節）、その背景となる世界の動向を説明し（1.2 節）、そこから期待される成果を述べる（1.3 節）。研究戦略については第 2 章以後で項目ごとに詳しく説明されるので、ここではサマリ的に内容を述べる。

一方、世界の動向は本文書作成時から大きく変化している。韓国では太陽-地球系 L4 ミッションが始動し、米国では Heliophysics Decadal Survey に太陽極域探査ミッションが優先的に実現すべき計画として掲載されるなどの動きが見られる。太陽研連では、日本としてのこれらのミッションへの関わり方について情報収集・議論を始めている。これらの新たな提案への対応については、2025 年度中に太陽研連将来計画シンポジウム等で議論を深め、2026 年度版において含める予定である。

1.1 日本の戦略・狙うサイエンス

日本の太陽物理学コミュニティが今後 10 年間に重点的に狙うサイエンス課題は、

- 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明（彩層・コロナダイナミクス）
- 太陽活動現象の発現機構の究明とその変動を予測するための知見の獲得（宇宙天気・宇宙気候基礎物理）

である。これは、1.2 節で述べる世界の動向と、課題の喫緊性、技術的成熟度などを踏まえてコミュニティ内での議論を繰り返してコンセンサスを得た目標である。このようなサイエンス課題解決のためにとる戦略として、

- 最優先事項として、SOLAR-C ミッションを実現
- このミッションを支えるために、太陽・太陽圏研究領域における国内外機関との共同研究、特に 4 m 級大型地上太陽望遠鏡（DKIST など）を用いた共同観測を推進
- 観測を支えかつ新課題を切り開く理論シミュレーション研究を推進し、天体高エネルギー物理学・地球惑星科学など関連分野との交流の中核とすること

を進める。その結果として 1.3 節に述べる成果を具体化することを目指す。さらにはその先の 2030 年代に向けて

- SOLAR-C 実現後の次世代プロジェクトについて、科学計画立案・要素技術開発・実証観測実験

について並行して議論を進める。

1.2 背景となる世界の動向（サイエンスとプロジェクト）

現在の太陽物理学分野の主な課題は、外層大気加熱・恒星風の形成とダイナミクス（コロナ加熱・太陽風・彩層ダイナミクス)、プラズマ爆発現象（フレア・コロナ質量放出・粒子加速)、磁場の起源（ダイナモ)、星としての太陽、が挙げられる。この節では、それぞれの項目についての世界の動向を述べる。

外層大気加熱・恒星風の謎に取り組むためには、光球底での熱対流乱流による擾乱発生から、その輸送を経て、彩層・コロナや恒星風へのエネルギー注入までを全て理解する必要がある。「ひので」ミッションは、エネルギー輸送を担う Alfvén 波の同定などの貢献を行った。NASA の Hi-C ロケット実験では、ナノフレア時の磁気ループの捻じれを示唆する高解像度画像が得られている。しかし、これらの発見はイベントスタディ的なもので、コロナ加熱機構との関連を発生・伝播・散逸まで結合した形で包括的・定量的には未だに理解できていない。この解決のためには、恒星の各大気層でのエネルギー輸送過程を網羅して明らかにする必要がある。この解明を最重要目的のひとつとして、SOLAR-C ミッションが提案された。世界的にも同様の認識がもたれており、現在稼働中の NASA の小型太陽観測衛星 Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) ミッション、米国 National Solar Observatory (NSO) の大型地上太陽望遠鏡 Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) は彩層を重要な観測ターゲットとしている。しかしながら IRIS の能力は限られた輝線による分光観測に限定されており、上層の遷移層からコロナに至る高温側の温度カバーが弱い。一方、DKIST では地上観測による連続観測・像安定・視野に制約がある。これに対して SOLAR-C は、10^4 から 10^7 K までの、彩層からコロナを繋ぐ磁気プラズマ診断に威力を発揮する。また、従来ミッションを大きく超える高感度特性により、高い時間・空間分解能を実現することで、コロナ中でのナノフレア現象の精細構造の物理診断が期待されている。DKIST 等の高解像度地上望遠鏡との共同観測により、大気上層の遷移層・コロナのみならず、下層の光球・彩層を一貫して理解することをめざしており、彩層・コロナダイナミクス課題の研究のために SOLAR-C の実現が不可欠であると考えられている。

太陽のプラズマ爆発現象については、「ようこう」衛星などで得られた、エネルギー解放機構としての磁気リコネクション（磁力線のつなぎかえ）という描像をもとに、次の段階へと研究の方向が進んでいる。それは爆発現象の発生機構の解明とその予測である。近年では、フレアやコロナ質量放出（Coronal Mass Ejection: CME）など磁気プラズマ爆発現象の背景にある電磁流体力学（Magneto-Hydro Dynamics: MHD）不安定性を特定し、磁気リコネクションの物理過程を探る努力が進展しており、それらの知見を爆発の予測に応用する試みも行われている。太陽フレアや CME、太陽高エネルギー粒子（Solar Energetic Particles: SEP)、太陽風は地球周辺の宇宙環境と社会活動にも多様な影響を与えることから、精密な観測と

シミュレーション、そして統計的機械学習のような新技術によって太陽活動を予測することは、地球にもたらされる宇宙天気災害や気候変動に対して現代社会が抱える潜在的なリスクを軽減するためにも極めて重要な手段となると考えられる。国際的にも、米国において宇宙天気予報研究は重要な国家戦略的プロジェクトとされており、欧州、中国、韓国でも同様の傾向が近年目立つ。航空運用にも影響を及ぼすため、2019 年に国際民間航空機関（ICAO）では宇宙天気情報の利用が開始された。アルテミス計画等の人類の宇宙進出により、地球だけではなく太陽圏内の宇宙天気予報の必要性が出てくる。宇宙天気の社会的重要性は今後高まると考えられ、宇宙天気の予測の範囲拡大と精度向上に向けた研究開発、さらにそのための基礎研究は太陽物理学の重要な課題の一つと言える。SOLAR-C は、コロナ・遷移層・彩層で磁気リコネクション領域を高空間・高時間分解能で観測することにより、電流シート近辺に現れると理論的に期待されている衝撃波や磁気島構造を捉え、速い（Alfvén 時間スケールの）エネルギー解放の物理機構の理解に迫る。また DKIST をはじめとする光球・彩層磁場観測と共同で活動領域上空のダイナミクスを連続観測することで、エネルギー蓄積やフレアトリガの問題に挑む。今まで捉えきれてこなかったフレア発生予兆現象を捕捉することができれば、宇宙天気予報研究においても重要な貢献をすることが期待される。さらに、太陽・太陽圏関連の大型ミッションとしては、Solar Orbiter（SO: ESA/NASA）と Parker Solar Probe（PSP: NASA）が現在運用中である。前者は水星近日点まで近づき、太陽風と太陽圏との解明を主ターゲットとしている。後者は名前の通り、太陽近辺に可能なかぎり近づいて「その場」観測をすることをめざす。これら複数の惑星間探査機や軌道上・地上望遠鏡の連携により、フレア・CME の太陽圏擾乱を捉え、宇宙天気現象との関連が今後大きく展開すると予想される。

磁場の起源について、ダイナモの現場となるのは星の内部であるが、その探索には地上や宇宙望遠鏡による継続的均質な観測に基づいた、日震学的手法が威力を発揮してきた。米国 NSO の Global Oscillation Network Group（GONG）や、NASA/ESA 共同ミッション Solar & Heliospheric Observatory（SOHO）搭載の Michelson Doppler Imager（MDI）、NASA の Solar Dynamic Observatory（SDO）搭載の Helioseismic and Magnetic Imager（HMI）が大きく貢献してきた。たとえば、太陽差動回転角速度の分布は、対流層全域にわたって精度よく求められている。一方で重要な課題も残っており、星表層で両極域にむかって流れる子午面還流が、星内部でどのような構造をしているかについて、異なる結果が提案されており、研究者間で意見の一致をみていない。星内部乱流は、磁束の拡散やねじれ運動などをもたらすダイナモ素過程の柱のひとつであるが、近年大きく発展した大規模数値シミュレーションの結果と、日震学による結果とが矛盾している状況にある。これはシミュレーション研究が解像度不足などの未成熟な部分を持つ可能性と、日震学診断手法の改良の余地が残されている。

星としての太陽について、惑星科学とのかかわりでは、Kepler 衛星や Transiting Exoplanet Survey Satellite（TESS）等により系外惑星観測は大きな展開を示し、今後 Thirty Meter Telescope（TMT）などは、惑星自身の発見ではなく、惑星環境、特に大気がどのようなものなのかを理解しようとしている。一方、太陽系惑星探査ミッションは NASA をはじめとして各国が火星・水星・木星などに探査機を送り込み、その惑星環境、ひいては太陽系の起源に迫ることを目標としている。太陽系惑星環境、特にその大気環境の進化を理解するためには、太陽系の歴史を通した太陽からの長期的な影響を評価する必要がある。これには太陽風や太陽からの突発的な CME、さらには太陽輻射の短期・長期的変動の理解が欠かせない。そして、恒星観測とも比較することで、これらの現象が宇宙においてどれほど普遍的であるのか検証することができるのは、わが太陽をおいて他にない。SOLAR-C では、太陽風加速と光球・彩層における磁気活動との関連の解明が重要課題のひとつであり、さらに太陽系環境への直接的な影響を調べる。

1.3 期待される成果

1.1 節・1.2 節で述べた、日本コミュニティの戦略と世界動向とを踏まえ、太陽研究分野で期待される成果は、「天体物理・プラズマ物理過程理解の深化」「天文学・惑星科学への展開」「地球・生命圏との繋がり」が挙げられる（図 1）。

天体物理・プラズマ物理過程の理解の深化：これまでの太陽物理学研究は、星としての太陽の天文学的理解とともに、そこを舞台として起こるさまざまな天体物理学現象の理解を深めるべく努力してきた。近年では、フレアなどの磁気プラズマ磁気爆発現象の背景にある**磁気リコネクション**の物理過程を探る努力を継続している。現在、磁気リコネクションは天文学のあらゆる分野で普遍的な現象として広く受け入れられているが、これは太陽や地球磁気圏でその物理の一端が明らかになってきたことが背景にあると言える。また太陽風中の**磁気プラズマ乱流**は分子雲における乱流現象の理解に役立っている。そしてフレアや CME による高エネルギー粒子加速現象は、宇宙線研究においても重要な観測対象となっている。このように太陽で起こっている現象を深く理解することは、天体物理学の基礎になっている。今後、彩層を中心とした太陽研究は**部分電離プラズマ**における基礎過程の理解に貢献をすると考えられる。特に、原始惑星系円盤における物理過程の理解に大きな役割を果たす。

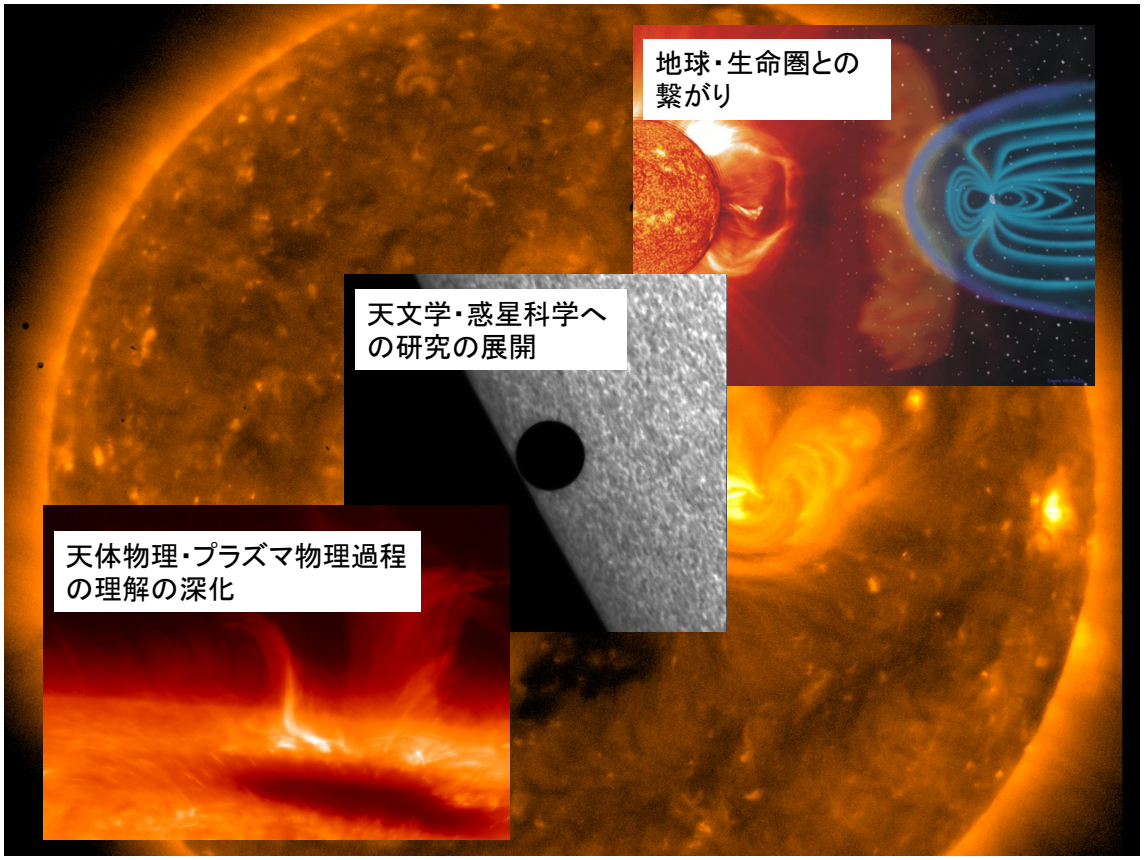

図 1　太陽物理学研究推進によって期待される成果と、近接研究領域への波及効果
（©太陽画像：国立天文台/JAXA、NASA）

天文学・惑星科学への研究の展開：太陽はそれをとりまく太陽圏およびその中にある**惑星圏**と不可分であり、過去から現在まで惑星に輻射・太陽風・突発現象・宇宙線環境というかたちで影響を与えている。これまでも地球磁気圏へ及ぼす太陽風の影響という観点で地球科学と太陽圏科学とは不可分のものとして研究がすすめられてきた。この研究は現在、太陽系の他の惑星、特に火星・金星の大気進化の理解という枠組みにおいてさらに展開が望まれている。そうした研究は、今後の惑星探査計画により情報が格段に増えると期待される惑星表層環境研究との連携が期待できる。さらに、これらの研究は**母星天体の系外惑星系への作用**を理解する基礎になるものである。

地球・生命圏との繋がり：地球周辺の宇宙環境に太陽が及ぼす影響は、フレア・CME・SEP・太陽風に伴う擾乱現象や輻射変動などさまざまなものがある。中には大きな社会的影響をもたらすものもあり、**宇宙天気**という言葉が社会的にもひろく認識されつつある。近年太陽フレア予測は深層学習を用いて予報運用されるほどに進展した。一方、磁場観測が困難な太陽裏面予報や、浮上磁場・黒点形成の予測がないと困難な長期予報は今後の課題である。ま

た SEP は太陽フレア発生に伴って生じる数十 keV〜数 GeV の高エネルギー粒子である。SEP はフレアや CME の衝撃波面で加速されると考えられているが、その加速過程は未解明である。月火星探査や宇宙旅行が本格化すると、社会的にも SEP 予測の重要性は増し、太陽研究の果たす役割は大きくなる。特に、米国 NASA を中心に策定されている有人月面着陸 Artemis 計画が現在進行中であり、宇宙環境擾乱イベントの予報には喫緊の要請がある。このように、宇宙天気の研究成果は社会経済活動に直接関係するという特徴を持ち、社会と天文学をつなぐ役割を担っている。さらに同研究分野はスーパーフレアや系外惑星への影響予測へと波及している。恒星風の影響は惑星大気進化に影響を与えることから系外惑星系環境、ひいては宇宙における生命存在条件の研究（**アストロバイオロジー**）のための一里塚もしくは検証のための貴重な情報源としても、太陽研究の存在意義は大きい。地球環境に現在の太陽がおよぼす影響は、フレア・CME などの擾乱現象や輻射変動などさまざまなものがあり、なかには大きな**社会的・経済的影響**をもたらすものもある。それ故、天文学の他の研究対象とは異なり、研究成果が社会経済活動に直接関係するという特徴を持つ。社会と天文学を直接つなぐ役割を太陽研究は担っている。一方、恒星風の影響は惑星大気進化に影響を与えることから**系外惑星系環境、ひいては宇宙における生命存在条件**の研究のための一里塚もしくは検証のための貴重な情報源としても、太陽研究の存在意義は大きい。

2. 研究ロードマップ

2.1 現在までの観測研究基盤

わが国の太陽物理学は、地上観測と衛星観測を両立させて研究が進められてきた。

現在運用される大型地上観測設備として、京都大学飛騨天文台のドームレス望遠鏡(1979 年完成)と国立天文台三鷹のフレア望遠鏡（1992 年観測開始）による可視光観測、また名古屋大学の豊川・富士・菅平・木曽に展開された電波望遠鏡群による太陽風の IPS 観測(1983 年観測開始）が挙げられる。

一方、衛星観測では、「ひのとり」(ASTRO-A, 1981 年打上げ)、「ようこう」(SOLAR-A, 1991 年打上げ)、「ひので」(SOLAR-B, 2006 年打上げ)と 3 機の太陽観測衛星を実現させた。これらの衛星観測は、地上からは決して観測できない X 線・ガンマ線による太陽フレアの観測から始まり、解像度を上げ、また観測波長域を拡げて、「ひので」衛星による可視光域での磁場観測へと至っている。これらのミッションの観測データはアーカイブにより公開され、広く世界中の研究者に利用され、その成果は世界的に高く評価されている。

現在、軌道上で運用を行っている太陽観測衛星「ひので」は、0.2-0.3 秒角の高解像度で光球磁場の高精度計測やコロナの極端紫外分光・軟 X 線撮像観測を行い、他の衛星・地上望遠鏡等では得られない貴重な観測データを取得し続けている。データは取得直後に公開され、国内外問わず、太陽・太陽圏領域の研究者によって広く利用されており、今後も太陽研究の中核天文台として運用継続は重要である。太陽活動サイクル（約 11 年）を超え、2020 年代には、探査機 PSP や SO および地上大型太陽望遠鏡（DKIST 等）との観測連携によって、さらに科学成果が期待できる。次期太陽観測衛星 SOLAR-C の科学成果を最大化する上でも重要なこれらの観測を推進し、また、2031 年前後と予想される次の太陽活動極小期を確実に超える時点（2033 年度を設定）まで、太陽圏にも影響を及ぼす極域磁場等の観測を継続することを太陽コミュニティとして切望する。(3.1 節参照)

2.2 今後 10-20 年間の長期的研究戦略

1.2 節の背景となる世界の動向で述べられたように、太陽物理学分野の主な課題は、1）高温でダイナミックな太陽外層大気・太陽風の形成メカニズムの解明、2）大規模太陽フレアのメカニズムの解明と予測の基礎構築、3）太陽周期活動と放射強度の変動を駆動するメカニズムの解明、の 3 つに大別される。

1） 高温でダイナミックな太陽外層大気・太陽風の形成メカニズム

太陽の表面（光球）温度はおよそ 6000 度であるのに対し、その上空には恒常的に 1 万度の彩層、100 万度のコロナさらには太陽風領域が広がっており、このような高温の

大気をどのようにして形成しているかは太陽物理学における大問題としてこれまで研究されてきた。加熱過程として波動加熱説やマイクロ・ナノフレア加熱などいくつかモデルは提唱されているものの未だ明らかになっていない。太陽表面からコロナに至るまでのそれぞれの領域は、磁場によって結合されており、密度の高い太陽表面がもっている一部のエネルギーが上空の希薄なコロナに磁場を介して輸送され、散逸することでダイナミックな加熱現象を引き起こすと考えられている。従って、この問題を解決するには、エネルギーの供給源である太陽表面もしくは彩層の磁場およびその運動を詳細に観測し（参照：**2.3.2 光球・彩層磁場診断による研究**）、さらに上空へどのように物質・エネルギーが輸送され、散逸するかを同時に観測する必要がある（参照：**2.3.1 上空大気の分光診断による研究、2.3.3 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究**）。また、彩層はコロナのような光学的に薄いプラズマに比べ観測の解釈が難しく、太陽彩層におけるプラズマ・磁場・輻射が織りなす物理現象を数値シミュレーションによって正確に再現する事が、彩層の観測を解釈するのに重要である（参照：**2.3.8 理論シミュレーション研究・輻射磁気流体力学による彩層モデルの開発**）。

2) 大規模太陽フレアのメカニズムの解明と予測の基礎構築

太陽フレアは太陽系における最大の爆発現象であり、1 時間程で 10^{32} erg ものエネルギーを解放し、電波から X 線まであらゆる波長で増光する。この太陽フレアは、高温コロナ中に蓄えられた磁場のエネルギーを短い時間で磁気リコネクション及び電磁流体力学的な不安定現象によって解放していると考えられている。太陽フレアは磁気嵐の発生や太陽高エネルギー粒子を通じて地球周辺の宇宙環境及び地上の社会インフラに影響を与えた例が知られており、いつ・どこで・どのくらいの規模のフレアが起こるか予測することは社会的にも非常に重要な研究である。太陽フレアの発生メカニズムを解明し予測を実現するためには、境界条件である太陽表面の磁場を観測し、コロナ中の磁場配位を求め、どのくらいの解放可能な磁気的エネルギーがコロナ中のどこに蓄積されているか算出し（参照：**2.3.8 理論シミュレーション研究・3 次元コロナ磁場モデルの開発**）、どのようなトリガーによってコロナ中でエネルギー解放が起きるのかを観測・数値計算の双方から検討する必要がある（参照：**2.3.1 上空大気の分光診断による研究、2.3.3 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究、2.3.5 太陽圏科学における太陽研究、2.3.8 理論シミュレーション研究・太陽面爆発モデルと予測シミュレーションの開発**）。さらに、フレアに伴ってどのくらいの規模の CME や太陽高エネルギー粒子が生成されるかを理解するには、外側の境界条件である太陽風領域との相互作用まで取り扱う必要があり、システマティックに太陽表面から太陽風領域までの広い領域を長期間観測し数値モデリングと合わせて理解する必要がある（参照：**2.3.1 上空大気の分光診断による研究、2.3.3 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究、2.3.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究、2.3.8 理論シミュレーション研究・太陽高エネル**

ギー粒子モデリングの開発、領域連結計算の開発)。

3) 太陽周期活動と放射強度の変動を駆動するメカニズム

太陽の黒点数は約 11 年の周期で変動していることが知られている。太陽活動周期を駆動・維持するメカニズムはいまだに明らかになっておらず、太陽物理学の大問題の一つと認識されている。おおざっぱには、太陽の差動回転(自転)による大規模な磁場の引き伸ばし(Ω効果)と、Ω効果によって生成された磁場のコリオリ力によるひねり(α効果)によって黒点周期は維持されていると考えられている。また、太陽の活動周期には、黒点出現緯度の移動(蝶形図)や黒点対の極性ルール(ヘールの法則)など説明しなければいけない統計的性質がいくつもある。これらを説明するために、これまでに乱流効果のダイナモ波を発生させる乱流αΩダイナモや、子午面還流の輸送を用いる磁束輸送ダイナモなどが提案されているが、未だ「標準モデル」は確立されていない。どのダイナモモデルが正しいか、もしくは新しいモデルが必要なのかを理解するためには太陽内部の流れ場の様子を観測的に明らかにする必要がある（参照：**2.3.7 太陽内部・太陽周期活動についての研究、2.3.8 理論シミュレーション研究・太陽内部・ダイナモシミュレーションの開発**)。またこれらの観測研究と合わせて、大規模計算機を用いた太陽ダイナモシミュレーション研究を行い、乱流、熱対流、角運動量輸送などの詳細な物理過程の理解も含めて太陽活動周期を駆動・維持するメカニズム解明を目指す。またこれらの物理の理解は次期太陽周期活動予測研究の発展等に貢献できると考えられ、宇宙気候研究にも波及効果を持つ（参照：**2.3.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究**)。

さらに、黒点に関係した磁気的活動は、太陽総放射量や紫外線放射強度、フレア頻度に約 11 年の周期をもたらし、また太陽圏の磁場強度やグローバル構造も変化させる。太陽圏の変動は、地球に到来する銀河宇宙線量の変動要因ともなる。これらの長期変動が地球に与える影響（例えば地球気候への影響など）は未だ明らかになっておらず、今後の最重要課題の一つである。

以上１）～３）のように太陽物理学は高温の太陽コロナや太陽風はどのように作られるのか、爆発現象フレアはどのようにして起こるのか、さらに太陽の周期活動がどのように駆動されているかの解明をめざす。これら太陽物理学で得た知見は、他の恒星活動や系外惑星探査、特にハビタブルゾーンを評価する上でのテンプレートになる一方、太陽と他の恒星との比較研究により太陽を含む恒星活動や活動周期の探究を進める（参照：**2.3.6 恒星研究と連携した太陽研究**)。また、太陽系科学の一翼を担う太陽物理学として、太陽を出発点とする地球を含む惑星・惑星間空間へのダイナミックな結合という観点から「太陽圏の変動を一つのシステムとして理解すること」に貢献していく。

2.3 長期的研究戦略を実施するための研究活動

2.2 節で示した長期的研究戦略にて述べた課題解決に向けて必要な研究活動を、以下に具体的に述べる。

2.3.1 上空大気の分光診断による研究

「ひので」衛星をはじめとする最近の太陽観測から、彩層の主要な部分とコロナは、磁場が介在した機構により加熱されていると示唆される。現在考えられているこれらの加熱機構は、下層からくる波動の熱化によるものと微小フレアの重ね合わせによるものとに大別される。ただし、熱化そのものは、太陽観測のようなリモートセンシング（遠隔観測）では到底分解できない微小スケールで起こると考えられるため、この過程を直接観測することは不可能である。しかし、時間とともに変化する太陽の構造は特徴的なスケールをもっており、このスケールの構造とその時間的な変化を捉えることで、彩層・遷移層・コロナにおけるエネルギー輸送過程をとらえて加熱過程の特定に迫ることが可能と考えられる。観測技術の向上により、これまで観測できなかった Alfvén 波の同定や微小フレアの発生が検出できるようになり、さらに小スケールの観測がなされれば、加熱過程を特定できると考えられている。

太陽外層大気は、温度の異なる光球、彩層、遷移層、コロナから形成されており、光球からコロナまでの間は磁力線でつながり、物質であるプラズマとエネルギーが磁力線に沿ってやり取りされる一つのシステムである（図２）。このシステムの中で発生する太陽磁場の活動を本質的に理解するには、基本構造間でやりとりされるプラズマのエネルギー・質量の流れを定量的に観測してその物理過程を把握することが不可欠である。そのためには、光球より上空の彩層からコロナまでの温度範囲を抜けなくカバーし、基本的な空間スケールであると考えられている 0.5 秒角程度の構造を解像しかつ磁気的活動現象を支配する Alfvén 波を分解できる時間分解能で、加熱・加速などを理解するのに重要な速度場・温度・密度などの物理量を診断する、ことが重要になる。これまで「ひので」、SDO、IRIS 衛星のどの衛星観測でも行えなかった、高空間・時間分解能で行うシステマティックな分光観測を通して、宇宙プラズマの理解につながる太陽物理の重要課題にまず最優先に挑むのが SOLAR-C 計画である。

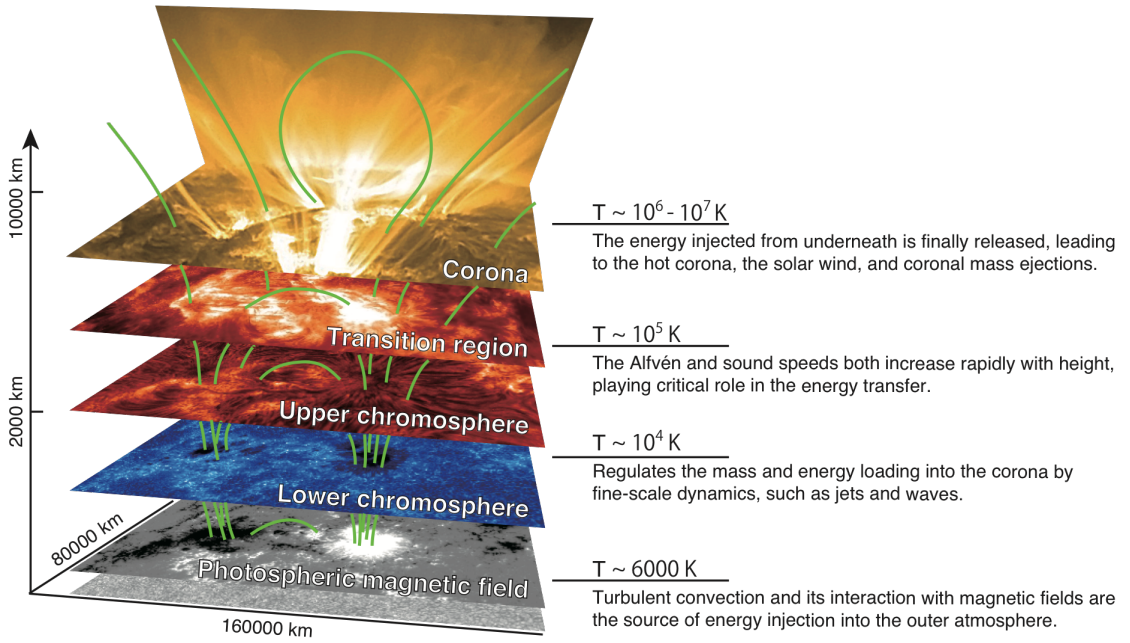

図 2 太陽光球から彩層・遷移層・コロナの構造

（©太陽画像：国立天文台/JAXA、NASA）

太陽大気において、6,000 度の太陽の表面である光球、その上空にある 1 万度の彩層、10 万度の遷移層、数 100 万度のコロナまでの密度・温度・電離度などが異なるプラズマ環境のいたる所で磁気リコネクションが起こっていることが、これまでの太陽観測衛星「ひので」などにより明らかになった。一般に、高磁気レイノルズ数の宇宙プラズマで起こる磁気リコネクションは古典的な理論で予想されるエネルギー解放速度に比べ圧倒的に”速い”事が知られており、「高速磁気リコネクションがどのようにして起こるのか」という問題は太陽物理学だけでなく宇宙科学全体の重要な科学課題である。SOLAR-C では磁気リコネクション領域を高空間（0.4 秒角）・時間（～1 秒）分解能で観測し、さらに分光し密度・速度・温度などを診断し高速磁気リコネクション問題に挑む。

また、フレア・CME に代表されるような太陽地球環境に影響を及ぼす突発現象がいつ・どこで・どのくらいの規模で起こるのか予測することは、科学のみならず社会的にも重要である。SOLAR-C では光球、彩層、遷移層、コロナをシームレスに観測し、DKIST をはじめとした地上観測と協調観測を行う事でいつ・どこで・どのくらいの規模のフレア・コロナ質量放出が起こるか予測することを試みる。DKIST では、4 m という大口径を生かした大集光力・高解像度での光球・彩層観測が可能となるのに加え、コロナにおける磁場観測も可能である。また、磁気リコネクションや波動現象といった太陽大気プラズマのダイナミックな現象をカバーする視野や時間分解能が必要である。そこで、DKIST の次世代焦点面装置として、広視野・高時間分解能での偏光分光観測装置「近赤外線の広視野偏光分光観測装置 NIRTF (Near InfraRed Tunable Filter)」を実現することにより、光球・彩層・コロナに至る

太陽大気プラズマのダイナミクスや磁場などの物理診断、エネルギー解放と輸送を担う物理素過程を直接的に観測することが望まれる。

2.3.2 光球・彩層磁場診断による研究

すべての太陽活動現象のエネルギー蓄積・伝播・解放の過程において、磁場は重要な役割を果たしており、それらの過程を定量的に把握するには、遠隔観測による磁場診断が不可欠である。「ひので」に代表されるスペースからの（光球磁場の）偏光分光観測が本格化したことで、可視光スペクトル線のゼーマン効果を測定して得られる光球磁場ベクトルは基盤的かつ必要不可欠なデータとなっている。ただし 1 章で述べた太陽物理学分野の主な課題のうち、特に「外層大気加熱・恒星風の形成とダイナミクス」と「プラズマ爆発現象」の研究をより一層進めるためには、大気活動のエネルギー源といえる光球磁場の診断はもとより、コロナへのエネルギー輸送に重要な光球-コロナの間にある彩層および遷移層における磁場診断の必要性が近年高まってきている。そのため、彩層・遷移層磁場診断の確立は世界的にもさまざまな取り組みがなされている。鍵となるのが、赤外スペクトル線と紫外スペクトル線の偏光分光観測である。日本の太陽コミュニティーは国立天文台を中心に、それぞれへの足掛かりを大気球実験 SUNRISE-3 (2024 年実施) と観測ロケット実験 Chromospheric Lyman-Alpha Spectro Polarimeter（CLASP: 2015 年実施）・CLASP2（2019 年実施）・CLASP2.1 (2021 年実施)という国際共同ミッションによる小規模実験を通して築きながら、海外の大口径地上望遠鏡との連携も進めている。それらに基づいた磁場診断の展望を以下に示す。

光球磁場診断に使われているゼーマン効果を使用して彩層の磁場を診断するためには、ゼーマン効果による波長分裂が大きくなる赤外スペクトル線（Ca II 854 nm、He I 1083 nm など）の偏光分光観測が期待されている。近年、狭帯域フィルターによる撮像偏光分光観測や面分光装置、偏光観測の多波長化など地上望遠鏡の観測技術も進化しており、より大型の望遠鏡で可視光・赤外線の偏光分光観測を行う機運が高まっている。地上望遠鏡では、2022 年から徐々に本格的な科学観測を開始した米国の DKIST が、口径 4 m の大口径がもたらす高解像度(波長 1 μm で 0.06 秒角)と集光力により、可視光から赤外線までの広い波長範囲にわたる高精度な偏光分光観測を進めている。しかしながら、大気ゆらぎや偏光較正の観点から観測装置の性能がまだ十分に発揮されておらず、今後の進展が期待されている。また、DKIST では、彩層・遷移層よりさらに上空のコロナにおける磁場の観測も開始され、2.4.1 章の上空大気の分光診断とのシナジーも期待される。ヨーロッパでは同じく口径 4 m の European Solar Telescope (EST) が 2020 年代後半の観測開始を目指して計画されている。高解像かつ高精度な磁場診断により、磁気リコネクションや磁気流体波など、エネルギー解放と輸送を担う物理素過程を直接的に研究できると期待されており、日本の太陽コミュニティーとしても、これらの望遠鏡で狙う科学課題の提案と、次期観測装置に向けた要素技術

の開発を通して、大口径地上望遠鏡計画への参入に取り組む必要がある。ただし、DKISTのような大口径望遠鏡では活動領域全域をカバーできる視野を確保することは困難である。そのため、このギャップを補うために国内では飛騨天文台の口径 60 cm ドームレス太陽望遠鏡に、典型的な活動領域をカバーする視野で SOLAR-C と協調観測を行う、可視—近赤外多波長同時偏光分光観測装置、および狭帯域フィルター分光撮像装置を設置することが計画されている。

一方、地上望遠鏡による観測では質の高い観測データが短時間得られるとしても、大気ゆらぎと天候によって広い視野にわたる高解像で連続的な観測は困難である。「広視野」と「連続観測」を要する研究では、依然としてスペース観測の優位性は高いと考えられる。そこで、スペースからの高精度偏光分光観測に必要な技術獲得を目指して、国際大気球望遠鏡 SUNRISE-3 に搭載する近赤外線偏光分光装置 Sunrise Chromospheric Infrared spectropolarimeter (SCIP)を、国立天文台を中心としたグループで開発した。SCIP は、Ca II 854 nm を含む多数の近赤外線スペクトル線を同時に偏光分光観測することで、光球・彩層の 3 次元磁場構造を得ることができる。SUNRISE は口径 1 m の大型光学望遠鏡をもち、SCIP を含む複数の観測装置により、紫外線〜近赤外線の広い波長範囲で地球大気の影響のない約 1 週間のフライト観測を 2024 年に実施し、高解像度・高精度の広帯域多波長偏光分光観測に成功した。

さらに、スペースからの観測が必須となる紫外線域には、可視光・赤外線ではアクセスできない彩層・遷移層が発するスペクトル線が複数存在する。かねてよりその分光観測によって、温度・密度・速度場などの多様な物理量診断が分光観測によって行われてきたが、IRIS 衛星（2013 年打上げ）の登場でより詳細な研究が進められている。偏光においては、水素ライマン α 線（波長 121.567 nm）や電離マグネシウム Mg II k 線（波長 279.55 nm）での偏光線輪郭形成モデルにより、ハンレ効果や磁気光学効果、ゼーマン効果による彩層・遷移層磁場診断の実現性が示され(Trujillo Bueno et al. 2011、Belluzzi & Trujillo Bueno 2012、ほか）、正にコロナに接する境界領域でのエネルギー伝播を調べることができると期待される。 そして、2015 年 9 月実施の観測ロケット実験 CLASP で、ライマン α 線での高精度 (0.1%) 偏光分光性能が実証され（Giono et al. 2016, 2017)、太陽起因の直線偏光の計測と遷移層磁場の同定にも成功した（Kano et al. 2017, Ishikawa et al. 2017）。続く 2019 年 4 月実施の CLASP2 では、Mg II k 線の直線偏光のみならずゼーマン効果由来の Mg II h & k 線（彩層中〜最上部より放射)、Mn I 線（彩層底部）円偏光の計測にも成功した。そして、「ひので」による光球磁場観測とあわせて、磁束管が彩層で急激に膨張し互いにひしめき合う彩層磁場の様子を観測的に初めて明らかにした（Ishikawa et al. 2021, Li et al. 2023)。さらに、2021 年 10 月には、CLASP2 再飛翔計画（CLASP2.1）が行われ、活動領域のより広範囲の観測データを取得し、磁場の導出に成功している（Li et al. 2024)。

2030 年代以降に実現すべきスペースミッションの 1 つとして、「ひので」衛星、CLASP、SUNRISE-3 と維持・発展させてきたスペース偏光分光観測技術を駆使した「ひので」以上

の口径、波長範囲を持つ宇宙望遠鏡の実現が検討されている。CLASP や SUNRISE-3 による一連の観測データが出揃い、DKIST による本格的な科学観測が開始される 2020 年代半ば〜後半は、科学課題 1）高温でダイナミックな外層大気の形成機構、2）大規模な噴出の発生機構とその予報に向けた研究、の解明に地上観測でどこまで迫れるのか？スペース観測の必然性は何か？を見極めることが重要である。そのためにも、日本の太陽コミュニティによる大口径地上望遠鏡計画への参入および大口径地上望遠鏡データを活用した科学成果の創出を着実に進めていく必要がある。

彩層・遷移層の磁場診断には、非熱平衡状態や 3 次元効果を考慮した輻射輸送計算が欠かすことができない。また、それらとより現実的な彩層モデル（**2.3.8 理論シミュレーション研究・輻射磁気流体力学による彩層モデルの開発**）を組み合わせた模擬観測も、重要なツールとなっている。模擬観測は実際得られた観測データを解釈するだけでなく、次世代装置の仕様を検討する際にも重要な役割を果たす。次世代大型宇宙望遠鏡の実現のために理論シミュレーションとのさらなる連携が求められている。さらに機械学習・深層学習で偏光分光データから磁場・速度などの物理情報を導出する手法の開発も近年急速に進展している。これらの先端的な解析手法を適用し、光球から彩層そして遷移層の磁場を 3 次元的に診断できる能力を手にすることが必要である。

2.3.3 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究

極端紫外線・X 線および電波による太陽観測は、前世紀後半に勃興した観測手法であり、主にコロナからの熱放射やフレアに伴い加速された非熱的電子からの放射を捉えることができる。日本では、名古屋大学、国立天文台および情報通信研究機構が長期にわたる太陽電波観測を行っており、これらの経験が太陽電波観測を発展させ、野辺山電波ヘリオグラフを経て、アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計（ALMA）による太陽観測の実現へとつながっている。一方、太陽極端紫外線・X 線観測は、「ひのとり」衛星以来、日本の衛星による天文観測の一翼を担っており、「ようこう」衛星の硬 X 線・軟 X 線撮像観測によって磁気リコネクションによる太陽大気での磁気エネルギー解放モデルを確立したことは、特筆すべき成果である。

観測機器の高性能化により、近年では地上の可視光望遠鏡と同程度の 1 秒角を切る空間分解能で宇宙からのコロナ観測が可能となった（Hi-C ロケット実験: Kobayashi et al. 2014）。この高空間分解能観測にて、1 秒角以下の太さをもつ微細なコロナループの捻じれが磁気リコネクションを引き起こし、捻じれを緩和させ、プラズマを加熱していることが示唆された（Cirtain et al. 2013）。この現象は、300 万度以上の高温コロナの生成メカニズム候補を直接観測しただけでなく、太陽コロナで普遍的に起こる磁気リコネクションの基本構造を示していると思われる。また Solar Orbiter による極端紫外線観測により、コロナ温度を持つ微小なジェット現象が頻発していることがわかり(Chitta et al. 2023)、さらに

Parker Solar Probe による内部太陽圏のその場観測から、太陽風加速にジェット現象が深く関わっている可能性が示唆されている(Raouafi et al. 2023)。このように高分解能による長期連続コロナ観測から、磁気リコネクションだけでなく MHD 波動などの根源的なプロセスを捉え、宇宙プラズマの素過程を明らかにすることが、太陽 X 線・極端紫外線観測の一つの方向である。よって SOLAR-C 衛星による極端紫外線分光撮像観測は、この課題でも大きな研究成果が期待できるだろう。

宇宙プラズマの素過程の中でも粒子加速は宇宙のいたるところで起きている。太陽大気・太陽圏（惑星間空間）では、太陽フレアやコロナ放出現象に伴い粒子加速が発生し、高エネルギー粒子による非熱的放射が観測されている（例えば Benz 2016, Pick & Vilmer 2008）。これら高エネルギー現象は、人類の宇宙活動を推進する上で重大な懸念であり、その発生や規模の予測が社会から求められている。粒子加速を理解するためには、MHD スケールの構造（MHD 衝撃波、リコネクションアウトフロー、プラズモイドなど: 例えば Shibata and Magara 2013）と粒子加速の空間的・時間的関係を明らかにすることが重要である。「その場」観測である地球磁気圏での観測や、空間・時間分解できない太陽以外の天体現象では関係性を明らかにすることが非常に難しく、構造全体を俯瞰して観測できる太陽においてのみ調べることができる。よって粒子加速と MHD スケールの構造との関係は、太陽物理学において明らかにしなければならない課題である。

非熱的放射であるガンマ線・硬 X 線（>数 keV）・マイクロ波での太陽フレア観測の空間分解能（>10 秒角）が他の波長の観測より著しく低かったため、現在のところ粒子加速のメカニズムはもちろん加速領域の特定もできていない。近年、ALMA による太陽観測 (Shimojo et al. 2017, 2024) や FOXSI ロケット実験で実証された結像型硬 X 線望遠鏡 (Krucker et al. 2014) などにより、太陽フレアにおける非熱的放射を秒角レベルの空間分解能で観測することが可能となってきている。また、低空間分解能ではあるが、太陽専用の電波干渉計 Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA)による広帯域での GHz 分光撮像フレア観測により、リコネクション領域における非熱的電子の分布だけでなく、磁場の導出が行われている(Chen et al. 2020)。2024 年 12 月に米国 National Science Foundation から出版された ”Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033”では、今後 10 年における最優先中規模プロジェクトに EOVSA の発展計画である Frequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) 計画が選出された。よって、FASR や ALMA による電波画像を使った高エネルギー粒子の空間分布や時間変動の研究が、今後大きく発展すると思われる。これら電波・硬 X 線観測とともに、FOXSI ロケット実験に搭載された軟 X 線光子計測検出器 (Narukage et al. 2020) を使って行う高解像度コロナ撮像分光観測を実現することにより、熱的プラズマの物理量の空間・時間構造を導出して MHD スケールの構造を検出し、非熱的粒子の分布と比較することで粒子加速研究を飛躍的に前進させることができるだろう。

2.3.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究

太陽が起こす様々な現象は、惑星間空間を通して地球周辺の宇宙環境・人類社会にも多大な影響を与えることから、宇宙天気・宇宙気候現象とも呼ばれる。このため、現代の太陽物理学には、太陽ないし恒星そのものの物理の解明以外に、地球・惑星環境への影響の予測という、実用面の役割が強く求められている。実際、太陽の大規模な太陽フレアが、磁気嵐の発生や高エネルギー粒子の飛来を通じて社会インフラに影響を与えた例が知られており、さらに太陽活動の長期変動が地球の気候の変動要因ともなることも知られている。
科研費新学術領域研究「太陽地球圏環境予測（PSTEP)」では、2015〜2019 年の 5 か年にわたって、太陽・地球磁気圏・電離圏・気象の研究者が協力し、地球に影響する太陽諸現象の発生予測の確立を目標とした研究が推し進められてきた。太陽嵐・地球電磁気・周期活動を柱とする予測の基礎となる研究に加えて、研究成果と産業界などにおける宇宙天気情報の現業利用の橋渡しをする、予報システムの構築に大きく貢献した。PSTEP で培われた研究者間、宇宙天気研究者および宇宙天気ユーザー間の協力、物理解明と社会応用の両輪の研究開発の推進は、今後も継続発展すべき宇宙天気研究の重要な方向性といえる。一方で PSTEP では主題ではなかった太陽風・SEP の理解の深化や、太陽嵐の長期予測は、月・火星へと人類が進出していく上で必要不可欠となる今後の課題である。

500 MeV 以上の SEP は航空機被ばくに影響があり、その予測は ICAO への情報提供において重要である。航空航路変更等に利用するには 12 時間前予測が必要であり、民間宇宙旅行や有人宇宙探査においては、さらに低エネルギーの粒子も警戒する必要があるため、より広いエネルギー帯でかつ、太陽圏内の任意の位置での予測技術も必要である。その一方、地球周回軌道（静止軌道・低軌道）や月周回軌道、太陽圏探査機による SEP モニター観測は今後充実していくことが期待される。次期気象観測衛星ひまわりに搭載される宇宙環境センサ開発が情報通信研究機構により進められており、2029 年に予定されている運用開始後は SEP の多点観測の一翼として日本上空の宇宙環境の定常観測を実現する。これら多点観測による蓄積された観測データを有効利用することで、物理数値シミュレーションと AI 技術を用いた予測技術を開発し､SEP フラックスとエネルギースペクトルの予測手法の確立、SEP 発生伝搬過程の解明を目指す。

また、樹木、氷床コア、堆積物等に含まれる炭素 14 やベリリウム 10 などの宇宙線生成核種の分析からは、過去数千年以上にわたる大規模な SEP イベントの履歴を辿ることが可能である。より長期にわたってイベントを探索することで、発生しうる最大規模の SEP イベントに関して手がかりが得られるほか、大規模なイベントの前後の年代の太陽活動を明らかにすることで、11 年周期や長期的な太陽活動の傾向との関係性などについても理解が深まると期待される。また、そういった大規模な SEP イベントの地球大気への影響の解明も課題である。

一方、太陽嵐の長期予報には、黒点出現や黒点形状の変化の予測が鍵となる。太陽内部は

乱流状態で、黒点は熱対流によりランダムに出現する。近年、熱対流中に磁束菅を置いた数値シミュレーションの結果、太陽内部の大規模な下降流に捕捉された磁束菅がデルタ黒点（フレア活動度が顕著に高い）を作りやすいことが示された。従って、太陽表面観測から黒点出現の兆候を見つけられると、黒点形成からフレア発生まで予報できる可能性がある。過去には日震学を用いた黒点出現予測の例もあるが、議論はまだ収束していない。観測データと数値シミュレーション、そして機械学習も組み合わせながら黒点出現のサインを特定し、まずは 3 時間先の黒点予測、次に原理的にどこまで黒点予測が可能かを解明する。さらに太陽深部の大規模な流れと黒点出現領域の関連を明らかにすることで長期的な黒点予報を可能にする。

このような地球への影響を視野に入れた太陽の監視観測は、わが国では国立天文台・京都大学・情報通信研究機構等の地上太陽望遠鏡により長きにわたって行われてきている。現在、国立天文台太陽フレア望遠鏡・京都大学 SMART 望遠鏡での光学観測は、世界的にも先端的な水準にあり、情報通信研究機構の山川太陽電波観測システムも電波バーストを捉えることによりプラズマ噴出のような太陽活動を常時監視している。さらに、世界に望遠鏡を配置して休みなく太陽を監視する観測も進められている（京大 CHAIN プロジェクト）。欧州ではラグランジュ点（L1, L5）に宇宙機を置き、静止気象衛星のように太陽から地球に飛来するプラズマ塊を常に一定方向から観測を行う計画を推進している。また米国では、地上 6 か所に太陽望遠鏡を置いて 24 時間体制で表面磁場の進化と太陽フレアの観測が行われているが、さらに上層大気の磁場までを捉えられるよう望遠鏡群を更新する計画(ngGONG)が提案されており、これらの計画への我が国の貢献も期待されている。また、近年機械学習手法が宇宙天気研究に導入されており、この動きは研究分野全体への広がりも見せつつある。2025 年には米国 NOAA が L1 点へ新たな宇宙機 SWFO(Space Weather Follow on) -L1 を打ち上げ予定である。SWFO-L1 は太陽風のその場(in situ)観測に加えて、コロナグラフ搭載しており、SOHO/LASCO の後継として CME のモニター観測を行う予定である。

このように、「常に太陽をとらえ、その観測を継続する」という、まさに気象観測と同様の太陽観測の実現が、今や社会からの強い要請となっている。先端的な観測装置の実現とそれによる物理の解明、そしてその成果を援用しつつ継続的な観測を行うことによって果たしていく実用的社会貢献、これら 2 つを両輪とすることが、今後の太陽分野を含む宇宙天気研究の目指す方向性である。

2.3.5 太陽圏科学における太陽研究

太陽風の加速・伝搬過程や太陽圏のグローバルな構造、およびその太陽活動に伴う変動など、太陽圏研究には未だ重要な問題が多く残されている。加えて、太陽大気は太陽風を介して地球・惑星圏とつながっており、惑星間空間磁場の変遷や、コロナ質量放出（CME）・太陽高エネルギー粒子（SEP）の太陽圏内の伝搬は、太陽圏研究と宇宙天気予報の両観点で重

要である。このような内部太陽圏の諸問題に関しては、太陽・太陽圏研究と地球・惑星圏研究の一貫した取り組みが必要である。

2020 年代から 2030 年代初頭にかけては、世界各国が太陽圏研究に関する主力飛翔体を推進する時期である。太陽研究は、太陽にできるだけ近い距離で「その場」観測を中心に行う太陽圏・惑星探査ミッションと連携することが重要である。PSP は 2025 年頃に 10Rs（太陽半径）以内まで接近し太陽コロナの「その場」観測データを取得する。2020 年打上げられた SO は傾斜角 25 度から太陽極域の遠隔観測をすると同時に、太陽から 0.3 AU（天文単位）周辺の「その場」観測を行う。日本が中心となるミッションとしては、SOLAR-C が飛翔し、太陽コロナ加熱・太陽風加速領域の詳細な観測を行う。これらの宇宙ミッション間の連携により、プラズマ速度のステレオ観測や「その場」観測と合わせた太陽風研究など先進的な観測が初めて可能になる。加えて日欧共同の水星探査機 BepiColombo（2018 年打上げ）は水星までのクルージングフェーズを含めて 0.3 AU の太陽風の「その場」観測を行い、また BepiColombo や JAXA の金星探査機「あかつき」は、探査機本体が地球から見て太陽の裏側に回り込む時にビーコン（地球に向けて送信される通信用電波）による太陽近傍のコロナ掩蔽観測ができる。並行して、欧米が計画する L5 ミッションや、韓国が計画する L4 ミッション、中国が計画する Solar Polar-orbit Observatory 計画、JAXA が計画する火星衛星探査計画（MMX）、さらには、情報通信研究機構が進めている次期ひまわり衛星への太陽プロトン計測装置搭載計画 などの将来計画と科学的な連携の具体化も重要である。このように国内外の太陽・太陽圏・地球惑星ミッションを連携させるための分野横断的なコミュニティを構築する。

これらの飛翔体を用いた観測を有機的に連携させるために、グローバルな太陽風の構造とその変遷を、地上電波望遠鏡を用いた惑星間空間シンチレーション（IPS）観測によって導出する。特に、2020 年代には、名古屋大学等が中心となり最新鋭の技術を投入した「次世代 IPS 観測装置」を実現することによって、世界に先駆けて太陽圏の 3 次元構造の時間変動を地上観測から導出し、次世代の太陽圏研究をリードする。更に次世代 IPS 観測装置を中核として、世界各国の地上 IPS 観測のネットワーク観測網を構築することで太陽風・CME の 24 時間稠密観測を実現する。観測と並行して、太陽圏のグローバル MHD シミュレーションモデル（SUSANOO 等）の開発研究を推進する。「ひので」衛星等の観測データを用いてモデルの内側境界条件の高精度化を進めるとともに、シミュレーション結果から IPS や白色光散乱光、「その場」観測の擬似データを合成し各観測データと比較することで、飛翔体・地上観測・モデリングを有機的に結合し、包括的な太陽圏の研究を可能にする。

太陽・太陽圏研究と地球・惑星圏研究の一貫した研究を行うための試みの一つとして、名古屋大学宇宙地球環境研究所に設置する「太陽圏サイエンスセンター」計画がある。SOLAR-C をはじめとした 2020 年代の太陽圏システム科学分野を担う「あらせ」、「みお」の 3 ミッションを包含するサイエンスセンターを宇宙科学研究所との協力により名古屋大学宇宙地球環境研究所に設置する。「太陽圏サイエンスセンター」では、3 ミッションの観測データ

および関連する地上観測, 数値シミュレーション・モデリングデータを有機的に結びつけ、太陽圏システム科学として太陽・太陽圏と地球・惑星圏の融合研究を可能とするデータ解析環境を整備する。

2.3.6 恒星研究と連携した太陽研究

太陽物理学は恒星物理学と多くの共通課題を抱え、分野間の連携による研究が活発化している。近年、恒星周囲を公転する系外惑星が多数発見され、太陽圏研究の知見の重要性がさらに高まっている。恒星研究では多波長同時観測が一般的に困難であるが、太陽の長期的な多波長シノプティック観測は、恒星の限られた観測を補い、理解を深める貴重な機会を提供する。また、空間分解が可能な太陽観測の利点を活用し、「星として」観測した太陽データを恒星活動現象と比較することで、太陽研究は恒星活動の理解に寄与する。一方、恒星の幅広いパラメータスペース（年齢など）や膨大な数を活かし、若い太陽や現代の太陽での極端宇宙天気現象の理解へ還元するアプローチも天文学の常套手段であり、太陽・恒星研究は相互に成長しうる関係にある。

2009 年に打ち上げられた NASA のケプラー宇宙望遠鏡の高精度な測光観測データは、恒星研究を大きく進展させた。特に、太陽型星で超巨大フレア（スーパーフレア）が発生していることの発見は重要である。スーパーフレアは、最大級の太陽フレアの 10 倍から 10000 倍のエネルギーを解放する現象で、自転速度が遅い太陽型星でも、100 年から数千年に 1 回の頻度で発生しうることが判明した。この知見から、太陽でも低頻度ながらスーパーフレアが発生する可能性が指摘されており、発生時には宇宙空間をインフラとして活用する現代文明に甚大な影響を及ぼす可能性がある。「太陽でスーパーフレアは起きるのか？」という問いは、もはや太陽・恒星物理学のみならず社会的にも極めて重要な課題である。

太陽型星スーパーフレアの理解は、太陽の空間分解観測データとの比較を通じて大きく進展した。京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡（DST）による Ca II HK 線と Ca II IR トリプレット観測との比較は、これらの星に超巨大黒点が形成されている可能性を示唆した。また、ひので衛星や飛騨天文台 SMART 望遠鏡、SDO 衛星による可視連続光フレアのデータとの比較などから、スーパーフレアでは超巨大黒点に蓄えられた磁気エネルギーが磁気リコネクションを介して解放されるという、太陽フレアと同様の描像が支持されている。しかし、太陽でスーパーフレアが発生するかを完全解明するには、超巨大黒点の磁束生成機構に注目した研究が必要であり、太陽ダイナモ機構の詳細な解明が観測・理論の両面で求められる。

ケプラー衛星の成功を契機に、恒星フレア研究の関心は放射機構の理解へ移行しつつある。X 線、紫外線、可視連続光、水素バルマー線など多波長での測光・分光観測が進展している。日本では 2018 年に京都大学岡山天文台せいめい望遠鏡が可視光分光観測を開始し、バルマー線や可視連続光の観測が進められている。また、X 線では全天 X 線監視装置 MAXI

に加え、2023 年に XRISM 衛星が観測を開始した。これら恒星データの理解を深めるには、多波長での「星としての太陽」のレファレンスデータ整備が求められる。DST や SMART は、可視連続光フレアやバルマー線の空間分解データと「星としての太陽」データの比較研究に寄与することが期待される。さらに、XRISM の高い波長分解能を用いて、鉄輝線等による恒星・前主系列星大気の調査が進むと期待されるが、その放射機構の理解には、従来の太陽 X 線観測データの活用が求められる。加えて、2023 年に JAXA 公募型小型 6 号機候補に選定された LAPYUTA による恒星紫外線分光観測や、将来的な SOLAR-C で得られる紫外線分光データとの比較研究も期待される。

系外惑星、原始惑星系円盤への影響を考慮した研究では、恒星 X 線・紫外線放射、恒星風、恒星 CME を含む恒星圏の観測が活発化している。星間吸収が強く観測困難な極端紫外線（EUV）は、系外惑星の大気散逸における重要な要因であり、その推定方法が提案されている。SOLAR-C による太陽極端紫外線の詳細観測は、恒星大気加熱機構の理解を深め、紫外線放射の精緻な推定を可能にすることが期待される。これにより、恒星から系外惑星、原始惑星系円盤への影響を解明する基盤が整備されるだろう。恒星圏プラズマの直接観測は困難だが、恒星風や CME に関する部分的な検出が進みつつある。せいめい望遠鏡と SMART を用いた観測では、恒星で巨大フィラメント噴出が発生していることが示された。しかし、これらの限られた恒星観測から系外惑星への影響全体を解明するのは依然困難である。太陽研究には、新たな検出手法の開発とともに、部分的な観測データから全体像を推定するツールの構築が期待される。地上望遠鏡および人工衛星によるシノプティック観測は、これらの課題に重要な役割を果たすだろう。

2.3.7 太陽内部・太陽活動周期についての研究

太陽に見られるほぼ全ての活動現象は磁場の存在を介して生じるが、磁場の起源は太陽内部にあると考えられる。太陽半径の外側 30%を占める対流層では、太陽中心の核融合で生じたエネルギーが注入されることにより、乱流的な熱対流が恒常的に発生している。この乱流こそが、太陽内部の磁場を増幅する主な原因であると考えられている（ダイナモ機構）。磁場増幅の発現として最も特徴的な帰結は黒点であるが、黒点数は 11 年の周期を持って変動することが知られている。また、太陽風構造やフレア・コロナ質量放出の発生数も同じく 11 年の周期で変動する（太陽活動周期）。

太陽活動周期を駆動・維持するメカニズムはいまだに明らかになっておらず、これをダイナモ問題と呼ぶ。ダイナモ問題解決の鍵は太陽内部にあり、大まかには、1. 太陽はどのような自転速度分布（差動回転）を持つのか？2. 子午面内の流れ場（子午面還流）はどのような構造を持つのか？3. 熱対流は、どの領域、どの空間スケールで、どのような速度を持つのか？を観測的に明らかにする必要がある。それらを明らかにすることによって、太陽内部でどのように磁場が生成され、周期活動が維持されているかが明らかになるであろう。1.

差動回転分布からは、太陽ダイナモにおける最も重要な効果である、差動回転による大規模磁場の引き伸ばし（Ω 効果）について空間分布の手がかりを得られる。また、2. 子午面還流からは、太陽内部における磁束輸送や、乱流による角運動量輸送を理解することができる。これは［子午面還流による角運動量輸送］＝［乱流による角運動量輸送］の釣り合いが成り立つためである。さらに、3. 熱対流の性質と太陽の自転速度の関係からは、乱流的なダイナモ効果や差動回転や子午面還流を形成する乱流角運動量輸送がどのように行われるのかを確認することができる。これらの観測は、各国で精力的に進められている理論シミュレーションの妥当性を検証する上でも重要な役割を果たす。

以上に挙げた流れ場は太陽内部に存在するため、いかなる波長によっても光学的な観測・検証を行うことは困難であり、ほぼ唯一の観測的手段が、太陽の音波を用いた日震学である。日震学はこの 30 年ほどで急速に発展し、差動回転については米国の地上観測ネットワーク GONG、NASA/ESA 共同衛星 SOHO/MDI、NASA の衛星 SDO/HMI などを用いた観測により、対流層の広い範囲で高精度の推定が可能となった（例えば Schou et al. 1998）。一方で、子午面還流の観測は、特に対流層の深部について、解析手法ごとに異なる結果が示され、意見の一致を見ない。例えば、SDO/HMI を用いた Zhao et al. (2013)の結果では、南北半球ごとに、深さ方向に 2 つのセルを形成しているが、GONG や SOHO/MDI を用いた Gizon et al. (2020)の結果では、各半球に 1 つのセルを示している。この結果の差異は、地球軌道からのみ望遠鏡を用いた測定を行っていることによって生み出されている。地球軌道からのみの観測では、太陽表面で緯度 30 度程度離れた二点の観測が限界であり、そのような観測では、対流層の下部では、逆問題を解くためには不適切な多くのノイズを含んだデータを得ることになる。また、熱対流速度の測定については、さらに混沌とした状況である。いずれも局所的日震学による見積もりを行った Hanasoge et al. (2012)と Greer et al. (2015)の解析結果では、全球スケールの流れについて、両者の間に、運動エネルギーにして 3-4 桁の不整合が存在する。すなわち、我々は、太陽深部の熱対流についてほとんど理解できていない。太陽ダイナモ問題解決のためには、太陽内部を精密に測定し、これらの不整合を解消することが必須である。これまでに我が国で推進されてきた太陽ダイナモの理論シミュレーションに加えて、8.1 で提案するような多点観測ミッションを進めることで、ダイナモ問題の解決に向けて大きく前進することができると考えられる。

また、太陽内部・ダイナモ研究は宇宙気候研究にも波及効果を持つ。太陽活動はそれぞれの周期で活発度が異なる事が知られており、非常に多くの黒点が出現したサイクルもあれば、マウンダー極小期のようにほとんど黒点が現れなかったサイクルもある。実際、第 24 太陽周期は、過去 100 年間で最も黒点数が少ない特異な周期であった。しかし、その原因は現在もよくわかっておらず、第 25 太陽周期がマウンダー極小期のような活動が非常に弱いものになるのか、それとも第 23 太陽周期以前のような比較的活動が高いものになるのか注目されている。これまで、世界的に数多くの研究者が様々な手法を用いて太陽周期活動の予測研究に挑んできたが、その予測結果は混沌とした状況である（Pesnell 2016, Iijima et al.

2017)。ダイナモ問題の研究は、これらのグランドミニマム研究や次期太陽周期活動予測研究の発展に貢献できる。言うまでもなく、長期間の太陽シノプティック観測で得られる黒点数とその時空間変動や彩層活動のデータの蓄積は、ダイナモ機構の理解と太陽周期活動予測を研究する上で基盤となるものである。また、炭素 14 やベリリウム 10 などに基づき過去の太陽周期の履歴を得ることも、長期的変動の要因を探る上で重要である。太陽表面・太陽内部の流れ場の観測データ・復元データや理論シミュレーションと組み合わせることで、ダイナモ問題の解決に進展をもたらすことが期待される。

2.3.8 理論シミュレーション研究

輻射磁気流体力学による彩層モデルの開発

彩層プラズマダイナミクスの理解は太陽大気の構造形成機構を理解する上で最も重要な課題である。その課題解決のために太陽彩層におけるプラズマ・磁場・輻射が織りなす物理現象を数値シミュレーションによって正確に再現することが必要である。このため、非局所熱力学平衡状態の輻射輸送を含む多次元磁気流体シミュレーションコードを構築し、(1) 彩層中の波動生成・伝播・熱化過程、(2) スピキュールと呼ばれる彩層のジェット現象、(3) 彩層加熱の解明に挑む。このような輻射磁気流体コードの開発は国内では初めてであり、世界的にみてもほとんど例がない。SOLAR-C をはじめとする新たな太陽観測ミッションの科学的価値を最大化するためには、先端的な理論研究と高度な数値計算に基づくシミュレーション（モデリング）研究を戦略的に推進する必要がある。その成果である彩層モデルは、SOLAR-C などの観測データから彩層のプラズマ状態とエネルギー流束を定量的に把握する上で、決定的に重要な役割を果たす。さらに、太陽のみならず様々な恒星の大気構造の多様性と共通性の理解にも貢献することができる。また、星形成領域における原始惑星系円盤など部分電離プラズマの共通物理の理解にも貢献する。

3 次元コロナ磁場モデルの開発

太陽コロナは磁気エネルギーがプラズマの熱エネルギーに対して優勢な低 β プラズマ[1]で満たされているため、そのダイナミクスを理解するには、コロナ磁場の 3 次元構造を知る必要がある。「ひので」による精密な光球磁場ベクトルの観測以来、このコロナ磁場を太陽光球面磁場の観測データからフォース・フリー（力学平衡）近似を使って推測する試みが進められている。しかし、光球は高 β 領域であることからこのフォース・フリー磁場モデルの信頼性は依然低い。それ故、光球に比べて β 値が低い彩層におけるベクトル磁場を観測することは、コロナ磁場の 3 次元構造を知る上で有用である。ただし、活動性の高い彩層での磁場観測を利用した 3 次元磁場モデルを開発するためには、今後いくつかの課題を解決する必要がある。それ故、大型地上太陽望遠鏡 DKIST 他による彩層磁場の取得までに 3

[1] β 値は磁気圧に対するプラズマ圧の比を表す。

次元コロナ磁場モデルを高度化し、彩層磁場データを利用することができる一般的な平衡磁場の境界値問題を解く方法を開発する。

太陽面爆発モデルと予測シミュレーションの開発

太陽フレアとコロナ質量放出（CME）として現れる太陽面爆発の発生機構を解明し、これを予測する試みは太陽研究の重要課題である。この目的達成のため、太陽光球面と彩層の磁場変動データを電磁流体力学モデルに取り入れる動的同化手法の開発を進展させ、DKIST 他が観測する光球・彩層磁場や SOLAR-C のコロナループのデータを利用して太陽大気下層のプラズマダイナミクスを精密に捉える研究を進める。さらに、太陽面爆発を再現するのみならず、その発生と発展を予測するためのモデル研究を組織的に進める。これにより、観測データに基づく精密な 3 次元 MHD シミュレーションを用いてフレア爆発と CME を再現すると共に、その過程で見出された知見に基づいて最も効果的な爆発予測アルゴリズムを開発する。さらに、正確な太陽風モデルを開発し、精密な衛星観測と視野の広い地上観測のデータを包括的に取り入れることで、太陽面爆発から CME に発展する過程を確度高く捉える数値モデルを構築し、包括的な観測データと先進的なモデルを用いた正確な宇宙天気予測を試みる。また並行して、SOLAR-C の主要観測タスクの一つにもなっている、物理素過程としての磁気リコネクション研究も、理論そのものの深化と同時に、シミュレーション結果をもとにした仮想観測を実施してテンプレートを準備する。

太陽内部・ダイナモシミュレーションの開発

太陽内部の熱対流・磁場を精密に解く大規模計算を「富岳」などの大規模計算機を用いて実行する。太陽ダイナモシミュレーションは、これまで「京」や「富岳」などを利用した世界最大規模の計算が我が国で継続的に行われてきている(Hotta & Kusano 2021 など)。本課題は大規模計算機の性能が成果に直結する側面があるため、HPC(High Performance Computing)分野から大きく注目されうるポテンシャルを秘めており、太陽分野としても強力に推進していくことが必要である。今後、具体的に解決すべき課題は(1)数値シミュレーションと観測結果の間にある運動エネルギーにして 3-4 桁程度の大きな隔たり(熱対流の難問, convective conundrum)。(2)小スケールの乱流から太陽全球の規則正しい 11 年周期変動が生成される機構の解明。(3)太陽内部の大規模な磁場から太陽表面で観測される黒点へと至る過程の理解である。これらを解決するためには(A)乱流をより精密に分解する高解像度計算、(B)物理状態が大きく異なる隣接領域である対流層-光球を連結する一貫計算が必要となる。(A)については、これまでに高解像度の計算が行われてきたが、高解像度化による磁場強度の収束は達成できていない。結果、乱流-磁場の相互作用は現実を再現できていないと考えられ、計算によって得られる乱流速度、大規模磁場生成なども現実と異なっていることが予想される。手法の効率化・コードの最適化などにより更なる大規模化が必要となる。(B)については以下のような問題意識がある。光球が太陽内部全体の熱対流への影響を及ぼすと主張する理論は古くからあり、その可能性が精力的に調べられている。また、光球に出

現する黒点こそが、太陽大規模磁場ひいては 11 年周期をコントロールしているという理論があり、全球の数値シミュレーションを行うときに光球の役割を適切に取り入れることが重要となる可能性がある。さらには、深部の熱対流が磁束に影響を及ぼすことで、表面の黒点形成が左右されると考えられる。その観点からも対流層-光球の一貫計算は重要である。しかし、対流層の中で密度は 100 万倍もの変化をし、結果として太陽内部・光球で熱対流の時間スケールは大きく変わってしまう。この状況を一貫して解くことはこれまでの計算機では不可能だったが、「京」や「富岳」でようやく可能になってきた。ポスト富岳もにらみながら高解像度を達成するとともに光球の効果を適切に取り入れながら 10 年スケールの磁場進化を解くことが、今後の太陽内部研究の大きな目標となるだろう。

太陽高エネルギー粒子モデリングの開発

航空機被ばくに影響のある 500 MeV 以上の SEP プロトン予測は、ICAO への情報提供において重要である。特に航空航路変更等に利用するには 12 時間前に予測する必要がある。さらに 20 年代後半から 30 年代に発展が期待される民間宇宙旅行や有人宇宙探査においては、さらにエネルギーの低い粒子も被ばくに寄与するため、より広いエネルギー帯の定量的な予測も重要になり、さらに太陽圏内の任意の位置での長期的な予報技術の確立も必要になってくる。その一方で、地球周回軌道（静止軌道・低軌道）や月周回軌道、太陽圏探査機による SEP モニター観測は今後充実していくことが期待される。これらの多点観測による蓄積された観測データを有効利用することで、フレア発生から CME 衝撃波形成と SEP 加速までを含めた一連の過程を再現する物理数値シミュレーションモデルもしくは AI 予測技術の開発を行い、SEP フラックスとエネルギースペクトルの予測手法の確立、および SEP の発生伝搬過程の解明を目指す。

領域連結計算の開発

上記の理論シミュレーション研究の一つの終着点として太陽物理学が目指すべきなのが、太陽深部-光球-彩層-コロナ-太陽風の領域連結計算である。磁場が生成される太陽内部(深部)、黒点が出現する光球、磁場エネルギーが解放される彩層・コロナ、地球環境に直接影響を及ぼす太陽風を一貫した数値計算で取り扱うことで初めてフリーパラメータ・人工的な仮定によらない理論計算が達成される。これまでこれらの異なる領域の計算は、別々のグループが別々の研究として発展させてきた。幸運なことに我が国には、2024 年現在でこれら全ての研究グループが存在するため、分野全体として連携し「富岳」のような大規模計算機を有効に利用することができれば、この領域連結計算が可能になる。この取り組みが成功すれば、太陽以外の恒星で観測されているスーパーフレアにより引き起こされる激甚災害について、もし太陽で起こった場合についても自己無撞着に磁場の起源からコロナ・惑星間空間への影響までを問うことができるようになる。また、太陽以外の低質量星やその惑星への影響の理解にも、仮定なく理論を適用することが可能となり、太陽の領域連結計算の波及効果は大きなものになる。

機械学習やデータ科学的アプローチを用いた研究開発

機械学習や AI 技術は、太陽物理や天文学にて応用される例が多くなった。太陽フレア予測では既に機械学習モデルが予報運用に実装されるなど利活用が進んでおり、他にも光球水平速度場の推定や観測データの高解像度化などに利用されている。また IEEE 等でも太陽データのセッションが開催されるなど、情報科学分野との連携が急速に進んでいる。さらに昨今では、物理法則を取り入れる機械学習手法や、機械学習を用いたデータからの物理法則導出手法などの開発が行われている。機械学習によるデータ解析が太陽物理学の未解決問題に貢献するかはその使い方次第であるが、データ科学的アプローチは太陽物理学においても大きな可能性を秘めている。米国においては NSF の 10 Big Idea の中で宇宙天気予報と AI 活用の推進が謳われ、2018 年に策定されたロードマップの元、機械学習と衛星観測ビッグデータを中心に、地上観測・数値シミュレーションも含めた戦略が立てられている。実際、ラベルデータを付加したベンチマーク用データベースが開発されたり、太陽解析ソフト Solar Software の Python 版が開発されたり、情報系研究者が気軽に太陽データ解析に参加できる環境づくりが行われている。さらに NASA と AWS が連携して太陽圏観測データベースの機械学習解析プラットフォームを構築中である。日本においても太陽地球系科学分野のみならず、情報系分野との連携も行いながら研究開発を推進する。

2.4 今後 10-20 年間における日本の太陽物理学の研究ロードマップ

日本の太陽研究は、地上・飛翔体を問わず世界一線級の観測装置を開発・運用するとともに、数値シミュレーションをはじめとする理論研究と観測研究を融合することにより成果を上げてきた。観測装置の進化により、科学成果を高めるにはさらなる有機的融合が必要となってきている。第 1 章にて掲げた目標を達成するためには、今後も観測研究と理論研究の両輪を成り立たせることが重要である。一方、前節で紹介した通り、太陽研究には多様な方向性がある。有限なリソースで成果を挙げ続けていくため、研究の多様性を保ちながらも大型計画をコミュニティー全体が一丸となって推進する必要がある。非常に難しい課題であるが、研究分野の発展には不可欠である。

これらを考慮したロードマップの基本方針として、ロケット/気球実験・観測機器／検出器開発・先進的な数値実験コード開発などの様々な小型研究計画の実施をコミュニティーとして奨励していく。先端的な研究を発芽させるだけでなく、技術の継承や教育の機会を増やすためにも必須な活動である。このような小規模計画で培った新しい研究手法や有効性が証明された先端的な観測技術などを基に、国内外の動向を鑑みて、国際的な計画への参入や衛星計画などの中型計画や大型計画へステップアップする計画を抽出し、コミュニティー全体で推進する。今後の衛星計画など大型計画の立案・実施には、太陽物理学という枠を越え、関連分野との協力・連携が強く求められる。ロードマップを考える上で、この点にも留意が必要である。

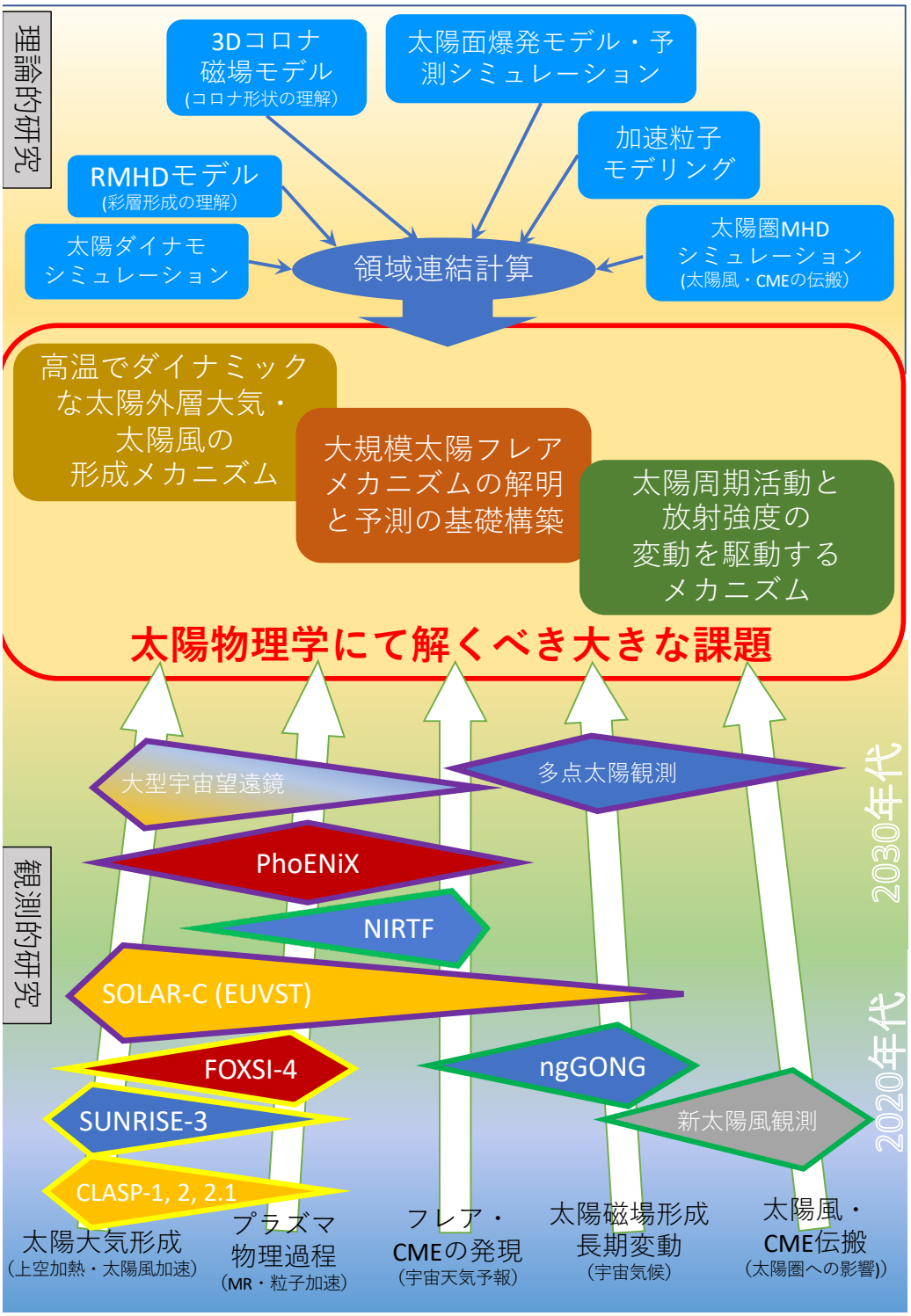

図 3　2020-2030 年代における日本の太陽物理学の研究ロードマップ

観測的研究における菱形が次節から説明される各研究計画を示している。菱形の縦幅が広い位置と横幅がそれぞれの研究計画での主要課題とカバーする課題を示し、色が観測波長帯（電波・赤外/可視・紫外・X 線）、枠の色が計画規模（小型・中型・大型）を示している。

2020-2030 年代における日本の太陽物理学研究のロードマップを上記の方針を基にまとめたのが図 4 である。この図では、三つの大きな問いに取り組むための具体的な 5 つの探求すべき課題「太陽大気形成（上空加熱・太陽風加速）」・「プラズマ物理過程（磁気リコネクション・粒子加速など）」・「フレア・CME の発現（宇宙天気予報）」・「太陽風・CME の伝搬（太陽圏への影響）」・「太陽磁場形成・長期変動（宇宙気候）」を示している。もちろんこれらの課題は独立ではなく複雑に絡み合っているが、次章以降に解説される各研究計画の主な方向性を平易に理解するため単純化した。また理論研究はこの複雑に絡み合ったシステムを理解するためには、個々の課題に対応するだけではなく各階層を連結して理解する必要があり、図上部にその方向性をまとめている。

2020 年代では、太陽物理学分野のフラッグシップ計画である SOLAR-C 衛星計画（**4.1 次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C**）の早期具体化が最優先である。2024 年 3 月には SOLAR-C プロジェクトチームが発足し、2028 年度の打ち上げに向けた開発が本格的に進められている。この活動をコミュニティーが一丸となって推進する一方、これだけでは太陽研究の最終的な目標は達成できない。SOLAR-C 衛星計画を推進すると同時に研究の多様性を保ち、2030 年代で重要となる研究課題の萌芽を促さなければならない。そのために SUNRISE 気球実験（**7.1 SUNRISE 気球実験**）やロケット実験である CLASP シリーズ・FOXSI シリーズ（**7.2 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4**）などの小型計画を推進するとともに、2020 年代後半での具体化に向けた NIRTF 計画（**6.3 次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置 NIRTF**）の検討や 2030 年代における PhoENiX 衛星計画（**5.1 衛星計画 PhoENiX [Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region]**）・太陽多点観測ミッション（**8.1 太陽多点観測ミッション**）・大型宇宙望遠鏡計画（**8.2 次世代大型宇宙望遠鏡**）の検討を行う。

飛翔体による比較的短期間（10 年以下）な観測では、太陽周期活動に起因する宇宙気候を理解することはできない。長期にわたるモニター観測が必須であり、モニター観測装置の性能向上による新たなサイエンスの開拓も多様性を担保するために重要である。これらの観点から、新太陽風観測装置（**6.1 次世代太陽風観測装置**）の開発推進と ngGONG 計画（**6.2 次世代国際ネットワーク計画 ngGONG**）の検討を行う。

各計画では、観測・装置開発的な視点からの検討だけでなく、理論研究による検討が必要であることは言うまでもない。観測データからの科学成果の創出だけでなく、計画段階から理論研究との有機的な融合研究を推進していく。

3. 既存大型計画の将来

この節では、現在実行中の大型計画の将来、特に運用中の「ひので」衛星の今後について議論する。

以降に出てくる計画は予算規模で分類されており、実現に必要な経費の総額が概ね 100 億円以上で大学等の一機関では実現不可能なものを”大型”、 概ね 100 億円以下のもので概算要求は必要であるが大学等の一機関で実現できる計画を“中型”、大型科研費等で実現可能な計画を“小型”とした。

3.1 SOLAR-C 時代に向けた「ひので」の位置付けと観測運用方針

「ひので」は 2006 年の打ち上げから 18 年以上にわたり観測を継続し、太陽・太陽圏科学に対するさまざまな発見と新たな課題をもたらしてきた。ここでは 2020 年代後半から予定される SOLAR-C による太陽観測の新時代を念頭に、SOLAR-C 時代に向けた「ひので」観測の位置付け・意義、また観測運用の実施方針を述べる。

太陽圏システム科学を志向する連携観測

SOLAR-C の打ち上げに向けて、Parker Solar Probe、Solar Orbiter、「みお」、「あかつき」、「あらせ」、PUNCH などの探査機群による内部太陽圏探査/観測が本格化する。これらの探査機が行う in situ 観測にとって、「ひので」の精密な光球磁場データとその外挿から示唆される探査機－太陽面間の connectivity 情報、および対応する太陽面上での X 線/EUV 活動情報は、探査機が取得する in situ データを理解・解釈する上での重要な手がかりとなる。また、太陽撮像機器を搭載する Solar Orbiter との連携により、ステレオ観測による磁場・コロナ構造の研究が行える。これら内部太陽圏探査機との連携観測は、SOLAR-C でも推進されるもので、「ひので」による観測は太陽圏の理解を進めると同時に、SOLAR-C での連携観測に向けての協力・連絡体制の事前構築や、連携の成果を最大化する上で実施すべき観測の洗い出しを可能とする。

「ひので」と SOLAR-C との共同観測

2028 年に予定される SOLAR-C の打ち上げまでの期間、「ひので」は極端紫外線撮像分光装置（EIS）による SOLAR-C の模擬観測を実施することで、SOLAR-C が直ちに適切な観測を開始できるよう、観測計画を準備する。また、内部太陽圏探査機に加え、ALMA・DKIST ほか地上の先端観測装置との連携観測においても、個別の観測研究に加えて、SOLAR-C での共同観測を念頭に協力体制の構築を進める。「ひので」によるこれらの準備活動を通じて、打ち上げ後スムーズに SOLAR-C の科学成果の最大化を図る。

SOLAR-C の打ち上げ後は 1 年間、「ひので」EIS と SOLAR-C との並行・比較検証観測を重点的に進め、SOLAR-C 観測機器の軌道上較正に貢献する。

「ひので」による太陽の長期継続観測

「ひので」は、スペースからの高空間分解能での光球面ベクトル磁場の精密観測という、SOLAR-C 時代に他のミッションではできない観測を行うことができる。この特徴を活かして、特に太陽周期活動の鍵を握ると言われる極域磁場の精密観測を継続する。地上からの太陽の縁近くの観測では、像のコントラストが低く補償光学の手法が効きにくいため、高空間分解能を得るのは困難である。そのため、「ひので」は 2030 年前後の時期においても、極域磁場の精密観測を行う上で、なお最良の観測装置であり続ける。また、軟 X 線によるコロナ撮像も SOLAR-C 時代に他ミッションでは計画されていないが、「ひので」の軟 X 線撮像によって、特に極端紫外線観測が苦手とする太陽全面の高温コロナに対する観測を継続し、SDO/AIA などの極端紫外線望遠鏡で見えにくい高温 CME の検出や、長期にわたるコロナ大規模構造の変遷、およびコロナホールの位置と面積の変化をとらえる。極域磁場を筆頭に、これらの情報は、太陽圏の研究を進める上での重要な基礎データとなる。

長期継続観測の実施期間は、極域磁場が最大になる次期活動極小期（2031 年を中心に前後 1 年程度と予想）を確実にカバーする 2033 年度までとし、この年度で「ひので」の運用を終了する。これにより、打ち上げ後の最初の極小期（2008 年 12 月）から 11 年の活動周期 2 サイクル分の長期データを得る。

「ひので」観測運用の実施方針

「ひので」の観測終了を予定する 2033 年度までの期間を、(a) SOLAR-C 打ち上げ（2028 年）まで、(b) SOLAR-C 打ち上げから 1 年の期間、(c) その後、2033 年度まで、の 3 つに分ける。

(a)の期間は「ひので」がこれまでも推進している観測に加えて、太陽圏探査機や地上の先端観測装置との連携を通じた成果創出、ならびに EIS による SOLAR-C の模擬観測の実施により、打ち上げ後の SOLAR-C の各種観測がスムーズに立ち上がり、速やかに成果創出を行えるよう、SOLAR-C に向けた観測内容の整備や連携観測体制の構築を進める。

SOLAR-C が打ち上がると、テレメトリリソースは SOLAR-C に集約されるため、「ひので」のデータダウンリンクは有償局を用いず、JAXA・NASA 局のみで実施する。科学データのダウンリンク量は、現行の 1/3 以下となる見込みである。(b)の期間は、「ひので」EIS と SOLAR-C との並行・比較検証観測を重点的に進めることで、SOLAR-C 観測機器の軌道上較正に貢献する。(c)の期間は、限られたテレメトリ資源の中で、前述の「ひので」にのみ行える長期継続観測に絞った観測を実施し、太陽活動周期 2 サイクル分にわたり、太陽圏研究にとって意義のあるデータを取得する。また、Solar Orbiter との極域共同観測（2029 年以降 Solar Orbiter の軌道傾斜角は 33° に達し、高緯度から太陽極域が観測可能になる）は、高速太陽風の流源である極域の磁場分布・X 線ジェット活動と、in-situ 観測による太陽風の活動状態を直接結び付ける初めての機会となる。SOLAR-C 打ち上げ後の「ひので」の運用では、（長期継続観測など）運用の簡素化を図り、かつ SOLAR-C の観測運用担当との兼任によって、必要な人的リソースを抑える。

4. 早期具体化させる大型計画の概要

この節及び 5,6,7,8 節にて、2020 年代及び 2030 年代に向けて検討されている、またはすでに予算措置がなされて開発等が始まっている計画を紹介する。

この節では、太陽コミュニティが今後具体化を進める大型計画である SOLAR-C について、その概要をまとめる。このミッションは、太陽研連では「最優先に実現をめざす」と位置付けられている。

4.1 次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C

計画の概要

宇宙に如何に高温プラズマが作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探求するため、「SOLAR-C」計画は、太陽表面から太陽コロナ・惑星間空間までのエネルギーと質量の輸送を理解し、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎物理過程を検証する。太陽の磁気活動は、基本となる微細な構造間で受け渡される磁気エネルギーを源泉とし、彩層やコロナという高温の大気を形成し、太陽面の大規模爆発現象から惑星間空間を乱す擾乱を生み出すと考えられている。これらの成因を理解するため、基本となる磁気構造を広範な温度領域で追跡し、それらの運動や相互作用を通して、磁気エネルギーの輸送過程や散逸過程を定量化することを目的としている。観測装置として極端紫外線域の高分散撮像分光器を用い、太陽を長時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気の彩層から太陽コロナに到る温度領域を隙間なく観測する。太陽大気全体に亘り、プラズマのダイナミックな現象に追随するため、観測装置は以前に飛翔したものに較べておよそ 1 桁以上の性能（空間・時間分解能、波長範囲）向上を見込む。本計画は、2020 年代の半ばに JAXA 公募型小型衛星として実現することを目指す計画である。日本の太陽研究者コミュニティが第一優先で取り組む計画であり、米国・欧州からの参加を得て実現する国際プロジェクトである。

目的と実施内容

本計画の使命は、太陽物理学の最も基本的な問題、磁場とプラズマの相互作用が、どのようにして太陽活動を引き起こすかという問いに、最終的な答えを出すことにある。相互作用の最も重要な帰結として、太陽外層大気の加熱と、太陽フレア及びコロナ質量放出（CME）といった爆発的エネルギー解放が挙げられる。従って、本計画の科学目的は： I. 太陽大気・太陽風を形成する基礎物理過程、II. 太陽大気の不安定化と太陽フレア・プラズマ噴出を引き起こすエネルギー解放過程 を解明することにある。そのため、A. 彩層からコロナに亘る太陽大気の全温度層を同時に切れ目なく観測する、B. 太陽大気の基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡する、C. 太陽大気で起きている基礎物理過程の分光情報を獲得す

る、以上 3 つのことを同時に実施する極端紫外線撮像分光望遠鏡（EUVST）を JAXA 公募型小型衛星に搭載する。

EUVST は, A）17-128 nm の波長域を、B）空間分解能 0.4 秒角、時間分解能 0.5 秒（最短）でデータ取得し、C) 2 km/s の視線速度変化を検出することができる高性能分光観測を行う。17-128 nm の波長域は、彩層から遷移層・コロナ、そしてフレアで生成される超高温プラズマまで広い温度帯（1 万度から 2000 万度）を隙間なく分光観測できる輝線が存在する波長域である。コロナ観測における空間分解能 0.4 秒角は、今まで実現された分光観測に比べ約 7 倍（分解される面積では約 50 倍）高く、太陽観測衛星「ひので」が太陽表面（光球・彩層）の観測で実現した空間分解能とほぼ同じである。この空間分解能により、表面上空に広がる外層大気に存在する基本的な磁気構造を初めて識別できる。高い時間分解能は、従来の観測に比べ EUVST が 10-30 倍高い有効面積を持つことで実現される。以上、従来の観測では実現できていない高い性能で、様々な輝線のスペクトルを高分散分光計測して、太陽プラズマの視線速度や温度・密度などの物理診断を行う。

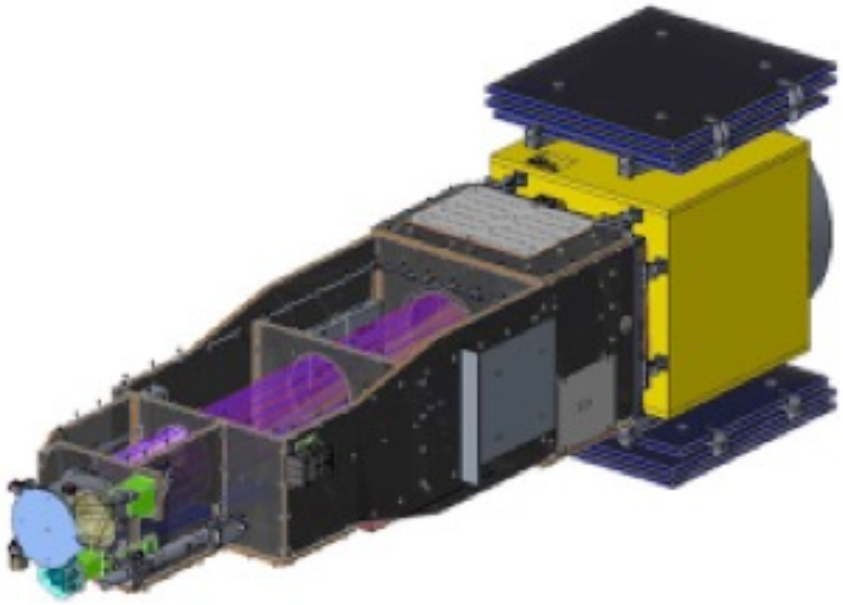

図 5 SOLAR-C 概念図（JAXA SOLAR-C プロジェクトチームより提供）

図 5 に示すように、EUVST 装置全体の構造が衛星バス系上部に搭載される。EUVST は、口径 28 cm の主鏡（軸外し放物面鏡単鏡）で太陽像を分光器部入り口のスリット面に結像し、スリットから取り込まれた太陽光は、回折格子で分散され、検出器（CCD 及び増感撮像センサー）でスペクトルが取得される。主鏡の角度を制御することでスリット面の太陽像を動かし、太陽の 2 次元情報を取得する。また、スリット面に結像された太陽像は反射され、画像も取得される。衛星総重量は約 600 kg であり、これをイプシロン S ロケットで太

陽同期極軌道に投入する。軌道上におけるノミナル観測期間は 2 年間を予定し、JAXA 宇宙科学研究所（相模原）にて衛星管制・科学運用を行う。取得される観測データは地上受信局で受信され、名古屋大学で運営されるサイエンスセンターで科学者に向けたデータ配信と解析が行われる。

表 1. SOLAR-C ミッションサマリー

科学目的	宇宙に如何に高温プラズマが作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探求するため、 a）太陽大気・太陽風を形成する基礎物理過程の究明 b）太陽大気の不安定化と太陽フレア・プラズマ噴出を引き起こすエネルギー解放過程の解明 を行う。
目的達成の観測戦略	太陽表面からコロナ・惑星間空間までのエネルギーと質量の輸送を理解し、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎物理過程を検証する。そのために、 A. 彩層からコロナに亘る太陽大気の全温度層を同時に切れ目なく観測する B. 太陽大気の基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡する C. 太陽大気で起きている基礎物理過程の分光情報を獲得する。 以上 3 つのことを同時に実施する観測装置を実現する。
観測装置	紫外線高感度分光望遠鏡（EUVST） 17-128 nm の波長域（1 万度から 2000 万度）を隙間なく、空間分解能 0.4 秒角、時間分解能 1 秒（最短）でデータ取得し、2 km/s の視線速度変化を検出することができる高性能分光観測を行う性能を有する。 併せて太陽極紫外線輻射モニター計(SoSpIM)を搭載し、軌道上での EUVST 較正や地球大気研究との連携強化を図る。
観測時期の計画	2028 年度打ち上げ、軌道上のノミナル運用期間: 2 年 4 か月 後期運用は別途審査による。

研究領域内での位置づけ

太陽観測衛星「ひので」は、太陽大気が無数の小さな磁気構造の集合体であり、それらが極めてダイナミックに変化していることを明らかにした。しかし、その中にはまだ解像されないより小スケールの構造が存在することもわかった。高温で活動的な太陽外層大気を発現させる機構は、その本質的な部分でまだ謎に満ちている。この解明に不可欠な観測は、光球からコロナの構造を空間・時間分解した精密な物理計測である。IRIS 衛星（NASA、2013 年）は彩層の高解像紫外線分光撮像を実現したが、対象は狭い温度領域である。Hi-C ロケット実験（NASA, 2012 年）は高解像極端紫外線（EUV）画像からコロナ中にサブ秒角の構造が存在することを示したが、数分間の観測で時間発展を追跡できない。ハワイに建設中の大型太陽望遠鏡（DKIST）は、光球彩層観測の超高解像観測を 2020 年に開始した。2025 年前後に Parker Solar Probe（NASA）と Solar Orbiter（ESA）が太陽に約 9 Rs（太陽半径)～水星軌道まで接近し、外部コロナ～内部惑星間空間（内部太陽圏）の探査を実施する。高解

像度太陽観測研究には、太陽大気の全温度層を観測できる分光望遠鏡が、コロナ高解像度観測と共に、最優先で求められている。本 SOLAR-C 計画は遷移層・コロナを含む太陽大気の全温度層を観測する高解像度分光撮像望遠鏡となる。コロナ高解像度観測を行う MUSE(NASA)計画と同時期に飛翔させ、DKIST が観測する太陽表面と、Parker Solar Probe 等が観測する内部太陽圏とのつながりを理解する上で必要不可欠なデータを提供する。

サイエンス成果が与える波及効果

本計画には太陽物理学の科学的優先度を反映した 2 つの側面がある。一つは、太陽で起きている多くの物理現象が宇宙で起きている物理現象に敷衍することができることである。太陽大気を構成する微細磁場構造を起因とする多様な太陽活動現象は宇宙に普遍的に見られる磁気プラズマのダイナミクスのいわば雛形である。本計画では、天体プラズマで起きている物理現象を理解するために重要である基礎物理過程の洞察や知見が得られ、天体物理学の幅広い分野へ応用することができる。二つ目は、太陽の磁場構造やそこで起きる大規模な活動が、太陽系空間や地球磁気圏を介して地球周辺の宇宙空間環境（宇宙天気）を支配している点である。先進的な人工衛星や測位技術（GPS）など宇宙に基盤をおく先進的な技術への依存度が増え続けている現在、この宇宙空間環境の変動が直接、我々の日常生活にも結びついている。本計画は、地球環境、社会環境に直接影響を及ぼし得る、太陽からの大規模噴出や太陽風の起源と動力学に関する知見を大きく発展させるものである。太陽面における大規模な爆発現象やそれに伴う噴出物などが地球に到達した場合、地球周辺の宇宙環境を乱すことになるため、これらの突発現象の発生を物理的により確度をもって予測できるようになると、社会インフラへ与える影響についても軽減することができるだろう。さらに、宇宙プラズマの基礎物理及び太陽の地球環境への影響の理解は、35 億年前に地球に生命が誕生した際の太陽地球環境の理解に発展させることができる。本計画はどのようにして地球に生命が誕生したかの理解にもつながる。また、本衛星計画における開発によって獲得される解像度の高い宇宙望遠鏡の技術や、衛星を指向方向に高精度に安定化する技術などについては、科学衛星のみならず、我が国の地球観測衛星の解像度向上、官需実用衛星等の高度化にも貢献することが見込まれる。

実施体制

本計画は日本が主導し、米国（NASA）と欧州各国（ESA およびドイツ・フランス・英国・イタリア等の宇宙機関）からの参加を得て実施する、国際協力衛星計画である。国内は、JAXA（宇宙科学研究所）と国立天文台が中核となり、衛星システムと EUVST 分光望遠鏡の構体および指向駆動できる主鏡機構アセンブリの開発を担当する。JAXA（宇宙科学研究所）が本計画の全般を統括して推進するために、機構プロジェクト「高感度太陽紫外線分光観測衛星(SOLAR-C)プロジェクトチーム」を発足させた。「ひので」搭載望遠鏡の開発実績や飛翔体に搭載される望遠鏡の開発経験が豊富である国立天文台は「SOLAR-C プロジェクト」を組織し、EUVST 望遠鏡部の開発を主導し、また衛星システムや海外が主導する分光

器の開発にも貢献する。飛翔後の衛星科学運用は宇宙科学研究所において、国立天文台や全国の大学研究者の協力を得て実施される。地上にダウンリンクされた観測データを較正し、データ解析を行う環境を全国の研究者に提供するサイエンスセンターを名古屋大学宇宙地球環境研究所が運営する。京都大学付属天文台は、EUVST と協働して行う国内外の地上観測をコーディネートする。また、東京大学大学院理学系研究科の研究グループは、全国の（太陽物理学分野の）理論研究者を取りまとめて、EUVST が取得する観測データを解釈する上で重要となる数値計算の連携を主導する。

欧米の研究機関は、EUVST で使用される検出器や回折格子を含む分光器のコンポーネントを製作する。また、EUVST 装置のインテグレーションおよび評価試験は海外施設を使って、日本と海外チームが共同で行う。

主要キー技術

遷移層・コロナ分光観測において世界一の高性能観測を実現する EUVST 装置を実現するためには、「軽量光学系技術」が重要となる。高性能観測のうち、特に、高空間分解能は、日本が開発する主鏡機構および望遠鏡構造がキーとなる技術である。中口径（約 30 cm）の主鏡は、軽量化のために薄厚化を進める一方で、軌道上運用温度が地上試験温度とは大きく異なり、主鏡支持機構を介して発生する熱変形量を nm オーダーで制御することが求められる。また、観測波長が EUV 域と短く、散乱光を抑えるために、鏡面変形の高周波成分（マイクロラフネス）を 0.5 nm 以下に抑える。この軽量化ミラーは、指向駆動するためのジンバル型のティップティルト機構および焦点調整のためのリニアステージ機構上に搭載される。また、望遠鏡構造は 3 m を超える長さを持つ CFRP（炭素繊維強化プラスチック）構造体で、主鏡とスリット、回折格子や検出器といった光学系の位置関係を 50 μm 以下で維持する。構造は軽量化を図る一方で、ロケット搭載上要求される高剛性を満足させる必要がある。これらに必要となる「軽量光学系技術」は、太陽表面（光球・彩層）の高解像度観測を実現した「ひので」望遠鏡の技術の発展として技術開発が進められる。「ひので」望遠鏡は固定鏡で 0.2 秒角を解像する能力を実現したが、SOLAR-C ではティップティルト機構やリニアステージ機構と組み合わせた複雑な主鏡機構で、ほぼ類似の空間分解能を実現する。

この開発は、単に「軽量光学系技術」に留まらず、「小型軽量化衛星バス技術」の高精度化にも貢献する。高空間分解能の実現には高い指向制御が必要であり、500 kg 級の科学衛星では初めてのレベルである。主鏡機構による指向制御や、超高精度な太陽センサなど高指向制御を実現する衛星本体の姿勢制御、衛星内に存在する擾乱の制御や地上での試験評価といった擾乱管理など、「ひので」やそれ以降の高解像度衛星で培った技術をさらに発展できる。

準備状況

本計画はこれまで JAXA 宇宙科学研究所の宇宙理学委員会のもとに設立された「SOLAR-C ワーキンググループ」が主体となり、戦略的開発経費などを得て検討を進めてきた。2015

年に JAXA 戦略的中型衛星として提案した SOLAR-C 計画の研究戦略を再考し、科学目的・戦略の尖鋭化による次期太陽衛星計画の早期実現をめざして、太陽研究者コミュニティで討議を重ねてきた。2016 年には、国際検討チーム（NGSPM-SOT；JAXA・NASA・ESA から選抜された 14 名の研究者）が招集され、世界の太陽物理研究者コミュニティより募った白書（34 提案の科学目的、概念計画）を元に、太陽物理学全領域の科学課題を抽出し、2020 年台中盤に実施すべき衛星計画の優先度付けを行った（Next Generation Solar Physics Mission－NGSPM ミッション構想）。本計画は、NGSPM ミッション構想を複数の衛星・地上天文台で実現させる上で中核となる衛星計画の提案である。JAXA 公募型小型衛星の公募（2017 年 9 月発出）に応じて本計画のミッションコンセプト提案（2018 年 1 月）を行い、宇宙理学・工学委員会の評価小委員会による審査の結果採択され、宇宙科学研究所長に答申された（2018 年 7 月）。宇宙科学研究所は答申どおりに次の検討フェーズ（アイデア実現加速プロセス, Phase A1-b）に進める衛星計画に決定し（2018 年 7 月）、国内外の著名科学者による国際科学審査（2018 年 12 月）、ISAS プリプロジェクト候補選定審査（2019 年 3 月）を経て、2019 年 4 月からミッション定義フェーズ（Pre Phase A2）の活動を JAXA 主導の下で開始した。2020 年 4 月には、ダウンセレクション前審査を経て公募型小型 4 号機に選定され、6 月には政府の宇宙基本計画工程表に掲載された。その後、予算の事項化がなされ、2022 年 7 月にミッション定義審査（MDR）、2022 年 12 月にシステム要求審査（SRR）、2023 年 12 月にシステム定義審査（SDR）が行われ、衛星計画の熟成が進められた。2024 年 2 月にプロジェクト移行審査の結果、2024 年 3 月に機構プロジェクト「高感度太陽紫外線分光観測衛星（SOLAR-C）プロジェクトチーム」が発足し、2028 年度の打ち上げに向けた開発に本格的に着手されている。また国際協力についても 2021 年度末までに各国での予算化調整が進み開発に参加する国際協力の体制も固まり、提供されるコンポーネントの開発進められている。

5. 検討中の大型計画の概要

本節では2030年代での具体化に向けて関連する研究者グループが検討進めている大型計画であるPhoENiX衛星計画を紹介する。太陽研連では、その検討を支持している。

この節及び 6,7,8 節では、本文書の改訂の際に、太陽研連会員に対して研究計画の依頼(2022 年度版：2021 年 11 月 30 日提出締切、2023 年度版：2023 年 1 月 25 日提出締切、2024 年度版:2024 年 3 月 15 日提出締切）を行い、それに応じて寄せられた計画について、その計画概要、目的・学術的意義、国内外の動向に対する計画の位置付けについて掲載する。

5.1 衛星計画 PhoENiX (Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region)

計画の概要

PhoENiX 計画は、太陽フレアを観測・研究対象とし、人工衛星を用いてX線とガンマ線を観測する計画である。その大目的は、「高いエネルギーにまで達するプラズマ加速現象の普遍性と、太陽や恒星におけるそのような現象が惑星の環境と居住可能性に与える影響を理解する。」ことである。

この大目的の実現に向け、PhoENiX 計画では、

- 太陽フレアにおいて、プラズマはどのようにして超高温にまで加熱されるのか？
- 太陽フレアにおいて、粒子はどのようにして加速・輸送されるのか？
- 太陽フレアにおいて、粒子のエネルギーはどのように熱的・非熱的成分に分配されるのか？

という3つを主たる科学目標として設定し、現在、科学目標の拡充にも努めている。

これらの科学目標を達成するための手段として、高いダイナミックレンジ（明るい場所も暗い場所も同時に観測できる能力）を確保した軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測（空間、時間、エネルギー分解能を同時に有する観測）と、高精度の硬 X 線～軟ガンマ線の偏光分光観測（時間、エネルギー分解能と偏光診断能力を同時に有する観測）を行う。これらの観測手法を用いた太陽フレア観測は、世界初の試みであり、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器といった日本が持つ最先端国産技術を用いて実現する。衛星の打ち上げは、現在の公募機会と衛星開発に要する状況を踏まえ、第26太陽活動周期の極大期付近にかけて（2030年代中盤以降）を目指している。

本計画は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の公募型小型計画の枠組みの中で実施し、理学分野（太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、高エネルギー宇宙物理学、実験室プラズマ物理学）の研究者らに加え、計画推進に必要な技術を持つ工学分野の研究者らも参画し、分野間連携の体制で実施する計画である。次の公募機会は2027年度以降に予定されており、これに向けて太陽系科学や宇宙物理学に関連した科学目標の拡充を図るとともに、観測ロケット実験FOXSIシリーズなどの機会を活用し、技術実証、及び科学成果創

出に努めている。なお、公募型小型計画（の一部）が戦略的小型計画に変わることが宇宙科学研究所で議論されており（2024/12/26 理工学委員会提示)、理学分野の 2 つの GDI とも連携をとりながら、計画を推進していく予定である。

学術的な意義

宇宙を満たす物質は、そのほとんど (99%以上) がプラズマ状態にあると考えられており、宇宙の至る所で超高温状態や加速状態になったプラズマが見つかっている。これはプラズマがエネルギーを獲得して加速されていることの査証であり、これらの現象の普遍性を理解することは、宇宙の活動を理解する上で不可欠である。そして、この普遍性の理解において鍵となるのが、磁気再結合と呼ばれるプラズマ中のプロセスである。磁気再結合は、磁場中に蓄えられた磁気エネルギーを爆発的に解放し、そのエネルギーを熱や運動エネルギーに変換することができるため、プラズマの効率的な加熱・加速機構として注目されている。さらにこのプロセスは、様々なプラズマ環境で発動することが可能で、宇宙における様々な規模の爆発現象に関係していることがわかってきている。

この様な中で、本 PhoENiX 計画が観測・研究対象とするのは、太陽系最大の爆発現象である太陽フレアである。その理由は、太陽は地球からの距離が近く、太陽フレアは磁気再結合が生み出す構造群を空間分解して観測できる唯一の宇宙プラズマ現象という極めてユニークな特徴を持つからである。しかしながら、この様に観測対象として恵まれた特徴を持つ太陽であっても、太陽フレアにおける高エネルギー現象、特に粒子の加速機構は、その理解に至っていない。その理由は、粒子の加速にはミクロからマクロなスケールの物理が介在しているが、太陽フレアの場合、そこに 1 m〜1 万 km という 7 桁ものギャップが存在するためである。加えて、観測手法・技術の限界から、既存の高エネルギープラズマの観測は、グローバルスケール（約 10 万 km）に留まっているのも理由である。本計画は、この状況を打ち破り、太陽フレア粒子の加熱・加速・輸送・エネルギー分配を理解することを目的とし、プラズモイドや衝撃波といったマクロスケールの加速源候補を空間・時間・エネルギー分解し、定量的な評価を行う。加えて数値計算も活用し、観測情報から物理（マクロケール以下の物理を含む）を引き出す。このように本計画が実現すれば、観測と数値計算の連携により、粒子の加速機構解明のために埋めるべき 7 桁のスケール間ギャップのうち、2 桁以上を埋めることが可能となり、粒子の加速を含めた太陽フレアの理解に大きなブレークスルーをもたらすことができる。

また、宇宙プラズマにおけるギャップはさらに大きく 15 桁以上に及ぶものもある。本計画によって太陽フレアにおける高エネルギー粒子の物理の理解を進めることは、その波及効果として、様々な宇宙プラズマ環境での高エネルギー現象の理解の足掛かりとなり、宇宙の活動を統一的に理解する上で極めて重要な第一歩となると期待される。具体的なアプローチとして、観測ロケット実験 FOXSI で取得した太陽 X 線スペクトルと、X 線分光撮像衛星 XRISM で取得した恒星フレアのスペクトルの比較研究などを立ち上げつつある。

以上のように、太陽フレアは宇宙でおきる様々な現象の縮図と言えるが、この様な基礎学

問的な価値に加えて、近年、太陽研究の実用面での重要性が増している。GPS や衛星通信といった人工衛星を用いたインフラが社会生活に不可欠となり、月への進出など人類の宇宙活動が今後益々盛んになる昨今、太陽フレアが生み出す膨大な量の X 線および高エネルギー粒子は人体および電子機器に甚大な影響を及ぼしかねないため、太陽フレアの発生およびその影響範囲を調査・予測することが急務となっている。これは宇宙天気予報と呼ばれ、一般にも報道される機会が増えている。太陽、特に太陽フレアの研究は、天文学としてだけでなく、人類活動の発展にも重要なものとなっている。太陽フレアが生み出す高エネルギー粒子の詳細な観測を行う本計画は、この観点からも極めて重要な役割を果たす。

国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

PhoENiX が観測対象とする太陽フレアにおけるプラズマ加熱、および粒子加速の研究は、1980 年代〜2000 年代にかけ、日本の太陽観測衛星「ひのとり」、「ようこう」が大きな役割を果たしてきた。その後、粒子加速については、米国の「RHESSI」衛星がその後を継ぎ、研究を牽引してきたが、2018 年夏に運用を終了した。現在は欧州の「Solar Orbiter」 衛星搭載の STIX が観測を行っており、2022 年には中国の「ASO-S」衛星搭載の HXI が観測を開始した。ただし、これらの装置は全て「すだれコリメータ式」の硬 X 線望遠鏡であり、ダイナミックレンジ不足が指摘されている既存の観測方式の継続に留まる。

一方、地上からの電波観測では米国の EOVSA が近年、大規模フレア（2017 年 9 月 10 日の X8.2 クラスフレア）の解析で大きな成果を挙げた。それを受けて 2024 年末に NSF から発表された Heliophysics Decadal Survey にて、EOVSA の拡張版である FASR が最も優先すべき中規模プロジェクトとして選ばれた。これにより 10 年以内に電波観測での高空間・周波数分解能のデータが得られ、粒子加速研究が進むと考えられる。ただし、電波観測では MeV 帯域の電子の情報しか得られず、熱的プラズマ（数 keV）から加速していく様を捉えることはできない。周囲の熱的プラズマとの相互作用も重要となる粒子加速研究では、電波と X 線の両方の観測データが必要である。

これらの観測とは異なる手法として注目を集めているのが X 線帯域の集光撮像分光観測で、日米共同観測ロケット実験 FOXSI を通して観測手法・技術の実証を行っている。2024 年 4 月に打ち上げられた FOXSI-4（FOXSI の 4 回目の飛翔計画）では、太陽フレアに対する世界初の X 線集光撮像分光観測を実施し、太陽面上で発生した中規模フレア（M クラスフレア）の減衰期の観測に成功した。これにより、フレア減衰期における 1 千万度以上の超高温成分を検出するとともに、マイフロフレアや活動領域などの観測にも成功している。また、FOXSI-4 の観測装置をそのままに、再度打ち上げを行う FOXSI-5 計画が 2025 年末から 2026 年頭頃に実施予定で、2 度目の太陽フレア観測に挑む（NASA に最高評価の Excellent で採択済み）。しかしながら、観測ロケットによる観測では、観測時間が弾道飛行中の 5 分程度に限られるため、フレアの発生を確認したのちに打ち上げるという手法しか取れず、フレア発生初期を観測することはできない。このフレア発生初期こそ、エネルギーの解放が際立っており、粒子の加速現象も顕著にみられる科学的に観測価値の高い期間であり、その観

測のためには定常的に太陽観測が行える衛星が不可欠である。PhoENiX 衛星計画は、ロケット実験 FOXSI を日本が独自に発展させたもので、世界的にも高い注目を浴びている。

一方、サイエンス推進の観点では、米国において NASA 出資の SolFER DRIVE Science Center が設立し、観測と理論の両輪で粒子加速を含む太陽フレア研究が推進されている。PhoENiX 計画のメンバーも SolFER に参加しており、この流れを PhoENiX に取り込む活動を行っている。

日本では、2020 年代後半の太陽観測衛星として SOLAR-C が推進されている。SOLAR-C は、高感度紫外線分光観測により彩層～コロナに及ぶ太陽大気の精密プラズマ診断がなされ、太陽フレアを始めとする活動現象に関して詳細な知見の獲得が期待できる。2030 年代中盤以降の計画として推進する PhoENiX では、粒子加速だけでなくプラズマ加熱も含めた、太陽コロナにおけるエネルギー解放現象全般をサイエンスの対象としており、SOLAR-C で得られる知見を活用しつつ、サイエンスを発展させることができる。。

また、地上観測装置（米国の大型望遠鏡 DKIST や京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡など）とは、粒子加速を含む太陽活動現象の源である磁場の測定や、加速粒子が彩層に突入した現場の測定などに関して連携を検討し始めている。

このように太陽フレア研究の黄金期を迎えようとしている状況の中、本 PhoENiX 計画は、唯一、軟 X 線帯域からの集光撮像分光観測と軟ガンマ線帯域での偏光分光観測を行えるユニークな装置を備えており、他の計画と相補的であると同時に、その独自性の価値が高く評価されている。

社会的価値

太陽は最も身近な天体であり、そこで起きる現象の理解は知的価値だけに留まらない。例えば、太陽フレアによって生成される高エネルギー粒子や X 線などの電磁波は、地球周辺の宇宙環境に大きな影響を及ぼす。つまり本計画が目指す太陽フレア粒子の加熱・加速・輸送・エネルギー分配の理解は、フレアによる宇宙天気変動の理解や社会環境への影響の把握を通じて、社会へ貢献し得る。（SDGs 目標 11「住み続けられるまちづくりを」への貢献）

また、日本は 1980 年代から世界の X 線観測をリードし第一級の科学成果を創出してきたが、本計画は、X 線観測を発展させてきた高エネルギー宇宙物理分野と太陽物理分野の連携の系譜を汲んだ計画であり、日本が育んできた科学研究、高等教育、観測技術を継続、発展させていく上でも重要である。（目標 4「質の高い教育をみんなに」）

加えて本計画は、高精度ミラー、半導体検出器、金属 3D プリンターなどの最先端技術を活用しており、工学・産業分野との連携で成り立っている。本計画を通じて新たな技術の獲得が進んでおり、今後も更なる工学・産業分野への波及効果が期待できる。（目標 9「産業と技術革新の基盤をつくろう」）

6. 2020 年代での具体化を目指し開発中または検討中の中型計画

本節では、2020 年代での観測開始を目指し科研費を基にすでに装置建設が進められている次世代太陽風観測装置、および 2020 年代での具体化を目指し検討をおこなっている次世代国際ネットワーク計画 ngGONG、次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置 NIRTF の三つの中型計画を紹介する。

6.1 次世代太陽風観測装置

計画概要

本計画では、太陽風がどうやって加速され宇宙空間へと伝搬していくのか、という太陽圏物理学最大の未解決問題「太陽風加速問題」を解明することを目標とする。そこで、太陽風が電波を散乱する特性を用いて地上電波観測から世界初の太陽風 3 次元構造の導出を行うための次世代太陽風観測装置を提案する。本計画では、国内 3 カ所にアレイアンテナ群を建設する。各基地局は、約 4000 m^2 の平面に 327 MHz 帯域に感度を持つアンテナを敷き詰めた 2 次元フェーズドアレイアンテナで構成され、各アンテナで取得された信号をデジタル処理することで多方向に同時に指向できるデジタルビームフォーミングを実現する。各基地局で取得されたデータを相関処理することで、太陽風速度を導出する。本装置では既存装置の 10 倍の太陽風観測を実現し、太陽風分布の流源における空間分解能を約 3 倍に向上させることで、初めて太陽風の流源における磁場・大気の特徴を明らかにし、加速過程の解明に迫る。またリアルタイムデータを用いたシミュレーションから宇宙天気予報の精度向上に寄与するとともに、飛翔体・モデリング・地上ネットワーク観測を統合した国際連携研究の中核的拠点を担う。

目的と学術的意義

太陽風は電離した大気の塊であり、電波を散乱する性質がある。太陽系外の天体を電波観測中に、地球と電波天体の間を太陽風が通過すると、天体からの電波が散乱され、強度が激しく変動する。これを惑星間空間シンチレーション（IPS）と呼ぶ。本計画では IPS 現象の地上電波観測から以下の科学課題の達成を目的とする。

(a)太陽風加速機構の解明：本計画の主目的は、太陽風の加速機構を解明することである。そのために、流源面に投影したシノプティックマップ上において 4 度×4 度という、従来を大きく上回る空間分解能で、太陽風の空間分布を導出することを目標とする。（この空間スケールは、ある 1 日の太陽表面に置き換えるとディスク中心部で約 0.7 分角に相当する。）この空間分解能は、流源面において太陽風速度分布と関連すると考えられる磁場の特徴的構造、（特に低緯度・活動領域コロナホール、高速-風低速風の境界領域、pseudo ストリーマなど今までの観測で十分に分解できていなかった可能性のある構造に対応した太陽風領域）、を十分に分解できる。この稠密な太陽風速度分布データを太陽の磁場観測データや太

陽大気観測データと比較することで、太陽風が活動領域やコロナホールの「どの部分から」流出しているのかが、初めて明らかになり、加速された太陽風速度とその流源の磁場・大気構造の関係式を構築できる。

(b) 実用的宇宙天気予報の精度向上：背景太陽風の変動に加えて、コロナ質量放出 (CME) によって生じる太陽風中の突発的擾乱は地球周辺環境に大きな影響を及ぼす。一方、CME の惑星間空間中の伝搬の再現は未だ難しく、地球への到来予報には 10 時間以上の誤差があるのが現状であった。そこで、本研究で得られる IPS のリアルタイムデータによって、その到来予報を向上させることを第 2 の目標とする。IPS 観測は惑星間空間中の CME の前面を検出することができるため、その到来予測精度を向上させることができる。IPS のリアルタームデータを利用した CME の到来予報モデルの開発で日本は世界をリードしてきた。この結果から、約 10 時間以上の誤差がある CME の 24 時間前到来予測は現状の IPS データを同化すると約 5 時間にまで向上することが示唆されている。次世代計画では、既存装置の 10 倍の IPS 観測を実現することで今まで約半日かけて取得していた IPS データを 1 時間程度で取得する。この稠密な IPS データを太陽圏のグローバル磁気流体シミュレーションに同化することで、CME の伝搬を高精度に再現でき、到来誤差を 1 時間未満にまで短縮できると予想される。到来予測精度が 1 時間に達すると、人工衛星の運用計画や宇宙ステーション・月面等での宇宙活動を予測に応じて調整することで安全を担保しつつ効率的な宇宙開発が実現できる。

実施内容

本計画では、国内 3 カ所（山梨県富士河口湖町、長野県上松町、愛知県豊川市）に IPS 観測用のアレイアンテナ群を建設する。各基地局は、約 4000 m^2 の平面に 327 MHz 帯域に感度を持つアンテナを敷き詰めた 2 次元フェーズドアレイアンテナで構成される。各アンテナエレメントで取得された信号をデジタル処理することで最大 8 方向に同時に指向できるデジタルビームフォーミングを実現する。各基地局でビームフォームされたデータをインターネット経由で愛知県名古屋市に収集し、相関処理することで、太陽風速度を導出する。本装置では既存装置の 10 倍の太陽風観測を実現できる。

国内外の動向と研究領域内での位置づけ

太陽風の理解が重要な課題であることは世界的に高く認識されている。米国の探査機 Parker Solar Probe は 2025 年頃にかけて太陽近傍に接近しつつ太陽風を調査し、2020 年に欧州を中心に打ち上げられた探査機 Solar Orbiter も 2025 年頃にかけて地球とは別の角度から太陽風を調査するべく、それぞれ現在飛翔中である。また、日欧共同の水星探査機 BepiColombo は 2025 年頃に水星に到達する予定だが、宇宙空間を航行中に、その場所の環境探査が可能であり、太陽風の探査にも有効である。更に 2020 年代に打ち上げ予定の SOLAR-C でも太陽風の理解を科学目標の一つに掲げている。2020 年代から 30 年代にかけては太陽・太陽風の探査を通じた太陽圏科学の重要な時期になろうとしている。

太陽風加速のエネルギー源である太陽表面、加速領域である太陽コロナ、加速後の太陽風分布の三つが揃って初めて加速モデルの検証ができる。この中で太陽表面は DIKST や ngGONG 等の将来計画が観測を予定している。太陽コロナは SOLAR-C 等の紫外線観測や PUNCH 等のコロナグラフなどの将来計画がある。加速後の太陽風は内部太陽圏を飛翔する探査機から「その場」の情報が得られるが、グローバルな分布を得るには IPS 観測が最も有効となる。本計画では、0.2-1.0 AU の領域を伝搬する加速後の太陽風に感度を持つ 327 MHz 帯域で最も高空間分解の太陽風観測を行うことで「空間分解能のボトルネック」となっている加速後の太陽風分布に注力し、その分解能を向上させることができる。この点で本計画は世界的にユニークな将来計画となっており、他の計画と高い相補性を持っている。

未来の学術振興構想およびロードマップ 2023 には「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」の一角として提案している。本構想は次世代太陽風観測装置に加えて地球の大気・超高層大気を観測する地上機器群（赤道 MU レーダー、EISCAT_3D レーダー、広域地上観測網）および観測データ統合解析システムの整備からなり、名古屋大学宇宙地球環境研究所に加え、京都大学生存圏研究所、国立極地研究所、九州大学国際宇宙惑星環境研究センターと国内外の関連研究機関らが連携した実施体制が構築される。本構想では太陽地球系の結合過程を統一し定量的に理解することを目的としている。次世代太陽風観測装置プロジェクトがハブとなることで宇宙惑星科学と大気水圏科学との結合が促進され、広大な領域を複合システムとして研究し、宇宙利用や大気変動予測に貢献することを目指す。

サイエンス成果が与える波及効果・社会貢献

（恒星物理学）本研究では、太陽風がどうやって加速され宇宙空間へと伝搬していくのか、という太陽物理学最大の未解決問題の一つ「太陽風加速問題」を解明することを目標としている。太陽風は恒星風の代表であり、その解明は太陽・恒星物理学全体に影響を与える。

（宇宙天気）太陽風は地球を含む惑星の周辺環境に擾乱を与え、通信障害や人工衛星障害など、社会インフラが甚大な被害を被ることがあり、太陽風の変動を事前に予報することには社会的価値も高まっている。太陽風速度のリアルタイムデータを取得し、太陽圏の 3 次元シミュレーションにデータ同化することで、太陽風の予測精度を向上させることで、将来の持続的な宇宙活動の実現に貢献する。

（ハビタビリティ）太陽風は惑星の大気や磁気圏と相互作用し、大気の流出を引き起こすなと、長期的視点では惑星の大気進化にも影響している。IPS の連続観測を通じた太陽風の長期変動の理解は、太陽風が惑星大気に与える影響を推定うるのに役立ち、惑星の大気進化やハビタビリティへの理解にも波及する。

実施体制

共同利用・共同研究拠点である名古屋大学・宇宙地球環境研究所の太陽風グループが主体的に運用を行う。観測は全自動で行われ、相関処理後の太陽風速度データは即日インターネット上に公開され、太陽圏研究に用いられるとともに、国内外の宇宙天気予報機関で現業の

宇宙天気予報にも利用される。また、デジタル信号処理による広視野マルチビーム観測の特徴を生かし、一部のビームを共同利用を通じて、太陽風以外の多様な観測対象に対しても提供する。本装置の観測帯域では、太陽・恒星・惑星・銀河・パルサー等多くの電波観測対象があり、幅広い活用が期待される。

必要な技術開発、主要キー技術、日本の強み技術

（デジタルビームフォーム）：最も必要な技術的開発は、最大 1024 個にもなるアナログ入力を全てデジタル化し、オンボードでデジタル的に合成するデジタルビームフォーミングである。そこで、8 個の AD 変換器と FPGA を用いた IPS 観測用のデジタルボードを自主開発し、FPGA 部にデジタルビームフォームする演算を並列に 8 個実装することで最大 8 ビームの同時観測を実現した。更にこの装置をトーナメント方式で多数接続することで、64ch の入力信号をデジタル化し､8 ビームを同時に合成するシステムの開発にも成功した。現在は、このアレイシステムを更に拡張し 1024 個の入力を処理できる大規模デジタルアレイの検討も進んでいる。ボードや演算回路の基礎設計から大規模アレイの構築までを一貫して自主開発している点で日本の強み技術と言える。

（平面フェーズドアレイ）：広視野な光学系を実現するために平面にアンテナエレメントを敷き詰めた平面フェーズドアレイが必要となる。個々のエレメントとなるアンテナは名古屋大学で開発運用してきた 327 MHz 帯域のダイポールアンテナの技術を活かし開発される。またこの方式は、駆動部を持たないため安定した運用を実現できる。一方、本方式には最大 16,000 本という大量のエレメントアンテナが必要となり、コスト面で課題がある。名古屋大学で伝統的に採用されてきたシンドリカルパラボラ方式は視野が限られるが比較的低コストであり検討の余地が残されている。

上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

低周波のデジタルフェーズドアレイ技術は太陽風観測だけでなく､地球大気･海洋･電離層･太陽を含む太陽系天体･系外天体まで幅広く必要となる普遍的な要素技術であり､世界各国で活発に研究が進められている。また､次世代太陽風観測装置で開発されているデジタル装置は小型･低コスト･省電力が大きな特徴となっており､小規模な地上観測プロジェクトでも導入しやすく､将来的には飛翔体搭載も不可能では無い。本技術を獲得することで､国内の幅広い宇宙科学研究に対して波及効果が期待できる。

準備状況

建設予定の 3 地点では、1980 年代より順次既存のシステムを用いた太陽風の観測を行ってきた。その過程で装置の運用や観測データを即日公開する経験を蓄積してきた。本提案に向けては､2018 年より数値計算等も用いて太陽風流源を分解するために必要な空間分解能、およびその空間分解能を達成するアレイシステムに必要とされる面積等を導出するなどの科学検討･技術検討を行ってきた。並行して、平面フェーズドアレイおよびデジタル信号処理装置の設計･開発を進めてきた。既にデジタル信号処理装置のプロトタイプが完成し、想

定した機能を有することが実験で確認されている。これらの結果をもとに本計画の一部を概算要求に提案するとともに、特別推進研究を含む大型科研費にも申請している。加えて、本計画の概要および進捗状況は、天文学会、太陽研究者連絡会、地球電磁気・地球惑星圏学会など、関連の学会・研究会で定期的に報告し、複数の分野を横断する形でコミュニティへの浸透に努めている。更に日本学術会議の物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会へ中型 B 計画として、地球惑星科学委員会に中型計画としてそれぞれ提案している。未来の学術振興構想およびロードマップ 2023 には「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」の一角として提案を行った。2021 年からは科研費（基盤研究(A)）を獲得し、Phase-I プロジェクトとして１基地局の数%に相当する規模のアレイを開発する計画を進めた。その結果、１基地局の 6%に相当する 64ch の入力信号をデジタル化し 8 ビームを合成するデジタルシステムの開発に成功した。2024 年度からは科研費（基盤研究(S)）を獲得し、Phase-II プロジェクトとして最初の建設基地局である富士観測所に 33%の規模のアレイを建設している。建設予定地へのアレイ敷設に向けた基礎工事の計画、アレイの土台の設計、アンテナ・受信機・信号処理装置のプロトタイプ機の開発および性能評価が完了し、量産化に向けた準備が進められている。

6.2 次世代国際ネットワーク計画 ngGONG

計画概要

ngGONG (next generation Global Oscillation Network Group)は、米国 National Solar Observatory (NSO)を中心に提案されている次世代の国際ネットワーク光学観測計画で、太陽全面を観測する望遠鏡を世界各地 6 か所に配置し、24 時間休みなく太陽を定常的に観測する。従来の GONG と比較し、光球と彩層でベクトル磁場とドップラー速度を測定できる能力を強化するため、ゼーマン効果に感度の高い近赤外線域を含む複数のスペクトル線を偏光分光観測する。さらに、太陽大気における爆発や惑星間空間におけるプラズマ伝播の数値計算と組み合わせることで、宇宙天気現象の予測研究にも貢献する。日本で培われた高度偏光観測技術、太陽圏観測や数値シミュレーション技術をもとに、複数ある観測装置のひとつを日本で担当する、データ駆動シミュレーションによる太陽圏変動予測、などの形で参画することで、次世代太陽ネットワーク観測を国際協力で実現することを目指す。

目的と学術意義

惑星間空間に影響を及ぼす太陽風の加速とフレア・CME の発生メカニズムを、太陽全面の磁場速度情報を中心とする連続的な観測データをもとに解明することが主目標である。その知見を理論と数値シミュレーションに組み込むことで惑星間空間のプラズマ環境の変動を明らかにする。

(1) 太陽活動現象を定量化に必要不可欠な光球・彩層磁場速度観測

表面磁場観測に基づくフレア発生予測とコロナ・惑星間空間の磁場モデリングは、標準的

な手法として使われてきた。しかし、従来の GONG の光球視線磁場観測のみでは不十分であることも明らかであり、(1)活動領域磁場のねじれ量や蓄積された自由エネルギーを推定するためにはベクトル磁場情報が必要不可欠であること、(2)高プラズマ β の光球磁場分布から非線形フォースフリー等の手法で外挿して得られるコロナ磁場は、時として、コロナ磁場のねじれを正しく推定できないため、低プラズマ β の彩層磁場を境界条件とした磁場外挿が必要であること、の 2 点が課題として認識されている。これらに進展をもたらすために、光球と彩層のベクトル磁場を同時に観測することで、活動領域やフィラメントの磁場とその時間発展を従来よりも高い精度で観測的に把握することを目指す。活動領域磁場の不安定化を定量的に測定し、さらには太陽大気のどこかで突発的に発生する現象に追従するため、太陽全面で磁場観測を行う。惑星間空間における太陽風速度の推定精度を向上させるために極域等のコロナホールにおける光球・彩層磁場の測定精度も改善する必要がある。同時に彩層速度を測定することで、活動領域やフィラメントが不安定化する前兆現象やプラズマ噴出の初速をとらえる。

(2) 太陽活動現象が太陽圏へ及ぼす影響

太陽圏の内部境界(いわゆる source surface)における磁場と太陽風速度を太陽光球・彩層の全面観測から推定するため、光球ベクトル磁場に加えて彩層磁場も利用したコロナ磁場の外挿手法を開発し、その上で太陽風加速モデルを改良する。コロナで発生した CME が惑星間空間へ伝播しどのような ICME となるかはまだ確立できておらず、他のコロナ観測や内部太陽圏観測と連携して、CME の源となる活動領域やフィラメントにおける精度の高い磁場速度情報と、ICME の関係性を調べる研究が必要となる。磁気嵐の激しさを決める重要な要素の一つである惑星間空間における磁場の南北成分(Bz)を、太陽磁場の観測と数値シミュレーションから決めることができれば、宇宙天気予報において大きな進歩となる。

(3) 長期連続観測による太陽磁場の短期・長期変動研究

地上望遠鏡によるネットワーク観測の強みである多波長かつ高頻度な観測を長期間に渡って連続的に行うことで、太陽磁場の短期・長期変動研究にも進展が期待できる。日震学観測を使うことで巨大黒点が地球から直接見えない太陽裏面で出現したことをいち早く察知できる far-side imaging 手法に加えて、太陽内部から磁束が浮上する兆候を音波や流れ場の変化からとらえる研究へと発展させる。さらに太陽周期活動を十分カバーするデータを蓄積することで、周期活動に付随する表面磁場の変化とともに太陽内部流の長期変化をとらえるなど、磁気活動の根源であるダイナモ機構の研究に貢献する。

国内外の動向に対しての位置付け

ngGONG は米国 NSO を中心に推進されており、2024 年に公開された Solar and Space Physics Decadal Survey においても、宇宙天気観測のための最重要観測装置として実現が推薦されている。NSO と HAO は ngGONG の開発を NSF へ提案しており、それが採択されれば、国際ワーキンググループが組織される予定であり、そこに日本からも参加し科学・装

置検討を進め分担を決めていく。最速のスケジュールとして、設計検討を 2026-2027 年に行い、開発・建設を 2028 年から開始する計画である。国立天文台では、シノプティック観測で 100 年以上にわたる磁気活動の長期変動データを蓄積しており、さらに ngGONG に先んじて近赤外線偏光分光観測で太陽全面をカバーする光球・彩層の磁場データを得ている。この世界的にもユニークなデータを使って上述の科学目標にどこまで近づけるのか実証することで ngGONG の実現に貢献する。

6.3 次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光撮像装置 NIRTF

研究の概要

口径 4 m の太陽望遠鏡 DKIST(米国)に代表されるように、現在、海外では超大口径望遠鏡の運用や計画が推進されている。これらに設置する次世代焦点面装置として、「近赤外線広視野偏光分光撮像装置 Near InfraRed Tunable Filter (NIRTF)」を開発する。太陽観測の最大の利点は、磁気流体の素過程を空間分解して観測できることであるが、これら超大口径望遠鏡は、その高解像度・大集光力により、この利点を最大限生かせる格好のプラットフォームである。NIRTF では、光球・彩層・コロナでの高解像度な、速度、磁場、さらには電場診断が可能となる。これにより、ナノフレア、磁気流体波、磁気リコネクションといった諸現象の物理過程により詳細に迫ることができ、ひいてはコロナ加熱、太陽フレア問題の解決を目指す。開発は京都大学と国立天文台が中心となって国内で行い、米国・National Solar Observatory (NSO)などとの協力の下、国際的なフレームワークで実現する。

目的と学術的意義

米国の DKIST(口径 4 m)では、その大口径を生かした大集光力・高解像度での観測により、光球・彩層での高精度な偏光分光観測を行うことが可能となる。さらに DKIST では、コロナにおける磁場も観測可能であることから、太陽大気プラズマのダイナミクスや物理診断が実現され、エネルギー解放と輸送を担う物理素過程を直接的に研究できると期待されている。DKIST のような大口径太陽望遠鏡に設置するために、近赤外線広視野偏光分光撮像装置 NIRTF の開発を、京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 DST をプラットフォームにして行う。

NIRTF の目指す学術的問いは、「プラズマダイナミクスに関連したコロナ・彩層磁場の定量化」である。NIRTF の意義と波及効果は、太陽物理学の基本的な現象であるナノフレア・磁気流体波・磁気リコネクションのダイナミクスについて、おおもとのエネルギー源である磁場の情報を与え、現象の物理解明をもたらすことである。磁場によるスケーリングを可能にすることで天体プラズマ物理学に広く波及する結果をもたらすと期待できる。

国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

海外大口径望遠鏡として DKIST を主案として、波長可変狭帯域フィルターを使った近赤外線広視野偏光分光撮像装置NIRTF を開発する。光球・彩層観測では Goode Solar Telescope

(GST)にある Near-Infrared Imaging Spectro-polarimeter(NIRIS)に相当し、コロナ観測では大口径望遠鏡版の Coronal Multi-channel Polarimeter(CoMP)と言えるものである。DKIST は現在ある大型望遠鏡の中で、唯一コロナグラフ観測ができる望遠鏡であり、その能力を生かした観測装置とする。DKIST の第 1 世代観測装置群では、主に可視域のスペクトル線を対象とする観測波長可変狭帯域フィルターVisible Tunable Filter(VTF: 波長範囲 520 – 870 nm)はあるものの、赤外線の狭帯域フィルター観測装置は存在しないため、その実現は DKIST 側からも期待されている。日本の太陽研究グループでは、これまでに、大口径望遠鏡用の次世代焦点面装置のプロトタイプとして、液晶可変遅延素子を使ったリオフィルター波長可変撮像観測装置(Universal Tunable Filter: UTF, 京大)、電気光学結晶である LiNbO3 を使った波長可変狭帯域フィルター(国立天文台)、偏光観測用大フォーマット赤外カメラ(国立天文台)を開発し、国際的にもユニークな技術を有する。さらに、CLASP1/2 ロケット実験や SUNRISE-3 気球実験を通して、高精度な偏光分光観測装置開発に必要な技術、国際協力で先端的観測装置を開発するノウハウが蓄積されており、これらを本計画に最大限活用する。また、NIRTF の開発、特に太陽光を用いた較正では、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡(Domeless Solar Telescope: DST)をプラットフォームとして活用する。

DKIST を主案とするため、DKIST の実施機関である NSO や DKIST 装置開発の実績がある米国・ハワイ大学と High Altitude Observatory (HAO)と共同で検討を進める。国内の検討グループで、科学的・技術的な概念検討・設計を行い、報告書をまとめる予定であるが、NSO とは科学的・技術的な検討で連携する内諾を得ている。ヨーロッパ、中国の大口径望遠鏡計画との連携の可能性もあるため情報共有を図る。NIRTF 開発には京都大学 DST を用いるが、開発に必要となる環境を併せて整備する。

NIRTF の実現は、2020 年代後半を見込んでいる。この時期には日本の次期太陽ミッション SOLAR-C が打ち上がっており、SOLAR-C によるコロナ・遷移層分光観測と DKIST/NIRTF による光球・彩層・コロナ磁場観測の協同観測が可能となる。特に広い視野を持つ NIRTF と SOLAR-C とは協調性が高く、極めて有効なシナジー観測が実現されると期待できる。

7. 実施中の小規模計画

この節では、実施中である二つの小規模計画を紹介する。ここでの“実施中”とは計画実現のための予算措置がなされており、具体的な装置開発が行われていることを意味する。

7.1 SUNRISE 気球実験

計画概要

光球とコロナをつなぐ彩層において、磁場が引き起こす動的現象による磁気エネルギーの輸送と散逸プロセスを明らかにするため、光球-彩層の 3 次元的な磁場・速度構造とその時間発展を観測する装置 SCIP (Sunrise Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter)を SUNRISE 気球望遠鏡に搭載する。SUNRISE は口径 1 m の大型光学望遠鏡を搭載した太陽観測気球実験で、大西洋上空の成層圏(高度 35 km 以上)を約 1 週間飛翔することで、地上望遠鏡では困難な(1) 紫外-可視-赤外の広波長範囲の観測、(2) 大気ゆらぎや天候に左右されない高精度かつ高解像で連続的な観測、を行うことができる。これまで、ドイツ・スペイン・アメリカを中心に推進されてきたもので、2009 年(SUNRISE-1)と 2013 年(SUNRISE-2)の 2 度飛翔観測を行い、光球の偏光撮像観測で数多くの成果をあげた。日本が新たに提供する SCIP に加え、紫外線と可視光の偏光観測装置もアップグレードされた。さらにゴンドラを改良することで高い指向安定度を実現した。2024 年に実施したフライトでは、約 6.5 日間の観測により、これまでの SUNRISE 観測とは質的に異なる高品質なデータを取得することができた。太陽活動度が高い時期にフライトを実施できたことで、静穏領域や黒点のみならず、磁気浮上領域やフレアなど、多様なターゲットの観測に成功した。現在、データ公開に向けた較正作業を進めるとともに、初期成果の創出に向けた解析を行っている。

目的と学術意義

日本担当の SCIP は光球・彩層磁場に高い感度をもつ多数の近赤外スペクトル線を高解像度(0.2 秒角,「ひので」撮像観測と同等)かつ高精度(0.03%, 1 σ)に偏光分光観測する装置である。本計画により以下の項目を実証する。

① 近赤外線の偏光分光観測で光球・彩層の 3 次元的な磁場構造を測定できること
② 磁気流体波動やジェットなど彩層の動的現象に対して有意な偏光を検出できること
③ 搭載装置の共同開発を通して、将来の国際大型ミッションに参加する基盤を構築すること

SUNRISE はフライト実績のある大型望遠鏡が存在するため、最小限のリソースで質の高い彩層磁場観測を実現し、さらに将来の高精度偏光分光観測に必要な技術を日本が獲得できる絶好の機会と言える。SUNRISE-3 計画は、紫外線偏光分光観測を行う CLASP2 ロケット実験とともに、ISAS/JAXA の小規模計画の一つ「小規模太陽観測プログラム」として推進

してきたものである。全く新しい観測手法やそのための新しい観測技術の検証を行うパスファインダーと位置づけており、若手研究者が飛翔体装置の開発・フライト運用・データ較正を経験する貴重な機会でもある。

国内外の動向に対しての位置付け

DKIST に代表される大口径地上望遠鏡では、大気ゆらぎと天候によって広視野・高解像な連続観測が依然として困難となる可能性がある。そのため、SUNRISE-3 のフライト観測で得られた高品質な偏光分光データを用いて、大口径地上望遠鏡と競える成果を出していくことが重要である。得られた成果から光球彩層の動的現象の研究を進展させることで、2020 年代後半に SUNRISE-4 として再フライトを実施し、SOLAR-C と協調観測を行う可能性を拓くことができる。SUNRISE-3 の望遠鏡及び観測装置は無事回収されおり、最低限の改修を施せば再飛翔可能な状態にある。また、新しい観測装置に入れ替えることもでき、スペース用面分光装置の開発実証など、2030 年代以降のスペース光学望遠鏡による偏光分光観測へと発展させる基盤となり得る。

7.2 日米共同・太陽フレア X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-5

計画概要

日米共同観測ロケット実験 Focusing Optics X-ray Solar Imager の 4 回目の飛翔計画である FOXSI-5 は、FOXSI-4 に引き続き、太陽フレアに対する X 線集光撮像分光観測（0.5 keV～30 keV）を行う。その目的は、磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とそれによって生じるエネルギー変換機構の追究に必要な、観測技術および研究手法の実証と研究基盤の構築である。

2024 年 4 月に打ち上げられた FOXSI-4 では、太陽フレアに対する世界初の X 線集光撮像分光観測を実施し、太陽面上で発生した中規模フレア（M クラスフレア）の減衰期の観測に成功した。これにより、フレア減衰期における 1 千万度以上の超高温成分を検出するとともに、マイフロフレアや活動領域などの観測にも成功している。一方、太陽フレアは、発生場所・エネルギー解放規模・継続時間などの違いにより調査できる物理現象が異なるため、太陽フレアを理解するためには、複数のフレアを観測する必要がある。そこで、FOXSI-4 の観測装置をそのままに、再度打ち上げを行うのが FOXSI-5 計画である。本計画は、米国 NASA の観測ロケットを用いて 2025 年末から 2026 年頭頃に実施予定である（NASA に最高評価の Excellent で採択済み）。

目的

本計画が目指す科学目標は、磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とそれによって生じるエネルギー変換機構の追究である。そのために本計画で達成を目指す科学目的は、次の 3 つの大項目からなる合計 6 項目である。

【1】　世界初となる太陽フレアのＸ線集光撮像分光観測を成功させる。
【2-1】観測から、太陽フレア領域全体の温度構造を精確に評価する。
【2-2】観測から、太陽フレア領域全体にわたって加速された電子（非熱的成分）を探索する。
【2-3】観測から、太陽フレアで解放されたエネルギーや加速された電子の伝搬を追跡する。
【2-4】観測と数値計算の両輪で、太陽フレアにおけるエネルギー解放・変換過程を精査する。
【3】　取得した観測データや解析用ソフトを公開し、この新しい観測手法を普及させる。

位置付け

これらの科学目的の達成には次の意義がある。まず、太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表には、2020 年代に重点的に狙うサイエンス課題として「彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明（彩層・コロナダイナミクス)」と「太陽活動現象の発現機構の究明とその変動を予測するための知見の獲得（宇宙天気・宇宙気候基礎物理)」が挙げられているが、FOXSI-4 の目的はこれらの課題に関連している。具体的には、高いダイナミックレンジと空間・時間・エネルギー分解能を同時に合わせ持つ世界初の太陽フレア X 線データの取得と、太陽コロナおよび太陽フレアに対する新しい観測手法・技術（高精度 X 線ミラーと X 線用高速度カメラの組み合わせによる X 線集光撮像分光観測）の実証を行うことが出来る（科学目的【1】の持つ意義)。そしてこのデータを用いることで、太陽フレアにおける磁気再結合および粒子加速の研究において大きな実績を積むことができる（科学目的【2】の持つ意義)。更に、これらの活動を通して、定常的な太陽フレア観測を実現するための衛星計画（PhoENiX 衛星など）の立案・推進、新しい観測に対応した数値計算モデルの構築、太陽フレアと他天体で起きる磁気再結合・粒子加速の比較など、新しい研究基盤が構築できる(科学目的【3】の持つ意義)。

また、日米共同観測ロケット実験という機会を通し、国際協力関係の強化が図れる上、若手研究者や大学院生が直接宇宙ミッションに携わる機会も提供でき、人材育成の点でも高い価値を持つ。

FOXSI-5 は、FOXSI-4 と同じく、観測時間に制約のある観測ロケット実験を用いた計画的な太陽フレア観測実験（観測ロケット・フレアキャンペーン）であり、フレア発生後、直ちに打ち上げを行う。日本が進める太陽フレア予測研究の成果も引き続き活用しながら、観測開始までに要する時間を短縮することで、フレアのピークに近い時間帯の観測を狙う。このように、新しい太陽フレア観測プラットホーム構築の観点からも高い意義を持つ。

8. 2030 年代以降に向けたアイディア

この節では、2030 年代以降を見据えて検討が行われている計画案を紹介する。

8.1 太陽多点観測ミッション

目的と概要

黄道面から離れ、人類がまだ目にしたことのない太陽極域もしくは、黄道面内の太陽-地球系の L5 点などに移動する太陽の多点観測を世界に先駆けて実現し、対流層深部の内部診断により、太陽周期活動を駆動するダイナモ機構の解明を目指すとともに異なる視点からの太陽圏描像を得ることがこのミッションの目的である。2.3.8 理論シミュレーションのうち、太陽ダイナモシミュレーションに示したように、我が国ではダイナモ問題について、理論面では世界を牽引する成果を挙げてきた。その一方で、観測面では、ダイナモ問題の解決に主眼を置いたミッションは国内にほとんど存在しない。我が国ではこれまで長きにわたって太陽磁場に関する研究をコミュニティ全体で推進してきたこと、また、太陽内部の理論研究がこの 10 年間で格段の進歩を遂げたことから、我が国としてもダイナモ問題解決に向けたプロジェクトを推進することが必要である。ダイナモ問題解決を大きく進めるプロジェクトの一案として、多点同時観測による太陽深部探査が挙げられる。太陽活動周期を駆動する磁場は太陽深部で生成されると考えられる。太陽表面で発生し、太陽深部を通過、再び太陽表面に現れる音波は、表面上で離れた位置に始点と終点がある。そのため、深部領域を日震学により探査するには、太陽面上の十分離れた 2 点を同時に観測する必要がある。具体的には、宇宙科学研究所の戦略的中型科学衛星を想定した SOLAR-C Plan-A において検討された黄道面離脱軌道からの極域観測や、L5 点など黄道面内安定軌道からの太陽定点観測などが挙げられる。太陽深部を日震学により探査するには、数年（もしくはそれ以上）にわたる長時間の観測積分を行い、子午面還流、熱対流、温度擾乱などを見積もることが求められる。

諸外国では、同様の目的意識を持った複数の黄道面離脱・極域ミッションが提案されている。このうち、Solar Orbiter（2020 年 2 月打上げ）は地球・金星スイングバイにより太陽距離 0.28-1.02 AU、軌道傾斜角 18° （ノミナル運用）から 33° （後期運用）に達する計画である。しかし、光学観測ウィンドウは北極域・赤道域・南極域において各 10 日間しかなく、深部子午面還流のような長時間観測を要する科学目標の実現は困難である可能性がある。また、NASA の MIDEX 計画として提案された Solaris は、木星スイングバイによる極軌道（Ulysses に類似した軌道）を採用し、緯度 75° からの観測を実現する。ノミナル運用では北極・南極とも 60° （55° ）より極側において 72 日（108 日）の観測期間（太陽距離 1.1-2.2 AU）を要求する。そのほか、0.48 AU において傾斜角 75° まで遷移する POLARIS・Solar Polar Imager・SPDEx 等の計画が提案されている。これらの計画に先駆けて我が国で多点観測ミッションを推進する、もしくは、協力関係を構築するなど、各国の情勢を見極めつつ対応を検討することが、日本の太陽コミュニティが太陽内部研究において主導権を持

つ上で重要である。

本ミッションを我が国で遂行する上で、大きな鍵となるのが、日震学研究コミュニティの拡大である。これまで我が国では、光球・彩層・コロナ研究が主流であり、日震学の研究の層が厚いとは言えない状況が続いている。一方で、日震学・星震学研究が皆無だったわけではなく、東京大学・国立天文台などで継続的に研究が進められてきている(Sekii 1991, Shibahashi et al. 1996, Takata et al. 1998, Sekii et al. 2007, Nagashima et al. 2011, Toriumi et al. 2013, Hatta et al. 2019)。よって、我が国にも日震学への素地はあり、これを業界全体に波及していくことがミッション成功のための必要条件となる。そのためには、今後も継続的に日震学に関する研究成果を創出しながらも、講習会などを通して、学生・若手の研究者に研究手法・技術を広めていくことが肝要であり、2023 年からその取り組みが始まっている。また、これらの活動を通じて観測要求を明確化させていく。熱対流などの光球で観測されるダイナミクスのより深い理解、フレア発生予測のリードタイムを増やすためには、日震学手法を活用することが有効なことは明らかであり、太陽研究への日震学の幅広い波及効果を周知する。また、理論的な太陽内部研究については、我が国でも世界最先端の成果創出をしてきており、日震学研究も理論研究とうまく連携することで相乗効果を生み出し、業界全体に広がっていくことを期待している。

実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

太陽多点観測ミッションは、地球軌道を離れ、太陽を安定的に継続観測できる軌道へ探査機を投入することが求められる、理工一体として進めるべき計画である。軌道の例として、太陽距離を 1AU とし、軌道傾斜角を増大させる黄道面離脱軌道は、本ミッションにおいて重要な選択肢となる。黄道面離脱軌道を実現する代表的なオプションとして、(1)地球スイングバイを繰り返し用いて電気推進により傾斜角を増大させる方法（SEP オプション)、および、(2)木星へ到達し、木星スイングバイを用いて傾斜角を増大させる方法（木星オプション）が存在する（軌道検討は両者を含む広い範囲で実施)。

(1)については、クルーズ期間中を含め地球同期性がほぼ常に保たれること、地球-探査機間距離がクルーズ期間中も相対的に短く通信に有利であることなどがメリットとして挙げられる。一方、太陽深部の日震学観測を行うため軌道傾斜角 45 度以上を目標とする場合、必要な増速（ΔV）は 20 km/s に達する。地球スイングバイを活用する場合でも、推進機によって 10 km/s の増速を獲得する必要があるが、現状の電気推進（イオンエンジン）技術はそれを実現していない。

(2)は太陽探査機「ユリシーズ」（1990 年打上げ）と同様の軌道である。木星でスイングバイを行うため、大きな軌道傾斜角（>60 度）を実現可能である。しかし、太陽距離 5.2 AU に達する木星軌道へ向かうため、電力確保や深宇宙通信が重要となる。また、単純に木星オプションを用いただけでは公転周期約 6 年の長楕円軌道となるため、クルーズ中に電気推進と地球スイングバイによる軌道調整を行い、太陽距離 1 AU の軌道を実現（地球同期性を確保）する方法が提案されている。

これらのオプションに対して、主に以下の課題が認識されている。

- 推進系：我が国は「はやぶさ」「はやぶさ 2」等の深宇宙探査ミッションにイオンエンジンを搭載した実績を有する。深宇宙探査技術実証機 DESTINY+は、「はやぶさ 2」搭載 μ10 エンジンの改良型を用いることで実現されるが、オプション(1)を実現する大きな増速を達成するには、改良型 μ10 を上回るさらなる燃費向上が求められる。そこで、印加電圧を高めることで μ10 クラスのまま比推力（Isp）を向上させる高比推力（HIsp）化が検討されている。オプション(2)でも、電気推進による軌道調整運用が提案されており、電気推進はいずれも軌道オプションにおいてもキーとなる技術と言える。
- 電源系：オプション(1)(2)のいずれにおいても、薄膜軽量太陽電池パドルの開発が求められる。DESTINY+では 100 W/kg 規模の出力密度が実証される予定であり、将来展開として 200 W/kg 級を目指して開発が行われている。
- 通信技術：主に画像として得られる太陽観測データを地上局へ伝送するため、大きなダウンリンクレートを実現する長距離通信技術が必要となる。オプション(2)では探査機-地球間距離が最大約 6AU に及ぶため、データ通信を地球近傍飛行時に実施するなどの工夫を行う必要がある。JAXA 地上局とともに、国際協力を通じて海外機関地上局（特に南半球地上局）を確保することも必要である。また、機上計算機である程度のデータ処理を行い、ダウンリンクするデータ量を削減する検討も必要である。観測装置：本ミッションで目指す日震学観測を行うには、太陽全面のドップラー速度マップおよび磁場マップの取得が必要となる。類似の先行観測装置としては、Solar Orbiter 搭載 PHI 望遠鏡（質量 31.5 kg、電力 33 W）が存在する。また、多数の観測装置を搭載する場合、特に太陽物理学以外の分野との相乗りミッションとなった場合に、観測装置の軽量化を図り、ペイロード全体として重量を抑制することが求められる。長期に渡るクルーズ期間中の観測装置の性能維持も課題であり、BepiColombo「みお」など国内外の先行ミッションから知見を得ることが必要である。

日本にて上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

本ミッションで目指す太陽多点観測は、太陽圏を自在に航行し目標軌道に到達する技術を実現するとともに、その軌道の特性を活かした太陽物理学や様々な観測的理学研究の機会を提供する。

1. 理学面

我が国のこれまでの太陽観測衛星（ひのとり・ようこう・ひので）は、いずれも近地球周回衛星であった。また、黄道面を離れ、太陽極域へ到達したミッションは、“その場”観測装置を搭載した「ユリシーズ」しか存在しない。したがって、本ミッションが実現すると、世界初となる太陽極域のリモートセンシング観測が実施され、従来とは質的に異なる新たなサイエンスを創出することにつながる。このことは、太陽物理学のみならず、STP 分野にお

ける太陽風プラズマの“その場”観測や天文学観測など、周辺諸分野へ多大な波及効果をもたらす。また、太陽・地球を同時に俯瞰する地点への航行技術を活かし、太陽地球間の全体を視野に納めた太陽フレア・コロナ質量放出の監視速報技術の実現にも道が開かれる。これは人類の活動領域が月や火星へ進出する時代にあたって重要となる。

2. 工学面

オプション(1)(2)とも、工学的にチャレンジングなミッションである。これらを実現することで、

- 新たな軌道設計およびそれを実現する推進技術（特に電気推進）の獲得
- 大消費電力を支える電源系（特に薄膜軽量太陽電池パドル）の実現
- 今後の深宇宙探査に資する長距離通信技術の獲得

など、我が国の太陽系探査能力を大幅に向上させることに繋がる。

8.2 次世代大型宇宙望遠鏡

計画概要

日本の太陽コミュニティが推進してきた太陽観測ロケット実験 CLASP シリーズや大気球実験 SUNRISE-3 により、スペース環境からの磁場測定が持つ優位性が示されつつある。これらの実験を発展させ、観測衛星による光球〜遷移層のシームレスかつ定常的な磁場観測を行うのが「次世代大型宇宙望遠鏡」である。スペース観測の利点は、天気や大気揺らぎに左右されず均質かつ高精度・高空間分解能な観測データを継続的に取得できること、さらには、コロナ直下の遷移層までアクセス可能な紫外線の観測ができることにある。

太陽の活動現象のタイムスケールは数十秒（波動）から数日（フレアのエネルギー蓄積）と非常に幅広い。太陽をほぼ連続的に観測できる太陽同期極軌道から、高空間・高時間分解能な高精度偏光分光観測を行う。彩層〜遷移層の磁場を網羅するのに肝となるのが紫外線域にあるスペクトル線、Lyα線 （波長 121.6 nm, 遷移層）、Mg II 線（波長 280 nm, 彩層最上部）、280 nm 付近に複数あり彩層底部から上部まで隙間なく観測できる Mn I 線、Fe II 線の観測である。光球及び相補的な彩層磁場観測のため、Fe I 線（525 nm もしくは 630.3 nm）や Ca II H & K 線（390 nm）、Ca II 線（854 nm）といった可視光〜近赤外線での観測も検討する。さらに、技術的な挑戦にはなるが、極端紫外線域の He II 線（30.4 nm）は紫外線域の観測と組み合わせることで、彩層・遷移層磁場導出の可能性が示唆されており、極端紫外線まで伸展した偏光分光観測も候補の一つである。望遠鏡の口径は 1 m 超が望ましいが、小口径でも高い空間分解能を達成できる紫外線の特徴を活かし、比較的小型（＜60 cm）な望遠鏡での実現も視野に入れる。

目的

光球に加えて、これまでアクセスが困難であった“彩層底部〜遷移層の磁場を網羅することで、太陽大気加熱やフレア、太陽風加速の駆動源である太陽大気の磁気的結合を直接的に

明らかにする。
具体的な課題としては

- シーイングフリーなスペース環境から、光球～彩層～遷移層の動的現象の磁場観測を行う。これにより、光球から遷移層に至る磁気流体波動の伝搬散逸や磁気リコネクション現場の磁場を捉える。高さ方向に隙間なく磁場を測定することで、エネルギー注入過程である光球における磁気対流ダイナミクスが太陽大気にどのような影響を及ぼすのか、機構解明に詳細かつ定量的に迫る。
- 広視野長時間連続観測により、活動領域の出現から太陽フレア・コロナ質量放出に至るまでの物理過程を包括的に理解する。光球から遷移層までをシームレスに長時間観測することで、フレアを駆動する前兆現象として考えられている小規模な磁気リコネクションが引き起こす 3 次元的な磁場構造の時間発展に迫る。さらに低プラズマβ領域の磁場をコロナ磁場モデリングやデータ駆動シミュレーションに活用することでエネルギー蓄積機構や駆動機構を明らかにする。

研究の位置付け

本計画の主軸となる彩層の磁場観測は、2022 年より本格的な科学観測が開始されつつある DKIST 超大型望遠鏡（ハワイ，口径 4 mϕ）、Swedish 1-m Solar Telescope（スペイン、口径 1 mϕ）、GREGOR 望遠鏡（スペイン、口径 1.5mϕ）などの地上望遠鏡で目指しているところでもある。DKIST をはじめとする地上望遠鏡による観測は、可視～赤外での偏光分光観測であり、主力となる Ca II 線（854 nm）では彩層中部までしかアクセスできない、He I 線（1083 nm）では静穏領域の観測は難しいなど、限りがある。また、大気ゆらぎや天候により、特にオフリムのスピキュールなど高空間分解能と高精度磁場測定を両立させた連続的な観測は難しいと考えられる。2024 年は、大気球 SUNRISE-3 に搭載された SCIP による世界初となる宇宙からの Ca II 線（854 nm）の観測が実施され科学成果の創出が行われている。さらに、SOLAR-C 衛星打ち上げ後は、DKIST などの地上望遠鏡との共同観測により、磁気エネルギーの変換過程と加速・加熱機構の研究が進展すると期待される。

DKIST などの地上望遠鏡や SOLAR-C により上記科学課題にどれだけ迫れるのか、また、DKIST とロケット実験 CLASP シリーズ（紫外線での偏光分光観測）や SUNRISE-3 の比較により、「宇宙からの可視光・近赤外線偏光分光観測は、どの点において地上観測を凌駕するのか？」・「紫外線による偏光分光観測にはどれくらいの優位性があるのか？」を実際の観測データに基づいて精査することが本計画の検討を進める上で重要となる。本計画では、新しい観測装置の可能性についても検討している。例えば空間 2 次元を同時に偏光分光観測できる面分光装置は、観測ターゲットによっては、スリット観測と比べて 1 桁以上偏光精度を向上させてダイナミクスを追跡することが可能である。また、極端～真空紫外波長帯の He II 線や Lyα線などではハンレ効果によるコロナ磁場の観測可能性が指摘されており、コロナグラフを用いた紫外線偏光装置の搭載についても検討を行っている。

実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

上述のように、観測装置の構成は現在検討中であるが、共通して必要となるのが、宇宙からの太陽磁場観測を実現するための

- 高精度偏光測定技術
- 高い空間分解能と指向制御

である。これまで我々日本の太陽コミュニティーは、ロケット実験 CLASP シリーズや SUNRISE-3 を通して、偏光素子や偏光変調装置の開発、さらには、偏光較正手法の構築により、1 点目の高精度偏光測定技術を培ってきた。一方、2 点目については、軽量化と高剛性を両立した支持機構、ティップティルト機構、擾乱管理、といった技術が必要不可欠となり、SOLAR-C 衛星の実現により、獲得が期待される。しかし、本計画では 60 cm を超える大口径が必要となる可能性があり（SOLAR-C 衛星、CLASP シリーズいずれも口径 30 cm 程度の中口径)、さらなる軽量化や擾乱・鏡面制御のための駆動機構の導入など、新たな技術が必要となると想定される。観測装置の構成についても、面分光装置や紫外線に特化したフィルターやコーティングなど、これまで宇宙観測での実績を持たない技術の導入も見込まれる。今後、必要な要素技術の精査とその獲得のための基礎開発を進めていくことが本計画を実現する上で重要である。また、これらの新しい観測技術を実証するため、気球やロケットといった小規模実験の実施も検討していく。このような飛翔体実験は、将来の衛星計画を推進していく上でも重要となる、若手の装置開発、飛翔体実験技術の獲得にも大きく貢献する。

彩層・遷移層起源の偏光スペクトルからベクトル磁場を導出するには、ハンレ効果を用いた磁場診断手法が必須となる。そのためには、局所的な輻射場の非等方性まで考慮した散乱偏光を理解することが必要不可欠であり、課題となっている。また物理量の空間分布を高い精度で推定するためには、複数のスペクトル線を同時に解析する必要があるが、そのような解析手法は未だ発展途上である。複雑な偏光スペクトルの解釈のためには、輻射の効果を取り入れた 3 次元磁気流体計算、その結果に基づく輻射輸送計算による模擬観測データの解析、インバージョン手法の確立、実際の観測への適用、という戦略が必要になってくる。近年の、輻射磁気流体力学計算分野における日本の太陽物理コミュニティの躍進は目覚ましく、観測・理論の両輪で彩層や遷移層をターゲットとした研究を推進していく。観測装置開発、輻射輸送計算・インバージョン手法の確立はロケット実験 CLASP や気球実験 SUNRISE-3 の科学検討で培った日米欧の国際協力体制を最大限に活用する。既に実施されているロケット実験 CLASP シリーズや飛翔予定の SUNRISE -3 の観測データはこれらの検証に大きく資するものである。

上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

紫外線の偏光分光観測による宇宙からの磁場測定は海外ミッションでも検討されるなど、その実現が強く期待されており、日本が持つ偏光測定技術はこれを切り拓くものである。また、本計画が目指す紫外線まで進展した高精度リモート観測は、天文学や地球・惑星観測で

も検討されており、広く宇宙科学全般への展開も期待される。