

太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表

(2022 年版)

2022 年 6 月 9 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 今田晋亮（東京大学）

(空きページ)

目次

改版履歴.....	5
2022 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)	7
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 2020-2030 年代での長期的研究戦略.....	13
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.....	20
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.....	23
2.3.7 太陽内部・太陽活動周期についての研究.....	24
2.3.8 理論シミュレーション研究.....	26
2.4 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.....	29
3. 早期具体化させる大型計画の概要.....	32
3.1 次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C(EUVST)	32
4. 検討中の大型計画の概要	38
4.1 衛星計画 PHOENIX (PHYSICS OF ENERGETIC AND NON-THERMAL PLASMAS IN THE X-REGION)	38
5. 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	42
5.1 次世代太陽風観測装置	42
5.2 次世代国際ネットワーク計画 NGGONG.....	45
5.3 次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置 NIRTF	47
6. 実施中の小規模計画.....	50

6.1 SUNRISE 気球実験.....	50
6.2 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4.....	51
7. 2030 年代以降に向けたアイデア	52
7.1 太陽多点観測ミッション.....	52
7.2 次世代大型宇宙望遠鏡	54
Appendix.....	57

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	改訂

2022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)・阿南 徹 (NSO)・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)・上野 悟 (京都大学)・勝川行雄 (国立天文台)・草野完也 (名古屋大学)・久保勇樹 (情報通信研究機構)・塩田大幸 (情報通信研究機構)・清水敏文 (JAXA/ISAS)・下条圭美 (国立天文台)・庄田宗人 (国立天文台)・鳥海 森 (JAXA/ISAS)・成影典之 (国立天文台)・堀田英之 (千葉大学)・宮原ひろ子 (武蔵野美術大学)・横山央明 (京都大学)・渡邊恭子 (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(2020 年代から 2030 年代)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状況を説明し（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、その内容をまずはサマリの的に述べる。

1.1 日本の戦略・狙うサイエンス

わたしたち日本の太陽物理学コミュニティが今後 10 年間、すなわち 2020 年代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の解決ためにとる戦略としては、

- 最優先事項として、Solar-C(EUVST)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 4m 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、

を取る。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(EUVST)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、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(EUVST) ミッションの提案がなされた。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(EUVST) 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(EUVST) 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（磁力線のつながりかえ）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 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 (Magnetohydro 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、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(ICA0)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(EUVST)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。さらに現在、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。いっぽう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なのであるが、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、日震学診断手法にのこる改良の余地とが残されている。

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、太陽系の歴史を通じ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質量放出(CME)、さらには太陽放射の短期・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、わが太陽において他にない。Solar-C(EUVST)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。

天文学・惑星科学への研究の展開：太陽はそれを取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、太陽系他惑星とくに火星・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であろう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。

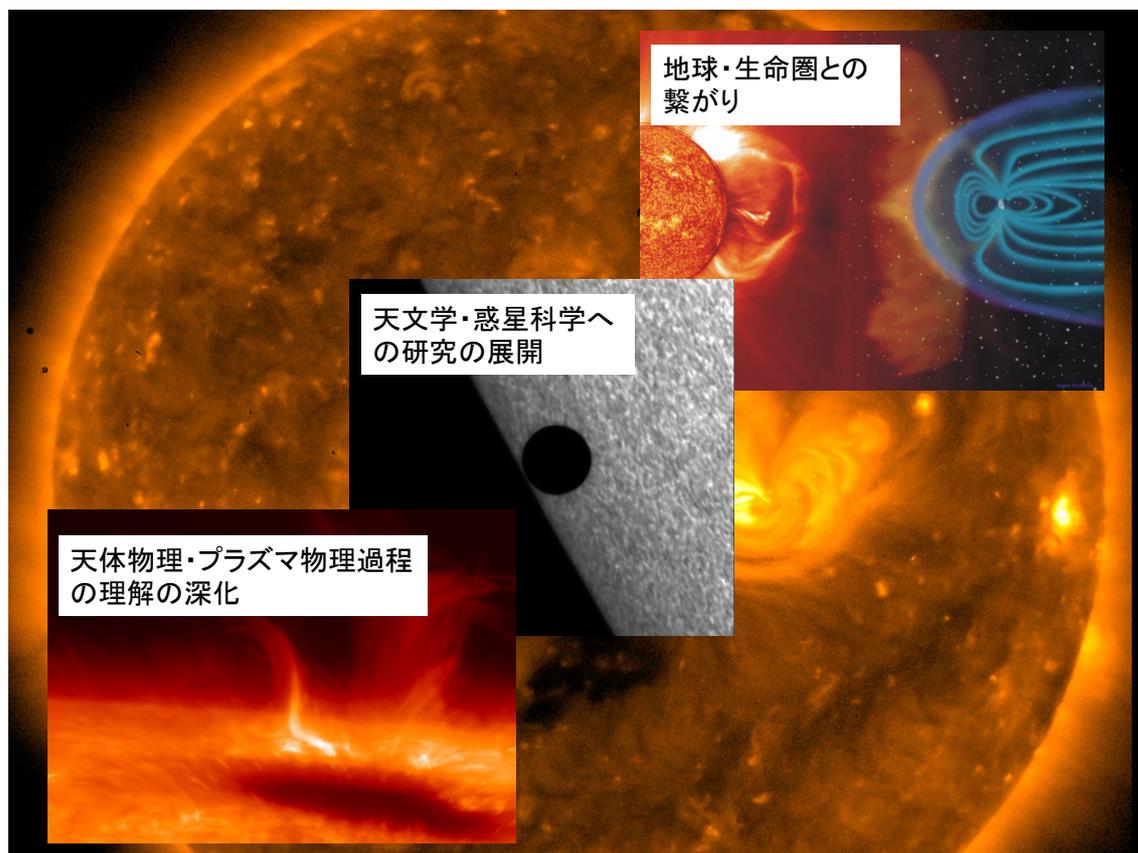


図 1 太陽物理学研究推進によって期待される成果と、近接研究領域への波及効果

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り、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な要請がある。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高い。

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・木曾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（図2）。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など）との観測連携によって、さらに科学成果が期待でき、次期太陽観測衛星Solar-C(EUVST)の飛翔が実現するまで観測運用を継続することを太陽コミュニティとして切望する。

Japanese Sun Observing Spacecrafts

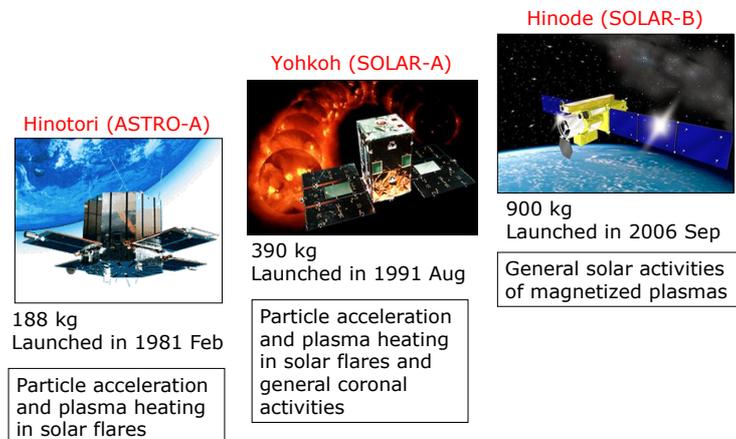


図 2 日本が実現させた歴代の太陽観測衛星

2.2 2020 – 2030 年代での長期的研究戦略

1.2 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：2.4.8 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。この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：2.4.8 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 太陽研科学における太陽研究、2.4.8 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コロナ質量放出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、システム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、2.4.8 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)や黒点对の極性ルール(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 α Ω 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、2.4.8 理論シミュレーション研究・太陽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、黒点に関係した磁氣的活動は、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、太陽観測のようなりモートセンシング(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につながり、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3)。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氣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 衛星な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ム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(EUVST)計画である。

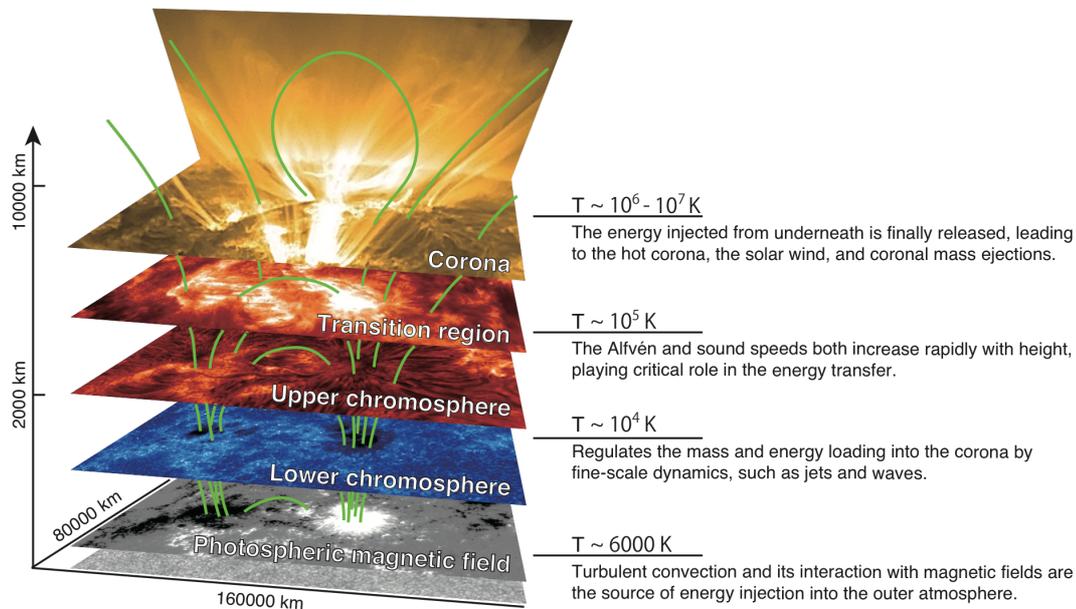


図 3 太陽光球から彩層・遷移層・コロナの構造

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(EUVST)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(EUVST)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のか予測することを試みる。DKIST では、4m 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「近赤外線の大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は不可欠である。「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 (2022 年実施予定)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・赤外線の大視野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 年に本格的な科学観測の開始を予定している米国の DKIST が、口径 4m の大口径がもたらす高解像度(波長 $1\mu\text{m}$ 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り高精度な偏光分光観測を行う計画である。なお、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計画されており、2.4.1 章の上空大気の大視野偏光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 4m 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 60cm 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(EUVST)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 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ている。SUNRISE は口径 1m の大型光学望遠鏡で紫外線～近赤外線の広い波長範囲で地球大気の影響のない約 1 週間の連続観測を行う。2022 年に計画する 3 度目の飛翔観測 SUNRISE-3 に搭載させる SCIP では、Ca II 854nm 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を目指している。

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 121.567nm) や電離マグネシウム Mg II k 線 (波長 279.55nm) での偏光線輪郭形成モデルにより、ハンレ効果による彩層・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)。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の取得に成功している。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」以上の口径の大型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 年代前半～半ばは、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 (2.4.5.理論シミュレーション 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。これらの先進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、近年では地上の大型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。残念ながら 1 秒角を切る極端紫外線・X 線観測はロケット実験でのみ実現できたのが現状であり、衛星による長期連続観測が期待されている。高分解能による長期連続コロナ観測により、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・紫外線観測の一つの方向である。

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が、その理解は部分的である。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）。磁気リコネクションにより励起された 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關係は、「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調べることが非常に難しく、磁気リコネクションの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。しかし、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いため、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) 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, Ishikawa et al. 2017) 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。これらの電波・硬 X 線観測とともに、粒子加速が起こる領域のプラズマの物理量や MHD スケールの構造を捉える高解像度コロナ撮像分光観測を PhoENiX 衛星で行うことにより、粒子加速研究が飛躍的に前進すると思われる。また電波天文分野では、太陽専用の GHz 帯電波干渉計 Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) やその将来計画である Frequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) 計画、また太陽専門電波干渉計ではないが今後 20 年間に Square Kilometre Array (SKA) や next generation VLA (ngVLA) などの国際的な超大型電波干渉計の計画がある。これらの電波干渉計による太陽・太陽圏観測によっても、粒子加速研究のさらなる進展が期待できるだろう (Gary et al. 2018, Nindos et al. 2019)。このような観測の向上や理論研究の深化からフレアにおける粒子加速の理解に向けて機運が高まり、米国にて国内外の研究機関を跨いだ研究センター Solar Flare Energy Release (SolFER) Science Drive Center が NASA により 2021 年に設立された。日本側からも本センターに参加しており、日本独自の観測機器開発や理論研究による寄与が期待されている。

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・人類社会にも大き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・周期活動といった予測の基礎となる研究をそれぞれの柱とするのに加えて、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。

500MeV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。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。

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、熱対流中に磁束管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管がデルタ黒点（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おり、現在、国立天文台太陽フレア望遠鏡・京都大学 SMART 望遠鏡での観測は、世界的にも先端的な水準にある。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計画も進められている（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。

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 0.3AU (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(EUVST) 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 0.3AU 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、JAXA が計画する火星衛星探査計画 (MMX) 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(EUVST)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有しており、分野間連携による研究の推進がますます盛んになっている。これまでの恒星研究では多波長同時観測の機会を得ることは困難であったが、太陽では多波長のシノプティック観測が長期にわたり継続されている。そこで、恒星観測データを、太陽を「星として」観測した結果と比較することで、以下に挙げる恒星活動現象の理解に太陽研究が貢献できる。

近年、NASA のケプラー宇宙望遠鏡などにより多数の恒星の測光観測データが得られ、それらの解析に基づいて、太陽型星で起きる超巨大フレア (スーパーフレア: 解放されるエネルギーが最大級の太陽フレアの 100 倍から 10000 倍のフレア) の研究が目覚ましく進展している。さらに、米国アパッチポイント天文台 3.5m 望遠鏡等を用いた高分散分光観測と ESA のガイア衛星により、スーパーフレア星の特徴 (彩層活動など) の調査も進んでおり、年を取り自転速度の遅くなったような、より太陽に似た星だけに限っても、最大級の太陽フレアの 100 倍に達するスーパーフレアが数千年に 1 回の頻度で生じることが明らかとなった。加えて、そのような恒星では、超巨大黒点の存在が示唆されている。また、太陽フレアにおいて成り立つ物理量のスケール則が、太陽型星のスーパーフレアでも成り立つことなどから、両者を共通のエネルギー解放機構現象としてとらえることが可能であると考えられている。

太陽で数千年に1回規模のスーパーフレアが起きた場合、通信に依存する現代文明に対しては壊滅的な打撃を与えうる。太陽で実際にスーパーフレアが起きうるのか、を明らかにするためには、超巨大黒点の生成メカニズムをダイナモ機構の観点から解明する必要がある。また、太陽型星の観測に基づく超巨大黒点の生成・消滅過程の特徴などについての知見も求められている。太陽フレアと太陽型星スーパーフレアでの放射機構についての比較研究も一層重要となる。例えば、太陽フレアにおける白色光増光と硬 X 線放射との関連の理解や、バルマー系列の強度比についての観測など、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 DST や太陽磁場活動望遠鏡 SMART における観測が望まれる。太陽型星スーパーフレアについては、2018年に完成した京都大学岡山天文台 3.8m せいめい望遠鏡や 2018年打上げの NASA の TESS など、大口径望遠鏡や新たな宇宙望遠鏡を用いた観測による一層の進展が見込まれる。国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟の全天 X 線監視装置 MAXI は恒星フレアの X 線観測に成功しているが、さらに JAXA の X 線分光撮像衛星 X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM: 2022年度打上げ予定) での観測提案もなされている。XRISM では特に輝線観測も想定しており、将来 Solar-C(EUVST)との比較研究が推進されることが見込まれる。

一方で、恒星大気(彩層・コロナ)や恒星風についての研究も一層進むことが期待される。今後、Solar-C(EUVST)や PSP、また DKIST など、地上・宇宙両面から太陽大気(彩層・コロナ)や太陽風について多くの知見が得られることで、これらの理解に大きく貢献することは間違いない。この他、より長期的な恒星変動(活動サイクル)を太陽地上シノプティック観測との連携・比較研究により進めることも、太陽や恒星の活動サイクル変動を理解する上で有効である。

加えて、これら太陽-恒星連携研究の推進においては、観測結果と数値シミュレーションとの比較研究も重要である。例えば、恒星巨大黒点の生成・消滅、太陽型星スーパーフレアにおけるバルマー線・白色光の増光、太陽・恒星風などについては、比較研究がすでに進みつつある。

さらには、恒星 CME も注目を集めており、太陽 CME の応用により、様々な手法で恒星 CME を検出しようとする機運も高まっている。恒星風や恒星 CME、放射(irradiance)は系外惑星の環境に影響を与えるため、系外惑星の宇宙天気研究へとさらに波及する可能性がある。

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。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な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、太陽半径に対して80%よりも浅い層の情報しか得ることができない。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。いずれも局所の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、6.1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思われる。

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。太陽内部の流れ場の観測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(EUVST)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(EUVST)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

¹ β 値は磁気圧に対するプラズマ圧の比を表す。

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(EUVST)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(EUVST)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。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。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500MeV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、2021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。

2.4 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

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た。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。

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。

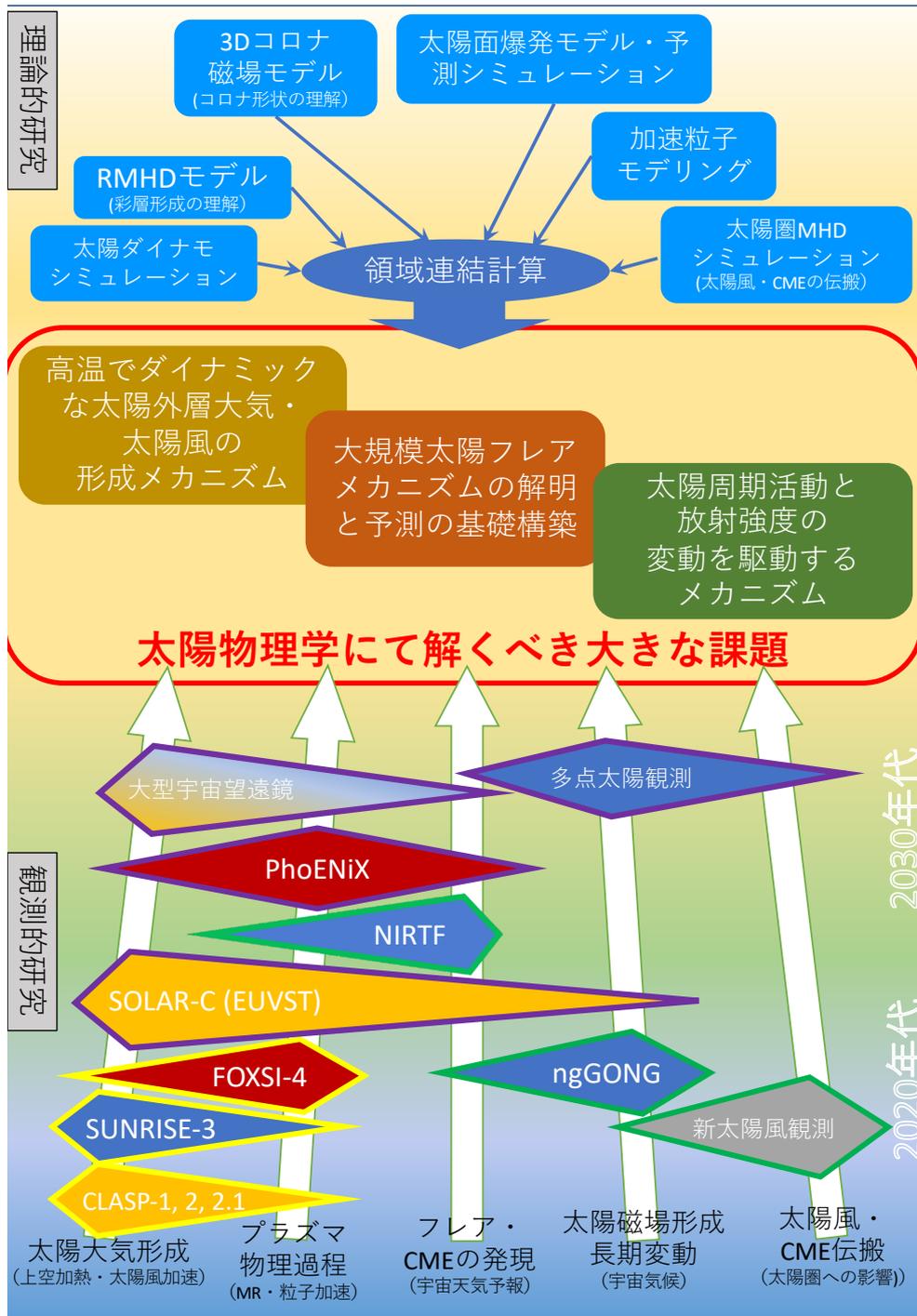


図4 2020-2030年代における日本の太陽物理学の研究ロードマップ

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(EUVST)衛星計画(3.1 次期太陽観測衛星計画 Solar-C(EUVST))の早期具体化が最優先である。本文書執筆中の2022年初頭では、Solar-C(EUVST)衛星計画は JAXA/ISAS にて公募型小型四号機に選定されており、衛星設計への詳細検討が行われている。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(EUVST)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(6.1 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(6.2 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 (5.3 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 (4.1 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 (7.1 太陽多点観測ミッション)・大型宇宙望遠鏡計画 (7.2 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(5.1 次世代太陽風観測装置)の開発推進と ngGONG 計画(5.2 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. 早期具体化させる大型計画の概要

この節及び 4,5,6,7 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。計画の分類は、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。

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(EUVST)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。

3.1 次期太陽観測衛星計画 Solar-C(EUVST)

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(EUVST)」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従するため、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) 17-128nm 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) 2km/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。17-128nm 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。

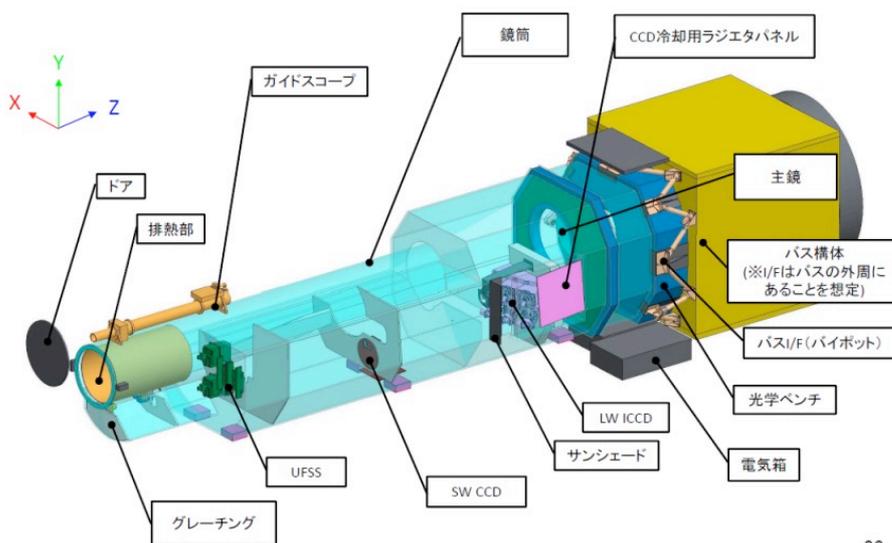


図 5 Solar-C(EUVST)概念図

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 28cm 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 500kg であり、これをシナジー・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 年間で予定し、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(EUVST)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的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) 17-128nm 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、2km/s の視線速度変化を検出することができるとができる高性能分光観測を行う性能を有する。

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 年に開始する。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。本計画はこれらと同時期に遷移層・コロナの高解像度分光撮像観測をおこなう唯一の計画であり、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し、「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、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たり、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。京都大学附属天文台は、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 30cm）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 0.5nm 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 3m 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 μ m 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(EUVST)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、約 500kg の小型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。本計画はその重要課題を網羅し、概念計画案の中で最優先の衛星計画を実行する提案である。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、2021年度後半にはミッション定義審査が行われ、打ち上げに向けた開発に本格的に着手されている。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、開発検討やインターフェース調整が本格化している。

また、スイスを中心としたグループにより太陽 EUV 光輻射モニター計(SoSpIM)の提供が決まり、EUVST を較正に寄与する他、地球との連携を深める輻射データの取得が行われる予定である。

4. 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5,6,7節では、本文書の2022年版改訂の際に、太陽研連会員に対して研究計画の依頼（2021年11月30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、国内外の動に対する計画の位置付けについて、そのまま掲載する。

4.1 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、磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を科学目的とした衛星計画で、磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアを観測対象とし、粒子加速場所の特定、加速の時間発展の調査、加速の特徴の把握を目指す。そのために、新機軸の観測の実現、新しいモデルの構築、関連分野との連携という3つの手法を取る。

観測では、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有する「軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測」と、時間・エネルギー分解能と偏光測定能力を有する「硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測」を行う。これらは、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器を用いて実現する。これまでの太陽フレア観測は、ダイナミックレンジ不足によりエネルギー解放領域（最有力の加速領域候補）が十分に見えていない上、3つの分解能の同時達成が不十分で、高エネルギー帯域の偏光測定も未実施であることを考えると、PhoENiX が初めて真に粒子加速の理解に迫る計画であると言える。本計画では、硬X線の2次元集光撮像分光観測により、加速中の電子が存在する場所、時間を同定する。そして、軟X線の2次元集光撮像分光観測から、加速の原因となっている物理過程の把握を行う。加速原因の候補としては、磁気リコネクションが生み出す強電場・衝撃波・プラスモイド・乱流などが想定される。これらはスペクトルから得られる物理情報を用いて同定する。また、硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測により、加速方向の非一様性、加速電子の最高到達エネルギー、加速電子が太陽表面に到達するまでの時間などを測定することで、加速電子の特徴を調査する。

また、観測で得られた知見を深めるために、太陽フレア環境を生み出すMHDスケールと粒子の運動を支配する運動論スケールを融合したモデル計算を実施し、加速粒子の振る舞いを推定する。そして放射モデルを介することで、観測との比較を可能とする。

これらの取り組みは、粒子加速を研究する関連分野の各々の強みを活かして実施する。さ

らにその成果を分野間で還元・融合することで、宇宙科学全体の発展にも貢献する。

本研究は衛星計画（JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画の枠組みが第一候補）を軸とし、第 26 太陽活動周期の前半から極大付近にかけて（2030 年代初め～半ば）の実現を目指している。

学術的な意義

磁気リコネクションは、磁力線がつなぎ変わることによって磁場中に蓄えられた磁気エネルギーを爆発的に解放、急速に運動・熱エネルギーに変換するプラズマ中のプロセスである。この磁気リコネクションは、実験室からマグネターまで実に 30 桁以上のエネルギー範囲に及ぶ多様な爆発現象を引き起こすことができ、宇宙における爆発現象の主要な駆動機構の一つと考えられている。そして太陽フレアは、この磁気リコネクションによって駆動されていることが確立している例の一つである。これは太陽が、磁気リコネクションとそれが生み出す構造を、空間分解・時間分解して観測できる唯一の天体现象であり、かつ観測とモデルで強く制限された 3 次元磁場構造のもとで物理を議論できることから、観測と理論の親和性が高く、その両輪で物理を議論できるためである。観測技術、理論計算はともに進歩しており、今後、Solar-C(EUVST)などにより、太陽フレアで生じている磁気リコネクションの詳細な物理メカニズムにも迫ることが出来るであろう。

この様に理解が大きく進んでいる太陽フレアにおいて、未解決の重要課題として残っているのが粒子の加速である。太陽フレアは、磁気リコネクションを出発点とするエネルギー変換システムとも言える。具体的には、磁気リコネクションによって、強電場・衝撃波・プラズモイド・乱流・加速粒子など、マイクロからマクロなスケールにわたる多様なプラズマ構造がシステムとして生じ、その過程において磁気エネルギーが、プラズマの加熱（熱エネルギー）・プラズマの塊の放出（磁気流体の運動エネルギー）・個々の粒子の加速（粒子の運動エネルギー）などに変換される。そして注目すべきは、太陽フレアは解放した多くのエネルギーを粒子の加速に費やすことが出来る大変優秀な加速器であるという事実である（様々な手法で見積もりがなされており幅はあるが、おおよそ数十%以上のエネルギーが加速に費やされていると見積もられている）。そして、この加速粒子のエネルギーが最終的に熱や放射に変換されたものが、一般的に知られる太陽フレアの姿である。つまり、粒子加速の理解は、太陽フレアを理解する上で欠かすことのできないキーストーンである。しかし粒子加速機構の解明は容易ではない。まず、太陽フレアは多様なプラズマ構造を生み出し、その各々がエネルギーの変換器（加速器）として作用可能である。更に、この加速器を生み出す MHD スケールと粒子の運動を支配する運動論スケールには、空間的にも時間的にも桁で異なるギャップがある（ $10^7 \sim 10$ cm vs $100 \sim 2$ cm, 10 秒 vs $\ll 1$ 秒）。つまり、加速器としての太陽フレアを理解するためには、多様な MHD 構造を取りまとめシステムとして理解した上で、粒子の運動を追跡する必要がある。しかし、これまでは観測も理論も、これに十分対応できていない状況である。

このような状況の中、観測技術の革新により、粒子の加速にアプローチ可能な波長帯域である X 線～軟ガンマ線帯域の観測において、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有する「軟 X 線～硬 X 線の 2 次元集光撮像分光観測」と、時間・エネルギー分解能と偏光測定能力を有する「硬 X 線～軟ガンマ線の偏光分光観測」が太陽観測史上初めて実現できる時代となってきた。一方、計算機技術の発展は大規模計算を可能とし、太陽フレアにおける粒子加速の数値シミュレーション (MHD スケールと運動論スケールの同時の取り扱い) に挑める状況となりつつある。これらの機運に乗り、世界に先駆けて観測・理論の両輪で粒子加速という太陽物理学における未解決の重要課題に挑むのが PhoENiX 計画である。

また、磁気リコネクションと粒子加速はともにプラズマにおける普遍的な現象であり、太陽物理学だけでなく、高エネルギー宇宙物理学、地球・惑星磁気圏プラズマ物理学、実験室プラズマ物理学にも共通する科学研究テーマである。太陽フレアにおける粒子加速研究の発展は、これらの分野への波及効果も期待できる。

加えて、PhoENiX の観測は粒子加速のみならず、加熱現象 (コロナ加熱、Pre-flare heating など) や噴出現象 (ジェット、CME など) 等々の研究にも威力を発揮する。紫外線分光観測を行う Solar-C(EUVST)とは相補的なデータを取得することができ、Solar-C(EUVST)で発展した科学研究の継続性・発展性も担保できる。

以上のように、PhoENiX 計画は、科学的価値・先端性・波及効果などで高い意義を有する。そして太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表において、2019 年版で太陽物理学分野の主要課題の一つとして挙げられていた「プラズマ爆発現象 (フレア・粒子加速) の理解」や、2022 年版 (本ドキュメント) で太陽物理学にて解くべき大きな課題 (図 4) として挙げられている「高温でダイナミックな太陽外層大気・太陽風の生成メカニズム」および「大規模太陽フレアメカニズムの解明と予測の基礎構築」に挑むものである。特に粒子加速については他の観測手段にない独自の貢献が可能である。

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粒子加速の研究では、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、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 が観測を開始する。ただし、これらの装置は「すだれコリメータ式」の硬 X 線望遠鏡であり、これまでの観測の継続に留まる。

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 クラスのフレア) の解析で大きな成果を挙げている。ただし、観測するのは MeV 帯域の電子の情報であり、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。またダイナミックレンジ不足、空間分解能不足も指摘されている。

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。FOXSI-4 計画 (FOXSI の 4 回目の飛翔計画で、2024 年春の打ち上げ予定) は、NASA では最高評価の Excellent で採択済みであり、日本では JAXA 宇宙科学研究所の小規模計画 (2020 年度公募) として採択されている。PhoENiX はこの 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(EUVST)が推進されている。Solar-C(EUVST)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高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 年代前半の計画として推進する PhoENiX では、Solar-C(EUVST)で得られる知見を活用しつつ、粒子加速研究をサイエンスの軸に据え、太陽コロナにおけるエネルギー解放現象もサイエンスの対象とし、Solar-C(EUVST)からのサイエンスの継続性にも留意する。

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。

社会的価値

太陽は人類に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 (加速された粒子) 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、本計画が目指す粒子加速過程の理解は、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。

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、PhoENiX 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ミッションであり、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。

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。本計画の推進において、現時点でも既に新たな技術の獲得がなされており、今後も更なる工学・産業分野への波及効果が期待できる。

5. 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。

5.1 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4000m²の平面に327MHz帯域に感度を持つダイポールアンテナを敷き詰めた2次元平面フェーズドアレイアンテナで構成され、各ダイポール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x4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を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 のリアルタイ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。

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 4000m² の平面に 327MHz 帯域に感度を持つダイポールアンテナを敷き詰めた 2 次元平面フェーズドアレイアンテナで構成される。各ダイポールアンテナ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、それぞれ現在飛行中である。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 年代半ばに打ち上げ予定の Solar-C(EUVST)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(EUVST)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、0.2-1.0AU の領域を伝搬する加速後の太陽風に感度を持つ 327MHz 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。

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ど、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するのに役立ち、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。

主要キー技術

(デジタルビームフォーム)：最大の技術的開発要素は、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する。この装置をトーナメント方式で多数接続することで、1024 個の入力を処理できる大規模デジタルアレイを実現する。

(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ダイポールアンテナ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ダイポールアンテナは名古屋大学で開発運用してきた 327MHz 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。

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な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。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最初の建設基地局である富士観測所に全体の数%の規模のアレイを開発する計画を開始した。

5.2 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する基盤となる光球・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(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していく。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(B_z)を、太陽磁場の観測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。さらに日震学観測を使うことで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による磁場生成の研究に貢献する。

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、Astro 2020 Decadal Survey 報告書では、狭視野ながら超高解像度で観測を行う DKIST と相補的に太陽全体をシノプティック観測する重要性が指摘されている。NSO が ngGONG の設計検討を 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 2023-2025 年に行い、開発・建設を 2026 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、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。

5.3 次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置 NIRTF

研究の概要

口径 4m 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、「近赤外線の広視野偏光分光観測装置 NIRTF (Near InfraRed Tunable Filter)」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 4m)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、近赤外線の大視野偏光分光観測装置 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、おお目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。磁場によるスケール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大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 NIRIS に相当し、コロナ観測では大口径望遠鏡版の 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 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(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のための技術と国際協力で開発を進め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 の開発には、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 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 の実施期間である 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(EUVST)が打ち上がっており、Solar-C(EUVST)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(EUVST)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。

6. 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。

6.1 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 1m 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 35km 以上)を約 1 週間飛行することで、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 度飛行観測を行い、光球の偏光撮像観測で数多くの成果をあげた。2022 年に計画する 3 度目の観測(SUNRISE-3)では、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する。さらにゴンドラを改良することで高い指向安定度の実現を図る。

目的と学術意義

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%, 1σ)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

しているものである。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マ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 の偏光分光観測で、大口径地上望遠鏡と競える成果を出し、光球彩層の動的現象の研究を進展させることができれば、極大期近くの 2027 年頃に SUNRISE-4 として再フライトさせ、Solar-C(EUVST) と協調観測を行う可能性を拓くことができる。気球観測のメリットは、フライト後回収し再飛翔させる、もしくは新しい観測装置に入れ替えることができることにある。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。

6.2 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4

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-4 は、世界初となる太陽フレアに対する X 線集光撮像分光観測(0.5keV~30keV)を行う。その目的は、磁気リコネクション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。本計画は、米国 NASA の観測ロケットを用いて 2024 年春に実施予定であり (NASA に最高評価の Excellent で採択済み)、日本では JAXA 宇宙科学研究所の小規模計画 (2020 年度公募に採択) として準備を進めている。

目的

本計画が目指す科学目標は、磁気リコネクション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。第一に、太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表の2019年版には太陽物理学分野の主要課題の一つとして「プラズマ爆発現象（フレア・粒子加速）の理解」が、2022年版（本ドキュメント）には太陽物理学にて解くべき大きな課題（図4）として「高温でダイナミックな太陽外層大気・太陽風の生成メカニズム」および「大規模太陽フレアメカニズムの解明と予測の基礎構築」が挙げており、FOXSI-4はこれに挑むものである。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、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（【1】の持つ意義）。そしてこのデータを用いることで、太陽フレアを用いた磁気リコネクション・粒子加速研究において大きな実績を積むことができ（【2】の持つ意義）、定常的な太陽フレア観測を実現するための衛星計画（PhoENiX）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リコネクション・粒子加速の比較など、新しい研究基盤が構築できる（【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。またFOXSI-4は、観測時間に制約のある観測ロケット実験を用いた世界初の計画的な太陽フレア観測実験であり、フレア発生と同時に打ち上げ、ピークから後半にかけての約5分間を狙う。そこで、日本が進める太陽フレア予測研究の成果も活用しながら実施する計画であり、新しい太陽フレア観測（ピークから後半にかけて）のプラットフォーム構築の観点からも高い意義を持つ。

7. 2030年代以降に向けたアイデア

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。

7.1 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ことがこのミッションの

目的である。2.4.5 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。

タイムラインとしては、2024年ごろにワーキンググループ設立、2027年プロポーザル提出、2037年ごろの探査機打ち上げを目指している。コアメンバーで日震学手法を用いて、研究成果を創出する試みは2021年から開始しているが、2023年には講習会を開始する予定である。

主要キー技術

本ミッションは、それを実現する探査機に必要となる工学技術においてもチャレンジングな側面を持つ。検討にあたっては、特に以下の点が成否を左右する重要な技術的課題であると認識する。

- a. 軌道計画と推進系の成立性：観測軌道に宇宙機をできるだけ速やかに投入するための軌道計画、および軌道を実現するための電気推進系の成立性。
- b. 大消費電力を支える太陽電池パドル・電源系の開発：観測軌道を迅速に達成するために、電気推進系には大きな合計推力が求められる。この大消費電力をまかなうための太陽電池パドル・電源系の成立性も、重要な技術課題である。
- c. 通信回線の確保：観測データは主に画像となるため、大きなダウンリンクレートが必要となる。通信回線をできるだけ確保するため、地球と機体とが黄道面同経度を保持する軌道をとることを想定するが、1 AU 程度の距離でこの回線レートを確保できるかは検討課題である。

7.2 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、Ly α 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) といった可視光での観測も検討する。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氣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ようとしている DKIST 超大型望遠鏡（ハワイ，口径 4 m ϕ ）で目指しているところでもある。DKIST 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 854 nm では彩層中部までしかアクセスできない、He I 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。一方で 2022 年は、大気球 SUNRISE-3 に搭載された SCIP による Ca II 854 nm の観測が予定されている。DKIST 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、紫外線波長帯の Ly α 線といった一部のスペクトル線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。

Appendix

太陽研究の将来計画を議論するため、2021年9月21日にシンポジウム「太陽研究:30年代の科学研究戦略」を開催した。次ページからシンポジウムのアナウンスと、シンポジウムでの議論を有益なものとするためにシンポジウム前に用意していただいた White paper をそのまま掲載する。これらの資料およびシンポジウムでの議論は、本文書執筆の際に参考にした。White paper の執筆者およびシンポジウムにて議論して頂いた参加者に感謝する。

シンポジウム「太陽研究：30年代の科学研究戦略」

趣旨:

次期太陽観測衛星 Solar-C(EUVST)が2026年末打上げを目指して準備が進められている中で、2020年代後半からの太陽研究をさらに実りあるものにするには、Solar-C(EUVST)の分光観測と数値シミュレーション・地上観測や内部太陽圏研究(PSPやSolar Orbiter, BepiColombo等)の連携の深化をどのように図ることが重要であろうか?そして、Solar-C(EUVST)後の時代、すなわち2030年代には、多様な研究の側面を持つ太陽研究は、周辺関連分野と連携して、どのような将来戦略や協働を描くべきであろうか?これらの観点を中心として、本シンポジウムにてコミュニティ規模の討議を行います。シンポジウムで活発な討議ができるように、太陽研究者連絡会(太陽研連)は、開催に先立って「30年代の科学研究戦略」White Paperを募集し、9件のWhite Paperが寄せられました。本シンポジウムでは、White Paperとして寄せられた10-20年先に太陽科学が取り組むべき研究テーマおよびその実施に向けた研究アイデアを中心に討議を行うことで、その後の検討を促進させることを目的とします。

開催日時: 2021年9月21日(火) 10:00-18:00

開催方法: Zoom

下記より参加者登録をお願いします。参加のためのID等のメールが届きます。

<https://us02web.zoom.us/meeting/register/tZ0udeyuqzsuHdO0R1-oH4VmC5E2YmwyG3YF>

主催: 太陽研究者連絡会

共催: JAXA 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (助成「太陽スペース研究シンポジウム」)

世話人: 清水敏文(ISAS/JAXA, 代表), 今田晋亮(名古屋大学)、勝川行雄(国立天文台)、
横山央明(京都大学)、浅井歩(京都大学)

アジェンダ:

10:00-10:05 趣旨説明 世話人

セッション「高解像度観測による太陽プラズマ研究」 座長: 今田

10:05-10:25 超口径太陽望遠鏡時代に向けた次世代焦点面装置・近赤外線広視野偏光分光装置
NIRTFの開発 浅井歩(京都大学)

10:25-10:45 紫外線偏光分光観測によるコロナ直下までの磁場の網羅的測定
石川遼子(国立天文台)

10:45-11:05 UV 偏光分光観測による太陽活動領域の進化・不安定化・エネルギー解放機構の理解
川畑佑典(国立天文台)

11:05-11:25 大口径光学望遠鏡で迫る光球・彩層におけるエネルギー蓄積・伝播・散逸過程
大場崇義(国立天文台)

11:25-12:05 質疑・討議
地上大口径望遠鏡と宇宙望遠鏡、それぞれの科学の到達点/目的の差別化

NIRTF から宇宙観測への科学の戦略的ステップアップのシナリオ

昼休み

セッション「太陽全面地上観測網の充実と太陽圏科学・宇宙天気研究」 座長: 浅井

13:00-13:20 太陽観測次世代国際ネットワーク計画 ngGONG への参画
勝川行雄 (国立天文台)

13:20-13:40 次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現
岩井一正(名古屋大学)

13:40-14:00 宇宙天気予測技術開発のための基礎研究
塩田大幸, 西塚直人(NICT)

14:00-14:40 質疑・討議
各計画の目指す科学的目標と相補性
宇宙天気予測や太陽圏科学との連携に向けた課題優先順位と戦略
地上観測網と宇宙観測の連携、それぞれの役割

休憩

セッション「太陽フレアと粒子加速研究」 座長: 横山

15:10-15:30 太陽フレアに対する X 線集光撮像分光および軟ガンマ線偏光分光観測を軸にした
粒子加速研究 成影典之(国立天文台)

15:30-16:10 質疑・討議
太陽コミュニティが母体になるには
粒子加速にどこまで迫れるか

セッション「太陽周期活動の解明のための太陽内部探査」 座長: 清水

16:10-16:30 太陽内部探査によるダイナモ問題への挑戦
堀田英之(千葉大学)

16:30-17:10 質疑・討議
科学的課題の絞り込み (6 か月連続観測の必須性など)
Solaris 等海外類似計画との違い
シミュレーションで優先的に解決すべき課題は

17:10-18:00 全体討議/まとめ 座長: 清水
今後の検討を促進させるために
RFI の改訂(長期戦略, 地上観測網など)に関して
周辺分野との連携

情報:

White Paper は以下太陽研連 HP (パスワードは太陽研連 HP と同じ、忘れた方は事務局まで)にて閲覧
できます。シンポジウム前に一読いただき、討議の参考にご活用ください。

<https://jpsc.sakura.ne.jp/documents/SolarPhysics2030s/>

以上

1. 提案タイトル

太陽内部探査によるダイナモ問題への挑戦

2. 提案者(名前、所属、Email)

堀田英之(千葉大学)、hotta@chiba-u.jp

3. 共同提案者リスト(名前、所属)

鳥海森(宇宙航空研究開発機構)、今田晋亮(名古屋大学)、阿南徹(National Solar Observatory)、飯島陽久(名古屋大学)、関井隆(国立天文台)、鳶田遼太(東京大学)

4. 研究の概要(500字以下)

本研究の目的は、太陽内部の熱対流、大規模流れ、磁場生成の現場を多点衛星観測によって解明する事である。太陽の黒点数は11年の周期を持って変動している。これは太陽内部の磁場が周期的に変動しているためと考えられているが、いまだにその周期維持のための物理メカニズムは明らかになっていない。周期活動を駆動するような磁場は太陽対流層の深い部分で生成されていると考えられており、活動周期の謎解明のためには、この領域の流れ場を詳細に測定することが必要となる。このような深い部分の流れ場を観測するために、本研究では日震学を採用する。日震学で太陽の深い領域を探索する場合は、その領域を伝わる音波の情報を得るために、離れた複数の観測点が必要となる。また、音速に比べて非常に遅い太陽深部の流れを精度高く見積もるために長期間の定常的な観測が重要となる。本研究では、この目的を達成するためのミッションを提案する。

また、国のフラグシップのスーパーコンピュータを使うような大規模数値シミュレーションを並行して発展・実行していく。現実になるべく忠実な太陽の状況を数値的に用意し、限られた観測データを最大限活用する方策を進めていく。

5. 背景の説明

太陽の黒点数(面積)は11年の周期を持って変動している。この周期活動を維持する物理メカニズムは未だに明らかになっていないが、太陽内部の乱流(熱対流)・子午面還流・差動回転の磁場生成機構(ダイナモ作用)が要因と考えられている。よって、これらの速度場を観測的に明らかにすることが周期の謎解明に向けての大きなステップとなる。これまでも日震学を用いた太陽内部探査は30年に渡って続けられ、大きな進展を見せており、重力成層構造や差動回転についてはその分布の詳細が明らかになっている(Basu et al., 1996, Schou et al., 1998)。子午面還流や熱対流についても、太陽内部の浅い部分のみの分布が得られている。一方で、ダイナモ作用を考える上で重要な太陽対流層の中部より深い部分の流れについては、いまだに大雑把な分布さえ合意が得られていない。例えば、Zhao et al., 2013では、対流層内部で半球ごとに二つの循環セルがあるような子午面還流を見積もっているが、Gizon et al., 2020では一つのセルであると結論づけている。つまり、これまでの観測では、太陽対流層の底で子午面還流が極向きか赤道向きかさえも決定することはできていない。Stejko et al., 2021では、この二つの子午面還流の形状を区別するだけの精度は現在では達成されていないとしている。深い部分の流れ場を推定するためには、太陽球面上の十分離れた地点を長期間観測することが重要となるがいまだに達成されていない。

一方で、ここ20年で数値シミュレーションによる太陽対流層研究も大きく進展してきた。3次元の太陽全球殻を覆うような大規模磁気熱対流計算が我が国でも京や富岳などの国のフラグシップシステムで行われており、徐々に太陽内部の状況を再現することが可能になってきた。しかし、数値シミュレーションと観測の間には熱対流速度や差動回転分布に大きな乖離があり、「熱対流の難問(Convective conundrum)」と呼ばれて大きな謎となっている(Hanasoge et al., 2012など)。

このように、現状では太陽深部の熱対流については速度についても全くわからなくなってしまっている。恒星の熱対流速度は古典的には混合距離理論によって見積もられてきたが、これを信頼することができなくなってしまったために、どのようにエネルギーが運ばれているのか、熱対流と自転の時間スケールの比はどうなっているのかなど基本的な問いに答えることができていない。熱対流は自転の影響を受け、角運動量を運ぶことで差動回転・子午面還流のような大規模流れを形成したり、11年周期を維持するような大規模磁場を形成したりする。よって、熱対流の情報を知ることが11年周期の

問題を解く上で本質的であると言える。

6. 科学目標

本研究の科学目標は、多点からの長期間観測により太陽対流層の以下の流れ場を解明することである。

a. 子午面還流、b. 熱対流速度・温度擾乱。それぞれの意義について説明する。

a. 子午面還流：子午面還流を測ることは二つの意義がある。

一つは、黒点サイクルの周期に関わる側面である。磁束輸送ダイナモという枠組みでは周期の長さはほとんど子午面還流の速さのみで決まる(Dikpati & Charbonneau, 1999)。よって、子午面還流の速さ・形状を正確に決定することは周期活動の物理機構を考える上で重要である。

二つ目は乱流による角運動量輸送に関わる側面である。太陽対流層内部では、子午面還流による角運動量輸送と乱流による角運動量輸送が釣り合った状況が達成されていると考えられている。観測的に乱流による角運動量輸送を完全に決定ことは困難を極めるが、上の事実を利用すると子午面還流を正確に測ることで乱流による角運動量輸送の概要を掴むことができる。乱流による角運動量輸送は、理論的には熱対流と自転の関係で決まる。この関係は、乱流による大スケールダイナモへと直接関係するものである。子午面還流→乱流による角運動量輸送→ダイナモ作用と直接につながるものである。子午面還流はダイナモ機構を理解する上で多方面に意義のある観測量であると言える。

b. 熱対流速度・温度擾乱：太陽内部の熱対流の空間スケール・速度を求めることは太陽内部のエネルギー輸送、角運動量輸送、ダイナモ機構を理解する上で本質的である。これまでに太陽表面から 50 Mm ほどの深さの領域までの熱対流速度の上限は求められてきた。本研究では、実際にダイナモ作用に重要と考えられる深さ 100 Mm 以上の領域において、熱対流のスケールごとの速度を求めることを目標とする。熱対流速度はこれまでに予想されているよりも非常に遅い可能性があり、提案する観測では測ることができない可能性もある。その場合も、速度の上限値を決めることは大きな意義を持つ。特に磁場が活発に生成されている領域では、熱対流速度がローレンツ力により抑えられている可能性があり、磁場生成の現場特定にも重要な観測量である。また、いわゆる $\alpha\Omega$ ダイナモの枠組みでは、ダイナモの周期は乱流拡散の時間スケールで決まる。熱対流の時間スケールを決めることで上記の子午面還流と合わせて太陽ダイナモの基本メカニズムに迫ることを目標とする。

また、これまでも Hanasoge et al., 2012 など指摘されているように、太陽の熱対流は古典的な混合距離理論に従っていない可能性が高い。その場合、どのように熱対流が太陽放射分のエネルギーを運んでいるかは大きな問題である。可能性としては、1. 温度擾乱が大きい。2. 速度場と温度場の相関が非常に高い。の二つが考えられる。熱対流に伴う温度擾乱を測ることで、この問題を解決する。温度擾乱を測ることで、速度場を測ることができなかった場合も、温度擾乱から熱対流速度の下限を決定することができる。混合距離理論は、恒星の進化モデルに広く使われているモデルであり、この改訂は恒星物理学またそれを利用した銀河系進化論など広い意義がある。

また、上記と並行して理論シミュレーションによる太陽ダイナモ問題の理論的解決を目指す。太陽全球を覆いつつ、放射層と対流層の境界から太陽光球から上空数百 km 程度までを包括した計算を数十年分実行する。限られた観測データから理論的にエネルギー輸送・角運動量輸送・ダイナモ作用の物理機構を決定づけるための根拠を提供するとともに、日震学における逆問題を解くためのデータとしても使う。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

2.4.5. 理論シミュレーション研究

2.4.8. その他(上記で述べられていない萌芽的研究)

太陽活動周期の問題、対流層の大規模流れ生成の問題、エネルギー輸送の問題は太陽を理解する上で基本的な要素であるが、「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版) 2.4 長期的戦略の考え方」には含まれていなかった。科学的意義の重要性、他分野への波及効果を考えて、長期的戦略に加えることを提案する。太陽ダイナモの理論シミュレーションについては、2.4.5 に含まれており大きな変更はないが、より観測計画と密に実行することにより、観測結果を最大限に活かすような連携を進める。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

観測：科学目標を達成する上で必要となる観測量と要求性能を下の表にまとめた。ノミナル値は黒字、最低限必要な量は青字で示した。

科学目標	日震学で診断する物理量	観測量	観測時間	ケータ ンス	視野	空間サン プリング数	衛星軌道
子午面還 流	対流層の底から 表面付近までの 速度 (予想) 数 m/s	光球視線速度 光球輻射強度	20 年 12 年	30 秒 60 秒	全面 全面	1024x1024 128x128	黄道面から軌道 傾斜角が45度 以上
熱対流	対流層の底から 表面付近までの 速度 (予想) 50 m/s	光球視線速度 光球輻射強度	11 年 半年	30 秒 60 秒	全面 全面	1024x1024 128x128	任意の方向に地 球から 45 度以 上離れる
温度擾乱	対流層の底から 表面付近までの 温度擾乱 (予想) 1 K	光球視線速度 光球輻射強度	11 年 2 ヶ 月	30 秒 60 秒	全面 全面	1024x1024 128x128	任意の方向に地 球から 45 度以 上離れる
表面磁場	(位置合わせ)	光球視線磁場強度	N/A	1 時間	全面	1024x1024	N/A

地球と異なる方向から太陽を観測する衛星を打ち上げる。地球方向からの観測と組み合わせ、対流層内部を音波が伝わる時間を測定し、対流層内部の流れ及び温度を診断する(ステレオ日震学)。この手法を用いると、対流層深部の流れを 5 m/s の精度で測定するために、6 ヶ月の観測を要すると推定されている (Löptien et al. 2015)。対応する温度擾乱測定精度は、音速と温度の関係から、0.1 K と推定される。表にある必要な観測時間は、太陽内部診断の精度が観測時間の $-1/2$ 乗で向上すること (Gizon & Birch 2004) や過去研究 (Braun & Birch 2008, Stejko et al. 2021) をもとに導出した。対流層深部の情報を得るためには、地球から45度以上離れた方向から太陽を観測する必要がある (e.g. Stejko et al. 2021)。なお、対流層深部の流れ構造の空間スケールは大きいため高空間分解観測の必要性は少ない。ステレオ日震学による測定精度は測定対象の空間スケールに依存するので、文献値と本研究で必要な値が異なる可能性がある。これらの詳細な検討は今後行う。

理論：理論シミュレーションでは、太陽対流層を忠実に再現しつつ、直接観測と比較可能なデータの生成を目標とする。そのためには、太陽全球を含んだ上で対流層と放射層の境界領域から光球から数 100 km までを包括した計算領域を用意する必要がある。その上で、太陽活動周期を包括できるように 20 年ほどの計算を実行する。格子点は 1500 億点、時間ステップは 5 億回ほどが必要になると見込んでいる。2021 年現在に富岳で実行可能な最大の計算の 300 倍以上の計算規模となる。ムーアの法則が破れかかっていることを考えても 2035 年までには十分実行可能な計算である。データは詳細に保存し、本研究計画の観測を最大限活かす。

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

本研究で目指すステレオ日震学を実施する上で、解析手法の新規開発要素は少ない。また、観測装置としては、既存の技術を活用可能である。

太陽内部探査を目標とする計画として、これまで複数の黄道面離脱・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: Müller et al. 2020) は、金星・水星スイングバイにより太陽距離 0.28-1.02AU、軌道傾斜角 18° (ノミナル運用) から 33° (延長ミッション) に達する計画である。マグネトグラフを含む複数のリモートセンシング装置を搭載するが、観測期間は北極域・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積分を必要とする科学課題の実現は困難である可能性がある。

一方、JAXA の戦略的中型ミッションとして提案された SOLAR-C Plan-A では、(1)約 1AU の太陽距離を保ったまま地球スイングバイにより傾斜角 45° まで遷移する軌道と、(2)木星スイングバイによる

極軌道 (Ulysses に類似した軌道) が検討された。このうち、(1)は地球との通信速度を確保しつつ長期にわたって極域を観測できるメリットを有する。

NASA の MIDEX 計画として提案された Solaris (Phase-A 検討中) は、(2)の軌道により緯度 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 1.1-2.2AU) を要求する。そのほか、(3)0.48AU (周期 4 ヶ月、すなわち地球と 3:1 共鳴の関係) において傾斜角 75° まで遷移する POLARIS (Appourchaux et al. 2009) ・ Solar Polar Imager (Liewer et al. 2009) ・ SPDEx (Voulidas et al. 2009 : 4 機の編隊飛行) 等の計画が存在する。一方、ミッションを実現する上での工学的課題として、電力確保、超長距離通信、高出力電気推進、深宇宙探査用地上局の整備などが挙げられる。このうち、薄膜軽量太陽電池パドルやイオンエンジン技術などは、JAXA 公募型小型 2 号機に選定された深宇宙探査技術実証機 DESTINY+にて実証予定である。

なお、太陽内部探査において、赤道～低緯度の深部のみを対象とする場合には、黄道面内で地球を離脱する軌道 (例えば L5 軌道) も候補となりうる。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

・適切な軌道の選択とデータ伝送手法の開発

日震学を用いて上記のダイナモ研究を行うためには、太陽全面視線速度の観測を時間分解能 1 分程度、空間分解能 15-30 秒角で観測する必要がある。地球周回軌道以外の衛星軌道を選択した場合、このデータをどのようにして地球へ伝送するかがこのミッションの肝になる。

以下の 2 つの方向で検討を進める予定である。

-地球との距離があまり遠くならない衛星軌道でサイエンスを達成できないかの検討

-最新のデータ圧縮・伝送技術を調査しデータ伝送をどこまで増やせるかの検討

・日本における日震学研究の充実

日本において太陽内部の研究者は少ない。中でも日震学を行っている研究者はほとんどいないので、海外の研究者にも参加していただくなどして、太陽内部特に日震学研究を行う研究者の育成を強く推進していく。

・他コミュニティとの連携

地球周回軌道以外の衛星軌道を選択した場合、その軌道の特徴を生かし、高空間分解能磁場望遠鏡 (MDI~HMI 程度) による極域磁場観測、直接その場観測の装置による黄道面外太陽風乱流観測、総放射モニターによる極域温度計測、コロナグラフによる CME モニター等の研究課題を吟味し、広く太陽圏の研究者コミュニティの参加を検討する。

また、より広いコミュニティからの支援を受ける更なる可能性として黄道面脱出による黄道光を避けた宇宙背景放射の近赤外での観測も検討に加えている。

参考文献

1. Appourchaux, T., et al. 2009, *Experimental Astronomy*, 23, 1079
2. Basu, S., et al. 1997, *MNRAS*, 292, 243 Braun, D. C., & Birch, A. C. 2008, *ApJL*, 689, L161
3. Dikpati, M., & Charbonneau, P. 1999, *ApJ*, 518, 508
4. Gizon, L., & Birch, A. C. 2004, *ApJ*, 614, 472 Gizon, L., Cameron, R. H., Pourabdian, M., Liang, Z.-C., Fournier, D., Birch, A. C., &
5. Hanson, C. S. 2020, *Science*, 368, 1469 Hanasoge, S. M., Duvall, T. L., & Sreenivasan, K. R. 2012, *Proceedings of the National Academy of Science*, 109, 11928
6. Liewer, P. C., Alexander, D., Ayon, J., Kosovichev, A., Mewaldt, R., Socker, D., & Vourlidas, A. 2009, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 224, 1
7. Löptien, B., et al. 2015, *SSRv*, 196, 251
8. Schou, J., et al. 1998, *ApJ*, 505, 390
9. Stejko, A. M., Kosovichev, A. G., & Pipin, V. V. 2021, *ApJ*, 911, 90
10. Vourlidas, A., Liewer, P. C., Velli, M., & Webb, D. 2018, *arXiv e-prints*, arXiv:1805.04172
11. Zhao, J., Bogart, R. S., Kosovichev, A. G., Duvall, T. L., J., & Hartlep, T. 2013, *ApJL*, 774, L29

1. 提案タイトル

大口径光学望遠鏡で迫る光球・彩層におけるエネルギー蓄積・伝播・散逸過程

2. 提案者 (名前、所属、Email)

大場崇義 (国立天文台, takayoshi.oba@nao.ac.jp)

3. 共同提案者リスト(名前、所属)

岡本文典 (宇宙科学研究所), 堀田英之 (千葉大学), 飯田佑輔 (新潟大学), 勝川行雄 (国立天文台), 川畑佑典 (国立天文台)

4. 研究の概要(500字以下)

太陽大気の形成過程およびその活動を決定する基礎的なエネルギー変換過程を理解することを目的とする。基本的な磁気要素である磁束管は大気中に無数に存在しており、それらが大局的な構造を形成しダイナミクスを決める。太陽表層大気で生じている対流運動に蓄積された運動エネルギーがなんらかの形でエネルギー変換・輸送・散逸過程を経て高温な彩層・コロナ、太陽風を形成していると考えられている。これらの理解のためには、上述した一連のエネルギー変換過程を理解することが重要である。これには「高空間分解能、時間分解能/高精度観測の両立、多波長観測」をすべて実現することが必要であり、大口径光学望遠鏡によってこの科学課題の達成を目指す。

5. 背景の説明

太陽大気構造やその活動の理解には、微細スケールにおける磁気要素のダイナミクスを理解することが重要である。Hinode/SOTをはじめとする高精度な偏光分光観測により、光球において200 km程度の微細な磁場構造を捉えた。これらの磁気要素がどのような役割を果たして上層大気構造を形成し、大気活動を駆動しているかを理解することが目下の課題である。特に最近注目されているのは、磁気流体波を介した大気加熱機構である。近年のスペース・地上望遠鏡により、彩層・コロナ中における磁気流体波の伝播が観測され (Okamoto et al. 2007, Tomczyk et al. 2007), エネルギー散逸の兆候も観測されている (Okamoto et al. 2015)。このようにエネルギー伝播・散逸過程の研究は進みつつある一方で、太陽表面におけるエネルギー注入過程は捉えられていないのが現状である。次のステップは、「光球において生じている乱対流運動が、磁束管に対してどのようにエネルギーを注入しているのか」を理解することである。

光球の乱対流運動は、動的であり微細な空間構造を形成している。粒状斑は熱いガスが湧き出している領域であり、間隙は冷たいガスが沈み込んでいる領域に対応している。ガス運動によって間隙に履き寄せられた磁束管は絶えず乱対流によって揺さぶられており、運動エネルギーが注入されていることは想像に難くない。エネルギー伝播に寄与する磁束管の多くは太陽表面から上空に向かって伸びているため、磁束管を揺する乱対流運動の水平速度場を診断することが重要となる。つまり、乱対流運動から磁束管へのエネルギー注入、そして上層大気での散逸に至る一連のエネルギー変換過程を捉えることが大気加熱の理解には必須である。しかしながら、これらを捉えるには下記3つの観測的課題の達成が求められる。

課題[1] 乱対流運動の基本構造を空間分解すること

磁束管は間隙に履き寄せられるため、間隙における水平ガス速度場を導出する必要がある。水平速度場の取得は、時系列の撮像観測データを用いた局所相関追跡法によって決定されてきたが、有効な空間スケールは1,000 km以上である (Malherbe et al. 2018)。一方、間隙の典型的な空間スケールは0.4秒角 (~300 km) であり、間隙における水平速度場を捉えることは困難であった。この問題は、ドップラー速度場解析を行うことで解決しうる。ただし、視線方向速度に水平ガス運動成分を含めるためには太陽縁での観測が必要であり、太陽表面の構造を斜めから観測することになるため実質的な空間分解能が低下する。太陽縁観測において水平ガス運動を有意に捉えるためには、太陽面中心から60度以上の領域 ($\cos \theta < 0.5$) の観測が要求される。そしてこの場合、太陽縁における間隙の空間構造は0.2秒角 (~150 km) となり、これ以下の空間分解能で偏光分光観測を行う必要がある。

課題[2] ダイナミクスを高時間分解能かつ高精度で捉えること

太陽大気の磁気活動は動的であるが、それに伴う偏光信号は微弱である。特に磁気流体波の振動による数ガウス以下の信号を捉えるためには、長時間の露光時間が必要である。一方、観測として時間分解能/偏光精度はトレードオフ関係にある。従来採用されてきたスリット観測方式は 1 次元空間情報しか得られないため、二次元空間情報を得るためには各スリット位置毎に観測を行う必要がある。そのため、露光時間を低減させて高時間分解能を得るか、時間分解能を犠牲にして高偏光精度を達成するかとの二択になる。Hinode/SOT によるスリット観測の場合、4.8 秒の露光時間で $1\sigma=10^{-3}$ を達成するが、1 つの粒状斑 (1.4 秒角) を掃くと 50 秒程度の時間分解能となる。一方で、光球におけるエネルギー変換過程を捉えるためには、高精度 ($1\sigma\sim 10^{-4}$)かつ高時間分解能 (10 秒) の両立が必要である。

課題[3] 光球-彩層の物理量(温度・速度場・磁場)を同時に導出すること

光球磁場のキャンセレーションと彩層ジェット発生との関連など、光球の運動と彩層活動の因果関係が定性的に認められるものは多い。一方、上述の課題で挙げた通り、速度場や磁場強度など、光球・彩層の物理量の測定には依然として困難が付きまとう。このことは、大気加熱を考える上で、いかなる光球の運動が波動などの彩層活動現象を作り出しているか、またその際どれだけのエネルギーが光球から彩層へ運ばれているか、あるいはどれほどの割合のエネルギーが熱化しているかといったことの理解を阻んでいる。異なる高度における物理量を正確に測定するためには、偏光計測も含めた多波長による光球から彩層の同時分光観測が不可欠である。

上記 3 つの課題に対し、すべての要求を満たす観測装置の実現が太陽大気現象の理解のためには必須である。第一に、大口径光学望遠鏡による高空間分解能の達成、次に多波長観測による光球と彩層のダイナミクスの同時把握、そして適切な空間視野を制御できる面分光装置が鍵となる。これにより、光球におけるエネルギー蓄積過程から上層大気におけるエネルギー解放過程まで、一連のエネルギー変換過程に迫ることが可能となる。

6. 科学目標

太陽大気中で生じている基礎的な物理過程である下記 2 つのエネルギー変換現象について理解する。

[1] 光球におけるエネルギー変換過程(運動エネルギー → 磁気エネルギー)

【a: 光球における水平ガス運動】

光球で生じている水平ガス運動に関する特徴付けを行い、速度場の振幅・空間分布・時間変動(ダイナミクス)を得る。水平ガス運動は磁束管へのポインティングフラックスを決定するうえで重要な物理量であり、上述した 3 つの特徴量は大気加熱機構に関する理論モデルの構築においても重要な境界条件となる(Suzuki & Inutsuka 2006)。一方、これまでの観測結果には多くの課題が残っている。最も基本的なパラメータである水平速度場の振幅値でさえコンセンサスが得られていない。観測結果から 1 km/s 以下から 2 km/s 以上まで様々な値が報告されている一方で(Müller et al. 2001, Oba et al. 2020)、数値シミュレーションによる理論大気モデルの値 (~3 km/s; Beeck et al. 2012) との乖離も大きい。ポインティングフラックスの観点からは最大で 1 桁変化することになる。粒状斑スケール以上の水平速度場は局所相関追跡をはじめとした解析によって高精度に得られていると考えられるが、前章の観測的課題で指摘したように粒状斑スケール以下の振る舞いは正確に捉えられていない。そこで、大口径望遠鏡による高解像度観測によって粒状斑だけでなく間隙スケールの水平ガス運動を捉える。

【b: 水平ガス運動による磁束管へのエネルギー蓄積過程】

光球の乱対流による水平ガス運動がどのように磁束管に作用することでエネルギーを蓄積するかを理解する。光球中では多様な流れ場が存在し、至る所で圧縮流や回転流が観測されている (Bonet et al. 2008, Matsumoto et al. 2010)。これらの流れ場が磁束管に作用することにより、磁気音波や Alfvén 波が励起されることが期待される。数値計算により、流れ場の特徴によって上層大気へのエネルギー輸送量および散逸高度が異なることが指摘されている(van Ballegooijen 2011, Vigeesh et al. 2012)。磁束管周りにおける流れ場および磁束管への作用を高い時間分解能・精度で捉え、蓄積されるエネルギー量を観測から見積もる。

[2] 彩層におけるエネルギー散逸過程(磁気エネルギー → 熱エネルギー)

光球の対流運動などを起源とするエネルギーが上空大気へいかに輸送され熱化するかを理解する。励起の例としての波動の場合、これまでの研究では周期数分の低周波波動が大きなエネルギーを持つとされているが (De Pontieu et al. 2007, Okamoto & De Pontieu 2011), 振幅の小さい周期 1 分以下の波動が正確に捕捉されているとはいえ、さらなる研究には高時間分解能 (1 秒), 高空間分解能 (0.1 秒角) の観測が必須である。地上観測では磁力線の振動を大気ゆらぎやスペckルマスキングによる影響と分離することが難しく、統計的研究の観点からスペース観測が唯一解である。これを達成することで、波動が持つエネルギーの周期依存性を明確にし、いかなる光球運動が特定の周期を持つ波動の生成に寄与しているのかをあらためて認識することができる。また、熱化過程の観点では、いかなるメカニズムが作用しているかが明らかではなく、ナノフレアや波動散逸にともなう温度・密度変化(多波長観測)、微小な磁場変化(彩層磁場測定)を捉えることが重要である。波動に伴う振動振幅をカバーする範囲、あるいはリコネクションに影響する 2 次元空間範囲(いずれも数秒角四方)全体を高い時間分解能 (10 秒) で押さえるには、スリット観測よりも面分光装置に利点がある。同時に、彩層磁場の観測は高い偏光精度が要求されるため、大口径かつ画質が安定するスペース観測が必要不可欠である。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

2.4.2.光球・彩層磁場診断による研究

「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019 年版)」における大口径光学望遠鏡の役割として彩層の高精度偏光分光観測の重要性が強調されている一方で、大口径望遠鏡で実現可能な光球研究のサイエンスの記述は十分になされていない。大気加熱機構の解明における光球観測の重要性は、彩層・コロナにおけるエネルギー解放現象の駆動元であるエネルギー注入過程 (運動エネルギーから磁気エネルギーへの変換) を捉えることにある。これまで観測されていないものであり、本提案で目指すターゲットの1つである。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

偏光分光観測を行う 1 m 口径の光学望遠鏡を提案する。観測波長域は紫外線-可視光-近赤外線を網羅し、光球-彩層大気までの物理量 (温度・速度・磁場) を診断することを狙う。面分光による偏光分光観測をターゲットとするが、サイエンスターゲットに柔軟に対応するため、スリット観測装置および広帯域/狭帯域フィルタ観測装置を搭載する。

諸性能要求値について、下記にまとめる。

【空間分解能】

可視光・近赤外域において 0.2 秒角の空間分解能を達成を要求する。微細スケールまで再現した数値シミュレーションにより、運動エネルギーと磁気エネルギーのパワースペクトルを解析した結果、200 km 以下において磁気エネルギーの方が卓越していることが報告されている(Rempel 2014)。150 km 以下の空間分解能の達成は、物理的に新しいレジームを捉えることができる可能性が高く、乱対流運動と磁束管のエネルギー変換を理解するうえで大きな飛躍となる。

波長[nm]	121	280	630	854	1083	1565
スペクトル線	Ly α	Mg II hk	Fe I	Ca II	He I	Fe I
空間分解能 (@回折限界の場合)	0.03"	0.08"	0.15"	0.20"	0.25"	0.35"

【視野】

磁束管周辺の粒状斑を数個分確保するため、面分光観測において 10 秒角四方を確保する。また、空間サンプリング数を調整することで、ネットワーク磁場領域をカバーできる 30 秒角四方の視野も変機能として保有する。

一方で、本観測計画で捉えられた個々のエネルギー蓄積・伝播・散逸過程から太陽大気構造(彩層、コロナホールなど)の形成メカニズムを理解するには、該当領域がどのように大規模な大気構造形成に寄

与しているかを知る必要がある。そのため、領域を同定するための 300 秒角四方の視野を持つ光球・彩層のフィルタ観測およびスリット観測が要求される。

【時間分解能・偏光精度】

10 秒積算により、 $1\sigma = 3 \times 10^{-4}$ を達成する。10 秒は、2 km/s の水平ガス運動が 20 km ピクセルを通過する様子を時間分解できる。積算時間・時間分解能はトレードオフ関係にあり、1 秒積算においては $1\sigma = 1 \times 10^{-3}$ を達成する。

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

【面分光観測装置】

スペース環境下における面分光観測装置の開発が要となる。面分光装置は、スペクトル情報を 2 次元空間において同時取得することに大きな利点がある。スリット観測と比べて狭視野となるが、10 秒角四方を維持できれば粒状斑・間隙を十分にカバーできる。面分光による定点観測により、高精度・高時間分解能を両立させることが可能になる。Hinode/SOT のスリット観測による同スキャン範囲 (1.4 秒角: 粒状斑の典型サイズ) を観測するケースと比較すると、最大で約 50 倍の時間分解能、あるいは約 7 倍の偏光精度の向上 (同空間サンプリングでは約 28 倍) が見込める。これまで捉えることができなかった光球における磁束管のダイナミクスおよび彩層におけるエネルギー散逸過程の理解が飛躍的に進展することが期待される。

また、面分光による定点観測は、像後処理によってさらなる高解像度化が見込める。スリット定点観測による 1 次元像データでは不可能であったが、面分光による 2 次元空間像の取得がこれを可能にする。

【データ圧縮技術】

本提案では、これまでにない高時間分解能かつ多次元 (空間 2 次元 × 波長 × 偏光 1 次元) 観測データの取得を想定しており、1 回の観測データ量は「ひので」をはじめとしたこれまでの衛星観測よりも膨大になると見積もられる。衛星観測はデータ送信可能量に制限が大きく、データ圧縮率は観測可能時間を決定する要因の 1 つである。そのため、想定される取得データに最適化した最新のデータ圧縮技術開発も非常に有用である。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

【大気球大口径望遠鏡を利用した飛翔体観測装置の開発】

SUNRISE-3 気球観測 (口径 1m) では 2022 年のフライトで紫外線 ($\lambda > 300$ nm) と近赤外線 (760 nm $< \lambda < 860$ nm) の偏光分光観測装置の実証を行う。Ca II 854 nm は彩層に感度のあるラインであり、モデリングおよび観測の比較により光球・彩層の物理量解釈を進めている。気球観測のメリットは、フライト後回収し観測装置を入れ替えることで、最小限のリソースでフライトさせることができることにある。実際に、SUNRISE-3 と同じ大型望遠鏡とゴンドラを使い、SUNRISE-4 として極大期近くの 2026 年頃に再フライトさせるアイデアもある。このような気球観測は、次世代のスペース観測に必要な観測技術を実証する場である。特にスペース環境下の面分光装置の開発は、太陽物理学においてはこれまで実現しておらず、開発実証は絶好の機会となる。

参考文献

- [1] Okamoto, T. J., Tsuneta, S., Berger, T. E., et al. 2007, *Science*, 318, 1577
- [2] Tomczyk, S., McIntosh, S. W., Keil, S. L., et al. 2007, *Science*, 317, 1192
- [3] Okamoto, T. J., Antolin, P., De Pontieu, B., et al. 2015, *ApJ*, 809, 71
- [4] Malherbe, J.-M., Roudier, T., Stein, R., & Frank, Z. 2018, *SoPh*, 293, 4
- [5] Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-I. 2006, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 111, 6101
- [6] Müller, D. A. N., Steiner, O., Schlichenmaier, R., & Brandt, P. N. 2001, *SoPh*, 203, 211
- [7] Oba, T., et al. 2020, *ApJ*, 890, 141
- [8] Beeck, B., Collet, R., Steffen, M., et al. 2012, *A&A*, 539, A121
- [9] Bonet, J. A., Márquez, I., Sánchez Almeida, J., Cabello, I., & Domingo, V. 2008, *ApJ*, 687, L131
- [10] Matsumoto, T., & Kitai, R. 2010, *ApJ*, 716, L19
- [11] van Ballegoijen, A. A., Asgari-Targhi, M., Cranmer, S. R., & DeLuca, E. E. 2011, *ApJ*, 736, 3

- [12] Vigeesh, G., Fedun, V., Hasan, S. S., & Erdélyi, R. 2012, ApJ, 755, 18
- [13] De Pontieu et al. 2007, Science, 317, 1574
- [14] Okamoto, T. J., & De Pontieu, B. 2011, ApJ, 736, L24
- [15] Rempel, M. 2014, ApJ, 789, 132

1. 提案タイトル

太陽観測次世代国際ネットワーク計画 ngGONG への参画

2. 提案者（名前、所属、Email）

勝川 行雄（国立天文台, yukio.katsukawa@nao.ac.jp）

3. 共同提案者リスト（名前、所属）

花岡庸一郎、末松芳法（国立天文台）、浅井歩、一本潔、横山央明（京大）、今田晋亮、岩井一正、草野完也、増田智（名大 ISEE）、久保勇樹、塩田大幸（情報通信研究機構）、A. Pevtsov, V. Martinez Pillet (NSO)

4. 研究の概要（500 字以下）

太陽はその磁気活動によって地球を含む惑星間空間の電磁気的環境を左右する存在である。本計画の目的は太陽全体を視野に収めつつ太陽大気と運動を十分な精度と分解能で連続観測することで、太陽コロナと太陽風を駆動する大局的な磁場構造を把握するとともに、突発的現象から太陽周期活動まで幅広い時間スケールの磁気活動をとらえ、その物理プロセスの理解を進展させることである。そのために ngGONG (next generation Global Oscillation Network Group) 計画[1]に参画する。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。ngGONG は、米国 National Solar Observatory (NSO) を中心として提案されている次世代の国際ネットワーク観測計画で、太陽の全面観測を行う望遠鏡を世界各地 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。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、観測サイトや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、などの形でこれに参画することで、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。

5. 背景の説明

太陽では光球下で磁場が生成され、それが表面に浮上し進化することで、その周囲に高温のコロナを形成し太陽風として流れ出すことで惑星間空間へと影響を及ぼす。さらに、大スケールの爆発現象フレアを生起しコロナプラズマが惑星間空間へ放出されると、時に地球への影響は文明社会における災害の原因ともなりうる。太陽物理学においては、大口径太陽望遠鏡による高解像度観測に基づき、磁場が引き起こす大気加熱と太陽風加速の物理素過程を理解する研究とともに、太陽全面の先進的観測に基づき、フレアを起こす巨大な活動領域の磁場構造の全容と惑星間空間へとつながる大局的な磁場構造を観測することで、太陽フレアの発生メカニズムとコロナから惑星間空間へいかに伝播するか研究することが基本となる。そのような研究を基礎として宇宙天気現象の予測を行うことは、現代の太陽物理学、太陽圏物理学、地球惑星圏物理学の重要課題である。太陽表面とコロナの観測に加えて、IPS 等による地上からの太陽圏観測、PSP、Solar Orbiter、BepiColombo 等の内部太陽圏衛星観測、地球惑星圏の衛星・地上観測が稼働している状況で、それらの観測が連携して太陽-地球惑星圏の環境予測の研究に取り組む必要がある。さらに、磁場が引き起こす爆発現象は、規模の違いはあれ、太陽に限らず多くの恒星で共通して発生するものであり、太陽-太陽圏における詳細な観測研究を起点として、主星の磁気活動が系外惑星の環境に及ぼす影響を理解することにも貢献する。

従来の GONG は、1995 年の観測開始以降、日震学による太陽内部構造の研究に加えて、太陽表面の視線磁場の連続観測によって、太陽圏モデリングの境界条件として使われる基盤的な観測データを提供してきた。しかし、宇宙天気現象の予測にはベクトル磁場観測に基づき磁場のねじれ量や蓄積された自由エネルギーを定量化すること、加えて太陽上層大気と磁場速度情報が重要であり、そのために先端的技術を使った観測装置に大幅にアップグレードすることが必要となっている。

6. 科学目標

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。

6.1 太陽活動現象を定量化する基盤となる光球・彩層磁場速度観測

太陽表面磁場データを用いたフレア発生予測や、表面磁場を境界条件としたコロナと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いる。しかし、従来の GONG で行っていた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)活動領域を形作る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]、(2)高プラズマ β の光球における磁場分布から非線形フォースフリー磁場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[3]、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。コロナ中に浮かぶ彩層温度の構造フィラメントとその周辺は CME の源泉域であるが、フィラメントのねじれた磁場を光球磁場観測から再現することは極めて困難である。上述に進展をもたらすために、光球ベクトル磁場に加えて彩層ベクトル磁場を同時に観測することで、活動領域上空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、さらには太陽大気はどこかで突発的に発生する現象にも追従するため、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にはその磁場強度を再現することが課題のひとつであり、その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。また、彩層速度を測定することで、活動領域やフィラメントの磁場が不安定化する前兆現象や噴出したプラズマの初速をとらえる[4]。

6.2 太陽活動現象が太陽圏へ及ぼす影響

太陽活動現象がコロナから惑星間空間へいかに伝播し影響を及ぼすかを明らかにするためには、太陽全面の磁場・速度とその時間発展の観測結果を、太陽圏数値シミュレーションの境界条件・初期条件として入力しないと行けない。太陽圏の内部境界(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よりよく推定するため、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していく。また、フレアやフィラメント噴出で発生した CME がコロナから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(B_z)を、太陽磁場の観測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。これら観測・数値シミュレーションからの太陽圏プラズマ現象の情報が、気象データのように定常的に供給するという社会的要求にも応えることが究極的な目標である。

6.3 日震学による太陽短期・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によって、日震学研究にも進展が期待できる。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今後発展させることが必要である。さらに太陽周期活動を十分カバーできる長期間にわたってデータを蓄積することで、周期活動に付随する太陽内部流の長期にわたる変化をとらえるなど、磁気活動の根源であるダイナモによる磁場生成の研究に貢献する。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版)」の中の「2.4.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究」においては既に、太陽物理学の枠にとらわれず、地球関連の広い学問分野はもとより、社会貢献までを視野に入れた研究の将来像が提示されているが、本研究はまさにその方向性の具体化に向けた提案である。また本研究は、太陽の観測技術やその解析(2.4.2. 光球・彩層磁場診断による研究)、惑星間空間科学との連携(2.4.6. 太陽圏科学における太陽研究)、プラズマ進化の予測(2.4.5. 理論シミュレ

ーション研究)といった面で、関連研究の進歩と歩調を合わせて実現するものである。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

表 1 に ngGONG で実現を目指す太陽全面観測装置の概要を示す。光球と彩層でベクトル磁場とドップラー速度を測定することが本質的であり、それらを実現するために、ゼーマン効果に感度の高い近赤外線域のスペクトル線を偏光分光観測する。また彩層ベクトル磁場の観測には彩層上部でハンレ効果に感度のある He I 1.083 μm 線が有力である。これらの観測を実現するには、S/N 約 1000-10000 の観測が必要であり、従来の GONG(6.5 cm)より大口径(50cm 程度)が必要となる。SDO 衛星による観測からフレア発生を引き起こす磁場の不安定化をとらえるには、30 分より短い時間間隔でベクトル磁場を測定する必要がある。フレアによる増光とフィラメント噴出などの爆発現象をとらえるため、さらに日震学による内部構造診断を行うため、光球・彩層におけるドップラー速度と明るさは高時間分解能(<1 分以内)で取得する必要がある。

表 1: ngGONG の概要

観測量	性能・要求
全面ベクトル磁場	光球と彩層の少なくとも 2 波長 2048 x 2048 画素以上、<30 分おき
全面ドップラー速度	光球と彩層の少なくとも 3 波長 2048 x 2048 画素以上、<60 秒おき
全面明るさ	H I α 656 nm: <10 秒おき He I 1.083 μm : <5 分おき 2048 x 2048 画素以上
白色光コロナ(偏光)画像 (一部サイトのみ)	視野>4 太陽半径 2048 x 2048 画素以上
Duty cycle (稼働率)	90%以上を 6 局で達成

この望遠鏡を世界各地 6 か所に配置して 24 時間休みなく太陽を観測する。地上望遠鏡によるネットワーク観測の強みは、多波長かつ高頻度で観測できることであり、これにより太陽大気で発生する現象を逃さずとらえる。また、このような観測の継続により、太陽の磁気活動の源泉であるダイナモ活動の情報を蓄積できる。

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

従来の GONG[5]は、Ni I 676 nm を観測する撮像分光装置で、世界 6 箇所に同一装置を配置し 1995 年から観測を継続している。2001 年から光球磁場と H α 線も取得できるようアップグレードされ、現在も運用が継続されている。キットピークでは偏光分光観測による太陽全面磁場観測が長年継続されており、Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun (SOLIS)[6]では、1 台のみであるが、Fe I 630 nm による光球ベクトル磁場に加えて、観測波長を近赤外線まで広げることで Ca II 854 nm による彩層視線磁場と He I 1.08 μm の強度(透過幅)を測定している。

国立天文台・三鷹にある太陽フレア望遠鏡では、近赤外線での光球・彩層ベクトル磁場測定を、光球を Fe I 1.56 μm で、彩層を He I 1.08 μm でそれぞれ観測することで、世界に先駆けて実現しており[7]、2010 年から観測を継続している。さらに、科研費新学術領域研究「太陽地球圏環境予測(PSTEP)」を中心とした研究活動は、偏光観測用大フォーマット赤外カメラの開発(国立天文台)[8]、狭帯域フィルター観測による彩層 3 次元速度場追跡の実現(京都大学)[9]など、ngGONG 実現のために必要とされる新技術を獲得している。これらを発展させることで、ngGONG 構成品の一部を提供できる。

光球ベクトル磁場を境界条件とした NLFFF コロナ磁場外挿は、Hinode-SP や SDO-HMI で得た活動領域データに適用され成果をあげてきた[10]。今後、ngGONG で得られる精度の高い広視野の彩層ベクトル磁場を NLFFF 外挿に組み込む手法の開発が必要である。さらに Force-Free 条件によらない磁場モデル[11]も今後実用化していくことが期待される。GONG の視線磁場観測データを境界条件として数値シミュレーションに入力し、惑星間空間における太陽風の再現と CME 伝播を予測する手法の開発(NICT)にも取り組んできた[12, 13]。ngGONG で得られる磁場速度情報を数値シミュレーションに入力できるようにするには、太陽光球・彩層の磁場構造と太陽風速度の関係を説明できる太陽風加速モデルを導入し、さらにフィラメント噴出と CME 速度の関係を明らかにするとともにデータ同化等

の手法を用いて数値シミュレーションに組み込む必要がある。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

ngGONG は米国 NSO を中心に推進されており、Astro 2020 Decadal Survey に提出した white paper では国立天文台と京都大も共著者として関わった。NSO が ngGONG の設計検討を NSF へ提案した際には、国立天文台太陽観測科学プロジェクトから Letter of Interest を提出し、協力する意思を示した。NSF への提案が採択されれば、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、科学検討、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 2022-2024 年に行い、開発・建設を 2025 年から開始する計画である。日本国内では、日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会が公募したマスタープラン 2023 大型・中型将来計画に対して、国立天文台を中心として ngGONG を中型 B 計画として提案した。

国立天文台の太陽フレア望遠鏡では、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 の実現に貢献できる。そのため国立天文台太陽フレア望遠鏡などで得たデータを米国の Virtual Solar Observatory へ提供する計画を現在進めている。データを国際的に共有し広く活用してもらうことで、近赤外線偏光分光観測の科学的な優位性を示すことが重要である。ngGONG で取得されるデータをルーチ的に較正し速度磁場を導出するには、AI などを活用した先端的なデータ解析手法を導入することが期待されており、そのような手法の開発も今後必要となる。

参考文献

- [1] Martinez Pillet, V. et al. “Synoptic Studies of the Sun as a Key to Understanding Stellar Astrospheres”, in Astro2020 Science White Paper, BAAS, 551, 110 (2019)
- [2] Kusano, K., et al. “A physics-based method that can predict imminent large solar flares”, Science, 369, 587 (2020)
- [3] Kawabta, Y., et al., “Chromospheric Magnetic Field: A Comparison of He I 10830 Å Observations with Nonlinear Force-free Field Extrapolation”, ApJ, 898, 32 (2020)
- [4] Seki, D., et al., “Relationship between three-dimensional velocity of filament eruptions and CME association”, Earth, Planets and Space, 73, 58 (2021).
- [5] Harvey, J., et al., “The Global Oscillation Network Group (GONG) Project”, Science, 272, 1284 (1996)
- [6] Keller, C., et al., “SOLIS: an innovative suite of synoptic instruments”, Proc. SPIE, 4853, 194 (2003).
- [7] Hanaoka, Y. et al., “Synoptic solar observations of the Solar Flare Telescope focusing on space weather”, Journal of Space Weather and Space Climate, 10, 41 (2020)
- [8] Hanaoka, Y., et al., “A HAWAII-2RG infrared camera operated under fast readout mode for solar polarimetry”, Earth, Planets and Space, 72, 181 (2020)
- [9] Ichimoto, K., et al., “A New Solar Imaging System for Observing High-Speed Eruptions: Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI)”, Solar Physics, 292, 63 (2017)
- [10] Inoue, S., et al., “Nonlinear Force-free Extrapolation of the Coronal Magnetic Field Based on the Magnetohydrodynamic Relaxation Method”, ApJ, 780, 101 (2014)
- [11] Miyoshi, T., et al., “A Magnetohydrodynamic Relaxation Method for Non-force-free Magnetic Field in Magnetohydrostatic Equilibrium”, ApJS, 247, 6 (2020)
- [12] Shiota, D. and Kusano, K., “Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME)”, Space Weather, 14, 56 (2016)
- [13] Iwai, K., et al., “Validation of coronal mass ejection arrival-time forecasts by magnetohydrodynamic simulations based on interplanetary scintillation observations”, Earth, Planets and Space, 73, 9 (2021)

1. 提案タイトル

UV 偏光分光観測による太陽活動領域の進化・不安定化・エネルギー解放機構の理解

2. 提案者 (名前、所属、Email)

川畑佑典 (国立天文台)、kawabata.yusuke@nao.ac.jp

3. 共同提案者リスト (名前、所属)

石川遼子、森田諭、大場崇義、Song Donguk、鹿野良平(国立天文台)、岡本文典(宇宙科学研究所)

4. 研究の概要 (500 字以下)

太陽大気磁場の三次元的に取得することで、活動領域の進化から磁気エネルギー解放に至るまでの機構の包括的な理解を目指す。活動領域はコロナに蓄積された磁気エネルギーを磁気リコネクションによって熱・運動エネルギーに変換し、太陽フレアやコロナ質量放出といった爆発現象を起こすことが知られている。しかし現状で定常的に偏光観測が行われているのは光球の1層のみであり、コロナへの磁気エネルギーの輸送・蓄積過程や三次元磁場構造に起因する不安定化に対する観測的制限が与えられていない。この課題を光球-彩層-遷移層-コロナの磁場を三次元的に取得することで解決する。磁場の取得には口径 1m 級の望遠鏡による偏光分光観測を提案する。波長帯は主に紫外線領域を検討しており、彩層-遷移層-コロナの磁場診断の能力を持つ。日本主導で開発を行った CLASP, CLASP-2 により、Ly- α 線や Mg II h&k 線による彩層-遷移層の磁場診断の有用性が実証されてきた。これらを発展させて衛星による高精度で長時間安定した紫外線偏光分光観測を実現する。

5. 背景の説明

太陽の活動領域では、蓄積された磁気エネルギーを磁気リコネクションにより解放して太陽フレアやコロナ質量放出(Coronal mass ejection:CME)といった大規模な爆発現象を起こすことが知られている。一方で活動領域がどのように進化し、フレアや CME がどのように駆動されるかは未解明である。以下に未解決課題のうち 3 つを示す。

1) 活動領域の進化

活動領域の進化は高精度な光球ベクトル磁場の安定した測定を可能にした「ひので」や太陽全球の光球磁場を定常的に観測する Solar Dynamics Observatory(SDO)によって大きく理解が進められた。

「ひので」の光球磁場の時間発展の解析により、浮上時にすでにねじれている磁場が上空に輸送されていく様子が報告されている(Okamoto et al. 2008)。一方で浮上していくねじれた磁場と上空の磁場の相互作用によって上空の彩層-コロナの磁場構造がどう変化したかは観測的に示すことができていない。また光球面のシア運動によりねじられる(Krall et al. 1982)という説も存在する。三次元的に磁場情報を得てエネルギー蓄積への貢献度を定量的に確かめることが求められている。

SDO の広視野時系列光球磁場データに対し、非線形フォースフリー磁場(Nonlinear force-free field:NLFFF)外挿を適用した三次元磁場の時系列解析も行われている(Sun et al. 2012)。活動領域の浮上に伴い自由エネルギーが増加している傾向を示されている。しかし光球磁場に基づく NLFFF 外挿では実際に観測された上空の彩層磁場と整合しない例があることが報告されており(Kawabata et al. 2020)、シミュレーションデータによるモデリングのテスト(Toriumi et al. 2020)でもフォースフリー条件を満たさない光球磁場を用いたモデリングの限界が報告されている。解決法として彩層の磁場を外挿に使用するという案がある。シミュレーションデータによるテストで彩層磁場をモデリングに組み込むことで磁場形状やコロナの電流分布を高精度に再現することができることが示されている(Fleishman et al. 2019)。

2) 不安定化機構

活動領域がどのように不安定化して太陽フレアにつながるかという問いに対して近年では磁気流体不安定という観点で研究が進められてきている。Jing et al. (2018)はトーラス不安定、キンク不安定に着

目し、NLFFF 外挿を用いた統計研究を行った。彼らの解析結果によるとキンク不安定の指標である twist number は CME 発生の有無と関連性が小さく、トーラス不安定の指標である decay index >0.8 が CME 発生の必要条件となっていた。一方で decay index が 0.8 以下の時にも CME は発生する例が存在した。1)の課題でも指摘されたように、NLFFF 外挿が適切にコロナ磁場を再現しないケースが原因の可能性はある。上空の彩層・遷移層磁場を外挿モデルに組み込むことで、正確な不安定化の評価が求められる。

最近では新しい不安定モデルとしてダブルアーク不安定(Ishiguro et al. 2017, Kusano et al. 2020)が提唱されている。このモデルの重要な要素は磁気中性線付近によるシア磁場の小規模な磁気リコネクションの存在である。このモデルの検証を行うためには、彩層-遷移層で三次元的に磁場観測を行い小規模な磁気リコネクション発生から不安定化に至るまでを観測する必要がある。

不安定化機構を理解する上で有望視されている手法の一つとしてデータ駆動型磁気流体シミュレーション(Cheung et al. 2012)がある。時間発展する光球磁場を境界条件に与えることで、非平衡状態に至るまでの過程の解析が可能になっている。問題点として、光球1層のみの観測であると、仮定なしで磁場の誘導方程式を解くことができない。光球-彩層をシームレスに測定することで解決したい。

3) 磁気リコネクションの高速化

太陽フレアのエネルギー解放メカニズムとして考えられている磁気リコネクションにも「どのようにして高速なエネルギー変換を可能にするのか」という謎が残されている。近年有力視されているのが、磁気リコネクションがおこる電流シート内に閉じた磁場構造をもつ複数のプラズモイドが形成されることで、磁気リコネクションが高速化されるモデルである(Shibata & Tanuma 2001)。太陽観測においては、極端紫外線のフレアの撮像観測によって高温のプラズマ小塊がプラズモイドのように動く様子が観測されている(Takasao et al. 2012)。フレアのみでなく彩層での小規模な磁気リコネクションでもプラズモイドらしき構造が観測されている(Roupe van der Voort et al. 2017)。しかし磁気リコネクション周囲の磁場情報は取得されていない。数値計算との定量的な比較を行い、物理的解釈を行うために磁気リコネクション周囲の磁場観測が求められている。

上記3つの謎を考える上で上層大気(彩層-遷移層-コロナ)の磁場取得が重要な要素となる。

6. 科学目標

本研究の学術的問いは「活動領域の形成・進化に伴う磁氣的活動のメカニズムの理解」である。具体的には以下の5つを提示する。

A. 活動領域の進化・不安定化:光球-彩層-遷移層の磁場構造の時間変化

光球から遷移層までの磁場をシームレスに観測を行うことで、磁場の浮上や光球の水平運動に伴う上空の磁場構造の変化を調べる。得られた光球-彩層-遷移層の磁場を用いて三次元磁場モデリングを行う。次の段階として時系列データによるデータ駆動型磁気流体力学シミュレーションを行い、実際のフレア・CME 発生の再現、発生機構の理解を目指す。

B. 不安定化前の磁場構造: プロミネンスの磁場構造

太陽 Off-limb に存在する活動領域のプロミネンスの観測を行う。彩層磁場は地上望遠鏡により観測が増え始めているが、Off-limb 観測は困難なため、スペースからの観測により不安定化前のプロミネンスの磁場構造を明らかにする。ねじれ度合いや太陽面鉛直方向の磁場減衰を評価し、キンク不安定やトーラス不安定による議論を行う。

C. ダブルアーク不安定の検証

背景に記述したようにダブルアーク不安定では小規模な磁気リコネクションが不安定化を駆動する。小規模磁気リコネクションが発生しうる彩層-遷移層領域を観測し、時系列変化を追うことで、不安定モデルの検証を行う。

D. 磁気リコネクションの高速化: 彩層磁気リコネクションの微細構造

彩層-遷移層観測で報告されている小規模磁気リコネクション周囲の磁場構造を測定する。高解像度で分解し磁場を取得し、数値計算と比較を行うことで、彩層-遷移層における弱電離環境における磁気リ

コネクションの理解につなげる。

E. フレア発生時のコロナの磁場構造

太陽フレア発生時の磁気リコネクション領域周囲の磁場の測定を目指す。温度診断、密度診断も加えることでアルフベン速度、リコネクションレートを導出し、太陽フレアのリコネクションのモデルに観測的制限を与える。

上記の科学目標を達成するためにスペースでの 1m 級望遠鏡による UV 偏光分光観測を提案する。UV 偏光分光観測は活動領域だけでなく小さな磁場強度に感度のあるハンレ効果の特性を活かし、静穏領域の観測にも適している(静穏領域を対象とした課題は石川らによる提案「紫外線偏光分光観測によるコロナ直下までの磁場の網羅的測定」を参照)。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

本研究で提案する UV 偏光分光観測外層大気の磁場診断は[2.4.1.上空大気の分光診断による研究], [2.4.2.光球・彩層磁場診断による研究], [2.4.4.宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究]と深い関連性を持っている。Interface Region Imaging Spectrograph(IRIS)による UV 分光観測で得られた彩層-遷移層の温度、速度場診断で大きな成果を残し、Solar-C_EUVST でも高解像度での彩層-コロナの温度、速度場診断が期待されている。本研究では新たに磁場診断を追加することで磁場とプラズマの相互作用による不安定化や磁気リコネクションに関する理解を進める。

そして磁場診断という観点では日本が主導して行ってきた観測ロケット実験 CLASP, CLASP-2 で実証された UV 偏光観測の有用性をスペース衛星観測に発展させるという側面がある。さらに大口径望遠鏡による多波長偏光分光観測という観点で SUNRISE-3 の SCIP や SUSI で得られる、光球-彩層磁場診断をスペースからの長期観測により理解を発展させるという立ち位置にある。

太陽フレア・CME の駆動機構は宇宙天気・宇宙機構を考える上で解明すべき重要課題である。提案されている物理モデルに観測的制限を与えることで、精度の高い宇宙天気予報につなげる。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

UV による偏光分光観測を主として考える。波長としてはロケット実験 CLASP, CLASP-2 で観測された Ly- α 線や Mg II h&k 線(両者とも彩層上部-遷移層の情報をもつ)が有力な候補として考えている。また Mg II h&k 線の付近(2599-2769Å)には彩層底部から中部の情報得られる複数の Fe II 線が存在し(Judge et al. 2021)、彩層-遷移層をシームレスに取得できる可能性を秘めている。オプションとして可視光や近赤外の観測も同時に行うことで相補的な情報も得ることも検討する。

課題 A, B では空間サンプリングは 0.5''-1'' で活動領域やプロミネンスを包括するような広視野観測を要求する。課題 C では磁気中性線付近を 10 秒から 1 分の時間分解能で観測することを要求する。課題 D では小規模磁気リコネクションの微細構造を捉えるためには高い空間サンプリング(0.1''-0.5''/pix)を要求する。課題 E は空間分解能 1''-5'', 時間分解能 30 分を要求する。

	科学課題				
	A	B	C	D	E
空間分解能要求	0.5''-1''	0.5''-1''	0.5''-1''	0.1''-0.5''	1''-5''
時間分解能要求	10-30 分	10-30 分	10 秒-1 分	10 秒-1 分	30 分
視野要求	200'' \times 200''	200'' \times 200''	10'' \times 200''	10'' \times 200''	200'' \times 200''
観測波長候補	UV: O VI 1032Å, Ly- α 1216Å, Mg II h 2803Å & k 2796Å, Fe II, 2599-2769Å, Ca II H 3968Å & K 3934Å (可視光: Fe I 6302Å, 近赤外: Ca II 8542Å, He I 10830Å, EUV: He II 304Å)				
偏光精度	1×10^{-3} (1σ)				

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

8. を実現するために、口径 1m 級のスペース望遠鏡を提案する。スペースからの観測が必要な理由と

しては、

- 1)地球からでは観測できない紫外線の観測
- 2)時間発展を精度良くかつ均質なデータの取得
- 3)地上では補償光学が難しい Off-limb の観測が挙げられる。

彩層-遷移層観測に限ると、Trujillo Bueno et al. (2017)の見積もりから、空間サンプリング $1''/\text{pix}$ で波長分解能 0.1\AA の観測を仮定した場合 Mg II h&k 線では 2 秒、Ly- α では 10 秒の露光時間で 10^{-3} の直線偏光を捉えることができる。また Mg II h&k 線の円偏光に関しては CLASP2(口径 27cm, $0.5''/\text{pix}$) の観測で 30 秒積算で 10^{-1} 以下の精度で捉えることができた。1m 口径で $1''/\text{pix}$ で同精度の観測を行うと約 0.5 秒の時間分解能となる。つまりスキンの時間を考慮すると $200''$ の視野の観測に、100 秒(Mg II h&k 円偏光), 400 秒(Mg II h&k 直線偏光), 2000 秒(Ly- α 直線偏光)を要する。7.で要求した時間分解能を達成するためにはマルチスリットやスリット交換機構の検討も必要であると考えている。 $0.5''/\text{pix}$ の場合 sit-and-stare の観測で Mg II h&k では 8 秒、Ly α では 40 秒となる。Off-limb の観測で十分な偏光信号を取得するために必要な露光時間については未検討である。

本研究では主に紫外線領域に着目しているが、過去に検討された SUVIT(Suematsu et al. 2017)のように、紫外線領域から近赤外領域まで同時に取得することができれば、高さ方向にシームレスな情報が得られるだけでなく、より精度の高い磁場診断が可能になる。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

UV 領域の Ly- α や Mg II h&k 線で形成される偏光信号には様々な要素が影響しているため(輻射の非等方性、速度場による影響)解釈が難しい。輻射磁気流体方程式に基づく輻射合成の研究を進めていくことが求められる。さらに本研究を進める上で、3次元磁場外挿、データ駆動型シミュレーション両者に必要な幾何学的高さを偏光観測から導出するのは容易ではない。磁気静水圧平衡を仮定して導出する手法(Borrero et al. 2019)や深層学習に基づく導出法(Asensio Ramos et al. 2019)といったような新たな偏光観測インバージョン手法開発も必要となる。

参考文献

- [1] Asensio Ramos et al. 2019, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 626, id.A102, 18 pp.
- [2] Borrero et al. 2019, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 632, id.A111, 11 pp.
- [3] Cheung et al. 2012, *The Astrophysical Journal*, Volume 757, Issue 2, article id. 147, 10 pp.
- [4] Ishiguro et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, Volume 843, Issue 2, article id. 101, 8 pp.
- [5] Judge et al. 2021, eprint arXiv:2106.07786, accepted in ApJ
- [6] Jing et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, Volume 864, Issue 2, article id. 138, 9 pp.
- [7] Kawabata et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, Volume 898, Issue 1, id.32
- [8] Krall et al. 1982, *Solar Physics*, Volume 79, Issue 1, pp.59-75
- [9] Kusano et al. 2020, *Science*, Volume 369, Issue 6503, pp. 587-591
- [10] Okamoto et al. 2008, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 673, Issue 2, pp. L215
- [11] Rouppe van der Voort et al. 2017, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 851, Issue 1, article id. L6, 8 pp.
- [12] Shibata & Tanuma, 2001, *Earth, Planets and Space*, Volume 53, p. 473-482.
- [13] Suematsu et al. 2017, *Proceedings of the SPIE*, Volume 10565, id. 105650R 5 pp. (2017).
- [14] Sun et al. 2012, *The Astrophysical Journal*, Volume 748, Issue 2, article id. 77, 15 pp.
- [15] Takasao et al. 2012, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 745, Issue 1, article id. L6, 7 pp.
- [16] Toriumi et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, Volume 890, Issue 2, id.103, 13 pp.
- [17] Trujillo Bueno et al. 2017, *Space Science Reviews*, Volume 210, Issue 1-4, pp. 183-226

1. 提案タイトル

紫外線偏光分光観測によるコロナ直下までの磁場の網羅的測定

2. 提案者（名前、所属、Email）

石川遼子、国立天文台・太陽観測科学プロジェクト、ryoko.ishikawa@nao.ac.jp

3. 共同提案者リスト（名前、所属）

岡本文典（宇宙科学研究所）、Song Donguk、川畑佑典、鹿野良平（国立天文台）

4. 研究の概要（500字以下）

太陽観測ロケット実験 CLASP（2015年打ち上げ）、CLASP2（2019年打ち上げ）により、紫外線偏光分光観測による太陽彩層～遷移層の磁場計測という新しい観測手法が切り拓かれた。さらに、CLASP2による観測から、彩層最上部の磁場計測を可能にする電離マグネシウム線（Mg II h & k, 波長 280.35 nm と 279.64 nm）に加えて、その近傍にあるマンガン線（Mn I, 波長 279.91 nm と 280.19 nm）の観測も組み合わせることで彩層底部からの磁場情報を網羅できることが明らかとなった。我々は、これら CLASP シリーズを発展させた、観測衛星による定常的な紫外線（Ly α , Mg II h & k, Mn I）の高精度偏光分光観測を提案する。これにより、地上観測では難しい彩層底部からコロナ直下までの継ぎ目のない連続した磁場測定を行い、彩層～コロナの活動現象の成因を定量的に探ることを目的とする。

5. 背景の説明

彩層・遷移層は 6,000 度の光球と 100 万度のコロナに挟まれた太陽大気の連結層である。その中でもガス圧優勢（光球）から磁気圧優勢に切り替わる特徴的な領域である彩層中層～遷移層は、ガスの運動と磁場との相互作用が本質的なプラズマ現象にとって極めて重要な領域である。加えて、彩層は温度 1 万度であるが密度が高く、定常的に彩層を維持するためには、コロナを加熱維持するよりも 10 倍以上のエネルギーが必要であることもわかっている（[1]）。これらの連結層が、太陽物理学の未解決問題「太陽風加速機構」や「彩層・コロナ加熱問題」を解明する鍵を握っていることは明らかで、太陽観測衛星ひので（2006年打ち上げ）や IRIS 衛星（2013年打ち上げ）による彩層の撮像、分光観測により、磁気流体波動やジェットなどコロナや宇宙空間へエネルギーを輸送していると考えられる様々な活動現象が明らかとなった（[2], [3]など）。しかしこれまで、これらの駆動源と考えられる磁場の情報は、光球より上空ではほとんど得られていない。中でも、ガス圧優勢から磁気圧優勢に切り替わる彩層中～遷移層の磁場測定が、磁気流体波動で運ばれるエネルギー量や散逸機構、ジェットの発生機構の本質的理解には必要不可欠である（[4]）。

このような状況下で、近年の理論研究により有用性が示唆されたのが、彩層～遷移層の大気層を構成する 1 万～数万度のプラズマ由来のスペクトル線が多数存在する紫外線の偏光である（[5]）。日米欧共同で開発を行い、2015年に打ち上げを実施した太陽観測ロケット実験 CLASP は、ライマン α 線（Ly α , 波長 122 nm）の高精度偏光分光観測に成功し（[6]）、彩層上部～遷移層の磁場によってハンレ効果（散乱で生じた直線偏光が磁場によって変調を受ける量子力学的効果）が働いていることを明らかにした（[7]）。さらに、2019年に実施した太陽観測ロケット実験 CLASP2 では、ライマン α 線から電離マグネシウム線（Mg II h & k, 波長 280.35 nm と 279.64 nm）波長域へ観測波長を変更し、再度高精度偏光分光観測に成功した。電離マグネシウム線の最大の利点は、ライマン α 線同様に散乱及びハンレ効果で生じる直線偏光に加え、視線方向磁場があればゼーマン効果によって検出可能な円偏光が生じることにある（[8]など）。CLASP2 による 2 分半の活動領域の定点観測から、(1) 活動領域ほぼ全域にわたって電離マグネシウム線の有意な円偏光の検出が可能、(2) 電離マグネシウム線のすぐそばのマンガン線（波長 279.91 nm と 280.19 nm）もゼーマン効果によって顕著な円偏光を示すこと、の 2 点が明らかとなった。このマンガン線は彩層底部から放射され、電離マグネシウム線による彩層中～最上部の磁場観測とひので衛星で取得された光球磁場の観測データを合わせることで、磁束管が彩層で急激に膨張し互いにひしめき合うという、これまでみなが想像するも、その観測的証拠が得られなかった彩層磁場の様子が初めて観測から明らかとなった（[9]）。また、磁場の時間変動の観測に関する知見も得られつつ

ある ([10])。このように、紫外線偏光分光観測の技術的実現性および有用性が CLASP, CLASP2 による先駆的な観測により明らかとなった。

将来の飛翔体観測装置での紫外線偏光分光観測は、世界的に期待が高まっている。ESA が募集した VOYAGE 2050 White Paper では、紫外線の偏光分光観測による磁場測定を実施する Magnetic Imaging of the Outer Solar Atmosphere (MImOSA) と CASPER: A mission to study the time-dependent evolution of the magnetic solar chromosphere and transition regions の 2 つの提案がなされた。さらに、NASA の Explorer Mission にも紫外線偏光分光観測の実施が提案される動きがある。

6. 科学目標

本提案で掲げる学術的問いは、

“彩層底部～遷移層の磁場を網羅することで、太陽大気加熱や太陽風加速の駆動源である太陽大気の磁氣的結合を直接的に明らかにし、それらのメカニズム解明に挑む。”

である。

具体的には、以下の科学目標をあげる。これらの科学目標以外にも、紫外線偏光分光観測によるフレア発生機構の解明など、太陽恒星大気の解明はもちろん、宇宙天気予報の観点でも重要な科学成果をあげることが期待され、これらについては、川畑らによる提案 (“UV 偏光分光観測による太陽活動領域の進化・不安定化・エネルギー解放機構の理解”) を参照されたい。

[Q-1] ネットワークや活動領域の磁場は高さとともにどう変化し、磁束管が高さとともにどのように広がっているのか？を明らかにする

[Q-2] さらに、彩層底部～遷移層にわたってどのような振幅の磁気流体波動が励起されているのか？を調べることでコロナへ伝搬するエネルギー量を見積もる

- 磁束管の広がり方は、アルフベン波の伝搬やモード変換を議論する上で決定的に重要である ([11])。また、これまで撮像や分光観測で検出された波動現象のエネルギーを見積もる際には、密度や磁場強度を仮定して求められており、磁場強度の導出は、その見積もりの精度をあげる。さらに、磁場の振動を直接的に求めることで、モードの特定、波の反射率、ポインティングフラックスの精密測定などが可能となる ([12])。

[Q-3] 静穏領域の光球面に見られる乱流的な磁場のうちどれだけが彩層に到達し、加熱やダイナミクスに寄与しているのか？

- ひので衛星により、局所的ダイナモ機構によって粒状斑スケールの小さな磁気ループが大量に存在し、彩層・コロナ加熱に必要なとされるエネルギー量を有することが明らかとなった ([13])。さらに、粒状斑間で渦をまく磁場が彩層にも発見され、それによる上層大気の加熱が示唆されている ([14])。このように、光球で乱流的な振る舞いによって発生する磁場がどの高さまで到達し、加熱にどのように寄与しているのか、統計的に調べる必要がある。

彩層の磁場観測は、今まさに、ハワイで科学観測が開始されようとしている Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) 望遠鏡 (4 m ϕ) で目指しているところでもある。DKIST による観測は、可視光～赤外での観測であり、主力となる Ca II 854 nm では彩層中部までしかアクセスできない、He I 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、地上観測では、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。DKIST、さらには現在計画中の European Solar Telescope (EST) でどこまで可能か、また、宇宙からの観測を考えたとして、可視光～赤外と紫外線のどちらが優位かを、DKIST などの科学成果をみながら検討していく必要がある。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

2.4.2. 光球・彩層磁場診断による研究

2.4.7. 恒星研究と連携した太陽研究

本提案は、太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版) 2.4.2 で、ポスト CLASP、CLASP2 として議論され、2030 年代早期に実現するプロジェクトとして有望とされた、「電離マグネシウム線とライマン α 線の同時観測による彩層上部～遷移層での磁場診断を行う衛星計画」に該当する。さらに、CLASP2 の観測で確認された Mn I 線 (彩層底部から放射) による観測と組み合わせることで、彩層底

部から遷移層までの磁場情報を網羅できると期待される。なお、同じく 2.4.2 で議論されているポスト SUNRISE-3 として位置付けられ、その実現が有望視されている口径 1 m 超の大型宇宙望遠鏡による磁場観測とも、観測波長を紫外線まで伸展させるなどして親和性が非常に高い。

また、太陽大気加熱や太陽風加速の起源、フレア駆動起源の解明は、恒星研究にも共通する課題であり「2.4.7 恒星研究と連携した太陽研究」の側面も持ち合わせている。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

必要な観測量及び性能要求を表にまとめる。観測対象とするスペクトル線は、CLASP で観測した Ly α 線と Si III 線 (Ly α 線よりも強い磁場に対してハンレ効果が働いたため、Ly α 線との同時観測によりハンレ効果と局所的な散乱偏光の影響を切り分けることができると期待 [7])、CLASP2 で観測された Mg II h&k 線、それらの間にある Mn I 線 (2 本) とする。ハンレ効果は、 $0.2B_H < B < 5B_H$ の範囲で (B_H : ハンレクリティカル磁場強度) 作用する。 B_H は Mg II h 線で 25 G、Ly α 線 50 G、Si III 線 300G であり、複数のスペクトル線のハンレ効果 (直線偏光) とゼーマン効果 (円偏光) により弱い磁場から強い磁場までをカバーすることができる。なお、Mn I 線と同様、彩層底～中部までの観測が可能になることが示唆された Fe II 線 (波長 259.9 – 276.9 nm [15]) や波長 279.16 nm の Mg II triplet line (Mg II h & k の間にある triplet lines は他のスペクトル線と重なりあっているため適切な磁場診断ができないことを CLASP2 の観測から確認済み) については、Mn I 線との相補性 (もしくは冗長性) を確認する必要があるが、現時点では含めていない。

波長域	279.0 -280.5 nm (Mg II h & k, Mn I) 120.4 – 122.4 nm (Ly α , Si III)
視野 (スリット長)	>200 秒角 (活動領域をカバー)
空間分解能	<0.4 秒角
波長分解能	0.01 nm
時間分解能	<30 秒

空間分解能については、彩層の基本構造を分解するため 0.4 秒角以下の空間分解能を要求する。波長分解能については、波長方向に正負の振幅を持つ偏光信号を検出する必要があるが、CLASP, CLASP2 で実績のある 0.01 nm が達成できればよい。彩層中を伝搬する磁気流体波動の検出に最も有効な観測だと考えられるのが、Mg II h & k 線の円偏光である ([10])。CLASP2 の観測から、30 秒程度積算すれば 10%以下の精度で磁場強度を求めることができることがわかっている (図 1)。CLASP2 と同程度のスループット (2%)、0.2 秒角の空間サンプリング (CLASP2: 0.5 秒角)、0.2 秒角のスリット幅 (CLASP2: 0.5 秒角)、CLASP2 と同等の 0.005 nm の波長サンプリングでの観測を想定すると、68 cm の口径 (CLASP2: 27 cm) を持つ望遠鏡が必要となる。なお、この口径での波長 280 nm の回折限界は 0.1 秒角で収差や波面精度を抑えれば実現可能である。また 1 m を超える大口径宇宙望遠鏡が実現できれば、さらに短い時間分解能での磁場観測が可能となる。

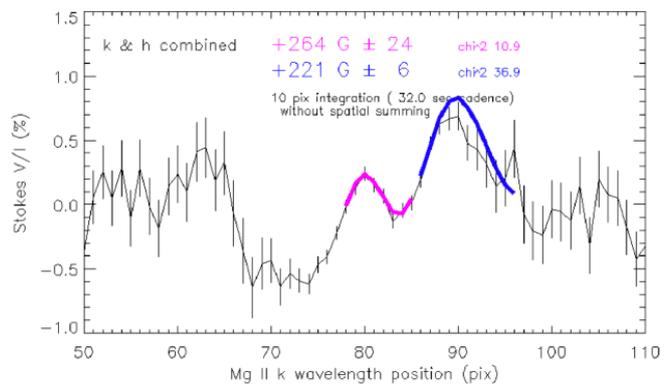


図1: CLASP2で得られた円偏光スペクトルを32秒積算し、弱磁場近似で得られる磁場の誤差を調べた。

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

観測ロケット実験 CLASP2 の再飛行計画 (CLASP2.1) の打ち上げが 2021 年 10 月に計画されている。CLASP2.1 では、スリットを固定して観測を行った CLASP2 を発展させ、望遠鏡をふることでスリットスキャンを行う。そして、ひので衛星との共同観測により、光球から彩層上部までの磁場の 3 次元断層診断を行う。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

電離マグネシウム線やライマン α 線から磁場情報を得るには、局所熱力学平衡や 3 次元的な散乱の効

果を考慮した輻射輸送計算が必要不可欠となっている。また、近年では機械学習及び深層学習を援用してスペクトル線から大気パラメータを抽出する手法の開発も盛んとなっている（[16]）。これらの手法は、紫外線スペクトル線だけでなく DKIST で観測を行う可視～赤外線スペクトル線の解釈にも必須となるであろう。我々日本のコミュニティも、これらの手法を観測データに適用し、最先端の科学成果をいち早く得られるよう準備が必要である。

参考文献

- [1] Withbroe & Noyes, *Annual review of astronomy and astrophysics*, Vol. 15, p. 363-387 (1977)
- [2] Okamoto et al., *The Astrophysical Journal*, Vol. 809, id. 71 (2015)
- [3] Antolin et al., *The Astrophysical Journal*, Vol. 809, id. 72 (2015)
- [4] Kawabata et al., *The Astrophysical Journal*, Vol. 898, id. 32 (2020)
- [5] Trujillo Bueno, Landi Degl’Innocenti, Belluzzi, *Space Science Review*, Vol. 210, p. 183–226 (2017)
- [6] Kano et al., *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 839, id. L10 (2017)
- [7] Ishikawa et al., *The Astrophysical Journal*, Vol. 841, id. 31 (2017)
- [8] Alsina Ballester et al., *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 831, id. L15 (2016)
- [9] Ishikawa et al., *Science Advances*, Vol. 7, p. eabe8406 (2021)
- [10] Okamoto et al. in prep.
- [11] Suzuki & Inizuka, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, id. A06101 (2006)
- [12] Fujimura & Tsuneta, *The Astrophysical Journal*, Vol. 702, pp. 1443-1457 (2009)
- [13] Ishikawa & Tsuneta, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 495, pp.607-612 (2009)
- [14] Wedemeyer-Böhm et al., *Nature*, Vol. 486, pp. 505-508 (2012)
- [15] Judge et al., Accepted in *The Astrophysical Journal*
- [16] Sainz Dalda et al., *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 875, id. L18 (2019)

1. 提案タイトル

次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現

2. 提案者（名前、所属、Email）

岩井一正 名古屋大学宇宙地球環境研究所 k.iwai@isee.nagoya-u.ac.jp

3. 共同提案者リスト（名前、所属）

徳丸宗利、藤木謙一（名古屋大学）

4. 研究の概要（500字以下）

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カ所にレイアンテナ群を建設する。各基地局は、約4000m²の平面に327MHz帯域に感度を持つダイポールアンテナを敷き詰めた2次元平面フェーズドアレイアンテナで構成され、各ダイポール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。

5. 背景の説明

5.1 研究の背景と世界的動向

我々の生活基盤は、近年急速に宇宙空間に進出している。例えば多くの情報通信衛星が我々の生活を支え、新たな宇宙開発、有人の月面や火星探査、更には民間による宇宙旅行も計画されている。この宇宙空間は太陽からの希薄な風「太陽風」が常に流れており、全くの真空では無い。太陽風は時に秒速800kmもの高速になって地球に到来し、地球周辺環境に大きな擾乱を与える。この擾乱によって、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社会的要請が高まっている。一方、太陽風は極めて希薄で、宇宙空間での観測は限られてきた。太陽風の加速過程は太陽物理学・宇宙空間物理学における重要な未解決問題となっている。

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 年代半ばに打ち上げ予定の Solar-C_EUVST 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。

5.2 科学的背景と未解明の問い

これまでの研究から、太陽風の加速には大気中の磁場が関与していると考えられている。また経験的にも太陽大気における磁場構造が、そこから流れ出る太陽風の速度と関連していることが示唆されている。しかし、太陽風は密度が低く、それ自体の発光を捉えることは難しい。宇宙空間を飛翔する探査機を使って太陽風の観測が可能だが、得られる情報は探査機のいる「その場」だけである。そのため、太陽表面の構造は詳細に調査できても、その構造から流出する太陽風の速度との対応付けが難しいことが、太陽風加速のメカニズムを理解する壁となってきた。太陽風の分布を、宇宙空間全体に渡って高い空間分解能で導出することができれば、太陽表面の構造との対応をつけることができ、加速に寄与する磁場構造・大気構造の議論をすることができる。つまり、本研究の核心をなす学術的「問い」は、太陽風がどのような領域から、どのような速度で流出しているか、である。言い換えると、「太陽風の3次元分布

を決定すること」ができれば、太陽風加速の理解が劇的に向上すると言える。

5.3 これまでの研究成果と研究の現状

太陽風は電離した大気塊であり、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。名古屋大学宇宙地球環境研究所では、この散乱現象に着目し、独自の電波望遠鏡を用いて太陽風を観測してきた[1]。これまでの研究で、太陽圏における太陽風のグローバルな 3 次元構造を導出し、流源における磁場構造の特徴を明らかにするとともに、1980 年代から続く連続観測により太陽活動に伴う太陽風構造の変動を明らかにしてきた[2,3]。既存の装置では 1 日に最大で 80 程度の電波天体の観測が可能だが、この観測データを太陽風の流源面に投影すると、シノプティックマップ上で約 15 度程度の空間分解能になる。これは極域コロナホールから流出する高速太陽風のような大局的構造を分解するには十分だが、活動領域近傍の低速風領域等の細かな構造を分解し、飛翔体等の詳細なデータとの比較から加速機構の解明に迫るには不十分だった。

6. 科学目標

6.1 太陽風加速機構の解明

本研究の目的は、太陽風の加速機構を解明することである。そのために、シノプティックマップ上において 4 度 x4 度という、史上最高の空間分解能で、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を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、ストリーマ、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大気観測データと比較することで、ある速度の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。

6.2 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 のリアルタイムデータを利用した CME の到来予報モデルの開発でも日本は世界をリードしてきた[4]。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[5]。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。この超密な 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。

6.3 次世代太陽風観測装置を中核とした国際連携拠点形成

太陽風の IPS 観測を用いて太陽圏の理解を深め、宇宙天気予報に活用する試みは、世界各国でも進みつつある。これら世界各国の IPS 観測基地局でネットワークを構成することで太陽風や CME の 24 時間連続した超密観測が可能となる。本計画ではこの IPS の国際ネットワーク World IPS Stations (WIPSS) の中核となり、国際連携をリードするとともにその集約拠点を形成する。加えて多数の飛翔体観測 (Parker Solar Probe、Solar Orbiter、BepiColombo、「ひので」および Solar-C 等の各探査機) との連携観測を実施することで、いまだかつてない、質・量の太陽・太陽風データを収集する。これらの観測領域や物理量が異なる観測データを、太陽圏の数値シミュレーションを用いて結合することで、太陽風の磁場・密度・速度といった様々な性質を太陽近傍から地球軌道まで議論することが可能となる。これら地上観測ネットワーク観測、飛翔体の多点観測、およびモデリングを統合した国際共同研究の拠点を形

成し、太陽圏システムの理解をリードすることを本研究の第3の目的とする。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

本研究は太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版)においても、5章「アイデアに基づき立案実施する計画」の一つとして位置づけられている。特に太陽物理学と太陽圏物理学を接続することが主となる本研究は工程表の「2.4.6.太陽圏科学における太陽研究」を実現する上での中核的計画である。また、リアルタイムデータを予報精度向上に直結する形で活かす本計画は「2.4.4.宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究」を実現するためにも重要な位置を占める。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

本計画では太陽風のIPS観測によって太陽風の3次元構造を導出する。導出した太陽風の速度と密度の情報は、実際には視線方向の積分量である。本研究グループでは、多数の方向の視線方向の積分データから3次元構造を復元する手法を開発し、電波の散乱データから太陽風の3次元分布を復元してきた実績がある。復元した太陽風分布は流源面に投影されるため、10倍のデータがあれば、復元された太陽風分布の空間分解能は10の平方根(=3倍以上)に向上できる。これは現在の約15度から約4度の分解能への向上を意味する。つまり、要求性能は現在のIPS観測(1日あたり数十~100天体)を10倍にすること、よって1日に約1000方向でIPS観測をすることである。観測天体数を増やすためには弱い電波天体まで観測対象とするための十分な感度を達成できる開口面積が必要となる。また、多数の天体を同時に観測するために複数のビームが必要となる。また、太陽風速度を導出するためには3カ所以上で同時に電波天体を観測し、IPSを検出する必要がある。次世代装置の計画はこれらの目標を達成するために必要な諸元を持つよう計画されている。観測帯域幅や時間・周波数分解能はデジタル処理で人工雑音を除去するために必要最低限の性能よりもやや高い性能が必要になる。参考までに現在世界で最も優れたIPS観測装置群と言える名古屋大学ISEEの現有装置と次世代装置の比較を以下に示す。

表1 次世代装置の目標とする観測性能

	次世代装置の計画	許容できる最低限の性能	(参考) 現在の名古屋大学ISEEの観測装置
観測量	太陽風速度/密度擾乱	太陽風速度/密度擾乱	太陽風速度/密度擾乱
観測天体数(個)	1,000	1,000	100
観測周波数(MHz)	327	327	327
帯域幅(MHz)	38.5	10	10
時間分解能(ms)	10	20	20
周波数分解能(kHz)	16	32	10,000
基地局数(箇所)	3	3	3
開口面積(m ²)	4000 x 3局	4000 x 3局	4000x1局, 2000x2局
デジタル化IF数	1024	1024	1
ビーム数	8	8	1

9. (オプション) 項目8を実現する手法や装置

上述のIPS観測を実現するために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(山梨県富士河口湖町、長野県上松町、愛知県豊川市)に327MHz帯域に感度を持つアレイアンテナ群を建設する。各基地局は、約4000m²の平面に327MHz帯域に感度を持つダイポールアンテナを敷き詰めた2次元平面フェーズドアレイアンテナで構成され、各ダイポール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。

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・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観測に提供し、太陽風以外の多様な観測対象に対しても活用する。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。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

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、特別推進研究等の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、天文学会等、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。

2021年からはPhase-I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全体の数%の規模のアレイを開発する計画を開始した。戦略的ステップとして、以下のようなマイルストーンを計画している。

- 2018年～2020年 : プロトタイプ装置の開発および実証実験による要素技術の獲得
- 2021年～2020年代前半 : 全体の数%の規模のアレイの建設、観測実験
- 2020年代半ば～2020年代後半 : 1基地局(富士)におけるフルサイズアレイの開発
- 2020年代後半～2030年代前半 : 2基地局(木曾・豊川)におけるフルサイズアレイの開発

参考文献

- [1] Tokumaru, M., et al. 2011, Radio Science, 46, RS0F02
- [2] Tokumaru, M., 2013, PJAB, 89, 67
- [3] Fujiki, K., et al. Solar Physics, 290, 2491
- [4] Iwai, K., et al. 2019, EPS, 71, 39
- [5] Iwai, K., et al. 2021, EPS, 73, 9

1. 提案タイトル: 宇宙天気予測技術開発のための基礎研究

2. 提案者: 塩田大幸: 情報通信研究機構 (NICT)、shiotad@nict.go.jp

西塚直人: NICT, nishizuka.naoto@nict.go.jp

3. 共同提案者リスト:

大辻賢一、久保勇樹 (NICT)、堀田英之 (千葉大学)、草野完也、三好由純、今田晋亮、岩井一正、金子岳史 (名古屋大学) 勝川行雄、庄田宗人 (国立天文台)、井上諭 (ニュージャージー工科大学)

4. 研究の概要 (500 字以下)

日本の宇宙天気研究は NICT を中心にここ数年で急速に進展している。今後宇宙天気の社会的重要性が高まると考えられ、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展開の一つである。その実現ため、太陽フレア・CME・太陽高エネルギー粒子(SEP)・太陽風の物理過程の理解を深化し、それらに基づく予測技術の開発が求められる。本書では、現在実現している予測技術の発展の展望とともに、今後着手すべき研究開発課題について総括する。

5. 背景の説明

太陽フレア、CME、SEP、太陽風は、地球周辺の宇宙環境のじょう乱 (宇宙天気) を引き起こす要因となる。社会での宇宙利用が近年進んでおり、宇宙天気に対するリスクも併せて増大している。宇宙天気は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。宇宙天気の社会影響については新学術領域研究「PSTEP」でまとめられた報告書を参照して頂きたい[1]。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。

太陽から到来する影響は、電磁波、SEP、バルクのプラズマの流れ (CME・太陽風) の順に到来時間が長くなる。宇宙天気の予測は、電磁波で観測された結果に基づいてその後到来する CME や太陽風の影響予測と、太陽フレア発生の事前予測に分けられる。深層学習を用いた太陽フレア予報運用モデル Deep Flare Net の開発で、SDO 観測データを用いた自動的なフレア予報が可能になった[2,3]。ただし、磁場観測が十分ではないリム付近や裏面の活動領域は対象にできていない。さらに長期予報については、浮上磁場・黒点形成の予測がないと困難であり、予報期間は1~2日に制限されている。

SEP についても高エネルギーの粒子は事前予測が必要になる。SEP は太陽フレア発生に伴って生成される数十 keV-数 GeV の高エネルギー粒子であり、30分~数時間で地球に到来する。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、必ずしも全てのフレアに付随して発生するものではなく、その加速過程の解明も課題の一つである。しかし、日本には SEP の研究者が少なく、その予測手段すら確立していない。NICT の航空機被ばく警報システム (WASAVIES) は nowcast であり、GOES や地上中性子モニタに到来中の粒子フラックス観測に基づいて計算している。30年代に月火星探査や宇宙旅行が本格化すると社会的にも SEP の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。

6. 科学目標

我々の目標は、フレア・CME・SEP・太陽風がどの方向にどれだけの規模で発生し地球に影響するかを高精度に予測することである。そのため、AI 技術を使った予測モデル開発とともに、物理過程の理解に基づいた数値シミュレーション予測技法を高度化することにより予測精度を向上する。さらにリアルタイム観測に基づいて太陽面磁場の微細構造から惑星間空間の太陽風を再現し、その中でフレア・CME・

SEP の発生過程をシームレスに再現する数値シミュレーションモデルを構築する。そして 30 年代には数値シミュレーション・観測データ・AI 技術が融合した予測モデル開発が鍵となると予想する。以下、20・30 年代に取り組むべき課題についてまとめる。

6.1. 黒点形成予測からの太陽フレア長期予報

深層学習を用いたフレア予測技術は確立され、現在予報運用に活用されている。しかしながら太陽内部の情報がなく、2-3 日先の黒点の出現や黒点形状の変化を予測することは困難で、フレアの長期予報も難しくしている。太陽内部は乱流状態で、黒点は熱対流の効果でランダムに出現する。近年、熱対流中に磁束管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管がデルタ黒点を作りやすいことが明らかになってきた[4]。従って、太陽表面観測から黒点出現の兆候（捕捉された磁束管）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[5]、出現シグナルの有無については議論の余地があり収束していない[6]。今回新たに機械学習を用いて、観測データと数値シミュレーション結果から光球磁場や流れ場、光強度の観測データを分析することで、黒点出現のサインを特定する。特に従来候補として考えられてきた水平流の出現、音波振幅の減衰、磁束量の増加がどの程度顕著か検証する。また水平流の出現は黒点出現の 3 時間前と言われている。従って 3 時間先の黒点予測が第一関門であり、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 1 か月後にこの領域は黒点が出やすい等の長期的な黒点予報を可能にし、太陽フレアの前兆期間も 2 日以上～1 か月先まで伸長することを目指す。

6.2. 活動領域磁場モデルによるフレア発生予測

フレア発生機構の物理過程の理解に基づいた数値シミュレーション予測技法では、従来、光球ベクトル磁場データから計算した活動領域上空コロナの非線形フォースフリー磁場(NLFFF)モデルが利用されている[7]。近年、NLFFF を利用した太陽フレア発生予測手法「 κ スキーム」が提案され[8]、リアルタイムデータを用いた予報運用利用の検証が近々予定されている。さらにこれと併せて、NLFFF を初期条件とした数値シミュレーションによる検証も計画している。

その一方で、NLFFF モデルには欠点もあり、今後改良すべき課題もある。まずベクトル磁場を観測できる光球では、プラズマ β が大きいため、force-free 条件を満たしていないことが多い。しかし光球ベクトル磁場データをそのまま force-free 磁場モデルの境界条件として使用することは問題で、プラズマ β がより低い彩層の磁場観測を入力とすることで、磁場の再現性を向上することができる。また non force-free 磁場モデル[9]を利用する手段も考えられている。さらに NLFFF モデルはある瞬間の観測データを境界条件とした平衡磁場を求めるが、実際は磁場分布の時間変化に応じてコロナの磁場が発展し、必ずしも平衡状態にあるとは限らない。時系列の観測データを用いたデータ駆動・データ制約 MHD シミュレーション手法の開発[10]を今後一層進めていく必要がある。

6.3. SEP 観測・予測

航空機被ばくに影響のある 500MeV 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。

6.4. 太陽風・CME 到来予測

SUSANOO MHD シミュレーション[11,12]は 25 太陽半径よりも外側の内部太陽圏のプラズマの挙動を計算する。光球磁場 synoptic map からポテンシャル磁場を計算、経験則に基づいて太陽風分布を決めて、内側の境界から伝搬させる。リアルタイムの synoptic map から今後到来する太陽風予測を行う。さらにその太陽風を背景として内部磁場を持つ CME を伝搬させて地球への到来の有無を予測する。

しかしながら光球磁場観測・磁場モデル・太陽風モデル・CME モデルのそれぞれに不定性があるため、定量的な予測は非常に困難である。これらの問題の解決のため、観測データに surface flux transport model を適用 [13,14]した synoptic map の利用、磁場モデルの更新(source surface の変更や current sheet モデルの導入、全球 NLFFF 磁場)、太陽風速度経験則の新バージョンの検証など要素ごとの改良が必要となる。CME については活動領域の磁場構造を参照することに加えて、コロナのダイナミクスの結果をパラメータに取り入れる手法の確立が必要。名古屋大学惑星間シンチレーション (IPS) 観測を利用したデータ同化予測の開発も進める[15, 16]。現在軌道上にある Parker Solar Probe、BepiColombo、Solar Orbiter 等の内部太陽圏探査ミッションによる太陽圏多点同時観測データを利用した太陽風・CME モデルの改良も今後早急に取り組むべき課題である。

6.5. コロナ MHD シミュレーション

NICT では太陽風予測モデルとして SUSANOO、REPPU の二つが運用されている。前者は下部境界の太陽風速度に、後者はコロナ加熱モデルに経験的、現象論的なパラメータ設定を用いており、必ずしも現実の太陽風を再現できない。そこで物理に基づく太陽風モデルを両コードに適用し、さらに AIA 等のコロナ画像観測とのデータ同化を用いることで SUSANOO、REPPU の精度向上を目指す。

CME への発展過程については、活動領域近傍の磁場のみならずその周囲の大規模磁場構造（さらに太陽風を含むプラズマの構造）が関わる可能性が高い。その関係性を理解するために、太陽風が流れている広域の全球のコロナ磁場の中で 6.2 に挙げた活動領域近傍コロナ磁場をより細かいグリッドで再現するような多層格子・適合格子の MHD シミュレーションが必要になると考えられ、そのための数値コードの開発も今後取り組むべき課題の一つである。

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

本提案では、「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版)」の中の「2.4.4 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究」の中の具体的な課題をまとめている。太陽風・CME・SEP に関する研究については「2.4.6.太陽圏科学における太陽研究」の要素も合わせて持っている。

参考文献

- | | |
|--|---|
| [1] 科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価
https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/ | [9] Miyoshi, Kusano, Inoue 2020, ApJS, 247, 6 |
| [2] Nishizuka et al. 2018 ApJ, 858, 113 | [10] Kaneko et al. 2021, ApJ, 909, 155 |
| [3] Nishizuka et al. 2021 EPS, 73, 64 | [11] Shiota et al. 2014 Space Weather, 12, 187 |
| [4] Hotta & Toriumi 2020 MNRAS, 498, 2925 | [12] Shiota & Kataoka 2016 Space Weather, 14, 56 |
| [5] Ilonidis et al 2011 Science, 333, 6045, 993 | [13] Arge et al. 2010 Twelfth Int. Solar Wind Conf., 1216, 343, doi:10.1063/1.3395870 |
| [6] Birch et al. 2016 Science Adv. 2, 7, e1600557 | [14] Iijima et al. 2017 A&A 607, L2 |
| [7] Inoue, S., 2016, Prog. in EPS, 3, 19 | [15] Iwai et al. 2019 EPS, 71, 39 |
| [8] Kusano et al. 2020, Science, 369, 6503, 587-591 | [16] Iwai et al. 2021 EPS, 73, 9 |

1. 提案タイトル

太陽フレアに対する X 線集光撮像分光および軟ガンマ線偏光分光観測を軸にした粒子加速研究

2. 提案者 (名前、所属、Email)

成影 典之 (国立天文台) noriyuki.narukage@nao.ac.jp

3. 共同提案者リスト (名前、所属)

岡 光夫 (カリフォルニア大学バークレー校), 深沢 泰司 (広島大学), 松崎 恵一, 渡辺 伸, 坂尾 太郎 (JAXA), 萩野 浩一 (東京理科大学), 三石 郁之 (名古屋大学), 水野 恒史 (広島大学), 篠原 育 (JAXA), 川手 朋子 (核融合科学研究所), 下条 圭美 (国立天文台), 高棹 真介 (大阪大学), 金子 岳史 (名古屋大学), 銭谷誠司 (神戸大学), 田辺博士 (東京大学), 上野宗孝 (JAXA), 高橋忠幸 (東京大学カブリ IPMU), 高島 健, 太田 方之 (JAXA), 他 PhoENiX ワーキンググループメンバー

4. 研究の概要 (500 字以下)

我々は「磁気再結合に伴う粒子加速」を理解するために、「太陽フレアにおいて、どこで、いつ、どの様に粒子の加速が起きているかを明らかにすること」を目指している。そのために、新機軸の観測の実現、新しいモデルの構築、関連分野との連携という 3 つの手法を取る。観測では、X 線帯域の集光撮像分光観測によって太陽フレア領域全体を測定し、粒子加速場所の特定と加速の時間発展の調査を行う。加えて、軟ガンマ線域の偏光分光観測を行うことで、加速電子の運動の非一様性、加速電子の最高到達エネルギーを調査する。また、観測で得られた知見を深めるために、太陽フレア環境を生み出す MHD スケールと粒子の運動を支配する運動論スケールを融合したモデル計算を実施し、加速粒子の振る舞いを推定する。そして放射モデルを介することで、観測との比較を可能とする。これらの取り組みは、粒子加速を研究する関連分野の各々の強みを活かして実施する。さらにその成果を分野間で還元・融合することで、宇宙科学全体の発展にも貢献する。本研究は衛星計画を軸とし、第 26 太陽活動周期の前半から極大付近にかけて (2030 年代初め~半ば) の実現を目指している。

5. 背景の説明

磁気再結合は、磁力線がつながり変わることによって磁場中に蓄えられた磁気エネルギーを爆発的に解放、急速に運動・熱エネルギーに変換するプラズマ中のプロセスである。この磁気再結合は、実験室からマグネターまで実に 30 桁以上のエネルギー範囲に及ぶ多様な爆発現象を引き起こすことができ、宇宙における爆発現象の主要な駆動機構の一つと考えられている [1]。そして太陽フレアは、この磁気再結合によって駆動されていることが確立している例の一つである。これは太陽が、磁気再結合とそれが生み出す構造を、空間分解・時間分解して観測できる唯一の天体现象であり、かつ観測とモデルで強く制限された 3 次元磁場構造のもとで物理を議論できることから、観測と理論の親和性が高く、その両輪で物理を議論できるためである。観測技術、理論計算はともに進歩しており、今後、Solar-C_EUVST などにより、太陽フレアで生じている磁気再結合の詳細な物理メカニズムにも迫ることが出来るであろう。

この様に理解が大きく進んでいる太陽フレアにおいて、未解決の重要課題として残っているのが粒子の加速である。太陽フレアは、磁気再結合を出発点とするエネルギー変換システムであると言える。具体的には、磁気再結合によって、強電場・衝撃波・プラスモイド・乱流・加速粒子など、マイクロからマクロなスケールにわたる多様なプラズマ構造がシステムとして生じ、その過程において磁気エネルギーが、プラズマの加熱 (熱エネルギー)・プラズマの塊の放出 (磁気流体の運動エネルギー)・個々の粒子の加速 (粒子の運動エネルギー) などに変換される [2]。そして注目すべきは、太陽フレアは解放した多くの (時に約 70%もの [3]) エネルギーを粒子の加速に費やすことが出来る大変優秀な加速器であるという事実である。そして、この加速粒子のエネルギーが最終的に熱や放射に変換されたものが、一般的に知られる太陽フレアの姿である。つまり、粒子加速の理解は、太陽フレアを理解する上で欠かすことのできないキーストーンである。しかし粒子加速機構の解明は容易ではない。まず、太陽フレアは多様なプラズマ構造を生み出し、その各々がエネルギーの変換器 (加速器) として作用可能である。更に、この加速器を生み出す MHD スケールと粒子の運動を支配する運動論スケールには、空間的にも時間的にも桁で異なるギャップがある ($10^7\sim 10^{10}$ cm vs $10^{0\sim 2}$ cm, 10 秒 vs $\ll 1$ 秒)。つまり、加速器としての太陽フレアを理解するためには、多様な MHD 構造を取りまとめシステムとして理解した上で、粒子の運動を追跡する必要がある。しかし、これまでは観測も理論も、これに十分対応できていない状況である。

6. 科学目標

本研究の科学目標は、太陽フレアにおける粒子加速の理解である。目標をより具体化すると、「太陽フレアにおいて、どこで、いつ、どの様に電子の加速が起きているかを明らかにすること」である。

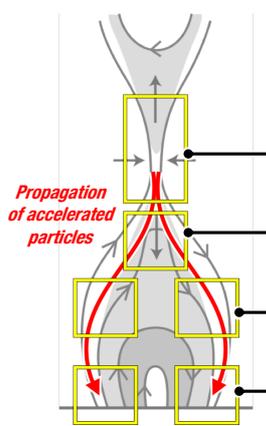
この目標を達成することの意義とその波及効果は下記のようなものが挙げられる。

- 太陽フレアは、解放した多くのエネルギーを粒子の加速に費やすことが出来る大変優秀な加速器であり、太陽フレアを理解する上で、粒子加速の理解は欠かすことができない。
- 粒子加速研究を推進することで、磁気再結合におけるエネルギー変換過程・エネルギー分配の研究も進展する。例えば、エネルギー配分では「熱 vs 磁気流体の運動 vs 粒子の運動 (加速)」や「電子 vs イオン」など。また、熱エネルギーへの変換に着目すれば、コロナ加熱研究にも貢献できる。
- 太陽フレアで発生する粒子加速により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。本研究がめざす粒子加速過程の理解は、フレアによる宇宙天気変動の理解や影響の把握を通じて社会へ貢献し得る。
- 加速された粒子は宇宙の至る所で見つっているにも関わらず、その起源には不明な点が多く残っており、宇宙科学における重要研究課題である。本研究で得られる知見は、プラズマ環境の違い、観測手法の違いという点で、地球・惑星磁気圏や高エネルギー天体の観測で得られている知見と相補的である [4]。これらの知見を合わせることは、統一的な粒子加速の理解の第一歩となる。

次に、本研究の新機軸について説明する。下図は、磁気再結合が作り出す太陽フレアシステムと、その中で加速される粒子について、簡単にまとめたものである。先にも述べたが、本研究の科学目標を達成するためには、太陽フレアをシステムとして理解する必要がある。即ち、図の4つのZONEすべてに対し、そこを占めるプラズマ構造 (加速源候補) の特徴を把握した上で、ZONE1 からZONE4 に至る粒子の流れ (加速中の粒子と加速済みの粒子の両方) を追跡する必要がある。なお、観測で追うのは個々の粒子ではなく、粒子の集合体である。しかし、「加速中の電子集団」が追える軟X線帯域の分光観測は、粒子加速研究の鍵を握るにも関わらず、1990年代以降ほとんど行われていない。「加速済みの電子集団」に感度がある硬X線の観測は行われているものの、既存の観測手法 (すだれコリメーター) はダイナミックレンジが低く、輝度が高いZONE4の観測が主で、フレアの種類によっては時折ZONE2も観測できることがあるという程度である。加速源候補であるプラズマ構造の観測 (紫外線・軟X線の撮像観測や、紫外線の分光観測) においてもダイナミックレンジ不足は否めなく、かつ、精密なプラズマ診断に不可欠な空間・時間・エネルギーの3つの分解能を同時に満たすことができないでいる。

一方、観測では超えられないMHDと粒子のスケールギャップを埋め、太陽フレアシステムの中での個々の粒子の動きの精査を期待されているのが数値計算であるが、現状、それには至っていない。

そこで、本研究では、これらを解決する新機軸の観測装置や新しい数値計算モデルを用いることで (項目9参照)、太陽フレアシステムの中で発生・進行する粒子加速の全体像を調査する (世界初)。



ZONE	Structural characteristic	Property in particle acceleration point of view	Observational capability	
			Past or existing obs.	Requirements for new obs.
ZONE1	Around reconnection site	• Energy release region → Possible acceleration site	Few samples in X-ray obs.	Plasma diagnostic capability for both thermal and non-thermal plasmas in all the ZONES and capability to track the propagation of accelerated particles
ZONE2	Above-the-loop-top	• Boundary between rare and dense plasmas → Possible acceleration site	Sometimes observed as hard X-ray coronal sources	
ZONE3	Flare loop	• Transit area • Trapping area → Possible acceleration site	Few samples in hard X-ray obs.	
ZONE4	Foot points of the flare loop (Solar surface)	• Energy deposition region • Mirroring region	Observed in many flares as the brightest hard X-ray source	

7. 長期的戦略の中での研究の位置付け

本研究の科学課題である粒子加速研究は、「太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表(2019年版)」の「2.4. 長期的戦略の考え方」において、「2.4.3. 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究」に記載されている。また項目6で述べたように、本研究を実施することで磁気再結合におけるエネルギー変換の研究も進展する。これは「2.4.1. 上空大気分光診断による研究」に関連する。また、項目4

で述べたように、本研究は数値計算も研究の柱の一つとして推進している。詳細は項目 9 に記載しているが、粒子計算は「2.4.5. 理論シミュレーション研究」に追記すべき重要テーマである。さらに本研究は粒子加速をキーワードに関連分野との連携を展開しており、これは「2.4.6. 太陽圏科学における太陽研究」「2.4.7. 恒星研究と連携した太陽研究」に関連する。また、項目 6 で述べたように太陽フレアにおける粒子加速過程の理解は、「2.4.4. 宇宙天気・宇宙気候研究と太陽研究」にも関連する。

8. 観測や計算等で得るものとその性能要求

本研究では、太陽フレアシステムの中で発生・進行する粒子加速の全体像を調査するために、「太陽フレアシステムが生み出すプラズマ構造」と「加速電子（加速中の電子と加速された電子の両方）」を観測から定量的に同定し、その振る舞いを精査する。そのためには、フレア領域全域を空間的、時間的に分解した上で、スペクトルや偏光情報を取得、そこから各構造や加速電子の物理量（温度・密度・運動の非一様性など）を抽出する必要がある。以下にそのために必要な性能要求を根拠とともに説明する。

観測能力	要求値（最低限には下線）	根拠
太陽フレアを観測するために必要な性能（全てのエネルギー帯域の観測に共通の要求）		
視野	> 360×360 arcsec ²	フレア領域全体が視野に収まること
観測時間	> 10 minutes	少なくとも、フレア発生前からフレアピークまでを観測できること
時間分解能	< 10 sec per spectrum < 1 sec per lightcurve	スペクトルに対しては Alfvén 時間で規定 ライトカーブに対しては加速電子の伝搬時間で規定
太陽フレアシステムが生み出すプラズマ構造（加速源）と加速中の電子集団を調査するために必要な性能：軟 X 線集光撮像分光		
エネルギー範囲	0.5 keV - 10 keV	プラズマ構造の温度（熱的スペクトル）と、加速中の電子の情報（熱的分布から乖離していくスペクトル）が取得できること
エネルギー分解能	< 0.2 keV (FWHM)	物理情報を引き出すために、輝線群と連続光成分が分離可能なこと
空間分解能	< 2 arcsec (FWHM)	磁気再結合が生み出す構造にはスケールフリーなものが含まれるため、次の様に設定する。大規模フレア（ $\sim 10^5$ km - 140 arcsec）では各 ZONE 内を分解し各プラズマ構造が識別できること。小規模なフレア（ $\sim 10^4$ km - 14 arcsec）では少なくともフレア領域を ZONE1~4 に分離できること。
ダイナミックレンジ	> 10 ⁴	フレアループが増光しても、全ての ZONE をくまなく観測できること
スペクトル毎の光子数	> 1600 photons	温度・密度の測定誤差を 10% 以下に収めること
加速された電子集団の検出と、その伝搬を追跡するために必要な性能：硬 X 線集光撮像分光		
エネルギー範囲	5 keV - <u>30 keV</u> , 100 keV	加速電子の情報（熱的分布から乖離した冪型スペクトル）の取得のため
エネルギー分解能	< 1 keV (FWHM)	加速状態が異なる成分（冪型スペクトルの折れ曲り）も検出できること
光源位置の決定精度	< 2 arcsec	空間分解したプラズマ構造（加速源候補）に対して、加速電子が存在する領域の位置を決定することが重要であり、その精度は、プラズマ構造の調査に必要な空間分解能と同程度である必要がある。なお、この位置決定精度を達成するため、その 2 倍程度の空間分解能も必要。
空間分解能	< 4 arcsec (FWHM)	
ダイナミックレンジ	> 10 ³	ループの足元が増光しても、全ての ZONE をくまなく観測できること
スペクトル毎の光子数	> 3200 photons	加速電子の総数の測定誤差をファクター2 以下（50%~200%）に収めること
加速された電子の運動の非一様性と最高到達エネルギーを調査するために必要な性能：軟ガンマ線偏光分光		
エネルギー範囲	20 keV - <u>300 keV</u> , 数 MeV	より高いエネルギーにまで加速された電子の情報を取得するため
エネルギー分解能	< 10% (FWHM)	加速状態が異なる成分（冪型スペクトルの折れ曲り）も検出できること
測定可能な偏光度の下限値	< 10% in >M5 class flares	加速電子の運動の非一様性を評価するため [5]。ただし測定手法に起因し、偏光測定エネルギー範囲は 60 keV - 300 keV になる。
スペクトル毎の光子数	> 500 photons	上記の偏光測定精度を達成するため

9. (オプション) 項目 8 を実現する手法や装置

項目 8 を達成するために、次の 3 つの観測装置で構成する衛星計画 PhoENiX を検討している [6]。

【軟 X 線集光撮像分光装置】 「ガラス研磨した高精度 X 線斜入射ミラー」と「CMOS 検出器を用いた高速度カメラ」で構成する。カメラは観測ロケット実験 FOXSI で、ミラーは放射光で実績がある。

【硬 X 線集光撮像分光装置】 「電気鋳造で製作する高精度 X 線斜入射ミラー」と「CdTe 検出器を用いたイベント駆動型カメラ」で成る。カメラは FOXSI で実績があり、ミラーは FOXSI-4 で実証する。

【軟ガンマ線偏光分光装置】 「Si/CdTe コンプトンカメラ」と「BGO アクティブシールド」で構成する。この装置は、「ひとみ」衛星で実績のある技術を使用する。なお、空間分解能は持たない。

【他の観測との連携】 太陽フレアのエネルギー源である磁場測定、そして、フレアが生み出すプラズマ構造や加速粒子の情報が得られる他の観測手法との連携も図る。例えば、EUVST との同時観測が実

現すれば、高空間分解された構造情報、視線方向速度、電離温度、イオン温度などの情報が付加され、加速源や加熱の研究が大きく進展する。また電波観測 (EOVSA など) との共同観測では、「加速済みの電子」の情報が異なる手法 (磁場にも感度があるジャイロシンクロトロン) で取得できるため、加速電子の調査が進むと同時に、コロナ磁場の推定にも活用できる。また PhoENiX と類似の観測装置を L5 にも配置できれば、3次元構造はもちろん、放射強度の違いから粒子運動の非一様性が測定できる [7]。

次に、数値計算について述べる。PhoENiX の観測で得られた情報から物理を最大限引き出すために、また、PhoENiX では観測できないミクロな物理過程を追うために、次の3つのアプローチを取る。

【MHD 計算 + α 】 太陽フレアが生み出す様々なプラズマ構造 (加速源候補) は流体近似が成り立つため、MHD 計算が利用できる。その場合、光球観測磁場を直接計算へ取り込み、コロナを含めた3次元磁場構造も再現できる [8]。一方、MHD では粒子の振る舞いを取り扱えないため、段階を経た工夫を施していく。最初はテスト粒子を用いることで、固定された MHD の世界の中での粒子の振る舞いを調査する [9]。ただし、テスト粒子計算では、粒子の運動が MHD の世界に反映されない。そこで次に述べる粒子計算を用い、その結果を MHD の世界にフィードバックさせるモデルの構築も目指す。

【粒子計算】 粒子計算は、個々の粒子の運動と、その運動が生み出す外界への影響も計算するため、粒子加速研究に適している。ただし現時点では、CPU パワーの限界から太陽フレアシステム全域をカバーする計算は行えない。そこで、局所的な粒子計算を行い、上記の MHD へのフィードバックをかける。一方で、将来のフル粒子計算を視野に、次世代コンピューティング環境を活かすための計算コードの開発も実施する。粒子計算は地球・惑星磁気圏の研究で盛んであり、この分野との連携で推進する [10]。

【放射モデル計算】 上記の方法で計算した結果 (電子のエネルギースペクトル) を観測 (X 線スペクトル) と比較するために、X 線の放射モデル計算も実施する。これまでの太陽分野の研究では、簡易化された放射モデルが用いられてきたが、今回、X 線天文分野で活用されている Monte Carlo 計算を導入し、現実的な放射モデルを構築することで、PhoENiX で得られる測定に対応させる [11]。

また、数値計算の精度向上のために、PhoENiX の観測結果を初期条件の設定に活用することも行う。つまり、観測と数値計算は相補的關係にあり、この両輪で科学成果の最大化を狙う。この様な方法で粒子加速を含む太陽フレア研究を行う動きは国際的にも起きており [12]、これらとの連携も行っている。

10. (オプション) 戦略的なステップアップ

【X 線撮像分光データの解析方法と新しい数値計算手法の普及】 PhoENiX で取得する X 線撮像分光データは、太陽研究者にとっては新しい種類のデータであり、その取り扱いに距離を感じる研究者もいるであろう。一方、関連分野の研究者にとってはデータの種類としては馴染みがあるが、太陽のデータということで距離を感じる場合があるであろう。これらの距離感を縮め、PhoENiX が取得するデータの科学的価値を認識してもらうためには、実際にデータを解析して頂くことが一番である (論文にまで至れば最高である)。そこで、我々が保有する観測ロケット実験 FOXSI やキューブサット MinXSS の太陽 X 線撮像分光データを解析ツールと合わせて公開すると共に、データ解析ワークショップも開催する。

一方、数値計算においても、例えば、既存の MHD 計算に工夫を施すことで、粒子加速というこれまでアプローチが困難であった重要科学課題に挑めることを講演、論文、ワークショップなどを通して示していく。またコードの開発においては、関連分野と共通のツールを使うなど、親和性も考慮する。

これらにより、太陽コミュニティはもちろん、関連コミュニティからの支持拡大を目指す。

【太陽 X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 の実施】 PhoENiX のキー技術や研究手法の一部は、観測ロケット実験 FOXSI シリーズで培い実証してきた。2024 年春に打ち上げ予定の FOXSI-4 では、いよいよ太陽フレアの X 線集光撮像分光観測に挑む (世界初)。フレア観測に向け、ミラーや検出器のアップグレードを実施しているが、これらは PhoENiX への展開も見据えたものであり、技術成熟度レベル (TRL) を向上させる絶好の機会である。また、取得するデータは、PhoENiX と同種のフレア観測データ (一部性能は劣るが) であり、これらを用いることで、PhoENiX で挑むサイエンスの予行演習が行える。この様に FOXSI-4 を実施することで、PhoENiX の科学的・技術的実現性を高める。

参考文献 [1] Tajima and Shibata, "Plasma astrophysics", Cambridge, Mass.: Perseus Publishing (2002), [2] 太陽フレアシステムの図: <https://phoenix-project.science/narukage-02>, [3] Aschwanden et al., ApJ 836, 17 (2017), [4] Oka et al., Space Science Reviews, 214, 219 (2018), [5] Jeffrey et al., A&A, 642, A79 (2020), [6] 衛星計画 PhoENiX のホームページ: <https://phoenix-project.science/>, [7] Krucker et al., Res Astron Astrophys 19, 167 (2019), [8] Kaneko et al., ApJ, 909, 155 (2021), [9] Kaneko et al., in prep (2021), [10] Zenitani & Kato, Comput Phys Commun, 247, 106954 (2020), [11] Odaka et al., ApJ, 740, 103 (2011), [12] NASA Heliophysics DRIVE Center "SolFER": <https://solfer.umd.edu/>