

**太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表
(2019年版)**

2019年11月05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 横山央明 (東京大学)

(空きページ)

目次

改版履歴	5
1 目標 (将来ビジョン).....	7
1.1 日本の戦略・狙うサイエンス.....	7
1.2 背景となる世界の動向 (サイエンスとプロジェクト)	8
1.3 期待される成果.....	9
2 研究ロードマップ.....	10
2.1 現在までの観測研究基盤.....	10
2.2 2030年代までのロードマップ案.....	11
2.3 背景：優先度の考え方	12
2.4 長期的戦略の考え方.....	13
2.4.1. 上空大気分光診断による研究.....	14
2.4.2. 光球・彩層磁場診断による研究.....	15
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.....	17
2.4.4. 宇宙天気・宇宙天候研究と太陽研究.....	18
2.4.5. 理論シミュレーション研究.....	19
2.4.6. 太陽圏科学における太陽研究.....	21
2.4.7. 恒星研究と連携した太陽研究.....	22
3 早期具体化させる計画の概要	23
3.1 次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C_EUVST	23
4 検討中の計画の概要	28
4.1 磁気リコネクション粒子加速ミッション PHOENIX.....	28
5 小規模計画：アイデアに基づき立案実施する計画.....	30
5.1 次世代 IPS 観測装置	30
5.2 SUNRISE 気球実験.....	31
5.3 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4.....	32
6 2030年代以降に向けたアイデア種.....	33
6.1 太陽極域ミッション.....	34

(空きページ)

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 05 日	大幅改訂; 宇宙科学研究所理工学委員会に提出

(空きページ)

1 目標 (将来ビジョン)

1.1 日本の戦略・狙うサイエンス

太陽研究者連絡会を中核とする、わたしたち日本の太陽物理学コミュニティが今後 10-20 年に狙うサイエンスは、

- 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)

であり、そのためにとる戦略 (図 1) 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 (第 5.3 節)、天体高エネルギー物理学・地球惑星科学など周辺分野との交流の中核とすること、

であり、さらには

- 2020 年代の 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

も並行して進めることである。



図 1. 太陽・太陽圏研究領域における日本の戦略と世界の大型計画動向

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、の理解が挙げられる。ここでは「彩層・コロナダイナミクス」と「プラズマ爆発現象」とに着目する。

外層大気加熱・恒星風の謎については、「ひので」ミッションは Alfvén 波の同定などの重要な貢献を行ったが、最重要課題である「光球熱対流による磁気エネルギー注入とコロナ加熱機構との結合」が未だに理解できていない。この解決のためには、彩層・遷移層・コロナにおける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、我々は Solar-C_EUVST ミッションの提案に至った。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 IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) ミッション、米国 NSO (National Solar Observatory) が建設中の大型地上太陽望遠鏡 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope) 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 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（磁力線のつなぎかえ）という描像をもとに、次の段階へと研究の方向が進んでいる。それは爆発現象の発生機構の解明とその予測である。爆発現象は地球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。特に、米国において宇宙天気予測研究は重要な（恐らく優先的な）プロジェクトとなりつつある。欧州、中国、韓国でも同様の傾向が近年目立つ。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、フレアトリガの問題に挑む。今まで捉えきれてこなかったフレア発生予兆現象を捕捉することを目指し、宇宙天気予測研究においても重要な貢献をする。

現在、ESA は Solar Orbiter ミッションの打ち上げ直前（2020 年予定）で、NASA は Parker Solar Probe

を運用中である。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。Solar-C_EUVST は、このいずれとも目指すサイエンスの方向性は異なり、互いに相補的な役割を担う。Solar-C_EUVST は、日本・米国・英国が「ひので」で培った宇宙望遠鏡の技術的基盤に立脚したユニークな戦略をとっており、他グループでは実現困難なミッションであると認識している。

惑星科学とのかかわりでは、Kepler 衛星等により系外惑星観測は大きな展開を示し、今後 TMT (Thirty Meter Telescope) などは、惑星自身の発見ではなく、惑星環境、特に大気がどのようなものなのかを理解しようとしている。一方、太陽系惑星探査ミッションは NASA をはじめとして各国が火星・水星・木星などに探査機を送り込み、その惑星環境、ひいては太陽系の起源に迫ることを目標としている。太陽系惑星環境、特にその大気環境の進化を理解するためには、太陽系の歴史を通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)、さらには太陽輻射の短期・長期的変動の理解が欠かせない。そしてその答え合わせを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

われわれが提案するミッション・地上観測を戦略的にすすめることで期待される成果（図2）は、以下である。

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：太陽はそれをとりまく太陽圏およびその中にある**惑星圏**と不可分であり、過去から現在まで惑星に輻射・太陽風・突発現象・宇宙線環境というかたちで影響を与えている。これまでも地球磁気圏へ及ぼす太陽風の影響という観点で地球科学と太陽圏科学とは不可分のものとして研究がすすめられてきた。この研究は現在、太陽系の他惑星とくに火星・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。

地球・生命圏との繋がり：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。

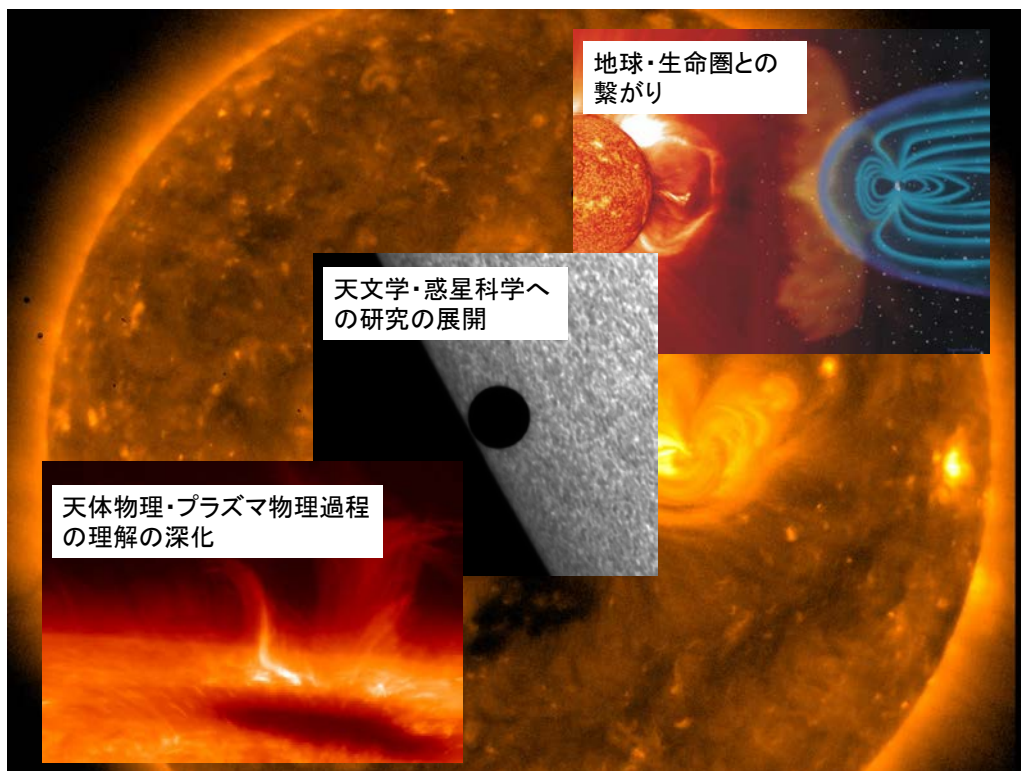


図 2. 太陽物理学研究推進によって期待される成果と、近接研究領域への波及効果

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、野辺山電波ヘリオグラフ (1992 年観測開始) による電波観測、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3)。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Parker Solar Probe(NASA)やSolar Orbiter(ESA)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

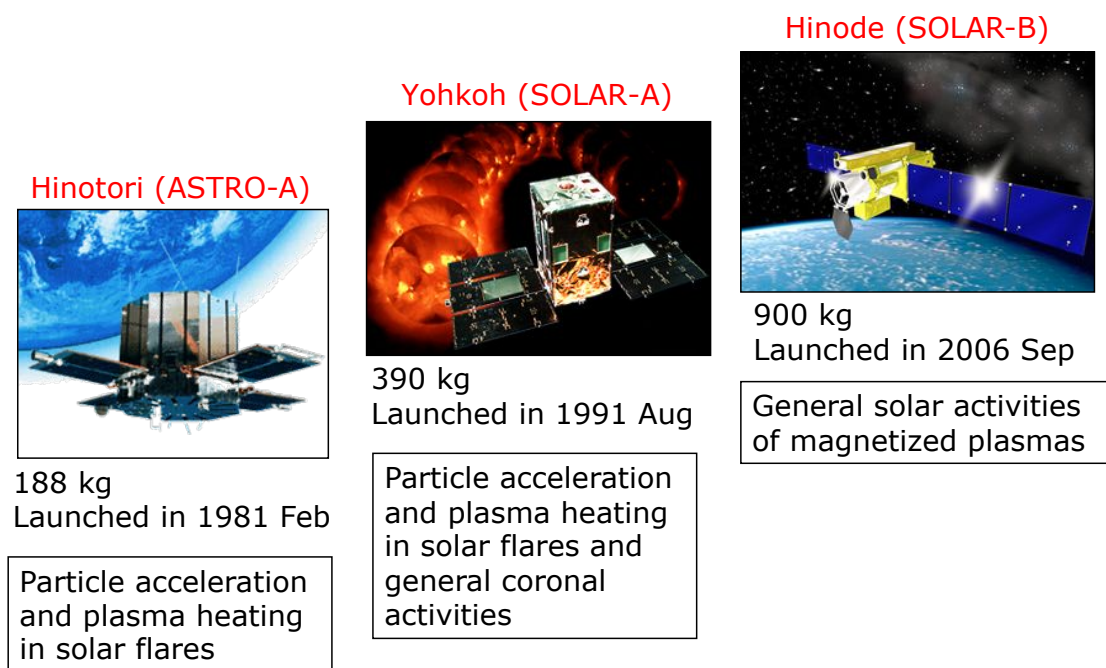


図3.日本が実現させた歴代の太陽観測衛星

2.2 2030年代までのロードマップ案

第1章で述べた世界の動向を踏まえて設定された「日本の戦略・狙うサイエンス」を進めるために、2030年代に向けた太陽研究分野のロードマップ案を図4に示す。ロードマップは、「狙うサイエンス」

を推進するための行動目標であり、太陽物理学コミュニティはこのロードマップの実現に向けて努力をする。一方、その後の研究動向や研究環境の変化などを踏まえて、「狙うサイエンス」の成果最大化のためにロードマップの最適化を図ることは重要であり、研究コミュニティでの議論などに基づき改訂が行われるべきものである。

2020年代のロードマップは、1.1節にまとめた戦略を推し進めるように設定される。最優先事項としての Solar-C_EUVST ミッションを 2025 年頃の実現した後については、多様な方向性が存在する。2020 年代終盤以降のロードマップの定義のためには、科学計画立案・要素技術開発・実証観測実験を進め、2020 年代前半にその方向性を絞り込み優先度を設定していくことが重要である。

太陽研究分野のロードマップ

観測はより上空大気へ、磁場診断(偏光分光)かつ温度シームレスに(分光)



図 4. 2030 年代までの太陽研究分野のロードマップ案 (2019.8)

2.3 背景：優先度の考え方

日米欧の 3 宇宙機関 JAXA/NASA/ESA により 2016 年に組織された Next Generation Solar Physics Mission Science Objectives Team (NGSPM-SOT) は、世界の太陽研究コミュニティから収集した white paper や討議を通じて、2020 年代に次世代太陽観測衛星により優先的に行なうべき研究課題を特定し、そのために優先的に実現すべき観測装置や国際協力のもとでの実現手法に関して報告書 NGSPM-SOT

Report¹ (July 2017)としてまとめ、3宇宙機関に答申した。報告書では、最優先の科学課題として、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、3) 太陽周期活動をつくる機構、の3つの大課題に対して、2020年台に解決すべき具体的な課題の明確化、その明確化に求められる観測や計測を定義した。このうち、課題1)2)の解明には、要素的スケールで物理機構を追求する観測的方向性が重要であるのに対して、課題3)の解決には、太陽内部を含む大スケールで物理機構を追求する観測的方向性が要求される。1.1節にまとめられた「日本の戦略および狙うサイエンス」は、このNGSPM-SOT報告書で優先度を与えた3つの大課題のうち1)と2)の課題に重点化するものである。この課題に取り組むために、a) 上空大気(彩層からコロナ)診断を行う高解像度分光望遠鏡、b) 高解像度コロナ撮像望遠鏡、c) 高解像度光球・彩層磁場診断望遠鏡の実現が、NGSPM-SOT報告書で答申されている。2015年にISASに提案した戦略的中型SOLAR-C計画は、これらa)b)c)を一つの衛星プラットフォーム上で実現を目指すものであったが、科学計画は良い計画であると評価されたものの、3つの宇宙機関が連携した国際協力の立ち上げの難しさから、実現が見送られた。その後、2020年代に考えられるリソース等をあらためて考慮し、2.2節のロードマップ案に示すように、日本の太陽研究コミュニティはa)を最優先で実現させることに全力を注ぎ、また欧米の4m級大型地上太陽望遠鏡への参加によってc)を部分的に実現させ、b)は米国等が主導するプロジェクトへの協力というかたちで実現させることで、国際連携した複数プロジェクトの船団として3つの観測望遠鏡を手に入れ研究を推進する戦略に舵を取るようになった。

2.4 長期的戦略の考え方

2.3節のように2020年代の研究ロードマップが見えてきたところであるが、その先の2030年代まで長期的に目指す研究方向性を踏まえることは研究を強力に推進する上で重要である。この節では、2030年代も踏まえた今後20年の戦略について議論する。

1.3節に述べたように、太陽系科学の一翼を担う太陽物理学は、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」に貢献していくことが求められる。さらに、太陽やジオスペース(電磁気圏・大気圏)のプラズマ現象は遠方の天体とは違って直接的な観測が可能であるため、多くの天体現象において要となる「プラズマ物理現象の素過程を解明する」ための絶好の実験場であり、そのような基礎物理の解明にも貢献が一層求められる。このような要請にも応えることを踏まえて、長期的戦略の考え方をそれぞれの課題について以下に述べる。なお、以下からわかるように、太陽研究の方向性には様々な多様性があり、大型計画を推進する上で成果を最大限に引き出せるように優先順位を明確にして推進することも必要である。

¹ https://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/SOLAR-C/Documents/NGSPM_report_170731.pdf

2.4.1. 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。

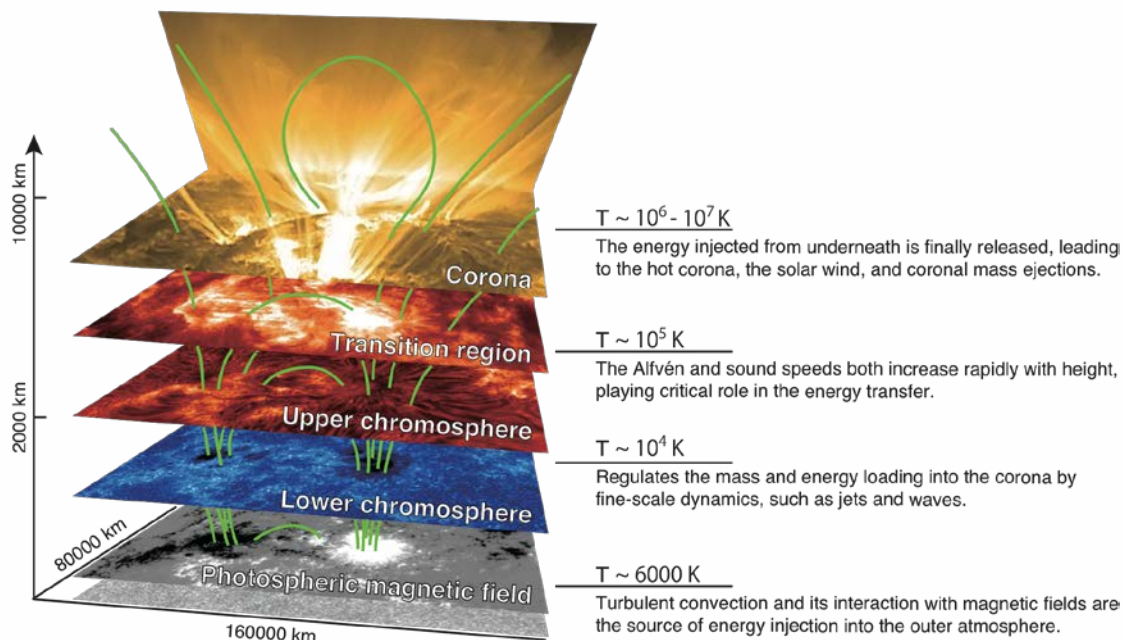


図5 太陽光球から彩層・遷移層・コロナの構造

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5）。このシステムの中で発生する太陽磁場の活動を本質的に理解するには、基本構造間でやりとりされるプラズマのエネルギー・質量の流れを定量的に観測してその物理過程を把握することが不可欠である。そのためには、（光球より上空の）彩層からコロナまでの温度範囲を抜けなくカバーし、基本的な空間スケールであると考えられている0.5秒角程度の構造を解像しかつ磁気的活動現象を支配する Alfvén 波を分解できる時間分解能で、加熱・加速などを理解するのに重要な速度場・温度・密度などの物理量を診断する、ことが重要になる。これまで「ひので」、「Solar Dynamics

Observatory(SDO)」、「Interface Region Imaging Spectrograph(IRIS)」衛星のどの衛星観測でも行えなかった、高空間・時間分解能で行うシステ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。

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 (~10 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時期リコネクション問題に挑む。

また、フレア・コロナ質量放出 (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か予測することを試みる。

2.4.2. 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 (2021 年実施予定)と観測ロケット実験 CLASP (2015 年実施)・CLASP2 (2019 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、2020年の観測開始を予定している米国の Daniel K. Inouye Solar Telescope (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。2021 年に計画する 3 度目の飛翔観測 SUNRISE-3 に向けて新規開発している SCIP では、多数の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。これにより、「ひので」衛星で培われたスペース偏光分光観測技術を維持・発展させ、口径 1m 超の大型宇宙望遠鏡による磁場観測を行う 2030 年代以降の計画へとつなげる。

一方、紫外線域には彩層・遷移層が発するスペクトル線が多数存在し、かねてより温度・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た (Trujillo Bueno et al. 2011, Belluzzi & Trujillo Bueno 2012、ほか)。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 線にて直

線偏光のみならず円偏光の計測にも成功し、彩層上部磁場の定量的導出が期待されている。遷移層に達するがハンレ効果しか利用できないライマン α 線と、ハンレ・ゼーマン両効果が併用できる Mg II k 線とは相補性が高いことから、CLASP と CLASP2 の結果を吟味することで、両スペクトル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は、2030 年代早期に実現するプロジェクトとして有望であり、それにより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。

なお、彩層・遷移層の診断では欠かすことのできない非熱平衡状態や 3 次元効果を考慮した輻射輸送、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。上述の観測で得られる偏光分光データに先端的な解析手法を適用することで、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。

2.4.3. 高解像度コロナ撮像分光や電波観測による太陽研究

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 (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のが非常に難しく、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) 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た。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 で行うことにより、次期太陽極大期において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、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。これらの干渉計による太陽・太陽圏観測によって、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)。

2.4.4. 宇宙天気・宇宙天候研究と太陽研究

太陽が起こす様々な現象は、宇宙天気・宇宙気候とも言われるように、惑星間空間を通して地球環境・人類社会にも大きな影響を与えている。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、純粋科学とは異なる実用面の役割が強く求められている。実際、太陽の大規模爆発現象が、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の様々な面に打撃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。

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、わが国においても国立天文台・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)。

また太陽と、その影響を受ける側である地球磁気圏・電離圏、気象の研究者の共同による、地球に影響する太陽諸現象の発生予報の確立を目標とした研究も急速に進んでいる。特にこの面の研究を進めることに大きく貢献している科研費新学術領域研究「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」は、太陽嵐・地球電磁気・周期活動といった予測の基礎になる研究をそれぞれ柱とするのに加え、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をもう一つの柱として、2015~2019 年度の 5 年にわたって進められてきた。PSTEP では、太陽・地球関連の広い分野の研究者が連携して研究成果を挙げ、高い評価を得ている。太陽・太陽圏の研究において、天文学や地球電磁気学といった個別の分野の垣根を取り払うにとどまらず、さらに学術という枠をも超えて広い範

困で産学が連携する形は、これからのこの分野の在り方を示す形といっても過言ではない。このような分野融合研究をさらに展開すべく、次なる研究の枠組みが議論されている。

諸外国においても、太陽の観測計画として科学目的のものだけでなく、宇宙天気の実用面に軸足を置いたものも提案されている。例えば欧州宇宙機関では、L1/L5 というラグランジュ点に宇宙機を置き、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の方向から監視して宇宙天気予報を行う計画を推進している。またアメリカでは、現在地球上の 6 カ所に太陽望遠鏡を置いて 24 時間休むことなく太陽表面の爆発現象をとらえる観測が行なわれているが、さらにそれら現象のもとになる磁場進化までをとらえられるよう望遠鏡群を更新増強する計画が提案されている。このような計画への我が国の貢献も期待されている。また、近年急速に進む機械学習や深層学習の技術が宇宙天気研究に導入されている。この動きは、宇宙天気研究に限定されない研究分野全体への広がりを見せつつある。

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。科学衛星のような先端的・大規模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、今後の太陽分野の向かうべき方向であり、同時に我が国の太陽物理学が目指す道筋でもある。

2.4.5. 理論シミュレーション研究

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。特に、衛星計画と連携して、下記の研究を進めることで、太陽・太陽圏研究の飛躍的な発展を実現する。

なお、本計画の実現のために、名古屋大学宇宙地球環境研究所に統合データサイエンスセンターを整備し、Solar-C_EUVST のデータ解析とシミュレーション研究を統合して進める体制を整える。これを利用して、東京大学、京都大学、国立天文台、宇宙科学研究所及び全国の大学、研究組織の研究者が協力して研究開発を実施する。これらの研究は、当然のことながら Solar-C_EUVST をはじめとする観測装置の開発と密に連携して進められる。

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。このモデルは、Solar-C_EUVST 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 대기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²で満たされているため、そのダイナミクスを理解するには、コロナ磁場の3次元構造を知る必要がある。「ひので」による精密な光球磁場ベクトルの観測以来、このコロナ磁場を太陽光球面磁場の観測データからフォース・フリー（力学平衡）近似を使って推測する試みが進められている。しかし、光球は高 β 領域であることからこのフォース・フリー磁場モデルの信頼性は依然低い。それ故、光球に比べて β 値が低い彩層におけるベクトル磁場を観測することは、コロナ磁場の3次元構造を知る上で有用である。ただし、活動性の高い彩層での磁場観測を利用した3次元磁場モデルを開発するためには、今後いくつかの課題を解決する必要がある。それ故、大型地上太陽望遠鏡 DKIST 他による彩層磁場の取得までに3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。

太陽ダイナモシミュレーションの開発

² β 値は磁気圧に対するプラズマ圧の比を表す。

ポスト京スーパーコンピュータ「富岳」を利用し、(1)太陽内部でのダイナモ磁場生成と(2)内部磁束からの表面黒点の生成を再現するシミュレーションを実現する。これにより、太陽内部のダイナモが太陽風及びフレアを通して太陽惑星圏へ影響を及ぼす過程を初めて連続的に解明する。この研究は、太陽黒点周期活動の謎に迫ると共に、惑星や銀河などの天体磁場生成の理解にもつながる普遍的重要性をもつ。また、惑星環境に多大な影響を及ぼす「スーパーフレア」の原因でもある巨大黒点生成の機構解明にもつながる。

2.4.6. 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。Parker Solar Probe (PSP : NASA)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年打上げ予定のSolar Orbiter (SO : ESA)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。

2.4.7. 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。

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リング則が、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 (Transiting Exoplanet Survey Satellite) 衛星など、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 XRISM (2021 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 Parker Solar Probe、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 (Coronal Mass Ejection) 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。

3 早期具体化させる計画の概要

太陽コミュニティが今後具体化を進める計画である 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の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其の変化を高空間・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。

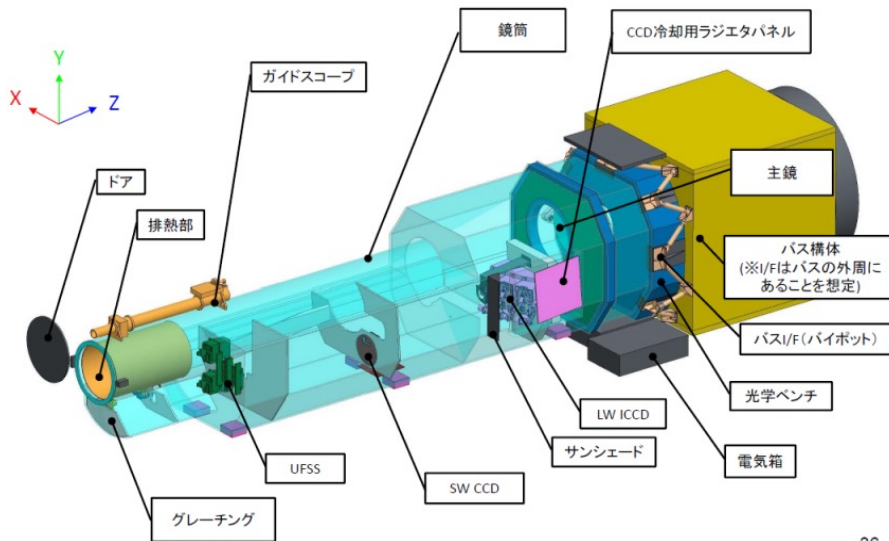


図 6 Solar-C_EUVST 概念図

図 6 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・イプシロンロケットで太陽同期極軌道に投入する。軌道上におけるノミナル観測期間は2年間を予定し、JAXA 宇宙科学研究所（相模原）にて衛星管制・科学運用を行う。取得される観測データは地上受信局で受信され、名古屋大学で運営されるサイエンスセンターで科学者向けの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 0.5 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校正したり、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、科学目的・戦略の尖鋭化による次期太陽衛星計画の早期実現をめざして、太陽研究者コミュニティで討議を重ねてきた。2016 年には、国際検討チーム (NGSPM-SOT ; JAXA・NASA・ESA から選抜された 14 名の研究者) が招集され、世界の太陽物理研究者コミュニティより募った白書 (34 提案の科学目的、概念計画) を元に、太陽物理学全領域の科学課題を抽出し、2020 年台中庸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。米国では、NASA の Partner MoO (Mission of

Opportunity) 公募に米国研究者グループが Solar-C_EUVST への参加を正式に提案し、2019 年 9 月に採択され Phase A 研究を開始した。ESA についても、2019 年 2 月、観測データのダウンリンクを中心とした支援でミッションに参加するための検討を正式に開始した。欧州の各国宇宙機関からは参加に関する意向表明書が JAXA に提出され、各研究機関での技術検討への支援が行なわれている。

4 検討中の計画の概要

以下の計画について、具体化に向けて関連する研究者グループが検討を行っている。太陽研連では、その検討を支持している。

4.1 磁気リコネクション粒子加速ミッション PhoENiX

計画の概要

PhoENiX (Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region) 計画は、太陽コロナ中の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。そのための観測手法として、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」を用いる。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される。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衝撃波、プラズマの塊（プラズモイド）、アウトフロー、電流シートなどが想定される。これらを軟 X 線～硬 X 線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。

X 線～ガンマ線帯域で太陽フレアを観測する本計画は、宇宙空間からの定常的な観測が必須であり、衛星を用いて次の太陽活動極大期である 2025 年頃の実現を目指す。

本計画は、粒子加速の理解を目指す研究者が、既存分野の枠組みを超えて参加・推進する分野間連携計画である。

学術的な意義

高エネルギー粒子（加速された粒子）は宇宙の至る場所で発見されているが、「加速粒子の起源は何か？」という問題は宇宙科学における未解決の難問である。

本計画では、この難問解決へのアプローチとして、太陽フレアを観測する。太陽フレアは、高エネルギー粒子が生成される過程全体を空間・時間分解して観測できる唯一の観測対象であると同時に、寿命は数分から数十分と短く、現象の始まりから終わりまでを通して観測することができる。また、様々な規模のフレアが頻繁に発生するため、サンプリングにも事欠かない。これらの点において太陽フレアは、極めて優れた観測対象である。

ただし、既存の観測手法では、ダイナミックレンジの不足が深刻で、加速されつつある電子の観測が行えていない。加えて、空間・時間・エネルギー分解能の同時達成が困難であり、加速電子の情報が十分取得できていないのが実情である。つまり、太陽フレアの持つ利点を活かしてきれていないのである。

本計画では、これら観測上の問題点を最新の技術を用いて解決する。つまり、高精度ミラーで高いダイナミックレンジを確保しつつ高い空間分解能を達成し、高速度カメラ・高精度検出器により光子計測を行うことで空間・時間・エネルギー分解能の両立を行う。また、偏光分光装置も搭載することにより、太陽フレアにおける加速電子の非一様性の情報も取得する。

この様に、PhoENiX で得られる太陽フレアの観測データは、これまでの観測とは異なる次元で、これらを複合的に解析することで、加速中の電子の情報を詳細に取得することが可能になると見込んでいる。

PhoENiX で得られる太陽フレアにおける粒子加速に対する知見は、プラズマ環境の違い、得られる情報の質的違いという点で、地球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。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り、高い学術的意義を持つ。

国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

粒子加速は、宇宙プラズマ環境の至る場所で観測されており、太陽物理学、地球磁気圏プラズマ、高エネルギー宇宙物理学といった各分野でそれぞれ独立に研究されてきた。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」(Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 衛星がその後を継ぎ、硬 X 線・ガンマ線観測による高エネルギー粒子の研究を牽引してきたが、2018年夏に運用を終了し、現在、世界的に後継機が望まれている状況である。

このような状況の中、本計画によって、太陽フレアにおける粒子加速に対する画期的な観測が提案された。この提案は、様々な分野で粒子加速を研究する研究者らの高い関心を集め、PhoENiX 計画を推進する新しい研究者コミュニティが形成されつつある。このコミュニティには、太陽物理学、地球磁

気圏プラズマ、高エネルギー宇宙物理学、プラズマ実験室といった既存コミュニティに所属する研究者らが国内外問わず参加しており、本計画の屋台骨となっている。

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 年代から宇宙からのX線観測を世界的に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学分野と太陽物理学分野の連携の系譜を汲んだミッションであり、日本が育ててきた科学研究、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 小規模計画：アイデアに基づき立案実施する計画

研究者個人や少数研究者からなる研究グループが、独創的なアイデアに基づいて立案して、尖鋭的に実施する研究計画がある。主として外部資金（科研費など）を元に実施されることを想定している。本文書の改訂の際に、太陽研連会員に対して研究計画の依頼（2019/9/9 提出〆切）を行い、それに応じて寄せられた計画について、その計画概要、目的・学術的意義、国内外の動向（第1章）に対する計画の位置付けについて、そのまま掲載する。

5.1 次世代 IPS 観測装置

計画概要

太陽風中の擾乱が電波を散乱することで、惑星間空間シンチレーション（IPS）現象が発生する。名古屋大学では独自の IPS 観測装置を開発し、国内3カ所に設置することで、地上電波観測から太陽風の速度と密度を測定し、太陽圏の物理過程の解明に 1983 年から取り組んできた。近年、特異な太陽活動に伴い複雑かつ低密度な太陽風構造が形成されるようになり、より詳細で稠密な観測データが必要となってきた。そこで、2020 年代前半の実現を目指して、「次世代 IPS 観測装置」の計画が進められている。本計画では、327MHz に感度を持つ、多数のダイポールアンテナで構成された 2 次元平面フェーズドアレイの電波望遠鏡を開発する。4,000~10,000m² の大きな物理開口面積を持つ超広視野の光学系を実現することで多数の天体（電波源）を観測するとともに、駆動部を無くすことで、1 年を

通して安定した運用を実現する。受信系には専用のデジタル信号処理装置を開発し、デジタルマルチビームフォーミングを実現することで、多数の天体を同時に観測し、観測効率を飛躍的に向上させる。

目的と学術的意義

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、太陽圏物理学には未だ重要な問題が多く残されている。加えて、コロナ質量放出（CME）の太陽圏内の伝搬は宇宙天気予報の観点でも重要な研究対象である。次世代 IPS 観測装置は最新技術を応用することで、既存機と同程度の物理開口面積であっても、既存機の 10 倍以上の IPS 観測データを取得できると試算される。通年で安定した IPS の稠密観測が実現されることで、世界に先駆けて太陽圏の 3 次元構造の時間変動を観測から導出し、次世代の太陽圏研究をリードする。更に既存機では 1 日に 1 回しかできない IPS 天体の全天スキャンを 1 日に複数回実施することで、CME のより正確な追跡を可能にする。更に現在の技術では追跡不可能とされる、発生から 1 日以内に地球に到来する高速な CME のような極端宇宙天気現象に対しても正確な予報を実現する。

国内外の動向に対して計画の位置付け

近年、世界各国が太陽圏研究に関する主力飛翔体を推進している。太陽コロナ加熱・太陽風加速領域の詳細な観測を行う Solar-C_EUVST に加え、10Rs（太陽半径）以内まで接近し太陽コロナの「その場」(in situ) 観測データを取得する Parker Solar Probe (PSP)、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 Solar Orbiter。更に、日欧共同の水星探査機 BepiColombo 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」観測を行う。次世代 IPS 観測装置は、これら各国の主力級飛翔体計画に対して相補的な「グローバルな太陽圏構造」という観測対象を有し、協調観測からよりインパクトの高い科学成果が創出できる。

5.2 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計画を国立天文台を中心とした研究グループで推進している。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 週間飛翔することで、地上望遠鏡では困難な (1) 紫外-可視-赤外の広波長範囲の観測、(2) 大気ゆらぎや天候に左右されない高精度かつ高解像で連続的な観測、を行うことができる。これまで、ドイツ・スペイン・アメリカを中心に推進されてきたもので、2009 年 (SUNRISE-1) と 2013 年 (SUNRISE-2) の 2 度飛翔観測を行い、光球の偏光撮像観測で数多くの成果をあげた。2021 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、紫外線と可視光の装置も大幅に増強され、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目指している。

目的と学術的意義

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、将来の大型ミッションに向けた国際協力を強化

SUNRISE はフライト実績のある大型望遠鏡と気球ゴンドラが存在するため、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。本計画は、紫外線偏光分光観測を行う CLASP 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ファインダーと位置づけており、若手研究者が飛翔体装置の開発を経験する貴重な機会でもある。

国内外の動向に対して計画の位置付け

DKIST に代表される大口径地上太陽望遠鏡では、大気ゆらぎと天候によって広視野・高解像な連続観測は依然として困難である。2021 年の SUNRISE-3 においてスペース（成層圏）からの偏光分光観測の優位性を示すことができれば、2024-25 年頃の太陽活動極大期に再飛翔させ、Solar-C_EUVST との協調観測を行う可能性が拓けるとともに、2030 年代以降のスペース光学望遠鏡での偏光分光観測へと発展させる基盤となる。

5.3 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4

計画概要

Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) は、太陽コロナから放たれる X 線を 2 次元集光撮像分光観測する日米共同の観測ロケット実験である。2012 年と 2014 年に行われた 2 回の飛翔では硬 X 線帯域 (5keV~15keV) の観測を実現し、2018 年に行われた 3 回目のフライトでは軟 X 線帯域 (0.5keV~5keV) の観測にも成功した。今回提案する 4 回目のフライト (FOXSI-4) では、太陽フレアの観測に挑む。

目的と学術的意義

FOXSI-4 の科学目的は、太陽フレアにおける「エネルギー解放場所の調査」、「超高温成分の調査」、

「フレア後期の粒子加速現象の探索」などである。これらは、いずれも未解明の重要研究課題である。これらの課題にアプローチするため、観測装置では、高精度 X 線ミラーを用いた空間分解能の向上と、検出器の高速化を行う。打ち上げは 2023 年の春を目指し、2019 年 11 月に NASA に対して提案を行う。この計画は、米国（ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校、NASA マーシャル宇宙飛行センター、NASA ゴダード宇宙飛行センター）と日本（国立天文台、東京大学カブリ IPMU、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、名古屋大学）の共同ミッションであり、これまでの FOXSI の国際協力の枠組みで実施する。

国内外の動向に対して計画の位置付け

2018 年の RHESSI 衛星の運用終了以降、太陽硬 X 線の観測は行われておらず、後継機の実現が国際的にも待ち望まれている。現在、日本国内においては、粒子加速の理解を科学目標として、太陽フレアからの X 線～軟ガンマ線を観測する衛星計画 PhoENiX が、分野間連携で検討されている。FOXSI-3 では、PhoENiX で用いる一部技術の実証に成功したが、観測対象が太陽フレアとなる FOXSI-4 では、さらなる技術実証が行えるとともに、太陽フレア観測のデモンストレーションも行える。PhoENiX の打ち上げ（次期太陽極大期頃＝2025 年頃を希望）の数年前に、これらが行えることは、PhoENiX の実現性を高める上でも高い価値を持つ。

なお、観測ロケットを用いた太陽フレア観測計画は、共同研究者である Dr. Winebarger, Dr. Glesener, Dr. Reeves により NASA に white paper (<https://rscience.gsfc.nasa.gov/keydocs/SolarFlareCampaign.pdf>) を提出され、今回、FOXSI-4 と Hi-C_flare という 2 本の観測ロケット計画で実現を目指す。具体的には、観測ロケットをランチャーに設置した状態で待機し（最大、数週間程度待機する）、太陽の状態をリアルタイムでモニタ（GOES 衛星の X 線強度データを用いる予定）、フレア発生の検知後直ちにロケットを打ち上げるといったものである。この手法が確立すれば、安価で手軽に太陽フレア（開始後の Gradual Phase ～ Decay Phase）の観測が実現できるため、飛翔体を用いた観測プラットフォームの観点でも革新的なものになると考えている。（なお、フレアの発生予測は困難であるため、この手法が確立したとしても、発生時の Impulsive Phase からのフレア観測には、衛星が必要である。）

6 2030 年代以降に向けたアイデア種

2030 年以降に実現を目指すために今後検討を行うことが望まれるミッションなど、アイデア段階の計画をまとめる。図 4 のロードマップにまとめられるように、2030 年代以降には複数のミッション方向性（スペース光学望遠鏡ミッション、黄道面脱出による太陽極域ミッション）がある。このうち、スペース光学望遠鏡ミッションについては、2.4.2 章の光球・彩層磁場診断による研究を追求するミッションであり、2010-20 年代に取り組みが進む観測研究（CLASP-1/2 や SUNRISE-3, DKIST 等）の先に実現の意義や可能性を検討すべきミッションである。一方、黄道面脱出による太陽極域ミッションについては、2010 年頃に戦略的中型 SOLAR-C のプラン A 案として検討を行っており、その検討から得ら

れたミッションの概要を 6.1 章に記載する。これらのアイデア段階の計画については、科学的検討および技術的検討を有志が集まり進めて、最終的に太陽研連としても計画の優先化検討を行う必要がある。

6.1 太陽極域ミッション

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の観測を世界に先駆けて実現し、極域の内部診断により、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。極域からの観測は、ダイナモの構成要素である対流層内部のさまざまな流れの日震学探査に大きな利点となる。また、極域磁場やコロナ活動を観測することが、太陽周期の理解を検証するカギとなる。この要請から、極域の磁場・速度場を観測する可視光望遠鏡、コロナを観測する極端紫外線・X線撮像 (分光) 装置、太陽総放射を精密測定する太陽放射計を搭載し、軌道半径 1AU 程度、傾斜角 40 度以上の太陽周回軌道に機体を投入する。

サイエンス成果が与えるインパクト

何よりもまず、黄道面から離れた位置からの太陽極域表面の観測は、成功すれば前人未到の成果となる。その与えるインパクトは太陽物理学・天文学にとどまらず非専門家にも大きな反響を呼ぶと思われる。以下、具体的に期待されるサイエンス成果のうち最も重要なもののみ記す。

● 太陽周期活動とダイナモ機構

現在広く信じられている「磁束輸送ダイナモ理論モデル」においては、太陽内部プラズマの平均的な流れである、差動自転と子午面循環流がカギであると考えられている。太陽内部を観測的に探る唯一の手段が日震学である。これまでの黄道面内からの観測では、60 度より高緯度の自転角速度分布を高精度で求めることができていない。子午面循環流については、赤道から高緯度への流れが低緯度で検出されているが、これが高緯度でどのように振舞うかも観測されていない。磁場を太陽内部へ輸送するような沈み込みの流れが極域に存在するかどうかはまだ分からない。本ミッションによる高緯度からの太陽観測は、射影によるデータの劣化のない、極域の局所の日震学観測を可能にし、太陽内部プラズマの流れの測定をこれまでにない精度で測ることを可能にする。

さらに、ダイナモや恒星内部の角運動量輸送を考慮するうえで、対流層底部の速度勾配層 (tachocline) の理解は重要なカギのひとつであると考えられている。局所の日震学を使った対流層深部の局所的構造探査にはまだ誰も成功していない。本ミッションの高緯度からの観測と、黄道面内からの観測とを組み合わせることで、対流層深部を通る p モード波の (長距離) 伝播を観測し、太陽対流層深部の流速分布を測定することを試みる。

極域からの日震学観測によって、太陽内部平均流やその深部構造を初めて明らかにすることで「磁束輸送モデル」を大きく制限することができる。

- 極域における磁気活動

太陽極域にはコロナホールが存在し、高速太陽風の流源となっている。太陽風の加速機構を理解するためには、黄道面を離れ、高緯度から観測することが必須である。X線や極端紫外線のコロナ輝線を使い、プラズマ温度・密度診断を行うとともに、太陽風の吹き出しの速度を直接測定し、同時に観測される光球磁場強度を用いて、極域コロナ活動や太陽風加速の起源に迫る。

- 極域からみた「太陽総放射」

太陽放射に関しては、黄道面内の観測から周期活動にともなって0.1%程度の変動があることが知られている。現在のところ磁場による対流熱輸送の遮蔽（黒点の寄与）、白斑や輝点の寄与などから放射量の変動が理解されているが、高緯度側から観測した例は無く、太陽総放射の変動が完全に測定されているわけではない。他の太陽型恒星では、太陽の3倍程度の大きさの放射変動が観測されている例もある。周期活動に伴う太陽総放射の変動は、黄道面を離れる極域ミッションによって初めて明らかにすることができる。

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な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。

- 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。
- 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。
- 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。

以上