

「ひので」から次世代の太陽観測へ

一本 潔^{1,2)}, 原 弘久²⁾,
勝川行雄²⁾, 石川遼子²⁾

¹⁾〈京都大学理学研究科附属天文台 〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱
飛騨天文台〉

²⁾〈国立天文台 SOLAR-C準備室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: ichimoto@kwasan.kyoto-u.ac.jp, hirohisa.hara@nao.ac.jp,
yukio.katsukawa@nao.ac.jp, ryoko.ishikawa@nao.ac.jp



一本 潔



原 弘久



勝川行雄



石川遼子

「ひので」の到達点は太陽物理学の新たな挑戦の始まりでもある。これからの太陽観測に課せられた重要課題は、太陽大気の基本磁気構造を分解し、光球とコロナをつなぐ磁場の3次元構造を計測することである。この目標に向かって世界の太陽研究者が一致して待望するのが、「ひので」を大きくしのぐ分解能で光球・彩層磁場とコロナの多温度構造のダイナミクスを観測する次世代太陽観測衛星SOLAR-Cである。日本の太陽コミュニティーはSOLAR-C計画の実現を見据えて、紫外線で彩層磁場を計測することを目的としたロケット実験CLASP、SOLAR-Cに搭載する偏光分光装置の先駆けとなる気球実験SUNRISEなどの飛翔体観測を推進している。また、地上からは多波長偏光分光観測による3次元磁場計測手法の開発を進めている。2020年代にはハワイやカナリア諸島で口径4mの太陽望遠鏡が稼働を開始し、超高解像度で太陽の微細磁気構造の中にある未踏の領域に踏み込もうとしている。SOLAR-Cによって宇宙から連続した高精度観測を同時に実現することで、太陽研究は宇宙に普遍的な磁気プラズマ過程の理解と、次世代宇宙天気予報の実現にさらに大きく貢献することが期待される。

1. はじめに

本特集で述べられてきたように、「ひので」は太陽物理学に大きな変革をもたらした。磁気対流、磁気リコネクション、磁気波動、乱流、熱化といったプラズマの基本過程が見え始め、それら普遍的な要素過程の連鎖によって太陽大気の大規模な構造が形成され、ときに不安定化して爆発的現象が発現していることが明らかになった。また光球とコロナをつなぐ境界領域=彩層が、これま

で想像されていたものをはるかに超えて激しく変化していることが「ひので」の鮮明な画像より明らかとなり、その理解が太陽活動大気の起源を理解するうえで極めて重要であることが認識された。太陽の活動的な高温大気がいかにして生成されているのか、太陽圏環境を支配するフレアやプロミネンス爆発、太陽風擾乱がいかにして発現するのか、また、太陽活動を駆動する磁場がいかにして維持され変動するのか、これらは太陽物理学に課せられた今後の重要課題である。宇宙に普遍

的に生起する磁気プラズマ現象のひな形として、地上では実現できない規模のプラズマ実験室として、また地球を取り巻く環境を支配し人類文明に大きな影響を及ぼす境界条件として、太陽の研究が果たす役割は、天文学、プラズマ科学、地球太陽圏環境科学の周辺分野と密接にかかわりながら、今後ますます大きいといえる。本章ではこうした現状を踏まえ、今後の太陽物理学研究が目指している方向性を、特に日本の太陽研究コミュニティが推し進めようとしている将来の観測計画に焦点をあて、展望する。

2. SOLAR-C太陽観測衛星計画

「ひので」が明らかにした激しい彩層の活動^{1), 2)}とコロナ底部で見え出したプラズマのダイナミクス³⁾との関係を明らかにし、その物理過程の本質を理解するには、それらの現象を引き起こす微細な磁気構造を観測できる精度と解像度が必須であると強く認識されてきている。ここで望まれている磁場観測の精度と解像度は、太陽物理研究者が数十年にわたって地上で苦闘した後に「ひので」衛星で達成したものを上回り、また磁気活動の結果として現れる微細構造を捉えてその素過程の解明を目指すには、自然と「ひので」を超える口径をもったスペース太陽望遠鏡が必要となる。このような観測を目指して計画されたのが、SOLAR-B（「ひので」）の後継計画として準備を進めているSOLAR-C衛星である。

SOLAR-C計画では以下の三つの課題を設定し、太陽観測から宇宙に普遍的に現れるプラズマ素過程の解明を目的としている。

- I. 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明
- II. 太陽面爆発現象の発現機構の究明とその発生の予測
- III. 太陽周期活動の起源の解明

Iではプラズマ加熱・加速、IIでは大規模な磁気構造の不安定化や磁気リコネクション発生領域の微細構造、そしてIIIでは太陽面を貫く磁束輸送

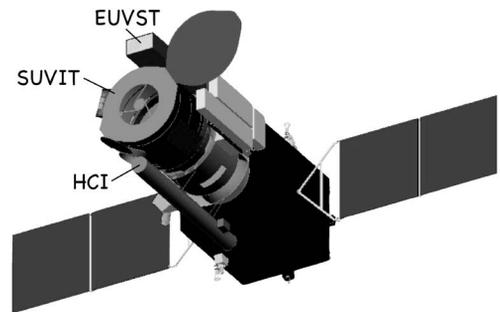


図1 太陽観測衛星SOLAR-Cの衛星案。中央には口径1 mの光学望遠鏡SUVITを配し、従来のものと比べて1桁解像度を向上させた極端紫外撮像分光装置EUVSTとコロナ撮像極端紫外望遠鏡HCIを衛星側面に搭載する。

過程の理解を目指している。これらの解明を通して、太陽活動が地球と人間社会に与える影響の理解と予測にも貢献するという視点がこの計画にはある。これを実施するためのSOLAR-C衛星(図1)は、光球と彩層の撮像観測・速度場・磁場観測を担当する光学望遠鏡(Solar UV-Visible-IR Telescope; SUVIT)、従来よりも1桁高い解像度でコロナを撮像する極端紫外望遠鏡(High-resolution Coronal Imager; HCI)、そして彩層からコロナの領域をHCIと同等の解像度で分光観測する極端紫外撮像分光装置(Extreme UltraViolet Spectroscopic Telescope; EUVST)という三つの観測装置で構成されている。そして、ほとんど夜のない連続的な太陽観測を行うために、衛星を静止衛星軌道に送り込む。SOLAR-Cの磁場観測では、(1)「ひので」の観測から推定されている微細磁場の構造スケール0.1秒角を観測する解像度と、(2)黒点領域全体、コロナを構成するコロナループ、太陽面爆発フレアのような数分角程度の構造を観測できる広い視野を併せ持った能力をもつ。微細構造のダイナミクスと大スケール構造の不安定化・構造形成との関係づけを可能とするこの軌道天文台の稀有な能力は、地上観測では決して手に入れることはできず、SOLAR-Cをこれまでになくユニークなものとしている。

SOLAR-C衛星は欧米の国際協力を前提とした日本主導の計画として、2020年代の打ち上げを目指して提案の準備を進めている。SOLAR-Cの提案準備を開始してから7年が経過しているが、国内・海外宇宙機関の事情で国際協力の足並みをそろえるのは難しい。この規模の衛星計画は「ひので」がそうであったように、世界で一つのものとなる。これを実現するために、世界の主要宇宙機関に推薦された研究者が集い、今後必要となる太陽観測衛星計画の議論が始まっている。

3. 小規模飛翔体による観測

「ひので」によるダイナミックな彩層活動の発見が、2013年から観測を行っているIRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) 衛星による彩層分光観測につながった。IRIS衛星はNASAの小型衛星の一つで、「ひので」よりずっと小規模の人工衛星にもかかわらず、高解像度紫外線分光観測という1点突破の特徴で成果を上げている。IRISの成功からも明らかなように、「ひので」の成果をさらに発展させるような新しい観測には新しい技術の開発が必要である。今後の太陽観測では、SOLAR-Cのような大規模で時間を要する計画と並行して、比較的小規模なロケット実験や気球実験を通して、将来の衛星計画の種となる新しい技術を獲得していく機運も高まっている。

3.1 観測ロケット実験 CLASP

太陽物理のフロンティアは、プラズマ圧優勢から磁気圧優勢となる彩層上部、遷移層そしてコロナでの磁場測定にある。飛翔体による観測が必須の紫外線領域には、彩層・遷移層を構成する1-10万度のプラズマ由来のスペクトル線が多数存在する。いまだ手付かずのこれらのスペクトル線の偏光情報は、彩層上部の磁場を計測する新しい可能性を秘めている。まず注目したのが、その中でも最も明るく、「ハンレ効果」(後述)によって有意な偏光が生じると理論的に予測されたライマン α 輝線(水素原子が出す121.6 nmの輝線)⁴⁾

である。このスペクトル線の有用性を確かめるべく、スペインおよび米国の研究グループとともに立ち上げたのが、観測ロケット実験CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter) である。「ひので」打ち上げから2年が経った2008年のことである。

太陽観測衛星「ひので」をはじめ、これまで広く行われている太陽表面(光球)の磁場測定では、ゼーマン効果で生じる偏光を観測する。しかし、彩層、遷移層そしてコロナでは、光球よりも磁場が弱くゼーマン効果で生じる偏光信号が弱いのに加え、激しい熱的・非熱的運動(ドップラー広がり)によって偏光信号がかき消されやすく、その検出は難しくなる。この状況を打破すると期待されているのが、スペクトル線のドップラー広がりによって偏光信号がかき消されず、ゼーマン効果に比べて弱い磁場に感度をもつハンレ効果である。これは非等方にやってくる光を彩層の原子が散乱する際に生じる線スペクトルの偏光状態を、磁場が変化させる効果で、近年量子力学と輻射輸送理論によってその理解が大きく進展したものである。ハンレ効果を用いた彩層磁場測定の試みとして、ヘリウム原子のスペクトル線(1.1 μm)の偏光分光観測が近年地上望遠鏡で行われるようになってきており、SOLAR-C SUVIT望遠鏡でも観測が検討されている。しかし、このスペクトル線は静穏領域では形成されにくく観測領域に制限を受けるなど、課題もある。

紫外線域のハンレ効果の観測は、静穏領域の磁場診断を切り拓く可能性があり、待ち望まれていた。一方、紫外線の偏光分光観測は前例がなく、偏光測定装置の開発はゼロからの出発であった。加えて、実験を行った中心メンバーは、装置開発の経験をほとんどもたない大学院生や若手研究者。「ひので」衛星の開発実績をもつシニア研究者をアドバイザーに、CLASPの開発は分子科学研究所の放射光施設での偏光素子の性能評価から始まった⁵⁾⁻⁹⁾。それから7年、直径50 cm、長さ

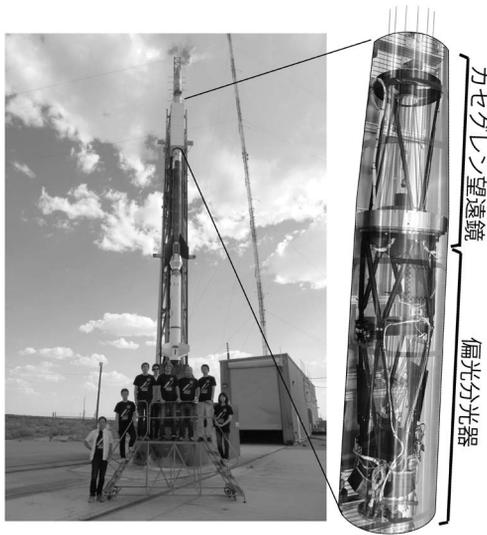


図2 (左) CLASP打ち上げ前の日本チームの集合写真。ホワイトサンズ・ロケット発射場にて。(右) 国立天文台で組み上げられたCLASPフライトモデル。

2.5 mのフライトモデルの開発がついに完了した(図2右)。手塩にかけて開発されたCLASPは、2015年9月3日、米国ホワイトサンズ・ロケット発射場にて打上げを迎え(図2左)、完璧な飛翔によって、紫外線領域での高精度偏光分光観測に世界で初めて成功した¹⁰⁾。観測装置も無事損傷なく回収することができた。

得られたライマン α 輝線の偏光プロファイルは、モデル計算¹¹⁾とおおむね一致し、紫外線領域で散乱による偏光が発生することを世界で初めて観測的に示した。一方で、理論予測¹²⁾を超える複雑な空間分布が明らかとなった。想定以上に複雑な偏光スペクトルの解釈は容易ではないが、ハンレ効果を示す観測の兆候を捉え、彩層上部から遷移層の磁場情報が新たに得られつつある。

現在CLASPのデータ解析を進める傍ら、再飛翔の計画が進められている。再飛翔では、初飛翔後に回収された観測装置に最小限の改修を施すことで、ライマン α 輝線と同様に有用なスペクトル線として期待される電離マグネシウム線



図3 SUNRISE高高度大型気球実験。手前に見えるのがゴンドラ部で、1 m口径の望遠鏡を搭載している。

(280 nm)¹³⁾の観測を目指す。これらCLASPシリーズを完遂し、紫外線領域の偏光分光観測のさらなる進展を目指している。

3.2 気球実験SUNRISE

可視・近赤外域の偏光測定精度を高めることで彩層磁場観測を目指しているのが、気球搭載太陽望遠鏡SUNRISEである(図3)。SUNRISEは高高度大型気球計画で、口径1 mの大型光学望遠鏡を高度35 km以上の成層圏で飛行させることで、(1)地上では観測できない紫外域の観測、(2)大気揺らぎのない高解像度偏光観測を実現した^{14), 15)}。2009年と2013年に2度のフライト観測を行い、0.1秒角(太陽表面で100 km以下)の微細構造を空間分解したことや、光球表面で渦状流を観測したことなど、30編以上の査読論文が出版され成果を上げている。これまではドイツとスペインを中心に開発されてきたが、現在提案中の3度目のフライトでは、日本が近赤外の偏光分光装置SCIP(Sunrise Chromospheric Infrared Polarimeter)を新たに開発する¹⁶⁾。「ひので」撮像観測と同じ0.2秒角分解能で、ゼーマン効果に高い感度をもつ複数のスペクトル線を同時に偏光分光観測することで、光球から彩層につながる磁場構造を初めて計測し、彩層のダイナミクスを引き起こすエネルギーの流れを明らかにすることを目指す。

SOLAR-Cへの足掛かりとすべく、2020年頃の実現を目指している。

3.3 多様な飛翔体観測の展開

「ひので」のコロナ観測は、「ひので」では分解できないプラズマのダイナミクスがコロナ加熱の鍵を握っている可能性を示唆しており、紫外線・X線のコロナ観測においても、空間分解能と分光能力の強化、波長範囲の拡大が期待されている。その観測技術を開拓するロケット実験を紹介する。Hi-C (High Resolution Coronal Imager) は0.2秒角という高い解像度の極端紫外線コロナ観測を初めて達成した装置で¹⁷⁾、NASAを中心として開発された。2012年に1度目のフライト観測を行い、2016年に2度目の観測を行う予定である。SOLAR-Cへの搭載を提案したコロナ撮像望遠鏡HCIはこのHi-Cの発展である。FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) は軟～硬X線 (<15 keV) を結像光学系で集光するコロナ観測装置で、1千万度以上の超高温プラズマの検出を目指し、これまで2度のフライト観測を行った¹⁸⁾。FOXSIのX線検出器開発を日本が担当しており、2018年に予定している3度目のフライト観測に向けて、軟X線で撮像分光できる高速読出CMOSカメラを新たに開発中である。

これらの小規模な飛翔体実験で培われた新しい技術を使った観測装置を、小型衛星やさらに大型のSOLAR-Cなどの飛翔機を使って実現することも視野に入れ、今後、国際協力で将来の衛星計画を具体化していく予定である。

4. 地上観測の役割と展望

飛翔体による観測は、地上では実現できないことに目的を絞り込み、厳しい条件の中で最大の成果を狙うものである。特に可視光や近赤外線の観測装置を人工衛星に搭載する場合、地上の観測による装置開発と科学データの検証、そして地上からできることの限界を見極めることが必須である。したがって宇宙からの観測を立案し、実現するうえで地上観測が果たす役割はますます重要だといえる。地上観測の利点は、人工衛星には搭載できない大きな観測装置を建設できること、既存の大型望遠鏡を用いて自由度の高い撮像・分光観測を行えること、100年を超える長い時間スケールの継続観測が行えること、などにある。これらの利点を生かし地上観測が担うべき役割は、(1) 巨大望遠鏡による超高解像度観測、(2) 自由度の高い(偏光)分光観測による新しいプラズマ計測手法の開拓、(3) 小口径望遠鏡群による太陽

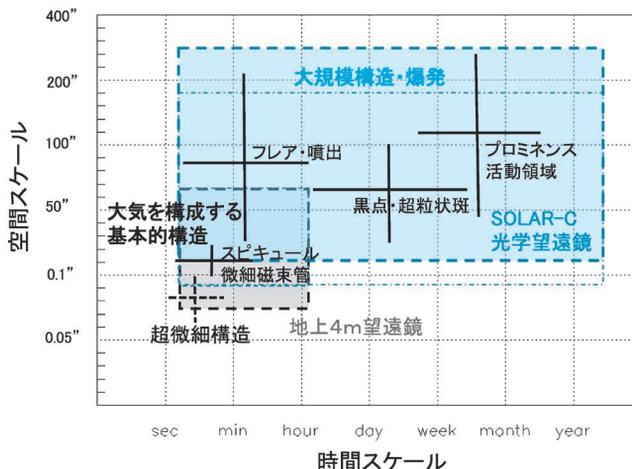


図4 1 m宇宙望遠鏡と4 m地上望遠鏡がターゲットとする太陽面現象の空間時間スケール。

活動の長期監視と宇宙天気研究、などが挙げられるだろう。

現在ハワイのマウイ島では2020年の完成を目指して口径4 mの太陽望遠鏡 (DKIST: Daniel K. Inouye Solar Telescope) の建設が進められている。また欧州でも2020年代半ばの建設を目指して大型太陽望遠鏡計画 (EST: European Solar Telescope, 口径4 m) を進めている。いずれも0.1秒角 (太陽面上の約70 km) を切る解像度での撮像・分光観測を行い、微小な磁気構造の中に見られる磁気リコネクションや衝撃波構造などのプラズマ素過程に迫る未踏の領域に踏み込もうとしている。図4に示すように、超大型地上太陽望遠鏡は究極の分解能で太陽の要素構造を顕微鏡のように観測するのに対し、SOLAR-Cはコロナを含むより大きな空間・時間スケールをカバーすることで、小さな構造と大規模構造の全貌を精度良く捉える。両者の相乗効果による太陽研究のさらなる革新が期待される。

近年稼働を開始したアルマ望遠鏡でも太陽の観測が可能になりつつある。これも視野と時間は限られるものの、従来よりも1桁以上高い解像度によるサブミリ波観測には、彩層の微細な温度構造やフレア高エネルギー電子を診断する新しい目として大きな期待が集まっている。

国内に目を向けると、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 (口径60 cm) では、シーイングによる像劣化を抑制するための補償光学装置が稼働を開始し、高分散分光器を使った汎用的な偏光観測装置や面分光装置の開発が進められている。これによってSUNRISEやSOLAR-Cで観測する光球・彩層ラインの磁場診断能力の検証、偏光データから3次元磁場分布を導出する手法の開発を行い、その技術はSUNRISEやSOLAR-C搭載装置の開発に生かされる。

一方、地上の望遠鏡群を使って太陽で発生するフレアやプロミネンス爆発を常時監視し、宇宙天気予報に資することを目的とした地上観測ネット

ワーク計画も進行している。すなわち、国立天文台フレア望遠鏡によるフィラメント磁場観測、飛騨天文台SMART望遠鏡によるフィラメント放出速度観測、情報通信研究機構の電波望遠鏡によるコロナ衝撃波の観測、名古屋大学の惑星間空間シンチレーションを用いた太陽風観測が連携し、「ひので」をはじめとする人工衛星のデータも用いることで、太陽における爆発の発生から地球への擾乱到達までを総合的に理解し、地球を襲う太陽嵐を予測することを目的としたプログラムである (PSTEP)¹⁹⁾。数年の研究期間の後には、次世代宇宙天気予報の礎を築くことを目指している。

5. ま と め

日本の太陽観測は黒点のスケッチやカルシウムK線全面分光観測に始まる約100年の歴史がある。1940年代の終わりから乗鞍、三鷹、岡山、飛騨に太陽望遠鏡を建設し、1980年代からは「ひのとり」、「ようこう」、「ひので」衛星を成功させ、世界の太陽研究を牽引してきた。そして装置の規模が巨大化する現在、世界の太陽研究者の間には互いに協力分担して大きなプロジェクトを実現する土壌が育った。本稿では今後10年程を見通した、主として日本の太陽観測計画の展望を述べてきた。その目標は国際協力の中で地上観測を礎とした次世代スペース観測の実現である。その先にはどんな計画が息吹いてくるのか？ 今後の挑戦の中でさらなる夢を育てていきたいものである。

参考文献

- 1) 岡本文典, 2016, 天文月報109, 540
- 2) 勝川行雄, 2016, 天文月報109, 548
- 3) 原弘久, 2016, 天文月報109, 533
- 4) Trujillo Bueno J., et al., 2011, ApJ 738, L11
- 5) Watanabe H., et al., 2011, Proc. SPIE 8148, 81480T
- 6) Ishikawa R., et al., 2013, Applied Optics 52, 8205
- 7) Ishikawa R., et al., 2014, Solar Physics 289, 4727
- 8) Narukage N., et al., 2015, Applied Optics 54, 2080
- 9) Ishikawa S., et al., 2015, Solar Physics 290, 3081
- 10) Giono G., et al., 2016, Solar Physics, in press
- 11) Belluzzi L., et al., 2012, ApJ 755, L2
- 12) Stepan J., et al., 2015, ApJ 803, 65
- 13) Belluzzi L., Trujillo Bueno J., 2012, ApJ 750, L11
- 14) Barthol P., et al., 2010, Solar Physics 268, 1
- 15) Solanki S., et al., 2010, ApJ 723, L127
- 16) 勝川行雄, 他, 2015, 大気球シンポジウム: 平成27年度, SA6000044039
- 17) Kobayashi K., et al., 2014, Solar Physics 289, 4393
- 18) 石川真之介, 2016, 天文月報109, 544
- 19) <http://www.pstep.jp/>

From HINODE to Next Generation Solar Observations

**Kiyoshi ICHIMOTO, Hirohisa HARA,
Yukio KATSUKAWA and Ryohko ISHIKAWA**
*SOLAR-C Project Office, National Astronomical
Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka,
Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The goal of HINODE is the start point of new challenges in solar physics. The task of the next solar observations is to determine the 3D structure of magnetic fields that connect the photosphere and corona by resolving elementary magnetic structures in the solar atmosphere. SOLAR-C is the long awaited next generation international solar physics satellite that will observe the magnetic field of the chromosphere and plasma dynamics all the way from the photosphere to the corona with much higher resolutions than HINODE. To this end, Japanese solar physics community is planning to conduct a sounding locket experiment, CLASP, and a balloon experiment, SUNRISE, to measure the chromospheric magnetic fields by spectro-polarimetry in ultra violet and infrared, respectively. The method for deriving the 3D magnetic field is investigated by using a multi-wavelength spectro-polarimeter on a ground solar telescope. It is expected that 4 m aperture solar telescopes will start the operation in 2020's in Hawaii and Canary islands, and open a new window to uncover fine scale structures with ever highest spatial resolution. Solar physics with the continuous high precision observations by SOLAR-C at those era will provide indispensable contributions for understanding the fundamental plasma process taking place in Universe and to establish the foundation for the next generation space weather forecasting.