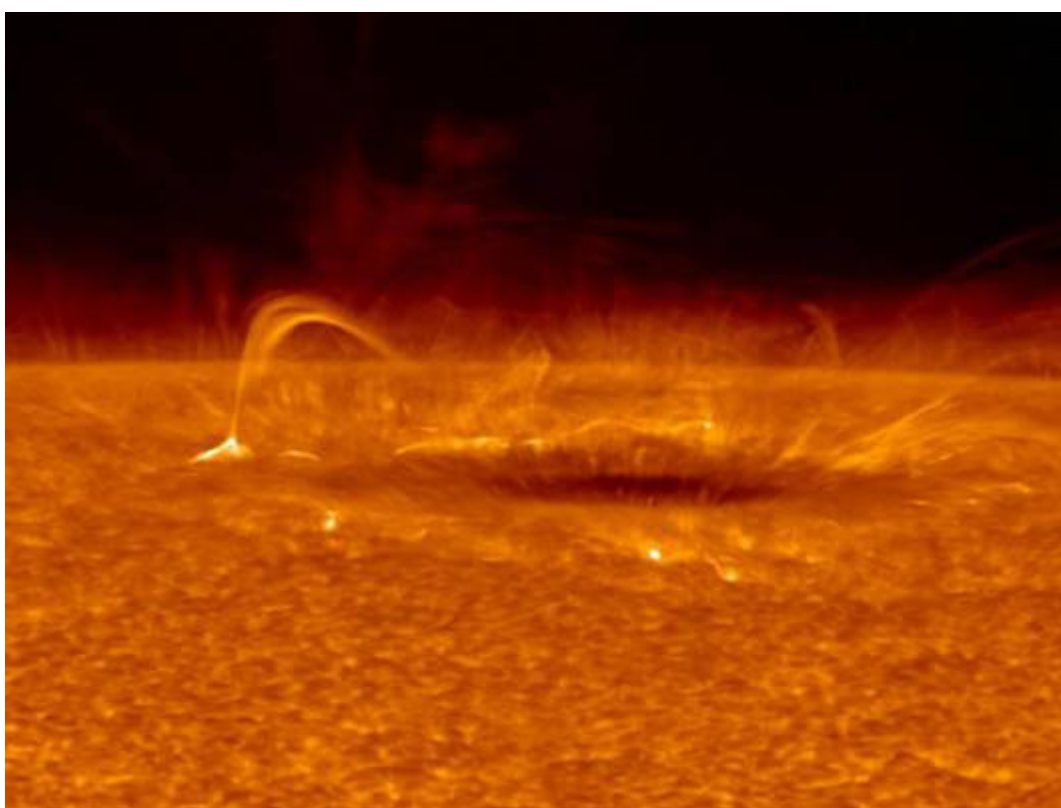


太陽観測衛星 SOLAR-C

検討ワーキンググループ設置提案書



平成19年12月

次期太陽観測衛星検討グループ

<目次>

1. 次期太陽観測ミッション概要	3
1.1. 提案の背景	3
1.2. 太陽観測衛星 SOLAR-C	5
2. プラン A: 太陽極域観測ミッション	7
2.1. ミッション概要	7
2.2. 極域ミッションの目指すサイエンス	8
2.2.1. 太陽内部構造の探査	8
2.2.2. 極域における磁気活動	10
2.3. ミッション構成案	12
2.3.1. 観測軌道	12
2.3.2. 推進系	12
2.3.3. 観測装置の構成概要	13
2.4. 技術的検討課題	13
3. プラン B: 高解像度太陽観測ミッション	15
3.1. ミッション概要	15
3.2. 高解像度ミッションの目指すサイエンス	16
3.2.1. 「ひので」の科学到達点と新しい高解像度観測の方向性	16
3.2.2. 光球・彩層・コロナの総合的な物理過程の解明	18
3.3. 搭載観測装置構成案	22
3.4. 科学的要求と検討課題	22
4. 開発体制	24
5. スケジュール	25

1. 次期太陽観測ミッション概要

1.1. 提案の背景

わが国の太陽物理学は、これまでに「ひのとり」(1981年)、「ようこう」(1991年)、「ひので」(2006年)の3機の太陽観測衛星を国際協力のもと実現し、宇宙からの太陽観測において世界をリードしてきた(図 1.1)。「ひのとり」では硬 X 線による太陽フレアの観測を行い、フレアによって発生する超高温プラズマの性質を明らかにした。「ようこう」は、軟 X 線・硬 X 線で、太陽フレアのみならず、ダイナミックに変化する太陽外層大気(コロナ)を詳しく観測し、激しい活動性の起源は磁気リコネクションであるという証拠を初めてとらえた。

同時に、1990年代以降、「SoHO」,「TRACE」といった海外の太陽観測衛星も活躍し、スペースからの太陽観測が日本のみならず世界的に本格的に行われるようになった。その結果、黒点に象徴されるような太陽表面に存在する磁場構造の出現・運動・消滅の過程、その磁場の運動が駆動する太陽コロナの加熱やフレアの発生メカニズムについて、多くの知見が得られた。太陽で発生する現象は、他の天体や地球磁気圏、実験室プラズマで観測されるプラズマ現象との類似点も多い。実際に、「ようこう」,「ひので」などで得られた成果は、太陽物理学の枠にとどまらず広汎な分野に大きなインパクトを与えている。

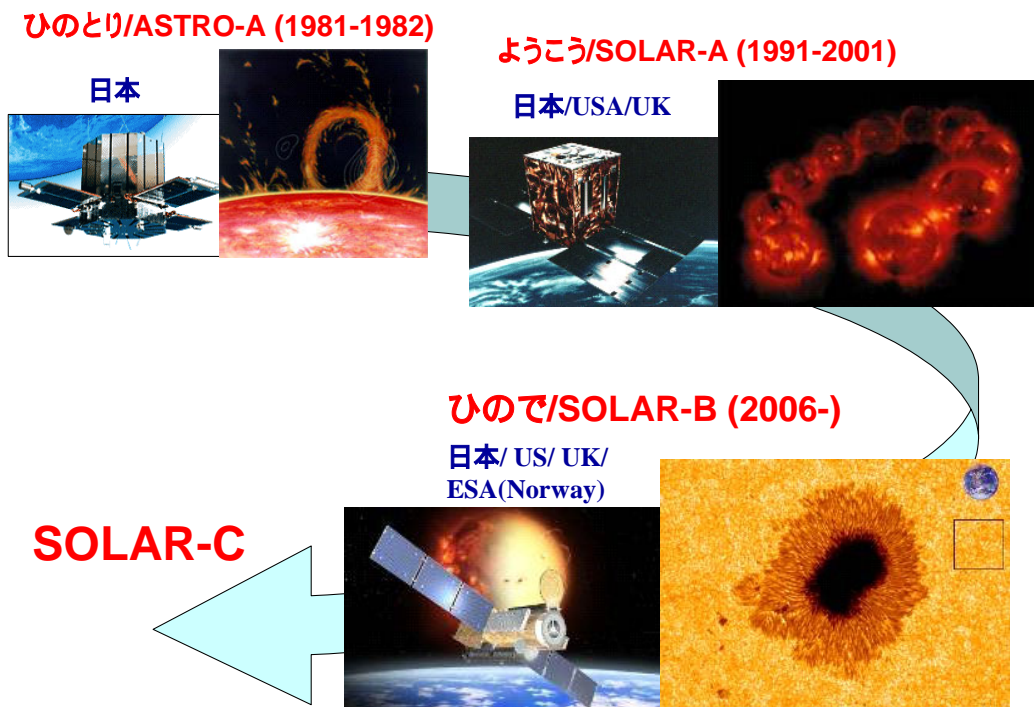


図 1.1: 日本の太陽観測衛星



図 1.2: 「ひので」可視光望遠鏡が観測した彩層スピキュールとプロミネンスの微細構造

「ひので」の到達点と新たな課題

2006年に打ち上げたわが国の太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)は、

- 可視光磁場望遠鏡(SOT)による、太陽表面(主に光球)の磁場やプラズマの運動の高解像度(0.2秒角)連続観測
- X線望遠鏡(XRT)と極端紫外線撮像分光装置(EIS)による、コロナに存在する高温プラズマの温度や運動の高解像度(1秒角)観測

を同時に実現し、コロナとその活動のエネルギー源である太陽表面の磁場とのカップリングを統一的に理解することを目指したものである。すでに、コロナ中を伝播するアルフベン波、彩層で普遍的に発生している磁気リコネクションやそれに伴う高速の流れなど、高温プラズマの加熱を理解する上で鍵を握っていると考えられる現象を捉えることに成功している。これらの成果は、スペースからの高解像度(0.2秒角)観測によってもたらされたものである。また、その結果発生する高温プラズマの運動も捉えられており、太陽風や質量放出の源と考えられる現象の検出に成功した。

一方、「ひので」可視光望遠鏡によって、彩層は、これまで知られていた以上にダイナミックに変化しており(図 1.2)、空間的、時間的に分解できていない要素的な現象が多く存在することが明らかになった。その活動の起源や彩層プラズマの加熱を理解する上で必要となる物理量診断(速度・磁場)の実現が求められるようになりつつある。次期太陽観測ミッションの方向性を考える上で、現在まだ初期段階である「ひので」を使った研究の深化が重要である(詳細は 3.2 を参照)。

太陽内部構造と周期活動の起源

1990年代以降、太陽表面で観測される振動から太陽内部構造を診断する「日震学」が急速に発展し、「SoHO」衛星の活躍もあり、太陽内部の温度・密度構造や、自転角速度分布が観測的に明らかになった。これによって、標準太陽モデルの精度検証が観測的に行われるとともに、磁気活動の周期的な変動を太陽内部で駆動していると考えられているダイナモ機構解明に向けた研究を促す契機となった。長期に渡って蓄積された黒点数など磁気活動の指標となるデータ(図 1.3)と数値シミュレーションを組み合わせた研究が盛んに行われるようになってきているが、鍵となる物理過程は未だに解明には至っていない。太陽のみならず、他の恒星の多くも磁気活動を伴っており、

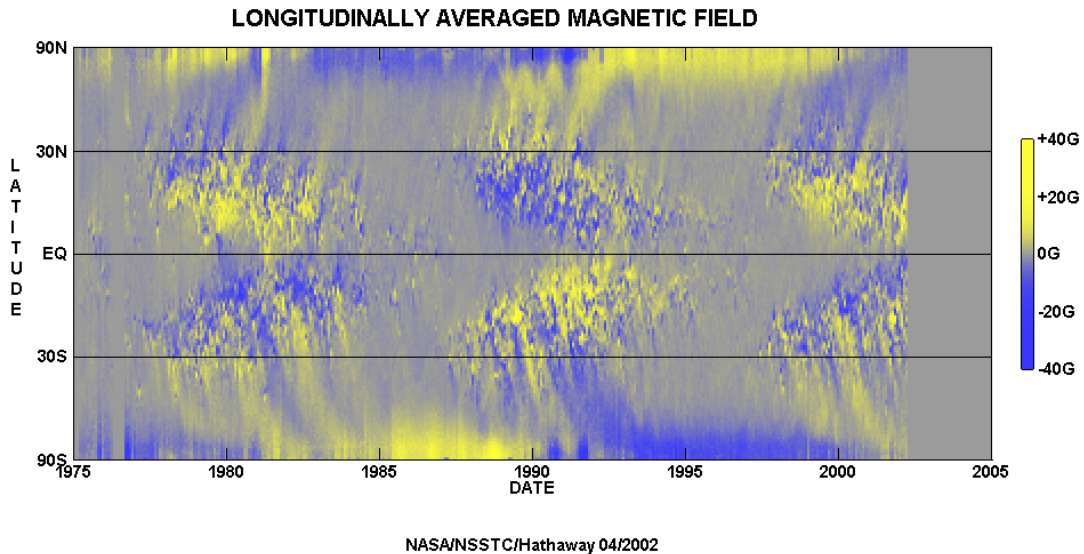


図 1.3: 経度方向に平均した磁場の太陽周期活動にともなう変遷。極域ではおよそ 11 年おきに磁極が反転するが、黄道面からの観測では極域の磁場測定精度が十分でない。

太陽と同様の周期的な変動が存在することが明らかになっている。よって、太陽・恒星磁場の起源は天体物理学の大問題である。近年の観測的、理論的研究から、対流層深部に磁場の起源が存在することが示唆されており、対流層深部の運動を詳細に調べるためのブレークスルーとなる観測が期待されている。その一つの可能性が、これまで流れや磁場の詳細な観測がなされていない極域の探査である(図 1.3、詳細は 2.2 を参照)。

宇宙天気研究

地球周辺の宇宙空間の状態は、太陽の磁気活動に応じて変動する。太陽磁気活動が地球や人間生活にどのような影響を与えるかを調べる研究が急速に盛んになり、「宇宙天気」という言葉が定着しつつある。この背景には、フレアやコロナ質量放出(CME)の発生から噴出物の伝播に至るまでの様子が、スペースからの太陽観測の発展によって克明に捉えられるようになってきたことが大きく寄与している。宇宙天気研究においては、太陽大気におけるプラズマの加熱、太陽風・質量放出の加速を引き起こす基礎となる物理過程の理解が必要不可欠であり、太陽観測の果たす役割は大きい。

1.2. 太陽観測衛星 SOLAR-C

上述の背景を踏まえ、わが国の太陽物理学分野が「ひので」の次に目指す太陽観測衛星計画として、以下の 2 案を候補として検討を開始した。

プラン A: 太陽極域観測ミッション (詳細は第 2 章に記載)

黄道面を離れ、未踏の太陽極域探査を行い、太陽内部診断と太陽周期活動を駆動するダイナモ機構の解明を目指す。

プラン B: 高解像度太陽観測ミッション (詳細は第 3 章に記載)

太陽大気の高解像度観測を追及するとともに、分光能力を大幅に強化することで、光球・彩層・コロナの総合的物理過程の理解を目指す。

いずれの案も科学的に極めて重要であり、国内外の太陽物理学コミュニティとして推進を強くサポートしている。太陽観測衛星 SOLAR-C 検討ワーキンググループの第 1 の目的は、2 案のうちどちらを次期太陽観測衛星 SOLAR-C としてミッション提案するかを、以下の事項を中心に検討することである。

- (1) 「ひので」による研究の進展状況
- (2) ミッションの科学的意義
- (3) ミッションの技術的成立性
- (4) 海外のミッションとの整合性

2. プラン A: 太陽極域観測ミッション

2.1. ミッション概要

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、太陽極域の内部診断と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プラン A: 太陽極域観測ミッション (以下、極域ミッション)の目的である。

太陽観測衛星「ようこう」は、フレア現象において磁気リコネクションが主要な役割を果たしていることを明らかにした。2006年に打ち上げられ、現在稼働中の「ひので」はコロナ加熱の謎を解き明かすことを、最重要の科学目的として掲げている。今、太陽物理学に残された最大の謎が、太陽周期活動とこれを駆動しているとダイナモ機構の解明である。

ダイナモ機構は太陽内部の磁場と流れ(プラズマの運動)との相互作用である。高緯度から極域を含んだ太陽全体の姿を明らかにすることが、太陽周期活動の解明の第一歩と考えられる。極域からの観測は、日震学による対流層深部の探査のためにも大きな利点となる。また、極域磁場やその反転現象、高緯度でのコロナ活動を観測することが、われわれの周期活動に関する理解を検証する上でも、メカニズムの解明の上でも重要なことが、近年になって認識されるようになってきた。

このような状況を踏まえ、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(EUV)・X線コロナ撮像(分光)装置を搭載し、軌道半径1AU程度、軌道傾斜角45度以上の太陽周回軌道に衛星を投入し、太陽極域の総合的な探査を行うミッションをSOLAR-Cの候補として提案する。

極域ミッションは黄道面から離れる日本で初めてのミッションであり、軌道設計や推進系など、従来の科学衛星とは大きく異なる技術的課題が存在する。また、極域ミッションの科学課題は黄道面内からの観測と組み合わせることで、その威力が何倍にも増大する性質のものであり、他国の地球周回衛星や黄道面の探査機等との共同観測を組織することも検討する必要がある。この点でも、本ミッションの推進は日本のリーダーシップのもと、国際的なコミュニティ全体で行う必要がある。

表 2.1 SOLAR-C プラン A 極域ミッション概要

科学目的	未踏の太陽極域の総合的探査、太陽周期活動の解明 (1) 極域の内部診断 (2) 極域における磁気活動の理解
観測装置	1) 可視光望遠鏡 光球における速度場・磁場の観測、日震学観測 2) 極端紫外線・X線撮像(分光)装置 コロナプラズマの温度・密度・速度診断
衛星	わが国初めての黄道面脱出ミッションとして、技術的にもチャレンジング 衛星重量： TBD テレメトリ： TBD
衛星軌道	軌道半径 1AU (TBR)、最終軌道傾斜角 45 度以上の太陽周回軌道
その他	補助的な観測装置として、太陽放射計、太陽風計測器、広視野コロナグラフの搭載を検討する (2.3.3 章参照)。

2.2. 極域ミッションの目指すサイエンス

プラン A (極域ミッション) の科学目的は、未踏の太陽極域を総合的に探査することである。具体的には、以下の観測を中心として実施する。

- 1) 日震学の手法による、極内部の自転角速度・子午面還流の観測
- 2) 極域光球の磁場・速度場の観測、及び、光球活動に伴うコロナ、太陽風の応答

これらの観測により、太陽の内部構造、太陽周期活動を駆動するダイナモ機構、高速太陽風の加速機構の解明を目指す。ユリシーズ(1990 年打上)は黄道面から離れた唯一のミッションであり、高緯度太陽風の直接計測に成功した。しかし、黄道面から離れた位置からの太陽極域表面の観測は世界的にも未だ実施されていない。

2.2.1. 太陽内部構造の探査

2.2.1.1. 太陽周期活動とダイナモ機構

太陽内部で周期活動を駆動していると考えられているダイナモ機構のモデルは、ダイナモと呼ばれるものである。ポロイダル磁場(太陽自転軸を含む子午面内の磁場)からトロイダル磁場(太陽自転方向の磁場)を生成する効果と、その逆にトロイダル磁場からポロイダル磁場を生成する効果との組み合わせである。これらが交互に働くことで、磁場の維持生成や極性の反転を説明することができる。効果は、速度勾配層(tachocline)と呼ばれる、放射層と対流層との間の境界層付近(太陽中心から約 0.7 太陽半径の位置)で主に起こっていると考えられていて、自転角速度のシアにより、種磁場をトロイダル方向に増幅する。この自転シアは、後述の日震学によりその分布がほぼ明らかになったものである。一方、効果は、観測的な証拠がまだ乏しく、

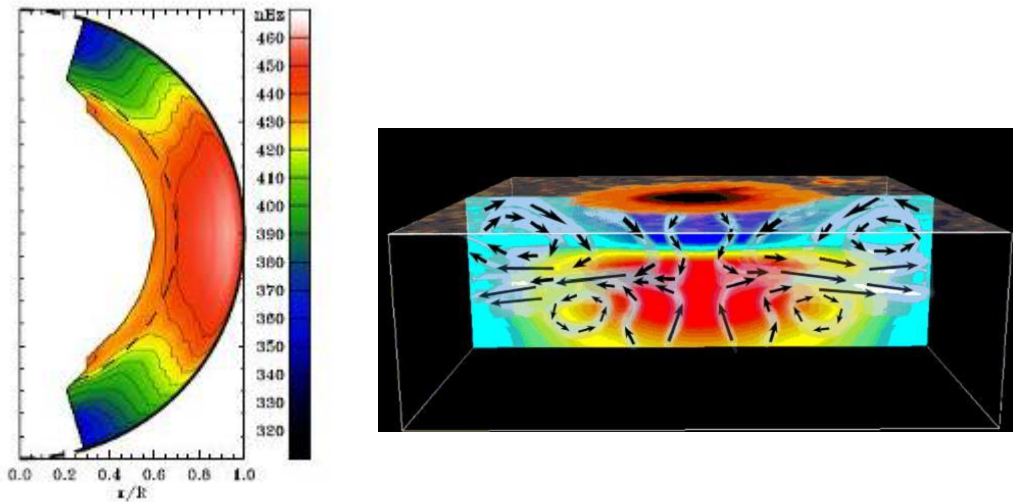


図 2.1: (左) 日震学で求めた太陽内部の自転角速度分布。点線は対流層の底部にあたり、この付近で速度勾配が大きいことがわかる (tachocline)。極域内部の自転角速度分布は精度よく調べられていない。(右) 局所的日震学で求めた、黒点周囲の温度・流れの構造。

太陽周期活動の理解を困難にしている要因となっている。

2.2.1.2. 日震学による太陽内部の探査

太陽内部を観測的に探る唯一の手段が、日震学である。日震学では、太陽内部を伝わる p モード波 (音波) や、太陽表面を伝わる f モード波 (表面重力波) の観測を基に、光球下の構造を明らかにすることに成功して来た。当初は、表面で観測される波動場で固有振動成分が卓越することから、固有振動数の決定とそのインバージョンによって、太陽内部の球対称構造や自転角速度分布 (図 2.1 左) を求めることを主な研究対象としてきた。近年では波動の伝播距離と伝播時間の関係を基礎データとする局所的日震学の手法が発展し、活動領域下の構造 (図 2.1 右) や、子午面還流の検出などに威力を発揮している。

SoHO 衛星や地上望遠鏡による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 (図 2.1 左)。ダイナモ機構において重要だと考えられている子午面還流については、低緯度においては赤道から高緯度への流れが検出されているが、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については、極域からの日震学観測によって初めて明らかにすることができると期待される。

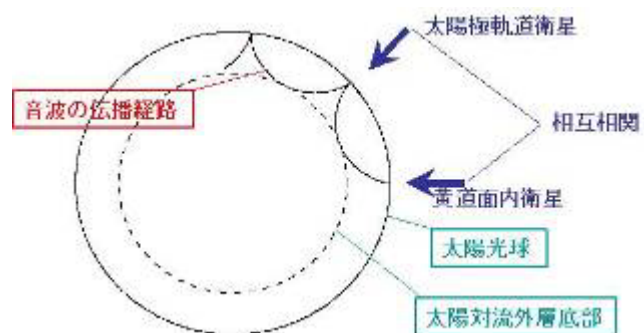


図 2.2: 極域ミッションと黄道面内衛星による局所的日震学。黄道面内衛星は地上観測で代用する可能性も検討する。

局所的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。音波モードの場合、太陽内部に深く伝わる波ほど表面での伝播距離が長いという特徴があり、広視野（大角度）での測定（図 2.2）が必要になる。本ミッションの高緯度からの観測と、黄道面内（地上望遠鏡・地球周回軌道衛星）からの観測とを組み合わせることで太陽表面の広い観測視野をカバーして、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。高緯度から射影角の影響なしに視線方向のドップラー速度を測ることで、対流層深部の探査がどれだけ可能であるかは、本ワーキンググループの重要検討課題である。特に、表層で極域に向かう流れと、底層で赤道に向かう流れとの境目の深さを明らかにすることが重要である。

2.2.2. 極域における磁気活動

2.2.2.1. 極域における光球磁気活動

太陽極域の磁場は、空間的にほぼ一様な極性をもつ。この磁場は、周期活動にともない 11 年ごとに極性が反転する（図 1.3）。前回・前々回は 1990 年・2001 年頃で、次回は 2012 年頃、次いで 2023 年頃が期待される。この磁極の反転は、ダイナモ機構の解明において重要な過程であると考えられているが、詳細な探査はこれまで実施されていない。子午面還流による低緯度から高緯度への磁場の輸送、高緯度での磁極の浮上や沈み込みなどを高精度で連続的に観測することで、ダイナモ機構のモデルに大きな制限をつけることができると期待される。

近年、「ひので」などによる高精度・高解像度磁場観測から、極域磁場は、決して一様な分布をしているのではなく、実際には豊かな構造を持つことが明らかになりつつある。太陽表面に対して水平な磁場成分をもつ小規模な対極ループ構造や、強く局在化した垂直磁束などが見つかったのである。これら極域の磁場構造は、太陽周期活動の理解においてのみならず、後述の極域コロナ活動とも密接に関連していると考えられており、重要性はますます高くなっている。

2.2.2.2. 極域コロナ活動と高速太陽風

太陽極域にはコロナホールが存在し、X 線コロナ画像では暗いことが知られている。しかしながら、近年の「ひので」などによる観測からコロナホール内でもコロナの活動性が高いことが明らかになりつつある。無数の X 線輝点が存在し、そこを足元として X 線ジェットが頻繁に発生していることが明らかとなったからである（図 2.3）。また、惑星間空間シンチレーション (IPS) やユリシーズによる観測から、高速太陽風は極域コロナホールを中心とした高緯度域を起源とするとも分かっている。これらのコロナ活動の起源や高速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。

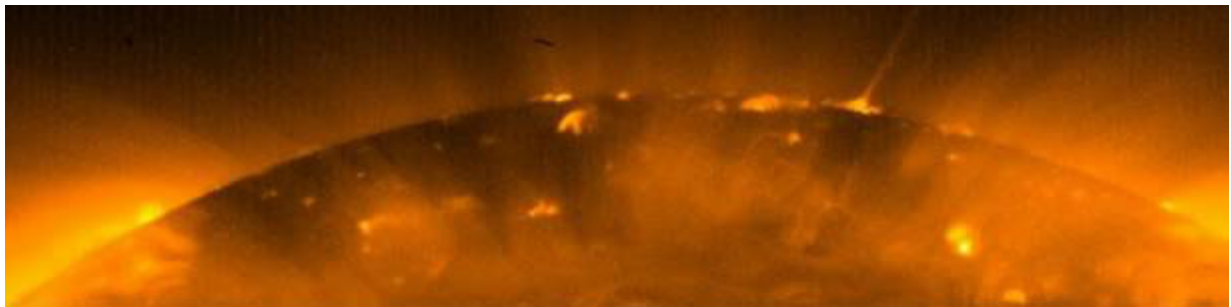


図 2.3: 「ひので」X線望遠鏡が観測した太陽極域で発生するX線ジェット

X線や極端紫外線のコロナ輝線を使い、コロナプラズマの温度・密度診断を行うとともに、上昇速度、すなわち、X線ジェットや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計算される磁力線の形状と組み合わせることで、極域コロナ活動や太陽風加速の起源に迫る。

2.2.2.3. 太陽磁気活動に関連した諸量の観測

黄道面を離れるミッションの性質を生かした以下の観測については、科学的意義や機器重量を考慮し、搭載の可否をワーキンググループで検討する。

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、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。

太陽風

太陽風(粒子、磁場)計測器を搭載することで、太陽風の緯度分布の経年変化を観測することが可能となる。軌道周期1年は11年の活動周期よりも充分短く、軌道周期の長いユリシーズと比較して有利になる。

コロナ質量放出(CME)や太陽風擾乱

コロナグラフによる内部太陽圏の撮像観測を黄道面外から行うことで、コロナ質量放出(CME)の経度方向の構造も含めた全体構造を捉えることが可能となる。黄道面内の人工衛星と組み合わせることで、CME衝撃波によるSolar Energetic Particle(SEP)の加速過程に迫ることができると期待される。

2.3. ミッション構成案

2.3.1. 観測軌道

本ミッションで検討の対象としている衛星軌道を表 2.2 にまとめる。太陽の極域を科学観測の対象とすることから、最終的な到達軌道傾斜角を 45 度以上、また、衛星への熱環境を考慮して、軌道半径は 1 AU 程度として検討を行なう。

表 2.2 観測軌道の要求条件

最終軌道傾斜角：	45 度以上(*) (目標 60 度) (*) 最終軌道傾斜角に到達する前から、できる限り太陽を指向し観測を行なう。
最終軌道半径：	1 AU 程度
最終軌道への到達所要時間：	最短な程よい
備考：	画像データの取得が科学的に重要であり、大容量の通信回線確保を考慮する必要がある

2.3.2. 推進系

黄道面を離脱した軌道をとるための衛星の推進系として、化学推進に比べて推進効率が高く、また、「はやぶさ」や「きく 8 号」等で使用実績が積み上げられてきている、電気推進系の採用を検討する。この電気推進系の成立性が、本プランの大きな技術的ポイントである。地球の公転速度を 30 km/s として、黄道面に対する衛星の軌道傾斜角を 45 度とするのに必要な速度増分 (V) は 23 km/s (60 度の場合は 30 km/s) である。この速度増分を、打上ロケット (含キックモータ) と電気推進、および必要ならスイングバイで達成するよう検討を進める。電気推進エンジンの推力は、複数台の同時運転の可能性も含み、合計 150 mN 程度を検討のベースとしている。

国産の電気推進エンジンとしては、(1) 次期小惑星探査ミッションを想定して、現在 JAXA 宇宙科学研究本部において開発が精力的に進められている μ シリーズエンジン数基からなる推進系、(2) JAXA 航空宇宙技術研究センター (旧 NAL) 等で開発が進められてきた大型イオンエンジン、の 2 種類が検討候補として考えられる。

表 2.3 電気推進系と関連項目

項目	内容
電気推進による推力 (動作するエンジンの合計値)	150 mN 程度 (TBR)
電気推進エンジンの検討候補	(1) μ シリーズエンジン (30 mN) (2) 大型イオンエンジン (150 mN)
電気推進系の所要電力	TBD

衛星重量	・電気推進系 TBD ・バス系 TBD ・ミッション系 TBD
打ち上げロケット	TBD

2.3.3. 観測装置の構成概要

本ミッションで搭載を検討している観測機器候補の一覧を表 2.4 に示す。可視光望遠鏡は「ひので」のような超高空間分解能を目指した大型のものではなく、空間分解能 1 秒角程度の磁場・速度場望遠鏡を想定している。推進系と軌道設計に基づく重量検討を通じて、科学目的を見据えた観測機器の選別・構成の最適化と個別機器の軽量化が、今後重要となる。

表 2.4 搭載観測機器の概要

観測機器	観測対象
可視光望遠鏡	太陽内部診断 極域磁場・速度場
極端紫外線・X線撮像(分光)装置	太陽大気の活動現象 太陽風の流出
(以下については、オプションとして検討する)	
太陽放射計	太陽総放射量の精密測定 太陽活動周期との関連
太陽風計測器	太陽風粒子・磁場計測
広視野コロナグラフ	コロナ質量放出

2.4. 技術的検討課題

本ミッションは、未踏の太陽極域の探査という科学的な意義を持つと同時に、それを実現するための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、特に以下の点がミッションの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
所期の観測軌道に衛星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。これによ

って、電気推進系が動作時に必要とする消費電力も非常に大きい。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。また、パドルの大型化にともなう姿勢安定度への影響の評価も必須である。

- 通信回線の確保

表 2.4 に記載した観測装置群の取得データは主に画像データとなるため、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、衛星は、地球と衛星が黄道面で同じ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。米国が昨年打ち上げた STEREO 衛星では、直径 1.2m のハイゲインアンテナを用いて 0.5 AU の距離で 1 日平均 100 kbps 強の回線レートを確保している（1 日の受信時間は 4 時間）が、同様のことが本ミッションで可能かどうか検討を要する。

3. プラン B: 高解像度太陽観測ミッション

3.1. ミッション概要

プラン B の高解像度太陽観測ミッションは、光球・彩層・コロナの分光観測能力を「ひので」(SOLAR-B)と比較して大幅に強化し、「ひので」の高い解像度で観測を行うことで、現在大きく発展を続ける高解像度太陽物理学の軸を極めるミッションである。「ひので」が新しく暴き出しつつある多様な彩層ダイナミクスを起こす物理素過程を定量的に観測し、彩層加熱やダイナミクスをコロナ加熱とともに総合的に理解することが中心目的である。

「ひので」搭載の可視光磁場望遠鏡(SOT)が、50cm 口径の解像度能力をフルに発揮して、太陽表面(主に光球)の高解像度動画像(0.2-0.3 秒角@380-660nm、回折限界)を世界で初めて取得することに成功した。特に、10 秒程度の時間間隔で撮影した連続画像(動画)は、太陽表面における磁場とプラズマが複雑に関係した太陽大気の高ダイナミックな振る舞いを初めて暴き出し、研究者のみならず一般社会においても驚嘆の声が上がり、現在研究が急速に発展しつつある。同時に、「ひので」の高解像度画像は、さらに小さな要素的な構造が太陽大気中に多々ある証拠を明らかに示し始めており、太陽大気における物理素過程を理解する上で、さらに小さな要素的構造の観測が重要と考えられている。

彩層のダイナミクス・加熱も含め、太陽大気中で発生する様々なプラズマ現象を総合的に理解することが今後の太陽物理学において重要である。特に、物理量(温度、速度、磁場など)診断を高解像度で行うことが物理素過程の理解には不可欠であると認識されつつある。このような状況を踏まえ、「ひので」では得られない波長帯である紫外線を含む広い波長範囲に渡り、高解像度分光観測を実現するミッション、プラン B: 高解像度太陽観測ミッション(以下、高解像度ミッション)を SOLAR-C の候補案として提案する。

高解像度ミッションは、可視光、紫外線(UV)、極端紫外線(EUV)域の分光能力を大幅に拡充した太陽観測用軌道上天文台である。「ひので」で培った高空間分解能望遠鏡技術や衛星姿勢・望遠鏡指向の高精度制御技術を応用することで、衛星システムや光学望遠鏡の新規開発要素を最小限とすることが可能と予想される。

表 3.1 SOLAR-C プラン B 高解像度ミッション概要

科学目的	光球・彩層・コロナの総合的な物理過程の解明
観測装置	3つの望遠鏡で軌道天文台を構成 1) 可視光・紫外線望遠鏡 (口径 50cm、あるいはそれ以上) 高解像度(0.1-0.3 秒角)で、光球・彩層・遷移層の吸収線、輝線を撮像かつ分光する機能 2) 極端紫外線分光望遠鏡 高解像度(0.5 秒角)、高時間分解能(1 秒)での遷移層・コロナ輝線分光 3) 極端紫外線撮像望遠鏡 高解像度(0.2 秒角)でのコロナ輝線撮像
衛星	「ひので」で培った高空間分解能望遠鏡技術や衛星姿勢・望遠鏡指向の高精度制御技術を応用することで、新規開発要素を最小限にする 衛星重量：TBD テレメトリ：TBD
衛星軌道	太陽同期極軌道

3.2. 高解像度ミッションの目指すサイエンス

3.2.1. 「ひので」の科学到達点と新しい高解像度観測の方向性

高解像度ミッションにおいては、「ひので」による科学研究の到達点を多角的に評価し、科学的・観測装置の最適化がきわめて重要である。以下に現時点における「ひので」の到達点と新しい高解像度観測の方向性についてまとめる。なお、「ひので」データの解析は今後も大きく進展が見込まれるので、ミッション検討に反映させていくことが重要である。

- 可視光撮像観測は、光球・彩層における微細構造のダイナミックな振る舞いを世界で初めてとらえた。とりわけ、プロミネンスや彩層スピキュールを伝播する「アルフベン波」や彩層での「磁気リコネクション」など磁力線とプラズマが起こす物理的素過程と考えられる現象を画像の中に初めてとらえた。
- 可視光偏光スペクトル観測は、0.3 秒角で見た光球磁場ベクトルの精密観測を初めて可能とし (図 3.1)、微細磁束管の形成過程、対流運動で形成される水平浮上磁場、黒点暗部や半暗部内の磁場構造やその時間発展、など、新たな発見・知見が得られ始めている。
- 軟 X 線撮像観測は、世界で初めての高解像度(1 秒角)の斜入射望遠鏡で、コロナに存在する高温プラズマの振る舞いを広い温度域でとらえ、低速太陽風の噴出し口の同定や、極域における活発なジェット現象などの発見をもたらした。
- 極端紫外域のコロナ輝線の精密スペクトル観測は、コロナのプラズマ診断(温度・密度・速度)を高解像度(2 秒角)・高波長感度(約 10 倍の速度検出能力)で行い、ダイナミックなコロナプラズマの振る舞いを定量化することに成功した。コロナ質量放出に伴う上昇流の検出、フレ

アヤコロナ加熱に伴うプラズマの運動の測定を高解像度で達成した(図 3.2)。

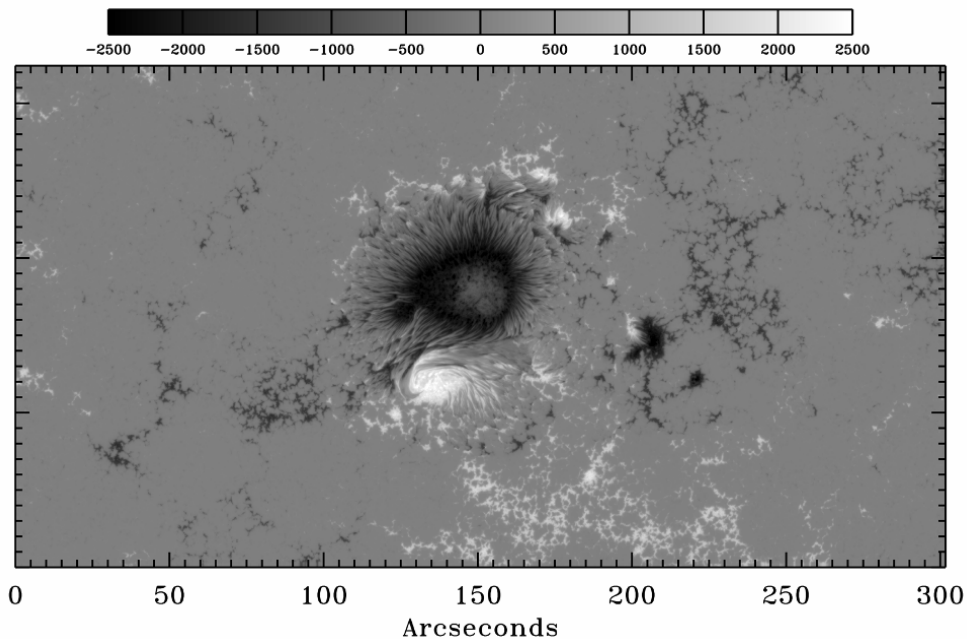


図 3.1: 「ひので」可視光望遠鏡による偏光スペクトル観測から導出された黒点の視線方向磁場分布

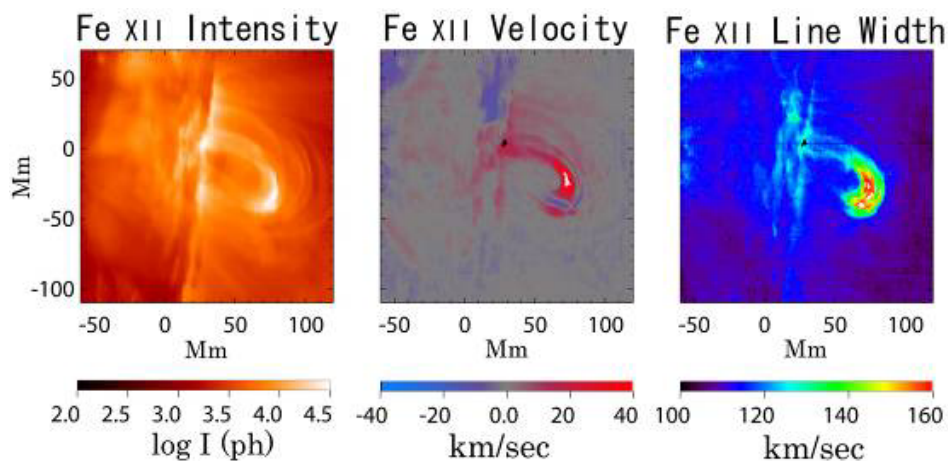


図 3.2: 「ひので」極端紫外線撮像分光装置によるコロナ輝線のスペクトル計測で得られたコロナプラズマの速度分布

一方、「ひので」では観測できないパラメータ領域も存在する。その開拓は高解像度ミッションの科学目的上重要であり、新たなテーマの観測的研究が可能となる。高解像度ミッションにおいて実現すべき観測の方向性について、「ひので」観測と対比させて、表 3.2 にまとめる。

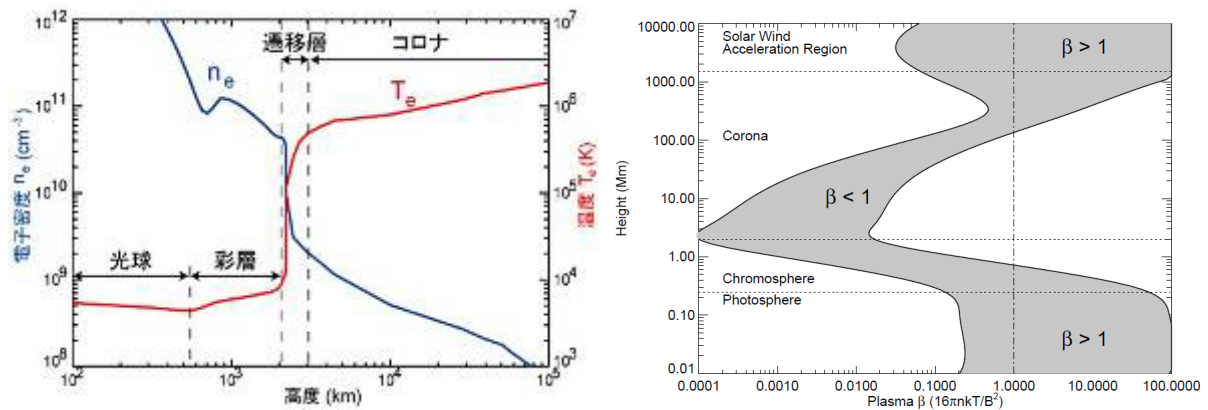


図 3.3: 太陽光球面からコロナにわたる温度と密度の平均的な変化(左)と、高さとプラズマ β の関係 (右)

表 3.2 「ひので」や従来観測で実現されていない観測と新たな高解像度観測の方向性

1. 彩層における速度や磁場といった物理量の診断を可能とする観測	「ひので」CaIIH 観測は広帯域フィルターによる画像情報のみ。彩層の速度・磁場計測には彩層起源の吸収線の(偏光)分光観測が必要。
2. コロナ低層・遷移層プラズマのスペクトル診断における時間分解能(感度)	静穏領域観測で、「ひので」EIS は 40 秒もの光子積算、SoHO 搭載 SUMER で 15 秒必要。太陽大気のダイナミックスの時間スケール(数秒)と比較して1桁不足。ダイナミックスの物理過程の理解には感度向上が不可欠。
3. 彩層とコロナをつなぐ遷移層(温度 1 万~100 万度)のプラズマ診断	遷移層は「ひので」では観測できない温度帯が広く存在。唯一 SoHO 衛星搭載 SUMER が観測可能。ひのでと SUMER の共同観測による結果を見極めることが重要。
4. コロナ・遷移層観測の解像度	光球からコロナへの磁氣的結びつきを特定する上での障害となる。1 秒角を切る遷移層・コロナ観測はまだ実現されていない。

3.2.2. 光球・彩層・コロナの総合的な物理過程の解明

太陽外層大気は、温度、密度がわずか 3000 km 程度の間に変化が急激に起こる領域である(図 3.3)。この中では、磁気流体波、磁気リコネクションなど基礎的プラズマ現象が発生し、プラズマの加熱や加速などダイナミクスを引き起こしている。「ひので」が中心課題として研究を進めている「コロナ加熱」は、100 万度を超える希薄な高温プラズマがコロナでどのような物理過程で作られているかという天文学上基本的な問題である。コロナ加熱と共に、「彩層加熱」も太陽物理学において基本的な問題である。

3.2.2.1. 彩層加熱の謎

約 6,000 度の光球の上に 1 万度の温度をもつ彩層が存在するためには、彩層の中で輻射や熱伝導によらないエネルギー輸送と散逸過程が必要である。彩層を維持するために必要なエネルギーは、コロナ加熱に必要なエネルギーの約 20 倍と見積もられており、彩層加熱はエネルギー収支上

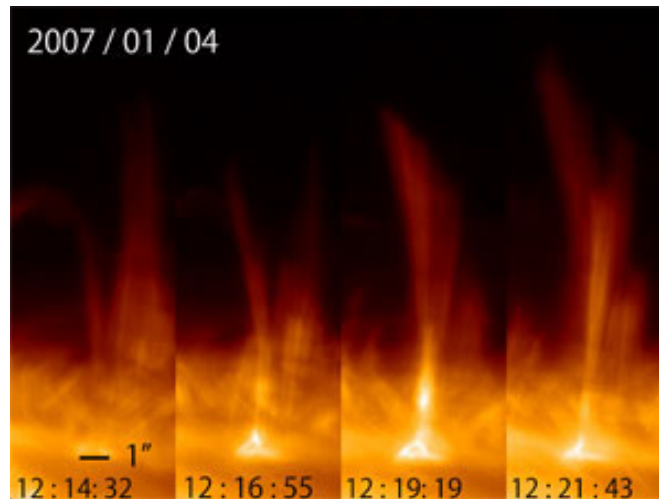


図 3.4: 彩層で発見された磁気リコネクションに伴うジェット噴出現象

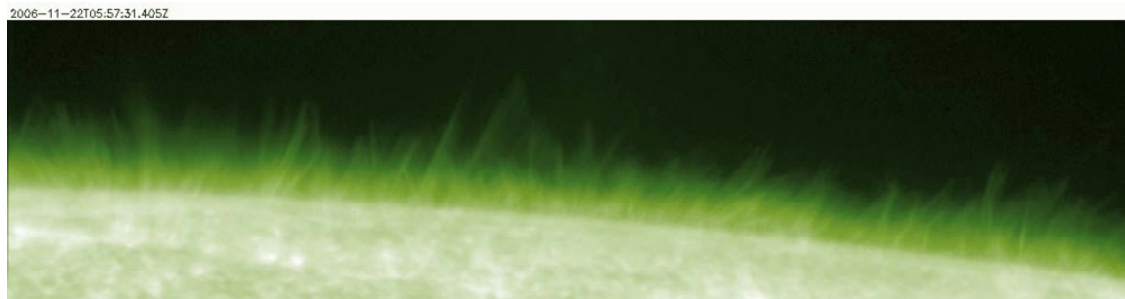


図 3.5: 無数の刷毛状構造の集合体として「ひので」がとらえた彩層

コロナ加熱以上の難問である。また、彩層はコロナへのエネルギー輸送の通過点となっており、彩層加熱を研究することは、光球からコロナまでの太陽大気の構造や加熱を統合的に理解するために重要である。

また、彩層ではダイナミカル現象が多様に存在していることが「ひので」によって明らかとなった。磁気リコネクションが起源となっていると考えられるジェット現象が普遍的に発生していること(図 3.4)、彩層は刷毛状の構造(スピキュール)が無数に存在し、それらが激しく時間変動していること(図 3.5)などが明らかになった。また、音波や磁気流体波がスピキュールを伝播する姿も画像として初めてとらえられている。図 3.3 に示したような準静的平板大気モデルで彩層を表現することはもはや正しくない。彩層のダイナミカルな振る舞いを理解するためには、時間変化を含む3次元構造としてとらえ、しかも物理量診断を可能とする観測が不可欠である。彩層起源のスペクトル線を分光することで、速度や温度構造の立体的な構造を把握し、動的現象の起源や彩層加熱への役割、その普遍性を理解することが重要である。

太陽のみならず他の多くの晩期型星においても、彩層が存在することが確かめられており、恒星大気的基本的な属性であると言ってもよい。太陽における彩層加熱機構の理解は、晩期型星における彩層のモデル化にも直接応用できるものであり、恒星大気における磁気活動の普遍性についても理解が進むものと期待される。また、彩層は、磁気圧とガス圧が釣り合う(プラズマ ~ 1)あたりに相当し(図 3.3)、弱電離衝突プラズマという特徴を持つ。弱電離衝突プラズマは、天体低

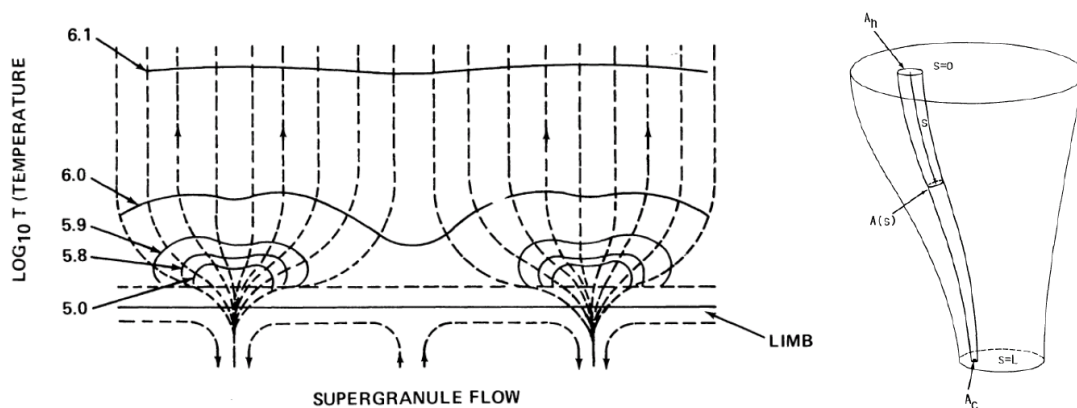


図 3.6: 光球からコロナまでの標準的な磁場形状とそれぞれの高さでの温度

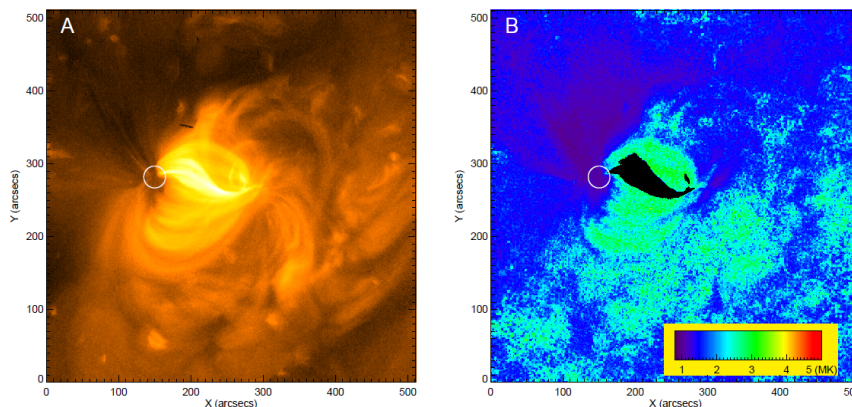


図 3.7: 「ひので」XRT が捉えた太陽風の噴き出し口

温ガス、例えば星間分子雲や星形成領域にも存在し、彩層で得られる知見はこれらの天体への物理的応用が可能である。

3.2.2.2. 光球とコロナのインターフェイス

高領域(光球)と低領域(コロナ)との境界(図 3.3)である彩層・遷移層の中では、磁力線は、静的には図 3.6 のように高さと共に急激に広がる形状をしていると考えられている。「ひので」ではガス圧が支配的な光球におけるベクトル磁場を高解像度で観測し、大きな成果を上げている。一方、コロナで繰り広げられる加熱や活動は、磁気圧が主に支配する世界での現象である。つまり、コロナの加熱、活動を生み出すコロナ磁場の状態を推定するための、磁力線の根元は磁気圧とガス圧がほぼ釣り合っている(プラズマ $\beta \sim 1$)彩層であると言える。光球磁場に加え、彩層でのベクトル磁場を観測することで、光球から彩層、さらにコロナへの磁場構造の空間的変化を立体的にとらえることができる。これによって、コロナで発生している動的現象や加熱の総合的理解を可能にする。

太陽風加速については、いままで太陽表面から数十倍太陽半径程度までの大規模なスケールでの議論が中心であった。このため、太陽表面近くでの磁力線・プラズマ構造を考慮しての議論は

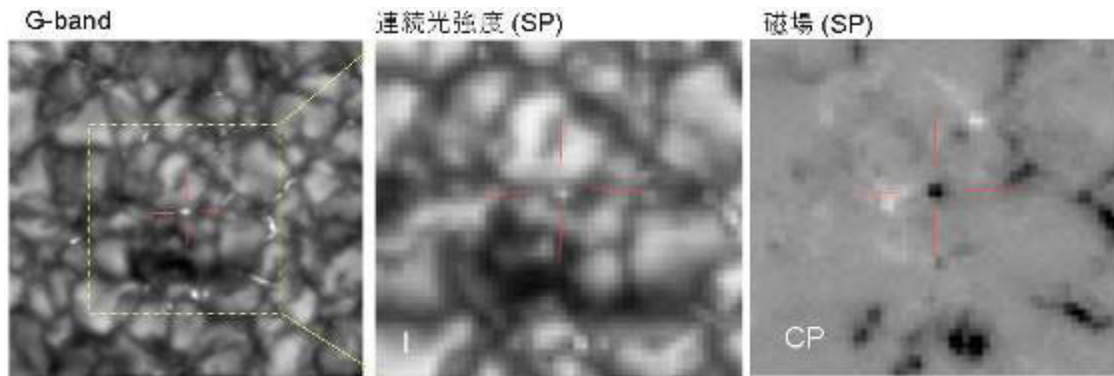


図 3.8: 「ひので」が「分解」した磁気要素

乏しく、高速、低速太陽風の加速機構の違いなどの表面近くの構造が決めている物理過程を取り入れるまでに至っていない。「ひので」の X 線撮像観測は、コロナホールの境界（活動領域の境界でもある）から太陽風が噴き出している姿を画像の形ではじめて明らかにした（図 3.7）。太陽表面近くでの磁場の構造（expansion factor 図 3.6）は加速機構にとって非常に重要であり、太陽風の噴き出し口である彩層・遷移層からコロナまでの物理量を高時間・空間分解能で磁場と共に観測することが太陽風加速を理解する上で鍵となる。

3.2.2.3. 太陽大気の超高解像度観測

「ひので」可視光望遠鏡は、0.2-0.3 秒角の解像度ではかつてない精度の光球磁場データをもたらしており、太陽面で最も小さい構造とされてきた「磁気要素」の時間発展を追跡することを可能にした（図 3.8）。「ひので」は太陽大気が磁場と波動で充満していることを克明に示し、太陽研究の新しい扉を開いたと言える。一方、「ひので」のもたらすデータには、全く予期していなかった多くの微細現象が発見され、新たな謎を生み出している。太陽大気には局所的に音速を超えるガスの運動が多々存在することがわかってきた。このことは必然的に太陽大気の至るところに衝撃波が存在することを示唆している。また、対流によって磁力線が揺さぶられることで、アルフベン波が発生すると同時に、磁場の不連続面すなわち電流シートが形成され得ることも示唆されている。さらにその帰結として磁気リコネクションの発生も期待される。

また、従来の 1 秒角分解能での X 線、極端紫外線観測では、コロナループ構造が完全に分解されているわけではない。「ひので」可視光望遠鏡は、1 秒角以下の小さな空間スケールで彩層が動的に振舞っていることを如実に示したが、それが上空の遷移層・コロナとどのように結びついているかを理解するためには、遷移層・コロナにおいても 1 秒角を切る解像度で観測する必要がある。空間分解能とともに、時間分解能の向上も重要なポイントである。波動がある距離を伝播するのにかかる時間は空間分解能の向上とともに短くなる。よって、動的な現象をとらえるためには、遷移層・コロナ輝線の検出感度を向上させ、短い時間間隔で観測することが必要である。撮像観測では、10 秒以下の短い時間スケールで変化する現象も見つかっているが、これまで極端紫外線の分光観測装置では時間分解能が不足している。

3.3. 搭載観測装置構成案

「ひので」衛星開発で獲得した高解像度宇宙望遠鏡技術、衛星姿勢の高精度制御技術を応用することで、新規開発要素を最小限にすることが本ミッションの特徴である。搭載観測装置の案を表 3.3 にまとめる。特に、「ひので」で達成した口径 50cm クラスの回折限界太陽観測望遠鏡は国際的な評価も高く、日本における高解像度宇宙望遠鏡技術のさらなる発展のためにも、本ミッションの果たす役割は大きい。

表 3.3 搭載観測装置案

可視光・紫外線望遠鏡	
口径	50cm 、あるいはそれ以上 (回折限界分解能 0.1 - 0.3 秒角)
観測波長	1200Å – 8500Å 光球・彩層・遷移層の速度場、磁場の診断に適したスペクトル線を選択して観測を行う
光学系	「ひので」搭載可視光望遠鏡と同様の反射光学系をベースとし、波長範囲を広げて紫外線域もカバーする
極端紫外線分光望遠鏡	
口径	20cm 以上 (分解能 < 0.5 秒角)
観測波長	100 Å – 1000Å 数万度から数 100 万度においてイオンが発する輝線を観測
光学系	多層膜コーティングされた主鏡と凹面回折格子の 2 枚鏡による反射光学系
極端紫外線撮像望遠鏡	
口径	20cm 以上 (分解能 < 0.5 秒角)
観測波長	100 Å – 300Å 100 万度程度のイオンが発する輝線を複数選択
光学系	多層膜コーティングされた主鏡、副鏡の 2 枚鏡による直入射反射光学系

3.4. 科学的要求と検討課題

可視光・紫外線望遠鏡と極端紫外線分光望遠鏡は、「ひので」搭載装置の開発で培われた技術を発展させることで新規開発項目を少なくする。また、極端紫外線撮像望遠鏡については、「ひので」X線望遠鏡や 1998 年 1 月におこなったロケット観測「XUV ドップラー望遠鏡(XDT)」の開発・検討を活用することができる。但し、要求される解像度が高く、観測波長帯も異なるため、科学

的要求の評価も含め、以下に挙げる項目については、ワーキンググループで重点的な検討を行う必要がある。

- 口径、解像度、視野

望遠鏡の口径を大きくすることで解像力も集光力が向上し、細かな構造を素早くとらえることが可能になる。一方、口径が大きくなることで、技術的困難も急増する。口径については、科学的意義と技術的側面を評価検討することで、適切なサイズを決定する。検出器の画素数には制限があるため、解像度を上げるほど視野は狭くなる。現実的な検出器(4k×4k程度)の場合、解像度が0.1秒角～0.5秒角のとき、視野は200秒角(黒点の大きさ程度)から1000秒角(太陽半径程度)である。科学要求に応じて適切な視野サイズ・画素数を選ぶ必要がある。

- 観測波長

太陽大気のどの層でどのような物理量を診断するかは、紫外線、可視光域のどの吸収線に着目するか、または極端紫外域のどの輝線に着目するかで決まってくる。ミッションが目指す科学的方向性を十分に吟味し、最も有効なスペクトル線を総合的に検討する必要がある。

- 熱設計

太陽光はそれ自体が莫大なエネルギーであり、安定した熱環境で望遠鏡を運用するためには、観測視野外や観測波長外の太陽光を望遠鏡内に取り込まないことが重要である。「ひので」搭載望遠鏡で培った技術を生かすとともに、特に、口径を大きくする場合、重要な検討項目の一つとなる。

- 紫外線・極端紫外線用の光学系

極端紫外線光の反射率を高めるコーティングは、極端紫外線分光望遠鏡と極端紫外線撮像望遠鏡の集光力向上のために重要な検討項目である。多層膜(異種金属を交互に積層したコーティング)も含めて吟味する。また、レンズ、コーティングの放射線耐性についても十分配慮する必要がある。

- コンタミネーション管理

有機物やダストの付着は駆動メカや電気回路の動作不良を引き起こすだけでなく、光学素子に付着した場合、望遠鏡の光学性能劣化の原因となる。特に有機物は、極端紫外光を吸収するのみでなく、紫外光との光化学反応によって黒色化することがあり、「ひので」衛星開発以上に徹底したコンタミネーション管理が必須である。

4. 開発体制

SOLAR-C では「ひので」以上に大型の国際協力が必須となる。「ひので」においては ISAS/JAXA と国立天文台は緊密な連携をとりつつ、日本のスペース太陽物理学コミュニティの中核メンバーとして、米国 NASA・英国 PPARC (現 STFC) との間の大規模な国際協力にもとづく搭載観測装置の開発と運用、さらに ESA との間での打上げ後の観測データ受信を成功裏に進めてきた。このような実績をふまえ、SOLAR-C でも ISAS/JAXA と国立天文台を中心に衛星開発・国際協力を推進する。なお、「ひので」までは、国内の他研究機関は打上げ後のデータ解析からの参加にとどまっていたが、SOLAR-C では、わが国のスペース太陽物理学の裾野を広げ、太陽コミュニティ内の有機的なつながりや健全な発展を促進するために、適切な枠組みのもと、これら研究機関にも開発段階からの積極的な参加を促したい。

以上を背景とし、当ワーキンググループには下記の大学・研究所等所属の方々に参加していただく予定である。

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
自然科学研究機構 国立天文台
東京大学 大学院 理学系研究科
京都大学 理学研究科
名古屋大学 太陽地球環境研究所
情報通信研究機構 電磁波計測研究センター
海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター
(順不同)

また、ワーキンググループの代表は以下の通りである。

代表: 常田佐久 (国立天文台)
副代表: 坂尾太郎、清水敏文 (JAXA 宇宙科学研究本部)
渡邊鉄哉 (国立天文台)

5. スケジュール

SOLAR-C 衛星の開発スケジュール概要を下表にまとめる。本年度中の WG 設立後、2008 年度上半期中に、プラン A・プラン B のどちらを SOLAR-C としてミッション提案するかを決定する。その後、ミッション内容を具体化しミッション提案を行う。

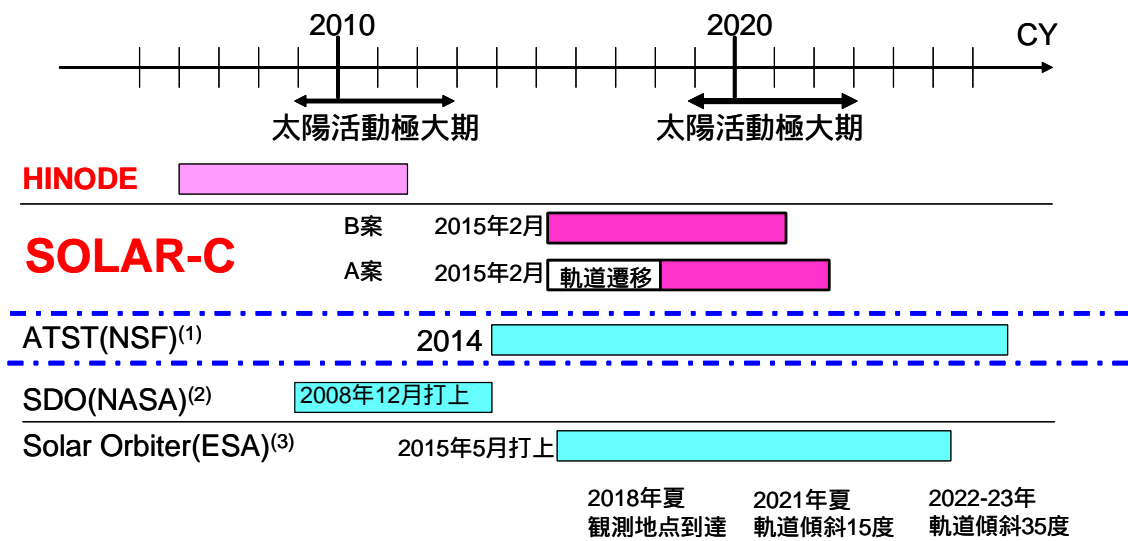
表 5.1 SOLAR-C 衛星計画の開発スケジュール

年度	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015~
衛星開発	WG設立	予備開発	基礎開発	EMの製作試験	FMの製作試験	試験	試験	運用	

↑
打ち上げ

SOLAR-C 衛星の飛翔を 2014 年度に実現したい。特に、極域ミッション(プラン A)を実行する場合には、太陽周期活動における磁極の反転を観測すること、また第 25 極大期において黄道面外の十分な傾斜角から太陽極域の観測が行えることなどが、科学目的の達成には重要である。よって、できる限り早期の打ち上げ実現と、第 25 極大期まで到達するミッションライフが必要となる。ESA が 2015 年の打ち上げを予定している Solar Orbiter 衛星との同時観測(図 5.1)も重要な要素である。

高解像度ミッション(プラン B)についても、NASA が 2008 年 12 月の打ち上げを予定している Solar Dynamics Observatory (SDO)との時間的オーバーラップを確保するためには(図 5.1)、早期の打ち上げを実現することが必要である。高解像度ミッションは狭視野にならざるを得ないため、地球周回軌道から太陽全面を観測する SDO は、相補的な役割を担い科学的価値を高めることが期待される。



(1) ATST (Advanced Technology Solar Telescope)

米国(NSF)が中心となって推進している口径 4m(世界最大)の可視光・赤外地上望遠鏡計画。ハワイ・ハレアカラ山頂に建設、2014年にファーストライト予定。大口径と補償光学(AO)を生かし、0.1秒角を切る空間分解能と、偏光分光観測による光球・彩層の磁場診断を狙う。コロナグラフ観測によるコロナ磁場測定も重要なターゲットとしていることも特徴。

(2) SDO (Solar Dynamics Observatory)

米国(NASA)が中心となって推進している太陽観測衛星計画。SoHO衛星の後継機に相当し、SoHOよりも高い解像度(1秒角)で太陽全面の速度場、磁場測定、日震学による太陽内部診断、コロナの撮像観測を行う。2008年12月に打ち上げ予定、地球周回の静止軌道に投入され、長時間連続的な観測を実現する。

(3) Solar Orbiter

欧州(ESA)が中心となって推進している太陽観測衛星計画。電気推進とスウィングバイによって0.21AUまで太陽に接近し、内部太陽圏のプラズマ計測や、光球・コロナの高解像度観測(0.05秒角)を実現する。太陽に接近した後、金星によるスウィングバイをさらに行うことで軌道傾斜角を最終的に約35度まで上げ、太陽高緯度の観測を行うこともミッションのターゲットとしている。2015年打ち上げ予定。

図 5.1: SOLAR-C、及び、海外の主要太陽観測ミッションのスケジュール