

# 太陽将来計画検討書

Ver. 200810.01

太陽将来計画検討 WG

本文書は太陽将来計画 WG（主査・末松芳法）の下におかれたサブグループによる検討結果を一冊にまとめたものである

## 内容

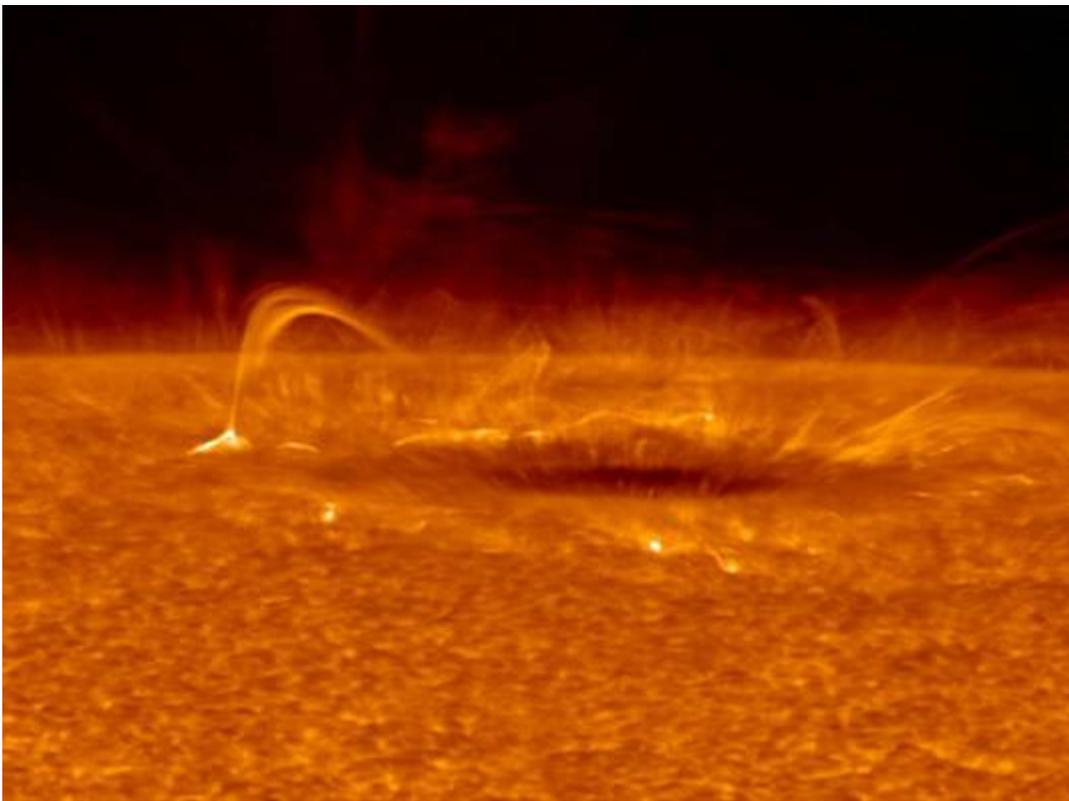
<b>太陽観測衛星 SOLAR-C 検討ワーキンググループ設置提案書</b> .....	<b>5</b>
1. 次期太陽観測ミッション概要.....	7
1.1. 提案の背景.....	7
1.2. 太陽観測衛星 SOLAR-C.....	9
2. プラン A: 太陽極域観測ミッション.....	11
2.1. ミッション概要.....	11
2.2. 極域ミッションの目指すサイエンス.....	12
2.2.1. 太陽内部構造の探査.....	12
2.2.2. 極域における磁気活動.....	14
2.3. ミッション構成案.....	16
2.3.1. 観測軌道.....	16
2.3.2. 推進系.....	16
2.3.3. 観測装置の構成概要.....	17
2.4. 技術的検討課題.....	17
3. プラン B: 高解像度太陽観測ミッション.....	19
3.1. ミッション概要.....	19
3.2. 高解像度ミッションの目指すサイエンス.....	20
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.....	20
3.2.2. 光球・彩層・コロナの総合的な物理過程の解明.....	22
3.3. 搭載観測装置構成案.....	26
3.4. 科学的要求と検討課題.....	26
4. 開発体制.....	28
5. スケジュール.....	29
<b>地上太陽光学観測の将来 検討報告書</b> .....	<b>31</b>
I. 太陽物理学の現状と今後の地上光学観測の役割.....	32
I-1. 地上次世代望遠鏡で目指すサイエンス.....	32
I-1-1. 高空間分解能観測.....	32
I-1-2. 偏光による高度なプラズマ診断.....	35

I-1-3. 恒星ダイナモについて .....	36
I-2. 諸外国の地上太陽望遠鏡将来計画の動向 .....	40
II. 地上太陽観測将来計画の進め方 .....	43
<b>太陽将来計画：高エネルギー現象関係 .....</b>	<b>46</b>
1. イントロダクション .....	47
2. 太陽高エネルギー現象の現在までの理解と今後の課題 .....	47
2.1 粒子加速 .....	47
2.2 超高温プラズマ生成 .....	50
3. 海外の諸計画 .....	50
4. 今後 10 年くらいのタイムスケールで狙うべき課題 .....	51
5. 課題を解決するための観測装置検討 .....	54
6. 日本の太陽高エネルギー研究の今後 .....	54
7. References .....	54
<b>太陽電波観測 .....</b>	<b>56</b>
1. 太陽研究における太陽電波観測 .....	57
2. 世界の太陽電波観測の現状 .....	58
3. 野辺山太陽電波観測所の現状 .....	60
4. 太陽研究における電波観測への課題 .....	61
5. 世界の太陽電波観測の将来計画 .....	62
6. 日本の太陽電波の今後 .....	65
<b>理論サブグループ 検討報告書 .....</b>	<b>67</b>
1. はじめに .....	68
2. 磁場の起源 .....	68
2.1 全球スケール流れ .....	68
2.2 回転勾配層（タコクライン） .....	69
2.3 孤立磁束管の生成・浮上 .....	69
2.4 $\alpha$ 効果 .....	69
2.5 11 年周期、Maunder 極小期 .....	69
2.6 現状と課題 .....	70
3. 外層大気の加熱と構造形成 .....	70
3.1 コロナ加熱 .....	70
3.2 太陽風加速 .....	71
3.3 彩層加熱とダイナミクス .....	73
4. 爆発現象 .....	74

4.1 研究の現状 .....	74
4.2 今後の研究課題：フレア .....	74
4.3 今後の研究課題：コロナ質量放出 .....	75
4.4 粒子加速 .....	76
5. 宇宙天気 .....	77
6. シミュレーション科学としての太陽研究 .....	77
7. 人材育成 .....	78
<b>分野間連携の視点に関するサブワーキンググループ報告書 .....</b>	<b>79</b>
1. 太陽将来計画に関する関連分野研究者のコメント調査 .....	80
2. 主なコメントの抜粋 .....	80
3. まとめ .....	83

# 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>

<b>1.次期太陽観測ミッション概要</b> .....	<b>7</b>
1.1. 提案の背景 .....	7
1.2. 太陽観測衛星 SOLAR-C .....	9
<b>2.プラン A: 太陽極域観測ミッション</b> .....	<b>11</b>
2.1. ミッション概要 .....	11
2.2. 極域ミッションの目指すサイエンス .....	12
2.2.1. 太陽内部構造の探査 .....	12
2.2.2. 極域における磁気活動 .....	14
2.3. ミッション構成案 .....	16
2.3.1. 観測軌道 .....	16
2.3.2. 推進系 .....	16
2.3.3. 観測装置の構成概要 .....	17
2.4. 技術的検討課題 .....	17
<b>3.プラン B: 高解像度太陽観測ミッション</b> .....	<b>19</b>
3.1. ミッション概要 .....	19
3.2. 高解像度ミッションの目指すサイエンス .....	20
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 .....	20
3.2.2. 光球・彩層・コロナの総合的な物理過程の解明 .....	22
3.3. 搭載観測装置構成案 .....	26
3.4. 科学的要求と検討課題 .....	26
<b>4.開発体制</b> .....	<b>28</b>
<b>5.スケジュール</b> .....	<b>29</b>

# 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。

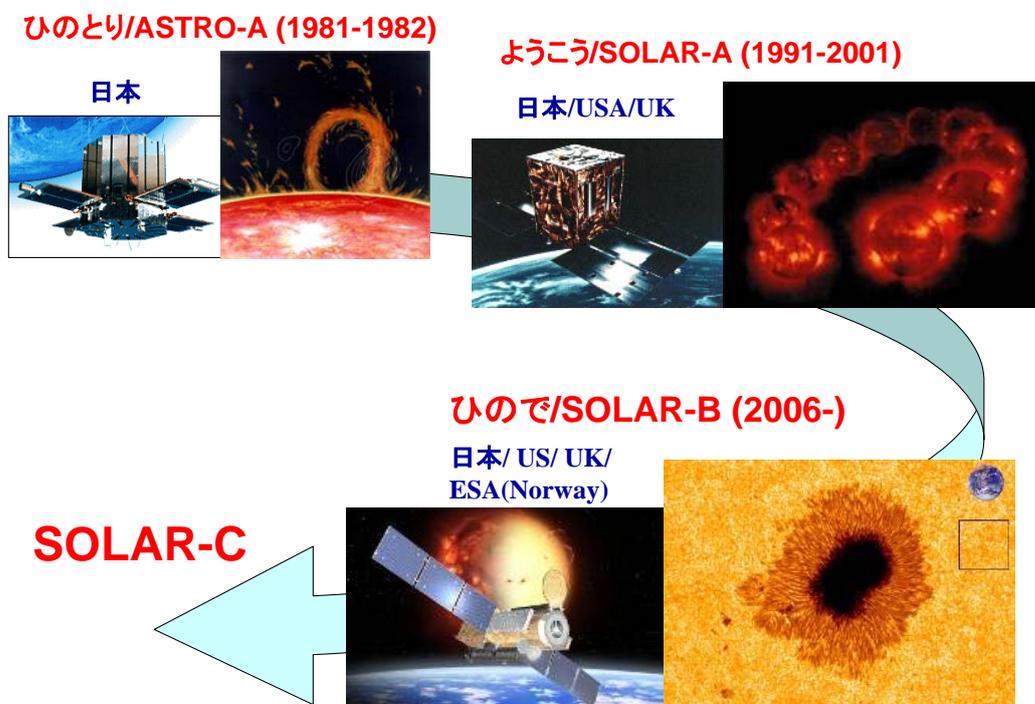


図 1.1: 日本の太陽観測衛星

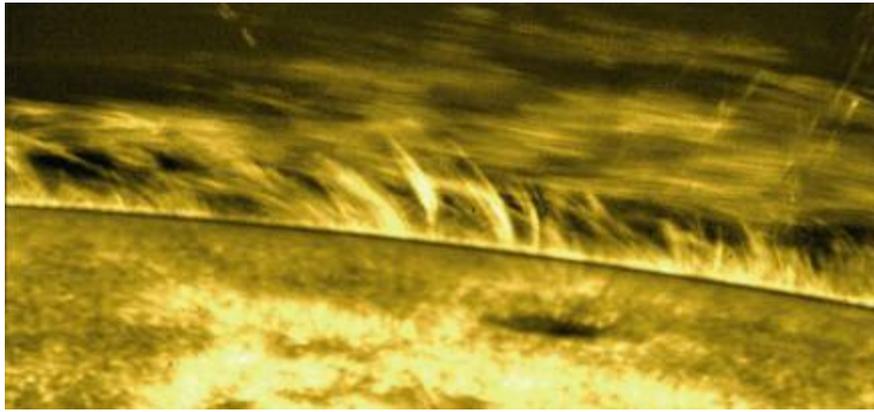


図 1.2: 「ひので」可視光望遠鏡が観測した彩層スピキュールとプロミネンスの微細構造

### **「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、

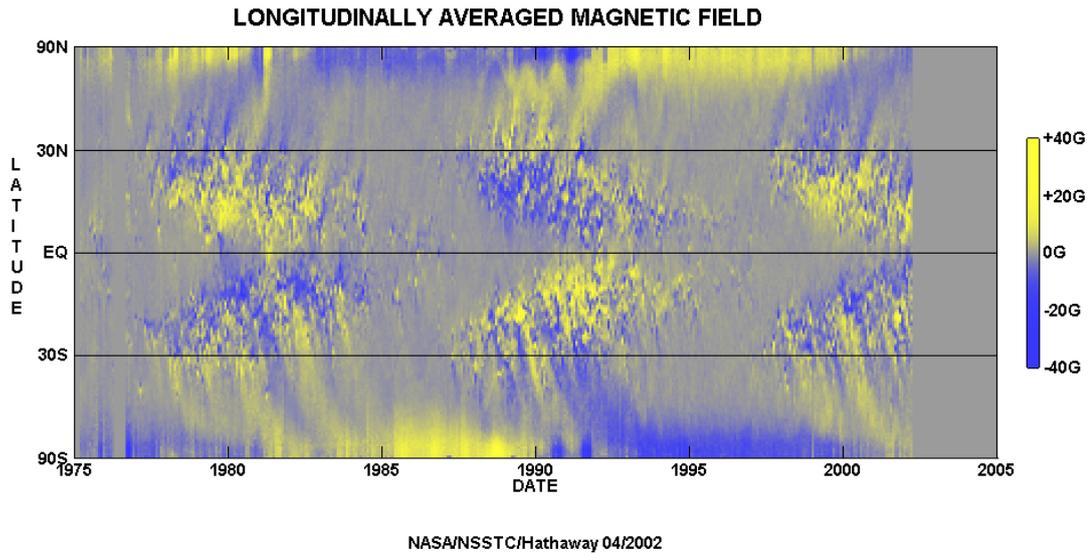


図 1.3: 経度方向に平均した磁場の太陽周期活動にともなう変遷。極域ではおよそ 11 年おきに磁極が反転するが、黄道面からの観測では極域の磁場測定精度が十分でない。

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  $\alpha \Omega$  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  $\Omega$  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  $\alpha$  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。 $\Omega$  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、回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。この回転シアは、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  $\alpha$  効果は、観測的な証拠がまだ乏しく、

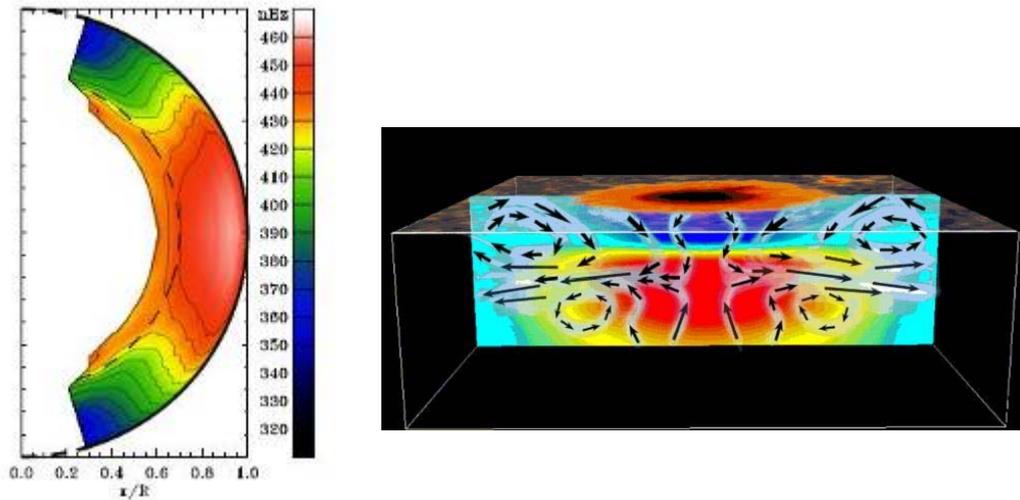


図 2.1: (左) 日震学で求めた太陽内部の自転角速度分布。点線は対流層の底部にあたり、この付近で速度勾配が大きいことがわかる (tachocline)。極域内部の自転角速度分布は精度よく調べられていない。(右) 局所的日震学で求めた、黒点周囲の温度・流れの構造。

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。

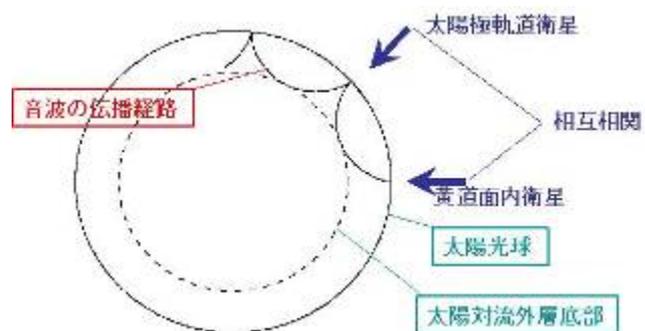


図 2.2: 極域ミッションと黄道面内衛星による局所的日震学。黄道面内衛星は地上観測で代用する可能性も検討する。

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。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ことも分かっている。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。

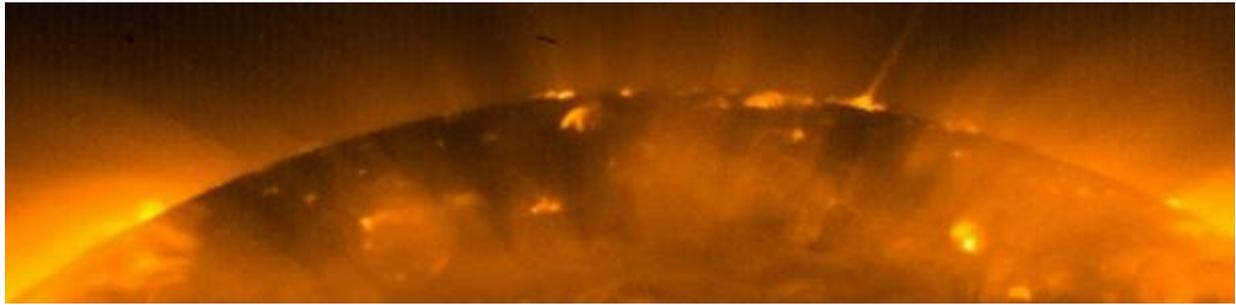


図 2.3: 「ひので」 X 線望遠鏡が観測した太陽極域で発生する X 線ジェット

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 ( $\Delta V$ ) 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。

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) $\mu$ 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

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  $\mu$  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。

### 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解像度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、フレアや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)。

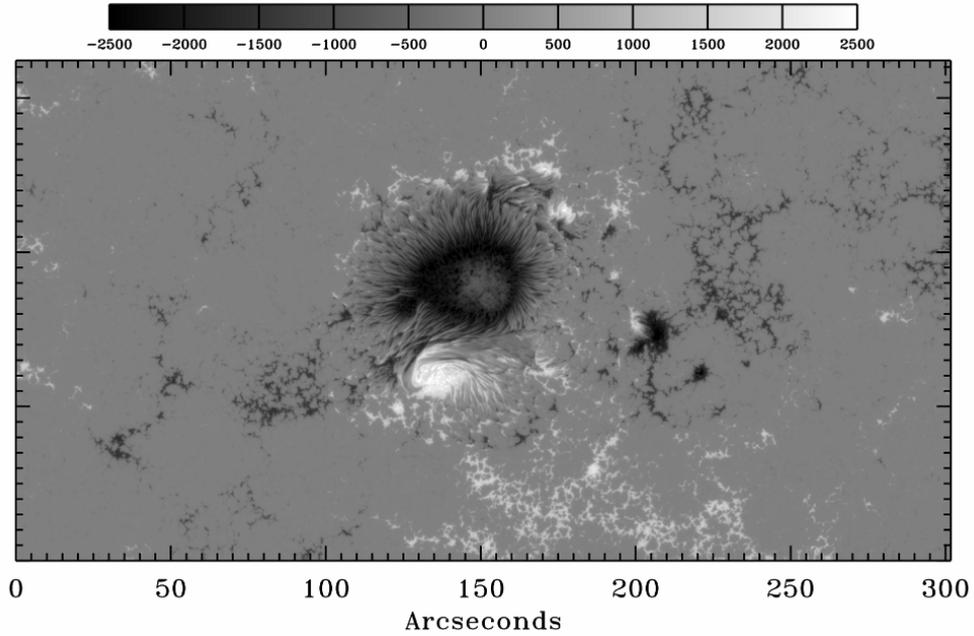


図 3.1: 「ひので」可視光望遠鏡による偏光スペクトル観測から導出された黒点の視線方向磁場分布

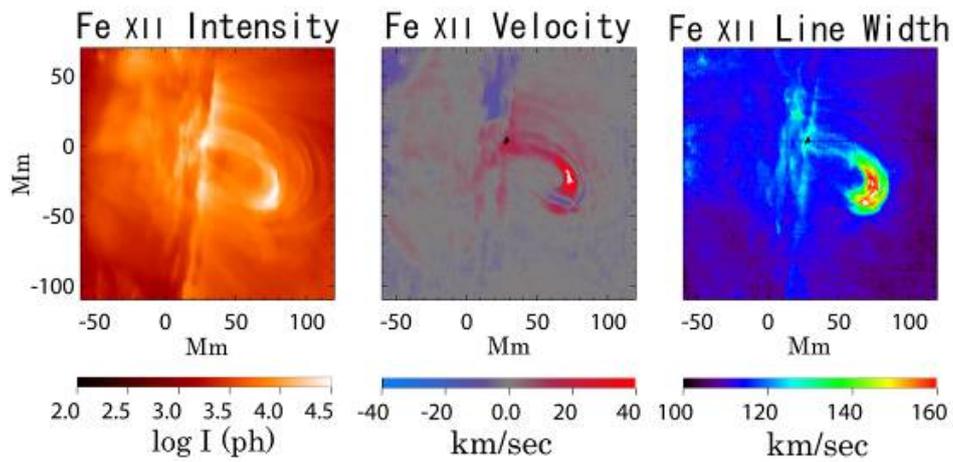


図 3.2: 「ひので」極端紫外線撮像分光装置によるコロナ輝線のスペクトル計測で得られたコロナプラズマの速度分布

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。

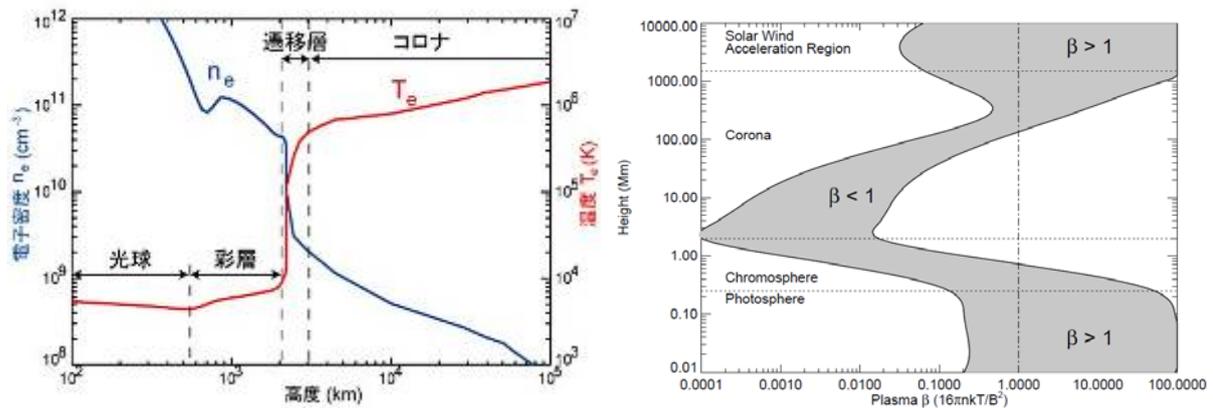


図 3.3: 太陽光球面からコロナにわたる温度と密度の平均的な変化(左)と、高さとプラズマ  $\beta$  の関係 (右)

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 程度の間に変化に急激に変化する領域である(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

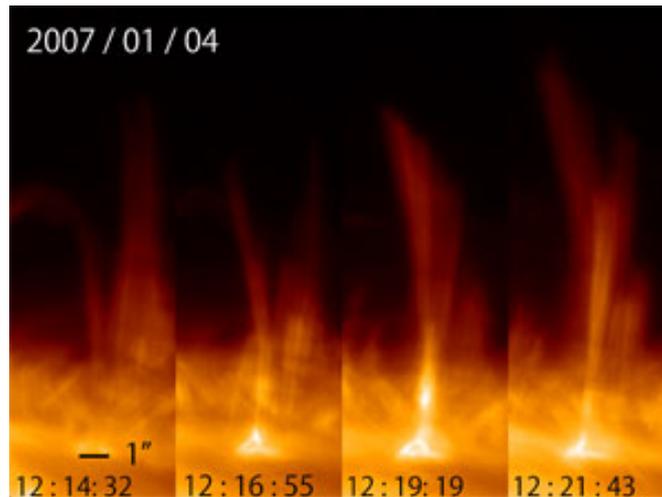


図 3.4: 彩層で発見された磁気リコネクションに伴うジェット噴出現象

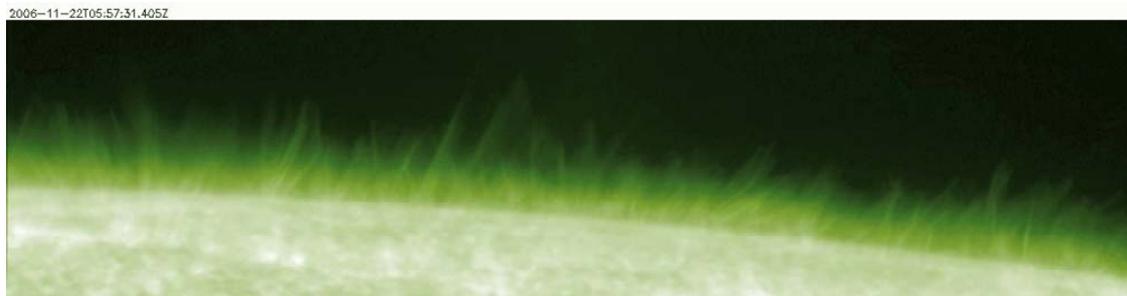


図 3.5: 無数の刷毛状構造の集合体として「ひので」がとらえた彩層

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 $\beta \sim 1$ )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

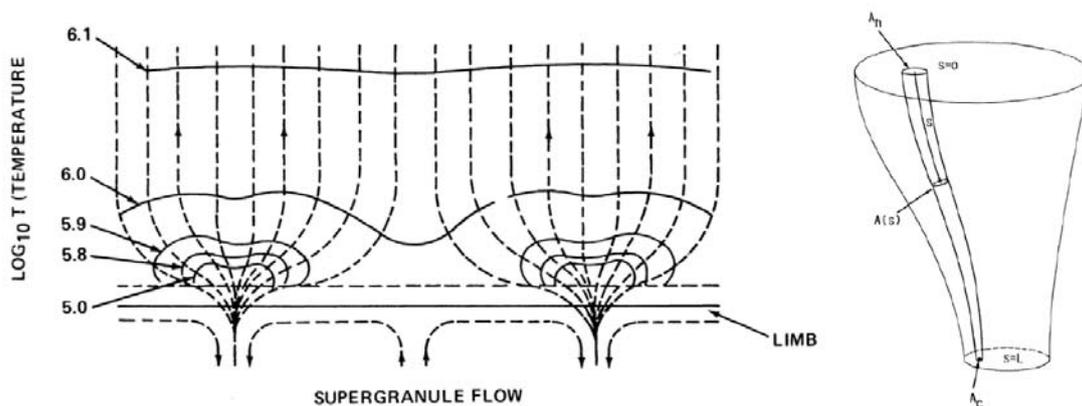


図 3.6: 光球からコロナまでの標準的な磁場形状とそれぞれの高さでの温度

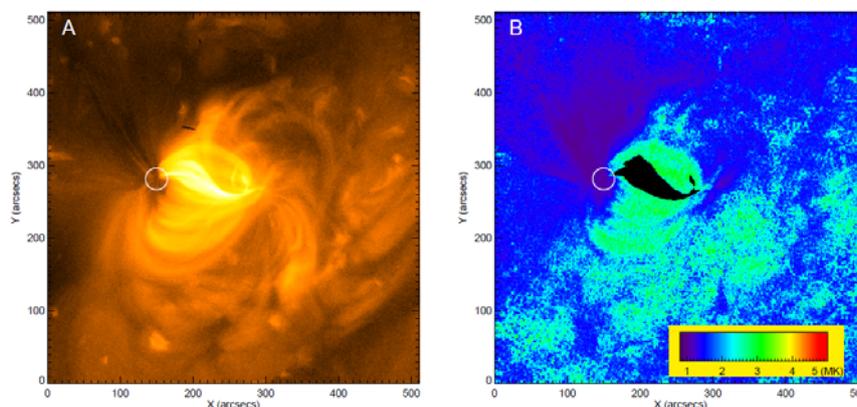


図 3.7: 「ひので」 XRT が捉えた太陽風の噴き出し口

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 $\beta$ 領域(光球)と低 $\beta$ 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

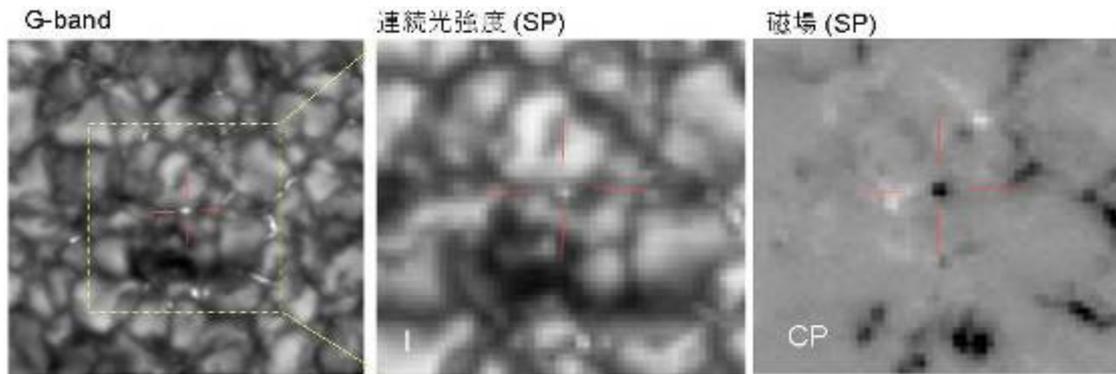


図 3.8: 「ひので」が「分解」した磁気要素

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」のもたらずデータには、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 φ、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 φ 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 φ 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。

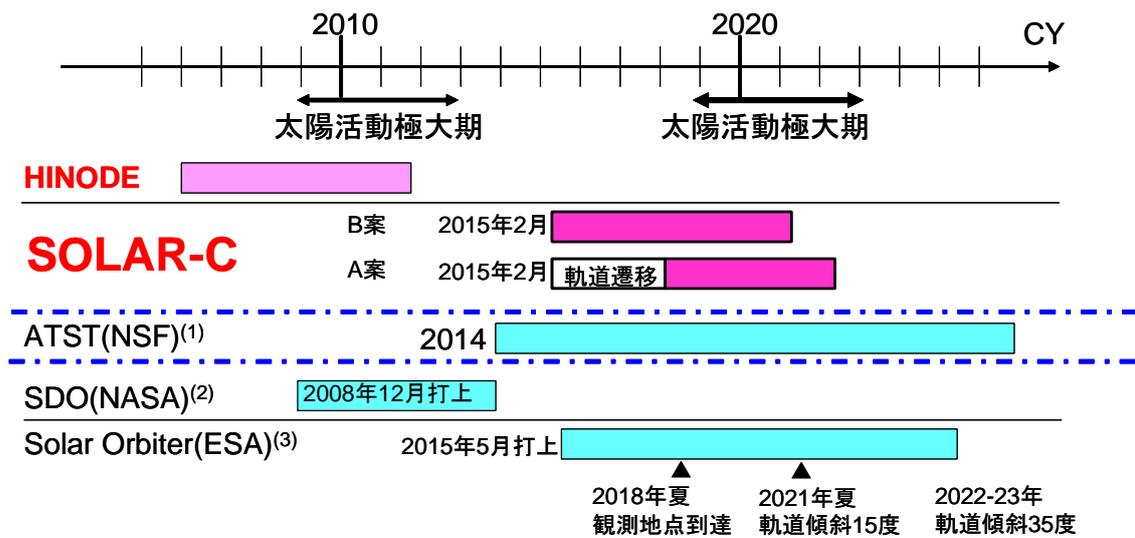
表 5.1 SOLAR-C 衛星計画の開発スケジュール

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	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

# 地上太陽光学観測の将来 検討報告書

より高い空間分解能・より高い偏光測光精度で切り開く  
これからの太陽物理学

2008年3月 (v.5)

地上太陽観測検討サブグループ  
(花岡、一本、北井、山本、末松)

## 目次

I. 太陽物理学の現状と今後の地上光学観測の役割	…32
I-1. 地上次世代望遠鏡で目指すサイエンス	…32
I-2. 諸外国の地上太陽望遠鏡将来計画の動向	…40
II. 地上太陽観測将来計画の進め方	…43

# I. 太陽物理学の現状と今後の地上光学観測の役割

近年の太陽光学観測では望遠鏡の大口径化が進みつつあり、それに伴って空間分解能・偏光測光精度が著しく向上している。これによって太陽表面のプラズマや磁場の振る舞いの本質に迫る研究が進んでいる。経済面、あるいはデータ取得量などの面から見て望遠鏡の大口径化は地上望遠鏡で行うのが有利であるので、高い空間分解能・高い偏光測光精度による研究は、次世代地上望遠鏡が主役となって推進していくことが期待される。ここでは太陽物理の現状と将来の研究の方向性を

- ・ 高空間分解能観測
  - ・ 偏光による高度なプラズマ診断
  - ・ 太陽物理の発展が将来的に大きく寄与すると期待される恒星ダイナモの研究
- という面から概観し、さらに諸外国の地上望遠鏡建設の現状と将来について述べる。

## I-1. 地上次世代望遠鏡で目指すサイエンス

### I-1-1. 高空間分解能観測

#### 光球微細構造

2000年頃以降、カナリア諸島の望遠鏡群(SST, DOT, VTT)、補償光学、画像処理の進歩、さらに「ひので」の登場によって50cm~1mの口径をフルに生かした高解像度画像が取得できるようになった。特にSSTでは、空間分解能約100kmを達成している(図I-1-1)。これによって、粒状斑やその間にある微細磁気要素の時間発展を追うことが可能になった。これらの観測技術の進展に伴い、

- ・ 微細磁気要素(0.2"~160km)の形成(emergenceやconvective collapse)や消滅(cancellation)
- ・ 微細磁気要素の運動や(非)磁気流体波動の励起(彩層・コロナの加熱との関係)
- ・ 黒点に見られる構造の起源(umbral dot, penumbral filament, Evershed flowなど)

といった、これまでの観測でも見えかけてはいたが、詳細まで踏み込めなかった現象の研究が急速に進展しつつある。

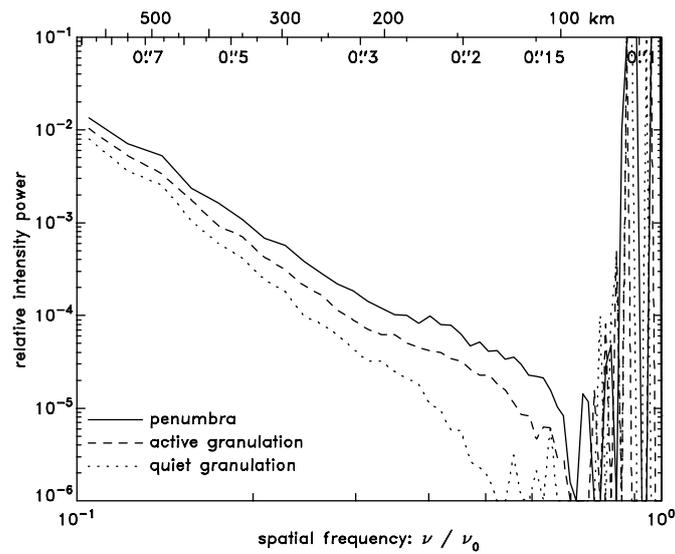


図 I-1-1: カナリア諸島ラパルマの Swedish Solar Telescope (SST) で得られた G-band で観測した光球構造の(空間)パワースペクトル。0.2"程度まで power-law 的な分布が観測されるが、0.15"より高波数域は分解できていない (Roupe van der Voort et al. 2007)。

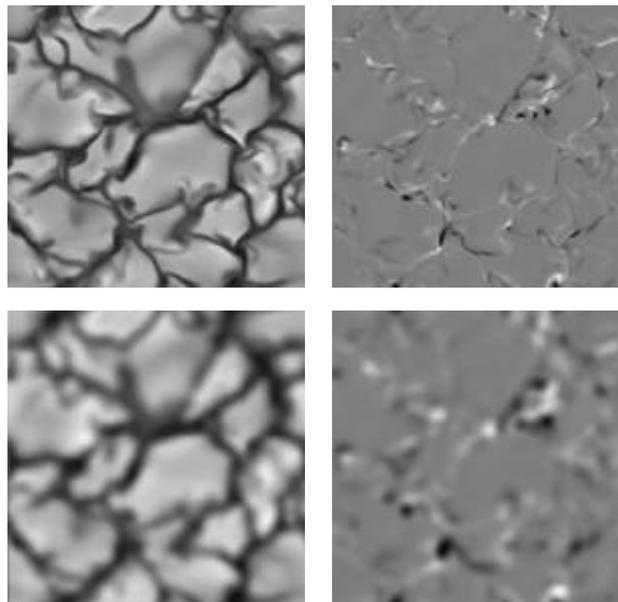


図 I-1-2: 磁気対流の数値シミュレーション。(左)温度と(右)磁場の空間分布。上が分解能 30km の場合、下が分解能 150km の場合。

ただし、これらの観測においても、光球の構造を完全に分解できていないことは明らかである。微細磁気要素といっても、それよりも小さな構造が存在しないわけではない。光球の対流は乱流であるから、磁気散逸が効く空間スケールまで高波数の運動や構造は存在していると期待され(図 I-1-2)、その空間スケールは現在の分解能よりもはるか先である。「ひので」による観測においても、空間分解できていない構造の存在は示唆されている。特に、微細磁気要素内部の磁場構造や、

その周囲あるいは内部を伝播している（非）磁気流体波動、さらには磁気散逸の現場(電流シート)の直接観測をするためには、さらなる高空間分解能が要求される。また、ローカルダイナモの観点においても、高波数域の運動の観測は重要である。

### 彩層ダイナミクス

彩層やさらに上空のコロナを加熱する物理過程の解明は、重要なテーマである。この分野も、近年の地上高空間分解能観測や「ひので」によって、詳細な研究が行われるようになった(e.g. 図 I-1-3)。最近の高空間分解能観測によると、彩層は  $0.5''$  よりも細かい磁力線によって構成されており、さらにそれが 10 秒以下の時間スケールで変動していることが明らかとなっている。彩層で発生する色々な現象では、

- 光球から彩層、さらに上空への（非）磁気流体波動の伝播
- 彩層磁気リコネクション

の 2 つの物理過程が鍵を握っていると考えられている。（非）磁気流体波動のモードや、衝撃波、磁気散逸(電流シート)を同定しようとする、速度や磁場の定量的な測定を、現在よりも高い空間分解能で実現する必要がある。特に、彩層磁場の高解像度測定は、既存の観測装置では困難であるが、上記物理過程の理解のためには必須である。

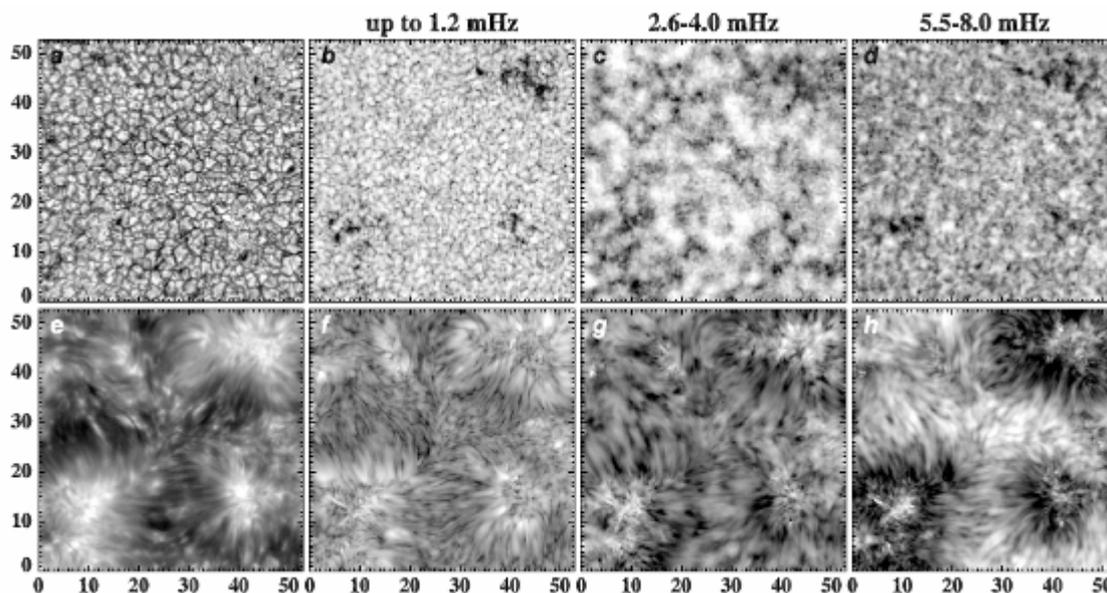


図 I-1-3: Interferometric BIdimensional Spectrometer (IBIS, US National Solar Observatory) で観測された光球画像(連続光, a)と光球における速度パワーの空間分布(b-d)、CaII 854.2nm 線で観測した彩層画像(e)と彩層における速度パワーの空間分布(f-h)。(Vecchio et al. 2007)

### 高空間分解能を実現する望遠鏡

従来の高空間分解能観測の多くは撮像観測でのみ実現されているが、運動や磁場の詳細な診断のためには、(偏光)分光観測が必須である。分光器による観測や、狭帯域の波長可変フィルターを用

いた撮像分光観測のいずれにおいても、特に偏光まで観測しようとするすると光子の量でリミットされてしまう。磁場観測に必要な0.1%の測光精度を実現しようとする、既存の望遠鏡では、積算時間は数秒以上かかってしまう。高空間分解能を実現するためには、同時に時間分解能も重要な要素となる。光球、彩層での音速はおよそ10km/sであるから、それが空間分解能40km(0.05arcsec)を横切るのにかかる時間は4秒である。これよりも十分短いスケールでの観測が必要となる。よって、大口径望遠鏡で十分な光子を集めることが高空間分解能観測においては重要である。

また、特に、光球と彩層のカップリングを観測するためには、複数の吸収線を同時に分光観測することが必要である。高空間分解能 + 高時間分解能 + 多波長点数を実現しようとする、必然的に膨大なデータ量となり、スペース望遠鏡よりも地上望遠鏡の方がはるかに有利となる。

## 1-1-2. 偏光による高度なプラズマ診断

### プラズマ診断の現状

現在、太陽プラズマの診断はスペクトル強度による温度・密度診断に加えて、ゼーマン効果による磁場の測定が主流である。磁場の測定については、観測されるスペクトル線のストークス輪郭（偏光の4成分）を、輻射輸送の方程式から導かれる理論的な輪郭でフィッティングすることにより、太陽大気中の磁場3成分を決定する方法が実用化されている。これによって、主に光球の比較的強い磁場を非常に高い信頼度で求めることが可能になった。一方、スペクトル線の偏光をもたらす物理過程は磁場によるゼーマン効果のみではなく、その他の大気中物理量の非等方性に起因して偏光が発生する物理過程もある。例えば輻射場の非等方性による散乱偏光、それに磁場の付加的な作用が加わったハンレ効果、電場によるスタルク効果、熱伝導や粒子ビーム等の粒子速度場の非等方性による衝突偏光などが知られている。このことは、スペクトル線の偏光から散乱体の磁場、電場、粒子加速領域や熱伝導を診断できる可能性があることを示している。いうまでもなく、これらの物理量は太陽大気で起こっているプラズマ現象を理解する上できわめて重要であり、その測定は太陽プラズマ研究の新しい切り口を開くと期待できる。例えば、直流電場による電流シートやフレア粒子加速現場の同定、衝突偏光による非熱的粒子やコロナループ足下の熱伝導の検出、ハンレ効果によるプロミネンス弱磁場の診断、等の重要問題に迫ることができる。

### プラズマ診断の展望

これら偏光による診断を目的とした観測はこれまでも地上太陽観測において行われており、有意な信号を検出した報告も複数ある。しかし、ゼーマン効果と比較するとその観測例は格段に少なく、プラズマ診断のツールとしてはまだ十分に実用化された方法とはいえないのが現状であろう。その理由は、一般にこれらの偏光シグナルがきわめて微弱であり観測に高い精度が要求されること、また、それぞれの偏光メカニズムを記述する理論的な方法がまだ発展段階にある、ということによる。これら新しいプラズマ診断手法は、ゼーマン効果による磁場診断のみに依存した現在

の太陽プラズマ研究を大きく発展させる可能性をもっており、その開拓は今後推し進めるべき重要な課題であろう。但し、すでに確立した方法で確実に成果を上げることを要求されるスペースミッションではなかなか追求しにくい分野でもある。

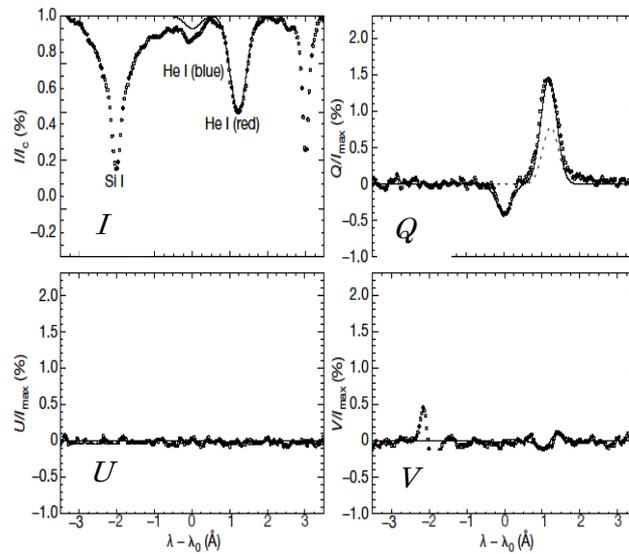


図 I-1-5. ダークフィラメントの HeI 10830Å ラインの偏光。散乱+磁場のハンレ効果による偏光が確認できる。(J. Trujillo Bueno et al. 2002, NATURE , 415, 24)

以上のことから、偏光による新しいプラズマ診断手法の開拓および、それに基づく太陽プラズマ現象の研究は、次世代大型地上望遠鏡で推進すべき課題の1つの柱と位置づけられる。これを実現するための望遠鏡には、高い精度を短時間に達成するために必要な光子を得られる口径、散乱偏光の測定に適した近紫外線から、ゼーマン効果やスタルク効果の測定に適した中間赤外領域を含む広い波長範囲のカバー、偏光観測に最適化された光学系が要求される。また、得られた偏光スペクトル情報からプラズマの物理量を引き出すための理論的な基盤の整備も必要である。これには量子力学による散乱理論を駆使した専門的なノウハウが必要であり、又、実験室プラズマ等の研究分野との連携も必要である。

### I-1-3. 恒星ダイナモについて

#### ・ 恒星ダイナモの研究意義

恒星ダイナモの研究を行う意義は、普遍的な磁気流体现象としてダイナモを理解する事である。太陽は対流などの内部構造が詳細に分かる唯一の天体であるが、同様の周期変化を見せる変光星の一つに過ぎない。自転速度や対流層の温度など、構造が異なる恒星群について、周期的な（光

度・磁場) 変化を調べる事で、ダイナモの理解が進むと期待される。

### ・ 恒星ダイナモの観測的研究

恒星ダイナモの観測的研究方法は、分光あるいはフィルター観測による各波長の光度変化を調べる方法と、偏光分光観測により恒星の磁場(構造)を求め、その変化を調べる方法がある。

Babcock (1947)に始まる恒星の磁場観測の、最近の状況は以下のようなものである。

Saar (1996)では、17個のG、K、M型星(巨星を含む)の偏光分光観測を行い、1-4kG、filling factor 1.5-70%という値が得られている。

BAF型星の全体的な傾向として、B型星の磁場強度は数100G、A型星は1kG前後である(Henrichs et al. 2002; Hubrig et al. 2002)。O型星については、近年磁場の存在を示す偏光分光観測の結果が得られ始めた(Donati et al. 2006、磁場強度は100-1kG)。これにより、主系列星全ての恒星型で磁場を持つ恒星の存在が確認された。

原始星については、Donati et al.(2007)などが降着円盤を持つV2129 Oph (T Tauri star)の偏光分光観測を行い、降着円盤を含めた磁場構造を再現しようとしている。近年では、Zeeman-Doppler imagingと呼ばれる方法(Semel 1989)により、恒星表面の磁場構造の変化を復元する試みも行われている。

一般に、偏光分光観測は分光観測と比べてより困難である。よって、ダイナモの周期活動を、長期的に多数の恒星で、調べる手段としてCaIIのHK線(以下、HK線)、軟X線などの長期観測が有効だと考えられている。

HK線は、例えば太陽に見られるように、磁場による影響を強く受ける。1930年代後半より、ウィルソン山天文台およびパロマー山天文台では、HK線を使った、GKM型星の継続的な観測が行われている。図1は、横軸が恒星の型(色指数)、縦軸はHK線の光度を可視光の光度で規格化した値である。HK線の光度変化が観測されている恒星では、図中の縦棒がその光度変化を示している。この図からは、F型星よりもM型星において、HK線の光度が高く、かつ周期変動の幅も大きくなっている事が分かる。これらの結果は、磁場を作り出すダイナモ活動の激しさに比例していると解釈される。近年では恒星のHK線と、衛星により観測が可能になった軟X線のフラックスの比較なども行われている(Schrijver et al. 1992)。

観測から得られた恒星の周期活動、および自転速度などの物理量を比較する研究も行われている。図2の横軸は可視光の光度変化から得られる活動周期(あるいは自転周期)、縦軸は平均的なX線光度を示している。活動周期の短いものほどX線光度は強くなっている。

### ・ 恒星ダイナモの展望

恒星の変動周期や磁場強度などの物理量は、太陽ひとつに比べ、幅広く、普遍的なダイナモ機構のヒントを与えてくれる。しかしながら、精度良い活動周期や、磁場強度とその変動周期の決定に必要な観測的データは不足している。なかでも、磁場強度の長期的な変動観測はまだ(あま

り)行われておらず、ダイナモを理解する上で有用な項目であると考えられる。次世代望遠鏡の特徴の一つとしては、恒星の常時・長期観測が挙げられるだろう。以下に述べる、ESPaDOnS、CSHELLによる観測は共同利用観測であり、常時観測ではない。口径2 m以上の望遠鏡による常時観測は、この分野の研究を進める上で有効であると考えられる。

現在、国内において恒星ダイナモの観測的な研究は行われていない。岡山天体物理観測所には、HBS(低分散・偏光分光測光装置)があるが、恒星磁場を観測するための偏光分光観測には向いていない。海外では、Canada–France–Hawaii 3.6m 望遠鏡の ESPaDOnS と呼ばれる可視光域の偏光解析装置があり、Donati et al.(2006)などの結果が出ている。また、Infrared Telescope facility 3.0m 望遠鏡では CSHELL と呼ばれる分光装置があり、赤外波長の顕著なゼーマン分裂幅から磁場強度を調べることができる(Saar 1996)。

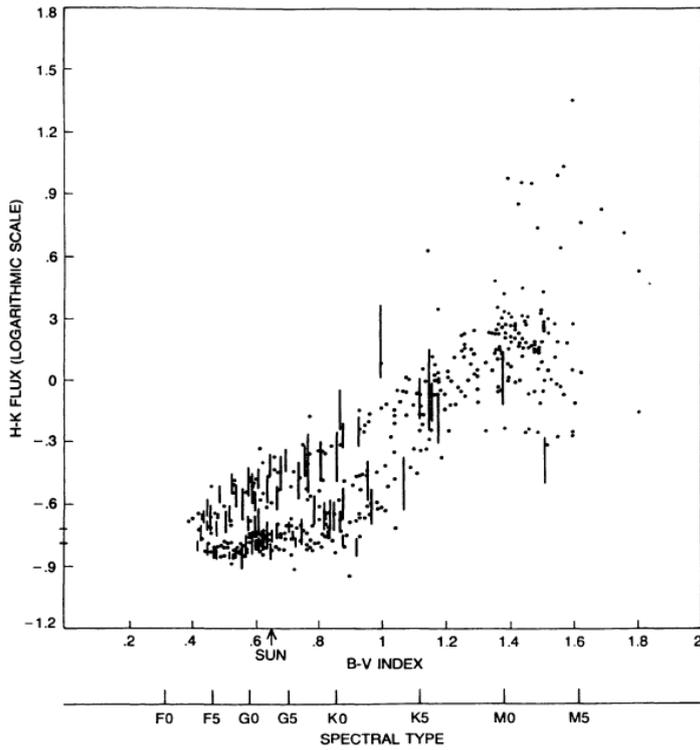


図 1(Hartmann & Noyes, 1987 より)。横軸は恒星の型 (色指数)、縦軸は HK 線の光度を可視光の光度で規格化した値。縦棒は、長期観測による HK 線の光度変化幅 (観測がある恒星のみ)。

Figure 3 The survey of Ca II emission in solar neighborhood stars by Vaughan & Preston (1980).  $S$  is an index proportional to the line-center emission relative to the Ca II line wings (see text). The solid lines indicate the excursion of activity index  $S$  for stars monitored by Wilson (1978) for long-term activity variations.

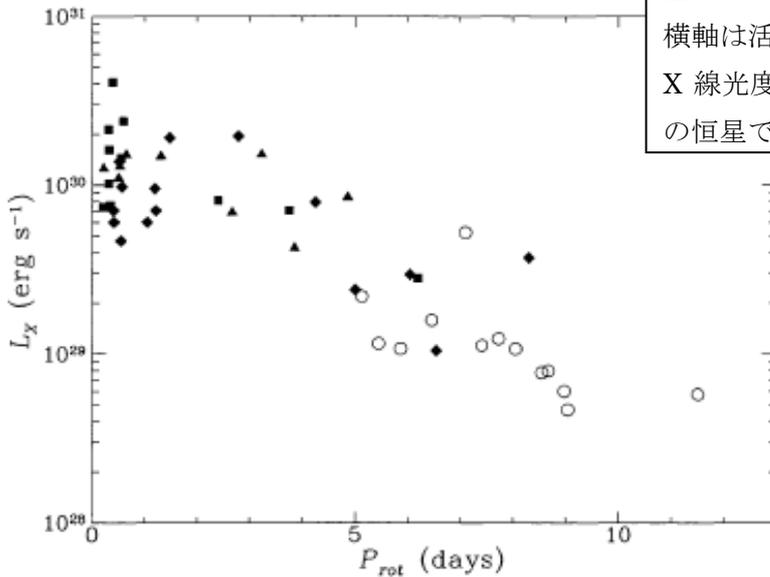


図 2(Patten & Simon 1996 より)。横軸は活動 (自転) 周期、縦軸は X 線光度。サンプルは散開星団等の恒星である。

FIG. 11.— $L_X$  vs.  $P_{rot}$  for solar-type stars in the IC 2391 (filled triangles),  $\alpha$  Persei (filled squares), Pleiades (filled diamonds), and Hyades (open circles) clusters.

## I-2. 諸外国の地上太陽望遠鏡将来計画の動向

太陽物理に限らず天文学全般において、対象天体をより高い空間分解能で、またより高い測光精度で観測する、という強い要求があり、太陽の地上光学望遠鏡においても、長年の間大口径化への道が探られてきた。長らく一般的であった太陽望遠鏡とは、地上観測ではシーイングで空間分解能が制限されるため、自然のシーイングの最も良い状態に合わせた口径数十 cm 程度であり、かつ望遠鏡自体による大気揺らぎの発生を防ぐため望遠鏡を密閉した真空望遠鏡(したがって大型化が容易ではない)であった。しかし、1990年代後半になって、

- ・ 補償光学の実用化によりシーイングを補正して回折限界を達成することが可能になった
- ・ 望遠鏡を密閉するのではなく開放型にして(Open Telescope)かつ望遠鏡由来のシーイングを防ぐ手法が確立した

という2つの大きな技術革新があったことにより、地上太陽望遠鏡での観測は革命的に進歩した。まず、補償光学が口径 1m 程度までの現役望遠鏡で稼動を始め、空間分解能 0.1~0.2 秒での観測



図 I-2-1. Swedish Solar Telescope。1m の口径を持ち、補償光学を併用することで、現時点で世界最高の空間分解能を実現している望遠鏡である。



図 I-2-2. Dutch Open Telescope。口径 45cm で大きくは無いが、初めて開放型望遠鏡で回折限界を実現できることを示し、地上太陽望遠鏡の大型化への道を開いた。

が当たり前になったことで、やや停滞の感のあった地上観測が大きく進化し、多大な研究成果を上げ始めた。さらに Open Telescope で 1m を超える口径の実現が容易になったことで

- ・ New Solar Telescope (NST) 口径 1.6m、アメリカ

・GREGOR 口径 1.5m、ドイツ

という新世代の望遠鏡が現在建設中である。これらは最初から補償光学を組み込んで回折限界を達成することを前提としており、0.1 秒を切る空間分解能の点からも、それと同時に大きな集光力を実現できる点からも、従来無かった新しい世界を開くことが期待される。

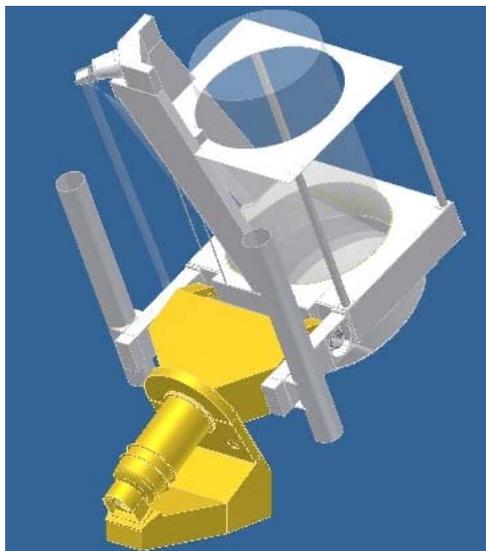


図 I-2-3. New Solar Telescope の概念図。



図 I-2-4. GREGOR の望遠鏡本体部分。塔の上に既に設置されている。

また、さらに大口径を目指す望遠鏡として、アメリカを中心に口径 4m の Advanced Technology Solar Telescope が計画されている。これも Open Telescope と補償光学を前提とした望遠鏡で、これまでになかった空間分解能と集光力を実現しようとしており、赤外観測やコロナの観測をも予定している。同じ大口径計画としてはヨーロッパでも口径 4m の太陽望遠鏡の検討を始めようとしており、その実現がまだ決定したわけではないものの、最先端の太陽物理学は既に口径数 m の時代が視野に入ってくる現状となっている。

さらに、従来自国ではトップレベルの太陽望遠鏡での先端的観測の経験の少なかったインド・中国が、それぞれ新世代の望遠鏡を持とうとしている。インドでは口径 2m の太陽望遠鏡の建設を計画しており、中国では口径は 1m であるが既に建設が始まっている。

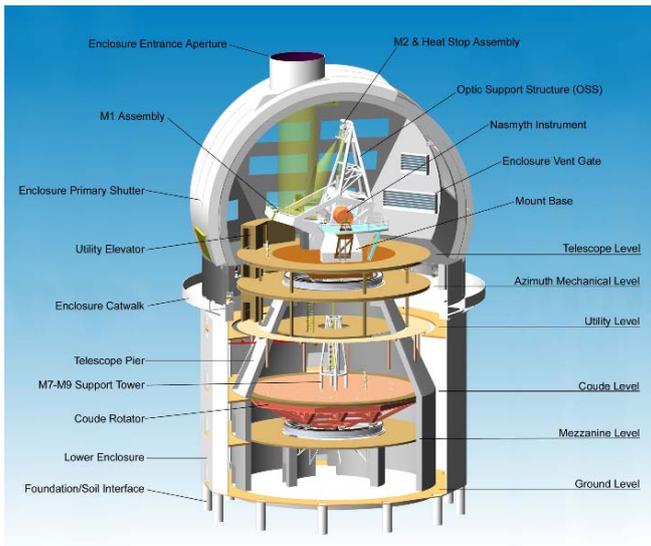


図 I-2-5. ATST の概念図。ドームの中に設置されるが、積極的に風を流通させることでシーイングの劣化を防ぐ Open Telescope の一形式である。

以上のような太陽光学望遠鏡の進展をまとめると、図 I-2-6 のようになる。この図は、回折限界の観測を目的として建設された/または計画中の代表的な太陽光学望遠鏡の、その建設年代と口径の関係を示している。2000 年ごろまでの停滞の後、1990 年代後半の補償光学実用化をきっかけとして地上望遠鏡は口径の拡大へ向かって大きく動いており、また従来の地上望遠鏡の口径はスペースまたは気球の望遠鏡によってカバーされるようになってきているのがわかる。このように、地上太陽望遠鏡は、長く続いた口径数十 cm が中心となっていた時代は間もなく去り、1m を超える口径の望遠鏡による観測が当たり前になり、それも一部の限られた国だけではなく、太陽の光学観測による研究で成果を挙げようという多くの国において当たり前になる時代が目前に迫っている。

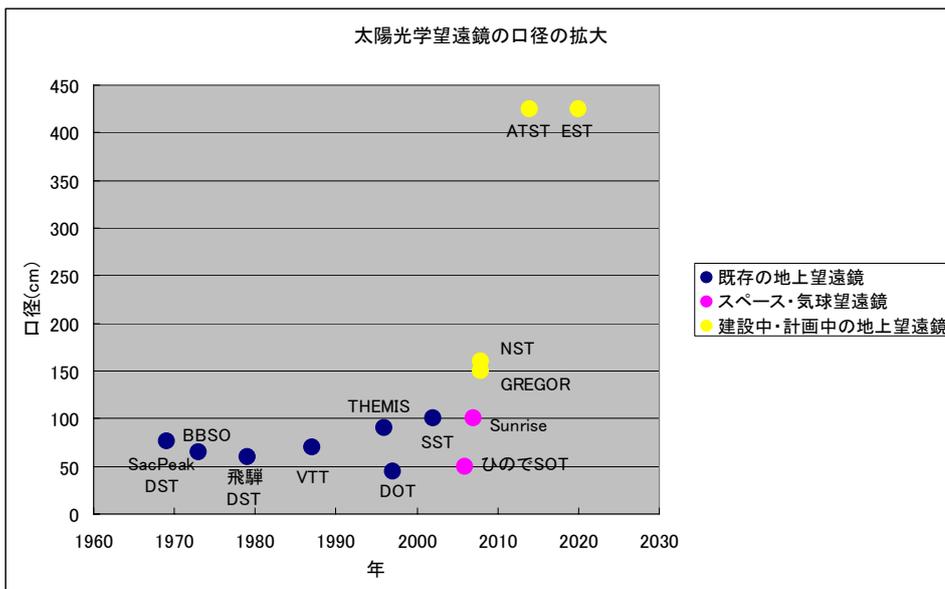


図 I-2-6. 代表的な太陽光学望遠鏡の建設年代とその口径。

## II. 地上太陽観測将来計画の進め方

今後 30 年にわたって進めるサイエンスを実現するため、日本独自の大口径太陽望遠鏡を適所に設置することを第一目標とする。そのために必要な検討事項、年次計画をまとめる。

### ・望遠鏡仕様検討 (2007 年～2008 年) : 口径 2～4 m

高空間分解能観測による光球・彩層観測、高精度偏光観測にプラズマ診断、恒星ダイナモ観測研究を柱に、必要な望遠鏡、観測装置の仕様、実現可能性を検討していく。サイエンスの要求（空間分解能、偏光測光精度、恒星観測など）から、口径は 2m 以上が必要である。一方、安定した分解能を出すにはシーイングを打ち消すアダプティブ・オプティクスが必須であり、この性能とシーイングから可能な最大口径が決まってくる。また、コロナ観測を要求するかも仕様を決めるポイントとなる。サイエンスから要求される性能を表にまとめる。また、SOLAR-C 案 B（高分解能）との関係、腹案として、海外大型との協調検討（例えばインド口径 2m）も視野に入れる。

表 II-1. サイエンスから要求される望遠鏡性能。ATST との比較。

	次期太陽大口径望遠鏡	ATST
サイエンスからの要求	高空間分解能 高精度偏光診断 恒星偏光観測	高空間分解能 偏光診断 赤外コロナ観測
主な特徴	昼夜両用偏光観測	大口径コロナグラフ（主鏡のクリーン度維持が鍵）。夜の観測は重視しない方針。
口径	2～4 m	4 m
観測波長	0.3～25 μm	0.3～25 μm
空間分解能	0.05"（撮像）～0.2"（偏光）	0.03"@500nm
視野	～3 分角	3 分角（5 分角目標）
偏光測光精度	～10 <sup>-5</sup>	<10 <sup>-4</sup> 軸外しグレゴリアンによる人為偏光の較正が鍵
備考	寿命： 30 年以上（恒星の周期活動）	寿命： 30-40 年想定 建設予定地： ハレヤカラ（標高 3000m）、2009 年建設開始予定、2014 年ファーストライト予定

### ・サイト調査 (2008 年～2009 年) : アジア適所に

大口径を生かすためにはサイトの選定が重要である（晴天率+良シーイング）。今までの経験に

より太陽観測に適したサイトの条件はかなりはっきりしている。残念ながら、日本国内には適所がないため、海外に目を向ける必要がある。近隣地区にこだわる必要はないが、先行している大型望遠鏡が、ハワイ、カナリー諸島に設置されることから、これらから地理的に離れたアジアに設置する意義は大きい。いずれにしても外国に設置する場合、相手国（研究者）と協力関係が持てることと、サイトのインフラがある程度整備されていることが観測条件に加えて重要な要素となる。この点、候補となるサイトは限られてくる（特にコロナ観測が必要な場合）。また、昼間の太陽観測適地と夜間の観測適地は必ずしも一致しないので、重みのつけ方も重要となる。

具体的な進め方として：

- ・ 候補サイトの情報収集と実地調査（中国・昆明 Fuxian 湖、インド・Hanle、他）
- ・ 関係国との協力協議
- ・ 小望遠鏡の設置によるモニター観測（コロナ観測が可なら、乗鞍の NOGIS の移転・運用が候補）

リモート運用の予行協議

#### ・ 国際協力による観測装置運用（2007年～）

大口径望遠鏡の実現には時間がかかる。また、観測装置はいずれ必要なものである。このため、すでに適地で稼働している、或いは建設予定の望遠鏡の観測装置を提案し、常設することで観測時間を確保する。開発者だけでなく共同利用ユーザーにも使ってもらうことで、成果を挙げる。若手の教育にも活用できる。具体的な観測装置検討が急務。

候補として、多波長 2 次元同時分光装置？などが考えられる。

#### ・ 国立天文台・三鷹の装置開発環境、共同利用運用（2010年～）

大口径望遠鏡を支援する、

今後の太陽観測で必要となる新技術、先端装置（地上だけでなく、スペース用にも）を開発できる環境が必要である。また、乗鞍コロナ観測所が 2009 年度で閉所予定であることから、その後、共同観測・利用に利する設備が望ましい。具体的な設備を要検討。

一案として、高度環境試験棟の 90cm ヘリオスタットと乗鞍の大型分光器の組み合わせ（或いは新規）。望遠鏡はレンズでも良い。先端技術センターと要協議。或いは気球棟を改造して設置。

#### ・ 検討推進母体

国立天文台・太陽観測所及び京都大学・花山飛驒天文台のスタッフを中心とする太陽コミュニティー。国立天文台・太陽観測所の下に本検討を推進するためのサブプロジェクトを立ち上げることも必要である。

表 II-2 年度計画案

	2007 年 度	08年度	09年度	10年度	11年度	12年度	13年度	14年度
望遠鏡仕様検討								
サイト調査								
海外用観測装置開発検討								
三鷹開発環境 共同利用								
大口径太陽望 遠鏡								
乗鞍運用								
三鷹定常観測		赤外ポ ーラリ メータ 太陽全 面磁場						
ATST			建設開 始?					ファースト ライト?
SOLAR-C								

# 太陽将来計画: 高エネルギー現象関係

Ver. 4. 2008/09/26

## 1. イントロダクション

太陽フレアにおいては、普段の太陽大気には存在していない、非常に高いエネルギーの粒子(電子、イオン、中性子など)が生成される。しかしながら、まだその加速機構については、明らかになっていない。太陽フレアで加速される粒子には、電子とイオンの2種類があり、それぞれ観測する方法が異なる。電子の加速については、硬 X 線(10~数百 keV のエネルギーを持つ光子)や電波(おもに使われるのは、周波数が 1~数十 GHz 程度の電波)による観測がもっとも効果的であるが、彩層輝線(H $\alpha$ 線など)や極紫外線などでも加速粒子の情報を引き出せることもある。イオンの場合、 $\gamma$ 線がおもな観測手段であるが、イオンの核反応によって作られる中性子の観測によっても、イオン加速の情報を得ることができる。また、電子・イオン両者に共通する観測手法は、惑星間空間の人工衛星による加速粒子の直接観測である。ただしこの方法では、太陽から惑星間空間に飛び出した粒子のみ観測可能であり、加えて、地球近傍という、太陽から約 1 AU も離れた場所での観測になるため、加速場所を特定することが難しくなる。また、フレア(コロナ下部)で加速された粒子と惑星間空間衝撃波で加速された粒子の区別が難しい。

以下では、太陽フレアにおける粒子加速について、主に硬 X 線、電波、 $\gamma$ 線を用いた、これまでの観測結果と今後の課題を簡単に紹介する。

## 2. 太陽高エネルギー現象の現在までの理解と今後の課題

### 2.1 粒子加速

#### 加速場所

ようこう衛星の観測により、impulsive flare において、軟 X 線フレアループ上空に硬 X 線源が発見された(Masuda et al. 1994)。これは、フレアのエネルギー解放がフレアループの上空で起きている証拠であり、磁気リコネクションが有力なエネルギー解放機構であることを、強力に支持している。しかしながら、この硬 X 線源の放射機構については、いまだに解明されておらず、粒子加速領域や磁気リコネクション領域との関係も分かっていない。

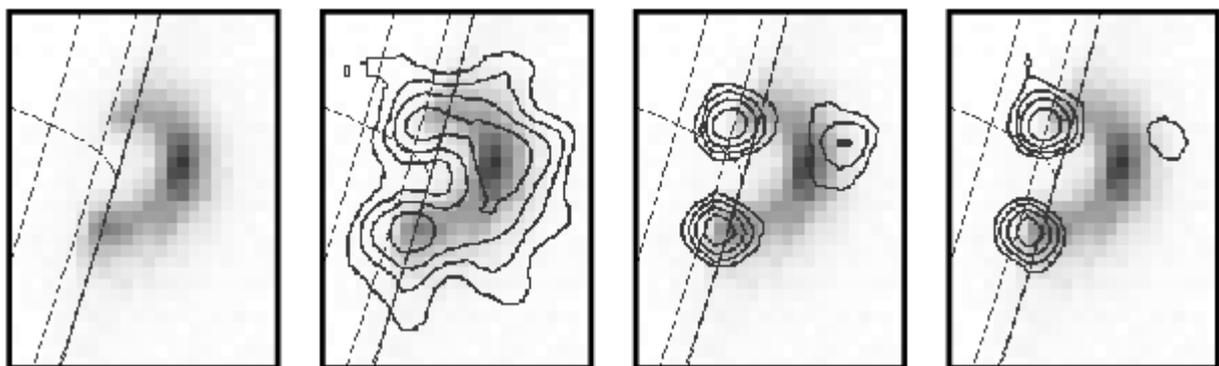


図 1. ようこう衛星で観測された 1992 年 1 月 13 日の M クラスの太陽フレア。左端: 軟 X 線像、左から 2 枚目から 4 枚目: 軟 X 線像(グレースケール)に硬 X 線像(等高線)を重ねたもの。エネルギー

一は順に 14-23, 23-33, 33-53 keV。

Aschwanden et al. (1996)の CGRO/BATSE を用いた time of flight(TOF)の統計解析結果によると、フレアループの足元からフレアループの半長の  $1.43 \pm 0.30$  倍離れたところに加速領域があるという結論になっている。つまり、加速領域はループの中ではなく、上空という主張である。ただし、この解析には「すべてのエネルギーの電子が同時に一つの加速領域を出発した」とする大きな仮定が入っていることに注意しなくてはならない。

またフレアには、複数の磁気ループが衝突して発生する場合もある。このタイプについては、野辺山電波ヘリオグラフとようこう衛星硬 X 線望遠鏡の同時観測により、粒子加速についての詳細な研究が進んでいるが、その電子の加速領域は、ループの衝突箇所付近と結論づけられている (Hanaoka 1996; 1999, Nishio et al. 1997)。

### 加速タイムスケール

SMM/HXRBS や CGRO/BATSE などの硬 X 線スペクトル計の観測では、10-100 ミリ秒程度のタイムスケールで強度変動する成分が観測されており、電子加速のタイムスケールもそれと同程度だと考えられている。イオンの場合、 $\gamma$ 線の観測から 1 秒以下のタイムスケールで加速が起きていると考えられている。

### エネルギースペクトル (lower cut-off energy、加速粒子数、エネルギー収支)

硬 X 線 -  $\gamma$  線域の太陽フレアの典型的なスペクトルは、下図のようになっている。

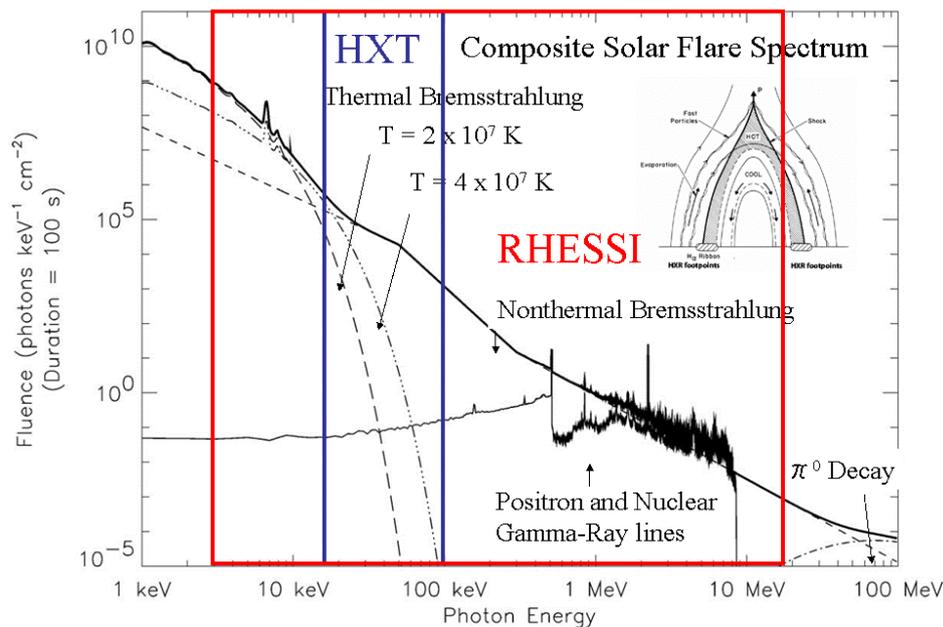


図 2 フレアの典型的なエネルギースペクトルと、ようこう衛星搭載硬 X 線望遠鏡(HXT)と RHESSI 衛星の観測エネルギー域 (Lin. et al. 2003 図 1 を加工)。

数十 keV 以上の硬 X 線は、加速電子からの制動放射であり、そのスペクトルは通常、べき指数が -3 から -6 程度のべき型分布に従うことが多い。加速電子のエネルギースペクトルは、硬 X 線のスペクトルからモデルを介して求めることができる。モデルにはおもに 2 種類あって、**thick target model**、もう一方を **thin target model** と呼ぶ。両者の違いは、電子のエネルギーの失い方にある。前者は、非常に密度の高いプラズマにぶつかり、瞬間的に全電子がエネルギーを失うモデル、後者は、比較的密度の小さなプラズマ中を通過する際に、硬 X 線を放射しエネルギーを失うモデルである。前者は磁気ループの足元付近の彩層上部での硬 X 線放射モデル、後者はコロナ中での硬 X 線放射モデルとして、おもに使用される。いずれのモデルでも、加速電子の個数、総エネルギーを計算する際には、べき型スペクトルの低エネルギー側の限界エネルギー(**lower cut-off energy**)を決める必要がある。この **lower cut-off energy** には、通常、20–25 keV という値が用いられるが、近年の分光撮像観測の進歩により、**lower cut-off energy** がもっと高い可能性(例えば、35 keV)も議論されている(Sato et al. ?)。フレアのスペクトルのべきは大きいため、この **lower cut-off energy** が少し高くなるだけで、加速電子の個数やエネルギー量も急激に小さくなる。また、逆にフレアのごく初期において、**lower cut-off energy** は極端に低く数 keV までべき型のスペクトルが延びているという結果も発表されている(Krucker et al., 2002)。いずれにせよ、フレアのエネルギー解放時に、熱エネルギーと非熱的エネルギーへのエネルギー分配の割合の問題、加速粒子数の問題にとって、べき型スペクトルの **lower cut-off energy** の決定は重要である。ただし、近年、正確なコンプトン後方散乱効果を考慮する必要があるとの指摘がされており、計算機実験の手法での理論的な研究も必要になっている。

エネルギースペクトルに関する別の問題としては、**soft-hard-soft** という硬 X 線強度に対するスペクトルのべきの値の変化がある。つまり、硬 X 線強度が大きくピークとなる時には、スペクトルが硬くなるということである。何らかの加速機構やエネルギー消失機構の情報を反映しているはずだが、よく分かっていない。また、**soft-hard-harder** というスペクトル変化を示すフレア(もしくはエネルギー帯)もあり、加速電子の磁気ループへのトラップを反映していると考えられている。これは、加速電子のピッチ角分布の情報を与える可能性がある。

### ピッチ角

加速機構を特定する際に重要な情報である加速粒子のピッチ角分布を直接観測することは、太陽大気中では実現できていない。しかしながら、間接的に加速粒子のピッチ角の情報を得ることはできる。例えば、硬 X 線では、下記のような証拠により、磁気ミラーが働いて、かなりの高エネルギー電子が磁気ループ中にトラップされている状況が示されている。(1) 磁気ループの両足元の磁場強度に大きな違いがある場合、硬 X 線 **footpoint source** の強度/スペクトルに非対称性が現れる。(2) 硬 X 線放射を伴わないマイクロ波源が強磁場領域に現れる。(3) 硬 X 線スペクトルにハードニングが見られるフレアがある。(4) ループトップに電波源、**footpoint** 領域に硬 X 線源というフレアが、多数存在する。高エネルギー電子のピッチ角分布を探るためには、硬 X 線とマイクロ波の同時撮像観測と、放射や磁気トラップを再現するような数値実験が必要である。

## 加速機構

太陽フレアにおける電子加速についての観測側からの要請は、おおよそ、次のようにまとめられる(参考 Tsuneta and Naito, 1998)。

最高エネルギー	数-10MeV
スペクトル	べきが-3 から-6 程度のべき型
加速粒子数	$10^{33}$ - $10^{35}$ 個
加速のタイムスケール	1 秒以下
硬 X 線源	ループの両足元に集中。ただしコロナ中にも弱いソース有り。

加速モデルとしては、直流電場モデル(Benka and Holman, 1994 など)、統計加速(Miller et al. 1996 など)、衝撃波加速(Tsuneta and Naito, 1998 など) など、さまざまなモデルが考えられているが、現状では、決定打と言えるものが無い。加速機構の決定のために、観測から与えるべき重要な情報は、加速電子のピッチ角分布、加速領域の環境の情報(乱流、衝撃波、電場)である。

## 電子加速 vs イオン加速

RHESSI 衛星によって、初めて、 $\gamma$  線の撮像観測が行われた(Hurford et al. 2003)。2.2 MeV の中性子捕獲ラインでの撮像観測の結果、イオンの降り込みを示す  $\gamma$  線源と、電子の降り込みを示す硬 X 線源の位置に有意なずれがみられるフレアが複数あった。これは、イオンと電子の加速領域の違いを反映している可能性がある。ただし、イベント数があまりに少ないので、今後、もっとイベントを増やして統計的な研究を行うとともに、空間分解能/時間分解能のより高い詳細な観測による検証が必要である。

## 2.2 超高温プラズマ生成

太陽フレアにおける超高温(30-50MK)プラズマの観測は、Lin et al. (1981)によるバルーンを用いた硬 X 線スペクトル観測に始まる。その後、ひのとり衛星、ようこう衛星により、撮像観測が行われ、超高温プラズマがループトップ付近に存在していることが分かった。しかし、その成因については、磁気リコネクションのアウトフローにより形成される衝撃波による加熱、ループ上空のカレントシート内での加熱、高密度のループ内での加速粒子の熱化など、さまざまなモデルが提案されているものの、決着はついていない。決定するためには、衝撃波の検出、カレントシート内の物理量の決定、ループ内の硬 X 線スペクトルの高空間分解能観測などが必要である。

## 3. 海外の諸計画

RHESSI 衛星は現在も観測を続けているが、その後の太陽高エネルギー関係の具体的なプロジェクトは、ほとんど無い。

### Sentinels

4機の衛星を90度ごとに位相をずらした近日点0.25AU、遠日点0.75AU程度の楕円軌道に投入し、4つの方向から同時に太陽を観測しようとする衛星計画である。米国が提案しており、打ち上げ時期は2015年を希望している。まだ、予算的な裏づけは無いようである。高エネルギー関係の装置としては、X線望遠鏡が提案されている。その性能は、エネルギー域: 1-150 keV、エネルギー分解能:  $\sim 0.05\text{keV}(\text{?})$ 、検出器: CZT and silicon pin detector、時間分解能: 20 sec (standard), 3 sec (flare) (cf. spin period = 3sec.)、角分解能: 20 arcsec (5-15 arcsec at 1AU)である。

### FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager)

UC Berkeley が中心になって進めているロケット実験である。2010年に打ち上げ予定。X線ミラーによる硬X線観測を売りにしている。装置の情報は、以下のとおりである。角分解能: 7 arcsec、焦点距離: 2m (Walter I)、検出器: Double-sided Silicon Strip Detectors (500 $\mu\text{m}$  thick) 128  $\times$  128 pixels、エネルギー域:  $\sim 4 - 15\text{keV}$  (200 $\mu\text{m}$  Be filter)、エネルギー分解能:  $\sim 1\text{keV}$  (FWHM)、視野: 640 $\times$ 640 arcseconds、有効面積: 180 $\text{cm}^2$  at 8keV, 14  $\text{cm}^2$  at 15keV。検出器は、JAXA/ISASの高橋研の協力で実現する予定。将来的には、SMEX missionとして、発展を目指している。

### Solar Orbiter

Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays (STIX)と呼ばれるX線望遠鏡が搭載される可能性あり。Yohkoh/HXTタイプ(非スピン型すだれコリメータ)の望遠鏡が予定されているが、詳細は不明。2015年ごろの打ち上げを目指している。

## 4. 今後10年くらいのタイムスケールで狙うべき課題

### $\gamma$ 線撮像観測によるイオン加速の研究

最大の課題は、「イオン加速領域と電子加速領域が異なるのかどうか」を明らかにすることである。RHESSI衛星により、初めて太陽フレアの $\gamma$ 線領域での撮像観測が行われた(Hurford et al. 2003)。そして、現在までに、加速されたイオンが原因となる2.2MeVの中性子捕獲ラインを用いて、4つの太陽フレアの $\gamma$ 線像が論文として報告されている(Hurford et al. 2006)。最も注目すべき点は、少なくとも2つのフレアにおいて、高エネルギー電子による制動放射である硬X線源と加速されたイオンが起源となる2.2MeVの $\gamma$ 線源の位置が有意にずれていたことである。Hurfordらは、 $\gamma$ 線源と硬X線源の位置関係からイオンの加速領域のほうがより高いコロナにあり、長い磁気ループが関与しているのではないかと推測し、イオンの加速機構は、Emslie et al. (2004)で述べられているように stochastic acceleration (in a turbulent cascade of MHD waves) が有力だと結論づけている。

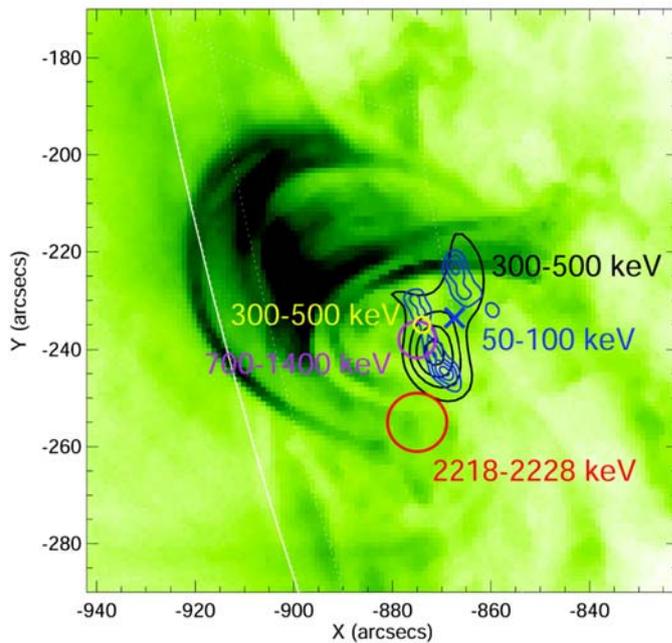


図3 2002年7月23日のXクラスフレアの硬X線と $\gamma$ 線像(等高線)。背景は、約90分後の紫外線像(ネガ)。(Lin et al. 2003より抜粋)

ただし、(1) たった数例のイベントの解析に基づいていること、(2) 使用されている $\gamma$ 線の画像はフレアのほぼ全期間を積分して作られた画像であり時間変化の情報が無いこと、(3) 重心位置とおおよそのサイズは求められているが $\gamma$ 線源の形状の情報が無いことを考慮すると、イオン加速を議論するにはじゅうぶんなデータが揃っていないとは言えない。今後、 $\gamma$ 線域で撮像できるイベント数を増やし、硬X線源とのずれについて詳細に統計解析することが重要である。そのためには、観測装置に有効面積を大きくすることと、空間分解能を上げることが求められる。

### 衝撃波加速の検証

2章でも述べたように、太陽フレアにおける粒子(電子)加速機構は、いくつも提案されている。その中で、今後10-15年くらいのタイムスケールで考えて、最も観測的に検証される可能性が高いモデルは、衝撃波加速ではないだろうか。地球磁気圏など *in situ* の観測が行える宇宙空間では、粒子や磁場の直接観測から衝撃波を同定し、そこで高エネルギー粒子が生成されている様子が観測されている。また、超新星爆発の領域では、爆発によって生じた衝撃波付近でX線強度の急激な上昇が観測されている。太陽フレアにおいては、磁気リコネクションのアウトフローがフレアループにぶつかる領域で *fast shock* が存在する可能性が示唆されており、そこで硬X線強度の急激な上昇があるのかどうかを観測することが重要である(衝撃波がどこにあるかは、別の観測装置で同定する必要がある)。現在の観測では、ループ上空に硬X線源が観測されるイベントがあるのだが、その領域が加速領域なのか、あるいは、どこかもっと上空で加速された電子がその領域で硬X線を放射しているのか、区別がつけられていない。この課題を解くために、新しい装置には、

特に空間分解能を上げること、また、ダイナミックレンジを大きくして **footpoint source** が存在してもループ上空の弱い硬 X 線源を撮像観測できることが、要求される。

### エネルギースペクトル(Lower cut-off energy など)の高精度決定

粒子加速機構を明らかにするためには、詳細なエネルギースペクトルの情報が不可欠である。ただし、一つのフレアにおいても、同時に性質の異なる複数の硬 X 線源が存在するため、フレアを空間的に分解して、硬 X 線源ごとのスペクトルを求める必要がある。すなわち、**imaging spectroscopy** の手法が強くと求められる。それを売り物にして打ち上げられた **RHESSI** 衛星だが、いまだに十分な **imaging spectroscopy** の結果は報告されていない。

スペクトルの形状だけではなく、加速電子によるべき型のスペクトルが低エネルギー側にどこまで延びているか、すなわち **lower cutoff energy** の決定は、エネルギー収支に関わってくる。ひのとり・**SMM** の時代から、**lower cutoff energy** を **20keV** や **25keV** に設定すると、非熱的な電子の持つエネルギーが熱的なエネルギーより大きくなるフレアが存在するという問題があった。しかし、その解析は、硬 X 線源を空間的に分解しておらず、超高温プラズマからの熱的な放射も含まれていた可能性もある、そこで、非熱的な成分だけを反映していると考えられる **footpoint source** だけのスペクトルを、ようこう衛星を用いて統計的に解析すると、**lower cutoff energy** は、**35-40keV** 程度になるイベントが多いという結果になった。また、**RHESSI** 衛星でも、かなり高い **lower cutoff energy** を示すフレアが報告されている(Holman et al. 2003)。しかし、一方では、フレアのごく初期には、べき乗型のスペクトルが **10keV** 以下のエネルギー帯まで延びているという結果も報告されており(Krucker et al. 2002)、**lower cutoff energy** については、まだまだ解析や議論が必要な状況である。

### 粒子加速・輸送仮定の理論シミュレーションモデルの構築

これまでに得られてきた観測結果、及び将来得られるであろう、より詳細な観測データを解釈する手段として、

太陽フレア中の粒子加速・輸送の理論シミュレーションモデルを構築しておくことが極めて重要である。

よく知られているように、太陽大気では粒子スケールと現象のスケールに大きな隔たり（電子の場合およそ  $10^9$  の差）がある。計算機能力の将来的な指数関数的上昇を見込んでも、太陽大気の実パラメータを用いて粒子ダイナミクスを完全に解くことは厳しいだろう。そこで2つの異なる手法を並列し、粒子シミュレーションモデルの構築を計画する。1つは **full particle approach** を用いた、フレアにおけるプラズマ素過程の理解である。これにより、磁気リコネクションにおいて中心的役割を果たす磁気拡散領域における粒子ダイナミクスを記述する。もう一つは **drift kinetic approach** を用いた、観測との直接比較を通じた実証的理解である。これにより、フレアのグローバルな構造発展に伴う粒子ダイナミクスを記述する。さらに、高エネルギー太陽物理学研究における観測量は、プラズマではなく硬 X 線や電波といった放射なので、計算で得られた粒

子分布からこれら放射への変換が必要である。そのためのより精密な放射モデルの構築も、併せて行っていかなければならない。

## **5. 課題を解決するための観測装置検討**

前章で述べた課題のうち、近い将来に実現可能である装置という観点から、コロナ中での電子加速領域の撮像観測を第一目標に掲げて、必要な観測装置について検討を行った。その結果、角度分解能 1 秒角、有効面積は Yohkoh/HXT の 100 倍(検出器 360 個程度、合計約 6000cm<sup>2</sup>)を達成する、非スピン型のすだれコリメータ方式の望遠鏡が最適だという結論になった。ただし、ダイナミックレンジ確保のため、視野は 1 分角×1 分角程度に狭くなる。この狭い視野を補いフレア領域全体像をつかむためには、Yohkoh/HXT と同程度の性能の広視野望遠鏡を同時に別途用意する必要がある。検出器は、CdTe 検出器を用いると、2keV 程度のエネルギー分解能を達成できる。さらに 1 次元の空間感度を持つ CdTe 検出器が使用できると、コリメータ/検出器の数を半分程度に減らせる可能性もあり、飛翔体に搭載する際に重量/容積の点から有利になるが、データ処理や電気回路が煩雑になるという不利な点もある。

## **6. 日本の太陽高エネルギー研究の今後**

日本の高エネルギー太陽物理学研究グループの現状を考慮すれば、海外の諸計画にさまざまな形で協力し、日本での高エネルギー太陽物理学を継続して行っていくのが得策である。

ミラー光学系を用いた太陽硬 X 線望遠鏡である FOXSI(PI: S. Krucker(SSL/UCB))は、ロケット実験として 2010 年に打ち上げ予定である。検出器部分を、日本の ISAS/JAXA の高橋研が担当している。日本の高エネルギー太陽物理学グループは、増田・下条両名が FOXSI プロジェクトメンバーとして参加してサイエンス面でのサポートを行っており、打ち上げ前の観測機器の議論および打ち上げ後のデータ解析等に参加している。FOXSI 実験後、性能を向上させた望遠鏡を SMEX 衛星計画として提案する予定があり、2016 年以降の打ち上げを目指している。この衛星計画には、計画段階から参加し、設計に関する議論/目指すサイエンスの明確化/ソフトウェア開発などの支援を行い、打ち上げ後は、装置較正/データ解析に積極的に参加し、成果の拡大を目指す。

また、これらとは別に 2015 年以降の打ち上げを目指している Solar Orbiter への搭載を考えている STIX(PI: A. Benz (ETH))に、早い段階からサイエンス協力者として参加し、設計に関する議論/目指すサイエンスの明確化/ソフトウェア開発などの支援を行う。打ち上げ後は、主にデータ解析・ソフトウェア開発で貢献する。

## **7. References**

- Emslie et al., ApJ, 602, L69, 2004.
- Hanaoka, Solar Phys., 165, 275, 1996.
- Hanaoka, PASJ, 51, 483, 1999.
- Holman et al., ApJ, 595, L96, 2003.

Hurford et al., ApJ, 644, L93, 2006.  
Hurford et al., ApJ, 595, L77, 2003.  
Krucker et al., Solar Phys., 210, 445, 2002.  
Lin et al., ApJ, 251, L109, 1981.  
Lin et al., ApJ, 595, L69, 2003.  
Masuda et al., Nature, 371, 495, 1994.  
Nishio et al., ApJ, 489, 976, 1997.  
Tsuneta and Naito, ApJ, 495, L67, 1998.

# 太陽電波観測

2008/09/24 Ver. 3

## 1. 太陽研究における太陽電波観測

太陽からの電波放射の多くは、フレアや CME などの活動現象が放射源である。このため太陽電波観測による研究は、活動現象の理解が主なるターゲットとなっている。特に、電波放射が加速された電子により引き起こされるため、フレアや CME における粒子の加速機構を明らかにすることが、太陽電波観測における一番大きな課題とされている。

一方、観測的な側面から太陽電波研究を考えると、観測周波数によって大きく2つに分けることができる。一つは MHz 帯における電波観測であり、もう一つは GHz 帯における電波観測である。

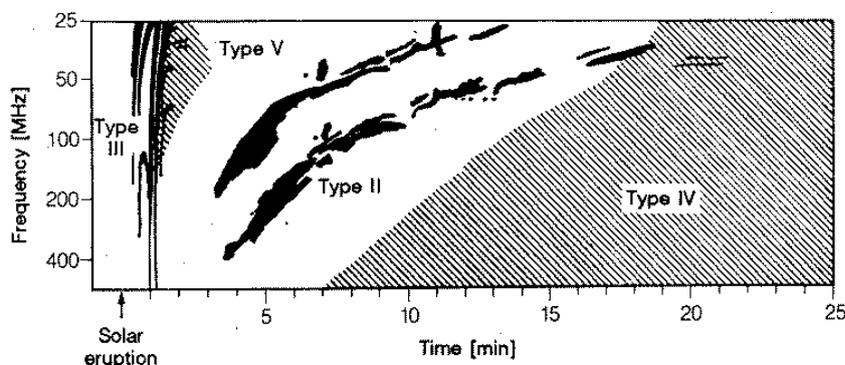


図 1 : MHz 帯電波バースト模式図

MHz 帯の観測では、Type II, Type III, Type IV などの電波バーストが良く知られている。これらの電波バーストは、加速された電子により励起された、プラズマ振動が電波放射の起源とされているため、周波数から放射源の太陽からの高度（正確には密度）を知ることが可能である。この特徴を利用し、フレアで発生する衝撃波や、CME の衝撃波で発生する Type II 電波バーストを観測することにより、惑星間空間を移動する CME の時間発展の研究がなされている。最近では、地上で観測することができない kHz 帯の観測を衛星搭載<sup>1</sup>の受信機にて行い、より地球の近くまで CME の時間発展を追いかける研究(Interplanetary CME の研究)が行われている。また Type III 電波バーストにおいては、フレア自体(→フレアのエネルギー解放現場)で加速された電子からの放射であるため、バーストが開始する周波数を調べることでフレアにおける粒子加速の場所を特定する研究が行われている。このような研究が行われている一方、MHz 帯の電波バーストによる加速電子自体の物理量（電子数やエネルギースペクトル等）の導出は行われていない。なぜなら、MHz 帯の電波バーストでは、加速電子から電波放射へ至るまでに、プラズマ振動等の物理プロセスを経るため、MHz 帯の観測から加速電子の情報を得ることが非常に難しいからである。

<sup>1</sup> Wind 衛星搭載の WAVES や STEREO 衛星搭載の SWAVES

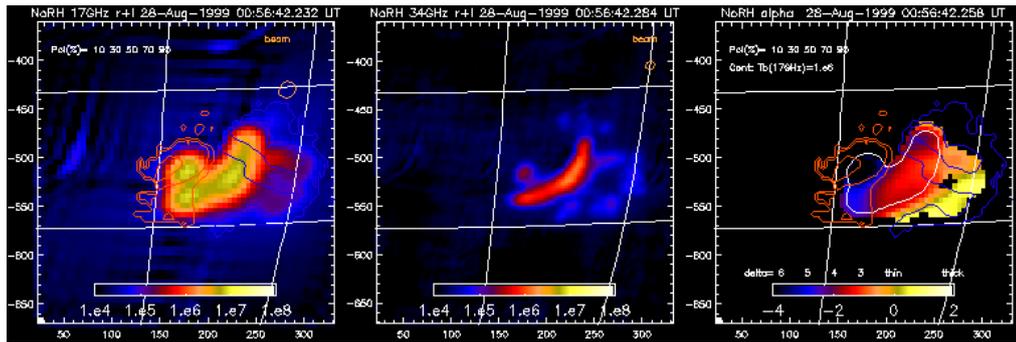


図 2：野辺山ヘリオグラフで捉えられたフレア電波画像 (Yokoyama, et al. 2003)

一方、GHz 帯の電波放射は、熱放射を除き、加速電子のサイクロトロン運動からの放射がほとんどである。このため、MHz 帯より比較的容易に加速電子の物理量を導出することが可能である。ただし、GHz 帯の電波放射には周波数に応じてある程度の磁場強度が必要とされるため、GHz 帯の観測は MHz 帯に比べて太陽表面近くに存在する加速電子の様子を調べることとなる。よって、GHz 帯の太陽電波を観測は、フレアそのもので加速された電子を調べるために有効なツールとなっている。特に、硬 X 線観測と GHz 帯の共同観測を行うことにより、ループを伝播する加速電子(図 2)、またはミラー効果でループに蓄積する加速電子を GHz 帯でしらべ、ループを伝播し彩層に突入する加速電子を硬 X 線で調べる事が可能である。このような硬 X 線観測と電波の相補的特長を使った研究が数多く行われている。

## 2. 世界の太陽電波観測の現状

表 1 は、世界中にある太陽電波望遠鏡の一覧(衛星搭載の太陽電波観測装置を除く)である。タイプ別に分けると以下のように分類することができる。

### [MHz 帯の観測装置]

#### 2.1 ダイナミックスペクトル計： 11 装置

数 MHz から数 GHz までをカバーするスペクトル計。Type II, III, IV バーストの研究の基本的装置。世界中に分布している。上記の 11 装置は、太陽専用で作成されたダイナミックスペクトル計のみの集計である。一方、東北大学の惑星シンクロトロン電波望遠鏡のように、もともと太陽観測用ではないダイナミックスペクトル計を利用しての太陽電波バースト研究も行われつつある(Morioka et al. 2007 など)。

#### 2.2 強度・偏波計： 3 装置

平磯(日本)、Cracow(ポーランド)、オーレンスバレー[SRBL](アメリカ)に設置。ただし SRBL は、0.4-15GHz に 120 チャンネルを持つので、MHz 帯から GHz 帯までをカバーする、擬似ダイナミックスペクトル計的装置である。

### 2.3 電波干渉計： 2 装置

Nancay (フランス)、Guribidaur(インド)の2箇所に設置されている。空間分解能は、5～15分角。CMEの観測(Type II, IVの画像化)に用いられているが、低空.間分解能のためCMEの内部構造等は分解できていない。

表1：世界の稼働中の太陽電波望遠鏡 (FASR 計画書より)

Observatory	Country	Angular resolution	Frequencies	Type
Guribidaur	India	5'	40-150 MHz	2D mapping
Nancay	France	1.5-5'	150-450 MHz	2D mapping
RATAN 600	Russia	15"-240"	1-20 GHz	Fan beam
OVRO	USA	5"-90"	1-18 GHz	2D mapping
SSRT	Russia	20"	6 GHz	2D mapping
Nobeyama	Japan	15"/7.5"	17/34 GHz	2D mapping
Itapetinga	Brazil	2'	48 GHz	Multi-beam
SST	Argentina	4'/2'	212/405 GHz	Multi-/single beam
Metsahovi	Finland		22/37/90 GHz	Single dish
BIRS	Tasmania		3-50 MHz	Spectrograph
Izmiran	Russia		25-260 MHz	Spectrographs
Ondrejov	Czech Rep.		0.8-4.5 GHz	Spectrographs
Tremsdorf	Germany		40-800 MHz	Spectrographs
Zurich	Switzerland		0.1-4 GHz	Spectrograph
Espinuncia	Portugal		150-650 MHz	Spectrographs
Nancay	France		10-40 MHz	Spectrograph
Culgoora	Australia		18-1800 MHz	Spectrographs
Hiraiso	Japan		25-2500 MHz	Spectrographs
ARTEMIS	Greece		100-469 MHz	Spectrograph
Beijing	China		0.7-7.3 GHz	Spectrometers
DRAO	Canada		2.8 GHz	Fixed freq.
Cracow	Poland		0.4-1.415 GHz	6 fixed freq.
SRBL	USA		0.4-15 GHz	Fixed freqs.
Nobeyama	Japan			7 fixed freqs.
Hiraiso	Japan		0.2, 0.5, 2.8 GHz	3 fixed freqs.

#### [GHz 帯の観測装置]

### 2.4 太陽全面の強度・偏波計： 3 装置

野辺山[NoRP] (日本)をはじめとして、3箇所に設置。ただし、DRAOと平磯は、2.8GHzのみを観測。

### 2.5 スキャンングおよびマルチビームによる2次元マップパー： 3 装置

Metsähovi (フィンランド)、Itapetinga (ブラジル)とSST (アルゼンチン)に設置。Metsähoviはシングルディッシュで、機械的にスキャンすることにより全面像を得ている。ItapetingaとSSTは、マルチビーム装置である。

## 2.6 電波干渉計： 4装置

野辺山（日本）、オーレンスバレー[OVSA]（アメリカ）、シベリア[SSRT]、カフカス[RANTAN-600](ロシア)の4装置。RANTAN-600は、1次元のマッパー。

野辺山・SSRTは、日毎画像をWebにて公開している。

野辺山電波ヘリオグラフ観測開始(1992年)以降、太陽電波観測装置の大規模計画は無く、電波画像を出力する装置は作られていない。NoRH以降の観測装置としては、SRBLとSSTがある。SRBLは、もともとアメリカ空軍の観測装置であった。しかし、プロジェクト自体がキャンセルとなり、作られた1台がNJITにより運用されている。SSTは太陽専用のサブミリ波望遠鏡で、野心的なプロジェクトである。

<補足>

アメリカ NRAO(National Radio Astronomical Observatory)が運営している VLA(Very Large Array)も、太陽電波の観測ができる装置ではあるが、野辺山電波ヘリオグラフ観測開始以降は太陽観測数が激減し、現在は太陽観測には利用されていない。

## 3. 野辺山太陽電波観測所の現状

野辺山太陽電波観測所は、1968年の開所以来、日本の太陽電波観測を担ってきた観測所である。2007年度現在、野辺山電波ヘリオグラフ(NoRH)と野辺山偏波計(NoRP)の、2つの太陽電波観測装置を運用している。NoRPは、1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35, 80GHzの7周波で太陽全面からの電波放射を測定している。この観測周波数は、前章で紹介したMHz/GHz帯強度・偏波計の中では観測帯域が最も広く、フレアにて発生するジャイロシンクロトロン放射でも光学的に薄い周波数帯をカバーし、加速電子のエネルギースペクトルを導出するために最適な周波数帯となっている。一方、NoRHは、観測周波数が17GHzと34GHzの電波ヘリオグラフであり、GHz帯の干渉計としては、最も観測周波数が高く、最も時間・空間分解能が高い観測装置となっている。この2つの観測装置により、フレアにおける加速粒子の分布とエネルギースペクトルを導出できる装置を所有している、世界で唯一無二の観測所となっている。

NoRHは、その優れた観測能力だけでなく、“電波天文学者でなくても利用できる唯一の太陽電波干渉計”という意味で、さらに唯一無二の装置となっている。これは、他の太陽電波干渉計では像合成に職人的技術を要するのに対し、NoRHでは観測所の計算機を使いIDLコマンド一発で像合成が可能であるためである。また、ほぼリアルタイムのデータ公開・イベントリストの整備・解析ソフトの充実(SSWパッケージ化)・共同利用体制の充実などが、世界の太陽研究者に広くデータが使われている要因となっている。

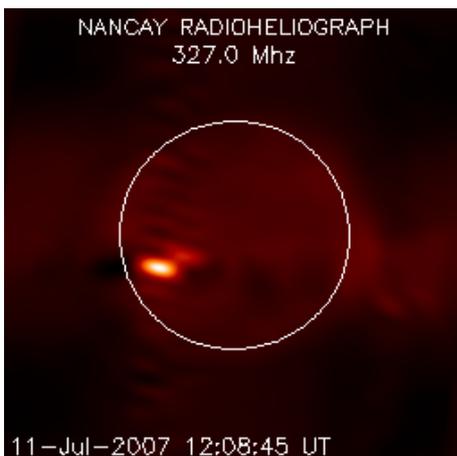
1992年の観測開始後、すでに16年間観測を継続しているNoRHであるが、すべてのコンポーネントが完成当時のスペックで動作しており、その稼働率は98.5%と驚異的な値となってい

る。これは、設計時の熟慮と日々の保守作業の成果である。また、完成当時から利用していた PC-9801 や専用計算機等は、ここ数年で今後も入手可能な、Linux システムでリプレイスされている。また、入手困難な部品についてはストックを観測所で所有している。このような措置は、NoRP についても行われており、ハード的には NoRH, NoRP 共に今後 5 年以上観測を継続させることは容易である。

## 4. 太陽研究における電波観測への課題

これまで紹介したように、世界中で MHz 帯・GHz 帯の太陽電波観測装置による観測が行われている。しかし、これらの観測では、最終目標である粒子加速の理解という点まで至っていないわけではない。フレア時の粒子加速のメカニズムに関する詳しい議論は、高エネルギー物理の章を参照してもらうことにして、ここでは各波長での問題点および今後の発展の方向性を述べる。

### 2.7 MHz 帯



MHz 帯の観測では、すでに前述している通り、観測された電波強度やスペクトルから、電波を放射している電子の情報を取得することは、ほぼ不可能である。また、周波数が低く高空間分解能の実現が難しいこともあり、現在の MHz 帯の干渉計では、バーストの空間構造を知ることができていない。左の図は、ある日のフランス Nancay 電波ヘリオグラフの画像である。この画像より、ビームサイズが活動領域より大きいことがわかる。このような分解能では、CME 等の衝撃波を分解するようなことは非常に難しい。

一方、太陽-地球間科学分野である「宇宙天気」分野の大きな課題のひとつとして、CME が惑星間空間をどのように伝播するのか、さらにその過程でどのように粒子加速が起きているのか、が議論されている。この問題を調べるツールとして、MHz 帯の観測は最適であるため、高空間分解能を持つ MHz 帯の干渉計が求められている。

### 2.8 GHz 帯

NoRH により、フレアループ中の電子の振る舞いが理解されてきたが、粒子加速を解明するようなレベルには達していない。特に、フレア中の粒子加速を議論する上では、電子のエネルギースペクトルの空間分布を得ることは非常に重要であるが、NoRH でさえも、フレアループを分解した例はほとんど無い (Yokoyama et al. 2003 は特異な例である)。また、NoRH の波長

は 17,34GHz の 2 波長のみであるため、大フレアでしばしば起こる高い turn-over frequency の場合、電子のエネルギー Spektrum を導出することは不可能になってしまう。これらの課題に対応するためには、高空間分解能と多周波同時観測ができる干渉計が求められている。具体的な値としては、空間分解能 1 秒角程度の空間分解能が必要であると思われる。

以上がそれぞれの観測波長帯での課題であるが、双方とも必要なのは、高空間分解能であり、それは干渉計の最大基線長の増大を意味している。

## 5. 世界の太陽電波観測の将来計画

前章でも示したように、太陽電波観測の次なるステップは、高空間分解能・多周波同時観測をめざすところにあることは、周知の事実である。高空間分解能の太陽電波観測をターゲットにし、以下の 2 つの大型計画が、アメリカおよび中国で進行中である。

### ● FASR (Frequency Agile Solar Radiotelescope)<sup>2</sup>

アメリカ国立電波天文台 (NRAO)、ニュージャージー工科大学 (NJIT)、メリーランド大学 (UMd)、UC Berkley(UCB)が中心となって推進している、MHz 帯と GHz 帯両方を観測する巨大太陽電波干渉計計画である。FASR の主な科学目的としては、以下のようなものである。

#### ➤ コロナ磁場の測定

フレア時以外でも、黒点付近からは Gyro-resonance 放射と呼ばれる放射メカニズムによる GHz 帯の電波強度が強い。Gyro-resonance 放射は、熱運動による電子のジャイロ運動から電波が放射されるメカニズムであり、その放射電波の周波数は、放射領域の磁場強度と対応つけることができる<sup>3</sup>。よって、これらの周波数の 2 次元画像は、等磁束密度面を示すこととなる。FASR では、1~10GHz 帯で観測をし、黒点付近の 500~1500Gauss の等磁束密度面の情報を得る。これにより、モデル計算でしか得ることができなかったコロナ磁場に直接観測的制限を与え、コロナ中の磁場の発展を明らかにすることを目的とする。

#### ➤ フレアの理解

NoRH での粒子加速研究を高空間分解能で発展させるとともに、Type III 電波バース

---

<sup>2</sup> <http://www.fasr.org/>

<sup>3</sup> 数倍のハーモニクス of GHz 放射も含まれるため、周波数と磁場強度の 1 対 1 対応とはならない。

トの可視化により粒子加速位置の特定を行い、フレア中の粒子加速メカニズムを明らかにすることを目的とする。

➤ 宇宙天気への貢献

MHz 帯で高空間分解能を達成することにより、衝撃波などCMEの構造を分解し、CMEのメカニズムを明らかにする。特に、CMEの衝撃波で行われていると思われる粒子加速の詳細を明らかにすることにより、SEPなど宇宙天気で重要な現象の理解を深めることを目的とする。

➤ 静穏領域の理解

電波は、硬X線に比べ少量の高エネルギー粒子を検出することができる。この利点により、VLA や NoRH 等により XBP における粒子加速に痕跡を見つけることができた。これは、非常に小さなエネルギー解放でも粒子加速が行われている事を示しており、コロナ加熱における寄与を考える必要がある。FASR の高空間分解能観測により、小さなエネルギー開放についての理解を深める。また、黒点付近と同じレジュームでコロナ磁場の測定も行えるので、FASR により静穏領域の理解を進展させることも目的である。

FASR のスペックを表に示す。



**Table I. FASR Instrument Specifications**

Angular resolution	$20/\nu_{\text{GHz}}$ arcsec
Frequency range	30 MHz – 30 GHz
Number channel pairs	2-4
Total instantaneous BW	2 GHz
Frequency resolution	0.3-3 GHz: 0.1% <0.3,>3 GHz: 1%
Time resolution	0.3-3 GHz: 10 ms <0.3,>3 GHz: 100 ms
Polarization	IQ/UV
<hr/>	
Number antennas	3-30 GHz: 100 0.3-3 GHz: 80 <0.3 GHz: 60
Size antennas	3-30 GHz: 2 m 0.3-3 GHz: 6 m <0.3 GHz: LPDA
Maximum antenna spacing	6 km
<hr/>	
Absolute positions	1 arcsec
Absolute flux calibration	<5%
<hr/>	
$\Delta T_B$ (snapshot)	1000 K

このスペックを達成するためには、最長基線長は約 6km となる。また広帯域の観測をするため受信システムとしては、LFA（30~300MHz/active dipole アンテナ）、IFA(300MHz~3GHz/6m parabola)、HFA(3GHz~24GHz/2m parabola)の3種類の別個の受信システムを構築する。アンテナ配置は、上図のように log-スパイラルを採用することを想定している。この配置は、少ないアンテナ数でより良い PSF を実現するための配置である。しかし、u-v 空間での冗長性が無いので、NoRH のように self calibration(太陽自身を較正源とする較正法)をすることはできず、像合成処理を NoRH のように単純化することは難しい。

この計画は NSF にアプライされ、2 台のアンテナによるテストベッドの装置が完成し、実験観測が行われている。ただし計画の進行には遅延が生じており、当初計画の 2007 度建築開始という状況にない。また、最高観測周波数が不確定で、20GHz を切る可能性もある。

- CSRH (Chinese Solar RadioHeliograph)

中国国家天文台が計画している太陽電波干渉計である。科学目的・スペック等、ほぼ FASR と同じである。中国の計画では、MHz 帯の干渉計を CSRH-1(0.4~2GHz)、GHz 帯の干渉計を CSRH-2(2GHz~15GHz)と 2 つに分離している。予定では、2007 年度から CSRH-1 の着工し、2009 年から観測を開始し、CSRH-2 を 2010 年頃から着工したいと考えている。現在は、北京郊外の Miyun Radio Observatory にて、2 アンテナのテストベッドによる実験観測を行っている。

すでにモンゴル自治区に土地の確保を行い、予算目処も立っているので、着工にむけての外的環境は整っている。しかし、中国には太陽干渉計の経験は無く、システム設計においてかなり困難が生じているようである。中国としては、日本を含め、アメリカ・フランスなど干渉計技術を持った国からの技術サポートを熱望している。このため、スケジュールどおりに着工できるかは疑問が残る。

---

ここに紹介した観測装置共通の問題点として、最高観測周波数がある。FASR を計画しているコアメンバーは、NoRH をよく利用しているグループであり、太陽フレアにおける GHz 帯研究をよく理解しているグループなので、FASR の最高観測周波数を 30GHz 程度と計画していた。これは、ある程度大きなフレアでも Tune-over frequency が観測周波数より高くなることを防ぎ、optically-thin の gyro-synchrotron 放射から、加速電子のエネルギースペクトルを導出できるようにとの配慮によるものである。しかし、NFS 自体の予算削減あおりを受けたせいか最高観測周波数が下がってきており、着工予定の今年度となっても、計画 Web ページのトップページには”frequency range of 50 MHz to more than 20 GHz”との表記になっている。このため、状況によっては最高観測周波数がさらに下がる可能性がある。一方 CSRH は、高周波側の技術的困難も見越してか、最高観測周波数は 15GHz と規定している。この最高観測周波数の低周波数へのシフトは、粒子加速問題を解く上では、大きな問題であると思われる。

## **6. 日本の太陽電波の今後**

太陽電波は、フレアにおける粒子加速の研究のために必須な手段であり、いままで専用観測装置を持っていなかった米国や中国が、多周波対応の大型電波干渉計計画を推進している。米国は FASR 計画、中国は CSRH 計画で、ほぼ同程度の規模の計画である。メートル波帯からマイクロ波帯までカバーする電波干渉計で、20GHz 付近では、野辺山電波ヘリオグラフの空間分解能 10 倍の性能 (1 秒角) をめざしている。それぞれ国内において高い評価を得て調査費や土地購入費などが認められ、具体的な設計を行っている。また、ロシアでも既存の大型電波干渉計を大幅改造して、多周波化をめざしている。一方国内においては、野辺山電波ヘリオグラフが非常に順調に観測を行っており、世界的にも高い評価を得て、世界中にユーザーがいる。しかし、この装置

の大型化は、土地の制約や人的資金的制約から難しい状況である。以前より、野辺山電波ヘリオグラフを 2009 年度末での運用停止が検討されてきたが、他の大型装置が立ち上がる前に運用を停止することになれば、太陽の活動度が上がり、ひのひによるフレア観測の機会が増えるにもかかわらず、粒子加速の観測的研究ができない状態となる。そこで、日本としては他の大型装置が観測を開始するまでは、なるべく現状を維持してデータ提供行いたい。これを可能とすべく、関係者の努力を期待する。

# 理論サブグループ 検討報告書

執筆者：磯部、横山、草野、真柄、塩田、鈴木、柴田

## 1. はじめに

理論研究は個々の研究者の自由な発想に依るという側面が大きく、大きなプロジェクトや分野全体としての将来計画策定にはなじみにくい。一方で、特に重要な問題に対して観測プロジェクトとある程度コヒーレントな研究を推進することは、分野全体での科学成果を最大化するためにも必要である。太陽物理学における理論研究の現状と今後の主要な課題を整理し、今後の研究の方向性を検討するのが本稿の目的である。

黒点、コロナ、フレアなど、磁場とプラズマの相互作用に起因する種々の活動現象をプラズマ物理学の手法を用いて理解することが現在の太陽物理学の主要部分を占める。また近年は太陽活動の地球への影響（宇宙天気）に対し、学術的にも実用的な観点からも興味が高まってきている。磁場に起因する活動現象はどれも相互に密接に関係しているが、特に重要な問題をここでは以下のように分類する。

- 磁場の起源（ダイナモ）
- 外層大気加熱と構造形成（コロナ加熱、彩層加熱、太陽風）
- 爆発現象（フレア、コロナ質量放出、粒子加速）
- 太陽地球環境と宇宙天気

以下ではまず主要課題ごとの研究の現状と将来の展望を記述し、次に理論研究のインフラである大型計算機の発展に伴う、シミュレーション科学としての太陽物理学の展望と、コミュニティとしての人材育成等の取り組みに関する計画を述べる。

## 2. 磁場の起源

太陽活動現象の源泉である磁場の起源は、言うまでもなく太陽物理学の最重要課題の一つである。磁場は太陽内部の流れによって増幅、維持される。このメカニズムをダイナモと呼ぶ。近年の日震学による太陽内部の観測から、ダイナモ理論に対しさまざまな条件付けがなされている。また一方で大規模なシミュレーションが可能になってきたことで、ここ数年のダイナモ研究の進展は目をみはるものがある。しかし、全球ダイナモをいっぺんに取り扱うシミュレーションは計算量が膨大になるためまだ可能ではなく、現在はダイナモを構成する物理過程の要素をそれぞれに研究している段階である。以下では個々の要素ごとの課題を述べる。

### 2.1 全球スケール流れ

日震学の観測から、太陽対流層内部の差動回転の様子が明らかになってきた。また、子午面還流とよばれる、低緯度から極域にむかって流れる数メートル毎秒程度の流れも見つかっている。

これらの流れは、いずれもダイナモにとって非常に重要な要素である。ところが、理論モデルによるその再現がこれまでのところうまくいっていない。Miesch et al. (2006)は、対流層底部に温度の非一様分布を境界条件として与えることで、一応実現できることを示したが、いまだ自己完結的なモデル、つまりこのような温度非一様性を説明するモデルにまではいたっていない。

## 2.2 回転勾配層（タコクライン）

日震学により、もうひとつ明らかになったのは、対流層の底、放射層との境界に、回転角速度に急勾配を持つ層が存在することである。この層は「回転勾配層（タコクライン）」と呼ばれる。詳細な構造はあまりわかっていないが厚さが非常に薄く、またちょうど対流安定と不安定との境目にもなっている。このような構造がどのようにして維持されているのか、その厚みはどう決まっているのか、どのような物理過程がその中でおこっているのか、など興味深い課題につきない場所である。とくに $\Omega$ 効果—角速度勾配によりポロイダルからトロイダル磁場を生成する効果、にとっては、回転勾配層がきわめて重要な場所になっている。

## 2.3 孤立磁束管の生成・浮上

太陽大気中で観測される活動領域を構成する磁場のおおもとになる磁束は対流層底から浮上してくると考えられるが、黒点を説明するような孤立した、また適切な強さの磁束管を生成する物理機構はいまだあきらかになっていない。また対流層底と光球面付近では圧力スケール長が2桁程度異なるので浮上するループの空間スケールが異なるとかんがえられる。つまり浮上自体が2段階あるいはそれ以上になる可能性がある。また磁束管は対流層中ではきわめて高ベータであり、対流による影響を強く受けるはずである。途中受けた履歴により浮上して現れる活動領域の黒点型（アルファやデルタなど）もかわると考えられ表面フレア活動などへの影響をあわせて考えると興味深い。

## 2.4 $\alpha$ 効果

先にポロイダルからトロイダル磁場をつくる $\Omega$ 効果については言及したが、トロイダルからポロイダル磁場をつくる過程については謎が多い。この過程が働いている箇所は、回転勾配層の中、そのすぐ上（「境界層ダイナモ」）、表面に出たから（「磁束輸送ダイナモ」）などいくつかの提案が出ているが決め手には欠いている。いわゆる $\alpha$ 効果がこの機構の有力候補のひとつなのであるが、乱流的なプロセスを仮定しており、乱流自身がどのようなものなのか、あまりさだかではない。特に局所磁気乱流シミュレーションであきらかになった「 $\alpha$ 抑制」現象は、 $\alpha$ 効果に対して強い制限をあたえている。

## 2.5 11年周期、Maunder 極小期

ダイナモのめざす最終的なゴールのひとつが11年周期の実現であり、さらには他のさまざまな長周期モードはては、Maunder 極小期などの不規則な増減の実現である。この分野では、運動学的ダイナモ（線形ダイナモ）が、子午面還流の効果をとりにいたり、過去のデータを使ったりして、

次活動期の黒点数の推測をおこなっている。しかし、基本的には経験的なものであり、多数の自由パラメータ（チューニングパラメータ）を含む。これらの自由度に対して一つずつ物理的な裏づけを与えて自己完結的なモデルをつくる必要がある。

## 2.6 現状と課題

日本のダイナモ研究は、幾つかの重要な研究はあるもののこれまで決して盛んだったとはいえない。ダイナモ問題は本質的に3次元の問題であり、大規模な計算能力を要するものであるが、後述するように日本の天文学、太陽物理学はこの点に関してめぐまれた環境にいる。大規模計算機を使った「力技」的な仕事でやることは多く残っている。したがって、問題設定さえ正しくおこない、目標をあきらかにすれば、ダイナモで世界トップレベルになるのはまだ難しくない。日震学や黄道面脱出ミッション等、新しい観測手法によるダイナモ研究は近い将来に観測的太陽物理学の主要なテーマとなる可能性が高く、理論研究を先行して進めることは日本の太陽物理学界の将来をにとって極めて重要である。

## 3. 外層大気加熱と構造形成

可視連続光で見た太陽の表面（光球）の外側には、厚さ約2000km、温度約1万度の彩層と呼ばれる層があり、その外側には100万度から1000万度の高温のコロナが広がる。コロナは惑星間空間へと流出し、太陽風となって太陽圏を形成する。これら太陽の外層大気では、磁場によって黒点やプロミネンスなどの複雑な構造、フレアやジェットなどのダイナミックな現象が起きている。外層大気における加熱、構造形成、ダイナミクスは太陽物理学の主要なテーマである。

### 3.1 コロナ加熱

6000度の表面の外側に100万度もの高温のコロナができるのはなぜか？というのがコロナ加熱問題である。外側対流層を持つほとんどの星はコロナを持ち、また降着円盤など恒星以外の天体でもコロナに相当するような高温希薄な外層大気が存在すると考えられている。従ってコロナ加熱は天文学における普遍的な重要問題である。

コロナ加熱が磁場と関係していることは、X線、極紫外線の観測で磁場の強い活動領域が明るく、また高温プラズマが磁気ループに沿った構造をしていることから明らかである。加熱のエネルギー源としては、光球面には十分な対流の運動エネルギー（速度約1km/s、運動エネルギー密度約 $10^4 \text{ erg cm}^{-3}$ ）である。対流の運動エネルギーが磁場を介してコロナへ輸送、熱化することで加熱が起きていることに関しては、分野全体でコンセンサスが得られている。現在問題となっているのは、磁場によるエネルギーの輸送と散逸のメカニズムである。

コロナ加熱理論には大きく分けて波動加熱モデルと磁気リコネクションモデル（ナノフレアモデル）がある。前者は磁場と対流の相互作用により発生した磁気流体波（主としてアルフベン波）

がコロナへ伝播、散逸するというモデルで、コロナでの散逸メカニズムとして位相混合、共鳴吸収、非線形効果による衝撃波形成など様々な理論が提唱されている。一方後者は対流運動が磁力線の足下をランダムに動かすことで磁力線が絡まり、コロナに電流シートが形成されて磁気リコネクションが起き、プラズマを加熱するというモデルである。波動モデル、磁気リコネクションモデルの双方とも、コロナ加熱を説明できる論文が多数出版されており、加熱メカニズムそのものに原理的な困難はない。従って現在の理論研究の課題は、

- 現実的な大気でどのメカニズムが最も支配的であるかを明らかにする
- 観測データから診断できるようにする

の2点にある。

波動モデルとリコネクションモデルを分けるものは、光球で対流と磁場の相互作用により発生する擾乱のタイムスケールである。擾乱の典型的タイムスケールがコロナのアルフベントタイムより短ければ、擾乱は波動として伝わり、長ければ波動ではなくコロナの磁場トポロジーの変化、つまり電流シート形成となる。現在の大型計算機的能力をフル活用すれば、対流層からコロナに至る領域を全て含んだ磁気流体シミュレーションにより、擾乱の発生から伝播、散逸に至る過程を調べることが可能になってきており、現在その研究が国内の研究者により精力的に進められている。「ひので」の観測データと磁気流体シミュレーションの詳細な比較により、コロナ加熱問題はこれから数年で理解が大きく進展することが期待される。

### 3.2 太陽風加速

太陽は輻射だけでなく、太陽風やコロナ質量放出により、物質も周囲へと放出している。その総量は毎秒約  $10^9$  kg にもおよび、外側に流れ出した太陽風プラズマは 90-100 天文単位で終端衝撃波を形成した後、そのさらに外側にあるヘリオポーズまで達し、広大な太陽圏を形成している。地球の周囲もこのような太陽風プラズマにより満たされている。地球近傍での太陽風の速度は 300-800 km/s にもなり、太陽風は地球磁気圏との相互作用による磁気嵐などを通じ、人間社会へも影響を及ぼしている。最近では、太陽系外から飛来する銀河系宇宙線と太陽風の相互作用が、地球の雲の形成、引いては地球の気候をコントロールしている可能性も指摘されており、我々が考えていた以上に我々は太陽風の影響を受けていることを示唆している。

太陽風の駆動に関しては、おおもとのエネルギーは太陽内部の対流運動であり、そこから磁力線の運動などを通じてエネルギーを一部上空へと持ち上げ、プラズマを外向きへと加速するという描象が、大枠として理解されている。しかしながら、具体的な磁場を介したコロナ、太陽風プラズマの輸送過程は、未解明部分が非常に多く、宇宙天気などの応用研究を今後進める上でも大きな障害となり得る。太陽風駆動の基礎的物理過程の解明は、非常に重要な研究課題である。

太陽風の重要な特徴として、次の2つが挙げられる。

1. 高速風と低速風という2つの種族の存在
2. 太陽活動の11年周期に伴う太陽風の変化

高速太陽風は、主に極域のコロナホールを中心に高緯度域を流源としているものが多く、比較的

定常的に存在する成分である。対して、低速太陽風は主に低緯度域から吹き出しているが、場所毎に間欠的に出現、消失を繰り返すものも多く、時間依存する成分である。活動極小期前後には、赤道域を除く大部分が定常的な高速風領域になるが、逆に活動極大期前後は太陽全面の大部分が非定常な低速風成分で覆われる。図2に ULYSSES 衛星の観測によりえられた、活動極小期の太陽風速度分布を示す。

このようなことから、太陽風の根幹を成す部分として定常的な高速風成分が存在し、エネルギー注入が大きい場合などに、低速風が出現すると考えることができる。すなわち、太陽風の駆動機構を解明するには、まず定常的成分である高速風を理解した上で、経年変化などを通じて低速風も統一的に理解するというのが有用な方法であると考えられる。

理論的に太陽風駆動を解明するには、言うまでもなく数値シミュレーションが非常に強力な手法である。しかしながら

1. 光球から太陽圏まで 15 桁以上の密度差
2. ミクロ(ラーモア半径)スケールの加熱が大局構造を支配する

という特徴があるため、加熱のモデル化や連結階層的手法を的確に利用することにより、大きな密度差を解く方法を確立することが必要である。

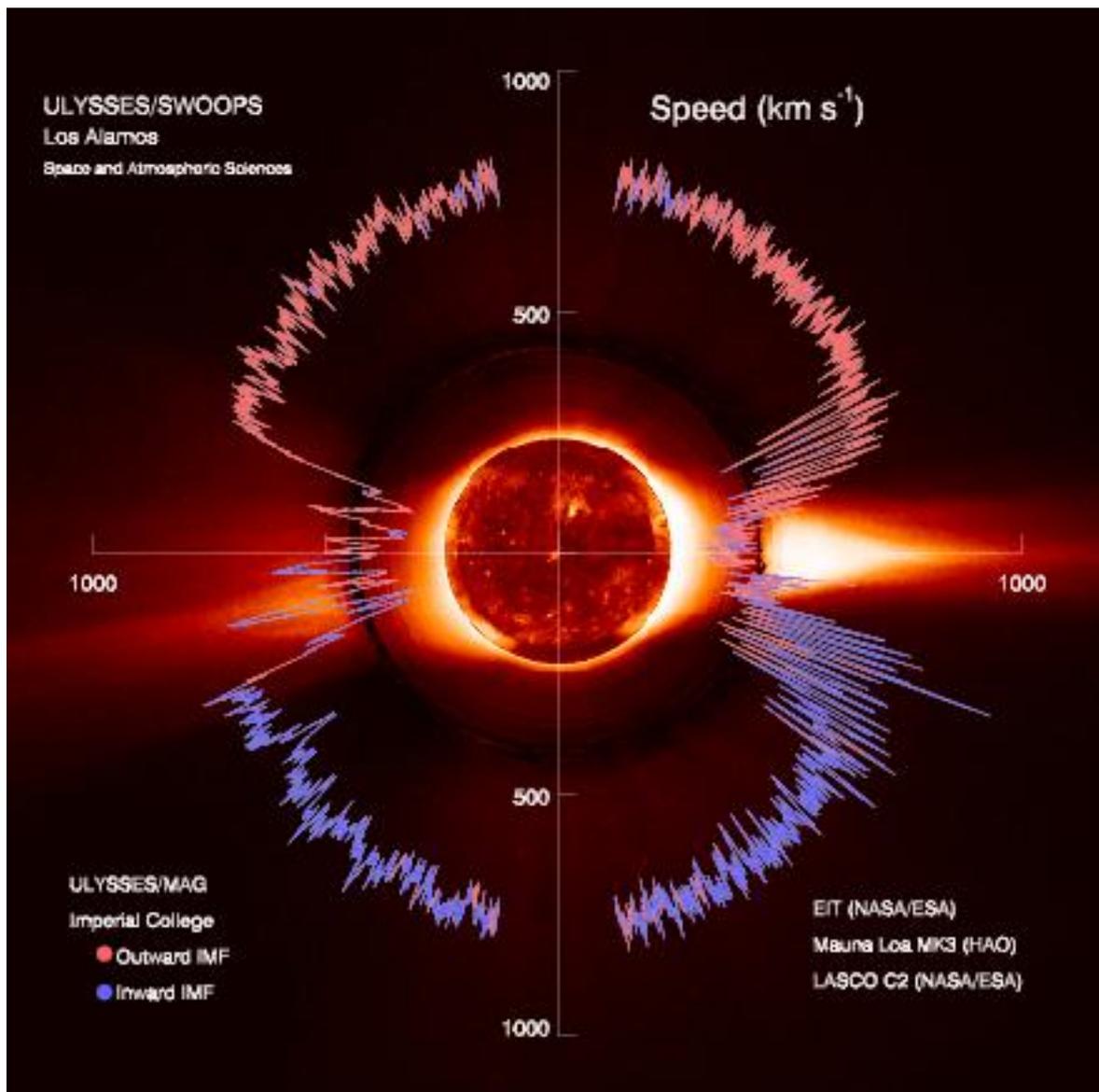


図 2 : ULYSSES による太陽風速度分布

### 3.3 彩層加熱とダイナミクス

彩層は密度が高く輻射による冷却が効くので、彩層を維持するにはコロナ加熱の 10 倍以上のエネルギーが必要である。彩層加熱は実はコロナ加熱以上に不明な点が多く、加熱しているのが音波なのか磁場なのかすらわかっていない。またひのでの観測により、彩層は古典的な静的で 1 次元大気とはほど遠い、様々なスケールで衝撃波やプラズマジェット行き交う、極めてダイナミックな領域であることが分かってきた。彩層は光球とコロナをつなぐ境界層であり、そこでの物理過程の理解はコロナ加熱問題の解明のためにも必須である。

彩層は衝突と光電離の両方が電離に寄与する弱電離プラズマで、波動の伝播や電気抵抗、イオンと中性水素の二流体効果など、基本的なプラズマの性質で分かっていないことが多い。弱電離プ

ラズマのダイナミクスは太陽物理ではこれまであまり顧みられてなかったが、星・惑星形成領域でも重要な一般性のある問題であり、理論、観測の双方から今後の重要な研究テーマになるであろう。

彩層のエネルギー収支と電離度の変化を取り扱い、また観測と直接比較するためには、局所熱力学平衡を仮定しない(non-LTE)輻射輸送と磁気流体力学をカップルさせて解くことが必要である。non-LTE 輻射磁気流体シミュレーションは、特にヨーロッパに強力なグループがあるが、日本では天文分野で実績があるものの太陽に応用した研究はまだ無い。早急な開発が望まれる。

## 4. 爆発現象

### 4.1 研究の現状

太陽フレアとコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) はともに代表的な太陽面活動現象であり、劇的なエネルギー解放と激しい形状変化を示す現象である。両者の違いをエネルギー解放過程に求めれば、前者は第一義的には熱化現象として見なされるべきものであり、一方後者においては運動エネルギーが主要な発生エネルギーとなる。両者に共通するのはエネルギー源であり、現在までのところ磁気エネルギーがこれにあたりと見なされている。

解放される磁気エネルギーは電流という形で存在し、フレアにおいては電流の熱化過程、CME においては電流によるローレンツ力の駆動過程が主要な研究対象となる。これまでの研究により、電流シート内の磁気リコネクションに基づいたモデルがフレアの熱化過程とそれに付随する力学的な現象 (ジェット、プラズモイド噴出) を説明するのに有力であるという共通認識が得られている。一方で磁気リコネクションと高エネルギー粒子加速のミクロの物理過程には不明な点が多い。一方、CME についてはいくつかのモデルが乱立しているのが現状であり、これらがある一つのモデルに統合されていくのか、それとも CME 自体が複数のモデルで記述されるべきものなのか、今後観測結果を踏まえて検討していくことになる。

また、フレア・CME とその物理過程を記述するモデルが得られた場合、それが太陽面の実環境で有効に働くかどうかを確認していくことになる。これは宇宙天気観測の観点から将来にわたって重要な研究課題となる。太陽面の観測データをモデルに取り入れる試みは最近始められ、結果も徐々に始めている。

### 4.2 今後の研究課題：フレア

上記のように、磁気リコネクションモデルはポストフレアループの形成を伴うフレアのメインフェーズを MHD レベルで説明することに成功した。しかし、プレフレア状態からどのような物理条件のもとでフレアが発生し、メインフェーズに至るのかは未だに謎に包まれている。フレアが極めて短い時間スケールで突発的に発生することは、強力なリコネクションを導く小さな拡散領域がフレア初相に急速に形成されることを示唆している。しかし、その形成メカニズムに関してはいくつかの理論モデルが提案されているにすぎない。例えば、複数のリコネクションの電磁流

体力学的なフィードバックがリコネクションを爆発的に加速とするダブルリコネクションモデル、Sweet-Parker 型リコネクションから Hall MHD 効果による高速リコネクションへ遷移するとするリコネクションの分岐遷移モデル、なんらかの microscopic instabilities に起因する異常抵抗の発生がトリガとなるとする異常抵抗モデルなどがある。しかし、急激に変化するフレア初相の観測が十分でないため、これらの理論提案を定量的に評価し差別化することはできていない。また、フレアに伴う加熱機構、粒子加速機構についても説明すべき課題が残されている。それゆえ、今後、フレア発生機構を完全に理解するためには、過熱・加速過程をも含めた物理プロセスを総合的に説明することが重要な課題といえる。

計算機の発展に伴い、コロナの MHD ダイナミクスに関しては 3 次元 シミュレーションが普通に行われるようになったが、超高温プラズマであるコロナの散逸機構を正確に取り込んだ精密なシミュレーションの実現は今後の課題である。このためには、MHD シミュレーションにおける多層格子技術、マイクロ過程を繰り込んだ散逸過程の精密なパラメタリゼーションを開発することが必要であろう。また、Hall MHD モデル、ハイブリッドモデル、プラズマフル粒子モデルなどを階層的に利用した連結階層モデルなどの開発も重要になるであろう。同時に、ベクトルマグネトグラム、コロナ多波長観測などのデータを可能な限り取り込んだデータ駆動型シミュレーションを実現し、フレアの発生とその後の発展に関する徹底的な再現実験を行う必要があると考えられる。現在、ベクトルマグネトグラムを境界条件としたフォースフリー解を初期条件としたシミュレーションが試されつつあるが、現実の条件を正確に取り込むには非フォースフリー要素の導入など解決すべき課題が多い。こうした研究をさらに推し進め、フレア発生の再現と予測を実現することは、太陽フレアのみならず多様な高温プラズマの爆発現象を理解するためにも重要であるとともに、後述する宇宙天気予測研究にとっても大きな貢献をするものである。

#### 4.3 今後の研究課題：コロナ質量放出

コロナ質量放出 (CME) の発生機構に関しては未だに明確に理解されていない。特に、太陽フレアと CME の間には何らかの相互関係があることが観測的に示されているが、その物理的因果関係を明確化する段階には至っていない。理論的には、CME の駆動過程にはフレアを生む活動領域の局所的な磁場構造とグローバルな太陽磁場構造の相互作用が重要な役割を果たすと考えることができ、いくつかの磁場トポロジーが典型的なモデルとして提案されているが、それらの妥当性を観測から明確に評価し、その可否について結論を出すことはできていない。それゆえ、CME の駆動機構については、CME の前兆となる現象 (例えば不安定化する filament) を手がかりに、可能な限り実環境に即した条件の下、現象の再現を目指すことが必要である。これまで提案されているモデルは基本的に軸対称 2 次元トポロジーの基で考えられており、実環境を取り入れるという点でまだ改善の余地がある。また、太陽コロナから CME へ至る磁気ヘリシティの蓄積・放出過程の解明も観測とシミュレーションの連携のテーマとして重要である。CME の機構解明とその予知は、宇宙天気研究の進展に合わせて今後さらなる発展が望まれる。

一方、CME の伝搬過程については、太陽分野のみならず惑星間空間及び地球磁気圏研究者との連携が求められる。特に、惑星間空間における CME の 3 次元構造の解明は、CME の多点観測、シ

ンチレーション観測、in situ 観測などによって急速に進むことが考えられる。これらの研究と連携し、CME の初期形成過程を太陽研究の立場から明らかにすることは宇宙天気研究からも極めて重要である。

#### 4.4 粒子加速

フレア時に発生する非熱的粒子の加速機構の解明は、太陽物理学研究の重要課題のひとつである。粒子分布関数が高エネルギー側でべき乗分布になる現象は、太陽フレアだけではなく、宇宙線や地球磁気圏でもみられる普遍的な現象である。太陽を対象として粒子加速を研究する利点は、数多くのフレアを多波長観測でき、非熱放射の空間・時間的な分布を得るのに優れていること。いっぽうの難点は、得られるのが放射（光子）によるものなので、放射機構に依存する間接的なことである。また、加速はプラズマ運動論的なミクロスケールで起こっていると考えられるが、静穏コロナ中では数メートル以下と極端に小さく、観測では空間分解できない上に、マクロスケールとのギャップが極端に大きいこともある。それから、他分野ではあまり意識されていないけれども太陽では重要な、「多量の」加速粒子をいかに作るか、という課題がある。これは、フレア観測から示唆される「非熱と熱とはエネルギーがほぼ拮抗している」を説明するために必要で、リコネクションによって解放された磁気エネルギーのそれなりの割合を非熱粒子加速に転換する機構が必要とされる。

これらの利点・難点・課題から、理論的な研究は主に二つの方向性があると考えられる。一つめは、加速の素過程の研究で、プラズマ運動論の枠組みで行う。この分野の研究は、主にプラズマ物理学・地球物理学分野の研究者によってすすめられている。一方太陽分野においては、従事している研究者は極めて少なく、2000年以後はほとんど論文も出ていない。ミクロスケールで見ると、太陽における加速と地球・実験室プラズマにおける加速とではそれほど大きな違いがあるわけではないので、これら他分野との情報交換・連携が重要になると考えられる。特に、粒子コードによる粒子・電磁場ミクロ相互作用を同時に解く計算については上記のような分野では研究が進んでいる。背景電磁場を固定したテスト粒子軌道計算も有効な手段である。うまく使うことでマクロとミクロとを併せ持つような加速機構の解明に役立つ可能性があり太陽のようなシステムでは特に有効かもしれない。

理論研究のもう一つの方向性は、観測される多波長放射のスペクトル・空間・時間分布を矛盾なく説明する粒子輸送・拡散モデルの構築とそのシミュレーションの実行である。RHESSI 衛星の硬 X 線撮像スペクトル観測や、野辺山電波ヘリオグラフによるマイクロ波観測をあわせることで非熱粒子についてなんらかの情報が得られそうな状況にはある。これら観測データから粒子加速の情報に迫るためには、空間・時間・エネルギー・ピッチ角の関数として電子輸送・拡散を解く Fokker-Planck シミュレーションを実行し、観測と組織的に比較することが必要と考える。拡散過程についてプラズマ運動論物理の知見が必要なこともあり、太陽ではその観測情報が皆無なので（温度異方性や陽子温度についての情報さえない）、不定性が大きい。しかし観測から加速過程を制限付けるためには必須な研究であるといえる。

## 5. 宇宙天気

「宇宙天気」とは地球近傍の放射線、電磁環境を意味しており、軌道上の衛星および飛行士の健康、地上の長距離ネットワークを守るためにその状態把握と予測を行うことは、ハイテク社会の重要な要請である。全ての宇宙天気現象は CME や太陽風など太陽に起源を持っており、特に宇宙天気予知にとって太陽研究は大きな責任がある。

地球磁気圏の大規模擾乱は太陽風の状態変化に起因して生じる。それゆえ、高速・低速太陽風の境界である CIR(corrotational interaction region)と CME の到達を予測することは宇宙天気研究にとって重要なテーマである。前者に関しては太陽表面の磁場、温度、密度状態から太陽風の 3 次元構造を再現する試みが進められている。しかし、このためには詳細な太陽コロナ観測データの整備と共に、コロナ中の加熱過程を取り入れた惑星間空間の精密な 3 次元シミュレーションが必要となる。一方、磁気圏ダイナミクスは磁気圏と衝突する惑星間磁場 (IMF) の南北方向磁場 ( $B_z$ ) に敏感であるため、地球軌道における CME 磁場構造を衝撃波の強度および到達時間と共に予測する技術を開発することは宇宙天気研究にとって極めて重要である。このためには、CME の形成と太陽風との相互作用を含む精密なモデルを完成しなければならない。また、太陽風内の乱流の理解も必要となる。

一方、太陽高エネルギー粒子 (SEP) の影響評価をフレア発生以前に行うことは、特に衛星運用の安全確保のために強く求められる。このためには、フレア予知のみならず、その後の粒子加速と伝播の評価をリアルタイムで実施する必要がある。そうした技術の基礎的研究に太陽研究は大いに寄与できるであろう。

日本には惑星間空間の理論研究を行う専門化が不足しており、この分野で欧米に立ち遅れている。それゆえ、太陽の理論家は太陽だけに閉じるのではなく惑星間空間の物理を理解し、積極的に研究を展開する努力が求められている。地球電磁気学研究と連携し、太陽フレア、コロナ加熱、CME、太陽風などのモデルを総合した統合モデルの開発を通して太陽理論研究は宇宙天気研究の重要な一翼を担うことができる。

## 6. シミュレーション科学としての太陽研究

太陽は多様な非線形プラズマ現象の舞台であり、その総合的な理解を推し進めるためには今後高度なシミュレーション研究が重要な役割を果たすと考えられる。現存する地球シミュレータ級の高速計算機を利用すれば、現在でも次元あたりの自由度が 1000 程度の 3 次元 MHD シミュレーションが十分実行可能であるが、前述した通り全球ダイナモ計算や太陽風の 3 次元乱流モデルに関してはその分解能は十分でない。今後、次世代スーパーコンピュータなどの出現によって数 PFlops 級の高速計算が可能になる可能性があるが、複雑な 3 次元シミュレーションでは計算負荷は次元あたりの自由度の 4 乗に比例するため、計算可能な自由度は依然最大 4000 程度に制限されると予測される。これは、乱流直接計算やマイクロモデルによるグローバルシミュレーションにとってま

だ十分ではない。

そのため、高速計算機を最大限に利用するためには新たなシミュレーション手法を開発する必要もある。それらの研究はシミュレーション科学としても重要な役割を果たすであろう。例えば、精密な散逸過程を含む高精度磁気流体（MHD）シミュレーションの開発、可能な限り非散逸な高分解スキームの開発、高精度陰解法による高速計算、活動領域からコロナ、惑星間空間に至る多分解能モデル、MHD 衝撃波モデルと粒子加速モデルの連結、非 MHD 効果を含むマイクロモデルと MHD マクロモデルの連結階層スキームの開発などが、太陽研究を加速する役割を果たすと考えられる。また、これらの先進的な計算手法の開発は太陽のみならず様々な天体、プラズマ、流体現象のシミュレーションにとっても有用であり、太陽研究がシーズとニーズの両面からシミュレーション研究に貢献することが考えられる。

## 7. 人材育成

次世代の理論研究を担う人材の育成はコミュニティ全体で取り組むべき最重要課題であると認識されている。天文、スペースプラズマ分野との合同による大規模なシミュレーションスクールや、大学院生を対象に研究テーマまで設定した少人数のワークショップ等はこれまでも開催されてきたが、特に少人数のワークショップに関しては今後はより定期的に開催することを検討している。

またここ数年の研究環境の大きな変化として、汎用シミュレーションコードの整備が挙げられる。JST のプロジェクト（代表：松元亮治千葉大教授）により整備された磁気流体コード CANS (Coordinated Astrophysical Numerical Software) は、多次元の様々な座標系における磁気流体コードと、基本的な天体現象のモデルセットアップ（太陽大気、降着円盤など）がパッケージ化されており、普段数値シミュレーション以外の手法で研究している研究者や、シミュレーション研究がどんなものが知りたいという学生などが、手軽にシミュレーション研究を始めることができる。例えば、普段観測的研究を行っている研究者が、自分の観測結果を解釈するために簡単なシミュレーションをやってみる、といった研究スタイルが可能になると考えられる。観測家と理論、シミュレーション研究者の合同のワークショップ等を開催して、観測家にも数値シミュレーション研究を奨励し、研究の裾野を広げる機会を定期的に持つ計画である。

太陽天体プラズマ専門委員会

太陽将来計画ワーキンググループ

分野間連携の視点に関するサブワーキンググループ

草野完也、柴田一成、秋岡眞樹

## 1. 太陽将来計画に関する関連分野研究者のコメント調査

太陽は地球環境に直接影響を与える母なる星であると共に、様々な非線形プラズマ現象の宝庫でもある。それ故、太陽現象は太陽研究の対象であるのみならず、地球物理、地球環境、プラズマ物理など関連分野の研究にも様々な影響を与えており、分野関連携の視点から太陽研究の将来を検討することは重要である。そこで、「分野関連携の視点に関するワーキンググループ」では、太陽研究の将来計画について議論する基礎資料として、地球科学、プラズマ物理、流体物理など関連分野の研究者約 60 名に太陽研究の将来計画に関するコメントを依頼した。本稿ではそのうち重要なコメントの抜粋をそれぞれ以下に報告する。

## 2. 主なコメントの抜粋

### ■ 地球環境との関係：

- ▶ 太陽面現象と惑星間空間構造、さらにそれらの地球磁気圏との相互作用が精力的に研究されているが、それらに加え、地球から見えない太陽裏側の継続的モニター、気象影響など実用性に重点を置いた太陽面現象の予測、長期的な精度の高いモニター観測などが重要と考える。
- ▶ 太陽黒点周期に対する成層圏界面での大気応答の存在がほぼ共通認識になっている。(その機構解明のため) より正確で長期のスペクトル観測が重要。
- ▶ UV,EUV,X 線のスペクトルは電離層、熱圏の基本構造を決める最も重要なパラメータだが、その変動は完全には理解されていない。気候変動影響も含め、全ての波長において、太陽光の長期変動は、地球・惑星大気の進化に重要。
- ▶ 銀河宇宙線が気候に影響を与える可能性から、銀河宇宙線のモジュレーションを正確に評価するために極域を含めた太陽表面の 3 次元磁場構造をモニターする必要がある。
- ▶ 「地球環境」、我々の生活圏とのかかわりにおいて具体的な問題を設定する必要がある。

### ■ 宇宙天気との関係：

- ▶ ひのでの研究成果を受けた上で、更に詳しく測れば、フレア予測が可能になると言えるような研究計画が、単純に、宇宙天気予報的に最重要である。また、究極の宇宙天気ミッションとして極ミッションでコロナグラフ観測をやると面白い。

### ■ 太陽風：

- ▶ 太陽磁場構造と地球軌道での太陽風との関係の機構を解明したい。太陽風はマクロな磁場構造でほぼ決まるのか、マクロな構造をミクロなプロセスにまでフィードバックしないと再現できないのかは興味深いテーマである。
- ▶ 太陽風の長期変動に関して新しい知見が得られれば、惑星大気の進化の研究にも大きな貢献がある。また、多点での太陽風モニターが、宇宙天気研究への貢献も含めて重要。
- ▶ 地球近傍における太陽風の構造一特に三次元構造一が分かる観測があると磁気圏

研究にとって有用。

#### ■ 太陽磁場：

- コロナ全体に強い影響を与える極域磁場を直接観測するなら、メリットは多い。ただし、太陽極周回軌道への投入のためには技術的に検討すべき課題が多いであろう。
- ファラデー回転を利用してコロナ磁場を直接観測できると面白い。
- 太陽表面から浅い領域の磁場を、太陽表面磁場と日震学の両面から推定できないか？

#### ■ 観測手段

- 太陽全面の(可視光)連続スペクトル観測は共通して貢献できそうな手法。CCDの感光格子にあたる部分に光ファイバーの一端を持ってきて誘導した光をそれぞれ分光器にかける作り。大口径の地上観測向きか。可能であればコロナ底部のアルフベン波の観測などが可能になるかもしれない。
- 4 m望遠鏡の回折限界でフレア/活動領域を見ることが新たな展開を与えるかも。
- 水星軌道かさらに近づいて磁気ループのまたくぐりができると画期的なのだろうか？
- 共同研究プロジェクトについては、太陽と磁気圏物理の連携の関連では、例えば、Solar-Probe/Solar-Orbiterのようなものは魅力的。
- 太陽近傍において太陽半径方向に距離を変えて3基以上の衛星編隊を組み3D立体映像のみならず、フレア起源で伝搬するプラズマ現象、例えば粒子加速や衝撃波など、が同時観測できれば粒子速度や波動伝搬などの情報が得られるのではないか。
- 理想MHD以外の電場の観測も重要。

#### ■ プラズマ物理、流体力学との関係

- 高磁気レイノルズ数、非一様MHD乱流の典型例として磁場、速度場の平均値と揺らぎおよびその相関をさらに詳しく知ること、乱流モデルの検証につなげたい。
- ダイナモ理論に関連して、平均的な速度場や磁場だけでなく、ゆらぎ場にヘリシティやクロス・ヘリシティ（速度-磁場相関）がどのように存在するかについての情報を得たい。
- MHD乱流のマルチスケール性に関して太陽と実験室の類似性と相違を明らかにすることは重要。
- 核融合でも関連深い磁気再結合や粒子、熱、運動量の乱流輸送を記述するため、いかなる理論モデル（MHD、2流体、ブラゾフ、あるいはジャイロ運動論？）が妥当なのかを示す観測研究をしてほしい。
- 太陽研究を「プラズマを生で見ることができ、観測可能な高温プラズマ発生装置」と位置づけた場合、二流体効果など非MHD的な効果がどのようにプラズマ

の中に発現しているかを確認する研究があってもよい。

- ▶ 粒子加速や過熱、波動との相互作用を考えたときに、MHD スケールの解析、理解だけで十分なのかどうかを検証することも必要。

■ 弱電離プラズマとして：

- ▶ 太陽表層における弱電離プラズマの乱流状態を中性流体乱流、完全電離流体(MHD)乱流と比較した乱流研究は、単に地球物理・天文の枠にとどまらず、より普遍性のある興味深いテーマ。
- ▶ 太陽表面の部分電離プラズマの振る舞いは、弱電離プラズマと中性粒子との相互作用に関して貴重なデータを与えるのではないか。

■ リコネクション：

- ▶ 無衝突リコネクションの実験室プラズマとの類似性が興味深い。1
- ▶ サブストームとの類似性に関連してリコネクションの物理機構は地球と太陽の連携すべきテーマ。また、地球磁気圏で使われる電流系としての太陽研究も視点も必要。
- ▶ リコネクションの定量的観測を通じた無衝突リコネクションの機構解明が必要。

■ ダイナモ、太陽周期：

- ▶ 太陽の長期変動の解明という視点で考えると、少なくとも2、3サイクルにわたって、SOHO でやったような日震学による太陽内部の速度場のデータを得ることが重要。また、氷床データによる長時間太陽活動変動解析との連携も必要。
- ▶ 太陽と地球のダイナモの相違と類似性を共通に考える視点が重要。振動型と定常型の解の違い。タコクラインの生成原因と惑星大気の色運動量輸送の関係など。
- ▶ 輻射対流層境界におけるダイナモと熱流の関係について、レーザープラズマでの磁場発生消滅と関連して興味がある。

■ 粒子加速、高速粒子：

- ▶ 例えば、非熱的粒子の加速問題は、X線-ガンマ線天文学から、宇宙線、太陽物理、磁気圏物理、レーザープラズマ、磁場閉じ込めプラズマなどでも重要なテーマ。
- ▶ 宇宙線加速機構に関係した素過程（高エネルギー粒子によるアルフベン波増幅、Maxwell tail からの粒子の injection）を押さえる観測に期待する。非熱的な輻射スペクトルの空間時間変化（できれば偏光も）の観測から乱流磁場と高エネルギー粒子の関係の理解が重要。TeV エネルギーのガンマ線で粒子の加速機構に迫るために重要なのは電波、X線、GeV ガンマ線との連携であろう。また、太陽の可視光を銀河宇宙線の電子が逆コンプトン散乱する現象が観測されるという論文が出されており興味がある。
- ▶ ホイッスラーモードコーラスに関連して太陽におけるミラー磁場での粒子加速の解明は重要。
- ▶ コーラスと呼ばれるホイッスラーモードの強いプラズマ波動による高効率加速過程が太陽のコロナループでも存在しないか？光、X線とともに数10GHz帯迄の大

型電波干渉計で同定出来ないか？

- フレアで加速された電子と流れとその輸送について興味がある。

#### ■ 内部流れ（日震学）

- 地球流体力学にとっても日震学による太陽内部流れの推定は興味あるテーマ。
- 地球から見えない側の観測も含めて長期的な日震学ミッションは重要。
- 流れのマルチスケール性を示すデータに期待する。

#### ■ 分野連携の在り方、太陽研究の位置づけ

- 太陽研究者と地球研究者の交流の「きっかけ」はできつつある。粒子の運動論効果を取り入れた連結階層の考え方などを通して、両分野で情報交換ができるようにしたい。
- 太陽物理の固有の問題に加えて、プラズマ科学としての視点での研究が進展できればよい。プラズマ科学との共同研究プロジェクトとして多様な取り組みが可能。
- 太陽は、物理現象として、何が「極限的」な（地上で作れない）ラボだといえるか？「特殊性」あるいは「個別性」を追求する視点の方が、一般性を探求する物理の立場より可能性や期待感があるように思われる。
- 現在行っている3学会合同セッションなどによる研究者交流は非常に重要。

### 3. まとめ

関連分野からの太陽研究に対する期待と関心は、予想以上に大きいと共に多様である。特に、プラズマ物理、宇宙プラズマに関しては、太陽とそれ以外のプラズマ現象との類似性と相違の理解に関心が高い。関連分野と共通する重要な物理課題としては、ダイナモ、リコネクション、粒子加速、乱流などがあるだろう。宇宙天気関連ではフレア予測、太陽風と太陽磁場活動の関係、地球から見えない領域のモニターなどに関連分野の研究者から関心が寄せられている。また、太陽と地球環境との関連に関しては複数の分野の研究者からその研究の重要性が指摘されている。

さらに、関連分野の研究者から様々な観測ミッションの提案も寄せられている。主なものとしては、(1) 極ミッション、特に地球から見えない側の観測、(2) 長期観測、(3) プラズマ波動観測、電波観測、(4) 太陽接近ミッション、(4) 多点観測、(5) コロナ磁場計測、(6) 太陽全面の連続スペクトル観測、(7) 大口径望遠鏡による観測、などがある。

これらの内容を吟味し、より広い科学的視点と社会的使命に留意しながら太陽研究の将来計画を策定することが必要であろう。