

# 太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表

2015年1月31日

太陽研究者連絡会

(略称：太陽研連、英文名称：Japan Solar Physics Community)

代表 草野完也 (名古屋大学)

## 1. 目標(将来ビジョン)

### 日本の戦略・狙うサイエンス

我々太陽研究者連絡会(以下、太陽研連)が提案する今後10-20年の戦略(図1)は、(1)最優先事項として、**SOLAR-C** ミッションを実現し、「彩層ダイナミクス」と「宇宙天気基礎物理」の2本柱を解明することを目指す(第2節)。(2)ひきつづき「磁場の起源・ダイナモ」に迫る**SOLAR-D** ミッションを実現する(第3節)。また、これらのミッションを支えるために、国内外機関と大学の連携に基づく**太陽圏環境変動ネットワーク**の構築(第5.2節)、および観測を支えかつ新課題を切り開く**理論シミュレーション研究**の戦略的な推進(第5.3節)を行い、天体高エネルギー物理学・地球惑星科学など周辺分野との交流の中核とする。

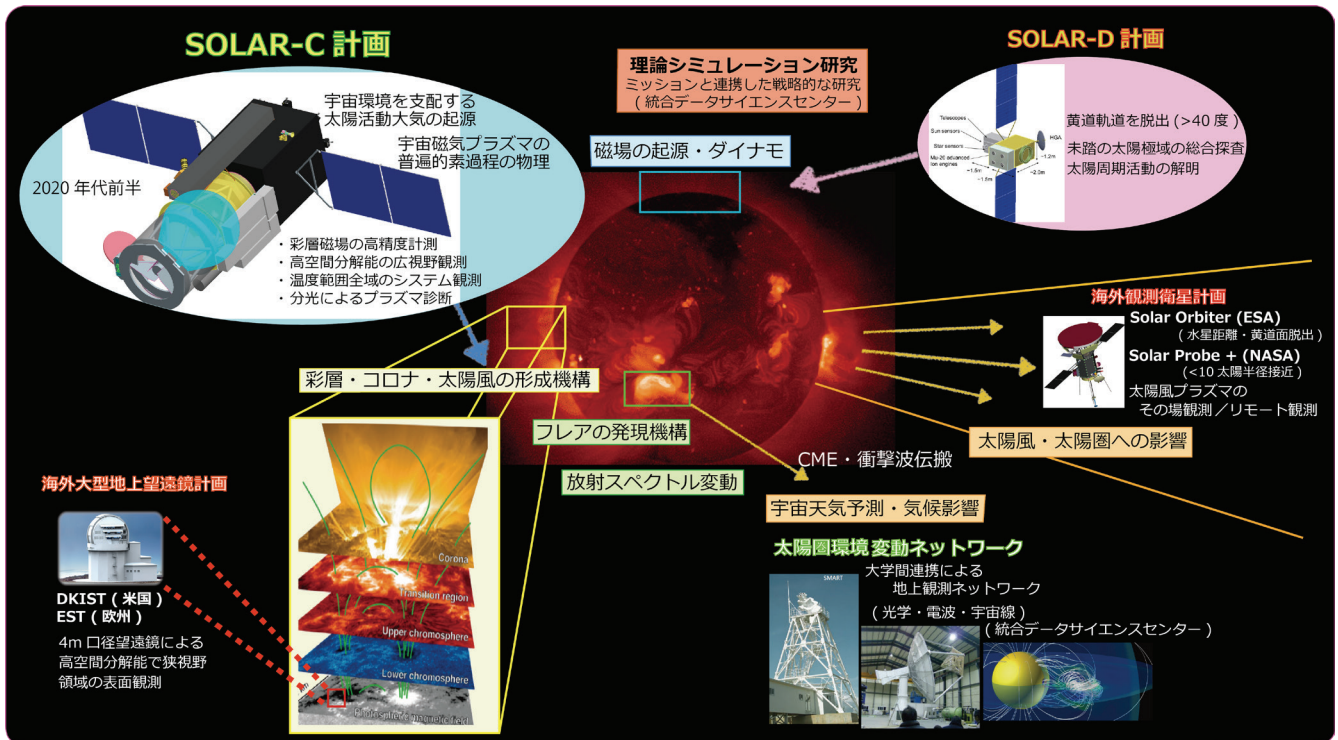


図1. 太陽・太陽圏研究領域における日本の戦略と世界の大型計画動向

### 背景となる世界の動向(サイエンスとプロジェクト)

太陽物理学分野の主な課題は、(a) 星進化、(b) プラズマ爆発現象(フレア・コロナ質量放出・粒子加速)、(c) 外層大気加熱・恒星風の形成とダイナミクス(コロナ加熱・太陽風・彩層ダイナミクス)、

(d) 磁場の起源（ダイナモ）があり、その重要性は概ね世界中で共有されている。(a)は理論を牽引力として 1970 年代ごろほぼ完成、(b)は 1990 年代「ようこう」ミッションによる磁気リコネクション仮説の決定的検証を経て、宇宙天気の理解と予測への新たな研究段階へと進んでいる。重要な未解明課題として (c) および (d) の解明が中心問題となる。一方、太陽活動と惑星間空間・地球・惑星を一つのシステムとして理解する重要性が強く認識されつつあり、今後、地球惑星科学分野との連携がさらに強化されると考えられる。

課題(c) 外層大気加熱・恒星風の謎については、「ひので」ミッションは重要な貢献を行ったが、最重要課題である「光球熱対流による磁気エネルギー注入とコロナ加熱機構との結合」が未だに理解できていない。この解決のためには、光球とコロナの間を埋める彩層におけるエネルギー輸送過程を明らかにする必要がある、我々は SOLAR-C ミッションの提案に至った。世界的にも同様の認識がもたれており、現在稼働中の NASA の IRIS ミッション、建設中の米国 NSO の地上大型望遠鏡 DKIST は彩層を重要な観測ターゲットとしている。しかしながら IRIS の能力は限られた輝線による分光観測に限定されており、SOLAR-C へのパスファインダー的役割を担うものである。一方、DKIST では地上観測による連続観測・像安定・視野に対する制約がある。これに対して、SOLAR-C は偏光分光観測による磁気プラズマ診断に威力を発揮する。また彩層のみならず、光球・彩層・遷移層・コロナを一貫して同時観測できる点も SOLAR-C がこれらに比べ優位な点であり、課題(c)の解決のために SOLAR-C の実現が不可欠であると考えられている。

課題(b)のプラズマ爆発現象についてはエネルギー解放機構としての磁気リコネクションという描像をもとに、次の段階へと研究の方向が進んでいる。それは爆発現象の発生機構の解明とその予測である。爆発現象は地球環境と社会活動にも多様な影響を与えることから、精密な観測とシミュレーションによって太陽活動を予測することは宇宙天気災害や気候変動に対して現代社会が抱える潜在的なリスクを軽減するためにも極めて重要な手段となると考えられる。特に、米国において宇宙天気予測研究は重要な（恐らく優先的な）プロジェクトとなりつつある。欧州、中国、韓国でも同様の傾向が近年目立つ。SOLAR-C は、光球のみならず彩層の磁場も観測することで、今まで捉えきれてこなかったフレア発生予兆現象を捕捉することを目指し、宇宙天気予測研究においても重要な貢献をする。

近い将来 ESA は Solar Orbiter ミッション（2017 年予定）、NASA は Solar Probe Plus（2018 年予定）をそれぞれ計画している。前者は水星近日点まで近づき、太陽風と太陽圏との解明を主ターゲットとしている。後者は名前の通り、太陽近辺に可能な限り近づいてその場観測をすることをめざす。SOLAR-C は、このいずれとも目指すサイエンスの方向性は異なる。SOLAR-C は「ひので」で培った宇宙望遠鏡の技術的優位がもたらしたユニークな戦略をとっており、他グループでは実現困難であると認識している。また SOLAR-D 計画についても「はやぶさ」などで培われた我が国の宇宙機軌道制御技術が生かせるものと期待している。

惑星圏生命圏とのかかわりでは、Kepler 衛星により系外惑星観測は大きな展開を示し、今後、TMT などは、惑星自身の発見ではなく、惑星環境とくに大気がどのようなものなのかを理解しようとしている。また一方太陽系惑星探査ミッションは NASA をはじめとして各国が火星・水星・木星などに探査機を送りこみ、その惑星環境、ひいては太陽系の起源に迫ることを目標としている。太陽系惑星環境、特にその大気環境の進化について理解するためには、太陽系の歴史を通した長期的な太陽からの影響を評価する必要がある。これには太陽風や突発的質量放出、さらには輻射の短期・長期的変動の理解が欠かせない。そしてその答え合わせをすることができるのはわが太陽において他にない。SOLAR-C では、太陽風加速と光球彩層磁気活動との関連が重要課題のひとつで、太陽系環境への直接影響を調べる。これらの現象の背景には、太陽磁場の長期・短期変動の理解が欠かせず、ダイナモや磁気活動領域進化の理解が必要となる。ダイナモについては SOLAR-D ミッションとともに理論大規模シミュレーションによる研究展開を計画している。

### 期待される成果

それぞれのミッションで期待される成果は第 2 節 (SOLAR-C)・3 節 (SOLAR-D) に譲るが、SOLAR-C を中軸として両ミッションの戦略実現により期待される太陽研連(日本)としての成果 (図 2) は、以下のようなだろう。

天体物理・プラズマ物理過程の理解の深化：これまでの太陽物理学研究は、星としての太陽の天文学的理解とともに、そこを舞台として起こるさまざまな天体物理学現象の理解を解明する努力であった。近年では、フレアなどのプラズマ磁気爆発現象の背景にある磁気リコネクションの物理過程を探る努力を継続していることは広く知られている。現在、磁気リコネクションは天文学のあらゆる分野で普遍的な現象として広く受け入れられているが、これは太陽や地球磁気圏でその物理が明らかになってきたことが背景にあると信じる。また太陽風での磁気プラズマ乱流は分子雲における乱流現象の理解に役立っている。このように太陽で起こっている現象を深く理解することは、天体物理学の基礎になっている。今後、彩層を中心とした太陽研究は部分電離プラズマにおける基礎過程の理解に貢献をすると考えられる。特に、原始惑星系円盤における物理過程の理解に大きな役割を果たす。

天文学・惑星科学への研究の展開：太陽はそれを取りまく太陽圏およびその中にある惑星圏と不可分であり、その影響は過去から現在まで惑星に輻射・太陽風・突発現象というかたちで影響を与えている。これまでも地球磁気圏への太陽風の影響という形で地球科学と太陽圏科学とは不可分のものとして研究がすすめられている。この研究は現在、太陽系の他惑星とくに火星金星の大気進化の枠組みでさらに展開が望まれている。そうした研究は今後の惑星探査計画により情報が格段に増える惑星表層環境研究との連携が期待できる。さらに、これらの研究は母星天体の系外惑星系への作用の理解の基礎になるものである。

地球・生命圏との繋がり：地球環境に現在の太陽がおよぼす影響は、フレア・CME などの擾乱現

象や輻射変動などさまざまなものがあり、なかには社会的・経済的影響の大きなものもある。それ故、他の天文学とは異なり、研究成果が社会経済活動に直接関係するという特徴を持つ。社会と天文学との直接のつながりを担う役割を太陽研究は担っている。一方、恒星風の影響は惑星大気進化に影響を与えることから系外惑星系環境、ひいては宇宙における生命存在条件の研究のための一里塚もしくは検証のための貴重な情報源として太陽研究の存在意義は高い。

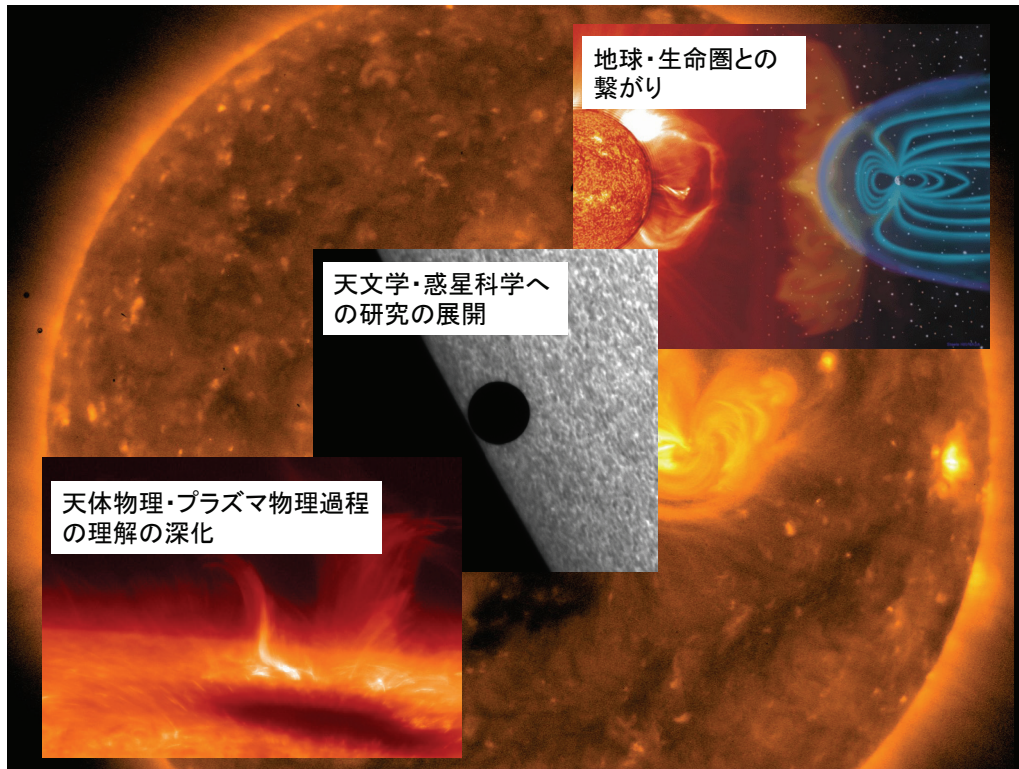


図 2. 太陽物理学研究推進によって期待される成果と、近接研究領域への波及効果

## 2. 次世代太陽観測衛星ミッション SOLAR-C 計画

### ミッション目的および概要 (表 1)

太陽表面から太陽コロナ及び惑星間空間に繋がるプラズマダイナミクスを一つのシステムとして理解すると共に、宇宙プラズマに普遍的に現れるプラズマ素過程を解明して、太陽活動が地球と人間社会に与える影響の理解と予測を実現するために必要な科学的知見を獲得することが、SOLAR-C 計画の基本目的である。

この基本目的を達成するため、SOLAR-C は以下の科学課題に挑む。

- a) 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明
- b) 太陽面爆発現象の発現機構の究明とその発生を予測するための知見の獲得
- c) 地球気候変動に影響する太陽放射スペクトルの変動機構の解明

これらの科学課題に対して、SOLAR-C は以下の観測戦略で取り組む。

- 光球と彩層の磁場とそれらの磁場情報をもとに推定したコロナ磁場から、三次元磁気大気構造を決定してその時間発展を追跡する。
- 光球からコロナまでの太陽大気の基本構造を解像し、現象のスピードに追従する観測を行う。
- 光球からコロナまでの温度範囲全域を同時にカバーして、太陽活動現象を一つの結合系の中の現象としてとらえて観測を行う。
- 太陽大気中で発生するダイナミクスの素過程に関わる物理情報を取得する。

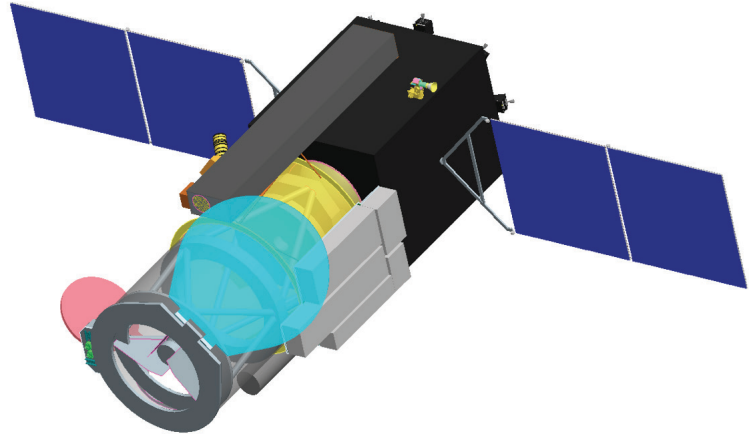


図 3. SOLAR-C 衛星外観

このような観測戦略に基づいて、これらの観測性能を実現するのに必要となる 3 つの観測装置

光学磁場診断望遠鏡 (SUVIT)

高感度紫外線分光望遠鏡 (EUVST)

高解像度コロナ撮像望遠鏡 (HCI)

を SOLAR-C 衛星(図 3)は搭載し、これらの観測装置が協調して観測することでミッション科学課題に取り組む。

表 1. SOLAR-C ミッションサマリー

科学目的	宇宙環境を支配する太陽活動大気の起源、宇宙磁気プラズマの普遍的素過程の物理の究明 a) 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明 b) 太陽面爆発現象の発現機構の究明とその発生を予測するための知見の獲得 c) 地球気候変動に影響を与える太陽放射スペクトルの変動機構の解明
目的達成の観測戦略	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光球・彩層からコロナを貫く磁場の 3 次元構造およびその時間発展を計測</li> <li>• 光球からコロナまでの大気の基本構造を空間的・時間的に分解</li> <li>• すべての温度領域 (<math>4 \times 10^3 - 2 \times 10^7</math> K) を隙間なく観測</li> <li>• プラズマ大気中で発生するダイナミクスのプラズマ物理診断 (温度・密度・速度等)</li> </ul>
主な観測装置	光学磁場診断望遠鏡 (SUVIT) 0.1~0.2 秒角の高い解像度で光球と彩層の精密磁場観測 高感度紫外線分光望遠鏡 (EUVST) 彩層・遷移層からコロナ・フレアプラズマの速度・温度・密度を分光測定 高解像度コロナ撮像望遠鏡 (HCI) 0.3 秒角の解像度でコロナの広視野高頻度撮像観測

## 研究領域内での位置づけ

太陽外層大気は、磁場の基本構造によって一つに結合されたシステムであり、主にガス圧に制御される光球・彩層の磁場観測と同時に、磁気圧が卓越する彩層～遷移層～コロナも観測することで、複雑な磁気プラズマの結合システムの中でのエネルギー・物質の輸送や散逸の全貌がはじめて理解可能となる。コロナや彩層の加熱や、フレアをはじめとした活動的な磁気流体現象の発生は、太陽圏の磁気的環境をコントロールしている。「ひので」等の観測によって、太陽外層大気を構成する基本構造は光球表面で 0.1”、上空のコロナで 0.3”程度の幅を持った磁気構造であることが分かってきた。コロナ加熱や磁気流体現象を磁場の基本構造レベルで理解する取り組みは、解像できない他の天体での活動性を理解する上でも重要である。SOLAR-C は、磁場の基本構造を光球表面・彩層からコロナまで空間的に分解し、その基本構造レベルでエネルギー・物質の輸送や散逸過程を観測的に調べる。磁気エネルギーの輸送・散逸を観測するのに行う彩層磁場の診断には、 $10^{-4}$  レベルの高精度の偏光測光が要求される。このように、基本構造を分解してその動的な時間発展を長時間にわたって追跡し、また光球・彩層磁場の 3 次元構造を捉えるには、宇宙に設置した 1m 超の光学望遠鏡でのみ実現可能となる。さらに、遷移層～コロナのプラズマ診断には、紫外域から軟 X 線域の分光撮像観測が必要であり、宇宙からの観測が担うものである。

一方、フレアや CME といった太陽面爆発現象の発生は、太陽圏の環境(宇宙天気)に多大な影響を与えるため、その発現機構を理解し、その発生を予測することは社会的な要請でもある。フレアの発生では磁気リコネクションが中心で働く物理機構として考えられているが、磁気リコネクションがいつどこでどのように開始するかは殆ど理解できていない。フレア発生に至るまでの一般的描像としては、磁気浮上活動や光球面運動によってコロナ磁場に自由エネルギーが蓄積され、何らかの過程を経て磁場構造が不安定化して爆発や噴出に至る。現在「ひので」等の観測を用いて、磁気中性線近傍に現れる微小磁気構造の一つが爆発を発現するトリガーとしての役割を果たす可能性が調べられつつあるが、SOLAR-C は光球のみならず彩層の磁場を精密に計測し、かつすべての温度領域での速度診断をすることで、今まで捉えきれていなかったトリガーに至る過程、さらにトリガーから構造不安定化の過程の物理的理解を目指す。この目的のためには、SOLAR-C の実現は、2023-2025 年ころにピークを迎える太陽活動極大期をカバーすることが不可欠である。

地球の気候を変動させる要因の一つに太陽の磁気活動がある。磁気活動は約 11 年の周期変動やさらに長期の変動の存在が知られている。磁気活動の周期変動と共に、太陽の総放射量も変動している。特に、紫外域(200-300nm)では 11 年周期中に 5-10%と大きな変動を示すが、太陽表面に分布する磁場に応じて変動する放射スペクトルをモデル化できていない。微細な磁場の基本構造をとらえることができる SOLAR-C は紫外域観測を実現することで放射スペクトルのモデル構築に取り組むことができる。太陽紫外線は地球の中層大気に影響を与える波長であり、それと結合する地球気候への影響の研究への発展も期待される。また、このような長期変動の根源は、太陽内部で働くダイナモ機

構にある。現在、この太陽周期変動が特異性を示し始めている。今サイクル(サイクル 24)では、2008-2009 年の極小期の黒点数が 100 年ぶりに少なく、2012-2014 年ころに迎えた極大期の黒点数も低下し、過去 5 サイクルの長期的変動とは明らかに異なる振る舞いをしている (図 4)。次サイクル(サイクル 25)は、さらに減少するのか増加するのかは予想がつかない。**特異性を示す太陽周期活動に関するデータは、人類にとって無比の重要な観測データ**となる。特に、ダイナモ機構において種磁場と考えられる極域磁場の情報が、長期変動の増減の理解に向けては必須である。地球からはほぼ真横からしか見ることができない極域における磁場を知るには、「ひので」や SOLAR-C 並みの空間分解能や磁場測定精度が不可欠である。極域磁場は次に続くサイクルに向けて極大期に極性が反転する。次サイクルの極大ピークと予想される 2023-2025 年ころに極域磁場の反転過程を定量的に計測するには、2020 年代前半に SOLAR-C の実現がなくては観測できない。

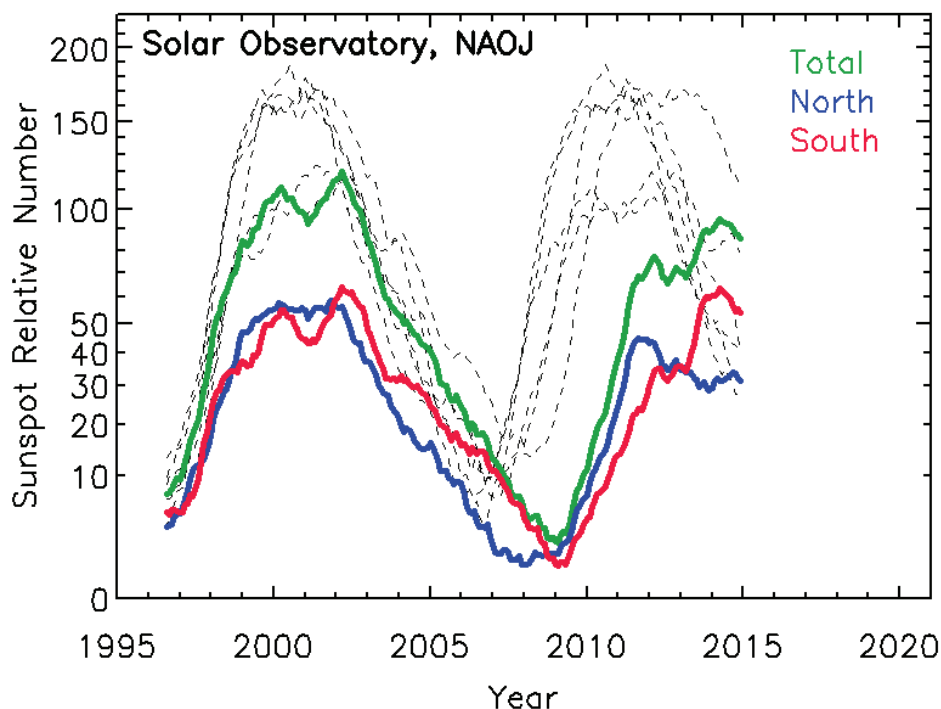


図 4. 黒点相対数の変動(13 カ月移動平均)。緑線は最近 1 サイクルにおける変動、青線と赤線は最近 1 サイクルにおける北半球(青)と南半球(赤)の変動、点線(黒)は過去の 5 サイクルにおける変動を極小で始点を揃えてプロットしたもの (国立天文台太陽観測所)。

### サイエンス成果が与える波及効果

この計画による科学成果が与える波及効果としては、大きく分けて下記の 2 つが期待される。

- ① 宇宙の全バリオン物質の殆どがプラズマであり、フレアやジェットなど磁気プラズマのダイナミクスや加熱が様々な天体や宇宙空間で普遍的に起きている。唯一空間的・時間的に詳細に診断できる太陽プラズマで起きるダイナミクスや加熱の物理素過程の解明によって、**宇宙に普遍的に存在する磁気プラズマの理解**につながる。

- ② 宇宙空間の環境(宇宙天気)を的確に予報することが増々社会的に要請されてくる。黒点の観測指標等を用いた経験則に基づいて現在実施されているフレア発生予報を太陽面爆発の物理的予測モデルに基づいた予報に転換できる道が、SOLAR-Cの研究によって開けることが期待される。

## 主要キー技術

- 太陽観測用高精度宇宙望遠鏡技術

磁気構造の基本要素を探る超高解像度(<0.1")で彩層磁場計測を可能にする高精度の光学磁場診断望遠鏡(SUVIT、口径約 1.4m)は、「ひので」望遠鏡開発で培った技術を発展させる形で国内開発する。2009 年から戦略的研究開発経費の支援のもと国内メーカー等と技術的成立性やそのための望遠鏡基本設計、要素技術の研究開発を進め、戦略的中型ミッション公募に応募できるレベルの技術検討が実施済みである。

高解像かつ高精度の偏光観測を行う SOLAR-C 望遠鏡の性能は、他では実現できていない。表 2 は解像度の観点からまとめた比較表である。また、太陽を直視する姿勢を続けながら高解像度の高精度観測を可能にするために、高度な構造・熱・光学設計の他、可動鏡や焦点調節機構等の精密機構技術や衛星システムレベルの擾乱管理技術の組み合わせで実現しており、「ひので」で培った日本独自の難易度の高い技術である。

表 2. 世界の類似ミッションとの比較

装置名	最高解像度	緒言
SOLAR-C/SUVIT	0.07"	口径 1.4m, 280-1100nm
Sunrise (気球実験、欧米)	0.13"	2009/2013 年、口径 1m、225-854nm, 観測期間 5 日
Hinode/SOT	0.2"	2006 年打上げ、口径 50cm, 380-680nm
IRIS (NASA)	0.33"	2013 年打上げ、口径 20cm, 130-280nm
SDO/HMI (NASA)	1"	2010 年打上げ、口径 14cm, 617nm

## 準備・検討体制

2007 年 12 月に SOLAR-C ワーキンググループが理学委員会のもとに設置された。ワーキンググループは、国立天文台、宇宙科学研究所、京都大学、名古屋大学、東京大学を主体とした太陽関連の研究者が広く参加し、JAXA の工学研究者・専門家の支援を受けて活動を行ってきている。また、太陽研連が主催するシンポジウム等の機会を通じて、太陽研究コミュニティ全体で SOLAR-C 計画の議論を重ね、コミュニティー丸となって、SOLAR-C 計画の精鋭化のための議論を繰り返してきている。

SOLAR-C は JAXA が主導する国際ミッションとして検討している。海外での研究集会や関係者との協議を通じて、SOLAR-C 計画の国際的周知に努め、欧米太陽コミュニティの期待は極めて高い。搭載される観測装置のうち、光学磁場診断望遠鏡に取り付けられる一部の焦点観測装置、高感度紫外線分光望遠鏡、高解像度コロナ撮像望遠鏡は、米国・欧州の太陽関連研究コミュニティ・宇宙機関か



らの寄与を想定している。2008年に欧米研究者も多数参加した国際サブワーキンググループを複数立ち上げ、ミッション実現の鍵となる科学的項目、および搭載観測装置の仕様に関して集中検討を行った。結果の討議のために、国際 SOLAR-C Science Definition Meeting を国内外で年1回以上の頻度で開催してきた。

NASA 本部と ESA 本部とは協力体制の対話を 2009 年から始めている。NASA 本部とは、合同検討チーム(JAXA-NASA Joint Solar-C Science Assessment Committee : JSSAC)を 2010年に設置し、SOLAR-C A/B 案(現在 B 案=SOLAR-C, A 案=SOLAR-D)の科学的評価を行った。米国 NRC が 2012年に公表した Decadal Survey for Solar and Heliophysics レポートでは、SOLAR-C は極めて高く評価され、「最も信頼できるパートナーである JAXA との国際協力によってぜひとも実現すべきミッション」と報告された。今後早期に科学技術検討チーム(STDT)が設立され、具体的検討が始まることを期待している。一方、ESA との協力については、2010年の Cosmic Vision 提案機会に、欧州・米国・日本の研究者が参加した LEMUR コンソーシアム(leader: 独マックスプランク太陽圏研究所 Teriaca 博士)が SOLAR-C への欧州寄与として高感度紫外分光望遠鏡を Missions of Opportunity として提案し、高い評価を得た。さらに、2014年8月に発出された Cosmic Vision M4 に対して、欧州分担寄与をさらに拡大させた EPIC (European Participation in the Solar-C mission)提案書(leader: 独マックスプランク太陽圏研究所 Solanki 所長)を 2015年1月に ESA に提出した。

## 準備状況

技術的準備は、理学委員会戦略的開発研究費の支援のもと 2009年から始め、大型光学望遠鏡(口径~1.4m)や紫外線・X線観測装置の技術的実現性検討の開発研究を立ち上げ、システム・望遠鏡の概念設計検討や技術課題の明確化をメーカーおよび JAXA 支援のもと進めてきた。「ひので」で培った宇宙望遠鏡技術の財産を有効活用する方針で概念検討を進める一方で、SOLAR-C で新たに必要となる要素技術は優先順位を決めて開発研究を進めてきている。重点的に研究開発を進めてきた要素技術としては、精密な偏光観測に必要な波長板を光路中で連続回転させる高信頼性回転駆動機構や焦点位置を調節するリニア直動機構、光ファイバを用いて2次元視野の同時分光を可能にして磁気流体现象のダイナミクスを高時間分解能でとらえる面分光部品、紫外域から近赤外線幅広い波長域をカバーする反射鏡面コーティング、紫外線域の性能劣化を抑える光学汚染防護技術などがあり、SOLAR-C 提案前から開発すべき要素技術の開発を着実に進めてきている。また、戦略的開発研究費以外にも技術的および科学的検討のために外部資金獲得にも努めている(表3)。

表 3. 検討のための外部資金獲得状況

種目	研究課題名	代表者/期間/総額	開発内容・状況
科研費 基盤 (A)	偏光分光スペクトルによる新しい プラズマ診断手法を用いた太陽活 動現象の研究	一本 H22-25 3510 万円	汎用偏光分光観測装置を地上太陽望遠鏡に設置、 SOLAR-C で行う彩層磁場計測の手法について検 討
科研費 基盤 (C)	太陽大気での磁気リコネクション 現象におけるエネルギー輸送の観 測的研究	清水 H23-26 533 万円	光学磁場診断望遠鏡の像安定化のためのコリレ ーション・トラッカ用超高速 CMOS カメラを試 作、原理・性能を評価
国立天文 台 共同開 発研究	狭帯域チューナブルフィルタによ る高速撮像分光装置の開発	一本 H26 350 万円	光学磁場診断望遠鏡に搭載する狭帯域フィルタ ー撮像装置の実験モデルを製作し、科学性能を検 証
宇宙研 基礎開発	衛星搭載用可視・近赤外狭帯域チュ ーナブルフィルタの基礎開発	一本 H23-24 850 万円	光学磁場診断望遠鏡に搭載する狭帯域フィルタ ーの実験モデルを製作し、基礎技術を獲得
科研費 若手 (A)	激しい時間変動をともなう太陽次 期流体現象の探査に向けた高感度 分光装置の開発	勝川 H25-27 1910 万円	光学磁場診断望遠鏡で使用予定の近赤外線セン サの性能評価、試作開発による面分光装置の科学 性能の評価
科研費 挑戦的 萌芽	太陽観測に向けた超高精度 X 線ミ ラーの開発	坂尾 H24-25 290 万円	X 線望遠鏡案として検討してきた斜入射鏡のミ ラー精密研磨の開発
科研費 基盤 (A)	太陽コロナダイナミクスを解明す るナノ加工・計測技術による超高精 度 X 線イメージング	坂尾 H26-29 2930 万円	斜入射鏡のミラー保持検討。併せて、光学磁場診 断望遠鏡の焦点観測装置内の光学素子の精密保 持方法に知見を与える。
科研費 基盤 (B)	水素ライマン $\alpha$ 線による太陽彩層 磁場観測のための分光装置用回折 格子の開発	原 H23-25 1110 万円	SOLAR-C にて UV 域偏光分光観測の実現性を見 極めるため、UV 域で使える凹面回折格子を国内 開発し、その性能評価用 UV 偏光光源を開発
科研費 基盤 (B)	高精度偏光観測で初めてえられる、 量子論的ハンレ効果を用いた太陽 彩層磁場構造の研究	鹿野 H24-27 1860 万円	CLASP 開発実験が主用途であるが、SOLAR-C における UV 偏光観測・磁場診断を見据えた偏光 素子・分光器技術の開発を実施。
三菱財団 自然科学 研究助成	太陽遷移層・彩層磁場の測定のため の日米欧共同ロケット実験 CLASP の推進	鹿野 H25 500 万円	CLASP 開発の中で、SOLAR-C 光学磁場診断望 遠鏡の分光器で用いる非球面鏡に適合できる反 射鏡のマウント手法を開発。
JSPS 先端 研究拠点 事業	現場の自己組織化問題の解明 (コーディネータ：東大・小野)	清水・原 H24-26 1900 万円	プラズマ物理学との連携。磁気流体現象のプラズ マ挙動をマクロ・マイクロ両面から検討。SOLAR-C に関わる科学検討に関する海外渡航を支援。
科研費 基盤 (B)	太陽フレア・トリガ機構の解明とそ の発生予測	草野 H23-27 1340 万円	SOLAR-C で取り組む科学課題(フレア予測)に関 する検討
科研費 基盤 (S)	太陽コロナ・彩層加熱現象に迫る一 ひので・IRIS・CLASP から SOLAR-C へ	常田 H25-29 15090 万円	IRIS の科学研究と CLASP の開発実験が主用途。 SOLAR-C 開発を担う若手研究者の育成。

※ 他に、H27 科研費公募に対して、新領域、基盤(S)、基盤(A)、基盤(B)等 6 件審査中である。

### 3. 太陽極域観測ミッション SOLAR-D 計画

#### 目的と概要

黄道面から離れ、人類がまだ目にしたことのない太陽極域の観測を世界に先駆けて実現し、極域の  
内部診断により、太陽周期活動を駆動するダイナモ機構の解明を目指すことがこのミッション

「SOLAR-D」の目的である。ダイナモの解明は、太陽物理学最大の謎でその大気活動全般を司る磁場の起源に迫るものである。これは一般に高エネルギー天体活動現象のエネルギー源に迫る課題で、太陽のみならず天体物理学の未解明重要問題である。

極域からの観測は、ダイナモの構成要素である対流層内部のさまざまな流れの日震学探査に大きな利点となる。また、極域磁場やコロナ活動を観測することが、太陽周期の理解を検証するカギとなる。この要請から、極域の磁場・速度場を観測する可視光望遠鏡、コロナを観測する極端紫外線・X線撮像(分光)装置、太陽総放射を精密測定する太陽放射計を搭載し、軌道半径 1AU 程度、傾斜角 40 度以上の太陽周回軌道に機体を投入する (表 4)。

表 4. SOLAR-D ミッションサマリー

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) 極域の日震学手法による内部診断 (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 3) 太陽放射計 太陽総放射量の精密測定とその活動周期依存性
飛翔体軌道	軌道半径 1AU (TBR)、太陽赤道面から 40 度以上の太陽周回軌道

### 研究領域内での位置づけ

「SOLAR-D」ミッションは、従来「SOLAR-C プラン A」と呼ばれていたものであり、その重要性・実現性についてプラン B (現在の「SOLAR-C」) と徹底的な比較検討を重ねてきた。活動周期・磁場の起源は、プラン B がめざす大気加熱問題と同等に重要な太陽物理学課題であり、その決定までの検討は難航した。結果、技術的な成熟度、特に黄道脱出軌道への投入について実績を積む必要性から、SOLAR-C の次に実現するのが妥当との結論に至ったものである。一方、ミッションの科学的重要性・画期性・分野内外からの期待度などは遜色なく、研究領域コミュニティでもぜひとも実現するべきと考えている。

国際的には、ESA の Solar Orbiter (2017 年予定) が、水星近日点に近づきつつ黄道面脱出を試みる予定である。ノミナル運用で 25 度、延長運用で 34 度の軌道傾斜角となり、日震学観測も試みることになっている。しかし、実際の観測に使える継続時間窓は 1 週間ほどで、この長さが直接信号ノイズ比に効く日震学には必ずしも向いていない。また飛翔体からのダウンリンクデータ量にも制限があり、パスファインダー的な位置づけと考えるのが妥当である。我々は Solar Orbiter ミッションによる研究に参加し、またその成果を踏まえつつ SOLAR-D による極域からの本格的観測について戦略を立てる。この研究参加により、技術的・科学的課題の詳細検討が可能になるとともに人材育成を図ることが可能になると考える。

## サイエンス成果が与えるインパクト

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

### ● 太陽周期活動とダイナモ機構

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

さらに、ダイナモの主な舞台は太陽内部でも対流層の底付近であると考えられている。局所の日震学を使った対流層深部の局所的構造探査にはまだ誰も成功していない。本ミッションの高緯度からの観測と、黄道面内からの観測とを組み合わせることで、対流層深部を通るpモード波の（長距離）伝播を観測し、太陽対流層深部の流速分布を測定することを試みる。

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

### ● 極域における磁気活動

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

### ● 極域からみた「太陽総放射」

太陽放射に関しては、黄道面内の観測から周期活動にともなって0.1%程度の変動があることが知られている。現在のところ磁場による対流熱輸送の遮蔽(黒点の寄与)、白斑や輝点の寄与などから理解されているが、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、黄道面を離れるSOLAR-D極域ミッションによって初めて明らかにすることができる。

## 主要キー技術

本ミッションは、それを実現する探査機(図 5)に必要となる工学技術においてもチャレンジな側面を持つ。検討にあたっては、特に以下の点が成否を左右する重要な技術的課題であると認識する。

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

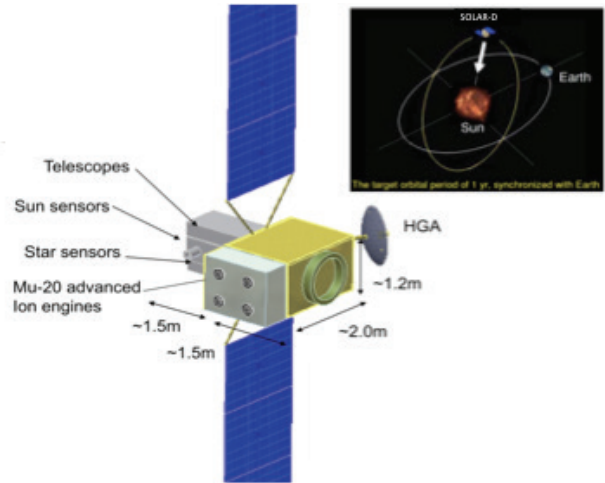


図 5. SOLAR-D 探査機外観案

## 準備・検討体制

「SOLAR-C プラン A」として策定した際に、科学面・技術面双方からさまざまに検討した。その際に工学分野研究者、特に軌道投入技術の研究者と概念検討を行った。また科学面についても国際的な枠組みで世界トップレベルのダイナモ・日震学研究者たちと検討しその交流は今も続いている。SOLAR-D の大きな柱である日震学研究について、人材育成と国際的協力関係構築とを進めることが重要な課題であると認識していて、SOLAR-C ミッションと同時並行で具体的な方策をたてる。

## 準備状況

太陽物理学コミュニティとしては、SOLAR-C の次に実施するとの位置づけであり、主にダイナモ理論面について数値シミュレーションによる研究に注力している。技術的準備状況については、イオン推進エンジンの開発状況などにつき工学分野での進展を注視している。特に、宇宙研の小型科学衛星 3 号機について提案中の DESTINY ミッションにより、SOLAR-D が必要とする新宇宙探査技術の重要な部分とその目的とされている。

## 4. 関連ミッション間の考え方・戦略

現在軌道上で運用を行っている太陽観測衛星「ひので」は、 $0.2''\text{-}0.3''$ の高解像度で光球磁場の高精度計測やコロナの極紫外分光・軟 X 線撮像観測を行い、他の衛星等では得られない貴重な観測データを取得している。国内外問わず、太陽・太陽圏領域の研究者によって広く利用され、太陽研究の中核

天文台として運用継続は重要である。太陽活動サイクルを超え、さらに次期観測衛星 SOLAR-C の飛翔が実現するまで観測運用を継続することを太陽研連として切望する。

将来のミッションとしては、最優先事項として、次期観測衛星「SOLAR-C」を 2020 年代前半に実現し、それに引き続いて「SOLAR-D」のミッションを速やかに策定し、早期実現を目指す戦略を取る。「SOLAR-D」として構想されている現状案は、黄道面を脱出し太陽極域観測を行う探査機であり、それに必要となる工学技術の実証を行う小型衛星計画(DESTINY)などの取り組みに注目し支持する。

また、2015 年に国際観測ロケット実験 CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter) の初飛翔を予定して準備が進められている。CLASP は太陽の彩層・遷移層 から放たれるライマン $\alpha$ 線を偏光分光観測し、彩層・遷移層の磁場を直接計測することを目的としている。CLASP を始め観測ロケット等の飛翔機会を用いた実験は、全く新しい観測手法や技術の検証を行う貴重な機会であり、将来の新しい太陽観測研究の方向性を開拓するパスファインダー的役割を担う。また、若手研究者が飛翔体に搭載する観測機器開発の経験を積む貴重な機会であり、積極的な推進を太陽研連として支援する。

## 5. 関連する隣接領域・地上観測との間の考え方・戦略

太陽研連として最優先すべき大型計画は、「SOLAR-C」計画である。以下に「SOLAR-C」と太陽・隣接領域との間での考え方を述べる。

高解像度での光球・彩層磁場の精密観測を行う「SOLAR-C」は、2020 年代前半に海外で稼働を始める大型地上望遠鏡とは相補的な役割を担い、宇宙からの観測でしか実現できない観測を行う (5.1 節)。国内の地上観測は、太陽と太陽圏を包括的にとらえ、大学間連携の枠組みの構築による「次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測」を計画している (5.2 節)。2020 年ごろまでに順次その整備を行い、SOLAR-C との連携観測を実現することで、SOLAR-C の科学成果を格段に高めることを目指している。また、SOLAR-C をはじめとする新たな観測ミッションと連携して、そのデータの科学的価値を最大化するために必要な理論やモデリング研究は重要である。理論シミュレーション研究者は、SOLAR-C などで必要となる理論モデリング研究を計画的に進める (5.3 節)。また、太陽研究は、宇宙天気や太陽系科学など隣接する分野との連携を積極的に行うことで学際的研究に発展させることも重要である (5.4 節)。

### 5.1. 高解像度地上観測

SOLAR-C が行う高解像度・高精度観測のうち、光学磁場診断望遠鏡に関して地上観測との関係、特に宇宙からできない観測の戦略について述べる。地上天文台の大型太陽望遠鏡としては、

現在稼働中の NST (1.6m 径, 米国)と GREGOR (1.5m 径, 独)、SOLAR-C が飛翔する 2020 年代前半に稼働を始める DKIST(4m 径, 米国)等がある。これらの地上望遠鏡に対して、SOLAR-C 望遠鏡しか実現できない優れた観測性能として、1) 広い観測視野に渡って一様でかつ安定した点像分布関数(PSF)、2) 常時実現される回折限界像性能、3) 最高解像度で実現される高精度偏光計測、がある。地上望遠鏡は、補償光学技術を持って 10 秒角程度の視野しか回折限界性能は実現できない。太陽活動ダイナミクスの研究では、活動領域(サイズ 100"~200")をカバーする広い視野が不可欠であり、広観測視野にわたる最高解像度性能は、SOLAR-C でしか実現できない。さらに、 $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$  の高精度の偏光観測を最高解像度で実現することは、地上ではシーイングのため殆ど不可能である。磁気結合システムとして太陽プラズマ大気をシームレスにとらえて、そこで起きるエネルギーや物質の輸送・散逸の全貌を観測するには、可視・近赤外域に加えて、宇宙からのみ観測可能な紫外・軟 X 線での同時分光・撮像観測が必須であり、それは SOLAR-C での実現が唯一となる。以上から、日本の研究コミュニティでは、全体的に優位性をもつ宇宙からの高解像度・高精度観測の実現によって、SOLAR-C が行う科学目的を追求することを、最優先順位にして実現を目指している。

## 5. 2. 次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測計画

### 計画の目的

太陽圏は太陽が放射する光と磁化されたプラズマや非熱的粒子で満たされており、その環境は太陽の活動に支配されている。太陽から地球に至るこの広大な空間は、対象領域に応じて光や電波による異なる施設で観測が進められているが、太陽活動の地球への影響を理解するためには、これらの観測を有機的に結合することが重要である。本計画は太陽・太陽圏の短期的変動（宇宙天気）と長期的変動（宇宙気候）を包括的に捉え、そのメカニズムを理解すると共に、人間社会と地球環境への影響を予測するための科学的知見を得ることを目的とした地上観測ネットワークを構築する(図 6)。即ち、可視・赤外・電波の既存地上観測装置群を活用し、大学及び関連研究機関の連携によって 2018 年ころまでに新たな機能を整備、データの共有化を図ることで、太陽活動領域から 1 天文単位の空間スケール、および 1 秒から数十年の時間スケールを包含する太陽・太陽圏観測網を実現する。SOLAR-C による超高解像度観測と連携することで、SOLAR-C の科学成果を格段に高めるとともに、SOLAR-C の実現にとって重要な観測技術の地上検証と人材育成を図ることも目的とする。

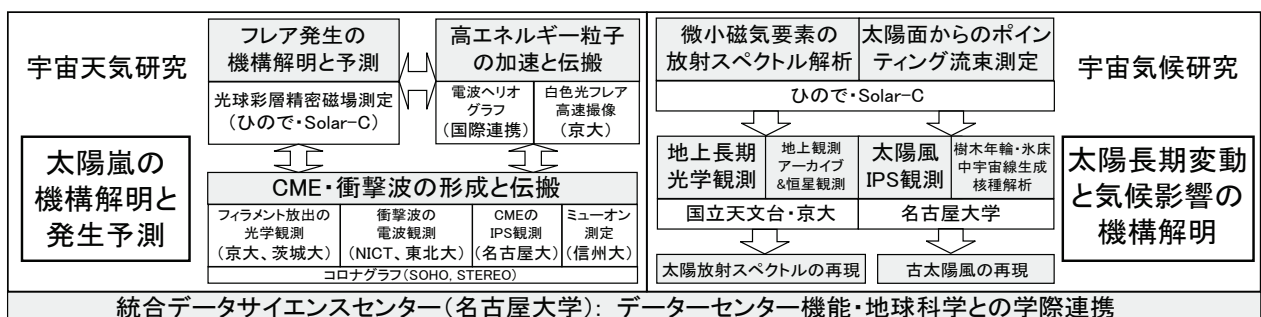


図 6. 次世代太陽圏環境変動ネットワークの研究課題と連携体制

## 計画の概要

本計画は以下の3グループの有機的な協力によって実施される。

### 1) 太陽地上光学観測ネットワーク：

京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡偏光分光装置の新設による活動領域フィラメントの磁場観測、同太陽磁場活動望遠鏡(SMART)の改修によるフィラメント放出速度の全面観測、茨城大学とNICTの協力による $H\alpha$ 多波長自動観測、国立天文台太陽磁場観測システムの新設による太陽磁場長期変動観測を、技術共有と人的交流を通じて相互に協力しながら進めることにより、フィラメント放出の連続精密観測を実現し、宇宙天気擾乱の原因であるCMEの初期条件を正確に捉える体制を整える。また、彩層活動と黒点活動の関係を解明し、太陽活動の長期変動とその環境影響のメカニズムを明らかにするため、太陽全面磁場及び彩層輝度の長期観測を継続して実施できる体制を整える。

### 2) 太陽電波・宇宙線観測ネットワーク：

太陽フレアからCMEの形成・伝搬までの全過程を異なる周波数で捉える電波観測ネットワークを組織の枠を超えて構築する。このため、太陽フレアによる高エネルギー粒子生成過程を国立天文台野辺山太陽電波ヘリオグラフ(国際コンソーシアムICCONが運用)にて、フィラメント放出とCMEに伴うコロナ衝撃波の形成をNICT新太陽電波バースト監視システム(70MHz-9GHz)、東北大学太陽電波望遠鏡AMATERAS(既存装置、50MHz-500MHz)及びAMATERAS-II(15MHz-150MHz)にて連続追跡する。さらに、新phased arrayアンテナ技術を導入した名古屋大学次世代IPS観測システムの実証機を完成させて惑星間CMEの追尾性能を格段に向上させる。また、信州大学の次世代グローバルミューオン計測ネットワークを拡張し、地球周辺に接近する磁気雲を宇宙線観測によって事前に捉える体制を整える。

### 3) 統合データサイエンスセンター：

名古屋大学太陽地球環境研究所(STE研)、国立天文台、宇宙科学研究所が協力し、天文学と地球科学の学際連携を目指した新研究センターをSTE研に設立する。同センターは様々な太陽地球系観測衛星及び地上観測と共に、太陽圏ネットワーク観測の統合データセンターの役割を果たす。特に、SOLAR-Cサイエンスセンター等として衛星データの学際的科学利用を推進する母体としての役割を果たす。

## SOLAR-C との連携

本プロジェクトは以下の点でSOLAR-Cを支援するものである。

### a) SOLAR-Cのサイエンス強化

「ひので」とSOLAR-Cによるフレア爆発の高解像観測と、本計画による広視野フィラメント放出およびコロナを伝播する大規模擾乱の観測を接続することで、フレアから地球に到達する擾乱を追跡することができ、SOLAR-Cの科学課題の1つ、「太陽面爆発現象の発現機構の究明とその発生を予



測」を発展させ、宇宙天気予報の真の実用化を図ることができる。SOLAR-Cによる局所的な磁場と紫外線放射の精密観測は、本計画による地上からの太陽全面磁場の長期観測と合わせることにより太陽全放射スペクトルの予測モデルを構築することを可能とし、SOLAR-Cの科学課題の1つ「地球気候変動に影響する太陽放射スペクトルの変動機構の解明」による宇宙気候研究を各段に強化することができる。

#### b) SOLAR-C 実現のための技術開発・人材育成

飛騨天文台で行うフィラメント磁場の観測では SOLAR-C に搭載する2次元偏光分光装置の技術実証モデルを京都大学、国立天文台、宇宙科学研究所が協力して製作し、ドームレス太陽望遠鏡を用いた実際の太陽観測により、その科学性能の検証をおこなう。又、SOLAR-Cで採用するスペクトルラインの偏光分光観測を実施し、得られた偏光データから偏光輻射輸送理論を用いて彩層磁場を導出するためのアルゴリズムの開発を行う。これらはいずれも SOLAR-C の開発と科学成果の創出を確固たるものにする上で極めて重要である。さらにこれらの活動を名古屋大学、東京大学をはじめとする全国の関連大学と協力して進めることにより、SOLAR-C の開発や解析研究を推進してリードする若手研究者の育成を組織的に行う。

### 5.3. 理論シミュレーション研究計画

SOLAR-Cをはじめとする新たな観測ミッションの科学的価値を最大化するためには、先端的な理論研究と高度な数値計算に基づくシミュレーション（モデリング）研究を戦略的に推進する。特に、SOLAR-C 及び SOLAR-D 衛星計画と連携して、下記の研究を進めることで、太陽・太陽圏研究の飛躍的な発展を実現する。

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

#### 輻射磁気流体力学による彩層モデルの開発

彩層プラズマダイナミクスの理解は太陽大気の構造形成機構を理解する上で最も重要な課題であり、SOLAR-C の基本目的の一つとなっている。その課題解決のために太陽彩層におけるプラズマ・磁場・輻射が織りなす物理現象を数値シミュレーションによって正確に再現することが必要である。このため、非局所熱力学平衡状態の輻射輸送を含む多次元磁気流体シミュレーションコードを構築し、(1) 彩層中の波動生成・伝播・熱化過程、(2) スピキュールと呼ばれるジェット現象、(3) 彩層加熱の解明に挑む。このような輻射磁気流体コードの開発は国内では初めてであり、世界的にみてもほとんどない。このモデルは、SOLAR-C の観測データから彩層のプラズマ状態とエネルギー流束を定量的

に把握するために決定的に重要な役割を果たす。さらに、太陽のみならず様々な恒星の大気構造の多様性と共通性の理解にも貢献することができる。また、星形成領域における原始惑星系円盤など部分電離プラズマの共通物理の理解にも貢献する。

### 3次元コロナ磁場モデルの開発

太陽コロナは磁気エネルギーがプラズマの熱エネルギーに対して優勢な低 $\beta$ プラズマ<sup>1</sup>で満たされているため、そのダイナミクスを理解するには、3次元コロナ磁場の構造を知る必要がある。「ひので」による精密な光球面ベクトル磁場観測以来、この3次元コロナ磁場を太陽光球面磁場の観測データからフォース・フリー ( $\beta=0$ ) 近似を使って再構成する試みが進められている。しかし、光球は高 $\beta$ 領域であることからこのフォース・フリー磁場モデルの信頼性は依然低い。それ故、光球に比べて $\beta$ 値が低い彩層におけるベクトル磁場を観測することは、コロナ磁場の3次元構造を知る上で有用である。ただし、活動性の高い彩層での磁場観測を利用した3次元磁場モデルを開発するためには、今後いくつかの課題を解決する必要がある。それ故、SOLAR-Cの打ち上げまでに3次元コロナ磁場モデルを高度化し、彩層磁場データを利用することで一般的な平衡磁場の境界値問題を解く方法論を開発する。このため、輻射磁気流体コードを用いたデータ同化手法を駆使した開発を組織的に行い、SOLAR-Cの打ち上げ後に実際の彩層磁場データを用いた解析を実現する。

### 太陽面爆発モデルと予測シミュレーションの開発

太陽フレアとコロナ質量放出 (CME) として現れる太陽面爆発の発生機構を解明し、これを予測する試みは太陽研究の重要課題であり、SOLAR-Cの基本目的の一つでもある。この目的達成のため、太陽光球面と彩層の磁場変動データを電磁流体力学モデルに取り入れる動的同化手法の開発を進めさせ、SOLAR-Cが観測する磁場のデータを利用して太陽大気下層のプラズマダイナミクスを精密に捉える研究を進める。さらに、太陽面爆発を再現するのみならず、その発生と発展を予測するためのモデル研究を組織的に進める。これにより、観測データに基づく精密な3次元MHDシミュレーションを用いてフレア爆発とCMEを再現すると共に、その過程で見出された知見に基づいて最も効果的な爆発予測アルゴリズムを開発する。さらに、正確な太陽風モデルを開発し、精密な衛星観測と視野の広い地上観測のデータを包括的に取り入れることで、太陽面爆発からCMEに発展する過程を精密に捉える数値モデルを構築し、包括的な観測データと先進的なモデルを用いた正確な宇宙天気予測を試みる。

### 太陽ダイナモシミュレーションの開発

京及びポスト京コンピュータを利用し、(1)太陽内部でのダイナモ磁場生成と(2)内部磁束からの表面黒点の生成を再現するシミュレーションを実現する。これにより、太陽内部のダイナモが太陽風及びフレアを通して太陽惑星系圏へ影響をおよぼす過程を初めて連続的に解明する。この研究は、太陽黒

---

<sup>1</sup>  $\beta$  値は磁気圧に対するプラズマ圧の比を表す。

点周期活動の謎に迫ると共に、惑星や銀河などの天体磁場生成の理解にもつながる普遍的重要性をもつ。また、惑星環境に多大な影響を及ぼす「スーパーフレア」の原因でもある巨大黒点生成の機構解明にもつながる。

#### 5.4. 隣接する研究領域との連携

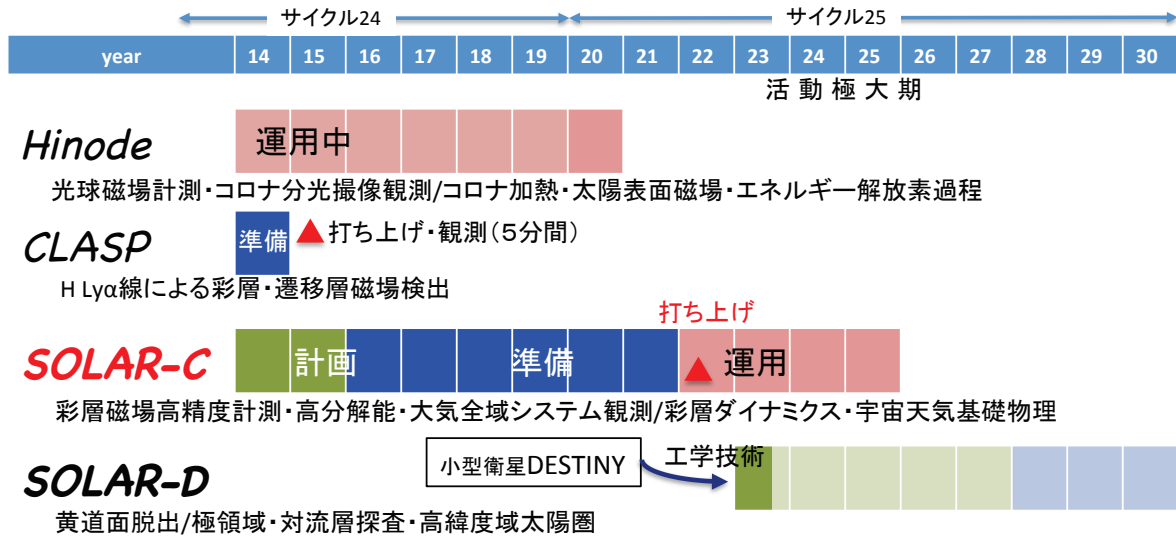
「SOLAR-C」が観測する太陽プラズマ大気は、コロナや太陽風を介して惑星間空間に繋がっており、太陽活動が地球と人間社会に与える影響や磁気圏・大気・表層環境など惑星圏への影響などと密接に関係している。太陽活動の地球への影響を学術的に理解し最終的に予測を目指す宇宙天気研究、磁気リコネクションや磁気プラズマの自己組織化に関する磁気圏や実験室プラズマ研究領域との連携は、「SOLAR-C」が目指す宇宙プラズマに普遍的に現れるプラズマ素過程の解明にとって、増々重要になると考えられる。地球電磁気・地球惑星圏学会等が主体となって実現を目指すミッション(直近では ERG 衛星)とも連携して、太陽研究が学際的研究へも発展できるように取り組む。

太陽にできるだけ近い距離でその場観測を中心に行う太陽圏・惑星探査ミッションとの連携は重要である。Solar Orbiter (ESA, 2017 年打上げ予定)は、2024 年(ノミナル観測期間の終わり)には傾斜角  $25^\circ$  の軌道にあり、「SOLAR-C」との連携観測の実現によって、プラズマ速度のステレオ観測やその場観測と合わせた太陽風研究など先進的な観測が初めて可能になる。また、2024 年には、日欧協力ミッション「BepiColombo」水星探査機が水星周回軌道に投入され地球型惑星である水星を探査する。JAXA が開発する水星磁気圏探査衛星(MMO)は、水星磁気圏の探査を主目的としてイオン・電子の 3 次元空間・速度分布を計測するが、周回軌道の位置によっては太陽で発生するフレアや太陽風をその場計測でき、「SOLAR-C」観測との連携は、太陽・太陽風と水星磁気圏を含む太陽系空間の新たな学際研究への展開が期待できる。さらには、Solar Probe Plus (NASA, 2018 年打上げ予定)は、2025 年に太陽最接近(9.8 太陽半径)を予定しており、「SOLAR-C」との連携観測は他にはない貴重なデータになると期待できる。

また、磁気リコネクションやプラズマ磁気対流乱流のような基礎物理過程を撮像し、間接的ではあるが物理量を観測できるほぼ唯一の天体としての太陽で得られた知見は、他天体でも起こるのであろう爆発現象や輸送過程のよき見本として天体物理学一般にも役立てることができると期待している。

## 6. 工程表 (ロードマップ)

図 7 に太陽・太陽圏分野のロードマップを示す。あわせて、海外で計画されている大型計画についても含めた。



**大学間連携**      機器更新含む

**地上観測:太陽圏環境変動ネットワーク** / 宇宙天気・宇宙気候

**海外の大型計画**      SOLAR ORBITER (ESA)      傾斜角 25°到達      延長期間

宇宙ミッション (1節、5.4節)      ▲ 打上

SOLAR PROBE+(NASA)      ▲ 打上      ▲ 太陽最接近

大口径地上望遠鏡 (1節、5.1節)      建設中

DKIST(米国)      計画中

EST(欧州)

図 7. 太陽研究領域ロードマップと海外動向