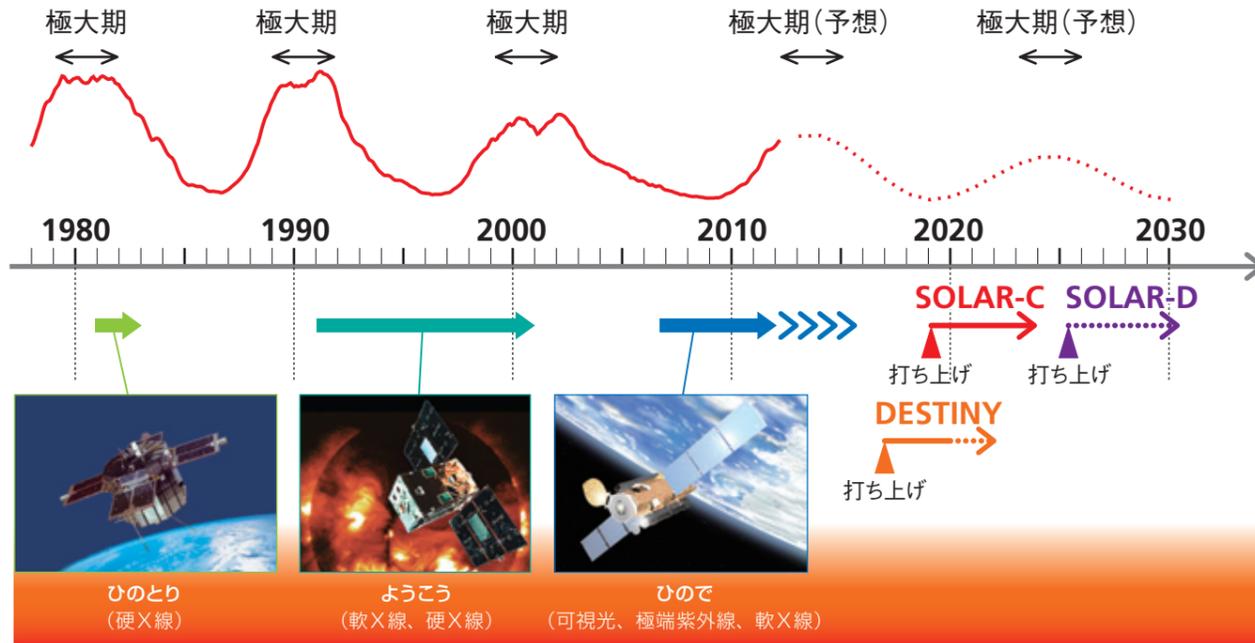


日本の太陽観測衛星とロードマップ

日本はこれまでに「ひのとり」、「ようこう」、「ひので」の3機の太陽観測衛星を打ち上げ、高い科学成果を挙げてきました。**SOLAR-C**は、4機目の太陽観測衛星で、2018年度の打ち上げを目指し検討を進めています。2012年現在では、太陽が近年にない異変を示し始めており、今後の数サイクルが太陽と地球環境の結びつきを理解する絶好のチャンスです。「ひので」による高空間分解能磁場観測により、ようやく静穏領域や極域を含めた太陽面全域の磁場の長期変動を調べられるようになります。

した。太陽の11年周期活動を理解する上で重要な太陽極域の磁場極性が反転する様子をとらえつつあります。「ひので」データとの連続性や前の活動周期との比較研究を行う観点からも、次の極小期から極大期への立ち上がりをとらえることが特に重要で、**SOLAR-C**の2010年代後半の実現が必須です。また、2020年台早期に**SOLAR-D**を実現するためには、大型イオンエンジン・薄膜軽量太陽電池パネルなどの実証試験を行う**DESTINY**(小型科学衛星3号機に提案予定)の実現も重要です。



SOLAR-C WGのこれまでの活動

SOLAR-Cワーキンググループでは、黄道面から離脱し極域の探査を行うA案、太陽の光球からコロナまでをシームレスかつ高い解像度で分光観測を行うB案を定義し、この2案を検討するために、国内太陽物理コミュニティを中心として、米国・欧州の主要研究者の協力も得てサブワーキンググループを組織しました。検討結果は中間報告書としてまとめられ、公開されています (http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/Documents/Interim_report2011.html)。NASAと合同でJoint Solar-C Science Assessment Committeeを組織し、中間報告書の記載を基に、①サイエンス、②衛星と搭載装置の技術的成熟性、③JAXAに要求する総開発経費の試算結果、④外国宇宙機関の幅広い参加、⑤主要観測装置1台相当の国内開発がで

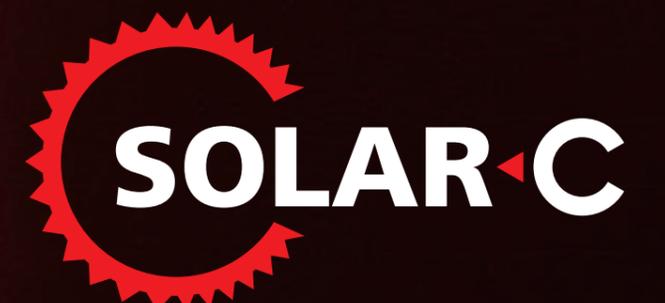
きるか?などの観点から選定を行い、B案をまず**SOLAR-C**として実現し、惑星間航行に開発要素のあるA案を**SOLAR-D**として実現することを決め、ここに至っています。サブワーキンググループの活動が発展し、欧州のグループが、**SOLAR-C**の EUV/FUV high throughput spectroscopic telescope (EUVS)をLEMURという名前でESAのCosmic Visionに2010年12月に提案しました。また、技術的成熟度を必要なレベルに引き上げるために、宇宙科学研究所の戦略的開発経費を利用して、大型望遠鏡及び焦点面装置、高頻度動作が可能な高信頼性回転駆動機構、X線光子計測型検出器、像安定度確保のための衛星システム、の検討・開発を進めています。

問い合わせ先: ISAS/JAXA SOLAR-C ワーキンググループ
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

国立天文台 SOLAR-C 検討室
〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

SOLAR-C ウェブサイト: <http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/>

次世代太陽観測衛星



背景図:「ひので」がとらえた、太陽の縁での彩層ジェット現象。吹き上がるジェットの中に非常に細かい筋構造がたくさん見えます。彩層やコロナでは、磁場の影響でこのような激しい活動現象が繰り返し起きています。

「ひので」から SOLAR-C へ

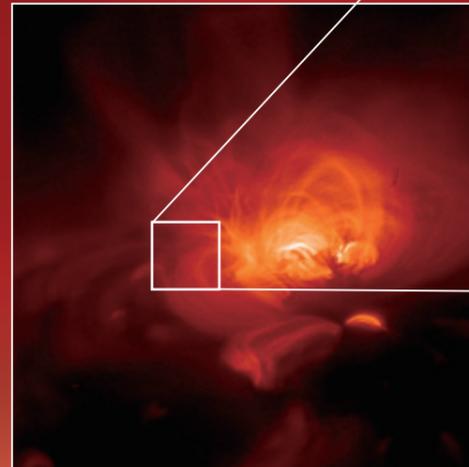
彩層の磁場観測とコロナの高解像度観測により

太陽の磁気活動の全貌を明らかにする

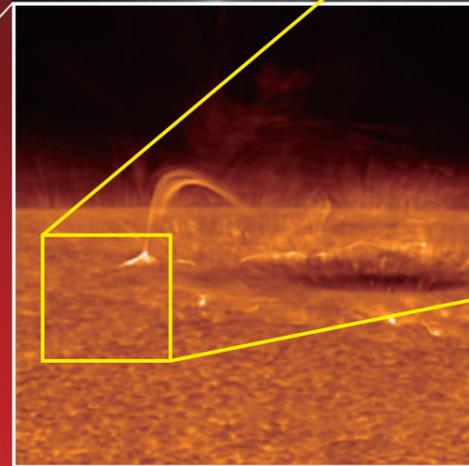
太陽では温度が6千度の光球の外側に約1万度の彩層があり、さらに上空には100万度以上のコロナが広がり、外側ほど熱い温度構造になっていますが、それらの成因はまだよく分かっていません。黒点の近傍では莫大なエネルギーが突発的に解放される大爆発現象(フレア)が発生し、その影響は惑星間空間にまで及びます。いっぽう、小さなスケールではいたるところで大気を加熱する機構はたらいいて、彩層やコロナが形成されていると考えられています。このような活動の源は、太陽の対流層が作り出す磁場のエネルギーによるものですが、実際のところどのようにして活動的な磁気大気が生み出されるのかについてはよく分かっていません。

太陽面で観測される活動現象を理解するには、光球-彩層-コロナを磁場により結合された一つのシステムとしてとらえる必要があります。これを実現するには、鍵となるスケールサイズを解像できることが必要です。「ひので」衛星の成果から、それが到達可能な0.1-0.5秒角程度と推定されてきています。このうち、光球とコロナを結合する上で特に重要なのがその二つの領域を仲介する彩層領域の磁場の情報です。さらに、光球-彩層-コロナの構造をスムーズにつなぐためには、解像度の高いコロナ観測が必要となります。

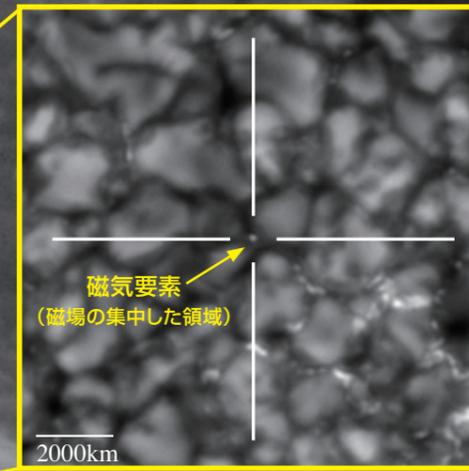
SOLAR-C衛星では、解像度の高い偏光分光観測によって、光球のみならず、これまで困難であった彩層の磁場を測定します。さらに、それをもとに間接的手法でコロナの3次元磁気構造を求めます。彩層磁場観測に加えて、SOLAR-C衛星では、「ひので」衛星を大幅に上回る解像度でコロナの観測を行うほか、彩層やコロナを分光観測することで微細スケールのダイナミクスをとらえます。磁場にともなう多様な素過程(微細構造)と大局的構造、そしてその時間変動をとらえるとともに、これまでにない高い解像度でコロナを同時に観測することで、星の外縁に普遍的に存在する高温大気を生み出す機構をはじめ、激しく変動する太陽の磁気活動の全貌を明らかにします。



コロナ(温度100万度)



彩層(温度1万度)

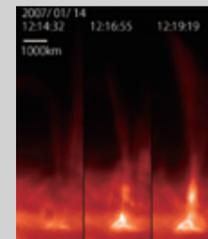


磁気要素
(磁場の集中した領域)

2000km

光球(温度6000度)

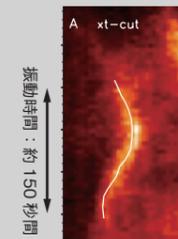
「ひので」が明らかにした太陽大気活動性と課題



(A) 彩層ジェット



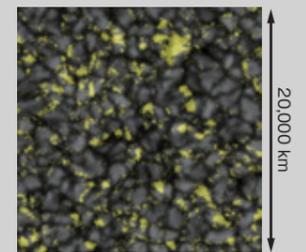
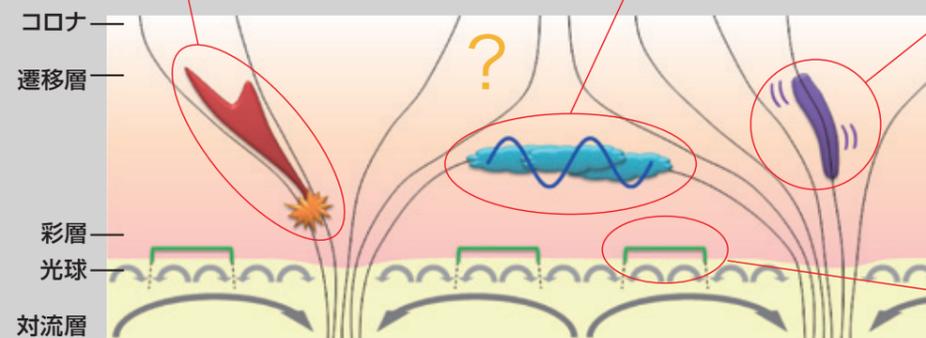
(B) プロミネンス中を伝播する波(黄色矢印)



振動時間: 約150秒間

(C) 振動するスピキュール

2,500 km



(D) 光球短寿命水平磁場(黄色部分)

太陽は、光球(約6千度)の外に彩層・コロナという高温の大気を持っています。彩層の温度は約1万度ありますが、その加熱に必要なエネルギーは、100万度のコロナを作るのに必要なエネルギーの10倍から100倍大きいことが知られています。彩層やコロナ加熱のメカニズムは、太陽物理学上の大きな謎のひとつです。日本の太陽観測衛星「ひので」によって、ジェットや波動現象(図A-C)といった動的現象が彩層で頻繁に発生していることが発見されました。これらの彩層の動的現象がエネルギー

源となって、コロナを加熱している可能性もあります。また、「ひので」による光球磁場の観測により、太陽表面のいたるところに短寿命の水平磁場が発見され(図D)、彩層の動的現象の原因となっているのではないかと注目されています。彩層やコロナの加熱には磁場が重要な働きをしており、その加熱過程を理解するには、彩層を含む光球からコロナまでの磁場の精密・高空間分解能観測が不可欠です。

太陽物理学分野のサイエンス課題

- 彩層・コロナはどのように加熱されているのか
- 太陽風はなぜ吹き出すのか
- 彩層に見られる多様な磁気構造はどのように形成されているのか
- 太陽フレアのような爆発現象はどのように発生するのか
- 太陽の磁気周期はどのように生み出されているのか

太陽のコロナはどのように加熱されているのでしょうか？ 巨大フレアの10億分の1のエネルギー規模のナノフレアにより加熱されているのでしょうか？ それとも、磁気流体波がコロナの加熱と超音速に達する太陽風の加速を同時に引き起こしているのでしょうか？ 「ひので」衛星による高解像度の磁場観測から、太陽の光球に存在するサイズ・時間変動のスケールが著しく異なる様々な磁気構造を明らかにすることができました。しかし、その上空の彩層やコロナの磁場がどのような構造をしているのかについてはよく分かっていません。コロナの磁場は、光球の運動を反映して複雑に絡みあい、ナノフレアの発生しやすい磁気構造が無数にできているのでしょうか？ それとも磁気流体波が上空へ伝わりやすい磁気構造が実現されているのでしょうか？

SOLAR-C衛星は、搭載される光学磁場診断望遠鏡、紫外線高感度分光望遠鏡、X線撮像分光望遠鏡の3台の観測装置が有機的に連携して、これらの疑問に最大限に答えられるように設計されます。光球から太陽圏に至る大規模な現象を支配しているのは、磁気リコネクションや波動現象であり、それらにともなって衝撃波、乱流といった小さなスケールの物理現象が現れると考えられています。

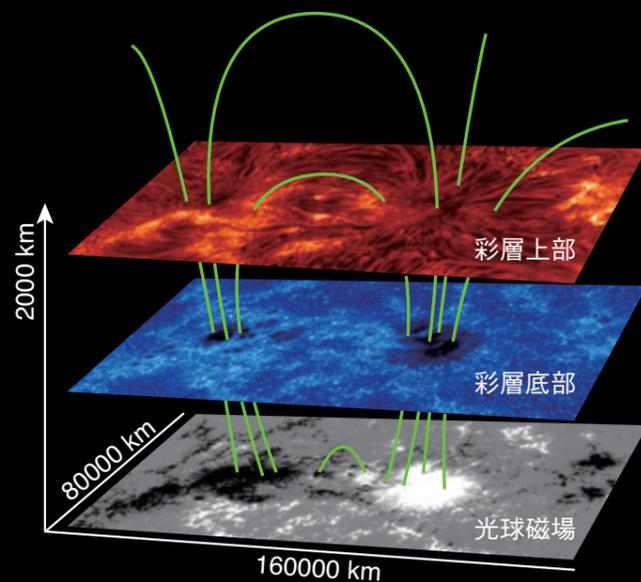
これらを観測するためには、(1) 微細構造をとらえる高解像度と(2) 速い時間変化をとらえる高感度が同時に必要とされ、これが「ひので」衛星に比べて大きな望遠鏡を必要とする理由です。

SOLAR-C衛星に搭載される3つの観測装置の高解像度観測から、光球—彩層—コロナの磁気結合の様子が明らかになります。そして、大型の光学磁場診断望遠鏡による光球・彩層の磁場観測を通して、光球からコロナまでの3次元磁気構造を求めます。これにより磁気リコネクションの起きやすい磁気構造の同定や、波動の伝播や反射・散逸の様子が明らかになります。磁気リコネクションにともなうインフローやアウトフロー、乱流や衝撃波、波動などは、光学磁場診断望遠鏡や紫外線高感度分光望遠鏡による分光観測を通して、また衝撃波で加熱されたプラズマの温度分布の早い変化は、X線撮像分光望遠鏡の撮像観測によりとらえられます。

ここでは、**SOLAR-C**計画の取り組む多くの課題のうち幾つかを取り上げて解説します。太陽物理学のサイエンス課題について大きな進展をもたらすことが、**SOLAR-C**衛星の成功基準です。

科学課題1: 太陽磁場の3次元構造を求める

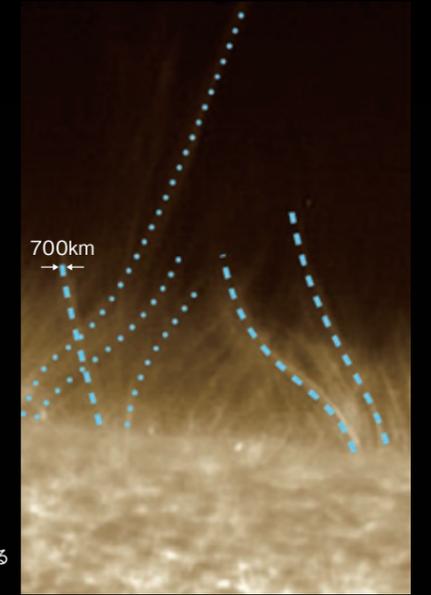
これまで述べたように、磁場から多様な現象を解明するには、光球からコロナまでの3次元な磁気構造を求めることが必要とされ、これ自身が極めて重要な**SOLAR-C**衛星のサイエンス課題です。**SOLAR-C**衛星では、「ひので」の解像度を上げ、光球における最小の大きさ(100km以下程度と考えられている)の磁気要素を分解すると共に、彩層の磁場を世界で初めて直接観測します。磁気エネルギーの支配する彩層上部(プラズマ $\beta < 1$)の磁場観測を行うことにより、観測データを使用した境界値問題としてコロナの磁場を求めることも可能となります。3次元な磁気構造が求められれば、磁気リコネクションや磁気流体波による、彩層・コロナの加熱機構や太陽風の加速機構をはじめ、太陽フレアのトリガー機構などの解明が進むと期待されます。また、数百km以下の小さなスケールの磁場が、表面の対流運動と共に太陽表面のいたるところで現れていることが「ひので」によって発見されましたが、その磁束量は黒点のそれを上回っています。このような小スケール・短寿命の無数の磁場の発生が、光球—彩層—コロナの大規模な3次元磁気構造の形成と進化にどのような影響を与えているかを解明するのも**SOLAR-C**衛星の課題です。



太陽磁場の3次元構造。緑線は光球の磁場から推測した磁力線。彩層上部では磁力線に沿った黒い筋構造が見えます。

科学課題2: 波動により彩層・コロナ・太陽風が理解できるか？

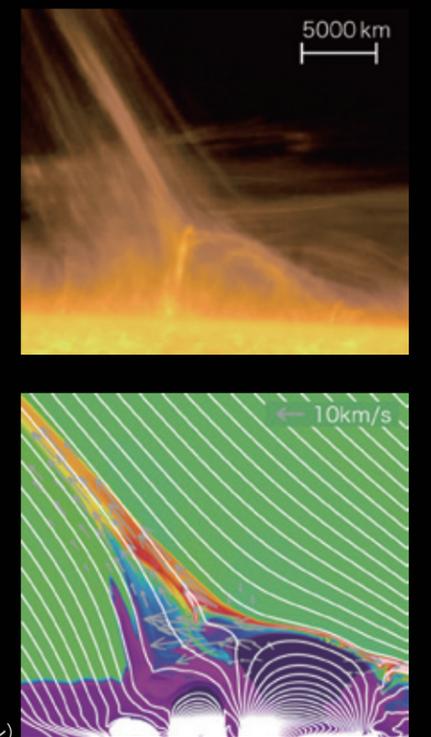
光球の対流運動によって、磁束管が揺らされたり捻れたりすることで、絶え間なく磁気流体波が発生していることが「ひので」によって分かってきました。この波動は、彩層や遷移層で反射したり屈折したりしつつ上空まで伝わり、コロナと太陽風の加速と加熱を行っているのではないかとこの仮説が注目を浴びています。彩層からコロナへ伸びる尖ったスピキュール(右図)は、コロナに質量を供給していると考えられていますが、波動は、スピキュールのような活動現象を生み出す上でも重要な役割を担っていると考えられています。また、「ひので」で観測された彩層のダイナミックな現象(表紙画像)が、コロナに向かう強い波動を生み出している可能性も指摘されています。光球・彩層からの波動の性質を明らかにし、それによりコロナ・太陽風の加速・加熱が起きているかどうかを解明することは、**SOLAR-C**衛星の主要なサイエンス目的の一つです。**SOLAR-C**衛星に搭載される光学磁場診断望遠鏡と紫外線高感度分光望遠鏡の連携により、彩層磁場の小さな揺らぎの観測から波動の同定を初めて行います。光球と彩層、さらにはコロナの磁気流体波をとらえることで、それぞれの大気層での波のエネルギー流束を見積もり、彩層やコロナで生じているエネルギー散逸量とその機構を明らかにすることができると期待されます。



右図: 太陽の縁で観測された彩層からコロナへ伸びるスピキュール(「ひので」観測)

科学課題3: 磁気リコネクション現象の解明とコロナ・彩層加熱への寄与

太陽では太陽フレアや彩層・コロナのジェット現象(表紙)などの爆発的な活動現象が幅広い空間スケール・時間スケールにわたって発生しています。これらの現象には、磁気リコネクションが深く関与していることが、「ようこう」や「ひので」の観測結果から分かってきました。磁気リコネクションとは、反平行に近い磁力線がなぎ変わり、磁場の持つエネルギーが短時間に解放されることで、プラズマを急激に加速・加熱する現象です。この現象によって発生するジェットは、下層大気から上空へ質量を供給します。また磁気リコネクションにともなう磁気構造の急激な変形は磁気流体波を発生させ、この波がコロナを加熱している可能性もあります。一方、無数の微小フレアが太陽コロナを加熱するという説も有力です。これらの現象の解明には、衝撃波の役割など磁気リコネクション自身の理解が不可欠ですが、磁気リコネクションが起きている現場周辺の温度・速度・磁場の観測情報が決定的に不足しています。磁気リコネクションにより加速・加熱された直後のプラズマは、背景にあるプラズマと比較して暗く時間変化が速いため、これまでの観測ではとらえることが困難でした。**SOLAR-C**衛星に搭載される紫外線高感度分光望遠鏡・X線撮像分光望遠鏡では、広い波長域にわたる高解像度の分光撮像観測を実現します。この性能により、磁気リコネクションにともなう発生するプラズマ流や磁気流体波・衝撃波などの現象を様々な温度の大気層において切れ目無く調べることが初めて可能となります。さらに、磁気エネルギーが支配する彩層上部領域における磁場観測により、磁気リコネクションにともなう磁気構造の変化を直接的に観測することが期待されます。



上図: 太陽の縁で観測された彩層ジェット(「ひので」観測)
下図: 磁気リコネクションにともなうジェット(MHDシミュレーション)

SOLAR-C に搭載される3つの大型望遠鏡 — 撮像観測から分光観測へ —



これまでの衛星観測では、広域の情報を素早く取得することができる撮像観測が大きな成果をもたらしてきました。しかし、撮像観測だけでは手に入る物理情報に限界があります。活動現象の背後にある物理過程に踏み込むためには、太陽大気が放射するスペクトルを分光観測によって精度良く測定し、温度・速度・磁場などの基本的な物理情報を取得することが重要です。

光球からコロナまで温度の切れ目のない観測を行うため、波長別に3台の望遠鏡を搭載します。

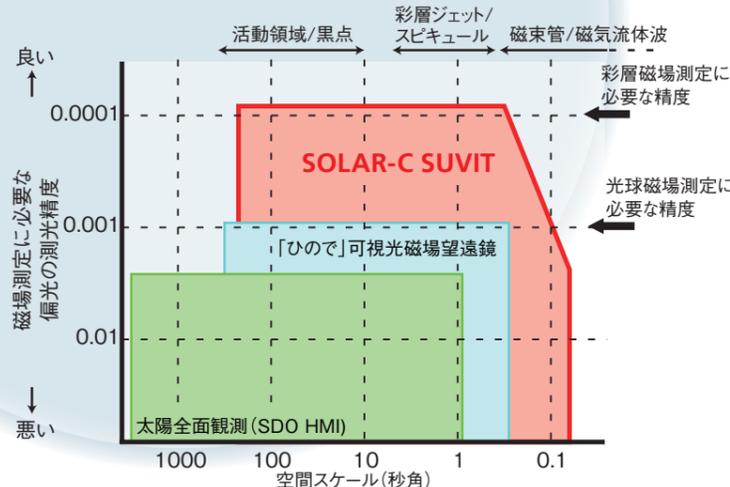
- 彩層・光球の磁場を測定する
Solar UV-Visible-IR Telescope (SUVIT)
- 高解像度で彩層・遷移層・コロナを分光観測する
EUV/FUV High Throughput Spectroscopic Telescope (EUVS/LEMUR)
- コロナとフレアの高温プラズマを撮像分光観測する
X-ray Imaging Telescope (XIT)

Solar UV-Visible-IR Telescope 光学磁場診断望遠鏡

これまで観測が困難であった彩層の磁場を世界で初めて測定します。「ひので」はゼーマン効果による偏光を利用して高精度の光球磁場マップを取得し、大きな成果を挙げることができました。**SUVIT**では、ゼーマン効果に加えハネレ効果を利用して、光球より弱い彩層磁場の測定を行います。彩層におけるハネレ効果による微弱な偏光信号は、光球から来る偏光のおよそ10分の1の大きさです。点状の基本磁束管からの偏光信号の強さは口径の2乗に比例するため、「ひので」の約3倍の口径(1.5m)の望遠鏡が必要となります。大型望遠鏡により0.1-0.2秒角の高い解像度を実現しつつ、高精度の光球・彩層磁場観測を行います。

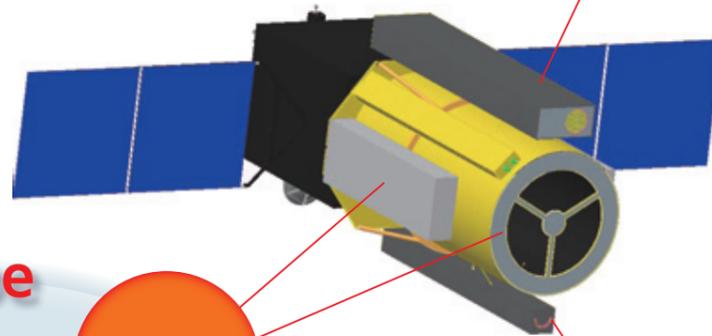
彩層の磁場が求まると、コロナの磁場を計算により求めることが可能になり、光球からコロナまでの3次元の磁気構造が分かるかと期待されています。これにより、彩層やコロナの加熱やダイナミックな現象の鍵を握っている磁気リコネクションや波動現象の現場に迫ることができます。このためには、高い空間分解能だけでなく広視野・長時間の連続観測が必須で、宇宙からの観測でしか実現することができません。

空間分解能	0.1" - 0.2"
時間分解能	0.1 - 1 秒 (撮像) 1 - 20 秒 (偏光分光)
視野	180" × 180"
観測波長	280 - 1100 nm



観測装置を支援する衛星システム

- 地上望遠鏡のように太陽活動の変化に応じて機敏に観測ターゲットや観測プログラムを変更できます。
- 夜による中断のない24時間連続観測が可能です。
- 異なる観測装置で取得した画像の正確な位置合わせを可能とします。
- 「ひので」の20倍以上の大容量データを取得伝送します。

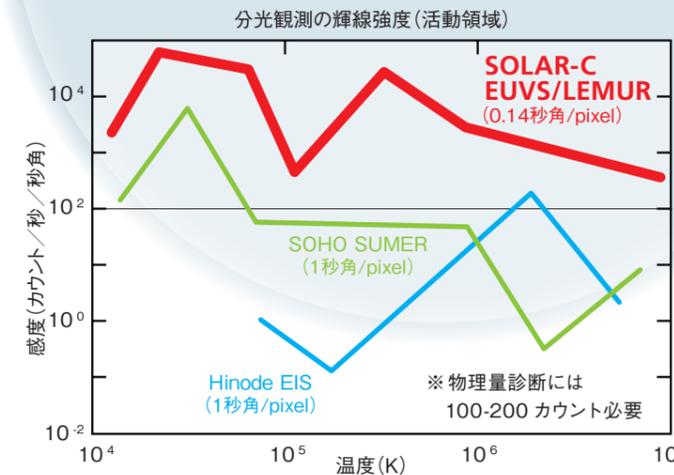


EUVS/LEMUR

EUV/FUV High Throughput Spectroscopic Telescope

紫外線高感度分光望遠鏡

空間分解能	0.28"
時間分解能	10 秒以下 (0.28" サンプル) 1 秒以下 (1" サンプル)
視野	280" × 300"
速度分解能	2 km/s 以下
観測波長	17 - 21 nm, 46 - 128 nm



EUVS/LEMURは、太陽の出す輝線を分光することにより、プラズマの速度・温度・密度を求める観測装置です。今までの紫外線分光装置と比較して、解像度は5倍以上・感度は10倍以上*向上しています。観測波長は10-100nmの紫外線域を幅広くカバーし、多数の輝線で彩層(約1万度)からコロナ(500万度)を切れ目なくとらえることができます。特に、彩層からコロナへと急激に構造が変化する10万度以上の上層大気の診断能力に優れています。高感度がもたらす1秒程度の短い露光での分光観測により、磁気構造の激しい時間変化や磁気リコネクションにともなうジェット・光球から伝播する波動を見逃しません。これまでのコロナ観測の空間分解能は、光球のそれと比べて一桁悪いものでした。**SOLAR-C**では、光球からコロナまでの空間分解能をできるだけそろえることにより、**SUVIT**で観測された磁気構造のどこで加熱が起きているかなどの決定的情報を得ることができます。

* それぞれ解像度・感度に最適化した観測モードをとった場合

XIT

X-ray Imaging Telescope

X線撮像分光望遠鏡

	XIT-PC	XIT-NI
空間分解能	~1" - 2"	~0.2" - 0.3"
時間分解能	10 秒	< 10 秒
視野	80" × 400"	400" × 400"
観測波長	0.5 - 5 keV	9 - 21 nm

光子計測型軟X線望遠鏡(XIT-PC):

斜入射光学系と光子計数型CMOSの組み合わせにより、太陽のコロナやフレアの撮像分光観測を世界で初めて行います。斜入射光学系としてはこれまでの最高の解像度で、コロナ中のさまざまな温度構造を一望のもとに観測できます。画素ごとにX線スペクトルを求めることで、加熱されて熱平衡に達する前のプラズマの様子を観測することができ、磁気リコネクションにともなう衝撃波によるコロナ加熱やフレアの研究にブレークスルーをもたらします。

超高空間分解能EUV望遠鏡(XIT-NI):

多層膜X線望遠鏡により、0.2 - 0.3秒角のこれまでにない高い空間分解能でコロナの広視野・高頻度の撮像観測を行ないます。**EUVS/LEMUR**がもたらす詳細な分光情報に対して高品質の画像情報を提供します。さらに、**SUVIT**による光球・彩層磁場の観測と組み合わせることで、コロナ加熱や太陽風の加速機構の解明を目指します。

SOLAR-Cで進展する高解像度衛星観測技術

2006年に打ち上げられた「ひので」衛星の開発を通して培われた宇宙望遠鏡技術を発展させるとともに、先端技術を適用することで、SOLAR-Cを実現する高解像度衛星観測技術が進展しています。



回折限界解像度を実現する宇宙望遠鏡技術

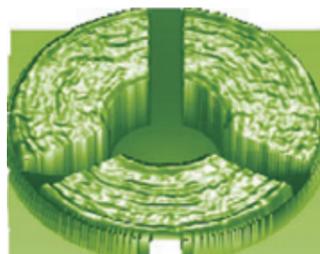
SOLAR-Cに搭載する予定のSUVITは、「ひので」可視光望遠鏡と比べ、口径を3倍近く増大させる一方、望遠鏡長を2倍程度にしたコンパクトな光学望遠鏡を目指しています。そのため、光学系の位置精度要求が厳しくなっています。「ひので」可視光望遠鏡の開発で培った高精度望遠鏡構造・熱設計、組立アライメント手法、干渉計光学測定技術を応用発展させます。望遠鏡主構造は、0.1ppm以下と非常に熱膨張率が低い炭素繊維強化プラスチック素材(CFRP)を用い、軌道上においてアライメント調整機構無しに50cm口径の回折限界性能を実現しました。この開発で培ったプレジジョン望遠鏡構造技術がSOLAR-Cの1.5mクラス望遠鏡に適用されます。焦点面観測装置に必要な高精度・長寿命な宇宙用可動機構の国内開発も進んでいます。



「ひので」可視光望遠鏡



「ひので」可視光望遠鏡の口径50cm軽量化ULEガラス主鏡と3点静定支持機構。SOLAR-Cでは90%近い軽量化構造、ストレスフリーの支持機構を実現します。



「ひので」可視光望遠鏡の波面誤差分布。波面誤差18nm(RMS)を実現。誤差5nm(RMS)の高精度干渉計測定により、光学系・アライメントの問題点を洗い出し、可視光波長で回折限界性能を発揮する光学系を実現します。



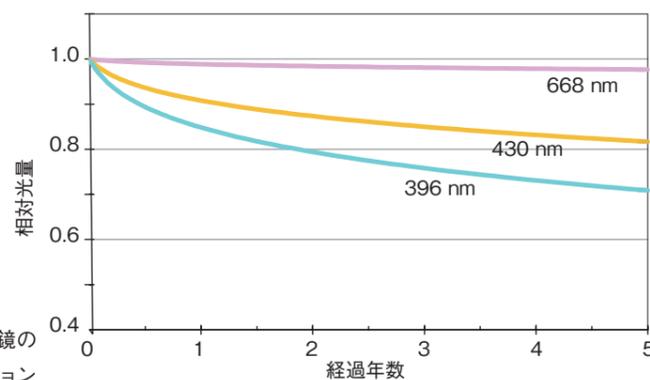
「ひので」可視光望遠鏡の1次焦点排熱鏡。アルミ鏡に銀増反射コーティングをほどこし、約5%の太陽光吸収率を実現。コーティングの耐久試験や鏡面の汚染管理によって1500ソーラーの光が集中する排熱鏡の温度を50℃以下に保つことができました。



焦点面装置の国内開発に向け、回転駆動機構を開発しています。試作した機構は、薄肉大口径ベアリングを用いた駆動機構で、高精度偏光観測に必要な連続回転波長板に用いることができます。

光学系の汚染管理・汚染予想モデルの構築

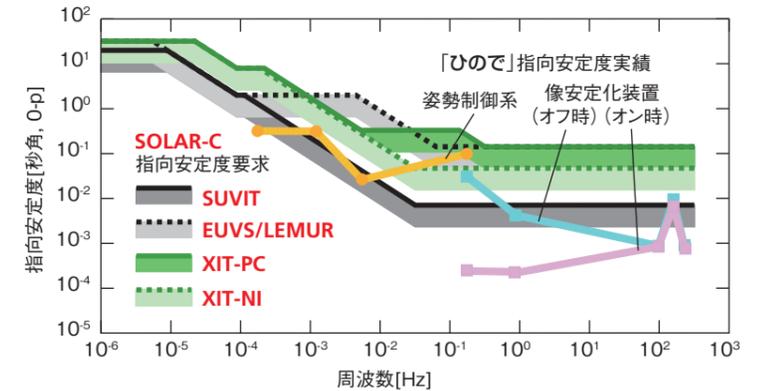
宇宙太陽望遠鏡の寿命には、汚染物質の付着と紫外線黒化による反射率劣化、それが引き起こす鏡の熱変形が大きく影響します。「ひので」可視光望遠鏡では、脱ガス量の測定に基づく望遠鏡構成部材、接着剤等の選定を行うとともに、汚染予想数学モデルに基づくベークイングなど、徹底した汚染管理を行いました。SOLAR-C SUVITでは紫外線域の観測を行うため、「ひので」以上に厳しいコンタミネーション管理が必要となります。



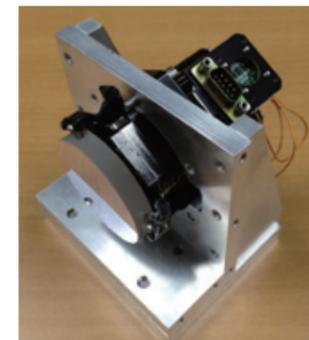
汚染予想数学モデルに基づく「ひので」可視光望遠鏡の感度劣化シミュレーション

高解像度観測に欠かせない高指向安定度技術

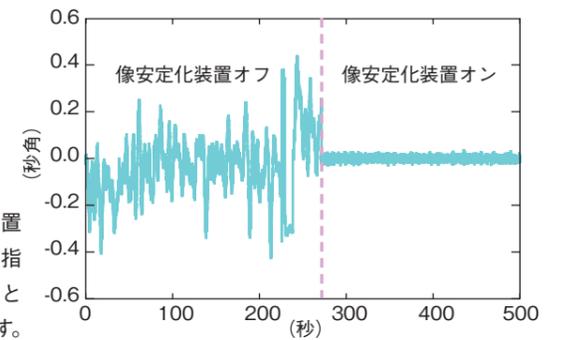
「ひので」では、高解像度観測・高精度偏光測定を実現するため、高い指向安定度を持つ衛星姿勢制御系を開発するとともに、姿勢制御系で抑制しきれない指向揺れを取り除くための可動鏡による像安定化装置、さらに高周波数域の微小擾乱を管理する技術が導入されました。また、異なる望遠鏡間のアライメントを軌道上で維持するため、低熱膨張光学ベンチも開発されました。これによって、広い周波数帯域にわたり、国内最高性能の指向安定度を達成しています。SOLAR-Cで狙う高解像度と偏光測定精度を達成するには、「ひので」と比較して2-3倍高い指向安定度が要求されています。高周波数擾乱の低減化のため、擾乱発生や擾乱伝達を抑制する方式を導入するとともに、像安定化装置を広帯域化することを検討しています。



「ひので」指向安定度実績とSOLAR-Cにおける指向安定度要求。SOLAR-Cでは「ひので」と比較して2-3倍高い指向安定度が必要です。中周波数域の衛星姿勢制御系の性能改善、及び、高周波数域の微小擾乱低減化が鍵になります。



「ひので」可視光望遠鏡の像安定化装置で用いられている可動鏡。3本のピエゾ素子によって折曲鏡の角度を高精度に駆動し、太陽面上の模様を追尾します。

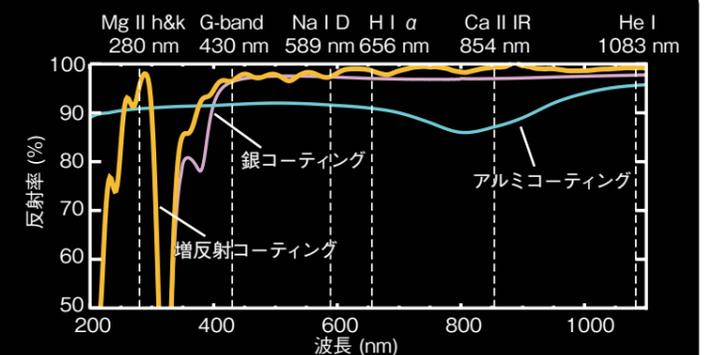


「ひので」可視光望遠鏡像安定化装置の軌道上実績。0.2秒角程度あった指向揺れは、像安定化装置を働かせることで0.03秒角(3σ)まで抑えられています。

新たに取り組む先進技術開発

ナノテクノロジーによる斜入射X線鏡

SOLAR-C搭載予定のX線撮像分光望遠鏡では、0.5-10 keVのX線波長で1秒角以下の高い解像度の実現を目指しています。そのためには、高い鏡面精度を持つ斜入射X線鏡の開発が必須です。ナノテクノロジー測定技術を応用することで、高精度斜入射X線鏡の製作が国内で可能になりつつあります。ナノメートル精度加工のナイフエッジ、あるいはキューブを使って、X線焦点面をナノメートル精度でスキャンし、そこからの回折光を測定します。これによって精度の高い点像分布関数の測定が可能になっています。この結果から斜入射鏡面形状誤差を推定し、面形状の加工へと反映させることで、高精度なX線鏡を製作することができます。



超増反射ミラーコーティング

太陽望遠鏡で高い光学性能を実現するためには、不要な太陽光の排熱機能、熱変形を抑えるための低太陽光吸収、高精度偏光観測のため高反射率コーティングが重要です。「ひので」では可視光域のみの観測で開発要素の小さい銀コーティングが使用されました。SUVITでは紫外から近赤外の広い波長範囲で90%を超える高い反射率、3%以下の太陽光吸収率の実現を目指し、超増反射コーティングを「ひので」の実績を基に開発中です。

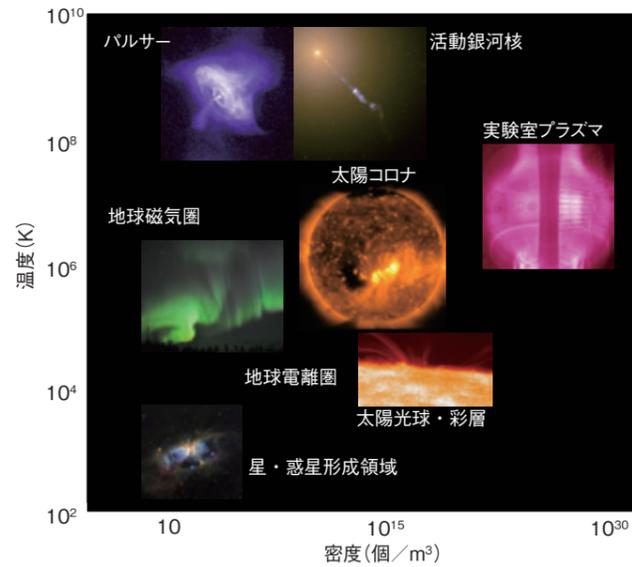
SOLAR-Cが取り組む科学の広がり

プラズマ実験室としての太陽

「ようこう」衛星がもたらした最大の学術的成果は、「太陽フレアが磁気リコネクションによって発生する」ことを実証したことにあります。磁気リコネクションが、磁気プラズマの散逸・エネルギー転換の本質のプロセスであることが確立されたことにより、現在では、天文学・地球物理学・プラズマ物理学の広汎な現象を理解するために不可欠な概念として浸透しています。「ひので」衛星で初めて観測された短寿命水平磁場は、対流起源の局所ダイナモ機構が黒点を上回る磁束量を生み出していることを示し、天体物理学としても重要な磁場生成に関する素過程の発見です。また、これまでその存在が指摘されていたアルベン進行波の存在も観測的に明らかになりました。アルベン波は、宇宙空間で効率の良いエネルギー運搬手段であり、太陽風の加速機構との関連が議論されています。このように、太陽は宇宙プラズマの格好の実験室としての役割を果たしてきました。

SOLAR-Cは、太陽の光球からコロナの磁気プラズマの磁場・速度・温度といった物理量を精度よく測定することで、太陽物理の未

解明の問題に取り組めます。他の天体や地球磁気圏、地上実験室のプラズマとの比較研究を通して、宇宙にあまねく存在するプラズマと磁場の普遍的な性質を明らかにすることが期待されます。



太陽地球環境と宇宙天気予報

宇宙天気予報のためのアルゴリズムの構築

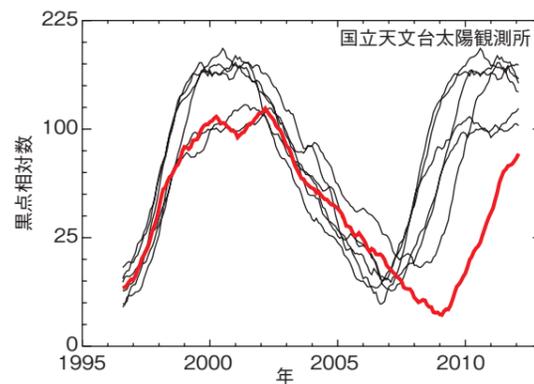
太陽フレアやコロナ質量放出にともなう高エネルギー粒子やオーロラ・地磁気嵐などの宇宙空間環境の短期変動を予測することを「宇宙天気予報」と呼びます。「宇宙天気予報」の実現には、物理過程の理解と、太陽面の観測データを入力としたコンピュータシミュレーションによる予測アルゴリズムの構築の両方が欠かせません。SOLAR-Cの役割の一つは、フレアの予測アルゴリズムの構築に寄与することです。フレアが起きるコロナ中の磁場を直接測ることは非常に難しいため、表面（光球）の磁場観測データを境界条件としたシミュレーションがこれまで行われてきました。SOLAR-Cでは、フレアの現場であるコロナに近い彩層で磁場を測るため、観測データに基づくシミュレーションの精度を格段に高め、これまで困難であった太陽フレアそのものの発生を含めた宇宙天気予報の実現が可能になると考えられます。

太陽活動の異変を解明する SOLAR-C

太陽は11年の周期活動を繰り返していますが、数十年にわたって黒点が現れない太陽活動の停滞期が過去に何度か起きています。

このような太陽活動の停滞は地球気候にも影響を与える可能性があり、1600年以降の停滞期である、ダルトン極小期やマウンダー

極小期では地球は寒冷化していました。2007-2009年頃は太陽の活動が極端に低くなり、活動の周期も12.6年と長くなるという異変が起きました。同じ様に周期が長かったのは、ダルトン極小期の直前の1800年頃で、およそ210年ぶりの異変です。黒点数は太陽活動を知る大事な指標ですが、太陽活動の停滞のメカニズムを理解するには、黒点・極域・静穏領域の磁場、つまり太陽全体の磁場の変化を総合的にとらえる必要があります。SOLAR-Cで太陽磁場のグローバルな変化を引き起こす微細な表面磁場の変化を観測することで、太陽活動の長期的な低下が起きるかを注意深く監視し、太陽活動の異常がどのように地球気候に影響を与えるかを明らかにすることに貢献します。



最近1周期の黒点数の変動(赤線)と過去6周期の変動(黒線)。今サイクルは、太陽周期が11年から12.6年に伸び、さらに2013年後半に予想される極大期は低調と予想されています。

SOLAR-C から SOLAR-D へ

— 人類未踏の太陽極域探査 —

太陽ダイナモ機構の理解へ

SOLAR-Cでは太陽大気で見られる様々な磁気活動の全貌を明らかにすることが、最重要ターゲットです。SOLAR-Dでは、その磁気大気を生み出す「ダイナモ機構」の理解に挑みます。グローバルダイナモ機構の顕著な例が、太陽の11年周期活動です。黒点数・活動性・極性が、なぜ11年周期で変動するのかは、太陽物理最大の謎です。「ひので」、SOLAR-Cでは太陽極域の表面磁場・表面速度場を得ることができます。SOLAR-Dではそれらに加えて、ダイナモ機構の現場である太陽内部の回転や流れを知ることができます。

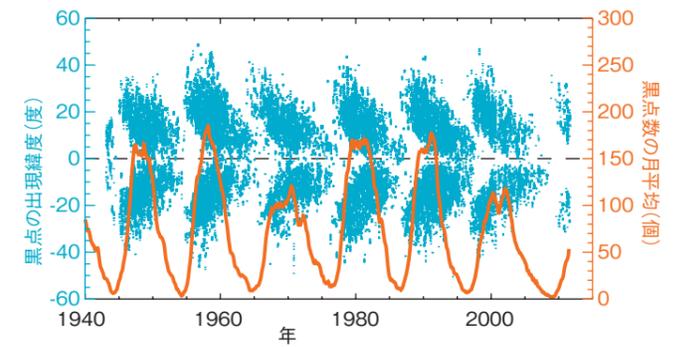
なぜ太陽極域探査が必要か？

グローバルダイナモ機構の鍵を握るのは、差動回転や子午面還流といった太陽内部の大局的な流れと磁場との相互作用です。特に、太陽極域の磁場は次の太陽周期の種となると考えられており、高緯度地域の磁場の変動と太陽内部の流れの関係をj知することは、次のサイクルの磁場を生み出すメカニズムを解明するために必要不可欠です。太陽内部は光で見ることができず、ドップラー観測による太陽表面の振動測定から太陽内部を診断する日震学が唯一の手段です。しかし、これまで実施されてきた黄道面内からの観測では、太陽の極域が見えにくく、極域の太陽内部の流れを知ることができませんでした。この問題を解決するために、SOLAR-Dでは、黄道面を離れた場所(傾斜角目標~40°)から、太陽全面の磁場・ドップラー速度場を観測します。極域を含む太陽全体の大局的な流れと磁場の変動・運動を同時に観測し、太陽磁気周期活動の起源を探ります。

搭載観測装置案

- ◎ 太陽全面可視光磁場・ドップラー観測装置
日震学を用いた太陽内部の流れの導出や光球磁場の測定。
- ◎ 総放射量計
放射強度の緯度依存性を測定し、同じ磁気活動を持つ他の太陽型星と比較して、太陽の放射量変動は1/3程度しかない理由を探る。
- ◎ X線/EUV撮像・分光望遠鏡
軌道傾斜角による見え方の違いから、極域太陽風等の3次元構造を探る。
- ◎ オプション(惑星間撮像装置、その場観測装置等)

太陽の11年周期(国立天文台太陽観測所)



太陽内部のイメージ図

