

特集 「ひので」プロジェクト

「ひので」がリードする世界の太陽研究

清水敏文

総合研究大学院大学准教授 宇宙科学専攻/宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部准教授

「ひので」がいま世界の太陽研究を大きくリードしている。国際協力で実現した最新鋭の望遠鏡が取得するデータそのものすごさはもちろん、データの即時公開システム、世界に開かれた軌道上天文台として科学運用していること、などによる寄与も大きい。

飛翔する望遠鏡を操る

軌道上にある「ひので」の望遠鏡を動かして1枚の画像を取得するといっても、観測目的に応じて調整すべきパラメーターが多数存在する。波長を細かく選択するフィルター、目標物の明るさに適した露出時間、目標物の大きさや細かさに適した観測視野や画素サイズ、画像圧縮の度合いなどがある。また太陽観測は、時々刻々変化するダイナミックな物理現象を取り扱っており、ある頻度で周期的に画像を取得していく特徴がある。その結果、データ量は観測時間とともに

どんどん増え、観測時間や撮像頻度も重要な調整パラメーターとなる。

遠く軌道上にある望遠鏡を地上からうまく操り、多種多様な科学目的に合致した優れた観測データを取得できるようにするのが、衛星運用スタッフの任務だ。しかも、運用は何年も継続して行うため、運用に関わるスタッフに負担がかからないやり方を構築する必要がある。

「ひので」は地球を周回しているため、衛星や望遠鏡に指令を送るのは1日のうちきわめて限られた交信時間(1日計約30分程度)だけである。その時間内に、膨大な数のコマンドリストとテーブルを

送信する。コマンドリストとは、「何時何分にどの撮像シーケンスを開始せよ」とか「何時何分に地上局へ向けてデータを送信せよ」という指示リストである。また、望遠鏡ごとに撮像パラメーターや撮像シーケンスを詳細に定義したものがテーブル(メモリーデータ)である。観測は、それらに基づき自動的に行われる。

最適な観測のためには、事前の計画立案が最も重要である。もちろん、不具合を招くコマンドの誤りは許されない。そのため、計画立案作業は、前日の運用会議(図1)から始まり、十分に時間をかけて慎重に行われる。

「ひので」を運用する人びと

運用室で望遠鏡を操るのは、「チーフ・オブザーバー(主任観測者)」とよばれる研究者・大学院生である。観測内容を検討し、最適な観測ができるように計画を立案する。何時にどのようなデータを取得するかを、詳細にスケジュール化する作業である。撮像される画像の視野や空間分解能、撮像のシーケンス、使用するフィルター(観測波長)などを観測目的に応じて決めていく。

広視野、高空間分解能、高撮像頻度、多波長で観測すれば、それだけ多くの観測情報を得ることができるだろうが、衛星観測では取得できるデータ量に制限が



図2 「ひので (SOLAR-B) 衛星の開発に参加した世界の研究機関・大学。欧州宇宙機関 (ESA) とノルウェー宇宙センターは、科学データ受信を支援することでプロジェクトに参加している。

ある。衛星と地上間の伝送データ(テレメトリー)量に制限があるからだ。取得データ量を地上に降ろせるテレメトリー量以下に抑え、一方で観測目的を満たすようにデータの取り方を工夫しなければならない。

各パラメーターをトレードオフして最善の観測を立案するのが、チーフ・オブザーバーの腕の見せ所だ。前日に取得したデータをレビューし、最新の太陽表面の状況をインターネット経由で収集し、実施する科学観測内容を検討し、望遠鏡のデータ取得計画を組み立てる。ほぼ一日がかりの作業である。

3つの望遠鏡が共同して観測目的を実現する場合も多い。そのとき独立な3つの望遠鏡の観測の調整をするのが「チーフ・プランナー(主任計画者)」である。運用会議で議論をリードして、観測スケジュールを調整していく。

運用スタッフとなっているのは装置開

発を行った各研究機関・大学(図2)の研究者や大学院生たちで、さらに、「ひので」データを用いて研究を行う東京大学、京都大学、名古屋大学などの研究者や大学院生もチーフ・オブザーバーとして参加する。彼らが運用に携わるのは年に合計2~3週間ほどで、これはまったくのボランティアである。

私は「ひので」運用の全体を統括する立場であり、チーフ・オブザーバーやチーフ・プランナーがスムーズに観測立案ができるように心がけている。また、技術者の支援を受けながら、望遠鏡以外の衛星バスの状態やデータを受信する地上局の状態などに目を光らせている。時に不測の事態もあるが、全体として、これだけ多機能の望遠鏡を有する「ひので」を、小規模の研究者・大学院生が主体となって、また各自の負荷も比較的軽い状態で運用できていることは、運用の仕組みを作った者として満足している。

世界の軌道上太陽天文台として

「ひので」は、世界中の研究者に開かれた軌道上太陽天文台として科学運用を行っている。観測提案が採択されれば、誰でも「ひので」を用いた観測が実現できる。この提案観測は、Hinode Operation Plan (HOP) とよばれる。シニア研究者で構成される科学スケジュール調整グループが、随時 HOP を受け付け、審査する。提案は、欧米はもちろんのこと、中国や東欧などからも届く。いまや、「ひので」は世界の太陽研究者にとって不可欠な観測天文台として機能している。

「ひので」観測はこの HOP とともに、「ひので」チームが重点と考えるベースライン観測や運用に従事する研究者・大学院生が自らの研究に必要とする観測をバランス良く取り込んで立案される。太陽は急に活発になったり静かな時期が続



図1 毎朝開かれる運用会議。海外の研究者も参加するため、会議の公用語は英語である。

August 2009

Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
27	28	29	30	31
Daily Meeting	HOP 79: NS Irradiance Scan Daily Meeting	Daily Meeting SSC Meeting	HOP 79: EW Irradiance Scan Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	Daily Meeting Weekly Meeting
3	4	5	6	7
HOP 128: Coordinated Observations with Hida Observatory, Telemetry negotiate with HOP126				
Daily Meeting	HOP 126: Chromospheric Jets with SST/La Palma, 1st priority			
	Daily Meeting	HOP 73: Prominences with DOT/La Palma, 2nd priority to HOP 126		
		Daily Meeting	Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	Daily Meeting Weekly Instrument Meeting
10	11	12	13	14
HOP 128: Coordinated Observations with Hida Observatory, Telemetry negotiate with HOP126				
HOP 126: Chromospheric Jets with SST/La Palma, 1st priority				
HOP 73: Prominences with DOT/La Palma, 2nd priority to HOP 126				
Daily Meeting	Daily Meeting	Daily Meeting	Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	Daily Meeting Weekly Meeting
17	18	19	20	21
HOP 126: Chromospheric Jets with SST/La Palma, 1st priority				
Daily Meeting	Daily Meeting	Daily Meeting	Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	Daily Meeting Weekly Meeting
24	25	26	27	28
Dr. Shine at SST/La Palma: Hinode supporting observations				
HOP 124: Time-varying Doppler velocity diagnosis of X-ray Bright Points				
Daily Meeting	Daily Meeting	Daily Meeting SSC Meeting	Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	Daily Meeting Weekly Meeting
31	September 1	2	3	4
Daily Meeting	HOP 79: NS Irradiance Scan Daily Meeting	DST/IBIS Hinode support period		
		Daily Meeting	HOP 79: EW Irradiance Scan Weekly Instrument Meeting Daily Meeting	HOP 95: SOT network Daily Meeting Weekly Meeting

図3 「ひので」観測予定カレンダー。提案観測 HOP の予定がびっしり書きこまれている。

いたり、ある意味まぐれなため、観測計画は、毎日の太陽の状況を考慮しつつ、最終的にチーフ・プランナーとチーフ・オブザーバーが出席する運用会議で決められる。

ボランティア的に運用に従事する研究者や大学院生は、外部の研究者から提案された観測に対しても、非常に献身的である。彼らにとっては自分の研究に専念できない時間を抱えるわけだが、メリットもある。調整次第で自らが必要とするデータを取得する時間を確保できること、観測直後の最新データを世界で初め

て眺めることができ、新しい研究のアイデアを発掘できること、などである。

ただ実際には、観測実現にあたって相当な苦勞があり、また、大学院生の中には自分のための観測をすることに遠慮がちになる学生もいる。その場合は、運用会議の様子も考慮して、観測実現に向けたアドバイスをしよう心がけている。

観測データは即時公開

「ひので」の特徴として、データは例外なく、取得後即時に公開される。これは、X線や赤外線のア天文衛星や太陽系探

査機など、日本の科学衛星では他に例がない。

打ち上げ前の議論では、打ち上げ直後から即時公開せよとの強硬な意見が欧米研究者から相次いだ。日本の研究者には相当な葛藤があった。即時公開の理念は一般論としては妥当である。「ひので」から毎日送られてくるデータは、開発チームのメンバーが研究に生かされたいほど大量である。世界中の研究者が誰でも自由に使える環境があれば、研究活動の活性化につながり、日本の評価も上がる。

Sat	Sun
1	2
Daily Meeting	
8	9
Daily Meeting	
15	16
Daily Meeting	
22	23
	Dr.Shineat SST/La Palma: Hino
Daily Meeting	
29	30
HOP 81: Polar Monitoring Campaign	
Daily Meeting	
5	6
Daily Meeting	
	HOP 95: SOT network

しかし日本は、打ち上げ直後からの即時公開には慎重な意見を持った。科学運用が軌道に乗るまで、装置開発の中心となって働いてきた研究者や大学院生は四六時中運用のために駆けずり回り、科学研究に割く時間がなかなか取れない。この状況は日本の研究者にとって特に顕著であり、欧米研究者と比較すると明らかに公平ではない。

欧米では、科学者をサポートする体制がしっかりしている。たとえば、望遠鏡運用やソフトウェア開発などには専門エンジニアが支援し、研究者はサイエンス

に多くの時間を割くことができる。ほぼ10年近く、研究人生を「ひので」の実現に奉げてきた立場からすれば、「ひので」の成果が外部研究者に持っていかれることは何としても避けたかった。

最終的に、打上げ後約半年間だけ開発チーム内のデータ占有期間を設けた。このおかげで、運用やデータ校正に忙殺されながらも、いくつもの初期成果にたどりつけた。「サイエンス」や「日本天文学会欧文論文集 (PASJ)」の「ひので」特集号には、日本人による論文が多く掲載された。

即時公開は2007年6月から開始した。HOPも例外ではない。提案者に対してデータの占有権は一切発生しない。一方で、大学院生の学位論文研究については、紳士協定として研究者に配慮をお願いしている。ウェブ上で誰がどんな研究をしていて、どのデータを使っているかを知らせることで、大学院生による学位論文取得において不利とならないように配慮する。じっくりとデータ解析したり、さまざまな思考を巡らせ研究の深化を図ることが大学院生にとって特に大切と考えるからだ。もちろん、若手研究者として早く研究の荒波の中で研究を推進することも大切である。

共同観測の積極的な推進

「ひので」は、3つの波長(可視光、極端紫外線、軟X線)で非常に高い解像度の観測を行っていて、これだけでも価値がある。さらに、「ひので」ができない観測を地上の天文台や他の太陽観測衛星が行うことで、「ひので」のデータが2倍にも3倍にも価値のあるものになる。そこで「ひので」は、他の衛星や地上天文台との共同観測を積極的に推進している。いくつかの科学成果が得られているが、そのうち2例を紹介したい。

まず、太陽フレアにおける粒子加速の現場が、「ひので」による太陽表面の磁場観測と、NASAのRHESSI衛星、国立天文台野辺山電波ヘリオグラフとの共同観測でとらえられ始めている。

図4は、同時観測に成功した巨大な太陽フレアである。「ひので」の可視光望遠鏡が撮影したCa II H線画像は、東西に広がった2本の明るい筋(フレアリボン)が時間とともに成長する様子を詳しくとらえている。フレアリボン、上空コロナに作られる高温プラズマで満たされたフレアループ群(アーケード)の足元だ。

「ひので」が観測できない硬X線、マイクロ波領域では、加速された電子による非熱的放射の振舞いを知ることができ、非熱的放射源は、局所的に存在し、

フレアループ群の中でも限定された磁気ループでのみ効率的に粒子加速が起きていることがよくわかる。名古屋大学の箕島 敬さんらは、可視光望遠鏡のベクトル磁場データを用いて足元付近の磁場を調べ、強い粒子加速を起こした磁気ループが磁場のセパトトリクス（磁気線の境界面）にあることを突き止めた。

もう一つの例は、可視光望遠鏡による水平磁場の発見である。対流セル（粒状斑）よりも小さい、太陽面に対して水平な磁場が、太陽の全面に大量に存在していることがわかった（詳細は勝川さんの記事、8ページを参照）。太陽表面付近の対流運動が、いままで知られていなかった種類の磁場を生成しているらしい。この磁

場は大量に存在するため、水平磁場の総エネルギー量は大きく、太陽のさまざまな活動や大気加熱を引き起こす磁気エネルギー源である可能性が出てきた。

東京大学大学院生の石川遼子さんは、太陽表面の少し上空の彩層での活動性や加熱との関連を探るため、スペイン領カナリー諸島の天文台で「ひので」との共同観測を行っている。光球で見える水平磁場は、彩層まで到達しているのか、もし到達しているならば彩層での磁場の振舞いはどうなっているのかを理解することが課題だ。彩層での磁場ベクトルの計測は「ひので」では不可能なため、カナリー諸島の彩層磁場測定装置と共同観測を行うことで研

究の発展を目指している。

運用の工夫で困難を克服

「ひので」はこれまで、必ずしも順風満帆で科学運用を行ってきたわけではない。約3年間の運用で、何度か冷や汗をかき、その対応に奔走する日々を送った。その最たるものが、2007年末に発生したX帯系送信機の障害だ。衛星からのX帯信号が不安定となり、データを欠損なく地上に伝送することが難しくなったのだ。X帯系送信機は科学データを高速（4Mbps）で地上に伝送する役割を担っており、科学観測にとっては生命線である。

人工衛星は地上にある設備とは異な

新人としてプロジェクトに参加

岡本文典

自然科学研究機構 国立天文台学振特別研究員



そもそもの始まりは SOLAR-B（現 ひので）打ち上げ1年前の2005年、当時京都大学博士課程1年生だった私は指導教官から、「東京で SOLAR-B の地上試験があるが、京都からも若い人を出してほしいということなので、君、行って来ない？」という感じで送り出された。

それなりに興味はあったものの、装置に関してはまったく知識がなく、何をやっているのかもわからないことが多々あった。しかしいくつかの試験に参加させてもらい、取得データの解析を行った。装置開発に関わるメンバーの方々から丁寧に教えてもらえたこともあり、何とかレポートにしてまとめあげることができた。その功績を認められ、2006年から東京に移り住み、プロジェクトに本格的に参加することになった。

そうなると、さらに装置や運用体制を勉強しなければならない。「この計画書のこのページのこれを読んで理解しといて」と言われて読んでみるものの、そもそも英語で書いてあるので、結局何度か聞いてみないと理解できない。衛星の運用も外国人が大勢参加するため、英語で行われる。なので、打ち上げ前に行われた2度のリハーサルでは、何を言っているのかわからないことも多かった。「こんなんで大丈夫やろか……」と

思いつつ、精進するしかなかった。

2006年9月に打ち上げに成功、その後観測が開始されると、すぐに観測機器の運用を任された。サポートは付いているものの、「オレでええんかいな」と思わずにはいられない。しかし、開発メンバーの方たちは「君が正しいと思う観測をどんどんやりなさい」と奨励してくれた。つまり、10年以上の歳月をかけてようやく完成した装置を好きに使っていいよ、とされているに等しい。もちろん、無意味な観測を実行した覚えはないが、そのようなメンバーの寛大さには尊敬の念を禁じ得ない。それがあったからこそ、私のような新参者であっても研究に打ち込むことができたのだと言える。

開発段階を知らない私から見て、「ひので」プロジェクトはとても多くの部分が信頼で成り立っていると感じる。責任の大小は無論あるが、プロジェクトを維持するうえで学生もスタッフも関係ない。私も打ち上げ後から衛星の科学運用の一端を任されている。とは言っても、まだまだわからないことも多く、英語での議論に難儀することもある。

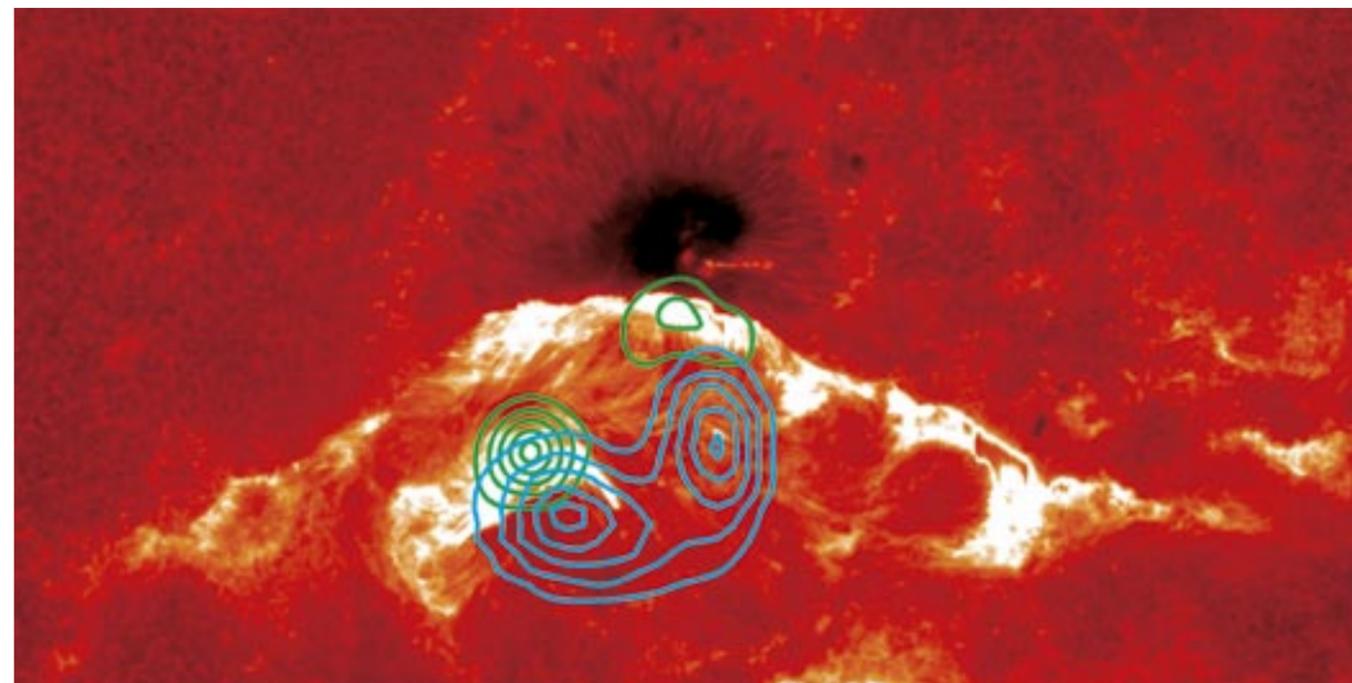


図4 同時観測に成功した巨大な太陽フレア（2006年12月13日）。「ひので」可視光望遠鏡（SOT）のCa II H線画像の上に、RHESSI衛星による硬X線源（緑色の等高線）と野辺山電波ヘリオグラフのマイクロ波源（青色の等高線）を重ねてある。

粒子加速が効率的に起きている磁気ループ内で、硬X線源は足元付近に、マイクロ波源はより上空にある。マイクロ波は、磁気ループにとらえられた高エネルギーの電子から、硬X線は磁気ループから高密度の大気に降り注ぐ電子から主に放射される。

り、障害が起きたからといって修理や交換はできない。運用の工夫で何とかするしかない。当初はX帯系送信機の使用頻度を下げ、連続使用時間を短くするなどして、何とか科学観測を続けた。並行して障害原因や回復の検討を行ったが、2008年春までにほぼ機能喪失状態となった。そのため、X帯に比べ16分の1しか伝送速度がないS帯を科学データの送信に使用するよう切り替えた。

遅い伝送速度の不利をカバーするため、観測データを機上で効率良く圧縮する工夫を施し、また受信回数を大幅に増やした。受信回数増加は、各国宇宙機関の全面的なバックアップにより、世界に散らばるいくつもの地上局を「ひので」データの受信に振り分けてもらうことで実現した。この結果、2008年秋以降、X帯運用時の科学観測に比べ7割程度の科学観測ができるまで回復し、世界の太陽天文台としての運用を再開している。

さらなる活躍をめざして

ヒヤヒヤする事態を何度か乗り切り、約3年間運用してきたが、「ひので」にはまだまだ行うべき観測がいくつもあ。太陽活動が極小期になる直前に打ち上げられた「ひので」は、いままで多くの観測時間を「静かな太陽」の観測に費やしてきた。これからは、「活動的な太陽」の観測に重点を移していくことが、科学研究上重要だ。つまり、太陽フレアや活動領域の観測である。しかし、なかなか太陽の活動度が上がらず、やきもきする毎日である。

最近、活動サイクルが極大に達するのは、2013年ころまで遅れるとの予測がされている。とすると、最低でもいまから4年以上「ひので」は観測を続けていく必要がある。そのためにも、「ひので」運用の防人として注意深く衛星を監視していきたい。そして、これまで以上に世

界の太陽研究をリードできればと考えている。



清水敏文（しみず・としふみ）
大学院時代、「ようこう」衛星に育ててもらった。活動的な太陽コロナに魅かれ、「マイクロフレア」の観測的研究などを進める。SOLAR-B計画では、可視光望遠鏡や衛星の開発に研究人生のほとんどを捧げた。2005年にJAXA宇宙科学研究本部に移り、プロジェクトマネージャーを補佐、「ひので」運用の司令塔を務める。科学研究に割く時間が増えないのが目下の悩みである。

論文の数で見る 「ひので」による国別科学成果

下条圭美

総合研究大学院大学助教 天文科学専攻／自然科学研究機構 国立天文台・野辺山太陽電波観測所助教

「ひので」プロジェクトでは全観測データを即時公開しているため、全世界の太陽研究者が「ひので」により得られたデータを使って研究することができる。このような状況で、各国の科学成果がどの程度挙げられているかは、興味が湧くところである。科学成果を評価することは困難であるが、ここでは単純に、「ひので」データを基に執筆された査読論文の数を、第一著者が所属する研究機関の国籍別に集計し、国別の科学成果の評価を試みた。

今回の集計は、太陽物理分野における主要論文誌である、日本天文学会欧文研究報告 (PASJ)、Astrophysical Journal (Letter および Supplement を含む)、Astronomy & Astrophysics (A&A)、Solar Physics、Science の5誌にて出版された査読論文を対象に行った。そのため、上記以外の論文誌にて出版された査読論文や査読無し論文を含む「ひので」の全論文数は、以下で述べる数倍になっていることに注意していただきたい。なお、2007～2008年では、1日1編のペースで「ひので」の論文が出版されているとの報告もある。

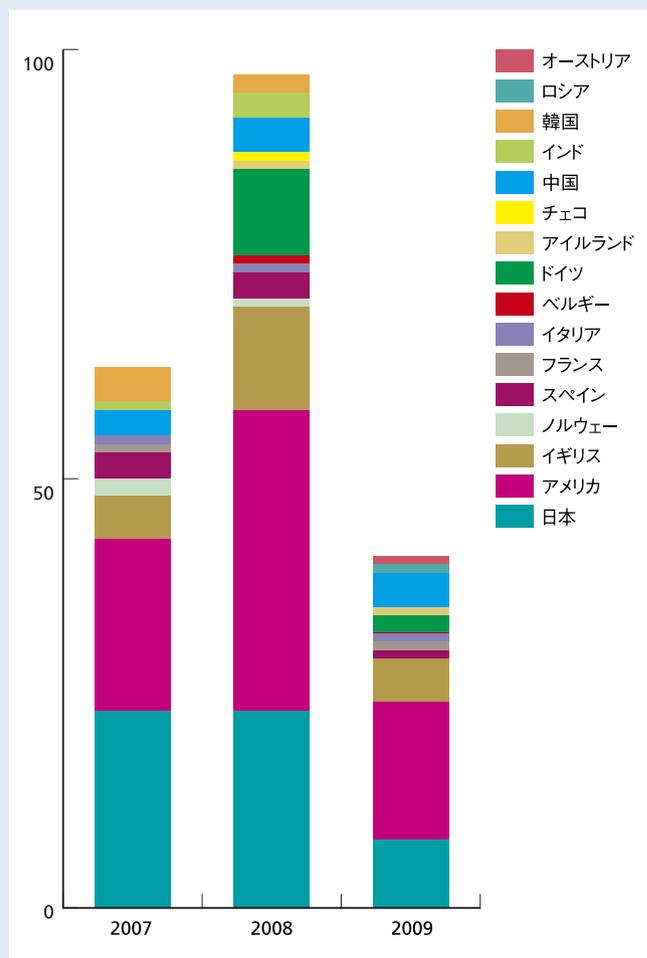
「ひので」打ち上げから2年8カ月経った2009年5月末現在、全観測データ公開および観測データの即時公開開始から2年が経過し、201編（2007年63編、2008年97編、2009年41編）の査読論文が対象論文誌に掲載されている。また、2007年にはPASJ、Science、Solar Physicsにて、2008年にはA&A、Solar Physicsにて「ひので」特集号が出版されている。

2007年は、データ全面公開から間もないこともあり、衛星および搭載望遠鏡の開発に関わった日米英の著者による論文が大多数を占めている。全データ公開から約1年が過ぎた2008年からは、開発に関わらなかった国の著者が増え、特にアメリカ、ドイツ、中国の研究機関に所属する著者による論文が増えていることが読み取れる。

個々の論文を見ると、アメリカの研究機関に所属している著者の中には、中国からアメリカに留学し、アメリカの研究機関を第一所属として執筆している著者が多くいる。彼らは第二所属として中国の研究機関を表記している。よって今回の集計では、中国の研究機関に所属する著者の論文数を過小評価している可能性はある。

一方、日本の研究機関では、日本の太陽研究者のほとんどが論文を出版した2007年と同じ数の論文が2008年にも出版さ

れた。さらに2009年も同様のペースで出版されており、日本における太陽研究の活発さを示している。しかし、「ひので」の論文総数が増加傾向にあるため、全論文に対する日本の割合は減少している。これは、日本の太陽研究者数が、日本が生み出す高品質の観測データに対し不足していることを表しており、日本にとって太陽研究者の育成が急務であることを示唆している。



第一著者が所属する研究機関の国籍別に集計した論文数（2009年5月末現在）。PASJ、Astrophysical Journal、A&A、Solar Physics、Scienceの5誌に出版された査読論文を対象とする。