

太陽観測衛星「ひので」の誕生と活躍

清水 敏 文

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉
e-mail: shimizu@solar.isas.jaxa.jp



2006年9月23日午前6時36分(日本時間)、太陽観測衛星「ひので」を載せたM-Vロケットの第7号機は、ごう音をとどろかせ、内之浦の発射台から飛び立っていった。あれから10年、あっと言う間の時間であった。いくつかの苦難に遭遇しながらも、世界の第一線で太陽研究を牽引している。搭載された三つの望遠鏡はどれも当初目指した性能をほぼ実現し、ほかではできない特徴的な観測をしている。「ひので」は日本が誇るべき、世界に開かれた軌道上太陽天文台である。

1. 太陽観測衛星「ひので」の誕生

1.1 打上げまでの長い道のり

「ひので」は、軌道上飛翔前には、SOLAR-Bと呼ばれた¹⁾。具体的なミッション概念の検討は1993年頃から始まった。1991年からX線画像観測を開始した「ようこう」が、想像を超えてダイナミックに変動するコロナの活動の様子を捉えたことが契機である。研究者らは、次はそのコロナ活動の源を知りたい、という科学的動機を共通してもっていた。そこで提案されたのが、コロナ活動の源がある太陽表面(光球)の磁場の形態や性質を高解像度で偏光観測し、同時に軟X線や極紫外分光でコロナの観測を行うミッションである。この基本的な概念を一貫してもち、そしてSOLAR-Bプロジェクトが1998年に立ち上がった。このあたりの立ち上げやその後の開発の苦労に関しては、天文月報2008年6月号(第101巻第6号)に掲載された特集『「ひので」太陽を見つめて』の巻頭言で、常田佐久先生がまとめられているので、それを是非読んで欲しい。

1.2 軌道上運用の初期

2006年9月23日に衛星は打ち上げられ、「ひので」と命名された。完璧な軌道投入であり、最

後の打ち上げとなったM-Vロケットの有終の美を飾るのにふさわしい飛翔だった(図1)。1年のうち8か月以上夜がない軌道となる、高度約680 kmの太陽同期極軌道に衛星の軌道を修正した後、10月下旬より望遠鏡が観測を開始した。衛星が打ち上げられた2006年は、第23太陽活動サイクルの極大からすでに6年ほどが経過していた。しかし、幸運にも、2006年12月に大規模



図1 「ひので」を搭載したM-V-7号機の打ち上げ(2006年9月23日)。

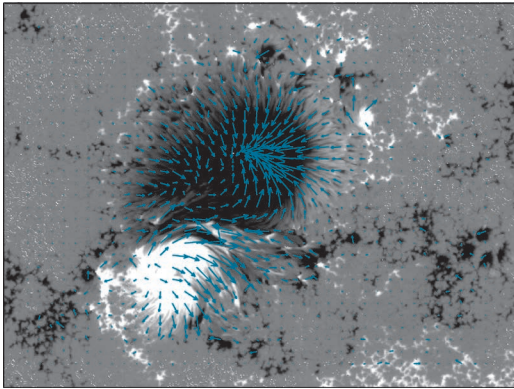


図2 大規模フレアを発生させた活動領域の太陽表面磁場形状。2006年12月13日取得。視線方向の磁場の極性を白黒で示した磁場画像に、水平方向の磁場を青矢印で重ねた。



図3 初代プロジェクトマネージャの故 小杉健郎教授。

(Xクラス)フレアを3回起こした活動領域が太陽面上に現れ、この活動領域の太陽表面磁場形状(図2)の時間変化やX線で見たフレアを初期観測で捉えたこと²⁾は、フレア爆発やコロナ質量放出(CME)における磁場構造のモデリング研究に多大な貢献となった³⁾。その後、約100年ぶりと言われた無黒点の状態が2008-2010年ころに続くことになるが、この期間には静穏領域をさまざまな視点で観測することに集中できた。

1.3 小杉先生の逝去

三つの望遠鏡が設計どおりの性能を発揮し始めた矢先だった。初代プロジェクトマネージャとして、ひのでプロジェクトを牽引してこられた小杉健郎先生(図3)が、2006年11月26日に突如この世を去られた。そのとき、衛星運用は若手研究者が中心となり推進する体制ができていたが、国際ミッションのマネジメントも若年層が中心にもり立てていくことになった。宇宙研では、坂尾太郎准教授、そして筆者がマネージャとしての重責を背負って、プロジェクトを進めてきた。小杉先生は、この10年のひのでの活躍を見て、私たちに及第点を与えてくれるだろうか。

また、共同でプロジェクトを推進している国立天文台の皆さんや大学の研究者・大学院生が、

日々の衛星科学運用に参加して、そしてデータ解析を通して新しい科学成果を創出してくれていることが、プロジェクトにとって最も頼もしいサポートである。

2. 衛星・望遠鏡の概要

太陽観測衛星「ひので」(図4)には、三つの最新鋭望遠鏡が搭載されている。可視光磁場望遠鏡(SOT)⁴⁾⁻⁷⁾は、口径50cmの反射式望遠鏡で、2016年現在でも太陽衛星観測としては世界最大の口径をもつ。可視光域にて、この口径での回折限界性能を実現し、0.2-0.3秒角(太陽面150-200km)の高解像度観測を行っている。さらに、安定した軌道上環境からの連続観測は、太陽大気内の磁場に沿って励起された電磁流体(MHD)波を初めて捉えた^{8), 9)}。さらに、焦点面観測装置は、太陽表面に磁束管として分布する磁場のベクトルを高精度に計測する能力をもち、それによって太陽表面に存在する磁場の振る舞いについての理解が大きく進んだ。斜入射型のX線望遠鏡(XRT)^{10), 11)}は、高温のコロナプラズマから発せられる軟X線を空間分解能約1秒角で画像として観測している。太陽風の流源で上空に流れ出すプラズマ流を捉えたり¹²⁾、ダイナミックに活動するコロナを画像と

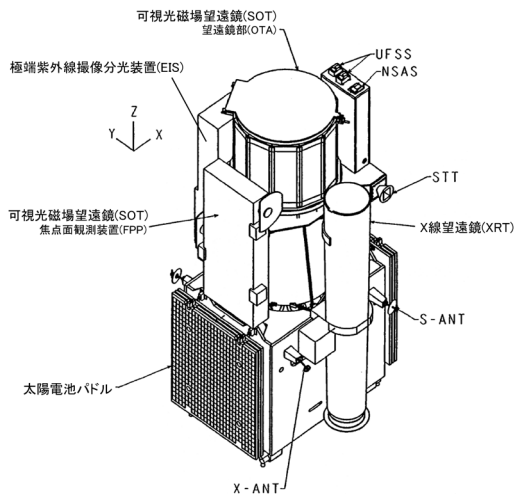


図4 「ひので」の概観(打上げ時)。収納された太陽電池パドル両翼は軌道投入後に展開された。

して捉えた。極端紫外線撮像分光装置 (EIS)¹³⁾ は、極端紫外線域 (17-21, 25-29 nm) のコロナプラズマ起源の輝線スペクトルを高精度に計測する分光器である。コロナプラズマの状態を分光・撮像手法により診断し、コロナの振る舞いについて大きく理解が進んだ。

日本の衛星としては、前例がない高解像度の観測を行う衛星であり、その挑戦的な性能を実現するために、姿勢制御や熱構造¹⁴⁾ など新たな技術が必要となった。「ひので」データから明らかのように、この開発によって厳しい精度の衛星技術が新たに培われた。この衛星技術、例えば、微小擾乱の試験や管理手法は、その後の観測衛星で手本として活用されている。

3. 科学成果ぞくぞくと

三つの望遠鏡から得られたデータは、新たな発見や知見を次々ともたらし、それらの成果は多数の論文として発表されてきている。図5に一部を示すように、米国 *Science* (2007年)、日本天文学会欧文研究報告 (*PASJ*, 2007年, 2014年), *Astronomy & Astrophysics* (2008年), *Solar Physics* (2007年, 2008年; 装置論文) など、国内外の査

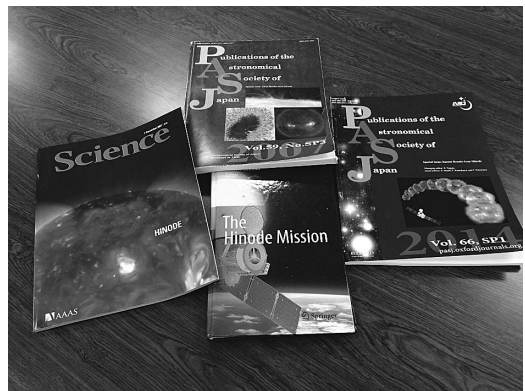


図5 「ひので」成果を特集した査読雑誌の一部。

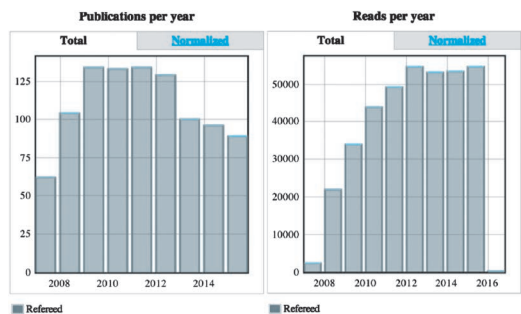


図6 「ひので」査読論文の発表数(左)とダウンロード数(右)。NASA ADSによる。

読専門誌が「ひので」特集号を組んで、科学成果を大々的に紹介している。

図6(左)は、2007年から2015年までに発表された査読付き論文の数の推移である。飛行後数年が経過したころ(2009-2012年)には、データ解析の深化が進み毎年120編を超える論文が発表された。最近はやや勢いは下がったが、それでも年間90-100編程度の論文が発表され続け、現時点で総査読論文数は1,000編を超えた。また、これらの論文がどれだけ読まれているかをNASA ADSで調査してみると、徐々に「ひので」の知名度が上がり、2012年以降は年間5万件を超える回数で発表論文への一定したアクセスがあることがわかる(図6右)。

「ひので」が得た観測データは即時公開され(打上げ後約6カ月間を除く)、世界中の誰でも興味

あれば利用することができる¹⁵⁾。発表された査読論文の数は、アジア地域、アメリカ地域、ヨーロッパ地域で1:1:1の割合である。国別では米国が一番多く、ついで日本、英国と装置開発に寄与した国々が多い。また、地上天文台での可視光偏光分光観測で実力をつけてきたドイツやスペイン、そして近年では中国やインド発の成果発表も多い。日本の研究者・大学院生にとって、世界からの追い上げを感じながら、緊張感をもって研究活動ができる好ましい状況となっている。

4. 大規模な国際協力

「ひので」搭載の望遠鏡は、いずれも国際協力で製作された。SOTの望遠鏡本体や画像安定化システムの主要部分、XRTのCCDカメラといった、ミッション上重要な部分を国内で開発することで、日本の主体性を確保した。一方で、それ以外の望遠鏡部分は、米国(NASA)と英国(STFC)との国際協力によって開発した。日本が開発した部分も海外機関が開発した部分も、ブラックボックスを極力なくすという方針で、定期的開催した設計会議で双方納得がいくまで尽くした討議や、性能試験への相互参加などを積極的に行った。私にとって、飛翔体開発を行ううえで非常に貴重な経験を得る場となった。

また、欧州宇宙機関(ESA)やノルウェー宇宙センタ(NSC)が、北極・南極地域にある地上局アンテナを用いて毎日15パス程度、「ひので」からのデータを受信していることも、動画観測が重要となっている太陽観測にとって、強力な支援である。

5. 世界に開かれた軌道上太陽天文台

軌道上の衛星運用は、日本を中心に、米国や英国の開発機関が参加する形で行っている。各望遠鏡の運用当番(チーフオブザーバーと呼ぶ)は、日本の研究者・大学院生のみならず、海外の研究者も来日して宇宙科学研究所で顔を突き合わせて

運用を行った。数年が経過して運用が定常的になるに従って、海外からはリモートで観測立案や取得データのチェックを行える体制を構築していった。衛星運用への研究者や大学院生の参加は、最新データをいち早く確認できるなどの利点が多いが、ある種ボランティア的な負担をお願いしている。各自がデータ解析にあたる時間を公平にもてるようにとの考えから、この負担は国際的にもできるだけ均等になるように配慮してきた。毎日行っている運用会議では、運用当番らが観測立案のために必要な望遠鏡間の観測調整や観測ターゲットの調整を行っている。大学院生にとっては、英語の良い鍛錬の場にもなっている。

観測は、定常的に行われる標準的観測とともに、国内外から随時届く提案観測(HOP; Hinode Operation Plan)から成り立ち、常に世界に開かれた軌道上太陽天文台として観測運用を行っている。想像以上にダイナミックな彩層を捉えた「ひので」動画は、太陽コロナと表面をつなぐ彩層の重要性を認識させ、NASAは彩層の紫外線分光を行う小型衛星IRISを2013年に飛翔させた。IRISは、「ひので」が観測するターゲットを追従するように観測を行っている。

6. 山あり谷あり

「ひので」の衛星運用は、順風満帆と見られるが、実際のところ山あり谷ありである。最大の苦境は、2007年12月末から発生し始めたX帯変調器の不調である。X帯通信は、科学データを高速に伝送する重要なものであるが、2008年3月以降は全く使い物にならなくなってしまった。さまざまな試行錯誤や協力を得て、最終的には、伝送速度が1/16しかないS帯高速回線で科学データを地上に降ろすことに移行した。搭載系での工夫(データ圧縮や取得方法の効率化)や、各宇宙機関の地上局ネットワークおよび商用地上局での受信回数を大幅に増やすことで、観測への影響を可能な限り抑えた。また、2011年3月の東日本大震

災では、首都圏の計画停電の影響で、頻繁に地上系システムを停止させる必要があり、観測立案やコマンド送信が相当たいへんであった。

また、「ひので」が飛翔する高度約680 kmの極軌道は、宇宙デブリが多数存在する領域であり、頻繁に異常な接近が発生している。推進系をもつ「ひので」は、衝突の危険がある異常接近に対応するための運用手順を2010年に明文化して、そのような事態に備えている。2012年3月の他国の超小型衛星との異常接近のケースでは、実際に推進系を用いた緊急回避マヌーバを実施した。日本の科学衛星では、初めてとなるデブリ回避運用であった。

7. 今後の展望

世界の研究者からの「ひので」観測へのニーズは非常に高い状態を維持し続けている。また、衛星機能も劣化などが見られるが、健全である。「ひので」の飛翔後、太陽サイクル活動が低調であることも踏まえると、2020年に向けた極小期の観測は、太陽サイクルの根源を探るうえでも大事である。少なくとも2020年を超えて観測を継続させ、そして次期太陽観測衛星につなげることは、太陽研究において重要である。幸いにも、各宇宙機関にはミッション延長の重要性が高く評価いただけている。例えば、2015年に行われたNASAの太陽圏ミッションに対するシニアレビューの評価結果では、「ひので」は14機中3番目にランキングされている。今後も「ひので」が継続して活躍するためには、研究コミュニティによる研究活動を通じた支援が重要である。

謝辞

「ひので」の活躍は、非常にたくさんの方々によるさまざまな支援・参加があるからです。非常

に限られた紙面のため、すべてを述べることはできませんが、この場を借りて御礼申し上げます。今後ともご支援をよろしく願います。

参考文献

- 1) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 2) Kubo M., et al., 2007, PASJ 59, S779
- 3) Schrijver C. J., et al., 2008, ApJ 675, 1637
- 4) Tsuneta S., et al., 2007, Sol. Phys. 249, 167
- 5) Suematsu Y., et al., 2007, Sol. Phys. 249, 197
- 6) Shimizu T., et al., 2007, Sol. Phys. 249, 221
- 7) Ichimoto K., et al., 2007, Sol. Phys. 249, 233
- 8) Okamoto T. J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 9) De Pontieu B., et al., 2007, Science 318, 1574
- 10) Sakao T., et al., 2007, Science 318, 1585
- 11) Golub L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 63
- 12) Kano R., et al., 2007, Sol. Phys. 249, 263
- 13) Culhane J. L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 19
- 14) Minesugi K., et al., 2013, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. 56(2), 104
- 15) Matsuzaki K., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 87

Hinode's Brief History—Still Active Toshifumi SHIMIZU

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara 252-5210, Japan

Abstract: The 7th M-V rocket, carrying solar observing satellite Hinode, was successfully launched from the launcher at Uchinoura at 6:36 JST on 23 September 2006. Ten years have almost passed since then. Hinode has been active in the front line of solar researches in the world, although there are some difficulties in spacecraft operations. All the onboard telescopes provide science data with high performance as planned, which cannot be acquired by other facilities. Hinode is the solar observatory on orbit fully open to the world, which we should be proud of.