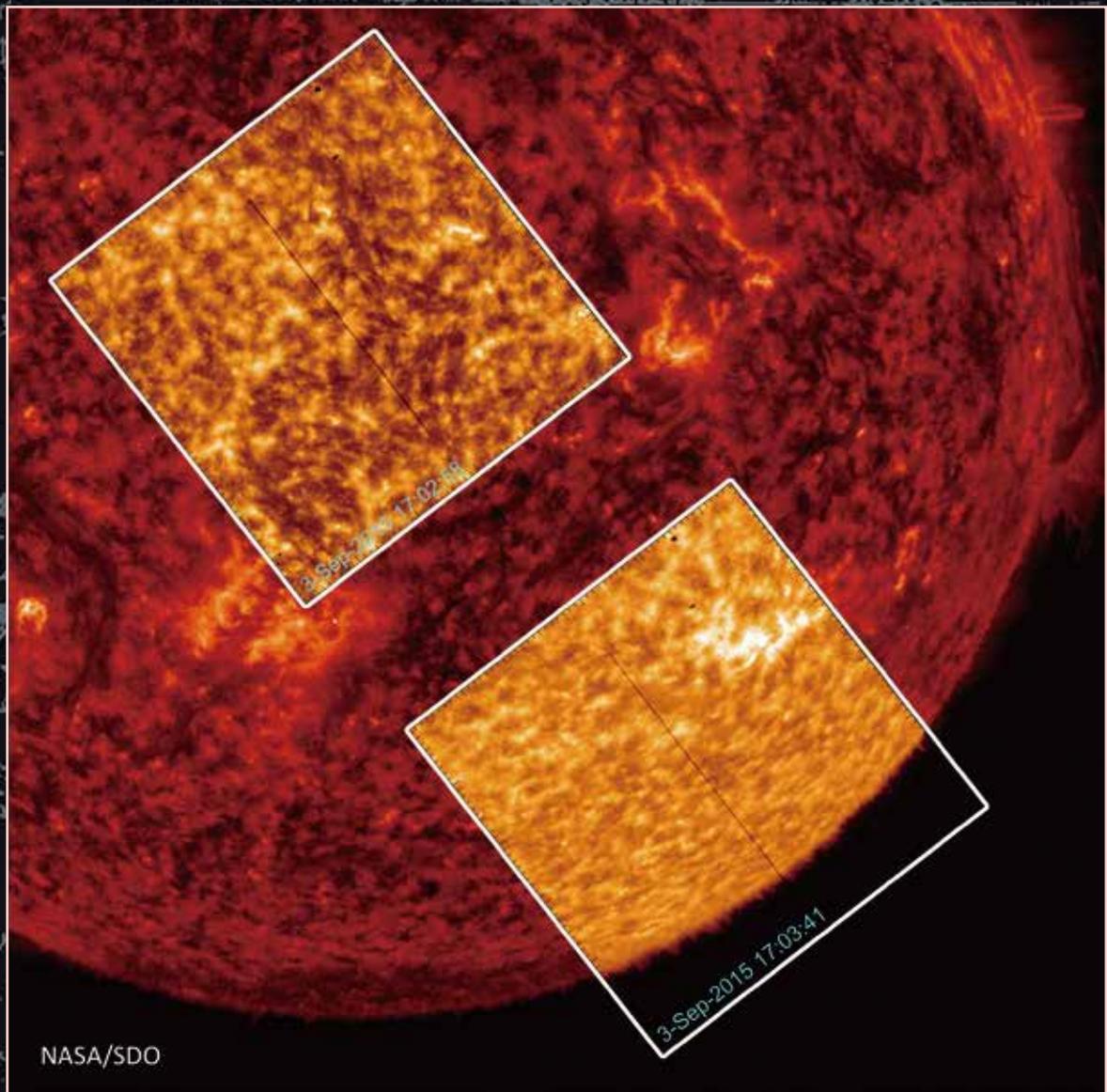


国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2016年1月1日 No.270

特集 CLASP観測成功！ —未知の太陽彩層磁場の計測に挑む—



● 2016年を迎えて — 林 正彦台長

● CLASP観測成功！

Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)の概要 / 太陽ライマン α 線の偏光を世界で初めて検出した観測装置CLASP / 偏光で捉えた彩層・遷移層の新しい姿 / 紫外線望遠鏡を可視光で測定する / 高精度で一様回転する波長板モーターの開発 / Visible-light optical alignment of the instrument to minimize experiments at Lyman- α — 紫外線の観測装置をどうやって調整するの? — / 太陽彩層の動画を撮るSlit-jaw (モニタ)光学系の開発 / 見た目も黒衣になった、陽の当たらない主構造 / なかなか一筋縄ではいかなかった全体試験 / 5分間にかかる7年間のプロジェクトをマネジメントする

● 「KAGRA 実験施設第一期完成記念式典」報告

1

2016

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

巻頭言

2016年を迎えて

— 林 正彦 (国立天文台長)

04

おしらせ

- 「KAGRA 実験施設第一期完成記念式典」報告
— 平松正顕 (天文情報センター/チリ観測所)

06

特集 CLASP 観測成功！

—未知の太陽彩層磁場の計測に挑む—

- Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP) の概要
— 鹿野良平 (SOLAR-C 準備室)
- 太陽ライマン α 線の偏光を世界で初めて検出した観測装置 CLASP
— 成影典之 (先端技術センター)
- 偏光で捉えた彩層・遷移層の新しい姿
— 石川遼子 (ひので科学プロジェクト)
- 紫外線望遠鏡を可視光で測定する
— 勝川行雄 (ひので科学プロジェクト)
- 高精度で一樣回転する波長板モーターの開発
— 石川真之介 (JAXA / ISAS SOLAR-B プロジェクト)
- Visible-light optical alignment of the instrument to minimize experiments at Lyman- α 紫外線の観測装置をどうやって調整するの？
— Gabriel GIONO (総合研究大学院大学)
- 太陽彩層の動画を撮る Slit-jaw (モニタ) 光学系の開発
— 久保雅仁 (ひので科学プロジェクト)
- 見た目も黒衣になった、陽の当たらない主構造
— 坂東貴政 (ハワイ観測所)
- なかなか一筋縄ではいかなかった全体試験 — 成影典之
- 5分間にかける7年間のプロジェクトをマネジメントする — 坂東貴政

15

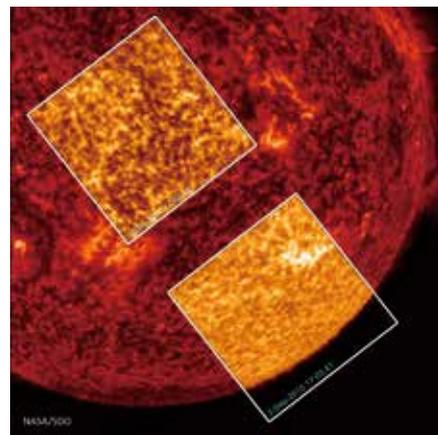
- 編集後記
- 次号予告

16

シリーズ「新すばる写真館」22

鎖状銀河団：70億年前の巨大銀河団形成の現場

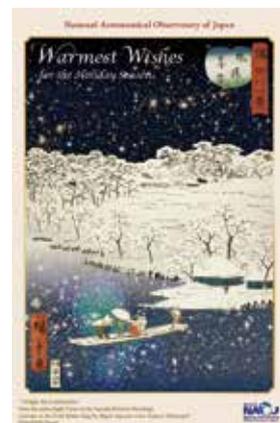
— 兒玉忠恭 (ハワイ観測所)



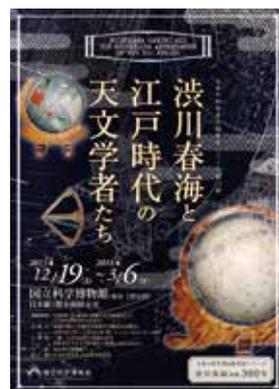
表紙画像

CLASP が捉えた太陽像 (くわしくは特集記事へ)。

背景星図 (千葉県立郷土博物館)
渦巻銀河 M81 画像 (すばる望遠鏡)



今年もよろしく
お願いします。



国立科学博物館
で開催中！ 国
立天文台の貴重
資料も多数展示
されています。

国立天文台カレンダー

2015年12月

- 3日(木) 幹事会議
- 4日(金) 運営会議
- 8日(火) ~11日(金) プロジェクトウィーク
- 11日(金) 4次元デジタルシアター公開/観望会(三鷹)
- 18日(金) 幹事会議
- 19日(土) 4次元デジタルシアター公開(三鷹)
- 24日(木) 安全衛生委員会(三鷹)
- 26日(土) 4次元デジタルシアター公開/観望会(三鷹)

2016年1月

- 7日(木) 幹事会議
- 8日(金) 4次元デジタルシアター公開/観望会(三鷹)
- 13日(水) 先端技術専門委員会
- 15日(金) 運営会議
- 16日(土) 4次元デジタルシアター公開(三鷹)
- 22日(金) 幹事会議
- 23日(土) 4次元デジタルシアター公開/観望会(三鷹)
- 25日(月) プロジェクト評価委員会
- 28日(木) 安全衛生委員会(全体・三鷹)

2016年2月

- 5日(金) 幹事会議
- 12日(金) 4次元デジタルシアター公開/観望会(三鷹)
- 20日(土) 4次元デジタルシアター公開(三鷹)
- 25日(木) 安全衛生委員会(三鷹)
- 26日(金) 幹事会議
- 29日(月) 天文情報専門委員会

2016年を迎えて

国立天文台長
林 正彦

巻
頭
言

あけましておめでとうございます。

昨年はなかなか苦しい年でした。4月に本格化しようとしていたマウナケア山頂での次世代超大型光学赤外線望遠鏡TMTの建設工事が、一部の反対運動のため中断されました。非常に残念なことです。国立天文台では、すばる望遠鏡が建設中であったことから、ハワイ住民の方々とさまざまな機会に対話を行い、また天文学振興財団の協力のもと、ハワイ文化を守るための地域活動を支援してきました。このようなハワイ現地における日々の活動を通して、すばる望遠鏡や、これから建設することとなるTMTへの理解を、住民の方々にお願いしてきました。その結果、住民の大半からはTMTを快く支援していただいています。しかし、まだ全ての方々の合意を得るには至っていません。今年は、何とかこれらの方々の理解を得て、建設の目処を立てたいと思っています。

一方で、2015年にはたいへん嬉しいニュースもありました。東京大学宇宙線研究所の梶田隆章所長がノーベル物理学賞を受賞されたことです。梶田所長は、現在は大型低温重力波望遠鏡KAGRAの責任者を務められています。実は、日本において重力波の検出実験を進めてきたのは国立天文台でした。たとえば三鷹のキャンパス内には、KAGRAのプロトタイプとなった基線長300mのレーザー干渉計型重力波検出実験装置TAMA300があります。TAMA300は、2000年ごろに当時の世界最高感度を達成し、大型干渉計として世界に先駆けて長期間観測も行いました。そして、現在KAGRAに参画している研究者の多くが、TAMA300で経験を積んできた人たちです。KAGRAにおいては、国立天文台は主干渉計、防振装置、補助光学系、ミラー性能評価など、主要部分を担当しています。KAGRAが一日も早く最終性能に達し、重力波が日常的に検出できるようになる日が来るのが楽しみです。

さて、アルマ望遠鏡はいよいよ第三期（サイクル3）の共同利用に入りました。今期の特徴は、10km程度の長い基線を用いた観測が初めてオープンされたことです。その結果、ハッブル宇宙望遠鏡より10倍シャープな分解能0.01秒角の画像が撮れるようになります。つまり、昨年目を見張ったおうし座HL星の円盤のような画像が、今後は次々と出てくるはずで、今年中には、そのような驚くべき画像をいくつか皆さんに見せられるのではないかと期待しています。

すばる望遠鏡は、超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam）による観測を順調に続けています。昨年は、このカメラで描き出された最初のダークマター地図をお見せしました。また、昨年は宇宙におけるリチウム元素の生成現場を直接観測するなど、重要な成果を挙げ続けています。

今年もまた、最先端の望遠鏡で得られた成果を「国立天文台ニュース」を通して皆さんにお届けします。

最後になりましたが、日本の天文学の目覚ましい発展は、国立天文台職員の努力はもとより、政界、官界、産業界の皆様のご支援と、何にも増して多くの国民の皆さんのご理解によって成しとげられてきました。年頭にあたって、あらためてこれらの方々に感謝を申し上げ、国立天文台のさらなる発展に向けて努めていきたいと思っております。

KAGRA 実験施設第一期完成記念式典

平松正顕（天文情報センター広報室）

「アインシュタインの最後の宿題に挑む」。そんな観測装置が、岐阜県の神岡鉱山に作られている KAGRA（かぐら）です。国立天文台と東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構（KEK）を主要ホスト機関として建設されている KAGRA の第一期実験施設がほぼ完成し、2015年11月6日に現地でのお披露目と富山市内で完成記念式典・記者会見が行われました。重力波は、その名の通り重力の変動が波として伝わってくる現象です。重力波が届くと、空間がごくわずかだけ伸び縮みします。その変化量は、太陽と地球の間の距離（約1億5千万km）であっても水素原子1個分（0.1ナノメートル）に満たないほど。この極微の変動を捉えるために、KAGRA は片腕3kmのL字型真空パイプの両端に置かれた鏡間の距離をレーザーで極めて精密に測定します。2015年中の試験観測、2017年度からの本格観測で、世界初の重力波直接検出を目指しています。

富山大学で開催された記者会見の様子。登壇者は左から林正彦 国立天文台長、五神真 東京大学総長、梶田隆章 東京大学宇宙線研究所長、山内正則 高エネルギー加速器研究機構長、大橋正健 東大宇宙線研究所重力波推進室長。梶田氏のノーベル賞受賞決定後とあって、テレビ・新聞・雑誌などの記者で会場は大入り満員に。林台長からは、国立天文台の TAMA300 の実績や KAGRA における分担の説明に続いて、重力波検出の暁には電磁波観測と併せたマルチメッセンジャー観測で新たな天文学の扉を開く決意が披露されました。



(上) KAGRA において国立天文台が担当する鏡の防振装置。NAOJ ロゴが掲げられている装置に鏡（ピンク色に見える円形の物体）が収められています。(下) KAGRA 坑内を見学中の佐藤勝彦 自然科学機構長（左）と林台長（右）。中央は装置の解説をする国立天文台重力波プロジェクト推進室の麻生洋一准教授。長さ 3km の L 字パイプの結節点がある中央実験室は非常に大きな空間で、クライオスタットなども見上げるほどの高さがあります。



東京大学宇宙線研究所 写真提供



重力波望遠鏡のがなめともいえる鏡を格納する巨大なクライオスタット（右）と、その前で説明を聞く多数の記者。左奥が中央実験室で、3km の真空パイプはページ右手前方向に延々と続いています。

特集

CLASP 観測成功！

— 未知の太陽彩層磁場の計測に挑む —

協力

CLASP プロジェクト

ひので科学プロジェクト

SOLAR-C 準備室

2015年9月に打ち上げられた“Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)”は、世界で初めて太陽彩層のライマン α 線で偏光を観測することに成功し、未知の磁場構造の解明に光を当てました。CLASP 開発プロジェクトの全貌を紹介します。



CLASPの打ち上げの様子。

Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP) の概要

鹿野良平 SOLAR-C 準備室 准教授
CLASP 日本側 Principal Investigator (PI)

「太陽の彩層での磁場を測りたい」。これがCLASPプロジェクトを進めてきた原動力です。

太陽表面（光球）の上空に広がるコロナは数百万度の高温プラズマで形成されています。これが如何に加熱されているかは、太陽物理学積年の疑問です。また、そこで発生する太陽フレアなどの活動現象が如何に引き起こされているかも未解決です。2006年に打ち上げられた「ひので」衛星によって、光球での磁場観測とコロナでのプラズマ診断、さらに両者の間の彩層・遷移層での撮像観測や分光観測が精力的に行われ、研究が進められています。中でも、彩層での高空間分解能による撮像観測は、ジェットや波動などの多くの活動が彩層を満たしていることを発見し、近年、彩層での定量的観測の重要性が高まってきました。そして、

2013年に打ち上げられたIRIS衛星により彩層スペクトル線の分光観測が始まり、温度・密度・速度場の研究は発展してきました。しかし、太陽大気の加熱や活動現象の解明に重要な磁場測定を、磁場が主体的に振る舞うプラズマ $\beta < 1$ になる彩層上部～遷移層で行うことは、いまだ満足にはなされていません。十分強い光球磁場（100～数千ガウス）の測定で用いられているゼーマン効果では、高々100ガウス程度しかない彩層や遷移層の磁場が生む偏光信号はもともと弱いうえに、光球より激しい熱的・非熱的運動により打ち消され、到底観測できる偏光信号は残りません。

その状況の中で着目されたのが、Trujillo Buenoの集録論文（[図01左](#)）です。太陽の彩層・遷移層から放たれるライマン α 線（水素原子が出す波長121.6 nmの輝



線）は、黒点などの強磁場領域（活動領域）周辺だけではなく、黒点からはなれた静穏領域でも明るく光っていますが、そのライマン α 輝線の偏光を、0.1%レベルの高精度で測定すれば彩層磁場の情報が得られるはずとの画期的な内容でした。そ

その後、実際の静穏領域の太陽大気を簡易的に模擬したFAL-Cモデルを用いて再評価したところ、出現する偏光の符号が反転したものの、0.1%レベルの精度の偏光観測で彩層磁場にアクセスできるとの結論は変わりませんでした(図01右)。ポイントは、散乱で生じる微弱な偏光が彩層磁場によるハンレ効果(10ページ参照)で変化することを利用する点で、さらに、これが激しい運動によって打ち消されにくい偏光であることでした。

散乱偏光とそこに現れるハンレ効果を正しく理解するためには、太陽大気構造の十分な理解だけではなく、量子力学的素養も強く求められるので、敷居が高いのは事実です。また、ライマンα線のような真空紫外線の光は大气だけではなく、多くの光学ガラスで吸収されてしまうこともあり、高精度で偏光計測できる真空紫外線用偏光分光装置は存在していませんでした。ですが、ライマンα線の高精度偏光観測でのハンレ効果の検出は、太陽全面での彩層磁場計測の道を拓くための、とても魅力的な手段です。そこで、いきなり衛星搭載機器と考えるにはあまりにも挑戦的過ぎますが、短時間の弾道飛行中ながら宇宙からの観測ができる観測ロケットを使ったプロジェクトであれば実現性が高いとして、これまでNASAの観測ロケット・プロジェクトの経験があるNASAマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)と、上記論文の著者であるTrujillo Bueno氏率いるスペインの研究グループを主なパートナーとしてCLASP計画が発足しました。その後、フランスやノルウェーを含む多くの研究者の協力を得ることができ、5か国12機関に広がるプロジェクトに発展しました(図02)。

ライマンα線の直線偏光を~0.1%という高い精度で検出するという、これまでにない観測装置を開発するにあたっては、後述されるような様々な苦労話が発生しましたが、2015年春に何とか無事にCLASP観測装置を完成させることができました。そして、2015年9月に米国ホワイトサンズ・ロケット発射場(図03)から完璧な飛翔によって打上げられ、ほぼ完璧なライマンα線観測データを得ることができました(タイトルバック画像・くわしくは国立天文台ニュース2015年10月号参照)。現在、磁場情報を引き出すべくライマンα線の偏光データの解析が進

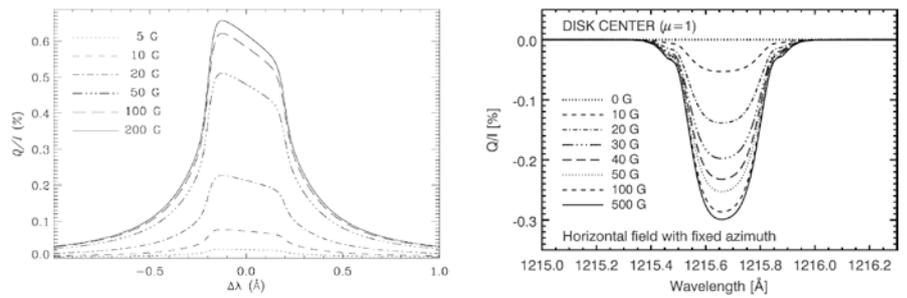


図01 (左) 簡便なスラブモデルを使って初めて示されたライマンα線のハンレ効果による偏光度予測(Trujillo Bueno et al., 2005, ESA SP-596)。(右) 経験的太陽大気モデルFAL-Cを使って計算しなおされた偏光度予測(Trujillo Bueno et al., 2011, ApJ)。



図02 CLASPの国際連携体制。

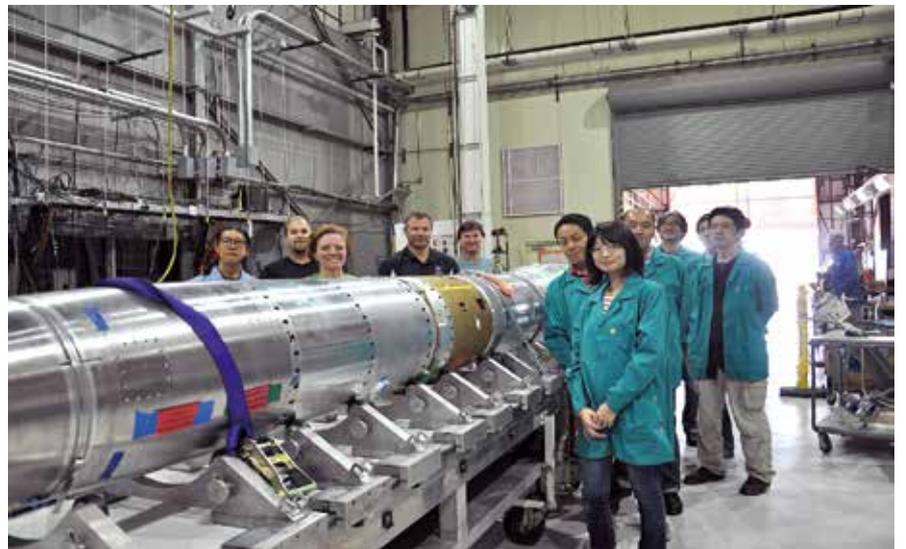


図03 ホワイトサンズ・ロケット発射場の機械環境試験室にて組み上げられた、CLASP観測装置とロケット側搭載機器。そして、日米CLASPチーム。

められていますが、それ以外にも、ライマンα輝度変動から彩層・遷移層での加熱過程を明らかにしようという試みや、偏光度の時間変化から磁気的波動の検出を試みるなど、様々なテーマでの解析研究がなされています。これまでに要素技

術開発に関する査読論文が4本出版されていますが、今後、CLASP観測装置全体の論文も含めて装置論文が3本程度、初期科学成果報告を含めた科学研究論文も多数、日米西仏のチームから出版される予定です。

太陽ライマン α 線の偏光を世界で初めて検出した観測装置CLASP

成影典之 先端技術センター 特任研究員
CLASP日本側 Instrument Scientist

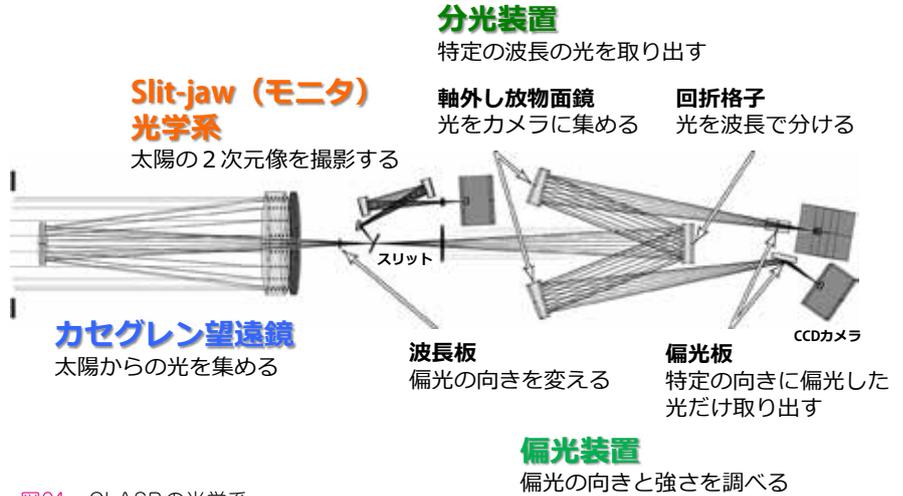


図01 CLASPの光学系。

カセグレン望遠鏡

● CLASPの望遠鏡はカセグレン式で、スリットに焦点を結びます。この望遠鏡の特色は、狭帯域フィルター・コーティング（コールドミラー・コーティング）が施された主鏡です。見た目には透明で可視光や熱は反射せず透過するのですが、ライマン α 線だけは反射します。これが、このコーティングをコールドミラー・コーティングと呼ぶ所以です。つ

まり、このコーティングによって、必要なライマン α 線のみを装置内に取り込んでいるのです。主鏡を透過した、可視光・熱は、主鏡の後ろに設置された熱吸収板で吸収させます。太陽光は可視光や熱の量が膨大なので、その対策が必須なのですが、このコーティングと熱吸収板の組み合わせは、シンプルながら大変効果的な熱対策システムです。

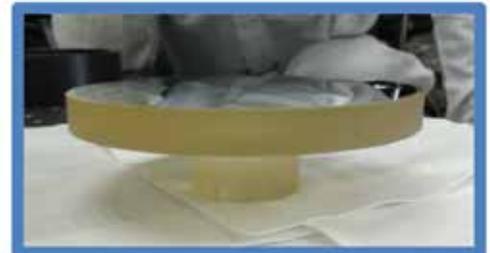
偏光分光装置

● CLASPの中心となる装置で、ライマン α 線の直線偏光を測ります。スリットを通過した光は、回折格子によって分光されます。分光された光のうち、ライマン α 線近くの波長帯が、軸外し放物面鏡でCCDカメラに結像されます。そして、スリットの前に置かれた半波長板と、CCDカメラの直前に配置された偏光板によって偏光を測ります。仕組みは以下のようなものです。波長板を回転させることで、太陽からの光の偏光の向きを回転させます。そして、その光を偏光板に通した後に、カメラで強度を測定します。太陽の光の持つ偏光（向きと度合い）と波長板の回転角度によって、カメラで測定される光の強

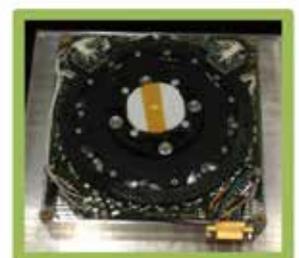
度が変化します。この変化の具合を調べることで、太陽からの光の偏光の向きと度合いを知ることが出来ます。

CLASPでは、光の損失を無くすため波長板を連続的に回転させていて、波長板が0.3秒間で22.5°回る間に1回の露光を行うように、波長板用回転モーターとカメラを精密に制御しています。そして、CLASPの偏光分光装置の最大の特徴は、2つの系統を持ち、それぞれの系統の偏光板が互いに直交する向きに配置されていることです。これにより直交する直線偏光2成分を同時に測定することができ、装置の偏光測定精度を高めています。

副鏡



波長板



軸外



図02 CLASPの構造と搭載光学素子。

CLASPは、太陽から放たれるライマン α （アルファ）線（真空紫外線領域の輝線：121.567 nm）の直線偏光を0.1%という極めて高い精度で測定できる、世界で初めての観測装置です。このような装置がこれまでに存在しなかった理由はライマン α 線を含む真空紫外線という波長帯の持つ性質が大きいのですが、そもそも0.1%という偏光測定精度は、どの波長でも容易ではありません。

なぜなら、偽の偏光を生んでしまう複数の要因を0.1%よりも十分小さく抑える必要があるからです。偽の偏光の要因には「①光子雑音」「②太陽の強度変動」「③観測装置の姿勢のブレ」「④観測装置の偏光較正の誤差」などが挙げられます。つまり、高精度の偏光測定のためには、短い時間で偏光変動データセットが取れる高いスループットを持つ装置を作り、精確に装置の偏光較正を行うことが必要なのです[高いスループットを持つ(=多くの光を集める)というの①の対策のため、短い時間でというの②

③の対策のため]。

話を真空紫外線の持つ性質に戻します。真空紫外線は、特定の物質以外は透過しにくい、つまり空気も含めた大半の物質に吸収されるという性質を持っています。この吸収されやすいという性質は、多くの光を集めたい装置にとっては厄介なものです。観測装置のデザインや光学素子に用いる素材に制限が加わる上、汚染管理も厳しく行わなければならないからです。

我々は、0.1%の偏光測定性を達成するために、「高いスループットを持ち」「直交する直線偏光2成分を同時に測定できる」新しい光学系をデザインしました。それが、図01の光学系です。まず吸収されやすいライマン α 線で高いスループットを達成するために、透過型の光学素子は波長板のみにしました。また、それ以外の反射型素子の数も必要最小限に抑えました。

さらに、CLASPのデザインで特徴的なのが、直入射に配置された回折格子で

す。これにより、回折格子の本来の役目である「波長分散」に加えて、「光を対称に2つに分ける役割」も持たせました。つまり、直入射の場合に対称になる+1次光と-1次光を利用するのです。この2つに分けられた光を、互いに直交する向きに置かれた偏光板に通すことで、直交する直線偏光2成分を同時に測定することを可能としています。

このデザインを具現化したのが図02です（各観測装置、つまりカセグレン望遠鏡、偏光分光装置、Slit-jaw（モニタ）光学系の詳細については、それぞれのかみ解説を御覧ください）。反射型の素子には、その役割に応じた高い反射率を持つコーティングを施し、スループットを高めています。また、厳しい汚染管理を行い、スループットの低下を防ぎました。

その結果、我々が開発したCLASPは、太陽からのライマン α 線の直線偏光を世界で初めて検出し、目指していた0.1%の測定精度も達成することができました。

主鏡



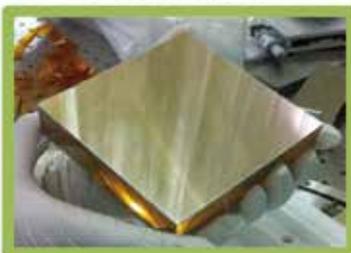
Slit-jaw（モニタ）光学系



外し放物面鏡



回折格子



偏光板



Slit-jaw（モニタ）光学系：
ミラーユニット & フィルターユニット

● ライマン α 線の2次元画像を撮るための装置です。スリットが切ったある板は鏡になっていて、スリットを通らなかった光が、この装置に導かれます。光は、2枚の放物面鏡によってCCDカメラに結像されます。そして、ライマン α 線以外の光をカットするため、コールドミラー・コーティングが施された折り返し鏡と、2枚のフィルターを使っています。この装置で撮られた画像は、リアルタイムで地上に送られ、観測時の位置合わせに使われました。位置合わせをスムーズに行えるように0.6秒間隔という短い間隔で連続的に撮影したのですが、このような高い時間分解能で撮られたデータは科学的にも大変貴重です。

偏光で捉えた彩層・遷移層の新しい姿

石川遼子 ひので科学プロジェクト 助教
CLASP日本側 Project Scientist

CLASPの観測時間は、たったの5分。一瞬とも言える観測から、最大限の科学成果を引き出すため、我々は観測領域やスリットの向き、他の観測機器との共同観測計画まで、綿密に議論してきました。観測標的は、黒点などの強い磁場のない、静穏領域です。彩層の磁場測定は

これまで地上観測で行われてきましたが、比較的磁場の強い黒点などの活動領域の観測に留まっています。さらに、静穏領域は太陽の大部分を占めており、高温大気形成の理解には、静穏領域の磁場情報は必要不可欠です。CLASPの科学目標は、彩層～遷移層というコロナに最も近い大気層での静穏領域の磁場情報を初めて得る事です。

そして迎えた打ち上げ。我々が手塩にかけて開発した観測装置は予想通り、いや予想以上の性能を発揮し、世界で初めてのライマンα輝線の偏光スペクトルの観測に成功しました。得られた直線偏光は、散乱偏光がハンレ効果★によって変調を受けているものと考えられます。

うれしいハプニングもありました。打ち上げ前は完全にノーマークだったシリコンの輝線がたまたま観測視野内に入っていたのです。このスペクトル線は、打ち上げ後のデータ解析で、ライマンα線と同程度の強い直線偏光を示すこと、さらにはライマンα線とは異なる磁場強度に対してハンレ効果に感度を持つことがわかりました。ライマンα線との振る舞いの違いから、より確実に磁場情報が引き出せると考えています。現在、チームを挙げてデータ解析に取り組んでおり、



静穏領域磁場の導出はすぐそこに迫っています。

★ハンレ効果

太陽大気中の輻射場は、高さ方向及び水平方向に非等方で、これによって散乱偏光が生じる。平行平板大気の場合、散乱偏光は太陽の縁に平行、もしくは垂直方向の直線偏光となる。そこに磁場があると、その強度や方向に応じて、散乱偏光による直線偏光が変調を受けるのがハンレ効果である。ライマンα線は、彩層～遷移層の静穏領域で予測される5～50ガウスの磁場に対してハンレ効果が働く。

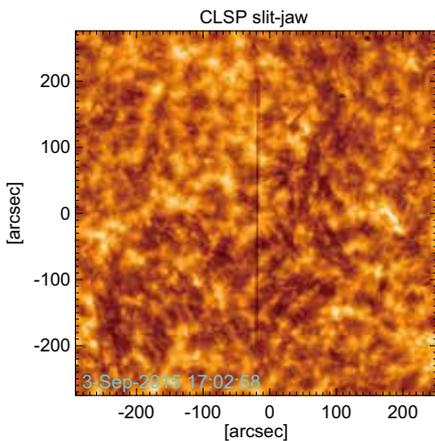


図01 (図03も参照) CLASP Slit-jaw (モニタ) 光学系で撮像された太陽中心のライマンα線画像。CLASPは最初の10秒間、太陽中心を観測しました。太陽中心では対称性から散乱偏光がゼロになると考えられており、その情報を偏光測定性能の評価に使うという思惑があったためです。思惑通り、得られた観測データから、見事0.1%の偏光測定性能が達成できていることを確認できました。

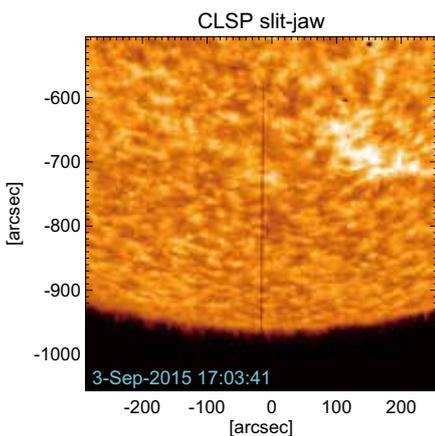


図02 (図03も参照) 太陽中心での観測の後、CLASPは240秒間の本観測に移りました。CLASP第一の目的は、ライマンα線の散乱偏光の検出です。そのため、大きな散乱偏光が発生すると考えられている太陽縁近傍が観測領域として選ばれました。Slit-jaw (モニタ) 画像の視野内に明るい活動領域があるのは、打ち上げの最中、リアルタイムでポインティングの調整をする際の目印とするためです。

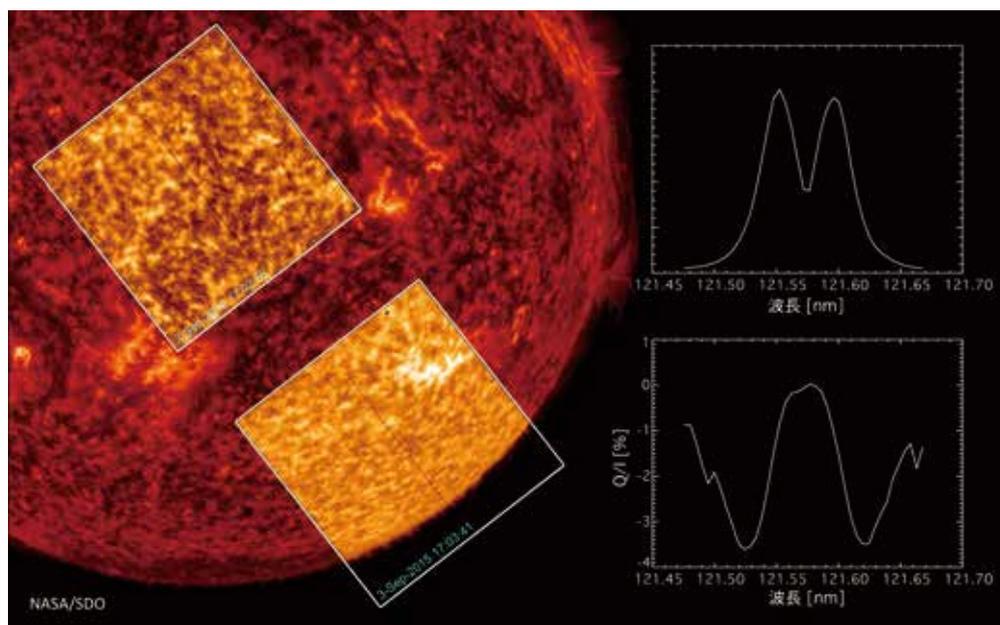


図03 図01、02の観測領域。右の図は、世界で初めて得られたライマンα輝線の偏光スペクトルの例。上から、強度(I)、Q/I (太陽の縁に平行な直線偏光が正、太陽の縁に垂直な直線偏光が負)。

紫外線望遠鏡を可視光で測定する

勝川行雄 ひので科学プロジェクト 助教



CLASP 望遠鏡部は口径27 cmのカセグレン式反射望遠鏡です。主鏡と副鏡の2枚の鏡から構成される天文観測でよく使われるシンプルな望遠鏡です。

CLASPで一番大きい光学素子である直径30 cmの主鏡を望遠鏡構造に設置す

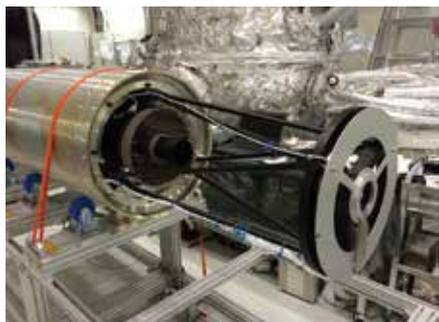


図01 CLASPのカセグレン望遠鏡部を分光器部とドッキングしたところ。「透明」な主鏡が見える。

る作業は、組立工程の中で最も緊張する作業の一つでした。トラス構造の隙間からそっと主鏡を中にいれ精度よく設置するため、治具の改良や作業のリハーサルを何度も行うことで組み立てられました。組立の後は光学性能出しのための調整です。CLASPの主鏡にはライマンα線のみを反射し可視光を透過する特殊なコーティングがほどこされています。そのため主鏡は見た目には透明です。

一方、口径27 cmの望遠鏡の光学性能(収差)を紫外線で精度よく測定することは大変難しいため、可視光をわずかでも反射してあげることが大切です。レーザー干渉計測定で望遠鏡の収差を測定できるためです。干渉計測定は「ひので」可視光望遠鏡(50 cm口径)の測定で経験のあるものですが、主鏡で反射する

光が弱いため干渉縞のコントラストが低く苦労させられました。測定やデータ処理は私よりもGabriel Gionoさんが頑張ってくれました。最初に測定した時には予想以上に収差が大きかったことをよく覚えています。主鏡・副鏡それぞれの性能は確認できていたので、それを組み合わせてもそんなに悪くなるはずがなく、原因を探してみると副鏡の位置出しピンが誤って180度逆向きに取り付けられていたことに気が付きました。それを直し、干渉計測の結果をもとに副鏡の傾きを調整しました。さらに望遠鏡を120度おきに回して3回干渉計測し平均をとることで重力変形の影響を打ち消す測定を行い、ほぼ無収差の紫外線反射望遠鏡を作ることができました。

高精度で一様回転する波長板モーターの開発

石川真之介 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
SOLAR-B プロジェクト プロジェクト研究員



CLASPではライマンα光の直線偏光を観測するために、一定速度で連続回転する半波長板を用いています。望遠鏡で集光された太陽からのライマンα光は、回転波長板を通すことで直線偏光の向きが連続的に変化します。回転波長板を通

過した光は、CCDカメラで撮像される直前に反射型偏光板で特定の向きの直線偏光の成分のみ取り出されます。するとCCDカメラで検出される光の強度は波長板の回転に

伴って時間変化します。この時間変化の大きさと位相から、直線偏光の偏光度と方向を導きだします。波長板の回転が一様でないと、偏光度や方向の見積もりに誤差が生じ、磁場の強度や方向の見積もりにも誤差が生じてしまいます。そのため、波長板を連続回転させるモーターには高い回転一様性が要求されます。CLASPで使用される波長板モーター(図01)は、もともとは次期太陽観測衛星SOLAR-Cの光学磁場診断望遠鏡(SUVIT)のために、宇宙研を中心としたSOLAR-Cワーキンググループとメーカーが協力して開発してきたもので、SOLAR-Cに向けた技術実証も兼ねてCLASPに搭載されました。SOLAR-CとCLASPは回転速度が違うので、CLASP搭載用のモーター駆動回路は、メーカーとともに新たに開発しました。駆動回路はCLASPの回転速度で性能が発揮できるよう最適化して設計しています。モーターと駆動回路はCLASPへの取り付け前に回転一様性を確認する試験

を行い(図02)、偏光度測定への誤差が0.1%未満という、非常に高い性能を発揮できていることが確認できました。CLASPの打ち上げ時にも波長板モーターは完璧に動作し、見事に太陽からのライマンα光の直線偏光を検出することができました。



図01 CLASPの構造に取り付けられた波長板モーター。輪状の部分と内側の黒い部分全体が一体となって回転する。中央の空洞の奥には波長板が取り付けられている。



図02 回転一様性評価試験のセットアップ。中央の台の上に乗っているのが波長板モーター(作業者の右手の左側)。可視光LED、偏光板、回転波長板を用いてCLASPの観測装置と同様の偏光測定システムを作り、回転一様性と偏光測定への影響を評価した。

Visible-light optical alignment of the instrument to minimize experiments at Lyman- α —紫外線の観測装置をどうやって調整するの？—

Gabriel GIONO 総合研究大学院大学



Well aligning the mirrors and the grating was an important part of the instrument development, as it ensures the image quality (i.e. spatial and spectral resolutions). Misaligned optics would result in blurry slit-jaw images and spectro-polarimeter spectrums, compromising the scientific objective of the instrument. Aligning the CLASP optics at the Lyman- α wavelength (121.6 nm, in the vacuum ultraviolet) was technically difficult since this wavelength is absorbed by air. Experimental solutions had to be found to minimize the experiment-time under vacuum condition.

The telescope and spectro-polarimeter parts were aligned separately, and attached afterwards. For the telescope, a He-Ne laser (632.8 nm) was used to measure the wavefront error and the secondary mirror was adjusted with respect to the primary mirror to obtain the best image quality possible at the center of the slit. Spatial resolution of 1" was achieved, which corresponds to resolve ~730 km-long structures on the surface of the Sun. The optical alignment of the spectro-polarimeter was more complicated, as the diffraction grating (i.e. optical element separating the light into the different wavelengths, similar to the effect of a prism) had to be aligned at Lyman- α . However, the off-axis mirrors could be aligned in visible-light (VL). A custom-designed VL grating tuned for the He-Ne laser was used for this purpose instead of the Lyman- α grating. Then, the VL grating was replaced by the Lyman- α grating. Only its tilt and the camera's focus position were adjusted under vacuum using motorized mechanical jigs and a Lyman- α light-source. The final spatial and spectral resolutions met the requirement for the spectro-polarimeter.

Working on the instrument as a PhD student was a very enriching experience. CLASP is a relatively small instrument, but includes many aspects of instrumentation: imaging with the slit-jaw combined with the telescope, spectroscopy with the spectrograph and also polarization. The alignment of the various optical elements was challenging: both the experiments on the telescope and spectro-polarimeter took between two weeks and a month of all-day-long activities in the clean room. Many problems arose during the experiments, and innovative solutions had to be found, such as writing a new software to calculate the telescope's wavefront error or using computer simulation to guide the spectro-polarimeter alignment.

鏡や回折格子の調整をうまく行うことは、画像の質（空間および波長分解能）にかかわるので、観測装置を組み立てるうえで重要な部分でした。光学系の調整が悪いと、Slit-jawの画像や偏光分光装置のスペクトルがぼやけてしまい、観測装置の科学目的の達成が危うくなります。

CLASPの光学系をライマン α の波長（121.6 nm、真空紫外線域）で調整することは、技術的に困難でした。この波長は大気に吸収されてしまうからです。真空状況下での実験時間を最小限に抑えるために解決策を見つける必要がありました。望遠鏡部と偏光分光装置部を別々に調整し、後で結合させました。望遠鏡部については、赤色レーザーを用いて波面誤差を測定し、スリットの中心にできるだけよい画質の像を得るために、副鏡の傾きを主鏡に対して調整し、1秒角の空間分解能を達成しました。これは、太陽面上の730 km以下の長さの構造を分解することに相当します。

偏光分光装置の光学調整は、もっと複雑でした。回折格子（光を異なる波長ごとに分ける、プリズムと似た効果の光学素子）はライマン α で調整する必要があったからです。しかし、軸外し鏡は可視光で調整することができました。この目的のために、ライマン α 用の回折格子の代わりに、赤色レーザーに合わせた可視光用の回折格子を開発しました。それから、可視光用の回折格子をライマン α 用の回折格子に取り換え、ライマン α 用回折格子の傾きとカメラの焦点位置の調整のみを真空下で、モーター駆動で傾きを調節する機械装置とライマン α 光源を用いて行いました。最終的な空間および波長分解能は、偏光分光装置に要求された値を満足できるものでした。

大学院生として装置開発に携わったことは、非常に意義深い経験でした。CLASPは比較的小さな装置ですが、多くの開発的要素を含んでいます。望遠鏡とSlit-jawによるイメージング、分光装置による分光、そして偏光です。異なる光学素子間の調整は、チャレンジングでした。望遠鏡と偏光分光装置の両方の実験とも、2週間から1か月、一日中クリーンルームの中での作業でした。実験中、多くの問題が生じ、例えば、望遠鏡の波面誤差を計算する新しいソフトウェアを書いたり、偏光分光装置の調整の指標とするコンピュータシミュレーションを用いたり、イノベティブな解決策を見出す必要がありました。



Figure 1: Alignment of telescope.
図01 望遠鏡の調整。左側が著者。

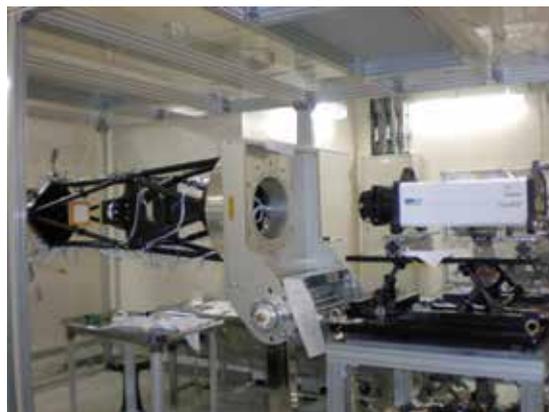


Figure 2: Alignment of the spectro-polarimeter: the spectro-polarimeter (left) was attached horizontally to the dolly, and the He-Ne laser interferometer (right) was positioned with a 6-axis table to illuminate the slit position.

図02 偏光分光装置の調整。偏光分光装置（左）は水平にドリーに取り付けられている。He-Neレーザー干渉計（右）はスリット位置を照射できるように6軸の台に置かれている。

太陽彩層の動画を撮る Slit-jaw (モニタ) 光学系の開発

久保雅仁

ひので科学プロジェクト 助教

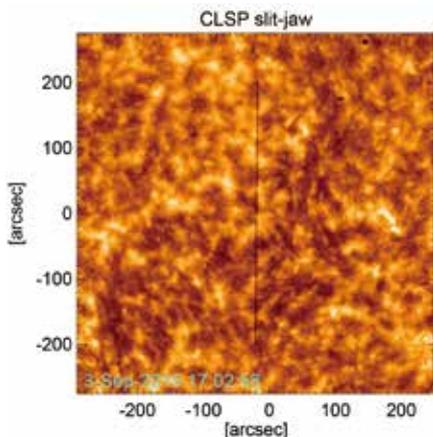
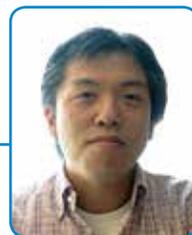


図01 ドアが開いた直後に Slit-jaw が撮った太陽面中心付近の様子。

Slit-jaw (モニタ) 光学系は、望遠鏡によってスリット周辺に作られた太陽像の二次元画像をライマン α 波長域で取得します。取得した画像は、リアルタイムでロケットの向く方向を決めるのに使用されるので、「後のデータ解析で何とかする」ということは許されず、観測の5分間（というか最初の1分くらい）で成否が決まります。さらに、露光時間等も打ち上げ前に設定した値から変えること

ができないため、正にまな板にのった鯉でした。ロケットのドアが開いて、少しモゴモゴした彩層っぽい画像（図01）がディスプレイに表示された時は、嬉しいというより、これで責任を果たすことができたとホッとしました。

Slit-jaw (モニタ) 光学系は、構造的には分光器部の一部です。開発の際に与えられたお題は、「分光器部の組立に極力迷惑をかけずに組立を行うこと」でした。そのため、CLASP 本体に簡単に取り付けて最小限の性能確認で済むように、光学素子類をユニット化し、単体で性能を確認できるように工夫する必要がありました（図02）。初めての経験だったこともあり、試作品の開発やその性能試験では、いろいろな方に迷惑をかけ、ずいぶん苦労もしました。その分、フライト品に関しては時間短縮・リスク低減ができ、本体に組み込んだ後は全く問題を起こりませんでした。また、スリット鏡の開発では、物理的な孔の開いた凸凹の無い $25\mu\text{m}$ 幅のスリットをどうやって作るかが難題でしたが、ATCの野口卓さ

んの助けを得て、シリコンウェハ—にエッチングするという方法で問題をクリアできました。ただ、ウェハ—の厚みは 0.4mm と非常に薄いので、最後まで割れないか不安でしたが、ホルダー—の設計が上手く行ったこともあり、日米での振動試験や打ち上げ振動でもびくともしませんでした。スリットは、Slit-jaw 画像の真ん中に、黒い線として見えています。皆さんにとっては、単なる黒い線にしか見えませんが、Slit-jaw で撮った美しい太陽像との共演は感慨深いものがあります。



図02 可視光を使って実施した単体での光学性能評価試験の様子。

見た目も黒衣になった、陽の当たらない主構造

坂東貴政

ハワイ観測所 研究技師
CLASP 日本側 Project Manager

主構造開発とは、鏡や回折格子などを保持する機械マウント構造、および、これらの光学部品を所定の位置に精度良く固定しつつ、ロケット打ち上げの振動・衝撃を受けても壊れたりズレたりするこ

とのない骨組み構造の開発です。飛翔体構造の経験豊富な外部エンジニアの設計のもと、先端技術センター ME ショップの皆さんの多大なるご支援によって実現できました。



図01 全長が約 2.5m ある CLASP 主構造のベーキング準備作業。組み立て前の構造部品全てに対して念入りの脱脂洗浄と真空ベーキングを行い、さらに、光学部品を除く大部分を組み立てた後の主構造全体でも、大型真空チャンバーで再度ベーキングを行った（主構造は、乱反射光の除去のために、塗装を用いない低アウトガスの黒色化を施してある）。

CLASP で観測する波長域は油脂などの有機物にとっても吸収されやすいため、構造材料に有機物が残留していると真空環境下でアウトガスとして放出され、CCD カメラで検出される光量が極端に減少（感度劣化）してしまいます。宇宙で真空になるのは約5分間とごく短時間ですが、試験光源を使って地上で行う光学性能評価や偏光校正計測のために延べ千時間近く真空状態になる



図02 フランスチームが開発し供給した球面回折格子を機械マウント構造に設置するため、回折格子のガラス基板裏面と金属パッド部を接着剤で接着するところ。高額の一品モノを所定の位置に精度良く一発で接着する、という絶対に失敗の許されない重圧のかかる作業。接着ジグの開発と手法の検討、ダミー品を使っでの試行錯誤と改良を経て、この回折格子を含む CLASP の全フライト鏡7個をインハウスで接着。

ので、その間にどんどん光学的な劣化が進んで行くことになります。このため、主構造は真空ベーキングと呼ばれる、真空中で高温にすることで有機物を飛ばして除去する工程を長時間かけて行いました(図01)。CLASPの場合、穴の位置や寸法などのちょっとした修正加工でも再

び長時間のベーキングを要するため、スケジュールの大きな遅延に繋がってしまっています。図面や3次元CAD上で念入りに確認はしたものの、光学設計と構造設計のインタフェースに誤解が無かったか、装置全体に関わる部分なのでずっと心配は尽きませんでした。それだけに、全て

の光学部品を取り付けた後、CCDカメラにきちんと像が映って主構造に問題がないことを確認できた時は本当にホッとしました。“陽の当たらない”地味な部分の開発(図02)でしたが、ブレない仕事を宇宙でしっかりとやり遂げて無事に帰還した主構造を誇りに思います。

なかなか一筋縄ではいかなかった全体試験

成影典之 先端技術センター 特任研究員
CLASP日本側 Instrument Scientist

打ち上げの約5か月前、それぞれ単体での試験を合格した望遠鏡、偏光分光装置、Slit-jaw (モニタ) 光学系の3つのパートは、結合して一つの装置に組み上げられました。ここで初めて全長約2.5mのCLASPの全貌が現れました。ここからはCLASP全体での評価試験(end-to-end試験)となるので、試験規模は大きなものになりました。

最初に実施したのは、可視光迷光試験です。これはライマン α 線を観測する偏光分光装置やSlit-jaw (モニタ) 光学系に可視光が入ってこないことを確認するための試験です。太陽の場合、可視光の量はライマン α 線の約2千万倍も明るいので、ほんの僅かの迷光でもライマン α 線の測定の邪魔になります。この試験には、ATC大クリーンルームの屋上にあるヘリオスタットを用いました(図01)。この試験では、ライマン α 線の光量に比べて数%の可視光が、偏光分光装置のカメラに届いていることが判明しまし

た。原因はスリットで回折した可視光が、カメラに入ってきていたのです。この迷光の経路は想定していなかったもので、急遽、この経路を塞ぐライトトラップを設置して解決しました。

次に行ったのは、ライマン α 線を使っただけの光学性能評価です。この試験には、CLASPの口径(直径約30cm)全体を照らせる、ライマン α 線の平行光が必要でした。そこで我々は、CLASPとは別の望遠鏡を用意しました。この望遠鏡の焦点位置にライマン α 線のランプを設置すれば、主鏡から平行光が出せるという仕組みです。平行な光を作るので、我々はこの装置のことをコリメーターと呼んでいます。コリメーターの長さは約1.5mなので、CLASPと結合させれば、全長4mにもなります(図02)。この試験は、日本、米国で何度も行いました。射場に輸送する直前に行われた試験では、CCDカメラの故障が判明しました。この故障が射場まで気付かないままだったら、打ち上げ延期は必至でしたが、輸送前に発見できたのは不幸中の幸いでした。

そして全体試験の山場は、なんといっても振動試験です。打ち上げの振動に耐えられるかを確かめるために、CLASPにロケットのセクションを結合させた全長6m以上の試験体を加振器に載せ、振動を加えます(図03)。そびえ立つ様に見えるCLASPに振動が加えられると、鳴り響く轟音の大きさは半端ではありません。装置が壊れないか心配と緊張が走り、数十秒の加振がとて長く感じます。射場で打ち上げ直前に行った振動試験では、先述のライトトラップが外れてしまいました。打ち上げ日が迫っていたため、急遽、金を蒸着した特殊なテープを用意し、これを貼ってライトトラップとすることにしました。しかし、一旦組み上



図02 ライマン α 線を使った光学性能評価試験。

がったロケットをばらすことは出来ず、なんとか腕が一本入るだけの空間を使って、目視確認無しの手探りでテープを貼る必要がありました。しかも、許されるズレは0.5mm以下と要求の厳しいものでした。そこで、テープを貼るための治具を急ごしらえで作り、何時間も掛けてテープを貼るための準備とデモンストレーションを行いました。実際にテープを貼る作業自体は、ものの数秒で終わったのですが、大変緊張した作業でした。

全体試験では予期せぬことが幾つも起こりましたが、その都度、検証と対策を施し、万全に仕上げたCLASPは、そのフライトでたいへん素晴らしいデータを取得してくれました。



図03 振動試験。

ヘリオスタット(ATC屋上)



図01 ヘリオスタットを用いた太陽光迷光試験。

5分間にかける7年間のプロジェクトをマネジメントする

坂東貴政 ハワイ観測所 研究技師
CLASP日本側Project Manager



プロジェクトマネジメントは、プロジェクトの規模や状況に応じて異なる面もありますが、CLASPの場合、①スケジュール・開発資金の管理（つまり、リスクコントロールと問題対応）、②メーカー対応（仕様とコストのせめぎ合い、契約調整）、③ロジスティクス、④手薄な部分の開発作業を主な役割として考え、鹿野PIと密に連携して進めていきました。

観測ロケット搭載装置の開発は、衛星搭載装置の開発とはだいぶ異なっています。開発性の高い観測装置を極端に制限

された予算で試行錯誤しながら開発するという手作的要素が大きく、また、衛星計画とは異なりメーカーの関与は限定的です。このため、メーカーが長年蓄積してノウハウとして持っているマネジメント力は活用できず、あらゆることが手探り状態での運営となりました。CLASPは20~30代の若手中心のチームで、大した経験もありませんでした。しかしながら、鹿野PIのリーダーシップと要所要所でのシニアの方々の温かい助言、そして何よりもメンバそれぞれが強い責任感を

持って役割を果たし、持ち味を発揮してくれたことでCLASPは大成功しました。最高のチームで仕事できたことに本当に感謝しています。

一方で、まだ装置開発と観測が成功しただけです。CLASPの観測による多くの科学成果が発表され、そして次の新しいアイデアに繋がることによって、CLASPプロジェクトは完結します。

ランチャーに搭載された観測ロケットとCLASPプロジェクトの主要メンバー。



2月号の研究トピックスは、天の川銀河中心に潜む超巨大ブラックホール周囲の磁場構造の解明をお届けします。系外惑星の命名記事もお楽しみに！

深き宇宙

編集後記

年始年末の休み、妻の実家に4泊。仕事しようとノートPCを持参したが、電源アダプタを忘れ仕事は3時間だけ。ゆっくり子どもと遊べてよい正月でした。(I)

新しい年、改めてアルマ望遠鏡の魅力と広報のポイントを探る。(h)

系外惑星の国際会議でハワイ島へ。久しぶりにマウナケア山頂まで。海ではTinker's butterflyfishに会えました。(e)

CLASP特集いかがでしたでしょうか？観測装置の開発過程では正直しんどい時もありますが、データが得られたときの感動は言葉には言い表わせないものがあります。その感動を少しでも共有できたら幸いです。(K)

雪不足のニュースが聞こえる中、雪かきをしないで済むのは楽です。最近、雪かきすると何故かのどが痛くなるのは、雪の中に何か混じっているのかも。(J)

近所の公園の片隅に倒れている動物を発見。よく見てみると、ん？狸？？でもどう見ても狸だよなあ、と驚いた年の瀬でした。でも、なんでこんな住宅地で行き倒れていたのだろう？実は狸にばかされていたのかな？(K)

春からNHK番組中央審議会の委員を仰せつかることに……。さて、そろそろブラウン管TVをなんとかしないと…(W)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.270 2016.1

ISSN 0915-8863

© 2016 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

発行日 / 2016年1月1日

発行 / 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958

FAX 0422-34-3952

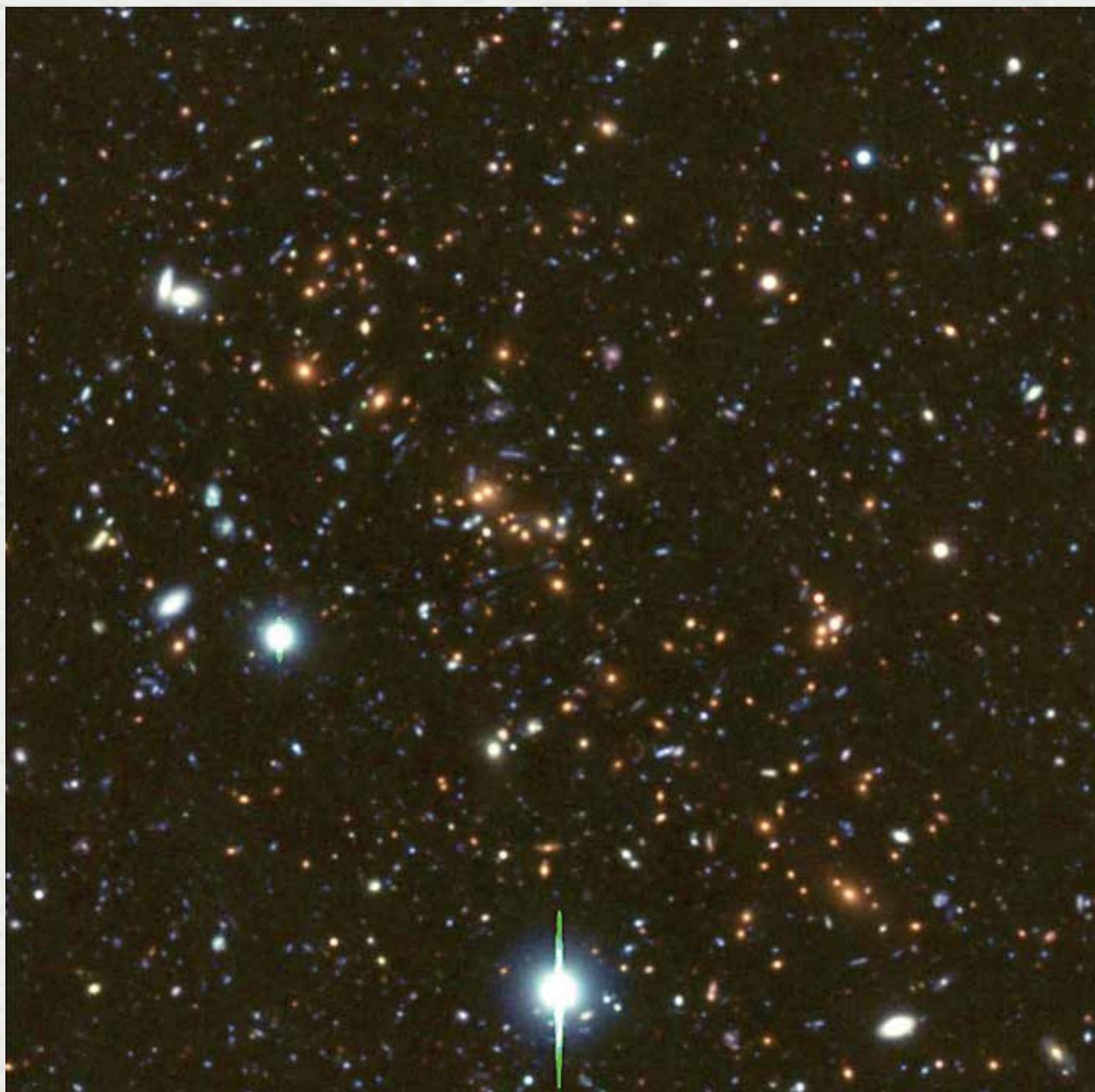
国立天文台ニュース編集委員会

- 編集委員：渡部潤一（委員長・副会長）／小宮山 裕（ハワイ観測所）／寺家孝明（水沢VLBI観測所）／勝川行雄（ひので科学プロジェクト）／平松正顕（チリ観測所）／小久保英一郎（理論研究部／天文シミュレーションプロジェクト）／伊藤哲也（先端技術センター）
- 編集：天文情報センター出版室（高田裕行／岩城邦典）
- デザイン：久保麻紀（天文情報センター）

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、<http://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

チェーン
鎖状銀河団：70億年前の巨大銀河団形成の現場

兒玉忠恭(ハワイ観測所)



データ

天体：銀河団 RX J0152.7-1357
(くじら座)

撮影：2003年9月26日、27日
(Suprime-Cam, V, R, i'バンド)

宇宙が誕生してからちょうど半分の時代、すなわち今から約70億年前の大型銀河団の姿を捉えた写真の一部(1%)の拡大図。一边は銀河団の距離ではおよそ450万光年に相当します。橙色に見える銀河の大半はこの銀河団に属する銀河で、主に3つの塊になって存在し、それらが画像の左上から南西方向に鎖状に連なっています。これらの塊はお互いの重力で引き合っただけで合体して一つの大きな銀河団へと進化するでしょう。すばる望遠鏡はそのユニークな大型カメラの活躍によって、数々の独創的な成果を上げてきました。銀河団のような巨大な天体の研究もその一つです。現在このさらに7倍もの視野を誇る新しい超大型カメラが動き出しており、このような遠方宇宙の大規模構造の研究がますます飛躍的に進むと期待されます。

