

3 ここ20年のできごと

3.1 営繕

3.1.1 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡塔体冷却システムの改修

老朽化による長い間の懸案であったドームレス太陽望遠鏡塔体冷却システムの改修が、平成14年度の補正で予算化され平成15年11月末に完工しました。昭和53年度に設立されたドームレス太陽望遠鏡は世界最新技術の粋をあつめ、独自に開発された世界屈指の望遠鏡であり、現在も世界第一級の高分解能を持つ最先端設備として一線で活躍している望遠鏡です。その一部ともいえる塔体冷却システムは観測の大敵である「かげろう」を防ぐための極めて重要な設備ですが、永年経過による塔体冷却水配管やパネル裏面等の腐食、また悪性の特定フロンを使用する冷凍機など早期の改修が待たれていました。



新装なった塔体冷却パネル

今回の基本設計に当たっては既設設備の要点を十分に考慮し、関係者のさまざまな発想や議論から検討を進めてきましたが、従来のステンレスパネルから極めて日射吸収率の低いアルミ板(ステンレスの約50%)をパネルに採用する事とし、アルミの持つ高い熱伝導率を利用して、従来の構造とはまったく異なった冷却パネルの設計を採用することとなりました。既設の冷却パネルは、表面5mm厚のステンレス板と裏面6mm厚の鉄板を7mmの隙間をおいて張り合わせ、その隙間7mmへパネル面全体に冷却水を通し、塔体10面体の壁面パネル温度を外気温度と同等、又はそれ以下に冷却することにより「かげろう」の発生を防ぐ構造となっていました。今回のアルミパネルでは8mm厚アルミ板の裏面に200mm間隔で張り付けた角パイプに冷却水を通し、パネル全体を熱伝導で冷却するという画期的な構造となりました。実験を通して角パイプ間隔やアルミパネル厚の選定から、角パイプ上の温度と角パイプ間の中央の温度差が1度以内におさまるよ

うに設計し、最終的には0.8度以内におさまることに成功して、既設と同様に設定温度±1度以内の制御が可能となりました。また日射を受けるパネル材質に日射吸収率の低いアルミを採用することにより、冷却負荷の軽減(約30%減)を図ることができ省エネ対策を講ずることができました。更にパネルの構造上製作が容易となってローコストに抑える事ができ、アルミの採用でパネル重量が軽くなったことから格段に施工性も向上しました。懸案であったパネルのメンテナンス性については、新設備では冷却パネル1枚毎にメンテ用パネル(メンテパネルも冷却)を取り付け、パネル1枚毎の脱着を可能としました。このメンテパネル取り付けにより施工が容易となり、且つ、万一の漏水等損傷事故に最小限の費用で対応できるようになっています。

システムの心臓部である冷凍機は、通年仕様を基本とする設計から空冷式を採用し、キメ細かい送水温度制御ができるインバーターチャラーを2台設置しました。2台の設置とし



(左) 塔体冷却システムの機械室 (右) ブラインチラー (冷凍機)

たのは、夏季間の低負荷期には1台での運転制御が可能であり、万一の故障等に低負荷時ならば他の1台でバックアップ運転が可能となります。これによってパネルに熱吸収率の低いアルミを採用したのと併せ、システムとしての高い省エネルギー化の実現と、ブラインチラーの出口温度が -10 度の能力をもっていることから、冬でも外気温度が -5 度以上であれば運転制御が可能となるなど、飛騨天文台の厳しい冬期間でもパネルの冷却制御ができる通年仕様システムとなりました。なお、老朽化による塔体冷却水配管の腐食と漏水事故が危惧されていましたが、今回の改修では外部等の配管を従来の黒鋼管からステンレス鋼管に改修したことにより、大幅な設備の安全や耐久性と維持管理の軽減を図ることができました。

新システムにおける他の主な特長は、従来の設備で採用されていたエアによる自動制御を全て電気式制御方式に改修したことです。エアによる制御方式は機敏で早い動作が大きな利点ですが、空気源であるコンプレッサーの騒音やオイルフリーコンプレッサーのメンテ負担が大きいことから、近年制御性や信頼性が向上している電気式を採用することになりました。もう一つは、従来の密閉式膨張タンクと窒素ガス加圧による冷却水の圧力制御から、窒素ガスの取り扱い等メンテナンスの軽減を図るため、ブライン補給ポンプによる圧力制御に変更しました。最後に、この極めて重要なシステムを観測者等が負担なく運用するためには、操作の軽減を図ることが大きなポイントであることから、ボタン一つでシステム全体の運転を可能にするなど操作性の向上を図ったことが上げられます。

以上が新装なったドームレス太陽望遠鏡塔体冷却システムの概要ですが、この改修によって一層の安定した温度制御と、年間を通じてかげろうを防ぐ塔体空調が可能になったことや、省エネルギー化の実現と維持管理の軽減、及び操作性の向上などますます安全で安定した運用が可能となりました。これにより平成14年度にドームレス太陽望遠鏡に設置されたマルチチャンネル高分解能撮像装置など、太陽活動総合観測システムの運用と併せ、高精度の観測に大きく貢献できるものと期待されています。

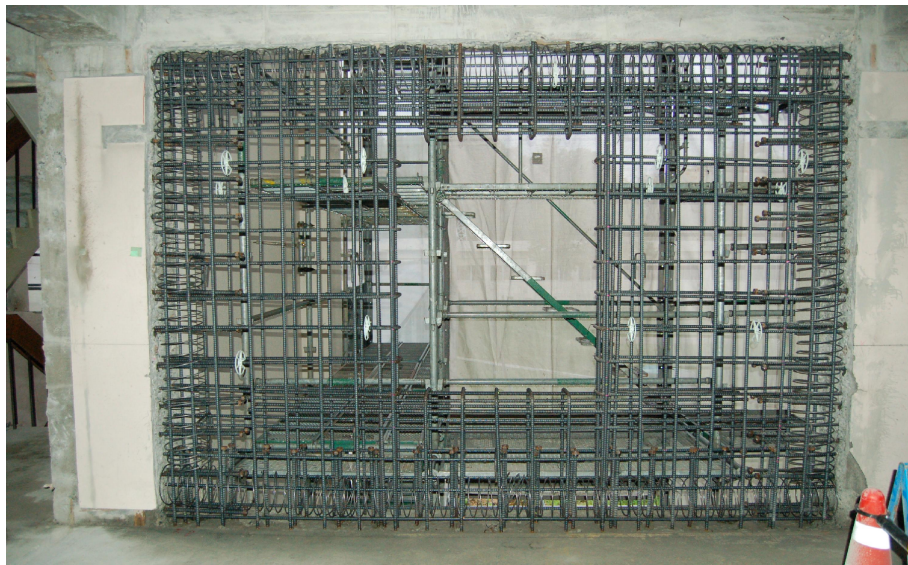
(石浦 2003 年度年次報告より)

3.1.2 研究棟耐震補強工事

研究棟耐震強度測定の結果、耐震構造としては不適合との耐震診断が下され、建物の補強工事と機能改修工事が平成 19 年度中の準備期間を経て、2008 年度実施された。工事の概要は以下の通りである。

(1) 耐震補強工事

今回の工事の内、最も重要である建物の耐震耐力を強化するための工事であり、当初建物外壁外部に、鉄骨またはコンクリートにより補強を施す設計がされたが、建物外壁に底を超える部分に構造物を設ける事は、凍結、積雪等により凍結割れ等の崩壊が進行することは、過去の事例により明らかであったため、施設部に対し設計変更を依頼し、既設壁面にコンクリート壁を打ち増す工法と、開口部(窓)の数を減少させ、耐震強度を高める方式を採用した。これにより、外観上は窓の数量が減少した程度にしか感じないが、耐震強度は規定を十分満たす事となった。



補強構造壁配筋状況 (通常より数量が多い。2 階 研究室 3 北側外壁)

(2) 機能改修工事

耐震補強工事を実施するに当たり、建物内の全ての内装、給水配管、電気通信配線を撤去する必要があるとあり、この機能を復旧するため機能改修工事が実施され、以下の項目の工事が行われた。

(2a) 給排水改修工事

(2b) 電気設備改修工事

(2c) 暖房設備改修工事

(2d) その他

(2a) 給排水設備改修工事

給排水設備改修工事として既設給排水管を全て撤去した後、新しい給排水管を敷設した。また、従来の配水方式は 4 階に高架水槽を設置し配水していたが、今回新たに加圧給

水ポンプを設置し全館へ配水する方式を採用した。これにより、従来水压不足で水压が低かった箇所にも十分な圧力で送水する事が可能となった。

(2b) 電気設備改修工事

電気室内、高圧電気機器及び、館内の全ての電気設備が更新された。電気室内に於いては、高圧盤、低圧盤、変圧器の更新がなされ、変圧器は低損失型の変圧器が採用され省エネルギーの一助となっている。また、低圧盤にあつては従来のナイフスイッチから盤取付型ブレーカーとなり安全性が向上した。

(2c) 暖房設備改修工事主に暖房設備(蒸気暖房)の往復配管とラジエーター(放熱器)の更新がなされた。放熱器の配置数は再設計がされたため、従来よりラジエーターの配置数が多くなり、極寒冷地である当地に於いても素早い暖房が可能となった。

(2d) その他

今回の機能改修工事では、機能改修を主に行われたが、省エネルギーを配慮した工事となり、窓ガラスにはペアガラスが使用され、更に屋外に面したサッシの内側に樹脂製の内サッシが設けられ、サッシグレードはH-5以上を達成し、北海道等の極寒冷地でも採用される断熱性能を十分満たしている。

屋外駐車場のコンクリート舗装が永年の風雪等により劣化が進行していたため、研究棟に面している部分と、道路の一部およそ $320m^2$ について更新された。

改修工事費に伴い建新予算が認められ、各種什器類の更新も成された。また、施設整備費により、大会議室内の視聴覚機器の新設、ブラインド、案内看板の設置も行った。

(3) 7m ドーム改修工事

従来より営繕要求などにより予算要求を行っていた研究棟7mドームの改修が、耐震補強工事の実施と同時に行われた。これは、耐震補強工事と同時に改修工事を行えば工事関連諸経費の節約を図れるためと、ドームの状況が非常に悪化していたためである。外装ステンレス板全面と、下地木張り部分を撤去し改修した。スリット部分は、特に雨漏りが酷かったためステンレス板シーム溶接により一体構造となったため防水性能が格段に向上した。

(施工業者: 建築工事 和仁建設(主契約者) 電気工事 宝興建設電気事業部、トーエネック JV 設備工事 橋本工業、工事範囲: 研究棟、工事費: 115,000 千円)

(木村 2008 年度年次報告より)

3.1.3 その他の営繕工事

飛騨天文台高圧ケーブル配線替他工事（2012 年 11 月）

台内各所へ配電している高圧ケーブル(6600v)は敷設後長期間を経過し、漏電事故などの懸念があった。埋設されている全ての高圧ケーブルを更新する工事を実施した。配線経路は電力会社分岐点から研究棟電気室、研究棟からドームレス太陽望遠鏡棟に至るおよそ500mの埋設ケーブルを更新した。

(施工業者:宝興建設株式会社 電気事業部)

研究棟非常用自家発電機改修工事（2014 年 11 月）

研究棟非常用自家発電機は、飛騨天文台開所の昭和 43 年に設置され、以来 47 年間に渡り使用されており、近年老朽化による不調が多発していた。学内改修費によって発電機本体、電源切替盤の更新がなされた。また、本工事に付帯する改修工事として、65cm 棟電気室低圧盤の全面更新も併せて実施された。

改修後の発電機定格、規格などは以下のとおりである。

製造会社: ヤンマーエネルギーシステム(株) 製 AP-65C-6R 60.9kW

定格: 220V 60Hz 55KVA

(施工業者: 杉浦電気工事株式会社)

飛騨天文台浄化槽改修工事（2017 年 7 月）

飛騨天文台では各棟に浄化槽が設けられ、それぞれの棟で污水处理を行ない清掃なども浄化槽単位で実施し管理が大変煩雑であった。また、旧規格の浄化槽しか設けられておらず環境面においても不適格な状況であった。これらの浄化槽を一元化し、天文台から排出される全ての污水を集約し処理する合併処理浄化槽を新設する工事を実施した。

(施工業者: 橋本工業株式会社)

管理宿泊棟他防水等改修工事（2017 年 7 月）

飛騨天文台管理宿泊棟屋上および外壁、ドームレス太陽望遠鏡機械室屋根、渡り廊下防水工事を実施した。また、管理宿泊棟については老朽化したアルミサッシ更新を行い室内側に樹脂サッシを取付け断熱性能の向上を図った。

(施工業者: 和仁産業株式会社)

暖房設備等改修工事(2017 年 10 月)

飛騨天文台暖房設備及び危険物屋外貯蔵施設の全面改修を実施した。暖房設備についてはボイラー 2 基ならびにボイラー室内の付帯設備について全面更新を行った。危険物屋外貯蔵施設については 14 キロリットルタンクを 3 基に減じ、タンク、配管設備を全面改修した。

(施工業者:株式会社アクアテック)

(木村)

3.2 観測装置

3.2.1 ドームレス太陽望遠鏡スペクトロヘリオグラフの改良

2006 年に打ち上げられた HINODE 衛星の CaII H 線フィルタ撮像観測により、太陽彩層活動現象のより詳細な様子が明らかとなった。それに伴い、太陽の各種活動現象や、光球-コロナ間エネルギー伝播過程(コロナ加熱過程)における、彩層の果たしている役割を改めて見直す動きが進んだ。ただ、HINODE 衛星には彩層を分光的に観測できる装置が搭載されなかったため、彩層現象の定量的な把握には制限があった。

従って、飛騨天文台では、光球から彩層上部にまで渡る、幅広い高さ情報を含んでいる CaII K, H 線の分光観測を高時間分解能で行なう事ができれば、HINODE 衛星のフィルタ撮像データと合わせて、彩層の様々な物理量の分布や時間変化をより詳細に知る事が可能になると考え、2007 年度にドームレス太陽望遠鏡・垂直分光器におけるスペクトロヘリオグラフの高速化を実施した。

それまで高速化が困難だった理由と 2007 年度に高速化が必要とされた理由としては、2006 年度までドームレス太陽望遠鏡において分光観測用に用いていた CCD カメラは、Ca K, H 線が位置する短波長領域の感度が低く、これを用いたスペクトロヘリオグラフで光量を十分に確保しつつ、1 秒角を切る空間サンプリングでの観測を行なおうとすると、1 回のスキンの所要時間が長くなってしまうこと、そのため、そのままの状態では、HINODE の観測で注目されるようになった、彩層の振動現象やジェットなど、短いタイムスケールで変動する現象を 2 次元に渡って捉えるのが困難であったこと、があげられる。

そこで 2007 年度、この短波長領域での感度が高く、かつフレーム読み出しレートが速く、空間方向にも波長方向にもピクセル分解能が良いもの、という条件のもと、CCD カメラの選考を行ない、ドームレス太陽望遠鏡・垂直分光器スペクトロヘリオグラフへの導入を行なった。このカメラの垂直分光器で使用時の実際の仕様は以下の通りである。

- ・カメラ名: PROSILICA 社 GE1650
- ・画素数: 800×600 (2×2 ビニング時)
- ・波長ピクセル分解能: $0.020 \text{ \AA}/\text{pix}$
- ・空間ピクセル分解能: $0.24 \text{ arcsec}/\text{pix}$
- ・FOV: $16.0 \text{ \AA} \times 145 \text{ arcsec}$
- ・A/D 変換階調: 12 bit
- ・Ca II K,H 線での典型的な露出時間: 50 – 80 ms
- ・フレーム容量: 約 1 MB/frame
- ・フレームレート: 最高 30 Hz まで、HDD への連続書込み可能

従って、このカメラを利用することにより、例えばスキャン幅 120 arcsec 、 0.6 arcsec ステップでの Ca H,K 線のヘリオグラムが、所要時間約 15 秒で取得できるようになった。これにより、中規模の活動領域やプロミネンス領域中で発生する周期 3 分程度の振動現象や、短命のジェット現象などにおける物理量の時間変化を、逃さずに追って行くことが可能となったわけである。この垂直分光器スペクトロヘリオグラフを用いて、2007 年度には、HINODE 衛星との協同観測を始めとする、彩層分光観測に重点を置いた様々なテーマでの観測が行なわれた(図 1、2 参照)。

図1：活動領域のスキャン例
(CaII K 線)
スキャン幅120" のサンプル

取得日時：2007.08.07,
03:08:04 - 03:08:16 UT

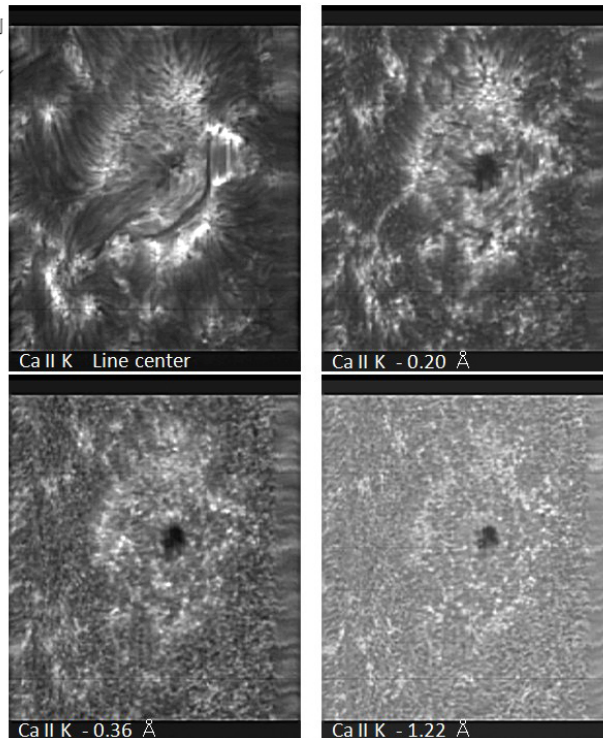
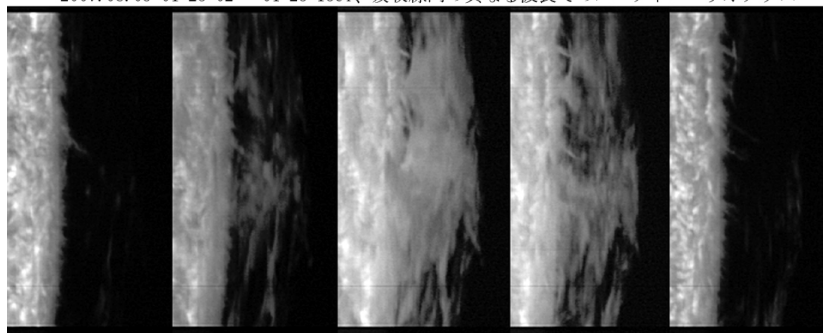


図2：プロミネンスのスキャン例 (CaII K線)
2007.08.05 01:25:02 - 01:25:15UT、吸収線内の異なる波長でのスペクトロヘリオグラム



しかし、その間にも、さらに Ca II K, H線だけでなく、他の彩層ライン、場合によっては光球ラインも含めた、複数の波長におけるスペクトルを同時に取得できるスペクトロヘリオグラフの必要性が高まっていった。なぜなら、光球から彩層にかけての太陽大気中の様々な物理量を導出する際に、複数のラインのプロファイルに対して大気モデルをフィッティングさせた方が、より精度良くそれらの値を求めることができるからである。また、垂直分光器スペクトロヘリオグラフにおいては、太陽像に対して分光スリットをスキャンさせる方法として、望遠鏡本体をスキャンさせる、という方法が採られてきたが、この方法の場合、望遠鏡の動作速度の非一様性や高速スキャン時の位置精度の限界、という問題が存在していた。

そこで、2008年度には水平分光器において、焦点面直前に回転式ガラスブロックを設置することにより、より安定した速度・位置精度での高速スキャンを可能とし、同年度から少しずつ高速カメラの台数を増やして、多波長同時観測が可能なスペクトロヘリオグラフを実現させた。この水平分光器スペクトロヘリオグラフにより、2008年度以降、学部学生の卒業研究から、Hinode 衛星や IRIS 衛星、海外の地上観測所との国際協同観測に至るまで、様々なテーマでの多波長2次元分光観測が実施されるようになった。

(上野 悟 記、2007年度年次報告の当該記事を編集・追記)

3.2.2 ドームレス太陽望遠鏡の補償光学装置の開発 – 実験から実用へ –

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡は、太陽像の劣化の原因となる空気の揺らぎ(かげろう)を抑えるため、あらゆる手を尽くした望遠鏡である。望遠鏡の筒全体を真空にする、風の流れを乱す格納ドームを排除する、望遠鏡をかげろうのたちやすい地面から離すため 20m を超えるタワーの上に設置する、さらにタワー側面を外気温と同じに温度に制御して空気の対流を防ぐ、といった工夫である。これらの対策によって望遠鏡周りの空気揺らぎは極力低減されているが、解像度の劣化には手の届かない大気の上空での乱流も寄与しており、望遠鏡の口径 60 cm を真に発揮した回折限界分解能は、1 年を通してもごく限られた時間にしか実現できないのが現状である。

大気の揺らぎによる波面の乱れを何とか補正できないか？ これを実現するものが補償光学装置 (Adaptive Optics: AO) である。近年画像処理の高速化や精密光学素子の制御技術の進歩によって AO の有用性が広く認知されるようになり、昼夜を問わず世界中の天文台でしのぎを削って開発している技術である。飛騨天文台においても国立天文台の花岡や北見工大の三浦らのグループが 2000 年代中盤からドームレス望遠鏡においてその開発に取り組んでおり、実験的なセットアップにより実績を積んできた。これをドームレス望遠鏡の実際の観測に生かすべく、AO で波面補正された光を分光器に導くための「AO 常設光学系」を製作した。2008 年度は、垂直分光器室にこれを設置した (図 1)。

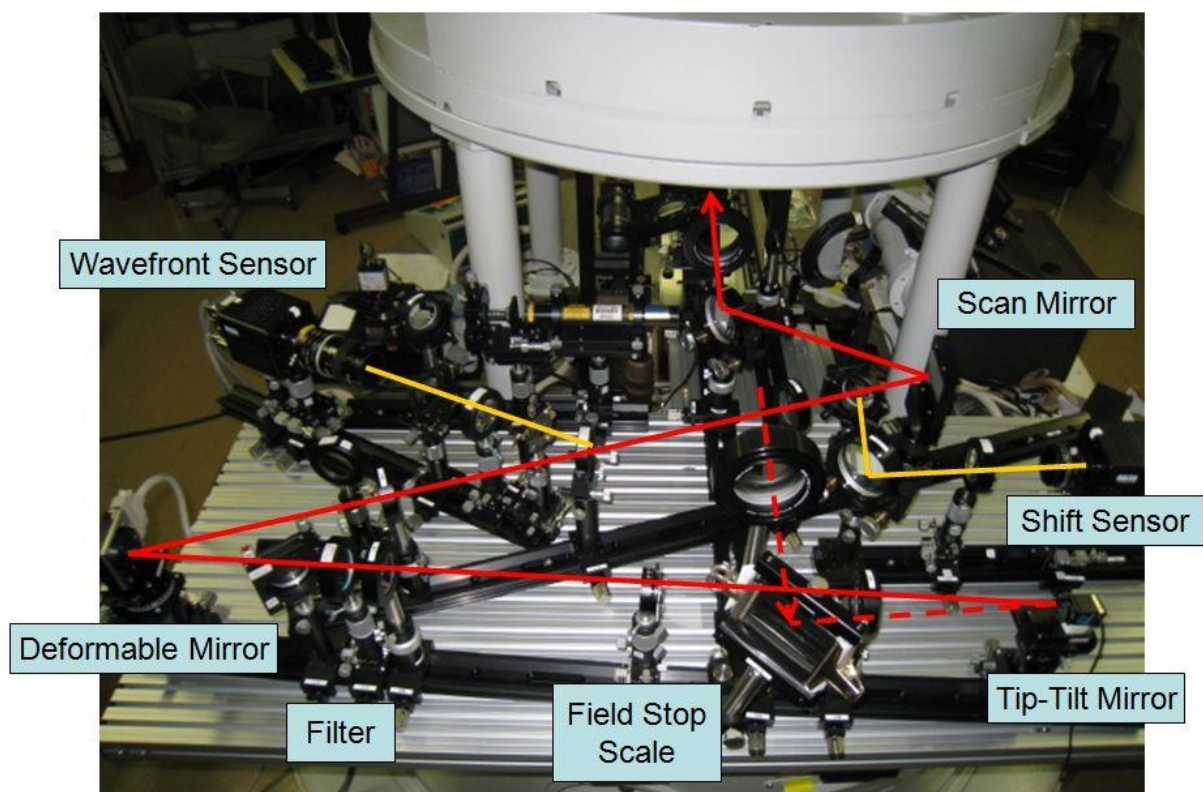


図 1: 垂直分光器用補償光学系

2009 年 8 月と 11 月には、従来と同様に、可変形鏡には 52 ch の電磁型のもの、波面センサーには 6×6 のマイクロレンズアレイと 955 fps の CCD カメラを用いた。望遠鏡から

の光は、斜鏡によって AO に導入され、波面補償の後、元の望遠鏡光路に戻される。AO 装置内では、リレーレンズ系によって Tip-tilt 鏡と可変形鏡上で二度瞳像が結像する。また、可変形鏡で反射したのち、光の一部が分割されて波面センサーと位置ずれセンサーに導入される。

2010 年 3 月には、波面センサーの改善を行った。10×10 のマイクロレンズアレイを用いて空間的な計測精度を向上させると共に、2000 fps での画像取り込みが可能な CMOS カメラを導入し、時間的な性能の改善を図った。これによって装置全体の性能もかなり向上した。図 2 は AO が動作していない時の画像である。大気ゆらぎのため細かな構造が全く見えていない。これに対して、AO を動作させたときに得られた画像が図 3 であり、細かな構造を見ることができる。視野は 71×54 arcsec、観測波長は 650 nm である。

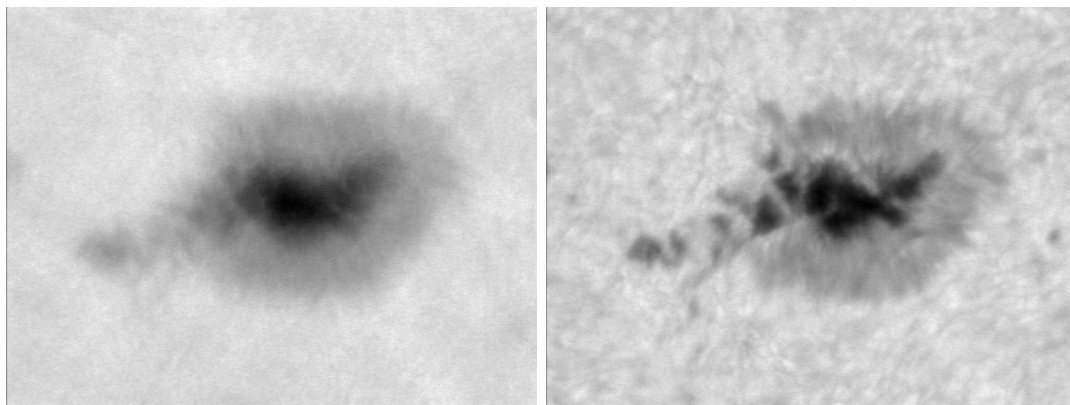


図 2: AO なしで観測された太陽像

図 3: AO を通して観測された太陽像

2010 年度 7-8 月には、フィルタ配置の修正を行った。これにより、白色光を分光器に渡すことができるようになった。また、波面センサー用ソフトウェアの改良を行い、幾つかのサブアパーチャでセンシングが失敗した場合でも、波面計測がより安定して動作するようにした。

2010 年 9 月には、97 ch の電磁型可変形鏡を新しく導入した。従来用いていた 52 ch のものに比較して、アクチュエーターが増えたことにより、鏡面精度がかなり向上した。同様の理由により、波面計測・補償に使用するゼルニケ多項式の係数を 9 項から 20 項にまで増やすことができた。同じシステムにおいて、11 月には波面測定における絶対差和計算部を複数コア PC で並列処理をすることに成功した。これにより、システム全体の動作周波数が可変形鏡の応答速度の上限である 900 Hz にまで上昇した。

開発したシステムを用いて、2011 年 11 月 21 日、AO を動作させながら 10 分間の連続観測を行い、装置が問題なく動作することを確認した。図 4 はその中から比較的細かな構造が見えるものを約 1 分おきに並べたものであり、細かな構造の時間変化を確認することができる。ただし、これらの画像はデコンボリューション処理によって画像を鮮明化してある。視野は 30.2×30.2 arcsec、観測波長は 430 nm である。

川手らによるドームレス望遠鏡におけるシーイング特性 (空気揺らぎの空間・時間周波数の確率分布) の評価によれば、観測期間の約 10 %において本 AO が有効に機能すると期待できることがわかった。AO が実用化すれば高い空間分解能が得られるだけでなく、

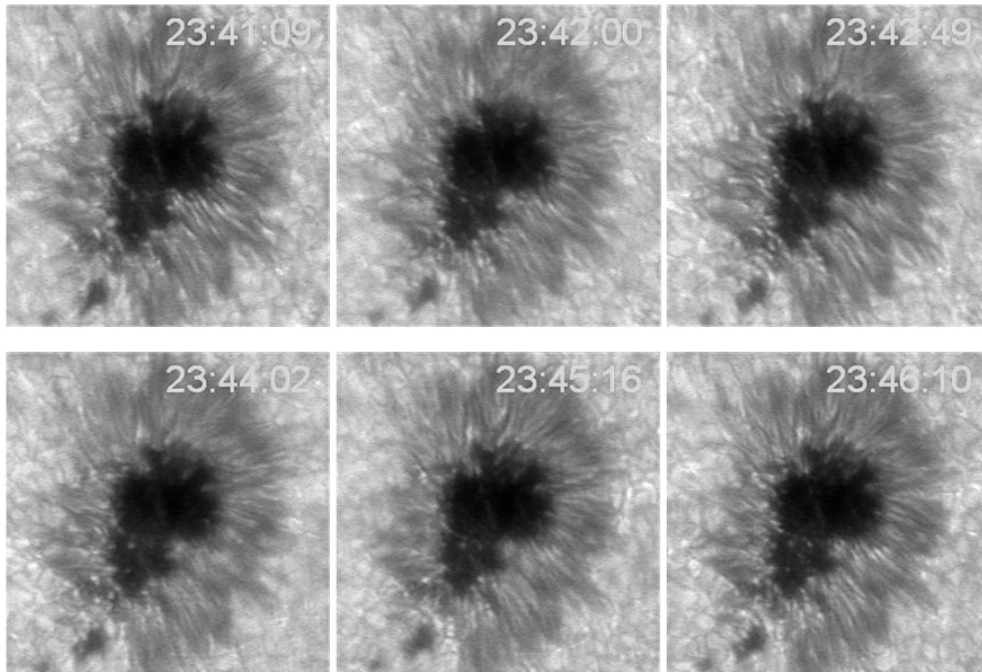


図 4: AO を通して観測された太陽像時系列 (波長 430 nm)

像が安定化することによってより精度の高い偏光観測も可能となってくる。これによりドームレス太陽望遠鏡では以下の研究を推進することを計画している。

- ・ 高空間分解・高精度偏光分光観測による微細磁場構造の観測研究
- ・ 「ひので」との協調観測による彩層ダイナミクスの研究
- ・ 多波長高分解分光観測による Solar-C のサイエンス及び搭載装置の検討
- ・ 高精度偏光分光観測による新しいプラズマ診断手法の開拓

Reference:

- [1] “Advances in solar adaptive optics system at the domeless solar telescope of the Hida Observatory,” N. Miura, Y. Noto, S. Kato, Y. Yokoyama, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, S. Nagata, S. Ueno, R. Kitai, K. Ichimoto and H. Takami, Proc. SPIE. Vol. 7439B, 7439B-30 (2009)
- [2] “Optical setup and wavefront sensor for Solar Adaptive Optics at the Domeless Solar Telescope, Hida Observatory,” N. Miura, F. Yokoyama, M. Nefu, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, S. Ueno, Y. Nakatani, S. Nagata, R. Kitai, K. Ichimoto and H. Takami, Proc. SPIE. Vol. 7736, 7436-191 (2010)

(三浦則明、横山文人 (北見工大)、馬場直志 (北大工)、一本潔 記、2008, 2010 年度年次報告より)

3.2.3 ドームレス太陽望遠鏡の新補償光学装置の開発

北見工大や国立天文台と協力して基礎的開発をすすめてきた垂直分光器室の実験的 AO により、2009 年度には撮像観測における太陽像の明らかな改善をみるようになった。しかし、シーイングで乱れた波面を補正する能力はまだ不十分であり、多数のレンズを用いているため光の透過率が悪く、また限られた波長でしか使えないため、ドームレス望遠鏡の最大の特徴である多波長高分散分光観測に生かすことができない。

そこで 2010 年度よりドームレス太陽望遠鏡の垂直・水平両分光器で使える本格的な補償光学装置 (AO) の開発に着手した (図 1)。新 AO は水平分光器観測室に設置する約 $3\text{m} \times 1\text{m}$ の光学定盤の上に搭載され、可変形状鏡、可動鏡、軸外し放物面鏡を含む 16 枚のミラーからなる大がかりな装置となる (図 2)。2011 年度は補償光学装置の心臓部である形状可変鏡 (サイネティックス社製、直径 77mm、97 素子) の制御システムの製作および面形状の測定を行った。実験初期制御装置に不具合も発見されたが、改修後すべての素子が自作のプログラムにより正常に動作し、ミラーを平面にするための条件だしなどをおこなった。また、ミラー保持機構の設計、軸外し放物面鏡の製作をおこなった。

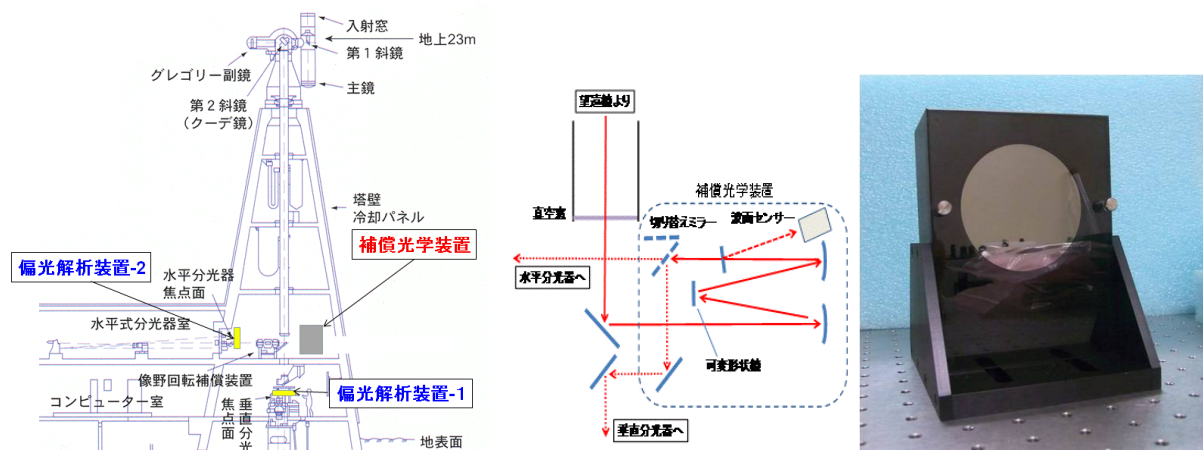


図 1. ドームレス太陽望遠鏡新補償光学装置の設置。右の写真は形状可変鏡。

2014 年度には光学素子の設置が完了し、最初の観測結果を得た。図 3 は、(a)AO を動作させないとき、(b)AO を動作させたときに得られた太陽像である。AO を動作させない時には見えなかった細かな構造が、AO を使用することによって見えているのがわかる。観測波長は 430nm、視野は 40×30 秒角である。波面センシングの対象として用いたのは、中央 3 つの黒点間の明るい領域である。この領域については特に細かな構造が見えているが、離れるに従って補償の効果が少なくなっていくことも確認できる。なお、波面展開に当たって、新たに KL 関数系を導入し、ゼルニケ多項式の代わりに実際に装置に組み込んだ。

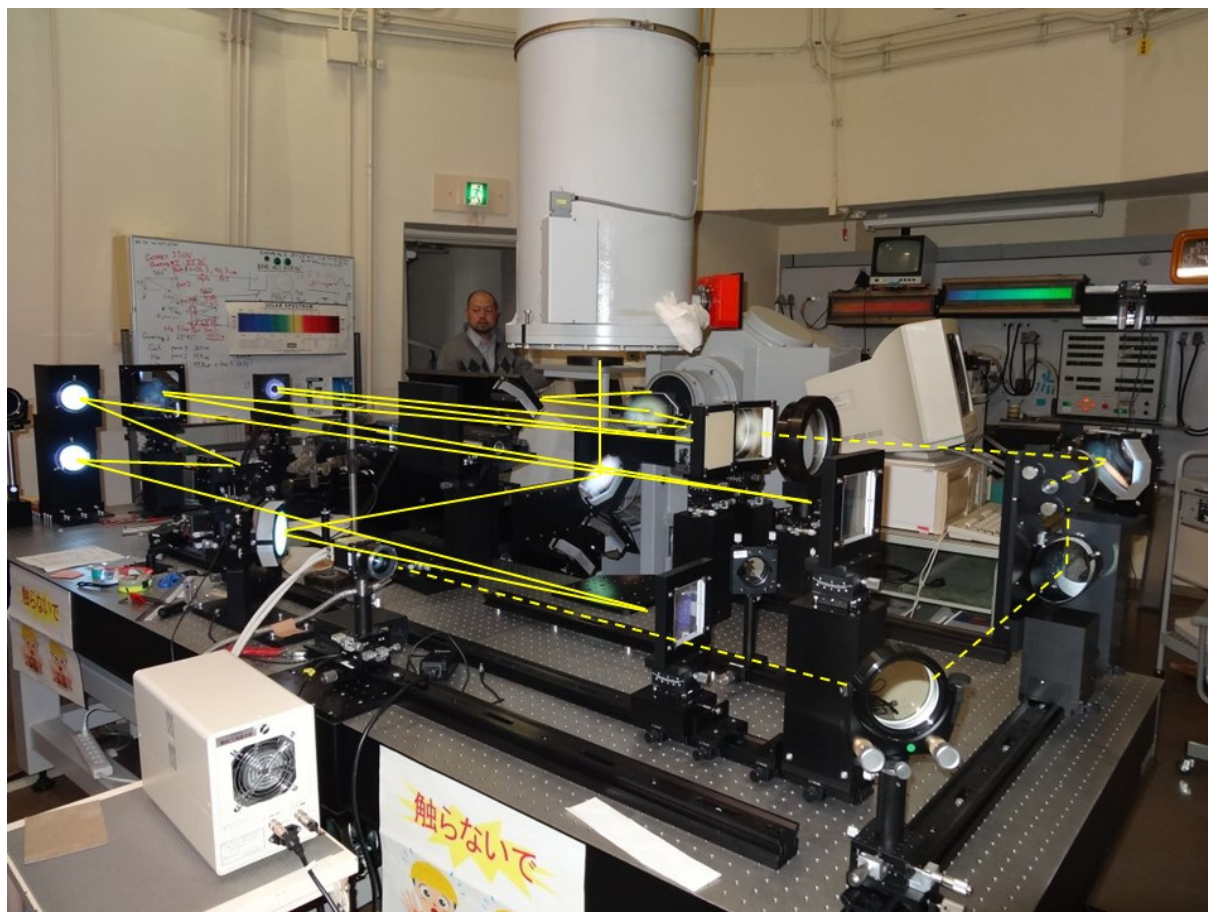


図2. 水平分光器室に設置された新補償光学装置。

また、前年度に実施した波面情報からのデコンボリューション法を用いた太陽像改善において、波面推定の際に KL 関数系を用いて、画像処理をやり直した。図3下段 (a) は AO を通して観測された太陽像、下段 (b) は波面情報から得られた PSF (2 倍に拡大) であり、このストレール比は 0.15 である。この PSF 計算の際に KL 関数系を用いている。図3下段 (c) は、(a) を (b) でデコンボリューションした結果である。デコンボリューション法としては、Lucy-Richardson 法を用いており、再生ループは 200 回である。全体にコントラストが向上し、細かな構造が見えているのがわかる。

通常の AO では補償が有効な視野が狭いため、広い視野での補償を可能にするマルチコンジュゲート (多層共役、MC) AO の開発も進めている。2014 年度は、1F ターンテーブル上に MCAO 用光学系を設置した。観測に当たっては、2 F 常設 AO の下流で使用することを設定しており、MCAO では地表からの高さ 3km の上空ゆらぎのみを補償する。ここで開発している MCAO では太陽像の伸縮の抑制を目的とした簡易な波面センシング法を用いている。観測した太陽像において、黒点間の距離変動の偏差を評価したところ、MCAO の効果で黒点間の位置変動が抑えられていることが確認できた。

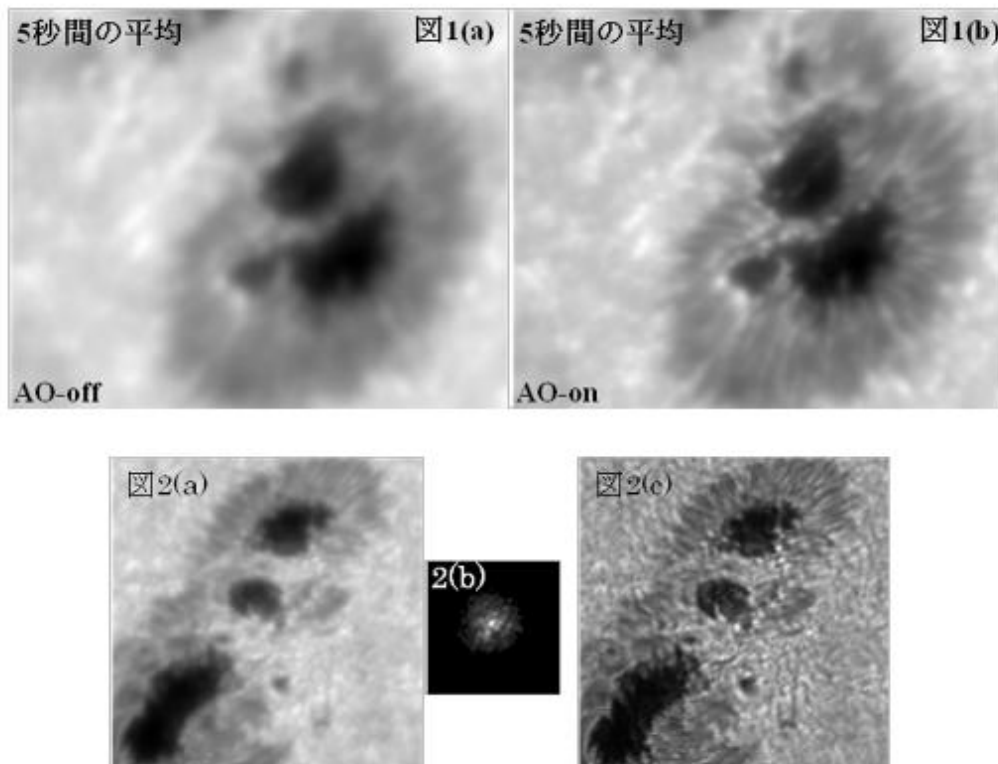


図3. 上段：新補償光学装置による像の改善。下段：SF によるデコンボリューションの効果。波長 430nm。(本文参照)

尚、この開発は科学研究費補助金、基盤研究 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 (代表:一本潔)」と基盤研究 B「太陽 multi-conjugate 補償光学系の実用化 (代表:三浦則明)」により推進した。

<文献>

[1] N. Miura, A. Oh-ishi, S. Aoki, H. Mogaki, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, M. Yamaguchi, S. Ueno, Y. Nakatani, S. Nagata, R. Kitai, and K. Ichimoto, " Development of a new solar adaptive optics system at the Hida Observatory " Proc. SPIE, 9148, 914831 (2014).

(三浦則明、大石歩、大石明 (北見工大)、一本潔 記 2011, 2014 年度年次報告より)

3.2.4 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 広波長帯偏光分光観測システムの完成

ゼーマン効果を用いた太陽光球磁場の測定によって、太陽現象と磁場の密接な関係が明らかとなった。近年では、偏光メカニズムの理論的發展と偏光測定精度の向上がゼーマン効果とハンレ効果を用いた彩層磁場の測定を可能にした。今後、彩層やプロミネンスの磁場を測定することで、彩層の様々な活動的現象のメカニズムが明らかになることが予想される。彩層・プロミネンスの磁場を測定するために、私たちは可視から近赤外の広い波長帯 (400 nm ~ 1600 nm) で高偏光測定精度 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$) な偏光分光観測ができる装置を

開発した。複数のスペクトル線の偏光を測定することで、スタルク効果を用いた電場の測定、衝突偏光を用いた熱伝導や非熱的粒子の測定などといった新しいプラズマ診断手法を開拓することも私達の大きな目的である。

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡は高波長分解能な分光観測ができる垂直分光器が備わっており、スペクトル情報から太陽表面現象の物理量を導出するのに適した望遠鏡である。またこの望遠鏡には光球によって形成されるスペクトル線 ($6302.5 \text{ \AA}$) での偏光観測が可能なポラリメーターが設置されている (Kiyohara et al. 2004)。私達は既設のポラリメーターを広い波長域でより高精度な測定が可能な装置に改良した。まず、近赤外に感度を持つ赤外カメラと大容量の画像を高速に取得できる CCD カメラ、広帯域波長板を導入し、検出器及び偏光変調器を広帯域化 ($400 \text{ nm} \sim 1600 \text{ nm}$) した。そして、波長板回転角の原点センサーをカメラ連続撮像の開始トリガーとすることで、十分な回転角精度で波長板を連続的に回転させながら効率良く直交 2 偏光成分を同時に連続的に撮像できる装置を開発した。これによりこれまで可視域で偏光精度 10^{-3} を達成するのに 150 秒以上を要していた装置を、可視では約 30 秒、近赤外では約 60 秒で達成できる装置に改良することができた。

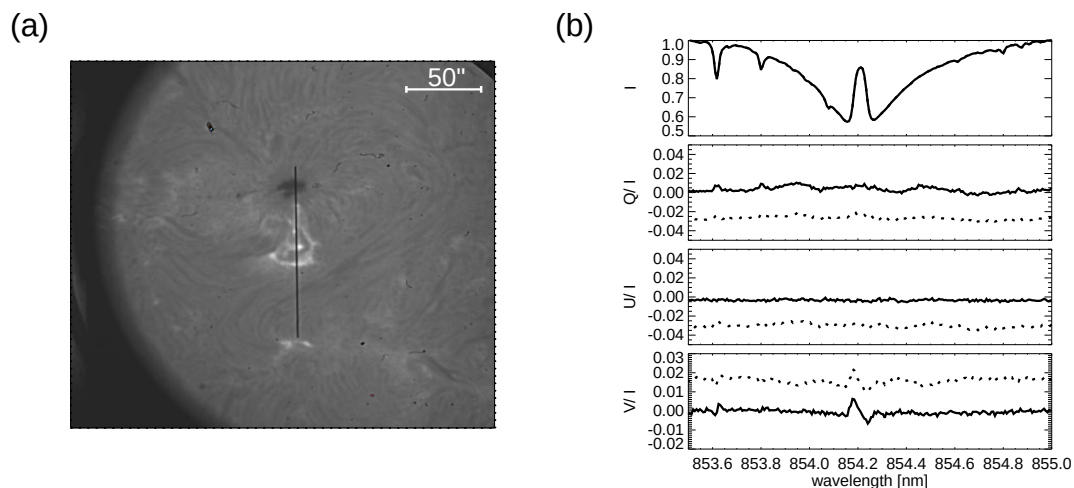


図: CaII 8542Å で観測された小フレア。

太陽からの偏光を正しく導出するためにはさらに DST の装置偏光を補正しなくてはならない。私たちは、太陽中心の連続光 (理想的な無偏光) と偏光板を用いて既知の偏光状態を持つ光を望遠鏡に入射させ出力された光の偏光状態を測定することで、広波長域における DST の偏光モデルを構築した。図は本装置による観測例である。

Reference:

Kiyohara et al. 2004, Proceedings of SPIE, 5492, 1778K

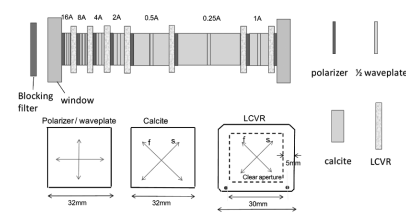
(阿南徹 記 2011 年度年次報告より) Reference: Anan, T. et al. 2012, SPIE, 8446, 84461C.

3.2.5 狭帯域チューナブルフィルター (UTF32) の開発と太陽彩層観測

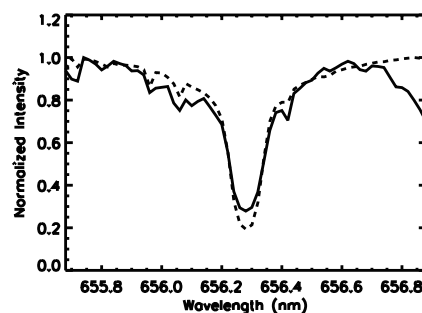
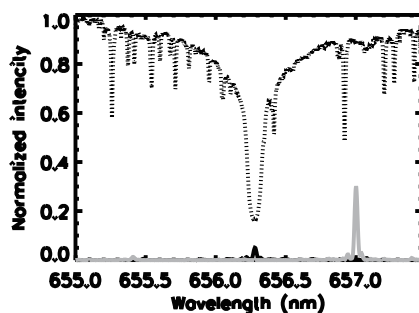
太陽観測衛星「ひので」や高解像度の地上大型望遠鏡による観測から、太陽大気はダイナミックなプラズマの運動に埋め尽くされている事が明らかになってきました。これらの現象の起源を理解するために、高速で広視野での速度場や磁場などの物理量を測定する必要があります。我々はこの分光イメージ観測を実現するべく、高波長分解能で短時間に波長シフトできる「狭帯域チューナブルフィルター」の開発を行ってきました。

このフィルターは7段のステージで構成され、次のような性能を持っています。このフィルターは波長制御に液晶可変遅延素子を用い、方解石に京都大学飛騨天文台既存の32mm径リオフィルターのものを用いました。従来の狭帯域フィルターから次に列挙する点において大きく発展しました。(1) 広帯域の偏光板と1/2波長板を用い500nm–1100nmの任意の波長で観測が可能。(2) チューニング素子として液晶可変遅延素子を用いチューニング時間は約0.1秒という高速化を実現。(3) 波長チューニングに必要であった可動部分がないため油槽を排除でき、軽量でコンパクトであり気泡の混入がない。太陽光を用いた測定で、透過幅は0.025nm(656.3nm)、透過率は15%と良い成績を得ました。

このフィルターを用いて、中国雲南天文台の撫仙湖太陽天文台の1 m 真空太陽望遠鏡で2015年1月19-30日に高解像度イメージング観測を行いました。この期間に、いくつかのフレアや彩層の微細構造を観測できました。



左図:フィルター外観、右図:フィルター内部の素子配置



左図:フィルター透過プロファイル (破線はH α 線付近の太陽スペクトル、実線は波長中心と連続光の透過プロファイル)、右図:フィルターの透過波長を変化させて取得した像から再構築したスペクトル線

Hagino, M. et al. 2014, SPIE, 9151, 91515V-1

Ichimoto, K. et al. 1999, PASJ, 51, 383

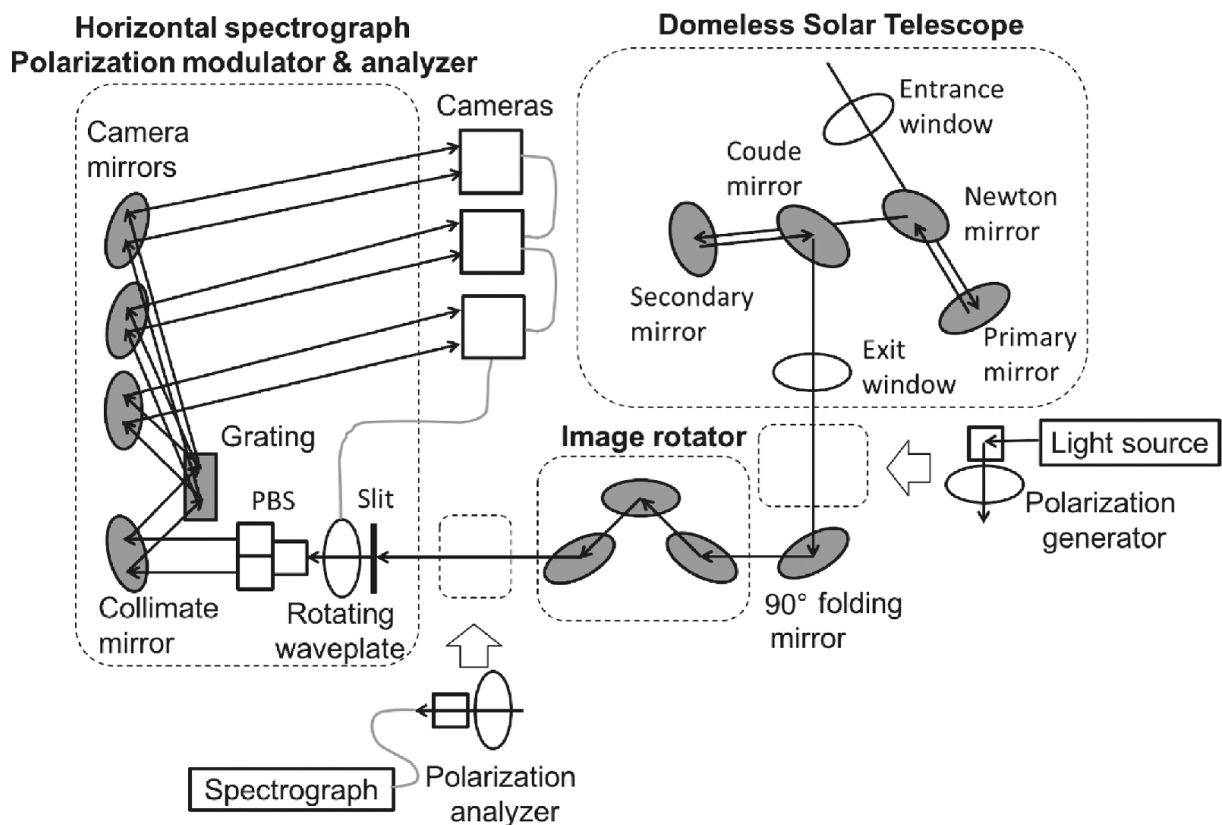
(萩野 正興 記 2014 年度年次報告より)

3.2.6 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 複数波長帯同時偏光分光観測システムの完成

複数の波長帯の偏光スペクトルを同時に取得するために、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) に新たな偏光分光観測装置を開発した。太陽大気における 3 次元磁場やその他のベクトル量を診断する強力なツールとなることが期待される。

この新たな偏光観測装置は、経緯台式の口径 60 cm 真空望遠鏡 DST、イメージローター、水平分光器、回転波長板、偏光ビームスプリッター、高速大容量の CMOS カメラと赤外カメラで構成される。偏光変調器に用いる HI-RETAX 複合波長板（ルケオ株式会社製）は広い波長帯（500 – 1100 nm）で偏光変調効率の高い遅延量を持つ。同様に偏光解析装置であるシグマ光機製の偏光ビームスプリッターは 500 – 1100 nm の波長帯で高い消光比 1:300 を持つ。さらに、水平分光器はカメラと同数の波長帯で同時分光観測を可能とする。

これらによって、可視光から近赤外にかけての広い波長帯（500 – 1100 nm）における複数の波長帯を同時に高精度に偏光観測することが可能となった。私達は、装置全体の偏光特性を評価し校正手法を確立することで、ストークスパラメーター Q, U, V 間のクロストークを 0.06% ~ 1.2% に抑え、20 ~ 60 秒の積算時間で偏光測定精度 0.03 % を達成できる装置を完成させた。



Reference:

Anan et al., 2018, PASJ

(阿南徹 記)

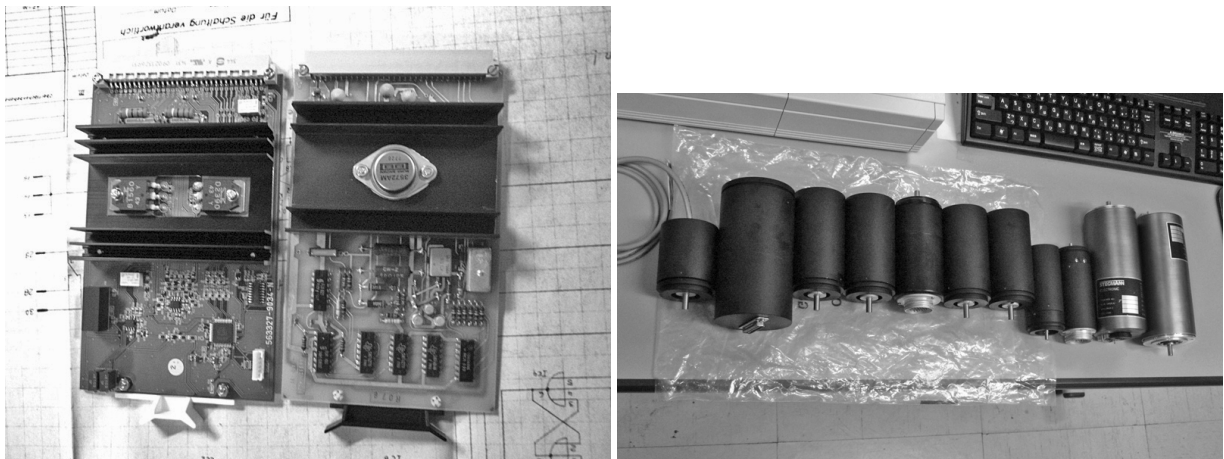
3.2.7 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の観測制御装置の更新

平成 28 年度の京都大学全学経費「設備整備経費(教育・研究)」として、「飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の観測制御装置の更新」を採択して頂くことができました。

ドームレス太陽望遠鏡(DST)は、飛騨天文台に1979年に設立されました。以降、国内最大の地上太陽観測拠点として運用を行ってきており、学内における教育・研究に供されているだけでなく、全国の大学・研究施設から太陽や太陽系天体を専門とする科学者が実質上「共同利用」という形で毎年利用してきています。近年は、さらに海外からの観測者も受け入れているほか、将来の飛翔体観測(次期太陽観測衛星「Solar-C」やSunrise 気球実験等)用の観測装置の開発に必要な実験設備としても活躍しています。

しかし、建設から37年目を迎え、特に観測制御装置内の多数の電子回路基板の故障頻度の上昇、各駆動部分に取り付けられているエンコーダからの出力値に含まれるノイズの増加、旧式の赤外線撮影装置の利用者からのニーズに対する性能不足が各々顕著となってきました。

そのため、これら電子回路基板やエンコーダ、赤外線観測装置を、最新のものに更新することで簡素化・高性能化し、故障発生確率を大幅に低減させ、安定して高精度なデータが得られる環境を整えました(写真1, 2)。これにより、当望遠鏡の共同利用を更に加速させていくことが可能となりました。



(左) 写真1: 更新前と更新後の制御システム電子回路基板の比較一例。今回は特に既に製造中止となっているICを使用している電子回路を中心に更新を行ないました。この更新により、電子回路の耐久性も大きく向上し、かつ回路が簡素化されたため、故障発生確率が大幅に抑制されました。(右) 写真2: 新規製作・導入した11種類の各駆動部エンコーダ。全て寸法は旧エンコーダに揃え、容易に取り換えが可能なものとししました。この更新により、望遠鏡各駆動部の位置情報信号のノイズが除去され、望遠鏡各部の誤作動の発生が回避されて安定した天体観測データが得られるようになりました。

(上野 2016 年度年次報告より)

3.2.8 太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) の高分解能太陽全面像

飛騨天文台に新設された太陽磁場活動望遠鏡 (Solar Magnetic Activity Research Telescope: SMART: スマート) は図1の写真のように2月の厳冬期でも設計どおりに作動することが確認できました。裸のまま厳しい自然に晒された中で、望遠鏡蓋及び側面パネル開閉や内部の空調システムなどを安定に作動させることは非常に難しい課題でしたが、1年を通した立ち上げテスト観測の中で、様々な測定と最適化調整を経て確認されました。SMARTの目的は、我々人類と地球にとって最も大切な太陽の活動を詳しく調べることです。そのためには、太陽全面に互って出来るだけ高分解能且つ高精度で、太陽表面の三次元磁場構造の変化とそれによる太陽プラズマ活動現象の変化を同時に観測する必要があります。このため SMART には、次のような新しい多くの工夫がなされています。



図1: 厳冬の中での飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡

- (1) 鉄塔上に設置 (地上 16m)。鉄塔歪: 40μ 以下 (風速 10m 時)
- (2) 搭上面を極力狭い格子構造とし、陽炎除去
- (3) 望遠鏡を極力コンパクトなドームレス型
- (4) 望遠鏡内を二重構造にして自動温度制御 (摂氏 25 度 $\pm$ 5 度)
- (5) 大口径フィルターにより対物レンズ直前で不要波長除去
- (6) 望遠鏡を動かさずに観測領域選択: 2 枚の大口径楔を対物レンズ直前で回転
- (7) 口径 50mm (世界最大) Lyot フィルタの製作
- (8) 25cm 多機能望遠鏡: 直交する 2 偏光の同時撮影で磁場の測定精度向上
- (9) 大口径タンデム型ファブリ・ペロフィルタの製作
- (10) 最大画素数 4096×4096 で、現在最速の USB2 データ転送を用いた CCD カメラを採用

次のページでは 2003 年の 8 月 6 日に撮影された太陽全面の $H\alpha$ 像を示しています。調整テスト段階において撮影されたものですが、既に太陽全面 $H\alpha$ 像としては、世界最高級の空間分解能を実現していることが分かります。これまで、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡を用いた、高分解能 $H\alpha$ 写真によって、色々な新しい発見がなされてきましたが、その半面で、高分解能の弱点として撮影領域の視野が狭いために、数々の面白い現象の発展段階を逃してきたのも事実でした。そのたびに「太陽全面をいつも高分解能で観測でき

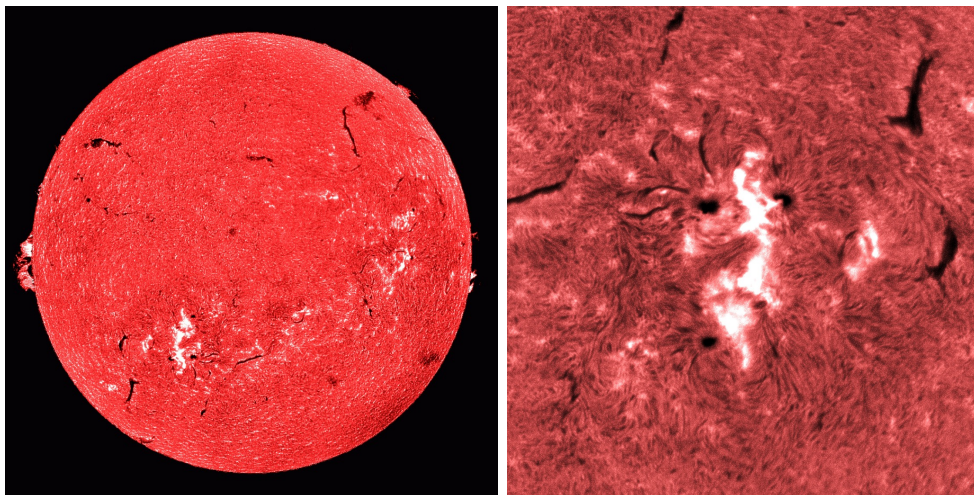


図 2(左): SMART で観測された太陽全面 $H\alpha$ 像 (2003 年 8 月 6 日撮影) 図 3(右): 図 2 の全面像の右下の活動領域を拡大したもの

る望遠鏡」の必要性が要望されてきたわけですが、今まさに実現したと云えます。

この太陽全面像の分解能を確認するために、右下の活動領域だけを拡大したものを図 3 に示します。黒点周辺の強い磁場に沿ったプラズマの流れを表す黒い微細な筋模様が分解されて見えているのが良く判ります。

図 4 には、2003 年 10 月末から 11 月にかけて多くの強いフレアを発生させた活動領域を含む太陽全面の $H\alpha$ とベクトル磁場図を示しています。このように SMART は高い空間分解能でいつも太陽全面を観測できますから、地球側に向いた太陽表面に現れる全ての活動領域をその誕生から、その発達過程を詳細に連続して追跡することが可能となりますので、フレアなどの爆発現象の発生メカニズムを研究する上で大きな武器を得たことになります。

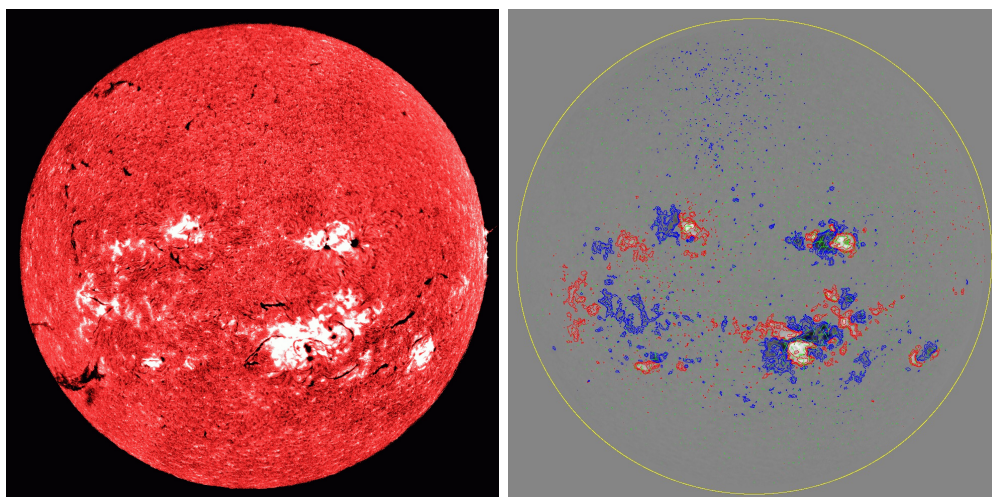


図 4: 2003 年 10 月 30 日の太陽全面像。(左): $H\alpha$ 線像。(右): ベクトル磁場図。

(黒河 宏企 記 2003 年度年次報告より) Reference: UeNo, S. et al. 2014, SPIE, 5492, 958.

3.2.9 SMART H α / 連続光 高速撮像装置 (FISCH: Flare Imaging System in Continuum and H-alpha) の新設

可視光においてフレアカーネルの時間発展を高速かつ高空間分解能で撮像することで、フレア加速粒子の空間的・時間的发展を詳細に捉える目的で、飛騨天文台 SMART 望遠鏡 T3 の光学ベンチに H α /連続光撮像光学系を新たに設置した¹。

2011 年 8 月 18 日にファーストライトを迎え、2011 年 9 月には、白色光フレアの観測に成功した。

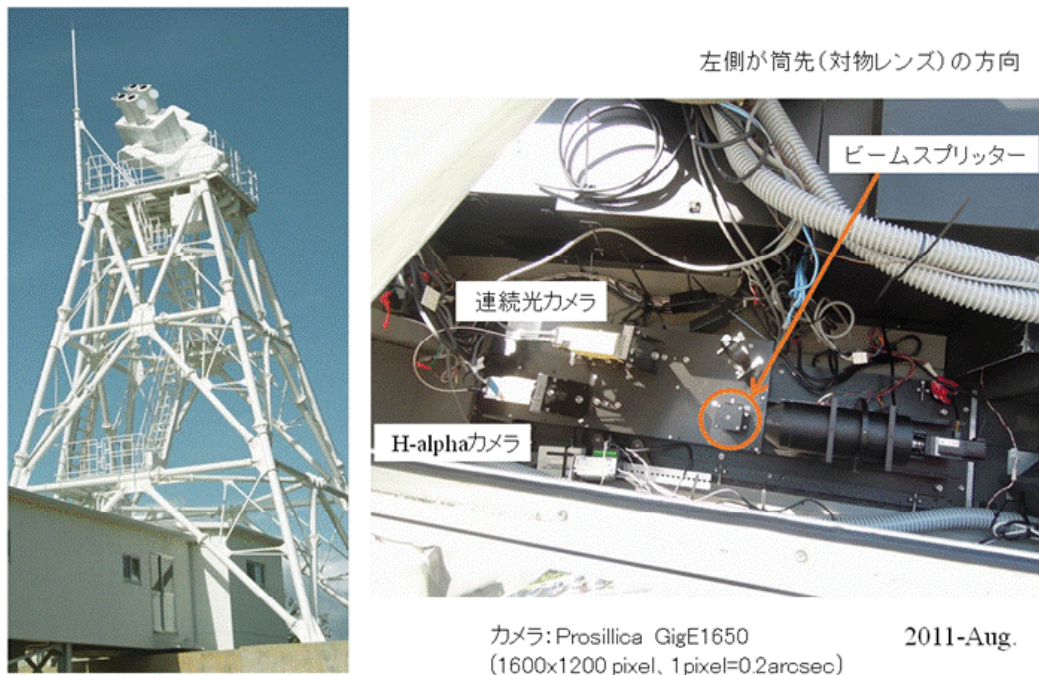


図 1:(左)SMART 全景 (右) 新設された H α /連続光高速撮像システム

SMART に搭載した新光学ベンチの写真を図 1 に示す。H α /連続光高速撮像システムは、光を 2 つの撮像系に分けるビームスプリッター、H α と連続光 (647nm) の多層膜バンドパスフィルター、および 2 台の高速 CCD カメラ (1600 × 1200 画素) から構成される。

視野は 350 × 260arcsec² をカバーし、25 frames/秒で 2 つの波長の画像を同時に取得する。H α のフィルターは透過幅 3 Å のものを採用したため、純粋な彩層画像は得られないが、同時に取得した連続光画像を差引くことにより H α 線の積分強度に対応する画像を得る。露出時間は 0.2 msec 程度で、これは大気の揺らぎ (シーイング) の時定数よりも十分に短い。スペックル像再生処理を施すことにより、回折限界の解像度 (∼ 0.6 arcsec) を達成する。画像データは望遠鏡タワー下の観測室に設置する観測制御計算機にて連続的に保存する。このとき発生するデータ量は 1 時間当たり 1 TB、一日に 7 ∼ 8 TB と膨大なものとなるが、フレアが発生している時間帯以外のデータの時間分解能を落としてデータを選別することにより、現実的なデータ量に抑える。フレア時以外は、連続光画像を用いたフレームセレクションを行い、5 秒に 1 セットの H α 線と連続光画像を選別する。

¹この開発研究は、名古屋大学 STE 研の地上ネットワーク観測大型共同研究 (重点研究) (代表:一本潔、増田智) により行われた。

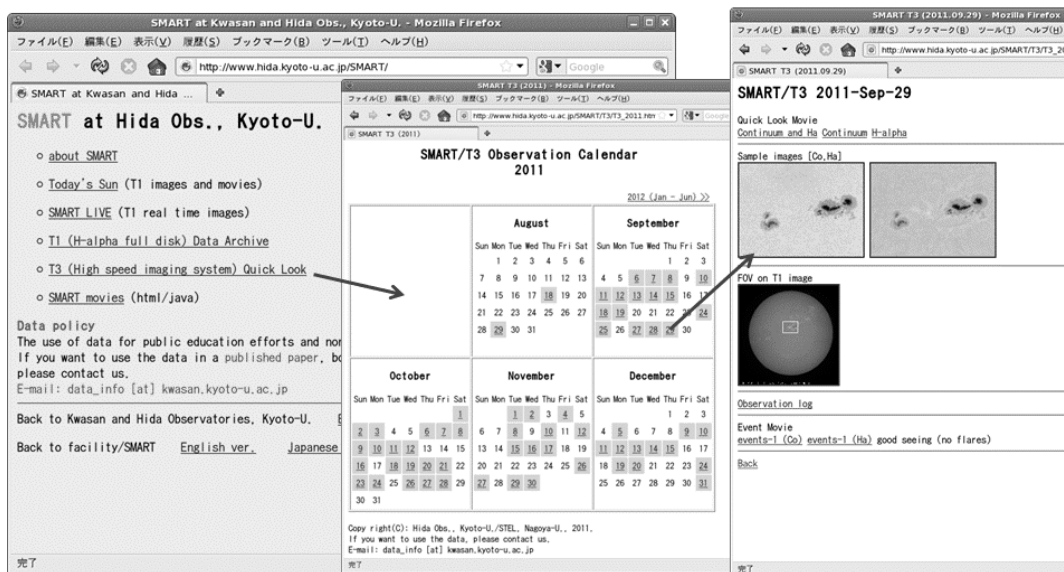


図2: データ公開

2011年8月18日にファーストライトを迎え、11月には、 $H\alpha$ 全面像と同様の定常観測を開始した。観測翌日にはサンプル画像やクイックルックムービーなどをホームページ (<http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/SMART/>) から閲覧できる (図2)。

ファーストライト以降に発生した9回のXクラスフレア (日本時間の昼のものは5回) のうち、4例が観測されている。2011年9月6日世界時22時と、9月7日世界時22時に発生したXクラスフレアにおいて、連続光におけるフレア時の増光が確認された。2012年3月7日の観測データは確認途中であるが、天候不良もあり、連続光での増光は判断がついていない。2011年9月6日のフレア (図3) について、RHESSI など硬X線での撮像分光観測やSDO/HMIの磁場データとの比較解析を行い、日本天文学会にて発表を行った。

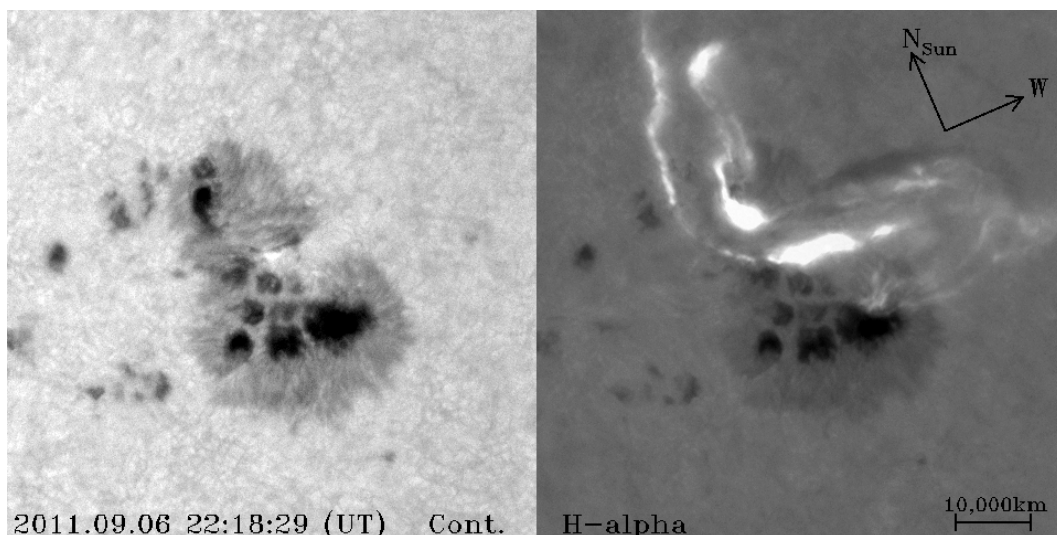
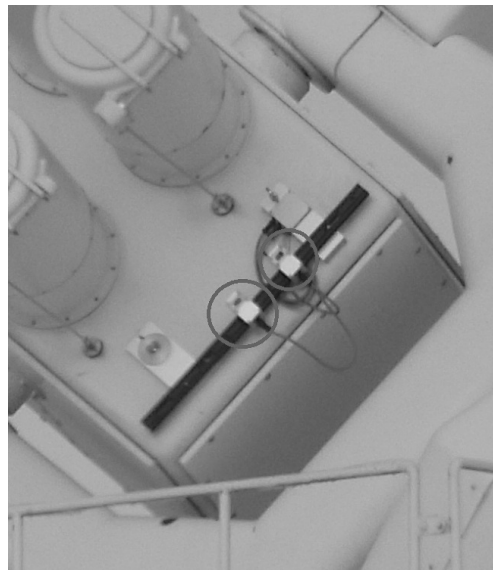


図3: 2011年9月6日のXクラスフレア (左) 黒点中央に白色光フレア

(石井貴子 記 2011 年度年次報告より) Reference: Ishii, T.T. et al., 2013, PASJ, 65, 39.

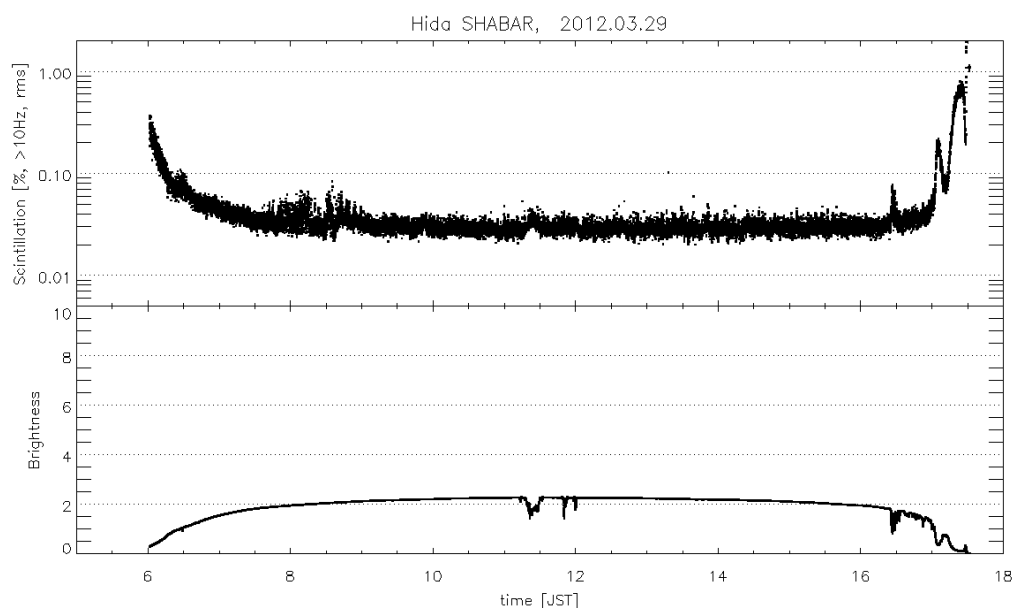
3.2.10 太陽観測用シーイングモニターの開発

SHABAR(SHAdow-BAnd Ranger)により太陽の光量を測定し、そのシンチレーションからシーイングを見積もる装置を開発し、飛騨天文台太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) に設置した。SMARTは、高さ 16m の塔上にドームレスで設置されている。四本の望遠鏡を一つのフォーク式架台に同架している望遠鏡函体の前面 (観測時に太陽を指向) にセンサー類を設置した (右写真)。



回路のパターン設計などは飛騨天文台にて自作し、4層のプリント基板で作成した (5枚作成済み、増産も可能)。センサーはアルミケース内に納め、汎用の 50 mm 光学ベンチ (長さ: 約 1 m) に配置し、A/D コンバーターへは防水メタルコンセントにて接続した。降雪対策として、ケース天面に融雪用のヒーター (自己制御) を組み込んだ。光量は 16-bit AD 変換を行い 5000 Hz で取得し、2 秒ごとに平均輝度、rms 輝度変動、二つのセンサー間の相互相関値を記録している。現在、二つのセンサーを間隔 20 cm で運用しているが、これは、汎用ベンチキャリアを介して容易に変更、増設できる。

SMART 観測時には、常にデータを取得し、全面像撮影の停止・再開の自動判断に平均輝度の値を用いている。毎日のデータは台内向けに web サーバーに保存している。2011 年 3 月 29 日の、rms 輝度変動 (シンチレーション) と平均輝度のグラフを下図に示す。今後、得られたシンチレーションのデータと、SMART H α /連続光高速撮像望遠鏡の画像から判定した実際のシーイングとの比較検討を行っていく。



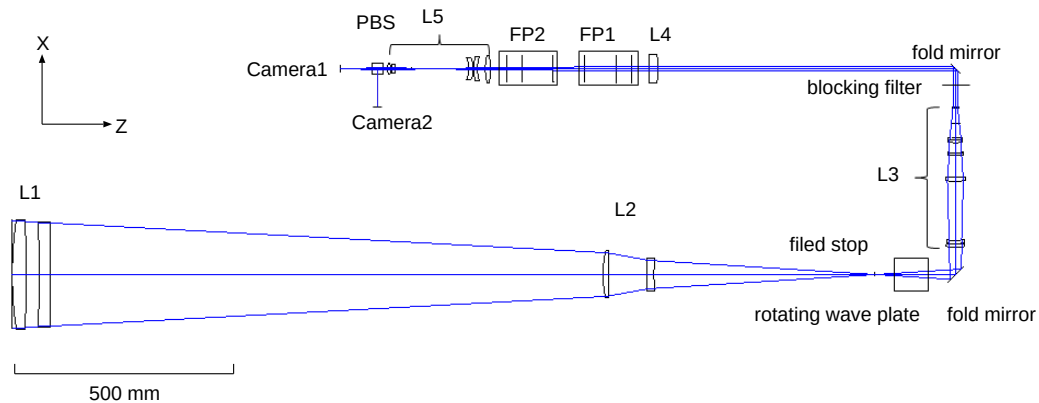
(石井貴子 記 2011 年度年次報告より)

3.2.11 SMART-T4 マグネトグラフ:Tandem Etalon Magnetograph (TEM)

飛騨天文台の Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART) の第 4 鏡筒 (T4) は、2003 年のプロジェクト開始当初に実験プラットフォームとして位置づけられ、第 2 鏡筒 (T2) で実施する全面の光球磁場観測を補う部分像光球磁場観測、もしくは彩層、光球の 2 色同時撮像観測を計画していた。

初期運用期間には、いずれのオプションを選択するのかの検討を続けてきた。この間、2006 年に「ひので」衛星の打ち上げがあり、可視光望遠鏡の Spectro Polarimeter (SP) では、SMART T2 を凌駕する高精度の磁場観測データを取得できるようになった。このために、地上観測の利点を生かした、特徴ある磁場観測を SMART で実施できないか検討を深め、最終的には T4 を磁場観測望遠鏡として位置づけ、その新装置 (Tandem Etalon Magnetograph) の開発を科研費など利用して、2008 年度より行ってきた。2012 年度からの試験観測を経て、2015 年度から定常観測を行っている。なお、2010 年には、NASA の Solar Dynamics Observatory (SDO) 衛星が打ち上げられ、Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) による連続的な光球全面のベクトル磁場観測が行われるようになった。

T4 マグネトグラフは、SMART-T2、「ひので」などと同じ FeI 6302.5Å のゼーマン効果を計測して、光球面の 3 次元磁場情報を取得する。吸収線を選択する狭帯域フィルターとしては、2 台の Fabry-Perot フィルタ使用して、 $\sim 100\text{m}\text{\AA}$ の FWHM で、線輪郭を測定する。偏光観測装置としての特徴は、2Hz で連続回転する回転波長板と偏光ビームスプリッター、30fps の CCD カメラを 2 台使い、直交偏光信号を同時に取りこむ点である。



マグネトグラフの光路図 (Nagata et al. (2014) より転載)

直交偏光の同時取得により、シーイングによる疑似偏光の混入を抑制することが可能となり、さらに 30fps の高速読み出しデータを時間方向に積分することで、統計的な計測誤差も抑えることができる。これにより、 3×10^{-4} に達する測光精度での光球磁場マップを、1 分程度の時間間隔で取得することが可能になる。これは、12 分間隔で 10^{-3} の精度での観測をする SDO/HMI を上回るものである。

本計画の主要な試験、開発要素は以下のようにまとめられる。

機構改修:当初に使用を想定していた full frame CCD とは異なる小型の interline CCD のカメラの視野に対応した視野調整レンズ(ワイドコンバーター)を望遠鏡光学系を設計・制作したコニカミノルタとともに新規に開発した。ワイドコンバーターレンズ、ビームスプリッター、カメラを搭載する機構も新規制作した。

狭帯域撮像:CSIRO により制作された Fabry-Perot フィルタの分光性能評価は、ドームレス太陽望遠鏡分光器を利用して行われた。波面性能については、国立天文台の先端技術センターのザイゴ干渉計を利用させていただき実施した。なお、「ひので」衛星でも経験されている、Andover 社製のブロッキングフィルターの劣化(透過波長の短波長シフト)が顕著になったために、2017 年度に Alluxa 社製のものに交換している。

偏光変調:ドームレス太陽望遠鏡の偏光観測での経験を活かし、横河の中空サーボモータを用い、直線偏光と円偏光の変調効率が等しくなるように遅延量を調整した波長板(日本真空製)を設置し、約 2H で連続回転するシステムとした。偏光復調に必要な撮像時の角度信号を、サーボモータの制御装置から取り込むようにした。

データ処理:30fps では各画像間のシーイングの影響は除去できないために、複数画像を用いて偏光復調を行うためには画像の位置合わせが必要となる。このために、広く用いられている Image destretch のアルゴリズムを、マルチコア CPU を用いて並列処理するライブラリを開発した。

ストークスインバージョン:取得されたストークスプロファイルからベクトル磁場への変換は、「ひので」可視光望遠鏡の Narrowband Filter Imager(NFI)用の Loop Up Table(LUT)方式のコードをベースに開発し、小さな計算機資源でも効率的に磁場データを得られるようにした。

T4 マグネトグラフの性能を検証するために、2012 年 7 月 10 日に観測された活動領域 NOAA11520 の様子を、SDO/HMI の観測の様子と詳細に比較を実施したところ、ほぼ設計値を満たす 3×10^{-4} という偏光測定精度を 20 秒の観測で実現出来ていることが確認された。これは、同じ観測時間で比較した場合は、SDO/HMI をも上回るものになっている(図 2)。

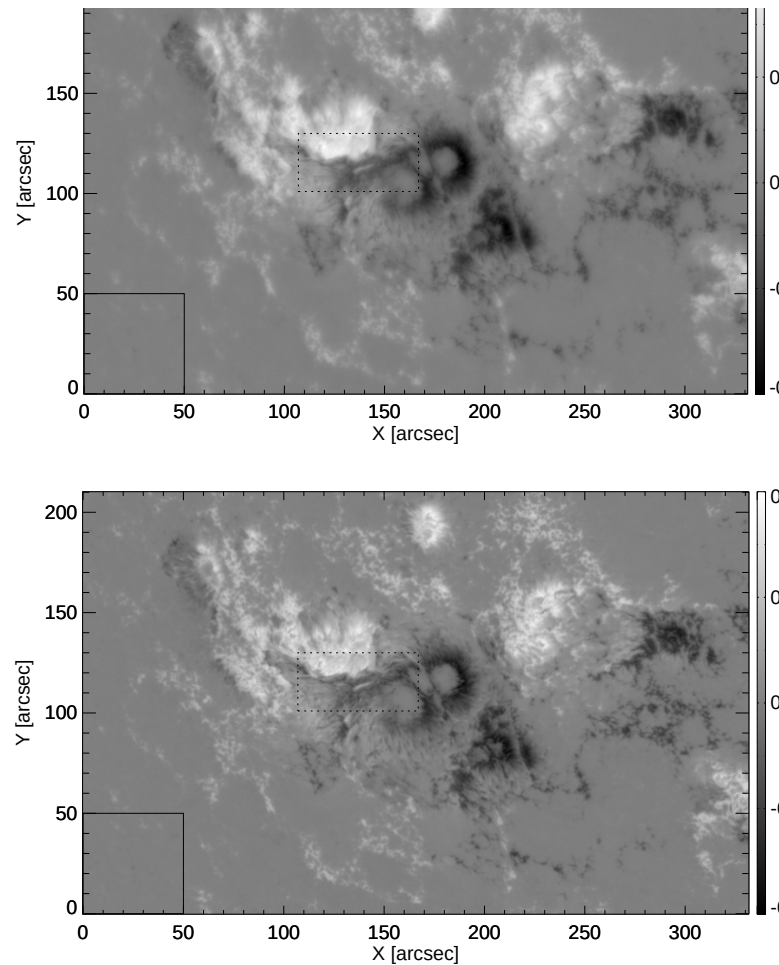


図: SMART/TEM（上）と、SDO/HMI で取得された NOAA11520 の偏光信号（視線方向磁場強度）の比較 (Nagata et al. (2014) より転載)。

2015年8月25日には、NOAA12403で発生したインパルシブなcircular ribbon flare(M5.6)を観測し、リボンの発達に伴った顕著な光球磁場構造の変化が捉えられた。SDO衛星のコロナデータと合わせて、フレアに関与する磁気リコネクションの時間変動についての解析を進めている。また、9月6日にX9.3の巨大フレアを起こしたNOAA12673については、2017年9月4日-5日の発達の様子を捉えることができた。今後、T1/SDDI, T3/FISCHの特徴あるH- α 速度場、白色光フレアの観測データと合わせることで、太陽フレアやプロミネンス噴出における磁気エネルギー蓄積・開放過程、力学的不安定成長に関する観測研究を推進していく。

Reference:

Nagata, S. et al. 2014, PASJ, 66, 45.

(永田伸一 記)

3.2.12 SMART 全面像望遠鏡用チューナブルフィルターの作製—新学術領域PSTEP(太陽地球圏環境予測) がスタート—

2015 年度より新学術領域研究として、太陽地球圏環境予測 Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP) が発足した。これは太陽と地球およびそれを取り巻く惑星間空間すなわち「太陽地球圏」を統合的に研究することで、太陽表面におけるフレアやフィラメント噴出現象、CME といった活動現象が我々の社会基盤や生活にどのような影響を及ぼすかを予測する「宇宙天気予報」の確立を目的としている。

PSTEP 発足に伴い飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡 SMART では、地球磁気圏に影響を及ぼす太陽噴出現象をより詳細かつ定量的に観測するため、彩層全面像用の新たなチューナブルフィルターを開発することとなった。新たなフィルターは口径 40mm、透過幅 $0.25\text{\AA}$ 、波長チューニング幅 $9\text{\AA}$ 、チューニング時間 0.1 秒と、従来のものと比較してより広範囲の速度域 ($\sim \pm 400\text{ km s}^{-1}$) を短時間でカバーすることが求められた。これまで捉えることができなかった高速噴出現象をその初期段階から観測することで宇宙天気予報の正確性、迅速性を向上させることを期待され、開発費用は PSTEP から拠出された。

今回、コンパクトかつ即応性に優れたチューナブルフィルター作製のため、遅延素子として液晶可変遅延素子 (LCVR) を用いた。各種光学素子は干渉計、ひずみ検査器および偏光特性計測装置を用いて検定を行った。特に LCVR は光の波長、印過電圧および温度によって遅延量が変化するため、状況に応じた適切な印過電圧を計算するためのモデル作成を行った。フィルター本体を組み立て後、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡にて試験観測を行い、今回のチューナブルフィルター作製を完了した。来年度以降、実際に SMART の望遠鏡内部にチューナブルフィルターを設置した上での定常観測へ向けて計画を実施していく予定である。

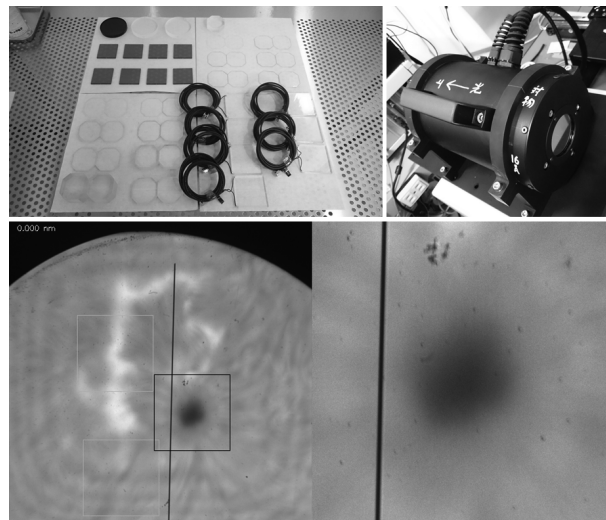


図: (左上) チューナブルフィルター作製に用いた全光学素子、(右上) 完成したチューナブルフィルターの外観、(下段) ドームレス太陽望遠鏡で試験観測した活動領域近傍の彩層。

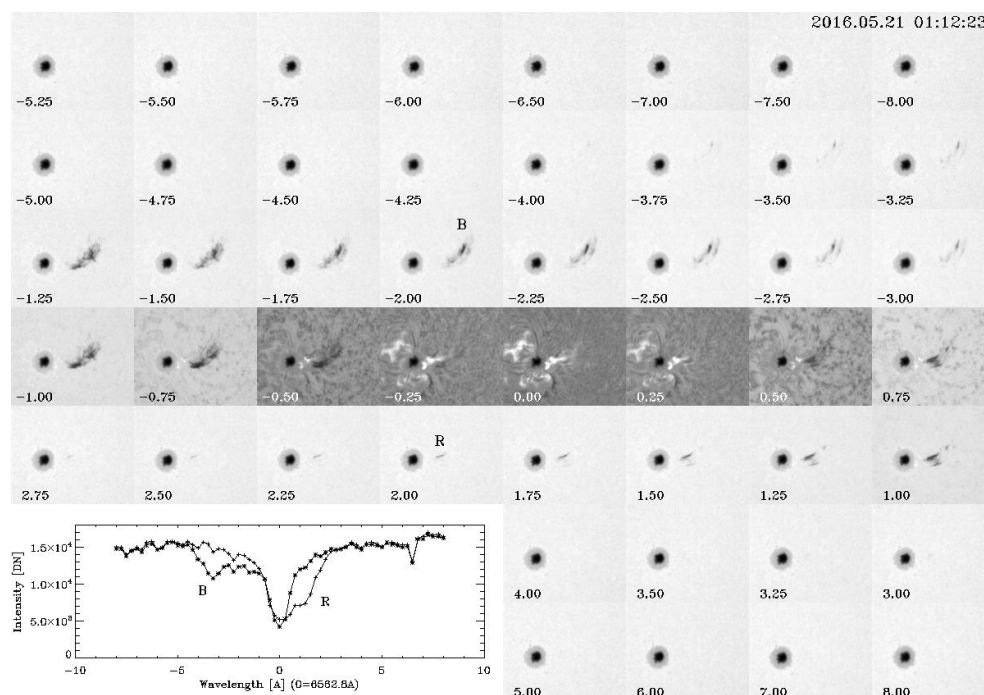
(大辻 賢一 記 2015 年度年次報告より)

3.2.13 SMART 望遠鏡 新全面像速度場撮像装置: Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI)

新学術領域「太陽地球環境予測 (PSTEP)」の太陽嵐班 (A02) の研究のため、太陽から高速に飛び出すフィラメント放出現象を観測することができる装置を2016年4月末に飛騨天文台 SMART 望遠鏡に新設した。

太陽から放たれる紫外線や X 線、高エネルギー粒子 (放射線)、および磁化したプラズマの風は、太陽面爆発 (フレア) やコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection: CME) により激しく変動する。このような太陽現象を起因とする太陽・惑星間空間の変動「太陽嵐」は、地球環境と人間社会にも多大な影響を与える。コロナ質量放出 (CME) は、太陽面からのフィラメント (プロミネンス) 消失に伴い発生することが知られているが、すべてのフィラメント消失が CME と関連するのではなく、運動するフィラメントの速度構造との関係は十分に調査されていない。

そこで、本研究では、高速で運動するフィラメントの三次元速度構造を決定するため、飛騨天文台 SMART 望遠鏡の太陽全面像観測システムを更新した。従来の観測は、Lyot フィルターを用いた波長制御と 4K CCD カメラによる波長点数 7 点 ($H\alpha$ 中心および $\pm 0.5, 0.8, 1.2 \text{ \AA}$)、視野 2300 arcsec^2 (ピクセルサイズ 0.56 arcsec/pix)、時間分解能 1-2 分であったのに対し、新装置 (Solar Dynamics Doppler Imager : SDDI) は、液晶による波長制御を行う複屈折フィルターと 100 frames/sec の高速撮像可能な 2K CMOS カメラにより、波長点数 73 点 ($H\alpha \pm 9 \text{ \AA}$ の範囲を $0.25 \text{ \AA}$ 刻みに観測)、視野 2520 arcsec^2 (ピクセルサイズ 1.23 arcsec/pix)、時間分解能約 15 秒で観測を行う。これにより、従来の装置で観測できるフィラメントの噴出速度は最大 55 km/秒 だったのに対して、新装置では、最大 410 km/秒 までとらえることが可能となった。



2016 年 5 月 21 日に活動領域 NOAA 12546 の周辺で観測された噴出現象

本年代報告の表紙には、2016 年 5 月 21 日に活動領域 NOAA 12546 の周辺で観測された噴出現象の SDDI による多波長観測画像と、R,B 付近の波長ごとの明るさの変化を示したグラフを掲載した。グラフの 0 が、 $H\alpha$ 中心に相当し、物質が運動することによりグラフ(吸収線)の形が変化していることがわかる。この変化量から、運動するフィラメントの視線方向の速度が算出でき、太陽画像から視線と水平な方向の速度を求めることにより、フィラメントの三次元速度場が導出できる。

SDDI では、広い波長範囲を高時間分解能で観測するため、データ量は巨大(10 時間の観測で 1.4TB)になる。秒速 150km を超えるような速い活動現象は稀れ(日によって活動度は異なるが、多い時で一日数例(合計 2-3 時間程度)、観測されない日も多数)なため、観測終了後に高速現象を確認して波長範囲を狭めたデータを保存、現象の受かっていない外側の波長のデータは消去している。こうして確認された高速のサージ、フィラメント活動の観測例や、リアルタイム太陽画像は、飛騨天文台 SMART 望遠鏡のウェブサイト <http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/SMART/> より閲覧可能である。

Reference:

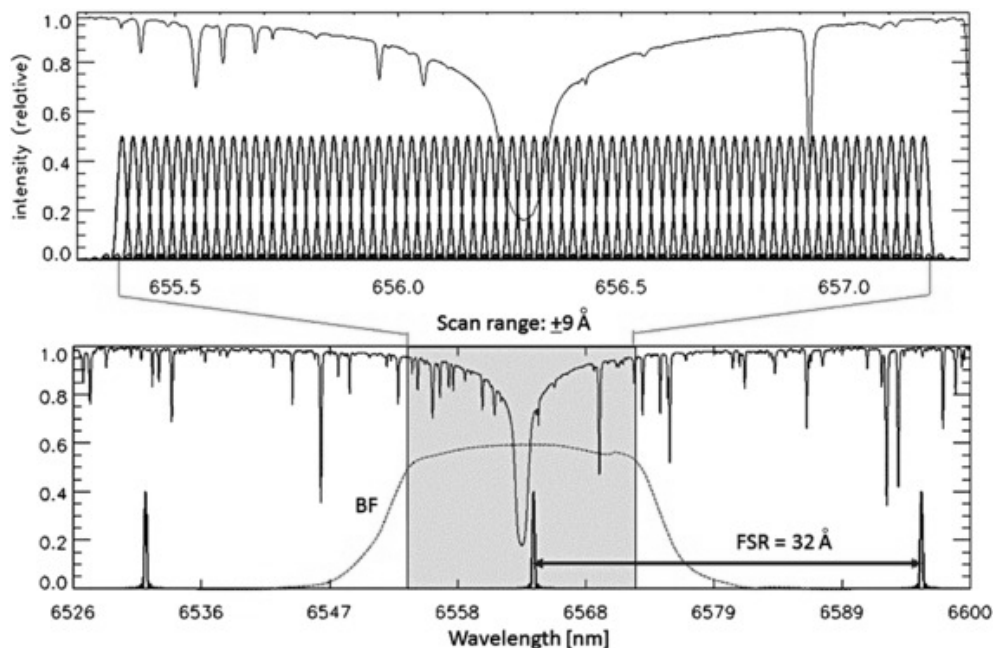
Ichimoto, K. et al. (2017) Solar Physics, 292, id63.

(石井 貴子 記 2016 年度年代報告より)

参考:

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/170410_1.html

産経新聞(2017 年 4 月 15 日夕刊 8 面)、中日新聞(2017 年 4 月 15 日 29 面)、日本経済新聞(2017 年 4 月 14 日 30 面)および毎日新聞(2017 年 4 月 19 日 27 面, 本記念誌 p.61)に掲載されました。



SDDI が観測可能な波長範囲と波長分解能 (Ichimoto et al. 2017 より転載)。

3.2.14 飛騨天文台フレア監視望遠鏡のペルーへの移設

皆さん御存知の通り、フレア監視望遠鏡 (FMT) は 1991 年度、宇宙天気研究の推進に太陽観測の立場から貢献することを主たる目的として、飛騨天文台に建設された。その後、この FMT が小型望遠鏡ながらも太陽彩層全面像の多波長同時観測が可能であることを活用し、様々なテーマで多くの研究業績を生み出してきた事は、当天文台ホームページの FMT 関連論文リストのページ¹等を御覧頂くとお分かり頂けるものと思う。

当天文台では、地球環境に影響を及ぼし得るようなフレア、フィラメント噴出、衝撃波など、太陽彩層で見られる大規模な活動現象を漏れなく検出して、それらの物理量を測定することを可能とするために、2005 年頃より、上記のように宇宙天気研究に有効な特徴を備えた FMT 型望遠鏡を世界中に展開することにより、太陽全面 H α 多波長地上観測国際ネットワークの形成を目指すプロジェクト: Continuous H-alpha Imaging Network (CHAIN) Project を発案し、海外第一号 FMT を設置する候補地・協力機関を探し始めていた。

その様な背景の中、ペルーの石塚睦先生から、ペルーへの太陽望遠鏡設置検討の御要望を頂いた事、太陽の連続観測と言う観点からもペルーは日本の夜の時間帯を長時間カバーし、連続的に飛騨天文台における観測にボタンタッチしてくれると言う地理的好条件を備えている事、などから、私たちは 2006 年度に上記海外第一号 FMT 設置候補地をペルー国に定めることとし、更に 2008 年度夏には、具体的にペルーに設置する望遠鏡として、飛騨天文台の FMT そのものをペルーに移設する、と言うことを決めるに至った。

なお、幸い飛騨天文台には 2003 年に SMART 望遠鏡が完成したので、H α 周辺波長での太陽全面撮像観測は、多波長同時ではないものの、可能であり、今後、撮像頻度を上げてデータ数を稼ぐなどの改良により、異なる波長での撮影時のシーイング変動の効果も抑制して行けるものと判断し、日本における CHAIN プロジェクトの主要観測装置は、SMART が担って行くものとした。

ペルーにおける具体的な観測サイトや運用方法、インフラなどについての議論は、この CHAIN プロジェクトとペルーへの FMT 設置計画を国際的に公表するために当天文台の上野とペルー地球物理学研究所 (IGP) のイシツカ・ホセ氏が参加した、2006 年 11-12 月、インドのバンガロールにて開催された “International Heliophysical Year (IHY) 2007” の国際会議の時点より開始し、2007 年 1 月には当天文台の柴田台長と上野も実際にペルーに渡り、IGP より提案されていたアンコン観測所、ワンカイヨ観測所、ハワイ新教育天文台建設候補地、そしてイカ大学、の 4 か所の候補サイトを視察して回り、それらのサイトの中から、先ず第一には晴天率を重視し、更にインフラ整備の見通し、アクセス性の良さ、オペレーションスタッフやデータを効果的に利用する研究者等の人的環境・教育効果の高さ、等を総合的に勘案した結果、IGP チームがイカ大学に働きかけて 2008 年からの着工が決まっていた、同大学内の「太陽ステーション」を FMT 設置サイトとして最終決定するに至った。

¹http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/fmt/fmt_papers.html



写真 1：飛騨天文台での FMT 解体作業



写真 2：飛騨天文台での FMT 解体作業



写真 3：ペルーでの FMT 組立作業



写真 4：ペルーでの FMT 設置完了時の様子

そうして、ついに今年度、科研費学術創成「宇宙天気予報の基礎研究」(代表：柴田一成教授)や国立天文台受託研究費(大学支援経費)「ペルー国イカ大学に設置する国際協同太陽観測装置による宇宙天気研究」(代表：柴田一成教授)、京大・理・GCOE プログラム・若手スタッフ GCOE 研究基盤強化プロジェクト経費「国際太陽地上観測ネットワーク形成による 100 年に一度の活動極小期から極大期に向かう太陽および宇宙天気の観測的研究」(代表：上野悟)等の支援を受け、飛騨天文台 FMT のペルーへの移設作業が実施されるに至った。

2009 年 11 月 10 ～ 11 日には、実際に飛騨天文台の FMT が解体されて京都の西村製作所へと運送され(写真 1,2)、同年 12 月末には、ペルー・イカ市の緯度(南緯 14 度)に合わせた赤道儀架台の製作が完了。その後、仮組み立て・動作テストを行ないながら輸出入手続を行ない、2010 年 1 月 29 日に、神戸港より周辺機器と共に船便で発送された。それらの荷物は、3 月 3 日、無事ペルーのカヤオ港に入港し、約 10 日間の通関手続きを経た後、3 月 13 日の夜、イカ大学太陽ステーションに無事、到着した。現地では当天文台の上野、木村に加え、西村製作所スタッフが FMT の組立、調整作業を行ない(写真 3)、3 月 17 日に同ステーション内のシーロスタット分光器棟横に設置を完了した(写真 4)。ただし、現在イカ大学太陽ステーションにおいては、主にイカ大学の特別予算から支出して頂いて、さらに本格的な FMT 用格納庫の建設を進めて頂いている所であり、来年度以降、この格納庫が完成し次第、その中に望遠鏡を移動する予定である。この新格納庫には、空調の利いた制御計算機室も用意して頂ける他、同太陽ステーション内の研究棟との間が直接 LAN ケーブルにて接続される予定のため、この格納庫を利用すれば、観測したデータがリアルタイムで研究棟の解析用計算機に転送できるようになり、日本へも順次自動的に転

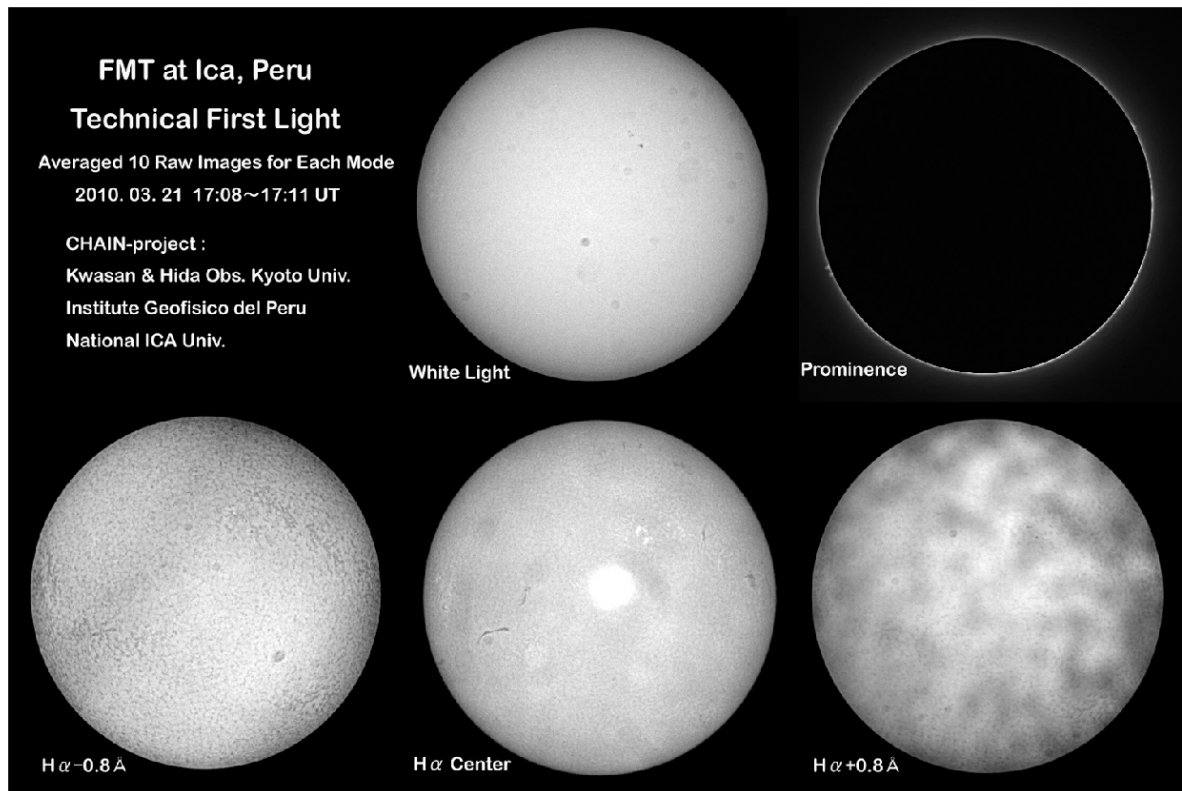


図 1 : ペルーへの FMT 移設直後の太陽画像（ダーク、フラット処理無しの状態）

送できるようになる予定である。

最後に、図 1 にペルーに FMT を移設した直後の 3 月 21 日に太陽を撮影した際の生画像をまとめた。この画像上には、一部フィルタの劣化によるパターンの目立つものや、長期に渡る保管・輸送期間中のフィルタ温度の低下の影響を受けたパターンが見られるものがあるが、これらのフィルタ自体を更新することも、今後の課題のひとつである。ただ、当面は次年度に予定されている、当天文台スタッフのペルー長期滞在による現地研究者・学生に対する研修・実習プログラムの中で、ダーク、フラットの取得法・画像処理方法を確立して教育することにより、これらの器械的パターンを除去して科学的解析に当たって行く予定である。

これらの研修・実習の成果は、次年度 11 月頃にペルーにおいて国際ワークショップを開催し、発表する場を設けると共に、CHAIN/FMT データを用いた今後の科学研究テーマについて、より深く議論する機会を持つ予定になっている。

(上野 悟 記 2009 年度年次報告より)

関連論文:

Cabezas, D.P. et al. 2017, ApJ, 836, 33.

Seki, D., et al. 2018, Sun and Geosphere, in press. (arXiv:1808.06295)

3.2.15 サウジアラビアへのフレア監視望遠鏡の設置

ISWI News Letter, 2015 Nov.

Solar Observation Started with the Flare Monitoring Telescope at King Saud University under the CHAIN Project

Reporter: Satoru UeNo (Hida Obs., Kyoto Univ.)

The main purposes of our CHAIN project are reinforcement of multi-wavelength H-alpha observations of the full-disk Sun by formation of an international network of ground-based solar station, and international spread, academic exchange and promotion of the space-weather research including developing countries. Under this purposes, we had supported the installation of a new Flare Monitoring Telescope (FMT) at King Saud University (KSU) in Saudi Arabia.



Photo 1: The building and astrodomes of the department of physics and astrophysics of KSU

In 2011, KSU started the project to install the FMT by their own budget and research space weather through solar observations. KSU has very wide campus in the capital city Riyadh. The department of physics and astronomy has two 6.6 m astronomical domes (photo 1). In the one dome, a telescope for the solar observation in white-light has been already working. In another dome, a telescope for night astronomy was working in former times. However, nighttime observation in Riyadh city has become difficult due to the light pollution. Therefore,

they decided to replace this nighttime telescope with the FMT and focus on the researches of solar activities and space weather.

Therefore, Kyoto University and Japanese telescope-company cooperatively performed initial installation of a new FMT at KSU in December 2014 under the fund of KSU (photo 2, 3).

Moreover, in October 2015, we did further optical adjustment (photo 4, 5, 6) and training of telescope-operation and data-analysis for Saudi Arabian researchers (photo 7, 8). After that, the daily solar observation with the FMT in KSU safely started on Oct-31 (photo 9, 10, 11).

By starting daily observation at KSU, the CHAIN project came to be able to monitor the Sun for 24 hours continuously without blank time all year round, with including solar observations at Japanese and Peruvian CHAIN stations.



Photo 2: Carrying the fork-mount of the FMT in the astrodome (Dec 2014)

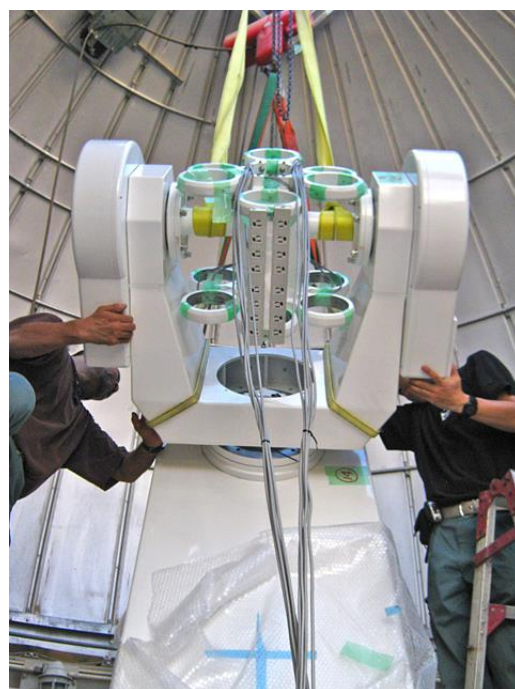


Photo 3: Assembling the FMT (Dec 2014)



Photo 4: Assembling focus-adjustment systems (Oct 2015)



Photo 5: Adjustment of the alignment of objective lenses (Oct 2015)



Photo 6: Adjustment of observational wavelengths of optical filters (Oct 2015)

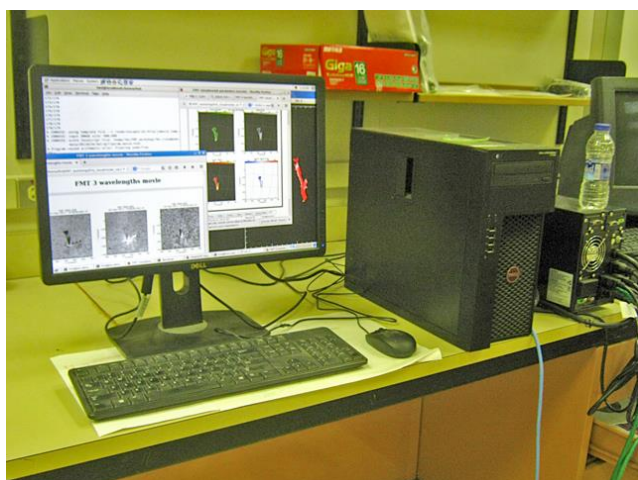


Photo 7: The Linux computer in which data-analysis software was installed

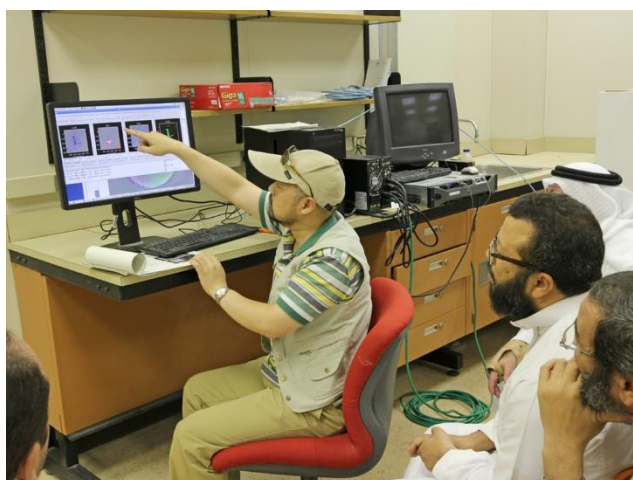


Photo 8: Training of data-analysis of the FMT-data for Saudi Arabian researchers (Oct 2015)



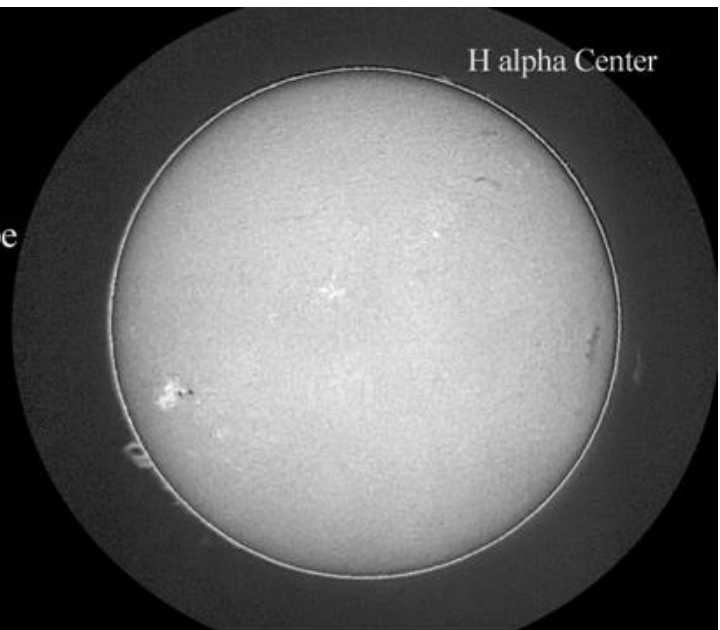
Photo 9: The completed FMT that started daily solar observation (Oct 2015)



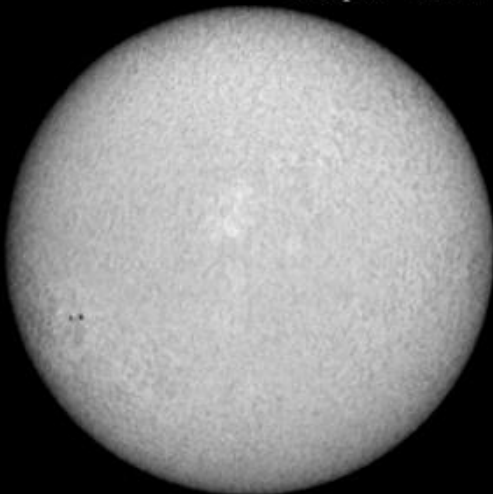
Photo 10: Monitors of each solar image in the control & data-analysis room (Oct 2015)

Solar Observation Started
with the Flare Monitoring Telescope
at King Saud University
under the CHAIN project

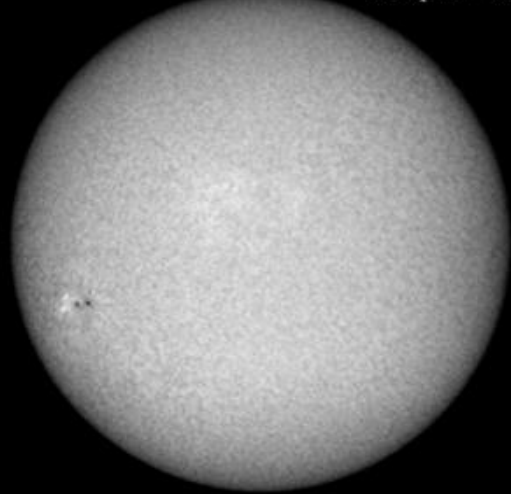
2015-10-31 07:55 UT



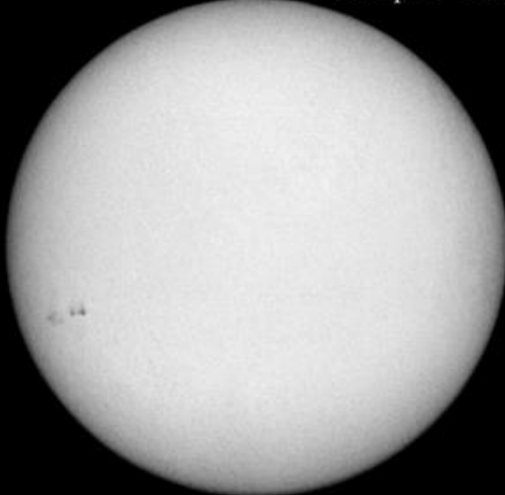
H alpha - 0.6 Å



H alpha + 0.6 Å



H alpha - 1.2 Å



H alpha + 1.2 Å



Photo 11: Five kinds of solar images at different wavelengths around H-alpha absorption line on the first day of daily observation with the Saudi Arabian FMT

3.2.16 60cm 反射望遠鏡 恒星観測用整備

飛騨天文台は「惑星天文台」という別名で呼ばれたこともあるように、当初は火星・木星などの惑星と月の観測が主体であった。この天文台の第1号の望遠鏡として花山天文台から移設された60cm望遠鏡も、当初は多くの時間で惑星を写真観測することに使われた。しかし、この20年では、恒星の観測に使えるように様々な手入れがなされてきた。

1999年には、恒星の日周運動の追尾精度を上げ長時間露光に対応するために、極軸の再調整が行われた。また同年には、カセグレン装置の分解掃除とモーターの交換も行なわれた。それ以前はセルシンモーターが使われていたが、その入手が不可能となったので、ステップモーターに変更された。

2000年にはエンコーダが交換された。それまでは観測視野への天体の導入は、赤経軸のみに取り付けられた精度15分のエンコーダ出力をもとに、ガイド望遠鏡で目視をしながら行なうようになっていた。これでは暗い恒星の導入に手間がかかるため、赤経軸及び赤緯軸にOMRON社製の高精度インクリメンタル型ロータリーエンコーダが取り付けられた。これにより望遠鏡方向の取得精度が赤経方向1秒、赤緯方向10"となり、天体の座標のみから短時間で視野に導入できるようになった。

2001年には、カセグレン焦点に取り付けてられていた1K×1Kピクセルの液体窒素冷却CCDカメラが、主焦点に取り付けられるようになった。これにより焦点距離が大幅に短くなり(焦点距離12m; F20から焦点距離3.3m; F5.5)、約25分角の明るい広視野を確保できて、観測のフレキシビリティが大幅に向上した。また、恒星や銀河の観測において一般的に使用されているJohnson-Kron-Cousinsシステムに準拠した B, V, R_c, I_c の干渉フィルターが導入された。これに合わせてフィルターターレットも制作された。また、望遠鏡の微動用のハンドパドルと、ドームのスリットの位置を動かすためのハンドパドルを統合した新しいハンドパドルが制作され、操作性が向上した。

以上により、19等程度までの恒星の測光観測に十分に使えるようになった。また、1-2年に1回程度、梅雨時の主鏡の再蒸着を継続している。

(野上)

3.2.17 65cm 屈折望遠鏡制御装置の改修

65cm屈折望遠鏡は1972年に設置され、惑星観測を中心に使用されてきた。近年では金星、木星、土星などの偏光観測に用いられている。望遠鏡の制御装置などは建設当時のまま使用されていることから、使用すると必ず故障するということが続いており、その修理のために多くの時間を要していた。制御方法もDTL(Diode Transistor Logic)のため回路構成面積が大きく故障個所の追跡が困難であること、同等仕様の部品の入手が困難になっているということで、制御装置の更新を行った。

各種モーターの取替え、各配線の張替え、制御装置の入替えを行い、これまで行うことができなかった自動導入が行えるようになったなど、使い勝手が格段に向上した。

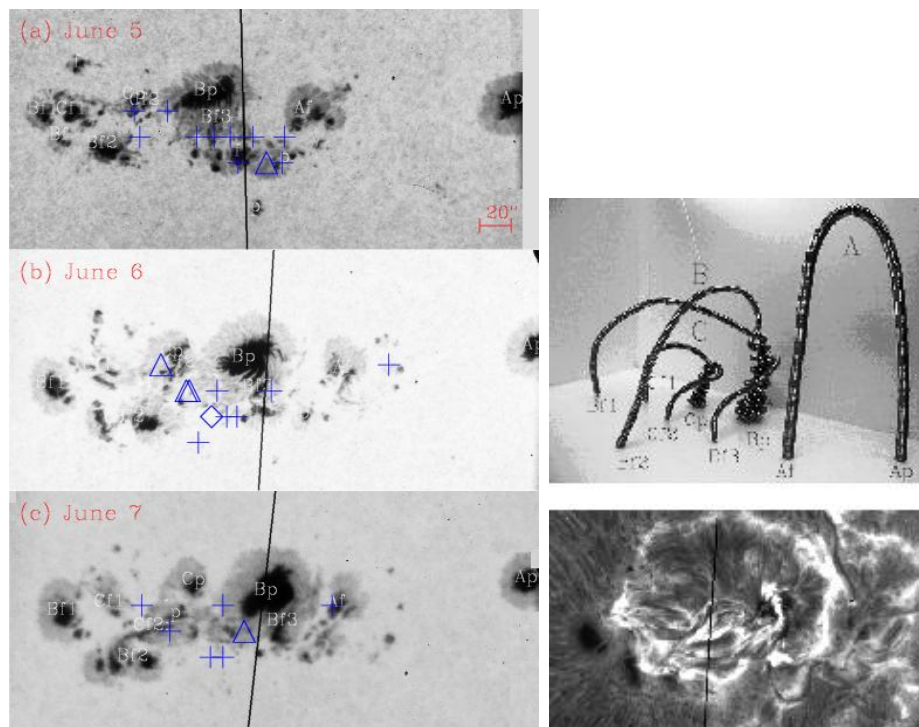
(仲谷 2017 年日本天文学会秋年会 V267a 予稿より)

3.3 研究トピックス

3.3.1 太陽活動領域における捻れた磁束管の浮上とフレア活動との関連について

太陽活動領域(太陽表面の黒点や黒点上空のコロナ)では、様々な活動現象が観測されています。中でも太陽面爆発現象(フレア)は、莫大なエネルギー($10^{22} \sim 10^{25}$ J)を短時間(数分から数時間)で解放する活動現象で、その影響は惑星間空間を経て地球にまで及びます。フレアで解放されるエネルギーが、どこにどのようにして蓄積されるかは未だ解明されていませんが、磁気シアと呼ばれる磁場のひずみにエネルギーが蓄えられるという考えがあります。この考えを検証するためには、活動領域における浮上磁場の形態とフレア活動との関連の研究が必要です。

本研究では、二つの大黒点群(NOAA 5395 と NOAA 4201)について磁場構造の変化とフレア活動との関連を吟味しました。これらの黒点群はどちらも活発なフレア活動を示しており、特に NOAA 5395 は前太陽活動周期で最も活発であった黒点群として知られています。それぞれの黒点群について、黒点の運動や磁場構造の変化を調べ、観測された運動や変化を説明できる浮上磁場のモデルを作成しました。更に、黒点群内での場所によるフレア活動度の違いについて評価したところ、捻れた磁場が浮上している領域に活発なフレア活動が集中していることが判明しました。このことは、フレア活動のエネルギー源が捻れた磁場にあることを示唆します。



左: NOAA 4201 でのフレアの発生位置を黒点像に重ねて表示。+: C-class、 Δ : M-class、 $\diamond$: X-class flare。右上: 浮上磁場のモデル。右下: 捻れた磁束管の浮上領域(右上図 B 及び C)で発生したフレア。

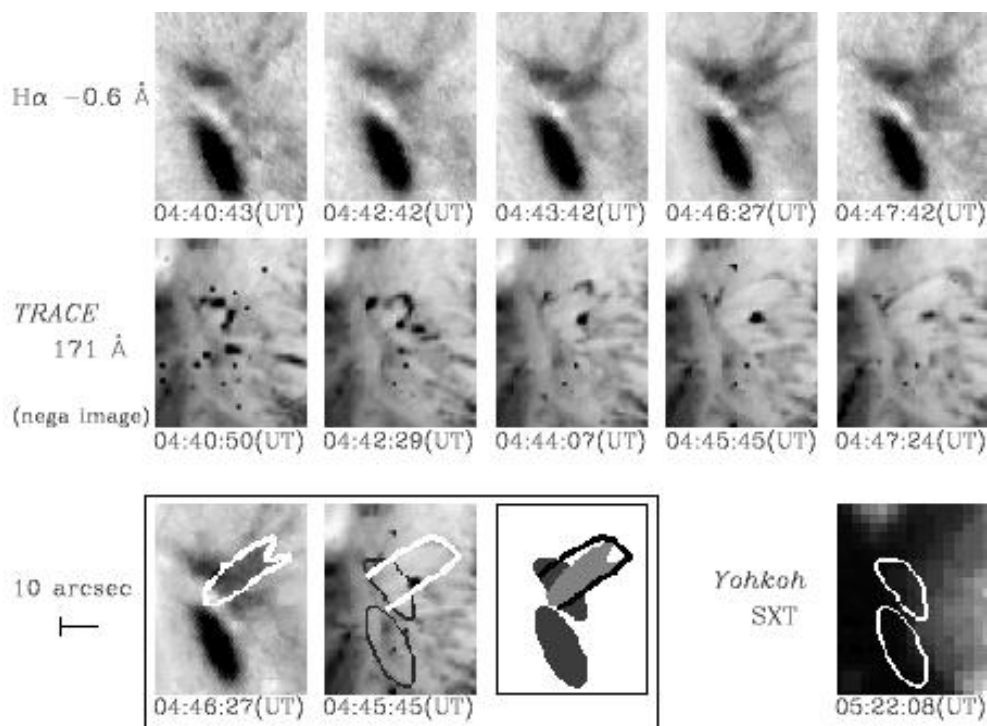
(石井貴子 記 1999 年度年次報告より 学位論文要旨)

Reference: Ishii et al. 1998, ApJ, 499, 898. (被引用件数 15 位)、Ishii et al. 2000, PASJ, 52, 337.

3.3.2 太陽黒点の暗部に見られる、ライトブリッジからのプラズマ放出

太陽表面の活動現象は磁場構造の変化に起因していると考えられています。黒点が生まれ成長する段階では、次々と複雑な磁場構造が形成され、盛んな活動現象が起こります。サージと呼ばれる暗く細い筋状の噴出現象もその一つで、太陽内部から浮上した磁力線が既存磁場と磁気再結合(磁気リコネクション)し、エネルギー解放することで引き起こされと考えられています。一方、崩壊段階にある黒点暗部では、サージなどの活動現象は起こりにくいと考えられていました。ライトブリッジ(light bridge; 黒点暗部内に見られる細長く明るい領域、黒点の崩壊段階で見られることが多い)からのサージについてもごくわずかに観測例があるものの、詳細な解析はなされてきませんでした。

しかし私は、黒点が崩壊する際の磁場構造の変化もまた活動現象に何らかの影響を及ぼすと考えました。そこで私は2000年5月2日に、活動領域 NOAA 8971にあるライトブリッジを京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡を用いて $H\alpha$ 線で観測し、そこから噴出するサージを発見しました。ライトブリッジはこれまで、周囲と同一の磁場極性を持ち磁場構造も単純であると考えられてきましたが、今回の観測で、浮上磁場の存在等複雑な磁場構造をしている可能性が強く示唆されました。この結果は、黒点の進化、特に崩壊段階での磁場構造と活動現象の描像に対して、新たな問題提起となる重要な結果といえます。



さまざまな波長で見たライトブリッジからのサージ; $H\alpha$ 線(上)、極紫外線 (171 Å; 中)、軟 X 線(右下)。

(浅井 歩 記 2000 年度年次報告より)

Reference:

Asai, A., Ishii, T.T., Kurokawa, H. 2001, ApJ, 555, L65. (被引用件数 11 位)

3.3.3 国際協同観測によって明らかになった、太陽の捩れた磁束管構造

2000年の5月から6月にかけて、米国ロッキード太陽天体物理研究所のSOUP観測チームがLa Palmaで観測する時期に合わせて、飛騨天文台でも協同観測を実施しました。これは2000年2月に筆者らがLockheedを訪ねた際に、Allan Title、Tom Berger、Richard Shine達と実施について打ち合わせておいたものです。飛騨天文台での観測が終わる(08-09UT)頃に、La Palmaでの観測が始まるので、高空間分解能の観測を連続して行うことが出来るということが、国際協同観測の狙いです。TRACEもこの期間、同一領域を観測しました。この協同観測期間中に、幸いにして、我々の目的に合致した活動領域NOAA9026が出現して、強いフレア活動を起こしました。図1に飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡のH-alpha撮像装置で得られたこの領域の進化を示しています。

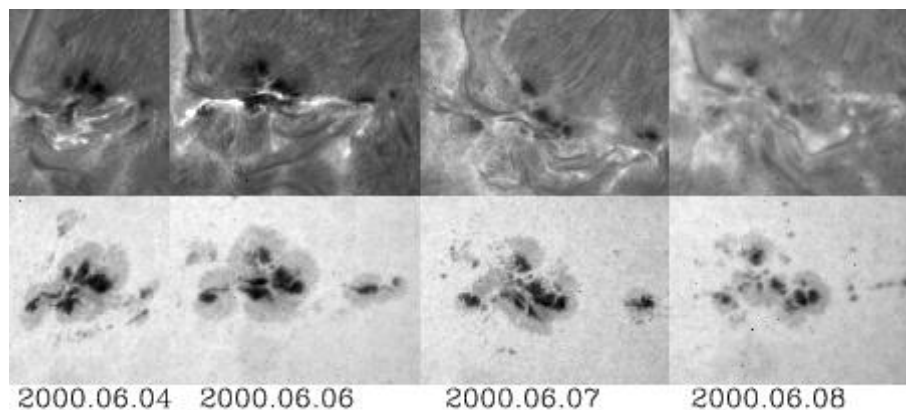


図1: 活動領域NOAA9026の発達衰退過程。(上) H-alpha center (下) H-alpha -5.0 Å

図1から判るように6月6日から6月7日にかけて、中央の黒点が急激に回転して8日には崩壊を始めています。面白いことにこの間にXクラスフレア3個とMクラスフレア2個、合計5個の強力なフレアが発生しました。我々はこの間の磁場構造と黒点の固有運動などを人工衛星のデータを用いて調べて、図2のような捩れた磁束管が浮上するモデルを作りました。この我々の図によって、捩れた磁束管が浮上する際に、磁束管全体の捩れが中央部に集められてdelta型の黒点を作るとともに、不安定化によって急激に回転したことが始めてはっきりと示されました。この時にその捩れのエネルギーが解放されて強力な5個のフレアが発生したと考えることが出来ます。

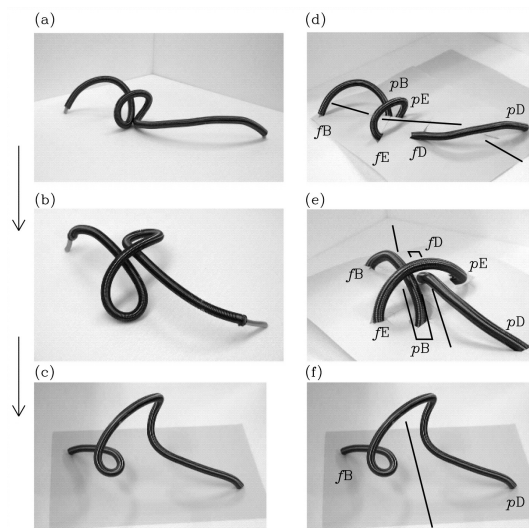


図2: 捻じれた浮上磁束管のモデル。

(黒河宏企 記 2000 年度年次報告より)

Reference: Kurokawa, H., Wang, T., Ishii, T.T. 2002, ApJ, 572, 598. (被引用件数 21 位,p38 新聞記事)

3.3.4 H α と軟 X 線フレアループ構造の高精度な比較

大規模フレアに伴って H α 線でループ状構造が見られることがあり、これをポストフレアループと呼びます。飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) では 1992 年 11 月 2 日のフレアに伴うポストフレアループが観測しましたが、DST では現象の初期から観測されており、またようこう衛星の軟 X 線撮像装置 (Yohkoh/SXT) でも同時に観測されたという貴重なデータです。

H α 線や軟 X 線でループ構造が見られる原因は次のように考えられています。フレアによって生成された高エネルギー粒子が磁場に沿って彩層に突入し、磁気ループは彩層蒸発によって生じた高温のプラズマで満たされます。高温プラズマ ($\sim 10^7$ K) は軟 X 線でループ状の構造として見え、これが冷却されて温度が下がる ($\sim 10^4$ K) と H α 線で見られるようになると考えられます。そこで、H α と軟 X 線のループ構造の時間変化を詳しく調べることによってプラズマの冷却時間を求めることを目的に解析を行いました。

まず、H α と軟 X 線画像の位置合わせを行ってループ構造を比較した結果、H α と軟 X 線のループ構造で共通した特徴があることがわかり、H α の構造は軟 X 線の構造が冷却された結果であるという説明が裏付けられました。次に、ループ構造の対応関係が確かめられた定点について、H α と軟 X 線の明るさの時間変化を求めました (図 1)。この結果は H α の時間変化は軟 X 線よりも遅れてることを示すもので、この遅れはプラズマの冷却時間と解釈することができます。

さらに、Yohkoh/SXT の 2 種類のフィルターで撮像したデータから温度と密度を求め、プラズマの冷却時間を概算してみました。単純な熱伝導と輻射による冷却を考えた計算でプラズマの冷却時間を概算すると、観測データの解析から求められた冷却時間に近い結果が得られました。この結果は観測データから求められた遅れが冷却時間時間であるという解釈と符合するものです。

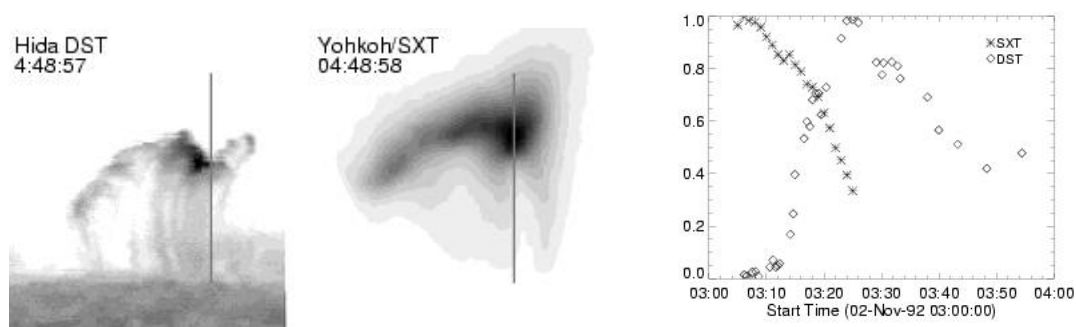


図 1. 左側:同時刻における H α と軟 X 線のループ構造。右側:定点における H α と軟 X 線の明るさの時間変化。

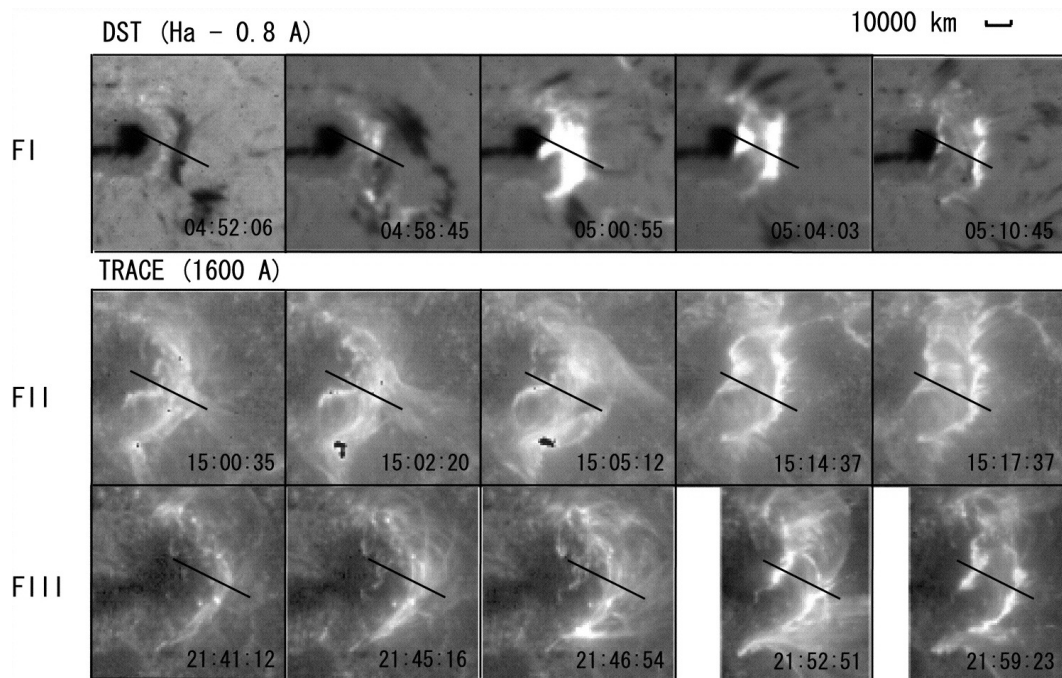
(神尾 精 記 2001 年度年次報告より)

Reference: Kamio, S., Kurokawa, H., Ishii, T.T. 2003, Solar Phys., 215, 127.

3.3.5 2000 年 11 月 24 日に起きたホモロガスフレアの定量解析

現在、太陽の爆発現象(太陽フレア)を説明する理論として、磁気リコネクション(磁力線の再結合)モデルと呼ばれる理論があります。本研究では、京都大学飛騨天文台やさまざまな人工衛星に搭載された高分解能な望遠鏡を用いて、2000 年 11 月 24 日に起きた 3 つのフレアを解析し、磁気リコネクションモデルから理論的に予想される物理量を見積もり、そのモデルから予想されるエネルギー解放率に関する関係式の妥当性を確かめました。これらのフレアは、短時間のうちに同じ活動領域で起きているので、同じような物理条件の下で起きたと考えられます。そのため、過去の研究に比べより少ない仮定のもとで精度の良い研究を行えました。今回の研究では磁場の大きさを一つの指標として上記の関係式を検証し、その結果、エネルギー解放率と非熱的放射には良い関係があることが分かりました。この結果は、従来の磁気リコネクションモデルを強く支持するものです。また、この研究では「Neupert Effect」というエネルギー解放に関する経験則に似た、軟 X 線放射強度の時間変化とフレアループの広がる速度の時間変化に関する次に表されるような新しい経験則を見つけることに成功しました。

$dI_{SXR}(t)/dt \propto V_{rib}(t)$, where $I_{SXR}(t)$ is the soft X-ray intensity and $V_{rib}(t)$ is the separation velocity of the two ribbons. This relation is similar to the well-known empirical law, the Neupert effect.



Reference: Takasaki, H. et al. 2004, ApJ, 613, 592.

(本文は、高崎宏之 2004 年度年次報告より、図は論文より転載)

3.3.6 飛騨天文台でのモートン波観測

飛騨天文台では、フレア監視望遠鏡 (FMT) や太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) による $H\alpha$ 線での太陽全面監視観測を 1992 年より継続して行っている。彩層においては、フレアの発生に伴って、フレアを中心に波のようなものが太陽面上を伝わっていくのが観測されることがある。これは、発見者の名をとって「モートン波」と呼ばれている。また、これら太陽フレアに伴う衝撃波は、惑星間空間を伝播し地球磁気圏へ影響を与えるため、宇宙天気観測の観点からも重要な研究対象である。飛騨天文台での $H\alpha$ 線観測により、 $H\alpha$ 線モートン波についての数多くの研究成果が上がっている。

モートン波は、典型的には速度約 1000 km/s で、フレア発生場所から 50 万 km も離れたところまで伝播する。モートン波の正体については、 $H\alpha$ 線で観測されることから「彩層を伝わる波」と当初考えられた。しかし 1000 km/s という速度は彩層の磁気音速 (数十 km/s) の 10 倍以上もあり、彩層を伝わっているのであれば、すぐに拡散してしまい 50 万 km も遠方にまで伝わることは説明できない。1968 年に内田によって出された“sweeping skirt モデル”は、この問題を説明するモートン波の理論として最も受け入れられている。フレアに伴い生じる衝撃波はコロナを磁気音速に近い速度で伝播する。その衝撃波が彩層と接する面が、モートン波として観測される。このモデルによると、彩層のさらに上の層であるコロナにも彩層と同じように、フレアに伴う波があることが予言される。

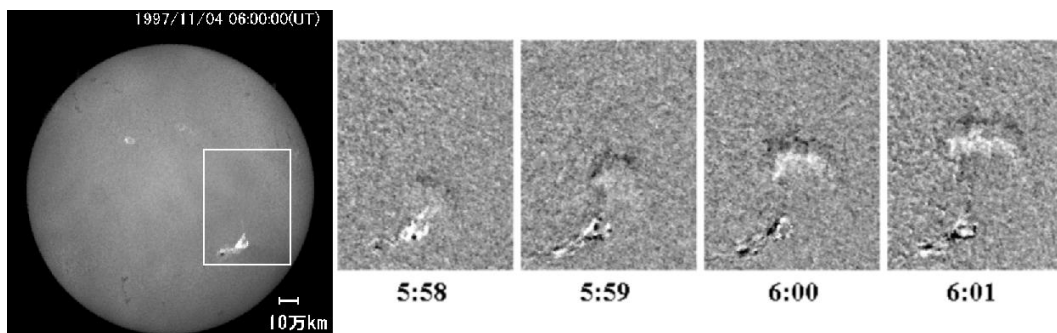


図 1: モートン波:飛騨天文台/FMT(右の 4 枚の視野は、左の全面像の四角)

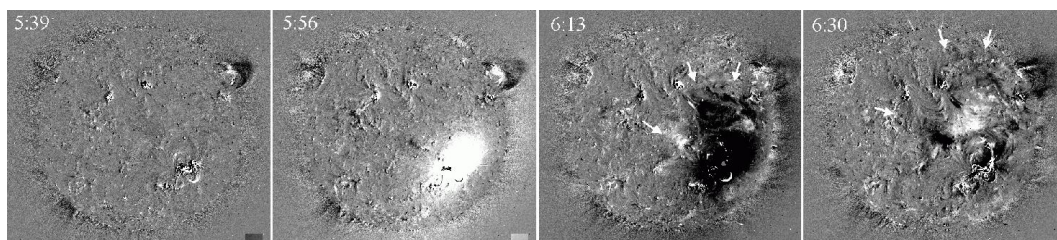


図 2: EIT 波:SOHO/EIT(時間は、左から 5:39、5:56、6:13、6:30[世界時])

このモデルが予言する「コロナのモートン波」の候補として、まず注目されたのが、極端紫外線を用いたコロナ観測で見られる、フレアに伴って太陽面上を伝播する「EIT波」であった。モデルによると、「モートン波」と「コロナのモートン波」は、ほぼ同じ波面、同じ速度を持つことが予言される。したがって、EIT波がコロナ中のモートン波かどうかを検証する最も直接的な方法として、モートン波、EIT波の同時性に着目した。ただし、モートン波は非常に観測例が少ないため、同時観測例も極めて少ない。

そのうちの1例は、飛騨天文台FMTにより観測された1997年11月4日のフレアに伴うモートン波である(図1)。^[1]では、このイベントに対する解析で、モートン波、EIT波では、平均伝播速度はそれぞれ、約720 km/s、約200 km/sと大きく異なり、波面の位置も異なることを明らかにした(図2)。したがって、少なくともこのイベントに関しては、EIT波はコロナのモートン波ではない、という結論に至った。

続いて、ようこう衛星搭載の軟X線望遠鏡(SXT)でも、1997年11月3日のフレアに伴い、コロナ中を伝わる波が直接見つかった(図3)^[2]。このX線波(X-ray wave)はFMTによりH α 線モートン波と同時観測され、伝播方向・伝播速度においてモートン波と共通の性質を持っていることが分かった。さらに、観測と電磁流体力学の理論を用いて、X線波が電磁流体衝撃波であることが確認された。これらの結果も、X線波がコロナ中のモートン波であることを示唆している。

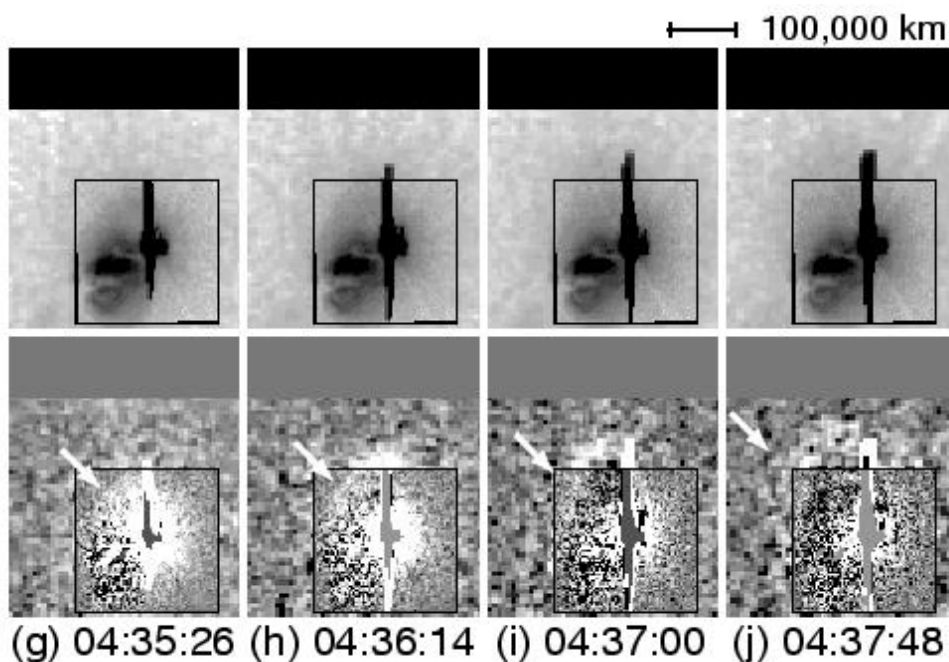


図 3: X線波 1997/11/03

2000年3月3日に太陽の縁付近で発生したフレアに伴い、ようこう/SXTによるX線波とFMTによるH α 線モートン波が同時観測された(図4)。このイベントは、太陽の縁付近で起きたことから両者の高さ方向に関する位置関係が一層明らかになった。また、X線観測データを詳しく観測することで、衝撃波のマッハ数が時間とともに徐々に減少しており、マッハ数がおよそ1になるタイミングと、モートン波が消えるタイミングが同じであることも分かった[3]。

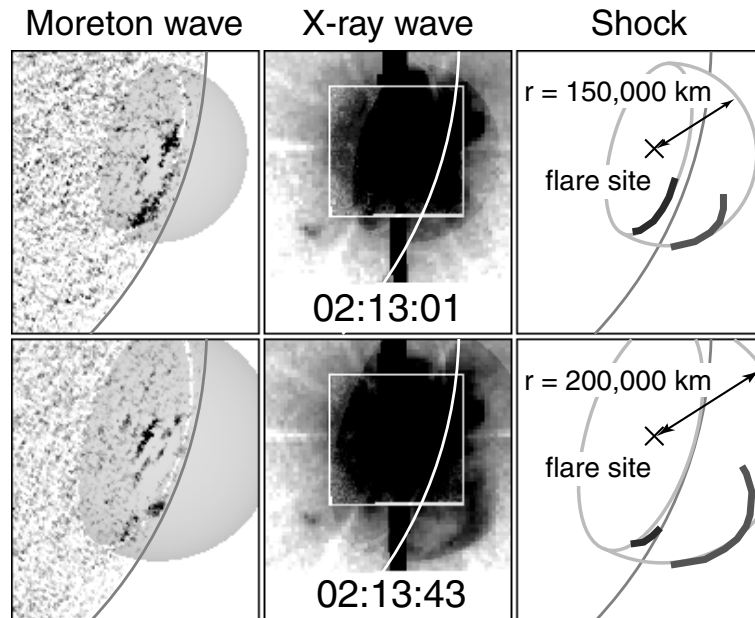


図4: 2000年3月3日に太陽の縁で観測されたモートン波とX線波。モートン波は太陽面に沿って伝播しているのに対し、X線波はコロナを太陽の外側に向かって伝播している。

H α 線モートン波は、まれにしか観測されず、かつ短時間しか現れないため観測例が少ない。しかし、何らかの擾乱がコロナ中を伝播し、フレア領域から遠く離れたフィラメント/プロミネンスを振動させることがある。これらは、H α 線単色画像では、フィラメントが消えたり現れたりする様子で観測されるため、「ウィンクするフィラメント(winking filament)」とも呼ばれる。フィラメントの振動開始(winking)のタイミングなどからは、モートン波と同じような速度をもった擾乱がコロナ中を伝播したと考えられ、そのような擾乱は「見えないモートン波(invisible Moreton wave)」とも呼ばれている。

FMTでは、このwinking filamentの観測でも成功を収めている[1]。さらに、観測されたwinking filamentを引き起こす擾乱はモートン波(と同等の速度を持つ擾乱)によるものだけではなく、EIT波によるものもあることが分かった[4]。これはEIT波の正体を突き止める上でも、興味深い結果である。

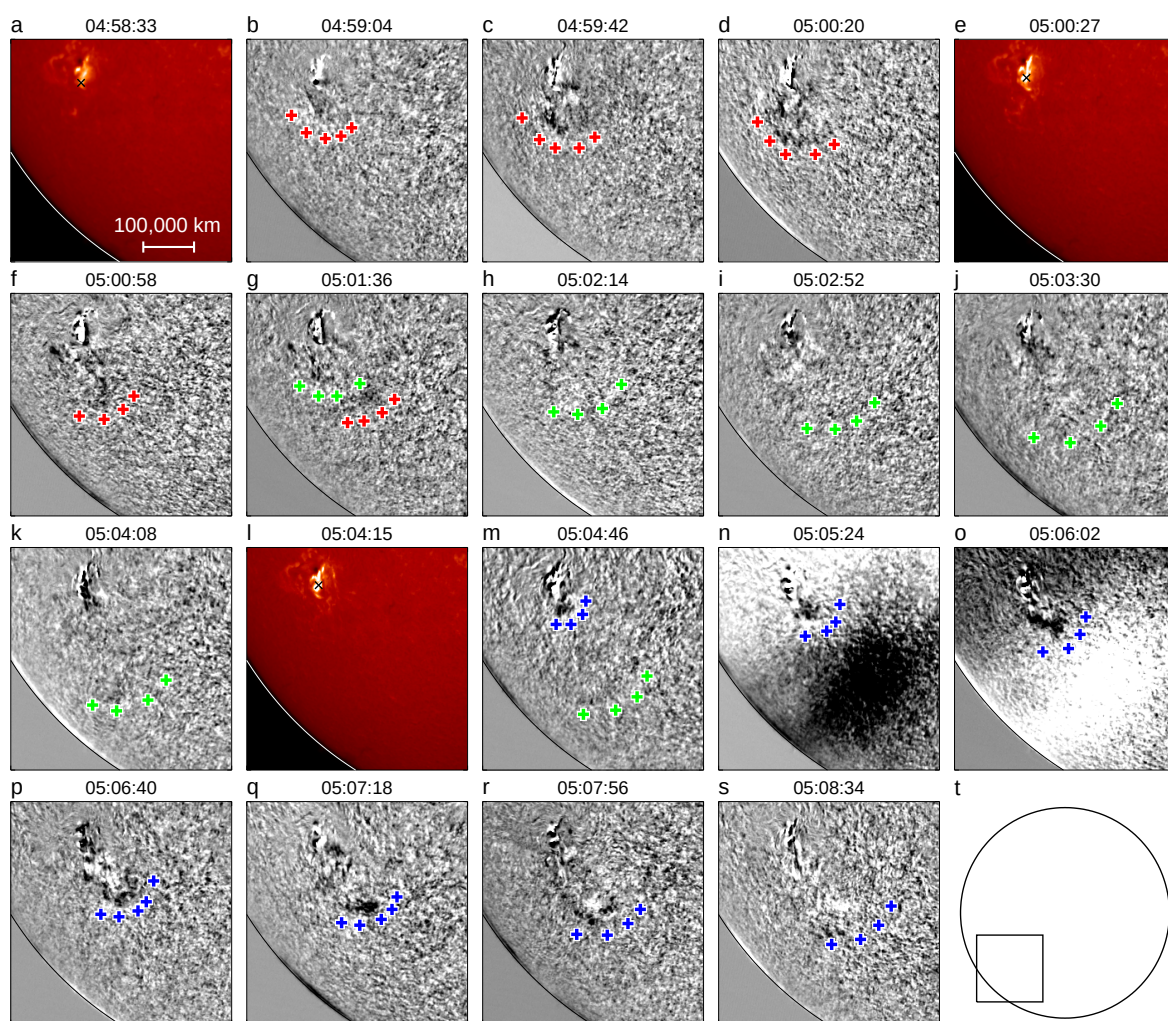


図5: 2005年8月3日にSMART望遠鏡が観測した3連発のモートン波。赤印: 第1波、緑印: 第2波、青印: 第3波

飛騨天文台に新たにSMARTが導入されると、空間分解能、時間分解能など観測条件の大幅な向上により、従来は観測されなかった $H\alpha$ 線モートン波も検出可能となった。これにより、2005年8月3日のフレアに伴い、世界で初めて「3連続」で発生したモートン波を発見した(図5)[5]。

1番目に発生した衝撃波の伝搬速度は遅く、2番目に発生した速く伝搬する衝撃波に追いつかれ、ふたつの衝撃波が合体する様子を捉えた。さらに、電波のデータからは、合体する際に衝撃波の強さが強くなったことが示唆された(図6)。加えて、3つのモートン波(衝撃波)の発生には、瞬間的なエネルギーの解放と、フィラメントの噴出が強く関係していることが分かった。3連続の各々のモートン波の発生時刻には、瞬間的にエネルギーの解放が強められていることが観測されていた。そして、各々のモートン波に対応して、フィラメントも3度噴出しており、それらの噴き出す方向や速度は、対応するモートン波の伝搬した方向や速さと関係していることが分かった。これまで、モートン波の発生メカニズムについては、はっきりと分かっていなかったが、今回の発見により、フィラメント噴出がモートン波を駆動させているという説を裏付けるものとなった。

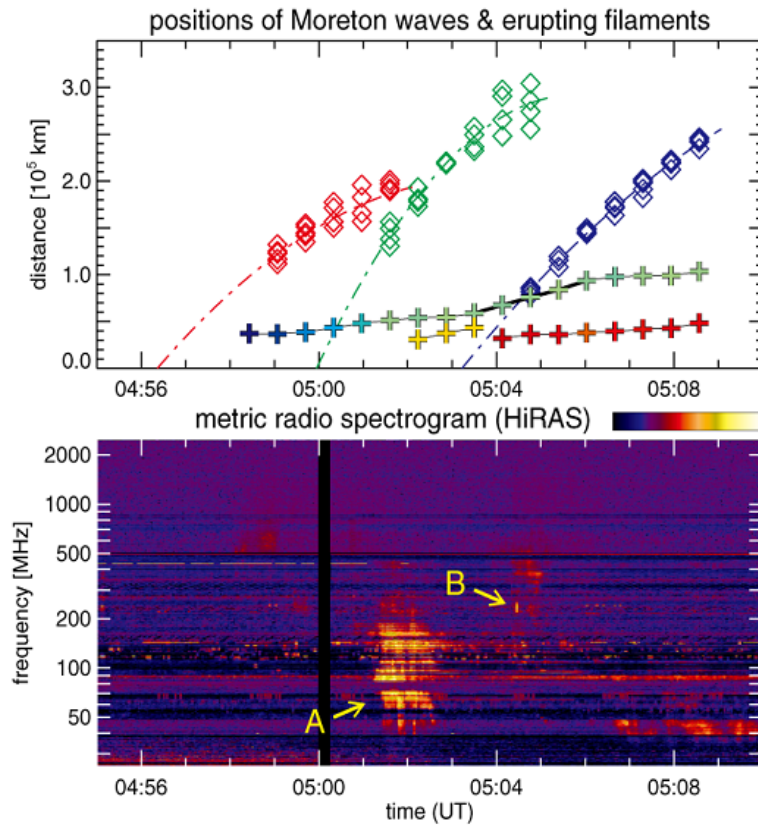


図 6: 3 連発モートン波の時間発展を示したグラフ。横軸は時刻。上のグラフは、縦軸がフレア地点からの距離で、各時刻でのモートン波の波面の位置が◇で示してある。赤色が 1 発目、緑色が 2 発目、青色が 3 発目のモートン波の波面の位置。このグラフを見ると、1 発目のモートン波 (赤色◇印) に 2 発目のモートン波 (緑色◇印) が追いついている様子がよくわかる。+印は噴出したフィラメントの位置を示しており、フィラメントも 3 度噴出しているのが分かる。下のグラフは電波の強さを表したもので、1 発目と 2 発目のモートン波が合体した時刻に、強さが増しているのが分かる (矢印 A)。また、3 発目の衝撃波 (色◇印) と最初に噴出したフィラメント (青-緑色の+印) がぶつかった瞬間にも、電波の信号が強くなっているのがわかる (矢印 B)。

さらには、2011 年 8 月 9 日に活動領域 NOAA 11263 で発生した巨大フレア (X6.9) に付随して、世界で初めて、 $H\alpha$ 線モートン波と極端紫外線での波動状現象 (EUV 波)、およびそれらに駆動されるフィラメント・プロミネンス振動現象を同時に観測することに成功した [6]。SMART により得られたこのフレアの $H\alpha$ 線撮像データからは、フレア位置からおよそ 760 km/s で伝播するモートン波が確認された (図 7 右)。また、SDO 衛星 AIA による極端紫外線 (EUV) 撮像観測データの解析により、このモートン波に付随する波動状現象 (EUV 波) をとらえた (図 7 左)。モートン波は、コロナ中を伝播するフレア衝撃波と彩層との接地面であると考えられていることから、観測された EUV 波はまさにコロナ中の衝撃波面をとらえたものと考えられる。加えて、この衝撃波によって励起されたと考えられるフィラメント・プロミネンスの振動現象を、 $H\alpha$ 線や EUV での多波長で同時観測することに成功した。これらの振動現象を駆動するには、570 から 800 km/s の速度での衝撃波の伝播が必要であり、この速度はまさに観測された $H\alpha$ 線モートン波や EUV 波の伝播速度と同等であることがわかった。またこれらの結果により、これまで長い間謎であった”EIT 波”と呼ばれる太陽コロナの波動現象の正体を観測的に明らかとする手がかりを得ることができた。

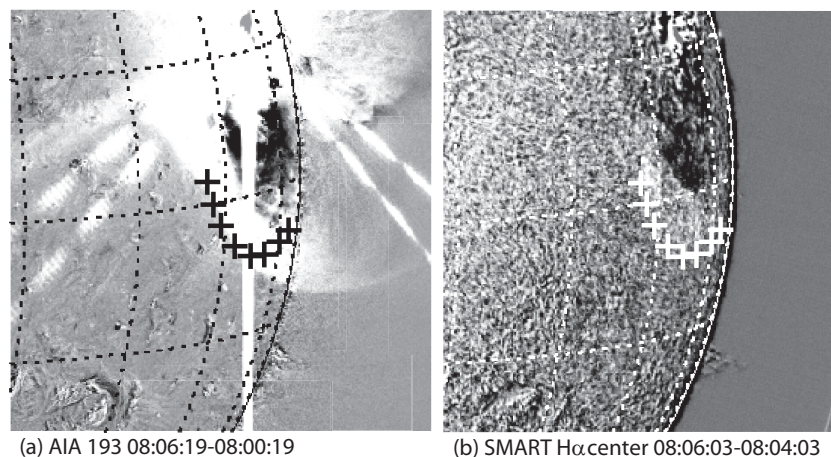


図 7: 2011 年 8 月 9 日のフレアに付随した衝撃波現象の EUV 画像 (左) と $H\alpha$ 線画像。どちらも差分画像。図中の + マークは $H\alpha$ 線モートン波の波面を示す。

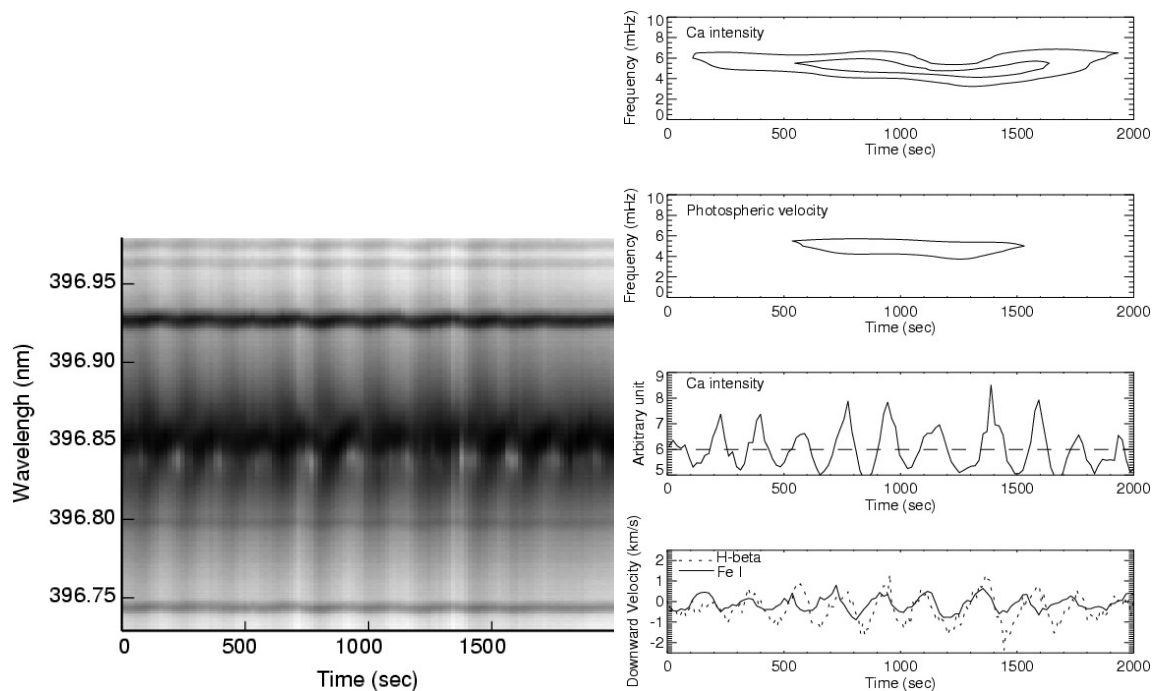
Reference:

- [1] Eto, S. et al. 2002, PASJ, 54, 481. (被引用件数 3 位)
- [2] Narukage, N. et al. 2002, ApJL, 572, L109. (被引用件数 5 位)
- [3] Narukage, N. et al. 2004, PASJ, 56, L5.
- [4] Okamoto, T.J, et al. 2004, ApJ, 608, 1124. (被引用件数 6 位)
- [5] Narukage, N. et al. 2008, ApJL, 684, L45. (p.45 新聞記事)
- [6] Asai, A. et al. 2012, ApJL, 745, L18. (被引用件数 10 位、p.54 新聞記事)

(衛藤茂、成影典之、浅井歩 記)

3.3.7 彩層グレインと光球・彩層の振動の関係

グレインは、太陽静穏領域で彩層の Ca II 線で観測される 1000 km 程度の大きさの輝点で、彩層やコロナの加熱にも関係していると考えられるため、その発生機構を明らかにすることは大きな意義があります。本研究では、ドームレス太陽望遠鏡 (DST) の水平分光器 (HS) を用いて静穏領域の多波長同時分光観測を行い、Ca II H_{2v} で見られる彩層グレイン (輝点) の発生と彩層および光球の 3 分周期の速度振動の振幅の間に相関があることを明らかにしました。データ解析では Fe I と $H\alpha$ スペクトルのドップラーシフトから彩層と光球の運動速度を求めて、Ca II H_{2v} グレインの発生との関係を調べました。ウェーブレット解析によち、光球と彩層の 3 分周期の振動成分を取り出すことにより、光球と彩層の 3 分振動の強度分布に相関があり、同時に彩層の 3 分振動の大きさとグレインの増光にも相関があることを明らかにしました。これらの結果により、光球から彩層に伝播した 3 分周期の音波がショックを形成し、ショックによる密度・温度上昇がグレインの輝点として観測されるという理論モデルが観測的に検証されました。また、彩層で卓越している 3 分周期の振動は、その直下にある光球の 3 分周期の振動に起源があることを観測的に初めて明らかにしました。



Reference:

Kamio, S., Kurokawa, H., 2006, A&A, 450, 351

(本文は、神尾精 2005 年度年次報告より、図は論文から転載)

3.3.8 Cooperative Observation of Ellerman Bombs between the Solar Optical Telescope aboard Hinode and Hida/Domeless Solar Telescope

ひので衛星搭載の可視光望遠鏡が2007年1月5日に撮像したCaII Hフィルターを用いて、活動領域NOAA10933を解析した。黒点近傍に現れた浮上磁場領域には1秒角以下の小規模輝点が多く観測された。我々は、ひので衛星と同期して飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で撮像されたH α フィルター像を用いて、それらの輝点のうち2つについてエラーマンボムであることを同定した。エラーマンボムは従来H α 線の観測的特徴によって定義されているため、ひのでCaII H像では同定不可能であったが、今回の地上と宇宙の共同観測によって初めてCaII輝点とエラーマンボムの同定が可能になった。

さらにひのでCaII Hフィルターによる高解像度撮像を用いることで、これまでほぼ点源として観測されていたエラーマンボムにコアとハローの構造が見られることを突き止めた。コア部は明るい楕円形の構造をしており、それを包むようにハロー部が存在している(図左下)。ハロー部は双極子磁場の磁極と同じ位置にあり、その磁気中性線上にコア部がある。このことから、異なる磁極が接近することにより磁気リコネクションが誘発し、そのエネルギー解放の結果としてエラーマンボムが観測されるのではないかとと思われる(図左)。これは従来考えられてきた、浮上磁場に付随する磁気リコネクション説(Pariat et al.2004)を支持するものである。

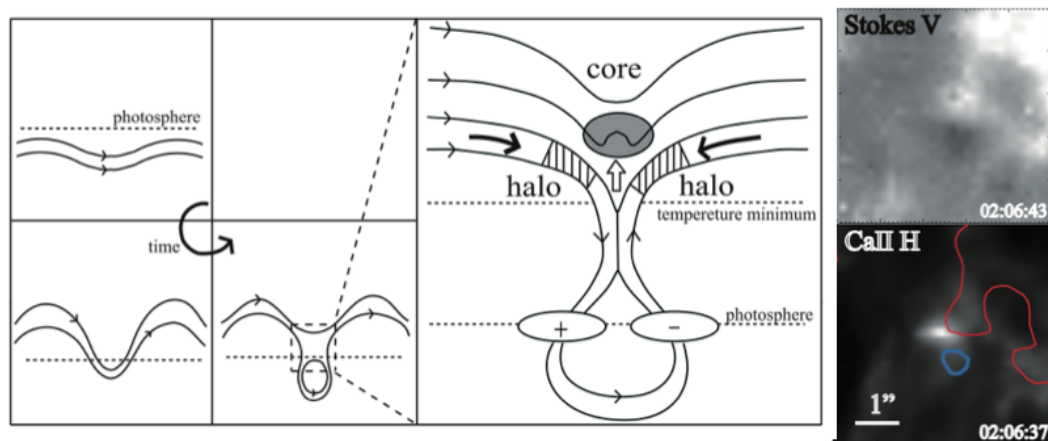


図: 観測された磁場分布(右上)とCaII H像(右下)と考えられ得るエラーマンボムの形成機構

Reference:

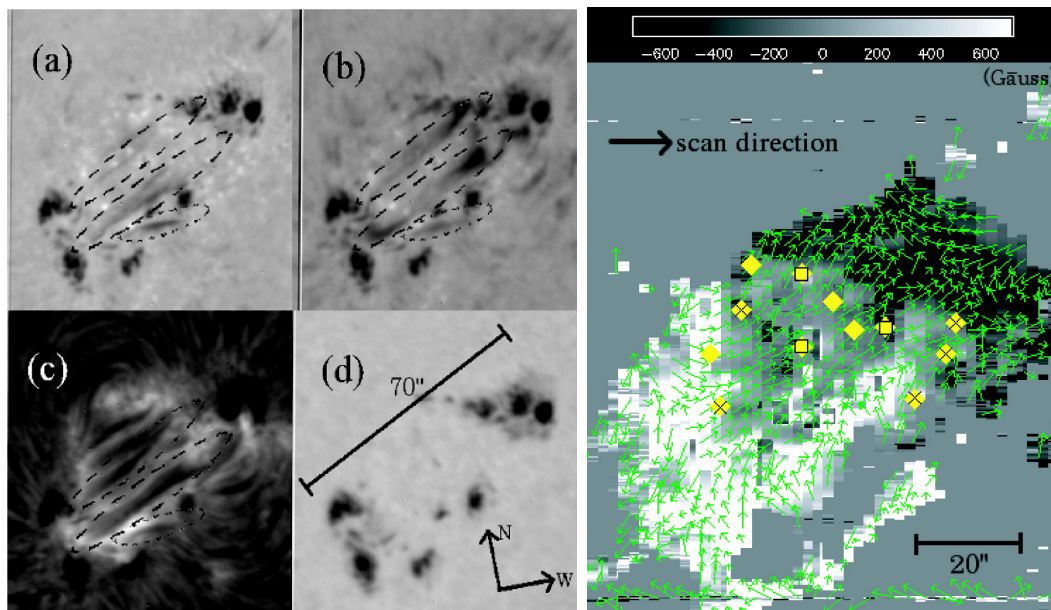
Pariat et al. 2004, ApJ, 614, 1099

Matsumoto, T. et al., 2008, PASJ, 60, 577

(松本琢磨 記 2008 年度年次報告より)

3.3.9 Spectropolarimetric Observation of an Emerging Flux Region: Triggering Mechanisms of Ellerman Bombs

A high spatial resolution observation of an emerging flux region (EFR) was made using a vector magnetograph and a $H\alpha$ Lyot filtergraph with the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory on 2006 October 22. In $H\alpha$ wing images, we could see many Ellerman bombs (EBs) in the EFR. Observations in two modes, slit scan and slit fixed, were performed with the vector magnetograph, along with the $H\alpha$ filtergraph. Using the $H\alpha$ wing images, we detected 12 EBs during the slit scan observation period and 9 EBs during the slit fixed observation period. With the slit scan observation, we found that all the EBs were distributed in the area where the spatial gradient of vertical field intensity was large, which indicates the possibility of rapid topological change in the magnetic field in the area of EBs. With the slit fixed observation, we found that EBs were distributed in the areas of undulatory magnetic fields, in both the vertical and horizontal components. This paper is the first to report the undulatory pattern in the horizontal components of the magnetic field, which is also evidence for emerging magnetic flux triggered by the Parker instability. These results allow us to confirm the association between EBs and emerging flux tubes. Three triggering mechanisms for EBs are discussed with respect to emerging flux tubes: 9 out of 21 EBs occurred at the footpoints of emerging flux tubes, 8 occurred at the top of emerging flux tubes, and 4 occurred in the unipolar region. Each case can be explained by magnetic reconnection in the low chromosphere.



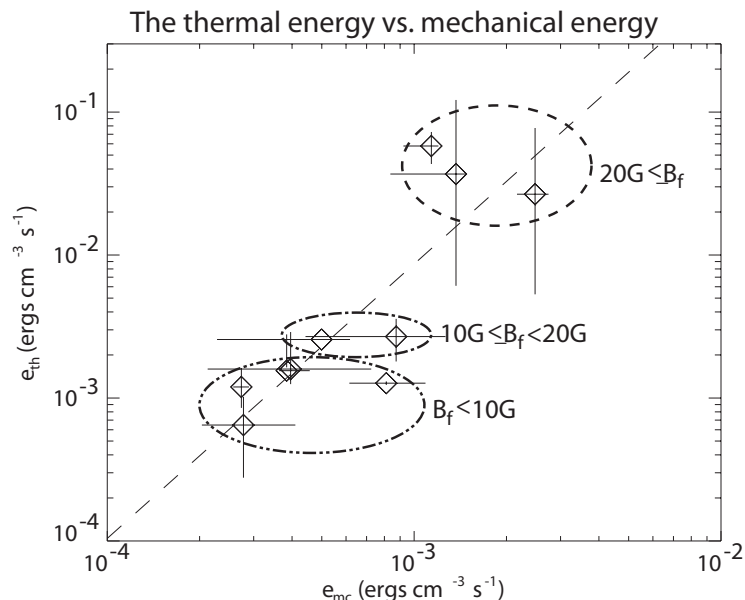
Reference:

Watanabe, H., Kitai, R., Okamoto, K., Nishida, K., Kiyohara, J., Ueno, S., Hagion, M., Ishii, T.T., Shibata, K., 2008, ApJ, 684, 736. (被引用件数 19 位)

3.3.10 太陽フィラメント消失とそれに随伴するフレアアーケードの間のエネルギー関係について

プロミネンス噴出やフィラメント消失に伴って、 $H\alpha$ 線ツーリボンフレアが発生し、軟 X 線や EUV では明るいアーケード構造が形成されることはよく知られている。しかし、両者の物理的なつながりは未だ明らかになっていない。両者の相関についてのこれまでの研究では、軟 X 線のピーク強度と質量放出現象のみかけの速さの比較あるいは時間変化の相関に注視されてきた。物理的により有意な相関を調べるためには、放出物の三次元速度場の導出が必要である。飛騨天文台のフレア監視望遠鏡 (FMT) で取得された太陽全面の $H\alpha$ 線中心波長、 $H\alpha - 0.8 \text{ \AA}$ (青色側ウィング)、 $H\alpha + 0.8 \text{ \AA}$ (赤色側ウィング) の三つの波長帯でのデータを用いると、運動するフィラメントの三次元速度を求めることができる (Morimoto & Kurokawa 2003 PASJ)。

本論文では、10 例の消失するフィラメントに対して、運動エネルギーと重力ポテンシャルエネルギーの二つを求め、それらとフレアアーケードやループの熱エネルギーと比較した。更に、力学的エネルギー密度 (下図横軸) と熱エネルギー密度の増加率 (下図縦軸) と対象領域の平均磁場強度との関係を調査した。その結果、熱エネルギー解放率と力学的エネルギーとの間は正の相関関係にあることがわかった。この相関の関係式は、蓄積された磁気エネルギーがポインティングエネルギー流速により運ばれ、磁気リコネクションにより熱エネルギーに変換されるということと、フィラメントの加速はローレンツ力によってなされることを仮定する簡略モデルで説明することができた。周辺の平均光球磁場強度が強いほど両エネルギー密度増加率が大きいことも、この考え方を支持する。



Reference:

Morimoto, T. & Kurokawa, H. (2003) PASJ 55, 503.

Morimoto, T. & Kurokawa, H. (2003) PASJ 55, 1141.

Morimoto, T., Kurokawa, H., Shibata, K., Ishii, T.T. (2010) PASJ, 62, 921.

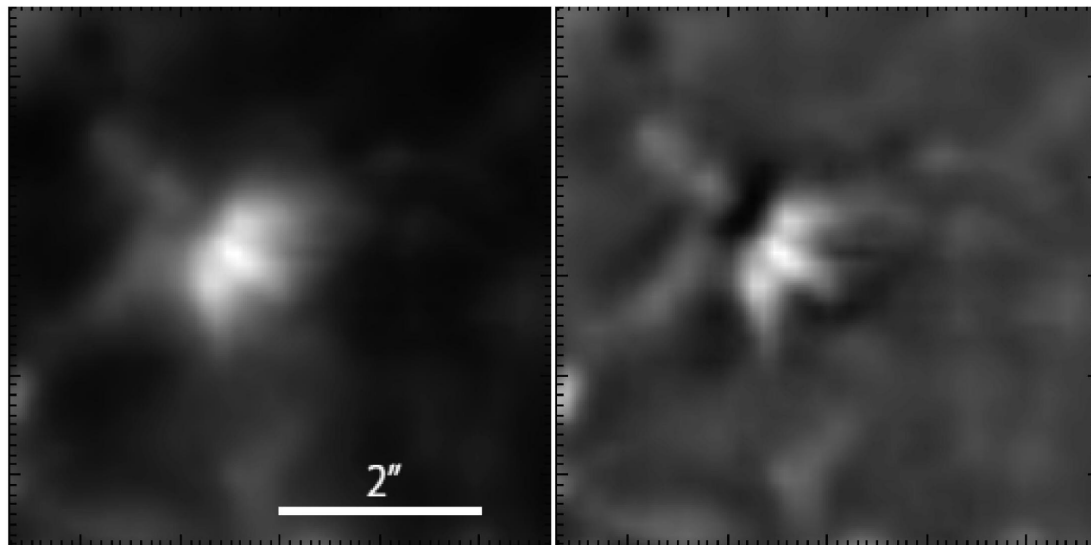
(石井 貴子 記 2010 年度年次報告より)

3.3.11 エラーマンボムの内部微細構造

エラーマンボムとは、活動的な太陽黒点周辺で見られる微小な構造である。これまでの研究から、それは活動領域彩層下部での小規模の爆発現象であり、磁気再結合現象による爆発と考えられている。しかしながら、この現象は空間的なサイズが小さくその詳細は不明であった。

2007 年 8 月に、飛騨天文台と「ひので」衛星との共同観測が実施されて、活動領域 NOAA10966 内で発生した 4 例のエラーマンボムを、高空間分解能、高時間分解能で観測することに成功し、エラーマンボムの形態変化、磁場分布、視線速度変化を捉えることができた。そのデータ解析の結果、(1) エラーマンボムは、ジェット状の内部微細構造を持っていること、(2) ジェット状の内部構造は、そのサイズが巾 170 km、長さ 450 km 程度で、平均寿命 390 秒であること、(3) ジェット状構造は、磁気中性線に当初現れてその後延伸すること、(4) エラーマンボムの Ca II K 輝線が青方に非対象である時、即ち、ガスが太陽表面から噴出しているとき、ジェット状微細構造が発生していることが観測的に明らかになった。

以上の結果を踏まえて、エラーマンボム現象とは、磁気中性線上で次々とそして間欠的に起こる磁気再結合現象の集合体であり、複数見られるジェット状の微細構造 (図参照) はそれぞれ 5-6 分継続する 1 回の磁気再結合現象の対応するという描像を得ることができた。



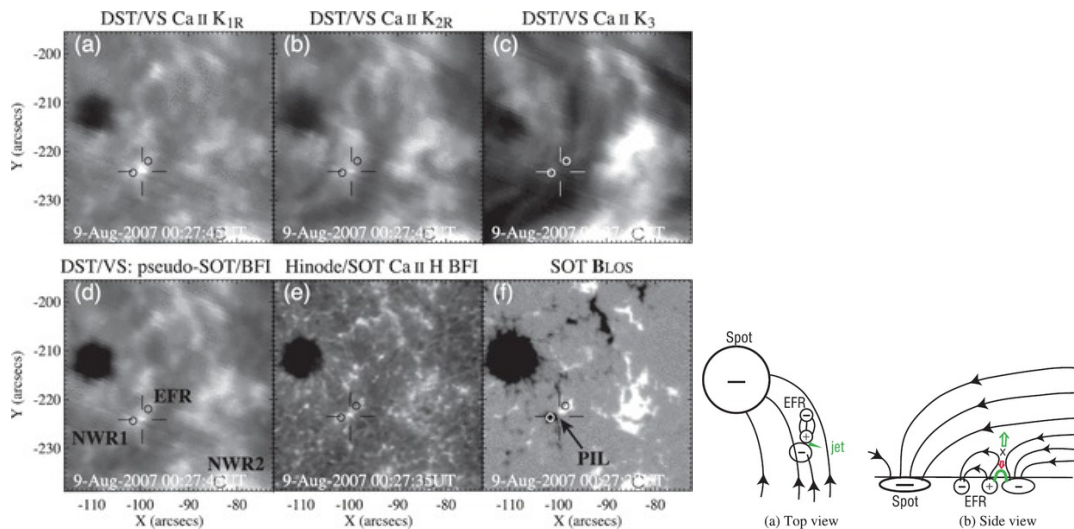
Reference:

Hashimoto, Y., Kitai, R., Ichimoto, K., Ueno, S., Nagata, S., Ishii, T. T., Hagino, M., Komori, H., Nishida, K., Matsumoto, T., Otsuji, K., Nakamura, T., Kawate, T., Watanabe, H., and Shibata, K., 2010, PASJ, 62, 879.

(北井 礼三郎 記 2010 年度年次報告より)

3.3.12 Observations of Chromospheric Anemone Jets with Hinode Ca II Broadband Filtergraph and Hida Ca II Spectroheliograph

We present the first simultaneous observations of chromospheric "anemone" jets in solar active regions with Hinode SOT Ca II H broadband filtergram and Ca II K spetroheliogram on the Domeless Solar Telescope (DST) at Hida Observatory. During the coordinated observation, 9 chromospheric anemone jets were simultaneously observed with the two instruments. These observations revealed three important features, i.e.: (1) the jets are generated in the lower chromosphere, (2) the length and lifetime of the jets are 0.4–5 Mm and 40–320 sec, (3) the apparent velocity of the jets with Hinode SOT are 3–24 km/s, while Ca II K3 component at the jets show blueshifts (in 5 events) in the range of 2 – 6 km/s. The chromospheric anemone jets are associated with mixed polarity regions which are either small emerging flux regions or moving magnetic features. It is found that the Ca II K line often show red or blue asymmetry in K2/K1 component: the footpoint of the jets associated with emerging flux regions often show redshift (2–16 km/s), while the one with moving magnetic features show blueshift (around 5 km/s). Detailed analysis of magnetic evolution of the jet foaming regions revealed that the reconnection rate (or canceling rate) of the total magnetic flux at the footpoint of the jets are of order of 10^{16} Mx/s, and the resulting magnetic energy release rate $(1.1\text{--}10) \times 10^{24}$ erg/s, with the total energy release $(1\text{--}13) \times 10^{26}$ erg for the duration of the magnetic cancellations, 130s. These are comparable to the estimated total energy, 10^{26} erg, in a single chromospheric anemone jet. An observation-based physical model of the jet is presented. The relation between chromospheric anemone jets and Ellerman bombs is discussed.



Reference:

Morita, S., Shiabta, K., Ueno, S., Ichimoto, K., Kitai, R., Otsuji, K., 2010, PASJ, 62, 901

3.3.13 2001年4月10日の太陽フレアに伴うフレアリボン内の $H\alpha$ 輝線赤方偏移

太陽フレアでは、コロナで解放されたエネルギーが非熱的粒子や熱伝導の形で彩層まで伝わり、そこで急激に彩層プラズマの圧力を上昇させる。この急激な圧力上昇は、磁力線に沿って上向きの流れ(彩層蒸発流)を生じ、磁気ループは高温プラズマで満たされる。一方、この彩層蒸発の反作用として、彩層プラズマは下方へ押されることから、フレアリボンやフレアカーネルでの $H\alpha$ 線輝線の赤方偏移として観測される。

私たちは、2001年4月10日に発生した太陽フレアについて、京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡によって観測された $H\alpha$ 線の多波長撮像観測データを用いてフレアリボン内に見られる赤方偏移について詳細に調べた。それによると、赤方偏移はフレアリボン内の至る所で見られるが、フレアリボンの最も外側(1000~2000 km程度)で特に強くなっていることがわかった(下図)。また私たちは、赤方偏移の強さが $H\alpha$ 線輝線の放射強度には依存しないことを初めて明確に示した。このことは、赤方偏移(彩層プラズマの下向きの流れ)の時間変化は $H\alpha$ 線の放射強度の時間変化とは同起しておらず、また最も赤方偏移が強くなる時(最も強く彩層プラズマが凝縮されている時)の値も放射強度には強く依存しないことを示している。

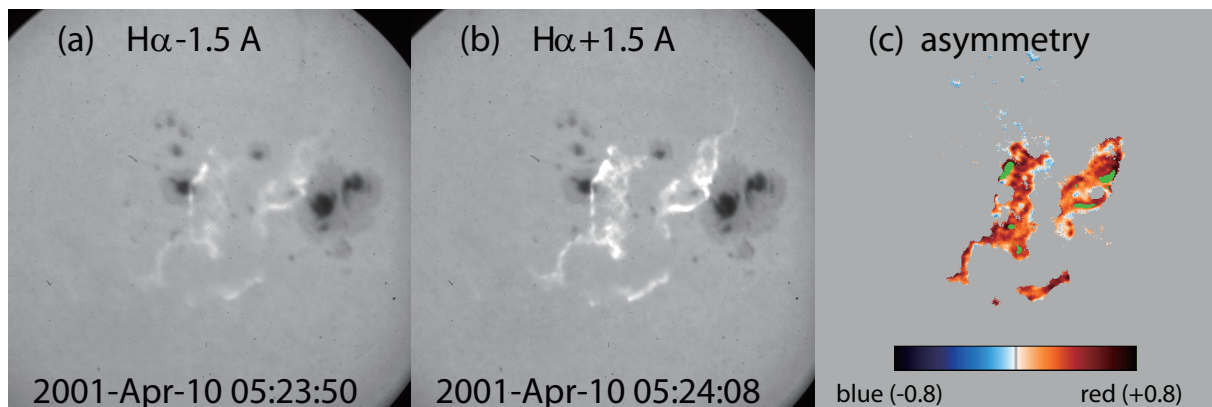


図: 2001年4月10日に発生したフレアの、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡による $H\alpha$ 線画像。(a)は $H\alpha$ 線中心から $-1.5\text{\AA}$ 離れたところでの画像、(b)は同じく $+1.5\text{\AA}$ の画像、(c)は $H\alpha$ 線の青方・赤方偏移を青・赤で示した図。フレアリボンは至る所で赤方偏移していることがわかる。

Reference:

Asai, A., Ichimoto, K., Kitai, R., Kurokawa, H., Shibata, K., "A Study on Red Asymmetry of $H\alpha$ Flare Ribbons Observed in the 2001 April 10 Solar Flare", 2012, PASJ, 64, 20

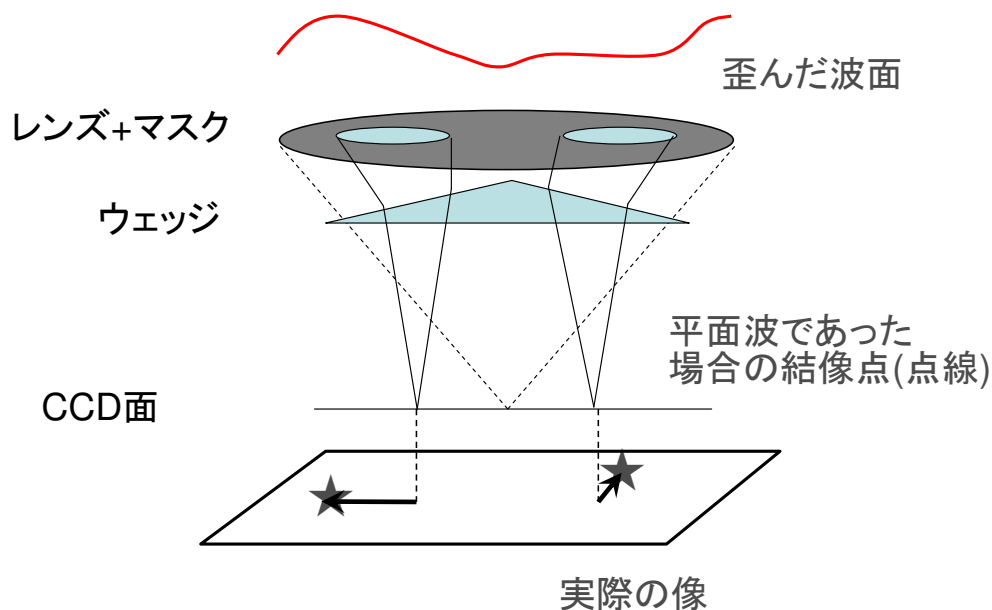
(浅井歩 記 2011年度年次報告より)

3.3.14 太陽観測における大気揺らぎの定量評価の正当性：シャックハルトマン波面センサを用いた太陽観測用 DIMM の特性 (修士論文)

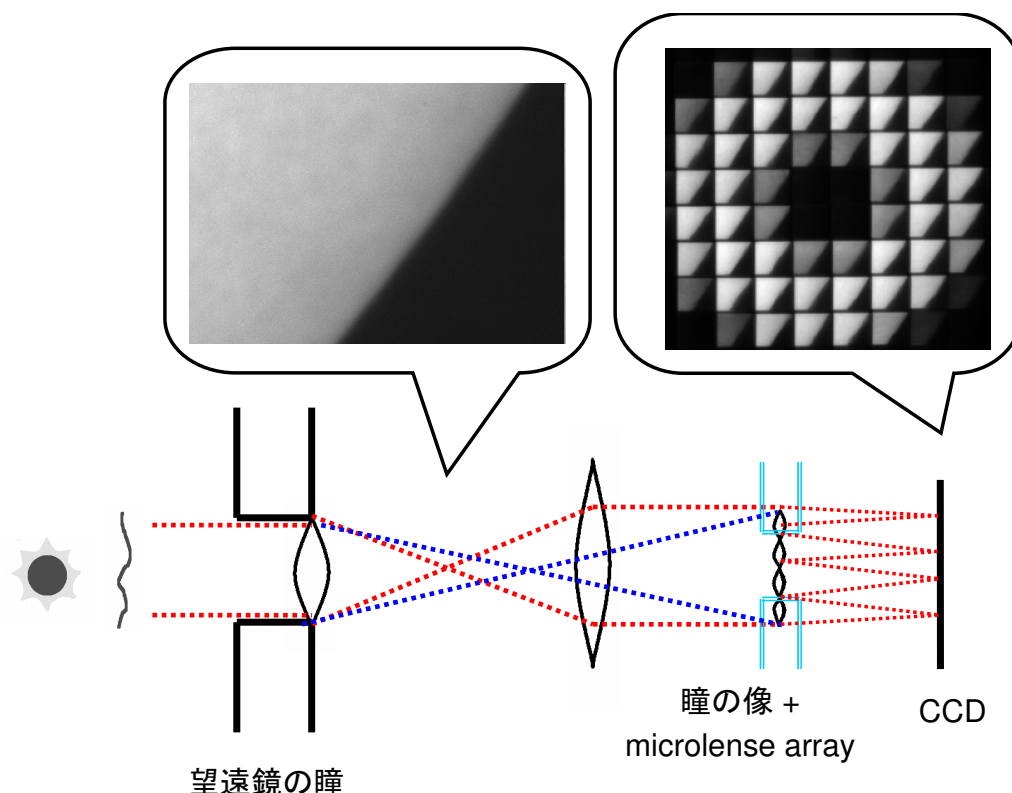
地上から天体を観測する際に、空間分解能の減少要因として大きな割合を占めるものが大気揺らぎ (seeing) である。seeing は周囲の地形・時間・季節等により強度自体が変動し、その揺らぎのパターンも数ミリ秒で変動する。それゆえ地上観測において、観測に適した場所を新たに探す場合、あるいは揺らぎのパターンを光学的に補正する補償光学装置などを設計する場合には、seeing の定量評価を行う必要がある。

seeing の定量評価のひとつとしてフリードパラメータ r_0 (Fried (1965)) というものがある。これは r_0 より大きいどのような口径の望遠鏡であっても、 r_0 を口径とする望遠鏡の回折限界と空間分解能がほぼ等しくなるような大気の状態であるという基準の値であり、通常日中観測で seeing の良い場合で 8cm 程度と言われている。従って全ての大口径望遠鏡は常に seeing の制約下にあると言って良い。

フリードパラメータの計測方法はいくつかあるが、今回は Differential Image Motion Monitor (DIMM) (Sarazin & Roddier (1990)) というものを取り扱った。



これは1つの望遠鏡を光学的に二開口に分割し、局所的な二箇所の大気の揺らぎの度合いを計測することで全体の大気の揺らぎの強度からフリードパラメータを求めるものである。DIMMは夜間、日中観測問わず一般的に seeing 計測として用いられている装置であるが、夜間ではターゲットとするものが星、つまり点源であるのに対し、日中観測では太陽のリムという、空間的に広がった「構造」を用いなければならない。一方、DIMMの結果からフリードパラメータに変換するモデルは主に3種類構築されているが、いずれも点源を仮定したモデルであり、本来空間的に広がった対象を仮定したモデルではない。それゆえ、太陽のリムを用いたフリードパラメータ導出方法が正しいのか、実証を必要とする。



実験は京都大学附属飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡(口径 60cm)において、国立天文台及び北見工業大学による補償光学実験装置の一部、シャックハルトマン波面センサを用いて行った。シャックハルトマン波面センサとは、マイクロレンズアレーを望遠鏡の瞳結像部分に設置して擬似的に望遠鏡の開口を分割し、望遠鏡開口部分全体の大気の揺らぎをその結像位置変動から求めるものである。つまり、マイクロレンズアレーで分割された複数の開口(サブアパーチャ)の各組み合わせが DIMM として機能する。これにより DIMM からフリードパラメータを求めるモデルに必要な観測条件のうち、大気揺らぎの方向と二開口の空間配置を同時に観測することにより、そのモデルの正当性を評価した。

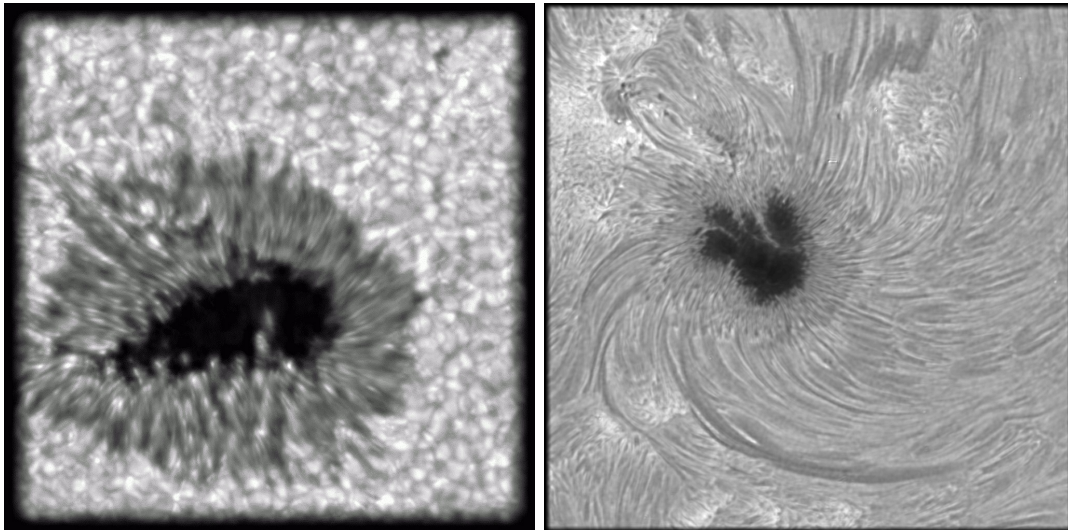
実験条件としてサブアパーチャの像は 8x8 に分割したものを 1kHz で連続的に取得し、その高時間分解ゆえ実際の大气揺らぎの変動を再現することが可能となった。そこで、単純な二開口の DIMM では得られない風速、風向というパラメータに対するモデルの安定性や、時間的に連続する像を積算することによる露出時間依存性に対する議論も行った。また実験は 2008 年 5 月から 12 月の様々な観測状況(視野内のリムの方向、風速、風向)に対して行った。

その結果現在構築されている 3 つの点源用のモデルのうち、Sarazin & Roddier (1990) によるモデルと 10% 以内で空間配置として一致する結果となった。また露出時間×風速の増加により、フリードパラメータを大きく見積もってしまう事を定量的に議論することが出来た。

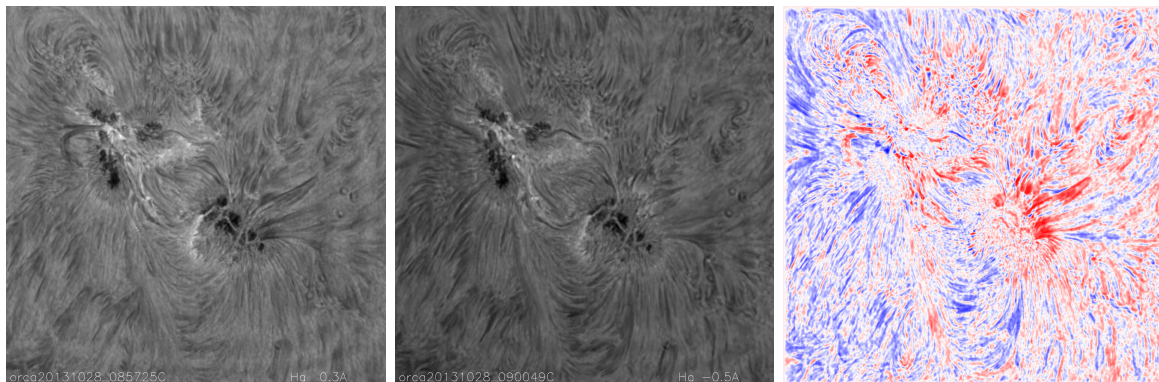
(川手 朋子 記) Reference: Kawate et al. 2011, MNRAS, 416, 2154.

3.3.15 スペックルマスキング法による画像復元

シーイングによって解像度の劣化した観測画像から対象の本来の輝度分布を得るために、スペックルマスキング法による画像復元プログラムをIDL上に作成した(spemirh.pro、天文台技報参照)。入力画像は観測対象が変化しないと考えられる時間内に得られた短時間露出画像の時系列である。スペックルマスキング法を用い、位相復元プロセスに新たな工夫を付け加えることで、ロバストで効果的な画像復元をおこなうことができる。飛騨天文台のDSTで得られた画像への適用例を示す。



左:430nm 右:656.28nm



Ha -0.4A, Ha +0.4A, Dopplergram

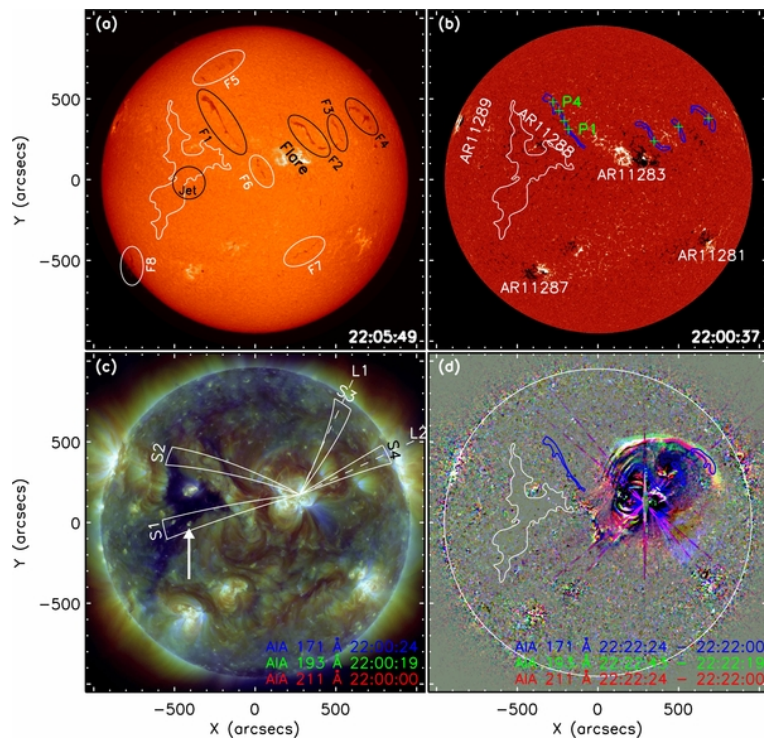
Reference:

一本 潔、川手 朋子 (2014-01-25) 京都大学大学院理学研究科附属天文台技報, 2(1): 1-22

https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/180390/1/TRKHO_2_1.pdf

3.3.16 A Chain of Winking (Oscillating) Filaments Triggered by an Invisible Extreme-ultraviolet Wave

Winking (oscillating) filaments have been observed for many years. However, observations of successive winking filaments in one event have not yet been reported. In this paper, we present the observations of a chain of winking filaments and a subsequent jet that are observed right after the X2.1 flare in AR11283. The event also produced an extreme-ultraviolet (EUV) wave that has two components: an upward dome-like wave (850 km s⁻¹) and a lateral surface wave (554 km s⁻¹) that was very weak (or invisible) in imaging observations. By analyzing the temporal and spatial relationships between the oscillating filaments and the EUV waves, we propose that all the winking filaments and the jet were triggered by the weak (or invisible) lateral surface EUV wave. The oscillation of the filaments last for two or three cycles, and their periods, Doppler velocity amplitudes, and damping times are 11-22 minutes, 6-14 km s⁻¹, and 25-60 minutes, respectively. We further estimate the radial component magnetic field and the maximum kinetic energy of the filaments, and they are 5-10 G and 10¹⁹ J, respectively. The estimated maximum kinetic energy is comparable to the minimum energy of ordinary EUV waves, suggesting that EUV waves can efficiently launch filament oscillations on their path. Based on our analysis results, we conclude that the EUV wave is a good agent for triggering and connecting successive but separated solar activities in the solar atmosphere, and it is also important for producing solar sympathetic eruptions.

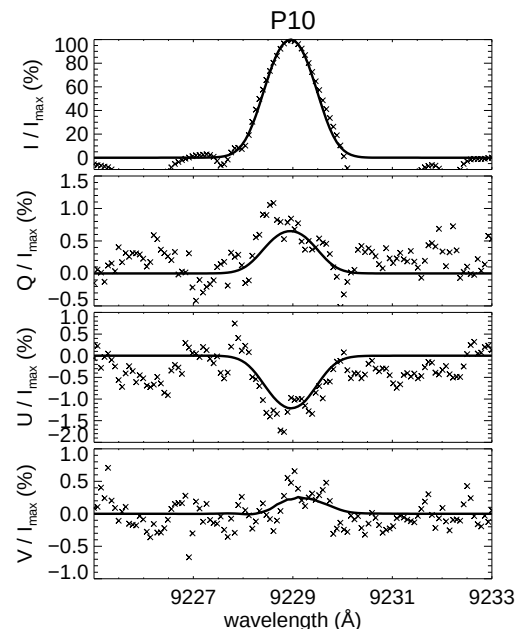


Shen, Y., Ichimoto, K., Ishii, T.T., Tian, Z., Zhao, R., Shibata, K. 2014 ApJ 786, 151.

3.3.17 太陽物理における偏光分光観測を用いた新しいプラズマ診断手法の開拓

これまでゼーマン効果を用いた太陽光球の磁場測定は詳細に行われ太陽現象には磁場が密接に関わっていることが明らかとなった。今後は、磁気圧優勢な上空大気（彩層やコロナ）で磁場がプラズマにどのように働くかを定量的に評価することが、コロナ加熱問題をはじめとした様々な現象のメカニズム解明に重要である。一方で、電場は磁気エネルギーの散逸、荷電粒子の加速などに働き、磁気リコネクションや粒子加速において重要である。さらに、部分電離プラズマの中性粒子が磁場を横切る際に電場が中性粒子にかかるので、部分電離プラズマである彩層プラズマのダイナミクスの理解において電場の測定は重要である。スペクトル線の偏光観測を用いて磁場と電場を測定する新しいプラズマ診断手法を開拓するため、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡（DST）を用いて、可視から近赤外の広い波長域（400 nm - 1100 nm）で、高精度（SN で $10^3 - 10^4$ ）な偏光観測ができる偏光分光観測システムを開発した。

これまで電場が太陽プラズマにする仕事は磁場に比べて小さく電場による偏光信号も小さいと推定されるため、電場はほとんど測定されてこなかった。しかし、電離度の低い彩層の中性粒子が磁場を横切る際に中性粒子にかかる電場は測定できると推定される（Gilbert et al. 2002）。そこで私たちは、これまで測定されていない活動領域上空のジェットの磁場を測定すると共に強い電場が存在すれば電場を検出することを目的に2012年5月5日DSTで開発した偏光分光観測システムを用いて、シュタルク効果に敏感で電場の測定が期待できる中性水素パッシュェン系列のスペクトル線を用いて活動領域ジェットの偏光分光観測を行った。電場測定の過去の研究では中性水素の主量子数大きなエネルギー準位における原子偏向は無視されていたが、観測された活動領域ジェットの中性水素は過去の研究の仮定が成立しないことが明らかとなった。Casini らが開発した原子偏向及び磁場と電場の効果を考慮した偏光プロファイル計算コードを用いて、活動領域ジェットは磁場に沿っていること、電場の効果を示す偏光信号が検出されないことを明らかにしたと同時に、中性水素が磁場を横切ることで中性水素にかかる電場の上限値を導出した。さらに観測された中性水素の速度と電場の上限値から導出される中性水素が磁場を横切る速度の上限値を比較することで、中性水素は磁場に凍結していることを明らかにした。

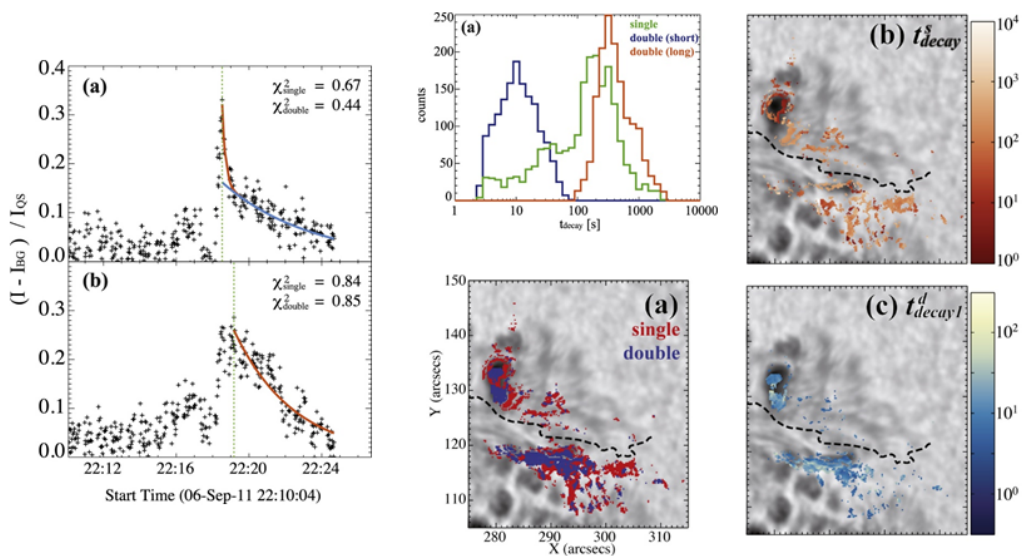


観測された偏光プロファイル（十字）とフィッティング（実線）

(阿南 徹 記 2014 年度年次報告より) Reference: Anan, T. et al. 2014, ApJ, 786, 94.

3.3.18 太陽フレアにおける白色光フレアカーネルの時間発展および空間分布

2011 年 9 月 6 日世界時 22 時に活動領域 NOAA 11283 にて発生した巨大フレア (X2.1) は、連続光でも増光のみられる白色光フレアであった。このフレアについて、飛騨天文台 SMART 望遠鏡の $H\alpha$ 連続光高速撮像望遠鏡 (Flare Imaging System in Continuum and $H\alpha$: FISCH) により極めて高い時間分解能 (25frames/sec) で得られた画像に対しスペックルマスキング法による画像回復処理 (Ichimoto & Kawate 2014) を行い、白色光フレアカーネルの増光の時間発展および空間分布を各ピクセルについて詳細に調査した結果、以下のことが分かった。(1a) 明るさ変化から、減衰時間を求めたところ、42 %のピクセルが速さの異なる二つの時間成分を持ち、それぞれの成分の平均は、15.6 秒と、587 秒であった。(1b) 残りの一つの成分のみのピクセルについて、減衰時間の平均は、254 秒であった。(2a) 短い減衰時間をもつピクセルのピーク時の明るさは、連続光で特に明るい場所とよい相関があった。(2b) 長い減衰時間をもつピクセルのピーク時の明るさは、フレアのより初期に磁気中性線に近い側で明るい傾向がみられた。(3) 長い減衰時間をもつピクセルの方が、短い減衰時間をもつものより、平均して 1.78 倍明るかった。もし、短い減衰時間が彩層での冷却時間もしくは非熱的イオン化時間により決まっており、長い減衰時間がコロナでの冷却時間に相当するとすると、これらの結果は、彩層起源とコロナ起源の双方に由来するものが全体の 42 %であり、コロナ起源による増光の方が彩層起源によるものよりいくらか強いことを示唆する。



グラフ: (左) 明るさ変化の様子。二成分ある例 (a) と一成分の例 (b)。(中上) ピクセルごとの減衰時間のヒストグラム。画像: 各ピクセルの空間分布。黒点線は磁気中性線を示す。(a) 一成分 (赤) と二成分 (青)。(b) 一成分の減衰時間の分布。時間の長いものが多い。(c) 二成分のうち短い方の時間の分布。

Reference:

Ichimoto & Kawate (2014) 京都大学大学院理学研究科附属天文台 技報 Vol. 2, 1.

Kawate et al. (2016) ApJ, 833, 50.

(石井 貴子 (京大・理・天文台)、川手 朋子 (宇宙科学研究所) 記 2016 年度年次報告より)

3.3.19 噴出前における太陽フィラメントの小スケールな運動の視線方向速度の大きさの増加について

太陽面上では、しばしば爆発と共に宇宙空間に大量のプラズマや電磁波を放出する。近年、これら太陽面爆発由来のプラズマや電磁波が、大規模停電や人工衛星の故障という形で、我々の生活に影響を及ぼすことが指摘されている。太陽面爆発に伴う現象の1つに、フィラメント噴出がある。太陽大気中には、フィラメントという周囲より低温高密なプラズマ塊が磁場により浮遊しているが、しばしば磁場構造の不安定化により噴出する(=フィラメント噴出)。これまで、フィラメントは、噴出の前に内部のプラズマが活発に運動する様子が定性的に報告されていたが、これを定量化し、噴出の予測に応用した例はなかった。

そこで我々は、噴出に近づく際の、フィラメント中の小スケールな速度場の時間発展について研究した。観測は、飛騨天文台のSMART/SDDIを用いて行われたが、噴出前および噴出中のフィラメントの視線方向速度を、これまでにない精度で導出することができる。2016年11月5日に噴出した、静穏領域フィラメントの観測画像から、Beckersのクラウドモデルを用いて、フィラメントの視線方向速度場を導出し、各時刻における速度場のヒストグラムを作成した(図参照)。もし、フィラメント内部のプラズマの運動が静かであれば、ヒストグラムはシャープな形となるが、活発に動いているならば、潰れた形となる。従って、速度分布の標準偏差は、内部プラズマの運動の活発さを表した値、とみなすことができる。この値の時間変化を追った結果、我々は、噴出前日の標準偏差は2-3km/sでほぼ一定なのに対し、噴出当日には3-4km/sに少し増えていたこと、噴出の約3時間前には、 1.1m/s^2 で標準偏差が増加したこと、そして噴出の約1時間前には、 2.8m/s^2 で標準偏差が増加したことを発見した。本結果から、我々は、フィラメントの小スケールな運動の大きさの増加が、噴出の前兆と見做せることを提案した。

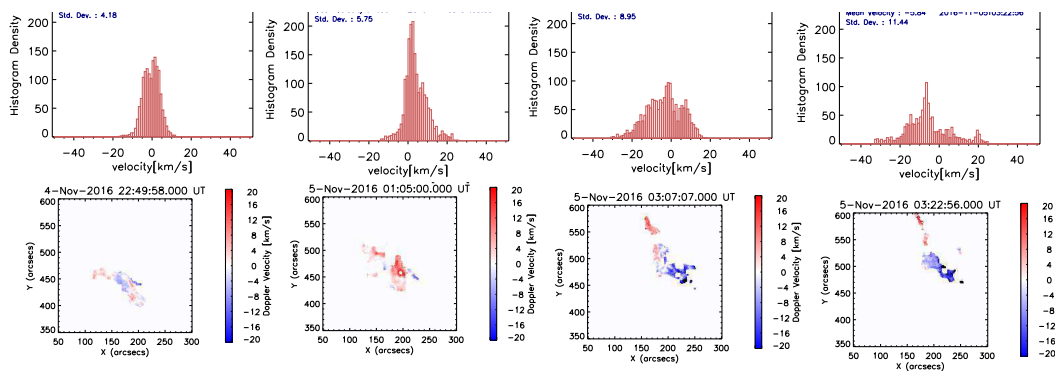


図: (下) フィラメントの視線方向速度場。青部分が地球方向、赤部分が太陽方向。(上) 下図の速度場のヒストグラム。噴出が近づくにつれ(左から右)、ヒストグラムの形が潰れていく(標準偏差が大きくなっていく)様子がわかる。

Reference: Seki, D., Otsuji, K., Isobe, H., et al., 2017, ApJ, 843, L24

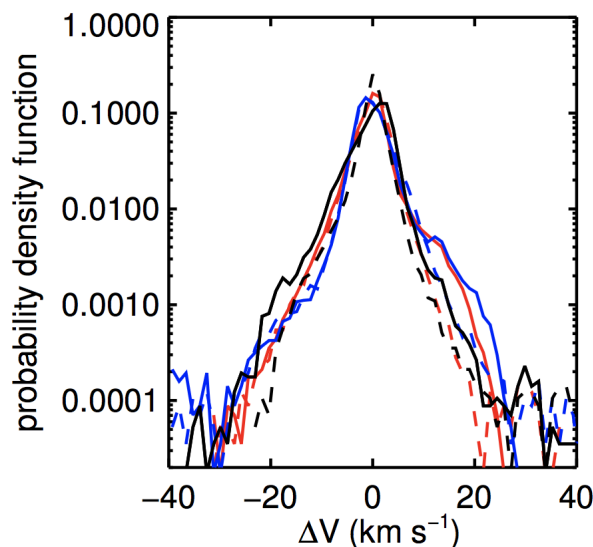
(関大吉 記 2017 年度年次報告より)

参考: http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/170707_2.html
京都新聞(2017年7月15日29面、本記念誌p.61)に掲載されました。

3.3.20 プロミネンスにおけるイオンと中性粒子の速度差

部分電離プラズマである太陽彩層の中性水素は、荷電粒子との衝突を介して、ローレンツ力を受けている。これまで太陽彩層は密度が大きく十分な衝突があるため、 $H\alpha$ (H I 656 nm) などで観測される様々な現象は磁気流体力学によって理解されてきた。特にコロナ中に浮かぶ冷たく重いプロミネンスにおける中性水素は、電荷を持たないにも関わらず磁場によって支えられていると考えられている。中性粒子と荷電粒子の衝突による摩擦力は中性粒子と荷電粒子の速度差に比例する。近年、この速度差を起因とする中性粒子流体からの磁場の拡散が理論的に研究され始め、この磁場の拡散によってコロナ加熱に重要な波の減衰率、磁気リコネクションの効率、浮上する磁場の量、彩層加熱率、さらには星形成の効率に影響することが明らかとなってきた。

私達は中性粒子と荷電粒子の速度差を観測的に明らかにすることを目的に、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の水平分光器を用いて、プロミネンスの H I 397 nm、H I 434 nm、Ca II 397 nm、Ca II 854 nm を同時分光観測し、ドップラー速度を比較した。その結果、中性水素とカルシウムイオンのドップラー速度に有意な差があることが明らかとなった。その一方で、中性水素の2本のスペクトル線のドップラー速度同士またはカルシウムイオンの2本のスペクトル線のドップラー速度同士を比較しても、同様の有意な差があることが明らかとなった。以上より、私達は中性粒子流体からの磁場の拡散に伴う中性水素とカルシウムイオンの速度差を検出したのではなく、スペクトル線形成に寄与が大きなプロミネンス微細構造がスペクトル線毎に違うため、別々の微細構造の動きの違いを検出したと結論した。



速度差のヒストグラム (確率密度関数)。Ca II 397 nm と H I 397 nm (赤実線)、Ca II 397 nm と H I 434 nm (赤破線)、Ca II 854 nm と H I 397 nm (青実線)、Ca II 854 nm と H I 434 nm (青破線)、Ca II 397 nm と Ca II 854 nm (黒実線)、H I 397 nm と H I 434 nm (黒破線)。

Reference: Anan, T., Ichimoto, K., Hillier, A. 2017, A&A, 601, A103

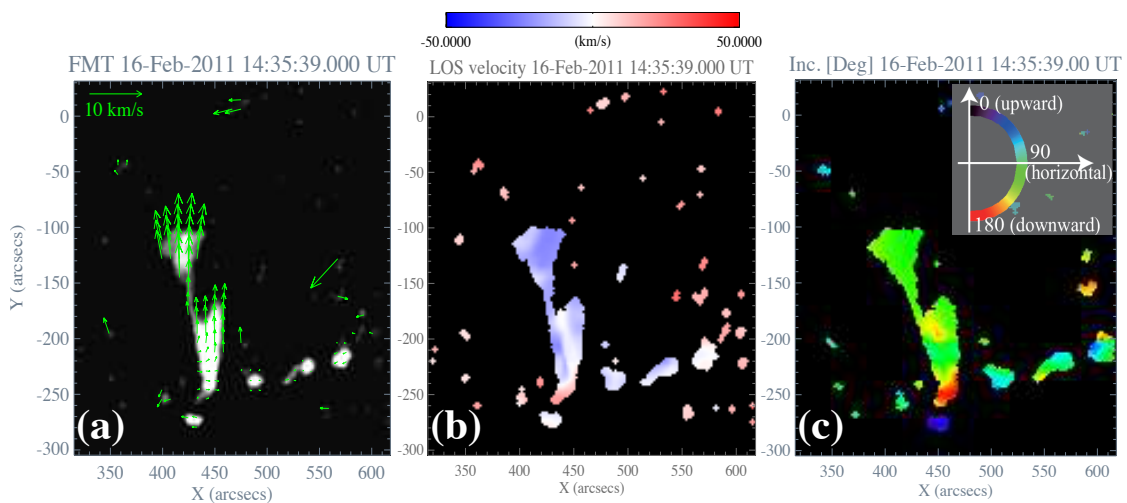
(阿南徹 記 2017 年度年次報告より)

3.3.21 “Dandelion” Filament Eruption and Coronal Waves Associated with a Solar Flare on 2011 February 16

In the recent years the study of solar filament eruptions are extensively being carried out because they play a crucial role in triggering coronal mass ejections (CME). This latter considered as the primary driver of geomagnetic storms. Therefore, the importance reside in determining the real mass motion of the filament eruption, that is, in direction of the line-of-sight (LOS), which do provide valuable information to investigate Earth affecting CMEs.

Here we summarize the study of a filament eruption that accompanied a M-class flare on 2011 February 16. This event was captured in multiwavelength imaging $H\alpha$ line by the Flare Monitoring Telescope (FMT), in operation at Ica National University, Peru. Combining observations in $H\alpha$ line center and its wing ($H\alpha \pm 0.8 \text{ \AA}$), the tangential (a) and the LOS (b) velocities were determined by applying local correlation tracking method and a modified Becker’s cloud model, respectively. The composition of the tangential and the LOS velocity enabled us to derive the 3-dimensional velocity field of the erupting filament. In addition, by the mean of the derived velocity vectors, we estimate the inclination (c) of the erupting material with respect to the solar surface. Associated with this event, coronal waves in EUV and activation of quiescent filaments in $H\alpha$ wing were also observed.

The main findings can be summarized as follows: (1) we could trace the temporal evolution of the velocity field and inclination of the filament eruption and compare them with EUV observations, (2) although the FMT may have missed detecting very fast component of the erupting material due to the limited off-band $H\alpha$ images, the main part of the filament eruption was identified to travel with a LOS velocity of about 30 km s^{-1} , and (3) the inclination maps we performed leads us to conclude that the filament was ejected nearly horizontal to the solar surface. Regarding the filaments activation, the correlation in time suggests that they were activated by the coronal wave passage.



Reference:

Cabezas, D.P., Martinez, M.L., Buleje, Y.J, Ishitsuka, M., et al., 2017, ApJ, 836, 33
(Denis Cabezas 記、2017 年度年次報告より)

3.3.22 ヨードセル法を用いた太陽面視線速度観測に基づく差動回転則の決定

太陽の差動回転は磁場活動を引き起こす源となるので重要であるが、定量的にはまだ十分によく理解されているとはいえない。観測的手法の観点から見ると、黒点の見かけの移動を追って自転の差動度を調べる方法は直接的で簡単ではあるが、高緯度領域が探れないなどの問題点もあり、分光観測でガスの視線速度を測定する方法（ドップラー法）も欠かせない。ただこの分野はこれまで特別の観測機器を用いる光電的ドップラー補償法の独壇場となっており、通常の分光観測での差動回転決定はいくつか例はあるが満足できる結果は得られていないのが現状である。そこで今回我々は、ヨードセル法（ヨウ素ガスフィルターを通して分光してスペクトルに焼き込んだ多数のヨウ素分子線を比較スペクトルにして高い視線速度精度を達成する）を用いて太陽差動回転を求めることを企てた。

観測は2010年7月20日と21日の両日、京都大学附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡（DST）の水平分光器に、国立天文台岡山観測所で開発したヨードセルを持ち込み機器として装着して太陽ディスク全面の分光観測を行った。波長域は5188–5212 Åに設定し、両日とも観測は半径方向に13ステップ（1/12太陽半径刻み）、角度方向に48ステップ（7.5度刻み）、すなわちディスク面上の $13 \times 48 = 624$ 点それぞれにスリットを当てて行った。ただし7月20日はスリットの向きは東西に固定、7月21日は南北に固定した。またスリットの長さ方向三分割して三本のスペクトルを求めたから結果的に観測点は更に3倍になり、延べ $624 \times 3 \times 2 = 3744$ 点である（図1(a)）。

この各点で得た「太陽+ヨウ素分子吸収線入り」スペクトルを、別途取得した「太陽のみ」テンプレートスペクトルと「ヨウ素分子吸収線のみ」スペクトルと合わせて解析して、その点でのテンプレートに対する相対視線速度 V_{rad} を求めた（手法の詳細については文献[1]を参照）。平均的誤差は $\sim 20\text{--}30 \text{ m s}^{-1}$ である。この V_{rad} に対して更に地球運動の補正を加えて太陽中心系に直した値から日面緯度 (ψ) で対恒星自転角速度 ω_{sidereal} を求めた。この際以下の二点に注意を払わなければならなかった。

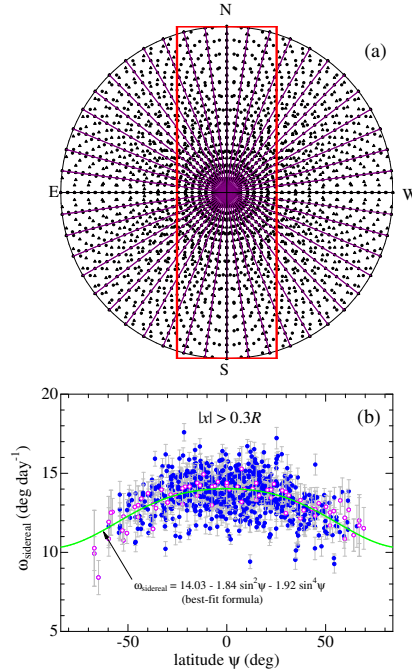
- (1) 東半球と西半球の対応する値を平均して非対称性をならすこと、
- (2) x (子午線からの距離) の小さい観測点は誤差が増幅されるので除外すること（今回は $|x| > 0.3R$ の観測点のみ用いた; 図1(a)）。

結果として得られた ω_{sidereal} vs. ψ 関係を図1(b)に示す。これを良く用いられる解析式 $\omega_{\text{sidereal}} (\text{deg day}^{-1}) = A + B \sin^2 \psi + C \sin^4 \psi$ でフィットさせるべく最小自乗法で係数 (A, B, C) を求めると $A = 14.03(\pm 0.06)$ 、 $B = -1.84(\pm 0.57)$ 、 $C = -1.92(\pm 0.85)$ となった。この係数はこれまでに（主にドップラー補償法で）得られた結果と良く一致する。従って「単にヨウ素ガスフィルターをスリットの前に置いて分光するだけ、という大変安価で簡単な方法でも（特殊な精密装置を用いる手法に匹敵するほどの）太陽差動回転則の十分精度の良い決定が可能である」ということが示された。

本研究の詳細については文献[2]を参照されたい。

参考文献

- [1] Takeda, Y., et al.: 2002, *PASJ*, **54**, 113.



(a) 二日間の観測でスペクトルが得られた点の太陽ディスク面上のプロット。赤線で囲った部分は誤差が増幅するために自転角速度決定には用いなかった領域。(b) 得られた対恒星自転角速度 (ω_{sidereal}) と日面緯度 (ψ) の関係。白抜きのシンボルはリムから得られた結果。実線は最適なフィットが得られた解析式を表す。

[2] Takeda, Y., Ueno, S.: 2011, *Solar Phys.*, **270**, 447.

(竹田洋一 (国立天文台)、上野悟 (飛騨天文台) 記 2010 年度年次報告より)

3.3.23 太陽スペクトルを用いた NLTE 補正因子の決定に向けた観測

1. 近赤外域 C I 1.07 μm 線の重要性

金属欠乏星 (それも特に $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ の超金属欠乏星) は多様な炭素過剰星の存在などもあり特に炭素の組成を正確に決定することはきわめて重要である。これまでこの種の星の炭素組成決定にはもっぱら $\lambda \sim 4300 \text{ \AA}$ の青領域の強い CH 分子線バンド (G バンド) が低金属領域でも観測できるためにもっぱら用いられてきた。ただ大気上層で形成されてきわめて強い温度依存性を持つためにモデル大気の不確定性に大きく影響されるという欠点があった。最近竹田と比田井は近赤外 1.07 μm にあるマルチプレット 1 の一群の中性炭素原子線が超低金属領域まで明確に見えて広い金属量範囲の星の炭素組成決定に大いに有用であることをすばる望遠鏡 IRCS で得られた 45 個の星 ($-3.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.3$) の zJ バンドスペクトルの解析から示した (Takeda & Takada-Hidai 2013, PASJ in press, preprint: arXiv 1302.3313)。ただこの線はかなり non-LTE 効果が効くので NLTE 補正の適用が必須であるが (-0.1dex から -0.6dex で低金属になるほどより重要)、この補正は中性水素非弾性衝突係数にかなり影響されるので、正確な NLTE 補正を見積もるにはこの衝

突係数の古典的な取り扱いの妥当性の是非が問題になる (古典値のままでよいか？補正因子を掛ける必要があるか？)。

2. 太陽スペクトルを用いた補正因子 k の経験的決定に向けた観測

そこで、太陽面上の異なる μ ($= \cos \theta$) の点では形成層が異なることを利用して、複数観測点における線強度 (輪郭) データをパラメータ (衝突断面積の古典値に対する補正因子 k) を色々変えた理論計算と比較することで k の経験的な情報を得るために 2012 年 7 月に DST 水平分光器を用いて観測を行った。つまり太陽面子午線上の静穏領域の各点において $\Delta r = R/20$ の間隔で周縁から中心までスキャンして $x = \sin \theta$ が 0.00, 0.05, 0.10, ..., 0.95, 1.00 の 21 個の各点におけるスペクトルを得た。波長範囲は約 32 Å で波長分解能は $R \sim 60000$ である。

図 1

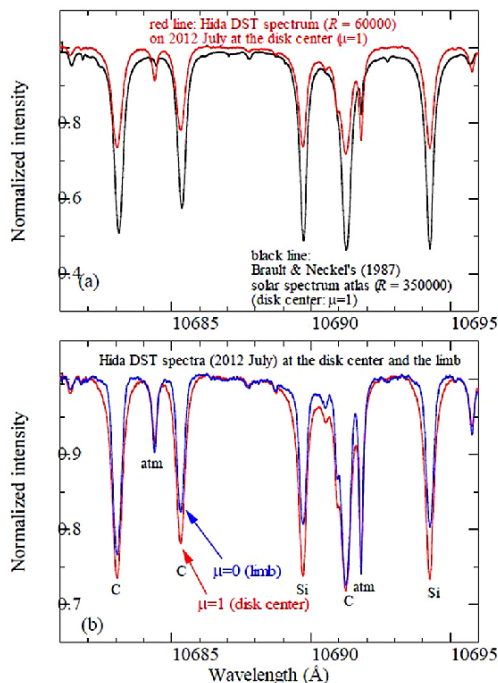
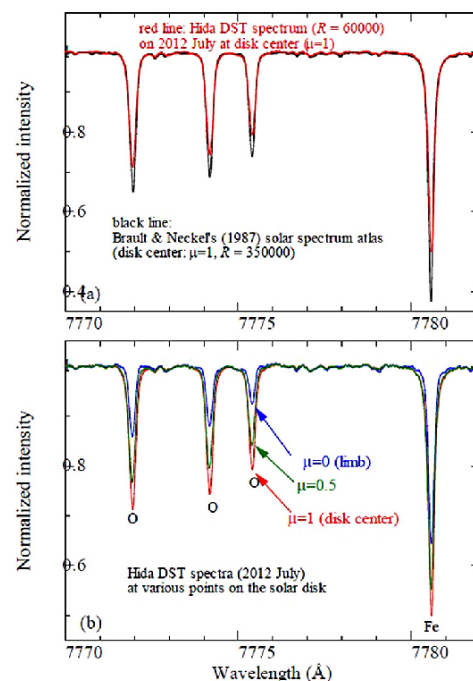


図 2



3. 太陽スペクトルアトラスとの比較で明らかになったこと

公開されている広い波長範囲の太陽スペクトルとしては Brault & Neckel (1987) の NSO の FTS で撮った円盤中心 ($\mu = 1.0, x = 0.0$) の $R=350000$ のデジタルスペクトルが有名である。従って我々の得た円盤中心のスペクトルをこれと比較してみたところ、意外にも大きな食い違いが見られた。図 1 に示すように DST のスペクトルにおける C スペクトル線強度は NSO アトラスに比べて明らかに弱くせいぜい半分程度である (図 1a)。もちろん両者の波長分解能はかなり異なるのであるが、マクロ乱流によって決まる線幅が一番重要なので $R=60000$ と $R=350000$ の違いによる半値幅の差はほとんど明確でない。(というよりも分解能のより低い DST のスペクトル線の方が「むしろ少し痩せている」ように見

えるのは不思議である。) なお図 1b は中心とリムでの DST スペクトルの比較だが、後者が弱いのは予想通りである。

ディスク中心の C I 10683 Å 線の等価幅 (分解能に依存しない) を測定した結果は、それぞれ 120 mÅ (DST スペクトル)、208 mÅ (Brault & Neckel のスペクトルアトラス) であった。これからわかるように DST のスペクトルにおけるスペクトル線強度は顕著に (約六割近くにまで) 弱くなっている。また多波長での状況の参考として OI 7771-5 Å の三重線の場合を図 2 に示す。この場合は C I 線ほど食い違いは顕著ではないがやはり DST のスペクトルは若干強度が弱くなっている (図 2a)。ちなみにディスク中心における OI 7771.94 線の等価幅を測定したところ DST スペクトルからの値は 69 mÅ、Brault & Neckel (1987) のスペクトルアトラスからの値は 78 mÅ であった。従って波長が長くなって 1 μm 以上の近赤外域に入るほど食い違いが増大すると言って良いであろう。

4. 今後の課題

そこで来年度に改めてこの近赤外の $\lambda \sim 1.07 \mu\text{m}$ 領域に対象を絞って色々な条件で再観測とテストを行い、果たして昨年のような食い違いの傾向がやはり見られるのか、もしそうならその原因は何か、何らかの補正を施して初期の目的にかなうような中性炭素の線の周縁～中心スペクトルを得ることは可能なのか、などについて調べたいと思っている。具体的には、水平分光器と垂直分光器での両方での観測、光学系や波長分解能を変えての観測、散乱光の定量的評価 (ディスク外の色んな点でのスペクトル、黒点の中のスペクトル、なども)、可能なら検出器を変えての観測、などできる限りのことを試みたい。

(竹田洋一 (国立天文台)、上野悟 (飛騨天文台) 記 2012 年度年次報告より)

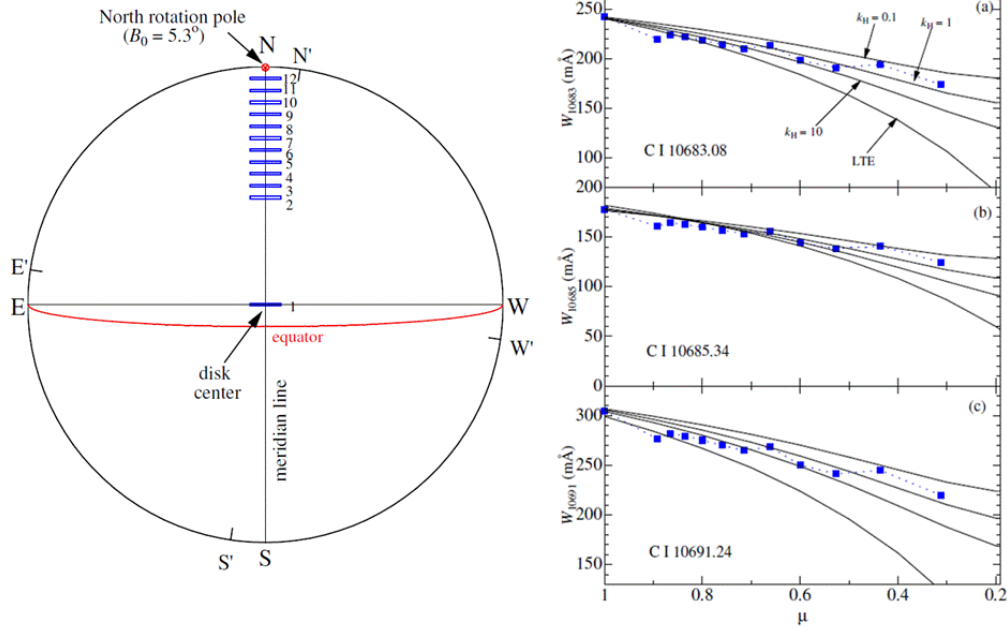
3.3.24 中性炭素線の太陽面中心-周縁強度変化と中性水素衝突係数の推定

最近竹田らがすばる望遠鏡の IRCS を用いて行った近赤外の $1.07 \mu\text{m}$ の C I 線に基づく金属欠乏星の炭素組成解析 (文献 [1]) では $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ の非常に金属欠乏領域において CH から出した組成と C I から出した組成の系統的な食い違いが見られた。この食い違いの説明として一つの可能性は NLTE 効果が大きい C I 線の NLTE 補正が正しくないことである。というのも FGK 型の晩期型星では中性水素原子による非弾性衝突効果がよくわかっていないので衝突遷移レートの不確定性が大きく、これが NLTE 計算の信頼性を損ねているからである。

この中性水素衝突係数 $C(H)$ には古典的考察に基づく公式もあるが単なるオーダーの目安程度のものにすぎないので、そこで $C(H) \equiv kHC(H)_{\text{classical}}$ と書いてこの補正因子で対応するのが一般的であり、結局 kH の値を知ることが本質的になる。([1] においては $kH = 1$ を用いた。) そこで我々は太陽を用いる経験的なアプローチでこの問題に取り組むことにした。つまり太陽面上の異なる μ ($=\cos\theta$) の点では形成層が異なることを利用して、複数の μ における近赤外 $1.07 \mu\text{m}$ C I 線強度を kH を色々変えた理論計算値と比較し、 kH の値に関する情報を得ることを試みたのである。

観測は 2013 年 7 月 26 日に京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の水平分光器を用いて行った。図 (左) に示すように太陽面上の μ の異なる 12 点の位置で $1.069 \mu\text{m}$ 領域で波長分解能 19 万のスペクトルを得た。そして中性炭素線三本の等価幅 $W'(\mu)$ を各位置で

測定した。円盤中心でのスペクトルを NSO スペクトルアトラス (文献 [2]) と比較したところ散乱光の影響で約 25%ほどスペクトル線強度が弱く出ていたので、みかけの $W'(\mu)$ に対しこの効果を補正して真の等価幅 $W_{obs}(\mu)$ を求めた。



次に各々の線について ATLAS9 太陽大気モデル ([3]) を基に、 $kH = 0.1, 1, 10$ の三通りの場合で Non-LTE 計算を行い、理論的な $W_{th}(\mu)$ を計算した。

こうして得られた観測値 W_{obs} と理論値 W_{th} の比較を図 (右) に示す (なお LTE は $kH = \infty$ に対応するがこの場合も参考のために図示している)。この図からは (ちらばりがあるので kH の値を特定することは難しいが) 「古典的な取り扱いの $kH = 1$ で特に悪くない」ことが言える。従って最初に述べた食い違いは non-LTE 計算が不適当だったための C I からの組成の系統誤差にはできない。分子線は温度に非常に敏感なのでむしろ大気構造の不確定性が CH バンドから出した C 組成の方に系統誤差を生じたのではないかと推察される。本研究の詳細については文献 [4] を参照されたい。

(文献)

- [1] Takeda & Takada-Hidai 2013, PASJ, 65, 65
- [2] <ftp.hs.uni-hamburg.de/pub/outgoing/FTS-Atlas>
- [3] Kurucz 1993, Kurucz CD-ROM No.13
- [4] Takeda & UeNo 2014, PASJ, 66, 32

(竹田洋一 (国立天文台) 記 2013 年度年次報告より)

3.3.25 2003 年 3 月 29 日に発生したガンマ線バースト GRB030329 の早期可視残光光度曲線の構造

ガンマ線バーストは数ミリ秒から数百秒程度の時間尺度で莫大なエネルギーを放出するバースト現象である。X 線から電波に至るすべての波長で、残光現象が観測されることがある。そのうち、ガンマ線バーストの継続時間が秒スケール以上のものは、ある種の大質量星が進化の最後で超新星爆発を起こす際の現象だとされている。その発光機構としては、中心にできたブラックホールに周囲の物質が落ち込んでいき、その一部が相対論的ジェットを形成して星本体を突き破って星間空間に飛び出した際に、たまたま地球がそのジェットの方向にあれば、内部衝撃波によるガンマ線や外部衝撃波による残光が観測されるというものである。

現在までに多くのガンマ線バーストで残光現象が観測され、上記のような描像が確立しているが、2000 年代に入る頃ではガンマ線バーストの位置特定精度が悪く、特に発見後 0.1 日以内の残光現象の詳しい観測はほとんど報告されていなかった。しかし、2003 年 3 月 29 日 11 時 37 分 14.67 秒 (世界時) に HETE-2 衛星に検出され、その 0.051 日後に世界中に広報された GRB030329 は、すぐに可視光で 12 等もの明るさの新天体と同定され、京都大学を中心とした世界的ネットワークで追跡観測がなされた (Uemura et al. 2003, 2004)。

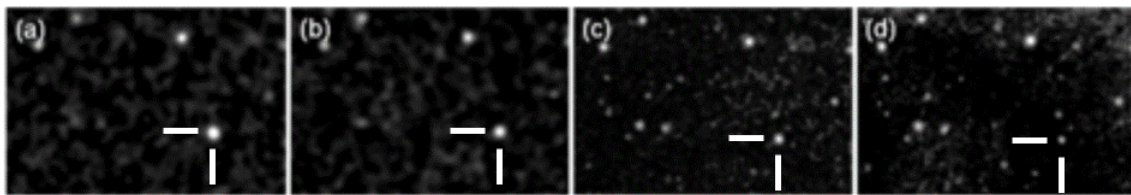


図 1: ガンマ線バースト発生から (a)1.27 時間後、(b)3.37 時間後、(c)8.18 時間後、(d)28.65 時間後の Rc-band 画像 (Uemura et al. (2004) の図 1 を改編)。(a)(b) は京都大学宇宙物理学教室、(c) は南アフリカ天文台、(d) は飛騨天文台 60cm 反射望遠鏡で撮影されたもの。

京都大学宇宙物理学教室では、当時博士課程の大学院生であった植村誠氏を中心に、屋上に設置されていた 30cm 望遠鏡と 25cm 望遠鏡で広報を受け取ってすぐに観測を開始し、明るい残光を確認した (図 1a)。世界的に観測が継続される中、飛騨天文台ではこの日は天候が悪く残念な思いをしていたが、次の日には晴れ、60cm 反射望遠鏡で野上が観測を行なった。ガンマ線バースト発生後 1.2 日が過ぎていたが、16 等程度の明るさでしっかり観測された。

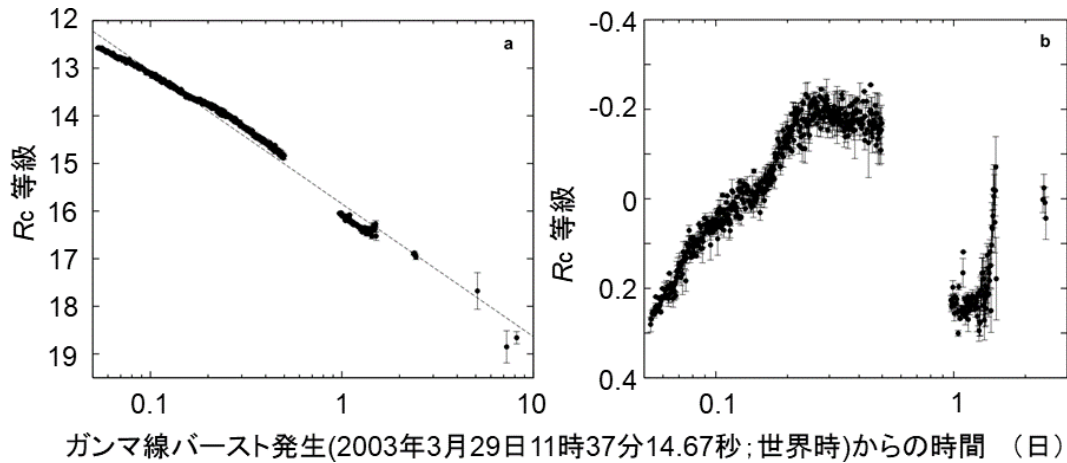


図2: ガンマ線バースト発生から0.053日(1.27時間)後から10日後までの光度曲線(Uemura et al. 2003 の図1 を改編)。左図は全体の光度曲線と時間のべき乗則でフィット(べきは-1.115)した線(点線)を表している。右図は実際の光度曲線からべき乗則の線を引いた残差。

観測は我々の観測ネットワーク全体で8日間継続された(図2)。図2左では時間の単純なべき乗則で明るさが減少していくモデルでフィットしたものを点線で書き入れてある。べき指数は-1.115で、これは可視光残光の減光を表すものとしては標準的な値であった。しかし、観測データからべき乗モデルを引いたものを示した図2左からわかるように、バースト発生から0.5日までに、2こぶの構造があるのがあった。その後、1日までは比較的速い減光があり、そこから増光に転じていた。これはそれまでに理論的に提唱され観測もされていた相対論的ビーミングの弱まりによるジェットブレイクや、超新星成分の卓越による光度変化では説明できないものであり、1日以下のタイムスケールでの光度曲線の構造を捉えた初めての観測であった。

Reference:

Uemura et al. 2003, Nature 423, 843. (被引用件数 17 位、p.40 新聞記事)

Uemura et al. 2004, PASJ 56, S77.

(野上大作 記)