

京都大学飛騨天文台 SMART/SDDI による 太陽面噴出現象モニタリングと宇宙天気予報

大 辻 賢 一¹関 大 吉²石 井 貴 子³一 本 潔⁴

大辻



関



石井



一本

〈^{1,3,4} 京都大学大学院理学研究科附属天文台飛騨天文台〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱〉

〈² 京都大学大学院総合生存学館〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町1東一条館1階〉

e-mail: ¹ otsuji@kwasan.kyoto-u.ac.jp, ² seki@kwasan.kyoto-u.ac.jp, ³ ishii@kwasan.kyoto-u.ac.jp,

⁴ ichimoto@kwasan.kyoto-u.ac.jp

京都大学大学院理学研究科附属天文台の飛騨天文台では、太陽の活動を監視する観測望遠鏡として、Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART) を用いた観測が行われている。今回われわれはこの SMART 用の光学フィルターとして、液晶可変遅延素子を用いたチューナブルフィルターを開発し、太陽表面でのプラズマの運動を立体的に捉えることが出来る装置、Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI) による太陽観測を開始した。SMART/SDDI により、太陽表面におけるプラズマの噴出現象をリアルタイムで監視し、その噴出速度や方向を高い精度で求めることが可能となった。また太陽表面に浮かぶフィラメントと呼ばれるガス塊が噴出する前の不安定化の様子も捉えることができ、噴出を前もって予測することに向けた研究が進行しつつある。これらの情報は太陽が地球に及ぼす影響を予報する「宇宙天気予報」にとって有用であり、予報モデルのさらなる高精度化につながるものとして期待される。

1. 宇宙天気予報とわれわれの社会

1.1 宇宙天気とコロナ質量放出 (CME)

太陽活動とわれわれの社会との間には密接な関係があることが近年クローズアップされている。2017年9月には、太陽表面における爆発現象「フレア」が発生し、新聞やニュースで取り上げられたことは記憶に新しい。また過去には、1989年3月に発生した太陽からの噴出現象「コロナ質量放出 (CME)」が地球を直撃し、地球磁気圏の大規模な擾乱「磁気嵐」が引き起こされた結果、カ

ナダのケベック州では広範囲の停電に見舞われた¹⁾。このような被害を未然に防止するため、太陽の活動現象を監視、予測して地球への影響を事前に予報する「宇宙天気予報」という分野の研究が盛んに行われている。宇宙天気予報では、観測とシミュレーションを用いて太陽から放出されたプラズマがどのようにして地球に到達し、地磁気圏の擾乱を引き起こすかを研究の一つの柱としており、2015年度からは文部科学省から科学研究費補助金を受け、太陽から地球磁気圏に及ぶ太陽地球圏の環境変動を包括的に解明することを目的と

した「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」による研究が精力的に推進されている。

1.2 CMEの起源とその観測

時にはわれわれの社会に大きな影響をもたらす可能性のあるCMEであるが、それらの大多数に細長く明るいコアが存在することがコロナグラフによる観測から明らかになっている。コアの起源は太陽の表面上空に浮かぶ低温で密度の高いフィラメントやプロミネンスと呼ばれるガス塊である。フィラメントやプロミネンスは普段は太陽の磁力線に拘束されて安定状態にあるが、ひとたび不安定化すると惑星間空間へ向けて噴出する。このとき、太陽の磁力線やそれに捕らわれているプラズマも一緒に飛び出す。これらが地球近傍を通過する際に地磁気との相互作用を引き起こし、地磁気擾乱をもたらす。すなわち、われわれの社会に影響を与えるCMEの起源の多くは太陽表面上空に浮かぶフィラメントやプロミネンスであり、これらの噴出プロセスを詳細に観測することが宇宙天気予報の高精度化のために必要とされている。

2. 世界におけるH α 線太陽全面像観測

フィラメントやプロミネンスは以前より、6562.8 ÅのH α 線と呼ばれる波長を用いて観測されてきており、H α 線で観測されたフィラメントの消失現象と地球磁気圏の擾乱との関連性はかなり早い時期から研究されてきた²⁾。H α 線は温度1万度程度の励起した水素原子によって形成される輝線・吸収線である。これらの励起した水素原子が磁場に捕らわれたプラズマと相互作用することで、結果としてH α 線近傍の波長帯では太陽表面近傍での磁力線の形状をトレースしたさまざまな模様を観測することが可能であり、太陽表面から数千km上空の彩層と呼ばれる領域や、さら

に上空に浮かぶフィラメント・プロミネンスをよく捉えることができる。このような観測的利点から、H α 線における太陽観測はこれまで世界中で行われてきた。特に、太陽全面を視野に含めることが可能なH α 線太陽全面像観測は、噴出現象やフレア現象、モートン波^{*1}といったさまざまな活動現象が太陽面上のどこで発生しても捉えることができるため、非常に有力な太陽観測の手段である。表1に現在世界で稼働中の主なH α 線太陽全面像観測装置のリストを挙げる。ここで注目すべき点は、H α 線中心の単色観測を行っている観測装置はリストアップしたものも含めて多数存在する一方で、観測波長をシフトしたり、複数の異なる波長の撮像望遠鏡を搭載したりすることでH α 線近傍での多波長観測が可能な装置は世界でも数えるほどしか存在しない点である。H α 線中心の単色観測では、H α 線中心の単色観測では、フレア時の増光測光観測やフィラメントやプロミネンスの形状変化の解析は可能であるが、ドップラー速度や密度、温度解析といった定量的な解析は困難である。こういった定量解析には、H α 線のプロファイルを取得可能な多波長観測が欠かせない。特にフィラメント噴出現象の場合、大きな視線速度成分で運動するフィラメントを捉えるためには、幅広い波長範囲を高い波長分解能で観測する必要がある。そのためには、透過波長を自由に变化させることができるチューナブルフィルターを用いるのが最も効果的である。噴出速度に関する先行研究³⁾では、太陽リムにおける噴出プロミネンスの見た目の運動を電波で観測した結果、最大400 km s⁻¹に達することがわかっている。これはH α 線近傍でのドップラーシフト量に換算すると8.75 Åに相当する。一方、表1に示したように、今回紹介するSDDIが稼働するより以前は世界中のフィルター撮像観測における観測波

*1 太陽フレアに伴って彩層中で観測される波動現象。フレアで生じた磁気流体衝撃波がコロナを経由して彩層に到達した際に彩層を押し下げるため、H α 線ではレッドシフトした波面が彩層中を伝播するよう見える。

表1 世界における主なH α 線太陽全面像観測装置.

名称 (略称)	観測所 (国名)	観測波長	口径
Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI)	京都大学飛騨天文台 (日本)	波長範囲 H α \pm 9 Å 73 波長点	20 cm
Solar Flare Telescope (SFT) T1	国立天文台三鷹太陽地上観測 (日本)	H α 中心, \pm 0.5, \pm 0.8, +3.5 Å	12.5 cm
Optical and Near-infrared Solar Eruption Tracer (ONSET)	撫仙湖観測所 (中国)	H α 中心, \pm 0.5 Å	27.5 cm
Flare Monitoring Telescope (FMT) (同上)	イカ大学 (ペルー) キングサワード大学 (サウジアラビア)	H α 中心, \pm 0.8 Å H α 中心, \pm 0.6, \pm 1.2 Å	6.4 cm 6.4 cm
H α Telescope	Kodaikanal Solar Observatory (インド)	H α 中心	20 cm
Sartorius Telescope	京都大学花山天文台 (日本)	H α 中心	17.8 cm
Global High-resolution H α Network (同上)	Big Bare Solar Observatory (アメリカ)	H α 中心	15 cm
(同上)	カタール天文台 (イタリア)	H α 中心	15 cm
(同上)	Udaipur Solar Observatory (インド)	H α 中心	15 cm
(同上)	ホワイロウ太陽観測基地 (中国)	H α 中心	14 cm
(同上)	Kanzelhöhe Solar Observatory (オーストリア)	H α 中心	10 cm

長オフセット量は最大でも3 Å前後であった。このことは、太陽面中心付近で400 km s⁻¹でフィラメント噴出が発生した場合、高速で噴出するフィラメント本体を捉えられないことを意味する。これは、地球に影響を及ぼす可能性の高い太陽面の中心付近で発生するフィラメント噴出現象を観測する上での問題であった。また、噴出の視線速度が正確に求められないということは、噴出角度や方向にも不定性が生じることになるため、噴出フィラメントが地球に影響を及ぼすか否かの判定が不可能という状況が続いていた。

3. 飛騨天文台における新チューナブルフィルター (TF40) の開発

3.1 飛騨天文台太陽磁場活動望遠鏡 (SMART)

京都大学飛騨天文台では、国内においては最先端の太陽観測研究を行っている。そのなかでも、太陽磁場活動望遠鏡 (Solar Magnetic Activity Research Telescope; SMART) は4本の望遠鏡を用いてさまざまな波長で太陽観測を実施している⁴⁾。図1はSMARTの外観を示したもので、地上付近の対流の影響を避けるため望遠鏡本体は高さ16 m

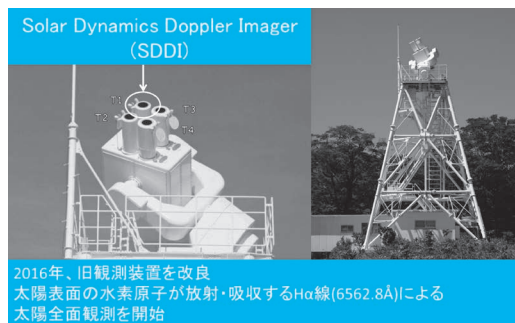


図1 SMART/SDDIの外観。京都大学飛騨天文台にて撮影。望遠鏡本体は高さ16 mのタワーの上に設置された、口径20または25 cmの4本の望遠鏡で構成されている。現在4本中3本の望遠鏡が稼働中で、それぞれH α 線太陽全面像観測 (T1: SDDI), H α 線/連続光高速撮像観測 (T3: FISCH) および光球面ベクトル磁場観測 (T4) を実施している。

のタワーの上に設置されている。現在稼働中の望遠鏡は、T1: H α 線太陽全面像望遠鏡 (SDDI), T3: H α 線/連続光高速撮像望遠鏡 (FISCH), T4: 光球面ベクトル磁場望遠鏡の3本である。

T1では、これまでリオ・フィルター^{*2}を用いたH α 線周辺波長における太陽彩層全面像観測を

*2 フランスの天文学者ベルナル・リオによって開発された、複屈折結晶と直線偏光板を組み合わせる狭い波長透過幅を実現したフィルター。

行ってきた。だが、当該フィルターの回転機構による透過波長チューニングは低速であり、時間分解能の観点から観測波長点数を増やすことには限界があった。そのため、従来のT1観測では視線方向の速度成分で $\pm 60 \text{ km s}^{-1}$ を超える現象は捉えることができなかった。また時間分解能も2分と、高速で移動する噴出物の追跡も困難であった。さらに、リオ・フィルターの老朽化に伴い駆動部分が故障したり光学素子を浸しているシリコンオイルに微細な金属粉末が混入して透過率が低下したりと様々な問題が生じており、新しいフィルター開発が喫緊の課題であった。新フィルターは旧来のリオ・フィルターで採用されていた回転機構による波長板制御と油槽を廃し、電圧によって遅延量操作が可能な液晶可変遅延素子(Liquid Crystal Variable Retarder; LCVR)を採用した。これにより観測波長を高速にチューニングすることができ、彩層のプラズマ運動の視線速度をより大きな速度域まで測定することが可能となる。新フィルターの有効口径は40 mmだったため、われわれはこのフィルターをTF (Tunable Filter) 40と呼称した。飛騨天文台では今回開発したTF40のほかに、同様にLCVRを用いたチューナブルフィルター「UTF (Universal Tunable Filer) 32」を以前開発しており⁵⁾、その際のノウハウが活かされることとなった。

3.2 TF40の開発

図2は今回開発したTF40の光学素子の配置概念図である。基本的な素子の並びは旧来のリオ・フィルターのものに準じるが、回転波長板の代わりにLCVRを用いていることが特徴である。フィルター内部は大きく7段のブロックに分けることができる。最小の透過幅をもつブロックは 0.25 \AA ブロックで、厚さ23 mmの方解石ブロックを二つ重ねたものを用いている。これを含め、透過幅の小さい方から $0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8$ および 16 \AA のブロックを透過ピークが一致するようにして組み合わせることで、隣り合う透過ピークの間隔

SMART T1用H α チューナブルフィルター (TF40)
口径40mm 透過幅0.25 \AA

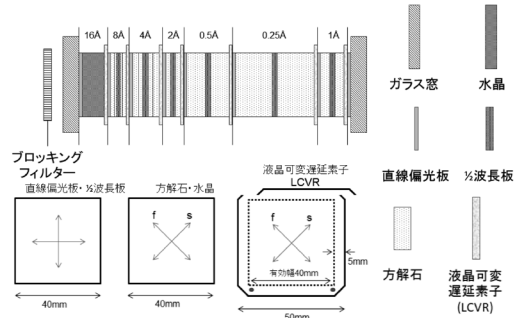


図2 TF40の光学素子配置概念図。左が入射側。透過波長幅が異なる7段の素子群を直列に並べて配置することで、隣り合う透過ピークの間隔 32 \AA 、透過波長幅 0.25 \AA のフィルター性能を実現している。

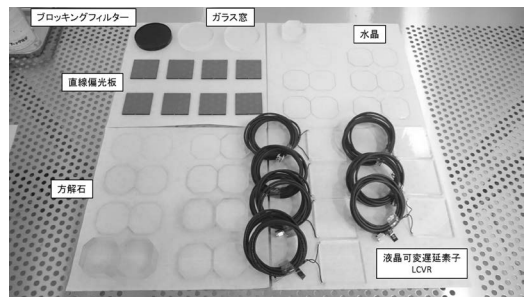


図3 TF40の使用光学素子群。全部で46個の光学素子を用いている。

32 \AA 、透過波長幅 0.25 \AA のフィルター性能を実現している。図3に今回開発したTF40の光学素子の外観を挙げる。

今回使用したLCVRは、アメリカMeadowlark社製のものである。LCVRは温度によって遅延量の電圧依存性が変化するため、恒温槽を用い、環境温度を変化させながらLCVRに印加される電圧と遅延量の関係を測定しその温度依存性を明らかにした。これにより、任意の温度において所望の遅延量を実現するために必要な印加電圧を算出する計算式を求め、LCVRのモデル化を行った。図4は得られた式をもとに、環境温度が30度の際の電圧と遅延量の関係を計算し、実際に測定さ

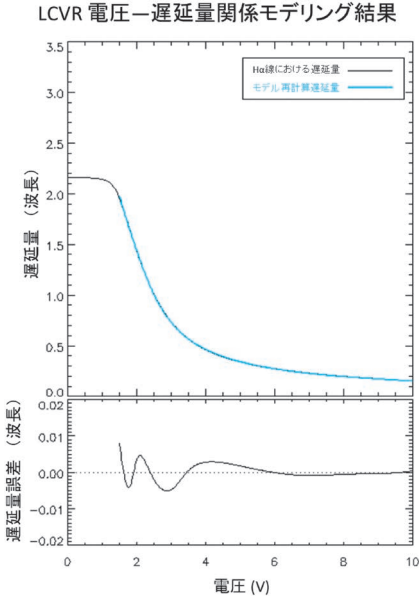


図4 H α 線 (6562.8 Å) における、印加電圧に対するLCVRの遅延量の測定値および計算式による遅延量再現結果 (上段), 誤差 (下段). 測定時の温度は30度. 遅延量の誤差は最大0.01 (波長).

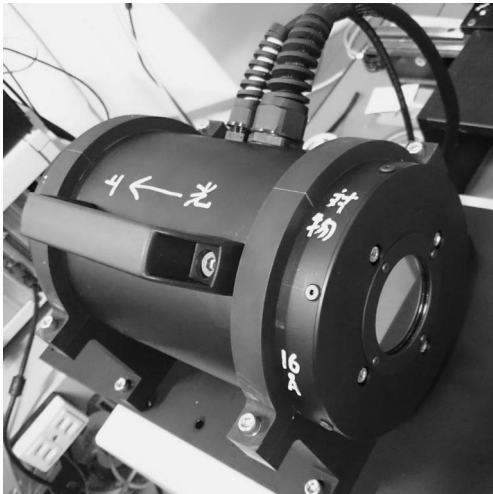


図5 TF40の組み上げ後外観.

れた結果と比較したものである. 計算式により再現された遅延量と測定値との誤差は0.01 (波長) と非常に精度の良いモデリング結果となった.

LCVRを含む各光学素子の測定を終えたのち、フィルターの組み上げを行った. 組み上げ後の完

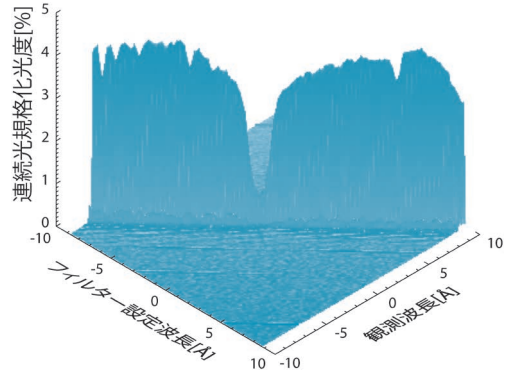


図6 TF40組み上げ後の波長スキャン試験結果. 長波長側 (~9 Å) で透過光度が減少しているのは、ブロッキングフィルターによる効果.

成写真を図5に示す.

図6はTF40の組み上げ後、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の分光器を用いて行った波長スキャン試験の結果である. この試験ではフィルターの透過波長設定を変えながら太陽光のH α 線周辺波長での透過スペクトルを取得した. 設定波長を変化させることで透過プロファイルのピークが移動していく様子が見て取れる. また、フィルター全体のピーク透過率は4%前後と求まった.

4. SMART/SDDIによる定常観測開始

組み上げられたTF40フィルターをSMARTのT1内に設置し、われわれはこれをSDDIと命名した. SDDIによる定常観測は、2016年5月より開始された. 観測視野は2,460"×2,460", 観測波長域は初期には±8 Åの範囲だったが、のちに±9 Åにまで拡張している. 波長分解能 (サンプリング) は0.25 Åで、1セット73波長の太陽全面像データを取得している. 時間分解能は各波長あたり15秒, 空間サンプリングは1.2"である. 目立った噴出現象が発生しない時間帯は、データ量削減のため±3 Å以内の波長域のデータのみ保存している.

図7は、SDDIで取得された2016年9月6日のH α 線中心における太陽全面観測のサンプル画像

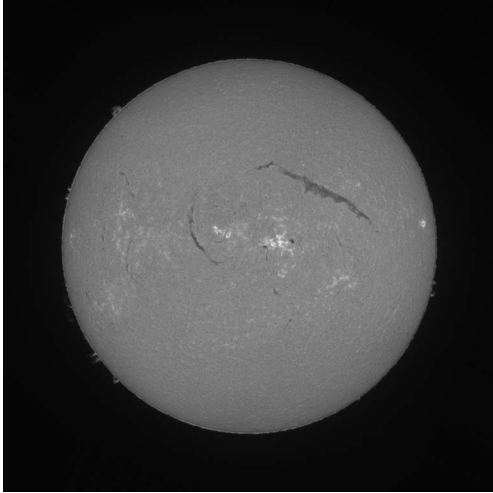


図7 SDDIによるH α 線中心太陽全面像. 2016年9月6日観測.

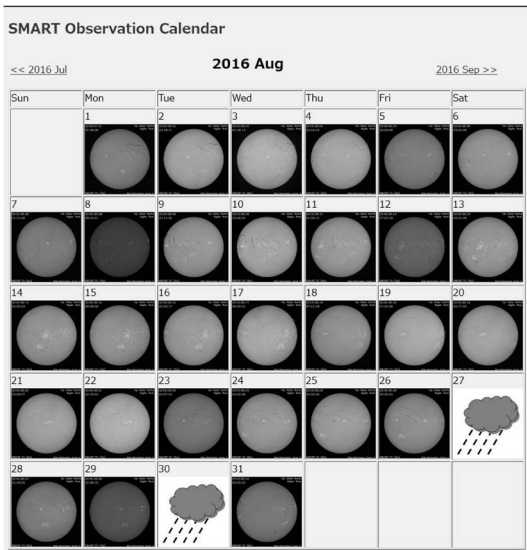


図8 SDDIによる観測データ公開用アーカイブページ.

である. SDDIの全面像データの特徴として, 太陽リム外の視野の広さが挙げられる. これは, 噴出するプロミネンスの軌跡を太陽からより遠い距離まで捉えることを意図しているためである.

取得されたデータは京都大学大学院理学研究科

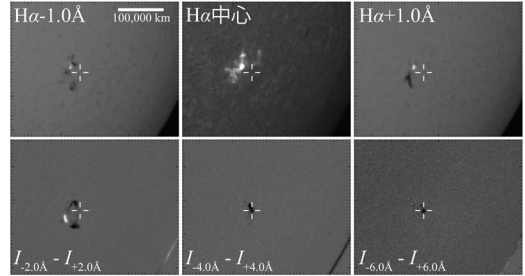


図9 SMART/SDDIによって観測された2016年7月7日のフィラメント噴出現象. 時刻は07:55 UT. 上段: H α -1.0 Å, H α 線中心, H α +1.0 Åの画像. 下段: H α ±2.0 Å, H α ±4.0 Å, H α ±6.0 Åの差し引き画像.

附属天文台のホームページ^{*3}で即日公開している (図8).

5. SDDIによる太陽面噴出現象の観測

5.1 2016年7月7日のフィラメント噴出現象⁶⁾

2016年7月7日に太陽面上の活動領域 NOAA12561にてC5.1クラスフレアが発生した. この現象はSDDIにて観測され, フレアに伴う噴出現象の速度場の導出が行われた. 図9に観測された噴出現象の図を示す. 図の上段は左から順に, H α -1.0 Å, H α 線中心, H α +1.0 Åで見た太陽像. 下段は左から, H α ±2.0 Å, H α ±4.0 Å, H α ±6.0 Åにおける光度を差し引き ($I_{\text{blue}} - I_{\text{red}}$) したものである. この図から, 右下のH α ±6.0 Åにおける光度差し引き画像中に暗い領域が見られ, ブルー側のH α -6.0 Åにおいても吸収が存在することがわかる (図中の白十字の中心部分). これはドップラー速度に換算して270 km s⁻¹の上昇運動に相当する.

上昇中のフィラメントのうち, 図9中に白十字で示した部分の各波長における光度をプロットしたものを図10に示す. この図から, H α 線中心近傍 ($|\lambda| \leq 2.0 \text{ Å}$) の波長域では, 噴出フィラメントと静穏領域のプロファイルでは差が見られない

*3 <http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/SMART/T1.html>

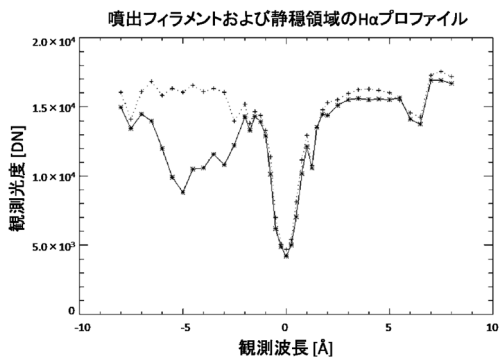


図10 上昇中のフィラメントのプロファイル (実線) および太陽面中心における静穏領域プロファイル (破線). フィラメントによる吸収が短波長側に見て取れる.

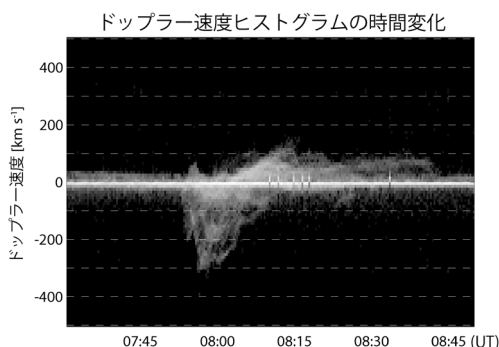


図11 噴出フィラメントのドップラー速度ヒストグラムの時間発展. 横軸が時間, 縦軸がドップラー速度.

ことがわかる. すなわち, このような高速の噴出現象は, 観測波長域が狭い旧来の観測装置では検出できなかったが, SDDIにより初めて捉えることが可能となったといえる. より定量的な速度場の導出のため, SDDIで得られた観測データに Beckers のクラウドモデル⁷⁾を適用した. Beckers のクラウドモデルでは, 太陽面上空に浮かぶフィラメント中の源泉関数, 光学的厚み, ドップラー幅, ドップラーシフト量を与えることで, 観測されるプロファイルの形状を求めることができる. このクラウドモデルを観測で得られたプロファイルにフィッティングすることで, フィラメントの物理量を導出することが可能である⁸⁾. 図11は,

クラウドモデルを適用して得られた噴出フィラメントのドップラー速度の分布の時間発展を示したものである. この図によると, 噴出は07:52 UTに発生し, 07:58 UTにはドップラー速度で -320 km s^{-1} まで加速したのち, 8:00 UT頃からは太陽表面へ落下する成分が継続して観測されていることがわかる.

5.2 2016年11月5日のフィラメント噴出現象⁹⁾

宇宙天気予報にとって重要な手法の一つは, 太陽表面で「いつ」「どこで」噴出現象が発生するかを予測するということである. これには, 太陽表面全面のフィラメントを監視し, 将来噴出を引き起こすような「前兆」を捉えることが必要である. これまでの研究により, 噴出を起こすフィラメントには, 徐々に上昇していく¹⁰⁾, フィラメントが振動する¹¹⁾, 加熱が見られる¹²⁾, 内部運動が増大する¹³⁾といった前兆を伴うことが明らかになっている. この点に着目して, 噴出直前のフィラメントの不安定化をSDDIで捉えた結果を紹介する. 使った観測データは2016年11月4日22:00 UTから11月5日5:00 UTにかけて取得されたものである. 太陽の北半球の静穏領域に存在していたフィラメントが11月5日3:30 UTごろに噴出し, それに伴ってB1クラスの小規模なフレアが発生した. SDO/AIAによる極紫外線観測では, 噴出したフィラメントが太陽の北西方向へ伝播していく様子が捉えられた. また, SOHO/LASCOによるコロナグラフ観測では, フィラメントがCMEとして惑星間空間へ飛び出していくことが確認された. このCMEは地球磁気圏に接近し, 11月9日から10日にかけて穏やかな地磁気嵐を引き起こしたと見られる.

SDDIで取得されたH α 線画像にクラウドモデルを適用して得られたドップラー速度の空間分布の時間発展 (図12) からは, フィラメントが形状を変化させながら一方の端 (南側) ではブルーシフト, もう一方の端 (北側) ではレッドシフトしながら噴出していく様子が見て取れる. 噴出が

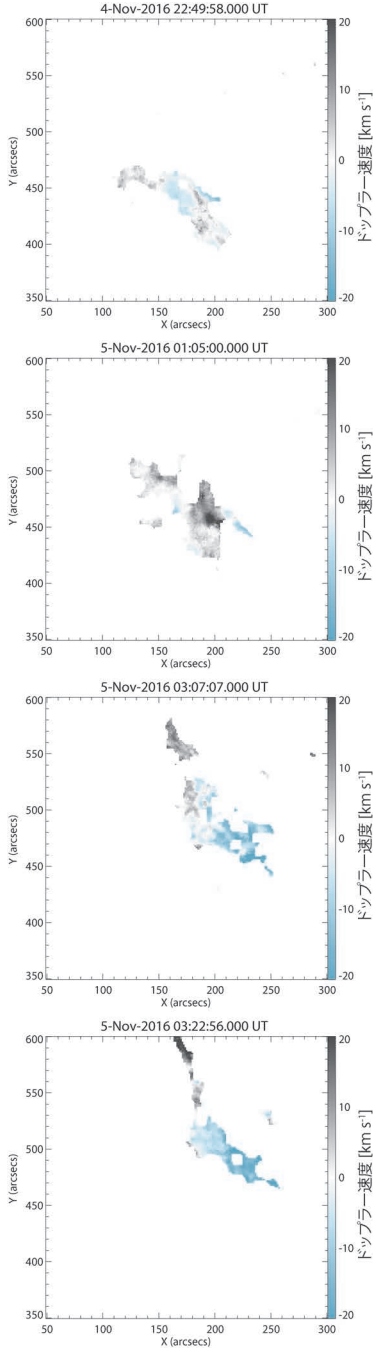


図12 噴出フィラメントのドップラー速度の空間分布の時間発展. グレーの部分が下降, ブルーの部分が上昇している領域.

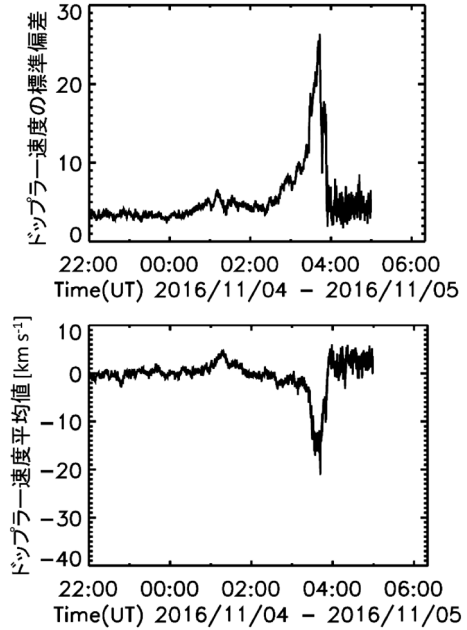


図13 噴出フィラメントのドップラー速度の標準偏差(上)および平均値(下)の時間発展. (Seki et al. 2017).

発生した時刻 (3:30 UT) より以前の段階 (図12一段目) においても, フィラメント内には $\sim \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ 程度の速度差が存在することが確認された. これは, フィラメント内部の流れを見ているものと考えられる. 図12二段目では, フィラメントのドップラー速度の絶対値が大きくなってきており, 三段目では速度差は $\sim \pm 20 \text{ km s}^{-1}$ まで増大している. 噴出直前の四段目ではフィラメントのドップラー速度の幅は $-35 \pm 25 \text{ km s}^{-1}$ となっている.

これらの内部運動の時間発展の様子をより詳細に調べるため, フィラメント内部のドップラーシフトの平均値および標準偏差を計算し, その時間変化を図13にプロットした. これによると, 観測開始時点でフィラメントのドップラー速度の標準偏差は $3\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$ であった. 標準偏差は0:30 UTごろまでは一定の値を保っていたが, その後1:10 UTにかけて徐々に増大していった. この時の標準偏差の増加率は 1.1 m s^{-2} と求まった. ま

た、1:10 UTにはドップラー速度の平均値も正の極大を示している。その後いったん減少した標準偏差は2:30 UTごろから再び 2.8 m s^{-2} の増加率で増大し始め、3:10 UTには急激な標準偏差の増加および平均値の減少が見られた。そしてこれらの現象に引き続き、フィラメント噴出が発生した。

フィラメント噴出に先行して観測されたこれらの現象は、果たして噴出の前兆現象として宇宙天気予報に役立てることができるのであろうか。2:30 UTから見られた 2.8 m s^{-2} での標準偏差の増加は、先行研究でも観測された噴出前のゆっくりとしたフィラメントの上昇^{11), 14)}を反映している可能性がある。また、観測開始時点でのドップラー速度の標準偏差は $3\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$ であったが、これは前日(11月4日)に同様に測定された値($2\text{--}3 \text{ km s}^{-1}$)よりも大きいことが明らかになっている。フィラメント内部のプラズマの運動は、自身に働く浮力と周囲のプラズマからの抗力の釣り合いにより終端速度が決定される^{15), 16)}。一方、フィラメントが噴出に近づくにつれ、フィラメントをつなぎ留めている周囲の磁場が弱くなり、フィラメントが膨張することが考えられる。このことにより、フィラメント内部のプラズマに働く力のバランスが変化し、速度の分散が大きくなるのではないかと予想している。これは、統計的な研究によって確認される必要がある。

5.3 太陽全面彩層ドップラー速度場モニタリング

TF40およびSDDIの開発の最終目的は、太陽表面のフィラメントやプロミネンスを常時モニタし、噴出の発生を実時間で知らせるシステムを開発することである。そのためには、観測されたデータをリアルタイムで処理してドップラー速度を導出することが必要である。しかし、SDDIの観測データレートは膨大(1分あたり2.3 Gbyte)のため、処理が追い付かないことが問題だった。われわれは並列処理化により、1分1枚の太陽全面彩層ドップラー速度場をリアルタイムで導出す

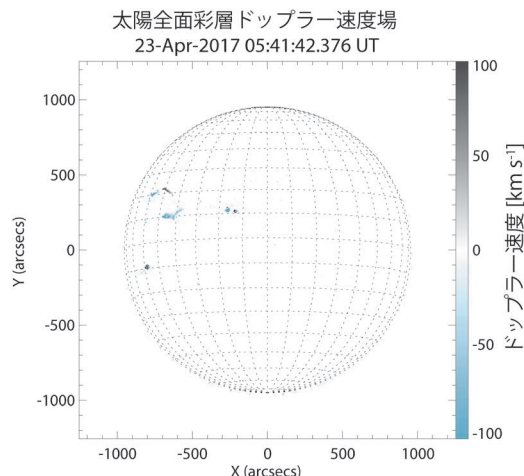


図14 2017年4月23日のフィラメント噴出時の太陽全面彩層ドップラー速度場。太陽面の北東部分(左上側)にある細長いブルーの領域が噴出しているフィラメント。視線速度は最大で $\pm 100 \text{ km s}^{-1}$ 程度。

るシステムを開発した。SDDIから得られた観測データは、ダーク・フラット処理の後フィラメントやプロミネンス等のクラウド領域の自動検出にかけられ、クラウドと判定された領域に対してクラウドモデルフィッティングが行われる。図14は2017年4月23日に発生したフィラメント噴出現象時における太陽全面彩層ドップラー速度場である。太陽面の北東部分(左上側)にてフィラメントが噴出している様子が捉えられている。このように、SDDIによる観測とクラウドモデルを組み合わせることで、太陽表面のどこで噴出現象が発生しても、高時間分解能でドップラー速度を導出することが可能となった。このような観測機器は他に類を見ず、非常にユニークなデータを取得することができるようになった。今後はLCT(Local Correlation Tracking)による噴出現象の見た目の運動速度と組み合わせることで、フィラメントやプロミネンスの噴出速度の3次元成分の導出を目指す。

6. ま と め

京都大学飛騨天文台で開発された、液晶遅延素子を用いたチューナブルフィルター TF40 を SMART 望遠鏡に組み込むことで、これまで捉えることのできなかった高速で噴出するフィラメントも観測可能な装置 SDDI による太陽観測が開始された。SDDI により、太陽のあらゆる場所で発生する噴出現象をモニタリングし、噴出速度の導出を行うことが可能となった。また、噴出前のフィラメント内部での速度分布の変化から噴出を予測することも提唱されており、より精度の高い噴出アラートシステムの構築に向けて研究が行われている。フィラメント噴出現象は、地球磁気圏ひいてはわれわれの社会生活へ及ぼす影響が重大視されるようになってきており、宇宙天気予報の信頼性の向上に対する SDDI が担う役割は今後ますます大きくなるものと期待される。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2017年に筆者らが発表した投稿論文^{6),9)}に基づいているので、詳しくはそれらをご覧くださいと存じます。天文月報編集委員の上野悟氏には今回の執筆の機会をいただき感謝いたします。

本研究は MEXT/JSPS 科研費 JP15H05812 「太陽地球圏環境予測：われわれが生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」、15H05814 「太陽嵐の発生機構の解明と予測」の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Bolduc, L., 2002, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 1793
- 2) McNamara, L. F., & Wright, C. S., 1982, *Nature*, 299, 537
- 3) Shimojo, M., 2014, in *IAU Symp. 300, Nature of Prominences and their role in Space Weather* (Cam-

- bridge University Press), 161
- 4) Ueno, S., et al., 2004, *Proc. SPIE*, 5492, 958
- 5) Hagino, M., et al., 2014, *Proc. SPIE*, 9151, 91515 V
- 6) Ichimoto, K., et al., 2017, *Sol. Phys.*, 292, 63
- 7) Beckers, J. M., 1964, Ph.D. Thesis (University of Utrecht)
- 8) Morimoto, T., & Kurokawa, H., 2003, *PASJ*, 55, 503
- 9) Seki, D., et al., 2017, *ApJ*, 843, L24
- 10) Nagashima, K., et al., 2007, *ApJ*, 668, 533
- 11) Isobe, H., & Tripathi, D., 2006, *A&A*, 449, L17
- 12) Chifor, C., et al., 2006, *A&A*, 458, 965
- 13) Tandberg-Hanssen, E., 1995, *The Nature of Solar Prominences* (Springer Netherlands), 105
- 14) Sterling, A. C., & Moore, R. L., 2004, *ApJ*, 602, 1024
- 15) Hillier, A., et al., 2012, *ApJ*, 761, 106
- 16) Hillier, A., et al., 2011, *ApJ*, 736, L1

Monitoring of Solar Eruptive Events by SMART/SDDI and its Application to the Space Weather Forecast

Kenichi OTSUJI¹, Daikichi SEKI², Takako T. ISHII³, and Kiyoshi ICHIMOTO⁴

^{1,3,4} Hida Observatory, Kyoto University, Kurabashira, Kamitakara-cho, Takayama, Gifu 506-1314, Japan

² Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, 1 Nakaadachi-cho, Yoshida, Sakyo-ku, Kyoto 606-8306, Japan

Abstract: The SMART (Solar Magnetic Activity Research Telescope) at Hida Observatory has been monitoring solar activity since 2003. We developed a new tunable filter using liquid crystal variable retarders as tuning elements and installed it as the SDDI (Solar Dynamics Doppler Imager) on the SMART. Using SDDI/SMART, three dimensional motion of filament eruptions can be determined up to a speed of 400 km s⁻¹ in line of sight. Also, an instabilizing process of solar filament before its eruption was detected in its internal motion by the SDDI. These observational information are important for space weather forecasting and expected to improve the forecasting model.