



## ケーデンス1秒以下を目指した太陽彩層の高速2次元 分光観測

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-04-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 當村, 一郎, 廣瀬, 公美 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007516">https://doi.org/10.24729/00007516</a>

# ケーデンス 1 秒以下を目指した太陽彩層の高速 2 次元分光観測

當村 一郎\*, 廣瀬 公美\*\*

High-speed 2-D Spectroscopy of the Solar Chromosphere Aimed at Achieving a Cadence of Less than 1 Second

Ichiroh TOHMURA\* and Kumi HIROSE\*\*

## ABSTRACT

In May 2017, we succeeded to obtain spectroheliograms in the  $H\alpha$  line ( $\lambda 656.3\text{nm}$ ) with cadences of less than 2 seconds with use of the Domeless Solar Telescope (DST) and the Horizontal Spectrograph (HS) at the Hida Observatory and a high-speed C-MOS camera which has a Gig-E interface. In this paper, preliminary results from the data of an active region NOAA15628 ( about 1.8 sec cadence ) are reported.

**Key Words :** sun, chromosphere, high-cadence spectroscopy

### 1. はじめに

太陽は我々人類の住む地球に最も近い恒星であり、地球環境に対して大きな影響を及ぼし続けていることは周知のとおりである(図 1)。このうち数分～数日スケールの短期的影響については、その多くが、太陽の「彩層」および「コロナ」と呼ばれる領域で起きるフレアやプロミネンス爆発のような活動現象に起因すると考えられている(図 2)。

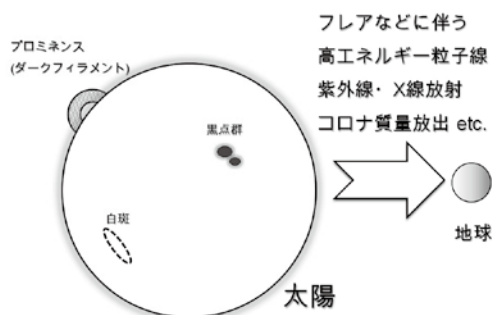


図 1 太陽～地球環境の模式図

また、太陽大気の温度は光球が約 6,000K であるのに対し、その外側の彩層は約 10,000K、さらに外側のコロナは約 100 万 K と、外側へ行くほど温度が高くなっている。太陽活動のエネルギー源が太陽深部にあること

2017 年 8 月 21 日受理

\* 総合工学システム学科 機械システムコース

(Dept. of Technological Systems : Mechanical Systems Course)

\*\* 京都大学大学院理学研究科附属天文台博士課程 2 年

(Hida Observatory, Graduate School of Science, Kyoto University)

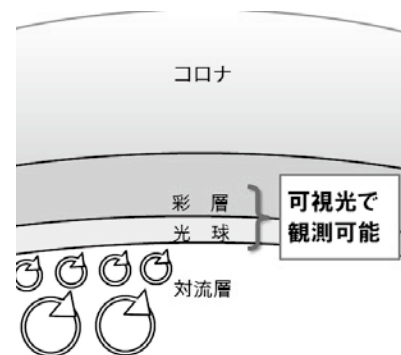


図 2 太陽大気構造の模式図

は間違いないので、エネルギーの流れを考えれば外側へ行くほど温度は下がるはずであるが、光球より外側では逆転しているのである。これをコロナ加熱の問題といい、太陽物理学における最難問の一つである。コロナ加熱にはフレアよりもずっと小さいエネルギー解放現象が寄与している可能性が従来から指摘されており、彩層やコロナはそのような加熱現象が起きていると考えられる舞台にもなっている。

太陽を観測するとき、地球大気がフィルターとなって紫外線や X 線はほとんど地表に届かないため、水素  $\alpha$  線 (波長 656.3 nm) や CaII K 線 (波長 393.3 nm) などの可視領域にあるスペクトル線で彩層を観測することが昔から行われている。さらに現在では、紫外線や X 線による観測は人工衛星やロケットのような飛行体を用い、地上からは電波や可視光で観測して、両者の結

果を総合し研究を進める手法が一般的である。その際、少しでも正確に物理量を求めようとするとき分光観測が望ましく、さらに2次元の領域を調べようと思うと、スペクトルを撮りながら太陽像をスキャンする2次元分光観測が必要となる。(通常、スペクトルは分光器の細長い入射スリットに入った光を回折格子等にあてて生成するので、一度に観測できる領域は1次元である。そこで、2次元的な広がりを持つ対象を分光観測したい場合は、観測中に太陽像を移動させつつ太陽面上の異なる場所のスペクトルを順次撮影するのである。)このようにして得たスペクトルから物理量を導出して描いたマップをスペクトロヘリオグラムという。

著者は高速度カメラを用いてスペクトロヘリオグラムの時間分解能(ケーデンス)の向上を目指す研究を続けてきた<sup>[1]-[8]</sup>。特に2015年10月の飛騨天文台における観測では、6個のCクラスフレアを高速分光観測により時間分解能6秒で捉えることに成功した<sup>[6]</sup>。また2016年10月の同天文台における観測では、それまで用いていたUSB3.0インタフェースではなくGig-Eインタフェースのカメラを用いることにより、108×70~140秒角の視野を2.0~3.3秒の時間分解能で安定して観測することに成功した<sup>[8]</sup>。

本研究では2017年5月に京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡(Domeless Solar Telescope)<sup>[9]</sup>と併設の水平分光器、および太陽像を高速スキャンするための回転ガラスブロックと、Gig-Eインタフェースを持つ高速C-MOSカメラとの組み合わせによる観測を行い、H $\alpha$ 線で見えた活動領域のスペクトロヘリオグラムを従来よりさらに高い1.8秒の時間分解能で連続観測することに成功したので報告する。

## 2. 観測

### 2-1. 観測装置

京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡は、地球の大気揺らぎの悪影響を避けるために気流を乱すドームを持たず、冷却パネルで覆われた高い塔の上に設置されている(図3)。望遠鏡から塔の中を下りてきた光は垂直分光器または水平分光器のいずれかに導かれ、高精度のスペクトルを生成する。今回の観測では水平分光器を用いた。水平分光器の直前には回転ガラスブロックを置き、太陽像の高速シフトを行う。シフトされた太陽光は水平分光器に入射し、スペクトルとなってポートから出てくるので、これを高速度カメラで撮像する。水平分光器室における観測機材のセッティング全体の状況を図4に示す。図中のAは上述の回転ガラスブロック、Bはアダプタ光学系と

高速度カメラである。AおよびBの拡大図を、それぞれ図5および6に示す。



図3 京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡(著者撮影)

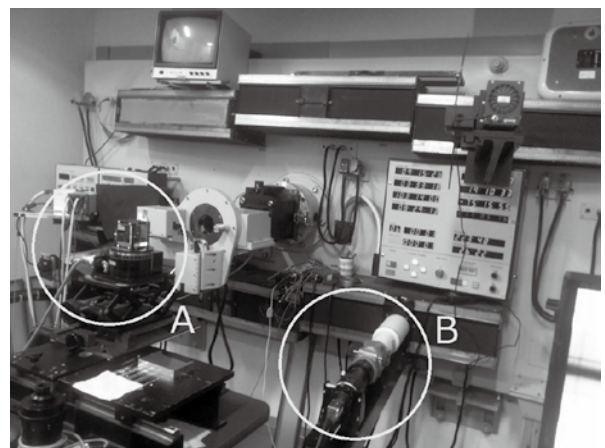


図4 観測機材のセッティングの状況(著者撮影)

図中Aは回転ガラスブロック、Bはアダプタ光学系と高速度カメラ。

スペクトルの撮像にはAVT社のMako-G030を使用した。インタフェースは上述のとおりGig-E、フルフレームサイズは644(H)×484(V)、センサはCMOSIS CMV300、ピクセルサイズは7.4×7.4 $\mu\text{m}^2$ 、AD変換のビット深さは10または12bit(今回の観測では12bit)。

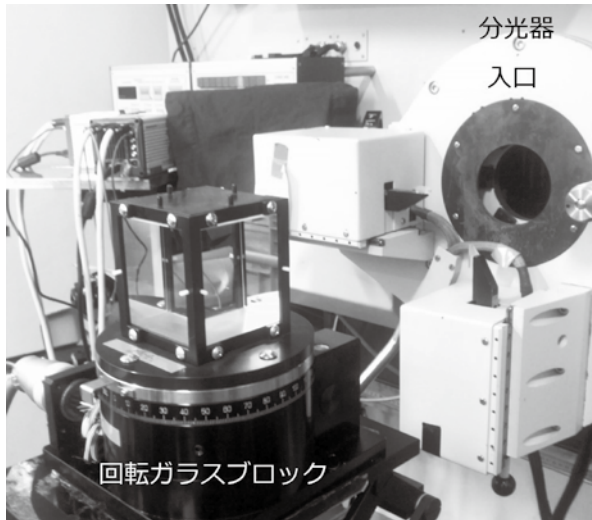


図 5 図 4 の A 付近の拡大図 (著者撮影)  
向かって左側から来た太陽光は、ガラスブロックを  
通って分光器入口に入射する。

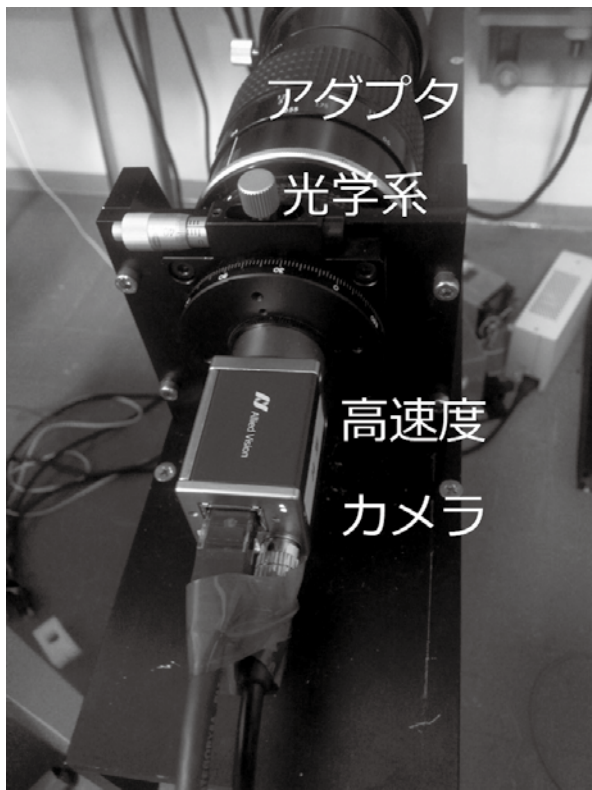


図 6 図 4 の B 付近の拡大図 (著者撮影)  
画面上方向から来たスペクトルは、アダプタ光学系を  
通ってカメラに入り撮像される。

フルフレームでの最大撮像速度は 309 fps @ 12 bit である (同社データシートによる)。撮られたスペクトル像は 12 bit Packed というファイル形式でいったん PC の内蔵 SSD に記録し、観測終了後に HDD に保存した。

## 2-2. 観測とデータの前処理

観測期間は 2017 年 5 月 15 日～19 日で、天候に恵まれ実際に観測できたのは同 17 日～19 日の 3 日間である。観測パラメータおよび観測リストを表 1 および 2 にそれぞれまとめた。

データの前処理 (熱ノイズの差し引きと感度むらの補正) は従前<sup>[5]</sup>と同様のため、フラット像を図 7 に、ダーク・フラット処理後のスペクトル像を図 8 に、それぞれ示すにとどめる。

波長較正の方法も従前<sup>[5]</sup>と同様であるが、今回はマーカーとして 1 回電離 Ti イオンによる波長 655.9576 nm 吸収線、中性 Si 原子による 656.0555 nm 吸収線 (ただし地球大気中の水蒸気による吸収線がブレンドしている)、中性 V 原子による 656.59 nm 吸収線の 3 本を用いた。これらはいずれも光球で形成されるので、ドップラーシフトによる波長のずれは太陽光球に相対的な値となる。ここで典型的なスペクトル線輪郭および放射強度は文献 [10] に、各スペクトル線の標準波長は文献 [11] に、それぞれ掲げた。観測から得られた平均スペクトル線輪郭を図 9 に、フィッティング結果を図 10 に、波長較正結果を図 11 に、それぞれ示す。

## 3. 解析

### 3-1. モーメント法による物理量導出

物理量の導出には、計算の破綻が少ないモーメント法 (積分のみで物理量を求める方法) を用いた。連続光強度  $I_{\text{cont}}$  については、できるだけ  $H\alpha$  線中心から離れ、かつ他の吸収線のブレンドがない波長域のデータを用いた。ただし、 $H\alpha$  線は非常に幅の広いスペクトル線であるので、今回取得したスペクトルの波長範囲には真の連続光部分が含まれていない。そこで、文献 [10] を用いて連続光強度を補正した。物理量の導出に用いた式を以下に示す。波長  $\lambda$  における明るさを  $I(\lambda)$ 、 $H\alpha$  線の中心波長を  $\lambda_0$  とするとき、

線の全強度 (Line Intensity)

$$I_{\text{line}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] d\lambda \dots (1),$$

線の中心波長 (Line Center)

$$\lambda_0 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] d\lambda} \dots (2),$$

線幅 (Line Width)

$$\Delta\lambda = \sqrt{2 \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] d\lambda}} \dots (3),$$

表 1 観測パラメータ

分光器の セッティング	H $\alpha$ 使用グレーティング G1 出射ポート 2	1 次スペクトル グレーティング角 26°22' 出射位置 38.5 cm	高次光カットフィルタ なし
カメラの セッティング	ビニングなし 露出 6.000 ms	ゲイン 0 フレームレート 160 fps	ガンマ 1.0 ファイル形式 MONO12packed

表 2 観測リスト

観測月日	活動領域番号 <sup>[12]</sup>	太陽面上の位置	スキャン幅	時間分解能
5/17	NOAA12656	r=14'17", p=030°38', i=171°14'	20 arcsec	0.98 sec
			40 arcsec	1.39 sec
5/18	NOAA12658	r=13'09", p=078°20', i=205°15'	40 arcsec	1.39 sec
			60 arcsec	1.84 sec
	NOAA12656	r=12'25", p=054°01', i=205°11'	70 arcsec	2.04 sec
5/19	NOAA12656	r=09'48", p=046°54', i=054°39'	70 arcsec	2.04 sec
	NOAA12658	r=10'18", p=078°36', i=098°20'	60 arcsec	1.84 sec
	Dark Filament	r=12'08", p=064°48', i=098°31'	150 arcsec	3.64 sec

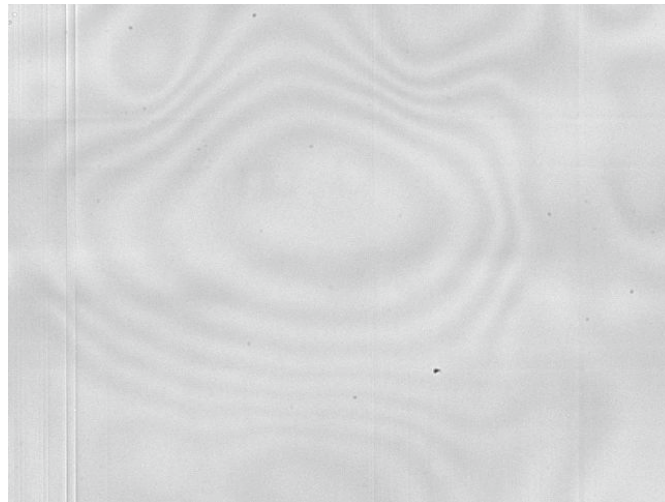


図 7 平均フラット画像 (スペクトル線を消したもの)

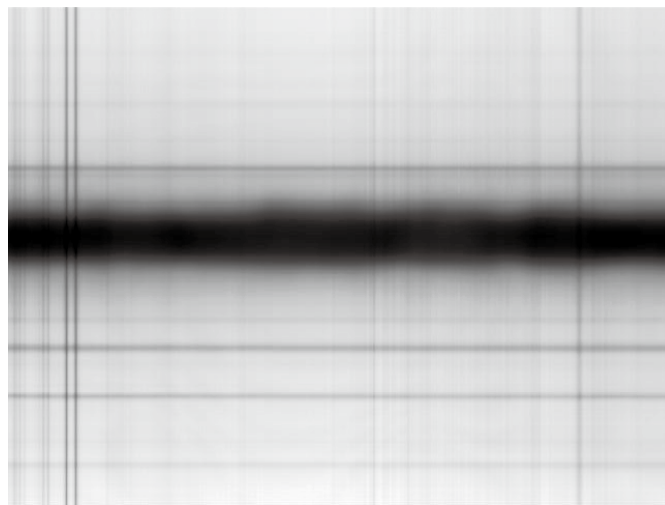


図 8 平均スペクトル画像 (ダーク/フラット処理済み)

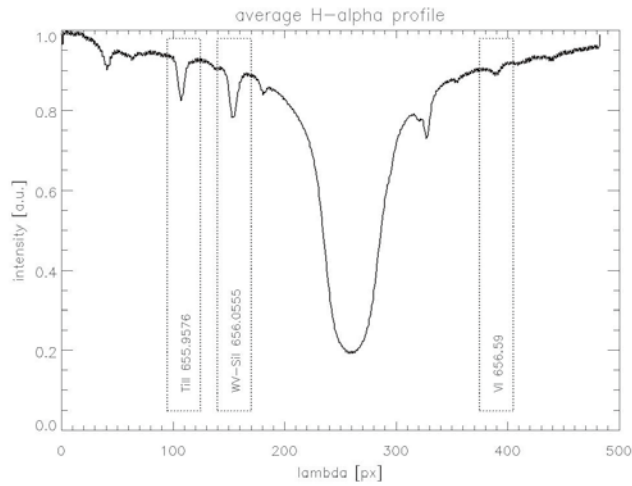


図 9 平均スペクトルのプロファイル (波長較正前)

横軸は波長 (単位はピクセル), 縦軸は光の強度 (単位は任意). 枠で囲んだ 3 本の吸収線が波長較正に用いた光球のスペクトル線. 中央の太い吸収線が  $H\alpha$  線.

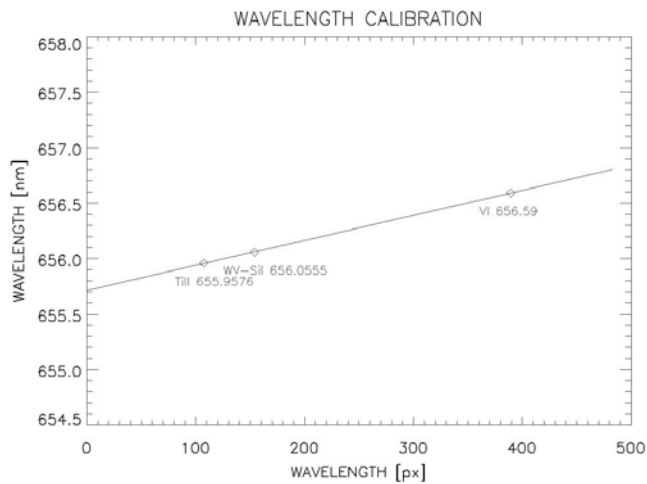


図 10 波長較正のフィッティング結果

横軸は波長 (単位はピクセル), 縦軸は較正後の波長 (単位は nm). 直線は理論値, 菱形は観測値.

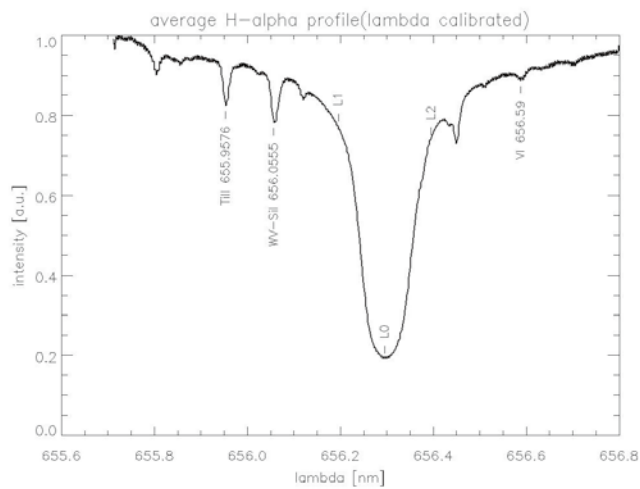


図 11 平均スペクトルのプロファイル (波長較正後)

横軸は波長 (単位は nm), 縦軸は光の強度 (単位は任意).

等価幅 (Equivalent Width)

$$EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\text{cont}} - I(\lambda)] d\lambda / I_{\text{cont}} = I_{\text{line}} / I_{\text{cont}} \cdots (4).$$

ここで,  $\lambda_1, \lambda_2$  はそれぞれ図 11 の L1, L2 に対応する。また, 平均的な H $\alpha$  線中心を図 11 の L0 で示す。

### 3-2. 解析結果

5 月 19 日 06:55JST からの NOAA12658 の時系列スペクトロヘリオグラムを図 12~15 に示す。各行内の図は左から連続光強度  $I_{\text{cont}}$ , 線強度  $I_{\text{line}}$ , 線中心  $\lambda_0$ , 線幅  $\Delta\lambda$ , 等価幅  $EW$ , 時間は上から下に向けて経過しており, 各行の時間間隔はおおよそ 1.8 秒である。連続光強度図や線強度図の左上に並ぶ暗点は黒点で, 図の左が天の北極方向で, 左斜め上方が太陽中心の方向である。各視野の横幅はおおよそ 60 秒角, 高さはおおよそ 110 秒角である。ただし, ガラスブロックによる像移動の特性上, ブロックの向きによって像移動の速さが変化するため, 図のアスペクト比はあまり厳密でない。各図の微細構造が時間と共に大きく変形している場合があるが, これは太陽面上の高速変動現象ではなく, 地球大気揺らぎの変動やイメージシフトと高速撮像のシステム側に起因すると考えられる。

### 4. 考察とまとめ

今回は補償光学系を使用していないため, 地球大気揺らぎの影響がやや強く出ているが, 図 12~15 から判るように太陽活動領域の様子が 2 秒以下の時間分解能で 2 次元的に捉えられている。地球大気揺らぎの補正は補償光学系を用いることでかなりの程度実現できるので, 今後は像移動と撮像速度の一様性を検証しつつ, さらに短いケーデンスでの観測を実現したい。ケーデンスが現在の目標である 1 秒を切れば, フレアのような高速変動現象にもじゅうぶん追従でき, 太陽プラズマのダイナミクスの解明に貢献できるものと期待される。

### 参考文献

[1] 「FASTCAM による太陽超高速撮像の試み」 當村一朗, 北井礼三郎, 井田民男 (1999) 大阪府立工業高等専門学校研究紀要, 第 33 巻, 65-69 頁。  
 [2] 「超高速ビデオカメラによる太陽スペクトル撮像の試み」 當村一朗, 井田民男, 上野悟, 北井礼三郎 (2002) 日本天文学会春季年会。

### 謝辞

[3] 「超高速ビデオカメラによる太陽スペクトル撮像の試み (II)」 當村一朗, 井田民男, 上野悟, 北井礼三郎 (2003) 日本天文学会春季年会。  
 [4] 「高速カメラを用いた太陽の疑似 3 次元分光」 當村一朗 (2014) 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, 第 48 巻, 15-22 頁。  
 [5] 「飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡と高速カメラを用いた高時間分解能スペクトロヘリオグラム」 當村一朗 (2015) 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, 第 49 巻, 21-28 頁。  
 [6] 「2015 年 10 月 19 日~23 日に発生した C クラスフレアの高速度 2 次元分光観測」 當村一朗, 上野悟, 一本潔 (2016) 日本天文学会春季年会。  
 [7] 「太陽彩層活動現象の高速分光観測」 當村一朗 (2016) 大阪府立大学工業高等専門学校研究紀要, 第 50 巻, 29-38 頁。  
 [8] 「太陽彩層の 2 次元高速分光観測」 當村一朗, 上野悟, 一本潔 (2017) 日本天文学会春季年会。  
 [9] "Domeless Solar Tower Telescope at the Hida Observatory" Nakai Y. and Hattori A. (1985) Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ. Series of Phys. Astrophys. Geophys. Chem., No.36, pp.385-399.  
 [10] パリ天文台ホームページ <http://bass2000.obspm.fr/>.  
 [11] "The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å : Second Revision of Rowland's Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths" Moore, Minnaert, Houtgast (1966) <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc13249/m1/> (UNT Digital Library, University of Texas).  
 [12] NASA/ESA による SOHO 衛星ホームページ <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>.

高速カメラと回転ガラスブロックを用いた高速分光観測の機会を与えていただいた京都大学理学部附属飛騨天文台各位に, とりわけ観測の実施にあたり終始手厚いサポートをいただいた上野悟助教, データの解析にあたり貴重なご示唆をいただいた一本潔教授に, それぞれ厚く御礼申し上げます。

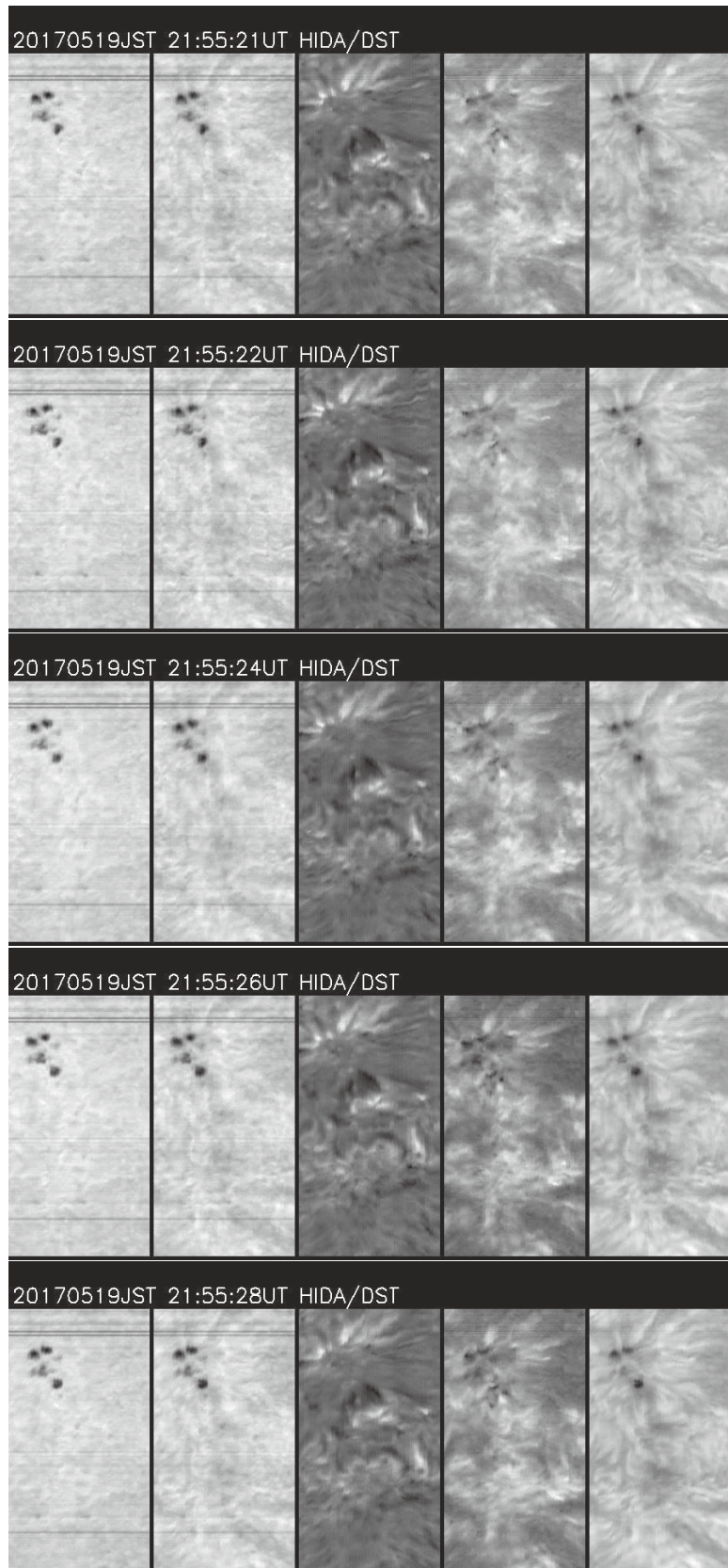


図 12 NOAA12658 の H $\alpha$  時系列スペクトロヘリオグラム (1)

各時刻とも向かって左から連続光強度，線強度，中心波長，線幅，等価幅．各行の時間間隔はおよそ 1.8 秒．視野の横幅はおよそ 60 秒角，高さはおよそ 110 秒角．(図 15 まで同様)



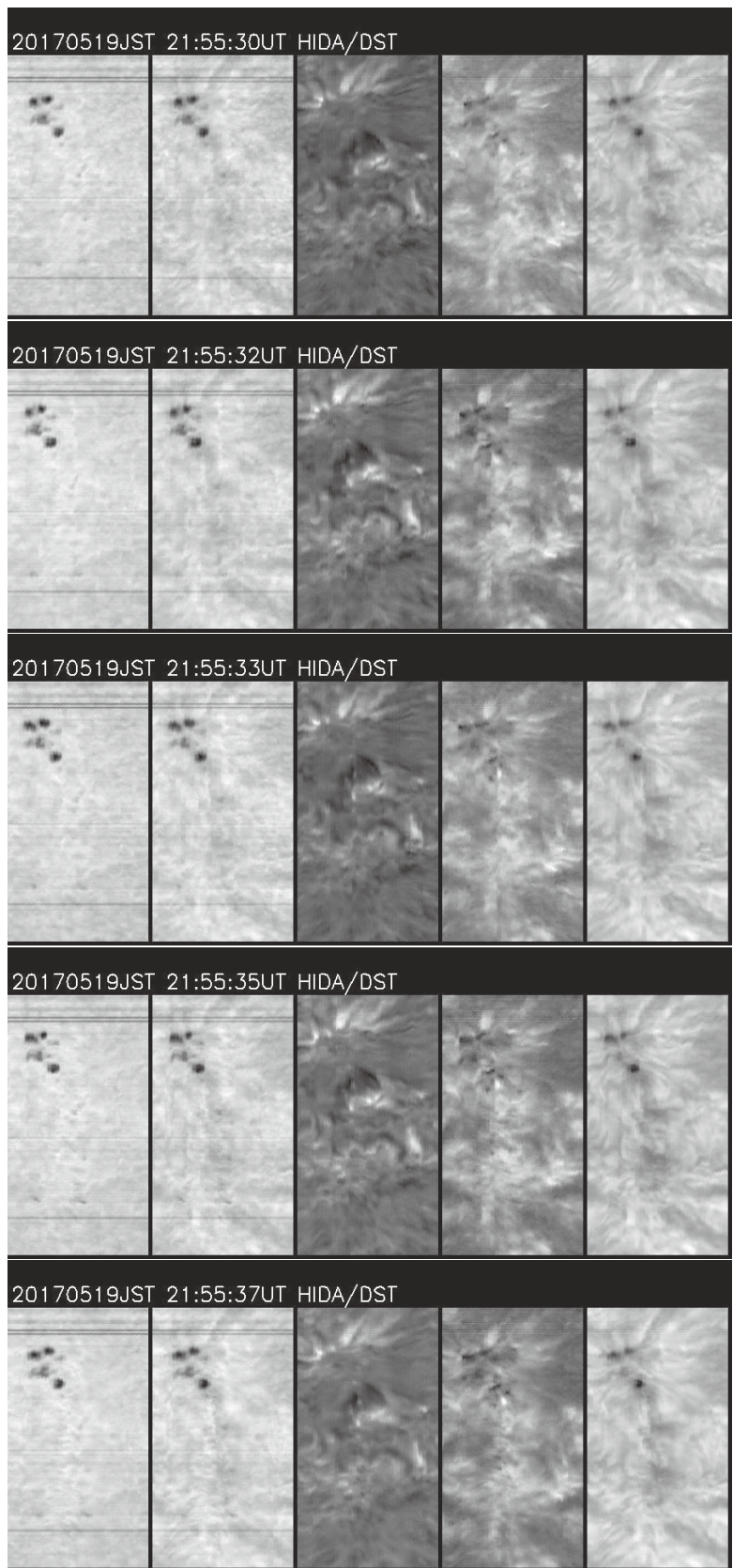


図 13 NOAA12658 の H $\alpha$  時系列スペクトロヘリオグラム (2)  
図 12 の続き. 各図の意味等は図 12 に同じ.

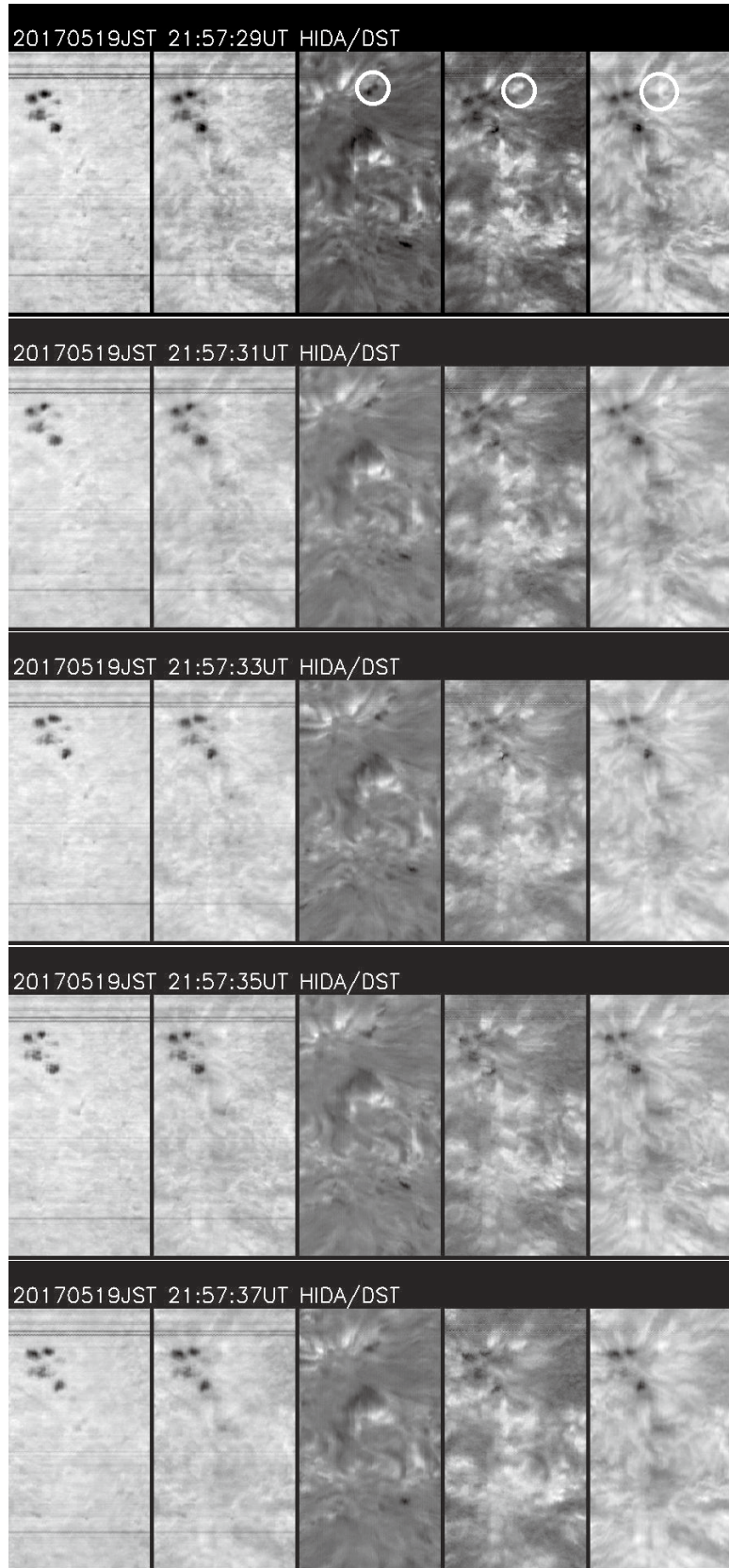


図 14 NOAA12658 の H $\alpha$  時系列スペクトロヘリオグラム (3)

図 13 より約 2 分後、各図の意味等は図 12 に同じ。黒点近傍において、図 12 の中心波長図では不明瞭であった青方偏移の構造 (○印) が成長している。この変化は線幅図および等価幅図でも捉えられている。

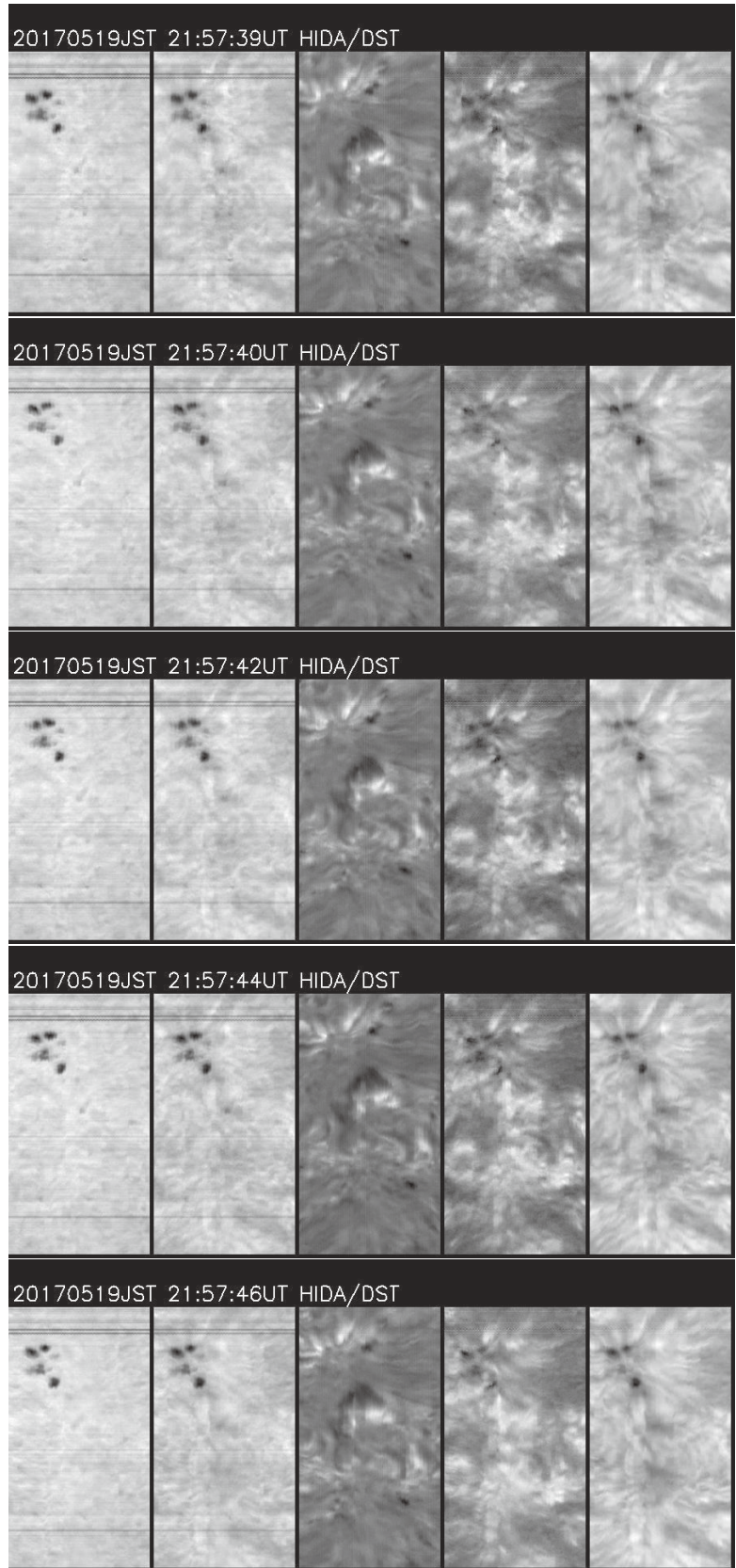


図 15 NOAA12658 の H $\alpha$  時系列スペクトロヘリオグラム (4)  
 図 14 の続き. 各図の意味等は図 12 に同じ.