大阪公立大学
Osaka Metropolitan University
学術情報リポジトリ

太陽彩層活動現象の高速分光観測

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-02-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 當村, 一朗 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007527

太陽彩層活動現象の高速分光観測

當村 一朗*

High-speed Spectroscopic Observation of Solar Chromospheric Active Phenomena

Ichiroh Tohmura*

ABSTRACT

The importance of high-speed spectroscopy has been recognized to study rapid solar active phenomena such as flares. In May 2016, we observed the solar active regions with the Domeless Solar Telescope (DST) at the Hida Observatory and a high-speed C-MOS camera to obtain spectroheliograms in the Hα line (λ656.3nm) with a cadence of 7 seconds. Adaptive optics was inserted in front of the spectrograph to decrease the affection of the disturbance of the telluric atmosphere. In this paper, the results from our preliminary analysis are reported.

Key Words : sun, chromosphere, visible spectrum, high temporal resolution

1．はじめに

地球環境にも大きな影響を与える太陽活動現象は主に彩層とコロナにおいて観測されるが，通常の光学観測では，コロナはほとんど見えないためもっぱら彩層が観測される．彩層像の例として，LUNT 社製口径 10cm 望遠鏡と Hα フィルタ (中心波長 656.3nm，半値幅 <0.07nm) によるフィルタグラムを図 1 に示す．Hα 線は，彩層を観測するために，可視域では最もよく使われる中性水素原子のスペクトル線で，通常は吸収線である．太陽面左側に見える細長く暗い模様はダークフィラメント，中央やや左下の小さい暗部が黒点，太陽面に散在する白い模様はプラージュと呼ばれる明るい領域である．

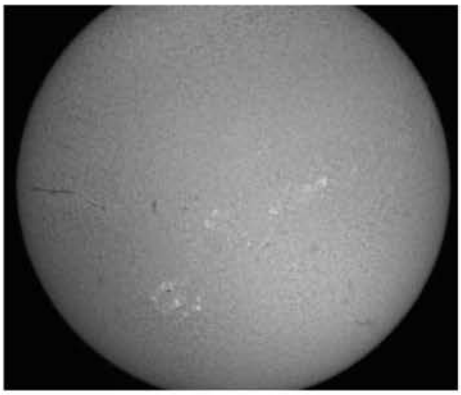

図 1 口径 10cm 望遠鏡による太陽全面像 (著者撮影)

2016 年 8 月 22 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)

このような活動現象の物理状態を調べたいとき，スペクトルを用いた分光観測は重要な手法となる．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，活動領域 (ごく簡単には黒点群と思ってよい) のように 2 次元的な広がりを持つ対象を観測したい場合は，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か，スペクトルは生成せずに超狭帯域のフィルタを用いて単色像を撮影する必要がある．

前者の方法を用いた場合は，太陽スペクトルのうちごく狭い波長範囲 (通常 0.1nm 程度) だけの単色光像 (スペクトロヘリオグラム) を作成することができる．スペクトロヘリオグラムは光の強度だけでなく，スペクトル線の幅や，光のドップラー効果に起因する波長のずれ等の物理量を用いて描くこともできるので，太陽面の物理状態を 2 次元的に調べる時に非常に有用である．従来はスペクトロヘリオグラムの時間分解能は数十秒から数分であったが，フレアのように秒単位で変化する現象を研究するためには，スペクトロヘリオグラムの時間分解能も同程度かそれ以上であることが必要なため，2 次元分光観測の時間分解能を上げることは近年の太陽分光観測における重要な課題となっている．

著者は高速度カメラを用いて 1 枚のスペクトルの撮像時間をできるだけ短くすることにより，1 枚のスペクトロヘリオグラムの作成に要する時間，すなわち 2 次元分光観測の時間分解能を向上させる研究を続けてきた

[1]–[5]．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捉えることに成功し，例えば同 21 日 05:31～06:09UT(世界時) のフレアでは，90 秒角× 140 秒角の領域のスペクトロヘリオグラムを 1 枚あたり 6 秒の時間分解能 (cadence) で約 40 分間にわたり継続的に取得することができた [6]．

これらを踏まえて，本研究では 2016 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)，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，さらに地球の大気揺らぎによる太陽像の劣化を補正するための補償光学系 (Adaptive Optices) と，高速 C-MOS カメラとの組み合わせによる観測を行い，水素 α 線 (Hα 線，波長 656.3nm) で見た太陽 (図 1) のスペクトロヘリオグラムを 7 秒の cadence で連続的に得ることができた．本稿では，その初期解析の結果を報告するとともに，今後の課題についても検討する．

2．観測

2－1．観測装置

前述のとおり観測は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 [7] および水平分光器を用いて行った．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冷却パネルで覆われた高い塔の上に設置され，かつ気流を乱すドームを持たない (図 2)．今回は，望遠鏡から出た光が分光器に入る手前に，同天文台に設置されている補償光学系を挿入し，地球の大気揺らぎの悪影響をさらに減らした状態で観測した．

図 2 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)

スペクトルの撮像に用いたカメラは PixeLink 社製 PL-D732 である．センサは C-MOS でグローバルシャッタを有し，フルサイズの画素数は 2048 ピクセル× 1088 ピクセル，ピクセルサイズは 5.5μm × 5.5μm，センサの有効面積は 11.26mm × 5.98mm，ビット深さは 8 または 10bit(今回の観測では 10bit)，PC とのインタフェースは USB3.0，フルフレームレート (理論値) は 170fps(frame per second) である (同社データシートによる)．今回の観測では水平分光器のスペクトル出口に高速度カメラを取り付け，定速回転する立方体ガラスブロックで太陽像を高速移動しながら連続的にスペクトルを撮像した．観測時の機器セッティングを図 3 に示す．図 3 の (A) は回転ガラスブロック，(B) は分光器入射スリット，(C) はスペクトル出口 (撮像用光学系と遮光カバーに覆われているのでスペクトル自体は見えない)，(D) は C-MOS カメラ (白い円内) である．撮像データは 16bit の TIFF ファイルとして連続的に PC に送られ，SSD にいったん貯め込まれて，観測終了後に HDD に保存される．

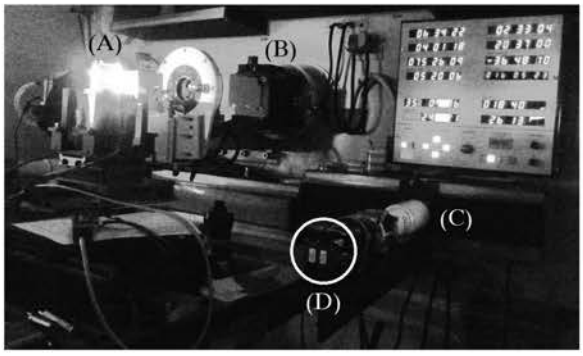

図 3 観測時の機器セッティング (著者撮影)

2－2．観測とデータの前処理

観測期間は 2016 年 5 月 23 日～27 日で，天候の関係で実際に観測できた日は同 23 日，24 日，27 日であった．太陽面上の活動領域 (黒点群) を主要なターゲットとし，Hα 線 (波長 656.3 nm) の 1 次のスペクトルを撮影した．このとき回折格子は G2 を用い，回折格子の回転角は 26°13’，高次光カット用のフィルタを併用した．また，7 秒 cadence で撮影するためガラスブロックの回転周期は 28 秒とし，1 回転する間に 4 枚のスペクトロヘリオグラムが取得できるようにした．7 秒間に平均およそ 440 コマ撮像したので，実効フレームレートは 62.9fps となった．(ただし実効フレームレートは完全に一定ではなく数％程度の揺らぎが生じた．) 撮像は実効フレームレートが比較的安定している 80 秒間連続して行い，これを観測可能な間繰り返した．補償光学系の動作は，tip tilt mirror は常時 ON，deformable mirror は大気揺らぎの状況が良いときのみ ON とした．

スペクトルの露出時間は 8 ミリ秒，カメラのゲインは 7.6 に設定した．露出時間を短くするためとノイズ

を低減するためにカメラ上で 2 × 2 のビニングを行ったので，実際の画素数は波長方向に 544 ピクセル，空間方向 (スリットに沿う方向) に 1024 ピクセルとなり，スペクトロヘリオグラム 1 枚の視野は縦方向 (スリットに沿う方向) に 253 秒角 (1 ピクセルあたりの空間分解能は 0.247 秒角) となった．また，スリット幅を 100μm としたので，横方向 (スリットに垂直な方向＝太陽像スキャンの方向) の空間分解能の上限は 0.64 秒角，横方向の視野は 280 秒角となるが，スキャン両端ではガラスブロックの枠によるケラレが発生するため注意が必要である．以上からスペクトロヘリオグラム 1 枚の視野の大きさはおよそ 250 秒角 (縦) × 280 秒角 (横)，太陽面上で 1 秒角はおよそ 720km に相当するので，実視野はおよそ 18 万 km × 20 万 km となる．なお，Hα フィルタによるモニタ像も適時撮影した．

スペクトル像の前処理 (熱ノイズの差し引きと感度むらの補正) は前稿 [5] と同様のため詳細は割愛し，サンプルのみ図 4～6 に示す．いずれも縦軸は波長 (単位はピクセル)，横軸は空間方向 (250 秒角) である．

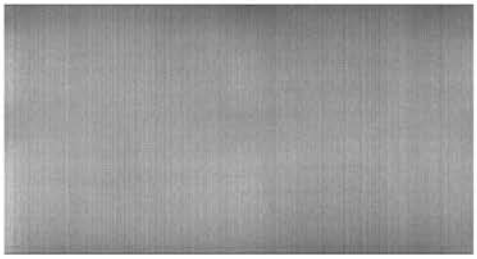

図 4 平均ダーク画像
縦軸は波長 (単位はピクセル)，横軸は空間方向 (長さ 250 秒角)．(図 6 まで同じ)

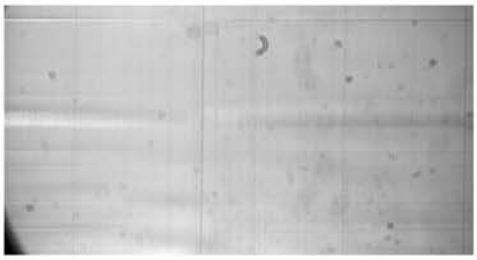

図 5 平均フラット画像 (スペクトル線を消したもの)

図 6 平均スペクトル画像 (ダーク/フラット処理済み)

波長較正には中性 Si 原子の波長 655.5466nm 線,1 回電離 Ti イオンの波長 655.9576nm 線, 中性 Fe 原子の波長 656.9224nm 線の 3 つの吸収線を用いた．これらはいずれも主に光球 (肉眼で見える大気層) で形成されるので，以降の解析で導出される太陽プラズマの速度は光球に対するものとなる．以上を図 7 に示す．横軸は波長 (単位はピクセル)，縦軸は光の強度 (単位は任意) である．(図中央の深い吸収線が Hα 線である．) 典型的なスペクトル線輪郭および放射強度は文献 [8] に，各スペクトル線の標準波長は文献 [9] に，それぞれ拠った．波長較正結果を図 8 に示す．横軸は波長 (単位は nm)，縦軸は光の強度 (単位は任意) である．図 8 に描き込まれた 5 つの枠 (A)～(E) については次節で説明する．

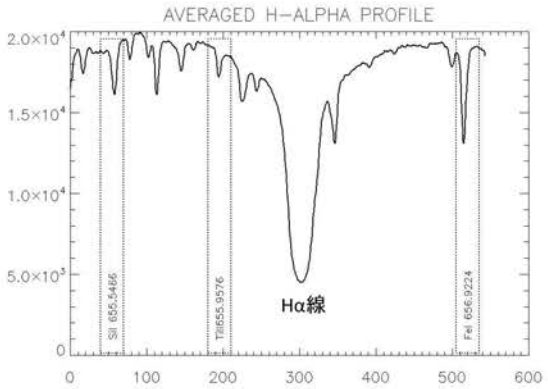

図 7 平均スペクトルのプロファイル (波長較正前)
横軸は波長 (単位はピクセル)，縦軸は光の強度 (単位は任意)．枠で囲んだ 3 本の吸収線が波長較正に用いた光球のスペクトル線．中央の太い吸収線が Hα 線.

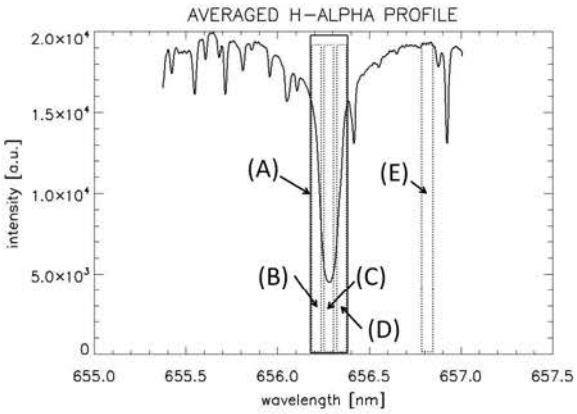

図 8 平均スペクトルのプロファイル (波長較正後)
横軸は波長 (単位は nm)，縦軸は光の強度 (単位は任意)．図中の枠 (A)～(E) については本文参照.

3．解析と結果

以下では 2016 年 5 月 24 日 06:54:16UT から観測に成功した Hα フレアのスペクトルデータの解析と結果につ

いて述べる．GOES 衛星によると，このフレアに伴う X 線増光は B クラスで [11]，フレアとしてはごく小規模なものである．観測領域の太陽面上での位置は，太陽面中心からの見かけの距離 $r = 12°31'$, 天の北極を基準とした位置角 $p = 243°35'$，活動領域番号は NOAA12546 で，シンプルな形状の黒点を中心とする活動領域である [10]．本研究では (1) フィルタグラムのエミュレーション，(2) モーメント法による物理量導出の 2 通りの解析手法を用いた．

3－1．疑似フィルタグラム

通常見慣れているフィルタグラムとの比較が容易なため，疑似フィルタグラムを作成した．図 8 の枠 (B)(C)(D) の中心波長は Hα 線中心に対してそれぞれ-0.07nm，±0nm，+0.07nm だけずらしてあり，Hα 線の'blue wing'，'center'，'red wing' と呼ばれる．各枠の波長方向の幅は 0.05nm とした．このようにして決めた枠 (B)(C)(D) 内の放射強度を波長方向に積分し，それぞれ'blue wing'，'center'，'red wing' の放射強度とした．

3－2．モーメント法による物理量導出

図 8(A) の部分を Hα 線の中心部と考え，この波長範囲 ($\lambda_1 \sim \lambda_2$ とする) のデータを用いて物理量を導出した．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．連続光強度については，できるだけ Hα 線中心から離れ，かつ他の吸収線のブレンドがない図 8(E) のデータを用いたが，図 8(E) の波長範囲には真の連続光部分がないため，このままでは以下の (1)～(3) 式右辺の $I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)$ の引き算が正しい答えを与えないので，文献 [8] を用いて真の連続光強度に換算した．

物理量の導出に用いた式を以下に示す．波長 λ における明るさを $I(\lambda)$，Hα 線の中心波長を λ_0 とするとき，

線の全強度 (Total Intensity)

$$I_{\mathrm{tot}} = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} [I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)]\, d\lambda \quad \cdots (1)$$

線の中心波長 (Line Center)

$$\lambda_0 = \frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} [I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)]\, \lambda d\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} [I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)]\, d\lambda} \quad \cdots (2)$$

線幅 (Line Width)

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} [I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)]\, (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} [I_{\mathrm{cont}} - I(\lambda)]\, d\lambda}} \quad \cdots (3).$$

ここで I_{tot} は，図 8(A) で吸収されている部分の面積に，λ_0 はその重心に，それぞれ対応する．また，スペクトル線の輪郭がガウス型の場合には $\Delta\lambda$ は標準偏差に比例する．

3－3．解析結果

05:58:07UT に撮影した Hα モニタ像を図 9 に示す．画面中央の傾いた黒線は分光器入射スリットの像である．生成したスペクトロヘリオグラムのアスペクト比は図 9 と比較して確認した．

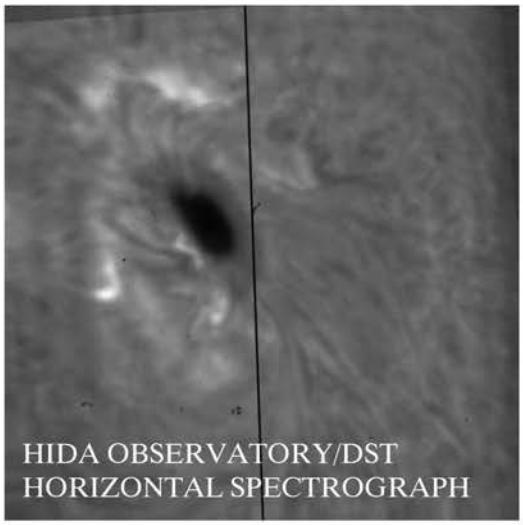

図 9 観測領域の Hα モニタ像 (05:58:07UT)

解析結果を図 10～12 に示す．各図の高さはおよそ 250 秒角 (太陽面上の実距離で 18 万 km) である．各図の幅はフレームレートの変動により変わるので，平均フレームレートの場合のアスペクト比に合わせた．また，カメラのフレームレートが平均値の 5 %以上揺らいだときのデータは省いた．各図とも向かって左から右へ順に，

(1) Hα 線'blue wing' 像 (Hα 線中心から 0.07nm だけ短波長側で見た太陽像)，
(2) Hα 線'line center' 像 (Hα 線中心で見た太陽像)，
(3) Hα 線'red wing' 像 (Hα 線中心から 0.07nm だけ長波長側で見た太陽像)，
(4) Hα 線連続光像 (Hα 線近傍の連続光で見た太陽像)，
(5) Hα 線 Total Intensity 図 (Hα 線の全吸収量の分布，明るいところが吸収が強い)，
(6) Hα 線 Line Shift 図 (Hα 線中心の波長シフトの分布，明るいところが赤方偏移，暗いところが青方偏移)，
(7) Hα 線 Line Width 図 (Hα 線線幅の分布，明るいところが幅が広い)

を示す．観測時刻は，図の最下段に示す't_0' を起点とする相対的な時刻を，各時刻で一番左側のマップに秒単位で記した．

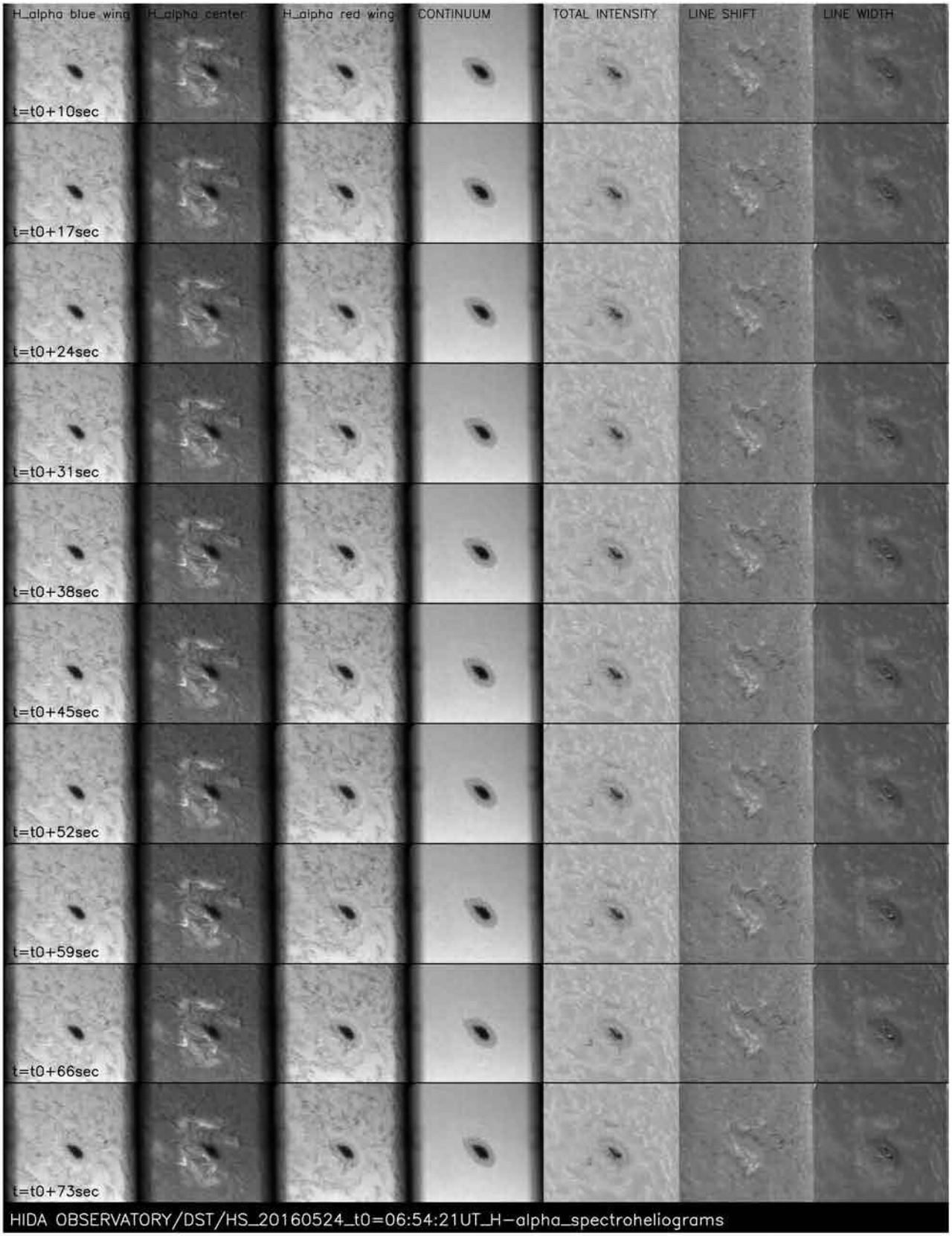

図 10 スペクトロヘリオグラム，t_0 =06:54:21UT(詳細は本文参照)

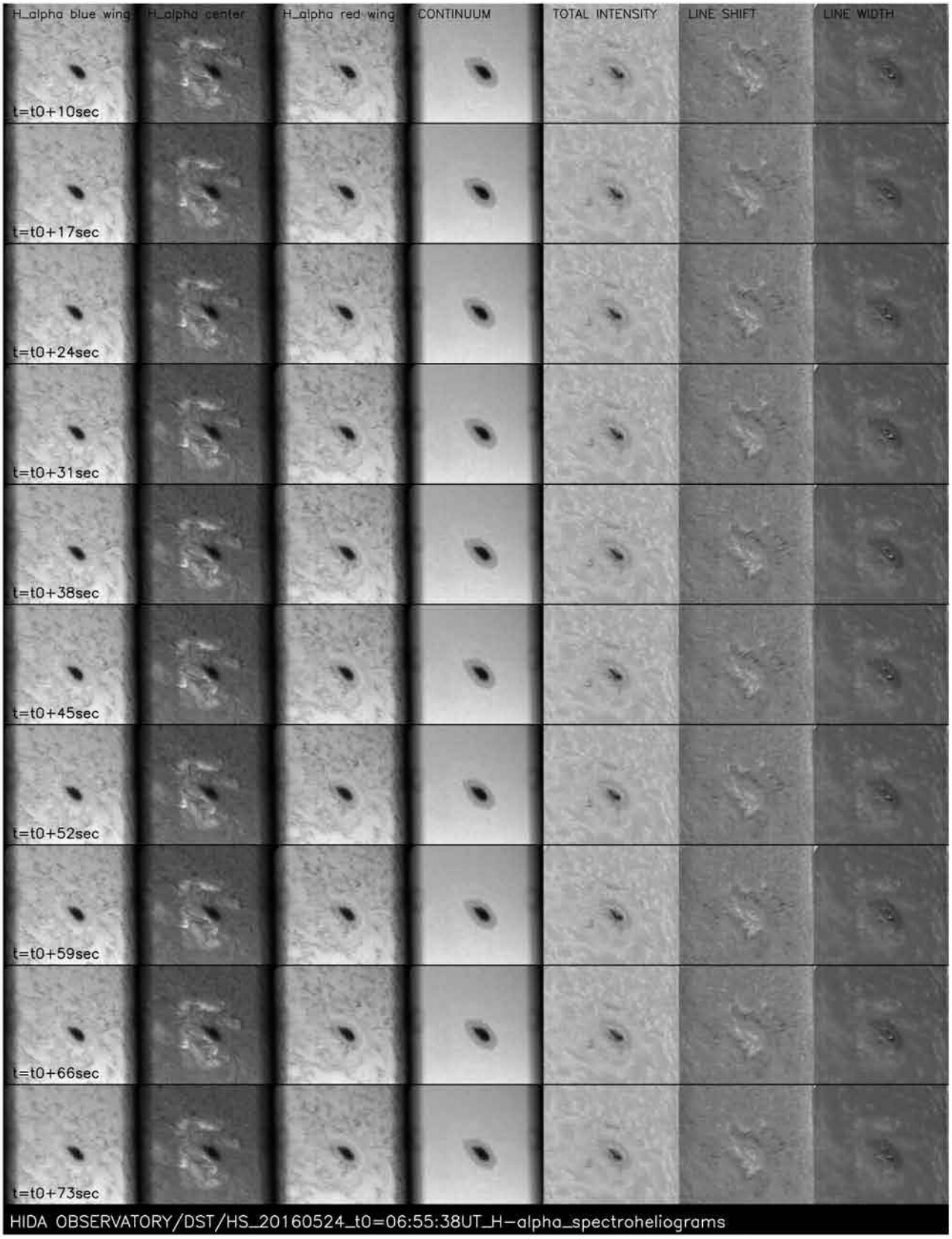

図 11 スペクトロヘリオグラム，t_0 =06:55:38UT(詳細は本文参照)

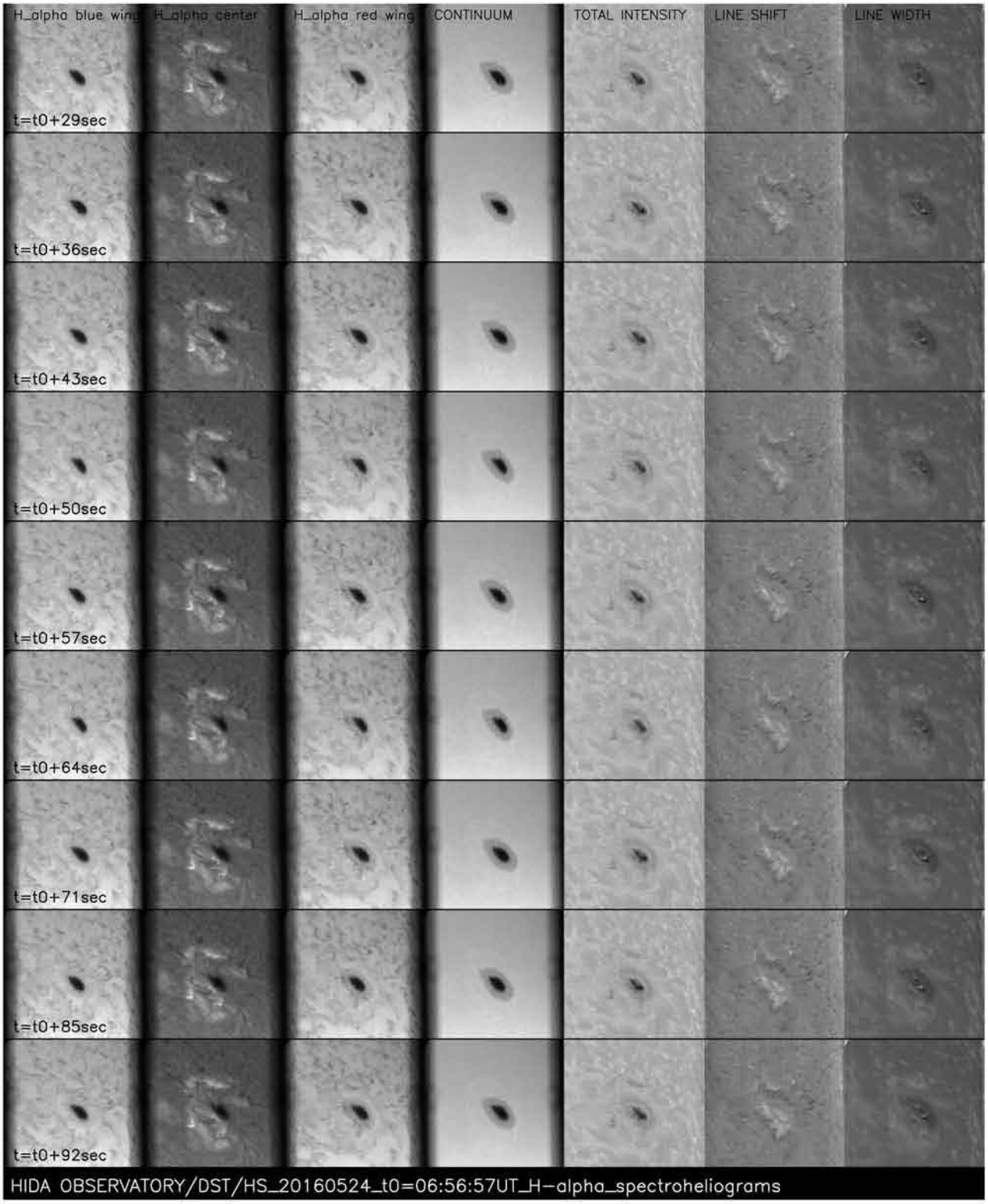

図 12 スペクトロヘリオグラム，t_0 =06:56:57UT(詳細は本文参照)

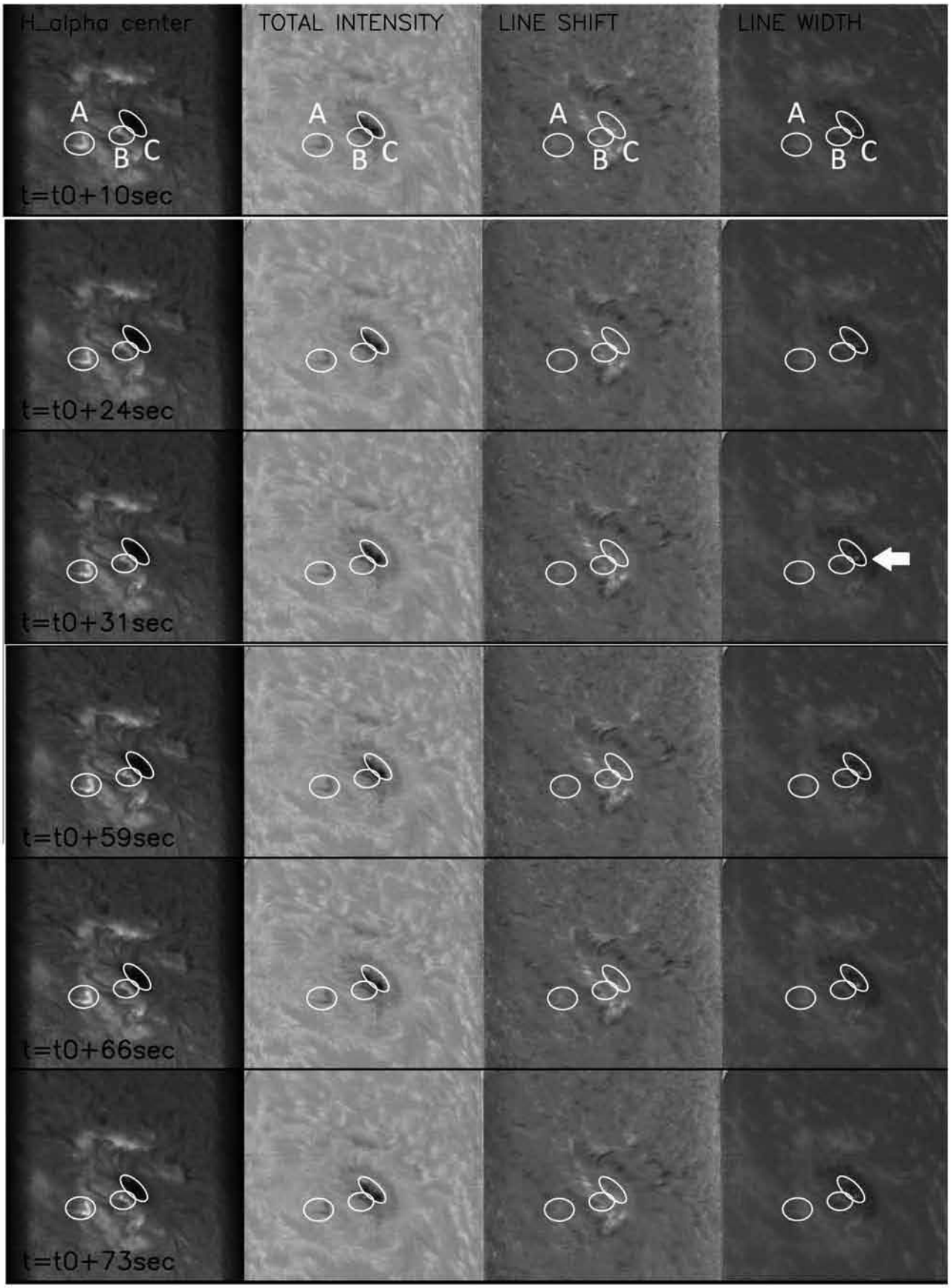

図 13 スペクトロヘリオグラム，図 10 の抜粋 (詳細は本文参照)

4．考察

図 10～12 を見ると，いずれも解析の破綻もなく，疑似フィルタグラム，物理量のマップともに安定して生成できている．図 12 においては時刻が 7 秒おきでない箇所があるが，これはカメラのフレームレートの揺らぎが大きい部分を省いたためであり，それ以外の個所は約 4 分間にわたり 7 秒 cadence で安定して撮像できていることが判る．

見やすさのため図 10 の黒点近傍の Hα 線中心像と total intensity マップ，line shift マップ，line width マップのみをいくつかの時刻について切り出したものを図 13 に示す．図の A，B はフレアカーネルと呼ばれ，フレアによる彩層加熱が起きている領域である．C は黒点の暗部 (中心部) である．これらの領域に注目して見ていくと，

(1) カーネル A，B にはいずれの物理量マップでもほとんど時間変化が見られない，

(2) 同じく A，B はスペクトル線のシフトがほとんどないが，線幅は周囲より大きい，

(3) 領域 C の右端には線幅が周囲より大きい場所があり，最初の 30 秒間はほとんど変化がないが，t_0+31sec から幅が広がり始め (図の白い矢印)，t_0+66sec まで続いたのち t_0+73sec では元に戻っている，

のような興味深い特徴を見ることができる．どの物理量の時間空間変動を見たいかによって，後から追加で解析することがいくらでも可能であり，これこそがスペクトロヘリオグラムの強みであると考える．

次に，カメラのフレームレートの揺らぎについて検討する．図 10～12 に示した 3 つの観測シーケンスのそれぞれについて，7 秒あたりの平均コマ数 (ave) と標準偏差 (dev)，および相対誤差 (err) は，

図 10　ave=445.6 dev=6.687 err=1.50 %

図 11　ave=444.4 dev=5.582 err=1.26 %

図 12　ave=428.8 dev=14.04 err=3.27 %

であった．ただし，これらは 7 秒あたりのコマ数が平均より 5 %以上揺らいだ場合を除いているので，全データについての揺らぎはさらに大きいと考えられる．

フレームレートの揺らぎはカメラ本体，データ転送のインタフェース，データを受ける側の PC，データを記録する媒体のいずれによっても起こりうることであるので，問題の切り分けが必要である．

5．まとめ

2016 年 5 月 23 日～27 日に京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡，水平分光器，補償光学系，回転ガラスブロック，および高速度カメラを用いた太陽彩層の高速分光観測を行い，Hα 線による視野およそ 250 × 280 秒角のスペクトロヘリオグラムを 7 秒 cadence で連続的に取得することができた．

現システムの最大の課題は，カメラの実効フレームレートがこれ以上上がらないため，cadence をより短くすることができないことである．しかし，フレアのように秒単位で変化する現象に追従するためには 1 秒程度の cadence が必要である．そこで現在は，高速性と安定性を期待して 10Gig-E 接続のカメラによるシステムを構築中である．

前稿 [5] でも述べたように，スペクトロヘリオグラムは，観測したスペクトルが持っている情報を任意に引き出してマップ化することができ，このことが，視野内の同時性が原理的に達成できない欠点を大きく凌いでいる．視野内の同時性は完全に保証される代わりに，得られる情報を後から増やしたり変更したりすることが困難なフィルタグラムに比べると，非常にフレキシブルな解析が可能な観測手法である．

参考文献

[1]「FASTCAM による太陽超高速度撮像の試み」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]「超高速度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．

[3]「超高速度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]「高速度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度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] ”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.

[8] パリ天文台ホームページ http://bass2000.obspm.fr/.

[9] ”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).

[10] NASA/ESA による SOHO 衛星ホームページ http://sohowww.nascom.nasa.gov/.

[11] National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) による Space Weather Prediction Center ホームページ http://www.swpc.noaa.gov/.

謝辞

高速度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同天文台の上野悟助教と，データの解析にあたり貴重なご示唆をいただいた同天文台の一本潔教授に，それぞれ厚く御礼申し上げます.