



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-02-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 當村, 一郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007541

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*

High-temporal Resolution Spectroheliogram Using the Domeless Solar Telescope of Hida Observatory and High-speed Camera

Ichiroh TOHMURA*

ABSTRACT

We observed the solar active regions with use of the Domeless Solar Telescope (DST) at the Hida Observatory and a high-speed camera to obtain spectroheliograms in $H\alpha$, $H\beta$, and $CaII$ K lines with high temporal resolution. Here we report the result of our preliminary analysis, a spectroheliogram of an active region NOAA12353 in $H\alpha$ line observed within about two seconds.

Key Words : sun, visible spectrum, high temporal resolution

1. はじめに

太陽光をスペクトルに分けた後、ごく狭い波長範囲(通常 1nm 以下)の光だけを取り出して作成した太陽単色光像をスペクトロヘリオグラムという。このとき、取り出す波長範囲を、例えば彩層の様子をよく表すことで知られている水素 α 線($H\alpha$ 線、波長 656.3nm)に限れば、 $H\alpha$ 線の光だけで見た太陽像、つまり「高純度の」彩層像が得られる。スペクトロヘリオグラムは、帯域フィルタを用いたフィルタグラムのようなサイドローブの問題が生じず、フィルタの透過率の不均一も気にしなくてよい。また、最初にスペクトルを作っているので、その解析結果を用いて太陽像を作成すれば、単に太陽面の輝度分布だけでなく、太陽大気の色やスペクトル線幅の分布、あるいは複数のスペクトル線を同時に用いて温度や密度の推定も行うことができる。

しかし、スペクトロヘリオグラムを生成するには分光器の入射スリットで太陽面上の観測領域を掃引しながら次々とスペクトルを撮像しなければならないため、1枚のスペクトロヘリオグラムを得るためにはかなりの(従来は数分以上)時間を要する。太陽大気の状態は数分から数秒、あるいはそれ以下の時間スケールで変動するので、正確な情報を得るためにはスペクトロヘリ

オグラムの時間分解能を上げることが非常に重要である。

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を短縮することを試みてきた^{[1]-[4]}。2015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, 以下 DST)および併設の水平分光器で実施した観測では、同天文台により DST に設置された太陽像を高速スキャンするための回転ガラスブロックを使用する機会に恵まれ、これと高速度カメラとの組み合わせにより1枚のスペクトロヘリオグラムを最短2秒以下で得ることができた。本稿では、その初期解析の結果を報告する。

2. 観測

2.1 観測装置

観測は、上述のとおり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^[5]および併設の水平分光器を用いて実施した。ドームレス太陽望遠鏡は地球の大気揺らぎ(シーイング)の悪影響を避けるために、冷却装置が組み込まれた高い塔の上に設置され、また通常天文台にあるようなドームを持たないのが外見の特徴である(図1)。これによって太陽を極めて高い空間分解能で観測することができる。また、水平および垂直の2つの分光器を備えており、高分散・高精

2015年8月17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)



図 1 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の外観 (著者撮影)

度のスペクトルを得ることができる。

撮像に用いた高速度カメラは RedLake 社製 MotionPro である。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 (図 2)、回転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。



図 2 高速度カメラを分光器出口に取り付けたところ (著者撮影)

2.2 観測の概略

観測は 2015 年 5 月 24 日～29 日にかけて実施した。太陽面上の活動領域 (黒点群) を主要なターゲットとし、前述のとおり回転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。

撮像したスペクトルは中性水素原子による $H\alpha$ 線 (波長 656.3 nm)、 $H\beta$ 線 (波長 486.1 nm)、および 1 回電離

のカルシウムイオンによる K 線 (波長 393.4 nm) で、いずれも彩層の様子をよく反映するスペクトル線である。カメラに入射する光量を少しでも多くするため、スペクトルの次数はいずれも 1 次とした。

1 回の観測でカバーする領域はスリットに沿う方向に 172 秒角 (分光器入射スリットの長さで決まる)、スリットに垂直な方向、つまり太陽像のスキャンの方向におよそ 100～200 秒角 (連続撮像の速さ、枚数、およびガラスブロックの回転速度で決まる) である。太陽面上で 1 秒角はおおよそ 720km に相当するので、実距離に換算した視野はおおよそ 12 万 km × 7 万～14 万 km となる。スリット幅は 100 μ m としたが、これは太陽面上で 0.64 秒角に相当し、これがスリットに垂直な方向の空間分解能の上限である。

撮像速度はスペクトルの波長や次数、観測時の天候、さらにはカメラの感度設定に依存するが、今回の観測では 30fps (コマ/秒)～125fps とした。

2.3 観測の詳細

本稿で報告するデータは 2015 年 5 月 26 日の 00:58:24 (世界時) に取得した活動領域 NOAA12353 の $H\alpha$ 線スペクトルである。上述のとおり次数は 1 次、G2 グレーティングを用い、グレーティング角は 26° 15' である。スリット幅は 100 μ m、スリット長を太陽面上の距離に換算すると 172 秒角 (実距離でおおよそ 12 万 km) である。

カメラのゲインは 1、スペクトル像のサイズは 1024 × 768 ピクセル、撮像速度は 100fps (1 枚の露出時間が 1/100 秒)、1 回の撮像枚数は 226 枚とした。

ガラスブロックの回転速度は最高値である 10000pps (パルス/秒) で、1 回の撮像に要した時間を実測すると 2.45 秒であった。ただし、撮像開始のトリガーを手動でかけたため、撮像の最初と最後にガラスブロックが停止している時間が発生した。そのため有意な撮像時間は上記よりも短く、コマ数でおおよそ 160 コマ、時間でおおよそ 1.6 秒、スリットに垂直な方向の視野サイズでおおよそ 100 秒角 (実距離でおおよそ 7 万 km) となった。

また、上記データとは別に、カメラの感度むらと熱ノイズを補正するためのダーク画像、フラット画像、フラット画像補正用のダーク画像をそれぞれ 1024 枚づつ撮像した。フラット画像は、撮像中に太陽像をスリットに対してまんべんなく動かすことにより取得した。

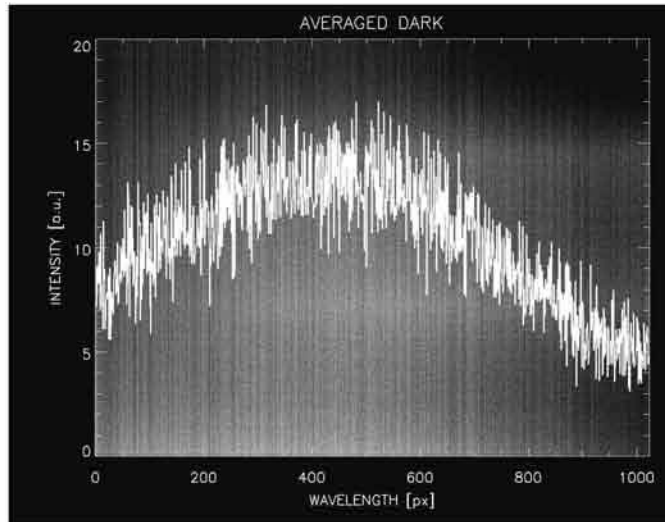


図3 ダーク画像 (1024 枚の平均) と画像内の平均プロフィール
横軸は波長 (単位はピクセル), 縦軸は明るさ (単位は任意). (図9まで同じ)

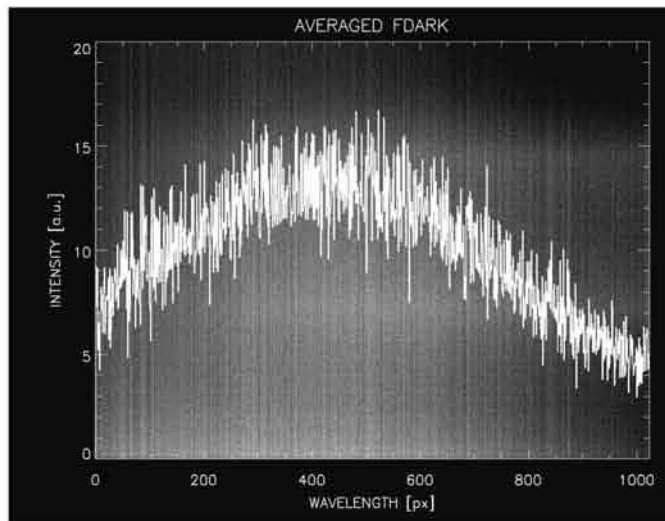


図4 フラット画像用ダーク画像 (1024 枚の平均) と画像内の平均プロフィール

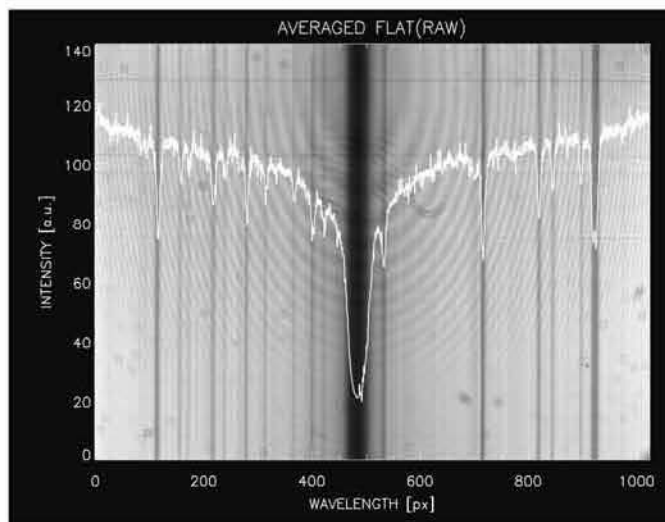


図5 フラット画像 (1024 枚の平均) と画像内の平均プロフィール

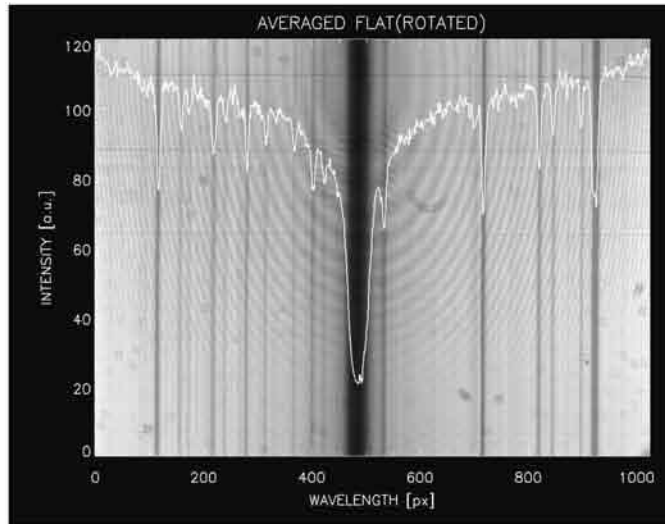


図 6 スペクトル線の傾きを補正したフラット画像 (1024 枚の平均) と画像内の平均プロフィール

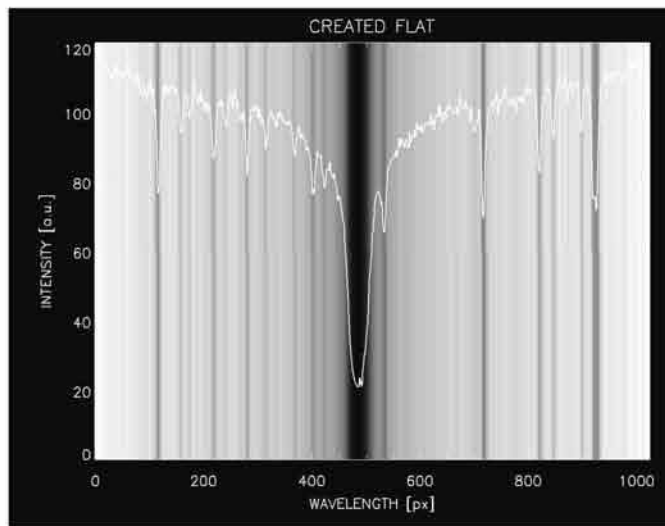


図 7 フラット画像からスペクトルの明暗だけを消すために生成した画像

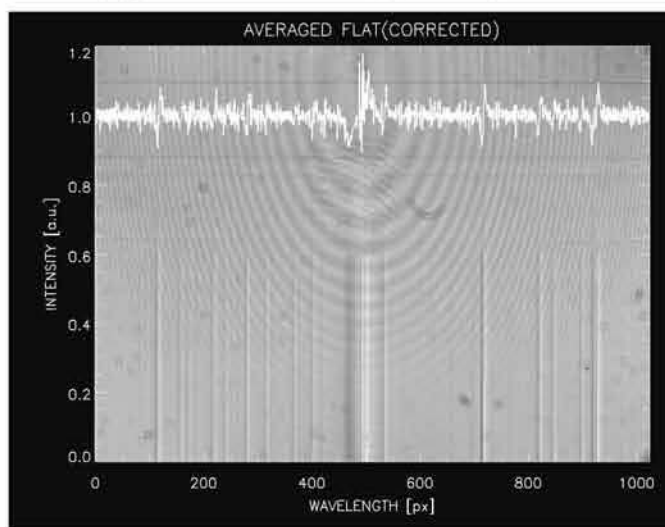


図 8 スペクトルのパターンを消した補正済みのフラット画像
ただし、スペクトル線を完全には消しきれておらず、一部痕跡が残ってしまっている。

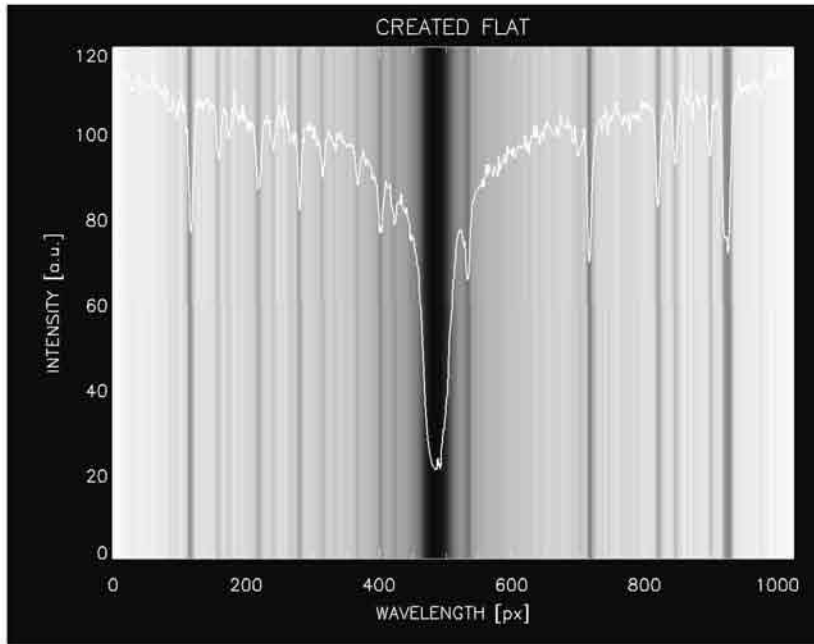


図9 フラット処理した平均スペクトル像

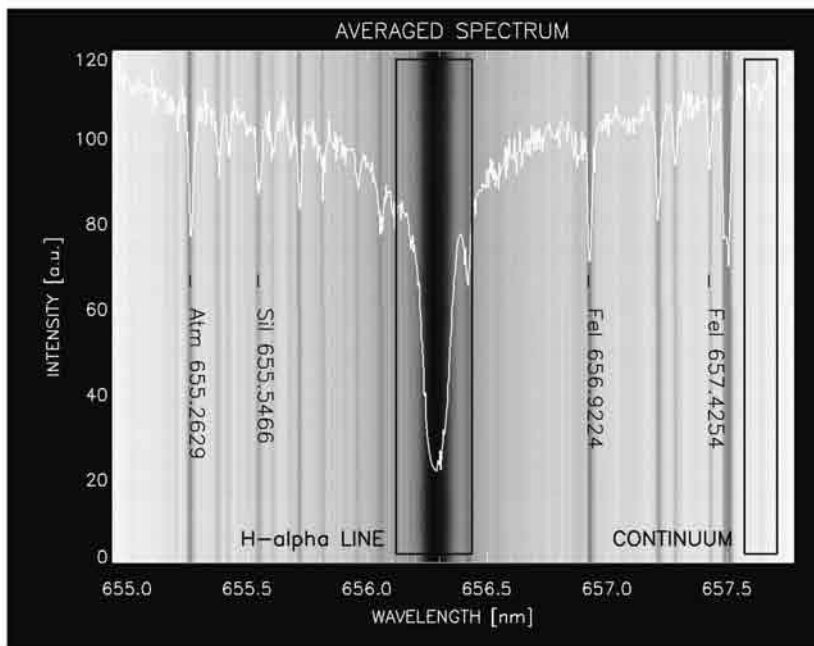


図10 波長較正を済ませた平均スペクトル像

横軸は波長(単位は nm), 縦軸は明るさ(単位は任意). 白い点線で囲んだ4本の吸収線を波長較正に用いた. 略称 Atm は地球大気の水蒸気の吸収線, SiI, FeI はそれぞれ中性の珪素原子と鉄原子の吸収線(太陽起源). 略称の後の数値は波長(単位は nm). 黒い実線で囲んだ2箇所のうち画面中央は H α 線, 右側は連続光の範囲(以下同).

3. 解析

以下では 2.2 節で記述した活動領域 NOAA12353 の H α 線スペクトルデータの解析手順と結果について述べる。

3.1 前処理

固体撮像素子は熱ノイズと感度むらがあるため、これらを補正する必要がある。熱ノイズは、得られた画像からダーク画像を差し引くことにより補正した。補正に用いたダーク画像を図 3 に、フラット画像用のダーク画像を図 4 に、それぞれ示す。

感度むらの補正は、熱ノイズを補正した画像データを、同じく熱ノイズ補正済みのフラット画像で割ることで行った。白色光等での撮像とは違い、本観測のようにごく狭い波長域のみ撮像する場合は、撮像素子上に干渉縞(フリッジ)が発生するので、これもフラット画像で割ることにより補正する。また、本観測で取得したフラット画像は太陽を光源としているため、スペクトル線がそのまま写りこんでしまうので、フラット補正を行う前に、フラット画像からスペクトル線を消す必要がある。これらの補正は以下のように行った。

- (1) 熱ノイズ補正済みのフラット画像を生成する。(図 5)
- (2) スペクトル線がフラット画像の縦軸に平行でない場合は、その傾きを補正する。(図 6)
- (3) 傾きを補正したスペクトルを空間方向(画像の上下方向)に積分し、平均のスペクトル輪郭を得る。得られた平均のスペクトル輪郭を上下方向に隙間なく並べ、平均のスペクトル輪郭だけの画像を生成する。(図 7)
- (4) 図 7 の画像(ただしスペクトルの傾きは元に戻してある)で図 5 の画像を割り、スペクトルのパターンだけを消す。(図 8)

図 8 の画像で、観測されたスペクトル像(熱ノイズ補正済み)を割れば前処理は完了である。

3.2 波長の較正

3.1 節の補正を施したスペクトル像(図 9)を用いて、波長の較正を行った。波長の較正に用いたスペクトル線は、(1) Atm(地球大気中の水分子による吸収線) 波長 655.2629 nm, (2) SiI(太陽大気中の中性珪素原子による吸収線) 波長 655.5466 nm, (3) FeI(太陽大気中の中性鉄原子による吸収線) 波長 656.9224 nm および (4) 同 657.4254 nm の 4 本である。典型的なスペクトル輪郭は文献 [6] に、各スペクトル線の標準波長は文献 [7] に、それぞれ掲げた。較正した結果を図 10 に示す。

3.3 物理量の導出

前処理が済んだ H α 線スペクトルの、ある波長方向の明るさの変化(線輪郭という)を模式的に描くと図 11 のようになる。図 10 から判るように、この H α 線の輪郭は線中心から離れてもまだ水平になっておらず、真の連続光の範囲は視野に入っていないので、ここでは図 10 で"CONTINUUM"と記した部分を"仮の"連続光データとして用いた。この範囲の平均の明るさを I_{cont} とする。

次に、図 10 中央で"H-alpha LINE"と記した部分を H α 線の中心部と考え、この波長範囲($\lambda_1 \sim \lambda_2$ とする)のデータを解析した。本来ならばガウス型輪郭でフィッティングするほうがよいが、ここでは計算の破綻がずっと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。波長 λ における明るさを $I(\lambda)$ 、H α 線の中心波長を λ_0 とするとき、

線の全強度 (Total Intensity)

$$I_{tot} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{cont} - I(\lambda)] d\lambda$$

線の中心波長 (Line Center)

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

線幅 (Line Width)

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

の 3 つの物理量を求めた。このうち I_{tot} は、図 11 の網掛けで表した部分の面積に、 λ_0 はその面積の重心に、それぞれ対応する。また、線輪郭がガウス型をしている場合には $\Delta\lambda$ は標準偏差に比例するが、ここでは詳細は割愛する。解析したスペクトルの例を図 12(a) および (b) に示す。画像中央の H α 線の一部が右あるいは左へ伸びている場所は、この場所のプラズマが観測者から遠ざかる向きあるいは近づく向きに運動していることを示す。

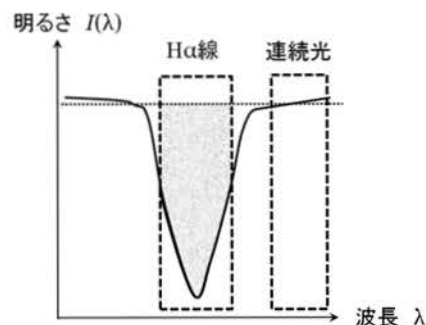


図 11 解析手順の概念図

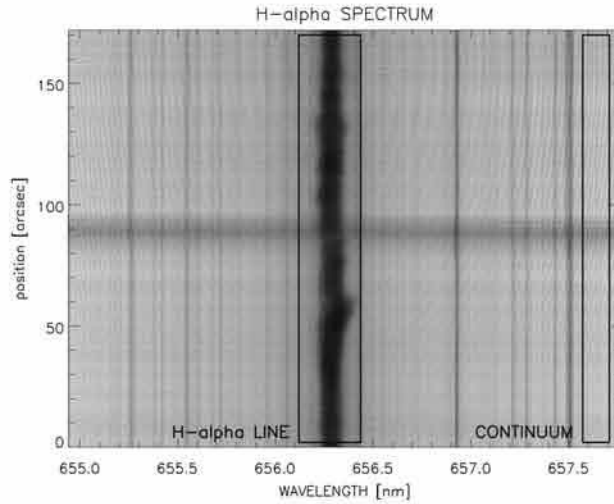


図 12(a) 解析したスペクトルの例 (1)

横軸は波長 (単位は nm), 縦軸は太陽面上の距離 (単位は秒角). (図 12(b) も同じ)

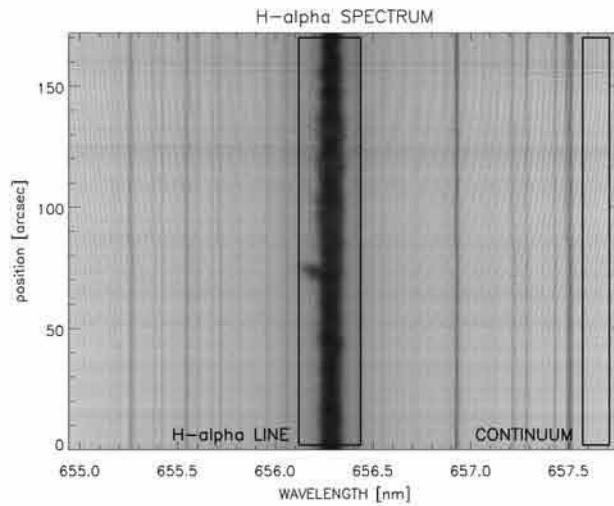
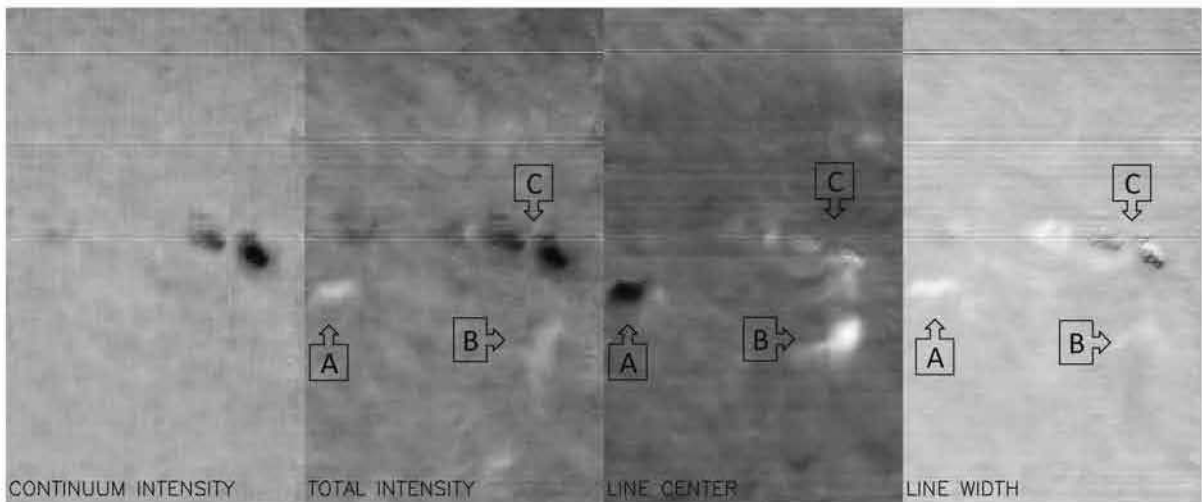


図 12(b) 解析したスペクトルの例 (2)



HIDA_DST:20150526JST_005824UT H-alpha 103"c.a.x172" 100fps

図 13 得られたスペクトロヘリオグラム (スペクトルから生成した太陽単色光像)
向かって左から, 連続光強度 I_{cont} , 全強度 I_{tot} , 線中心 λ_0 , 線幅 $\Delta\lambda$. (詳細は本文参照)

4. 結果と考察

解析の結果得られた物理量をマップとして描いたもの(スペクトロヘリオグラム)を図 13 に示す。アスペクト比の確認には文献 [8] の太陽連続光像を用いた。2.3 節で述べたように、データ取得に要した時間はおよそ 1.6 秒である。図 13 の向かって左から、連続光強度 I_{cont} (図の中央右寄りに黒点が 2 つ見える)、 $H\alpha$ 線の全強度 I_{tot} (暗いところは吸収が弱く、明るいところは吸収が強い)、 $H\alpha$ 線中心 λ_0 (明るいところは赤方偏移すなわち観測者から遠ざかる向きにプラズマが運動している場所、暗いところは青方偏移すなわち観測者に近づく向きに運動している場所)、 $H\alpha$ 線幅 $\Delta\lambda$ (明るいところはスペクトル線の幅が広く、暗いところは幅が狭い)である。各スペクトロヘリオグラムの視野サイズは横およそ 103 秒角×縦 172 秒角(太陽面上の実距離でおよそ 7 万 km × 12 万 km)、太陽面の中心は各図のほぼ左下方向にある。4 つのスペクトロヘリオグラムを比較すると；

[A] 黒点から離れているが吸収が強い場所があり、青方偏移していかつ線幅が広がっている。

[B] 黒点の近くで吸収がやや強い場所があり、強く赤方偏移していかつ線幅はわずかに広がっているが、フィラメントと思われる模様(各図の右下に向かって長く伸びているかすかな構造)と完全には一致していない。

[C] 黒点の暗部付近で、赤方偏移かつ線幅が狭い場所と、青方偏移かつ線幅が広い場所とが小さなパッチ状に混在している。また、そのようなパッチの分布が半暗部のフィラメント構造と重なる可能性がある。

など興味深いことがいろいろと見えてくる。

このように、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、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になる方法であると考えられる。

5. まとめ

2015 年 5 月 24 日～29 日に京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡および水平分光器と高速度カメラを用いたスペクトル観測を行い、視野およそ 170 × 100 秒角の $H\alpha$ 線によるスペクトロヘリオグラムを約 1.6 秒で取得することができた。今回の観測で用いた機器の組み合わせでは、数秒以上の長時間にわたる連続観測ができない、撮像速度が 100fps 程度までしか上げられない、などの問題があった。今後の課題としては；

- (1) 1 回の観測にかかる時間を短縮する
 - (2) ある観測が済んで次の観測を開始するまでの時間を短縮する
 - (3) 短くても数分以上、できれば数十分の連続観測を可能にする
- などがあげられる。スペクトロヘリオグラム観測の時間分解能をさらに上げることにより、あらたな知見が数多く得られ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.
- [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] "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.
- [6] パリ天文台によるホームページ <http://bass2000.obspm.fr/>.
- [7] "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).
- [8] ESA/NASA によるホームページ <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>.

謝辞

高速度カメラと回転ガラスブロックを用いたスペクトル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に、また、高速度カメラの使用に際してお世話になってきた大阪府立大学工業高等専門学校機械システムコースの杉浦公彦教授と同じく故・山内慎准教授(当時)に、それぞれ厚く御礼申し上げます。