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

高速度カメラを用いた太陽の疑似3次元分光

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2015-02-10 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/10.24729/00007549

高速度カメラを用いた太陽の疑似3次元分光

當村 一朗*

Pseudo 3-Dimensional Solar Spectroscopy using Highspeed Camera

Ichiroh TOHMURA*

ABSTRACT

Spectroscopy has played an important role in solar physics because it enables to know the physical states of the solar atmosphere in detail. However, the usage of a one-dimensional entrance slit of the spectrograph prevents observers from obtaining solar spectra from a two-dimensional region simultaneously; three-dimensional spectroscopy. In this paper, we propose a new method to obtain solar spectra from a two-dimensional region in a very short time span; pseudo three-dimensional spectroscopy. With use of a high-speed camera that can obtain more than 1,000 pictures of 256 × 256 pixel area per second and the Domeless Solar Telescope (DST) at the Hida Observatory, we succeeded to make a spectroheliogram in Hβ line (λ = 486.1 nm) within a time span of about 1 second.

Key Words : sun, visible spectrum, high temporal resolution

1. はじめに

太陽観測は，恒星の観測と異なり観測対象が点光源ではなく，常に 2 次元的広がりを有する.（註：近年は光干渉計を用いた恒星の 2 次元像の観測も進展を見せている.） 図 1 に太陽活動領域（黒点群）の白色光像の例を示す．口径 10cm の屈折望遠鏡を用い，光路中に接眼鏡を挿入した拡大撮影像である．画面左上の横棒は 10 秒角を表し，太陽面上の実距離に換算すると約 7,200km である．画面中央上寄りに散在する白点は，データ前処理時に消せなかった光学系の微小な汚れによる像である．図 1 から，太陽黒点の有意な画像を得るためには最低でも 10 秒角四方の視野が必要なことが判る．

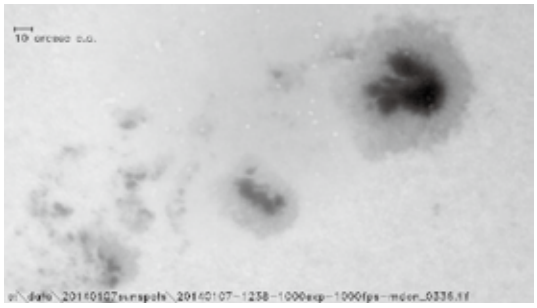

図 1　太陽活動領域 (黒点群) の白色光像
(2014 年 1 月 7 日 12:38JST 於大阪府大高専 著者撮影)

2014年8月18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)

ところで，太陽観測においては，白色光像を撮影しただけで必要なデータが入手できるケースもあるが，ほとんどは特定の波長の光を詳しく解析し，観測領域の物理状態を調べることが必要になる．その方法として，特定の狭い波長域だけを透過するフィルタを用いるものと，スペクトルを撮る（分光する）ものとがある．

前者により得られた画像は**フィルタグラム**と呼ばれ，高価な分光器がなくても必要な仕様を備えたフィルタがあれば容易に撮像できること，1 枚のフィルタグラムの中では同時性が確保されていることが大きな利点である．しかし，波長透過幅がフィルタによって決まっているため複数の波長で撮像するには波長可変型のフィルタが必要であり，波長を順次変更しながらの撮像では異なる波長間の同時性が失われること，ビームスプリッターで光を分けて一気に多波長撮像する方法では一度にあまりたくさんの波長に分けるのは難しいこと，などが難点である．

いっぽう，分光観測すれば望む波長域のスペクトルを詳しく調べることができるが，分光器の入射スリットは通常 1 次元であるので，2 次元領域のスペクトルを取得するには，太陽面上でスリットを少しづつ移動しながら順次スペクトルを撮像するしかない．そのため，2 次元的に広がった観測対象のスペクトルを同時に撮像することは基本的に不可能である．このようにして得られたスペクトルを切り出して並べ，2 次元像としたも

のを**スペクトロヘリオグラム**と呼ぶ．

上述のように，観測領域内での同時性を求めれば波長方向の同時性の確保が難しくなり，波長方向の同時性を優先すれば観測領域内の同時性が確保しにくくなるというジレンマが古くからあった．ただ，太陽像（あるいはスペクトル像）の変化の時間スケールがうんと遅ければ，これは実質的には問題にならないはずである．ところが，地上観測においては地球大気の揺らぎの影響によって天体像が常に変形や移動を続けているので，確実に同じ領域・波長を観測しているといえるためには，観測の同時性が非常に重要になる．地球大気の揺らぎの時間スケールは非常に速く，少なくともおよそ 500Hz～1kHz くらいであると考えられるので，太陽観測で普通に用いられる 100fps（fps ＝コマ/秒）くらいまでの撮像速度のカメラでは，大気揺らぎに追従することができない．

このような，波長方向（1 次元）の同時性と空間方向（2 次元）の同時性のジレンマに対する解決策として，多数の光ファイバーを用いた空間 2 次元→ 1 次元への変換，複数のスリットによる方法，マイクロレンズアレイを用いる方法などが試みられてきた．また，地球大気の揺らぎによる波面の乱れを能動的に補償し，太陽像そのものを安定化させる研究も進められている [1]．我々は，それらに次ぐ方法として，太陽面を非常に速くスキャンしつつ，高速度カメラによりそのスペクトルを撮像して，観測領域内の時間差をできるだけ小さくする試みを行ってきた（疑似 3 次元分光）[2][3]．テスト観測と，初期的な解析結果についてはすでに報告済みであるが [4]，その後，より詳細な解析を行ったので，本稿ではその結果を報告する．

2.　観測

2.1　観測の概要

観測は 2002 年 7 月 26 日 04:52:32（UT）に京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台において，同天文台のドームレス太陽望遠鏡（Domeless Solar Telescope, DST）[5] および DST に併設の水平分光器を用いて行った．観測領域は活動領域 NOAA10039/44 である．この領域の Hα フィルタグラム（波長 656.3 nm）を図 2-1（Hα ± 0.0 nm）および図 2-2（Hα − 0.12 nm）に示す．これらは飛騨天文台 DST とリオフィルタによって撮影されたものである．図 2-1 は Hα 線中心における像，図 2-2 は Hα 線ウィング（中心よりも連続光に近い波長）における像である．また，両図右下のスケールは 50 秒角（太陽面上の実距離にして約 36,000km）を示す．観測時には，太陽像を急速移動させながら，水平分光器でそのスペクトルを作り，高速度カメラで撮像した．撮影したスペクトル画像はその場でデジタルビデオコーダー（DVC）に録画し，後日 1 コマづつ再生しながら画面をキャプチャして BMP 画像を得た．

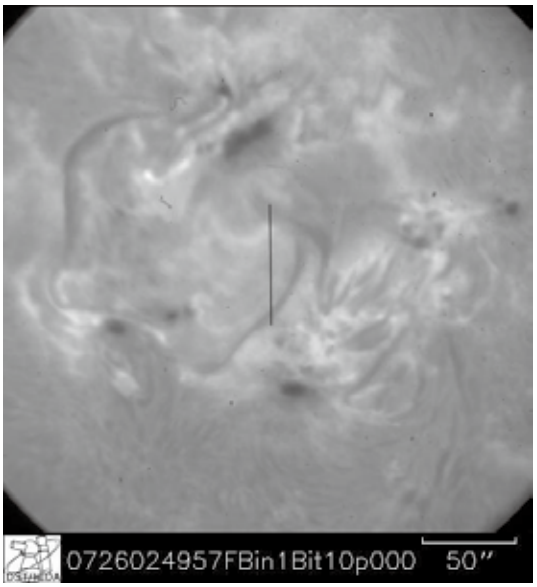

図 2-1　観測領域の **Hα** 単色像
(2002 年 7 月 26 日 02:49:57UT，DST による)

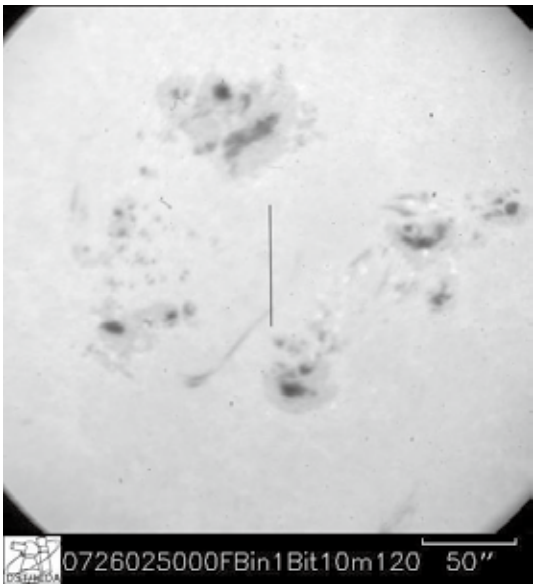

図 2-2　観測領域の **Hα − 0.12 nm** 単色像
(2002 年 7 月 26 日 02:50:00UT，DST による)

2.2　スペクトル

スペクトロヘリオグラム作成には Hβ 線（波長 486.1 nm）を用いた．水素バルマー系列の中で最も強い Hα 線と同様に，太陽彩層の状況をよく表すと考えられて

いるスペクトル線である．観測には DST と水平分光器を用い，分光器入射スリットの幅は 500 μ m，スペクトルの次数は 2 次，グレーティング角は 30° 51’ である．

2.3　高速度カメラ

観測に使用した高速度カメラはフォトロン製 FASTCAM である．取得画像のサイズは 256 × 256 ピクセル，撮像速度は 1,024 fps とした．得られた画像は 1 セット（1,024 コマ）撮影するごとに DVC に録画した．

固体素子による撮像では通常，ダーク画像と呼ばれる暗電流ノイズを補正するためのものと，フラット画像と呼ばれる素子の感度ムラを補正するためのものもあわせて取得するが，FASTCAM にはダーク画像を自動的に差し引く機能があるので，暗電流ノイズの補正はそれにより行うものとし，フラット画像のみ別途取得した．水平分光器に高速度カメラを接続した様子を図 3 に示す．

図 3　水平分光器に接続した高速度カメラ

3.　解析

3.1　前処理

まず，DVC に記録してある画像の再生画面をキャプチャしてデジタル化した．画面キャプチャで得られる画像は 640 × 480 ピクセルであるが，ここには画像に関するデータなど，本来のスペクトル画像以外の領域も含まれているので，キャプチャした BMP 画像から必要な部分（456 × 478 ピクセル）のみを切り出し，さらに元画像のピクセルスケールに合わせて 243 × 255 ピクセルにリサイズしたうえで解析を行った．また，前述のとおりダーク画像の差し引きはカメラ上で自動的に行うので，補正用にはフラット画像のみを取得し，生画像をフラット画像で割って感度ムラを補正した．ただし，単純な平均フラット画像にはまだ若干のパターンが残っていたため，幅 2 ピクセルの LEE フィルタをかけて使用した．平均のスペクトル等を図 4 に示す．

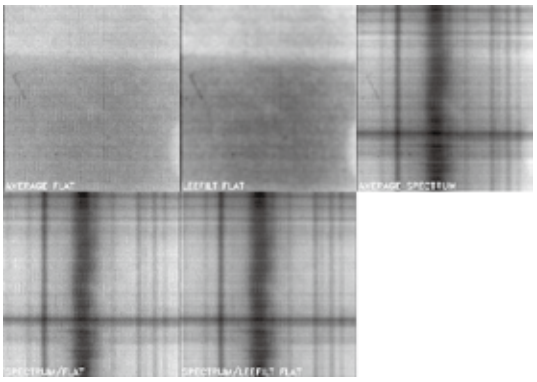

図 4　平均のスペクトル

上段左から，(a) 平均フラット画像，(b) (a) に LEE フィルタをかけた画像，(c) 平均のスペクトル（フラット未処理），下段左から，(d) (c) を (a) で割ったもの，(e) (c) を (b) で割ったもの．解析には (e) を用いた．

3.2　波長の較正

前項で得られたフラット処理済みの平均スペクトルに対し，波長の較正を行った．較正には観測で得られた 1,024 枚すべてのスペクトルについて求めた平均の線輪郭を用い，較正用の波長データは Moore 他 (1966) のものを用いた [6]．較正に用いた波長データを表 1 に示す．

表 1　観測波長とその近傍のスペクトル線 [6]

元素	波長 [nm]
Fe I	485.8254
Fe I	485.9134
Fe I	485.9747
CrII	486.0217
Cr I	486.1849
Fe I	486.1952
FeI?	486.2598
Fe I	486.3650
Ni I	486.3936
CrII	486.4323
V I	486.4738

元素記号の後の「I」は中性原子であることを,「II」は 1 階電離のイオンであることを，それぞれ示す．

平均のスペクトルに基づいた較正結果を図 5 に，較正結果に基づいて波長を決定した平均の線輪郭を図 6 に，それぞれ示す．ピクセル値と波長の絶対値を念のため 2 次式でフィッティングしたが，実際にはほぼ 1 次式の関係にあることが図 5 から判る．

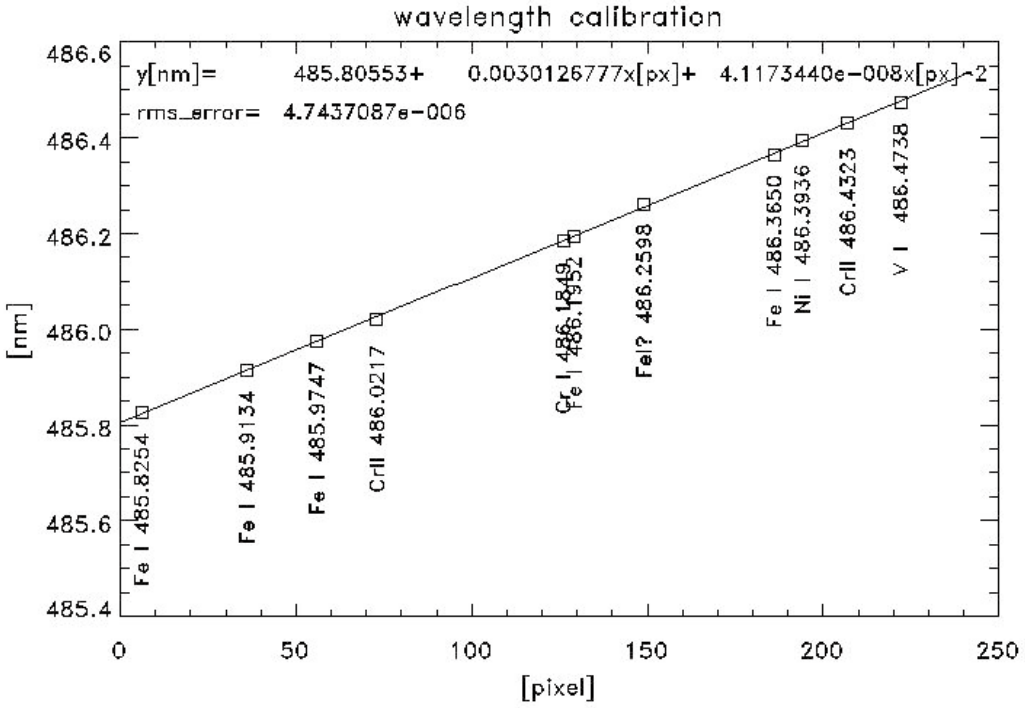

図 5　波長の較正
横軸はピクセル値，縦軸は波長の絶対値 (nm)

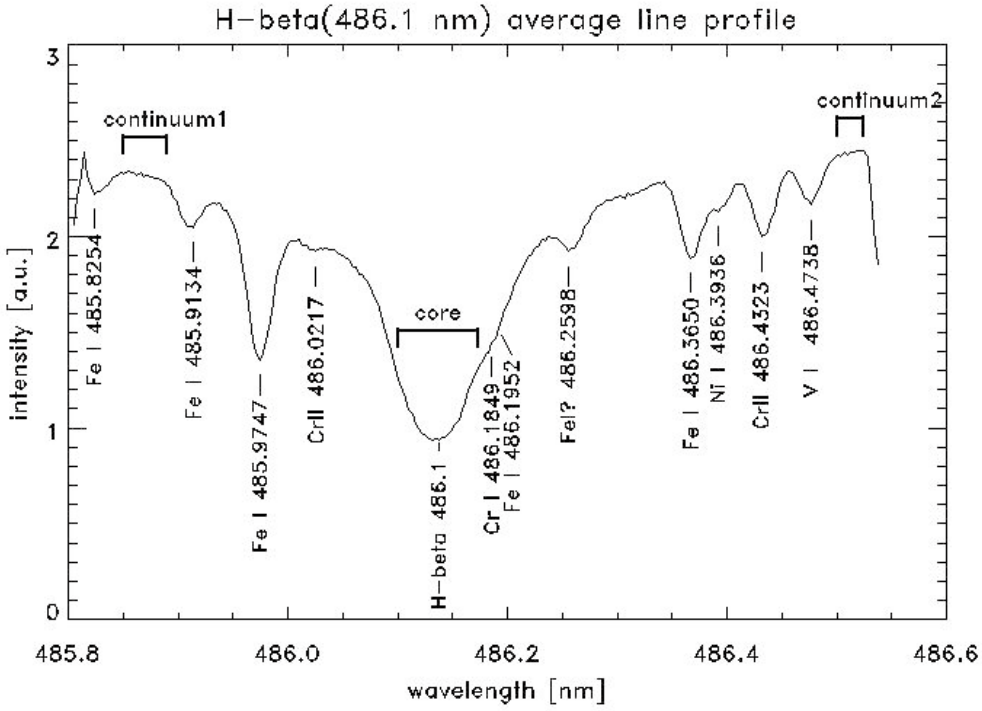

図 6　波長較正をした平均の線輪郭
横軸は波長 (nm)，縦軸は放射強度（単位は任意）

3.3　連続光強度の較正

図 6 からも判るように，今回の観測の，波長方向の視野はあまり広くなく，Hβ 線のウィングまでをカバーするものの，その外側の「真の連続光」（線スペクトルの吸収の影響がない部分）は撮像できていない．そこで，パリ天文台の BASS2000 を較正データとして用いた [7]．まず全スペクトルを用いた平均スペクトルのウィング（図 6 で「continuum1」「continuum2」と示された部分）の平均強度が BASS2000 の該当部分の平均強度（真の連続光強度＝ 1 とすると 0.812）と最もよく一致するように放射強度のスケールを定めた．次に，観測された各スペクトルの解析にあたり，「continuum1」「continuum2」と示された波長域の平均強度を前述の 0.812 で割って，そのスペクトルの連続光強度とした．

3.4　スペクトル線輪郭のフィッティング

連続光強度の較正ができたので，観測されたスペクトル線輪郭の定量解析を行った．通常，線スペクトルの中心（前出のウィングに対して「コア」という）付近はガウス型関数で表されるので，本研究でもそれに従った．観測されたスペクトルの放射強度を波長 λ の関数として $I_{\lambda,obs}$，連続光強度を I_c として，解析すべき線輪郭 I_λ を

$$I_\lambda = I_c - I_{\lambda,obs} \tag{1}$$

とする．（ここでは吸収線を仮定している．）　これを次式のガウス型輪郭でフィッティングした．

$$I_\lambda = a_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - a_1)^2}{2a_2^2}\right] \tag{2}$$

今回のデータのフィッティング結果のサンプルを図 7-1～3 に示す．図 7-1 は最良のサンプル，図 7-2 は典型的なサンプル，図 7-3 は最もうまくいかなかったサンプルである．各図とも横軸は波長 [nm]，縦軸は放射強度（真の連続光＝ 1）である．フィッティングした波長領域は図中に「fitting region」として示した．また，フィッティングの RMS 誤差の相対値を各図中に示した．

3.5　スペクトロヘリオグラム

フィッティング結果から，以下の物理量を導出した．a_0, a_1, a_2 は (2) 式のフィッティング係数である．

・連続光強度 I_c

・スペクトル線の深さ $\mathtt{depth} = a_0$

・スペクトル線のドップラーシフト

$\mathtt{shift} = \dfrac{a_1 - 486.1}{486.1}c$ （c は真空中の光速）

・スペクトル線のドップラー幅 $\mathtt{width} = \sqrt{2}a_2$

・スペクトル線の等価幅 $\mathtt{eqv_w} = \sqrt{2\pi}\dfrac{a_0 a_2}{I_c}$

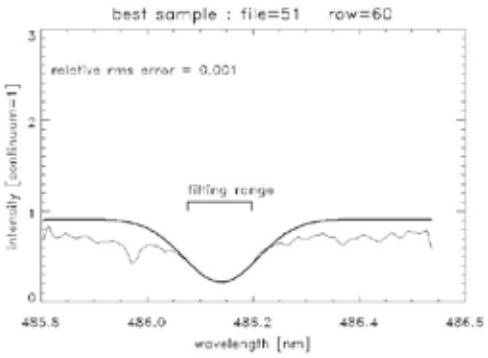

図 7-1　ベストなフィッティングの例

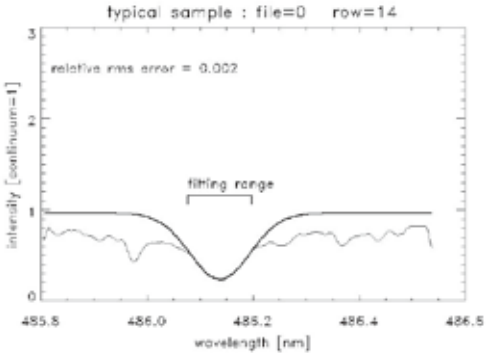

図 7-2　典型的なフィッティングの例

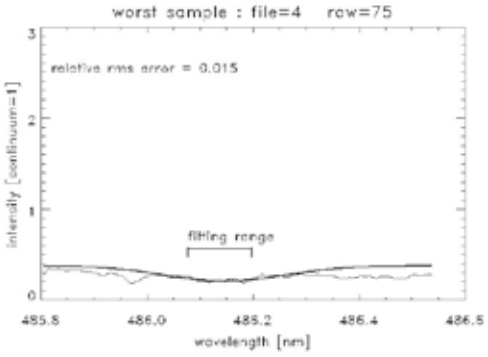

図 7-3　最も悪いフィッティングの例

元データは 1,024 枚のスペクトルからなっているが，作成したスペクトロヘリオグラムのアスペクト比を実際の値にできるだけ近づけるため，16 枚ごとに平均のスペクトルを作成し，合計 64 枚の平均スペクトルのフィッティング結果からスペクトロヘリオグラムを作成した．その後さらに横方向に 0.81 倍圧縮し，DST の Hα 像と

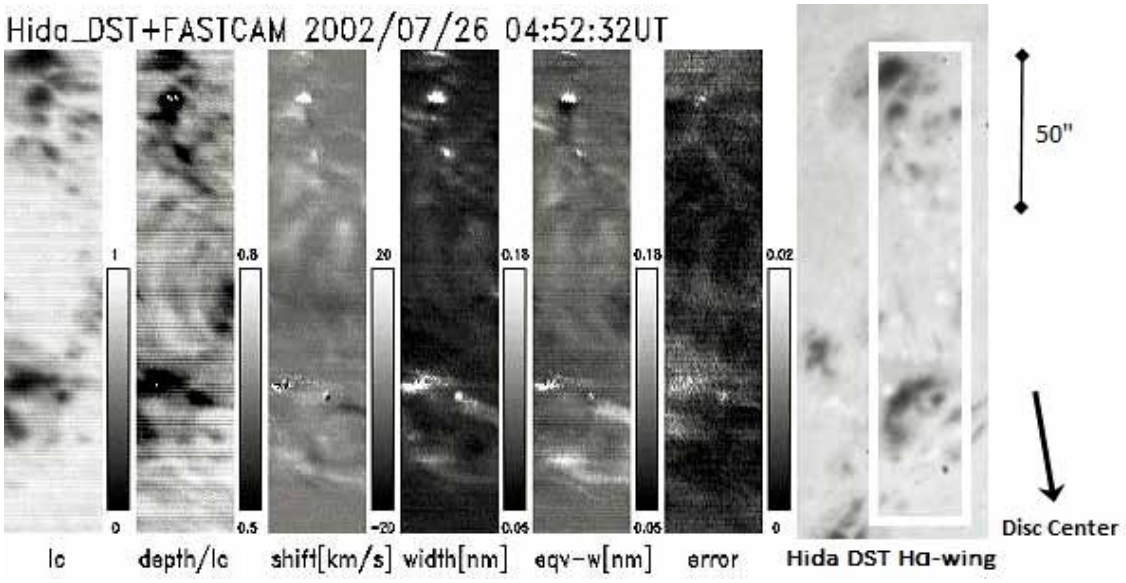

図 8　**Hβ** 線によるスペクトロヘリオグラム

向って左から，連続光強度（真の連続光＝ 1），スペクトル線の相対的深さ（真の連続光＝ 1），ドップラーシフト（[km/s]，視線方向に近づく向きが正，遠ざかる向きが負），ドップラー幅（[nm]），等価幅（[nm]），フィッティングの RMS 誤差の相対値，DST による Hα 像（ウィング，図 2-2 から該当部分を切り出して，ヘリオグラムにスケールおよび向きを合わせたもの）．Hα 像右側の矢印は太陽面中心（disc center）の方向を示す.「50”」の棒はスケールを表す（太陽面上の実距離で約 36,000km）．なお，ヘリオグラムとの比較を容易にするため，Hα 像はヘリオグラムの範囲（Hα 像中の白い枠）よりも広い範囲を表示してある．

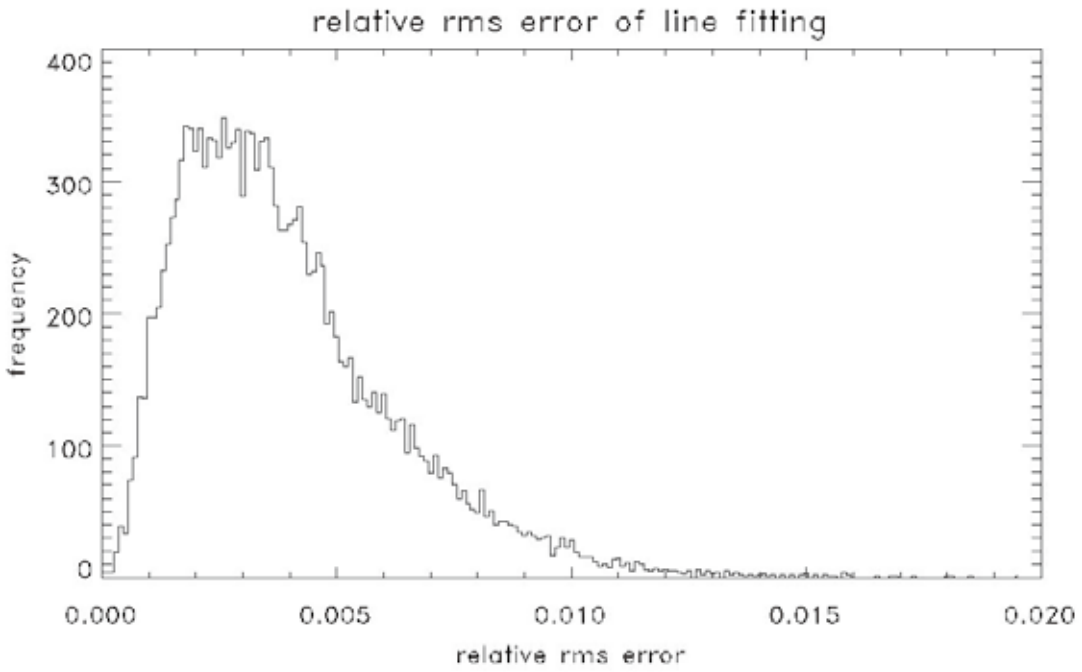

図 9　フィッティングの相対誤差の頻度分布
横軸は RMS 誤差の相対値，縦軸は度数.

できるだけスケールを合わせた．ただし，スキャン方向がスリット方向に対して完全に垂直ではなかったので，ヘリオグラムには若干の歪みが残っているが，これについては修正していない．得られたスペクトロヘリオグラムと DST の Hα 像（ウィング）を図 8 に示す．また，フィッティングの RMS 誤差の相対値の頻度分布を図 9 に示す．横軸は RMS 誤差の相対値，縦軸は度数である．RMS 誤差の最頻値は 0.002～0.003（0.2～0.3 %）程度であることが判る．

4. 考察

図 8 に示したように，飛騨天文台 DST および水平分光器と高速度カメラを用いて，太陽活動領域のスペクトロヘリオグラムを 1 秒間の観測時間で得ることができた．図の上から 1/10 のあたりと，下から 1/4 のあたりでは連続光強度（I_c）以外のヘリオグラムが白く飛んでいる部分があるが，これらはいずれも黒点の最暗部にあたっており，放射強度が低すぎて，適切にフィッティングができなかった箇所である．図の一番右側の RMS 誤差のマップにおいても，対応する場所の誤差が大きいことが，上記の判断を裏付けている．

それ以外の部分においては，各物理量の分布が相当よく求められていると考えられる．データを最終的に BMP 形式で保存したためにビット深さが 8 ビットしかなく，ノイズが目に付くことは否めない．しかし従来の標準的な方法でスペクトロヘリオグラムを得るためには数分～数十分かかっていたことを考慮すれば，1 秒間でこれだけの情報が得られることには注目してもよいと考える．

いっぽう，地球の大気揺らぎの時間スケールが 1 ミリ秒程度であることを考えると，今回の成果が所期の時間分解能に及ばないことも事実である．図 8 のスペクトロヘリオグラムの横方向（時間的にスキャンした方向）の実際のサイズは 64 ピクセルであるので，地球の大気揺らぎにより太陽像が変化してしまう前に，太陽面の有意な構造を捉えるためには，少なくとも 50 回程度のスキャンを 1 ミリ秒程度のうちに行うことが必要である．そのためには，太陽像をスキャンするのに望遠鏡（あるいはその内部の光学系）を動かすのではなく，国立天文台乗鞍コロナ観測所（当時）で用いられていたような太陽像移動用のガラスブロックを高速回転させて像移動を素早く行うなどの工夫が必須である．また，50 回のスキャンを 1 ミリ秒のうちに行うためには，50,000fps の撮像速度が必要である．露出時間が短くなる分，カメラの感度が高く，かつ S/N 比が保たれなければいけないことになり，ハードウェア面でのハードルはかなり高いといえる．

5. まとめ

京都大学飛騨天文台 DST において 2002 年 7 月 26 日に行った高速度カメラによる Hβ 線（波長 486.1 nm）でのスペクトル観測から，連続光強度，スペクトル線の深さ，ドップラーシフト，ドップラー幅，および等価幅について，活動領域のスペクトロヘリオグラムを作成することに成功した．黒点の最暗部を除いては，相対精度 0.2～0.3 %またはそれより良い精度で，ガウス型輪郭でフィッティングすることができた（図 9）．用いたスペクトル画像は 1,024 枚であるが，高速度カメラで撮影したため，ヘリオグラム作成のための撮像に要した時間は 1 秒であった．これは，従来スペクトルヘリオグラムを作成するために必要な観測時間（数分～数十分）に比べるとじゅうぶん短いといえるが，地球の大気揺らぎ（～1kHz）に追従するには遠く及ばず，回転ガラスブロック等を用いた太陽像の高速移動装置や，より高感度で高速度のカメラが必要である．また，地球の大気揺らぎの影響を可能な限り低減するために，補償光学系を併用することは非常に有効であろうと考える（図 10）．本研究が太陽における高速変動現象の発見や解明に役立てば幸いである．

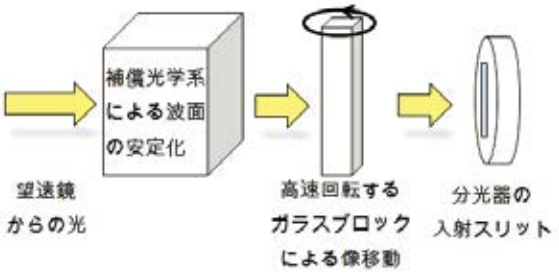

図 10　太陽像移動装置や補償光学系の併用

参考文献

[1] Solar Adaptive Optics : Rimmele, T.R. and Marino, J.(2011) Living Rev. Solar Phys., vol.8, 2-92.

[2]「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．

[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」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．

[4]「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.

[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., 385-399.

[6] The Solar Spectrum 2935 AA to 8770 AA : Second Revision of Rowland's Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths. Moore, Charlotte E.; Minnaert, M. G. J. ; Houtgast J. (1966) Washington D.C.. UNT Digital Library.

[7] http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php.

謝辞

観測の実施にあたって手厚いサポートをいただいた京都大学理学部附属天文台の上野悟助教に，本研究の立案の段階から貴重なご指導とご助言をいただいた同天文台の北井礼三郎准教授（当時）に，また，高速度カメラの使用に際して大変お世話になった近畿大学の井田民男教授に，それぞれ厚く御礼申し上げます.