

# 太陽表面の速度場の振舞い

花岡 庸一 郎\*

## 1. はじめに

太陽の観測において特徴的なことは現象の時間変化が追えることであろう。人間が眺めているタイムスケールで変化していく様子が観測できるわけである。このような変化はだいたいにおいて実際にものが動くことによって起こっているわけで、この運動を直接観測することは太陽表面現象を理解する上で本質的な重要性を持っている。他の星と違って近くにあるので表面の様子がよく見え、しかもその見え方が波長によって違い、そのうえ短時間で変化するのだから、解析のための情報量は空間2次元+波長+時間ということになって、きわめて多くなる。ところが速度を求めるにしても、普通にスペクトルを撮ったのでは空間的に1次元の情報しか得られず、不十分な場合がある。2次元的な速度場を図として視覚化したものを、ドップラーシフトを図にしたという意味でドップラーグラムというが、太陽表面の現象を理解するためにはこのドップラーグラムを作って解析することが必要になる。ドップラーグラムには空間2次元+波長の情報がつまっているわけで、これを時間をおいてどんどん撮っていけば十分な情報が得られるわけである。それでは実際にどの様な方法でドップラーグラムが作られてきたのか見てみよう。

### 1) 写真で作る

吸収線の長波長側と短波長側の単色像写真を用意し、片方を白黒反転してもう片方に重ねる。ラインシフトがなければ画像は相殺されて消えてしまうが、ラインシフトがあるところは白くなったり黒くなったりして残る。このようにして簡単にドップラーグラムが得られるが、2波長のデータしか使えず、また定量的なことはわからない。かつてレイトンが超粒状斑対流の見事なドップラーグラムを作った由緒ある手法であるが、今となってはいささか古風といえよう。

### 2) 写真をもとに画像処理して作る

上の写真で作る作業を計算機にさせるものである。吸収線付近の複数の波長で撮った単色像写真をマイクロ密度計で測定し、デジタルデータに直す。得られたデータから画像の上の各点のラインプロファイルがわかるので、これからラインシフトを計算し、画像を合

成すればドップラーグラムができる。この方法は、定量的な解析はできるものの、やたら労力を食うのが欠点である。

3) 観測の時に画像をデジタルデータで取り込んでおいて処理する。

2) で写真を使う代わりに CCD カメラなどを使って画像をデジタルデータで取り込む。太陽でも最近の流行は CCD である。写真を使った場合の労力の大半が軽減される。先にも書いたが、観測から得られる情報量は膨大であり、場合によっては解析にかかる労力で使えるデータ量が決まってしまうので、初期のデータ処理が簡単にできるようになることはかなり重要である。

いずれにしても最初に単色像を撮らなければならないが、狭帯域のフィルターを使ったり、スペクトロヘリオグラフを使ったりする。複数の単色像を撮るには少し時間がかかるが、フランスには複数波長の単色像を1回の露出で撮れる便利な器械がある。

さて、本稿では活動領域に見られるダーク・フィラメントの中のプラズマの運動に焦点を当て、上に述べた2)の方法でこれを解析した結果について述べる。

フィラメントは磁力によって浮いている雲のようなものであるから、その中のプラズマの運動はコロナ中の磁場構造を考える鍵になる。しかし、その運動は今まで案外はっきりしたことはわかっていなかった。全体的な上昇運動があるとか、一方の足からもう一方の足へ流れていく運動があるとか、あるいは両方の足へ流れ込む運動があるとか、諸説あって決定的なものはない。

我々がフィラメント中の運動を解析したのは NOAA 4171 という活動領域で、1983年5月に1週間ほど連続で観測された。ドップラーグラムからわかるのは視線速度だけであり、1回の観測で速度を求めても運動の本当の方向はわからない(視線に垂直な速度成分はわからない)。しかし、1週間観測があると、この間に太陽の自転で活動領域を見る向きが変わるので、運動が1週間の間にあまり大きく変化しなければ3次元的な運動の方向を知ることができる。

フィラメント中の運動を求める上で問題になるのは、吸収線のドップラーシフトがそのまま速度を表すのではないということである。これは、フィラメント(より一般的には、彩層の上に浮いているものという意味でクラウド)に入る光が既に下の彩層による吸収を受けており、観測されるのはこの光がさらにクラウドで吸収されたも

\* 京大・理 Yoichiro Hanaoka: Velocity Field on the Solar Surface

のだからである。定性的にブルーシフトだレッドシフトだという分にはあまり問題ないが、このようなクラウドのスペクトルを定量的に扱う、つまり速度の大きさを問題にする場合には、背景の彩層のスペクトルまで考慮したベッカーズ (1964) のクラウドモデルによって解析するのが一般的である。

## 2. 観 測

観測は飛驒天文台のドームレス太陽望遠鏡で行われた。観測された活動領域は NOAA 4171 と呼ばれるもので、1983年5月9日から15日まで毎日と18日に観測された。連続的に毎日観測することは天候の影響でなかなか難しいが、飛驒ではこの時期に1週間ほど続けて晴れることがときどきある。観測は天文台の黒河先生が行ったが、筆者もこの時飛驒天文台に滞在中で、ドームレス望遠鏡の使い方の修行中であつた。この活動領域はあまり活発なものではなかったが、フィラメントはよく発達している。この領域の単色像が  $H\alpha -0.8, -0.5, -0.3, \pm 0.0, +0.3, +0.5, +0.8 \text{ \AA}$  の7波長で1日数回、全部で40組ほど撮影された。1回の観測で各波長ごとに何枚も写真を撮り、シーイングの良い瞬間をとらえるのである。図1にこの内のひと組を連続光の像と共に示す。最終的にこのような組を1日あたり1~3組、計14組選

んでドップラーグラムを作った。

$H\alpha$  の単色像を撮影するのに用いているフィルターは、リオフィルターと呼ばれるものである。これは干渉フィルターではなく、水晶や方解石を用いた複屈折フィルターで、正常光と異常光の屈折率の差が波長によって異なることを利用し、偏光板と組み合わせて透過する波長を制限している。透過中心波長が簡単に変えられ、また斜め入射の光に対しても透過波長があまり(ファブリ・ペローフィルターほどには)変わらないという利点があるが、やたらに高価である(なんと数千万円)。飛驒天文台で使用しているものは透過幅  $0.25 \text{ \AA}$ 、波長可変範囲  $H\alpha \pm 16 \text{ \AA}$  であるが、透過幅がより狭いものや、波長可変範囲が数千  $\text{ \AA}$  にわたるものも作られている。

## 3. データ処理

まず撮影された写真をマイクロデンシトメーターで測定するわけだが、今回の解析では全部で100枚以上測定しなければならないので、35mm版で面積は小さいとはいえ、大変であつた。測定したのは角度にして  $5' \times 5'$  で、活動領域がすっぽり入る。得られたデータを周辺減光の補正や未知数の部分の多いリオフィルターの特性の補正などを行い、最終的には像の各点での明るさを周辺の静穏領域の明るさを基準としてあらわしたデータを得

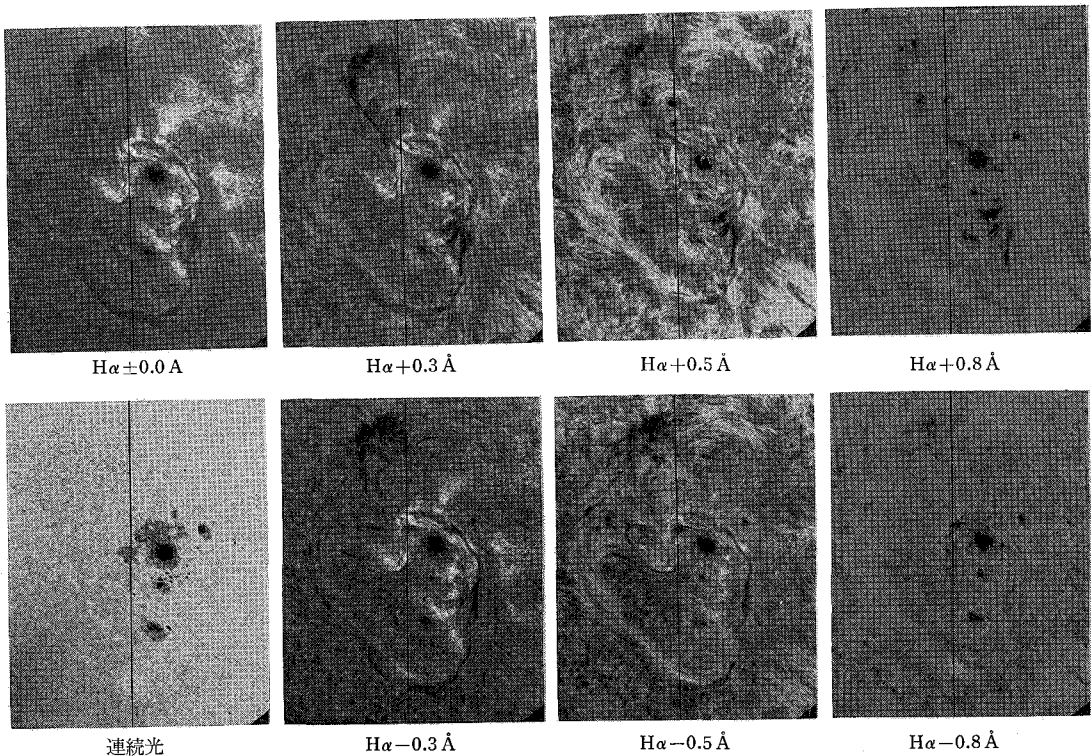


図 1 活動領域のフィルター写真の例

た。こうして得られた各波長のデータから、各データの間で位置合わせをおこなった上で、各点における  $H\alpha$  線のドップラーシフトを求め、ドップラーグラムを合成した。図2に  $H\alpha$  像とそれらに対応するドップラーグラムを、紙数の制限があるので4組だけ示す。ドップラーグラムにおいて白はブルーシフト、黒はレッドシフトに対応している。数日にわたる観測の場合、太陽の自転で見かけ上表面にあるものの形が変化するので、これらの図では地図のように円筒図法で投影した形にして、直接比較できるようにしてある。そもそもどれを以てひとつひとつのフィラメントとするのかちょっと見ただけではわからないので、5月10日の  $H\alpha$  像のフィラメントに番号をふって切れ目を示しておいた。5月9日の  $H\alpha$  像にキットピーク天文台から提供されたマグネトグラムのコントラストを重ねてある。実線が +25 ガウス、点線が -25 ガウスのコントラストである。フィラメントが磁気中性線にほぼ一致していることがよくわかる。また、ブラージュ（やや明るく、模様の細かい部分）がすっぽりコントラストに囲まれているのもわかる（わかりにくい）。

なお、このデータ処理は花山天文台と京大大型計算機センターで行った。

#### 4. 解析結果

ドップラーグラムを見てわかるようにいくつかのフィラメントでかなりの運動がみられる。良く見るといろいろな特徴がある。

まず、フィラメントの全体で速度の絶対値の大きいものはだいたいにおいて太陽面の半径方向、つまり図の中で太陽の中心の方向を示す矢印に平行にのびているものである。統計的に調べると同じフィラメントでも半径方向にのびているときの方が円周方向にのびているときより大きな速度を示す。フィラメントが半径方向と直角にのびているときはその長軸が視線に垂直になっているので、その時に限って視線速度が小さいということは、フィラメント中のプラズマがその長軸方向に運動していることを示している。フィラメントが半径方向にのびていると、太陽が丸いせいで太陽面の中心にあるとき以外は多少なりとも傾いているので、長軸に沿う運動がドップラーシフトとして観測されるのである。また、フィラメントが地面に這うような格好ではなくアーチ状になっていると、半径方向に直角にのびているときでも速度の鉛直成分が見えるはずだが、これは見えていない（フィラメントの両端で見えるものはあるが）。つまり、フィラメントはほとんど水平にのびており、運動もほとんど水平方向になっているのである。ところで、フィラメントの長軸は磁気中性線とほぼ一致する。フィラメント中のものの流れは磁場に束縛されていると考えられるので、磁力線はフィラメントの長軸に沿っていると考えられる。素直に考えると磁力線は磁気中性線に直角になっていそうなものだが、そうはなっていない。このことから考えるとフィラメントは図3(a)に示すような格好をしていると思われる。磁力線はこのフィラメントに平行に

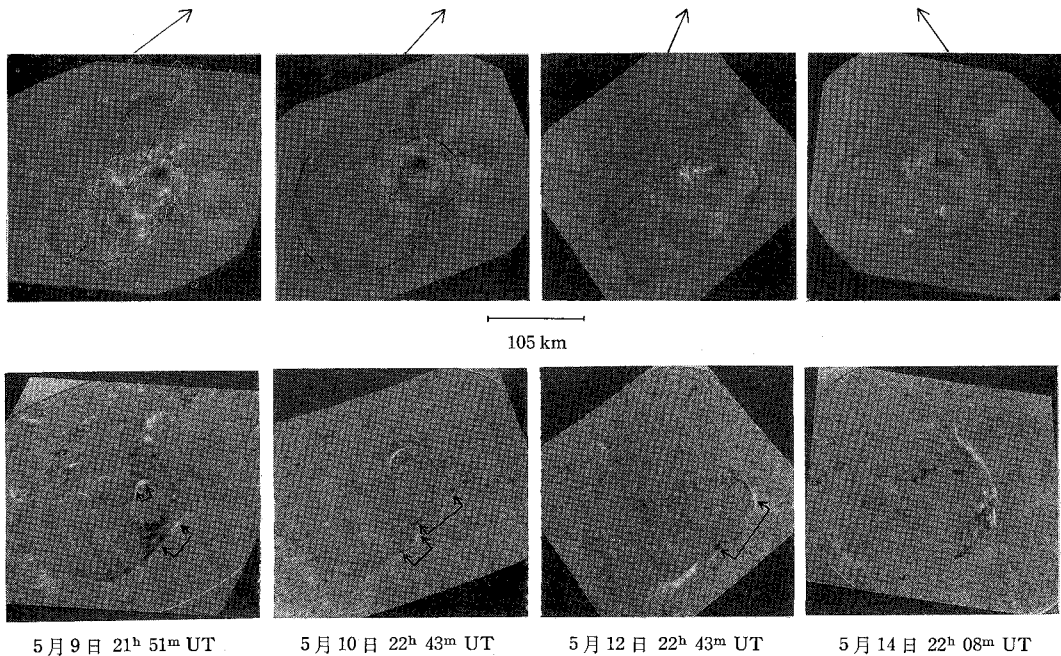


図2 活動領域の  $H\alpha$  像とドップラーグラム

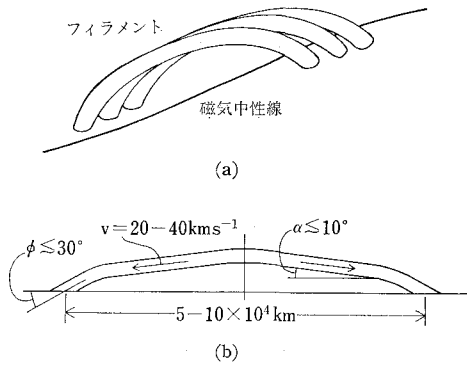


図 3

走っているのである。このような磁場を磁気中性線に対してシアしているといい、いろいろ悪さをするので興味のもたれる状況なのである。

次に個々のフィラメントの速度を良くみてみると、ドップラグラム中に矢印で示したように、太陽面の中心に近い方がブルーシフト、遠い方がレッドシフトになっているものがいくつかあり、その反対はない。フィラメント中の運動が完全に水平方向とすると、太陽の中心に近い方の端に向かって流れるものはブルーシフト、その逆はレッドシフトで見えるわけで、このような見え方はフィラメントの中央部が分水嶺になってそこから両端へものが流れていることを示している。くわしく解析するとレッドシフトの速度の方がブルーシフトの速度より系統的に大きく、フィラメント中の運動が完全に水平ではなくやや下向きになっていることを示している。半径方向に直角なフィラメントで、端でだけ速度が見えるものがあり、しかもそれはレッドシフトである。つまり、フィラメントの端では太陽面に流れ込むような運動になっている。このようなことをいくつかのフィラメントについ

て詳しくみた結果、図 3 (b) のような描像が得られた。フィラメントの中央にプラズマの枯れない源泉があるというのはおかしな話だが、 $H\alpha$  で見えるのはただか数千度のプラズマだけであり、プラズマの供給はより高温のものも考える必要がある。したがって今回の観測だけではプラズマがどのように供給されるのか議論できない。

このような個々のフィラメントの速度は少なくとも数日にわたって同じ様なパターンを継続しており、それ以上の日数だと太陽の自転の影響で見かけ上速度が変わるので続いているかどうかかわからないが、それにしてもかなり安定したものの流れがフィラメントにはあるようである。

### 5. これからの観測

今回の解析は写真をもとに行ったが、前に述べたようにドップラグラムを作るまでにかかなり労力を要する。そこで現在ドームレス望遠鏡につける CCD テレビカメラを用いたスペクトロヘリオグラフの開発を行っている。分光器から出て来るスペクトルを、スリットと走査線が平行になるようにテレビカメラで撮るとそれぞれの走査線がスリットの部分の 1 次元の単色像になる。テレビカメラの画像はフレームメモリで A/D 変換して  $512 \times 512$  画素のデータとしてパソコンに取り込める。太陽像を動かしながら画像をどんどん取り込み、後で特定の走査線のデータだけつなぎ合わせると 2 次元の単色像ができるわけである。さらに吸収線のまわりの複数の波長で同時に単色像を作ればそれからドップラグラムが得られるわけである。必要な波長のデータ以外を捨てて取り込み速度を上げると 1 回の取り込みが 1/30 秒になるので、例えば 512 回取り込むと約 17 秒かかる。このとき縦  $512 \times$  横  $512$  画素のヘリオグラムが得られ、視野は

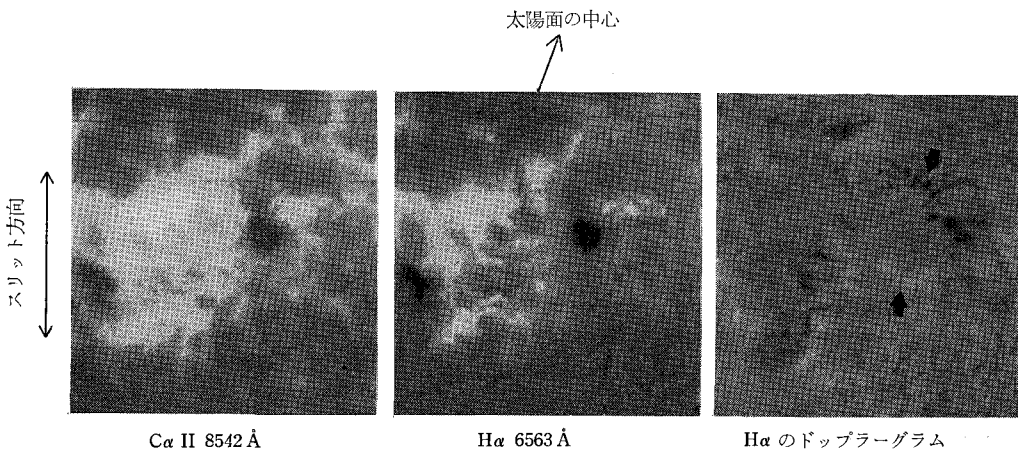


図 4 ヘリオグラムの例 (1988 年 7 月 16 日)

約4'×4'となる。分解能の良い像を得るためには、一瞬で像の得られるフィルター写真より更に良いシーイングが要求されるのが難点である。また、いまのところA/D変換が8ビットなのでやや物足りない。図4は実際に作ってみたヘリオグラムとドップラーグラムの例である。シーイングが良くなかったのであまりみまげがしないが、H $\alpha$ で見えるフィラメントに沿った流れなどが見えている。ドップラーグラム中に矢印で示したのは彩層エバーシェッド流であり、太陽面の中心側がレッドシフト、リム側がブルーシフトになっていて、黒点に流れ込む運動であることが良くわかる。横にすじが入るのは感度ムラその他の影響であり、フラットフィールドリングで消すべきところだが、この時はフラットフィールド用のデータを取る前に曇ってしまった。この方法は実に簡単にデジタルデータが得られるのが大きな強みであり、大量のデータを効率よく処理できる。短い時間間隔でどんどんデータを取り込んでいって後でつなぎあわせれば、ドップラームービーというようなものもできる。今回の解析では時間変化は大ざっぱにしかわからないが、より細かく追跡できるようになるわけである。今後はこのヘリオグラフを早期に完成させ、どんどんデータが取れるようにしたいと思っている。

# ASTRO Observatory Domes

## 天文台の建設は青少年の 未来の心をはぐくみます

当社は豊富な経験と独自の製作技術により美観、耐久性、堅牢性、経済性は抜群です。ドームの屋根葺きには耐蝕性に優れたステンレススチール、鋼板葺きなどがあり、優れた特長を持っております。詳しくはお問い合わせ下さい。

### ◆主な天体観測ドーム納入先◆

宇宙科学研究所 / 東京大学教養学部 / 宮崎大学教育学部 / 東京学芸大学 / 埼玉大学 / 福島大学 / 川崎市青少年科学館 / 杉並区立科学教育センター / 駿台学園一心荘 (北軽井沢) / 駿台学園高校 (東京) / 東海大学宇宙情報センター (熊本) / 栃木県こども総合科学館 (宇都宮) / 日原文天文台 (島根県) / 大分市コンパルホール / 坂戸市中央児童館 (埼玉) / 山崎記念天文台 (高知) / 刈谷市中央児童館 / 宇美青少年育成センター (福岡) / 船橋市立高校 / 都立九段高校 / 都立大森高校 / 慶応義塾高校 (横浜) / 高知学園等の他全国に150余基の実績。

### ASTRO 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321

## 超 高 速 32bit 天 体 画 像 処 理 装 置 シ ス テ ム

# ASTIPS / DSPT9506

世界トップレベルのイメージプロセッサ「T9506」を核に、多様なユーザ要求 (ボードレベルから大型システムまで) に応える超高速、多機能、コンパクトな画像/信号処理システム。

- 主要諸元
- FFT演算速度が世界一
  - 高精度32ビット演算を実行
  - クロック周波数10MHz
  - 画像メモリは512×512×8×3系統
  - 高速データバス転送機能 (10Mbyte/sec)
  - IEEE-796 マルチバス コンパチブル

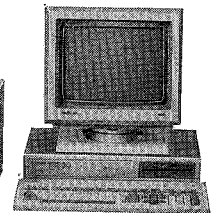
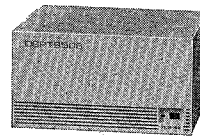
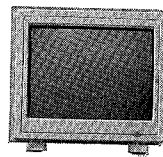
■主要処理速度

入力クロック周波数	10MHz
演算速度	F F T 2.0ms/1024 points, complex
	空間フィルタ 1.0 $\mu$ s/pixel (3×3 mask)
	アフィン変換 400 nS/pixel
	ヒストグラム 700 nS/pixel
積和演算	100 nS/term (64 bit sum)

このシステムは命令、表示などの機能をパソコンに任せて、画像処理演算そのものはDSPT9506本体で行う

ため、スーパーミニコン並みの超高速処理を達成しています。

- ★豊富なオプションボード群 (ITVボード、モニタボード、A/Dボード、フレームメモリボードなど)
- ★使いやすいコマンド形式のソフトウェア
- ★ソフトウェアの開発が容易に行えるサブルーチンライブラリー
- ★パソコンにも接続可 (PASOPIA1600、PC9801、IBM PC/AT はコマンドで対応可能)



〔画像処理システム例〕

(有)荒川電機 / TOSHIBA

有限会社 荒川電機 〒253 神奈川県茅ヶ崎市行谷805  
TEL. 0467-53-4693 FAX. 0467-53-4695