

## 連載

花山天文台で行った生徒実習から【1】

## 太陽の5分振動の検出

西村昌能（元京都府立洛東高等学校）、  
 黒河宏企（京都大学名誉教授）、  
 石井貴子（京都大学理学研究科附属天文台）

## 1. はじめに

京都府立洛東高等学校と京都大学大学院理学研究科附属天文台は連携して2002年から花山天文台の施設を用い、同校の生徒に対する夏期休業を利用した太陽の高分散分光観測を中心とした観測実習を行ってきた。この14年にわたる実習の観測対象は、フレアの光度変化と視線速度変化、サージの速度場、アーチフィラメントシステムの視線速度、差動回転速度、黒点磁場強度の測定などである。これらの生徒観測実習の成果は、日本天文学会ジュニアセッション、日本地球惑星科学連合大会高校生のパスター発表会などで発表された。また、これらの観測実習のうち、アーチフィラメントシステムの視線速度については、天文教育誌上で報告された[1]。

2013年に実施した観測実習では太陽の5分振動を観測することができた。本稿では、生徒の行った観測の結果、解析内容、考察を振り返りながら、5分振動の検出の試みについて、報告したい。なお、図版や一部文章は生徒たちが我々の指導のもと作成したものである[2]。

## 2. 太陽の5分振動

太陽の表面はおよそ5分の周期で振動している。これを太陽の5分振動という。これは、太陽全体にわたるグローバルな振動で、太陽一面に0.4km/sの速度成分のパターンが広がっている。太陽内部の様子を探るのに大変重要な研究方法になっている。その原因は、太陽内部の対流層での乱流的対流によって励起

される固有振動であるといわれている[3]。

この現象は、1962年にLeightonらによって発見された[4]。彼らはCa I、Na I、Fe Iなどの光球起源吸収線の速度場変動が原因である波長のズレ（ドップラーシフト）をスペクトロヘリオグラフによって検出し光球の明るさの空間及び時間変動を調べたのである。

高校生の先行研究としては、国立天文台岡山天体物理観測所の太陽クーデ望遠鏡や6cm小望遠鏡で行われた岡山県鴨方高校科学部の研究[5]やCa II線で行われた米子高等専門学校科学部の研究[6]がある。

## 3. 観測

観測は、京都大学大学院理学研究科附属花山天文台で8名の生徒によって行われた。2013年8月16日～19日の4日間の実習期間中は黒点の出現も少なく、フレアもでなかった。同天文台の太陽館にあるシーロスタットと高分散分光器で、自転速度を調べるために、6301Å～6302Å付近のスペクトルを撮像していた。この時、生徒の一人が「地球大気起源の酸素線はそうでもないのに、太陽の鉄線は何か、くねくねしているように見える」と発言した。それで、かつて著者の一人（石井）が観測に成功したことがある太陽の5分振動が検出できるのではないかと、生徒にやってみるか提案したのである。

この波長域は以下の理由で観測に便利であるので太陽の自転速度測定や黒点磁場の強度測定に良く利用されている。

1) ブレンドしていない、ほどよい強度の太

太陽大気起源の中性鉄線（等価幅がおよそ  $100\text{m}\text{\AA}$ ）2本のそばに地球大気起源の酸素分子線がほどよい波長差の位置に存在し、高分散分光撮像でも同じフレームに収まる（図1から図3）。

2) そのため、地球大気線をリファレンスにして太陽大気線の視線速度測定が精度良く行える。

3) さらに、2本の中性鉄線は大きな有効ランダム因子を持つので、磁場の影響でゼーマン分岐し、磁場測定が可能である。

4) ほどよい強度の吸収線であるので、線形成領域が光球中であり、動きのはげしい彩層の影響を除外できる。

#### 4. 観測装置

太陽館にある口径  $70\text{cm}$  のシーロスタット望遠鏡に附属する高分散分光器（波長分解能 50 万、スリット幅  $100\mu$ 、スリット長が太陽面上で約  $5\text{万 km}$ ）を使用した。

使用した波長域は  $6301\text{\AA}\sim 6304\text{\AA}$  付近である。この波長域は太陽大気の中性鉄  $\text{Fe I}$   $6301.508\text{\AA}$  線、 $6302.499\text{\AA}$  線の2本の吸収線に地球大気起源の酸素分子線  $\text{O}_2$   $6302.000\text{\AA}$  線、 $6302.764\text{\AA}$  線がある（図3）。

#### 5. 生徒の探究活動

##### 5.1 観測

観測領域は太陽面中心付近となるよう設定し、 $\text{H}\alpha$  画像モニターで太陽面の同じ場所になるように監視した。また、スリット面で太陽面の同じ位置の光を分光できるように太陽面の端3点にマグネットで印を付け、ずれないように太陽像を自動追尾した上に手動で追尾の動きを補正した（写真1）。

観測は2013年8月18日13時40分00秒（日本時間）から10秒間隔のスペクトル画像の取得で行われた。観測は4人一組で行い、トレーリング（位置合わせ）、時刻読み、



写真1 分光器のスリットと太陽像

太陽面の同じ位置の光を分光できるように太陽面の端3点にマグネットで印を付け、ずれないように太陽像を追尾した。

カメラの撮像、記録をそれぞれ分担した。

最初の500秒は撮像位置に不安があったので、解析には利用していない。また、データ取得に手間取って10秒ごとの撮影に間に合わなかった場合は欠測とした。さらに太陽面が雲に隠れたこともあり、13時45分00秒から15時30分00秒の105分間に、10秒ごとの260個のスペクトル画像データが取得できた。時刻の精度は、撮像のタイミングでほぼ決まり、0.2秒程度と判断される。データは全てTIFF画像として保存された。

##### 5.2 解析

得られたスペクトル画像は国立天文台提供のマカリ[7]を利用して数値化しスペクトルトレースにした。

地球大気起源の吸収線を利用して分散方向の1ピクセルあたりの波長の測定を行ったところ、 $0.0032\text{\AA}/\text{ピクセル}$ の値を得た。

次に、スペクトル画像のスリット方向のピクセルあたりの太陽表面での実長を調べた。 $\text{H}\alpha$  モニターに記録されているスリットの形と太陽像を比較して、太陽面でのスリット長が  $50000\text{km}$  とわかった。これをスペクトル

画像でのスリット方向のピクセル数で割り、48km/ピクセルを得た。

スペクトル画像のスリット方向(y軸座標)でスリットやCCD上でゴミの少ない320ピクセルから420ピクセル間で切り取ったスペクトルトレースをマカリで作成した。この間は太陽面実長でおよそ5000kmになる。

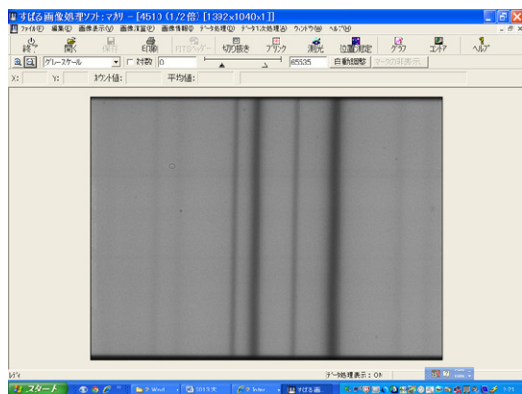


図1 マカリで表示したスペクトル画像  
何本かの縦の黒線が太陽大気と地球大気の吸収線である。

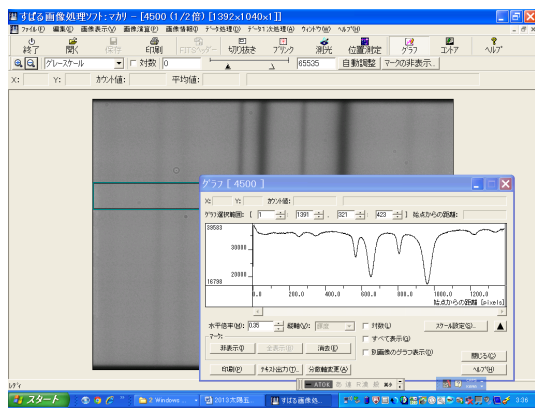


図2 マカリで画像データを数値化し、スペクトルトレースを作成しているところ

作成したスペクトルトレースを利用して地球大気起源の酸素分子線を基準にして、太陽大気起源の中性鉄線の波長のずれをピクセル単位で測定した。その際、Fe I 6302.499

Å線とO<sub>2</sub> 6302.764 Å線、Fe I 6301.508 Å線とO<sub>2</sub> 6302.000 Å線の2つのペアを用いた。

4本の線の波長測定については、それぞれの線の深さの2分の1の線幅中央値とした(半値幅中央波長、図4)。コンティニュームの位置はスペクトルトレースの吸収線の少ないところで、一番明るい場所と仮定した(図3)。

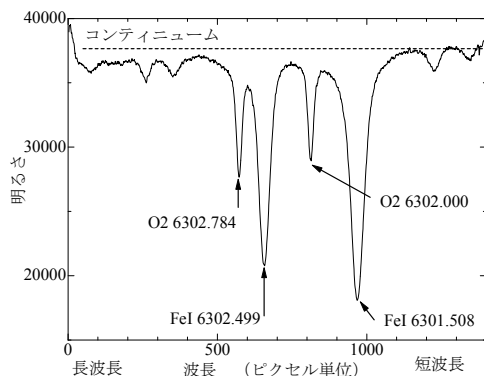


図3 スペクトルトレースの例  
縦軸は光の強さ(明るさ)、横軸はピクセル単位の波長。右側が短波長。

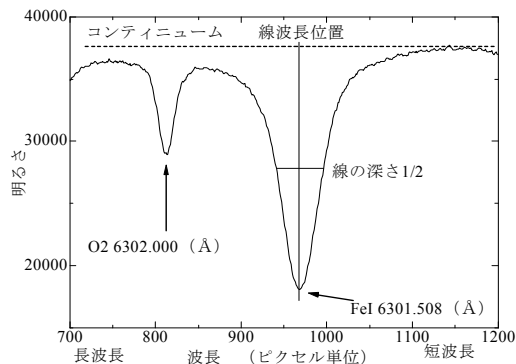


図4 吸収線の波長の決定方法

生徒は、260個のスペクトル画像データに対して20ステップの作業をして、線波長を決定し、酸素分子線に対する中性鉄線の時刻

ごとの波長のずれ（ピクセル単位）を測定した。

また、測定領域の粒状斑などの寄与を調べるために、同じスペクトル画像データでスリット長全域のスペクトルトレースを再度作成し、コンティニュームの明るさを調べた。これらの作業に、数ヶ月を費やした。

### 5.3 結果

生徒たちの研究で得られた結果を図5に示す。

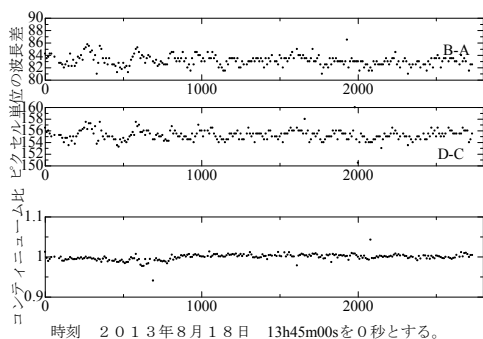


図5 時刻（秒単位）に対する太陽の吸収線の波長変動（上、中）と測定領域とスリット長全域のコンティニュームの明るさの変動（下：コンティニューム比と表記）

図5で上図（B-A）は、 $O_2$  6302.000 Å線 A に対する Fe I 6301.508 Å線 B のずれ量、中図（D-C）は、 $O_2$  6302.764 Å線 C に対する Fe I 6302.499 Å線 D のずれ量をそれぞれピクセル単位で表す。また、下図は、スリット長全体のコンティニュームの明るさの時刻ごとに表したものである。

上図、中図とも、明らかに4ピクセル程度の周期的な波長のずれがわかる。この周期は目分量で300秒程度と見積ることができた。つまりこの段階で5分の周期的な波長変化があることが分かった。また、コンティニュームの明るさの変動は見られないと言える。し

かし、目分量では、はっきりしないので、高速フーリエ変換ワークシート[6]を利用して、パワースペクトラムを調べてみた（図6～図11）。

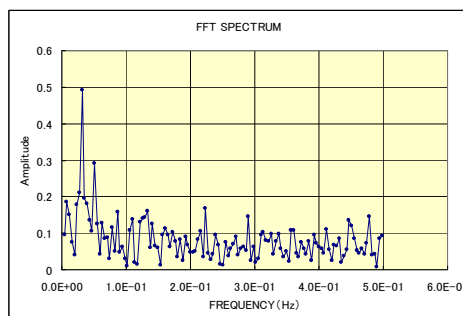


図6 B-Aのパワースペクトラム  
ピークは振動数 0.003137 の位置である。

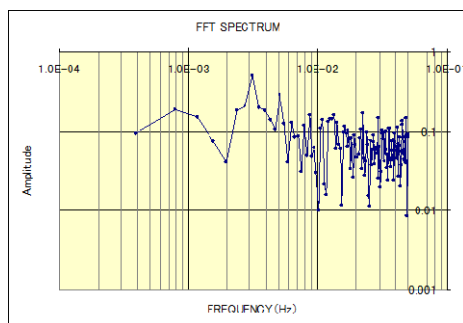


図7 図6を対数表示にしたもの

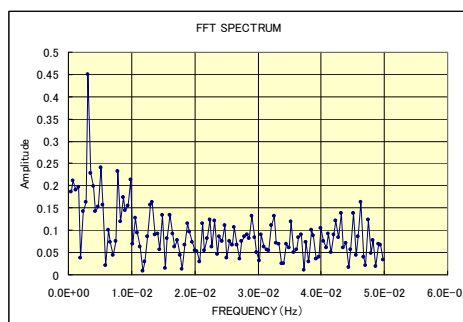


図8 C-Dのパワースペクトラム  
図6A-Bと同じ振動数0.003137にピークがみられる。

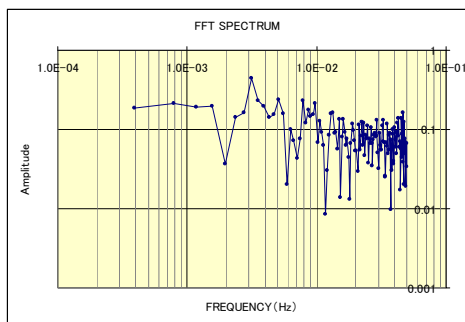


図9 図8を対数表示したもの  
図6~9から振動数0.003137にピークが見られた。これを周期にすると318.8秒となった。分単位に直すと5.3分となる。

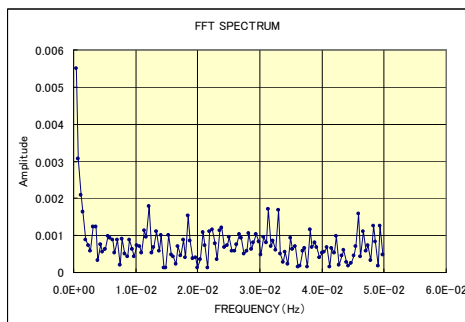


図10 スリット長全体に対するスリット位置(320ピクセルから420ピクセル)の明るさの変動のパワースペクトラム

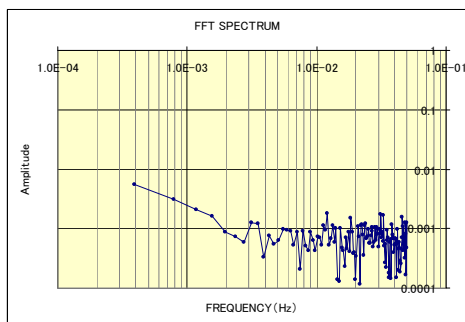


図11 図10を対数表示したもの  
図10、図11からは、観測範囲の明るさの変を調べると、振動数のピーク値は0.000392であり、これは、周期にすると全観測時刻に相当する。

### 5.4 考察

独立する2組の吸収線の波長差から、同じ周期318.8秒が得られた。一方、観測領域とスリット長全体の明るさの変動には、周期性が見られない。このことは、周期318.8秒が粒状斑のような対流現象を含まず太陽の5分振動を捉えたものであるといえる。318.8秒は5.3分にあたり、5分を少し超過する。大脇ら[6]によるCaK線フィルターグラムによる観測でも5分振動の値は5分を少し超過するものである。

5分振動の速度を求めると図5の振幅が最大4ピクセル程度であることから2ピクセルの変動がドップラー効果による速度として

$$V = 2 \times 0.0034 \text{ \AA} \times 3 \times 10^5 \text{ km/s} \div 6300 \text{ \AA} = 0.33 \text{ km/s}$$

となり、一般的に言われている0.4km/sの値に近いといえる。

### 6. 生徒の感想

生徒、特に二人の生徒(文献[2]の最初の2名)がこの研究に活躍した。研究結果は、日本学生科学賞に応募し、京都読売新聞賞を受賞した。また、学会以外の発表会での報告を多数行った。

その中で生徒は、「太陽の5分振動の観測をしてきた中で、様々な機材に触れる機会があり、とても貴重な体験ができました。私たちは、太陽の5分振動だけでなく、浮上磁場領域や黒点、太陽の自転周期など様々な観測を行いました。今回の5分振動の観測では、長時間、休憩が無く、とても忍耐力のいる作業でしたが、観測終了後は疲労感を忘れてしまうほどの達成感を味わいました。その後、学校の放課後を利用して、観測データをまとめる作業を行いました。この作業はミスが多かったりと大変でしたが、努力した甲斐あって研究の成果を出せたことを非常に嬉しく感じました。」という感想を提出している。

また、卒業後にも、「この太陽の5分振動の研究が高校生活の中で、自分に残したものが大きい。」旨の感想を著者に送ってきてくれた。

## 7. まとめと課題

京都大学大学院理学研究科附属花山天文台で行った生徒実習による高分散分光観測において、地球大気起源の吸収線と太陽大気起源の吸収線の波長差の時間変動から太陽の5分変動を見出すことができた。今回、生徒たちが求めた5分振動の値は5.3分であったが、他の先行研究と比較して満足できる値である。

第一の課題としては、観測誤差の問題である。撮像時刻については、観測を装置の扱いの習熟ののちに行い、撮像手順の合理化を行ったので0.2秒以内の観測誤差になると考えている。しかし、同一の太陽面を観測できたかという問題が残る。太陽を追尾装置で追いつながら、スリット面上の太陽の縁にマークをし、手で追尾補正を行った（写真1）。太陽面の中心を観測対象としたが、解析範囲を5000kmとしたので、太陽の振動セルサイズが5000kmから10000km程度（柴田ら[3]）とほぼ同じ大きさの観測範囲で行ったことになる。この大きさはスリット長の10分の1（太陽全体の280分の1）であり、焦点面での太陽画像で0.7mm程度の長さにあたり、ズレを皆無にすることはたいへん難しいと言える。

5分振動セルは、太陽面全体に広がっている。スペクトルのスリット長は太陽面の長さにして50000km分あるので、スリット長全体で振動セルの視線速度測定が、10セット行えることになる。そうすると、隣り合う振動セルの振幅のズレが観測できる。生徒にも、この測定を勧めたが、受験という時間の壁に遮られ、途中で中止となった。今回はリニア

な解析にとどまったが、面的な解析を、今後への課題としたい。

実習資金捻出の課題もある。実習資金には、生徒の交通費（最寄りの駅から天文台まで毎日タクシーで往復した。）、謝金、消耗品に必要であり、総額30万円程度であった。今までは、科学技術振興機構のサイエンス・パートナーシップ・プログラム（SPP）が課外活動にも利用できていた。しかし、当時は、SPPが授業向け資金に変更された直後で、応募もしていない（現在は、SPPは募集停止になり、その代わりに3年間継続実施の「中高生の科学研究実践活動推進プログラム」が募集されている[9]）。そのため、この事業では、平成25年度京都府高等学校学力向上フロンティア事業および洛東高等学校PTAの援助で行われた。

## 8. 謝辞

観測においては京都大学大学院理学研究科附属天文台のスタッフと京都大学学生であるTAの方々にお世話になった。記して感謝の意を表したい。

## 9. 文献

[1] 西村昌能、岡和田健文、黒河宏企、石井貴子（2011）「2010年洛東高校 花山天文台太陽観測実習報告」、天文教育 23 巻 5号（2011年9月号）p51

[2] 早川孝徳、宮崎純一、中野達貴、板谷由菜、小林亮介、瓶子実紗央、各務正浩、上籠俊輝、京都府立洛東高等学校 太陽観測チーム（2014）「太陽の5分振動検出の試み」、日本天文学会2014年春季年会大16回ジュニアセッション予稿集 p40

[3] たとえば 柴田一成・大山真満・浅井歩・磯部洋明『最新画像で見る太陽』p26、ナノオプトニクス・エネルギー出版局、2011年発行

[4] Robert B. Leighton, Robert W. Noyes, and George W. Simon (1962) ApJ 135 474

[5] 大本真理子・藤井章仁・秋田 望・石井優菜・大橋千絵・小野隆弘・光井田紀恵 (岡山県鴨方高等学校科学部) (2001) 「太陽の 5 分振動の検出に挑む!」、日本天文学会ジュニアセッション 2001 年秋季年会ジュニアセッション講演予稿集 p6

および 大島 修・大西高司・川端善仁 (2002) 「太陽の 5 分振動の観測 -科学部の活動を指導して-」、第 7 回天体スペクトル研究会集録 p3

<http://otobs.org/etc/solar5ocsillation.pdf>

[6] 大脇秀捷、加川庸一、川上優太、久古貴将、富田拓也、波多野瑤、林原真史、笹谷航、田原早央莉、永見莉奈 (国立米子工業高等専門学校・科学部) (2013) 日本天文学会第 15 回ジュニアセッション講演予稿集 p114

[7] <http://makalii.mtk.nao.ac.jp/>

[8] Y. Akiyama (2008) 高速フーリエ変換ワークシート FFT-Plot Rev.1.0

[9]

[http://www.jst.go.jp/cpse/spp/o\\_kikan/index.html](http://www.jst.go.jp/cpse/spp/o_kikan/index.html)



西村 昌能

\* \* \* \* \*