

連載

花山天文台で行った生徒実習から【2】
差動回転の検出西村昌能（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

太陽が自転していることを最初に見いだしたのはガリレオ・ガリレイであった。彼は、黒点のスケッチ観測から黒点が西から東へ日ごとに移動することを見いだした。さらに移動による黒点の形状変化(周縁ほど細くなる)、黒点間の距離変化(周縁ほど狭くなる)、黒点の移動の速さの変化(周縁ほど動きが遅い)、同一経線上の黒点では、そのようなことはないことから黒点が太陽表面の現象であること、太陽は球体であり、同時に太陽はほぼ1太陰月で、自転していることを論理的に証明した[1]。

Carrington は、1860年代に、それまでの太陽観測から黒点の移動速度は赤道に近いほど大きくなること、つまり差動回転を発見した[2]、[3]。

また、1888年に、Huggins は、分光学的に視線速度測定をし、太陽の差動回転をみいだすことができたという[4]。

このような観測の積み重ねによって、太陽の自転周期は緯度ごとで異なり、赤道付近が速く、高緯度に近づくほど遅くなることが発見された。この現象を太陽の差動回転もしくは差動自転(differential rotation)という。英文表記から、この現象を微分回転ということもあった。また、赤道加速とも呼ばれている。

1961年、Babcock は、この差動回転が黒点を作り出すという仮説を提案した[5]。この仮説は、現在でも生きていて、黒点形成理論の基礎となっている。つまり、差動回転は、太陽物理の基本的物理量といえるのである。

2. 洛東高校の観測

洛東高校の花山天文台太陽観測実習は、2002年から始まった。このとき、すでに太陽の自転速度測定の実習を行っている[6]。

その後訪れた太陽活動極小期の時期には、フレアなどの活動現象が少なくなったので、もっぱら精力的に太陽の差動回転の観測を行ったのである。

2.1 観測について

(1) 観測装置とスペクトル

観測装置とその諸元、利用した波長域などは、前号の報告[7]と同じである。

観測は、太陽館のシーロスタットとその分光器のスリット面上に結像した白色光太陽像(直径18cm程度)の移動方向から天球上の東西方向を決め、次にOHP用紙に印刷した太陽面経緯度図(当日の太陽面中心緯度 B_0 を考慮したもの)を太陽の自転軸の傾き(P)の値だけ傾け、太陽周縁の緯度を合わせて、スペクトル画像を撮影したのである。

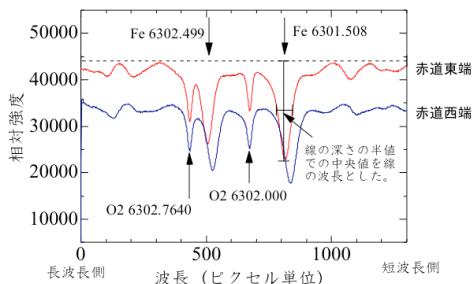


図1 観測された鉄吸収線の偏移

赤道における太陽面東西での視線速度の違いが分かる

自転速度は、ドップラー効果によるスペクトル線の変位量を地球大気起源の酸素の吸収線の波長との比較から求めた (図 1)。

太陽面の西端から来る光は、地球に近づくので短波長側にずれ、同様に、東端から来る光は、地球から遠ざかるので長波長側にずれる。波長のずれの量を $\Delta\lambda$ とし、静止状態でのスペクトル線の波長を λ 、太陽の自転速度 (視線速度) を V 、光速を c とすると

$$\Delta\lambda/\lambda = V/c \quad (1) \text{式}$$

で表すことができる。この (1) 式を利用し太陽の自転速度を求めた。生徒にとっては、分かりやすい原理のようである。

波長測定は、マカリ [6] を利用して画像スペクトルをスペクトルトレースに変換して行った (図 2)。

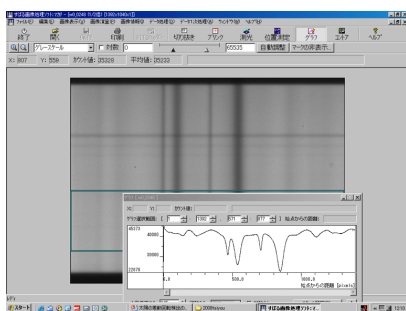


図 2 マカリ上に表示されたスペクトルとマカリによって作成されたスペクトルトレース

(2) 観測期間と観測方法

差動回転の観測を集中して行ったのは、太陽活動の極小期にあたる 2007 年、2008 年、2009 年であった。観測方法は年度の進行につれ観測方法や解析方法を検討する中で、改良を重ねて行くことができた。

2.2 2007 年の観測

2007 年は、緯度 0° から 60° の間 10° きざみでスペクトルを 2 セットずつ撮影することに

した。さらに、プロミネンスの根元の光球部分のスペクトルも撮影した。プロミネンスの緯度は、ザートリウス望遠鏡での $H\alpha$ 画像スケッチから求めた。プロミネンスの緯度はスケッチからかなり正確に確かめることができるからである。その後、地球の自転によるドップラー変位量を差し引いた。太陽の南中時を少しでも離れると地球自転によるドップラー効果はかなり効いてくるためである。観測日時は、2007 年 8 月 16 日～19 日の 10 時～16 時であった。

ドップラー変位量を求めるには、吸収線の中心波長を知る必要がある。この年は、線の一番深い波長を中心波長とした。

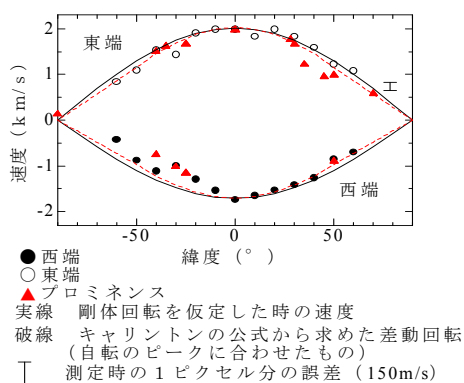


図 3 2007 年の観測で得られた差動回転曲線 [8]

図 3 は、緯度ごとの自転速度をプロットしたものである。●は太陽のリムの西端、○は東端での視線速度、▲は太陽のリムに見えたプロミネンスの根元での視線速度 (緯度が正確に求まると考えられる) を表している。地球自転によるドップラー効果の補正を計算によって行った。実線は、剛体回転を仮定したときの自転速度を表す。緯度 0° の視線速度を基準にしている。なお、地球の公転によるドップラー効果は考慮していない。

恒星を基準にしたキャリントンの公式 [9]

$$\xi = 14.38 - 2.7 \sin^2 \phi \quad (2) \text{式}$$

ここで ξ は恒星に対する一日の太陽の自転角度(°)、 ϕ は太陽面緯度(°)をそれぞれ表す。この(2)式を図3に当てはめてみると破線のようになる。この図からは、差動回転と剛体回転を分離するのは、かなり難しいと生徒たちも考えた。

2.3 2008年の観測

2008年の観測期間も太陽に黒点は無く、活動領域も少なかった(図4)。



図4 京都大学理学研究科附属飛騨天文台で撮影された2008年8月22日の太陽H α 画像
生徒実習期間は太陽表面に顕著な活動領域が少なく、黒点は見えなかった。

観測は太陽の緯度0°から60°の間と両極を15°きざみでスペクトルを2セットずつ以上で、撮影することにした。前年の10°刻みは操作が難しいと考えたためであった。また、前年とことなり、太陽中央も参考のために撮影した。

観測時刻は、2008年8月20日～21日のそれぞれ10時20分～16時までであった。

この年は、吸収線の波長測定は吸収線の深さの1/2の所の線幅の中央値とした。線の深

さを求めるために利用したコンティニウムの高さはスペクトルで一番明るいところを結んで見つけた(図1)。

その後、地球の自転によるドップラー変位量を差し引いた。

図5は、緯度ごとの自転速度をプロットしたものである。□は太陽のリムの西端、○は太陽面中央、△は東端での視線速度を表している。図5では、東西端の表記が誤って入れ違っているので注意してほしい。地球の自転によるドップラー効果の補正をしてある。エラーバーは観測数が3個以上の場合の標準偏差値である。なお、地球の公転によるドップラー効果は考慮していない。

恒星を基準にしたキャリントンの公式(2)式を当てはめてみると図5の破線のようになる。実線は、剛体回転を仮定したときの自転速度を表す。それぞれ、緯度0°の視線速度を基準にしている。実線の剛体回転の曲線と比べ、エラーバーより小さな差であるので、なかなか差動回転の検出は難しいといえる。

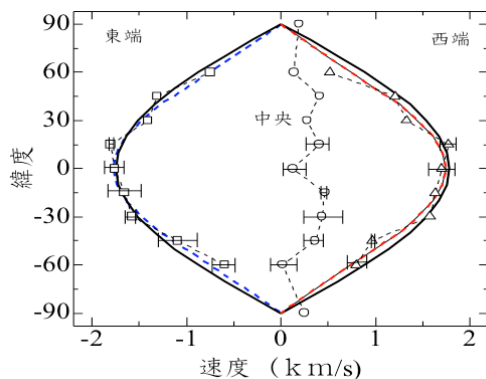


図5 2008年の観測で得られた差動回転曲線(図中の東端、西端の表示が誤って逆になっているので、注意)[10]

また、得られた太陽面中央値が全体に赤方偏移を行っているのが見られた。

そこで、あり得る誤差の原因を以下の様に考えた。

1) ある緯度のところで、リム側にずれた所を測定している可能性。

2) 太陽面の緯度をきっちり決められていなかった可能性。

3) 太陽面でのガスの動きの存在。

4) 図でセンターの値が $0.3\sim 0.5\text{km/s}$ 程度赤方変位しているのは、重力赤方変位の可能性（太陽面中央経度上では緯度によらず自転速度が0ではないか?）。

と生徒たちは考察した。

2.4 2009年の観測

この年は前年の成果を踏まえ、緯度 0° から 60° の間 15° きざみでスペクトルを東西7セット撮影することが出来た。

観測日時は、2009年8月17日～21日の10時～16時までであった。

さらに、前年の成果に検討を加え、地球の自転速度成分などをキャンセルすることを考えた。

$$|V_e - V_w| \div 2 = |V| \quad (3)\text{式}$$

ここで、(3)式中、 V_e 、 V_w はそれぞれ、太陽の同じ経線上にある太陽の自転速度によるドップラー効果+地球の自転によるドップラー効果+太陽の重力赤方変位の総和である。同じ緯度の東西端で観測値を平均することにより地球自転によるドップラー効果分と太陽の重力赤方偏移量がキャンセルできる。このために太陽面の同じ緯度である東西の地点の観測を1～2分以内でできることを目標にして、スリットを移動させるトレーニングを行った。

さらに、図の表現を変更し、緯度ごとの回転角速度で表すことにした（図6～図8）。この表現は、黒点などから求めるのに利用され

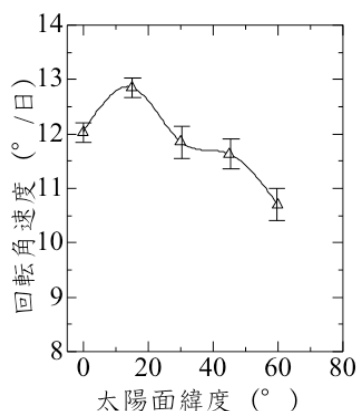


図6 2009年の観測で得られた北半球の差動回転曲線[11]

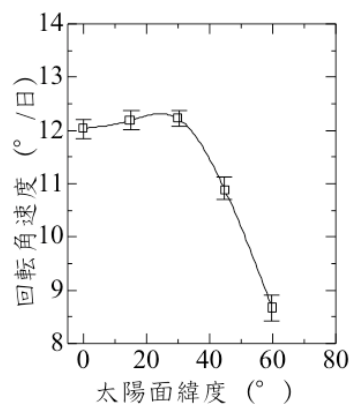


図7 2009年の観測で得られた南半球の差動回転曲線[11]

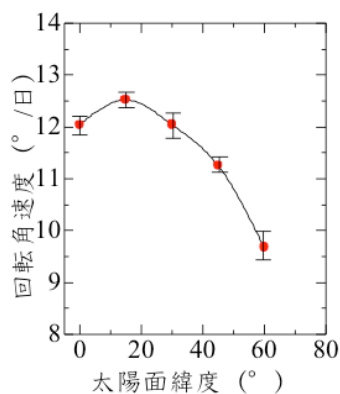


図8 2009年の観測で得られた南北両半球で平均した差動回転曲線 [11]

ている古典的な差動回転の表示法である。このことにより、差動回転の様子が明らかとなった。

2009年の実習生徒たちは、自らが描いた差動回転の図から、図9のような教科書的な結果が出なかったことについて次のような原因を考えた。そしてそれらを検討した。

- 1) 光球ガスの運動の存在
- 2) 地球の自転によるドップラー変位
- 3) 太陽の重力赤方変位
- 4) 測定緯度のずれ

5) スリットが正しく太陽の縁に置かれていたか（スリットの向きが太陽の縁に対して垂直でなく、平行になっていた緯度もある）

1) の光球ガスの運動は太陽の対流に起因するもの（超粒状斑の水平流）や、5分振動によるものが考えられ、値は $0.3\sim 0.6\text{km/s}$ 程度であるが、たくさんのスペクトルを平均しているので、全体としては平均化されていると考えられる。

2) の地球自転と 3) の重力赤方変位は、ほぼ同時刻の東西の視線速度を平均することでキャンセルできている。

4) は天球上の東西方向を決め、そこから太陽の緯度を決めるようにした。が、問題は残っている。

5) はスリットが回転しないため赤道の東西端と東端南緯 15° と西端北緯 15° の4か所では、ちょうど太陽の縁とスリットが平行な状況となり、スリットが太陽周辺に置けたかどうか確認がしにくい。そのため、赤道と南北緯度 15° の値は大きな誤差を含むと考えられる。しかし、太陽面上で 2万 km 内側を測定しているとする 3% 小さい値になる。これは回転角速度になおすと $0.36^\circ/\text{日}$ の値になり、この値をみこんでも、赤道の値はかなり小さくなる。

そこで、生徒たちは、図8の緯度 15° の高まりを見て、これは、差動回転異常ではない

かと考えた。太陽活動極小期が長期間続いていたことからこれに結びつけようとしたようである。

5. おわりに

差動回転の研究は、過去のものではない。差動回転は黒点の位置の記録から160年前に発見された。黒点は高緯度に現れず、極域に現れるフィラメント、極域白斑などを利用するしかない。黒点、フィラメント、極域白斑、光球にみられる磁場パターンで、様子が異なる（図9）。また、黒点を用いた差動回転の測定は、1太陽活動周期以上の長期間の観測が必要である。

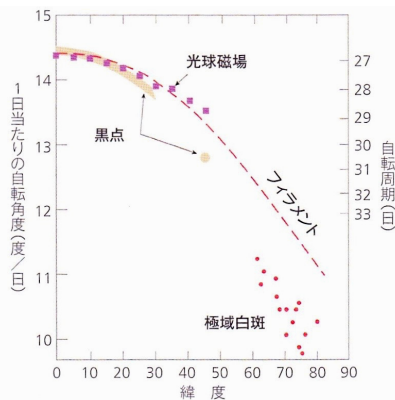


図9 様々な観測によって得られた太陽の差動回転[11]

分光では光球の差動回転（深さ500kmまで）がわかる。黒点などの観測は磁束管の動きを見ているもので、光球自身の動きであるという保証はない。光球よりもっと深いところの動きを表していると考えられる。これは、黒点磁場や太陽磁場に結びついているフィラメントや極域白斑でも同じことでもある。

このように差動回転の観測は太陽に黒点がない極小期の観測が重要である。しかも差動回転の様子が長年月、一定である保証もない。たとえば、Eddy *et al.* [13]は、マウンダー極

小期には、差動回転の度合いが現在の3倍大きかったと報告している。

竹田洋一[14]、Takeda, Ueno [15]は、飛騨天文台DSTの高分散分光器にヨードセルフイルタを装着して、分光学的な手法で細密な差動回転を報告した。その結果は、1970年代～80年代に行われていた分光学的研究と良く一致していて、特に異常な自転は見られないとのことであった。生徒のいう“差動回転異常”は否定されたのであった。

図8の“異常箇所”は北半球(図6)と南半球(図7)の赤道領域の観測値が小さいことが大きく足を引っ張っていることがわかる。前述のように、この赤道部分では、スリットが太陽周縁に平行に当たるようになっている。スリットは回転できない仕様のため、太陽の自転軸の傾きが都合の良い3月から4月にこの研究を行う必要がある。この追観測は未だ、なされていない。

文 献

- [1] ガリレオ・ガリレイ 「太陽黒点にかんする第二書簡」 『星界の報告 他一編』 山田慶児、谷 康 訳 岩波文庫 1976年
- [2] Carrington, R., C. 1860 MNRAS 20 254
- [3] Carrington, R., C. 1862 MNRAS 22 301
- [4] 清水一郎、小野 実、小山ひさ子「太陽黒点の観測」p.36 恒星社厚生閣 昭和44年発行
- [5] H.W.Babcock 1961 ApJ 133 572
- [6] <http://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html>.ja
- [7] 柳真之、山崎史裕、林貴子、松本悠祐、幾山幸治、後藤達也、澤田弘剛 2003 「高分散スペクトルを利用した太陽の自転速度と黒点磁場の測定」日本天文学会第5回ジュニアセッション集録 p.42
- [8] 牧野滉平、古市まどか、小島丈嗣、永下山 朋生、山田みゆき、久保弘樹、板倉春佳、牧野未裕 2008 「太陽の差動回転検出の試み」日本天文学会第10回ジュニアセッション集録 p.48
- [9] 野附誠夫 新天文学講座3 太陽」p.3 恒星社厚生閣 昭和40年発行
- [10] 古市まどか、小島丈嗣、永下山朋生、山田みゆき、久保弘樹、前田聖人、田村由衣 2009 「太陽の差動回転検出の試み(2)」日本天文学会第11回ジュニアセッション集録 p.23
- [11] 大洞一馬、古市まどか、前田聖人、山田みゆき、大西竜司、織田希美、田中健太、西岡 翼、西山拓巳、永戸一史、原 奈於、安田春花「太陽の差動回転について」2010 日本天文学会第12回ジュニアセッション集録 p.98
- [12] 柴田一成・大山真満・浅井 歩・磯部洋明 2011 「最新画像で見る太陽」p.20(株)ナノオプトニクス/エナジー出版局発行
- [13] Eddy, J. A., Gilman, P. A., Trotter, D. E. 1977 “Anomalous solar rotation in the early 17th century” Science, vol.198, Nov. 25, p. 824
- [14] 竹田洋一 2011 「太陽並びに恒星の差動自転の分光学的研究」 第16回天体スペクトル研究会集録 p.73 この報告では、文献[10]、[11]が引用されて、研究の動機として紹介された。
- [15] Takeda, Y. Ueno, S. Solar Physics, Vol. 270, Issue 2, pp.447-461

