

連載

花山天文台で行った生徒実習から【3】

サージの速度場

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花山天文台）

1. はじめに

皆既日食や $H\alpha$ 画像によって、太陽周縁に突出してみえる赤く輝く構造が見られることがある。太陽表面から突出していることから、これらをプロミネンスという。日本語では色と形状から紅炎と表記される。この現象は18世紀初めから注目されていて、フラムスチードやワッセリウスは月の大気現象では無いかと論じていた。1851年、スウェーデン皆既日食でプロミネンスは太陽に付属し彩層上部にあたるのが観測された。1868年、フランス人ヤンセンはインド日食でプロミネンスのスペクトルが数本の輝線からなり、これは成長したガス塊で、主成分は水素で、数分間で激しくその形を変え、運動することを認めた[1]。

プロミネンスの正体はコロナ（100万 K）に浮かぶ低温（数千から1万 K）のプラズマである。組成は太陽と同じくほとんど水素であり $H\alpha$ 線の赤色波長の輝線を発している。このために赤く輝いて見えるのである。密度は 10^{11} 個/cm³ 程度で周辺のコロナより100倍も密度が高い。このプラズマが黒点磁場や太陽本体の磁場に結びついて浮かんでいるといわれている[2]。

プロミネンスには二種類ある。静穏型と活動型である。静穏型は数ヶ月間も存在するものもあり、長期間安定しているが、その形状は、ゆっくりと変形している。典型的なサイズは長さ20万 km、高さ5万 km、幅6千 kmで薄い板状である[2]。活動型というのは、数 km/s～2000 km/s の速度場を持ち、数分から数時間で変形・消滅するものである。この活動型の中に、噴出型プロミネンスとサージの

二つのタイプがある。噴出型プロミネンスは、元々存在していたプロミネンスが、それを支えていた磁場の変化で不安定となり、噴出するものであり、サージは彩層から新たに噴出するものである。噴出型プロミネンスには、最初ゆっくりと上昇しながら、次第に加速して飛んで行くものと、フレアと共に最初急激に加速して飛んで行くものがある。一方、サージはジェット状プロミネンスとも呼ばれ、足元の彩層爆発現象で加速される現象であるが、速度が太陽の脱出速度以下なので、ほとんどの物質は噴出経路をたどって落下する。ジェットの形は磁力線に沿っている[3]。

なお、太陽周縁で明るく見えていたプロミネンスは、太陽の自転によって太陽表面上に來たとき、太陽光球からの光を吸収して黒く見えるようになり、ダーク・フィラメントと呼ばれる。従って、プロミネンスとダーク・フィラメントは同じものである。

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。その後、太陽の活動が極小期に向かう2004年から2007年の3年間に、サージ現象の観測ができた[4]。

2.1 観測装置とスペクトル

観測装置とその諸元は、以前の報告[5]と同じである。観測波長域は $H\alpha$ 線を中心とする $6560\sim 6565\text{Å}$ である。この波長域には、水素の $H\alpha$ 線 (6562.808Å) の他に地球大気起源である H_2O 分子の 6561.097Å 線、 6564.206Å 線、同じく地球大気線である 6561.82Å 線、

6562.85 Å線があり、波長同定に利用できる。

2.2 観測期間

サージの観測を行ったのは、2004年8月16日から20日、2005年8月15日から19日、2006年8月7日から11日の3回である。それぞれ、そのうちのそれぞれの1日にサージ状のプロミネンス噴出が見られ、観測時間を設けた。

3. 解析の原理

光は、ドップラー効果により地球から遠ざかると長波長側にずれ、近づくと短波長側にずれる。このことを利用して、プロミネンスの速度を測定した。この速度は、測定される視線方向の速度成分のみがわかるので、視線速度という。観測された波長のずれの量を $\Delta\lambda$ とし、静止状態でのスペクトル線の波長を λ 、視線速度を V 、光速を c とすると

$$\Delta\lambda/\lambda = V/c \quad (1)$$

で表すことができる。速度場の解析はほぼこの(1)式を利用することで行われた。

4 生徒の解析と結果

4.1 2004年

最初にプロミネンスの視線速度を測定した年であった[6]。この時の観測は何枚か撮像したうちの1枚を解析した。解析した観測データを取得した時刻は、2004年8月18日11時58分49秒(JST)である。この観測の前に付近でフレアが発生している。

図1は、シーロスタットに備え付けられた分光器のスリット面(鏡面仕上げになっている)に反射した太陽像をH α モニタに導いたものである。図1は、データ取得時の太陽の様子を示している。太陽面は図の左側にあり、スリットの位置は画面中央の上下に伸びる遮光版の影の間に見える細い線である。スリットはサージのほぼ根元の位置に垂直に当たっ

ていることが分かる。その光は分光器に導かれ、CCDによってTIFF画像として保存された(図2)。

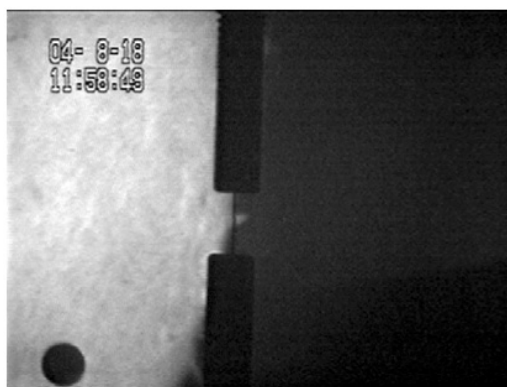


図1 プロミネンスのH α 画像

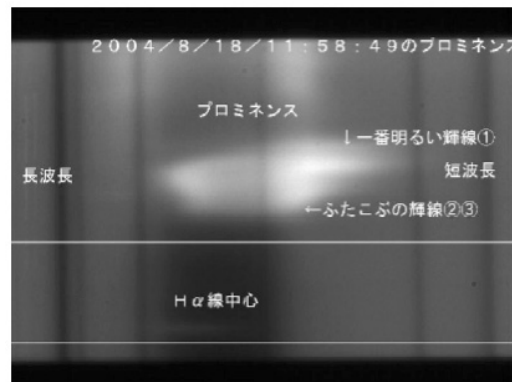


図2 プロミネンスのスペクトル画像

スペクトルを見ると全体に薄暗い所に明るい構造が見られる。図2で上が太陽表面側となっている。つまり薄暗い所はコロナ領域で、そこに散乱光として光球から吸収線や地球大気線が上下に延びている。中央左側の幅広い吸収線がH α 線である。図2の「プロミネンス」と記入されている部分より上側にH α 線の両側に明るくみえる部分がある。これは彩層に相当する。画面中央のH α 線領域が明るくなっている部分がサージの輝線成分で、よく見ると一番明るい輝線成分とふたこぶの輝線成分に分かれている。そこで、サージの輝線成分を二つに分けて解析することにした。

輝線の視線速度を正しく理解するためには、元の $H\alpha$ 線の位置を確定しないといけない。そこで、同じ画像の輝線のない $H\alpha$ 線領域をバックグラウンドとして、輝線のある領域のスペクトルから引算して図3を得た。図2で左右に伸びる2本の線分に挟まれた領域をバックグラウンドとした。得られた CCD 画像はIDLシステムを用いて数値化された。

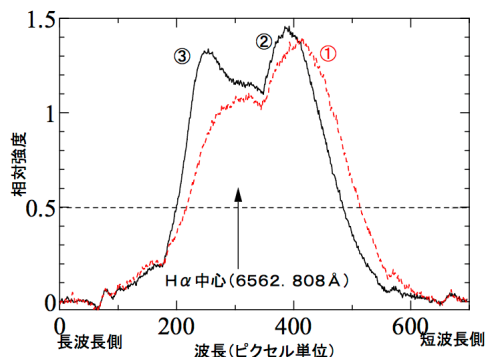


図3 輝線の輪郭

バックグラウンドを引いたもので破線が一番明るい輝線成分、実線がふたこぶの輝線成分を表す。

表1 輝線ピークの視線速度

	ピーク	ドップラー変位 Å	視線速度 km/s
ひとこぶ	①短波長輝線	-0.704	-32.2
ふたこぶ	②短波長輝線	-0.51	-23.4
	③長波長輝線	0.33	14.9

視線速度測定は1) 輝線のピーク位置から求める方法(表1)と2) 相対強度0.5での線幅中央値から求める方法を行った。 $H\alpha$ 線は吸収係数が大変大きいので大気の上層を見ていることになり、サージ全体の動きを見ることにはならない。一方、線幅中央値はサージ全体の平均的な視線速度を示している。

輝線ピーク波長から求めた値は表1にまとめられている。また、ひとこぶ輝線の相対強度比0.5での線幅中央値における変位量は

-11.0km/sで、青方偏移して近づいていることを意味している。ふたこぶ輝線の相対強度比0.5での線幅中央値における変位量は、-18.3km/sでこちらも青方偏移している。プロミネンスの視線速度は全体として10~20km/sの青方偏移を示した。

ふたこぶ輝線の長波長輝線は赤方偏移をしているので、近づいているようにみえるのは実際に近づきながら膨張している可能性もあると生徒は判断した。

4.2 2005年

翌年も8月15日から19日まで観測実習を行った[7]。この年のサージの観測時刻は2005年8月18日11時18分45秒~11時42分頃まで(JST)であった。この時間中プロミネンスが観測された(図4、5)。



図4 太陽の東端に現れたサージ

シーロスタットの分光器スリット面での $H\alpha$ 線モニタ画像。

図5の上部の暗い部分は宇宙空間でコロナ領域である。下部の明るい部分は光球である。光球にある幅の広い吸収線は $H\alpha$ 線で光球とコロナ領域の間に広がる薄暗い部分は彩層である。吸収線を含んだ光球の散乱光がコロナ領域にまで確認できる。

スペクトルは花山天文台のIDLによって

数値化され、バックグラウンドを引き算することで輝線成分のスペクトルトレースが作られた(図6)。この作業を50個の観測データで行い視線速度(図7)と大きさ(図8)の時刻変化を調べた。

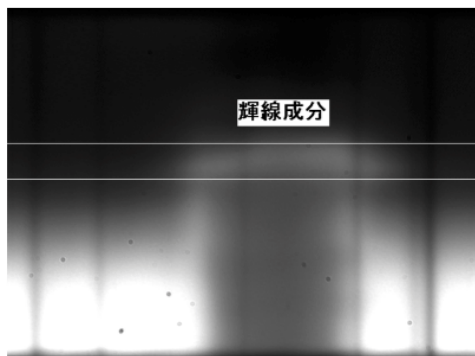


図5 2005年8月18日11時32分11秒のサージスペクトル

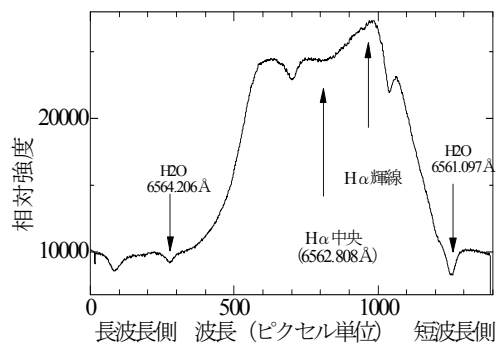


図6 図5の2本の線で囲まれた輝線成分をスペクトルトレースしたものを

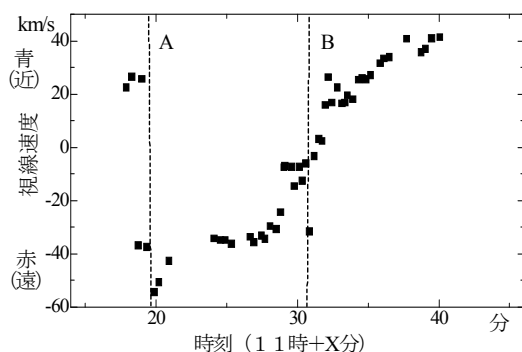


図7 サージの視線速度の時刻変化

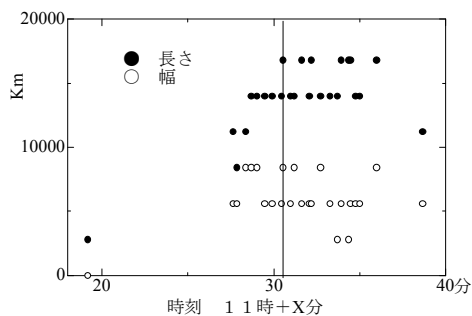


図8 プロミネンスの大きさの時刻変化
黒丸はサージの長さ、白抜き丸はサージの幅をそれぞれ表す。

スペクトルの数値化は生徒が天文台のワークステーションのIDLで行い、実習中できなかった観測データは後日天文台を訪問して行った。図7で、Aの時刻(11時20分頃)から、Bの時刻(11時30分頃)までは赤方変位(遠ざかる)であったものがBの時刻以降は急激な青方変位(近づく)に変わった。

プロミネンスの形状変化(図8)はAの時刻までは、サージが成長したが、Bでは成長せず、かえって縮小傾向にあると判断できる。図7と図8を比べると最初は向こう側の方に成長していたプロミネンスがBの時刻から大きさをそれほど変えずにガスが落ち込み始めたものと考えられると生徒たちは考察した。

4.3 2006年の観測

2006年8月9日11時頃から12時頃までおよそ1時間にわたって、太陽の東端にサージ状プロミネンスが現れた[8]。

この年から得られたCCD画像はすばる画像処理ソフト「マカリ」[9]を利用して数値データ化することになった。観測時刻は、2006年8月9日10時59分05秒~12時00分19秒迄(JST)である。

図9から図11は、2006年の観測データの一例である。図9は、スリット面でのH α 画像、図10は、図9のスペクトル画像、図10

は、そのスペクトルトレースである。

生徒は 150 個以上の撮像を行い、学校へ帰ってから翌年 1 月までにそれぞれのスペクトルデータで、輝線成分を確定してトレースを作り、それからバックグラウンドを引き算する作業を続けて図 12 の輝線成分の視線速度時刻変化時刻変化を作成したのである。

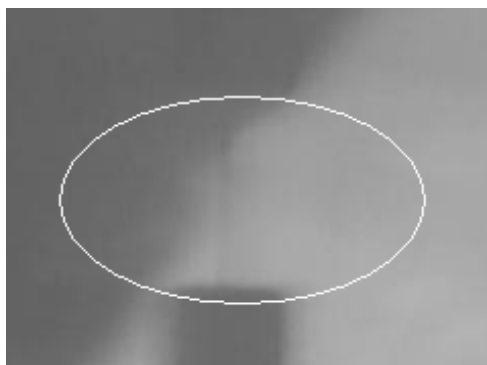


図 9 2006 年 8 月 9 日 11 時 08 分 05 秒のサージ H α 画像

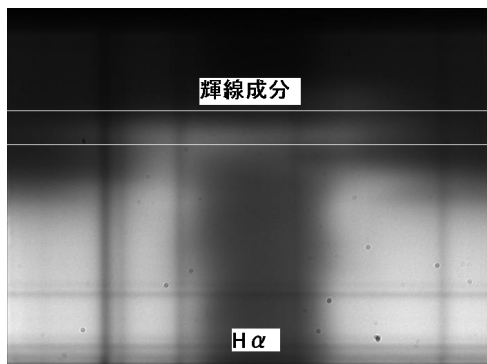


図 10 図 9 のサージスペクトル画像

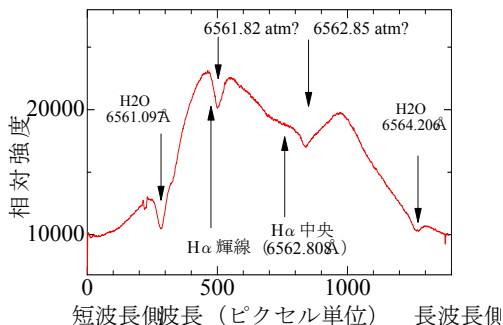


図 11 図 10 のスペクトルトレース
図 3, 図 6 とは波長方向が左右逆になっている。

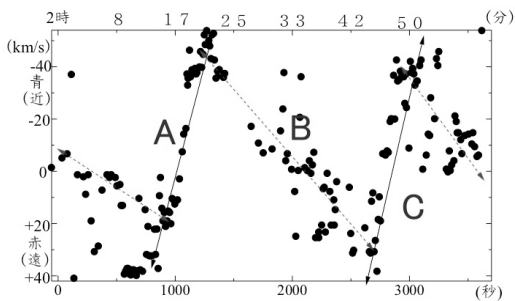


図 12 輝線成分の視線速度時刻変化
時刻は世界時 (UT) 表記である。

生徒たちは根気よく研究を行い、次のような結果と考察を得た。

「図 12 から次のことが理解される。つまり UT2 時 15 分頃から向こう側に伸びるサージが噴出し始め、17 分頃に戻り始めた (A)。その後 25 分頃にこちら側に伸びるサージが現れた (B)。二回目の現象は向こう側に伸びるサージが 44 分頃に噴出し始め、47 分頃に戻り始めた (C)。50 分頃からこちら側に伸びるサージが現れた。

この結果から二方向にサージが繰り返し噴出していることが分かった。

それぞれのサージの運動は等加速度運動とみなせるので、加速度を求めてみた。その結果視線速度から見た加速度は

A では -174m/s^2

B では $+54\text{m/s}^2$

C では -136m/s^2

となった。

グラフにばらつきが見られるのは北側のサージと南側のサージを両方とった為だと思われる。サージが視線に対して傾いていることを考慮するとサージの動きは太陽の重力加速度 (274m/s^2) に支配されていて自由落下運動をしていると考えられる。」

さらに空間的な構造を確かめるために、他の観測を調べてみた。図 13 は TRACE 衛星の紫外域画像である。観測から 40 時間経っ

た画像であるが、その分、太陽の自転によってこちらを向いてきたのでサージを起こした活動領域の様子が分かる。よく見ると活動領域の上にループ状のプロミネンスが見える。また、図 14 は、サージ 2 時間後に京都大学飛騨天文台で得られた当該領域の $H\alpha$ 画像である。物質の上昇下降の様子を見るため波長域を $\pm 0.8\text{\AA}$ ずらしたもので大きな視線速度を持つプロミネンスが二本見えている。これはループの根元にあたるのであろうと考えた。

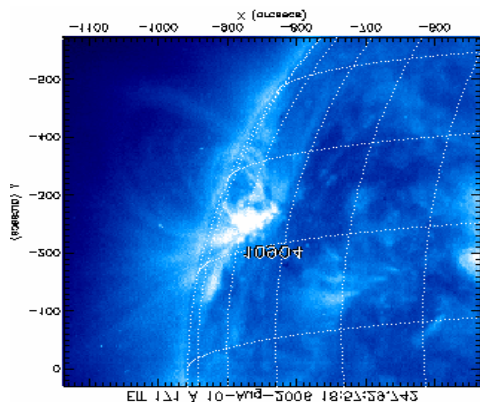
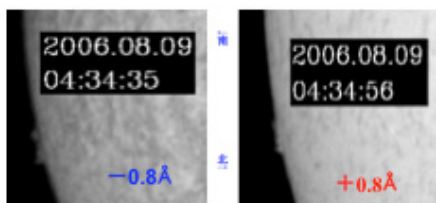


図 13 TRACE の紫外域画像 [10]

観測時から 40 時間後のもので図 9 と方向があらうように向きを変えている。ループ状の磁力線が見えている。



飛騨天文台の SMART 望遠鏡より

図 14 京都大学理学部附属飛騨天文台 SAMRT の画像 [11]

観測時刻の 2 時間後の該当地域の $H\alpha$ 画像。観測波長をそれぞれずらしてある。図 9 とは上下が逆である。

生徒たちは視線速度の変化 (図 12) にこのような幾何学的な構造を加味してこのサージ

の構造を考えた (図 15、16)。図 15 は、サージの噴出の順序を表したものである。①は図 12 で A の前半にあった赤方偏移成分、②は A の後半に、③は B の前半に、④は B の後半に、それぞれ対応するとした。

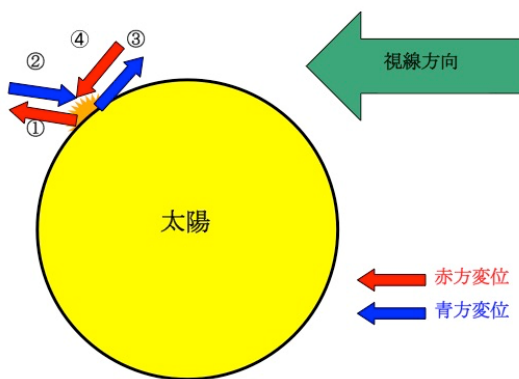


図 15 サージの視線速度変化

噴出現象を幾何学的に見たものである。①から④へとサージの運動が変化したと考えた。

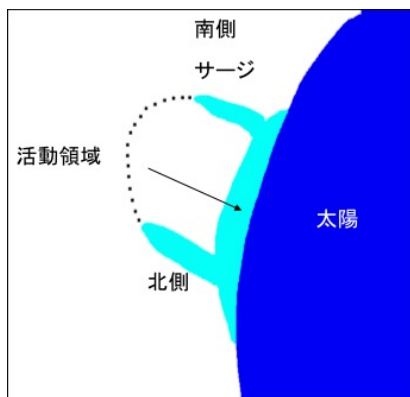


図 16 図 15 から推定されたサージの構造

生徒は活動領域をまたぐサージがあることを考えた。さらにループ状をしている可能性も考えた (図 16)。そうするとループが成長し膨張していくモデルも考えられる。磁力線が膨張しつつ、ガスが落下していくイメージである。この活動領域は後に太陽自転で地球側に現れ NOAA10904 と命名されている。

5. 研究に参加した生徒たちについて

文献[6][7][8]を参照していただくと、青山と森坂の両名が3年間同じテーマで活動していたことが分かる。両名以外にもこの研究に参加した生徒は1名を除き、私が当時顧問をしていたランプリング部（登山部）の選手たちであった。津田、青山、森坂はインターハイ登山大会に出場、青山は国体の山岳競技のクライミング全国2位、縦走全国4位を獲得した。梅村も国体山岳競技全国大会に2年連続で出場した。津田、森坂は兄弟で天文台実習に参加している。なお、津田を除き物理や数Ⅲ・数Cを履修していない文系生徒であった。つまり、花山天文台での実習は、文系の生徒にも、また運動部で活躍している生徒にも大きな魅力を持つものであったといえる。

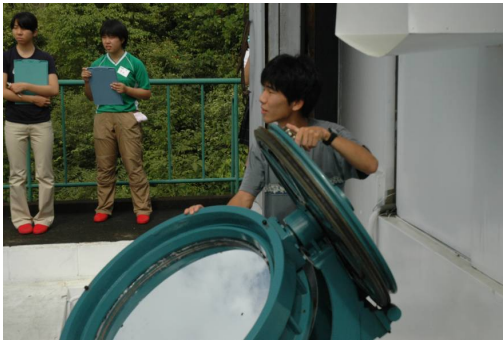


図17 太陽館のシーロスタット第2鏡を操作する青山勇気（1年次）

文 献

- [1] 清水一郎・小野実・小山ひさ子（1969）『太陽黒点の観測』，恒星社厚生閣，pp.27-33.
- [2] 桜井隆・小島正宣・小杉健郎・柴田一成（2009）『シリーズ現代の天文学 10 太陽』第5章 5.7 プロミネンス，日本評論社，pp.184-193.
- [3] 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』，ナノオブ

トニクス・エナジー出版局，pp.28-32

- [4] 西村昌能（2016）『花山天文台観測実習の14年』，第30回天文教育研究会（2016年天文教育普及研究会年会）集録
- [5] 西村昌能・黒河宏企・石井貴子（2016）『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』，天文教育 Vol.28 No.4（2016年7月号），pp.36-42
- [6] 津田直幸・青山勇気・森坂輩之（2005）『プロミネンスの速度場』，日本天文学会第7回ジュニアセッション集録，p.38
- [7] 青山勇気・森坂輩之（2006）『プロミネンスの速度場の時間変化』，日本天文学会第8回ジュニアセッション集録，p.24
- [8] 青山勇気・森坂輩之・梅村智己・吉岡純一（2007）『プロミネンスの速度場』，日本天文学会第9回ジュニアセッション集録，p.48
- [9] <http://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>
- [10] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1998-020A>
- [11] https://www.hida.kyoto-u.ac.jp/SMART/index_j.html

