

連載

花山天文台で行った生徒実習から【4】

黒点磁場の測定

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

太陽の黒点は、肉眼で見たものとしては、中国に古い記録が見られるが、望遠鏡での観測はガリレオ（17世紀初め）が最初である。その黒点に磁場があるということが分かったのは、次のような経過を辿る。つまり、1892年にヤングは、黒点のスペクトルにある吸収線の幅が光球のものより広くなり、また2本に分かれみえる現象を発見した[1]。一方、ゼーマンはナトリウムの炎を、磁場を通してスペクトル観察するとナトリウムの輝線は太く見え、さらに強磁場の下では2本に分裂することを実験によって発見をした。このゼーマン効果の発見は1896年のことである[2]。太陽黒点に見られる吸収線の分岐を精密に測定、黒点の磁場強度を2.6キログaussとし、吸収線の分岐を黒点磁場と結びつけたのはヘールであった[3]。彼は、その後、ニコルソンと共にウイルソン山天文台で、黒点磁場の観測を続け、黒点の先行黒点・後行黒点の双極磁場の極性が太陽の南北半球で逆であり、11年周期ごとに反転すること（ヘール・ニコルソンの法則）を発見している[4]、[5]。

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年から始めたが、最初の年からスペクトル線のゼーマン分岐の検出とゼーマン効果による磁場強度の測定がテーマにあった[6]。この時期は太陽活動極大期直後で、大きな黒点群が見られた。磁場測定は続く2003年、2004年とそれから次の太陽周期に入った2015年の4回である。

2.1 観測装置とスペクトル

観測装置とその諸元は、報告[7]と同じである。観測波長域は6301Å～6304Å付近で、この波長域には太陽大気の中性鉄Fe I 6301.508Å線、6302.499Å線の2本の吸収線に地球大気起源の酸素分子線O₂ 6302.000Å線、6302.764Å線がある。Fe I線のうち6302.499Å線は、ゼーマン効果が効きやすい特徴を持つ。

2.2 観測期間

黒点磁場の観測を行ったのは、2002年8月19日、2003年8月19日～22日、2004年8月16日と19日、2015年8月19日の4回である。2015年は、2002年の観測開始から太陽活動の一周余りを経て、最大期は過ぎたものの、未だ大きな黒点が出ていた時期であった。

3. 解析の原理

黒点の磁場測定には、吸収線のゼーマン分岐を用いる。

原子にある電子のエネルギー準位は通常、縮退して一つの準位にあるが、磁界の中では、準位の縮退が解け準位は3つ以上に分裂する。すると線スペクトルはそれに応じた数の線になり、線の間隔は磁場の強度に比例してくる。この分裂した線間隔の幅をゼーマン分岐量とよぶ。ゼーマン分岐量が分解能以下の場合、線は分岐せず、太く見える。

つまり、スペクトル線は強い磁場の中でゼーマン効果を受けて線が分かれるのだ。ゼーマン分岐量を $\delta\lambda$ とし、 $\langle B \rangle$ を磁場強度（ガ

ウス単位) とすると (1) 式の様に見える。

$$\delta\lambda = g\lambda_z \langle B \rangle \quad (1)$$

ここで、 g は有効ランデ因子 (Fe I 6302 の場合は2.487、Fe I 6301 Åは1.669である[8]。この値が大きいほど磁場の影響を受けやすくなる)、 $\lambda_z = 4.67 \times 10^{-13} \times \lambda_0^2$ 、 λ_0 はゼーマン分岐をしたスペクトル線の中心波長を表す[9]。

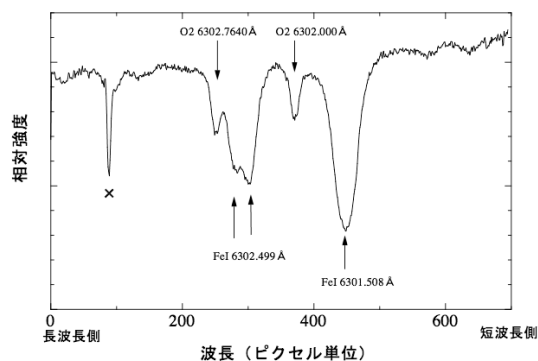
さらに、分裂したスペクトル線は磁場の方向との関係で円偏光や線偏光として観測される。吸収線の場合は、磁場と見る方向との関係で分離の仕方が決まる。磁場の方向から見ると2本の成分が見え、互いに逆向きの円偏光をしている。円偏光の向きから磁場の方向つまり、極性が分かる。磁場に対して横方向から見ると3本の成分のうち、中央成分が磁場方向に直線偏光し、両側の成分は磁場と直角方向に直線偏光する。一般的な角度では、楕円偏光する[10]。

つまり、ゼーマン分岐を示す吸収線を分光すると、強い磁場を持つ黒点の場合、自然光でもゼーマン分岐が観察されるので磁場が測定でき、偏光を用いた場合は黒点の極性とある程度弱い磁場の場合でもその強さが測定できるである。

4 生徒の解析と結果

4.1 2002年[11]

2002年8月19日3時09分(UT)、黒点群 NOAA0069 の中心黒点の半暗部で2本にゼーマン分岐した Fe I 6302 Å線が観測された(図1)。ゼーマン分岐量を測定すると0.1216 Åとなり、(1)式より、半暗部での磁場の強さが2.6 キロガウスと求まった。この値は通常の黒点を示す磁場の強さの典型であるといえる。なお、このときの観測グループは、太陽の赤道での自転速度を分光解析で求めている。



8月19日 3時09分頃(UT)
NOAA0069 黒点半暗部

図1 黒点半暗部で観測されたゼーマン分岐のスペクトルトレース(自然光)。図中×印は CCD 上のゴミによるノイズを表す。

4.2 2003年[12]

続く、2003年も黒点に恵まれた。この年は、観測期間中、図2のように太陽中央に大きな黒点群が存在し続けたので、黒点磁場の時間変化を狙うことにした。

図1、8月22日の太陽像



中央の黒点群の右端の黒点をb、左端をaとしました。

図2 白色光の観測当日の太陽画像(松本孝氏提供[13])

図3は、観測対象にした黒点群画像を拡大したものである。生徒たちは、先行黒点をb、後行黒点をaとした。aの直径は約20000kmであった。

図4は大きい方の黒点aと黒点の無い静穏領域で得られたスペクトルトレースである。

図2、8月21日に観測された黒点a、黒点a,b

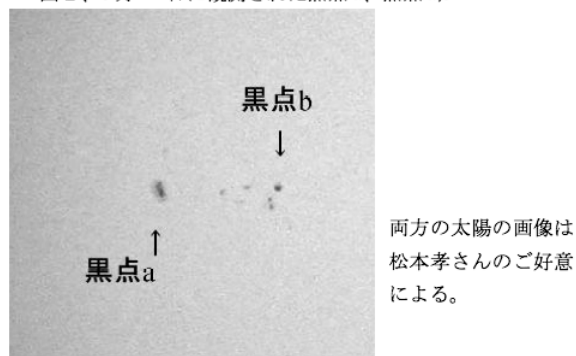


図3 観測した黒点群のクローズアップ[13]

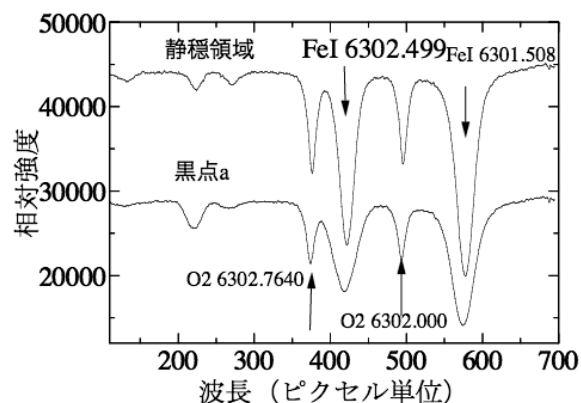


図4 黒点aと静穏領域のスペクトルトレース

図4から、この黒点では、ゼーマン分岐が見られないことがわかる。その理由は、一つにはシーイングが悪いことがあげられる。しかし、磁場の強さが弱いとも考えられた。ゼーマン分岐が見えないので、著者の得意分野である恒星分光学の手法を用いて磁場強度を調べることにした。太陽大気モデルで、合成スペクトルを作成し生徒たちに示すことにしたのである。利用したスペクトル合成ツールSPTOOLは、国立天文台の竹田洋一氏から提供を受けていたものである[14]。

観測スペクトルの半値幅(FWHM)を調べて、磁場強度を変えた合成スペクトルのそれと比較することで磁場強度を求めた。結果を表1に示す。

表1 黒点aとbのスペクトルで得られた半値幅と予想される磁場強度

日付	黒点 a		黒点 b	
	FWHM (Å)	磁場強度 kG	FWHM (Å)	磁場強度 kG
8/19	0.2048	0.94	0.2208	1.11
8/20	0.2208	1.11	0.2112	1.00
8/21	0.2432	1.33	0.2208	1.11
8/22	0.2272	1.17	0.2272	1.17

表1から、この黒点磁場は1キロガウス程度であることが、分かった。生徒たちの考察では、黒点a、bの大きさはそれぞれおよそ20000km、5000kmで4日間大きさに変化が無くまた、磁場の強さも1キロガウス程度で一定であったとしている。さて、黒点の持つ磁気エネルギーEは一時近似で(2)式のように表せる。

$$E = B^2 \times L^3 / 8\pi \quad (2)$$

ここで、B: 磁場の強さ、L: 黒点の直径を表す。

生徒たちは(2)式を利用して黒点a、bのエネルギー量を計算し、それぞれaは 3×10^{32} エルグ、bは 5×10^{30} エルグと求めた。そして、フレアのエネルギー量($10^{29} \sim 10^{32}$ エルグ)と比較して黒点bは単独ではフレアを起こさないと考えた。

4.3 2004年の観測[15]

この年は、さらに研究手法を一步進めて、磁場測定のために1/4波長板と偏光板を利用することにした。前述のように、磁場中を通る光は偏光するので、これらを通してスペクトルを観察するとゼーマン分岐によって分けられた偏光成分の波長のずれの方向から黒点の極性が分かる。これは、京都大学理学部3回生の課題演習に使われている装置であるが、その演習経験者である清原淳子さんにTAとして参加して頂けたのは幸いであった。

円偏光を1/4波長板で直線偏光に変換し、その偏光の方向を偏光板によって測定するこ

とによって極性が分かるという仕組みである。偏光板角度 225 度のスペクトルが短波長にずれる方が N 極で、偏光板角度 135 度のスペクトルが短波長にずれる方が S 極であると清原さんから生徒たちは教えていただいた。

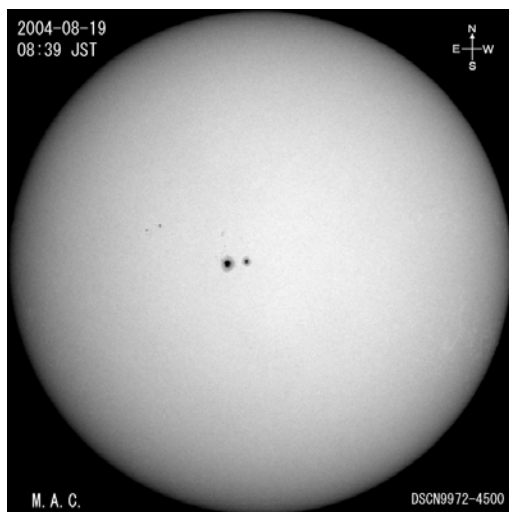


図 5 観測当日の白色光画像[13]

中央にある黒点群が観測対象の NOAA10661 である。また、左側に若い黒点群 NOAA10662 が見える。

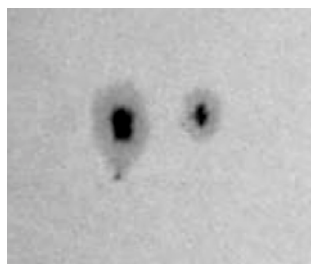


図 6 NOAA10661 付近の拡大図[13]

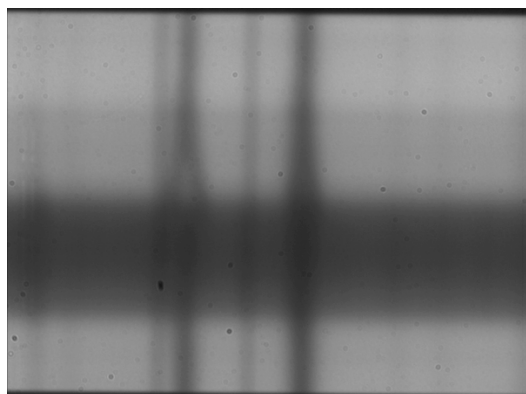


図 7 NOAA10661 のスペクトル

偏光板角度 225 度 左の Fe I 6302 Å 線にゼーマン分岐が見られる。

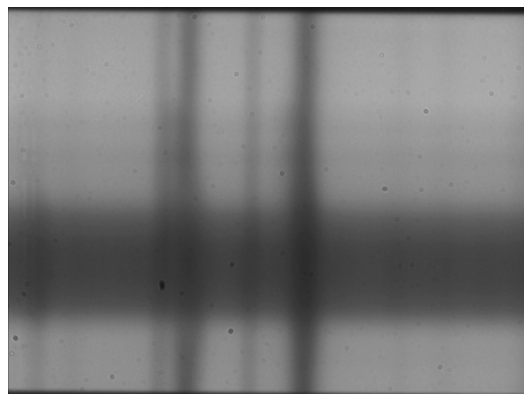


図 8 NOAA10661 のスペクトル
偏光板角度 135 度

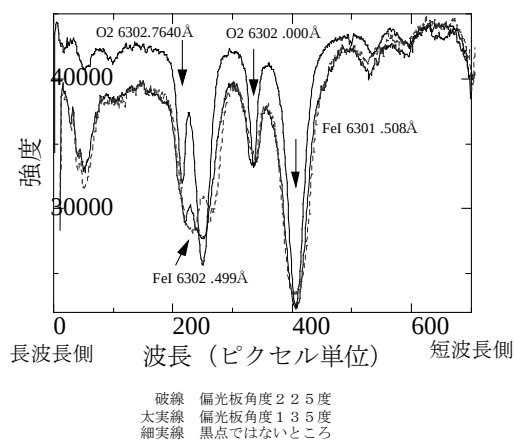


図 9 NOAA10661 のスペクトルトレース

破線が偏光板角度 225 度、太実線が 135 度、細実線は静穏領域で得られたスペクトルである。

図 7 と図 8 は黒点群 NOAA10661 の西側にある黒点の偏光板の位置をそれぞれ 90 度傾けて得られたスペクトル画像である。図 9 はそれらのスペクトルトレースと比較のための黒点の無い静穏領域でのスペクトルトレースである。偏光板角度 225 度、135 度のスペクトルを見るとどちらもゼーマン分岐していることが分かる。酸素線のブレンドがあるので注意が必要であるが、詳しく見ると分岐した吸収線の一番深い波長は偏光板の角度によって異なることが分かる。

図 10 は生まれたばかりの黒点群 NOAA10662 である。このような黒点群を磁場浮上領域という[16]。



図 10 若い黒点群 NOAA10662[13]

先行黒点を efp(N 極)、後行黒点を eff(S 極)とした。

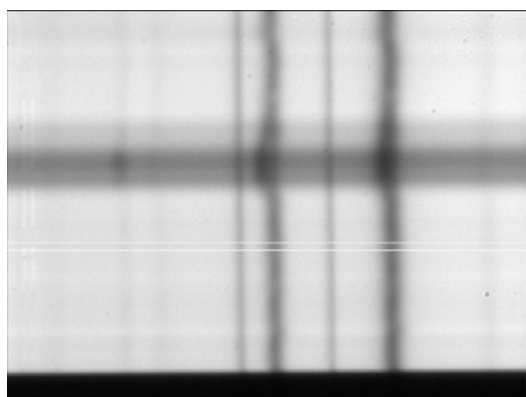


図 11 efp135 度

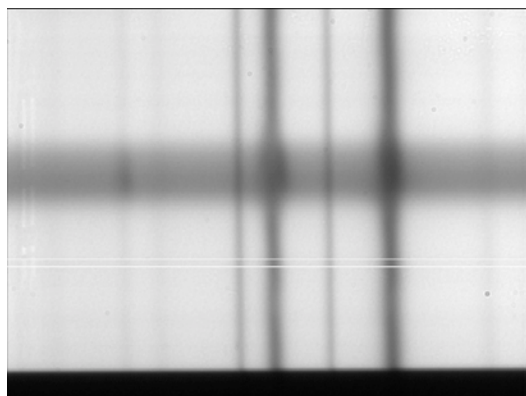
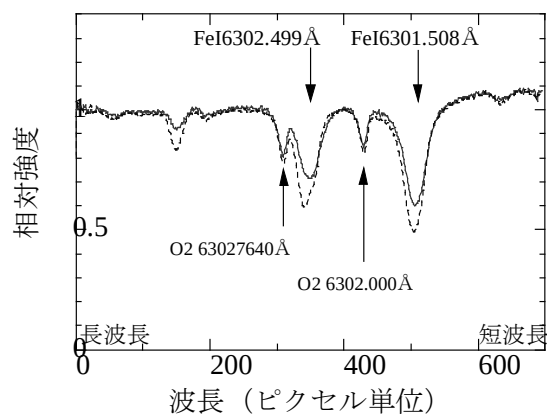


図 12 efp225 度

図 10 の先行黒点を efp、後行黒点を eff と名付けた。それは浮上磁場領域を **emerging flux region** と呼ぶからであり、先行は **pre**、後行は **following** に因む。さらに先行黒点では図 13 から偏光板角度 225 度のスペクトルが短波長にずれているのが分かる。このずれは N 極を示す。



EFP 破線：偏光板角度 1 3 5 度
実線：偏光板角度 2 2 5 度

図 13 図 11 と図 12 のスペクトルトレースを重ねたもの

地球大気線の波長に比較して 135 度は長波長側に 225 度は短波長側にずれているのが分かる。

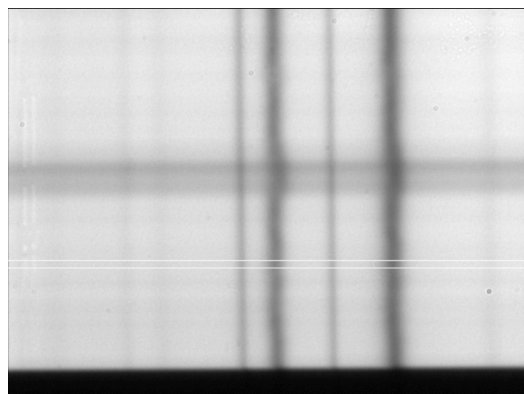


図 14 後行黒点 eff で偏光板角度 135 度のスペクトル

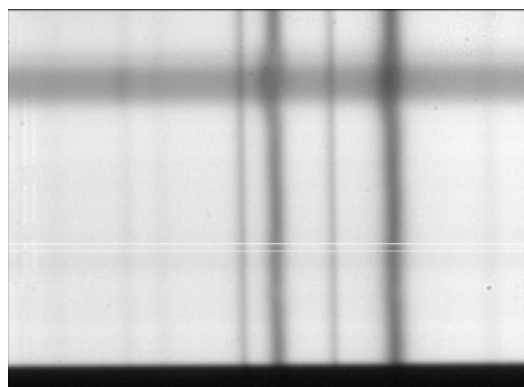


図 15 後行黒点 eff で偏光板角度 225 度のスペクトル

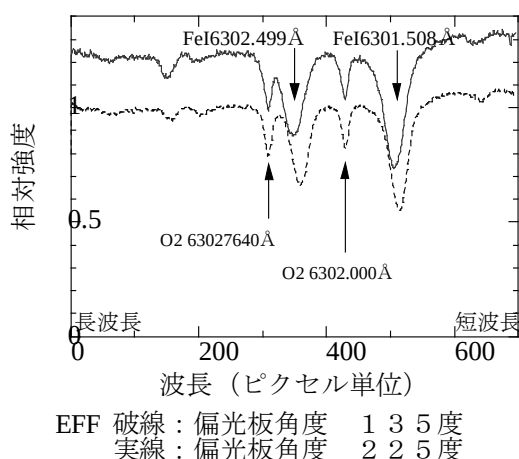


図 16 図 14 と図 15 のスペクトルトレースを重ねた

図 16 を見ると後行黒点 eff では偏光板角度 135 度のスペクトルが短波長にずれるのが分かる。これはこの黒点の極性が S 極であることを示す。

生徒は、この研究で次のことを見いだした。

NOAA10661 について

- (1) ゼーマン分岐量: 0.1 Å
- (2) 磁場強度 B: 2.2 キロガウス
- (3) 黒点のもつ磁場エネルギー量 E は黒点の直径が 2 万 km であるので (2) 式から 1.5×10^{33} エルグ

NOAA10662 若い黒点 (磁場浮上領域) では

- (1) ゼーマン分岐量: 0.035 Å
- (2) 磁場強度 B: 750 ガウス
- (3) 黒点の直径 6000 km だから磁場エネルギー量は 4.8×10^{30} エルグと分かった。
- (4) また、偏光板の使用により磁場の極性が容易に判定できることが確認された。

ただ、感想では、かなり難しく理解できないと嘆いていた。

4.4 2014 年の観測 [17]

太陽活動の極小期には、黒点磁場の研究はできなかったが、2015 年は連なった微小な黒点が見られるようになり、磁場測定を再開し

ようということになった。

この年から CCD カメラが更新され分光器で得られたスペクトル画像は FITS 画像として保存されるようになった。使用した波長域は Fe I 6301、6302 を中心とする $6299 \text{ Å} \sim 6304 \text{ Å}$ の範囲に広がった。

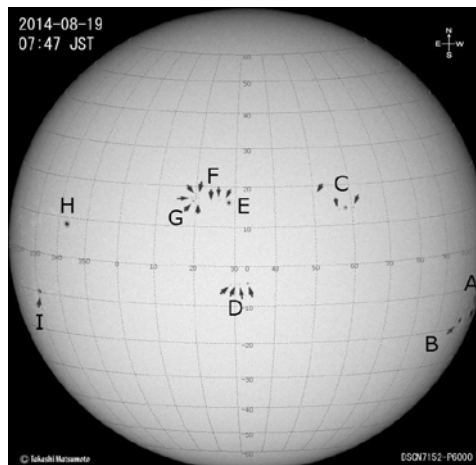


図 17 2014 年 8 月 19 日の太陽の様子
小さな黒点がたくさん見られる。黒点には A~I の記号を付け区別した。

観測実習は 2014 年 8 月 18 日~21 日までの 4 日間行った。そのうち 8 月 19 日の 10 時 00 分~11 時 06 分 (JST) の間に A~I までの黒点のスペクトルを合計 65 枚得た。

表 2 に黒点の太陽面経緯度の測定値を上げた。黒点 A、B、I は太陽の端にあり、黒点をかなり斜めから見ているので磁場も大きく傾いていることが想像された。そのため、今回の研究からは除外した。また、黒点 F と G は微小黒点であり、位置同定に不安があるため、研究から除外した。

表 2 黒点の太陽面経緯度

黒点	黒点直径 km	太陽面経緯度
A	11830	78W 5N
B	15880	75W 30N
C	7970	28W 2S
D	5520	2W 20N
E	13830	2W 0
G	3400	8E 2S
H	15250	42E 2S
I	4698	60E 12N

表 2 の黒点直径は黒点の撮像画像から求めたものではなく、スペクトルでの暗部の幅 (y 軸方向) を測ったものの平均値であることに注意して欲しい。

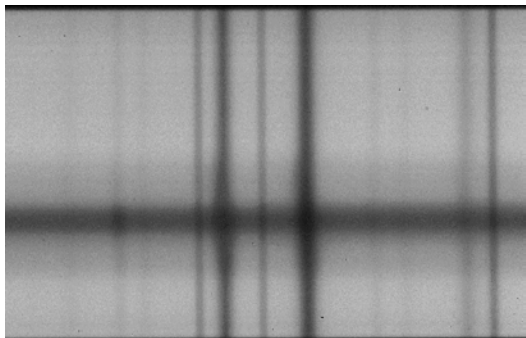


図 18 得られた黒点スペクトルの例
暗部と半暗部が分かる。強い 2 本の吸収線のうち左側のものが Fe I 6302 Å 線である。ゼーマン分岐を分らないが、線幅は太くなっていることが分かる。

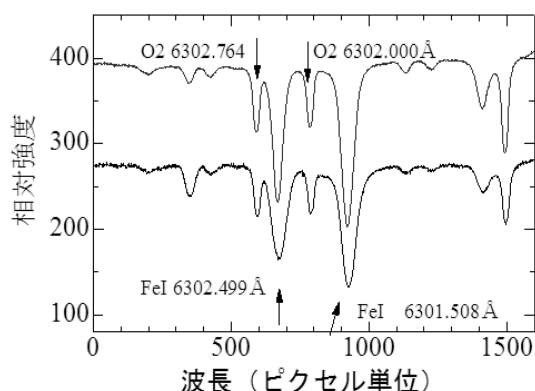
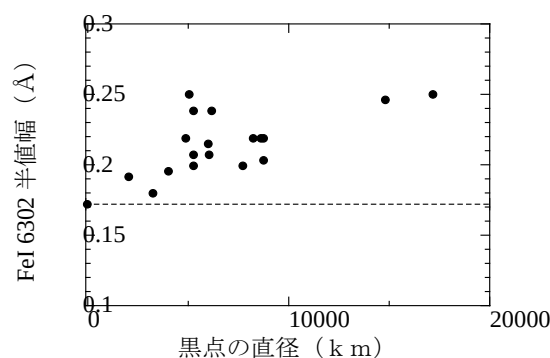


図 19 図 18 のスペクトルトレース
上が静穏領域のスペクトル、下が黒点暗部のスペクトルを表す。ゼーマン分岐は見られない。

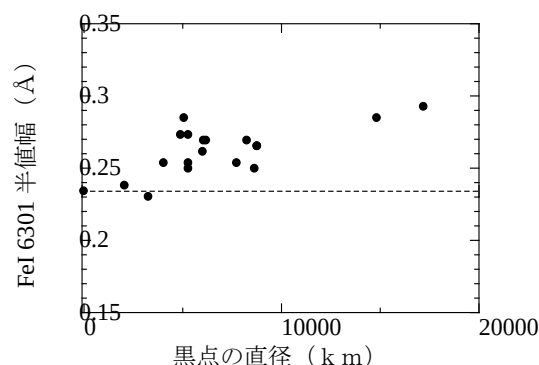
図 20 と図 21 を見ると黒点の直径 (スペクトル上での黒点の差し渡し幅) と線幅には、強い一定の関係が見られた。つまり、黒点が大きいくほど、線幅が広くなる、つまり磁場が強くなるという関係である。さらに、表 2 の黒点の直径 (スペクトルでの暗部の差し渡し幅) の平均値を用いて、黒点の大きさと線幅の関係を調べると Fe I 6302 Å 線、Fe I 6301 Å 線それぞれで図 22、図 23 のようになった。



暗部 Fe I 6302 の FWHM と黒点の直径の関係

図 20 黒点の暗部で Fe I 6302 Å 線にみられた
黒点の直径と線幅の関係

破線は静穏領域での線幅を表す。スペクトルごとに黒点暗部の幅を見積もった値を黒点の直径としている。



暗部 Fe I 6301 の FWHM と黒点の直径の関係

図 21 黒点の暗部で Fe I 6301 Å 線にみられた
黒点の直径と線幅の関係

破線の意味と黒点直径の測定法は図 20 と同じである。

2014 年は、スペクトル合成で磁場測定を行わなかった。そこで、米坂ら[12]の論文にあった半値幅 (FWHM) と磁場強度をグラフにしてみた。そうすると直線関係が見られ、式に直すと式 (3) が得られた。

$$\square \quad Y = 8.9X - 0.89 \quad (3)$$

ただし Y は磁場強度 (キロガウス)、X は Fe I 6302 線の半値幅 (FWHM、Å) である。

ゼーマン分岐量と磁場強度の関係は (1) 式の通りであるから、吸収線の幅は磁場強度のみの一次関数であることがわかる。

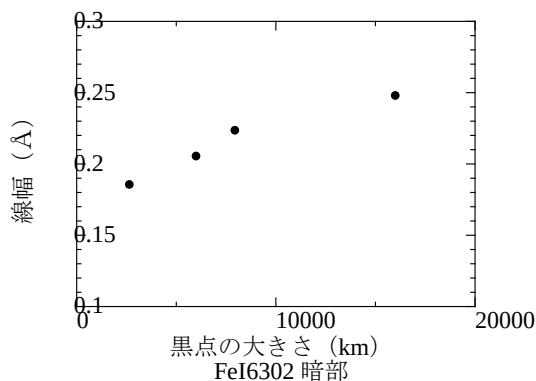


図 22 Fe I 6302 Å 線における黒点の大きさの平均値と線幅平均値の関係

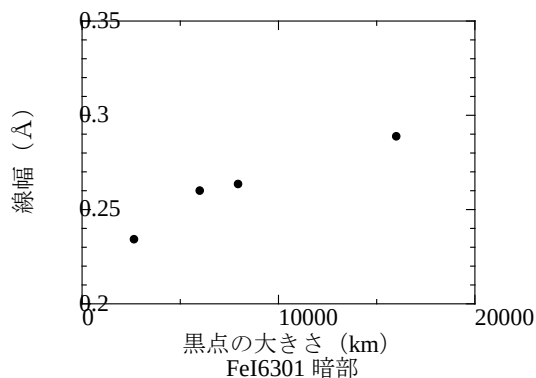
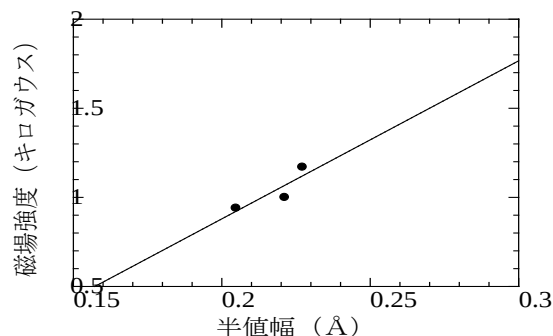


図 23 Fe I 6301 Å 線における黒点の大きさの平均値と線幅平均値の関係

黒点の暗部で調べた図 22 (Fe I 6302) と図 23 (Fe I 6301) を比較するとほぼ同様な一次曲線になっている。また、黒点の直径が 5000km で 0.9 キロガウス、10000km で 1.1 キロガウス、15000km で 1.3 キロガウス、20000km で 1.6 キロガウス程度の磁場を持つことが図 22 と図 23 と米坂らの研究図 24 との比較で分かった。

一方、ここでは、図示していないが半暗部では、磁場強度は黒点の大きさに暗部より関係が少ないが比例しているが、ばらつきは大きい。これは、半暗部では磁場が傾いている

ためだと考えている。



Fe I 6302 Å 線の半値幅と磁場強度

図 24 米坂ら [12] 半値幅と磁場強度のデータを引用して求めた Fe I

6302 Å 線における半値幅 (FWHM) と磁場強度の関係

5. 研究者との対話

2014 年の研究の報告を校内での報告会、日本天文学会のジュニアセッション、高校生天文活動発表会などで発表した。生徒は発表するものの質問の応答は苦手ようであった。

ジュニアセッションや高校生天文活動発表会では、ある研究者の方々の指摘に、ランデ因子が大きな吸収線を利用した今回の方法では磁場強度に比例せず、上限値しか求まらないというのがあった。一方、校内発表会では、指導者からは、「ある観測では磁場が強い黒点ほど暗く、別の研究では大きな黒点ほど暗いということが分かっている。これらから大きな黒点ほど磁場が強いことが分かる (たとえば [18] 参照)。」という指摘をいただいた。生徒たちが観測した黒点の大きさと磁場の強さの関係は図 20～図 23 をみて分かるようにある程度の黒点の大きさ/磁場の強さ以上で傾きがなまっていて、飽和しているようであると生徒たちと話し合った。

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, p.38
- [2] Zeeman P., 1897, "On the Influence of Magnetism on the Nature of the Light Emitted by a Substance." ApJ, vol.5, p.332
- [3] Hale, George E. 1908 "On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots" ApJ, vol. 28, p.315
- [4] 清水一郎・小野実・小山ひさ子 (1969) ibid. pp.39-40
- [5] 磯部洋明 (2011) 『総説 宇宙天気予報』, 柴田一成, 上出洋介編著, 京都大学学術出版会, p.593
- [6] 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 pp.194-197
- [7] 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
- [8] <http://vald.astro.univie.ac.at/~vald3/php/vald.php>
- [9] 花岡洋一郎 (2009) 『シリーズ現代の天文学 10 太陽』 桜井隆・小島正宣・小杉健郎・柴田一成編集, 第4章 4.1.3 「より高精度に偏光をとらえる ゼーマン効果」, 日本評論社, pp.62-66.
- [10] 桜井 隆 (2011) 『総説 宇宙天気予報』, 柴田一成, 上出洋介編著, 京都大学学術出版会, p.64
- [11] 柳 真之、山崎史裕、林 貴子、松本悠佑、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検出』, 日本天文学会第5回ジュニアセッション集録, p.42
- [12] 米坂聡一郎、和田光男、畑中滋生 (2004) 『高分散スペクトルを利用した太陽黒点の見積もり』, 日本天文学会第6回ジュニアセッション集録, p.42
- [13] 松本 孝 <http://sunspots.sakura.ne.jp>
- [14] Takeda Y., 1995 PASJ 47, 287
- [15] 兼田 匠、山中 渉 (2005) 『太陽黒点の磁場の極性と強さ』, 日本天文学会第7回ジュニアセッション集録, p.36
- [16] 西村昌能、岡和田健文、黒河宏企、石井貴子 『2010年洛東高校 花山天文台太陽観測実習報』 天文教育 Vol.23 No.5 (2011年9月号) pp.51-54
- [17] 板谷由菜、上籠俊輝、野上隼紀、大江貴裕 (2015) 『太陽黒点の大きさと磁場の強さ』, 日本天文学会第17回ジュニアセッション集録, p.116
- [18] 一本 潔 (2011) 『総説 宇宙天気予報』, 柴田一成, 上出洋介編著, 京都大学学術出版会, p.106

* * * * *