

マカリを利用した太陽の自転速度測定実習

京都教育大学非常勤講師 西村昌能

1. はじめに

著者は、高校教員在職中から、太陽や激変星の分光観測をテーマに探究活動と部活動の指導を行ってきた[1]。非常勤講師をしている京都教育大学では、主に理科専攻1年生が受講する地学基礎実験という科目で、これらの経験を活かした視線速度測定による太陽の自転速度測定の実習を行っている。この実習で利用しているマカリ[2]は、学生にとって画像を定量化できるデジタルツールであり、将来、教員になったときに授業で活用して欲しいと指導している。

2. 京都教育大学での地学基礎実験

今回報告する地学基礎実験は1回生秋学期(地学は地球物理・地質、岩石・天文)に行うものである。そのうち天文分野は2019年度12月23日から2月3日に実施した。受講学生は例年25名程度の2クラス計約50名で、中高理科免許取得希望者(理科と技術専攻)が受講している。天文分野は90分2コマ×5回合計10コマである。受講している学生は1回生後半であっても高校4年生レベルである

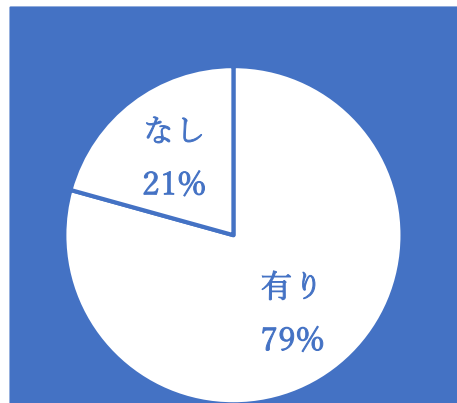


図1 天文の興味が有る学生の割合

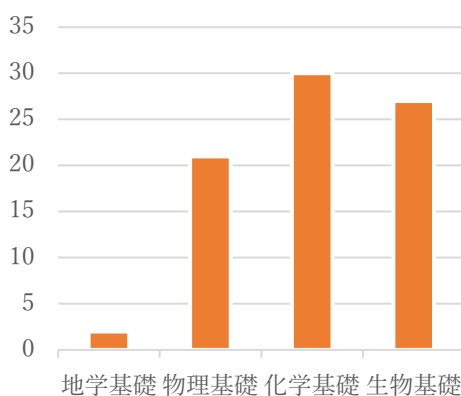


図2 1回生のうち高校で基礎を付した理科(2単位)科目を履修した割合(%)

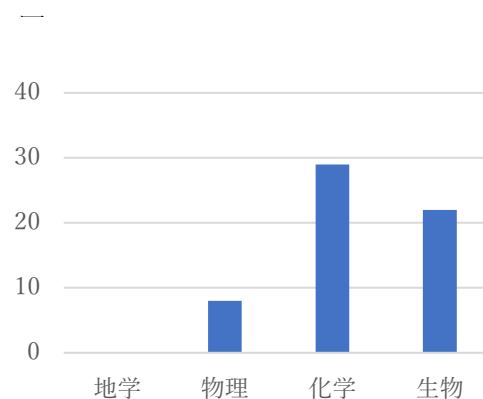


図3 1回生のうち高校でいわゆる発展理科(4単位)を履修した生徒の割合(%)

図2, 3とも2018年の1年生30名

と思っただら良いだろう。なお、受講生には上級生・大学院生・現職教員の聴講生が含まれる。この講義では教員希望（高 40%、中 40%、小 20%）が大半であるので、講義のどの項目においても“教員目線”で講義を受けることを指示している。図 1 から、8 割の学生が天文に興味を持つことがわかる一方、図 2、図 3 からは受講生は地学をほとんど学ばず、物理の履修率が低いこともわかる。また、この講座の受講者は小中高ともアクティブ・ラーニングを受けた経験を持つ学生は多い。一方、1 年生の内 255 名ではアクティブ・ラーニング経験は高校が一番高く、小学校に年齢が下がるほど低くなっていた。これは、小学校からアクティブ・ラーニングを経験した者が理系に進む傾向にあるのか、理系進学者が小中でのアクティブな授業を記憶しているか、詳しくは分からない。

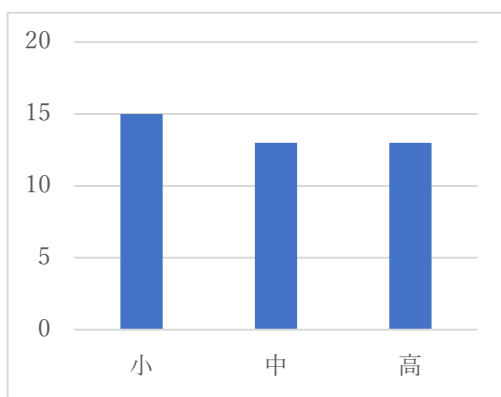


図 4 小中高でアクティブ・ラーニングを経験した者の数 (人数、母数は 30 名)

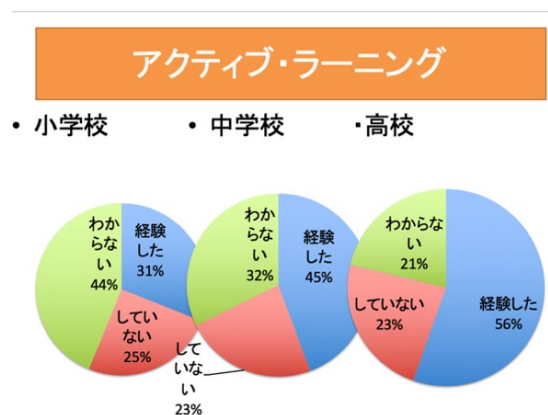


図 5 1 回生 255 名を母数にしたアクティブ・ラーニング経験者の割合

3. 天文分野の講義内容

5 回全 10 コマの内容を以下に示す。実験実習前には知識を伝達するためのパワーポイントを用いた講義を実施している。

- (1) 地球半径測定と星座早見盤作成 (天球の概念、地球の公転、恒星の等級、色)
- (2) 望遠鏡の使い方と月の観察 (月の表面)
- (3) 望遠鏡の使い方と太陽の黒点スケッチ/太陽半径測定 (太陽物理)
- (4) 分光器の作成とスペクトル観察 (スペクトル理論)
- (5) マカリを利用した太陽の自転速度測定 (スペクトル解析)

太陽の自転速度つまり自転周期を調べる方法には、黒点やプロミネンスの動きから調べる方法(例えば図 6)とドップラー効果を利用して高分散分光観測から太陽の自転周期を調べる方法がある。後者を利用した実習 (5) は、太陽が赤道付近で 25 日の周期で自転していることを分光データから求めるものである。この実習には観測データは京都大学理学研究科附属花山天文台の高分散分光シートスタット望遠鏡を利用 (分解能 50 万) で得られたものを利用した。初年度は学生自身によるデータ取得を花山天文台で試みたが降雪など悪天

できず、以後は高校生実習のデータを借用している。

実習で学生に要求する項目は

- 1) マカリを利用して、太陽の赤道（東西）のスペクトル画像からスペクトルトレースを作る。
- 2) スペクトルトレースから吸収線のドップラー効果を利用して視線速度を求める。
- 3) 視線速度から太陽の回転角速度を求める。（ここまでグループワーク）
- 4) この一連の作業からマカリを利用したスペクトル画像を用いた太陽の回転角速度を求めるワークシートを作成する。（これは宿題：個人の作業）である。

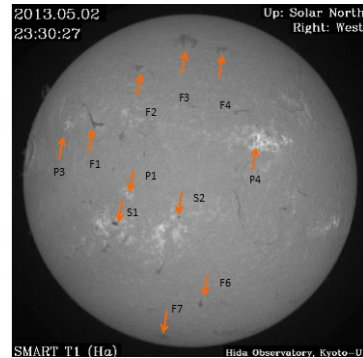


図6 太陽のH α 像（飛騨天文台提供）の例 数日の画像からプロミネンスの位置を調べることから太陽面上の各緯度での自転周期が求められる。

4. 使用した画像データについて

スペクトル画像はFe I 6301、6302 Å 線を含む波長域を利用した（図7，図8）。以下の様に観測したものを利用した。分光器のスリット上で太陽像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を用いて太陽周縁の緯度を合わせ、スペクトルを撮影した。

観測されたスペクトルは TIFF 画像（現在は FITS）である。ダーク・フラット処理をしていない。コンパソンライン（波長校正用）は地球大気起源の分子線を利用する。波長方向の分散は、波長で表さず、ピクセル単位で表示している。

学生への問いかけ：2本の細い線は、地球大気中の酸素分子（O₂）の吸収線である。また、太い2本の吸収線は、太陽の光球にある中性鉄（Fe I）が作る線である。地球大気のO₂線を基準にするとFe I線はずれている。この原因は何だろうか？グループで相談して、ホワイトボードに答えを書き、説明すること。

5. 解析の手順

太陽の光球起源の線 Fe I 6301.508 Å、Fe I 6302.499 Å は、太陽本体の吸収線だから太陽の自転に伴って、速度を持つ。つまりドップラー効果で視線速度がわかる。一方、地球大気起源のO₂線は太陽の自転でドップラー偏移を起こさないので、解析の基準線とする。

自転速度はドップラー効果によるスペクトル線の偏移量を地球大気起源の吸収線との比較から求める。偏移量を $\Delta\lambda$ とし、静止状態でのスペクトル線の波長を λ 、太陽の自転速度を V 、光速を c とすると

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

で表すことができる。

ここで、 $\Delta\lambda = \text{測定波長} - \text{静止波長}$ である。この値は近づくときは青方偏移となりマイナスの値である。また、遠ざかるときは赤方偏移となり、値はプラスをとる。

マカリで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する。その際、FeI 6302.499 Å 線と O₂6302.764 Å 線、FeI 6301.508 Å 線と O₂ 6302.000 Å 線の2つのペアを用いる。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の波長での線幅中央値とする。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する

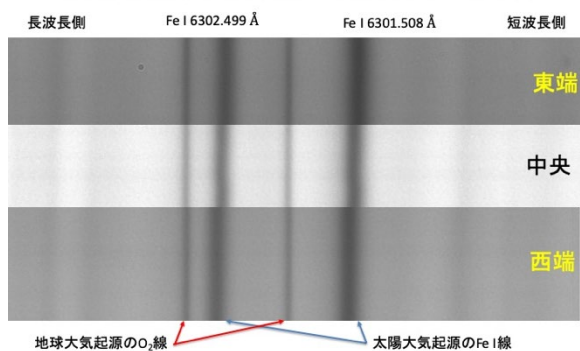


図7 赤道の東端、中央、西端で得られた太陽スペクトル。地球大気起源の酸素分子線を規準にしたすると太陽大気起源の中性鉄線がドップラー効果でずれているのが分かる。

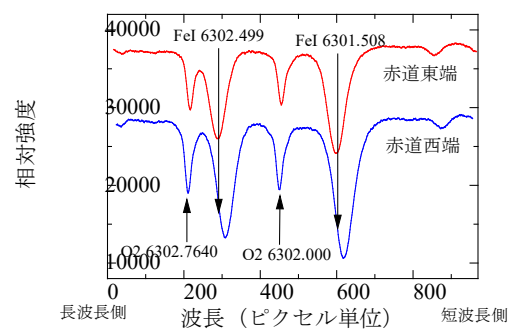


図8 図7のスペクトル画像の東端と西端のスペクトルトレース

1ピクセルが何Åか、測定するには、地球大気の2本のO₂線の線幅中央値を測定し、その2線の波長差を波長方向のピクセル差で割る。

O₂線の波長 B : 6302.000 Å ①ピクセル、D : 6302.764 Å ②ピクセルとすると

$$(6302.764 \text{ \AA} - 6302.000 \text{ \AA}) \div (\text{①} - \text{②}) = 1 \text{ ピクセルあたりの波長 (\AA) } \text{ ③ 式 (2)}$$

式(2)から、1ピクセルあたりの波長が分かる。

線幅中央値の求め方は図9のように、コンティニューム（スペクトルで一番明るい所で代用）のカウント値を調べ（④）、吸収線の一番深い所のカウント値を調べる（⑤）。そして、それらの平均を取る（(④+⑤)÷2=⑥）。吸収線の広がり（ウイングという）の両側で⑥の値となる波長のピクセル数で調べる（⑦、⑧）。これから（⑦+⑧）÷2=線幅中央値（⑨）として線幅中央値を求めることができる。

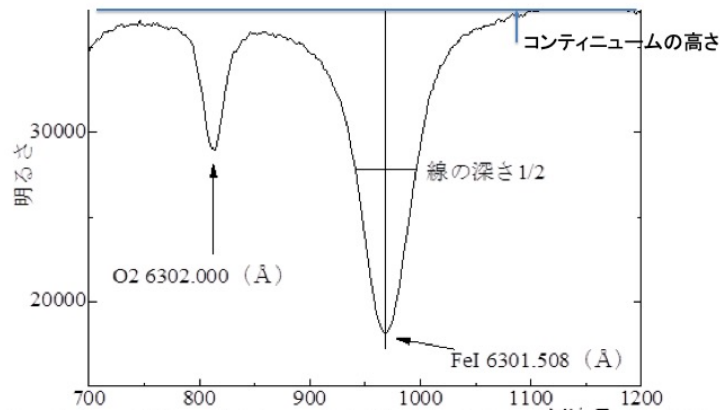


図9 線幅中央値の測定

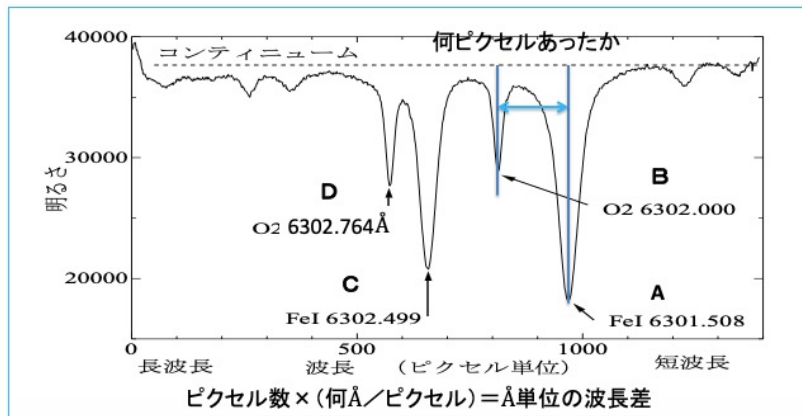


図10 吸収線波長の決定

吸収線波長の決定は図10のように Fe I 6301.508 Å (線 A) の線幅中央値 (ピクセル単位) を求め (⑩)、O₂ 線 6302.000 Å の線幅中央値 (ピクセル単位) を求める (⑪)。

$$6302.000 \text{ Å} + (\text{⑪} - \text{⑩}) \times \text{③} \quad \text{式 (3)}$$

式 (3) からスペクトル上の Fe I 6301.508 Å の線幅中央値 (Å 単位) を求めることで FeI6301.508 の観測波長 (λ_A) を求める。同様に O₂ 線 6302.764 Å と Fe I 6302.499 Å の線幅中央値 (Å 単位) から FeI6302.499 Å の観測波長 (λ_C) を求める。

$$\lambda_A \text{ (Å)} - 6301.508 \text{ Å} = \Delta \lambda_A \quad \text{式 (4)}$$

$$\lambda_C \text{ (Å)} - 6302.499 \text{ Å} = \Delta \lambda_C \quad \text{式 (5)}$$

式 (4)、(5) でドップラーシフト量が判る。式 (1) から視線速度を線 A、線 C それぞれ

で 求め、

$$V = (\Delta \lambda / \lambda) \times c \quad c = 3 \times 10^5 \text{ km/s} \quad \text{式 (5)}$$

式 (5) を用い、それぞれの線で、視線速度を出し、平均を取る。この作業を東西両方で行う。

さて、 $\Delta \lambda$ に寄与する物理量を考えると

- 1) 太陽の自転によるドップラー効果 : V_e, V_w
 - 2) 地球の公転によるドップラー効果 : α
 - 3) 地球の自転によるドップラー効果 : β
 - 4) 太陽の重力赤方偏移 (0.6km/s) : γ
 - 5) 光球ガスの運動 (粒状斑) と 5 分振動[3]によるドップラー効果
- なお、最後の 5) は、太陽の縁では速度が小さいことが期待される。

そこで赤道での視線速度 V は次の式で表され

$$V = \{(V_w + \alpha + \beta + \gamma) - (V_e + \alpha + \beta + \gamma)\} \div 2 \quad \text{式 (6)}$$

式 (6) から太陽の自転の要因以外が引き算でキャンセルできるので赤道での自転速度 V が判る。

学生への問いかけ

視線速度は km/s で求め、太陽の半径が 70 万 km だから、一周に何日かかるか計算してみよう。つまり太陽の自転周期 (回転角速度) を求めることになります。

6. 学生のまとめと感想

学生には、この作業をワークシートにする課題も課してある。ところがレポートは紙ベースで提出させている上、レポートは返却するので手元に残っていない。唯一メールで提出した現職教員のレポート (2019 年 2 月) を紹介する (ワークシートは省略)。

(1) 西側 : 1 ピクセルにつき 0.0032 オングストローム対応

$$\Delta \lambda = 6302.473 - 6302.499 = -0.026$$

静止波長 $\lambda = 6302.499$ より

$$V = c \times (-0.0026) / (6302.499) = -1.240 \text{ km/s}$$

(2) 東側 : 1 ピクセルにつき 0.0032 オングストローム対応

$$\Delta \lambda = 6302.537 - 6302.499 = 0.038$$

静止波長 $\lambda = 6302.499$ より

$$V = c \times (0.038) / (6302.499) = 1.804 \text{ km/s}$$

まとめ

前項4の計算で $|\Delta\lambda(w)| + |\Delta\lambda(w)| \div 2$ の意味が分かりませんでした。
ドップラーシフト量による誤差を解消するためにそれぞれの地点での視線速度を求めた値の平均値をとるのでしょうか？

太陽が自転していることは計算結果（途中までしか求められませんでした）から推定できました。

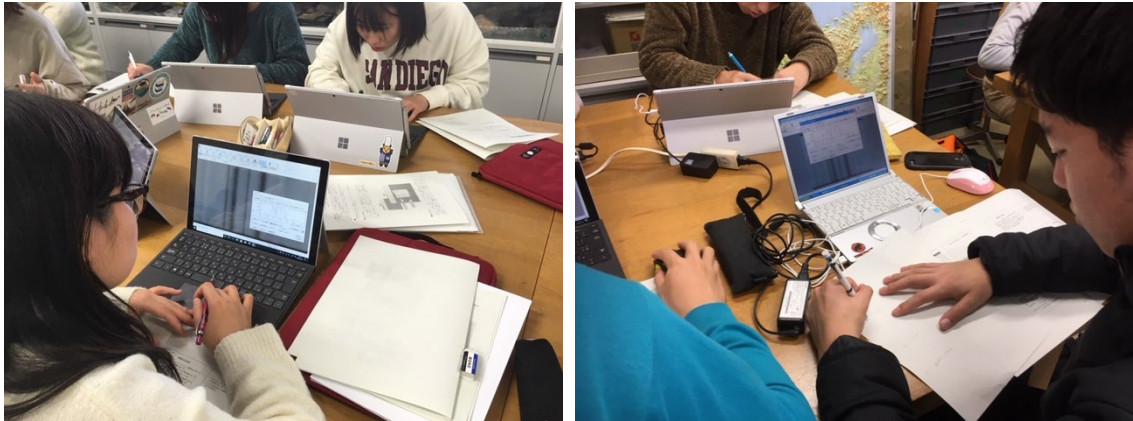


図 11 作業をする学生（2020年1月）

図 11 は、今年度の学生の作業風景である。学生は予め、マカリ超入門 2020 の YouTube[4]を閲覧し事前にマカリをインストールした各自の PC を持ちこみ、作業に入った。

7. 文献

[1]西村昌能、黒河宏企、石井貴子 2016 「花山天文台で行った生徒実習から 【2】 差動回転の検出」天文教育 vol.28 No.5 2016年9月号 p.p.8-13

[2] <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>

[3] 西村昌能、黒河宏企、石井貴子 2016「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 p.p.36-41

[4]鈴木文二 2020 https://www.youtube.com/watch?v=HP0F_-wwFoM