

対物プリズムによる恒星スペクトル分類 (夏休み科学自由研究の指導から)

西美濃天文台 船越 浩海

1. はじめに

西美濃天文台では、夏休みの科学(理科)自由研究の助言、指導を希望者に個別に行なっている。そのなかで、1995年夏に中学3年生(女子生徒)の行なった「対物プリズムによる恒星スペクトル分類」について、その経緯と指導内容について紹介する。星(天体)のスペクトルの解析は、表面温度や化学組成、大きさ、質量、自転周期、空間速度など様々な情報を知る手がかりとなる。恒星スペクトルの初歩的な理解を促すには、最低でも高校卒業程度の学力が必要なため、その指導においては本来の学術的な方法を探らずに、概念的な現象論的アプローチを行い、中学生でも理解ができ研究が進められるよう配慮した。

2. 経緯

今回恒星スペクトルの研究を行った生徒は、この前年の中学2年の夏には、「市街地と山間地の星の見え方の違い」と題して自由研究を行い、その研究レポートは羽島市で金賞、岐阜県で入選となった。西美濃天文台では、この研究に際し双眼鏡などの機材や星図、参考書などの資料の提供のほか、観察星野、日周運動と星図の見方、固定写真の撮り方、等級の概念、月齢と観察スケジュール、観察記録のポイントなど基礎的な指導を行った。(観察および研究レポートの作成は、当然のことながら当人の意志に任せ、質問にのみ助言をした。)

そして今回再度自由研究の相談を受け、前年度の研究の際の努力、理解力を考慮し、中学生には少し難しいと思われたが本人の希望もあり、幾つかの選択肢の中から恒星のスペクトル観測を選ぶこととなった。対物プリズム、小型望遠鏡、35mmカメラのという簡単な機材の組み合わせで、“遠く輝く星に手が届く”と誘いをかけたのである。

3. 目的

恒星スペクトル分類を通じ、何光年も離れた星のプロファイルをいかにつかむのかについて、情報入手(観測)と結果出し(解析)のプロセスの概略が分かり、遠く手の届かない星の情報を自分の手の中に納めることが出来ることを体験する。

恒星のスペクトルを撮影し、写真から吸収線を同定、スペクトル型を決定したうえで星の表面温度などを推定する。

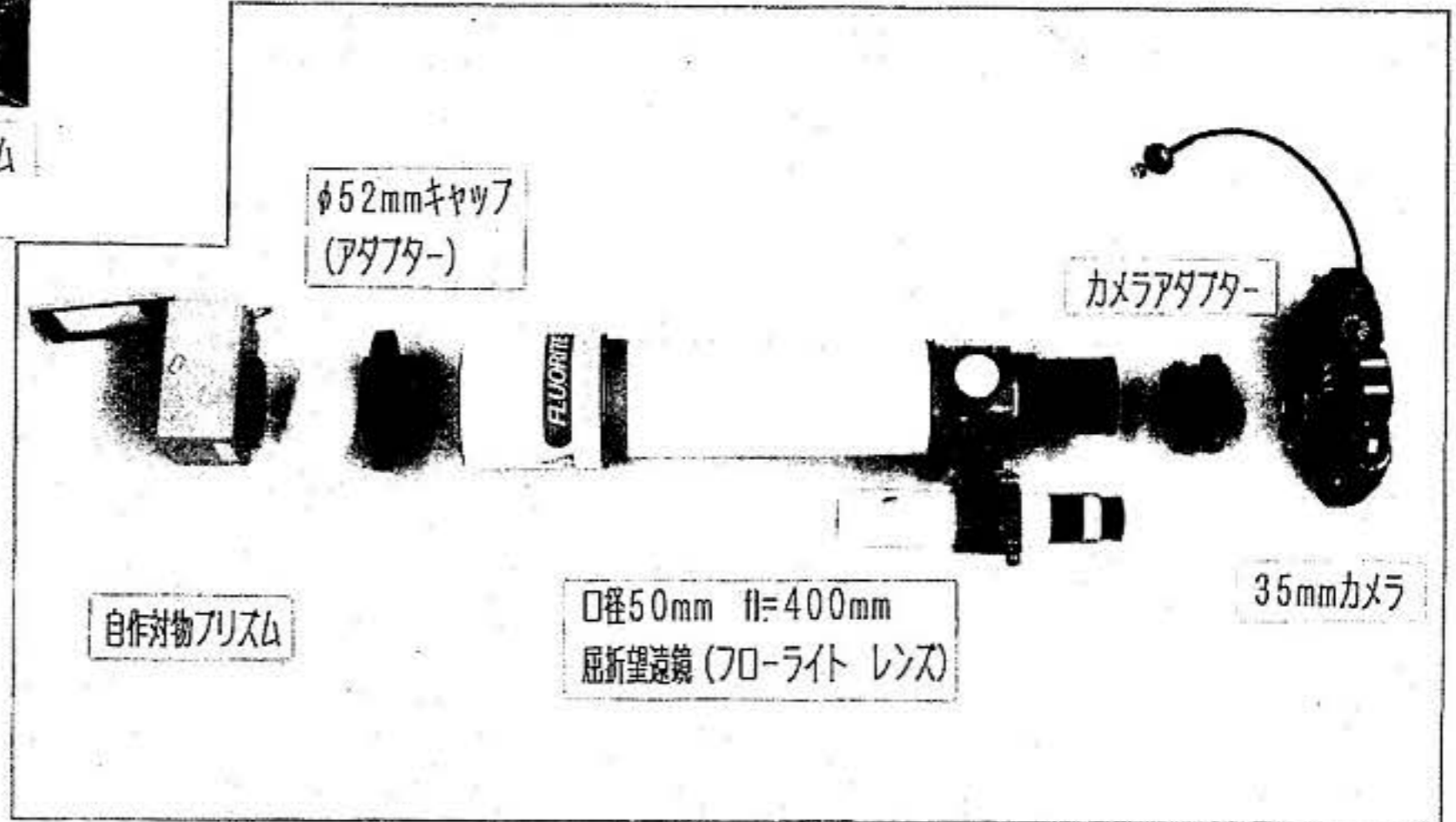
その過程で必要な知識の習得や科学的思考方法などを身に付ける。

4. 観測機器

図4. 1で示した写真がシステム全容である。当初は小型の移動型赤道儀との組み合わせであったが、その後、西美濃天文台口径60反射望遠鏡に同架させ写真観測を行った。対物プリズムは自作で、一辺5cmの直角プリズム(材質不明)を木



自作対物プリズム



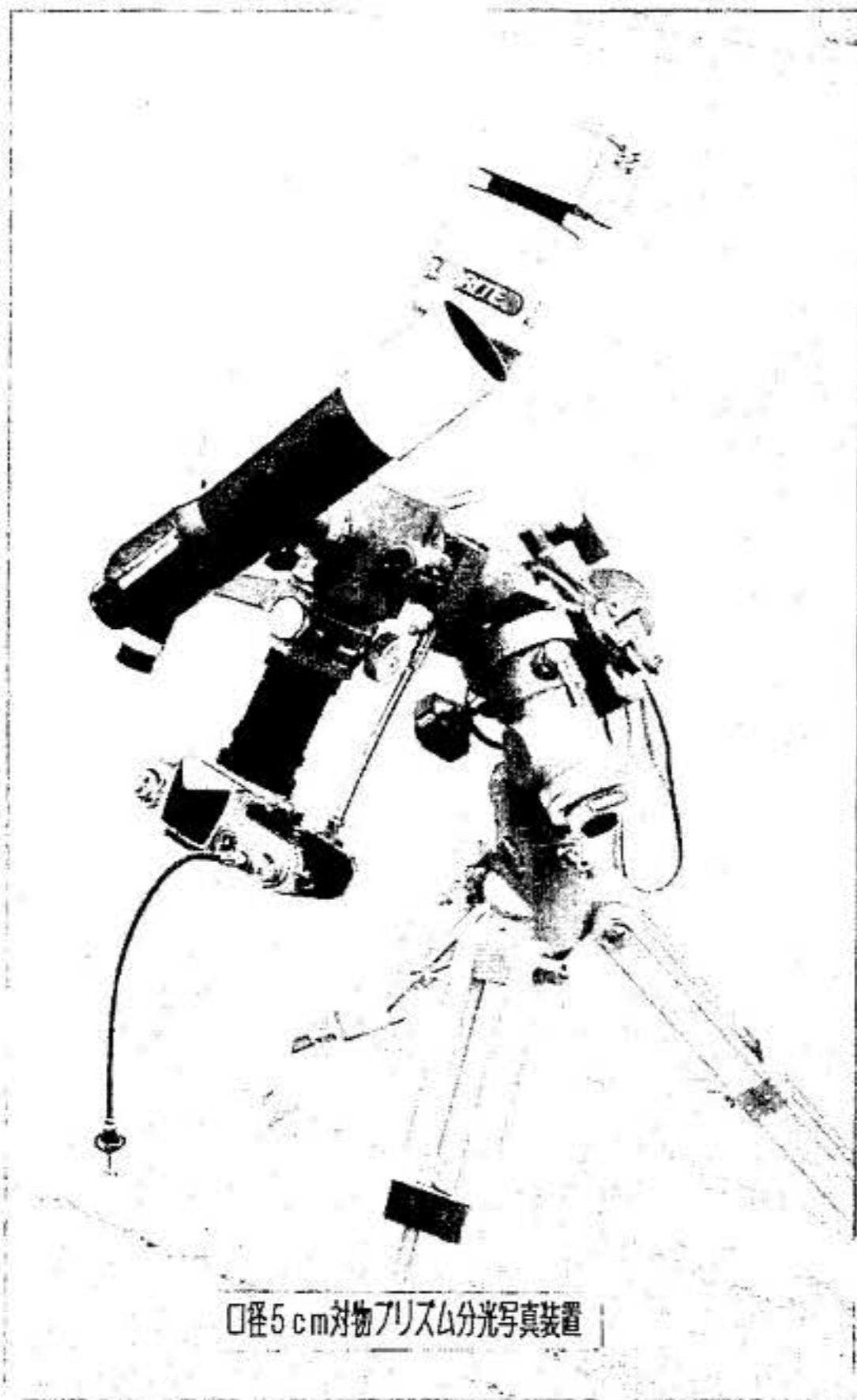
φ52mmキャップ
(アダプター)

カメラアダプター

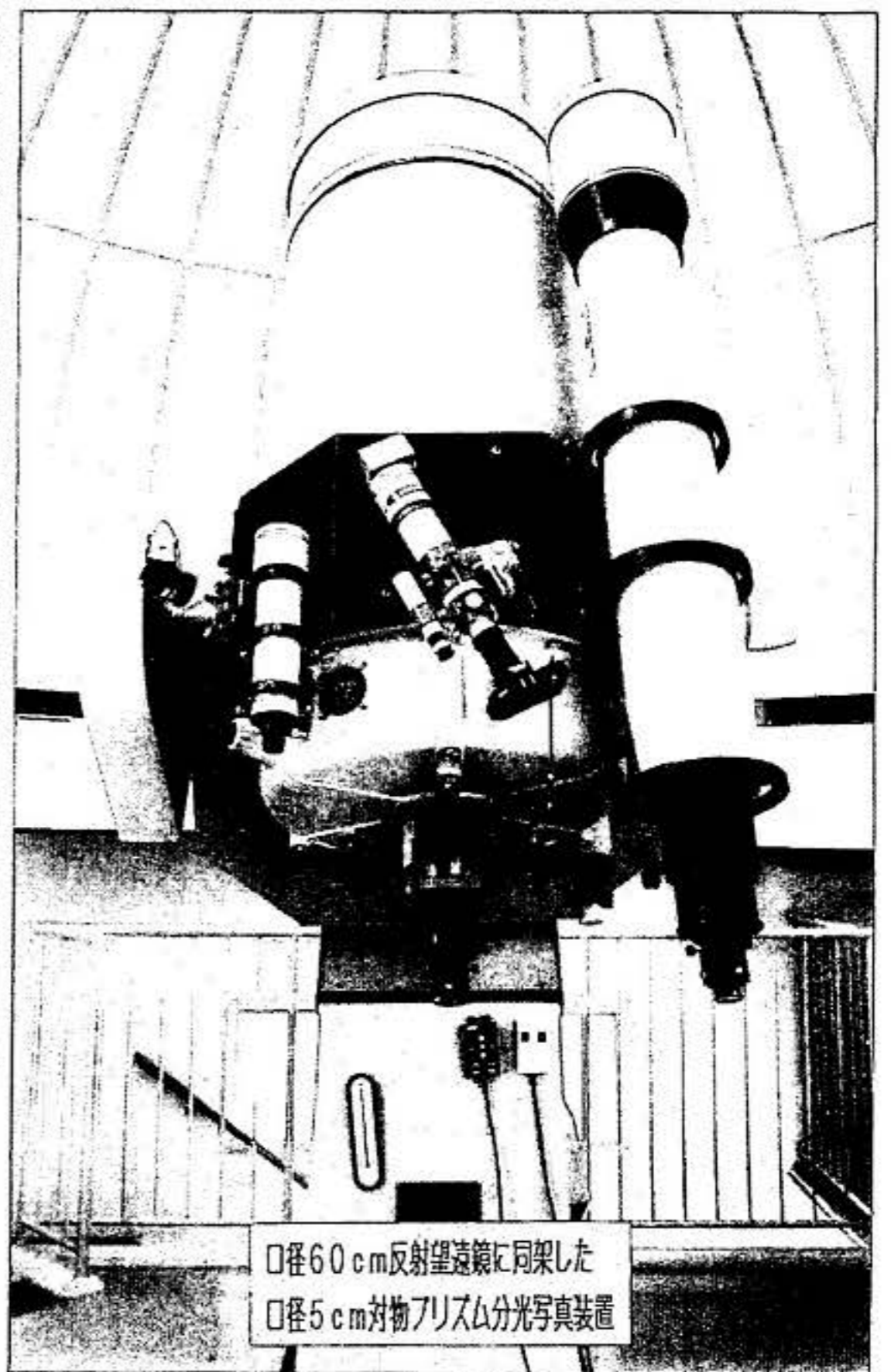
自作対物プリズム

口径50mm $f=400\text{mm}$
屈折望遠鏡 (フローライト レンズ)

35mmカメラ



口径5cm対物プリズム分光写真装置




口径60cm反射望遠鏡に同架した
口径5cm対物プリズム分光写真装置

図 4.1 対物プリズム分光写真システム

枠に納め、 $\phi 41\text{mm}$ 穴をあけたカメラのレンズキャップを接着しアダプタとしている。フィルムはスペクトルの色を実感させるためカラーネガフィルムとした。

以下に使用した観測機器を列記する。

- ・自作対物プリズム（頂角 45° 、最少偏角 27° 、光路 $\phi 41\text{mm}$ ）
- ・口径 50mm 、F8屈折望遠鏡（フローライトレンズ使用）実効 $F=10$
- ・カメラアダプター
- ・ 35mm カメラ
- ・ケーブルリリース
- ・フィルム（ISO3200、800カラーネガフィルム）
- ・小型赤道儀
- ・目的天体案内用フィールドスコープ  西美濃天文台 口径 60cm 望遠鏡

5. 指導手順（内容）

5. 1 事前知識の習得

分光観測の資料提供、重要ポイントの洗い出しと関連づけを行った。

図鑑や辞典、地学の参考書、専門書などから分光観測に関する記載を集め、その資料に目を通してもらうことから始めた。（図書館に行くことも勧めたが、実際に図書館では適当な本が見つからなかったようである。）資料を渡して約一週間後、生徒はいつもの笑顔は消え少し青ざめた表情で現れた。当然のことながら、内容が難しく理解できないのである。分光に関する資料はその大半が大学レベルの内容のため、資料のうち特に数式をすべて無視し（読み飛ばし）、中学生でも読めば大まかでも意味が分かり、重要と思われる箇所のみをマーカーで囲み、再度その部分だけを一通り読んでくるよう指導した。これによりだいぶ安心したようである。

だが、これでは重要事項の羅列のため、一連の統計だった理解が進まない。そこで、後述するポイントを確認し、相互に関連づけをして、最終的に「恒星スペクトルから読み取れる主な情報は何か」が、概念として理解できるようにすることが重要である。また、学校の理科の実験室でできるものは、できるだけ実験をすることを勧めた。基礎的な関連知識が増えると見い出せる情報も多くなるが、欲張りすぎると知識の押し売りになりかえって逆効果になる。そこで、HR図や黒体輻射、主系列と巨星のスペクトルの違いなどには触れなかった。

< 恒星スペクトルの概略を理解するためのポイント >

炎色反応 :

物質による炎色の違いから、元素に固有の波長域（色）の発光があることを調べる。したがって、炎色反応の色からその物質を推定することができる。直視分光器で炎を見る。

放電管 :

水素やその他元素の放電管を直視分光器で観察し輝線のようなすを調べる。元素に応じた輝線のようなすを観察する。

光の性質 :

屈折により光の進路が曲げられ、光の波長によって屈折の度合いが異なる。光の

波長の違いは私たちの目には色の違いとして感じられる。

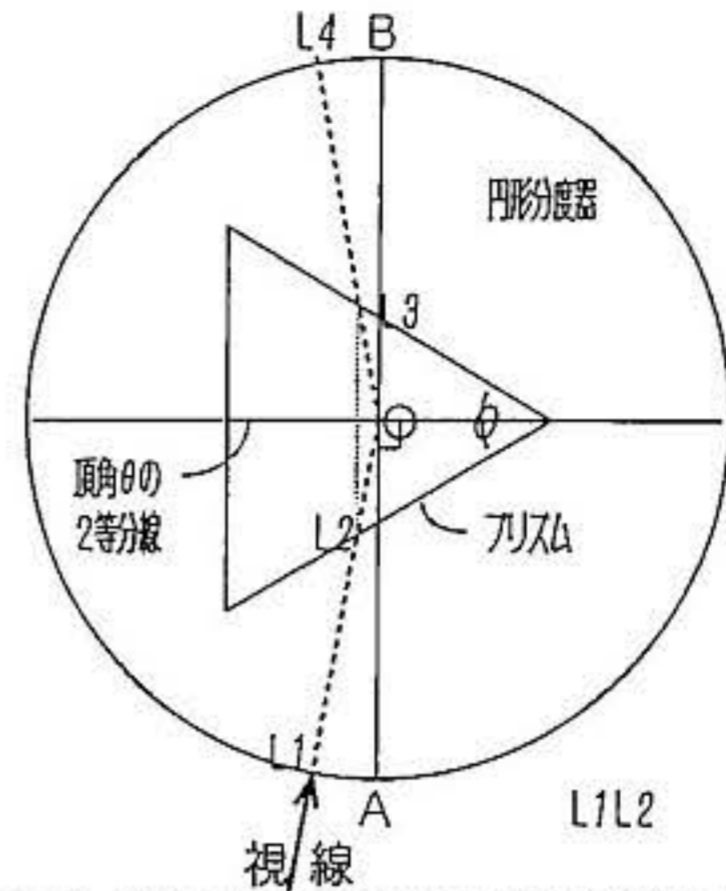
プリズムとスペクトル :

光の波長により屈折率が異なるためプリズムを通った光は七色に分散しスペクトルをつくる。プリズムの向きとスペクトルの伸長方向の 関係をつかむ。

最小偏角 :

プリズムを通して景色を見ると輪郭が七色に見えるほか、歪んで見える。プリズムの向きを変えてみると、縮んで（伸びて）見えた景色がある角度から逆に伸びて（縮んで）見えるようになる。縮みから伸び（または逆）に転じる中間が歪みが最小になる。この時、入射光と屈折した透過光のなす角度が最小偏角となる。分度器や作図により求めることができる。

(図 5. 1. 1)



$\angle A O L_1 = \angle B O L_4$ で、 L_1, L_2, L_3, L_4 がプリズムを通して一直線に見えたとき、 $\angle A O L_1$ の2倍がおよそその最小偏角

図5. 1. 1 プリズムと図から求める最小偏角

電磁波と可視光線 :

太陽などの光のスペクトルの青（紫）の外側には紫外線、赤の外側には赤外線がある。波長によりエネルギーが異なる。

(青写真や温度計を使って示すこともできる。) 波長の単位 (Å) または、(nm) の確認をする。

原子モデルと暗線、輝線 :

簡単な原子モデルで電子の軌道間の移動（遷移）と光によるエネルギーのやりとりを示す。元素毎に電子がどこからどこに移動するかによって、やりとりされる光のエネルギー（波長）が違い、それぞれ固有の値をとる。(図 5. 1. 2) 星の中心部から発せられた光（連続スペクトル）は、表層の大気を構成する原子に特定（波長）のエネルギーを与え、電子をより外側の軌道に移動させる。(励起状態になる。) しばらくすると励起された電子は元の軌道に戻り（基底状態になり）、エネルギー差に応じた特定波長の光を放出する。この時、光は任意の方向に放出されるので、観測者から見るとその波長が相対的に暗く見え、吸収線（暗線）を観測することになる。(図 5. 1. 3)

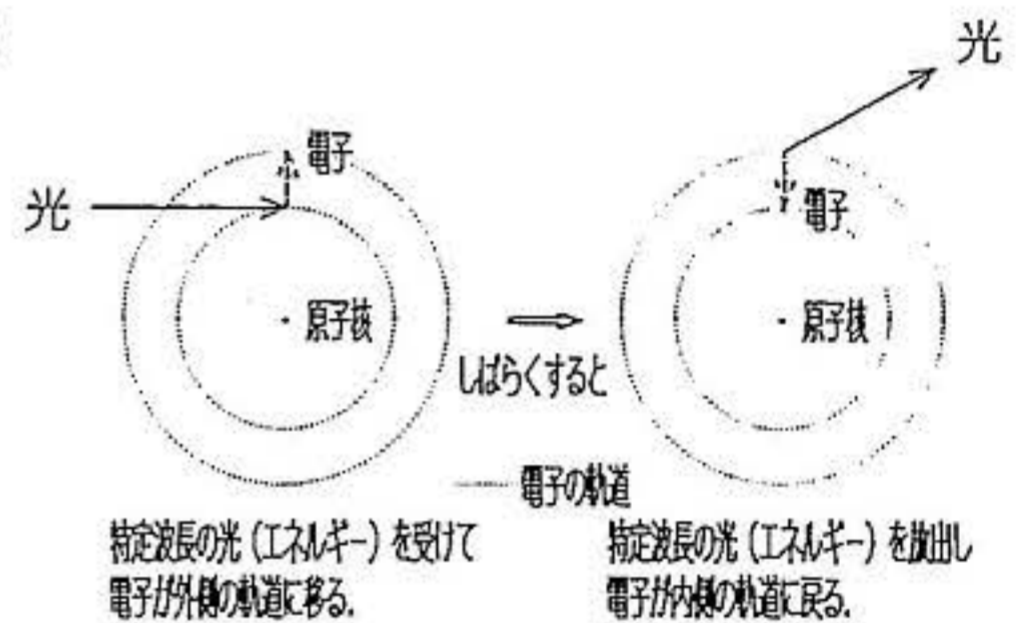
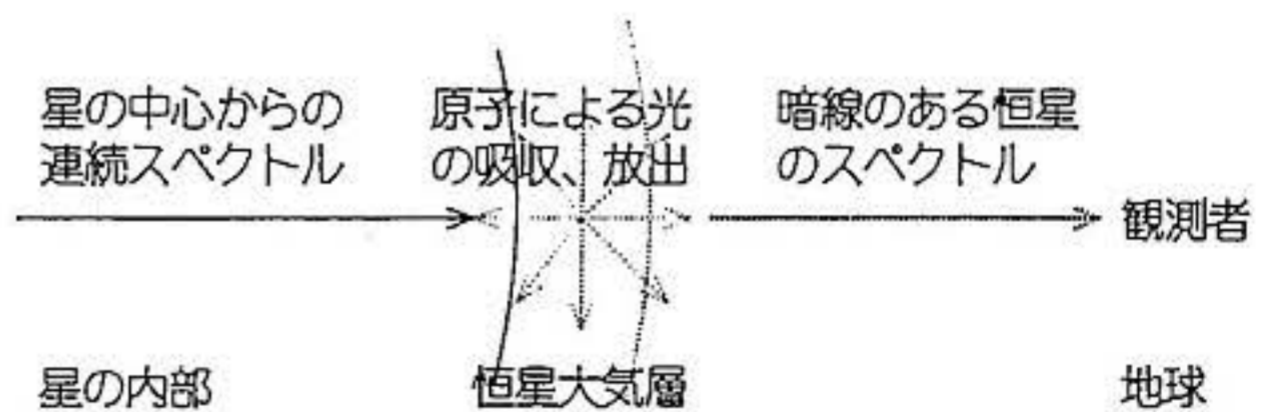


図5. 1. 2 電子の遷移と光のやりとり



恒星スペクトルの暗線は、星の大気に存在する一部の原子の吸収を示す。どの原子の吸収が顕著になるかは表面温度により決まる。

図5. 1. 3 恒星スペクトルと暗線の関係

観測者から見るとその波長が相対的に暗く見え、吸収線（暗線）を観測することになる。(図 5. 1. 3)

屈折率・分解能・分散度 :

観測の精度等の目安となるが、計算による算出はせず実際の写真ネガでおおよそ

の見当をつけた。ちなみにA型星のスペクトルのネガ上の実際の波長方向の長さは6.3mmである。

暗線の同定

フィルムの感光特性を利用して吸収線の同定を行う。写真としてとらえることのできる感度は、ある波長域を境とし急激に低下する。同一フィルムであれば、感光特性はほぼ同じと考えられるので、一つの基準として利用できる。比較スペクトルとして、蛍光灯（水銀灯）のスペクトルを同一システムで写し、写真のプリントで赤と背景の黒との境界から短波長側の水銀の輝線までの距離を測り、写真上の波長のスケールを求める。水銀の顕著な輝線の波長は理科年表などで調べる。求めたスケールを用い恒星のスペクトルの吸収線の大体の波長を求め、元素を推定する。

恒星のスペクトル型と表面温度

恒星のスペクトル写真から吸収線を同定し、スペクトル型を推定する。各スペクトル型で顕著に見られる吸収線やその波長や強度などを資料で調べ、O-B-A-F-G-K-Mの7つの型に分類する。またスペクトル型で恒星の表面温度を知る手掛かりとなることを示す。スペクトル写真に写る吸収線は、恒星大気の組成を示すが、存在する元素のうちどの元素の吸収線が顕著に観測できるかは、表面温度に大きく依存していて、構成元素の全てが吸収線として観測できる訳ではない。

以上、主なポイントを上げた。何をどこまで（詳しく）説明するかは、判断が難しいところである。中学で学ぶ事柄から関連づけて、恒星スペクトルの理解へとつなげていくが、奥の深い内容は言葉だけの説明にとどめ、深入りしない方がよいと思う。あくまでも、導く概念と実験的（観測的）事実を伝えることである。

事前知識の習得に多くの時間を割当てなければならない。

5. 2 観測方法とテスト観測

図4.1に示した対物プリズムを口径50mm屈折望遠鏡の筒先にセットし35mmカメラによる直焦点写真撮影のテストを下記の方法で行なった。テスト観測では、①フィルムの選定、②トレーリングの方法、③案内望遠鏡のセットと赤道儀の使い方、④ピント合わせ⑤視野確認⑥スペクトルの伸長方向を赤緯方向に合わ方などについて夜間実地で指導した。このテスト観測によってフィルムの選定とトレーリング（露出）、ピント合わせの方法について、当初の計画通りにいかず、考慮が必要なことが分かった。

フィルムはISO3200のネガカラーを使用した。フィルムの粒子が荒く2～3等級の明るさの星では、吸収線の判別が難しいか不可能だった。そこで、ISO800ネガカラーで再テストを行った。粒状性は改善されたものの感度が低く、やはり暗い星の吸収線は写らなかった。分光システムの実効F値が10と暗く、日周運動による1回のトレーリングでは1等星が限界であった。

さらに暗い星を写すために、トレーリングには、設定や撮り扱いの簡単な西美濃天文台の口径60cm反射望遠鏡のコメットトラックモードを利用することにした。恒星時で追尾し、赤緯方向に24時間あたりの移動量を67.5°、22.5°に設定した。

レンズの色収差のため、スペクトルの赤側と青側ではピントの合う位置が異なる。赤側でピントを合わせると、主に吸収線の識別できる緑から青側がピンボケとなり、淡い吸収線は識別不能とをなってしまう。

結果で紹介するスペクトル写真（図6.2～6.4）は、ISO800のカラーネガフィルムでコメットトラックモードによりトレーリングしたものである。

観測手順（*から始まる箇所は口径60cm反射の同架した場合のみの手順）

1. 等級の分かる星図から、3等星までの星をピックアップする。
2. 分光写真システムを組み立て赤道儀にセットする。
 - * 分光写真システムを組み立て口径60cm反射の同架する。
3. 赤道儀の極軸を大まかに合わせる。
 - * 不要
4. 光軸のあったファインダーで明るい星を導入し、赤緯方向に約 27° （最小偏角分）粗動させる。対物プリズムを回転させ、目的の星のスペクトルが直焦点カメラのファインダーに入るよう調整する。この時、スペクトルの伸長方向（プリズムの3角形の面）が赤緯方向に平行になる。
 - * 明るい星を自動導入し、分光写真システムを赤経方向に約 27° （最小偏角分）粗動させる。対物プリズムを回転させ、目的の星のスペクトルが直焦点カメラのファインダーに入るよう調整する。この時、スペクトルの伸長方向（プリズムの3角形の面）が赤経方向に平行になる。
5. 望遠鏡の上に自由雲台を介してフィールドスコープなどの案内用望遠鏡を載せ、4の作業が終了後、主望遠鏡の向きは変えず（固定し）、間もない間に目的の星が視野の中心に見えるよう案内望遠鏡を固定する。
 - * 不要
6. 案内望遠鏡で別の星を導入し、その星のスペクトルが直焦点カメラのファインダーに正しく入っているか確認する。入っていない場合は、4、5の作業を繰り返す。
 - * 自動導入で別の星を導入し、その星のスペクトルが直焦点カメラのファインダーに正しく入っているか確認する。入っていない場合は、4の作業を繰り返す。
7. カメラのピントを合わせる。望遠鏡の対物レンズの色収差のためスペクトルの赤の位置と青の位置では、ピントの合う位置が違う。緑から青にかけての位置でピントを合わせると良い。
8. カメラにフィルムが挿填され、シャッタースピードがB（バルブ）になっていることを確かめる。
9. 観測の目的の星を導入し、露出時間は2分でスペクトル写真を撮る。日周運動でトレーリングするので、モータドライブは使用しない。
 - * 観測目的の星を導入し、コメットトラックモードで赤緯方向の移動量をセット後、露出時間は5分でスペクトル写真を撮る。モータドライブを使用する。
10. 西の地平線に近い星から順に6および9の手順で、3等星よりも明るい撮影可能な星を順次撮影していく。また、スペクトル写真の波長のスケールを知るための蛍光灯の分光写真を別途撮影する。

5. 3 分析方法

写真を同時プリントし、印画紙に焼く時の引き伸ばし率が微妙に違くと、吸収線の同定に影響がでるため、焼き増しする時には、1枚だけ必要な場合でも必ず分析する全コマ同時に焼いてもらう。前述 5. 1 の吸収線の同定の方法により波長スケール（図 6. 1）を作り、撮影した恒星のスペクトルの吸収線の大体の波長を求める。天文資料集などから各スペクトル型の写真や顕著な吸収線の元素の特徴や波長を調べ、得られた写真と比べ恒星のスペクトル型を推定する。スペクトル型の分類の際、何が決め手になるかを把握する。（決して恒星名からスペクトル型を直接調べない。）

実際の方法としては、①赤の長波長端から吸収線までの距離をノギスで測り、図 6. 1 のグラフから波長を求め元素を推定する。この時、露出の差によって生じる、赤端のフィルム上のにじみが問題となる。露出過剰の場合は、にじみにより赤端が実際よりも長波長側に伸びたものとなるので、②の方法で簡便な補正が必要となる。② 4000 Å ~ 5500 Å の間を 100 Å 刻みの目盛りと、①での同定の度に元素の波長を記した独自のメジャーを作り同定に役立てる。露出の過不足により赤端がずれたと思われる場合は、最も顕著な吸収線に波長の基準を合わせる。同定の作業を始めしばらくたつと、②のメジャーが非常に役に立ち見直し確認にも重宝する。スペクトル型の分類でキーとなる吸収線があるかどうか、吸収線の強さはどうか、に注意し作業を進める。大まかなスペクトル分類をした後恒星の表面温度を推定する。また、気づいた点などを細かくメモをしておき、考察などに役立てる。最終的に星表などから撮影した恒星のスペクトル型を調べ、自分で分類したもの比べる。分類が正しかったかどうか、判定が難しかった直接間接的原因はなにか、さらに踏み込んだ（正確な）分類をするためにはなにが必要かなど、観測方法に遡った考察を行う。

6. 観測結果

蛍光灯の水銀の輝線からスペクトルの波長スケールを作成したものが図 6. 1 である。全体でテストを含め約 150 枚の写真を撮り、そのうち 37 の星のスペクトルをキャビネ大にプリントし、切り取ったものを図 6. 2 ~ 6. 4 に示す。（観測によって得られたスペクトル写真を科学レポートとは別に整理してある。（）内は V 等級である。）印刷では見にくいかも知れないが、明瞭な暗線が確認できるものが多い。スペクトルの幅の違いは、トレーリングの速さの違いと露出時間のばらつきによる。

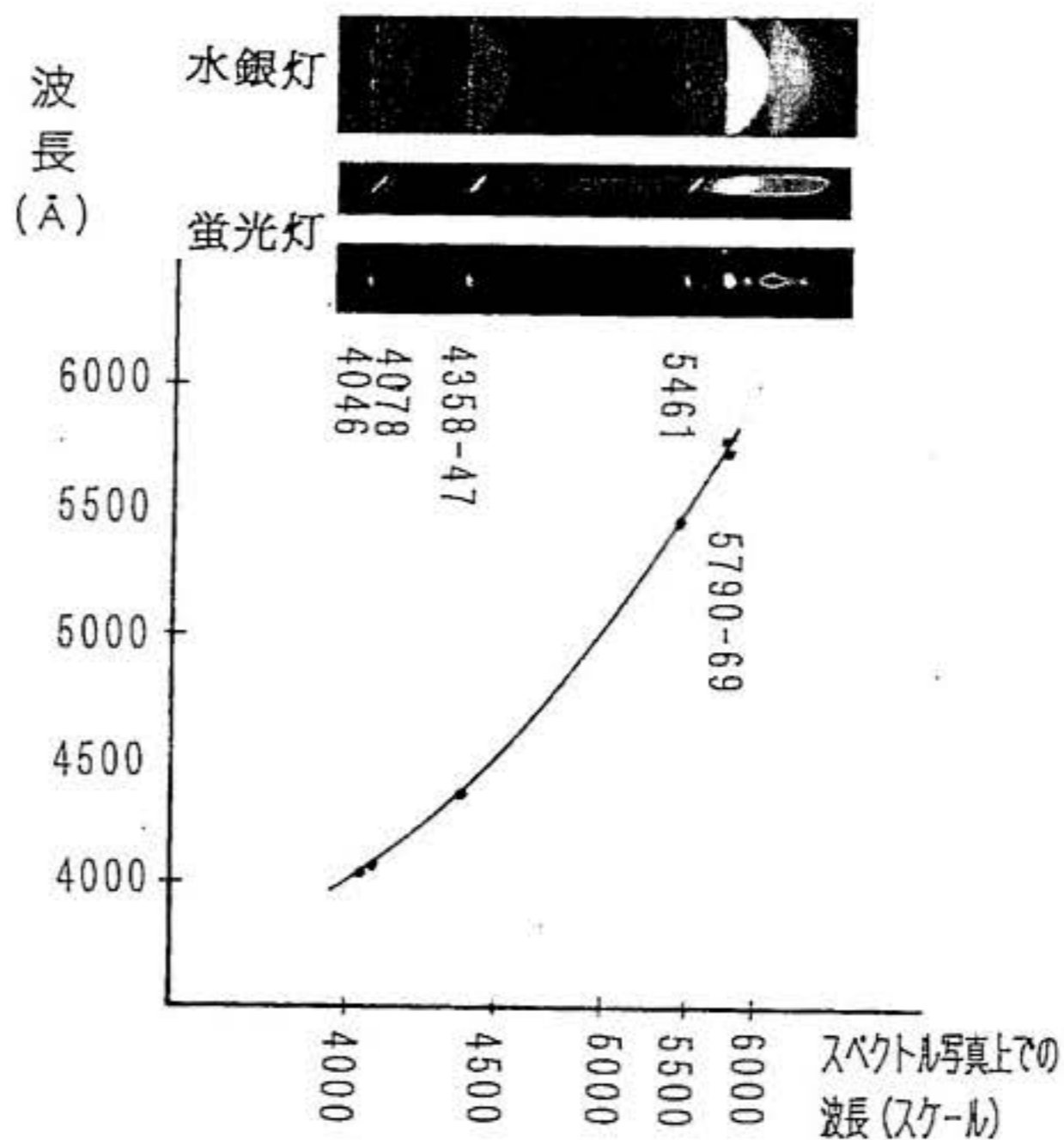
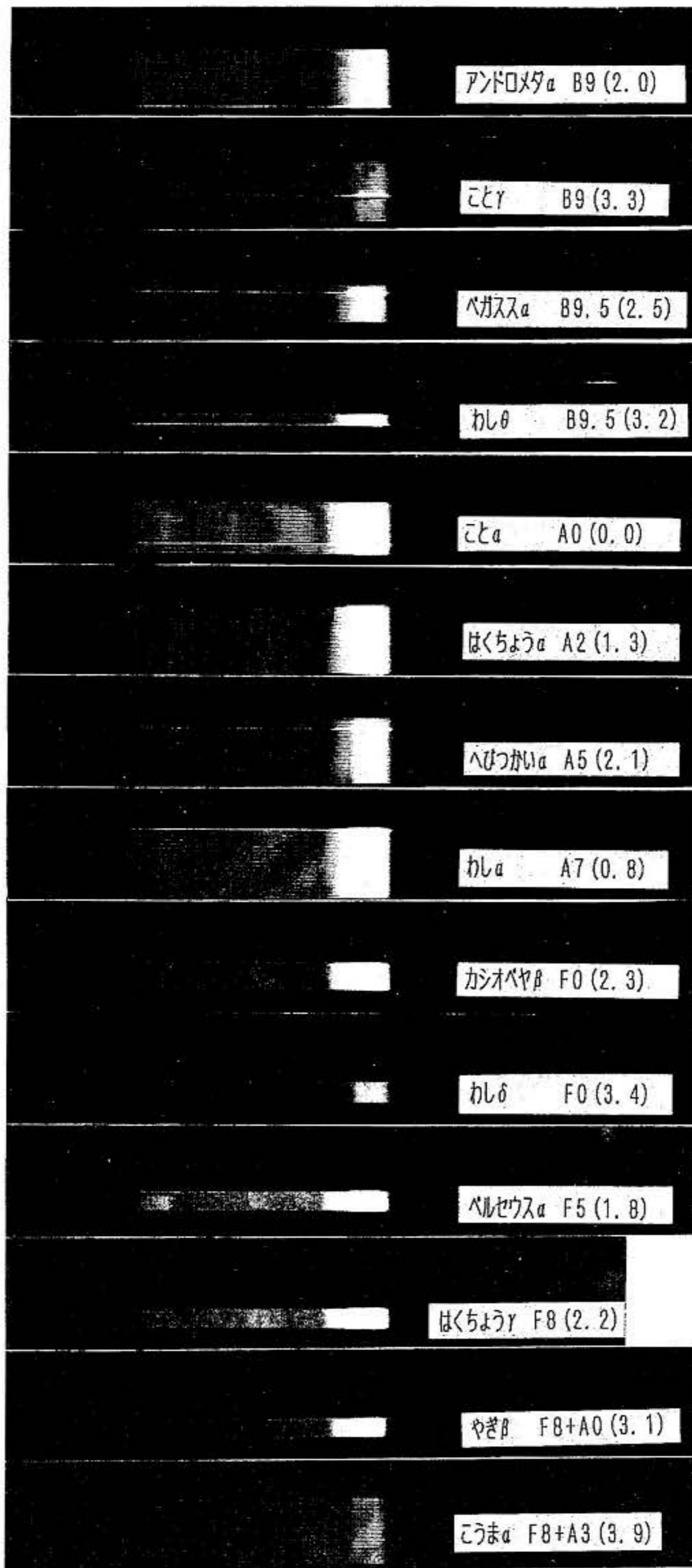
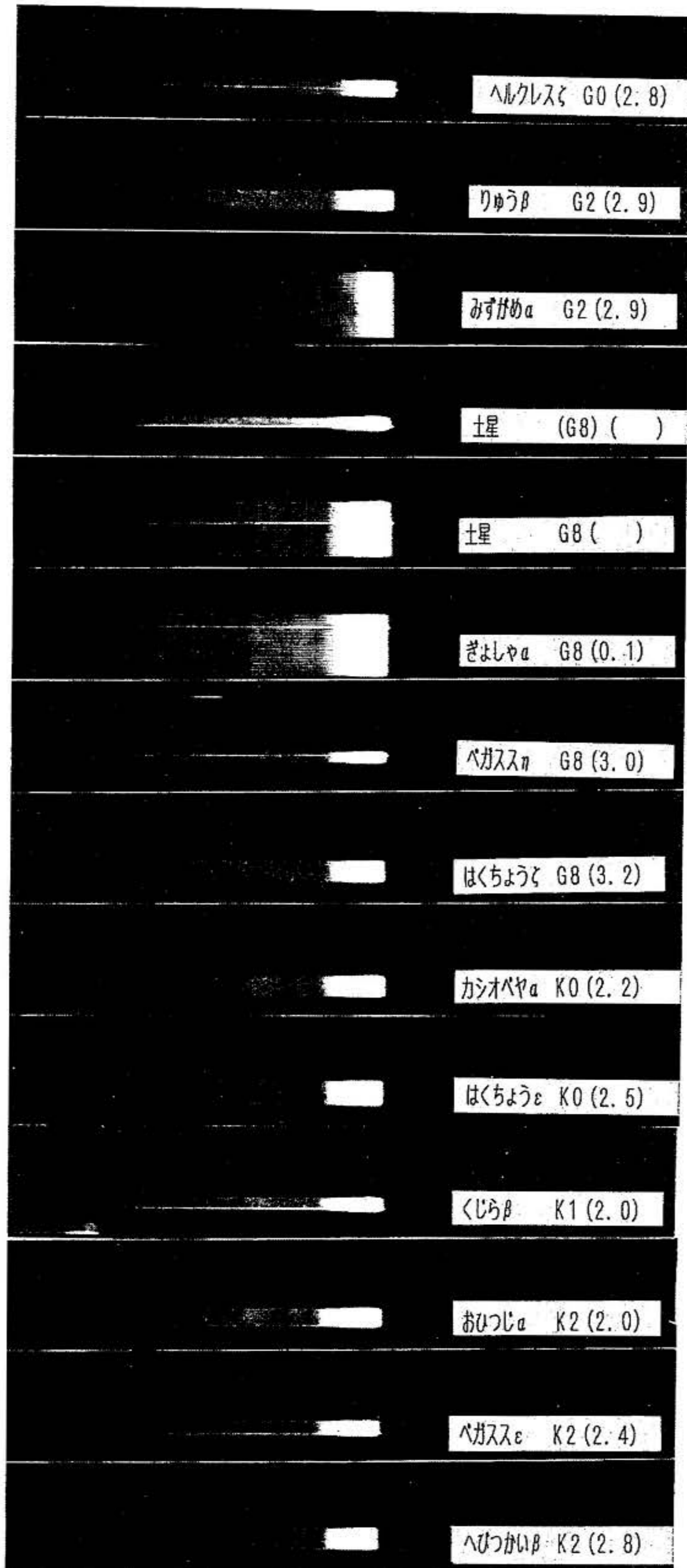


図 6. 1 蛍光灯の輝線から求めたスケール



4000 4500 5000 5500 6000 波長(A)

図 6.2 対物プリズムによる恒星スペクトル (1)



4000 4500 5000 5500 6000 波長(Å)

図 6.3 対物プリズムによる恒星スペクトル (2)

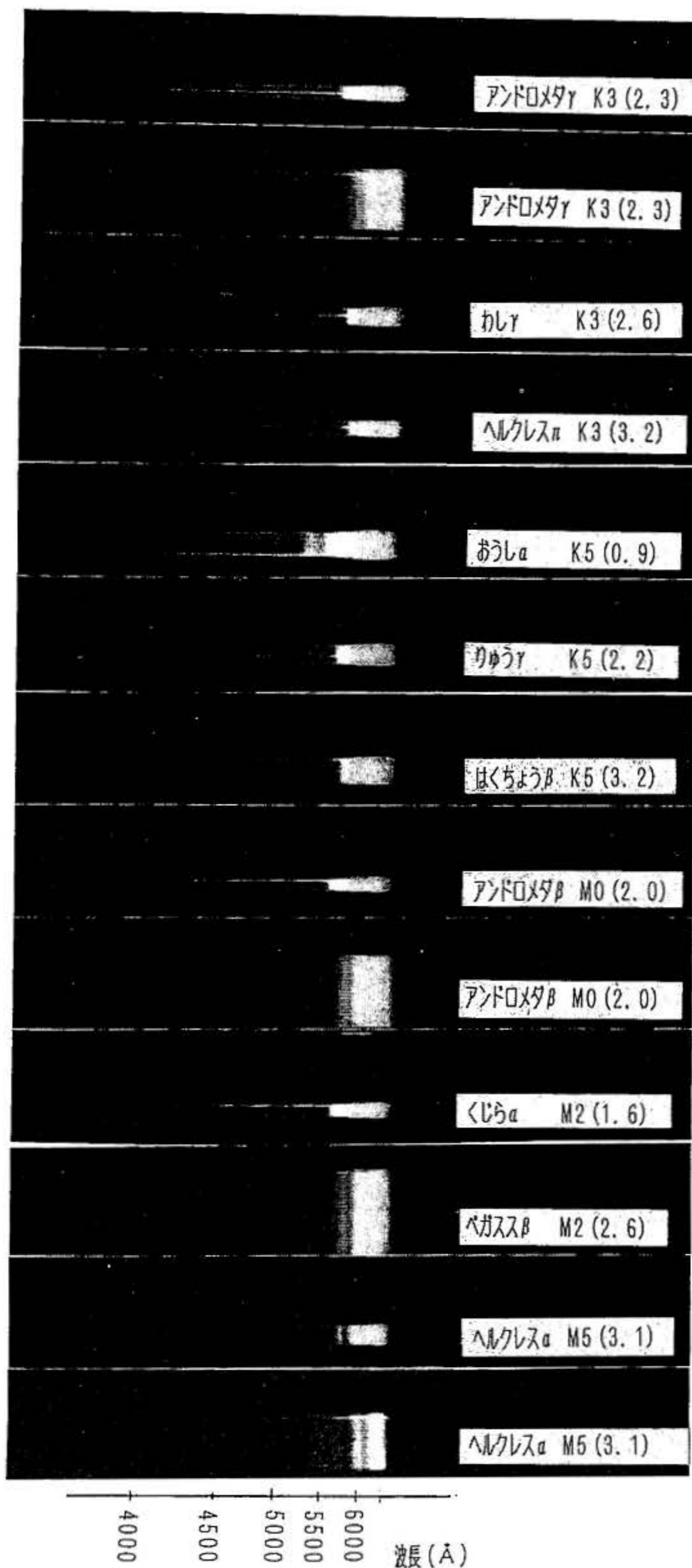


図 6.4 対物プリズムによる恒星スペクトル (3)

今回のスペクトル撮影では、分類として①B-A型、②F-G型、③K型、④M型の4グループに大ざっぱに分けることができた。その際、手がかりとしたことは下記の通りである。

- ①B-A型：H β ，H γ ，H δ ，H ϵ の吸収線が顕著で、その他の吸収線は、殆ど見られない。B型かA型かを判断するHe IIの吸収線は写らなかった。
- ②F-G型：Fe I，Gバンドの吸収線が見え始める。
- ③K型：TiOや4000～4500Åの間に(Sr II，Fe I-II，Ca I，Gバンドなど)吸収線が多くなる。
- ④M型：吸収線の現れ方が他のものとは異なる。(消去法的に分類)

スペクトル型の分類を行ってみると、露出不足に起因する判定グレー(判定に迷う)ものも少なくなかった。また、短波長域では3950Åを前後して感度が急激に低下し、F型から顕著になるCa II(3934)については、全く確認不能であった。露出の過不足による赤端のズレ(プリント上で $\sim 0.5\text{mm}$)もあり、分析で使用した波長を測るスケールでは、K型～M型の入り込んだ金属の吸収線の同定には誤差が大きく、「○×らしい」としか言えない場合がある。

撮影した恒星をスペクトル系列順に並べ、確認できた吸収線を元素別に◎：良く分かる、○：分かる、△：微かに分かる、?：暗線はあるが元素不明などと大別し一覧表を作ると、前述①～④の分類の傾向を一目で見ることができる。

7. おわりに

カラー写真で恒星スペクトルを撮ったが、色が見える(視覚にうったえる)ので、自分で撮影した写真がプリントされたときの生徒の喜びは、大きかったようである。下手な指導にも拘らず、終盤は徹夜をしでまでよくがんばってくれたと思う。観測時も数晩にわたって夜中2時前後まで撮影に費やした。今回の報告にて使用した写真も生徒本人からネガを借りて焼き伸ばしたものである。残念ながら科学レポートの提出期限もあり、仕上がったレポートは見ることはできなかったが、本人に聞いたところ、「あともう少し時間があれば、より満足したレポートになった。少し難しかったので時間がかかった。でも、スペクトルの撮影は面白かった。」と感想を述べていた。

ポジ(スライド)フィルムで撮影し、スライドプロジェクターで適度に拡大投影して吸収線を調べること(この場合はトレーリングを工夫し露出時間を更にかねなければならない。)、回折格子レプリカ、使用や冷却CCDカメラでの応用など改善点や反省点を今後の活動に役立てていきたいと思う。そして、公共天文台の利点を活かし、今後も更なる天文普及に努めたいと考えている。

- 参考文献 小平桂一編 現代天文学講座 6巻 「恒星の世界」 恒星社厚生閣 (1980年)
森本雅樹編 現代天文学講座13巻 「天体観測セミナー」 恒星社厚生閣 (1980年)
大脇直明 磯部 瑋三 斎藤馨児 磯源一郎 著 「天文資料集」 東京大学出版会 (1989年)
横尾武夫編 「宇宙を観るI・II」 恒星社厚生閣 (1993年)
国立天文台編 「理科年表平成7年」 丸善 (1994年)
豊田博慈 近角聡信 監修 「図解実験観察大事典 物理」 東京書籍 (1992年)
ジェームスB・ケイラー著、磯部 瑋三 平山智啓 訳 「星の物理」 日経サイエンス社 (1993年) 他
- 写真提供 浅野未来 (岐阜県羽島市)