

高等学校天文分野を対象とした

Field Star を用いた

HR 図描画教材の授業開発

三重大学大学院教育学研究科 教科教育専攻 理科教育専修

211M028 高田 碧郎

2014 年 2 月 13 日

## ABSTRACT

平成24年度から全面実施された新しい高等学校学習指導要領において地学の内容の取扱いについて新たに「恒星の「性質」については距離、絶対等級、半径、表面温度、スペクトル型及び質量を扱うこと。恒星の『進化』についてはHR図を扱い、質量により恒星の進化の速さ、恒星の週末及び生成元素がことなることも扱うこと」との項目が追加された。「恒星の性質と進化についてはHR図を中心に扱い、定性的な扱いにとどめること」となっていた旧学習指導要領の時期と比べ、恒星の学習についての重要性は高まっている。中でもHR図は、恒星の性質として明るさと色を表す量があること、恒星が主系列星、赤色巨星など種類があることを理解させる教材として重要視されている。そこで本研究では星団に属さない星（Field Star）を用い、視覚的に主系列星と赤色巨星に分類することができる、HR図教材の作成を目的とした。併せて開発教材を用いた授業案の提案をおこなった。教材開発に必要となる恒星の観測は東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所のKWFCを中心に行った。また尾鷲市天文科学館81cmニュートン式反射望遠鏡でも観測を行った。結果として100個の恒星を観測することができた。観測した恒星を元にHR図描画教材の授業案を作成し、高校生、大学生に対し、実践授業を行った。生徒は、作成したHR図から主系列星と赤色巨星を分類することができており、視覚的に星の分類が可能となる描画教材の作成という目標を達成することができた。また、実習の終えた後に生徒に対してアンケート調査を行った。アンケートの結果から、新しい知識を獲得できたと回答した生徒は9割を超え、恒星の性質を系統的に学習する上で本教材はその導入部として効果的であることがわかった。



## 目次

1.はじめに .....	1
1.1 高等学校地学教育の現状と課題 .....	1
1.2 天文分野教材の現状と課題 .....	2
1.3 本研究の目的 .....	3
2.教材について .....	4
2.1 等級について .....	4
2.1-1.等級の歴史と定義 .....	4
2.1-2 等級の原点について .....	4
2.1-3 絶対等級について .....	5
2.2.スペクトル型について .....	6
2.3.色指数について .....	8
2.4 .HR 図とは .....	9
3.観測 .....	14
3.1.観測天体 .....	14
3.1-1 Hipparcos catalogue .....	14
3.1-2 観測天体と数の選定 .....	14
3.2 観測装置 .....	17
3.3 取得データ .....	20
4.解析方法 .....	22
4.1.一次処理 .....	22
4.1-1 bias 補正 .....	22
4.1-2 flat 補正 .....	23
4.1-3 一次処理の手順 .....	23



4.2 二次処理.....	27
4.2-1 恒星の測光.....	27
4.2-2 見かけの等級の計算.....	29
4.3 HR 図の作成.....	31
4.3-1 測光・計算.....	31
4.3-2 絶対等級の変換.....	32
4.3-3HR 図の描画.....	32
4.4 マカリィについて.....	33
5. HR 図教材を用いた授業実践と評価.....	34
5.1 HR 図描画教材の授業案の作成.....	34
5.2 大学生に対する模擬授業の实地とその評価.....	34
5.3 実践授業の内容.....	38
5.3-1 実践授業の实地.....	38
5.3-2 実践授業の流れ.....	39
5.4 生徒の測定結果及び実践授業の評価.....	40
6. まとめ.....	46
謝辞.....	47
参考文献.....	48
付録	

## 1.はじめに

### 1.1 高等学校地学教育の現状と課題

地学で扱う対象は、気象や岩石など我々の生活に密着した現象が多い。また日本のように自然災害の多い国においては、正しい知識に基づく防災教育の観点からも、地学教育は重要な役割を担っている。一方で、高校地学においては、いくつかの課題が挙げられている。その1つが、理科の他分野に比べ高校での開講数が極端に少ない点である。科学技術振興機構と国立教育政策研究所は平成21年1月～2月、全国約900校の高校で理科を教える約3300人の教員を対象に、理科教育の物的・人的環境、理科教員の意識、理科授業への取組みなどについての実態調査を行い、『平成20年度高等学校理科教員実態調査報告書』（平成22年3月）をまとめた【1】。この報告書によれば、調査を行った高等学校のうち、物理Ⅱ、化学Ⅱ、生物Ⅱの開講されている割合はいずれも90%以上だが、地学Ⅱが開講されているのは全体の8.3%と極めて少ない。

地学の開講数の少なさは高校における地学教員数の減少や、非受験科目としての軽視に伴い、地学を開講しない高校が増えていることが原因に挙げられる【2】。これにより進学した先の高校で地学が開講されていなければ、興味を持った生徒がいたとしても、独自に学ぶか、学習を諦めるしかなくなってしまう。

また、地学の開講数の少なさは地学の履修率低下の原因でもある。地学の履修率の低下によって、宇宙科学に対し、その知識を正しく理解できる人材が減少することも問題である。高校で地学を学習しなかった場合、宇宙科学の基礎となる恒星の性質や宇宙の進化などといった内容を学ぶ機会がなくなる。このことは科学が発展し、宇宙科学・宇宙開発が重要な位置を占めている昨今、その成果がブラックボックス化してしまうことを意味する。宇宙科学・宇宙開発の成果がブラックボックス化し、成果を正しく評価できる人材が減少することは、長期的観点から見れば当該分野の衰退を意味する【3】。

また、上記調査では、高校理科を担当する教員に対し、高校在学中に履修した科目の調査も行っている。その調査では、理科の各分野の履修は、普通科高等学校勤務者では、物理80%、化学91%、生物72%、地学43%となっており、開講率と同様に、他教科に比べ地学履修者が少ない。そして、化学Ⅱ、物理Ⅱ、生物Ⅱにおいては、教員の担当科目と同じ科目の高校在学時の履修率は85%を越えているが、地学Ⅱ担当者においては、高校在学時の地学履修率は65%に留まっている。つまり、物理・化学・生物に比べ、地学は高校での履修経験のない教員が指導するケースが多いことになる。

調査の中で「授業を充実させるために必要な事項」について、「教材研究の時間確保」、「優れた教材や指導法に関する情報」の2項目に、8割以上の理科教員が「非常に必要だ」および「必要だ」と回答している。併せて、教材や理科の指導法で困った時にサポートしてくれる場が「ない」と回答した教員のうち約9割が、「優れた教材や指導法に関する情報」を必要だと回答している。平成24年度から理数科目において高等学校では新学習指導要領が全面実地された。新しい学習指導要領では、新しい内容が追加され

ている。そのため、「優れた教材や指導に関する情報」がより必要になってくるものと考ええる。

## 1.2 天文分野教材の現状と課題

新しい高等学校学習指導要領【4】において地学の内容に「恒星の性質と進化について理解すること」が明記されており、さらに内容の取扱いについては新たに「恒星の『性質』については距離、絶対等級、半径、表面温度、スペクトル型及び質量を扱うこと。恒星の『進化』についてはHR図を扱い、質量により恒星の進化の速さ、恒星の週末及び生成元素がことなることも扱うこと」とされた。「恒星の性質と進化についてはHR図を中心に扱い、定性的な扱いにとどめること」となっていた旧学習指導要領【5】の時期と比べ、恒星の学習についての重要性は高まっている。恒星の学習では、恒星の性質として明るさ（絶対等級）と色（スペクトル型、表面温度）があること、恒星には主系列星、赤色巨星など種類があり、それぞれ明るさと色が違うことを、HR図を用いて理解させる必要がある。

恒星の性質の理解にHR図は欠かせないが、このHR図については、恒星の進化の分野に関連させたものとして、距離と年齢が一定の星団に対する教材が多くある【6】【7】。星団を使ったHR図描画教材は大きく分けると2つに分けられる。1つは散開星団を扱ったHR図である【8】。散開星団は星の年齢では比較的若い主系列星の集まりである。2つ目は球状星団を扱ったHR図である【9】。球状星団は比較的老いた星の集まりである。これらの教材はともに星団のHR図を描くことで恒星の進化を深める教材として位置づけられている。このように、「恒星の性質と進化」の範囲において発展的な恒星の進化を学ぶ教材は多数作成されているが、恒星の種類と性質を表す基本的なHR図の形を描画する教材はほとんど見られない。図1.1はこのようなHR図の例である。星団は同年代の星の集団であるため、様々な年代の星を用いて作成される図1.1のようなHR図を作成することはできない。そのため、恒星の性質を理解することは星団を用いた教材では難しいと考えられる。

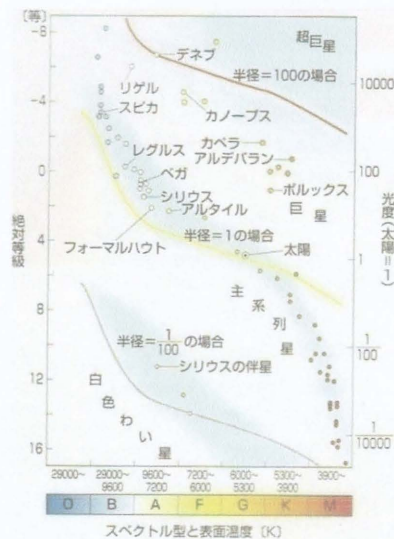


図 1.1 : 教科書に記載された HR 図<sup>1</sup>

恒星の分類分けができる基本的な HR 図を描く教材が数少ない理由としては、画像撮影、画像処理、解析が星団の HR 図作成の教材に比べ、長い時間を要することが挙げられる。散開星団や球状星団を扱う場合、望遠鏡を用いて天体を撮影する際に、星団全体が映っている画像を撮影すればよい。しかし、図 1.1 のような様々な年齢から成るが HR 図を描くためには、星団に属さない数多くの恒星 (Field Star) を撮影する必要がある。

図 1.1 のような、恒星の分類分けができる基本的な HR 図を描くことで、恒星に種類があり、種類ごとに明るさと色・表面温度・スペクトル型に関係性があることを理解することができる。加えて、教科書に記載されている図を演繹的に確かめる学習活動は、生徒の興味・関心を惹き、学習の理解を深めるという効果がある。

### 1.3 本研究の目的

以上の状況の下、本研究では理科教員をサポートする教材で、生徒達を地学に触れさせ地学の魅力を伝えることができるような教材は作成できないかと考えた。

本論文では、恒星の性質の理解を深める教材として、星団に属さない多数の恒星 (Field Star) を用い、恒星の分類分けをすることができる HR 図を描画する教材をつくること、教材の具体的な授業案を作成すること、この二つを本研究の目的とする。

<sup>1</sup>東京書籍「地学 I」より引用

## 2.教材について

HR 図教材を作成するにあたり、以下に必要な知識をまとめる。

### 2.1 等級について

#### 2.1-1.等級の歴史と定義

星の明るさを定量的にあらわすとき、等級という単位を用いる。等級の起源は、ギリシャの天文学者 Hipparchus (BC190～120 年) が、肉眼で見える 1 番明るい星を 1 等星とし、肉眼で見ることができ一番暗い星を 6 等星としたことまで遡る。その後、イギリスの天文学者 J.F.W. Herschel が口径の違う 2 つの望遠鏡を用い、1 等星は 6 等星の明るさの約 100 倍違うことを発見し、のちにイギリスの天文学者 N.R. Pogson が定式化した【10】。Pogson は星の等級と星の明るさ (flux) が以下の式 (2.1) で表すことができる と定義した。【11】

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{L_2}{L_1} \cdots (2.1)$$

ここで  $m_1, m_2$  は恒星の等級、 $L_1, L_2$  は恒星からの明るさ (flux) を表す。

flux は恒星から放射された、

単位時間単位波長単位面積当たりのエネルギー [ $\text{W nm}^{-1}\text{m}^{-2}$ ] である。式 2.1 は Pogson の式と呼ばれており、現在でも等級を導く式として使われている。

#### 2.1-2 等級の原点について

目的天体の等級を知りたい場合、式(2.1)を整理した式 (2.2) より、目的天体の等級 ( $m_{\text{star}}$ ) を計測することができる。ここで  $m_0$  は等級既知の星の等級を、 $L_{\text{star}}$ 、 $L_0$  は対象天体、等級既知の天体の flux を示す。精密な等級の計測が行われ、他の天体の等級推定の基準となる星を測光標準星 (standard star) と呼ぶ。

$$m_{\text{star}} = -2.5 \log \frac{L_{\text{star}}}{L_0} + m_0 \cdots (2.2)$$

標準星の原点は北極星を 2 等級と定義することから始まる【12】。しかし北極星が、明るさが周期的に変わる変光星であることがわかり、こぐま座  $\lambda$  星を 6.5 等と定義し直して北極星野の暗い星が多数観測され、1922 年第 1 回 IAU (International Astronomical Union) 総会において北極星野の 96 個の星を国際式等級の標準星として決め直した【13】。これを国際式  $P_g P_v$  システムや、旧国際式システムと呼ぶ。国際式  $P_g P_v$  システムでは、現在天体観測の主流とされている CCD カメラを用いた撮影ではなく、写真乾板を用いて、星を撮影し等級を決めている。

その後、H.L. Johnson が 1953 年に UBV システムを発表した。Johnson は、特定の波長を通すフィルターを用い観測を行った。主に緑色の光(平均波長  $\lambda_c$ : 540nm)を通す V バンドフィルターを用いて測定した際の等級を V 等級と言う。さらに Johnson は青い光(平均波長 442nm)を通すフィルターを B バンドフィルター、紫外光(平均波長 364nm)を通すフィルターを U バンドフィルターとした。B バンドを用いて測定した際の等級を B 等級、U バンドを用いて測った等級を U 等級、と呼称している。このシステムでは旧国際式標準星の中の北極標準星野 6 個の星の国際式写真実視等級( $P_v$  等級)を Johnson の V 等級と同一とみなすことで V 等級の原点とした。U と B 等級については、6 個のスペクトル型 A0 型主系列星 ( $\alpha$  Lyr,  $\gamma$  UMa, 109 Vir,  $\alpha$  CrB,  $\gamma$  Oph, HR3314) の平均の色指数 B-V, U-B を 0 等級として定義した(色指数については後述)

【14】。その後、多数の 2 次標準星が作られ、その中でも A.U. Landolt が観測した赤道帯標準星【15】が有名であり、多くの観測に使われている。

### 2.1-3 絶対等級について

天体の明るさは天体までの距離に反比例する。したがって天体の明るさは、天体までの距離によって異なり、天体まで近くなるほど明るくなる。よって、地球上から見た明るさに基づいた等級を、見かけの等級という。これに対して、その天体までの距離によらない、本来の明るさの指標として、絶対等級が用いられる。絶対等級はその天体を 10pc 離れたところから見たときの等級である。

太陽から距離  $d$  [pc] だけ離れたある星の見かけの等級  $m$ 、絶対等級を  $M$  とすると、星間物質などによる光の吸収が無視できる場合は

$$M = m - 5 \log\left(\frac{d}{10}\right) \cdots (2.3)$$

という関係式が成り立つ。恒星の代表例の太陽は見かけの等級は V バンドで -26.8 等級と明るい、絶対等級にすると 4.8 等級となる。



## 2.2.スペクトル型について

太陽の光をプリズムに通すと、虹の七色にわかれる。恒星からの光も同様である。この色の系列をスペクトルという。光は電磁波の一種で、電磁波は波長により下の図 2.1 のように波長の長い方から、電波、赤外線、可視光線、紫外線、X 線、 $\gamma$  線と呼ばれる。また、ヒトの目には 380nm～770nm 程度の波長をとらえることができる。この波長帯が可視光線である。

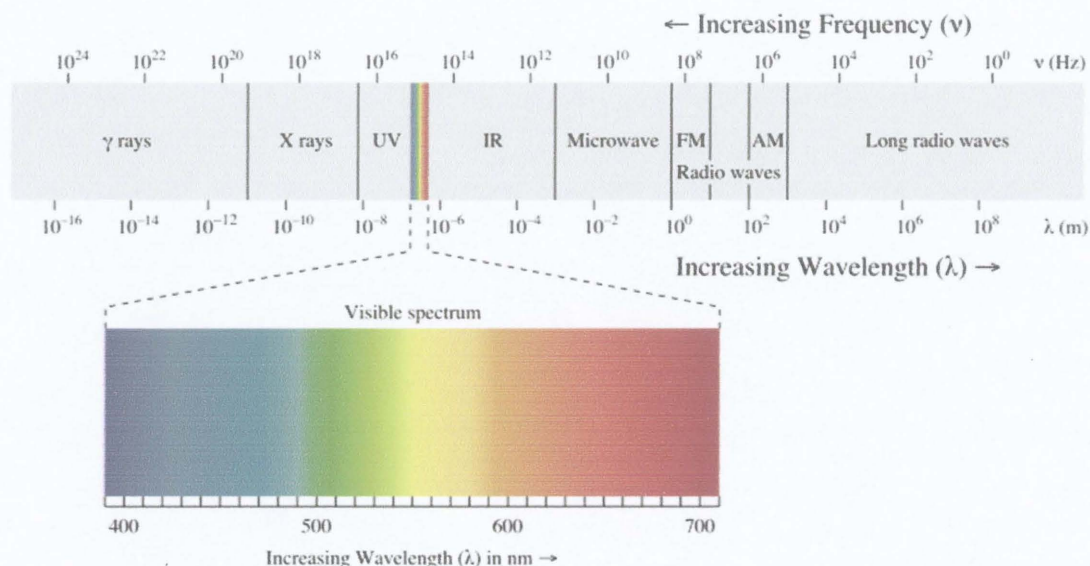


図 2.1：電磁波の波長による分類分け<sup>2</sup>

図 2.2 は可視光域での太陽のスペクトルである【16】。図 2.2 の矢印部のように、ところどころ黒い線（暗線）が入っているのがわかる。この暗線を吸収線といい、光が星の大気中を通過する際、原子やイオンによって光の一部が特定の波長で吸収されることで現れる。吸収線の位置（波長）を調べることで、恒星の大気の組成がわかる。図中の矢印の吸収線は左からそれぞれ、 $\text{Ca}^+$ (393nm),  $\text{Fe}$ (430nm),  $\text{H}\beta$ (486nm)による吸収線である。

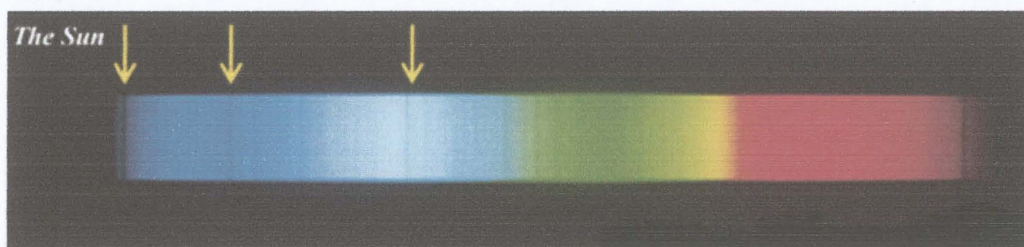


図 2.2：太陽の連続スペクトルと吸収線

<sup>2</sup><http://www.astro.uiuc.edu>

図 2.2 に見られるような吸収線の位置で恒星を分類する方法をスペクトル分類 (spectral classification) と呼ぶ。スペクトル分類としては、Pickering, E.C, Cannon, A J.らがまとめたハーバード式分類法がある【17】。その後、星の絶対等級を示す光度階級を追加し、ハーバード式分類法と合わせて分類する MK スペクトル分類【18】が確立され、広く使われている。このスペクトル分類によって細分された星のタイプをスペクトル型 (spectral type) という。

恒星のスペクトル型はその表面温度や化学組成に対応している。ハーバード式分類法では、スペクトル型が、O, B, A, F, G, K, M, の順で、表面温度が高く、さらに細分化する場合は、上記の文字の後に 0 から 9 までの数字をつける。スペクトル型の順序は表 2.1 のように表面温度の高いものから低いものにむかう順序になっており、色は表面温度が高いものから青白く、低いものになると白、黄、赤の順序になっている【19】。また、MK スペクトル分類では、星の明るさについては光度階級を用いて表す。光度階級とは絶対等級の明るいものから暗いものへ、ローマ数字の I ~ V の五段階で表したものである。なお、太陽は G2V 型に分類される恒星である。

表 2.1： 主系列星のスペクトル型と表面温度の関係

スペクトル型	有効温度 (K)
O5	45000
B0	29000
B5	15000
A0	9600
A5	8300
F0	7200
F5	6600
G0	6000
G5	5600
K0	5300
K5	4400
M0	3900
M5	3900



### 2.3.色指数について

太陽のスペクトルを図 2.4 で示す. 図 2.4 より, 波長により flux が異なっていることがわかる. 太陽以外の恒星も同様に, 波長ごとに flux が異なっている. そのため, 二つの異なる波長で撮った画像でのある星の明るさの比率は, その星のスペクトル型 (表面温度) によって変わる. 恒星のスペクトルは黒体放射で近似できることが知られている. ここで言う黒体放射とは, あらゆる波長の電磁波を吸収する理想的な物体 (黒体) からの放射のことである. いま, 黒体放射のスペクトルの明るさを異なる二種のフィルターを通して測り, その強度の比を取った場合を考える. 黒体放射スペクトルは温度が高くなるほど放射のピーク波長は短くなる.

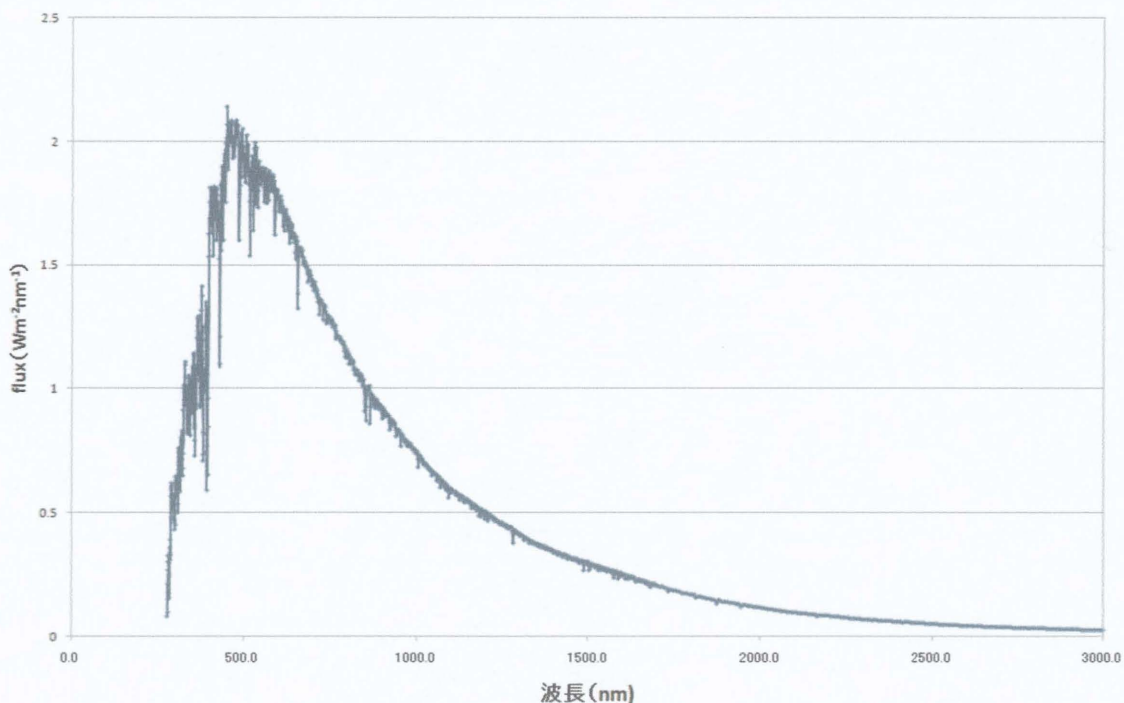


図 2.4 : 大気圏外での太陽のスペクトル分布<sup>3</sup>

例えば, 5,000K の黒体では,  $\lambda=500\text{nm}$  の flux に対する  $\lambda=400\text{nm}$  での flux の比は 0.72 であるが, 10,000K の黒体では, その比は 1.44 となる. このように 2 波長の flux の比は黒体温度の指標とすることができる. 星のスペクトルの場合も同様に, 2 波長での flux の比を用いて表面温度の指標として用いることができる. さらに, 式(2.2)より, 星の flux は等級としてあらわすことができるため, 2 波長の flux の比は等級差として表すことができる. B バンドと V バンドの 2 波長を用いた場合, この等級差は次式(2.4)

<sup>3</sup> <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>

のように記述できる。同一星を異なる 2 波長で観測した場合の等級差を色指数またはカラーと呼ぶ。

$$B - V = -2.5 \log \frac{L_{\text{star}B}}{L_{\text{star}V}} + 2.5 \log \frac{L_{\text{vega}B}}{L_{\text{vega}V}} \cdot \cdot \cdot \quad (2.4)$$

HR 図を書くためには横軸にスペクトル型を用いるため、恒星のスペクトル型を分光観測により推測すれば良いが、色指数がスペクトル型に対応しているため撮像観測の場合は色指数を求め、横軸を色指数で HR 図を描くことができる。そこで本教材の場合では、短波長側に B バンドを、長波長側に V バンドを使用し、色指数として (B-V) を用いる。主系列星での恒星のスペクトル型と、色指数の関係を表 2.2. に示す。

表 2.2： 恒星のスペクトル型と色指数の関係<sup>4</sup>

スペクトル型	色指数 (B-V)
O5	-0.30
B0	-0.30
B5	-0.16
A0	0.00
A5	0.15
F0	0.33
F5	0.45
G0	0.60
G5	0.68
K0	0.81
K5	1.15
M0	1.40
M5	1.60

## 2.4 .HR 図とは

HR 図（ヘルツシュプルング・ラッセル図）とは恒星の性質や進化を学ぶ上で必須となる散布図である。デンマークの天文学者 Ejnar Hertzsprung とアメリカの天文学者 Henry Norris Russell により提案された【20】。この HR 図は、恒星の明るさと色、表面温度の関係性をあらわし、それにより恒星の種類が分かる。図 2.5 にヒッパルコス衛星が観測した恒星で描いた HR 図を示す。

<sup>4</sup>1997 年理科年表より

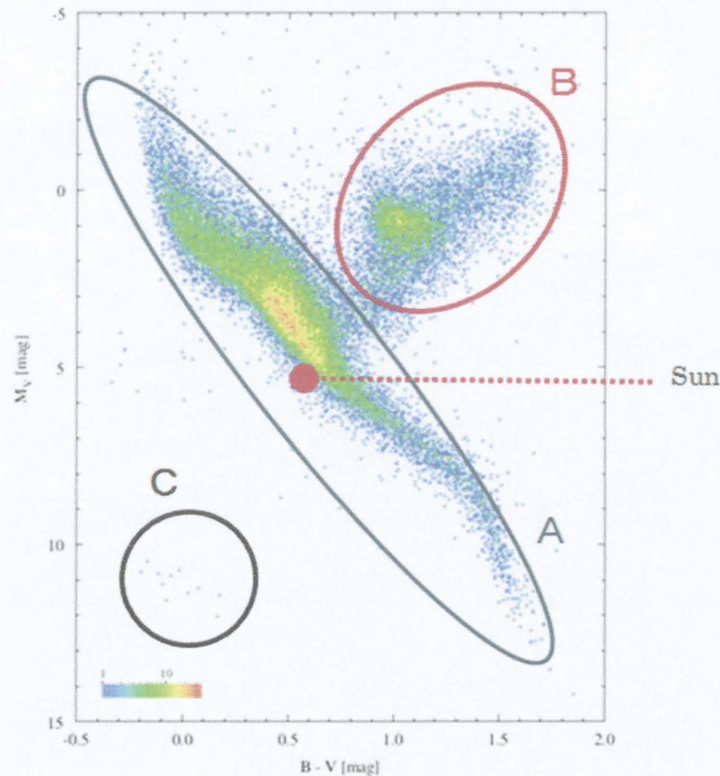


図 2.5：ヒッパルコス衛星が観測した恒星のHR図【21】  
(A～C の枠線は筆者が記入)

例えば、図 2.5 の HR 図上で恒星の分布を見ると大部分の恒星が図の左上から図の右下(A の部分)に延びる線上に位置する。この系列に属する星を主系列星と呼んでいる。主系列星は水素の核融合反応が安定に進行している星である。恒星の中心部の温度が  $10^7\text{K}$  を超えると水素の原子核がヘリウムの原子核に転換する核融合反応が始まる。主系列星の段階になった恒星は、重力によって縮まろうとする力と、核融合で発生する熱によって膨張しようとする力が釣り合って非常に安定な状態になる。そのため、恒星はその一生の大部分の時間を主系列星として過ごす。主系列星は赤い星は暗いが、青い星は明るい性質であることが HR 図から読み取ることができる。太陽もこの主系列星に属する。

光度・寿命などの物理量は、その恒星の質量だけでほぼ決まる。スペクトル型については、太陽質量の 10 倍以上の恒星は O 型、B 型の主系列星になり、太陽質量以下の恒星は K 型、M 型の主系列星になる。また太陽質量の 8% 以下の恒星では中心部の温度、圧力が上がらずに核融合反応を始めることなく、褐色矮星となる。

主系列の右上方に位置する星 (B の部分) は主系列の同じ表面温度の星に比べると明るい星である。主系列星の段階の恒星は水素の核融合反応により、中心部にはヘリウムの核ができる。ヘリウムは、 $1 \times 10^8\text{K}$  以下では核融合反応を起こさないので、星は自身

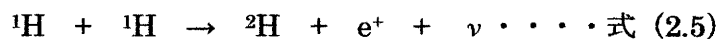
の重さで収縮し始める。そのため、中心部の温度が上がりヘリウム核周辺の水素層で核融合がおこるため、星の外層は逆に膨張し始める。その結果、表面温度は中心部とは逆に下がり、星は赤化する、この段階の星（Bの部分）を赤色巨星とよぶ。これらの星は核融合反応から生成されたヘリウムが恒星の中心核となり老年期に入った星である

【22】。

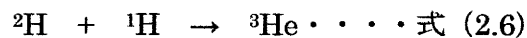
主系列の左下方に位置する星（Cの部分）は主系列の同じ表面温度の星に比べると暗い星である。これは星自体の直径が小さいことを示している。これらの星は白色矮星と呼ばれる恒星の種類であり、核融合反応が停止して一生を終えつつある星である。

恒星の一生における HR 図上での移動は次のようになる。まず、星雲から原始星が誕生する。この段階ではまだ核融合反応は始まっておらず収縮による重力エネルギーの解放で輝いている。中心核の温度が上昇し、核融合反応が始まると星は原始星から主系列星となり、その質量に応じた主系列上の位置に移動する。

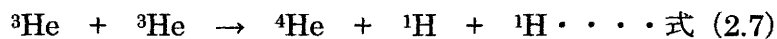
太陽程度の質量の星の核融合反応は“p-p チェイン”と呼ばれるもので、2 個の陽子 ( ${}^1\text{H}$ ) がぶつかって、陽子と中性子からなる重水素 ( ${}^2\text{H}$ ) になる。このとき、陽電子 ( $e^+$ ) とニュートリノ ( $\nu$ ) が出る。“p-p チェイン”の第一段階の反応式を式(2.5)に示す。



次に重水素 ( ${}^2\text{H}$ ) に陽子 ( ${}^1\text{H}$ ) がぶつかって融合してヘリウム 3 ( ${}^3\text{He}$ ) になる。その式を式 (2.6) に示す。



そして、ヘリウム 3 ( ${}^3\text{He}$ ) 同士が衝突してヘリウム 4 ( ${}^4\text{He}$ ) になる。第三段階の反応式を式(2.7)に示す。



p-p チェインによるエネルギー発生率は温度の 4 乗に比例する。

一方質量が大きい星では p-p チェインではなく、CNO サイクルという核融合反応が起きる。この反応では、p-p チェインと同じように、4 つの  ${}^1\text{H}$  (水素の原子核) が融合し、一つの  ${}^4\text{He}$  (ヘリウム原子核) になる。しかし、CNO サイクルは温度の 17 乗に比例し、p-p チェインよりも温度依存性が大きい【23】。

質量が大きい星ほどエネルギー生成量が高く、表面温度が高く絶対等級も明るくなるので主系列の左上の方に位置する。核融合反応が進み、中心核での水素が枯渇すると恒星は徐々に膨張していく。表面温度は低下し、HR 図上では主系列から外れて移動していく。主系列上に位置する時間の長さは恒星の質量による。質量による主系列段階の進化経路とおもな段階での年齢を図 2.6 に示す【23】。

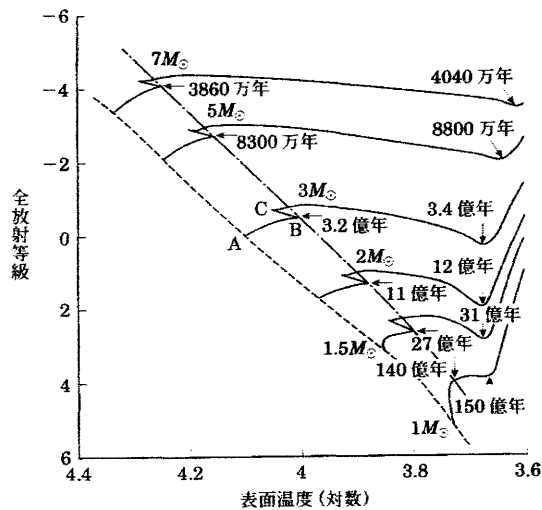


図 2.6：主系列星の赤色巨星への進化経路とおもな段階での年齢

図中  $3M_{\odot}$  の恒星の場合、A-B は主系列星の時の核融合反応により、中心核の水素がヘリウムに変えられて減少していき、B 点对対流中心核内の水素がほとんどなくなる。このとき、水素燃焼のエネルギー発生率が静水圧平衡<sup>5</sup>を保つのに必要なエネルギーと釣り合うことができなくなるので、星全体が重力収縮する (B-C)。重力収縮によって恒星内部温度が上昇し、ヘリウム中心核のすぐ外側の層で水素燃焼が活発化し、その層より外側の静水圧平衡を維持するのに必要なエネルギーが得られるようになり、C 点で外層の重力収縮が止まる。しかし、水素燃焼殻により内部では、核融合反応によるエネルギーの発生がないので、重力収縮が止まった状態になるには、密度勾配だけから得られる圧力勾配によって重力が支えられる必要がある。この状態は、ヘリウム中心核の質量が星全体の約 10% よりも小さい時に可能である。ヘリウム中心核に対するこの質量限界をセンベルグ - チャンドラセカル限界という【23】。

ヘリウム中心核の質量がセンベルグ - チャンドラセカル限界よりも大きいと、静水圧平衡を保つために温度勾配が必要となる。そのため熱エネルギーが中心から外側にむかって流れ、ヘリウム中心核はエネルギーを失うので重力収縮し、中心核内の温度が上昇していく。ヘリウム中心核の重力収縮により、そのすぐ外側にある水素燃焼殻の温度が上昇し、エネルギー発生率が上昇する。そのため、たくさんのエネルギーが外層に流れ込むことになり、外層はエネルギーを吸収して膨張する。そのため表面温度が下がり、HR 図上右側の赤色巨星へと進化していく。

小質量星（太陽質量程度、それ以下）の恒星の進化は上記の進化とは少し状況が異なっている。小質量星の主系列段階の水素燃焼は温度勾配が対流条件を超えないため、中心部では対流が起こらず、ガスの混合が起こらない。この場合、中心で水素が枯渇した時点でも中心からわずかに離れた層にはまだ水素があり、中心燃焼構造から燃焼殻構造

<sup>5</sup>重力による収縮と圧力勾配による膨張とが釣り合った状態

への変化が起こる。したがって、大中質量星の進化経路に見られる B-C 段階は小質量星進化にはない。

このようにして最終的に赤色巨星となった後、大質量星（太陽質量の 4 倍以上の星）は核融合反応が爆発的に起こり、超新星爆発により一生を終える。小質量星（太陽質量の 4 倍以下）では赤色巨星でいる間に外層の大部分を吹き飛ばしてしまう。内部の高温部分が露出するために表面温度は上昇していくが、直径が小さくなるために絶対光度は暗くなり、HR 図上を左下へ向かって移動し、白色矮星となる。核融合反応が起こらないため、その後は冷えて暗くなる一方であり徐々に HR 図上を右下へ移動していき一生を終える【24】。



### 3.観測

#### 3.1.観測天体

本研究では教材としてHR図を扱うにあたり見かけ等級を絶対等級に直す作業を行う。その作業のためには、距離がわかっている恒星が必要である。そこで、距離を求めるための視差の精度が従来のカタログに比べより良い Hipparcos catalogue を用い、観測する恒星の選定を行った。

##### 3.1.-1 Hipparcos catalogue

Hipparcos catalogue は位置天文衛星 Hipparcos の観測に基づく星表である。位置天文衛星 Hipparcos は、欧州宇宙機関 ESA(European Space Agency)が 1989 年 8 月に打ち上げ、1989 年から 1993 年までに 118218 個の恒星の年周視差を計測した【25】。この Hipparcos catalogue の特徴は、恒星までの三角視差の精度が $\pm 1\text{mas}^6$ 、固有運動の測定精度が $\pm 1\text{mas/年}$  ( $\sim \pm 5\text{km/s/kpc}$ ) と過去の地上観測から得られたデータよりもはるかに高精度であることである【26】。

##### 3.1-2 観測天体と数の選定

HR 図作成に必要とする、観測天体数を決めるために、Hipparcos catalogue からランダムに恒星を抽出し、HR 図を描いた。以下の図 3.1～図 3.3 は恒星を 50 個、100 個、150 個と設定して描いた HR 図である。

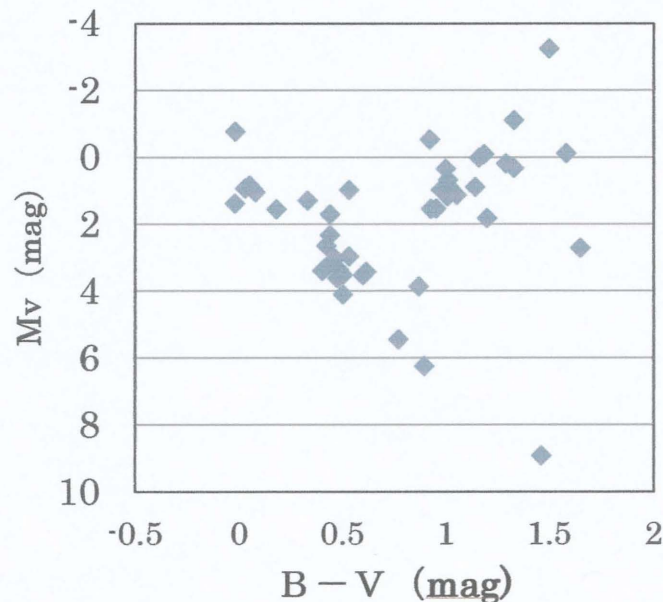


図 3.1 : Hipparcos catalogue から 50 個の恒星で描いた HR 図

<sup>6</sup>1mas=1" の 1/1000.

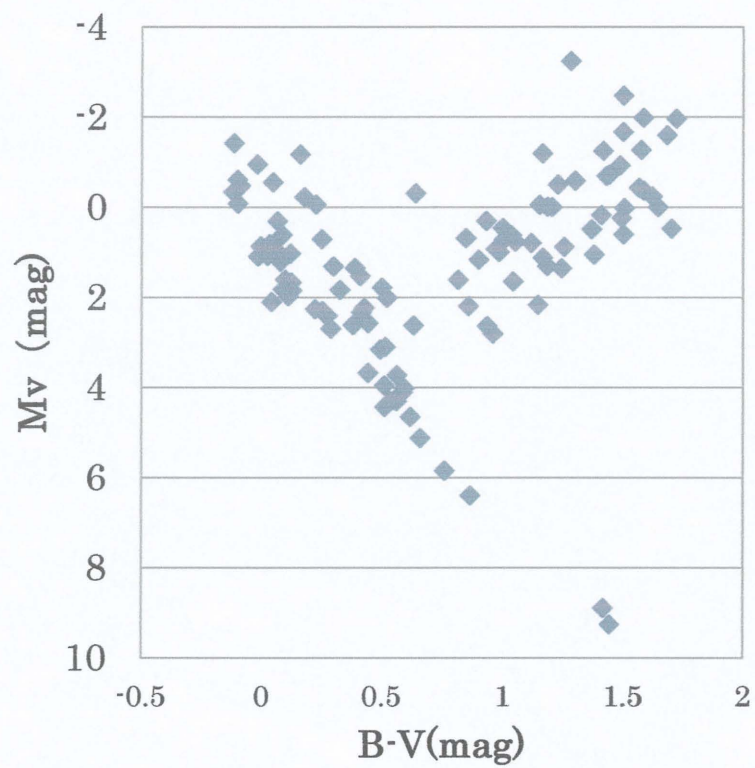


図 3.2 : Hipparcos catalogue から 100 個の恒星で描いた HR 図

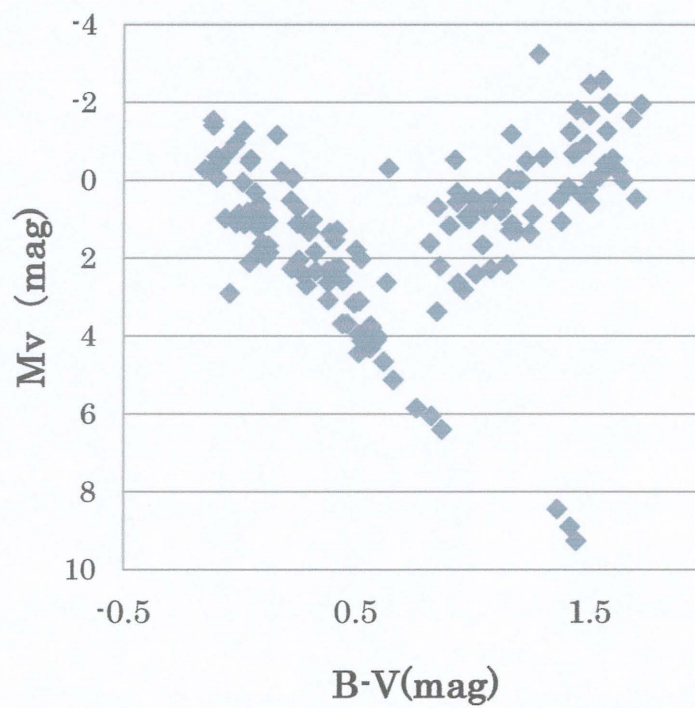


図 3.3 : Hipparcos catalogue から 150 個の恒星で描いた HR 図



本研究では教材として、主系列星と赤色巨星に恒星の分類分けが視覚的にできる基本的な HR 図が描けることを目的としている。上記の図 3.1 の 50 個では、主系列星と赤色巨星がわかりにくい。図 3.3 のように 150 個では、はっきりと二つの恒星の種類がわかるが、数が多いと画像解析に時間がかかり、実習時間が長くなってしまう。そこで、図 3.2 の例にある 100 個のケースで、恒星の種類分けができると判断し、観測恒星数を 100 個とした。

また、観測天体には等級の基準として扱われる Vega を中心に行うこととした。Vega の赤経(RA)・赤緯(Dec)は次の通りである。

Vega の位置 : RA:18h36m56.1s,Dec: +38° 46' 58" (2000 年分点)

次に Vega 周囲どのぐらいの範囲に Hipparcos catalogue に載っている恒星が位置するか調べるために、Hipparcos catalogue から Vega を中心として 250 個のカatalog星の分布を調べた。調べた結果を図 3.4 に示す。なお、縦軸に赤緯 (Dec)、横軸は赤経 (RA)を角度で表わしており赤い中心点はベガの座標で、 $(279.2341^{\circ}, 38.783^{\circ})$  である。

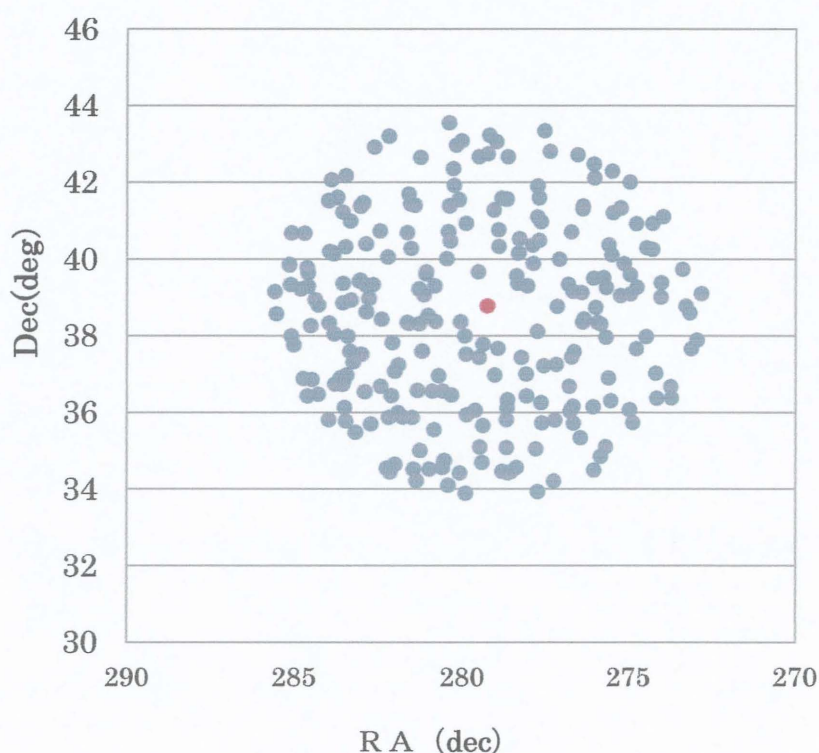


図 3.4 : Vega 周囲 250 個の Hipparcos catalogue の恒星の分布

図 3.4 より 250 個の恒星が Vega を中心に半径  $5^\circ$  以内の範囲に存在することがわかった。この 250 個の星の中から、スペクトル型等の情報をもとに 108 個の恒星を観測候補天体としてリストアップした。天体数が多いため、観測天体のリストは付録 1 に示す。

### 3.2 観測装置

3.1 節で示したように、本研究では観測天体として少なくとも 100 個の恒星を観測する必要がある、その恒星は  $15^\circ \times 10^\circ$  の広い視野内に点々と存在していることがわかる。そのため、焦点距離の短い望遠鏡や画素数が少ない CCD を用いると視野が小さくなるため撮影する領域数も多くなる。例えば、天文研究室には SBIG 社の冷却 CCD (1020×1530 画素) があり、尾鷲市立天文科学館の 81cm ニュートン式反射望遠鏡を用い観測すると、視野が  $10' \times 15'$  となる。その場合、本研究で扱う恒星は、その視野では 1 個ずつしか観測できず、100 個の恒星を観測しようとする、1 恒星あたり 1 枚、合計 200 枚の画像 (B バンド, V バンドで 100 枚ずつ) を取得する必要がある。そのため、長時間の観測が必要になってくる。その問題を解決する手段として、本研究では超広視野の観測を行うことができる東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曽観測所の KWFC(Kiso Wide Field Camera)と尾鷲市天文科学館の大型望遠鏡の 2 施設を用いて観測を行った。望遠鏡の全体写真を図 3.5、望遠鏡の仕様を表 3.1、観測機器である KWFC の仕様を表 3.2 に示す。



図 3.5 103cm シュミット望遠鏡

表 3.1 望遠鏡の仕様（木曾）

焦点	シュミット式
口径	103cm
焦点距離	330cm
口径比	F/3.1
望遠鏡の位置	東経 137° 37' 42.2" 北緯 35° 47' 38.7" 海拔 1130m

表 3.2 撮像装置の仕様（木曾）

検出器		SITe 社 2K×4KCCD×4 個 MIT 社 2K×4KCCD×4 個
画素数		計 8K×8K ピクセル
画素サイズ		15μm×15μm
視野		125' ×125'
画素スケール		0.9" /ピクセル
観測波長 (限界等級*)	B	c : 445nm (22.2mag)
	V	λ c : 551nm (21.3mag)

\* : S/N=10, 15 分露出の場合

この望遠鏡は視野が 2° ×2° という広視野を一度に撮影できる観測装置である【27】。この観測装置を使うと今回の観測天体は 32 枚（B バンド、V バンドで 16 枚ずつ）観測を行うことができる。16 枚の撮影する範囲を図 3.6 に示す。なお、図 3.6 の中央の赤丸が Vega, 他の×点が観測座標の中心点をあらわし、16 枚で撮影できる恒星の数は 108 個である。

また、木曾での撮影は撮影日時が決まっており天候が悪く観測ができない場合もあることを考え、三重大大学と提携を結んでいる尾鷲立天文科学館の 81cm 反射望遠鏡を用い事前に 20 個の恒星の観測を行った。尾鷲の望遠鏡の全体写真を図 3.7、望遠鏡の仕様を表 3.3、観測機器の使用を表 3.4 に示す。この 81cm 望遠鏡にはニュートンとカセグレンの 2 種の焦点があるが、本研究ではニュートン焦点での観測を行った。



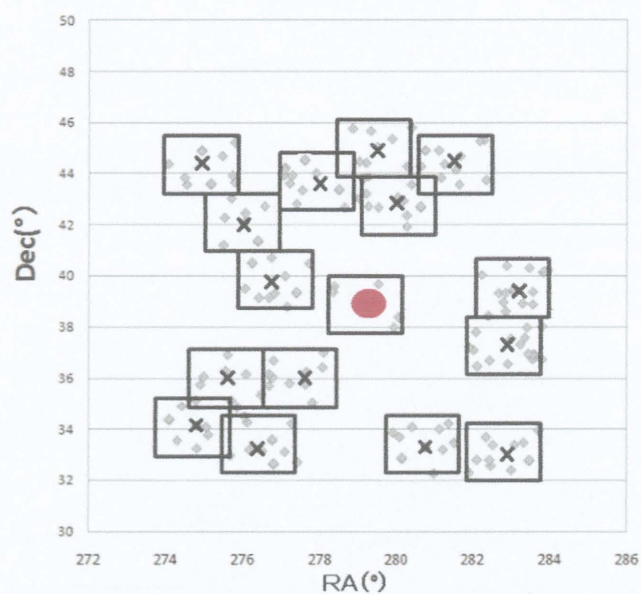


図 3.6 : 16 枚の画像の撮影範囲



図 3.7 : 81cm ニュートン式反射望遠鏡

表 3.3 望遠鏡の仕様 (尾鷲)

焦点	ニュートン式
口径	81cm
焦点距離	312cm
口径比	F/3.9
望遠鏡の位置	東経 136° 11' 30" 北緯 34° 4' 27" 海拔 54m

表 3.4 撮像装置の仕様（尾鷲）

検出器		SBIG 社 ST-8XME
画素数		1020×1530 ピクセル
画素サイズ		$9 \times 10^{-6} \text{m}$
視野		10' × 15'
空間分解能		0.6'' × 0.6''
観測波長	B	$\lambda_c : 435 \text{nm}$
	V	$\lambda_c : 538 \text{nm}$

### 3.3 取得データ

尾鷲での観測は 2011 年 9 月 21 日, 10 月 19, 26 日に行った. 木曽での観測は 2012 年 8 月 7~9 日に行った. 観測の主体となった木曽での 16 枚の画像データの取得状況を次ページの表 3.5 に示す. 露出時間は天体からの明るさが観測機器の信号量を飽和しないように, 0 等星の vega は 1 秒, 他の恒星は 8~10 等星が多かったため 5 秒に設定した.

表 3.5 : 取得画像データ

	バンド	露出時間(s)	枚数	観測時刻
1 枚目	B	1	2	8/7 23:10
Vega 付近	V	1	4	8/8 20:58
2 枚目	B	5	2	8/7 23:13
HIP91794 付近	V	5	1	8/8 21:50
3 枚目	B	5	3	8/7 23:24
HIP89812 付近	V	5	1	8/8 22:23
4 枚目	B	5	3	8/7 23:40
HIP90415 付近	V	5	3	8/8 22:27
5 枚目	B	5	2	8/7 23:48
HIP89602 付近	V	5	2	8/8 22:49
6 枚目	B	5	2	8/9 19:57
HIP90297 付近	V	5	1	8/8 23:59
7 枚目	B	5	1	8/9 20:16
HIP90708 付近	V	5	1	8/8 24:07
8 枚目	B	5	2	8/9 20:24
HIP92691 付近	V	5	2	8/8 24:15
9 枚目	B	5	1	8/9 20:34
HIP91348 付近	V	5	2	8/8 24:25
10 枚目	B	5	2	8/9 20:44
HIP90044 付近	V	5	3	8/8 24:40
11 枚目	B	5	2	8/9 20:54
HIP90561 付近	V	5	1	8/8 25:01
12 枚目	B	5	2	8/9 21:01
HIP92096 付近	V	5	3	8/8 25:08
13 枚目	B	5	2	8/9 21:14
HIP91610 付近	V	5	1	8/8 25:27
14 枚目	B	5	3	8/9 21:26
HIP92551 付近	V	5	2	8/8 25:38
15 枚目	B	5	5	8/9 22:40
HIP92591 付近	V	5	3	8/8 25:54
16 枚目	B	5	3	8/9 22:55
HIP89482 付近	V	5	3	8/9 23:23

## 4.解析方法

### 4.1.一次処理

CCDデータを解析する場合、どのような天体を観測した場合でも必ず行わなければならない共通したデータ処理のことを一次処理という。一次処理は大きく分けて、bias画像の合成及び観測画像からの差引きと、感度補正の合成及び観測画像に対する補正の2つの作業からなる。

#### 4.1-1 bias 補正

CCDによって出力される信号は、入射光量に応じて出力される信号と、光が入射していない状態でも出力される信号の2種類がある。後者は天体からの信号とは無関係なので補正をする必要がある。

後者の信号でも詳しく見ると2種類の信号に分けられる。1つは暗電流と呼ばれる信号(dark)で、CCD自身の温度によって熱的に励起される電子に起因する。この暗電流が、天体から出される信号が劣化してしまうノイズの1つとなるので、これを取り除くことが必要である。暗電流の発生量は、CCDの温度が関係しており、温度が下がるにつれて暗電流は減少する。そのため今回の観測では、木曽観測所では $-100^{\circ}\text{C}$ 、尾鷲では $-10^{\circ}\text{C}$ まで冷却して行った。

2つ目の信号はbiasと呼ばれる信号である。この信号は、CCDからの出力をデジタル値に変換する際に出力値がマイナスにならないよう、アナログーデジタル変換の精度を向上させるために人工的に付加されたものである。データ解析をする際には取り除く必要がある。biasは各画素の出力に一定の値を加えたものである。基本的には定数となるが装置環境の変化などによって若干の時間変化が起きる。したがって、観測する際には対象天体を観測する前後にbias画像を撮っておく必要がある。bias画像は観測装置のシャッターを閉じた状態で画像を取得する。また、画像取得の際には、読み出しに伴うノイズが現れる。このノイズの大きさはランダムに現れるため、bias画像を何枚か撮影し、平均化することで軽減させることができる。平均化したbias画像を観測天体の画像から差し引くことによって、ノイズを抑えることができる。

なお、木曽観測所では前述の通りCCDの温度が $-100^{\circ}\text{C}$ まで冷却して行ったことにより、1画素あたりに発生する暗電流の量は1時間あたりで電子1個以下となり、実質的に観測データに影響を与えない程度に抑えることができたのでdarkは考慮しなかったが、尾鷲では木曽よりもCCDの温度が高く暗電流は時間に比例して大きくなるため、観測天体観測天体の画像と同じ露出時間のdark画像を撮影した。

#### 4.1-2 flat 補正

CCDは複数画素の集合体であるが、各画素の感度は少しずつ異なっている。また、光路上に傷やほこりがあった場合でも、画素への入射光量は変化する。そのため、すべての画素に同じ明るさの光を当てたとしても、画素ごとに異なる値が出力される。この感度のムラを無視したまま解析を行うと誤差の要因となるので、画素間の感度の違いを補正する必要がある。この補正をflat補正という。感度の違いは波長によってことになってくるので、この補正は波長ごとに行う必要がある。flat補正のための画像を取得するには各画素に同一輝度の光を入射させ、その出力差を求めればよい。そのため広い視野に一樣に光を当てることができる光源が必要になる。一樣光源を得るための方法にはsky flat, dome flat, twilight flatがあり、木曽観測所ではドーム内の一樣な光を当てることができる領域を用いたdome flatを使った。尾鷲の天文台にはドーム内に一樣な光をあてることのできる領域がなかったことから、日没直後の空と日の出前の空を一樣光源とみなすtwilight flatを使用した。

#### 4.1-3 一次処理の手順

CCD画像を一次処理する際天体画像解析用ソフトであるIRAF【28】を使用した。IRAFでは画像同士のカウント値の四則演算、フレーム内カウント値の平均値の算出、星の自動検出、測光などを行うことができる。bias補正とflat補正を踏まえると、一次処理の手順は以下ようになる。

1. bias (dark) 画像を合成し、平均bias(dark)画像とする。
2. flat画像から平均bias (dark) 画像を差し引く
3. 同じ波長のflat画像を重ね合わせる。
4. 全画素の平均値が1になるように合成flat画像を規格化する。
5. 波長ごとに2～4を繰り返す
6. 天体画像から平均bias(dark)画像を差し引く
7. 6の画像を同じ波長の合成flat画像で割る。
8. 波長ごとに6～7を繰り返す。

bias画像を図4.1, flat画像を図4.2, 木曽観測所KWFCのVバンドでの処理前の画像を図4.3に、処理後の画像を図4.4に示す。また、Bバンドでの処理前の画像を図4.5に、処理後の画像を図4.6に示す。図4.3では画像上方の領域は各画素での感度が違うため縞模様のようになり恒星が認識できない。図4.5では画像にムラがあり、どちらも画像解析に適したデータとは言えない。そこで上記の1次処理をおこなうことで、図4.4や図4.6のように鮮明な画像を得ることができる。



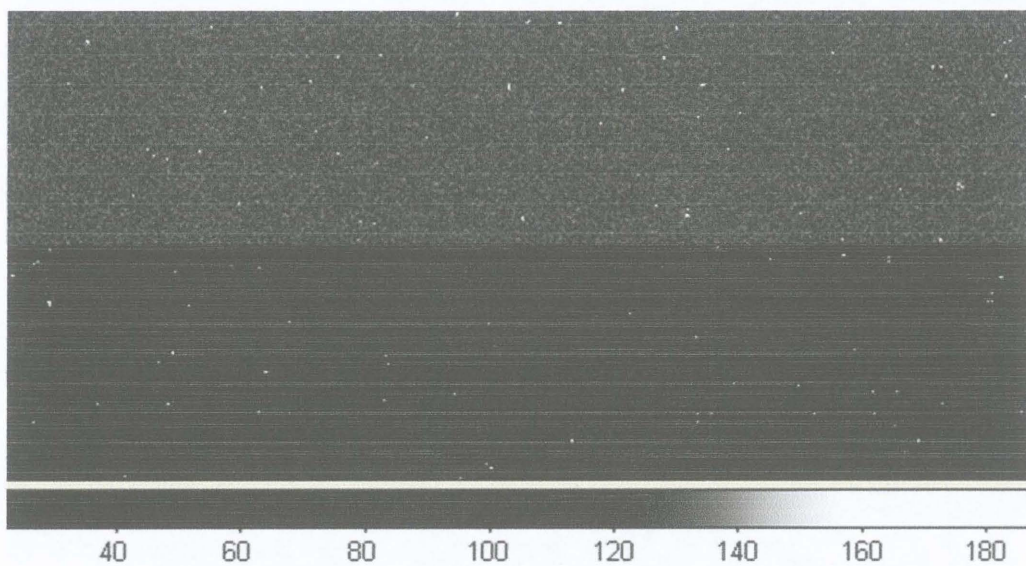


図4.1 bias画像

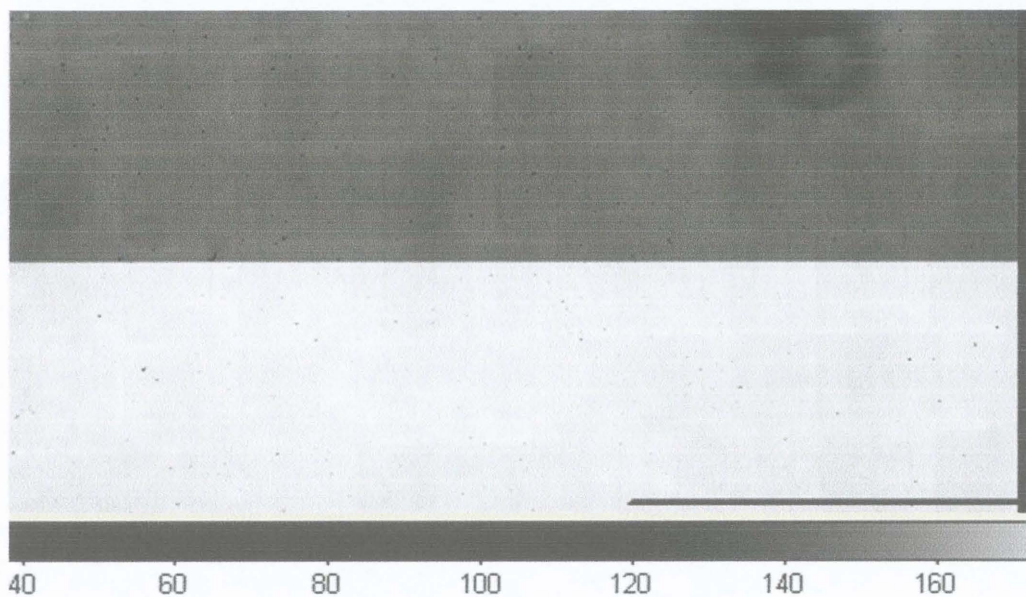


図4.2 flat画像 (dome flat,Vバンド)

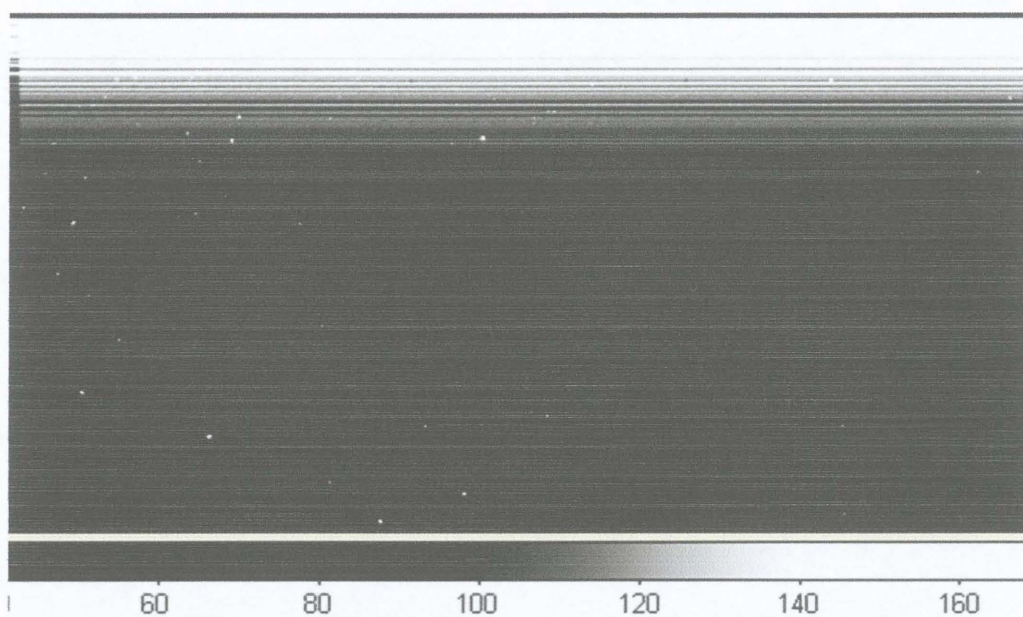


図4.3 一次処理前の天体画像 (HIP91497,Vバンド)

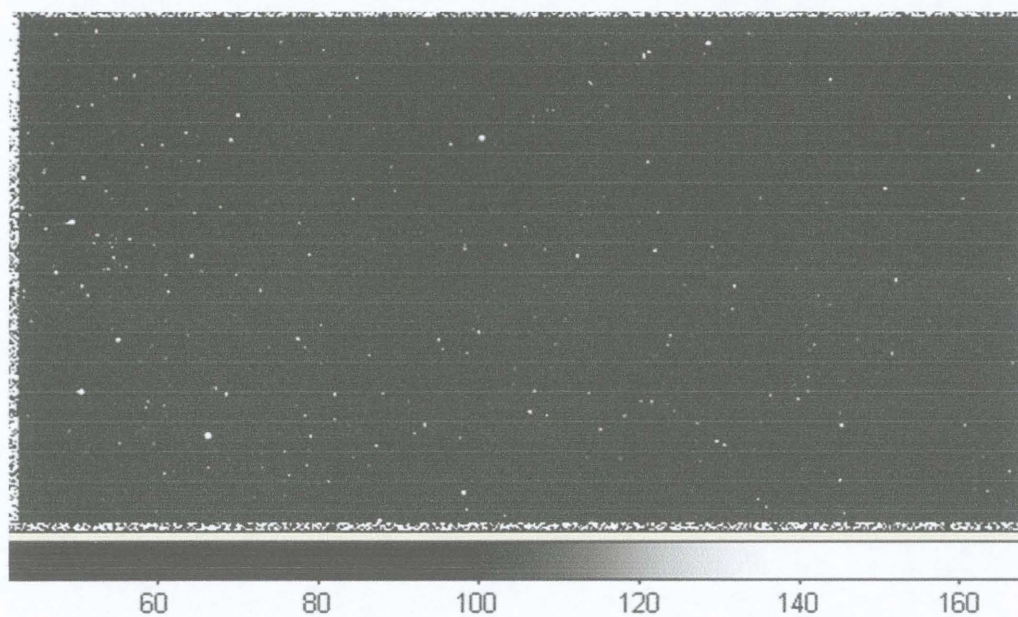


図4.4一次処理後の天体画像 (HIP91497,Vバンド)



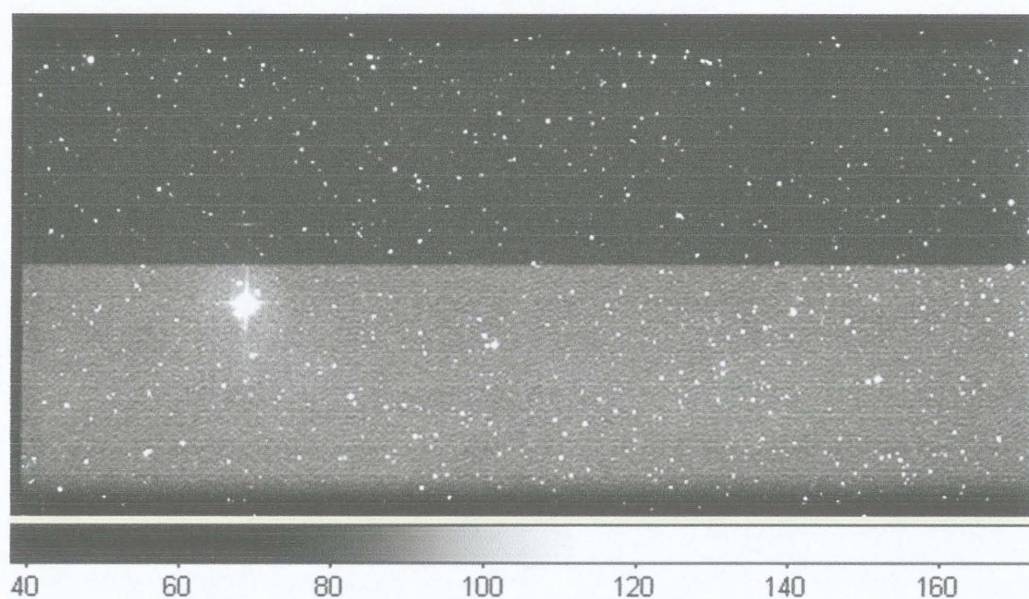


図4.5 一次処理前の天体画像 (HIP92420, Bバンド)

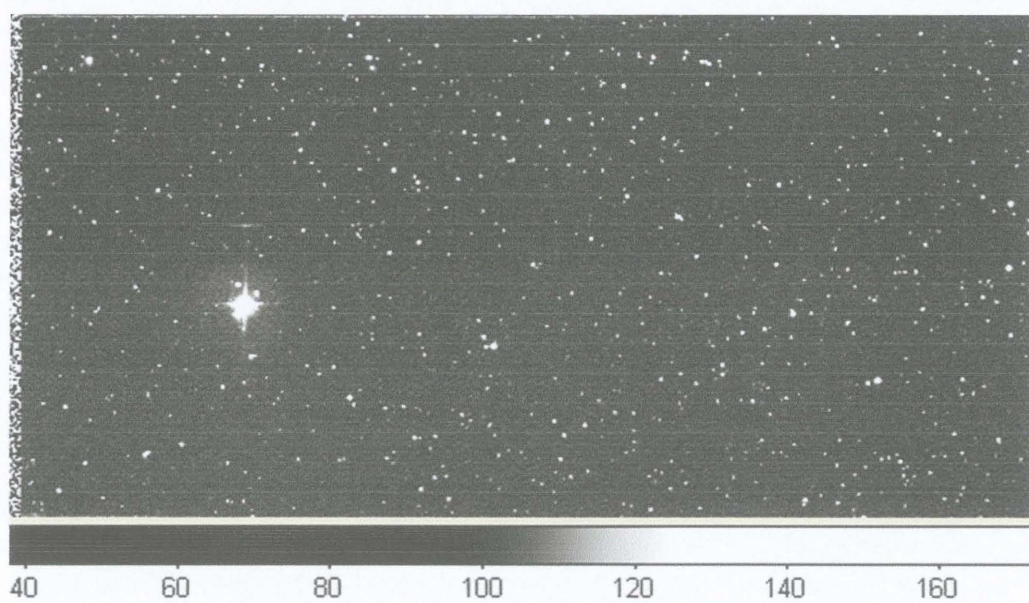


図4.6 一次処理後の天体画像 (HIP92420, Bバンド)

## 4.2 二次処理

一次処理済みの天体観測画像から必要な光度等の情報を取り出す過程が二次処理である。

### 4.2-1 恒星の測光

一次処理が終了した画像の中からHipparcos catalogueに記載された恒星を探し、測光する。画像内には図4.4～4.6で示したように、非常に多くの恒星が写っている。これらの恒星の中からカタログに載っている恒星を探した。カタログに載っている恒星は赤経と赤緯がわかっているためDigitized Sky Survey Data Archiveから画像を取得し(以下DSS画像と呼ぶ)、DSS画像と観測画像の星の配置を比較することで対象天体を同定した。

次に、同定した恒星のfluxを測定するために測光を行った。測光には開口測光法を採用し、IRAFのapphotパッケージを用いた。開口測光とは、星が映っている領域中の信号量(カウント値)の積分を求め、skyを差し引くことで星の明るさを測定する方法である。開口測光の模式図を図4.7に示す。測光する際、地上からの天体観測では、天体からの放射光のほかに、地球の上層大気からの夜光や、市街光の散乱光が加わる。天体以外の成分を「スカイバックグラウンド」(sky background)または「スカイ」(sky)と呼ぶ。Skyは星本来の明るさとは別に得られる画素ごとの信号量である。

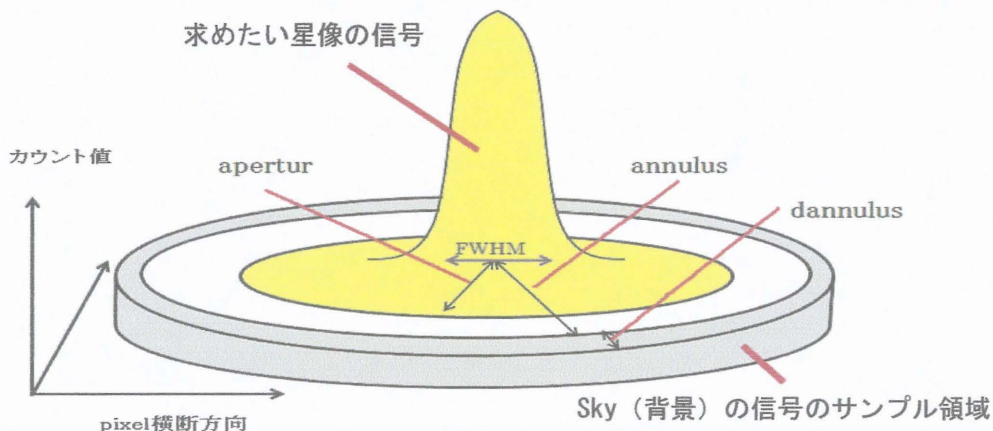


図4.7開口測光の模式図

開口測光を行うためには図4.7に示したFWHM, apertur, annulus, dannulusの各パラメータの設定が必要である。以下、各パラメータについて説明する。



### ・ FWHM

恒星は遠方にあるので、事実上は点に見えるはずだが、大気ゆらぎ及び望遠鏡の光学性能で、実際には図4.8のような広がった像に写る。得られた星像線輪郭はガウス曲線で近似することができる。FWHM(Full Width Half Maximum; 半値全幅)とはガウス曲線のピーク値の半分の値での関数の広がりであり、恒星の広がりを、FWHMを指標としてあらわすことができる。同じ画像内であれば写っている恒星すべてでFWHMの値は共通の値となるはずであるので、検出された恒星の中で飽和している恒星を取り除き、画像ごとに恒星の平均を求め設定した。

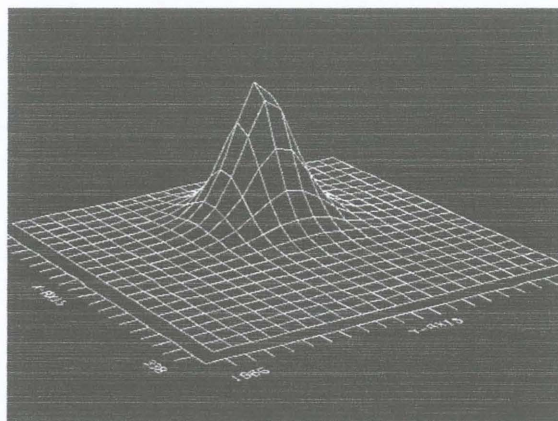


図4.8星の空間方向への広がり の例

星の広がり の動径方向輪郭を図4.9に示す。なお、図4.9の横軸はピクセル値、縦軸はカウント値である。図4.9の+印は各ピクセルでの観測結果を表し、破線はその値を近似したガウス曲線を表す。

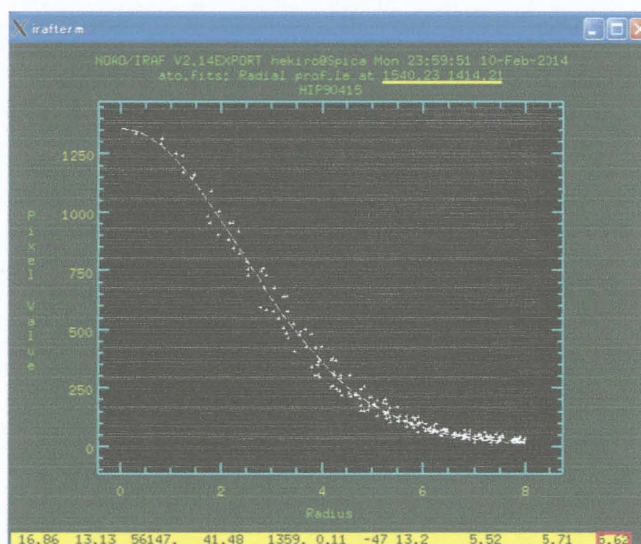


図4.9恒星の動径方向輪郭

- annulus

sky(背景)のレベルを推定するためのパラメータの設定である。天体から得られるカウント値にはSkyの明るさも含まれている。そのため、局所的なskyを評価し、それを差し引かなければならない。そのskyをサンプルする領域として、星のまわりの円環型領域を考える必要がある。annulusはその円環の内径を示す。

- dannulus

円環の幅を示す。annulusとdannulusを合わせると円環の外径になる。この円環領域でのカウント値の平均値を星像でのsky値とする。

- apertur

開口半径を示す。

なお、FWHMは上記のように恒星の画像から求めた。annulusの値はFWHMの3倍、dannulusの値は3pixel、aparturはannulusと同じFWHMの3倍の値とした。

## 4.2-2 見かけの等級の計算

次に得られた値から教材としてHR図が正しく描けるか確かめるために、HR図を描くうえでかかせない等級の計算を行った。今回の観測した恒星はすでに等級がカタログにより正確に求められているが、木曾、尾鷲の観測機器の違い、観測日の大気、天候条件の違いなどによってカウント値が変わってくる。そこでまずどれだけの観測機器等の違いがどれだけあるか調べるため、得られた数値から0等の値を、式4.1を用い計算した。

$$I_{\lambda_0} = 100^{m_{\text{star}}} \cdot I_{\lambda_{\text{star}}} \cdots \text{式 (4.1)}$$

ここで $I_{\lambda_0}$ は0magのカウント値、 $m_{\text{star}}$ はカタログによりわかっている恒星の等級(mag)、 $I_{\lambda_{\text{star}}}$ は観測で得られた恒星のカウント値である。天体からのfluxを $f_{\lambda}$ 、カウント値を $I_{\lambda}$ とすれば、以下の式4.2で表すことができる。

$$I_{\lambda} = \int_{\lambda_c - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{2}} f_{\lambda} A T_{\lambda} R_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda \cdots \text{式 (4.2)}$$

ここで $A$ は望遠鏡有効面積、 $T_{\lambda}$ は望遠鏡透過率、 $R_{\lambda}$ はCCD感度、 $\tau_{\lambda}$ は露出時間、 $d\lambda$ はバンド幅を示す。 $\Delta\lambda \ll 1$ とすれば、 $f_{\lambda}$ 、 $T_{\lambda}$ は一定とみなせるので、

$$I_{\lambda} = f_{\lambda} A T_{\lambda} R_{\lambda} \tau_{\lambda} \Delta \lambda \cdots \text{式(4.3)}$$

となり、ここで  $A T_{\lambda} R_{\lambda} \tau_{\lambda} \Delta \lambda$  は星によらず一定なので、

$$k_{\lambda} \equiv A T_{\lambda} R_{\lambda} \tau_{\lambda} \Delta \lambda \cdots \text{式(4.4)}$$

とすれば、

$$I_{\lambda} = k_{\lambda} f_{\lambda} \cdots \text{式 (4.5)}$$

となり

$$I_{\lambda} \propto f_{\lambda} \cdots \text{式(4.6)}$$

の関係が得られる。等級が  $m_A$ ,  $m_B$  と定められている恒星から得られたカウント値をそれぞれ  $I_{\lambda_A}$ ,  $I_{\lambda_B}$  と表すと、カウントの比は以下の式4.7のようにそれぞれの恒星から得られる flux である  $f_{\lambda_A}$ ,  $f_{\lambda_B}$  で表すことができる。

$$\frac{I_{\lambda_A}}{I_{\lambda_B}} = \frac{k_{\lambda} f_{\lambda_A}}{k_{\lambda} f_{\lambda_B}} = \frac{f_{\lambda_A}}{f_{\lambda_B}} \cdots \text{式(4.7)}$$

そのため、恒星の flux の比をカウントの式で置き換えることができるため、式2.1は式4.7から、以下の式4.8で表すことができる。

$$m_A - m_B = -2.5 \log \frac{I_{\lambda_A}}{I_{\lambda_B}} \cdots \text{式(4.8)}$$

$m_A$ ,  $m_B$  は各恒星の等級を表す。

式4.7, 式4.8より flux は、測光で測ることができた CCD 出力信号のカウント値と対応しているため、カウント値を用い画像解析を行うことができる。

次に、教材として使用するために、観測高度による大気吸収の影響や、天候条件の違いにより、0等のカウント値 ( $I_{\lambda_0}$ ) の値が変わってくるため、得られたカウント値から、カウント値の補正をおこなった。今回観測したすべての恒星の等級がわかっているのですが、どの星を基準に計算してもよいが、できるだけ誤差を減らすため今回の観測ではBバンドで一番暗い(小さい)値を示した恒星(HIP90883)を基準に計算した。計算方法としては、式4.9よりカタログからわかる各恒星の等級( $m_{star}$ )、HIP90883の等級

( $m_{HIP90883}$ ) からHIP90883を基準とした場合の各恒星の観測条件補正後のカウント( $I_{\lambda m}$ )を求めた.

$$I_{\lambda m} = 10^{-0.4(m_{star}-m_{HIP90883})} \dots \text{式 (4.9)}$$

次にその値を観測結果と比較し、式4.10より観測から得られた恒星のカウント( $I_{\lambda star}$ )から係数 $\alpha$ を求め、さらに、各画像から得られる信号量が補正後のカウントと同じになるように各画像を係数 $\alpha$ で割った.

$$\alpha = \frac{I_{\lambda m}}{I_{\lambda star}} \dots \text{式 (4.10)}$$

また $\alpha$ で割る際は、各恒星によって $\alpha$ の値が変わるため、木曾の画像は各恒星をトリミングしてから計算した. 尾鷲の画像は1枚につき恒星が1つしか写らなかったためそのまま計算した.

この処理により、天候条件や観測機器が違うデータを同時に扱うことができる. なお、各恒星の係数 $\alpha$ を付録2に示す. また、2次処理の手順を以下に示す.

1. 天体画像からHipparcos catalogueの恒星を探す
2. 天体画像に星をプロットする.
3. IRAFのタスクimexamでFWHMなど星のパラメータを調べる
4. タスク epar phot で測光パラメータの入力
5. タスク phot で測光
6. 各バンド、各画像で1~5を繰り返す
7. HIP90883を基準としたときの各恒星のカウントを求める
8. 観測により得られたカウント、HIP90883を基準としたときの各恒星のカウントから係数 $\alpha$ を求める.
9. 各恒星をトリミングしたのち、IRAFのタスク imarith で画像を係数 $\alpha$ で割る
10. 各バンド、各画像で8~9を繰り返す

## 4.3 HR 図の作成

### 4.3-1 測光・計算

補正した画像から教材として目指しているHR図を作成することができるか確認するため、二次処理後の天体画像をもう一度測光し、各バンドでの等級を求めた. 等級を求める際は0等のカウント値を用い式2.2より等級を計算した. 付録3に演算後の測光結果と計算し求めた等級、見かけ等級より計算した色指数B-Vを示す.



#### 4.3-2 絶対等級の変換

次に見かけの等級を絶対等級に変換する．絶対等級は各天体までの距離がわかれば求めることができる．距離で主に使われる単位はpc（パーセク）であり，年周視差が1"となる恒星までの距離が1pcと定義されている．1pcの定義を図4.10に示す．年周視差と恒星までの距離は反比例するので，年周視差が $p''$  であるような恒星までの距離  $r$  (pc) は式4.11より求めることができる．今回はHipparcos catalogueに年周視差が載っているので，その値を用い距離を求めた．求めた距離からVバンドの見かけの等級をVバンドの絶対等級に変換した．その際は式2.3を用いた．

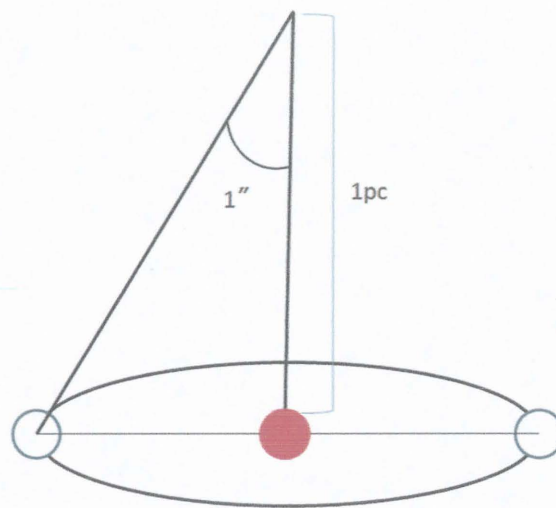


図4.10 : 1pcの定義

ここで青の円は地球，中心の赤の円は太陽を表す．

$$r = \frac{1}{p} \cdots \text{式 (4.11)}$$

#### 4.3-3HR 図の描画

得られた値から縦軸にVバンドの絶対等級，横軸に色指数（B-V）を用いた．その後図4.11aのようにHR図を描き，図4.11bに示したカタログの値から直接描いたHR図と比べ評価した．両者を比較すると，計算後に描いたHR図はカタログから描いたHR図と類似した図が描けていることがわかる．

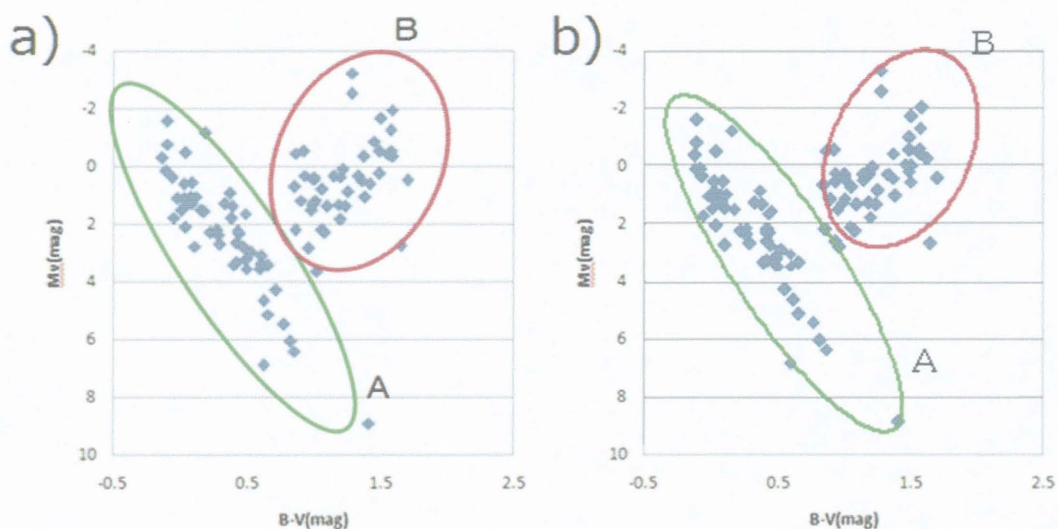


図4.11 : (a)観測画像を測光し描いたHR図, (b)カタログより描いたHR図

#### 4.4 マカリィについて

本研究での授業実践では、生徒が行う実験天体画像の測光には画像処理ソフト「マカリィ」を用いた。「マカリィ」とは国立天文台と AstroArts 社により開発された天文教育向けのフリーのソフトである【29】。画像処理ソフトとは、画像中の任意の位置の画素の信号量を調べたり、任意の領域中の信号量を積分したり、画像間で信号量を演算したりすることなどを行うソフトである。マカリィは 4.2-1 節で示した開口測光のパラメータ設定を自動で簡単に行えるため、実習用の解析ソフトとして採用した。

## 5. HR 図教材を用いた授業実践と評価

### 5.1 HR 図描画教材の授業案の作成

教材開発においては、単にデータセットを用意するだけではなく、それを用いた授業提案も必要である。そこで作成した HR 図を元に指導案を考えた。本教材は恒星の性質について理解を深め、天文学的な探究心を育むものとして考えており、教材の範囲としては『高等学校学習指導要領「地学」の内容（４）宇宙の構造—イ恒星と銀河系—（ア）恒星の性質と進化』の導入部に位置付けた。また、理科の４観点から以下の目標を立てた。

- ・天文学で行われる測光方法を体験し、天文学的な探究心を育む（関心・意欲・態度）
- ・等級についての知識を得る。HR 図について理解する。（知識・理解）
- ・見かけの等級と絶対等級の違いを理解する。（知識理解、科学的な思考・表現）
- ・恒星の HR 図を描き主系列星と赤色巨星に分類できる。（実験・観察の技能）
- ・描いた HR 図から主系列星と赤色巨星の特徴を考察する。（科学的な思考・表現）

教材を使用する授業対象としては地学基礎ではなく、地学の分野に該当するため、2 年生以上とし、授業案を作成した。また授業時間は三重県内の高等学校の 1 限あたりの平均時間に該当する 50 分の 2 コマ分、計 100 分と考え、前半 40 分が講義、後半 60 分が実験、考察と時間を決めた。

### 5.2 大学生に対する模擬授業の実地とその評価

実践授業をするにあたり、現場実践を行う前によりよい授業計画を考えるために、素案として作成した指導案を元に模擬授業を大学内で行った。生徒役には理科教育天文学研究室の3年生2名に依頼した。表5.1に授業内容の詳細を示す。なお、授業の説明には Microsoft OfficePower Point(2007)をデータのまとめにはMicrosoft Office Excel (2010) を用いた。また、天体画像の測光には画像処理ソフトマカリィを用いた。

表5.1模擬授業内容の詳細

日時	2013年11月21日（木）
場所	三重大学地学実験室
時間	13:00～14:40

授業内容としては、前半は等級の原理、スペクトル型と表面温度・色指数との関連、見かけの等級と絶対等級の違いなど、HR図を描画するために必要な知識を指導する講義をおこなった。その後「星の明るさ（絶対等級）と色（色指数）にはどのような関係があるのだろうか？」という主発問から、実験を行った。実験では、マカリィを用い観測

天体を測光し、そのカウント値から見かけの等級、絶対等級、色指数 (B-V) を求めさせた。求めさせる際はExcelで数式を使い計算させた。その後、計算した値から、Excelの散布図を用いHR図を作図した。できあがったHR図をもとにワークシートを用い恒星の種類分け、太陽のプロット、恒星の性質の考察を行った。作成したワークシートを付録5に示す。また、模擬授業の様子を図5.1に示す。

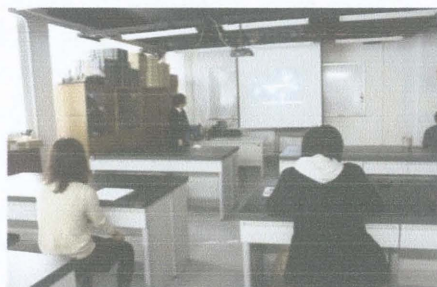


図5.1：模擬授業の様子

模擬授業後、問題点を討論した、以下に挙げた問題点とその解決方法を示す。

#### 問題点1.

模擬授業では100個の恒星を生徒役の学生2名で30個ずつ、残りの恒星を筆者が測光し実験を行ったが、一人30個の恒星の測光は作業量として過超である。

#### 解決方法1.

生徒の人数が少ない場合このような意見がでると考え、授業方法に班学習を採用した。生徒を1班2～3人程度の5つの班に分け、100個の恒星を割り振ることで一人当たりの測光する恒星数の数を減らすことにした。

#### 問題点2.

生徒の作業の大部分がPCを使用した授業であるので、PC操作を苦手とする生徒へのケアが必要である。

#### 解決方法2.

授業のなかでパソコンを扱うにあたっては、ほぼクリックのみで行えるようなできるだけ簡単な作業で済むようにすることにした。

マカリィは自動測光を使用するため、星像をクリックし測光ウィンドウに表示された星の明るさを示すカウント値をメモ、またはコピーし、Excelに記入する。この作業はパラメータの設定などがいらずマウスのみで行うことができるので、簡単であると考えられる。

Excelにおいては得られたカウント値から式を用い等級を計算すること、結果からHR図を作図すること、この2点がパソコンを苦手な生徒は苦戦すると考えられた。そこで、



Excelファイルにマクロを組み込むことにした。それにより、マカリィで得られたカウント値を打ち込んだ後、ボタンをクリックすれば、すべての星の等級を計算するようにした。絶対等級の計算や、HR図の描画についてもマクロを組み、ボタン一つでHR図が描けるようにした。図5.2にマクロを組み込んだExcelシートの例を示す。図5.2において、aの「見た目等級でグラフを描く！」ボタンでは縦軸を見た目等級で描いたHR図の描画が自動で行われる。bの「絶対等級を計算！」ボタンをクリックすると、絶対等級を表示し、cの「絶対等級でグラフを描く！」ボタンをクリックするとHR図が自動的に描写されるようにマクロを組んだ。ただし、すべてをマクロで処理すると、等級の算出方法を身につけることが難しいため、マクロを実行する前に一人最低限2つ以上の恒星を関数電卓で計算することにした。

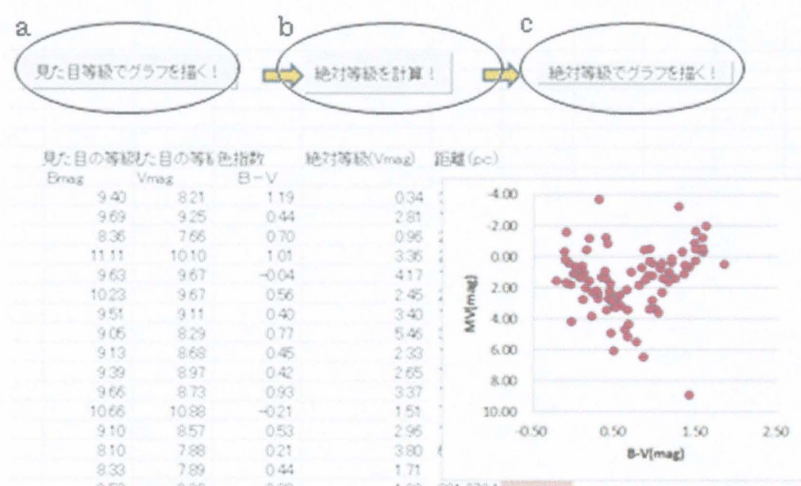


図5.2：マクロを組み込んだエクセルシート

### 問題点3.

時間配分を気にするあまり、説明が雑だった。

### 解決方法3.

当初は年間授業の一つとして取り組む教材を考えていたため、三重県の高등학교の平均授業時間50分の2コマ分の100分の中でおさめるように考えていた。しかし、模擬授業をふまえ課題研究や、課外活動の一環として取り組める教材にしようと位置づけを変えた。等級の定義を理解させるために指数・対数といった高等学校2年次に学ぶ知識や、スペクトル型と色指数・表面温度の関係性の新たな知識が必要であり、未習である場合その知識を丁寧に指導するためには100分の授業時間では十分ではないことが1番の理由である。そのため、授業案を150分に変え書き直し、前半の1時間を講義に使うことにした。

#### 問題点4.

HR図を書いただけでは高校生には考察が難しいのではないか.

#### 解決方法4.

HR図を描く際,はじめは見かけ等級 (Vバンド) で描き,その後絶対等級 (Vバンド) で描きなおすことにした. 見かけ等級でHR図を描くと,図5.3のようになり,縦軸と横軸の関係性はわからないが,絶対等級でHR図を描きなおすと図5.4のようにアルファベットのY字型になり恒星の色と明るさの関係性から恒星の種類を考察することができる. この前後の変化を示すことで距離によって,恒星の明るさが違うことや絶対等級の定義の学習にもつながると考えた.

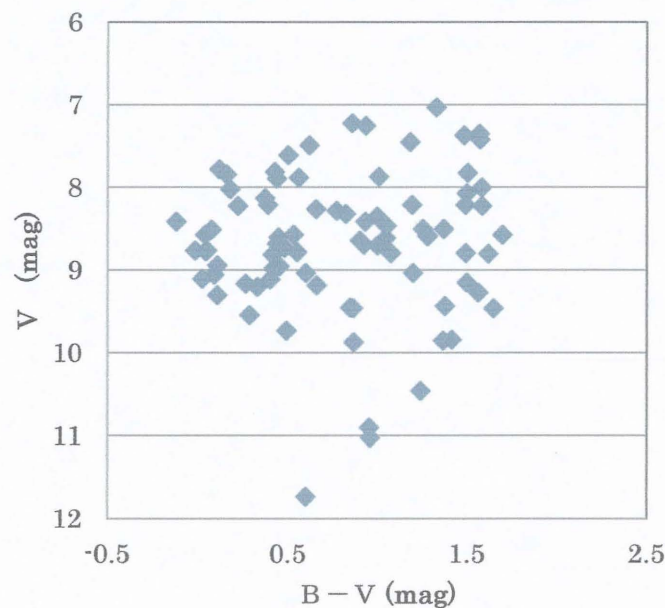


図5.3見かけ等級 (Vバンド) で描いたHR図

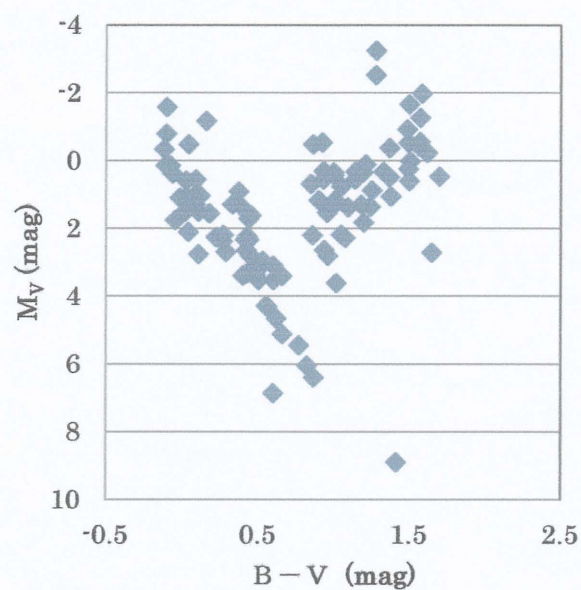


図5.4：絶対等級（Vバンド）で描いたHR図

以上の結果から、模擬授業後、指導案を改訂した。完成した指導案を付録5に示す。

## 5.3 実践授業の内容

### 5.3-1 実践授業の実地

模擬授業の反省を踏まえ、高校生を対象に実践授業を行った。地学の新たな知識を身につける学習活動と考えているため、地学が未習である生徒を対象に三重県の高校に高校地学の課外活動として募集を呼び掛けた。実践授業内容の詳細を表5.2に示す。本教材は高校生が対象であるが、サンプル数を増やすため地学を未習としている三重大学生にも実践授業を行った。

表5.2：実践授業の内容の詳細

対象	三重県立 津高等学校 1年生9名 2年生1名	三重大学 教育学部12名 人文学部1名
日時	2014年1/26 9:30～12:00	2014年1/28 13:00～15:30
場所	三重大学 地学実験室	



### 5.3-2 実践授業の流れ

実習の時間は全体で150分とした。この内、序盤の60分を実習内容の説明にあて、恒星には明るさと色の2種類の表わし方があり、前者は等級で表し、基準の星を決めて計算で求めることができること、後者はスペクトル型や、表面温度、色指数で表すことができる等を説明した。

中盤は、『この2つの量の関係性を探るためグラフを作成しよう』という主発問から、PCと関数電卓を使い画像処理の時間とした。画像処理では、教材用に作成した、B、Vバンドの2波長での画像を用い、HIPカタログに載っている恒星を探し、マカリィでの開口測光を行わせた。開口測光によって得られたカウント値をExcelのワークシートに打ち込み、ワークシートに事前に示している0等のカウント値から星の等級を関数電卓で計算させた。また横軸で扱う色指数をもとめさせた。

終盤では、各班のデータを、教師側でまとめ各班に再配布した。まとめたデータから図5.2に示したマクロを組み込んだ「見かけ等級でグラフを描く!」というボタンで、見かけ等級でHR図を描いた。そして、描いた恒星の色と明るさはどのような関係性があるか発問した。次に、絶対等級の説明をし、マクロによって見かけ等級を絶対等級に変換した。その計算があっているか恒星を各班で最低ひとつ計算し、演繹的に確認するという手順で学習活動を行った。その後、「絶対等級でグラフを描く!」というボタンで絶対等級でHR図を書き直し、見かけ等級で描いたHR図とどう形が違うか発問した。その後、見ただけでは恒星は分類できないが、グラフにすることで恒星に違いがあることがわかることを説明し、恒星を二つのグループに分類すること、今回の実験からわかる主系列星と赤色巨星の2種の特徴の考察をすることなどをまとめプリントやプリントアウトしたHR図を元に行った。

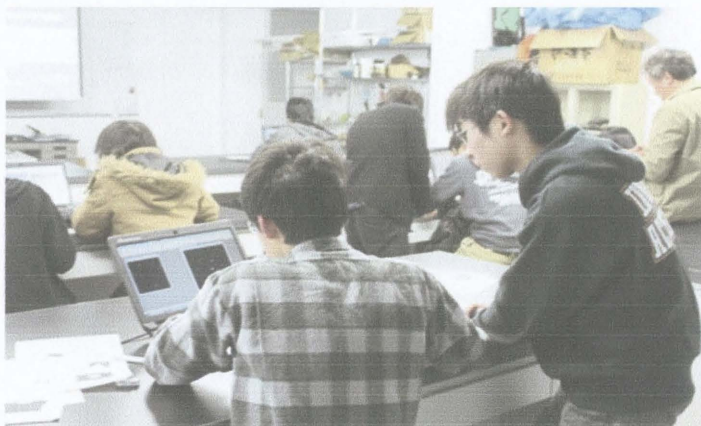


図5.5：実習中の様子

授業実験時の生徒の様子を図5.5に示す。2回の実習とも2名～3名を1グループとし5班に分けて行った。1班あたり20個の測光を割り振り、計100個の星の2次処理するのに約50分かかった。マカリィは生徒にとっては初めてのソフトであったが、使用し

たのは開口測光モードのみで、その操作もマウスのみでできることから、操作に関して大きな困難はなかった。見かけ等級でグラフを描いたときに色指数との関係性を発問したときは、生徒からは「わからない」という意見がでた。その後、絶対等級で描き直したHR図を描いたあと、絶対等級と色指数の関係性を発問したときは、生徒からは「形がかわった!」「さっきより綺麗な形になった」などの意見がでた。

なお、今回の実践授業ではTAを一人つけた。サポート内容は実験時の机間指導や、絶対等級の説明を筆者がしている間にHR図の印刷を行うことなどである。

#### 5.4 生徒の測定結果及び実践授業の評価

今回の実験から生徒が測光したデータで描いたHR図を図5.6に示す。

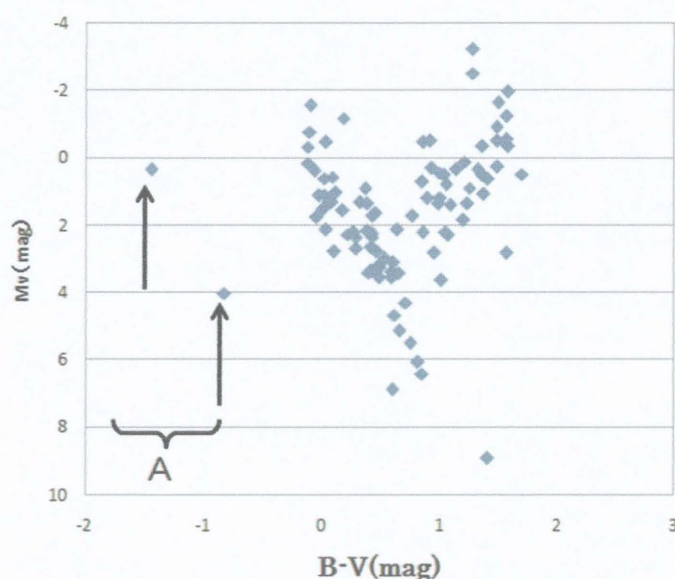


図5.6：生徒が描いたHR図

図5.4のカタログから描いたHR図と比較をすると、大きい相違として矢印で示した点の存在が挙げられる。この点は図5.4には見られない。この原因として測光の際、間違った恒星を測光した可能性があると考えられる。しかし、全体としては図4.11bに示したようにほぼ同じHR図が描けており、当初の目的としていた「恒星の分類分けをすることができるHR図を描画する」ことを達成できたといえる。

また、実習の終えた後に教材の有効性を確認することを目的として生徒に対し、アンケート調査を行った。アンケート項目と集計結果を表5.6に示す。表5.6より、実験主題そのものに対する興味・関心については面白い・やや面白いと好意的にとらえている生徒の割合が9割を超える結果となった。天文学に対しての印象も、「研究者はいつも望遠鏡をのぞいてカッコいいことをしているのだろう」と思っていたけど研究者の仕事

って地味だなあとと思ってより惹かれた」,「天文でパソコンを使うと思わなかった。情報の授業をもっと真剣に受けようとおもった」という意見があり,実験前は夜空を望遠鏡で見るというイメージをもっている生徒が多くいたものの,実験後には地道な科学的な方法を用いて天体を探るというイメージへと変化していることがうかがえた。「また天文学の実験をやりたいか?」というアンケートには全員がぜひやりたい・機会があればやりたいと回答し,天文学実験に対する関心を引くことができた。自由記述の欄には「資料を集めてグラフをつくることで新たな発見になって、それが面白かった」といった好意的な意見が多く見られた。このような結果から,高校の学習範囲の内容と実際の天文学者が行う研究方法とを結びつけるなどのやり方を用いることで高校生,大学生に十分興味を持ってもらえることが確認できた。

実験内容についての項目を見ると,「見かけ等級と絶対等級の違いがわかったか?」というアンケートには高校生,大学生ともにほぼ全員が理解できた,だいたい理解できたと回答した。模擬授業の反省から指数・対数の式変形を丁寧に指導し説明に時間を割いたことや,見かけ等級で描いたHR図と絶対等級で描いたHR図を比べることで視覚的に強い印象を与えることができたことが,教材としての成功を導くことができたといえる。

実験・観察の技能を評価するために,プリントアウトしたHR図上で主系列星と赤色巨星に分類をさせた時に,机間巡視を行った。その時は全生徒が主系列星と赤色巨星に分ける事はできていた。しかし,「恒星の種類がわかったか?」というアンケートに対してもほぼ全員がわかった・だいたいわかったと回答していたが,恒星の種類をあまり理解できなかったという学生が1名いた。机間巡視時,分類はできていたので,恒星の種類による性質についての知識を獲得することができなかったのではないかと考えている。アンケートには理解できなかった理由を書く欄を設けておらず,具体的な理由が検証できない。そのため,今後実践授業のサンプル数を増やし,その際,理由記述欄を設けることで分析をする必要がある。

また,知識・理解の評価観点においては,大学生の方が,理解度が低かった。これは,指導した筆者が,大学生の実践授業の際,大学生はすでに高等学校のカリキュラムを修了しているはずなので,指数・対数などの知識を完全に身につけていると高をくくって説明してしまったことが挙げられる。また高校生に対する実践授業では二人一組を基本とし,一人が測光し,もう一人がカウント値のメモなど役割分担が確立していたのに対し,大学生の場合は3人班もあり,作業を見ているだけであまり授業参加できない(しない)学生が存在したことが原因ではないかと考えられる。また高校生はSSC(Super Science Club)に所属している生徒で理科が得意な生徒が多かったが,大学生では文学部の学生や,理科教育以外に所属する学生などが半数おり,理科を苦手とする生徒への指導を再考すべきであると強く感じた。



実験の難易度についてはちょうど良いと感じた生徒の割合が高く、パソコン操作も操作内容を限定したことにより、特に大きな困難はなかったことが確認できた。自由記述の欄には「もっと実験とか複雑で規模の大きいものかとおもったら意外と簡単だった」といった意見も見られた。中には「用語ははじめややこしくて難しかったが作業をやるうちにわかってきた」、「暗い星を見つけるのが難しかったが特徴をつかめば案外簡単に見つけられた。」などといった、作業を繰り返すことで理解を深めることができることも確認できた。

授業時間に関しては、高校生はちょうど良いと回答した割合が9割を超えたが、大学生に対しては長いとの指摘が多かった。大学生の自由記述の欄には、「少し作業量が多いと感じた」、「関数電卓の計算が多くつらかった」など作業量に対する不満が見られた。今回の実験では5班で行ったため、100個の恒星を1班20個ずつに分けたが、班数を増やし班ごとの作業量を減らすことで実験を行うことができたなら、こういった不満も減らせたのではないかと考えられる。しかし知識を身につけるためには反復型学習も効果をもつと確認できている。そのため、一人あたりどのくらいの恒星を扱えば不満もなく知識・理解の効果も期待できるか今後検証が必要である。

表5.6アンケート項目，集計結果

実験はおもしろかったか (関心・意欲・態度)	すごく面白い	やや面白い	どちらでもない	ややつまらない	すごくつまらない
高校生	8	2			
大学生	2	10	1		

恒星の種類がわかったか (知識・理解)	わかった	だいたいわかった	どちらでもない	あまりわからなかった	わからなかった
高校生	9	1			
大学生	8	4		1	

見かけ等級と絶対等級の違いを理解できたか (知識・理解)	理解できた	だいたい理解できた	どちらでもない	あまり理解できなかった	理解できなかった
高校生	8	2			
大学生	8	5			

作業時間	長い	やや長い	ちょうど良い	やや短い	短い
高校生		1	9		
大学生		9	4		

難易度	簡単	やや簡単	ちょうど良い	やや難しい	難しい
高校生			9	1	
大学生			12	1	

表5.6 (続き)

また天文学実験 をしたいか	ぜひ やりたい	機会があれば やりたい		あまり やりたくない	全く やりたくない
高校生	7	3			
大学生	4	8			

天文学の印象が 変わったか	はい	いいえ
高校生	9	1
理由	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 研究者はいつも望遠鏡をのぞいてかっこいいことをしているのだろうと思っていたけど研究者の仕事って地味だなあと思っってより惹かれた。</li> <li>• ただ単に星を眺めているだけだったが図を使って数字で星を表すことができたから</li> <li>• 星はきれいだけじゃなかったから。</li> </ul>	
大学生	9	4
理由	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 初めて聞いた言葉などがでてきておもしろかった。</li> <li>• もっと実験とか複雑で規模の大きいものかとおもったら意外と簡単だったから。</li> <li>• 思っていたより計算ばかりだった。</li> <li>• けっこう統計的な授業なのだとわかった。</li> <li>• 天体自体何か理解していなかったなので学びを深めることができた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 計算が難しそうでそのとおりだったから。</li> <li>• 思っていたとおりロマンチックだった。</li> </ul>



表 5.6 (続き)

自由記述	<p>高校生</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地味な作業だけど、最後にグラフになって形が現れた時に達成感が感じられた。</li> <li>• 大変そうだけど楽しかった。</li> <li>• 地味だけどレクチャーも面白くてすごく楽しかった。コツコツ資料を集めてその集大成がグラフをつくることで発見になって、それが楽しいのだなあという感覚がつかめた。</li> <li>• 少し疲れたが達成感があつた。</li> <li>• 天文でパソコンを使うと思わなかった。情報の授業をもっと真剣に受けようとおもった。</li> <li>• 地道な作業をするといろいろな発見や考察があるなと思った。楽しかった。</li> <li>• 記録をとる作業が大変だった。でも楽しかった。</li> <li>• エクセルをもっと使えるようになればもっと便利になるのかな、と思った。</li> <li>• 奥が深いと感じた。</li> </ul>
	<p>大学生</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 初めて聞いた言葉などがでてきて面白かった。</li> <li>• パソコンを使うのが難しかった、数学が難しかった</li> <li>• 恒星の中にいくつか種類があることがわかってよかった。</li> <li>• 用語ははじめややこしくて難しかったが作業をやるうちにわかってきた。</li> <li>• 天体のことが少しでもかじれておもしろかった。</li> <li>• あまり好きではない分野だったので難しく感じた。グラフの読み取りはたのしかった。</li> <li>• 作業量が少し多いと思った。</li> <li>• 天体分野が一番楽しい！</li> <li>• ととてもつらかった。関数電卓の計算が多くつらかった。</li> <li>• 地学の用語についてよくわかった。</li> <li>• 暗い星を見つけるのが難しかったが特徴をつかめば案外簡単に見つけられた。</li> </ul>

## 6. まとめ

本研究では、高等学校地学の天文分野において、恒星の性質と進化を系統的に学習するために、恒星の性質に焦点を当て、新しい教材として視覚的に恒星の分類ができるHR図の教材作成と授業案の開発を行った。観測天体には星団には属さない100個のField Starを用いた。Field Starの選定にはHR図の縦軸は絶対等級を扱うため、恒星の視差の測定精度がより良いHipparcos catalogueを用いた。観測には東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曽観測所のKWFCを中心に、三重大学が提携使用している尾鷲市立天文科学館の81cm ニュートン式反射望遠鏡も併せて使用した。観測に使用したフィルターはBバンド、Vバンドである。

取得した画像を元に画像解析を行った。天候状況や観測機器の違いになどに条件が変わるため、条件が違うデータを扱えるよう、すべての画像の原点をそろえた。その後HR図を作成し、そのHR図を元に授業案を作成した。授業時間を150分の授業とし、PCの操作はできるだけ簡単な操作で実験を行えるように、マウス操作のみで作業を行うことができる天文教育向けの画像処理ソフト「マカリィ」の使用や、エクセルの計算時やグラフの描画はマクロを組むことでPC操作の障壁をなくすことを考えた。教材の範囲として『高等学校学習指導要領「地学」の内容（4）宇宙の構造—イ恒星と銀河系—（ア）恒星の性質と進化』の導入部に位置付けた。

作成した授業案を元に高校生、大学生を対象に実践授業を行った。生徒はカタログから描いたHR図とほぼ一致したHR図を作成することができ、視覚的に主系列星と赤色巨星を分けることができるHR図を描画することを達成できた。また、実習の終えた後の生徒に対するアンケート調査を行った。アンケートの結果から、新しい知識を獲得できたと回答した生徒は9割を超え、恒星の性質を系統的に学習する上で本教材は効果的であることが示された。

## 謝辞

本研究, 及び本論文の作成にあたり、終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さいました指導教官の伊藤信成先生に厚く感謝の意をここに表します。また、実践授業に協力していただいた津高等学校の奥田先生ならびに SSC の皆様, 観測装置を使わせていただいた木曾観測所, 尾鷲市立天文台の皆様, 日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた天文学研究室の皆様, に感謝致します。

## 参考文献

- 【1】 科学技術振興機構(JST), 平成 20 年度高等学校理科教員実態調査報告書, (2008)
- 【2】 田村糸子, 高等学校における地学教育の現状と問題点, 地質学雑誌 第 114 号 4 号 p.157-162 (2008)
- 【3】 伊藤信成, 天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発 I, 三重大学教育学部研究紀要第 64 巻自然科学 p.35-40 (2013)
- 【4】 文部科学省 (2012) 『高等学校学習指導要領 (平成 24 年 7 月) 』
- 【5】 文部省 (1999) 『高等学校学習指導要領 (平成 11 年 3 月) 』
- 【6】 富田晃彦, 尾久土正己, 坂口聡之輔, 前田香織, 河野英太郎, SPP 授業「天体までの距離と年齢の推定」での教材開発, 日本教育工学会研究報告集 03-1 p.51-54(2003)
- 【7】 田中義洋, 縣秀彦, 小池邦昭, 中学校における恒星の多様性に関する学習の提案 - ハッブル宇宙望遠鏡撮影画像を用いたHR図作成実習の評価 -, 地学教育, 第 55 巻第 4 号 p.135-139 (2002)
- 【8】 西浦慎悟, 柏木雄太, ヘルツシュプルング・ラッセル図の描き方, 天文教育 2 巻第 3 号 p.35-42(2010)
- 【9】 原正, 五島正光, 洞口俊博, 古荘玲子, 大島修, 矢動丸泰, 金光理, 星団の色等級図作成と年齢を推定する高校生向け教材の開発と授業実践地学教育, 64 p.131-150 (2011)
- 【10】 Jones, D , Norman Pogson and the Definition of Stellar Magnitude, Astronomical Society of the Pacific Leaflets, Vol. 10, No. 469, p. 145-152 (1967)
- 【11】 Pogson, N., Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the first day of each month of the year 1857, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 17, p.12-15 (1856)
- 【12】 Pickering E.C. ,Ann. Astron. Harvard College 14,1(1884)
- 【13】 市川隆,標準測光システム, 天文月報,第 90 巻第 1 号 p.25(1997)
- 【14】 Johnson H.L, Morgan W.W., Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas, Astrophysical Journal, 117,p.313-352(1953)
- 【15】 Landolt, A. U. ,UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator, Astronomical Journal, 104, p340-371 (1992)
- 【16】 栗野諭美, 田島由起子, 田鍋和仁, 紀元祐慈, 福江純, 宇宙スペクトル博物館＜可視光編＞天空からの虹色の便り, 裳華房(東京) (2001)

[17] Cannon, A. J., Pickering, E. C., The Henry Draper Catalogue, Ann. Astron. Obs. Harvard College, p91-99. (1918-1924)

[18] W. W. Morgan, Philip C. Keenan and Edith Kellman, An Atlas of Stellar Spectra, with an Outline of Spectral Classification., Chicago College, (1943)

[19] 丸善株式会社, 理科年表国立天文台編平成 9 年 天 51 (p137) (1997)

[20] Russell, H. N., Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars, Popular Astronomy, vol. 22, pp.275-294(1914)

[21] Perryman, M. A. C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., Hoeg, E., Bastian, U., Bernacca, P. L., Crézé, M., Donati, F., Grenon, M., Grewing, M., van Leeuwen, F., van der Marel, H., Mignard, F., Murray, C. A., Le Poole, R. S., Schrijver, H., Turon, C., Arenou, F., Froeschlé, M., Petersen, C. S., The HIPPARCOS Catalogue, Astronomy and Astrophysics 323, 49-52 (1997)

[22] 杉本大一郎, 星の進化と終末, 恒星社(1979)

[23] 野本憲一 定金晃三 佐藤勝彦, シリーズ現代の天文学第 7 巻 恒星, 日本評論社 (2009)

[24] 斉尾英行, 星の進化, 培風館(1992)

[25] Turon, C., Crézé, M., Egret, D., Gómez, A., Grenon, M., Jahreiß, H., The Hipparcos input catalogue, Bulletin d'Information du Centre de Données Stellaires, Vol. 41, p.9

[26] 宮本昌典, 辻本拓司, ヒッパルコス星表と銀河天文学, 天文月報, 第 90 巻 第 8 号 p357 (1997)

[27] Shigeyuki Sako Tsutomu Aoki, Mamoru Doi, Nobuyuki Ienaka, Naoto Kobayashi, Noriyuki Matsunaga, Hiroyuki Mito, Takashi Miyata, Tomoki Morokuma, Yoshikazu Nakada, Takao Soyano, Ken'ichi Tarusawa, Satoshi Miyazaki, Fumiaki Nakata, Norio Okada, Yuki Sarugaku, Michael W. Richmond, "KWFC: four square degrees camera for the Kiso Schmidt telescope", Proc. SPIE, vol.8466(2012)

[28] Tody, D., The IRAF Data Reduction and Analysis System, Proc. SPIE, vol. 627, pp.733-748, (1986)

[29] Horaguchi, T., Furusho, R., Agata, H., Paofits WG: "FITS Image Analysis Software for Education : Makalli'i" Proceeding of Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ASP Conference Series Vol.351. 544-547 (2006)



## 付録

付録 1 : 観測天体のリスト

HIP number	RA h m s			Dec ° ' "			Parallax mas	Vmag mag	B-V mag	Spectral type
89253	18	12	49.28	42	37	24.7	0.84	9.7	1.558	M0
89257	18	12	53.03	42	48	11.4	6.99	8.74	0.906	K0
89282	18	13	7.19	41	28	32.4	29.91	7.38	0.649	F8
89317	18	13	29.3	43	19	54.5	5.8	7.29	1.015	G5
89336	18	13	41.85	42	52	45.8	3.92	8.12	0.284	F0
89482	18	15	38.78	42	9	33.6	6.04	5.56	-0.111	B7IV
89693	18	18	17.73	43	11	8.6	19.62	9.78	0.897	K2
89719	18	18	35.92	42	33	52.7	2.94	8.61	0.065	A0
89762	18	19	3.58	35	8	20.2	7.19	9.11	0.401	F5
89794	18	19	30.12	35	44	8.9	5.44	8.97	0.422	F5
90024	18	22	8.86	36	18	6.8	15.23	7.61	0.501	F8
90044	18	22	24.88	36	54	3.3	5.81	7.89	0.438	F8
90063	18	22	45.26	35	6	4.6	2.62	9.2	0.33	F
90196	18	24	16.04	36	8	42.1	1.77	9.45	0.848	G0
90325	18	25	47.28	35	20	34	9.9	7.22	0.859	G5
90395	18	26	39.16	35	42	48.7	1.01	8	1.583	K2
90419	18	26	56.42	36	4	28.5	2.39	8.41	0.932	G5
90426	18	27	1.49	36	1	45.8	5.1	8.57	0.041	A0
90517	18	28	10.66	43	55	34.1	1.58	7.84	0.16	A3
90520	18	28	15.24	44	7	51.5	1.78	8.41	-0.118	A
90524	18	28	18.84	44	15	24.2	5.9	7.45	1.183	K0
90561	18	28	45.64	43	37	8	4.4	9.16	0.265	A2
90569	18	28	51.16	35	47		1.92	8.22	1.585	K5
90586	18	29	3.87	43	56	20.1	27.11	7.49	0.619	G5
90622	18	29	28.06	42	48	7.8	1.34	9.85	1.367	K5
90681	18	30	8.44	43	20	38.4	1.15	9.27	1.564	K5
90708	18	30	25.64	35	43	38.3	15.43	9.18	0.66	G5
90723	18	30	34.58	36	14	57	1.83	7.42	1.574	M...
90776	18	31	11.64	35	2	43.9	2.55	8.21	1.493	M0
90819	18	31	36.16	44	1	12.8	2.25	8.18	0.227	A2
90880	18	32	17.08	36	25	34.2	4.25	8.21	0.388	F0

number	h	m	s	°	'	"	mas	mag	mag	Spectral type
90883	18	32	20.08	36	59	55.7	1.58	7.57	5.46	C8
91059	18	34	30.72	42	39	41.8	1.56	8.8	1.62	M0
91069	18	34	34.41	36	19	38.8	2.93	8.76	-0.015	A0
91070	18	34	34.72	36	7	49.3	2.4	8.57	1.7	K0
91080	18	34	40.07	35	48	16.6	4.47	7.78	0.12	A0
91081	18	34	40.27	35	4	57.7	2.28	11.02	0.96	K0
91128	18	35	18.01	45	44	35.4	64.61	9.84	1.415	
91164	18	35	54.71	43	3	20.2	11.94	7.25	0.936	K0
91178	18	36	3.65	44	28	1.6	2.49	9.1	0.024	F8-D
91213	18	36	26.52	43	47	48.3	2.19	7.37	1.486	K2
91249	18	36	45.29	44	24	47.6	2.99	8.5	1.254	M2
91265	18	36	57.2	42	44	24.8	0.43	8.59	1.281	K2
91274	18	37	3.94	43	54	18.9	6.43	8.22	0.223	G0
91289	18	37	14.12	45	40	18.1	3.6	8.32	0.248	K0
91364	18	38	1.74	42	39	54.2	35.14	8.32	0.822	G5
91590	18	40	43.99	42	57	45	3.7	8.44	0.419	F5
91617	18	41	5.21	42	21	12.1	1.27	10.03	1.142	K2
91664	18	41	33.45	45	49	18.1	1.94	8.61	0.013	G5
91782	18	42	55.43	44	55	31.1	8.09	7.17	0.889	G5IV
91783	18	42	55.78	44	55	56.5	7.39	8.99	0.424	F2V
92116	18	46	28.1	43	33	39	2.36	7.19	1.514	K5
92132	18	46	41.65	44	41	6.7	1.03	9.46	0.864	G5
92216	18	47	37.46	32	18	42.6	3.76	8.88	-0.045	
92217	18	47	38.47	37	14	35.9	4.96	8.71	0.271	
92256	18	48	2.9	37	4	26.2	2.39	7.32	-0.102	
92276	18	48	21.61	37	49	12.6	2.88	7.81	1.213	
92281	18	48	27.68	32	46	46.7	3.11	7.43	1.454	
92282	18	48	28.14	36	26	27.1	3.73	7.52	-0.062	
92313	18	48	53.64	40	3	34.9	6.9	8.6	0.447	A5
92334	18	49	7.11	45	19	16.9	0.6	8.58	1.28	K0
92359	18	49	23.99	33	42	3	7.33	7	0.118	K0
92395	18	49	43.64	36	40	34.4	9.21	8.28	0.602	B9
92398	18	49	45.91	32	48	46.2	3.23	5.93	-0.154	F0

HIP	RA			Dec			Parallax	Vmag	B-V	Spectral type
number	h	m	s	°	'	"	mas	mag	mag	
92405	18	49	52.92	32	33	3.9	13.7	5.22	0.1	K2
92420	18	50	4.79	33	21	45.6	3.7	3.52	0.003	F5
92506	18	51	7.52	38	58	35.1	1.37	8.79	1.494	A0
92539	18	51	27.74	40	24	9.3	3.22	8.76	0.051	K2
92551	18	51	36.52	36	32	20.8	2.91	6.1	-0.1	A8
92590	18	52	1.5	37	30	59.5	3.65	7.33	-0.078	F8
92591	18	52	1.65	32	22	26.7	10.2	8.57	1.018	K0
92606	18	52	10.71	39	27	15.8	3.41	8.95	0.454	A2
92613	18	52	15.04	39	25	49.3	3.26	8.94	0.109	K5
92616	18	52	17.29	33	21	28.5	3.74	8.65	0.015	A0
92666	18	52	59.15	37	19	3.3	11.23	7.99	0.489	K0
92691	18	53	13.74	38	55	52	2.58	7.78	-0.08	K0
92696	18	53	15.85	33	28	28	2.55	8.29	1.143	B9p Si
92702	18	53	21.72	37	35	42.5	3.29	8.75	0.991	A0
92720	18	53	38.15	37	59	7.6	18.94	7.9	0.669	M0
92728	18	53	43.56	36	58	18.2	3.02	5.58	-0.138	K2
92739	18	53	54.18	40	19	25.4	4.46	7.85	0.397	B9
92751	18	54	2.3	36	51	20.6	2.12	8.73	1.025	M3
92764	18	54	11.72	36	54	51.8	3.39	8.64	0.088	K0III
92765	18	54	12.75	39	22	2.1	2	9.05	0.091	K0...
92767	18	54	13.22	38	51	23.9	4.92	9.3	0.108	K2
92769	18	54	13.57	36	44	0.4	3.21	7.61	-0.109	F2
92791	18	54	30.29	36	53	55	3.63	4.22	1.575	A2
92833	18	54	52.52	33	58	6.9	2.45	5.99	0.922	F2V
92847	18	55	9.31	36	44	30.2	3.4	7.93	0.026	K0III
92850	18	55	14.86	38	2	44.9	3.59	8.6	1.095	A0
92861	18	55	20.01	40	8	19.8	2.61	8.35	1	A0
92906	18	55	46.78	40	12	10.3	1.68	8.5	1.371	G2

付録 2：観測天体と係数  $\alpha$  の値

HIP catalog number	$\alpha$ の値 B	V	HIP catalog number	$\alpha$ の値 B	V
89509	52.30	28.92	90880	3.28	1.81
89540	43.46	12.93	90883	1.00	1.00
89602	44.27	1.39	91059	11.53	1.34
89645	44.73	33.22	91069	3.17	3.28
89655	42.21	12.81	91070	7.42	3.99
89682	51.49	11.57	91080	4.95	4.44
89762	12.48	13.90	91081	0.90	3.74
89771	41.15	2.32	91128	38.80	15.08
89774	39.18	3.50	91164	9.99	3.40
89794	24.15	11.04	91178	16.26	5.52
89810	45.95	22.87	91213	11.79	2.98
89848	54.37	40.53	91249	34.84	8.82
90003	41.04	17.44	91265	22.13	26.79
90024	8.94	2.45	91274	13.29	3.59
90044	5.15	2.50	91348	32.00	3.08
90063	43.42	39.16	91364	20.71	27.39
90072	36.34	8.75	91497	43.39	2.20
90084	46.27	10.56	91541	19.84	21.83
90088	39.10	19.10	91617	19.41	28.70
90093	35.04	7.19	91739	25.81	8.00
90196	17.00	19.56	91783	36.03	29.33
90314	46.90	12.88	91794	28.61	5.10
90325	2.12	0.50	91927	28.07	20.34
90351	22.56	13.53	91984	44.72	4.76
90372	17.89	13.35	92132	26.45	31.89
90395	5.02	3.54	92216	2.12	20.94
90401	44.92	13.64	92217	2.53	11.77
90415	50.80	15.18	92256	2.55	9.22
90419	2.90	2.89	92276	19.13	12.05
90426	2.56	2.93	92282	2.37	4.69
90434	10.92	1.69	92313	21.61	24.69



	$\alpha$ の値			$\alpha$ の値	
HIP catalog number	B	V	HIP catalog number	B	V
90444	36.33	34.06	92334	28.60	16.64
90517	10.97	8.21	92395	2.74	4.96
90520	10.92	16.86	92506	39.63	33.58
90524	15.99	15.44	92539	15.09	28.15
90525	48.66	9.29	92551	1.82	5.40
90533	14.01	48.67	92591	1.20	26.37
90540	7.94	7.74	92606	25.13	47.54
90561	8.44	8.63	92616	5.90	20.77
90569	3.76	3.83	92696	13.35	21.17
90581	41.40	44.17	92702	18.63	14.16
90586	10.86	11.02	92764	2.78	6.76
90622	15.96	6.00	92765	25.49	17.34
90681	11.66	7.79	92767	22.68	21.18
90708	3.05	4.06	92769	1.88	6.11
90723	2.69	2.27	92847	1.59	7.84
90736	42.47	10.94	92850	25.46	17.59
90776	2.95	6.19	92861	22.42	15.38
90809	41.81	42.15	92906	24.30	17.45

付録 3 : HIP カタログの恒星と演算後の測光結果

	演算後		カタログ上	演算後		カタログ上
	測光結果	等級	実際	測光結果	計算	実際
HIP catalog number	V	Vmag	Vmag	B	Bmag	Bmag
89509	46530.59	8.21	8.21	27846.58	9.40	9.40
89540	32204.67	8.61	8.61	21886.55	9.67	9.66
89602	138610.77	7.03	7.03	72830.70	8.36	8.36
89645	14708.27	9.46	9.46	5781.82	11.11	11.11
89655	21873.33	9.03	9.03	22691.53	9.63	9.63
89682	21875.98	9.03	9.03	13047.90	10.23	10.23
89762	20315.30	9.11	9.11	25246.74	9.51	9.51
89771	43633.83	8.28	8.28	38542.95	9.05	9.05
89774	30192.27	8.68	8.68	36252.93	9.12	9.12
89794	23114.99	8.97	8.97	28171.17	9.39	9.39
89810	28828.69	8.73	8.73	29518.63	9.24	9.21
89848	4018.21	10.87	10.90	2930.37	11.85	11.86
90003	33460.96	8.57	8.57	36813.02	9.10	9.10
90024	80882.86	7.61	7.61	92190.15	8.10	8.11
90044	59419.20	7.94	7.89	75051.31	8.33	8.33
90063	18709.40	9.20	9.20	24805.22	9.53	9.53
90072	63668.91	7.87	7.87	45246.67	8.88	8.88
90084	29645.40	8.70	8.70	21166.50	9.70	9.70
90088	55531.14	8.02	8.02	84792.79	8.20	8.20
90093	29916.40	8.69	8.69	22945.51	9.61	9.61
90196	14883.86	9.45	9.45	12215.25	10.30	10.30
90314	52952.82	8.07	8.07	23923.52	9.57	9.57
90325	115826.08	7.22	7.22	94403.76	8.08	8.08
90351	19561.68	9.15	9.15	9541.98	10.57	10.65
90372	11490.31	9.73	9.73	13099.63	10.22	10.22
90395	56474.59	8.00	8.00	23625.56	9.58	9.58
90401	37055.22	8.46	8.46	25201.13	9.51	9.51
90415	10089.87	9.87	9.87	8254.37	10.72	10.74
90419	38707.90	8.41	8.41	29492.77	9.34	9.34
90426	33406.23	8.57	8.57	57836.45	8.61	8.61

	演算後		カタログ上	演算後		カタログ上
	測光結果	等級	実際	測光結果	計算	実際
HIP catalog number	V	Vmag	Vmag	B	Bmag	Bmag
90434	35311.39	8.51	8.51	58978.86	8.59	8.59
90444	13709.18	9.54	9.54	18798.35	9.83	9.83
90517	67015.57	7.81	7.84	101124.78	8.00	8.00
90520	37991.92	8.43	8.41	77580.18	8.29	8.29
90524	93722.52	7.45	7.45	56631.19	8.63	8.63
90525	31295.28	8.64	8.64	24585.78	9.54	9.54
90533	15129.23	9.43	9.43	7639.42	10.81	10.81
90540	32983.69	8.58	8.81	32853.74	9.23	9.23
90561	19778.47	9.14	9.16	27324.69	9.43	9.43
90569	46117.01	8.22	8.22	19261.13	9.80	9.81
90581	5861.09	10.46	10.46	3369.36	11.70	11.70
90586	90663.06	7.49	7.49	91832.28	8.11	8.11
90622	10272.45	9.85	9.85	5254.53	11.22	11.22
90681	17605.28	9.27	9.27	7523.92	10.83	10.83
90708	19051.34	9.18	9.18	18649.57	9.84	9.84
90723	96353.73	7.42	7.42	40640.43	8.99	8.99
90736	67270.50	7.81	7.81	81559.38	8.24	8.24
90776	46544.15	8.21	8.21	21154.66	9.70	9.70
90809	27538.62	8.78	8.78	25651.96	9.42	9.33
90880	46540.55	8.21	8.21	58534.58	8.60	8.60
90883	83919.00	7.57	7.57	970.35	13.05	13.03
91069	28039.41	8.76	8.76	51117.87	8.75	8.75
91070	33409.27	8.57	8.57	12537.29	10.27	10.27
91080	69166.84	7.78	7.78	111320.81	7.90	7.90
91081	3497.73	11.02	11.02	2597.51	11.98	11.98
91128	10365.83	9.84	9.84	5065.42	11.25	11.26
91178	20511.97	9.10	9.10	36054.15	9.12	9.12
91213	97346.22	7.41	7.37	46147.28	8.86	8.86
91249	35629.07	8.50	8.50	20190.41	9.75	9.75
91265	32803.59	8.59	8.59	18122.26	9.87	9.87
91274	46104.36	8.22	8.22	67506.72	8.44	8.44

	演算後		カタログ上	演算後		カタログ上
	測光結果	等級	実際	測光結果	計算	実際
HIP catalog number	V	Vmag	Vmag	B	Bmag	Bmag
91348	27277.85	8.79	8.79	18205.26	9.87	9.87
91364	42063.20	8.32	8.32	35451.77	9.14	9.14
91497	27783.73	8.77	8.77	48011.66	8.81	8.81
91739	44307.21	8.26	8.26	43643.72	8.92	8.92
91783	22692.27	8.99	8.99	27600.02	9.41	9.41
91794	1814.93	11.73	11.73	1840.03	12.35	12.33
91927	50102.48	8.13	8.13	63874.93	8.50	8.50
91984	102763.10	7.35	7.35	43142.86	8.93	8.92
92132	14718.44	9.46	9.46	11945.60	10.32	10.32
92216	25121.22	8.88	8.88	47049.89	8.84	8.84
92217	29365.68	8.71	8.71	41127.21	8.98	8.98
92256	105821.88	7.32	7.32	208636.54	7.22	7.22
92276	67280.55	7.81	7.81	39570.20	9.02	9.02
92282	87873.10	7.52	7.52	167258.45	7.46	7.46
92313	33143.89	8.58	8.60	38714.15	9.05	9.05
92334	33105.36	8.58	8.58	18307.74	9.86	9.86
92395	43830.26	8.28	8.28	45063.77	8.88	8.88
92506	27285.47	8.79	8.79	12400.33	10.28	10.28
92539	28267.71	8.75	8.76	48097.64	8.81	8.81
92551	326317.18	6.10	6.10	640612.24	6.00	6.00
92591	33408.59	8.57	8.57	23515.45	9.59	9.59
92606	23540.71	8.95	8.95	27071.64	9.44	9.40
92613	23758.73	8.94	8.94	37048.97	9.09	9.05
92616	30996.21	8.65	8.65	55021.37	8.67	8.67
92666	57007.71	7.99	7.99	65318.09	8.48	8.48
92696	43231.51	8.29	8.29	27126.64	9.43	9.43
92702	28308.70	8.75	8.75	20423.77	9.74	9.74
92764	31319.26	8.64	8.64	51935.60	8.73	8.73
92765	21466.45	9.05	9.05	35485.17	9.14	9.14
92767	17051.46	9.30	9.30	27797.57	9.41	9.41
92769	80951.74	7.61	7.61	160768.10	7.50	7.50

	演算後		カタログ上	演算後		カタログ上
	測光結果	等級	実際	測光結果	計算	実際
HIP catalog number	V	Vmag	Vmag	B	Bmag	Bmag
92847	60236.28	7.93	7.93	105726.69	7.96	7.96
92850	32503.06	8.60	8.60	21314.40	9.69	9.70
92861	40911.05	8.35	8.35	29285.54	9.35	9.35
92906	35635.23	8.50	8.50	18120.70	9.87	9.87

#### 付録4：学習に活用したワークシート

氏名

考察：作成したHR図（色 - 等級図）をプリントアウトして、結果を検討してみよう。

問1 プリントアウトした色 - 等級図の星々の中から主系列星と赤色巨星の2つのグループを見つけよう。

できるだけ幅を狭くにとって、これだと思える範囲を線で囲んでみよう。

問2 主系列にある星はどのような特徴を持っていますか。縦軸の絶対等級や横軸の色指数の意味を考えながら説明してみよう。

問3 太陽の絶対等級 $V = 4.85$ 、 $B - V = 0.65$ です。

(1) 色 - 等級図上にプロットしてみよう。

(2) 太陽の位置よりも上の方にある星は明るさや色指数の意味から、どのような特徴を持つ星だといえますか。

問4 等級を計算できるか確かめよう。

(1) 金星(−4等級)は1等星より何倍明るいのか

(2) 等星は5等星の何倍明るいのか

(3) 太陽(−26.7等級)は獅子座の $\theta$ 座(3.3等級)の何倍明るいのか

問5 (発展)

赤色巨星に分類される恒星の大きさは同じ温度（色指数）の主系列星とくらべ大きいだろうか？小さいだろうか？

ヒント：恒星の半径：恒星の放射する光の量（ $L$ ）は、単位面積が出すエネルギー（ステファン・ボルツマンの法則から求める）×その恒星の表面積だから、恒星の表面温度 $T$ （K）、半径 $r$ （m）とすると下の式で求めることができる。  $L = \sigma T^4 \cdot 4\pi r^2$



## 付録5：HR図描画教材を扱った、指導案

### 実習教材「恒星のHR図を作ろう」

#### 1. 範囲

高等学校学習指導要領「地学」2内容（4）宇宙の構造—イ恒星と銀河系—（ア）恒星の性質と進化 恒星の種類と性質について理解を深めるための教材

#### 2. 目標

星団には属さない恒星の画像を元にパソコンを用いて画像解析からHR図を作成し、以下の活動を行う。

- ・天文学研究で行われる実際の測光方法を体験する。
- ・等級についての知識を得る。HR図について理解する。最初に見かけ等級でHR図を描き、その後絶対等級でHR図を描くことで見た目の等級と絶対等級の違いを理解する。
- ・星団のHR図とは違った、教科書に載っているHR図に近い恒星のHR図を作図する。
- ・恒星のHR図を描き主系列星と赤色巨星に分類する。
- ・主系列星と赤色巨星の絶対等級（明るさ）と表面温度（色等級）の違いを元にシュテファン・ボルツマンの法則を用い大きさを想定する。（発展）

#### 3. 内容と時間

##### ＜準備するもの＞

PC、画像処理ソフト「マカリイ」、恒星のB及びVバンドのFITS画像、恒星のイメージ、Microsoft Office Excelのテンプレートファイル、関数電卓

※関数電卓以外は全部こちらで用意いたします。関数電卓はいくつかはこちらで用意しますが、関数電卓があれば用意していただくと助かります。

＜定員＞5～20名

＜日時＞1月25日AM：9:30～12:30 三重大学教育学部2F地学実験室

1. 恒星の明るさ（等級）と色について・・・・・・・・・・60分
2. ソフトの説明・・・・・・・・・・10分
3. 測光作業・・・・・・・・・・40分
4. データの整理・HR図（色等級図）の作成・・・・・・・・15分
5. 見かけ等級と絶対等級について・・・・・・・・・・15分
6. 結果・考察・・・・・・・・・・30分

#### 4. 教材について

##### 4-1. 観測天体

尾鷲市立天文科学館の81cmニュートン式望遠鏡、東京大学木曽観測所の105cmシュミット式望遠鏡が撮影した恒星の画像を用いる。本教材では絶対等級を縦軸としたHR図を

描くため距離が判明している恒星を扱う必要がある。そこで恒星までの距離、スペクトル型、見かけの等級がカタログに明記されており、距離の測定精度がよりよいヒッパルコスカタログの恒星を使用する。1996年にまとめられたヒッパルコス星表に記載されているうち、約100個の恒星を扱う。範囲としてはベガ周囲の星  $10^\circ \times 10^\circ$  以内で以下の図の中の枠内の領域の星を用いる。(図1)

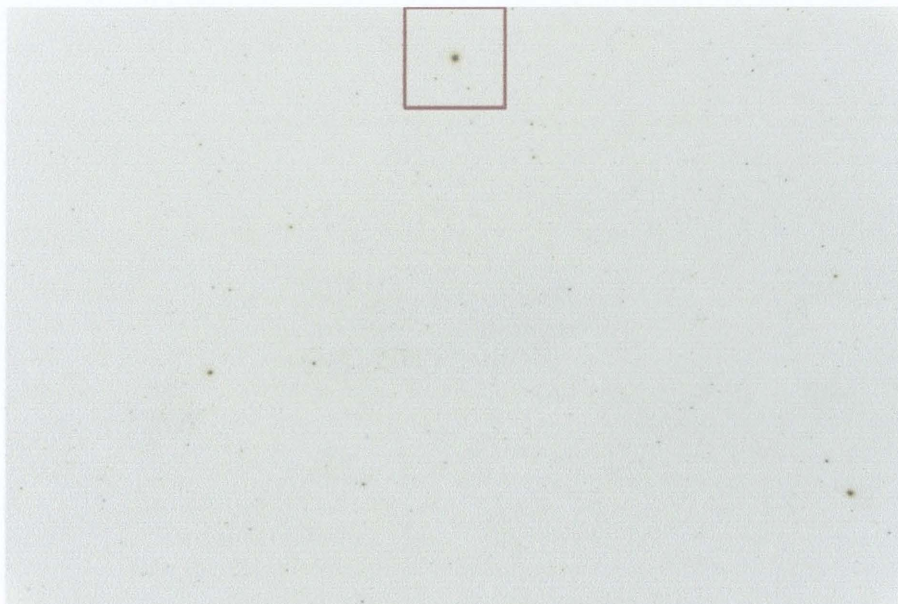


図1：夏の大三角とベガ周囲  $10^\circ \times 10^\circ$

#### 4-2. 等級について

一般に星の明るさを表わす場合単位として等級を用いることが多い。しかし、像から星の明るさを測定し得られるものはその星の領域内での画素の総カウント値である。カウント値は星の明るさに比例した量であるが、等級そのものを表す値ではない。したがって、星の画像から得られたカウント値を等級に変換することが必要である。

##### 4-2-1. FITS画像のカウント値と星の等級の関係について

本実験では天体画像はFITSという拡張子をもつ画像を用いる。FITS (Flexible Image Transport System) は天文分野の研究者をはじめ、天文アマチュアの間でも画像やデータの保存に使われるデータ形式である。

星の明るさと等級には

- ・ 等級が大きいほど明るさは暗い。
- ・ 5等級違うと明るさは100倍違う。
- ・ 等級差は明るさの比を表わす。

の関係が定義されている。したがって、明るさ(カウント)  $C_1$  と  $C_2$ 、等級  $m_1$  と  $m_2$  には次式のようにあらわすことができる。

$$\frac{C_2}{C_1} = 100^{\frac{(m_1 - m_2)}{5}} \cdot \cdot \cdot \textcircled{1}$$

等級の絶対値を求めるためには基準となる星が必要である。その基準として本実習ではベガの明るさ（カウント）を用いる。ベガは標準星として観測時に明るさの基準に用いられる星であり、その等級は0等級である。そのため、①式より、観測により明るさ  $L_{\text{star}}$  がわかる星の等級  $m$  は以下の式で表すことができる。

$$m = -2.5 \log \frac{L_{\text{star}}}{L_{\text{vega}}} \cdot \cdot \cdot \textcircled{2}$$

※  $L_{\text{vega}}$  は観測によりわかったベガのカウント値をあらわす。

ベガは今回用いるヒッパルコス星表の星々に比べ非常に明るく同一条件での撮影が難しいため、理論上の値を計算し、生徒にはその値を掲示する。

#### 4-2-2. 見かけの等級と絶対等級

天体の明るさは天体までの距離に反比例する。地球上から見た明るさ（等級）を見かけの明るさ（見かけの等級）という。これに対して、その天体までの距離によらず、本来の明るさの指標として、絶対等級が用いられる。恒星などの場合、絶対等級はその天体を 10pc 離れたところから見たときの等級である。

太陽から距離  $d$  pc だけ離れたある星の見かけの等級  $m$ 、絶対等級を  $M$  とすると、星間物質などによる光の吸収が無視できる場合は

$$M = m - 5 \log \left( \frac{d}{10} \right) \cdot \cdot \cdot \textcircled{3}$$

という関係式が成り立つ。

#### 4-3-1. 色指数とスペクトル型

二つの異なる波長で撮った画像でのある星の明るさの比率は、その星の表面温度（スペクトル型）によって決まる。黒体放射のスペクトルの明るさを異なる二種のフィルターを通して測り、その強度の比を取った場合を考える。黒体放射スペクトルは温度が高くなるほど放射のピーク波長は短くなる。したがって、温度の異なる黒体のスペクトルについて、温度範囲について特定の2波長を選び強度の比を求めれば、温度が高いほど長波長での強度に比べ短波長での強度の方が大きくなる。星の場合も同じく、2波長のフィルターを使って明るさを測ることを考える。恒星の表面温度はだまかに 3000K～数万 K の範囲である。例えば、可視光波長域（大体 400nm～800nm）では温度が高い星ほど長波長での明るさに対して短波長での明るさが明るくなる。明るさを等級で表すと、明るさの比率は等級差で求められる。この等級差を色指数という。本教材の場合、短波長フィルターとしては青い光を通すフィルター（B バンドフィルター）を、長波長フィルターとしては緑（可視域）の光を通すフィルター（V バンドフィルター）を用いて撮った画像（B バンド画像と V バンド

画像）が用意されており、BバンドとVバンドにおける等級差を色指数として（B－V）を用いる。

$$B - V = -2.5 \log \frac{L_{\text{starB}}}{L_{\text{starV}}} + 2.5 \log \frac{L_{\text{vegaB}}}{L_{\text{vegaV}}} \cdots \textcircled{4}$$

※B－VはBバンドの等級とVバンドの等級の差を表す。  
主系列星での恒星のスペクトル型と有効温度、色指数の関係は図のようにになっている。

表 1： 恒星のスペクトル型と表面温度・色指数の関係<sup>7</sup>

スペクトル型	有効温度（K）	色指数（B－V）
O5	45000	-0.30
B0	29000	-0.30
B5	15000	-0.16
A0	9600	0.00
A5	8300	0.15
F0	7200	0.33
F5	6600	0.45
G0	6000	0.60
G5	5600	0.68
K0	5300	0.81
K5	4400	1.15
M0	3900	1.40
M5	3900	1.60

##### 5. データの処理・マカリィについて

撮影した天体画像をマカリィで開き拡大すると図2のように画像は四角形の集まりでできている。この四角形の単位を画素（ピクセル）と呼ぶ。マカリィは画素ごとに明るさに対応する数値が入っている。

<sup>7</sup>1997 年理科年表より

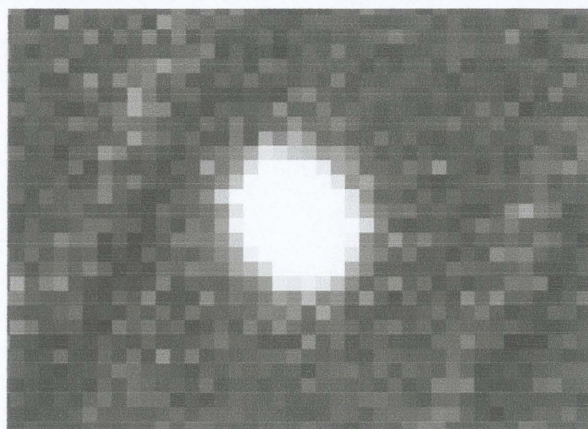


図2：マカリィで撮影した天体画像の拡大

星の明るさは、一般的に開口測光という方法で測定する。開口測光とは星が映っている画素の領域中（測光開口部）の値の積分を求め、スカイの明るさを差し引くことで星の明るさを測定する方法である。スカイの明るさとは測光する際、星本来の明るさとは別に画素における信号量である。（図3）

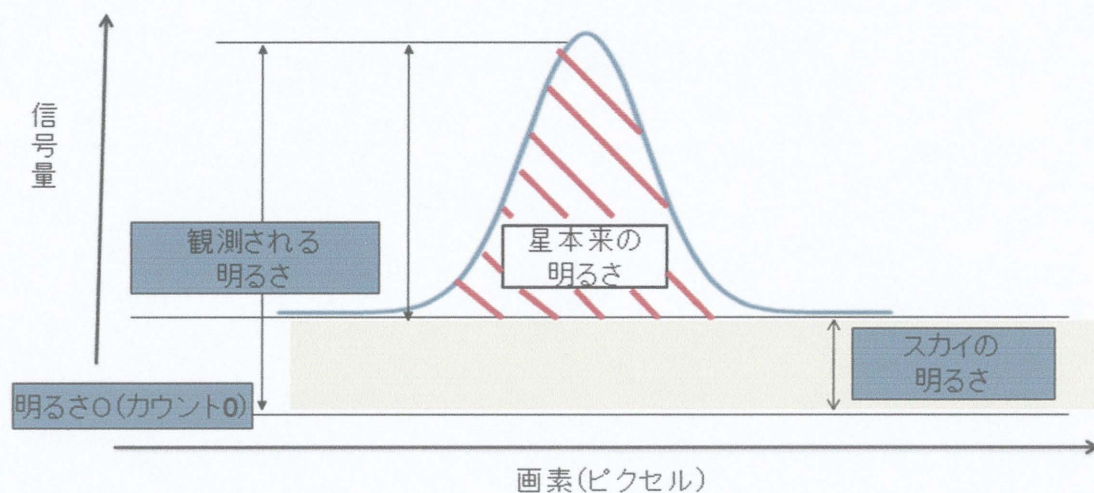


図3：星の明るさとスカイの明るさの関係

スカイと測定したい星の範囲（測光開口部）の位置関係は以下のようなになる。（図4、5）



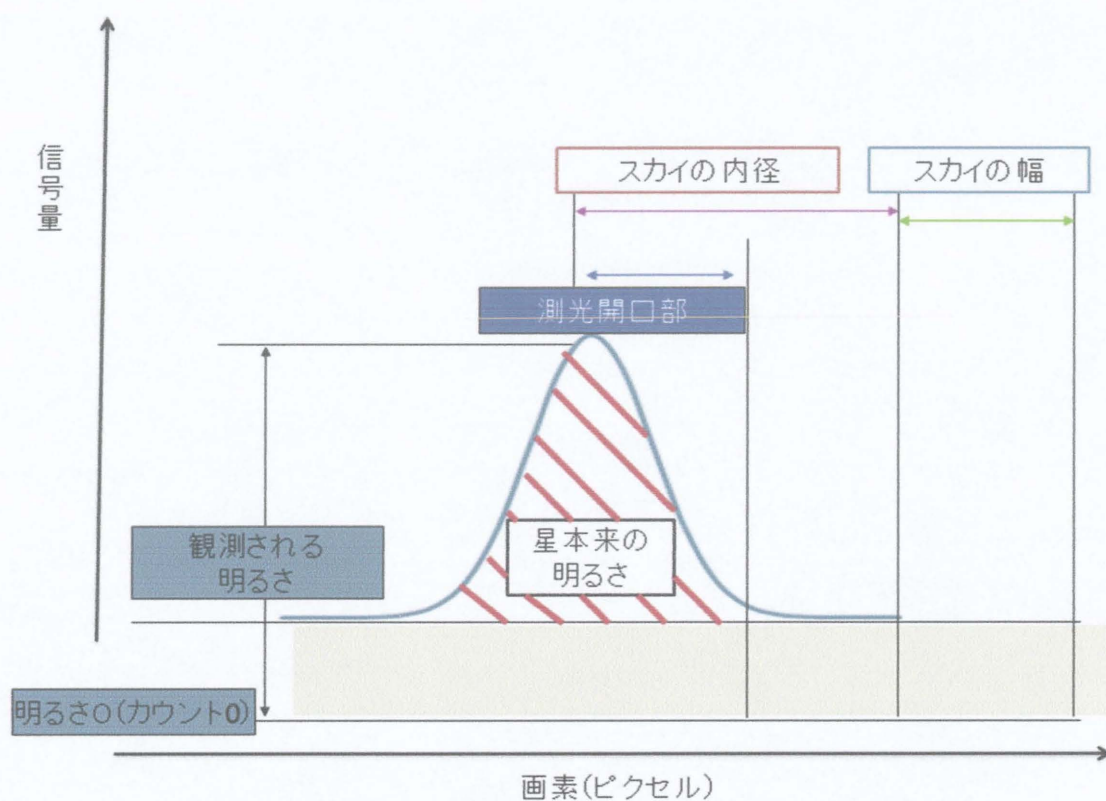


図4：星像に対する測光開口部とスカイ内径、幅の位置関係

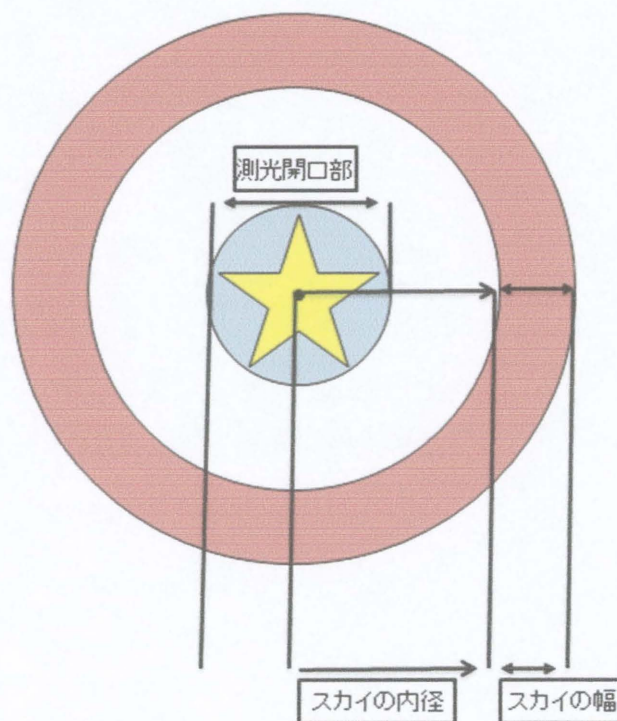


図5：画像上での測光開口部とスカイ内径、幅の位置関係



画像解析ソフト「マカリィ」は、画像中の任意の位置の画素の信号量を調べたり、任意の領域中の信号量を積分したり、画像間で信号量を演算したりすることなどを簡単に行うソフトである。

「マカリィ」の自動測光モードで、測光したい星をカーソル中心に選びクリックすると、選んだ星を中心に計算し、その中心からある半径内に含まれるピクセルの信号量を積分し、さらに、その測光した星領域の周りの円環領域の信号量の平均をバックグラウンドの明るさとして引き算をし、カウントという値で返す。

## 6. 生徒が行う実際の作業手順と指導内容

実験の際にはマカリィでの測光時に観測天体の恒星を探す必要がある。そこで生徒にはマカリィとは別に観測天体の名前が入った png イメージを用いて、観測天体を探すことで天文学における測光処理を体験させようと考えている。(図6) png イメージは Digitized Sky Survey Data Archive より取得したもので、撮影した FITS 画像の視野に合わせ中央に観測天体が位置するようにトリミングしてある。星を探す際の具体的なパソコンの画面の様子を図6に示す。

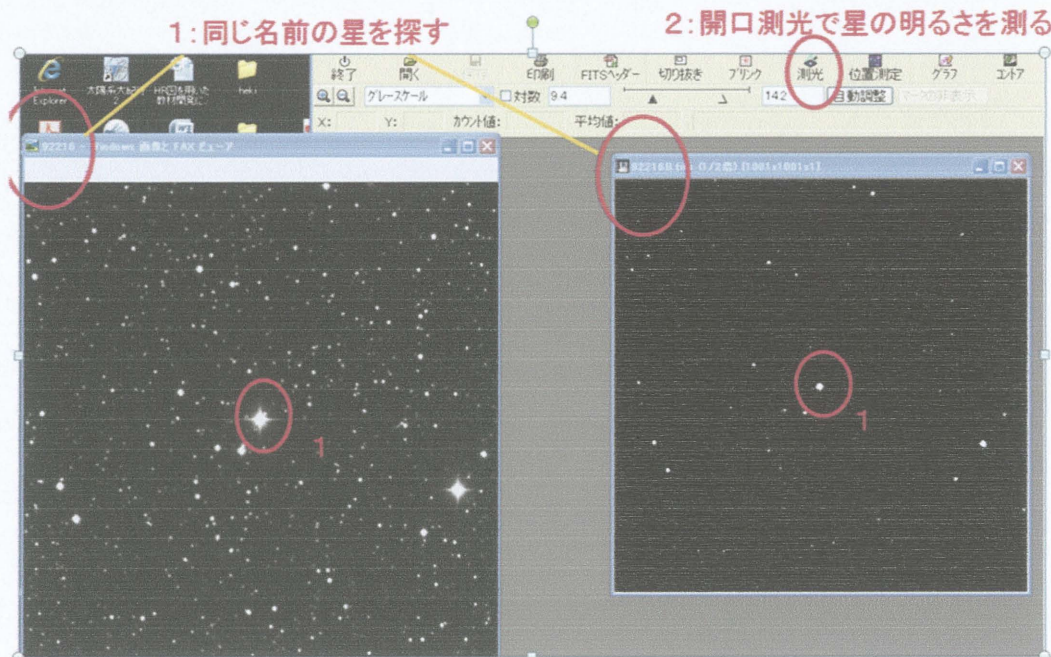


図6：開口測光時における恒星の探し方

※図6の左側のウィンドウが png イメージである。png イメージはフォトビューアーで開く

測光の際にはマカリィのタスクバーにある測光アイコンをクリックし、測定したい星の上でマウスを左クリックすると図7の左側に示したような測光ウィンドウが立ち上がる。このウィンドウには星の重心や測光開口部の大きさ、スカイレベルなど様々な測定結果が表示される。これらの数値の中でカウント値が星本来の明るさの信号量を表すため、カウント値を Exel のテンプレートファイルに打ち込む（図7）。

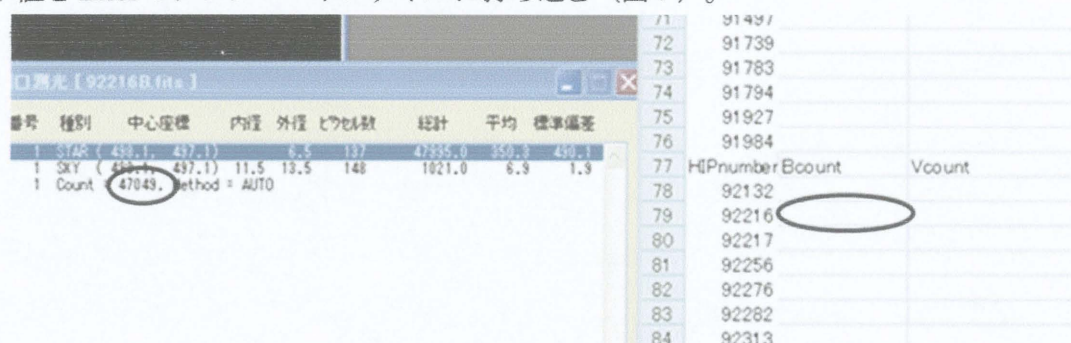


図7：カウント値（恒星の明るさ）の探し方

この作業をBバンドとVバンドの画像において繰り返し行う。ただし、星数が100個あるため、5つ程度の班に分け1班20個程度を目安に全員で一つのHR図を描くことを考えている。

得られたカウント値から3-2-1の②式を用い見かけの等級を、関数電卓を用い計算する。Exelの見かけの等級に入力する。それをBバンドとVバンドの画像について行い、BバンドとVバンドの等級からB-Vを計算する。得られたデータから、エクセルのグラフ作成の散布図を選び、縦軸にVバンドの見かけ等級と横軸にB-VからHR図を描くと下図のようになるはずである。（図8）

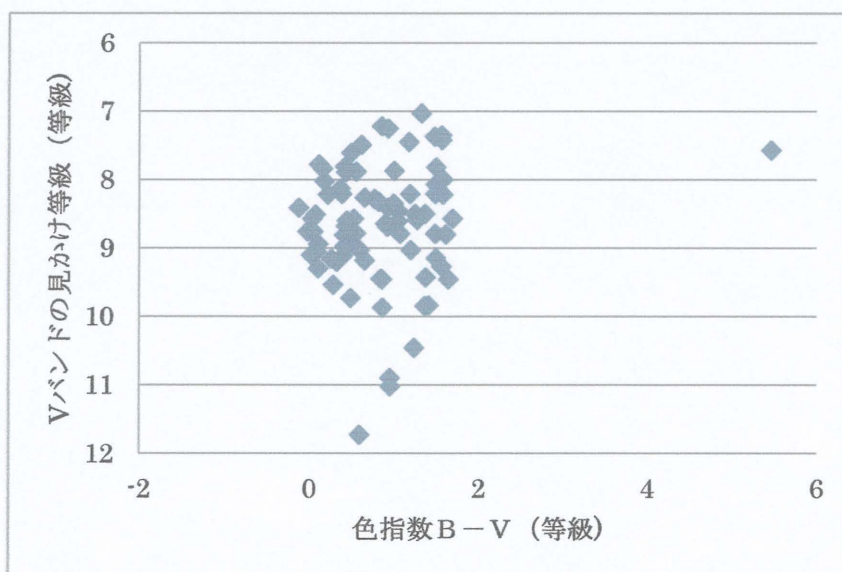


図8：見かけ等級と色指数



まずこの段階で生徒に星の明るさと色の関係を議論してもらおう。しかし、このままでは星の明るさと色の明瞭な関係性はわからない。そこで、見た目の明るさと星本来の明るさは違うことを説明する。各恒星の距離はヒッパルコス星表からわかっているので③式をもとに絶対等級を求め縦軸に絶対等級をとりグラフを再プロットし、教科書のHR図に類似していることを確認する（図9）。本実験では絶対等級は、生徒は電卓を用いて計算するが、時間の都合上一人2、3個ほどとし、残りはExcelのマクロを用いボタン一つで表示できるようにする。

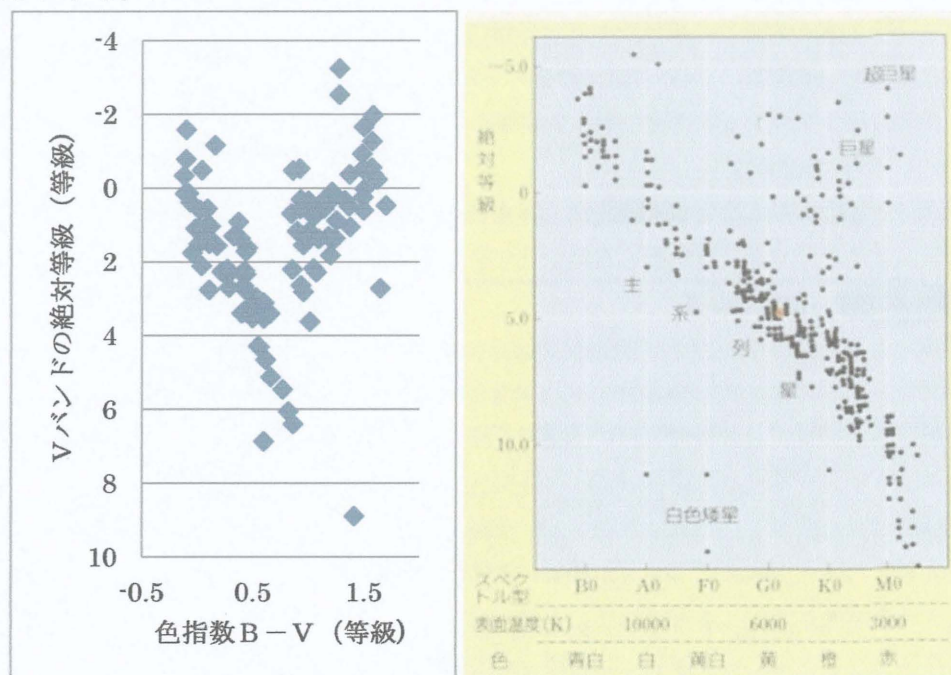


図9：本実験のHR図と啓林館地学Ⅱに記載されたHR図

描いたHR図を元に恒星をグループに分けそれぞれ特徴が異なる主系列星と赤色巨星と呼ばれる恒星であることを理解する。描いたHR図をプリントアウトし太陽をプロットし、どちらのグループに属するか考える。描いたHR図をもとに主系列星はどのような特徴をもつ恒星であるか縦軸と横軸をもとに考察する。以上はワードでワークシートを作成し学習させようと考えている。

## 7.データの提供方法と生徒の学習活動

実験で使用するプログラム、各ファイルはUSBメモリーで提供する。

時間	学習内容	生徒の学習活動	教師の指導・留意点
5分	恒星について	恒星についての知識を確認する。 各恒星の明るさ、色が違うことを理解する。	オリオン座を撮影した写真を掲示し、星によって色や明るさが違うことに気付かせる。
5分	等級について	等級が明るさの基準を表すことを理解する。 ポグソンが1等級違うと明るさが約2.5倍違うことを発見したことを知る。	ヒッパルコスが肉眼で見える星を1～6等星に分けたことの説明。
5分	累乗根、指数対数の表わし方について	5等級違うと明るさが100倍違うことから、1等級違うと明るさがどのくらい違うか考える。 $x^2 = 2$ $x = \pm\sqrt{2}$ より $x^5 = 100$ $x = \sqrt[5]{100}$ $x = 100^{\frac{1}{5}}$ と表すことを理解する。 $2^3 = 8$ $\log_2 8 = 3$ より $\log_{10} 100 = 2$ と表すことを理解する 例題 $2^2 \times 2^3 = 32 = 2^5$ $\log 100 = 2 = \log 10^2$ $= 2 \times \log 10$	数学科では2年次の単元のため未習時は丁寧に指導する。 わからない場合具体的な例題をとかせる。 1等級違うとx倍違うとおく。 6等級では $x^5$ 倍違う。 $\sqrt[5]{100} \approx 2.5$ であることを説明
5分	指数・対数の計算方法	などから、指数・対数の基本的な計算方法を身につける  等級と明るさの関係を理解する。 $\frac{L_1}{L_2} = \frac{L_2}{L_3} = \frac{L_3}{L_4} = \frac{L_4}{L_5} = \frac{L_5}{L_6} = 100^{\frac{1}{5}} \approx 2.5$	例題を織り交ぜながら基本的な指数・対数の計算方法を指導する。  等級の基準としては歴史的に北極星や、標準星のヴェガが使わ

5 分	<p>等級と明るさの関係</p> $\frac{L_1}{L_3} = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{L_2}{L_3} = 100^{\frac{2}{5}} \approx 2.5^2$ $\frac{L_1}{L_4} = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{L_2}{L_3} \times \frac{L_3}{L_4} = 100^{\frac{3}{5}} \approx 2.5^3$ $\frac{L_M}{L_m} = 100^{\frac{(m-M)}{5}} \dots \textcircled{1}$	<p>れていることを説明する。</p> <p>1 等級を L 1、2 等級を L 2 . . . . 6 等級を L 6 とすると</p> <p>1 等級ごとの比は等しい</p>
5 分	<p>具体例</p> $\frac{100}{1} = 10^{(6-1) \times \frac{2}{5}}$ $\log \frac{100}{1} = \log 10^{(6-1) \times \frac{2}{5}}$ $\log \frac{100}{1} = \frac{2}{5} \times (6-1)$ <p>になることから 等級は</p> $\frac{2}{5} \times (m_2 - m_1) = \log \frac{L_1}{L_2}$ <p>で求めることができることを理解する。</p>	<p>具体的な例として 1 等で明るさが 100 の場合 6 等で明るさはいくつか発問する。</p> <p>1 等(<math>m_1</math>)—100(<math>L_1</math>) 6 等(<math>m_2</math>)—1(<math>L_2</math>)</p> <p>より、一等級違うと明るさが</p> $\sqrt[5]{100} = 10^{\frac{2}{5}}$ <p>違うことから等級と明るさの関係式を導き出す。</p>
5 分	<p>星の色と表面温度、スペクトル型、色指数</p> <p>恒星による色の違いから、星の表面温度、スペクトル型、色指数が違うことを知る。また星の色は、表面温度、スペクトル型、色指数に関係が深いことを理解する。</p> <p>色指数は異なる 2 波長の明るさの傾きであること、表面温度、ス</p>	<p>サンプルとして恒星の画像、スペクトル型を用意。</p> <p>青い恒星→リゲル・スピカ 赤い恒星→アンタレス、ベテルギウス</p> <p>高温は青色になる、という日常的な例が工業的なものしかないため J a v a ソフト (p H E T) を使い、現象を理解させようと考えている。</p>

5 分		<p>ペクトル型、色指数の対比から色指数が大きいと表面温度が低いことを理解する。</p>	<p>本実験では星のスペクトル型を観測するには非常に難しい操作が必要なため、HR図の代わりに色等級図を使う。</p> <p>等級は明るさを対数で表したものであるため、波長ごとの等級の差は明るさの比になることを説明し、星の連続スペクトルと色指数の関係を説明する。</p>
星の色と明るさにはどんな関係があるか？実際に測定し、グラフにしよう！			
5 分	マカリィを用い開口測光をする。	<p>測光の手順、エクセルファイルの使い方を学ぶ。</p> <p>マカリィを用いBバンド、Vバンドの各画像において測光を行う。</p> <p>約 100 個程度のデータがあるため、一人 5 個ほどBバンド、Vバンドの測光、得られたデータをエクセルに書き込む、といった操作を行う。</p> <p>得られたデータから縦軸を見かけ等級で描いたHR図を作成する。等級と明るさの関係性を考える。</p>	<p>マカリィが星の明るさを、カウント値を用いて表示することを説明する。</p> <p>パワーポイントを用いマカリィでの処理の手順を説明する。画像はBバンドとVバンドで観測した画像を扱う。</p> <p>縦軸にはみかけ等級、横軸に色指数（B－V）を用いる。</p> <p>得られたデータをまとめることや、グラフを書く操作は時間がかかりそうなのでマクロを組んだりするなど工夫をすることを考えている。</p>
25 分			
10 分	見かけの等級と絶対等級	<p>地球から見られる恒星の等級と、絶対等級が違うことを理解する。</p> <p>見かけ等級から絶対等級にする方法を考える。①式と②式より</p> $\frac{d^2}{10^2} = 10^{\frac{2}{5} \times (m-M)}$ $\log d^2 - \log 10^2 = \log 10^{\frac{2}{5} \times (m-M)}$ $M = m - 5 \log \left( \frac{r}{10} \right)$ <p>と表すことができることを理解</p>	<p>太陽と、遠方だが太陽よりも絶対等級が明るい恒星（スピカ・シリウスA・アルタイル）の明るさを比較する。</p> <p>明るさは距離の 2 乗に反比例すること、距離 10pc においた等級を絶対等級ということを説明する。</p>



		<p>する。</p> <p>見かけ等級を絶対等級で計算しなおし、グラフを再プロットする。</p>	$\frac{L}{l} = \frac{d^2}{10^2} \cdots \textcircled{2}$ <p>絶対等級を <math>M</math>、絶対光度を <math>L</math>、みかけ等級を <math>m</math>、見かけ光度を <math>l</math>、その星までの距離を <math>d</math> (pc) とする。</p> <p>エクセル上で計算させる。もしくは電卓を用い 1、2 個ほど計算した後は、残りのデータは数式を用い表示するように設定する。</p>
10 分	HR 図の作成	<p>描いた HR 図が先ほどの見かけ等級で書いた図と比較しながら星の明るさと色の関係を考える。</p>	<p>描いた HR 図を並べさきほどの HR 図と比べてどこが違うか発問する。→「y 字型になった！」など。</p>
15 分	描いた HR 図を元に考察	<p>HR 図上で 2 つのグループに恒星が分かれることを理解する。太陽はどちらの分類に属するかグラフを用い判断する。</p> <p>主系列星は明るければ明るいほど表面温度が高いことを理解する。</p> <p>今回の実験を受けて感じたことや HR 図からどんなことがわかったか表現できる。</p> <p>まとめ・感想</p>	<p>HR 図上に位置する恒星が主系列星と赤色巨星というふたつの分類に分かれることを説明する。太陽の色指数と絶対等級を伝えグラフをプリントアウトし HR 図上に太陽をプロットしてどちらの分類に属するか発問する。</p> <p>恒星の分類において性質を、グラフを用い説明する。縦軸と横軸の関係から主系列星は青い星ほど明るくなることから表面温度と明るさの関係を説明する。時間があれば、シュテファン・ボルツマンの法則から赤色巨星が主系列の星より大きいことを説明し、HR 図から様々なことがわかることを伝える。</p>