

題 目 食変光星ケフェウス座U 星の光電測光と教材化

教科領域教育専攻

自然系コース

M 8 4 2 6 9

池 田 昌 司

目 次

1. 緒 言	1
2. 三色光電測光について	3
3. 観測方法と整約	5
(1) 使用機材	5
(2) 星の光量測定と器械等級	7
(3) 標準星と大気減光補正	9
(4) ジョンソンシステムへの変換	11
(5) 比較星と変光の観測	14
(6) 主極小時刻の決定と日心時刻への変換	16
4. 測定結果	18
(1) U Cepの観測結果	18
(2) U Cepの光度曲線	26
(3) UCepのB-V曲線	27
(4) 食中の光度曲線	28
(5) 結果の考察	32
(a) 光度曲線とB-V曲線	32
(b) E=3121 (1985年1月7日) の食について	35
(c) 光度曲線における観測点のばらつきについて	37
(d) 周期変動について	39
5. 教材化の検討	42
(1) 変光星の種類	42
(2) 色指数B-Vの教材化について	46
(3) UCepと脈動変光星のデータ	48
(4) 測光のデータをもとに変光星の種類を識別する方法	53
(5) 授業における実習例	56

6. 結論	57
(1) 周期変動について	
(2) 教材化について	
7. 謝辞	58
・ 文献一覧	59
・ 付録	62
・ 整約プログラムリスト	62
・ 標準星団リスト	66
・ 恒星表	69

本研究の一部は、日本地学教育学会第39回全国大会第3部会（埼玉県南浦和市民文化会館、1985年8月9日）で発表した。

1. 緒言

ケフェウス座U星 (U Cep) は、周期が約2.493日のアルゴル型食連星であり、その主星と伴星は、それぞれB7型主系列星とG8型巨星である。この星の特徴は、1880年に変光が確認されて以来、長期間に渡って周期増加を続けていることである。UCepは光度曲線の主極小が深く、その底部は一定の明るさが続く皆既食となる。しかし、食によっては皆既食中の明るさが変化し、Crawford (1979) らは伴星自身の変光を指摘している。また、アルゴル型特有の浅い副極小も見られるが、Hall and Walter (1974) によると、食外の平坦部でも変光が認められる。主極小における上昇部は下降部よりも急勾配であり、その第1接触は第4接触よりも0.1等ほど暗い。Batten (1973) によれば、主極小付近の光度曲線が非対称になる原因としては、伴星から主星へ落下するガス流により、主星の光が包み隠された結果とするStruve (1944) の説が広く受け入れられている。また、Olson (1979) らによれば、通常の食 (undisturbed eclipse) では2時間ほど継続する皆既食の短い異常な食 (disturbed eclipse) も観測され、この種の食は主極小時刻の決定が困難とされている。異常な食の原因は、大規模な質料移動により、主星上に生じた熱白点 (hot spot) とされている。

Sato and Ito (1984) は、写真測光によってこのU Cepの周期変動を調べ、1983年4月から12月までの主極小時刻が、Crawford and Olson (1981) が1980年11月までに調べた観測結果から予想されるものより15分程度遅れているという結果を得た。

本研究では、このU Cepを写真測光法に代えて、三色光電測光を用いて観測する。光電測光は精度面において有利である以外に、測光に要する時間が少なく、済み、数多くのデータをとることができる。

特にアルゴル型食変光星の副極小 (U Cep は 0.1 等) も観測でき、写真測光よりも観測の範囲が大きくなる。本研究では、この光電測光により、得た V 等級の光度曲線から正確な主極小時刻を決定し、U Cep の周期変動の様子を調べる。

また、高校の地学教科書 8 社 (啓林館、東京書籍、教育出版、実教出版、大原出版、教研出版、大日本図書、第一学習社) について調査した結果、変光星に関する作業実習を扱っているものは皆無であった。このような資料を活用した作業実習は、まだまだ研究の余地が多いことが分かった。

光電測光では U、B、V 等級以外にも、スペクトル型に対応する色指数 B-V などの観測データが得られる。そこで、変光星の観測値を活用して、効果のある実習教材を検討する。

以上、本研究の目的は U Cep について次の 2 点を調べ、検討することである。

1. 光電測光により、U Cep の V 等級光度曲線を求めて正確な主極小時刻を決定し、U Cep のその後の周期変動の様子を調べる。
2. U Cep の観測により、得られた V 等級と色指数のデータを活用し、高校の地学の授業で連星系の識別が行える実習方法を検討する。

2. 三色光電測光について

光電測光の目的は、天体の明るさを正確に求めることにある。適当な光電子増倍管とフィルターを使えば、いろいろな波長域での明るさが測定できる。それによつて、天体の物理的状態が分かる。

本研究に用いたのは、1950年頃からジョンソン、ハリスらによつて始められたUBV三色測光システム（ジョンソンシステム）である。U、B、Vというのは紫外（Ultraviolet）、青（Blue）および実視（Visual）領域で測光された等級を表す記号である。U、B、Vの有効波長と帯域幅は、それぞれ表2-1のとおりである（例えば、福田、上杉、1980）

表2-1 UBV等級と波長

記号	呼称	有効波長	帯域幅
U	紫外等級	3650 Å	680 Å
B	青色等級	4400 Å	980 Å
V	実視等級	5500 Å	890 Å

ジョンソンの三色測光システムにおける色指数は、 $B-V$ 、 $U-B$ と表現される。この値はベガ（琴座 α 星）のような白色に近い表面温度約1万度のA0型星で0になるように定義されており、一般に青い星では負、赤い星では正の値をとる。

波長域を更に増やしたものに、ステビンス、ウィットフォードのU（紫外）、B（青）、V（実視）、G（緑）、R（赤）、I（赤外）六色測光システム

がある。測光域の拡大に伴い、それだけ得られる情報量も増えるが、測光に時間がかかるために変化の激しい変光星の観測には向きである。さらに、ジョンソンシステムが有利なのは、提案者であるジョンソンが6等より明るい恒星の大部分の精密な測光観測結果を発表しており、その実績から最も広く用いられている点である。変光星の場合は、異なる天文台や時間を隔てた観測結果と比較することが多く同じシステムによって整約されていなければ、単に断片的なデータ以上の意味を持たない。

以上の理由から、本論文の観測値はジョンソンシステムに変換させている。

付録にジョンソン標準星団リスト (Henden and Kaitchuck, 1982) を示した。

3. 観測方法と整約

(1) 使用機材

観測に使用したのは、図3-1と図3-2に示す50cm反射望遠鏡(西村製作所製: $f = 6000\text{mm}$)と、その接眼部に取りつけた光電測光装置である。光電子増倍管には、浜松ホトニクス製の1P21型を使用している。1P21の使用電圧を926Vに固定して、暗電流の増加を防ぐために観測2時間前から光電子増倍管のエージングを行った。内蔵された3種類のU、B、Vフィルターをルーレット環を回転させることにより簡単に交換でき、3つの波長領域における星の光量を測定することが可能である。また、星の光量に応じてアンプのゲインを切り替え、かなり暗い恒星の測光も可能である。

記録計として、横河製作所製のバーチカルペンレコーダを使用し、星の明るさに応じたペンの振れを、チャートスピード2cm/秒で記録した。

測光した観測結果の解析には、NEC製のマイクログコンピュータPC-9801F₂を用いた。その整約のために、付録のリスト1-1から1-4のプログラムを自作した。

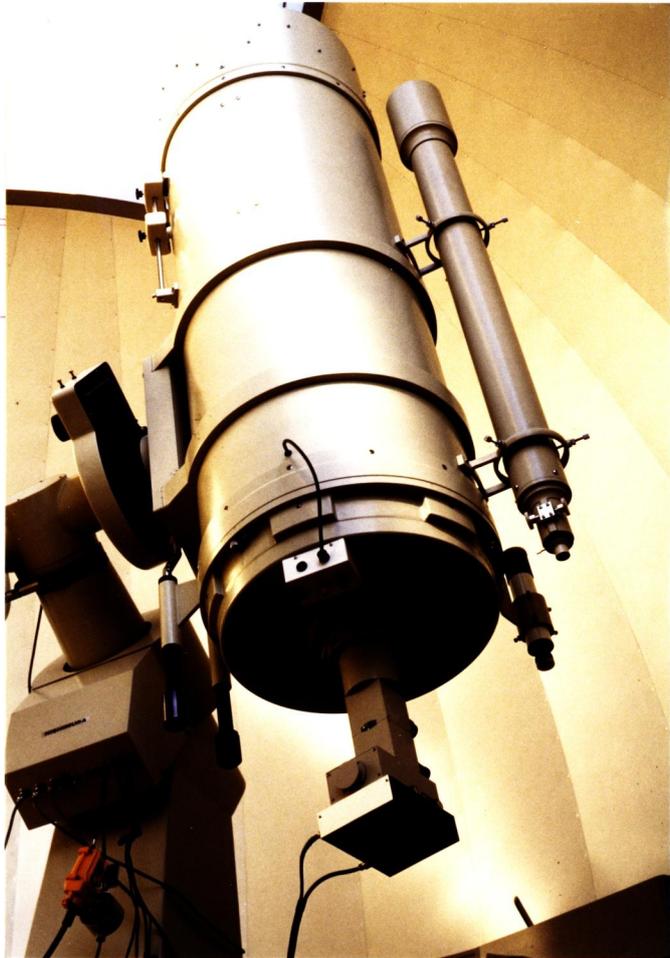


图 3 - 1 50 cm 反射望远镜

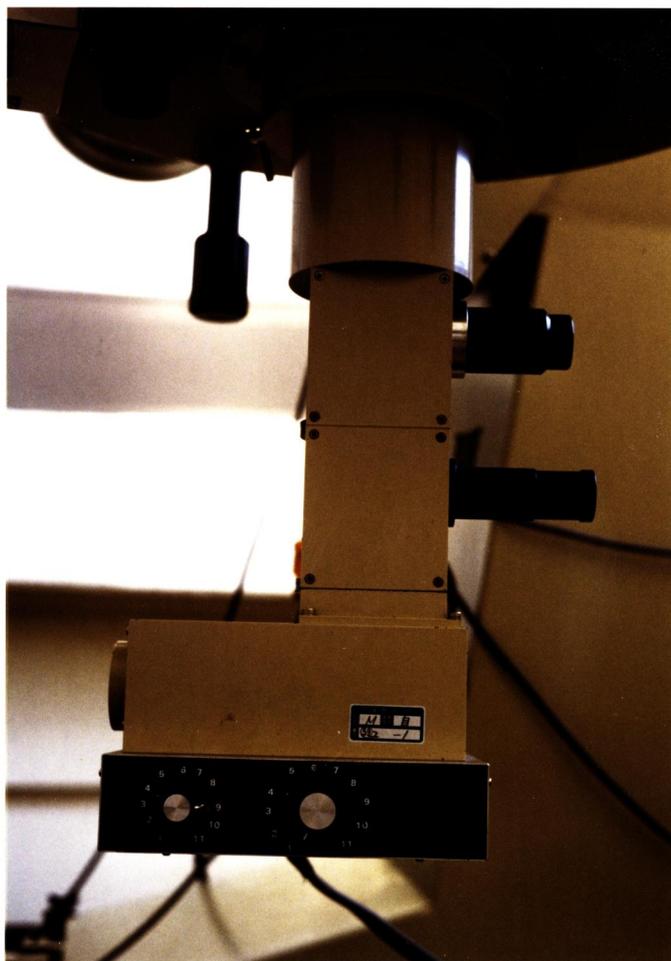


图 3 - 2 光电测光装置

(2) 星の光量測定と器械等級

光電子増倍管によって測光された星の光量は、電流値に応じたペンの振れ幅としてペンレコーダに記録される。しかし、この時の光量は視野内の夜光の影響を受けている。そこで、星の測光をした直後に、背景の空の明るさだけを別に測定し、その差を星の光量として用いた。この方法で3つのフィルターを入り替え、V、B、Uの3波長領域について測光した。チャート上の振れ幅(d)は、1/10mmまで測定した。

V、B、U領域での振れ幅を、それぞれ d_v 、 d_b 、 d_u とすると、その器械等級 v 、 b 、 u は次式(1)~(3)で表現できる。計算値の誤差は ± 0.003 である。

$$v = -2.5 \log(d_v) \quad (1)$$

$$b = -2.5 \log(d_b) \quad (2)$$

$$u = -2.5 \log(d_u) \quad (3)$$

個々のデータは、光度の大小に応じてアンプのゲインを変えて測光している。そこで、観測された器械等級は、全てゲイン1の状態に較正した。アンプのゲイン較正量は、表3-1である。このデータは光電子増倍管に高圧をかけ、そのときの電流値を測定して求めたものである。また、実際に天頂付近の空をゲインを切り替えて測光し、チャートの振れ幅を調べて確認した。

ゲイン較正を加えた器械等級の整約はマイコンで行った。そのプログラムのサブルーチンが、付録リスト1-1である。

表 3 - 1 ゲイン較正量

ゲイン	増幅率	等級差
1	1	m 1.200
2	3.0187	1.314
3	3.3549	1.199
4	3.0171	1.304
5	3.3227	1.209
6	3.0439	1.301
7	3.3139	1.200
8	3.0209	1.309
9	3.3395	1.176
10	3.6538	1.327
11	3.3960	

(3)標準星と大気減光補正

測光して求めた器械等級は、大気による減光の影響を受けている。この減光の割合は、通過してくる大気層の厚みにほぼ比例して大きくなっている。そこで、大気層の厚み(空気量 X)と減光率の関係を調べることにより、減光の補正をすることができると考えられる。大気層を平行平面の層と考えると、この空気量 X は星の天頂距離を Z とすると、 $\sec Z$ に比例する。ただし、Henden and Kaitchuck (1982)によれば、天頂距離 Z が 60° を越すと平行平面という仮定が破れ、地球の曲率を考慮する必要がある。そこで、空気量 X の計算には以下に示すBemporad (1904)のデータにもとづくHardieの多項近似式(4)を用いた。

$$X = \sec Z - 0.0018167 (\sec Z - 1) - 0.002875 (\sec Z - 1)^2 - 0.0008083 (\sec Z - 1)^3 \quad (4)$$

図3-3はジョンソンの1次標準星22個を観測し、空気量 X と減光の割合を調べたものである。標準星リストには標準星の大気外 V 等級と色指数が載っており、式(4)による空気量 X に対して、それぞれのリストの V 等級と測光観測から得られた器械等級 V の差 $V-V$ をグラフにプロットした。周極星のU Cepがとりうる X の値は、 $1.4 < X < 2.3$ である。図3-3を見ると、この範囲では式(4)から計算される X と $V-V$ は1次の関係である。従って、U Cepの観測では、式(4)を使って空気量 X を計算し、大気の減光を補正した。

実際の観測では、ジョンソンの標準星をいろいろな高度で測光した。その時の器械等級 V と色指数 $b-V$ 、 $u-b$ をリスト中の V 等級と色指数 $B-V$ 、 $U-B$ から引き、その差をそれぞれ測光時の空気量 X に対してプロットした。これらは、いずれも図3

3のように直線で近似できる。この直線の傾きを空気量 X に対する減光の割合、すなわち減光係数 k'_{bv} 、 k'_{bu} 、 k'_{ub} とした。

この空気量 X と減光係数を用いて、減光補正を加えた観測値は次式(5)~(7)になる。ただし、小文字 o は大気外の値を示す。

$$V_o = V - k'_{bv} \cdot X \quad (5)$$

$$(b - V)_o = (b - V) - k'_{bv} \cdot X \quad (6)$$

$$(u - V)_o = (u - b) - k'_{ub} \cdot X \quad (7)$$

計算はマイコンで処理した。その大気減光補正プログラムは、付録リスト1-2のサブルーチンである。

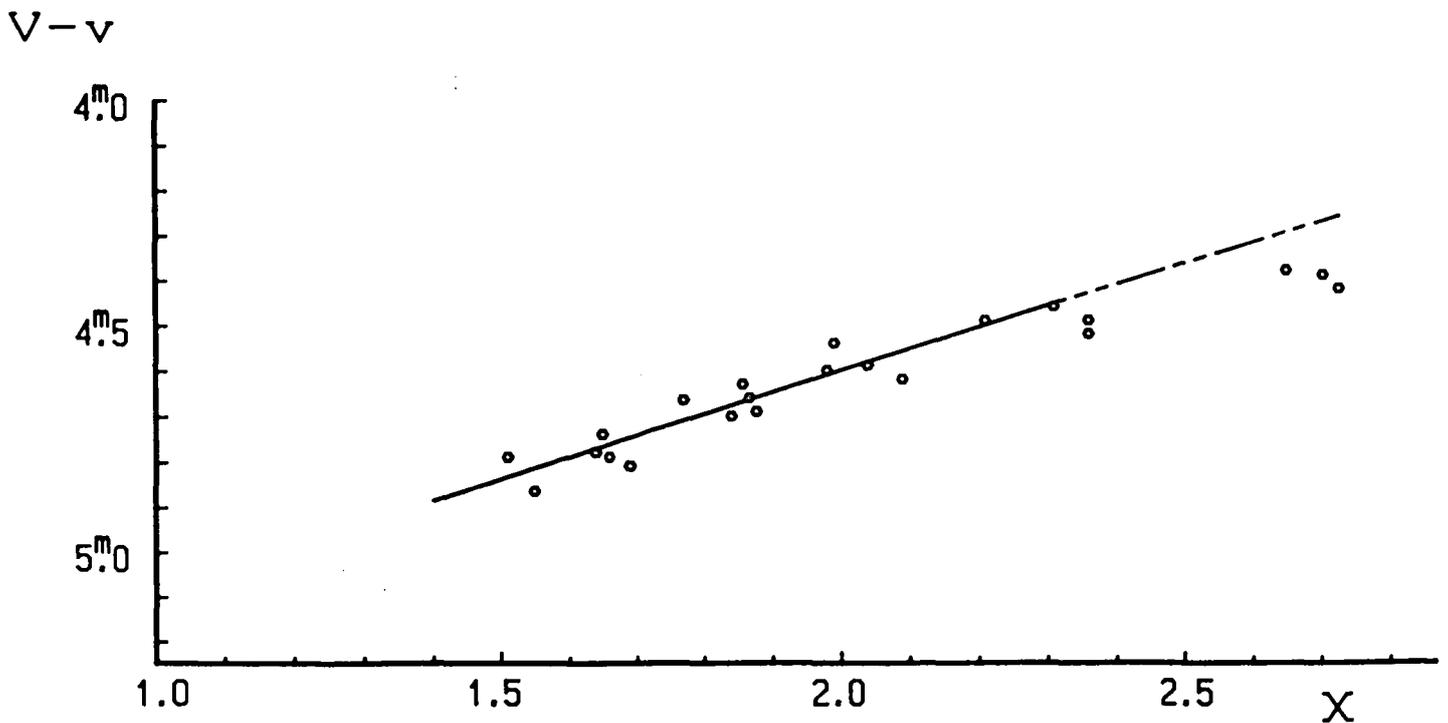


図 3-3 大気減光の割合と空気量 X の関係

(4) ジョンソンシステムへの変換

本学の測光系は、ジョンソンのオリジナルシステムに近いものである。しかし、光学系の違いなどから、比較星との色指数の差が大きいとジョンソンシステムからずれてくる。また、光電子増倍管の感度も少しずつ変化していくので、その補正が必要となる。Henden and Kaitchuck (1982) によれば、2星間の等級差を求める場合、その観測値をジョンソンシステムに変換した値は、次式(8)~(10)で表現される。

$$\Delta V = \Delta V - K'_{vr} X + \varepsilon \Delta(b - v). \quad (8)$$

$$\Delta(B - V) = \mu \Delta(b - v)_0 - \mu K'_{bv} \Delta X - \mu K''_{bv} \Delta(b - v)_0 \bar{X} \quad (9)$$

$$\Delta(U - B) = \psi \Delta(u - b)_0 - \psi K'_{ub} \Delta X - \psi K''_{ub} \Delta(u - b)_0 \bar{X} \quad (10)$$

Δ は2星間の観測値の差を、 \bar{X} は空気量 X の平均を示し、 K''_{bv} 、 K''_{ub} は2次の減光係数である。 ε 、 μ 、 ψ は、ジョンソンシステムへの変換係数で、ジョンソンの標準星を観測して求めらる。

変換係数の大きさは光電子増倍管の感度変化などに影響を受けるものであり、観測期間中に1~2回調べる必要がある。本研究では、1985年4月6日に標準星31個を観測して決定した値を使用している。

リストに記載されている標準星の V 、 $B - V$ 、 $U - B$ と測光した v 、 $b - v$ 、 $u - b$ の差を、色指数に対してプロットしたのが図3-5、6、7である。それぞれ直線で近似でき、それらの直線の傾きが ε 、 $1 - 1/\mu$ 、 $1 - 1/\psi$ である (Henden and Kaitchuck, 1982)。この結果、 $\varepsilon = -0.009$ 、 $\mu = 0.912$ 、 $\psi = 1.090$ となった。

ジョンソンのオリジナルシステムが $\varepsilon = 0$ 、 $\mu = 1$ 、 $\psi = 1$ であり、本学の測光系はジョンソンのオリジナルシステムに近い。従って、ジョンソンシステムへの変換に関する誤差は少ないと考えられる。ただし、Henden and Kaitchuck (1982) によると、ジョンソンのリスト自体、 ± 0.02 等の誤差が含まれており、それ以上の精度は得られない。また、ジョンソンのオリジナルシステムに近いものは、 $K_{bv}'' = -0.03$ 、 $K_{ub}'' = -0.01$ と近似できる。

ジョンソンシステムへの変換は、付録リスト 1-3 を使ってマイコンで処理した。

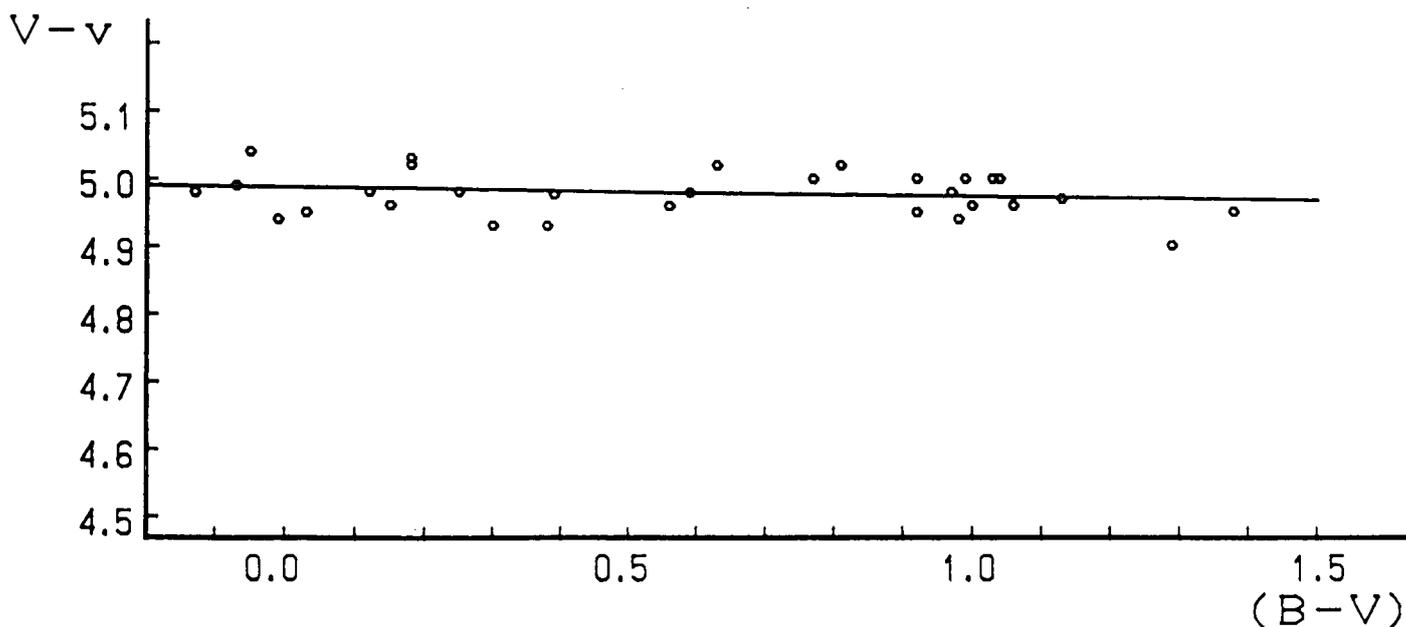


図3-5 変換係数 ε の決定

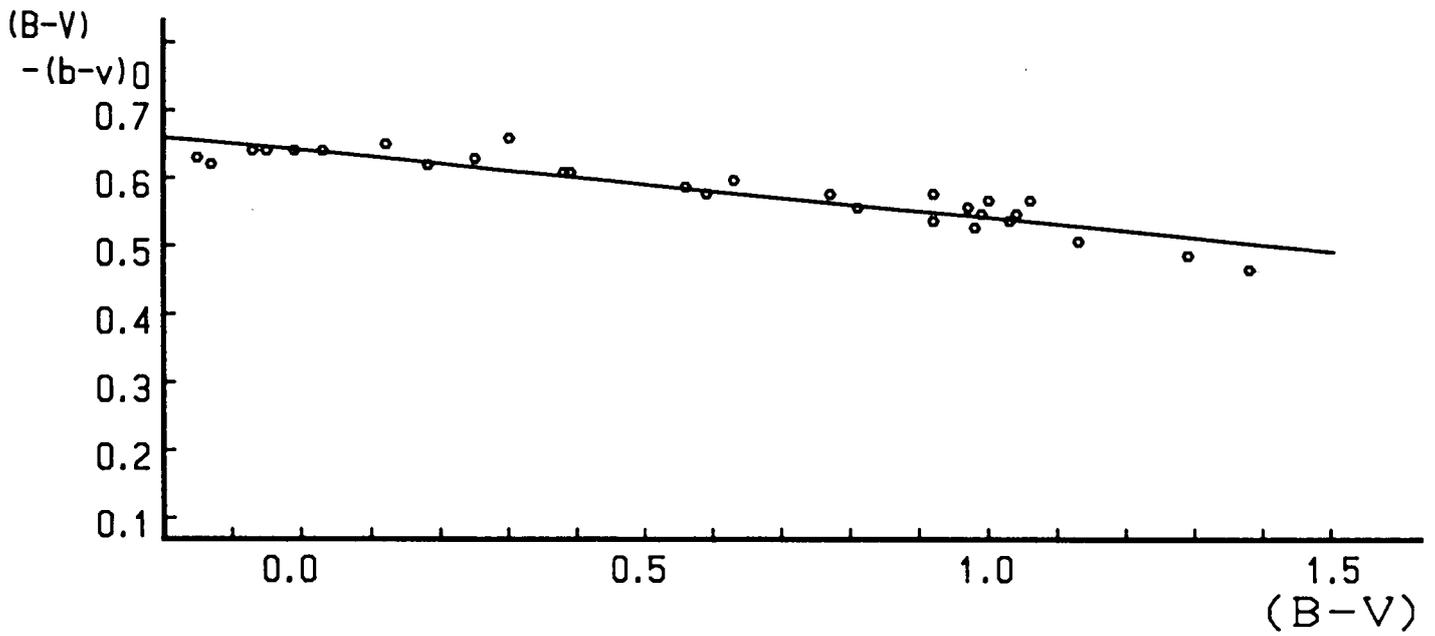


図3-6 変換係数 μ の決定

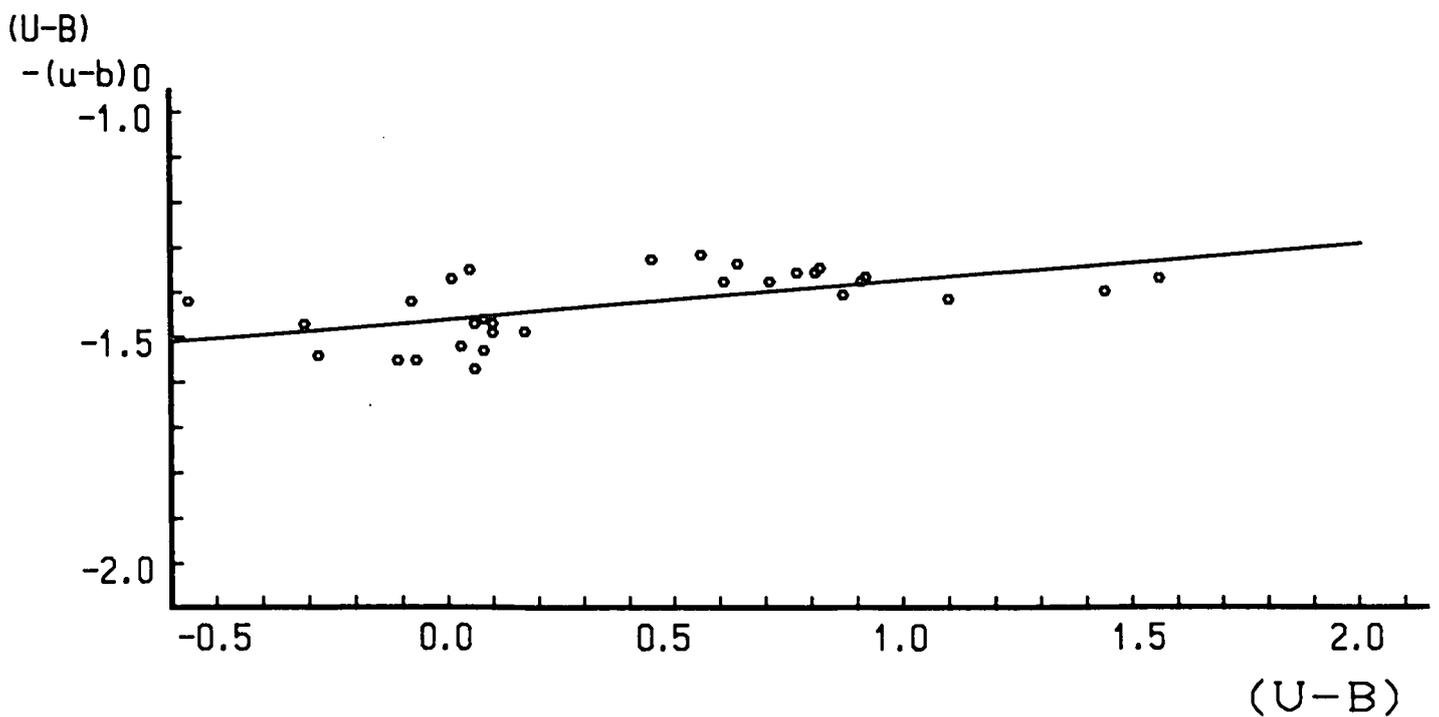


図3-7 変換係数 ψ の決定

(5)比較星と変光の観測

U Cepの光度変化は、図3-8の比較星との光度差を観測して調べた。A~Fの比較星は、U Cepの明るさに応じて使い分けた。U Cepと比較星を交互に観測し、観測値は器械等級に換算した。U Cepと比較星の器械等級と色指数を、それぞれ観測時刻に対してプロットし、観測点はなめらかな曲線で結んだ。U Cepの観測時刻に対応する比較星の観測値を曲線上から求め、その差を観測時刻の等級差 ΔV と色指数の差 $\Delta(b-v)$ 、 $\Delta(u-b)$ とした。

比較星のV等級と色指数B-V、U-Bは、ジョンソンの標準星リスト中の標準星HR 285 (HD 5848、 $\alpha(1950) = 1^h 5^m 18^s$ 、 $\delta(1950) = +86^\circ 8'$ 、 $V = 4.27$ 、 $B - V = 1.21$ 、 $U - B = 1.33$)との等級差を観測して決定した。その結果が表3-2である。

表3-2 U Cepの比較星

比較星	V等級	B - V	U - B
	m	m	m
A	6.68	0.00	0.03
B	7.23	0.35	0.03
D	8.01	0.02	-0.09
E	8.46	0.59	-0.24
F	8.54	0.66	-0.02

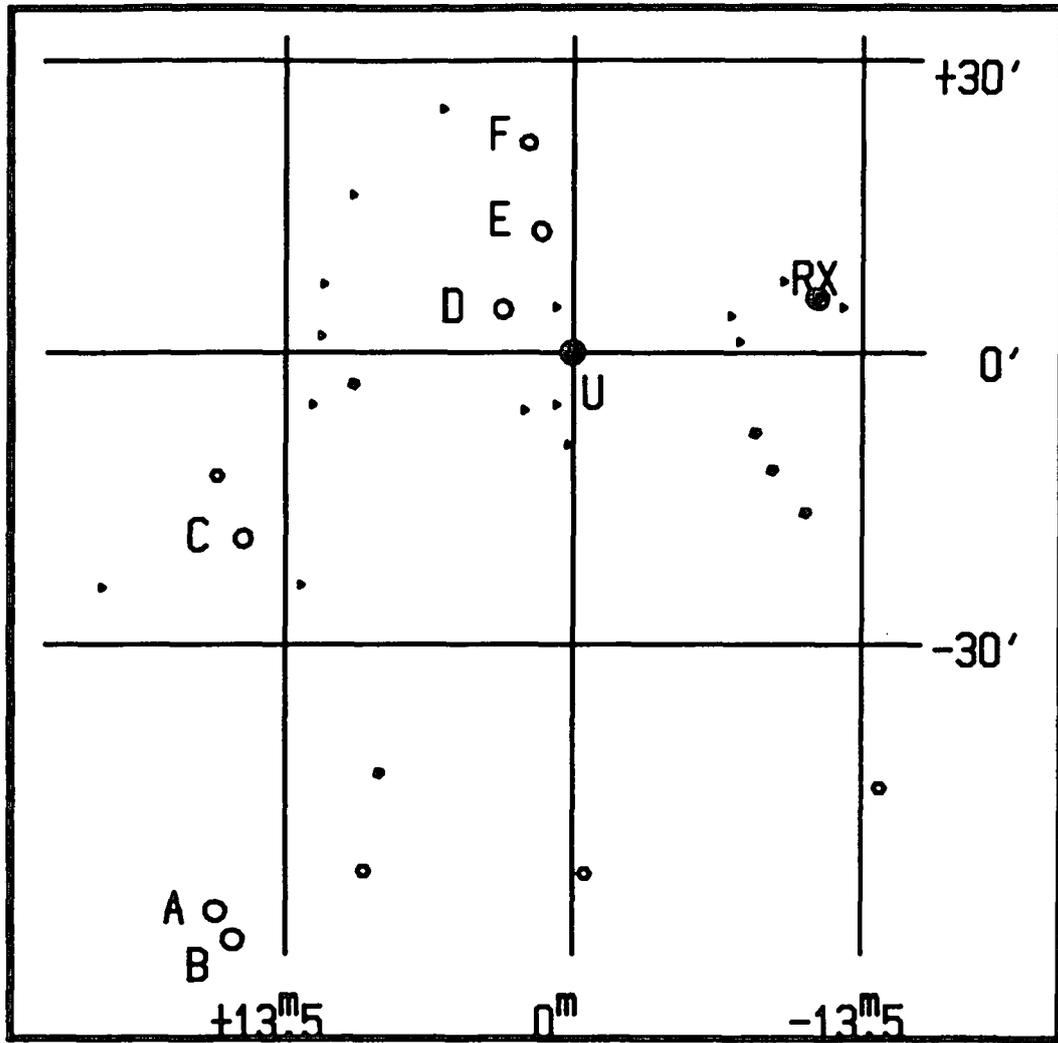


図3-8 U Cepとその比較星

(6) 主極小時刻の決定と日心時刻への変換

主極小時刻は、観測時刻に対して等級をプロットした食中の光度曲線から決定した。この際、食中の光度曲線の一部しか得られていないものも含まれているので、次の2とおりの方法を採用した。

食中の光度曲線の全域（下降部～底部～上昇部がある）が取れた場合は、観測点をなめらかな曲線で結ぶ。同じ等級値の上昇部と下降部を0.1等級ごとに直線を引き、それぞれ直線の中心点を求める。それぞれの点を通る曲線を引き、光度曲線の底部と交わった点を主極小時刻とした。

一部しか得られなかったものは、表3-3の正常な食の光度曲線をデータに重ね合わせた。その光度曲線の中央値を主極小時刻とした。

観測期間は約11ヶ月に渡るものであり、地球の公転の影響により、観測日によって変光星までの距離が異なっている。距離の違いは測光する時刻に差を生じ、変光周期に影響する。このため観測時刻を地心ユリウス日（Geo. JD）から日心ユリウス日（Hel. JD）に変換した。変換には次式(II)を用いた。

$$\text{Hel. JD} = \text{Geo. JD} + 0.0057755 \cdot R \cdot \cos(\theta - \lambda) \cdot \cos \beta \quad (\text{II})$$

ここで、 λ と θ はそれぞれU Cepの黄経（ $72^\circ 23'$ ）と黄緯（ $63^\circ 17'$ ）である。 θ は地球の日心黄経で、 R はAUを単位とした太陽-地球間の距離である。 θ と R は、観測日における値を天体位置表（海上保安庁、1985）から求めた。

以上の変換は、付録リスト1-4のサブルーチンを使い、マイコンで処理した。

表 3 - 3 U Cep の正常な食の光度変化

食の中心 からの時間	位 相	V 等級
h - 4 . 0	p 0 . 9 3 3 1	m 7 . 0 5
- 3 . 5	0 . 9 4 1 5	7 . 2 2
- 3 . 0	0 . 9 4 9 9	7 . 4 4
- 2 . 5	0 . 9 5 8 2	7 . 7 5
- 2 . 0	0 . 9 6 6 6	8 . 1 8
- 1 . 5	0 . 9 7 4 9	8 . 8 0
- 1 . 0	0 . 9 8 3 3	9 . 2 3
- 0 . 5	0 . 9 9 1 6	9 . 2 4
0 . 5	0 . 0 0 8 4	9 . 2 4
1 . 0	0 . 0 1 6 7	9 . 2 4
1 . 5	0 . 0 2 5 1	8 . 8 2
2 . 0	0 . 0 3 3 4	8 . 1 8
2 . 5	0 . 0 4 1 8	7 . 7 2
3 . 0	0 . 0 5 0 1	7 . 4 1
3 . 5	0 . 0 5 8 5	7 . 1 7
4 . 0	0 . 0 6 6 9	7 . 0 1

(Crawford and Olson, 1979 による)

4. 測定結果

(1) U Cep の観測結果

1985年1月4日から11月29日までの観測結果を、表4-1に示した。第2欄は観測時刻の日心ユリウス日、第3欄は位相P、第4、5、6欄はそれぞれV、B、U等級、第7、8欄は色指数B-V、U-Bである。位相Pは、観測時刻と最も近い主極小時刻との差を周期2.4930679日(Olson, 1981)で割ったものである。この周期を用いた主極小時刻の計算値と実測値のずれは10分以下であり、位相計算の誤差は±0.003以内である。

(2) U Cep の光度曲線

表4-1のV、B、U等級値をそれぞれの位相Pに対してプロットした光度曲線が、図4-1、図4-2、図4-3である。ただし、No.36~46の観測値は、異常な食の可能性があるので除いてある。

(3) U Cep の B-V 曲線

表4-1のB-V値を各位相ごとにプロットしたのが、図4-4のB-V曲線である。光度曲線と同様に、No.36~46は除いた。

(4) 食中の光度曲線

観測日ごとにプロットした食中の光度曲線が、図4-5~図4-11である。光度曲線の全域がとみなすが、たものは、表3-6の正常な食の光度曲線をデータにフィッティングしてある。中心線は主極小時刻を示している。

表4-1

U Cep の 観 測 値

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
1	70.0456	0.075	6.75	6.72	6.60	-0.03	-0.12
2	70.1741	0.126	6.75	6.79	6.66	0.04	-0.13
3	70.2474	0.156	6.95	7.00	6.61	0.05	-0.39
4	70.2765	0.168	6.94	7.01	6.67	0.07	-0.34
5	70.3270	0.188	6.95	6.99	6.64	0.04	-0.35
6	70.3500	0.197	6.85	6.77	6.68	0.08	-0.09
7	71.9546	0.841	6.86	6.91	6.56	0.05	-0.35
8	71.9712	0.847	6.85	6.88	6.54	0.03	-0.34
9	71.9829	0.852	6.84	6.89	6.52	0.05	-0.37
10	71.9987	0.858	6.86	6.89	6.56	0.03	-0.33
11	72.0074	0.862	6.94	6.98	6.60	0.04	-0.38
12	72.0210	0.867	6.94	6.88	6.58	0.06	-0.30
13	72.0274	0.870	6.92	6.91	6.52	-0.01	-0.39
14	72.0522	0.880	6.98	6.97	6.63	-0.01	-0.34
15	72.0656	0.885	6.95	6.95	6.65	0.00	-0.30
16	72.0740	0.888	6.85	6.80	6.54	-0.05	-0.36
17	72.0935	0.896	6.88	6.91	6.59	0.03	-0.32
18	72.1001	0.899	6.95	6.87	6.63	-0.08	-0.24
19	72.1115	0.904	6.92	7.01	6.78	0.09	-0.23
20	72.1184	0.906	6.86	6.98	6.58	0.12	-0.40
21	72.1253	0.909	6.90	6.92	6.56	0.02	-0.36
22	72.1309	0.911	6.98	6.94	6.52	-0.04	-0.42
23	72.1376	0.914	6.94	6.95	6.69	0.01	-0.26
24	72.1413	0.915	6.96	6.97	6.52	0.01	-0.46
25	72.1474	0.918	6.98	6.91	6.45	-0.07	-0.46
26	72.1537	0.920	6.98	6.97	6.55	-0.01	-0.42
27	72.1609	0.923	6.99	6.94	6.59	-0.05	-0.35
28	72.1663	0.925	7.00	6.78	6.45	-0.22	-0.33
29	72.1717	0.928	7.00	7.02	6.65	0.02	-0.37
30	72.1822	0.932	7.00	7.00	6.47	0.00	-0.53
31	72.1861	0.933	6.96	7.06	6.48	0.10	-0.58
32	72.1905	0.935	7.04	7.14	6.72	0.10	-0.42
33	72.1954	0.937	7.04	6.99	6.64	-0.05	-0.35
34	72.2002	0.939	7.13	7.18	6.83	0.05	-0.35
35	72.2108	0.943	7.15	7.15	6.79	0.00	-0.36
36	72.3181	0.986	7.75	7.51	7.17	-0.24	-0.34
37	72.3274	0.990	8.10	8.12	7.85	0.02	-0.27
38	72.3336	0.993	7.85	7.91	7.52	0.06	-0.39
39	72.3390	0.995	7.67	7.84	7.28	0.17	-0.56
40	72.3454	0.998	8.51	8.29	8.96	-0.22	0.67
41	72.3502	0.000	8.55	9.48	9.36	0.93	-0.12
42	72.3585	0.004	8.77	9.54	9.25	0.77	-0.29
43	72.3593	0.004	8.87	9.48	9.31	0.61	-0.17
44	72.3635	0.005	8.96	9.73	9.77	0.77	0.04
45	72.3683	0.007	8.72	9.38	9.55	0.66	0.17

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
46	72.3726	0.009	8.59	9.43	9.50	0.84	0.07
47	73.0015	0.261	6.84	6.84	6.43	0.00	-0.41
48	73.0183	0.267	6.78	6.78	6.23	0.00	-0.55
49	73.0599	0.284	6.78	6.76	6.16	-0.02	-0.60
50	73.0953	0.298	6.87	6.77	6.35	-0.10	-0.42
51	73.1142	0.306	6.83	6.79	6.39	-0.04	-0.40
52	73.1392	0.316	6.84	6.77	6.62	-0.07	-0.15
53	73.1585	0.324	6.87	6.77	6.52	-0.10	-0.25
54	73.1891	0.336	6.83	6.92	6.47	0.09	-0.45
55	73.3051	0.382	6.78	6.81	6.54	0.03	-0.27
56	73.3375	0.395	6.82	6.74	6.75	-0.08	0.01
57	73.3494	0.400	6.80	6.80	6.61	0.00	-0.19
58	73.9267	0.632	6.73	6.77	6.53	0.04	-0.24
59	73.9592	0.645	6.73	6.81	6.53	0.08	-0.28
60	74.0581	0.684	6.86	6.95	6.58	0.09	-0.37
61	74.0749	0.691	6.85	6.95	6.54	0.10	-0.41
62	74.1044	0.703	6.88	6.90	6.56	0.02	-0.34
63	74.1197	0.709	6.88	6.91	6.50	0.03	-0.41
64	74.1412	0.718	6.83	6.92	6.54	0.09	-0.38
65	74.1654	0.727	6.90	6.94	6.79	0.04	-0.15
66	74.1905	0.737	6.86	6.79	6.34	-0.07	-0.45
67	74.2036	0.743	6.79	6.85	6.30	0.06	-0.55
68	74.2301	0.753	6.90	6.92	6.59	0.02	-0.33
69	74.2467	0.760	6.86	6.91	6.66	0.05	-0.25
70	74.2747	0.768	6.90	6.89	6.62	-0.01	-0.27
71	74.3169	0.788	6.88	6.93	6.42	0.05	-0.51
72	74.3329	0.795	6.82	6.93	6.55	0.11	-0.38
73	74.3558	0.804	6.85	6.86	6.42	0.01	-0.44
74	74.3724	0.810	6.88	6.92	6.51	0.04	-0.41
75	74.9030	0.023	8.79	9.15	8.75	0.36	-0.40
76	74.9072	0.024	8.62	8.95	8.66	0.33	-0.29
77	74.9121	0.026	8.57	8.85	8.91	0.28	0.06
78	74.9154	0.028	8.42	8.66	8.67	0.24	0.01
79	74.9197	0.029	8.43	8.67	8.42	0.24	-0.25
80	74.9233	0.031	8.26	8.45	8.40	0.19	-0.05
81	74.9267	0.032	8.20	8.41	8.36	0.21	-0.05
82	74.9306	0.034	8.09	8.26	8.41	0.17	0.15
83	74.9342	0.035	8.06	8.18	8.24	0.12	0.06
84	74.9385	0.037	8.06	8.19	8.08	0.13	-0.11
85	74.9424	0.038	7.84	7.95	7.90	0.11	-0.05
86	74.9475	0.041	7.74	7.84	7.97	0.10	0.13
87	74.9794	0.053	7.34	7.37	7.34	0.03	-0.03
88	74.9833	0.055	7.30	7.33	6.91	0.03	-0.42
89	74.9871	0.056	7.25	7.31	6.98	0.06	0.33
90	74.9906	0.058	7.18	7.20	6.71	0.02	-0.49
91	74.9953	0.060	7.16	7.17	6.67	0.01	-0.50

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
92	75.0001	0.062	7.13	7.17	6.65	0.04	-0.52
93	75.0071	0.064	7.09	7.13	6.60	0.04	-0.53
94	77.0434	0.881	6.88	6.90	6.34	0.02	-0.56
95	77.0725	0.893	6.90	6.95	6.40	0.05	-0.55
96	77.0808	0.896	6.89	6.94	6.40	0.05	-0.54
97	77.0962	0.902	6.90	6.93	6.51	0.03	-0.42
98	77.1023	0.905	6.91	6.94	6.48	0.03	-0.46
99	77.1072	0.907	6.90	6.94	6.50	0.04	-0.44
100	77.1135	0.909	6.91	6.95	6.51	0.04	-0.44
101	77.1183	0.911	6.92	6.95	6.55	0.03	-0.40
102	77.1246	0.914	6.90	6.94	6.57	0.04	-0.37
103	77.1327	0.917	6.88	6.96	6.65	0.08	-0.31
104	77.1376	0.919	6.94	6.99	6.66	0.05	-0.33
105	77.1424	0.921	7.02	7.06	6.60	0.04	-0.46
106	77.1465	0.923	6.93	6.99	6.55	0.06	-0.44
107	77.1515	0.925	6.96	6.97	6.52	0.01	-0.45
108	77.1565	0.927	7.00	7.06	6.59	0.06	-0.47
109	77.1628	0.929	7.01	7.05	6.60	0.04	-0.45
110	77.1669	0.931	7.03	7.10	6.63	0.07	-0.47
111	77.1746	0.934	7.04	7.11	6.64	0.07	-0.47
112	77.1847	0.938	7.37	7.66	6.94	0.29	-0.72
113	77.1902	0.940	7.34	7.62	7.09	0.28	-0.53
114	77.1959	0.942	7.34	7.72	6.99	0.38	-0.73
115	77.2003	0.944	7.56	7.86	7.48	0.30	-0.38
116	77.2095	0.948	7.62	7.89	7.36	0.27	-0.33
117	77.2144	0.950	7.62	7.89	7.87	0.27	-0.02
118	77.2190	0.952	7.74	8.06	7.83	0.32	-0.23
119	77.2239	0.954	7.79	8.10	8.26	0.31	0.16
120	77.2295	0.956	7.85	8.24	8.14	0.39	-0.10
121	77.2344	0.958	7.98	8.30	8.74	0.32	0.44
122	77.2384	0.959	8.06	8.37	8.55	0.31	0.18
123	77.2435	0.961	7.97	8.35	8.44	0.38	0.09
124	77.2476	0.963	8.08	8.79	9.08	0.71	0.29
125	79.0801	0.698	6.76	6.86	6.27	0.10	-0.59
126	79.1064	0.709	6.71	6.82	6.26	0.11	-0.56
127	79.1286	0.718	6.78	6.84	6.30	0.06	-0.54
128	79.1542	0.728	6.80	6.81	6.29	0.01	-0.52
129	79.1735	0.736	6.72	6.74	6.31	0.02	-0.43
130	79.1951	0.744	6.80	6.85	6.35	0.05	-0.50
131	79.2118	0.751	6.79	6.81	6.35	0.02	-0.46
132	79.2428	0.764	6.83	6.84	6.26	0.01	-0.58
133	79.2576	0.770	6.84	6.89	6.30	0.05	-0.59
134	79.2848	0.781	6.80	6.85	6.34	0.05	-0.51
135	79.3007	0.787	6.84	6.92	6.37	0.08	-0.55
136	79.3257	0.797	6.85	6.89	6.40	0.04	-0.49
137	79.3403	0.803	6.83	6.88	6.27	0.05	-0.61

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
138	79.3709	0.815	6.84	6.89	6.27	0.05	-0.62
139	91.9678	0.868	6.88	6.92	6.38	0.04	-0.54
140	91.9894	0.876	6.89	6.92	6.32	0.03	-0.60
141	92.0127	0.886	6.90	6.94	6.34	0.04	-0.60
142	92.0509	0.901	6.92	6.94	6.42	0.02	-0.52
143	92.0728	0.910	6.91	6.96	6.45	0.05	-0.51
144	92.0813	0.913	6.87	6.97	6.46	0.10	-0.51
145	92.0889	0.916	6.89	6.97	6.46	0.08	-0.51
146	92.1190	0.928	6.89	6.96	6.61	0.10	-0.35
147	95.9344	0.459	6.77	6.79	6.39	0.02	-0.40
148	95.9462	0.464	6.81	6.83	6.45	0.02	-0.38
149	95.9558	0.468	6.84	6.87	6.47	0.03	-0.40
150	95.9899	0.481	6.81	6.83	6.40	0.02	-0.43
151	95.9960	0.484	6.89	6.91	6.38	0.02	-0.53
152	96.0049	0.487	6.84	6.88	6.40	0.04	-0.48
153	96.0126	0.490	6.84	6.87	6.40	0.03	-0.47
154	96.0208	0.493	6.87	6.92	6.44	0.05	-0.48
155	96.0299	0.497	6.83	6.87	6.38	0.04	-0.49
156	96.0383	0.501	6.87	6.89	6.42	0.02	-0.47
157	96.0473	0.504	6.93	6.93	6.58	0.00	-0.35
158	96.0751	0.515	6.95	6.95	6.49	0.00	-0.46
159	96.1050	0.527	6.93	6.92	6.61	-0.01	-0.31
160	96.1270	0.536	6.90	6.93	6.50	0.03	-0.43
161	103.9824	0.687	6.85	6.90	6.66	0.05	-0.24
162	104.0113	0.698	6.92	6.96	6.60	0.04	-0.36
163	104.0350	0.708	6.84	6.93	6.46	0.09	-0.47
164	104.0544	0.716	6.81	6.86	6.53	0.05	-0.33
165	104.0713	0.722	6.77	6.97	6.48	0.20	-0.49
166	104.0990	0.734	6.74	6.81	6.42	0.07	-0.39
167	104.1563	0.757	6.80	6.96	6.42	0.16	-0.54
168	104.1796	0.766	6.78	6.89	6.59	0.11	-0.30
169	104.2005	0.774	6.86	6.88	6.55	0.02	-0.33
170	109.9016	0.061	7.17	7.23	6.60	0.06	-0.63
171	109.9099	0.064	7.09	7.13	6.64	0.04	-0.49
172	109.9178	0.068	7.02	7.06	6.62	0.04	-0.44
173	109.9536	0.082	6.89	6.91	6.43	0.02	-0.48
174	109.9899	0.097	6.87	6.91	6.51	0.04	-0.40
175	179.9912	0.175	6.74	6.77	6.17	0.03	-0.60
176	180.0438	0.196	6.73	6.76	6.37	0.03	-0.39
177	180.0859	0.213	6.72	6.75	6.27	0.03	-0.48
178	180.1278	0.230	6.81	6.75	6.20	-0.06	-0.55
179	180.1421	0.235	6.80	6.82	6.30	0.02	-0.52
180	180.1838	0.252	6.77	6.85	6.25	0.08	-0.60
181	180.2072	0.262	6.78	6.85	6.21	0.07	-0.64
182	180.2535	0.280	6.77	6.73	6.02	-0.04	-0.71
183	184.0151	0.789	6.91	6.98	6.40	0.07	-0.58

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
184	184.0422	0.800	6.86	6.91	6.60	0.05	-0.41
185	184.0767	0.814	6.86	6.83	6.48	-0.03	-0.35
186	184.1047	0.825	6.82	6.81	6.48	-0.01	-0.33
187	184.1324	0.836	6.88	6.91	6.56	0.03	-0.35
188	184.1583	0.846	6.88	6.87	6.51	-0.01	-0.36
189	184.1753	0.853	6.96	6.99	6.50	0.03	-0.49
190	184.1988	0.863	6.89	6.97	6.44	0.08	-0.53
191	184.2416	0.880	6.89	6.84	6.75	-0.05	-0.09
192	184.2624	0.888	6.97	6.94	6.70	-0.03	-0.24
193	185.0060	0.185	6.81	6.85	6.31	0.04	-0.54
194	185.0229	0.192	6.84	6.88	6.44	0.04	-0.44
195	185.0415	0.199	6.79	6.76	6.56	-0.03	-0.30
196	185.0676	0.210	6.76	6.73	6.48	-0.03	-0.25
197	185.0837	0.216	6.79	6.83	6.66	0.04	-0.27
198	185.1031	0.224	6.74	6.75	6.56	0.01	-0.19
199	185.1267	0.234	6.74	6.76	6.41	0.02	-0.25
200	185.1476	0.242	6.76	6.78	6.28	0.02	-0.50
201	185.1696	0.251	6.80	6.81	6.34	0.01	-0.47
202	185.1993	0.263	6.76	6.77	6.24	0.01	-0.53
203	202.0214	0.012	9.20	9.74	10.38	0.54	0.64
204	202.0325	0.016	9.16	9.70	10.08	0.54	0.38
205	202.0408	0.019	9.07	9.55	9.76	0.48	0.21
206	202.0848	0.037	7.92	8.07	7.69	0.15	-0.38
207	202.1107	0.047	7.57	7.68	6.95	0.11	-0.73
208	202.1174	0.050	7.46	7.52	6.97	0.06	-0.55
209	202.1267	0.054	7.41	7.46	6.75	0.05	-0.71
210	202.1365	0.058	7.25	7.26	6.82	0.01	-0.44
211	202.1454	0.061	7.17	7.20	6.64	0.03	-0.56
212	202.1577	0.066	7.08	7.20	6.53	0.12	-0.67
213	202.1671	0.070	7.04	7.15	6.42	0.11	-0.73
214	202.1769	0.074	6.94	6.92	6.30	-0.02	-0.62
215	202.2156	0.089	6.91	6.87	6.38	-0.04	-0.49
216	202.2256	0.093	6.78	6.82	6.22	0.04	-0.60
217	202.2510	0.104	6.88	6.83	6.42	-0.05	-0.41
218	221.9780	0.015	9.09	9.82	9.68	0.73	-0.14
219	221.9846	0.018	9.07	9.76	9.10	0.69	-0.66
220	221.9921	0.021	9.00	9.69	9.36	0.69	-0.33
221	221.9984	0.023	8.80	9.36	8.91	0.56	-0.55
222	222.0184	0.031	8.35	8.60	7.86	0.25	-0.74
223	222.0260	0.034	8.13	8.34	7.53	0.21	-0.81
224	222.0408	0.040	7.88	8.02	7.57	0.14	-0.45
225	222.0474	0.043	7.73	7.85	7.30	0.12	-0.55
226	222.0537	0.045	7.57	7.70	7.11	0.13	-0.59
227	222.0583	0.047	7.52	7.61	7.13	0.09	-0.48
228	222.0646	0.049	7.47	7.56	7.07	0.09	-0.49
229	222.0715	0.052	7.40	7.40	6.92	0.00	-0.48

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
230	222.0973	0.063	7.01	7.01	6.50	0.00	-0.51
231	222.1042	0.065	6.99	7.02	6.47	0.03	-0.55
232	222.1119	0.069	6.96	6.96	6.43	0.00	-0.53
233	222.1181	0.071	6.91	6.87	6.40	-0.04	-0.47
234	222.1248	0.074	6.93	6.94	6.47	0.01	-0.47
235	222.1328	0.077	6.89	6.90	6.38	0.01	-0.52
236	222.1397	0.080	6.84	6.85	6.31	0.01	-0.54
237	222.1464	0.082	6.87	6.74	6.38	-0.13	-0.36
238	222.1516	0.084	6.77	6.79	6.36	0.02	-0.43
239	274.0731	0.911	6.88	6.91	6.49	0.03	-0.42
240	274.0808	0.914	6.87	6.92	6.47	0.05	-0.45
241	274.1156	0.928	6.90	6.91	6.71	0.01	-0.20
242	274.1315	0.935	7.15	7.16	6.81	0.01	-0.35
243	274.1391	0.938	7.20	7.33	6.64	0.13	-0.69
244	274.1587	0.946	7.29	7.51	6.80	0.22	-0.71
245	274.1885	0.957	7.62	7.89	7.03	0.27	-0.86
246	274.1988	0.962	7.83	8.12	7.26	0.29	-0.86
247	274.2105	0.966	8.10	8.50	7.84	0.40	-0.66
248	274.2355	0.976	8.85	8.95	9.32	0.10	0.37
249	274.2509	0.983	9.11	9.47	10.32	0.36	0.85
250	274.2589	0.986	9.13	9.71	10.22	0.58	0.51
251	274.2706	0.990	9.15	9.74	10.70	0.59	0.96
252	274.2831	0.996	9.12	9.72	10.44	0.60	0.72
253	353.9549	0.954	7.67	7.83	6.95	0.16	-0.88
254	353.9604	0.956	7.65	8.00	6.90	0.35	-1.10
255	353.9715	0.961	7.83	8.08	7.49	0.25	-0.59
256	353.9792	0.964	8.06	8.40	7.93	0.34	-0.47
257	353.9896	0.968	8.23	8.67	8.10	0.44	-0.57
258	354.0042	0.974	8.52	9.19	10.24	0.67	1.05
259	354.0208	0.981	8.87	9.56	10.03	0.69	0.47
260	354.0313	0.985	8.99	9.73	10.40	0.74	0.67
261	354.0417	0.989	9.12	9.79	10.49	0.67	0.70
262	354.0524	0.993	9.21	9.73	10.69	0.52	0.96
263	354.0625	0.997	9.20	9.85	10.68	0.65	0.83
264	354.0729	0.001	9.20	9.86	10.58	0.66	0.72
265	354.0833	0.006	9.15	9.76	10.25	0.61	0.49
266	354.0938	0.010	9.06	9.79	10.17	0.73	0.38
267	354.1042	0.014	9.06	9.74	10.18	0.68	0.44
268	354.1146	0.018	9.07	9.69	10.16	0.62	0.47
269	354.1250	0.022	8.76	9.31	9.02	0.55	-0.29
270	354.1354	0.027	8.49	8.97	8.45	0.48	-0.52
271	354.1458	0.031	8.19	8.58	8.08	0.39	-0.50
272	398.8767	0.973	8.20	8.47	7.74	0.27	-0.73
273	398.8835	0.976	8.36	8.72	8.05	0.36	-0.67
274	398.8910	0.979	8.56	9.01	8.51	0.45	-0.50
275	398.8976	0.982	8.69	9.25	8.90	0.56	-0.35

表4-1 U Cep の観測値 (続き)

No.	Hel. JD	Phase	V _{mag}	B _{mag}	U _{mag}	B - V	U - B
	+2446000						
276	398.9047	0.984	8.78	9.46	9.08	0.68	-0.38
276	398.9098	0.986	8.88	9.75	9.50	0.87	-0.25
278	398.9187	0.990	9.05	9.97	9.43	0.92	-0.54
279	398.9281	0.994	9.27	10.20	10.86	0.93	0.66
280	398.9594	0.006	9.14	10.16	10.38	1.02	0.22
281	398.9695	0.010	9.05	9.61	8.68	0.56	-0.93
282	398.9903	0.019	8.92	9.74	9.26	0.82	-0.48
283	399.0007	0.023	8.68	9.20	8.63	0.52	-0.57
284	399.0111	0.027	8.45	8.82	8.29	0.37	-0.53
285	399.0217	0.031	8.19	8.27	8.13	0.08	-0.14
286	399.0322	0.036	8.00	8.13	7.53	0.13	-0.60

V
等
級

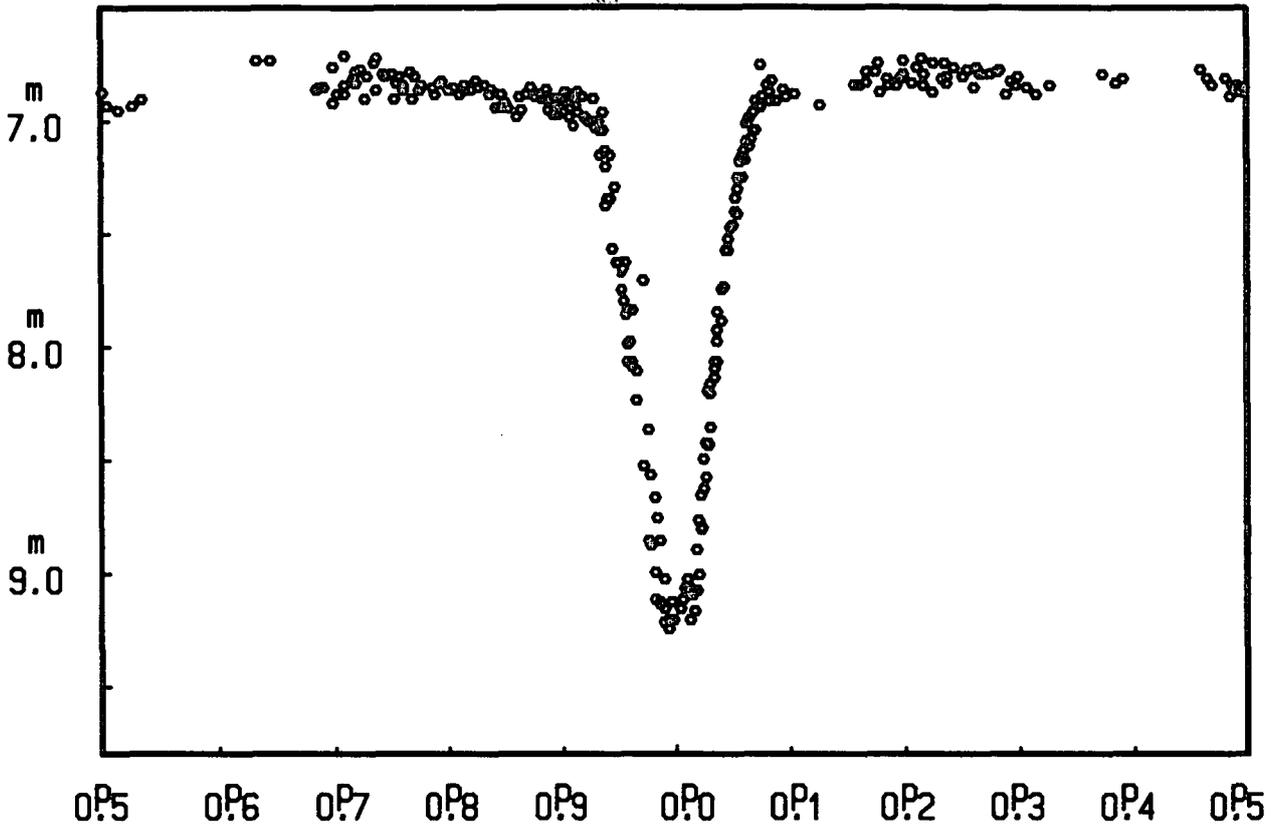


圖4-1 V 等級光度曲線

B
等
級

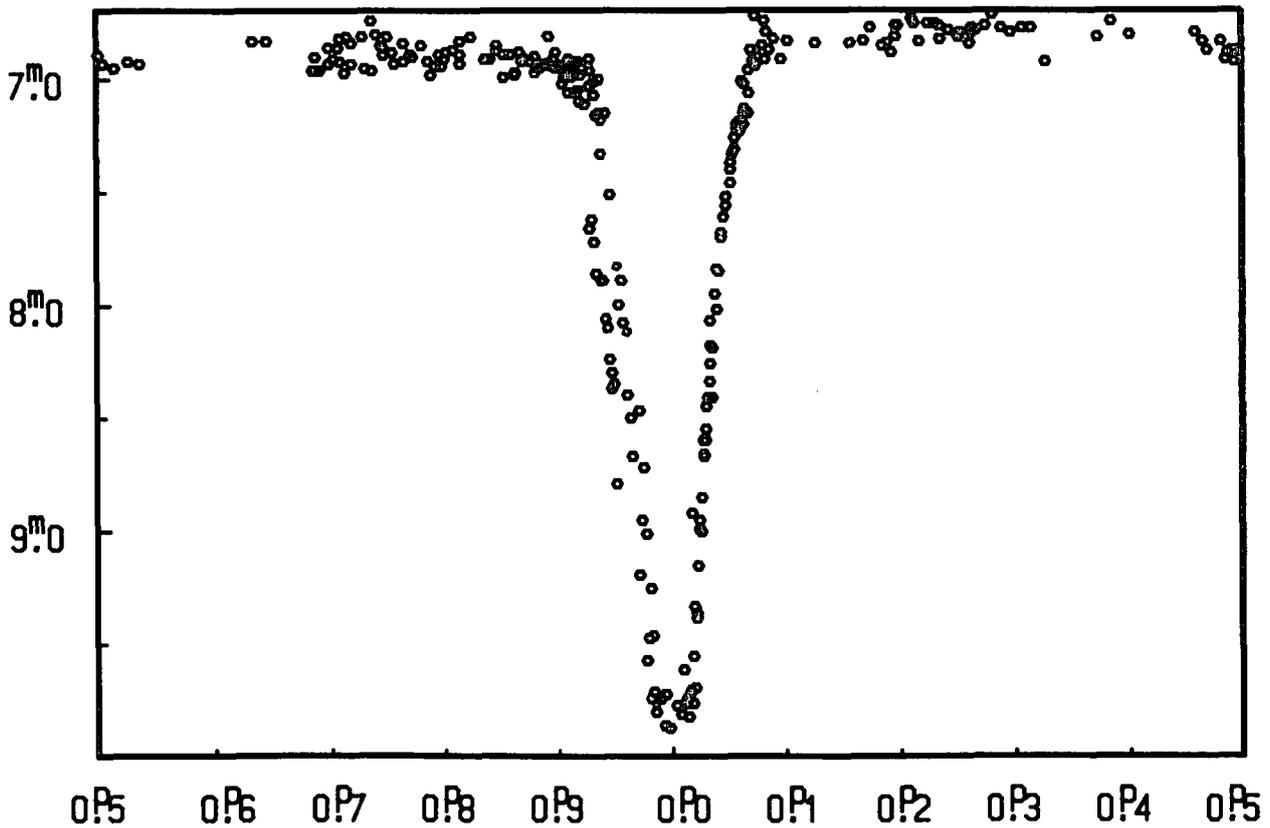


圖4-2 B 等級光度曲線

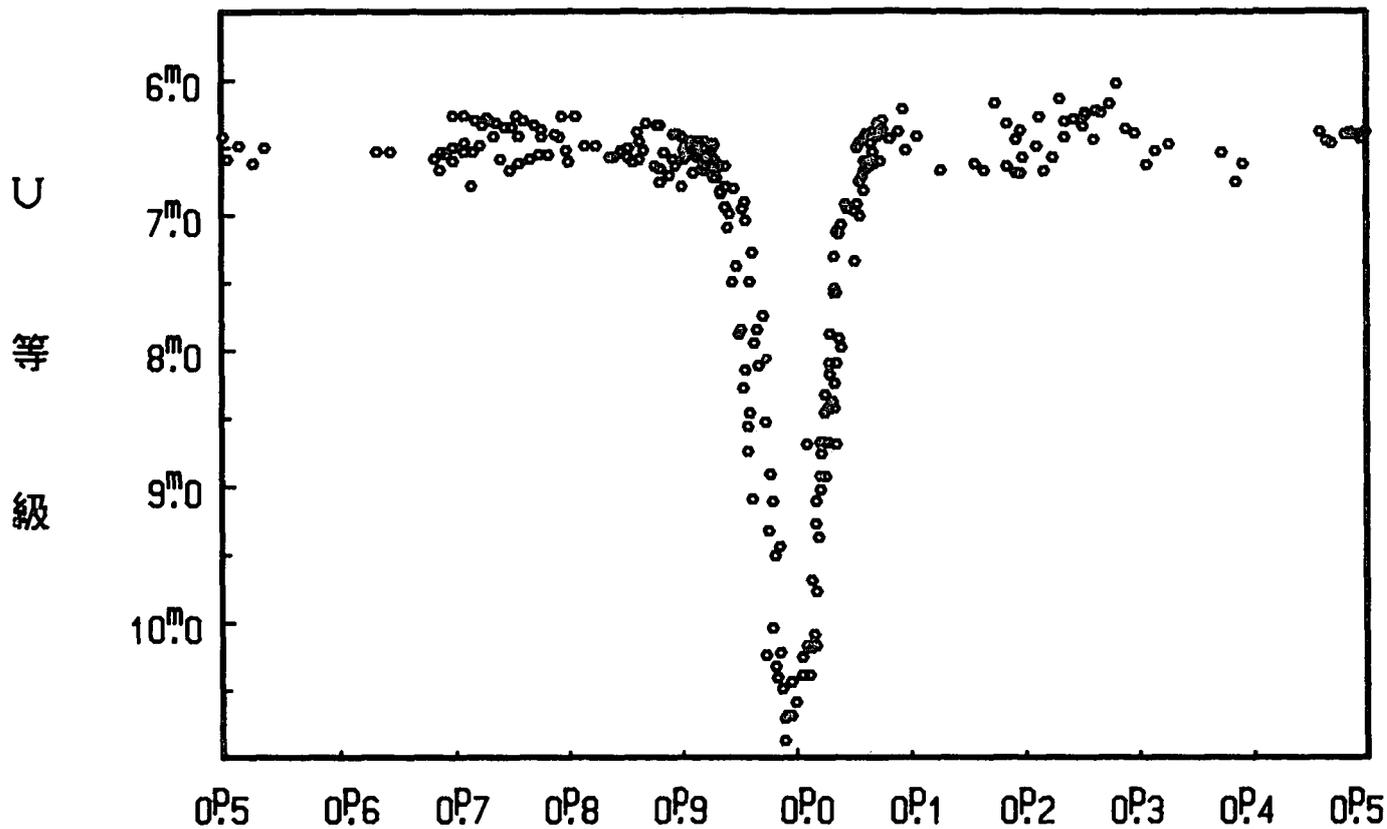


図4-3 U等級光度曲線

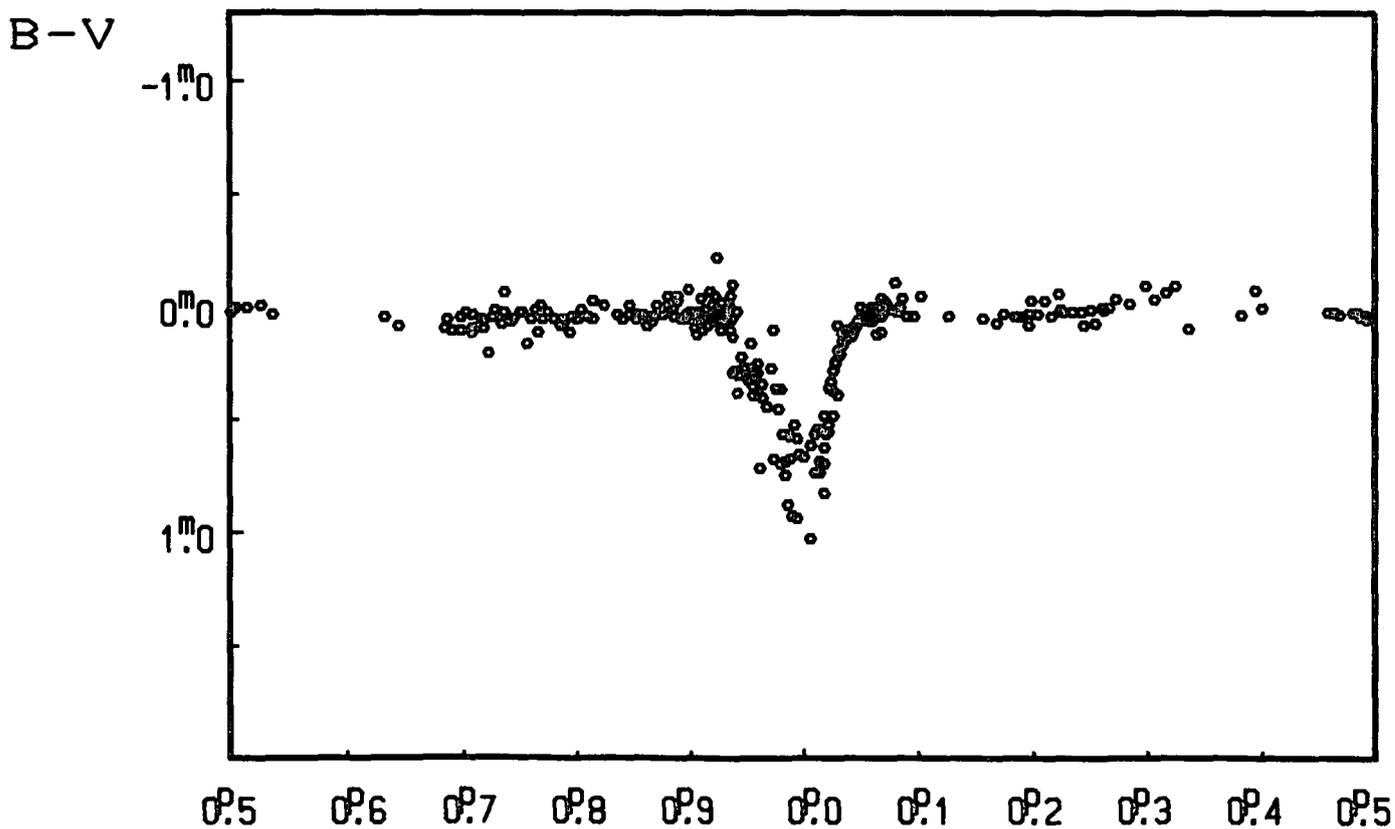


図4-4 (B-V) の変化

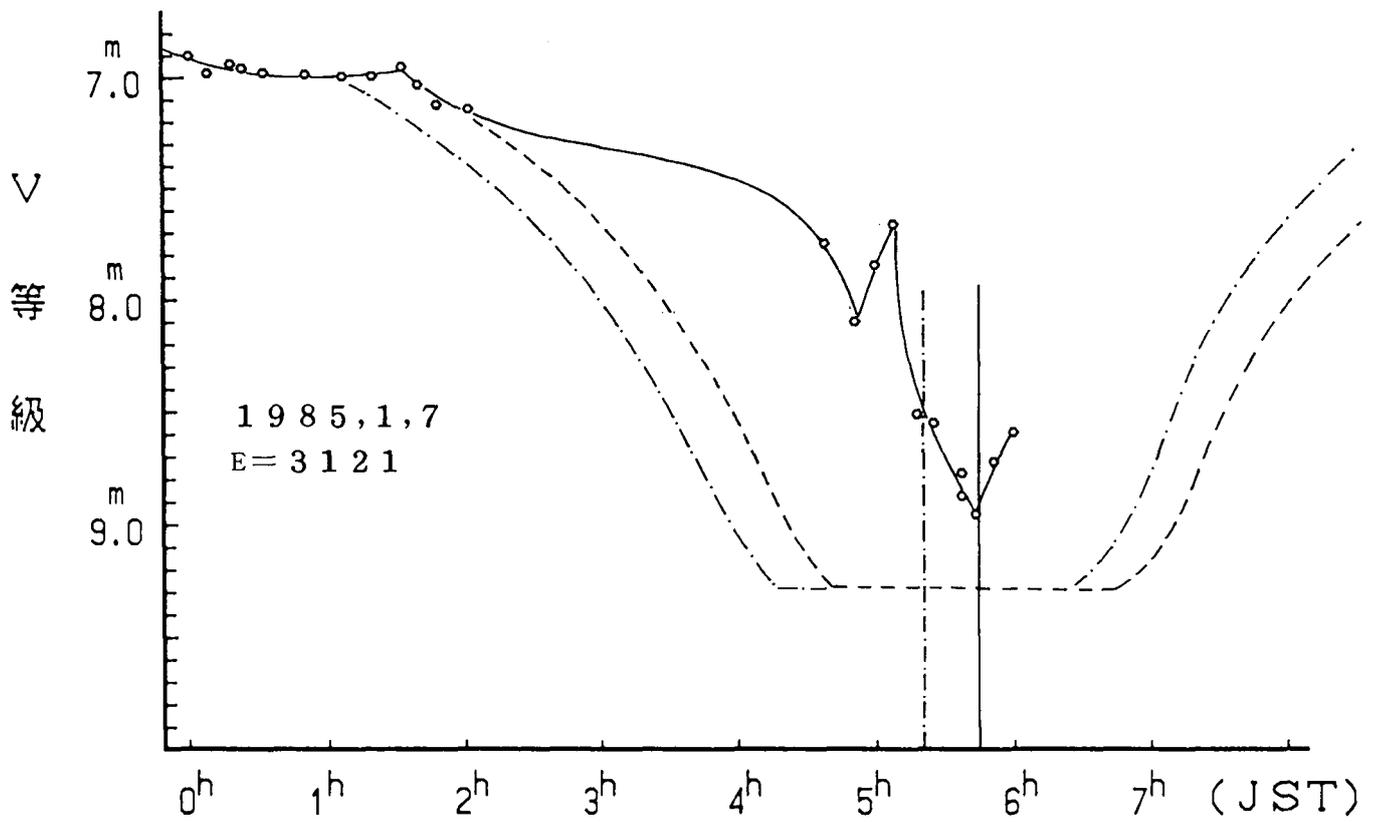


図4-5 主極小付近の光度変化

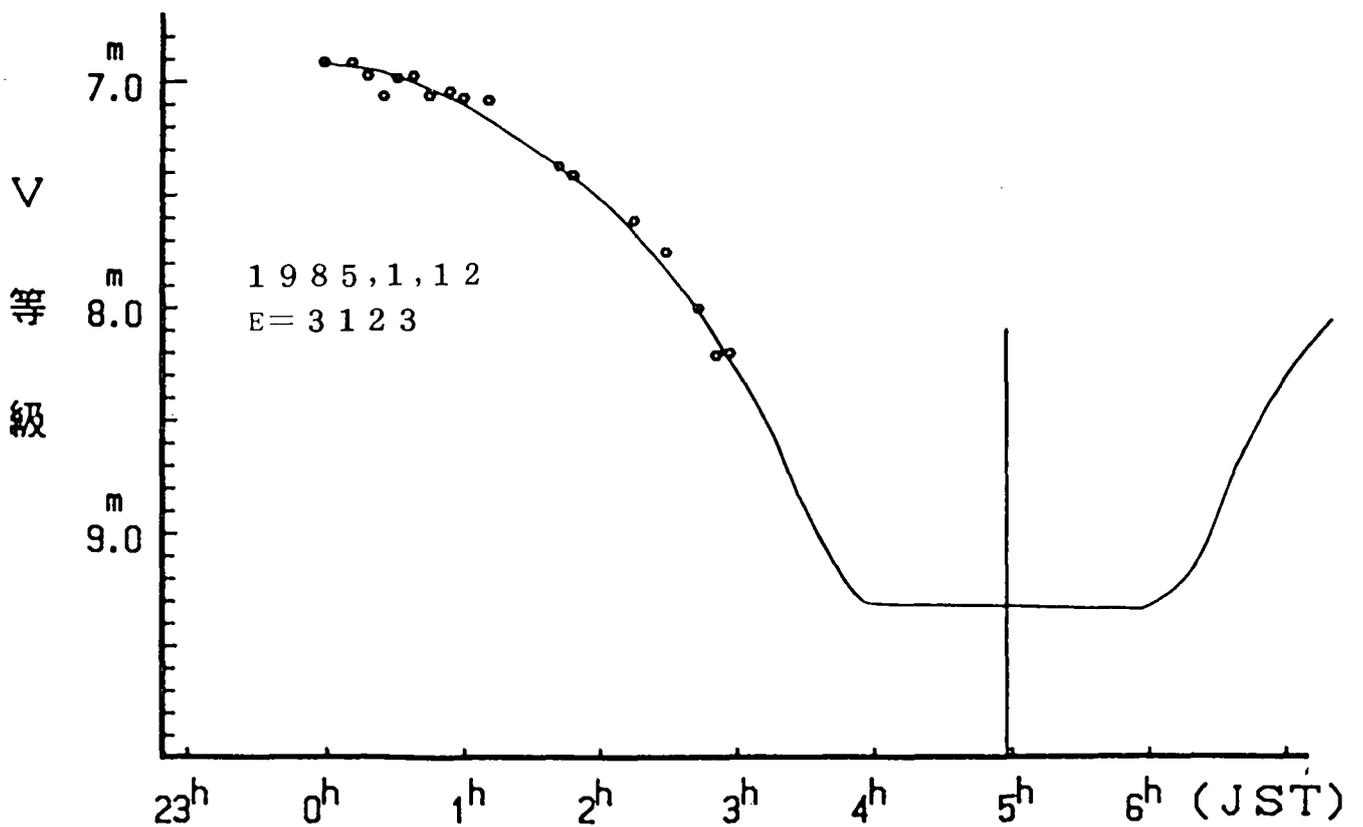


図4-6 主極小付近の光度変化

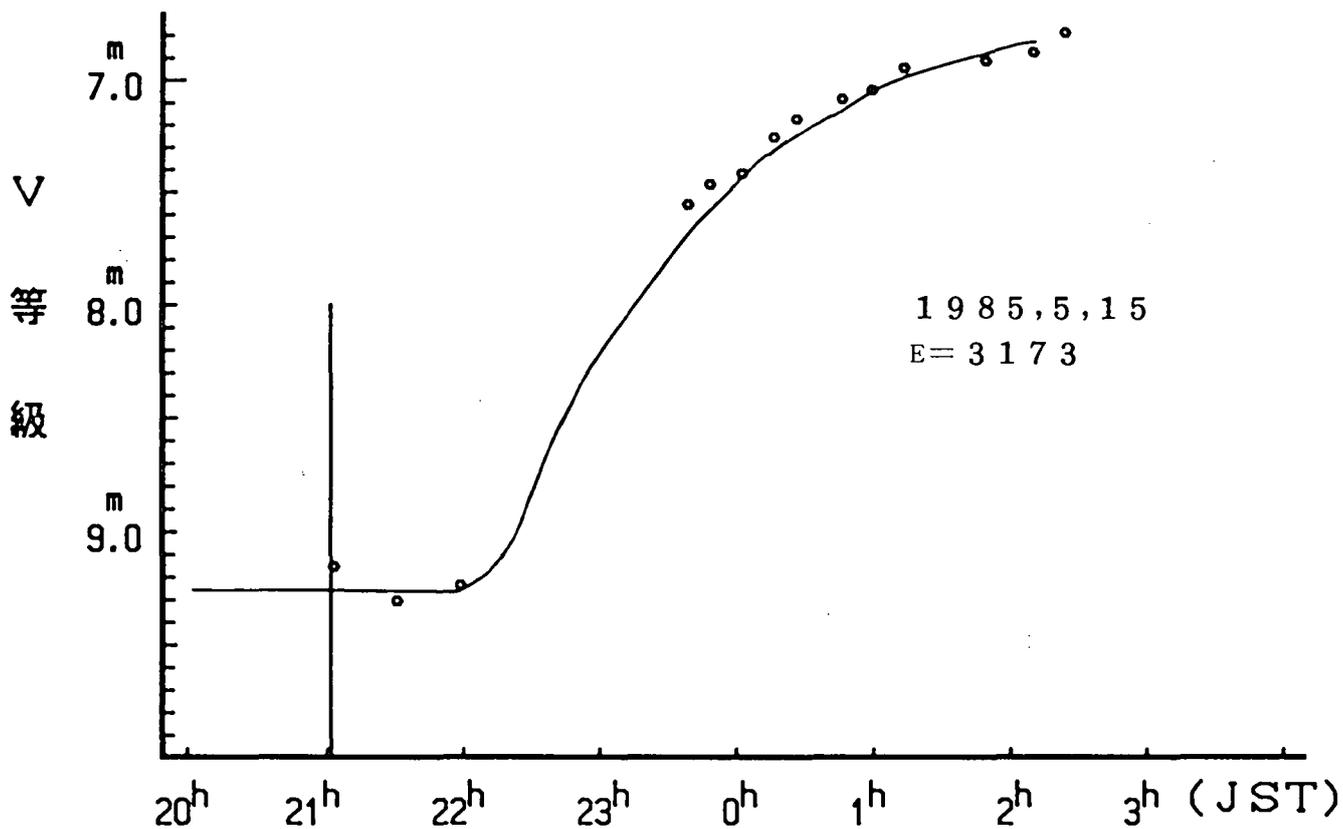


図4-7 主極小付近の光度変化

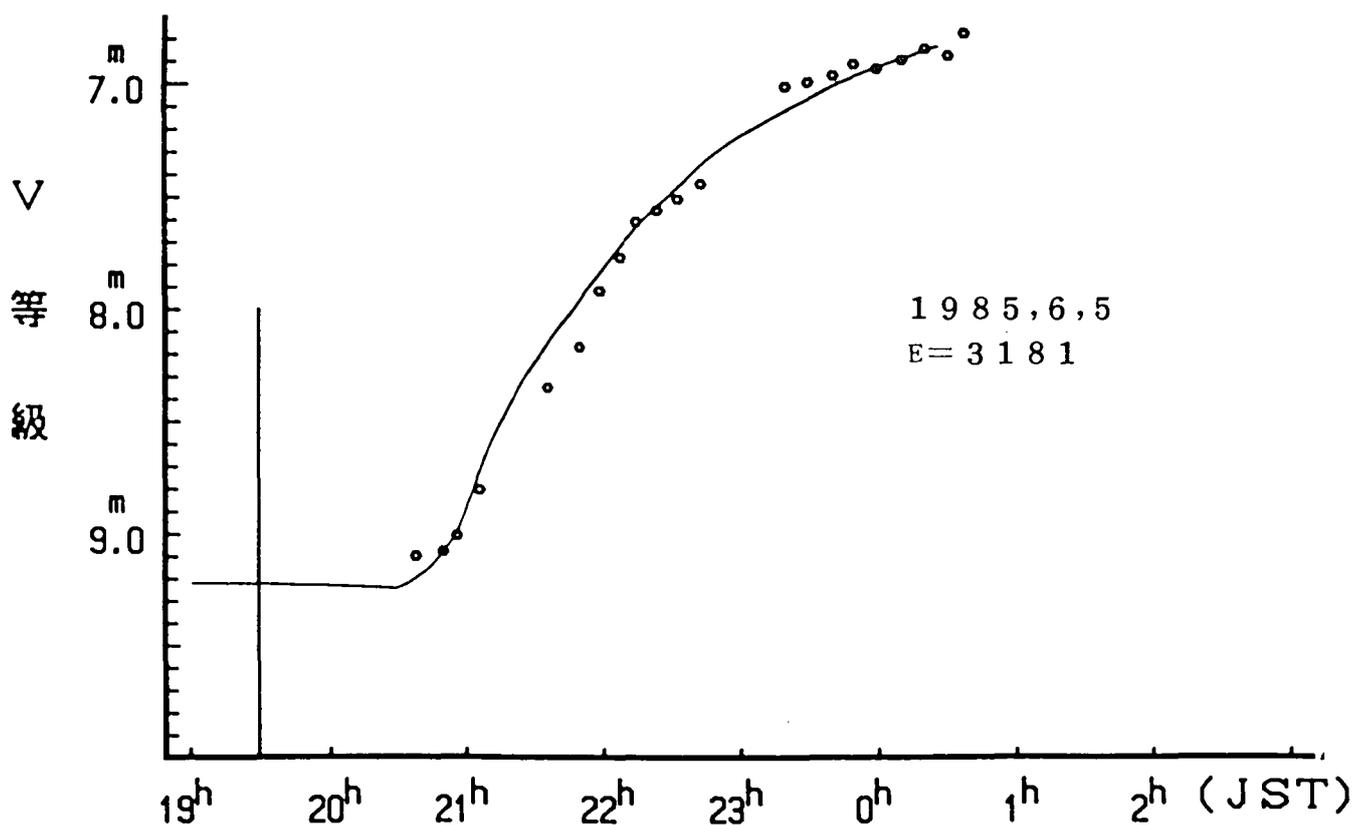


図4-8 主極小付近の光度変化

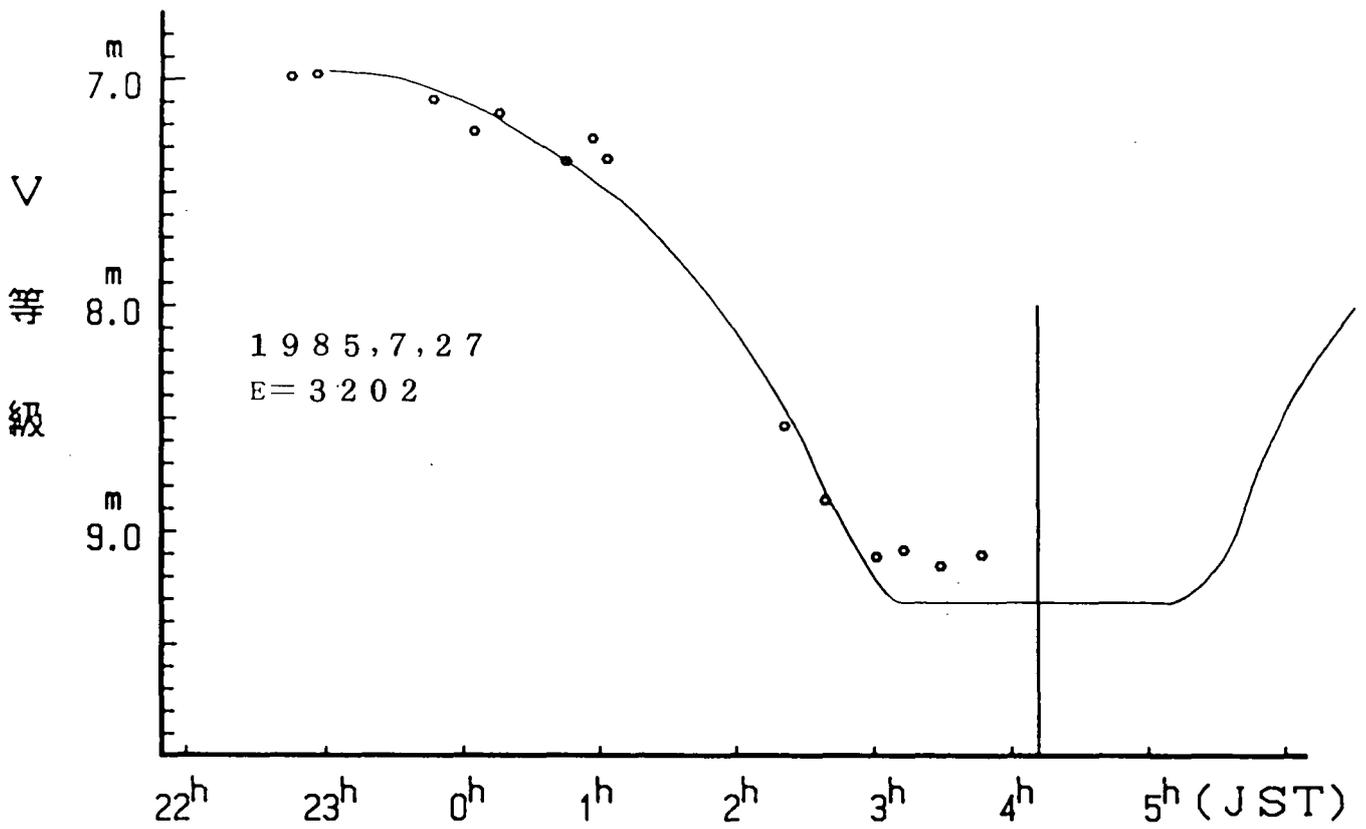


図4-9 主極小付近の光度変化

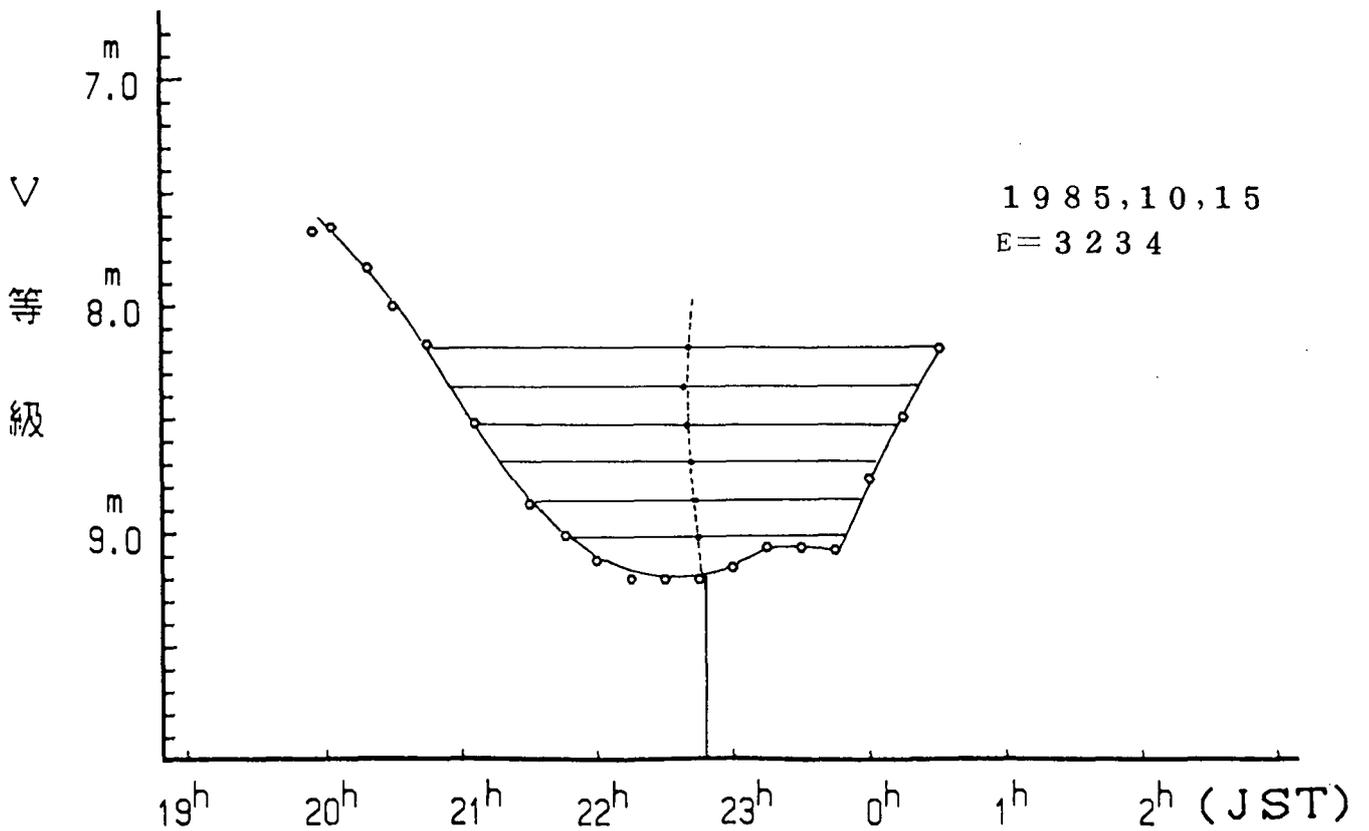


図4-10 主極小付近の光度変化

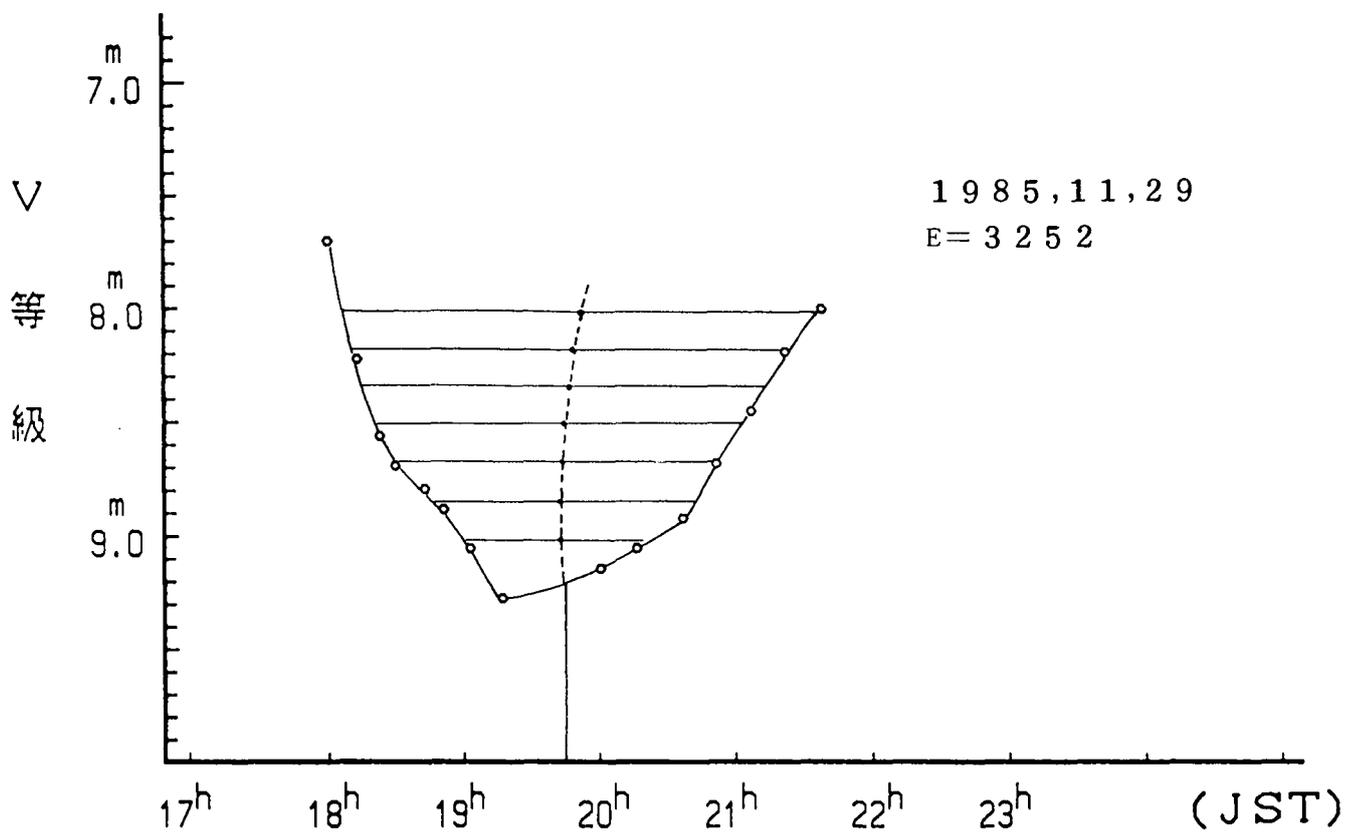


図4-11 主極小付近の光度変化

(5) 結果の考察

(a) 光度曲線と B - V 曲線

図 4 - 1、図 4 - 2、図 4 - 3 の光度曲線を見ると、主極小が深く、食の右肩の部分（第 4 接触）が左肩の部分（第 1 接触）よりも約 0.1 等級明るいことが分かる。その主極小の深さは、U、B、V 等級の順に浅くなっており、それぞれ 4、3、2 等級程度の大きさである。

非対象な光度曲線となる原因は、伴星から主星へ移動する大気のためであるとする Struve (1944) の説が広く受け入れられている (Batten, 1979)。図 4 - 4 を見ても、第 1 接触から主極小にかけての下降部は B - V の観測値のばらつきが大きい。これに対し、第 4 接触付近の上昇部はばらつきが小さい。図 4 - 12、図 4 - 13、図 4 - 14 でも、主極小に至るまでの下降部の経路は観測日によって異なるが、上昇部の経路はほとんど一致している。つまり、伴星の公転方向には、Struve (1944) の指摘した大気の流しが存在しているために、光度曲線の下降部がばらつくといえる。

この伴星は、2 時間ほど平坦な主極小が続く皆既食を起している。従って、伴星の公転軌道が地球からの視線方向に対して 90° 近く傾斜していることと、伴星の半径が主星半径よりもかなり大きいといえる。皆既食中は伴星の光を観測しており、このときの絶対等級と色指数から U Cep の伴星が主系列星ではなく、巨星 (G8 型) であることが分かる。

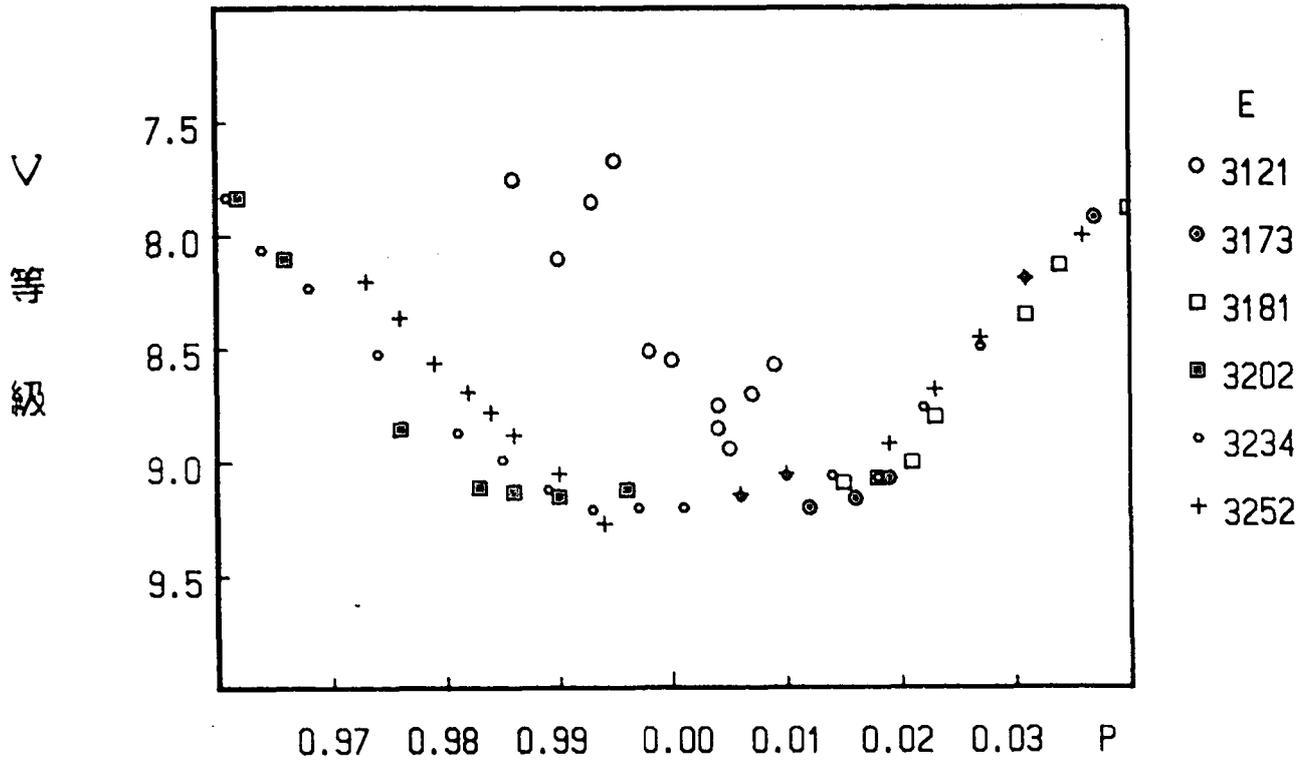


図4-12 皆既食中のV等級変化

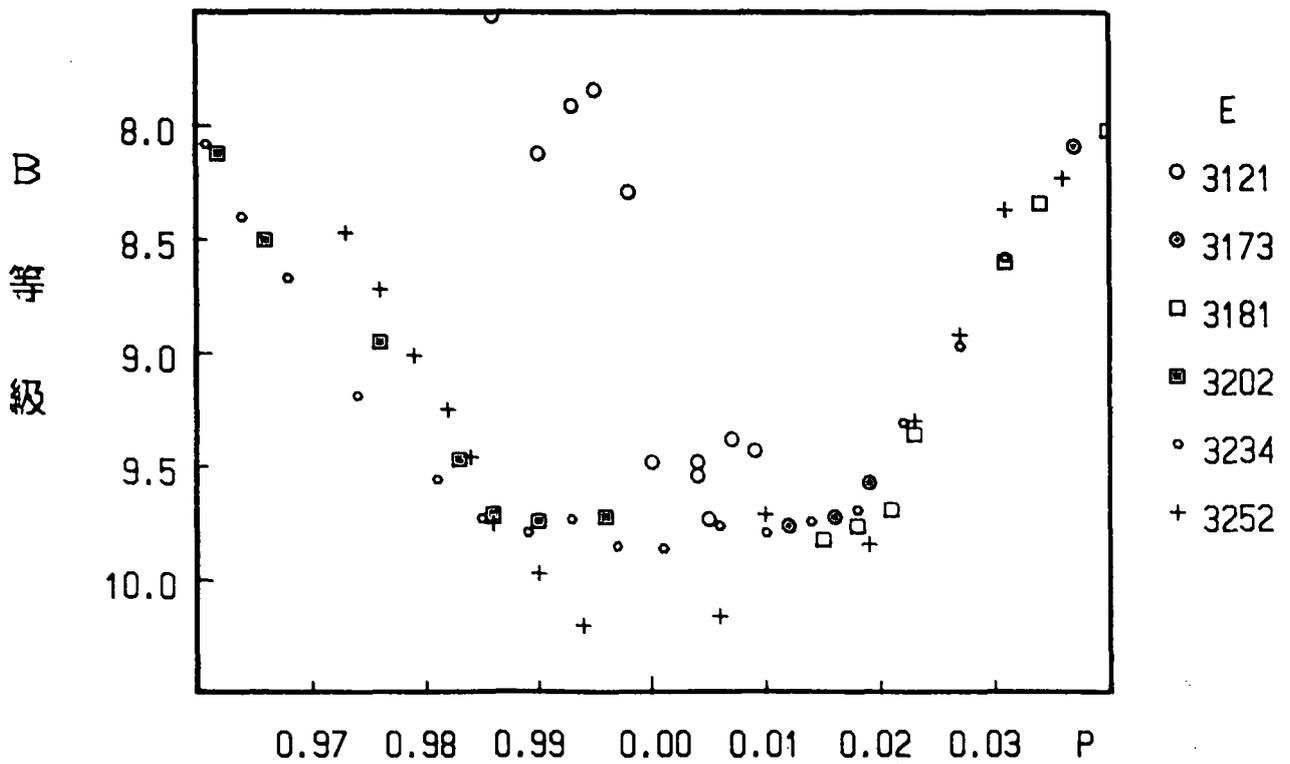


図4-13 皆既食中のB等級変化

(b) E = 3121 (1985年1月7日) の食について

図4-12、図4-13、図4-14を見ると、観測された食の中で E = 3121 の食が他の食と大きく異なっている。第1接触から皆既食に至る間が2時間ほど観測できなかつたためと、光度曲線の下降部が複雑な変化を示しているために典型的な食の光度曲線(表3-3)のフィッティングが困難であった。しかし、6.9等付近からのゆるやかな明るさの減少は他の食の第1接触と変わりはなく、この部分を基準にして表3-3の光度曲線を重ね合わせたのが図4-5の破線である。

下降部の観測値にフィッティングを行うとすれば、その主極小時刻は破線のフィッティングで得た主極小時刻より1.4時間ほど遅れることになる。また、U Cep の周期は約2.493日であり、正常な食においては、5日後(2公転後)の食の主極小は20分ほど早い時刻(JST)に観測される。そこで、E = 3123 の主極小時刻から20分遅らせた位置を主極小時刻(光度曲線の中央値)として、表3-3の光度曲線をフィッティングしたのが図4-5の1点破線である。この光度曲線の位置をみても、下降部の観測値には表3-3の正常な食の光度曲線をフィッティングできない。

破線のフィッティングが正しいとすれば、この食は正常な食(破線)に比べると光度の減少が遅い。さらに、この食には通常1.9時間継続する皆既食の部分が見られなかつたようであり、主星が伴星の裏側に回った皆既食中にも変光を続けていたこととなる。Olson (1976)によると、皆既食の短い食の原因は、ときどき起こるB7型主星への大規模なガスの落下と、それによって生じた熱白斑(hot spot)のためとされている。

熱白斑が生じる過程は、以下に示す太陽表面の白斑から考えることができる。白斑が他の光球面に比べて明るい原因については、次の3つの説がある。(例えば、平山、1981)。まず、白斑の部分がへこんでおり、光球の深いところ(温度が高い)が見えるため明るいとする説。第2は、光球表面に落下したガス流が重力のために加速度がつき、その運動エネルギーが熱に変換されるという説(ガス流下説)。第3は、白斑の下から磁気流体の波が磁力線に沿って来ると、白斑のところで波が碎けて熱に変換するという説。第2の説が最も観測事実と合致するが、落下するガスの持ち上げが問題となっている。また、白斑の上層は白斑彩層と呼ばれており、他の彩層よりも明るく分かれている。

近接連星のU Cepでは伴星から流し込むガスがあり、主星上に生じる熱白斑の存在をガス流下説で説明できる。さらに、熱白斑の上層には、彩層白斑の存在も考えられる。皆既食中に光度変化を示す問題も、この彩層白斑を観測した結果であれば、図4-5の破線のフィッティングは正しいといえる。以上の考察の結果、E=3121の食は正常な食とはいえず、U Cep上で大規模な質量移動が起きた可能性が考えられる食といえる。

(C)光度曲線における観測点のばらつきについて

観測値の確率誤差は、比較星の等級を決定した際のデータから検討した。このときの確率誤差は、比較星と標準星の観測値から、それぞれの標準偏差を計算し、その幾可平均を求めればよい(Henden and Kaitchuck, 1982)。計算の結果、V等級、B等級、U等級における確率誤差は、それぞれ ± 0.06 等、 ± 0.07 等、 ± 0.08 等であった。従って、比較星と変光星の等級差を求める場合も、この範囲の誤差が生じるといえる。しかし、この範囲を越える変化に関しては、U Cepの光度変化と考えられる。

図4-12を見ると、V等級における皆既食中の明るさは、ほぼ一定値を示す。しかし、図4-13、図4-14のB等級、U等級については、観測日によって皆既食中の明るさが変化している。特に、B等級光度曲線のE=3252の食では、他の観測値に比べて0.5等級ほど暗い。光度曲線の上昇部においては他の観測結果と一致するので、観測に伴う誤差とはいえない。Huffer and Code(1958)は皆既食中の光度を光電測光によって詳しく調べ、伴星自身の光度変化を指摘している。今回の観測結果にみられる観測値のばらつきは、この伴星の変光によるものと考えられる。また、図4-14のU等級のばらつきはかなり大きい。Hall(1972)は紫外(U等級)過剰の原因について、質量移動に伴う彩層活動の影響を論じている。Hallに従えば、U等級光度曲線は、この彩層活動の指標がもしれない。

図4-1、図4-2、図4-3の各光度曲線でも、食外の平坦部はかなりの変動がみられる。Hall and Walter(1974)は食外の解析を行い、hot spotによる増光の可能性を取り上げている。ただし、個々の観測点は観測日が異なり、Huffer and Code(1958)

の指摘した伴星の変光の影響も受けていると考えられる。

以上、光度曲線に見られた観測点のばらつきの原因には、伴星自身の変光と主星上に生じる hot spot の影響が考えられる。

(d) 周期変動について

7回の主極小時刻は表4-2に示した。第4欄は観測値Oと予報時刻Cの差をとったO-Cの値である。予報時刻Cは、次のKukarukinら(1969)の予報式(12)を使って計算した。EはU Cepの公転回数である。

$$\text{HJD}_{\min}(I) = 2438291^{\text{d}}.5020 + 2^{\text{d}}.4930410 \cdot E \quad (12)$$

O-C値で：は「異常な食」で不正確である。また、不等号の表示は光度曲線の底部が得られず、フィッティングの精度が悪いため考えらるる最小値を意味している。

表4-2の測定値をプロットしたのが、図4-15である。フィッティングをおこなった食については、▲の記号を用いて、他の観測結果(O印)と区別した。黒丸はCrawfordら(1981)が1980年までの観測値をまとめたものであり、X印はSato and Ito(1984)の写真測光による観測結果である。U Cepの周期が一定である場合、O-Cと公転回数Eは一次の関係となり、観測点は1本の直線上に乗る。U Cepに周期変動が生じれば、直線の傾きは変化する。

Sato and Ito(1984)は、観測結果がCrawfordら(1981)の観測値から予想されるもの(破線)より15分程度遅れていたことから、1980年11月から1983年4月の間にU Cepが周期変動を起こしたと結論した。

今回の観測結果の中で、E=3121の食は「異常な食」の可能性があり、その他の食の観測値はほぼ1本の直線上に乗る。そこで、E=3121の食を除いた6個の観測点に最小自乗法を使って直線を引いた。この直線は、E=3123の食からE=3252の食までのU

Cep の周期が一定であることを示している。さらに、この直線の延長上に Sato and Ito (1984) の観測値は乗らなかった。従って、1983年12月から1985年1月の間に、U Cep が新たに周期増加を起こしたことが分かる。また、Sato and Ito (1984) の観測結果から予想される周期(1点破線)と今回の観測結果を延長したもの(破線)の交点は、E = 3121の「異常な食」の付近にくる。この食に見られた光度曲線の異常は、周期変動に関係したものかもしれない。

なお、U Cep の主極小時刻は、理科年表1985年版の予報時刻(歴部 P.72)より1.5 ~ 2.0時間ほど遅れていた。また、図4-15の直線の傾きから求めた周期の増加量は1.27 day/cycle である。ケプラーの第3法則を用いて、この変動を起こすために伴星から主星へ流れる質量移動 ΔM を計算すると、 $\Delta M = 1.42 \times 10^{-4} M_{\odot}$ (太陽質量)であった。

表4-2 U Cep の (O - C)

公転回数 (E)	観測値 (O) +2446000	予報値 (C) +2446000	O - C day
3121	72.364	72.283	0.081
3123	77.334	77.269	> 0.065
3173	201.999	201.921	0.078
3181	221.935	221.865	> 0.070
3202	274.298	274.219	0.079
3234	354.078	353.996	0.082
3252	398.955	398.871	0.084

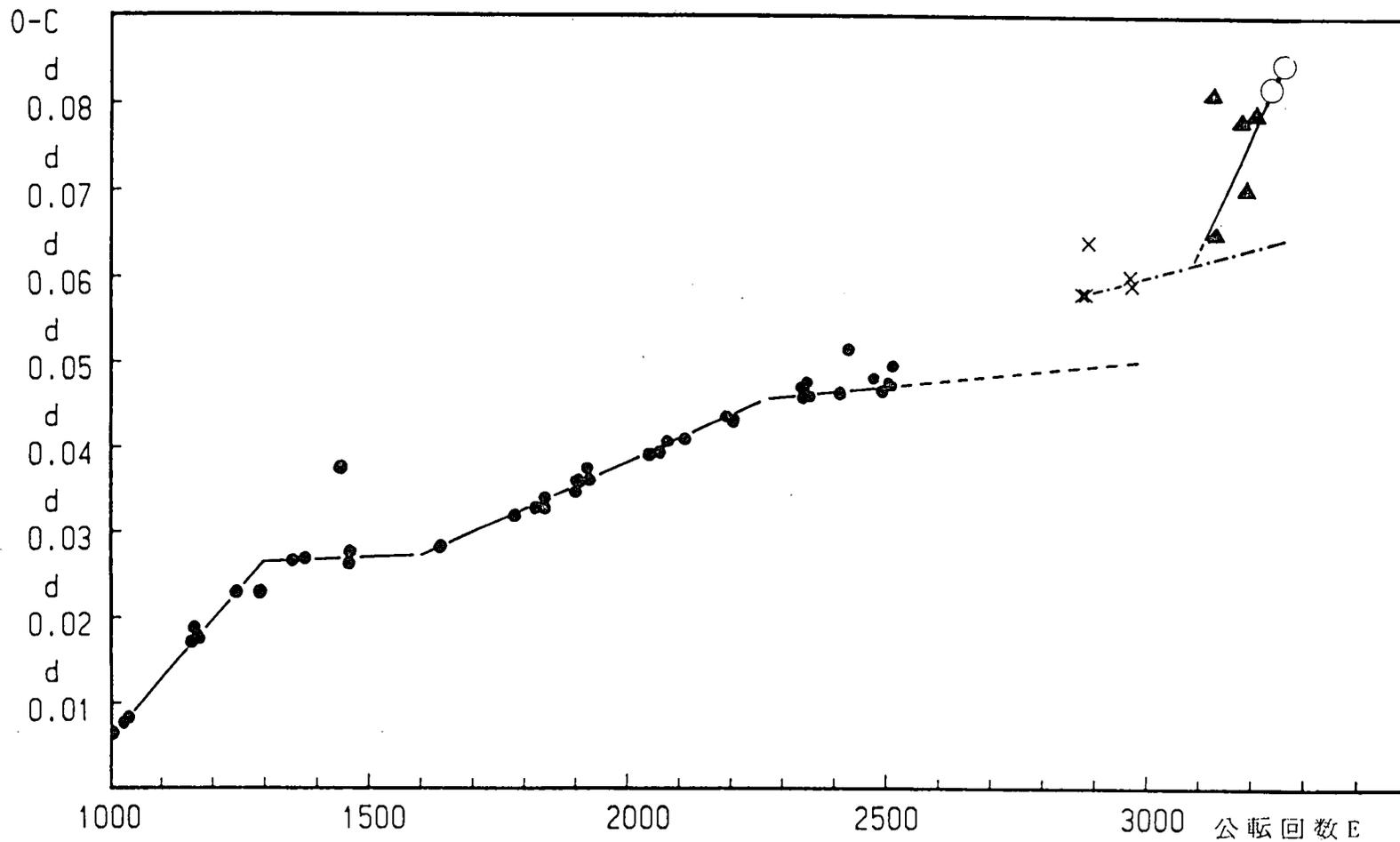


図 4 - 1 5 U Cep の食の時刻の O - C

- : Olson, Crawford, Hall, Louth, Markworth and Piirola, 1981 の観測値
- × : 佐藤、伊藤, 1983 の観測値
- : 今回の観測値 △ : 今回の観測値 (フィッティングによる)

5. 教材化の検討

(1) 変光星の種類

変光星の分類には、いろいろな基準のとり方があり、古くは光度曲線の形によるものが多かった。最近では変光原因によって分類するようになり、大別すると、①食変光星、②脈動変光星、③爆発変光星に分けられる(例えば、下保、1970)。それぞれ、4000、18000、1000個ほどの変光星が確認されている。

① 食変光星

連星が共通重心を回るとき、互いに他を隠し合うこと(食)によって見かけの明るさが周期的に変化する。こうした変光を示すものを食変光星と呼び、その光度曲線の形から、以下の(a)～(c)に分類されている(例えば、北村、山崎、1980)。

(a) アルゴル形

食の始まり(第1接触)と終わり(第4接触)がはっきりしている。食を起していないとき(食外)の明るさは、ほぼ一定である。主極小は深い、副極小が目立たないものもある。

(b) こと座β型

星の形状が球体よりずれていることから、明るさが連続的に変化する。副極小は常に観測される。

(c) おおぐま座W型

2星の形は楕円で、互いの表面はほとんど接触している。明るさの変化はこと座β型よりも連続的になり、第1接触や第4接触は不明瞭である。主極小と副極小は、ほぼ同じ深さを示す。

②脈動変光星

恒星自身が膨張と収縮（脈動）をくり返すため、その明るさが変わる星を脈動変光星と呼ぶ。尾崎（1979）によると、脈動星は表5-1の8種に分類される。また、これらの脈動変光星は、図5-1のようなHR図上の限られた領域に存在している。

表5-1 脈動変光星の種類と特徴

種類	周期	代表的周期	スペクトル	実視絶対等級
こと座RR型	1.5~24時間	0.5日	A2-F6	+1.0~0等
ケフェウス型	1~50日	5~10日	F6-K2	-0.5~-6等
おとめ座W型	2~45日	12~20日	F2-G6	0~-3等
おうし座RV型	20~150日	75日	G, K	-3等
ミラ型	100~700日	270日	Me, Re, Ne, Se	+1~-2等
たて座 δ 型	1~3時間	2時間	A2-F5	+3~-2等
ケフェウス座 β 型	3~6時間	5時間	B1-B2	-3.5~-4.5等
くじら座ZZ型	100~1000秒	200~700秒	DA	+12~+9等

以下、図5-1のセファイド不安定帯に属する3種の脈動変光星についてだけ説明する。

(d)ケフェウス型（セファイド）

ケフェウス座 δ 星の δ Cephei (δ Cep) を代表とする光度が大きい周期的な脈動変光星である。銀河系には700個ほど発見されており、それらは銀河面に沿って平坦な分布をしている。その周期と絶対等級の間には、いわゆる周期-光度関係が成立する。HR図上では、セファイド不安定帯の最上部を占める超巨星の領域に位置する。

(e) δ と座RR型

δ と座RR型は、銀河系の球状星団の中に数多く存在する。その絶対等級は、 $0.^m0 \sim 1.^m0$ の狭い範囲に限らぬ（尾崎、1979）。シャプレーはこの性質から球状星団までの距離を計算し、銀河系のスケールを決定した。HR図上の位置は、主系列から分離した巨星の領域である。

(f) たて座 δ 型

たて座 δ 星 δ Scuti (δ Sct) を代表とするA型からF型の脈動変光星である。変光範囲は0.3等以下で、周期も4時間未満にすぎない（尾崎、1979）。HR図上でみると、主系列とセファイド不安定帯が交わる付近に存在している。

③ 爆発変光星

爆発変光星は光度が急激に、大きく変化する天体である。新星、超新星、ふたご座U型、くじら座UV型、きりん座Z型、ぎよしゃ座RW型、かんむり座R型に細分さぬ（下保、1970）。

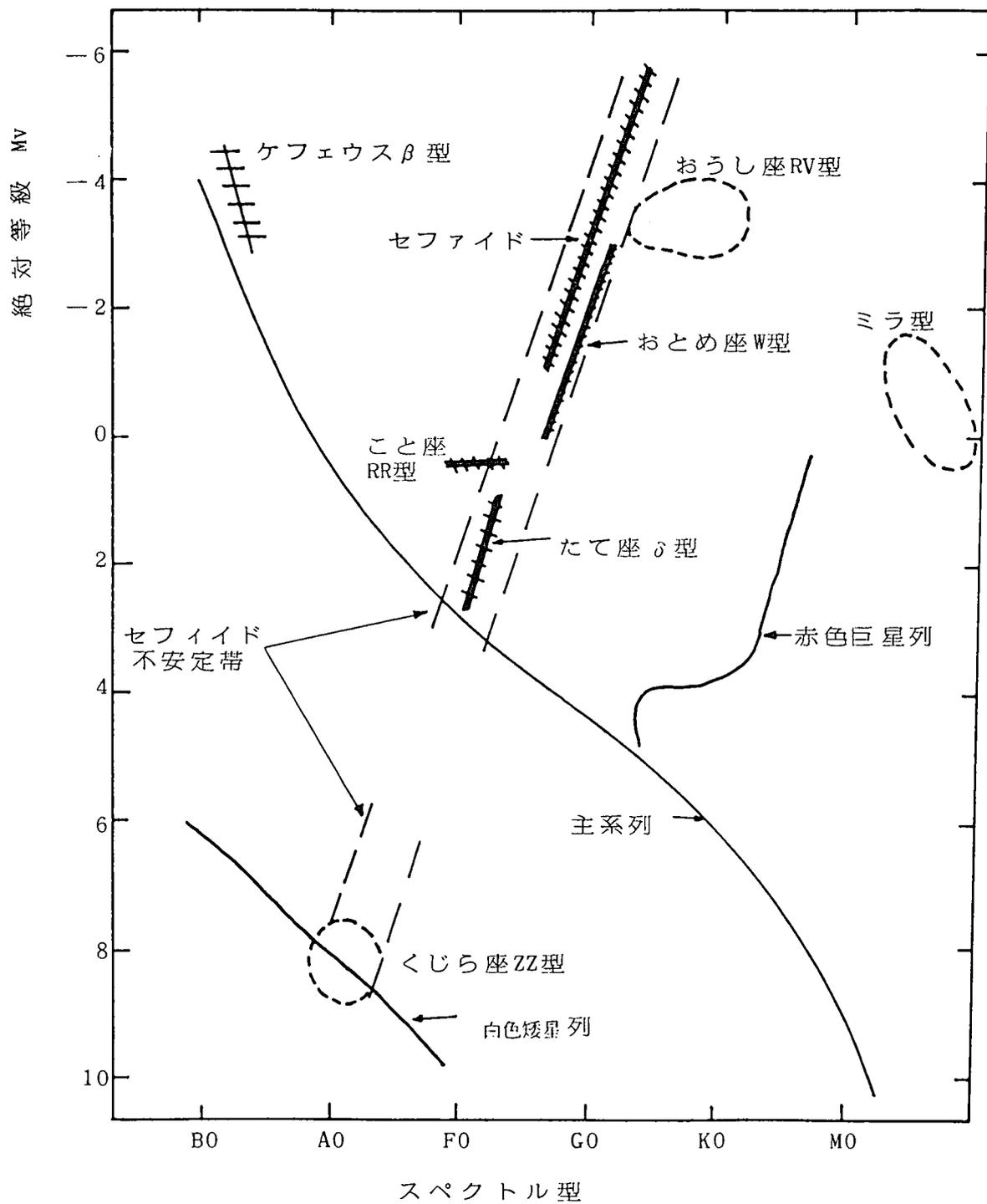


図5-1 脈動変光星のHR図上の位置 (尾崎、1979による)

(2) 色指数 $B - V$ の教材化

恒星の表面温度や色を示すものとしては、スペクトル型がよく使われている。このスペクトル型の代わりに、色指数 $B - V$ を使用することができる。表 5-2 は、主系列星におけるスペクトル型と色指数の関係である (Flügge, 1958 より)。また、大澤 (1981) によれば、 $A \sim K$ 型星では色指数 $B - V$ と表面温度 T の関係を次式 (13) で表現できる。

$$B - V = \frac{9500}{T} - 1.00 \quad (13)$$

このように、色指数 $B - V$ は恒星の色と表面温度の指標となる。さらに、表面温度 T を計算することもできるので、色指数 $B - V$ を教材として利用するには価値が高い。しかし、8社 (啓林館、東京書籍、教育出版、実教出版、大原出版、教研出版、大日本図書、第一学習社) の高等学校地学教科書を調査した結果、この色指数 $B - V$ を取り扱っているものは皆無であった。

恒星の色指数をスペクトル型の代わりに使う際には、星間赤化の影響を補正する必要がある。星間物質による光の選択吸収は短波長側で強く、観測された光は全体に赤っぽくなる。これが星間赤化と呼ばれる現象である。これを補正するには、赤化されていない同じスペクトル型の星との色指数の差 (色超過、 E_{B-V} 、 E_{U-B}) を求めればよい (例えば、佐藤、1978)。

星間吸収が無視できるか補正可能な場合、地学の教科書でよく用いられている HR 図の横軸には、スペクトル型の代わりに色指数 $B - V$ が使える。この HR 図とは、Hertzsprung と Russell が研究したスペ

クトル型と絶対等級の相関図のことであり、ヘルツシュプリング・ラッセル図と呼ばれている。もし、星間赤化が無ければ、色指数 $B-V$ は星個有の色を表し、HR図上で主系列星や巨星を判別することができる。

表5-2 主系列星のスペクトル型、 M_v と $B-V$

SP	M_v	$B-V$	SP	M_v	$B-V$
B0	-4.3	-0.32	F5	3.5	0.44
B1	-3.2	-0.28	F6	3.7	0.47
B2	-2.4	-0.24	F8	4.1	0.53
B3	-1.7	-0.20	G0	4.4	0.60
B5	-0.7	-0.16	G2	4.7	0.64
B7	+0.1	-0.13	G5	5.2	0.68
B8	0.5	-0.09	G8	5.5	0.70
B9	0.8	-0.05	K0	5.8	0.82
A0	1.1	0.00	K1	6.0	0.86
A1	1.4	0.05	K3	6.5	1.01
A3	1.7	0.09	K5	7.2	1.18
A5	2.0	0.15	K7	7.7	1.37
A7	2.3	0.19	M1	9.2	1.48
F0	2.7	0.30	M3	10.0	1.49
F2	3.0	0.37	M5	12.9	1.69

(Flugge, S., 1953による)

(3) U Cep と脈動変光星のデータ

HR 図上の違いをは、きりさせるため、巨星と超巨星の脈動変光星を選んだ。巨星はおひつじ座 X 星 X Arietis (X Ari) で、こと座 RR 型の脈動変光星である。超巨星としては、ケフェウス型の代表星、ケフェウス座 δ 星、 δ Cephei (δ Cep) を用いた。表 5-3 は、Preston (1961) の観測による X Ari のデータである。表 5-4 は、Bahner, Hiltner and Kraft (1961) の観測による δ Cep のデータである。

表 5-5 は、作業資料として扱うために U Cep の観測結果 (本論文) を位相 0.95 ~ 0.05 で 0.05、その他は 0.1 ごとに平均したものである。見かけの等級 m_V と色指数 $B-V$ の観測値は、以下の手順で星間物質による散乱と吸収量を補正した。

星間赤化による色超過 E_{B-V} と V 等級、B 等級の星間吸収量 A_V 、 A_B には、それぞれ $A_V = 3.0 \cdot E_{B-V}$ 、 $A_B = 4.0 \cdot E_{B-V}$ の関係がある (石田、1983)。Eggen (1963) は、U Cep の E_{B-V} の大きさを 0.03 としている。この値を使、て、 $A_V = 0.09$ 、 $A_B = 0.12$ を得た。

絶対等級 M_V は、下の式 (14) を使、て m_V から計算した。U Cep までの距離 D は、Batten (1979) の 200 pc を用いた。

$$m_V - M_V = 5 \cdot \log D - 5 \quad (14)$$

U Cep、 δ Cep、X Ari のデータと表 5-2 の主系列星のデータを同じ HR 図上にプロットしたのが、図 5-2 である。

表5-3

X Arietisのデータ

Phase	mv	Mv	B - V	Phase	mv	Mv	B - V
0.002	9.040	0.040	0.215	0.795	9.940	0.940	0.49
0.017	9.040	0.040	0.225	0.810	9.960	0.960	0.47
0.025	9.075	0.075	0.225	0.867	9.955	0.955	0.50
0.039	9.110	0.110	0.215	0.876	9.975	0.975	0.49
0.054	9.160	0.160	0.24	0.890	9.970	0.970	0.46
0.069	9.205	0.205	0.245	0.904	9.875	0.875	0.45
0.072	9.210	0.210	0.25	0.915	9.740	0.740	0.435
0.077	9.230	0.230	0.245	0.919	9.670	0.670	0.425
0.094	9.255	0.255	0.270	0.922	9.610	0.610	0.40
0.114	9.300	0.300	0.280	0.933	9.445	0.445	0.36
0.118	9.315	0.315	0.290	0.939	9.415	0.415	0.345
0.262	9.565	0.565	0.400	0.942	9.390	0.390	0.34
0.279	9.585	0.585	0.405	0.956	9.295	0.295	0.30
0.449	9.820	0.820	0.48	0.959	9.250	0.250	0.295
0.516	9.880	0.880	0.48	0.967	9.190	0.190	0.265
0.790	9.940	0.940	0.46	0.981	9.085	0.085	0.240

(Preston, 1961 による)

表 5 - 4 δ C e p h e i のデータ

Phase	m v	M v	B - V
0.019	3.22	-3.56	0.35
0.075	3.30	-3.48	0.42
0.115	3.37	-3.41	0.45
0.149	3.44	-3.34	0.48
0.158	3.45	-3.33	0.51
0.199	3.51	-3.27	0.54
0.559	3.94	-3.05	0.77
0.706	4.01	-2.77	0.81
0.789	4.02	-2.76	0.74
0.823	3.89	-2.89	0.70
0.892	3.56	-3.22	0.51

(Bahner, Hiltner and Kraft, 1961 による)

表5-5 U C e p h e i のデータ

Phase	mv	Mv	B-V	Phase	mv	Mv	B-V
0.002	9.12	2.61	0.54	0.517	6.53	0.32	-0.03
0.007	9.11	2.60	0.52	0.676	6.72	0.21	0.03
0.012	9.02	2.51	0.62	0.749	6.74	0.23	0.02
0.018	9.01	2.50	0.52	0.857	6.79	0.28	0.00
0.023	8.63	2.12	0.39	0.911	6.85	0.34	0.00
0.028	8.39	1.88	0.28	0.925	6.85	0.34	-0.01
0.032	8.10	1.59	0.21	0.935	7.02	0.51	0.03
0.037	7.88	1.37	0.10	0.944	7.79	0.78	0.24
0.044	7.57	1.06	0.07	0.952	7.63	1.12	0.27
0.055	7.22	0.71	0.01	0.957	7.74	1.23	0.30
0.063	7.02	0.51	0.03	0.962	7.86	1.35	0.37
0.072	6.90	0.39	0.03	0.967	8.08	1.57	0.39
0.090	6.77	0.26	-0.01	0.975	8.60	2.09	0.35
0.184	6.71	0.20	-0.01	0.982	8.90	2.39	0.50
0.248	6.69	0.18	-0.03	0.987	8.99	2.68	0.63
0.343	6.74	0.23	-0.01	0.992	9.10	2.59	0.72
0.472	6.74	0.23	0.00	0.997	9.10	2.59	0.83

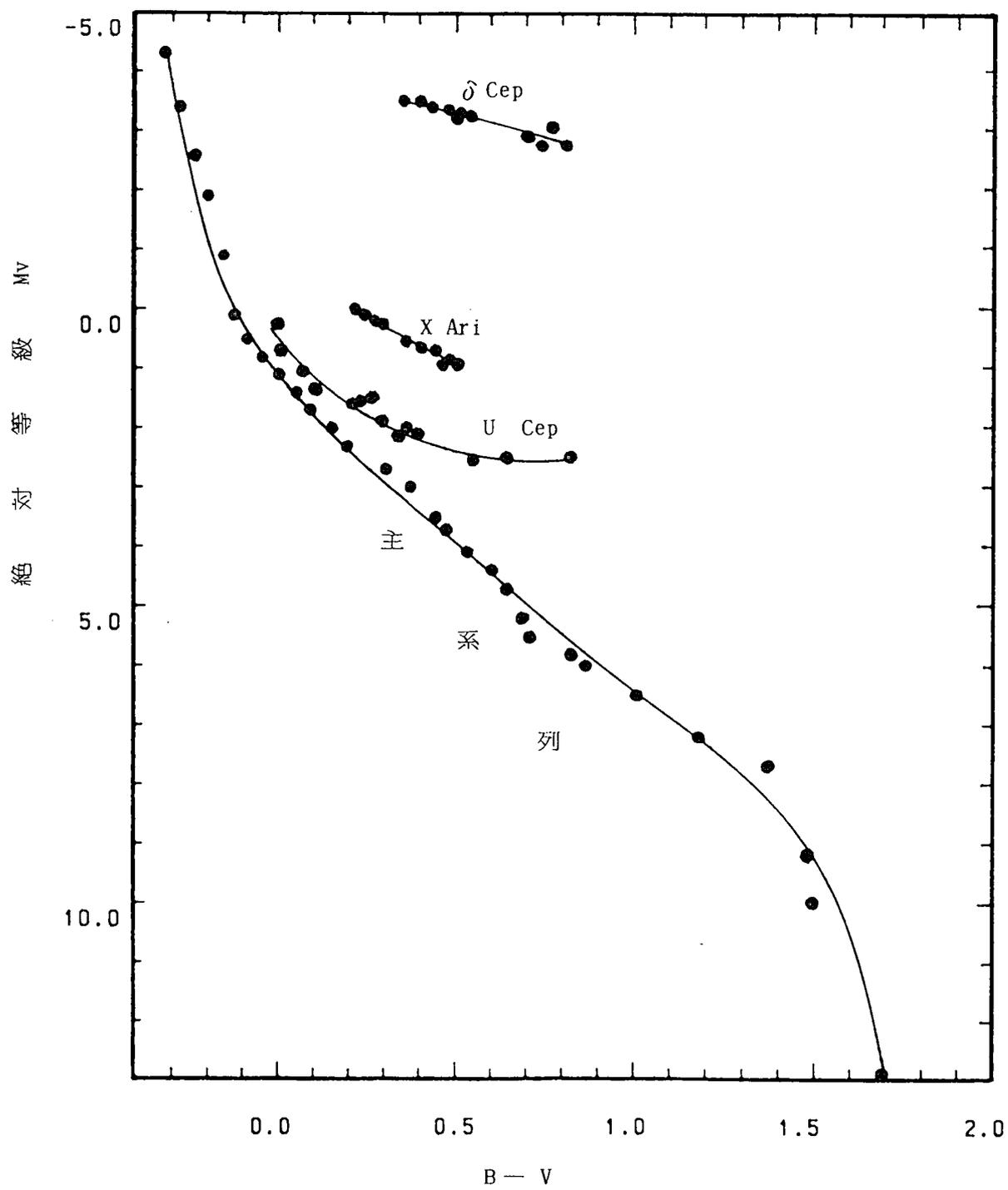


図 5 - 2 HR図上の変光星の色指数変化

(4) 測光のデータをもとに変光星の種類を識別する方法

図5-3は、以下に示す変光星の種類を識別する過程を模式的に表現したものである。ここに用いられている学習内容は、高校の地学領域で扱われているものばかりで、実際の授業で行うことができる。

図5-2における変光星の色指数変化の原因は、次の2つの仮説が考えられる。

1. 異なる色指数（スペクトル型）の2つの恒星が、「食連星」をなし、交互にその光が観測される。
2. 恒星が「脈動変光星」であり、脈動に伴って表面温度が変化している。

1の仮定に従えば、図5-2における変動の両端、色指数の最大値と最小値の部分が、食連星の主星と伴星の位置を表すと考えられる。そこで、2星のおよその絶対等級と色指数を求められる。また、変動の中間部分（色指数の中間）は、2星の光を同時に観測しているところで、この時の等級は2星の合成等級である。

2星の合成等級は、ポグソンの式(12)、(13)から計算できる。絶対等級が M_1 等と M_2 等の星の光の強さを、それぞれ I_1 と I_2 にすれば、

$$M_1 - M_2 = -2.5 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (12)$$

$$\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 0.4 \cdot (M_2 - M_1) \quad (13)$$

M_1 等と M_2 等の星の合成等級を M_c 、その光の強さを I_c とすれば、 $I_c = I_1 + I_2$ である。そこで、式(12)から、次式(14)が導き出される。

$$M_1 - M_c = 2.5 \cdot \log \left(\frac{I_1 + I_2}{I_1} \right) \quad (14)$$

式(13)と(14)を用いて、 M_1 と M_2 の値から M_c を計算することが出来る。計算で求めた合成等級が観測値と一致すれば、その星を食連星とした仮定は正しい。

表5-3より、 χ Ariは $M_1 = 0^m.040$ 、 $M_2 = 0^m.955$ である。表5-4より、 δ Cepは $M_1 = -3^m.56$ 、 $M_2 = -2^m.77$ である。 U Cepの観測値は色指数の最小値(-0.03)が2つあり、副極小の方の値を表5-5から選び、 $M_1 = 0^m.32$ 、 $M_2 = 2^m.68$ とした。それぞれの合成等級を計算した結果、 χ Ariは $-0^m.35$ 、 δ Cepは $-3^m.99$ 、 U Cepは $0^m.20$ となった。 χ Ariと δ Cepは計算値が完全に観測値の範囲外になり、これらの星を食連星とした仮定は正しくない。 U Cepは $B-V = -0.01$ のところで計算値と観測値が一致し、 U Cepは食連星と考えることができる。ただし、色指数が-0.01の場所は、ほとんど最小値といえるところであり、かろうじて観測誤差に救われたことになる。この原因は U Cepの主星が伴星よりもはるかに明るく、主星の光が隠される副極小が極めて浅い(約0.1)ためである。従って、この方法で連星の識別を行うには、主極小と副極小の深さがほぼ等しくなること座 β 型かおおぐま座 W 型の食変光星を使う必要がある。

以上、適切な食連星を選択すれば、この方法を用いて連星の識別実習を行えることが分かった。また、このような実習において、色指数 $B-V$ はスペクトル型を定量的に扱えるので指導に適している。

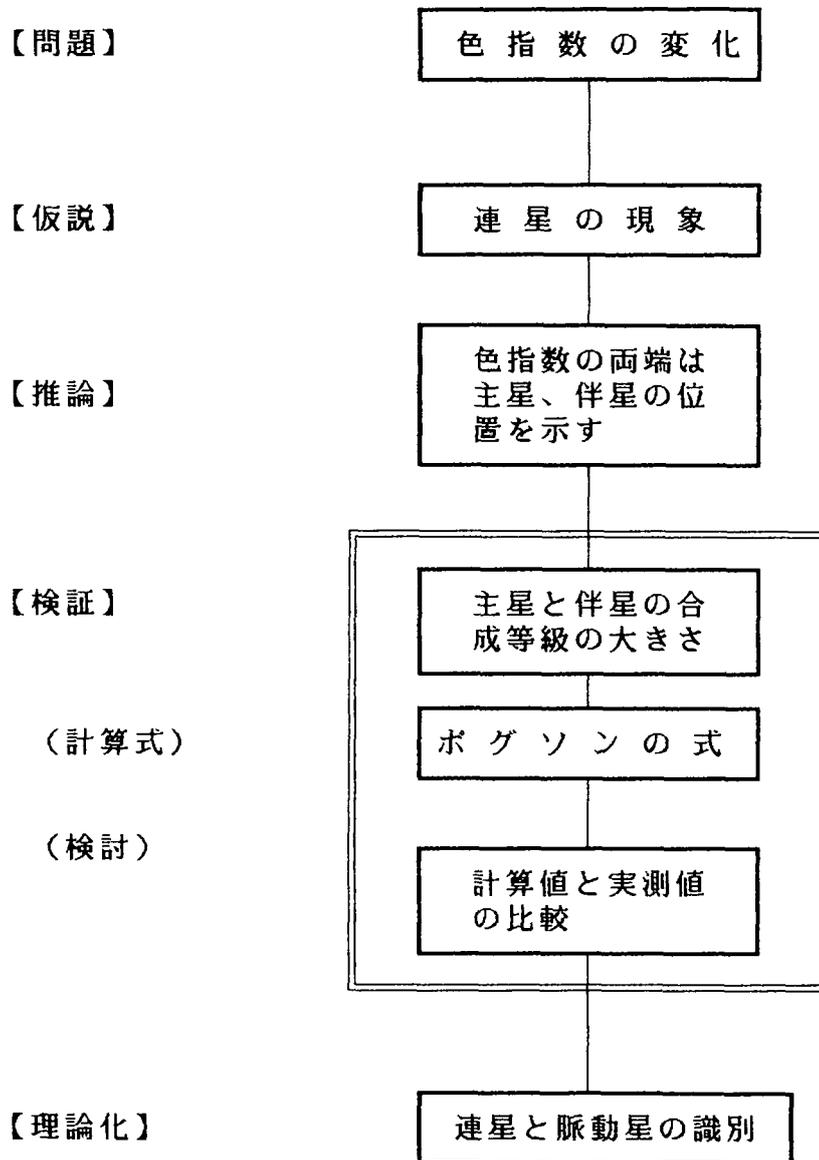


図5-3 変光星の種類識別の流れ図

(5)授業における実習例

[目的] 主系列星と変光星のデータをプロットした HR 図を作成し、HR 図上における連星の識別を通して恒星についての理解を深める。

[準備] 方眼紙、定規、主系列星と変光星のデータ (表 5-2、3、4、5)

[作業] 方眼紙の縦軸に絶対等級、横軸に色指数のスケールをとってグラフを作成する。グラフに主系列星 (表 5-2)、食変光星 (表 5-5) と脈動変光星 (表 5-3、4) の数値をプロットする。

[考察] 1. 変光星の色指数変化の原因を考える。

2. 変光星が連星系を構成していると仮定して、HR 図上における主星と伴星の位置を判別する。

3. 主星と伴星の合成等級をポグソンの式から計算する。

4. 合成等級の計算値と観測値を比較して、食変光星と脈動変光星を識別する。

[発展] 1. HR 図の位置をみて、U Cep の主星と伴星を恒星の分類に従って考察する。

2. 付録の星団リスト (リスト 5、6、7) を HR 図上にプロットし、星団の進化を調べる。

6. 結 論

本研究で次のことが明らかになった。

- (1) 1983年12月から1985年1月の間に U Cep が周期増加を起し、1985年11月まではその周期が続いていた。
- (2) 観測した主極小時刻は、理科年表1985年版の予報時刻(暦部、P72)より1.5～2時間程度遅れていた。
- (3) HR図上に変光星のV等級と色指数B-Vのデータをプロットすることにより、連星系を識別させる学習が指導できる。

7. 謝 辞

本研究は1984年4月より1985年12月まで、兵庫教育大学自然系理科教育研究室で行ったものである。適切な御指導と御示唆を頂いた当研究室教授、伊藤信隆先生、終始懇切丁寧に御指導と御助言を賜った当研究室助教授、佐藤文男先生、並びに快く観測の御援助をしてくださいました岩手県藤沢町立藤沢中学校教諭、伊藤文男先生、及び有益な資料を提供して頂いた岡山県立蒜山高校教諭、大島修先生に心から感謝します。

* 文献一覧

- Batten, A. H., 1973: A New Unified Interpretation of U Cephei : Publ. Dominion Astrophys. Obs., 14, 191~269.
- Batten, A.H. and Plavec, M., 1971 : Two New Chapters in the Story of U Cephei -- I: Sky and Telescope., 42, 147~150.
- Barhner, K., Hiltner, W.A. and Kraft, R. P., 1961 : Color and Magnitudes for 45 Cepheids of Northern Milky Way : Contributions from the McDonald Observatory, University of Texas, No. 361.
- Crawford, R.C. and Olson, E.C., 1979: Recent Period Changes in U Cephei: Publ. Astron. Soc. Pacific, 91, 413~421.
- Eggen, O.J., 1976: Classification of Intrinsic Variables VI. The Long-Period Cepheids : The Astrophysical Journal Supplement Series, 34, 1~31.
- Flugge, S., 1958 : Handbuch der Physik, 60.
- Henden, A.A. and Kaitchuck, R.H., 1982: Astronomical Photometry : Van Nostrand Reinhold Company Inc, U.S.A.
- Hirshfeld, A. and Sinnott, R.W., 1982 : Sky Catalogue 2000.0, Vol. 1: Stars to Magnitude 8.0: Sky Publ. Corp., Cambridge, Mass., U.S.A.
- Kukarukin, B.V., Kholopov, P.N., Efremov, Yu.N., Kukarukin, N.P., Kurochikin, N.E., Medvedeva, G.I., Perova, N.B., Federovich, V. P. and Frolov, M.S., 1969: General Catalogue of Variable Stars (Moscow).

- Olson ,E. C. , 1976 : U Cephei:A Mass-Transfere Event.I :
Astrophys.J. ,220,251~150.
- Olson, E.C.,1978 : Continuing Mass Transfer in U Cephei :
Observations and Analysis outside Primary Ecripse :
Astropys.J.,220,251~260.
- Olson, E.C.,1980 : U Cephei: Effect of Disk, Hot Spot and
Stream on Primary Ecripse Light Curve :Astropys. J.,251,
257~268.
- Olson,E.C.,Crawford,R.C.,Hall,D.S.,Louth,H.,Markworth,N.L.
and Piirola,V.,1981:Further Period Changes in U Cephei :
Publ. Astron. Soc. Pacific,93,464~469.
- Preston,G.W.,1961:A Coarse Analysis of RR Lyrae Stars :The
Astrophysical Journal,134~633.
- Sato, F. and Ito, F. , 1984 : Photographic Photometry of
Eclipsing Binary U Chephei with Small Equipment:兵庫教育
大学研究紀要第4巻, 第3分冊, 85~100.
- 佐藤 文男, 1978 : 若い散開星団の示す銀河系の構造 : 地学
教育第31巻, 第3号, p 61~69.
- Tsesevichn,V.P.,1969 : RR Lyrae Stars : Israel Program for
Scientific Translation ,Cat.No.5443. Jerusalem.

- 石田 蕙一，1983：銀河と宇宙：丸善， p 33～36.
- 大澤 清輝，1981：新版天文学：恒星社， p 46.
- 尾崎 洋二，1979：現代天文学講座第7巻，星の進化と終末：恒星社，
p 213～233.
- 海上保安庁，1985：天体位置表：書誌684.
- 下保 茂 ，1970：変光星の観測：恒星社， p 85～86, p 178～190.
- 齊田 博 ，1977：天文の計算教室：地人書館， p 38～59.
- 天文年鑑編集委員会，1985：天文年鑑：誠文堂新光社， p 37.
- 東京天文台，1985：理科年表：丸善， p 75, p 124～128.
- 西村 史朗，1981：現代天文学講座第11巻，宇宙の観測：恒星社， p 105～122.
- 平山 淳， 1981：現代天文学講座第5巻，太陽：恒星社， p 117～133.
- 広瀬 秀雄，1979：初等天文学演習：恒星社， p 101～110.
- 福田 一郎・上杉 明，1980：現代天文学講座第6巻，恒星の世界：恒星社，
p 9～47.
- 山崎 篤麿・北村 正利，1980：現代天文学講座第6巻，恒星の世界：恒星社，
p 181～236.

付録

リスト 1-1

```

5 ' *****
6 ' *      DATA  REDUCTION PROGRAM FOR VARIABLE STARS  *
7 ' *                                     (FOR PC-9801F2  Ver.1)   *
8 ' *                                                                 *
9 ' *      Apl. 1985          (C)  BY SHOUZI IKEDA          *
10 ' *****
1000 ' *****<v<b<u ノ コウ トウキユウ*****
1010 LOCATE 10,10:INPUT"Vフィルター ノ Gv,dv ハ ? : ",GV,DV
1020 LOCATE 10,12:INPUT"Bフィルター ノ Gb,db ハ ? : ",GB,DB
1030 LOCATE 10,14:INPUT"Uフィルター ノ Gu,du ハ ? : ",GU,DU
1040 CLS:COLOR 5
1050 LOCATE 10,10:PRINT"<ケ`イン>","<フ レ>"
1060 LOCATE 10,11:PRINT"V";GV,DV
1070 LOCATE 10,12:PRINT"B";GB,DB
1080 LOCATE 10,13:PRINT"U";GU,DU
1090 LOCATE 12,15:INPUT"シュウセイ シマスカ ?(Y/N)";T$
1100 IF T$="Y" THEN 1110 ELSE 1150
1110 COLOR 2:LOCATE 12,17:INPUT"V,B,U ノ ト`レ ヲ シュウセイ シマスカ";NP$
1120 IF NP$="V" THEN LOCATE 12,19:INPUT"Gv,dv=";GV,DV:GOTO 1040
1130 IF NP$="B" THEN LOCATE 12,19:INPUT"Gb,db=";GB,DB:GOTO 1040
1140 LOCATE 12,19:INPUT"Gu,du=";GU,DU:GOTO 1040
1150 GOSUB 1310
1160 F=LOG(DV)/LOG(10)*(-2.5)+GK
1165 F=INT(F*100)/100
1170 GV=GB
1180 GOSUB 1310
1190 F2=LOG(DB)/LOG(10)*(-2.5)+GK
1195 F2=INT(F2*100)/100
1200 GV=GU
1210 GOSUB 1310
1230 F3=LOG(DU)/LOG(10)*(-2.5)+GK
1235 F3=INT(F3*100)/100
1240 CLS
1250 LOCATE 10,10:PRINT"1 <v>= ";F
1260 LOCATE 10,12:PRINT"2 <b>= ";F2
1270 LOCATE 10,14:PRINT"3 <u>= ";F3
1310 ' *****ケ`イン カクセイ*****
1315 IF GV=1 THEN GK=0: GOTO 1400
1320 IF GV=2 THEN GK=1.2 : GOTO 1400
1330 IF GV=4 THEN GK=3.713 : GOTO 1400
1340 IF GV=3 THEN GK=2.514 : GOTO 1400
1350 IF GV=4 THEN GK=3.713 : GOTO 1400
1360 IF GV=5 THEN GK=5.017 : GOTO 1400
1370 IF GV=6 THEN GK=6.226 : GOTO 1400
1375 IF GV=7 THEN GK=7.527 : GOTO 1400
1380 IF GV=8 THEN GK=8.727 : GOTO 1400
1390 IF GV=9 THEN GK=10.036: GOTO 1400
1395 GK=11.212
1400 RETURN

```

リスト 1-2

```

280 '***** チホウ コウセイシ` ヘンカン *****
300 CLS:COLOR 5
310 LOCATE 5,10:INPUT"1 0h UT= (h,m,s):",H2,M2,S2
320 T2#=H2*3600+M2*60+S2
330 '
340 LOCATE 5,12:INPUT"2 J.S.T= (h,m,s):",H1,M1,S1
350 LOCATE 5,16:INPUT"シュウセイ シマスカ (Y/N)";U$
360 IF U$="Y" AND B$="A" THEN CLS:COLOR 2:GOTO 310
370 IF U$="Y" AND B$="" THEN CLS:COLOR 2:GOTO 310
380 IF U$="Y" THEN CLS:COLOR 2:GOTO 340
390 CLS
400 T1#=H1*3600+M1*60+S1
410 T3#=(T1#-32400)*1.002737905#
420 T#=T3#+T2#+32448
430 IF T#>86400# THEN T#=T#-86400#
440 TH#=T#/3600
450 H=INT(TH):TM=(TH-H)*60:M=INT(TM):S=(TM-M)
480 '***** シ`カク ケイサン *****
490 T4=3738.3 :T5=1.429627084216951#
500 TT#=T#-T4
510 IF TT#>86400! THEN TT#=TT#-86400!
520 THA=TT#/3600:HAH=INT(THA):THB=(THA-HAH)*60
530 HAM=INT(THB):HAS=(THB-HAM)*60:HAS=INT(HAS*10+.5)/10
540 IF HAH<0 THEN HAH=HAH+24
550 HH=THA*15
560 IF HH<0 THEN HH=HH+360
570 HT=HH*3.141592653#/180
580 HH=INT(HH*100)/100
590 '***** クウキ リョウ X *****
600 D#=1/(.57216973#*SIN(T5)+.820135233#*COS(T5)*COS(HT))
610 X#=D#+.0018167*(1-D#)-.002875*(1-D#)*(1-D#)
      +.008083*(1-D#)*(1-D#)*(1-D#)
620 X#=INT(1000*X#+.5)/1000
630 LOCATE 10,11:PRINT"                h    m    s"
640 LOCATE 10,12      :PRINT"4  <H.A> = : ";HAH;HAM;HAS
650 LOCATE 10,14      :PRINT"5  < X > = : ";X#

```

リスト 1-3

```
3700 '***** Extinction corrections*****
3710 CLS 3:LOCATE 10,8:PRINT" Extinction Corrections "
3720 LOCATE 10,12:INPUT"1 <kv> = ";KV
3730 LOCATE 10,14:INPUT"2 <k'bv>= ";KBV
3740 LOCATE 10,16:INPUT"3 <k'ub>= ";KUB
3750 LOCATE 10,22:INPUT"シュウセイ シマスカ ?(Y/N)",H$
3760 CLS:IF H$="Y" THEN COLOR 2:GOTO 3720
3770 LOCATE 10,12:INPUT"1 <dv>= ";DV
3780 LOCATE 10,14:INPUT"2 <dbv>=";DBV
3790 LOCATE 10,16:INPUT"3 <dub>=";DUB
3800 LOCATE 10,22:INPUT"シュウセイ シマスカ ?(Y/N)",H$
3810 CLS:IF H$="Y" THEN COLOR 2:GOTO 3770
3820 LOCATE 10,12:INPUT"1 <X ノ サ>=";AX
3830 LOCATE 10,14:INPUT"2 <X ノ ハイキン>=";BX
3840 LOCATE 10,22:INPUT"シュウセイ シマスカ ?(Y/N)",H$
3850 CLS:IF H$="Y" THEN COLOR 2:GOTO 3820
3860 EP=-.0096
3870 MU=.9121
3880 PS=1.0905
3890 DBVA=MU*DBV-KBV*MU*AX+.03*MU*DBV*BK
3900 DVA=DV-KV*AX+EP*DBVA
3910 DUBA=PS*DUB-KUB*MU*AX+.01*MU*DUB*BK
3920 DB=DBVA-DVA
3930 DU=DUBA-DB
3940 LOCATE 10,12:PRINT "<DV>= ";DVA
3950 LOCATE 10,14:PRINT "<DB>= ";DB
3960 LOCATE 10,16:PRINT "<DU>= ";DU
3970 LOCATE 10,18:PRINT "<DBV>=";DBVA
3980 LOCATE 10,20:PRINT "<DUB>=";DUBA
```

リスト 1-4

```

90 '*****Geo.JD*****
100 Q=0:J=0
110 COLOR 5
120 LOCATE 5,10:INPUT"Geo.JD ハ ? (0h マヱ ノ テ-タ ) :";C1#
130 LOCATE 5,12:INPUT"Sun-Earth ノ 距離 ハ ? (AU):";R
140 LOCATE 5,14:INPUT"日心黄経 ハ ? (h,m,s):";H6,M6,S6
150 CLS:COLOR 5
160 LOCATE 5,10:PRINT"1 <Geo.JD=>";C1#
170 LOCATE 5,12:PRINT"2 <AU =>";R
180 LOCATE 5,14:PRINT"3 <Hel.JD=>";H6,M6,S6
190 LOCATE 10,16:INPUT"シュウセイ シマスカ (Y/N)";A$
200 IF A$="Y" THEN 210 ELSE 280
210 COLOR 2:INPUT"トノ テ-タ ヲ シュウセイ シマスカ No";W
220 IF W=1 THEN GOTO 250
230 IF W=2 THEN GOTO 260
240 IF W=3 THEN GOTO 270
250 INPUT"<Geo=>";C1#:GOTO 150
260 INPUT"<AU =>";R :GOTO 150
270 INPUT"<コウケイ>";H6,M6,S6:GOTO 150
750 '*****HEL . JD*****
770 T6#=(H6+M6/60+S6/3600)*3.1415926#/180
780 EH#=63.28*3.1415926#/180
790 EM#=72.39*3.1415926#/180
810 EJD#=.00577*COS(EH#)*COS(T6#-EM#)*R
820 HL#=C#-EJD#
830 HL#=INT(HL#*10000+.5)/10000
840 FOR Z=200 TO 400
850 HJ#=HL#-2445449.0871#-2.4930683#*Z
860 IF HJ#<0 THEN GOTO 880
870 NEXT Z
880 HJM#=HJ#/2.4930683#+1
890 QR=INT(HJM#*10000+.5)/10000
900 CLS
910 COLOR 5:LOCATE 10,4:PRINT"1 Geo.JD= :";C#
920 LOCATE 10,6 :PRINT"2 Hel.JD= :";HL#
930 LOCATE 10,8 :PRINT"3 phase>= :";QR
940 Z=Z-1
950 LOCATE 10,9:PRINT" (E=";Z;")"
960 RETURN

```

リスト 5

ブレアデス標準星団リスト

HR	R. A.	DEC.	V	B - V	U - B	SPEC.
1165	3 ^h 46 ^m 35 ^s	24° 3'35"	2.87	-0.09	-0.34	B7II
1145	3 44 18	24 25 17	4.31	-0.11	-0.46	B6V
1172	3 47 27	23 22 34	5.45	-0.07	-0.32	B8V
	3 47 12	24 56 35	6.46	1.70	2.07	K5
	3 46 5	24 28 30	6.82	0.03	-0.07	B9V
	3 47 36	24 18 2	6.95	0.12	0.09	A0
	3 49 34	24 27 2	7.42	0.13	0.12	A2
	3 46 43	23 33 51	7.72	1.23	1.12	K0
	3 45 40	23 34 42	8.11	0.35	0.29	A0
	3 44 40	24 25 3	8.60	0.35	0.11	A2
	3 46 48	23 29 54	8.79	1.15	0.81	K0
	3 49 0	24 10 24	9.16	0.16	0.15	A0
	3 46 16	24 13 55	9.46	0.47	0.02	F8
	3 44 46	24 34 55	9.70	0.55	0.05	F8
	3 47 32	24 0 13	10.02	0.56	0.09	-
	3 46 0	23 32 19	10.52	0.64	0.16	F9
	3 48 30	23 47 42	11.35	0.78	0.38	G2
	3 45 46	23 27 10	12.02	0.99	0.54	G8
	3 45 13	24 49 18	12.05	1.01	0.84	G5
	3 43 9	24 11 54	12.51	0.81	0.30	G1
	3 46 24	24 20 46	12.61	1.18	1.00	G9V
	3 45 13	25 7 22	14.36	1.01	0.47	-
	3 48 30	23 56 21	15.72	1.15	0.98	-
	3 46 44	24 41 20	16.42	0.60	0.25	-

(Johnson and Morgan, 1953 より)

リスト 6

プレセペ標準星団リスト

H R	R . A .	D E C .	V	B - V	U - B	SPEC.
3429	8 ^h 39 ^m 35 ^s	19° 35' 55"	6.30	0.17	0.16	A2
3428	8 39 14	20 3 41	6.39	0.98	0.83	K0II
3428	8 39 30	19 43 25	6.44	1.02	0.90	K0II
	8 34 27	19 38 32	6.53	0.67	0.25	G0II
	8 38 59	19 35 40	6.59	0.96	0.72	K0II
	8 39 19	20 1 29	6.61	0.01	0.02	A0
	8 40 4	19 38 3	6.78	0.17	0.14	A6V
	8 39 51	19 46 23	6.85	0.20	0.15	A9II
	8 40 58	19 55 42	6.90	0.96	0.74	K0II
	8 39 26	19 35 8	7.54	0.16	0.13	F0II
	8 38 17	19 38 45	8.50	0.25	0.07	A9V
	8 37 55	19 33 15	9.00	0.32	0.03	A5
	8 39 9	20 11 22	9.67	0.44	-0.02	F6V
	8 37 40	19 31 6	10.01	1.01	0.78	G5
	8 39 3	20 7 7	10.11	0.49	-0.00	-
	8 40 34	19 59 52	10.72	0.60	0.10	-
	8 39 48	19 43 24	10.87	0.68	0.19	-
	8 38 23	20 15 52	11.31	0.70	0.24	-
	8 40 42	20 1 23	11.71	0.78	0.38	-
	8 38 21	29 21 30	12.37	0.46	-0.05	-
	8 38 37	19 50 25	12.64	1.00	0.76	-
	8 40 24	19 48 7	13.70	0.81	0.40	-
	8 39 13	19 48 45	14.61	0.95	0.69	-
	8 38 23	20 7 26	14.94	1.48	1.10	-

(Johnson, 1952 より)

リスト 7 IC 4665 領域標準星団リスト

HR	R. A.	DEC.	V	B - V	U - B	SPEC.
	17 ^h 45 ^m 23 ^s	5°32' 7"	6.85	0.01	-0.54	B4V
	17 45 56	5 46 45	7.12	0.02	-0.48	B8
	17 45 26	5 39 48	7.34	0.02	-0.46	B9
	17 43 19	5 3 57	7.43	0.33	0.15	A2
	17 47 59	5 42 20	7.49	0.02	-0.41	B9
	17 45 12	5 41 58	7.59	0.00	-0.49	B6V
	17 45 52	6 7 32	7.74	-0.01	-0.55	B9
	17 43 28	5 15 23	7.83	1.28	1.10	K2
	17 45 44	6 14 27	7.89	1.03	0.77	K0
	17 45 43	5 24 8	7.94	0.45	-0.01	F0
	17 43 7	5 51 2	8.05	0.07	-0.17	A0
	17 46 2	5 34 12	8.22	0.11	-0.30	B9
	17 43 31	5 43 13	8.31	0.06	-0.16	B9
	17 46 44	5 36 31	8.33	1.73	2.08	K5
	17 47 4	5 22 1	8.40	1.23	1.04	K2
	17 46 13	5 25 50	8.89	0.11	-0.27	B9V
	17 47 38	5 18 51	8.96	1.25	1.07	-
	17 44 50	5 25 55	9.10	0.26	0.10	-
	17 44 16	5 31 42	9.39	0.31	0.17	A2V
	17 44 2	5 12 22	9.68	1.27	1.04	-
	17 46 24	5 30 54	9.81	0.68	0.23	-
	17 44 37	5 34 11	10.10	0.12	0.01	A0
	17 44 16	5 51 55	10.21	1.29	1.27	-
	17 45 34	5 56 34	10.61	0.45	0.15	A2
	17 46 24	5 12 30	10.75	0.37	0.22	-
	17 45 27	6 5 56	11.33	0.53	-0.05	

(Johnson, 1954 より)

恒星表 (I) (近距離の恒星)

星名	視等級 m	絶対等級 M	色指数 B-V	スペクトル型	年周視差 P''	距離 光年
ケンタウルス座 α A	0.1	4.5	0.71	G2	0.760	4.3
" B	1.5	5.9	0.88	K6	0.760	4.3
" C	11.0	15.4	1.65*	M5	0.760	4.3
バーナード星	9.5	13.2	1.65*	M5	0.552	5.9
ウォルフ 359	13.5	16.7	1.82*	M8	0.431	7.6
GC 15183	7.5	10.5	1.51	M2	0.402	8.1
シリウス A	-1.5	1.4	0.00	A1	0.377	8.7
" B	8.3	11.2	0.15*	A5	0.377	8.7
ロイテン 726-8 A	12.5	15.3	1.72*	M6	0.365	8.9
" B	13.0	15.8	1.72*	M6	0.365	8.9
ロス 154	10.6	13.3	1.65*	M5	0.345	9.4
ロス 248	12.2	14.7	1.72*	M6	0.317	10.3
エリダヌス座 ϵ	3.7	6.1	0.88	K2	0.305	10.7
GC 14217	12.2	14.6	1.72*	M6	0.302	10.8
ロス 128	11.1	13.5	1.65*	M5	0.301	10.8
はくちょう座 61 A	5.2	7.5	1.18	K5	0.292	11.2
" B	6.0	8.3	1.37	K7	0.292	11.2
インディアン座 ϵ	4.7	7.0	1.06	K5	0.291	11.2
プロキオン A	0.3	2.6	0.42	F5	0.287	11.4
" B	10.8	13.1	0.39*	F3	0.287	11.4
GC 25648 A	8.9	11.2	1.60*	M4	0.284	11.5
" B	9.7	12.0	1.65*	M5	0.284	11.5
BD +43° 44 A	8.1	10.4	1.48*	M1	0.282	11.6
" B	11.0	13.3	1.72*	M6	0.282	11.6
GC 32159	7.4	9.6	1.50	M2	0.279	11.7
くじら座 τ	3.5	5.7	0.72	G8	0.273	11.9
BD +5° 1668	9.8	11.9	1.60*	M4	0.266	12.2
GC 29761	6.7	8.8	1.41	M1	0.260	12.5
カプタイン星	8.8	10.8	1.45*	M0	0.256	12.7
クリューガー 60 A	9.7	11.7	1.60*	M4	0.254	12.8
" B	11.2	13.2	1.72*	M6	0.254	12.8
ロス 614 A	11.3	13.3	1.65*	M5	0.249	13.1
BD -12° 4523	10.0	12.0	1.65*	M5	0.249	13.1
ファン マーネン星	12.4	14.2	0.47*	F6	0.234	13.9
ウォルフ 424 A	12.6	14.4	1.72*	M6	0.229	14.2
" B	12.6	14.4	1.72*	M6	0.229	14.2
CD -37° 1549	8.6	10.4	1.49*	M3	0.225	14.5
GC 13987	6.6	8.3	1.37	K7	0.217	15.0

(注：*はスペクトル型からの計算値)

恒星表(Ⅱ) (明るい恒星)

星名	視等級 m	絶対等級 M	色指数 B-V	スペクトル型	距離 光年
カノープス	-0.7	-4.6	0.16	F0	200
アークトゥルス	-0.1	-0.3	1.23	K2	36
ベガ	0.0	0.5	0.00	A0	26
カペラ	0.1	-0.8	0.78	G8	50
リゲル	0.2	-6.1	-0.02	B8	600
アケルナー	0.5	-1.9	-0.17	B5	100
ケンタウルス座β	0.6	-4.8	-0.23	B1	400
アルタイル	0.8	2.2	0.23	A7	17
アルデバラン	0.9	-0.8	1.53	K5	70
スピカ	1.0	-3.4	-0.24	B1	250
ボルックス	1.2	1.0	1.00	K0	35
フォーマルハウト	1.2	2.1	0.09	A3	22
みなみじゅうじ座β	1.3	-4.6	-0.24	B1	500
デネブ	1.3	-7.0	0.09	A2	1500
レグルス	1.4	-0.3	-0.11	B7	70
おおいぬ座ε	1.5	-8.3	-0.21	B2	3000
みなみじゅうじ座α*	1.6	-3.8	-0.26	B1	400
さそり座λ	1.6	-3.2	-0.21	B1	300
オリオン座γ	1.6	-3.2	-0.22	B2	300
みなみじゅうじ座γ	1.7	-2.2	1.61	M3	200
おうし座β	1.7	-1.6	-0.13	B7	150
りゅうこつ座β	1.7	0.8	0.00	A1	50
オリオン座ε	1.7	-6.6	-0.19	B0	1500
つる座α	1.7	0.2	-0.14	B5	65
おおぐま座ε	1.8	0.9	-0.03	A0	50
ベルセウス座α	1.8	-4.1	0.48	F5	500
おおぐま座α	1.8	-0.1	1.07	K0	80
おおいぬ座δ	1.8	-7.6	0.67	F8	2500
いて座ε	1.8	-0.1	-0.02	B9	80
おおいぬ座η	2.4	-6.5	-0.08	B5	2000
さそり座θ	1.9	-4.0	0.40	F0	500
ぎよしゃ座β	1.9	1.0	0.03	A2	50
みなみのさんかく座α	1.9	0.0	1.45	K4	80
ふたご座γ	1.9	0.6	0.00	A0	60
くじゃく座α	1.9	-2.5	-0.20	B3	250
ほ座δ	1.9	0.0	0.04	A0	80