

アルゴール

細川良正*

1. まえおき

食変光星アルゴールについて原稿の御依頼がありましたが、アルゴールを含む近接連星の研究は最近観測技術の急速な進歩によって非常に多面的となり、単独では到底対応し切れない状態となってまいりました。その上、定年を間近に控え過ぎこしかたを顧みますと、わずかにアルゴールの一角をかすめたに過ぎず、とてもそれについて語る資格はないのですが、幸いにも1980年2月「アルゴールと関連星」と題する研究会が開かれ、専門分野を異にする方々によって活ばつな討論が行なわれました。アルゴール研究の現況に御関心のある方はこの研究会の集録を御覧頂くことにして、差し当り話題の中心をアルゴールの光度曲線に置き関連する諸問題につき感想を述べることで文責を果したいと存じます。

アルゴール変光の主な部分はB8V型主系列星とK型準巨星との間に交互に起る食によるものです。御承知のように、食変光星のなかでその観測の歴史は最も古く、1782年発見以来くりかえし光度曲線が描き直され、平行して分光連星としても詳細な研究が続けられて来ました。近年、測光波長域が遠赤外や超紫外域へ広がり、更にX線や電波も検出されるようになって、アルゴール(悪魔)の謎は次第に解明されようとしております。

図1に波長の違う幾つかの観測曲線を示しました。観測の有効波長が長くなるほど主極小(一次食)が浅く、第二極小(二次食)が深くなるのが分かります。食変光の一般的傾向としてこれは恒星の光が熱輻射であることの端的な証拠に外なりません。食の起らない部分でも光度は一定でなく第二極小の両肩が上がります。高温高光度の主星の光の一部が低温の伴星光球に当てて吸収、熱輻射として再放出され、主星に向いた側が反対側より明るいために起るこの現象は、古くから**反射効果**として知られていました。図1で、これが短波長で消え失せるように見えるのは、主星自体の連星全光量に占める割合が圧倒的に増すことによるものです。

アルゴールには、小振幅ながら幾通りかの正弦的な周期変化の重なりが認められ、そのため四重ないし五重星系ではないかと疑われた時期がありましたが、現在では**三重星系**であることが確実となりました。その概要は表1に示す通りです。すなわち、食連星AB系の周りを

表1

連星系	軌道半長径(AU)	離心率	周期
AB	0.065	0.02	2.87日
AB-C	2.67	0.21	1.86年

成分	スペクトル型	質量(太陽単位)	半径(太陽半径)
A	B8V	3.7	3.1
B	K	0.8	3.4
C	Am	1.7	1.4

A, B間隔の約40倍の軌道半径で第三体Cが公転しています。光度曲線を扱う際には特殊事情として第三体の存在を考えに入れる必要があります。

X線、電波による観測は開始されて僅かに10年、本稿執筆中も新しい報告が相次ぎ、X線、電波共にその発生源は星の本体ではなく、周りをとりまくガス包被かまたは高温のコロナ領域である可能性が強くなって来ました。いずれにせよ、今のところ流動的で確かなことが分かるのはこれからと思われます。

2.1 光度曲線解析の原理

軌道面の天球面に対する傾きが直角に近ければ皆既または金環食となりますが、アルゴールはそれに到らず極小は共に部分食です。話を簡単にするために次の仮定をします。(1) 連星は輝度(表面の明るさ)一様な二つの円盤として見える、(2) 互いに円軌道を描く。そうすると輝度の高い主星が輝度の低い伴星で覆われるとき深い主極小が、その反対の場合に浅い第二極小が交互に起こります。この際、ある時刻(フェーズ)の連星光度を決めるのは次の一組のパラメータで、これを**光度曲線の要素**といいます。公転周期(P)、主星の光度(L_1)、主星、伴星の半径(r_1, r_2)と軌道面傾斜(i)の5要素です。ただし、光度の単位として全系の光度($L_1+L_2=1$)を、長さの単位として軌道円の半径を取ります。何故なら、等級差で描いた光度曲線は星までの距離や長さの絶対値には無関係なためです。周期を除く4要素(L_1, r_1, r_2, i)は原理的には極小曲線上4フェーズの観測光度から決定できるはずですが、実際には観測全体を有効に使って計算します。そのため幾通りもの計算法が工夫されましたが、先を急ぐのでこれは省略し、ただこの方向の開拓者として最近来日したマンチェスター大学のZ. コパール教授と故H. N. ラッセル教授の名を挙げておきましょう。後者はヘルツシュェブルング・ラッセル図のラッセル

* 山形大・理 Yoshimasa Hosokawa: Algol

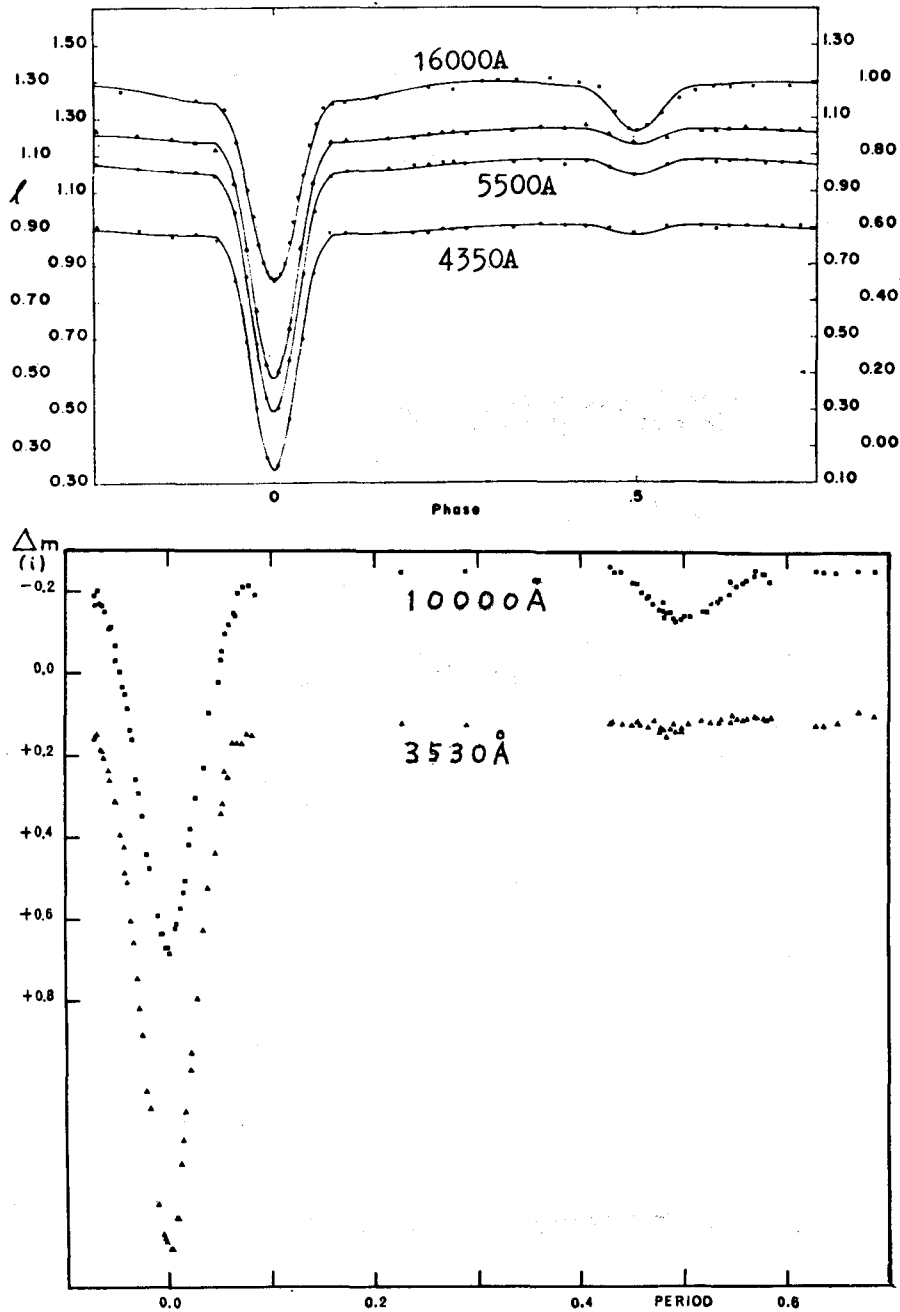


図1 Photoelectric observations of Algol in U ($\sim \lambda 3530$), triangles, and I ($\sim \lambda 10000$), squares.

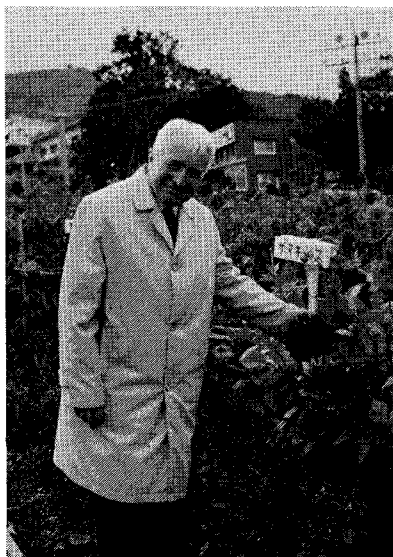
です。

これまで、一つの簡単化されたモデルで説明しましたが、実際は円盤上の輝度は一様でなく、太陽と同様中心から縁に向かって暗くなるので、輝度遞減率を示す周縁減光係数 u_1, u_2 を要素に加えます。更に、楕円軌道の場合には軌道離心率 e 、近点経度 ω が追加され、時により精粗はあっても全て光度曲線の要素として決めることができます。星と星の間が開いて r_1, r_2 (目安として < 0.2) が

小さく、星の形が球に近づけば本節で述べた方法で十分確実な要素が導かれます。例外として、浅い部分食の場合解は不定となりますが、これは彗星軌道の一小部分から軌道要素を計算する場合と類似の事情によるものです。

2.2 光度曲線の直線化

星の間隔が縮まり r_1, r_2 が大きく (> 0.2) ならば、自転と起潮力によって変形し先ず三軸楕円体となります。この範囲の変形に関する限り、次のことが言えます。光



蔵王山麓ダリヤ園でのコパール氏

光度曲線の食以外の部分はもはや水平な直線でなくなり、反射効果によって起こる月の満ち欠けに似た1公転周期の変光の上に、楕円体の自転によって生じる1/2公転周期の変光を重ねた曲線になります。この場合、次の3条件: (1) 軌道は円である, (3) 視楕円盤上の輝度分布はフェーズに関係なく一定の周縁減光係数 u_1, u_2 で表わされる, (3) 二楕円体は相似である, …… を満足する理想的連星を仮定すれば, 光度曲線は前節で述べた円盤モデルの光度曲線に転換することが可能です。一次食と二次食の間を水平な直線に直すこの操作は「レクティフィケーション」の臨時的な訳)とよばれます。理想的連星の要素と直線化された光度曲線の要素の間には一定の関係があるので光度曲線は正しく解けます。けれども残念ながら、現実にはこのような連星系は存在できません。実際の連星の形は決して相似ではなく楕円盤上の輝度分布は一般に大変複雑です。1960年代までは、専らこのような直線化によって、観測された光度曲線进行处理しておりました。言いかえれば、元来直線化できないはずの光度曲線にあえてこれを適用し近似解を求めていたのです。直線化のやり方も改良され、今でも適用例が散見されます。ここで、直線化可能なモデルからのずれは、近接度が増すために生じる高次の変形効果をも含め、しばしば測光的摂動と称されます。

2.3 光度曲線合成法

測光的摂動の研究が停頓している間に、1970頃から全く従来と発想を異にする新方式が登場してまいります。それはすなわち大型計算機の活用によるもので、手続きはおよそ次の通りです。(1) 暫定的に一組の要素を仮定する、(2) これを使ってフェーズごとに光度を計算し光度曲線を組み立てる、(3) 組み立てられた光度曲線が観

測光度曲線を正確に再現するように暫定要素を修正する。

合成の方法は研究グループによってさまざまですが、アルゴールを扱ったもののなかから、カナダ・ドミニオン天文台の J. B. ハッチングスのグループとアメリカ南フロリダ大学の R. E. ウィルソンのグループの方法を取り上げることにします。

2.3.1 ハッチングスの合成方式

星の構造をロシュのモデルと仮定し、表面を制限三体問題のゼロ速度曲面の一つで代表させます。星の表面が互いに離れている場合、主星伴星にそれぞれ別のゼロ速度面を当てます。内部構造理論で示される強い質量集中に照らし、この近似は光度曲線解析に関する限り十分と考えられます。

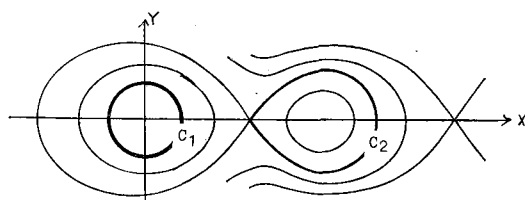


図 2

まず、主星についてはその中心を座標原点にとれば(図 2)、制限三体問題の無次元化されたポテンシャルが次の式:

$$C_1 = \frac{1}{r} + q \left[\frac{1}{\sqrt{1-2\lambda r + r_2}} - \lambda r \right] + \frac{1}{2}(1+q)r^2(1-\nu^2)$$

($q = m_2/m_1$: 質量比, λ, μ, ν : 方向余弦)

で与えられます。 q と C_1 を与えれば任意方向の半径 r (λ, μ, ν) が解けるので、これは主星表面の方程式に外なりません。伴星に対しては、 q と $1/q$, C_1 と C_2 を入れかえます。 C_1, C_2 を指定すれば星のサイズと形が同時に与えられます。

ハッチングスたちはアルゴール光度曲線の要素として、質量比 (q)、星の極半径 (r_1, r_2, r_3)、軌道面傾斜 (i)、自転極の有効温度 (T_1, T_2, T_3)、伴星の重力減光指数 (β_2) の9個を選びました。重力減光とは全輻射流束 σT^4 と表面重力の間に成立する一定の法則に由来する有効温度(従って輝度)の表面分布を表わす用語です。球形の主星に対して β_1 は不必要ですが、変形した伴星表面の有効温度分布は

$$T = (g/g_0)^{\beta_2} T_0$$

で与えられ、指数 β_2 の理論値として、輻射平衡で 0.25、対流平衡で 0.08 が採用されます。 T_0, g_0 は自転極の有効温度、重力です。

次に、星の表面を適当な方向を極とする等緯度線と等経度線で、伴星では数百、主星で数千の小片に細分し、そのうち観測者に見える小片全部について各片から送られ

る光量を総計して連星の光度とします。前方にかぶさる星の表面法線と視線が直交するという条件で、食によって切りとられる部分の境界線を決めます。この方法を適当な間隔を置いたフェーズごとに実行すれば光度曲線ができていきます。計算誤差は観測波長に関係なく ± 0.007 等以下と報告されています。各小片からの光強度は、光球内の温度分布と吸収係数対不透明度の比 κ_i/κ を与え、非灰色大気の公式を用いて計算されますから、周縁減光係数 u_1, u_2 は不用となります。全方向への実光度の総量 L_1, L_2 もまた光球内温度分布から計算されるので要素から省かれます。

近接効果のうち最も大きい反射効果は念入りに扱われます。伴星上任意の点に注ぐ主星の輻射量を正確に計算しその加温効果を含めて光球内温度分布を、一方背面では本来の有効温度 T_2 に対応する温度分布を用意します。主星、第三体については T_1, T_3 を用い同様にします。

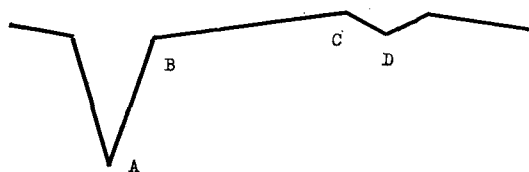


図 3

ハッチングスたちは 4500 \AA から 16000 \AA にわたる6本の観測光度曲線について、波長別に主極小、第二極小の深さおよび反射効果の強さをそれぞれ、図3に示す点の等級差 $(m_A - m_B)$, $(m_D - m_C)$, $(m_B - m_C)$ で表示、これらを要素の判定条件とし、合成光度曲線上でこれら3数値が観測の幅のなかに収まるよう9要素を調整しました。図4はその様子を示すものです。縦軸の1目盛は0.05等、主極小の深さについては0.5等です。要素の最終値は表2の第1列に示す通りとなります。

表 2

	ハッチングス	ウィルソン	旧方式
T_1	$10800 \pm 300^\circ \text{K}$	12800°K	
T_2	$4600 \pm 100^\circ \text{K}$ (暗い側)	$5334 \pm 179^\circ \text{K}$	
	$5600 \pm 150^\circ \text{K}$ (明るい側)		
T_3	$8400 \pm 300^\circ \text{K}$	$(T_3$ の代り光度 l_3 を与える)	
r_1	0.214 ± 0.002	0.221 ± 0.001	0.213 ± 0.003
r_2	0.252 ± 0.003	0.234 ± 0.002	0.243 ± 0.004
r_3	0.105 ± 0.008		
i	$81^\circ 6 \pm 0^\circ 2$	$82^\circ 42 \pm 0.04$	$82^\circ 4 \pm 0^\circ 9$
$\frac{m_1}{m_2}$	4.0 ± 0.3	5.0	5.0
β_1	(1.)	1.	
β_2	0.08 ± 0.03	1.	
A_1	(1.)	1.	
A_2	(1.)	0.515 ± 0.023	

図4に書き込まれた太い折れ線は最終要素に対応するものです。以上のようなやり方が成功したのは、アルゴリズムの観測が十分広い波長範囲にまたがっていることによります。表2の主星(B8V)の有効温度が 10800°K と、普通の温度スケールに比べ低過ぎる嫌いがありますが、この矛盾は次に述べるウィルソン方式によって解決されました。

2.3.2 ウィルソンの合成方式

ハッチングス法が一種の試行錯誤法なのに対して、これは出発点で要素のなるべく良い一組の近似値を選び、これに微分修正を施し観測との不一致を解消するという方法です。要素として、ハッチングスの極半径にかえてポテンシャル C_1, C_2 を、光強度の計算には周縁減光係

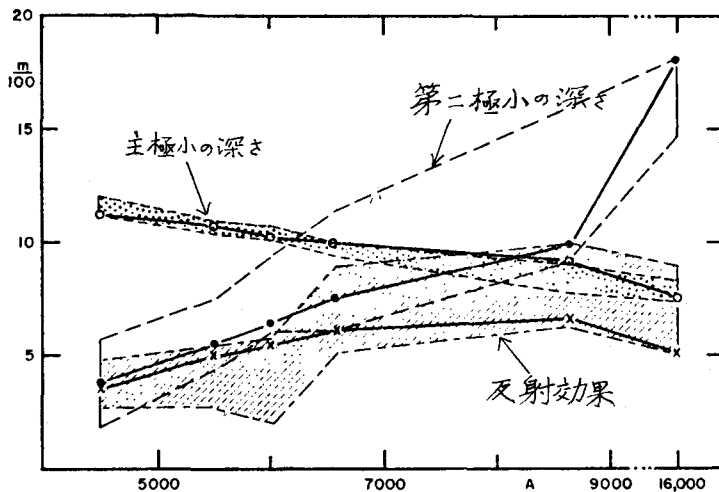


図 4

数 u_1, u_2 を用い、波長別強度は黒体放射とするなど、計算量の軽減を計っています。ウィルソン法の特徴は反射効果を計算する際、新たに輻射アルベード (反射能) A_1, A_2 を導入したことです。主星面からの反射は無視できるので $A_1=1$ とし、伴星のアルベード A_2 を未知数として他の要素と一緒にして微分修正しました。表2に示すように、主星に慣用の温度尺度 12800°K を当てた結果、アルベードの値として $A_2=0.515$ を得ました。伴星大気で吸収された主星エネルギーの約半分は対流層を通して背面に運ばれると考えられますが、その機構は十分明らかではありません。しかし、少くともアルベードは表面に対流層を持つ分離型の伴星に共通する現象と考えられます。

2通りの合成方式と旧方式との比較を表2で御覧下さい。表のなかで、 r_1, r_2 は星のわきの半径、つまり半主軸を長さの順に a, b, c とした b に相当し、これは変形した星と同容積の球の半径に近く、星の平均半径とみなされるものです。旧方式の r_2 は要素として b を求めている文献についての平均値です。主星半径 r_1 、軌道面傾 i は大体一致しますが、伴星半径 r_2 はハッチングスで少し大き過ぎます。これは、アルベードを考えなかった結果、主星の温度が低く評価され、主極小の深さを観測に合わせるために、結果として伴星のサイズが少し増えたものと解釈されます。ウィルソンのグループは伴星の重力減光についても慎重な配慮を加えました。すなわち、ハッチングスグループは理論値 0.08 をそのまま採用しましたが、その後コパールの研究によって、原因不明ながらもむしろ輻射平衡値に近い値が第二極小の赤外域観測に合うことが分かり、ウィルソンは $\beta_1=\beta_2=1$ を採用しました。

このように見て来ると、同じ合成方式でもウィルソンの方が優先すると判断されます。他方、古典的方式で求めた (r_1, r_2, i) の値はそれとほとんど差がありません。その理由は、要素の決定に強い比重を占める主極小の部分で伴星の約5倍の質量を持つ主星はほとんど球形を保ち、その上、輝度光度共に観測の有効波長範囲で伴星のそれを遙かにしのぐためです。言うなれば、幾何学的要素 (r_1, r_2, i) に関する限り合成方式は結果的に空振りの形に終わりました。けれども、伴星のアルベードが確認され、以後アルベードを要素に組み込む方式が定着したことは大切な成果です。

光度曲線解析法にはこの外マンチェスター学派によって開拓されたフリーエ解析法がありますが、紙幅の都合もあり、解説は省かせて頂きます。

3. 合成方式の特色とその限界

光度曲線合成法の最大の長所として、有効波長を異に

する2本以上の観測曲線を連立して解き、全観測に一致する最終要素の一組を導く点を挙げねばなりません。光度曲線を色別にしか処理できなかった旧方式に比較して、その信頼度は格段に高いと言えます。更に、接触型 (大熊座W型) 連星に対する有効性を見逃すことができません。すなわち、光球が接触してまゆ型となり、まゆの形やサイズは一つのポテンシャル $C_1=C_2=C$ で表現され、従って視線速度曲線から質量比 q が分かりさえすれば、たとえ軌道面傾斜が小さく食が浅い場合でも、この方法は適用可能であり現に適用されております。

次に、幾つか所見を述べますと、まず、合成方式は計算の基礎を制限三体問題のゼロ速度面に置いてありますので、軌道が円であるか離心率の非常に小さい場合以外は無効となります。楕円軌道の場合に、公転に合わせてゼロ速度面内の星の容積が増減すると考えることは論理的に誤りです。アルゴールの場合、離心率はわずか 0.02 です。合成方式が許されるわけですから、合成方式を楕円軌道に拡張する課題は未解決です。また、この方式が奏効するためには高い観測精度が要求されます。観測自体が粗い場合は無論のこと、連星をとりまくガス包被、ガス流、黒点、白はん、その他の不確かな原因によって光度曲線が乱される場合には失効します。かみそりで牛を解体するようなものです。このような場合や、合成方式のための暫定要素を用意する場合には牛刀の旧方式で間に合わせる方が賢明と思います。反面、厳密に言えば、星の間が十分開いて周りの綺麗な分離型の場合を除けば、全ての波長で不規則変光を全く含まない光度曲線は実在しないのではないかと思います。アルゴールの光度曲線も古くは単純なタイプと考えられておりましたが、細心の観測によって実視域でもわずかながら不規則変光が検出されるようになり、更に遠赤外域では、不規則変光が食変光と同程度になる傾向が見られます (図5)。その原因を、ガス流のなかの自由電子の自由・自由遷移による赤外線散乱であるとする研究があります。図5に破線で示される光度曲線は一定の電子分布を想定し散乱光を連星本体の光度に加えて計算されたものです。

4. むすび

以上、光度曲線を中心に書き進んで来ましたが、天文学的に見てアルゴールに関する最も重要な問題は約30年を周期とする近点運動の研究ではないかと考えております。これについては研究会集録に私見を述べて置きました。この外、対流層とアルベード、重力減光の関係など難かしい問題が残されております。今後の発展を祈りつつかく筆致します。

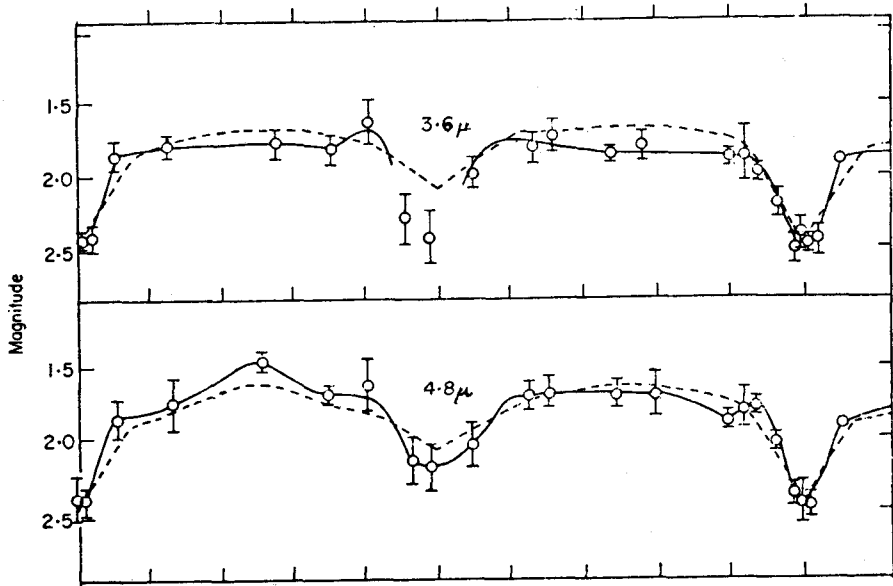


図 5

1980年2月, 山形大学で行われた「Algol と関連星」の集録の残部がまだありますので, 希望者は300円「または50円切手6枚」同封にて右記へ申込んで下さ

い。

〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1
東京天文台 北村正利

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価380(〒70円) '81-4 月号・3月5日発売!

● 4月号のおもな内容

- ★藤井旭さんの観測ガイドは、新春早々突然姿を現わしたパンサー彗星の観測法をはじめ、木星・土星・海王星・ジュノの観察です。
- ★今年の『朝日賞』に輝く科学衛星はくちよう研究グループの松岡勝さんが、科学衛星の活躍ぶりを紹介。
- ★数年前にその構造を紹介したMMT (マルチミラー望遠鏡) は、すでに活躍中。清原勉さんがレポート。
- ★『チッ素・水素増感法』について平林茂人さんが、くわしくデータをつけて紹介。ご期待を。
- ★ほかに、台湾の天文ファンたち、星食計算センター日本へ、など今月号より増ページしてさらに魅力アップ。

好評書

天文年鑑 1981年版

毎月の空のほか、惑星、小惑星、流星、彗星、新星、変光星、日食、月食などのこまかなデータを掲載。その他天体観測に最低限必要なデータなどもりだくさんな内容。

■天文年鑑編集委員会編 / 定価480円発売中



四季の天体観測

—肉眼・双眼鏡・小望遠鏡で—

刊行以来好評であった『新版・四季の天体観測』を全面的に書きかえ、新しい写真、新しい数値であらたに発売。

■中野繁著 / 定価2300円 発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京6294 電話03(292)1211