

# 近接連星の素顔をみる

—光度曲線から分かること—

山崎 篤 磨\*

## 1. 星のことは

近接連星について、現在さまざまな種類の観測が行なわれている。なかでも、光度変化を知るための測光観測は、近代的な連星研究と共に歩いてきた長い歴史を持っている。

実際、今日でも光度変化の様子から、近接連星について知りうる情報は非常に多い。近接連星研究の世界的権威であるコパールが、光度曲線のことを「星のことは」と呼んでいるのもこうした理由による。きっと、近接連星が私達に語りかけてくる「ことは」の内容は、私達が理解する以上に豊富であるに違いない。

しかし、遠い星からのささやきを、私達が正しく理解するのは結構難しいことである。ささやきが雑音にかき消され、あるいはあまりに早口だったり、遅口(?)だったり、翻訳がうまく出来ずに誤訳ばかりしていたりするだろう。このあたりの事情——近接連星の光度曲線とその解析について、紹介してみよう。

## 2. 光度曲線の種類

人間のことはに幾種類もあるように、近接連星もその光度曲線の形によって、大まかに種類分けすることができる。先年亡くなったクカルキンが中心になって編纂した「ゼネラルカタログ」には、よく知られているように、EA (アルゴル型)、EB (こと座ベータ星型)、EW (お

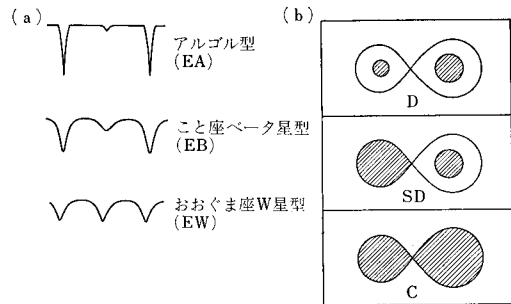


図 1 (a) 食連星の光度曲線

(b) 近接連星の種類. D: 分離型, SD: 半分離型, C: 接触型

おぐま座W星型), EII (楕円体型) というように分類が行なわれている (図 1)。光度曲線の形と結びついて、分りやすい分類である。

しかし、この分類にも問題がある。連星系の実際の構造を反映した臨界ロッシュローブによる分類 (図 1)——分離型 (D)、半分離型 (SD)、接触型 (C)——との対応があまり明瞭とはいえないのである。例えば、アルゴルパラドックスで有名なアルゴル型連星は半分離型といわれているが、EA (光度曲線のアルゴル型) は、半分離型連星 (いわゆるアルゴル型連星) の他に分離型連星を含み、EB も同様に両者を含んでいる。但し、EB の連星系の二星は接近していることが多いのが EA といわれる連星と違う。この混乱した事情は、たとえば私達が現

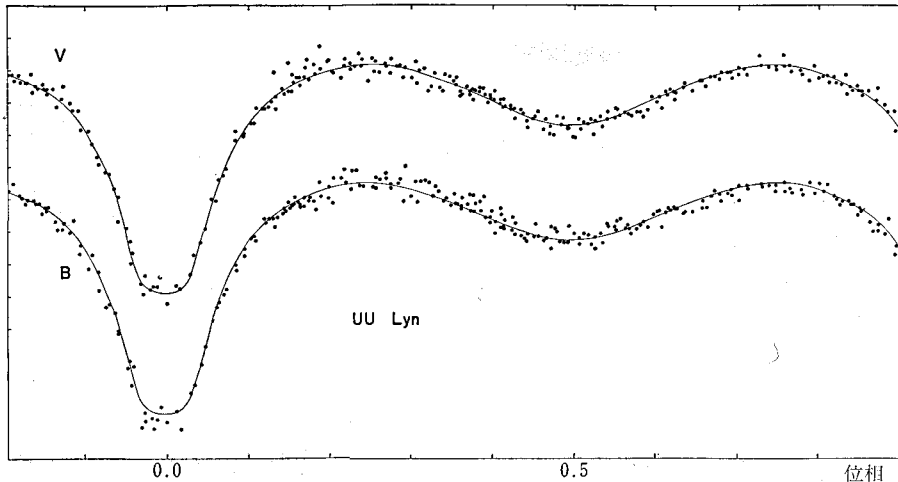


図 2 短周期非接触連星 UU Lyn の光度曲線 (周期 0.468 日). 縦の 1 目盛が 0.1 等. 実線は解析の答から計算したもの. (山崎, 岡崎, 北村 1982 による).

\* 東大教養 Atsuma Yamasaki: Profiles of close binary stars

在研究を行っている、周期が1日程度より短い短周期非接触連星では、その光度曲線はEAともEBとも区別のつけ難いものとなっている(EAB!? 図2)。

EWとEBの区別も、必ずしも明瞭ではない。私の感じでは、EBの定義が特にあいまいである。もう少し実態に即した分類が必要になってきているのであろう。星のことばにもいろいろあり、地方なまりが目立つこの頃というところであろうか。

ついでに言えば、その星が暗いことなどのため、写真測光による光度曲線しかない場合、その分類はあまり信用できない。本当はEBであっても、写真測光ではEAとされてしまったり、ひどい時には、食連星がRR Lyr型の脈動星と混同されたりする。写真測光による光度曲線には用心しないとイケない。

### 3. 解読——解析的手法——

コパール教授の見事な理論式が、マンチェスター大学の階段教室(レクチャーシアター)の黒板にさらさらと書かれていく。長い黒板の端から端までが、どんな近接連星のどんな食も解ける「1つの」式である。大学院生と一緒に講義を聴いている隣のバディングが、小声で「4メートル方程式だ」といってくすくす笑っている。教授の講義はますます熱がこもっていく……。たしかに、コパール教授の見出したこの長い式こそ、近接連星のことば——光度曲線を解析的に解読する方法の究極のものと思われる。

解析的手法は、1912年のラッセルの考案した方法に遡り、今日でも時々この方法をつかって解析が行なわれている。原理的には、食内の三点だけを使い、連星の二星は球体からのずれは相似の楕円体として扱う近似であり、その後いろいろな研究者によって補助テーブルが整備されてきた。多くの連星が、過去この方法で解析されており、その功績は大きいものがある。しかし、いくらなんでもその時代は終わったと私は思っている。

食内の多くの観測点をとり入れた精度の良い方法として、コパールがラッセルの方法を拡張したりしたが、実用的には、北村の方法(1965年)が優れている。これはまず、観測された光度曲線の食内の全部の点を用いて、食の形を特徴づける特性量を計算機で求め、次に、あらかじめいろいろなパラメータの値によって計算されたテーブルを繰って、観測と理論の特性量が一致するパラメータの組を見出すという方法である。両星が著しく接近し、食外でも光度曲線が歪んでくる場合を除けば、北村の方法は一般的な光度曲線を精度良く解くことが出来る。

これに対して、コパールは、長年純粹に解析的に光度曲線を解く方法を探究して、ついに答を見出した。例の

「4メートル方程式」がそれである。私はマンチェスターに滞在していた時、コパールの講義を聴いていたが、理論式の展開の美しさに魅せられたことを思い出す。

コパールの勧めもあって、私は、北村の方法をコパールの理論によって解釈することを行なった。マンチェスター大学の計算機CDC 7600は1語長が長く有効桁数が多いのであるが、それでも両者の比較のためには、120ビット(29桁)の語長をとる必要があった。理論式に出てくる交代級数のため、桁落ちがすさまじいのである。東大のHITAC 8800では4倍精度を使用した。二つの方法は良く一致したが、完成された理論の美しさが必ずしも実際の応用の簡単さに結びつかないことを感じたことであった。

### 4. 解読——シミュレーション——

電子計算機が発達した今日では、近接連星の光度曲線の解読は、解析的手法とは別に、計算機シミュレーションによっても行なわれるようになってきた。

1968年頃だったろうか、岡山で観測している時に、北村先生が「ロッシュを食させたらどうなるだろうか」といわれたことがあった。その時はまだ計算機を使い慣れてないせいもあって、私はあいまいな返事をした記憶があるが、今にして思えばそれを具体化していれば、その後各国で本格的な光度曲線シミュレーションが続々誕生していったのに先駆けて、我国でこの方法が生まれたのではなかっただろうか……。

光度曲線合成法と呼ばれるこのシミュレーション法は、連星の各星の表面を千から数千の微小な面素に分け、その各々の面素が我々が見ている方向にどれだけ傾いているか、どのくらいの輻射を出しているか、相手の星に隠されているか、相手の星からどのくらい照らされているか等々について逐一調べていき、我々のみている方向に総計でどれだけ光量来るかを計算するものである。

星の形はどんな形でも良いし、各々の面は一様に光っていても良い。柔軟性に富んでいる。ふつうは、軌道傾斜角、両星の半径、両星の光度比、周辺減光係数、重力減光係数、反射能などをパラメータとしている。二星が接近してくれば、星の形状はロッシュポテンシャルで与えられると仮定して光度曲線を解くこともある。その時は、質量比がパラメータとして入ってくる。逆に言えば、従来はスペクトルをとって視線速度を測り、視線速度曲線から求めなければならなかった二星の質量比が、ロッシュモデルの仮定の下に、光度曲線から求めることができるということになる。

適切なたとえではないが、解析的な方法が、星のことばをコパール著「最新大星和文法辞典」などの辞書を引

き引きスマートに翻訳していくとすれば、シミュレーション法は、星のことは自動電子翻訳機(?)にかけて力まかせに訳してしまうといえなくもない。どちらを使うかは好みにもよろう。

以下に、私が開発したシミュレーション法(光度曲線合成法)による解析例を紹介してみよう。

### 5. 短周期非接触連星

主系列星が連星をつくっている場合、どのくらいまで二星は接近できるだろうか、またそのように近接した連星では、星の構造はどのように変形し、進化による影響はどのように現われてくるだろうか等を観測的に調べてみようと思いついて、私達は、周期が1日程度より短い、接触していない(D, SD)連星を総合的に研究することをはじめています。

私達は、また調べられたことのない多数の候補星をリストアップし、その中から、堂平と岡山の両観測所で測光観測を行ない、すでに数星について良い光度曲線を得た。また、岡山観測所で分光観測を行ない、スペクトル型を決め視線速度曲線を求めている。

このうちのひとつ、UU Lyn について私達が得た光度曲線とその解析例が図2に示されている。実線で示された解析の最終解は、良く観測を再現していることが分かる。臨界ロッシュローブと実際の UU Lyn の各星は図

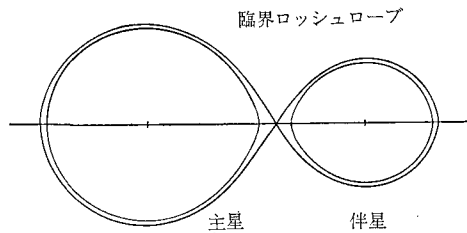


図3 短周期非接触連星 UU Lyn.

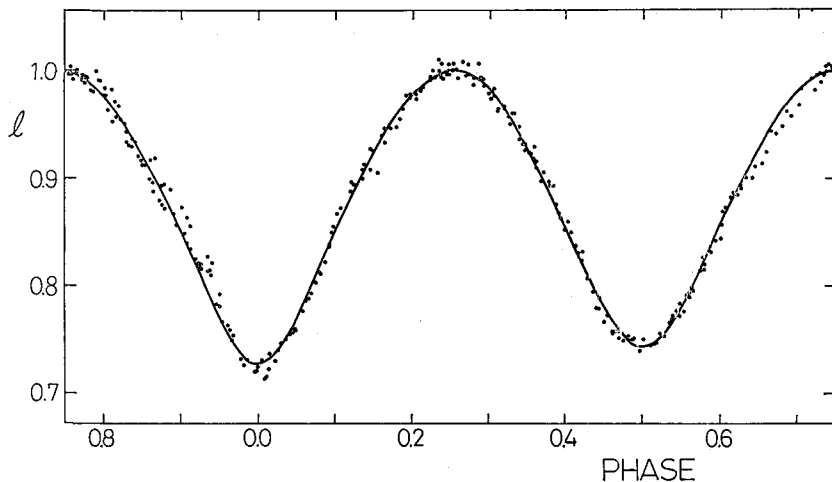


図4 接触連星 TX Cnc の光度曲線(周期 0.383日).

3のようになっている。両星とも非常に臨界ロッシュローブに接近しているものの、なお接触していないことが示されている(D)。

光度曲線解析から、光は主星から97%、伴星からはたったの3%しか来ていないことが分かった。勿論、スペクトルをみても伴星のスペクトルは全く見ることはできない。つまり、視線速度は主星からのものだけである。通常、こうした場合、質量比を求めることは出来ない相談である。しかし、光度曲線合成法はロッシュモデルの仮定の下に、質量比を0.41と与えた。この値は、全体の考察からみてもつじつまが合っており、信用のおけるものではないかと思われる。

短周期非接触連星 UU Lyn が、現在どのような連星進化の位置にあり、今後どのように進化していくのか興味のある問題であり、さらに詳しい観測が望まれる。

このような短周期非接触連星の観測のためには、多くの候補星が13, 14等以下と暗いため、現在は10-12等の明るいものに限定しているが、是非とも大口径望遠鏡でこれらの暗い天体を、効率良く観測したいと希望している。また、短周期であるため、望遠鏡をふる必要のない二光路高速測光器が是非必要であり、早急に製作できることを願っている。

### 6. W UMa 型接触連星

EW と分類されている W UMa 型星の光度曲線解析は、星の球体からの歪みが著しいため、従来の解析的方法では取扱いが困難である。最近では、光度曲線合成法によって解析が進められ、接触連星の理解が随分進んだ。1968年のルーシの W UMa 型連星の共通対流層モデルは、その後の理論の進展の出発点となった仕事であるが、同時に出された W UMa 型連星の光度曲線の計算は、その後の1970年代に生まれた光度曲線合成法の先

駆的なものであった。

少なからぬ W UMa 型接触連星の光度曲線が、この方法によって解析された。しかし、計算に要する時間は決して小さくなく、また、計算機やプログラムを利用しにくい研究者もいると思われるため、私はコパールの方法や北村の方法の特性量との類比で、接触連星についての特性量を定義し、表を計算して与えた。この表を使えば、粗いとはいえ、光度曲線合成法の計算をしないで接触連星のパラメータを概略求めることができるものである。昨年秋、西ドイツのバンベルクで連星についての IAU コロキウムが開かれ、星の進化との関連で議論が行なわれた。日本からは私が出席したが、席上、チュービンゲン大のマウダーが、私の表を愛用し、彼の観測の解析に役立てていると言っていた。

図4は、私達（北村、山崎）が観測したプレセペ中の W UMa 型連星 TX Cnc を、この表だけを使って解を求めたものである（実線が解）。観測を十分良く再現していることが分かる。表を使わないでもっと良く観測に合わせてみる計算も行なってみたが、表をつかったものと殆ど差はみられなかった。

このように、光度曲線合成法は、W UMa 型連星に於て本質的な成功をおさめたが、しかし新たな問題も生じている。質量比を光度曲線から決めることは既に述べたが、W UMa 型の場合、分光的に決めた質量比と一致しない場合が少なくないことや、光度曲線をより良く合わせるために導入する両星の表面温度差が結構大きく、共通対流層モデルの理論値と整合しないこと、周辺減光、重力減光、反射能などのパラメータが必ずしも理論の予想と合わないことなどである。いずれにしても、これらは、今後共接触連星の理論と光度曲線解析の両方が、相互に矛盾を解決する方向で進んでいくことは、間違いないところであろう。

7. 星の黒点

太陽と同じように、恒星にも恒星周期があることを示したのは、O. C. ウィルソンであるが（1978年）、RS CVn 型星では、連星であるために自転が公転と同期し、単独星の時より速く自転させられることにより、太陽黒点をはるかに大規模にした星の黒点が存在すると言われている。この黒点の存在のため、RS CVn 型星の光度曲線は歪められて、しかもそれがゆっくりと動いていく現象が見られる。これは、表面の黒点が微分回転のため非一様に自転しているためと解釈されている。同様な現象は、BY Dra 型フレア星にもみられる。

ところが最近、W UMa 型連星に於ても、その光度曲線が形を変えるものについて、表面に黒点の存在が示唆された。IUE でみると、特に RS CVn 型星や W UMa

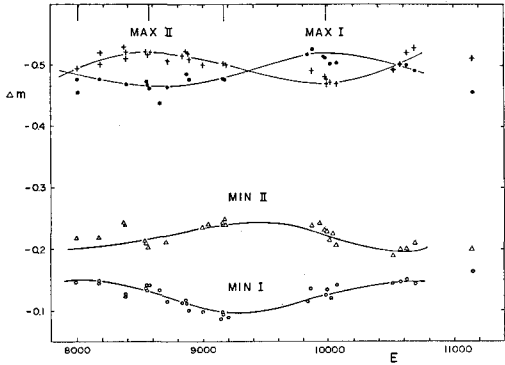


図5 接触連星 VW Cep の光度変化（周期 0.278 日）。MAX I, MAX II はそれぞれ位相 0.25, 0.75 の極大等級。MIN I, MIN II はそれぞれ主極小, 副極小の等級。いずれも比較星 HD 199476 からの等級差。E は公転の繰返し回数。（K. K. クィー 1966 による）。

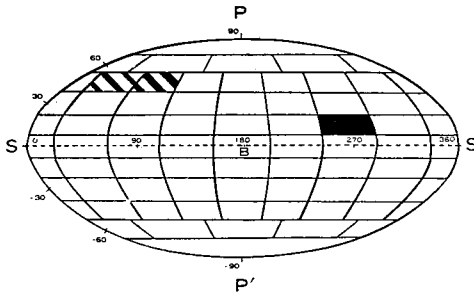
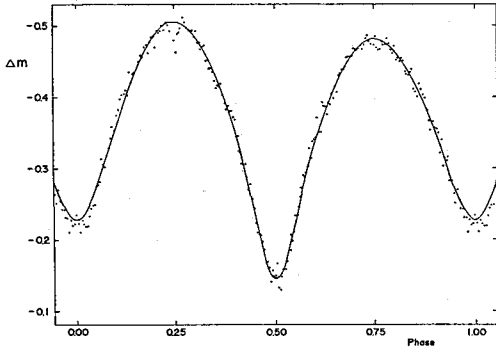
型星は強い紫外線放射源であり、また、アインシュタイン衛星でも両者は強い X線源であることが分かった。両者で彩層やコロナの基本的な構造は違わないとすれば、RS CVn 型星と同様、W UMa 型星でもこのような活動の一環として、黒点があるとしても全く不思議ではない。

光度曲線の形を変える W UMa 型星は珍しくないが、なかでも VW Cep は変化が大きく、K. K. クィーの精力的な連続観測があることもあって、私はこの星の黒点分布を求めてみることにした。VW Cep は、IUE でもアインシュタイン衛星観測でも、W UMa 型星の中で特に強い紫外、X線放射を行なっている興味深い星でもある。

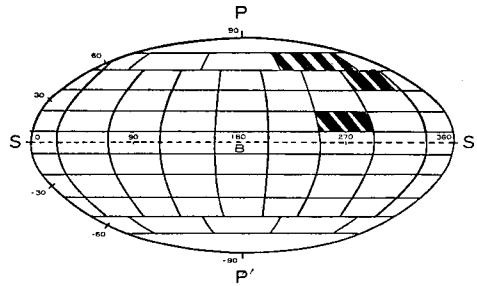
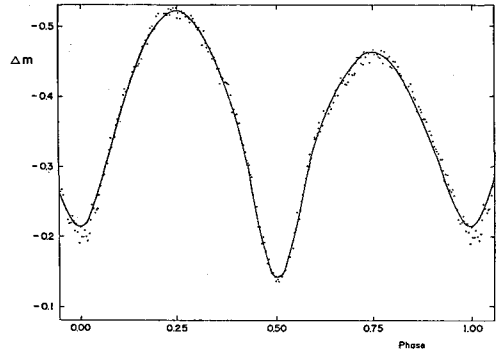
解析はまず、黒点がないとした時の光度曲線探しから始められた。しかしどの時期の光度曲線を見ても、何らかの変形をうけておりこの星では黒点のない時期はないのではないかとあきらめた（図5）。しかし、黒点は常に見えているというわけではなく、黒点が隠れて見えない位相もあるようなので、多くの光度曲線を重ねて、黒点のない光度曲線というものをつくった。これを、光度曲線合成法で解析し、接触連星としての解を得た。

その上で、黒点の存在していると思われる主星の表面を 66 の領域に分け、1つ1つの領域に 11 段階にわけて強さ（大きさ）の異なる黒点をおき、黒点が 66 の領域中最高 4 つの領域にあるとして、クィーの観測にあうまであちこちの領域にいろいろの強さの黒点を置いていった。さすがの電子計算機（M 200 H）も黒点の配置を決めるまでには随分時間がかかったが、最終的には、図6のような主星上の黒点の分布が得られた。黒く塗りつぶしたところほど黒点が強く（大きく）、白いほど黒点が弱い（小さい）。

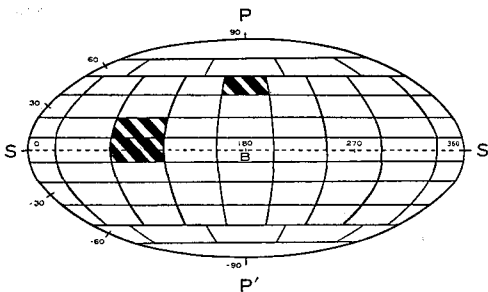
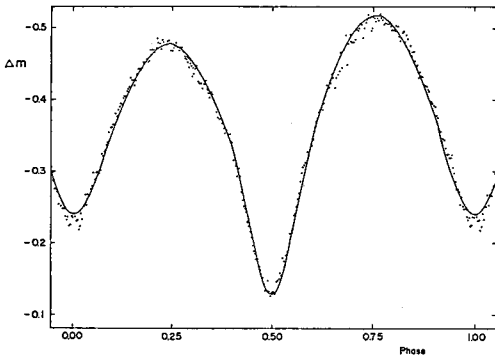
(a) HJD 2436124



(b) HJD 2436285



(d) HJD 2436679



図から、主星の表面を黒点が1周するのに2年ほどかかってゆっくり自転と同じ向きに、平均の自転よりも約0.04%ほど速く、運動していることがわかる。

実をいえば、黒点の分布は、RS CVn 型星や BY Dra 型星では求められたことがあるが、これはいずれも球状星上の黒点として求められたもので、W UMa 型星のように、本質的に球からずれた接触連星について、このような黒点分布が求められたのは、これが最初である。シミュレーション法(光度曲線合成法)の有用性を発揮した計算ということができよう。

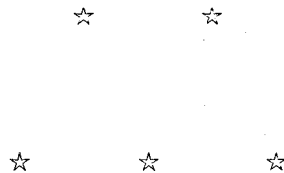


図 6 接触連星 VW Cep の光度曲線と主星上の黒点の位置。P, P' は極, S は伴星とつながる点 (L<sub>1</sub> 点)。 (C=表紙)