

である。

2. 2重周期ケフェイドの発見

南の三角座U星とカシオペア座TU星とは、極大光度が毎回かなり異なる。これらの星を観測していたワルラーヴェンやオステルホフたちは、極大光度があるときは高く、あるときは低く、と変化しようすが、振動でいう唸りに似ていることに気付いた。そこで、ふたつの変動に分解できないかどうか調べ、その結果、2個の異なった周期を持つ振動が重なり合っているとすれば、それらの変光曲線が説明できることを発見した。周期が2重に存在するというので、これらの変光星は2重周期ケフェイドと呼ばれている。2重周期への分解は、まずもともと目立つ周期を取り出し、その周期で「重ね合わせ」法を用いて第1の変光曲線を導き、その曲線と実際の観測の差を調べて、そこから第2の周期を見出すという手法が用いられていたが、観測が詳しく行われ、利用できる観測の数が増えてくると、観測結果をフーリエ分解して周期を見出すようになった。このようにして導かれた2個の周期の比は、おおよそ0.70から0.71の付近に集っている。ロジャース、ピーターセンらは、このような周期比がそれまで考えられてきた恒星の内部構造や進化の理論と必ずしも一致しないことを指摘した。竹内は、励起されているモードが第1倍振動と第2倍振動である場合を調べる必要があることを指摘したが、アメリカにおいて詳しい数値計算が行われ、その可能性は否定され、周期比の問題はなぞのまま残っていた。最近、恒星外層における気体の放射に対する不透明度についての研究が進み、従来の値が不正確であったことが分ってきた。新しい不透明度を用いて恒星の構造を計算すると、2重周期ケフェイドの周期比はほぼ説明できる。少なくとも従来よりずっと観測に近い値が得られる。このことは、新しい不透明度の妥当さを証明しているわけである。

2重周期ケフェイドが認知されてくるにつれて、他の変光が規則的に繰り返されない星についても、観測結果をフーリエ分解して周期を求める試みが行われた。楯座デルタ星型や、くじら座Z型星の変光星でも、フーリエ分解による複数個の周期の決定が行われ、これら多重周期の検出は、恒星測光観測の手ごころな目標となっている。その他、変光する超巨星、例えば、ヘルクレス座UU星では、かなり不規則な光度の変動を示し、約70日の周期が見られる時期と、約45日の周期が見られる時期が交互に現われるとされていたが、観測結果を72.5日と44.8日の2重周期変光として説明できることが、ゾールドシとサセロフによって最近、示された。二人は、2個の周期を仮定するだけでなく、それぞれのモードの振幅の変動も仮定しなければならなかったので説得力にはやや欠けるが、2個の周期が見出されたことは興味深い。

3. 2重周期ケフェイドの理論

2重周期ケフェイドはその後引続き発見されているが、その理論的再現には問題があった。周期の問題についてはすでに述べたが、その他に、ケフェイドの流体力学的シミュレーションを行うと、すべての典型的ケフェイドは単一周りで振動する。このような性質は、振動論の立場からいえば、モード間の結合が強いために振動慣性モーメントの大きい基本モードが他のモードの振動を吸引してしまうということである。モード間の結合の強さは、それぞれのモードの振幅が小さいとし、かつ断熱振動とした場合については、竹内と相川によって計算されていた。非断熱変化まで含めた場合については、竹内・山川・石田¹⁾の近似がある。理論的には3次の微量量まで考慮し、かつエネルギーの式もきちんと扱わなければならないが、この研究ではそこまで到達していない。ブシュレらフロリダ大学のグループは、一般的な式を導いたが、複雑過ぎて理論的解析のためには使えない。

これまでのケフェイドの流体力学的シミュレー

ションでは、対流の扱いや表面近くでの衝撃波の取り扱いが不十分である。そのため、実際よりも結合が強くなりすぎている可能性がある。石田・竹内²⁾はこの線で流体力学的モデルの改良を試みているが、現在対流の取り扱いについて検討中という段階である。アメリカではロスアラモスのグループが対流を考慮した流体力学的モデルに取り組んでおり、琴座RR型変光星で観測との比較が行われている。

4. 恒星の脈動の特徴

流体力学的シミュレーションを行って直ちに感ずることは、恒星の動径方向の振動で基本モードあるいは第1陪振動など、次数の低いモードが容易に発生することである。このことは、恒星は、動径方向の変化に対しては、ひとまとまりの物体として振舞う性質をもっているということである。別の言葉でいえば、恒星の動径方向振動では、実現する変動の規模が恒星の大きさに近いということになる。このような場合、恒星の動径方向振動を、少数次元の運動方程式で近似することが許されるであろう。実際、質量が恒星の中心に集中しているようなモデルによって、恒星の脈動の周期、振動に対する不安定性が近似できることをベイカーが指摘した。ベイカーのモデルは、質量保存の式、運動方程式、エネルギーの式の3本の1階の微分方程式で書き下される。(すなわち、自由度2の系である。)流体力学的モデルを用いてシミュレーションを繰り返してみると、このような少数自由度系で恒星の動径方向脈動をある程度近似できるのではないかという気持ちがでてくる。他方、タックマンら、ファデエフら、中田典規などは、流体力学的モデルが場合によっては不規則な変動を示していた。

5. 非線形理論の応用

現実の流体力学的変光星の振舞いが決定論的少数自由度系として記述できるのではないだろう

か。もしそうならば、そのような系の一見不規則な動きは、少数次元の位相空間のなかの運動として捉えれば見通しよく研究を進めることができるのではないだろうか。こう考えたとき、新しい研究の分野が開けてきた。茨城大学の田中靖夫は、非線形振動におけるレスラーの式(自由度2)に注意を向けた。ちなみに竹内がレスラーの式を変形してベイカーの式と比べられる形にしたのは、常磐線の水戸—仙台間の特急列車のなかである。さらに、齊藤も加えて、恒星の動径方向の流体力学的振動を現わす非線形の式を利用して、恒星外層の不透明度が非線形的に変化するという条件のもとで、モデルが周期分割分岐という経路を通じてカオス的振動に至ることを示すことに成功した。このような少数自由度でかつ散逸のある系の性質

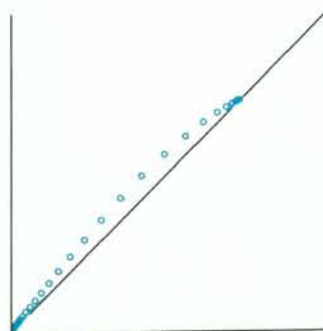
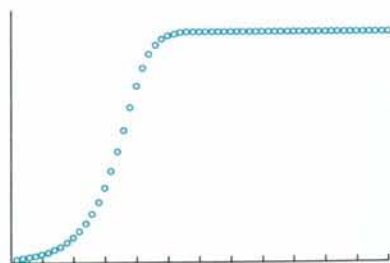


図1 (上)増加し、やがてある値に収束する数値の列、左から右へと順序に数値を示してある。(下)上の数値列の回帰図。通常のケフェイド変光星の流体力学的モデルでは、このような回帰図が得られる。回帰図については本文を参照されたい。

は、非線形力学で種々調べられている。その結果を参考にすると、たとえば、周期について回帰図を描いてみるとか、フェイズロッキングについて考えると、研究すべきことが見えてくる。これらについては、田中の解説が天文月報に載っている³⁾。

ここで、回帰図について考えてみよう。例えば極大光度が毎回異なる変光星の場合に、極大光度を時間順に並べて見ると、数値の列ができる。このような数列のなかの規則性を調べるために役立つのが回帰図である。回帰図は、列の中のN番目の数値とN + 1番目の数値の関係を図に描いたものである。ある数値がその直前の数値によって決

定されていれば、図は1価の関数のようになる。もし、各々の数値が、その直前の数値以外のものによって影響を受けていれば、図は多価関数的になるであろう。実際に、ペイカー流の恒星の単層模型では、回帰図はきれいな1価関数にはならない。これは、斉藤たちの用いた式が高次の項を含み、回帰図が位相空間の中での分りやすい断面でつくられていないからであろう⁴⁾。

流体力学的模型のシミュレーションの結果を用いてつくった回帰図は、意外なほどすっきりしている。プシュレのグループは多数の流体力学的模型について回帰図を描いたが、いずれも1価の曲線上に並び、その状況によって周期分割型（周期倍化型）分岐あるいは間欠（接線型）分岐の回帰図となった。模式的な回帰図の例を図1、2、3

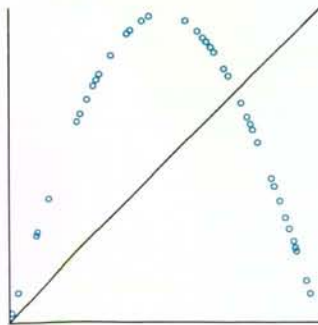
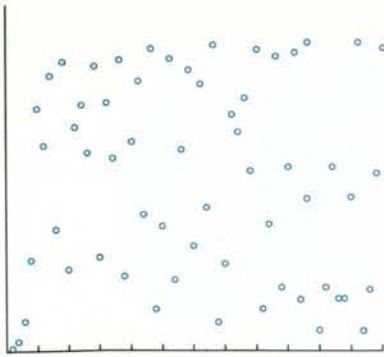


図2 (上)一見不規則な数値の列。
(下)上の数列の回帰図。明瞭な規則性が見られる。振幅が小さい場合に強い励起があり振幅が大きくなった場合に著しい減衰がある流体力学的模型では、このような回帰図が得られる。(周期分割型の例)

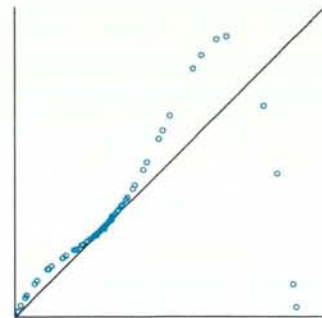
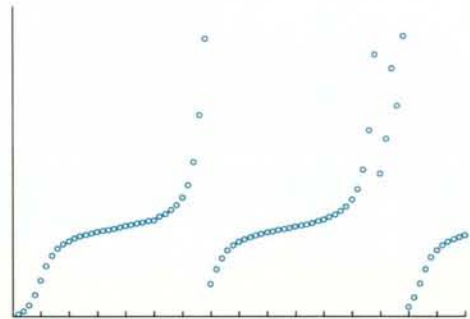


図3 (上)間欠的に不規則な数値の増加と減少が見られる数値の列。
(下)上の数列の回帰図。相川は、振幅の小さい場合と大きい場合にそれぞれ異なった励起作用と減衰作用が働くと考えた。(接線型の例)

に示す。相川とブシュレらとは、それぞれ独立に接線型の分岐が流体力学的モデルで得られることを見出した。これらの結果は、恒星の流体力学的モデルの動径方向振動が、ほぼ2自由度の決定論的系で近似できることをはっきりと示している。他方、観測結果の整理は西城、渡辺、コラートらによって行われているが、流体力学的モデルに比べて、まだ分りやすい回帰図が得られているとはいえない。

6. 不規則変光星

恒星の動径方向振動が少数自由度系で近似でき、しかもそれが、パラメータを変えると周期分割分岐あるいは接線分岐という経路を通じてカオスの振動になるならば、われわれは、単一周期変光星も複数周期の変光星も、その極限としてのカオス的な変動を行う変光星も、統一的に取り扱ってよいといえる。問題は、このような分岐に際してのパラメータは何かということである。斉藤たちの単層モデルでは、不透明度の非線形性を表すパラメータがそれであった。フロリダや仙台での流体力学的モデルについての研究結果を眺めると、質量や光度が同一ならば半径の増加が分岐を進行させ、光度と半径が同一ならば質量の現象が分岐を進行させていることが分る。すなわち、モデルの表面重力がパラメータとしてよさそうである。

恒星の表面重力がパラメータであるということは、似たような構造の恒星において、表面重力が相対的に強ければ単一周期の変動を示し、逆に弱ければ多くの周期を示す変動をするということである。周期が多ければ、観測的には多数の周期が入れ替わり立ち替わり現われるので容易には規則性が発見できず、不規則的な変動として記録される他なくなる。これをさらに突き詰めて考えれば、表面温度と光度が等しい2個の恒星があったときに、一方が単一周期で変動し、他方が複雑な変動を示しているならば、片方は質量が大きく、他方は質量が小さいというように解釈できるわけであ

る。

このように変光の不規則性が小質量の証拠になるということは、まず、ぎょしゃ座イプシロン系のF型星について考えられた。他の観測結果も合わせて検討された結果、この星の質量は小さいことが確かめられた。先に述べたヘルクス座UU星については、ジョルドシとサセロフによる周期比0.60という値は、質量が太陽の14倍のG型超巨星でなければ満足されない。これに対して、周期の平均が72日程度であって、多数の周期を示す小質量星であるとする、質量が太陽より小さいF型超巨星という可能性がある。

ヘルクス座UU星は明らかにF型であり、2個のモードへの分解にあたって、振幅の変動というかなり任意性の強い仮定を用いなければならなかったことを考え合わせると、多数の周期を示す単一のモードという考えが妥当のように思われる。ここまで研究が進んできたのであるから、ヘルクス座UU星についての流体力学的シミュレーションを行うことが望まれる。相川は古い不透明度を用いてではあるが、この星を狙った流体力学的モデルを調べ、複雑な変動が生ずることを確かめている⁵⁾。

ヘルクス座UU星が、大質量であれば、太陽の6万倍の光度があることになり、銀河面から9キロパーセクの高さに存在する年齢の若い恒星であるということになる。このようなところに、どうして若い恒星が存在するのかを考えることは、問題としては面白いが、ちょっと奇をてらいすぎているような気がする。

7. 検出されたモードへの疑問

種族IのA型あるいはF型の巨星（あるいは主系列星）で、周期が0.01日ないし0.2日、変光範囲が0.9等以下の一群の変光星がある。これらが、楯座デルタ星型変光星である。この種の星の変光は一見したところ規則性が少ない。フーリエ分解すると幾つかの周期が浮び上がってくる。ここで

得られる周期は、最初に取り上げたミラの場合のように観測から直接見出される時間間隔ではなく、多数の正弦波に分解した際に、どの成分が主要かという意味での周期である。このようにして得られた周期が突然不連続的に変化する例がある。このような変化は、カオス的な変動を無理に正弦波に分解していることによるのではないかという疑問がジェンボウスキやブレグから提起されており、非線形理論による研究が望まれている。これらの星は多数の動径方向および非動径方向のモードが弱く結合していると思われるので、検討は容易ではない。

8. 系の自由度を推定する

ある物理量の時間変化が与えられたとき、その変動が何個の自由度をもつ系によって引き起こされているかを、その変動のフラクタル次元を調べることによって推定することができる。この方法では、データの数が少ないと、フラクタル次元が多い場合には明確な結果が得られない。天体の場合、充分多数の観測結果を集めることは難しいので、実際には使えないことが多い。

海野らは白鳥座X-1のX線変動のフラクタル次元を調べた⁶⁾。最近、兼武、牧島らは、ケンタウルス座X-1のX線変動のデータを解析し、その4.8秒周期の変動を支配する系の自由度は小さくないことを見出した。このことは、ケフェイド型の変光星の光度変化が少数自由度系に対応しているのに対し、ケンタウルス座X-1のこのような性質は、X線の4.8秒変動をつくりだしている物理過程の尺度が、X線を出している領域の大きさに比べて小さいことを示している。それが具体的に何かとはまだ言えないが、このような形でX線変動の機構の解明のための手がかりを増やすことができる。また、数百秒の尺度での強度の変動については、自由度の小さい系に起因しているかも知れないという結果が得られているが、はっきりしたことはまだいえない。

9. 非線形変光星論の将来

以上、流体力学的変動に起因する変光星の研究に、非線形力学の概念を応用することが最近試みられてきたようすを述べてきた。非線形力学の概念としては、離散量の間の法則性とか、位相空間での軌道とか、いろいろ基礎的な事項があるが、今回はそれらを省いて、現実の変光星の理解に密着した問題を主として述べてきた。降着円盤の振動も非線形理論を適用すれば有益な結果が得られると思われるが、今回は触れなかった。とりあえず、変光星の多重周期性や不規則性について、やみくもに流体力学的シミュレーションを試みるのではなく、ある程度の見通しをもって考えることができるようになってきたことは分って頂けたと思う。今後の研究の突破口は理論的研究よりは観測の整理の面で起きそうであるが、今のところ個々の星についての観測の量が充分でなく、回帰図もフラクタル次元の決定も充分な精度で行われていると言いはし難い。AAVSO(アメリカの変光星観測家の組織)などで、精力的に観測を収集し、そのコンピュータによる整理が始められている。このような基礎的な努力と、非線形振動論のいつそうの進歩との組合せによって、恒星の構造と進化についての手がかりをより豊かにして行くことができる。

ここ数年、東北大学電気通信研究所の澤田康次教授には私の話相手になって頂き、数々の有益な示唆を頂いた。また、近畿大学の海野和二郎教授には絶えず激励して頂いた。ここでお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 竹内峯, 1992, 天文月報, 85, 12 (掲載予定).
- 2) 石田俊人, 1992, 天文月報, 85, 352.
- 3) 田中靖夫, 1991, 天文月報, 84, 397.
- 4) 斎藤昌也, 1990, 天文月報, 83, 110.
- 5) 相川利樹, 1992, 天文月報, 85, 30.
- 6) 海野和二郎, 1991, 天文月報, 84, 312.