

巨星から惑星状星雲へ駆け抜ける星 — 牡牛座RV型変光星 —

竹内 峯

〈東北大学天文学教室 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail : takeuti@astr.tohoku.ac.jp

変光曲線がダブルピークという特徴を持つ牡牛座 RV 型変光星は、漸近巨星枝から惑星状星雲形成への過渡期にある恒星であり、その特徴的な変光は数千年しか続かない。謎のダブルピークは、二つのモードの共振らしいが、非線形振動論にはとって絶好の試金石である。

1. 牡牛座 RV 型星の謎

牡牛座 RV 型変光星は、これまでわれわれの銀河系では 120 個程度しか発見されておらず、これを取り扱った研究論文の数も多くはない。変光曲線は、ダブルピークを示すという特徴を持っているが、長い時間観測をしていると、ダブルピークというてよいかどうか分からなくなったり、平均光度が変動したりするという奇妙な動きをすることがあり、古典的な脈動変光星の理論ではどう考えてよいか分からない。最近の詳しい測光観測の例としては、ポラードらの研究がある¹⁾。

この型の変光星の明るいものの例を表 1 に掲げる。サブグループとして、極大光度がほぼ一定の RV a 型と、極大光度が周期的に変動する RV b 型

とがある。RV b 型の平均光度の変化は、連星であることによると思われるが、ここでは立ち入らない。

このグループの特徴は、ダブルピークであって、図 1 に模式的に示したように、深い極小と浅い極小が交互に観測され、かつては琴座ベータ型の食変光星かと疑われたことがある。変光曲線は毎サイクルごとにかんがりの変化を示す。周期をどう測るかが問題であるが、深い極小から次の深い極小までの期間を周期とするのが習慣である。このような周期をダブルピリオッド（二重周期）あるいはフォーマルピリオッド（公式周期）という。二重周期は、近年他の種類の変光星で周期が 2 個発見されているものを呼ぶ際に用いられており、それと混同されそうである。これに対して、深いか浅いかを問わず、とにかく極小と極小の間の期間をシング

表 1 明るい牡牛座 RV 型変光星

星	極大光度 (等)	極小光度 (等)	周期 (日)	スペクトル	サブグループ
R Sge	8.0	10.4	71	G0Ib-G8Ib	RVb
AC Her	6.85	9.0	75	F2Ib-K4	RVa
RV Tau	9.8	13.3	79	G2Ia-M2Ia	RVb
R Sct	4.2	8.6	147	G0Ia-K2(M3)Ib	RVa

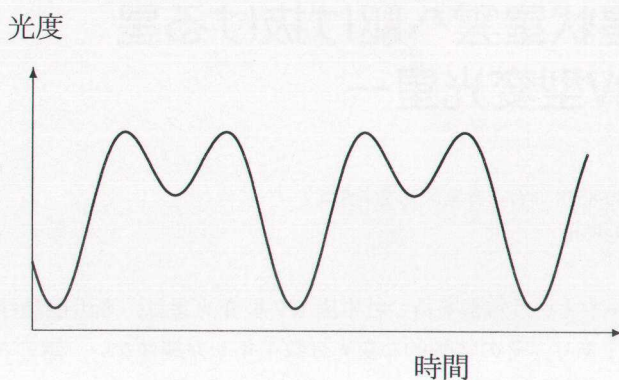


図1 金牛座 RV 型変光星の光度変化 (模式図)

ルピリオッド (単周期) あるいはファンダメンタルピリオッド (基本周期) という。基本周期というと、脈動理論でいう基本振動の周期と混同されやすいので、これも困る。半世紀も前に使い始められた用語が、変光星研究の発展の中で、生き延びられるかどうかという瀬戸際にある。表1に掲げられている周期は公式の周期 (フォーマルピリオッド) である。シングルピリオッドは、公式の周期の2分の1である。

金牛座 RV 型変光星では、なぜ深い光度極小と浅い光度極小が交互に現れるのかという質問をされるが、答えを先に言えばまだ分からないということである。この謎をめぐる研究者間での議論は、この稿で追って紹介する。

金牛座 RV 型星の第一の特徴は、この2種類の極小が交代することである。2番目は、周期が30日程度から150日の範囲にあること、3番目にはスペクトル型がF型からK型の範囲にあり超巨星 (光度階級 I あるいは II) であることが特徴とされている。なぜ、このようなスペクトルを示す星が、ダブルピークの変光をするのかが、問題である。のちに述べるが、この型の変光は、恒星の進化の特別な状態の場合のみ見られるので、巨星の最後の段階にある星について研究する上で極めて興味

深い手掛かりとなる。この型の星についての専門的研究の紹介は多くはないが、ワールグレンのものがある²⁾。

2. 共振仮説

金牛座 RV 型星についての理論は、以前から少なかった。従来の脈動星の理論は、線形理論 (振幅が微小で、時間変化はサインカーブとする) が主であったから、このような不規則性の強い変光には歯が立たなかった。星の構造を考えようとすると、エネルギーの放射率 (絶対光度) が必要だが、個々の金牛座 RV 型星の距離を測ることができなかったので、それも難しかった。しかし、球状星団中に4個のこの型の変光星が発見され、漸近巨星枝 (Asymptotic Giant Branch) の星が、惑星状星雲を持つ星に向かって進化する途上の状態にあると考えられた。こう考えると、光度階級が I (超巨星) というスペクトルの特徴も、表面重力が低いということから説明できる。この解釈は現在ますます正しいとされてきている。球状星団の距離から導くと、絶対光度はマイナス3.5等程度となり、漸近巨星枝から進化してきたとすると、質量は太陽質量の0.6倍前後なはずである。

1983年に、わたしはコペンハーゲン天文台のピ



ーターセン博士と共同で、牡牛座 RV 型星のダブルピーク型変光を、線形振動の基本モードと第 1 陪振動の共振で説明できるかどうか調べた結果を発表した。深い極小は基本振動で起きており、それにはめ込まれるように第 1 陪振動が起きていれば、それが浅い極小を作り出すであろうという単純なアイデアであった。

この研究のポイントは、牡牛座 RV 型をケフェイド不安定系列の一部と考え、共通の周期・平均密度関係が成り立つとしたことである。しかし、周期を計算するコードとしては、当時手元には線形断熱近似のコードしかなかったため、非断熱効果を含めて周期を計算できなかった。そのため、結果は観測を説明するところまで行かなかった。そこで、タケウチ・ピーターセンの共振仮説と呼ばれたわけである。1980 年夏にベルギーのリエージュで開かれた天文学者の集まりで、この研究を初めて発表したとき、それまで脈動理論の適用が遅れていた牡牛座 RV 型に手を着けたということで反響があった。

この論文は宿題をふたつ残した。ひとつは、牡牛座 RV 型星の周期・光度関係の勾配が正か負かという疑問である。当時球状星団の距離に基づいて導かれていた関係では、周期の長い星ほど光度が暗くなる（勾配は負）ということであった。わたしたちの計算では、どうも勾配は正になる。観測者たちは、これを研究のひとつのターゲットにした。また、わたしたちの周期の計算が線形断熱であっ

たため、非断熱性や非線形性を考慮に入れた場合、理論的周期がどうなるかという問題も残った。これらの宿題に答えが出てきたのはしばらく経ってからである。

3. 新しい理論的周期

星の模型やその振動の数値計算はけっこう複雑で、恒星大気中での放射の伝搬や、各種の物理的過程の評価をきちんと行わなければならない。省略すべきものは省略しないと、答えを出すまでに膨大な計算時間が必要となり、研究が完結しないということになる。腕力と計算機利用の努力だけでなく、理論的作業が必要とされる場所である。線形非断熱周期の計算には計算技法も重要で、異なった研究グループによる相互チェックがないと不安が残るところであるが、これまでの周期計算の結果は、基本振動と第 1 陪振動の共振が牡牛座 RV 型星で起きていそうだとことを示している。

線形非断熱効果は、星の表面で放射の伝搬の効果が熱容量に比べて大きいことに由来する。そのため表面重力の小さな星ほど著しい。漸近巨星枝の星は、すべて非断熱効果が著しい。ミラ型変光星の研究もそういう意味では難しいのである。基本モードの周期は非断熱効果によって短くなる。例えば 170 日周期であったものが 70 日まで短くなる。この原因は、簡単に考えれば、表面近くの音速の遅い殻が放射に対して透明になり、表面での反射が実質的には星の表面より多少内側で行われ

表 2 漸近巨星枝段階を過ぎた星の基本モードと第 1 陪振動が共振を起こす場合

質量 (太陽質量)	光度 (太陽光度)	表面温度 (K)	周期 (日)
0.55	1600	5200 - 4700	35 - 50
0.60	4600	5200 - 4600	70 - 110
0.65	7600	5200 - 4500	85 - 140

ていることにある。第1倍振動モードでは、脈動のノードになる部分が表面に近いので、周期が短くなるとは限らない。詳しい計算の結果を整理して見ると表2のようになる³⁾。この新しい結果は、タケウチ・ピーターセンの単純な共振仮説が、ダブルピークの説明になっているのではないかと考えさせる。

4. 流体力学模型

流体力学の式をもとに星の状態が時間とともにどう変わっていくかを計算できる。このような計算では、線形非断熱の周期計算に比べて精度は落ちるが、脈動の非線形挙動を調べることができる。質量が太陽の0.6倍で、光度が太陽の6000倍である星についての計算例を見ると、表3のようにになっている⁴⁾。表面温度5200 Kを境として、高温の側は1周期に極大が1個であり、低温の側は極大が2個(ダブルピーク)である。興味深いのは高温側の模型は第1倍振動で脈動しており、ダブルピークになっている模型は、基本モードでも第1倍振動でもない周期で脈動する。極大光度のリターンマップを描いてみると、接線分岐という過程を経て不規則な振動へ移っているように見える。この計算は、シミュレーションでタケウチ・ピーターセン仮説の検証を目的としてなされたが、なお検討の余地がある。

牡牛座RV型変光星より光度が低く、表面温度

が低い模型でシミュレーションを行った結果では、光度が低ければ倍周期分岐を経て多重周期振動へ移り、光度が相対的に高ければ接線分岐を経て間欠的に不規則な振動が励起される状態に移る。牡牛座RV型では接線分岐を経て複雑な振動に移るということは、これらのシミュレーションの傾向と一致する。接線分岐を経て不規則振動へと進む模型がダブルピーク型変光を示した例もある。(倍周期分岐、接線分岐は、過程の特徴を表すために、非線形振動論で用いられている概念で、規則的振動が乱れていく際の特徴を表す。)

5. マイクロレンジング探査から

重力レンズのうち、質点が作り出すレンズ作用がマイクロレンジングである。われわれの銀河系の内外での恒星や恒星より小さな天体(MACHO)の分布を、マイクロレンジングによる星の増光を手掛かりにして調べるために、銀河系のバルジやマゼラン雲の星を長い間監視する作業が続けられている。この結果蓄積された多数の星の明るさについてのデータは、変光星観測者にとって宝の山である。大マゼラン雲中では既に1500個の典型的ケフェイドと1万個の琴座RR型変光星が確認されている。この宝の山をあさった結果、大マゼラン雲中の牡牛座RV型変光星の周期・光度関係が確かめられた。

図2には、27個の変光星がプロットされている

表3 漸近巨星枝段階を過ぎた星の変光のシミュレーション

表面温度 (K)	周期 (日)	変光曲線の形
5200	70.3	ダブルピーク
5215	69.5	ダブルピーク
5235	39.7	極大1個のみ

質量 = 0.6 太陽質量, 光度 = 6000 太陽光度

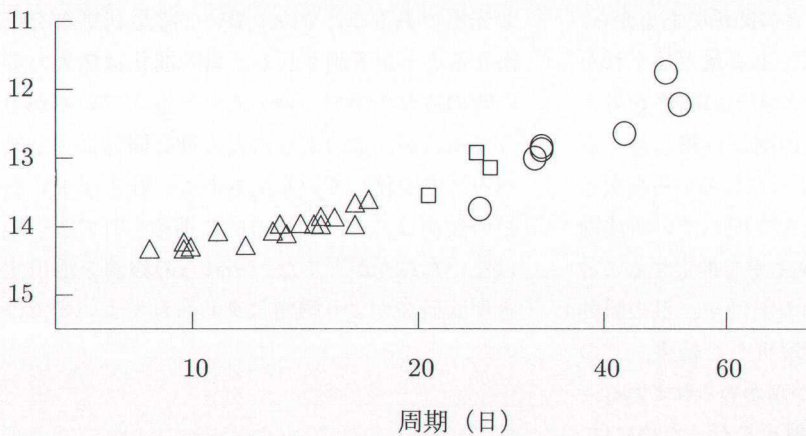
W_{MACHO} 

図2 大マゼラン雲中の牡牛座RV型星の周期・光度関係 W_{MACHO} は赤い光の等級 (R_{MACHO}) に星間物質による吸収の影響を補正した量で、ほぼ絶対光度に比例する。図の中で記号はそれぞれ、タイプIIケフェイド：△，牡牛座RV型変光星：○，両者の中間型：□を示す。

が、周期が短いものはタイプIIケフェイドで、周期の長い7個が牡牛座RV型である⁹⁾。両者の中間的なものが3個発見されている。図で縦軸は、赤い光に星間物質の吸収の影響を補正した量であり、ほぼ絶対光度に比例する。タイプIIケフェイドの延長上にダブルピークを示す模型があることは、これまでのシミュレーションでも確かめられていたが、このようなはっきりした観測結果が得られたのは、これが最初である。牡牛座RV型とタイプIIケフェイドとは周期25日を境に切り替わっている。注意してほしいのは、この図に掲げているのはシングルピリオッドであって、公式の周期の半分である。したがって、この図で一番周期の短い牡牛座RV型は、52日周期である。ある研究会で最初にこの図を見せられたとき、大マゼラン雲の牡牛座RV型星は周期が短いものばかりなのかと一瞬疑った思い出がある。

大マゼラン雲中の牡牛座RV型星の研究の結果、周期が長い方が明るいというケフェイド型変光星に共通の性質が確認されたことは、さかのぼってタケウチ・ピーターセン仮説を支える結果といえる。しかし、共振かどうかは、この図だけでは何ともい

えない。また、周期75日の星は、この関係を用いると、光度が太陽の900倍となり、これまで理論研究で採用されていたのより小さな質量の模型を調べる必要が生じていることが示されている。

最近、銀河系バルジ中で2000個の半規則変光星が確認されたが、この中にも牡牛座RV型が含まれていると思われる。研究の進展が待たれるところである。

6. 変光曲線の非線形解析

振動理論によれば、星の脈動は断熱変化としてよい場合には自由度1の振動で近似され、非断熱効果が無視できない場合には自由度2の振動となる。断熱近似が成り立つ場合でも、2個のモードの相互作用が無視できないような場合には、自由度2の振動となる。変光星の観測結果から、脈動にかかわるメカニズムがどのような性質のものであるかを知ることができれば、星の構造についての理論を検証する上で重要な手掛かりを得ることができる。このような立場から行われるのが、非線形解析である。

変光曲線がサインカーブで表されるような変光

星では、自由度が1であって、断熱振動の理論を用いてよい。サインカーブからずれるような場合には、その変光曲線のフラクタル次元が手掛かりになる。変光曲線は時刻と光度との関係であるから、2次元の曲線である。これに、ある量だけずれた時刻の光度を組み合わせると3次元の関係が得られる。このようにして高次元の関係へ移し替えることを埋め込みという。このようにいろいろな次元における関係を見ると、変光を支配している法則がどのような自由度のものであるかを推定することができる。簡単な非線形振動の実例や、星の脈動のシミュレーションの結果を解析した結果、このような方法が有効であることが確かめられている。

実際に変光星でこのような解析を行うためには、数多くの観測結果が必要である。牡牛座RV型である盾座R星 (R Sct) について、非線形解析が行われたが、この星について長い年月にわたる多くの観測者の観測結果の蓄積があったからである。解析の結果、この星の脈動は、自由度が3の振動であることが分かった⁶⁾。非断熱効果が著しく、かつもう一つのモードが関係していると見るべきであろう。このもうひとつのモードは、第1倍振動であると思われるので、タケウチ・ピーターセン仮説はまあよいところを突いていたということになる。

7. リアルタイムで進化が追える

牡牛座RV型の変光星について、ここ十年ほどの研究の進展はまさに著しいものがある。赤外線観測衛星IRASのデータから、周囲に濃いダストがあることが分かり、漸近巨星枝段階をまさに過ぎた時期にある星だということが確認され、さらに周期・光度関係が確立され、理論と変光曲線の非線形解析の双方からダブルピーク型の変光の原因が確かめられようとしている。

星の進化の理論に従えば、漸近巨星枝の段階を終えた星がダブルピーク型の変光を示すのは、わずか数千年（あるいは千数百年）の期間にすぎない。この型の星に見られる、星の周囲のダストの

形成はたかだか300年前にストップしたばかりであるという。個々の星について何年先とは言えないが、牡牛座RV型星は、あまり遠くない将来に変光星であることやめ、ついで惑星状星雲を花開かせることが予測される。星の進化は悠久の宇宙の時の流れの中で、ゆったりと進んでいるかのようであるが、このように人の世と同じような速いペースで変化していく星もある。牡牛座RV型の星の観測は、もっと積極的に進められてよいのではないだろうか。また、それらの観測を活用すべき理論研究がより緻密に進められてよいのではないか。

参考文献

- 1) Pollard K.R., Cottrell P.L., Kilmartin P.M., Gilmore A.C., 1996, MNRAS 279, 949
- 2) Wahlgren G.M., 1993, in : Luminous High Latitude Stars, ed. D.D. Sasselov, (ASP Conf. Ser. 45), p. 270
- 3) Tuchman Y., Lebre A., Mennessier M.O., Yarli A., 1993, A&A 271, 501
- 4) Fokin A.B., 1994, A&A 292, 133
- 5) Pollard K.R., Alcock C., Alves D.R., Bennett D.P. et al., 1997, in : Variable Stars and the Astrophysical Returns of the Microlensing Surveys, eds. R. Ferlat, J.-P. Maillard, & B. Raban, (Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette), p. 219
- 6) Buchler, J.R., Kollath, Z., Serre, T., Mattei, J., 1996, ApJ, 462, 489

Stars Rushing from Giant Stars towards Planetary Nebulae

— The RV Tauri Stars —

Mine TAKEUTI

Astronomical Institute, Tohoku University

Abstract: The RV Tauri stars characterized by its double-peak light curve have remained as enigmatic variable stars for more than a half century. Progress on the study of this group is briefly reviewed. The success of non-linear analysis of the light-curve for R Sct and the confirmation of the period-luminosity relation for the Magellanic RV Tauri stars are new useful results in recent investigations. It will be interesting to watch the RV Tauri stars because they evolve very quickly.