

氏名。(本籍)	なか た みち のり 中 田 典 規
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 946 号
学位授与年月日	昭 和 61 年 1 月 29 日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻
学位論文題目	The properties of pulsations in low surface-gravity stars and its role in the mass-loss phenomena (低い表面重力の星における脈動の性質と質量放出現象におけるその役割)
論文審査委員	(主査) 教 授 高 窪 啓 弥      教 授 須 田 和 男 教 授 高 橋 真 一

## 論 文 目 次

第 I 章	序 論
第 II 章	低い表面重力の星における脈動
1	平衡模型
2	線形模型
3	非線形模型
4	低い表面重力の星での脈動の数値的な研究における改善
第 III 章	黄色超巨星のモデル系列
1	計算の方法
2	計算の結果
3	非線形模型の性質
4	考察とまとめ
第 IV 章	結 論

# 論文内容要旨

## 第 I 章 序 論

本論文は、低い表面重力の星における脈動の性質と質量放出現象におけるその役割を研究したものである。

Deutsch (1956) によって晩期型星の質量放出が確認されて以来、その機構を解明するために様々な努力が観測と理論の両面からなされてきた。その結果、高い質量放出率の恒星風をもつ晩期型星の外層構造について、観測が理論に要求していることは、ガスの温度が一万度程度あるいはより高い温度領域があるとしても小さな領域を占めるにすぎないこと、質量放出率はオリオン座の  $\alpha$  星を典型例にあげれば  $10^{-6}$  太陽質量/年であること、流出速度は  $5-100$  km/秒 で星の表面での脱出速度よりも小であり両者の比は表面重力の減少とともに小さくなる等の諸点である。こうした恒星風は、HR 図上の広い範囲の恒星において見出され、太陽の 1% 以下の表面重力を持つ晩期型星に共通の現象である。これらの特徴を説明する機構として太陽風や早期型星の恒星風で重要な役割を果たしている機構、すなわち、輻射による加速、アルフベン波による加速、熱的な加速が、重要な役割を担っている可能性が調べられたが、それらはいずれも否定的である。晩期型星の恒星風は、太陽風や早期型星の恒星風と比べて、ガスの温度や流出速度が著しく異なっているので、太陽風や早期型星の恒星風において重要な役割を果たしている機構に類似したものより、むしろ、晩期型星の特徴を反映した機構によって作り出されていると思われる。晩期型星の大部分は脈動しているので、このことを反映した機構がまず考えられる。脈動の大気外層への影響を調べる方法として、大気模型の内側の境界に脈動に似せたピストンを置いて大気の振る舞いを調べる方法があるが、この方法は大気の振る舞いの光球以下の層への反作用が無視できる場合に妥当である。低い表面重力の星ではこの反作用を無視することが難しい。加えて、低い表面重力の星の脈動自体も余りよく分かっていない。ここ数年間、低い表面重力の星の脈動の研究は流体力学的模型を使って行われてきた。モスクワのグループは黄色超巨星の流体力学的模型を作り、低い表面重力の星の脈動の強い非線形的な振る舞いを報告した。彼らの研究では、光学的に薄い領域での放射を拡散近似で取り扱っていることが問題であるが、脈動によって恒星風が生成される可能性を定性的に示している。そこで、彼らとは別な流体力学的模型を用い、彼らの研究と比較しながら、低い表面重力の星の脈動における表面重力の影響を調べる必要がある。本論文の第 II 章では、低い表面重力の星の脈動に関するこれまでの数値的研究をまとめ、流体力学的模型の改善すべき点を明らかにする。第 III 章では、本研究で用いられた流体力学的コードが記述され、計算結果、考察とまとめが述べられる。第 IV 章が結論である。

## 第 II 章 低い表面重力の星における脈動

Christy (1964) によって脈動の非線形解析の方法が提起されて以来、ケフェイド変光星やこと座 RR 型星では、多くの基本的な問題が解決されて信頼性の高い流体力学的模型が作り出

されている。最近、かんむり座 R 型変光性、長周期変光星、黄色超巨星などの低い表面重力の星の脈動に様々な理由から関心が集まっている。これらの星はケフェイド変光星やこと座 RR 型星に比べて質量に対して光度が非常に大きく、その脈動の振る舞いはよく知られていない。振動は平衡状態のまわりの運動であるので、一般に脈動の振る舞いは平衡模型の性質を反映する。長周期変光星と黄色超巨星の平衡模型は対流層の発達を除けば極めてよく類似している。従って、赤色超巨星を念頭におきつつ黄色超巨星の模型を研究することは妥当であると思われる。線形解析によって得られていることは、低い表面重力の星では、脈動不安定な領域が HR 図上で有効温度 10000 K の領域まで延びていること、振動の成長率が非常に大きいこと、断熱周期と非断熱周期との差が非断熱性の強まりと共に大きくなること、対応する断熱モードを持たない非断熱モードが存在すること、非断熱性の強まりと共に基本振動の周期が大気の臨界周期に近づくこと等である。これらの特徴はケフェイド変光星やこと座 RR 型星には見られないので、低い表面重力の星の非線形模型の振る舞いに関心を抱かせるが、多数の線形模型の系統的な研究に対して非線形模型の研究例は数少ない。その原因は、低い表面重力の星の脈動の特徴が、強い衝撃波の出現、非常に大きな振動成長率、大振幅という強い非線形非断熱性にあるので数値的取り扱いが難しいうえに、完全な極限周期解に振動が落ち着かず、数周期にわたって繰り返される運動がみうけられるので、膨大な計算時間が必要なことにある。従って、低い表面重力の星の脈動の理解は、線形模型の解析のうえに非線形模型を一つずつ調べることに同時に、脈動の性質を系統的に追跡することで得られると思われる。

これまでの数少ない研究側から、研究の発展のために流体力学的模型の改善すべき点が得られる。それらは、水素の臨界電離層を常に細かいメッシュで取り扱うこと、模型の外側の境界における進行波の反射を除去すること、光学的に薄い大気での放射の取り扱いを改善すること、大気のメッシュが粗くなるのを防ぐことである。

### 第 III 章 黄色超巨星の模型系列

第 II 章で述べた模型の改善すべき点を考慮して、太陽の 3200 倍の光度を持ち、有効温度が、5300 K で、太陽質量の 2.0, 1.5, 1.25, 1.0 倍の質量を持つ模型系列を, Castor et al(1977) によるコードを改良して調べた。この模型系列は表面重力が小さくなる系列であり、かつ、非断熱性の度合いが強くなる系列でもある。

まず、平衡模型が調べられた。この系列に沿って、質量の中心集中度が高くなり、重力的束縛の弱いより希薄な外被が作られる。He II の臨界電離層の外側にある質量は変わらないが、He II の臨界電離層の位置は星の中心核に向かって移動し、それに含まれる質量は減少する。一方、水素の臨界電離層の外側にある質量は増加するが、水素の臨界電離層の位置は変わらず、それに含まれる質量も殆ど変わらない。

次に模形模型を Castor (1971) に基づくコードを用いて調べた。脈動の成長率がケフェイド変光星やこと座 RR 型星と比べて一桁大きいこと、He II の臨界電離層による励起の度合いは

この系列に沿って変わらないが、水素の臨界電離層による励起の度合いは増加すること、基本振動だけが不安定でその非断熱周期と断熱周期との差は拡大するが、第一及び第二倍振動の非断熱周期は断熱周期に殆ど等しいことが得られた。

最後に、非線形解析を行った。質量の大きい二つの模型では、極限周期解が得られたが、小さな質量を持つ二つの模型では準周期的な解だけが得られた。後者が極限周期解に収束するようには思われず、数周期毎に同じような振る舞いを繰り返す傾向を持っている。この繰り返しは、振動の成長と、強い衝撃波の生成と共に振動が急激に減衰することから成る。強い衝撃波の生成による大気中における力学的エネルギーの散逸の増加が脈動の減衰を生み出していると思われる。質量の大きい模型の周期は線形非断熱周期よりも大きく、このことは解析的な結果と一致する。他方質量の小さい模型で得られた準周期は Takeuti の境界条件を使用した線形非断熱周期に近い。脈動の性質は両者で著しく異なるが、光球の挙動は不規則性や振幅の違いを除けば定性的によく似ている。他方、質量が小さい模型の大気は非常に広がっており、激しい運動を呈している。従って、低い表面重力の星の脈動は大気外層の振る舞いを抜きにして理解することはできない。

なお、この研究の最も重要なことの一つはモスクワのグループによる流体力学的模擬の結果を確認したことである。コードの特性の差は数値計算における時間ステップの長さの差として現われている。従って、低い表面重力の星の脈動の主な性質は、流体力学的模型によってほぼ把握されたと思われる。

#### 第 IV 章 結 論

低い表面重力の星における脈動の特徴は、強い衝撃波という形態の強力な進行波を伴う数周期に及ぶ運動、光球の運動から全く予測されない大気外層の激しい振る舞い、Takeuti の境界条件に基づく非断熱周期に近い脈動周期である。数周期毎に生み出される強い衝撃波の形態をした強力な進行波が広がった大気を作り出し質量放出現象と密接に関係していると思われる。

## 論文審査の結果の要旨

脈動する恒星としてケフェイド変光星、琴座 RR 型変光星などがよく知られているが、これらの星の脈動現象はかなりよく理解されていると言ってよいであろう。一方、低温度星（晩期型星）についてはその大部分が脈動を示すことがよく知られているにも拘らず、これの解明は充分とは言えない。また、これらの星、特に表面重力の小さな星、では周囲の空間にガスが流れ出す現象、つまり質量放出、が著しいがこれの解明もまた遅れている。

本論文は、これらの星の脈動がケフェイド変光星のものとは異なる機構を含み、大気中で生ずる現象が光球内部へも影響をおよぼすこと、脈動によって生ずる大気の運動は非線形的な性質が顕著であることなどが上記の困難を生ぜしめるものであることに着目し、これらの星の脈動と質量放出を同時に解明するために、光度が太陽の 3200 倍、有効温度が 5200 K の黄色超巨星を例として選び、このモデルを作成し平衡解のまわりの大振幅の脈動的振動を数値解析的手法を用いて究明しようとしたものである。

この解析においては、星の質量をパラメータとして四つのモデル（質量が太陽の 2.0 倍、1.5 倍、1.25 倍、1.0 倍）が作成された。これらのモデル作成では、水素の臨界電離層および大気外層の数値的取扱い、モデルの外側境界面での条件、大気中の輻射伝達などに詳細な注意がはらわれており、かつ、必要十分な時間間隔で積分が行われた。

この結果によると、質量が大きい方の二つのモデルでは定常的周期解に収束するが、興味あることに、質量が小さい方の二つのモデルでは、充分長い期間についての数値的追跡にも拘らず、準周期解しか得られなかった。これら準周期解は数周期毎に類似した振舞を示し、強い衝撃波が生ずるために大気中の力学的エネルギーが急速に散逸され、振動は減衰するが、振動の増幅率が極めて大きいため、再び衝撃波を生ずるという循環をくりかえす。また衝撃波は大気外層に向けて進行し、このため膨大な大気が形成され、かつ大きな質量放出が行われることになる。

以上の結果は、表面重力の小さな星の特徴をよく表しており、この種の脈動およびそれに伴う諸現象の正しい理解のために一つの指針を与えたものと言えよう。また、本論文の著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することも示している。よって中田典規提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。