

リービット変光星の線形非断熱模型

石田俊人^{1,2,*}

1) 東北大学理学部天文学教室

2) 兵庫県立西はりま天文台

A Linear Nonadiabatic Study of Leavitt Variables in the Magellanic Clouds

Toshihito ISHIDA^{1,2,*}

1) *Astronomical Institute, Faculty of Science, Tohoku University, Aoba, Aoba-Ku, Sendai, 980*

2) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Ohnadesan, Sayo-cho, Hyogo 679-53*

Abstract

Bright variable supergiants S65-08 and S65-48 in the LMC and HV1956 in the SMC are studied by using linear nonadiabatic radial pulsation models. Comparing observed properties with results obtained by linear models, it appears that (1) the mass adequate to S65-08 is $25 \sim 30M_{\odot}$, (2) all calculated models of S65-48 are pulsationally stable, (3) the mass adequate to HV1956 is $8 \sim 9M_{\odot}$. Furthermore, the evolutionary status and the characteristics as a classical Cepheid are examined for S65-08 and HV1956. It is found that the first crossing object of the evolutionary sequence with mass loss effect fit to the S65-08 model. On the other hand, it is found that the overluminosity of the HV1956 model as a classical Cepheid with $8 \sim 9M_{\odot}$ makes not to match to evolutionary calculations nor to relations of Classical Cepheids. In conclusion, model calculations shown here indicate that (1) although the effective temperature of S65-08 is too high for a classical Cepheid, this star is still a possible member of classical Cepheids, (2) S65-48 seems not a classical Cepheid, but a yellow semiregular variable, and (3) HV1956 is probably not a classical Cepheid.

Key words: Classical Cepheids; Linear Nonadiabatic Models; the Magellanic Clouds; Stellar Pulsation

1. はじめに

Grieve et al.(1985)は、大マゼラン雲中の非常に明るい2つの変光星S65-08, S65-48について、その性質を報告した。それによる

と、これらの星はいずれも、約250日の周期を持っており、古典的セファイド(classical Cepheid)に類似している。もし、これらの星が古典的セファイドに属することが確認され

* 現在の所属: 兵庫県立西はりま天文台

Present address: Nishi-Harima Astronomical Observatory, Ohnadesan, Sayo-cho, Hyogo, 679-53, Japan

れば、セファイドを用いた信頼性の高い距離決定が、従来の約2倍以上の距離まで可能になる。彼らは、これらの星を含めて、非常に周期の長い($\log P > 1.8$)古典的セファイド変光星をリービット変光星(Leavitt variables)と呼ぶことを提案した。

ところで、両マゼラン雲には、銀河系内で見られない周期200日以上セファイドが存在している。このため、こういったセファイドの進化状態を調べることは、マゼラン雲と銀河系の違いを考察する上でも興味深い。Madore(1985)が系外銀河中のセファイドの測光観測をまとめた表には、周期200日以上セファイドとして、大マゼラン雲の上記2つの星の他、小マゼラン雲のHV1956を合わせた3個があげられている。

しかし、Laney and Stobie(1986)の赤化補正済みのデータを用いて両マゼラン雲の色等級図を作成すると(Fig. 1a,b)、HV1956が通常の古典的セファイドとして妥当な位置を占めているのに対し、S65-08, S65-48は、いくらか早期型に寄った位置を占めている。このことを考慮すると、大マゼラン雲中の2つの星

を古典的セファイドとして扱って良いかどうかには疑問がある。

そこで、この論文では、線形非断熱脈動星模型を用いて、リービット変光星S65-08, S65-48の性質を、HV1956の性質とも比較しつつ検討する。以下、第1章では、計算した模型のパラメータについて述べ、第3章では計算結果を示す。第4章では、進化状態について、第5章では古典的セファイドとしての性質について検討する。最後に第6章で、全体の結論を示す。

2. 模型

模型のパラメータは、以下のようにして定めた。S65-08, S65-48については、スペクトル型の観測があるので、Flower(1977)の較正を用いて、有効温度および真の色指数(true color)を決めることができる。この真の色指数と実際に観測されている色指数を比較して、赤化量(reddening)が決まる。Feast and Walker(1987)の式を用いると、全吸収量(total absorption)を求めることができる。大マゼラン雲までの距離指数(distance modulus)とし

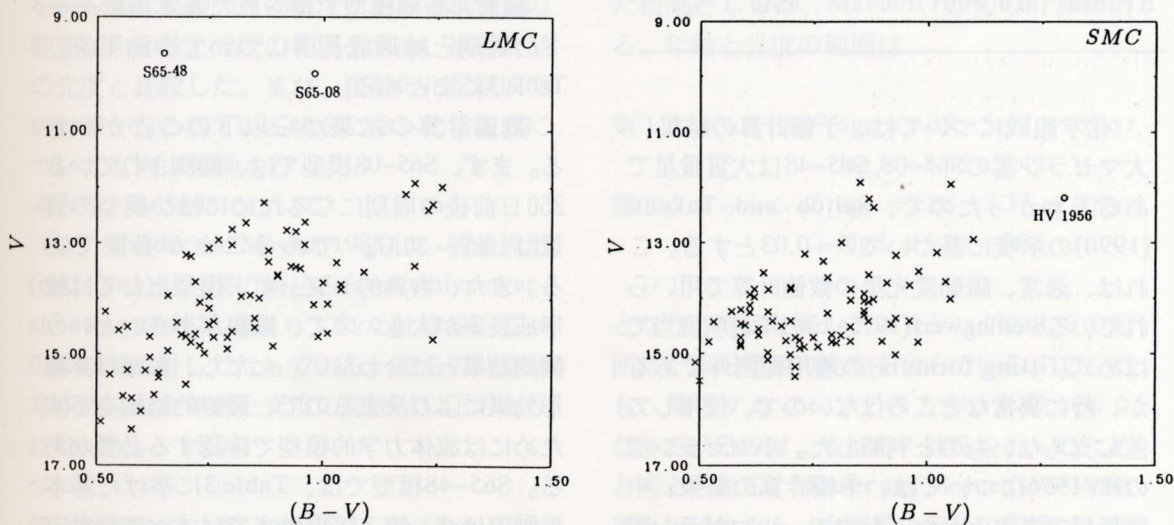


Figure 1. Positions of the Leavitt variables on the color-magnitude diagram. Magnitudes and colors are adopted from Laney and Stobie(1986).

(a) The diagram for the Large Magellanic Cloud. Two circles are the positions of Leavitt variables, S65-08 and S65-48. Crosses denote those of classical Cepheids.

(b) The diagram for the Small Magellanic Cloud. The circle is the position of the Leavitt variable, HV1956. Crosses are positions of classical Cepheids.

て、Tammann(1987)が採用している平均値18.50を用いると、観測されている実視等級(visual magnitude)から絶対等級(absolute magnitude)が決まる。一方、スペクトル型から、同じくFlower(1977)の較正を用いると、放射補正(bolometric correction)が決まるので、さらに絶対等級を放射等級(bolometric magnitude)に換算して光度を求めることができる。こうして、有効温度と光度が決まった。HV1956については、Laney and Stobie(1986)の赤化補正済みの色指数から、線形補間で有効温度と放射補正を求め、あとは、S65-08, S65-48と同様にして光度を求めた。質量はいずれの模型においてもパラメータとして変化させて、観測される周期を再現するものを求めることとする。このようにして求めた模型のパラメータをTable 1に示す。

Table 1: Parameters of Leavitt variable models.

Model	Luminosity (L_{\odot})	Effective Temperature (K)
S65-08	3.0×10^5	5070
S65-48	4.2×10^5	6210
HV1956	6.9×10^4	4540

化学組成については、予備計算の結果、大マゼラン雲のS65-08, S65-48は大質量星であるとわかったので、Saitou and Takeuti (1990)の示唆に基づいて $Z = 0.03$ とする。これは、通常、脈動変光星の数値計算で用いられているStellingwerf(1975a,b)の不透明度当てはめ式(fitting formula)の適用範囲外であるが、特に異常なところはないので、使用して差し支えないものと判断した。小マゼラン雲のHV1956については、予備計算の結果、中質量星であるとわかったので、小マゼラン雲の金属量の平均値 $[Fe/H] = 0.056$ (Westerlund 1990 and references therein)から導きだした $Z = 0.006$ を用いた。計算した模型の化学組成

を、Table 2にまとめる。

Table 2: Chemical composition of Leavitt variable models.

Model	X	Y	Z
S65-08	0.69	0.28	0.03
S65-48	0.69	0.28	0.03
HV1956	0.714	0.28	0.006

今回行なった計算の方法は、Castor(1971)の方法と以下の点を除いて同じである。Ishida and Takeuti (1991)は、模型に含まれる層の数を十分多くとらないと、線形非断熱計算の成長率が不正確になることを指摘している。そこで、今回の計算では、模型の層の数が、400以下にならないよう注意を払った。また、いくつかの質量の小さい模型では、通常の線形非断熱計算がうまく収束しない現象が起こったので、Zalewski(1992)の方法を導入した計算を行なった。

3. 計算結果

線形非断熱模型で得られた基本振動モードの周期と線形成長率についての結果を、Table 3にまとめる。

数値計算の結果から以下のことがわかる。まず、S65-08模型では、観測されている250日前後の周期になるためには、模型の質量は $25 \sim 30 M_{\odot}$ であることが必要である。また、古典的セファイド模型としては線形成長率が大きいので、振幅が小さいという観測結果とは合わない。ただし、振幅は非線形効果により決まるので、最終的結論を下すためには流体力学的模型で確認する必要がある。S65-48模型では、Table 3に挙げた基本振動のほか、第3倍振動まではすべて脈動安定であった。色等級図上の位置を考慮すると、S65-48は古典的セファイドではなく、黄色半規則変光星であると考えられる。

Table 3: Results of the linear nonadiabatic calculations.

Model (M_{\odot})	S65-08 models		S65-48 models		HV1956 models	
	Period (days)	Growth rate	Period (days)	Growth rate	Period (days)	Growth rate
100	104.9	1.8×10^{-4}	73.9	-6.6×10^{-3}	—	—
50	143.2	8.9×10^{-2}	91.0	-2.3×10^{-1}	—	—
35	192.0	3.0×10^{-1}	122.9	-3.9×10^{-1}	—	—
30	221.0	4.5×10^{-1}	142.1	-4.1×10^{-1}	79.8	1.1×10^{-1}
25	260.6	6.9×10^{-1}	169.2	-4.0×10^{-1}	88.7	2.4×10^{-1}
20	* 312.5	9.9×10^{-1}	* 209.7	-6.1×10^{-1}	106.2	4.1×10^{-1}
15	—	—	* 307.1	-1.8×10^{-1}	* 135.8	7.5×10^{-1}
10	—	—	—	—	* 188.6	1.5
9	—	—	—	—	* 202.8	1.7
8	—	—	—	—	* 218.0	2.0

* : Zalewski's parameter is applied (see text).

HV1956模型では、観測されている207.5日の周期になるためには、模型の質量は $8 \sim 9M_{\odot}$ であることが必要である。

4. 進化状態

S65-08とHV1956の進化状態を検討するため、いくつかの進化計算の結果から内/外挿を行って、模型の有効温度に対して、質量の範囲から年齢と光度の範囲を求め、線形模型の光度と比較した。また、複数の化学組成での計算が行われている場合には、化学組成についても内/外挿を行った。

4-1. S65-08について

(1) Maeder and Meynet(1988)は、質量放出(mass loss)と対流の射込み(convective overshooting)の効果を取り入れた計算を、 $Z = 0.02$ のみに対して行っている。彼らの計算から求められた年齢と光度の範囲は以下のようになった。

第1クロッシング age = $5.35 - 6.57 \times 10^6$ yr
log L = 5.44 - 5.62

第2クロッシング age = $3.62 - 5.10 \times 10^6$ yr
log L = 5.82 - 6.00

第1クロッシングの光度は線形模型の光度を含んでいる。しかし、第2クロッシングの方が年齢が若いという奇妙な結果が出ている。これは、第2クロッシングでは範囲を求める際に外挿が行われているため、精度が悪くなったと考えられる。

(2) 同じグループによる金属量を変化させた結果としては、Maeder(1990)の計算がある。年齢と光度の範囲は、

第1クロッシング age = $4.37 - 5.67 \times 10^6$ yr
log L = 5.68 - 5.42

第2クロッシング age = $2.28 - 3.77 \times 10^6$ yr
log L = 5.93 - 5.85

となり、やはり第1クロッシングの光度の範囲は、線形模型の光度を含んでいる。ここでも、第2クロッシングの方が、年齢が若くなっているのは、やはり、外挿を行ったためと考えられる。Maeder and Meynet(1988)の結果と比較すると、金属量の変化の影響は、それほど顕著には現れていない。

(3) Brunish and Truran(1982)は、質量放出の効果を入れたものと入れなかったものの2

つの場合について、第1クロッシングまでの計算を発表している。

第1クロッシング

質量放出なし age = $5.80 - 7.64 \times 10^6$ yr
log L = 5.24 - 5.45

質量放出あり age = $4.41 - 6.28 \times 10^6$ yr
log L = 5.30 - 5.50

線形模型の光度は、質量放出の効果を入れていない場合の範囲からははずれているが、質量放出を入れた場合の範囲には入っている。

以上の結果から、S65-08は、第1クロッシングにある天体と考えられる。また、質量放出の効果が入った進化計算の方が、より計算結果と合うことがわかる。

4-2. HV1956 について

(1) Bertelli et al.(1986)は、質量放出と対流の射込みの効果を取り入れた計算を行っている。

第1クロッシング age = $3.17 - 3.86 \times 10^7$ yr
log L = 4.13 - 4.28

第2クロッシング age = $3.22 - 4.19 \times 10^7$ yr
log L = 4.29 - 4.48

第3クロッシング age = $3.33 - 4.34 \times 10^7$ yr
log L = 4.29 - 4.44

いずれも、線形模型の光度より小さい光度になっている。なお、第3クロッシングの光度が、第2クロッシングの光度より小さい値となっているのは、外挿による精度の低下のためと考えられる。

5. S65-08とHV1956の古典的セファイドとしての性質

ここでは、古典的セファイドで成り立っているいくつかの関係を、S65-08, HV1956に当てはめてみる。なお、誤差範囲が明示されている関係式については結果の範囲を求める

際に考慮した。

(1) Becker, Iben and Tuggle(1977)の進化計算による、質量光度関係にあてはめて、質量の範囲から光度の範囲を求めると、以下のようになる。

S65-08

第1クロッシング log L = 5.45 - 5.80

第2クロッシング log L = 5.49 - 5.80

HV1956

第1クロッシング log L = 3.85 - 4.02

第2クロッシング log L = 4.09 - 4.27

S65-08の線形模型の光度は、第1クロッシングの光度範囲に含まれている。第2クロッシングの光度範囲に対しては、範囲の境界近くにあたる。HV1956の線形模型の光度は、どちらのクロッシングに対しても光度が大きすぎる。

逆に周期光度関係を使って、線形模型の光度から周期を求めてみよう。

S65-08

第1クロッシング P = 168.0 (days)

第2クロッシング P = 239.0

HV1956

第1クロッシング P = 55.4

第2クロッシング P = 73.0

この場合は、S65-08は第2クロッシングのほうがより合っているようである。しかし、このように質量の大きい星では質量放出の効果があることはわかっているので、Becker et al.(1977)の結果の信頼性は低いと考えるべきであろう。HV1956は、いずれの場合でも周期が短く出ている。

(2) Gieren(1989)の周期温度関係を用いて、有効温度から周期を求めてみると以下の

ようになる。

S65-08 P = 25.7 (days)

HV1956 P = 90.1

ここでは、どちらも非常に短い周期が出ている。

(3) 光度と有効温度から半径を計算して、Gieren, Barnes, and Moffett(1989)が求めた、周期-Wesselink半径関係で、周期を求めてみると、

S65-08 P = 177.1 - 285.7 (days)

HV1956 P = 89.7 - 138.5

となる。どちらもやや長い周期となった。

(4) Gieren(1989)が求めた周期の2次の項を含んだ周期-Wesselink質量関係を用いて、線形模型の質量の範囲から周期の範囲を求めてみよう。

S65-08 P = 188 - 303 (days)

HV1956 P = 16 - 19

S65-08の周期範囲は、観測されている周期を含んでいる。HV1956は、再び非常に短い周期となった。

(5) 周期光度温度関係と周期光度関係から周期を求めてみよう。これらの関係については、さまざまな研究者がいくらか異なった関係式を導きだしている。それらの中から、ここでは Caldwell (1983) によるものと Schmidt (1984) によるものの2種類の関係式を用いることにする。

Schmidt (1984)	PLC rel	PL rel
S65-08	P = 231.0	844.1(days)
HV1956	131.4	177.0

Caldwell (1983)

S65-08 181.3 - 217.5 385.8 - 455.1

HV1956 103.1 - 123.6 95.2 - 112.2

以上、さまざまな関係式にあてはめて、古典的セファイドとしての性質を検討した。この結果、(1) S65-08は、有効温度が古典的セファイドとしては高すぎるが、それ以外の性質は古典的セファイドと考えて矛盾はない、(2) HV1956は、全体的に古典的セファイドの性質からははずれている場合が多い。

6. 結論

線形非断熱模型を用いて大マゼラン雲の中に見つかっている周期約250日以上の変光星S65-08, S65-48の性質を、小マゼラン雲の周期約200日の古典的セファイドとされている変光星HV1956と比較しつつ検討した。

S65-08の模型では、 $25 \sim 30 M_{\odot}$ の模型において、基本モードが周期約250日を持ち、脈動不安定であることがわかった。S65-48の模型では、今回調べた質量範囲では、第3倍振動までのすべてのモードについて脈動不安定であることがわかった。S65-48のスペクトル型が、古典的セファイドより早期型であるという観測結果を考慮すると、この星は黄色半規則変光星であると考えられる。また、HV1956の模型では、 $8 \sim 9 M_{\odot}$ の模型において、基本モードが周期約200日を持ち、脈動不安定であることがわかった。

さらに、S65-08, HV1956の進化状態と古典的セファイドとしての性質について検討した。その結果から、S65-08は、第1クロッシング段階の天体であると考えられる。また、質量放出の効果を取り入れた進化計算の方が、取り入れていない進化計算より、線形模型の結果と、よりよく合うことがわかった。また、有効温度が高すぎることを除いては、古典的セファイドに近い性質をもっていると考えられる。銀河系内の古典的セファイドで

青色主系列の伴星がある場合に、観測される色指数が青くなる例が知られているので、S65-08にもこのような伴星があるのかもしれない。HV1956については、進化計算も古典的セファイドとしての性質も十分には合わない。これは、この質量の星としては光度が大きすぎるためであると考えられる。

これらのことから S65-08 は、古典的セファイドと類似した天体ではあるが、観測されているスペクトル型は早期型すぎるので、古典的セファイドであると断言はできない。HV1956については、色等級図上は古典的セファイドの延長上にあるが、この質量の星としては光度が大きく、古典的セファイドではない可能性がある。

この研究が終了した後に、ローレンスリヴァモア研究所のグループによる新しいロスランド平均不透明度(Rosseland mean opac-

ity)の表の発表が始まった(Iglesias and Rogers 1991)。現在これにともなって、進化計算など不透明度を用いていた研究の見直しが進行中である。これらの見直しの結果がある程度発表された段階で、今回の研究も再検討する必要がある。

この研究を行うにあたって、東北大学の竹内峯教授には、さまざまな議論をしていただきました。また、名古屋大学の隈井泰樹博士には、マゼラン雲の化学組成について有益な助言をいただきました。記して感謝いたします。数値計算の半分は、東北大学天文学教室のワークステーションSun4/330上で行ないました。また、残りの半分は、西はりま天文台のワークステーションSun4/330上で行ないました。

《参考文献》

- Becker, S.A., Iben, I., and Tuggle, R.S., 1977, *Astrophys. J.*, **218**, 633
 Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., and Angerer, K., 1986, *Astron. and Astrophys. Suppl.*, **66**, 191
 Brunish, W.M. and Truran, J.M., 1982, *Astrophys. J. Suppl.*, **49**, 447
 Caldwell, J.A.R., 1983, *Observatory*, **103**, 244
 Castor, J.I., 1971, *Astrophys. J.*, **166**, 109
 Feast, M.W. and Walker, A.R., 1987, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **25**, 345
 Flower, P.J., 1977, *Astron. and Astrophys.*, **54**, 31
 Gieren, W.P., 1989 *Astron. and Astrophys.*, **225**, 381
 Gieren, W.P., Barnes, T.G., and Moffett, T.J., 1989, *Astrophys. J.*, **342**, 467
 Grieve, G.R., Madore, B.R., and Welch, D.L., 1985, in *IAU Colloquium 82, Cepheids: Theory and Observations*, ed. B.F. Madore (Cambridge: Cambridge University Press), p215
 Iglesias, C.A., and Rogers, F.J., 1991, *Astrophys. J.*, **371**, L73
 Ishida, T. and Takeuti, M., 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 795 (Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., **2**, xx-xx に再録)
 Laney, C.D. and Stobie, R.S., 1986, *South African Astron. Obs. Circ. No.* **10**, p51
 Madore, B.R., 1985, in *IAU Colloquium 82, Cepheid: Theory and Observations*, ed. B.F. Madore (Cambridge: Cambridge University Press), p166
 Maeder, A., 1990, *Astron. and Astrophys. Suppl.*, **84**, 139
 Maeder, A., and Meynet, G., 1988, *Astron. and Astrophys. Suppl.*, **76**, 411

Saitou, M. and Takeuti, M., 1990, Publ. Astron. Soc. Japan, **42**, 341.
 Schmidt, E.G., 1984, Astrophys. J., **285**, 501
 Stellingwerf, R.F. 1975a, Astrophys. J., **195**, 441
 Stellingwerf, R.F. 1975b, Astrophys. J., **199**, 705
 Tammann, G.A., 1987, in IAU Symposium **124**, *Observational Cosmology*, eds. A. Hewitt, G. Burbidge, and L. Fang, (Dordrecht: Reidel), p151
 Westerlund, B.E., 1990, Astron. and Astrophys. Rev., **2**, 29
 Zalewski, J., 1992, Publ. Astron. Soc. Jap., **44**, 27

Abstract

We participated in a global photometric campaign on the pulsating central star of the planetary nebula NGC1501. Observations were carried out using a CCD on the 0.6-m telescope at Okayama Astronomical Observatory. They were made in V-band during the campaign and in R-band later on. We have detected a pulsating period of 46 minutes.

ことから、Vワウルフラーとした。これは、
 星の中心部で発生するパルス状の光の放射が、
 星の表面から放射される光の放射と干渉する
 ことによるものである。このパルス状の光の放射
 は、星の中心部で発生するパルス状の光の放射
 と干渉する。このパルス状の光の放射は、星の
 中心部で発生するパルス状の光の放射と干渉
 することによるものである。このパルス状の光の
 放射は、星の中心部で発生するパルス状の光の
 放射と干渉することによるものである。このパル
 ス状の光の放射は、星の中心部で発生するパ
 ルス状の光の放射と干渉することによるもので
 ある。このパルス状の光の放射は、星の中心部
 で発生するパルス状の光の放射と干渉すること
 によるものである。このパルス状の光の放射は、
 星の中心部で発生するパルス状の光の放射と
 干渉することによるものである。このパルス状
 の光の放射は、星の中心部で発生するパルス
 状の光の放射と干渉することによるものである。
 (1991) (1991) (1991)