

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03695

研究課題名（和文）赤色巨星における抑圧された双極子振動モードの謎 - 漸近理論による究明

研究課題名（英文）Enigma of depressed dipole modes of oscillations in red giants - investigation based on the asymptotic theory

研究代表者

高田 将郎 (Takata, Masao)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：20334245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ケプラー宇宙探査機で観測された一部の赤色巨星において見つかった、抑圧された双極子モードについて、その原因を究明することを目的とした。主な成果は、以下の4点にまとめることができる。（1）磁場に基づく仮説を理論的に詳細に検討し、その不備を示したこと。（2）赤色巨星の振動の漸近理論を発展させ、周波数スペクトルの微細構造を物理的に説明することに成功したこと。（3）一般の恒星について、化学組成分布に不連続がある場合を含めて、固有振動周波数を決定する表式を導出したこと。（4）赤色巨星の前段階である主系列星において、内部磁場検出の可能性を検討し、実際に候補天体を見つけたこと。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、直接的には、赤色巨星の星震学を通じてその中心部の構造について新たな知見を得たことであるが、これは単に赤色巨星のみならず、一般の恒星の理論にとっても意義のある結果である。とりわけ内部の磁場構造についての理解は乏しいのが現状なので、本研究のように現実の星について観測に基づく内部磁場の研究は貴重である。また恒星の内部構造と進化の描像は宇宙を理解する上で基盤をなすものであるから、天文学の他の分野の研究にも影響するものである。一方で天文学の研究は、研究者以外の一般社会の多くの人々にとっても興味のある問題であり、本研究もそうした人々の知的好奇心を刺激するという意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to study the origin of depressed dipole modes, which are found in a part of red giant stars observed by the Kepler spacecraft. The major outputs of the project can be summarised by the following 4 points: (1) detailed theoretical analysis of a hypothesis based on the magnetic field has revealed a problem; (2) by developing the asymptotic theory of red-giant oscillations, we have succeeded in providing physical explanation of the fine structure of the oscillation spectrum; (3) we have derived a formula to describe oscillation frequencies of general stars, taking account of the case of discontinuities in the chemical composition profiles; (4) we have examined the possibility of detecting the internal magnetic field in the main-sequence stars, which are ancestors of red giants, and discovered a candidate star.

研究分野：天文学

キーワード：星震学 恒星振動 恒星磁場 恒星自転

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 太陽をはじめとする大部分の星は、中心部でおこる水素の核融合をエネルギー源として輝いている(主系列段階)。恒星進化論によれば、いずれ中心部の水素が尽きると、星の外層は膨れ、表面温度は下がり、赤色巨星へと進化する。この過程は星の質量によらず起こるため、赤色巨星はほぼすべての恒星の未来の姿である。
- (2) アメリカ航空宇宙局(NASA)によって打ち上げられたケプラー宇宙探査機は、2009年から2018年まで運用され、系外惑星探査を主目的としつつも、星震学(恒星表面で起こる振動を検出して内部構造を調べる研究)の観測も並行して実施し、極めて良質なデータを得た。なかでも赤色巨星については、1万個を超える星で振動が検出され、その星震学は飛躍的な進展を遂げた。
- (3) こうしたなか、観測された赤色巨星の振動を詳細に解析してみると、約1割弱の星では双極子振動モード(赤道面に関して南北反対称のパターンを持つモード)の振幅が小さいという現象が発見された(以下「抑圧された双極子モードの問題」と呼ぶ)。赤色巨星の振動は、太陽と同様に表面付近にある乱対流層から発生する音波によって励起されると考えられている。この描像に基けば、双極子振動モードと動径振動モード(球対称な振動モード)の振幅の比を予想することができ、実際多くの赤色巨星では、この予想と矛盾のない振幅比が観測されている。一方で新たに発見された一部の赤色巨星では、何故か双極子モードの振幅が、動径モードに比べて予想より小さいことがわかった。しかもその割合は、赤色巨星の進化段階によって異なり、比較的若い、赤色巨星になりたての星では予想値の20~30%程度であるのに対し、進化とともにこの割合は増加し、やがては予想値と矛盾のない値に漸近することがわかった(Garcia et al. 2014; Mosser et al. 2017)。本研究の開始時点では、この現象の原因としては、中心部に存在する強い磁場の影響や、振動の非線形効果による他のモードとの結合といった仮説が提唱されていたが、どの仮説が正しいのか(あるいはどれも正しくないのか)は、全く不明という状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、多くの赤色巨星で検出されている太陽型振動を、星震学の手法を用いて、理論、観測の両面から詳細に調べることにより、抑圧された双極子モードという謎の現象の原因を究明することである。この問題の原因は、赤色巨星の中心部でおこる何らかの物理機構にあると考えられる。そのような機構は、標準的な恒星進化のシナリオでは知られていないため、この問題の解決は、主系列星から赤色巨星にいたる恒星の内部構造と進化の描像に大きな影響を与える可能性がある。

## 3. 研究の方法

本研究では、赤色巨星の振動における抑圧された双極子モードの問題について、これまでに提唱された仮説を理論的に詳細に検討すること、また観測データを新しい漸近理論によって調べることに重点をおいた。具体的には、以下のアプローチを採用した。(1) 有望な仮説と思われる磁場に基づく仮説を理論的に詳細に検討する。(2) 赤色巨星の振動をより詳細に解析するべく、独自に開発した漸近理論を発展させる。(3) 赤色巨星を含む一般の恒星について内部磁場検出の可能性を検討し、実際の観測データを調べる。

## 4. 研究成果

本研究の主要な成果は以下の4点にまとめられる。

- (1) 磁場説の理論的検討  
抑圧された双極子振動モードを説明する仮説として、Loi & Papaloizou (2017) によって提唱されたモデルを理論的な観点から詳細に検証した。この仮説によれば、表面付近の乱対流から発生した音波が、中心部にある磁場の存在する領域に入射すると、磁気流体的な波動成分(アルフベン波)を持つように変質する。この成分は波長が短いために容易に減衰し(振動のエネルギーが熱的に散逸し)、結果として双極子モードの振幅は小さくなると考える。しかしながら、本研究での検証によれば、この仮説で仮定されている磁場の強度はかなり強いもので、この場合振動の振幅のみならず、周波数も大きな影響を受けなければならないことが明らかになった。つまり、この仮説は(少なくとも当該論文で提唱されている形のままで)内部矛盾を含むことを明らかにした。本研究でこの結果を得た後、その公表前にLoi & Papaloizou (2018) が発表されたが、この論文では本質的に同じ結論が得られている。

(2) 赤色巨星の振動周波数スペクトルの微細構造

抑圧された双極子モードの問題の解明には、赤色巨星の振動周波数スペクトルの構造を深く理解することが必要と考え、従来の理論的枠組みを発展させ、実際に観測と比較してその正さを検証した。具体的には、双極子モードの周波数構造を説明するために、従来経験的に導入されていたパラメータの物理的起源を、独自に開発した恒星振動の漸近理論を適用して説明した。この結果当該パラメータの恒星進化に伴う変化が、内部構造の変化として矛盾なく説明できることが明らかになった。残念ながら、今のところ抑圧された双極子モードを持つ星については、このパラメータを観測的に測定することは困難であるが、将来より高精度の観測が得られるようになれば、このパラメータの値から中心部の構造についての手がかり（すなわち抑圧された双極子モードの問題についての新たな洞察）が得られる可能性がある。この結果については Pincon et al. (2018) として公表した。

(3) 多層構造を持つ恒星の固有振動の漸近理論の開発

(2)と同様の動機に基づき、赤色巨星のみならず一般の恒星の振動周波数を記述する漸近公式を導出した。赤色巨星の双極子振動モードは、中心部では浮力を復元力とする内部重力波、外層では圧力を復元力とする音波で構成される複雑なものである。その上、恒星進化の影響次第では、化学組成分布がほぼ不連続に変化する層が形成される可能性があり、この場合の振動モードの構造はより一層複雑になる。そこで本研究では、恒星の内部を複数の層からなるものと考え、各層は特定の復元力（分散関係）をもつ波動で構成され、その境界は波動の伝播しない層または化学組成が不連続になる層で定められるとした。このような多層構造からなる場合に、どのように固有振動モードが決まるかを数学的に詳細に解析し、特に固有振動周波数を定める一般表式を導出した。これは、従来の2層構造の場合の表式の単なる拡張というだけでなく、化学組成が不連続になる構造の影響と、複数の物理的に異なる波動が組み合わさる影響を、統一的な視点から捉えられるという大きな利点をもつ。この表式はいずれ赤色巨星や他の星の振動周波数スペクトルの解析において重要な役割を果たすことが期待される。この結果の詳細については Pincon & Takata (2022) で公表した。

(4) 赤色巨星前段階にある主系列星の内部磁場

本研究を実施している途中で、他の研究グループから、星震学の解析により、赤色巨星の中心部に磁場の存在する証拠を発見したという報告があった (Li et al. 2022)。また同じグループによる続報 (Deheuvels et al. 2023) によれば、検出される磁場の強度と抑圧された双極子モードを説明する仮説 (Fuller et al. 2015) との関連も指摘されている。明らかにこの発見は、本研究と深く関わるものであるため、結果を詳細に考察することにした。特にもし赤色巨星の中心部に強い磁場が形成されているのであれば、それは進化の前段階である主系列星の内部にも発見されてよいのではないかと考えた。そこでターゲットとして、質量が太陽の約 1.5~2 倍であるかじき座ガンマ型変光星に着目し、ケプラー探査機によって得られているデータを詳細に調べてみた。これは研究代表者が同時期に発表した成果 (Takata et al. 2020a, 2020b) の発展でもある。その結果ほとんどの星では磁場の兆候は（おそらく自転の影響が強すぎるために）見つからなかったが、一例だけ磁場の影響と思われるものを発見した。これが確認されれば、赤色巨星における抑圧された双極子モードの問題にとどまらず、恒星進化における磁場の形成と進化について、新たな手がかりが得られることになると考えている。残念ながら、本研究期間終了までに解析を完了することはできなかったが、今後も解析を継続し、できるだけ早い時期に論文として結果を公表する予定である。

< 引用文献 >

- Garcia, R. A., et al., 2014, A&A, 563, A84.  
Mosser, B., et al., 2017a, A&A, 598, A62.  
Loi, S. T., Papaloizou, J. C. B., 2017, MNRAS, 467, 3212.  
Loi, S. T., Papaloizou, J. C. B., 2018, MNRAS, 477, 5338.  
Pincon, C., Takata, M., Mosser, B., 2019, A&A, 626, A125.  
Pincon, C., Takata, M., 2022, A&A, 661, A139.  
Li, G., et al., 2022, Nature, 610, 43.  
Deheuvels, S., et al., 2023, A&A, 670, L16.  
Fuller, et al., 2015, Science, 350, 423.  
Takata, M., et al., 2020a, A&A, 635, A106.  
Takata, M., et al., 2020b, A&A, 644, A138.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tokuno, Takato; Takata, Masao	4. 巻 514
2. 論文標題 Asteroseismology of the dip structure in period-spacings of rapidly rotating Doradus stars caused by the coupling between core and envelope oscillations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4140-4159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1492	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 C. Pincon, M. Takata	4. 巻 in press
2. 論文標題 Multi-cavity gravito-acoustic oscillation modes in stars. A general analytical resonance condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 id.A139, 20 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takata M., Ouazzani R.-M., Saio H., Christophe S., Ballot J., Antoci V., Salmon S. J. A. J.	4. 巻 644
2. 論文標題 Inferring the internal structure of Doradus variables from Rossby modes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A138 ~ A138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202038098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ouazzani R.-M., Lignieres F., Dupret M.-A., Salmon S. J. A. J., Ballot J., Christophe S., Takata M.	4. 巻 640
2. 論文標題 First evidence of inertial modes in Doradus stars: The core rotation revealed	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A49 ~ A49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takata, M.; Ouazzani, R. -M.; Saio, H.; Christophe, S.; Ballot, J.; Antoci, V.; Salmon, S. J. A. J.; Hijikawa, K.	4. 巻 635
2. 論文標題 A diagnostic diagram for Doradus variables and slowly pulsating B-type stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 id.A106, 15 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Masao Takata	4. 巻 -
2. 論文標題 Asymptotic view of oscillations of red giant stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Oscillating Stars (PHOST), Banyuls-sur-mer, France, 2-7 September 2018	6. 最初と最後の頁 id.39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5281/zenodo.1874121	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 C. Pincon, M. Takata, B. Mosser	4. 巻 626
2. 論文標題 Evolution of the gravity-offset of mixed modes in RGB stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 id.A125, 17 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Dhanpal, Siddharth; Benomar, Othman; Hanasoge, Shravan; Takata, Masao; Panda, Subrata Kumar; Kundu, Abhisek	4. 巻 958
2. 論文標題 Inferring Coupling Strengths of Mixed-mode Oscillations in Red Giant Stars Using Deep Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.63, 14 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad0046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 Inferring the internal structure of SPB and gamma Dor stars based on a diagnostic diagram
3. 学会等名 TASC6/KASC13 Workshop, Asteroseismology in the Era of Surveys from Space and the Ground: Stars, Planets, and the Milky Way (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田 将郎, R.-M. Ouazzani, 斉尾 英行, S. Christophe, J. Ballot, V. Antoci, S.J.A.J. Salmon
2. 発表標題 Dor型脈動変光星で検出されるロスビー・モードを用いた内部構造診断
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田将郎
2. 発表標題 赤色巨星の太陽型振動にみられる周波数スペクトルの微細構造の解釈
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 Theoretical analysis of the evolution of the asymptotic parameters of the dipolar mixed modes of red giant stars
3. 学会等名 TASC4/KASC11: First Light in a new Era of Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 Asymptotic view of oscillations of red giant stars
3. 学会等名 Physics of Oscillating Stars, what physics can we learn from oscillating stars? (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 Physics of dipolar mixed modes
3. 学会等名 How much do we trust stellar models? A journey from the observations of stellar pulsations to the physics of stars. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 An easy way of estimating internal rotation rates of gamma For stars
3. 学会等名 Workshop on recent topics in helio- and asteroseismology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高田 将郎
2. 発表標題 星震学の現状と展望 (赤色巨星を中心に)
3. 学会等名 天の川銀河バルジ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 How can we take account of differential rotation in the traditional approximation? --rotation measurement of gamma For stars--
3. 学会等名 Workshop on angular momentum transport in red giants (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高田 将郎
2. 発表標題 Dor型変光星の内部自転を測る簡便な方法について
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masao Takata
2. 発表標題 Mixed modes
3. 学会等名 PLATO Stellar Science Conference 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Paris Observatory	Universite de Toulouse		
ベルギー	University of Liege			
デンマーク	Technical University of Denmark	Aarhus University		
スイス	Universite de Geneve			
インド	Tata Institute of Fundamental Research	Intel Labs		