

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400219

研究課題名(和文) ロゼット・モードで探る恒星における振動と自転の相互作用の研究

研究課題名(英文) Study of the interaction between oscillation and the rotation of stars based on rosette modes

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、最近数値計算で発見された、自転する星のもつ特異な固有振動モード、ロゼット・モードの性質を理論的に調べることであった。主な成果は、(1)モード形成の物理機構の解明、および(2)現実の星における観測可能性を示したことである。まず、(1)については、自転のない場合に、非常に近い固有振動数を持つ複数のモードが、自転によって生じるコリオリ力の影響で相互作用することで、ロゼット・モードの特異な構造が出現すること示した。一方(2)については、恒星進化モデルに基づく数値計算を実行し、一部のB型主系列星で実際にロゼット・モードが励起される可能性のあることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to examine theoretically the properties of a unique type of oscillation eigenmodes of rotating stars, the rosette modes, which have recently been discovered in the numerical simulation. There are two main results: (1) clarification of the physical process of the mode formation, and (2) demonstration of the observability of the modes in real stars. As for (1), it has turned out that the interaction caused by the Coriolis force among the multiple eigenmodes, which have close frequencies in the absence of rotation, induces the unique structure of the modes. Concerning (2), we have shown that the modes can be excited in some B-type main-sequence stars by performing the numerical calculations based on evolutionary stellar models.

研究分野：天体物理学

キーワード：恒星振動 回転

1. 研究開始当初の背景

(1) 脈動変光星と呼ばれる種類の星は、自らの形を変えながら明るさを変化させる星である。代表例は古くから知られているセファイドや RR ライリであるが、近年は太陽や白色矮星、赤色巨星といった多様な星で脈動変光が見つかっている。これらの脈動は固有振動と解釈され、その様子を詳しく観測することで、恒星内部の構造を調べることができる。このような研究分野を星震学という。近年ケプラー衛星などの活躍により、星震学の研究は世界的に盛んになっている。

(2) 星震学研究の基盤となるのは、恒星振動の理論的研究である。なかでも、本研究の中核をなすのは、星の自転が固有振動とどのように相互作用するかという問題である。もちろん、このような基本的な問題は、従来特に恒星の進化に与える影響という観点から、多くの研究者の関心を集めてきた。

(3) 星の自転の固有振動モードに対する影響でもっとも顕著なものは、高速自転の場合に内部重力波モード(浮力を復元力とする低周波数モード)に現れる。これらのモードの振動振幅は赤道方向だけで大きくなるのである。この現象は「赤道閉じ込め」と呼ばれる。一方で自転速度が遅い場合には、従来振動は星全体に広がっているものと考えられてきた。これに対して、最近理論数値計算により、低速自転の場合に特徴的な振動パターンを持つ一群のモードが発見され、ロゼット・モードと名付けられた (Ballot et al. 2012)。これらのなかには「赤道閉じ込め」とは対照的に、極方向にのみ振幅を持つものがあり、大きな驚きを持って注目されていた。

2. 研究の目的

本研究では、ロゼット・モードに関する以下の3つの問題について詳細に研究することを目的とする。

(1) (ロゼット・モードの起源)そもそもなぜこのような振動モードが出現するのか?

(2) (ロゼット・モードの性質)このような振動モードは、振動周波数の分布、振動モードの励起および星内部の角運動量輸送にどのように影響するか?

(3) (ロゼット・モードの観測との関係)実際の星でロゼット・モードは観測されるか?

3. 研究の方法

(1) ロゼット・モードの起源を探るに当たっては、(Ballot et al. (2012)による先行研究が数値計算によるものであったのに対し、)本研究では、摂動論による解析的な取り扱いを基盤とする。すなわち、自転(とくにコリオリ力)の恒星振動への影響を小さい

摂動とみなし、なおかつ(自転のない場合に)複数の固有モードの周波数がほぼ一致すること(準縮退)を考慮して、「準縮退のある場合の摂動論」(例えば Lavelly & Ritzwoller 1992)を展開する。これにより、ロゼット・モードの起源を同定し、その構造を再現する。研究代表者と分担者は、既に自転軸に関して対称な振動モードについての解析を発表済みである (Takata & Saio 2013) ため、ここでは、解析を一般に非軸対称な振動モードにまで拡張する。

(2) 解析的な計算と並行して Ballot et al. (2012) が行なったような直接的な数値計算も独立に実施し、摂動論にもとづく結果と比較することで、ロゼット・モードの性質を詳細に調べる。この手法は特にロゼット・モードの観測可能性を調べる場合には必須である。

4. 研究成果

(1) ロゼット・モードは、自転星に現れる比較的low周波数の振動モードであり、その子午面上の運動エネルギー密度が、特徴的な構造(ロゼット・パターン)に沿って分布するという著しい性質を持つ。本研究の第一の成果は、なぜこのような特殊なモードが形成されるか、その物理機構を明らかにしたことである。この解明のために、まず自転がない(球対称)の場合の星のモデル(ポリトロープ)の固有振動数スペクトルを調べ、モード(固有関数)の角度方向の構造が異なる複数のモードが、ほぼ同じ固有周波数を持つことがあることを確認した。次に、このような状況下で星が回転すると、たとえ自転角速度がさほど速くなくても、これらの周波数の近い振動モード同士が、主にコリオリ力のために、強く相互作用し、結果として生ずる固有振動モード(固有関数)の構造が大きく変化するということを示した。以上の過程は、まず(準縮退のある場合の摂動論という)解析的な手法によって明らかにされ、また直接的な数値計算によっても確認された。特に振動モードの構造が自転軸に関して対称でない場合であっても、ロゼット・モードが構成されることを示した (Saio & Takata 2014)。

(2) ロゼット・パターンの形成機構をさらに深く理解すべく、振動の角度方向の波長が短いという仮定に基づいて、漸近解析を行い、ロゼット・モードの構造を本質的な点で再現することに成功した。また、ロゼット・モードの構造を記述するパラメータを同定し、それらとモードを形成する固有モードの性質の間の関係を明らかにした (Takata 2014)。

(3) 形成の物理機構から考えて、ロゼット・モードは自転が比較的速い星の低周波数(長周期)領域で見つかる可能性がある。とはいえ星の特定の固有振動モードが観測される

ほどの振幅を持つかどうかは、振動振幅を大きくする効果(励起機構)と小さくする効果(減衰機構)のせめぎ合いで決まり、詳細はそれぞれの星の内部構造に依存する。そこで前述の高速自転、長周期振動という条件を考慮した結果、ロゼット・モードが励起されるとすれば比較的質量の大きい主系列星、変光星のタイプで言えば、長周期振動 B 型星 (SPB) であろうという予想をたて、このタイプの星の現実的なモデルを構築し、その振動モードを数値的に計算した。とくに 5 太陽質量の主系列星の場合を詳細に調べると、自转角速度が臨界値の約 25% (赤道自転速度約 150 km/s) を越えないような場合に、実際に励起されるロゼット・モードが存在することがわかった。また、振動に伴う角運動量輸送について評価した結果、ロゼット・モードの場合にはその特殊な構造に対応し、通常のモードとは異なり、角度方向の輸送に特徴的な寄与が見られることがわかった (Takata & Saio 2015)。

<引用文献>

① Ballot, J., et al. in Progress in Solar/Stellar Physics with Helio- and Asteroseismology, ed. H. Shibahashi et al. (San Fransisco: Astronomical Society of the Pacific), 389-397.

② Lively, E. M., Ritzwoller, M. H., 1992, Phios. Trans.: Phys. Sci. Eng., 339, 431.

③ Saio, H., Takata, M., Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, id. 58.

④ Takata, M., Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, id. 80.

⑤ Takata, M., Saio, H., Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, 2013, id. 68.

⑥ Takata, M., Saio, H., in The Space Photometry Revolution - CoRoT Symposium 3, Kepler KASC-7 Joint Meeting, Toulouse, France, Edited by R. A. Garcia; J. Ballot; EPJ Web of Conferences, Volume 101, 2015, id. 05008.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Saio, Hideyuki; Bedding, Timothy R.; Kurtz, Donald W.; Murphy, Simon J.; Antoci, Victoria L.; Shibahashi, Hiromoto; Li, Gang; Takata, Masao, “An astrophysical interpretation of the remarkable g-mode

frequency groups of the rapidly rotating γ Dor star, KIC 5608334”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 477, 2018, pp. 2183-2195, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/sty784

② Takada-Hidai, Masahide; Kurtz, Donald W.; Shibahashi, Hiromoto; Murphy, Simon J.; Takata, Masao; Saio, Hideyuki; Sekii, Takashi, “Spectroscopic and asteroseismic analysis of the remarkable main-sequence A star KIC 11145123”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 470, 2017, pp. 4908-4924, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stx1506

③ Mosser, B.; Pincon, C.; Belkacem, K.; Takata, M.; Vrad, M., “Period spacings in red giants. III. Coupling factors of mixed modes”, Astronomy & Astrophysics, 600, 2017, id. A1, 査読有, DOI: 10.1051/0004-6361/201630053

④ Mosser, B.; Belkacem, K.; Pincon, C.; Takata, M.; Vrad, M.; Barban, C.; Goupil, M.-J.; Kallinger, T.; Samadi, R., “Dipole modes with depressed amplitudes in red giants are mixed modes”, Astronomy & Astrophysics, 596, 2017, id. A62, 査読有, DOI: 10.1051/0004-6361/201629494

⑤ Takata, Masao, “Asymptotic analysis of dipolar mixed modes of oscillations in red giant stars”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id. 109, 2016, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psw104

⑥ Takata, Masao, “Physical formulation of mixed modes of stellar oscillations”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id. 91, 2016, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psw093

⑦ Benomar, O.; Takata, M.; Shibahashi, H.; Ceillier, T.; Garcia, R. A., “Nearly uniform internal rotation of solar-like main-sequence stars revealed by space-based asteroseismology and spectroscopic measurements”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 452, 2015, pp. 2654-2674, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stv1493

⑧ Kurtz, Donald W.; Saio, Hideyuki; Takata, Masao; Shibahashi, Hiromoto; Murphy, Simon J.; Sekii, Takashi, “Asteroseismic measurement of surface-to-core rotation in a main-sequence star”, EPJ Web of Conferences, 101, 2015, id. 01007, 査読無,

DOI: 10.1051/epjconf/201510101007

⑨ Takata, Masao; Saio, Hideyuki, “Nonadiabatic analysis of rosette modes of oscillations in rotating stars and their contribution to angular momentum transport”, EPJ Web of Conferences, 101, 2015, id.05008, 査読無, DOI: 10.1051/epjconf/201510105008

⑩ Masao Takata, “Rosette modes of oscillations of rotating stars caused by close degeneracies. III. JWKB analysis”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, id.80, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psu055

⑪ Hideyuki Saio; Masao Takata, “Rosette modes of oscillations of rotating stars caused by close degeneracies. II. Nonaxisymmetric modes”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, id.58, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psu027

[学会発表] (計 12 件)

① Masao Takata, “Comments on red giant seismology” in Asteroseismology and its impact on other branches of astronomy, 2018.

② Hideyuki Saio, “Nonradial pulsations strongly affected by Coriolis force” in Asteroseismology and its impact on other branches of astronomy, 2018.

③ 高田 将郎, 「太陽型星の星震学」, 高精度ドップラー観測で探る太陽型星周りのハビタブル惑星, 2018.

④ Masao Takata, “Some recent topics in asteroseismology” in 10th Workshop on Astronomy with Precise Radial Velocity Measurements - Extra-Solar Planet Search and Asteroseismology -, 2017.

⑤ 高田 将郎, 「赤色巨星の混合振動モードの再定式化と抑圧された双極子モード問題の考察」, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017.

⑥ Masao Takata, “Physical formulation of the eigenfrequency condition of mixed modes of stellar oscillations” in Seismology of the Sun and the Distant Stars 2016, 2016.

⑦ Hideyuki Saio, “Progress and problems in massive star pulsation theory” in IAU General Assembly, Meeting #29, 2015.

⑧ Masao Takata, “Asymptotic analysis of dipolar mixed modes” in The KASC8/TASC1 Workshop, Space Asteroseismology: The next generation, 2015.

⑨ 斉尾 英行, 「大質量星の回転と進化」, 「大質量星の進化・活動現象と星の回転」研究会, 2015.

⑩ 高田 将郎, 「星震学で明らかになった星の内部自転」, 「大質量星の進化・活動現象と星の回転」研究会, 2015.

⑪ 斉尾 英行, 「自転星の特異な固有振動モード、ロゼットモードの非断熱解析」, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014.

⑫ Masao Takata; Hideyuki Saio, “Rosette modes of oscillations in rotating stars as a new aspect of rotation-pulsation interaction” in The Space Photometry Revolution, CoRoT Symposium 3, Kepler KASC-7 joint meeting, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 将郎 (TAKATA, Masao)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 20334245

(2) 研究分担者

斉尾 英行 (SAIO, Hideyuki)
東北大学・理学研究科・名誉教授
研究者番号: 10162174