

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540260

研究課題名(和文) 高時間分解高分散分光観測に基づく星震学の新しい展開

研究課題名(英文) Asteroseismology based on high time-resolution and high dispersion spectroscopy

研究代表者

柴橋 博資 (Shibahashi, Hiromoto)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30126081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：脈動Ap星におけるスペクトル線変動は大気の深さ方向に大きく依存しており、逆に、スペクトル線変動を調べることで、大気内部の構造や速度場をより詳しく知ることができる。自転と脈動を組み込み、これらの星のスペクトル線変動を理論的に再現して、観測との比較から大気の構造や速度場を導いた。ケプラー宇宙望遠鏡による取得データの時刻を太陽系重心での時刻に変換すると、時間等間隔ではない。この影響を考慮すると、ナイキスト周波数より高い脈動であっても脈動を決定出来ることを実例を挙げて証明した。脈動の自転に対する効果を考慮し、B型星の振動の進化により星周円盤が生成されて輝線星になるというシナリオを立てて検討した。

研究成果の概要(英文)：The vertical wavelengths of the oscillations found in roAp stars are so short that the amplitude and phase of the variation of each spectroscopic line are highly dependent on the level of the line profile. We carried out a numerical simulation of line-profile variation by taking account of the finite thickness of the line-forming layer. We demonstrated how effective this treatment is. Barycentric corrections made to the timing of Kepler observations break the regular time-sampling of the data. A consequence is that Nyquist aliases are split into multiplets that can be identified by their shape. We provided an analytical derivation of the phenomenon, alongside demonstrations with simulated and real Kepler data. Observations indicate that a circumstellar disk is formed around a Be star while the stellar rotation is below the break-up velocity. I proposed a working hypothesis to explain this mystery by taking account of the effect of leaky waves upon angular momentum transfer.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：星震学 脈動星 特異星 B型輝線星 分光観測 データ解析

## 1. 研究開始当初の背景

振動現象を使って星の内部を「見る」という試みは、多数の振動モードが検出される太陽について日震学という分野を開拓し、大きな成功を収めるに至った。太陽と同様に一般の星についても同様の成功が大いに期待される状況となってきた。

(1) A型特異星は、大気化学組成には希土類等の元素が異常に多く見られる特異な星であり、また、主系列星として数キロガウスもの強い磁場を有する唯一の星のクラスであるため、天体の化学進化と天体磁場を研究する上で極めて重要な対象天体である。星の表面化学組成の水平分布が非一様であるためにスペクトルが変動し、また、磁場は自転軸に傾いているために磁場強度が変動するのだと考えられている。A型特異星の研究は、星震学という新しい学術研究手法により新たな局面を迎えようとしている。期待される状況となってきた。

(2) ケプラー衛星は、太陽型の恒星に付随する地球型の惑星を検出することを主たる目的として白鳥座の一面、視野116平方度にある星16万個を連続して測光モニター観測を行っていた。ケプラー宇宙望遠鏡により長時間に亘って得られ続けている極めて高精度の観測データは、量的には従来のもを圧倒し、質的には従前の精度を遥かに凌駕する、正に革命的なものと言って良い。ただし、1分毎の測光か30分毎の測光モードしかないため、脈動周期の短い星には向かないとされていた。

(3) Be星は顕著なバルマー線の輝線を示すB型の主系列星である。数年から数十年のタイムスケールで輝線スペクトルの様子は大きく変動する。これらの輝線は恒星そのものではなく、恒星を取り巻くガスの円盤に起因しており、輝線スペクトルの変動は、星を囲む星周円盤の生成及びその消滅に起因すると思われる。Be星の星周円盤の成因は星の自転が臨界速度に達してガスが放出されたからという考え方があったが、Be星の自転を観測解析すると、自転速度は臨界値には達していないので矛盾し、説明は困難のままであった。

## 2. 研究の目的

(1) 化学組成水平分布が非一様であったり、振動のパターンが球対称ではない場合に起きる、スペクトル線のプロファイル変化を新たな情報原とする星震学の新たな方法により、A型特異星の大気構造を探る。

(2) ケプラー衛星を使った測光観測を有効活用して、A型星の星震学を推進する。

(3) Be星現象の源である星周円盤の生成及びその消滅のメカニズムの解明を目的として、波動による角運動量輸送を研究する。

## 3. 研究の方法

(1) ① 水平方向と深さ方向の振動速度場を考慮に入れたスペクトル線のプロファイルを使った星震学の新たな方法を確立するために、順問題として、まず脈動速度場を既知としてスペクトル線プロファイルの変動をシミュレーションする。これと平行して、すばる望遠鏡を用いてA型特異星の高分散高時間分解能の分光観測を行う。理論シミュレーションの結果を高時間分解高分散分光観測データと詳細に比較して、データを最も良く再現する各元素の3次元分布を明らかにする。

② ヘリウムが主成分である大気を持つコンパクト星であるヘラクレス座V652星の大気構造並びに運動構造を、すばる望遠鏡を使って、高分散かつ高時間分解能のスペクトル観測を行い、その解析を進める。

(2) 脈動星の測光時系列離散的データにおいて、連星を成す脈動星の軌道光路長の周期的変化がどのように影響を及ぼすかを数学的に解析的に表す。次いで、今度は観測者(ケプラー衛星)の軌道運動による光路長の周期変化を打ち消すために、データ取得時刻を太陽系重心での時刻に変換することの影響が、どのように影響を及ぼすかを数学的に解析的に表す。これらの結果を、実際の観測データに適用する。

(3) 自転速度が早い星における、低周波数の内部重力波モードを、トラディショナル近似を採用して解くために、潮汐方程式を固有値問題として数値的に説く。そしてこれ $r$ の固有値を使って、現実的なB型星の進化モデルを用いて、非断熱非動径振動重力波モードを解く。表面の力学的境界条件が、自転の効果によって臨海周波数が高くなることに着目して、 $\kappa$ -メカニズムによって励起された高調波重力波振動モードは、走行波となって、角運動量と質量を星の外に運び出すことを示す。

## 4. 研究成果

(1) ① A型特異星の場合は振動周期が基本周期に比べて極めて短い高調波であるために、振動の動径方向の波長がスペクトル線形成層の薄さに匹敵する程短く、有限の厚さを考慮せねばならない。逆に、そうすることによって星震学によるこの手法でしか探れない研究が出来る。この様な背景下、水平方向と深さ方向の振動速度場を考慮に入れたスペクトル線のプロファイルを順問

題としてシミュレーション出来る様にし、観測と比較できるようにした。その結果、高時間分解高分散分光観測による脈動の観測から、化学組成の水平方向及び鉛直方向の不均一性を探れる様になった。成果は学術誌論文として発表した。すばる望遠鏡を使った高時間分解高分散分光観測については、論文を学術誌に投稿中である。

② ヘリウムが主成分である大気を持つ、コンパクト星の大気構造並びに運動構造を、すばる望遠鏡を使って、高分散かつ高時間分解能のスペクトル観測を行い、その解析を進めた。脈動速度が音速に達して衝撃波が生じ、それが大気を伝わる様を明らかにした。理論モデル大気を使ったシミュレーション結果との詳細な比較を現在も継続中である。中間発表として国際研究会で成果を披露したが、学術誌投稿論文執筆に向け努力中である。

(2) ケプラー宇宙望遠鏡により長時間に亘って得られ続けている極めて高精度な観測データの活用法を研究した。ケプラー衛星は太陽系重心の周りを公転しているので、如何なる星からの光路長も公転と共に周期的に変動する。この変動を打ち消す為に、ケプラー宇宙望遠鏡による取得データの時刻は、太陽系重心での時刻に変換して記録される。そのため、実はケプラー宇宙望遠鏡で取得されたデータは、時間等間隔ではないのだが、このことの影響をきちんと考慮すると、ナイキスト周波数（サンプリング周波数の 1/2）より高い脈動であっても正しく求めることが出来ることを実例を挙げて証明した。従来は、測光を行う時間間隔が解析可能な振動数域を決めていると思われていたが、そういった限界がない事を証明し、ケプラー衛星が得る観測データに新たな活路を開く事に成功した。成果は学術誌論文として発表した。今後、数多くの応用が期待される。

(3) 脈動の自転に対する効果を考慮し、星の振動の進化により星周円盤が生成されるといふ以下のような新しいシナリオを立てて検討した。一部の B 型主系列星は鉄族元素のイオン化する温度領域で起こる  $\kappa$ -メカニズムにより振動不安定となる。非軸対称 g モードによる角運動量輸送を考えると、角運動量が星表面に輸送され表面付近の自転速度が上昇することが予想される。自転が速くなると、脈動は赤道域に集中する性質を持つ。その結果として、重力波が定在波になるための星表面での臨界振動数（それ以下では定在波にならずに進行波になる）が高くなり、それまで定在波であった振動モードが進行波となってしまうことが予想される。そうすると、一気に角運動量放出と質量放出とが進み、星周円盤を形成して

Be 星になるという作業仮説を立てて、子細に検討した。中間発表として国際研究会で成果を披露したが、学術誌投稿論文執筆に向け努力中である。

## 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 12 件)

① Jeffery, C. S., Montañés-Rodríguez, P., Shibahashi, H., Kurtz, D. W., Elkin, V., and Saio, H. 2014, Shock Diagnostics in the Pulsating Proto-Subdwarf V652 Herculis, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, 査読無, Vol. 481, pp.125-131

② Murphy, S. J., Bedding, T. R., Shibahashi, H., Kurtz, D. W., and Kjeldsen, H. 2014, Finding binaries among Kepler pulsating stars from phase modulation of their pulsations, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 査読有, 掲載決定済

③ Jeffery, C. S., Shibahashi, H., Kurtz, D. W., Elkin, V., Montañés-Rodríguez, P., and Saio, H. 2013, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, 査読無, Vol. 479, pp.369-376

④ Ishimatsu, H. and Shibahashi, H. 2013, A Working Hypothesis about the Cause of Be Stars: Episodic Outward Leakage of Low-Frequency Modes Excited by the Iron-Peak  $\kappa$ -Mechanism, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, 査読無, Vol. 479, pp.325-333

⑤ Murphy, S. J., Shibahashi, H., and Kurtz, D. W. 2013, Super-Nyquist asteroseismology with the Kepler Space Telescope, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 査読有, Vol. 430, Issue 4, pp.2986-2998  
DOI:10.1093/mnras/stt105

⑥ Shibahashi, H. and Kurtz, D. W. 2012, FM stars: a Fourier view of pulsating binary stars, a new technique for measuring radial velocities photometrically, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 査読有, Vol. 422, Issue 1, pp.738-752  
DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.20654.x

⑦ Nomura, T., Naito, J., and Shibahashi, H. 2012, Numerical Simulations of Line-Profile Variation beyond a Single-Surface Approximation for Oscillations in roAp Stars, Publ. Astron. Soc. Japan, 査読有, Vol. 64, No. 1, Article No. 9, 18 pp. DOI:10.1093/pasj/64.1.9

⑧ Kurtz, D. W., Cuhna, M. S., Saio, H., Balona, L. A., Elkin, V. G., Shibahashi, H., Brandao, I. M., Uytterhoeven, K., Frandsen, S., Frimann, S. Hatzes, A. Lueftinger, T. Gruberbauer, M., Kjeldsen, H., Christensen-Dalsgaard, J., and Kawaler, S. D. 2011, The first evidence for multiple pulsation axes: a new rapidly oscillating Ap star in the Kepler field, KIC 10195926, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 査読有, Vol. 414, Issue 3, pp.2550-2566 DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.18572.x

[学会発表] (計 12 件)

① 柴橋博資、スーパーナイキスト星震学、日本天文学会 2014 年春季年会、2014.03.19-22、三鷹市

② Shibahashi, H., A working hypothesis about the cause of Be stars: Episodic outward leakage of low-frequency waves excited by the iron-peak  $\kappa$ -mechanism, IAU Symposium 301, 2013.08.19-23, Wrocław (Poland)

③ Shibahashi, H., Super-Nyquist asteroseismology, Kepler Asteroseismic Science Consortium Sixth Workshop, 2013.06.23-28, Sydney (Australia)

④ 石松宏幸、柴橋博資、Be 星の星周円盤の生成、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012.09.19-21、大分市

⑤ Shibahashi, H., Frequency modulated stars, Kepler Asteroseismic Consortium Fifth Workshop, 2012.06.18-22, Balatonalmádi (Hungary)

⑥ 内藤純、柴橋博資、roAp 星におけるスペクトル線プロファイル変動、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011.09.22-24、鹿児島市

⑦ Shibahashi, H., Numerical simulations of line-profile variation beyond a single-surface approximation for oscillations in roAp stars, IAU

Symposium, 2011.09.18-23, Oxford (UK)

⑧ Shibahashi, H., Traditional approximation for low-frequency modes in rotating stars and a working hypothesis about episodic mass-loss in Be stars, The 20<sup>th</sup> Stellar Pulsation Conference Series, 2011.09.05-09, Granada (Spain)

## 6. 研究組織

研究代表者

柴橋博資 (SHIBAHASHI, Hiromoto)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：30126081