

KIC 11145123の星震学： 内部自転，扁平率，進化過程

八田 良樹¹
関井 隆²



八田



関井

〈総合研究大学院大学天文科学専攻／国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: ¹yoshiki.hatta@nao.ac.jp, ²takashi.sekii@nao.ac.jp

Kepler 探査機による長期間高精度測光観測データは星震学に急速な発展をもたらし、グローバルな恒星物理量の推定のみならず、これまでの恒星物理学では不可能であった内部探査も可能にしている。そのような、個々の星のダイナミクスや平衡構造の推定を目指した星震学は、恒星内部角運動量輸送、元素混合過程やダイナモ機構、また、状態方程式など、様々な物理過程を紐解く上で重要である。重点的に星震学的解析が行われた星はいくつか挙げられるが、本稿ではその内の一つである KIC 11145123 の、内部自転，扁平率，進化過程の三点について順に紹介する。

1. KIC 11145123 が日の目を見るまで

Kepler 探査機の打ち上げに胸を躍らせたのは何も系外惑星分野の人々だけではない。星震学コミュニティも（人知れず）沸き立っていたのだ。というのも、*Kepler* 探査機はその「ナノヘルツレベルの振動数分解能（～長期間連続観測）」と「マイクロ等級レベルでの高精度測光観測」の二点において、MOST¹⁾ や CoRoT²⁾ 等の過去の宇宙探査機の性能を大きく上回っていたからである。2010年の打ち上げ後、データは順調に蓄積され、2012年にはフランスを中心としたグループが世界で初めて赤色巨星に対し内部自転推定を行い^{3),4)}、見事な成功を収めた。

「次は主系列星の内部自転推定だ」ということで、2013年初頭に恒星振動数解析のスペシャリストである、星震学界の‘ドン’こと、Donald

W. Kurtz は次の作業に取り掛かった。それは、「pモードとgモードの両方で振動している」かつ「内部自転推定に必須な周波数分裂が（pモードとgモードのどちらに対しても）観測できている」という両方の条件を満たす主系列星を、*Kepler Input Catalog*⁵⁾ (*Kepler* 探査機の観測ターゲットのカタログ)の中から探し出すというものである。仮にそのような星が見つかったとすれば、それは「内層（gモードで探査）から外層（pモードで探査）にかけての自転角速度分布推定」が可能であることを意味する。ただし、その手の推定がなされた主系列星は、宇宙広しといえども、それまでに存在しないとんでも過言ではなかった*1。

Kurtz氏による網羅的探査の結果、二つの星が見つかった。一つがF型星 KIC 9244992⁷⁾であり、もう一つが本稿の主役であるA型星 KIC

*1 もちろん、日震学を利用した太陽の詳細な自転角速度推定は既に行われていた⁶⁾が、太陽の場合、gモードは見つからないので、核融合反応が起こっているような深部輻射層に関しては依然として不明な点が多い。

11145123⁸⁾である。このように、KIC 11145123は情報量が多い大変レアな星なのである。だからこそ、以下に紹介していく詳細な研究(内部自転・扁平率・進化過程)に繋がっていったとも言える。

2. KIC 11145123の内部自転

初めはKIC 11145123の内部自転に関わる話である。まず、星震学に基づいた恒星内部の自転角速度推定手法について概説する(本特集の高田の総説記事を参照)。

自転角速度 $\Omega(x, \mu)$ が固有振動数に比べ十分小さく、自転の二次の効果を無視できる場合、自転由来の周波数分裂(rotational splitting)という現象による周波数のズレ(rotational shift) $\delta\omega_{nlm}$ と自転角速度 $\Omega(x, \mu)$ とを線型の関係式で結びつけることができる:

$$\frac{\delta\omega_{nlm}}{m} = \iint K_{nlm}(x, \mu)\Omega(x, \mu)dx d\mu + e_{nlm}, \tag{1}$$

ここで $K_{nlm}(x, \mu)$ は、 n, l, m を指数とする固有モードのrotational splitting kernelと呼ばれる関数であり、恒星内部の密度・音速分布を定めたら計算できる。また、 x と μ はそれぞれfractional radius(恒星中心からの距離 r を恒星半径 R で割ったもの)と余緯度 θ のコサイン($\mu = \cos \theta$)を表す。観測誤差は e_{nlm} で示されている。

以上は理論的な定式化の話であるが、KIC 11145123におけるrotational splittingの観測例を図1に示す。ご覧のようにピークがほぼ等間隔に並んだ構造が確認できる⁸⁾。

自転角速度は未知の関数であるが、測定できているrotational shiftの数だけ式(1)が立式できるので、あとはこの連立方程式を解いてやれば自転角速度 $\Omega(x, \mu)$ を推定できる。このような手続きにより自転角速度推定を行うことを、自転の逆問題を解くという。余談だが、太陽の場合、連立方

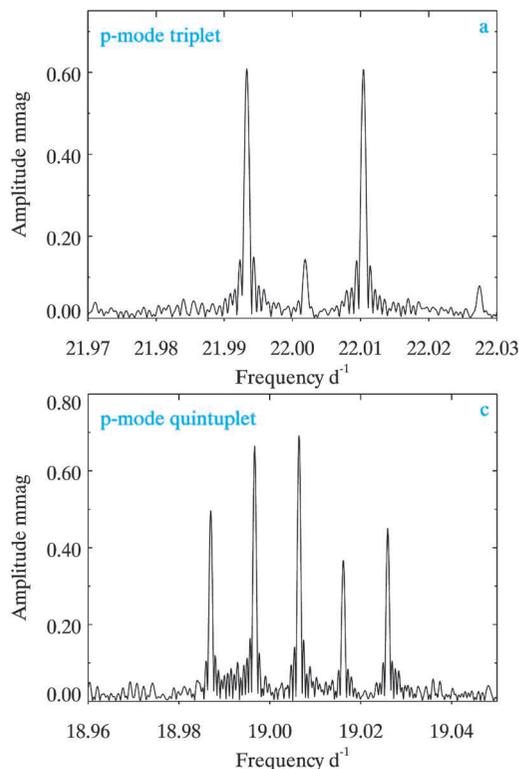


図1 KIC 11145123のrotational splittingの例。横軸は振動数(d⁻¹)、縦軸は振幅(ミリ等級)を表す。上図と下図はそれぞれ $l=1$ のpモードの場合と $l=2$ の混合モードの場合を示している。Kurtz et al. (2014): ‘Asteroseismic measurement of surface-to-core rotation in a main-sequence A star, KIC 11145123’ 中の図3から転載⁸⁾。

程式の本数は10万を越えるが、KIC 11145123の場合だと20と少しである。そのため、太陽の自転の逆問題に精通している研究者にとっては、星震学における自転の逆問題がどうも朝飯前に思えるようで、以前ミーティング中に「暗算で解けるね」と関井は言った。

恐らく冗談であるとはいえ油断はできない。暗算で逆問題を解かされることに恐怖を覚えた八田は、数値計算によってKIC 11145123の自転の逆問題を解いた。解法としては日震学・星震学で標準的に使用されるOLA⁹⁾(Optimally Localized

Averaging) と呼ばれる方法を用いた。その結果、大きく分けて二つの結果が得られた。

一つ目は、外層における自転角速度の緯度依存性の発見である。この星においては「高緯度域が低緯度域よりもわずかに速く回転している」ことが 2σ 以上の確からしきで確認できた。太陽の場合とは逆の傾向を示していることから、anti-solar-like rotationとも呼ばれる。KIC 11145123の自転周期は100日ほどだが、このように自転の遅い星がanti-solar-like rotationを示すことはBrunらの理論計算から予測されていた¹⁰⁾ので、彼らの計算を確かめる結果となっている。なお、太陽型星の自転角速度の緯度依存性については本特集のBenomarと関井の記事を参照されたい。

二つ目は、星の中心部における速い回転の示唆を得たことである。これまでは星の深部探査においてgモードが中心的に用いられていた¹¹⁾。例えばKurtzらは、2014年の時点で、この星の(一次的)自転角速度推定を行っており、「外層(pモードで探査)が深部輻射層(gモードで探査)より僅かに速く回転している」ことを、モデルに依存しない手法に基づき報告している⁸⁾。しかし、われわれが再度解析してみたところ、逆問題の解き方次第では、「深部領域の方が速く回転している」というKurtzらとは逆の結果も得られた。これはなぜだろうということ、詳しいチェックを行ったところ¹²⁾、「深部領域の方が速い」という解が得られる場合には混合モードが大きく寄与していることが分かった。この星の場合、混合モードはgモードが伝播不可能である対流コア内にも僅かな感度を持つため、「対流コア内は速く回転しているが、その上部に位置する深部輻射層はゆっくりと回転している」と考えれば(図2)、先ほどの食い違いを説明できる。そしてわれわれは自転角速度分布の3-zone modeling(恒星内部を3つの領域に分けて、それぞれの領域が剛体回転をしていると仮定した上で式(1)を利用した最小二乗法を行うこと)などから「対流コアが他

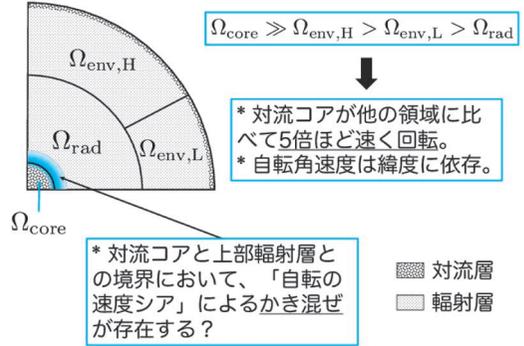


図2 KIC 11145123の自転角速度分布の概略図。Kurtzらが得た「深部輻射層が外層よりも僅かに速く回転している」という結果も確認できた。

の領域に比べ5倍ほど速く回転している」可能性があることを最終的に発見した(図2)。

特に二つ目の結果は、KIC 11145123内部のダイナミクスを考察する上で興味深い。なぜならば、他の星震学的解析から「拡散を弱めた設定でこの星の進化計算を行った方が、観測をよく説明できる」ことが示唆されているのだが、先の「対流コアと上部輻射層との間の速度シア」と「弱い拡散」との間になんらかの関係性があることが予想されるからである(図2)。例えば太陽の場合では、輻射層と対流層との間に存在する速度シア(tachoclineと呼ばれる)により、かき混ぜが生じ、ヘリウムの重力拡散が弱められていると考えられている¹³⁾。KIC 11145123でも果たして同様の機構が存在するのかどうか。もちろん両者に明確な違いも存在するが、太陽の場合と類似した機構が働いているというシナリオは大変興味深い。

3. KIC 11145123の扁平率

次はこの星の扁平率に関わる話である。恒星が自己重力とガス圧力勾配の二者だけの釣り合いからなるガス球であると考えた時、星の形状は球体である。事実、日中に見える太陽は丸い。ところが、自転による遠心力や、磁場などにより、恒星形状の扁平・扁長が見出されることもある¹⁴⁾。

例えば有名どころで言えば、Altairが挙げられる。このわれわれの近傍の高速自転星は、赤外干渉計の観測等から自転軸対称な扁平が生じていることが直接観測¹⁵⁾されている。

以上のような扁平現象は、KIC 11145123についても星震学的手法に基づいて測定されている¹⁶⁾が、驚くべきはその扁平率の低さである。Gizonらはこの星の赤道半径と極半径の差 ΔR が、数kmほどであることを報告している。果たしてそのような極々僅かな扁平率^{*2}はいかにして測られるのだろうか、疑問に思う読者も多いと思われる。以下にその手順について概説する。

用いられる観測量は、またもや周波数分裂による周波数のズレである (図1参照)。ただし、rotational shiftが m に対し奇関数的に振舞っていたのに対し、扁平率の指標は m に対し偶関数的に振る舞う、以下のように定義される量である：

$$2\pi s_{nlm} \equiv \frac{\omega_{nlm} + \omega_{nl,-m}}{2} - \omega_{nl0}. \quad (2)$$

以上の s_{nlm} が負 (正) の場合は扁平 (扁長) していることを示す。値の符号が扁平率を表現することは次のようにして説明できる。例えば扁平している場合、 $m \neq 0$ の固有振動を構成する波が星を一周するのにかかる時間よりも、 $m=0$ の固有振動を構成する (子午面を通る) 波が星を一周するのにかかる時間の方が短い。従ってそれぞれの振動数は、 $\omega_{nl|m|} < \omega_{nl0}$ という大小関係を満たし、 s_{nlm} の符号も負となる。扁長の場合も同じようにして説明できる。

GizonらはKIC 11145123において、観測された4つの周波数分裂の組に対し、6つの s_{nlm} を計算した。その結果を図3に示す。図3から分かるように、この星は扁平であることが結論できる。

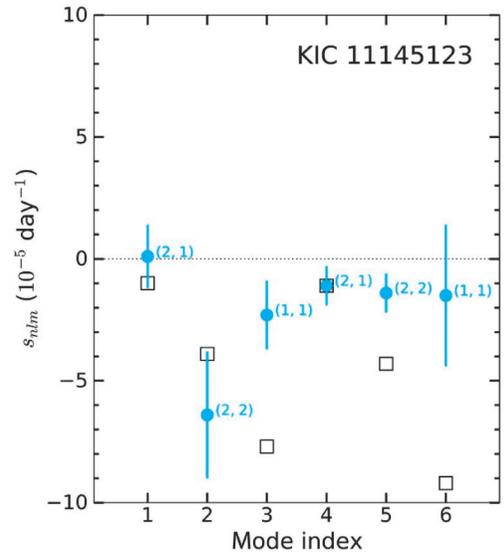


図3 6つの固有モードに対し s_{nlm} の観測値をプロットしたもの (青丸)。横軸は各固有モードに割り当てられた番号を示す。黒縁の正方形は自転から理論的に予想される s_{nlm}^{mod} 。かっこ内の数字は固有モードの指数 l と m を左から順に表している。Gizon et al. (2016): ‘Shape of a slowly rotating star measured by asteroseismology’ 中の図2を転載¹⁶⁾。

星を扁平にするメカニズムの代表的なものとしては自転が考えられる。そこでGizonらは剛体回転を仮定した上で理論的な s_{nlm}^{mod} を求め、観測値 s_{nlm}^{obs} と比較した (図3)。その結果、観測値が理論値の三割程度の値となることを発見した。このことから、この星は自転から予想されるよりも扁平が小さいことになり、星を扁長にしようとする何か他のメカニズムが存在していることを示している。そのような機構としては磁場以外考えられなかったため、Gizonらは以上の結果を元に、この星の外層において弱磁場が存在している可能性を指摘した。

ちなみに、Gizonらにより得られたKIC

*2 一言で「扁平」と言っても、Gizonらが測定した扁平率はあくまで「音波が感じる」扁平であり、「光球面」などで定義される扁平とはやや異なる概念であることに注意されたい。

11145123の扁平率は、これまでに測定されたどの天体の扁平率よりも小さいので*³, KIC 11145123は(暫定的ではあるが)‘宇宙で最も丸い物体’の呼び声が高い¹⁸⁾.

4. KIC 11145123は青色はぐれ星?

最後はこの星の進化過程に関わる話である。Kepler探査機の測光データから、この星は「A型主系列星」と分類されていた¹⁹⁾が、Kurtzらが計算した恒星モデルとの比較によると、この星はそれほど単純ではないことが分かっている。

この星においてgモードが受かっていることは既に触れたが、観測される振動数と、gモードの漸近理論²⁰⁾とを照らし合わせ、Kurtzらは「この星が主系列の最終段階にある」と考えた。つまり、コア内水素燃焼がほとんど終了し、主系列を離れつつある星ということになる。

加えて彼らは、恒星モデルとの比較から、初期ヘリウム量が質量比にして0.36ほどであることが好ましいことも発見した。ビッグバンによる元素合成から生成されたHe量は0.25弱であると見積もられている²¹⁾ので、単独星であると仮定してこの星の進化計算を行うことに困難があることを示している*⁴。

二つ目の結果を説明できる最も単純なシナリオとしては、「この星が外部からHeを獲得した」などが考えられる。この仮説は、先の自転角速度推定の結果である「外層の方が深部輻射層よりも速く自転している」ことにも説明を与える点で説得力がある。

一方、この星の遅い自転に鑑みると、Ap星やAm星である可能性等も考えられた。このような状況を打開するために高田-比田井らは、化学組成の測定と基本的恒星パラメタの導出を目的として、Subaru/HDSによる分光観測を行った。そして、得られた化学組成パターンや低金属量($Z \approx 0.003$)、大きな空間移動速度などを合わせ、彼らはこの星が青色はぐれ星であると結論づけた²⁴⁾。

青色はぐれ星は、球状星団や散開星団によく見られ、星団の年齢から考えればどうに主系列を離れていても良いにも関わらず、主系列上(青色サイド)に残っている(はぐれてる)ことからそのように呼ばれる²⁵⁾。いわば、「若返っている」ように見える星なのである。青色はぐれ星がいかにして「若返っているのか」については諸説あるが²⁶⁾、*⁵、現在有力なのは「連星系における相互作用」と「恒星同士の衝突」の二説である。従って、やはりKIC 11145123の恒星モデリングにおいては、単独星進化の仮定を離れ、質量降着等の効果を取り入れた進化計算・構造計算を行うべきであることが示唆される。実際、高田-比田井らは、金属量などの新しい観測データを制約条件として再度この星の恒星モデリングを、単独星と仮定して行ったが、満足のいく結果は得られなかった。そうしたこともあって、現在筆者らはこの星の非標準的恒星モデリングを目論んでいる。

最後に、KIC 11145123が青色はぐれ星だとしたら面白い点がもう一つあるので触れておこう。と言うのも、他の有力な青色はぐれ星形成説として「内部混合による寿命増加」も挙げられている

*³ 例えば太陽の場合、 $\Delta R/R$ はおおよそ 1×10^{-5} と見積もられており¹⁷⁾, KIC 11145123の場合($\approx 1.8 \times 10^{-6}$)¹⁶⁾との比較から、太陽の方が5-6倍扁平率が大きいことが分かる。

*⁴ 球状星団中には、ヘリウム量が0.3以上と考えられる主系列星が存在することも報告されている²²⁾。ただしそれらの星は、AGB星(あるいは高速自転大質量星)による元素合成の影響を受けたガスから二次的に誕生したと考えられていて²³⁾、目立った窒素超過や炭素欠乏が見られないKIC 11145123はその手の星ではないとわれわれは考えている。

*⁵ 大変extremeな説としてはBeech(1990)が挙げられる²⁷⁾。Beechは青色はぐれ星が若返る原因として、その恒星系に知的生命体がいると仮定し、主星の進化に伴って惑星が取り込まれてしまうという事態を防ぐために、その知的生命体が主星を(どうにかして)若返らせている、と考えた。

からだ。これまでに青色はぐれ星の内部構造に関する観測的研究は行われたことがなく、以上の説の是非も問われていなかったが、青色はぐれ星の星震学が発展すれば、この状況に前進をもたらすかもしれない。その観点からすれば、「KIC 11145123の星震学」は「青色はぐれ星の星震学」のプロトタイプとも言える。

5. おわりに

本稿では、これまでに重点的な星震学的解析がなされてきたKIC 11145123について最新の研究成果を報告した。データが豊富でさえあれば、これだけ詳細な内部探査や恒星諸性質の推定が行えるのである。まさに、はじめに行ったターゲット選定の賜物と言えよう。よりによって変わった特徴が多い、ヘンテコな星が選ばれてしまった訳ではあるが、それはこの星の興味深さを物語っているとポジティブに解釈して、謎の解明に向けて研究を続けていく所存である。続報に乞うご期待。

参考文献

- 1) Walker, G., et al., 2003, *PASP*, 115, 1023
- 2) Baglin, A., et al., 2006, in Proceedings of "The CoRoT Mission Pre-Launch Status—Stellar Seismology and Planet Finding" (ESA SP-1306), eds. Fridlund, M., Baglin, A., Lochard, J., and Conroy, L., 33
- 3) Deheuvels, S., et al., 2012, *ApJ*, 756, 19
- 4) Mosser, B., et al., 2012, *A&A*, 548, A10
- 5) Brown, T. M., et al., 2011, *AJ*, 142, 112
- 6) Thompson, M. J., et al., 1996, *Science*, 272, 1300
- 7) Saio, H., et al., 2015, *MNRAS*, 447, 3264
- 8) Kurtz, D. W., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 102
- 9) Backus, G. E., & Gilbert, J. F., 1967, *Geophysical Journal*, 13, 247
- 10) Brun, A. S., et al., 2017, *ApJ*, 836, 192
- 11) Aerts, C., et al., 2017, *ApJL*, 847, L7
- 12) Hata, Y., et al., 2019, *ApJ*, 871, 135
- 13) Gough, D. O., et al., 1996, *Science*, 272, 1296
- 14) Chandrasekhar, S., 1969, *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*, (Yale Univ. Press)
- 15) van Belle, G. T., et al., 2001, *ApJ*, 559, 1155
- 16) Gizon, L., et al., 2016, *Science Advances*, 2, e1601777
- 17) Irbah, A., et al., 2019, *ApJ*, 875, L26
- 18) <https://www.sciencealert.com/scientists-just-discovered-the-most-perfect-sphere-in-the-known-universe>
- 19) Huber, D., et al., 2014, *ApJS*, 211, 2
- 20) Tassoul, M., 1980, *ApJS*, 43, 469
- 21) Cyburt, R. H., et al., 2016, *RvMP*, 88, 015004
- 22) D'Antona, F., et al., 2005, *ApJ*, 631, 868
- 23) Bastian, N., & Lardo, C., 2018, *ARA&A*, 56, 83
- 24) Takada-Hidai, M., et al., 2017, *MNRAS*, 470, 4908
- 25) Sandage, A. R., 1953, *AJ*, 58, 61
- 26) Leonard, P. J. T., 1989, *AJ*, 98, 217
- 27) Beech, M., 1990, *EM&P*, 49, 177

Asteroseismic Analyses of KIC 11145123: Internal Rotation, Asphericity, and Evolutionary Stage

Yoshiki HATTA and Takashi SEKII

Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies/National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: A wealth of unprecedentedly high-quality data provided by *Kepler* space telescope has enabled us to probe interiors of stars in more detail than before. One of the most deeply studied *Kepler* targets is KIC 11145123, on which we report the internal rotation, the asphericity, and the evolutionary stage, mostly revealed by asteroseismic analyses.