

特異な自転構造から示唆される 赤色巨星 Kepler-56 系の歴史

徳 野 鷹 人

〈大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

e-mail: takato.astron@gmail.com



恒星の自転異常は、周囲の伴天体との相互作用の履歴として読み解くことで、その系が過去に辿ってきた軌道進化を探る手がかりとなる。本稿では、惑星を持つ赤色巨星 Kepler-56 に着目する。Kepler-56 では、外層の高速自転や内部の自転軸不整列といった特異な自転構造が示唆されている。この自転異常を過去の惑星との相互作用の痕跡として考えることで、現在は直接見えない Kepler-56 系の軌道進化を制限することができる。本稿では、Kepler-56 の特異な自転構造と、そこから浮かび上がる「Kepler-56 系史」について紹介する。

1. 恒星の自転異常の探究意義

「恒星進化」というと、質量・半径・有効温度といった、Hertzsprung-Russell 図 (HR 図) 上で表される物理量の変化を思い浮かべる方が多いだろう。実際、恒星の進化段階は HR 図によってある程度整理できる。しかし、HR 図に現れる物理量だけが恒星のすべてではない。自転もまた、HR 図には直接現れないものの、恒星進化を考えると重要な物理量の 1 つである。

恒星の自転は、進化とともに変化していく。この自転進化は、主に恒星内部の物理によって決まる。恒星内部では、乱流や磁場に起因する角運動量輸送、また恒星進化に伴う内部構造の変化によって、角運動量分布が絶えず変化している。その結果、同じ質量・金属量を持つ単独星は、ある程度共通した自転進化の経路をたどることが知られている。

単独星の自転進化は、恒星内部の物理を制限する手がかりであり、それ自体にも興味深い話題が数多くある。しかし本稿では、この単独星の自転進化をいったん経験則として受け入れ、その経験則から逸脱した恒星に着目する。以降では、これを「自転異常」と呼ぼう。

自転異常を作り出す主要な起源の 1 つが、恒星外部に存在する伴天体、すなわち伴星や惑星との角運動量交換である。潮汐は、このような角運動量交換を引き起こす代表的な機構であり、伴天体の軌道角運動量と恒星の自转角運動量の間で角運動量をやり取りする。

潮汐は、惑星系や連星系における長期的な軌道進化の駆動源として注目されている。しかし、そのタイムスケールはかなり長く、現在進行形で起きている軌道進化を検出するのは容易ではない^{*1}。また、現在観測される軌道だけを見ても、その軌道がどのような初期条件から進化してきたのかを

^{*1} 現在進行形で起きている惑星の軌道進化を検出する試みとその困難については天文月報 2026 年 5 月号の河合さんの記事でまとめられている [1]。是非そちらも参照されたい。

知ることは難しい。

そこで、軌道進化そのものではなく、それに伴って恒星に残された自転の痕跡に着目することで、過去の軌道進化を検討する手法が提案されている。潮汐は角運動量交換であるため、伴天体の軌道が変化すれば、それに応じて恒星の自転も変化する。単独星の自転進化は経験的にある程度わかっているため、そこからのずれ、すなわち恒星に残された自転異常を手がかりにすれば、伴天体が過去に経験した軌道進化を制限できる可能性がある。

実際に、恒星の自転異常から惑星の軌道進化に迫ることができた事例はいくつか存在する。その中でも、惑星を持つ赤色巨星Kepler-56^{*2}の事例は、自転異常そのものの面白さ、そしてそこから示唆される軌道進化の興味深さという点で、特筆すべきものだと思われる。以降では、筆者自身の研究も交えながら、その詳細を紹介しよう。

2. Kepler-56: 惑星を持つ赤色巨星

Kepler-56は、Kepler宇宙望遠鏡によって周囲に惑星が発見された赤色巨星である。赤色巨星とは、その名が示す通り、赤く大きく膨張した星であり、主系列星として中心部の水素を燃やし尽くした後に到達する進化段階である。HR図上では赤色巨星は主系列星よりも右上の領域に位置することで区別できる。実際、Kepler-56はその領域に位置していることが図1で示されている。

赤色巨星では、分光観測や測光観測の観測結果を恒星進化モデルと比較することで質量や半径を比較的によく決めることができる。このような解析からKepler-56の質量は約1.3太陽質量であることがわかっている [3]。そのためKepler-56がもとF型主系列星であり、その後進化して現在の赤色巨星段階に至ったということがわかる。

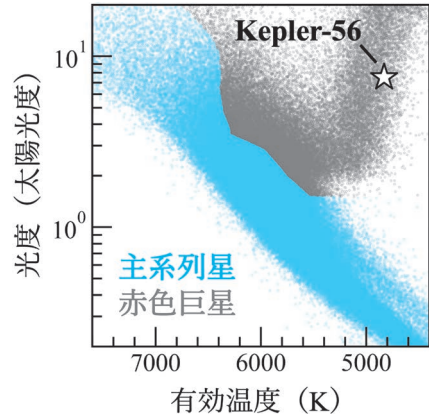


図1 HR図上における Kepler 宇宙望遠鏡で観測された星。主系列星段階の星を青色、赤色巨星段階の星（準巨星を含む）を灰色で示している。Kepler-56は黒い星印で示されている。図の作成には Kepler 望遠鏡・Gaia 望遠鏡のデータを使用した [2]。

Kepler-56の周囲には2つの系外惑星、Kepler-56bとKepler-56cがいることがトランジット法などからわかっている（図2） [3]。どちらもトランジットしていることから、これらの公転軸が揃っていることがわかる。さらにトランジット法から得られる情報を視線速度観測と組み合わせることで、これらの惑星の軌道離心率がゼロに近いことや、それぞれの惑星の質量がわかっている^{*3}。具体的には、公転周期10.5日（軌道長半径0.10 AU）で内側を回る Kepler-56bは約0.1木星質量の惑星で、公転周期21.4日（軌道長半径0.17 AU）で外側を回る Kepler-56cは約0.7木星質量の惑星である [4]。これらの結果はKepler-56b/cがどちらも比較的恒星近くを周回するガス惑星（近接ガス惑星）であることを示している。赤色巨星周りには近接ガス惑星が少ないことが知られており、Kepler-56系はその点で珍しい方の惑星系といえる [5]。

^{*2} Kepler 望遠鏡で惑星が確認された恒星は Kepler-[番号] と名前がついている。

^{*3} 視線速度法によって、さらに外側に Kepler-56d と呼ばれる惑星／褐色矮星も発見されている [4]。本稿では Kepler-56d については扱わないが、より詳細に軌道進化を検討する際には重要となる可能性がある [6]。

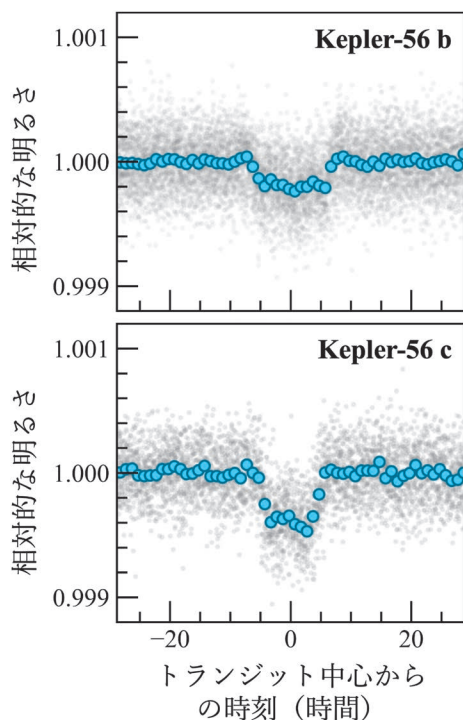


図2 Kepler-56b (上) と Kepler-56c (下) のトランジット光度曲線。灰色の点は、各トランジットを重ね合わせた実際の観測点を示す。青色の点は、それらを1時間ごとにビンニングしたものである。図の作成には Kepler 望遠鏡のデータを使用した。

3. Kepler-56の自転異常

3.1 星震学による赤色巨星の自転計測

Kepler-56の注目すべき点は、赤色巨星であるがゆえに星震学と呼ばれる手法によって自転構造が詳細に調べられることにある。星震学がどのような手法なのか、そして星震学によって赤色巨星の自転構造の何がわかるのかを紹介しよう^{*4}。

星震学とは恒星の振動を用いて恒星の物理量や内部構造を調べる手法のことである。恒星の中には固有振動によって明るさが変化するものがある。

Kepler 望遠鏡を筆頭とする高精度測光観測により、明るさの変化を正確に捉えることで固有振動数のパターンが検出されている。固有振動数は恒星の密度・温度・自転などによって決まるため、観測されたパターンから恒星の性質を制限することができる。

振動が自転を検出できる仕組みは大雑把には以下のような原理となっている。自転と同じ方向に進む波と、反対方向に伝わる波を考えてみよう。これらは対称的で、自転がない場合には同じ固有振動数をもつとする。自転は恒星内部に流れを作り、自転と同じ向きに伝わる波にとっては「追い風」、反対向きに伝わる波にとっては「向かい風」として伝搬の仕方をそれぞれ変化させる^{*5}。その結果、もともと同じ固有振動数をもっていた振動モードの間に、わずかな振動数の差が生じる。この振動数の差がどれくらいかを測定することで、恒星内部の自転周期を推定することができる。

またここでみているのは全体が膨らんだり縮んだりする球対称な振動（動径振動）でなく、緯度や経度ごとに膨らんでいるか縮んでいるかが違うような非球対称な振動（非動径振動）となっている。非動径振動ではある領域が明るくなる一方で別の領域が暗くなるため、それらがどの程度打ち消し合うかは、恒星をどの方向から見るかによって変わる。したがって、非動径振動の振幅には自転軸が視線方向に対してどの程度傾いているか（自転傾斜角）という情報も含まれている。この性質を利用することで、星震学から恒星内部の自転周期だけでなく、視線方向に対する自転軸のなす傾き（自転傾斜角）にも制限を与えることができる。

ここまでは、星震学が自転周期や自転傾斜角を調べられるということを紹介したが、もう少し深掘りしよう。剛体であれば自転周期や自転傾斜角は場所（緯度^{*6}・深さ）に対して同じであるが、

^{*4} ここで紹介している星震学の原理、星震学による自転推定、赤色巨星の星震学については天文月報2020年2月号における高田さんの記事 [7, 8] で詳しくまとめられている。是非そちらも参照されたい。

^{*5} 実際にはコリオリ力によって伝播経路が変わり振動数が変化する効果もある。

^{*6} 緯度方向についてはより高次のモードを使う必要があり、Kepler-56では難しい。他の低温度星で制限する試みは Benomar さん・関井さんの記事 [9] に詳しくまとめられている。是非そちらも参照されたい。

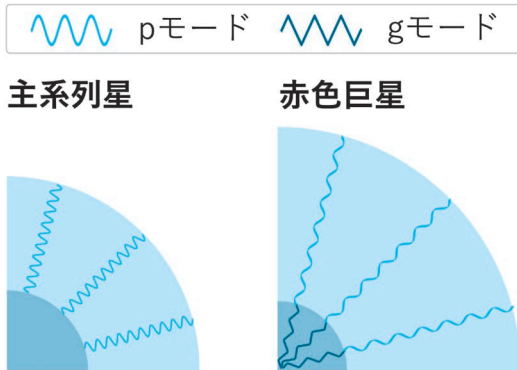


図3 主系列星（左）と赤色巨星（右）の表面で見える振動の伝搬領域を示した図。主系列星では外層のみを伝わる振動（pモード）が見えるが、赤色巨星では外層を伝わる振動（pモード）とコアを伝わる振動（gモード）が結合した混合モードが見える。

流体ではそうとは限らない。これを踏まえて場所についてもう少し詳しくすると、星震学では「波が伝搬する領域において重み付け平均された」自転周期や自転傾斜角を調べていることになる。

この「波が伝搬する領域」は恒星の内部構造によって決まる。振動は復元力の違いによって音波モード（pモード）と重力波モード（gモード）の二つに大きく分けられ、それぞれ別の場所を伝搬する。外層に対流層・コアに輻射層を持ついわゆる「低温度星」では、外層をpモードが、コアをgモードが伝搬する。殆どの低温度星では外層を伝わるpモードのみが観測される（図3左）ため、制限がつくのは外層の自転のみである。

しかし、赤色巨星では外層を伝わるpモードとコアを伝わるgモードが結合した混合モードが観測される（図3右）^{*7}。混合モードはコアと外層の両方を伝搬しており、外層の情報とコアの情報をそれぞれ含んでいる。さらにあるモードはコア

の影響を強く受け、別のモードは外層の影響をより強く受けるなどその度合いはモードごとに異なっている。そのため、さまざまな混合モードを複合的に検討することで、コアと外層の自転を別々に検討することができる。

3.2 Kepler-56の自転異常

星震学によって、赤色巨星ではコアと外層の自転がそれぞれ推定できることを紹介した。つまり、原理的には外層の自転周期と自転傾斜角、コアの自転周期と自転傾斜角という4変数を取ることができる。しかし実際の解析では、「コアと外層の自転軸はそろっている」と仮定して、外層の自転周期・コアの自転周期・共通の自転傾斜角の3変数とすることがほとんどである。単独星進化ではコアと外層の自転軸が異なるとは考えにくい上、仮定を置くことで表式が単純になるからである。

当然、Kepler-56の従来の星震学的解析もこの（至極真っ当な）仮定のもとで行われた。その結果、自転傾斜角が40度という解が示された^[3]。Kepler-56b/cはトランジット惑星でありその軌道面はほぼ視線方向に沿っていることを踏まえれば、この解はKepler-56の自転軸と惑星の公転軸が揃っていないことになる^{*8}。複数惑星系で自転軸と軌道軸がずれているということでKepler-56系は長年注目を浴びてきた。

ところが、従来の星震学的解析が示すこの解には自転周期に懸念点があった。この解では、外層の自転周期はおおよそ数百日程度となる^{*9}^[11]。この値はKepler-56と質量・進化段階が近いほかの赤色巨星と同程度であり良いように見える。しかし、ことKepler-56においてはそうではない。Kepler-56では自転で黒点が見え隠れすることで生じる周期的光度変動が検出されている。この周

^{*7} 主系列星でも混合モードを示す星がわずかに存在する。そのうちの1つを詳細に検討する試みが天文月報2020年2月号の八田さんの記事^[10]に詳しくまとめられている。是非そちらも参照されたい。

^{*8} トランジット惑星であるKepler-56b/cは視線方向に対する公転軸のなす傾き（軌道傾斜角）が90度に近いことから。

^{*9} 実は2013年に行われた星震学解析は、各モードのコアや外層への感度の取り扱いが間違っており、外層の自転周期が正しく見積もれていなかった。ここで示した外層の自転周期は後述するOng氏が再解析の際に求めた値である。

期的変動の振る舞いは外層の自転周期が70日程度であるという、より高速な自転を指し示していたのだ [3]。この高速自転は分光観測で見える自転による吸収線拡大からも支持されている [4]。つまり、従来の星震学的解析は、他手法が示す高速自転と合致しないことになる。

この対立は星震学者の Joel Ong 氏によって解決された。Ong 氏是对立の原因が「コアと外層の自転軸はそろっている」という仮定にあると考えた。そこでこの仮定を課さず、コアと外層それぞれの自転周期・自転傾斜角を独立な4変数として扱う表式^{*10}を用いて、Kepler-56の振動データを再解析した。その結果、コアと外層の自転軸がそろっていない場合に対応する新しい解が発見され、驚くべきことに、その解における外層の自転周期は黒点変動などから得られる高速な自転周期と合致していた [11]。つまり、Kepler-56では、コアと外層の自転軸がそろっていないことが支持されたのだ。もちろんこのような「ねじれた」自転構造の可能性が指摘されたのは初めてのことで、Ong 氏の論文がarXivに公開されたとき筆者はとても驚いたことを覚えている。

図4ではKepler-56の自転と軌道の位置関係がまとめられている。言葉で書けば以下になる。

- 1) 外層の自転周期は約70日であり、他の赤色巨星に比べて数倍速く自転している。コアの自転周期は約20日であり、ほかの赤色巨星と同程度である。
- 2) コアと外層の自転軸は少なくとも60度以上ずれている。外層の自転軸と惑星の公転軸は揃っている可能性があるが、コアの自転軸は惑星公転軸とそろっていない。

つまり、Kepler-56の自転異常は「外層の高速自転」と「内部の自転不整列」とまとめることができる。

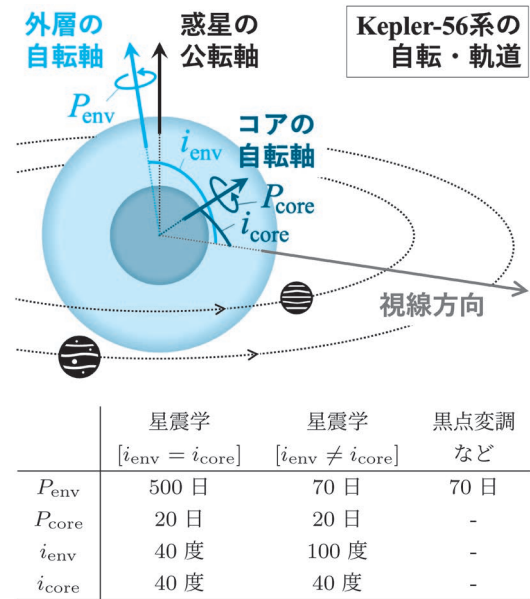


図4 Kepler-56系における自転と軌道の関係のまとめ。上段は概念図、下段は各手法で示された値 [3, 4, 11] の表である。P, iはそれぞれ自転周期と自転傾斜角を表し、添え字 env, core はそれぞれ外層とコアの値であることを示す。

4. 自転異常から示される惑星軌道進化

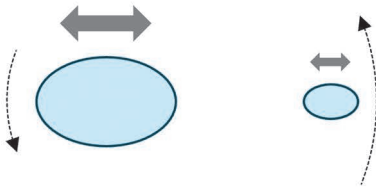
4.1 潮汐によって作り出される自転異常

Kepler-56が示すこの自転異常は、少なくとも定性的には、潮汐による惑星軌道との角運動量交換と整合的な特徴となっている。潮汐が引き起こす角運動量交換の特徴からどのように説明できるかを紹介しよう。

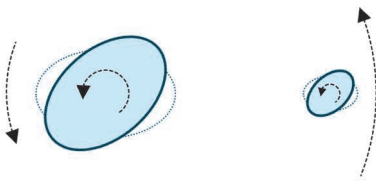
恒星や惑星は完全な球体であれば、自転角運動量と軌道角運動量は保存する。しかし、恒星や惑星は潮汐力によって相手の方向へわずかに膨らんだ楕円形に変形する(図5上)。この膨らみを「潮汐バルジ」と呼ぶ。恒星の自転周期と惑星の公転周期が一致していれば、潮汐バルジは常に相手の方向を向く安定な状態を保つことができる(潮汐ロック)。しかし、恒星の自転周期と惑星の公転

^{*10} 実は表式自体は太陽での検討を目的として1993年時点で作られていた [12]。32年間の時を経て別天体に適用されたというのは実に数奇なことである。ちなみに今でも太陽の混合モードは観測されていないため、太陽には適用できない。

1. 潮汐力で変形する



2. 自転でずれる



3. 元に戻ろうとする

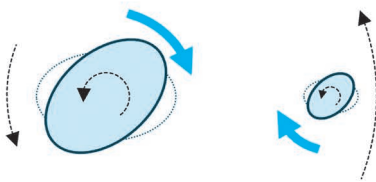


図5 潮汐トルク概念図。回転系・自転が公転より速い場合を示す。

周期が一致していない場合、潮汐バルジは相手の方向からずれていく（図5中）。このずれた状態は不安定であるため、潮汐ロックという安定な形に近づこうとするトルクが働く（図5下）。このトルクを「潮汐トルク」と呼ぶ。近接ガス惑星系では惑星質量が大きい・軌道半径が小さいという変形を大きくする効果がそろっているため潮汐トルクが無視できない割合で働く^{*11}。大雑把に言えば潮汐トルクは「周期が速い方」から「周期が遅い方」へと角運動量を輸送する。そのため、恒星の自転周期よりも公転周期が短い近接ガス惑星系では潮汐トルクは惑星の軌道角運動量を恒星の自転角運動量へ輸送する方向に働く。

結果として、近接ガス惑星系では潮汐により以下の3つの現象が起きる。

- 1) 潮汐トルクで軌道角運動量が失われるため、惑星の軌道長半径は徐々に減衰する。極端な場合、惑星が恒星に飲み込まれる。
- 2) 潮汐トルクで自転角運動量が増えるため、恒星の自転は徐々に加速する。
- 3) 安定な場合である恒星の自転軸と惑星の公転軸が揃う形に近づいていく。

上述の2)、3)は図4で示した Kepler-56 の自転や軌道とよく合致していることがわかるだろう。具体的には、以下のようなシナリオならば Kepler-56 の自転異常を形成できる。もともとは恒星のコアと外層の自転軸がそろっており、一方で惑星軌道だけがそれらに対して傾いていたとする（図6上）^{*12}。このとき潮汐トルクによって惑星の軌道角運動量が外層のみに輸送されると、外層は加速されると同時に惑星軌道の方へと整列する。コアはそのままだとすれば、結果的に「外層の高速自転」と「内部の自転不整列」という2つの自転異常を同時に作ることができる（図6下）。

以降では Kepler-56 の自転異常がこのシナリオでできたとする。冒頭で示したように、角運動量を定量的に見積もることで Kepler-56 の自転異常から Kepler-56 周囲の軌道進化を議論できる。以降では筆者が行った議論を紹介しよう。

4.2 Kepler-56b/cの潮汐で説明できるか？

観測されている状況から素直に導かれるシナリオは「Kepler-56を現在周回している Kepler-56b/cの潮汐が Kepler-56の自転異常を作った」というものだろう。しかし、実はこのシナリオは角運動量という観点でみると難しい。ここでは角運動量の収支を考えることでそれを示していこう。

Kepler-56の自転異常を再現するために必要な

^{*11} 逆に言えば近接ガス惑星以外では惑星の潮汐トルクはほとんど無視してよい。

^{*12} Kepler-56の前駆体であるF型主系列星周囲にはこのような自転軸と軌道軸が揃っていない近接ガス惑星が一定の割合で存在する [13]。

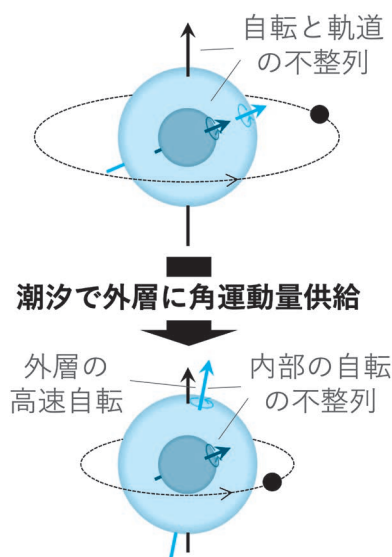


図6 潮汐による角運動量輸送でKepler-56の自転異常を作るシナリオ。簡単のため惑星は1つのみとした。コアと外層の共通自転軸と軌道がずれているという状態（上）から外層にのみ角運動量を渡せば外層が高速自転かつコアと外層の自転軸がずれているという状態（下）を再現できる。

角運動量（つまり Kepler-56 が典型的な赤色巨星に比べて過剰に持っている自転角運動量）は観測された自転周期と恒星進化計算で得られる慣性モーメントから $\sim 3 \times 10^{49}$ erg・s と推定できる。一方、Kepler-56b/c の潮汐によって恒星へ供給できる角運動量は潮汐トルクを時間積分として推定できる。これらと比較することでシナリオの是非を検討することができる。

供給可能な角運動量は潮汐トルクの効率を表す比例係数 Q'^{-1} に比例する。 Q'^{-1} の値は未知数だが典型的には $Q'^{-1} \sim 10^{-5} \sim 10^{-8}$ 程度と考えられている^{*13}。しかし、この値を用いると供給可能な角運動量は $\leq 1 \times 10^{47}$ erg・s 程度となり必要量に比べて大幅に小さい。Kepler-56b/c の潮汐で供給可能な角運動量は必要な角運動量に比べて無視できる程度しかない、ということになる。

不定性がある Q'^{-1} を大きくして解決すればよいのではないかと、思った方もいるかもしれない。確かに潮汐効率を極端に大きくすれば角運動量の問題は解決するが、タイムスケールという観点で問題が生じる。この場合、Kepler-56b/c は現在よりもはるかに外側、すなわち公転周期が数十日程度の軌道から現在の近接軌道まで引き込まれる必要がある。Kepler-56b/c は今後数百年程度で恒星へ落下してしまうことになり、かなりのファインチューニングが必要になる。さらに、同程度に強い潮汐が Kepler-56 以外の赤色巨星一般で働いているとすると、赤色巨星周囲の近接ガス惑星はほとんどが飲み込まれてしまう。どちらも観測事実とは適合しにくい。

この困難の本質は、赤色巨星である Kepler-56 の慣性モーメントが非常に大きいことにある。恒星は主系列段階を終えて膨張しているため、外層の自転を加速するには大きな角運動量が必要になる。現在の Kepler-56b/c の軌道角運動量だけでは、その過剰な自転角運動量を十分に賄うことができない。一方で、無理に Kepler-56b/c から必要な角運動量を取り出そうとすると、これらの惑星を現在よりもはるかに外側から急速に内側へ移動させる必要があり、その結果として極端に短い軌道減衰タイムスケールを要求してしまう。したがって、Kepler-56b/c の潮汐だけで Kepler-56 の自転異常を説明するシナリオは、角運動量収支と進化タイムスケールの両面から難しいと考えられる。

4.3 Kepler-56 の惑星飲み込み

前節の議論から Kepler-56b/c の潮汐だけで Kepler-56 の自転異常を説明するシナリオは難しいことがわかった。これは Kepler-56 の自転異常を説明するには、さらなる角運動量源が必要であることを意味する。つまり Kepler-56b/c の内側にかつて惑星がいて、その惑星は潮汐によって恒星

*13 この値は軌道減衰の観測的制限や潮汐の理論的制限によるものである。

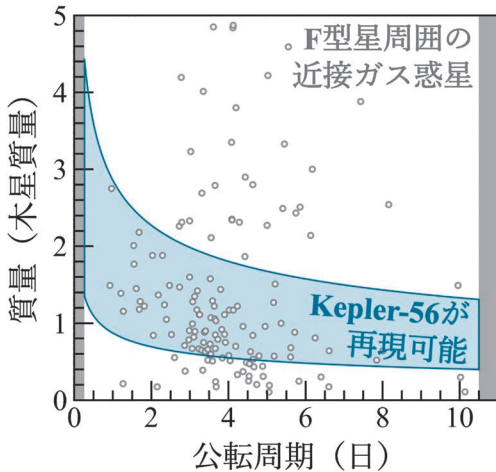


図7 Kepler-56の自転異常から示唆される飲み込まれた惑星の質量・公転周期（青色）。散布図はF型主系列星の周囲の近接ガス惑星の質量・公転周期を示しており、飲み込まれた惑星の範囲と矛盾しない。図はTokuno (2025) [14] の Fig. 6を再構成して作成した。

へ飲み込まれたとするシナリオである。

このシナリオのもとでは、先ほど推定した 3×10^{49} erg・s程度が供給できるという条件から飲み込まれた惑星に対する制限を与えることができる。実際に見積もってみると、飲み込まれた惑星は木星質量程度かつ数日程度の公転周期をもつ惑星、つまりホットジュピターであるという結果が得られた（図7）。実際にF型主系列星（過去のKepler-56の姿に相当）の周囲にはこのようなホットジュピターが普遍的にいること、この領域のホットジュピターは典型的な強さの潮汐トルクでも飲み込まれることが確かめられているなど、このホットジュピターの飲み込みは既存の観測や理論と今のところ大きく矛盾しないこともわかっている。

もしこの推察が正しいならば、Kepler-56は惑星飲み込みが恒星にどのような観測的痕跡を残すのかを考えるうえで、重要なベンチマークとなる。自転異常以外の惑星飲み込みの痕跡としては、恒星表面の化学組成異常がよく議論されてい

る。しかし、そのような痕跡が常に検出できるとは限らない。とくに赤色巨星では、深い表面对流層によって飲み込まれた物質が大きく希釈されるため、化学組成異常を捉えることは難しいと考えられている [15]。Kepler-56に明確な化学組成異常が見られないことは、この描像と整合的である。同時にこのことは、化学組成異常としては見えにくい惑星飲み込みの痕跡を、自転異常という別の観測量から探る重要性を示している。

5. 今後の展望

本稿では、赤色巨星Kepler-56の示す自転異常から、過去の惑星飲み込みが示唆されることを紹介した。しかし、まだ明らかにすべき点も多い。例えば、Kepler-56で示唆されている内部での自転軸不整列が本当に存在するのかについては、さらなる観測的検証が必要となる。また、惑星飲み込みがいつ、どの進化段階で起きたのかを明らかにするには、恒星進化・軌道進化を組み合わせたより詳細なモデリングが不可欠である。さらに、Kepler-56が特異な一例なのか、それとも同様の自転異常を持つ恒星がほかにも存在するのかを調べることも重要である。

いずれにしても、一連のKepler-56系に関する研究が、恒星の自転・潮汐・振動といった多岐にわたる分野に一石を投じたことは間違いない。これを出発点として、関連研究がさらに活発になることを期待したい。

謝 辞

本稿の内容は筆者の論文 [14] に基づいています。このような場で執筆する機会を与えてくださった天文月報編集委員の谷川衝氏にはこの場をお借りして深謝いたします。

本稿の図の作成には、NASAのKeplerミッションのデータ、およびESAのGaiaミッションのデータを使用しました。また、本稿の執筆は日本学術振興会の特別研究員研究奨励費（JP24KJ0605、

JP26KJ0211) の支援を受けています。

参考文献

[1] 河合優悟, 2026, 天文月報, 119, 264
[2] Godoy-Rivera, D., et al., 2025, A&A, 696, A243
[3] Huber, D., et al., 2013, Science, 342, 331
[4] Weiss, L. M., et al., 2024, ApJS, 270, 8
[5] Lillo-Box, J., et al., 2016, A&A, 589, A124
[6] Li, G., et al., 2014, ApJ, 794, 131
[7] 高田将郎, 2020a, 天文月報, 113, 61
[8] 高田将郎, 2020b, 天文月報, 113, 94
[9] Benomar, O., 関井 隆, 2020, 天文月報, 113, 73
[10] 八田良樹, 関井 隆, 2020, 天文月報, 113, 80
[11] Ong, J. M. J., 2025, ApJ, 980, 40
[12] Gough, D. O., & Kosovichev, A. G., 1993, ASP Conf. Ser., 40, 566
[13] Winn, J. N., et al., 2010, ApJ, 718, L145
[14] Tokuno, T., 2025, MNRAS, 544, 2835
[15] Behmard, A., et al., 2023, MNRAS, 521, 2969

History of the Kepler-56 System Inferred from Anomalous Rotation

Takato TOKUNO

Osaka University, Department of Earth and Space Science, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: Stellar rotation can be altered not only by stellar evolution itself, but also by interactions with surrounding companions. Therefore, anomalous rotation that cannot be easily explained by standard stellar evolution may provide a clue to the past orbital evolution of the system. In this article, we focus on the planet-hosting red giant Kepler-56, which has been suggested to exhibit an anomalous rotation structure, including a rapidly rotating envelope and an internal spin misalignment. By interpreting these anomalies as traces of past interactions with planets, we can constrain the orbital evolution of the Kepler-56 system that is no longer directly observable. We review the unusual rotation structure of Kepler-56 and discuss the “history of the Kepler-56 system” inferred from it.