

系外惑星「遠い世界の物語」その14 ～10年間にわたるWASP-33bの軌道歳差～

渡辺 紀治¹

(要旨) 高温星周辺のホットジュピターは、ホットジュピターの軌道進化の解明に適した天体である。軌道進化の手がかりとなる惑星軌道傾斜角は、トランジット分光観測からドップラー・トモグラフィー法で測定されているが、1回の観測では見かけの惑星軌道傾斜角しか測定できない。しかし、この惑星系特有の現象である軌道歳差を観測することで、真の惑星軌道傾斜角を算出することが可能となる。本稿では、高分散分光器HDS、HIDES、TS23によるトランジット分光観測と、MuSCATとMuSCAT2によるトランジット測光観測から得られた、高温星周辺のホットジュピターWASP-33bの約10年間にわたる軌道歳差の振る舞いと、算出した真の惑星軌道傾斜角について述べたいと思う。

1. はじめに

恒星に極めて近い場所で10日以内に公転1周する巨大ガス惑星(ホットジュピター)は、その場での形成ができないため、雪線より外側で形成された後に内側に移動する軌道進化モデルが提唱されてきた。主に、(1)原始惑星円盤との相互作用で主星方向に移動する理論[1]、(2)近くの惑星との重力散乱で楕円軌道になった後に円軌道化で主星に近づく理論[2]、(3)伴星との相互作用による古在機構で楕円軌道になった後に円軌道化で主星に近づく理論[3]がある。円盤相互作用のみで軌道進化した理論(1)では軌道が主星自転と揃い、他天体との相互作用の影響で軌道進化した理論(2)と(3)では主星自転に対して軌道が傾くようになる。よって、ホットジュピターにおいては、中心星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度(惑星軌道傾斜角)を測定することで、軌道進化を推測することができる。

しかしながら、太陽型星の場合、恒星内部の厚い対流層が潮汐散逸の影響を受け、主星自転軸と惑

星公転軸が再び揃ってしまう。そのため、揃った軌道である場合が大半である太陽型星周辺のホットジュピターにおいては、円盤との相互作用で軌道が揃っているのか、潮汐相互作用によって揃うのかを区別できず、軌道進化の判別が困難になる。一方、表面温度が7000Kよりも高い恒星(高温星)の場合、恒星内部に対流層がほぼなく、潮汐散逸をほとんど受けないため、惑星軌道傾斜角が軌道進化直後以来ほぼ変化しない[4]。よって、高温星周辺のホットジュピターは、その惑星の軌道進化の調査に適しているといえる。

高温星周辺のホットジュピターは、主にトランジット分光観測からドップラー・トモグラフィー法(DT法、図1参照)で惑星軌道傾斜角の測定が行われてきたが、1度の観測だけでは天球面上に投影された見かけの惑星軌道傾斜角しか測定できず、それで軌道進化が議論されてしまうという問題があった。しかし、高温星の高速自転によって自身が扁平するため、軌道が傾いていれば、惑星公転軸が主星自転軸を中心に歳差運動する現象である軌道歳差が起こる。これによる複数回の観測で見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーター(観測者から見た、ラン

1. 東京大学

n-watanabe@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

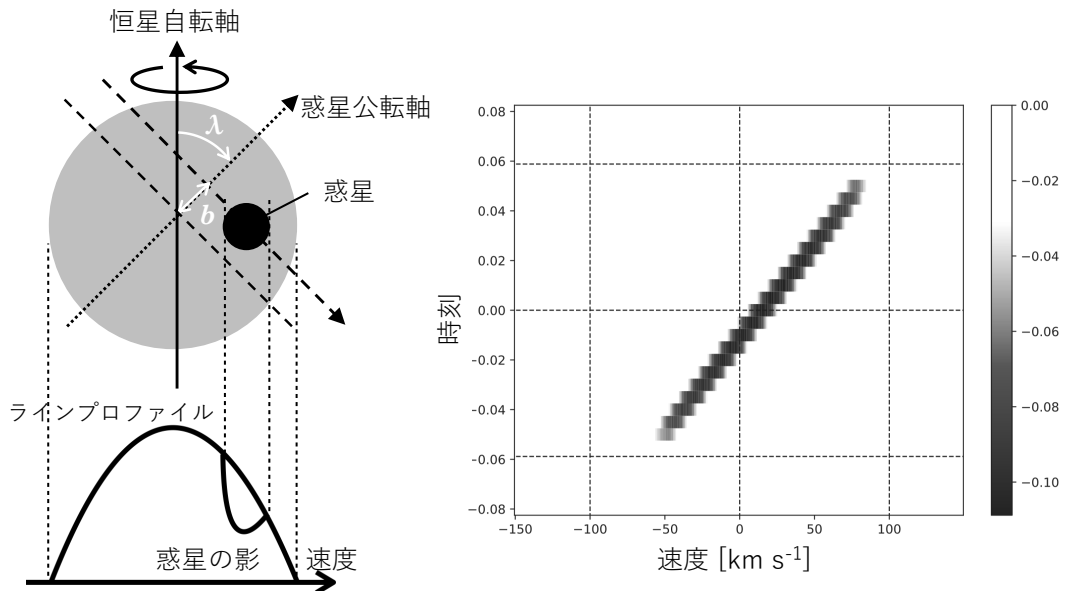


図1: ドップラー・トモグラフィ法の概要。

(左図)トランジットで惑星が恒星面の一部を隠すことで、主星のラインプロファイルに「惑星の影」と呼ばれる凹みが現れる。トランジット中の惑星の影の動きは、見かけの惑星軌道傾斜角(λ)とインパクトパラメーター(b)に依存する。

(右図)トランジット中とトランジット外のラインプロファイルを引くことで取り出した惑星の影をカラースケールにして、時系列に並べることで影の移動の様子を捉えることができる。横軸はラインプロファイル上での速度、縦軸はトランジット中心時刻を0として、公転周期で規格化した時刻を表す。両端の縦破線は見かけの主星自転速度を、横破線は下からトランジット開始・中心・終了時刻を示す。

ジット軌道から主星中心までの距離を主星半径で規格化したパラメーター)の時間変化から真の惑星軌道傾斜角を算出できる。よって、高温星周辺のホットジュピターにとって、軌道歳差観測は軌道進化をより正確に調査するための重要な手法となる。

A型星(表面温度7430K)周辺を1.2日周期で公転するホットジュピターWASP-33bは、複数回のDT法で軌道歳差が確認された唯一の惑星系である[5]。ただし先行研究[5]では、2つの観測点(2008年と2014年のデータ)でしか行われていなかったの、筆者らは2011年の観測点をDT法で追加して軌道歳差の検証を行なった。しかし、2014年以降の軌道歳差の振る舞いがどのようにになっているのか追観測・解析した研究が今までになかった。よって、筆者らはさらに2014年以降の観測点を増やし、WASP-33bの真の惑星軌道傾斜角を算出するためにトランジット観測を行なった。

2. 観測と解析

まず、WASP-33bの見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターを測定するために、高分分光器で捉えられた5つのトランジット分光データをDT法で解析した(図2)。そのうちの1つは、筆者が提案して2019年に取得した観測した岡山天体物理観測所188cm望遠鏡にあるHIDESのデータ、もう1つは、共同研究者である成田憲保氏が2011年に取得したHDS(すばる望遠鏡)のデータ(先行研究[6]で使用したデータ)、残りの3つは共同研究者Marshall C.Johnson氏が2008年、2014年と2016年に捉えたTS23(HJST)のデータである(これは先行研究[5]で使用されたデータも含む)。

また、トランジット測光観測でも、トランジット中の減光にライトカーブモデルをフィットすることでインパクトパラメーターを測ることができる。よって、筆

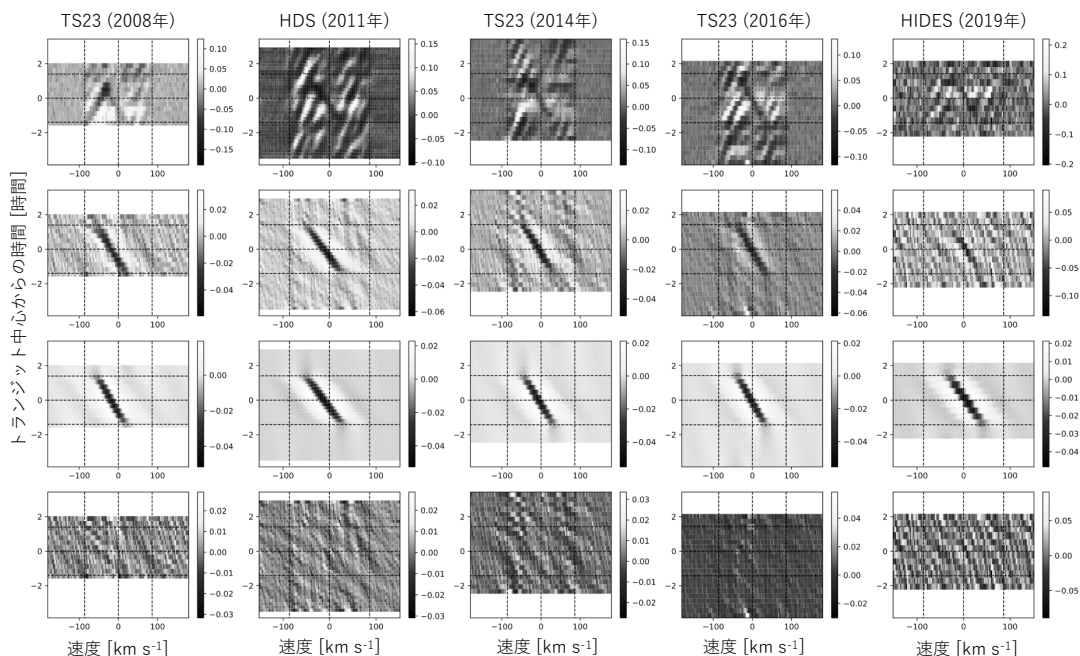


図2: WASP-33bのDT法解析.

(1段階目)トランジット内外の差をとったラインプロファイル差分の時系列. 主星表面に非動径方向の脈動が起こっているため[7], 惑星の影のみでなく, 主星脈動による(左下から右上に向かう縞模様部分)も現れる.

(2段階目)フーリエフィルタリング[5]と呼ばれる手法で惑星の影のみを取り出した.

(3段階目)惑星の影のモデル. このモデルにも, フーリエフィルタリングをかけている.

(4段階目)2段階目と3段階目の差分.

者の所属するMuSCATチームが管理している多色撮像カメラMuSCAT(岡山天体物理観測所188cm望遠鏡)とMuSCAT2(ティデ観測所152cm望遠鏡)を用いて, それぞれ2017年, 2018年にその観測を行った. そのデータに対して, ライトカーブモデルをフィッティングした解析結果を図3に載せる.

さらに, 軌道歳差によって公転軸が周回する角速度[7]を参考にして, 筆者らは見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターの時間変化モデルを作成した. このモデルを, 測定された各観測点の見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターの値に対してフィッティングを行った. これに伴い, 惑星軌道傾斜角を算出した.

3. 軌道歳差の振る舞い

軌道歳差モデルでフィッティングを行なった結果

を図4に示す. インパクトパラメーターの変化を見ると, モデルに沿って単調減少しており, 10年間という長い期間で軌道歳差が起こっていることを確認した. 一方, 見かけの惑星軌道傾斜角の変化については, モデルとは異なり, 単調変化をしないことが明らかになった. このようにモデルと合わない原因を探るため今後もトランジット分光観測を行っていく.

また, インパクトパラメーターの長期変化を図5に載せる. まず, WASP-33bの軌道歳差の周期が約785年であることを解明した. そのうち, 我々から見てトランジット軌道が恒星面上に存在する期間, つまり, トランジットが観測可能である時期が周期に対して約2割であり, 長い目で見ると, WASP-33bのトランジットが珍しい現象であることを解明した. 筆者らの解析結果では, およそ西暦2057年を過ぎると, 約353年間WASP-33bのトランジット観測ができなくなるという結果になった. しかしながら, いつトラ

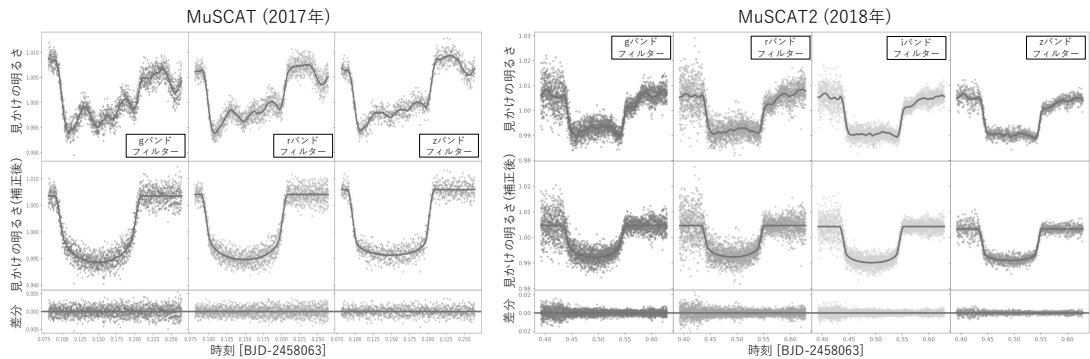


図3: 3色のフィルターで同時撮像可能なMuSCAT(左)と4色のフィルターで同時撮像可能なMuSCAT2(右)で捉えたWASP-33bのトランジットライトカーブ。フィッティングしたモデルを黒色実線で示している。

(1段目)観測されたトランジットライトカーブ。主星脈動による波状の変動も含んでいる。

(2段目)主星脈動の成分を除いたWASP-33bのライトカーブ。

(3段目)観測データとモデルの差分。

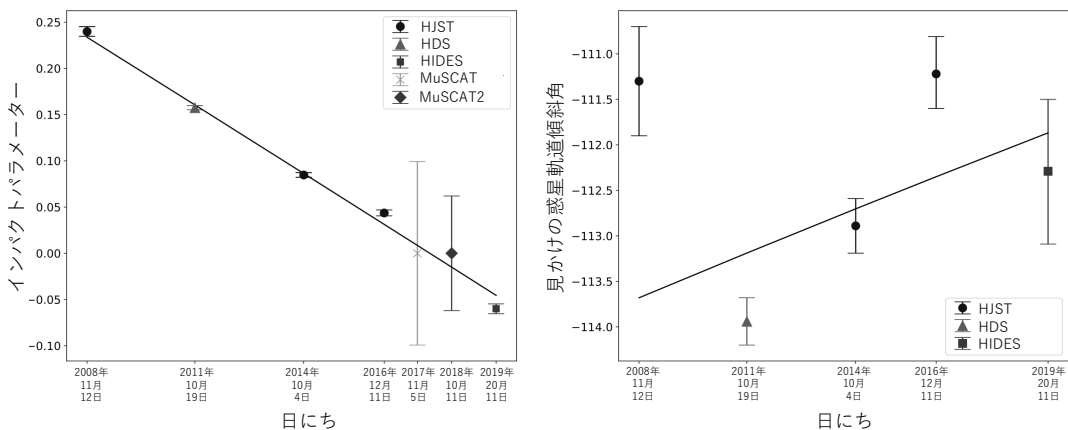


図4: 軌道歳差によるWASP-33bのインパクトパラメーター(左)と見かけの惑星軌道傾斜角(右)の時間変化。フィッティングした軌道歳差モデルを黒色実線で示している。

ンジット観測ができなくなるのかという予報をより正確に求めるために、今後も定期的なトランジット分光観測及び測光観測を行っていく。

4. 真の惑星軌道傾斜角

軌道歳差モデルのフィッティングを行ったことで、真の惑星軌道傾斜角を $110.2^{+1.3}_{-1.4}$ 度と算出した。見かけの惑星軌道傾斜角の絶対値よりもやや小さい値であったが、実際にはほぼ極軌道を描く惑星であるこ

とが確認できた。この角度から、他の惑星、または、伴星との重力相互作用によって軌道が傾いた可能性があることを示した。

軌道が傾いた原因を解明するために、惑星系WASP-33bに伴星が存在するかどうかを調査する必要がある。実際に、2200年の公転周期である伴星候補の存在が直接撮像で捉えられたと先行研究[8]で挙げられているが、実際に伴星であるかどうかを確認されていない。よって、実際に伴星かどうかを確かめるために、もう一度直接撮像を行って、主星と伴

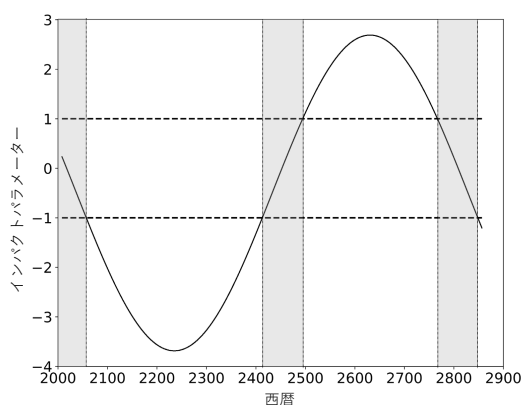


図5: 長期的に見たWASP-33bのインパクトパラメーターの時間変化。横破線は恒星面の端を示す。灰色領域はトランジット観測可能時期を、白色領域はトランジット観測ができない時期を表している。

星候補の固有運動が同じかどうかを測定する必要がある。

5. まとめ

本研究では、およそ10年間のトランジット分光観測とトランジット測光観測からWASP-33bの軌道歳差を調査し、その惑星の真の惑星軌道歳差を算出した。このように、2つの観測手法からの軌道歳差を調査したことは初めての試みである。

今まで高温星周辺のホットジュピターは15個程度発見されている。それら全てがDT法で見かけの惑星軌道傾斜角が測定されており、少数ではあるが、0度から180度にわたって分散している傾向にあることがわかっている。しかし、その内、真の惑星軌道傾斜角が測定された惑星はWASP-33bを含めて5つしかないため、今後、他の高温星周辺のホットジュピターに対して軌道歳差観測を行っていく。

また、高温星周辺のホットジュピターの軌道が、主星自転と揃う傾向にあるか、それとも傾く傾向にあるのかを調べるために、より多くのサンプルが必要となる。そこで、今も宇宙で測光観測を行っている宇宙望遠鏡TESSが発見した惑星候補から、筆頭者が先導して高温星周辺のホットジュピターを発見確認してゆく。

以上のようにして、真の惑星軌道傾斜角のサンプル数を増やし、ゆくゆくは観測からホットジュピター

の軌道進化を制約していきたい。本研究で行なった軌道歳差観測は、真の惑星軌道傾斜角の分布を作成するにあたって、新たな一歩を踏み出したと言える。

参考文献

- [1] Lin, D. N. C. et al., 1996, Nature 380, 606.
- [2] Chatterjee, S. et al., 2008, ApJ 686, 580.
- [3] Fabrycky, D. and Tremaine, S., 2007, ApJ 669, 1298F.
- [4] Albrecht, S. et al., 2012, ApJ 757, 18.
- [5] Johnson, M. C. et al., 2015, ApJ 799, 30.
- [6] Watanabe, N. et al., 2020, PASJ 72, 19.
- [7] Iorio, L., 2016, Ap&SS 331, 485.
- [8] Moya, A. et al., 2011, A&A 535, A110.