

太陽系外惑星を見つけたい！ 観測装置と統計数理を融合

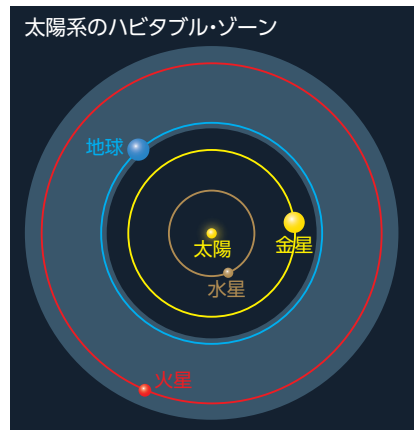
1995年に観測によって太陽以外の恒星にも惑星があることが確認されて以来、世界中で太陽系外の新たな惑星探しが盛んになされている。2018年に打ち上げられた系外惑星探索衛星「TESS」が発見した系外惑星候補を、地上から追加観測して本物の惑星かを見分ける研究をリードしているのは、東京大学先進科学研究機構の成田憲保教授だ。望遠鏡に取り付ける多色同時撮像装置「MuSCAT」シリーズの開発と、統計数理手法による高精度な解析を融合し、系外惑星探査の可能性をひらく。

なりた のりお
成田 憲保

東京大学大学院 総合文化研究科附属 先進科学研究機構 教授
2017年よりさきがけ研究者

常識をくつがえす「変な惑星」 新たな惑星形成理論の土台に

古代から人々は宇宙や星に興味を抱き、その謎に迫ろうと天体観測を行ってきた。望遠鏡が登場すると、遠く
の天体の微弱な光も捉えられるようになった。太陽以外の恒星にも惑星があることが観測によって初めて確かめられたのは、1995年のことだ。このような他の惑星系にある惑星を「太陽系外惑星」または「系外惑星」と呼ぶ。それまで太陽系のことしか知らなかった私たちに新たな世界観をもたらす発見をしたとして、最初の発見者たちに2019年にノーベル物理学賞が贈られている。



ハビタブル・ゾーン計算はKasting et al.(1993)に基づく
図1 ハビタブル・ゾーンは、恒星の周りで惑星表層に液体の水が存在し得る領域を指す。太陽系では地球もこのようにハビタブル・ゾーンの中に入っている。

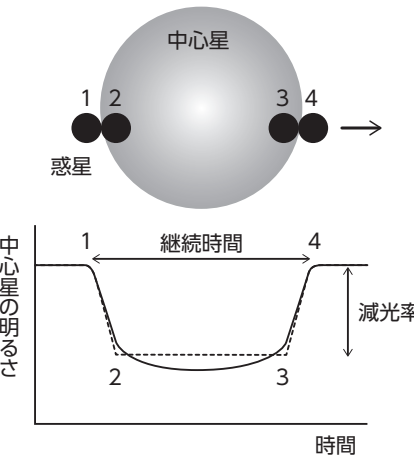


図2 太陽系でも太陽と地球の間を水星や金星が通り過ぎるように、太陽系外惑星でも主星の前を惑星が横切る現象をトランジットという。惑星が主星の前を通り過ぎる際に、惑星が主星の一部を隠すため、主星がわずかに減光して観測される。トランジット法では、この明るさの変化で、減光の深さからは主星と惑星の半径比、減光の継続時間からは惑星の軌道傾斜角と主星の密度などを求めることができる。

太陽系外の惑星が初めて発見されると、さらに新たな系外惑星を探す研究が世界中で盛んになった。系外惑星探査の最大の目的は、地球外生命の発見だ。そのために研究者たちは、地球のように生命を育めそうな惑星、つまり恒星から適度に離れていて、熱すぎず寒すぎないハビタブル・ゾーンにあり、液体の水が存在し得る環境の「ハビタブルな惑星」を探している(図1)。

しかし、系外惑星の面白さはそれだけではないと語るのは、日本の系外惑星探査研究をリードする東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構の成田憲保教授だ。「系外惑星には、太陽系の常識からは全くかけ離れた惑星もたくさん見つかっています。それらが従来の惑星形成理論を覆し、新たな理論の土台になっています。ですから、私はむしろ『変な惑星』に注目しています」と語る。

どんなタイプの惑星がどこにあるのかは、その惑星系の歴史をたどる手掛かりになる。太陽系は内側から、地球のように岩石でできた「岩石惑星」、木星のように水素やヘリウムのガスが集まった「巨大ガス惑星」、水やメタンなどが凍った「巨大氷惑星」の順に並び、どれもほぼ同じ面上で、真円に近い楕円軌道上を公転している。

しかし、他の惑星系では、恒星に近いところを公転する「ホットジュピター」と呼ばれる巨大ガス惑星があったり、惑

星が主星の赤道面から斜めに傾いた軌道や、長く引き伸ばされた楕円形の軌道で回っていたりする。こうした惑星は最初からそういう軌道だったのではなく、その惑星系の歴史上のどこかで軌道が大きく変わった可能性があるという。

系外惑星が発見されるまでは太陽系しか例がなかったので、太陽系は最初からこの形で、他の惑星系があるとしても太陽系と似たような形をしているだろうと考えられていた。しかし、最初に発見されたペガサス座51番星bが公転周期わずか4.2日のホットジュピターであったことは、研究者たちを仰天させた。

星のわずかな減光を観測 惑星と恒星の違いを見抜く

その後も、太陽系にはないタイプの惑星が多数発見されたことで、太陽系は宇宙の標準ではないことがわかってきた。太陽系以外の惑星系のことがわかるにつれて、太陽系の成り立ちについて、他の惑星系と比較した議論ができるようになった。系外惑星に着想を得て、太陽系でも惑星は内側・外側への移動を繰り返して今の位置に落ち着いたという説など、新しい太陽系形成理論も生まれている。

成田さんはさきがけ「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェ

ント計測・解析手法の開発と応用」領域の支援も得て、自ら開発した観測装置で系外惑星の観測を続けているが、太陽系の外に惑星を見つけることは簡単ではない。多くの場合、惑星は恒星に対してとても小さい。例えば、地球の直径は太陽の約100分の1、太陽系で一番大きな木星でも約10分の1だ。また、恒星は自ら光っているが、惑星は自ら光っていない。しかも太陽系から一番近い恒星でも、約4.3光年(約41兆キロメートル)も離れている。

そのため系外惑星の観測では、惑星そのものを直接観測するのは難しい。そこで間接的に系外惑星を発見する方法として、望遠鏡で恒星の明るさを観測し、恒星の前を惑星が横切る「トランジット」と呼ばれる現象を観測する「トランジット法」が、現在系外惑星探査の主流となっている。トランジットすると、惑星に光が遮られる分、恒星から届く光は一時的にわずかに暗くなる。トランジット法ではこの周期的な減光を捉えて、惑星候補を発見する(図2)。惑星の重力で主星がわずかに揺れ動くために起こる光のドップラー偏移を観測する「ドップラー法」に比べ、たくさんの恒星を同時に観測して系外惑星を探せるという利点がある。この方法の特徴として、主星に対して大きな惑星ほど減光が大きく発見しやすい。また、公転周期が短い、つまり主星に近い惑星ほどトランジットが頻繁に起こるので見つけやすい。

しかし、2つの恒星が互いに公転している連星のうち、一方がもう一方の前を横切る「食連星」でも周期的な減光が起こる(図3)。つまり時間をかけて観測、解析して惑星候補を発見しても、その中には「偽物の惑星」がかなりの割合で含まれている。これがトランジット法での系外惑星探しの困難な点である。

18年にアメリカ航空宇宙局(NASA)のエクスポローラー計画でトランジット系外惑星探索衛星「TESS」が打ち上げられた(図4)。TESSは09年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡の20倍の広視野を持ち、トランジット法で地球から全方向を網羅的に探査してい

る。成田さんはTESSで見つかった惑星候補が本当に惑星であるかを確かめる追加観測を担っている。

小口径望遠鏡を活用 スペイン、ハワイにも設置

成田さんはトランジットが本物の惑星によるものかを判別するのに、光の波長ごとの減光の深さの違いが手がかりになると考えた。つまり光を発しない惑星が恒星の光を遮った場合には、どの波長の光も同じように減光するため、減光の深さに波長依存性がない。一方、恒星が恒星をトランジットする食連星の場合、後ろの恒星は前の恒星に

隠された分の減光が起こると同時に、前を通った恒星の光が足されるため、減光の深さに波長依存性が生じると考えたのだ。そこで、トランジット法で発見された惑星候補が本物の惑星かどうかを判別するための観測装置開発に取り組んだ。

成田さんはこれまでの惑星大気観測の知見を元に、天体からの光を赤・青・近赤外の3色に分けて、3つのカメラで同時に撮影することを考えた。こうして成田さんは天体望遠鏡に取り付けられる多色同時撮像カメラ「MuSCAT^{マスカット}」を開発した(次ページ図5)。

世界では莫大な研究費を投じ、主鏡の直径が8～10メートル級の大型望

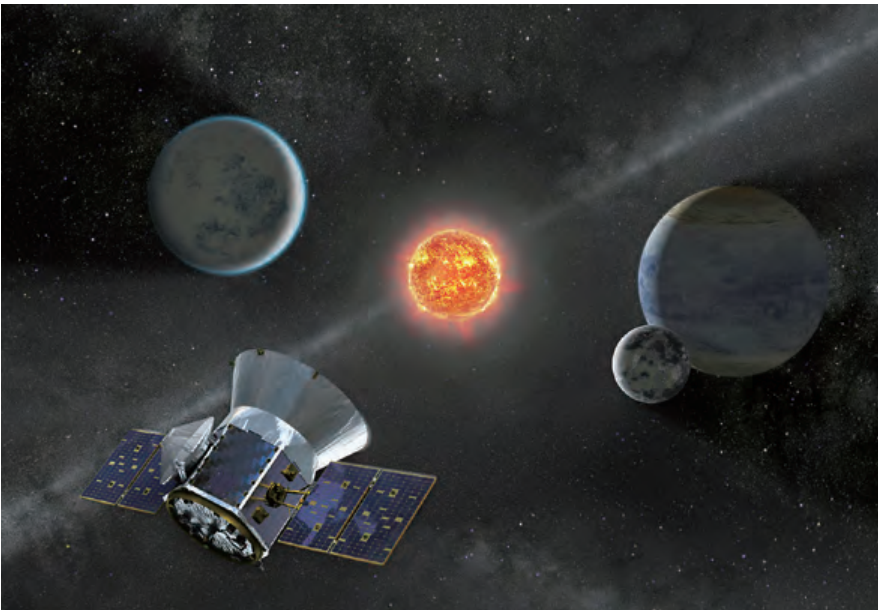
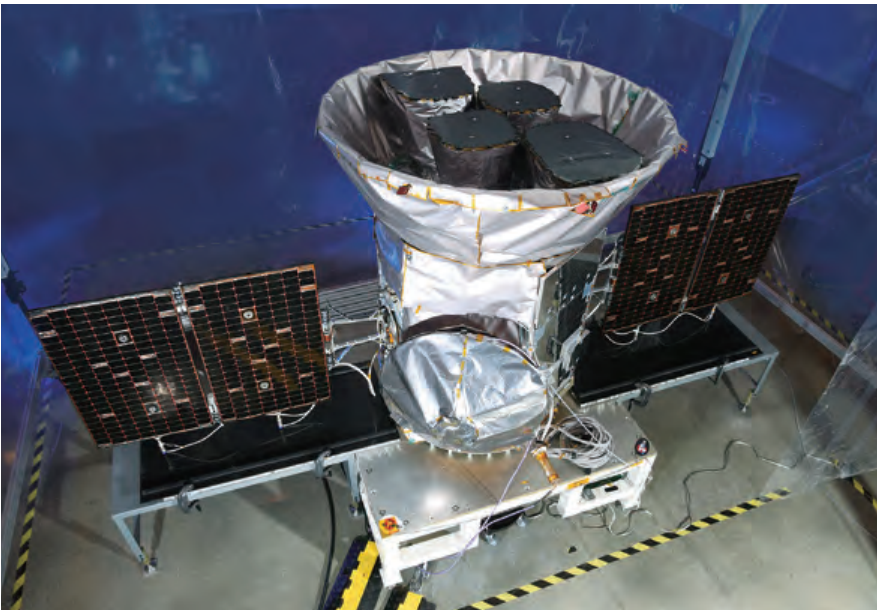


図4 系外惑星探査衛星「TESS」の外観(上、©Orbital ATK)と観測イメージ(下、©NASA)

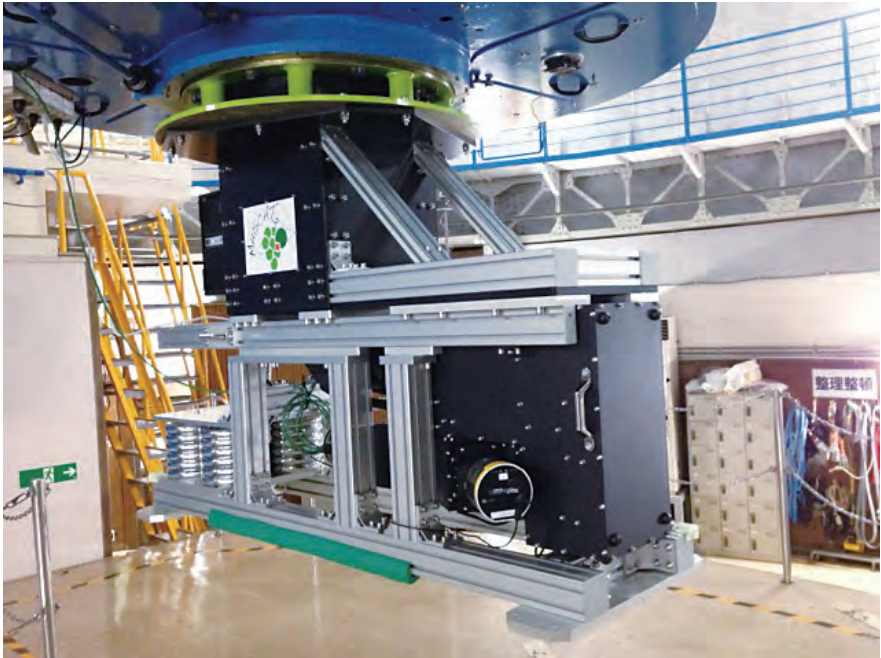


図5 成田さんの研究チームが開発した多色同時撮像カメラ「MuSCAT」

遠鏡とその観測装置を開発して観測を行うのが主流になりつつある。そんな中で、小口径の望遠鏡に取り付けられるMuSCATは、最先端の観測装置の中では異色の存在にも見える。「欧米に比べれば、日本の研究費がかなり少ないのは確かです。しかしこの限られた研究費の中で、私たちにしかできないことをやり、世界をリードしたいと常に考えていました。そこでMuSCATは、多くの観測時間を占有できる1～2メートル級の小口径望遠鏡を利用することにしました」と成田さんは戦略を語る。

成田さんはMuSCATの1号機を岡山県の旧岡山天体物理観測所にある188センチメートル望遠鏡に設置し、14年から観測を開始した。その観測結果に興味をもったヨーロッパの研究チームから「スペインにほとんど使っていない望遠鏡があるから、そこにも設置してみないか」と声がかかった。1号機で用いたのとは異なる波長の近赤外光を加え、4色での撮影が可能になったMuSCAT2を、17年にカナリア諸島テネリフェ島のティデ観測所に設置した(図6)。

トランジットの観測では、昼間の観測できない時間に惑星のトランジットが起こり、貴重な観測チャンスを逃す可

能性もある。スペインでの成果も認められた成田さんは、次にMuSCATシリーズを地球上に点在させ、観測地をリレーすることで、24時間同じ恒星を観測できる体制づくりに乗り出した。「20年にハワイ州マウイ島のハレアカラ観測所に3機目を設置しました(図7)。これで北半球では24時間観測ができるようになりました」と胸を張る。さらに南半球にもMuSCATシリーズを設置したいと考えている。

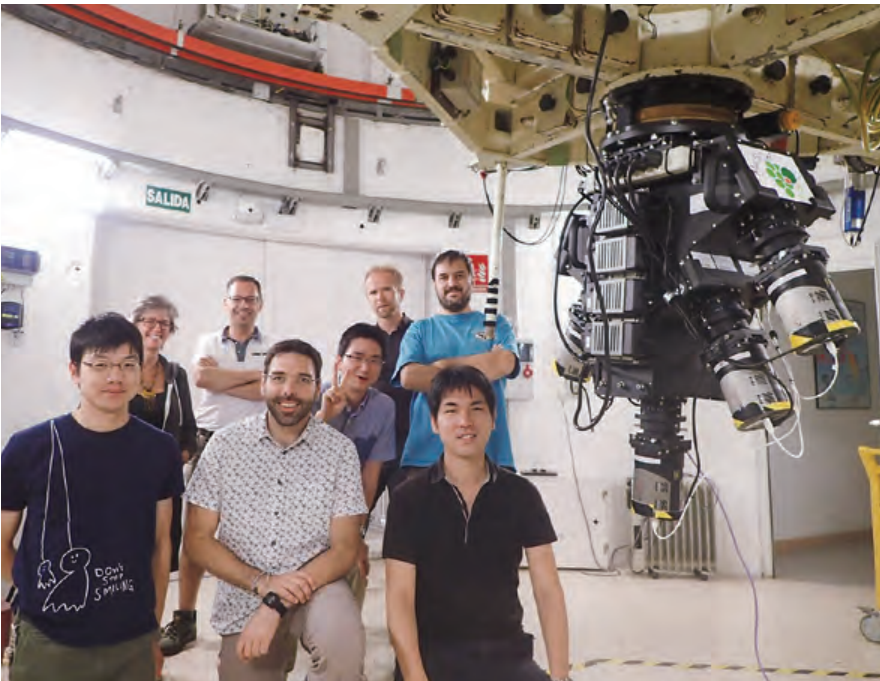


図6 「MuSCAT2」のファーストライト(初めて観測装置に天体の光を通すこと)の記念写真

ノイズを含む観測データ「ガウス過程」でモデリング

もちろん装置を設置して終わりではない。観測データが得られたら、それを解析する必要がある。トランジットは惑星の周回運動によるため、周期的に起こり、原理上はきれいに主星の明るさに減光が現れるはずだ。しかし、観測で得られた生の時系列データには、主星自身の変光や、地球の大気の影響、感度が一律でない検出器上で星が動くことによる見かけ上の明るさの変化などの系統的な変動が、ノイズとして含まれる。そのため、きれいな減光が観測できることはあまり多くないという。

そこで統計的な手法を用いて生の時系列データからノイズを取り除く必要がある。例えば、太陽系の近くに数多く存在する「赤色矮星」を公転する地球サイズの惑星の場合、トランジットを確認するには0.1パーセント程度の減光をきちんと判別できる精度が必要になる。そのためには、観測装置の性能の向上と同時に、データ解析における統計手法の工夫が必要になる。「そこで、私たちはガウス過程と呼ばれる統計手法でノイズとなる系統的な明るさの変動をモデリングして取り除き、わずかな減光も判別できるようにしました」と成田さんは語る。

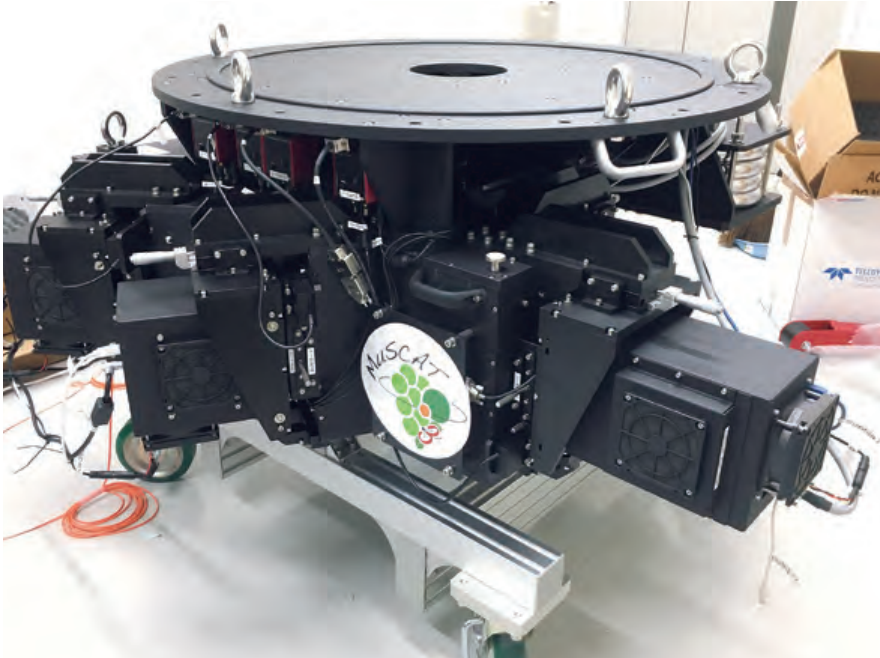


図7 東京大学の研究室で完成した「MuSCAT3」

ガウス過程では、カーネル関数と呼ばれる関数を用いて、時系列データに現れる複雑な系統的変動をモデリングしている。実際この手法を用いると、既知のトランジット惑星・WASP-12bのトランジット観測データをよくモデリングすることができた(図8)。

成田さんは世界の3台の望遠鏡に搭載したMuSCATシリーズによる高精度な計測と、ガウス過程などの統計手法を取り入れた高精度な解析の融合で、地上最高レベルの観測精度を達成し、さきがけ研究期間中にTESSで発見された200個を超える惑星候補の追加観測を遂行した。その結果、地球とほぼ同じ密度を持つ地球型の岩石惑星Gliese486bをはじめ、多数の惑星の発見を成し遂げた。

天文学でもデータの統計的な解析法が重要な研究分野の1つと捉えられるようになる中、さきがけで計測技術と高度情報処理を融合した領域に採択されたのは幸いだったと口にする。「私がやろうとしていた観測装置の開発とデータの解析の両方に取り組むことができました。また研究機関を移った時には、研究室立ち上げの支援をいただきましたし、海外研究者との連携にかかる費用なども支援いただきました」と笑顔を見せる。

新しい発見が相次ぐ分野 次世代の参入にも期待

今でこそ日本でも系外惑星研究は盛んに行われているが、成田さんがこの分野に入った頃は、初めて系外惑星が発見されてから7年しか経っておらず、系外惑星を本格的に研究していた研究室も日本にはまだ少なかった。成田さんは大学生から系外惑星の研究

を始めた最初の世代で、おのずと外国との共同研究が多くなった。学生時代のプリンストン大学やマサチューセッツ工科大学と行っていた共同研究の縁が、今のTESSなどの大型国際プロジェクトへの参加につながっている。

その後も、09年にHAT-P-7bという惑星が恒星の自転の向きと逆向きに公転していることを世界で初めて発見した他、20年には「白色矮星」の周りを公転する巨大惑星を初めて発見するなど、成田さんの研究で明らかになってきたことは多い。今後も今まで考えられていなかった惑星を数多く発見して、それらがどんな様子か、どうやってできたのかを詳しく知りたいと、さらなる謎の解明に意欲を見せる。

「高校生、大学生の皆さんが活躍する10年後、20年度には、系外の生命居住可能惑星に生命の兆候も探せるようになって、ますます面白い研究ができるようになってい我想います。ぜひ一緒に研究しましょう」と次の世代に向けてメッセージを送る。系外惑星を知ることは、太陽系を知ることもある。宇宙の謎に迫る発見やこれまでの固定観念を打ち砕く新しい概念の確立に向け、成田さんの研究はこれからも続く。

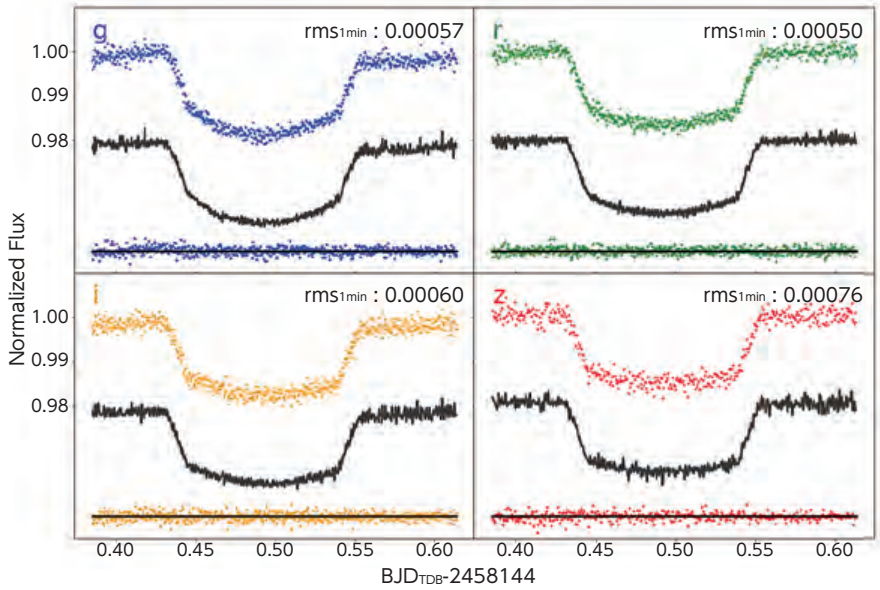


図8 既知のトランジット惑星であるWASP-12bのトランジットを「MuSCAT2」で観測したデータ。各パネルは左上(青)、右上(緑)、左下(橙)、右下(赤)の順に400～550ナノメートル(天文学の呼び方でgバンド)、550～700ナノメートル(iバンド)、700～820ナノメートル(jバンド)、820～920ナノメートル(zバンド)で観測した主星WASP-12の明るさの変化を表している。横軸は天文学で使われるユリウス日での時刻。ガウス過程を用いて観測されたデータをモデリングしたのが黒い実線。トランジットによる減光に加えて、系統的な変動もモデリングされていることがわかる。その下にあるのが観測データとガウス過程によるモデルの残差だ。各パネルの右上にある数字は1分あたりの残差の二乗平均平方根で、全ての波長で0.1パーセントを切る観測精度が達成されていることがわかる。