

多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズ 10年の歩み

成 田 憲 保^{1,2}

〈¹ 東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

〈² アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹narita@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



MuSCATシリーズは、世界各地の4台の1.5-2 m望遠鏡に搭載された、3色ないし4色の同時撮像装置である。MuSCATシリーズは、主に系外惑星のトランジットを多色で同時にかつ高精度に観測することを目的として開発された。本稿ではMuSCATシリーズの開発の歴史と仕様、主なサイエンスと観測成果について、この10年の歩みとこれからの展望を紹介する。

1. はじめに

太陽以外の恒星を公転する太陽系外惑星（以下、系外惑星）のうち、惑星の軌道が主星の前面を通過する現象をトランジットと呼び、トランジットを起こす惑星をトランジット惑星と呼ぶ^{*1}。

2009年のNASAのケプラー望遠鏡の打ち上げ以降、トランジットによって新しい系外惑星を探索するトランジットサーベイが系外惑星発見の主流の方法となり、2025年現在までに発見された6,000個近くの系外惑星のうち、4分の3程度がトランジット惑星となっている。トランジット惑星の最大の特長は、半径・質量・密度・大気・軌道などの惑星のさまざまな性質を調べる、いわゆる「特徴付け」が詳しくできることである。

我々は多色で同時に高精度なトランジット観測

を行うことを目的として、これまでに世界各地の4台の1.5-2 m望遠鏡用に多色同時撮像カメラMuSCATシリーズを開発し、新たなトランジット惑星の発見と特徴付けに取り組んでいる。本稿では、これまでのMuSCATシリーズの大まかな開発の歴史について前半で紹介し、後半ではMuSCATシリーズの主なサイエンスと観測成果、そしてこれからの展望について紹介したい。

2. MuSCATシリーズの開発

2.1 MuSCATができるまで

MuSCATのような多色同時撮像カメラが欲しいと考える最初のきっかけとなったのは、2009年に赤色矮星周りのサブネプチューン^{*2}GJ 1214 b[3]が発見されたことだった。この惑星の大きさはおよそ2.7地球半径で、主星が太陽系から約13パーセクとかなり近傍にあるため、トランジット観測

^{*1} トランジット惑星についての基本的な解説は、2012年1月の筆者の天文月報記事をご参照いただきたい[1]。

^{*2} 発見論文のタイトルを含めて当時は「スーパーアース」と呼ばれていたが、2017年にFultonらによって惑星の半径ギャップ [2]（系外惑星の半径のヒストグラムで1.5-2地球半径のところに存在頻度の谷間があり、水素大気を失った惑星と保持している惑星の境界と認識されている）が発見されて以降、2-4地球半径の惑星はスーパーアースではなくサブネプチューンと呼ぶのが定着している。

によって小型系外惑星（以下、小型惑星）の大気の特徴付けができる最初のターゲットとして注目されていた。特に、広がった水素大気によるレイリー散乱の兆候（波長が $1\mu\text{m}$ 以下の領域で、短波長側に行くほどトランジットが深くなる）が観測されるかどうかというのが世界的に注目を集める観測テーマとなり、筆者らもすばる望遠鏡のSuprime-CamやFOCAS、南アフリカのIRSF1.4 m望遠鏡を用いてGJ 1214 bのトランジット観測に取り組んでいた [4, 5]。

そして、2012年9月25日に当時岡山天体物理観測所の近くにあった遙照山ホテルで開催された研究会でGJ 1214 bの観測結果を発表し、今後も小型惑星の発見が増えると期待されることを考えると、可視から近赤外にかけて多色で同時にトランジットを観測できるような観測装置が欲しいという提案を行った。その後の議論を経て、岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡用に新しい観測装置を開発するため、科研費を提案することとなった。

その結果、2013年度に科研費・基盤研究（A）と、追加で井上リサーチアワードの研究費を獲得することができ、3色同時撮像カメラの開発予算を確保することができた。この観測装置は、岡山県の名産と元々の開発目的にちなんでMuSCAT（Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets）と名付けられた。MuSCATは2014年12月24日にファーストライトを迎え、2015年から岡山天体物理観測所の共同利用観測に供されることとなった。

2.2 MuSCATからMuSCAT2へ

MuSCATが完成してから我々がまず取り組んだのは、MuSCATの性能と有用性の実証である。

まず既知のトランジット惑星であるHAT-P-14 bのトランジットを観測し、 $V=10$ 等の天体に対して5分ごとにビニングしたデータで、残差の二乗平均平方根（rms）が0.03%を切るレベルの高精度測光が、3色同時に達成できることを実証した [6]。また、2014年からケプラー望遠鏡の第2

期のトランジットサーベイ計画であるK2が行われ、新しいトランジット惑星の候補が報告されていたため、そうした候補の追観測（3.1節で紹介する発見確認観測）にも取り組んだ。すると、トランジット惑星候補の減光をMuSCATで1回観測するだけで、本物のトランジット惑星と食連星由来の偽検出とを効率的に判別できることを確認できた。そして、2015年11月にアメリカ・サンタバーバラで開催された国際会議K2SciConでこうしたMuSCATの初期成果のポスター発表を行った。

そこでMuSCATに強く興味を持ってくれたのが当時カナリア天体物理研究所（IAC）の研究部長をしていたEnric Pallé氏であった。IACがテネリフェ島のティデ観測所で運用しているあまり使われていない1.52 m望遠鏡があり、そこにMuSCATのような装置が欲しいと言うのである。

筆者とPallé氏は共に2013年に採択されたNASAのTransiting Exoplanet Survey Satellite（TESS）の海外共同研究者として計画に参加していたため、TESSの時代にMuSCATのような装置があれば新しいトランジット惑星の発見確認で世界をリードすることができるということで考えが一致した。

このことをアストロバイオロジーセンターの田村元秀センター長と相談したところ、ありがたいことに4色同時撮像カメラに必要な開発予算をアストロバイオロジーセンターから出していただくこととなった。その後ティデ観測所の現地調査と観測時間配分などの諸条件の交渉をIACと行なった上で、2016年12月にアストロバイオロジーセンターとIACの間でMuSCAT2に関する国際共同研究の覚書が締結された。その後MuSCAT2の開発は順調に進み、2017年8月24日にティデ観測所でファーストライトを迎えることができた。

2.3 MuSCAT2からMuSCAT3へ

時差の離れた日本とスペインの望遠鏡にMuSCATシリーズを搭載することができたおかげで、

げで、北半球で観測可能なトランジットが大きく増えた。こうなると、後はアメリカのどこかの望遠鏡に3台目を搭載できれば北半球に MuSCAT シリーズのネットワークができるのに、と思わざるを得ない。

そしてそれが実現できるチャンスは意外と早く訪れた。2018年6月に MuSCAT3 の開発計画を含んだ新学術領域研究の計画研究（研究代表者：生駒大洋氏）が採択されたのである。計画研究の予算に加えてアストロバイオロジーセンターからの装置開発予算と筆者が獲得していた JST さきがけの予算を加えることで4色同時撮像カメラの開発の目処が立ち、アメリカの複数の研究機関の研究者らと望遠鏡への装置搭載の交渉を行うこととなった。

その中で、当初最も有力な候補だったのはハーバード大学がアリゾナ州・ホプキンス山で運用している Fred Lawrence Whipple Observatory (FLWO) の 1.2 m 望遠鏡である。この望遠鏡については、現地調査や装置設計の段階まで進んだものの、先方の事情により新装置の受入対応が困難になったとのことで、2019年5月4日にハーバード大学から受け入れできないという返事が届き、残念ながら振り出しに戻ってしまった。

そんな時、まさに渡りに船という出来事が起きた。ハーバード大学に装置受け入れを断られてから6日後の2019年5月10日に IAC の Enric Palle 氏からメールが届いた。曰く、Las Cumbres Observatory (LCO) の創設者である Wayne Rosing 氏がテイデ観測所に 1 m 望遠鏡を設置するため現地視察に来ていて、案内したついでに MuSCAT2 を見せたところ、LCO がマウイ島ハレアカラ観測所で運用している 2 m 望遠鏡に MuSCAT3 を搭載することに興味を持ってくれたというのである。

そこからは急ピッチで LCO との交渉が進んだ。幸いだったのは、FLWO の 1.2 m 望遠鏡用に準備していた光学設計がある程度 LCO の 2 m 望遠鏡に流用できることがわかり、装置の設計と仕様を

早い段階で見通せたことである。2019年7月中旬には LCO 本部を訪問して2日間にわたって LCO の執行部に装置の説明を行い、8月上旬にはハレアカラ観測所の現地調査を行い、LCO 側との調整を行いながら8月下旬までに装置の設計と仕様をほぼ固めることができた。

そして、9月7日には LCO の Lisa Storrie-Lombardi 所長から MuSCAT3 を受け入れるという連絡をいただいた。その後は観測時間配分などの諸条件の交渉を LCO 側と行い、2019年12月にはアストロバイオロジーセンターと LCO の間で MuSCAT3 に関する国際共同研究の覚書が締結された。

2020年に入るとコロナ禍が始まり、開発には大きな遅れは出なかったものの、ファーストライトのために現地に渡航できないという事態が起こってしまった。しかし、入念にファーストライトマニュアルを作成し、LCO の現地スタッフとハワイ大学の研究者の協力を得ることができたため、MuSCAT3 は2020年9月28日にファーストライトを迎えることができた。

2.4 MuSCAT3 から MuSCAT4 へ

MuSCAT3 の完成によって、北半球の時差の離れた3台の望遠鏡に MuSCAT シリーズを搭載することができ、北天のターゲットは MuSCAT シリーズで効率的に観測できるようになった。しかし、南天のターゲットへのアクセスはまだ限られていて、南半球の望遠鏡にも MuSCAT シリーズを開発したいと考えていた。

一方、LCO はハレアカラ観測所で運用しているものと同じ型の 2 m 望遠鏡をオーストラリアのサイディングスプリング観測所でも運用していて、LCO 側もその 2 m 望遠鏡用に MuSCAT4 を開発することに意欲を持っていた。

MuSCAT4 の開発が本格的に動き出したのは、2022年に入ってからである。2022年3月12日に LCO の Lisa Storrie-Lombardi 所長から連絡があり、アメリカの Heising-Simons 財団から MuSCAT4 の

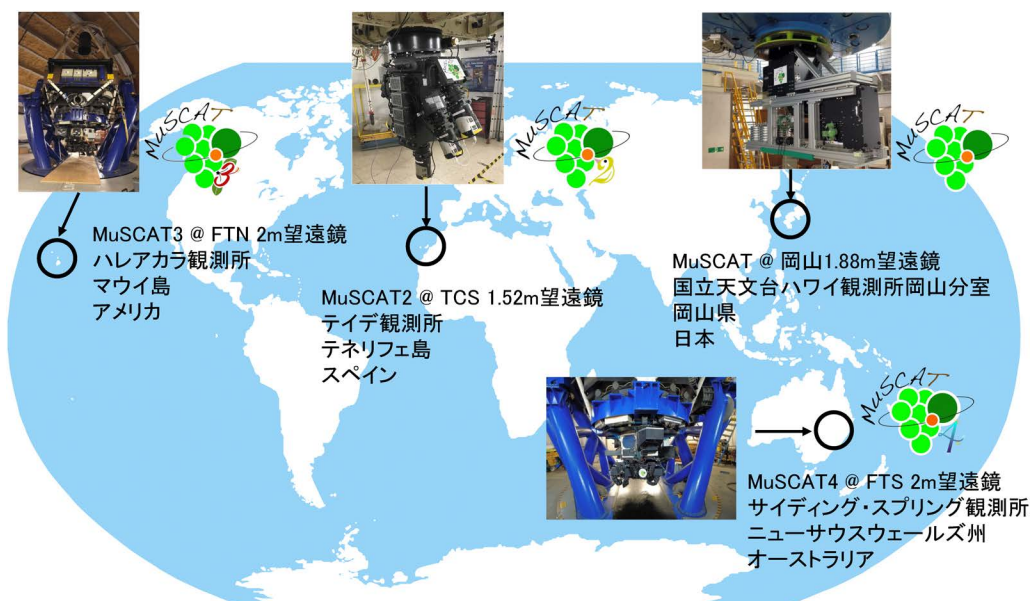


図1 MuSCATシリーズの写真と世界の中での配置.

開発予算の助成提案を出すよう招待を受けたという知らせをいただいた。それからLCOと集中的にやり取りをして、3月末までに開発に必要なコストと開発スケジュールなどの提案内容を準備し、LCOは4月1日に助成提案を提出した。そして5月10日には、Lisa Storrie-Lombardi 所長から助成が認められたという連絡をいただいた^{*3}。

基本的にMuSCAT4はMuSCAT3のコピーであるため、光学設計には特に変更すべきところがないものの、夏の気温は特に高温になることと、常にダストが多いオーストラリアの環境を考慮し、CCDカメラは空冷式ではなく水冷式を採用することとなった。このため、これまで経験がなかった水冷CCDカメラで4台同時の動作試験を行うなど試験項目は増えたものの、開発自体はほぼスケジュール通りに順調に進み、MuSCAT4は2023年10月6日にファーストライトを迎えた^{*4}。

以上のようにして、約10年をかけて4台のMuSCATシリーズが完成し、日々これらを用いた観測を継続している。図1は4台のMuSCATシリーズの写真と所在地を示している。図2はMuSCATシリーズで観測されたトランジットライトカーブの例を示している。

2.5 MuSCATシリーズの仕様

表1はMuSCATシリーズの基本的仕様をまとめたものである。MuSCATシリーズの共通した装置設計思想は以下のようなものである。

- ・なるべく広視野であることが望ましい。
- ・なるべく多くの波長帯で同時に観測したい。
- ・各波長帯はなるべく高い効率で観測したい。

これらの希望を満たすため、まずなるべく広視野となるようF変換を施し、光路上にダイクロイックミラーを置くことで、概ねSDSSシステムの g, r, i, z_s バンドに相当する400–550 nm, 550–

^{*3} 日本の競争的資金では経験したことがない予算獲得のスピード感到に驚いた。

^{*4} 余談だが、ファーストライト観測で訪れたサイディングスプリング観測所では、初めて見た南半球の夜空に驚嘆するとともに、観測所内を普通にカンガルーが跳ね回っている光景にカルチャーショックを受けた。

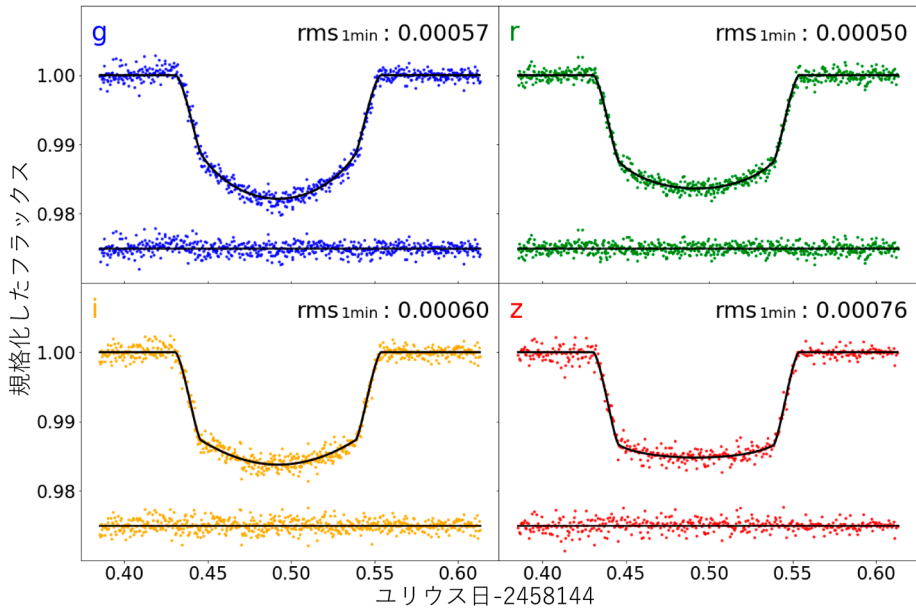


図2 MuSCAT2で観測した既知のトランジット惑星WASP-12 bのライトカーブ. MuSCAT2の装置論文 [8] の図13を改変. 左上, 右上, 左下, 右下のパネルがそれぞれ g, r, i, z バンドに対応している. 各パネルの右上には1分ごとにビンニングした残差の二乗平均平方根 (rms) の値を示している.

表1 MuSCATシリーズの基本的仕様

装置名	MuSCAT [7]	MuSCAT2 [8]	MuSCAT3 [9]	MuSCAT4 [9]
設置場所	国立天文台 ハワイ観測所岡山分室	IAC ティデ観測所	LCO ハレアカラ観測所	LCO サイディング スプリング観測所
望遠鏡口径 (m)	1.88	1.52	2.0	2.0
座標	北緯34度34分37秒 東経133度35分38秒	北緯28度18分2秒 西経16度30分39秒	北緯20度42分27秒 西経156度15分22秒	南緯31度16分24秒 東経149度4分16秒
標高 (m)	372	2387	3055	1116
観測波長帯 (バンド)	g, r, z_s	g, r, i, z_s	g, r, i, z_s	g, r, i, z_s
観測視野 (分角)	6.1	7.4	9.1	9.1
ピクセルスケール (秒角)	0.36	0.44	0.27	0.27
ファーストライト日	2014年12月24日	2017年8月24日	2020年9月28日	2023年10月6日

700 nm, 700–820 nm, 820–920 nm の4つの波長帯 (MuSCATの場合は400–550 nm, 550–700 nm, 700–920 nmの3つの波長帯) に光を分け, 高いスループットを持つ各バンドの天文観測用フィルターを特注し, 各バンドで最も量子効率の高いCCDカメラを採用した. なお, トランジット観

測では測光精度を高めるためにわざとデフォーカス (ピンボケ) して観測することが多いため, 結像性能については観測地のシーイングに収まる程度に緩めになっている. また, 望遠鏡の焦点前にダイクロイックミラーを配置するスペースがない場合には, オフナーリレー光学系を追加して光路

長を延ばしている。このように望遠鏡ごとに装置を最適化した設計となっているため、MuSCAT3/4は同一の光学設計だが、MuSCAT・MuSCAT2・MuSCAT3/4は全く異なったものとなっている。

なお、フィルターについては、MuSCATとMuSCAT2は手動、MuSCAT3/4は電動・遠隔で別のフィルターとの交換が可能となっている。MuSCATの z_s バンドフィルターは i バンドフィルターに変更が可能な他、MuSCAT2/3/4では各バンドでナローバンドフィルター [10, 11] (g, i, z_s バンドでは地球大気吸収線を避けて波長帯を絞ったもの、 r バンドではナトリウムD線に特化したもの)との交換が可能となっている。

3. MuSCATシリーズのサイエンス

3.1 新たなトランジット惑星の発見確認

ここからは、MuSCATシリーズの主なサイエンスを得られた観測成果と共に紹介していきたい。

MuSCATの開発を科研費に提案した際の当初の研究目的は、MuSCATという名前の中にAtmospheresのAが入っているように、トランジット惑星の大気の特徴付けが考えられていた。一方、IACのEnric Pallé氏らとMuSCAT2の開発をすることとなり、アストロバイオロジーセンターからMuSCAT2の開発予算を出していただくこととなってからは、来るTESSの時代を見据えて(ハビタブルゾーンにある地球型惑星のような)トランジット惑星をいち早く発見するという新たなトランジット惑星の発見確認も主要な研究目的の一つとなった。

では発見確認とは何かというと、トランジットサーベイで発見されたトランジット惑星候補が本物のトランジット惑星であることを確認する(惑星以外の可能性を排除する)プロセスのことであ

る。なぜこのような確認プロセスが必要になるのかというと、トランジットサーベイで発見されたトランジット惑星候補の中にはかなりの割合で惑星ではないものが混入していて、すべてが本物のトランジット惑星であるとは限らないためである。

トランジットサーベイは多数の恒星の明るさを同時に観測して、周期的に減光するシグナルをもとにトランジット惑星候補を発見している。しかし、周期的な減光という現象は食連星でも起きている。通常は減光の深さ(減光率)から明らかに惑星ではないものは判別がつくものの、光球面の端をかすめるような減光率が小さい食連星の場合はそれだけでは見分けがつかない。また、トランジットサーベイは超広視野で行われることが多く、検出器の1ピクセルがカバーする視野(ピクセルスケール)が大きくなってしまう。すると近くにある食連星がターゲットの恒星と同じピクセルに混入した場合(重力的に束縛された階層的三重連星や、たまたま同じ方向にある恒星と背景の食連星の場合などがある)、トータルで見た減光率は惑星と見分けがつかない深さになってしまうことがある。これ以外にも、装置に起因する実在しない減光シグナル(false alarm)という場合もあり、トランジット惑星候補は追観測をしないと本物のトランジット惑星かどうかはわからない^{*5}。

そこで発見されたトランジット惑星候補に対して最初に行われるのが、減光が確かにそのターゲットで起きていて、その減光率が大きな波長依存性を示していないかを確認するための多色での測光観測である。なぜ多色での測光観測が発見確認につながるかというと、トランジット惑星の場合は恒星のように自分自身では光っていないため、(惑星大気に起因する小さな効果を見逃さず)基本的には隠した面積の割合だけ減光するの

^{*5} TESSでは減光の形状なども含めた情報から、機械学習を用いたvettingというプロセスで惑星候補を絞っているが、それでも発表されたトランジット惑星候補(TESS Objects of Interest: TOI)の半数程度は惑星ではないのが現状である。

で、どの波長で観測しても減光率に大きな波長依存性はない。一方、食連星の場合は減光の最中に前面を通過している恒星の光のスペクトルが残るため、減光率に大きな波長依存性が生じる。そのため、多色での測光観測によって食連星の混入を見破ることができる。ただし、両者がほぼ同一のスペクトルを持つ食連星では減光に波長依存性が生じないため、高分散分光観測で分光連星でないかの確認や、高空間分解能の撮像観測で近くに混入している天体がないかといった発見確認観測も追加が必要となる。

以上のような発見確認観測により惑星以外の可能性が統計的に排除されれば、その惑星候補は惑星として認められる（英語ではvalidation^{*6}という）。

この多色での測光観測において、単色の撮像装置を使うと複数回のトランジットを観測しなくてはならないものの、MuSCATシリーズを使えば一度の減光の観測で済み、さらに世界の4台の望遠鏡に搭載しているため効率的に発見確認を進めることができる。このことが世界の他のチームにはない特長となっている。

MuSCATシリーズでは2024年までに500個以上のトランジット惑星候補の発見確認観測を実施しており、そのデータは100個以上の新しいトランジット惑星の発見につながっている。以下ではその中から主要な観測成果を紹介する。

3.1.1 赤色矮星周りのトランジット惑星

2018年4月のTESSの打ち上げ前まで、赤色矮星を公転するトランジット惑星の発見数は少なく、赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布がどのようになっているのかや、スーパーアースやサブネプチューンと呼ばれる小型惑星の質量と半径の関係がどのようになっているのか、赤色矮星周りの小型惑星がどのような大気を持つのかな

どの観測的知見がほとんど得られていなかった。赤色矮星周りのトランジット惑星は、TESSによって発見数が急激に増え、発見された惑星の質量や大気などの特徴付けの追観測が行われ、その性質の理解が大きく進んできた。

MuSCATシリーズは、TESSで発見された赤色矮星周りのトランジット惑星候補の発見確認において、世界の中で大きな役割を果たしてきた。MuSCATチームのメンバーは、TESSの公式追観測プログラムであるTESS Follow-up Observing Programのサブグループ1 (TFOP-SG1)に参加し、MuSCATシリーズでの多数の観測結果を報告してきた。その結果、2024年までに発見確認に成功した赤色矮星周りの新たなトランジット惑星の数は50個を超える。

このうち、アストロバイオロジーセンターで開発された装置として最も重要な成果の一つは、赤色矮星LP 890-9 (別名SPECULOOS-2)を公転する2つのスーパーアースの発見だろう。主星のLP 890-9は太陽系から32パーセクの距離にある活動性の低い有効温度2850 Kの赤色矮星で、発見された2つのスーパーアースのうち外側を公転するLP 890-9 c (SPECULOOS-2 c)は、半径約1.37地球半径で岩石主体の惑星と考えられ、公転周期は約8.46日、惑星が主星から受け取る日射量は地球の約0.9倍であり、(楽観的なものより条件が厳しい)保守的なハビタブルゾーン内に位置していた[12]。これによりアストロバイオロジーセンターの目標の一つとも言える、赤色矮星周りのハビタブル惑星の発見を達成することができた。

MuSCATシリーズで発見確認された赤色矮星周りのトランジット惑星50個以上のうち、30個程度については筆者が研究代表者として提案したすばる望遠鏡IRDのインテンシブ観測により質

^{*6} 余談だが、最終的に高精度な視線速度測定により惑星質量の決定まで行われると、惑星としてconfirmationされたという。惑星以外の可能性が統計的に排除され、質量は決定されていない段階で発表された惑星発見論文をvalidation論文、質量の決定まで行われた惑星発見論文をconfirmation論文、validationされた後で追加で惑星質量を決定した論文はmass determination論文のように呼ばれている。

量の制限・決定も行なった。こうした観測により、岩石主体の地球型惑星と考えられる惑星^{*7}やJWSTでの大気の観測に適していると考えられるサブネプチューン [13, 14] などを多く発見することができた。

図3はTESS打ち上げ前の2017年末までと、TESS打ち上げ後を含めた2025年現在までに発見された赤色矮星周りのトランジット惑星の公転周期と半径の分布である。両者を見比べると、TESSの打ち上げ後に赤色矮星周りのトランジット惑星が多数発見されてきたことで、赤色矮星周りでもサブネプチューンやスーパーアース、地球サイズ程度の惑星が太陽型星周りと同様に豊富に存在することがわかった。これは赤色矮星周りの惑星形成を説明する従来の理論モデルの予言とも一致している。

しかし、TESSの打ち上げ前には存在が知られていなかった惑星として、赤色矮星周りにも短周期巨大惑星^{*8}の集団があることが明らかとなった。太陽型星周りでは以前から短周期巨大惑星（いわゆるホットジュピター）の存在は知られていたが、赤色矮星周りでは短周期巨大惑星はほとんど形成されないと理論では予言されてきたため、この観測的知見は惑星形成理論に一石を投じるものであると言える。MuSCATシリーズはこうした新しい惑星の集団の発見にも大きく貢献してきた [15-20]。

TESSによって明らかとなった赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布は、惑星形成理論がこれから説明すべき観測的知見として重要なものとなるだろう。

3.1.2 レアなトランジット惑星

MuSCATシリーズが発見確認観測を行ったトランジット惑星の中には、滅多に存在しないレア

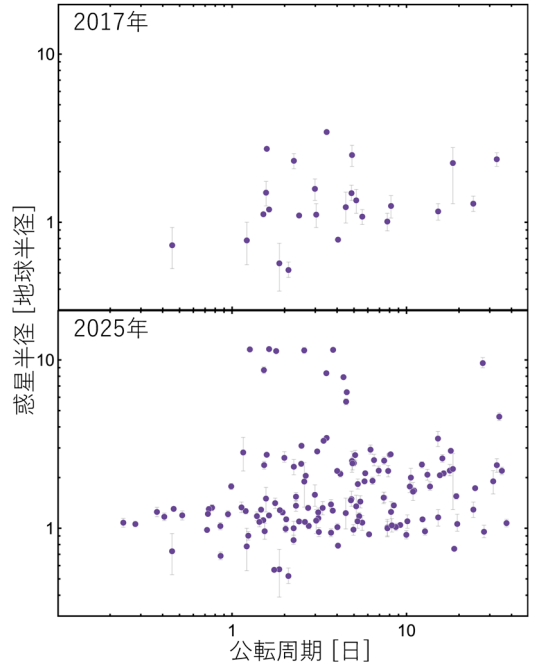


図3 発見された赤色矮星（ここでは有効温度2500–3500 Kの主星）周りのトランジット惑星の公転周期と半径の分布。上パネルは2017年末まで、下パネルは2025年5月現在までに発見されたものをプロットしている。NASA Exoplanet Archiveのデータをもとに作成。

なトランジット惑星も見つかっている。その中から2つの成果を紹介しよう。

一つは、太陽系から約25パーセクの距離にある白色矮星WD 1856+534（以下、WD 1856）を周期1.4日で公転する天体WD 1856 b [21] である。その天体の半径はほぼ木星と同じで、質量への制限は木星の約14倍以下となっているため、短周期の巨大惑星あるいは褐色矮星ということになる（褐色矮星である可能性は低いので、以下では巨大惑星と呼ぶことにする）。

白色矮星は、太陽の8倍程度より小さな質量を持つ恒星が核融合を終え、燃え尽きた後に残され

^{*7} 岩石主体の地球型惑星と考えられる惑星も20個以上発見できた。中でもすばる望遠鏡のIRDで質量決定まで行った超短周期惑星TOI-1634 bとTOI-1685 bについては、本特集8月号掲載の平野照幸氏の記事をご覧ください。

^{*8} 赤色矮星周りではそれほど惑星の平衡温度が高くないため、ホットジュピターとは呼ばず、GEMS (Giant Exoplanets around M-dwarf Stars) のように呼ばれることが多くなっている。

る地球程度の大きさのコンパクトな天体である。しかし、恒星が白色矮星になる前には大きさが1天文単位程度まで膨らんだ赤色巨星という段階を経るため、周期1.4日という軌道にある惑星は赤色巨星の段階で飲み込まれて破壊されてしまうはずである。

ではなぜこのような軌道に巨大惑星があるかという、赤色巨星の段階からその軌道にいたわけではなく、赤色巨星に飲み込まれないような軌道にあった巨大惑星が、主星が白色矮星となった後にその軌道へと移動してきたと考えられる。実際、白色矮星WD 1856は2つの赤色矮星G 229-20AとG 229-20Bとともに3重連星系を成していることが知られていて、これらの伴星の影響で移動してきたという説明がなされている [22, 23]。

これまでに発見された白色矮星周りのトランジット惑星はWD 1856 bの一つだけしかない^{*9}ものの、後から移動してくることで白色矮星にも短周期の惑星が存在するというのはとても面白い。

もう一つは、太陽系から約32パーセクの距離にある比較的年老いた太陽型星HD 110067で、この恒星の周りで発見された6つの惑星は、隣り合うそれぞれの惑星同士の公転周期の比が簡単な整数比（尽数関係）になっているというレアな惑星系である [24]。MuSCATシリーズはこの惑星系の内側から5番目の惑星HD 110067 fの発見確認観測に貢献した。

この惑星系では、TESSのデータに複数の周期のトランジットが検出されていたものの、公転周期がわからない1回だけのトランジットも検出されていた。周期の判明した内側の3つの隣り合う惑星の周期比がそれぞれ2:3という尽数関係にあったこと、既存のTESSのデータにトランジットがないことなどから、内側から5番目の惑星の公転周期は約41日と予想が立てられた。

このトランジットは減光率が0.1%程度しかなく、トランジットの継続時間は5時間以上、しかも予報の誤差も大きいという難度の高い観測で、2022年5月23～24日にかけて世界の複数のチームが協力してトランジットを観測するキャンペーン観測が実施された。その結果、MuSCATシリーズではMuSCAT2でトランジットの開始、MuSCAT3でトランジットの終了を精度よくとらえることができた。

このキャンペーン観測に参加したチームの中で、トランジットの開始と終了の両方をとらえることができたのは世界でMuSCATチームだけであり、地上最高レベルの測光精度を多色で同時に達成でき、時差の離れた複数の望遠鏡に装置を搭載しているというMuSCATシリーズの強みが活かされた成果となった。

3.2 トランジットタイミング変動（TTV）の測定

あるトランジット惑星があった時に、その惑星系にその惑星しかなければ、トランジットは一定の周期で起こる。一方、その惑星系には他にも惑星があった場合、惑星同士の重力相互作用によって惑星が主星をトランジットするタイミングが一定周期からずれてしまう。このトランジット時刻の一定周期からのずれをトランジットタイミング変動（TTV）と呼ぶ。TTVについての詳しいレビューは、2012年3月号の福井暁彦氏と2017年8月号の増田賢人氏による天文月報記事 [25, 26] をご覧いただきたい。

TTVを測定すると、そのTTVを引き起こしている別の惑星の質量に対して制限を与えることができる。複数の惑星がトランジットをする複数トランジット惑星系では、それぞれのTTVを測定することでお互いの質量に制限が与えられる。通常TTVのずれは観測誤差に対して無視できるほど小さいものの、惑星同士の公転周期の比が尽数

^{*9} 惑星由来の物質が白色矮星に降着したと考えられる観測結果は他にもあるものの、明確にトランジット惑星として発見されたのはWD 1856 bのみである。

関係に近い状態ではTTVのずれは大きくなる。特に尽数関係にある惑星ペアが両方トランジットをする場合には、TTVの測定によってそれぞれの質量を決定できる場合がある [27]。

系外惑星の質量を測定する代表的な方法は視線速度法であるが、いくつかの場合にはTTVの方が質量の制限・決定に適している。

例えば、比較的長周期の小型惑星の質量を決定することを考えた場合、視線速度法では長周期になるほど視線速度のシグナルが小さくなり、質量の決定が難しくなる。一方、尽数関係にある惑星ペアの場合は、長周期になるほどTTVのシグナルは大きくなるため、TTVの測定は視線速度法と相補的なよい質量決定方法となる。

また、若い恒星では黒点などの恒星表面の活動性に起因する見かけ上の視線速度変動が、惑星由来の視線速度変動より大きくなってしまふ。そのため、若い恒星の周りのトランジット惑星の場合には、系統誤差の影響で視線速度法では正確な質量決定が困難となってしまう。一方、若いトランジット惑星では尽数関係にあるペアが多いことが知られていて [28]、尽数関係にあるペアのTTVによる大きなトランジット時刻のずれに比べると、トランジット時刻決定の系統誤差は小さい。そのため、若いトランジット惑星ではTTVの方が系統誤差が小さく正確な質量決定をすることができるといふ利点がある。

一方、サイエンスとしてのTTVの難しい点として、トランジットの継続的な観測が必要となり、特に長周期の惑星になるとトランジットの観測機会が少なくなるため、結果が出るまでに長期間のTTVの観測が必要となることが挙げられる。そのため、長期間にわたって多くの観測が必要となる。

MuSCATシリーズは、多色でトランジット観測ができるため1回ごとのトランジット中心時刻の決定精度が高いことや、時差の離れた望遠鏡に設置されているためトランジットの観測機会を稼

げること、豊富な観測時間を確保していることから、TTVを長期的に測定するのに適した観測装置となっている。これは世界の他のチームにはない強みであるため、MuSCATチームでは新しいトランジット惑星の発見確認と並行して赤色矮星周りの小型惑星や若いトランジット惑星のTTVの測定にも力を入れている。

3.3 トランジット惑星大気の特徴付け

MuSCATシリーズは地上の1.5-2 m望遠鏡に搭載されているため、トランジット惑星大気の特徴付けとしてできることは地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡に比べると限られている。しかし、豊富な観測時間があることから、同じ惑星のトランジットを繰り返し観測することで可能な限り精度を高め、 g, r, i, z バンドでトランジットの深さがどのようにになっているかを調べることに取り組んできた。

トランジット惑星の空が雲で覆われていると、主星からの光が惑星の大気を透過してこれなくなってしまう。すると、どのバンドで観測してもトランジットの深さは変わらず、その波長依存性はフラットとなる。一方、晴れた空のホットジュピターでは高層にあるナトリウム大気による吸収や水素大気のレイリー散乱などの影響を受けるため、トランジットの深さはフラットにはならない。

こうしたことから、トランジットの深さの波長依存性がフラットになるか、あるいは何かしらの大気の兆候が見えるかどうかを調べるため、重力が小さくて惑星大気の兆候が観測しやすいホットジュピターのトランジットを繰り返し観測してきた。その結果、WASP-74 bというホットジュピターでは、レイリー散乱よりも急激に短波長側ほどトランジットが深くなる兆候が見られることを発見した [29]。これは惑星大気上層にヘイズ（もや・エアロゾル）があることを示唆している。

ただ、ブロードバンドフィルターではナトリウム大気による吸収の効果がなまされてしまうことから、2023年にはナトリウムに特化したナローバンドフィルターを製作した。現在は2029年以降

打ち上げ予定の欧州の系外惑星大気観測専用の宇宙望遠鏡 Ariel を念頭に、ナローバンドフィルターを使って曇っていないホットジュピターをスクリーニングするための観測を始めている。

また、トランジット惑星大気の特徴付けとしては、トランジットの観測だけではなく惑星が主星の裏に隠れる二次食（セカンダリエクリプス）の観測もある。ただ、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の波長では二次食の深さがとても小さくなるため、これまでに検出された例はまだ少ない。

我々は史上最も熱い惑星として知られている KELT-9 b の二次食を MuSCAT2 で観測し、 i , z_s バンドで二次食を検出した。測定されたそれぞれのバンドでの二次食の深さは 0.038% (i バンド) と 0.064% (z_s バンド) であり、非常に小さなシグナルを検出することができた。特に i バンドの地上観測でトランジット惑星の二次食を検出したのは世界初である。この二次食の深さの波長依存性のモデリングから、大気中の TiO（酸化チタン）や VO（酸化バナジウム）の存在度に制限を与えることができた [30]。

3.4 時間軸天文学・太陽系小天体への貢献

MuSCAT シリーズの持つ3色あるいは4色で同時に天体を撮像・測光観測できるという機能は、系外惑星のトランジット観測以外の観測的研究にも活用することができる。想定されるのは、超新星爆発や突発天体のような時間軸天文学の観測や、太陽系小天体（太陽系外からやってきた恒星間天体を含む）の観測などである。

もちろん大型望遠鏡に比べれば明るいターゲットに限られてしまうものの、MuSCAT シリーズの利点もいくつかある。例えば天体の色の変化を見るため複数のバンドで観測したい場合、単色の装置ではフィルターを切り替えて観測するため同時性が保証できないのに対し、MuSCAT シリーズでは同時に観測することができる。また、時差の離れた世界の複数の望遠鏡に設置しているため、1ヵ所からの観測に比べて短い時間間隔で

データの取得が可能である。さらに、太陽系小天体の場合は北天と南天を行き来することがあり、1ヵ所からでは観測が継続できなくなってしまうことがある。MuSCAT3/4 は北半球と南半球に同じ装置が設置されていることから、同じ装置での観測が継続できる。

こうした時間軸天文学や太陽系小天体の観測、あるいはそれに限らず MuSCAT シリーズの性能を活かした観測のアイデアをお持ちの方は、ぜひご連絡をいただければ幸いである。

4. これからの展望

最初の MuSCAT の開発から 10 年あまりが経過し、時と共に MuSCAT シリーズの主なサイエンスや観測ターゲットも移り変わってきた。2018 年に TESS が打ち上げられてからは、TESS と連携した新たなトランジット惑星の発見確認が主なサイエンスとなっているが、赤色矮星周りのトランジット惑星については新たに 50 個以上発見することができ、赤色矮星周りの惑星の公転周期と半径の分布がどのようになっているかなどの観測的知見が得られ、ひと段落ついたと考えている。

MuSCAT シリーズでの発見確認観測のターゲットとして次に注目しているのは、（年齢がおよそ 10 億年より）若いトランジット惑星と長周期のトランジット惑星である。

TESS による全天のトランジットサーベイが始まるまで、若いトランジット惑星の発見数は赤色矮星周りのトランジット惑星の発見数よりもさらに限られていた。TESS のサーベイが始まってからも、若いトランジット惑星の発見数はすぐには増えてこなかったが、位置天文観測衛星の GAIA によって新しい星団が同定され実は主星が若いことがわかるなどして、若いトランジット惑星の発見数はこの数年でようやく増えてきた。このように、若いトランジット惑星はまだ新しい研究対象であるだけでなく、年老いた惑星とは異なり、惑星が質量・半径・軌道・大気といった点でまだ進

化段階にある（変化している過程にある）惑星という点で面白い研究対象である。

MuSCATシリーズは、こうした若いトランジット惑星の発見確認で高精度な多色同時観測の強みを活かすことができる。また、特に年齢が数千万年以下の若いトランジット惑星は尽数関係にある惑星ペアが多いことが知られているため、TTVによる質量決定のよいターゲットでもある。

MuSCATシリーズによる発見確認観測とTTVの観測により、若いトランジット惑星の公転周期と半径の分布が年齢とともにどのように進化（時間変化）しているのかや、それぞれの惑星の質量・半径・密度などを特徴付けることができれば、惑星形成理論に対して重要な新しい観測的知見をもたらすことが期待できる。

一方、公転周期が数十日以上長の長周期のトランジット惑星もまだ発見数が少ないが、TESSで発見された長周期トランジット惑星候補については、HD 110067 fの発見確認のように世界の観測チームに対してTFOP-SG1の中で呼びかけが行われ、キャンペーン観測が行われることがある。こうしたキャンペーン観測に参加することで、長周期のトランジット惑星の発見確認にも継続して貢献していく。

また、2026年以降に打ち上げ予定の欧州のトランジットサーベイ衛星PLATOは、TESSよりも長期間（約2年間）にわたって同じ領域を連続観測する予定のため、長周期のトランジット惑星候補（K型星周りのハビタブル惑星候補を含む）の発見が今後数年で増加すると期待される。MuSCATチームはPLATOと連携した発見確認観測も行い、長周期のトランジット惑星の発見確認に取り組んでいく予定である。

さらに、2029年以降打ち上げ予定の欧州の衛星計画Arielでは、筆者を始めとするMuSCATチームは地上観測支援という形でArielコンソーシアムに参加している。MuSCATシリーズはその性能を活かして、Arielの観測ターゲットのト

ランジット予報時刻の精度向上や、新たな観測ターゲットとなるトランジット惑星の発見、Arielでの詳細観測に適した惑星のスクリーニング観測などに取り組んでいく。また、Arielの観測開始後は、観測ターゲットとなる恒星の活動性のモニタリング観測をアレンジするなどして、Arielの観測に対する支援を行っていく。

以上のように、今後も宇宙望遠鏡や世界各地の地上望遠鏡と連携して、高い研究成果をあげていきたいと考えている。

謝 辞

本稿の執筆を提案していただいた天文月報編集委員の日下部展彦氏に感謝いたします。また、初期の頃からMuSCATシリーズの開発・運用を支えてくれた福井暁彦氏を始めとするMuSCATチームの全メンバーと、オプトクラフトの山室智康氏に深く感謝いたします。MuSCATシリーズの開発・運用のための予算獲得においては、田村元秀氏、生駒大洋氏、岡田真人氏から多大なご支援をいただきました。MuSCATシリーズの資産管理や輸出・修理などにおいてお世話になっているアストロバイオロジーセンターのスタッフの皆様と、MuSCATシリーズを設置させていただいている国立天文台ハワイ観測所岡山分室、IAC、LCOのスタッフの皆様がこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 成田憲保, 2012, 天文月報, 105, 7
- [2] Fulton, B. J., et al., 2017, AJ, 154, 109
- [3] Charbonneau, D., et al., 2009, Nature, 462, 891
- [4] Narita, N., et al., 2013a, PASJ, 65, 27
- [5] Narita, N., et al., 2013b, ApJ, 773, 144
- [6] Fukui, A., et al., 2016, ApJ, 819, 27
- [7] Narita, N., et al., 2015, J. Astron. Telesc., Inst. Syst., 1, 045001
- [8] Narita, N., et al., 2019, J. Astron. Telesc., Inst. Syst., 5, 015001
- [9] Narita, N., et al., 2020, Proc. SPIE, 11447, 114475K
- [10] Fukui, A., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 130963U

- [11] 川内紀代恵, 2024, 日本惑星科学会誌遊星人, 33, 67
- [12] Delrez, L., et al., 2022, A&A, 667, A59
- [13] Mori, M., et al., 2022, AJ, 163, 298
- [14] Kawauchi, K., et al., 2022, A&A, 666, A4
- [15] Parviainen, H., et al., 2021, A&A, 645, A16
- [16] Gan, T., et al., 2022, MNRAS, 511, 83
- [17] Gan, T., et al., 2023, AJ, 166, 165
- [18] Hartman, J. D., et al., 2023, AJ, 166, 163
- [19] Kagitani, T., et al., 2023, PASJ, 75, 713
- [20] Triaud, A. H. M. J., et al., 2023, MNRAS, 525, L98
- [21] Vanderburg, A., et al., 2020, Nature, 585, 363
- [22] Muoz, D. J., & Petrovich, C., 2020, ApJ, 904, L3
- [23] Stephan, A. P., et al., 2021, ApJ, 922, 4
- [24] Luque, R., et al., 2023, Nature, 623, 932
- [25] 福井暁彦, 2012, 天文月報, 105, 138
- [26] 増田賢人, 2017, 天文月報, 110, 522
- [27] Holman, M. J., et al., 2010, Science, 330, 51
- [28] Dai, F., et al., 2024, AJ, 168, 239
- [29] Luque, R., et al., 2020, A&A, 642, A50
- [30] Hayashi, Y., et al., 2024, PASJ, 76, 1131

The MuSCAT Series: A Network of Multi-color Simultaneous Cameras

Norio NARITA

¹*Komaba Institute for Science, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan,* ²*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The MuSCAT series is a network of multi-color simultaneous cameras, capable of 3- or 4-color simultaneous imaging, installed on four of 1.5–2 m telescopes around the world. The MuSCAT series was primarily developed for simultaneous multi-color, high-precision observations of exoplanetary transits. This article introduces the history of development and specifications of the MuSCAT series, as well as the main science cases and observational achievements over the past decade.