

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247026

研究課題名(和文) 高精度近赤外3色同時トランジット観測によるスーパーアースの基本的性質の解明

研究課題名(英文) Investigating the Nature of Super-Earths via High-Precision Near-Infrared 3-color Simultaneous Transit Photometry

研究代表者

成田 憲保 (Narita, Norio)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：60610532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最近太陽系外で発見されつつある「スーパーアース」、すなわち太陽系の地球と天王星・海王星の中間の質量・半径を持つ惑星の性質を調べるため、新しいスーパーアースを発見し性質を調べるための観測装置の開発と、その装置などを用いた観測、そして観測結果の理論的解釈に取り組んできました。

その研究成果として、岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡に新しい多色同時撮像カメラMuSCATを予定より前倒して開発し、それを用いた観測から2つの新しいスーパーアースを発見した。また、生命居住可能領域にあるスーパーアースK2-3dの影をMuSCATによる観測で地上から初めてとらえるなど、当初計画した以上の成果があった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to investigate the nature of super-Earths, which are emerging population of extrasolar planets. To do so, we have worked on development of a new astronomical instrument named MuSCAT (Multi-color Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets), which is a 3-color simultaneous camera, for the 188cm telescope at Okayama Astrophysical Observatory. Using the instrument and other facilities, we conducted observations and theoretical modeling to reveal properties of super-Earths.

Consequently, we succeeded in developing MuSCAT faster than we expected, and discovered 2 new super-Earths based on our observations using MuSCAT. We also succeeded in detecting a planetary transit of the habitable super-Earth K2-3d using MuSCAT for the first time from the ground, and improved the knowledge about properties of this planet.

Based on the above and other publication results, we have made better-than-expected achievements from this study.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：太陽系外惑星 トランジット スーパーアース 観測装置開発 多色撮像カメラ 透過分光 系外惑星大気

1. 研究開始当初の背景

1995年に太陽型星のまわりで初めて太陽系外惑星が発見されてから15年ほどの間は、発見された太陽系外惑星は主に巨大惑星で、その性質の調査が進められてきた。その中で、2010年前後から「スーパーアース」と呼ばれる太陽系の地球と天王星・海王星の中間の質量・大きさを持つ惑星が発見されるようになってきた。

このスーパーアースは、以下のような点で科学的に重要な天体と言える。まず水素ガス大気を持たない岩石惑星である地球と、水素ガス大気を持つガス惑星である天王星・海王星の中間の質量・大きさの惑星は太陽系には存在していない。そして岩石惑星とガス惑星の境となる質量・半径は、理論的にも観測的にもまだ明確に求まっていない。また、スーパーアースの主な大気成分の候補は惑星の軌道や形成過程を反映して理論的には水素か水だと考えられているが、それもまだ観測的に検証されていない。そのため、このスーパーアースがどんな質量・半径、軌道、大気を持つのかという性質はまだほとんどわかっておらず、この観測的な知見は惑星形成の全体像(汎惑星形成論)を明らかにするためにも必要不可欠である。

一方、2009年に打ち上げられたケプラー衛星の活躍によって、本研究開始前の2012年頃には宇宙にはスーパーアースが大量に存在することが示唆されていた。しかし、ケプラー衛星は太陽系から遠く離れた領域を観測していたため、発見されたスーパーアースも遠い惑星系にあり、惑星の詳細な性質を調べることはまだ困難であった。

惑星の詳細な性質を調べるためには、より太陽系に近い惑星系を発見することが重要となる。ケプラー衛星は、惑星が主星の前を通過する「トランジット現象」をもとに系外惑星を発見してきたが、このトランジット法を用いた次世代の系外惑星探索計画として、全天トランジット惑星探索衛星 TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) が2017年の打ち上げを目指して2011年にNASAに提案されていた。申請者はTESSの提案に海外の共同研究者として参加しており、TESSの時代を見据えてスーパーアースの基本的性質を解明することを目指した研究計画を立案した。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では発見後に詳細な観測が可能な新しいスーパーアースを発見することと、実際の観測と理論的解釈をもとにスーパーアースの質量・半径、軌道、大気などの基本的な性質を解明していくことを大目標とした。この大目標を達成するため、本研究の研究分担者・連携研究者・研究協力者らと共に、装置開発・理論・観測にまたがる以下の4つの課題を具体的な目的として掲げた。

(1) 太陽系近傍にある新しいスーパーアースを効率的に発見するため、TESSの打ち上げ前に岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡用に新しい多色同時撮像装置を開発すること。

(2) スーパーアースのトランジット観測で得られた結果の理論的解釈を行なうため、スーパーアースのトランジットの深さ波長依存性を理論的に予測するモデルを開発すること。

(3) (1)の観測装置が開発するまでは、既存の望遠鏡・観測装置で既知のトランジット惑星の観測を行い、(2)で得られた理論モデルと合わせてスーパーアースの主要大気成分を調べる方法論を確立すること。

(4) (1)で開発した観測装置を用いて新しいスーパーアースを発見し、他の望遠鏡・観測装置での観測と合わせて質量・半径、軌道、大気などの性質を調べること。

3. 研究の方法

(1) 新しい多色同時撮像装置の開発:

岡山天体物理観測所188cm望遠鏡に対して可能な限り広い観測視野を持つように観測装置の光学系設計を行った。また、同時に観測する波長帯は、トランジット惑星の主要大気成分を調べる上で重要となるレイリー散乱の特徴が顕著となる波長帯を理論モデルに基づいて検討し、可視光から近赤外光にかけての3バンド(400-550nm、550-700nm、820-920nm)を選定した。この3バンドをカバーする天文観測用フィルターと、波長を分割(短波長を反射、長波長を透過)するダイクロイックミラー2枚を準備し、3色同時撮像カメラを開発した。

(2) トランジット惑星の透過光スペクトルモデルの開発:

トランジット惑星がトランジットしている時に大気を透過して我々に届く光(透過光スペクトル)を、輻射輸送計算によって求めるコードを開発した。この際、惑星が晴れた空を持つ場合や、雲に覆われた空を持つ場合、もや(ヘイズ)に覆われた空を持つ場合などを考慮し、特にもやの形成過程まで考慮した計算を行った。

(3) 既知のトランジット惑星の大気の性質調査:

本研究開始時に発見されていた2つのスーパーアースGJ1214bに対して、既存の望遠鏡と観測装置を用いて多色撮像観測を実施し、そのデータを解析した。この方法は(1)で開発する多色撮像装置で可能となる観測方法と実質的に同じであり、(1)の装置が完成した際の解析方法の確立にもつながっている。そして解析で得られたトランジットの深さ

の波長依存性を、(2)で開発する透過光スペクトルと比較し、その惑星の大気の主要成分や空模様(晴れているか、曇っているか、もやがかかっているかなど)を調べた。

(4) 新しい惑星の探索とその性質の調査：

(1)の装置の完成後は、ケプラー衛星が2014年から開始した第2期観測計画 K2 との連携により新しいスーパーアースを発見し、その性質を調べる研究を実施した。そのために、K2でのトランジット惑星探索の国際共同研究チームに参加し、K2で発見された惑星候補の発見確認観測(惑星候補が本物の惑星であると確定するための観測)と、性質調査のためのフォローアップ観測を実施した。この研究は TESS が打ち上げられた後に行う研究の予行演習となる。

4. 研究成果

(1) スーパーアースの大気の観測と理論的解釈：

本研究開始時に発見されていたスーパーアース GJ1214b の多色撮像観測によって、GJ1214b では可視光から近赤外光までの波長でトランジットの深さに波長依存性が見られないことを明らかにした。この惑星では晴れたあるいはもやがかかった水素大気の空を持つ場合、レイリー散乱による有意な波長依存性があることが理論的に予言されている。そのため、この結果は GJ1214b が水(水蒸気)を主体とした大気を持つか、空が雲に覆われていることを意味している(Narita et al. 2013)。

(2) 岡山天体物理観測所の新しい3色同時撮像カメラ MuSCAT の完成：

2013年から開発を開始した岡山天体物理観測所の多色同時撮像装置 MuSCAT (Multi-color Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets の略称)は、2014年12月24日に188cm望遠鏡に初めて搭載され、最初の天体観測(ファーストライト)を行った。その後、2015年3月までに試験観測を完了し、想定されていた性能が十分に達成されていることが確認された(Narita et al. 2015a, Fukui et al. 2016：以下の写真が MuSCAT)。



(3) 新しいトランジット惑星の発見とその性質調査：

本研究で開発した岡山天体物理観測所188cm望遠鏡の MuSCAT や既存の望遠鏡・観測装置を用いて、K2で発見されたトランジット惑星候補の発見確認観測を実施した。これにより以下の7つの惑星を新しく発見し、その公転周期、半径、可能な場合には質量などの性質を論文として発表した。

K2-22b (Sanchis-Ojeda et al. 2015)

K2-28b (Hirano et al. 2016a)

K2-34b (Hirano et al. 2016b)

K2-39b (van Eylen et al. 2016)

K2-77b (Gaidos et al. 2017)

K2-99b (Smith et al. 2017)

K2-105b (Narita et al. 2017)

このうち、K2-28b、K2-105b は本研究で定義しているスーパーアースに相当し、MuSCATを用いて発見確認を行った。これらのスーパーアースは今後のさらなる性質調査の研究ターゲットとなる惑星である。

またこの他に、惑星ではないものの、惑星と恒星の中間の質量を持つ褐色矮星を1つ発見した(Nowak et al. 2017)。

(4) 当初の計画にはなかった研究成果：

本研究で新しい観測装置 MuSCAT を開発したことにより、本研究計画時には想定していなかった研究が可能となった。特に MuSCAT の性能を活かして新たに得られたそのような成果として、以下の3つを挙げる。

① トランジット周期変動の観測による見えない惑星の質量の決定：

惑星系に複数の惑星が存在し、その惑星同士の公転周期が簡単な整数比になっている場合を共鳴軌道にあると言う。このような共鳴軌道にある惑星がトランジットをしていると、共鳴軌道にある別の惑星の存在によりトランジットの周期が一定とならず、変動することが知られている。このトランジット周期変動を観測することで、トランジットを観測していない別の惑星の方の質量を決定することができる。

MuSCATは高精度に3色で同時にトランジットを観測することができるため、地上望遠鏡の中でも特にトランジット時刻の決定精度が高い。そのため、トランジット周期変動の観測においても力を発揮する。

このことを用いて、3:2の共鳴軌道にあるトランジット惑星 K2-19b と c のうち、K2-19b のトランジット周期変動を観測した。その結果、トランジットを観測していないほぼ天王星・海王星サイズの惑星 K2-19c の質量が地球の約20倍であることを明らかにした(Narita et al. 2015b)。

② 生命居住可能惑星の影の検出と惑星のトランジット予報時刻の精度向上:

系外惑星の中でも、表面に液体の水を持つことができるような軌道に存在する「生命居住可能惑星」は特に注目されている。このような惑星は将来の超大型望遠鏡・宇宙望遠鏡での重要な観測ターゲットになると考えられるが、そのような惑星の公転周期やそれをもとにしたトランジット予報時刻の精度が悪いと、極めて貴重な超大型望遠鏡・宇宙望遠鏡の観測時間を無駄にしてしまう可能性がある。

本研究期間中に発見された生命居住可能惑星 K2-3d は、地球の約 1.5 倍の半径を持ち、太陽系から約 150 光年のところにあるスーパーアースである。この惑星はケプラー衛星が発見した中では最も太陽系に近い生命居住可能惑星のひとつで、将来の超大型望遠鏡・宇宙望遠鏡でのトランジット観測が期待されている。しかし 2018 年以降にはトランジット予報時刻の誤差が数時間以上になってしまふことが問題となっていた。

そこで 3 色同時に撮像する MuSCAT の利点を活かして系統誤差を取り除く解析を行うことで、地上で初めてこの惑星のトランジットを観測することに成功した (Fukui et al. 2016)。これにより、K2-3d の公転周期の誤差は 18 秒程度と極めて小さくなり、2018 年以降のトランジット予報時刻の誤差も 10 分程度に抑えることが可能となった。

このように、MuSCAT は重要なトランジット惑星の公転周期とトランジット予報時刻の精度向上にも大きな役割を果たせることがわかった。

③ MuSCAT2 の開発:

本研究で開発した MuSCAT を国際会議のポスター講演で紹介したところ、スペイン・カナリア諸島のカナリア天体物理研究所 (IAC) の研究者から、IAC が所有する Carlos Sánchez Telescope (以下、TCS1.5m 望遠鏡) に 2 台目の MuSCAT を搭載したいという打診を受けた。そこで IAC との共同研究を開始し、新しい多色同時撮像装置 MuSCAT2 の開発に着手した。また、IAC との覚書を締結し、2018 年 1 月から 5 年間にわたって MuSCAT2 に年間 162 夜以上の観測時間が保証されることとなった。

これは本研究がその研究期間を超えて将来の研究へと結びついたものであり、当初予期していなかった大きな副産物の研究成果であると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

① Norio Narita, Teruyuki Hirano, Akihiko Fukui, et al. (20 人中 1 番目)、The K2-ESPRINT project. VI. K2-105 b, a hot

Neptune around a metal-rich G-dwarf、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、69 巻、2017 年、id 29 (12 pp)、10.1093/pasj/psx002

② Akihiko Fukui, John Livingston, Norio Narita, et al. (7 人中 3 番目)、Ground-based Transit Observation of the Habitable-zone Super-Earth K2-3d、Astronomical Journal、査読有、152 巻、2016 年、id 171 (12 pp)、10.3847/0004-6256/152/6/171

③ Teruyuki Hirano, Akihiko Fukui, Andrew W. Mann, Roberto Sanchis-Ojeda, Eric Gaidos, Norio Narita, et al. (21 名中 6 番目)、The K2-ESPRINT Project III: A Close-in Super-Earth around a Metal-rich Mid-M Dwarf、Astrophysical Journal、査読有、820 巻、2016 年、id 41 (11 pp)、10.3847/0004-637X/820/1/41

④ Akihiko Fukui, Norio Narita, Yui Kawashima, et al. (9 人中 2 番目)、Demonstrating High-precision, Multiband Transit Photometry with MuSCAT: A Case for HAT-P-14b、Astrophysical Journal、査読有、819 巻、2016 年、id 27 (11 pp)、10.3847/0004-637X/819/1/27

⑤ Norio Narita, Teruyuki Hirano, Akihiko Fukui, et al. (19 人中 1 番目)、Characterization of the K2-19 Multiple-transiting Planetary System via High-dispersion Spectroscopy, AO Imaging, and Transit Timing Variations、Astrophysical Journal、査読有、815 巻、2015 年、id 47 (11 pp)、10.1088/0004-637X/815/1/47

⑥ Norio Narita, Akihiko Fukui, Nobuhiko Kusakabe, et al. (9 人中 1 番目)、MuSCAT: a multicolor simultaneous camera for studying atmospheres of transiting exoplanets、Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems、査読有、1 巻、2015 年、id 045001 (14 pp)、10.1117/1.JATIS.1.4.045001

⑦ Norio Narita, Takafumi Enomoto, Shigeyuki Masaoka, Nobuhiko Kusakabe, Titania may produce abiotic oxygen atmospheres on habitable exoplanets、Nature Scientific Reports、査読有、5 巻、2015 年、id 13977 (6 pp)、10.1038/srep13977

⑧ George R. Ricker, Joshua N. Winn, Roland Vanderspek, et al. (58 人中 42

番目)、Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)、Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems、査読有、1巻、2015年、id 014003 (10 pp)、10.1117/1.JATIS.1.1.014003

- ⑨ Akihiko Fukui, Yui Kawashima, Masahiro Ikoma, Norio Narita, et al. (25人中4番目)、Multi-band, Multi-epoch Observations of the Transiting Warm Jupiter WASP-80b、Astrophysical Journal、査読有、790巻、2014年、id 108 (12 pp)、10.1088/0004-637X/790/2/108
- ⑩ Norio Narita, Akihiko Fukui, Masahiro Ikoma, et al. (22人中1番目)、Multi-color Transit Photometry of GJ 1214b through BJHKs Bands and a Long-term Monitoring of the Stellar Variability of GJ 1214、Astrophysical Journal、査読有、773巻、2013年、id 144 (10 pp)、10.1088/0004-637X/773/2/144

[学会発表] (計69件)

- ① Norio Narita、「TRAPPIST-1 and Future Surveys of Habitable Transiting Earth-like Planets」、AstroBiology Center, NINS International Workshop 2017、2017年3月23日、広島大学、広島県東広島市
- ② 成田憲保ほか、「MuSCATによるトランジット惑星観測 運用2年目の観測成果と今後の展望」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月16日、九州大学、福岡県福岡市
- ③ Norio Narita、「Subaru-TESS Synergy」、Subaru Users' Meeting FY2016、2017年1月12日、国立天文台、東京都三鷹市
- ④ 成田憲保、「TESSとすばるによる連携観測のサイエンス」、2020年代のすばる望遠鏡と衛星計画のシナジー検討研究会、2016年4月22日、国立天文台、東京都三鷹市
- ⑤ 成田憲保ほか、「IRDのトランジットフォローアップとTESSとのシナジー」、近赤外高分散分光研究会：地球型惑星探索と広がるサイエンス、2015年11月24日、国立天文台、東京都三鷹市
- ⑥ 成田憲保ほか、「岡山188cm望遠鏡MuSCATの観測成果 I: K2のトランジット惑星候補 EPIC201505350b のトランジット時刻変動(TTV)の確認」、日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学、

兵庫県神戸市

- ⑦ 成田憲保ほか、「岡山188cm望遠鏡の新多色撮像カメラMuSCATのサイエンス I: 新しいトランジット惑星の発見確認と可視透過分光」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月21日、大阪大学、大阪府豊中市
- ⑧ 成田憲保ほか、「岡山天体物理観測所188cm望遠鏡の新しい多色撮像カメラMuSCATの開発」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11日、山形大学、山形県山形市
- ⑨ Norio Narita、「Toward Detections and Characterization of Habitable Transiting Exoplanets」、International Astrobiology Workshop 2013、2013年11月29日、宇宙科学研究所、神奈川県相模原市
- ⑩ 成田憲保ほか、「スーパーアースGJ1214bの多波長トランジット観測とその惑星大気組成」、日本惑星科学会2013年秋季講演会、2013年11月20日、石垣市市民ホール、沖縄県石垣市

[その他]

プレスリリース発表状況

- ① 青い光で見るスーパーアースの空
http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2013/09/03/j_index.html
- ② 新しい系外惑星観測装置 MuSCAT (マスカット)、始動
<http://www.oao.nao.ac.jp/2015/01/05/muscat/>
- ③ 生命がいなくても酸素を豊富に保持する地球型惑星の存在可能性を示唆
http://esppro.mtk.nao.ac.jp/Members_PRES/201509/
- ④ 近傍の赤色矮星をまわる新たなスーパーアースを発見
<http://www.oao.nao.ac.jp/public/research/k2-28b/>
- ⑤ そこにあるはずがない惑星を発見
http://abc-nins.jp/press/20160702_K2-39.html
- ⑥ 生命がいるかもしれない惑星の”影”の観測に成功
<http://www.oao.nao.ac.jp/public/research/k2-3d/>

⑦ 灼熱の海王星型惑星 K2-105b を発見 ～第
2 の地球探しへの足がかり～
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2017/5270/>

ホームページ

① MuSCAT ホームページ

<http://esppro.mtk.nao.ac.jp/MuSCAT/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 憲保 (NARITA, Norio)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：60610532

(2) 研究分担者

生駒 大洋 (IKOMA, Masahiro)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：80397025

泉浦 秀行 (IZUMIURA, Hideyuki)
国立天文台・岡山天体物理観測所・准教授
研究者番号：00211730

(3) 連携研究者

福井 暁彦 (FUKUI, Akihiko)
国立天文台・岡山天体物理観測所・特任専門員
研究者番号：60632049

佐藤 文衛 (SATO, Bun'ei)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号：40397823

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：00260018

柳澤 顕史 (YANAGISAWA, Kenshi)
国立天文台・岡山天体物理観測所・助教
研究者番号：90311183

永山 貴宏 (NAGAYAMA, Takahiro)
鹿児島大学・理学部・准教授
研究者番号：00533275

塩谷 圭吾 (ENYA, Keigo)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：40392815

関根 康人 (SEKINE, Yasuhito)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：60431897

玄田 秀典 (GENDA, Hidenori)
東京工業大学・地球生命研究所・准教授

研究者番号：90456260

栗田 光樹夫 (KURITA, Mikio)
京都大学・理学研究科・准教授
研究者番号：20419427