

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14246

研究課題名(和文) クールワールドにおける系外惑星探査とキャラクターゼーション

研究課題名(英文) Exoplanet Exploration and Characterization in a Cool World

研究代表者

河原 創 (Kawahara, Hajime)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：90649758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ケプラーデータの中から、1-3回しかトランジットを起こさない長周期惑星をGPUを用いた検出を行い、計67個の長周期惑星を同定した。この結果によると半径にして海王星サイズのものが1 AU付近に多く存在することが分かった。これは、マイクロレンズによる晩期型星まわりの結果が、太陽型星まわりにおいても成り立つことを示しており現在の惑星形成論では説明の難しい観測結果となっている。新しい惑星大気検出法としてHigh-Dispersion Coronagraphを可能とする装置をすばる望遠鏡のSCEXAOとIRDを接続するプロジェクトREACHを通じて作成し、ファーストライトを行うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙における人類・生命というテーマからは自然と、我々は宇宙で孤独なのか、という素朴な問いが生じる。人類史上、長らく思弁的に捉えられてきたこの疑問は、1995年の太陽系外惑星の発見以来、科学的に解答可能な具体的問題として宇宙科学の最重要課題の一つとなった。本研究の成果は将来の地球型惑星探査、およびそこでの生命探査に繋がる基礎的研究である。とくに1年以上の長周期惑星の発見法を確立したこと、また緒々末津撮像での高分散分光による大気探査を開始したことが将来の地球型惑星探査にとってインパクトがあると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A total of 67 long-period planets with only one to three transits were identified using GPUs in the Kepler data. The results show that most of the planets are Neptune-sized in radius and are located around 1 AU. This indicates that the results of microlensing of late type star orbits are also valid for solar type star orbits, which is difficult to explain by current planet formation theory. A new instrument for detecting planetary atmospheres, the High-Dispersion Coronagraph, has been constructed through Project REACH, which connects Subaru's SCEXAO with IRD, and first light has been successfully performed.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：系外惑星 宇宙生物学

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星の研究は、発見の時代から特徴づけ (キャラクターゼーション) の時代になったといわれて久しい。キャラクターゼーションの二大手法は、惑星が恒星前面を通過するトランジット惑星を用いたものと、恒星光を隠し惑星光を観測する直接撮像である。4000 個以上のトランジット惑星候補を発見したケプラー衛星は系外惑星研究のブレイクスルーとなった。結果、惑星の頻度等の普遍的な性質が議論できるようになった。しかし、ケプラー衛星で発見された惑星は太陽系でいうと水星 (0.4au) より内側の惑星がほとんどである。一方、近年急速に発展してきた直接撮像では、土星軌道以遠の年齢が若く熱い惑星のみが観測されている。つまり、現在の系外惑星キャラクターゼーションは、太陽系でいう金星から木星の 0.5-5 au の主要な領域をほとんど探査できていない状況があった。

2. 研究の目的

従来の熱い環境の系外惑星を超えて、太陽系惑星程度の温度を持つ系外惑星 (クールワールド) の探査・キャラクターゼーションの開発・実行を行う。具体的には、ケプラー衛星や TESS 衛星データを用いたトランジット長周期惑星探査、直接撮像におけるクールワールド木星型惑星の光度曲線解析、直接撮像における高分散分光をもちいたクールワールドのキャラクターゼーションの方法論開発を行う。これらはどれも申請者がこれまで先鞭をつけたもので独自性が高い。さらに得られた結果を、装置チームと共有し共同開発につなげることで、次世代の系外惑星キャラクターゼーションの礎を築くことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

クールワールド・トランジット探査では自動探査プログラム作成と実行をおこなった。また直接撮像の表面推定については方法論の定式化を行い、地球の観測データを用いて実証を行った。惑星大気検出法としては、すばる望遠鏡にて装置開発を行う。

4. 研究成果

①ケプラー衛星・長周期惑星のカatalogの完成: ケプラーデータの中から、1-3 回しかトランジットを起こさない長周期惑星を GPU を用いた検出を行い、計 67 個の長周期惑星を同定した。この結果によると半径にして海王星サイズのものが 1 AU 付近に多く存在することが分かった。これは、マイクロレンズによる晩期型星まわりの結果が、太陽型星まわりにおいても成り立つことを示しており現在の惑星形成論では説明の難しい観測結果となっている。この結果は Kawahara and Masuda として AJ に出版された。また、より大量のデータが利用できる TESS 衛星データからニューラルネットを用いて異常減光を探索し、若い星の周りに物質が回ることによる非周期的減光 (dipper) を 35 個同定し、初めて高速で分子雲から逃げ出している dipper を発見した。

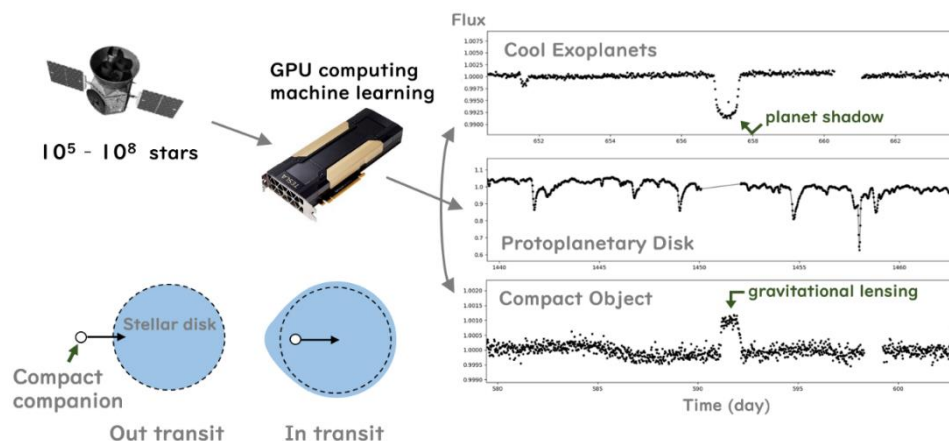
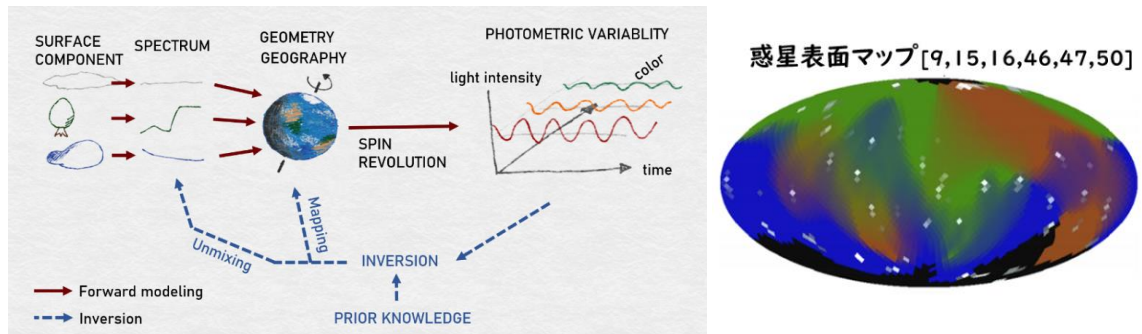


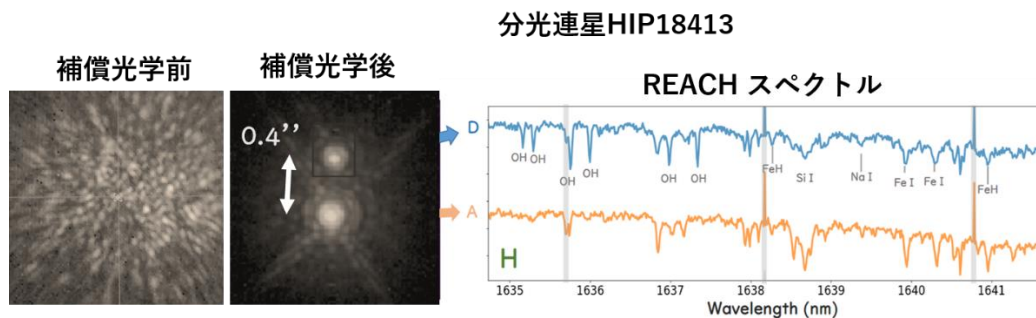
図: 本研究で衛星ビッグデータから系外惑星・原始惑星系円盤・自己重力レンズ天体を検出した例 (右図上から順に)。左下の図は、星の周りをまわるコンパクト天体 (ブラックホール・白色矮星など) による時空の歪みで、星の像が拡大し、増光を引き起こす仕組みの説明

②直接撮像による地球型惑星の表面推定法は、我々が2010年に二次元地図の推定法(Spin-Orbit Tomography)を提唱して以来、さまざまな改良がなされてきた。今回は、スパースモデリングにより、さらに解像度を上げる方法と表面組成のスペクトルを仮定無しに同時推定する手法(Spin-orbit Unmixing)の二種類を定式化し、実際の地球の長時間観測データに適用することでその有効性を実証した。前者はAizawa, Kawahara, FanとしてApJに、後者はKawahara(単著)としてApJにてそれぞれ出版された。また、さらに多次元ガウス過程+同相写像を利用したベイズ推定から非定常表面分布(すなわち惑星表面のムービー、主に雲の動き)を再生できることを、実際の地球の長期モニタリングデータを用いて示した。この方法は宇宙コロナグラフ計画により直接撮像データから大陸・海洋分布といったマッピングが可能になる



図：惑星表面マッピングの概略。直接撮像による得られる惑星の一次元の時系列データ(光度曲線)を用いて、惑星表面の組成・分布を推定する。右パネルは実際の地球の衛星観測データ(DSCOVR)による光度曲線を用いて、本手法により再構成された地球表面の推定マップ

③PRV法による新しい惑星大気検出法として我々が2014年に提唱したHigh-Dispersion Coronagraph(HDC)を可能とする装置をすばる望遠鏡のSCEXAOとIRDを接続するプロジェクトREACHを通じて作成し、2019年夏にファーストライトを行うことに成功した。REACHはすばる望遠鏡の共同利用が可能な装置として運用を開始した。



図：REACHにより分光連星を分解して高分散分光した例。

引用文献

1. Global Mapping of an Exo-Earth using Sparse Modeling, Masataka Aizawa, Hajime Kawahara, Siteng Fan, ApJ 896, 22 (2020)
2. Searching for Thermal Inversion Agents in the Transmission Spectrum of MASCARA-2b/KELT-20b: Detection of Neutral Iron and Ionised Calcium H&K Lines
Stevanus K. Nugroho, Neale P. Gibson, Ernst J. W. de Mooij, Chris A. Watson, Hajime Kawahara, Stephanie Merritt, MNRAS 496, 504 (2020)
3. Mutual Orbital Inclinations Between Cold Jupiters and Inner Super-Earths
Kento Masuda, Joshua N. Winn, Hajime Kawahara, AJ 159, 38 (2020),
4. Self-lensing Discovery of a 0.2M_⊙ White Dwarf in an Unusually Wide Orbit Around a Sun-like Star
Kento Masuda, Hajime Kawahara, David W. Latham, Allyson Bieryla, Masanobu Kunitomo,

- Morgan MacLeod, Wako Aoki , ApJL 881, 1 (2019),
5. Transiting Planets near the Snow Line from Kepler. I. Catalog
Hajime Kawahara, Kento Masuda, AJ 157, 6 (2019),
 6. Back to “Normal” for the Disintegrating Planet Candidate KIC 12557548 b
Everett Schlawin, Teruyuki Hirano, Hajime Kawahara, Johanna Teske, Elizabeth Green
on Benjamin V. Rackham, Jonathan Fraine, Rafia Bushra, AJ 157, 6 (2018)
 7. A Linear and Quadratic Time-Frequency Analysis of Gravitational Waves from
Core-Collapse Supernovae
Hajime Kawahara, Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, Kazuhiro Hayama, Kei Kotake, ApJ
867, 2 (2018)
 8. X-ray study of the double radio relic Abell 3376 with Suzaku
I. Urdampilleta, H. Akamatsu, F. Mernier, J. S. Kaastra, J. de Plaa, T. Ohashi, Y.
Ishisaki, H. Kawahara, A&A 618, A74 (2018)
 9. Systematic Search for Rings around Kepler Planet Candidates: Constraints on
Ring Size and Occurrence Rate
Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, AJ, 155, 206 (2018)
 10. Discovery of Three Self-lensing Binaries from Kepler
Hajime Kawahara, Kento Masuda, Morgan MacLeod, David W. Latham, Allyson Bieryla,
Othman Benomar, AJ 155, 144(2018)
 11. High-Resolution Spectroscopic Detection of TiO and Stratosphere in the Day-
side of WASP-33b
Stevanus K. Nugroho, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Takayuki
Kotani, Akito Tajitsu, AJ 154,221 (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawahara Hajime, Masuda Kento	4. 巻 157
2. 論文標題 Transiting Planets Near the Snow Line from Kepler. I. Catalog	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 218 ~ 218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab18ab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masuda Kento, Kawahara Hajime, Latham David W., Bieryla Allyson, Kunitomo Masanobu, MacLeod Morgan, Aoki Wako	4. 巻 881
2. 論文標題 Self-lensing Discovery of a 0.2 M White Dwarf in an Unusually Wide Orbit around a Sun-like Star	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L3 ~ L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab321b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masuda Kento, Winn Joshua N., Kawahara Hajime	4. 巻 159
2. 論文標題 Mutual Orbital Inclinations between Cold Jupiters and Inner Super-Earths	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab5c1d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masataka Aizawa, Hajime Kawahara, Siteng Fan	4. 巻 896
2. 論文標題 Global Mapping of an Exo-Earth using Sparse Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8d30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawahara Hajime	4. 巻 894
2. 論文標題 Global Mapping of the Surface Composition on an Exo-Earth Using Color Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 58 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab87a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawahara and Masuda	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Transiting Planets near the Snow Line from Kepler. I. Catalog	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Everett Schlawin, Teruyuki Hirano, Hajime Kawahara, Johanna Teske, Elizabeth Green, Benjamin V. Rackham, Jonathan Fraine, Rafia Bushra	4. 巻 156
2. 論文標題 Back to "Normal" for the Disintegrating Planet Candidate KIC 12557548 b	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aaeb32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hajime Kawahara, Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, Kazuhiro Hayama, Kei Kotake	4. 巻 867
2. 論文標題 A Linear and Quadratic Time-Frequency Analysis of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae57b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 I. Urdampilleta, H. Akamatsu, F. Mernier, J. S. Kaastra, J. de Plaa, T. Ohashi, Y. Ishisaki, H. Kawahara	4. 巻 618
2. 論文標題 X-ray study of the double radio relic Abell 3376 with Suzaku	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201732496	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hajime Kawahara, Kento Masuda, Morgan MacLeod, David W. Latham, Allyson Bieryla, Othman Benomar	4. 巻 155
2. 論文標題 Discovery of three self-lensing binaries from Kepler	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 the Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aaaaaf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Stevanus K. Nugroho, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Takayuki Kotani, Akito Tajitsu	4. 巻 154
2. 論文標題 High-resolution Spectroscopic Detection of TiO and a Stratosphere in the Day-side of WASP-33b	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 the Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa9433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, Yasushi Suto	4. 巻 155
2. 論文標題 Systematic Search for Rings around Kepler Planet Candidates: Constraints on Ring Size and Occurrence Rate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 the Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aab9a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Madoka Itahana, Motokazu Takizawa, Hiroki Akamatsu, Reinout J. van Weeren, Hajime Kawahara, Yasushi Fukazawa, Jelle S. Kaastra, Kazuhiro Nakazawa, Takaya Ohashi, Naomi Ota, Huub J. A. Rottgering, Jacco Vink, Fabio Zandanel	4. 巻 69
2. 論文標題 Suzaku and Chandra observations of the galaxy cluster RXC J1053.7+5453 with a radio relic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publication of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 Transiting Planets near the Snow Line
3. 学会等名 From protoplanetary disks through planetary system architecture to planetary atmospheres and habitability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 Transiting exoplanet survey by micro satellites
3. 学会等名 Nikko Japan - Latin America Academic Conference 2018 in Nikko (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 小型衛星によって第二の太陽系発見をめざす系外惑星探査計画: LOTUS
3. 学会等名 2018年度宇宙科学技術連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 超小型衛星による長周期トランジット惑星探査(LOTUS)
3. 学会等名 超小型衛星利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 High Dispersion Spectroscopy for Exoplanet Characterization
3. 学会等名 Symposium on Planetary Sciences 2019 (SPS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 How to find an Earth analog and a solar-system analog in the world of exoplanets
3. 学会等名 JpGU 2018, B-A001 Astrobiology session
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Kawahara
2. 発表標題 Finding long period objects around snowline
3. 学会等名 Planet Formation beyond Snowlines, Tokyo, Japan, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 河原 創	4. 発行年 2018年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 288
3. 書名 系外惑星探査	

〔産業財産権〕

〔その他〕

REACH: information for open use http://secondearths.sakura.ne.jp/reach/
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------