

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01247

研究課題名(和文)系外惑星の軌道・表層進化とそのリモートセンシングへの応用

研究課題名(英文)Orbital and surface evolution of exoplanets and its application to remote-sensing

研究代表者

須藤 靖 (SUTO, Yasushi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90183053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：すでに5000個以上発見されている系外惑星に対して、単なる統計的信頼度の向上にとどまらない新たな研究テーマの開拓に繋がる可能性を持つ萌芽的な研究を行った。具体的には、トランジット惑星周りのリングの探索、大循環モデルによる系外惑星の気候シミュレーションと系外惑星系の自転・公転による周期変動を用いたリモートセンシングの方法論提案、星震学を用いた系外惑星の自転周期および自転傾斜角決定、原始惑星系円盤に埋もれた惑星から生まれる多重惑星系の安定性、階層的重力3体系の力学的安定性と連星ブラックホールの兆候の理論予測などである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

系外惑星はそのわかりやすさという意味において、一般市民がもっとも興味をもつ天文学的テーマである。のみならず、それらのどこかに存在しているであろう生命の兆候を検出することは、科学におけるもっとも基礎的かつ高いインパクトを持つ挑戦的課題である。本研究課題は、最終的には宇宙における生命の普遍性という究極の問いにつながるはずの、一連の基礎的かつより現実的なテーマを設定し、それらに対して現時点で何がどこまで可能であるのかを明確に提示したという意味において、学術的な意義の高さは言うまでもなく、より長い時間スケールで見た将来の科学に向けて重要な社会的な意義をもつものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Since more than 5000 exoplanets have been discovered so far, it is highly desired to explore qualitatively different, pioneering research areas. We attempted a variety of unique approaches including search for exo-rings around transiting planets, Global Circulation Model simulation of earth-twins and its applicability to future remote-sensing of terrestrial planets, determination of rotation periods and inclination of planetary spin using asteroseismology, fate and stability of multi-planetary systems emerged from observed proto-planetary disks, dynamical stability of hierarchical three-body systems and theoretical prediction of the signature of inner binary black-holes.

研究分野：Astrophysics

キーワード：系外惑星 リモートセンシング 大気大循環モデル 天体力学 バイオシグニチャー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1995年に主系列星の周りに初めて惑星が発見されて以来、系外惑星研究は観測的にも理論的にも驚くべき発展を遂げてきた。特にすでに検出総数が約五千個に達した当時、単に従来の方法を踏襲していたずらに数を増やすような研究にとどまることなく、原始惑星系円盤からの惑星系形成、惑星の力学進化と軌道移動、惑星系の力学的安定性、惑星の表層環境進化とバイオシグニチャーの同定といった、より具体的な視点にたち新たな方法論の開拓が期待されていた。

2. 研究の目的

具体的に以下の5つのテーマを選び、(1)から(3)で主星と惑星の自転軸、惑星系の公転軸に着目した惑星系の形成・進化モデルを構築、それを考慮しつつ(4)でシミュレーションを行い、それを用いて(5)でリモートセンシングによる惑星表層、さらにはバイオシグニチャー観測可能性を探るというステップを踏むことで、惑星系の角運動量進化とその観測的帰結の探求を研究の目的として設定した。

- (1) 自転公転角に着目した天体力学的数値シミュレーションによる惑星移動シナリオの検証
- (2) 星震学を用いた主星の自転軸傾斜角の決定とその統計解析
- (3) トランジット惑星の周りのリング探索と惑星自転軸の推定
- (4) 大循環モデルによる系外惑星系の気候シミュレーション
- (5) 系外惑星の自転・公転による周期変動を用いたリモートセンシング

3. 研究の方法

(1)についてはALMAの観測データを初期条件とする惑星移動の計算コードを新たに開発した。(2)はKeplerのデータを用いて、共同研究者であるOthman Benomar氏が開発したコードによって星震学解析を行った。(3)は惑星リング探索とその統計的検定を行うコードを独自に開発した。(4)は研究分担者である石渡正樹氏が開発してきた大気大循環モデルを用いてシミュレーションを実行した。(5)は研究分担者である河原創氏が提案した方法論に基づいた計算コードを完成させ、実際の地球のデータを用いて検証を行った。

4. 研究成果

(1)に関しては、以下の3つの具体的な研究を行った。

1A: 数値シミュレーションにもとづく原始惑星系円盤回転軸と主星自転軸のなす角度の理論予言

現在までに100個以上の系外惑星系に対して、主星自転軸と惑星公転軸のなす角度が測定されている。そのうち3割程度は、その角度が30度以上ずれていることが知られている。その起源として、原始惑星系円盤誕生時の主星自転軸とガス円盤の軌道回転軸がどのような分布をしているかを、粒子法に基づく流体力学シミュレーションを用いて系統的に調べた。誕生した原始星は質量膠着して成長するにしたがって、周りの円盤の角運動量の方向に整列することが示された。その結果、原始星の誕生時に円盤の公転軸に対してほぼランダムに分布していた自転軸は、質量膠着が終わる頃には、ほとんどが約20度以下で整列することを発見した。

1B: 逆行星周円盤の形成シナリオの提唱

近年のALMA望遠鏡による高解像度の観測によって、回転軸が互いに傾いた原始惑星系円盤を

持つ若い連星系が多数発見されている。さらには、大質量原始星連星 IRAS 16547-4247 の個々の原始星に付随する原始惑星系円盤が互いに逆回転している可能性も報告されている。このような回転軸が互いに傾いた円盤や逆回転する円盤の形成過程を明らかにするため、原始惑星系円盤の形成進化 3 次元シミュレーションを行い、乱流分子雲コア中で形成される原始惑星系円盤の回転軸の時間進化を調べた。その結果、原始星連星を周回する 3 つ目の原始星に付随する原始惑星系円盤が進化の途中で逆回転することを発見した。これは、内側の原始星連星がその周囲に作る周連星系円盤からの質量降着を通じて引き起こされる現象であり、原始星の捕獲や磁場の効果といった複雑な物理過程なしに、流体力学的なガスの力学的進化だけから逆回転する円盤が誕生する新たなシナリオである。

1C: 原始惑星系円盤に埋もれた惑星から生まれる多重惑星系の進化とその多様性

ALMA 望遠鏡による高解像度観測によって、原始惑星系円盤に多くのギャップ構造が存在することが明らかとなっている。それらは形成途上の惑星によって生まれたとするのがもっとも有力な可能性である。惑星系の多様性の起源が初期条件によるものなのか、あるいはその後のカオス的な重力進化によるものなのかはまだ定説がない。特に、従来の理論計算は、人為的な初期条件から出発しており、その結果として、複数惑星系の不安定性が過大評価されている可能性がある。そこで我々は、ALMA で観測された HL Tau 円盤のリングの位置に惑星が存在すると仮定し、惑星と円盤相互作用を考慮した惑星移動シミュレーションを行い、最終的に生まれる惑星系の性質を計算した。その結果、ほとんどの場合、従来の研究とは異なり 100 億年程度の長期間安定な系が生まれることがわかった。さらに、我々は円盤のギャップに埋もれた原始惑星の質量を推定する従来の方法論を精査し、その質量に応じて 2 つの異なる解が存在する場合があることを発見した。現時点での観測データだけでは、この 2 つの解の縮退を解くことは難しいものの、それらの力学的進化の結果として予想される多重惑星系のアーキテクチャーに興味深い多様性が生まれることを発見した。

(2) に関しては、以下の 3 つの具体的な研究を行った。

2A: 星震学を用いた恒星の自転傾斜角測定における系統誤差の評価

星震学の枠組みの中では、観測データから作られたパワースペクトルの解析を通じて我々から見た恒星の自転傾斜角が測定可能である。これをトランジット惑星系に適用することで恒星の自転と惑星の軌道の方向の関係を推定することができる。しかし自転が遅いなど恒星のある特定の条件下ではその測定が正確ではない可能性が指摘されている。我々はシミュレーションを通して様々な条件(恒星の自転速度、S/N、観測時間など)の元で自転傾斜角測定の精度と確度を調べ、正確な測定に必要な条件を導いた。

2B: ケプラー探査機の精密測光データと星震学を用いた星の自転周期推定値の信頼性

ケプラー探査機の測光観測データから数万個の星の自転周期が推定されている。これとは独立に、星の脈動を用いる星震学から数百個の主系列星に対する自転周期が推定されている。星の表面活動と黒点の運動、さらには表面と内部の微分回転の効果を考えれば、前者の測光的周期と後者の星震学的周期とは必ずしも一致する必要はない。そこで、今回は星震学的周期が推定されている 92 個の主系列星に対して、Lomb-Scargle periodogram、自己相関関数、wavelet を用いてそれらの測光的周期を再解析し、星震学的周期と系統的に比較することで、お互いの推定値の信頼性を評価するとともに、微分回転に対する制限を議論した。特に 2A で導かれた条件と組み合わせることで、特に惑星をもつ系の自転周期に関して、測光的推定値と星震学的推定値が整数倍異なる例を複数発見し、それが黒点の分布に起因する可能性を指摘した。これは、系外惑星の自

転周期推定における両者の相補的な重要性を示すものである。

2C: 黒点による星の光度変化の解析的モデル

2B で示したように、ケプラー探査機に代表される高精度光度関数によって数多くの星の自転周期が推定されている。そのほとんどは、表面上の黒点が自転にともなって見かけ上の光度変動を生み出すためである。しかし今までそのような黒点の分布から出発した光度曲線の解析的モデル化はなされていなかった。今回、黒点のサイズが星に比べて十分小さいという近似のもとで、星の微分回転の効果をもとりにんだ光度曲線の解析的表式を導出し、精密な光度曲線データを用いれば微分回転パラメータを決定できることを示した。

(3)については、長周期トランジット惑星に対する氷リングの探査、短周期トランジット惑星に対する岩石リングの探査、の2つの研究を行ってきたが、前者は本研究課題申請時に研究を開始し、この課題が発足した段階ですでに結果が得られていたため、ここでは後者についてのみ述べる。ただし、これらはいずれも、我々のグループ以外では行われたことのない挑戦的かつ独創的な成果であることは強調しておきたい。

3A: Kepler 衛星データを用いた岩石リングの系統的探索

Kepler 衛星の高精度測光データを用いて、短周期系外惑星の周りのリングの系統的な探索をおこなった。まず、全ての惑星とその候補の中から、仮に土星と同様のサイズのリングが存在すれば検出できるだけの高精度の光度曲線を持つ168の系を選んだ。次に、光度曲線を適切に処理したのちに、惑星食モデルおよびリング付き惑星食モデルでそれぞれのデータを解釈した。結果として、29の系にてリングモデルが統計的に有意であることが判明した。そこで、それらの系については、さらなる個別な議論をおこない信号の原因特定をおこなった。そして、詳細な議論ののち、その中で惑星リング由来でありそうなものは一つもないと結論づけた。信号が有意にうからなかった系に対しては惑星リングのサイズへの上限を与えた。加えて、この上限の値を用いて、例えば太陽系外惑星が土星サイズのリングをもつ確率が15%以下であることを示した。ただし、これらはいずれも短公転周期のホットジュピターと呼ばれる系外惑星にたいするものであるため、岩石リングに対する制限であると解釈すべきである。

(4)に関しては、以下の研究を行った。

4A: 雲の影響を考慮した系外惑星の光度曲線解析

将来の直接撮像によって系外地球型惑星の表層を知るために、点光源としての惑星からいかに情報を引き出し得るかの方法論を確立することは本質的である。惑星の表面が非一様な場合に反射光が自転公転に伴って時間変動することを用いた方法論が研究されてきたが、気候力学に基づいた雲の影響は取り入れられてこなかった。我々は

3次元大気大循環モデルを用いて自転傾斜角が異なる地球の雲構造を表現し、観測シミュレーションを行った。この光度曲線データに周波数変調から自転傾斜角を推定する方法論を適用した結果、砂漠のような少雨地域が周期的に観測される特殊なケースに限り、同様の推定が可能であると示唆された。

4B: 陸惑星表面における液体の水の存在条件に関する調査

地球型系外惑星の一種として考えられている陸惑星気候に関する数値計算を実施した。陸惑星とは惑星大気表層系の水の量が平均水深にして10mのオーダーの惑星を指す。これまでに、地球のように水を豊富に持つ惑星よりも少量の水しか存在しない陸惑星の方が広い太陽定数範囲で惑星表面に液体の水を保持される可能性が指摘されており、陸惑星は系外惑星における生命

存在可能性を考える上で重要な研究対象である。我々は惑星表面全体にバケツモデルを適用した陸惑星設定を用いた太陽定数増加実験を実施した。その結果、陸惑星においては、水を豊富に持つ惑星において液体の水が存在できる全球平均入射放射フラックスの上限値 300 W/m^2 、および過去の研究で陸惑星に関して得られていた上限値 415 W/m^2 を大きく上回る入射フラックス 550 W/m^2 まで液体の水が保持されることが示された。この結果は、従来考えられていたものよりも広い太陽定数範囲で陸惑星上に液体の水が存在しうることを意味するものであり、将来の系外惑星探査において陸惑星は重要なターゲットになることを示唆するものである。

4C：系外惑星気候多様性探索のための大気大循環モデル開発

地球型の系外惑星気候多様性を探索するための惑星大気循環モデルの放射スキームの開発を進めた。k-分布法を用いた惑星大気用の放射スキームの開発を行い、大気量が表面気圧にして数 hPa となる薄い大気から数万 hPa となる厚い大気までの放射計算を同一の枠組みで計算することが可能となった。更にその放射スキームを用いて金星大気の鉛直 1 次元放射対流平衡構造を求めた。その計算結果と観測で得られた温度分布を比較することにより、比熱の高度依存性を考慮する必要があることが示された。この成果は今後の系外惑星大気モデリングを進める上での指針の 1 つとなるものである。

(5)に関しては、以下の研究を行った。

5A：惑星マッピングの理論的拡張

将来の宇宙直接撮像で系外惑星表面の二次元マッピングをする手法、Spin-Orbit Mapping の理論的拡張を行った。具体的には 正則化項のスパース化。これにより陸大陸分布がより明確に再現された。 スペクトルとマップの同時推定の定式化。これまで単色もしくは単成分でのマッピング手法のみであったが、今回、行列分解の手法を用いてスペクトルとマップの同時推定ができるようになった。 動的マッピング手法の確立。雲のような時間変動する成分を推定できる手法を確立した。同時に完全ベイズ的なマッピング手法も作った。 スペクトル+マッピングのスパース化。 のスパース化をこれにも適用した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 40件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 22件）

1. 著者名 Takaishi Daisuke, Tsukamoto Yusuke, Kido Miyu, Takakuwa Shigehisa, Misugi Yoshiaki, Kudoh Yuki, Suto Yasushi	4. 巻 963
2. 論文標題 Formation of Unipolar Outflow and Protostellar Rocket Effect in Magnetized Turbulent Molecular Cloud Cores	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 20 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad187a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 TAKAHASHI Yoshiyuki O., HAYASHI Yoshi-Yuki, HASHIMOTO George L., KURAMOTO Kiyoshi, ISHIWATARI Masaki, KASHIMURA Hiroki	4. 巻 102
2. 論文標題 Dependence of the Radiative-Convective Equilibrium Structure of the Lower Atmosphere of Venus on the Thermodynamic Model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 5 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2024-001	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 TAKAHASHI Yoshiyuki O., HAYASHI Yoshi-Yuki, HASHIMOTO George L., KURAMOTO Kiyoshi, ISHIWATARI Masaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Development of a line-by-line and a correlated k-distribution radiation models for planetary atmospheres	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 39 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2023-003	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 Hayashi Toshinori, Suto Yasushi, Trani Alessandro A.	4. 巻 958
2. 論文標題 Constraining the Binariness of Black Hole Candidates: A Proof-of-concept Study of Gaia BH1 and Gaia BH2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acf4f6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Shijie, Kanagawa Kazuhiro D., Suto Yasushi	4. 巻 932
2. 論文標題 Architecture of Planetary Systems Predicted from Protoplanetary Disks Observed with ALMA. II. Evolution Outcomes and Dynamical Stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 31 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac68de	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suto Yasushi, Sasaki Shin, Nakagawa Yuta, Benomar Othman	4. 巻 74
2. 論文標題 Analytic model for photometric variation due to starspots on a differentially rotating star	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 857 ~ 876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac039	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 Hayashi Toshinori, Trani Alessandro A., Suto Yasushi	4. 巻 939
2. 論文標題 Dynamical Disruption Timescales and Chaotic Behavior of Hierarchical Triple Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8f48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lu Yuting, Benomar Othman, Kamiaka Shoya, Suto Yasushi	4. 巻 941
2. 論文標題 Meta-analysis of Photometric and Asteroseismic Measurements of Stellar Rotation Periods: The Lomb-Scargle Periodogram, Autocorrelation Function, and Wavelet and Rotational Splitting Analysis for 92 Kepler Asteroseismic Targets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 175 ~ 175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9906	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuwata Atsuki、Kawahara Hajime、Aizawa Masataka、Kotani Takayuki、Tamura Motohide	4. 巻 930
2. 論文標題 Global Mapping of Surface Composition on an Exo-Earth Using Sparse Modeling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 162 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac64a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Toshinori、Trani Alessandro A.、Suto Yasushi	4. 巻 943
2. 論文標題 Lagrange versus Lyapunov Stability of Hierarchical Triple Systems: Dependence on the Mutual Inclination between Inner and Outer Orbits	5. 発行年 2023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/acac1e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suto Yasushi、Sasaki Shin、Aizawa Masataka、Fujisawa Kotaro、Kashiyama Kazumi	4. 巻 75
2. 論文標題 Modeling photometric variations due to a global inhomogeneity on an obliquely rotating star: Application to light curves of white dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac093	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 Kawahara Hajime、Kawashima Yui、Masuda Kento、Crossfield Ian J. M.、Pannier Erwan、van den Bekerom Dirk	4. 巻 258
2. 論文標題 Autodifferentiable Spectrum Model for High-dispersion Characterization of Exoplanets and Brown Dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 31 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac3b4d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Murakami Naoshi、Yoneta Kenta、Kawai Kenya、Kawahara Hajime、Kotani Takayuki、Tamura Motohide、Baba Naoshi	4. 巻 163
2. 論文標題 Polarization-based Speckle Nulling Using a Spatial Light Modulator to Generate a Wide-field Dark Hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 129 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac3510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kasagi Yui、Kotani Takayuki、Kawahara Hajime、Tajiri Tomoyuki、Muto Takayuki、Aizawa Masataka、Fujii Michiko S.、Hattori Kohei、Masuda Kento、Momose Munetake、Ohsawa Ryou、Takita Satoshi	4. 巻 259
2. 論文標題 Dippers from TESS Full-frame Images. II. Spectroscopic Characterization of Four Young Dippers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac4e8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuwata Atsuki、Kawahara Hajime、Aizawa Masataka、Kotani Takayuki、Tamura Motohide	4. 巻 930
2. 論文標題 Global Mapping of Surface Composition on an Exo-Earth Using Sparse Modeling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 162 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac64a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harakawa Hiroki、Takarada Takuya、Kasagi Yui、Hirano Teruyuki、Kotani Takayuki、Kuzuhara Masayuki、Omiya Masashi、Kawahara Hajime、et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 A super-Earth orbiting near the inner edge of the habitable zone around the M4.5?dwarf Ross?508	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 904 ~ 922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Aizawa Masataka, Kawana Kojiro, Kashiya Kazumi, Ohsawa Ryou, Kawahara Hajime et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 Fast optical flares from M-dwarfs detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1069 ~ 1094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Currie Thayne, Lawson Kellen, Schneider Glenn, Lyra Wladimir, Wisniewski John, Grady Carol, Guyon Olivier, Tamura Motohide, Kotani Takayuki, Kawahara Hajime et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 751 ~ 759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01634-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takaishi Daisuke, Tsukamoto Yusuke, Suto Yasushi	4. 巻 73
2. 論文標題 A new formation scenario of a counter-rotating circumstellar disk: Spiral-arm accretion from a circumbinary disk in a triple protostar system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L25 ~ L30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab084	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 Wang Shijie, Kanagawa Kazuhiro D., Suto Yasushi	4. 巻 923
2. 論文標題 Architecture of Planetary Systems Predicted from Protoplanetary Disks Observed with ALMA. I. Mass of the Possible Planets Embedded in the Dust Gap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 165 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2d95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Shin, Suto Yasushi	4. 巻 73
2. 論文標題 Disentangling the stellar inclination of transiting planetary systems: Fully analytic approach to the Rossiter-McLaughlin effect incorporating the stellar differential rotation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1656 ~ 1668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab102	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 Aihara Hiroaki et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 247 ~ 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab122	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 Hayashi Toshinori, Wang Shijie, Suto Yasushi	4. 巻 890
2. 論文標題 A Strategy to Search for an Inner Binary Black Hole from the Motion of the Tertiary Star	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 112 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6de6	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 Wang Shijie, Kanagawa Kazuhiro D., Hayashi Toshinori, Suto Yasushi	4. 巻 891
2. 論文標題 Architecture of Three-planet Systems Predicted from the Observed Protoplanetary Disk of HL Tau	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 166 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab781b	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 Takaishi Daisuke, Tsukamoto Yusuke, Suto Yasushi	4. 巻 492
2. 論文標題 Star-disc alignment in the protoplanetary discs: SPH simulation of the collapse of turbulent molecular cloud cores	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5641 ~ 5654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa179	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 Hayashi Toshinori, Suto Yasushi	4. 巻 897
2. 論文標題 Radial-velocity Variation of a Tertiary Star Orbiting a Binary Black Hole in Coplanar and Noncoplanar Triples: Short- and Long-term Anomalous Behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab97ad	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Yuta, Kodama Takanori, Ishiwatari Masaki, Kawahara Hajime, Suto Yasushi, Takahashi Yoshiyuki O., Hashimoto George L., Kuramoto Kiyoshi, Nakajima Kensuke, Takehiro Shin-ichi, Hayashi Yoshi-Yuki	4. 巻 898
2. 論文標題 Obliquity of an Earth-like Planet from Frequency Modulation of Its Direct-imaged Lightcurve: Mock Analysis from General Circulation Model Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9eb8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aizawa Masataka, Suto Yasushi, Oya Yoko, Ikeda Shiro, Nakazato Takeshi	4. 巻 899
2. 論文標題 Search for Alignment of Disk Orientations in Nearby Star-forming Regions: Lupus, Taurus, Upper Scorpius, Ophiuchi, and Orion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 55 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba43d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okabe Taizo, Oguri Masamune, Peirani Sebastien, Suto Yasushi, Dubois Yohan, Pichon Christophe, Kitayama Tetsu, Sasaki Shin, Nishimichi Takahiro	4. 巻 496
2. 論文標題 Shapes and alignments of dark matter haloes and their brightest cluster galaxies in 39 strong lensing clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2591 ~ 2604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1479	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, Masuda Kento	4. 巻 900
2. 論文標題 Bayesian Dynamic Mapping of an Exo-Earth from Photometric Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba95e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aizawa Masataka, Kawahara Hajime, Fan Siteng	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 22 ~ 22
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Toshinori, Suto Yasushi	4. 巻 907
2. 論文標題 Unveiling the Architecture of a Pulsar - Binary Black Hole Triple System with Pulsar Arrival Time Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abcec6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aizawa Masataka, Masuda Kento, Kawahara Hajime, Suto Yasushi	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 ~ 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 該当する

1. 著者名 Okabe Taizo, Nishimichi Takahiro, Oguri Masamune, Peirani Sebastien, Kitayama Tetsu, Sasaki Shin, Suto Yasushi	4. 巻 478
2. 論文標題 Projected alignment of non-sphericities of stellar, gas, and dark matter distributions in galaxy clusters: analysis of the Horizon-AGN simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1141 ~ 1160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1068	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 Kamiaka Shoya, Benomar Othman, Suto Yasushi	4. 巻 479
2. 論文標題 Reliability of stellar inclination estimated from asteroseismology: analytical criteria, mock simulations and Kepler data analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 391 ~ 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1358	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 Ueda Shutaro, Kitayama Tetsu, Oguri Masamune, Komatsu Eiichiro, Akahori Takuya, Iono Daisuke, Izumi Takumi, Kawabe Ryohei, Kohno Kotaro, Matsuo Hiroshi, Ota Naomi, Suto Yasushi, Takakuwa Shigehisa, Takizawa Motokazu, Tsutsumi Takahiro, Yoshikawa Kohji	4. 巻 866
2. 論文標題 A Cool Core Disturbed: Observational Evidence for the Coexistence of Subsonic Sloshing Gas and Stripped Shock-heated Gas around the Core of RX J1347.5?1145	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aadd9d	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 Kamiaka Shoya, Benomar Othman, Suto Yasushi, Dai Fei, Masuda Kento, Winn Joshua N.	4. 巻 157
2. 論文標題 The Misaligned Orbit of the Earth-sized Planet Kepler-408b	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab04a9	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 Suto Yasushi, Kamiaka Shoya, Benomar Othman	4. 巻 157
2. 論文標題 Asteroseismic Determination of the Stellar Rotation Period of the Kepler Transiting Planetary Systems and its Implications for the Spin?Orbit Architecture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 172 ~ 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab0f33	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, Kuroda Takami, Takiwaki Tomoya, Hayama Kazuhiro, Kotake Kei	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 ~ 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 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 15件/うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Dynamics of a tertiary body orbiting an inner black-hole binary
3. 学会等名 RESCEU-NBIA workshop on gravitational-wave sources (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 From N to 3
3. 学会等名 The 14th RESCEU symposium "From Large to Small Structures in the Universe" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Dynamics of a triple system comprising an inner binary black hole in a mutually inclined orbit
3. 学会等名 Kavli-IAU symposium 382 "Complex Planetary Systems II" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Lagrange and Lyapunov stabilities of hierarchical triple systems
3. 学会等名 the 10th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Signatures of an inner binary black hole with a tertiary orbiting star
3. 学会等名 the World Copernican Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 From unknown knowns to known knowns: cases of dark baryon and exo-ring
3. 学会等名 Continuous Challenges for X-ray Astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Spin-orbit architecture of planetary systems with the Rossiter-McLaughlin effect and asteroseismology
3. 学会等名 JSPS Planet2/RESCEU workshop on exoplanets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Spin-orbit architecture of planetary systems
3. 学会等名 From Protoplanetary Disks through Planetary System Achitecture to Planetary Atmospehers and Habitability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Universe unveiled through holes of aluminum plates
3. 学会等名 Wide-Field Sky Survey of the Universe: From the Past to the Future of Astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Lessons from Mars and Earth for future explorations of bio-signatures from earth-like planets
3. 学会等名 Climates of Terrestrial Planets in Various Solar Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 Unveiling the presence of an inner binary black-hole from the tertiary orbiting star
3. 学会等名 The 9th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤靖
2. 発表標題 宇宙の構造形成と暗黒成分：過去、現在、そして未来
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会 シンポジウム「観測的宇宙論の進展」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤靖
2. 発表標題 安全保障と学問の自由に関する天文学会声明と世代間ギャップ
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 物理と社会 シンポジウム「軍事研究と物理と社会－研究の自由を考える」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasushi Suto
2. 発表標題 GCM simulation of a second earth: cloud pattern and the obliquity determination from future direct imaging
3. 学会等名 the 8th KIAS workshop on cosmology and structure formation (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 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 2018年

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

〔図書〕 計10件

1. 著者名 須藤靖	4. 発行年 2024年
2. 出版社 朝日新聞出版	5. 総ページ数 288
3. 書名 宇宙する頭脳	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2022年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 268
3. 書名 20世紀科学論文集 現代宇宙論の誕生	

1. 著者名 須藤靖	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝日新聞出版	5. 総ページ数 232
3. 書名 宇宙は数式でできている なぜ世界は物理法則に支配されているのか	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2021年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 224
3. 書名 ものの大きさ 第2版	

1. 著者名 須藤 靖、伊勢田 哲治	4. 発行年 2021年
2. 出版社 河出書房新社	5. 総ページ数 344
3. 書名 科学を語るとはということか 増補版	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2019年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 320
3. 書名 解析力学・量子論 第2版	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 240
3. 書名 一般相対論入門 改訂版	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2018年
2. 出版社 毎日新聞出版	5. 総ページ数 248
3. 書名 情けは宇宙のためならず	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2018年
2. 出版社 亜紀書房	5. 総ページ数 184
3. 書名 この空のかなた	

1. 著者名 須藤 靖	4. 発行年 2019年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 240
3. 書名 不自然な宇宙 宇宙はひとつだけなのか？	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	石渡 正樹 (ISHIWATARI Masaki) (90271692)	北海道大学・理学研究院・教授 (10101)	
研究 分担者	河原 創 (KAWAHARA Hajime) (90649758)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	

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
---------	---------