

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04049

研究課題名（和文）A New Planet in the Solar System? Investigating the Role of Undiscovered Planets on the Formation and Evolution of the Kuiper Belt in the Outer Solar System

研究課題名（英文）A New Planet in the Solar System? Investigating the Role of Undiscovered Planets on the Formation and Evolution of the Kuiper Belt in the Outer Solar System

研究代表者

ソフィアリカフィカ パトリック（Sofia Lykawka, Patryk）

近畿大学・総合社会学部・准教授

研究者番号：30549853

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：太陽系外縁部の遠方のカイパーベルトと呼ばれる領域には謎の天体が多数存在する。本研究では、遠方のカイパーベルトに未発見惑星があると仮定し、それらの影響をコンピュータシミュレーションで検証した。従来モデルでは説明できなかった遠方カイパーベルト天体の特性を、このモデルにより再現することに成功した。地球の1.5～3倍質量で、太陽から200～800 au離れた軌道を持ち、傾斜角30度の惑星なら、現在の観測結果とほぼ一致する。本研究結果により、太陽系外縁部に未発見の惑星が存在する可能性が示唆される。今後、こうした惑星を実際に観測する際の指標となることが期待される。（1 auは、太陽から地球までの平均距離）

研究成果の学術的意義や社会的意義

海王星の軌道を超えるカイパーベルト天体は、太陽系における惑星形成の名残であると考えられているため、重要な存在である。従って、カイパーベルトの形成は、太陽系とその惑星（地球を含む）がどのように、どのような条件で形成されたかを理解するのに役立つ。本研究では、カイパーベルトのより遠方領域を分析した結果、太陽系外縁部に未発見の惑星が存在すれば、遠方カイパーベルトの特性がよく説明できると分かった。この惑星の影響を考慮することで、太陽系形成に関する新たな洞察を得ることができる。また、未発見の惑星の存在を予測しているため、今後の日本や国際的な天体観測によって、太陽系内に新惑星などが発見される可能性がある。

研究成果の概要（英文）：There are many mysterious objects in the region of the outer solar system known as the distant Kuiper Belt. In this study, we assumed that there is an undiscovered planet in the distant Kuiper belt and verified its effects by computer simulations. The model succeeded in reproducing the main properties of distant Kuiper Belt objects that could not be explained by conventional models considering only the known 8 planets. A hypothetical planet with 1.5 to 3 times the mass of the Earth, an orbit 200 to 800 au away from the sun, and an inclination of 30 degrees would be in close agreement with current observations. The results of this research suggest the possibility of the existence of an undiscovered planet in the outer solar system. It is expected to serve as an indicator for the actual observation of such a planet in the future. (1 au is the average distance from the Sun to the Earth)

研究分野：地球惑星科学

キーワード：太陽系 太陽系外縁天体 カイパーベルト 未知の惑星 solar system trans-Neptunian objects Kuiper Belt undiscovered planets

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

約 45 億年前に太陽系が形成された時、出来上がった惑星の数が現在知られている 8 個だけであったとは限らない。地球と同じくらいの重さの惑星がもっと多く存在していた可能性はある。そうした惑星のうち、私たちが現在はその存在を知らないものも生き残っているものはあるだろうか？ 太陽から約 30 au※1 の距離にある海王星、その外側にあるカイパーベルト天体 (TNO) ※2 は、太陽系外縁部※3 で惑星が形成された際の名残である。特に太陽から 50 au 以遠の遠方カイパーベルトにある TNO の軌道は、その領域に存在していた可能性のある惑星の存在を調べるための信頼できる痕跡となる。遠方のカイパーベルト天体はそうした仮想的な惑星から継続的に重力摂動を受け、独特な軌道構造を持つ可能性がある。そうした特徴は、我々の初期分析によって明らかになった遠いカイパーベルトにおける以下の 4 つの興味深い未解明の性質と関連している可能性がある：

- ① 海王星との様々な平均運動共鳴※4 に捕獲された、始原的であり安定した共鳴 TNO の集団
- ② 海王星の重力の影響が及ばない位置に軌道を持ち、近日点距離※5 が 40 au を超える離脱 TNO の集団
- ③ 45 度以上の高い軌道傾斜角※6 を持つ TNO の集団
- ④ セドナ※7 のように説明の難しい特異な軌道を持つ極端な TNO の集団

現在の代表的なカイパーベルトおよび太陽系の形成モデルでは上記の性質を一貫して説明できない。したがって、遠方のカイパーベルトはおそらく 4 つの巨大惑星 (木星、土星、天王星、海王星) や、太陽系初期に存在したものの現在は失われた仮想的な巨大惑星からの摂動※8 のみによって形成されたものではない。現存する未知の惑星を含む先行研究のモデルでは、これらの性質を説明することはできない。特にいわゆる「プラネット・ナイン」(第 9 惑星) モデルはカイパーベルトの軌道構造をうまく説明できているとは言えない。今や多くの研究がプラネット・ナインの研究動機となった TNO の角度方向の整列の妥当性を否定している。本研究では、太陽系外縁部に未発見の惑星があると仮定し、遠方のカイパーベルトの性質を説明できるようになると仮説を立てて検証を行った。以降、「カイパーベルト惑星」※9 と呼ぶ。

2. 研究の目的

本研究は次のような基本的な疑問に答えることを目的とする。

- (1) もしも遠いカイパーベルトに未発見の惑星があるとすれば、それは上記①-④の性質を一貫して説明できるだろうか？ 現在のカイパーベルトの軌道構造はどのような重力の影響を受けるのか？
- (2) カイパーベルト惑星は、約 45 億年前に形成中の太陽系にもどのような影響を与えたのか？

3. 研究の方法

本研究では、仮定の未発見の惑星が遠方カイパーベルトの形成に与える影響を調べた。特に約 45 億年前の初期太陽系に関し、4 つの巨大惑星と 1 つのカイパーベルト惑星、そして資源的な遠方カイパーベルトをコンピュータモデル化した小天体円盤を考慮して初期太陽系を再現した。このモデルは数値シミュレーションを実施した。私達はカイパーベルト惑星の軌道と質量を幅広く検証し、数値シミュレーションの結果を観測結果と比較した。数値シミュレーションではまず太陽系形成から 45 億年後の遠方カイパーベルトを再現した後、その結果を遠方の TNO 集団の比率や現在知られている極端な軌道を持つ TNO と比較した。また、太陽系大規模観測 (OSSOS) のサーベイシミュレータを使い、私たちのシミュレーション計算の結果に観測的なバイアスを与え、観測結果と直接比較できるようにした。

本研究で実施された数値シミュレーションには、研究代表者 (ソフィア リカカ パトリック) の研究室に設置された研究用 PC および国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) が運用する共同利用計算機「計算サーバ」が使用された。

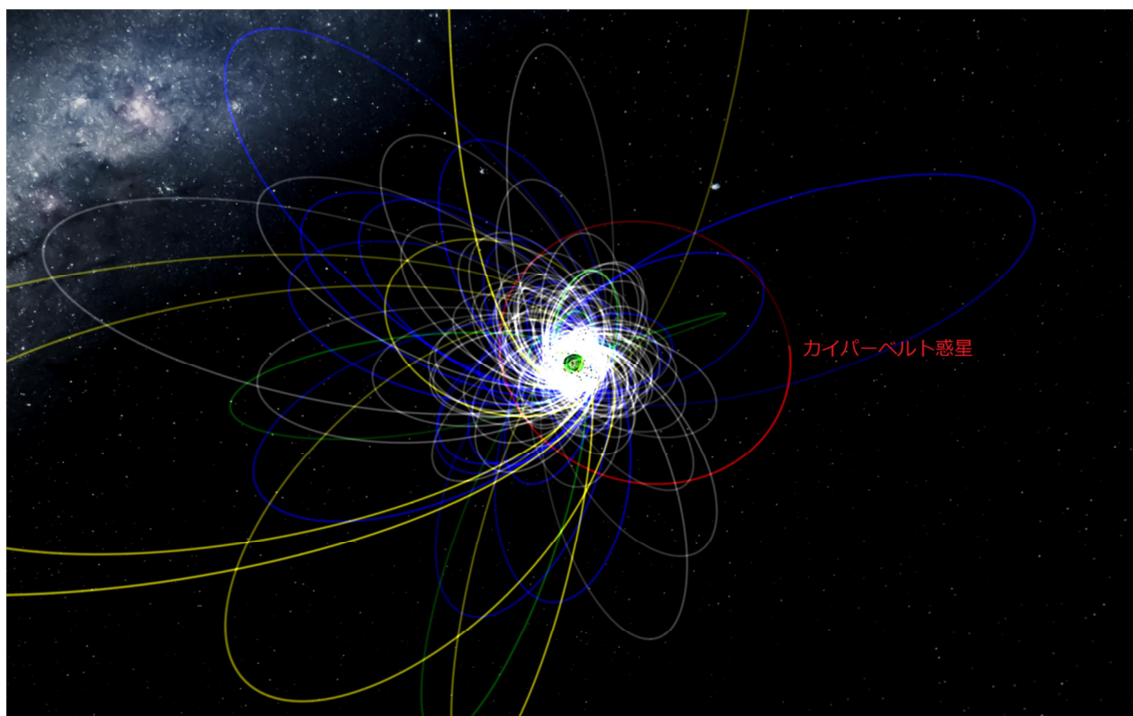
4. 研究成果

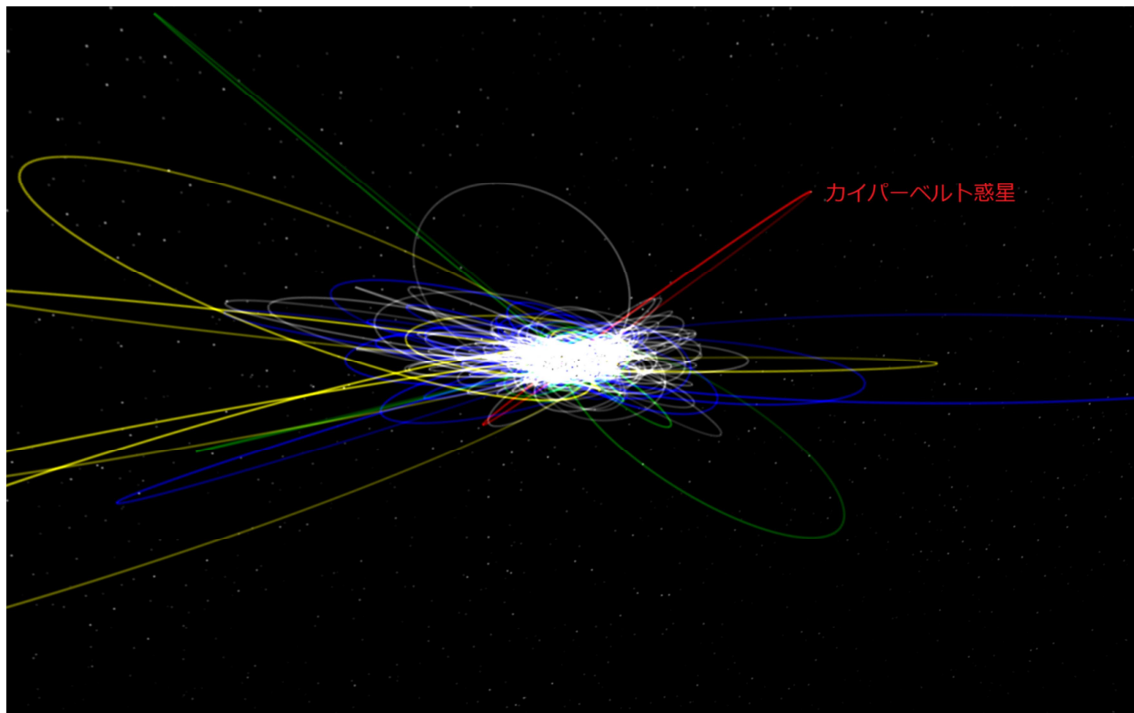
本研究の主な結果とその意味は次のように纏める。まず、広範な数値シミュレーションに基づき、私達は4つの巨大惑星のみを考慮した標準的モデルが分離TNO、高い軌道傾斜角を持つTNO、そして極端なTNOのいずれをも説明できないことを実証した。次に私たちはカイパーベルト惑星を含むモデルを使い、その結果は観測とほぼ一致した。このカイパーベルト惑星を含む数値モデルは遠方カイパーベルトの①-④の四つの性質を説明できる可能性がある。さらに、カイパーベルト惑星による摂動は太陽系史を通して海王星以遠領域の軌道構造を形成してきた。よって、安定な共鳴にあるTNO、近日点距離が大きい離脱TNO、高い軌道傾斜角を持つTNO、およびその極端なメンバーは、こうしたカイパーベルト惑星の特性を制約する可能性がある。詳細な結果は下記の通り：

- 我々は遠方のカイパーベルトにおいて数十億年にわたり安定した共鳴TNOを同定した（性質①）。そして、地球的なカイパーベルト惑星が今もこのような安定した共鳴天体の集団を説明するためにカイパーベルト惑星は ~ 200 au以遠に位置する必要があることを発見した。
- カイパーベルト惑星が距離 $\sim 200-300$ au、 $\sim 200-500$ au、あるいは $\sim 200-800$ auの離心軌道で進化すれば、離脱TNOを説明できることがわかった（性質②）。
- 質量が地球の1.5倍を超え、軌道が30度傾いた地球的なカイパーベルト惑星は、高い軌道傾斜角を持つTNOを説明できる（性質③）。また、太陽系内を逆行する軌道を持つTNOや彗星（例、ハレー型彗星）の源となるような、遠方にあり高い軌道傾斜角を持つ天体も供給し得る。
- 最後に、この未発見のカイパーベルト惑星は現在知られている極端なTNO（セドナ含む）を説明し得る奇妙な軌道を持つTNOを生み出せることを発見した（性質④）。

結論すれば、地球の1.5倍から3倍の質量を持ち、太陽から200-500 au（または200-800 au）以内に位置し、30度の傾斜軌道を持つ未発見の地球的な惑星 $\times 10$ があれば、以下の天体の分布を説明できる：海王星の影響が十分に小さい離脱TNO、45度以上の軌道傾斜角を持つTNO、遠方のカイパーベルトで極めて特異な軌道で進化する離脱TNOまたは高軌道傾斜角TNOの集団。さらに、本研究が提案するカイパーベルト惑星は安定した共鳴TNOの存在と調和的である。また、カイパーベルト惑星による摂動は、海王星による重力散乱を強く受けるTNOのように50 auを超えたところにある他の天体の形成を阻害するものでもない。従ってこのカイパーベルト惑星モデルは遠方のカイパーベルトの分布を説明できるし、現代の観測結果と矛盾するものではない（以下の図も参照）。

今回の研究結果は太陽系外縁部の端に未発見の惑星が存在する可能性を示唆するものである。このシナリオはまた、近日点距離が大きい、または大きな軌道傾斜角を持つ未知のTNOが ~ 100 auを超える領域に存在し得ることも予測する。こうした天体の集団はカイパーベルト惑星の存在を観測的に検証する際の指標となり得る。もしもこのような天体が実在し、それが実際に発見されるとしたら、それは将来の天文学的観測によってのはずである。太陽系のこうした領域にある天体の軌道構造をより詳細に知ることによって、太陽系外縁部での惑星の形成や太陽系全体の進化についてより深い理解が得られるだろう。





図：遠方に存在するカイパーベルトの軌道構造（上：上からの様子。下：横からの様子）。カイパーベルト惑星が存在する場合は、離脱 TNO（青い軌道）、高い軌道傾斜角を持つ TNO（緑の軌道）、極端な TNO（黄色の軌道）を一貫して説明できる。この図でカイパーベルト惑星は太陽から 200 から 500 au 程度の距離で、その軌道は地球の軌道面に対して 30 度程度か傾いていると予想される。また、カイパーベルト惑星を考慮しても海王星との安定した共鳴にある TNO を含む他の TNO（白い軌道）の形成は阻害されない。

用語解説

- ※1 au : 1 au は、太陽から地球までの平均距離で、約 1 億 5 千万 km。太陽から海王星の距離は約 30 au。
- ※2 カイパーベルト : 太陽系の中で、海王星以遠に存在する小天体が集中している領域。遠方のカイパーベルトとは 50 au 以遠の領域を指す。カイパーベルトに存在する天体はカイパーベルト天体または太陽系外縁天体という（省略：TNO）。
- ※3 太陽系外縁部 : 巨大惑星である木星、土星、天王星、海王星とそれ以降で構成される領域。
- ※4 平均運動共鳴 : 天体の周りを公転する 2 つの天体の公転周期の比が、2:1 や 2:3 など簡単な整数比の状態のことを指す。例えば冥王星と海王星は 2:3 の平均運動共鳴にある。
- ※5 近日点距離 : 天体の軌道上で太陽までの最短距離。
- ※6 軌道傾斜角 : 天体の赤道面と軌道面とがなす角度。
- ※7 セドナ : 遠方カイパーベルトに存在する天体。非常に遠い軌道と大きな近日点距離（~76 au）を持っている。
- ※8 摂動 : 主要な力による運動が、他の副次的な力によって乱される現象。
- ※9 カイパーベルト惑星 (Kuiper Belt Planet) : 遠方のカイパーベルトに存在すると仮定された地球的な惑星（本研究）。
- ※10 地球的な惑星 : 質量が地球程度である惑星。本研究では質量が地球の 1 倍から 3 倍の間にある惑星であると定義した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Lykawka Patryk Sofia、Ito 伊藤 Takashi 孝士	4. 巻 166
2. 論文標題 Is There an Earth-like Planet in the Distant Kuiper Belt?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 1~20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-3881/aceaf0	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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Patryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 太陽系外縁に新惑星の存在の究明
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会 - Virtual
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Patryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 Investigating the orbital structure of the distant Kuiper Belt: Evidence for an undiscovered planet?
3. 学会等名 54th Annual Meeting of the AAS Division for Planetary Sciences (DPS) - Virtual (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Patryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 遠いカイパーベルトの軌道構造の究明：未知の惑星の存在？
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会 - Virtual
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ptryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 太陽系外縁に新惑星の存在の究明
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会 - Virtual
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ptryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 Investigating the existence of a new planet in the far outer solar system
3. 学会等名 53rd Annual Meeting of the AAS Division for Planetary Sciences (DPS) - Virtual (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ptryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 遠いカイパーベルトの軌道構造の究明：未知の惑星の存在？
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ptryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 遠方のカイパーベルト軌道構造の究明：未知の惑星の存在？
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Patryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)
2. 発表標題 遠方のカイパーベルト軌道構造の究明:地球クラスの未知の惑星は存在する?
3. 学会等名 日本惑星科学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

太陽系外縁部に未知の惑星（カイパーベルト惑星）が存在する可能性があるという論文を一部のマスコミに取り上げていただきました。詳細は、以下「KUIPER BELT PLANET カイパーベルト惑星」のウェブページまでご参照ください：
<https://sites.google.com/site/patryksofiailykawka/home/kbp>

また、カイパーベルト惑星に関するリリースは下記の通りです：

近畿大学のニュースリリース
 シミュレーションで太陽系外縁部に未発見の惑星がある可能性を示唆 世界初、海王星以遠の天体の特性を再現することに成功
<https://www.kindai.ac.jp/news-pr/news-release/2023/08/039803.html>

近畿大学のニュースリリース（英語版）
 Possible Existence of Earth-Like Planet Predicted in the Outskirts of the Solar System -- Kindai University
<https://www.kindai.ac.jp/english/news/news-release/2023/09/039941.html>

researchmapのプレスリリース
 シミュレーションで太陽系外縁部に未発見の惑星がある可能性を示唆 世界初、海王星以遠の天体の特性を再現することに成功
https://researchmap.jp/press_releases/press_releases/view/633014/af5bf73b682ca54a75b5b5f44f3579b1

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