

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740335

研究課題名(和文)小惑星帯にある天体の不規則衛星への進化

研究課題名(英文)Evolution of Mainbelt Asteroids into Irregular Satellites

研究代表者

樋口 有理可(Higuchi, Arika)

東京工業大学・理工学研究科・流動研究員

研究者番号：90597139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：木星や土星に加え、火星を周回する不規則衛星の起源について調べた。まず、周太陽軌道にある小天体が周惑星軌道へ移行する第1段回として、円軌道惑星による一時捕獲軌道を考えた。一時捕獲とは、小天体が惑星近傍に一定時間以上滞在する軌道である。簡単な近似と仮定をおくことで、周太陽軌道と周惑星軌道の関係を明快に解析解で与えることに成功した。そして、その解析解の結果を確認する粒子軌道の数値計算を行った。粒子は、解析解が予測する、捕獲されうるパラメタ範囲を初期条件とした。結果、数値計算は解析解をよく再現することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the dependence of the temporary capture of asteroids by a planet (ie, Jupiter, Saturn, or Mars) on their original heliocentric semimajor axes through analytical arguments and numerical orbital integrations in order to discuss the origins of irregular satellites of giant planets. An analytical investigation reveals the intrinsic dynamics of these dependences and gives boundary semimajor axes for capture. The numerical calculations support the idea of deriving analytical formulae and confirm their dependence.

研究分野：惑星科学、天体力学

キーワード：不規則衛星 小惑星

1. 研究開始当初の背景

(1) 不規則衛星とその起源

不規則衛星とは太陽系の4大惑星(木星・土星・天王星・海王星)の周囲に発見されている衛星で、規則衛星と異なる性質をもつ。規則衛星とは惑星に近い場所をほぼ同一平面内を円に近い軌道で周回する衛星で、その中心の惑星が形成される際に付随的に形成された周惑星円盤中の固体成分が集積することで形成された。一方、不規則衛星は規則衛星の外側を楕円軌道で周回する衛星で、惑星の自転方向に対して逆行するものも多い。このような軌道から、不規則衛星は、元は太陽を中心に周回していた小天体がある時惑星に重力的に捕獲されたものと考えられ(図2)、4大惑星形成直後の力学的・物質的情報を保持する貴重な天体である。

(2) 不規則衛星の起源に関する理論的研究

現在はニースモデルに基づいた研究が世界的に精力的に行われている。ニースモデルとはニース天文台が中心となって構築した大胆な太陽系形成モデルで、2005年に発表された。このモデルは、海王星より外側の微惑星(惑星の材料となった小天体)が内側の惑星領域に降り注ぐことで、現在の4大惑星の配置や後期重爆撃(約40億年前に地球や月に多くの小天体が衝突したとされるイベント)などを統合的に説明する。ニースモデルによると不規則衛星はこの微惑星が惑星に捕獲されたものと考えられている。

(3) 不規則衛星の観測的研究

アメリカ航空宇宙局と欧州宇宙機関が共同で打ち上げた探査機カッシーニが2004年に土星に接近した。カッシーニは地上観測では得られなかった土星の衛星系に関する詳細な観測データを取得し、土星をはじめとする衛星系の起源に関する理論研究を加速させた。一方、天王星・海王星は地球から遠いた

め、木星・土星に比べて不規則衛星の発見されている個数や観測データは少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木星や土星といった巨大惑星が保持する不規則衛星の起源を解明することである。巨大惑星のもつ不規則衛星の起源が小惑星帯にある可能性を数値計算と解析的手法を用いて調べ、小惑星分布と不規則衛星の分布の関係を明らかにする。そうして得られた関係に、現在の観測で得られる不規則衛星や小惑星のデータを代入することで、惑星形成後期から現在にかけての小天体の力学的・物質的分布を予測し、太陽系全体の初期の姿を解明する。また、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡を用いて天王星・海王星の不規則衛星や小惑星を観測し、新たなデータを得る。その観測結果を理論モデルに還元し、太陽系全体の起源の解明につなげる。

以上の目的を2段階に分け、以下の順で明らかにする。

[1] 円軌道惑星を仮定し、小惑星が惑星の一時捕獲軌道(緩い束縛状態)に入り長期に安定に存在する確率を、単純化したモデルのもとで明らかにする。そして、捕獲前の周太陽軌道と、捕獲後の惑星周回軌道に関連づける。主に、捕獲前の周太陽軌道長半径と、捕獲後の軌道の順行/逆行の関係を明らかにする。

[2] [1]の数値計算にもう1個惑星を追加する。2個目の惑星が与える摂動が結果にどのような影響を明らかにする。

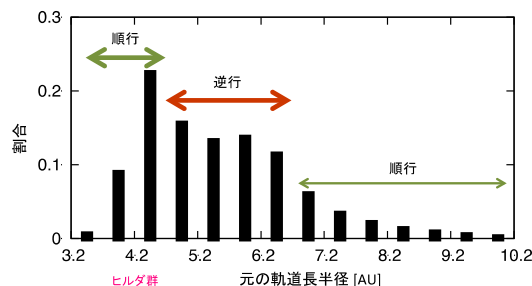
3. 研究の方法

まず解析幾何を用いて、円軌道惑星に一時捕獲される条件を解析的に導く。そしてそれを捕獲後の軌道要素と関連づける。具体的には、惑星による小天体の一時捕獲条件と、元

の小天体軌道（周太陽軌道）と、捕獲後の軌道（周惑星軌道）との関係を、解析的手法を用いて調べる。小天体は周太陽軌道から惑星のラグランジュ点 L1, L2 を通り、周惑星軌道に移行すると仮定する。また簡単のため、軌道の移行は小天体が軌道の遠日点または近日点にいるときに起こると仮定する。この仮定は、小天体は周惑星軌道の遠点または近点において軌道移行するという仮定を含む。数値計算では、円制限 3 体問題として太陽、惑星、粒子の軌道進化を計算する。多数の粒子の軌道計算を現実的な計算時間で行うために、独自の軌道計算コードを開発する。また、第 2 の惑星の摂動が結果に影響を及ぼすかどうかを検証するため、制限 4 体問題の数値計算も行う。解析解・数値計算の両手法の結果を併せ、惑星の内側・外側にある小惑星が対象の惑星まで輸送され、その後不規則衛星に進化する確率とそのパラメタ依存性を明快な数式で表す。その結果を、まず木星系に応用する。すでにある観測結果と比較し、現在の小惑星帯にある天体と不規則衛星を関連付ける。

4 . 研究成果

(1) いくつかの仮定をおくことにより、解析幾何を用いて元の小天体軌道と捕獲後の軌道を明快に関連付けることに成功した。また、一時捕獲が可能となる小天体軌道要素の範囲を示すことができた。例えば、軌道傾斜角が約 9 度以上の天体は木星に一時捕獲されることはない。ほか、惑星から遠く離れた軌道長半径を持つ天体は順行で、惑星と近い軌道長半径を持つ天体は逆行で一時捕獲されるという関係を得た。これらの結果は別に行った数値計算の結果と合致する。



図：木星に一時捕獲された小天体の周太陽軌道長半径の分布。木星より内側のヒルダ群領域から順行軌道で捕獲されるものが多いことを示す。

(2) 太陽、木星、土星の 3 天体から重力を受けて運動する粒子(小惑星)の軌道の進化を計算した。これまで制限 3 体問題で近似されることが多かった粒子の衛星軌道への捕獲を制限 4 体問題として扱った結果、その差が有意にあることを示した。具体的には、制限 4 体問題では木星回りの力学的平衡点のうち、対称と近似されていた 2 点の非対称性が強調され、木星の衛星軌道の捕獲は外側よりも内側からのほうが容易に起こることがわかった。すなわち、木星の内側にある小惑星が捕獲される可能性を支持している。ただ、彗星のような離心率の高い天体についてはまだ十分な計算はなく、外側からの供給を否定しているわけではない。

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 1 件)

[1] 樋口有理可、井田茂(東京工業大学)
 “Temporary Capture of Asteroids by a Planet: Dependence of Prograde/Retrograde Capture on Asteroids' Semimajor Axes”
 The Astronomical Journal, Volume 151, Issue 1, id. 16, (2016) 査読あり
 DOI:
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/151/1/16>

[学会発表](計 3 件)

[1] 樋口有理可、小久保英一郎

“Formation and Disruption of the Oort

cloud by Stellar Encounters”

ACM(小惑星、彗星、流星)会議 (新潟県新潟市) 2012年5月

[2] 樋口有理可、井田茂

“Outward Transport and Capture of Main Belt Asteroids by Jupiter and Saturn”

ACM(小惑星、彗星、流星)会議 (ヘルシンキ/フィンランド) 2014年6月

[3] 樋口有理可、井田茂

“Temporary Capture of Asteroids by a Planet: Dependence of Prograde/Retrograde Capture on Asteroids' Semimajor Axes”
Lunar and Planetary Science Conference (ヒューストン/アメリカ) 2016年3月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 有理可 (HIGUCHI, Arika)
東京工業大学 大学院理工学研究科
流動研究員
研究者番号：90597139

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者
なし