



# Observational Studies for Dynamical and Collisional Evolutions of Small Solar System Bodies

Terai, Tsuyoshi

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2011-09-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5180

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005180>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 寺居 剛  
博士の専攻分野の名称 博士（理学）  
学 位 記 番 号 博い第 5180 号  
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の日付 平成 23 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

Observational Studies for Dynamical and Collisional Evolutions of Small Solar System Bodies（太陽系小天体の力学進化および衝突進化に関する観測的研究）

審 査 委 員

主 査 教 授 伊藤 洋一  
教 授 大槻 圭史  
教 授 吉岡 祥一

太陽系小天体は、太陽系初期の惑星形成段階に、原始惑星系円盤内で形成され、惑星形成の材料になった微惑星の生き残りである。しかし、それらは必ずしも始原的な天体というわけではなく、様々な力学進化、衝突進化、組成変化を経験している。本論文では太陽系小天体の起源と進化を解明し、太陽系の歴史を明らかにすべく、2種類の太陽系小天体に関する観測的研究を行った。

第1章は、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の衝突進化に関する研究である。小惑星とは太陽を中心とする軌道を持ち、揮発成分の放出が確認されない小天体（特に主に岩石で構成されているもの）である。火星軌道と木星軌道の間、特に日心距離2.1-3.3 AUの領域には小惑星が密集しており、この領域を小惑星帯（メインベルト）、この領域に存在する小惑星をメインベルト小惑星と呼ぶ。これらの多くは黄道面（地球の公転面）に沿った軌道を公転しており、円形に近い軌道を持つ。この特徴は、メインベルト小惑星は原始惑星系円盤内で形成された微惑星が起源であることが反映されている。しかし、メインベルト小惑星は太陽系初期に存在した微惑星からは大きさや組成などが変化していると考えられている。その最も大きな要因が小惑星どうしの衝突破壊現象である。小惑星は傾度の差はあるものの、形成されてから現在に至るまで多数回の衝突現象を経験しており、中には粉々に砕けてしまうものもある。メインベルト小惑星がどのような衝突進化を経てきたのかを知るための最も大きな手掛かりがサイズ分布（直径 vs. 個数）である。小惑星の個数は天体直径の小さなものほど多く、一般的にサイズ分布はべき乗則で表わされるが、このべき指数の値は小惑星の破壊強度（天体質量の半分が破片として放出されるために必要な単位質量当たりのエネルギー量で定義される）で決定されることが知られている（強度が大きいほどサイズ分布の傾きは浅くなる）。すなわち、小惑星の破壊強度が分かればそれらの衝突進化を理解することができる。

室内実験や数値シミュレーションを用いた研究により、小惑星の破壊強度は直径100m程度よりも小さな天体は直径とともに強度が減少するのに対し、直径数100m以上に天体では直径とともに強度は増加する。しかし、破壊強度が衝突速度によってどのように変化するのは分かっていなかった。特に衝突速度が10km/sec前後の超高速衝突は太陽系で比較的良好に起こるにもかかわらず、その強度曲線はまだ知られていない。

そこで我々は軌道傾斜角（黄道面に対する軌道面の傾き）が大きな小惑星の平均的な衝突速度が10km/sec程度であることに着目し、それらのサイズ分布を調べることで、それらの破壊強度を求めるというアイデアの下、観測を行った。観測には口径8.2mのすばる望遠鏡と広視野撮像装置Suprime-Camを用い、広い視野を効率良く探査するという手法を用いた。その結果、直径が1km前後の微小メインベルト小惑星616個を検出した。それらからバイアスを除去したのち、サイズ分布の傾きを算出したところ、軌道傾斜角が15°以上の天体の方が浅い（べき指数の小さい）ことがわかった。さらに大きなサイズの小惑星に関しても先行研究によって得られている小惑星カタログを用いてサイズ分布の比較を行ったが、上と同様の結果を得た。このことから、超高速衝突下では、小惑星のサイズ分布

は浅い傾きである、すなわち衝突強度が増すということが示唆される。この結果はメインベルト小惑星の衝突進化を研究する上で考慮すべき重要な要素である。

第2章は木星から海王星までの巨大惑星の周りを回る不規則衛星に関する研究である。不規則衛星 (irregular satellites) は、大きな軌道長半径と、高い軌道離心率および高い（黄道面に対する）軌道傾斜角を持ち、その大半が逆行軌道である。そのため、それらは周惑星円盤内での集積過程によって形成されたものではなく、元は太陽周りを公転していた小天体が惑星の Hill 圏に捕獲されたものであると考えられている。不規則衛星が捕獲された時期は太陽系形成過程の最終段階と推測されているが、それらの運搬経路や軌道エネルギーの散逸メカニズムはよく分かっていない。不規則衛星の起源と捕獲過程を解明することにより、惑星形成後の原始惑星系円盤の環境や、微惑星の軌道進化に関する理解を深めることができる。

不規則衛星の軌道要素は高い精度で決定されているものの、天体形状や自転周期など基本的な物理量が不明な天体が多い。そこで我々はすばる望遠鏡主焦点カメラSuprime-Camを用いて、天王星不規則衛星の光度変化を調べるための可視光観測を行なった。天王星周辺の領域0.25平方度を3日間、計17時間に亘って観測し、XVI Caliban、XX Stephano、XVII Sycorax、XVIII Prosperoの4天体について、先行研究よりも精度の高い光度変化曲線が得られた。周期解析の結果、それらは2-15時間の自転周期を持つことが分かった。

さらに、SycoraxとProsperoについて位相曲線（太陽-天体-観測者のなす角による天体の光度の変化）の傾きを求めたところ、それぞれ0.03mag/deg、0.14mag/degという値が得られた。この値を他の太陽系小天体（外縁天体、ケンタウルス族天体、木星トロヤ群、巨大惑星の規則衛星、小惑星）と比較したところ、前者は高軌道傾斜角のケンタウルス天体やトロヤ群と、後者は低軌道傾斜角のケンタウルス天体や高軌道傾斜角の外縁天体と一致することが分かった。この結果から、この2衛星は海王星以遠の外縁部ではなく、もっと内側の領域で形成された微惑星を起源とする可能性が高いという結論が得られた。

氏名	寺居 剛		
論文 題目	Observational Studies for Dynamical and Collisional Evolutions of Small Solar System Bodies (太陽系小天体の力学進化および衝突進化に関する観測的研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	伊藤 洋一
	副査	教授	大槻 圭史
	副査	教授	吉岡 祥一
	副査		

印

要 旨

本論文は、メインベルト小惑星と不規則衛星という2種類の太陽系小天体に対して観測的な研究を行ったものである。

第1章は、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の衝突進化に関する研究である。小惑星とは太陽を中心とする軌道を持ち、揮発成分の放出が確認されない岩石質の小天体のことである。火星軌道と木星軌道の間、特に日心距離 2.1-3.3 天文単位の領域には小惑星が密集しており、この領域を小惑星帯、この領域に存在する小惑星をメインベルト小惑星と呼ぶ。これらの多くは黄道面を公転しており、円形に近い軌道を持つ。このことは、メインベルト小惑星が原始惑星系円盤内で形成された微惑星を起源とすることを意味している。しかし、メインベルト小惑星の大きさや組成などは、太陽系初期に存在した微惑星のそれらからは変化していると考えられている。その最も大きな要因は小惑星同士の衝突破壊現象である。小惑星は頻度の差はあるものの、形成されてから現在に至るまで何回もの衝突現象を経験しており、中には粉々に砕けてしまうものもある。メインベルト小惑星がどのような衝突進化を経てきたのかを知るためには、直径個数分布を求めることが有効であると言われている。小惑星は天体直径の小さなものほど多く、一般的に直径個数分布はべき乗則で表わされる。このべき指数の値は小惑星の破壊強度で決定されることが知られている。例えば、強度が大きいほど直径個数分布の傾きは浅い。すなわち、小惑星の直径個数分布を求めることにより、その破壊強度を推定することができ、小惑星の衝突進化を理解することができる。

室内実験や数値シミュレーションを用いた研究により、直径 100m 程度よりも小さな小惑星は直径が大きくなるとともに破壊強度が減少するのに対し、直径数百 m 以上の天体では直径とともに強度は増加することがわかってきた。しかし、衝突速度によって破壊強度がどのように変化するかを調べた研究は少ない。特に衝突速度が毎秒 10km 前後の超高速度衝突は太陽系内で比較的良好に起こるにもかかわらず、その速度領域での破壊強度はまだ知られていない。

そこで本論文では黄道面に対する軌道傾斜角が大きな小惑星に着目した。このような天体の平均的な衝突速度は毎秒 10km 程度と大きいと考えられている。こうした小惑星の直径個数分布を調べることで、超高速度衝突下での破壊強度を推定することができる。観測には口径 8.2m のすばる望遠鏡と可視光広視野撮像装置 Suprime-Cam を用いて、広い視野を効率良く探査した。同一視野を時間をおいて 2 度撮影することにより、小惑星を移動天体として検出できる。その結果、直径が 1km 前後の微小メインベルト小惑星を 616 天体検出した。これらの大半は新しく発見したものである。ここから様々な観測バイアスを除去したところ、軌道傾斜角が 15° 以上の天体は直径個数分布の傾きが浅いことがわかった。すなわち、軌道傾斜角の大きな小惑星では、直径の小さな天体は相対的に少ない。直径の大きな小惑星に関しても小惑星カタログを用いて直径個数分布の比較を行い、上と同様の結果を得た。このことから、超高速度衝突下では、小惑星の直径個数分布は浅い傾きである、すなわち衝突強度が増すということが結論できた。

氏名	寺居 剛
----	------

第2章は、巨大惑星の周りを回る不規則衛星に関する研究である。不規則衛星は、木星から海王星までの惑星を公転するものが発見されている。これらは大きな軌道長半径と、高い軌道離心率、黄道面に対する高い軌道傾斜角を持ち、その大半が逆行軌道を回る。そのため、それらは周惑星円盤内での集積過程によって形成されたものではなく、元は太陽を公転していた小天体が惑星のヒル圏に捕獲されたものであると考えられている。不規則衛星が捕獲された時期は太陽系形成過程の最終段階と推測されているが、それらの形成場所や運搬経路、軌道エネルギーの散逸メカニズムなどはよく分かっていない。不規則衛星の起源と捕獲過程を解明することにより、惑星形成後の原始惑星系円盤の環境や、微惑星の軌道進化に関する理解を深めることができる。

本論文は不規則衛星の表面特性を他の太陽系小天体と比較することにより、その起源を探ることを目的とした。太陽系小天体の表面特性は、アルベドやカラーなどの様々な観測量から推定することができる。いくつかの不規則衛星のカラーについては既に観測で求められているが、カラーは宇宙風化などによっても変化してしまう。一方で、位相曲線と呼ばれる観測量は、小天体表面のレゴリス層の特性を反映するものと考えられている。太陽-天体-観測者のなす角を位相角という。小天体は位相角が 1 度以下の時に急激に増光することが知られている。この増光を位相角の関数として表したものを位相曲線という。数多くのメインベルト小惑星に対しては、位相曲線が詳しく調べられており、その表面のレゴリス層の形状が推定されている。一方で、不規則衛星に対しては、位相曲線は観測的にほとんど得られていない。位相曲線を測定するには、天体の自転による光度変動を正確に把握し、中間の明るさを見積もる必要がある。そこで、すばる望遠鏡主焦点カメラ Suprime-Cam を用いて可視光観測を行い、天王星不規則衛星の光度変動を測定した。天王星周辺の領域 0.25 平方度を 3 日間、計 17 時間にわたって観測し、Caliban、Stephano、Sycorax、Prospero の 4 天体について、先行研究よりも精度の高い光度変動曲線を得た。周期解析の結果、それらは 2-15 時間の自転周期を持つことが分かった。次に Sycorax と Prospero について周期解析から得られた中間等級から位相曲線を求め、それぞれ位相角一度あたり 0.03 等級、0.14 等級の増光を示すという結果が得られた。前者は高軌道傾斜角のケンタウルス天体やトロヤ群の位相曲線と、後者は低軌道傾斜角のケンタウルス天体や高軌道傾斜角の外縁天体の位相曲線と一致する。

巨大惑星は形成された位置から移動したとする仮説に基いた最新の太陽系進化モデルによると、大きな軌道傾斜角を持つ外縁天体は海王星軌道よりも内側の領域で形成され、惑星の重力摂動によって現在の位置まで運搬されたと考えられている。同様に、高軌道傾斜角のケンタウルス天体もより内側の領域から移動したものと考えることができる。これらの仮説を考慮すると、Sycorax は天王星軌道よりも内側の約 5-10 天文単位の領域で形成された微惑星が起源で、木星や土星の重力摂動を受けて外側に移動し、天王星に捕獲されたと推測できる。一方で、Prospero は天王星軌道付近の領域で形成された微惑星が起源で、その後天王星に捕獲されたと推測することができる。このように、天王星の不規則衛星は多様な起源を持つ天体の集団であると結論付けられる。

以上のように、本論文では申請者によって行われてきた可視光広域観測による太陽系小天体の起源に関する成果がまとめられている。高黄緯小惑星と不規則衛星という特異な太陽系小天体に着目し、直径個数分布と位相曲線を用いてその形成と進化の過程を明らかにしたものであり、太陽系の形成について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者の寺居剛は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。