

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	石澤 祐弥
論文題目	Uranian satellite formation from a circumplanetary disk generated by a giant impact (巨大衝突により生じた周惑星円盤からの天王星の衛星形成)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、天王星の衛星系の起源に関する「巨大衝突説」の検証をN体 (重力多体) 計算を用いて行い、天王星への巨大衝突およびその後の周惑星円盤の進化を考慮することで、実際に天王星の衛星系が形成可能であることを示したものである。</p> <p>天王星は太陽系惑星の中で唯一、自転軸が横倒しになって公転している惑星である。またその周りを回る主な衛星系も、天王星と共に公転面に対して横倒しとなっている。この衛星系の起源についてこれまでに複数のシナリオが提案されてきたが、いずれも衛星系の形成過程と天王星系の傾きを整合的に説明することが困難であり、その起源は未解決のままであった。そこで申請者は、天王星に地球サイズの天体が衝突して天王星の自転軸を傾けるとともに、衝突破片によってその周囲に形成された周惑星円盤内で衛星系が形成されたとする「巨大衝突説」に着目した。このシナリオであれば、衛星系の形成過程と天王星系の傾きを同時に説明できる可能性があるが、これまで巨大衝突過程およびその後の衛星系形成過程に関する数値計算は十分に行われておらず、その妥当性は未検証のままであった。</p> <p>ところが近年になって大型数値計算が可能となったことにより、天王星への巨大衝突過程に関してSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた数値流体計算が複数行われた。これらの先行研究により、衛星系形成に十分な量の衝突破片が天王星の周囲にばらまかれることが示されていた。そこで申請者は、まずこれらの結果を用いて巨大衝突後に衝突破片から形成される周惑星円盤の構造を推定した。ここでは特に、周惑星円盤内の固体物質の面密度分布が、天王星からの距離に対し負の冪関数であることが予想された。次に、周惑星円盤内での固体物質の衝突合体過程について、大量のN体計算を用いたパラメータスタディを行うことで、天王星衛星系が再現できるかを検証した。ここで用いたN体計算コードは、申請者の共同研究者が作成した既存のコードをもとに申請者が本研究用に再構築したものであり、粒子同士の衝突過程の厳密化や並列計算を用いた計算速度の向上などが主な改良点である。また、形成後の衛星系の潮汐軌道進化についても解析的な計算を行い、最終的な衛星系の軌道分布が求められた。以上の計算の結果、ここで用いた周惑星円盤の状況下では天王星衛星系の特徴、特に5大衛星とよばれる巨大衛星の質量・軌道分布を再現することはできないことが示された。主な原因は固体物質の面密度分布が負の冪となっていたことであり、そのため天王星から遠い衛星ほど質量は小さくなり、実際の5大衛星の質量分布とは逆の質量分布を持つ結果となった。この結果は、周惑星円盤内の固体物質の面密度分布が正の冪を持たない限り天王星衛星系を再現することは不可能である、という</p>			

ことを強く示唆している。

申請者は次に、周惑星円盤の熱力学的進化に着目した。天王星への巨大天体衝突は非常に高エネルギーな現象であるため、衝突直後において衝突破片はほぼ全て蒸発していると考えられる。特に衝突破片の大部分を占める氷は完全に蒸発し、凝固するまでに時間がかかる。そのため、ガス状の周惑星円盤が粘性拡散によって広がりながら冷却が進み、円盤外側から順に凝固点を下回り固体の周惑星円盤へと進化していくことが予想される。この円盤進化過程について、申請者は共同研究者らと半解析的な計算を行い、最終的に実現される周惑星円盤の構造を求め、周惑星円盤内の固体物質の面密度分布が正の冪を持つことを示した。さらに、この計算から求めた周惑星円盤の構造をもとに初期条件を設定し直し、新たに衛星系形成過程に関するN体計算を行った。その結果、5大衛星の質量・軌道分布を再現することに成功した。これによって、天王星の衛星系の起源が「巨大衝突説」で説明可能であることが示された。

(論文審査の結果の要旨)

惑星系の形成理論に関しては1960年代頃から長い研究の歴史があり、太陽系さらには太陽系外惑星の形成過程に対して、その大枠を示した標準理論が存在している。一方、その惑星の周りを回る衛星系の形成理論に関しては、2000年代に入る頃からようやく様々な仮説が提案・検証されはじめ、現在も各仮説に対する議論が続けられている。標準理論が存在している惑星系形成理論の場合とは異なり、衛星系形成理論は衛星系ごとに異なるシナリオを適用する必要があると考えられている。その中には、地球の月の起源についての「巨大衝突説」や、木星のガリレオ衛星の起源についての「周惑星円盤説」など、すでに定説となったものもあるが、天王星衛星系の起源のように複数のシナリオが提案されたままで定説が存在しない衛星系も多い。

申請者は、太陽系の惑星の中でも特異な自転軸を持つ天王星の衛星系の起源について研究を行った。天王星衛星系の起源を説明するためには、天王星の自転軸の傾きと、それに沿って傾いた衛星系の形成過程の両方を同時に実現する必要がある。複数の先行研究において、天王星衛星系の形成過程の説明が主に行われてきたが、衛星系全体を傾けるためにはいずれも特殊なポストプロセスを必要としており、決定的なシナリオが提示されるには至っていなかった。そこで申請者が注目したのが、過去にアイデアのみが提案されたものの、数値計算による検証が行われていなかった「巨大衝突説」である。ここ数年の間に、天王星への巨大天体衝突過程に関する数値計算が複数のグループによって行われ、またその一部は申請者の共同研究者らによって行われたこともあり、最新の計算結果をもとに独自の周惑星円盤モデルを構築することができた点に、まずは本論文のオリジナリティがあるといえる。また天王星衛星系の形成過程に関するN体計算は、非常に高精度かつ長時間の数値積分を要求するため、申請者はそれを可能にする計算コードの開発・改良および大型計算機の利用などの計算環境の最適化を行った。こうして完成したコードの信頼性は高く、本論文の成果に直接的に繋がっている。この点は高く評価できる。

本論文の前半の結果は、先行研究から示唆される周惑星円盤構造のもとでは天王星衛星系は再現できない、というものであった。特に先行研究から推定された周惑星円盤内の固体面密度分布が、天王星からの距離に対し負の冪を持っていたことにより、実際の衛星系の質量・軌道分布とは真逆の傾向を持った分布が作られてしまうことを明確に示した点が重要な成果である。しかしこの結果は、天王星衛星系の起源に関する巨大衝突説を単純に棄却するものではない。本結果をうけて申請者は、これまでの巨大衝突説において無視されていた周惑星円盤の進化過程を考慮する必要があることに思い至った。

申請者およびその共同研究者らは、巨大天体衝突直後の周惑星円盤がほぼ完全にガス化しており、その後の熱力学的進化を経ることで周惑星円盤内の固体面密度分布が変化する可能性を指摘した。周惑星円盤の進化過程が半解析的な手法を用いて

計算され、進化後の周惑星円盤の構造、特に固体物質の面密度分布が求められた。最終的に実現される固体面密度分布は巨大天体衝突のパラメータにあまり依存せず、特に固体面密度分布が必ず正の冪を持つことが示された点が非常に重要である。申請者は得られた周惑星円盤の構造のもとで新たにN体計算を行い、天王星衛星系の質量・軌道分布が再現できることを示した。

以上により「巨大衝突説」の妥当性が示され、長年の天王星衛星系の起源の議論に対してひとつの答が提示されたことは、惑星科学分野の研究における重大な成果であると判断できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降