

土星のFリングと羊飼衛星の起源を解明

<研究成果の要旨>

神戸大学大学院理学研究科の兵頭龍樹さん(博士後期課程2年)と大槻圭史教授は、衛星同士の衝突過程のシミュレーション等により、土星のFリングと羊飼衛星の起源を解明しました。主な内容は以下の通りです。

[背景] 最新の衛星形成理論によると、土星衛星系の形成過程最終段階で、土星主要リングの外縁付近に小衛星が複数形成されます。また現在土星の主要リング外縁付近にある小衛星は、密度の高い核を持っていると考えられています。

[結果] 本研究において、核を持つ小衛星同士が主要リング外縁付近で衝突する過程をシミュレーションによって調べた結果、幅広いパラメータ範囲で衛星は部分的に破壊されることがわかりました。生き残った二つの衛星が羊飼衛星となり、間に挟まれた軌道に分布する粒子がFリングになると考えられます。

[意義] 上の結果より、一見特異に見えるFリングと羊飼衛星という系は、土星の衛星系形成の最終段階で自然な副産物として形成されることがわかりました。また本研究の結果は探査機カッシーニが得た観測結果とも整合的です。以上により、本研究は惑星の周りの粒子円盤から衛星系が形成されたという説に、新たな確証を与えたと言えます。

この研究成果は8月18日、Nature Geoscience 電子版に掲載されました。

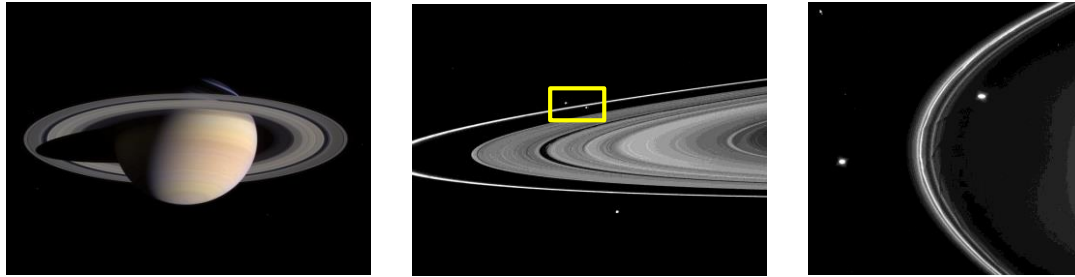
<研究の背景>

土星のリングについて：土星は複数のリングと衛星を持つことで知られています(図1)。普通の望遠鏡でも見ることのできる明るい部分がAリング(外側)とBリング(外側)で、その内側に暗いCリング、Dリングがあります。Eリングは衛星エンケラドスから噴出した微粒子が幅広く広がってできたリングです。Fリングは幅が数万キロメートルに及ぶ主要リングの外側に位置する、幅数100キロメートルの細いリングで、内側にプロメテウス、外側にパンドラという2つの羊飼衛星を持っています。

図1. 土星のリング及びリング近傍の衛星の模式図(NASA/PIA03550)。

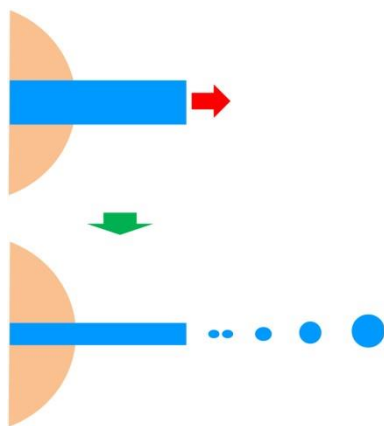


図 2 : 探査機カッシーニが撮影した土星の主要リング及びFリングと羊飼衛星



(左) 土星の主要リング (NASA/PIA06077)。(中) 主要リング外部領域とその外側に位置する細い F リング。画像中央から左上付近 (四角の中) で F リングを挟むように並ぶ二つの衛星は羊飼衛星のプロメテウス (内側) とパンドラ (外側) (NASA/PIA12717)。(右) F リングと羊飼衛星プロメテウス(内側)とパンドラ(外側) (NASA/PIA07712)。中図及び右図で土星は画面外の右方向に位置している。

図 3 : 最新の衛星形成モデルの模式図



土星のリング-衛星系を横から見た模式図。(上) かつて土星の周りには現在のリングより質量の大きなリングがあり、粒子間の衝突や重力作用により外側へ広がっていった。

(下) 土星から十分遠方まで広がると粒子はお互いの重力により合体し衛星が形成され、形成された衛星はさらに外側に移動する。この結果、リングの質量が大きい時に形成されたより外側の衛星ほど大きく、主要リングのすぐ外側では小さな衛星が複数形成される。

F リングは 1979 年パイオニア 11 号によって発見されました。F リングと羊飼衛星はその後、1980 年～1981 年に土星をフライバイした探査機ボイジャー 1 号、2 号や、2004 年に土星に到着し今も土星の周りを回り続ける探査機カッシーニにより詳細に観測されています (図 2) が、どのように形成されたか、その起源はこれまで明らかになっていませんでした。

衛星形成過程の概略 : 一方、巨大惑星の衛星、特に惑星に近い軌道を持つ衛星群の起源に関して、かつて惑星の周りに粒子からなる円盤 (リング) があり、そこから拡散した粒子が集まって衛星が形成された、という説が最近提案されました。土星の場合も、現在より質量の大きなリングがかつてあり、粒子間の衝突や重力作用により外側へ広がっていきま (図 3、上)。土星近くでは土星重力の影響が強く、粒子が衝突しても粒子同士の重力で合体することはできず、リングはリングのままです。土星から十分離れると土星重力が弱く衝突した粒子はお互いの重力で合体できるようになり、衛星が形成されます。

形成された衛星は外側に移動し、粒子の拡散に伴ってリングの質量は減っていきます。

この結果、衛星系形成過程の初期の段階、つまりリングの質量が大きい時に形成された、より外側の衛星ほど大きな質量を持つこととなります。これは、土星や天王星、海王星で、惑星に近い軌道を持つ衛星の質量が、惑星から遠ざかるほど質量が大きくなるという特徴を説明できます。この説によると、衛星系形成過程の最終段階ではリングのすぐ外側に、複数の小さな衛星が、互いに近い軌道を持つように形成されます（図3、下）。

小衛星は核をもつ：探査機カッシーニの観測によると、土星リング外縁近くの小衛星は密度の高い核を持つことが示唆されています。本研究ではリング外縁近くで形成された、中心に密度の高い核を持つ小さな衛星に着目し、そのような小衛星同士の衝突を考えました。

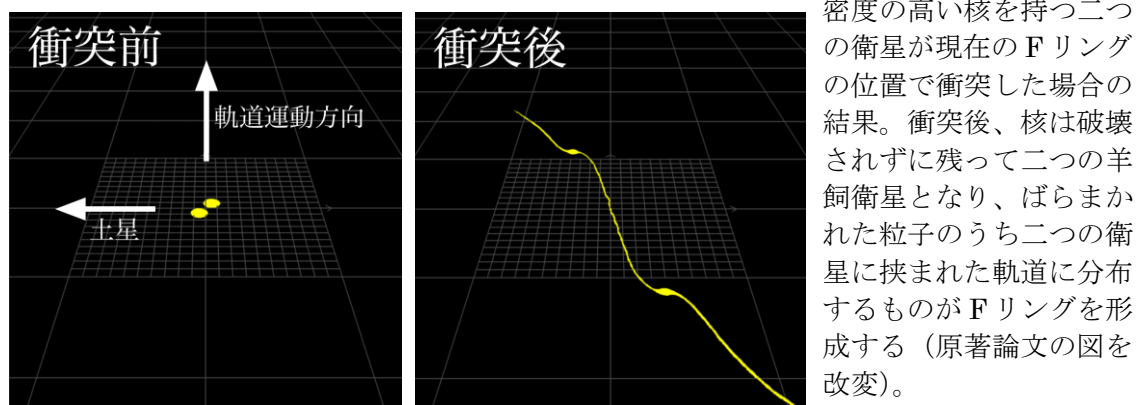
<研究の内容>

設定・手法：土星近傍では土星の重力が強く、リング粒子同士は衝突しても互いの重力で合体することはできませんが、土星から十分離れると重力により合体して衛星になります。一方、リング外縁近くはその中間的な場所のため、土星重力と粒子間の重力の両方が重要です。本研究では土星重力と粒子間の重力の両方を正しく考慮し、リング外縁近くでの衛星同士の衝突過程のシミュレーションを行ないました。シミュレーションは神戸大学の当研究室にある計算機のほか、国立天文台の共同利用計算機も使用して行いました。

結果：密度の高い核を持つ小衛星同士が衝突した場合、衝突した衛星は完全には破壊せず、幅広いパラメータ範囲の場合において、部分的な破壊が起きることがわかりました（図4）。この場合、核を含む部分が二つの衛星として生き残り、核の周りを覆っていた小さな氷粒子部分の一部が衝突によって剥ぎ取られて周囲にばらまかれます。シミュレーションの結果、ばらまかれた粒子の一部は、生き残った二つの衛星の軌道に挟まれた軌道上に分布することがわかりました。これがFリングとなり、生き残った二つの衛星が羊飼衛星になると考えられます。

核を持たない様な構造の衛星同士の衝突の場合は、完全に合体するか両衛星とも完全にばらばらになるかのどちらかで、リングと羊飼衛星のような系は形成されませんでした。従って、主要リング外縁近傍の衛星が核を持つということは、探査機の観測から示唆されているだけでなく、Fリングと羊飼衛星という系の形成という観点からも支持されます。

図4：衛星同士の衝突破壊過程のシミュレーション結果（本研究）



＜本研究の意義と今後の展開＞

本研究の結果より、一見特異に見える F リングと羊飼衛星という系は、土星の衛星系形成の最終段階で自然な副産物として形成されることがわかりました。また本研究の結果は探査機カッシーニが得た観測結果とも整合的です。以上により本研究は、土星および天王星、海王星の近傍にある衛星群は、惑星の周りにかつて存在した粒子円盤から形成されたという説に、新たな確証を与えたと言えます。

細いリングと羊飼衛星という系は土星だけに特有なものではなく、天王星の ϵ (イプシロン) リングも同様です。従って、このリングも本研究で考えたような、衛星同士の衝突により生成されたと考えられます。さらに、このような衛星形成過程が太陽系の複数の惑星で起きたと考えられることより、太陽系外の巨大惑星の周りでも同様なメカニズムで形成された細いリングと衛星の系があると予想されます。ただしこの場合は地球からはるか遠方にあるため、そのような細いリングを実際に観測により発見するのは難しいと予想されます。

惑星の周りに存在した粒子円盤からの衛星形成という過程は、地球の月の起源としても最も有力なものです。また、最近、火星の衛星の起源としても同様な可能性が検討されています。現在、巨大惑星の衛星系および火星の衛星の探査計画が国内外で進められており、惑星の形成過程を理解する上でも、様々な衛星系の起源の解明は非常に重要です。本研究は、今後太陽系内外の衛星系形成を解明する一端となると期待されます。

＜参考＞

原著論文：

著者： Ryuki Hyodo & Keiji Ohtsuki

題名：“Saturn’s F ring and shepherd satellites a natural outcome of satellite system formation”

雑誌： Nature Geoscience

論文 URL：<http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2508>

【問い合わせ先】

神戸大学大学院理学研究科

大槻 圭史 (教授)

TEL：078-803-6483

E-mail：ohtsuki@tiger.kobe-u.ac.jp