



土星の衛星タイタンがひとりぼっちになった訳

名古屋大学高等研究院（兼・大学院理学研究科）の藤井 悠里 特任助教と国立天文台科学研究部の荻原 正博 特任助教は、土星とその衛星タイタンのように、ガス惑星が大きな衛星をひとつだけ持つ系の形成シナリオを初めて提唱しました。

土星の衛星は現在 82 個見つかっていますが、その中でも衛星タイタンはひとときわ大きいことで有名です。これまでの研究では、このような大きな衛星が惑星の周りにできたとしても複数できるか、もしくはすぐに惑星に落ち込んでしまい残ることができないとされてきました。そのため、大きな衛星をひとつしか持たない系がどのように形成されるかは、長らく謎とされてきました。

本研究では、衛星の材料となったガス惑星周囲の円盤状のガスの温度分布を精密に計算し、そのような円盤の中で形成される衛星の運動を国立天文台が運用する「計算サーバ」を用いて詳細にシミュレーションしました。その結果、円盤内の温度が異なるガスから衛星が力をうけることで、衛星が惑星に向かって移動することを防ぐ「安全地帯」が存在することを発見しました。この「安全地帯」に一時避難した衛星が、惑星の周りからガスが散逸するまで生き残った場合に、タイタンのような大きな衛星をひとつだけ持つ衛星系を形成することができることがわかりました。

この研究成果は、2020年3月9日付け（日本時間15時）、欧州天文学専門誌「Astronomy & Astrophysics」に掲載されます。

【ポイント】

- ・土星とタイタンのように、大きな衛星がひとつしかない衛星系の形成過程は長らく謎とされてきた。惑星の周囲を取り巻くガス円盤から生まれた衛星は、軌道の変化によりその多くが惑星に飲み込まれると考えられてきた。
- ・研究チームによるガス円盤の温度を考慮したシミュレーションにより、衛星の惑星への落ち込みが防がれる「安全地帯」が存在する場合があることが明らかになった。
- ・「安全地帯」に一時避難した衛星だけが生き残り、衛星を一つだけ持つ衛星系が形成されうるという衛星形成シナリオを初めて提唱した。

【研究背景と内容】

太陽系の惑星の一つである土星には現在 82 個もの月、つまり、土星の周囲をまわる「衛星」が見つかっています^{注1)}。中でもタイタンはひととき大きな衛星として有名で、2 番目に大きな衛星であるレアの約 50 倍もの質量を持ちます。このようなガス惑星が一つだけ大きな衛星をもつ衛星系^{用語1)}がどのようにしてできるか、これまで様々な理論研究が試みられてきましたが、未だに大きな謎とされています。

土星のようなガス惑星の周りの衛星は、惑星形成時に惑星の周りを回転するガスや塵などでできた円盤の中で固体成分が集積することで、いくつか同時に生まれると考えられています^{注2)}。しかし、この円盤の中で固体成分がタイタンのようなサイズまで成長できたとしても、そのまま衛星になれるとは限りません。円盤にガスが残っている間は、軌道の外側のガスから衛星が後ろ向きに引っ張られるように力を受けることで、惑星の周囲を回転する勢いが失われます。そのため、多くの衛星はだんだん惑星に近づいていき、最終的に惑星に飲み込まれてしまうと考えられています。このような衛星形成の困難を解決するために、様々な説が唱えられてきました。しかし、これまでの理論では複数の衛星が残ってしまい、そもそも一つだけしか衛星が形成されないと仮定する以外に、衛星がひとつだけの系の形成を説明できませんでした。

衛星が円盤のガスから受ける力は、ガスの温度に大きく影響されます。しかし、これまでの研究で行われてきた衛星の運動の計算では、円盤の温度や密度などが簡単化されており、実際の円盤の状態と異なる可能性がありました。そこで、名古屋大学の藤井 悠里 特任助教と国立天文台の 荻原 正博 特任助教の研究チームは、円盤を構成するガスや塵などによる熱の放射や吸収の影響をとりいれ、円盤の温度や密度の状態を従来の研究よりも詳細に計算しました。そして、このような実際の状態に近い円盤での衛星の運動を、重力多体シミュレーションを行い、詳しく解析しました。この計算には、国立天文台が運用する「計算サーバ」が用いられました。

その結果、衛星が惑星とは反対の向きに移動する「安全地帯」が円盤の中に存在する可能性があることを発見しました。円盤はガスの摩擦によって、惑星に近いほど温かく、遠いほど冷たいという温度分布になっています。詳細な計算の結果、「安全地帯」の周辺は、塵の影響によって内側と外側の温度差が特に大きくなる領域であることがわかりました。この急な温度差によって、衛星の軌道の内側のガスと外側のガスから受ける力に差が生じ、衛星が外側に押されることで、衛星が惑星に落ちることな

くとどまる領域ができていたのです。この「安全地帯」に一時的に衛星がとらえられ、円盤のガスが散逸するまで生き残ると衛星が一つだけ形成される場合があることが本研究で示されました。

研究をリードした藤井氏は、「ガス惑星における衛星の形成は、これまで様々な説が唱えられてきました。木星と4つのガリレオ衛星^{用語2)}のように大きな衛星を複数持つ衛星系については、いくつか形成可能な説が提唱されていましたが、土星とタイタンのような一つしか大きな衛星を持たない衛星系の形成を、本研究で初めて示すことができました。まだ考慮しなければならない点は残っていますが、この結果を足がかりにタイタンの起源の研究が進むこと期待しています」と今後の進展への期待を語っています。

今回提唱したメカニズムが土星とタイタンで本当に起こったのかを、直接確認することは難しいと研究チームは考えています。「ですが、今後は系外惑星の衛星も次第に観測されてくるはずで、その観測から、土星のように大きな衛星が一つしかない衛星系がたくさん見つければ、そのような系の形成についての議論が大いに進展するでしょう。そのときに、このシナリオの正しさも議論されることと思います」と荻原氏は将来への展望を語っています。

この研究成果は、2020年3月9日付けの欧州天文学専門誌「Astronomy & Astrophysics」に掲載されます。この研究は、平成29年度から始まったJST 科学技術人材育成コンソーシアムの構築事業および文部科学省科学研究費助成事業若手研究(JP18K13604)の支援のもとで行われました。

【成果の意義】

本研究で、これまで説明が困難だったガス惑星が衛星をひとつしか持たない系の形成メカニズムを初めて提唱しました。土星の衛星タイタンの形成過程の理解が大きく進むことが期待されます。

【用語説明】

用語1：衛星系：中心の惑星とその周りを回る衛星からなる力学系

用語2：ガリレオ衛星：ドイツの天文学者シモン・マリウスとイタリアの天文学者ガリレオ・ガリレイによって同時期に独立して発見された木星の衛星、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストの4つの衛星の総称

【注釈】

注1：参照「国立天文台 惑星の衛星数・衛星一覧」

<https://www.nao.ac.jp/new-info/satellite.html>

注2：土星の衛星には、土星が形成された後に土星の重力によって捉えられた小惑星なども多く存在する

【論文情報】

雑誌名 : Astronomy & Astrophysics

論文タイトル : Formation of single-moon systems around gas giants

著者 : 藤井 悠里(名古屋大学)、荻原 正博(国立天文台)

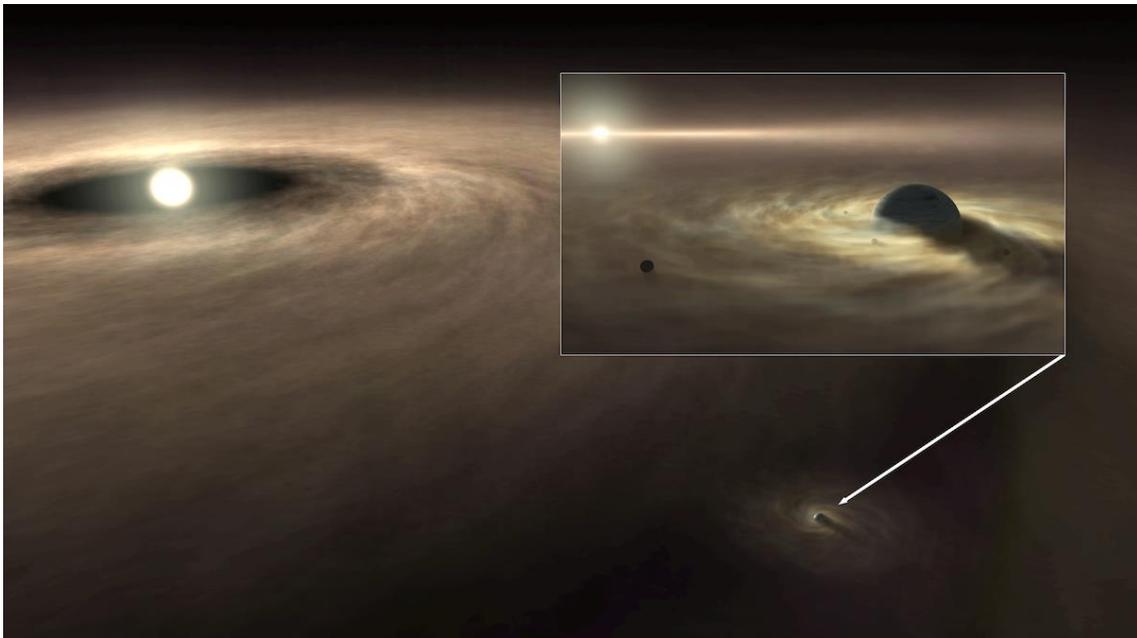


図 1 : 衛星形成のイメージ図。惑星形成時に、土星のようなガス惑星の周りをガスや塵が円盤状に取り巻き回転していた。この円盤の中で固体成分が集積して衛星が形成された。(クレジット : 名古屋大学)

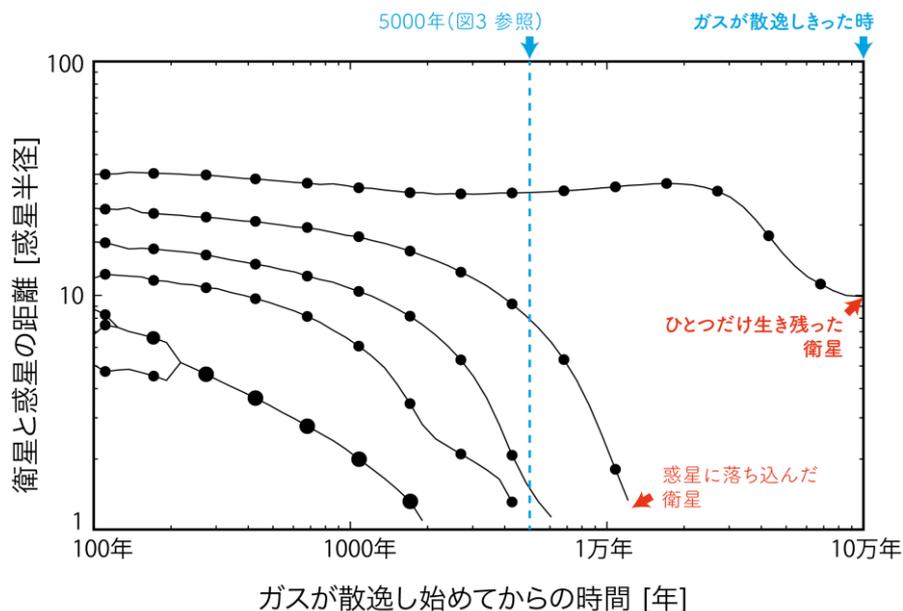
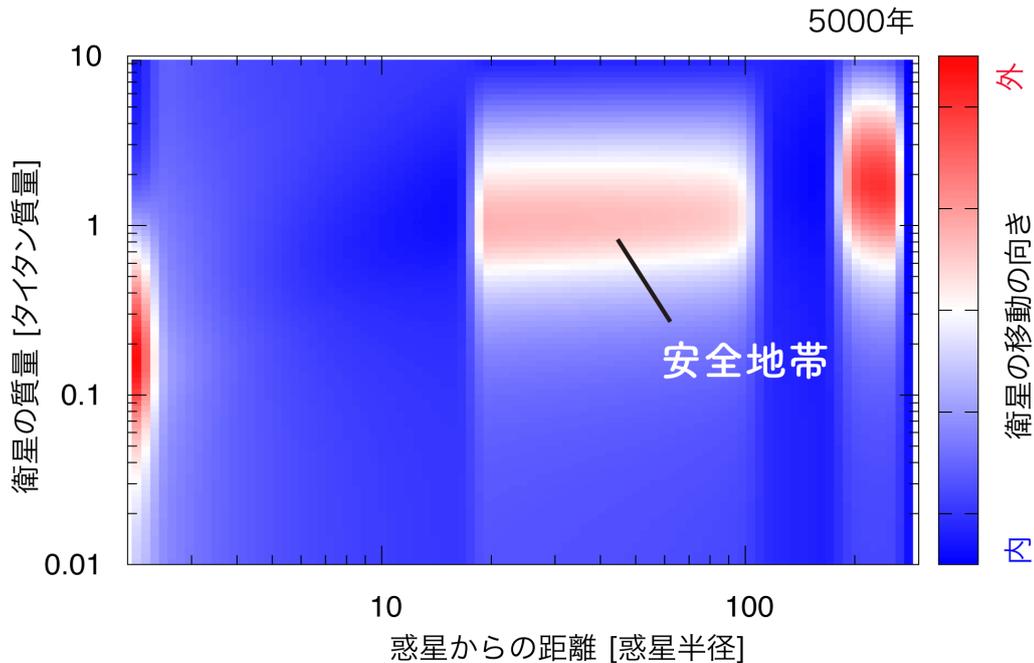


図 2 : 衛星と惑星の距離(衛星の軌道半径)の時間変化のシミュレーションの一例。縦軸は惑星の半径を単位とした惑星からの距離、横軸は惑星を取り巻くガスが散逸し始めたときからの経過時間を表す。シミュレーション開始時に7つあったタイタンと同じ質量の衛星が、円盤状のガスの中を移動し、その軌道が時間とともに変化していく様子が見て取れる。ほとんどの衛星は惑星に飲み込まれてしまうが、一番外側に置かれた衛星がひとつだけガスが散逸しきるまで惑星に取り込まれずに生き残った。この天体が「安全地帯」に一時的に位置していた天体である(図3参照)。(クレジット : Fujii & Ogihara, A&A, 2020)



動画 : <https://youtu.be/cJ7DxHxzxVc>

図3 (静止画, 動画) : 衛星の惑星からの距離 (軌道半径) と質量、衛星の移動の向きシミュレーション結果。縦軸がタイタンの質量を単位とした衛星の質量、横軸が惑星半径を単位とした惑星からの距離である。図の青い領域が衛星の移動の向きが惑星の向き、赤が惑星とは反対の向きになっている領域である。動画では衛星を黒丸で表している。時間とともに多くの衛星が次々と内側に移動し惑星に落ち込むが、一番外側に位置していた1天体は途中から赤い領域で示した「安全地帯」の範囲に位置し、ガスが散逸し終わるまで残る様子が見取れる。また、安全地帯の位置が時間によって変化する様子も見られる。画像は、ガスが散逸し始めてからの時間が5000年の状態 (図2では青い破線で示されている)。このとき、タイタンと同じぐらいの質量で20~100惑星半径程度のところに「安全地帯」となる領域が存在する。図2で最後まで生き残った衛星はこの領域に一時位置していた。(クレジット: Fujii & Ogihara, A&A, 2020)

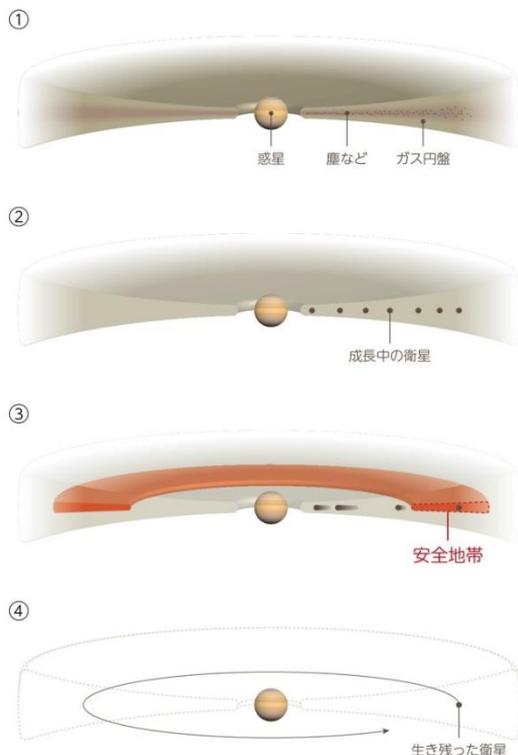


図4: 巨大衛星がひとつだけ形成されるメカニズムの模式図。(1) 惑星が誕生するとき、惑星の周囲を回るガスや塵からなる円盤が形成される。この円盤のなかで塵などの固体成分が集積し、成長していく。(2) 円盤の中で固体成分が衛星の大きさまで成長する。本研究ではこの状態から計算を始めた。(3) 円盤内の衛星の軌道が、ガスに影響を受けることで次第に変化する。多くのものは回転しながら惑星に近づいていき、やがて惑星に落ち込む。しかし、軌道が安全地帯に位置するものは、惑星に落ちること無く、惑星からの距離をたもち続ける。(4) 円盤のガスが散逸し、安全地帯で生き延びた衛星は安定した軌道をもち生き残る。(クレジット: 国立天文台)