

惑星の環における プロペラ構造の形成

道越 秀 吾¹
小久保 英一郎²



道越



小久保

〈国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: ¹ michikoshi@cfca.jp, ² kokubo@th.nao.ac.jp

土星探査機カッシーニによって、土星の環でプロペラのような形をした構造が見つかってきている。このプロペラ構造は、小衛星の重力散乱によって形成される部分空隙と関係していると考えられている。また、土星の環の高密度領域で新しい小衛星が発見された。しかし、この小衛星の周囲ではプロペラは見つかっていない。そこで、 N 体シミュレーションを行い、プロペラ形成の条件を調べた。その結果、小衛星周囲の環の面密度が十分に大きい場合は重力不安定に起因する構造が卓越するため、プロペラが形成されないことがわかった。

1. 土星の環

土星の環を初めて観測したのは、ガリレオでした。しかし、それが環だとは気づきませんでした。初めて土星に環があることを発見したのは、ホイヘンスでした。その後、土星の環は、一様な円盤ではなくさまざまな構造があることがわかってきました。カッシーニによって土星の環には明るい領域と暗い領域があることが発見されました。外側の領域はA環、内側の領域はB環と呼ばれています。さらにB環よりも内側にも暗いC環があることもわかっています(図1)。

探査機による土星の調査が行われたことによって、土星の環の観測が飛躍的に進みました。1977年にボイジャー1号、2号が打ち上げられました。1980年に相次いで土星に接近し、地上からの望遠鏡観測では不可能な詳細な観測を行いました。その結果、これまでに知られていない複雑な構造があることがわかってきました。1997年に打ち上げられた土星探査機カッシーニは、現在

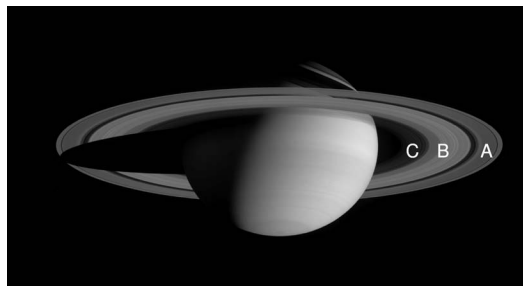


図1 土星と環。内側からC環、B環、A環と呼ばれている。(画像: NASA/JPL/Space Science Institute)

も土星を周回しており、新しい発見が続いています。

土星の環とは一体何なのでしょう。マクスウェルの理論的な研究によって、土星の環は、固体や液体の板でないことが、わかっています¹⁾。非常に多くの数センチから数メートルの小さな氷粒子が、土星の周りを周回しており、環のように見えているのです。土星の環の幅は、数万キロメートルと大きな構造ですが、その厚みは数十メートルしかなく、非常に薄くなっています。

土星には、環だけでなく衛星も存在しますが、両者は棲み分けをしています。土星の近傍は環、遠方は衛星となっています。この傾向は、潮汐力と自己重力の関係で説明できます。

潮汐力は、有限の大きさをもった物体が非一様重力場中にある場合に生じ、遠心力と土星からの重力の差に起因します。潮汐力は、物体を動径方向に引き伸ばそうとします。一方、土星の周りを公転する粒子は、自己重力によって周囲の物質を引きつけようとしています。粒子の近傍では自己重力のほうが強く、一方、粒子から遠く離れば、土星による潮汐力のほうが強くなります。潮汐力よりも粒子の自己重力の方が強い領域はヒル球と呼ばれ、その典型的な大きさはヒル半径で表されます。粒子のヒル半径は、粒子の質量を m とすると、

$$R_h = a \left(\frac{2m}{3M_s} \right)^{1/3}$$

と書けます²⁾。 M_s は土星の質量で、 a は土星からの距離です。

したがって、土星に近づくほど、ヒル半径は小さくなります。つまり、土星に近づくほど、相対的に潮汐力のほうが粒子の自己重力よりも強くなります。惑星からの距離がある一定の値（ロッシュ限界半径）よりも近くなると、粒子のヒル半径よりも二つの同じ大きさの粒子の物理半径の和のほうが大きくなります。この場合は、ヒル半径の中に別の粒子の重心が入ることができません。よって、潮汐力のために自己重力で他の粒子を束縛できなくなります。このとき集積はできません。これが環に対応します。一方、ロッシュ限界半径よりも外側では、自己重力が潮汐力に勝つことで集積が進み、衛星ができます。したがって、土星に近い場所に環、遠い場所に衛星が存在するのです。

2. プロペラ構造

2006年に土星探査機カッシーニの観測によって、A環に「プロペラ構造」が発見されました³⁾。

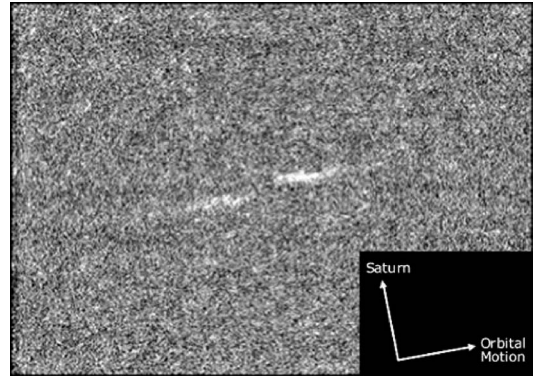


図2 カッシーニの観測によって発見されたプロペラ構造。中央に見える二つの白い模様がプロペラです。上の方向に土星があります。(画像: NASA)

図2は、プロペラの観測例です。プロペラは、対称な長いしずくのような二つの模様からなる構造です。この形が飛行機やヘリコプターのプロペラを連想させることからプロペラと名づけられました。典型的には数百mの非常に小さな構造です。現在までにA環で数多くのプロペラが見つかっており、その起源や形成機構の解明に向けて多くの研究が進められています。

プロペラ形成の最も有力な説は、環の中に埋もれた小衛星によって作られるという説です⁴⁾。環に埋もれた小衛星は、重力散乱によって周囲の粒子に摂動を与えます。粒子の運動を解析すると、一部の粒子は小衛星に衝突し、衝突しない粒子は小衛星から離れようとするのがわかります^{5),6)}。よって、小衛星の周囲には空隙ができます^{7),8)}。

一方、環には、粒子のランダム運動に起因する粘性物質拡散があると考えられています^{9),10)}。希薄な領域ができた場合、拡散によって、その希薄な領域を埋めようとしています。

小衛星からの重力散乱による空隙形成と拡散の競合によって、空隙の大きさが決まるはずですが、小衛星が小さい場合には、重力散乱が弱く環一周に及ぶような空隙を空けることができず、部分空

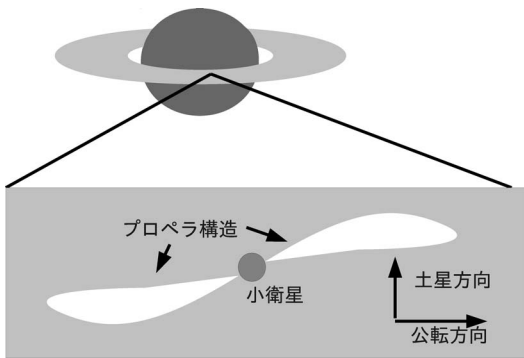


図3 プロペラの模式図. 中心に観測では見えていない小さな小衛星があると考えられています.

隙となります.

図3で示すようにプロペラの中心に、直径数十メートルから数百メートル程度の小衛星が埋められているとします。土星の環には、土星からの距離によって、公転速度の差があります。よって、小衛星から見て下流の向きに散乱の影響が表れます。その結果、粒子の少ない領域がちょうど公転の向きに沿って、対となって現れます。この穴がプロペラと関係していると考えられています。

これらのモデルで想定されているプロペラの中心の小衛星は、小さすぎるためこれまでのところ直接観測されていません。プロペラの形成機構からプロペラの大きさは、ヒル半径でスケールされることが予想されます。よって、逆にプロペラの大きさから、それを作る小衛星のサイズが推測されています^{3), 4)}。

現在、数多くのプロペラが発見されており、小衛星のサイズ分布が求められています。およそ半径20メートルから1キロメートルで、環の粒子のサイズ分布の勾配よりもより急な勾配となっていることが指摘されています^{3), 11)-13)}。これは、環の粒子とプロペラを作るような小衛星の起源が異なっていることを示唆します。このようにプロペラの研究から、土星の環や小衛星の起源へと広がりを見せています。

理論的にプロペラの可能性を指摘したのは、

Spahn and Sremčevićでした⁴⁾。しかし、その計算には、流体モデルが用いられました。粒子の平均的な挙動が流体的に扱えると仮定しているのです。流体モデルには多くの仮定が入るため、詳しい解析には粒子シミュレーションによる検証が必要です。Seißらによって、粒子シミュレーションが行われました¹⁴⁾。この研究によって、これまでSremčevićらによって指摘されていたプロペラの大きさに関する理論が検証されました¹⁵⁾。しかし、この粒子シミュレーションでは、粒子間の自己重力の効果を近似的にしか取り入れていませんでした。詳しくは後で論じますが、自己重力の効果は重要な要素です。自己重力を考慮したより現実的なプロペラ形成のシミュレーションがLewis and Stewartによって行われました¹⁶⁾。彼らは自己重力の効果とサイズ分布の効果を取り入れるとプロペラができにくくなることを示しました。そして、最大の粒子と小衛星の質量比が1/30よりも大きい場合には、プロペラが形成されないことを発見しました。しかし、シミュレーションで用いられた面密度が小さいため、以下で説明する自己重力ウェイク構造の効果を正しく取り入れていない可能性があります。より詳細に調べるには、高密度の環の数値シミュレーションが必要です。

3. 自己重力不安定とウェイク構造

最近の研究によって、土星のA環やB環には、ウェイクと呼ばれる構造が存在していると考えられています^{17), 18)}。図4にあるように公転方向に対して傾きをもった細かな縞模様です。これは自己重力不安定性が関係していると考えられています^{19), 20)}。

自己重力に比べてランダム運動など圧縮を妨げる要素が無視できる場合を考えます。揺らぎによって密度が高くなったとします。するとこの領域の自己重力が強くなります。その結果、周囲の物質をさらに引きつけようとして、この過程に

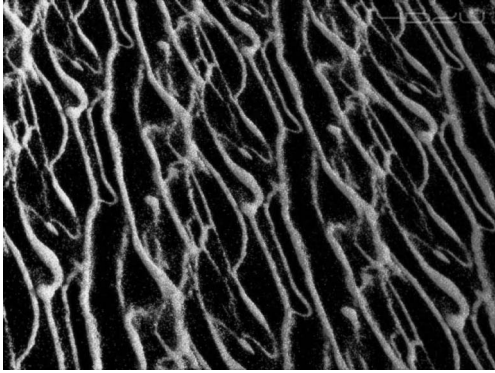


図4 ウェイクのシミュレーションの例. (シミュレーション: Daisaka and Ida¹⁸⁾, 可視化: 武田隆顕 (4D2U プロジェクト))

よって、周囲の物質も暴走的に引きつけていくはずで、この現象は自己重力不安定と呼ばれています。しかし、粒子にランダム速度がある場合は、実質的な圧力として働き、圧縮したとき圧力が強まるため、さらなる圧縮ができなくなり、自己重力不安定が発生しない場合があります。自己重力不安定の条件はランダム速度と環の面密度によって記述されます¹⁹⁾。

$$Q = \frac{c\kappa}{3.36G\Sigma} < 1$$

ここで c はランダム速度、 Σ は面密度、 κ はエピサイクル振動数です。

土星の環では粒子の衝突による粘性が効いています。粘性によって公転速度差のエネルギーをランダム運動エネルギーに変換しようとしています。一方、環の粒子は非弾性衝突をするためエネルギー散逸をします。この公転速度差からのエネルギー変換と非弾性衝突によるエネルギー散逸の釣り合いから粒子のランダム速度が決まります^{9), 21), 22)}。このことから、実際に自己重力不安定が可能か見積ると、環の面密度が高いほど、土星からの距離が遠いほど不安定になりやすくなります。特にA環やB環では自己重力不安定となっていることが示唆されます^{10), 17), 21), 22)}。

したがって、A環やB環では、自己重力不安定

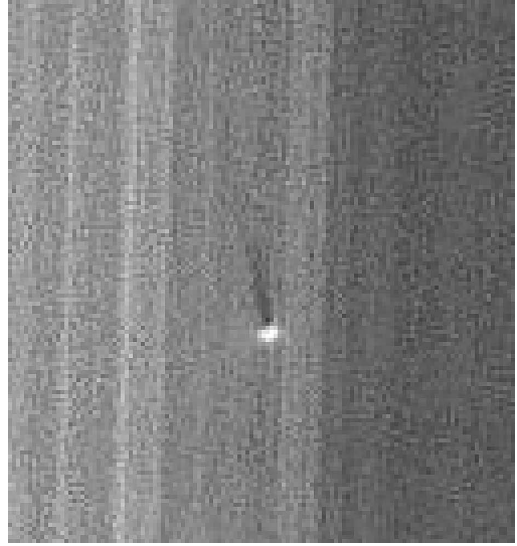


図5 B環で発見されたプロペラなし小衛星。環に落とした影の長さから半径150 mと見積もられています。(NASA/JPL/Space Science Institute)

によって、粒子は自己重力で集ろうとします。一方、潮汐力が強いと重力的に束縛できない状態となっています。このことから、自己重力不安定による物質の引きつけと潮汐力による破壊が絶えず繰り返されている状態であると考えられています。これがウェイクです。非定常な構造で、環の公転周期程度の時間で変化します。その縞の間隔は、自己重力不安定の特徴的な空間スケールであり、数十メートル程度と見積られます。構造が小さすぎるため現在までの観測では直接ウェイクは観測されていませんが、間接的にはその存在は確かめられています²³⁾。

2009年にB環で環の中に埋もれた小さな構造が発見されました²⁴⁾ (図5)。この構造の正体について、さまざまな可能性が議論されていますが、小衛星が埋まっているという可能性があります。しかし、この構造の周囲には、不思議なことに、プロペラが観測されていません。一つの可能性は、これが小衛星ではなく、単に一時的な揺らぎのため、プロペラができていないということです。しかし、もしこれが小衛星だとすれば、プロ

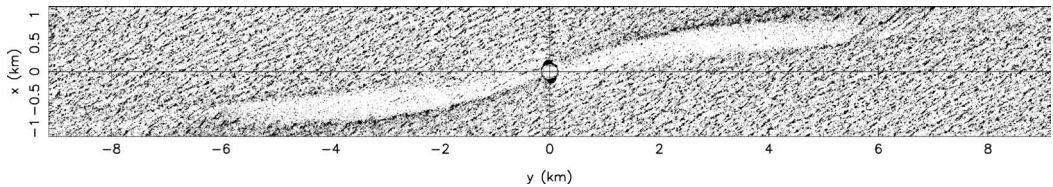


図6 数値シミュレーションで再現されたプロペラ. 面密度は $\Sigma=60 \text{ g/cm}^3$. 中心に小衛星があります. 周囲にはウェイクが表れています.

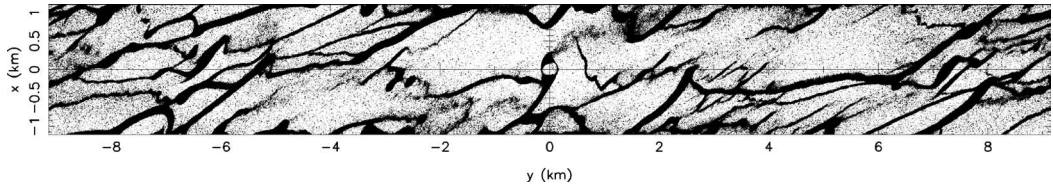


図7 図6の場合よりも面密度を大きくして計算した場合. 面密度は $\Sigma=414 \text{ g/cm}^3$. ウェイクが強く表れ, プロペラができていません.

ペラができていない理由があるはずですが. B環は一般的にA環よりも面密度が大きく, ウェイクが強く出るはずですが. B環ではウェイクがプロペラの形成に何らかの影響を及ぼしている可能性があります. しかし, これまでのプロペラの形成機構の研究では, ウェイクが強く表れている中でのプロペラの形成については詳しく調べられていませんでした.

4. プロペラ構造形成のシミュレーション

強いウェイクが表れている中でのプロペラ形成について調べるために, 大規模粒子シミュレーションを行いました²⁵⁾. 計算には, 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのGRAPE-DRクラスターを用いました²⁶⁾. 特にこれまでの研究で検討されていなかった, 高密度の環の中でのプロペラ形成について詳しく検討しました.

まず, シミュレーションパラメーターは, プロペラが数多く見つかったA環に近いものを用いました. また, 中心の小衛星の半径は150 mで, プロペラを作る小衛星としては, 標準的な大きさです. 粒子サイズ分布は, 2-10 mの範囲で

べき分布 $ndR=(R/R_0)^{-q}dR$ を用いました. ここで q は, べき指数で $q=2.8$ としました. 反発係数のモデルは, Bridgesらのモデルを用いました²⁷⁾. このモデルでは, 衝突速度が速いほど反発係数が小さくなります. 計算は, 小衛星を座標原点とする局所回転座標系で行いました. 周期境界条件を考慮して, 運動方程式を解きました²⁸⁾.

結果は, 図6です. 面密度は, 60 g/cm^2 で, A環に相当します²⁹⁾. この計算の場合には, 周囲にウェイクができているものの, プロペラも同時に表れていることがわかります. つまり, このパラメーターでは, ウェイクとプロペラが共存できることを示しています.

次により高密度の場合の計算を行いました. 面密度は, 414 g/cm^2 です. その他のパラメーターはすべて同じものを用いています. B環の面密度は, A環よりも高いと考えられており, この面密度は, 典型的なB環の面密度に対応します³⁰⁾. シミュレーション結果は図7です. 濃くはっきりとしたウェイクのみが見られます. しかし, 定常的なプロペラは見られませんでした.

図8は, 両者の違いを調べるために, 典型的なプロペラの形成領域の面密度の時間進化を調べた

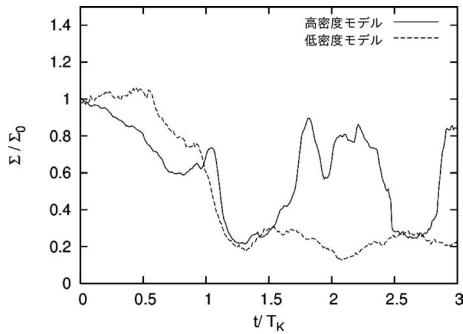


図8 横軸は時間、縦軸は、典型的なプロペラ領域の初期の面密度に対する割合です。T_Kはケプラー周期です。実線が高面密度モデル、点線が低面密度モデルです。低面密度モデルのほうが面密度が低く一定で、安定してプロペラができています。一方、高面密度モデルでは、激しく変化し、プロペラが壊されていることを表しています。

グラフです。初期面密度で規格化しています。1となる場合は、初期の面密度と同じであることを意味しています。プロペラができた場合は、安定して初期面密度の20%程度の値を維持します。これは、確かに部分空隙ができており、ウェイクがあっても安定して空隙が維持されることを示しています。一方、プロペラができなかった場合、揺らぎが大きく、0から1まで変動しています。これはプロペラが形成される場所にもウェイクが、繰り返し侵入していることを意味します。ウェイクが侵入したときに、瞬間的に面密度は上昇します。よって、このような面密度の激しい変化は、ウェイクによって部分空隙が維持できずプロペラが壊されていることを示しています。

このプロペラができる場合とできない場合の違いは、次のように理解されます。ウェイク構造は、プロペラを壊そうとします。ウェイクの強さは周囲の環の面密度で決まります。環の面密度が大きいほど、プロペラができにくくなります。一方、小衛星が大きいほど重力散乱が強くなるのでプロペラができやすくなります。したがって、プロペラ形成の条件は、小衛星の大きさと周囲の環

の面密度で記述できます。これらの効果を考慮し形成条件を導きました。自己重力不安定の典型的な空間スケールは $\lambda = 4\pi^2 G \Sigma / \Omega^2$ とかけます。ここで、 Ω はケプラー角速度です。よって、自己重力不安定によってできる構造の典型的な質量は $M_{\text{wake}} \approx \Sigma \lambda^2$ となります。この質量が小衛星 M_{moon} の質量よりも十分に小さければ、小衛星の重力に比べて、ウェイクの重力は無視できます。よって、

$$M_{\text{wake}} \lesssim M_{\text{moon}}$$

の条件を満たすとき、プロペラはできます。この条件は、小衛星のヒル半径と自己重力不安定の波長と比べて小衛星のヒル半径のほうが大きいこと

$$\lambda \lesssim r_H$$

と等価です。これから、小衛星の物理量と軌道要素の関数としてプロペラの形成される環の面密度の条件が得られます。

$$\Sigma < \Sigma_{\text{cr}} \equiv C \left(\frac{M_s^2 \rho R^3}{144 \pi^5 a^6} \right)^{1/3}$$

ここで ρ 小衛星の密度、 R は小衛星の半径、 C は無次元量で典型的には1程度です。

図9は、さまざまなシミュレーションパラメーターで計算をした結果です。小衛星半径は、60 mから250 m、面密度は133 g/cm²から670 g/cm²まで変化させました。プロペラができた場合、できなかった場合をまとめたものです。C=1.5とした場合、シミュレーション結果とよく一致していることがわかります。

ここで求めた結果を、150 mの小衛星が存在している場合の計算結果に適用します。半径150 mの小衛星がある場合の臨界面密度は、308 g/cm²になります。したがってシミュレーションでは60 g/cm²と414 g/cm²ですので、ちょうどプロペラができる場合とできない場合の計算になっていることがわかります。

次に、この結果を実際のA環で見つかっている

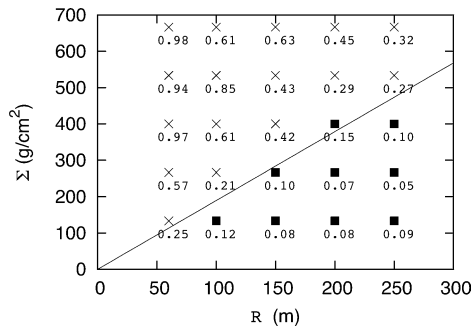


図9 横軸は、小衛星の半径、縦軸は土星の環の面密度です。■角で記した点がプロペラができた場合、×印で記した点は、できなかった場合です。印の下の数字は、プロペラができる典型領域での初期面密度に対する面密度の割合です。この数値が低いほどはっきりとしたプロペラができたことを意味します。直線は、導いたプロペラ形成の条件で、この線よりも下の領域では、プロペラができます。

プロペラに適用します。A環の典型的な面密度は 50 g/cm^2 程度です²⁹⁾。これから計算されるプロペラを作ることができる最小の小衛星の大きさは直径40 mです。現在A環で発見されている小衛星のサイズは、直径40 mから1 kmですので、観測と整合的です^{3), 11)-13)}。

5. 今後の展開

ウェイクが発達している場合のプロペラの形成条件を明らかにしました。重力不安定波長 λ よりも衛星のヒル半径 r_H のほうが大きければ、プロペラができます(図10)。しかし、まだいくつか謎が残されています。最も大きな問題は、プロペラの観測の解釈の問題です。

多くの観測では、プロペラは、周囲の環よりも明るい部分として見えています。しかし、数値シミュレーションでは、プロペラの形をした穴が空くことが確かめられたものの、この明るさの増加については、まだ完全には理解されていません^{11), 12)}。

一つの可能性は、環の粒子間の衝突で放出される小さな破片によって明るくなるという説で



図10 プロペラ構造を斜めから観測した場合。可視化: 武田隆顕 (4D2U プロジェクト)

す¹¹⁾。粒子が衝突したときに破片が放出される可能性があります。小衛星周囲では、重力散乱によって速度が増加するために、多くの破片が出る可能性があります。小さな破片は、光の反射率を増加させるため、プロペラの形に明るく見えるかもしれません。この研究で導いたプロペラ形成条件は、小衛星による典型的な散乱速度と自己重力不安定によって生じる粒子のランダム速度を比較することでも得られます。したがって、この研究で導いた形成条件が適用できるかもしれません。プロペラの解釈の問題は、今後の詳しい研究が必要です。プロペラの高解像度シミュレーションを行い、プロペラの形やプロペラ内部の詳細な構造、粒子の速度分布などを詳しく調べれば、問題の解決のヒントになるのではないかと期待しています。

観測で得られたプロペラの形が理論と食い違いがある可能性も指摘されています^{11), 12)}。小衛星の周囲にできるプロペラの大きさが、中心にある小衛星の大きさから見積られることが、理論的に予測されています。しかし、多数のプロペラの観測例とこの予測を比較すると、プロペラの長さの理論的予測と矛盾する可能性が指摘されています。観測の分散も大きいためまだ決定的ではありませんが、もしこれが事実とすれば、観測解釈や理論を洗い直す必要があります。これまでの粒子

シミュレーションでは自己重力の効果が適切に扱えていなかったため、自己重力を考慮した大規模計算を行えば、理論の側から理解が進む可能性があります。

また、原始太陽系で微惑星と呼ばれる多数の小天体から惑星が形成されていく過程でも似た物理過程があります。惑星の環の研究を通じた惑星形成理論の検証にも発展させたいと考えています。

参考文献

- 1) Maxwell J. C., 1859, MNRAS, 19, 297
- 2) Nakazawa K., Ida S., 1988, Progress of Theoretical Physics Supplement 96, 167
- 3) Tiscareno M. S., Burns J. A., Hedman M. M., Porco C. C., Weiss J. W., Dones L., Richardson D. C., Murray C. D., 2006, Nature 440, 648
- 4) Spahn F., Sremčević M., 2000, A&A 358, 368
- 5) Nishida S., 1983, Progress of Theoretical Physics 70, 93
- 6) Goldreich P., Tremaine S., 1980, ApJ 241, 425
- 7) Lissauer J. J., Shu F. H., Cuzzi J. N., 1981, Nature 292, 707
- 8) Petit J.-M., Henon M., 1988, A&A 199, 343
- 9) Goldreich P., Tremaine S. D., 1978, Icarus 34, 227
- 10) Daisaka H., Tanaka H., Ida S., 2001, Icarus 154, 296
- 11) Sremčević M., Schmidt J., Salo H., Seis M., Spahn F., Albers N., 2007, Nature 449, 1019
- 12) Tiscareno M. S., Burns J. A., Hedman M. M., Porco C. C., 2008, AJ 135, 1083
- 13) Tiscareno M. S., Burns J. A., Sremčević M., Beurle K., Hedman M. M., Cooper N. J., Milano A. J. Evans M. W., Porco C. C., Spitale J. N., Weiss J. W., 2010, ApJ 718, L92
- 14) Seiß M., Spahn F., Sremčević M., Salo H. 2005, Geophys. Res. Lett. 32, 11205
- 15) Sremčević M., Spahn F., Duschl W. J., 2002, MNRAS 337, 1139
- 16) Lewis M. C., Stewart G. R., 2009, Icarus 199, 387
- 17) Salo H., 1995, Icarus 117, 287
- 18) Daisaka H., Ida S., 1999, Earth, Planets, and Space 51, 1195
- 19) Toomre A., 1964, ApJ 139, 1217
- 20) Julian W. H., Toomre A., 1966, ApJ 146, 810
- 21) Ohtsuki K., 1999, Icarus 137, 152
- 22) Ohtsuki K., Emori H., 2000, AJ 119, 403
- 23) Colwell J. E., Esposito L. W., Sremčević M., Stewart G. R., McClintock W. E., 2007, Icarus 190, 127
- 24) Porco C. C., 2009, IAUCirc. 9091, 1
- 25) Michikoshi S., Kokubo E., 2011, ApJ 732, L23
- 26) Makino J., Hiraki K., Inaba M., 2007, Proc. 2007 ACM/IEEE Conference, 1–11
- 27) Bridges F. G., Hatzes A., Lin D. N. C., 1984, Nature 309, 333
- 28) Wisdom J., Tremaine S., 1988, AJ, 95, 925
- 29) Tiscareno M. S., Burns J. A., Nicholson P. D., Hedman M. M., Porco C. C., 2007, Icarus 189, 14
- 30) Robbins S. J., Stewart G. R., Lewis M. C., Colwell J. E., Sremčević M., 2010, Icarus 206, 431

Formation of a Propeller Structure by a Moonlet in a Dense Planetary Ring Shugo MICHIKOSHI and Eiichiro KOKUBO National Astronomical Observatory of Japan, Center for Computational Astrophysics, 2–21–1 Osawa, Mitake, Tokyo 181–8588, Japan

Abstract: The Cassini spacecraft discovered propeller-shaped structures in Saturn's A ring. Those propeller structures are thought to be formed by gravitational scattering of ring particles by an unseen embedded moonlet. Self-gravity wakes are prevalent in dense rings due to gravitational instability. Strong gravitational wakes affect the propeller structures. Here, we derive the condition for the formation of a propeller structure by a moonlet embedded in a dense ring with gravitational wakes. We find that a propeller structure is formed when the wavelength of the gravitational wakes is smaller than the Hill radius of the moonlet. We confirm this formation condition by performing numerical simulations. This condition is consistent with observations of propeller structures in Saturn's A ring.