

ガス惑星周りの巨大衛星形成

芝池 諭人¹

2019年10月1日受領，査読を経て2019年10月25日受理。

(要旨) 木星や土星を周回する巨大衛星は、主惑星のガス集積の副産物である周惑星円盤の中で、kmサイズの微衛星が集積して形成されたと考えられてきた。しかし、近年の筆者らの研究で、微衛星形成にも微惑星形成同様の「ダスト落下問題」があるとわかってきた。すなわち、周惑星円盤に供給されたダストが微衛星にまで成長する前に、cmサイズのペブルとして主惑星へと落下してしまう。そこで、筆者らは、惑星形成論で近年盛んに議論されている「ペブル集積」を応用し、新たな衛星形成シナリオを構築した。主惑星へと落下中のペブルを少数の衛星の種が集積し、従来よりも時間をかけて衛星が形成されるシナリオである。そして、この「ゆっくりペブル集積シナリオ」は、従来不可能であった木星の巨大衛星の特徴の統一的な説明が可能である、とわかった。

1. はじめに

太陽系の二つのガス惑星はそれぞれ大きな衛星を持っている。木星はイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト(ガリレオ・ガリレイによって発見されたため、「ガリレオ衛星」と呼ばれる)の四つの巨大衛星を持ち、土星は一つの巨大衛星、タイタンを持つ。いずれも地球の月と同程度のサイズであり、主に氷と岩石から成る。巨大で、全て軌道が同一平面上にあり、しかも比較的惑星より離れた場所にあることから、これらの衛星はガス集積時に惑星周囲にできる「周惑星円盤」内で形成されたと考えられている。本記事では、筆者らによって近年得られた研究成果を踏まえて、周惑星円盤における巨大衛星の形成過程についてまとめる。

2. 従来の衛星形成

ー 微衛星集積シナリオ ー

まず、従来の衛星形成研究について紹介する。周惑星円盤における衛星形成は、基本的に、原始惑星系円盤における惑星形成の縮小版として考えられてきた。

したがって、まず考えられたのは最小質量円盤モデルである[1]。ガリレオ衛星(あるいはタイタン)の質量と同量の固体物質とその100倍のガスから成る円盤内での形成が検証された。このとき、周惑星円盤は原始惑星系円盤から完全に孤立(あるいは原始惑星系円盤がすでに消失)している。その後、最小質量円盤における衛星形成がいくつか検討されたが、これらは衛星の移動をきちんと考慮できていない[2]。衛星のType I及びType II移動を考慮すると、ガリレオ衛星のサイズと軌道半径を同時に説明することは難しい[3]。

一方で、原始惑星系円盤における惑星形成と違って、衛星形成環境は孤立系である必要がない。そこで考えられたのが、Gas-starved(ガス抑制)円盤モデルである[4]。最小質量円盤モデルに対して少ないガスと固体物質しか円盤内に存在しないが、常に原始惑星系円盤からこれらを供給することで、衛星形成に必要な材料物質を確保する。そして、ガス流入量を調整し面密度を低く保つことで、過度の衛星の移動と円盤の高温化(ほとんどの衛星はH₂O氷を含む)を防ぐ。また、好都合なことに、このモデルは近年の数値流体計算から予想される惑星のガス集積の描像と整合的である。すなわち、ギャップ形成後もガス惑星への緩やかなガス

1. Physikalisches Institut & NCCR PlanetS, Universitaet Bern
yuhito.shibaik@space.unibe.ch

の流入が続き、惑星周囲には比較的面密度の小さい周惑星円盤が維持される(図2も参照のこと)[5].

このガス抑制円盤モデルにおける衛星形成は、まず Canup 氏と Ward 氏らによって調べられた[6]. 彼らは、周惑星円盤に流入するガスとダストの量(と円盤の乱流の強さ)から、衛星の材料となる km サイズの「微衛星」(微惑星の衛星系版)の量と円盤のガス面密度を調整し、その円盤における衛星の成長を N 体計算によって調べた。結果、衛星は微衛星の集積及び衛星同士の衝突による成長と Type I 移動による主惑星への落下を繰り返し、周惑星円盤が消失するときに残った衛星が、現在の巨大衛星となることがわかった。そして、木星や土星の巨大衛星の総質量が、成長と落下のタイムスケールのバランスから再現された。次に、佐々木氏らによって、惑星磁場による周惑星円盤内側のキャビティ構造¹の有無と周惑星円盤へのガス流入の終わり方の違い²から、ガス抑制円盤モデルによって木星系と土星系の作り分けが可能であることが示された[7]. 特に、木星の磁場によるキャビティ構造が、衛星形成を議論する上で重要であることが、後の荻原氏と井田氏の N 体計算により明らかとなった[8].

さて、ここまでの議論は衛星の質量と軌道など力学的な側面に限定されていた。これを、衛星の組成や内部構造といった化学的側面にまで拡大すると、従来の微衛星集積シナリオによるガリレオ衛星等の再現は少し困難となる。ガニメデとカリストはその質量の半分程度が H₂O 氷であるが、イオとエウロパにはそれぞれ氷はゼロあるいはごく少量(6-9 重量%)しか存在しないと推定されている[9]. 微衛星集積シナリオでは、スノーライン(H₂O 氷が蒸発する円盤内の位置)の内側では岩石微衛星が、外側では氷微衛星(氷:岩石 = 1:1 の組成を持つ)が形成され、それぞれの衛星が程よく岩石と氷の微衛星を集積することで、実際のガリレオ衛星の組成比が再現されると考えられてきた。しかし、実際にはこれらの微衛星は周惑星円盤の中で混ざってしまい、どちらかの微衛星を選択的に集積することが難しい[10]. また、ガニメデ内部は完全に金属コ

ア³、岩石コア、そして氷のマントルに分化しているのに対して、カリストの内部は氷と岩石の部分的な分化に留まっていると推定されているが[11], この違いを微衛星の集積による加熱の違いで再現するのはかなり難しい[12]. ガニメデとカリストはほぼ同サイズであるが、もしこれらが同じ環境で形成されたなら、集積による形成時間、つまり集積加熱の度合いも等しいはずである。従って、もし集積加熱で二つの衛星の内部(温度)構造が決まるのであれば、それらは同じになると推定されるためだ。さらに、これらの様々なガリレオ衛星の特徴を、微衛星集積シナリオによってパラメータ設定や仮定の矛盾なく統一的に説明することはできていない。

3. 微衛星集積シナリオにおける問題点 — ダスト落下問題 —

このように、微衛星集積シナリオについては多くの研究がなされてきた。しかし、これらの研究が仮定していた微衛星は、そもそも周惑星円盤内で十分に形成されるのだろうか。原始惑星系円盤における微惑星形成に多くの課題があることを考えれば、微衛星形成も一筋縄でいかないことは容易に想像される。そこで、筆者らは、周惑星円盤内でのダストの合体成長と移動を世界で初めて計算し、微衛星形成が可能となる条件を調べた[13]. 結果、現実的なパラメータの範囲において、原始惑星系円盤における微惑星形成と同じように、ダストが微衛星まで成長するより前に主惑星に落下するとわかった。ガス円盤はガス圧によりケプラー速度より遅く回転しているため、ケプラー速度回転しているダストはガスから「向かい風」を受けて角運動量を失い、中心の恒星/惑星に向かって螺旋状に落下してしまうのだ。このようにガス円盤からの向かい風で角運動量を失って落下していくダストのことを、ペブルと呼ぶ⁴。筆者らの研究の内容を、以下に簡潔に記す。

1. 過去の木星は現在よりも強い磁場を持っていたと考えられており、円盤内縁の電離が十分であれば、ガスは双極子磁場に沿って木星に集積するため、木星付近の円盤面にガスが存在しないと推定される[14].

2. 現在の理解とは多少異なり、土星へのガス集積のみ緩やかに続くと仮定している。

3. ガニメデには磁場があることが確認されており、金属コアがあると推測される。

4. 「ペブル」は、地球科学ではサイズにより定義されるが、本分野では、この仕組みで成長より落下のタイムスケールが短くなり円盤中心に向かって落下する物体を指す。

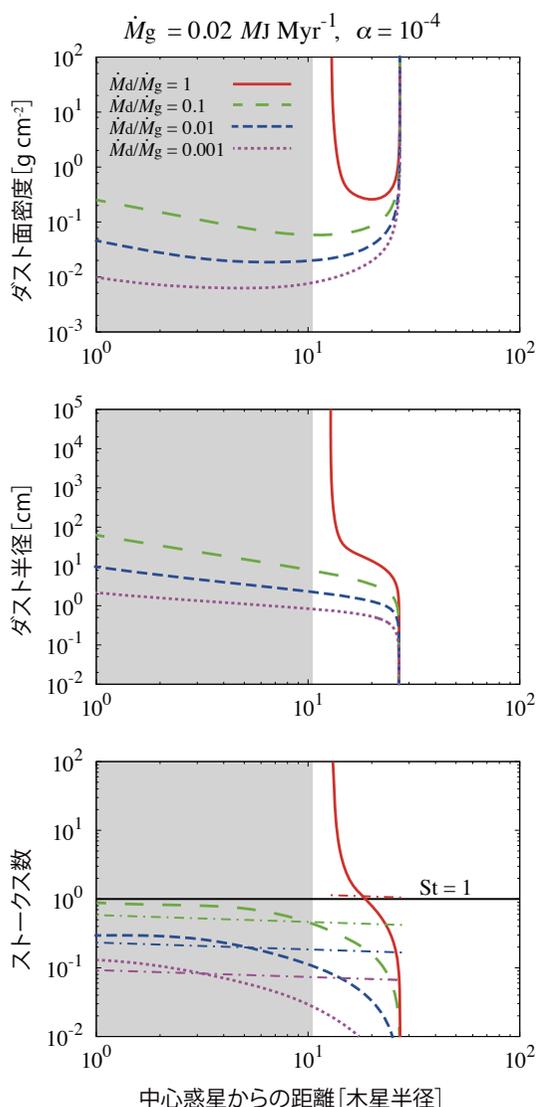


図1: ダストの成長と落下。曲線の色及び種類は周惑星円盤に流入するダスト/ガス質量フラックス比の違いを示す。下パネルの鎖線は式(1)を示す。灰色は氷の昇華温度を超える領域を示し、ここでは氷微衛星の形成はできない。ダストはガスの流入領域の最も外側($r=27R_J$)に供給されると仮定した。参考文献[13]の図2を改変。

3.1 定常周惑星円盤におけるダストの合体成長と移動

筆者らは、まず、周惑星円盤を、ガスの供給が続く定常な一次元(軌道半径 r 方向)の粘性降着円盤(いわゆる α 円盤)としてモデル化した。そして、この円盤内でのダストの合体成長と軌道半径方向の移動を計算

した。ダスト同士の衝突率は、ダストのサイズと円盤面での空間密度に依存するが、この空間密度は、乱流によるダストの鉛直方向の巻き上げ具合と、ガス密度とダストのサイズにより決まるダストの軌道半径方向の移動(落下)速度から、計算される。このモデルでは、簡単のため、ダストはガスの流入領域の最も外側に集中して供給され、かつ各軌道半径におけるダストのサイズが分布を持たず一つに定まる、と仮定した。また、周惑星円盤へのダストとガスの流入フラックス比 \dot{M}_d/\dot{M}_g と、円盤の乱流の強さ α を主なパラメーターとした。

図1に、周惑星円盤へのガスの流入フラックスが $\dot{M}_g=0.02 M_J \text{ Myr}^{-1}$ (M_J : 木星質量)⁵、乱流の強さが $\alpha=10^{-4}$ の時のダストの進化を示す。ダストは周惑星円盤に供給されるとすぐにその場で成長するが、cmサイズまで成長すると惑星に向かって落下する。ダスト/ガス流入フラックス比が1の場合(赤実線)は、その後再び大きく成長しているが、それ以外の場合はそのまま惑星へと落下している。また、ダストの落下速度はストークス数 St (制動時間/ケプラー時間)が1の時に最大となるため、 St が1を超えるとダストが渋滞して微衛星が形成される(図1下)。この描像はダストの合体成長による微惑星の形成と同じである。

また、図1下の鎖線は、ストークス数の曲線(図1下実線と点線)の $r \rightarrow 0$ の漸近線をいくつかの近似の下に求めたもので、以下に表される⁶。

$$St \approx 1.2 \left(\frac{\dot{M}_d/\dot{M}_g}{1} \right)^{2/5} \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{1/5} \left(\frac{T}{160 \text{ K}} \right)^{2/5} \left(\frac{M_{cp}}{1 M_J} \right)^{2/5} \left(\frac{r}{10 R_J} \right)^{-2/5} \quad (1)$$

ここで、 T は円盤面の温度、 M_{cp} は中心惑星の質量である。この式からも、ストークス数が1を超えて微衛星が形成される条件は、ダスト/ガス流入フラックス比が1以上であること、とわかる。また、興味深いことに、ストークス数はダストの内部密度に依存しない。これは、微惑星形成においてダスト落下問題の回避に

5. このガス流入フラックスはCanup&Wardの仮定の1/10である。また、数値流体計算からギャップ内はガス面密度が外の1/100程度とされるが[15]、ギャップがない場合にやはり数値流体計算から予想されるガス流入フラックスはおおよそ200MJ/Myrであり、ギャップにより1/100になるとしても、氷衛星形成に適切な円盤温度となる値より大きくなってしまふ。いかに円盤温度を下げるかは、氷衛星形成における課題の一つである。
6. 導出の詳細は参考文献[13]をご覧ください。

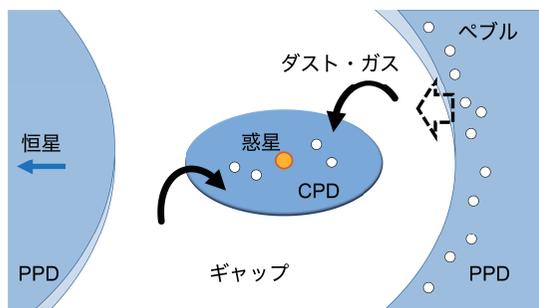


図2: ダストとガスの周惑星円盤(CPD)への流入。衛星形成の頃には、CPDの周囲にギャップが形成され、ガスの流入フラックスは減少する。原始惑星系円盤(PPD)遠方から落下してきたペブルはギャップの縁に溜まり、小さなダストを除いてギャップ内に入ることができない。そのためCPDにガスと共に供給されるガスは少量である。CPD内では、この少量のダストから再びペブルが生成され、惑星へと落下する。

有効であった「低内部密度ダストモデル」[16]は、微衛星形成には貢献できないことを意味する。周惑星円盤は原始惑星系円盤に対して小さくガス面密度が高いため、ダストがガスから受ける抵抗がいわゆるストークス則でなくニュートン則に従い、ダスト内部密度がキャンセルアウトされてしまうのだ。また、周惑星円盤内ではダストとガスの(面)密度比も非常に小さくなるため、ストリーミング不安定が起きる条件も満たさない⁷[17]。

さて、この「ダスト/ガス流入比>1」という微衛星の形成条件は、達成が難しい。原始惑星系円盤遠方から落下してきたペブルは、とても小さいダストを除いてギャップ外縁の圧力勾配にせき止められるため、周惑星円盤にガスと共に供給されるダストの量は少なくなる[18]。加えて、ガスは周惑星円盤に上空から流入するため、ダストの円盤赤道面への沈降を考えれば、ダスト/ガス流入比はさらに小さく考えられる[19]。従って、従来のシナリオで仮定されていた、周惑星円盤内でのダストの合体成長による微衛星形成は、実は困難であるとわかる。ダストは、微衛星へと成長する前に、cmサイズのペブルとして惑星へと落下してしまう。図2にガスとダストの周惑星円盤への流入の様子を示した。

7. ダスト/ガス比が大きくなると、ダストの落下が“渋滞”を起こしてさらにダストが集まる、ストリーミング不安定と呼ばれる現象が起きる。ここではガス面密度は $10^3 - 10^4 \text{ g cm}^{-2}$ 程度であり、図1上よりダスト/ガス面密度比は 10^{-5} 程度とストリーミング不安定に必要な面密度比より3桁ほど小さくなる[16]。

3.2 局所的・短期的な微衛星形成の可能性

とはいえ、周惑星円盤における微衛星形成が絶対に不可能かと言えば、そうではないだろう。局所的あるいは短期的に微衛星が形成される可能性はある。Dražkowska氏とSzulágyi氏は、自分たちが過去に行なった数値流体計算に基づき、周惑星円盤内の特定の位置において微衛星形成が可能であると主張した[20]。すなわち、約85木星半径以遠の円盤赤道面には外向きのガスの流れがあり、その外向きの移流とダスト落下が釣り合う地点にダストが溜まり、ストリーミング不安定が起きて、微衛星が形成される。あるいは、筆者らは現在、非理想MHD計算から得られた周惑星円盤環境における微衛星形成の条件を調べているが、それは前述の形成条件よりも緩いものとなりそうだ[21]。周惑星円盤も磁場によって駆動される⁸可能性があるとうわかったのだが、その場合、乱流による円盤赤道面からのダストの巻き上げを抑えつつ、円盤のガス面密度を下げるができる。結果、従来のモデルより、ダスト同士の衝突確率が上がり成長が速くなる一方で、ダストの落下速度は遅くなるため、より少ないダストの供給でも微衛星が形成され得る。

また、惑星形成と異なり、必ずしも微衛星をその場で作る必要はない。原始惑星系円盤で形成された微惑星が、周惑星円盤に進入し、ガス抵抗により運動エネルギーを失うことで円盤に捕獲され、微衛星として機能する可能性がある。実際に、末次氏と大槻氏の研究によれば、従来の微衛星集積シナリオで仮定されていたような微衛星の分布を、微惑星の捕獲によって再現できることがわかった[22]。しかし、このシナリオの前提として、主惑星周囲に十分量の微惑星が存在する必要があり、これが容易には達成できないことに注意する必要がある。惑星の成長に伴い微惑星の分布にもギャップ構造ができ、惑星周囲から微惑星が排出されるためである[23]。そのため、現在は、例えば土星の移動によって周囲の微惑星の軌道離心率をあげて、微惑星を強制的に木星周囲へと運ぶ方法が検討されてい

8. 円盤に刺さった磁場が曲がることで磁気張力が発生し、ガスの角運動量が輸送され円盤構造が進化する。また、円盤の表面からは磁場に沿ってガスが流出する。

9. これは、木星系と土星系の比較の観点から面白い。つまり、自らより遠方に存在する“運び屋”の有無に衛星形成が左右されるならば、木星と土星の主要衛星数の違いを説明できる可能性がある。

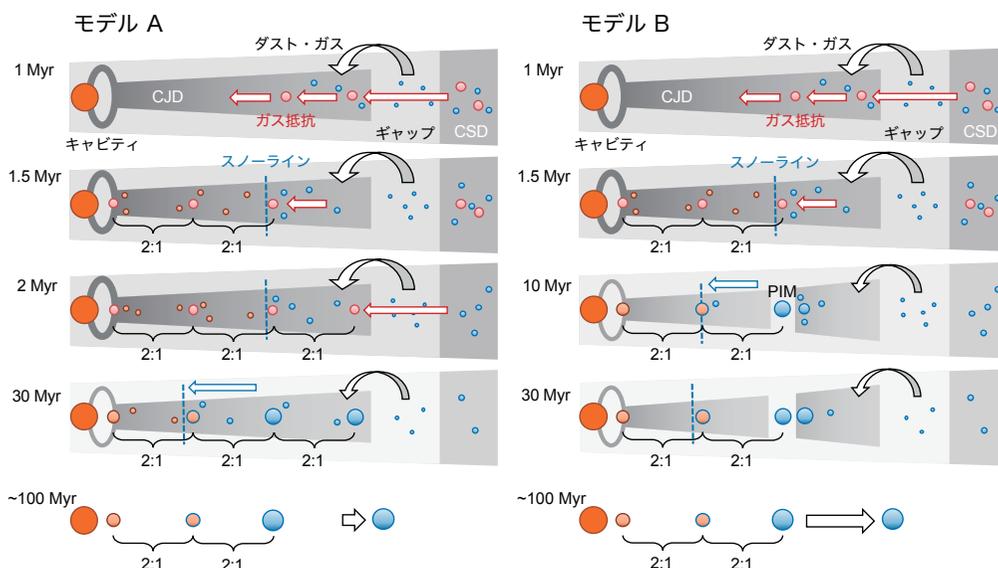


図3: ゆっくりペブル集積シナリオの二つのモデル。[モデルA]1Myr 木星が現在の40%ほどの質量にまで成長する。周木星円盤(CJD)の周囲にギャップ構造ができることでガスの集積率が下がり、木星周囲に木星磁場によるキャビティが形成される。原始惑星系円盤(周太陽円盤, CSD)遠方から流れてきたペブルはギャップの外側でせき止められ、小さいダストのみがガスと共に周木星円盤に供給される。また、溜まったペブルから微惑星ができる。1.5Myr 三つの微惑星が周木星円盤に捕獲され、ガス抵抗により木星に向かって移動する。最も内側の微惑星の移動はキャビティの端で止められ、残り二つの微惑星が外側から順次2:1の平均運動共鳴に入る。この時、スノーラインは三番目の微惑星のすぐ内側にある。2Myr 四つ目の微惑星が円盤に捕獲される。その後速やかに内側へ移動し、三つ目の微惑星との2:1共鳴に入る。30Myr 四つの微惑星が現在のガリレオ衛星のサイズまで成長する。原始惑星系円盤のガスが散逸するに従い周木星円盤へのガス流入も減少する。スノーラインはエウロパのすぐ内側の軌道まで移動し、少量の氷ペブルがエウロパに集積される。~100Myr 周木星円盤が消失し、カリストがガニメデとの共鳴軌道から外れ、現在の軌道に移動する。[モデルB]三つの微惑星が周木星円盤に捕獲されるまではモデルAと同じ経過をたどる。10Myr ガニメデがペブル孤立質量(PIM)に到達する。ガス圧の極大地点に落下してきたペブルが溜まり、イオ、エウロパ、そしてガニメデの軌道までペブルが供給されなくなることで、三つの衛星の成長が止まる。エウロパは、スノーラインの移動により、成長が止まる前に少量の氷ペブルを集積する。カリストの種がガス圧極大地点に溜まったペブルからできる。30Myr カリストが溜まったペブルを集積して現在のサイズまで成長する。~100Myr 周木星円盤が消失し、ガニメデに近い軌道にあるカリストが散乱され、現在の軌道に移動する。参考文献[25]の図1を改変。

る⁹[24]。

4. 新たな衛星形成シナリオ ー ペブル集積シナリオ ー

このように、従来の微衛星集積シナリオには、そもそも微衛星を十分に形成(あるいは捕獲)できないという大きな問題があるとわかった。そこで筆者らは、惑星形成において現在活発に議論されている「ペブル集積」という惑星形成メカニズム¹⁰を衛星形成に応用し、新しいシナリオを構築した[25]。このシナリオでは、

わずか数個の微惑星が周惑星円盤に捕獲されて「衛星の種」となり、これらが円盤内を中心惑星に向かって落下するペブルを集積して衛星にまで成長する。また、周惑星円盤の内側にキャビティ構造ができると仮定しており、そこで衛星の移動(落下)が止まるため、材料物質が少なくても長い時間をかけて衛星を作ることができる。さらに、対象を木星の衛星、ガリレオ衛星に絞って検証したところ、長い時間をかけてペブルを集積して作ることで、これまで不可能だった、「ガリレオ衛星のほぼ全ての特徴を一つのシナリオで同時に矛盾なく説明する」ことが可能となった。以下に、このシナリオの詳細と筆者らが行った計算及びその結果について説明する。

10. 基本的にダストは微惑星まで成長する前にペブルとして中心星に落下してしまうため、多数の微惑星を作り、それらを集めて惑星を形成するのは難しい。そこで、局所的に好条件な場所で少数の大きめの微惑星(惑星の種)が形成され、それらが落下していくペブルを濾しとって惑星となる、というメカニズムが考えられた。

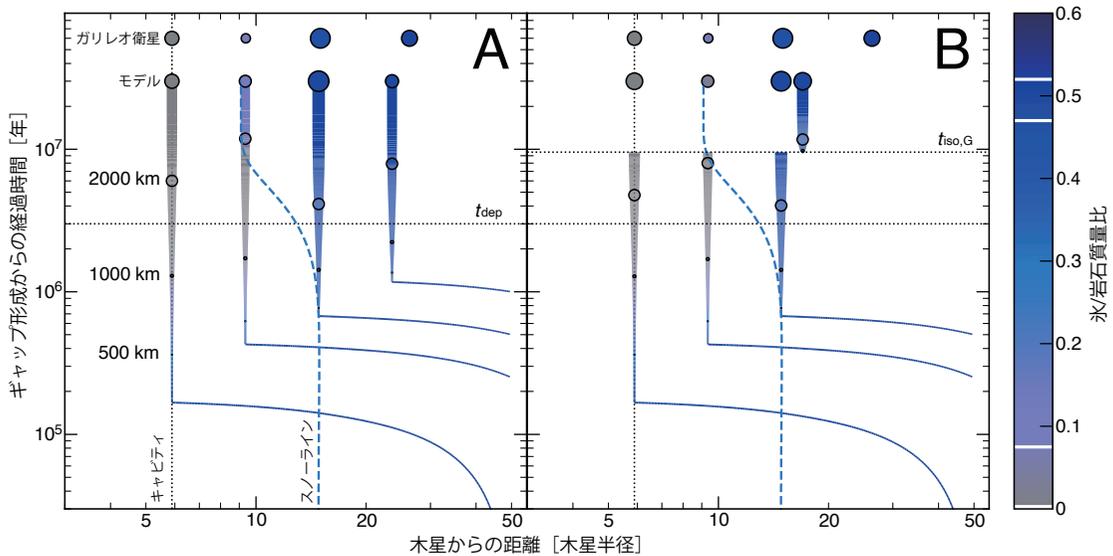


図4: 衛星の成長と移動及び氷/岩石質量比。左図がモデルA, 右図がモデルBの結果を示す。丸の大きさが衛星のサイズを示し、カラースケール(印刷版はグレースケール)が氷/岩石質量比を示す。また、黒と水色の縦の点線は、それぞれキャビティとスノーラインの位置を示す。横の点線は、ガスとダストの流入フラックスが指数関数的に減少するタイムスケール($t_{\text{dep}}=3\text{Myr}$)を示す。モデルBのもう一本の点線は、ガニメデがペブル孤立質量(現在のガニメデの質量と仮定)に到達する時刻($t_{\text{iso,G}}=t-t_{\text{gap}}=9.54\text{Myr}$)を示す。実際のカリオ衛星の諸元も描画した。カラーバーの白線は実際のカリオ衛星の氷/岩石質量比の推定値である。参考文献[25]の図4と図6をOrmelとともに改変。カラーの電子版も参照のこと。

4.1 ゆっくりペブル集積シナリオ

まず、このシナリオ(ゆっくりペブル集積シナリオと呼ぶ)について、もう少し詳しく説明する。筆者らはこのシナリオを二つの可能性、モデルAとBに分けて検討した。モデルAは、四つの微惑星が捕獲されて、それぞれ軌道移動とペブル集積による成長を経て現在の四つのガリレオ衛星となる。モデルBでは、まず三つの微惑星が捕獲され、軌道移動と成長が起きる。この時、三つ目の衛星(ガニメデ)がペブル孤立質量(PIM)に到達する[26]。ペブル孤立質量とは、天体がある程度まで成長すると、周囲のガス圧構造が変わってペブルがせき止められ、ペブル集積による天体の成長が止まる質量のことである。今回のモデルでは、ペブルのガニメデへの集積とその軌道より内側への落下がせき止められ、ガニメデ自身だけでなくイオとエウロパの成長も止まる。そして、せき止められて溜まったペブルから、カリストが形成される。図3は、この二つのモデルを絵で示したものである。

4.2 計算方法

次に、筆者らが行った計算について簡単に紹介する。衛星形成の場である周木星円盤として、ガス流入のある一次元の粘性降着円盤を考えた。微衛星形成の検証時は定常状態を考えていたが、ここでは、ギャップ形成時($t=t_{\text{gap}}$)¹¹からガス流入が $t_{\text{dep}}=3\text{Myr}$ のタイムスケールで指数関数的に減少するが、円盤進化はダストの合体成長や移動より十分に長いタイムスケールである、準定常状態を考えた。初期のガス流入フラックスはCanup氏とWard氏のモデルと同じ $\dot{M}_g=0.2M_J\text{Myr}^{-1}$ とした。乱流の強さ($\alpha=10^{-4}$)と、円盤のオパシティそして温度に寄与するような固体物質とガスの面密度比は円盤全体で一様とした¹²。結果として、計

11. CAI形成から1Myrとした。これは近年の木星の早期形成説と整合的である[34]。

12. 周惑星円盤では磁気回転不安定は起きないと考えられており[35]、乱流が弱いとする仮定と整合的である。一方で、オパシティは、円盤が最も低温になるような、(ガニメデの軌道付近で)光学的厚みが1となるような値を選んだ。スノーラインの位置によって決まる各衛星の氷/岩石比は、このパラメーターに強く依存する。

算初期のスノーラインの位置はガニメデ軌道のすぐ内側となった。次に、周木星円盤に供給されるダスト/ガス質量フラックス比を $\dot{M}_d/\dot{M}_g = 0.0026$ に固定し、円盤内の各位置におけるダスト(ペブル)のサイズを計算した。この値は、微衛星形成に必要な値、 $\dot{M}_d/\dot{M}_g = 1$ よりもはるかに現実的である。この時、落下により決まるペブルのサイズは式(1)で与えた。また、ペブル同士の衝突速度(大きなペブルほど速く衝突する)を見積もり、岩石及び氷ペブルがそれぞれ $5, 50 \text{ m s}^{-1}$ 以上で衝突する場合は、破壊により成長がそのサイズで止まるとした[27]。また、スノーラインより内側のペブルフラックスは外側の半分とし(氷ペブルの氷/岩石比を1とした)、衛星に集積されることによるペブルフラックスの減少も考慮した。結果、スノーラインより内側は衝突破壊によって、外側では落下(ドリフト)によってペブルのサイズが決まった。また、衛星の“濾し取り”によるペブルフラックスの減少は最大でも10%程度だった。

以上のようにして得られたガスとペブルの円盤内での分布を基に、ペブル集積による衛星の成長と軌道半径方向の移動を計算した。時刻 t における衛星の質量 $M_s(t)$ は、以下のように与えられる¹³。

$$M_s(t) = \int_{t_{\text{cap}}}^t \dot{M}_p P_{\text{eff}} dt \quad (2)$$

ここで、 t は CAI 形成からの経過時間、 t_{cap} は衛星の種(微惑星)が捕獲された時刻、 \dot{M}_p はペブルフラックス、 P_{eff} はペブル集積率(落下していくペブルを濾し取る割合) [28] である。ペブル集積率は衛星の質量と周囲のペブルのストークス数(前段落の計算)で決まる。捕獲時間は、最初の三つの微惑星がモデル AB 共に CAI 形成から $t_{\text{cap}} = 1.0, 1.25, 1.5 \text{ Myr}$ 経過後とし、モデル A ではさらに四つ目の微惑星が $t_{\text{cap}} = 2.0 \text{ Myr}$ に捕獲されると仮定した。モデル B では、カリストの種が、ガニメデが現在の質量に到達した時に、ガニメデによって形成されるガス圧の極大地点に形成されるとした。ガニメデの質量は、この周木星円盤モデルにおけるペブル孤立質量と近い値を持つためである [26]。同時に、ガス円盤からの抵抗を受けた衛星の内側への落下と、円盤との重力相互作用による衛星の Type I 移動を計算した [29,30]。前者は衛星が小さいほど、後者は衛星が大

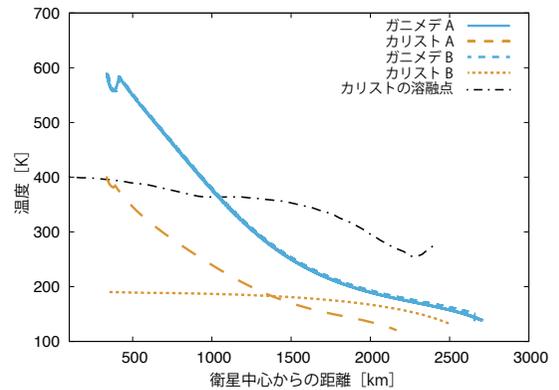


図5: ガニメデとカリストの内部温度。水色とオレンジ色の曲線は、それぞれガニメデとカリストの内部温度を示す。モデルAとBの両方の場合を描画した。黒の鎖線は、推定される実際のカリストの溶融点(参考文献[12]の図5より引用)を示す。参考文献[25]の図7を改変。

きいほど短いタイムスケールで落下する性質がある。また、衛星が別の衛星と2:1あるいは3:2の平均共鳴軌道まで接近した場合の接近速度が、N体軌道計算から推定される各共鳴に入る条件を満たすほど遅いか確認し、条件を満たす場合はその共鳴軌道の間隔を保つこととした[31]。例外として、モデルBにおけるカリストの軌道は、解析的に求めたガス圧極大地点に固定した。ここで、衛星の軌道移動に関連する仮定として、衛星の木星への落下を止められるようなキャビティ構造が周木星円盤の内側にでき、その幅が現在のイオの軌道半径であるとした。キャビティの形成要因としては、前述のように現在よりも強い木星の磁場が考えられる [32]。また、筆者が荒川氏と共同で行った研究において、周木星円盤内側のダスト量が光泳動¹⁴によって減少することで、磁気回転不安定(MRI)が活性化され、円盤面のガス面密度が下がる可能性があることがわかった [33]。いずれにせよ、周木星円盤にはこのようなキャビティ構造ができ、衛星の木星への落下が止まると考えられる。最後に、ガニメデとカリストがそれぞれ分化するか確かめるため、両衛星の内部温度を計算した。ペブルの集積による衛星表面の加熱と放射による冷却、そして集積され衛星を構成するペブルに含まれる²⁶Alの放射壊変熱による加熱、を計算した [12]。

13. モデルBのカリストの成長については参考文献[25]を参照のこと。

14. 中心星/惑星からの放射によりダスト周囲のガスの温度構造が変化し、ダストが円盤外向きに移動する現象。

4.3 計算結果

図4は、モデルA及びBにおける衛星の成長と移動、そして氷/岩石質量比を示す。モデルAとBのどちらの場合も、捕獲された微惑星はすぐに内側に落下し、共鳴軌道に入ったのちにペブル集積により成長した。

まず、衛星のサイズを見ると、どちらのモデルでも、実際のガリレオ衛星のサイズがよく再現されているとわかる。これらは、ダスト/ガス流入フラックス比の値を調整することで達成された¹⁵。また、スノーラインの内側では氷が蒸発してペブルフラックスが半分となることから、内側二つと外側二つの衛星のサイズの違いが再現された。

モデルAとB共に、内側の三つの衛星の軌道が再現された。捕獲された微惑星はガス抵抗によって内側に移動するが、イオ(の種)がまずキャビティによって移動が止められ、その後外側から順次衛星の種が2:1の共鳴に入った。一方で、モデルAでは実際と違い、カリストもガニメデとの2:1共鳴に入った。しかし、木星星円盤が晴れた後に、カリストは共鳴から外れる可能性がある[36]。モデルBでは、カリストは木星から17木星半径の位置に形成されるが、これはガニメデから(同衛星の)5ヒル半径の距離であり、両衛星の軌道はとても近い。従って、モデルBにおいてもカリストはガス消失後に散乱されるはずであり[37]、現在のようにガニメデから離れた軌道となる可能性がある。

図4の色(あるいは濃淡)に注目すると、全てのガリレオ衛星の氷/岩石比もよく再現されているとわかる。特に、エウロパの少量の氷(6-9重量%)は、ガス集積フラックスの減少により周惑星円盤温度が下がることで、スノーラインがエウロパ軌道の内側に移動し、形成の最終段階でのみ少量の水ペブルを集積することによって再現された。モデルA、Bでそれぞれエウロパの氷/岩石質量比は11重量%および3重量%となった。従来の微惑星集積シナリオでは、サイズの大きい氷微惑星はスノーライン内側でもすぐには蒸発しないため、エウロパが獲得する水の量をこのような少量に抑えるのは難しい¹⁶[10]。

次に、図5にガニメデとカリストの内部温度を示す。いずれのモデルにおいても、ガニメデのみが溶融点を超え、カリストは未分化のまま保たれた。この温度の差は、ペブルに含まれる²⁶Al(半減期は約0.7 Myr)の放射壊変による加熱の違いによって生まれる。すなわち、ガニメデの種となる微惑星はCAI形成後1.5 Myrに木星星円盤に捕獲されてペブル集積を開始するため、そのペブルには十分量の壊変前の²⁶Alが含まれているのに対して、モデルAでは2.0 Myrにカリストの種となる微惑星が捕獲され、モデルBでは10.5 Myrにガニメデがペブル孤立質量(つまり現在の質量)に到達しカリストの種が形成されるため、カリストに集積されるペブル内には²⁶Alがほとんど残っていない。また、本シナリオでは、供給される材料物質の少なさのため従来のシナリオよりも時間をかけて(~10 Myr)衛星が成長することで、ペブルの集積加熱が少なく、内部温度が²⁶Alによって決定される。さらに、モデルAでは、ゆっくり形成するため集積開始時刻の違いが最終的なガニメデとカリストの大きさに影響せず、ほぼ同じサイズであるにも関わらず異なる内部構造を再現できた。なお、今回は衛星形成時の温度しか計算していないが、この後の長寿命核種の放射壊変やレイリー・テイラー不安定などによる衛星内部の(温度)進化も大変重要である¹⁷。

以上のように、新しい「ゆっくりペブル集積シナリオ」は、ガリレオ衛星の質量、軌道(カリストは除く)、組成、そして内部構造を非常によく説明できるとわかった。ただし、この二つのモデルを計算するにあたり、多くの仮定を置き、パラメーターを調整していることも事実である。従って、筆者らは、このシナリオが一般的な巨大衛星形成において必ずしも正しいとは主張していない。あくまで、今回のシナリオはガリレオ衛星の特徴を再現することを目的としている。

5. まとめ

本記事では、木星や土星の持つ巨大衛星の形成過程についての現状の理解を、筆者らが行ってきた研究を中心にまとめた。従来の微惑星集積による衛星形成は、

15. モデルAの四つの衛星及びモデルBのカリストは、木星星円盤へのダストの供給がなくなることで成長が止まっている。一方で、モデルBのガニメデの質量は仮定より現在の質量(=ペブル孤立質量)に等しく、イオとエウロパはガニメデがその質量に到達すると同時に成長が止まる。

16. ただし、スノーラインをエウロパとガニメデの軌道の間に固定し、スノーライン内を落下中に部分的に蒸発した氷ペブルがエウロパに集積され、少量の氷を説明した研究はある[38]。
17. 参考文献[25]にて少し議論したので、そちらもご覧いただきたい。

衛星の質量や軌道について一見うまく説明できているようであったが、肝心の微衛星の形成に問題があることが、筆者らの研究によってわかってきた[13]。また、実際の探査から推定されたガリレオ衛星等の組成や内部構造について、従来の形成シナリオによる統一的な説明は成されていなかった。そこで、筆者らは、惑星形成において注目されている「ペブル集積」を衛星形成に応用することで、新たな衛星形成シナリオを構築することに成功した[25]。このシナリオでは、従来のシナリオよりも現実的なパラメータ範囲でありながら、ガリレオ衛星の質量、軌道、組成、そして内部構造について統一的な説明が可能となった。特に、ガニメデの成長はペブル孤立質量に到達したことで止まったと考えることができ、その場合、カリストがその外側に溜まったペブルから形成されることで両衛星の形成時刻に自然に差が生じ、観測から推定されているような両衛星の内部構造の違いが再現された。

しかし、筆者としては必ずしもガリレオ衛星などガス惑星の衛星がペブル集積のみによって形成されたとは考えていない。3.2章にも書いたように、周惑星円盤の構造や原始惑星系円盤での微惑星の状態によっては、局所的あるいは短期的に、微衛星が形成(あるいは捕獲)されることが期待される。「微衛(惑)星かペブルか」という問いは、衛星形成論と惑星形成論が現時点で共通に抱える課題であると言えるだろう。衛星形成論の今後は、これまででもそうであったように、惑星形成論の今後の議論に大きく左右されるに違いない。そして、周惑星円盤や系外衛星の観測が今後本格化していくことは確実であり、観測から衛星形成論、さらには惑星形成論へと、逆に制約を与えることも可能となるかもしれない。

謝 辞

本記事の原稿を詳細に読んで頂き、数多くの有意義なコメントを下さった、査読者の谷川享行氏に深く感謝致します。本記事は、筆者が第一著者である参考文献[13]及び[25]の内容から主に構成されています。これらの共著者であり、たくさんの実りある議論をして頂いた、東京工業大学の井田茂氏と奥住聡氏、京都大学の佐々木貴教氏、そして清華大学のChris W. Ormel氏に深く御礼を申し上げます。そして、本記事

の執筆機会を与えてくださった和田浩二遊星人編集長と田中秀和編集委員に深く感謝致します。This work has been carried out within the frame of the National Centre for Competence in Research PlanetS supported by the Swiss National Science Foundation (SNSF). The author acknowledges the support of the Swiss National Fund under grant 200020_172746.

参考文献

- [1] Lunin, J. I. and Stevenson, D. J., 1982, *Icarus* 52, 14.
- [2] Mosqueira, I. and Estrada, P. R., 2003, *Icarus* 163, 198.
- [3] Miguel, Y. and Ida, S., 2016, *Icarus* 266, 1.
- [4] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, *The Astronomical Journal* 124, 3404.
- [5] Tanigawa, T. and Tanaka, H., 2016, *The Astrophysical Journal* 823, 48.
- [6] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2006, *Nature* 441, 834.
- [7] Sasaki, T. et al., 2010, *The Astrophysical Journal* 714, 1052.
- [8] Ogihara, M. and Ida, S., 2012, *The Astrophysical Journal* 753, 60.
- [9] Kuskov, O. and Kronrod, V., 2005, *Solar System Research* 39, 283.
- [10] Dwyer, C. et al., 2013, *Icarus* 225, 390.
- [11] Schubert, G. et al., 2004, *Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere*, 1, 281.
- [12] Barr, A. C. and Canup, R. M., 2008, *Icarus* 198, 163.
- [13] Shibaie, Y. et al., 2017, *The Astrophysical Journal* 846, 81.
- [14] Takata, T. and Stevenson, D. J., 1996, *Icarus* 123, 404.
- [15] Kanagawa, K. D. et al., 2015, *The Astrophysical Journal Letters* 806, L15.
- [16] Kataoka, A. et al., 2013, *Astronomy & Astrophysics* 557, L4.
- [17] Carrera, D. et al., 2015, *Astronomy & Astrophysics* 579, A43.
- [18] Kanagawa, K. D. et al., 2018, *The Astrophysical Journal* 868, 48.
- [19] Tanigawa, T. et al., 2012, *The Astrophysical Journal*

747, 47.

- [20] Drazkowska, J. and Szulagyi, J., 2018, *The Astrophysical Journal* 866, 142.
- [21] 芝池諭人, 森昇志, 2019, 日本惑星科学会2019年秋季講演会.
- [22] Suetsugu, R. and Ohtsuki, K., 2017, *The Astrophysical Journal* 839, 66.
- [23] Fujita, T. et al., 2013, *The Astronomical Journal* 146, 140.
- [24] Ronnet, T. et al., 2018, *The Astronomical Journal* 155, 224.
- [25] Shibaïke, Y. et al., 2019, *The Astrophysical Journal*, 885, 79.
- [26] Lambrechts, M., et al., 2014, *Astronomy & Astrophysics* 572, A35.
- [27] Wada, K. et al., 2009, *The Astrophysical Journal* 702, 1490.
- [28] Ormel, C. W. and Liu, B., 2018, *Astronomy & Astrophysics* 615, A178.
- [29] Adachi, I. et al., 1976, *Progress of Theoretical Physics* 56, 1756.
- [30] Ogihara, M. et al., 2015, *Astronomy & Astrophysics* 579, A65.
- [31] Ogihara, M. and Kobayashi, H., 2013, *The Astrophysical Journal* 775, 34.
- [32] Christensen, U. R. et al., 2009, *Nature* 457, 167.
- [33] Arakawa, S. and Shibaïke, Y., 2019, *Astronomy & Astrophysics* 629, A106.
- [34] Kruijjer, T. S. et al., 2017, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201704461.
- [35] Fujii, Y. I., et al., 2014, *The Astrophysical Journal* 785, 101.
- [36] Fuller, J. et al., 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 3867.
- [37] Chambers, J. et al., 1996, *Icarus* 119, 261.
- [38] Ronnet, T. et al., 2017, *The Astrophysical Journal* 845, 92.