「2016年度最優秀発表賞受賞論文」 多様な巨大惑星リングの形成過程について

兵頭 龍樹^{1,2,3}, Sébastien Charnoz², 大槻 圭史³, 玄田 英典¹ 2017年 3 月31日受領, 査読を経て2017年 5 月11日受理,

(要旨)太陽系には多様なリングを持つ巨大惑星が存在する.土星リングは,その質量の95%以上が水氷か ら形成されているが,天王星や海王星のリングには岩石成分も多く含まれていると考えられている.このよ うに,観測技術の発展および莫大な探査データの解析からリングの詳細な描像が明らかになる一方で,リン グの起源および多様性が生まれた素過程は謎に包まれている.本研究では,約38億年前に起こったと考え られている後期重爆撃期に,冥王星サイズの巨大な微惑星が巨大惑星と少なくとも数回の近接遭遇を経験し うることに注目し,SPH計算とN体計算を用いて,分化した微惑星の近接遭遇時の潮汐破壊過程,および, 惑星に捕獲された破片の長期進化を詳細に調べた.その結果,密度の小さな土星では,微惑星の氷マントル が主に破壊・捕獲される近接遭遇しか起こらないが,密度のより大きい天王星や海王星では,微惑星の岩石 コアまで十分に破壊・捕獲される近接遭遇が可能となり,観測に矛盾しない多様なリングが形成されうるこ とが明らかになった.本研究で提案するリングの形成モデルは,惑星形成過程で必然的に起こりうる微惑星 との近接遭遇によって起こるものである.それゆえに,現在観測が進む系外惑星系にも適応が可能となり, 将来の観測で多様なリングが系外巨大惑星周りに観測されることが期待される.

1. はじめに

太陽系には、多様なリングが存在する。例えば、土 星リングは、非常に巨大であり、その質量の95%以 上が水氷から形成されている[1]. 一方、天王星や海 王星リングは、土星リングに比べると低質量であり、 岩石成分も多く含まれていると考えられている[2]. リングを構成している粒子の典型的なサイズについて は、μm-mサイズであると考えられている。さらに、 巨大惑星周りにはリングのみならず、リングの動径方 向外側近傍に多数の衛星(inner regular satellites)も 存在している[1]. この衛星群の特徴として、ほぼ惑 星の赤道面上を、ほぼ円軌道で順行方向に公転してい ることが挙げられる. さらに、惑星から遠ざかるほど、

hyodo@elsi.jp

より大きくなる傾向にある.また,このような衛星の 一つである土星衛星Enceladusには、内部海が存在し ていることが明らかになり、アストロバイオロジーの 観点からもリング-衛星系の起源・進化の解明は重要 性を担っている.

土星リングの形成起源は、これまでにいくつか提案 されてきた、例えば、"リングは土星の原始周惑星円 盤の残り"である説[3,4]がある、しかし、この説は、 リングから生まれたと考えられる(次章を参照)土星周 囲の衛星と土星本体の化学組成が大きく違うことから 現在では否定的に考えられている、さらに、別の説と して、土星のロッシュ半径近傍に既に原始衛星が存在 していて、それが外部からやってきた彗星との衝突で 破壊され、リングになった説[3,4]がある、しかし、 岩石と氷の混合であると考えられる原始衛星の破壊で は、観測される土星の氷リングを形成するのは難しい、 一方、近年の研究で、土星リングが氷主体であると

いう観測事実をうまく説明できた形成モデルがある

^{1.} 東京工業大学 地球生命研究所

Institut de Physique du Globe/Université Paris Diderot, 75005 Paris, France
神戸大学 理学研究科

^{3.} 种广八于 庄宁训九

[5]. このモデルでは、原始周惑星円盤内で集積したタ イタン程度の分化した衛星が、ガス抵抗によって内側 に落下し ロッシュ半径の内側で潮汐破壊されたとい うものである。ポイントとなるのは、ガス抵抗の強さ によって、氷マントル部分のみの潮汐破壊が起こり、 岩石コアは潮汐破壊される前に土星に落下して、氷の みのリングが形成されうるという点である。このモデ ルは上述のように氷リングを形成できるという点では 非常に成功しているが、いくつか問題点が指摘されて いる。例えば、ガス抵抗の強さにファインチューニン グが必要となってくる、ガス抵抗が強すぎると、潮汐 破壊された氷マントル破片も全て土星に落下してしま い、リングが形成されなくなる、逆に弱すぎると、コ アも破壊される、または、コアが落下せずにリング中 に残ってしまうことになる.また、潮汐破壊だけでは、 観測される µ m-m サイズの小粒子を形成することが 難しいという点も挙げられる. さらに,上述のモデル では,原始周惑星円盤を持ちうる土星には当てはめる ことが可能であるが,天王星や海王星には適応が難し くなる.

一方,いくつかの先行研究[6,7]では、<数kmサイ ズの彗星が潮汐破壊されることで巨大惑星周りにリン グを形成するアイデアが提案された.この説において、 リングの大質量を説明するためには、無数の彗星の潮 汐破壊が必要となるが、例えば、ある任意の座標系で、 ある彗星は時計回りにやってきて潮汐破壊され、破片 が惑星周りを時計回りに回るようになる.一方、別の 彗星は反時計回りにやってきて、反時計回りの破片を 形成する.それゆえに、無数の彗星を考えた場合、平 均すると系の総角運動量は最終的に0になってしまい リングが形成されなくなる.これが"彗星の潮汐破壊 説"における大問題であった.また、無数の彗星の潮



図1:N体計算の結果(リングの初期質量は惑星質量の約1%). リングを赤道面上方から見た図. 初期にリ ングは惑星のロッシュ半径内に存在している. 図中の時間(T)は, ロッシュ半径での公転周期で規格 化されている. Hyodo et al. 2015 [13]の図を借用.



図2:図1の続き.第一衛星の形成後,第二衛星が形成されている.

汐破壊でリングが作られるということは、異なる惑星 で観測される多様なリングを形成することは難しくな る.さらに、近接遭遇過程で潮汐破壊され捕獲された 破片は、非常に楕円軌道になり、さらに、この軌道面 は現在リングが観測される赤道面からずれている可能 性がある.このような問題は未解決であり、それがゆ えに、彗星の潮汐破壊説は否定的に考えられてきた.

本研究は、この"彗星の潮汐破壊説"を大きく拡張さ せた"巨大分化微惑星の潮汐破壊説"であり、さらに、 潮汐破壊後の破片の長期進化を詳細に明らかにし、リ ングの形成可能性を世界で初めて導き出したものとな る.

リングの拡散進化による複数衛星 系の形成

本研究で提案するリング形成モデルを議論する前に, 土星,天王星,そして海王星周りに現在観測される複 数の内側順行衛星(inner regular satellites)がリング から形成された可能性について議論し,リングの形成 当初には上述の衛星の質量を含んだ大質量リングであ った可能性について説明する.

リングは、粒子間の衝突や重力的な相互作用を通し て動径方向へ拡散する[8,9]. 系が重力不安定である場 合のリング粒子の単位時間あたりに惑星からの距離r を通過する質量フラックス(F)は、リング(円盤)の面 密度に支配されており、次式で表現される.

$F = \pi C G^2 \sigma^3 / \Omega^3$

ここで、Gは重力定数、Cは数値計算から求まる係 数[9]、σはリングの面密度、Ωは公転振動数である。 リング粒子が惑星のロッシュ半径(それよりも外側で は、リング粒子間の重力が惑星重力よりも卓越するこ とで、粒子同士の重力集積が可能となる臨界距離)よ りも染み出すと、粒子間の重力集積が起こり、衛星が 形成される(図1)[10-13].形成された衛星は、重力作 用を通して残りのリングの拡散を一時的に抑制し、そ の反作用として衛星は外側へ移動する(図2上図). 衛 星が十分にリングから遠ざかると,再びリングが染み 出してきて新たな衛星が形成される(図2下図). 近年, このような衛星の集積と外側移動を繰り返すことで, 観測される複数衛星系が形成されうることが明らかに なった[14-16]. この時,より外側に存在する衛星が より大きくなるのは,外側衛星が形成された時の方が, よりリングに質量が残っていることから,質量フラッ クスがより大きかったためである.

つまり、このようなリングの拡散進化によって、土 星, 天王星, そして海王星周りに観測される複数衛星 系が形成されたということは、過去に衛星を形成でき るだけの質量をリングは最低限保持していなければな らないことになる、土星系の場合、現在のリングの質 量は約~10¹⁹kgであるが、リングの形成当初は約 ~10²¹kgの質量を保持していたと考えられ、その後の 40億年程度をかけたリングの染み出しによって衛星 Rheaまで形成することが可能である[15]. 一方, 天王 星の場合、現在のリング質量は10¹⁵-10¹⁶kg[17]と見積 もられているが、衛星Oberonまでリングの染み出し で形成しようとすると、リングの形成当初には約~ 10²²kgの質量が必要となる。海王星の場合、衛星 Triton(Tritonはその軌道から捕獲された衛星だと考 えられている)よりも内側の衛星をリングの拡散で形 成しようとすると、約~10²⁰kgの初期リング質量が必 要となる.

3. 微惑星の潮汐破壊によるリング 形成モデル

上述の議論を踏まえて,巨大惑星の多様なリングの 形成モデルを考えるにあたって説明しなければいけな い点は,1. 観測される小さなリング粒子の起源,2. 惑星によってリングの組成が違う理由,3. 複数衛星 系を形成しうる初期リングの大質量の起源,となる.

一方,最新の惑星形成論(ニースモデル)[18]によっ て,約38億年前に起こったと考えられる後期重爆撃 期に巨大惑星の外側にある微惑星円盤に1000-4000個 の冥王星サイズの巨大微惑星(質量~10²²kg)が存在し ていた可能性が明らかになった.このような巨大微惑 星のほとんどは、ニースモデルで予想される不安定時 期に巨大惑星に衝突したり、近接遭遇をして太陽系外



図3: SPH計算の概念図.分化した微惑星(青色)が,巨大惑星の ロッシュ半径(破線)の内側を通過するような近接遭遇過程 において潮汐破壊を経験し,その破片の一部が惑星の重力 場に捕われる.捕獲直後の破片は数十kmサイズと大きく, 軌道は非常に楕円軌道である(離心率e~0.9). Hyodo et al. 2017[21]の図を改変.

に弾き飛ばされたりするが[18],本研究では、このような微惑星が、巨大惑星と"数回の"近接遭遇を経験しうることに注目し、この過程におけるリングの形成可能性について詳細に調べ上げた.

3.1 微惑星の潮汐破壊と破片の巨大惑星によ る捕獲

まず我々は、Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH)計算(SPH計算の詳細は[19]を参照)を用いて分 化した冥王星サイズの微惑星(50 w%の岩石コアと 50 w%の水氷マントル)が巨大惑星のロッシュ半径以 内に近接遭遇した場合の、潮汐破壊による破片の巨大 惑星周りへの捕獲率を詳細に調べた(図3,4)、10²¹⁻²³kg サイズの天体が分化しているかどうかは議論の余地は あるが、形成のタイムスケールが早ければ分化してい ることを主張している論文もみられる[20].また、捕 獲の定義としては、潮汐破壊後の破片が惑星に重力的 に捕獲されている、かつ、破片の近点距離が惑星半径 より大きい、かつ、破片の遠点距離が惑星ヒル半径よ り小さい、とする.

SPH計算の結果, 微惑星は近接遭遇距離が小さい ほど,より強い惑星重力を経験することで,より破壊 され,より多くの質量が捕獲される傾向になることが 明らかになった(図5,6).ここで,ロッシュ半径(自 己重力=潮汐力となる臨界距離)は,惑星の密度 p_{ρ} , 半径 R_{ρ} ,そして微惑星の密度 ρ_{s} を用いて

$$a_R = 2.456 \, \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{1/3} R_p$$



図4: 土星系での潮汐破壊過程のSPH計算のスナップショット(微惑星質量M=10²³kg,初期微惑星スピン8h(順行方向),近点距離q=5.6 ×10⁷m,無限遠での相対速度3km/s,の場合).各パネルは,微惑星の軌道面の垂直方向から見た微惑星の重心系での図である. 赤色は岩石コア,青色は氷マントルを表している.各パネル上の右上の矢印は土星の方向を示している.水平の黒棒は微惑星の ヒル半径を示している.一番上の二つのパネルにおいて,重心系で見た時の微惑星が持つ速度を矢印で示している.Hyodo et al. 2017 [21]の図を改変.



図5:異なる近点距離での分化した微惑星の潮汐破壊過程における土星周りの破片の捕獲率(100×捕獲質量/微惑星の初期質量). 各点 はSPH計算の結果であり,破線は先行研究[6]で解析的に求められた理論値. 各点の色は,捕獲質量における岩石質量の割合を表 している(100×捕獲岩石質量/捕獲総質量). 左図は微惑星質量が10²¹kgの場合,右図は微惑星質量が10²³kgの場合. 上,真ん中, 下図は微惑星の近接遭遇面に垂直方向の初期スピンが,それぞれ,近接遭遇方向と同じ(スピン周期は8h),スピン無し,近接遭 遇方向と逆(スピン周期は8h)の場合を示している. 図中の青色領域は土星内部を表しており,実際には巨大惑星に衝突してしま うので起こりえない近接遭遇パラメータである(本研究では,巨大惑星を質点として表現しているので,データ点が存在する). Hyodo et al. 2017 [21]の図を改変.

と表現される. それゆえに,密度が比較的小さい土星 (687 kg/m³)では, 微惑星は土星のロッシュ半径の約 45%までしか近接遭遇ができない(それより内側を通 過すると惑星に衝突してしまう). 一方,天王星や海 王星の密度は土星に比べて大きく(それぞれ1270 kg/ m³と1640 kg/m³), 微惑星は惑星ロッシュ半径の35 %程度まで近接遭遇が可能となる. さらに,微惑星の 近接遭遇速度は,土星と天王星(または海王星)を比べ ると,土星においてより速くなる(無限遠での相対速 度は土星で3 km/s程度であるが,天王星や海王星で は2 km/s程度となる[7,18]).また、土星と天王星(ま たは海王星)を比較すると、潮汐力は惑星ポテンシャ ルの動径方向の二回微分で表現されるが、天王星およ び海王星の方が、その勾配が大きくなることから、土 星よりも大きな潮汐力となる、以上の効果により、近 接遭遇過程において微惑星は天王星や海王星において 土星に比べてより強い潮汐破壊を経験することになる。 それゆえに、土星系では、氷マントルのみが破壊・捕 獲される近接遭遇のみが支配的に起こることになる (図5).一方、天王星や海王星では、岩石コアまでも



図6:図5と同じ.ただし,天王星の場合.土星の場合と比べて,岩石捕獲率が高くなっている(惑星に衝突せずに微惑星の岩石コアま で効率良く捕獲できる近接遭遇バラメータがより多くある). Hyodo et al. 2017 [21]の図を改変.

潮汐破壊され,破片が捕獲されうることになる(図6). つまり,観測に矛盾しない異なる組成の物質が異なる 巨大惑星周りに捕獲されうるプロセスが初めて明らか になった.

3.2 捕獲破片の長期力学進化

しかし、潮汐力のみによって破壊された破片の捕獲 直後のサイズは、数km-数十km程度になると考えら れ(氷の物質強度と経験する潮汐力を比較した場合の 最小サイズ)、観測されるリング粒子サイズに比べる とはるかに大きい.さらに、捕獲破片の軌道は離心率 が0.9程度と非常に楕円軌道である[21].また、捕獲 破片の軌道面は、初期の微惑星の巨大惑星との近接遭 遇面であるため、巨大惑星の赤道面と一致していない 可能性が高い.一方で、観測されるリングは巨大惑星 のほぼ赤道面に位置している.これでは、観測される リングとは似ても似つかない状況である.そこで次に 我々は、巨大惑星の偏平の効果(J₂とJ₄項を考慮)を取 り入れたN体計算を用いて捕獲された破片が長期的 な進化でリングへと進化しうる可能性に取り組んだ. 本研究のN体計算初期条件には、SPH計算から直接 得た破片の質量、位置、速度の情報を用いた.また各 破片は、さらに細かいkmサイズのハードスフィア粒 子からなるアグリゲイトとして表現し、粒子間の重力 および衝突を考慮した.これによって、捕獲後の周惑 星軌道における更なる潮汐破壊も表現することが可能



図7:N体計算の概念図.巨大惑星の偏平の効果により数百年から数千年をかけて、捕獲破片は歳差を経験する ことで、巨大惑星の赤道面に対象なトーラス状の構造を形成する(左上図:赤道面に垂直方向から見た図, 左下図:赤道面から見た図).その後の長期的な進化で破片同士は軌道交差の結果、高速衝突を経験し、 破砕され、小さな粒子を形成する.さらに、衝突ダンピングで離心率および軌道傾斜角はダンピングされ、 円軌道で赤道面に落ち着いたリングが形成される(右図).

となった.

N体計算の結果,惑星の偏平の効果によって,捕獲 破片は惑星周りに歳差運動をすることで,数百年から 数千年のうちに,赤道面に対象なトーラス状の構造を 形成することが分かった(図7左).そして,より長期 的な進化で破片同士は衝突を経験することになる.こ の時,破片同士の軌道は歳差によって十分にランダム な方向に向いているため,破片同士の軌道交差がおこ り(図7),衝突速度は,

$v_{\rm col} \sim v_{\rm Kep} (e^2 + \sin(i)^2)^{1/2}$

程度となる(v_{Kep}は、ケプラー速度, eとiは破片の離 心率と軌道傾斜角である).ここで, e~1であるから, 破片同士の衝突速度は数km/s程度になることから, 破片は衝突によって細かく破砕されることが期待され る.この時,衝突のタイムスケールは初期の破片の軌 道面の傾き(惑星赤道面からの傾き)によるが,数千年 から数万年程度だと見積もられる[21].さらに、衝突 によって離心率と軌道傾斜角がダンピングされること から,最終的に小さな粒子からなる円軌道で赤道面に 落ち着いたリングが形成されうることが明らかになっ た(図7).

4. まとめと今後の展望

太陽系の巨大惑星には多様なリングが存在している. さらに,近年の研究[13-16]によって,リングは動径 方向に拡散進化をすることで,その周囲に複数の衛星 を生み出しうることも明らかになった.一方,リング は惑星本体に付随して形成されたと考えられるので, その起源解明は当時の集積環境などの惑星形成史を紐 解く鍵になりうるが,多様な巨大惑星リングの起源は 謎につつまれていた.

本研究では、SPH計算とN体計算を組み合わせる ことで、約38億年前に起こったと考えられる後期重 爆撃期における冥王星サイズの分化した微惑星と巨大 惑星の近接遭遇時に多様な巨大惑星リングが作られる 可能性を調べ上げた.その結果、微惑星が巨大惑星の ロッシュ半径の約半分よりも内側を通過した場合(先 行研究[18]から、各巨大惑星において、このような近 接遭遇が冥王星サイズの微惑星において少なくとも数 回起こることが明らかになっている)、潮汐破壊によ って、微惑星質量の0.1-10%が惑星周りに捕獲される ことが明らかになった[21]、ゆえに、土星、天王星、 海王星の衛星を形成しうる初期リング質量を得るため には、10²³kgの微惑星が一度近接遭遇をして、潮汐破 壊されるだけで十分となる。一方、冥王星サイズの 10²²kg程度の微惑星の場合は、複数回の近接遭遇が必 要となるが、近年のニースモデルによると[18]、各惑 星は、10²²kg程度の微惑星と複数回の近接遭遇を経験 しうることが示唆されている。

しかし、捕獲直後の破片は、初期に巨大惑星周りを 非常に歪んだ楕円軌道で運動しており(離心率~0.9)、 さらに破片サイズは数十キロメートルと観測されるリ ング粒子のサイズに比べるとはるかに大きい.これで は観測されるリングとは似ても似つかない状況である. しかし、捕獲破片はその後の長期進化において、惑星 の扁平(主に赤道面の膨らみ)の効果によって、歳差運 動を経験することで、軌道方向がランダムに分布し、 軌道交差がおこるようになる.軌道交差が起こると破 片同士の高速衝突が発生し、捕獲破片はさらに破砕さ れ、小さな粒子を形成することになる.さらに、この ような衝突によってエネルギーの散逸が起こり、楕円 軌道が円軌道化され、現在観測されるリングになりう ることが明らかになった[21].

さらに、土星と天王星(または海王星)のリングの組 成の違いは、惑星本体の密度の違い、および、各惑星 における近接遭遇速度の違いによって生じうることが わかった、土星の密度は、天王星や海王星の密度に比 べると小さい、潮汐破壊が起こる臨界距離は、ロッシ ユ半径によって特徴付けることが可能であるが、ロッ シュ半径は惑星密度の1/3乗と惑星半径に比例する。 それゆえに、密度のより小さい土星では、密度の大き い天王星(または海王星)と比べると、微惑星は惑星の 重力ポテンシャルの深いところを通過することができ ない(ロッシュ半径で規格化したときの、惑星半径が 土星ではより大きい).また,天王星および海王星では, 潮汐力となるポテンシャルの二回微分がより急勾配と なり、より強い潮汐力が働くことになる. さらに、微 惑星の近接遭遇速度は、天王星および海王星では、土 星の場合に比べて遅くなることから、天王星および海 王星では土星に比べて、より長く潮汐力を経験し、程 度の激しい潮汐破壊が微惑星に起こる. それゆえに、 土星では主に分化した微惑星の氷マントルのみが潮汐 破壊され、破片が捕獲される近接遭遇しか起こらない が、天王星や海王星では、岩石コアまで破壊・捕獲さ

れる近接遭遇が起こることで、観測に矛盾しない多様 なリングが形成されうることが明らかになった[21].

本研究で提案する微惑星の潮汐破壊によるリング形 成モデルは、惑星形成過程で自然に起こりうる物理プ ロセスである.つまり、この物理プロセスは太陽系だ けに当てはまるものではなく、他の惑星系にも適応可 能となる.現在、観測技術の発達に伴って、系外惑星 リングや系外惑星衛星検出プロジェクトが進んでいる [e.g. 22].我々は、現在のところ、太陽系リングの起 源のみに焦点をあててきたが、今後は、異なる惑星系 で起こりうる、近接遭遇パラメータを用いて、系外惑 星系で形成されうるリング、そして、そこから拡散進 化によって形成されうる衛星系に理論的な制約を与え、 将来の観測天文学に役立つような研究をしていきたい と考えている.

謝 辞

本研究の遂行にあたり、長年指導して頂いた指導教 官である神戸大学 大槻圭史教授には何よりも多大な 感謝を申し上げます.また、フランス・パリに約二年 間招待してくれ、共同研究をしてくれたパリ大学・ IPGP Sébastien Charnoz 教授に感謝いたします. SPH 計算の指導をして頂き、多くの共同研究をして頂いた 地球生命研究所 玄田英典特任准教授にも特別の感謝 を致します.また、2016年日本惑星科学会最優秀発 表前夜に日本惑星科学杯(フットサル大会)を開催して 頂き, その後, 深夜まで激励会と称した飲み会を開催 して頂いた国立天文台 堀安範特任助教, 日本スペー スガード協会 浦川聖太郎氏, 千葉工大 岡本尚也研究 員、のおかけで、これまでにないリラックスした発表 ができました. この場をかりて感謝いたします. 本研 究は、日本学術振興会の特別研究員奨励費(15J02110) の助成を受けておこないました.

参考文献

- [1] Porco, C. C. et al., 2007, Science 318, 1602.
- [2] Tiscareno, M. S. et al., 2013, ApJL 762, L28.
- [3] Pollack, J. B. et al., 1973, Icarus 20, 263.
- [4] Pollack, J. B., 1975, Space Sci. Rev. 18, 3.
- [5] Canup, R. M., 2010, Nature 468, 943.

- [6] Dones, L., 1991, Icarus 92, 194.
- [7] Charnoz, S. et al., 2009, Icarus 199, 413.
- [8] Lynden-Bell, D. and Pringle, J. E., 1974, Mon. Not. R. Astron. Soc. 168, 603.
- [9] Daisaka, H. et al., 2001, Icarus 154, 296.
- [10] Kokubo, E. et al., 2000, Icarus 148, 419.
- [11] Ida, S. et al., 1997, Nature 389, 353.
- [12] Hyodo, R. and Ohtsuki, K., 2014, ApJ 787, 56.
- [13] Hyodo, R. et al., 2015, ApJ 799, 40.
- [14] Charnoz, S. et al., 2010, Nature 465, 752.
- [15] Crida, A. and Charnoz, S., 2012, Science 338, 1196.
- [16] Hyodo, R. and Ohtsuki, K., 2015, Nature Geoscience 8, 686.
- [17] French, R. G. et al., 1991, In Uranus, 327.
- [18] Nesvorný, D. and Vokrouhlický, D., 2016, ApJ 825, 94.
- [19] 玄田英典, 2015, 遊星人 24, 191.
- [20] Guilbert-Lepoutre, A. et al., 2011, A&A 529, 71.
- [21] Hyodo, R. et al., 2017, Icarus 282, 195.
- [22] Kipping, D. M. et al., 2012, ApJ 750, 115.