

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800250

研究課題名(和文)ダストは惑星を動かすか

研究課題名(英文)Do dust particles move a planet?

研究代表者

山田 耕(ko, yamada)

早稲田大学・政治経済学術院・准教授(任期付)

研究者番号：60424793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：一般的に惑星は、固体粒子(ダスト)を含むガス円盤の中で形成される。その際、惑星はガス円盤からのガス抵抗によってその軌道を大きく変える。本研究の目的は、この軌道変化の様子をより詳細に理解することである。従来の研究ではガス円盤と惑星との間の相互作用しか考えていなかったが、本研究ではこれらにダストの効果を含めた惑星・ガス・ダスト3体間の相互作用を考慮した。その結果、ダストの存在は従来予想されていた軌道変化率を変えうることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Migration for terrestrial planets which are forming in gas disks is one of important issues to systematically understand their orbital evolution. Planet with the order of Earth mass undergoes the decay of its semi-major axis by the interaction between a planet and a disk gas. Previous works indicate that planets move toward their host star. In addition, most studies on the time-evolution of dust particles in disks show that dust particles on the order of mm move from a distant region to an inner planet-forming region of a disk, leading to enhance the dust/gas ratio. The gas flow pattern changes through the exchange of the angular momentum between dust particles and gas. This may influence the total amount of torque exerting a planet. A goal of our study is to examine the effect of dust particles on the planet migration. We find that the inward migration speed may be reduced or vanished with the increase in both the size of a dust particle and the gas/dust ratio.

研究分野：惑星形成論

キーワード：惑星移動 ダスト 円盤ガス トルク

1. 研究開始当初の背景

(1)系外惑星と呼ばれる太陽系以外の惑星が発見されたのが1995年のことである。そこから約20年が過ぎた。この間に地上望遠鏡や宇宙望遠鏡で発見された系外惑星は数千にのぼる。図1は発見された系外惑星に対する確定した軌道長半径と質量を示したものであるが、これら系外惑星の軌道分布を見ると宇宙には様々な位置に異なる質量をもつ惑星が存在していることがわかる。木星質量程度の惑星は中心星の極近傍から太陽系の木星の位置に対応する所まで広く分布している。さらに、地球質量の10倍程度の惑星も軌道長半径0.01AUから1AUまで分布していることが図1からわかる。これよりも遠方における低質量惑星になると観測限界のため、現時点では検出することができないが、図1の分布を見てみても太陽系とは異なる惑星系が宇宙には多く存在することが確認できる。

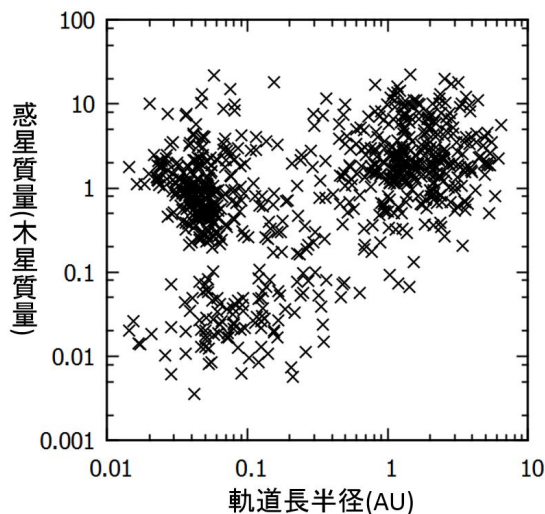


図1: 横軸は軌道長半径(AU: 太陽と地球の間の距離が1AU)、縦軸は観測者と観測される惑星軌道の不定性を考慮した惑星質量を示している(木星質量を1として規格化している)。データはThe Exoplanet Data Explorerから取った。

(2)では、これら惑星系はいつ作られたのであろうか。太陽系で言えば、各惑星(水金地火木土天海)の位置関係はいつ現在のようになったのであろうかという疑問になる。惑星の位置問題は、惑星の形成途中の環境がどうだったのかという問題ともリンクする。そして、惑星が誕生した時のガス円盤の環境は惑星を構成する成分だけでなく、惑星表面のその後の環境進化にも大きな影響を与えるため、惑星が作られた、もしくは初期に惑星が長いこといた環境は惑星形成論において説明すべき重要な課題の一つである。

(3)望遠鏡の性能の向上に伴い、年齢の若い恒星周りに円盤状のガスがあることがわかっている。このガス円盤は原始惑星系円盤と言

われ、大部分は水素やヘリウムから成る。その他に数wt.%程度のダストといわれる水岩石成分を含む。このダストがガス円盤中でコツコツと衝突合体することによって、惑星サイズまで大きくなると考えられている。初期の惑星形成論では、惑星は形成時からほとんど動かないと仮定され、惑星の成長などが考えられてきた(これをその場形成という)。しかし、Goldreich & Tremaine(1979)は惑星が地球質量程度よりも重くなると円盤ガスと重力相互作用をして、惑星の軌道が変わる可能性を指摘した。彼らの解析によると、5AU辺りにある地球質量程度の惑星は10万年程度のタイムスケールで中心星に落ちる。これをタイプ1惑星落下と呼ぶ。この移動のメカニズムは次の通りである。地球質量程度の惑星はガス円盤との重力相互作用により、惑星軌道の両側のガスにそれぞれ密度波、つまりガスの濃い領域を作り(図2)、その密度波を通して惑星はその軌道角運動量を失う。すなわち、中心星重力とガスの遠心力が主に釣り合って運動するケプラー回転円盤では、惑星よりも内側のガスは惑星よりも速く回り、外側のガスは遅く回る。そのため、内側にできたガスの濃い領域は惑星の回転速度を速める方向に惑星に重力をかけ、外側のガスは減速するような重力をかける。これらの力の差が惑星にかかる正味の力となり、ガス圧や曲率などの効果によって(惑星の回転速度にブレーキをかける)外側の重力が若干卓越する。その結果、軌道長半径が減衰するというものである。

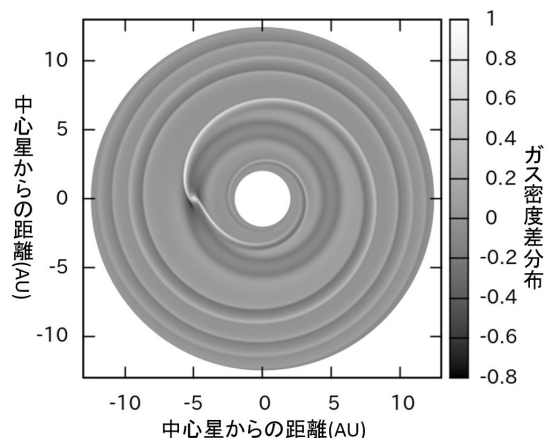


図2: 等温ケプラー円盤におけるガス密度差分布の(上から円盤を見た)スナップ図。密度差は惑星が無い時のガス密度分布(ρ_0)と惑星のある時の密度分布(ρ)との差($(\rho - \rho_0) / \rho_0$)を示している。色の明るい領域はガス密度の濃い領域を示しており、惑星の両側に存在していることが分かる。これが密度波といわれるものである。原点に中心星があり、(-5, 0)に反時計回りで運動している惑星がある。図の分布は惑星が中心星を20周回った時のものである。

(4)内側への軌道変化が本当であれば、図1で

示した中心星の近く(0.1AU以下)にある惑星の存在は説明することができる。しかし、図1にはそれ以外の位置にも多くの惑星が存在する。同様に、太陽系の惑星もすべてが太陽の近傍にある訳ではない。さらに、内側移動が10万年程度で起こるなら、地球をはじめ木星など太陽系の主要な惑星は誕生後すぐに太陽に落ちてしまい、無くなってしまう。この理論予測は、地球や他の惑星が現に存在しているという観測事実を説明することができなくなる。一方で、円盤のある領域内では、惑星の軌道変化が止まったり、外へ動いたりすれば図1のような様々な軌道に惑星が存在することと矛盾しない訳であるが、彼らの研究によると円盤のどの場所でも一律で惑星が内側へ移動すると主張しており、観測事実とのギャップが生じている。しかしながら、初期の研究はまだ精度のよい流体数値計算ができなかったため、基本的に近似式を用いた分析であった。そのため、その落下時間の精度には大きな疑義が付されていた。

(5)その後、この問題は近似法の精緻化や計算機の精度向上によって、惑星の軌道変化の詳細がかなりよく理解されるようになってきた。過去の研究(e.g., Tanaka et al., 2002)によると、ケプラー運動しているガス円盤の下では惑星はガスとの重力相互作用によって内側へ移動し、かつそのスピードは数十万年である。これは初期の研究の結果とほとんど変わらないものである。初期の分析はその近似の粗さにより、タイプ1惑星落下は惑星形成において深刻な問題にならないと思われていたが、近年の精密な近似計算や数値計算は不定性がかなり改善されたため、惑星が短時間で内側へ移動するという理論予測は無視できないものとなった。

(6)一律に内側移動というのは、従来の研究が想定していた惑星の「その場形成」という前提に対して何らかの修正をリクエストするものであり、惑星の軌道はいつどのように決まったのかを惑星落下を引き起こすメカニズムを考慮しつつ、再考することを研究者につきつけた。一方、過去のタイプ1惑星落下研究は中心星の周りをケプラー運動している等温ガス円盤という仮定を置いていた。近年、この妥当性を見直して、様々な効果を考えて惑星落下問題を調べ直すことが行われている。

(7)円盤ガスの時間進化を調べている研究によると、円盤ガスは静的に中心星の周りをケプラー運動しているものではなく、その中は磁場などの影響によって非常にダイナミックな運動(例えば、乱流運動など)が起こっていることが指摘されている。また、ガスの冷却効率という観点から見ると、円盤進化に伴ってガス輻射率は変化する。つまり、ガス温度はその運動に従い、変化する。ガス温度はその密度とも関係しているため、重要な物理である。ゆえに、ガス円盤の力学・熱的な変化を考慮して、惑星落下問題が最近精力的に

調べられ始めた。

(8)Baruteau & Masset(2008)はガスの冷却率が悪い時、すなわちガスは発生した熱をすぐに逃がさず溜め込めるような状況では、密度波からの重力だけでなく、惑星とはほぼ同じ軌道(この軌道を共回転軌道という)を回るガスからも大きな重力的な影響を受けることを明らかにして、惑星の内側移動にブレーキをかけ、場合によっては外方向へ移動することを示した。これは惑星軌道両側のガスエントロピー分布の非対称性が大きなガス密度変化を引き起こし、共回転共鳴トルクの大きさを変えるためである。Yamada & Inaba(2011)は、惑星落下の速度や方向をガスの輻射効率の関数として与えた。これらの結果から、内向き惑星落下にならないパラメータ条件は従来のものと比較してある程度緩和されたが、それでも多くのパラメータ領域で惑星の軌道進化は内向きを示しており、図1のような多様性を説明するには不十分である。

2. 本研究の目的

(1)本研究の最終的な目的は、惑星が円盤ガスのどこにあっても一律でかつ短時間で内側へ移動するのか、それともガス円盤のある領域では内側移動を遅らせる、止める、もしくは外方向の移動に変化させるようなことはあるのかということ明らかにすることである。1章で述べたように、太陽系の惑星だけでなく系外惑星の軌道の多様性を説明する上でこのメカニズムの理解は必須である。ゆえに、本研究では、ガス円盤の進化過程で必然的に実現するような環境で作動する、従来の内側移動を変えるメカニズムを提案することである。

(2)ALMA観測は円盤進化の描像を明らかにしてその理解を飛躍的に高めている(国立天文台ALMAページ)。それに伴い、円盤進化の理論的な研究も精力的に行われている。これらの結果の一つには円盤ガス中のダスト進化がある(e.g., Birnstiel et al., 2012)。これらの結果は、10AU以内の惑星形成領域では外側にあるmmサイズのダストが大量に落ちてきて、ダスト量が初期に比べて10倍以上(ガス/ダスト比で0.1以上)に達する可能性があることを報告している。Birnstiel et al.(2010)によると、そのダスト増加期間はかなり長い時間継続し、その一部は惑星形成時期と重なることが示されている。従来の「その場形成」論では、固体惑星が作られつつあるステージにおいてダストは惑星を作る原材料として使い果たされ、ほとんどないと思われていたが、このような結果を踏まえると今までの描像を捨て去り、惑星近傍にも大量のダストが漂っているかもしれないということ想定しなければいけない。

(3)ダストはガスと相互作用をして、ガスの運動を変化させる。ケプラー運動をするダストはガスから向かい風の摩擦を受けて、内側へ

落ちる。一方、ガスはダストから角運動量を得て外側へ動く(地球惑星科学 12 比較惑星学)。ガス密度が濃い領域に大量のダストが混ざると、ダストの影響でガス密度の緩和が生じる。このような円盤中のダストの振る舞いとガスへの影響を考えると、惑星移動を決める密度波にダストの存在が何らかの影響を与えるのではないかと言うことができる。この効果はまだ過去の研究で確かめられておらず、ダストを考慮した時に惑星移動がどのように変わるのかわかっていない。仮に惑星移動が大量にあるダストの影響(実際にはダストがガス密度に影響して、である)で止まることがあれば、惑星形成論に対していくつかの重要な示唆を与えるだろう。

(4)この示唆の一つには、ダストが大量にある領域内に固体惑星がその場で止まる、もしくは長時間留まれば、惑星は周りにあるダストを取り込むことによって惑星質量を増大する可能性がある。また、地球は現在の場所で作られたとすると水の量が多すぎると言われている。しかし、この問題もダストの濃い領域に滞在している間に氷ダストを大量に取り込めばある程度解決することができると思われる。したがって、ダストが惑星移動にどのような影響を与えるのかを調べることは惑星移動だけでなく、我々地球のその後の進化にも何らかの示唆を与える可能性がある。

3. 研究の方法

(1)惑星移動はダスト、ガス、惑星の3つの非線形的な相互作用の結果として生じる。この非線形的な振る舞いの詳細を明らかにするためには数値計算しか方法がない。本研究では、Inaba et al.(2005)が開発した流体計算コードに惑星重力とダストの効果を入れた。この方法はダストとガスの方程式はそれぞれ移流項と相互作用項を続けて解くオペレーター分割法を用いて計算するものになっている。相互作用項はルンゲクッタ法で計算し、移流項は有限体積法を用いてMUSCL-Hancock法で計算している。惑星は大きさを無視した重力源として方程式の中に組み込み、それは中心星の周りをケプラー回転していると仮定した。計算時間が惑星の軌道変化の時間よりもはるかに小さい間でしか実行することができないため、惑星軌道を固定してシミュレーションを行った。また、円盤の厚みはその動径方向に比べて十分薄いと運動は2次元としている(Yamada & Inaba, 2012)。

(2)惑星にかかるガスとダストからのトルク(力)は惑星を挟んで逆向きの効果を与える。つまり、内側から与えられる力は惑星を外に、外側からの力は惑星を内へと押しやる。それらの差として惑星移動の向き・速度が決まる。そのため、非常に微妙な差が惑星移動の決定には重要になってくる。そこで、我々はその差を正確に測るために局所近似ではなく、グ

ローバル計算を採用した。また、メッシュ数も過去の計算で通常使われているよりも10倍以上多くした。当然、計算時間も非常に長くなるが、プログラムコードの仕様を工夫することで現実的な時間範囲で終わるように設定した。

(3)ダストの大きさがmmサイズ以上になるとガスの流れから外れた運動を行うため、ガスはダストとの摩擦抵抗を介して流れを変える。近似解から、大局的にはダストが落ちる反動で円盤ガスは外向きの流れが生じる。ダストからの惑星への重力はもちろんのこと、ガスの流れ場が変わることで惑星にかかるトルクも変化する。本研究では改良した数値計算コードを使い、ダストの大きさ、ガス/ダスト比をパラメータにして惑星移動への影響度を調べる。

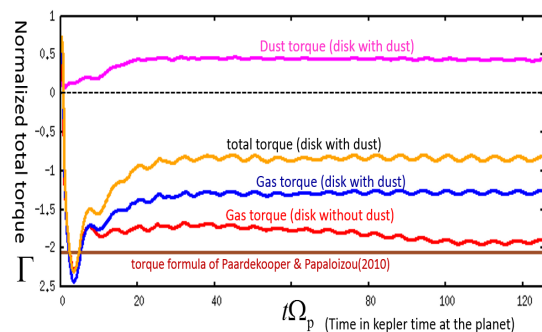


図3: ガスとダストから惑星にかかる全トルク量の時間進化。横軸は惑星の周期で無次元化した時間を示す。縦軸は無次元化したトルク量で、1が8.5万年で1AU程度進む速度に対応する。赤線がダストの無い場合のガスからのトルク量、ダストを考慮した時のガスからのトルク量が青線で、ダストからのトルク量が紫線である。橙色の線は青線と紫線を足した正味の惑星にかかるトルク量を示す。茶色線はダストの無い時の全トルクの近似解を示す。

4. 研究成果

(1)数値計算によって、惑星にかかる正味のトルク量へのダストの影響を調べたのが図3である。これはトルクの時間進化を示しており、ガス/ダスト比が0.1、ダスト半径が1cmの場合である。図3において、最初にガスから惑星にかかるトルク(赤線と青線)を見ると、ダストが入るとガストルクが大きくなるのがわかる。つまり、これは惑星移動の内側移動が減速していることを意味している。また、ダストからのトルク量(紫線)を見ると、正のトルクを示している。これは惑星を外側へ移動させる力である。したがって、ダストが入ると、ガストルクの増加およびダストからの正のトルクで正味のトルク量(橙色)はダストのない場合に比べて大きくなっている。

(2)では、なぜガスからのトルクがダストを入れると大きくなるのであろうか。図4はガスとダストのトルク密度を示している。これは

惑星から r の位置にあるガスやダストから惑星にかかるトルク量を示している．最初にダストの影響を考える．図4からわかるように，ダストから惑星にかかるトルク量はほぼ惑星近傍で決まっており，それよりも遠くになるとほぼ0である．次にガスの場合を考えると，ガスは惑星からスケールハイト程度の場所で大きな値を示しており，この辺からの重力によってガスから惑星への正味のトルクが決まる．ダストが入るとこの辺のガストルク量が大きくなり，惑星を挟んでより対称的な構造へと変移していることがわかる．結果として正味のトルクが大きくなる．正確に言えば，対称的な構造になるために惑星の内側と外側の寄与が打ち消しあって0になる．しかし，なぜ対称的な構造が作られるのかは正確にわかっていないが，ダストの効果によりガスの流れが変わり力のバランスが変化したことが原因であろう．

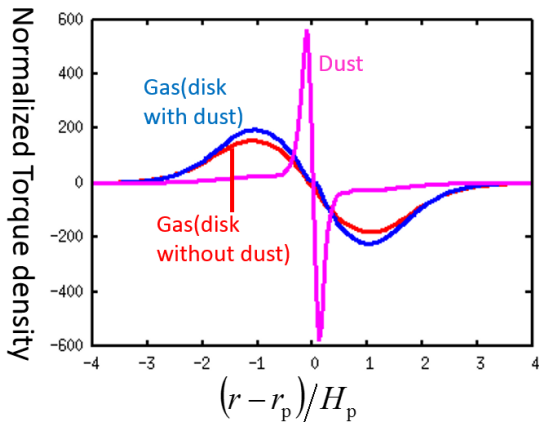


図4：ガスやダストから惑星にかかるトルク密度の分布．横軸は惑星の位置を原点にした時の距離で，マイナス符号が中心星の方向を示している．これらの距離はスケールハイトで規格化されている．縦軸は無次元化されたトルク密度を示す．赤線がダストの無い場合のガストルク密度，青線はダストがある場合のガストルク密度で，紫線はダストトルクを示す．データは定常状態になった時のものである．

(3)次に，この正味のトルクに対するダスト量や大きさの応答性を調べたものが，図5になる．図5から，ガス/ダスト比が大きくなると惑星にかかるガスおよびダストのトルク量は大きくなる．同様に，ダストのサイズも大きくなるとトルク量は増加する．これらはダストの量やサイズが大きくなると，ガストルク量はダストの無い時と比べて増加する．数値計算の結果を見ると，ダストサイズやガス/ダスト比に対するダストトルクの変化は同じようなものと考えられるが，ガストルクはダストサイズに敏感に増減するようである．まだ，これらの依存性を明示的に示した解析の導出には成功していない．

(4)上述したように我々の研究は，ダストの存在によって惑星移動の速度が変化する可能

性を指摘した．しかし，我々が調べたパラメータ範囲では内側移動の減速は認められたが，外向きに変える，もしくは移動を止めてしまうというほどの効果は観測されなかった．

(5)これらの結果を惑星形成過程に適用して何が言えるのかを考えてみる．基本的に，惑星はダストのないケプラー回転している円盤領域では内向きに10万年で数AU程度移動する．しかし，円盤内の(スケールハイトより十分大きな)局所的にあるダストの濃い領域があり，そこに惑星が突入すると惑星の内側移動が弱まり，ゆっくり移動することになる．この時，先行して突入してきた惑星と後から来た惑星がダストの濃い領域内でぶつかる可能性があり，衝突で惑星質量の増大が促進される．この衝突の際にばらまかれたダストはさらにその領域のダスト量を増やし，惑星はますますその濃い領域内にトラップされることになる．そのような惑星にさらに後続の原始惑星がぶつかれば，巨大ガス惑星へと一気に成長する．このことは，現在かなり長い時間がかかると考えられている巨大ガス惑星のコア成長時間の問題を解決する可能性がある．したがって，短時間での巨大ガス惑星成長モデルを提案することができるだろう．さらに，ダストの濃い領域にある惑星は氷ダストを集積して，惑星表面に多くの水成分をもたらす可能性がある．これは現在地球の表面に水成分が多くある事実を説明しようと考えている．

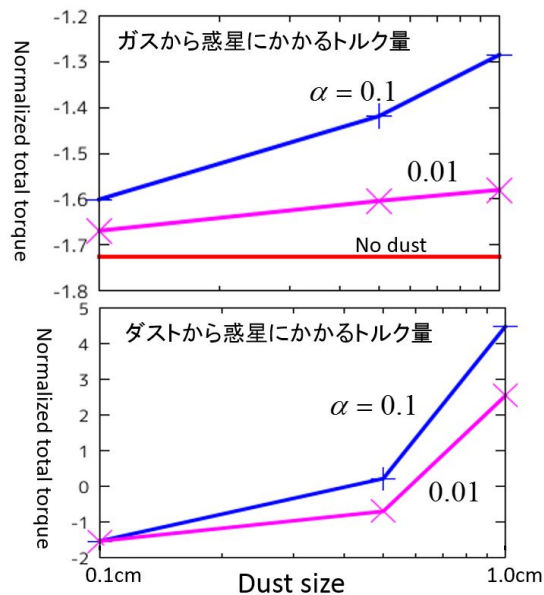


図5：横軸はダストサイズで0.1cmから1.0cmまでを示している．縦軸は無次元化されたトルク量を示す．上の図がガスから惑星にかかる全トルク量で，下の図がダストから惑星にかかる全トルク量である．赤線がダストの無い時の惑星にかかるトルク量で，紫線と青線それぞれがガス/ダスト比が0.01と0.1に対応している．

(5)しかしながら,当然ダストの濃い領域がどこにあり,あったとしてもそこで惑星同士の衝突が頻繁に起こるようになるのかといったことは本研究の結果だけではわからない.これらに答えるためには,惑星の軌道進化を考慮した N 体計算や円盤進化の計算などが必要である.これらは今後の課題であるが,まずは本研究のパラメータサーベイを進める.それと同時に N 体計算を使って惑星(移動+成長)過程を総合的にシミュレーションする際に重要な道具になりうる,ダストのある場合の惑星移動速度を表す解析解の導出に取り組みたい.

<引用文献>

- (1)The Exoplanet Data Explorer, <http://exoplanets.org/>,最終閲覧日 2017 年 6 月 15 日
- (2)Goldreich P., Tremaine S., 1979, ApJ, 233, 857
- (3)Tanaka H, Takeuchi T, Ward W., 2002, ApJ, 565, 1257
- (4)Baruteau C., Masset F., 2008, ApJ, 672, 1054
- (5)Yamada K., Inaba S., 2011, MNRAS, 411, 184
- (6)国立天文台 ALMA ページ, <https://alma-telescope.jp/>,最終閲覧日 2017 年 6 月 15 日
- (7)Birnstiel T., Klahr, H., and Ercolano, B., 2012, A&A, 539, A148
- (8)Birnstiel T., Dullemond C. P., Brauer F., 2010, A&A, 513, A79
- (9)岩波講座 地球惑星科学 12 比較惑星学
- (10)Inaba S., Barge P., Daniel E., Guillard H., 2005, A&A, 431, 365
- (11)Yamada K., Inaba S., 2012, MNRAS, 424, 2746

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

稲葉知士, 山田耕, 系外惑星の観測と形成理論, Waseda Global Forum, 査読有, 2013, Vol. 10, pp. 299-315

[学会発表](計 5 件)

山田耕, 稲葉知士, 光学的に薄い円盤内での Type I 移動に対するダストの影響, 日本惑星科学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月, 宮城仙台

Ko Yamada, Satoshi Inaba, The Effect of Dust Grains on Type I Migration, 2014 年 9 月, Planet Formation and Evolution 2014, ドイツ(キール)

山田耕, 稲葉知士, Type I 惑星移動に対するダストの影響について, 日本惑星科学会 2013 年秋季大会, 2013 年 11 月, 沖縄石垣島

山田耕, 稲葉知士, Type I 惑星移動に対するダストの影響, 原始惑星系円盤研究会 2013, 2013 年 8 月, 東京三鷹

山田耕, 稲葉知士, ダスト - 円盤ガス - 惑星間の重力相互作用, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月, 千葉幕張

[図書](計 1 件)

Ko Yamada, Satoshi Inaba, Expanding beyond the solar system: Current observation and theory. In Schuster A. (Ed.) Understanding Information: From the Big Bang to Big Data, 2017, Springer Verlag, ページ数 21

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 耕 (YAMADA, Ko)

早稲田大学・政治経済学術院・准教授(任期付)

研究者番号: 60424793