

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 28日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740296

研究課題名（和文） 木星はなぜあるのか？

研究課題名（英文） Toward unified understanding of Type I migration

研究代表者

山田 耕 (YAMADA KOU)

早稲田大学・政治経済学術院・助教

研究者番号：60424793

研究成果の概要（和文）：

太陽系形成モデルによると、木星は5AU付近において10倍の地球質量程度の天体ができ、その後強力な重力で周りのガスを纏うと考えられている。しかし、惑星軌道の研究は天体が地球質量程度になるとガス円盤との重力相互作用によって中心星に落下し、木星の材料となる固体塊がなくなると指摘している。この結果を信じると木星はできないことになるが、木星は存在する。この理論矛盾を解決するために、申請者は円盤内にある地球質量程度の天体の軌道進化を体系的に調べた。

研究成果の概要（英文）：

Accepted theories of gas giant planet formation like Jupiter suggest that a massive rocky object with 10 Earth mass is formed first at 5AU and gravitationally captures nebular gas. However, some works indicate that the rapid inward migration occurs as a result of the gravitational interaction between a terrestrial planet and nebular gas, leading to the lack of rocky objects which are constituent of Jupiter. These theoretical results are inconsistent with observations. In order to overcome this difficulty, we systematically examined orbital evolution of Earth-sized planets, taking account into the effect of some physical processes on the planetary migration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星移動、ガス円盤、輻射輸送、密度波、重力相互作用、原始惑星

1. 研究開始当初の背景

1995年に最初の系外惑星が発見されてから、その後続々と系外惑星が発見されている (<http://exoplanet.eu/>)。それらの軌道分布を見ると、恒星に非常に近い所を回る惑星もあ

れば、超楕円を描く惑星など非常に多様な軌道があることがわかる。このような軌道の多様性は惑星形成過程と密接に関係しており、惑星形成過程の統一的理解が系外惑星の発見により要請され始めている。

従来の惑星形成理論では、地球質量程度の惑星まで成長した後は、他の天体の重力による軌道の揺さぶりが無い限り、惑星はできた場所からほとんど動かないと思われていた。しかし、近年研究が進んだことによって、地球質量程度の惑星も円盤ガスからの重力で軌道を大幅に変えることがわかってきた。この惑星の移動を **Type I 惑星移動** と呼ぶ。この理論的な結果は、従来の惑星形成のシナリオに修正を与えるインパクトがあった。

巨大ガス惑星の形成は、コア集積モデル (Safronov, 1969, Hayashi et al. 1985) と重力不安定モデル (Cameron, 1978) の 2 つが提唱されていた。コア集積モデルは、固体惑星が 10 倍の地球質量程度の天体まで成長し、その時その重力によって周りの原始惑星系円盤のガスを集積して (Mizuno 1980, Ikoma et al., 2000)、巨大ガス惑星になるというモデルである (図 1)。しかし、このモデルでは、巨大ガス惑星になるまでに微惑星 (微惑星の衝突合体成長) → 1 地球質量程度の原始惑星 (原始惑星の衝突合体成長) → 10 地球質量程度の天体 → ガス集積 というプロセスを踏まなければならないため、非常に長い時間がかかるという問題がある。一方で、重力不安定モデルは原始惑星系円盤ガスが重力的に不安定になって円盤ガスがぶちぶちと分裂してそれらが短時間のうちに巨大ガス惑星になるというモデルである。しかし、円盤ガスが重力不安定を起こすためには円盤質量が 0.1 倍の太陽質量以上の質量を有している必要があるが、そのような大質量円盤は少数であることが観測から言われている (Beckwith & Sargent, 1996)。また、このモデルに従うと、巨大ガス惑星が多く作られるという結果ももたらす。このように両モデルともメリットデメリットがあるが、現在の太陽系の巨大ガス惑星 (木星や土星) の様々な観測値や惑星系の構成を説明するのに適しているのは、コア集積モデルである。

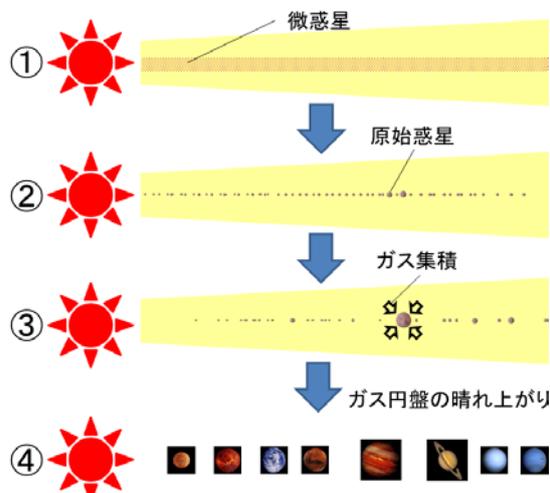


図 1: 円盤進化の概念図。①から④に行くに

つれて進化が進んでいる。微惑星 (数 km サイズの固体塊) の形成 (①) と衝突合体によって、②原始惑星の形成、それらの衝突合体による成長によってさらに大きな原始惑星ができて、周りのガスを集積する (③)。④最後に、円盤ガスの晴れ上がりで惑星系だけが残る。

若い星の周りにある円盤の観測結果から、円盤ガスは長くとも数百万年程度で消失することが指摘されている (Hernandez et al., 2007)。これは、コア集積モデルから計算される巨大ガス惑星形成時間と大体同じ程度か、短い。そのため、太陽系では木星の後に土星ができたと考えられているが、円盤ガス散逸時間内に土星までちゃんと作れる理論的モデルをなかなか提示することができていない。ガスが消失する前に惑星を作るためには、惑星の成長過程のどこかを加速させる必要があり、まだ調べていない物理過程を考えなければならない。

コア集積モデルにおける仮定の一つに原始惑星はその軌道をほぼ変えないというものがある。例えば、5AU 付近でできた原始惑星は 5AU 付近に留まって、他の原始惑星との衝突合体で大きくなると考え、成長時間が見積もられてきた (Kobayashi et al., 2011)。しかし、近年の計算機の発展などで、1 地球質量程度の惑星は円盤ガスとの重力相互作用によって、**Type I 惑星移動** が起きることがわかった。これは、惑星のその場形成という仮定を崩すものである。すなわち、**Type I 惑星移動** の発見は、巨大ガス惑星の卵はどこで作られたのかという起源の再考、どこでガスを集めたのかという集積過程の再考、なぜ 5AU や 10AU の位置に落ち着いたのであろうかという軌道形成の再考をせまるものであった。

2. 研究の目的

本研究では、まず **Type I 惑星移動** のメカニズムを詳細に理解し、地球質量程度の惑星がどのような軌道変化をするのかを知ることにある。従来の **Type I 惑星移動** に関する研究では、惑星移動の方向は中心星に落下する方向 (内向き) であった。また、その速度も非常に速く、5AU にある地球質量の惑星は十万年程度で中心星に落下してしまう。そのため、巨大ガス惑星の材料となる原始惑星が 10 倍の地球質量まで成長する前に円盤内、少なくとも中心星から遠方の領域からなくなってしまい、巨大ガス惑星が形成できないという問題が生じていた。しかし、近年の計算機能力の向上によって、**Type I 惑星移動** に関する詳細なシミュレーションが行われるようになり、惑星移動の方向や速度は円盤の力学的・熱的な構造と密接に関係して変化することがわかってきた。今までの一律に原始惑星

が内側へ数十万年で移動するという描像は変わってきたが、今度は円盤内で惑星はどのように運動するのかがわからなくなってきた。

では、一昔前の研究結果(惑星落下)と最近の研究とは何が違うのであろうか。それは、一昔前の研究では、数値計算や解析の簡単化のために円盤の温度分布を固定して考えていた。すなわち、ガスのエネルギー方程式を解いていなかった。しかし、原始惑星とガスとの重力相互作用は温度変化(正確にはエントロピー変化)を伴う過程であり、この効果がType I 惑星移動に大きな影響を与えた。

Type I 惑星移動を引き起こしている正体は、ガスと惑星との間のトルクのやり取りである。円盤内に原始惑星があると、惑星は円盤に密度波をたてる。図2は、ある時刻(惑星の公転周期で20周時)での密度分布を示しているが、惑星の両サイドに密度の高い領域、密度波ができていくことがわかる。密度波は周りの密度に比べて高い密度になっているため、惑星に重力をかける。この時、惑星の内側にある密度波は惑星よりも速く回っているため、惑星を前から引っ張るような力をかけて、トルクを与える(トルクをもらった惑星は外に動く)。一方、惑星の外側にある密度波は惑星よりも遅く回っているため、惑星を後ろから引っ張るような力をかけて、トルクを奪う(トルクを失った惑星は内側へと移動する)。密度波からの正味のトルクは、この外側と内側の力のバランスによって決まる。観測や理論などで通常考えられている円盤構造では、内側よりも外側の密度波からかかるトルクの方が大きく、密度波は惑星を内に落とす。この密度波からのトルクをリンドブラッドトルクと呼ぶ。

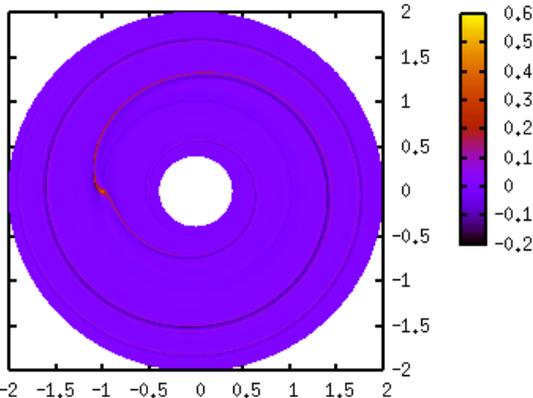


図2: 惑星が中心星の周りを20周回った時の円盤ガス密度分布。密度波の存在を明示するために、初期面密度を差し引いて初期面密度で規格化している。惑星は座標(-1, 0)にある。密度の濃い(スパイラル状の)領域が密度波である。

密度波の他にもう一つトルクをやり取り

する場所がある。それは惑星の馬蹄形軌道内である。馬蹄形軌道内では、図3のように惑星前面のガスは惑星に近づいて遠ざかる(惑星後面ではこの逆)という運動を行う。円盤において、通常内側からその公転速度は速い。そのため、惑星の前後を横切って違う位置に移動する際に、惑星にトルクを与える。この馬蹄形軌道から惑星にかかるトルクを、共回転トルクと呼ぶ。

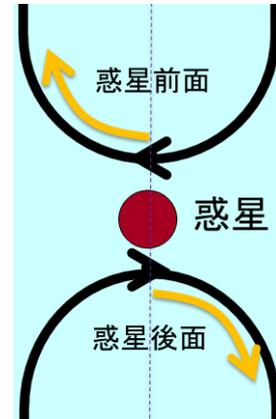


図3: 惑星の馬蹄形軌道内のガスの運動の概念図。惑星前面では外側から来たガスが惑星前面を通過して、内側に入る。後面ではその逆。惑星の前後でガスはUターンするような運動をする。

惑星にかかるトルクはリンドブラッドトルクと共回転トルクとの和で決まる。この和が、マイナス(惑星は角運動量を失って中心星方向へ移動する)になるかプラス(惑星は角運動量をもらい外側へ移動する)になるかで、Type I 惑星移動の方向と速度が決まる。従来の温度分布を固定した研究では、リンドブラッドトルク(通常は負の量)の方が絶対値で共回転トルクよりも大きく、惑星は中心星へ落ちるといった結果になっていた。しかし、共回転トルクは円盤の温度構造に強く依存していることがエネルギー方程式を考慮した研究からわかった。具体的には、馬蹄形軌道内でガスがUターン運動をすると、ガスは断熱圧縮による密度増加やエントロピー勾配と圧力勾配の不一致で起こる渦度発生による密度増加を経験する。どちらの効果もエネルギー方程式がないと出てこないものである。馬蹄形軌道内で生じる密度増加領域から惑星にかかる重力が新たなトルクを生み、共回転トルクを大きくする。円盤構造によっては、リンドブラッドトルクを越す非常に大きな正の共回転トルクを生み出し、全トルクが正となり、惑星の移動方向が外向きになる。最近の研究の目的は、惑星移動の方向と速度がどのように円盤構造に依存して変わるのか、また、円盤内にある粘性、輻射、磁場などといった散逸物理過程とどのような関係があるのかを調べることにある。粘性は、惑星重力の摂動でできた面密度変化を均す役目があり、あまりにも強い粘性だと共回転トルクが大きくなり、惑星は落ちてしまう。申請者の研究は、世界的な研究の流れと同じように共回転トルクへの散逸過程の影響を

調べたものである。

散逸過程の影響は、様々な研究者が調べている。一例を挙げていけば、粘性との関係は *Masset (2001,2002)*, *Paardekooper & Papaloizou (2009)*, *Muto & Inutsuka (2009)*, *Yamada & Inaba (2012)* があり、自己重力との関係は *Baruteau & Masset (2008)*、輻射との関係は *Paardekooper & Mellema (2006)*, *Baruteau & Masset (2008)*, *Paardekooper & Paploizou (2008)*, *Kley & Crida (2008)*, *Bitsch & Kley (2010)*, *Paardekooper et al. (2010)*, *Yamada & Inaba (2011)*、乱流との関係は *Nelson & Papaloizou (2004)*, *Oishi et al. (2007)*, *Baruteau & Lin (2010)*, *Baruteau et al. (2011)*、磁場との関係は *Fromang et al. (2005)*, *Muto et al. (2008)* などがある。科研費交付中に行った申請者の研究は、以下の2つがある：一つは、(1)「Type I Migration in Radiatively Efficient Discs」であり、もう一つは(2)「Type I migration in optically thick accretion discs」である。

(1)は、共回転トルクへの輻射の効果がどのようなものであるかを調べたものである。従来の研究では、輻射の効果が非常に限られた一部の場合でしか調べられていなかったため、本研究では、円盤の構造パラメータ(密度分布や温度分布)およびダストオパシティーを系統的に変化させて、その影響を測った。

(2)は、光学的に厚い円盤内での惑星移動の影響を調べたものである。ガス円盤の温度構造はダスト粒子による熱放射(冷却)と粘性乱流による加熱のバランスで決まっている。熱放射効率は、ダストサイズやその構成成分によって大きく変化する。そのため、光学的に厚い円盤では、温度分布のベキが内側の鉄やシリケートダストしか存在しない領域(領域I)、外側の鉄やシリケートダストの他に氷ダストが存在する領域(領域III)、氷が蒸発している中間の領域(領域II)でそれぞれ異なる。したがって、各領域で惑星にかかるトルクが異なってくる。円盤内に散逸過程がないと仮定すると、惑星は領域Iと領域IIIで外側に移動し、領域IIで内側に移動する。この移動方向が成り立てば、領域IとIIの間のスノーラインに惑星が集まることが期待される。しかし、過去の研究から、粘性が強いと大きな正の共回転トルクが発生しにくいいため、領域Iでも落ちてしまう可能性がある。本研究では、粘性がどのような値であれば、スノーライン付近に惑星が集まるようになるのかという条件を明らかにした。

3. 研究の方法

本研究は2次元の流体計算を使って、惑星にかかるトルクを計算する。計算機性能が向上した現在においても、円盤全体を数値計算

領域として入れることは不可能であるため、本研究では数値計算領域を円盤内の小領域に限定し、内側半径と外側半径をそれぞれ惑星軌道の0.4倍の所と2倍の所に持つリング領域に設定する。計算領域は半径方向と周方向を、それぞれ等分に分割し、計数百万個のセルに分ける。惑星は、円軌道で運動すると仮定する。この仮定は惑星が移動するタイムスケールに比べて、数値計算の時間が圧倒的に短いため妥当であろう。惑星にかかるトルクは基本的には定常的にかかるため、一度定常状態になればトルクが計算されたことになる。ガスの方程式は、ソース項と移流項を続けて解くオペレーター分割法を用いて解く。ソース項の計算はルンゲクッタスキームで解き、移流項の計算には、有限体積法を用いてMUSCL-Hancockスキームで解いている。これらの方法は、*Inaba et al. (2005)* をベースに改良したコードを使っている。

本研究ではType I 惑星移動の様子を調べたいので、*Inaba et al. (2005)* のコードに次の効果を組み入れた：(1)粘性項、(2)輻射項、(3)惑星重力項。粘性項はガス粘性で、 α 粘性モデルを使った。輻射項のダストオパシティーは分子雲などで観測されているダスト成分を想定して考えられた温度依存性を持ったものを採用した。

本研究は2次元円盤、つまり、円盤の厚み方向を無視できることを仮定している。実際の円盤では、動径方向に対してガス円盤の厚みが非常に小さいことは観測からも指摘されており、悪い仮定ではない。また、過去のエネルギー方程式を無視した3次元計算では、円盤ガスから惑星にかかるトルク量が2次元計算に比べると小さくなるが、オーダーを変えるまでの効果はないことが報告されている。これは、3次元よりも厚みのない(縦方向の距離を無視した)2次元円盤の方で惑星重力が多少強めにカウントされてしまい、トルクが大きく出るからである。本研究では、3次元の効果を擬似的に2次元計算に入るように、惑星近傍では惑星重力が弱くなるような関数を導入して、3次元計算の場合と同じような値を2次元計算でも出るよう工夫を施している。したがって、2次元計算の結果はある程度現実のType I 惑星移動の議論に適用することができる。

4. 研究成果

初めに、(1)の論文で得た研究成果について述べる。この研究では、Type I 惑星移動と熱散逸の関係を調べた初期の研究の中に入る。図4はガスから惑星にかかる周方向に平均化したトルク密度を示したものである。赤がエネルギー方程式を考慮したが散逸過程のない断熱円盤、青が等温円盤(エネルギー方程式は解かず、温度分布を固定した円盤モ

デル)、紫が輻射輸送を考慮した円盤(以下、これを輻射円盤と言う)それぞれの場合におけるトルク密度である。共回転トルクに対する熱輸送の効果を見たいため、強い共回転トルクが発生するように、断熱円盤と輻射円盤のエントロピー分布は負のベキに設定した(密度分布のベキ=0.8、温度分布のベキ=0.7)。惑星にかかるトルクは共回転トルクとリンドブラッドトルクの2つであり、惑星移動はこの2つのトルクの兼ね合いで移動方向と速度が決まる。

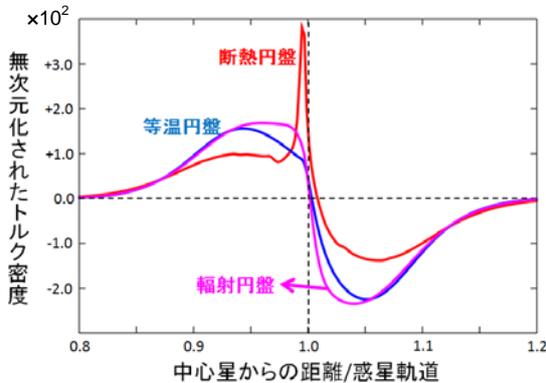


図4: トルク密度分布。赤が断熱円盤、青が等温円盤、紫が輻射円盤の時のガスから惑星にかかるトルク密度を示している。横軸は中心星からの距離を惑星軌道で割ったもの、縦軸は無次元化されたトルク密度。無次元化に使った量は Tanaka et al.(2002)の解析解を参考に設定した。

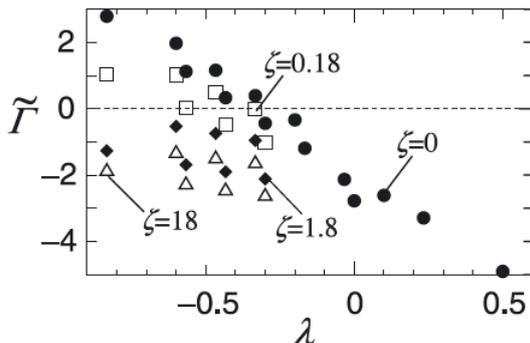


図5: 横軸はエントロピーのベキ λ 、縦軸は無次元化された惑星にかかる全トルク。 ζ は熱輸送率を示すパラメータで、大きいほど熱輸送率が良いことを示す。 \bullet は $\zeta=0$ 、 \square は $\zeta=0.18$ 、 \blacklozenge は $\zeta=1.8$ 、 \triangle は $\zeta=18$ を示す。この図は論文(1)の図7である。

図4より、熱輸送効率が大きくなると正の共回転トルクが弱まる。惑星前方において馬蹄形軌道に沿って運動してきたガスが外側から内側に入る際に輻射によってエネルギーが抜かれ、もともとガス素片が持っていたエントロピー量が増える。その結果、断熱圧縮に比べてガス密度を高めることができなくなり、共回転トルクが減少する。図4の場合、断熱円盤の全トルクは無次元化した量

で+1.0程度に対して等温円盤と輻射円盤では-7.0程度である。このような計算を円盤のエントロピー分布と輻射輸送効率を色々変えて、全トルクを求めたのが図5になる。図5から、エントロピー分布のベキが-0.4よりも小さく、かつ熱散逸のない円盤では惑星は外に移動する。これは共回転トルクが非常に強くなるためである。一方で、全トルクは円盤のオパシティーが増えると小さくなる。ただし、本研究では粘性などのガスを動径方向に動かすような物理過程が入っていないため、渦度などはそのまま馬蹄形軌道内に残り、トルクの飽和という現象をもたらす。そのため、時間がある程度経つとトルクの飽和現象が起きて、共回転トルクが小さくなり、全トルクは負のトルクになる。

次に、(2)の論文の研究成果について述べる。光学的に厚い円盤内にある原始惑星が粘性などの散逸過程によってどのような移動を示すのかについて調べた。Hasegawa & Pudritz(2011)は、光学的に厚い円盤内の温度分布の変化に伴うエントロピー分布のベキの変化と惑星移動のエントロピーベキ依存性を考慮して、光学的に厚い円盤では惑星移動の方向がスノーラインに向くことを解析的な手法を使って示した。しかし、この研究では、円盤には散逸過程がないことを仮定した解析解を使っている点に問題がある。すなわち、光学的に厚い円盤では輻射や粘性といった散逸過程があるからである。そのため、スノーラインを挟む両側の領域において常に惑星がスノーラインの方に移動するとは限らない。上述したように、粘性が入るとガスが動径方向に動くため惑星周辺でできた渦が壊され、強い正の共回転トルクは発生しない。このことは、惑星を内側に落とすリンドブラッドトルクが卓越し、円盤の至る所で惑星の移動方向が中心星向きになることを意味している。

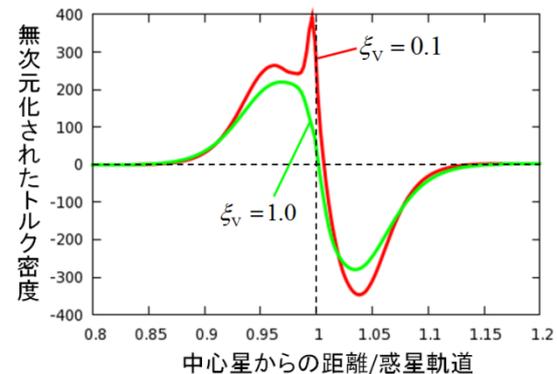


図6: region Iでのトルク密度分布。 ξ_v は粘性率の大きさを示すパラメータ。赤が $\xi_v=0.1$ 、緑が $\xi_v=1.0$ の時のガスから惑星にかかるトルク密度を示している。横軸は中心星からの距離を惑星軌道で割ったもの、縦軸は無次元化されたトルク密度である。散逸のない

い断熱円盤では region I にある惑星は外に動く。

図 6 は、region I (円盤の内側) において粘性を入れた場合のトルク密度を示しており、大きな粘性では共回転トルクが消えていることがわかる。このことから、粘性が大きい時は負のリンブラッドトルクを打ち消す正の共回転トルクが発生しないため惑星は領域 I で内側へ移動することがわかった。一方で、粘性がある程度小さい時はまだリンブラッドトルクを越すような共回転トルクが発生するため、惑星にかかる全トルクが正となる。また、粘性が入るとガスが動径方向に動くため、トルクの飽和現象は起こらなくなり、トルクは一定値となる。region II では断熱円盤時でも共回転トルクが小さいため、常にこの領域では惑星は内側に動く。

さらに我々は共回転トルクが弱まる条件を解析的に求めた。粘性とオパシティーの値を様々に与えて、惑星にかかる全トルク値をまとめた結果、馬蹄形軌道内をガスが横切る時間と粘性拡散時間が等しくなるところで全トルクが大体 0 になることがわかった。この結果と解析的な方法により、我々は全トルクが 0 になる粘性率 ξ_v を $\xi_v = 0.07$ (惑星軌道 / 1AU)^{11/17} (面密度 @ 1AU / 100gcm⁻²)^{7/17} (惑星質量 / 地球質量)^{18/17} (オパシティー / 標準的なオパシティー)^{-5/17} と導出した。この関係式を降着率に変換すると、region I で全トルクが正になるのは約 2.1×10^{-8} 太陽質量 / 年よりも小さい時であり、この時惑星はスノーラインに集まる移動を起こす。

原始惑星系円盤の降着率は円盤観測で推定されているが、平均的な降着率は 1.0×10^{-8} 太陽質量 / 年程度である。したがって、本研究の結果を考え合わせると、一部の円盤ではスノーラインに惑星が集まり、合体成長し、巨大ガス惑星のコアを短時間で作ることができると期待される。

木星のような巨大ガス惑星形成の条件として、数地球質量の固体天体がガス円盤内に長期間 (百万年オーダー) 存在する必要がある。従来の研究では、数地球質量の固体天体は数十万年で中心星に落下してしまい、円盤内に残らず、ガス惑星形成の大きな問題となっていた。一方で、最近の理論的進展によって必ずしも内方向の惑星移動ばかりではないことがわかったが、どのような時に外側移動になるのかは未整理の状態であった。本研究では、時間のかかる流体計算を高速化するコードを作り、多くの円盤構造パラメータ内で内側移動と外側移動の領域を明確化し、それらを分ける解析式も導出した。

現在、ALMA など高性能望遠鏡が稼働し始め円盤構造、特に惑星形成領域の内側の構造がわかり始めてきた。内側の構造がわかれば、

我々の惑星移動条件から、固体天体がどの辺に集まり、どの領域の円盤ガスを集積するのかなどを推定することができる。これらは、巨大ガス惑星形成過程を理解する有用な情報となり得る。

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 2 件)

① K. Yamada, S. Inaba, Type I migration in optically thick accretion discs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、424、2012、2746-2756、doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21375.x

② K. Yamada, S. Inaba, Type I Migration in Radiatively Efficient Discs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、411、2011、184-192、doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17670.x

[学会発表] (計 6 件)

① K. Yamada, S. Inaba, Planetary migration in accretion disks and formation of Earth-sized planets, 日本地球惑星科学連合大会、2012、幕張

② K. Yamada, S. Inaba, On Low-Mass Planetary Migration in an Optically Thick Disk, 43rd LUNAR AND PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 2012、USA

③ K. Yamada, S. Inaba, Planet migration in an optically thick disk, 日本惑星科学秋季講演会、2011、相模原

④ K. Yamada, S. Inaba, Radiative effect on the type I migration, 日本地球惑星科学連合大会、2011、幕張

⑤ 山田耕, 稲葉知士、光学的に薄い円盤内でのタイプ I 惑星移動、日本惑星科学秋季講演会、2010、名古屋

⑥ K. Yamada, S. Inaba, Dependence of the planet mass on the type I migration in a radiative disk, 日本地球惑星科学連合大会、2010、幕張

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 耕 (Yamada Ko)

早稲田大学・政治学研究科・助教

研究者番号：60424793