

平成 21 年 4 月 3 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740281

研究課題名 (和文) 太陽系外での地球型惑星形成

研究課題名 (英文) The formation of terrestrial planets in extrasolar systems

研究代表者

長沢 真樹子 (NAGASAWA MAKIKO)

東京工業大学・グローバルエッジ研究院・テニユア・トラック助教

研究者番号：00419847

研究成果の概要：

いろいろな原始惑星系円盤において形成された原始惑星を対象に、木星型惑星の摂動のもとでガス円盤が散逸する場合に、どのような地球型惑星が形成されるかを数値計算した。また、太陽系外で多く見ついている短周期の惑星は、惑星散乱が起きる場合に生じる古在機構と中心星との潮汐相互作用によって説明できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	210,000	2,710,000

研究分野：数物系科学

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：惑星起源・進化，理論天文学

1. 研究開始当初の背景

これまでに発見されている系外の木星型惑星は、大質量、大離心率、小さな軌道長半径など、太陽系の惑星と大きく異なった軌道要素を持つものが多い。これらの惑星系がどのように形成されたのか、どこで太陽系と違ってきたのか、まだはっきりとしていない。太陽系の地球型惑星は、火星質量程度の原始惑星が、長期の重力相互作用による軌道不安定を起こして、巨大衝突して形成されたと考えられている。しかし、軌道不安定の過程で、地球型惑星は太陽系よりも大きな離心率を持ってしまふことが知られている。太陽系においては、惑星の巨大衝突は、木星が形成さ

れた後に起きるガス円盤の散逸によるポテンシャル変化によって促進されることがわかってきた。ただし、太陽系外の状況における研究はなされていない。

2. 研究の目的

(1) さまざまな原始惑星系円盤から形成される原始惑星を対象に、原始惑星系円盤が散逸する時代に木星型惑星の摂動のもとでどのような地球型惑星が形成されるかを数値計算する。

(2) 一部の木星型惑星がなぜ地球型惑星領域を通過して観測されるような短周期軌道

になったかについて、複数の木星型惑星が軌道不安定を起し、中心星と潮汐相互作用して短周期化する進化過程を考えて調べる。

3. 研究の方法

(1) 原始惑星系円盤の散逸の時間スケールおよびスケールハイト、木星型惑星の離心率をパラメーターとし、原始惑星系円盤が散逸するときの原始惑星の衝突成長過程を数値計算して、中心星からどのくらいの位置に、どのような軌道要素で地球型惑星が形成されるかを調べる。

(2) 中心星との相互作用によって生じる動的潮汐力、相対論的効果、惑星間重力を考慮に入れて、惑星散逸過程およびその後の軌道進化を数値計算する。惑星が自転していない場合、惑星が、潮汐によって変化しない値の自転速度で回っている場合の両方で、どのような惑星分布が地球型惑星領域で作られるかを求める。

4. 研究成果

(1) 地球型惑星は、火星程度の大きさに成長した原始惑星が巨大衝突を起して形成されることが知られている。しかし、この衝突は、軌道が不安定になることによって生じるため、結果として惑星の軌道は円軌道からずれたものになりやすい。この問題を解決するために、木星型惑星の摂動と散逸するガス円盤からの重力抵抗を受けながら地球型惑星が成長する場合を考え、さまざまな初期条件のもとで、太陽系類似の惑星系が作られる確率の計算を行った。

①基本モデルでの計算

0.5AUから3AUまで10ヒル間隔で原始惑星が孤立している場合を初期状態とする。原始惑星の質量は、原始惑星系円盤の個体質量の表面密度 S が、軌道長半径 a に対して $S=7(a/1\text{AU})^{-1}\text{g/cm}^2$ のときの孤立質量とする。原始惑星系円盤のガスの表面密度 S_g は $S_g=2000(a/1\text{AU})^{-1}\exp(-t/t_n)\text{g/cm}^2$ でスケールハイト H は $H=0.05(a/1\text{AU})^{5/4}\text{AU}$ とする。ここで t_n はガスの散逸の時間スケールであり、基本モデルではこれを500万年ととる。 t は時間である。また、木星と土星は現在の軌道にあると考え、抵抗や相互作用での離心率減少を考慮に入れて、木星の初期離心率を0.075とした。これを基本モデルとして、数値計算を30例、それぞれ5億年にわたって行った。

木星型惑星の摂動によって、原始惑星の衝突が起り、重力抵抗によって離心率が下げられるため、形成された地球型惑星は、ほとんどが太陽系類似の離心率をもった。2つの最大地球型惑星は、太陽系と同じく1AU近傍

に形成され、それ以外の小さい惑星は、この領域以外に形成されることが判明した。

系全体としての角運動量欠損が、太陽系の値1.5倍以下であり、かつ軌道長半径の集中度が太陽系の半分以上ある系を太陽系類似であると考えて評価すると、太陽系類似の惑星系形成確率は50%であった。また太陽系類似であって、地球サイズの半分以上より大きい惑星が2つ以上でかつ惑星は4つ以上存在しない、極めて太陽系に似ている系は全体の36%であった。

②重力抵抗の強さに対する依存性

原始惑星系円盤のガスのスケールハイトを変化させることによって、重力抵抗の強さを変えた計算を行った。重力抵抗を約半分にした場合は、10例中3例で太陽系類似の地球型惑星系が形成された。抵抗が弱くなると、軌道不安定が阻害されるため惑星形成はあまり促進されず、惑星の数は多くなる傾向がある。しかし、この程度であれば、全体としての結果は基本モデルの場合とほぼ同じとなる。逆に重力抵抗を2倍程度にした場合は、円盤散逸時に共鳴が原始惑星を捉えることができなくなり、太陽系類似の地球型惑星系は形成されない。

③円盤散逸の時間スケールに対する依存性

基本モデルに対して、円盤散逸の時間スケールを300万年とした場合、太陽系類似の地球型惑星が形成される確率は23%であった。この時間スケールでも、重力抵抗の強さに対しては、基本モデルの抵抗を変化させた場合と同じ依存が見られる。抵抗を約2倍と半分にした場合をそれぞれ計算し、全体として太陽系類似の惑星系形成の確率を比較すると、円盤散逸の時間スケールが500万年の場合は21%、300万年の場合は17%となる。つまり、さまざまなガス円盤の厚みをもつ系外惑星系全体としては、この程度の散逸時間の違いは明確には現れないことになる。しかし、基本モデルに対しては、円盤散逸が早いと共鳴が惑星を捉えにくくなることから太陽系類似の地球型惑星系形成は明らかに減少するため、散逸時間が100万年程度の系外惑星系では、太陽系類似の地球型惑星はほとんど存在しないであろう。

④木星型惑星の離心率に対する依存性

木星の離心率を0.05とした場合、角運動量欠損が太陽系の1.5倍以下の系は全体の3割、中心集中度が太陽系類似の系は約5割となっている。合わせると太陽系類似の地球型惑星系が作られる確率は1割程度となる。これは、共鳴の効果が弱く、惑星形成が結局のところ円盤が散逸した状況で行われることによる。このことは木星型惑星の離心率の大

きさが、太陽系類似の地球型惑星形成に強い影響を持つことを示している。太陽系外では離心率の大きい木星型惑星が多数見つかっており、この結果から、多様な地球型惑星の系が作られること示唆される。

(2) 木星型惑星の位置と離心率は、地球型惑星形成に大きな影響を与える。太陽系外においては、地球型惑星領域にも木星型惑星が見つかっている。木星型惑星は、氷が凝縮する領域で形成されるため、見つかっている短周期の惑星は、何らかの方法で中心星の方向に移動をしたものであると考えられる。そこで、これらの木星型惑星、特に地球型惑星領域を通過して中心星のごく近くに移動する木星型惑星の起源を軌道計算した。

複数の木星型惑星が形成され、軌道不安定が生じる状況を考えるために、3つの木星サイズの惑星を5AUから10AUまでに配置して軌道計算を行った。初期の離心率はゼロとし、運動を3次元的にするためにわずかな軌道傾斜角を与えた。散乱過程はきわめてストカスティックであるため、惑星の角度方向の配置を乱数によってさまざまに与え、多数の計算を行った。

ほとんどの惑星系は散乱を繰り返す中で、1つの惑星が系外に排出され、残る2つが互いに距離をとって安定となった。また、離心率が大きくなったものは、中心星と潮汐相互作用を起こして軌道のエネルギーと角運動量を失い短周期円軌道化されることがわかった。最終的に得られた近点分布は図1の様になっている。

図1で左側のピークが短周期円軌道化された惑星である。全部の計算のうち3割程度で短周期の惑星が形成されていることがわかる。右側のピークは外側に散乱されて安定化した惑星である。中央のピークが内側に散乱されたものの、短周期化はされなかった惑星であり、離心率は幅広く分布している。このピーク的位置は、初めに系の持つエネルギーの保存から決まっているが、氷が凝縮する数AU以遠で木星型惑星が形成されると考えた場合、1AU程度より内側になることはない。そして、左側の短周期化された惑星との間に明白なギャップが形成されることがわかった。これは観測と一致している。

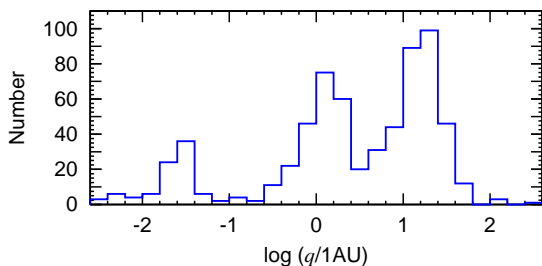


図1 : 形成された惑星の近点分布

潮汐相互作用が働くためには、近日点が中心星のごく近くに入る必要がある。しかし、直接の軌道散乱で最終的に潮汐力の働く領域に入る確率はわずか2%ほどにすぎず、これまでこの散乱過程はよく調べられてこなかった。しかし、この研究によって、これまで言われてきたよりもはるかに多くの短周期惑星が散乱過程から形成されることが示された。これは、散乱によって惑星の軌道傾斜角が大きくなると、残りの惑星との重力摂動で軌道傾斜が離心率へと変換される、古在機構と呼ばれる永年変化が生じるためである。系が不安定である間にこの機構によって一時的に離心率が大きくなって短周期化される惑星は全体の2割あった。また、1つの惑星が排出されたのちに、古在機構の働く条件に惑星があつて短周期化される場合は1割程度であった。

短周期の惑星が形成される確率は、あまり潮汐力の強さに依存しない。これは進化パスが潮汐力の強さにはよらず、散乱によって入った軌道によって決まっているためと判明した。残りの7割の系では、木星型惑星は、火星軌道以遠に存在する。つまり、このような系であれば、太陽系類似の方法で地球型惑星形成の行われる可能性がある。

惑星は原始惑星系円盤から形成されるため、通常であれば、惑星の軌道面は中心星の自転軸に対して垂直であることが予想される。これに対して、散乱を経由して短周期化した惑星は、軌道傾斜角に広い分布を持つことがわかった。特に、古在機構は角運動量のz成分の小さい惑星で顕著に働く。そのため、散乱によって大きな離心率、軌道傾斜角を得た惑星が短周期化されやすい傾向を持つ。一般に視線速度法による観測では、恒星の自転軸に対する惑星の軌道面の傾きを知ることができない。しかし、惑星が恒星面の前を横切る時に生じるRossiter-McLaughlin効果と呼ばれる現象を測定することで、一部の惑星においてはこの軌道面傾斜を測定することが可能である。軌道面が恒星の自転軸から傾いている惑星が存在するという理論的な指摘は、Rossiter-McLaughlin効果を用いた観測を行なうグループにインパクトを与え、数多くの惑星で軌道傾斜が測られることになり、XO3-bと呼ばれる惑星で、実際に軌道の傾きが発見されている。

中心星の近くでは、相対論的な効果が効くが、この効果を考慮した場合でも考慮しない場合でも短周期化の確率や最終的な惑星の分布に大きな差は見られなかった。これは中心星の近傍での惑星の潮汐進化のタイムスケールが相対論効果による近点移動速度に比べ、十分に早いと考えられる。

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 5 件)

- ① 長沢真樹子, 永年共鳴と惑星系の進化, 日本惑星科学会誌遊星人, 18 巻, 223-231 頁, 2008, 査読有
 - ② Makiko Nagasawa, Shigeru Ida, Taisuke Bessho, Formation of hot planets by a combination of planet scattering, tidal circularization and Kozai mechanism, The Astrophysical Journal, 678, 498-508, 2008, 査読有
 - ③ Makiko Nagasawa, Shigeru Ida, Taisuke Bessho, The formation of close-in planets by the slingshot model, Proceedings of IAU Symposium 249, Exoplanet: Detection, Formation and Dynamics, 279-284, 2008, 査読有
 - ④ Edward Thommes, Makiko Nagasawa, D. N. C. Lin, Dynamical Shakeup of Planetary Systems II. N-Body Simulations of Solar System Terrestrial Planet Formation Induced by Secular Resonance Sweeping, The Astrophysical Journal, 676, 728-739, 2008, 査読有
 - ⑤ Makiko Nagasawa, E. W. Thommes, S. J. Kenyon, B. C. Bromley, D. N. C. Lin, The Diverse Origins of Terrestrial-Planet Systems, Protostars and Planets V, V, 639-654, 2007, 査読有
- [学会発表] (計 12 件)
- ① 長沢真樹子, 惑星散乱と潮汐力による高離心率の短周期惑星の形成, 日本惑星科学会 2008 年秋季講演会, 2008 年 11 月 3 日, 九州大学
 - ② 長沢真樹子, 円盤散逸と永年共鳴, 日本惑星科学会 2008 年秋季講演会, 2008 年 11 月 2 日, 九州大学
 - ③ 長沢真樹子, 惑星散乱による高離心率ホットジュピターの形成, 日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008 年 9 月 12 日, 岡山理科大学
 - ④ 長沢真樹子, 惑星散乱による高離心率短周期高離心率の系外惑星の形成, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 28 日, 幕張メッセ国際会議場
 - ⑤ Makiko Nagasawa, Shigeru Ida, The

formation of close-in planets through a coupling effect of planet scattering and tidal circularization, EGU General Assembly 2008, 2008 年 4 月 17 日, Vienna, Austria

- ⑥ Makiko Nagasawa, Shigeru Ida, Taisuke Bessho, The formation of close-in planets by the slingshot model, The International Astronomical Union, IAU249, 2007 年 10 月 26 日, 中国蘇州大学
 - ⑦ 長沢真樹子, 井田 茂, 別所 泰輔, ジャンピングジュピターモデルによる短周期惑星形成, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 28 日, 岐阜大学
 - ⑧ 長沢真樹子, 井田 茂, 別所 泰輔, ホットジュピターの軌道起源: スリングショットモデル, 日本惑星科学秋季講演会, 2007 年 9 月 26 日, 高知大学
 - ⑨ Makiko Nagasawa, Shigeru Ida, Taisuke Bessho, The origin of the short-period planets: the Jumping Jupiter model with tidal circularization, Extreme Solar Systems, 2007 年 6 月 26-29 日, Santorini, Greece
 - ⑩ Makiko Nagasawa, Eiichiro Kokubo, Jack Lissauer, Runaway Growth in a Binary System, The Third Workshop on Development of Extra-solar Planetary Science, 2006 年 12 月 11 日, 東京大学
 - ⑪ 長沢真樹子, 小久保英一郎, 複数惑星系の短周期惑星の力学進化, 日本惑星科学会秋季講演会, 2006 年 10 月 19 日, 神戸
 - ⑫ 長沢真樹子, D. N. C. Lin, 小久保英一郎, 短周期太陽系外惑星の軌道進化, 日本天文学会 2006 年秋季年会, 2006 年 9 月 21 日, 九州国際大学
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
長沢 真樹子 (NAGASAWA MAKIKO)
東京工業大学・グローバルエッジ研究院・テニユア・トラック助教
研究者番号: 00419847
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
なし