

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：特定領域研究
研究期間：2004～2008
課題番号：16077202
研究課題名（和文） 数値シミュレーションによる系外惑星系の形成過程の理論的研究
研究課題名（英文） Theoretical studies on formation of extrasolar planetary systems through numerical simulations
研究代表者 井田 茂（IDA SHIGERU） 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授 研究者番号：60211736

研究成果の概要：

惑星形成は多様な物理が絡む多段階非線形過程である。各過程に対して大規模シミュレーションなどを通して基礎過程の徹底理解の上で、半経験的惑星形成モデルを構築し、観測データとの比較のもとに理論モデルの不定パラメータを較正するという手法の基本的な枠組みを確立した。系外惑星の質量・軌道長半径の分布の予測を世界で唯一可能にし、現在進行中および将来の観測計画立案に重要な役割を担うようになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	21,900,000	0	21,900,000
2005年度	22,400,000	0	22,400,000
2006年度	17,800,000	0	17,800,000
2007年度	17,800,000	0	17,800,000
2008年度	17,800,000	0	17,800,000
総計	97,700,000	0	97,700,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：系外惑星、原始惑星系円盤、ダスト、乱流、惑星形成、数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太陽系形成の標準モデルは以下のように考えられていた。太陽系は太陽自身の形成の副産物である原始惑星系円盤の中で生まれた。現在の太陽の組成からの類推で、円盤は98～99%の質量が水素・ヘリウムのガスで構成され、残りのごく一部が固体成分（ダスト粒子）であった。ダストは微惑星へ、微惑星は地球型惑星、木星型惑星のコアへと集積した。大きなコアが形成されると、その強い重力で円盤ガスをひきつけ、木星型の巨大ガス惑星が形成された。

一方で、生まれたばかりの若い星である、

Tタウリ型星の電波・赤外観測が進み、そのまわりに多数の多様な原始惑星系円盤が発見されていた。また1995年以降、太陽系外に続々と多様な惑星（系外惑星）が発見され、その数は100個を越えていた。これらの多様な円盤、多様な系外惑星の観測データと太陽系形成の標準モデルがいかに調和していくのかしないのかが、天文学における大きな課題となっていた。

2. 研究の目的

惑星形成の初期状態である原始惑星系円盤のサンプル数、惑星形成の終状態である系

外惑星のサンプル数は統計的議論を可能にする数になってきていた。惑星形成過程の初期状態と終状態をつなぐために、惑星形成の各プロセスについて詳細な理論シミュレーションを行い、惑星形成の統一形成モデルの構築を目指すことにした。

さらに、現状の円盤の観測の精度は、それだけで、惑星形成の「初期状態」として必要な円盤内でのダスト分布の情報を提供するには十分ではない。そこにも詳細な理論シミュレーションを行うことにした。

3. 研究の方法

(1) 円盤内でのダスト密度分布の進化、およびその分布の多様性：分子雲コアの収縮による円盤形成、ダストの円盤内移動、合体によるサイズ分布進化過程といった基礎過程の数値シミュレーションを行なう。円盤の熱構造や円盤ガスの乱流の効果も考慮し、惑星形成の「初期状態」としてのダスト密度分布の多様性の推定、およびその分布から発する放射と観測との比較検討を行なう。

(2) 一般的な惑星系形成の決定論的作業モデルの構築：円盤のダスト密度分布が与えられたとした場合に、その後の微惑星集積、巨大ガス惑星の形成、惑星軌道進化を組み合わせ、どのような惑星系ができるのかの決定論的作業モデルを構築する。

(3) 系外惑星の質量や軌道分布の推定：観測と理論モデルによって推定されたダスト密度分布（惑星形成の初期条件）の頻度分布に、惑星系形成の決定論的作業モデルを適用することにより、系外惑星の質量や軌道分布の推定を行なう。また、観測との比較検討を行なう。

4. 研究成果

(1) 原始惑星系円盤の構造と進化：円盤内の磁気回転不安定の流体シミュレーションを行ない、乱流によるダスト拡散率を求めた。また、磁気回転不安定にはイオン化率の推定が重要であるが、電離度を上げる新たなメカニズムを提案した(犬塚・佐野 2005)。また、円盤内のダスト沈殿を妨げるケルビン・ヘルムホルツ不安定性について、ガス・ダスト 2 流体解析を行い、重力不安定性による微惑星形成へのシナリオを提案し(道越・犬塚 2006)、乱流内でのダストの成長・破壊・蒸発現象を調べた。

(2) 円盤内でのダスト分布の進化：円盤赤道面へのダストの沈殿の線形解析(犬塚・石津)及び沈殿に伴うダストの合体成長のシミュレーションを行ない(田中ほか 2005)、円盤乱流の影響の検討の必要性を指摘した。また、ダストの衝突破壊のシミュレーションを行い、ダストがどれくらいの圧密を受けるのかを調べた(陶山ほか

2008)。

(3) 一般化惑星系形成モデルの構築：大規模シミュレーションにより、地球型惑星の形成を詳細に明らかにした(小南ほか 2005、小久保ほか 2006)。円盤散逸に伴う重力ポテンシャルの変化の効果(永年共鳴)も調べた。木星の形成過程を流体力学と磁気流体力学の両方の手法で明らかにした(町田他 2006,2007,2008,2009)。形成された原始惑星の落下問題について磁気流体力学を取り入れた解析を行った(武藤他 2008)。

(4) 系外惑星の質量や軌道分布の推定：系外惑星に適用できる統合的惑星形成モデルを構築し、惑星砂漠の予測(井田・Lin 2004a)、中心星の金属量への依存性の説明(井田・Lin 2004b)、中心星の質量への依存性の予測((井田・Lin 2005, Burkert・井田 2007)、惑星軌道移動の効果の予測(井田・Lin 2008a,b)を行った。

(5) 視線速度による系外惑星観測プロジェクトへの参加：岡山巨星サーベイ(PI 佐藤)参加後に7つの巨大惑星発見。すばる N2K サーベイ(PI 佐藤)3つの巨大惑星発見(うち2つはトランジット惑星)。プロ・アマチュア共同のトランジットフォローアップ・ネットワークを設立。

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 32 件)

- ① Kato, M. T., Nakamura, K., Tandokoro, R., Fujimoto, M., & Ida, S.: 2009. Modification of angular velocity by inhomogeneous magnetorotational instability growth in protoplanetary disks. *Astrophys. J.* 691, 1697-1706. (査読有)
- ② Muto, T. & Inutsuka, S.: 2009. Orbital evolution of a particle interacting with a single planet in a protoplanetary disk. *Astrophys. J.* 695, 1132-1150. (査読有)
- ③ Suzuki, T., & Inutsuka, S.: 2009. Disk winds driven by magnetorotational instability and dispersal of protoplanetary disks. *Astrophys. J.* 691, L49-L54. (査読有)
- ④ Muranishi, T., & Inutsuka, S.: 2009. Direct simulations of particle acceleration in a fluctuating electromagnetic field across a shock. *Astrophys. J.* 691, L24-L26. (査読有)
- ⑤ Marchi, S., Ortolani, S., Nagasawa, M., & Ida, S.: 2009. On the various origins of close-in extrasolar planets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 394, L93-L96. (査読有)
- ⑥ Ida, S., Guillot, T., & Morbidelli, A.: 2008. Accretion and destruction of planetesimals in turbulent disks. *Astrophys. J.* 686,

- 1292-1301. (査読有)
- ⑦ Ida, S. & Lin, D. N. C.: 2008b. Toward a deterministic model of planetary formation. V. *Astrophys. J.* 685, 584-595. (査読有)
- ⑧ Ida, S. & Lin, D. N. C.: 2008a. Toward a deterministic model of planetary formation. IV. *Astrophys. J.* 673, 487-501. (査読有)
- ⑨ Shiraishi, M. & Ida, S.: 2008. Infall of planetesimals onto growing giant planets: Onset of runaway gas accretion and metallicity of their gas envelopes. *Astrophys. J.* 684, 1416-1426. (査読有)
- ⑩ Suyama, T., Wada, K., & Tanaka, H.: 2008. Numerical simulation of density evolution of dust aggregates in protoplanetary disks. I. Head-on collisions. *Astrophys. J.* 684, 1310-1322. (査読有)
- ⑪ Wada, K., Tanaka, H., 他 3 名: 2008. Numerical simulation of dust aggregate collisions. II. Compression and disruption of three-dimensional aggregates in head-on collisions. *Astrophys. J.* 677, 1296-1308. (査読有)
- ⑫ Machida, M. N., Kokubo, E., Inutsuka, S., & Matsumoto, T.: 2008. Angular momentum accretion onto a gas giant planet. *Astrophys. J.* 685, 1220-1236. (査読有)
- ⑬ Nagasawa, M., Ida, S., & Bessho, T.: 2008. Formation of hot planets by a combination of planet scattering, tidal circularization, and the Kozai mechanism. *Astrophys. J.* 678, 498-508. (査読有)
- ⑭ Ogihara, K., Ida, S., Morbidelli, A.: 2007. Accretion of Terrestrial Planets from Oligarchs in a Turbulent Disk. *Icarus* 188, 522-534. (査読有)
- ⑮ Atobe, K., Ida, S.: 2007. Obliquity evolution of extrasolar terrestrial planets. *Icarus* 188, 1-17. (査読有)
- ⑯ Burkert, A. & Ida, S.: 2007. On the Separation/Period Gap in the Distribution of Extrasolar Planets around Stars with Masses $M > 1.2 M_{\text{sun}}$. *Astrophys. J.* 660, 845-849. (査読有)
- ⑰ Wada, K., Tanaka, H., 他 3 名: 2007. Numerical simulation of dust aggregate collisions. I. Compression and disruption of two-dimensional aggregate. *Astrophys. J.* 661, 320-333. (査読有)
- ⑱ Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T.: 2007. Magnetic fields and rotations of protostars. *Astrophys. J.* 670, 1198-1213. (査読有)
- ⑲ Michikoshi, S., Inutsuka, S., Kokubo, E., Furuya, I.: 2007. N-body simulation of planetesimal formation through gravitational instability of a dust layer. *Astrophys. J.* 657, 521-532. (査読有)
- ⑳ Kokubo, E. & Ida, S.: 2007. Formation of terrestrial planets from protoplanets. II. Statistics of planetary spin. *Astrophys. J.* 671, 2082-2090. (査読有)
- (21) Daisaka, K. J., Tanaka, H. & Ida, S.: 2006. Orbital evolution and accretion of protoplanets tidally interacting with a gas disk. II. *Icarus* 185, 492-507. (査読有)
- (22) Machida, M. N., Inutsuka, S. & Matsumoto, T.: 2006. Outflows driven by giant protoplanets. *Astrophys. J.* 649, L129-L132. (査読有)
- (23) Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T.: 2006. *Astrophys. J.* 647, L151-L154. (査読有)
- (24) Michikoshi, S. & Inutsuka, S.: 2006. A two-fluid analysis of the Kelvin-Helmholtz instability in the dusty layer of a protoplanetary disk: A possible path toward planetesimal formation through gravitational instability. *Astrophys. J.* 641, 1131-1147. (査読有)
- (25) Kokubo, E., J. Kominami & Ida, S.: 2006. Formation of terrestrial planets from protoplanets. I. Statistics of basic dynamical properties. *Astrophys. J.* 642, 1131-1139. (査読有)
- (26) Ida, S., & Lin, D. N. C.: 2005. Towards a deterministic model of planetary formation. III. *Astrophys. J.* 626, 1045-1060. (査読有)
- (27) Kominami, J., Tanaka, H. & Ida, S.: 2005. Orbital Evolution and Accretion of Protoplanets Tidally Interacting with a Gas Disk. I. *Icarus* 178, 540-552. (査読有)
- (28) Sato, B., Fischer, D., Henry, G., Laughlin, G., Butler, P., Marcy, G., Vogt, S., Bodenheimer, P., Ida, S., 他 12 名: 2005. The N2K consortium. II. A transiting hot Saturn around HD 149026 with a large dense core. *Astrophys. J.* 633, 465-473. (査読有)
- (29) Tanaka, H., Himeno, Y. & Ida, S.: 2005. Dust growth and settling in protoplanetary disks and disk Spectral energy distributions. I. *Astrophys. J.* 625, 414-426. (査読有)
- (30) Inutsuka, S., & Sano, T.: 2005. Self-sustained ionization and vanishing dead zones in protoplanetary disks. *Astrophys. J.* 628, L155-L158. (査読有)
- (31) Ida, S., & Lin, D. N. C.: 2004b. Toward a deterministic model of planetary formation. II. *Astrophys. J.* 616, 567-572. (査読有)
- (32) Ida, S., & Lin, D. N. C.: 2004a. Toward a deterministic model of planetary formation. I. *Astrophys. J.* 604, 388-413. (査読有)

〔学会発表〕(計 7 件)

① 小久保英一郎, “Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets”, xoplanets and disks: Their formation and diversity, 2009, The 2nd Subaru International Conference "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity", 12 March, 2009, Hawaii, USA.

② 田中秀和, “Dust Growth in Protoplanetary Disks”, Exoplanets and disks: Their formation and diversity, 2009, The 2nd Subaru International Conference "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity", 10 March, 2009, Hawaii, USA.

③ 井田茂, “Formation of short-period terrestrial planets”, Exoplanets and disks: Their formation and diversity, 2009, The 2nd Subaru International Conference "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity", 10 March, 2009, Hawaii, USA.

④ 犬塚修一郎, “A Hybrid Scenario for Planet Formation”, Exoplanets and disks: Their formation and diversity, 2009, The 2nd Subaru International Conference "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity", 9 March, 2009, Hawaii, USA.

⑤ 井田茂, “Modeling for formation of extrasolar planets”, Origin and evolution of planets, 2008, Ascona Conference, 4 July, Ascona, Switzerland,

⑥ 井田茂, “Migration and M-a distributions of extrasolar planets”, IAU symposium 249, 24 October, 2007, Suzhou, China.

⑦ 井田茂, “Planetary formation -- architectures, theory”, From disks to planets, 10 March 2005, Pasadena, California, USA

〔図書〕(計 1 件)

① 井田茂, 東京大学出版会、「系外惑星」、2007, 204 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井田 茂 (IDA SHIGERU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：6 0 2 1 1 7 3 6

(2) 研究分担者

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：0 0 2 8 2 8 1 4

犬塚 修一郎 (INUTSUKA SHUICHIRO)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：8 0 2 7 0 4 5 3

小久保 英一郎 (KOKUBO EIICHIRO)

国立天文台・理論天文学研究系・准教授

研究者番号：9 0 3 3 2 1 6 3

(3) 連携研究者

なし