

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18540238
 研究課題名（和文） 原始惑星系円盤における弱電離プラズマ素過程と惑星形成過程の理論的研究
 研究課題名（英文） Basic Physical Processes of Weakly Ionized Plasma and Planet Formation

研究代表者
 犬塚 修一郎 (Shu-ichiro Inutsuka)
 名古屋大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号： 80270453

研究成果の概要（和文）：弱電離プラズマ状態にある原始惑星系円盤における種々の物理的プロセスを解析して、円盤進化を理解する上で重要になる現象を調べ上げた。また、それに基づき、惑星形成理論についての示唆を完結した。特に、惑星形成に関する新しいシナリオ（ハイブリッド・モデル）を提唱した。

研究成果の概要（英文）：I investigate the various physical processes in weakly ionized protoplanetary disks and clarified the important processes for the disk evolution and planet formation. According to these developments, I have proposed a new scenario for planet formation, called “Hybrid Scenario of Planet Formation.”

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,200,000	0	1,200,000
2007 年度	800,000	240,000	1,040,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星形成，惑星形成，系外惑星系，原始惑星系円盤，MHD，弱電離プラズマ，太陽風，乱流

1. 研究開始当初の背景

1995年に51Pegという星の周りを回る系外惑星が発見されて以来、惑星形成に関連する研究を進めている研究者の数は世界中で爆発的に増加し、研究成果も急成長を遂げた。しかしながら、その本質的な進歩は主に天文観測によるものが主であると言わざるを得ない。当時、200個に迫る系外惑星の大幅に異なる性質（主星からの距離・質量・軌道

離心率）の統計的な議論が可能となっており、我々の太陽系とは非常に異なる形態の多数の系外惑星系の存在は、惑星形成理論の研究に対して豊かな動機付けを与えていた。

一方、理論的な進展に関しては、我々の太陽系だけが実測できる唯一の惑星系であった時代に提唱された惑星形成理論である大きく異なる2つのシナリオ（京都モデルとキヤメロン・モデル）が完全には否定されるこ

と無く、研究され続けており、そのどちらもが定性的には原型をとどめていた。このような理論面の混乱の一つの理由はそのどちらもが、理論的は内的矛盾と観測事実との相違を伴っているからであった。

2. 研究の目的

そこで私は、必要な物理素過程を積み上げて、もう一度形成シナリオを考え直すことに取り組む。古典的な惑星形成モデルが考案された段階に比べて大きく発展した原始惑星系円盤の天文学的研究は、円盤の物理的・化学的特長の観測と、その内部での角運動量輸送と質量降着に関する理論である。実際、角運動量輸送を引き起こす現象論的乱流粘性の起源としては磁気回転不安定性による磁気乱流であることが有力となり、その研究は非常に進歩した。この磁気流体力学的現象は原始惑星系円盤において重要であるにもかかわらず、従来の惑星形成シナリオでは無視されている。したがって、この電磁場の効果を考慮した現代的な惑星形成理論を再解析することが本研究の目的である。具体的には以下のような3つの側面について研究を進める予定であるが、その結果としてこれまでのシナリオとは非常に異なる惑星形成理論を展開することになり、世界的に見ても非常に独創的な研究が展開できるはずである

3. 研究の方法

(1) 原始惑星系円盤の電離度分布と磁気乱流の解析

温度が数百度程度で高密度の原始惑星系円盤での電離度は低いと考えられていたため、これまでの惑星形成理論は磁場の効果は重要視されていなかった。しかし、2005年の論文で我々は、正のフィードバック・プロセスが働いて、磁気乱流状態での準定常的なエネルギー散逸が電離度を上げる効果をもたらし、弱電離プラズマ状態である原始惑星系円盤内で磁気乱流状態が継続することを示唆した。本研究では、電離プロセスに対してさらに詳細な解析を行い、現実的な円盤内での電離度の分布を明らかにし、どのような弱電離プラズマ乱流状態分布になるかを解明する。

(2) 塵粒子の合体・成長過程における電磁氣的相互作用の効果の研究

塵粒子はその速度分散に応じて合体・成長して、赤道面に沈殿する速度が変化すると考えられているが、磁気乱流状態の中では、むしろその合体成長は促進されると考えられる。但し、従来のモデルでは塵粒子同士が大きな速度をもって衝突した際は、破壊されるのみで合体できないと考えられている。しかし、それは荷電粒子の効果を考慮しない場合の結果であり、電荷を帯びた粒子の場合は分

極力のため合体しやすくなる。この効果を考慮した研究はまだほとんどないため、この効果が塵粒子サイズの成長と沈殿、微惑星の形成過程に与える影響を定量的に明らかにする。

(3) 原始惑星系円盤のガス成分の散逸過程の研究

最終的には、微惑星の形成と原始惑星の形成の後に水素・ヘリウム主体の始原的ガスを消失させる必要があるが、この方法についても、どのメカニズムが有望なのかについて、決着がついていない。その一つのメカニズムとして、磁気乱流状態にある円盤表面に形成されるコロナからのガスの消失（漏れ流れ・蒸発）を定量的に計算する。これは本研究課題の中では自然な研究の延長となっている。この際、主系列星に比べて活動的なTタウリ型星の星風の効果も考慮する必要がある。この研究に関しては、コロナの加熱と太陽風の加速に関する我々の最近の研究成果を拡張することで直接的に研究が進められるため、ガスの消失過程の現実的・定量的なモデルの構築を目指す。急速な発展を遂げている原始惑星系円盤の観測結果との直接的な比較研究も行う。

4. 研究成果

弱電離プラズマ状態にある原始惑星系円盤における種々の物理的プロセスを解析して、円盤進化を理解する上で重要になる現象を調べ上げた。さらに、これまでに調査してきた項目をまとめ、惑星形成理論についての示唆を完結した。特に、2009年初頭に米国で開催された系外惑星系についての国際会議において、私は惑星形成に関する新しいシナリオ（ハイブリッド・モデル）を提唱した。この講演についての諸外国の研究者からの手ごたえは十分あり、ひとつの新しい研究の方向性としてまとめることが急務であるため、これまでの研究の延長線上にある素過程の研究を続けることだけでなく、これまでの成果を組み合わせることも進めた。特に、我々が世界的に先駆的な研究成果をあげている原始星の形成・進化の研究の延長として、原始惑星系円盤の形成・進化の計算をより推し進め、形成初期の大質量円盤の重力不安定性による巨大惑星形成のシナリオを確立させた。この研究が上述の惑星形成ハイブリッド・モデルの骨子となり、すでに調査してきた円盤内での素過程の研究と組み合わせ、現実的な惑星形成シナリオを構築することができた。また、2008年度末に米国天体物理学学会誌に発表した円盤磁気乱流の帰結としての円盤ガス蒸発流が円盤進化に与える影響も解明した。これらの研究は解析的な手法と数値シミュレーションを組み合わせる

った。

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 43 件)

- (1) "Emergence of Protoplanetary Disks and Successive Formation of Gaseous Planets by Gravitational Instability", S. Inutsuka, M. N. Machida, & T. Matsumoto, ApJL 印刷中 (arXiv0912.5439) (査読有)
- (2) "Protoplanetary Disk Winds by Magnetorotational Instability: Formation of an Inner Hole and a Crucial Assist for Planet Formation", T. K. Suzuki, T. Muto & S. Inutsuka (2010) ApJ 印刷中 (arXiv0911.0311)
- (3) "A Hybrid Scenario for Planet Formation", Shu-ichiro Inutsuka (2009) EXOPLANETS AND DISKS: THEIR FORMATION AND DIVERSITY AIP Conference Proceedings, Volume 1158, pp. 31-34 (2009) (査読無)
- (4) "Kelvin-Helmholtz Instabilities with Godunov SPH" Seung-Hoon Cha, Shu-ichiro Inutsuka & Sergei Nayakshin (2010) Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.403, pp.1165-1174 (査読有)
- (5) "Gas accretion onto a protoplanet and formation of a gas giant planet", Masahiro Machida, Eiichiro Kokubo, Shu-ichiro Inutsuka, & Tomoaki Matsumoto (2010) Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Online Early (査読有)
- (6) "Analysis of the Relaxation Process using Non-Relativistic Kinetic Equation" Makoto Takamoto & Shu-ichiro Inutsuka (2010) Progress of Theoretical Physics, accepted (arXiv:1004.0635) (査読有)
- (7) "Two-Fluid MHD Simulations of Converging HI Flows in the Interstellar Medium. II: Are Molecular Clouds Generated Directly from Warm Neutral Medium?" Tsuyoshi Inoue & Shu-ichiro Inutsuka (2009), The Astrophysical Journal Vol.704, pp.161-169 (査読有)
- (8) "The Circumbinary Outflow: A Protostellar Outflow Driven by a Circumbinary Disk", Masahiro Machida, Shu-ichiro Inutsuka, & Tomoaki Matsumoto (2009) ApJ Vol.704, L10-L14 (査読有)
- (9) "Binary formation with different metallicities: dependence on initial conditions" Masahiro Machida, Kazuyuki Omukai, Tomoaki Matsumoto, & Shu-ichiro Inutsuka (2009) MNRAS Vol.399, pp.1255-1263 (査読有)
- (10) "N-body Simulation of Planetesimal Formation Through Gravitational Instability and Coagulation II. Accretion Model" Shugo Michikoshi, Eiichiro Kokubo, & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 703, 1363 (査読有)
- (11) "Emission from a Young Protostellar Object I. Signatures of Young Embedded Outflows", Yamada, M., Machida, M. N., Inutsuka, S., & Tomisaka, K. (2009) ApJ 703, 1141 (査読有)
- (12) "Local Linear Analysis of Interaction between a Planet and Viscous Disk and an Implication on Type I Planetary Migration", Takayuki Muto & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 701, 18 (査読有)
- (13) "First Direct Simulation of Brown Dwarf Formation in a Compact Cloud Core" Masahiro N. Machida, Shu-ichiro Inutsuka, & Tomoaki Matsumoto (2009) ApJ 699, L157 (査読有)
- (14) "Supernova Propagation and Cloud Enrichment: A New Model for 60Fe Origin in Early Solar System", Matthieu Gounelle, Anders Meibom, Patrick Hennebelle & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 694, L1 (査読有)
- (15) "Turbulence and Magnetic Field Amplification in Supernova Remnants: Interactions Between A Strong Shock Wave and Multi-Phase Interstellar Medium", Tsuyoshi Inoue, Ryo Yamazaki, & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 695, 825 (査読有)
- (16) "Orbital Evolution of a Particle Interacting with a Single Planet in a Protoplanetary Disk" Takayuki Muto & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 695, 1132 (査読有)
- (17) "Disk Winds Driven by Magnetorotational Instability and Dispersal of Proto-planetary Disks", Takeru K. Suzuki & Shu-ichiro Inutsuka (2009) ApJ 691, L49 (査読有)
- (18) "Direct Simulations of Particle Acceleration in Fluctuating Electromagnetic Field across a Shock", T. Muranushi & S. Inutsuka (2009) ApJ 691, L24 (査読有)
- (19) "Magneto-Hydrodynamics of Population III Star Formation", Machida, M. N., Matsumoto, T., & Inutsuka, S. (2008) ApJ 685, 690 (査読有)
- (20) "Two-Fluid MHD Simulations of

- Converging HI Flows in the Interstellar Medium. I: Methodology and Basic Results”, Inoue, T., & Inutsuka, S. (2008) *ApJ* 687, 303 (査読有)
- (21) “Angular Momentum Accretion onto a Gas Giant Planet”, Machida, M. N., Kokubo, E., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2008, *ApJ* 685, 1220 (査読有)
- (22) “Formation Scenario for Wide and Close Binary Systems”, Machida, M. N., Tomisaka, K., Matsumoto, T., & Inutsuka, S. 2008, *ApJ* 677, 327 (査読有)
- (23) “The Formation and Evolution of Prestellar Cores”, André, P., Basu, S., & Inutsuka, S. 2008, in “Structure Formation in Astrophysics”, Ed. G. Chabrier, (Cambridge UP, 2008) (査読有)
- (24) “The Effect of Poloidal Magnetic Field on Type I Planetary Migration: Significance of Magnetic Resonance”, Muto, T., Machida, M. N., & Inutsuka, S. 2007, *ApJ* 679, 813 (査読有)
- (25) “Conditions for the Formation of First-Star Binaries”, Machida, M. N., Omukai, K., Matsumoto, T., & Inutsuka, S. 2007, *ApJ* 677, 813 (査読有)
- (26) “High- and Low-Velocity Magnetized Outflows in Star Formation Process in a Gravitationally Collapsing Cloud”, Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2007, *ApJ* 676, 1088 (査読有)
- (27) “Magnetic Fields and Rotations of Protostars”, Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2007, *ApJ*, 670, 1198 (査読有)
- (28) “Evolutionary Conditions in Dissipative MHD Systems Revisited”, Inoue, T., & Inutsuka, S. 2007, *Progress of Theoretical Physics*, 118, 47 (査読有)
- (29) “Dynamical Formation of Dark Molecular Hydrogen Clouds around Diffuse H II Regions”, Hosokawa, T., & Inutsuka, S. 2007, *ApJ*, 664, 363 (査読有)
- (30) “The Role of Ambipolar Diffusion in the Formation Process of Moderately Magnetized Diffuse Clouds”, Inoue, T., Inutsuka, S., & Koyama, H. 2007, *ApJ*, 658, L99 (査読有)
- (31) “Synthetic Observations of Carbon Lines of Turbulent Flows in the Diffuse Multiphase Interstellar Medium”, Yamada, M., Koyama, H., Omukai, K., & Inutsuka, S. 2007, *ApJ*, 657, 849 (査読有)
- (32) “N-Body Simulation of Planetesimal Formation through Gravitational Instability of a Dust Layer”, Michikoshi, S., Inutsuka, S., Kokubo, E., & Furuya, I. 2007, *ApJ*, 657, 521 (査読有)
- (33) “Current Advances in the Methodology and Computational Simulation of the Formation of Low-Mass Stars”, Klein, R. I., Inutsuka, S., Padoan, P., & Tomisaka, K. 2007, *Protostars and Planets V*, 99 (査読有)
- (34) “Structure and Stability of Phase Transition Layers in the Interstellar Medium”, Inoue, T., Inutsuka, S., & Koyama, H. 2006, *ApJ*, 652, 1331 (査読有)
- (35) “How Long Can Tiny H I Clouds Survive?” Nagashima, M., Inutsuka, S., & Koyama, H. 2006, *ApJ*, 652, L41 (査読有)
- (36) “Outflows Driven by Giant Protoplanets”, Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2006, *ApJ*, 649, L129 (査読有)
- (37) “Dynamical Expansion of Ionization and Dissociation Front around a Massive Star: A Starburst Mechanism”, Hosokawa, T., & Inutsuka, S. 2006, *ApJ*, 648, L131 (査読有)
- (38) “Second Core Formation and High-Speed Jets: Resistive Magnetohydrodynamic Nested Grid Simulations”, Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2006, *ApJ*, 647, L151 (査読有)
- (39) “The First Jets in the Universe: Protostellar Jets from the First Stars”, Machida, M. N., Omukai, K., Matsumoto, T., & Inutsuka, S. 2006, *ApJ*, 647, L1 (査読有)
- (40) “Can Warm Neutral Medium Survive inside Molecular Clouds?”, Hennebelle, P., & Inutsuka, S. 2006, *ApJ*, 647, 404 (査読有)
- (41) “Dynamical Expansion of Ionization and Dissociation Front around a Massive Star. II. On the Generality of Triggered Star Formation”, Hosokawa, T., & Inutsuka, S. 2006, *ApJ*, 646, 240 (査読有)
- (42) “Solar winds driven by nonlinear low-frequency Alfvén waves from the photosphere: Parametric study for fast/slow winds and disappearance of solar winds”, Suzuki, T. K., & Inutsuka, S. 2006, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 111, A06101 (査読有)
- (43) “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”, Michikoshi, S., & Inutsuka, S. 2006, *ApJ*,

641, 1131 (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

- (1) 犬塚修一郎, 「惑星形成のハイブリッド・シナリオ」, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 27 日, 広島大学
- (2) 犬塚修一郎, 「原始惑星系円盤の発現と巨大惑星の形成について」, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2009 年 9 月 16 日, 山口大学
- (3) S. Inutsuka, “A Hybrid Scenario for Planet Formation”, 第 6 回太陽系外惑星大研究会, 2010 年 1 月 18 日, 東京
- (4) S. Inutsuka, “Disk-Jet Interaction”, 国際会議 From circumstellar disks to planetary systems, 2009 年 11 月 4 日, Garching, Germany
- (5) S. Inutsuka, “Phase Transition Dynamics of Magnetized Interstellar Medium”, Joint Discussion “Magnetic Fields in Diffuse Media” at XXVII IAU General Assembly (第 27 回国際天文学連合総会) 2009 年 8 月 14 日, Rio de Janeiro, Brazil
- (6) S. Inutsuka, “Recent Progress in Theory of Interstellar Medium and Star Formation”, 国際会議 Joint Subaru/Gemini Science Conference, 2009 年 5 月 21 日, Kyoto, Japan
- (7) S. Inutsuka, “A Close Look at Foot points of Protostellar Outflows: Can we determine the driving mechanism by ALMA?”, 国際会議 “The 5th ALMA Japan-Taiwan science workshop (Dec. 5-6, 2008) National Tsing-Hua University, Hsinchu, Taiwan
- (8) S. Inutsuka “Comments from a Theorist”, 国際ワークショップ SEEDS Workshop, (Feb. 1, 2008) Mitaka, Tokyo
- (9) S. Inutsuka, “Dynamics of Multi-Phase Interstellar Medium”, 国際会議 Star Formation Through Cosmic Time, KITP, UC SANTA BARBARA, USA (August 29, 2007)
- (10) S. Inutsuka, “Triggered Star Formation”, 国際会議 “Star Formation, Then and Now”, KITP, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA BARBARA, USA (August 13 - August 17, 2007)
- (11) S. Inutsuka, “Dynamics of Multi-Phase Interstellar Medium”, 国際会議 HI Survival through Cosmic Times, SARTEANO (SIENA), ITALY (June 11-15 2007)
- (12) S. Inutsuka, “Magnetohydrodynamics and thermodynamics of protostellar collapse”, 国際会議 Structure formation in the Universe, Chamonix, France (May 27 - June 1, 2007)
- (13) S. Inutsuka, “Resistive MHD Evolution of Protostars”, IAU Symposium 243: Star-Disc Interaction in Young Stars, Grenoble, France

(May 21 - May 25, 2007)

- (14) S. Inutsuka, “Collapse and Outflow in Star Formation”, 国際会議 SUPERNOVAE CONFERENCE 2007, Tokyo, Japan (February 1 - 3, 2007)
- (15) S. Inutsuka, “The Role of Magnetic Fields in Planet Formation”, 特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」第 3 回大研究会, Koshiba Memorial Hall, University of Tokyo, Japan (December 11-13, 2006)
- (16) S. Inutsuka, “Dynamics of Multi-Phase Interstellar Medium”, 国際会議 “THE SECOND EAST-ASIA NUMERICAL ASTROPHYSICS MEETING (EANAM2006)”, Daejeon, Korea (2006/11/1-2006/11/3)

[図書] (計 3 件)

- ① 富坂 幸治 (編さん), 花輪 知幸 (編集), 牧野 淳一郎 (編集), 犬塚修一郎他 (共著), 日本評論社「シミュレーション天文学」(シリーズ現代の天文学) 2007, pp.209-222
- ② 福井康雄, 犬塚修一郎他 (編集), 犬塚修一郎他 (共著) 日本評論社「星間物理学と星形成」(シリーズ現代の天文学) 2008, 325
- ③ 観山正見・二間瀬敏史・野本憲一 (編集), (犬塚修一郎他共著) 日本評論社「天体物理学の基礎〈1〉」(シリーズ現代の天文学) 2009, pp.295-330

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

犬塚 修一郎 (Shu-ichiro Inutsuka)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 80270453

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し