

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：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244027

研究課題名(和文) 星形成理論の展開

研究課題名(英文) Revolving Theory of Star Formation

研究代表者

犬塚 修一郎 (Inutsuka, Shu-ichiro)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：80270453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：3つの主要課題に対して成果が得られた。特筆すべきは、銀河系円盤部の星形成過程に関する長年の理論的研究をまとめて星形成の新しい統一理論を構築したことである。これにより、中性水素分子雲と分子雲の分布構造の特徴・分子雲の速度分散・フィラメント状分子雲と磁場構造の関係・星形成の継続時間・星形成の加速過程・分子雲コアの質量関数などの種々の観測事実を首尾一貫して説明可能となった。原始惑星系円盤の形成過程については、3種類すべての非理想磁気流体力学的効果を取り入れた輻射磁気流体力学的計算により、現実の円盤形成過程が異なる2種類の進化過程に分類した。また、原始惑星系円盤における永年不安定性の研究を発展させた。

研究成果の概要(英文)：We investigated important processes in various stages of star formation, starting from the formation of molecular clouds from warm atomic medium, covering to the formation of protostars and protoplanetary disks. Based on those result we proposed an integrated scenario of star formation processes in our galaxy, which explains most of important observational aspects, such as cloud-to-cloud velocity dispersion, and the mass function of molecular cloud cores, star formation efficiency, and gas depletion timescale. We also investigated two kinds of new planet formation scenario: one is hybrid model that combine gravitational instability and core-accretion model. The other is based on secular gravitational instability. Our paper on the latter process resulted in the prediction of multiple ring-like structure in the protoplanetary disks prior to the discovery of multiple ring structure in HL-Tau disk by ALMA. This process is supposed to be important in creating so-called debris disks.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：星形成 惑星形成 星間媒質 分子雲 磁気流体力学 系外惑星 電離領域 初期質量関数

1. 研究開始当初の背景

星は分子雲の中で生まれるため、分子雲の形成過程を理解することは、星形成過程の初期条件を決定するために不可欠である。また、銀河内での分子雲形成過程を理解することは、星形成活動に起因する銀河進化の研究の為に必須である。しかし本研究開始以前は、星間ガスの相転移を含む分子雲の形成過程から系統的に星形成過程を理解するという試みは極めて限られており、星形成過程の多様な側面が個別に研究されているのが通常であった。研究代表者は分子雲形成の研究を2000年頃から世界に先駆けて取り組み始めており、その成果をもとに磁場の効果を含めた現実的な星間媒質のダイナミクスを研究することにより、星形成過程を統一的に理解することが求められていた。

2. 研究の目的

銀河系円盤部に存在する中温ガス(温度約一万度、ウォームガス)や低温ガス(温度約百度、コールドガス)から分子雲(温度約十度)が形成され、その中の高密度領域(分子雲コア)で星が形成される過程について、第一原理に基づく首尾一貫した理論を完成させる。特に、以下の3つの「星形成の未解決問題」を解明する。

- (1) いつどのようにして重力収縮は始まるか?
- (2) どのような星周円盤が形成され進化するか?
- (3) 星周円盤においてどのような巨大ガス惑星が形成され、生き残るのか?

また、すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト SEEDS や次世代大型電波望遠鏡 ALMA 等による観測計画において有効な予言を行い、日本の天文学研究が世界を牽引していく環境を構築する。

3. 研究の方法

本研究の中心課題は、第一原理に基づく首尾一貫した理論的記述を行い、星形成過程に関してまだ解決されていない上記3つの課題を解明することである。どの問題に対しても、第一原理に基づくこれまでの研究手法を貫いた。つまり必須となる高精度計算手法(アルゴリズム)を自ら開発し、それを用いた数値解析を駆使して理論的解明を目指した。但し、これまでに費やしてきた研究と同様に長大な研究作業が必要となるため、特任助教並みのポストドクを雇って研究を加速することで世界に追い抜かれないようにした。理論的研究の成果をもとに、すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト SEEDS や次世代大型電波望遠鏡 ALMA 等による観測で星形成過程の核心に迫る方法を予言し、観測プロジェクトの専門家と協力して検証を試みた。

4. 研究成果

上記3つ課題すべてに対して多くの成果が得られた。特筆すべき成果は、以下の5つの項目に分類される。

(1) 星形成シナリオの確立

銀河系円盤部の星形成過程に関する長年の理論的研究をまとめて星形成の新しい統一理論

(Inutsuka et al. 2015)を構築したことである。この論文の定式化に立脚して分子雲の質量関数に関するより詳細な解析結果も発表した(Kobayashi et al. 2017)。これまでに提案されていた星形成のシナリオは、電離領域の拡大に伴うトリガー機構、分子雲衝突による星形成、さらに近年急速に発展した分子雲のフィラメント状構造に起因する星形成条件に基づくもの(André et al. 2014)などがあり、それぞれは独立で異なる現象として捉えられていた。今回提案しているシナリオは、それらすべては統一的に含み、それぞれは一つの統一的なシナリオの異なる側面に過ぎないことになる。この論文で提案したシナリオにより、中性水素分子雲と分子雲の分布構造の特徴・分子雲の速度分散・フィラメント状分子雲と磁場構造の関係・星形成の継続時間・星形成の加速過程・分子雲コアの質量関数など、多様の観測事実が首尾一貫して説明可能となった。このシナリオにより円盤銀河における星形成活動を普遍的に記述できるので、今後はこのシナリオに基づき、円盤銀河の渦状腕などの大域的な構造に依存して星形成過程の発展が記述可能であり、銀河進化を記述する研究への自然に発展すると期待される。

(2) 原始星の形成過程の解明

分子雲コアが重力的に不安定となって収縮し(第一収縮)、原始星を形成する過程については3次元非理想磁気流体力学的数値シミュレーションにより継続的に研究を行って、その描像をほぼ確立できた。具体的には、第一収縮の結果として第一コアが形成された直後に双極分子流が駆動されること。第一コアの中心部分で第二収縮が始まり、第二コアつまり原始星ができること。第一コアの中では磁場と流体が相互作用しないデッドゾーンがあり、その中で進む第二収縮においては磁場の凍結が解除されるため、原始星は小さな磁束しか持たないこと。しかし、その小さな磁束をねじることで大きなトロイダル磁場が生み出されるためコリメーションが効果的となり、細いジェットが発生すること。第二収縮においては磁場による磁気制動が弱まるため、角運動量を保ったガスが原始星の星周円盤を形成すること。その現象が継続的に続くことにより第一コアが徐々に星周円盤に姿を変えていくことで、いわゆる原始惑星系円盤ができること(Machida et al. 2011)。この形成段階の原始惑星系円盤は中心星よりも大きな質量を用いるため、自己重力的に不安定となり、分裂する可能性があること。原始惑星系円盤の外縁半径は分子雲コアのエンベロープが消失するに伴い、急激に大きくなること、などである。この内容については査読付き(招待)レビュー論文においてまとめた(Inutsuka 2012)。

(3) 原始惑星系円盤の形成過程の解明

3種類すべての非理想磁気流体力学的効果を取り入れた輻射磁気流体力学的数値シミュレーションにより、現実の円盤形成過程が異なる2種類の進化過程に分類できることを示した(Tsukamoto et al. 2015)。その2種類の進化は、形成初期に大きな半径の円盤になるか小さな

のになるかという点が顕著な違いである。この理論的発見は、従来観測的研究により論争になっていた円盤サイズの違いの起源を自然に説明することが可能となるため、原始惑星系円盤の進化に関する研究分野の重要な寄与として理解されるはずである。

(4) 永年重力不安定性の解析

原始惑星系円盤における永年不安定性の詳細な研究を行った。特に、ガスとダストの相互作用が本質的なこの現象に対して、ガス・ダストの2成分系での理論的解析を世界で初めて行い、100AU程度の半径で間隔が13AU程度の複数リング構造ができることを予言していた(Takahashi & Inutsuka 2014)。その後の観測により、ALMA電波干渉計によりHL-Tau星周円盤における複数リング構造の発見されたのは記憶に新しい。この研究をさらに発展させた。その成果は、一定の条件のもとで円盤中に複数のリング構造が形成され固体惑星の形成へとつながる可能性を議論する論文として発表した(Takahashi & Inutsuka 2016)。このテーマの研究は今後も活発に議論され、新しい惑星形成メカニズムとして重要となるはずである。

(5) 円盤風の発見と解析

原始惑星系円盤の電離度が十分高い領域においては、円盤内で弱い磁場をもとに磁気乱流が発生する。この乱流は円盤表面部から重力脱出速度よりも遅い円盤風を駆動することを円盤の局所シミュレーションにより発見していた(Suzuki & Inutsuka 2009)。その流れは円盤内にダストを残し、ガスのみを取り除く効果となるため、結果的に円盤内におけるガス量に対するダスト量の比を挙げることになる。そのため、微惑星形成にとって極めて有利な環境を与えることを示していた(Suzuki, Muto, & Inutsuka 2010)。この現象の解析において、局所近似を外し大局的な円盤モデルで計算することは計算の技術的な問題で困難を極めていたが、2014年に現実的な縦磁場入りの計算を世界で初めて実行し解析し、局所計算では分からない大局的な進化についても議論した(Suzuki & Inutsuka 2014)。この円盤風の発見は理論的研究において極めて重要であるため、世界的にその追試が行われ、我々の発見から4年後の2013年に世界の3つのグループにより、その確認を示す論文が同時に発表され、その概念は確立された。これにより、惑星形成過程についての理論的考察の新しい流れが形成された。世界の同分野の研究者からは、惑星形成研究の一つのパラダイムシフトを導いたと評価されている研究である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(査読付き計 63 件)

- ① "The Formation and Destruction of Molecular Clouds and Galactic Star Formation: An Origin for The Cloud Mass Function and Star Formation Efficiency", S. Inutsuka, T. Inoue, K. Iwasaki, & T. Hosokawa (2015) *Astronomy and Astrophysics*, Volume 580, A49 (7pp)
- ② "Bimodality of Circumstellar Disk Evolution

Induced by the Hall Current", Y. Tsukamoto, K. Iwasaki, S. Okuzumi, M. N. Machida, and S. Inutsuka (2015) *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 810, L26 (5pp)

- ③ "Two-component Secular Gravitational Instability in a Protoplanetary Disk: A Possible Mechanism for Creating Ring-like Structures", S. Z. Takahashi & S. Inutsuka (2014) *The Astrophysical Journal* Vol. 794, 55
- ④ "Magnetohydrodynamic Simulations of Global Accretion Disks with Vertical Magnetic Fields", T. K. Suzuki & S. Inutsuka, *The Astrophysical Journal* Vol. 784, 121
- ⑤ "From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation", P. André, J. D. Francesco, D. Ward-Thompson, S. Inutsuka, R. Pudritz, J. Pineda (2014) Review Chapter in *Protostars and Planets VI*
- ⑥ "Present-Day Star Formation - From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks", S. Inutsuka (2012) *Prog. Theor. Exp. Phys.* Vol. 2012 Issue 1, 01A307
- ⑦ "Effect of Magnetic Braking on the Circumstellar Disk Formation in a Strongly Magnetized Cloud", M. Machida, S. Inutsuka, & T. Matsumoto (2011) *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.63, No.3, pp.555--573.

他の欧文発表論文の詳細は以下に掲載：

<http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/Papers/>

〔学会発表〕(国際会議のみ計 37 件, 内 24 件は招待講演)

- ① "Low-Mass Star Formation: From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks", S. Inutsuka, Invited Review Talk given at The 6th Zermatt ISM Symposium "Conditions and Impact of Star Formation - From Lab to Space" (Sept 7-11, 2015) Zermatt, Switzerland
- ② "The Formation and Destruction of Molecular Clouds and Galactic Star Formation", S. Inutsuka, Invited Talk given at IAU Symposium 315 "FROM INTERSTELLAR CLOUDS TO STAR-FORMING GALAXIES: UNIVERSAL PROCESSES" (August 3-7, 2015) Honolulu, Hawaii, USA
- ③ "The Formation of Molecular Clouds and Galactic Star Formation", S. Inutsuka, Invited Review Talk given at Star Formation Across Space and Time (November 11-14, 2014) ESA-ESTEC, Noordwijk, Netherlands
- ④ "The Formation and Early Evolution of Protoplanetary Disks: A Hybrid Scenario of Planet Formation", S. Inutsuka, Invited Talk given at German-Japanese-Meeting 2014 in Heidelberg: Disks & Exoplanets (November 5-7, 2014) House of Astronomy, Heidelberg (HdA) Germany

- ⑤ "Self-Sustained Ionization in Cool Atmosphere", S. Inutsuka, Invited Talk given at International Workshop "Electrification in dusty atmospheres inside and outside the solar system" (September 8-11, 2014) Pitlochry, Scotland
- ⑥ "The Formation and Evolution of Protoplanetary Disks: The Critical Effects of Non-Ideal Magnetohydrodynamics", S. Inutsuka, Invited Review Talk given at "MHD, Stability, and Dissipation in Protoplanetary Disks" (August 4-8, 2014) Copenhagen, Denmark
- ⑦ "Dynamics of Interstellar Medium: Theory, Methodology, and Implications", S. Inutsuka, Invited Review Talk given at "The 9th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM-2014)" (June 23-27, 2014) Long Beach, California, USA
- ⑧ "From Magnetized Dense Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks", S. Inutsuka, Invited Talk given at "Magnetic Fields from Cloud Cores to Protostellar Disk" (May 21-24, 2013) Heidelberg, Germany
- ⑨ "Brown Dwarf Formation in Isolated Cores", S. Inutsuka, Invited Talk given at Invited Talk given at "50 Years of Brown Dwarfs: from Theoretical Prediction to Astrophysical Studies" (Oct 21-24, 2012) Ringberg Castle, Bavaria, Germany
- ⑩ "From Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks", S. Inutsuka, Invited Keynote Talk given at "The Origin of Stars and Their Planetary Systems", (10-15 June, 2012) Origin Institute , McMaster University, Canada

②松本倫明 (Matsumoto Tomoaki)
法政大学・人間環境学部・教授
研究者番号：60308004

他の講演の詳細は以下に掲載している：
<http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/Papers/talk.html>

〔図書〕(計1件)

天文学辞典「シリーズ現代の天文学 別巻」岡村定矩・家正則・犬塚修一郎・小山勝二・千葉証司・富阪幸治(編), 日本評論社(出版年月: 2012年7月) ISBNコード:978-4-535-60738-5 (4-535-60738-9) 頁数: 539 頁

〔その他〕ホームページ

http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/Papers/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(3) 連携研究者

①町田正博 (Machida, Masahiro N.)
九州大学大学院・理学研究院・准教授
研究者番号：10402786