

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03929

研究課題名（和文）動的恒星系渦状腕が駆動する星間媒質の相転移過程における磁場の役割

研究課題名（英文）The role of magnetic fields in the phase transition process of interstellar medium driven by the dynamic stellar system spiral arms

研究代表者

岩崎 一成 (Iwasaki, Kazunari)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・助教

研究者番号：50750379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では詳細な物理的素過程を考慮した分子雲形成・進化に関する局所シミュレーションをおこない、分子雲の大局的な物理的性質はその形成環境に強く依存する一方で、星が誕生する高密度領域の統計的性質には普遍的な関係があることを見出した。これは様々な物理状態の分子雲において、初期質量関数といった普遍的な性質が存在するという観測的特徴を説明する可能性がある。また、銀河大局スケールを考慮に入れるために、銀河渦状腕を駆動する恒星多体系モジュールを公開シミュレーションコードAthena++に実装した。その際に異なる解像度の境界に分布する恒星に働く数値的自己力の低減に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星は宇宙の基本的構成要素で、その形成過程を理解することは、宇宙進化を解明するうえで必要不可欠である。本研究は星形成の場である分子雲形成の局所プロセスを可能な限り第一原理から調査することで、形成される分子雲の多様性と、星形成に至る物理過程の普遍性を明らかにした。星形成の初期条件解明の第一歩となった。また本研究において、銀河スケールのプロセスが分子雲形成を始めとする星間媒質の進化へ与える影響を明らかにするために開発した恒星系多体系モジュールは将来的に公開を目指しており、天文コミュニティでこのコードが共有されることにより、多様な物理過程を考慮したシミュレーションがさらに発展すると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, local simulations considering detailed physical processes were performed to investigate the formation and evolution of molecular clouds. We found that while the global physical properties of molecular clouds strongly depend on their formation environment, the statistical properties of high-density regions where stars are born show a universal relationship. This finding may explain observational features where molecular clouds in various physical states show a universal stellar initial function. Furthermore, to take into account galactic-scale processes, a galactic stellar system, which drives galactic spiral arms, was implemented into the publically available simulation code, Athena++. This implementation successfully reduces numerical self-force exerting on stars near boundaries of different resolutions.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：分子雲 星形成 磁気流体力学 恒星系力学

## 1. 研究開始当初の背景

銀河の基本構成要素である星の形成過程を理解することは、銀河進化を理解するうえで不可欠である。星形成は非常に非効率であることが観測的に知られており(e.g., Zuckerman and Palmer 1974), 超音速乱流や磁場・フィードバックが星形成を抑える要素として重要な役割を果たすと考えられているが、特に磁場観測が困難であることもあり、まだ詳細は明らかになっていない。星形成の初期条件を明らかにするために、原子ガスから分子雲への進化過程を直接流体計算で追跡する研究が活発におこなわれてきた。原子ガスは、超新星爆発や銀河渦状腕などの外的擾乱により衝撃波圧縮を受けると、暴走的冷却により凝縮し、分子雲へと進化すると考えられている。銀河の一部を切り取り、原子ガスの衝撃波圧縮を原子ガスの衝突流として模擬した局所分子雲形成計算により、形成初期の分子雲の物理状態と分子雲形成効率において磁場が極めて重要な役割を果たし、多様な物理的性質(乱流エネルギーと磁気エネルギーの比など)をもった分子雲が形成されうることを示した(Iwasaki et al. 2019)。しかし分子雲形成初期に着目していたため、自己重力が考慮されておらず、分子雲の大局的な物理的性質が星形成にどのように影響するのかは未解明であった。

また局所分子雲形成計算は、高い分解能によって詳細な分子雲形成過程を追うことができる一方で、衝撃波圧縮を引き起こす基となる超新星爆発や銀河渦状腕を統合的に考慮できていない。分子雲形成は本来局所的な現象ではなく大局的な星間媒質の進化の中で起こるため、銀河円盤において、星間媒質と磁場がどのように相互作用して進化するのかを明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、分子雲形成と進化を追跡するのに必要な素過程を考慮した自己重力的磁気流体計算コードを開発し、分子雲形成を精密に計算することで星形成の初期条件を明らかにし、さらに星間媒質の大局的進化の中で磁場がどのような役割を果たすのかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

銀河大域円盤スケール(数十キロパーセク)から星形成スケール(0.1パーセク未満)は大きな長さスケール差があるため、単一のシミュレーションで両者をカバーするのは不可能である。そのため、数十キロパーセクのスケールの銀河大局円盤計算と、分子雲の典型的な大きさに対応する数十パーセクスケールの分子雲形成・進化計算の2つに分割して研究をおこなう。

分子雲形成・進化計算を行うためには、化学反応・熱過程・自己重力を考慮する必要がある。Iwasaki et al. (2019)で用いた簡易的な化学反応ネットワークが平衡状態での化学組成(例えばCO量)に大きな誤差を含むことが判明したため、より詳細な化学反応ネットワーク(Gong et al. 2017の化学反応ネットワークを改変したもの)を新たにAthena++(Stone et al. 2020)に実装する。詳細な化学反応ネットワークと統合的な熱過程を実装する。自己重力はAthena++に実装されたモジュール(Tomida & Stone 2023)を用いる。原子ガスの超新星爆発や銀河渦状腕による圧縮などによる衝撃波圧縮を、原子ガスの衝突流で模擬する。衝撃波圧縮された原子ガスは、暴走的な冷却によって凝縮すると同時に、熱エネルギーの一部を乱流エネルギーに転換し自然に乱流が駆動される。様々な圧縮環境を模擬するため、圧縮方向と磁場方向の成す角度および衝突流の速度を変えた計算をおこなう。

銀河円盤大局スケールの研究では、恒星系が作る渦状腕を統合的に扱うためにAthena++に重力多体系モジュールを実装する。具体的には、アラバマ大学のChao-Chin Yang助教が開発した粒子モジュールと、多重格子法を使った重力ソルバ(Tomida & Stone 2023)を組み合わせてParticle-Mesh(PM)法を実装する。また銀河における主要な乱流駆動源と考えられている超新星爆発のサブグリッドモデルを実装する。開発したAthena++コードを用いて、磁場入りの銀河大局円盤計算をおこなう。

## 4. 研究成果

### (1) 分子雲形成・進化計算

Iwasaki et al. (2019)でおこなった自己重力を考慮しない計算において、すでに原子ガスの圧縮方向と磁場方向の成す角が分子雲の大局的性質を決める重要なパラメータであることがわかっていた。原子ガスの圧縮方向と磁場方向がほぼ沿っている場合(平行モデル)は、乱流エネルギーが磁気エネルギーよりも卓越した希薄な分子雲が形成され、ある臨界角度付近の場合(臨界モデル)に、乱流エネルギーと磁気エネルギーが同程度な高密度な分子雲が形成される。臨界角度よりも大きく傾いた圧縮では、磁気圧が卓越した希薄な分子雲が形成される。

重力を考慮した本計算においても、上記の傾向は維持されることが分かったが、分子雲の構造は自己重力に大きく影響を受けることがわかった。図1は集積方向に積分した柱密度を表す。今

回の自己重力を考慮した計算によって、臨界モデルでは自己重力によって磁場に沿ってガスが集積し、顕著なパーセクスケールのフィラメント状の構造が形成されることが分かった。一方、平行モデルでは乱流エネルギーが卓越しているため、フィラメント構造は形成されない。仮に磁場に対する原子ガスの圧縮方向が完全にランダムだとすると、平行モデルの出現確率は低いと、多くの分子雲でフィラメント構造が見られるという観測事実 (e.g., Andre et al. 2014) と整合的であると考えている。

分子雲の大局的性質は、原子ガスの圧縮環境に強く依存することがわかった。この大局的性質が星の誕生する高密度領域にどのように引き継がれるのかを調べるため、高密度領域を同定し、その統計的な性質を調べた。その結果、図2に示すように、各種エネルギー (熱エネルギーと乱流エネルギー・磁気エネルギー・重力エネルギー) に普遍的な統計的関係があることを見出した。またそれらの関係を説明する解析的モデルを構築した。これは星の初期質量関数に代表される星形成の普遍的な性質を説明する可能性がある重要な結果であると考えている。

この成果は [Iwasaki and Tomida 2022, ApJ, 934, id.174](#) として、出版済みである。

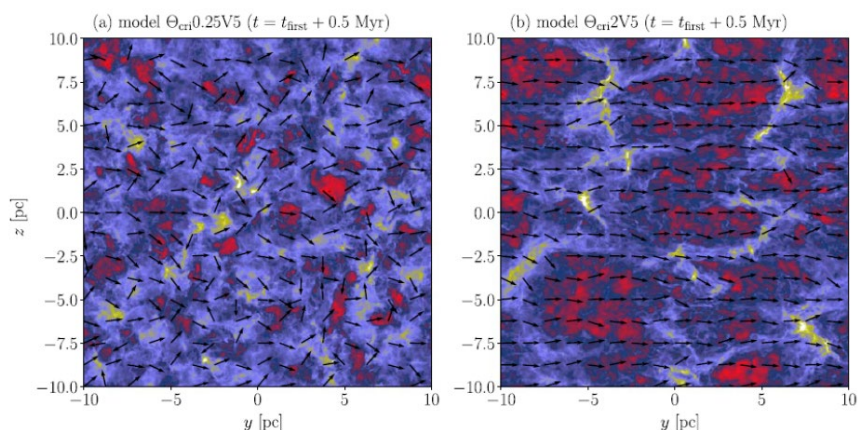


図1 分子雲形成・シミュレーションの結果。原子ガスの圧縮方向に積分した柱密度分布を表す。矢印は集積方向に沿って平均した磁場の方向を表す。右図が磁場にほぼ沿って原子ガスを圧縮したモデル(平行モデル)、左図が磁場に少し角度 $11^\circ$ を付けて原子ガスを集積したモデル(臨界モデル)。後者のモデルでのみ顕著なフィラメントが見て取れる。

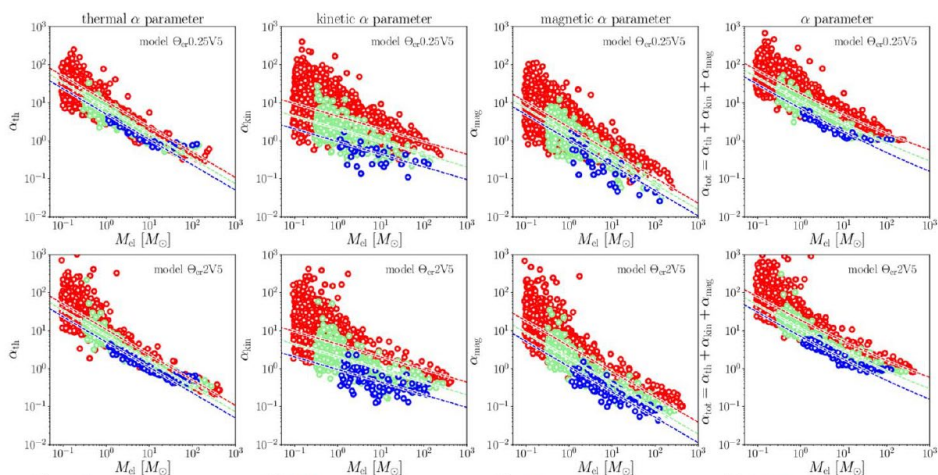


図2 分子雲形成・シミュレーションで同定した高密度領域の統計的性質を表す。色は各高密度領域の密度を表し、赤から黄・青の順に密度が高い。横軸は高密度領域の質量を表す。上段は平行モデル、下段は臨界モデルの結果を表す。左から順に熱・乱流・磁場・全エネルギーと重力エネルギーの比を示す。普遍的な統計的関係が見て取れる。

宇宙進化の過程で分子雲形成がどのように変遷してきたのかを解明するために、低金属量環境下での分子雲形成・進化計算をおこなった。その結果、分子雲の物理的性質は金属量には依存しないが、分子雲形成に要する時間は金属量が低くなるほど長くなることがわかった (Kobayashi, [Iwasaki et al. 2023, ApJ, 954, id. 38](#))。また、分子雲形成シミュレーションに必要な分解能の調査 (Kobayashi et al. 2022, 954, id. 129) や、フィラメント状分子雲同士の衝突による星形成の誘発条件の調査 (Kashiwagi, [Iwasaki, & Tomisaka 2023, ApJ, 954, id. 129](#))、フィラメント状分子雲における太陽系形成シナリオの提案 (Arzoumanian et al. 2023, ApJL, 947, id. L29) など、研究課題と関連する研究も遂行した。

## (2) 銀河大域計算

### (コード開発)

Particle-Mesh (PM) 法を Athena++ に実装した。恒星粒子を格子に割り当てて求めた密度場を基に、すでに Athena++ に実装されている重力ソルバ (多重格子法) を使って重力ポテンシャルを求解する。各種テスト計算をおこない一様格子の場合には良好な結果を得た。一方、解像度の異なる格子を多段に配置した場合、異なる解像度の格子境界 (レベル境界) 近傍において、恒星粒子に本来働くはずのない自己力が数値的エラーによって働くという問題があった。粒子質量を格子に分配する手法の改良および PM 法におけるレベル境界の精度の向上をおこなった。その結果自己力の大きさを約 10 分の 1 にすることに成功した。図 3 は、銀河円盤の恒星多体系テスト計算のスナップショット (恒星面密度の初期値からの差) であり、ツリー法と整合的な結果が得られ

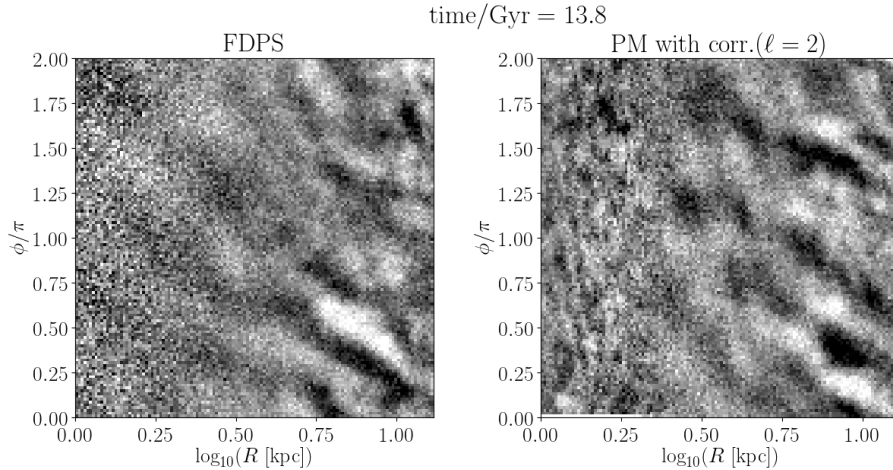


図 3  $10^7$  体の恒星粒子を使った銀河円盤シミュレーションのテスト計算の結果。色は星面密度の方位角平均からの差を表す。左図がツリー法を用いた (FDPS, Iwasawa et al. 2016) で、右図が PM 法 (Athena++) を用いた結果。右斜め下に傾いた筋状の構造が渦状腕に対応する。 $\log_{10}(R[\text{kpc}]) < 0.25$  の構造で見られるツリー法と Particle-Mesh 法の結果の違いは、PM 法の分解能の影響と考えている。

ている。

### (銀河大局円盤計算)

上記のコード開発に時間を要したため、恒星系が駆動する銀河渦状腕を整合的に考慮した銀河大局円盤計算にまで至らなかった。様々な初期縦磁場強度における銀河円盤シミュレーションを富岳において準定常状態に到達するまでおこなった。初期磁場強度が  $\mu\text{G}$  に匹敵するほど強い場合、銀河円盤のガスのスケールハイトが増幅された磁場により大きくなり、観測値と不整合となることがわかった。これは銀河円盤の初期縦磁場強度が非常に小さかったことを意味する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iwasaki Kazunari, Tomida Kengo	4. 巻 934
2. 論文標題 Universal Properties of Dense Clumps in Magnetized Molecular Clouds Formed through Shock Compression of Two-phase Atomic Gases	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 174 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac75cc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Masato I. N., Inoue Tsuyoshi, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Nakatsugawa Hiroki	4. 巻 930
2. 論文標題 Nature of Supersonic Turbulence and Density Distribution Function in the Multiphase Interstellar Medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5a54	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Masato I. N., Inoue Tsuyoshi, Inutsuka Shu-ichiro, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Tanaka Kei E. I.	4. 巻 905
2. 論文標題 Bimodal Behavior and Convergence Requirement in Macroscopic Properties of the Multiphase Interstellar Medium Formed by Atomic Converging Flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc5be	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kashiwagi Raiga, Iwasaki Kazunari, Tomisaka Kohji	4. 巻 954
2. 論文標題 Simulation of Head-on Collisions between Filamentary Molecular Clouds Threaded by a Lateral Magnetic Field and Subsequent Evolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 129 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace7bd	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 分子雲形成・進化シミュレーション：高密度クランプの重力不安定条件
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎 一成、富田賢吾
2. 発表標題 分子雲形成シミュレーションで探る重力的に束縛された高密度クランプの統計的性質
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎 一成
2. 発表標題 分子雲形成に伴う多相流体ダイナミクス
3. 学会等名 国立天文台研究集会（サブ）ミリ波単一鏡の革新で挑む，天文学の未解決問題（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 SPICAで探る分子雲の多相構造
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 The formation of molecular clouds by compression of two-phase atomic gases
3. 学会等名 16th Rencontres du Vietnam: Magnetic Field in the Universe 7 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 分子雲形成シミュレーション：自己重力の効果
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会、熊本大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 Physical Properties of Dense Clumps and Cores in Magnetized Molecular Clouds Formed through Accumulation of HI clouds
3. 学会等名 Magnetic Fields from Clouds to Stars (Bfields-2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 Development of Particle-Mesh Method for Self-gravity in Athena++
3. 学会等名 Athena++ Workshop 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩崎一成
2. 発表標題 Universal Properties of Dense Clumps in Magnetized Molecular Clouds
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://www.cfca.nao.ac.jp/~kiwasaki/study.html">https://www.cfca.nao.ac.jp/~kiwasaki/study.html</a> <a href="https://www.cfca.nao.ac.jp/~kiwasaki/study_gyouseki.html">https://www.cfca.nao.ac.jp/~kiwasaki/study_gyouseki.html</a>
--

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	富田 賢吾 (Tomida Kengo) (70772367)	東北大学・理学研究科・准教授  (11301)	
研究協力者	杉村 和幸 (Sugimura Kazuyuki) (10773856)	北海道大学・理学研究院・助教  (10101)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Magnetic Fields from Clouds to Stars (Bfields-2024)	開催年 2024年～2024年
---	--------------------



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------