

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13581

研究課題名（和文）原始惑星系円盤磁場の進化過程の解明

研究課題名（英文）the evolutionary process of the magnetic field of the protoplanetary disk

研究代表者

塚本 裕介 (Tsukamoto, Yusuke)

鹿児島大学・理工学域理学系・助教

研究者番号：70748475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、2019年度において分子雲ガスに含まれるダストのサイズが円盤磁束の進化に影響を与えることが明らかにした。次に、2020年度はダストの成長が磁束進化に与える影響を解明するためにダストガス2流体磁気流体力学コードの定式化と実装に取り組んだ。ダスト-ガス2流体の新しい数値計算手法を提案し査読論文として報告された。また、このコードを用いて2021年度に新しい物理現象である「原始惑星系円盤の降灰」を発見し、レター誌に受理されるとともにプレスリリースをおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最も重要な成果は「原始惑星系円盤の降灰現象」です。以下でその内容について述べます。我々の研究グループは、惑星の種となる固体微粒子の「ダスト」（数ミリメートル程度に成長した塵）が惑星のゆりかごである「原始惑星系円盤」に降り積もる現象を、スーパーコンピュータを用いたシミュレーションによって発見しました。

地球上の火山噴火による降灰は、人々の生活に大きな影響を与えますが、今回発見した天空の「降灰」は、円盤の外側領域で惑星の種を成長させるメカニズムとなる可能性があります。また、今回の発見は、星と惑星形成についてのまったく新しい理論的理解への道を開くという点でも重要なものです。

研究成果の概要（英文）：In FY 2019, this study showed that the size of the dust in the molecular cloud gas affects the evolution of the disk magnetic flux. Next, in FY2020, we worked on the formulation and implementation of a dust-gas two-fluid magnetohydrodynamic code to elucidate the effect of dust growth on the magnetic flux evolution. A new numerical method for dust-gas two-fluid was proposed and reported as a peer-reviewed paper. Using this code, we discovered a new physical phenomenon, "dust accretion in protoplanetary disks," which was accepted for publication in Letters and a press release was issued in FY2021.

研究分野：天文学

キーワード：原始惑星系円盤 惑星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場は原始惑星系円盤やその周囲のエンベロープにおいて多様な現象を引き起こす。磁場は円盤内部においては、磁気回転不安定性(MRI)乱流や磁気円盤風による角運動量輸送を引き起こし、さらに固体物質(ダスト)の成長過程にも影響を与える。また、若い円盤にはエンベロープからガスが降着しているが、降着ガスの角運動量の大きさは磁気張力による角運動量変化(磁気ブレーキ)によって決まることが知られている。

磁場によって引き起こされる現象の強さは磁場の強度に依存するため原始惑星系円盤やその周囲の磁場強度は、原始惑星系円盤の力学進化や内部でのダスト成長を決定づける本質的なパラメータである。また、星が形成する際、分子雲ガスが持っていた大量の磁束がいつ失われるか(磁束問題)は星形成論に残された未解決問題である。しかしその重要性にも関わらず原始惑星系円盤内の磁場強度(あるいは磁束)の進化過程はほとんど解明されていなかった。

原始星の磁束がその母体である分子雲コアの磁束に比べて3桁以上小さいことを考えると、星形成のいずれかの段階で磁束が失われるはずであるが、その詳細はいまだ不明であり、最も若い原始星(YSOs)であるClass 0 YSOsと進化の進んだClass II YSOsでは円盤内の磁場強度はどの程度異なるか?という基本的な問いにさえ我々は答えることができていなかった。そのため、多くのMRIや磁気円盤風の先行研究では便宜上、プラズマ(ガス圧と磁気圧の比)をパラメータとして研究が行われてきた。しかし、先行研究で発見された数々の興味深い現象が、現実の原始惑星系円盤の「どこで」、「どの進化段階で」重要な役割を果たすか、を明らかにするためには円盤内の磁場強度を知ることが不可欠であった。

2. 研究の目的

このような問題意識のもと、本提案研究では原始惑星系円盤形成進化において、円盤磁場がどのように進化するかを包括的に研究し、特に原始星の進化段階別に円盤内の典型的な磁場強度を明らかにすることを目的とする。

先行研究では円盤内磁束の進化は主として1次元シミュレーションを用いて研究が行われてきたが、これらの先行研究には(1)円盤外縁部の磁場強度(外側の磁場の境界条件)の不定性(2)中心星輻射場中での円盤の電離状態と磁気抵抗率の不定性という困難があった。本研究の学術的な独自性は、この困難を3次元の磁気流体計算、2次元の輻射輸送と化学反応計算、を組み合わせることで克服する。一人の研究者が主体となって種々のシミュレーションを組み合わせることで、それぞれの手法の優位性を活かし、短所を補い合うことで、大局磁場の進化という星形成論、惑星形成論にまたがる最も重要な問題を解明する。

3. 研究の方法

3次元非理想磁気流体力学シミュレーションコードを開発し、それによって円盤の形成進化過程を調べるとともに、非理想効果の強さを適切に決めるための化学進化計算の新しいアルゴリズムとコードを開発し、円盤の磁束進化を解明する。さらに、非理想効果に大きな影響を与えると考えられる、ダストの成長やダイナミクスを考慮するために、ダスト-ガス2流体非理想磁気流体力学シミュレーションコードを開発する。

4. 研究成果

2018年度は、研究計画の中核となるガスの電離状態と抵抗値を計算する化学計算コードの開発を行うとともに、エンベロープ中での原始星形成後期過程における磁場の飽和値を計算した。

化学計算コードはC++と常微分方程式のソルバーであるCVODEパッケージを用いて実装した。コードは宇宙線電離、X線、紫外線や様々なサイズ分布のダスト粒子の帯電の影響も取り扱えるように一般的に設計されている。これにより従来よりも柔軟に化学反応ネットワークやダストモデルの選択が可能になるとともに様々な星形成環境下でのガスの電離状態を計算することが可能になった。

さらに、このコードを用いた最初の応用として、主降着期のエンベロープの密度、速度構造の時間進化を記述する解析モデルを構築し、そのモデルにおける電離度、抵抗値を計算した。そして、それを用いて両極性散逸による磁場の最大値を様々な化学反応やダストサイズ分布、宇宙線電離強度のもとで計算し、様々な宇宙線環境下での分子雲コア崩壊時の磁束進化についての解析的な描像を得た。

2019年度は、前年度までに開発したガスの電離状態と抵抗値を計算する化学反応計算コードと原始星をシンク粒子として取り扱うことを可能にした3Dシミュレーションコードを組み合わせる最初の応用として、主降着期の円盤、アウトフロー、そして磁束の進化過程を調べた。ここでは特に、ダストサイズがこれらの天体の進化過程にどのような影響を与えるかについて研究した。

その結果、ダストのサイズが大きい場合、(1)円盤サイズが大きくなる、(2)アウトフローの活動性が高まる、(3)磁束の円盤からの流出が促進される、といったことが解明された。このことはダストの成長と原始星進化が関連する可能性があるという点で興味深い。この内容について査読

論文を執筆し受理された。

また、より現実的なダスト成長の効果を調べるために、ダストの力学進化と成長過程を3次元シミュレーションに取り込むための新たなコードの開発を行なった。このコードではダスト-ガスを1流体的に扱いダストとガスの相対速度の時間発展を計算する。この取り扱いでは、ダストとガスの空間解像度が等しくなるため、従来知られていたダストの数値的な濃集が抑えられる利点がある。

2019年までの申請者の研究で、分子雲ガスに含まれるダストのサイズが円盤磁束の進化に影響を与えることが明らかになってきた。そこで、2020年度はダストの成長が磁束進化に与える影響を解明するためにダストガス2流体磁気流体力学コードの定式化と実装に取り組んできた。ダストガス2流体磁気流体力学を構築する上での大きな困難は帯電ダストが受ける電磁気力の取り扱いである。一般に分子雲や原始星周囲において μm サイズのダストは帯電し電磁気力の主要な受け手になる。一方でダストダイナミクスが重要となる(sub-)mm成長したダストに対して電磁気力は無視しうると予想される。そこで、申請者はダストに対する電磁気力を見積もるために化学反応ネットワーク計算を行い、ダストへの電磁気力が無視しうる条件を導出した。さらに、ダストが受ける電磁気力が無視できる近似を用いて、今までの研究で用いてきたシミュレーションコードにダストの力学進化を計算するモジュールを実装した。このコードを用いて種々のテスト計算を行いコードが正しく実装されていることを確認し、査読論文として投稿し受理された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tsukamoto Y., Machida M. N., Susa H., Nomura H., Inutsuka S.	4. 巻 896
2. 論文標題 Early Evolution of Disk, Outflow, and Magnetic Field of Young Stellar Objects: Impact of Dust Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 158 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab93d0	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 Arzoumanian D., Furuya R. S., Hasegawa T., Tahani M., Sadavoy S., Hull C. L. H., Johnstone D., Koch P. M., Inutsuka S., Doi Y., Hoang T., Onaka T., Iwasaki K., Shimajiri Y., Inoue T., Peretto N., Andr? P., Bastien P., Berry D., Tsukamoto, Y et al	4. 巻 647
2. 論文標題 Dust polarized emission observations of NGC 6334	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A78 ~ A78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202038624	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Ngoc Nguyen Bich, Diep Pham Ngoc, Parsons Harriet, Pattle Kate, Hoang Thiem, Ward-Thompson Derek, Tram Le Ngoc, Hull Charles L. H., Tahani Mehrnoosh, Furuya Ray, Bastien Pierre, Qiu Keping, Hasegawa Tetsuo, Kwon Woojin, Doi Yasuo, Lai Shih-Ping, Coud? Simon, Berry David, Tsukamoto Yusuke et al	4. 巻 908
2. 論文標題 Observations of Magnetic Fields Surrounding LkH 101 Taken by the BISTRO Survey with JCMT-POL-2	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 10 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd0fc	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Doi Yasuo, Hasegawa Tetsuo, Furuya Ray S., Coud? Simon, Hull Charles L. H., Arzoumanian Doris, Bastien Pierre, Chen Michael Chun-Yuan, Di Francesco James, Friesen Rachel, Houde Martin, Inutsuka Shu-ichiro, Mairs Steve, Matsumura Masafumi, Onaka Takashi, Sadavoy Sarah, Shimajiri Yoshito, Tsukamoto Yusuke et al	4. 巻 899
2. 論文標題 The JCMT BISTRO Survey: Magnetic Fields Associated with a Network of Filaments in NGC 1333	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba1e2	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Hirano Shingo, Tsukamoto Yusuke, Basu Shantanu, Machida Masahiro N.	4. 巻 898
2. 論文標題 The Effect of Misalignment between the Rotation Axis and Magnetic Field on the Circumstellar Disk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 118 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9f9d	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Takaishi Daisuke, Tsukamoto Yusuke, Suto Yasushi	4. 巻 492
2. 論文標題 Star?disc alignment in the protoplanetary discs: SPH simulation of the collapse of turbulent molecular cloud cores	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5641 ~ 5654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa179	査読の有無 有
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 Wada Keiichi, Tsukamoto Yusuke, Kokubo Eiichiro	4. 巻 886
2. 論文標題 Planet Formation around Supermassive Black Holes in the Active Galactic Nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 107 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4cf0	査読の有無 有
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 Liu Junhao, Qiu Keping, Berry David, Di Francesco James, Bastien Pierre, Koch Patrick M., Furuya Ray S., Chung Eun Jung, Doi Yasuo, Friesen Rachel K., Tsukamoto, Yusuke et al	4. 巻 877
2. 論文標題 The JCMT BISTRO Survey: The Magnetic Field in the Starless Core <i> </i> Ophiuchus C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0958	査読の有無 有
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 Koga Shunta, Tsukamoto Yusuke, Okuzumi Satoshi, Machida Masahiro N	4. 巻 484
2. 論文標題 Dependence of Hall coefficient on grain size and cosmic ray rate and implication for circumstellar disc formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2119 ~ 2136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3524	査読の有無 有
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 Tanaka Yuki A, Tsukamoto Yusuke	4. 巻 484
2. 論文標題 Pebble accretion in Class 0/I YSOs as a possible pathway for early planet formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1574 ~ 1588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz069	査読の有無 有
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 Tsukamoto Y., Okuzumi S., Iwasaki K., Machida M. N., Inutsuka S.	4. 巻 868
2. 論文標題 Does Misalignment between Magnetic Field and Angular Momentum Enhance or Suppress Circumstellar Disk Formation?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae4dc	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 Takakuwa Shigehisa, Tsukamoto Yusuke, Saigo Kazuya, Saito Masao	4. 巻 865
2. 論文標題 Possible Counterrotation between the Disk and Protostellar Envelope around the Class I Protostar IRAS 04169+2702	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 51 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aadb93	査読の有無 有
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 Soam, Archana; Pattle, Kate; Ward-Thompson, Derek; Lee, Chang Won; Sadavoy, Sarah; Koch, Patrick M.; Kim, Gwanjeong; Kwon, Jungmi; Kwon, Woojin; Arzoumanian, Doris; Berry, David; Hoang, Thiem; Tamura, Motohide; Lee, Sang-Sung; Liu, Tie; Tsukamoto, Yusuke et.al	4. 巻 861
2. 論文標題 Magnetic Fields toward Ophiuchus-B Derived from SCUBA-2 Polarization Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac4a6	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Kwon, Jungmi; Doi, Yasuo; Tamura, Motohide; Matsumura, Masafumi; Pattle, Kate; Berry, David; Sadavoy, Sarah; Matthews, Brenda C.; Ward-Thompson, Derek; Hasegawa, Tetsuo; Furuya, Ray S.; Pon, Andy; Di Francesco, James; Arzoumanian, Doris; Tsukamoto, Yusuke et.al	4. 巻 859
2. 論文標題 A First Look at BISTRO Observations of the Oph-A core	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabd82	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 Impact of magnetic field on circumstellar disk formation
3. 学会等名 Magnetic Fields in the Universe 7 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 Early-stage evolution of disk, outflow and magnetic flux in YSOs
3. 学会等名 ALMA science workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本裕介
2. 発表標題 粒子法によるMHD計算：SPMHDの手法とその円盤形成シミュレーションへの応用
3. 学会等名 STE シミュレーション研究会 計算プラズマ物理の新潮流（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本裕介
2. 発表標題 星形成後期課程でのオーム散逸、両極性散逸の役割について
3. 学会等名 2019年日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本裕介
2. 発表標題 Protostar and Protoplanetary Disk observation with SKA
3. 学会等名 SKA-Japan シンポジウム2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 Importance of non-ideal phenomena in protostar formation
3. 学会等名 Polarimetry in the ALMA era:a new crossroads of astrophysics, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 Non-ideal MHD simulations of formation of circumstellar disks
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 The formation of protostars and disks with all the three non-ideal MHD effects
3. 学会等名 AAPPS-DPP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 The impact of non-ideal effects on the protostar formation and their observational signatures
3. 学会等名 First TagKASI International Conference: Cosmic Dust and Magnetism (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚本裕介
2. 発表標題 分子雲コアの磁場と角運動量の傾きは円盤形成を促進するか？、それとも抑制するか？
3. 学会等名 2018年日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Tsukamoto
2. 発表標題 The impact of non-ideal effects on the circumstellar disk evolution and their observational signatures
3. 学会等名 XXX th IAU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------