

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03906

研究課題名(和文) アウトフローを伴う回転円盤の力学

研究課題名(英文) Hydrodynamics of a Rotating Gas Disk Associated with Outflows

研究代表者

花輪 知幸 (Hanawa, Tomoyuki)

千葉大学・先進科学センター・特任教授

研究者番号：50172953

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)：計算セルの中心と方位角方向の境界面では動径( $r$ )方向や方位角( $\theta$ )方向が異なる効果を取り入れて、円筒座標系での流体力学方程式から差分方程式を導いた。得られた差分方程式は一樣流保持を実現するほか、 $z$ 軸周囲での方位角方向の解像度を  $\theta = 60^\circ$  に下げても顕著な誤差が発生しないという良い特性を持つ。この差分方程式を用いることで円筒座標系を用いて原始星などへ降着するガスの流れを、精度を保ちながら、比較的少ない計算量でシミュレーションできるようになった。またガス降着に顕著な非対称性が見られる分子雲コアTMC-1Aや原始星DG Tauの流体モデルを作成し、分子電波輝線の観測結果を半定量的に再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始星などに付随する対称性の良い回転ガス円盤と、著しい異方性を示す降着流を同時にかつ精度良く数値シミュレーションできる手法が得られた。円筒座標系ではベクトル量の各成分が座標の曲りにより見かけの変化を示す。本研究で開発した局所的なデカルト座標系への座標変換を採用すると、見かけの変化は打ち切り誤差なしに求めることができる。これは多くの計算法で採用されているテーラー展開による見かけの変化の評価より本質的に優れている。局所的なデカルト座標系への変換という手法は、3次元極座標など曲線座標系一般に応用可能である。

研究成果の概要(英文)：We derived a difference equation from the fluid dynamics equation in the cylindrical coordinate system, by taking into account the effect that the radial ( $r$ ) direction and azimuthal ( $\theta$ ) direction are different at the boundary between the center of the calculation cell and the azimuthal direction. The obtained difference equation not only maintains uniform flow, but also has the good property that no significant error occurs even when the resolution in the azimuthal direction around the  $z$ -axis is lowered to  $\theta = 60^\circ$ . By using this difference equation, we can simulate the flow of gas accreting onto protostars using a cylindrical coordinate system while maintaining accuracy and with a relatively small amount of computation cost. We also created fluid models for the molecular cloud core TMC-1A and the protostar DG Tau, both of which exhibit significant asymmetry in gas accretion, and semi-quantitatively reproduced the results of observations of molecular radio emission lines.

研究分野：理論天文学

キーワード：原始星 ブラックホール 流体力学 数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

原始星やブラックホール天体など、動的な降着流、ケプラー回転するガス円盤、アウトフローが共存する系の力学を明らかにするため、円筒座標で 3 次元磁気流体力学シミュレーションを行う計算手法を開発する。従来のシミュレーションで発生している  $z$  軸周囲での数値不安定を、基底ベクトルの向きが方位角とともに変化することを考慮して取り除く。この手法をシミュレーションパッケージ CANS+ に組み込むことにより、中心天体への降着流および軸に沿って時間発展するアウトフロー（ジェット）の長時間発展を、数値的に安定にかつ精度高く追う。またこの改良により CANS+ の汎用性を高める。

## 2. 研究の目的

ガス降着が盛んな天体の多くは、同時に高速のジェットやアウトフローを伴う天体でもある。原始星の場合、Class 0 や Class I といった段階がこれに該当する。原始星の周囲には原始惑星系円盤があり、その外側には動的に落下する infalling envelope と高速で放出されるジェットやアウトフローが存在する。ブラックホールを中心とする X 線連星でも、質量降着率が高くなると、やはり降着円盤に対して垂直なジェットが見られる。どちらも、ガス降着による重力エネルギー解放が、ジェット・アウトフロー駆動のエネルギー源であるという特徴がある。

このように、動的に落下するガス流、コンパクト天体の周囲を回転する円盤状のガス、両極方向へ飛び出すジェット・アウトフローが共存する系を理論的に扱う良い座標系は、円筒座標系  $(r, \phi, z)$  あるいは極座標  $(r, \theta, \phi)$  である。これらの座標系には、回転平衡円盤のガスの流れに沿った座標、アウトフローやジェットに沿った  $z$  あるいは  $\theta$  座標が含まれているので、流れをスムーズに記述できる。しかし円筒座標系で差分法に基づく 3 次元数値シミュレーションを行うと、 $z$  軸の付近に不自然な構造が形成されやすい。これは遠心力  $(v_\phi^2/r)$  のように  $z$  軸 ( $r = 0$ ) で形式的には発散する見かけの力が現れるからである。軸対称性 ( $\partial/\partial\phi = 0$ ) を仮定した 2 次元シミュレーションではこの困難を回避する方法が確立しているが、3 次元では問題点が解決されていない。

一方でこれらの系でも 3 次元構造が本質である現象が見つかっている。アウトフローの方向が変化したと思われる原始星や、原始星からの距離により回転軸が異なる warp した円盤などが目に見える例である。また磁気回転不安定性 (MRI) を介した角運動量輸送では、磁場が 3 次元的に曲がるのが本質である。本研究では、軸の付近でも安定で精度の高い数値法を確立し、ガスが非対称に降着している原始星や、ブラックホール周囲の移流優勢円盤 (ADAF) の 3 次元シミュレーションを行うことが目的である。

## 3. 研究の方法

速度や磁場といったベクトル量は移流により場所が変化すると、単位ベクトルの向きが場所に依存するため、ベクトルとしては保存していても円筒座標や極座標での成分は変化する。数値シミュレーションで用いる数値セルでは、その中心と境界面でも向きが変化する。このことを厳密に考慮した差分方程式を導き、数値シミュレーションの精度を向上させるとともに安定性を得る。またこれを原始星へのガス降着などに適用し、観測結果を再現するモデルを作成する。計算手法を公開コード CANS+ に組み込み提供するとともに、シミュレーション結果と観測との比較から、ガス降着のダイナミクスを明らかにする。

## 4. 研究成果

計算セルの中心と方位角方向の境界面では動径 ( $r$ ) 方向や方位角 ( $\phi$ ) 方向がわずかにずれる効果を取り入れて、円筒座標系での流体力学方程式から差分方程式を導いた。新たに導いた差分方程式を用いると、円筒座標の  $z$  軸を通り過ぎる流れを安定かつ精度良く計算できる。特に、密度・速度・圧力が空間的に一様となる流れを、丸め誤差の精度で解けることは特筆に値する。これは数値流体力学で free-streaming preserving と名付けられた、差分誤差による座標系の曲率による見かけの力を完全に消去できたことを示す。初期に密度や圧力が段階的に変化する衝撃波管問題でも、新たに開発した差分法では曲率の大きい座標の  $z$  軸付近でも、精度の高い解が得られることを確認した。得られた解では全質量、 $z$  軸周りの全角運動量、 $z$  軸方向の全運動量、全エネルギーが打ち切り誤差なしで保存する。さらにこの差分方程式は  $z$  軸の周囲での角分解能を  $\Delta\phi = 60^\circ$  と下げても、free-streaming preserving が保たれ、解の精度も十分に高い。これにより時間ステップ  $\Delta t$  をはるかに大きく設定することが可能になり、比較的少ない計算資源で長時間

の進化を追えるようになった。また動径方向の広いダイナミックレンジも比較的少ない計算資源で実現できるようになった。さらにz軸の周囲での角分解能を $\Delta\phi = 60^\circ$ とすると、数値セルが正三角形に近くなり、数値拡散が等方的になるという副次的な効果も得られる。導かれた差分法は国内外の学会で発表するとともに、国際学術誌[1]で公表した。

従来の計算法では数値セルの境界での速度を周囲の数値セルの値から補間する際、座標系の曲りによる見かけの変化と、流体の変化の区別が曖昧であった。本研究により開発した方法では、局所的な直線座標系に座標変換することにより見かけの変化を取り除いた速度・磁場ベクトルを求めている。座標変換により求められたベクトルの各成分はデカルト座標系での計算と同様の手法で数値安定性を保ちながら高次精度を保つ補間を用いることができる。

本研究により得られた数値解法のうち、円筒座標でセルの中心と方位角方向の表面、および方位角方向の近傍のセルで基底となるベクトルの向きが異なることを考慮する部分については公開コード CANS+に組み込み、コミュニティーで利用可能にした。

同様の手法は磁気流体力学方程式や 3次元極座標を用いた数値シミュレーションにも応用できる。いずれも基底となるベクトルの方向が数値セルの中心と表面で異なることと、基礎方程式をガウスの定理やストークスの定理などを用いてベクトルとして整合的な差分を行うことが鍵となる。密度・圧力・速度・磁場が一様な場合に定常状態が保たれるという条件を課すことにより、適切な差分方程式が得られる。

デカルト座標系を用いたが、磁場を伴うガスが降着しガス円盤を伴った原始星と衝突する場合に、降着ガスが磁場により加速される場合があることも見出した[2]。

開発したコードを利用し、原始星 TMC-1A の周囲に見られる非対称ガス降着や、原始星 DG Tau へ降着する細く伸びた流れ(ストリーマー)を再現する流体モデルを作成した。これらのモデルから得られた降着するガスの密度分布と速度分布から分子電波輝線の予想強度を求め、ALMA 電波望遠鏡による観測結果を半定量的に再現できることを示した [3,4]。原始星 DG Tau のモデル計算では、降着流が潮汐力により細長く伸びストリーマーとなる条件も理論的に論じた。ストリーマーが形成されるのは、周囲のガスが降着流と同程度の圧力をもちかつ極めて希薄な場合である。周囲のガスの圧力が低い場合、降着ガスは膨張する。周囲のガスの密度が高いと、降着流の前面に抗力が働き、扁平になる。抗力は降着流の速度の2乗に比例して大きくなるので、初期の落下速度が遅い方が伸びやすい。DG Tau のモデルでは、降着流が原始星から 600 au 離れたところから開始するのに対し、円盤との衝突地点は原始星から 60 au の距離で数十 au 程度の大きさである。このようなダイナミックレンジのシミュレーションを比較的小型の計算機で実現できたのは本研究の成果である。

この他の原始星についても、付随する降着流やガス円盤が ALMA 電波望遠鏡による分子輝線観測研究に理論解釈の担当として国際共同研究に従事した。この共同研究の成果の一部はすでに国際学術雑誌で公表している。

発展的な課題として、降着流のシミュレーションに取り入れる重力の精密化にも取り組んだ。重力により流体の速度が変化するため、運動エネルギーも変化する。運動エネルギーの一部は仕事を通じて熱エネルギーに変換されるが、運動・熱・重力のエネルギーの総和は一定に保たれる。また重力は流体のエントロピーを変化させない。全エネルギーとエントロピーの差分による打ち切り誤差を減らす数値計算法を2種類開発した。1種類目の方法では密度や速度の打ち切り誤差は2次の微小量であるが、全エネルギーは丸め誤差の範囲で保たれる。2種類目の方法では密度や速度だけでなく、流体素片の比エントロピーを全て時間・空間4次精度で求めることができる。どちらの方法も重力が流体の自重による場合も外場として与えられる場合も適用可能である。前者は国際学術雑誌[5]で公表した。また P. Mullen 氏の貢献により、公開コード Athena++ と結合して利用できるようになっている。後者の概要は出版する国際研究集会で口頭発表し集録[6]でも公表した。

## 引用文献

- [1] Tomoyuki Hanawa & Yosuke Matsumoto 2021, *Astrophys. J.*, 907, id.43
- [2] Masaki Unno, Tomoyuki Hanawa & Shinsuke Takasao 2022, *Astrophys. J.*, 941, id.151
- [3] Tomoyuki Hanawa, Nami Sakai & Satoshi Yamamoto 2022, *Astrophys. J.*, 932, id.122
- [4] Tomoyuki Hanawa, Antonio Garufi, Linda Podio, Claudio Codella & Dominique Segura-Cox 2024, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 528, 6581
- [5] P. D. Mullen, Tomoyuki Hanawa & C. F. Gammie 2021, *Astrophys. J. Suppl.*, 252, id.30
- [6] Tomoyuki Hanawa & Patrick D. Mullen 2024, *J. Physics: Conf, Ser.*, 2742, id.012023

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Ohashi Satoshi, Momose Munetake, Kataoka Akimasa, Higuchi Aya E, Tsukagoshi Takashi, Ueda Takahiro, Codella Claudio, Podio Linda, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami, Kobayashi Hiroshi, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 954
2. 論文標題 Dust Enrichment and Grain Growth in a Smooth Disk around the DG Tau Protostar Revealed by ALMA Triple Bands Frequency Observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace9b9	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 該当する

1. 著者名 Hanawa Tomoyuki, Garufi Antonio, Podio Linda, Codella Claudio, Segura-Cox Dominique	4. 巻 528
2. 論文標題 Cloudlet capture model for the accretion streamer onto the disc of DG Tau	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6581 ~ 6592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stae338	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 該当する

1. 著者名 Sabatini G., Podio L., Codella C., Watanabe Y., De Simone M, ... Hanawa, T. et al.	4. 巻 684
2. 論文標題 FAUST. XIII. Dusty cavity and molecular shock driven by IRS7B in the Corona Australis cluster	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L12 ~ L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202449616	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 該当する

1. 著者名 Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami, Yamamoto Satoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Episodic accretion onto a protostar	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 288 ~ 293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921322001223	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 Unno Masaki, Hanawa Tomoyuki, Takasao Shinsuke	4. 巻 941
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic Model of Late Accretion onto a Protoplanetary Disk: Cloudlet Encounter Event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 154 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca410	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 Codella C, Lopez-Sepulcre A, Ohashi S, Chandler C J, De Simone M, Podio L, Ceccarelli C, Sakai N, Alves F, Duran A, Fedele D, Loinard L, Mercimek S, Murillo N, Zhang Y, Bianchi E, Bouvier M, Busquet G, Caselli P, Dulleu F, Feng S, Hanawa T, Johnstone D, Lefloch B, Maud L T, Moellenbrock G, Oya Y, Svoboda B, Yamamoto S	4. 巻 515
2. 論文標題 FAUST VI. VLA1623?2417 B: a new laboratory for astrochemistry around protostars on 50 au scale	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 543 ~ 554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1802	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 Ohashi Satoshi, Nakatani Riouhei, Liu Hanyu Baobab, Kobayashi Hiroshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami	4. 巻 934
2. 論文標題 Formation of Dust Clumps with Sub-Jupiter Mass and Cold Shadowed Region in Gravitationally Unstable Disk around Class 0/I Protostar in L1527 IRS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac794e	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 該当する

1. 著者名 Vastel C., Alves F., Ceccarelli C., Bouvier M., Jimenez-Serra I., Sakai T., Caselli P., Evans L., Fontani F., Le Gal R., Chandler C. J., Svoboda B., Maud L., Codella C., Sakai N., Lopez-Sepulcre A., Moellenbrock G., Hanawa T., Yamamoto S. et al.	4. 巻 664
2. 論文標題 FAUST V. Hot methanol in the [BHB2007] 11 protobinary system; hot corino versus shock origin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A171 ~ A171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243414	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 Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami, Yamamoto Satoshi	4. 巻 932
2. 論文標題 Cloudlet Capture Model for Asymmetric Molecular Emission Lines Observed in TMC-1A with ALMA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 122 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6e6a	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 Okoda Yuki, Oya Yoko, Francis Logan, Johnstone Doug, Inutsuka Shu-ichiro, Ceccarelli Cecilia, Codella Claudio, Chandler Claire, Sakai Nami, ,.. Hanawa Tomoyuki et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 FAUST. II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398?3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 (22頁)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abddb1	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 該当する

1. 著者名 Ohashi Satoshi, Codella Claudio, Sakai Nami, Chandler Claire J., Ceccarelli Cecilia, Alves Felipe, Fedele Davide, Hanawa Tomoyuki et al.	4. 巻 927
2. 論文標題 Misaligned Rotations of the Envelope, Outflow, and Disks in the Multiple Protostellar System of VLA 1623?2417: FAUST. III	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54 (13頁)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4cae	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 該当する

1. 著者名 Hanawa Tomoyuki, Matsumoto Yosuke	4. 巻 907
2. 論文標題 A Proper Discretization of Hydrodynamic Equations in Cylindrical Coordinates for Astrophysical Simulations	5. 発行年 2021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/abd2b2	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 Mullen P. D., Hanawa Tomoyuki, Gammie C. F.	4. 巻 252
2. 論文標題 An Extension of the Athena++ Framework for Fully Conservative Self-gravitating Hydrodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/abcfbd	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 該当する

1. 著者名 Nakatani Riouhei, Liu Haiyu Baobab, Ohashi Satoshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Chandler Claire, Oya Yoko, Sakai Nami	4. 巻 895
2. 論文標題 Substructure Formation in a Protostellar Disk of L1527 IRS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab8eaa	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 該当する

1. 著者名 Soon Kang-Lou, Momose Munetake, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Kataoka Akimasa, Hanawa Tomoyuki, Fukagawa Misato, Saigo Kazuya, Shibai Hiroshi	4. 巻 71
2. 論文標題 Investigating the gas-to-dust ratio in the protoplanetary disk of HD 142527	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz112	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 Hanawa Tomoyuki, Kudoh Takahiro, Tomisaka Kohji	4. 巻 881
2. 論文標題 Fragmentation of a Filamentary Cloud Permeated by a Perpendicular Magnetic Field. II. Dependence on the Initial Density Profile	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2d26	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 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Patrick D Mullen
2. 発表標題 Higher Order Methods for Numerical Simulations Including Self-Gravity
3. 学会等名 日本天文学会 秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Patrick D. Mullen
2. 発表標題 Achieving Higher Order Accuracy in Space in Hydrodynamic Simulations of Self-Gravitating Gas
3. 学会等名 15th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 花輪 知幸
2. 発表標題 Cloudlet Capture Model for the Streamer Associated with DG Tau
3. 学会等名 日本天文学会 秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto
2. 発表標題 Episodic accretion onto a protostar
3. 学会等名 IAU Symposium No. 362, The Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Unno, Tomoyuki Hanawa, Shinsuke Takasao
2. 発表標題 MHD model of nonaxisymmetric accretion from an envelope to a protoplanetary disk
3. 学会等名 Star Formation: From Clouds to Discs (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 A Proper Discretization of Hydrodynamic Equations in the Cylindrical Coordinates for Astrophysics
3. 学会等名 American Astronomical Society
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Removal of Apparent Singularity in the Cylindrical Coordinates
3. 学会等名 14th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花輪 知幸、松本 洋介
2. 発表標題 円筒座標系での3次元動的降着のシミュレーション -見かけの特異点(z軸)によるトラブルの回避
3. 学会等名 宇宙惑星ジェットの数理
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花輪 知幸、松本 洋介
2. 発表標題 円筒座標系での見かけの特異点を取り除いた数値シミュレーション法
3. 学会等名 日本天文学会 秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyuki Hanawa, Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Removal of Apparent Singularity in the Cylindrical Coordinates
3. 学会等名 Challenges and Innovations in Computational Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花輪 知幸、松本 洋介
2. 発表標題 曲線座標系の曲率に起因する偽の力を打ち消す差分法
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花輪 知幸、
2. 発表標題 散発的なガス降着による原始惑星系円盤の成長
3. 学会等名 日本天文学会 春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

千葉大学 先進科学センター 花輪 知幸 <a href="https://sites.google.com/view/hanawa-chibau/">https://sites.google.com/view/hanawa-chibau/</a> 花輪知幸 <a href="https://sites.google.com/view/hanawa-chibau/">https://sites.google.com/view/hanawa-chibau/</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
研究分担者	松本 洋介  (Matusmoto Yosuke)  (20397475)	千葉大学・大学院理学研究院・准教授    (12501)	

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			
フランス	Grenoble Alps University			
イタリア	Observatory Arcetri			
米国	National Radio Astronomy Observatory	NASA	Univ. of Texas	他2機関
ドイツ	Max Planck Institut	European Southern Observatory		
その他の国・地域	Academia Sinica of Astro. and Astrophys			
ドイツ	Max Planck Institut	European Southern Observatory		
米国	University of Illinois	Los Alamos National Laboratory	Princeton University	