

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05017

研究課題名(和文) 数値シミュレーションと高分解能撮像によるガス円盤を伴った若い連星の研究

研究課題名(英文) Study of Young Binary Associated with Gas Disks Based on Numerical Simulations and High Resolution Imaging

研究代表者

花輪 知幸 (Hanawa, Tomoyuki)

千葉大学・先進科学センター・教授

研究者番号：50172953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：連星とともに回転する座標系を用い、若い連星へのガス降着の数値シミュレーションを行った。当初の目論見とはずれたが、コリオリの力の評価法を改善することにより、降着するガスの角運動量の計算精度を格段に向上させることができた。また従来のシミュレーションに見られた不自然な振動を抑えることができた。この改善は自己重力系のシミュレーション全般にも応用できることが見出された。新規の方法は、自己重力も含めた流体の全エネルギー保存が保証される差分法を提供する。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations of a young accreting binary have been performed on a numerical grid corotating with the binary. The accuracy of specific angular momentum has been greatly improved by adopting a new method of evaluating the Coriolis force. This improvement is out of the initial scope and suppresses unnatural oscillations seen in the numerical simulations thus far. As a bi-product, the new method provides an explicit difference scheme which guarantees conservation of the total energy of the fluid including the self-gravity.

研究分野：天文学

キーワード：数値シミュレーション 連星 回転系 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

星の過半数は連星あるいは多重星のメンバーである。連星の主星に対する伴星の質量比は様々であることが知られているが、その理由は謎である。連星は同時に生まれ、それらを取り巻くガスを取り込みながら成長すると考えられているが、この過程ではほとんどが等質量となることが、流体力学シミュレーションにより予想されている。この食い違いの原因は、現在の理論や数値シミュレーションに大きな見落としがあることを示唆している。

一方で電波観測では空間分解能が上がり、連星周囲のガスや塵を分光撮像できるようになった。また赤外線観測でも連星周囲のダストを捉えることができるようになっていく。これらの観測結果と比較することにより、連星系でのガス降着のダイナミクスを正しく理解することが可能になった。

このような状況を踏まえ、これまでの連星系でのガス降着シミュレーションを批判的に再検討し、連星の質量比の起源を明らかにすることを目指した。再検討にあたっては、衝撃波の取り扱いに着目した。ガスが降着するためには角運動量を捨てることが重要であるが、角運動量を輸送する過程として有効なのは衝撃波である。しかし連星周囲のガスは低温なので、流れのマッハ数は大きく、衝撃波の取り扱いは数値的にも困難である。このため従来の方法では十分な精度が得られていない可能性がある。

2. 研究の目的

周連星円盤を伴うガス降着の盛んな連星の数値シミュレーションを実施し、その結果を L1551 NE など ALMA 望遠鏡による若い連星の分光撮像と比較し、ロッシュローブでの流れを明らかにする。従来のシミュレーションでは、ガスの温度は一定と単純化されてきたが、星からの放射により熱せられるため、実際の連星では主星や伴星の近くで温度が有意に高くなる。この効果を取り入れ、質量比が 1 より有意に小さい連星が多く産まれる機構を明らかにする。実際には主星に比べ伴星の質量が 1/2 以下も多く存在するが、これまでの数値シミュレーションの多くでは伴星へのガス降着が盛んになり、主星とほぼ同じ質量の連星ばかりが産まれると予想されている。この食い違いは、ロッシュローブの中や周連星円盤内で発生する強い衝撃波の数値的取り扱いによるものである可能性がある。このことを意識し、数値解法の再検討も行う。

研究を進めてゆく過程で、連星と共に回転する系で衝撃波が発生すると、大きな偽の角運動量生成や消滅が発生することが明らかになった。研究の途中では、この原因の解明と解決策にも取り組んだ。

3. 研究の方法

強い衝撃波を取り扱う技術は確立されたと考えられているが、現在主流の方法でマッハ数が 6 を超えるような強い衝撃波をシミュレーションすると、波面が細く歪み乱れた流れが発生するなどの問題が生じる。この原因は現在主流となっている計算法では質量や運動量の流束をリーマン解に基づいて求めているからである。リーマン解は粘性を無視できる場合の流体力学方程式の厳密解である。実際、分子粘性は天体スケールで無視できるほど小さいが、衝撃波では速度が急激に変化するため、粘性による運動量流束が圧力より大きくなる。この寄与を正しく評価しなければ、衝撃波面の前後で質量と運動量の両方が等しくなるような構造が求められない。従来の数値粘性では、解像度により鈍らされた衝撃波面で質量流束が不自然に上昇する。とくに衝撃波が数値格子に対して傾いてほぼ定常状態にあるとき問題が顕著になる。研究代表者はこの問題に銀河衝撃波のシミュレーションで気づき、分子粘性を解像度に応じて人為的に増やすという解決法を見出した。平成 27 年度はこの解決法を若い連星系でのシミュレーションに適用する。

4. 研究成果

研究の最初にコードチェックと精度確認のため、粗い数値格子でシミュレーションを実施した。連星と共に回転する座標を用いて、十分に遠方からガスが落下する場合を計算したところ、ガスの比角運動量が異常に増大するという不備が見つかった。異常な増大は衝撃波の近傍で発生し、衝撃波が強ければ強いほど大きなエラーが起こることに気づいたので、原因の追求を始めた。

直接の原因はコリオリの力が正しく評価されていないことであった。天文学の数値シミュレーションでは、質量、運動量、エネルギーが完全に保存するよう、流体力学方程式を保存形式で書き表すのが普通である。しかし回転系ではコリオリの力は源泉項として付加されるので、運動量の保存は保証されない。衝撃波の前後では速度が不連続に変化するため、差分による誤差が大きくなり、目立って現れる。

同種の誤差は私たちのみならず、回転系を用いたほとんどのシミュレーションにも表れていたはずである。気づかれなかった原因の 1 つは、慣性系での速度・角運動量があまり分析されなかったためと思われる。回転系では座標の回転による速度が目立ち、誤差が目立たなくなる。

この問題は、コリオリの力を考えている数値セルの平均運動量密度と、そのセルに流入する質量密度の平均を用いることにより大

幅に改善される。このようにコリオリの力を評価すると、慣性系での運動量保存が保証されるからである。言い換えると慣性系での運動量保存則を満たすよう、回転系での差分方程式を導けば上記の問題が発生しない。この結果は回転系のシミュレーション全般に適用できる結果なので、国際研究集会で発表し、集録に結果を報告した。

本研究で使用した数値シミュレーションコード SFUMATO では、コリオリの力 $2 \times \mathbf{v}$ を質量密度流束 (=数値流束) に比例させるのを標準としてきたが、他の多くのシミュレーションでは数値セルの平均運動量密度に比例させている。本研究で見出した改良案は、コリオリの力の半分を質量密度流束に比例させ、残り半分を平均運動量密度に比例させる混合型である。条件を等しくして比較すると、質量密度流束だけ、あるいは平均運動量密度だけで計算した場合、連星の周囲のガスは大きな振動を示す。しかし混合型でコリオリの力を計算すると、このような振動が消える(図は報告書の末尾に掲載)。従来論文で報告されてきた周連星円盤の振動も、不適切なコリオリの力が原因である可能性がある。

当初の目的である物理的な粘性を加え、衝撃波を安定させることはできなかつた。数値粘性を加えたが、衝撃波での速度変化は大きく、これを滑らかな変化として捉えるだけの空間分解能を達成することができなかつた。128 × 128 × 64 の空間分解能の3次元正方格子を5段重ねた多層格子によるシミュレーションで確かめたが、この空間分解能では不十分であった。また多層格子では階層ごとに解像度が異なるため、粘性の大きさを揃えることが難しかった。

しかし副産物として、コリオリの力の評価法の改善は、自己重力系にも応用できることを見出した。通常のシミュレーションでは、重力も源泉項として計算されるため、保存形式を採用しても、重力を含めたエネルギーは保存されない。また作用反作用の法則により、自己重力系では全運動量が保存されるはずであるが、これも厳密には保存しない。しかし本研究での成果を応用すると、単位体積あたりの重力 \mathbf{g} や、重力によるエネルギー解放率 $\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}$ を、ポワソン方程式と整合的にするように評価すると、全エネルギーも全運動量も厳密に保存する陽解法を構築することができる。すでにテスト計算によりこの解法が正しいことは確認ができていたので、2018 年度に国際研究集会などで発表予定である。

共同研究者としては、若い連星 L1551NE や L1551 IRS5 の観測研究に参加した。L1551NE では周連星円盤の輝度分布や視線方向速度に見られる S 字型構造が連星の重力トルクにより発生する衝撃波であること再確認するとともに、主星と伴星に付随する円盤の大きさを測定した。また L1551 IRS5 では、固有運動の測定から連星の軌道要素に制限を加

え、連星の離心率は低く、軌道面は視線に対して 25° 傾いている可能性が高いことを示した。また連星ではないが、ALMA による電波観測の結果から、若い原始惑星円盤 HD142527 の構造を推定する研究でも成果をあげた。

関連する研究として、星形成領域に普遍的に見られるフィラメント状分子雲の安定性を解析した。

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 10 件)

- (1) Tomoyuki Hanawa, Takahiro Kudoh, Kohji Tomisaka, Fragmentation of Filamentary Cloud Permeated by a Perpendicular Magnetic Field, *Astrophys. J.*, 848 巻, article id 2, 12 頁 (2017) 査読あり
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8b6d>
- (2) Nami Sakai, Yoko Ohya, Aya E. Higuchi, Yuri Aikawa, Tomoyuki Hanawa, ほか 10 名, Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disc in the Class 0 protostar, IRAS 04368+2557, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 467 巻, p. L76, 5 頁 (2017) 査読あり
<https://doi.org/10.1093/mnras/slx002>
- (3) Kang-Lou Soon, Tomoyuki Hanawa, Takayuki Muto, Takashi Tsukagoshi, Munetake Momose, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 69 巻, article id 34 16 頁 (2017) 査読あり
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx007>
- (4) Shigehisa Takakuwa, Kazuya Saigo, Tomoaki Matsumoto, Masao Saito, Jeremy Lim, Tomoyuki Hanawa, Hsi-Wei Yen, Paul T. P. Ho, Spiral Arms, Infall, and Misalignment of the Circumbinary Disk from the Circumstellar Disks in the Protostellar Binary System L1551 NE, *Astrophys. J.*, 837 巻, article id 86, 14 頁 (2016) 査読あり
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6116>
- (5) Yuki Kudoh, Tomoyuki Hanawa, Approximate Riemann solvers for the cosmic ray magnetohydrodynamical equations, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 462 巻, p. 4517, 15 頁 (2016) 査読あり
<https://doi.org/10.1093/mnras/stw1937>
- (6) Akimasa Kataoka, Takashi Tsukagoshi, Munetake Momose, Hiroshi Nagai, Takayuki Muto, Cornelis P. Dullemond,

- Adriana Pohl, Misato Fukagawa, Hiroshi Shibai, Tomoyuki Hanawa, Koji Murakawa, Submillimeter Polarization Observation of the Protoplanetary Disk around HD 142527, *Astrophys. J.*, 831 巻 article id L12, 6 頁 (2016) 査読あり
<https://doi.org/10.3847/2041-8205/831/2/L12>
- (7) Jeremy Lim, Tomoyuki Hanawa, Paul K. H. Yeung, Shigehisa Takakuwa, Tomoaki Matsumoto, Kazuya Saigo, Formation of the Unequal-mass Binary Protostars in L1551NE by Rotationally driven Fragmentation, *Astrophys. J.*, 831 巻, article id 90, 13 頁 (2016) 査読あり
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/1/90>
- (8) Jeremy Lim, Paul K. H. Yeung, Tomoyuki Hanawa, Shigehisa Takakuwa, Tomoaki Matsumoto, Kazuya Saigo, Rotationally driven Fragmentation in the Formation of the Binary Protostellar System L1551 IRS 5, *Astrophys. J.*, 826 巻, article id 153, 20 頁 (2016) 査読あり
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/2/153>
- (9) Takayuki Muto, Takashi Tsukagoshi, Munetake Momose, Tomoyuki Hanawa, Hideko Nomura, Misato Fukagawa, 他 11 名, Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 67 巻, article id 122, 28 頁 (2015) 査読あり
<https://doi.org/10.1093/pasj/psv098>
- (10) Akimasa Kataoka, Takayuki Muto, Munetake Momose, Takashi Tsukagoshi, Misato Fukagawa, Hiroshi Shibai, Tomoyuki Hanawa, Koji Murakawa, Cornelis P. Dullemond, Millimeter-wave Polarization of Protoplanetary Disks due to Dust Scattering, *Astrophys. J.*, 809 巻, article id 78, 15 頁 (2015) 査読あり
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/1/78>
- 〔学会発表〕(計 9 件)
- (1) Tomoyuki Hanawa, Keijiro Miyazaawa, Tomoaki Matsumoto, Numerical Evaluation of the Coriolis Force on the Cartesian Grid, Numerical Simulations of Planet-Disk Interactions (国際学会), 2017 年
- (2) 花輪知幸, 工藤哲洋, 富阪幸治 乱流による実効的な圧力を考慮したフィラメントモデルの安定性, 日本天文学会秋季年会, 2017 年
- (3) Tomoyuki Hanawa, Keijiro Miyazawa, Tomoaki Matsumoto, Spiral Shocks in Young Circumbinary Disks, 12th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (国際学会), 2017 年
- (4) Tomoyuki Hanawa, Fragmentation of Filamentary Molecular Clouds Threaded by Perpendicular Magnetic Field, Phase Transitions in Astrophysics, from ISM to Planets(国際学会), 2017 年
- (5) 花輪知幸, 工藤哲洋, 富阪幸治, 垂直な磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の Jeans 不安定, 日本天文学会春季年会, 2017 年
- (6) Tomoyuki Hanawa, Takahiro Kudoh, Kohji Tomisaka, Fragmentation of Filamentary Molecular Clouds Threaded by Perpendicular Magnetic Field, Annual Meeting of the American Astronomical Society, 2017 年
- (7) 花輪知幸, 坂井南美, 大屋瑤子, 山本智, 降着エンベロープからケプラー円盤への遷移, 日本天文学会秋季年会, 2016 年
- (8) Tomoyuki Hanawa, Protoplanetary Disks - A Review, Accretion Processes in Cosmic Sources (招待講演)(国際学会), 2016 年
- (9) Tomoyuki Hanawa, Multi-color Model for the Protoplanetary Disks, HD142527 & HL Tau, 10th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (国際学会), 2015 年
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔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
<https://ohtaka.cfs.chiba-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 花輪 知幸 (HANAWA, Tomoyuki)
 千葉大学・先進科学センター・教授
 研究者番号: 50172953

(3) 連携研究者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

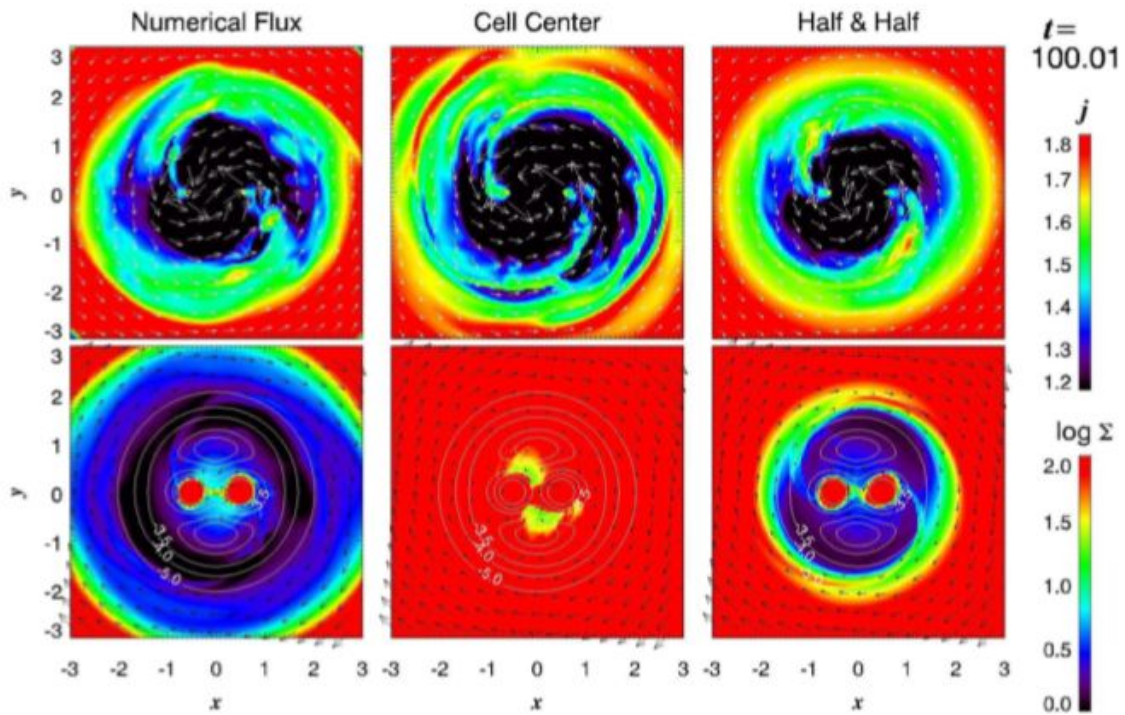


図 1 連星を取り巻く円盤を 3 次元数値シミュレーションした結果の比較。上段と下段は連星が初期から 16 回転した時点での比角運動量分布と公転面に投影した面密度分布を表している。左はコリオリの力を質量密度流束に比例させた場合で、中央は運動量密度に比例させた場合である。いずれでも大きな数値誤差による振動が発生するのに対し、右に示す混合型の計算法では流れが安定する。