



Title	3次元輻射磁気流体計算を用いた連星系における共通外層期の軌道進化の調査
Author(s)	水谷, 耕介
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 76-79
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106240
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

3次元輻射磁気流体計算を用いた 連星系における共通外層期の軌道進化の調査

水谷 耕介

大阪大学 大学院理学研究科

1. はじめに

重力波放射をはじめとする高エネルギー現象は近接した連星系で起こる。このような近接連星の連星間距離 ($10^{-7} \sim 10^{-2}$ au) は、恒星連星の典型的な連星間距離 ($10^{-1} \sim 10^2$ au) に比べ数桁以上小さい。この連星間距離の隔たりをつなぐメカニズムとして共通外層期[1]が有力視されている (図 1)。共通外層期は、連星のうち巨星となった星がもう一方の天体をその内部に取り込む段階である。この段階において連星の軌道エネルギーが共通外層部へ移動し、軌道が縮小する。その結果、はじめに比べ連星間距離が数桁程度縮小した近接連星が形成される。

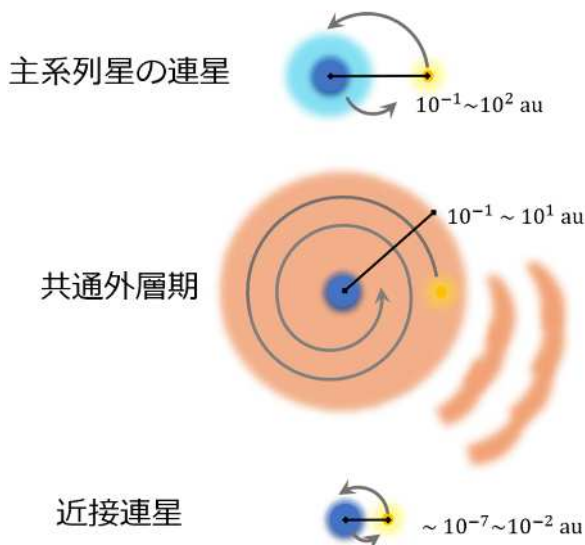


図 1：共通外層期の概要

高エネルギー現象の起源を理解する上で重要な共通外層期であるが、現在でもその機構は十分に理解されていない。特に、失われた軌道エネルギーがどの程度外層部の放出に使われるのか、はぎ取られた外層部がどのような構造を形成するのか、一度連星から遠ざかったガスが再び系へ戻るのか、といった点は未解明である。これらの問題はいずれも共通外層期後の連星間距離や周囲

のガス分布を決定するため、近接連星の形成過程を理解する上で重要である。

現在まで共通外層期の詳細な物理の解明が進んでいない背景には、共通外層期が3次元かつ非線形な現象であり、この現象の理解には3次元流体計算が必須となる点がある。これまでに共通外層期を扱った3次元流体計算例はいくつか存在するが[2]、観測との比較に焦点を当てた例は限られている。また、過去の計算の多くは小質量星を対象としており、中性子星やブラックホールへ進化し高エネルギー現象を引き起こす大質量星で起こる共通外層期については、未だ十分に調べられていない。大質量星では対流や輻射といった物理過程も重要となるため、より現実的な3次元計算が必要である。

さらに、共通外層期における立体構造の形成には磁場が重要な役割を果たす可能性がある。磁場を考慮した研究[3]では、極方向へ高速なアウトフローが形成されることが示されており、その形状が双極惑星状星雲と似ていることも指摘されている。そこで本研究では、大質量星で起こる共通外層期に焦点を当て、磁場を考慮した3次元磁気流体計算を行った。さらに、共通外層期の対応突発天体として考えられている高輝度赤色新星との直接比較を行うことを目指し、輻射輸送コードの開発も進めた。

2. 計算における困難と過去の研究について

共通外層期は連星進化を理解する上で重要であるにもかかわらず、数値計算における多くの困難のためにシミュレーション例は未だ限られている。特に深刻な問題として、計算領域内における密度差が大きいことが挙げられる。共通外層期では高密度な星内部と低密度な放出物という

20 桁以上にもなる密度差を扱う必要がある。このような問題では、数値的な安定性を保ちながら長時間の時間発展を追うことが難しい。

この密度差に起因する問題に対処するため、これまでの共通外層期計算では流体を粒子に近似して計算を行う粒子法がよく用いられてきた。粒子法は大きな密度差を扱いやすいという利点を持つ。一方で、解像度が粒子分布に依存するため、低密度な放出物の構造を高い精度で追跡することは難しい。しかし共通外層期における低密度な放出物は、観測される光度曲線やスペクトルを決める重要な要素であるため、その時間発展を正確に追うことが求められる。

また、観測との比較を行うためには、単に最終的な連星間距離を求めるだけでは不十分である。はぎ取られた外層部が赤道面方向に円盤状構造を形成するのか、極方向へアウトフローを作るのか、あるいは一部が再び連星近傍へ戻るのかといった 3 次元構造を調べる必要がある。このような構造は、光がどの方向へ逃げやすいか、どの程度の時間スケールで冷却されるか、観測者から見た明るさがどのように変化するかに影響を与える。したがって、共通外層期を観測と結びつけるためには、低密度放出物を十分な解像度で扱うことができる 3 次元流体計算が不可欠である。

3. 本研究のアプローチ

本研究では、大質量星で起こる共通外層期に焦点を当て、放出物の性質に対して磁場が与える影響を調査した。対象とする系は、82.1 太陽質量の赤色超巨星と 35.0 太陽質量の伴星からなる連星系[4]である。このような大質量連星は、後にブラックホール連星となり、重力波源へと進化する可能性がある。初期の連星間距離は30.0 auである。

本研究の特徴の一つは、連星が相互作用を始める Roche Lobe Overflow から計算を開始している点である。多くの共通外層期の計算では、伴星を主星表面付近に置いた状態から計算を始める場合がある。しかし、共通外層期直前の質量移動や

放出物の形成は、その後の軌道進化や外層部構造に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、伴星が主星外層部へ徐々に接近し、共通外層期へ移行していく過程を含めて計算した。

計算には 3 次元磁気流体計算コード Athena++[5]を用いた。本計算コードは空間を格子状に分割して方程式を解くオイラー法に基づいている。オイラー法では、粒子法とは異なり、密度分布に直接依存せず計算格子を配置できる。そのため、低密度な放出物に対しても、あらかじめ指定した解像度を確保できる。この特徴は、共通外層期における放出物の時間発展や観測量との対応を調べる上で大きな利点となる。

初期条件として、主星中心に双極子磁場を持つ赤色超巨星を配置した (図 2)。主星は静水圧平衡を満たすように構成し、主星表面における磁気圧がガス圧の 1/1000 となるように磁場強度を設定した。本研究では、初期には比較的弱い磁場が伴星との相互作用を通じてどのように増幅され、放出物の構造へ影響を与えるかを調べた。

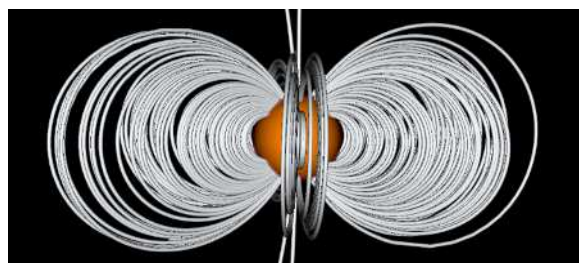


図 2：計算初期条件と双極子磁場

本計算では計算領域の原点を主星中心に取っているため、密度の高い主星中心部を静止させた座標系で計算することができる[6]。これは数値拡散による誤差を抑える上で有効である。

一方で、本計算には数値的な困難も残されている。本研究の対象である恒星は、ほとんど真空である宇宙空間に存在しているため、星中心と星外部での密度差は 20 桁を超える。このような密度差をそのまま扱うことは非常に難しいため、本計算では主星中心部に重力緩和を施し、中心部の密度を下げている。本研究で重要なのは主星表面に近い外層部とそこから放出されるガスであるた

め、この処置によって主目的となる物理を保ちながら計算を安定化している。

また、観測との比較を行うためには、流体や磁場だけでなく輻射輸送を考慮した計算が必要である。高輝度赤色新星の光度曲線は、放出物がどのように膨張し、冷却し、光を放出するかによって決まる。そこで本研究では、磁気流体計算と並行して Flux-Limited Diffusion 法[7]による輻射輸送モジュールの開発も行った。

4. 結果

4.1 磁場による角運動量輸送

まず、磁場が共通外層期における軌道進化に与える影響を調べた。計算の結果、最終的な連星間距離は、磁場なしの場合で6.05 au、磁場ありの場合で5.63 auとなり、磁場を考慮した場合の方がやや小さい連星間距離へ到達した。この違いは、磁場が角運動量輸送を促進することと関係している。磁場はガス同士をつなぐ張力として働き、局所的な流体運動だけでは輸送されにくい角運動量を、より効率的に外側へ運ぶことができる。そのため磁場なしの場合と比較して、磁場ありの場合では連星周囲のガスにおいて角運動量がより広い範囲へ輸送される。

4.2 磁場構造の時間発展

次に、磁場構造そのものの時間発展を調べた。

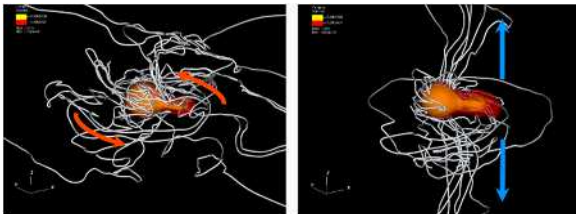


図3：磁場構造の時間発展。白線は磁力線を、色付きの面は密度の等値面を表す。

図3に、共通外層期前後における磁場構造の変化を示す。計算開始時には主星内部に双極子磁場を与えているが、伴星が主星外層部へ侵入し公転運動を続けることで、周囲のガスとともに磁力線が引き伸ばされ、巻き上げられる。この過程によって磁気エネルギーが増加し、磁場が力学的に重要な役割を持つようになる。さらに、発達した磁場

は磁気圧によって極方向へ集められる傾向を示した。これは、磁場が単に局所的に増幅されるだけでなく、放出物全体の3次元構造を変化させることを意味している。共通外層期に形成される放出物の形状は、高輝度赤色新星や惑星状星雲の観測的特徴と関係するため、この結果は観測との比較を行う上で重要である。

4.3 極方向アウトフローの形成

磁場構造の変化に伴い、極方向へのアウトフローが形成されることも確認された。図4に、公転面に垂直な面上での動径方向速度分布を示す。磁場なしの場合と比較して、磁場ありの場合では極方向に沿って外向きの速度を持つガスが明瞭に現れており、磁場の効果によって極方向アウトフローが駆動されていることが分かる。このようなアウトフローの駆動機構としては、磁気圧駆動、磁気遠心力、ガス圧駆動などが考えられる。本計算では、伴星の運動によって磁場が巻き上げられ、その結果として増加した磁気圧が極方向へのガスの加速に寄与している可能性がある。

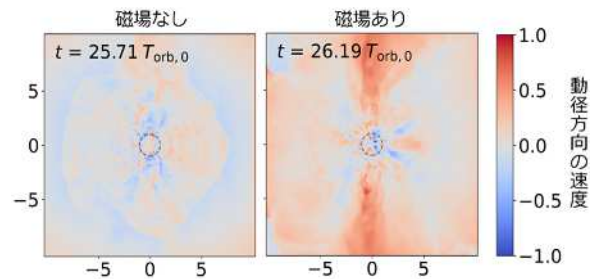


図4：磁場の有無によるアウトフローの違い。公転面に垂直な面における動径速度を示す。

極方向アウトフローは、双極惑星状星雲の形成とも関連する可能性がある。観測される惑星状星雲の中には、赤道面方向にくびれを持ち、極方向へ伸びた双極構造を示すものがある。このような形状の起源として、連星相互作用や共通外層期が重要であると考えられてきた。本研究の結果は、共通外層期中に伴星の運動によって磁場が増幅され、その磁場が双極的なアウトフローを駆動しうることを示している。

4.4 輻射輸送コードの開発

高輝度赤色新星との比較を行うためには、流体

の運動だけでなく輻射輸送を考慮した計算が必要である。本研究では、Athena++に対して Flux-Limited Diffusion 法[7]を用いた輻射輸送モジュールの開発を行った。Flux-Limited Diffusion 法は、光学的に厚い領域では輻射を拡散として扱い、光学的に薄い領域では光速を超える非物理的な輻射輸送が起こらないように制限を加える手法である。このため、恒星内部のように光学的に厚い領域から、放出物外縁のように光学的に薄い領域までを含む問題に対して有用である。

従来実装では、時間ステップ間における温度変化が十分小さいことを仮定して方程式を線形化していた。しかし、強い温度勾配や不連続面を含む問題では、この仮定が十分に成り立たず、収束性や精度に課題があった。そこで本研究では、Newton-Raphson法による非線形解法を導入した。各 Newton-Raphson 反復で得られる線形化方程式は、Multigrid 法によって解くようにした。

この実装により、従来法と比較して接触不連続面をより正確にとらえることが可能となり、解の収束性も改善されたことを確認した(図5)。一方で、線形問題に対しては従来実装と大きな差は見られず、新たな実装が既存手法と整合的であることも確認できた。今後はこの輻射輸送モジュールを磁気流体計算へ組み込み、高輝度赤色新星との直接比較を目指す。

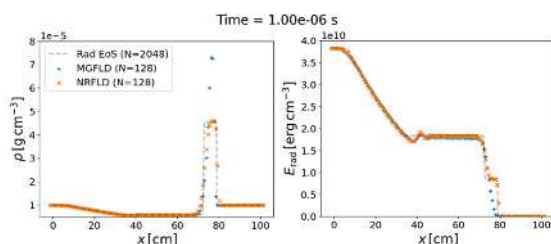


図5：輻射輸送コードのテスト（衝撃波管問題）

5. おわりに

本研究では、大質量連星系で起こる共通外層期を対象として、磁場を考慮した3次元磁気流体計算を実施した。オイラー法に基づく計算コードを用いることで、中心連星部だけでなく低密度な放出物に対しても解像度を確保し、共通外層期にお

けるガス構造の時間発展を調べた。

その結果、伴星の運動によって磁場構造が大きく変化することを確認した。さらに、増幅された磁場によって極方向へのアウトフローが駆動されることも分かった。このような双極的構造は、双極惑星状星雲の形成や高輝度赤色新星の観測的特徴と関連する可能性がある。

加えて本研究では、高輝度赤色新星との比較を目指して Flux-Limited Diffusion 法による輻射輸送コードの開発を行った。Newton-Raphson 法と Multigrid 法を組み合わせた非線形解法を導入することで、従来実装よりも接触不連続面を正確にとらえ、解の収束性を改善できることを確認した。テスト計算により今後の応用に向けた基盤を整えることができた。

今後は、開発した輻射輸送モジュールを3次元磁気流体計算へ組み込み、放出物がどのように冷却され、どのような光度曲線を生み出すかを調べる予定である。これにより、高輝度赤色新星の観測との比較を行い、共通外層期における磁場、輻射、軌道進化の相互作用を明らかにしていきたい。

参考文献

- (1) N. Ivanova, et al., The Astronomy and Astrophysics Review, 21, 59 (2013).
- (2) S. T. Ohlmann, et al., The Astrophysical Journal Letters, 816, L9 (2016).
- (3) M. Ondratschek, et al., Astronomy & Astrophysics, 660, L8 (2022).
- (4) P. M. Ricker, et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 489, 2013 (2019).
- (5) J. M. Stone, et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, 249, 4 (2020).
- (6) J. MacLeod, et al., The Astrophysical Journal, 863, 5 (2018).
- (7) G. D. Levermore, G. C. Pomraning, The Astrophysical Journal, 248, 321 (1981).