

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：37111

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23443

研究課題名（和文）大質量星の重力崩壊に伴う磁気流体ジェットの加速メカニズム

研究課題名（英文）Acceleration mechanism of magnetized jets associated with core-collapse of massive stars

研究代表者

松本 仁（MATSUMOTO, Jin）

福岡大学・公私立大学の部局等・ポスト・ドクター

研究者番号：70722247

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、数値シミュレーションを用いて大質量星の重力崩壊時に出現するジェットのダイナミクスを明らかにすることである。本研究では大質量星の重力崩壊とジェット伝搬を切り分け個々の現象を精度良く求めた。その結果、重力崩壊にともなう磁束の保存によりマグネタークラスの磁場が形成される場合にはジェットが駆動されることがわかった。一方、ジェット伝搬においては、磁場を含まないジェットは振動にともなう慣性力を起源とする流体不安定性の成長の影響でジェット形状が崩れジェット外媒質との混合が生じジェットの流体速度が減速することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相対論的ジェットのダイナミクスは、大質量星の重力崩壊時に出現するジェットだけではなく、銀河中心にある巨大ブラックホール近傍から駆動される活動銀河核ジェットにも共通する物理である。特にジェット伝搬中の安定性の議論は、スケールの違いはあるがそのまま応用可能である。本研究課題で明らかにしたジェット振動にともなう慣性力を起源とする流体不安定性の成長によるジェット形状の変化は、活動銀河核ジェットの電波観測による形態の分類の物理的起源に迫る手がかりとなる可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to reveal the dynamics of the jet associated with the core-collapse of the massive star. To this end, we separately performed numerical simulations of the supernova explosion and the jet propagation. We had mainly two achievements. The magnetically driven jet is launched and propagates along the rotational axis of the massive star when the magnetar-class magnetic field is formed due to the magnetic flux conservation as a result of the gravitational collapse of the massive star. In addition, we found from the jet propagation simulations that the jet velocity is decelerated due to the growth of the local hydrodynamic instability which origin is the inertia force of jet oscillations when the purely hydrodynamic jet propagates through the ambient medium.

研究分野：天体物理学

キーワード：大質量星 ジェット 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

大質量星の重力崩壊時に出現する超相対論的ジェットのパダイナミクスは、宇宙物理学における解明すべき大きな謎の一つである。ジェットの駆動、加速、およびジェット最大の特徴である収束性(ジェット半径に対し伝搬方向に何桁も安定してプラズマが流れる構造)を無矛盾に理解する必要がある。

観測から少なくともいくつかのガンマ線バーストには重力崩壊型の超新星爆発が付随することがわかってきている。また一方で超新星 1987A や超新星残骸である Cas A などからは、双極状爆発およびジェット構造が観測され、超新星の非球対称爆発が注目を浴びている。両者とも超新星爆発と非球対称なアウトフロー構造を有しているが、そのアウトフロー速度には決定的な違いがある。どのような条件のもとで、超相対論的ジェットであるガンマ線バーストが生じるかは分かっていない。ガンマ線バーストや超新星爆発の際に生じる元素合成や放射を定量的に理解するためには、大質量星の重力崩壊に伴う爆発現象およびその際駆動されるジェットのダイナミクスの解明が必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、大質量星の重力崩壊時に生じるジェットの統一的な描像を構築することである。一部の超新星爆発とガンマ線バーストには「大質量星の重力崩壊」と「ジェット」という共通した状況が生じる。それらを差別化する指標として鍵になるのがジェットの加速およびそれに関わるジェット構造の安定性である。数値シミュレーションを用いて大質量星の特徴や磁場強度を系統的に変化させ、ジェットの加速機構を解明することで大質量星の最終進化段階における分岐の起源に迫ることを目指す。

### 3. 研究の方法

大質量星の重力崩壊時に出現するジェットのダイナミカルレンジは大質量星内部の駆動領域から星を突き破り星周空間の伝搬領域にかけて何桁にも及ぶ。計算資源の制約から大質量星の重力崩壊現象およびジェットの星周空間での伝搬を 1 つの計算領域で精度良く解くには困難を極める。そこで数値シミュレーションを(1)大質量星の重力崩壊、(2)ジェット伝搬に切り分け、それぞれの領域で生じる物理現象を精度良く解像する。(1)では大質量星の質量、磁場強度、回転に対する応答を詳細に調べ、(2)ではジェットを特徴付ける物理パラメータに対する伝搬中の速度、安定性への応答を詳細に調べる。

### 4. 研究成果

#### (1)大質量星の重力崩壊シミュレーション

超新星の典型的な爆発エネルギーである  $10^{51}$  erg より爆発エネルギーが 10 倍程大きく  $10^{52}$  erg に達する極超新星の爆発メカニズムには、大質量星の爆発メカニズムの主流になりつつあるニュートリノ加熱に加えて磁場が何らかの役割を果たすと期待されている。そこで、大質量星に磁場が存在する場合の重力崩壊現象をニュートリノ輻射輸送込みの電磁流体シミュレーションを用いて調べた。図 1 は、27 太陽質量の親星 (s27.0, Woosley et al. 2002) が回転していない場合に重力崩壊し、コアバウンス後に生じた衝撃波の時間発展を示したものである。球対称の一次元計算(磁場なし)では、停滞衝撃波の復活は生じなかった。一方、軸対称二次元計算(磁場あり)では、停滞衝撃波の復活が生じ、爆発へと転じた。親星の初期磁場強度依存性は、磁場が強いほど停滞衝撃波の復活の開始がわずかに遅延することを示した(200 ms あたりで青色の線は赤色の線に比べて立ち上がりが遅れている)。

詳細に解析した結果、爆発につながる流体のパダイナミクスにおける磁場の寄与はほとんどなく、ニュートリノ加熱メカニズムで爆発が生じていることがわかった。停滞衝撃波の復活における磁場強度の違いによる遅延の原因を解明すべく乱流スペクトルを確認したところ、磁場が強いほどスケールが大きい領域に比べてスケールが小さい領域での乱流の生成が抑えられていることがわかった。これは、小スケールでは曲率半径が小さな値をとり磁気張力が大きくなるため

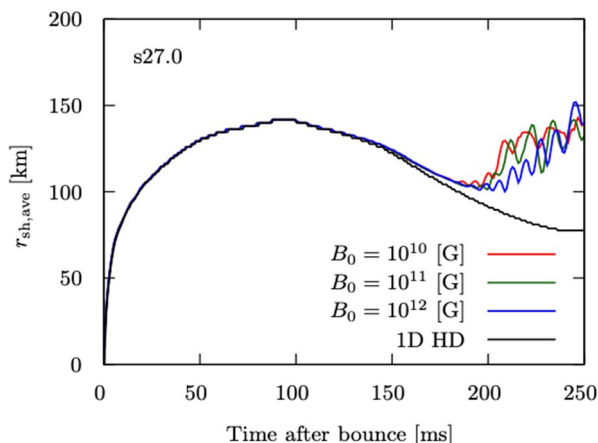


図 1: 大質量星(s27.0)が重力崩壊し中心核がバウンスした後の平均衝撃波の位置。モデルは大質量星の初期磁場強度( $B_0$ )による違い。1D HD は一次元磁場無しモデルを表す。その他は磁場あり二次元軸対称モデル。

大スケールに比べて流体の動きが制限されていることに起因すると考えられる。

親星の質量に対する依存性を確認すべく、15.0、18.4 太陽質量の親星 (s15.0, s18.4, Woosley et al. 2002) に対しても初期磁場強度を変化させ重力崩壊現象の数値シミュレーションを行ったところ、s27.0 の親星と同じく強磁場である程、停滞衝撃波の復活の立ち上がりにおいて遅延を示した。これはこれまで考えられてきた磁場が爆発をサポートするという研究結果 (e.g., Obergaulinger et al. 2014) とは反対のセンセーショナルな結果である一方、超新星爆発シミュレーションにおいて数値計算コードにおけるニュートリノや磁場の取り扱いが結果に対して非常に繊細であることを投げかけるメッセージ性の高い研究成果である。

回転していないいずれの親星モデルにおいても大質量星コアの初期磁場が強い ( $10^{12}$  G 程度) モデルは、重力崩壊にともなう磁束の保存により自然なかたちでプロトマグネターが形成された。マグネターは、通常の中性子星より磁場強度が3桁程大きい  $10^{15}$  G に達する強磁場中性子星である。また、親星が回転しているモデルでは、初期磁場が強くプロトマグネターが形成された場合には、回転軸方向に磁気流体ジェットが駆動された (図2 参照) が、プロトマグネターが形成されない弱磁場モデルではジェットは駆動されなかった。

## (2) ジェット伝搬シミュレーション

ジェットを加速するうえでジェット構造の安定性は重要な要素である。ジェットの形状が崩れるとジェット外媒質との混合が生じ加速効率が悪くなる。ジェットは伝搬する際、ジェット外媒質との圧力差により自然なかたちで動径方向に振動する。ジェットとともに動く系に移動すると振動を引き起こす圧力勾配力とバランスする慣性力がドライビングフォースとなり、ジェットの境界で流体不安定性が成長する (Matsumoto & Masada 2013)。そこでこの流体不安定性の成長がジェットの速度に与える影響を解明すべく相対論的ジェットの伝搬シミュレーションを行った。

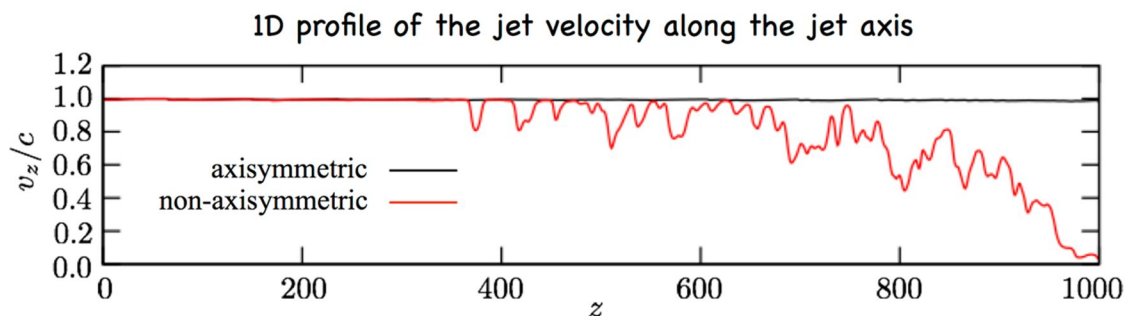


図 3: ジェットの伝搬軸 ( $z$  方向) に沿ったジェット中の流体速度 ( $v_z$ ) の構造。  $c$  は光速を表す。黒線は二次元軸対称計算、赤線は三次元計算の結果。

ジェット伝搬を特徴付ける物理パラメータに、ジェット媒質と伝搬する媒質の慣性の比、および内部エネルギーが慣性に寄与する程ジェットが熱的であるかどうかの 2 つがある。慣性の大小、熱的かどうかのいずれの組み合わせ (4 パターン) においても三次元計算においては、上記の慣性力に起因する流体不安定性の成長がジェット境界で確認された。それにともないジェット形状が崩れジェット外媒質との混合が生じジェットの流体速度が減速された (図3 参照)。一方、上記の流体不安定性は非軸対称モードであるため軸対称二次元計算では不安定性が成長しないことが想定され、三次元計算と同じ物理パラメータで実行したところ不安定性が成長せず流体速度が保たれることが確認された。現実世界は三次元であるため、ジェットを効率よく加速するためにはこの不安定性の成長を抑える効果が必要となる。

本研究課題では、(1)と(2)のシミュレーションにおける個々の物理現象の理解は進んだが、(1)で駆動されたジェットの伝搬・加速の系統的なパラメータサーベイにまでは至らなかったため、大質量星の進化の最終段階における分岐の完全解明にまでは至らなかった。その解明の鍵となるジェット加速を理解するためには、更なる大規模パラメータサーベイにより駆動されたジェットをモデル化し、伝搬を解くことでジェットの統一的な描像を構築する必要がある。

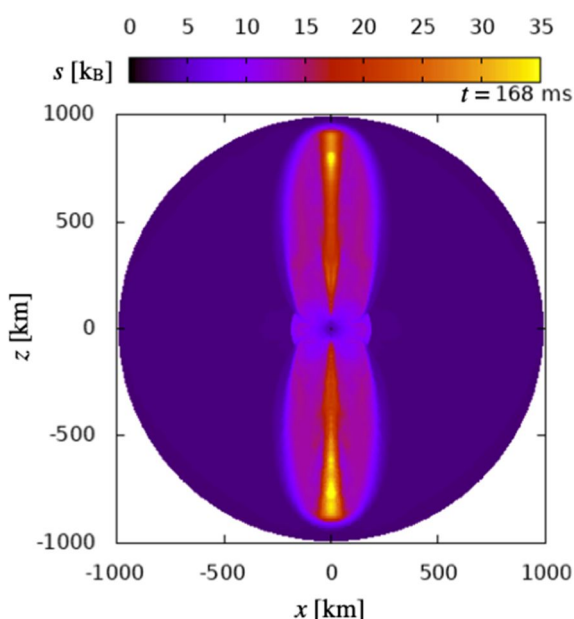


図 2: 回転あり s27.0 親星モデルの一例 (強磁場モデル)。磁気流体ジェットが駆動され、回転軸方向にジェットが伝搬している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsumoto J, Takiwaki T, Kotake K, Asahina Y, Takahashi H R	4. 巻 499
2. 論文標題 2D numerical study for magnetic field dependence of neutrino-driven core-collapse supernova models	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 4174 ~ 4194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3095	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 Matsumoto Jin, Komissarov Serguei S, Gourgouliatos Konstantinos N	4. 巻 503
2. 論文標題 Magnetic inhibition of the recollimation instability in relativistic jets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4918 ~ 4929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab828	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 Jin Matsumoto, Youhei Masada	4. 巻 490
2. 論文標題 Propagation, cocoon formation, and resultant destabilization of relativistic jets	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 4271 ~ 4280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2821	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松本仁
2. 発表標題 無回転大質量星コアの重力崩壊における磁場強度依存性
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 Jin Matsumoto
2. 発表標題 The stability of the gamma-ray burst jet propagating through a progenitor star
3. 学会等名 Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本仁
2. 発表標題 磁場反転ジェットの伝搬ダイナミクス
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin Matsumoto
2. 発表標題 MHD simulations of astrophysical jets with toroidal magnetic field reversals
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center - Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------