

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19540236  
 研究課題名（和文） 原始中性子星でのダイナモ作用と超新星爆発の理論的研究  
 研究課題名（英文） Theoretical Study of Dynamo Action in Proto-Neutron Star and Supernova Explosion  
 研究代表者  
 氏名（ローマ字）：花輪 知幸（Hanawa Tomoyuki）  
 所属機関・部局・職：千葉大学・先進科学センター・教授  
 研究者番号：50172953

## 研究成果の概要：

II型超新星爆発について磁場を考慮した3次元数値シミュレーションを行い、査読論文にまとめた。この3次元シミュレーションにより、適当な強さの磁場があると、親星の回転軸方向に磁気流体ジェットが放射されることが初めて示された。また捻れた磁場がアルフヴェン波として上空を伝播する過程が、原始中性子星の形成(バウンス)から磁気流体ジェットの放出までの時間差を律速していることも明らかにした。さらに親星が回転軸に対して傾いた磁場をもつと、原始中性子星が回転軸に対して傾いた磁場をもつと、原始中性子内部に向きが周期的に反転する磁場構造が現れることや、ジェットとは垂直方向に遅いアウトフローが放出されることも見いだした。

また磁気流体力学シミュレーションの数値技法の改良でも成果を挙げた。従来の方法で衝撃波を鮮明に捉えようとする(1)平衡状態を長時間計算すると偽の加熱が発生する。(2)衝撃波面が座標軸と平行になる領域で不自然なこぶ(カーバンクル)が発生する。これらの問題点は、源泉項や数値粘性の計算法を変えることにより解消されることを示した。開発した数値シミュレーションコードは並列型のスーパーコンピュータで高速に動作することも確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：超新星、磁気流体、数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

大質量星の最終段階で起こるII型超新星

爆発は、中性子星の形成過程であり、宇宙の化学進化の源でもあり、銀河における熱いガスの生成源であり、 $\gamma$ 線バースト源の有力な

候補でもある。これだけ重要な過程であるにも関わらず、その爆発機構には基本的な問題が残っている。30年以上にわたり計算が精密化されているが、いまだに納得のゆく形で爆発を再現した数値シミュレーションは存在しない。初期にはニュートリノ輸送の取り扱いを精密化すれば問題は解決すると考えられていたが、現在では球対称モデルの枠組みでは解決不能と考えられている。

また超新星爆発の初期段階では非球対称から有意にずれていることがこの数十年で明確になってきた。大マゼラン雲で見つかったSN1987Aは、球対称モデルの予想よりはるかに早期にX線で明るくなったこともその証拠の一つである。X線の光度曲線を説明するには大規模な物質混合が必要と現在では考えられている。大規模な物質混合は、輝線の強度と視線速度を説明するためにも必要である。

さらに超新星残骸が有意に非球対称であることを示す偏光観測も行われている。また高速度パルサーの運動量や爆発の機構そのものも、爆発の非対称性に起因するとする考え方もある。

非対称性を生み出す要因の一つとして回転と磁場が考えられる。II型超新星爆発により生まれた原始中性星が周期2msで自転していると、その回転エネルギーは $10^{51}$  ergにも達する。このエネルギーは超新星爆発のエネルギーに匹敵し、磁場により有効に変換されれば、超新星爆発にも大きく寄与する。このような期待から磁気流体力学シミュレーションが行われてきた。

II型超新星爆発の磁気流体力学シミュレーションはLeBlanc & Wilson (1970)に始まるが、盛んになったのは21世紀に入ってからである。初期のシミュレーションでも双極ジェット放出が予想されていたが、そのようなモデルでは極めて強い磁場が仮定されていた。パルサーやX線パルサーの観測により極端に強い磁場は否定され、1990年代にはこの方面のシミュレーションが広がらなかった。また当時は計算機資源が現在に比べ貧弱で、現在の水準から見ると粗い計算であった。

現在では1980年代までと比較すれば格段に精度の良いシミュレーションが行われるようになってはいるが、まだ十分と言える段階にはない。

たとえば、(1) 初期磁場や回転の速さへの系統的な依存性、(2) 3次元効果が不明である。初期磁場を変えたモデルは公表されているが、まだ散発的であることと、比較が現象論的で、初期磁場を変えた場合を予測する力はない。特に初期磁場が弱い場合についての研究が不足している。特異的に初期磁場が大きいモデルも $\gamma$ 線バーストを考える上で

重要であるが、普通の超新星の場合での磁場の役割はさらに重要である。

磁場が弱い場合のシミュレーションが困難な理由は次のように説明できる。大質量星コアの爆縮により形成された原始中性子星の磁場を $10^{15}$  Gと大きめに見積もっても、磁気エネルギーは $2 \times 10^{47}$  ergにしかならない。超新星爆発に対して有意な寄与をするためには、さらに磁場を強めなくてはならない。原始中性子星の自転周期を2msとしても、ダイナモ効果により磁場が10倍強められるまでに数十msの時間がかかる。初期磁場が弱い場合にはさらに長い時間が必要である。原始中性子星がニュートリノ放射により冷えるまでに数秒かかることを考えると、数百msや数秒のシミュレーションを行う必要がある。

長時間進化を計算するには、計算法を改良するとともに空間分解能を上げ、数値拡散を抑えなくてはならない。数値拡散は計算を安定に行うため不可欠であるが、非物理的な拡散により磁場を弱め、シミュレーションを無価値にしてしまう。数値拡散の量は、計算に用いたセルのサイズ( $\Delta x$ )、シミュレーションでの物理的経過時間( $t$ )、計算法に由来に比例定数の積で評価できる。現在の磁気流体力学シミュレーションで標準として使われているZEUSコードは数値拡散の比例定数が大きい。さらにセルサイズを十分小さくすることも困難である。このため、物理的に長時間の進化を追跡すると、数値拡散が深刻になる。初期磁場に穏当な値を仮定した場合を調べるには、数値計算法の改良と高空間分解能化が必要である。

また3次元性がシミュレーションに入っていないことも現在の課題である。2次元シミュレーションでは初期磁場の方向と回転軸が揃っている場合しか扱うことができない。磁場と回転軸に対して斜めの場合や、磁気回転不安定(MRI)を完全に扱うためには3次元シミュレーションが欠かせない。

## 2. 研究の目的

これまでに開発した3次元シミュレーションコードを並列化することにより計算速度を向上させ、空間分解能が2-4倍高いシミュレーションを可能にする。初期磁場が回転軸に対して斜めの場合は、向きの異なる磁場が交互に積み重なる層が形成されるので、その進化にも注目する。ジェットの放出については、初期磁場や回転への依存性を数値シミュレーションにより求めるだけでなく、その理論的な理解を深める。私たちの現時点での結果によれば、磁気エネルギーを貯めることができるのは、中心から20-60kmまでの領域に限られるようである。半径に上限がある

のは、これより外では磁場の捻れの伝播(=アルフヴェン速度)が脱出速度を上回るためでないかと予想している。空間分解能を上げ、初期磁場が弱いモデルも計算し、これらのことを確かめつつ磁気エネルギーの解放が大きな爆発を引き起こす条件を求める。

### 3. 研究の方法

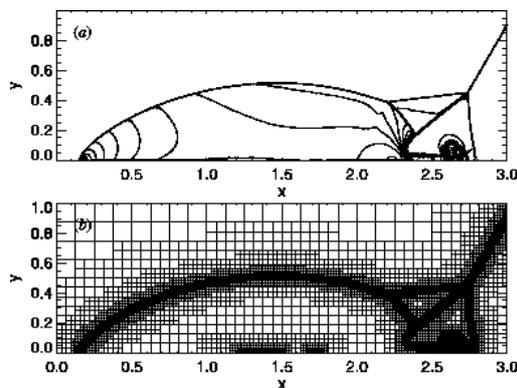
自己重力と磁場の効果を取り入れた3次元磁気流体力学シミュレーションコードを開発し、大質量星が鉄コアの重力崩壊と超新星爆発を起こす過程を追跡する。開発にあたっては、(1) 半径 10 km から数千 km にわたる広い範囲で高い空間分解を達成する、(2) 衝撃波を鮮明に捉える、(3) 任意の初期磁場分布を取り扱える、(4) 並列型のスーパーコンピュータで高速に動作する、という目標を設定する。これらの目標は解適合格子(Adaptive Mesh Refinement)、衝撃波を鮮明に捉える数値流束を組み合わせ、MPI と Fortran で計算コードを実装することにより実現する。

### 4. 研究成果

#### (1) 数値シミュレーションコードの開発

超新星爆発の3次元磁気流体シミュレーションを行う計算コードを開発した。このコードは次に述べる様々な特色を持っている。

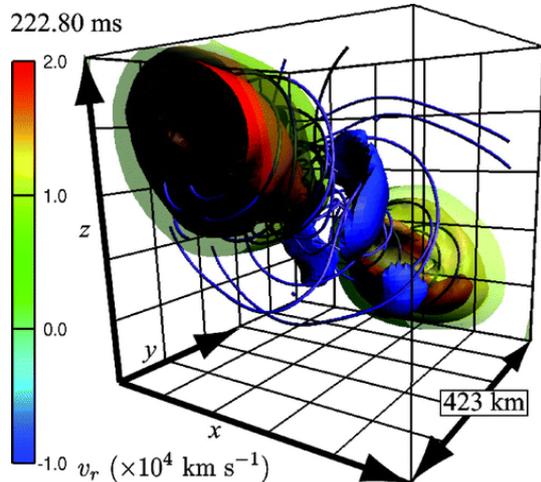
- (1) 解適合格子(Adaptive Mesh Refinement)を採用することにより、半径 10 km から半径数千 km までの広い範囲を高い角度分解能( $\Delta r/r$ )で計算できる。(2) 衝撃波を数値的なこぶや振動無しに鮮明に捉えられる。(3) 長時間追跡しても全エネルギーが保たれる。(4) 縮退した電子による圧力を考慮できる。(5) 数百台の演算器(CPU)を搭載した並列型計算機でも高い並列加速率を実現できる。[雑誌論文(1), (4)]



解適合格子での2重マッハ円盤テスト。上は求めた解、下は計算格子の分布を表す。(Matsumoto 2007)

#### (2) 超新星爆発への3次元磁気流体効果

開発途中で作成した多層格子(Nested Grid)を利用したコードを利用し、超新星爆発の3次元数値シミュレーションを初めて行い、結果を学術雑誌[雑誌論文(5)]で公表すると共に、多数の国際学会で口頭発表を行った。

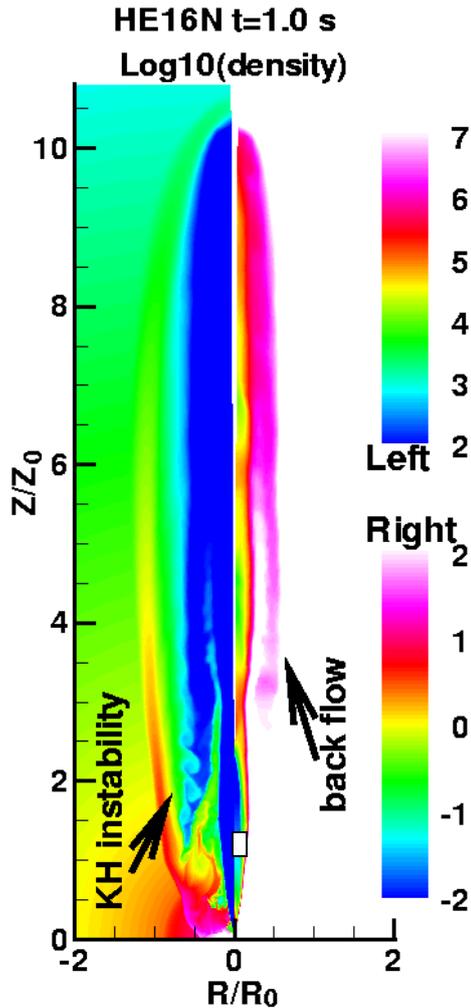


3次元磁気流体力学シミュレーションによる双極ジェット。赤と緑は高速に吹き出すガスの分布を、青は高速に落下するガスの分布を表している。また紫の線は磁力線を表している。(Mikami et al. 2008)

シミュレーションでは超新星の親星が、回転に対して傾いた磁場をもつと仮定した。磁場の進化は大きく3段階に分けられる。最初に磁場は重力収縮により動径方向に引き延ばされるとともに、密度の2/3乗に比例して強められる。中心密度が $4.5 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ に達すると収縮は止まり(バウンス)、磁場は回転により非動径方向に引き延ばされる。引き延ばされることにより回転軸に対して磁場は、向きの異なる磁力線と互い違いの層を成すことが初めて確認された。収縮が止まってから数十ミリ秒が経過すると、回転により捻られた磁場が上空へと伝播してゆき、最後には磁気ジェットを放出する。磁場や回転の速度を変えモデルの比較により、収縮の停止からジェット放出までの時間差は、磁気捻れが伝わる時間(=アルフヴェン経過時間)波と等しいことが見いだされた。またジェットは初期の回転軸方向を向くことも明らかになった。さらにジェットの脇を、ガスが高速で落下することや、回転軸に垂直な方向に外向きの低速な流れが発生することを新たに見いだした。

(3) 相対論的ジェットの放射角分布

超新星爆発の中でも極めて大きなエネルギーを解放し、光速に近いジェットを放出するものは、 $\gamma$ 線バーストとして観測されると期待される。ジェットの速度が光速に近づくと、相対論効果に放射の指向性が高められる。この効果を調べるために、ローレンツ因子が100の高速ジェットの伝播をシミュレーションし、放射の指向性を調べた。超新星の親星の質量が軽いほど、放射が強い指向性を示すことを確認した[雑誌論文(6)]。



相対論的な2次元軸対称ジェットの伝播。右は低密度ガスの、左は高密度ガスの分布をカラーで表している(Mizuta & Aloy 2009)。

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 6 件)

- ① A. Mizuta and M. A. Aloy, Angular Energy Distribution of Collapsar-Jets, *Astrophys. J.*, 印刷中 (2009) 査読有

- ② M. N. Machida, K. Tomisaka, T. Matsumoto, S. Inutsuka, Formation Scenario for Wide and Close Binary Systems, *Astrophys. J.*, *Astrophys. J.*, Vol. 677, pp. 327-347 (2008) 査読有

- ③ T. Hanawa and A. Soeda, Critical Accretion Rate for Triggered Star Formation, *Astrophys. J.*, vol. 686, pp. 417-422 (2008) 査読有

- ④ T. Hanawa, H. Mikami, and T. Matsumoto, Improving Shock Irregularities Based on the Characteristics of the MHD Equations, *J. Comp. Phys.*, Vol. 227, pp. 7952-7976 (2008) 査読有

- ⑤ H. Mikami, Y. Sato, T. Matsumoto, and T. Hanawa, Three-dimensional Magneto-hydrodynamical Simulations of a Core-Collapse Supernova, *Astrophys. J.*, vol. 683, pp. 357-374 (2008) 査読有

- ⑥ T. Matsumoto, Self-Gravitational Magneto-hydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement, *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol. 59, pp. 905-927 (2007) 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① 三上 隼人, 重力崩壊型超新星における定在衝撃波へのMHDジェットの効果, 日本天文学会, 2009年3月24日, 大阪府立大学

- ② 松本 倫明, 磁気乱流を持った分子雲コアの収縮とアウトフローの放出, 日本天文学会, 2009年3月25日, 大阪府立大学

- ③ H. Mikami, The 3D MHD Core Collapse Supernova, The 3<sup>rd</sup> East-Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2008年11月10日 南京国際会議場 南京 中華人民共和国

- ④ H. Mikami, The 3D MHD effects for a Core Collapse Supernova Explosion, Workshop: Asymmetric Instabilities in Stellar Core Collapse, 2008年7月7日, H. Poincare 研究所 パリ フランス

- ⑤ A. Mizuta, SN-GRB jet, 14<sup>th</sup> Workshop on "Nuclear Astrophysics", 2008年3月13日, Ringberg Castle ドイツ

- ⑥ H. Mikami, The 3D MHD effects for Core Collapse Supernova Explosion, 14<sup>th</sup> Workshop on "Nuclear Astrophysics", 2008年3月13日, Ringberg Castle ドイツ

- ⑦ 水田 晃, 相対論的流体の数値解法の改良: 法線成分と接線成分の分離, 日本天文学会, 2007年9月27日, 岐阜大学

- ⑧ 花輪 知幸, MHD衝撃波のカーブクル不安定とその回避法, 日本天文学会, 2007年9月27日, 岐阜大学

- ⑨ 松本 倫明, 天文学における AMR(適合細分化格子)の最近の動向と実際, 日本天文学

会, 2007年9月27日, 岐阜大学

⑩ H. Mikami, The Three Dimensional MHD Effects for Core Collapse Supernova Explosion, Astrophysics of Compact Objects, 2007年7月2日, Huanghan 中華人民共和国

⑪ T. Hanawa, Care for the Carbuncle Instability Based on the Characteristics of the MHD Equations, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, 2007年6月14日, Paris フランス

[図書] (計 2件)

① T. Hanawa, H. Mikami, and T. Matsumoto, Astron. Soc. Pacific, Numerical Modeling of Space Plasma Flows ASTRONUM-2007 (ed. N.V. Pogorelov, E. Audit, and G. Zank) (2008年) 共著 pp.259-264

② 富坂 幸治, 花輪 知幸, 牧野 淳一郎 編, 日本評論社, シミュレーション天文学 (現代の天文学 第14巻) (2007年) 総頁数 324頁

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

## 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

### (2) 研究分担者

水田 晃 (Mizuta Akira)  
千葉大学・先進科学センター・特任教員  
研究者番号: 90402817  
松本 倫明 (Matsumoto Tomoaki)  
法政大学・人間環境学部・准教授  
研究者番号: 60308004

### (3) 連携研究者

なし