

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840050

研究課題名（和文）重力崩壊型超新星爆発とその周辺の天体現象

研究課題名（英文）Core-collapse supernovae and involved astronomical phenomena

研究代表者

澤井 秀朋 (SAWAI HIDETOMO)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：70514199

研究成果の概要（和文）：磁気超新星は今世紀に入ってから大きな注目を集め、数値的研究が盛んに行われてきた。それらにより、磁気超新星のダイナミクスについて多くの理解が得られたが、崩壊前に弱磁場をもつコアのダイナミクスや乱流電気抵抗の効果についてはほとんど調べられてこなかった。本研究ではそれらを明らかにすべく、数値計算による研究を進めた。弱磁場を持つコアのダイナミクスについては数値コードの開発の遅れにより数値計算が行えなかった。一方、乱流電気抵抗については2次元軸対称の抵抗磁気流体計算を行った。計算の結果、乱流電気抵抗の効果によって爆発のエネルギー、衝撃波面の縦横比がともに小さくなる傾向にあることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Magnetized supernovae have attracted attention since the beginning of this century. Although numerical works so far have yielded insights about the dynamics of magnetized supernovae, neither the evolution of weakly-magnetized core-collapse nor effects of turbulent resistivity have been well understood. We have started this research program to clarify these matters. Since a development of a numerical code delayed, we could not carry out computations for weakly-magnetized cores. For effects of turbulent resistivity, we have done two-dimensional resistive magnetohydrodynamic simulations. As a result of computations, we found that the turbulent resistivity decreases both explosion energy and aspect ratio of shock surface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	890,000	267,000	1,157,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,790,000	537,000	2,327,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：重力崩壊型超新星爆発、磁気流体、数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発（以下便宜上超新星と呼ぶ）は質量が太陽の8倍以上の重い星が進化の最後に引き起こす爆発的現象のことである。爆発のエネルギー源は重力エネルギー

であり、爆発後の残骸として中性子星（パルサー）やブラックホールが残ると考えられている。超新星の数値シミュレーションは約半世紀にわたって数多く行われてきたが、そのいずれも爆発を再現できていない。

超新星爆発メカニズムの候補のひとつとして、古くに Leblan & Wilson (1970, ApJ, 161, 541) が磁場と回転 (自転) による駆動を提案していた (磁気超新星)。このメカニズムが働くにはマグネター級の磁束が必要であるため、爆発の結果残されるコンパクト天体は通常の電波パルサーではなく、マグネターであると考えられる。

マグネターの存在が観測と理論の双方から広く認められるようになったのは前世紀末であるが、今世紀に入ってから磁気超新星はマグネターを生み出す超新星として注目を集め始めた。特に数値計算による研究は数多く行われ、磁場・回転の初期パラメタの違いによるダイナミクスの傾向、強磁場からの磁気回転不安定性、放出される重力波、一般相対論の効果、ニュートリノ加熱の効果、マグネターの反跳、元素合成などが調べられてきた。これにより、磁気超新星のダイナミクスやその周辺の物理現象はだいぶ明らかになってきた。

しかし、これまでの数値的研究はほとんどの場合初期強磁場の枠組みで行われており、初期弱磁場が磁気回転不安定や対流不安定により増幅されダイナミクスに影響を及ぼすというシナリオはあまり調べられてこなかった。また、磁気回転不安定や対流不安定は飽和状態において乱流状態に達すると考えられている。乱流状態では実効的な粘性 (乱流粘性) や電気抵抗 (乱流電気抵抗) が無視できない可能性があるが、それらの効果も当時までの数値計算には取り入れられていなかった。

## 2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究計画で目指すのは、磁気回転不安定や対流によって初期弱磁場がダイナミクスに効く程度まで十分に増幅されるかどうかを明らかにすること、そして、乱流電気抵抗により磁気超新星のダイナミクスがどのような影響を受けるのかを調べることであった。本来は乱流電気抵抗と同様に乱流粘性もダイナミクスに一定の効果を及ぼすと考えられるが、今回は初歩段階の研究として乱流電気抵抗のみを考慮することにした。

一方、磁気回転不安定や対流は初期強磁場の状況下でも起こりうるものであり、その際もやはり乱流電気抵抗がダイナミクスに影響を与える可能性がある。これらについては初期強磁場の枠組みでも調べられた例がなかったが、これは本研究計画のテーマに関連する重要な事柄である。研究期間中にその認識を新たにした研究代表者は、初期強磁場の状況下での乱流電気抵抗の働きについても明らかにしていくことにした。

## 3. 研究の方法

研究は研究代表者が開発した抵抗磁気流体数値コードを用いて行った。これは Kurganov & Tadmor (2000, Journal of Computational Physics 160, 241) の高精度中心差分法を抵抗磁気流体に適用したものであり、磁場の発散がゼロになる条件の保証には制限輸送 (CT) 法を用いている。コード内では自己重力も解いており、状態方程式はこの分野で現実的状态方程式としてよく使われる Shen の状態方程式 (Shen et al. 1998, Nuclear Physics A, 637, 435) を組み込んでいる。このコードは超新星への適用も含めて、必要なテスト計算をクリアしている。

### (1) 初期弱磁場の研究

磁気回転超新星において弱磁場増幅の研究が今まであまり行われてこなかった理由は計算機能力の限界に起因するものである。超新星のダイナミクスを追うためには半径約 1000 km のコアを計算領域とする必要があるが、その多くの領域で 1 m 程度の空間解像度が必要であり、コア全体を解くグローバル計算は難しい。コアの一部を計算領域として取り出したローカル計算も考えられるが、その場合、物質の降着は考慮されず、成長した磁場がグローバルなダイナミクスへ及ぼす影響も調べられない。そこで申請者は新しいアイデアとしてグローバル・ローカル融合計算を考えた。グローバル・ローカル融合計算の基本的な考え方はグローバル計算とローカル計算を同時に行い、それぞれの結果をお互いの時間発展に反映させるというものである。

まずはこの計算法を実現する数値コードを開発し、それを用いて初期弱磁場を持つ超新星爆発のダイナミクスを数値的に調べるのが当初の予定であった。しかし、数値コードの開発が難航し、本研究期間内に初期弱磁場超新星の研究成果を得ることはできなかった。

### (2) 初期強磁場の研究

こちらの研究に関しては特に新たな数値コードの開発が必要なく、上述の抵抗磁気流体数値コードをそのまま用いて研究を進めることが出来た。計算は 2 次元軸対称で行い、15 太陽質量の星の中心 1.7 太陽質量を計算領域とした。

初期条件として磁気エネルギーと重力エネルギーの比が 0.5 % になるような双極型磁場と、回転エネルギーと重力エネルギーの比が 0.5 % になるようなゆるい差動回転をコアに与えた。これらのパラメタは先行研究で行われてきた典型的な磁気超新星計算と同様のものである。乱流電気抵抗は空間的・時間的

に一定とし、Thompson et al. (2005, ApJ 620, 861) の見積もりを参考にした値をとった。計算モデルは乱流電気抵抗を  $10^{13}$ ,  $10^{14}$  cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> にとった 2 種類の抵抗モデルと、乱流電気抵抗を与えない理想モデルの計 3 つである。

#### 4. 研究成果

本研究では初期強磁場の状況下において乱流電気抵抗がダイナミクスに与える影響が明らかになった。

まずは理想モデルにおけるダイナミクスの時間発展の様子を述べる。計算開始後コアは崩壊を始め、140 ミリ秒程度で中心が核密度に達し、核力による跳ね返り（バウンス）が起こった。崩壊によって質量が中心付近に集まると同時に、角運動量の保存によって回転エネルギーが、磁束の保存によって磁気エネルギーが増加した。バウンスの時点で優位な磁場成分はポロイダル成分であった。バウンス後のコアはとくに原始中性子星の表面付近で強い差動回転プロファイルを持っているが、それが崩壊による圧縮で強くなったポロイダル磁場を巻き込むことで、強いトロイダル磁場が生成され始めた。バウンス後 1 ミリ秒後にはトロイダル磁場の大きさがポロイダル磁場を凌駕し、その数ミリ秒後には卓越した磁気圧によって、物質を外に押し始めた。同時に物質の運動はトロイダル磁場によるフープ・ストレスで制限され、回転軸に沿ったジェットが形成されていった。バウンス後約 40 ミリ秒後には放出された物質の先端が半径 2000 km に達し、その時の爆発エネルギーは  $2.6 \times 10^{51}$  erg という典型的な超新星の値であった。図 1 は理想モデルにおいて衝撃波の先端が 1000 km 付近に達したバウンス後約 45 ms 後の様子を描いたものであり、カラーマップは磁気圧と圧力の比（対数スケ

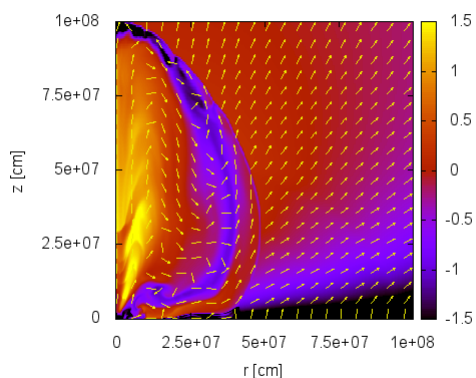


図 1：理想モデルにおいて衝撃波の先端が 1000 km 付近に達した際の磁気圧・圧力の比とポロイダル磁場ベクトルの向き

ール)、矢印はポロイダル磁場ベクトルの向きを表わしている。そこからは、磁場の強い回転軸付近に沿ってジェットが形成されている様子が分かる。

2 つの抵抗モデルは、バウンスまでは理想モデルとほぼ同じ時間発展をした。バウンスが起こる時刻も回転エネルギーや磁気エネルギーの増加の仕方も理想モデルとほとんど違いがなかった。しかし、バウンス後はダイナミクスの振る舞いが理想モデルからずれてきた。ここでは乱流電気抵抗が強い方のモデルを例にとって記述する。

理想モデルで爆発の駆動力となっていたのは差動回転によって増幅されたトロイダル磁場の磁気圧であった。抵抗モデルでも同様に、差動回転が磁場のトロイダル成分を生成する。しかし、電気抵抗の効果により磁場の巻き込みが効率的に行われず、生成されるトロイダル磁場の強さは、理想モデルの半分程度であった。その結果爆発の駆動力が弱まり、衝撃波の先端が 2000 km に達した際の爆発エネルギーは  $1.3 \times 10^{51}$  erg と、やはり理想モデルの半分程度であった。図 1 と図 2 を比較すると抵抗モデルは理想モデルに比べて、磁気圧があまり働いていないことが分かる。ちなみに乱流電気抵抗が弱い方のモデルは理想モデルからのずれが比較的小さく、上記と同じ基準で評価した爆発のエネルギーは  $2.4 \times 10^{51}$  erg であった。

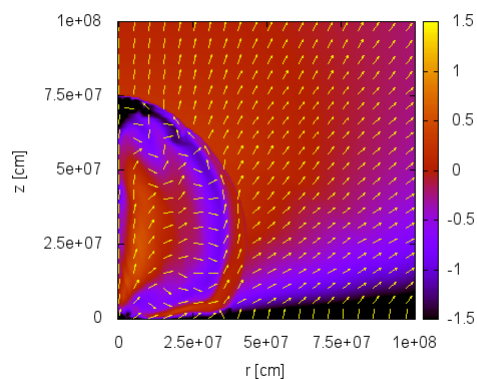


図 2：乱流抵抗が強いモデルについて描いた図 1 と同様の図（時刻も図 1 と同様）

こうして、抵抗モデルでは乱流電気抵抗の働きによって磁場を効率的に増幅できず、爆発が弱まることが分かった。これは爆発の燃料となる回転エネルギーを効率よく使えていないことを意味する。では、同じ量の回転エネルギーを消費した際の各モデルの爆発エネルギーは同じ程度になるのだろうか。もしそうであれば、抵抗モデルも長い時間をかけて理想モデルと同程度の爆発エネルギー

一に達することになる。これを調べるために、

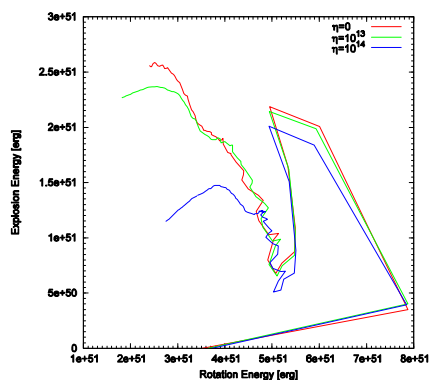


図3：残された回転エネルギーと爆発エネルギーの関係

残された回転エネルギーを時間軸の代わりに用いた爆発エネルギーの発展を評価した(図3)。これをみると、同じだけの回転エネルギーを消費しても抵抗モデルは小さな爆発エネルギーしか生み出せていないことが分かる。回転によって増幅された磁場は物質を外に押しやろうとするが、実際に外に運ぶためには外向きの力が重力を上回る必要がある。そうでない場合、物質は中心に向かって降着し、結果回転エネルギーは無駄に使われたことになる。この図はそれが抵抗モデルで起きていることを示唆している。

乱流電気抵抗の効果としても一つ明らかになったのが、衝撃波面の縦横比が小さくなるというものである。図1と図2を見比べると、極側の衝撃波先端位置は理想モデルの方が遠いのに対して、赤道側の位置は両モデルともあまり変わらない。各モデルで縦横比の時間発展を比較すると、乱流電気抵抗が強いほど、縦横比が小さくなる傾向が明らかになった。これは図1から分かる通り、極付近に比べて赤道付近は磁場が弱く、もともとあまり磁場がダイナミクスに効かないためである。

以上のように、本研究では2次元軸対称の抵抗磁気流体計算を行い、乱流電気抵抗が磁気超新星のダイナミクスに与える影響を調べた。その結果、乱流による実効的な電気抵抗の増加がダイナミクスに一定の影響を及ぼすことが明らかになった。爆発を弱め、衝撃波の縦横比を小さくするというのが本研究によって明らかになった乱流電気抵抗の効果である。

## 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1件)

- ① Hidetomo Sawai, Kei Kotake, Shoichi

Yamada, "Magnetorotational Supernovae with Resistivities, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on OPTICS - ASTROPHYSICS - ASTRONOMY (ICOOA '10), pp. 178-184, 2010, 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 澤井秀朋、固武慶、山田章一、「強磁場超新星における磁気散逸の働き」、2011年3月1日-3日、超新星からのマルチメッセンジャー超新星研究会2011、国立天文台
- ② Hidetomo Sawai, Kei Kotake, Shoichi Yamada, "Effects of magnetic dissipation in a collapse of massive star", February 14 - 18, 2011, RädlerFest: Alpha Effect and Beyond, Stockholm, Sweden
- ③ 澤井秀朋、固武慶、山田章一、「磁気超新星で電気抵抗の果たす役割」、2010年9月22日-24日、日本天文学会秋季年会、金沢大学
- ④ Hidetomo Sawai, Kei Kotake, Shoichi Yamada, "Magnetorotational Supernovae with Resistivities", February 19 - 21, 2010, 5th International Conference on OPTICS - ASTROPHYSICS - ASTRONOMY, Cambridge, UK
- ⑤ 澤井秀朋、固武慶、山田章一、「磁気粘性を考慮した強磁場超新星の数値計算」、2009年11月16日-18日、宇宙流体力学のフロンティア、京都大学基礎物理学研究所
- ⑥ 澤井秀朋、固武慶、山田章一、「強磁場超新星における磁気粘性の効果」、2009年9月14日-16日、日本天文学会秋季年会、山口大学

他、3件

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤井 秀朋 (SAWAI HIDETOMO)  
早稲田大学・理工学術院・助手  
研究者番号：70514199