

學位審查報告書

(ふりがな)	まつもと じん
氏 名	松本 仁
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 年 月 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目)	
Special Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Astrophysical Outflows (天体アウトフローの特殊相対論的電磁流体シミュレーション)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 柴田 一成 教授 長 滝 重 博 准教授 嶺 重 慎 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	松本 仁
論文題目	Special Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Astrophysical Outflows		

(論文内容の要旨)

天体から重力の支配を振り切って外側へプラズマが流れ出す、天体アウトフローと呼ばれる現象は、様々な空間スケールで存在する普遍的な天体現象である。天体アウトフローは、駆動源である中心天体付近の多くの情報を含んでいるため、その力学進化を明らかにすることは、中心天体の物理的な状況に示唆を与えるとともに、エネルギーや角運動量、物質の輸送といった周囲の環境への影響の解明にもつながる。本論文では高密度星表面における磁氣的爆発がもたらすアウトフローの非線形ダイナミクス、および、相対論的ジェットと周囲の媒質との相互作用がアウトフローのダイナミクスに与える影響を調べた。

まず、高密度星の表面で磁氣的爆発が起きた際の物質の力学進化を相対論的電磁流体シミュレーションを用いて調べた。その結果、磁氣的爆発によって駆動されるアウトフローの速度は、高密度星の表面のアルヴェン速度の $1/2$ 乗に比例し、その前面には強い衝撃波が形成されることがわかった。また、アウトフロー速度は星周物質の密度に強く依存し、星周密度が急激に減少する場合に、自己相似的な相対論的アウトフローが形成されることを発見した。アウトフローの駆動源は高密度星の磁気エネルギーである。しかし、その相対論的速度への加速は、星周物質の急激な密度勾配を衝撃波が伝搬するために生じており、純粋に流体力学的な効果である。

次に、相対論的高温ジェットと周囲の媒質との境界で生じる希薄波同士の相互作用がジェットに与える影響を、相対論的流体シミュレーションを用いて調べた。ジェットの伝搬方向に対し垂直な方向のジェットの構造を模したシンプルな一次元シミュレーションにより、相対論的高温ジェット中で繰り返して生じる希薄波の相互作用が、ジェット内での内部エネルギーと運動エネルギーの転換を反復して引き起こし、ジェットの速度が振動することを発見した。ジェットの運動エネルギーの増減は、ジェット内に速度差を生じさせ、不均一なジェットが形成されることを予言する。そこでジェットの伝搬方向も考慮した二次元シミュレーションを行った結果、一次元計算で明らかにしたジェットの振動がジェットの伝搬方向に対し、準周期的な構造を形成し、速度の不均一なジェットを生むことを明らかにした。また、相対論的高温ジェットが圧力勾配の存在する媒質中を伝搬する際には、希薄波の相互作用領域が自己相似的に広がることを示した。

さらに、ジェットの断面の進化を追う二次元計算を行い、相対論的高温ジェットの実効的な慣性がジェットを取り囲む媒質の慣性よりも大きい場合、ジェットが振動する際にジェットの境界で Rayleigh-Taylor 不安定性と Richtmyer-Meshkov 不安定性が成長し、ジェットの構造を著しく乱すことを明らかにした。

これらの研究はアウトフローと周囲の媒質との相互作用がアウトフローの力学進化に与える影響が大きいことを示すものであり、自己相似発展といったアウトフローの発展の仕方の特徴は、密度や圧力構造といった伝搬する周囲の媒質の流体力学的な構造に大きく依存することを示すものである。

(論文審査の結果の要旨)

本博士論文は、高密度星の表面での磁氣的爆発にともなうアウトフローの非線形ダイナミクスと、相対論的ジェットと伝搬する媒質の相互作用がジェットのダイナミクスに与える影響を相対論的数値シミュレーションを用いて詳しく調べた結果をまとめたものである。

磁氣的爆発にともなう天体アウトフローのプロトタイプは、太陽フレアにともなうコロナ質量放出である。太陽では自転速度が遅いので、太陽大気中に磁気エネルギーが蓄積される過程はゆっくりしており準静的である。ところが、高密度星の場合、とくにその生成過程に対応するガンマ線バーストの中心エンジンなどでは、星の自転速度の効果が直接ダイナミクスに影響を及ぼす。本博士論文の新しい点は、高密度星における磁氣的爆発アウトフローのモデルに太陽フレア・モデルを単に適用しただけでなく、太陽ではありえないが、高密度星では起こりうる、今まで調べられたことのない極端な物理量の範囲（差動自転の速度がアルヴェン速度に比べて無視できないくらい大きい場合）を世界で初めて丁寧に調べたことにある。これより、従来知られていなかった新しい磁氣的天体アウトフロー準定常解が存在することを、数値シミュレーションにより発見した。また、そのアウトフロー速度の磁場強度依存性は、（降着円盤などで考えられていた）従来の磁力線が開いたシステムにおけるアウトフローの定常理論の枠組みでは発見できなかった新しい物理であり、申請者の電磁流体现象への深い理解と洞察に基づいた成果である。

次に、申請者は相対論的高温ジェットの圧力が周辺媒質の圧力よりも大きい場合にジェットの境界で生じる希薄波がジェットに与える影響を詳細に調べた。本研究のユニークな点は、ジェットの伝搬方向に対し垂直に伝搬する希薄波同士の相互作用に着眼したところにある。その結果、相対論的ジェット中における斜め衝撃波の形成やローレンツ因子の増加などの複雑な二次元構造を、伝搬方向に垂直な方向の一次元の物理だけで説明することに成功した。一次元化されたモデルはシンプルであるがゆえに理解がしやすく、ジェットの物理をさらに解明するうえで役に立つ。実際、一次元計算から導かれたスケーリング則を使ってジェット中の構造の自己相似発展を明らかにしている。さらに、相対論的高温ジェットの断面の進化を追う二次元計算では、希薄波の相互作用の影響により、ジェットの境界で Rayleigh-Taylor 不安定性和 Richtmyer-Meshkov 不安定性が成長し、ジェットの構造を著しく乱すことを見出した。これらの成果は申請者の相対論的流体に対する深い理解とユニークな着眼点をもってなしえた、世界初の質の高い仕事である。

以上のように申請者の研究は、天体アウトフローの基礎的な物理に理論的側面から様々な知見をもたらした独創的かつ重要な成果である。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 3 月 30 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降