

氏 名	野 澤 さとし
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	論 理 博 第 1464 号
学位授与の日付	平 成 18 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of Nonlinear Magnetic Buoyancy Instability of Flux Sheets with Magnetic Shear (磁気シアーを持つ磁気シートの非線形磁気浮力不安定の三次元電磁流体シミュレーション)
論文調査委員	(主 査) 教 授 柴 田 一 成 教 授 長 田 哲 也 助教授 戸 谷 友 則

論 文 内 容 の 要 旨

この論文は、磁気シアーを持つ磁気シートで発生する磁気浮力不安定性の非線形発展を、三次元電磁流体シミュレーションを用いて詳細に調べたものである。また、その応用として太陽において予測される現象について議論している。

重力場中で磁氣的静水圧平衡を成す磁気シートに働く不安定性は、磁場 B と与える摂動の波数ベクトル k の方向の違いにより性質が異なる。 $B \perp k$ の場合は、交換型不安定性と呼ばれ、磁場を曲げることがない。そのため、軽い流体の上に重い流体が乗るレイリー・テイラー不安定性の一種と言え、波数に対し成長率は単調増加する。 $B // k$ の場合は、磁場の一部を曲げる変形が生まれ、磁力線の曲がりを元に戻そうという磁気張力が働く。しかし、曲がった磁力線に沿ってプラズマが流れ落ちることにより磁束管の一部は軽くなって浮力が発生する。この浮力が磁気張力に比べ大きければ、系は不安定となる。したがって、ある波数以上（ある波長以下）では不安定性は成長せず、特徴的な波長が存在する。Parker (1966) は後者の不安定性を銀河ガス円盤に適用し、銀河で観測される分子雲が特徴的な間隔で存在することを説明した。このため天文学では、この不安定性のことを Parker 不安定性と呼ぶことが多い。交換型不安定性と Parker 不安定性を総称して、磁気浮力不安定性という。

Parker 不安定性の二次元非線形数値計算は Matsumoto et al. (1988) が初めて行ない、非線形段階で衝撃波が発生することを見出した。Shibata et al. (1989) は太陽大気に応用し、自己相似解が存在することを見つけた。Parker 不安定性と対流不安定性が複合した不安定性は Nozawa et al. (1992) が調べ、特徴的な波長が存在しない対流不安定性が初期に発生しても、後に Parker 不安定性で予測される極大の波数に対応する磁気ループが発生することを明らかにした。三次元の磁気シートの不安定性の数値計算を最初に行なったのは Matsumoto and Shibata (1992), Matsumoto et al. (1993) である。三次元の場合、極大値を持たない交換型不安定性が Parker 不安定性に比べて速く成長するため、二次元の計算で報告された発展をしないと考えられるが、彼らの結果では、初期摂動を周期的に与えた場合、二次元の場合と同じように磁気ループがコロナに膨張していく発展を示した。また、Kim et al. (1998, 2002) など同様な報告をしている。しかし、水平磁場の方向が高さとともに変化する磁気シアーを有する場合の研究は無く、本研究が最初である。

初期に磁気シートでなく、捻れた磁束管を置いた計算として Matsumoto et al. (1998), Fan (2001), Magara (2004) などがある。これらの計算における捻れは実際の太陽のものより非常に強い（磁束管の太さや長さのスケールが小さい）ため、直接太陽の現象に応用するには難がある。本研究で仮定した磁気シアーはこのような捻れた磁束管が大きなスケールで存在する場合の表面付近に対応している。

本研究では、初期条件として、太陽の大気分布を仮定し、磁氣的静水圧平衡にある水平磁気シート（光球面直下）に摂動を与えることで不安定を励起させ、その後の線形または非線形発展を調べている。計算の空間は三次元としデカルト座標系 (x, y, z) を用い、 x と y は水平方向、 z は鉛直上方と設定し、水平磁場の方向を高さ (z) の関数として変化させ（これを磁気シアーと呼ぶ）、磁束浮上の違いを調べた。

その結果、次のことがわかった。磁気シアーがないとき、初期の摂動を周期的に与えた場合は Matsumoto et al. (1993)

のように磁気ループがコロナまで上昇していくが、初期摂動を局所的またはランダムに与えた場合、磁気ループは水平方向へ急激に膨張しコロナまで上昇していかない。しかし、磁気シアアがある場合は、線形の段階で交換型不安定性に対応する短波長成分の成長がおさえられ、非線形の段階でも磁気シアアがない場合よりコロナに上昇する構造ができる。ただし、この磁気シアアの効果は線形解析から予想されるほどは強くはなく、光球で膨張する磁気ループ中での鉛直方向 (z) の磁場 (B) 分布、密度 (ρ) 分布は、磁気シアアの有無に関わらず、磁気的静水圧平衡で決まる分布になる。すなわち二次元では $B \propto z^{-1}$, $\rho \propto z^{-4}$ であったが、三次元では $B \propto \exp(-z/2\Lambda)$, $\rho \propto \exp(-z/\Lambda)$ となる。ここで $\Lambda = (1 + 1/\beta)H$, ただし、 β = ガス圧/磁気圧, H は圧力スケールハイトである。このように上昇した磁場が光球中に膨張し、コロナ以下の領域が磁場で満たされた状態になることがわかった。

最後に、以上の三次元数値計算の結果を実際の太陽における浮上磁場に応用する議論をしている。それによれば、磁束の光球への浮上直後における水平方向への膨張速度は、光球上で約10分間、音速程度 (~ 10 km/s) となる。これは、地上での高精度な太陽観測や、2006年打ち上げ予定の次期太陽観測衛星 Solar-B で観測可能である。

論文審査の結果の要旨

本論文は、磁気シアアのある磁気シートにおける磁気浮力不安定性の三次元非線形時間発展を、世界で初めて詳細に調べたものである。磁気シアアの効果は、核融合プラズマを始めとする様々な分野で交換型不安定性を安定化する機構として良く知られており、本研究でも線形の段階は予想通りの結果が得られている。また、非線形の段階でも磁気シアアは交換型不安定性の効果を弱くしていることが確かめられた。しかしながら、本論文の見出した新しい点は、磁気シアアの効果はそれほど強くはない、ということである。すなわち、太陽大気にふさわしい条件下では、不安定性の非線形段階で、磁気シアアの有無にかかわらず、磁束は光球への浮上直後に水平方向に急激に膨張し、その結果、二次元で得られた自己相似膨張とは全く異なる磁気静水圧平衡が実現する、ということである。観測で知られている上昇（膨張）磁気ループを生み出すには、この後、磁束は新たに膨張を始める必要がある。これは振れた磁束管の浮上の研究で知られていた二段階膨張を一般的な見地から裏付ける結果である。また、実際の太陽浮上磁場への応用として、磁場浮上直後10分くらいの時期に、音速に達するほどのプラズマの急激な水平方向の膨張運動が観測される可能性がある、と指摘している。このような浮上直後の激しいダイナミクスは、これまで観測の困難から、全く知られていなかったが、近年発展著しい地上太陽望遠鏡や2006年打ち上げ予定の SolarB 衛星搭載の可視光望遠鏡により、発見される可能性は十分にある。もし、この理論の予想通り発見されれば、従来の太陽浮上磁場の描像を書き換えることになり、関連分野へのインパクトは非常に大きい。

以上のように、本論文は磁気シアアのある磁気シートにおける磁気浮力不安定性の三次元非線形時間発展という基礎物理過程を、世界で初めて詳細に調べ、この過程の基礎を確立しただけでなく、太陽浮上磁場の初期に激しい水平運動が起こることを予言するなど、太陽物理学にも大きなインパクトを与えている。

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、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。