

論文題名

## 高密度シートZピンチの定常状態と力学

論文要旨

平成12年4月

申請者 ムラヴィチ アレクサンドル

Zピンチとは、高温・高密度プラズマの作成方法であり、熱核融合、軟X線レーザー、超強磁場生成等の研究によく利用されている。これらの研究では、安定したプラズマの存在時間をできる限り長くすることが求められている（例えば、核融合の場合のローソン条件を求めるため等）。しかし、普遍的な円柱状Zピンチのプラズマ柱は磁気流体力学（MHD）的に不安定である。このためZピンチの圧縮には激しい不安定性が伴い、プラズマ密度・温度・電流等の分布は時間的・空間的に非常に不均等となる。このMHD不安定性の増加速度はプラズマ境での磁場の曲率に依存し、柱の半径が小さくなる（プラズマ密度は高くなる）と共に加速する。この事実は上記の研究目的達成において大きな障害であった。

近年、MHD不安定性の破壊的な影響を減少させるためにシートZピンチが考案された。シートZピンチではプラズマ境での磁場の曲率が部分的に消失するが、この部分はMHD不安定性の発生に対し中立である。又、シートZピンチの中央部分での磁場の曲率を負数にすることが可能であり、この部分のプラズマは不安定性の発生に対し中立の状態を維持するばかりではなく安定となる。シートZピンチの両端にはMHD不安定性が円柱状Zピンチと同様に発生するが、その影響が中央部分に及ぶには普遍的なZピンチに比較すると遥かに長時間を要する。中央部分に生成された高温・高密度の安定したプラズマの存在がより長時間であるということは核融合等の実験を成功させるために有効である。つまり、上記実験の目的達成のためにはシートZピンチは円柱状Zピンチより効果的であると考えられる。

本論文ではシートZピンチの定常状態と過渡過程を課題とする理論及び数値的計算研究が行なわれた。

本論文の構成は下記の通りである。

第1章では、Zピンチの概念、主要な適用分野及び普遍的なタイプの一覧を概観した。古典的なZピンチは例外なく円柱状であることを強調した。高密度円柱状Zピンチが $m=0$ 、1のMHD不安定性に影響され易いという事実の理由を述べ、この問題の解決を目的とする従来の研

究動向を概観した。次いで、本研究の様式を述べた。

第2章では、シートZピンチの概要と本論文が用いる基本的な定義を述べた。又、本研究が基礎とする方程式を示した。無限大の幅とプラズマの温度は空間的に一様なシートZピンチの定常状態パラメーター関係を創出した。定常電流については、孤立した円柱Zピンチではほぼ一定の値のPease-Braginskii (PB) 電流となるが、シートZピンチではシートの幅に依存し、PB電流を超過させることも可能であった。シートZピンチ安定化分析も行った。

第3章では、有限な熱伝導率及び自己放射吸収を考慮に入れて、無限に幅広い厚さ  $2b$  のプラズマシートの定常状態を一次元モデルの元で解析した。

Bremsstrahlung放射とBraginskii熱伝導率の仮説上、最大温度と最低温度の地位に基づき類別すると、三つの温度分布のタイプが起こり得るという結論となった。実験の観点から重要なプラズマ境での温度  $T_b$  とガス圧  $p_b$  のできる限り低いタイプの解は従来論文より深く研究した。無次元熱伝導率パラメーター  $\alpha_{ic}$  と放射強度パラメーター  $\alpha_b$  が決まった値であれば、境ガス圧と中央ガス圧率  $p_b/p_0$  をある値より低くさせることは不可能であるということが明らかとなった。パラメーター  $p_b/p_0$  の最低値を  $\alpha_{ic}$  と  $\alpha_b$  の関数として求め、二次元グラフに表示した。

放射吸収の無視が可能な場合、シートZピンチの厚さはプラズマ温度に依存せず、面電流に反比例する： $b \propto I/I^*$ 。高密度シートZピンチでは、吸収された自己放射部分の放射量が増大すると厚さは温度にも面電流にも依存する： $b \propto I^{*2}/T^{11/4}$ 。

第4章では、復路電流導体間に生成されるシートZピンチの定常状態を二次元のモデル上で研究した。ピンチの断面形は主にプラズマ全電流と導体の形状により決まる。全電流値がPB電流ならば、断面形は円に近く普遍的な円柱状Zピンチと殆ど変わらない。しかし、全電流の増加と共にピンチの幅  $2a$  は全電流とほぼ正比例に拡張するが、復路電流磁場の影響で厚さ  $2b$  の拡張は停止する。復路導体間の距離が  $2d$  ならば、最大の厚さは  $1.5d$  を越えることはない。このためピンチの断面形が変わり、 $a \gg b$  の場合にシートとなる。幅  $2l$  の平行平板復路電流導体間には幅  $2a = 2l + d$  までのシートZピンチ生成が可能である、つまりシートの最大幅は導体の幅で決まる。

二つの双曲復路電流導体間の負数曲率の中央部分の磁力線シートZピンチ（負曲シート）の生成が本論文の計算により可能となり、プラズマの境は不安定性の発生に対し中立を保つだけでなく安定化した。しかし、この場合、導体の双曲率の上昇と共に、シートの最大幅は小さくなる。このため幅広い負曲シート生成には小さい双曲率の復路電流導体の使用が必要である。

第5章では、平行平板復路電流導体間に生成されたシートの幅と厚さの力学を一次元モデル

上でそれぞれ研究した。孤立した円柱Zピンチの磁場力は、測定点からZピンチまでの距離に反比例する： $B \propto 1/r$ 。しかし、Appendixでの証明の通り、復路導体間のy-磁場は遥かに速く低下する： $B_y \propto \exp(-\pi x/2d)$ 。これにより、幅広い ( $a \gg d$ ) シートの中央部分の両端のy-磁場の無視が可能となる。従って、中央部分の力学研究のためにx-移動を無視し、y-座標におけるプラズマパラメーターだけの一次元解析することは道理である。この力学のタイプを“厚さの力学”と名付けた。

“厚さの力学”については理論分析と数値解析を行った。理論分析ではシートの厚さと温度の時間依存の公式をひきだした。最初に拡張するシートの厚さの最大値を求めた。これをもとに、厚さを最初に復路導体まで拡張しない様なシートでの抵抗と面電流増加率の関係を算定した。数値解析では、初期熱伝導率は低くとも、圧縮されたシートZピンチでの温度は極めて均等な分布を持つということが明らかとなった。粘度は“厚さの力学”に大きな影響を及ぼす。シートについては無粘度と面電流増加率が低い場合、理論分析と数値解析の結果に殆ど違いはない。圧縮されたシートの電流密度分布も甚だ均一である。面電流増加率が高い場合、最初のシートの圧縮は衝撃波を伴う。その結果、初期のシートパラメーター分布は非常に不均等となる。圧縮された高粘度のシートでは、面電流増加率に拘わらず電流密度分布は不均等である。なぜなら、高粘度によりプラズマの動きが鈍化し、温度の上昇と共に電流伝導率が上昇するからである。結局、磁場の拡散時間が大きくなり、電流はスキーン層で流れるようになる。次に、数値解析に基づきシートZピンチでの均等圧縮パラメーターを盤定した：プラズマ密度  $n_0 > 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、面電流増加率  $dI^*/dt < 4.2 \times 10^2 n_0^{1/2} \text{ A/(m} \times \text{s)}$ 。

両端での磁場  $b_x$  と  $b_y$  は同規模の値のため、両端力学は本質的に二次元の現象である。しかし、y-座標圧力平衡を仮定すれば、全てのプラズマパラメーターをy-積分し、シートの力学をx-座標に沿う動きとして論ずることができる。この力学のタイプを“幅の力学”と名付けた。

“幅の力学”の分析では、連続的なシート幅の圧縮に一つの障害が現れた。初期化シートの幅が広い ( $a_0 > a_{\text{max}}$ ) と、幅圧縮過程の途中、シート断面は破裂する。破裂は下記のように生じる：

- ① 両端と中央部分の形に区別が現われ、両端は中央に向かって雪鋤の移動を始める。
- ② 動いている両端の前線に衝撃波が起こる。
- ③ 雪鋤の移動により両端は大きなプラズマ量を掻き集める。その結果、全電流の大部分が両端に流れるようになる。両端磁場の影響を受け、衝撃波前線のプラズマは両端に流れ込む。
- ④ 両端と中央部分間プラズマは完全に両端へ流れ込み、シート断面に破裂が生ずる。破裂が生じない臨界初期化幅  $a_{\text{max}}$  を面電流増加率と電流伝導率の関数として求めた。

$a_{\text{max}}$  は  $10.2d$  を超えないということが明らかとなった。厚さと幅の力学の結果を併せ、連続的に圧縮する、復路導体まで増大することのないシートZピンチのパラメーター範囲を判定した。

第6章では、雪鋤モデルとMHD方程式の元で二次元シートZピンチ力学のシミュレーションを行った。

雪鋤モデルは電流増加率が高い場合に適当である。プラズマ電流はシートの境で流れており、磁場がプラズマの中に入ることはない。全幅で均等的な $y$ -圧縮を生じさせるには、中央シートの曲率は復路電流導体曲率と同規模の値でなければならない。雪鋤シートZピンチにおいて最小の圧縮は $y$ -方向であり、 $x$ -方向での圧縮は殆どない。この特徴は復路電流磁場影響の結果であると確証した。

MHDシミュレーションでは更に粘度の重要性が認められた。無次元粘度のパラメーターが0.01の場合、破裂が生じない臨界初期化幅は無粘度の状態と比較すると四倍以上の増加である： $a_{\max} > 40d$ 。初期化幅、電流伝導率と電流増加率から、二つのシートZピンチ圧縮タイプに類別ができる。“鈍い”タイプの特徴は、厚さの圧縮が小さく、過渡電流分布は均等に近い。

“速い”タイプは、初期の厚さ圧縮が強く、両端と中央部の区別が明らかであり、過渡電流分布は不均等で、電流密度は両端で高い。計算された過渡的なシート断面では中央部分に負数曲率がある。従って、この部分のプラズマはMHD不安定性の発生に対し安定を維持し、圧縮の質と安定したプラズマの存在時間は普遍的な円柱状Zピンチより良好である。

第7章は、本論文のまとめである。

以上、本研究により復路電流導体間に生成する負曲シートZピンチの中央部分の高温・高密度プラズマは普遍的な円柱状Zピンチのプラズマに比べ安定性についての改善が認められ、核融合等の実験への実用化に有望と考えられる。