

氏 名 深 尾 昌 一 郎
ふか お しょう いち ろう
 学位の種類 工 学 博 士
 学位記番号 論 工 博 第 726 号
 学位授与の日付 昭 和 49 年 11 月 25 日
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
 学位論文題目 **ACCELERATION AND HEATING OF PLASMAS DUE
 TO RECONNECTION OF MAGNETIC LINES OF
 FORCE**
 (磁力線の再結合によるプラズマの加速及び加熱に関する研究)

論文調査委員 (主 査)
 教授 木村磐根 教授 宇尾光治 教授 板谷良平 教授 加藤 進

論 文 内 容 の 要 旨

この論文はプラズマ中の反平行磁場が、その磁力線に直角方向から加えられたプラズマの流れにより X 形につながる結果、プラズマ粒子の加速あるいは加熱が起る機構を数値実験で明らかにすると共に、これらと実験室内プラズマ中でのある種の粒子加速の現象や、太陽爆発による粒子の放出機構などとの関連について調べたもので 6 章からなっている。

第 1 章は序論で、まず磁力線の定義と数式的表現、および磁力線の運動の定義と数式的表現を明確にし、その後磁力線のつなぎ変り(再結合)ということの意味を説明している。そして反平行磁場の間に起る磁力線の再結合は、X 形の中性点付近に限られる現象であることを述べている。次に磁力線の再結合が関連する具体例として太陽爆発や X 線星といった宇宙物理的現象のほか、地球をとりまく磁気圏の尾部で起るオーロラ粒子の加速、および実験室プラズマ中で起る上記太陽爆発と類似な現象などをあげ、磁力線の再結合によって荷電粒子が加速をうける機構がありうることをのべている。

第 2 章では磁気中性点付近の磁力線の振舞につき位相解析的考察をしている。すなわち磁気中性点には X 形と O 形があることが知られているが、このほかに著者は渦巻形や節形などの磁気中性点もありうることを指摘している。またこのような渦巻形中性点の時間的推移の様子を定性的に検討し、渦巻状の流体の運動によって電流密度が極端に増大し、ある瞬間に流体が放線方向にピンチすると同時に蓄えられた磁気エネルギーが放出されることを明らかにしている。

第 3 章では X 形磁気中性点の定常的な再結合について、これまでに太陽爆発の機構を説明しようとして他の研究者達が行った研究結果を紹介している。従来磁力線の再結合の速さをきめる条件につき 2 つの相反する考え方があるが、その一つは磁力線の再結合が起る磁気中性点近傍の導電率が重要であるという立場であり、他は中性点よりずっと遠方のプラズマの運動状態が重要な影響力をもつという立場である。この大きな相違点を明らかにするために、系を記述する全方程式を従来の解析的近似法によらず数値的に解くことが必要であることを述べている。

第4章は X 形の磁気中性点をもつような非圧縮性の有限導電率をもった粘性流体（プラズマ）中で、中性点をはさむように両側からプラズマの流入がある二次元的モデルについての定常解を数値的に求める方法とその解について述べている。系を記述する方程式は連続の式，運動方程式，マクスウェルの式およびオームの法則で，これらを連立させて数値的に解いている。方法としては空間を網目に区切り，偏微分方程式を差分方程式になおして解いている。初期状態としては安全導電性の非粘性流体に対する解を出発点としている。計算の結果として空間的な磁力線と流線の形が求められたほか，磁気中性点近傍の拡散領域から遠方の対流領域まで，遷移層を介して磁力線および流線が滑らかに変化していくこと，また強い電流の核が中性点付近にでき，そのまわりに電流の鋭いシアができることが明らかになった。

得られた結論は流体の導電率や粘性の効果が磁力線再結合の形そのものにはあまり大きな影響をもたないことである。すなわち再結合の速さに効くのは流体の磁気中性点付近の導電率や粘性ではなく，系に加わる電界や流入するプラズマの速度といった外部的な条件であるという予測が正しいことが示された。

第5章は前章と同様な条件であるが磁力線の再結合の時間的推移を追うことが目的で過渡解を求めている。従って規定する方程式は前章と同様であるが，前章では省略された磁場および流体速度の時間微係数の項が加えられている。実際の計算は初期条件と境界条件を与え前章同様差分法で解き，またポアソン形の偏微分方程式は緩和法で解いている。計算の結果は最初反平行であった磁力線と，それに直角方向から挟むように流れ込むプラズマの流れにより時間の経過と共に X 形に変形し遂には磁力線がつなぎ変わるときの磁力線の方向にプラズマが流出して行く様子が明らかとなった。この際流入したプラズマ流はほぼ 90° 方向転換してよどみなく流れ出す。しかし磁場の磁束密度はその方向転換点付近で特に増大することがみられた。

また前章の定常解と同様再結合の速さは中性点付近の導電率や粘性には依存せず，横方向から流入するプラズマ流の速度や境界付近の圧力勾配等に依存することがわかった。

この磁場の再結合に関連して粒子がエネルギーを得る二種類の過程が存在する。一つは流入側は磁場も強く間口が広いのに対して流出側は磁場強度が弱く相対的に間口が狭くなる結果流速が速くなるもので，その流出粒子のエネルギー増加分は磁気エネルギーから来るものである。他の一つは磁場の時間変動によって誘起した電界によるジュール加熱である。太陽や磁気圏尾部における磁場の再結合では前者の方が後者より重要である。

第6章では前章までに得られた数値計算の結果と実験室プラズマ内で行われた X 形磁気中性点の実験結果を比較検討している。中でもカリフォルニア大学（リバーサイド）で行われた二重形逆ピンチの実験の結果は X 形の中性点を通して磁力線の再結合が起ったことが知られているが，この実験で観測された電流密度の等高線や上記の実験によって再結合の結果はき出される粒子が中性点付近の導電率に依らないことなどは本著者の計算結果と一致することが明らかとなった。

最後に太陽爆発や地球磁気圏尾部における粒子の加速の機構が上記の計算によって得られたような X 形磁気中性点での磁力線の再結合によるものであろうことを結論している。

論文審査の結果の要旨

磁力線はプラズマの状況を記述する上でしばしば有用である。本論文は反平行磁場があって両側からプラズマ流が流入すると磁力線が変形してつなきかわり（これを磁力線の再結合という）、遂には X 形になる過程を計算機を用いて定量的に明らかにし、その過程において得られたプラズマ粒子の加速、加熱の問題をも検討したものであって、得られた結果を要約すると下記のごとくである。

1. 磁力線の再結合が起りうるためには磁気中性点の存在が必要条件になるが、磁気中性点の存在条件について位相解析的に調べ、通常知られている X 形、O 形の中性点のほかに節形や渦巻形中性点などが存在し、また渦巻形は爆発的な粒子の加速をもたらしうることを指摘した。
2. 非圧縮性の有限導電率をもつプラズマ中で X 形中性点をもつ反平行磁場の定常解を数値的に解く方法を見出した。すなわちこの系を記述する式は非線形の連立偏微分方程式であるが、これを差分法による緩和法によって解いている。
3. 上記の方法で求めた結果磁気中性点近傍の拡散領域から遠方の対流領域まで遷移層を介して磁力線および流線が滑らかに変化していくこと、また強い電流密度の核が中性点付近にでき、そのまわりに電流の鋭いシアができることを明らかにした。
4. 磁気中性点付近で磁力線の再結合の起る条件はその部分の導電率が小さくなることであるが、上記の計算の結果、もとの導電率が高くても上記の強い電流の核とシアにより導電率が低下する結果再結合が可能となることがわかり、中性点付近の初期の導電率、粘性等にはあまり依存しないこと、むしろ遠方の流入粒子の速度や電界が再結合の速さを決めることを明らかにした。
5. 次に先述の場合と同じ条件で最初反平行であった磁場が、横からのプラズマ流による圧縮により時間と共に X 形中性点を作り磁力線が再結合して行く時間的推移を追跡した。その結果 X 形中性点の成長と磁力線の再結合が起ること、また定常解と同様再結合を起す条件は中性点付近の局所的状態よりもプラズマ流の流入速度といった外的なものの方が重要であることを明確にした。
6. 上記の磁場の再結合の際、横方向から流入した粒子は磁気エネルギーの変換により加速されて最初の平行磁場の方向に押し出されて行くこと、また磁場の変動による誘起起電力はまた粒子の加熱に寄与するが、太陽や地球磁気圏における磁力線の再結合では後者は前章ほど有効でないことを明らかにした。
7. 以上の計算結果は、カリフォルニア大学（リバーサイド）で行われた二重形逆ピンチと呼ばれる磁力線再結合の実験結果をよく説明することができる。

以上要するに本論文は流れのあるプラズマ中での磁力線の振舞いについて調べたものであって解析的には困難な非線形偏微分方程式の解法としても新しい知見を加えたもので、核融合、プラズマ工学は勿論のこと、太陽・地球間物理学など学術上実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。