

# 論文審査の結果の要旨

氏名 銭谷 誠司

プラズマ（電離気体）の加熱や加速は、高エネルギー天体・太陽コロナ・地球磁気圏などで広く見られる普遍的な現象である。荷電粒子と磁場との相互作用がその基本であるが、具体的にどのような物理機構を経て加熱・加速がおきているかということについては、未解決の問題が多く残る。いっぽう最近の観測技術の進展により高エネルギー天体におけるプラズマ物理過程が重視されるようになってきた。なかでも電子・陽電子対プラズマの相対論的な流れについては、たとえば超新星残骸カニ星雲などの高分解観測から注目をあつめている。ところが、そのような流れにおける詳細な物理過程については理論研究がまだまだ発展途上であるというのが現状である。

本論文で論述されているのは、相対論的電子・陽電子対プラズマ中での磁気拡散と粒子加熱・加速現象についての理論的研究である。向きが異なる磁束が接触する箇所に形成される電流集中構造、電流シートに特に着目し、そこでの電子・陽電子対プラズマの加熱・加速機構の大規模数値シミュレーションを遂行して、その結果に基づき物理的な考察を行って得られた成果が述べられている。

以下で、本論文の内容を簡単にまとめる。全体は、導入部（第一章）を含む五章構成であり、加えて三つの付録章からなる。中核となるのは第二章から第五章までである。

## （第二章）

この章では、相対論的磁気リコネクションについて二次元粒子シミュレーションを行った結果について述べ考察している。磁気リコネクションは、磁場の拡散と Lorentz 力による加速過程とが互いに助け合うことで効率よく磁気エネルギーを転換する物理過程で、その際に磁力線のつなぎ換え（リコネクション、再結合）が起こる。磁力線がつなぎ変わる X 型リコネクション領域と呼ばれる箇所周辺で、電場の効果により粒子が効率よく加速されているのが示された。特に、相対論的な慣性増大効果により高エネルギーを獲得した荷電粒子が、さらに電場の影響を受ける効率がより高くなり、粒子の分布関数が、硬いべき乗分布（高エネルギー粒子数の相対的超過）になる現象が報告されている。

## （第三章）

この章では、相対論的ドリフトキンク不安定について二次元粒子シミュレーションを行った結果について述べ考察している。ドリフトキンク不安定は、電流シート中でのエネルギー転換過程として、もうひとつの有力な候補であると考えられている。これは磁束間に流れる電流が、時間とともに蛇行を始める不安定でその際に磁場エネルギーの拡散を生じる。大きく蛇行した電流中すなわち電場中に粒子が長く留まることで効率よくおこる加速過程を発見したと述べられている。この過程は、これまでに考えられたことのない新しい機構である。また、線形解析の結果とあわせた考察から、その不安定成長の速度がリコネクションよりも大きいことが示され、このことは、磁気拡散過程としてドリフトキンク不安定がより重要であることを示唆している。

#### (第四章)

この章では、前二章を踏まえて、それを統合すべく三次元粒子シミュレーションを行った結果が述べられている。リコネクションとドリフトキンク不安定とが同時に起こり、どのように相互作用するかということを考察している。前者が電流に垂直な面内での変動、後者が平行な面内での変動であり、三次元空間においてはこの両者が相互作用して影響をおよぼしあう。電流に平行な方向の磁場が存在しない場合は、前二章の結果から推察されたようにドリフトキンク不安定が速く成長し、その拡散が主要な物理過程としてはたらいだ。いっぽう電流に平行な磁場成分が存在するとき、三次元的な新たな構造が形成されその変形により磁気リコネクションが誘発されることが報告されている。リコネクションとドリフトキンク不安定性が非線形段階においてどのような関係にあるのかについて、統一的なシミュレーションがなされ、定量的な考察がなされたのは初めてである。

#### (第五章)

この論文全体のまとめと、考察について記述されている。特に、具体的な天体現象であるカニ星雲流に適用したとき、ここでの研究結果がどういう示唆をあたえるかについて詳しく考察されている。結果、カニ星雲流れにおける磁場エネルギーの転換についてドリフトキンク不安定による拡散という新たな観点を導入した。

以上まとめる。本論文で論述されているのは、相対論的電子・陽電子対プラズマ中での電流シートにおける磁気拡散と粒子加熱・加速現象についての理論的研究である。本研究は、この物理現象について非常に重要で斬新な知見を与え、これまでの研究を大きく凌駕し、プラズマ物理学・天体物理学に大きな一歩を加えるものである。またその研究で得られた物理的知見は地球物理学にも重要な示唆となると考えられる。本論文には、星野真弘氏との共同研究の内容が含まれるが、そのすべてにおいて、本論文提出者が主体的に研究を遂行したものと認められる。

以上により、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な内容を含んでいるものと判定し、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。