

氏名・(本籍)	しづ 渋谷 せん 仙 きち 吉
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 878 号
学位授与年月日	昭 和 63 年 3 月 9 日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和43年3月 東北大学大学院理学研究科 (修士課程) 地球物理学専攻修了
学位論文題目	STUDIES ON THE DYNAMICAL INTERACTION BETWEEN THE SOLAR PLASMA FLOW AND THE EARTH'S MAGNETOSPHERE (太陽プラズマ流と地球磁 気圏のダイナミックな相互作用の研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 家 寛 教 授 福 西 浩 教 授 斎 藤 尚 生

論 文 目 次

ACKNOWLEDGEMENTS

PREFACE

CONTENTS

CHAPTER 1. INTRODUCTORY PROLOGUE OF THE DYNAMICAL INTERAC-
TION IN THE MAGNETOSPHERIC BOUNDARY LAYER

1.1 Overview

1.2 Open or Closed Magnetosphere

1.3 Magnetopause and Broad Boundary Layer

1.4 Electric Current Types and Tail Flapping Motions

1.5 Convection, Frozen Flux, and Reconnection

- 1.6 Particle Acceleration and Current Interruption
- 1.7 Time-Dependent Convection in the Low-Latitude
- 1.8 Momentum Transfer and D-C Dynamo

CHAPTER 2. NUMERICAL ESTIMATION OF MAGNETIZATION AND POLARIZATION CURRENTS IN THE MAGNETOSPHERIC BOUNDARY LAYER

- 2.1 Introduction
- 2.2 Magnetization Currents around the Tail Lobe under Static Conditions
 - .1 Introduction
 - .2 Magnetization Current and Confinement Condition
 - .3 Estimation of the Magnetization Current Effects
 - .4 Discussion and Conclusion
- 2.3 Polarization Current Induced by the Interaction of the Solar Wind Plasm with the Magnetotail Boundary
 - .1 Introduction
 - .2 Previous Observations of the Boundary Layer
 - .3 Broad Boundary Layer Model and Basic Equations
 - .4 Calculations and Discussion
 - .5 Conclusion

CHAPTER 3. DYNAMICAL PARTICLE ACCELERATION THEORY AND ITS APPLICATION TO THE GEOMAGNETIC TAIL

- 3.1 Introduction
- 3.2 Review on Magnetic Reconnection Theories
 - .1 History of Magnetic Reconnection Theory
 - .2 A Formulation of Magnetic Reconnection
- 3.3 Syrovatsky's Dynamic Dissipation Theory
 - .1 Review of Current Disruption Theories
 - .2 Dynamical Dissipation of Magnetic Field by an External Force
 - .3 Interpretation and Comment on His Dynamic Dissipation
- 3.4 Application of Syrovatsky's Theory to the Geomagnetic Neutral Sheet
 - .1 A Model to Apply Syrovatsky's Mechanism
 - .2 Acceleration Phase and Mechanism
 - .3 Namerical Calculation
 - .4 Discussion and Summry

CHAPTER 4. DESCRIPTION OF MAGNETIC FROZEN PHENOMENA AND

MAGNETIC RECONNECTION

- 4.1 Introduction
- 4.2 Summary of Frozen-in Flux and Magnetic Reconnection
 - .1 Three Definitions of Frozen-in Magnetic Flux
 - .2 Motion of Materialized Field Line
 - .3 Magnetic Reconnection Related with Frozen Flux
- 4.3 Alfvén's Criticism on Frozen-in Field and Reconnection
 - .1 Criticism from a Particle Aspect Based on Dualism
 - .2 Alfvén's Definition by Electric Drift Velocity
 - .3 Comment on the Drift Model in Low-density Plasmas
- 4.4 A Reply to Alfvén's Comment
 - .1 Two Aspect of Frozen-in Field
 - .2 Limitation of Dualism for a Frozen State
 - .3 Limitation of Hydromagnetic Frozen-in Field
- 4.5 Connection between Adiabatic Invariant and Frozen Flux
 - .1 Adiabatic Invariant and Types of Frozen Flux
 - .2 Third Adiabatic Invariant and a Macro Frozen-in Flux
 - .3 First Adiabatic Invariant and a Micro Frozen Flux

CHAPTER 5. A-C DYNAMO MODEL AND EFFECTS OF A-C GENERATOR IN THE LOW-LATITUDE BOUNDARY LAYER

- 5.1 Introduction
- 5.2 A-C Dynamo and A Model
- 5.3 A Zeroth Order Solution
- 5.4 An Effect of Fluctuating Convective Speed
- 5.5 An Electric Current due to Vortex Generator
- 5.6 Discussion and Conclusion

CONCLUDING REMARKS

BIBLIOGRAPHY

APPENDIX

論文内容要旨

序論

地球磁気圏は高速の太陽風と呼ぶプラズマ流に浸され、地球の磁場が閉じ込められてできている空間であり、1つの開いた系を形成している。太陽風から、荷電粒子、運動量、そしてエネルギーが磁気圏へと輸送され、太陽風 — 磁気圏相互作用領域、すなわち、マグネトポーズを含んだ磁気圏境界層が形成されている。

太陽と地球の電磁環境が磁化プラズマを介して相互に作用し合う磁気圏境界層の研究はその運動量、エネルギー輸送の規模の大きさから、地球外圏域の物理現象を支配する最も重要な鍵を握っている。但し、この領域ではプラズマは高温かつ非マックスウエル分布を呈し、太陽プラズマの変動に応じて電磁場も極めて活発に変動する。そしてそれらに伴うダイナミックな物理的過程の多くは複雑で、未だ多くの問題が未解決のまま残されている。

磁気圏プラズマの理論的研究は1971年頃を境に従来、その基礎が磁場を中心に進められていた記述から、粒子又は電流による記述で見直そうという大きな流れに変わりつつある。

本論文は太陽風として知られる太陽プラズマ流と磁気圏とのダイナミックな相互作用によって引き起こされる電流に主眼をおき太陽プラズマ流の力学的エネルギーが電磁エネルギーへ変換されるプロセスを明らかにする立場から、変動きわまりない磁気圏境界層での現象を理論的に解明することを主目的とする。

理論研究は、具体的には、i) 磁気圏境界層での電流の問題、ii) 電磁の急激な変動に起因する磁気リコネクション、特にシロバッキーによって提唱された高エネルギー粒子加速の理論とその磁気圏尾部への応用、iii) この過程における磁束凍結の問題、iv) 磁気圏境界層での交流 (A-C) ダイナモの問題に焦点を置いて進めている。

第1章 地球磁気圏境界層に関する問題点と研究現状

序論で述べた本研究の主目的を、第2章以下で推進、達成するために、太陽プラズマ流と地球磁気圏の相互作用の場である磁気圏境界層とそこに生起する種々の現象についての研究状況や問題点を、太陽風から磁気圏へのエネルギー輸送、磁気圏の電流という立場から簡単に本章にまとめた。磁気圏へのエネルギー輸送の研究は地球磁気圏が開いているか、閉じているかという磁気圏の生成理論と密接に関係しているので、初めにこの問題について記述した。

マグネトポーズを含んだ厚い磁気圏境界層は観測的に支持されているにもかかわらず、理論的研究が遅れているが、本章では、序章として本論でとりあつかっている。磁気圏境界層を1つの電流層とみなし、そこにi) チャップマン・ヘラロ電流、ii) 磁場に垂直方向のドリフト電流、iii) 磁気中性点近くでの電流、iv) 沿磁力線電流などの種類の電流が流れている場合について検討する事の重要性をまず指摘している。本論の第2章では磁場に垂直方向のドリフト電流、第3章では磁気中性点近くでの電流、第5章では再び磁場に垂直方向のドリフト電流と

さらに沿磁力線電流の効果がそれぞれ関連してくる。さらに、磁気圏境界層には磁気圏対流(磁束凍結)、磁気リコネクション、粒子加速、MHD(直流)発電など様々な現象が生起しているので、これらについての研究状況も本章で簡単にまとめている。

第2章 磁気圏境界層での磁化電流と分極電流

地球磁気圏に関する電流回路は i) 地球自転による起電力を源とするオーロラ電流回路, ii) 太陽プラズマ流と地球磁気圏の相互作用を源とするオーロラ電流回路, iii) 地球磁気圏境界層及び尾部電流回路, iv) 赤道環電流回路に大きく分類される。本章では地球磁気圏境界層及び尾部電流回路に流れる磁化電流と分極電流について定量的研究の結果を示す。

磁気圏尾部の磁気中性面、プラズマシート近くにおける分極電流を除いたドリフト電流の定量的計算はすでに Bird-Beard 等によってなされていたが、これを高緯度磁気圏境界層(プラズマ・マントルを含む)に適用し、その磁化電流の寄与を検討した。磁化電流はマグネットシースとプラズマロープの遷移層に流れる。従来、マグネットポーズの厚さはイオンのサイクロトロン半径の規模であると考えられていたのに対し、本研究ではマグネットポーズを磁化電流の流れる遷移層と、とらえその厚さを検討した。その結果は観測で得られているブロードな磁気圏境界層を理論的に裏づける事になった。

磁気圏尾部の軸にそった座標 X_{sm} に対し $X_{sm}=10Re$ 付近で、HEOS-2 のデータを使って計算すると、磁化電流によって作られる磁場の尾部全磁場に対する寄与は12%より大きくなる。さらに、VELA 等のデータをもとに $X_{sm}=-18Re$ 付近で得られる磁化電流の寄与は65%と大きい。これは遠方では地球のダイポール磁場が弱くなるにつれ、熱いプラズマ効果が相対的に増加する事を反映している。

次に、磁気圏尾部が太陽風によって乱されたとき、時間的な変動電場によって境界層に発生する分極電流を検討した。この分極電流の磁気圏での重要性はすでに指摘されていて、昼側磁気圏での計算が1部なされていた。しかし、本研究では、はじめて磁気圏尾部での分極電流の定量的研究を行った。物理的特性を解明するため、分極電流を三成分 (i) 純分極電流, ii) 慣性分極電流, iii) 磁気的分極電流に分け、Swift モデルを分極電流に拡張し、 $X_{sm}=-18Re$ 付近では PROGNO-7 のデータを、 $X_{sm}=-60Re$ 付近では主として EXPLORER-35 のデータをもとに得られた結果は以下のようにまとめられる。(1)境界層の剪断速度に関係している慣性分極電流の強さは地球に近い領域で他の2つの分極電流より1-2桁大きく、 2×10^{-10} (A/m²) 程度である。(2)分極電流の磁気圏尾部全電流に対する寄与は地球に近い側 ($X_{sm}=-18Re$) では16%、遠い側 ($X_{sm}=-60Re$) では32%程度である。(3)分極電流は境界層の圧縮、膨張の源になるというより、20~60分の準周期を持つ脈動の発生源となることが予想される。

第3章 動的な粒子加速理論とその磁気圏尾部への応用

太陽風の磁場と磁気圏との相互作用をトポロジ的に考えると、磁気中性点(線)が作られ

やすい所がいくつかある。蓄えられた磁気エネルギーが磁気中性点（線）付近で粒子の力学的エネルギーへ変換するメカニズムとして多くの磁気リコネクション理論が提出されている。

本章では、磁気中性点の近くで電流の中断が瞬間的に起きる、電流崩壊を伴う粒子加速にかかわるものとしてシロバッキー（1966）の理論を検討した。彼によって提出された磁場のダイナミックな拡散論は磁気リコネクションの1つであるが、衝撃的高エネルギー粒子加速機構として独特の論点を持っている。

その理論における磁場のダイナミックな拡散は変化が急激でコヒーレントな彼の言うハード相において起こり、ジュール拡散と異なっていて慣性ドリフトが本質的な役割をしている。このため、エントロピーの増加なしに磁場の拡散が起こされうる。したがって、かならずしも $E \cdot J$ が正の値を示さない。よって彼の磁気リコネクションは抵抗なしに進むことになる。

本研究の結果、シロバッキー理論がとりあつかうタイプの磁気リコネクションでは磁気中性点付近での第1断熱不変量の破れと密接に関係している側面を、初めて明らかにした。これは第4章で述べるマイクロ磁束凍結の破れを伴う場合に相当する。この結果、彼の理論においては慣性ドリフトによる電荷分離によって作り出される強力な電場が加速の原因となる事を明らかにした。

地球磁気圏尾部のプラズマシート付近に高エネルギー粒子 ($45\text{KeV} \leq \epsilon \leq 1\text{MeV}$) が爆発的に発生するという観測はしばしば報告されており、この現象を説明するために種々の磁気リコネクションモデルが提出され、これはコンピューターシミュレーションでも追跡されている。しかし、1MeV に至る高エネルギーまで加速するメカニズムは、解決されていない。

シロバッキーはこの磁場拡散メカニズムを太陽フレアに応用したが、本研究では地球磁気圏尾部に応用し、高エネルギー粒子加速現象の解明を試みた。まず、反平行の定常磁場に、磁気圏尾部境界層に局所的に流れる電流による磁場を重ね合わせるモデルを設定した。この電流の移動距離、動く速度等を観測値に較べて妥当な数値を設定し、数値計算を行った。その結果、磁場、粒子密度などが磁気中性点近傍で急激に変動するハード相にはおいて、高エネルギー粒子 ($200\text{KeV} \leq \epsilon \leq 2\text{MeV}$) が生成される事が明らかになった。このメカニズムは地球磁気圏尾部で、MeV に達するような高エネルギー粒子の加速に対して有力な候補の1つであることが、確認された。

第4章 磁束凍結現象の記述と磁気リコネクション

磁力線の再結合過程に関連し、このプロセスで生起する磁束凍結の崩壊の問題を考慮した。このため、本章では、また磁束凍結の概念を根本的に再検討している。

アルフヴェンによって確立された磁束凍結の概念は宇宙空間プラズマ（無衝突性）現象の二つの特異な状態について、それを使う事を放棄している。すなわち、オーロラ粒子の降下域のように磁力線に平行方向に電流が流れる場合、そして本論文でも問題にしている磁力線の再結合の場合である。これらは粒子の運動が主導的役割を果たすことから、アルフヴェンは「粒子

的様相に立って見る」という点を強調していて、単純に「磁場の側から眺める場合」に対峙するとしている。この二元論 (dualism) において、再結合過程を考える時、アルフヴェンは粒子的様相に立って見るかぎり、粒子運動が互いに融合して生れる再結合のような状態があり得ないとしている (アルフヴェンの批判)。

この点につき、本論文における検討では、その時間スケール、空間スケールに応じて磁束凍結の概念を幅広く拡張して使う事の可能性を指摘している。特に本論では従来からの磁束凍結の定義を三つの立場からまとめ再検討する。次に、アルフヴェンの磁束凍結、磁気リコネクションへの批判の要点を記し、これに答えるという形式で論を展開した。

磁束凍結の成立基準 (磁気レイノルズ数 $Rm \gg 1$) と MHD の成立基準 (ランディキスト数 $Lu \gg 1$) とが異なる事もあり、磁束凍結状態は MHD 状態とは一応区別される。磁束凍結状態は特徴的時空スケール、観測条件に依存することをマイクロのサイクロトロン運動の考察から結論づけた。確かに、再結合過程では $E \times B$ ドリフトに基づいたアルフヴェンの磁束凍結 (マクロ過程) の破れる限界は早く到来し、高エネルギー粒子加速の過程を理解するためには断熱不変量との対応を考えたマイクロな磁束凍結の概念が有効である。これはシロバッキー理論における再結合過程の初期に出現してくる。

第5章 低緯度境界層における A-C ダイナモの研究

太陽プラズマ流は磁気圏境界層の磁力線を横切って流れるので、起電力 (電力) を供給する可能性がある。磁気圏境界層は太陽プラズマ流のエネルギーの大部分を占める運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、1つの MHD ダイナモと言える。こうして変換された電気エネルギーの1部は、上、下に分割される2つの磁気圏ローブのまわりに生ずる磁気圏尾部回路に流れる電流となって消費される。他の残りのエネルギーは巨視的磁気圏対流を起すモーターの作用として消費されると理解される。従来、磁気圏境界層は D-C (直流) ダイナモとして働くことが提案されている。これは定常的なオーロラや磁気圏対流現象を説明するのに必要と考えられていた。

Sonnerup (1980) の D-C モデルを単純化し、観測に合う条件を設定し、計算すると、朝側において発生する電場は境界層中心方向に向き、そこにイオンが集中することがわかる。境界層の磁力線は電離層に結びついているので、その磁力線に沿ってダクトが形成され、さらに電流の連続の概念により、磁気圏境界層に誘起される電流は、沿磁力線電流として電離層に流れ込む事になる。

本章では従来とり扱われてきた D-C ダイナモを A-C ダイナモの概念に拡張し、地球磁気圏の赤道面領域の朝側と夕側に発生するラージスケール渦現象に伴う電磁現象に対し応用した。本論では定常的速度に、その1割程度の変動分が周期10~30分で重ね合わさるという観測事実にもとづき変動を正弦的に近似し、脈動的電流強度を計算した。磁気圏でのこれらの電流が磁力線に沿って電離層に流入する場合の値は 1.9×10^{-5} (A/m²) となり、これを磁場に換算すると74 (nT) 程度になるので沿磁力線電流の観測から得られている磁場変動値を十分に

説明し得る。

結 論

太陽プラズマ流と地球磁気圏の相互作用の場である磁気圏境界層は絶え間ない変動を続けている存在である。この境界層を1つの電流層、1つのエネルギー変換の場とみなし、マグネットポーズを含んだ厚い境界層をなしているという最近の観測的裏付けを基に、そこに生起している種々の現象を理論的に解明した。

観測的に明らかにされて来た厚い磁気圏境界層について、磁化電流を求めた。この場合、磁化電流は同じく観測された粒子分布、磁場強度の変化をもとに空間的な電流分布を考え、厚みをもった境界層の形成と調和的な解を得た。こうして計算される電流は、磁気圏境界が定常な場合、磁化電流 (Magnetization Current) が卓越し、時間変動が激しくなると、境界層を流れる分極電流が大きく寄与する事が判明した。

続いて、磁気リコネクションの1つであるシロバッキー理論を磁場モデル等を初期条件として設定し、地球磁気圏尾部に応用し、太陽風の変動が激しい時、1MeV以上にわたる高エネルギー粒子発生を観測結果を説明し得る事が示された。シロバッキー論文においてはしかし、磁束凍結が破れる詳しいメカニズムは明らかでなかった。本研究ではマイクロ磁束凍結概念を新たに導入する事により、磁束凍結の破れる過程の解釈を行った。再結合で有効な加速が起るハード相では、粒子の慣性ドリフト有効に働き、それによって発生する電場が粒子の加速とともに磁束凍結を破る原因となっている。

さらに、再結合過程に関連して、多様な側面をもつ磁束凍結現象を検討した。通常のMHDレベルで磁束凍結の概念が破れている再結合状態に対しても、磁力線中の荷電粒子の運動に関する第1断熱不変量の保存が成立している時はこれをミクロスコピックな磁束凍結として概念を立てた。電磁流体における $E \times B$ に基づく磁束凍結が崩壊した後もこのミクロスコピックな凍結が破れるまで再結合過程を1定期(加速相に入る直前)まで粒子に対する拡張された磁力線凍結として追跡する可能性を明らかにした。

太陽プラズマ流に観測される時間的、空間的変動に対して、単なるD-Cダイナモに加え、磁気圏境界層での、A-C(交流)ダイナモの効果についての検討を行なった。その結果、観測から得られている時間変動をしている沿磁力線電流はA-Cダイナモの効果として磁気圏に発生した時間変動電流が磁力線沿いに電離層に流入しているとして説明し得る事が明らかになった。

論文審査の結果の要旨

本研究は太陽風と地球磁気圏の相互作用に関し、粒子、及びその運動による電流とその変動という立場に立って、理論的に考察したもので、未だ謎が解かれ盡していない磁気圏の描像に、一つの新しい見方を加味し、将来の観測に注意をうながすという意義をもって、研究内容は三つの部分より構成される。

まず第一の部分では、2章に述べられているように、磁気圏境界層を介して生ずる Magnetization Current と、時間変動にともなう Polarization Current を厚みをもった、磁気境界層の新しいモデルを対象として求めている。これは従来、純粋理論として提唱されている、Magnetization Current を、磁気圏境界の実例を選びそこに適用した点に特徴がある。まず、Magnetization Current は、磁気圏の地球近く側、すなわち $-10R_E$ の位置では、磁気圏全磁場成分に対し12%程度、そして $-18R_E$ では磁気圏全磁場成分の65%を占めて貢献している事が判明した。また時間的に変動する太陽風の影響として電場の時間ゆらぎにもとづく Polarization Current が存在する事を示すがこの電流は地球から18倍半径の位置では、10%前後60倍半径程度の遠い側では、30%前後全体磁場強度に貢献している事が判明した。

本研究第二の部分は、3、4章に示される。磁気圏尾部で発生する爆発的なサブストームに関し、磁気再結合説が有力であるが、その一つのモデルとしてシロバツスキーが提案した単純な二電流モデルに検討を加えたものである。従来磁化プラズマ中の不安定性や、遅速性プラズマ衝撃波、といったもので特徴づけられる再結合論に対し、電流変化を起源とする、ユニークなモデルであるが、このプロセスは実証的にこれが否定されたのではなく、本研究ではその意義を理論的に評価している。この場合、プラズマ凍結が電磁流体的にやぶれた状態でもなお、粒子の凍結状態は、磁場運動とともに維持されるという見解を出し、この結果磁気圏尾部では、少量ではあるが、非常にエネルギーの高い成分を生む事を示唆している。

第3の部分は5章に示されている。太陽風エネルギーが磁気圏に流入する過程で、磁気再結合以外に、ダイナモ仮説が提出されているが、本研究は、そのダイナモ仮説の上に立ち、さらに、それが比較的速く時間変動する時に付加される新たな効果を AC ダイナモと定義し、検討したものである。この結果、この AC ダイナモ効果により20分~60分の特性時間をもつ電磁気的変動が、特に電離層レベルで、数10nT に達する磁場変動現象として表われる事を示唆している。

以上渋谷仙吉提出の論文は、著者が、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有する事を示していて、理学博士の学位として合格と認める。