

	いまさき あつし
氏 名	今崎 篤
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	電磁加速プラズマの巨視的不安定性とその抑制法の研究
指 導 教 官	東北大学教授 犬竹 正明
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 犬竹 正明 東北大学教授 畠山 力三 東北大学教授 阿部 健一 東北大学助教授 安藤 晃

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序論

本章では、本研究の研究背景を示し、本研究の目的、研究手法について述べている。

銀河中心、恒星面、惑星磁気圏等の宇宙空間においては、様々な電磁流体现象が人工衛星や地上から観測されており、これらの発生機構についての研究が進められている。銀河中心の電磁流体现象の研究の例として活動銀河核の現象が挙げられる。ハッブル宇宙望遠鏡による可視光観測等により、M87 銀河核では中心から数千年もの長さに及ぶジェット流が観測されたが、地上の電波望遠鏡による拡大電波画像より、中心核付近でジェット流が捻れながら噴出していることが分かった。中村達[1]は活動銀河核の三次元シミュレーションを行い、電流駆動のキンク不安定性によって、プラズマ流が磁力線と共に捻れながら噴出していくことを示した。

太陽では、地上の $H\alpha$ 望遠鏡や太陽観測衛星に搭載された X 線望遠鏡により、光球面上で磁力線が振れる現象が観測された。松元達[2]は太陽面の三次元シミュレーションを行い、キンク不安定性の成長に伴い磁力線が捻れ、磁束管が浮上していくことを示した。

地球磁気圏では、Pc5 と呼ばれる周期 150~600s の地磁気脈動が磁気圏観測衛星に搭載された磁力計により観測された。その発生機構としてバルーニング不安定性によるものなのかについて理論的研究が行われている[3]。

このように、宇宙空間にはプラズマの巨視的不安定性に起因する様々な現象が発生しており、観測面、理論面から様々な研究がこれまで行われている。しかし、宇宙空間ではスケールの大きさや、プラズマを直接観測できない等の制約がある。実験装置による電磁加速プラズマの巨視的不安定性に関する研究は、宇宙空間のプラズマに関する物理的特性を解明するためにも有用である。

一方、電磁加速プラズマの応用として宇宙航行用推進機の開発がある。現在実用化されている化学推進機に比べて比推力が大きく、化学推進機よりも長期間の航行が可能な電気推進機には電磁加速型と静電加速型がある。これまで電磁加速型の MPD 推進機の放電部に外部磁場を印加することにより、生成されたプラズマがさらに加速される結果が得られている[4]。しかし、放電部に外部磁場を印加すると様々な加速機構が働き、周方向のプラズマ回転現象や、プラズマの巨視的不安定性の発生も観測されている。この巨視的不安定の抑制法を確立することは、推進機の推力の向上に繋がるものである。

本研究では、高密度電磁流体実験装置 HITOP (High density TOhoku Plasma) を用いて磁場を印加した空間中に高速、高ベータプラズマを入射した時のプラズマ流の安定性を調べる。そして、プラズマの巨視的不安定性が発生する条件や、その特性、駆動機構を解明すると共に、巨視的不安定性を抑制する方法を確立することを本研究の目的とする。

第2章 実験装置及び測定方法

本章では、本研究で用いた実験装置と測定装置の仕様及び測定の方法について説明している。

HITOP は、全長 3.3m、内直径 0.8m の円筒形真空容器であり、その周囲には磁場コイルが計 17 個設置されており、各コイルに独立に電流を流すことにより、真空容器中に一様磁場、発散磁場等様々な磁場配位を印加することができる。

真空容器の端にプラズマ源として MPD アークジェット (Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet) を設置している。本研究では放電用ガスとして He を用いて、MPD 放電部でアーク放電を行うことにより、高密度 (真空容器中央付近で最大約 10^{20}m^{-3})、高ベータ (最大約 1) のプラズマが生成される。MPD アークジェットでは、放電電流と放電電流によって生成される自己誘起磁場とのローレンツ力によってプラズマが加速される。MPD アークジェットの電源には約 1ms の準定常放電が得られるようにパルス整形回路 (PFN) が用いられている。

HITOP 装置端部には、MPD 対向面に分割型エンドプレートが設置されている。分割型エンドプレートは 6 枚のリング状プレートで構成されている。各プレートは互いに独立にバイアス電圧を印加したり、浮遊電位状態にすることができる。これにより、真空容器中に様々な電位分布を作ることができる。

磁場変動測定用の磁気プローブの素子として積層型インダクタを用いた。積層型インダクタは小型で特性が揃っているため、磁気プローブが小型化され、プローブ挿入によるプラズマ流の擾乱を抑えることができる。積層型インダクタを三軸方向に多数配置した多チャンネル磁気プローブを真空容器に挿入して、磁場変動の径方向分布を求めた。磁場変動の周方向成分 ΔB_θ の径方向分布から、プラズマ中を流れる軸方向電流値 I_z を算出することができる。

真空容器中央部に径方向に多チャンネルのマッハプローブが設置されている。又、HITOP の真空容器中には軸方向、径方向に移動可能な二次元駆動マッハプローブが設置されている。各マッハプローブはイオン飽和電流の捕集面の法線がプラズマ流に平行方向、垂直方向に向けられ、各捕集面で測定されたイオン飽和電流密度 J_{perp} 、 J_{para} からイオン密度 n_i 、イオンマッハ数 M_i が求められる。

空間電位を求めるために、トリプルプローブを真空容器に挿入して、プラズマ密度、電子温度、浮遊電位を計測した。

第3章 HITOP 装置のプラズマ流の特性の測定結果

本章では、HITOP 装置で入射したプラズマ流の特性を測定した結果を示している。

発散磁場中にプラズマを入射して、 J_{perp} 、 J_{para} を軸方向に沿って測定して M_i を求めた結果、磁場の発散領域で M_i が増加してプラズマが加速していることが分かった。

MPD アークジェットの放電電流を変えながら真空容器にプラズマ流を入射して、下流部でマッハプローブにより J_{perp} を測定した。放電電流を高くすると、放電電流の低い時には見られなかった数 kHz の大きな変動が観測された。

この密度変動を調べるために、多チャンネルマッハプローブを用いて、 J_{perp} の径方向分布の時間変化を測定した。放電電流の低い時、プラズマ密度ピークは装置中心軸上にあるが、放電電流を高くしていくと、装置中心軸に対称に密度ピークが径方向の左右に交互に現れる現象が観測された (図 1)。次に、3 本のマッハプローブを周方向に互いに 90° の位相差となるように挿入して、 J_{perp} の時間変化を同時測定した。その結果、周方向に順番に J_{perp} のピークが現れる結果が得られた。これより、観測された J_{perp} の変動は、プラズマ流が装置中心軸より偏心して回転している現象であることが明らかになった。さらに、この回転の形状を調べるために、数本のマッハプローブを軸方向に並べ、 J_{perp} の時間変化を同時測定した。MPD より約 0.6~1.5m 下流の位置では下流側のプローブが上流側のプローブよりも約 $10\mu\text{s}$ 早くピークが現れながら変動している結果が得られた。以上の結果から、この位置で観測された密度変動は、プラズマ流がヘリカル形状で回転している巨視的不安定性と考えられる。

このプラズマの回転機構を調べるため、分割型エンドプレートのうち最も内側のプレート V_{EP1} の電位を変化させて、プラズマの回転の変化を測定した。 V_{EP1} を負にバイアスすると、バイアス電圧にほぼ比例してプラズマの回転周波数が増加した。又、 V_{EP1} を正にバイアスすると、プラズマは逆回転となり、回転周波数は約 2kHz で飽和した。

真空容器中央部でトリプルプローブを径方向に移動させながら、プラズマ密度、電子温度、浮遊

電位を測定し、プラズマの空間電位を算出して、径方向分布を求めた。その結果、エンドプレートのバイアスにより空間電位は変動して、空間電位の勾配による電場 E と外部磁場 B による $E \times B$ ドリフトの回転を求めたところ、方向と周波数がプラズマの回転の測定結果とほぼ一致した。これより、巨視的不安定性が起こっている時のプラズマの回転は空間電位の勾配による電場と外部磁場による $E \times B$ ドリフトによって決まると考えられる。

巨視的不安定性が発生している時の J_{perp} の径方向分布を多チャンネルマッハプローブで、磁場変動の周方向成分 ΔB_{θ} 、軸方向成分 ΔB_z の径方向分布を多チャンネル磁気プローブで同時に測定した。 J_{perp} の最大値、プラズマの反磁性量を表す ΔB_z の最小値、軸方向電流の中心を表す ΔB_{θ} の最小値がほぼ一致しながら時間と共に径方向の正負に周期的に移動する結果が得られた。これより電流が回転するプラズマ流に沿って流れていると言える。

第4章 巨視的不安定性の発生機構、抑制方法についての検討

本章では、HITOP 装置で観測されたプラズマ流の巨視的不安定性の発生機構、抑制方法について検討した結果を報告している。

プラズマ流の回転現象として観測された巨視的不安定性の駆動機構について検討を行った。まず、悪い曲率の磁場中でプラズマ圧力の高い時に駆動しやすいバルーニング不安定性について検討した。外部磁場配位として、一様磁場、悪い曲率を含む発散磁場、悪い曲率を抑えた発散磁場の3種類の磁場中にプラズマを入射して、 J_{perp} を測定してプラズマ流の安定性を調べた。いずれの磁場中でも放電電流を大きくすると周波数数 kHz の大きな J_{perp} の変動が観測され、巨視的不安定性が発生していることが分かった。この結果より、磁場の曲率によるバルーニング不安定性以外の要因が巨視的不安定性の主な駆動機構として働いていると考えられる。

次に、プラズマ中を流れる電流によって駆動されるヘリカル・キンク不安定性が駆動機構として働いているかについての検討を行った。プラズマ中を流れる軸方向電流 I_z の制御方法として2通りの方法を用いた。

まずエンドプレートより MPD アークジェットの陰極へ流れる電流の制御を行った。MPD 陽極、真空容器、エンドプレートを接続して導通状態にする（以下、MPD 陽極、エンドプレート：GND と呼ぶ）と、MPD 陽極とエンドプレートは同電位となり、エンドプレートより MPD 陰極へ電流が流れやすくなる。一方、MPD 陽極、真空容器、エンドプレートを互いに絶縁状態にする（以下、MPD 陽極、エンドプレート：float と呼ぶ）と、エンドプレートから MPD 陰極への電流が流れにくくなる。このように、MPD 陽極、エンドプレートを GND、float と切り換え、外部磁場配位（発散磁場の磁気ミラー比）、放電電流、ガス流量を変えながらプラズマを入射して、多チャンネル磁気プローブによって測定した ΔB_{θ} の径方向分布から算出した I_z と、多チャンネルマッハプローブの測定による J_{perp} の径方向分布からイオン密度ピークの装置中心軸からの偏心量 ΔR_j を求め、 I_z と ΔR_j との関係性を調べた。

MPD 陽極、エンドプレート：GND の時、 I_z は大きな値となり、 I_z が大きいほど ΔR_j も大きくなった。MPD 陽極、エンドプレート：float の時、 I_z 、 ΔR_j は GND の時に比べて小さくなった。

観測された巨視的不安定性がヘリカル・キンク不安定性であるか調べるために、 I_z から Kruskal-Shafranov の安全係数 $q[5]$ を求めて、 ΔR_j をプラズマ半径で規格化させた量と比較した。MPD 陽極、エンドプレート：GND の時、 q は 1 以下の小さな値となり、偏心は大きな値に分布し、MPD 陽極、エンドプレート：float の時、 q は 1 より充分大きな値となり、偏心は GND の時に比べて小さな値となった。

MPD 陽極、エンドプレート：float の時でもある程度の偏心が観測され、巨視的不安定性が完全には抑制されていない。これは MPD アークジェットの陽極より真空容器の下流へ伸びて陰極に戻る電流が存在するためと考えた。そこで、真空容器内に流れ込む電流を抑制するために、銅メッシュを MPD 出口近傍に挿入した。

MPD 陽極、エンドプレート：float として、銅メッシュを挿入していない時、挿入した時の J_{perp} の時間変化を放電電流を変えながら測定した。銅メッシュを挿入していない時、放電電流を上げると I_z も大きくなり、 J_{perp} の数 kHz の大きな変動が観測されたが、銅メッシュを挿入すると、 J_{perp} の数 kHz の大きな変動は殆ど見られなくなった。これより、銅メッシュ挿入により、下流のプラズマ中に流れ出す電流が抑制され、巨視的不安定性が抑制されたと考えられる。放電電流と安全係数の関係（図 2）から、メッシュ挿入により安全係数の値が大きくなり、プラズマが安定化し

ていることが分かった。

以上の結果から、HITOP 装置中で観測されたプラズマの巨視的不安定性は電流駆動のヘリカル・キンク不安定性によるものと考えられる。下流のプラズマ中に流れ出す電流を抑制することにより、巨視的不安定性を抑制することが可能であることが示された。

第5章 結論

本章では、本研究の結論を述べている。

HITOP 装置で、外部磁場印加時における MPD プラズマの特性を測定した。放電電流を高くした時、プラズマ流の密度ピークが装置中心軸より偏心し回転する現象が観測された。多チャンネルマッハプローブによる同時計測により、これはプラズマ流がヘリカル状に捻れて回転する巨視的不安定性であることが分かった。エンドプレートによって電位を制御して測定した結果、回転の機構として装置中の電場と磁場による $E \times B$ ドリフトによるものと考えられる。巨視的不安定性の駆動機構についての検討を行った結果、プラズマ中を流れる電流によるヘリカル・キンク不安定性であることが示された。又、プラズマ中の電流を抑制することにより、巨視的不安定性の抑制が可能となることが確認できた。

この不安定性抑制は、電気推進機の推力の向上に寄与することが期待される。又、HITOP 装置中で観測された巨視的不安定性と宇宙空間で観測された不安定性を対比することにより、宇宙空間の現象の解明に繋がることを期待される。

参考文献

- [1] M. Nakamura et. al., *New Astronomy*, 6, pp. 61, 2001
- [2] R. Matsumoto, T. Tajima, W. Chou, A. Okubo and K. Shibata, *Astrophysical Journal*, vol. 493, pp. L43, 1998
- [3] A. Miura, *J. Geophys. Res.*, vol. 105, no. A8, pp. 18,793, 2000
- [4] K. F. Schoenberg, R. A. Gerwin, R. W. Moses, Jr., J. T. Scheuer and H. P. Wagner, *Phys. Plasmas* vol. 5, no. 5, pp. 2090, 1998
- [5] 宮本健朗、プラズマ物理入門、1991

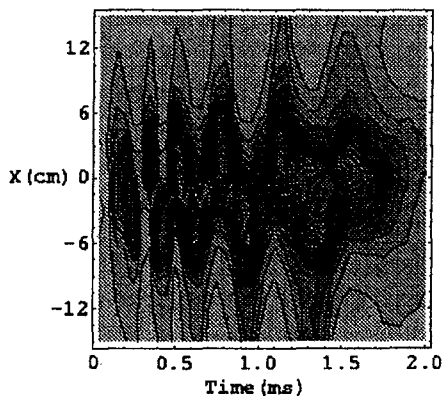


図1 放電電流を大きくした時の径方向密度(J_{perp})分布の時間変化 (等高線表示)

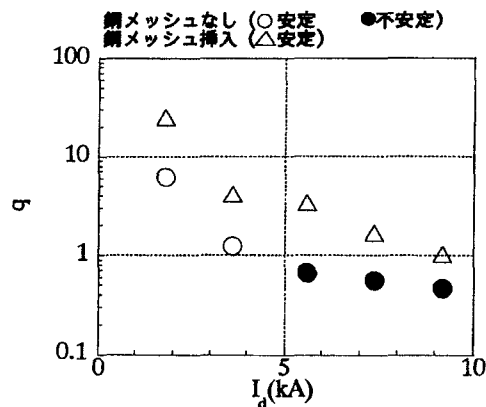


図2 銅メッシュ挿入によりプラズマ流中の電流を抑制した時の安全係数と安定性の変化

論文審査結果の要旨

電磁的に加速された高密度プラズマ流は大型衛星・宇宙ステーション等の姿勢制御・軌道保持・軌道遷移用および惑星間航行用の電気推進機への応用や、物質表面改質・新素材創製への応用にとって重要であり、基礎および開発研究が精力的に進められている。放電電流と自己発生磁場の相互作用を利用した電気推進機に外部磁場を印加することにより、その加速性能やプラズマ形状の制御性を飛躍的に向上させることができる。しかし、外部磁場を印加した場合プラズマ流全体が大きく変動する巨視的不安定性がしばしば観測される。本論文は、外部磁場中電磁加速プラズマ流の巨視的不安定性の解明とその抑制法に関する研究をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、電磁加速プラズマ源であるMPD (Magneto-Plasma-Dynamic) アークジェットおよびマイクロ磁気プローブなどの測定装置について述べている。本研究では、市販の積層チップインダクタを初めて磁気プローブ素子として利用することにより、小型で特性の揃った多チャンネル3次元マイクロ磁気プローブアレイを新たに開発している。これはプラズマへの擾乱を低く抑え、高密度パルスプラズマ中に流れる電流の空間分布を詳細に測定するうえで極めて有用であり、評価できる。

第3章では、外部磁場を印加した電磁加速プラズマ中で新たに観測された巨視的不安定性の特性について述べている。プラズマ密度や電流の半径方向、周方向、軸方向の空間分布および時間変動の測定から、プラズマ流が空間的に右ねじりのヘリカル状に変形し、時間的に右回りに偏心回転していることを明らかにしている。また、装置端部に設置されたリング状分割エンドプレートを用いて径方向電位分布を制御することにより、偏心回転の方向と周期が背景プラズマ中の電位分布に起因することを初めて明らかにした。これは高く評価できる。

第4章では、外部磁場の配位と強度、放電電流およびガス流量等を変化させた場合の巨視的不安定性の発生条件について述べている。磁場配位を変化させた場合の測定結果から、この不安定性は磁力線の曲率にはほとんど依存しないこと、すなわち、プラズマ圧力により駆動されるバルーニング不安定性ではないことを確認している。種々の実験条件下で観測された偏心量とプラズマ流中の軸方向電流分布の測定結果から、この不安定性はプラズマ中の電流により駆動されるヘリカルキック不安定性であると結論している。また、このような電磁加速プラズマ流の不安定性が、外部磁場とプラズマ中の電流が作る自己磁場との比に依存する無次元量で決定されることを初めて見いだした。さらに、MPD アークジェットの出口付近に金属メッシュを挿入することにより、放電部からプラズマ下流に同軸状に噴出する電流を低減させ、不安定性を抑制できることを実証している。これらは、電磁加速プラズマ流の物理的解明および応用上重要な成果であり、高く評価される。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、電磁加速プラズマ流中で観測された巨視的不安定性の特性を明らかにし、その発生要因を同定すると共にその抑制法を実証した研究であり、電気工学およびプラズマ理工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。