

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月6日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2012  
 課題番号：20540436  
 研究課題名（和文）非回転及び回転する磁気圏プラズマ中に於ける磁気流体不安定性の理論的研究  
 研究課題名（英文） A theoretical study of magnetohydrodynamic instabilities in non-rotating and rotating magnetospheric plasmas  
 研究代表者  
 三浦 彰（MIURA AKIRA）  
 東京大学・大学院理学系研究科・助教  
 研究者番号：20126171

## 研究成果の概要（和文）：

磁力線が無限遠方に延びた単極子磁気圏に対してエネルギー原理を構築した。単極子磁気圏及び閉じた磁力線を持つ磁気圏に対して、アイコナル近似を用いて、電離層駆動の不安定の存在を明らかにした。双極子磁場を含む一般的な閉じた磁気圏に対して、圧力駆動交換型不安定の安定性条件を得た。磁場のシアーを含む、イオンの反磁性ドリフト速度勾配によって駆動される非理想磁気流体不安定の固有値方程式を導出し、一般的安定性条件を得た。

## 研究成果の概要（英文）：

A new magnetospheric energy principle was constructed for spherically symmetric monopolar magnetospheres with magnetic field lines extending to infinity. By using eikonal assumption, I showed the existence of ionosphere-driven magnetohydrodynamic (MHD) instabilities for spherically symmetric monopolar magnetospheres and for magnetospheres with closed field lines. For an arbitrary closed magnetospheric configuration, which includes a dipole field, a general stability criterion was obtained for pressure-driven interchange instability. A nonideal MHD eigenmode equation was derived for a velocity shear instability, which is driven by a shear in the ion diamagnetic drift velocity in sheared magnetic fields, and a general stability criterion was obtained.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	400,000	120,000	520,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：磁気圏物理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：磁気圏・電離層・磁気流体(MHD)不安定性・プラズマ・単極子磁気圏・双極子磁気圏・エネルギー原理

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 磁気圏高ベータプラズマ中では、圧力駆動の交換型不安定やバルーニング不安定の理想電磁流体不安定の存在が知られていた。代表者は、一般的な磁気圏モデルに対してこれらの不安定を電離層まで含め大局的に議論しうる磁気圏のエネルギー原理 (Miura, 2007) を構築した。この原理により、従来あまり考えられてこなかった、圧力駆動不安定 (交換型不安定、バルーニング不安定) に対する電離層の境界条件の効果を明らかにし、また磁気圏のポテンシャルエネルギーへ不安定な負の寄与をする電離層駆動の項の存在を明らかにした。

(2) 代表者は高ベータプラズマ中では電場ドリフト ( $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト) の速度勾配ではなくイオンの反磁性ドリフト速度の勾配に起因する 2 成分流体の不安定が存在することを示し (Miura, 2001)、電場ドリフトの速度勾配が非常に小さく、磁場がイオンの反磁性ドリフト速度に垂直な一方向成分のみを持つ真昼間磁気圏境界のモデルに対して、そのような非理想 MHD 不安定が実際に存在しうることを示した (Miura, 2003)。

## 2. 研究の目的

申請時当初 (2008) の主要な研究目的は次の通りであった。

- (1) 閉じた磁力線を持つ磁気圏のエネルギー原理 (2007) とアイコナル近似を用い、双極子磁場中で圧力駆動交換型不安定の安定性条件を求め、Gold (1958) の安定性条件と比べる。
- (2) 磁気圏のエネルギー原理 (2007) によって発見された電離層駆動の不安定項が実際の磁気圏モデルに対して、安定化項を凌駕して本当に不安定モードを与えるかどうかを明らかにする。
- (3) 磁気流体プラズマの 0 次平衡中では一般に磁場のシアも存在するため、反磁性ドリフト速度の勾配による速度勾配不安定 (Miura, 2001, 2003) を磁場のシアを含む一般的な安定性の議論に拡張する。

## 3. 研究の方法

(1) 申請の時点 (2008) において計画していた研究方法。

① 上記の研究の目的の (1) と (2) については、研究代表者が開発した閉じた磁力線を持つ磁気圏のエネルギー原理 (2007) 及びアイコ

ナル近似を用いて、双極子磁場を含む任意の閉じた磁力線を持つ磁気圏プラズマ平衡に対して一般的な磁気流体不安定の安定化条件を求める。

② 上記の研究目的 (3) については、不安定を記述する固有値微分方程式から空間積分により解析的に 2 次形式を求め不安定の判定を行う。

(2) 研究期間内に得られた新しい着想による研究方法。

① 単極子磁気圏に対するエネルギー原理の構築を行い、単極子磁気圏中で電離層駆動の不安定モードの存在を、新たに単極子磁気圏に対して開発したエネルギー原理とアイコナル近似を用いて明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 磁気圏のエネルギー原理の発展・拡張。

① 単極子磁気圏に対する磁気圏のエネルギー原理の構築。

双極子磁気圏のように閉じた磁力線を持つ磁気圏のエネルギー原理 (Miura, 2007) では磁力線が球面状電離層面に垂直という仮定のもと、電離層近傍付近で磁場はほぼ逆 2 乗則に従う (Miura, 2007)。代表者は極端な磁気圏として 0 次の磁場がどこでも動径成分しか持たず球対称な磁気圏を考えると、磁場はどこでも逆 2 乗則に従い点単極子磁場となることを示し、このような磁気圏に対しても、電離層と無限遠における漸近的境界条件を自己共役性を満たすように与えれば、磁気圏のエネルギー原理を構築できることを示した (Miura, 2013a)。更に、このような単極子磁気圏のポテンシャルエネルギーの変分には電離層駆動項が存在し、閉じた磁力線を持つ磁気圏に対して得られた電離層駆動項 (Miura, 2007) の片半球分の表式と一致することを明らかにした。またプラズマ体積からのポテンシャルエネルギーへの寄与はエネルギー原理 (Bernstein et al., 1958) で磁力線曲率を 0 とおいたものと等しくなることを明らかにした (Miura, 2013a)。

② 電離層境界の下に存在する中性大気中の磁場エネルギーまで含めた拡張された磁気圏のエネルギー原理の構築。

磁気圏のエネルギー原理を拡張し、中性大気と完全導体の地面の存在まで考慮に入れた拡張された磁気圏のエネルギー原理の開発を行った。この原理によって、中性大気中の

磁場のエネルギーの変化は磁気圏のエネルギー原理のポテンシャルエネルギーの変分には寄与せず、電離層駆動の交換型不安定の不安定化及び安定化には全く働かないことを明らかにした (Miura, 2011)。

(2) 単極子磁気圏プラズマ中における電離層駆動の不安定の安定性解析。

新たに単極子磁気圏に対して開発したエネルギー原理とアイコナル近似を用いて、単極子磁気圏プラズマ中において、電離層駆動で磁場を曲げる非圧縮性の電磁流体不安定モードが存在することを明らかにした。また、この不安定なモードの無限遠方でのプラズマの水平変位は0に漸近することを明らかにした (Miura, 2013a)。

(3) 閉じた磁力線を持つ磁気圏プラズマ中に於ける電離層駆動交換型不安定の安定性解析。

球面状の電離層上の磁力線の運動によって、磁気圏のポテンシャルエネルギーの変分中の電離層駆動の項が磁気圏の安定化項を凌駕して、電離層駆動の交換型不安定を起し、低ベータの放射線帯やリングカレントの領域のパラメータに対して実際に起こりうることを示した。双極子磁場中では  $m=38$  (電離層での東西方向の波長がほぼ 500km) までの圧縮性モードが電離層駆動効果により不安定となることを明らかにした (Miura, 2009a, 2013b)。

(4) 閉じた磁力線を持つ磁気圏プラズマ中に於ける圧力駆動交換型不安定の一般的安定性解析。

① アイコナル近似に基づく双極子磁場中の波数ベクトルの一般的表式。

磁気圏のエネルギー原理とアイコナル近似に基づいて、双極子磁場中の交換型モードの計算において必要となる、磁力線に沿って任意の点での波数ベクトルの一般的表式を得た。磁力線に沿って赤道面と電離層での波数の比を、赤道面内で地球中心から磁力線までの距離を地球半径で割った  $L$  値の関数として表す一般的表式を得た。経度方向の波数が無限大の極限では電離層での経度方向の波数は赤道面での  $L$  の  $3/2$  乗倍となることを明らかにした (Miura, 2013b)。

② 閉じた磁力線を持つ磁気圏内の圧力駆動交換型不安定の安定性。

閉じた磁力線を持つ磁気圏のエネルギー原

理 (Miura, 2007) とアイコナル近似に基づいて、任意の磁気圏プラズマ平衡に対して適用しうる一般的な不安定のための条件を導きだした。圧力駆動の場合、双極子磁場を仮定すると、地球からの距離が十分に遠いという近似の元で Gold (1959) によって電磁流体・熱力学的考察によって導き出された不安定のための条件と一致することを明らかにした (Miura, 2009a)。

(5) 磁場のシアーを入れたイオンの反磁性ドリフト速度勾配による非理想磁気流体不安定性の一般的安定性。

高ベータプラズマ中で運動方程式とオームの法則から4階の非理想MHDの線型固有値微分方程式を導き出した。高周波のホイッスラー成分を無視するとこの固有値方程式は2階の固有値微分方程式になり、理想MHDの2階の固有値方程式において、速度の部分に反磁性ドリフト速度の項を付け加えた形になっていることを明らかにした。平板状プラズマ形状に対して、この一般的固有値方程式から安定のための十分条件を導き出した (Miura, 2009c)。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計6件)

① \*Miura, A., Magnetospheric energy principle for spherically symmetric monopolar magnetospheres, Phys. Rev. Lett., 10, 215001, 2013, 査読有.

② Miura, A., Correction to pressure-driven and ionosphere-driven modes of magnetospheric interchange instability, J. Geophys. Res. Space Physics, doi:10.1002/jgra.50173, 2013b, 査読有.

③ Miura, A., A magnetospheric energy principle extended to include neutral atmosphere, Physics of Plasmas, 18, 032904, 2011, 査読有.

機関リポジトリアドレス  
<http://hdl.handle.net/2261/43516>

④ Miura, A., Pressure-driven and ionosphere-driven modes of magnetospheric interchange instability, J. Geophys. Res., 114, A02224, 2009a, 査読有.

機関リポジトリアドレス  
<http://hdl.handle.net/2261/38138>

⑤ Miura, A., Correction to pressure-driven and ionosphere-driven modes of magnetospheric interchange

instability, J. Geophys. Res., 114, A04208, 2009b, 査読有.

機関リポジトリアドレス

<http://hdl.handle.net/2261/38139>

⑥Miura, A., Single-fluid stability of stationary plasma equilibria with velocity shear and magnetic shear, Physics of Plasmas, 16, 102107, 2009c, 査読有.

機関リポジトリアドレス

<http://hdl.handle.net/2261/38142>

\* この論文の着想、計算、執筆は2012年度内に行ない、年度内に受理された(2013年3月11日)。申請時にはこの論文の計画は含まれず、論文の出版は2013年5月となり、論文掲載料は代表者の個人裁量可能な、科研費以外の財源で支払うため謝辞には

“This research was supported in part by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research under Grant No. 20540436.”

を入れた。この論文の内容は本研究課題の磁気圏のプラズマ中に於ける磁気流体不安定というテーマを更に単極子磁気圏に発展させるものであり、成果中に記載。

[学会発表] (計9件)

①Akira Miura, Pressure-driven and ionosphere-driven magnetospheric interchange instabilities, ICSSSW, September, 20, 2011, Hangzhou, China.

②Akira Miura, A review of magnetospheric interchange and ballooning instability theory and modeling, Workshop on physical processes in non-uniform finite magnetospheric systems, Sept. 15, 2011, Nishijin Plaza.

③三浦 彰、中性大気までを含む拡張された磁気圏のエネルギー原理、2010年日本地球惑星科学連合大会、5月30日、幕張メッセ。

④三浦 彰、非軸対称な磁気圏モデル中における圧力駆動と電離層駆動の交換型不安定、2008年秋地球電磁気地球惑星圏学会、10月9日、仙台。

⑤三浦 彰、磁気圏における交換型不安定モードの圧縮性と安定性基準、2008年日本地球惑星科学連合大会、5月30日、幕張メッセ。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三浦 彰 (MIURA AKIRA)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：20126171

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし