

平成22年5月27日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340170

研究課題名（和文） 磁気圏型回転プラズマ中の波動・不安定性の基礎物理

研究課題名（英文） Waves and Instabilities in Magnetospheric Rotating Plasmas

研究代表者

吉田 善章 (YOSHIDA ZENSHO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80182765

研究成果の概要（和文）：

磁気圏型のダイポール磁場に閉じ込められた回転プラズマの中で起こる様々な揺動の安定性・伝播特性について、その強い非一様性、過渡性、非線形性を精密に分析し、それが引き起こす様々な「異常現象」の物理的メカニズムを明らかにした。とくに、電子サイクロトロン加熱（ECH）によって、電子ベータ値 >0.7 、エネルギー閉じ込め時間 $>0.1s$ を達成し、磁気圏型プラズマ閉じ込めが先進核融合の道を開くことを実証した。また、純電子プラズマの閉じ込めでは、閉じ込め時間（プラズマの保持時間） $>300s$ を達成している。これらの研究を通じて、磁気圏磁場配位の中で起こる「内向き拡散」によって「閉じ込めの自己組織化」が起こることが明らかになり、磁気圏型超高 β プラズマが先進核融合への道を開くことを示した。

研究成果の概要（英文）：

A magnetospheric configuration gives rise to various peculiar plasma phenomena that pose conundrums to astrophysical studies. We have demonstrated that the plasma self-organizes a stable vortex, in which particles diffuse inward to steepen the density gradient. By electron-cyclotron heating (ECH), we can produce ultra high beta (> 0.7) stable (confinement time $> 0.1s$) plasma. We can also produce a pure-electron plasma by emitting electrons from an electron gun placed in the vicinity of the confinement region. The confinement time is longer than 300s. The self-organized confinement is explained by the “distortion” of the phase space of magnetized particles in a strongly inhomogeneous magnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	15,800,000	4,740,000	20,540,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理、磁気圏プラズマ、自己組織化、非エルミート性、非線形波動、異常輸送、乱流

1. 研究開始当初の背景

天体の磁気圏、すなわちダイポール型磁場によって閉じ込められたプラズマは、自然界に存在する最も典型的なプラズマ配位であるが、その物理には未解決な問題が多く残されている。ダイポール型磁場配位は幾何学的に単純であるが、強い空間非一様性をもつ。このために、プラズマの諸パラメタ（密度、圧力、電場、流速など）は自律的な相関関係を形成しつつ固有の構造を生成する。そのメカニズムを理解することで、超高 β プラズマの高性能閉じ込めが実現できれば、先進核融合の科学的可能性が生まれる。

2. 研究の目的

磁気圏型磁場に閉じ込められた回転プラズマの構造および揺動の安定性・伝播特性・非線形性を実験的・理論的に分析し、磁気圏型超高 β プラズマによる先進核融合の科学的可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

我々独自の理論的予想に基づき、RT-1 実験装置（図1）を用いて精密な実験・計測を行い、磁気圏回転系の様々な「異常現象」を物理的に解明する。ECHで生成する超高 β プラズマの内部構造は、干渉計、反射計、プローブ、外部磁気計測などを用いて行う。また純電子プラズマを生成し、その揺動解析や内部電位のプロービングによって、磁気圏型磁場中で起こる自己組織化の基本原理を明らかにする。



図1. RT-1 磁気圏型プラズマ閉じ込め装置

4. 研究成果

(1) 磁気圏プラズマに現れる異常現象

磁気圏型のダイポール磁場に閉じ込められた回転プラズマの中で起こる様々な揺動の安定性・伝播特性について、その強い非一様性、過渡性、非線形性を精密に分析し、そ

れが引き起こす様々な「異常現象」の物理的メカニズムを明らかにした。とくに、電子サイクロトロン加熱（ECH）によって、電子ベータ値 >0.7 、エネルギー閉じ込め時間 $>0.1s$ を達成し、磁気圏型プラズマ閉じ込めが先進核融合の道を開くことを実証した。また、純電子プラズマの閉じ込めでは、閉じ込め時間（プラズマの保持時間） $>300s$ を達成している。これらの研究を通じて、磁気圏磁場配位の中で起こる「内向き拡散」が明らかになった。

(2) Kelvin-Helmholtz 不安定性の自己組織化と内向き拡散

内向き拡散による「閉じ込めの自己組織化」は、座標空間と磁気座標空間のメトリックの違いによって説明できる。磁化された荷電粒子は、サイクロトロン運動、バウンス運動という周期運動によって時空間で「階層化」され、磁気座標空間の多様体上を運動するようになる。粒子衝突などの散逸過程で、この多様体がかき乱されない限り、磁化によるトポロジー束縛が運動や構造を支配する。このために磁気座標空間の（束縛された）熱平衡は座標空間で独特な偏り（すなわち構造）をもつようになるのである（この偏りは、両空間の変換を与えるヤコビアンによって表わされる）。

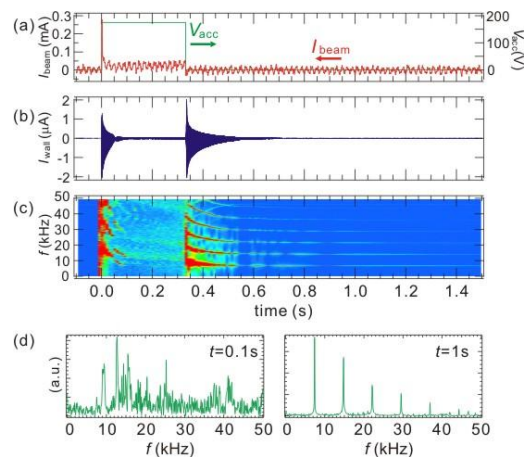


図2. 非中性プラズマの静電揺動。電子入射の開始時と終了時には乱流的な揺動が起こり[(d)左図]、内向き拡散によって内部構造が自己組織化する。安定期に入ると揺動はコヒーレントになり[(d)右図]、剛体回転渦が自己組織化されたことが示される。

純電子プラズマ（非中性プラズマ）においては、この平衡構造は剛体回転渦となること
がプラズマ内部の電場構造や揺動の空間構造
を分析することで確認された（図2）。これ
はシヤ回転が引き起こす Kelvin-Helmholtz
不安定性の自由エネルギーがなくなった基底
状態への緩和を意味する。これらの実験結
果は、並行しておこなった理論解析の結果
と一致しており、磁気圏という強い磁場非
一様性をもつ空間のなかで生じるプラズマ
現象の興味深い特性が明らかになったとい
える。

(3) 超高 β プラズマの高性能閉じ込め

ECHによって局所ベータ値が0.7を超える
プラズマを生成し、エネルギー閉じ込め時
間 $>0.1s$ の高性能を実証した（図3）。プラ
ズマの圧力は内側に強くピーキングした分
布をもつことが多チャンネル磁気計測で明
らかになった（図4）。電子温度は10keV程
度ではほぼ平坦に分布している。圧力分布
のピーキングは密度のピーキングによる。こ
こでも「内向き拡散」が起きていることがわ
かる。非中性プラズマの場合は、内向き拡
散は Kelvin-Helmholtz 不安定性（その静電
モードである diocotron 不安定性）によっ
て起こるが、中性プラズマの場合は、交
換型不安定性によっていると考えられる。

ダイポール磁場は内向き圧力勾配に対し
て「悪い曲率」をもつことから、初等的な理
解では交換型不安定性に対して不安定だと
考えられる。しかし、ダイポール磁場の強
い非一様性のために磁束管体積が外側ほど
大きく、そのために磁束管交換に伴う圧縮
効果で強い圧力勾配でも安定である。前記
のように、磁化した荷電粒子は磁気座標系
を自然な位相空間とするが、そこで一様な
分布とは磁束管あたりの粒子数を一様とし
る分布である。これを実験室系に変換する
と内向きの強い密度勾配が生じるのであ
る。

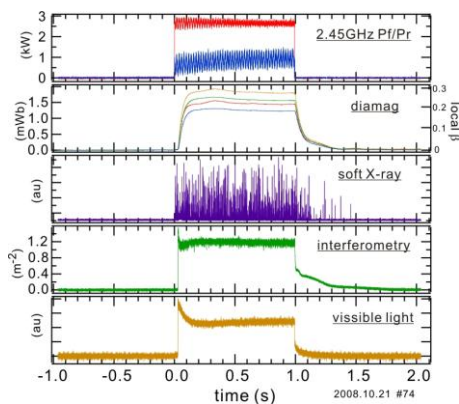


図3. RT-1 超高 β プラズマ生成の典型的波形。ECH
停止後の反磁性信号、密度の変化からエネルギー
閉じ込め時間、粒子閉じ込め時間を評価できる。

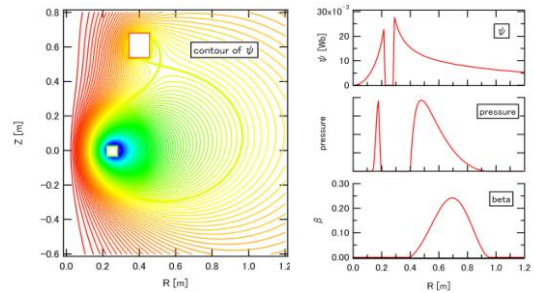


図4. 多チャンネル反磁性信号の計測を平衡計算
とフィッティングして推定される圧力分布。圧力
のピーキングは密度分布のピーキングによる。

(4) 安定性

RT-1 で実現された超高 β 平衡は、ダイポ
ール磁場の中で磁束管あたりの密度が均一化
した状態が自己組織化されるという理論的
予測を実証するものであるが、しかし実験的
には、単純なダイポール磁場で無限空間にプ
ラズマを閉じ込めるとい理論的モデルとは
異なり、有限領域にプラズマを閉じ込めると
いうチャレンジがある。実際に安定な閉じ込
めが得られているのは、セパトトリックス
の安定化効果が効いていることを理論的に
示した。セパトトリックス上には磁場が0と
なるX点があり、その近傍で磁束管体積が発
散する。このためにセパトトリックス近傍は
極めて安定であり、そこで周辺部の圧力を急
峻に0にして有限領域にプラズマを閉じ込
めることが可能である。

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18件）

- (1) Z. Yoshida, H. Saitoh, J. Morikawa, Y. Yano,
S. Watanabe and Y. Ogawa, Magneto-
spheric vortex formation: self-organized
confinement of charged particles, Phys. Rev.
Lett. (to be published)(2010) [査読有].
- (2) 吉田善章, 流れのある平衡・安定性理論
の課題, プラズマ・核融合学会誌 86
(2010) 209-219 [解説論文・査読なし].
- (3) M. Furukawa, H. Hayashi and Z. Yoshida,
Stabilization of Pressure-driven Magneto-
hydrodynamic Modes by Separatrix in
Dipole Plasma Confinement, Phys. Plasmas
17 (2010) 022503 1-5 [査読有].
- (4) Y. Ogawa, Z. Yoshida, J. Morikawa, H.
Saito, S. Watanabe, Y. Yano, S. Mizumaki
and T. Tosaka, Construction and Opera-
tion of an Internal Coil Device, RT-1, with a
High-Temperature Superconductor, Plasma
Fusion Res. 4 (2009) 020 1-8 [査読有].
- (5) H. Saitoh, Y. Yano, T. Mizushima, J.

- Morikawa, and Z. Yoshida, Measurement of the Density Profile of a Toroidal Non-neutral Plasma by a Wall-Probe Array, Plasma and Fusion Res. **4** (2009) 054 1-7 [査読有].
- (6) J. Shiraishi, Z. Yoshida and M. Furukawa, Topological transition from accretion to ejection in a disk-jet system -- singular perturbation of the Hall effect in a weakly ionized plasma, Astrophys. J, **697** (2009) 100 [査読有].
- (7) V. Krishan and Z. Yoshida, Kolmogorov dissipation scales in weakly ionized plasmas, Mon. Not. R. Astron. Soc. **395** (2009) 2039-2044 [査読有].
- (8) Y. Yano, Z. Yoshida, J. Morikawa, H. Saitoh, H. Hayashi and T. Mizushima, Improvement of field accuracy and plasma performance in the RT-1 device, Plasma Fusion Res. **4** (2009) 039 1-3 [査読有].
- (9) Z. Yoshida, Clebsch parameterization: basic properties and remarks on its applications, J. Math. Phys. **50** (2009) 113101 1-16 [査読有].
- (10) H. Saitoh, Y. Yano, T. Mizushima, J. Morikawa and Z. Yoshida, Initial Results of X-ray Imaging and Energy Spectrum Measurements of Hot Electron Plasmas in RT-1, Plasma Fusion Res. **4** (2009) 050 1-3 [査読有].
- (11) M. Iqbal, V. Berezhiani and Z. Yoshida, Multiscale structures in relativistic pair plasmas, Phys. Plasmas **15** (2009) 032905 1-6 [査読有].
- (12) Z. Yoshida and S.M. Mahajan, "Maximum" entropy production in self-organized plasma boundary layer: A thermodynamic discussion about turbulent heat transport, Phys. Plasmas **15** (2009) 032307 1-6 [査読有].
- (13) S. Watanabe, H. Saitoh and Z. Yoshida, Modification of Probe Characteristics in a Supersonic Plasma Flow, Plasma Fusion Res. **3** (2009) 019 1-3 [査読有].
- (14) V. I. Berezhiani, S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Plasma acceleration and cooling by strong laser field due to the action of radiation reaction force, Phys. Rev. E. **78** (2009) 066403 1-8 [査読有].
- (15) Z. Yoshida, Y. Ogawa, J. Morikawa, M. Furukawa, H. Saitoh, M. Hirota, D. Hori, J. Shiraishi, S. Watanabe, S. Numazawa, Y. Yano and J. Suzuki, RT-1 Project: magnetosphere-like plasma confinement, Transac. Fusion Sci. Tech. **51** (2007) 29-33 [査読有].
- (16) H. Saitoh, Z. Yoshida, J. Morikawa, S. Watanabe, Y. Yano and J. Suzuki,
- (17) Long-Lived Pure Electron Plasma in Ring Trap-1, Plasma Fusion Res. **2** (2007) 0451-452 [査読有].
- (18) J. Morikawa, Z. Yoshida, Y. Ogawa, S. Watanabe, Y. Yano, S. Mizumaki, T. Tosaka, Y. Ohtani and M. Shibui, Development of a super-conducting levitated coil system in the RT-1 magnetospheric confinement device, Fusion Engr. Design **82** (2007) 1437-1442 [査読有].
- (19) M. Furukawa, Z. Yoshida, M. Hirota and V. Krishan, Irregular singularity of the magnetorotational instability in a keplerian disk, Astrophys. J. **659** (2007) 1496-1504 [査読有].
- [学会発表] (計 47 件)
- (1) 齋藤晴彦、トロイダル純電子プラズマの wall probe を用いた空間分布計測、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 20、岡山
- (2) 水島龍徳、磁気圏型プラズマ RT-1 でのイオン加熱、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 20、岡山
- (3) 矢野善久、磁気圏型プラズマにおける加熱停止後に見られる崩壊現象、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 21、岡山
- (4) 播磨健明、2 次元非等方乱流のシエルモデルによる解析、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 21、岡山
- (5) 川面洋平、乱流境界層の現象論モデルとエントロピー生成率、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 21、岡山
- (6) 水島龍徳、磁気圏型配位でのイオン加熱とイオン温度計測、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 28、熊本
- (7) 川面洋平、Flux driven 系のエントロピー生成率に関する変分と安定性、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 28、熊本
- (8) 吉田善章、Clebsch 表現の基礎定理と応用、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 28、熊本
- (9) 播磨健明、格子モデルによる分散・散逸性非線形波動の数値的解析、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 26、熊本
- (10) 齋藤晴彦、磁気圏型配位 RT-1 における高エネルギー電子の分布・閉じ込め特性、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 26、熊本
- (11) 矢野善久、磁気計測を中心とした磁気圏型プラズマ RT-1 の閉じ込め特性解析、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 26、熊本
- (12) Z. Yoshida, Introduction to Advanced Math. Methods in Nonlinear Plasma Theory,

Mini-symposium on Advanced
Mathematical Methods in Nonlinear Plasma
Theory, 2009.8.14, Trieste, Italy [招待講演]

- (13) 古川勝、シア流を含む非一様プラズマ中のMHD波動と安定性、オイラー方程式の数理：渦運動と音波150年、2009.7.23、京都
- (14) 吉田善章、流れ場のClebsch表現について——基本的事項と応用、オイラー方程式の数理：渦運動と音波150年、2009.7.23、京都
- (15) 吉田善章、Self-organization in two-dimensional turbulence:-remarks on the variational principle, Hasegawa-Mima equation:30 years and future, 2009.5.21、京都
- (16) 吉田善章、磁気圏型プラズマ閉じ込め実験RT-1の進展、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.30、東京
- (17) 矢野善久、磁気圏型プラズマ装置RT-1における高 β 平衡の磁気計測、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.28、東京
- (18) 水島龍徳、磁気圏型プラズマ閉じ込め(RT-1)におけるトロイダル方向の流れ計測、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.28、東京
- (19) 川面洋平、プラズマの乱流熱輸送におけるヒステリシスの数理解析、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.27、東京
- (20) 林裕之、磁気圏型プラズマ閉じ込めにおける圧力駆動不安定性に対する安定限界解析、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.27、東京
- (21) 中津智世、内部層シア流によるテアリングモードの不安定化、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.27、東京
- (22) 齋藤晴彦、磁気圏型配位RT-1におけるトロイダル純電子プラズマの長時間閉じ込め、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.27、東京
- (23) 古川勝、抵抗性MHD安定性解析における理想MHD領域のプラズマ流効果、日本物理学会第64回年次大会、2009.3.27、東京
- (24) 齋藤晴彦、磁気圏型プラズマの超高 β 閉じ込め(反磁性)と内向き輸送(緩和現象)、閉じ込め・輸送研究会、2009.1.9、茨城
- (25) 吉田善章、RT-1磁気圏型プラズマ実験装置による高 β プラズマと非中性プラズマの閉じ込め、第25回プラズマ・核融合学会年会、2008.12.3、栃木[招待講演]
- (26) 吉田善章、High-Beta (Hot Electron) Plasma in Ring Trap 1(RT-1)、第22回IAEA核融合エネルギー会議、2008.10.15、Geneva, Switzerland
- (27) 吉田善章、相対論効果による渦度(磁場)の生成、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.23、岩手
- (28) 沼澤修平、擬粒子法を用いた流体・運動論シミュレーション-Weibel不安定性の1D非線形シミュレーション、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.23、岩手
- (29) 中津智世、流れを持つプラズマにおけるテアリングモード安定性の漸近接続法による解析、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.22、岩手
- (30) 林裕之、磁気圏型プラズマ閉じ込めにおけるバルーニング方程式に対する安定限界解析、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.22、岩手
- (31) 古川勝、テアリングモードのシア流による不安定化メカニズム、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.22、岩手
- (32) 矢野善久、RT-1磁気圏型プラズマの磁気計測とMHD平衡の実験的解析、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.21、岩手
- (33) 齋藤晴彦、RT-1におけるリミタ導入時のECHプラズマの高エネルギー電子成分の計測実験、日本物理学会2008年秋季大会、2008.9.21、岩手
- (34) Z.Yoshida, Maximum entropy production in self-organized plasma boundary layer, Workshop on Maximum Entropy Production: Earth, life and physical approaches, 2008.9.12, 京都[招待講演]
- (35) 矢野善久、RT-1プラズマの高性能化にもなう反磁性計測と新たな平衡計算モデルについて、日本物理学会第63回年次大会、2008.3.26、大阪
- (36) 齋藤晴彦、RT-1におけるプラズマ中の空間電位計測と流れ駆動実験、日本物理学会第63回年次大会、2008.3.25、大阪
- (37) 沼澤修平、高強度電磁波中の相対論的e-pプラズマの摩擦による加速、日本物理学会第63回年次大会、2008.3.24、大阪
- (38) Z.Yoshida, Some new understanding of "vortex" --for basic physics and "fusion", International Conference on New Energy Sources, 2007.10.22, Tbilisi, Georgia
- (39) 吉田善章、matter-field結合の変分原理、共変形式、非正準Hamilton形式、日本天文学会2007年秋季大会、2007.9.28、岐阜
- (40) 吉田善章、磁気圏型プラズマ装置RT-1における初期計測実験、日本天文学会2007年秋季大会、2007.9.27、岐阜
- (41) 古川勝、磁気回転不安定性と交換型不安定性に関する局所安定条件の統合、日本天文学会2007年秋季大会、2007.9.26、岐阜

- (42) 吉田善章、磁気圏型プラズマ閉じ込めの進展と現状、日本物理学会第 62 回年次大会、2007. 9. 23、北海道
- (43) 齋藤晴彦、RT-1 におけるコイル磁気浮上によるプラズマ閉じ込めの改善、日本物理学会第 62 回年次大会、2007. 9. 23、北海道
- (44) 渡邊将、RT-1 におけるヘリウム中性線発光強度比を用いた電子温度・密度計測、日本物理学会第 62 回年次大会、2007. 9. 23、北海道
- (45) 沼澤修平、静電波に対する多階層粒子シミュレーション法、日本物理学会第 62 回年次大会、2007. 9. 22、北海道
- (46) 吉田善章、Lagrangian for Collective Matter-Field Couplings, 京都大学数理解析研究所、2007. 9. 12、京都
- (47) 吉田善章、隙間と組織化—変分原理の観点から、隙間と組織化、2007. 8. 31、京都

[図書] (計 2 件)

- ① 吉田善章、岩波書店、非線形とは何か—複雑系への挑戦、2008、201
- ② Zensho Yoshida, Springer, The Challenge of Complex Systems, 2010, 205

[その他]

ホームページ等

<http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 善章 (YOSHIDA ZENSHO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：8 0 1 8 2 7 6 5

(2) 研究分担者

小川 雄一 (OGAWA YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：9 0 1 4 4 1 7 0

古川 勝 (FURUKAWA MASARU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・準教授

研究者番号：8 0 3 6 0 4 2 8

齋藤 晴彦 (SAITOH HARUHIKO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：6 0 4 1 5 1 6 4

森川 惇二 (MORIKAWA JUNJI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：7 0 1 9 2 3 7 5

(3) 連携研究者
なし