

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23224014

研究課題名(和文) 磁気圏プラズマの自己組織化 磁場によって歪むメトリックの非線形効果

研究課題名(英文) Self-organization of magnetospheric plasma confinement: nonlinear effect of distorted metric in foliated phase space

研究代表者

吉田 善章 (Yoshida, Zensho)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80182765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 81,800,000円

研究成果の概要(和文)：「渦」は宇宙に遍在する構造でありながら、その生成・維持のメカニズムには未解明な点が多い。そのために渦が関与する自然現象の理解や科学技術への応用には多くの課題が残されている。渦が自己組織化されるメカニズムを明らかにできれば、渦に係わる様々な事象の理解、解析、予測、制御の方法、最適化などが可能になる。

本研究では、天体磁気圏のプラズマを具体例として、その渦構造が生成するメカニズムを「時空の幾何学」の観点から明らかにした。理論的に予測された自己組織化原理が実験的に検証され、先進的核融合に応用できる新たな高性能プラズマ閉じ込め方式の科学的実証が得られた。

研究成果の概要(英文)：While vortices are ubiquitous in the Universe, the basic mechanism of their creation remains incompletely understood. The delineation of the self-organizing processes will bring about immense advances in physics and engineering of various vertical phenomena, leading to innovations in controlling or optimizing vertical structures.

The plasma vortex in a magnetospheric system has been studied in the perspective of space-time geometry. In a magnetosphere, the plasma self-organizes to a state with a steep density gradient. Although the creation of gradient is seemingly contradicting the entropy principle, the resulting nontrivial structure is a stable equilibrium if we properly take into account the topological constraint. We have given the experimental proof of the spontaneous confinement of plasma in a dipole magnetic field. Because of the high-performance plasma confinement and heating, this system has scientific potential for realizing advanced fusion.

研究分野：プラズマ物理学，非線形科学

キーワード：自己組織化 渦 磁気圏型プラズマ 非正準ハミルトン力学 葉層構造 階層構造 先進核融合 逆拡散

1. 研究開始当初の背景

物理的な宇宙に形成される構造は2種類に大別することができる。一つは星に代表される「クラスター」であり、もう一つは銀河や磁気圏に代表される「渦」である。両者は「力」の2グループに対応する。仕事をする力、すなわちエネルギーによって表現できる力が形成するのがクラスターである。他方、仕事をしない力、すなわち磁力やコリオリ力などの支配下で作られる構造が渦である。

星におけるクラスター構造の形成は、基本的には重力エネルギーを小さくしようとする力学に基づく統計分布(ボルツマン分布)で説明できるが、渦の生成を同じようにボルツマン分布で説明しようとしてもうまくゆかない。それは、渦を支配する力がエネルギーで表現できないからである。物理の理論は「物」を表象するエネルギーと「時空」を表象する幾何学の2つを柱として記述されるが、「渦」はエネルギーではなく幾何学の側に原因をもつ構造だということができる。

「渦」は宇宙に遍在する構造でありながら、その生成・維持のメカニズムには未解明な点が多い。そのために渦が関与する自然現象の理解や科学技術への応用には多くの課題が残されている。渦が自己組織化されるメカニズムを明らかにできれば、渦に係わる様々な事象の理解、解析、予測、制御の方法、最適化などが可能になる。例えば、核融合を地上で実現するためには、星のようなクラスター構造ではなく、磁場による渦構造を作らなくてはならない。その基本原理を、普遍的な自然現象に立ち戻って解明することから、画期的なイノベーションにつながることを期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、天体磁気圏のプラズマを具体例として、その渦構造が自己組織化するメカニズムを「時空の幾何学」の問題としてとらえる立場から明らかにしようとするものである。天体は自然に磁気圏を形成し(磁場は電磁場の渦である)、そこでは高密度の内側へ向かって粒子が逆拡散して「自発的な閉じ込め」が起こる。これはプラズマの粒子が感じる空間がダイポール磁場の強い局所性のために歪んでいるためだと考えることができる。つまり「渦」はそれ自身が定める時空によって自己組織化されたマクロな構造を形成していると考えられるのである。このような宇宙の現象にならって「自発的に閉じ込められたプラズマ」を作り、先進核融合や反物質プラズマの生成に応用する可能性を開くことが本研究の目的である。

具体的な研究課題は(1)密度勾配に反して粒子が拡散する「内向き拡散」の実験的解析、および理論的解明。(2)磁束管の圧縮効果による安定な高圧力(値)プラズマ閉じ込めの実証とその理論的基礎付け、(3)強い磁場勾配のために起こる非線形効果、プ

ラズマ加熱の実験的解明と理論的基礎付けである。

3. 研究の方法

実験と理論を両輪とした総合的な物理研究を行う。(1)実験研究では、RT-1磁気圏型プラズマ実験装置を用い、極めて高い圧力をもつプラズマの安定平衡が自己組織化するメカニズムを解明する。とくに、プラズマを構成する電子とイオンの非対称性によって生じる2流体効果を分析するために、高電子温度プラズマに対してイオンサイクロトロン加熱(ICH)を行い、イオン温度を直接的に制御して、プラズマの反応を解析する。

光学計測システム(ポッケルス・プローブ)を開発し、強い磁場勾配をもつ磁気圏において、様々なプラズマの波動がどのような内部構造をもつのかを直接的に計測する。プラズマ内部の密度、イオン温度、イオン流速、電子温度、密度揺動の計測によって、内向き拡散による自発的閉じ込めのメカニズムと構造を正確に同定し、高ベータ平衡の安定性を検証する。(2)これらと平行して進める理論研究では、マクロな構造を特徴付ける「マクロ階層」を運動の幾何学的理論(ハミルトン力学)の立場から定式化し、位相空間の葉層化とマクロ構造の関係を明らかにする。とくに構造の分岐・複雑化を葉層の特異点の構造から定式化する。内向き拡散を正しく定式化する統計理論を構築し、数値シミュレーションによって実験との定量的な比較検討を行う。

4. 研究成果

(1)マクロとは何か

マクロとミクロの違いは、スケールの大小、あるいは構成要素の数の多少として定義されるのが普通だが、ただそれだけでは表象の設定条件(*a priori*)を言っているだけで、これらに生起する現象の違いを明らかにしていない。マクロに対する関心の本質は何か、それは「構造」ミクロに分解してしまうと消えてしまう合成物そのものに向けられた眼差しである。

ここでは「マクロ」とは構造が形成される空間であると定義しよう。ミクロの世界にある膨大な自由度が同等・均一に発現するならば、マクロはエントロピー最大の無秩序状態となる。構造が生成するためにはミクロ自由度の縮減、すなわち「トポロジー束縛」が働かなくてはならない。生物の世界では、万能細胞に対して抑制が効いて分化が起こり、構造が生成することが知られている。物理の課題は、このような「設計図」のない世界でも起こるトポロジー束縛の起源を探ることだといえる。

すでに「トポロジー束縛」という言葉を用いて、トポロジーの概念を引き寄せることを提案したのだが、具体的には力学の幾何学的理論によって束縛の定式化を行う。我々は、

位相空間の「葉層構造」として「マクロ階層」を定義する[1]。すなわち、マクロとは位相空間のなかに埋め込まれた部分多様体 = 葉 (leaf) だと考える。このようにして、我々の理論的課題は、マクロな系の時空を支配する幾何学、とくにその大域的構造を解明することに帰せられる。また実験的課題は、理論が予測するマクロ構造とその形成メカニズムを反映する現象を明らかにし、理論的な前提の妥当性、解析の正当性、さらに応用に向けた可能性を証明することである。

(2)非正準ハミルトン力学系と葉層構造

標語的に言うと「ミクロは正準、マクロは非正準」である。ミクロの物理学は、要素へ還元して単純化した対象に対して、その運動を表現するために必要十分な空間を同定することを目的としている。したがって、ミクロな対象を記述する法則は「正準」すなわち過不足ない空間のなかの幾何学 = 群構造を表すものでなくてはならない(ハミルトン力学の枠組みではシンプレクティック多様体)。一方、マクロな系がミクロの単純な集合(直積空間)とは異なるものと定式化されるとするならば、その本質は非正準性にある。

非正準ハミルトン力学系の位相空間はカシミール不変量によって葉層化されており、その葉の上に多様な構造が分岐する。カシミール不変量は、トポロジー束縛をスカラー量によって表現する運動の第1積分であり、これを変分原理に組み込んで、構造の分岐を表現できる。エネルギーが単純でも、葉の上のエネルギー分布は、葉の曲がりによって複雑になる(図1)。このために、葉 = マクロ階層の上には複雑な構造が形成されるのである。具体的には、ヘリカルに変形した平衡状態や円偏光した電磁波 (Alfvén 波) などカイラリティーをもつ構造がヘリシティーというカシミール不変量の葉の上に形成される構造であることを示した[1,2]。

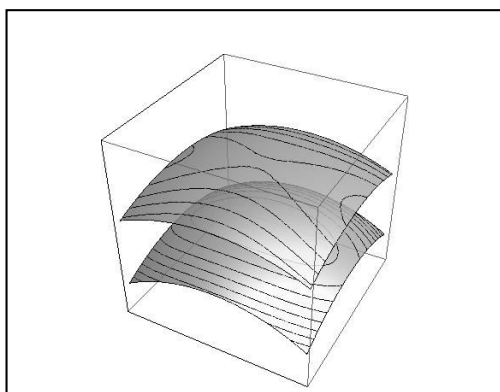


図1：葉層化した位相空間の概念図。運動はカシミール不変量の等高面(カシミール葉)の上に束縛される。カシミール葉の曲がりによって、実効的なエネルギーは複雑な分布(面上の等高線)をもつ。

(3)トポロジー束縛された系の統計力学

我々は、カシミール不変量を「断熱不変量」と解釈するのがよいと考える[3]。これによって「スケール」の概念がトポロジー束縛に導入できるからである。カシミール不変量はハミルトニアンと独立な運動の第1積分である。一般的に第1積分は何らかの「対称性」を表すものだと考えるのだが、カシミール不変量を与える対称性はハミルトニアンの中にはない。この奇妙な第1積分の起源はマクロ階層において捨象されたもの、すなわち粗視化でミクロ変数を分離したことで生じる対称性だと解釈するのである。これは断熱不変量を導く手続きに他ならない。

この理論を磁気圏プラズマにあてはめると、サイクロトロン運動、バウンス運動の断熱不変量 (μ, J_{\parallel}) を分離したマクロ階層を考えることができる。ランダウレベルのアナロジーで、周期運動の角周波数を量子化したエネルギー、断熱不変量を「擬粒子」の数だと考えることができる。マクロモデルとは、すなわちこの擬粒子の力学である。擬粒子は非正準な位相空間に棲んでいる。これを葉層化しているカシミール不変量は断熱不変量たちである[4]。

このようにトポロジー束縛された系のボルツマン分布とは、擬粒子たちのグランド・カノニカル平衡である。断熱不変量たちの葉の上で形成される熱力学平衡を参照系(実験室系)の位相空間で観測すると、葉の不変測度の非一様性が「構造」として現れる。平衡への緩和過程は、葉の不変測度に基づいた確率過程によって定式化された拡散方程式で表現できる。具体的なパラメタで数値シミュレーションを行い、粒子が内向き拡散すること、それにともなって参照系のエントロピーは減少することが示された[5]。

(4)実験的検証

RT-1 実験装置を用いた実験で「カシミール葉上の熱力学」の検証を行った(図2)。

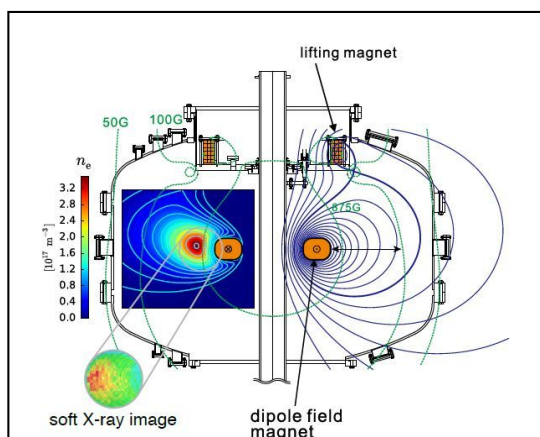


図2：RT-1 実験装置の断面図。左側には典型的な密度分布と X 線イメージを示す。右側には磁力線の構造を示す。

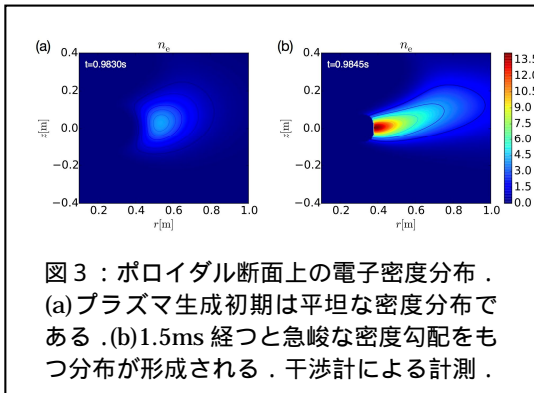


図3：ポロイダル断面上の電子密度分布．(a)プラズマ生成初期は平坦な密度分布である．(b)1.5ms経つと急峻な密度勾配をもつ分布が形成される．干渉計による計測．

自己組織化する閉じ込め：内向き拡散によって粒子は中心部へ向かって拡散し、自発的な閉じ込めが起こる（図3）．形成される密度分布は理論的な予測と良い一致を示す[6]．

ベータトロン加熱：プラズマ中のイオン温度分布・流速分布の計測によって、内向き拡散に伴って放射帯が生成するメカニズムが明らかになった[7]．磁気モーメント μ が保存する拡散過程では、磁場が強い中心部へ粒子が拡散するとき、磁場に垂直方向のエネルギーが増幅される．これはベータトロン加速器と同じ原理である．エネルギー源は拡散を駆動する揺らぎである．磁場に垂直および平行方向のイオン温度を計測し、中心部に向かって垂直方向の温度が選択的に上昇することを明らかにした（図4）．エネルギーバランスの理論モデルと良い一致を確認した．

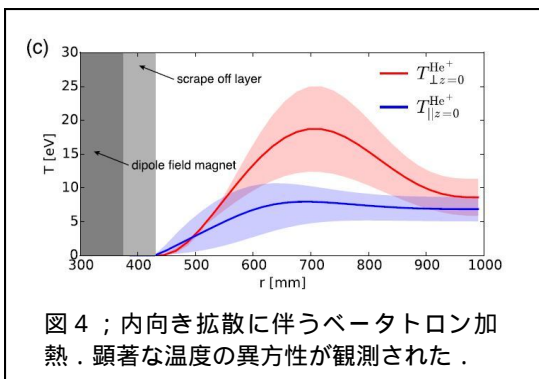


図4：内向き拡散に伴うベータトロン加熱．顕著な温度の異方性が観測された．

擬粒子の化学ポテンシャル：磁気圏プラズマをマクロにみると双極子マグネットと考えることができる．磁化 M は超伝導マグネットの電流とプラズマ中の反磁性電流の和で与えられる．高 β となると後者の寄与が顕著である．電子サイクロトロン加熱で β を上げると磁気浮上した磁気圏プラズマが全体で運動する．これは磁化 M が変化して磁気浮上系の力学バランスが変わるためである．サイクロトロン加熱は磁気モーメント μ の入射と考えることができ、これを擬粒子の数と解釈すると、擬粒子の化学ポテンシャルが磁化 M とエネルギー密度 ϵ の比例計数を決めることになる．図5は実験的に計測された比例関係である[8]．

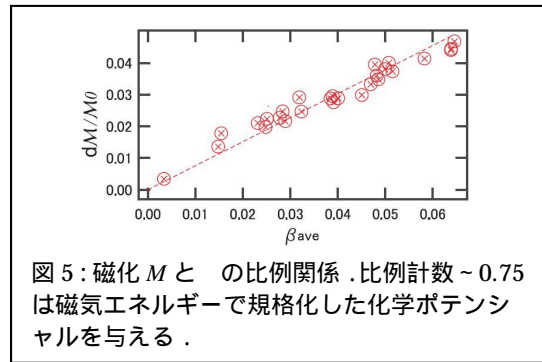


図5：磁化 M と ϵ の比例関係．比例計数 ~ 0.75 は磁気エネルギーで規格化した化学ポテンシャルを与える．

2流体効果：イオンサイクロトロン加熱によってイオンの圧力を変化させると、プラズマ回転流が変化することが観測された．これは2流体効果の直接的な実験的証明である．磁気圏プラズマは、クロスヘリシティ $=0$ の特異カシミール葉上に自己組織化される構造である．MHDのような1流体のモデルでは平衡状態はカイリティ η をもたないので回転流（電流を生成するドリフト成分を除く）が0になるが、2流体効果を考慮すると電子とイオンの非平衡のために電場が発生し、 $E \times B$ ドリフト回転が生じる（図6）[9]．

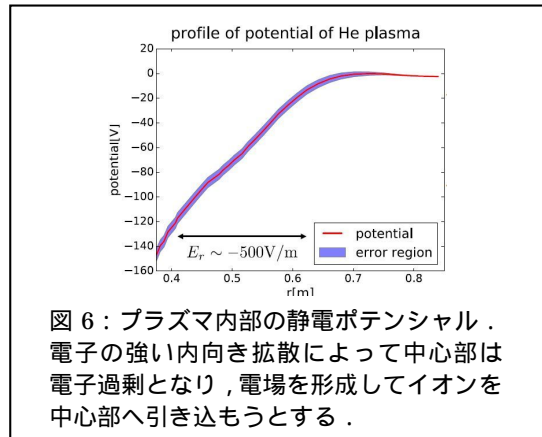


図6：プラズマ内部の静電ポテンシャル．電子の強い内向き拡散によって中心部は電子過剰となり、電場を形成してイオンを中心部へ引き込もうとする．

(5) 応用の可能性と残された課題

本研究によって、磁気圏型プラズマの自己組織化原理が明らかになり、局所 β が1を超える安定な平衡（閉じ込め時間 ~ 0.7 s）を実現した[10]．またイオンサイクロトロン波(S波)によって、閉じ込め領域全体にわたるイオン加熱に成功した[11]．将来、先進的核融合に活用できる新たな高性能プラズマ閉じ込め方式の科学的実証を得たといえる．

イオン加熱システムの最適化、高密度化などは残された技術的課題であり、次世代の大型実験で発展させる必要がある．

トポロジー束縛による時空の歪みの数学的表現、その効果の物理的理解は確立されたといえるが、カシミール不変量として積分できないトポロジー束縛について更なる研究が必要である．本研究を通じて考案された「ファントム」による空間拡張の方法[3]は、非ホロノミック束縛を扱う理論へ応用でき、大きな進展が期待できる．

参考文献

1. Z. Yoshida, Adv. Phys. X **1** (2016) 2-19.
2. Z. Yoshida, R.L. Dewar, J. Phys. A **45** (2012), 365502.
3. Z. Yoshida, P.J. Morrison, Phys. Scr. **91** (2016), 024001.
4. Z. Yoshida, S.M. Mahajan, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014** (2014), 073J01.
5. N. Sato, Z. Yoshida, J. Phys. A **48** (2015), 205501.
6. H. Saitoh *et al.*, Phys. Plasmas **18** (2011), 056102.
7. Y. Kawazura *et al.*, Phys. Plasmas **22** (2015), 112503.
8. Z. Yoshida *et al.*, Phys. Plasmas **19** (2012), 072303.
9. N. Takahashi *et al.*, in preparation for publication.
10. M. Nishiura *et al.*, Nucl. Fusion **55** (2015), 053019.
11. M. Nishiura *et al.*, Plasma Fusion Res. **11** (2016), 2402054.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 35 件 : 全て査読あり)

Z. Yoshida; Self-organization by topological constraints: hierarchy of foliated phase space, Adv. Phys. X **1** (2016) 2-19.

doi:10.1080/23746149.2015.1127773

Z. Yoshida and S. M. Mahajan; Quantum spirals, J. Phys. A: Math. Theor. **49** (2016), 055501 (12pp).

doi:10.1088/1751-8113/49/5/055501

Y. Kawazura, Z. Yoshida (他 8 人); Observation of particle acceleration in laboratory magnetosphere, Phys. Plasmas **22** (2015), 112503 (8pp). doi:10.1063/1.4935894

K. Tanehashi and Z. Yoshida; Gauge symmetries and Noether charges in Clebsch-parameterized magnetohydrodynamics, J. Phys. A: Math. Theor. **48** (2015), 495501 (20pp). doi:10.1088/1751-8113/48/49/495501

N. Sato and Z. Yoshida; A stochastic model of inward diffusion in magnetospheric plasmas, J. Phys. A: Math. Theor. **48** (2015), 205501 (24pp).

doi:10.1088/1751-8113/48/20/205501

N. Sato, N. Kasaoka and Z. Yoshida; Thermal equilibrium of non-neutral plasma in dipole magnetic field, Phys. Plasmas **22** (2015), 042508 (9pp). doi:10.1063/1.4917474

M. Nishiura, Z. Yoshida, H. Saitoh (他 6 人); Improved beta (local beta > 1) and density in electron cyclotron resonance heating on the RT-1 magnetosphere plasma, Nucl. Fusion **55** (2015), 053019 (5pp).

doi:10.1088/0029-5515/55/5/053019

H. Saitoh, Y. Yano, Z. Yoshida (他 5 人); Observation of a new high- β and high-density state of a magnetospheric plasma in RT-1, Phys. Plasmas **21** (2014), 082511 (6pp). doi:10.1063/1.4893137

Z. Yoshida and S. M. Mahajan; Self-organ-

ization in foliated phase space: construction of a scale hierarchy by adiabatic invariants of magnetized particles, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014** (2014), 073J01 (14pp). doi:10.1093/ptep/ptu104

Z. Yoshida and P. J. Morrison; A hierarchy of noncanonical Hamiltonian systems: circulation laws in an extended phase space, Fluid Dyn. Res. **46** (2014), 031412 (21pp). doi:10.1088/0169-5983/46/3/031412

Z. Yoshida, Y. Kawazura and T. Yokoyama; Relativistic helicity and link in Minkowski space-time, J. Math. Phys. **55** (2014), 043101 (19pp). doi:10.1063/1.4872236

Y. Kaneko and Z. Yoshida; Numerical study on a canonized Hamiltonian system representing reduced magnetohydrodynamics and its comparison with two dimensional Euler system, Phys. Plasmas **21** (2014), 032103 (7pp). doi:10.1063/1.4863982

Z. Yoshida, P. J. Morrison and F. Dobarro; Singular Casimir elements of the Euler equation and equilibrium points, J. Math. Fluid Mech. **16** (2014), 41--57.

doi:10.1007/s00021-013-0143-4

Z. Yoshida and E. Hameiri; Canonical Hamiltonian mechanics of Hall magnetohydrodynamics and its limit to ideal magnetohydrodynamics, J. Phys. A: Math. Theor. **46** (2013) 335502 (16pp).

doi:10.1088/1751-8113/46/33/335502

Z. Yoshida; Singular Casimir elements: their mathematical justification and physical implications, Proc. IUTAM **7** (2013), 141--150. doi:10.1016/j.piutam.2013.03.017

Z. Yoshida, H. Saitoh (他 7 人);

Self-organized confinement by magnetic dipole: recent results from RT-1 and theoretical modeling, Plasma Phys. Control. Fusion **55** (2013), 014018 (5pp).

doi:10.1088/0741-3335/55/1/014018

Z. Yoshida, Y. Yano, J. Morikawa and H. Saitoh; Thermo-magneto coupling in a dipole plasma, Phys. Plasmas **19** (2012), 072303 (5pp). doi:10.1063/1.4736984

H. Saitoh, Z. Yoshida (他 7 人); Observation of magnetic fluctuations and rapid density decay of magnetospheric plasma in RT-1, Phys. Plasmas **19** (2012), 064502 (4pp). doi:10.1063/1.4728089

Y. Kawazura and Z. Yoshida; Comparison of entropy production rates in two different types of self-organized flows: Benard convection and zonal flow, Phys. Plasmas **19** (2012), 012305 (5pp). doi:10.1063/1.3675854

H. Saitoh, Z. Yoshida (他 7 人); Formation of high- β plasma and stable confinement of toroidal electron plasma in Ring Trap 1, Phys. Plasmas **18** (2011), 056102 (9pp).

doi:10.1063/1.3567523

〔学会発表〕(計 105 件)

Z. Yoshida; A formulation of “macro hierarchy” and self-organization, 8th Festival de Theorie, Aix-en-Provence (France), 2015.7.21 [invited lecture].

Z. Yoshida; Self-organization by maximizing entropy on a foliated phase space, Turbulent Mixing and Beyond Workshop, Trieste (Italy), 2014.8.7 [invited talk].

Z. Yoshida; Geometrical theory of vortex, ICTP-NCP International College on Plasma Physics, Islamabad (Pakistan), 2013.11.12 [invited video lecture].

Z. Yoshida and S. M. Mahajan; Twisting Space-Time in relativistic plasma, Asia Pacific Physics Conference, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2013.7.17[invited talk].

Z. Yoshida, P. J. Morrison and R. L. Dewar; Unfreezing Casimir invariants ---application to a Hamiltonian description of tearing-mode instability, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics, 九州大学(福岡県福岡市), 2013.3.14 [invited talk].

Z. Yoshida; Singular Casimir elements and their roles in fluid/plasma dynamics, BIRS workshop “Spectral Analysis, Stability and Bifurcation in Modern Nonlinear Physical Systems”, Banff (Canada), 2012.11.6 [invited lecture].

Z. Yoshida; Self-organized structures over scale hierarchy: non-canonical Hamiltonian mechanics, phase space foliation, and “vortex”, Tbilisi State University, Tbilisi (Georgia), 2012.11.22~29 [lecture].

Z. Yoshida; Singular Casimir elements: their mathematical justification and physical implications, Topological Fluid Dynamics - IUTAM Symposium, Cambridge (UK), 2012.7.27 [keynote lecture].

Z. Yoshida; Self-Organized Confinement by Magnetic Dipole: Recent Results from RT-1 and Theoretical Modeling, Asia-Pacific Plasma Theory Conference, Murrumbidgee (Australia), 2012.2.1[invited talk].

Z. Yoshida; Origin and Structure of VORTEX: Frontier of Nonlinear Science, Plasma conference 2011, 石川県立音楽堂(石川県金沢市), 2011.11.24 [plenary].

〔図書〕(計 2 件)

Z. Yoshida and Y. Kawazura; Bifurcation, Stability, and Entropy Production in a Self-Organizing Fluid/Plasma System, in *Beyond The Second Law: Entropy Production and Non-Equilibrium Systems*, ed. R. Dewar, (Springer, 2014) Chap. 15, pp. 291--307.

Z. Yoshida and P. J. Morrison; Unfreezing Casimir invariants: singular perturbations giving rise to forbidden instabilities, in *Nonlinear physical systems: spectral analy-*

sis, stability and bifurcation, ed. O. N. Kirillov and D. E. Pelinovsky, (John Wiley and Sons, 2014) Chap. 18, pp. 401--419.

〔その他〕

ホームページ: <http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/>

解説記事

吉田善章; 渦・磁場のコスモロジー, パリテイー (2015), 41--42.

吉田善章; 宇宙にまなぶプラズマの自発的な閉じ込め: 先進的核融合の可能性を求めて, 科研費 NEWS Vol. 4, 11 (2012).

吉田善章; 時空の問題として見るプラズマ物理 --- 渦 とは何かをめぐって, 日本物理学会誌 68 (2013), 74--81 [交流・表紙].

紹介記事

『宇宙最初の渦 成り立ち解明』東京新聞, 2011年6月6日(朝刊).

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

齋藤 晴彦 (SAITOH HARUHIKO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
客員共同研究員(H23~H25まで)
研究者番号: 6 0 4 1 5 1 6 4

矢野 善久 (YANO YOSHIHISA)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
特任研究員(H23~H25まで)
研究者番号: 9 0 5 9 8 9 8 9

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(H23~H25まで)
研究者番号: 7 0 1 9 2 3 7 5

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・
准教授(H23~H24まで)
研究者番号: 8 0 3 6 0 4 2 8

高瀬 雄一 (TAKASE 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: 7 0 2 9 2 8 2 8

西浦 正樹 (NISHIURA MASAKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
准教授(H26~)
研究者番号: 6 0 3 6 0 6 1 6

川面 洋平 (KAWAZURA YOHEI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
助教(H26~)
研究者番号: 8 0 7 2 5 3 7 5