

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H02860

研究課題名(和文) 流体方程式における非共鳴非線形相互作用

研究課題名(英文) Non-resonant non-linear interaction in fluid equations

研究代表者

山田 道夫 (Michio, Yamada)

京都大学・数理解析研究所・特任教授

研究者番号：90166736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：空間的波動を伴う非線形発展方程式系において、波動の非線形非共鳴相互作用、特に近共鳴相互作用が、解の時間発展において果たす役割とその機構を調べるのが本研究の目的である。この問題は、回転球面上など差動回転を伴う流体運動において顕著な帯状流が形成される機構と密接な関係にある。本研究では、回転球面上の線形Rossby波モードを、帯状構造の有無、共鳴相互作用の有無によって分け、相互の非線形エネルギー輸送を調べた結果、非共鳴相互作用によるエネルギー輸送が系の時間発展に決定的に重要であり、共鳴相互作用を伴うモードに非共鳴相互作用によって輸送されるエネルギーが、帯状構造を作ることなどが見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転球面上の帯状流形成は惑星大気における典型的な流れパターンである。従来、帯状流形成はRossby波と帯状流の粘性臨界層を通しての相互作用によるという解釈が行われてきた。これに対し本研究の結果は、帯状流形成には非粘性非線形相互作用が重要であり、粘性は必ずしも必要ではないこと、また、共鳴相互作用は帯状流を形成できないため、非共鳴相互作用が帯状流へのエネルギー輸送を担っていること、を示している。即ち、帯状流形成においては共鳴相互作用に近い近共鳴相互作用が重要な役割を果たしていると考えられる。この帯状流へのエネルギー輸送では、波数空間が離散的であるため、非局所性が強く現れる。

研究成果の概要(英文)：Nonlinear and nonresonant interaction between linear waves is studied in nonlinear evolution equations of linear wave systems, including two-dimensional fluid dynamical equations on a rotating sphere where the Rossby waves are fundamental modes and the most noticeable phenomenon is the generation of zonal flows, which are steady Rossby waves uniform in east-west direction, as often observed in solar planets. Numerical simulation with very small viscosity strongly suggests that the generation of the zonal flows is possible without viscosity, although an interpretation of the zonal flow generation employs the energy transfer from Rossby waves to zonal flows through the viscous critical layers. The Rossby waves are divided into 4 groups according to zonal/nonzonal and whether resonant interaction is possible or not. Energy transport between these 4 groups shows that the non-resonant interaction transfers energy to the zonal modes which cannot receive energy by the resonant interaction.

研究分野：流体力学, 応用数学

キーワード：回転流体 帯状流 ロスビー波

1. 研究開始当初の背景

(1) 線形波動解を伴う非線形場において波動の振動数が無限大となる極限では、漸近的に波動解の共鳴相互作用が非線形相互作用の主要項となり、非線形解の空間パターンやダイナミクスを支配して系の振舞いの骨格をなすと考えられる。例えば宇宙惑星科学に現れる大規模流体運動では、差動回転効果に起因する線形波動 (Rossby 波) が存在し、非線形現象はこれら Rossby 波の非線形相互作用によって出現する。Rossby 波は、分散関係の形から 3 波共鳴可能な系であり、系の回転角速度が無限大となる極限において振動数は無限大に発散するため、この極限では、非線形項の中の共鳴相互作用項は他の非共鳴相互作用項よりも大きな重要性を持つと予想され、実際、本研究代表者ら (山田, 米田: Yamada and Yoneda, PhysicaD, 245 (2013)) は、平面上の 2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式について、任意の有限時間内では、回転角速度無限大の極限での解の振舞いは Rossby 波の非共鳴相互作用を除いた方程式に従うことを証明した。

(2) 大きい有限な回転角速度の場合における解の長時間の漸近挙動 ($t \rightarrow \infty$ with fixed) は、現実の惑星大気の運動とも関係する。数値的には、Navier-Stokes 方程式の解には長時間後に帯状流 (zonal flow) とよばれる東西方向に一樣性の高い流れが出現することが知られており、現実の惑星でも卓越する東西流が観測されている。ところが、大きな回転角速度を持つ平面や球面上であっても、共鳴相互作用しか含まない漸近方程式では帯状流モードにエネルギーを輸送できないことを示すことができる。このため波動場における帯状流形成において、非共鳴相互作用の果たす役割の重要性が注目されている。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、主に一樣回転する球面上の 2 次元 Navier-Stokes 方程式を対象にして、線形波動モード (Rossby 波) の非線形非共鳴相互作用の果たす役割を調べることを目的とする。特に回転球面上の流れの時間発展問題における非共鳴相互作用の果たす役割とその機構に注目する。この系においては、個々のモード間の非共鳴相互作用は、その強さにおいて共鳴相互作用に劣るため二次的な重要性しか持たないように見えるが、長時間の漸近挙動においては、非共鳴相互作用が最も顕著な現象を生成するための中心的な役割を担っている。このような状況がどの程度一般的であるのか、判断することは難しいが、近年、他の流体力学系においても「発展方程式の非線形項を共鳴相互作用のみに制限するとそれとは全く一致しない非現実的な結果を与える」という場合が見出されており、これは非共鳴相互作用が、全系にとって必須の役割を果たしていることを示唆している。本研究はこれらの重要な領域で見られる非共鳴相互作用の重要性に着目して、全系の時間発展における役割とそこに潜む機構を見出そうとするものである。

(2) 本研究の対象は、回転球面上の非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を中心とする流体方程式系であり、大きな課題は帯状流形成における非共鳴相互作用の役割の解明である。帯状流形成は顕著な現象であることから従来から多くの興味を集めてきた問題でもある。地球流体力学分野や地球惑星科学分野においては、この問題は「波と平均流の相互作用」と呼ばれる弱非線形理論の枠組みで論じられてきたが、全体を統合的に説明する理論はいまだ存在していない。特に帯状流となる東西波数ゼロの球面調和関数成分の生成については、具体的に記述する枠組みも知られていない。本研究計画はこの帯状流形成過程を Rossby 波の非線形非共鳴相互作用の構造を通して記述することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 回転球面上の 2 次元 Navier-Stokes 方程式に従う非圧縮性流体を考える。この系の線形波動 (Rossby 波) は、流れ関数が単項の球面調和関数 $\psi(\theta, m)$ となる線形解 (θ は正整数, m は整数, $-\theta \leq m \leq \theta$) であり、振動は数 $\omega(\theta, m) = -2m / \theta(\theta + 1)$ で与えられる。これらの線形解のうち $m=0$ となるものは東西方向一様の帯状流を表すモード (以下、帯状モード) である。球面調和関数の完全性により、任意の流れ関数はこれらの線形解によって展開することができる。本研究ではまず、3 つの Rossby 波が共鳴相互作用を起こす条件を求め、共鳴相互作用可能な波を特定する。回転球面の近似モデルである面上の 2 次元流れでは、すべての Rossby 波はフーリエモード (三角関数) であり、さらに x 方向波数がゼロである帯状波はすべて共鳴相互作用が可能であるが、本来の回転球面上の流れでは、球面調和関数の構造から、共鳴相互作用を伴わないモード (非共鳴モード) が存在するため、共鳴構造は面上のものとは大きく異なっている。

(2) 回転球面上の Rossby 波の間の非線形および共鳴 / 非共鳴相互作用を調べるため、Rossby 波を、帯状か非帯状か ($m=0$ / $m \neq 0$)、および、共鳴モードか非共鳴モードか、によって 4 つのグループに分類し、そのいくつかのみによる時間発展を数値的に求め、互いに比較することで、各々のグループの重要性を調べる。また、それらのグループ間におけるエネルギー輸送を数値的に検討して、非線形相互作用が帯状流を形成する機構を記述する。特に本研究では、共鳴相互作用によるエネルギー輸送のみならず非共鳴相互作用によるエネルギー輸送を評価する。

4. 研究成果

(1) 従来、帯状流形成はしばしば、Rossby 波の東西方向の位相速度と帯状流の速度が一致する緯度において発生する粘性臨界層を通して、Rossby 波の東西方向運動量が帯状流に渡されることに起因する、と語られてきた。この系では、数学的には流れの非粘性極限は非粘性流れと一致することが示される(それらが一致する流れに帯状流形成が含まれるかどうかは、数学的には証明されていない)。しかしながら、粘性臨界層を用いた議論では、本来非粘性の非線形相互作用のみで生じる現象に仮想的粘性を導入するだけでなく、Rossby 波は弱いものとして弱非線形的に扱われるため、本来の非線形相互作用による帯状流生成機構は未知のまま残されている。本研究ではまず、回転球面上の2次元流れについて数値実験を行い、数値的な限界まで粘性を小さくして得られる粘性流れの状況(帯状流の発生)と、非粘性流れの数値実験の結果が、数値誤差範囲内で一致することを確認した。これは、数値誤差の範囲内において、流れの非粘性極限で発生する帯状流の状況が、非粘性数値実験でも得られることを示し、非粘性流れであっても帯状流形成が進行することを示すものである。この結果に基づき、以下では非粘性非線形相互作用による帯状流生成機構を研究の対象とする。

(2) 流体方程式の非線形項の形から、3つの Rossby 波 $Y(\ell_1, m_1), Y(\ell_2, m_2), Y(\ell_3, m_3)$ の3波 (triad) が共鳴するためにはまず $m_1 = m_2 + m_3$, $|\ell_2 - \ell_3| < \ell_1 < \ell_2 + \ell_3$, $\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 = \text{奇数}$, $(\ell_1, m_1) = (\ell_2, m_2) + (\ell_3, m_3)$ が必要であることを示すことができる。また特に $m=0$ となる波が二つ以上含まれる場合は非線形項はゼロとなるため、帯状モード $Y(\ell, 0)$ については、 ℓ が奇数であるものが一つだけ含まれる triad のみが共鳴相互作用の対象となる。ところが、この triad の相互作用は、ターゲットモードの位相を変化させるのみであるため、エネルギー輸送には寄与しない。このため従来は、共鳴相互作用のダイナミクスを調べる際、共鳴相互作用によって結ばれるモードのクラスターの定義において、この triad はしばしば除外されていた。

そこで数値シミュレーションによって、共鳴モード(帯状と非帯状を含む)のみを維持しての時間発展、および、共鳴非帯状モードのみを維持しての時間発展を比較したところ、パリンストロフィーの時間的増大が、前者は後者よりも1割程度小さいことが分かった。これは、共鳴帯状モードが、エネルギー輸送は行わないものの、他のモードの位相に影響を与えることによって、系全体の時間発展に無視できない寄与を与えていることを示している。このため従来の、共鳴帯状モードを含まない共鳴モードのクラスター分解は、系の時間発展を考えるうえで必要なモードを欠いていることになる。

(3) 帯状/非帯状、および、共鳴/非共鳴によって分類された4つのモードグループについて、数値シミュレーションによってそれらの間のエネルギーのやり取りを調べた。Rossby 波の大部分は非共鳴非帯状モードであり、次に多いのは共鳴非帯状モードとなり、帯状モード($m=0$)の個数は非常に少ない。初期条件としてランダムかつ一様等方な場を与えて時間発展させた場合、初期には殆どのエネルギーは非帯状モードに担われているが、時間と共にエネルギーは共鳴帯状モードに移ってゆく。このとき非共鳴帯状モードのエネルギーは殆ど増加しない。これは流れ場に南極域と北極域における西向き周極流が概ね赤道対称に発達することと整合的である。

このときの各モード間のエネルギー輸送を詳細に調べた結果、共鳴帯状モードへのエネルギー輸送は、その殆どが非帯状モード同士の非線形相互作用によって担われていることが見出された。モード間の共鳴相互作用では、共鳴帯状モードにはエネルギー輸送が行われないため、ここで重要な役割を担っている非帯状モードの同士の非線形相互作用は、すべて非共鳴相互作用である。すなわち、回転球面上の2次元流れにおいて顕著な帯状流の形成は、初期エネルギーの大部分を占める非共鳴モードが、互いに非共鳴の非線形相互作用を行うことで、共鳴帯状モードにエネルギーを輸送する、というある意味ねじれた状況にある。通常の波動系では、非線形相互作用のうち最も強力なものは共鳴相互作用であり、回転球面上の2次元流体系は惑星大気モデルとして最も単純な系であるにも関わらず、波動間の非線形相互作用が共鳴相互作用を主体として記述できないことは非常に興味深い。なお、回転球面を接平面で近似した面においては、すべての帯状 Rossby 波は共鳴モードとなるため、回転球面上の共鳴帯状モードがもつ南北の対称性に関する特徴は引き継がれていないことを付記しておく。

(4) 帯状流形成は、面上でも議論されることも多いが、その際に用いられる方程式(Charney-Hasegawa-Mima 方程式)は、鉛直磁場下のプラズマの運動を記述する方程式と同型の方程式である。回転球面上の流れと面上の流れは、例えば、強制力のもとでの時間無限大における流れ場の漸近的振る舞いなどに相違がみられ、これは面近似に原因があると考えられる。そこでプラズマ分野の方程式(Hasegawa-Mima 方程式)においても、磁場の制限を緩めた方程式があれば、惑星大気とプラズマの理論的類似と相違が、非線形相互作用も含めて明らかになることが期待される。このような観点から、曲率を持つ磁場の下におけるプラズマの運動を記述する方程式を導出した。この方程式の詳しい解析は今後の課題である。また、関連する流体運動およびプラズマ運動について、流れの安定性と流れ形態形成に関する研究を行い発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sato Naoki, Yamada Michio	4. 巻 63
2. 論文標題 Vorticity equation on surfaces with arbitrary topology embedded in three-dimensional Euclidean space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0080453	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sato Naoki, Yamada Michio	4. 巻 88
2. 論文標題 A generalized Hasegawa-Mima equation in curved magnetic fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S0022377822000514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Obuse Kiori, Yamada Michio	4. 巻 89
2. 論文標題 Energy Transfer to Resonant Zonal Rossby Modes in Two-Dimensional Turbulence on a Rotating Sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.064401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takehiro Shin-ichi, Brun Allan Sacha, Yamada Michio	4. 巻 893
2. 論文標題 Assessment of Critical Convection and Associated Rotation States in Models of Sun-like Stars Including a Stable Layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab7fa6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sasaki Eiichi、Takehiro Shin-ichi、Yamada Michio、Kawahara Genta	4. 巻 406
2. 論文標題 Bimodal vortex solutions on a sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2020.132438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Naoki、Yamada Michio	4. 巻 876
2. 論文標題 Superharmonic instability of nonlinear travelling wave solutions in Hamiltonian systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 896 ~ 911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato N.、Yamada M.	4. 巻 391
2. 論文標題 Local representation and construction of Beltrami fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 8 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2019.02.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato N.、Yamada M.	4. 巻 400
2. 論文標題 Local representation and construction of Beltrami fields II. solenoidal Beltrami fields and ideal MHD equilibria	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2019.06.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Obuse Kiori, Yamada Michio	4. 巻 4
2. 論文標題 Three-wave resonant interactions and zonal flows in two-dimensional Rossby-Haurwitz wave turbulence on a rotating sphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.024601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takehiro Shin-ichi, Sasaki Youhei	4. 巻 6
2. 論文標題 On Destruction of a Thermally Stable Layer by Compositional Convection in the Earth's Outer Core	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2018.00192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Mitsuhiro, Yokoyama Naoto	4. 巻 71
2. 論文標題 On the initial evolution of the weak turbulence spectrum in a system with a decay dispersion relation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - B/Fluids	6. 最初と最後の頁 103 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.euromechflu.2018.03.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Obuse Kiori, Takehiro Shin-ichi, Yamada Michio	4. 巻 58
2. 論文標題 Effect of turbulence on zonal jet flows in equivalent-barotropic quasi-geostrophic model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ANZIAM Journal	6. 最初と最後の頁 C175 ~ C188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21914/anziamj.v58i0.11782	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Toshio, Takehiro Shin-ichi, Yamada Michio	4. 巻 30
2. 論文標題 An orbital instability of minimal plane Couette turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5017798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Youhei, Takehiro Shin-ichi, Ishiwatari Masaki, Yamada Michio	4. 巻 276
2. 論文標題 Effects of radial distribution of entropy diffusivity on critical modes of anelastic thermal convection in rotating spherical shells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 36 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2017.09.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 小布施祈織, 山田道夫
2. 発表標題 回転球面上2次元乱流における大規模構造形成とロスビー波非線形相互作用
3. 学会等名 2022年度日本統計関連学会連合会 (成蹊大学)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小布施祈織, 萩森祐介, 山田道夫
2. 発表標題 回転球面上2次元乱流での大規模東西流形成におけるロスビー波相互作用の役割
3. 学会等名 現象と数理モデル2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kiori Obuse
2. 発表標題 Towards an understanding of the mechanism of zonal flow formation in two-dimensional turbulence on a rotating system
3. 学会等名 Fusion Plasma Seminar (online)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiori Obuse
2. 発表標題 Spherical and beta-plane approximation models for two-dimensional turbulence on a rotating sphere
3. 学会等名 AAPPs-DPP2021 (Kyushu Univ., online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiori Obuse, Michio Yamada
2. 発表標題 Inviscid limit solution of 2D Navier-Stokes equation on a rotating sphere with hyper viscosity
3. 学会等名 KITP Program: Layering and Staircases(UC Santa Barbara, online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小布施祈織, 山田道夫
2. 発表標題 超粘性を用いた回転球面上2次元 Navier-Stokes 方程式の非粘性極限解の非粘性解への収束について
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (熊本大学, オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小布施祈織, 山田道夫
2. 発表標題 超粘性を用いた回転球面上2次元 Navier-Stokes 乱流の非粘性極限解
3. 学会等名 日本流体力学会2020年度年会 (山口大学, オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiori Obuse, Michio Yamada
2. 発表標題 Inviscid limit solution of 2D Navier-Stokes equation on a rotating sphere with hyperviscosity
3. 学会等名 The 17th International Conference on Flow Dynamics (Tohoku Univ., online) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小布施祈織, 山田道夫
2. 発表標題 回転球面上2次元乱流における大規模構造形成
3. 学会等名 工学と数学の接点を求めて (大阪大学, オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Michio Yamada
2. 発表標題 Jet Fromation in Simplest Fluid Systems
3. 学会等名 Physical and mathematical approaches to geophysical fluid problems (Niseko, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro, S.
2. 発表標題 Thermal convection in rotating spherical shells and generation of mean zonal flows
3. 学会等名 Physical and mathematical approaches to geophysical fluid problems (Niseko, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Yoneda
2. 発表標題 Recent topics on well-posedness and stability of incompressible fluid and related topics
3. 学会等名 Summer Graduate School, Mathematical Sciences Research Institute (MSRI, Berkeley, USA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田道夫
2. 発表標題 流体運動に関する未解決問題について
3. 学会等名 現象と数理モデル2019 (横手、秋田) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹広真一
2. 発表標題 恒星熱対流の臨界状態と平均流生成について
3. 学会等名 現象と数理モデル2019 (横手、秋田) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiori Obuse
2. 発表標題 Zonal flows formations and nonlinear interactions of Rossby waves in two-dimensional turbulence on a rotating sphere
3. 学会等名 Physical and mathematical approaches to geophysical fluid problems (Niseko, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiori Obuse and Michio Yamada
2. 発表標題 Zonal flow formation in two-dimensional Rossby wave turbulence on a rotating sphere
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP-2019) (Hefei, China) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 榎本剛
2. 発表標題 高速回転する球殻内の非弾性熱対流により引き起こされる表面帯状流
3. 学会等名 2019年 日本流体力学会年会 (電気通信大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiori Obuse and Michio Yamada
2. 発表標題 Zonal flow formation in two-dimensional inviscid Rossby wave turbulence on a rotating sphere
3. 学会等名 Fluid Dynamics Seminar (UCSD) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiori Obuse and Michio Yamada
2. 発表標題 Effective energy transfer in two-dimensional turbulence on a rotating sphere
3. 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (Technische Universitat Wien)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田道夫
2. 発表標題 Wave resonance and zonal flow formation
3. 学会等名 非線型コロキウム (早稲田大学) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田道夫
2. 発表標題 波動乱流と秩序構造の形成
3. 学会等名 第8回岐阜数理科学研究会 (岐阜県下呂市) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa, T., Sasaki, Y., Takehiro, S.
2. 発表標題 On formation of a stably stratified layer below the core-mantle boundary region: evaluating with a 1D thermal and chemical evolution model
3. 学会等名 The 16th Symposium of SEDI, (Edmonton, Canada)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuyoshi Yoneda
2. 発表標題 Instantaneous vortex stretching and energy cascade on the incompressible 3D Euler equations
3. 学会等名 KIAS workshop, Mathematics of Fluid Motion II: Theory and Computation (KIAS, Korea)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N.Yokoyama and M.Takaoka
2. 発表標題 Directional energy flux in anisotropic turbulence
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (Atlanta, USA)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田道夫
2. 発表標題 流体方程式の実効的エネルギー輸送(EET)について
3. 学会等名 現象と数理モデル2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田道夫
2. 発表標題 2次元流体の運動について
3. 学会等名 量子と古典の物理と幾何 (九州大学) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.Takehiro, Y.Sasaki, K.Ishioka, K.Nakajima, M.Ishiwatari and Y.-Y Hayashi
2. 発表標題 Disappearance of surface banded structure produced by thermal convection in a rapidly rotating thin spherical shell.
3. 学会等名 The 49th Annual Division for Planetary Sciences Meeting (Provo, Utah) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y.Sasaki, S.Takehiro, M.Ishiwatari and M.Yamada
2. 発表標題 Rapidly rotating two-dimensional annulus model for anelastic critical thermal convection with tilting boundaries and radially varying entropy diffusivity.
3. 学会等名 Compressible Convection Conference 2017 (Lyon, France) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.Takehiro and Y.Sasaki
2. 発表標題 Erosion of thermally induced stably stratified layer by compositional convection in the Earth's outer core.
3. 学会等名 AOGS 2017 (Singapore) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	竹広 真一 (Takehiro Shin-ichi) (30274426)	京都大学・数理解析研究所・准教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米田 剛 (Yoneda Tsuyoshi) (30619086)	一橋大学・大学院経済学研究科・教授 (12613)	
研究分担者	小布施 祈織 (Obuse Kiori) (90633967)	岡山大学・環境生命科学学域・准教授 (15301)	
研究分担者	横山 直人 (Yokoyama Masatoq) (80512730)	同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員 (34310)	削除：2018年12月6日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計3件

国際研究集会 FDEPS2019	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 FDEPS2018	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Fluid Dynamics in Earth and Planetary Sciences (FDEPS) 2017	開催年 2017年～2017年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	CEA Saclay	Ecole Normale Supérieure	