

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2016

課題番号：23540453

研究課題名(和文) 密度非一様性のある非定常界面の非線形発展に関する数理的な研究

研究課題名(英文) Nonlinear evolution of non-stationary interfaces with density stratification

研究代表者

松岡 千博 (MATSUOKA, Chihiro)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10270266

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：密度が異なった2つの流体の間に生じる界面(渦層)の非定常な大変形を、数理モデルを構成して理論的に調べた。通常の流体界面の研究からはじめて、本研究の後半では、流体を電磁流体(MHD)に拡張し、2種のプラズマが存在する系に界面に平行に磁場をかけたときに界面がどのように発展していくかが理論的に詳しく調べられた。

研究成果の概要(英文)：Non-stationary significant deformation of an interface (vortex sheet) between two fluids is theoretically investigated by constructing a mathematical model. Starting from the study of usual fluids, the research is extended to magnetohydrodynamic (MHD) flows in the later stage of the current study, in which the evolution of the interface (current-vortex sheet) is theoretically investigated in details.

研究分野：応用数学・流体力学

キーワード：渦層 非線形発展

1. 研究開始当初の背景

応募者はこれまで、密度の異なった流体の境界に生じる平面および円形渦層や、表面張力効果が大きく影響する非定常液滴など、さまざまな流体界面の非線形運動を研究してきた。これらは主として、境界積分法による2次元の数値計算を中心とした研究であり、同様な方法での3次元における界面の数値的研究はほとんど手付かずであった。

境界積分法による数値計算は、直接数値シミュレーション(DNS)に比べ、高精度で、かつ界面のみを計算すればよいので、計算時間を著しく節約できるが、スキームが数学的に複雑で、プログラムを計算機にかけるまでに解析的に面倒な計算を必要とする。この方法による密度が一樣な場合の3次元界面の計算はいくつか存在させていたが、密度非一様性のある3次元界面の数値計算は、世界的にみても、その支配方程式の導出すら行われていなかった。

応募者は、平成15年度-17年度に実施した若手研究(B)「3次元リヒトマイヤ・メシニコフ不安定性における密度境界の時間発展に関する研究」において、(対称性の高い)いくつかの場合について、3次元界面を計算するための支配方程式の導出に成功していたが、具体的な数値計算を行うまでには至らなかった。本研究では、上記研究を発展させ、3次元流体における渦層の非線形発展および、磁場等の外力がある場合の流体(磁気流体)中での電流渦層の時間発展を解析的かつ数値的に計算することを目指した。

2. 研究の目的

渦層のように不安定性の強い非平衡非定常界面が長時間安定に計算できるということは、乱流の解析に非常に重要である。密度非一様性があると、界面が密度が一樣な場合とは異なる運動をする可能性があり、それを明らかにすることも重要な目的の一つであった。さらに、本研究の途中で、磁気流体中における渦層の運動に関して、実験的に重要な発見がなされた。本研究の理論的手法がその解析に有効であることがわかったので、研究後半では、磁気流体中における電流渦層の運動の数理モデルの構築とその数値計算へと目的をシフトさせた。

3. 研究の方法

本研究では、最初にオイラー方程式等の流体の支配方程式をもとに数学的界面モデル(vortex sheet model と呼ばれる)を構成し、それに基づいて数値計算を行う。数値計算のための数値スキームの開発も合わせて行い、数値的に安定に長時間計算できる手法を考案して実際の数値計算を行っている。ここで用いている数値計算法は非常に高精度で、そ

のため、解析解との比較が容易にできるようになっている。

4. 研究成果

研究目的に記した、密度非一様性のある界面の複雑な形状を高精度で数値計算できる支配方程式および数値計算スキームを開発する、という目的のうち、密度非一様性を伴った3次元界面に関しては、主として、下記業績(論文)にまとめられている。この中では、密度の非一様性が存在することから生じる、一樣流体では起きえない3次元特有の様々な運動が詳しく議論されている。

また、磁気流体に生じる界面の非線形運動に関して、電流渦層界面モデル(current-vortex sheet model)を構築して、数値計算を行った(論文、)。この結果、観測や実験結果をよく記述する理論的結果が得られ、磁気流体における渦層の詳しい運動が非常に高精度で調べられた。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 13 件)

C. Matsuoka, K. Nishihara and T. Sano, Nonlinear dynamics of non-uniform current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows, J. Nonlinear Sci., Vol. 27, 531-572 (2017). (査読有)

C. Matsuoka, Motion of non-uniform double current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows, Physica Scripta, Vol. 91, 034005_1-9 (2016). (査読有)

C. Matsuoka, K. Nishihara and T. Sano, Nonlinear motion of a current-vortex sheet in MHD Richtmyer-Meshkov instability, J. Phys. Conf. Ser. Vol. 688, 012063_1-4. (2016). (査読有)

C. Matsuoka and K. Hiraide, Computation of entropy and Lyapunov exponent by a shift transform, Chaos, Vol. 25, 103110_1-6 (2015). (査読有)

C. Matsuoka, Kelvin-Helmholtz Instability and Roll-up, Scholarpedia, Vol. 9, 11821_1-8 (2014). (査読有)

C. Matsuoka, Nonlinear motion of non-uniform current-vortex sheets in MHD Richtmyer-Meshkov instability, Physica Scripta, Vol. 89, 088003_1-10 (2014). (査読有)

C. Matsuoka, K. Nishihara and T. Sano, Nonlinear motion of non-uniform current-vortex sheets in

magnetohydrodynamic flows,
Fluid Dyn. Res., Vol. 46, 031416_1-11
(2014). (査読有)

C. Matsuoka,

Three-dimensional vortex sheet motion
with axial symmetry in incompressible
Richtmyer-Meshkov and Rayleigh-Taylor
instabilities,

Physica Scripta, T155, 014013_1-6 (2013).
(査読有)

T. Sano, K. Nishihara, C. Matsuoka and
T. Inoue,

Magnetic Field Amplification Associated
with the Richtmyer-Meshkov Instability,
Astrophys. J., Vol. 758, 126_1-13 (2012).
(査読有)

C. Matsuoka and Y. Iwai,

A simple model for pattern formation
caused in sand dunes by
downbursts,

J. Phys. Soc. Jpn., Vol.81, 094007_1-7
(2012). (査読有)

C. Matsuoka and K. Hiraide,

Entropy estimation of the Henon
attractor,

Chaos Solitons Fractals, Vol. 45, 805-809
(2012). (査読有)

Y. Kohno, M. Fujii, C. Matsuoka, H.
Hashimoto, A. Ouchi, S. Nagaoka, and K.
Mukai,

Notable Effects of the Metal Salts on the
Formation and Decay Reactions of
alpha-Tocopheroxyl Radical in Acetonitrile
Solution. The Complex Formation between
alpha-Tocopheroxyl and Metal Cations,
J. Phys. Chem. B, Vol. 115, 9880-9888
(2011). (査読有)

C. Matsuoka and K. Hiraide,

Special functions created by
Borel-Laplace transform of Henon map,

Electro. Res. Ann. Math. Sci., 18, 1-11
(2011). (査読有)

[学会発表](計 32 件)

松岡千博

Capture of homoclinic points in complex
Henon maps, Chihiro Matsuoka and Koichi
Hiraide, 2016年度冬の力学系研究集会、
日大軽井沢研修所、2017. 1.

松岡千博

密度の異なった2層流体における界面の非
線形発展

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会
「海洋・海岸における波動の解析モデルの展
開」、九州大学応用力学研究所、2016. 12.

松岡千博, 平出耕一

力学系のホモクリニック点の探索と整関数
の零点分布

2016年度応用数学合同研究集会、龍谷大瀬
田キャンパス 2016. 12.

松岡千博、西原功修、佐野孝好

MHDにおける渦層の非線形発展と surface
Alfvén 波

第71回日本物理学会年次大会、東北学院大
学、2016. 3.

松岡千博, 平出耕一

Detecting all homoclinic points in
nonlinear dynamics via converging
asymptotic

expansions and Newton's method, 2015
年度冬の力学系研究集会、日本大学軽井沢研
修所、2016. 1.

松岡千博

表面張力を伴った2層流体における界面の
運動

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会
「海洋・海岸における波動の解析モデルの現
状と展望」、九州大学応用力学研究所、2015.
12.

松岡千博、平出耕一

非可積分力学系における厳密解の構成とカ
オスの捕捉

応用数学合同研究集会2015、龍谷大学、
2015. 12.

松岡千博

MHDにおける境界値からの領域磁場の構成
法

日本流体力学会年会2015、東京工業大学、
2015. 9.

松岡千博

MHD リヒトマイヤー・メッシュコフ不安定性
による超新星爆発残骸での磁場増幅モデル
大阪大学レーザーエネルギー学研究中心
シンポジウム2015、大阪大学、2015. 4.

松岡千博

磁場による流体不安定性の抑制

日本物理学会第70回年会、早稲田大学、
2015. 3.

松岡千博

磁気流体中に生じる非一様電流渦層の非線
形発展

日本流体力学会年会2014、東北大学、
2014. 9.

C. Matsuoka,

Nonlinear dynamics of non-uniform
current-vortex sheets in

magnetohydrodynamic flows, International
conference of Turbulent Mixing and
Beyond Workshop 'Mixing in Rapidly
Changing Environment - Probing Matter
at the Extremes', International Centre for
Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy,
2014. 8 (招待講演).

松岡千博

MHD リヒトマイヤー・メッシュコフ不安定性
による超新星爆発残骸での磁場増幅モデル
大阪大学レーザーエネルギー学研究中心
シンポジウム2014、大阪大学、2014. 4.

松岡千博
磁気流体中に生じる電流渦層の時間発展と磁場増幅
日本物理学会第69回年会、東海大学、2014.3.

松岡千博、平出耕一
Entropy estimation of the Henon attractor
研究集会「力学系と計算：Dynamical Systems and Computation」東京工業大学、2014.1.

松岡千博、西原功修、佐野孝好
超新星爆発残骸におけるMHDリヒトマイヤー・メシコフ不安定性による磁場増幅機構
第27回数値流体力学シンポジウム、名古屋大学、2013.12.

C. Matsuoka,
Nonlinear motion of non-uniform current-vortex sheets in MHD Richtmyer-Meshkov instability, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Denver, USA, 2013.11 (招待講演).

松岡千博
密度非一様性をともなった磁気流体における電流渦層の非線形発展
RIMS 研究集会「非線形波動現象の数理と応用」、京都大学、2013.10.

松岡千博、平出耕一
エノン写像のエントロピーの計算
日本数学会秋季総合分科会、愛媛大学、2013.9.

C. Matsuoka, K. Nishihara and T. Sano
Nonlinear evolution of a double current-vortex sheet in MHD Richtmyer-Meshkov instability, IFSA2013 (The Eighth International Conference on Fusion Sciences and Applications), Nara, Japan, 2013.9.

⑳ 松岡千博、西原功修、佐野孝好
非一様電流渦層による超新星残骸における磁場増幅
日本物理学会第68回年会、広島大学、2013.3.

㉑ 松岡千博、平出耕一
Henon 写像に付随する差分方程式の Borel-Laplace 変換によって生成される大域解
日本数学会年回2013、京都大学、2013.3.

㉒ C. Matsuoka
Nonlinear motion of non-uniform double current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure, Fukuoka, Japan, 2013.3.

㉓ 松岡千博、西原功修、佐野孝好
MHD-RMI による超新星爆発残骸での磁場増幅シミュレーション
第26回数値流体力学シンポジウム、東京、2012.12.

㉔ 松岡千博、平出耕一
Borel-Laplace 変換を用いたエノンアトラクターの関数表現
日本物理学会2012秋季大会、横浜国立大学、2012.9.

㉕ 松岡千博、西原功修、佐野孝好
2次元磁気流体中に生じる磁気双極子層・渦層の非線形発展
日本物理学会2012秋季大会、横浜国立大学、2012.9.

㉖ C. Matsuoka
Nonlinear motion of current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows with density stratification, 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2012), Beijing, China, 2012.8.

㉗ 松岡千博
2次元磁気流体中における current-vortex sheet の時間発展
日本物理学会第67回年会、関西学院大学、2012.3.

㉘ C. Matsuoka,
Nonlinear evolution of a current-vortex sheet in incompressible Workshop on Fluid Dynamics: Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields, National Institute for Mathematical Sciences (NIMS), Daejeon, South Korea, 2011.12 (招待講演).

㉙ 松岡千博
密度成層と表面張力を伴った界面の運動における特異性の形成
日本物理学会2011秋季大会、富山大学、2011.9.

㉚ 松岡千博
密度成層を伴った軸対称渦層の3次元発展
日本流体力学会年会2011、首都大学東京、2011.9.

㉛ C. Matsuoka
Three-dimensional vortex sheet motion with axial symmetry in incompressible Richtmyer-Meshkov and Rayleigh-Taylor instabilities, Turbulent Mixing and Beyond, Third International Conference and Advanced School, International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy, 2011.7.

6. 研究組織

(1) 研究代表者
松岡 千博 (MATSUOKA, Chihiro)
大阪市立大学・工学研究科・教授
研究者番号：10270266

(2) 研究分担者
なし ()