

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03672

研究課題名（和文）トポロジカル渦度ダイナミクスによる圧縮性流体中の速度不連続面の安定性

研究課題名（英文）Stability of an interface of velocity discontinuity in a compressible fluid by approach of topological vorticity dynamics

研究代表者

福本 康秀 (Fukumoto, Yasuhide)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授

研究者番号：30192727

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：非圧縮性流体においては、接線速度不連続面は必ずケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性（KHI）を起こし、波状変形が発達する。増幅率は接線速度差に比例する。圧縮性にはKHIを弱める作用があり、接線速度差のマッハ数が8を越えるとKHIが消失する。圧縮性気体のKHIに対する重力および表面張力の効果を調べた。上側の流体軽い場合、重力は復元力として安定化に作用するが、実際には、重力も表面張力も、圧縮性によって安定化されたKHIを不安定にする。圧縮性流体と非圧縮浅水流の間には数学的類似がある。圧縮性気体の音波に対応するのは重力波である。深さの違いの効果や有限幅のシア流に対して新しい不安定性を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

速度不連続面のKelvin-Helmholtz不安定性（KHI）や重い液体層が軽い層上に乗っているとき、界面が一方向的に変形して重い液体が沈み込むのがRayleigh-Taylor不安定性（RTI）で、RTI/KHIは乱流に発達し、界面を隔てた物質の混合を促進する。界面乱流は超新星爆発や太陽フレアなどの天体現象から、レーザー核融合、ナノ材料加工まで幅広く関与するが、一様等方性乱流ほど理解が深まっていない。圧縮性がRT乱流に及ぼす影響は未踏領域である。本研究では、圧縮性によって安定化するKHIを、復元力であるはずの重力と表面張力がむしろ不安定化するという謎めいた結果を得て、新たな課題を提供する。

研究成果の概要（英文）：For an incompressible fluid, a surface of tangential velocity discontinuity necessarily goes through the Kelvin-Helmholtz instability (KHI), by which wavy deformation develops. The growth rate is proportional to the tangential-velocity difference. Compressibility acts to weaken the KHI, and when the Mach number of the tangential velocity difference exceeds 8, the KHI subsides down. The effects of the gravity and surface tension on the KHI of a compressible gas are investigated. When the upper fluid is lighter, gravity acts as a stabilizing force, but both gravity and surface tension cause the KHI which otherwise is stabilized by compressibility effect. There is a mathematical analogy between compressible flows and incompressible shallow water flows. For the latter, gravity waves correspond to sound waves. New instabilities are found for the effect of depth differences and for a shear flow of finite width.

研究分野：流体力学

キーワード：ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性 圧縮性流体 接線速度不連続面 浅水流 重力波 剪断層 表面張力 重力

### 1. 研究開始当初の背景

非圧縮性流体中の接線速度不連続界面は必ずケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI: Kelvin-Helmholtz instability) を起こして、波状変形が発達する。その増幅率は接線速度の速度差  $U (>0)$  に比例する。Landau (1944) は、圧縮性には KHI を弱めるはたらきがあり、その効果は接線速度差が大きいほど強くなり、音速を  $c$  として、マッハ数  $U/c$  が  $\sqrt{8}c$  を越えるとケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI) が安定化する」という意外な結論を導いた。ただし、これは攪乱が 2 次元の場合で、3 次元ではこの限りではない。3 次元攪乱を許す場合の安定化条件は  $U/c > 8\cos$  で置き換えられる。ここで、 $\theta$  は波数ベクトルが基本流と成す角である (Syrovatskii 1954)。

圧縮性気体と河川流など浅水波の理論との間には数学的アナロジーが成り立つ。浅水波において、音波の役割を果たすのが水面を伝搬する重力波である。2 次元河川流において、接線速度に大きさ  $U$  の不連続性があると、重力波の伝播速度を  $c$  として、 $Fr = U/c$  が  $\sqrt{8}$  を越えると KHI が安定化する」が帰結する (Bezdenkov and Pogutse 1983)。

ハミルトン力学系の Krein 理論によると、正エネルギーと負エネルギーのモードの共存が不安定性の十分条件である。重力波 (音波) の存在は、KHI の結果を覆してしまう。非圧縮の場合、静止状態に立つ波のエネルギーの符号は正に限られ、流れがあってはじめて、負の攪乱モードを許す。ところが、フルード数  $Fr$  が 1 より大きくなると (圧縮性流体の超音速流に相当)、エネルギー符号の逆転が起こるはずである。KHI の安定化のエネルギー的側面は十分には調べられていない。

### 2. 研究の目的

1) 浅水流 KHI に対する 3 つの効果調べる。

i) 底の抵抗, ii) 水路の有限幅/深さの違い, iii) 剪断層の有限厚み

重力波がなければ、i, ii) において、底の抵抗と水路の有限幅、iii) において、剪断層の厚みは短波長 KHI の安定化に作用する。重力波はこの直感を裏切る可能性がある。

i) フルード数が  $Fr = U/c > \sqrt{8}$  のときに KHI が安定化するという事は、'超音速領域'において正・負両方のエネルギーモードの存在を意味する。負のエネルギーモードは系からエネルギーが抜かれる、すなわち散逸があると増幅する。「底の抵抗が不安定性を引き起こす」ことを示唆する。

ii) 有限幅水路内におけるカルマン渦列の結果から、非圧縮性近似のもとでは、流体水路の側壁が KHI を安定化することは想像に難くない。圧縮性流体においては「負の運動量モード」が存在し、波の反射係数が 1 より大きくなる「過剰反射 (over-reflection)」を引き起こす。有限幅水路において「速度不連続面と側壁での重力波の過剰反射の繰り返しによって、KHI が不安定化する」可能性を探る。界面を隔てて深さが異なる効果についても調べる。

iii) 有限幅の剪断層を考えると、'超音速'領域 ( $Fr > 1$ ) において、重力波の位相速度と流れの速度が一致する「臨界層」が剪断層の中に現れる、そこでは、攪乱のエネルギーが平均流に奪われて攪乱が減衰する可能性がある。これは、無限自由度固有の現象である。

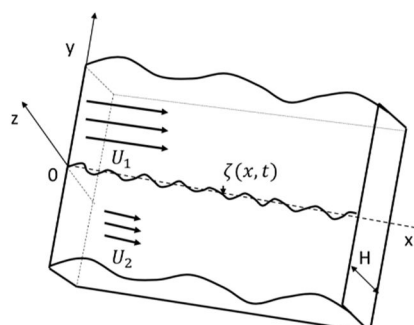
代表者は、「速度がスパン方向座標 ( $y$ ) について線形関数で与えられるとき、安定性問題の固有関数が Whittaker 関数を用いて陽に書き下せることに気づいた。可解モデルである。

2) 重力のもと、密度の異なる圧縮性流体が水平面状界面で接しているとき、圧縮性 KHI に対する i) 重力, ii) 表面張力の効果を調べる。

上の流体が下より軽いとき、重力も表面張力も復元力として働き、KHI を抑制すると考えられる。では、圧縮性によって KHI が安定化される時、重力と表面張力がそのまま界面を安定に保つか? これが問いである。

### 3. 研究の方法

渦層モデルにおいては、渦層を除く領域、すなわち、ほとんどいたるところで流体は渦なし運動を行う。圧縮性流体の運動に対するポテンシャル流解析を行う。非圧縮性流体との違いは、バルクに音波が存在する点である。渦層で隔てられた各領域で、非圧縮モードと音波が共存して自由度 (モード数) が非圧縮の場合の 3 倍になる。両側の解を、渦層上で法線速度連続と圧力連続の 2 つの境界条件で接続すると、渦層の波状変形の波長と周波数との関係、分散関係 - 波長の関数



接線速度不連続面をもつ浅水流

としての周波数 - が得られる。この分散関係の数値的・漸近解析を行うことにより、不安定性や安定化の臨界パラメータを計算し、1. i, ii, iii)や 2. i, ii)に対する圧縮性の効果、特に臨界パラメータや分岐を詳しく計算する。

圧縮性流体の波のエネルギー公式を導出し、エネルギーの符号、特に負のエネルギーモードを同定することによって、圧縮性による KHI の安定化の作用をエネルギー側面から明らかにする。

1.iii) 剪断層に対しては、Whittaker 関数を含む固有関数表示を用いて、両側のポテンシャル流と接続することによって、線形分散関係を導く。数式処理によって分散関係の厳密解析を行い、KHI の安定化・不安定化の臨界マッハ数を計算し、安定性ダイアグラムを作成する。

圧縮性剪断層の非線形発展、特に乱流遷移を大規模数値計算コードを開発して数値シミュレーションを行い、計算した数値データから 3 次元渦構造を自動抽出し[3]、KHI 不安定性と圧縮性による安定化を渦構造の側面から解明を目指す。

#### 4 . 研究成果

1. i) 浅水流中では、抵抗がない場合、重力波が存在することによって、接線速度の跳び  $U$  が重力波の伝播速度  $c$  の 2.82 倍を越えると安定化する。抵抗がある場合には、すべてのフルード数  $U/c$  の領域で不安定であることを見出した。トポロジカル流体力学の方法で不連続面の波のエネルギーを計算し、負のエネルギーのモードの存在を示すことによって、この結果が散逸誘導不安定性の一種であること解き明かした [1]。

1. ii) 不連続面の波状変形に関する安定性に対する深さの違いの効果を調べた。浅水流中の剪断層を接線速度および底の深さの不連続面としてモデル化して、不連続面の波状変形に関する線形安定性を計算した。接線速度の跳びがある臨界値を越えると、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性は抑制される。臨界速度差を重力波の伝播速度で規格化したフルード数は 1 よりも大きい、両側の深さが等しいときに最低値 2.82 をとることを数学的に証明した [2]。

1. iii) 浅水流中の速度不連続面を有限幅に正則化した、有限厚さの剪断層の安定性を計算した。剪断層内の攪乱は Whittaker 関数を用いて陽に書き下すことができ、増幅率が高精度で計算できる。有限厚さの効果には、圧縮性によって安定化された KHI を不安定化する効果があり、剪断層はすべてのマッハ数で不安定である [4]。接線速度不連続面という特異なモデルは剪断層内部に巣食う固有の不安定性を覆い隠していると解釈できる。

乱流においては、階層構造をなす大小さまざまな渦が絡み合っ、時間的・空間的に複雑な挙動を示す。ナビエ・ストークス方程式にもとづく境界層乱流の直接数値シミュレーションで得られた流れ場から、比較的強い渦度を有する渦体積領域を抽出し、個別渦グループに分けて自動的に追跡する「階層的渦クラスタリング法」を提案した [3]。データ階層性（包含関係性）で結びつけられた渦領域点集合の瞬時空間分布を可視化し、その動きの追跡を可能にする。

2. i, ii) 圧縮性気体の KHI に対する重力および表面張力の効果を調べた。上側の流体軽い場合、重力は復元力として安定化に作用するが、直感に反し、**重力も表面張力も、圧縮性によって安定化された KHI を不安定にする** [5, 6]。

#### 文献リスト

- [1] L. Jin, T.T. Le and Y. Fukumoto, "Frictional effect on stability of discontinuity interface in tangential velocity of a shallow-water flow", *Phys. Lett. A* **383**, 125839 (5 pages) (2019).
- [2] T.T. Le and Y. Fukumoto, "Effect of depth discontinuity on interfacial stability of tangential-velocity discontinuity in shallow-water flow", *Phys. Lett. A* **436**, 128073 (7 pages) (2022).
- [3] K. Matsuura and Y. Fukumoto, "Hierarchical clustering method of volumetric vortical regions with application to the late-stage of laminar-turbulent transition", *Phys. Rev. Fluids* **7**, 054703 (46 pages) (2022).
- [4] T.T. Le, Y. Fukumoto and T. Koch, "Linear stability of a simple shear layer between two parallel streams in a shallow water flow", *Phys. Lett. A* **493**, 129264 (7 pages) (2024).

#### 講演リスト（抜粋）

- [5] Y. Fukumoto, R. Zou, K. Matsuura and N. Taniguchi. "Compressible Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor instabilities" 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2023 Tokyo) Aug. 22 (2023)
- [6] Y. Fukumoto, R. Zou, K. Matsuura and N. Taniguchi. "Effect of compressibility on Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor instabilities" Exploration Conference: Interfaces and Mixing in Fluids, Plasmas, Materials, Kavli Institute for Theoretical Physics, UC Santa Barbara, USA, Oct. 26 (2023)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Packwood Daniel, Nguyen Linh Thi Hoai, Cesana Pierluigi, Zhang Guoxi, Staykov Aleksandar, Fukumoto Yasuhide, Nguyen Dinh Hoa	4. 巻 8
2. 論文標題 Machine Learning in Materials Chemistry: An Invitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machine Learning with Applications	6. 最初と最後の頁 100265-1 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mlwa.2022.100265	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 該当する
1. 著者名 Le Thi Thai, Fukumoto Yasuhide	4. 巻 436
2. 論文標題 Effect of depth discontinuity on interfacial stability of tangential-velocity discontinuity in shallow-water flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 128073-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2022.128073	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 Matsuura Kazuo, Fukumoto Yasuhide	4. 巻 7
2. 論文標題 Hierarchical clustering method of volumetric vortical regions with application to the late stage of laminar-turbulent transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 054703-1 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.7.054703	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 Fukumoto Yasuhide, Zou Rong	4. 巻 7
2. 論文標題 Isomagnetovortical perturbations and wave energy of MHD flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 8-1 ~ 8-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-023-00113-8	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 V. L. Okulov and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 62
2. 論文標題 SINGULAR APPROXIMATIONS FOR CALCULATING VORTEX FILAMENTS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Mechanics and Technical Physics	6. 最初と最後の頁 519 ~ 524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S0021894421030196	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 Liu Fengnan, Fukumoto Yasuhide, Zhao Xiaopeng	4. 巻 2921
2. 論文標題 A multi level linearized Crank-Nicolson scheme for Richards equation under variable flux boundary conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applicable Analysis	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00036811.2021.1992395	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 Kuwana Kazunori, Matsue Kaname, Fukumoto Yasuhide, Dobashi Ritsu, Saito Kozo	4. 巻 2022
2. 論文標題 Fire whirls: A Combustion Science Perspective	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00102202.2021.2019234	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 Okulov V. L., Fukumoto Y.	4. 巻 10
2. 論文標題 Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Energy Research	6. 最初と最後の頁 817941-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fenrg.2022.817941	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 該当する

1. 著者名 Packwood Daniel, Nguyen Linh Thi Hoai, Cesana Pierluigi, Zhang Guoxi, Staykov Aleksandar, Fukumoto Yasuhide, Nguyen Dinh Hoa	4. 巻 8
2. 論文標題 Machine Learning in Materials Chemistry: An Invitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machine Learning with Applications	6. 最初と最後の頁 100265-1 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mlwa.2022.100265	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 Le Thi Thai, Fukumoto Yasuhide	4. 巻 436
2. 論文標題 Effect of depth discontinuity on interfacial stability of tangential-velocity discontinuity in shallow-water flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 128073-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2022.128073	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 Jishan Fan, Yashuhide Fukumoto and Yong Zho	4. 巻 43
2. 論文標題 Regularity criteria for a Ginzburg-Landau-Navier-Stokes in superfluidity in $\mathbb{R}^n$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Methods in the Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 6542-6552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mma.6397	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 A. B. Samokhin and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 56
2. 論文標題 Singular modes of the integral scattering operator in anisotropic inhomogeneous media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Differential Equations	6. 最初と最後の頁 1212-1218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S0012266120090104	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 V. L. Okulov and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 27
2. 論文標題 Analytical solution for self-induced motion of a helical vortex with a Gaussian core	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thermophysics and Aeromechanics	6. 最初と最後の頁 481-488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S0869864320040022	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 Keigo Wada and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 2019
2. 論文標題 Compressibility effect on Markstein number for a flame front in long-wavelength approximation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019-20 MATRIX Annals	6. 最初と最後の頁 329-350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62497-2_19	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 Mako Sato and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 2019
2. 論文標題 Influence of an oblique magnetic field on planar flame front instability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019-20 MATRIX Annals	6. 最初と最後の頁 439-459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62497-2_26	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 Liangbing Jin, Le Thi Thai and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 383
2. 論文標題 Frictional effect on stability of discontinuity interface in tangential velocity of a shallow-water flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 125839 (5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2019.125839	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 Rong Zou, Joris Labarbe, Oleg N. Kirillov and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 101
2. 論文標題 Analysis of azimuthal magnetorotational instability of rotating magnetohydrodynamic flows and Tayler instability via an extended Hain-Lust equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 013201 (22pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.013201	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 Fengnan Liu, Yasuhide Fukumoto and Xiaopeng Zhao	4. 巻 22
2. 論文標題 Stability analysis of the explicit difference scheme for Richards equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 352 (8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e22030352	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 該当する

1. 著者名 Liu Fengnan, Yasuhide Fukumoto and Xiaopeng Zhao	4. 巻 -
2. 論文標題 A linearized finite difference scheme for the Richards equation under variable-flux boundary condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing	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) なし	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 Jishan Fan, Yasuhide Fukumoto and Yong Zhou	4. 巻 -
2. 論文標題 Regularity criteria for a Ginzburg-Landau-Navier-Stokes in superfluidity in $R^n$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Methods in the Applied Sciences	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) なし	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 Keigo Wada and Yasuhide Fukumoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Compressibility effect on Markstein number for a flame front in long-wavelength approximation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Matrix Annals	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) なし	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32件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 福本康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 流体・MHD方程式の南部括弧表現とその応用
3. 学会等名 第29回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto, Rong ZOU
2. 発表標題 Nambu bracket for ideal fluid and MHD equations and their applications
3. 学会等名 International School of Mathematics Guido Stampacchia & Workshop: Topological Methods in Mathematical Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Toward an analytical approach for simulating motion of a helical vortex tube: Legacy of Valery Okulov
3. 学会等名 International Workshop on Turbulence, Vorticity Dynamics and Wind Energy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福本康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 電磁流体方程式のコンパクトな南部力学表現
3. 学会等名 日本物理学会2022秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福本康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 流体・MHD方程式に対するコンパクトな南部括弧
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Okabe & Inoue's contribution to formation and metamorphoses of a vortex ring
3. 学会等名 13th International School for Young Scientists "WAVES AND VORTICES IN COMPLEX MEDIA" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Keigo Wada
2. 発表標題 Compressibility effect on vorticity production and Darrieus-Landau instability of a premixed flame front
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU (鄒蓉)
2. 発表標題 電磁・中性流体方程式に対するネーターの第二定理
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU (鄒蓉)
2. 発表標題 流体・MHD方程式に対するネーターの第二定理
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Rong ZOU
2. 発表標題 Nambu bracket and induced Lie-Poisson bracket for ideal MHD equation
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Rong ZOU
2. 発表標題 Particle relabeling symmetry and Noether's first and second theorems for fluid and MHD equations
3. 学会等名 OCAMI共同利用・共同研究(一般)ヘリシティと時空対称性, 古典場から量子場まで(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto & Rong ZOU
2. 発表標題 Noether's theorem, relabeling symmetry, Casimir invariants, generalized Bianchi identity
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Rong ZOU
2. 発表標題 Nambu-mechanics representation of Euler and MHD equations
3. 学会等名 Mathematical Aspects of the Contemporary Continuum Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuo Matsuura & Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Hierarchical Clustering of Vortical Regions in Transitional Boundary Layers
3. 学会等名 Invited workshop "Liutex and Third Generation of Vortex Identification for Engineering Applications" in "Aerospace and Aeronautics World Forum" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU (鄒蓉)
2. 発表標題 理想電磁流体方程式の南部括弧表現とその応用
3. 学会等名 京大数理解析研共同研究(公開型) 乱流の大域的特性
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Rong ZOU
2. 発表標題 Casimirs and Nambu brackets for fluid dynamics and magnetohydrodynamics
3. 学会等名 OCAMI Joint Usage/Research: Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vertical structure manifested by Nambu mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rong ZOU and Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Magnetorotational instability of MHD flows and the wave energy
3. 学会等名 OCAMI Joint Usage/Research: Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vertical structure manifested by Nambu mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Rong ZOU
2. 発表標題 Topological invariants and Nambu brackets in fluid mechanics and magnetohydrodynamics
3. 学会等名 17h International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 MHDのトポロジカル不変量再考
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 オイラー・電磁流体方程式の南部力学表現
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 電磁流体のトポロジーと磁気回転不安定性
3. 学会等名 第18回日本流体力学会 中部支部講演会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本 康秀, Rong ZOU
2. 発表標題 電磁流体方程式の南部力学表現
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto, Liu Fengnan and Xiaopeng Zhao
2. 発表標題 A finite difference scheme for the Richards equation under variable-flux boundary conditions
3. 学会等名 Workshop Applications of Nonlinear Diffusion Equations 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto, Abarzhi Snezhana and Keigo Wada
2. 発表標題 A finite difference scheme for the Richards equation under variable-flux boundary conditions
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Vortex dynamics in science, nature and technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Wada and Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Effect of compressibility on laminar flame speed and its stabilizing effect on Darrieus-Landau instability of a premixed flame front
3. 学会等名 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rong Zou and Yasuhide Fukumoto
2. 発表標題 Three dimensional azimuthal magnetorotational instability of a MHD flow
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Keigo Wada
2. 発表標題 Effect of compressibility in the reaction zone of a premixed flame and its implication to the Darrieus-Landau instability
3. 学会等名 MATRIX Conference on Conservation Laws, Interfaces, and Mixing (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto, Keigo Wada and Abarzhi Snezhana
2. 発表標題 Effect of compressibility on laminar flame speed and its influence on the Darrieus-Landau instability of a planar front of premixed flame
3. 学会等名 72th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Thi Thai LE
2. 発表標題 Stability of finite shear layer of shallow-water flow
3. 学会等名 10-th International School for Young Scientists "WAVES AND VORTICES IN COMPLEX MEDIA" (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhide Fukumoto and Keigo Wada
2. 発表標題 Effect of compressibility in the reaction zone of a premixed flame and its implication to the Darrieus-Landau instability
3. 学会等名 KIAS Workshop on Mathematics of Fluid Motion III: Theory and Computation (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福本 康秀, 和田 啓吾
2. 発表標題 Mallard-Le Chatelier 理論の観点による予混合火炎の伝播速度に対する圧縮性効果
3. 学会等名 第24回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 福本康秀, Thi Thai LE and Rong ZOU
2. 発表標題 Toward Nambu mechanics of baroclinic fluid dynamics and magnetohydrodynamics
3. 学会等名 IMI一般研究_研究集会(II)「ドレスト光子に関する数理研究とその応用」
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------