

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540406
 研究課題名 (和文) トポロジ-的変分原理による渦管の 3 次元運動とその最適性の追求
 研究課題名 (英文) Three-dimensional motion of a vortex tube and quest for its optimality based on topological variational principle
 研究代表者
 福本 康秀 (FUKUMOTO YASUHIDE)
 九州大学・大学院数理学研究院・教授
 研究者番号：30192727

研究成果の概要：

非圧縮流体中を運動する定常渦流は「インパルス一定の拘束条件下での等循環面上のエネルギー極大/極小状態である」を証明した。これより導かれる変分原理を高レイノルズ数での渦輪の運動に適用して、速度公式を大幅に改善した。また、低レイノルズ数極限で、すべての時刻にわたって渦輪の運動速度を書き下した。この解より決定した最適渦輪のパラメータは実験データと符合する。さらに、トポロジ-的変分原理に立脚して、渦管に立つ波のエネルギーと非線形的に誘導される平均流を計算した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：流体物理

1. 研究開始当初の背景

代表者らは、しばらく、渦管の 3 次元運動に対する渦核半径-曲率半径比についての高次漸近理論を開発し、渦輪内外の速度場の計算を行い、また、「粘性流体中の軸対称渦輪のリング半径の拡大則」を導いた [Y. Fukumoto & H. K. Moffatt: J. Fluid Mech. **417** (2000) p.1, Y. Fukumoto: Fluid Dyn. Res. **30** (2002) p.65]. さらに、「らせん渦管のまわりの速度場」を計算する [Y. Fukumoto & V. L. Okulov: Phys. Fluids **17** (2005) 107101] など、有限太さの効果の扱い

を前進させた。ただし、**3 次**まで有効な運動速度の表式はまだ荒削りで、しかも、そこに至る特異摂動法の計算は込み入っており、最終形とは言い難い。

2003 年、日本学術振興会・日英科学事業 [代表・坪田誠教授 (大阪市大), W. F. Vinen 教授 (Univ. of Birmingham)] での R. J. Donnelly (Univ. of Oregon) との出会いが、代表者に**変分原理の可能性に目覚めさせた**。Donnelly: "Quantized Vortices in Helium II" (Cambridge Univ. Press, 1991) Chap. 1 には、軸対称渦輪の**1 次精度**の進行速度 \mathbf{U} が、

いくつかの場合に、エネルギー H のインパルス \mathbf{P} に関する変分 $\mathbf{U} = \delta H / \delta \mathbf{P}$ から計算できることが 1 つの表に収められている。この方法では、同じオーダの進行速度を得るのにも、より低次の速度場だけですんでしまうので、計算量を劇的に減らせる。ただし、適用できるのは一様渦度分布のみとしている。それでも、類似の枠組みが、Bose-Einstein 凝集体のように Gross-Pitaevskii 方程式にしたがう渦輪に対しても適用できる点に惹きつけられる。

実は、一様渦度への限定は誤りで、変分原理の定式化に致命的な欠落がある。Donnelly は、拘束条件として、「渦輪の体積を変えない」までは取り入れたが、「渦線が流れに凍結している」という渦度に対するトポロジ的な拘束条件を見落としている。

2. 研究の目的

ミクロな (準) 粒子からマクロな渦の運動にまで通用する公式 $\mathbf{U} = \delta H / \delta \mathbf{P}$ の真の姿を描き出す。'弾性的な'モードにはそのまま適用できるであろう。マクロな系は複合的である。渦輪では、音波の発生や不安定波の発達は不可避で、それによる造波抵抗を受けて減速する。エネルギーと運動量を構成要素とするこの原理には拡張性があり、波動をも組み込めることが究極の目標である。

(1) 軸対称渦輪に対する変分原理

- ① 非粘性非圧縮性流体中を定常的に運動する任意の渦度領域の進行速度に対する変分公式を証明し、
- ② 3 次精度の渦輪の進行速度公式を導出する。
- ③ 高 Reynolds 数においては、粘性の働きは渦度分布の選択に限定されるので、②の公式が適用できるであろう。粘性流体中で、初期に太さ 0 の円から出発する渦輪の 3 次精度の進行速度を書き下す。

本テーマの成否は①にかかる。まず、問題を言い換えて、『渦度を凍結させながら』流体粒子をさまざまに並べ替えてできる軸対称渦度分布のうちで、定常渦度分布は、力学的拘束条件「インパルス=一定」のもとでのエネルギー極大の状態であることを証明する。しかし、この後に、「流体粒子の並べ替えの自由度は無限大である」点が障害として立ち上がる。Euler 方程式の解の 1 つのクラスに限れば、トポロジ的な拘束条件を課すと自由なパラメータは 1 つになってしまうという状況証拠を握っている。

③は Saffman (1970) 以降の長い空白を破る前進である。

(2) 低 Reynolds 数渦輪の進行速度と最適渦輪の形成機構の解明

ノズルから噴き出したジェットの高さがあ

る臨界値に達すると、渦輪としてちぎれ、それに続く渦度は取り込めない。この最適渦輪形成の秘密に迫りたい。渦輪が発達して成熟段階に達すると、初期に比べてエネルギーを失い、Reynolds 数も下がるであろう。低 Reynolds 数極限では、長時間にわたって渦度分布の振る舞いが計算ができる。

- ① 渦輪の低 Reynolds 数運動を全時間帯にわたって追跡する。
- ② 最適渦輪の生成機構を考える。①の解に基づいて、現実的な渦度分布も考慮することによって究明する。

(3) Kelvin 波の非線形相互作用と渦管の 3 次元安定性

円柱渦の上に立つ波を Kelvin 波という。ひずみ流中の渦管の安定性は、無現次元ハミルトン力学系のスペクトル問題とみなせる。Krein 理論によると、摂動を受けた円柱渦の安定性の鍵を握るの Kelvin 波のエネルギーである。波のエネルギーの計算は攪乱振幅について 2 次までの流れ場を要求する。この非線形攪乱を Euler 的記述の枠組みで計算するのは事実上不可能である。

これを解決する鍵はトポロジ的な変分原理の第 2 変分にある。Euler 方程式の定常解は、等渦度曲面上の極値として特徴づけられる (Arnold 1966)。定常解が臨界点と特徴づけられることにより、波のエネルギーの計算には線形固有関数で十分になる。これを忠実に表現する Lagrange 的記述の枠組みで、

- ① Kelvin 波のエネルギー
 - ② Kelvin 波の非線形相互作用によって誘導されるドリフト流
- を計算する。

以上は攪乱振幅について 2 次の量がかかわる。攪乱の成長に対する非線形効果は振幅について 3 次で登場する。

- ③ 攪乱の線形成長に対する非線形項による増幅/抑制効果を調べる。線形不安定性として、回転流に対する楕円型不安定性や細い渦輪に対する曲率不安定性をターゲットとする。これまで平均流が正確に求められていないので、既存の弱非線形安定性理論の基盤は脆弱であろう。それらを再検討する。さらに、Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーションを実施する。

並行して、らせん渦や太い渦輪に関して、新しい不安定モードを探索する。

(4) 伸縮を許す弾性棒の 3 次元運動に対する変分原理の構築と進行波解

Cosserat 理論の処方にしたがって、細長い弾性棒の 3 次元運動に対して、中心線の座標と各点でのディレクター・ベクトル系 (単位接線ベクトルを含む正規直交枠 $SO(3)$) に関する変分原理を構成する。そして、進行波解をあらわす厳密解を導出する。伸縮を許

す点が新しい。

3. 研究の方法

(1) 軸対称渦輪に対する変分原理

① まず、一般的に、非粘性非圧縮性流体中を定常的に運動する任意の渦度領域の進行速度に対する変分公式を証明する。この変分原理が連続的渦度分布にも適用できることを一般的な状況のもとで証明する。しかし、この後に、「流体粒子の並べ替えの自由度は無限大である」点が障害として立ちはだかる。

「渦度が流体に凍結している」というトポロジー的拘束条件が必須である点を明確にする。

② Fukumoto & Moffatt (2000) [J. Fluid Mech. 417 (2000) p.1] で導出した渦輪内外での Euler 流の速度場からエネルギーおよびインパルスを計算し、変分原理を実行する。3 次精度の進行速度を得るのに 2 次精度の速度場で済むのが利点である。

③ 高 Reynolds 数の運動に対しては、②の公式のかなりの部分が適用できる。

(2) 低 Reynolds 数渦輪の進行速度と最適渦輪の形成機構の解明

① 低 Reynolds 数極限で、非定常 Stokes 方程式を解いて、任意の初期軸対称渦度分布に対して、渦輪の渦度分布を積分表示の形で書きあらわす。とくに、Helmholtz-Lamb の方法を用いて、初期にデルタ関数核をとる渦輪に対して、運動速度を計算する。これはすべての時刻に適用できる。

② ピストンによってノズルからジェットを噴き出したとき、その界面の円形渦層が巻き上がってできる渦輪の成長限界を決める。この渦輪の形成機構を”渦度分布”も考慮した変分原理によって究明する。

(3) Kelvin 波の非線形相互作用と渦管の 3 次元安定性

定常基本流のまわりの攪乱速度場を振幅について 2 次まで展開する。攪乱速度場を Lagrange 変数で書きあらわす。Lagrange 変位がしたがう発展方程式を Euler 方程式から導く。

① 無限円筒内の回転流の Kelvin 波を Lagrange 変数で表現し、それをもとに、Kelvin 波のエネルギーを計算する。

② Lagrange 変位によってあらわした振幅について 2 次の速度場攪乱の時間平均をとることによって、Kelvin 波の自己相互作用による平均流を直接計算するスキームを構成する。計算には、数式処理ソフトウェア Mathematica を用いた。

③ Lagrange 的記述によって求めた平均流を Euler 的記述による弱非線形安定性理論の枠組みに取り込んで、楕円渦や渦輪の上に

立つ Kelvin 波の振幅の弱非線形発展方程式を振幅について 3 次まで導出する。

また、Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーション行う。

らせん渦管や Hill の球形渦輪の新しい線形不安定モードの探索については、WKB 法を利用する

(4) 伸縮を許す弾性棒の 3 次元運動に対する変分原理の構築と進行波解

しばらく前、弾性棒の平衡形 “Kirchhoff のエラスティカ” と軸流をもつ渦糸の変形しない運動とのアナロジーを発見した。それを解明する過程で、物質座標であるディレクター場による変分原理によって、平衡形を「曲げ・ねじりエネルギー極小の状態」として特徴づけることができた。これを足掛かりにして、ダイナミックスの領域まで踏み出す。

4. 研究成果

(1) 軸対称渦輪に対する変分原理

① 非圧縮流体中を一定速度で運動する定常渦流は「インパルス一定という拘束条件下での等循環面上のエネルギー極大・極小状態である」ことを証明し、これから、渦輪の進行速度を導く変分原理を構築した [雑誌論文⑦]。トポロジー的不変量が鍵を握るが、軸対称流に対する Casimir 不変量がクロス・ヘリシティの形で表現できることを見つけた [雑誌論文④]。

② 上記①でのトポロジー的変分原理と接合漸近展開法とを組み合わせることによって、非粘性流体中の軸対称渦輪の進行速度の渦核・リング半径比についての 3 次補正項を導出した。これは、Fraenkel (1970), Saffman (1970) 以来の空白を破る前進である [雑誌論文⑦]。

③ さらに、高 Reynolds 数の運動にも適用して、初期にデルタ関数核 (= 太さ 0) を渦輪に対する Saffman (1970) の速度公式を大幅に改善した。図 1 に Cantwell, Spalart & Stanaway (1988) による軸対称 Navier-Stokes 方程式の数値シミュレーション結果との比較を示す。運動速度 U を時間 t の関数としてあらわしている。ここで、 ν は流体の動粘性係数、 Γ_0 , R_0 は、それぞれ、 $t = 0$ で渦輪がもつ循環、リング半径である。一番上の太い実線が Saffman の公式、その下の細い実線が 3 次補正項を組み込んで改善した公式、その下に続く破線が数値シミュレーション結果である。上から循環 Reynolds 数 $R_{\Gamma_0} = \Gamma_0 / \nu$ が 200, 100, 0.01 である。Saffman の公式がかなり改善された。3 次精度の速度公式はそれほど高くはない

Reynolds数での渦輪の運動速度をよく近似する [雑誌論文⑦]. なお, 図1の一番下の細い実線は低Reynolds数極限である [続く(2)①].

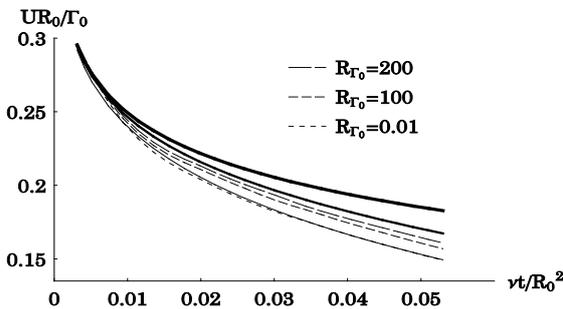


図1: 渦輪の進行速度の時間変化

(2) 低 Reynolds 数渦輪の進行速度と最適渦輪の形成機構の解明

① 低 Reynolds 数極限で, 非定常 Stokes 方程式を解いて, 任意の初期軸対称渦度分布に対して, 渦輪の渦度分布を積分表示の形で書きあらわした. とくに, Helmholtz-Lamb の方法を用いて, 初期にデルタ関数核をとる渦輪に対して, 運動速度を一般化超幾何関数を用いて閉じた形で書き下すことに成功した. これはすべての時刻に適用でき, 十分小さい時刻と大きな時刻で有効な漸近展開をそれぞれ行うことによって, 初期段階や減衰段階の漸近形を導いた. 初期段階の運動速度の時間変化は Cantwell, Spalart & Stanaway (1988) が行った数値シミュレーションの低 Reynolds 数での結果とよく合う. **渦輪が一生涯かけて移動できる距離も簡単な形で求められた** [雑誌論文⑧].

さらに, 粘性を時間に依存する **渦粘性係数**で置き換えることによって, **乱流渦輪**を模す解を構成できた [雑誌論文①].

② この渦度分布にもとづいて最適渦輪のパラメータを決定した. 「生成した渦輪の速度がジェット速度を超える瞬間の渦輪が最適渦輪である」に基づいて, ピンチ・オフ瞬間での無次元化した **エネルギー**, **インパルス**と **循環**を計算すると, 実験データとよい一致を示す [雑誌論文⑧].

(3) Kelvin 波の非線形相互作用と渦管の 3 次元安定性

① 一般的に, 点スペクトルに対応するモードの波のエネルギーを 1 次の Lagrange 変位のみで表現することに成功し, **それが分散関係の微分で与えられることを証明した** [雑誌論文⑥]. 定常状態からのずれとして定義される振幅について 2 次の波のエネルギーの表式を 1 次の Lagrange 変位場のみを用い

てと具体的に書き下した. 2 次変位は寄与しない.

そして, **波のエネルギー**が波の作用 (action) に角周波数を乗じたもので与えられることを示した [雑誌論文⑤]. この結果を渦管の上に立つ Kelvin 波に適用し, 以前 Cairns の公式によって導出した結果 (Fukumoto 2003) と一致する. 得られたエネルギーの表式からその符号は一目瞭然である [雑誌論文③].

一般的な速度分布をもつ平行流について, 点スペクトルの固有モードのみならず **連続スペクトルの特異モード**に対しても一般化された分散関係を定義し, 連続スペクトルにおいてもエネルギーと分散関係の微分が対応づけられることを示した [雑誌論文⑥].

② 副産物として, Kelvin 波の自己非線形相互作用によって誘導される平均流が得られた. 回転流の修正項のみならず軸方向のドリフト流も生ずる. 平均流は, 波の作用に波数を乗ずることによって得られる. すなわち, 平均流に密度を乗じた量は **擬運動量**と一致する [雑誌論文③].

③ 渦輪の不安定性について **直接数値シミュレーション**により調べた. 計算手法の改良を行い, **非線形領域で曲率不安定性による攪乱振幅の増幅の抑制**を捉えることに成功した [雑誌論文②, ③]. また, **太い渦輪として Hill の球形渦**を取り上げ, これについても **曲率不安定性**が存在することを示した.

らせん渦の線形安定性を短波長安定性解析により調べた. **曲率不安定性**が存在する. **振り**と **回転**の効果により曲率不安定性は変調を受ける [雑誌論文②].

(4) 伸縮を許す弾性棒の 3 次元運動に対する変分原理の構築と進行波解

弾性棒の 3 次元平衡形と渦ジェット糸とのアナロジーを手がかりに, 断面は円形で長さ方向に一様であるという仮定のもとで, 伸び縮みする弾性棒に対して, 接線ベクトルとそれに垂直な 2 つのディレクターからなる正規直交枠 $SO(3)$ を変数とする変分原理を構成した. これより, 弾性棒の変形の 3 次元的な進行波を記述する常微分方程式系を導出した [雑誌論文⑨, ⑩].

さらに, 弾性棒の 3 次元進行波に対する厳密解を見つけた. 厳密解は, 楕円関数と楕円積分を用いて具体的に書き下せる [久永英: 平成 19 年度九州大学修士論文].

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 13 件)

① F. Kaplanski, S. Sazhin, Y. Fukumoto,

- B. Steven, H. Morgan, "A generalised vortex ring model", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.622, pp. 233-258 (2009), 査読有
- ② Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Short-wavelength stability analysis of a helical vortex tube", *Physics of Fluids*, Vol.21, 014104 (7 pages) (2009), 査読有
- ③ Y. Fukumoto, M. Hirota, "Elliptical instability of a vortex tube and drift current induced by it", *Physica Scripta*, Vol.T132, 014041 (9 pages) (2008), 査読有
- ④ Y. Fukumoto, "A unified view of topological invariants of fluid flows", *Topologica*, Vol.1, 003 (12 pages) (2008), 査読有
- ⑤ M. Hirota, Y. Fukumoto, "Action-angle variables for the continuous spectrum of ideal magnetohydrodynamics", *Physics of Plasmas*, Vol. 15, 122101 (11 pages) (2008), 査読有
- ⑥ M. Hirota, Y. Fukumoto, "Energy of hydrodynamic and magnetohydrodynamic waves with point and continuous spectra", *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 49, 083101 (28 pages) (2008), 査読有
- ⑦ Y. Fukumoto, H.K.Moffatt, "Kinematic variational principle for motion of vortex rings", *Physica D*, Vol.237, pp.2210-2217 (2008), 査読有
- ⑧ Y. Fukumoto, F. Kaplanski, "Global time evolution of an axisymmetric vortex ring at low Reynolds numbers", *Physics of Fluids*, Vol.20, 053103 (13 pages) (2008), 査読有
- ⑨ Y. Fukumoto, "Analogy of a vortex-jet filament with the Kirchhoff elastic rod and its dynamical extension", *Proc. of IUTAM Symposium on Hamiltonian dynamics, vortex structure and turbulence* (ed. A.V.Borisov, V.V. Kozlov, I.S. Manaev and M.A. Sokolovskiy, Springer, 2008), pp.77-87, 査読有
- ⑩ S. Lugomer, Y. Fukumoto, B. Farkas, T. Sörényi, A. Toth, "Super-complex wave-vortex multiscale phenomena induced in laser-matter interactions", *Physical Reviews E*, Vol.76, 016305 (15 pages) (2007), 査読有
- ⑪ Y. Fukumoto, "Analogy between a vortex-jet filament and the Kirchhoff elastic rod", *Fluid Dynamics Research*, Vol.39, pp.511-520 (2007), 査読有
- ⑫ Y. Hattori, Y. Fukumoto, K. Fujimura, "Evolution of an elliptical flow in weakly nonlinear regime", *Proc. of IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence* (ed. Y. Kaneda, Springer, 2007), pp.433-438, 査読有
- ⑬ Y. Hattori, Y. Fukumoto, K. Fujimura, "Instability of an elliptical flow: Weakly nonlinear analysis", *Proc. of the Sixth International Conference on Advances in Fluid Mechanics, Fluid Structure Interaction and Moving Boundary Problems IV* (eds. S. K. Chakrabarti and C. A. Brebbia, WIT press, 2007), pp.193-201, 査読有
- [学会発表] (計 20 件)
- ① Y. Fukumoto, M. Hirota, "Linear and weakly nonlinear stability of an elliptic flow from the viewpoint of Hamiltonian spectra", *International workshop on verified computations and related topics*, 2009.3.7, University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany
- ② 福本康秀, 廣田真, 「渦流の 3 次元不安定性とそれよるドリフト流の誘導: ラグランジュ的アプローチ」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2008.11.14, 九州大学応用力学研究所, 春日
- ③ Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Short-wave stability of a helical vortex tube", *IUTAM symposium 150 Years of Vortex Dynamics*, 2008.10.16, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
- ④ Y. Fukumoto, "Global time evolution of viscous vortex rings", *IUTAM symposium 150 Years of Vortex Dynamics*, 2008.10.16, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark [*Keynote lecture]
- ⑤ 服部裕司, 福本康秀, 「短波長極限におけるらせん渦の不安定性」, 日本流体力学会年会 2008, 2008.9.6, 神戸大学六甲台キャンパス, 神戸
- ⑥ Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Curvature Instability of a vortex ring and a helical vortex tube", *XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, 2008.8.26, Adelaide Convention Center, Adelaide, Australia
- ⑦ Y. Fukumoto, H. K. Moffatt, S. Ooshiro, "Motion of vortex rings with and without magnetic field", *XXII*

International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM), 2008.8.26, Adelaide Convention Center, Adelaide, Australia

- ⑧ 服部裕司, 福本康秀, 「渦構造の曲率不安定性」, 研究集会「オイラー方程式の数理: 渦運動 150 年」, 2008.7.18, 京都大学数理解析研究所, 京都
- ⑨ 服部裕司, 泥谷圭亮, 「太い渦輪の線形安定性」, 日本物理学会 64 回年次大会, 2009.3.27, 立教学院池袋キャンパス, 東京
- ⑩ 服部裕司, 三宅俊甫, 福本康秀, 「らせん渦の短波長線形不安定性」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008.3.23, 近畿大学大学本部キャンパス, 東大阪
- ⑪ 福本康秀, 「渦流の 3 次元不安定性とそれによって誘導されるドリフト流: ラグランジュ的アプローチ」, 第三回九州大学産業技術数理研究センターワークショップ「自然現象における階層構造と数理的アプローチ」, 2008.3.8, 九州大学情報基盤研究開発センター, 福岡
- ⑫ Y. Fukumoto, M. Hirota, M. Adachi, "Global stability analysis of a rotating fluid columns subjected to a weak external Coriolis force", US-Japan workshop on shocks, hydro-instabilities, turbulence and hot (warm) dense matter and related phenomena, 2008.1.16, 大阪大学レーザーエネルギー科学研究所, 豊中
- ⑬ 福本康秀, F. Kaplanski, 「低レイノルズ数領域での渦輪の全時間領域にわたる挙動」, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007.9.22, 北海道大札幌キャンパス, 札幌
- ⑭ Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Nonlinear evolution of a vortex ring", EUROMECH Colloquium 491: Vortex dynamics from quantum to geophysical scales, 2007.9.12, University of Exeter, Exeter, UK
- ⑮ Y. Fukumoto, M. Hirota, "Elliptical instability of a vortex tube and drift current induced by it", International Conference "Turbulent Mixing and Beyond, 2007.8.24, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy
- ⑯ 服部裕司, 福本康秀, 「直接数値シミュレーションによる渦輪の曲率不安定性の検証」, 日本流体力学会年会 2007, 2007.8.8, 東大教養学部, 東京
- ⑰ Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Numerical detection of a new instability mode of a

vortex ring", 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, 3rd Symposium on Fundamental Issues and Perspectives in Fluid Mechanics, 2007.8.1, Sheraton San Diego Hotel & Marina, San Diego, CA, USA

- ⑱ 福本康秀, 「渦のキネマティクスとダイナミクス」, プラズマ科学のフロンティア 2007 研究会, 2007.8.1, 核融合科学研究所, 土岐 [*招待講演]
- ⑲ Y. Hattori, Y. Fukumoto, "Nonlinear evolution of disturbed vortex ring", US-Japan workshop on shocks, hydro-instabilities, turbulence and hot (warm) dense matter and related phenomena, 2007.6.26, Universidade do Porto, Porto, Portugal
- ⑳ Y. Fukumoto, "Kinematic variational principle for motion of vortex rings", Euler Equations: 250 Years On, 2007.6.20, Centre Paul Langevin, Aussois, France

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 〔分担執筆〕 福本 康秀, 第 5 章「渦を破壊せよ」, 「技術に生きる現代数学」(総ページ数 206, 若山正人編, 岩波書店, 2008) pp.133-174

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

福本康秀

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K000449/index.html>

服部裕司

http://www.ifs.tohoku.ac.jp/divisions/jp/cfd_acfdl.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福本 康秀 (FUKUMOTO YASUhide)
九州大学・大学院数理学研究院・教授
研究者番号: 30192727

(2) 研究分担者

()

(3) 連携研究者

服部 裕司 (HATTORI YUJI)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 70261469