

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年6月2日現在

機関番号：34310
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2009～2013
課題番号：21540400
研究課題名（和文） 流れ場におけるリズムとパターン発現の物理機構
研究課題名（英文） Physical mechanism in appearance of rhythms and patterns in flow fields
研究代表者
水島 二郎（MIZUSHIMA, Jiro）
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号：70102027
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円、（間接経費）1,050,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では定常流が不安定となり振動流へと遷移する過程の物理機構、特に振動源とパターン発現の物理機構を明らかにし、その条件と流れのパターンを求めた。具体的には、円柱を過ぎる流れ場中にカルマン渦列が発生・消滅・再生成の物理機構、周期的急拡大管の遷移機構、矩形断面をもつ容器中に満たされたエタノールと水の混合溶液中における2重拡散対流の発生とその遷移、バスタブ渦が生じるメカニズムを調べ、その研究成果を有力専門誌に論文を公表した。

研究成果の概要（英文）：In the present research project, I have clarified the mechanisms to induce instability of steady flow which yields oscillation and flow patterns in the flow field. Actually, I have investigated the underlying physics of appearance of the Karman vortex street behind a circular cylinder, the mechanism of annihilation of the Karman vortex street and its regeneration, the instability and transition of the double diffusive thermal convection in ethanol-water mixture, and the induction mechanism of the bathtub vortex. From these investigations, I obtained many fruitful results and published or submitted scientific papers to prominent journals.

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、数理物理

1. 研究開始当初の背景

(1) 流体物理学において重要な基本問題の一つである円柱を過ぎる流れの定常流から振動流への遷移については、1911年に von Karman が円柱後流に生じる渦列の安定な配置を計算し、実験とよく一致する結果を得た。その後、Sato (1960) などにより後流の安定性が調べられ、振動流の発生条件が求められたが、振動の発生の物理的な機構は未解明であった。最近になって流れの不安定性には絶対不安定性と対流不安定性があることが知られるようになってきた。すなわち、流れ場の中の絶対不安定領域で振動が生み出され、その振動が対流不安定性によって下流へ運ばれる結果、カルマン渦列のようなきれ

いな流れパターンが生じると考えられるようになってきた。絶対不安定性と対流不安定性に関する議論は Briggs (1964) や Lifshitz and Pitaevskii (1981) によるプラズマ物理における波東形攪乱の不安定性の研究にさかのぼる。また、1990年には Huerre and Monkewitz によるレビュー論文が出版されて多くの研究者にも知られるようになった。しかし、これらの研究はすべて理想的な2次元平行流における不安定性の研究であり、非平行である現実的で複雑な流れについての絶対不安定性と対流不安定性の研究は見あたらない。しかも絶対不安定性の物理的な発生機構については未解決である。非平行流れの安定性解析では、

攪乱の時間的増幅を取り扱い、これらは全体不安定性(Global instability)と呼ばれて、局所不安定性(Local instability)と区別されてきた。円柱を過ぎる流れについては Jackson (1987) が初めて全体不安定性を調べ、急拡大部をもつ管路流れについては Mizushima, Okamoto and Yamaguchi, Mizushima and Shiotani(2000,2001)が研究を行った。最近では、Akinaga and Mizushima(2005)および Mizushima and Suehiro(2005)が2円柱を過ぎる流れの全体不安定性を調べて、注目されている。本研究計画申請者である水島はこれまで主に**流れの安定性とパターン形成**について、研究を行っており、その成果を鳥取大学教授藤村薫氏と共著で「**流れの安定性**」として出版した。

(2) 流れ場が定常状態から振動流へと遷移し、流れ場中にリズムが生まれることはこれまでも数多くの研究が行われてきたが、それらの研究は現象の発見とその性質の議論が中心であり、リズムが生まれる物理的な機構はほとんど議論されることがなかった。その理由はこの問題を数学的に適切な問題として設定することの困難さにある。特に、アルコールと水の混合溶液中に発生する2重拡散対流は不安定性の初期は振動流として成長する攪乱がやがて定常攪乱へと漸近することが知られているがその物理的な説明は未だ行われていない。

(3) 流れ場中には多くの美しいパターンが発生し、これまでも多くの研究者を魅了してきたが、円柱後流のカルマン渦列だけでなく、その生成機構が未解明の現象が数多く存在する。たとえば、容器中の水を排水口から排水するときに見えるバスタブ渦などは研究者だけでなく、市井の人たちにも興味のある現象であるにもかかわらず、その生成機構と渦の回転方向の決定機構は未解明である。

2. 研究の目的

本研究計画の目的は、流れが不安定となって流れの中にリズム(振動)とパターン(渦)を発現する機構を物理的に説明することである。流れの不安定性には定常攪乱に対する不安定性と振動攪乱に対する不安定性があり、それぞれの不安定性は外力によって駆動されるものと外力を受けずに発現するものとに分類される。これらの不安定性の内、現在までにその物理的な機構が明らかになっているのは外力を受けて定常攪乱が増幅する場合のみであり、**外力を受けない流体運動によって駆動される不安定性についてはその物理的な機構は明らかではない**。この研究計画では一様流中に置かれた円柱または角柱を過ぎる流れにおけるカルマン渦列の発生機

構(図1)、周期的急拡大管路流れの遷移機構(図2)、2重拡散対流の発生機構(図3)、バスタブ渦の発生機構とその旋回方向(図4)を代表例として流れ場中のリズムとパターンの発生を司る物理を解明する。



図1

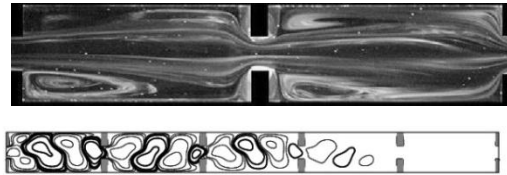


図2

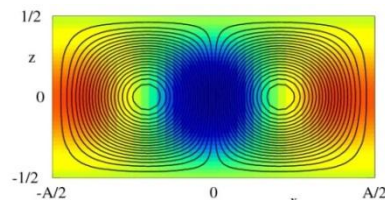
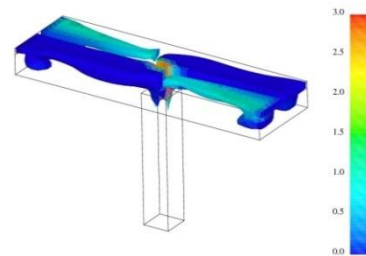


図3



3. 研究の方法

(1) 柱状物体を過ぎる流れの遷移

申請者らはこれまで円柱・角柱や円柱列を過ぎる流れの研究を行い、これらの物体を過ぎる流れが層流から乱流へ遷移する機構とその条件について、理論および数値シミュレーションと実験により調べてきた。これらは、複雑流の遷移であり全体不安定性とも呼ばれ、2次元平行流を仮定しないので、実際の実験結果とよく一致する結果を得ることで高い評価を得てきた。しかし、これらの研究は流れ場中に振動が発生する物理的機構を調べたものではない。

本研究計画では、円柱や角柱などの柱状物体を過ぎる流れの中に**インパルス攪乱**を加え、その攪乱の伝播と発展を追うことにより、流れ場中の全体不安定性発生時の物理機構を調べる。このとき、これまでの絶対不安定性の概念の信憑性について議論を行う。流れが全

体不安定となると、流れ場に振動を生じ、この振動は波動として、不安定領域へ伝播し、結果としてカルマン渦列が形成される。また、流れの分岐解析と弱非線形安定性解析を行い、実験および数値シミュレーション結果との比較を行う。

角柱を過ぎる流れにおいては物体後方のできるカルマン渦列は比較的短い距離まで下流方向に流されるが、ある距離まで流されると消滅し、カルマン渦が消滅してできる剪断流から再び第2のカルマン渦列が生じる。この第1カルマン渦列の消滅と第2渦列発生の物理機構を数値シミュレーション・流れの安定性理論・実験の3つの方法により調べる。実験は主に首都大学東京の浅井雅人教授および稲澤歩准教授が担当する。

柱状物体後流の非線形相互作用の物理を調べるため、2本の角柱を過ぎる流れの数値シミュレーション・実験を行い、弱非線形安定性理論の定式化を行う。これまでも後流の非線形相互作用については多くの研究者により調べられてきたが、決定的な物理機構を解明することが不可能であった。この研究計画では弱非線形安定性理論により、対称攪乱と反対称攪乱の2つの攪乱モードの振幅方程式を導き、パラメータによっては2つのモードの内なぜ一方のモードが選択され、他方が減衰するのか、その物理的機構を明らかにする。

(2) 周期的急拡大部をもつ管路流れ

申請者らはこれまでに、周期的拡大間管路流れには定常不安定性と振動不安定性が存在することを明らかにした。対称性をもつ周期的急拡大管路では、レイノルズ数が小さいとき、流れも対称定常流となる。臨界値よりも大きなレイノルズ数において、対称定常流をあらかじめ求めておき、対称定常流に管路入り口で攪乱を与える。レイノルズ数が小さいとき、波群は成長することなく、下流へ伝播するにしたがって減衰する。レイノルズ数を少しずつ大きくすると、伝播する波群は下流へ伝播するにしたがって成長する。その臨界条件が、対流不安定性の生じる臨界値である。ただし、一般的には成長する波群は下流へ流されるので、一過性の不安定性であり、周期的に並んだ急拡大部の最初のいくつかでは観測することすら難しい。しかし、さらにレイノルズ数を大きくしていくと、伝播する波群のみならず、定点で観測しても流れが振動を始めると期待される。これが申請者の主張するアクティブ不安定性の始まりである。この研究課題の中心テーマはこのアクティブ不安定性の発生条件を定めることと、その物理的発生機構を明らかにすることである。

(3) 2重拡散対流におけるパターンの発生
2枚の水平平板間あるいは矩形容器中に満たされたエタノールと水の混合溶液中では、純粋な水の中で発生するベナール対流とは異なり、時間的に振動する対流が発生する。この振動対流の発生の機構とその対流パターンの生成機構を数値シミュレーションおよび線形安定性理論・弱非線形安定性理論・解の分岐理論を用いて調べる。

(4) バスタブ渦の発生機構と渦の回転方向
容器中に満たされた水を容器底面の排水口から排水するとき生じるバスタブ渦については物理学者のみならず、市井の人たちにも関心の深い話題である。このバスタブ渦の発生機構とその渦巻き方向の決定機構について実験・数値シミュレーションおよび線形安定性解析により調べる。バスタブ渦の発生機構は容器の形状あるいは系のもつ対称性により異なることが予想される。

4. 研究成果

定常流が不安定となって振動流へと遷移する物理機構、特に振動源とパターン発現の物理機構とその条件を、それぞれの事例について求め、次のとおり研究成果を得た。

(1) 柱状物体を過ぎる流れの遷移

円柱を過ぎる流れにおいてカルマン渦列が生じる物理的機構を見つけるため、物体直後にパルス型攪乱を与え、下流へ伝播する波束型攪乱を観察した(図5参照)。この研究では、これまで用いられてきた対流不安定と絶対不安定概念を拡張し、パッシブモード不安定とアクティブモード不安定性の概念を提案し、これらの定義に従って攪乱の成長を調べることにより、流れの全体不安定とアクティブモード不安定性の関係を明らかにするとともにカルマン渦列が継続して生成されるための振動源を特定した。また、流れがパッシブモード不安定からアクティブモード不安定(絶対不安定)に遷移する条件は波束のテイルの群速度が0となることを見いだした。この研究成果を日本流体力学会、京都大学数理解析研究所共同利用研究集会「非線形波動現象の多様性と普遍性」等で発表し、論文として2010年1月に Physical Review E に公表した。

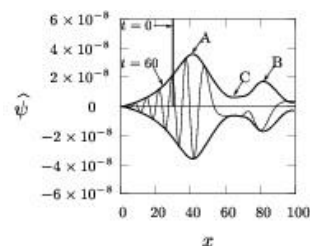


図5

アクティブ不安定性により発生したカルマン渦列はある距離まで下流へ流された後に消滅し、弱い剪断流となる。また、弱い剪断流は再び不安定性を生じて第2カルマン渦列を生じる(図6参照)。この物理過程を線形安定性理論により明らかにし、その成果を2014年1月に Journal of the Physical Society of Japan に公表した。

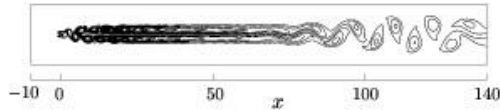


図6

2本の柱状物体を過ぎる流れではそれぞれの柱状物体後方にウェイクができ、それらの間で非線形相互作用が行われて最終的な流れのパターンと振動リズムが形成される。これら2つのウェイクの非線形相互作用を弱非線形安定性理論により振幅方程式を導出し、振幅方程式を解析的および数値的に解くことにより調べた。その結果、2本の柱状物体を過ぎる流れはパラメータの値を決めても必ずしも一意的に決まらず、初期条件に依存して多重安定解をもつことが分かった(図7参照)。この研究成果を、2014年4月に Journal of Fluid Mechanics に投稿した。

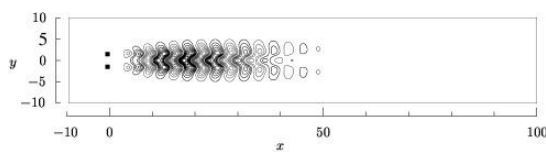


図7

(2) 周期的急拡大をもつ管路流れ

周期的急拡大管流れについて、数値シミュレーションと線形安定性解析を行い、流れがパッシブ不安定からアクティブ不安定に移行する機構とその条件を調べた。その結果、この流れにおいても、流れがパッシブ不安定からアクティブ不安定に遷移する条件は、波束のテイルの群速度が0となることであるということがわかった。(図8参照)。この研究成果を、2010年1月に開催された京都大学数理解析研究所共同利用研究集会「乱流の動力的記述と統計力学的記述の相補性」において発表し、同研究所講義録として2011年7月に出版した。

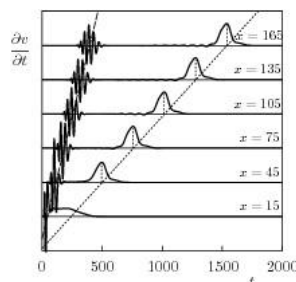


図8

(3) 2重拡散対流におけるパターンの発生

矩形断面をもつ長い容器中に満たされたエタノールと水の混合溶液中における2重拡散対流の発生とその遷移について、線形安定性理論および数値シミュレーション・分岐解析等により調べた。その結果、2重拡散対流が発生する物理機構として、流体に働く力が単位時間に流体に与えるエネルギーの時間平均が正となることにより2重拡散対流が発生し、その対流運動は振動流であることを明らかにした。また、線形不安定性によって生じる2重拡散対流は初期には振動流であるにもかかわらず、十分な時間の後に定常流へと遷移することがわかった(図9参照)。その研究成果を論文にまとめ、2013年8月に Journal of the Physical Society of Japan に公表した。

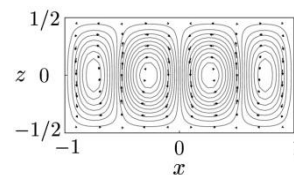


図9

(4) バスタブ渦の発生機構と渦の回転方向

バスタブ渦の発生機構と渦の構造および渦流の回転方向について数値シミュレーション・実験と線形安定性解析により調べた結果、バスタブ渦の発生には系のもつ対称性、すなわち、容器の形状や排出口の位置などの幾何学的な要素が重要であるという結論を得た。系が軸対称性をもつ場合について、常に水を供給することにより水面高さ一定の条件で、回転する円筒容器中に形成される渦の起源と、渦が継続して維持される機構を数値解析により調べた結果、バスタブ渦には2つの異なる種類の渦が存在することが明らかになった。一つは容器内の水がもっている残留渦度の中心部への集中により生じ、もう一つは地球の自転によるコリオリ力により生じる渦である(図10)。このように、軸対称な系ではバスタブ渦が流れの不安定現象として生じることはないという結論に達した。この研究成果を2012年7月に Journal of the Physical Society of Japan に公表した。この論文は日本物理学会のエディターズチョイスに選ばれ、読売新聞を初めいくつかの新聞にその内容が紹介された。

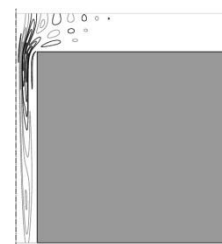


図10

一方、矩形断面容器中でのバスタブ渦発生についてはこれまであまり研究がなされてこなかったが、レイノルズ数が小さいときの流れである対称定常流の不安定性により、バスタブ渦が発生する可能性が Shingubara and Kawakubo(1984)の実験により示唆された。その真偽を確かめるため、直方体容器中に発生するバスタブ渦について数値シミュレーション・実験・線形安定性理論により調べた(図11参照)。その結果、矩形断面容器など反転対称性をもつ系ではバスタブ渦は流れの不安定性により生じることを明らかにし、その成果の一部を論文にまとめ、Physical Review Letters に投稿した。また、現在論文を執筆中である。

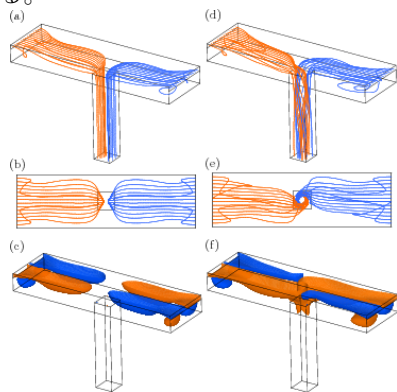


図 11

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 7 件)

- ① Jiro Mizushima, Genta Hatsuda, Hiroshi Akamine, Ayumu Inasawa and Masahito Asai, Rapid annihilation of the Karman vortex street behind a rectangular cylinder, 査読あり, Journal of the Physical Society of Japan, vol. 83, 2013, pp.014402-1-10. DOI: /10.7566/JPSJ.83.014402.
- ② Jiro Mizushima, Yuto Yasumizu, and Shunsuke Ohashi, Onset of double-diffusive convection in a rectangular cavity and its generation mechanism, Journal of the Physical Society of Japan, 査読あり, vol. 82, 2013, pp. 084402-1-12. DOI:10.7566/JPSJ.82.084402.
- ③ Naoto Yokoyama, Yuki Maruyama and Jiro Mizushima, Origin of the bathtub vortex and its formation mechanism, Journal of the Physical Society of Japan, 査読あり, vol. 81, 2011, pp.074401-1-10. DOI: 10.1143/JPSJ.81.074401.

- ④ Akihiro Wada, Keizo Ishikawa, Jiro Mizushima and Takeshi Akinaga, Deflection of jets discharged into a reservoir with a free surface, Fluid Dynamics Research, 査読あり, vol. 43, 2011, pp.025503-1-17. DOI:10.1088/0169-5983/43/2/025503.
- ⑤ Yukio Takemoto and Jiro Mizushima, Mechanism of sustained oscillations in a fluid flowing past a circular cylinder obstacle, Physical Review E, 査読あり, vol. 82, 2010, pp. 056316-1-6. DOI: 10.1103/PhysRevE.82.056316.
- ⑥ Yukio Takemoto, Keiji Kawanishi and Jiro Mizushima, Heat transfer in the flow through a bundle of tubes and transition of the flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読あり, vol. 53, 2010, pp. 5411-5419. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.015.
- ⑦ Tetsuya Fuchimoto, Shinichiro Yanase, Jiro Mizushima and Jiro Senda, Dynamics of vortex rings in the spray from a swirl injector, Fluid Dynamics Research, 査読あり, vol. 41, 2009, pp. 05503-1-22. DOI: 10.1088/0169-5983/41/4/045503.07.015.

[学会発表] (計 40 件)

- ① 阿部和貴, 水島二郎, 横山直人, 矩形水槽中におけるバスタブ渦の発生と振動流への遷移, 第54回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Muroran, Japan (2014.3.15)
- ② 阿部和貴, 水島二郎, 横山直人, 不安定性により発生するバスタブ渦, 数理解析研究所研究会: 大スケール流体運動と乱流揺らぎ, Kyoto, Japan (2014.1.8)
- ③ Genta Hatsuda and Jiro Mizushima, Flow patterns in the wake behind a pair of square cylinders, IWEC2013 (International Workshop on Energy Conversion 2013), Shantou, China (2013.11.26)
- ④ 初田元太, 水島二郎, 2角柱を過ぎる流れの非線形相互作用と解の分岐構造, 流体力学会年会 2013, Tokyo, Japan (2013.9.13)
- ⑤ 阿部和貴, 水島二郎, 横山直人, 不安定性により発生するバスタブ渦, 日本流体力学会年会 2013, Tokyo, Japan (2013.9.13)
- ⑥ Genta Hatsuda, Jiro Mizushima, Nonlinear interaction between wakes behind a pair of cylindrical obstacles,

- 52nd Workshop on Investigation and Control of Transition to Turbulence, Tokyo, Japan (2013.3.29)
- ⑦ 安水悠人, 大橋俊介, 水島二郎, 矩形容器における2重拡散対流の発生と遷移—流れ場中でのリズムの発生と消滅—, 数理解析研究所研究会: 多重物理・多重スケール乱流現象の数理, Kyoto, Japan (2013. 1. 10)
- ⑧ 大橋俊介, 水島二郎, 武本幸生, 柱状物体後流中でのカルマン渦列発生の機構, 第 61 回理論応用力学講演会, Tokyo, Japan (2012.3.7)
- ⑨ 村上真也, 水島二郎, 急拡大部をもつ管路内の流れの安定性と遷移, 数理解析研究所研究会: 非線形波動現象の研究の新たな進展, Kyoto, Japan (2011.10.14)
- ⑩ 武本幸生, 大橋俊介, 水島二郎, 円柱後流の不安定性と遷移, 第 49 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Kyoto, Japan (2011.9.23)
- ⑪ 赤嶺博史, 水島二郎, 稲澤歩, 浅井雅人, 角柱後流におけるカルマン渦列の消滅再生成, 第 49 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Kyoto, Japan (2011.9.22)
- ⑫ 稲澤歩, 浅井雅人, 水島二郎, 赤嶺博史, 低アスペクト比角柱後流の安定性に関する実験, 日本流体力学会年会 2011, Tokyo, Japan (2011.9.9)
- ⑬ 水島二郎, 大橋俊介, 赤嶺博史, 武本幸生, カルマン渦列発生の物理と数理, 数理解析研究所研究会: オイラー方程式の数理: カルマン渦列と非定常渦運動 100 年, Kyoto, Japan (2011.7.22)
- ⑭ 赤嶺博史, 水島二郎, 稲澤歩, 浅井雅人, 角柱後流におけるカルマン渦列の発生・消滅・再生成, 第 48 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Tokyo, Japan (2011. 3. 29)
- ⑮ 赤嶺博史, 水島二郎, 大橋俊介, 杉田翔, 角柱後方カルマン渦列の発生源・消滅と再生, 数理解析研究所研究会: 乱流研究次の 10 年: 乱流の動的構造の理解に向けて, Kyoto, Japan (2011.1.13)
- ⑯ 赤嶺博史, 水島二郎, 武本幸生, 柱状物体を過ぎる流れの不安定性と波束型攪乱の伝播, 数理解析研究所研究会: 非線形波動現象の多様性と普遍性, Kyoto, Japan (2010.10.15)
- ⑰ Keizo Ishikawa, Akihiro Wada, Jiro Mizushima, Takeshi Akinaga, Deflection of the flow discharged into water tank with a free surface, The third International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (3rd ICJWSF), Cincinnati, Ohio, USA (2010.9.30)
- ⑱ 音羽祐介, 武本幸生, 水島二郎, 複数の急拡大部をもつ管路流れの不安定性と遷移, 数理解析研究所研究会: 複雑流体の数理解析と数値解析, Kyoto, Japan (2010. 9. 29)
- ⑲ 武本幸生, 水島二郎, 円柱後流における振動の発生機構, 第 47 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Chofu, Japan (2010. 9. 21)
- ⑳ 武本幸生, 水島二郎, 赤嶺博史, 円柱後流の不安定性と振動源, 日本流体力学会年会 2010, Sapporo, Japan (2010. 9. 11)
- 21 武本幸生, 音羽祐介, 水島二郎, 周期的急拡大管路流れの不安定性と遷移, 第 46 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, Tokyo, Japan (2010. 3. 27)
- 22 武本幸生, 水島二郎, 柱状物体を過ぎる流れ場中の波動の伝播と振動の発生源, 数理解析研究所研究会: 非線形波動の数理と応用, Kyoto, Japan (2009.10.19)
- [その他]
ホームページ等
<http://www1.doshisha.ac.jp/~jmizushi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水島 二郎 (MIZUSHIMA, Jiro)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 70102027