

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 7日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560161

研究課題名（和文） 気泡（マイクロバブル）を含む2次元・3次元後流中の渦構造とカオス・乱流遷移

研究課題名（英文） Vortical structures and chaos, turbulence transition in two- and three-dimensional wakes containing micro-bubbles

研究代表者

柳瀬 眞一郎（YANASE SHINICHIRO）

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：20135958

研究成果の概要（和文）：マイクロバブルを含む2次元・3次元後流中の渦構造とカオス・乱流遷移を数値計算と室内実験によって調べた。まず、予備実験として直・ヘリカル円管内流れにマイクロバブルを注入した結果、明らかな抵抗低減と乱流の再層流化が見られた。次に、熱伝達率の変化を調べた結果、再層流化に伴う熱伝達率の減少が観測された。後流の数値計算のために新しくスペクトルコードを作成し、定常解、振動解などを高精度で求めることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Vortical structures, chaos and turbulence transition in two- and three-dimensional wakes were investigated experimentally and numerically. At first we conducted a series of experiment of micro-bubble flows through circular straight and helical pipes. Apparent drag reduction and relaminarization were observed, and reduction of thermal conduction was also seen. A new spectral code was written, by using which stationary and oscillating solutions were obtained with high accuracy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：混相流、後流、マイクロバブル、抵抗低減、カオス、乱流、遷移

1. 研究開始当初の背景

今日の流体力学で気泡、特にマイクロバブルを含む流れの持つ重要性は、その広大な応用の可能性に起因するところであるが、単純な流れに限定しても多くの基礎的に未知な問題を含み、それらは早急な解決を待っている。その中でも流体のダイナミクスにおいて最も基本的な要素である渦構造と気泡との関係

は、流体力学の根本的な問題の一つとして、マイクロバブルを含む流れにおいて極めて重要なテーマである。しかし、流体中の渦自体の研究が極めて困難な問題であることから、必ずしも明快な結果が得られているとは言い難い。申請者はこれまで、混相流中の渦構造に興味を持ち広範囲な研究を積み重ねていて、過去にも混相流中の渦構造に関して数値実験に基づく解析により興味深い結果を得ている。

さらに、様々な流体中の渦構造にも先進的な研究を行っている、特に回転流体中の渦構造の解明には大きな精力を傾け、これに関して多くの研究的貢献を行っている。回転流を研究対象とした最も大きな理由は、回転流中では渦構造が極めて簡単な渦管構造として現われ、その研究は非回転流と比べるとはるかに容易となるからである。近年のマイクロバブルの様々な応用例で、気泡流中にしばしば強くかつ多様な渦構造が存在することを考慮すると、気泡(マイクロバブル)と基本的なシア一流中の渦構造との相互作用の研究が実用的見地からも特に大切な課題であることは明らかである。

流体の中でもとりわけ明快な渦構造をもつ流れとして2次元後流が挙げられる。円柱後流には、カルマン渦列として知られる交互に渦が現れる渦構造が存在し、その単純さと実験室スケールから宇宙規模に至るまで観測される普遍性のために多くの研究努力が注がれている。もちろん、未解決な部分は数多いが、解明され・蓄積された成果が多い点では他に例を見ないシア一流中の渦構造である。従って、気泡(マイクロバブル)と渦の相互作用を研究する対象としては2次元後流が最適であると考えられる。同時に、実用的な応用を考えれば球を通過する3次元後流の渦構造と気泡(マイクロバブル)との相互作用を調べるのは大変興味深い。従って、本研究ではマイクロバブルなどの気泡を含む2次元及び3次元後流のダイナミクスに注目して、渦構造と気泡との相互作用を調べる。

一方、流体方程式の解では、レイノルズ数のようなパラメータが増加するにつれ定常流から他の定常流へ変化し、さらに非定常流となり、次にカオス的な流れとなって最後に乱流へと遷移する一般的なシナリオが存在する。2次元、3次元後流でもこのようなシナリオが存在するはずであるが、それは未だ明らかになっていない。それを解明するためには流体方程式の「基本解」を見つけるのが最も適切な方法である。基本解は申請者によって初めて提唱された呼称であるが、近年多くの流れで研究が進められている定常解や振動解などの初期条件に依存しない普遍的な解の総称であって、これを基礎として流れの遷移とカオス化を解析することが可能である。後流中では、100程度の大きさのレイノルズ数では、現実の流れではカルマン渦列が観測されるが、基本解の一つである双子渦解は、流体方程式の解としては存在している。もちろん、カルマン渦列も振動する基本解の一つとして存在する。マイクロバブルを含む

後流のような複雑な流れのカオス化と乱流遷移を解析するためには、基本解を中軸として取り扱う方法が極めて有利で、渦構造の役割を個々の渦ではなく、構造全体として捉えることが可能となる。

2. 研究の目的

(1) 気泡(マイクロバブル)を含む流れの基礎方程式の確定

気泡を含む流れに対する方程式としては、申請者が気液混合噴霧流で用いた方程式と類似の方程式を用いる。その方法は気泡を粒子として取り扱うが、気泡と流体の相互作用は経験式を用い、さらにパーセル法による気泡の集団的な取り扱いにより計算負荷を減らすように工夫する。

(2) 気泡を含む2次元、3次元後流の基本解の導出

次に、気泡を含む流れの基本解を求める。基礎方程式は(1)で得たものを用いる。申請者は、現在既に気泡を含まない流れの2次元後流の双子渦、カルマン渦列などの基本解を得ている。解析方法は、スペクトル法に、ニュートン法、ポアンカレ断面法などを組み合わせた手法である。これを基にして、気泡を含む流れの2次元後流の双子渦、カルマン渦などに対応する基本解を求める。その後、トロイダル・ポロイダル分解を基礎として3次元後流の基本解を得ることを目指した。

(3) 流れのカオス化・乱流遷移の研究

最後に流れがカオスとなり乱流へと遷移する過程を、基本解を基にして解析する。ここでは特に、流体中の気泡が流れのカオス化や乱流遷移に対してどのような影響を及ぼすかを重点的に調べる。その背景としては、マイクロバブルによって流れの遷移を制御しうる可能性を追求する目標がある。

(4) 力学系としての把握

カルマン渦列の気液二相流の解析は決して少なくないが、多くの場合、数値実験の結果を議論するにとどまり、理論的な解析を目指す研究は非常に少ないと思われる。申請者の解析方法は「基本解」を求めることから出発する点が重要であって、個々の渦と気泡の相互作用だけでなく、構造(カルマン渦列など)全体と気泡(マイクロバブル)との相互作用を根本的に研究する点が大きな特色である。本方法は、流れ・気泡系を力学系として扱える点が本質的で、このような複雑な系をカオス・

乱流まで体系的に解析する試みは、これまではドイツの一部の研究者を除いて極めてわずかである。

(5)幅広い応用

本研究によって解明される、気泡(マイクロバブル)が存在する中での後流の渦構造のダイナミクスは、流体力学の基本的な問題に対する一つの回答を与えるだけでなく、多くの応用問題に対して有益なデータを提供することが可能である。例えば、キャビテーションが発生する場合の水中の構造物に対する後流の影響、抵抗低減に対しても渦力学・力学系理論に基づく定量的な評価を与える。また、発生したマイクロバブルを工学的な問題に適用するとき、実際にどんな流れが起きていて、どうすれば最適な利用が実行できるかについても具体的な制御方法を提案することが可能である。

3. 研究の方法

(1)気泡を含まない2次元流れの基本解を求め

申請者は、スペクトル法によって、現在既に2次元後流の双子渦、カルマン渦などの基本解を得ているが、精度が不足しているために解の異常な振る舞いが若干残っている。従って、この点を改良する必要がある。現在推測される原因としては、カルマン渦列が下流に向けて無限に続く渦列であることが影響していると考えられ、これを解決するために、適当な座標変換、境界条件の設定、問題に対する最適なスペクトル展開関数の決定などの研究を行う。その上で高精度の基本解を、ニュートン法、ポアンカレ断面法などを用いたテクニックで求める。次に、球を通過する3次元後流の基本解を得るための数値的方法を確立することを目指している。解析方法としては多くの研究で高精度であることが確認されている、トロイダル・ポロイダル分解を基礎とする方法を用いる。

(2)気泡(マイクロバブル)を含む流れの基本方程式の確定

気泡流に対する方程式としては、申請者が気液混合噴霧流で用いた方程式と類似の方程式を用いる。そのアイデアは、気泡を粒子として取り扱うが、液体と気泡との相互作用は適切なモデル化によって表現し、さらに気泡をパーセル方により集団的に取り扱うことによって計算負荷を低減させる。この方程式の検証は、申請者が研究室で同時に遂行し

ている、ヘリカル管を通過するマイクロバブルを含む流れの実験によって行う予定である。この実験は、発生させたマイクロバブルを含む流れがらせん管を通過するときの流量と圧力低下との対応を調べるもので、やや間接的であるが、有力な検証方法である。マイクロバブルは10 μm 程度以下の大きさであり、粒子間結合などが大変少ないことと、水中に均一に混合されていることから、数値的取り扱いと比較的容易である。

(3)気泡を含む2次元流れの基本解の遷移を研究する

検証が得られた気泡を含む2次元後流の基本解の安定性をフロク指数の計算によって調べ、そのカオス化・乱流化を解析的に研究する。特に、気泡の存在によって解の分岐構造、遷移構造がどのような変化を行うかを詳細に解析する。

(4)気泡を含む2次元後流における円柱に対する抵抗変化を研究する

数値計算によって、気泡(マイクロバブル)を含む流れが円柱に及ぼす抵抗の変化を調べる。円柱に働く抵抗は後流中の渦構造と密接な関係があることが知られているため、もし抵抗に変化が見られた場合、それと渦構造の変容との対応を詳しく調べる。

(5)気泡を含む3次元後流のカオス化の数値的研究を行う

数値計算によって、球を通過する3次元後流のカオス化を調べる。3次元計算は計算機に対する負担が大変大きいため、超大型計算機を利用して実行する。さらに、OpenFOAMなどの、商業的なCFD計算ソフトも利用する。

4. 研究成果

(1)直管とヘリカル管のマイクロバブルによる抵抗低減

傾斜をつけた直管と三種類の曲率を持つヘリカル管でのマイクロバブルによる摩擦抵抗の低減効果の調査を行い、以下のような結論を得た。

①ボイド率が大きくなるほど、レイノルズ数が増大しても、管摩擦抵抗係数の減少効果が見られる。しかし、ボイド率ごとにレイノルズ数がある一定の値を超えると抵抗低減効果はなくなる。これからマイクロバブルによる抵抗低減効果は乱流の再層流化によるものであるが、レイノルズ数がさらに大きくなると効果がなくなることが明らかとなった。

②水平直管と傾斜直管の摩擦抵抗の低減効果に差は見られず、管内流れにおいてマイクロバブルに対する浮力の影響は無視できることが結論づけられた。最大抵抗低減はポイド率が**0.44%**で、**53.96%**であった。

③ヘリカル管と直管では抵抗低減効果が大きく異なる。ヘリカル管では抵抗低減効果が直管よりかなり小さく、曲率が大きくなるにつれて効果はさらに減少することが分かった。この原因は、遠心力の影響により発生する二次流れにより、マイクロバブルが分散され、管壁から遠ざかることが影響していると考えられる。

以上の結果は、これまでも部分的には得られていたが、このように包括的に測定した例は世界でも例がない。

(2)伝熱効果へのマイクロバブルの影響

計測した全ての場合に対して、抵抗低減と同時に熱伝達率の減少が観測され、どちらも流れの層流化が原因であることが明らかとなった。

このような実験結果は、世界的には最初の試みであった。

(3)円柱後流の基本解

本研究では、3次元渦度方程式をスペクトル法を用いて、流入・流出条件を必要としない計算を行った。まず、円柱後流の時間発展計算を行い、ポアンカレ断面の不動点計算と**GMRes**法を組み合わせた方法によって周期解を求め、**Arnoldi**法を用いて周期解に対する安定性解析を行った。解析の結果、レイノルズ数が**172**で2次元解が不安定となり3次元解へ分岐し、3次元解はレイノルズ数が**211**で不安定化することが分かった。レイノルズ数が増大するにつれて流れは無秩序となり、乱流へと近づいて行った。なお、本計算で得られた抵抗係数の値は実験地と比較して約**1%**程度の誤差内で、非常に精度の高い計算が可能であった。また渦列の縦横比に対して妥当な値が再現できた。

以上のスペクトル法による後流の高レイノルズ数の高精度計算は世界でも類がない。

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5件)

①K. Matsuura M. Takenami Y. Kuroda, T. Hyakutake, S. Yanase, K. Naruse, Screening of sperm velocity by fluid mechanical characteristics of a cyclo-olefin

polymer microfluidic sperm-sorting device, Reproductive BioMedicine Online, 査読有, Vol.24, 2011, pp.109-115.

②Y. Hayamizu, K. Yamamoto, S. Yanase, T. Hyakutake, S. Morita, S. Ohtsuka, Experimental study of the viscous pump with a helical channel rotor: Torsion effect of the channel, Journal of Thermal Science, 査読有, Vol.19, No.2, 2010, pp.154-159.

③M. Shatat, S. Yanase, T. Takami, T. Hyakutake, Drag reduction effects of micro-bubbles in straight and helical pipes, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.4, No.1, 2009, pp.156-167.

④T. Fuchimoto, S. Yanase, J. Mizushima, J. Senda, Dynamics of vortex rings in the spray from a swirl injector, Fluid Dynamics Research, 査読有, Vol. 41, 2009, 045503.

⑤T. Hyakutake, Y. Hashimoto, S. Yanase, K. Matsumura, K. Naruse, Application of a numerical simulation to improve the separation efficiency of a sperm sorter, Biomedical Microdevices, 査読有, 2009, DOI 10.1007/s10544-008-9207-2.

[学会発表] (計11件)

①延岡大剛, 渡邊毅*(広島大), 柳瀬眞一郎, 河原源太*(大阪大), 円柱後流の3次元渦構造の数値解析, 日本機械学会中四国支部第50回総会・講演会, 1015, 2011.3.8, 広島大学, 東広島市.

②安達正隆, 柳瀬眞一郎, 後藤晋, 田中満*(京都工芸繊維大), 微小粒子群の2次元乱流中における挙動, 日本機械学会中国四国支部第41回卒業研究発表講演会, p.169, 2011.3.4, 岡山理科大学, 岡山市.

③岩崎正晃, 後藤晋, 柳瀬眞一郎, マイクロバブルの画像解析, 日本機械学会中国四国支部第49回総会・講演会, pp.389-390, 2011.3.5, 岡山理科大学, 岡山市.

④峯田陽介, 小川慧, 小山和晃, 西田五徳, 後藤晋, 柳瀬眞一郎, マイクロバブルを含む流体の円管内層流・乱流遷移, 第28回西日本乱流シンポジウム, 第7回日本流体力学会中四国・九州支部講演会, 002, 2011.8.2, 近畿大学, 東広島市.

⑤藤原昌弘, 岩崎正晃, 谷脇充浩*(新浜高専), 柳瀬眞一郎, 水道水と純粋によるマイクロバブル発生と比較, 日本機械学会中国四国学生会第40回学生員卒業研究発表講演会講演論文集 p.279, 2010.3.5, 広島工業大学, 広島市.

⑥柳瀬眞一郎, M. M. E. Shatat, 高見敏弘*(岡山理科大), マクロバブルによる管内流の伝熱特性, 西日本乱流研究会第27回シンポジウム, 2010.8.27, 広島工業大学, 広島市.

⑦柳瀬眞一郎, M. M. E. Shatat, 高見敏弘>(* 岡山理科大), マイクロバブルによる管内流の抵抗低減と伝熱特性, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 S0506-1-1, 2010. 9. 6, 名古屋工業大学, 名古屋市.

⑧S. Yanase, T. Fuchimoto, J. Mizushima, J. Senda, Numerical simulation of vortex rings in the spray from a swirl injector, Japan-Russia Workshop on Numerical Investigation of Hydrodynamic Instabilities and Turbulence with High-performance Computing, Proceedings pp. 24-25, 2010. 10. 7, Okayama, Japan.

⑨三宅弘敏, 谷脇充浩, 百武徹, 柳瀬眞一郎, 小型高効率マイクロバブル発生装置の開発, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会, 2009. 3. 6, 山口大学, 宇部市.

⑩藤原裕己, 渡辺毅>(* 広島大), 河原源太(* 大阪大), 百武徹, 柳瀬眞一郎, 円柱後流の不安定周期運動, 第 26 回西日本乱流シンポジウム, 2009. 8. 25, 岡山理科大学, 岡山市.

⑪川田淳, M. M. E. Shatat, 柳瀬眞一郎, 百武徹, マイクロバブル流による管内流の抵抗削減, 第 26 回西日本乱流シンポジウム, 2009. 8. 25, 岡山理科大学, 岡山市.

[図書] (計 2 件)

①柳瀬眞一郎, 百武徹, 河原源太, 渡辺毅(* 広島大), 森北出版, 乱流のシミュレーション LES による数値計算と可視化, 翻訳, 2010.

②柳瀬眞一郎他多数, 朝倉書店, 乱流工学ハンドブック, 2009.

[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

<http://fluid.mech.okayama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳瀬 眞一郎 (YANASE SHINICHIRO)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 20135958