

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560196

研究課題名(和文) 曲がり管内混相流のカオス化による混合促進と渦構造の解明

研究課題名(英文) Enhancement of mixing by the chaos of multiphase flows in a curved duct and the elucidation of vortical structures

研究代表者

柳瀬 眞一郎 (YANASE, Shinichiro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：20135958

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)：研究成果の概要(和文)：管路流れの中で物質を混合し、化学反応を促進させることは重要なテーマであるが、対象となる流れでは、管路幅が狭く流速の遅い低レイノルズ数流れが多いが、低レイノルズ数の故に乱流混合は期待できない。壁面が移動する矩形曲がり管を用いれば、低いレイノルズ数においても流れがカオス化して物質混合および熱伝達率が増加することが確認された。本研究によって、極めて小さなレイノルズ数流れにおけるカオス化の実態がラグランジュアンカオスであると確認され、矩形管の管断面の縦横比を変化させた場合の渦構造の変化と混合促進との対応が明らかとなり、実用的なマイクロタス開発への道が切り開かれた。

研究成果の概要(英文)：Recently enhancement of mixing and associated chemical reaction in pipe flows is very important theme in engineering. However, for generally used narrow pipes in which the fluid flow is slow, it is not expected to have turbulent mixing. In spite of that it has been known that chaotic behaviors of flows in a curved rectangular duct with moving walls enhance mixing and increase the thermal conductivity even if the Reynolds number is very small. In the present study, the cause of the mixing is found to be due to the Lagrangian chaos. Experimental and numerical studies showed that the relationship between the change of vortical structures varying the aspect ratio of the duct cross section and the change of mixing efficiency. Based on the present study, it is found that the cross section having a longer vertical side is more effective in mixing than that with a longer horizontal side.

研究分野：工学

キーワード：曲がり管 混相流 ラグランジュアンカオス 渦構造 物質混合 LIF OpenFOAM マイクロタス

1. 研究開始当初の背景

(1) 今日の流体力学・化学工学において、管路流れの中で物質を混合し、さらに化学反応を促進させることは重要なテーマとなっている。一方、対象となる流れのレイノルズ数の範囲は大変幅広く、管路幅が狭く流速の遅い低レイノルズ数流れから、高レイノルズ数流れまで及んでいる。しかし後に述べるように、単純な直管内流れで混合を促進させることは高レイノルズ数流れを除けばそれ程容易ではない。

それに対して曲がり管内流では常に2次流が存在するためその影響によって混合が促進されることが知られている。

そればかりではなく、例えば矩形曲がり管に対しては、かなり低いディーン数(レイノルズ数に曲率の平方根を乗じた数)においても流れがカオス化して、ヌッセルト数が増大し熱伝達率が増加することが数値解析結果から求められている。これは中程度のレイノルズ数流れでの熱の混合促進の例である。

一方、極めて低いレイノルズ数流れでも、適当な条件の下ではカオス状態となることが実験的に示されている。矩形管の4壁の中の2壁を回転させたときに発生する現象で、実験によって観測された(Hayamizu, Yanase et al. 2011)。この研究では、入口から2相混相流を流入させ下流への混合の様子を調べた。結果は、レイノルズ数が1の程度の流れでも、適当な回転を側壁に与えると流れがカオス化し、管内へ流入した2種類の流体が下流へ流れて行くにつれて十分に混合することが明らかにされた。よく知られているように、直管ではかなり大きなレイノルズ数に達するまで流れは層流状態を保ち、カオス状態はもちろん乱流状態に遷移することはないため、乱流が発生するような大きなレイノルズ数流れでなければ、直管内流で物質の混合を効率的に行うことは困難である。

従って、マイクロ流路を含む中程度以下のレイノルズ数流れでの物質混合を行うためには、曲がり管の利用が大変有効であることが予想され、曲がり管内混相流の性質を詳細に調べることは、今日、工学的および工業的に極めて重要かつ緊急な課題となっている。

(2) 微小な管路に流体を流すマイクロ流体チップは、溶液の混合・反応など様々な化学操作をマイクロ化し、微細基板に集積化したものである。最近申請者の近辺でマイクロチップが制作されているが、他の多くの例でも内部流の混合促進を十分に考慮した管路構造を設計することはこれまでほとんど行われていない。このような管路に曲がり管を導入することにより、2次流やカオスの発生によって流体混合の飛躍的な向上・化学反応の促進が期待される。

以上をまとめると、曲がり管内流では2次流の存在の下に容易にカオス化が生じ、直管内流では実現不可能な低レイノルズ数での効率的な熱・物質混合が期待され、どのような条件下で混合効率が最も大きくなるかを解明することが切望されている。

2. 研究の目的

(1) 矩形(断面)曲がり管内流の渦力学の数値解析による解明(Yanase et al.(2008))によって明らかにされたように、曲がり管内流の2次流は基本的には縦渦(管内主流方向渦)の存在が原動力となっていて、渦の周期振動は周期流を生成し、カオス的な運動は流れをカオス化する。本研究では、数値解による渦構造を幅広い条件下にわたって求め、渦構造・渦のダイナミックスの理解に基づき、流れのカオス化、乱流遷移の過程を解明する。

a. スペクトル法により周期解、進行波解に対応する渦構造を求めて、それらのカオス運動、微細渦構造の生成による乱流遷移を調べる。

b. 差分法計算によって、流れの下流方向への渦構造の発達を追う。

(2) 矩形曲がり管内 2 成分流れ(2 相流)の混合解析

a. Hayamizu et al.(2011)によって観測された低レイノルズ数でのカオス化と物質混合を数値計算により解析し実験との比較を行い、カオスの物質混合への影響を調べる。

b. 比較的高いレイノルズ数の矩形曲がり管内 2 相流のカオス化・乱流遷移を実験的・数値的に研究し、混合に対する 2 次流、縦渦の役割を調べ、混合効率が大きくなる条件を求める。

(3) マイクロ・ナノバブルの流れに与える影響の解析する。マイクロ・ナノバブルは流れの中の渦構造に大きな影響を持つため、これを用いて曲がり管内流中の渦構造を制御できれば多くの工業的な可能性への道が開けることが期待される。

a. マイクロ・ナノバブルを実験的に曲がり管内流に注入し、特に縦渦構造の変化を観測する。

b. 実験的研究により、マイクロ・ナノバブルによる熱・物質混合効率の変化を調べる。

(4) 熱・物質混合に最適な矩形曲がり管内流装置の設計を行う。レイノルズ数が比較的大きい場合にカオス化・乱流遷移を促進する条件と、小さなレイノルズ数でカオス化を促進する条件を求める。これによって、中規模の流路、マイクロ流路に対して熱・物質混合が増加し化学反応が促進されるような装置の設計方針を得ることができる。

3. 研究の方法

最初に、矩形曲がり管内単相流を計算する高次精度差分計算コードを作成し、現有のスペクトルコードと併用して渦構造のレイノルズ数に対する変化を調べた。次に、2 相流(2 壁の回転可)を取り扱うことのできるスペクト

ル・差分計算コードを作成し、カオス化・乱流遷移と物質混合の過程を解析した。同時に曲がり管の実験装置を組み立て、PIV法・LIF法による測定の精度チェックを行い、実験装置を完成した。まず、単相流の渦構造の測定結果を数値計算と比較し、その後、2 相流を曲がり管に注入して流体の拡散・混合の様子を観測し、数値計算の結果と比較検討した。さらに管内流にマイクロ・ナノバブルを混入させて渦構造の変化を見た。最後に、数値計算結果を参考にして、実験装置において流れパラメータを変化させ、装置全体の構造を改良し、最も物質混合効率の高い装置を決定した。

4. 研究成果

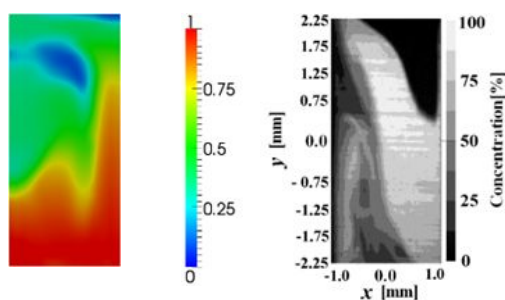
3 種類の縦横比の矩形断面をもつ曲がり管の実験的・数値的研究を行い、カオス混合の様子を調べた。チャンネルの内壁と底壁を回転により移動させ、圧力勾配を加えることにより管入口から出口方向へ流体を流した。このような流れはテイラー・ディーン流と呼ばれ、支配パラメータはディーン数 Dn (圧力勾配とレイノルズ数に比例)とテイラー数 Tr (壁の回転角速度に比例)の 2 つである。本研究では、テイラー・ディーン流のカオス混合の性質を、LIFによる実験とOpenFOAMを用いた計算とを比較することによって調べた。本研究では 3 種類の管断面の一辺が数ミリメートルの矩形断面曲がり管を制作した。(I) 縦横比が0.5の横長管、(II) 正方形管、(III) 縦横比が2の縦長管である。2 次流の測定はLIFを用い、3 次元数値計算にはフリーソフトウェアであるCFD ソルバの OpenFOAMを用い、同じ配置・流れ条件の流れを比較した。まず、ディーン数とテイラー数の間に条件式

$$De \leq 0.1 Tr$$

が成立するときには目覚ましい混合が生じるが、それ以外ではほとんど混合が発生しない

ことが明らかとなった。管断面形状の違いに関しては、(I)ではほとんど混合が発生しないことが認められた。(II)と(III)では共に混合が観測されたが、(III)ではより強い混合が生じることが数値的にも実験的にも確認された。この結果を図1に示す。

最後にマイクロバブルを注入した流れの性質の一部については、論文 にまとめられていることを付け加えておく。



数値計算

実験(LIF)

図1 曲り管内流中の混合 (III)

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15件)

Y. Hayamizu, S. Yanase, S. Morita, S. Ohtsuka, T. Gonda, K. Nishida and K. Yamamoto, A Micromixer Using the Chaos of Secondary Flow: Rotation Effect of Channel on the Chaos of Secondary Flow Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.2, No.4A, pp.195-201, (2012.12.26), <http://www.scirp.org/journal/ojfd/>

T. Watanabe, S. Yanase, Bifurcation Study of Three-Dimensional Solutions of the Curved Square-Duct Flow, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.82, 074402, (2013)

Y. Hayamizu, S. Yanase, K. Nishida, K. Yamamoto, Chaotic Mixing in a

Curved-Square Duct Flow at Very Low Reynolds Numbers, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.82, 103401, (2013)

K. Matsuura, K. Nishida, I. Sugimoto, S. Yanase, Microfluidic Device Increases Sperm Concentration by Optimization of Chamber Structure, Andrology & Gynecology: Current Research,1:3 doi:10.4172/2327-4360.10000105, (2013)

Y. Hayamizu, T. Hyakutake, K. Matsuura, S. Yanase, S. Morita, S. Ohtsuka, T. Gonda, Behavior of Motile Sperm in Taylor-Couette Flow: Effect of Shear Stress on the Behavior of Motile Sperm Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.3, No.2A, pp.9-13, (2013)

R.N. Mondal, S.C. Ray and S. Yanase, Combined Effects of Centrifugal and Coriolis Instability of the Flow through a Rotating Curved Duct with Rectangular Cross Section, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.4 No.1, pp.1-14, (2014)

清水義也, 柳瀬眞一郎, 河内俊憲, 森洋平, 福田修也, 枚葉式半導体洗浄機モデル内渦構造のPIV計測, 日本機械学会論文集, Vol.809, No.815, No.14-00046, (2014)

T.Kouchi, Y.Oka, G.Masuya and S.Yanase, Combined Stereo-PIV and PLIF Measurements of Transverse Injection in Mach 2 Supersonic Flow, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 12, No. APISAT-2013, pp. a85-a92. (2014)

T. Kawabe, Y. Hayamizu, S. Yanase, T. Gonda, S. Morita, S. Ohtsuka, K. Yamamoto, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effect of Inflow Conditions on the Mixing Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.4, pp.463-471, (2014)

K. Matsuura, K. Nishida, I. Sugimoto and

S. Yanase, Cleaning polymer ink from a glass substrate using microbubbles generated by a hydrogen bubble method Separation and Purification Technology, Vol.142, pp. 242-250, (2015)

山口真伍, 河内俊憲, 小池俊輔, 中島努, 佐藤衛, 神田宏, 柳瀬眞一郎, 高速断層シュリーレンによる二次元翼バフェットの可視化 日本航空宇宙学会論文集論文集 Vol.63, No.4, pp.166-174, (2015)

柳瀬眞一郎, 渡辺毅, 流体の線形安定性理論とその活用事例, 数理研講究録, B54 (2015), pp.55-69, (2015)

河内俊憲, 福田 修也, 中野 裕介, 清水 義也, 永田 靖典, 柳瀬眞一郎, 枚葉式半導体洗浄装置内に形成される渦の周期構造 日本機械学会論文集, Vol.809, No.815, No.14-00046, DOI: 10.1299/transjsme.15-00273, (2015)

R.N. Mondal, P.R. Shaha, N.K. Poddar and S. Yanase, Numerical prediction of Taylor-Dean flow through a rotating curved duct with constant curvature, Int. J. Adv. Appl. Math. and Mech., Vol.3, No.1, pp.10-23, (2015)

Y. Hayamizu, T. Kawabe, S. Yanase, T. Gonda, S. Morita, S. Ohtsuka and K. Yamamoto, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effects of Aspect Ratio and Inflow Condition on the Mixing Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.5, pp.256-264, (2015)

[学会発表](計6件)

Y. Hayamizu, S. Yanase, S. Morita, S.Ohtsuka, T. Gonda, K. Nishida and K. Yamamoto, A Micromixer Using the Chaos of Secondary Flow: Rotation Effect of Channel

on the Chaos of Secondary Flow, Proceedings of the 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2012, JA-20: USB, Busan, Korea 2012.10.14-17

Y. Hayamizu, T. Hyakutake, K. Matsuura, S. Yanase, S. Morita, S. Ohtsuka, T. Gonda, Behavior of Motile Sperm in Taylor-Couette Flow: Effect of Shear Stress on the Behavior of Motile Sperm, Proceedings of the 11th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows: USB (5 pages) 2013.05.06, Shenzhen, China

T. Kawabe, Y. Hayamizu, S. Yanase, K. Nishida, T. Gonda, S. Morita, S. Ohtsuka, K. Yamamoto, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effect of Inflow Condition on the Mixing, Proceedings of the 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2014, USB, JP11 (6 pages) 2014.09.24 Nagasaki, Japan

S. Yanase 他9名, Analysis of the Behavior of Radioactive Cesium in Incinerators during Garbage Incineration WM Symposia 2015 Phoenix Convention center, Proceedings p.8, CD-ROM, 2015.03.16, Phoenix, USA

S. Yanase, Y. Nakano, T. Kouchi, Y. Nagata and Y. Shimizu, Numerical study of vortical structures in a cylindrical domain with a rotating disk inside, Japan-Russia Workshop, Nagoya University VBL, 2015.12.11, Nagoya University VBL, Nagoya, Japan

K. Matsuura, T. Uchida, S. Ogawa, C. Guan and S. Yanase,

Surface Interaction of Microbubbles and
Applications of Hydrogen-Bubble Method
for Cleaning and Separation, 26th 2015
International Symposium on
Micro-NanoMechatronics and Human Science
MHS2015, Noyori Conference Hall, Nagoya
University, 2015.11.23, Nagoya, Japan

〔図書〕(計2件)

柳瀬眞一郎 他著者多数、技術情報協会、攪
拌・混合技術とトラブル対策, マイクロミキ
サ内流れのカオス化を利用した混合促進技
術, 2014、90-98

柳瀬眞一郎, 確率と確率過程, 森北出版,
2015, 214

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

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