

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04176

研究課題名(和文) 高密度マイクアレイと集束超音波音響流を用いた壁面圧力変動場に基づく乱流制御

研究課題名(英文) Turbulent flow control based on wall pressure fluctuation field using high-density microphone array and focused ultrasound acoustic flow

研究代表者

中 吉嗣 (Naka, Yoshitsugu)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：10723421

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)：本研究では下記の3点について研究を実施し成果を得た。高密度マイクロフォンアレイによる壁面圧力変動場の測定手法の開発、流れ制御用超音波音響流アクチュエータの開発、直接数値計算(DNS)データベースを用いた壁面圧力変動と乱流構造の関係解明。について曲面に適用可能なフレキシブルマイクアレイ、圧力の空間勾配場を評価可能な60ch 2列マイクアレイを開発した。について多数の超音波トランスデューサを位相制御して形成される強い音圧場によって生ずる超音波音響流を実現した。について壁乱流のDNSデータベースにクラスタリング解析を適用し、強い壁面圧力変動に対応する代表的な乱流構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したマイクロフォンアレイによって乱流場の情報を壁面で計測可能な新たな手法の構築が進められた。超音波音響流アクチュエータについて、ハプティクス分野で開発・発展しているフェーズドアレイ集束超音波技術を流れの制御に応用する異分野融合の試みであり、今後さらなる発展が期待される。DNSデータベースを用いた壁面圧力変動と乱流構造の関係解明について、学術的に新たな視点としてクラスタ解析を適用している。

研究成果の概要(英文)：In this project, the following subjects have been clarified: (1) development of high-density microphone arrays for the measurement of wall pressure fluctuation field; (2) development of ultrasound acoustic flow actuator for turbulent flow control; (3) understanding the relation between wall pressure fluctuations and turbulence structures using a direct numerical simulation (DNS) database. For subject #1, we have developed a flexible microphone array that can be applicable to curved surfaces and a 60ch two-rows microphone array that can evaluate the spatial gradient field of wall pressure fluctuation. Regarding subject #2, an ultrasound acoustic flow generated by a strong acoustic pressure field that is formed by phased-array ultrasound transducers has been realized. For subject #3, clustering analysis to the turbulent channel flow DNS database is applied, and representative turbulence structures that can be associated with the strong wall pressure fluctuations has been clarified.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 乱流計測 乱流制御 乱流の直接数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流のアクティブ・閉ループ制御を実用化するためには、乱流の情報を得ることのできるセンサと、高効率で効果的に流れに影響を与えうるアクチュエータの双方が必要となる。現状では、このどちらも実用的な水準には達しておらず、新たなセンサ・アクチュエータの開発が求められている。また、乱流のアクティブ・閉ループ制御実用化のためには、センサとアクチュエータを制御するコントローラが必要となる。近年、制御装置としてFPGA (Field Programmable Gate Array) が高性能化・高機能化し、大規模なセンサ・アクチュエータ系を構築するための環境が整備されつつある。しかし、効果的な乱流制御を行うために必要なシステムとその規模に関する客観的かつ統一的な指標は得られていない。

適切な乱流制御システムを設計するためには、乱流運動に関する物理的な理解、特に瞬時の乱流構造と乱流の統計的な特性の関係についての理解が重要となる。本研究では乱流圧力変動、特に壁面圧力変動に着目する。流れの支配方程式から、ある点における乱流圧力変動はその周辺の乱流構造の寄与を含むことが明らかである。しかし、圧力変動と乱流構造が具体的にどのように関連しているか、それらがどのように乱流のエネルギーバランスに寄与しているかは、明らかになっていない。また、高レイノルズ数条件の壁乱流では、境界層厚さ以上の長さスケールを持つ大規模構造が乱流統計量に大きく寄与することが指摘されている。しかし、このようなレイノルズ数依存性の変化の理由は明らかでない。このような状況に対して、研究代表者は、乱流境界層における壁面圧力変動が境界層の外層部分を含む大域的な寄与を受けていることを統計的な評価により示した。また、瞬時の壁面乱流圧力変動場を実験的に評価するためのマイクロフォンアレイを開発している。

本研究では新たな乱流制御用アクチュエータとして超音波音響流アクチュエータを提案する。これはハプティクス分野で開発が進められているもので、多数の超音波素子を位相制御して駆動することで局所的に非常に強い音圧領域を形成するものである。強い音圧によって流体が駆動される音響流現象によって流れ制御を行う。

瞬時場における壁面乱流圧力変動場と乱流構造の関係が明らかとなれば、壁面での計測データから、その上方を通過する乱流構造の性質を知ることができるようになり、これを乱流制御に応用することで、制御性能が向上することが期待されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は新たなセンサ・アクチュエータを開発し、これらを組み合わせる新しい乱流制御手法を提案することである。また、制御効果を高めるため、乱流構造と壁面圧力変動の関係を明らかにする。このために以下の3点を目的としている。

- (1) 高密度マイクロフォンアレイの乱流圧力場測定法としての性能向上
- (2) 乱流制御のための集束超音波音響流アクチュエータの開発とその特性評価、乱流アクティブ・閉ループ制御システムの構築
- (3) 基本的な壁乱流における壁面圧力変動場と乱流構造、およびこれらの乱流エネルギーバランスへの寄与のメカニズムを明らかにする

3. 研究の方法

(1) 高密度マイクロフォンアレイの開発と流れ場への適用

図1に示すように、28ch マイクロアレイ基板を翼・平板結合部複数枚設置して672ch 圧力変動の同時計測を実施した。

図2に示すような曲面に適用可能なフレキシブルマイクロアレイおよび変動圧力の空間勾配を評価可能な60ch 2列マイクロアレイを開発した。

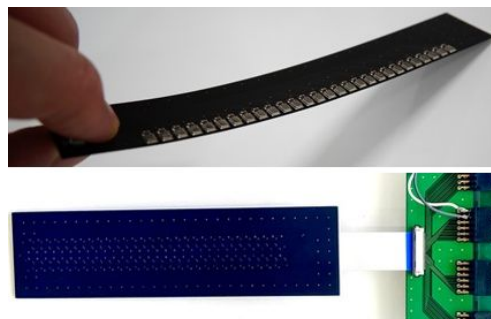


図1 翼・平板結合部 672ch 圧力変動計測 図2 フレキシブルマイクロアレイ(上)と60ch 2列マイクロアレイ(下)

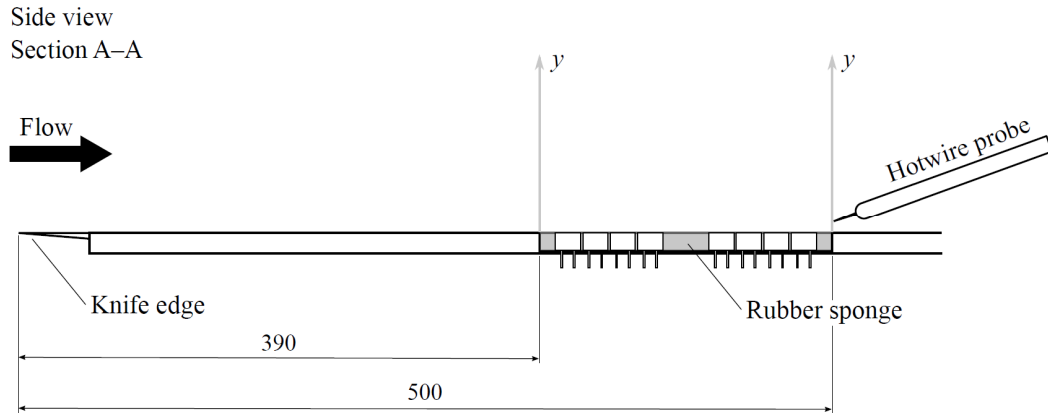


図3 超音波音響流による乱流境界層の制御実験の模式図

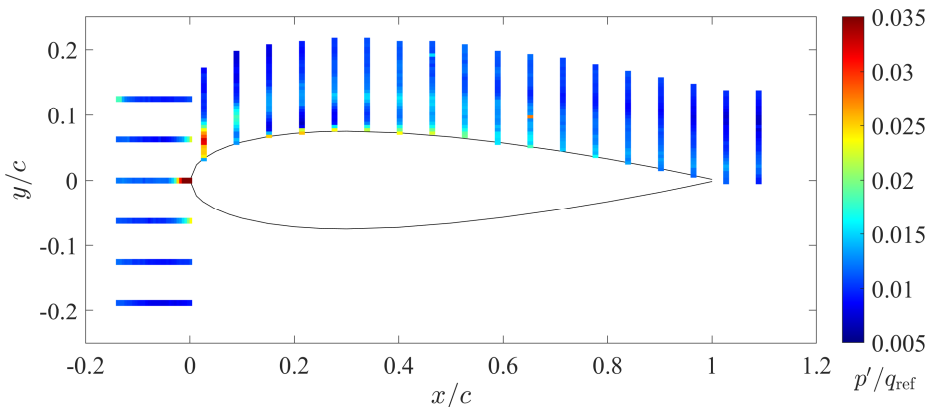


図4 翼・平板結合部流れの平板上の圧力変動強度分布

(2) 集束超音波音響流アクチュエータの開発と乱流アクティブ制御手法の構築

超音波音響流アクチュエータの基本的特性を評価するために1つ、2つ、3つの超音波素子が作る音場と流れ場の関係を、それぞれマイクロフォンと粒子画像流速測定法 (PIV) による測定によって明らかにした。

図3に示すように、100個の位相制御されていない超音波素子アレイを乱流境界層に設置し、駆動ON時とOFF時の平均速度分布と速度変動強度分布を熱線流速計で測定した。

超音波フェーズドアレイユニットから生ずる集束音場と超音波音響流の関係を明らかにした。249個の振動子が矩形に配列された装置を用いて、振動子の位相を個別に制御することで空間に任意の音場を形成できる。今回は音圧の強い領域が軸方向に細長い形状を示すベッセルビームについて音場と流れ場の関係を明らかにした。ベッセルビームの音圧分布をマイクロフォンによって計測し、流速を風速計とPIVで測定した。

(3) 壁面圧力変動と乱流構造の関係説明

チャンネル乱流のDNSデータベースを構築し、クラスター解析を実施することで、強い壁面圧力変動に対応するいくつかの代表的な乱流構造を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 高密度マイクロフォンアレイの開発の開発と流れ場への適用

28chマイクアレイ基板を複数枚設置して672ch圧力変動の同時計測を実施した。これと同期してPIVによるよどみ面上の速度場を測定し、結合部で生ずる馬蹄形渦と平板の圧力変動の関係を明らかにした。図4に平板上の圧力変動強度分布を示す。速度場と圧力場の対応を明らかにするためにPODモード係数の相関を評価した。相関が比較的高いモードから再構築した速度場と圧力場は翼・平板結合部の近傍で強い変動を示すことが示された。

曲面に適用可能なフレキシブルマイクアレイを開発し、曲面に設置した状態での圧力変動の計測が可能であることを確かめた。また、変動圧力の空間勾配を評価可能な60ch2列マイクアレイについて、乱流境界層内で圧力変動と圧力変動の空間勾配の測定を行い、これらの統計的特性を評価した。圧力変動と圧力変動勾配の確率密度関数は正規分布よりも裾野の広い間欠的な性質を示し、過去に報告された結果と概ね一致する結果を得た。本研究で開発した乱流圧力変動計測用マイクアレイは流れ場に合わせて柔軟に測定点を配置することができる。壁面での圧力変動の測定結果から流れ場を推定できるようになることで、壁面計測のみで流れの情報が得られる新たな計測法への発展が期待される。

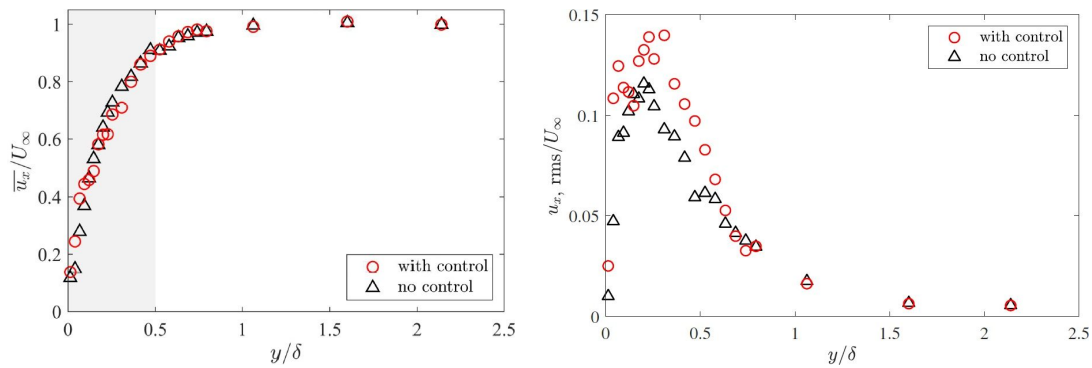


図5 超音波音響流制御時と非制御時の平均速度分布（左）と速度変動強度（右）の比較

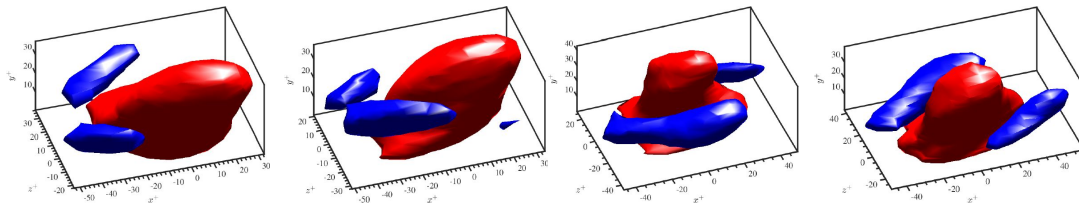


図6 強い正の圧力変動に関連する流れ構造；赤：正の圧力ソース、青：負の圧力ソース

(2) 集束超音波音響流アクチュエータの開発と乱流アクティブ制御手法の構築

超音波音響流アクチュエータの基礎的特性を評価するために1つ、2つ、3つの超音波素子が作る音場と流れ場の関係を明らかにした。素子の数を増やすことで音波の重ね合わせによってより強い音圧が形成され、誘起される音響流の流速が増加することを明らかにした。

100個の位相制御されていない超音波素子アレイを乱流境界層に設置し、駆動ON時とOFF時の平均速度分布と速度変動強度分布を比較した。図5に示す通り、駆動ON時には壁面近傍の平均速度勾配が大きくなり、速度変動強度が増加することが確認された。(2)の内容と合わせて、Journal of Fluid Science Technology 誌へ発表した。

超音波フェーズドアレイユニットから生ずる集束音場と超音波音響流の関係を明らかにした。ベッセルビームの音圧分布について、ビーム進行方向に直交する2次元断面の分布では、文献と同様にメインローブとサイドローブが確認された。最大出力時の最大音圧変動は約6.7 kPaとなりメインローブ径は約16 mmであった。3次元音圧分布の測定値から音響流駆動力を求め、運動量法則を用いることで流速分布を推定した。推定結果と風速計およびPIVによる計測結果は定性的に一致した。PIVで測定された流速分布のメインローブ直径は約10 mmであり、最大出力時における流速の最大値は約0.4 m/sであった。円柱後流中に本アクチュエータを設置し、円柱近傍に主流に直交する流れを誘起することで後流の制御を試みた。流れの可視化により、集束超音波音響流によってカルマン渦列の発達に影響を及ぼし得ることを確認した。超音波音響流は任意の位置に流れを発生させることができ、従来の流れ制御アクチュエータに無い特徴を持つことから、今後新たな乱流制御手法への発展が期待される。

(3) 壁面圧力変動と乱流構造の関係説明

チャンネル乱流のDNSデータベースを構築し、クラスター解析を実施することで、強い壁面圧力変動に対応するいくつかの代表的な乱流構造を明らかにした。壁面圧力ピークと乱流構造の対応を考えるにあたり、圧力ポアソン方程式ソース項の局所的な寄与の分布を評価し、k-means法を用いたクラスタリングを行った。ソース項の局所的な寄与の壁垂直方向への平均的な分布は正・負の壁面圧力ピークともにバッファー層で最大となった。図6に示すように、強い壁面圧力ピークはピーク位置周辺にある複数の渦構造と関連していることが示された。また、負の壁面圧力ピークは直上に流れ方向に対して傾いた渦が存在することが示された。正負の圧力ピークのペアリング特性について、瞬時場中の正の圧力ピークに対する負のピーク位置の確率密度分布によって、正の圧力ピークから約50+上流に負のピークが存在する傾向が示された（ここで+は壁単位長さを表す）。強い壁面圧力ピークと大規模流れ構造の関係について、条件付き平均によって強い壁面圧力ピークは大規模な高速領域により多く存在する傾向が示唆された。大規模な流れ構造と強い壁面圧力変動の関係とそのレイノルズ数依存性は現在未解明となっているが、本研究で提案する圧力ソース項の局所的な寄与に基づく解析によって明らかにすることができると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 NAKA Yoshitsugu, INOUE Kento, ISHIZAKA Takumi	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of an ultrasound acoustic streaming actuator for flow control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2020jfst0003	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 宮島充希, 中吉嗣	4. 巻 38(6)
2. 論文標題 MEMSマイクロアレイを用いた乱流境界層における壁面圧力変動の168ch同時計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 423-426
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 無
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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中吉嗣, 林大我
2. 発表標題 翼・平板結合部流れにおける672ch壁面圧力変動場と翼前縁近傍2D2C速度場の同時計測
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 土屋晶裕, 中吉嗣
2. 発表標題 2列マイクロフォンアレイを用いた乱流境界層における壁面圧力勾配変動の測定
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大沢耕介, 中吉嗣
2. 発表標題 チャンネル乱流における強い壁面圧力変動と乱流構造の関係
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 Yoshitsugu Naka, Kosuke Osawa
2. 発表標題 Pressure source contribution and near wall flow structures related to high amplitude wall pressure peaks
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP12) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田恵介, 中吉嗣
2. 発表標題 多音源有限振幅超音波が形成する音響流駆動力場の2次元数値解析
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎寛明, 中吉嗣
2. 発表標題 超音波トランスデューサによって誘起される 定常・非定常円形噴流の特性評価
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮島 充希, 中 吉嗣
2. 発表標題 MEMSマイクアレイを用いた乱流境界層における壁面圧力変動の168ch同時計測
3. 学会等名 流体力学会年会2019
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
---------	---------