

令和元年5月24日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18010

研究課題名(和文) 高密度MEMSマイクロフォンアレイを用いた壁面乱流圧力変動場の時系列計測

研究課題名(英文) Time resolved measurements of the fluctuating wall pressure field by a high density MEMS microphone array

研究代表者

中 吉嗣 (Naka, Yoshitsugu)

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：10723421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、デジタルMEMSマイクロフォンをアレイ状に高密度に配置した壁面乱流圧力変動場の時系列計測システムを新たに構築した。測定系の周波数応答特性を定量的に評価し、バックグラウンドノイズの低減手法の有効性を確認した。このマイクロフォンアレイを乱流境界層の壁面圧力変動測定に適用した。得られた変動圧力の2次元分布は乱流構造を反映し、間欠的な特徴を示した。また、圧力変動の統計的な特徴は既存の結果と良い一致を示し、測定結果の妥当性が確認された。

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り、壁面圧力変動の空間分布を時系列的に得ることが可能となった。壁面圧力変動の空間分布は、壁面乱流に存在する様々なスケールの乱流構造の寄与を反映しており、乱流構造と壁面圧力変動に関する新たな知見を得ることが期待される。さらに、壁面圧力変動は流体関連振動や空力騒音に関係し、工学的にも重要な物理量である。本マイクロフォンアレイは、測定対象の流れに合わせてマイクロフォンの配置を柔軟に設定することができるため、様々な流れへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this project, a high density digital MEMS microphone array has been newly developed for time resolved measurements of fluctuating wall pressure field. The frequency response of the measurement system was quantitatively evaluated, and the method for background noise treatment was established. The microphone array has been applied to the measurement in a turbulent boundary layer. The two-dimensional distributions of fluctuating pressure reflect the turbulence structures and exhibit intermittent features. Moreover, the statistical characteristics of pressure fluctuation show good agreement with existing results, and the validity of the technique has been confirmed.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流計測 圧力変動 壁乱流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS 技術の発展とモバイルデバイスにおける需要の高まりから、MEMS マイクロフォンの普及が急速に進みつつある。このような MEMS マイクロフォンを多数実装した高密度マイクロフォンアレイを乱流圧力変動センサとして適用した例はこれまでに無かった。壁乱流における壁面圧力変動は、支配方程式に基づいて局所だけでなく大域的な流体運動の寄与を受ける。すなわち、壁面圧力変動は壁面近傍だけでなく壁から離れた位置を通過する乱流構造とも相関を持つ。研究代表者はこれまでに、大規模な乱流構造と壁面圧力変動の関係について、正の壁面圧力はその上流側に位置する大規模な sweep 運動と相関があり、負の圧力は上流側の局所的な ejection 運動および下流側の sweep 運動と相関を持つことを実験的に示した。また、このような壁面圧力変動に関わる大規模な乱流構造のサイズについてのレイノルズ数依存性は、境界層厚さではスケールされないことを明らかにした。高レイノルズ数条件におけるこのような大規模構造のスケール則については現在も未解明となっている。このスケール側を明らかにすることは、高レイノルズ数条件での壁面乱流場の予測や制御を行う上で非常に重要である。さらに、壁面圧力変動は、工学的に流体騒音や物体の振動に関わっているため、これらの低減に役立つことが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、デジタル MEMS マイクロフォンを用いた壁面乱流圧力変動場の時系列計測システムを新たに構築する。このシステムでは、過去の研究で用いられた圧力センサアレイよりも格段に多い、千個程度のデジタル MEMS マイクロフォンを高密度に配置し、高空間解像度での壁面圧力変動場の時系列計測を実現する。壁面圧力変動場の時系列データを用い、乱流壁面圧力変動の時空間特性と壁面圧力変動に寄与する乱流構造の関係を明らかにする。本研究で開発する変動圧力場の時系列測定手法の工学的な応用に向けて、フレキシブルプリント回路基板への MEMS マイクロフォン実装による任意形状物体表面の圧力場の計測手法を開発する。非定常剥離を伴う逆圧力勾配を有する壁面乱流における圧力変動場の時系列計測を行い、非定常剥離現象と壁面圧力変動場の関係を明らかにする。これらの壁面圧力変動場と乱流構造に関する知見を能動乱流制御法の開発に資する。

### 3. 研究の方法

デジタル MEMS マイクロフォンをアレイ状に高密度に配置した壁面乱流圧力変動場の時系列計測システムを新たに構築した。マイクロフォンを配置する基板を設計し、測定対象の流れに合わせて任意の位置に圧力測定点を設定可能とした。56 個のマイクロフォンを 1 台の FPGA で制御する測定系を 1 ユニットとした。複数の測定ユニット外部トリガにより同期可能とすることで、必要に応じて測定点数を増減可能な構成とした。これまでに 4 ユニットでの測定を実施可能とした。乱流境界層での測定に合わせ、図 1 に示すような 28 個のマイクロフォンを 2 列に並べた構成とした。マイクロフォンのサイズは  $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  であり、基板の寸法は  $160\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  とした。各マイクロフォンの位置には、圧力測定孔として直径  $0.5\text{ mm}$  の穴を設けた。

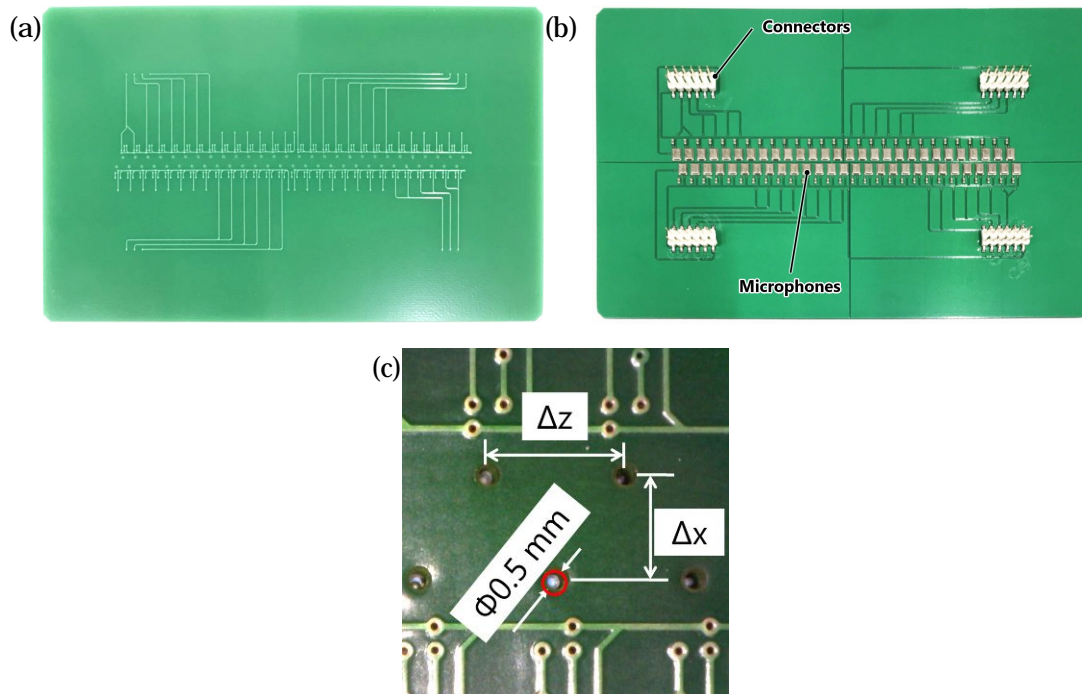


図 1 マイクアレイ写真，(a) 表面，(b) マイクロフォン実装面，(c) 測定孔部拡大

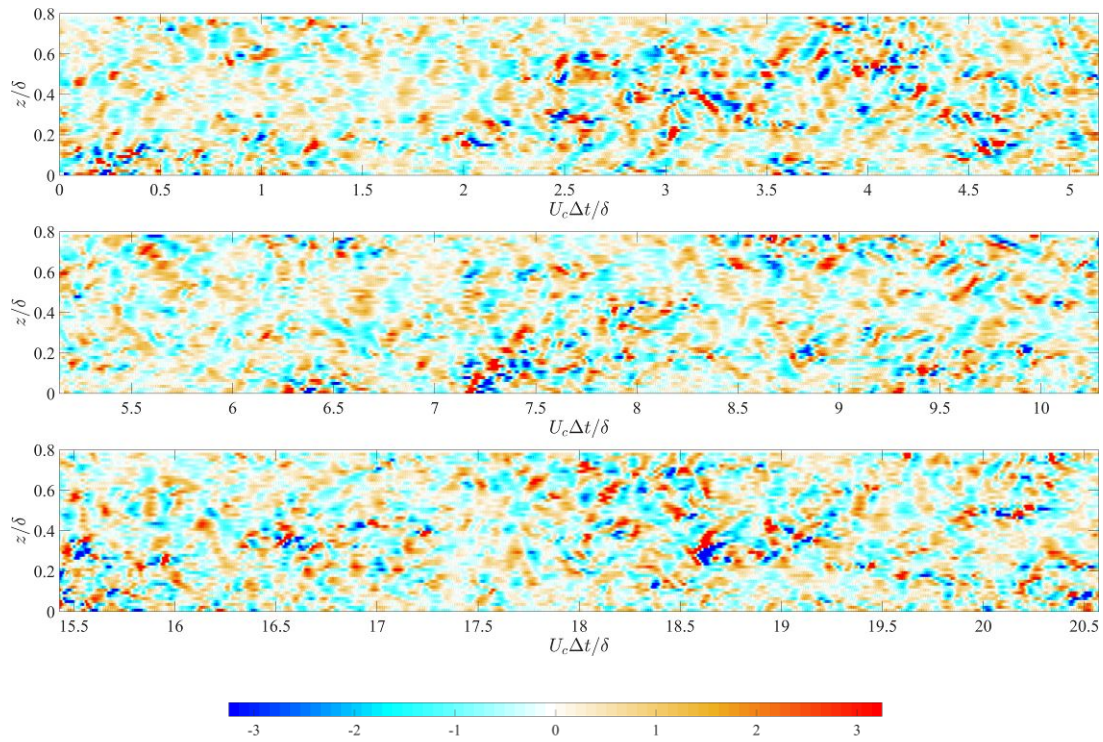


図2 RMS値で正規化された変動圧力の時空間分布

マイクロフォンの間隔は流れ方向に 3 mm，スパン方向に 4 mm とした。図 1 (c)に示す通り，2 つの列はスパン方向に 2 mm ずらして配置し，空間分解能を高めるように工夫した。

#### 4．研究成果

- (1) 本研究において，従来よりも格段に多くの測定点での壁面圧力変動測定が可能なマイクロフォンアレイを開発した。
- (2) 測定系の周波数応答を基準マイクロフォン出力との比較により定量的に評価した。40 Hz 以下の低周波数領域において，信号の減衰と位相遅れが確認され，これらを信号処理により補正するための検定データを得た。
- (3) マイクロフォンアレイを乱流境界層の壁面圧力変動測定に適用した。測定は，長さ 7.5 m，幅 1.2 m，高さ 0.8 m のテストセクションを有する，乱流境界層風洞で実施した。乱流境界層の摩擦レイノルズ数は 1140 とした。この条件で，境界層厚さは約 140 mm，壁単位長さは 123  $\mu\text{m}$  であった。壁単位長さとの比較により，測定孔の直径は乱流変動の寄与をとらえるために十分小さく，測定孔の間隔は壁面近傍の低速ストリーク構造をとらえるために十分小さいことを確認した。
- (4) 測定時のバックグラウンドノイズの低減には，多チャンネル同時測定の利点を生かし，POD 解析に基づく手法を提案した。POD 解析により，ノイズ成分を多く含むと考えられる成分を除外し，壁面圧力変動を再構築した。
- (5) 得られた圧力変動の時空間分布は，図 2 に示すように，様々なスケールの乱流構造を反映し，間欠的な性質を示した。圧力変動の統計的な特徴は，既存の結果と良い一致を示し，測定結果の妥当性が確認された。特に，壁面圧力変動の 2 点相関分布は，流れ方向とスパン方向に特徴的な広がりを持つ形状を示した。
- (6) 本研究で開発したマイクロフォンアレイにより，壁面圧力変動の空間分布を時系列的に得ることが可能となった。壁面圧力変動の空間分布は壁面乱流の様々なスケールの構造の寄与を反映しており，乱流構造と壁面圧力変動に関する新たな知見を得ることが期待される。さらに，壁面圧力変動は流体関連振動や空力騒音に関係し，工学的にも重要な物理量である。本マイクロフォンアレイは，測定対象の流れに合わせてマイクロフォンの配置を柔軟に設定することができるため，様々な流れへの応用が期待される。

#### 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. Yoshitsugu Naka, Atsuki Miyajima, A 56ch MEMS microphone array for measuring wall pressure fluctuation field, 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11), 2019 年
2. 宮島充希, 雑喉明典, 中吉嗣, 乱流圧力変動場計測のための 56ch MEMS マイクアレイの開発, 流体力学会年会 2018, 2018 年
3. 雑喉明典, 宮島充希, 中吉嗣, MEMS マイクアレイによる壁面乱流変動圧力場測定手法の開発, 日本機械学会関東支部第 24 期総会・講演会, 2018 年
4. Yoshitsugu Naka, 3D space-time correlations of wall pressure and velocity gradient in a turbulent boundary layer, New Challenges in Wall Turbulence, 2017 年
5. 中吉嗣, 高レイノルズ数乱流境界層における壁面圧力変動と乱流構造, 日本流体力学会 2016, 2016 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

明治大学理工学部機械工学科流体力学研究室ウェブサイト：

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~naka/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。