

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630051

研究課題名(和文) 局時局所壁面せん断応力ベクトル計測によるせん断乱流の動力学特性の解明

研究課題名(英文) Investigation on the kinetics of turbulent shear flows by means of the measurements of spatio-temporal wall shear stresses

研究代表者

長田 孝二 (Kouji, Nagata)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50274501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：壁面せん断応力測定用センサとして、シリコンウェハを使用したホットフィルムセンサ(SWセンサ)、フローティングエレメントセンサ(FEセンサ)、および、ポリイミドを用いた貼り付けタイプのホットフィルムセンサ(patch-typeセンサ)およびその制御回路を新たに開発し、それぞれのセンサの周波数応答やSN比等を詳細に検討した。さらに、SWセンサとpatch-typeセンサを用いて壁面噴流のせん断応力と速度場の同時計測を行った。

研究成果の概要(英文)：Three types of new sensors for measurements of wall shear stresses in turbulent shear flows: a hot-film sensor made of Silicon wafer (referred to as a SW sensor), a floating element sensor (referred to as a FE sensor), and a patch-type hot-film sensor made of polyimide (referred to as a patch-type sensor), and their control circuits have been developed. Frequency responses and SN ratios of the sensors are investigated. Further, simultaneous measurement of wall shear stress and velocity field are performed in a wall jet using the SW sensor and the patch-type sensor.

研究分野：流体工学

キーワード：流体計測 MEMSセンサ 壁面せん断応力

1. 研究開始当初の背景

乱流境界層や壁面噴流、はく離流れなどのせん断乱流場の流動ダイナミクスの一層の理解のためには壁面せん断応力の計測が必要となる。これは、これらの流れ場における壁面近傍の乱流渦構造が壁面せん断応力と密接に関わっているためである。このため、様々な手法により壁面せん断応力とせん断乱流場の関係が調べられてきた(例: Sheng J. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.633, 2009)が、未だに局時局所の壁面せん断応力と乱流渦構造の直接的/定量的な関係は実験的に明らかにされていない。これは高時間分解能/高空間分解能での定量的な壁面せん断応力計測技術が確立していないためである。壁面せん断応力計測は1990年代からMEMS技術の発達により広く行われるようになってきた(例: Nagaoka Y. et al., *JSME International Journal*, Vol. 40, 1997 / Chandrasekaran V. et al., *Experiments in Fluids*, Vol. 39, 2005)。しかし、いずれのセンサもせん断乱流場での定量的な計測は行えておらず、はく離点検出や層流/乱流境界層内の平均壁面せん断応力計測程度にとどまっていた。

2. 研究の目的

上述した背景のもと、本研究では、せん断乱流場へ適用可能な壁面せん断応力センサの開発を目的とした。さらに、開発したセンサと熱線流速計を組み合わせた計測により、せん断乱流場の一つである壁面乱流噴流場において壁面せん断応力と乱流場の同時計測を行い、乱流場と壁面せん断応力の関係を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) センサの種類

本研究では、以下の3つのセンサを設計・製作し、その性能評価を行った。

フローティングエレメントセンサ(FEセンサ)(図1)

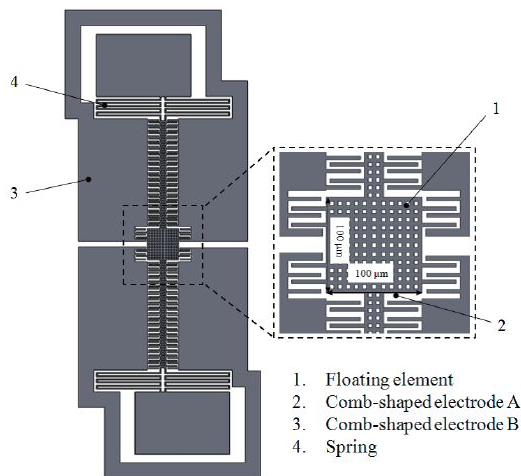


図1: フローティングエレメントセンサ(FEセンサ)

微小櫛歯振動電極を利用し、フローティングエレメントの変位量と櫛歯電極の静電容量の変化量の関係から壁面せん断応力を求めた。空間分解能とセンサ応答性のバランスを考慮した結果、受感部となるフローティングエレメントの面積を100µm×100µmとした。

シリコンウェハを使用したホットフィルムセンサ(SWセンサ)(図2)

基板にはシリコンウェハを使用し、温度変化の時定数を小さくするため微細薄膜金属として厚さ250nmの金(Au)を用い、その下部に10nmのクロム(Cr)の層を設け、その下部に1µmのシリコン酸化膜を有する構造とした。センサの基本的な駆動原理は定温度型熱線流速計と同じである。加熱部と周囲の温度差を大きくするため、微細薄膜金属を2度折り返すことにより電気抵抗を高めた。加熱要素の幅は10µm、長さは1.0mmとした。この加熱要素の放熱量から壁面せん断応力を求めた。

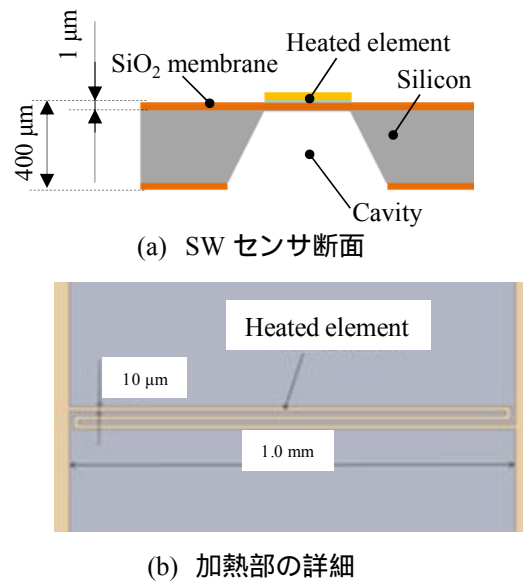
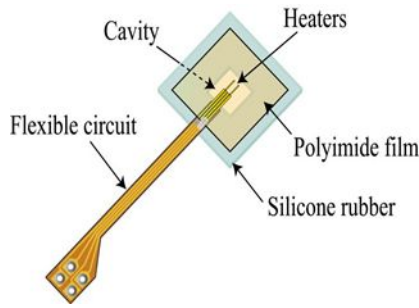


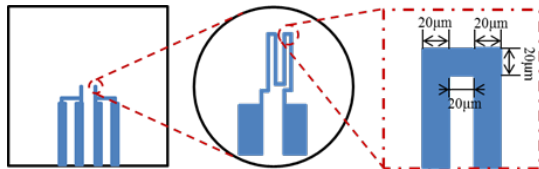
図2: シリコンウェハを使用したホットフィルムセンサ(SWセンサ)

ポリイミドを使用した貼り付けタイプのホットフィルムセンサ(patch-typeセンサ)(図3)

厚さ500µmのシリコンゴムシートの上に厚さ25µmのポリイミドフィルムを基盤として貼り付け、ポリイミドフィルム上に薄膜金属として10nmの厚さのクロム、また厚さ250nmの金をスパッタリングにより積層した。測定原理はSWセンサと同様であるが、こちらは曲率を有する壁面にも貼り付けて使用できるという長所を有する。



(a) patch-type センサの概要



(b) 加熱部の詳細

図 3: ポリイミドを使用した貼り付けタイプのホットフィルムセンサ (patch-type センサ)

(2) 実験装置および計測方法の概要

図 4 に壁面乱流噴流風洞と計測用テストセクションの全体概略図を示す。風洞部において流れは吸込口から送風機内に吸い込まれ、ディフューザ内で拡大される。その後、流れは金網により乱れを一様にした後、縮流部（ノズル）内で絞られる。風洞の出口寸法は 236 mm × 14 mm (アスペクト比 16.9) である。また、テストセクションには、噴流の二次元性を確保する目的で、噴流出口両端の延長上に高さ 200 mm のサイドウォールを設置した。座標系はノズル出口の下面中心を原点とし、流れ方向を  $x$ 、噴流中心軸に垂直な方向を  $y$ 、スパン方向を  $z$  とした。ノズル出口の流速は送風機のモータの回転数をインバータで制御し調節した。ノズル出口下流のテストセクションにはアルミ板 (500 mm × 500 mm × 2 mm) を設置した。また、壁面せん断応力の計測は  $(x, y) = (420 \text{ mm}, 0)$  の位置で行った。なお、プレストン管によるせん断応力計測に必要な静圧孔 (孔径 1 mm) を計測位置に設けてある。噴流出口流速  $U_0$  と壁面せん断応力  $\tau_w$  の関係は、プレストン管を用いて時間平均せん断応力を計測することで校正した。

壁面せん断応力センサおよび熱線流速計からの出力信号は A/D ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込まれ、統計処理された。サンプリング周波数を 10 kHz、サンプリング点数を 524,288 点とした。計測は  $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$  (SW センサ) と  $12.9 \text{ m/s}$  (patch-type センサ) の二種類で行った。このときの風洞出口高さ ( $d = 14 \text{ mm}$ ) に基づくレイノルズ数は  $Re = 5,200$  および  $12,000$  である。

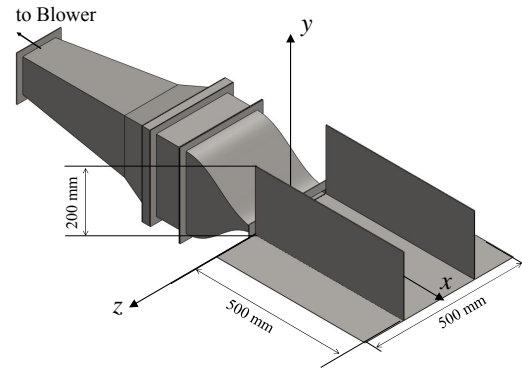


図 4: 実験装置 (壁面噴流) の概要

4. 研究成果

(1) フローティングエレメントセンサ (FE センサ)

音波 (平面波) を利用して管内に Stokes Layer を形成し、Stokes Layer により生じるせん断応力を利用する装置 (Stokes Layer 校正試験装置) を作成し (図 5)、校正試験を行った。

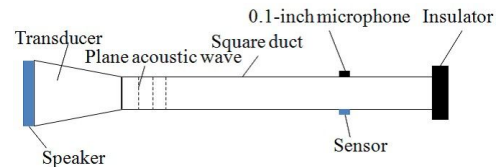


図 5: Stokes Layer 校正試験装置の概略

ファンクションジェネレータを用いて図 5 に示したスピーカーに正弦波電圧を入力した。これにより、スピーカーから音波を管内に導入し、疎密波の伝播により Stokes Layer を形成させ、周期的なせん断応力を発生させた。スピーカーへ印加する正弦波電圧の周波数を 200 Hz とし、印加電圧は、4 V、6 V、8 V、10 V の 4 種類とした。

図 6 に校正試験の結果を示す。図 6 の横軸は 1/10 インチのマイクロフォン (COUNTRYMAN:B6W4) で測定された圧力を基に算出したせん断応力  $\tau_w$ 、縦軸はセンサ出力電圧  $E$  である。図 6 より、せん断応力  $\tau_w$  が大きくなるにつれて、センサ出力電圧  $E$  が大きくなっている。このことより、フローティングエレメントセンサの計測手法や校正試験装置の妥当性が確認された。しかし、このセンサは SN 比が低いという問題があり、実際の壁面せん断応力変動計測に用いる際の課題として残された。

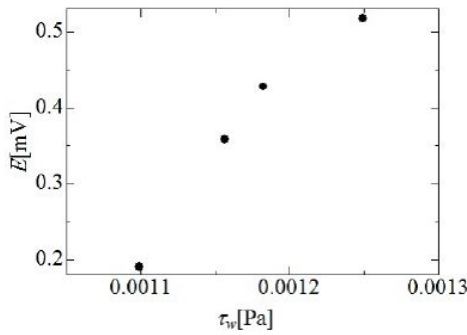


図 6: FE センサの較正試験結果

(2) シリコンウェハを使用したホットフィルムセンサ (SW センサ)

図 4 に示したテストセクションにセンサを設置し、噴流出口流速を  $U_0 = 5.8 \sim 9.4 \text{ m/s}$  と変化させ、プレストン管によって算出した壁面せん断応力とセンサ出力電圧との関係を調べた。このとき、熱拡散理論から壁面せん断応力  $\tau_w$  とセンサ出力電圧  $E$  には、

$$E^2 = A\tau_w^{\frac{1}{3}} + B \quad (1)$$

の関係式が成り立つため、この式を利用してセンサの較正試験のデータの整合性を確認した。センサの出力計測の結果を図 7 に示す。横軸は壁面せん断応力の 1/3 乗 ( $\tau_w^{1/3}$ )、縦軸はセンサ出力電圧  $E$  の 2 乗 ( $E^2$ ) を表す。図 7 より、計測した結果はほぼ線形となり、熱拡散の理論通りの結果を示し、式(1)とよく一致した。また、周波数応答特性試験を行った結果、センサの時間応答特性は 1,000 Hz 以上であり、高い時間応答性を有することがわかった。

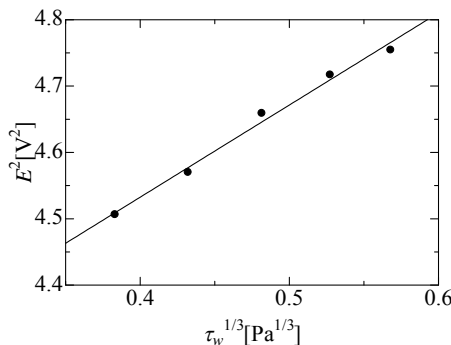


図 7: SW センサの較正試験結果

(3) ポリイミドを使用した貼り付けタイプのホットフィルムセンサ (patch-type センサ)

まず、SW センサと同様の方法で較正試験を行った。結果を図 8 に示す。図 8 より、計測した結果はほぼ線形となり、熱拡散の理論通りの結果を示し、式(1)と

よく一致した。また、周波数応答特性試験を行った結果、10 Hz 程度までのせん断応力の時間変動であれば適切に計測できることが明らかとなった。したがって、patch-type センサの周波数応答は SW センサのそれ (1,000 Hz 以上) には及ばないが、より小型であること、曲率を有する壁面に対しても使用可能である。出力が安定しており SN 比が高い、という長所を有する。小型であることは多点計測の際にも有利であり、時定数が比較的大きな流れ場であれば壁面せん断応力計測に対して非常に有効な計測手法となり得る。

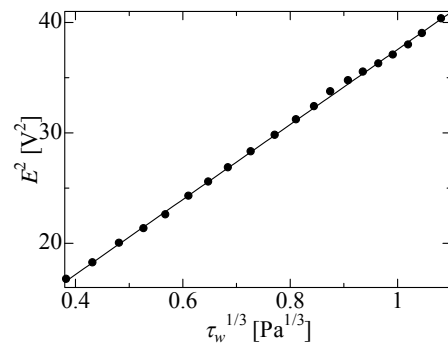


図 8: patch-type センサの較正試験結果

(4) 壁面乱流噴流計測

まず、patch-type センサを用いた実験結果を示す。このセンサは周波数応答が高くないので、時間平均量のみを計測した。

図 9 に熱線流速計で計測された速度分布を示す。縦軸が  $U^+$ 、横軸が  $y^+$  である。図中の直線は  $U^+ = 5.5 \log(y^+) + 5.5$  であり、この直線に熱線流速計で計測した速度分布をフィッティングさせ、そのときの壁面摩擦係数  $C_f$  値を求めた。表 1 にバルクレイノルズ数 ( $Re_m$ : 境界層厚さを基準としたレイノルズ数)、平均速度分布から求められた  $C_f$  と  $\tau_w$  および patch-type センサで計測されたそれぞれの  $C_f$  と  $\tau_w$  を示す。表 1 より、速度分布から算出したせん断応力と直接計測により得られたせん断応力が 10% 以下の違いで一致し、両者の差異は 0.02 Pa となった。

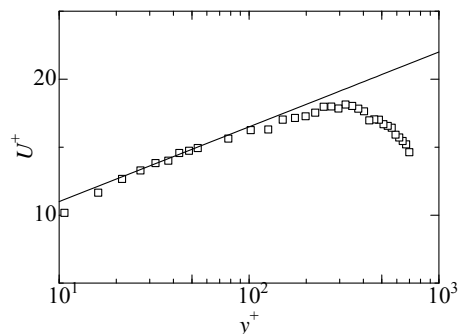


図 9: 平均流速分布 ( $x/d = 30$ )

表 1:  $C_f$  と  $\tau_w$  の計測結果

$Re_m$	device	$C_f$	$\tau_w$ [Pa]
4,000	patch-type sensor	0.0087	0.23
	hot-wire (Clauser fit)	0.0078	0.21

次に、周波数応答試験結果が最もよかった SW センサを用いて壁面噴流のせん断応力と速度場の同時計測を行った。

$x/d = 30, y/d = 0.07$  において計測された主流方向速度変動のパワースペクトルを図 10 に、壁面せん断応力変動のパワースペクトルを図 11 にそれぞれ示す。図 10, 11 より、速度変動のパワースペクトルにはピークが見られないのに対して、壁面せん断応力変動のパワースペクトルにはいくつかのピークが見られた。この結果から、壁面せん断応力変動は気流の速度変動に比べて、特定周波数を有する秩序渦構造のような乱流構造の影響を受けやすいことが推測される。

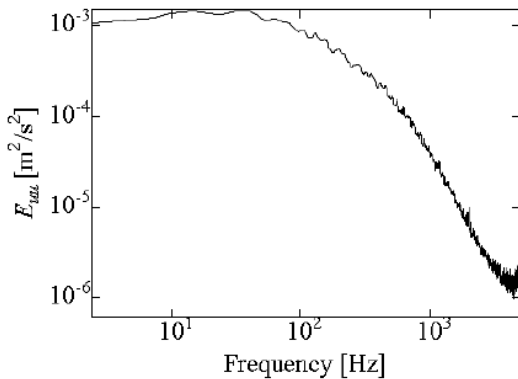


図 10: 主流方向速度変動のパワースペクトル ( $x/d = 30, y/d = 0.07$ )

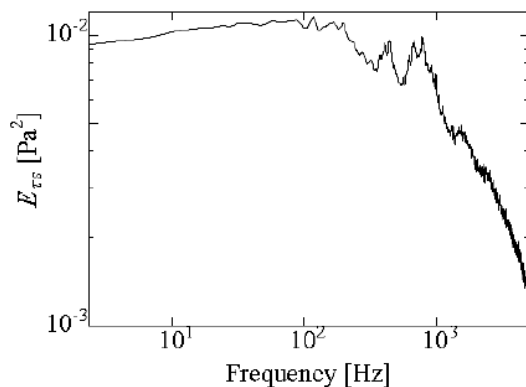


図 11: 壁面せん断応力変動のパワースペクトル ( $x/d = 30, y/d = 0.07$ )

## (5) まとめ

フローティングエレメントセンサ (FE センサ), シリコンウェハを使用したホットフィルムセンサ (SW センサ), ポリイミドを使用した貼り付けタイプのホットフィルムセンサ (patch-type センサ) を設計・製作し、較正試験を行った。それぞれのセンサの周波数応答や SN 比等を詳細に検討した。また、SW センサと patch-type センサを用いて壁面噴流のせん断応力と速度場の同時計測を行った。本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

FE センサの SN 比は SW センサや patch-type センサよりも低く、微小な壁面せん断応力変動を捉えるには SN 比の更なる向上が必要である。

SW センサの時間応答は 1,000 Hz 以上であった。これを用いて壁面噴流場で瞬時壁面せん断応力の計測を行った。その結果、速度変動のパワースペクトルにはピークが見られないのに対して、壁面せん断応力変動のパワースペクトルにはいくつかのピークが見られた。この結果から、壁面せん断応力変動は気流の速度変動に比べて、特定周波数を有する秩序渦構造のような乱流構造の影響を受けやすいことが推測される。

patch-type センサの周波数応答はおよそ 10 Hz であった。従って、SW センサの時間応答には及ばないが、より小型であること、曲率を有する壁面に対しても使用可能である、出力が安定しており SN 比が高い、という長所を有する patch-type センサを用いて壁面噴流場で平均壁面せん断応力の計測を行った。その結果、速度分布から算出したせん断応力と直接計測により得られたせん断応力が 10% 以下の違いで一致し、両者の差異は 0.02 Pa となった。

## 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 4 件)

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, Y. Ito, and S. Muramatsu, On the measurement of wall shear stress with a patch-type micro-fabricated hot-film sensor, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.9, 2014, JFST0029 1-13, 10.1299/jfst.2014jfst0029

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, and Y. Ito, Measurement of Wall Shear Stress Fluctuation with the Micro-fabricated Hot-film Sensor in a Boundary Layer of

a Wall Jet, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 査読有, Vol.14, 2014, S13-S18, 10.11395/jjsem.14.s13

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, H. Hida, K. Onishi, and Y. Ito, A Technique for the Measurement of Wall Shear Stress based on Micro Fabricated Hot-film Sensor, Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 査読有, Vol.7B, 2013, V07BT08A061 1-7, 10.1115/IMECE2013-63091

O. Terashima, T. Sawada, Y. Sakai, K. Nagata, H. Hida, and M. Shikida, Measurement of Wall Shear Stress by Using Micro-fabricated Hot-film and Floating-element Sensors, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, 査読有, Vol.13, 2013, 10.11395/jjsem.13.s1

〔学会発表〕(計7件)

村松 空, 酒井 康彦, 長田 孝二, 伊藤 靖仁, 式田 光宏, パッチタイプ型熱式フィルムセンサを用いた壁面せん断応力の計測, 2014年度日本機械学会年次大会, 2014年09月08日, 東京電機大学(東京都)

沢田 拓也, 寺島 修, 酒井 康彦, 長田 孝二, 式田 光宏, 伊藤 靖仁, MEMS技術による熱式マイクロセンサの開発およびそれを用いた壁面せん断応力計測に関する研究, 日本機械学会東海支部講演会, 2014年3月18日, 大同大学(愛知県・名古屋市)

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, H. Hida, K. Onishi, and Y. Ito, A Technique for the Measurement of Wall Shear Stress based on Micro Fabricated Hot-film Sensor, ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013年11月18日, San Diego (USA)

沢田 拓也, 寺島 修, 酒井 康彦, 長田 孝二, 式田 光宏, 肥田 博隆, 伊藤 靖仁, 壁面噴流中のせん断応力変動計測の試み, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2013年11月9日, 九州大学(福岡県・福岡市)

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, H. Hida, and Y. Ito, Measurements of Wall Shear Stress Fluctuation with the Micro-fabricated Hot-film Sensor in a Boundary Layer of Wall Jet, 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013年11月6日, 仙台市戦災復興記念会館(宮城県・

仙台市)

T. Sawada, O. Terashima, Y. Sakai, K. Nagata, M. Shikida, H. Hida, K. Onishi, and Y. Ito, On the measurement of wall shear stress with a micro-fabricated hot-film sensor, International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows 2013, 2013年9月17日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)  
沢田 拓也, 寺島 修, 酒井 康彦, 長田 孝二, 式田 光宏, 肥田 博隆, 伊藤 靖仁, 日本実験力学学会年次大会, 由利本荘市文化交流館「カダーレ」(秋田県・由利本荘市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

長田 孝二 (NAGATA Koji)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50274501

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

酒井 康彦 (SAKAI Yasuhiko)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 20162274

伊藤 靖仁 (ITO Yasumasa)  
名古屋大学・大学院工学研究科・特任准教授  
研究者番号: 40346078

式田 光宏 (SHIKIDA Mitsuhiro)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 80273291

肥田 博隆 (HIDA Hiroataka)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60402509