

機関番号：57701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560174

研究課題名（和文） 拡散促進と方向制御機能を兼ね備えた噴流の流動特性

研究課題名（英文） FLOW CHARACTERISTICS OF JET HAVING BOTH DIFFUSION ENHANCEMENT AND DIRECTION CONTROL FUNCTIONS

研究代表者

田畑 隆英 (TABATA TAKAHIDE)

鹿児島工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：50290846

研究成果の概要（和文）：噴流の拡散制御および方向制御に関する研究の一環として、LIF法による流れの可視化を行って、5角形ダクトから流出する噴流の流動状態について調べた。

また、熱線センサーおよび定温度型熱線流速計を用いて速度計測を行い、速度分布、速度減衰、半値幅、乱れ分布について調べた。さらに、噴流の構造を調べるために、半値幅における速度データを用いてウェーブレット解析を行った。そして、往復振動流を付加した噴流についても同様の実験を行った。

その結果、シンセティックジェットを付加していない場合と比較して、それを付加した5角形ダクト噴流の拡散は促進されることがわかった。また、シンセティックジェットを付加した側に噴流が引き寄せられることもわかった。さらに、ウェーブレット解析結果から、シンセティックジェットを付加した噴流の構造において、変動速度の低周波数成分は弱められることもわかった。

研究成果の概要（英文）：As a part of study on the diffusion control and the direction one the flow visualization of the jet flow issuing from the pentagonal duct was performed by the LIF method. And the jet diffusion was investigated by analyzing the velocity distribution, the velocity decay, the jet half width and the turbulent intensity obtained from the data by using the hot wire anemometer. Moreover, in order to reveal the coherent structure of the jet flow, the continuous wavelet transform was conducted using the information of the fluctuating velocity component at the measuring point showing the half value width. Furthermore, the characteristic of the jet with adding the synthetic jet as an oscillating flow was also studied.

As a result, it has been clarified that the diffusion of the jet with the synthetic jet is promoted comparing with that of the jet without one. And it has been found that the jet is induced toward the side on which the synthetic jet is added. Moreover from the result of the wavelet analysis, by adding the synthetic jet, it has been also clarified that the low frequency component of the fluctuating velocity is relatively wakened.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,900,000	570,000	2,470,000
21年度	700,000	210,000	910,000
22年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：噴流，5角形ダクト，拡散，ウェーブレット変換，熱線流速計

### 1. 研究開始当初の背景

噴流は、各種流体機械や燃焼装置など広範囲の工業機器に応用されている。この噴流の拡散促進に関する研究は、工業的波及効果が大きいこともあって、近年、盛んになってきている。噴流に関する最近の研究動向としては、噴流の拡散を種々な方法で促進させる研究が増加している。また、最近は米国を中心として、噴流の方向制御に関する研究も散見されるようになってきている。

### 2. 研究の目的

このような背景から本研究は、正5角形のダクトからは主噴流を流出させ、さらに、正5角形の一辺と同じ長さで構成される5個の正方形ダクトを正5角形ダクト周辺に配置する。そして、この正方形ダクトには往復振動流を付加する。例えば、往復振動流を1つの正方形ダクトに付加すると、直進していた主噴流の噴流中心線は、この往復振動流の影響を受けて、往復振動流を付加したダクトの側に大きく偏向することが予想される。この様に、本研究で新しく提案する噴流装置では、往復振動流を加えるダクトを選定することによって、主噴流の流出方向を任意に制御できる。すなわち、本研究の最終目標は、主噴流の拡散促進と方向制御を試みることである。

### 3. 研究の方法

まず、本研究における基本的流れ場を把握するために、往復振動流を付加しない場合の正5角形ダクトから流出する主噴流の流動特性を調べる。すなわち、流動状態を把握するために、主噴流の流れの可視化を行った。次に、平均速度分布、噴流の半値幅、等速度線図などの平均流特性、乱れ強さなどの乱流特性を求める。そして、円形噴流の半値幅などと比較することにより、正5角形ダクトから流出する主噴流の流動特性を明らかにする。また、流動状態を把握するために、主噴流の流れの可視化を行った。さらに、噴流の組織構造を調べるために、時系列速度データを用いて、ウェーブレット変換を行った。

さらに、主噴流の周囲に往復振動流を付加した実験も同様に行い、付加した往復振動流が主噴流の流動特性に及ぼす影響について考察する。以下に、実験装置および方法の詳細について述べる。

本研究の流れ場および用いる座標系を図1に示す。正5角形断面をもつダクトの出口中心に座標原点0をとり、流れ方向に $x$ 軸、ダ

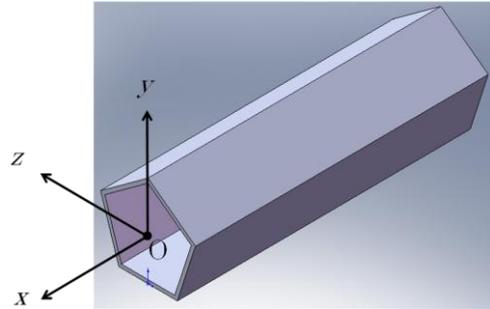
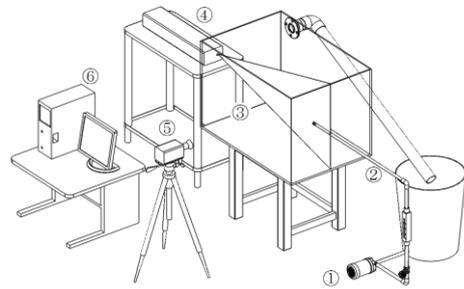
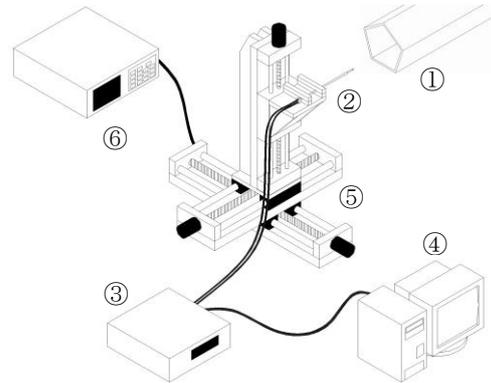


Fig.1 Coordinate Systems



①Pump ②Pentagonal duct ③Water tank  
④CW: YAG laser ⑤CCD Camera ⑥PC

Fig.2 Experimental Apparatus (LIF)



①Pentagonal duct ② Hot-wire probes  
③ Hot-wire Anemometer ④ PC  
⑤ 3-axis Traverse unit ⑥ Controller

Fig.3 Experimental Apparatus (CTA)

クトの頂点の方向に $y$ 軸、それらと直角方向に $z$ 軸をそれぞれとる。また、 $x$ 軸方向の速度成分を $u$ とする。

噴流の流動状態を調べるために、LIF法による流れの可視化を行う際の実験装置概略を図2に示す。ポンプによって汲み上げられた作動流体である水は、流量計を通過した

後、1辺が35.6 mmの正五角形断面をもつ長さ2200mmのダクトに送られる。ここで流れが十分発達した後、水槽内へと流出し、自由噴流を形成する。また、流れの可視化のために、出力5WのCW:YAGレーザー(Kanomax, CW532-5W)からのレーザー光を厚さ2mm以下のシート状にして $xOy$ 平面に照射した。さらに、トレーサーには蛍光染料ローダミン6Gの水溶液を用い、水噴流に混入した。可視化された画像は、水槽側方に設置した高速度カメラ(Phantom, V5.0, 1024×1024 pixel)によって撮影され、得られた画像情報はパソコンに転送され、記録される。ここで、本研究における力学的パラメータはレイノルズ数 $Re$ であり、五角形ダクト出口における最大速度 $U_{max}$ ならびに正五角形の面積とぬれ縁長さから求めた水力平均直径 $D_e = 49.1\text{mm}$ に基づく $Re$ を $1.0 \times 10^4$ とした実験を行った。

次に、速度の定量計測で用いる実験装置を図3に示す。ブローからの空気は、正五角形断面をもつダクトに送られ、流れが十分発達した後、自由噴流として流出する。その速度計測にはX型熱線プローブおよび定温度型熱線流速計(Kanomax, IHW-100)を用いた。計測された速度情報はパソコンに転送され、記録される。また、熱線プローブは3軸移動装置に設置されており、計測点の移動には、その制御装置を用いた。ここで、定量計測における $Re$ は $4.0 \times 10^4$ とした実験を行った。なお、比較のために行った円形噴流の場合、代表速度および代表寸法は、円管出口における最大速度 $U_{max}$ および円管の内径 $d$ である。さらに、サンプリング周波数およびサンプリング数は、1kHzおよび3,072個である。

次に、噴流の方向制御を行うために、五角形ダクトの底辺の外側にシンセティックジェットを付加した場合の実験も行った。すなわち、ダクト底辺の外側に図4に示す矩形断面をもつ中空のアクチュエータを取り付け、その内壁の1つにピエゾ素子板(村田製作所, 7NB-31R2-1)を貼り付け、これに正弦波電圧を印加して振動させる。これによってアクチュエータの容積が変化し、その正面に設けられた幅16mmで高さ0.5mmのスリットから $x$ 軸に平行に空気を噴出・吸引させることでシンセティックジェットを発生させた。ここで、ピエゾ素子板の振動数を1,150Hzとした際のアクチュエータのスリット出口中心における最大噴出速度は23.69m/s、時間平均速度は $u_{s,j}=9.38\text{m/s}$ であった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 五角形ダクトから流出する噴流

###### (1.1) 流れの可視化

噴流の流動状態を調べるためにLIF法による流れの可視化実験を行った。その一例として、 $xOy$ 断面における結果を図5に示す。

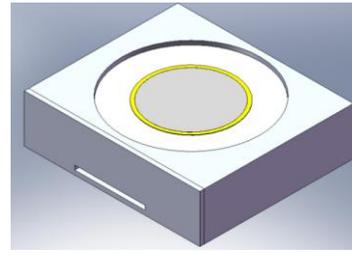


Fig.4 Synthetic Jet Actuator



Fig.5 Flow Image  
( $xOy$ -plane, LIF,  $Re=1.0 \times 10^4$ )

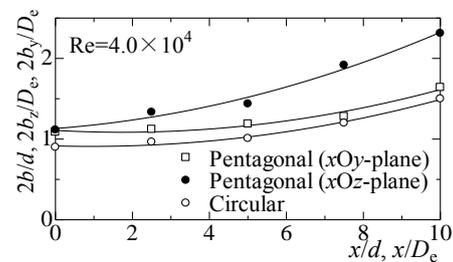


Fig.6 Half Value Widths of Jet Flow

図の右側に位置するダクトから噴流が流出し、下流へ進むにしたがって、噴流幅は広がっていく。ここで、ダクト底辺側にあたる下側のせん断層では明瞭な巻き込み渦が認められるのに対して、ダクト頂点側においては、巻き込み渦が崩壊しているのが特徴的である。

###### (1.2) 速度計測

次に、速度の定量計測を行うために、 $Re=4.0 \times 10^4$ とした空気噴流の熱線流速計を用いた実験を行った。得られた速度情報から $u$ の時間平均速度分布図を作成し、求めた噴流の半値幅 $2b_1$ および $2b_2$ の下流方向への変化を図6に示す。図には比較のために、円形噴流の結果も示している。

五角形ダクト噴流の半値幅は、下流へ進むにしたがって次第に増加し、円形噴流のそれよりも大きい。また、 $2b_2$ は $2b_1$ よりも大きく、その下流方向への増加率も高い結果が得られた。すなわち、円形噴流と比較して、五角形ダクト噴流の拡散は促進され、 $xOy$ 平面よりも $xOz$ 平面における噴流の広がりが大きいことがわかる。

以上のことから、 $xOz$ 平面における噴流の拡散は、 $xOy$ 平面よりも促進される。また、半値幅を示す位置における組織構造には、ダ

クトの頂点側で比較的高い周波数成分が含まれるが、底辺側には弱い高周波成分が含まれる。また、 $xOz$  平面においては、高周波成分は弱くなり、間欠的な構造をもつ。

## (2) 往復振動流を付加した噴流

噴流の方向制御を行うために、5角形ダクトの底辺の外側に往復振動流を付加した場合の実験も行った。ここで、空気噴流において効果的に往復振動流を付加するために、シンセティックジェットを用いることとした。

### (2.1) 平均速度分布

5角形ダクトから流出する噴流の $xOy$ 平面における $u$ の時間平均速度分布を図7に示す。ここで、図には比較のために、円形噴流の結果も示している。なお、縦軸はそれぞれの噴流の $U_{\max}$ で無次元化している。 $x/d=0$ において、5角形ダクトから流出する噴流の速度分布は $x$ 軸に対して非対称であり、円形噴流の場合よりも $y$ が正の領域における広がり大きい。これは5角形ダクトの形状が非対称であり、5角形ダクトの頂点が円形ノズルよりも $y$ の正側に位置するためである。また、シンセティックジェットを付加した場合、これによる速度の極大値が約 $y/d=-0.7$ において認められる。

$x/d=2.5$ 以降においては、下流へ進むにしたがって、円形噴流の最大速度は次第に減少し、速度分布の広がりも大きくなっていく。また、5角形ダクトから流出する噴流の速度は、円形噴流の場合よりも大きい。さらに、シンセティックジェットを付加した場合の速度は、それを付加していない場合と比較して、 $y$ の負側で高く、 $y$ の正側で低い。また、最大速度をとる位置がわずかに $y$ の負側にシフトしている。すなわち、シンセティックジェットを付加することによって、それを付加した側に噴流が引き寄せられるものと思われる。

### (2.2) 速度減衰

平均速度分布の結果から各下流位置における最大速度の減衰を求め、これを図8に示す。5角形ダクトから流出する噴流の速度減衰は、円形噴流の場合より小さい。また、シンセティックジェットを付加した5角形ダクト噴流の速度減衰はそれを付加していない場合よりも大きい、円形噴流の場合のそれよりは小さい。

### (2.3) 噴流の半値幅

噴流の広がりやを定量的に評価するために、得られた速度分布から噴流の半値幅 $2b_{0.5}$ を求め、その下流方向への変化を図9に示す。下流へ進むにしたがって、5角形ダクトから流出する噴流の $2b_{0.5}$ は増加し、円形噴流の場合よりも大きな値である。また、シンセティックジェットを付加した5角形ダクト噴流の $2b_{0.5}$ は、それを付加していない場合よりも

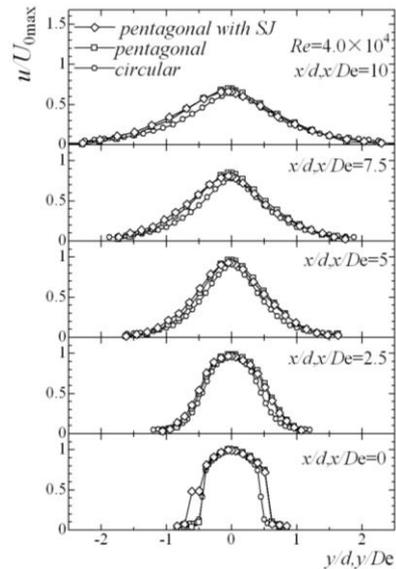


Fig. 7 Velocity distributions

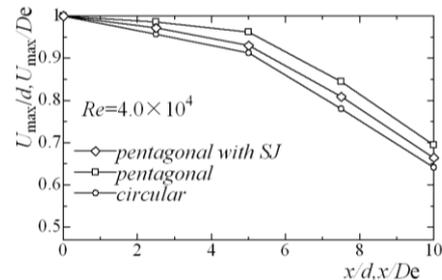


Fig. 8 Velocity decays

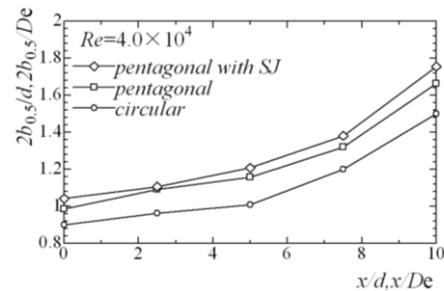


Fig. 9 Half value widths of jet flow

さらに大きな半値幅をとる。すなわち、5角形ダクト噴流の周囲にシンセティックジェットを付加すると噴流の拡散は促進されることがわかる。

### (2.4) 乱れ強さ

速度情報から求めた $x$ 軸方向の乱れ強さの $y$ 方向への分布を図10に示す。ここで、図の縦軸は、 $u'$ の二乗平均平方根をそれぞれのノズル出口における最大速度 $U_{\max}$ で除したものである。

$x/d=0$ での円形噴流の乱れ強さは、 $x$ 軸上で極小値をとり、ノズルの管端近傍の約 $|x/d|=0.4$ において極大値をとる。また、下流へ進むにしたがって、乱れ強さは次第に増加

するとともに、1つの極大値をもつ分布に近づいていく。

次に、5角形ダクトから流出する噴流の場合について考察する。  $x/d = 0$  における乱れ強さは、円形噴流の場合よりも大きく、約  $y/d = -0.4$  および  $0.5$  において極大値をとる。また、 $x/d = 2.5$  より下流においては、乱れ強さの極大値をとる位置は、 $|y|$  の増加する側へシフトしている。また、 $y$  の負側の極大値が大きいこともわかる。

このような5角形ダクト噴流にシンセティックジェットを付加すると、 $x/d = 0$  において、約  $y/d = -0.7$  で乱れ強さの最大値をとる。また、 $x/d = 2.5$  より下流では、 $y$  が正の領域および約  $-0.7 < y/d < 1$  において、シンセティックジェットを付加していない場合よりも乱れ強さの値は小さい。そして、 $x/d = 10$  における乱れ強さの分布は、5角形ダクト噴流とほぼ同様となっている。

### (2.5) ウェーブレット解析

噴流の構造を調べるために、連続ウェーブレット変換を行った。一例として、シンセティックジェットを付加した側の噴流せん断、すなわち、 $(x/d, y/b_{0.5}) = (10, -1)$  における変動速度のウェーブレット解析結果を図 11 に示す。ここで、ウェーブレットには修正 Morlet 関数を用いた。図 11(a) に示す5角形ダクト噴流の場合、約 10 から 100Hz の領域に高いウェーブレット係数の領域が、比較的連続して存在しているのが認められる。

一方、図 11(b) に示すシンセティックジェットを付加した場合、約 10 から 80Hz の領域に高いウェーブレット係数をもつ領域が間欠的に存在し、その数が少なくなっている。

このことから、シンセティックジェットを付加した噴流の構造は、付加していない場合と比較して、比較的、低周波数成分をもつ変動の出現が少なくなっている。

### (3) 結言

噴流の拡散制御および方向制御に関する研究の一環として、LIF法による流れの可視化を行って、5角形ダクトから流出する噴流の流動状態について調べた。また、熱線センサーおよび定温度型熱線流速計を用いて、速度計測を行い、速度分布、速度減衰、半値幅、乱れ分布について調べた。さらに、噴流の構造を調べるために、半値幅における速度データを用いてウェーブレット解析を行った。そして、往復振動流を付加した噴流についても同様の実験を行った。

その結果、シンセティックジェットを付加していない場合と比較して、それを付加した5角形ダクト噴流の拡散は促進されることがわかった。また、シンセティックジェットを付加した側に噴流が引き寄せられることもわかった。さらに、ウェーブレット解析結

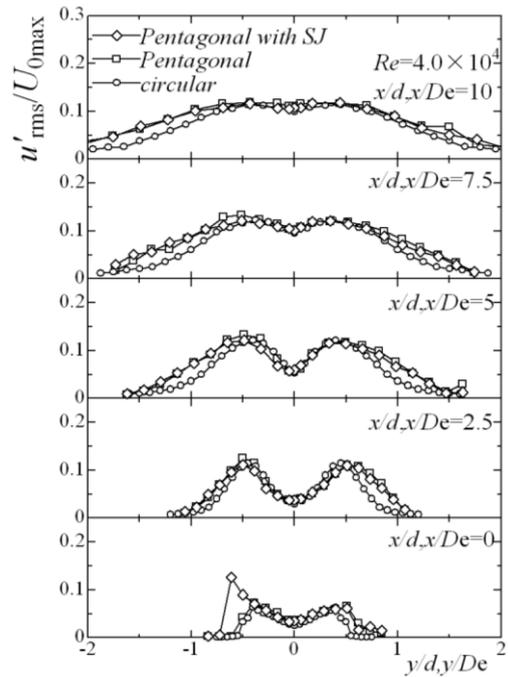
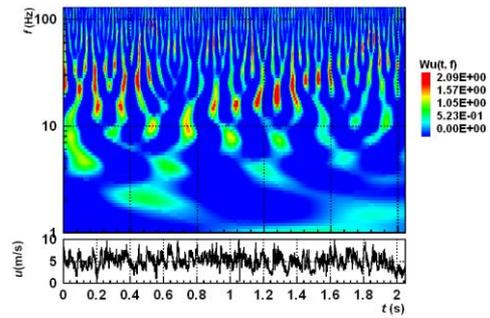
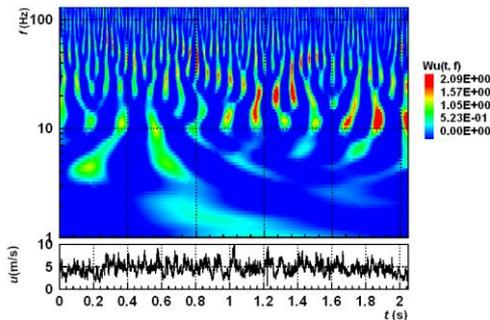


Fig.10 Turbulent intensities



(a) Pentagonal



(b) Pentagonal with SJ

Fig.11 Wavelet analysis  
 $((x/d, y/b_{0.5}) = (10, -1))$

果から、シンセティックジェットを付加した噴流の構造において、比較的、低周波数の変動成分が少なくなっていることもわかった。

なお、水噴流における往復振動流を付加した実験については、当該研究期間中における高速度カメラの故障・修理のため、これを行

うことができなかつたことが残念である。空気噴流におけるシンセティックジェットでは小さな振幅で高周波数の往復振動流を付加したが、水噴流の場合には比較的大きな振幅で低周波数のそれを付加することが、噴流の拡散および方向制御に効果的であることが予想される。当該研究期間後とはなるが、引き続き、この研究を行っていく予定である。

#### 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0件)

[学会発表] (計13件)

- ① 田畑 隆英、宇都 尚哉、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会九州支部第 64 期総会・講演会講演論文集、No. 118-1、2011、pp. 63-64.
- ② 田畑 隆英、宇都 尚哉、李鹿 輝、5 角形ダクトから流出する噴流のウェーブレット解析、日本機械学会第 88 期流体力学部門講演会講演論文集、No. 10-16、2010、pp. 229-230.
- ③ 田畑 隆英、宇都 尚哉、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会九州・中国四国支部合同企画徳島講演会講演論文集、No. 105-2、2010、pp. 229-230.
- ④ 田畑 隆英、堂菌 賢、李鹿 輝、5 角形ダクトから流出する噴流のウェーブレット解析、可視化情報学会全国講演会(鹿児島 2010)講演論文集、Vol. 30、Suppl. No. 2、2010、pp. 301-302.
- ⑤ 宇都 尚哉、田畑 隆英、5 角形ダクトから流出する噴流、可視化情報学会全国講演会(鹿児島 2010)講演論文集、Vol. 30、Suppl. No. 2、2010、pp. 315-316.
- ⑥ 田畑 隆英、宇都 尚哉、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集、No. 10-1、2010、pp. 163-164.
- ⑦ 田畑 隆英、宇都 尚哉、李鹿 輝、5 角形ダクトから流出する噴流、可視化情報学会第 38 回可視化情報シンポジウム講演論文集、Vol. 30、Suppl. No. 1、2010、pp. 125-126.
- ⑧ 田畑 隆英、増田 広豊、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会九州支部第 63 期総会・講演会講演論文集、No. 108-1、2010、pp. 221-222.
- ⑨ 田畑 隆英、増田 広豊、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会第 87 期流体力学部門講演会講演論文集、No. 09-8、2009、pp. 55-57.
- ⑩ 田畑 隆英、増田 広豊、李鹿 輝、5 角形ダクトから流出する噴流、可視化情

報学会全国講演会(米沢 2009)講演論文集、Vo. 29、Suppl. No. 2、2009、pp. 135-136.

- ⑪ 田畑 隆英、増田 広豊、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会九州・中国四国支部合同企画長崎講演会講演論文集、No. 098-3、2009、pp. 55-56.
- ⑫ 田畑 隆英、増田 広豊、5 角形ダクトから流出する噴流、日本機械学会 2009 年度年次大会、No. 09-1、2009、pp. 199-200.
- ⑬ 田畑 隆英、増田 広豊、李鹿 輝、5 角形ダクトから流出する噴流のウェーブレット解析、可視化情報学会第 37 回可視化情報シンポジウム講演論文集、Vol. 29、Suppl. No. 1、2009、pp. 175-176.

[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：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

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

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田畑 隆英 (TABATA TAKAHIDE)

研究者番号：50290846

鹿児島工業高等専門学校・機械工学科・准教授

##### (2) 研究分担者

李鹿 輝 (RINOSHIKA AKIRA)

研究者番号：00253906

山形大学大学院・理工学研究科・教授

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：