

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560191

研究課題名(和文) 対向噴流のよどみ点領域に対する高シュミット数スカラ場の構造解析とモデル化

研究課題名(英文) Investigation and modelling on the structure of high-schmidt-number passive scalar field at a stagnation region in counter jet

研究代表者

角田 博之(TSUNODA, Hiroyuki)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：10207433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：対向噴流の特徴はその混合能の高さである。高混合効率をもたらす要因の一つに対向噴流の構造的特徴があると考え、二次元対向噴流に関して瞬時よどみ点を含む流れ場の特性を実験的に調べた。まず、瞬時よどみ点を定量評価する手法を考案した。PIV実験で得られた速度場データに本手法を適用した結果、瞬時よどみ点位置の変動場に関する統計的特性を得ることができた。数値解析については、対向噴流で特徴的な噴流揺動がスカラ場に及ぼす影響を調べることを目的として、同様の噴流揺動が現れるフリップフロップ噴流場を解析した。本研究により、ノズル形状を変えることなく噴流の発信周波数の制御が可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Counter jet has a higher mixing ability compared with conventional jets. Considering that this superior mixing efficiency is produced mainly by the peculiar spatial structure of the counter jet, the characteristics of the flow field, including those of an instantaneous stagnating region, were studied experimentally for a plane counter jet. First of all, a technique for evaluating the instantaneous stagnation point quantitatively was devised. Then statistical features were found on the fluctuation field of the instantaneous stagnation point after applying this method to experimental data obtained by PIV. Furthermore, the flip-flop jet which has a similar jet meandering as the counter jet was investigated numerically in order to study the effect of the jet wandering on the development of the passive scalar issued from the nozzle. It was found that the jet oscillation frequency could be controlled externally without changing the nozzle geometry.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流 対向噴流 パッシブスカラ

### 1. 研究開始当初の背景

乱流中を移流拡散するパッシブスカラ場は、速度非均一性や乱流特有の広波数域多重スケール構造により複雑なカオスの挙動を有する。物質拡散現象は燃焼や環境問題とも関係してそれ自身工学的に重要な問題であるが、乱流を解明する手段の一つとして近年注目を集めつつある。即ち、乱流速度場の統計的特性と拡散スカラ物質の変動濃度場の統計的特性との関連性に着目し、『スカラ乱流 (Scalar turbulence)』の場を調べることで、非線形でより複雑な『ベクトル乱流速度場』の理解に役立てることができる。

スカラ乱流の研究は現在のところ理論解析や数値乱流を利用した解析がほとんどであり、計測上の要求レベルの高さから実験的研究例は少ない。唯一、等方乱流中の温度場拡散を扱った Warhaft らによる研究例ならびに Sreenivasan らによる乱流噴流中でのスカラ場の微細構造を調べた研究例があるのみである。本課題では、より複雑な二次元対向噴流場においてスカラ乱流の実験的検証を試みようとするものであり、研究の発展に多大な貢献をもたらすと期待できる。

### 2. 研究の目的

二次元対向噴流における速度と濃度の瞬時二次元場の時系列を同時測定し、速度場の時空間構造と濃度場の統計的特性との関係を調べることを第一の研究目的とする。また、固有直交分解 (POD) 解析を速度勾配テンソルの時系列に適用し、特に低次のエネルギーモードに対する乱流場の時空間構造を調べる。そして、実験から得られたスカラ乱流に関する知見を基に、ラグランジュ手法に基づく確率論的モデル化を行うことが第二の研究目的である。2点濃度相関のスケールリング則の結果を2粒子相対拡散の問題に適用し、ラグランジュ的な相対拡散モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

(1) 二次元対向噴流における乱流場の構造と濃度場の統計的特性との関係

図1に実験装置模式図と計測システムを示す。一様流には幅200mm×長さ2000mm×水深200mmの開水路を利用し、二次元噴流には、出口幅 $d=4\text{mm}$ 、スパン幅140mm、アスペクト比35の二次元スリットノズルを製作した。速度場と濃度場の同時計測のために、YAGレーザーシート発光と2台のCCDカメラによる撮像をパルス信号発生で制御し完全同期測定を行う。カメラには最大フレームレートが1000fps程度の高速度カメラを2台使用し、それぞれを速度測定 (PIV) と濃度測定 (PLIF) に用いる。実験では、噴流と一様流の速度比を  $V_r=1.6\sim 2.2$  の範囲内で変化させ、よどみ点近傍での速度場と濃度場の同時測定データを蓄積する。

(2) ラグランジュ手法によるスカラ乱流の確率論的モデル構築

実験で得られたスカラ乱流の知見を基に、

スカラ乱流のラグランジュ型モデルの構築を行う。確率密度関数法による拡散場数値解析への適用を考え、伊藤型確率微分方程式に基づく確率過程としてモデル化を行う。

対向噴流による流れの計算には、ナビアーストークス方程式の直接計算 (DNS) 手法を採用し、離散化には差分法を用いる。対向噴流場の計算に先立ち、対向噴流と同様の噴流揺動が顕著な流れ場として、フリップフロップ噴流 (以後、FF噴流と呼ぶ) を対象とした数値解析を行い、ラグランジュ的なスカラ場解析とラグランジュ型モデルの展開に利用することにした。モデル化を行う際、噴流揺動の周波数変化がスカラ場発展に及ぼす影響を調べておく必要がある。しかし、一般に、FF噴流の揺動周波数はノズル形状に固有の値であり可変制御が困難である。そこで、FF噴流場の数値解析では、ピエゾ素子による外部かく乱を数値モデル化し、素子の振動周波数を変えることで噴流揺動の周波数を制御することを試みた。

### 4. 研究成果

(1) 二次元対向噴流における乱流場の構造と濃度場の統計的特性との関係

① 二次元対向噴流の平均的特性

ノズルを製作して初めて行う実験であることから、まず、対向噴流の平均的特性を調べた。図2は $y=z=0$ の噴流中心軸上において (座標系は図1を参照)、 $x$ 方向平均速度  $U_a$  の下流方向減衰を5種類の場合について調べた結果である。ノズル出口 $x=0$ においての速度比  $U_a/U_0$  の値から  $U_a$  は下流方向に急激に減衰し、速度ゼロを経て、一様流に相

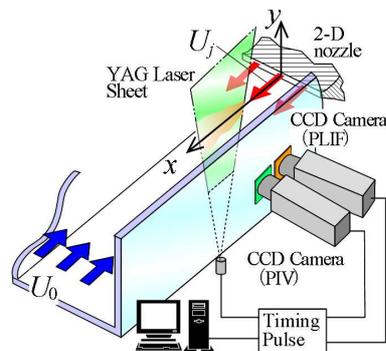


図1 計測システム模式図

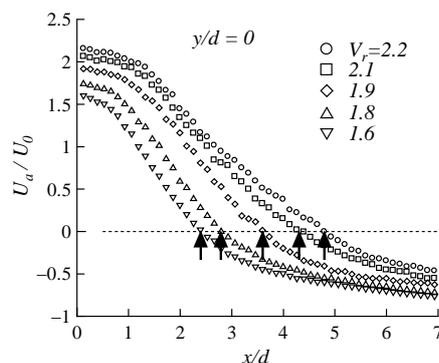


図2 噴流軸上における  $x$  方向平均速度  $U_a$  の下流方向変化

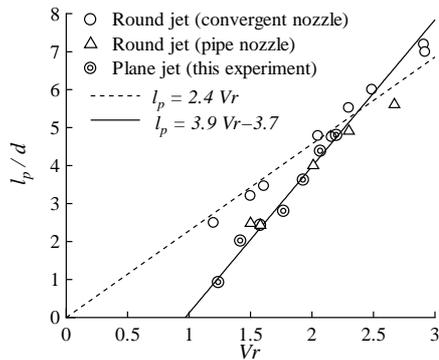


図3 噴流到達距離の速度比による変化

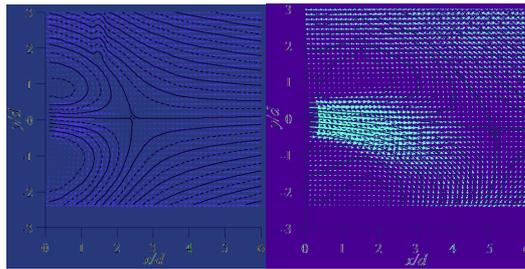


図4 平均流線 (左: Vr=1.6, 右: Vr=2.2)

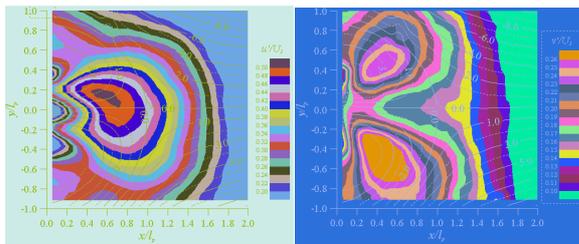


図5 速度乱れ  $u', v'$  の等高線 (Vr=1.6)

当する  $U_a/U_0=1$  へと漸近する。

$U_a=0$  となる  $x$  位置を噴流到達距離  $l_p$  と定義し、 $l_p$  との  $Vr$  による変化を調べた結果を図3に示す。比較のために、図には絞りノズルと管ノズルの2種類に対する円形対向噴流による結果も示してある。二次元対向噴流に対する本結果は、管ノズルによる円形対向噴流の結果とよく一致している。これは本実験で使用したノズルが間隔  $d$  で並べた2枚の平行平板で形成される形状であり、出口速度場が完全発達状態にあることと関係していると予想される。

速度ベクトルと平均流線を  $Vr=1.6$  と  $2.2$  の2種類の場合について図4に示す。ノズル下流の  $x$  位置 (噴流到達距離  $x=l_p$ ) に平均よどみ点が存在し、流線はそこで  $\pm y$  方向に分岐して分離流線が形成されるという対向噴流特有の流れ場の特徴を観察できる。  $Vr=2.2$  のとき、噴流が  $y<0$  の下壁に向かって偏向する傾向が観測され、 $y$  方向対称性が失われるという結果になった。開水路を用いたこと、そして、水深がノズル幅  $d$  に比べて十分でなかったことが原因と考えられ、この理由のために本研究における最大速度比は  $Vr=2.2$  に制限された。

$x, y$  方向速度変動rms値  $u', v'$  の等高線を調べた結果を図5に示す。速度比は  $Vr=1.6$  で、横軸の  $x$  と縦軸の  $y$  はともに  $l_p$  で無次元化してある。  $u', v'$  は  $x-y$  面内でピーク値を取る領域が大

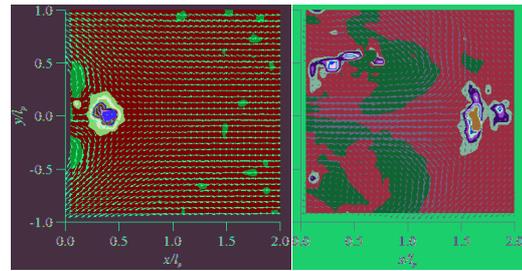


図6 瞬時よどみ領域の検出 (Vr=1.6)

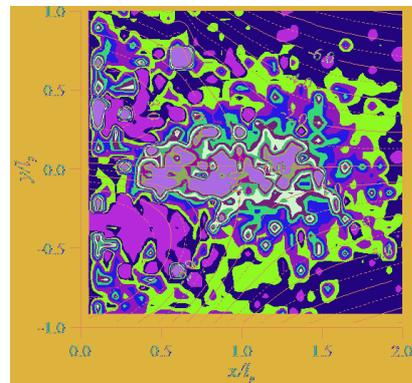
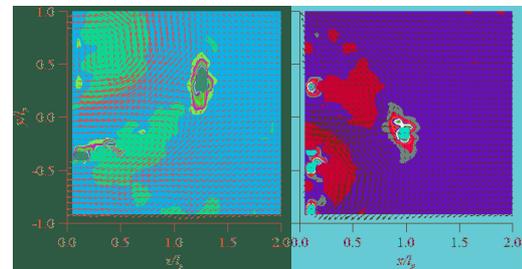


図7 平均よどみ領域 (Vr=1.6)

きく異なる。即ち、 $u'$  は噴流中心軸に沿ってよどみ点よりやや上流域において、 $v'$  は中心軸を挟んで分離流線内部の  $y>0$  と  $y<0$  の領域で線対称に、それぞれピーク領域を取るという結果になった。このような顕著な差は円形対向噴流においては見られなかった現象であり、二次元対向噴流に特有の結果である。 $u'$  のピークは瞬時よどみ点の  $x$  位置が  $x=l_p$  を境に中心軸に沿って  $x$  方向に大きく揺らぐこと、 $v'$  のピークは噴流が  $\pm y$  方向にフラッピング振動することとそれぞれ関係する。

## ②瞬時よどみ点の検出

図4の平均流線から予想されるように、よどみ点付近では速度の絶対値が小さくなるだけでなく、速度ひずみが相対的に大きくなることが考えられる。このような観測から、次の方法で対向噴流における瞬時よどみ領域の検出を試みた。

PIV で得られる二次元速度場  $(u, v)$  から変形テンソル  $S_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) / 2$  とび回転テンソル  $W_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i - \partial u_i / \partial x_j) / 2$  を算出し、高ひずみ領域識別のために、これらのノルムの差  $\|S\| - \|W\|$  を用いる。そして、高ひずみ領域の中から、速度絶対値がゼロに近づくよどみ領域を見分けるために、この差を速度ベクトルのノルム  $\|u\|$  で除し、 $P = (\|S\| - \|W\|) / \|u\|$  を用いて瞬時よどみ領域を検出することを試みた。

$V=1.6$ の場合について、 $P$ の等高線を速度ベクトルと重ねて、4種類の例を図6に示す。赤系統の等高線が本手法で識別されるよどみ領域を表している。重ねて示した速度ベクトルとの目視による対応から、本提案手法はよどみ領域を適切に検出していることが分かる。しかし、噴流が大きく偏向するとき、噴流外縁付近を誤ってよどみ領域と検出しており、今後の改良の余地がある。

瞬時の $P$ 分布を長時間平均した等高線を図7に示す。5Hzでサンプリングし、1000枚の画像から得られた平均である（平均時間は200秒）。よどみ領域が平均よどみ点を中心に主として $x$ 方向にのびていることが分かる。この結果は、噴流到達距離が時間的に大きく変動し、瞬時よどみ点の $x$ 位置がノズル出口に近い位置から $d$ の数倍程度下流の位置まで時間変化することを表す。

### ③現在進行中の実験と今後の予定

現在、図1に示した計測システムを用いて、二次元対向噴流の速度場と濃度場の同時測定実験を行っている。実験が終了次第、前節②で述べたよどみ点検出法をさらに洗練した手法を考案し、それを実験データに適用して本研究目的である速度場の時空間構造と濃度場の統計的特性との関係を調べる。

## (2) ラグランジュ手法によるスカラ乱流の確率論的モデル構築

### ① 計算準備と計算条件

FF噴流用ノズルを図8(a)に示す。二次元ノズル出口下流に対向する一対の付着壁を設け、出口と付着壁間の空間を壁で覆い二次元ダクトにする。そして、ダクトの上下端面(図の制御ポート1と2)をチューブなどで連結する。噴流がどちらかの付着壁に偏向付着すると、噴流を挟んでポート間に圧力差が現れ、この圧力差でダクト内に流れが誘起され、これが噴流を付着壁から剥がす復元力となり噴流が発振する。FF噴流は機械的可動部無しで噴流の発振を作り出すことができ、流量計や流動制御など、工業的利用価値が高い。本研究ではこのFF噴流の特性を数値解析で調べる。数値計算では、2つの制御ポートをチューブで連結する代わりに、両ポートが数値的に同一面となるように境界条件を設定する(上ポートを流出する流れ $A$ は下ポートからの流入 $A'$ となり、逆も可)。

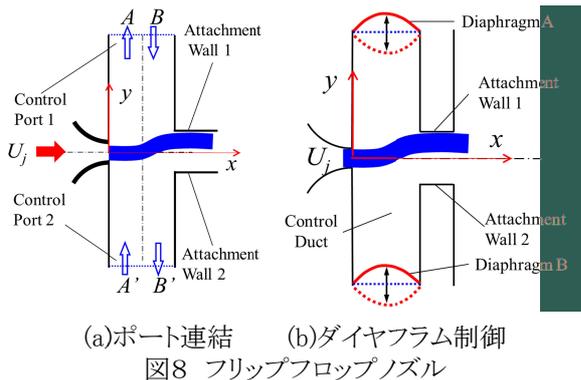


表1 計算条件

case #	$St_d$	$\Delta$	$F_{BC}$
1	$0.5St_0$	$1.07 \times 10^{-3}$	936
2	$St_0$	$2.14 \times 10^{-3}$	873
3	$1.5St_0$	$3.20 \times 10^{-3}$	851
4	$2.0St_0$	$4.27 \times 10^{-3}$	856
5	$2.5St_0$	$5.34 \times 10^{-3}$	854
6	$3.0St_0$	$6.41 \times 10^{-3}$	853
7	$3.5St_0$	$7.48 \times 10^{-3}$	853
8	$4.0St_0$	$8.54 \times 10^{-3}$	852

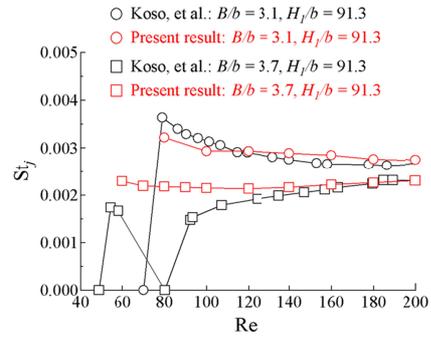


図9 噴流揺動周波数の $Re$ 数による変化

図9は噴流発信周波数の $Re$ 数による変化を高曾らによる実験結果と比較したもので、縦軸はノズル出口速度 $U_j$ と出口幅 $b_j$ で無次元化したストロハル数 $St_j$ である。 $Re < 100$ の低レイノルズ数で実験結果との若干のずれがみられるものの、本結果は $Re > 100$ の領域でよく一致している。

以上の結果を踏まえ、FF噴流の揺動周波数の外部制御に関する数値解析を行った。図8(b)に示すように、制御ポート間を連結する代わりに、ダイヤフラムを模擬した境界条件を2つのポートに与え、境界における速度を次式で定義した。

$$v_{BC}(x, t) = \pi \Delta St_d \sin\left(\frac{\pi x}{L_1}\right) \cos(2\pi St_d t) \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{B}{4St_d L_1 (H_1 - B)} \sqrt{1 + (2\pi St_d H_1 L_1)^2} \quad (2)$$

$\Delta$ はダイヤフラムの振動振幅であり、制御ダクト内での運動量保存から導いた。 $St_d$ はダイヤフラムの無次元振動周波数、 $H_1$ 、 $L_1$ 、 $B$ はそれぞれ制御ダクトの長さ、幅、付着壁間距離を表す。

表1に $St_d$ と $\Delta$ の計算条件を示す。 $St_0$ は制御ダクト端面を連結した場合のFF噴流の揺動ストロハル数であり(図9参照)、ダイヤフラムを用いた計算では、 $St_0$ の0.5倍~4.0倍の周波数でダイヤフラムを振動させ、それと同期して噴流を揺動させることを目指した。表中の $F_{BC}$ はダイヤフラムが流体に及ぼす力である。なお、レイノルズ数は $Re=100$ に固定して計算を行った。

### ② FF噴流の揺動制御に関する計算結果

ダイヤフラム振動の1周期間の噴流挙動を表1のCase 2とCase 3の場合について調べた結果を図10と図11に示す。図11から分かるように、Case 3の条件の場合については、ダイヤフラムが上死点から下死点を経て上死点に戻る1周期の間に、噴流は上壁付着から下壁付着を経て初期時間 $t=0$ の状態に戻っており、ダイヤフラム

と噴流揺動の振動周期が一致している。つまり、ダイヤフラムによる噴流揺動制御が実現されている。しかし、図10に示したCase 2の場合、ダイヤフラムの振動位相にかかわらず噴流は上付着壁への偏向を保ち続け、付着壁間の噴流揺動が見られず、外部制御が実現できていない。

Case 1~8の全計算条件について、上付着壁近傍での圧力のスペクトル分布を調べた結果を図12に示す。明瞭にみられるスペクトルピークは噴流の無次元発信周波数 $St_j$ を表し、ポート間連結時の発信周波数 $St_0$ で除して表してある。このピーク周波数が各Caseの計算条件であるダイヤフラム振動周波数 $St_d/St_0$ と一致すれば、噴流揺動の外部制御が達成されたことになる。図から、全てのCase 1~8において $St_j \approx St_d$ が達成されていることが分かるが、図10で示したように、 $St_d < St_0$ であるCase 1と2の場合の噴流揺動は上下付着壁間の片側振動である。

Case 1,2,3,5,7の5種類の条件において、制御ダクト内での上付着壁高さでの断面平均圧力 $P_U$ と下付着壁高さでの断面平均圧力 $P_L$ との圧力差 $P_U - P_L$ の時間変化をダイヤフラムが流体に及ぼす力 $F_{BC}$ の時間変化と比較した結果を図13に示す。 $P_U - P_L > 0$ のとき噴流は下付着壁偏向であり、 $F_{BC} > 0$ のとき制御ダクト内の流体は上付着壁から下付着壁に向かう力を受ける。Case 3~7において、 $P_U - P_L$ と $F_{BC}$ はほぼ位相が反転して同周期で変化することが分かり、ダイヤフラムの振動と噴流揺動の間に良好な同期がとられていることが分かる。一方、Case 1と2の場合、 $P_U - P_L$ は常時負値をとり、噴流は上付着壁への偏向を保ち、 $F_{BC}$ の時間変化と比べて周期はほぼ一致している。しかし、 $F_{BC}$ の振幅は小さく、そのため、片側に偏向している噴流を引き離しもう一方の側に偏向させるには不十分であると推測される。式(2)のダイヤフラム振動振幅 $\Delta$ を表す式を運動量理論から導く際、ダクト内側壁に働く粘性力を無視している。しかし、非常に遅い振動であるCase 1, 2の場合、粘性力がダイヤフラム振動による慣性力と比べ無視できなくなり、このため $F_{BC}$ の大きさが粘性力に打ち勝つのに不十分となり、完全な噴流揺動が得られなかったと予想される。今後、ノズル幾何形状で定まる $St_0$ よりも遅い周波数で噴流を振動させるとき、ダイヤフラム振動振幅の式(2)を粘性力を考慮したより洗練された式に改善していく必要がある。

### ③ 現在進行中の数値解析と今後の予定

現在、揺動噴流におけるスカラ場の特徴を調べるために、流れの運動方程式にスカラ物質の拡散方程式を付加した数値解析を行っている。利用できる計算機資源で実行可能な計算格子解像度の関係で、物質の分子シュミット数は1程度のオーダーに制限した。より大きなシュミット数のスカラ場解析はラグランジュ的な手法を用いる必要があり、その計算準備も進行中である。今後、解析で得られた結果を整理し、研究目的である揺動噴流中でのスカラ場の空間構造の特性を調べ、確率論的モデル開発につなげていきたいと考えている。

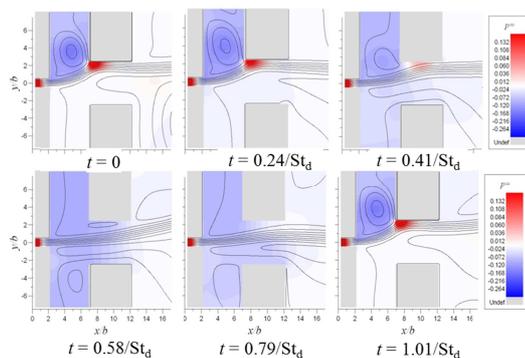


図10 ダイヤフラム1周期間の噴流揺動(Case 2)

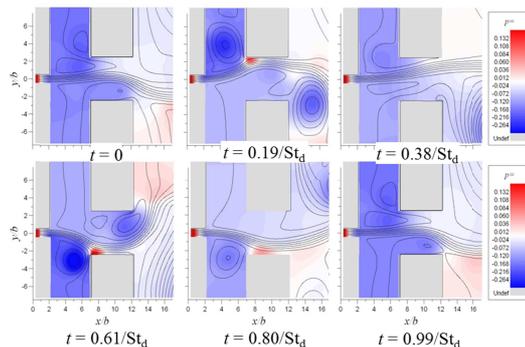


図11 ダイヤフラム1周期間の噴流揺動(Case 3)

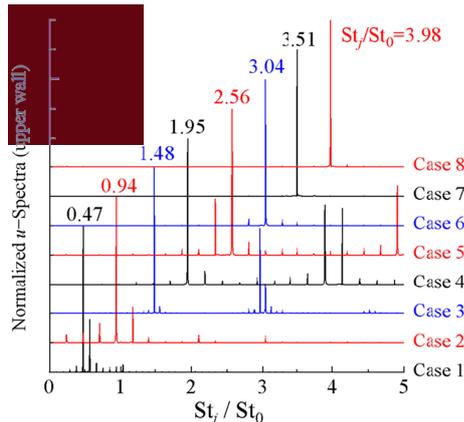


図12 噴流振動のピーク周波数

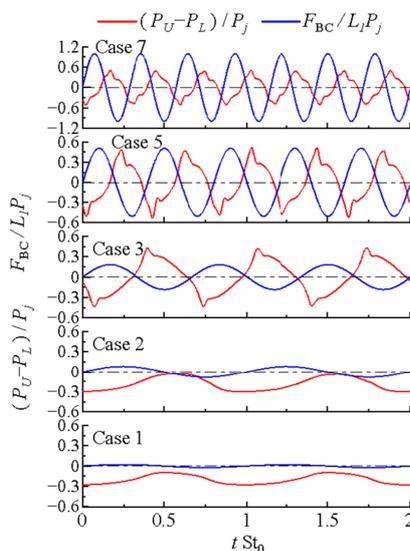


図13 噴流圧力差とダイヤフラムによる外力の時間変化

## 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2件)

- ① K. Fujii, H. Tsunoda, Numerical studies for the oscillatory control in a flip-flop nozzle jet, Proceedings of 4th ICJWSF, 査読有, 2013年9月18日, Nagoya.
- ② 角田 博之, 保坂 征志, 天野 聖也, 密度界面と干渉する円形渦輪の可視化 - 軸対称面と横断面の同時観察 -, 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol. 31, 2011, 21-26.

[学会発表] (計7件)

- ① 角田 博之, 中澤 健治, OpenFOAMを用いたヒービング振動翼の後流渦構造に関する数値解析, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会, 2014年3月15日, 農工大.
- ② 角田 博之, 仲俣 慶太郎, MPS法による開放型水車バケットの流れと流体力に関する数値実験, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会, 2014年3月15日, 農工大.
- ③ 角田 博之, 堀口 聡, 矩形断面を有するS字形状管内乱流のPIV計測, 日本機械学会関東支部山梨講演会, 2013年10月26日, 山梨大, 日本機械学会2012年度年次大会, 2013年10月26日, 山梨大.
- ④ 角田 博之, 天野 聖也, 森 康平, 円形渦輪と密度界面との干渉に伴う密度の異なる2流体の混合過程について, 日本機械学会関東支部山梨講演会, 2012年10月27日, 山梨大.
- ⑤ 角田 博之, 藤井 勸人, 二次元振動噴流の発振制御に関する数値解析, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大.
- ⑥ 角田 博之, 藤井 勸人, 直接数値計算による二次元フリップフロップ噴流の流動解析, 日本機械学会関東支部山梨講演会, 2011年10月22日, 山梨大.
- ⑦ 角田 博之, 天野 聖也, 密度跳躍界面と干渉する円形渦輪の変形について, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月14日, 東工大.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ms.yamanashi.ac.jp/lab/tsunoda/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

角田 博之 (TSUNODA, Hiroyuki)  
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号：10207433