

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560152

研究課題名(和文) 対向円形噴流における揺動機構の解明とDNS/PDF法による数値解析

研究課題名(英文) Investigation and numerical analysis based on DNS/PDF method on the jet meandering in a round counter-jet

研究代表者

角田 博之(TSUNODA HIROYUKI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：10207433

研究成果の概要(和文)：一様流に対向して噴出される円形噴流について、速度場と濃度場の同時計測を行い、対向噴流の強い混合特性を明らかにした。また、対向噴流の揺動メカニズムを調べるために、軸対称面における速度場と軸に垂直な断面における濃度場の時間遅れ計測を行った。数値解析については、対向噴流と同様に噴流揺動が現れるフリップフロップ噴流を調べた。数値解法にはマルチグリッド法を取り入れ、並列化による高速化を図った。解析の結果、実験と定量的に一致する噴流揺動が現れ、計算法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：It was found by the simultaneous measurements on the velocity and concentration fields of matter that a round jet injected into a counter uniform flow possessed strong mixing ability. Time-delayed measurements between the velocity field in an axisymmetrical plane and the concentration field in a cross-sectional plane of the jet were also conducted to elucidate the physical mechanism causing the jet wandering. Furthermore, the flip-flop jet which has a similar jet wandering as the counter-jet was investigated numerically. The multi-igrid method, together with parallelization, was incorporated in numerical analysis to accelerate the calculation speed. The simulated flow showed a jet wandering matching quantitatively with the experimental results, confirming the validity of the calculation method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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、噴流自励振動

1. 研究開始当初の背景

一様流に対向する円形噴流(以後、対向噴流と呼ぶ)は、静止流体中での噴流に比べ高い混合促進効果をもつ。このため、火炎安定化に代表される燃焼促進、河川や海洋中での汚染物や温排水の拡散促進などへの応用が考えられ、工学的にも工業的にも重要な研究課題である。

対向噴流の特徴はその強い不安定性にあり、噴流の瞬時到達点が低い周波数で軸方向にも半径方向にも大きく揺動する大規模変動を伴い、この揺動が対向噴流の強い混合促進に関係する。申請者は、過去、噴流軸に垂直な断面内での濃度場の特性を調べ、濃度場重心の噴流軸周りに変動が通常噴流に比べ著しく大きくなり、さ

らに、重心の時間変動に低周波の大規模変動が存在することを確認した。しかし、揺動の発振メカニズムや速度比との関係は未だ不明であり、それらの解決が課題となっていた。

2. 研究の目的

本申請課題では、第一の研究目的として、噴流揺動の発生機構を解明することを目指した。対向噴流の瞬時流線には、噴流流体と対向一様流とを隔てる分離流線が存在し(図1参照)、これがキャビティ噴流発振と同様な役割を果たすことにより、発振現象が現れると予想される。この推測を裏付けるためには、不規則変動する瞬時分離流線と噴流揺動運動との相関関係を調べる必要がある。そこで、分離流線を調べるためのPIV計測と噴流断面揺動を調べるためのPLIF計測との同時測定を行い、両者の相関を調べることにした。

第二の研究目的は、速度場と物質拡散による濃度場の数値解析を行い、揺動機構の解明に役立てるための数値解析モデルを確立することである。数値解析には、ナビアストークス方程式の直接計算(DNS)と確率密度関数法(PDF法)を併用し、前者を速度場の計算に、後者をスカラー拡散場の数値予測に使用する。

3. 研究の方法

(1) 瞬時分離流線と断面濃度場の同時計測

図2に実験装置と計測システムの概要を示す。実験には、高さ198mm、幅194mm、長さ2000mmの開放型水路を用い、水深を180mmに保った。水路断面ほぼ中央に出口径 $d=5\text{mm}$ の円形噴流ノズルを一様流と対向する形で設置した。座標系はノズル出口を原点として、下流方向を x 、鉛直、水平方向をそれぞれ y 、 z とする。水路一様流の平均速度を $U_0=-0.17\text{m/s}$ に固定し、実験では噴流出口速度 U_1 との速度比 $Vr=U_1/|U_0|$ を変化させた。

計測システムは本申請研究で完成させたものであり、粒子画像流速計(PIV)による速度場計測とレーザー誘起蛍光法(PLIF)による噴流軸断面濃度場計測との同時測定を行う。計測システムには、2組のパルス発光デュアルYAGレーザー(出力15mJと50mJ)と2台のCCDカメラを利用し、それぞれをPIVとPLIF計測に用いた。2台のレーザー発光とカメラ撮像の同期にはパルスジェネレータを用いた。PIVによる速度計測では、シート面を

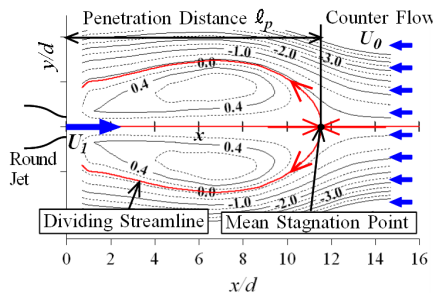


図1 対向噴流模式図

x - y 面に一致させ、PLIFによる断面濃度計測では、シート面が y - z 面と一致するように照射した。YAGレーザーの発光波長帯(532nm)付近に励起波長を持つ蛍光染料(ローダミン6G)の水溶液を拡散物質として用い、噴流中に含まれる染料からの蛍光画像をCCDカメラで撮像した。水路外部からアクリル側壁を通しての撮影となるため、プリズム型容器を側壁上に設置し、屈折の影響を最小化した。また、斜めからのアオリ撮影で生じる画像の歪みを補正するために、基準格子画像を用いたカメラ校正を行った。

(2) 対向噴流の数値解析モデルの確立

対向噴流による流れの計算には、ナビア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た。噴流のDNS解析は、圧力項の扱いに関していくつかの手法が考案されているが、本研究ではフラクショナルステップ法を基本とする圧力修正法を取り入れた。プログラムの開発と検証を行うために、対向噴流場の計算に先立つ第一段階として、本研究では、対向噴流と同様に噴流の揺動が顕著に表れるフリップフロップ噴流を対象として流れ場の解析を行った。

濃度場の数値予測には確率密度関数(PDF)法を採用した。液体中における物質拡散場であることから、分子シミュット数が大きく、濃度場の空間スケールは乱流速度場の最小スケール(コルモゴロフスケール)よりもさらに小さくなる。このため、直接計算による予測は困難と予想され、モデル計算が不可欠である。PDF法は一種のメッシュレス計算手法であり、化学反応項や乱流輸送項に対して勾配拡散などの現象論的モデルが不必要であるという目覚ましい特徴をもつ。モデル化を要する項はスカラー物質の分子混合項であり、伊藤型の確率微分方程式を基礎とした確率過程としてモデル化を行う。DNSで得られた速度場を利用してラグランジュ的に仮想粒子を動かし、分子混合項を上記モデルで与えた。

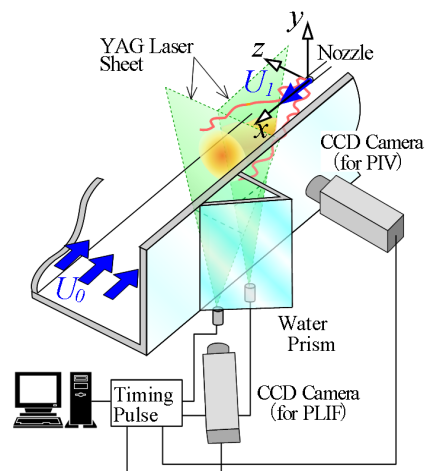


図2 PIV-PLIF同時計測システム

4. 研究成果

(1) 対向円形噴流によるパッシブスカラー拡散場の速度・濃度結合統計量の特性

① 研究の目的と実験方法概要

対向噴流におけるパッシブスカラー物質の拡散場を調べることを目的とし、図2に示したPIV・PLIF同時計測システムを改良し、速度場と濃度場を同一のx-y面内で同時測定した。これにより、軸方向ならびに半径方向の物質乱流フラックスの特性を示すとともに、よどみ点近傍での速度・濃度結合確率密度関数の分布を調べることで、対向噴流特有の流れ場の特性が濃度場の変化に及ぼす影響についても明らかにした。

② 実験結果と考察

本計測システムで得られた速度・濃度同時計測結果の例として、 $Vr=2.4$ の場合に、瞬時速度ベクトルと瞬時濃度の等高線を重ねた連続画像を図3に示す。4枚の画像の時間間隔は0.2sであり、本速度比に対する平均よどみ点は $x/d=4.9$ にある。これらの図から、速度ベクトルと濃度の同時瞬時場が良好に捉えられていることが分かる。また、瞬間的な噴流の到達距離が画像間で大きく異なっており、よどみ点近傍での噴流流体と対向流体との間欠生起を確認できる。

$Vr=2.4$ と7.8の場合について、軸方向と半径方向の物質乱流フラックス \overline{uc} ならびに \overline{vc} の等高線をノズル出口速度 U_0 と出口濃度 C_j で無次元化して図4と図5に示す。図中には軸対称性を仮定して求められた平均流線が破線で重ねて描かれており、分離流線(図1参照)は太実線で示してある。 \overline{uc} は噴流出口孔からよどみ点を経て分離流線に沿った対向噴流の発達領域のいたる所で正の値を保つことが分かる。また、 $Vr=2.4$ の場合におけるよどみ領域での \overline{uc} の極大域は分離流線に沿って半径方向に延びることも図から確かめることができる。 \overline{vc} の等高線についてみると、ややノイズが大きく不明瞭であるが、噴流せん断層の内部だけでなく、分離流線外周の対向一様流の湾曲域において値が大きくなる領域が現れていることが分かる。瞬時濃度場(図3)からも分かるように、噴流先端部は半径方向にも大きく揺らぐことから、この揺らぎに伴う物質の半径方向輸送が関係していると考えられる。

x向瞬時速度 U^* と瞬時濃度 C^* の間の結合確率密度関数 $P_{U^*C^*}$ ならびに瞬時速度 V^* と C^* の結合確率密度関数 $P_{V^*C^*}$ を求めた。図6は $Vr=2.4$ の場合について、 $P_{U^*C^*}$ の等高線を中心軸上 $x/l_p=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の5点の変化として示す。PDFは面積が1となるように正規化されている。また、各点においての U^* と U^* の平均値 U, C の値が図中に一点鎖線で示されている。 $x/l_p=0.8$ 付近から、濃度ゼロで速度が負の領域に等高線が現れ、対向流体を検出する確率が増し始めていることが分かる。即ち、このx位置で速度場と濃度場が共に間欠的になり始めているといえる。下流にいくに連れ、対向流体を検出する確率が

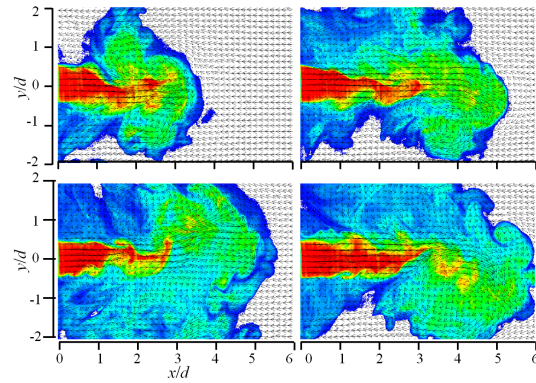


図3 速度ベクトルと濃度等高線の瞬時画像

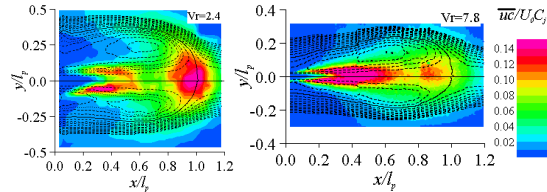


図4 軸方向乱流フラックスの等高線と流線

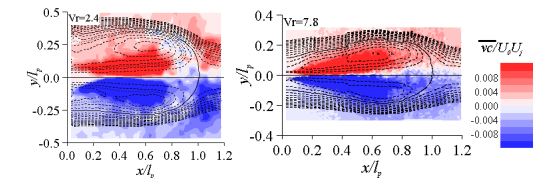


図5 半径方向乱流フラックスの等高線と流線

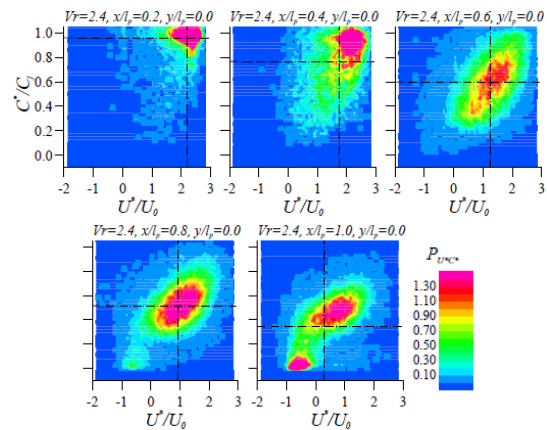


図6 瞬時変動 U^* と瞬時濃度 C^* の結合 pdf 等高線

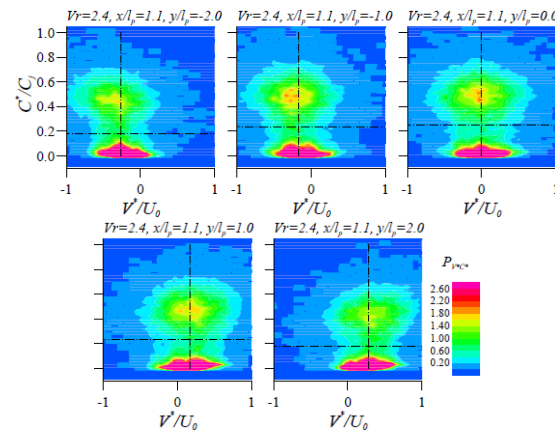


図7 瞬時変動 V^* と瞬時濃度 C^* の結合 pdf 等高線

増大し、 $x/l_p=1$ において、濃度と速度が共に正の噴流流体に相当する領域が第1象限、対向流体に相当する領域が第3象限に位置するようになり、そのため相互相関 \overline{w} が大きな値をとる。第1象限と第3象限の出現確率は、それぞれ約0.41、約0.37で、全確率の8割程度を占めた。

平均よどみ点よりも下流の $x/l_p=1.1$ の x 断面において、 $P_{V^*C^*}$ の y 方向変化を調べた結果を図7に示す。 y が大きくなるにつれ、噴流流体に起因する高濃度域での分布中心が第1象限(または、第2象限)に移行することが分かる。また、濃度ゼロの第3、4象限の出現確率がより大きいことから、この領域での平均速度 V は主に対向一様流の速度で決定され、高濃度域に対応する噴流流体は対向一様流に比べ平均的により大きな速度で半径方向に移流するといえる。この特徴は対向噴流の半径方向への揺動現象と深い関係を持つと考えられる。

③まとめ

同時計測された対向噴流の瞬時速度ベクトル場と瞬時濃度場を比較することにより、本計測の妥当性が示された。また、噴流中心軸上の下流域において、軸方向への物質乱流フラックスに現れるよどみ点近傍においての極大領域は平均分離流線に沿って半径方向に分布し、一方、半径方向乱流フラックスは分離流線外周の対向一様流の湾曲域で増大する傾向があることが確かめられた。最後に、 x, y 方向瞬時速度 U^*, V^* と瞬時濃度 C^* の結合PDFの変化を調べることで、速度場と濃度場に対向一様流による間欠性が現れる x 位置が明らかとなった。また、軸方向ならびに半径方向物質乱流フラックスのよどみ点付近における変化を結合PDFを用いて説明することができた。

(2) 対向円形噴流における速度場と断面濃度場の時間相関

①研究の目的と実験方法概要

対向噴流の揺動機構を明らかにすることを目的として、噴流の軸対称面内での瞬時速度場と噴流断面内での瞬時濃度場の関係を調べた。前者から瞬時分離流線形状の時間変化、後者から噴流重心の時間変化を求め、両者の測定を適当な時間遅れを設けて行うことによって互いの相関を算出し、分離流線形状の変化と噴流揺動との関係を調べる。実験には図2に示した計測システムを利用した。PIV用とPLIF用のそれぞれについて、2台のレーザ発光のタイミングと2台のCCDカメラの撮像タイミングをパルスジェネレータからの外部トリガを介して図8に示すように与えることにより、PIVによる速度場計測時間から τ の遅れ時間を設けてPLIFによる断面濃度計測を行うことができた。なお、両者のサンプル周期は $T=0.4s$ とし、撮影画像枚数は450枚とした。

②実験結果と考察

速度比 $V_r=7.4$ の場合について、実験で得られ

た450枚の瞬時速度ベクトルと瞬時断面濃度等高線の中の2枚のサンプルを図9に示す。本速度比における平均よどみ点距離が $l_p/d=19$ であったことから、速度計測 x 範囲は $6.0 \leq x/d \leq 13$ 、断面濃度計測 x 位置は $x/d=15.4$ とした。なお、計測 x 範囲での平均流速 U を考慮し、遅れ時間は $\tau=0.11s$ とした。図から、速度ベクトルに現れる噴流の y 方向への振れと瞬時断面濃度の最高濃度 y 位置が良く対応していることが分かる。今後、速度ベクトル場から分離流線を推定し、断面濃度場重心との関係を詳細に調べる必要がある。

図10は450枚の瞬時画像の平均から得られた時間平均速度ベクトルと平均濃度等高線である。断面平均濃度の等高線が円形を保っていることから、時間平均場が良好に軸対称性を有することが分かり、これは本計測の信頼性も表す。

③まとめ

本研究で考案したPIVとPLIFによる速度と濃

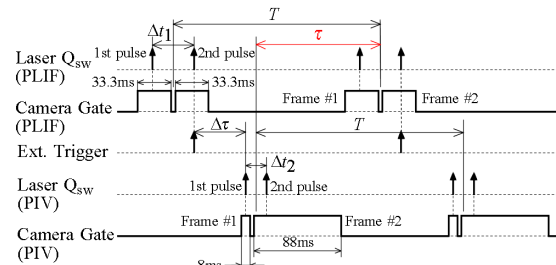


図8 タイミングチャート

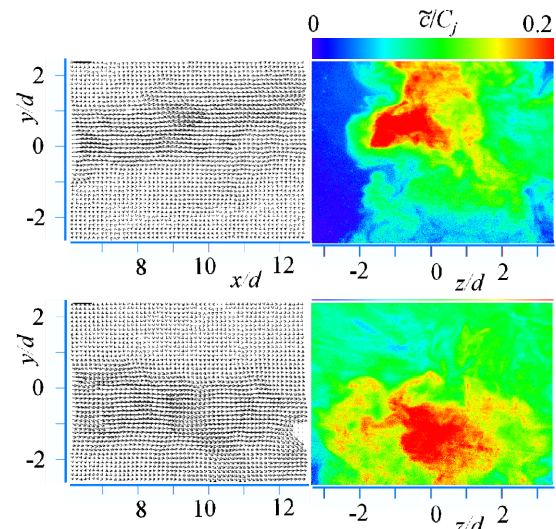


図9 瞬時速度ベクトルと断面濃度場

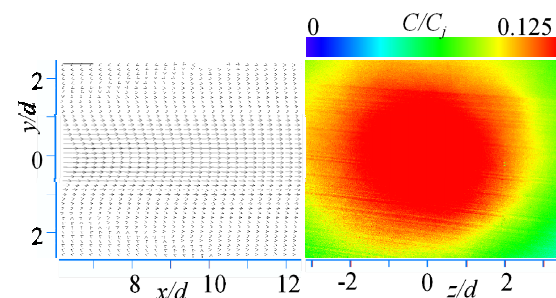


図10 時間平均速度ベクトルと断面濃度場

度の計測システムを用いて、軸対称面における速度場と軸に垂直な断面における濃度場の計測を行った。両者の測定に時間遅れを設けることにより、噴流の揺動に対応した瞬時速度ベクトルと断面濃度場が得られ、計測の信頼性を確認できた。今後、データ解析をさらに進め、速度場の瞬時分離流線と瞬時断面濃度場の重心との相関を調べることにより、研究目的である揺動機構の解明を目指していく予定である。

(3) NS式の三次元直接計算によるフリップフロップ噴流の数值解析

①研究の目的と計算方法概要

フリップフロップ噴流(FF噴流)は、図11に示すような二次元ノズル出口に制御ポートと対向する一対の付着壁を装着して形成される噴流である。二次元噴流の上面側と下面側は制御ポート1と2を通してダクトで連結される。ポート下流には対向付着壁1と2を置く。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誘導される流れが噴流を付着壁から剥がす復元力をもち、噴流が発振すると考えられるが、詳細な発振メカニズムは不明である。FF噴流は機械的可動部無しで噴流の発振を作りだすことができ、流量計や流動制御など、工業的利用価値が高い。しかし、付着壁の間隔やノズルからの距離などのアライメントの僅かな違いが発振に影響を及ぼすことから、実験的な調査は困難であった。そこで、本研究ではこのFF噴流の特性を数值解析で調べることを目的とする。また、FF噴流は下流域で顕著な噴流揺動を呈することから、対向噴流のような揺動が支配的な噴流に対するスカラー混合モデルを構築する上での好素材の流れでもあるので、対向噴流の数值解析を行う前段階として本流れの数值解析を行うことにした。

数值解析法には差分法を用い、三次元ナビアーストックス方程式(NS式)を直接計算した。NS式の流れ項と粘性項の差分には二次精度の中心差分を用い、流れ項は不等間格子に適合した完全保存形とした。時間積分には部分段階法を用い、各時間ステップで連続式を満たすように圧力を修正した。流れ項は二次精度アダムス・バッシュフォース陽解法、粘性項はクランク・ニコルソン半陰解法でそれぞれ時間積分した。

計算領域と境界条件を図12に示す。簡単のために x - y 面のみを示す。ノズルスリット幅を単位長さ($b=1$)として、各寸法を無次元表現する。黒塗り領域は固体壁で、噴流は長さ $L_1=2$ のスリットから噴出され、 $L_2=5$ だけ下流位置に間隔 $B=5$ で対向付着壁(幅 $L_3=5$)を設ける。噴流発達領域の x 方向、 y 方向そして z 方向長さはそれぞれ $L_4=120$ 、 $H=130$ 、 $D=65$ とした。境界条件は、固体壁および発達域側方境界(図12中の黒実線)をすべり無し境界とし、制御ポートと連結ダクトに相当する領域の側方境界(緑実線)を周期境界とした。後者を周期境界とすることにより、上下2

つの側方境界は数値的には連結する。ノズル入口の流入境界(青実線)条件は $U=1$ の一様流入で与え、発達域下流の流出境界(青実線)条件は渦の自然な放出が得られるようにゼンマーフェルト放射条件とした。計算格子は壁近くを密とする不等間直交格子とし、 x,y,z 方向メッシュ数は $228 \times 192 \times 97$ 。レイノルズ数は $Re=Ub/\nu=100$ 、無次元時間ステップは $\Delta t=0.05$ とした。

連立方程式の数值解法には、係数行列要素の大部分がゼロのスパース行列であることから

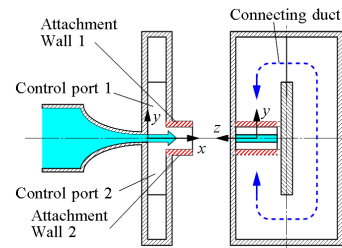


図 11 フリップフロップノズル正面図と側面図

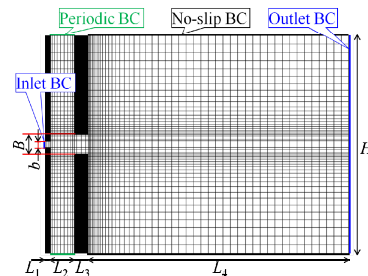


図 12 計算領域、計算メッシュと境界条件

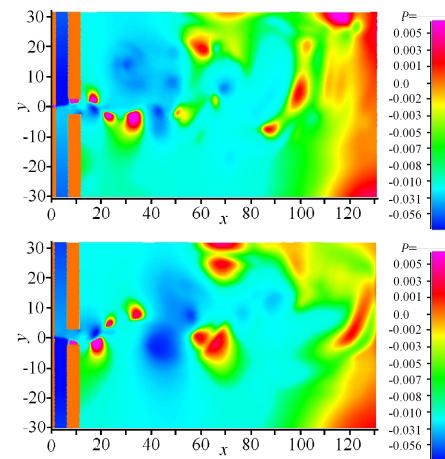


図 13 圧力等高線(上:上壁付着, 下:下壁付着)

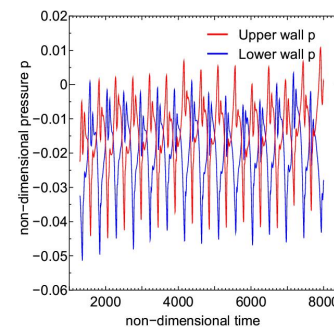


図 14 付着壁上の壁面圧力時間変化

自乗共役勾配安定法(BiCGSTAB法)を採用し、マルチグリッド法を前処理に用いることで反復回数の低減を図り、さらにOpenMPに基づく並列化を適宜取り入れることで計算時間の大幅な短縮に成功した。

②計算結果と考察

圧力等高線を図13に示す。上図は噴流が上壁に付着した瞬間、下図は下壁に付着した瞬間の例であり、暖色系が正圧、寒色系が負圧を表す。圧力等高線からは流れの様子を知ることが難しいが、せん断層に沿って並ぶ圧力極値域の分布から、噴流が上・下付着壁の間でスイッチングすることにより、下流域で大規模な噴流の揺動が現れていることを観察できる。また、噴流のスイッチングに応じて、制御ダクト内の噴流上下空間に圧力差が生じている様子も確認できる。

上・下付着壁の中央点における壁面圧力の時間変化を調べた結果を図14に示す。壁面圧力には明確な周期変動が存在し、上・下間で位相が反転している。この図から、数値計算による本流れが発振を起していることが分かり、周期境界条件を与えることで制御ポート間を仮想的に連結した効果を確認できる。この発振周期は無次元時間でおおよそ $T=470$ であり、ストローハル数は約0.0022となった。この値はFF噴流の実験結果とよく一致している。

③まとめ

NS式の直接計算法でFF噴流を数値解析するプログラムコードを開発した。マルチグリッド法や並列化などで計算手法を工夫することで、スパコンに比べて演算性能が圧倒的に劣るPCでも、低レイノルズ数に限れば、十分、三次元流れの実用計算が可能であることを実証できた。今後は、付着壁間距離やダクト長さなどの計算条件を変化させてデータを蓄積し、FF噴流の発振メカニズムを明らかにすることを目指す。さらに、計算で得られた速度場を利用して、スカラ拡散場のラグランジュ的計算を行い、噴流揺動が支配的な流れにおいてのスカラ拡散モデルを構築することを行っていく予定である。また、ここで得られた流れ解析に関する技術的知見を応用して、主要目的である対向噴流拡散場の数値解析の実現を目指していきたい。

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 角田博之、一様流に対向する円形噴流によるパッシブスカラ拡散場の速度・濃度結合統計量の特性、日本機械学会論文集(B編)、査読有、77巻、2011、529-536。
- 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、可視化情報、査読無、30巻、2010、397-400。

[学会発表] (計6件)

- ① H. Tsunoda、Experimental Study on Passive Scalar Diffusion in a Round Counter Jet by a Combined PIV and PLIF Measurements, 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2010年12月8日、Auckland.
- ② 角田博之、手塚元志、一様等方乱流中における微細気泡のラグランジュ的拡散解析、日本機械学会山梨講演会、2010年10月23日、甲府。
- ③ 角田博之、砂山邦和、角部はく離と自由表面再付着を伴う二次元壁噴流の研究、日本機械学会山梨講演会、2010年10月23日、甲府。
- ④ 角田博之、二次元オフセット噴流と自由表面との干渉に関する実験的研究、日本機械学会2009年度年次大会、2009年9月14日、盛岡。
- ⑤ 角田博之、保坂征志、周方向不安定性による円形渦輪の変形に関する実験的研究、日本機械学会山梨講演会、2009年10月24日、甲府。
- ⑥ 角田博之、一様流に対向する円形噴流拡散場における速度・濃度結合統計量の特性、日本機械学会2008年度年次大会、2008年8月6日、横浜。

[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・大学院医学工学総合研究部・
准教授
研究者番号：10207433

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし