

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05789

研究課題名(和文) フリップフロップノズルを利用した流動制御器の開発と対向噴流のよどみ点制御への応用

研究課題名(英文) Development of flow control device using flip-flop nozzle and its application to stagnation point control of counter jet

研究代表者

角田 博之 (TSUNODA, Hiroyuki)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10207433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：フリップフロップノズル(FFN)にプラズマアクチュエーター(PA)を組み込んだ流体制御デバイスの開発ならびに本デバイスを利用した円形対向噴流の動的制御を目的として研究を行った。PA組み込みFFNによる噴流の発振を調べるために、CFD解析を行った。その結果、噴流発振に必要なPA供給運動量の大きさが明らかとなった。対向噴流の動的制御のために、音波による対向噴流制御の実験を試みた。その結果、音響周波数や対向噴流の速度比に依存して、噴流到達距離の変化が見られた。しかし、音波で与えられる攪乱強さは対向噴流の発達に顕著な影響を及ぼすには十分でなく、今後、流体制御デバイスの開発が急がれる結果となった。

研究成果の概要(英文)：Research was conducted with the aim of developing a fluid control device incorporating a plasma actuator (PA) in a flip-flop nozzle (FFN) and controlling circular counter jet using this device. CFD analysis was carried out to investigate whether the jet ejecting from FFN incorporating PA oscillates or not. As a result, the magnitude of PA supplied momentum required for the jet oscillation was found. In order to dynamically control a counter jet, an acoustic excitation of the jet was attempted experimentally. It was found that a change in jet penetration distance was observed depending on the acoustic frequency and the velocity ratio of the counter jet. However, the disturbance intensity given by sound waves was not sufficient to exert a remarkable influence on the development of the counter jet and thus the development of fluid control device using FFN incorporating PA is urgently required in the future.

研究分野：工学

キーワード：対向噴流 流体制御 フリップフロップノズル プラズマアクチュエーター

1. 研究開始当初の背景

高応答で機械的可動部が無い流体制御デバイスとして、プラズマアクチュエーター(PA)は1998年に初めて考案され、以来、数多くの論文が国内外で発表されている。PAは翼のはく離制御や円柱効力低減などで良好な結果を示し、実用化に向けての期待も高まっている。しかし、その運動量(衝撃力)は比較的小さく、高圧流れを制御することは現段階で困難であり、適用例は大気圧下の外部流れに限られている。そこで、PAの誘起流れをトリガにしてより高運動量の制御流を得ることが当初の研究背景であった。また、もう一つの課題として、対向噴流の能動制御を挙げた。対向噴流は静止流体中の通常噴流に比べて高い混合拡散能力を有するが、その強い不安定性のためにこれまで流動制御を試みた例がなかった。この流動制御が当初の第二の研究背景であった。

2. 研究の目的

PAの運動量を増幅する流体制御デバイスの開発を第一の研究目的とした。この手段として、PAと同様に可動部が無いフルイディック素子であるフリップフロップノズル(FFN)を利用することにした。FFNから連結チューブを取り除き、2枚のPAの誘起流れをトリガにして噴流を自励振動させ、その流れを流体制御に利用することを考えた。

第二の目的は一様流に対向する円形噴流の動的制御である。先に述べたデバイスによる対向噴流制御を最終目的として、まずは音響的攪乱に対向噴流に印可したときの噴流特性を調べることにした。

3. 研究の方法

(1) FFNを利用したPA増幅流体制御デバイスの開発と検証について

ノズル形状ならびにPA誘起流れの運動量や設置位置などのパラメータを変化させた数値計算を行い、噴流発振の高速応答に最適なノズル形状を決定するとともに誘起流れの運動量と噴流発振周波数の関係を明らかにする。数値計算と並行して、流体制御デバイスの設計と製作を行う。デバイス入口に供給する噴流の圧力を変化させ、制御器内部および出口部の静圧分布の測定とPIVによる速度場の測定を行い、開発した流体制御デバイスの有効性を明らかにする。

(2) 対向噴流の能動制御について

円形ノズルの外周に同軸で環状ノズルを設け、スピーカーからの音波を環状ノズルに供給して、フィルム状のかく乱を噴流に加える実験を行う。対向一様流中の噴流の平均の貫通深さは噴流出口速度と一様流速度の速度比で決まるので、速度比を変えて実験を行い、ノズル出口において噴流外周に加える周期的なかく乱の強さや周波数がよどみ点領域の動的特性に及ぼす影響を系統的に調べる。これらの実験により、PAを利用した流体

制御デバイスを用いた対向噴流制御に対する基礎的データを得る。

4. 研究成果

(1) フリップフロップ噴流における噴流発振制御に関する数値解析^④

① 緒言

PAは流動制御デバイスとして注目され、翼の剥離抑制などで成功を収めている。しかし、PA誘起流れの瞬時運動量は一般に小さいため、その利用は大気圧下の外部流れに限られる。本研究では、噴流自励振動素子として知られるFFN噴流にPAを組み込むことで誘起流れの運動量を増幅する流体制御デバイスの開発を最終目標とする。FFN噴流は制御ポートと対向付着壁を備えた二次元ノズルにおいて、制御ポート間をダクトで連結することで機械的可動部なしで自励振動する噴流である。しかし、発振周波数は付着壁間距離やダクト長などの形状で定まり、周波数を可変できないことが流動制御への応用の障壁となっている。本研究はFFノズルの制御ポート間を連結する代わりに、PAを使って噴流側方から周期的に運動量を供給することで噴流発振の実現を目指すものである。初段階の研究として、噴流発振に必要な運動量供給量をCFD解析で調べることを目的とする。

② 解析手法と解析条件

図1に解析領域と境界条件を示す。計算格子には不等間隔スタガード格子を採用した。図に示すように、固体壁および発達領域におけるy方向側方境界(黒破線)を滑り無し境界条件で与え、制御ポート側方境界(点線)を勾配ゼロ条件で与えた。bとU_jに基づくレイノルズ数をRe=100に固定した。PAによる誘起流れを模した可動壁は図中の拡大図の赤色実線で示す位置に設置し、二次元噴流の両側面から運動量を供給できるように対向させた。上下可動壁速度V_{w1}及びV_{w2}をそ

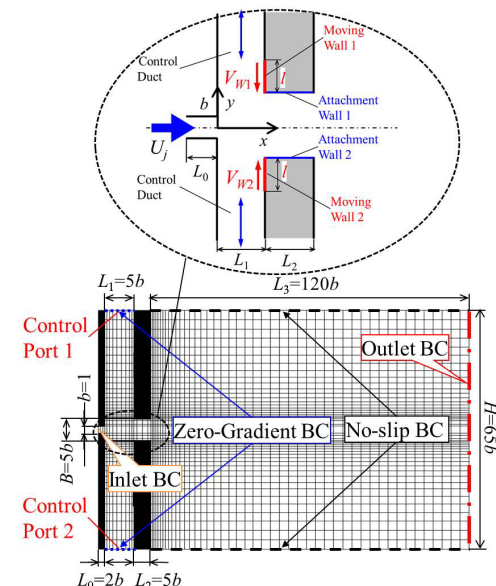


Fig. 1 Computational grid and boundary conditions for FF-jet with moving

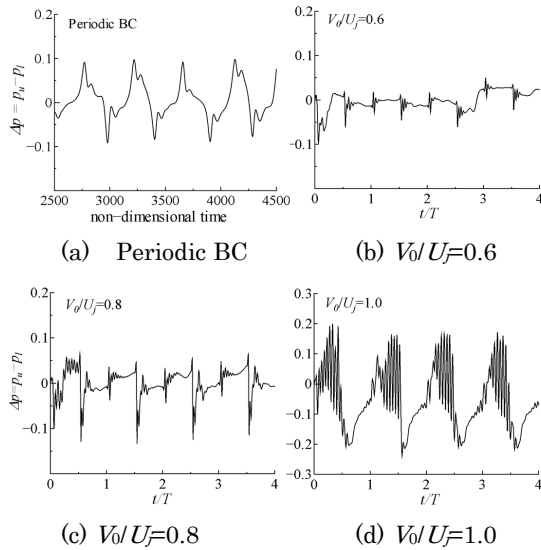


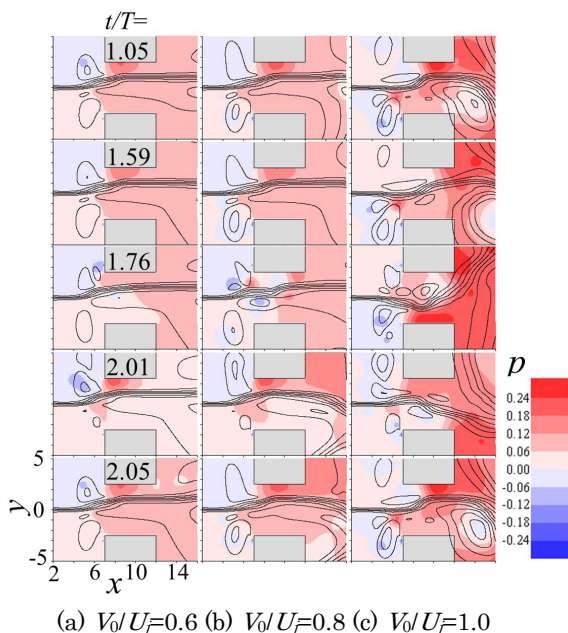
Fig. 2 Time variation of the pressure difference between two facing attachment walls

れぞれ位相を半周期ずらして与えることで噴流両側面に周期的に運動量を供給した。

③ 計算結果

まず、可動壁を設けず、図1に示す側制御ポート1及び2の境界条件を周期境界条件に変え、上側制御ポート1と下側制御ポート2が仮想的に連結した流れを計算し、本研究で採用したノズル形状で実現される噴流自励振動の周波数を調べた。図2(a)は上下付着壁1及び2の中心点での圧力の差 $\Delta p = p_u - p_l$ の時間変化を示す。 Δp は周期的に変化しており、噴流が自励振動していることが分かる。噴流振動の無次元周波数は $f_{in} = 0.0023$ となった。

次に、制御ポートの境界条件を勾配ゼロ条件に変えた計算を行った。可動壁を設けることで、自励振動と同じ周波数の噴流振動が得られるかどうかを調べるために、可動壁の移



(a) $V_0/U_j=0.6$ (b) $V_0/U_j=0.8$ (c) $V_0/U_j=1.0$
Fig. 3 Pressure contours and stream lines of the oscillating jet

動周期は $T=1/f_{in}$ で与えた。図2(b)~(d)はそれぞれ、 $V_0/U_j=0.6, 0.8, 1.0$ の可動壁速度条件で得られた Δp の時間変化の結果であり、横軸は無次元時間 t を周期 T で除して表した。また、各 V_0 条件の場合の流線と圧力コンターを図3(a)~(c)に示す。 $V_0/U_j=0.6$ の条件では、上下付着壁の圧力差変化が小さく、図3(a)から分かるように、可動壁励起を加えても噴流は上側付着壁から離れることはなく噴流発振は見られなかった。 $V_0/U_j=0.8$ の条件では、圧力差に周期性が現れ、図3(b)から分かるように、上側付着壁に偏向した噴流は上側可動壁からの運動量供給によって壁を離れた。しかし、下側付着壁まで噴流が偏向するには至らず、このため下側可動壁からの運動量供給により上側付着壁に再び戻るといった結果となった。付着壁による運動量供給が最大の $V_0/U_j=1.0$ の条件では、図2(d)及び図3(c)から分かるように、上下付着壁間での噴流偏向方向の変化が明確に表れ、可動壁励起による噴流発振を実現できているといえる

④ 結言

自励振動噴流として知られるFFNを利用し、フィードバック制御ダクトを用いる代わりに、可動壁を用いて噴流発振を実現する方法を提案し、発振に必要な可動壁条件を数値的に調べた。 $V_0/U_j=0.6, 0.8, 1.0$ の3種類の条件で壁の移動速度を変えて計算を行った。この結果、 $V_0/U_j=1.0$ の運動量を供給した場合に可動壁励起による噴流発振を確認できた。

(2) 音波による環状攪乱が円形対向噴流の発達に及ぼす影響について⁵⁾

① 緒言

対向噴流は静止流体中の通常噴流に比べて大きな混合促進効果を持ち、その工業的利用価値は高い。火炎保持のような燃焼問題への応用を考えたとき、噴流制御が重要なキーワードとなるが、対向噴流の強い不安定性のため、対向噴流制御を試みた研究例はこれまでに無い。そこで、対向噴流制御に関する基礎的資料を得ることを目的とした初段階の研究として、本研究では噴流制御法に音響攪乱を選び、ノズル出口外縁部で環状に導入した音波攪乱が円形対向噴流の発達に及ぼす影響を調べることを研究目的とする。

② 実験装置と実験方法

図4にノズルの概略を示す。噴流供給用の内径 $D=20$ mm、外径24 mmの円筒ノズルの外側に内径28 mm、スリット幅2 mmの音波供給用環状ノズルを同軸で設けた。環状部の空間にスピーカーからの音波を導入し、環状フィルム状の音響攪乱を得た。音波の生成にはコーン径200 mm、出力音圧レベル90dB/Wのウーファーを2台使用し、それらを木箱に収めた2台のスピーカーA、Bを用意した。木箱に設けた小孔からナイロンチューブで圧力波をノズルに導入し、図4のように90°間隔で計4ヶ所から環状スリット部に供給

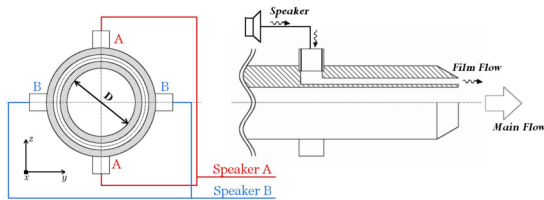


Fig. 4 Nozzle configuration

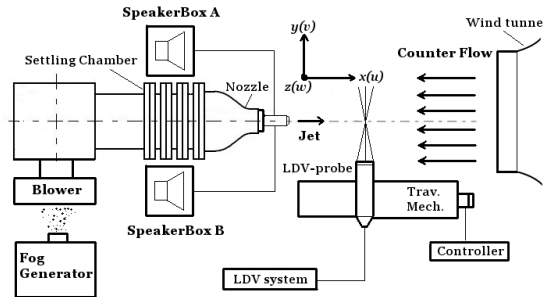


Fig. 5 Experimental apparatus

した。波形生成器からの正弦信号をアンプで増幅してスピーカーに入力した。この際、ノズル出口下流 20 mm で音圧を測定し、スピーカ A, B に供給するアンプ増幅レベルならびに入力正弦波形の位相差を調節した。図 5 に実験装置の概略図を示す。対向一様流には出口寸法 500 mm×500 mm の静音風洞を使用した。噴流供給用小型風洞を一様流に正対するように設置した。噴流出口速度を U_1 で表し、噴流速度と対向流 U_0 の速度比を $Vr=U_1/U_0$ と定義する。速度測定には二次元ファイバ式 LDV を使用した。実験主要条件を表 1 に示す。音波の周波数を f_a とし、 D と U_1 を用いてストローハル数を $St_a=Df_a/U_1$ と定義する。ノズル出口での音響攪乱の音圧レベルは $Vr=1$ では約 86 dB, それ以外の Vr では約 92 dB となるようにアンプを設定した。静止流体中の自由噴流に対して音響攪乱がないとき、 $x/d=2$ の噴流中心軸上における速度 u のスペクトル分布から観測された卓越ストローハル数 St_0 を表 1 に示す。

Table 1 Experimental parameters

U_0 [m/s]	8			
U_1 [m/s]	8	16	24	32
St_0	0.46	0.54	0.53	0.53
St_a	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.30	0.30	0.25	0.30
	0.50	0.58	0.40	0.57
	1.00	1.14	1.00	1.00
		1.50	1.67	1.50

③ 実験結果と考察

図 6 にノズル中心軸上における x 方向時間平均速度 U_c の下流方向変化を示す。 $U_c=0$ となる x 位置が噴流の平均到達距離であり、これを l_p と定義する。 $Vr=3.0$ および 4.0 に対する U_c の分布は St_a によらず同一の傾向を有し、本実験で採用した 92 dB の音圧レベルでは、 U_c の下流方向減衰に対する音響攪乱の影響は見られなかった。一方、 $Vr=1.0$ と 2.0 では僅かながら音響攪乱の影響が現れた。 $Vr=1.0$

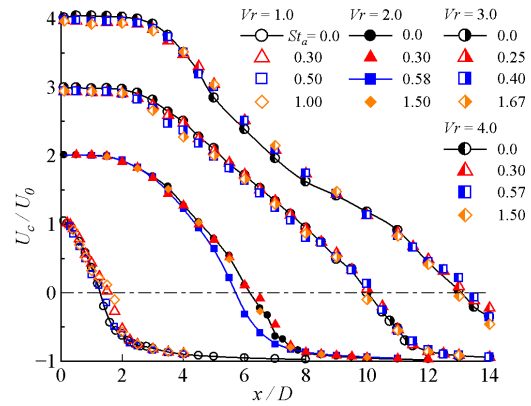


Fig. 6 Effect of the Strouhal number St_a of the acoustic disturbance on the downstream decay of the centerline mean velocity

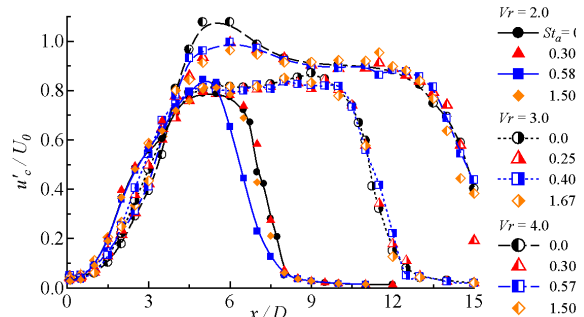


Fig. 7 Effect of the Strouhal number St_a on the axial profile of the rms velocity of u

では、音響攪乱を加えることで U_c の減衰が遅れ、 l_p が長くなる傾向が見られた。噴流を止め、音響攪乱のみを与えてスリット出口直後の流れを LDV で調べた予備実験から、音圧変動に応じて非常に低速ながら若干の流体の流入・流出があり、平均的には数 cm/s の速度で運動量流出が観測されたことから、これが U_c の減衰の遅れにつながったと予想される。 $Vr=2.0$ のとき、 $St_a=0.58$ の音響攪乱を与えた U_c は $x/d=4$ 付近から他の St_a の結果に比べ減衰が速くなり、 l_p が短くなった。 u のスペクトル分布の下流変化を比較したところ、 $St_a=0.58$ の音響攪乱のとき、励起周波数における明瞭なピークが $x/d=3.0$ の下流位置まで観測されたことから、音波攪乱がせん断層での組織構造形成に影響を及ぼしたことが関係すると考えられるが、現段階で詳細は不明である。

$Vr=2.0, 3.0$ および 4.0 の 3 種類の場合について、噴流軸上における x 方向速度 rms 値 u'_c の下流変化を St_a をパラメータとして図 7 に示す。データが重なり見づらいが、 $x/D=4.0\sim 6.0$ の噴流遷移域についてみると、対向流の影響が遷移域まで及ばない $Vr=4.0$ の場合に音響攪乱の有無で u'_c のピーク値に明確な違いが見られたが、他の Vr では St_a による顕著な差はなかった。 $Vr=4.0$ において、 $St_a=0$ のとき u'_c のピーク値が最大となり、実験条件の範囲内で St_a が大きくなるとともにピーク値が僅かながら下がる傾向が見られ

た. 対向噴流が最大到達点に達する平均よどみ点付近での特徴をみると, $V_r=2.0$ の場合を除き St_d の違いによる有意な差は現れなかった. $V_r=2.0$ での特徴は図 6 と同様で, $St_d=0.58$ における噴流到達距離が他の St_d の場合に比べ短くなることに対応している.

④ 結言

円形対向噴流に対してノズル出口外縁部で環状音響攪乱を与えることによって, 音波攪乱が円形対向噴流に与える影響を実験的に調べた. $V_r=1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ の 4 種類, 音波周波数 $St_d=0\sim 1.5$ 程度の範囲で変化させて対向噴流の中心軸に沿った速度場の特性について考察を行った. 本研究で採用した 92dB の出口音圧レベルの攪乱では, $V_r=3.0, 4.0$ に対して U_c の下流方向減衰に対する音響攪乱の影響は見られなかったが, $V_r=1.0$ では音響攪乱を与えた時に到達距離が伸び, $V_r=2.0$ では $St_d=0.58$ において到達距離が短くなるという結果が得られた. また, u'_c の下流変化についても, 噴流よどみ点領域で, V_r によらず St_d の違いによる顕著な差は認められなかった.

(3) 音響励起された円形対向噴流の流動特性^③

① 緒言

図 8 の模式図に示す通り, 対向噴流は流れ場中によどみ点と分離流線を形成する複雑流れであり, 静止流体中の通常噴流に比べて強い混合効果をもつことから工業的利用価値は高い. 火炎保持のような燃焼問題への応用を考えたとき, 噴流制御が重要なキーワードとなるが, 対向噴流の強い不安定性のため, 対向噴流制御を試みた研究例はこれまでに無い. そこで, 対向噴流制御に関する基礎的資料を得ることを目的とした初段階の研究として, 本研究では噴流制御法に音響攪乱を選び, 送風機からの流れにスピーカーからの音波を印可した流れをノズルから一様流に対向して噴出することで, 円形対向噴流の発達に及ぼす音響攪乱の影響を調べることを研究目的とする.

② 実験装置と実験方法

図 9 に実験装置全体図を示す. ノズル出口直径は $d=10\text{ mm}$ に選んだ. 噴流出口速度を U_1 で表し, 噴流速度と対向流の速度比を $V_r=U_1/U_0$ と定義する. 噴流に音波を印可するためにチャンバー側壁に 2 台のウーファーを対向して設けた. 波形生成器からの正弦信号をアンプで増幅してスピーカーに入力した. この際, ノズル下流 10mm の位置に騒音計を設け, 各々のスピーカーを単独で動作させたときの出口音圧レベルが同じ値となるようにアンプを調節した. 速度測定には PIV を使用し, トレーサー粒子として油微粒子を風洞と小型風洞の空気取込み口に導入した.

噴流速度 $U_1=15, 30\text{ m/s}$ の 2 種類を選び, まず, 対向一様流が無い通常円形噴流について実験を行った. 次いで, 一様流を対向させ,

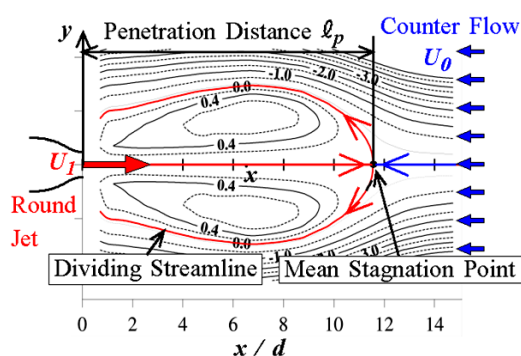


Fig. 8 Flow schematic

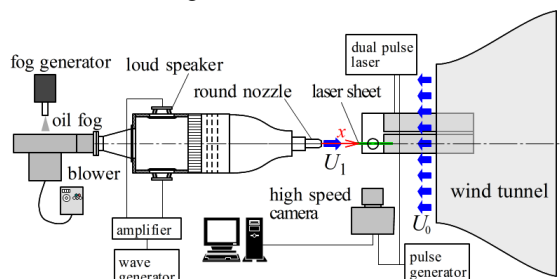


Fig. 9 Flow and measurement systems

速度比 $V_r=3.0\sim 7.1$ の範囲で実験を行った. 音波周波数はストローハル数を用いて整理した. 音波周波数 f とノズル出口径 d を用いて, 静止流体通常噴流ではストローハル数を $St_d=fd/U_1$ で, 対向噴流では $St_d=fd/(U_1+U_0)$ で定義し, 音波周波数 f を適宜変化させて $St_d=0.3\sim 1.3$ の範囲で実験を行った.

③ 実験結果と考察

通常噴流に対する結果を踏まえ, 対向噴流に対する音響攪乱の影響を調べた. 図 10 は噴流中心軸上における平均速度 U_c の下流方向変化に対する音響攪乱の影響を速度比 V_r を変化させて調べた結果である. 縦軸を U_c/U_0 で表し, $x/d=0$ における値は V_r と一致する. これらの図において, $U_c=0$ となる x 位置が対向噴流の平均貫通距離に相当し, 記号 l_p で表す. 先に示した通常噴流の場合に比べ, 対向噴流の平均流れ場に対する音響攪乱の影響は非常に小さいことが分る. 僅かに, $V_r=3$ ($U_1=15\text{ m/s}$) の場合については $St_d=1.0$ と 1.5 の攪乱を受けた対向噴流の l_p が $St_d=0$ の場合に比べて延びるという傾向がみられる. その他の V_r に対して, U_c の変化に対する音響攪乱の影響は全く現れなかった.

図 11 は $U_0=5\text{ m/s}$ に固定し, U_1 を変化させて $V_r=3\sim 7.1$ の条件に対して, 中心軸上の速度 rms 値 u'_c の下流変化を調べた結果である. $V_r\geq 5$ の結果については, 音響攪乱の影響は u'_c についても全く見られない. $V_r=3, 4$ に対する結果を見ると, $St_d=0.3$ の場合の u'_c がノズル出口直後に $St_d=0$ の分布に比べ若干増大していることが分かる. しかしながら, よどみ点付近に着目すると, u'_c の下流変化に対する音波攪乱の影響はほとんど表れなかった.

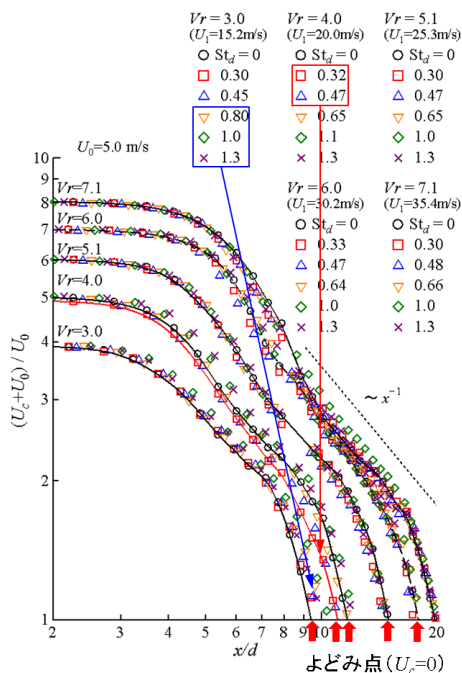


Fig. 10 Effect of acoustic excitation on axial variation of the mean velocity for counter jet

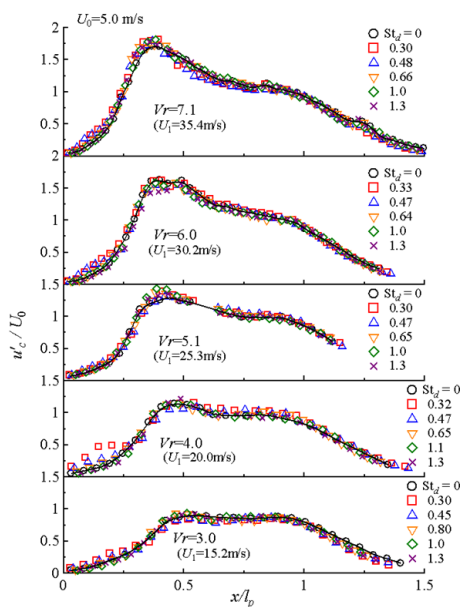


Fig. 11 Effect of acoustic excitation on axial variation of the rms velocity for counter jet

④ 結言

音波攪乱が対向噴流に与える影響を実験的に調べた。速度比を $V_r=3\sim 7.1$ の範囲で、音波周波数を $St_d=0.3\sim 1.3$ の範囲で変化させて、主に噴流中心軸に沿った速度場の特性を示した。本研究で採用した約 96 dB ($U_1=15\text{m/s}$ の場合)あるいは 102 dB ($U_1=30\text{m/s}$ の場合)の出口音圧レベルは、静止流体中の通常円形噴流の発達特性に影響を及ぼすのに十分であったが、対向噴流については顕著な影響を認められなかった。本研究で採用した整流チャンパー内での音波導入法では、噴流用送風機の動作時、ある特定の音波周波数に対してノズル出口音圧レベルが送風機停止時に比べて低下することがあった。送風機のタービン

の回転がノズル出口での音波に影響を与えていると推測され、今後、この問題を解決する方策を練り、音圧レベルをさらに増加させた実験を行っていく必要がある。

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 1 件)

- ①埋橋英夫, 鳥養映子, 角田博之, 半経験的相似則に基づく家庭エアコン用小形送風機的设计法について, ターボ機械, 査読有, Vol. 43, 2015, 1-10, DOI: https://doi.org/10.11458/tsj.43.6_348.

[学会発表] (計 4 件)

- ②舘野圭汰, 角田博之, 壁が隣接した角柱列周りの流れと空力音, 日本機械学会関東支部山梨講演会 2017, 2017 年 10 月 21 日, 山梨大.
- ③東健太郎, 角田博之, 音響励起された円形対向噴流の流動特性, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演会, 2017 年 9 月 4 日, 埼玉大.
- ④金谷峻太, 角田博之, フリップフロップ噴流における噴流発振制御に関する数値解析, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 2017 年 3 月 16 日, 東京理科大.
- ⑤高崎紘輔, 角田博之, 音波による環状攪乱が円形対向噴流の発達に及ぼす影響について, 日本機械学会関東支部第 22 期総会・講演会, 2016 年 3 月 11 日, 東工大.

[その他]

ホームページ等

<http://www.me.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・大学院総合研究部・准教授
研究者番号: 10207433