

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560197

研究課題名(和文) シンセティック・ジェットを用いた乱流混合促進の空間的制御の研究

研究課題名(英文) Study on the spatial control of turbulent mixing enhancement using synthetic jets

研究代表者

高首 徹 (KOSO, Toru)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40150528

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)：円形シンセティック・ジェットの強い乱れや乱流混合作用を、アンサンブル平均速度計測・煙霧法可視化・LES数値解析で研究した。強い乱流混合作用は円形オリフィスから離れた下流位置で急に生じ、それは渦輪の崩壊過程で生じた縦渦や変形渦輪という秩序構造によって引き起こされる。渦輪は隣の渦と干渉せずに崩壊し、崩壊位置は脈動流のストローク(噴出過程の流体吐出距離)が長いほど下流に移動することを明らかにした。シンセティック・ジェット装置の空洞内にオリフィスと同軸に短円筒を設置したり、オリフィスの代わりに縮流ノズルを用いてその効果を調べ、渦輪崩壊の位置を変えて乱流混合発生を空間的に制御する方法の実現性を示した。

研究成果の概要(英文)：The high intensity of turbulence and the strong turbulent mixing in a circular synthetic jet are studied by ensemble averaged velocities, smoke visualization and LES numerical simulation. The strong mixing is observed at some distance from the orifice, and it can be attributed to the mixing caused by the organized motion of deformed vortex rings and the longitudinal vortices in the process of vortex ring collapse. It is found that the vortex rings collapse without direct interference by neighbouring vortex rings, and the location of vortex collapse moves to downstream as the stroke of the alternating flow is increased.

A short coaxial pipe was placed behind the orifice in the cavity and effect on the location of vortex collapse was studied. And the synthetic jet from a contraction nozzle instead of an orifice was studied to examine the effect on the vortex collapse. The results indicate these are possible methods of spatial control of turbulent mixing enhancement by synthetic jets.

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：シンセティック・ジェット 乱流噴流 渦輪 渦輪崩壊 乱流混合 空間的制御 ストローク

1. 研究開始当初の背景

円形シンセティック・ジェットはオリフィスなどから往復振動流を噴出・吸引させて生じさせる平均噴流である。空気源なしに流れに運動量を与えることができるので、制御性の良い噴流として、はく離の能動制御に適用する研究が進められてきた。一方シンセティック・ジェットには強い乱れや乱流混合作用を生じさせる効果がある。この後者の効果の現象についての研究は少なく、十分に解明されていない。

この強い乱流混合の発生や発生位置を支配する流動機構を明らかにして、乱流混合促進を空間的に制御しようとする研究は見当たらなかった。

2. 研究の目的

シンセティック・ジェットは流れに運動量を与えるだけでなく、強い乱れ発生する。この強い乱れはオリフィスから少し離れた位置で発生し、広い周波数スペクトル範囲を有している。この強い乱流によって流体・運動量の強い乱流混合が生じる。著者らのこれまでの研究により、この強い乱流混合の発生位置はシンセティック・ジェットの駆動条件により変化することが明らかにされてきた。

本研究では、この強い乱流混合の発生や発生位置を支配する機構を解明して、乱流混合の発生位置を空間的に制御する乱流混合促進の可能性について明らかにする。

3. 研究の方法

円形シンセティック・ジェットの速度分布に及ぼす駆動条件の影響を熱線流速計で計測して、乱流混合の流れ方向変化を調べた。次に、乱流混合の流れ方向変化を生じさせる機構として、シンセティック・ジェット中の渦輪列の構造に着目し、渦輪列の構造におよぼすストロークおよびレイノルズ数の影響をアンサンブル平均速度の分布から調べた。また渦輪の崩壊過程に生じる現象をLES数値解析、拡大模型による煙霧法可視化によって詳細に調べた。

これらの結果を応用して、シンセティック・ジェット装置の空洞(キャビティ)内にオリフィスと同軸に短円筒を設置した場合や、オリフィスの代わりに縮流ノズルを用いたシンセティック・ジェットを調べて、シンセティック・ジェットの渦輪崩壊を制御して乱流混合の発生位置を空間的に制御する装置の実現性を検討した。

(1) 円形シンセティック・ジェット装置

図1に円形シンセティック・ジェットの模式図を示す。圧電振動板などの振動壁、空洞、オリフィスによって構成される。圧電振動板に正弦波電圧を印加して振動させると、空洞の体積が変化して円形オリフィスに往復脈動流が生じる。オリフィスを通る振動流の噴出過程で渦輪が形成され、吐出の押出距

離(ストローク)がある値以上の場合、渦輪は吸い込まれずに残り、その渦輪がオリフィス外に蓄積して平均噴流を誘起する。

本実験ではストロークの実験範囲を広くとるため、圧電振動板とスピーカの2種類の駆動源を用いた。オリフィスの径は  $d=5\text{mm}$ 、板厚は  $0.8\text{mm}$  である。

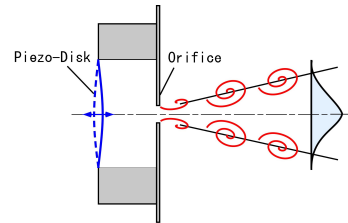


図1 シンセティック・ジェットの模式図

次元解析によればシンセティック・ジェットの流れはレイノルズ数  $Re$  と無次元ストローク  $L/d$  の2つの無次元数に支配される。ここで、 $L$  はストロークで脈動流の噴出過程における流体の押出距離、 $Re$  は  $Re=us'd/\nu$  で定義され、 $us'$  はオリフィス内の脈動速度 rms 値、 $\nu$  は空気の動粘度である。

両者の影響を調べるためレイノルズ数一定で無次元ストロークを変化させた実験(表1)とストローク一定でレイノルズ数を変化させた実験を行った。小形のI形熱線プローブを用い熱線流速計で速度を計測した。

表1 実験条件(ストロークの影響)

$f_s$ (Hz)	$us'$ (m/s)	$L/d$	$Re$
1000	7.90	0.712	2500
700	7.90	1.02	2500
500	7.90	1.42	2500
300	7.90	2.40	2700
200	7.90	3.60	2700
150	7.91	4.75	2700
100	7.86	7.10	2700

(2) アンサンブル平均速度分布の計測

熱線流速計で計測した瞬間速度波形から、圧電振動板やスピーカへの印加電圧(正弦波)を参照信号として、アンサンブル平均(位相平均)速度を求めた。図2に速度分布の計測システムの概略を示す。

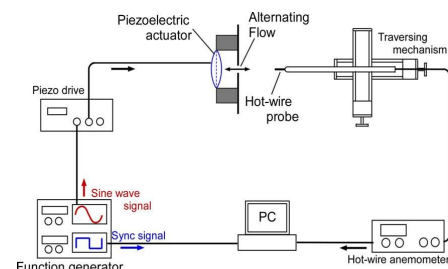


図2 速度分布計測システム概略図

(3) LES数値解析

シンセティック・ジェットの渦構造を調べるためLES(ラージ・エディ・シミュレーション)による三次元非圧縮非定常流体解析を行った。数値解析の結果からオリフィスが

ら放出された渦の空間的な分布や周方向渦度・流れ方向渦度（縦渦）など実験では計測困難な情報を得た。

#### (4) 煙霧法による可視化

シンセティック・ジェットを煙霧法で可視化しレーザーシート光で照明して、渦輪崩壊の瞬間的な現象を観察した。シンセティック・ジェット流れの力学的相似則により、6倍寸法の拡大模型を製作し、同じレイノルズ数・無次元ストロークの実験を低速度、低周波数で実験した。

#### (5) 乱流混合の発生位置の空間的制御

シンセティック・ジェット装置の空洞内にオリフィスと同軸に短円筒を設置して、その効果を調べた。図3に実験装置を示す。短円筒はオリフィスの脈動流にほとんど影響を与えないが、空洞内の渦流れを変え得る。

また、図4に示すようにオリフィスの代わりに縮流ノズルを用いてその効果を調べ、渦輪の崩壊とそれによる噴流拡大への影響を実験的に調べた。

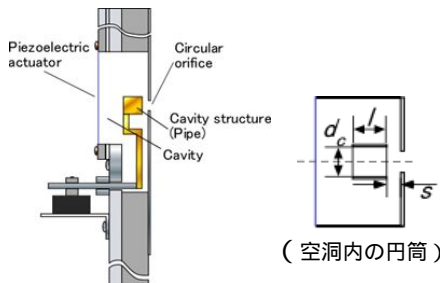


図3 キャピティ内構造による渦輪崩壊の制御。

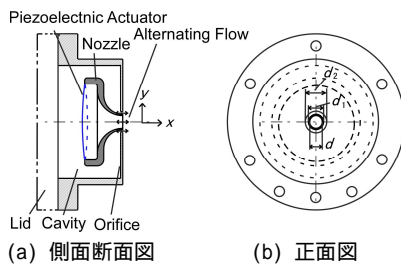


図4 縮流ノズルのシンセティック・ジェット。

### 4. 研究成果

#### (1) シンセティック・ジェットの平均流れ場

図5に円形シンセティック・ジェットの速度場の一例として、無次元ストローク  $L/d=1.02$  でレイノルズ数  $Re=2700$  の場合に発生した平均速度分布を示す。通常の噴流に似た速度分布がオリフィスより少し下流で得られている。下流に行くにつれて最大速度は減衰し噴流幅は拡大する典型的な噴流の流れ場が形成されている。

図6にシンセティック・ジェットの半値幅  $d_{0.5}$  の流れ方向変化を示す。半値幅  $d_{0.5}$  は噴流の直径として定義した。半値幅はストロークが短い ( $L/d=0.712$ ) 場合には発生直後からすぐに拡大するが、ストロークが長くなると

下流のある点から急速に拡大し始めることが分かる。拡大開始後の拡大率はストロークに依らずほぼ同じであり、連続噴流よりはるかに大きい。なお、半値幅の拡大開始位置は最大速度の減衰開始位置とほぼ対応していた。また、レイノルズ数変えても無次元ストロークが同じならば噴流の拡大開始の位置は変化しなかった。

以上のように、シンセティック・ジェットの平均流れ場の流れ方向変化は連続噴流と異なり、下流のある位置で急に噴流が拡大することが明らかになった。このことはオリフィスからある距離の位置で強い乱流混合が生じることを示している。

またストロークが増すにつれて噴流の拡大開始が下流に移行すること、レイノルズ数による影響は小さいことを明らかにした。

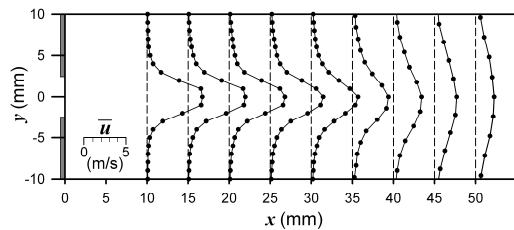


図5 円形シンセティック・ジェットの平均速度分布 ( $L/d=1.02, Re=2700$ )

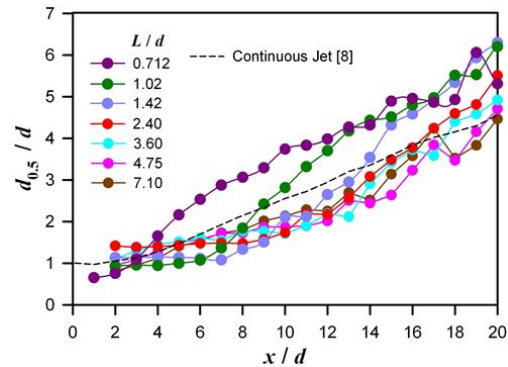


図6 噴流幅のストローク依存性

#### (2) 渦輪列の構造

乱流混合の流れ方向変化を生じさせる機構として渦輪の挙動に着目し、アンサンプル平均（位相平均）速度を求めて、シンセティック・ジェットの渦輪列の構造を調べた。

図7にアンサンプル平均速度  $\tilde{u}$  のカラー等値図と中心軸上の速度分布を示す。中心軸上の速度分布は脈動速度  $u_s'$  で無次元した。これらの図の時刻  $t/T=0.5$  は、噴出過程が終わって渦輪の形成が完了した時刻である。カラー等値図の高速域はオリフィスから放出された渦輪の内側領域と考えることができ、渦輪は1周期に1個形成されていた。カラー等値図から渦輪の空間的な分布、中心軸上の速度分布から渦輪の誘起速度の強さを検討することができる。渦輪の崩壊に際して隣り合う渦輪との干渉、追抜きなどなく渦輪は自己崩壊することが分かる。またストロークが長くなるにつれて渦輪間隔が広くなり、渦輪崩

壊が遅れる（より下流で生じる）ことが明らかになった。

長ストローク ( $L/d=3.60, 4.75, 7.10$ ) では渦輪の背後に弱い付随渦輪が観測された。この付随渦輪はピストンを用いた定速噴出においても同程度のストロークで生じている。

渦輪の崩壊とシンセティック・ジェットの数値減衰や噴流幅の拡大の関連を調べるため、崩壊過程位置  $x_{co}$  と噴流幅の拡大開始位置  $x_s$  の対応を調べた。図8に示すように、両者の対応は良いことが分かった。

以上の結果から、シンセティック・ジェットでは脈動流1周期に1個渦輪が放出されそれが渦輪列を形成し下流に流れていく。その間は噴流の拡がりはほとんどない。下流で渦輪が崩壊する過程で強い乱流混合が生じ、噴流の幅は拡大する。ストロークが長いほど渦輪崩壊の位置は下流に移動し、その結果、噴流の幅は拡大位置も下流に移動することが明らかになった。

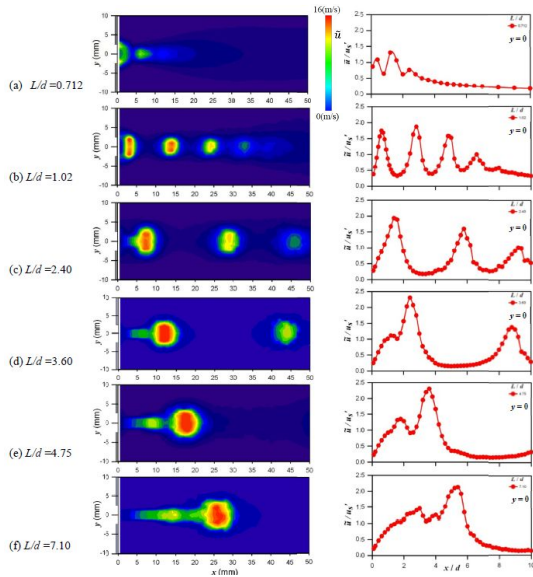


図7 アンサンブル平均速度の等値図と噴流軸上分布

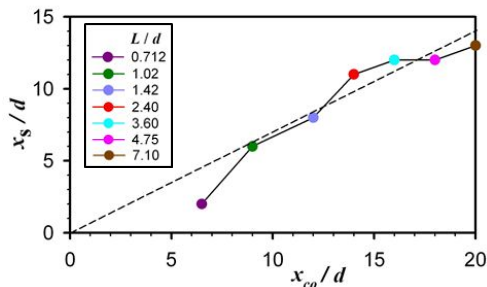


図8 渦輪崩壊位置  $x_{co}$  と噴流拡大開始位置  $x_s$  の対応

### (3) 渦輪の崩壊過程

図9にLES数値解析による速度ベクトルと渦度分布を示す。渦度の対は1個の渦輪の断面を表している。1周期に1個の渦輪が発生し、時間が経つにつれて下流に流れて、行きやがて崩壊する様子が見える。図9(b)の無次元ストローク  $L/d=4.72$  の場合、渦輪

の間隔が長くなるとともに1周期の1個の大きな渦（主渦輪）の後方に小さな渦輪が付随して流れるのが、実験結果と同様に観測される。この付随渦輪は直ぐに拡散・崩壊するので、シンセティック・ジェットの初期域の速度半値幅の微増を生じさせていると考えられる。また、渦輪の崩壊に際しては渦輪が変形し縦渦が発生することが分かった。

図10に煙霧法による可視化画像の一例として  $L/d=2.42$  の場合を示す。噴流軸に対称なキノコ状の煙分布は渦輪に巻き込まれて生じたパターンで、下流に移動していく様子が観察できる。煙のパターンは下流で変形し対称性を失ったのちに消滅した。この消滅は渦輪の崩壊に対応している。なお、崩壊過程において隣の渦輪との追抜きや合体など直接的な干渉は観測されない点はアンサンブル速度計測結果や数値解析結果と同じである。図11に噴流軸に垂直な面の可視化画像を示す。  $x/d=5$  断面を横切る1個の渦輪の断面画像を連続に左から順に示す。  $x/d=5$  は渦輪の形成が完了した時点で、渦輪は円環形を示すが、後方の星形のパターンは高次不安定による変形で、縦渦を曳いている様子を示していると考えられる。渦輪は高次不安定による星形の変形とそれが後方に引き伸ばされて生じる縦渦によって崩壊していくものと考えられる。

以上のように渦輪の崩壊に際して渦輪が変形し縦渦が生じることを明らかになった。変形渦輪という秩序構造によって運動量の強い乱流混合が生じると考えられる。

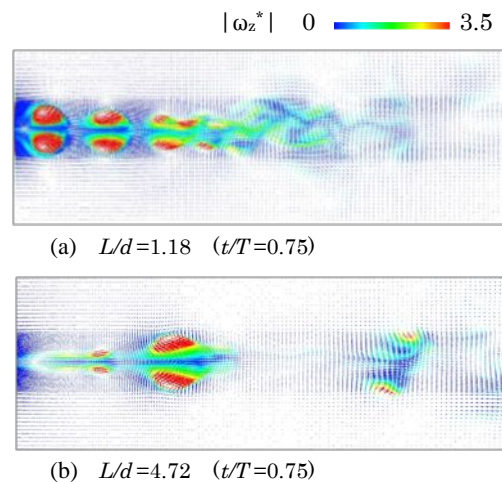


図9 速度ベクトルと渦度  $|\omega_z^*| = |\omega_z d/u_s^*|$   
( $\omega_z$ : 紙面に垂直方向の渦度)

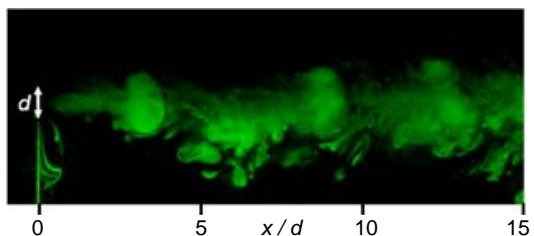


図10 煙霧法による渦輪列の可視化、縦断面  
( $L/d=2.42, Re=2660$ ).

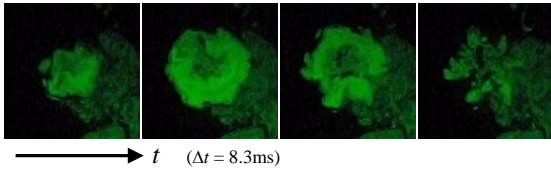


図 11  $x/d=5$  を通過する渦輪の連続画像 ( $L/d=2.42$ ) .

(4) 乱流混合の発生位置の空間的制御

図 12(a)に円筒 A (内径  $d_c=7\text{mm}$ , 長さ  $l=8\text{mm}$ ), (b)に円筒 B ( $d_c=5\text{mm}$ ,  $l=13\text{mm}$ ) を空洞内に設置した効果を示す. アンサンブル平均速度等値分布に及ぼすオリフィスとの隙間  $s$  の影響を示している. 円筒 A の場合, 隙間が最も小さい  $s/d=0.35$  の場合, 渦輪が早く減衰した. また, 渦輪間隔も減少することがわかる. 円筒 B は, 隙間が  $s/d=0.66$  の場合, 高速度域が早く減衰した. キャビティ内に設置した円筒のかく乱によって渦輪列の構造や崩壊が変化することがわかる.

図 13 に縮流ノズルのシンセティック・ジェットの噴流幅  $d_{0.5}$  の流れ方向変化を示す. 単調に拡大し連続噴流と似た傾向を示し, 円形オリフィスのシンセティック・ジェットと根本的に異なることがわかる. アンサンブル平均速度等値図によると縮流ノズルでは渦輪が早期に崩壊していることが示された.

以上のように, 空洞内構造やオリフィス形状を変えることによって乱流混合発生を空間的に制御する方法の実現性を示した.

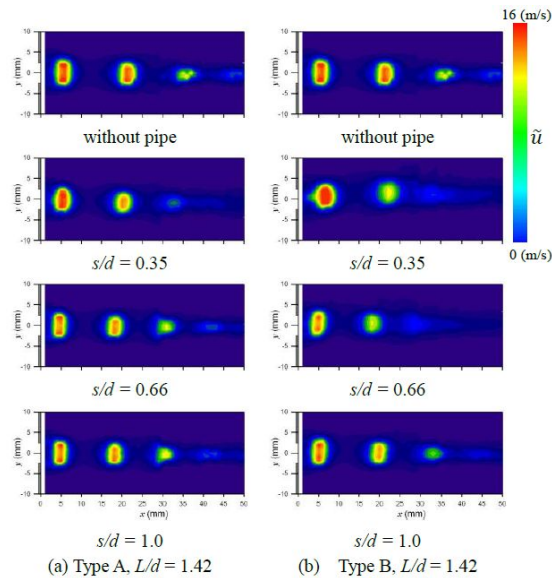


図 12 渦輪列構造に及ぼすキャビティ内構造 .

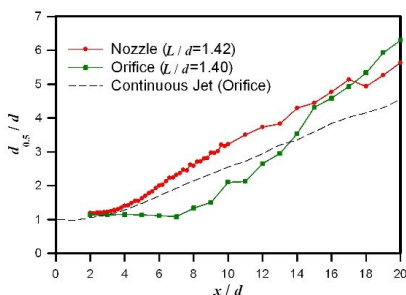


図 13 縮流ノズルのシンセティック・ジェットの噴流幅 .

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Toru KOSO, Shingo MATSUDA, Hiroto MASUDA, Tomoya AKAHOSHI, Effect of Stroke on the Structures of Vortex Ring Array in Circular Synthetic Jets, Proc. 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2013), 査読あり, 2013, ICJWSF2013-1167.

Hiroto MASUDA, Toru KOSO, Shingo MATSUDA and Tomoya AKAHOSHI, Effect of Stroke and Reynolds Number on Vortex Structures in Circular Synthetic Jets, Proc. 13th Cross Straits Symp. (CSS-13), 査読なし, 2011, ETP-21.

増田広豊, 高曾 徹, 井ノ上勝海, 松田信吾, 円形シンセティック・ジェットのアンサンブル平均速度計測による渦輪列の可視化, 可視化情報, 査読あり, Vol.31, S.No.2, 2011, pp13-14.

〔学会発表〕(計 15 件)

井ノ上 勝海, 高曾 徹, 円形シンセティック・ジェットの渦輪列に及ぼすキャビティ内構造の影響, 日本機械学会 九州支部 第 67 期総会・講演会, 2014 年 3 月 13 日, 北九州市 .

福原 百合子, 濱本 康智朗, 高曾 徹, 縮流ノズルから噴出する円形シンセティック・ジェットのアンサンブル平均速度分布, 日本機械学会 九州支部 第 67 期総会・講演会, 2014 年 3 月 13 日, 北九州市 .

高曾 徹, 福原 百合子, 濱本 康智朗, 井ノ上 勝海, 縮流ノズルから噴出する円形シンセティック・ジェットの流動特性とそれに及ぼす同軸環状振動流の影響, 日本機械学会 第 91 期 流体工学部門 講演会, 2013 年 11 月 9 日, 福岡市 .

井ノ上 勝海, 高曾 徹, ほか, 円形シンセティック・ジェットの渦輪形成に及ぼすストロークの影響, 日本機械学会 第 91 期 流体工学部門 講演会, 2013 年 11 月 10 日, 福岡市 .

Toru Koso, Shingo Matsuda, Hiroto Masuda, Tomoya Akahoshi, Effect of Stroke on the Structures of Vortex Ring Array in Circular Synthetic Jets, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Sep. Flows (ICJWSF2013), 2013.9, Nagoya.

高曾 徹, ほか, 円形シンセティック・ジェットの渦輪列の構造の可視化研究, 日本機械学会 2013 年度 年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山市 .

井ノ上 勝海, 高曾 徹, 円形シンセティック・ジェットの渦輪列構造の数値計算による検討, 第 11 回 日本流体力学会 中四国・九州支部総会・講演会, 2013 年 6 月 15 日, 広島市 .

赤星智也,高曾 徹,ほか,円形シンセティック・ジェットの渦輪列の形成と崩壊の可視化研究,日本機械学会 九州支部 第66期総会・講演会,2013年3月13日,福岡市.

赤星智也,高曾 徹,ほか,円形シンセティック・ジェットの渦輪列に及ぼすレイノルズ数の影響,日本機械学会 第90期流体工学部門 講演会,2012年11月18日,京都市.

赤星智也,高曾 徹,増田広豊,円形シンセティック・ジェットの渦輪列の展開と崩壊,日本機械学会 2012年度年次大会,2012年9月11日,金沢市.

増田広豊,高曾 徹,赤星智也,松田信吾,円形シンセティック・ジェットの渦輪列に及ぼすストロークとレイノルズ数の影響,日本機械学会 九州支部 第65期総会・講演会,2012年3月16日,佐賀市.

高曾 徹,円形シンセティック・ジェットの流動特性と渦構造,日本機械学会 第5回 噴流,後流,および剥離流れの基礎と先端的应用に関する研究分科会,2011年6月17日,飯塚市.

高曾 徹,円形シンセティック・ジェットの渦流れ,第4回渦流れ研究会,2011年6月11日,横浜市.

ほか.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://aes.cm.kyushu-u.ac.jp/aes/research/c-sj-vortex-j.htm>

成果は Journal of Fluid Science and Technology に投稿中。

Toru KOSO and Muneaki MORITA, M, Effect of stroke and Reynolds number on the characteristics of circular synthetic jets.

Toru KOSO, Shingo MATSUDA, Hiroto MASUDA and Tomoya AKAHOSHI, Effect of stroke on the structure of vortex ring array in circular synthetic jets.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高曾 徹 (KOSO Toru)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 40150528

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし