

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560292

研究課題名(和文) 流体静圧軸受を用いた超精密加工機の自律振動抑制システムの研究開発

研究課題名(英文) FLOW STABILITY OF A ROUND JET ISSUING INTO A CIRCULAR PIPE

研究代表者

井上 吉弘 (Inoue, Yoshihiro)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：00176455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：油空圧アクチュエータの絞り部下流の流れ場は、円管内に同心で噴出される円形噴流でモデル化することができる。本研究ではこの流れのモデルを用いて、流れの可視化観察と熱線センサーによる測定から、流れの安定性を調べ、流れを安定化させるためのシステムの構築を目指した。流れの特徴は噴流コラムの崩壊現象にあり、 $Re_j = 700 - 900$ では、崩壊位置は安定せず、準周期的に前後に揺動する。 $Re_j > 1000$ では崩壊位置は安定するが、噴流コラム周囲を上流に向かうリターン流れが顕在化する。 $x/d = 5.5$ における熱線センサーの出力信号から、長周期で変動するリターン流れを捕捉した。

研究成果の概要(英文)：A round jet penetrating into the same fluid-filled circular pipe with both axes coincident with each other is a simplified model of the restrictor in hydraulic actuators. Our study have been related to investigate the flow stability by the flow visualization and hot-wire measurement. The round jet is issued in parallel with the pipe axis through a circular nozzle. The collapse position of the jet column was transported upstream with increasing Re_j . At $Re_j = 700 - 900$, the collapse position of the jet column fluctuated pseudo-periodically. At $Re_j > 1000$, a vortex ring rolled up periodically and the collapse position of the jet column was stable. As shown in the measurement results of the hot wire at the position of $x/d = 5.5$, at $Re_j = 1100$ and 1300 , there appeared the fluctuations that have large amplitude and long period. This fluctuation might be caused by a return flow upstream from the downstream portion. This return flow could be observed as dye streak images.

研究分野：流体工学

キーワード：円管噴流 臨界レイノルズ数

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究では、超精密加工機の軸受として重要な技術的位置を占める流体静圧軸受を研究対象として取り上げ、その低振動化機構の開発に取り組む。機械が知能を持って動作するためには、その根底にある物理現象の理解が不可欠である。従来、軸受内の流体流れは、単純化のために流路に沿った1次元流とみなされ、例えば、管内流のレイノルズ数のみで流れの乱雑化の指針を得て設計作業が行われてきており、現実の流れ現象に十分配慮できていない。

(2) さらに、流路形状および流速に応じて、流れの乱雑化は随所で発生しており、テーブル振動自身の導入する攪乱も、流体流れの状態遷移に影響を及ぼす。振動攪乱の影響は高速度で流路全域に伝搬し、フィードバックループを構成する可能性もある。これらの現象の発生を予測し対策する技術の開発が期待されている。

2. 研究の目的

(1) 流体工学における従来の知見より、流れの安定問題がレイノルズ数に依存することは自明である。ただし、レイノルズ数の定義は流れの種類によって適宜なされる必要があり、その臨界値も流れの種類ごとに異なる。そのため、本研究では、軸受流路内でもっともレイノルズ数が高くなるであろうと予想される絞り部下流に着目した実験的調査を行い、臨界点近くでの流れの挙動を明らかにする。絞り部下流に形成される流れは、円管内噴流とみなすことができ、実験因子は噴流レイノルズ数、噴流と円管の直径比、および円管長となる。

(2) テーブル振動変位の自律抑制システムを開発するためには、流れの状態量を正確に把握する必要がある。実機ベースで利用できるセンサーシステムとして、本研究では熱線センサーの開発と性能試験を進め、同時に、円管内噴流を制御するためのアクチュエータとして、環状パルス噴流の発生装置を製作し、円管内噴流の臨界点近傍の流れの安定化を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験水槽 実験は作動流体を水とした装置を製作して行った。図1は本研究で流れのモデルとして採用した円管内噴流の概略を、図2はこの流れ場を得るために用いた実験水槽の全体概要をそれぞれ示す。作動流体の水は、オーバーヘッドタンクから流量計および流量制御用ニードルバルブを通り、整流管へと導かれる。測定用円管の出口端は容量の大きなタンクに開放され、噴出された水はタンクからポンプを用いて循環させている。測定部は、整流管(内径20mm)に、噴出孔径 $d = 6$ mmの円弧ノズル板($R 2$ mm, $t 3$ mm)を挟んで測定用円管(内径 $D = 38$ mm, 長さ $L = 270$ mm)を取り付ける構造

とした。直径比は $D/d = 6.3$ であり、ノズルと円管は同心である。座標系は、ノズル出口の中心を座標原点として、流れ方向に x 軸、横断面方向に y 軸と z 軸をとる。噴流噴出速度を U_j で表し、流れのレイノルズ数を $Re_j = U_j d / \nu$ と定義する。

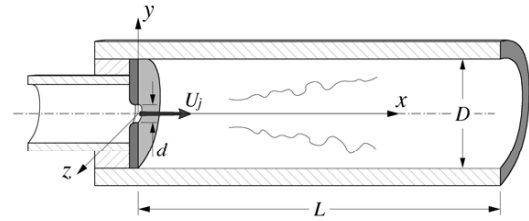


図1 流れ場の概要と主な記号

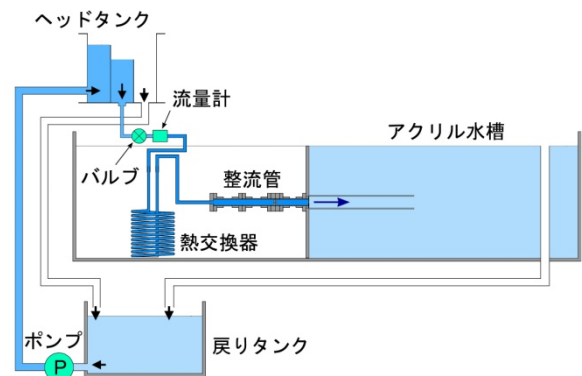


図2 実験水槽の全体図

(2) 環状パルス噴流生成方法 本研究では、主噴流に対して流れを制御する目的で印可する流れとして、環状パルス噴流を採用した。この場合の測定部構成を図3に示す。主噴流ノズルと同心で環状スリットを追加し、整流管の周囲に環状パルス噴流用のチャンバを設けている。環状スリットの内径、外径は14mm, 17mmであり、スリット幅は1.5mmである。チャンバにはダイヤフラム式のパルス圧力印加装置が接続される。直方体チャンバの一面を金属薄板とし、その中央部を回転カムで押し込む方式で、パルス圧力を生む。回転カムへの動作指示は、PCを通じたデジタル方式である。

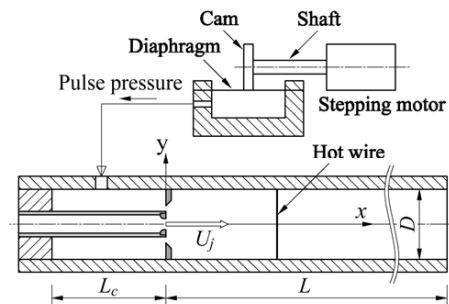


図3 環状パルス噴流印加時の測定部

(3) 流れの可視化方法 流れの可視化観察では、フルオレセインを用いた蛍光染料法を採用した。染料の注入には、オーバーヘッドタンクに取り付けられた注入管

(注手法 A) と整流管側壁に設けた細孔 (注手法 B) を用いた。流れの定常状態を確保するために、染料の注入開始前には十分な時間をとった。照明装置は、水冷 Ar-ion レーザ (出力 2 W) および空冷 Ar-ion レーザ (出力 0.5 W) に光ファイバー式シート光学系を取り付けて用いた。可視化像の撮影には、ハイスピードビデオカメラ (Photron FASTCAM SA3) を用いた。

(4) 熱線センサー 流れの状態量の計測には熱線法を用いた。熱線材料は市販のマグネットワイヤ (心線径 0.020 mm, 被膜厚さ 0.0035 mm) を用いた。本研究では、測定用円管内における流れ状態の捕捉を目的としているため、熱線を円管横断面にわたって張り渡し、すなわち熱線長さは円管直径 D と一致する。通常用いられる熱線流速計と異なる点は、熱線軸方向に速度が変化することであり、別途の検討を行う必要がある。このタイプの熱線センサーの取り扱い方は、森下⁽¹⁾を参考にした。熱線軸が y 軸と一致しているとして、熱線からの強制対流熱伝達係数 h は y の関数となり、全電気抵抗 R_w は y 方向への積分値となる。局所的な熱平衡の方程式は次式となる。

$$\frac{d^2\tilde{\theta}}{dy^2} + \frac{1}{\pi d_w^2 k_w/4} \left(\frac{\tilde{i}^2 R_f}{D} \alpha - \pi d_w \tilde{h} \right) \tilde{\theta} = -\frac{1}{\pi d_w^2 k_w/4} \frac{\tilde{i}^2 R_f}{D} \quad (1)$$

ここで、 i は加熱電流であり、 θ は局所の瞬時温度差であり、周囲温度 θ_f からの増分とし、上付きの \sim は瞬時値を表す。また、 d_w , k_w , a , R_f はそれぞれ熱線の直径、熱伝導率、温度係数、周囲温度における電気抵抗を表す。熱線両端間の電位差 E が一定の場合、次式が成立する。

$$\tilde{i} = \frac{E/R_f}{(1/D) \int_{-D/2}^{D/2} (1 + \alpha \tilde{\theta}) dy} \quad (2)$$

熱伝達係数の y 方向分布が既知の場合には、式(1)と(2)を連立させて動作電流 i を求めることができる。

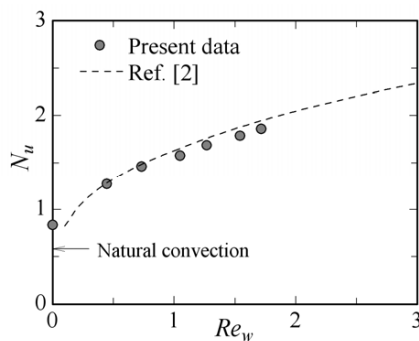


図4 熱線センサーの静特性

図4は、一様流と直交して熱線を設置して測定した基本特性を示す。図の横軸は熱線直径に基づくレイノルズ数 Re_w であり、縦軸は膜温度における熱伝導率 k_m を用いたヌセルト数である。ヌセルト数は、式(1)を変形して次式となる。

$$Nu = \frac{d_w \bar{h}}{k_m} = \frac{i^2 R_f}{\pi k_m D} \frac{1 + \alpha \bar{\theta}}{\bar{\theta}} = \frac{i^2 R_f}{\pi k_m D} \frac{\alpha}{1 - R_f/R_w} \quad (3)$$

図中には、 $Re_w = 0$ の自然対流熱伝達と、水中における強制対流熱伝達の参照値⁽²⁾を示す。実験値と参照値はよく一致している。

つづいて、熱線の動特性を確認のため、一様流中に置かれた円柱背後の流れを測定した。円柱の直径は 15 mm で、一様流速度は約 36 mm/s とし、円柱レイノルズ数は約 590 である。

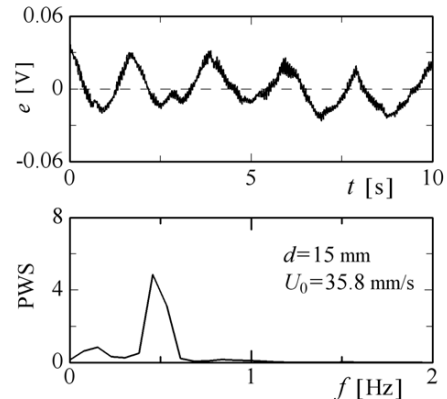


図5 熱線センサーの動的試験結果 ($Re_d = 590$) (上段) 出力波形, (下段) パワースペクトル

図5は熱線センサーの出力波形とそのパワースペクトルを示す。図より、ピーク周波数は約 0.5 Hz と読み取れ、ストロハル数は 0.21 となった。この値は従来得られている結果とよく一致しており、センサーの動特性を検証することができた。本研究の測定では、直流定電流源 (max 18 V, 2 A) を用い、熱線両端の電位差を測定した。熱線長さ $D = 38$ mm において水温 20 °C で電気抵抗は約 2 Ω であり、動作温度を 80 °C とした場合、電気抵抗は約 2.5 Ω となる。熱線出力の信号処理は、PC から LabVIEW (NI 社) を用いて行った。

4. 研究成果

(1) 最初に、円管内噴流の可視化画像を示す。噴流レイノルズ数 Re_j を 600 ~ 1000 の範囲で変化させた円管内噴流におけるスナップ画像を図6に示す。染料はオーバーヘッドタンクに取り付けられた細管から注入されており、噴流コラム全体の変化を観察することができる (注手法 A)。流れの向きは左から右であり、画像左端はノズル出口 ($x = 0$)、画像右端は $x = 35d$ 、画像の上下端は円管側面である。 $Re_j = 600$ の低レイノルズ数では、ノズルから噴出された流体は概ねコラム状に流下している。 $Re_j = 750$ では、 $x/d = 20$ 近傍でコラム先端の左右への揺動が始まり、 $x/d > 28$ でコラムは破断している。 $Re_j > 800$ では、コラム崩壊位置がレイノルズ数の増加とともに上流に移動する。噴流コラムの周辺に観られる染料は、コラム崩壊によって拡散させられた染料がリターン流れによって上流方向に運ばれたものである。

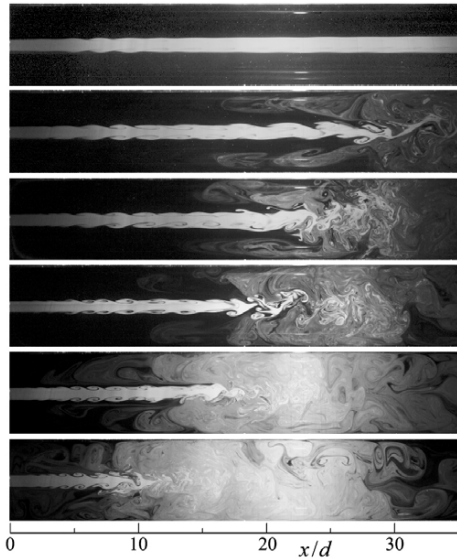


図6 流れの可視化画像 (注入法 A)
(上から $Re_d = 600, 700, 750, 800, 900, 1000$)

図7は、染料の注入方法を変えて可視化したスナップ画像を示す。染料は整流管側壁に設けた細孔から注入されており、噴流コラム外周部の変化をよく観察することができる(注入法 B)。 $Re_j = 700$ の低レイノルズ数では、コラム外周部には流れのせん断に基づく染料流脈の変形が観察されるが、観察範囲でコラムは崩壊していない。 $Re_j = 900$ ではコラム外周部の変形量は大きくなり、長円状に変形した流脈を観ることが出来る。 $Re_j = 1100, 1300$ では3~4列の渦輪列を確認することができ、特に $Re_j = 1300$ ではノズルにかなり近い位置で最初の渦の巻上りが生じている。

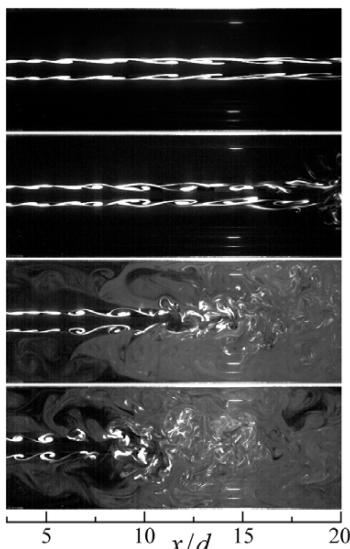


図7 流れの可視化画像 (注入法 B)
(上から $Re_d = 700, 900, 1100, 1300$)

(2)上記のスナップ画像では流れ場の時間的な変動を示すことができないため、ビデオ撮影された画像列を処理して調べる必要がある。すなわち、撮影画像列から

$y/d = 0.5$ における x 方向への輝度情報を抽出し、時間方向に積層した再構成画像を作成し、臨界レイノルズ数域におけるコラム崩壊位置の時間変化を示したものが図8である。画像の特徴は、 x 方向に伸びた縞模様と、 $x/d = 15$ 近傍で時間方向への明暗領域境界の変化にある。前者は波状変形したコラムの x 方向移動に伴うもので、短い時間スケールを有する。 $Re_j = 700$ において、その平均周波数は7.9 Hzとなり、ストロハル数で0.37となった。 $Re_j = 750$ では8.5 Hzで、ストロハル数は一致した。一方、後者はこれよりも長周期の変化を示し、 $Re_j = 700$ の無次元時間スケールで約1000であるが、 $Re_j = 750$ ではこの傾向が顕著には観られない。

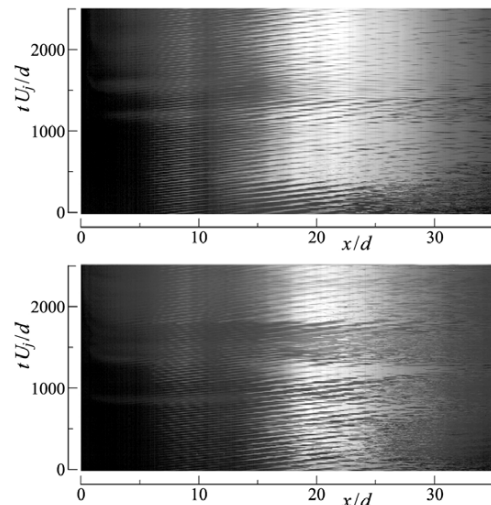


図8 可視化画像の再構成画像 (注入法 A)
($y/d = 0.5$, 上から $Re_d = 700, 750$)

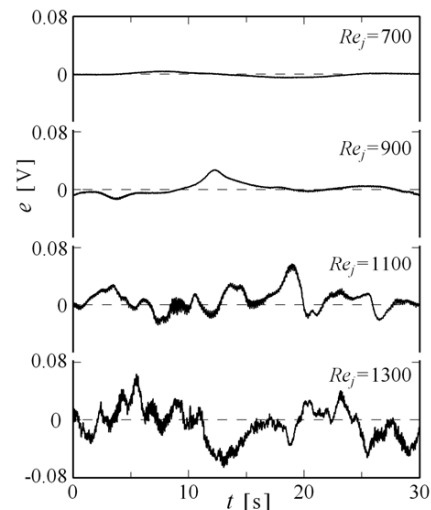


図9 熱線センサーの出力変動波形
($x/d = 5.5$, 上から $Re_d = 700, 900, 1100, 1300$)

(3)熱線センサーの出力波形を図9に示す。測定位置は $x/d = 5.5$ であり、噴流レイノルズ数 Re_j を700~1300の範囲で変化させている。それぞれのレイノルズ数における流れの可視化画像は図7に対応している。熱線出力

波形は小振幅 - 高周波数の変動成分と, $Re_j = 1100, 1300$ では, これに重畳した大振幅 - 低周波数の変動成分からなる。前者の小振幅 - 高周波数成分は波状変形したコラムの x 方向移動に伴うものであり, せん断層の不安定波動の生成による。熱線出力のパワースペクトルからこのピーク周波数を読み取り, 図 10 に示した。ピーク周波数 f_p は, 噴流速度 U_j にほぼ比例して増加しており, 噴流速度に基づく特性長で $U_j/f_p \approx 16 \text{ mm}$ となる。この特性長はコラム直径の 2.67 倍であり, コラム不安定に基づくモードに概ね対応する。すなわち, 噴出直後に形成される初期せん断層不安定波動に卓越して, コラム不安定波動が顕在化している。

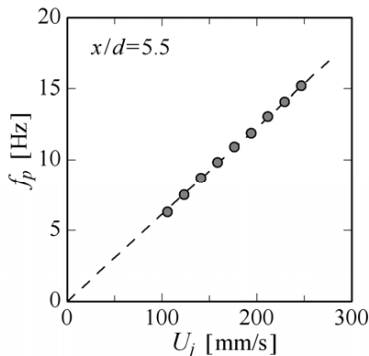


図 10 熱線出力のピーク周波数の変化

大振幅 - 低周波数の変動波形の特徴抽出には, ウェーブレット変換などの利用が考えられるが, ここでは, 熱線出力を制御入力信号として採用する場合, 実時間ベースでのデータ解析が必要となることを前提に, 以下の簡便なデータ解析法の適用を試みた; (a) 全体平均値 E に対する変動値 e の符号を調べる, (b) 短時間の局所平均および分散 e_{var} を求め, しきい値と大小比較する。両者の適用結果を図 11 に示す。方法(a)は局所分散を求める時間長 T としきい値 k_d の影響下にあり, 図の左端に T の値を示した。局所分散の大きさは時間長 T 程度の速度勾配の強さを表すものであり, 図より, 本流れ場の低周波数変動は 8 s 程度の時間スケールであることが分かる。

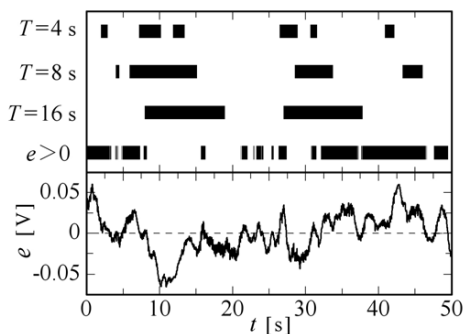


図 11 熱線出力の特徴抽出結果 ($x/d = 10.5, Re_d = 1100$)

(4) まず, 単独で環状パルス噴流を噴出させた場合の可視化画像を図 12 に示す。図 3 のカム軸を 1 回転させ

ており, カム軸の回転速度に応じて噴出速度と噴出期間は変化する。また, 横方向 3 列の画像は時間刻み 5 s での流れの進行を示したものである。何れの噴出期間においても渦輪の形成がみられるが, 噴出期間が長いほど渦輪の進行速度が速くなっており, 期間 25 ms では渦輪はほとんど滞留している。

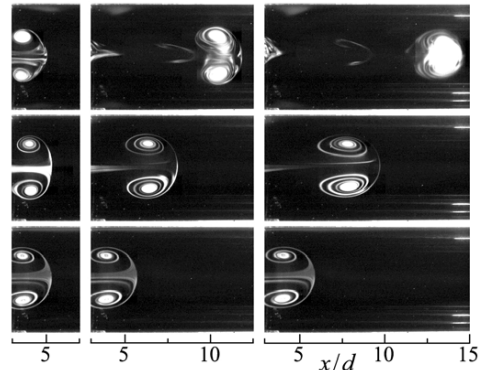


図 12 環状パルス噴流の可視化画像 (上段: 40 ms, 中段: 30 ms, 下段: 25 ms)

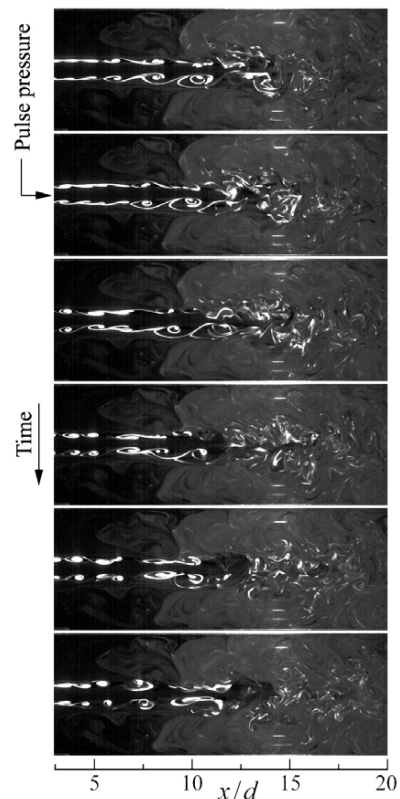


図 13 環状パルス噴流印加時の可視化画像 (上から下に時間進行, $Re_d = 1100$)

図 13 は, $Re_j = 1100$ の主噴流に, 噴出期間 25 ms の条件でパルス圧力を印加した場合の可視化画像であり, 上から下に時間差 0.06 s の時系列変化を示している。パルス圧力印加直後に, 噴流コラム外周面での渦の巻き上がりが生じ, 流下する様子を見て取れる。

< 引用文献 >

- (1) 森下悦生, 日本航空宇宙学会誌, 38 (1990), 591-599.
- (2) 甲藤好郎, "伝熱概論," 養賢堂, (1964).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

井上吉弘, 北野裕大, 澤貴行, 初期領域における円形壁面噴流の可視化実験, 可視化情報学会全国講演会 (姫路 2 0 1 2), 2012 年 10 月 04 日 ~ 2012 年 10 月 05 日, 姫路商工会議所 (兵庫県, 姫路市)

井上吉弘, 北野裕大, 佐々木実, 円管内噴流の流れの安定性に関する研究 (流れ状態の計測), 日本機械学会東海支部第 62 期総会講演会 2013 年 03 月 18 日 ~ 2013 年 03 月 19 日, 三重大学 (三重県, 津市)

井上吉弘, 井手政徳, 北野裕大, 噴流および後流における超音波速度分布測定について, 第 41 回可視化情報シンポジウム, 2013 年 07 月 16 日 ~ 2013 年 07 月 17 日, 工学院大学新宿キャンパス (東京都, 新宿区)

井上吉弘, 北野裕大, 佐々木実, 円管内噴流の流れの安定性に関する研究 (環状パルス噴流による操作), 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会, 2014 年 03 月 18 日 ~ 2014 年 03 月 19 日, 大同大学 (愛知県, 名古屋市)

井上吉弘, 佐藤寛敏, 後方ステップによるはく離流れに関する実験的研究 (大規模流れ構造について), 第 92 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 25 日 ~ 2014 年 10 月 26 日, 富山大学 (富山県, 富山市)

Keita SAKAKIBARA, Yoshihiro INOUE, FLOW STABILITY OF A ROUND JET ISSUING INTO A CIRCULAR PIPE, INT. CONF. ON JETS, WAKES AND SEPARATED FLOWS, 2015 年 06 月 16 日 ~ 2015 年 06 月 18 日, KTH MECHANICS, STOCKHOLM, SWEDEN

[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]

なし

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

井上 吉弘 (INOUE, Yoshihiro)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号: 00176455

(2) 研究分担者

佐々木 実 (SASAKI, Minoru)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号: 20183379

(3) 連携研究員

なし

(4) 研究協力者

なし