

環状吸込流を付加した円形自由噴流の 流動特性に及ぼすレイノルズ数の影響

山下英成*・福原 稔**・野崎 勉**・
福田 努***・中村一未***・木通克男**

EFFECT OF REYNOLDS NUMBER ON FLOW CHARACTERISTICS OF CIRCULAR FREE JET ADDED ANNULAR SUCTION FLOW

Hiddenari YAMASHITA, Minoru FUKUHARA, Tsutomu NOZAKI,
Tsutomu FUKUDA, Kazumi NAKAMURA and Katsuo KIZUSHI

The effects of the Reynolds Number on the flow characteristics of the circular free jet added the annular suction flow were examined experimentally. The two-dimensional flow field was measured by PIV, and the pass frequency of vortices was analyzed by FFT analyzer using a hot wire. As a result, the time mean velocity and the fluctuating velocity of the flow field in the vicinity of the exit of the pipe are approximately the same in all cases of the Reynolds Number. Therefore, it was found that these is hardly affected by the Reynolds Number. The pass frequency of the vortices is observed clearly at the velocity ratio within the range 0.7 to 0.9. As the Strouhal number shows almost a fixed value in all cases of the Reynolds Number, it was found that the periodicity of the flow is also hardly affected by the Reynolds Number.

Keywords : Flow control, Jet, Particle Image Velocimetry, Vortex, Reynolds number

1. まえがき

噴流の拡散・混合を制御することは、工学的見地からその必要性が高い^{1)~3)}。著者らは、同軸二重円管の外側に環状吸込流を設け、せん断層内の渦構造をこの吸込流により操作し、噴流の拡散・混合を制御することを提案した⁴⁾。これまでにPIV (Particle Image Velocimetry) を用いて、環状吸込流を付加した円形自由噴流の非定常な流れ場の多

点同時計測を行い、以下のような有用な結果を得た^{5),6)}。すなわち吹出し流速(レイノルズ数)を一定とし、環状吸込流を付加した場合、管出口端近傍において変動速度の半径方向への増大を示すことから噴流の拡散効果を得た。また、非定常な流れ場の計測から、非対称な半径方向への渦放出現象を観察することができ、上述した変動速度の増大の要因を明らかにした。

噴流は実用上使用条件に応じ、その吹出し流速つまりレイノルズ数を変化させて使用される。そのため、上述した流動特性がレイノルズ数の影響を受けるかどうか調査しなければならない。一般に自由せん断乱流場の時間平均特性についてはレイノルズ数の影響を受けないことが知られている⁷⁾が、そのようなにならない結果も報告されている⁸⁾。

2000年7月15日受理

* 博士後期課程物質生産工学専攻

** 機械工学科

*** 博士前期課程機械工学専攻

また、ここで取り扱う流れ場においては、通常の流れ場とは異なり非定常性が強くかつ空間的に大規模な渦の放出現象を示すことから、その渦の周期性についてもレイノルズ数の影響について調査する必要がある。

そこで、本研究では環状吸込流を付加した円形自由噴流において管出口端近傍での流れ場の流動特性に及ぼすレイノルズ数の影響について調査する。本報ではレイノルズ数を 1.56×10^4 から 6.26×10^4 に変化させ、前報^{5),6)}と同様に環状吸込流を種々付加させて実験を行った。管出口端近傍の全領域における二次元速度場はPIVを用いて測定し、平均流速および変動速度の各時間平均特性について調べた。また、流れの周期性を示す渦の周波数特性は熱線流速計を用いたFFT解析により求めた。

2. 実験装置および方法

Fig.1に可視化実験装置および画像処理装置の概略を示す。水平に設置された同軸二重円管の内管を噴口、外管を環状吸込口とし、それぞれ噴口管内径 ($d_i=47\text{mm}$) および吸込管内径 ($d_s=100\text{mm}$) は前報^{4),5)}と同じ寸法を用いた。噴流は管出口端において十分発達した乱流の速度分布を有し、その作動流体には空気を用いた。座標は円筒座標系を用い、管出口端の中心を原点とし、噴流中心の軸方向に z 軸、半径方向に r 軸をとる。実験装置の詳細については前報^{4),6)}を参照いただきたい。

PIVを用いた計測について以下に示す。トレーサ粒子にはタルクパウダ (平均粒子径: $10\mu\text{m}$) を使用した。それを噴流中に混入することにより濃度パターンを形成した。光源にはダブルパルスNd:YAGレーザ (出力: $15\text{mJ}/\text{パルス}$ 、繰り返し周波数: 30Hz) を用い、シリンドリカルレンズによりシート状にしたレーザライトシート (LLS) を測定断面 (r - z 断面) に間欠照射した。画像入力装置としてNTSC方式のCCDカメラ (フレームレート: $1/30\text{s}$) を用いた。このフレームレートでは移動速度が速い場合、2時刻間における濃度パターンの対応付けは困難となる。そのため、前報^{5),6)}と同様フレームレートに依存しない短い時間間隔の2時刻の画像を得る手法を採用した。LLSの照射間隔は、後述するようにレイノルズ数の 1.56×10^4 、

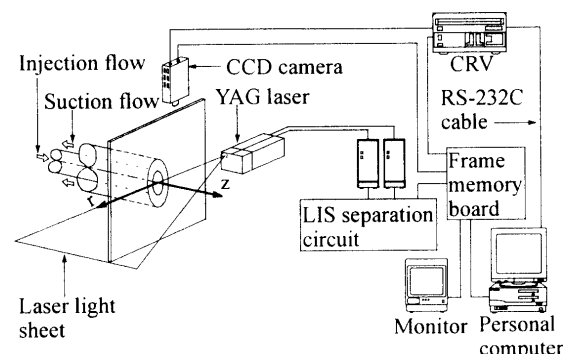
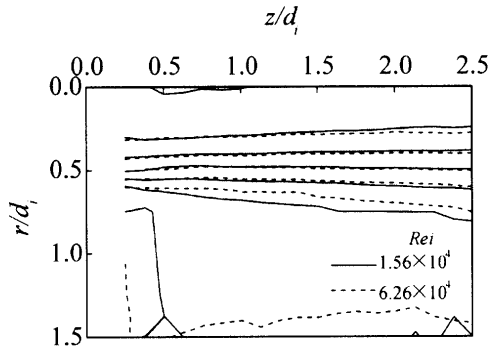


Fig.1 Schematics of visualization system and image processing system

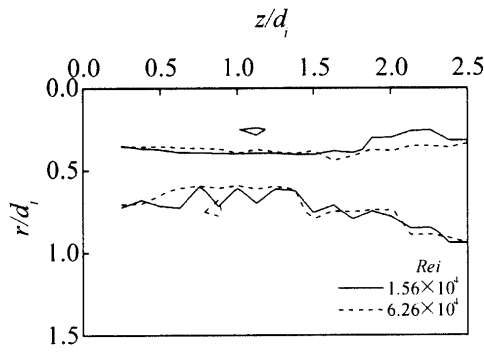
3.13×10^4 、 4.69×10^4 および 6.26×10^4 に対してそれぞれ $272\mu\text{sec}$ 、 $132\mu\text{sec}$ 、 $84\mu\text{sec}$ および $64\mu\text{sec}$ に設定した。このLLSの照射は各フレームごとに連続的に行われ、得られたCCDカメラの出力画像はCRV (光ディスク) に転送、記録された。得られた2時刻の画像に対し濃度相関法を適用して速度ベクトルを算出した。時間平均量を求めるため、サンプリング数は1000個とした。本実験での一連のPIVによる解析には、市販の画像処理流速計測システムCurrent PIV Ver.1.80 [日本カノマックス (株)] を用いた。可視化および画像処理の方法等の詳細については前報⁵⁾を参照いただきたい。なお、軸方向の測定領域である $0 < z/d < 0.25$ の範囲では、レーザライトシートが二重円管および平板に反射し、解析上過誤ベクトルが多く発生するため、この領域の結果は表示しない。

上述したように本研究で使用している PIV 計測システムの時間分解能は 33msec であるため、それに比べ約 8 倍高い分解能 (4msec) を有する熱線流速計を用いて渦の通過周波数を計測した。1 型熱線センサは軸方向と半径方向の合成成分が測定できるように r - θ 断面内において円周方向に接するように設置した。変動速度の周波数特性を表すパワースペクトルは FFT アナライザを用いて解析された。なお、サンプリング数は 1.28×10^5 個とした。

実験条件として、吹出し流速の流路断面積平均値 \bar{U}_i は 5m/s 、 10m/s 、 15m/s および 20m/s の 4 通りとした。つまり吹出し流のレイノルズ数 $Re_i (= \bar{U}_i d_i / \nu, \nu: \text{動粘性係数})$ は、 1.56×10^4 、 3.13×10^4 、 4.69×10^4 および 6.26×10^4 となる。流速比



(a) Time mean axial velocity



(b) Fluctuating velocity

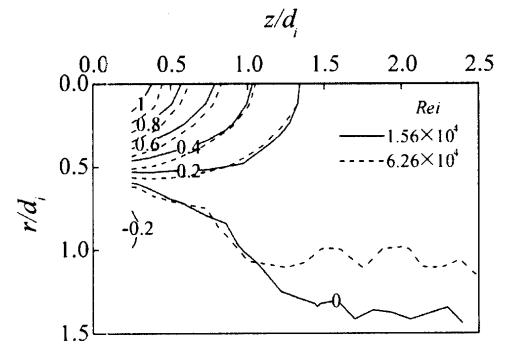
Fig. 2 Contour maps of time mean axial velocity and fluctuating velocity ($\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$)

\bar{U}_s/\bar{U}_i (\bar{U}_s : 吸込流速の流路断面積平均値) は 0、0.6、0.7、0.8、0.9 および 1.0 の 6 通りとした。吸込流を付加した場合、管径比 $d_s/d_i = 2.13$ において^{5),6)} 変動速度の最も増大した $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.8$ 付近を中心とした値を抽出した。また熱線流速計を用いた場合、さらに測定点数を 2 点増加させて実験を行った。

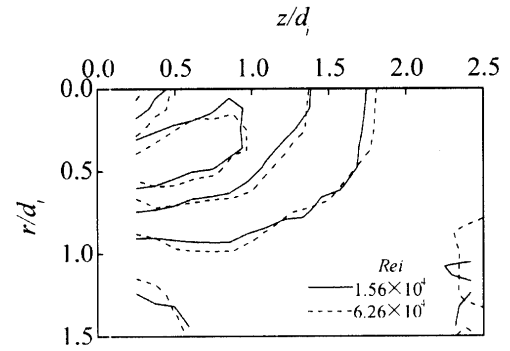
3. 実験結果および考察

3.1 速度場の時間平均特性

PIV を用いて得られた速度場の時間平均特性について調べる。まず、吸込流を付加しない場合 ($\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$) の特性量について調べる。時間平均流速の軸方向成分 \bar{U}_z および変動速度の軸方向と半径方向の合成成分 S' ($=\sqrt{\bar{u}_z^2 + \bar{u}_r^2}$) を \bar{U}_i で無次元化した等高線図をそれぞれ Fig.2(a)および



(a) Time mean axial velocity



(b) Fluctuating velocity

Fig. 3 Contour maps of time mean axial velocity and fluctuating velocity ($\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.8$)

Fig.2(b)に示す。一例としてレイノルズ数がそれぞれ 1.56×10^4 (実線) および 6.26×10^4 (破線) の場合について取り上げ、両者を比較する。前章で述べたように軸方向の測定領域は $0.25 \leq z/d_i \leq 2.5$ とし、半径方向の測定領域は流れの軸対称性を考慮し、片側のみ $0 \leq r/d_i \leq 1.5$ とした。レイノルズ数が 1.56×10^4 の場合、Fig.2(a)からわかるようにせん断層の $r/d_i = 0.5$ 付近に速度勾配の大きい領域が存在し、下流に行くにつれその勾配は若干緩やかになる。また Fig.2(b)において、 $r/d_i = 0.5$ 付近に変動速度の高い領域が存在する。これらの分布をレイノルズ数が 6.26×10^4 の場合の分布と比較するとその両者はほぼ一致することから、吸込流を付加しない場合においてレイノルズ数の影響をほとんど受けないことがわかった。

そこで、吸込流を付加した場合のレイノルズ数

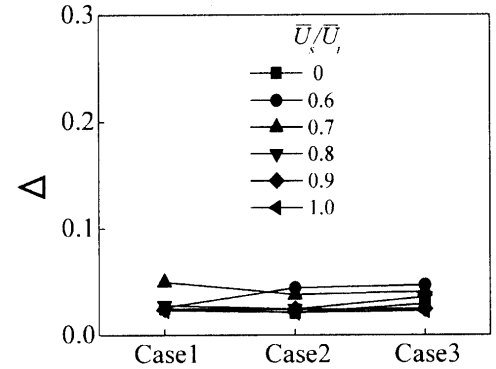
の影響について調べる。Fig.2(a)および Fig.2(b)と同様、 \bar{U}_i で無次元化した時間平均流速の軸方向成分 \tilde{U}_z および変動速度 S' の等高線図をそれぞれ Fig.3(a)および Fig.3(b)に示す。一例として流速比が 0.8 についてレイノルズ数がそれぞれ 1.56×10^4 および 6.26×10^4 の場合について示し、両者を比較する。レイノルズ数が 1.56×10^4 の場合、Fig.3(a)からわかるように吸込み管端のごく近傍に吸込流の存在が確認でき、その影響を受けた吹出し流は下流まで到達できず、速度勾配の大きい領域は管出口端近傍に存在することがわかる。また Fig.3(b)において、管出口端近傍に変動速度の高い領域が存在する。これらの分布をレイノルズ数が 6.26×10^4 の場合の分布と比較すると、その両者は吸込流を付加しない場合と同様、一致することがわかった。

他の流速比についてもレイノルズ数の影響を調査するため、測定領域内の同じ位置における各特性量の残差について評価を行う。残差 Δ は、

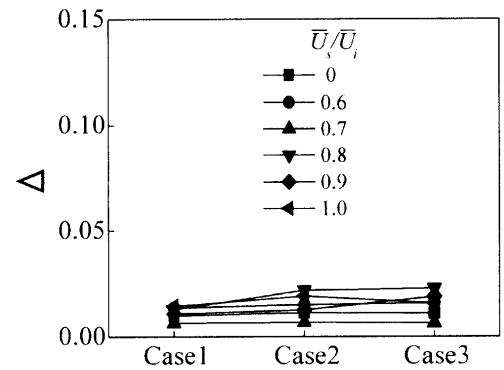
$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N |A_i - B_i|}{N} \quad (1)$$

により求められる。ここで、基準値 A_i に $Rei=1.56 \times 10^4$ における特性量を用い、参照値 B_i にそれぞれ $Rei=3.13 \times 10^4, 4.69 \times 10^4$ および 6.26×10^4 における特性量を用いた。本論文では、これらをそれぞれ Case1、Case2 および Case3 と呼ぶことにする。測定領域内の計算点数の総数 N は 247 点（軸方向：19 点、半径方向：13 点）とした。この評価方法は空間的データを失うが、すべての条件を総合的に評価できるという点では有効である。時間平均流速 \tilde{U}_z/\bar{U}_i および変動速度 S'/\bar{U}_i の残差について求めた結果をそれぞれ Fig.4(a)および Fig.4(b)に示す。横軸は各条件、縦軸は残差 Δ を表す。上述の Fig.2 ($\bar{U}_z/\bar{U}_i=0$) および Fig.3 ($\bar{U}_z/\bar{U}_i=0.8$) に示したデータは Fig.4 中の Case3 ($Rei=1.56 \times 10^4$ と 6.26×10^4 を比較した場合) にプロットされている。Fig.4(a)および Fig.4(b)の両図からわかるように、それぞれの流速比において Case1、Case2 および Case3 を比較するとほぼ一定値を示すことから、時間平均流速および変動速度についてレイノルズ数の影響をほとんど受けないことがわかった。

3.2 渦の周波数特性



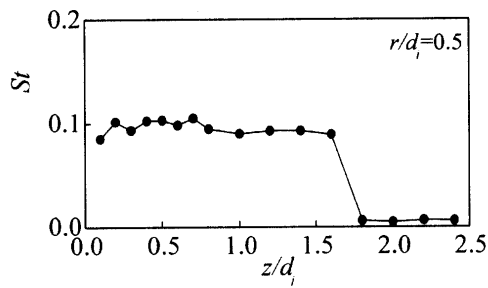
(a) Time mean axial velocity



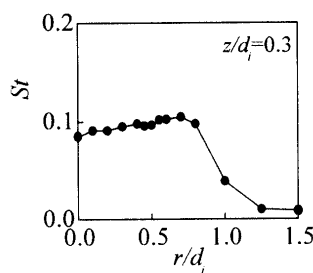
(b) Fluctuating velocity

Fig.4 Residuals of local values

前節では時間平均流速および変動速度について明らかにしたが、本節では渦の通過周波数を計測することにより流れの周期性について調べる。ここで、熱線センサは 1 点計測であるため、設置位置を特定する必要がある。一例として流速比が 0.8 の場合について説明する。上述した Fig.3(b)の等高線図の刻みを細かくし、変動速度の最も高い位置を求めた結果、 $z/d_i=0.3$ および $r/d_i=0.5$ となった。この位置を基準とし軸方向および半径方向に熱線センサをトラバースし、変動速度のパワースペクトルを計測した。検出されたピーク周波数 f を用い、流れの周期性を表す無次元数のストローハル数 $S_t (=fd/\bar{U}_i)$ を算出した。その結果を Fig.5(a) および Fig.5(b)に示す。両図からわかるように、ストローハル数は $0.1 \leq z/d_i \leq 1.6$ および $0 \leq r/d_i \leq 0.8$



(a) Axial direction



(b) Radial direction

Fig. 5 Distributions of axial direction and radial direction of Strouhal number ($\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.8$)

の範囲においてほぼ一定の値を示していることから、熱線センサの設置位置においては変動速度の最も高い位置を目安として設定できることがわかった。

一例としてレイノルズ数を 6.26×10^4 と一定にし、流速比を変化させた場合の周波数特性の解析結果を Fig.6 に示す。横軸は周波数 f [Hz]、縦軸は変動速度のパワースペクトル \sqrt{S} [m/s] を表す。流速比が 0.6 の場合、流速比が 0 の場合と比べて全帯域のスペクトルの増加は見られるが、顕著なピークは見られない。流速比が 0.7 になると、パワースペクトルのピークが 52Hz 付近に見え始める。流速比が 0.8 の場合、パワースペクトルのピーク ($f \approx 37\text{Hz}$) が最も顕著となる。これは管径比 $d_s/d_i = 2.13$ において変動速度の最も増大した現象と対応している。さらに流速比が 0.9 になると、パワースペクトルのピークは流速比が 0.8 に比べて緩やかとなり、流速比が 1.0 になるとそのピークは見えなくなる。上述したピーク周波数について

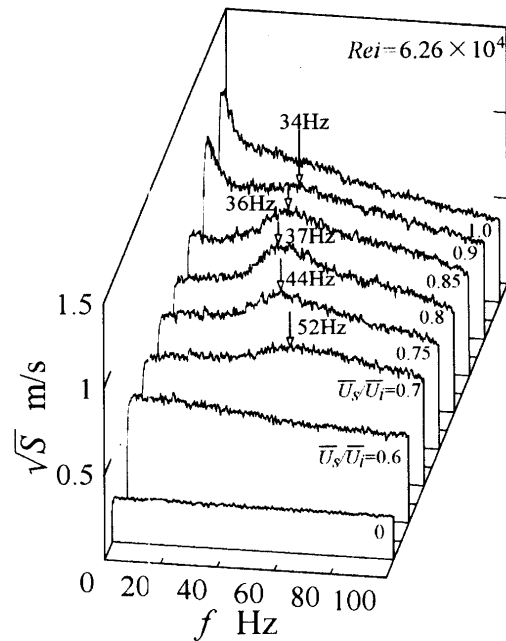


Fig. 6 Power spectrum distributions on various velocity ratios

は、流速比の増加とともに小さくなる傾向を示す。これは吸込流が増加するにつれ、せん断層の渦スケールが大きくなることから、低周波数側にピーク周波数が移動したものと考えられる。一方、流速比が 0.9 および 1.0 において上述した周波数帯域よりも低い帯域に卓越したスペクトルが見られる。これは、吸込流が強すぎるにより生じた上述とは別な現象であると考えられ、後述においては取り扱わないこととした。

つぎにパワースペクトルのピークを検出した流速比が 0.8 の場合を例にとり、ピーク周波数に及ぼすレイノルズ数の影響について調べた。その結果を Fig.7 に示す。レイノルズ数が増加するにつれ、ピーク周波数は高くなり、さらに全帯域のスペクトルも増加している。これはパワースペクトルのピークを検出した他の流速比についても同様なことがいえる。このピーク周波数を用いて、ストローハル数 St を求めた。その結果を Fig.8 に示す。横軸はレイノルズ数 Rei を表す。なお、パワースペクトル分布を 3 回計測し、その平均値をプロットしている。流速比が増加するにつれ、それぞれのレイノルズ数においてストローハル数は小さくなる傾向を示す。ただし、いずれのレイノルズ数

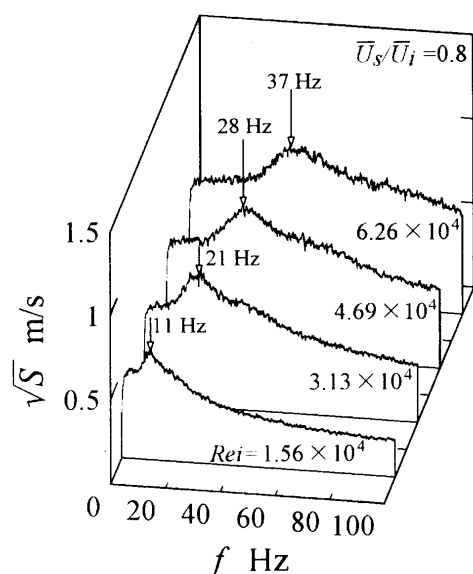


Fig. 7 Power spectrum distributions on various Reynolds number

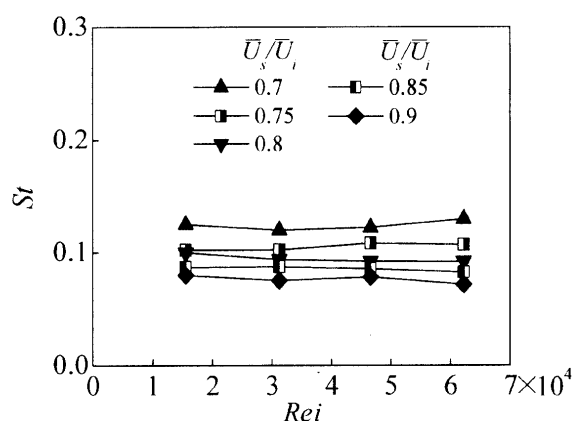


Fig. 8 Strouhal number

においてストローハル数はほぼ一定値を示すことから、流れの周期性についてもレイノルズ数の影響をほとんど受けないことがわかった。

4. むすび

本実験ではレイノルズ数を 1.56×10^4 から 6.26×10^4 に変化させ、環状吸込流を付加した円形自由噴流の流動特性に及ぼすレイノルズ数の影響を各流速比について調べた結果、以下のような結論を

得た。

- (1) いずれのレイノルズ数においても、管出口端近傍の流れ場の時間平均流速および変動速度は各流速比においてほぼ一致することから、レイノルズ数の影響をほとんど受けないことがわかった。
- (2) いずれのレイノルズ数においても、流速比が 0.7 から 0.9 の範囲において、渦の通過周波数のピークが見られる。この周波数を用いて得られたストローハル数はレイノルズ数変化してもほぼ一定値を示すことから、流れの周期性についてもレイノルズ数の影響をほとんど受けないことがわかった。

謝辞

終わりに臨み、PIV を用いた計測を行うにあたり新日本製鐵(株)津田宜久氏より貴重なご助言を賜った。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Hussain, F. and Husain, H. S., Jour. of Fluid Mechanics, 208, pp.257-320(1989)
- 2) 豊田国昭、白浜芳朗、小谷幸慈、日本機械学会論文集(B 編)、58-545, pp.7-13(1992)
- 3) 社河内敏彦、安田光博、安藤俊剛、若松朋宜、日本機械学会論文集(B 編)、61-589, pp.3251-3259(1995)
- 4) 野崎勉、園田裕和、李輝、福原稔、南田純也、日本機械学会論文集(B 編)、62-598, pp.2208-2214(1996)
- 5) 園田裕和、野崎勉、福原稔、米盛敬、津田実、可視化情報学会誌、18-69, pp.123-129(1998)
- 6) 福原稔、園田裕和、野崎勉、米盛敬、山下英成、日本機械学会論文集(B 編)、65-629, pp.36-43 (1999)
- 7) 日本流体力学編、流体力学ハンドブック、丸善、p.171(1987)
- 8) 土屋良明、堀越長次、佐藤俊、日本機械学会論文集(B 編)、49-438, pp.376-383(1983)