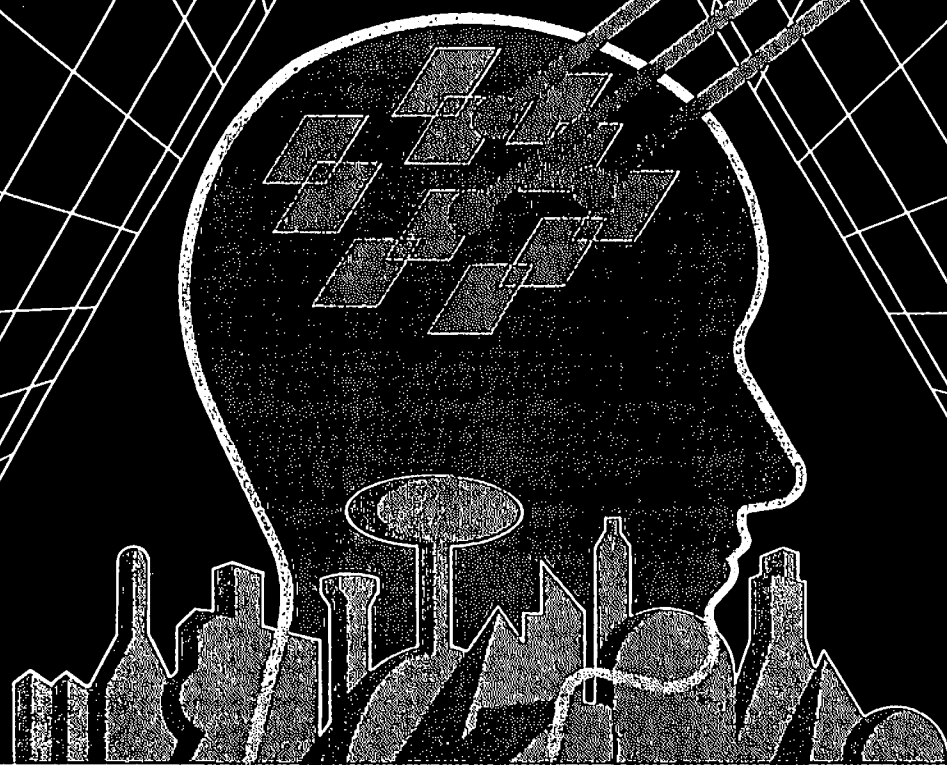


# 日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

Vol. 76, No. 772

流体工学, 流体機械, 熱工学, 内燃機関, 動力など  
Series B: Fluids and Thermal Engineering



**B**

論文集

第76巻第772号

1996年12月15日発行

日本機械学会出版

第76巻第772号

1996年12月15日発行

## UVPによる渦輪の速度ベクトル場の計測\*

北浦秀和<sup>\*1</sup>, 村井祐一<sup>\*2</sup>  
武田 靖<sup>\*3</sup>, Peter J. THOMAS<sup>\*4</sup>

## Velocity Vector Field Measurement of Vortex Ring Using UVP

Hidekazu KITAURA<sup>\*5</sup>, Yuichi MURAI,  
Yasushi TAKEDA and Peter J. THOMAS<sup>\*5</sup> Production Technology Development Center, TOTO LTD.,  
2-1-1 Nakashima, Kokurakita-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 802-8601 Japan

Ultrasound Velocity Profiler (UVP) is applied to measurement of two-dimensional velocity vector field of vortex rings in water. The instantaneous flow field passing through the measurement section is reconstructed from spatio-temporal distribution of velocity component obtained along two different ultrasound measurement lines. The method of reconstruction is valid when vortex rings have axisymmetric structure having constant translational velocity at the measurement section. Using this principle, vortex ring subject to background rotation is also presented to discuss the effect of weak Coriolis force on formation process of vortex rings.

**Key Words:** Vortex Ring, Background Rotation, Ultrasound Velocity Profiler, Flow Visualization

## 1. 緒 言

UVP(Ultrasound Velocity Profiler)は、超音波パルスドップラー式の流速分布計測装置<sup>(1)</sup>として利用が進み、流体に係わる産業技術分野に貢献している。特に、超音波を信号源とする強みを活かして、流体機器の内部流動様式の可視化や、不透明液体の流れの計測、さらには高精度な流量計として利用されている。UVPの原理については著者らのグループにおいて幾多の論文等<sup>(2)</sup>で発表してきた。最近では応用範囲の拡張に関して混相流への適用<sup>(3)(4)</sup>や、レオロメータとしての利用方法<sup>(5)</sup>についても開発を進めている。一方、UVP単体は1次元1成分速度計測であるため、PIVなどの2次元以上の流れ場の計測と対比して適用範囲が狭いと言わざるを得ない。そのため管内流などの一方向卓越流れには好適であるが、渦などの多次元流動構造を直接とらえるような応用例は多くない。

また、テイラー渦<sup>(6)</sup>のような壁面に拘束された渦の1次元的な配列による流動構造についてはUVPによる1次元計測がマッチするが、自由空間中の渦運動となると2次元以上の流動様式をとらえるための工夫が必要となる。

以上の背景のもと、本研究では自由空間中の渦輪を計測対象とし、UVPによる2次元2成分速度ベクトル場の計測方法について論ずる。渦輪は流体力学における渦のダイナミクス<sup>(7)(8)</sup>を論じる上での模範的素材であり、かつ歴史的にも多数の研究がある。すなわち、その構造から読みとられる物理については比較対象にこと欠かない。また渦輪は実際に、物質輸送やスポット冷却、乱流境界層制御や騒音源解析、内燃機関の燃料噴霧<sup>(9)</sup>など機械工学の先端的研究にも深い関連を持つ題材である。これに関連し、本研究の次の段階で、液体金属や混相流など光学的計測が不可能な媒体において、渦輪やブルームの挙動を計測する計画<sup>(10)</sup>があり今後はPIVで置き換えることができないという事情もある。以上がUVPで渦輪を計測しようとする理由である。なお、もし数億円を投じれば、超音波トランスデューサを数百配列してそれらの同期とドップラー信号の大型高速演算により、PIVと同様な速度ベクトル場計測を実現することができる。実際に医療分

\* 原稿受付 2010年8月19日。

<sup>\*1</sup> TOTO(株)(☎802-8601 北九州市小倉北区中島2-1-1)。<sup>\*2</sup> 正員、北海道大学大学院工学研究院(☎060-8628 札幌市北区北13条西8)。<sup>\*3</sup> 正員、東京工業大学(☎152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)。<sup>\*4</sup> ウォーリック大学(CV4-7AL Coventry, UK)。

E-mail: hidekazu.kitaura@jp.toto.com.

野、なかでも血液循環の3次元超音波ドップラー計測ではそのような開発が進められている。つまりハードウェアの性能に任せた多次元計測は可能である。これに対して本研究では少ない計測線から、幾何学的および流体力学的な法則性を一部利用しながら、速度ベクトル場を得る方法について論ずる。このような狙いは、器材の価格を抑えるだけでなく、計測線の配置と信号処理ソフトウェアの開発のみで多次元計測が実現できることを立証することに繋がり、UVPの応用範囲の拡大に資する。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置** 実験は英国ウォーリック大学に建造された大型回転水槽を利用した。図1に水槽および計測器材の配置の概略図を示す。高さ2.5 m、対角幅1 mの八角形断面の水槽が、回転台の上に設置されたものである。渦輪発生はノズルピストン機構とし出口径は  $D_o=50$  mm である。ノズル出口は上部水面から160 mmの深さに設定し、渦輪は鉛直下方に放出される。ピストン動作はプログラムにより自在に制御可能であり、ピストンストローク  $S$ 、ピストン最大速度  $V$ 、ならびにピストンの加減速を正確にコントロールできる。

**2.2 計測方法** UVPの超音波反射体としては液体に対して音響インピーダンスの差が大きな分散体を利用すれば良い。対象が液体金属でも水でも反射体には固体微粒子や不活性の微小気泡が利用される。ここでは陽極Al、陰極Ptとし直流電圧30 Vを印加した水の電気分解による微量の水素気泡を利用した。水素気泡と水との音響インピーダンス比は  $5 \times 10^5$  と比較的大きく、良好な超音波反射信号が得られる。水素

気泡が発生する陰極の2本のPt線(径0.5 mm、長さ100 mm)を十字に交差させて計測領域下方に配置し、発生した水素気泡が浮上して計測領域中へと供給されるようにした。計測領域中の気泡の濃度ムラを極力抑えるため、気泡発生部は計測領域下方の1250 mmに配置した。計算領域における気泡の浮上速度は概ね20 mm/sであり、データ解析上はこの平均気泡浮上速度を生データから差し引き、気泡浮上の影響を排除した。気泡直径は30~200  $\mu\text{m}$ 、ガス体積率は  $10^{-6}$  程度であり、渦輪に与える影響はほぼ無視できる。UVPの信号処理装置としてはMetFlow社のUVP-duoを用いた。これを回転水槽上部に載せ、操作用PCとの間で無線LANにより接続した。これにより、ピストンの制御、UVP計測操作の制御、およびデータの取得を全て外部からの操作で可能とした。図2にUVPの超音波トランスデューサの配置を示す。基本周波数4 MHzの三本のトランスデューサを、それぞれ異なる角度で、互いの計測線が1点で交差するように設置した。このような配置により、渦輪の並進速度の計測と、渦輪断面内における二次元速度ベクトル場の構築が可能となる。具体的にはトランスデューサAは渦輪の進行方向成分の流速分布を、トランスデューサBはそれに直交する流速成分の半径方向分布を、それぞれ計測する。トランスデューサCは、斜め45°方向の流速分布を計測する。なお、渦輪の速度ベクトル場の計測にあたっては、これらA~Cの全ての速度分布情報を全て同時に使う必要はなく、いずれか1, 2本のデータの組み合わせでベクトル場を復元することができる。

図3にピストン速度  $V=0.4$  m/s、ピストンストローク  $S=0.13$  m ( $S/D_o=2.6$ ) の場合での各計測線上で得られた時空間二次元の流速分布を示す。ここではノイズ除去など施していないUVPが出力した生データを示している。主な特徴は以下の通りである。まずトランスデューサAのデータは黒い帯が対角方向に横たわっており、渦輪が一定の並進速度でトランスデュー

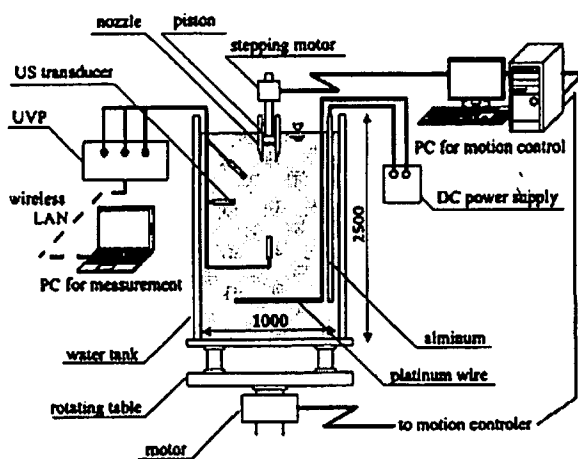


Fig. 1 Experimental set-up of vortex ring measurement

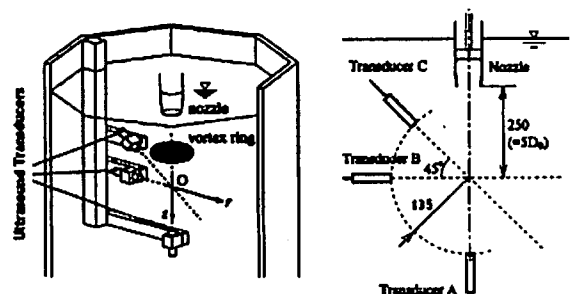


Fig. 2 Arrangement of three ultrasound transducers

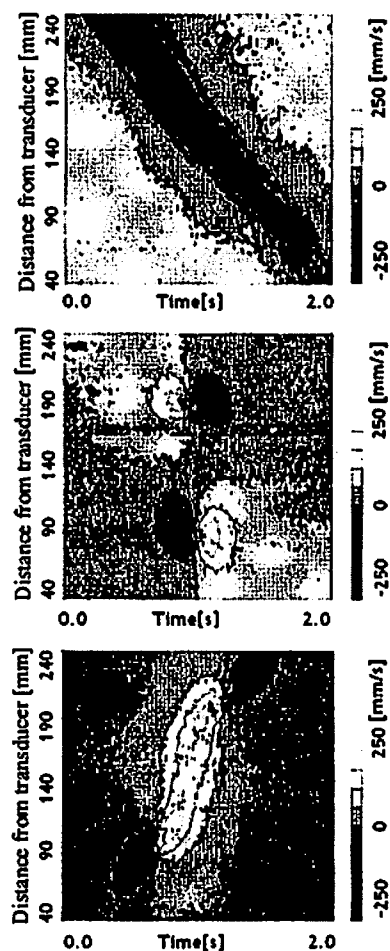


Fig. 3 Spatio-temporal velocity distributions obtained along three different measurement lines. Top: transducer A, middle: transducer B, and Bottom: transducer C

一サに接近していることがわかる。またその速度は渦輪の進行によって次第に弱り運動量拡散<sup>(11)</sup>が生じていることも確認できる。トランスデューサ B では、正と負の速度の極大点が4つ現れる。これは互いに逆回転の一对の渦が計測線を同時に横切るためである。トランスデューサ C では、中央に正の速度帯が大きく生じ、その両端に負の速度が出現するパターンとなる。またそれらは時空間二次元座標上で傾斜しており、この角度から渦輪が計測線を通過する速度、つまり渦輪の並進速度が得られるという特徴をもつ。

なお、上述のいずれの計測も、ノズル直径  $D_0$  の5倍下流での渦輪の構造を測定したものであり、渦輪が軸対称な構造を維持している領域にある。例えば  $10D_0$  下流では、Widnall 不安定<sup>(12)</sup>により周方向の波が成長し、その後、さらにそれらの非線形干渉によって乱流化する。設置すべき計測線の数は、流れの空間構造次元に依存するが、本報では  $z$  軸に関する軸対称

性を維持している安定域での渦輪を対象とする。

### 3. データ解析手法

3.1 前処理 図3で示したようにUVPの出力データにはエラーが含まれる。エラーの原因には主に二つあり、一つはトレーサである水素気泡の局所的な濃度ムラによるものである。もう一つはUVPで捕らえることができる速度ダイナミックレンジを一時的に超える部分が存在することによるエラーである。

前者のトレーサ濃度ムラについて詳述すると、例えば水素気泡が局所的に不十分な場所では反射波を受信できず、ドップラー周波数がランダムなノイズとなる。逆に水素気泡が過度に高濃度な部分では超音速パルスがそこで吸収・減衰してしまい、信号を取得できない。無論、このようなことが生じないように水素気泡の数密度を調整すべきであるが、乱流中とは異なり静止液体中の数密度は拡散作用がないため、均一に調整しにくく自然に疎密を形成する。このような場合には、図3のような時空間座標上で画像ノイズ除去と同じような二次元平滑化フィルタを課し、高周波ノイズ除去を行うのが適切である。本研究では  $3 \times 3$  のメディアンフィルタを1回のみ適用してノイズ除去を行った。

もう一つのエラーの原因となる速度ダイナミックレンジの超越は、渦輪を計測対象としている故に顕在化する問題である。すなわち高レイノルズ数の渦輪の渦核付近では並進速度に比べて非常に大きな局所的な流速を持つ。管内流など一方向卓越流れでは、その主流速度が大きくてもUVPの計測線を主流に対して大きく傾斜させることで、ドップラー周波数の投影成分を低下させ、結果的に高速の流れを計測することが可能になる。しかし渦輪のように多次元流動ではこの原理が適用できず、実際の流速に比例したドップラー周波数をUVPで扱わねばならない。そこで本研究ではそのような速度オーバーシュートが生じている部分を自動判定して、正しい速度分布に補正する処理を加えた。

図4はトランスデューサCが計測した速度分布に対する補正の一例である。上段は速度オーバーシュートが生じて一部の速度分布が別の速度帯にジャンプしている例である。これはドップラーシフトの位相がナイキスト限界  $\pi$  を超えて実際とは異なる位相の位置に現れるため、速度エイリアシングと呼ばれる。ただし超えた後は再び連続的な速度分布を出力する。従って速度が不連続な空間座標を空間微分操作により2点検出し、その間の速度分布を周囲に連結させれば、

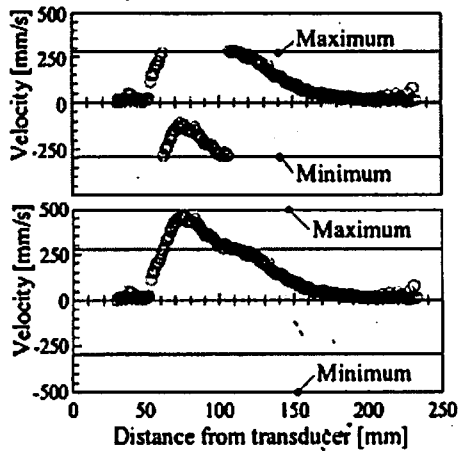


Fig. 4 Correction of velocity profiling due to velocity aliasing. Top: before correction, Bottom: after correction

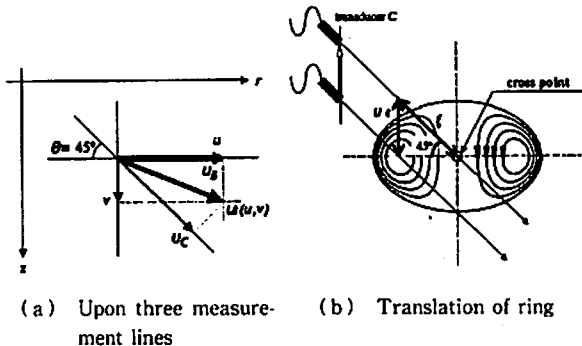


Fig. 5 Relationship between flow velocity vector of vortex ring and componental velocity vectors measured by UVP

正しい速度分布に戻すことができる。なお、非常にスピニングが速い渦輪では2重のエイリアシングが起こり、不連続点が4つ以上出現する。このような場合では復元処理が複雑となるため、データ解析の対象から外し、無効とした。

3.2 ベクトル場復元その1: 直接マッチング法

図5(a)は、渦輪の  $r$ - $z$  座標における流体の速度ベクトル  $u=(u, v)$  に対して、トランスデューサ B によって計測される速度ベクトル  $U_B$  と、トランスデューサ C によって計測される速度ベクトル  $U_C$  の関係を示す。図5(a)より、

$$u = U_B \dots\dots\dots (1)$$

$$v = U_C \sin \theta - (\tan \theta)^{-1} (U_B - U_C \cos \theta) \dots\dots\dots (2)$$

の関係があることが導かれる。ここで今回の配置では  $\theta=45^\circ$  である。この時点で、ある一点の速度ベクトルはその点上の  $U_B$  と  $U_C$  が与えられれば決定するこ

とがわかる。ただし実際にはそのような点は図2の右図に示すように3つの計測線の交点ただ一つである。そこで軸対称二次元の渦輪が一定速度で移動するという条件を適用する。すなわちテイラーの凍結仮説である。この場合、時空間二次元の関数として計測される  $U_B$  及び  $U_C$  を次のように渦輪並進速度  $U$  を用いて空間二次元関数に変換する。

$$z_B(t) = z_0 - Ut \dots\dots\dots (3)$$

$$z_C(t) = z_0 - U(t + \xi \cos \theta/U) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $z_0, U$  は、それぞれ、交点の  $z$  座標とトランスデューサ A により計測される渦輪の並進速度を示している。式(3)、(4)における、時刻  $t=0$  は、渦輪が最初に交点上に到達した時刻に相当する。式(4)中の変数  $\xi$  はトランスデューサ C の計測線上の計測線交点を原点とした位置座標を示している。以上のように、速度成分  $U_B$  及び  $U_C$  は、空間座標の関数として書き換えることができ、式(1)、(2)にこれを代入することで、最終的に流体の速度ベクトルの二成分は以下の式で与えられる。

$$u(z, r) = U_B[z_B(t), r] \dots\dots\dots (5)$$

$$v(z, r) = U_C[z_C(t), r] \sin \theta - (\tan \theta)^{-1} \{ U_B[z_B(t), r] - U_C[z_C(t), r] \cos \theta \} \dots\dots\dots (6)$$

図6に本手法を用いて計測された渦輪の速度ベクトル場の例を示す。ピストン速度  $V=0.3 \text{ m/s}$ 、ピストンストローク  $S=0.09 \text{ m}$  の例である。図6(a)は式(5)、(6)を用いた速度ベクトル場で、左図が絶対速度ベクトル、右図が渦輪の並進速度に対する相対速度ベクトルである。このような計測により渦核の位置やサイズ、中心軸上のジェットの構造、前後の淀み点や歪みの様子が把握できる。

3.3 ベクトル場復元その2: 連続の式推定法

UVPの計測線一本のみからでも、軸対称性な流れについては軸対称二次元の連続の式を拘束条件として、速度ベクトル場を推定することができる。図6(b)はその結果を示している。具体的には、次の連続の式、

$$\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

を用いる。ここで速度成分  $u$  はトランスデューサ B より直接得られるので、式(7)を変形して、

$$\frac{\partial v}{\partial z} = - \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \dots\dots\dots (8)$$

の左辺が与えられることになる。ここで速度成分  $v$  については渦輪が計測空間を一定の並進速度  $U$  で通過するとすれば、次の移流方程式を満たす。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

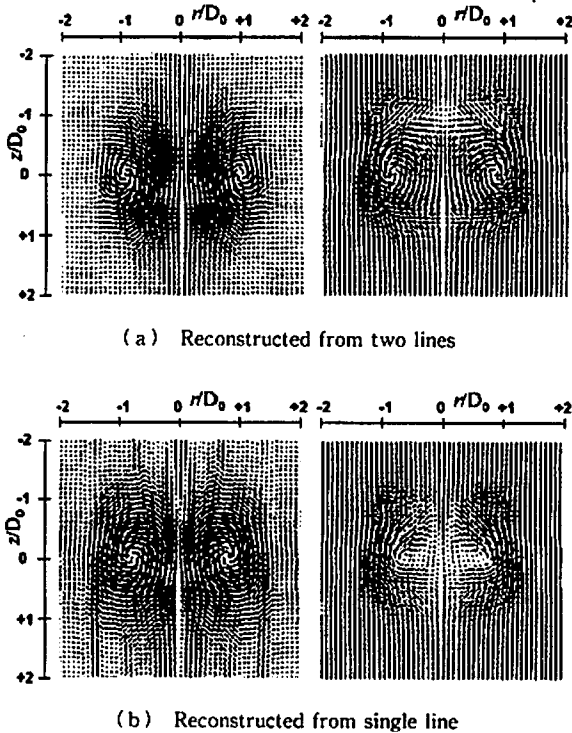


Fig. 6 Velocity vector field of vortex ring measured by the present method. Left: absolute vector, Right: relative vector to translational velocity of vortex ring at  $V=0.3\text{ m/s}$  and  $S=0.09\text{ m}$

従って式(8)、(9)より、以下の式が得られる。

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -U \frac{\partial v}{\partial z} = -U \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \dots\dots\dots (10)$$

式(10)を時間積分することにより、軸方向の速度成分  $v$  の時空間二次元分布を得ることができる。すなわち、

$$v(r, t) = v(r, 0) - U \int_0^t \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) dt \dots\dots (11)$$

式(8)の代わりに流れ関数を用いることによって、全く同じ式が導出される。式(11)の右辺第1項は軸方向初速度であり、静止流体では  $v(r, 0)=0$  となる。これによって求められた  $u$  と  $v$  の時空間分布を式(5)、(6)によって空間二次元分布に変換することで、最終的にトランスデューサ B からの一つの流速成分のみで渦輪の速度ベクトル場を復元することができる。

再び図6の下段の結果をみると、単一計測線から式(11)を介して得られた速度ベクトル場は、二本の計測線から直接的に計測された(a)の結果に対して、差が見受けられる。この原因は、式(11)において  $u$  の空間微分を含むため、計測ノイズが増幅するためである。また、その値を時間方向に積分する操作から、速度の偏り誤差が時間方向または  $z$  軸方向に蓄積するという特徴もある。それ故、図6(b)の結果を注意し

て見ると、縦筋状にノイズパターンが現れていることが確認できる。このような微積分操作に起因するノイズは、さらなる高度なエラー除去方法を導入する必要がある。この理由のため以降の結果のデータ解析においては連続の式を経由しない直接マッチング法を利用する。

3.4 速度ベクトル計測の不確かさ 渦輪の速度ベクトル計測の誤差は、UVP単体の速度成分計測の不確かさに起因する。これによる誤差が、二方向の速度成分のマッチング条件に依存して異なる振幅で伝搬し、最終結果の精度を決める。このうちUVP単体の不確かさは、反射波のドップラーシフト周波数に比例した位相の分解能で決まる。本計測条件では、速度レンジ  $0.5\text{ m/s}$  を8ビットで分解しているため速度分解能は  $\delta=0.5/256=0.00195\text{ m/s}$  である。次に、渦輪の速度成分  $u, v$  のうち  $u$  については式(5)に示すとおり単一成分だけで決定するから、その不確かさは  $\delta=0.00195\text{ m/s}$  のままである。一方  $v$  の不確かさは式(6)より、2成分の組み合わせで決定する。本実験のように  $\theta=45^\circ$  の場合は同式から、 $v$  が  $2.21\delta=0.00431\text{ m/s}$  の不確かさをもつことが導かれる。この値は最も遅いケースでのピストン速度  $V=0.1\text{ m/s}$  の5%に満たない。また、計測可能速度レンジの1%に満たない。すなわち有効数字3桁をもつ精度で渦輪の速度成分が計測される。このことから、UVPによる渦輪の速度分布計測は瞬時構造計測に十分に耐える精度をもつと言える。

4. 実験結果

上述の計測手法を用いて、ピストンストローク  $S$  とピストン速度  $V$  を変化させた一連の計測を行った。図7に、多数の計測結果のうち4つの例を示す。ここから見て判るようにノズル出口から  $5D_0$  下流における渦輪の構造は  $S$  と  $V$  の影響を受けて変化する。なお、従来から実施されているように染料による可視化だけでも渦輪の渦核直径や並進速度は簡単に評価できる。しかしここでは速度ベクトル場が計測されてこそ精密に定量化が可能な、渦輪の性質を特徴付ける諸量を求めた。また、水槽が回転している場合の渦輪の構造の変化についてもその応用として計測した。

4.1 渦輪のサイズ 図8に、ピストンストローク  $S$  の変化に対する渦輪の直径  $D$  と進行方向の長さ  $L$  の結果を示す。  $D$  は計測された速度ベクトル場から二つの渦核の中心間距離を測定することにより得られる。渦核の中心は並進速度と同じ流速をもつことから、渦度を計算することなく容易に得られる。長さ  $L$

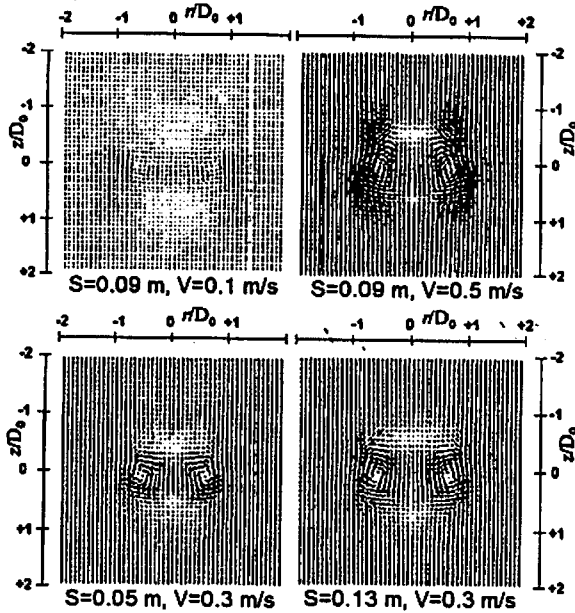


Fig. 7 Parametric dependency on piston motion

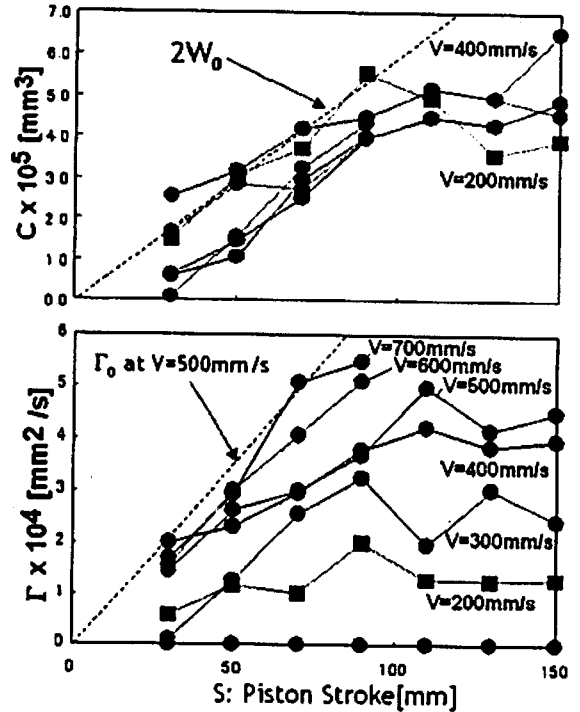


Fig. 9 Capacity and circulation

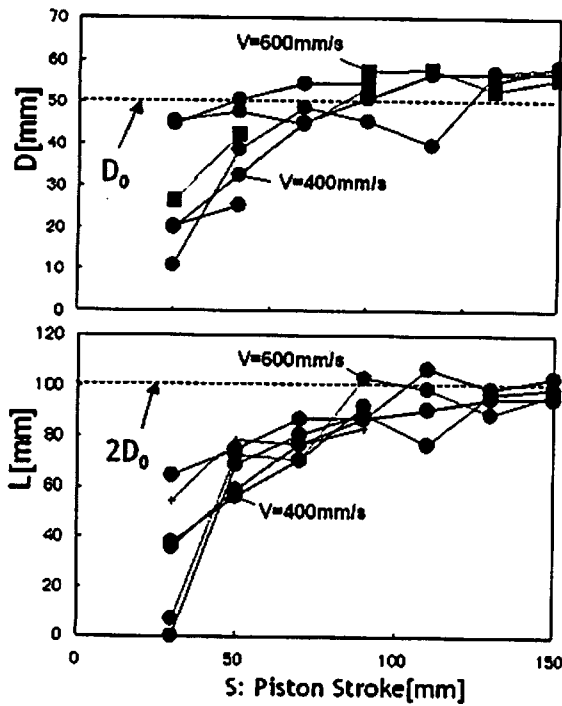


Fig. 8 Core diameter and longitudinal length

も同様に並進速度と同じ流速となる中心軸上の2点の距離から決定することができる。これらは渦輪速度ベクトル場のデータ解析プログラムによって自動的に得られるようにした。図8の結果より、 $D$ については $S$ の増加に対して右上がりとなり、ノズル直径 $D_0$ に漸近することがわかる。同様に $L$ は $2D_0$ に近づく。ここで実験点を線分で連結しているのは同じピストン速

度 $V$ であることを示しているが、 $D$ と $L$ に対する影響は単調ではない。これは本実験での渦輪のレイノルズ数、 $Re = UD_0/\nu$  (ここで $\nu$ は動粘度)が $10^4$ 以上であり、 $V$ への依存性、すなわち $Re$ 数依存性が弱く、むしろ計測位置を通過する瞬間の渦輪構造の分散が大きいことを示している。例えば渦輪は軸対称構造を保ったまま前後に振動しながら進むことがあるが<sup>(13)</sup>、各計測は一回の渦輪の通過によるものであるため、分散が生じる。

4.2 渦輪の容積と循環 図9に渦輪の容積 $C$ と内部循環 $\Gamma$ の結果を示す。 $C$ は軸対称二次元の流れ関数を求めてその符号が反転する閉曲線を検出することにより計算した。なおその結果は $D$ と $L$ のみから楕円体として $C = \pi D^2 S / 4$ で近似計算した容積と5%程度しか変わらないが正確さのため流れ関数からの判定を採用した。また循環 $\Gamma$ はストークスの定理から渦度の面積分値で与えるほうがランダム誤差の影響を緩和させることができるため、この方法を採用した。ここで面積分の範囲は計測領域全体とした。つまり渦度を有する範囲は渦輪容積内のみであり、その外部は渦無し流れとなっているため、渦輪よりも十分に大きな範囲で面積分すればよい。

図9の結果より、渦輪の容積 $C$ はピストンで吐き出される流体の容積、 $W_0$ の約2倍を上限として形成され $S > 100$  mmつまり $S/D_0 > 2$ では $C$ の増加が止

まることなどが確認される。また循環  $\Gamma$  はストローク  $S$  のみならずピストン速度  $V$  が速くなることで増加する。その値は、ピストン内部で形成される初期循環  $\Gamma_0 = VS$  と同程度であるが、 $S/D_0 > 2$  では増加が止む。これらの事は、安定な渦輪を形成するときには  $2 < S/D_0 < 3$  が適切である<sup>(14)</sup> という文献に合致する結果である。すなわちピストンから放出された流体が渦輪を形成して並進運動を開始する過程で、ストロークに依存して周囲流体のエントレインメントや渦輪内に蓄積される循環が決まる。

4.3 渦輪の並進速度と運動エネルギー 図10はトランスデューサAによって計測された並進速度  $U$  と運動エネルギー  $E$  で、双方ともピストン速度  $V$  を横軸にその変化を表示した。 $U$  については  $V/2$  よりやや小さめとなり古典理論に一致する。ただしストローク  $S$  が小さいと渦輪の直進性が失われるなど不安定となり  $U$  も小さい。運動エネルギー  $E$  は、次式で定義される渦輪全体の運動エネルギーである。

$$E = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \cdot 2\pi r dr dz \dots\dots\dots (12)$$

これに対して初期においてピストン内部の流体に与えられる運動エネルギーは

$$E_0 = \frac{1}{8} \pi D_0^3 S V^2 \dots\dots\dots (13)$$

である。図10の結果から  $E$  は  $E_0$  を超え、ストロークが長い場合では  $E_0$  の2倍に達する。これはピスト

ンによる渦輪の形成過程においては、ピストン内部の流体のみならずその前方の流体にも運動エネルギーが与えられることによる。具体的にはピストン内部の質量が  $\rho\pi(D_0/2)^2 S$  であるのに対して、無限流体におけるピストンヘッドに作用する付加質量は  $(1/3)\rho D_0^3$  であるから、その比は  $1 + (4/3)(D_0/S)$  となる。この関係から、例えば  $S/D_0 = 3$  ( $S = 150$  mm) のときは付加質量比が  $1 + 4/9 = 1.44$  となる。運動エネルギーの比は  $E/E_0 = 2$  であるから、この付加質量効果だけでなく、さらに渦輪が形成される過程での周囲流体の連行効果が入るものと説明できる。

4.4 水槽の回転による影響 水槽を回転させてその中で回転軸と同じ方向に渦輪を放出すると、渦輪の並進速度が低下したり、渦輪が途中で崩壊しやすくなることが知られている<sup>(15)</sup>。これはコリオリ力の作用によるものであるが、速度ベクトル場としてその構造の差異を見出すような計測事例は過去にない。そこで水槽を  $\Omega = 0.26$  rad/s (2.5 rpm) の一定回転数で左巻き(上からみて半時計回り)に回転させ、その中で前述までと同様な方法で渦輪を発生させ、その速度ベクトル場を計測した。ここでコリオリ力の影響度を表す無次元数であるロスビー数は  $Ro = V/(2\Omega D_0)$  で定義され、以下では  $Ro = 11.5$  のケースを取りあげる。つまり渦輪の慣性力に対するコリオリ力の比は  $1/11.5 = 8\%$  である。これ以上、コリオリ力が強いと計測位置に渦輪が到達する前に軸対称性を失いその後すぐに崩壊する。そのためここではコリオリ力が弱い状態で、軸対称な渦輪の構造の中に現れるコリオリ力の影響について明らかにした。

図11(a)に、ピストンストローク  $S = 50$  mm、ピストン速度  $V = 0.3$  m/s の条件における相対速度ベクトル分布を示す。このままでは回転の影響は判断しにくい。図11(b)には、この結果から無回転  $\Omega = 0$  での渦輪の速度ベクトル場を差し引いた成分、つまり

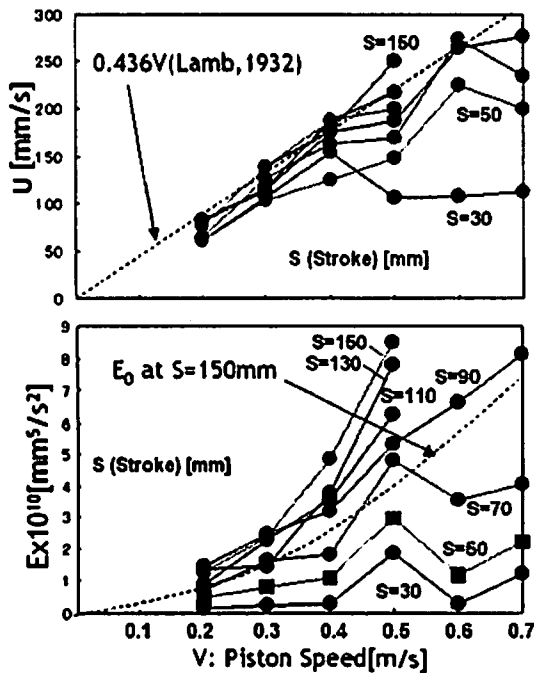
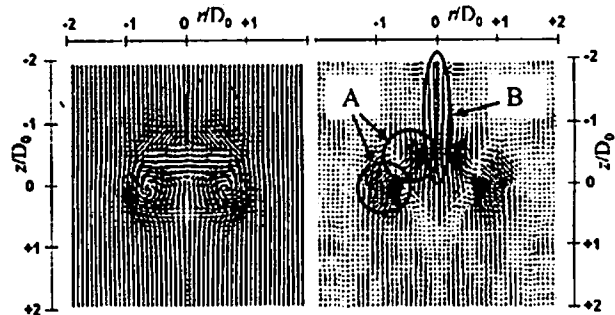


Fig. 10 Translational velocity and kinetic energy



(a) Relative vector (b) Differential vector  
Fig. 11 Influence of background rotation at  $S = 0.05$  m



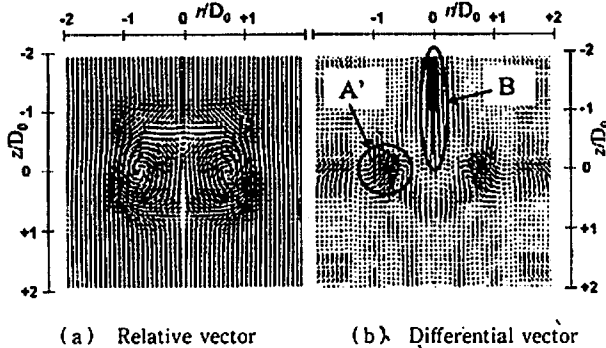


Fig. 12 Influence of background rotation at  $S=0.13$  m

差分ベクトルを示す。この結果より、コリオリ力の影響により渦核の前方と渦輪の後方旋み領域(A)で $-z$ 方向の速度をもつことがわかる。すなわち、これらの領域では渦輪の進行方向と反対の流れが誘起され、それが渦輪全体の並進速度を低下させるような抵抗となっていることがわかる。

図12はピストン速度が $V=0.3$  m/sのまま、ピストンストロークを $S=130$  mmに増加させた場合の回転場の影響を示す。差分ベクトルによれば、渦核の部分(A')で明らかな後向き流れが誘起されていることがわかる。これはコリオリ力が高い回転数をもつ渦核に選択・集中的に作用していることを示唆する。このような構造については染料による可視化からの考察や、数値シミュレーションからの議論として発表されている過去の論文<sup>(15)(16)</sup>の内容と合致する。また、著者らの計測で新たに判ったことは、渦輪の下流の中心軸上( $r < 0.2$ )で柱状の減速領域(B)が誘起されることである。これは渦輪の通過による角運動量の輸送によって、渦輪の下流に竜巻状の縦渦が形成されるためであると考えられる。その根拠として、著者らは同じ回転水槽で渦輪の代わりに固体球を回転軸上で並進させた場合にもそれが現れることをつきとめたためである<sup>(17)</sup>。これは回転場におけるテイラーコラムが移動する渦輪や固体球の後流に現れたものと解釈できる。

なお、回転場の渦輪の構造については多極渦間の干渉の問題としても流体力学的な興味は尽きず、今回取得したデータから種々の議論を展開することが可能である。これについては別報で詳しく述べることとし、本報では主としてUVPによる渦輪の速度ベクトル場の計測方法の確立と、それによる渦輪の特徴付けの事例について焦点を当てて述べた。

## 5. 結 論

UVPを用いて、渦輪の二次元速度ベクトル場を計

測する方法について述べた。その方法は、渦輪の進行方向に対して幾つかの異なる角度で超音波トランスデューサを配置するもので、この計測範囲内で渦輪がその構造を保ったまま一定の並進速度で通過するときに、速度ベクトル場が計測されるというものである。渦輪それ自体はWidnall不安定が成長する前の安定域においてこのような凍結仮説の適用は妥当である。またこの領域における渦輪は軸対称速度分布を持つので、連続の式を適用することでUVPの計測線が一つであっても速度ベクトル場を推定することができることを示した。ただしその演算では流速の空間微分と時間積分を伴うため、計測誤差の拡大と累積が伴い、それによって復元される渦輪構造は、直接的なベクトル場の計測による結果と比べて歪みやすいことを示した。

以上の方法を利用して、ピストン駆動型の渦輪生成法により、ピストン速度とピストンストロークの二つをパラメータとした一連の実験を実施した。特にUVPによって取得された速度ベクトル場から、定量的な渦輪の特徴付けを行うことができた点が新しい成果と言える。従来、PIVによる計測事例も多いが、UVPによる同等の計測を可能としたことは、次の段階で不透明流体や混相流における渦輪やブルームの計測を実現する上で基盤技術となる。また、この方法を利用することで、従来知られていない回転場中の渦輪の特徴を新たに見出したことについて述べた。この結果から、回転場中の渦輪の並進速度の低下や崩壊の促進は、渦核への選択的なコリオリ力の作用であることなどが考察された。

## 謝 辞

本研究実施にあたっては北海道大学と英国ウォーリック大学の学術交流協定にもとづく研究助成金を受けた。また、ウォーリック大学のM. ブレンド博士、Z. シャオ博士、G. P. キング博士、故・P. W. カーペンター教授からの協力に基づいて実験が進められた。謝意を示す。

## 文 献

- (1) Takeda, Y., Velocity Profile Measurement by Ultrasound Doppler Shift Method, *International Journal of Heat and Mass Flow*, Vol. 7 (1986), pp. 313-318.
- (2) Takeda, Y., Instantaneous Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method, *JSME International Journal, Series B*, Vol. 38 (1995), pp. 8-16.
- (3) Murai, Y., Tasaka, Y., Nambu, Y., Takeda, Y. and Gonzalez, S. R., Ultrasonic Detection of Moving Interfaces in Gas-Liquid Two-Phase Flow, *Flow Measure-*

- ment and Instrumentation, Vol. 21 (2010), pp. 356-366.
- (4) Murai, Y., Ohta, S., Shigetomi, A., Tasaka, Y. and Takeda, Y., Development of Ultrasonic Void Fraction Profiler, *Measurement Science and Technology*, Vol. 20 (2009), No. 11, 114003, pp. 1-13.
- (5) Murai, Y., Tasaka, Y., Sakurai, K., Oyama, K. and Takeda, Y., Ultrasound Doppler Rheometry from Spin Response of Viscoelastic and Bubbly Liquids, *Proceedings 7th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, (2010), pp. 9-12.
- (6) Takeda, Y., Morinaga, M. and Tasaka, Y., Oscillating Taylor-Couette Flow—Azimuthal Motion, *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 137 (2008), No. 012002 (8 pp).
- (7) Saffman, P. G., *Vortex dynamics*, (1992), pp. 192-206, Cambridge University Press, Cambridge.
- (8) Saffman, P. G., The Velocity of Viscous Vortex Rings, *Studies in Applied Mathematics XLIX*, Vol. 4 (1970), pp. 371-380.
- (9) Zhao, F., Lai, M. and Harrington, D. L., Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines, *Progress in Energy & Combustion Science*, Vol. 25 (1999), pp. 437-562.
- (10) Yanagisawa, T., Yamagishi, Y., Hamano, Y., Tasaka, Y., Yoshida, M., Yano, K. and Takeda, Y., Structure of Large-Scale Flows and Their Oscillation in the Thermal Convection of Liquid Gallium, *Physical Review E*, Vol. 82 (2010), 016320, pp. 1-8.
- (11) Liess, C., *Experimentelle Untersuchung des Lebenslaufes von Ringwirbeln. Bericht*, ISSN 0436-1199 (1978), Max-Planck-Institut fuer Stroemungsforschung, Goettingen, Germany.
- (12) Widnall, S. E., Bliss, D. B. and Tsai, C. Y., The Instability of Short Waves on a Vortex Ring, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 66 (1974), pp. 35-47.
- (13) Maxworthy, T., The Structure and Stability of Vortex Rings, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 51 (1972), pp. 15-32.
- (14) Linden, P. F. and Turner, J. S., The Formation of Optimal Vortex Rings and the Efficient of Propulsion Devices, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 427 (2001), pp. 61-72.
- (15) Moffatt, H. K., Generalized Vortex Rings with and without Swirl, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 3 (1988), pp. 22-30.
- (16) Verzicco, R., Orlandi, P., Eisenga, A.H.M., van Heijst, G.J.F. and Carnevale, G. F., Dynamics of a Vortex Ring in a Rotating Fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 317 (1996), pp. 215-239.
- (17) Yoshimoto, T., Vlaskamp, J., Brend, M., Thomas, P. J., Murai, Y. and Takeda, Y., Twisted Wake of a Sphere in Rotating Fluid, *Bulletin of 61st Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics*, American Physical Society, Vol. 53 (2008), pp. 124-125.