

# カラーPTVを用いた基本モードの振動渦輪の計測

大石 義彦<sup>o</sup> (北大), Mark A.BREND (Univ. of Warwick),

Peter J.THOMAS (Univ. of Warwick), 村井 祐一 (北大), 武田靖 (北大)

## Measurement of Oscillating Vortex Ring of Fundamental Mode using Color PTV

Yoshihiko OISHI, Mark A. BREND, Peter J. THOMAS, Yuichi MURAI and Yasushi TAKEDA

### ABSTRACT

Fundamental mode of vortex ring instability is characterized by Tsai-Widnall vortex rings. The present vortex ring is emitted from a piston-driving nozzle and triangle-nozzle, of which the piston speed and the piston stroke are varied. Separated layers by color in the vortex ring were measured using Color Particle Tracking Velocimetry. The result shows that three dimensional structure of the fundamental mode appears as acceleration of the vortex core.

**Keywords:** Vortex ring, Color illumination, PTV

### 1. 緒 論

渦輪は生成過程, 定常過程, 不安定過程, 乱流過程, 崩壊過程の順に成長する. この中の不安定過程では Tsai-Widnall不安定<sup>1)</sup>と呼ばれるn次モードの不安定波が生じる. この不安定波が成長しやがて乱流過程へと遷移する. このような遷移はエネルギーカスケードや乱流遷移の初期段階を知る重要な現象として用いられる. 本研究では不安定波の中で最も単純化された1次モードの振動する渦輪を取り扱う. 1次モードの渦輪は基本となるモードで2ヵ所の対角上でそれぞれが交互に振動しながら進行する3次元構造である. これまでに様々な3次元構造の可視化方法が提案されている<sup>2),3)</sup>が, 本研究では液晶プロジェクタによるカラーシート光を照射し, 色度別にシート光を層分解することで多層同時計測を行う.

### 2. 実験装置及び方法

#### 2.1 実験装置

図1に実験装置の概要を示す. 実験装置は英国 Warwick 大学における回転水槽を利用した. 装置概略を図1に示す. 水槽は正八角柱で, 対角幅 1m, 高さ 2.5m である. 水槽の側面部は強化ガラス製で, 作動流体には水道水を用い, 水面は大気開放である. 水面より 150mm に渦輪発生ノズルの先端を位置させ, ピストンを作動させて鉛直下方に渦輪を発生させる. ノズルの内径  $D_0$  は 50mm である. さらに, 発生した渦輪はノズル直後に 1 辺が 80mm の正三角形の出口を通過する. 通過後の渦輪は鉛直下向きに 1 次モードの振動をしながら移流する(図2). このとき渦輪は円周方向に振動はほとんどなく, 鉛直方向に振動する. ピストンの速度およびストロークは motion planner ソフトを利用してコンピュータ制御され, これら 2 つを制御パラメータとして種々の渦輪を発生さ

せる.

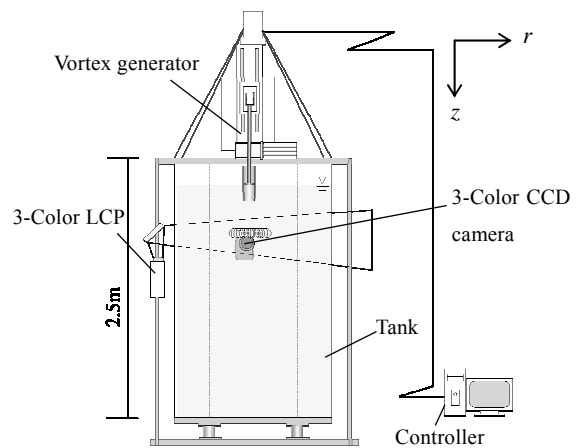


Fig.1 Experimental facility

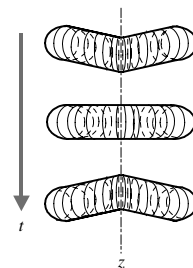


Fig.2 Side view of fundamental mode vortex ring

#### 2.2 可視化及び解析方法

カメラは回転水槽の側面に垂直に取り付け渦輪を撮像する. 撮影にはデジタルビデオカメラ (Panasonic, HDC-SD1) を用いた. 光源には 3-Color 液晶プロジェクタを用い, PC 上で作成したカラーシート光をプロジェクタで表示させ, カラーシート光を照射させる. カラーの配色はカメラの光軸手前から Red, Green, Blue (RGB)

の順とし、Green のシート光が渦輪の中央部になるように光源を設置した。なお、各シート光の厚さは 12mm である。シート光はカメラの視軸に対して 135 度から照射した。可視化のためにトレーサ粒子（三菱化学、ダイヤイオン HP20、粒子直径 250 $\mu\text{m}$ ）を用いた。粒子濃度は 0.03%とし、撮像される粒子数は 600 ~ 1000 個であった。記録された映像は M2TS 圧縮ファイルとして SD メモリに取り込まれる。映像は 60i(インターレースで秒 60 フィールド)で撮像されるため、上位フィールドと下位フィールドに画像を分けて粒子を抽出した。このとき各フィールドでできる画像の空間はフィールド毎に線形補間をした。このとき用いた PTV アルゴリズムは二値化相関法とし、1 次時刻目に上位フィールドの粒子画像を、2 次時刻目に下位フィールドの粒子画像を用いて速度を抽出した。なお画像サイズは 1440x1080 pixel で、空間分解能は 0.088 pixel/mm であった。取得したカラー画像は式(1)の色度 (Hue)から Red, Green, Blue の領域の粒子を分離する。輝度情報は式(2)を与え、各色の粒子画像に分ける。その後、二値化画像処理、ラベリング処理によって粒子位置を抽出し、PTV を各色に適用する。なお、後処理として楕円方程式に基づく時空間再配置法<sup>4)</sup>を適用した。

$$h = \begin{cases} \theta \\ 2\pi - \theta \end{cases}, \theta = \arccos\left\{\frac{2r - g - b}{2c}\right\} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2)$$

### 3. 結果及び考察

図 4 に各層の速度ベクトルと渦度分布を示す。Red 及び Blue の層は同じ位置であるためここでは省略する。Green の層は渦輪の中心部である。図 5(b)振動する渦輪は後流側に渦を誘発するが、本実験においても同様の渦が誘発されている。また、この渦は中央部に集中しており、外側(Blue)の断面では確認できない。例えば Widnall vortex や回転場系における渦輪は渦輪自体が振動していることが多く、その後流には鉛直下向きの縦渦が形成される。どの断面においてもこの縦渦が確認できると予想していたが、渦輪の中央断面に特徴的に現れることが確認された。

図 5 から得られた渦度の渦核を抽出し、それぞれの層における渦輪の加速度変化を時系列に並べた(図 6)。簡単のために、ここでは 2 つの渦核のうち片方のみを示す。このとき鉛直下向きを正とする。ただし、同じ Re 数における定常状態の渦輪の加速度は  $\pm 1\text{m/s}^2$  で変化する。図 6 より渦輪は加速した直後に減速することが確認できる。これは加減速の繰返しを確認できる。本実験における 1 モードの渦輪は上下に振動しながら移流するが、加速した直後に減速している。これは渦核が一旦その場に停滞していることを捕らえている。Green の層と Blue の層を比較すると、Blue の層での渦核と Green の層の渦核が交

互に加速することを捉えている。これらから本実験をカラーの層を多層にすることにより、振動する渦輪から Widnall vortex など 3 次元構造を再現することが可能であることを示した。

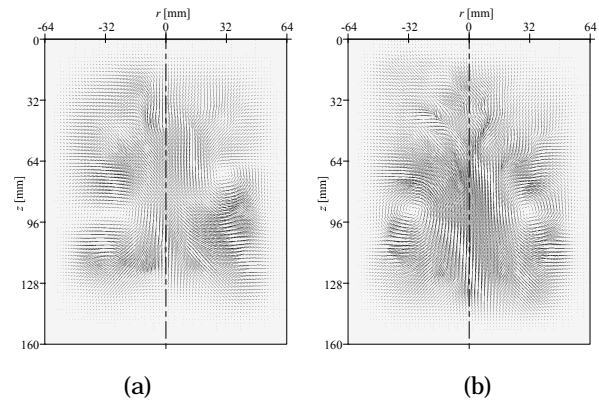


Fig.4 Velocity vectors 1 mode vortex ring at (a)blue layer and (b)green layer

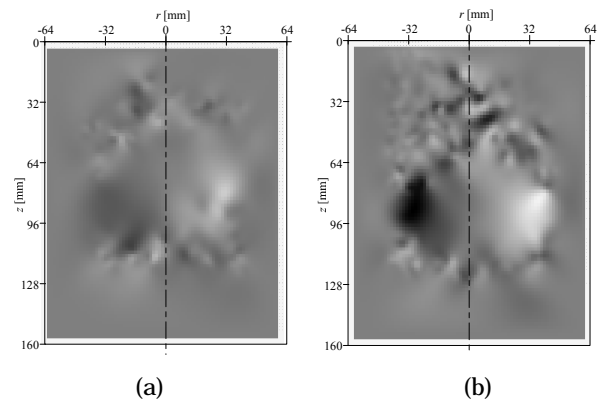


Fig.5 Vorticity distribution, (a)blue layer and (b) green layer.

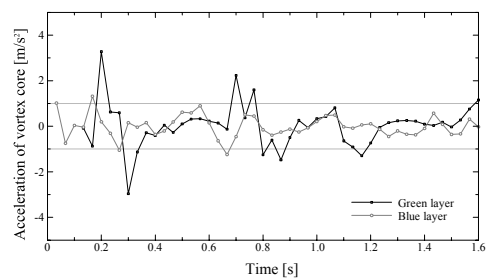


Fig.6 Acceleration of vortex core.

### 参考文献

- 1) Widnall S.E. et al.,: The instability of short waves on a vortex ring, J. Fluid Mech., Vol.66, part 1, (1974) pp.35-47.
- 2) Brücker Ch.,: 3-D PIV via Spatial Correlation in a Color-coded Light-sheet, Exp. in Fluids, Vor.21, (1996), pp.312-314.
- 3) McGregor T.J. et al.,: Laser-based volumetric colour-coded three-dimensional particle velocimetry, Optics and Lasers in Eng., Vol.45, (2007), pp.882-889.
- 4) Ido T., et al.,: A recursive Interpolation algorithm for Particle Tracking Velocimetry, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.17, (2006), pp.267-275.