A 2 1 0

Dual-Plane Stereo-PIV による水中竜巻の流動計測

羽成 敏秀[○] (筑波大院), 榊原 潤 (筑波大院)

Dual-Plane Stereo-PIV Study on Tornado-Like Vortex in Water

Toshihide HANARI and Jun SAKAKIBARA

ABSTRACT

We investigated tornado-like vortex induced by a fan similar to Rushton turbine placed under the top surface of a cylindrical water tank. Experiment was performed under the condition of vortex Reynolds number being 3800 and Swirl ratio being 0.45. The three-component velocity fields in two adjacent cross-sections of the tornado-like vortex were measured by dual-plane stereo-PIV. Single vortex column was formed in the center of the tank. Instantaneous axial component of velocity at the vortex center has been fluctuated in time significantly. Such a fluctuation of the velocity was observed since the traveling wave of velocity or vorticity has been passing through. Axial pressure gradient term of Navier-Stokes equation for the axial velocity component was found to be balanced with the convection term. Thus we conclude that the fluctuation of the axial velocity component at the center of vortex was caused by local axial pressure gradient induced by the vorticity wave traveling along the vortex.

Keywords: Dual-plane stereo-PIV, Tornado-like vortex, Fan

1. 緒 論

近年、環境問題が取り沙汰されるようになり、その中で環境改善のためにさまざまな研究が行われるようになってきている。その一環として、内海や湖などの閉鎖性水域の水質浄化の研究も行われている。そういった中で、竜巻状の水中渦を人工的に発生させ、竜巻の上昇流を利用し水の循環を行う水質改善の方法が実用化されている^{①)}。しかし、この方法は流体の輸送や渦の構造、および渦の生成機構について未知の点が多い。

そこで本研究では竜巻状の渦を発生させ、それにより作られる流動場を PIV を用いて計測することで、竜巻の 3 次元構造を理解することを目的とする。

2. 実験方法

本研究では、実機 (ファン直径 1m) ^{①)} を 1/20 にスケールダウンした幾何学的に相似形のファンを作成し、実験を行った。実験装置の概略を図 1 に示す。直径 800mm、高さ 1000mm の円筒形アクリル容器に水を満たし、上部水面直下にファンを設置し、それを回転させることで竜巻状の渦を生成した。なお、地球の自転を模擬するためにタンクに内円筒を設置し、約 0.3rpm で回転させた。

Fig. 1 schematics of the experimental system

Fig. 2 Photograph of a fan

実験に用いるファンの概略およびパラメータをそれぞれ図2と表1に示す。実験では、ファンを回転数 $n=250\text{rpm}$ で回転させ、竜巻状の渦を形成させた。2台のステレオPIVシステムを用いて、タンク底部からの高さ z における 30mm 間隔の2つの渦の断面（水平断面）の速度3成分を計測した。

Tab.1 Parameters

Diameter of fan [mm]	50
Vortex Reynolds Number: $Re=\Gamma/(2\pi\nu)$	3800
Swirl ratio: V_z/V_θ	0.45

3. 結果と考察

計測面は容器底部から約 400mm である。図3に渦軸方向（鉛直方向）の渦の中心（ $r=0\text{mm}$ ）および中心から 15mm の位置の速度成分の時間的変化を示す。これから、渦の中心は中心から離れた位置に比べ、速度が大きく変動していることが分かる。図4に、渦中心における渦軸方向（鉛直方向）速度成分および渦度の移動平均値を示す。渦軸方向速度は $50\sim 250\text{mm/s}$ と大きく変動しているが、その符号は正（上方）であり、上向きに流動していることが分かる。一方、下側計測面における速度および渦度が上側計測面のそれに比べて遅れており、その時間差から波の伝播速度は実験装置下方に約 30mm/s で進行していると推定される。ここで、速度の渦軸方向成分の変動と渦度分布の関連について考察する。渦度と渦中心圧力は密接に関係しており、渦軸方向に渦度勾配があれば、それが圧力勾配をもたらし、渦軸方向速度成分が時間的に変化すると考えられる。そこで、圧力を下記の式を用いて実験値からもとめた。

$$P=\int\frac{\rho V_\theta(r)^2}{r}dr$$

この値および速度の実測値から NS 方程式の両辺を求めた結果が図5である。両辺は比較的良好一致を示しており、渦度勾配が圧力勾配を介して速度変動を生み出していることを示唆している。

4. 結論

Dual-plane Stereo-PIV法を用いて竜巻状の渦の計測を行い、渦中心における軸方向速度成分の変動を捉え、渦度波が上流側へ伝達していることが分かった。この波の伝達により、軸方向圧力勾配の局所的な変動が誘起され、渦中心における軸方向速度成分の変動が引き起こされていると考えられる。

謝辞

本研究では㈱環境測定サービスから研究費の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

Fig. 3 Temporal fluctuation of v_z ($z=415\text{mm}$)

Fig. 4 Time-histories of v_z and ω
(Boxcar filtered width = 1.5s)

Fig. 5 Time-histories of Dv_z/Dt and $(-1/\rho)\partial P/\partial z$

参考文献

- (1) ㈱環境測定サービス「エコフロー」：
<http://www.ems-kankyo.co.jp/ecoexpl/ecoexp.html>
- (2) W.R.C. Phillips, B.C. Khoo : The Boundary Layer Beneath a Rankine-Like Vortex, *Proc. R. Soc. Lond., A* 411(1987), 177-192
- (3) D.S. Nolan, B.F. Farrel : The structure and Dynamics of Tornado-Like Vortices, *J. Atmos. Sci.*, 56(1999), 2908-2936