E201

自由界面を持つ回転流れの超音波計測*

田坂 裕司[○](北大), 飯間 信(北大), 伊藤 健太郎(北大)

Ultrasonic Measurement of a Rotating Flow under Free Surface

Yuji TASAKA, Makoto IIMA and Kentaro ITO

ABSTRACT

A rotating flow accompanying free surface shows aperiodic switching between an axisymmetric surface shape and a nonaxisymmetric surface shape at a certain Reynolds number. This study aims to clarify a relation between the surface shape switching and flow transition. Ultrasonic velocity profiling was utilized to measure instantaneous velocity profile of the rotating flow. Variation of the turbulent intensity with respect to Reynolds number shows a flow transition at the same Reynolds number for the switching. The variation also shows a change of a tendency which expresses flow instability occurring at a smaller Reynolds number.

Keywords: Ultrasonic measurement, Flow transition, Rotating flow, Free surface

1. 緒 論

自由界面を持つ回転流れでは, 界面形状の変化に伴い流れの様子が大きく変化し, 興味深い現象が現れる. その一つに, 界面形状の **switching**¹⁾ が挙げられる. 自由界面を持つ円筒容器内の液体を, 底面を回転させることで駆動させた場合, その回転数に応じて界面の変形も大きくなる. しかしながらある回転数に達したとき, 界面形状の軸対称性は崩れ, 軸対称な状態と非軸対称な状態との間で時間的に切り替わる (**switching**). この現象が現れるレイノルズ数が, 回転円盤上の境界層が乱流遷移するレイノルズ数 ($Re \sim 10^5$) に近いことから, 発生要因として流れの乱流遷移による圧力バランスの変化が挙げられており¹⁾, また可視化実験から流れの遷移の様子が確認されている²⁾. 本研究では, 超音波流速分布計 (UVP)³⁾ を用いてこの流れを計測し, 流れの遷移の様子を定量的に調べることを目的とする.

2. 実験装置および方法

実験装置の模式図を図1に示す. 円筒容器はアクリル製であり, 内径は $R = 42 \text{ mm}$ である. 円筒の底に設置されたアクリル製の円盤は, 軸を介してステッピングモータに接続されており, 回転数をゼロから 1600rpm の範囲において 10rpm 刻みで変化させることができる. なお, 円筒と円盤の間には, 摩擦による振動を防ぐため $\Delta R = 0.3 \text{ mm}$ の隙間が設けられている. 作動流体は水道水とし, トレーサとして $50 \sim 60 \mu\text{m}$ 程度の径を持つイオン交換樹脂を 0.01wt% の割合で混入した. 静止状態における水位を $H = 40 \text{ mm}$ とした. このときのアスペクト比は $A \equiv H/R = 0.95$ である. 本実験では, 円盤の回転数を 100rpm から 860rpm の範囲で変化させた. このときのレイノルズ数 ($Re = 2\pi\Omega R^2/\nu$, Ω は円盤の回転速度, ν は水の動粘性

係数) は, $Re = 0.18 \times 10^5$ から 1.59×10^5 である. 超音波トランスデューサを, 回転中心に向けて回転円盤から 8mm の高さに設置した. これにより, 円筒側面を介して図に示す ξ 軸上の瞬時速度分布が計測される. なお超音波の透過性を向上させるため, トランスデューサと接触する円筒側面部を平らに加工した. UVP には, Met-Flow 社の UVP monitor model Duo を用いた. 超音波の基本周波数は, 空間分解能と超音波の透過性を考慮して 4MHz とした. 計測される速度分布の空間分解能は, ξ 軸方向に対して 0.74mm である. UVP による計測とともにシート状のレーザー光を容器側面から入射し, デジタルビデオカメラにより界面形状の変化を撮影した.

Fig. 1 Experimental setup

3. 界面形状の変化と速度分布計測

3.1 界面形状の変化と Switching

図2に, $Re = 0.55 \times 10^5$ ($\Omega = 300 \text{ rpm}$) および $Re = 1.11 \times 10^5$ ($\Omega = 600 \text{ rpm}$) で撮影された界面形状の可視化写真を示す. レイノルズ数が比較的小さい場合, 界面は流れの遠心力とバランスするために, 中央部を中心に放物線状にくぼむ (図2(a)). このときの流れは, 可視化実験や界面形状の解析から, 中心部を除いて Rankine 渦に近い流れであることが示されている²⁾. 回転数を増加させると変形

した界面は回転円盤に付着し、流れは中央が空洞化した形で安定する (図 2 (b)). 更に回転数を増加させ、レイノルズ数が $Re \sim 1.5 \times 10^5$ 程度になると、界面は非軸対称に変形した後に回転円盤上から離れる (図 3). 本実験では、界面の軸対称状態と非軸対称状態の非周期的な切り替わり自体は観測されたが、一旦円盤から離れた界面が同じレイノルズ数で再付着することはなかった。これまでの研究で用いた実験装置では、そのような界面の再付着が観測されており、結果が異なっている。

(a) $Re = 0.55 \times 10^5$ (300rpm) (b) $Re = 1.11 \times 10^5$ (600rpm)
Fig. 2 Pictures of deformed interfaces

(a) Front view (b) Side view

Fig. 3 Pictures of interface with nonaxisymmetric shape at Switching ($Re = 1.56 \times 10^5$, $\Omega = 845$ rpm)

3.2 界面形状の変化に伴う流れの変化

UVP により計測された瞬時速度分布の時間変化を基に、流れの統計値を算出した。図 4 は、図 2 ならびに図 3 に示した可視化写真を撮影した各レイノルズ数において、1024 枚の瞬時速度分布から得られた平均速度 U および乱れ強さ u_{rms} の分布を示している。ここで、図中の横軸 ξ はトランスデューサの前面を原点とした超音波伝播方向の座標である。なお $Re \geq 1.11 \times 10^5$ では、変形した界面で超音波ビームが反射されるため、それより先の速度分布が得られない。そこで、超音波エコーとの比較から正しく測定されている範囲を特定し、その範囲のみを図示した。

平均流速分布からわかるように、円筒の半径方向では中心に向かう流れが存在し、中心に近いほどこの速度は大きい。しかしながら、Switching が起こる $Re = 1.56 \times 10^5$ では $\xi/R = 0.3$ 付近までは増加するものの、 $\xi/R > 0.3$ では増加量がきわめて小さくなっており、Switching による流れ場の大幅な変化が伺える。一方乱れ強さの分布では、 $Re = 0.55 \times 10^5$ と 1.11×10^5 とでは大きな違いは見られないものの、 $Re = 1.56 \times 10^5$ では ξ の広い範囲で数倍程度の増加が見られた。この結果から、Switching の発生と同時に流れ場が層流状態から乱流状態へ遷移していることがわかる。

Fig. 4 Profiles of temporally averaged velocity (left) and turbulent intensity (right)

Fig. 5 Variation of spatially averaged turbulent intensity $\langle u_{rms} \rangle$ with Reynolds number

レイノルズ数 Re に対する流れ場の変化を調べるため、図 4 中に黒矢印で示した範囲 ($0.361 \leq \xi/R \leq 0.537$) で空間平均乱れ強さ、 $\langle u_{rms} \rangle$ を定義した。 Re に対するその変化を図 5 に示す。先に示したように、Switching の発生と同時に $\langle u_{rms} \rangle$ は $Re = 1.56 \times 10^5$ で急増している。また他の傾向として、 $\langle u_{rms} \rangle$ の円盤周速度に対する比が、 $Re = 1.3 \times 10^5$ 付近において減少から増加に転じることが見て取れる。これは流れ場の不安定化によるものであるが、紙面の都合上その詳細は講演にて述べさせていただく。

4. 結論

自由界面形状の Switching 現象について、界面形状の変化と流れの遷移との関係を調べるため、流れ場の超音波計測を行った。その結果、乱れ強さのレイノルズ数に対する変化から、Switching の発生と同時に流れ場が層流から乱流に遷移すること、また $Re = 1.3 \times 10^5$ 付近で流れ場が不安定となり、乱れ強さが増加することを示した。

参考文献

- 1) Suzuki, T., Iima, M., Hayase, Y., Phys. Fluids, Vol. 18, (2006) 101701.
- 2) Tasaka, Y., Ito, K., Iima, M., submitted to J. Visualization.
- 3) Takeda, Y., Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol. 7, (1986), pp. 313-318.