

回転流れにおける表面大変形の遷移および分岐

北海道大学・電子科学研究所 飯間信 (Makoto Iima)

Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University,

北海道大学・工学研究科 田坂裕司 (Yuji Tasaka)

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

北海道大学・理学研究科 伊藤賢太郎 (Kentaro Ito)

Graduate School of Science, Hokkaido University,

2008 年 4 月 28 日

1 はじめに

表面大変形を伴う流れは身近で興味深い現象である。しかし解析は難しく、これまでの研究は多くはない。このような流れの最も単純な例が円筒容器内の流体を底面の回転により駆動する系である。[1, 2, 3, 4, 6, 7]。表面変形が容器スケールになる場合には、表面変形の水平断面が多角形となり、 n を多角形の頂点の数としたとき、 $n = 6$ までの場合が報告されている [1]、彼らの研究では流れの性質は乱流または層流である。

レイノルス数が境界層の層流-乱流遷移領域の場合 ($Re \simeq 1.0 \times 10^5$)、鈴木らが surface switching と呼ばれる現象を報告している [2, 3, 4]。これは水面の上下変動と表面変形の回転対称性が同時に変化する現象であり、 $n = 2$ の対称性をもち、水面が相対的に上がっている状態 $\widetilde{A_s}$ と、軸対称性をもち ($n = 0$)、水面が相対的に下がっている状態 $\widetilde{S_y}$ の間を非周期的に切り替わる現象である。このメカニズムとしては、流れの乱流化に伴う中心圧力の上昇および層流化に伴う中心圧力の低下が示唆されている [2]。これまでに、1) 流れ場の可視化により $\widetilde{A_s}$ では全域が乱流化しているが $\widetilde{S_y}$ では一部を除き層流である [4]、2) UVP (Ultrasonic Velocity Profile) 法を用いた流れ場の計測により、surface switching が起こる領域を境に、乱れ強さが不連続な遷移を起こし、平均的な水面の高さが遷移を起こす場所と一致する [3]、事が分かっている。しかし水面の変動と乱れ強さを同時に計測したことが無いため、switching の動的な過程において、表面形状変化と、流れの遷移の相関を直接示す定量的証拠はまだない。ここでは表面形状の変化と乱れ強さの同時計測に

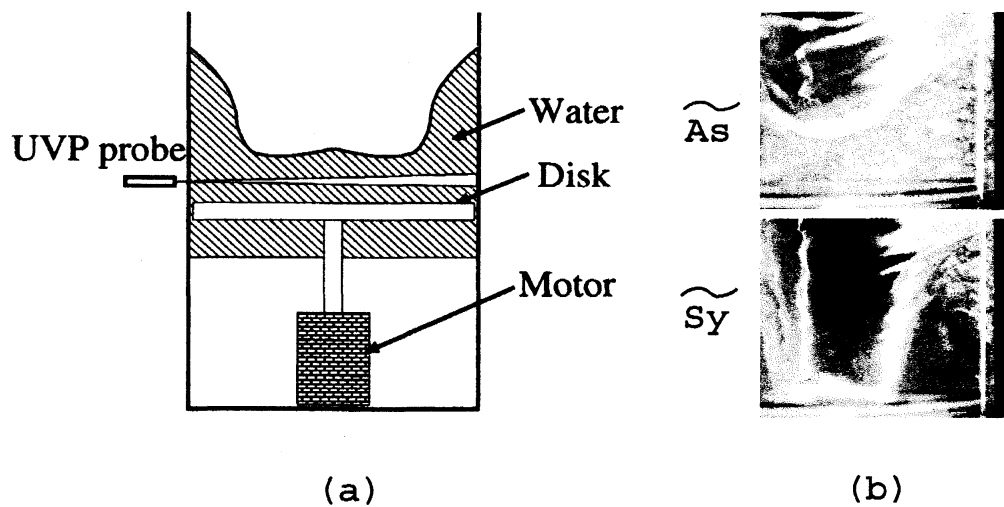


図1 左:実験装置。流体(水)が、モーターを通じた円盤により駆動されている。円盤半径は円柱の内半径に近い。右:可視化写真の例(770rpm)。詳細は文献[4]を参照のこと。

より、表面形状と流れの遷移の相関を定量的にはかった結果について報告する。

2 実験方法

図1に実験装置を示す。円筒容器(内径 $R = 42\text{mm}$; アクリル製)に入れられた作業流体(水)は、ステッピングモーターを通じた円盤回転(ガラス)の回転により駆動される。円盤と容器の間隔は $\Delta R = 0.3\text{mm}$ 、静止時の水高 H は $H = 40\text{mm}$ である。ここでは回転数を $\omega = 790\text{rpm}$ と設定した。レイノルズ数 $Re \equiv \omega R^2 / \nu$ (ν は動粘性係数) は $Re = 1.44 \times 10^5$ である。 ω, H を変えた場合の結果に関しては文献[7]を参照されたい。

表面変形はデジタルビデオカメラで側面から記録し、表面の中央部を底から測った高さ $h(t)$ により特徴付けた。また、動径方向の流速は超音波流速分布計(UVP)により計測した。プローブの位置は底面から 8mm の高さとし、実験器具に付随するノイズを消去するため中心からの距離が $0.5R$ と $0.6R$ の範囲を平均したものの時系列データを用いた。

3 結果

ここで問題にするのは、surface swithcing と呼ばれる水面の動的な大変形パターンである[2]。この状態では、 Re は時間的に一定であるにもかかわらず、表面は軸対称な形

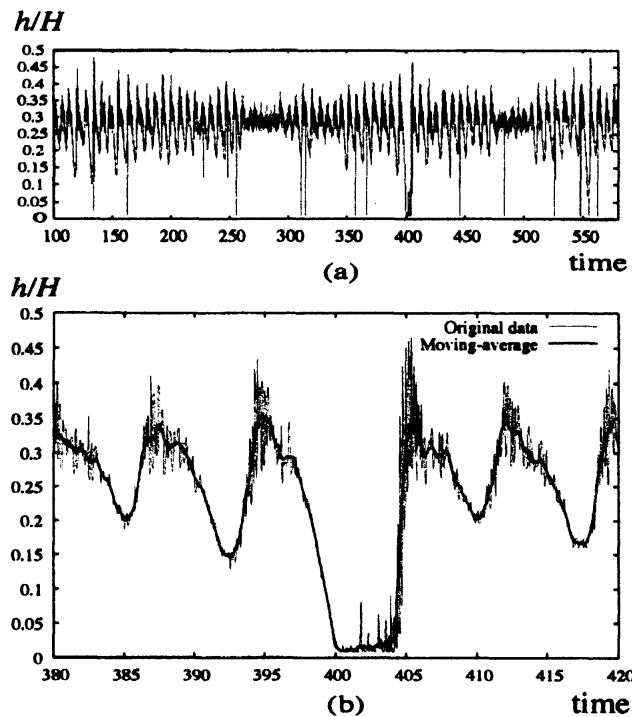


図 2 (a) 水面の高さ $h(t)$ の時系列データ。データ欠損に伴う縦線が何本も見られるが、これらは実際の水面変動を反映した物ではないことに注意。(b)(a) の一部を拡大したもの。太線により、0.533[sec] で移動平均したデータが示されている。

($\widetilde{S}_y$) と非軸対称な形 ($\widetilde{A}s$) (図 1(b)) の間を非周期的に切り替わり、しかも中央付近の水面の高さが大きく変化する。

この状態における水面の高さの変化と、乱れ強さの同時計測を行った。そのうち、水面の高さの時間変化を図 2(a) に示す。この時系列においては、7 秒程度の水面の振動が卓越しているが、その振幅は一定ではなく、また水面が大きく下がっている状態が見られることが分かる ($t \sim 130, 400, 560$ など)。データ欠損に伴う縦線が何本も見られるが、実際の水面変動を反映した物ではない。このうち $380 \leq t \leq 420$ の範囲を拡大した物を図 2(b) に示す。おおむね $400 \leq t \leq 404$ の間水面が底に接触し、その後離れている。また、その他にも 7 秒程度の振動が見られる。更に細かい振動が見られるが、これは $\widetilde{A}s$ 状態における表面回転に伴うものである。この回転の見かけの回転数は底面の回転数に比べるとずっと遅い。ここで問題にするのは水面の秒スケールの変動であり、そのため細かい振動を移動平均により取り除いた関数 h_{MA} を図 2(b) に示す。平均の幅は 0.533 秒であり、これは水面の回転周期の倍程度の大きさである。

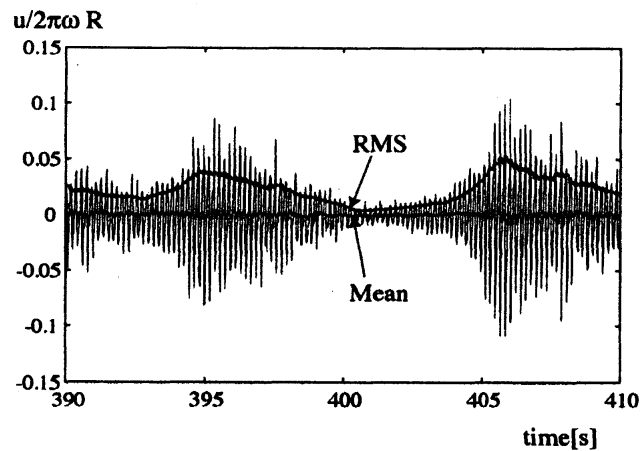


図3 UVP による、動径方向流速のデータ、移動平均 (幅は 0.52 秒; Mean で表示)、およびその間隔での二乗平均速度 (RMS で表示)。

UVP による流速計測データの例を図 3 に示す。このデータにおける時間軸の値は図 2 と対応しており、水面が底に接触した時間 ($400 < t < 404$) が含まれている。実線は流速場データであり、細かい振動が見える。この周期は水面の回転周期に対応している。この振動を移動平均 (0.52 秒) により取り除いた線が示されているが、揺らぎの大きさに比べて非常に小さく、平均流速 (動径方向成分) はほぼゼロであることが分かる。この間隔での速度の二乗平均速度 u_{RMS} も同時に示されている。こちらは振動の振幅にほぼ対応している。平均時間が水面の高さの場合と少し異なるのは、サンプリング時間の違いに起因するものである。

u_{RMS} と h_{MA} の間の関係をグラフにした物が図 4 である。一見して分かるように、これらの量の間には強い正の相関がある。乱れ強さは水面が $h_{MA}/H > 0.2$ を超えた付近から急激に大きくなっている。また、この変動は $h_{MA}/H < 0.15$ の領域を間欠的に通り、そのとき乱れ強さ $u_{RMS}/2\pi\omega R$ も小さくなっていることが分かる。より細かく見た場合、 h_{MA} と u_{MA} の間には位相のずれがあり、これにより $h_{MA}/H < 0.15$ を通る経路がループ状になっていることがわかる (図には水面が下がるイベントを線の種類と太さを変えて標示している)。この経路は 1) まず乱れ強さが下がり 2) その後水面が下がり 3) 続いて乱れ強さが大きくなり 4) 水面が上がる、という順番になっており、これまでの観測結果と対応している [3, 6]。

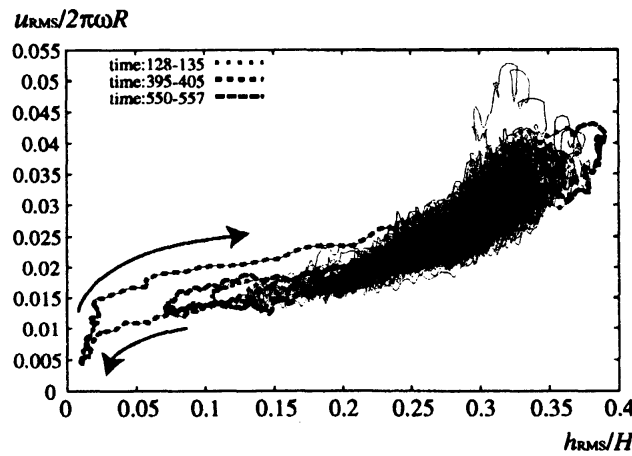


図4 $u_{RMS} - h_{MA}$ グラフ。両者の間には強い相関がある。水面が大きく下がる場合 ($128 \leq t \leq 135, 395 \leq t \leq 405, 550 \leq t \leq 557$) を太い波線または点線で示している。

4 結論

我々は底面の回転により駆動された円筒内の流れに見られる表面大変形の挙動、特に軸対称変形と非軸対称変形が特徴的な水面の高さの変動を伴って切り替わる surface switching の動的挙動を乱れ強さと水面の高さの同時計測データに基づいて行った。両者には強い相関があるが、位相差をもち、これら2つの量で作られる位相空間の中での振る舞いはループ状となっている。結果はこれまでに連続写真 [6] および流れの可視化 [4] で示唆されていたことと整合的で、対称性の変化が水面の高さに先んじて起こり、対称性の変化は流体の全域の乱流化と対応している。

レイノルズ数の変化に伴う乱れ強さは、surface switching が起きる値で急に大きくなり、その値は境界層が乱流に遷移する値と同じオーダーである [3]。従って、境界層で発生した乱流が流体全域に広げられる機構として表面の大変形が関係していることが示唆されている。実際軸対称状態において水面が底面に付いている状態から離れる時の流れの変化の詳細や、逆に非軸対称状態から対称性が回復して水面が底面に向かって伸びる時の流れの変化が可視化により解析されている [4]。

問題はそのような機構を如何に理解するのかということである。最近、円筒内における von Kármán flow の実験では、乱流内に見られる遅い時間スケールの変動が簡単なノイズ付き低次元力学系で記述されることが報告された [5]。従って我々の系でも、水面変動の

ような遅い時間スケールの変動が低次元力学系で書けることが期待される。実際、予備的な解析の結果によれば、surface switching の挙動は 1 次元写像である程度記述できるようである。今後より研究を進め、surface switching の挙動を詳しく調べたいと考えている。

参考文献

- [1] T. R. N. Jansson, M. P. Haspang, K. H. Jensen, P. Hersen, and T. Bohr. Polygons on a rotating fluid surface. *Phys. Rev. Lett.* , 96:174502, 2006.
- [2] T. Suzuki, M. Iima, and Y. Hayase. Surface switching of rotating fluid in a cylinder. *Phys. Fluids*, 18:101701, 2006.
- [3] Y. Tasaka, M. Iima, and K. Ito. Rotating flow transition related to surface switching. *J. Phys.:Conf. Ser.*, 2008. in press.
- [4] Y. Tasaka, K. Ito, and M. Iima. Visualization of a rotating flow under large-deformed free surface using anisotropic flakes. *J. Visualization*, 11:163–172, 2008.
- [5] A. Torre and J. Burguete. Slow dynamics in a turbulent von kármán swirling flow. *Phys. Rev. Lett.* , 99:054101, 2007.
- [6] 鈴木 俊行, 飯間 信, 早瀬 友美乃. 洗濯機内の流れが示す遷移現象の実験的研究. **数理解析研究所講究録**, 1472, 175–184, 2006.
- [7] 鈴木俊行. 円盤により駆動される円筒容器内の流れが示す遷移現象の実験的研究. 修士論文 (北海道大学理学研究科), 2005.