

Bathtub vortex の切り替え現象のシミュレーション

Simulation of switching phenomenon of Bathtub vortex

発表者: 浦田 勝行

指導教員: 坪井 一洋

1 はじめに

Bathtub vortex とは洗面台や浴槽などの排水口から水が排出されるときに流出口に現れる渦のことである。そして Bathtub vortex の切り替え現象とは同じ水槽の中に2つの流出口を一定の距離で配置したときに2つの渦の発生場所が時間の経過と共に入れ替わる現象である。

この現象は白石らの実験により発見された現象である[1]。白石らはベルヌーイの定理を用いて切り替えのメカニズムが2つの渦の圧力差によるものだと述べている。しかし、ベルヌーイの定理は本来渦なし流れに対して成り立つ定理であり、この Bathtub vortex の現象に適用することには疑問が残る。

そこで、一般的な粘性流れに対して適用可能なナビエ・ストークス方程式に基づく数値シミュレーションを用いて Bathtub vortex で発生する切り替え現象を検証することを考えた。

本研究では簡単な水槽モデルに基づいた Bathtub vortex のシミュレーションを行ない、切り替え現象を再現することを目的とする。

2 シミュレーション

2.1 初期渦のシミュレーション

切り替え現象を再現するためには最初に安定した初期渦を生成する必要がある。そのために、初期渦を発生させるシミュレーションを行なった。

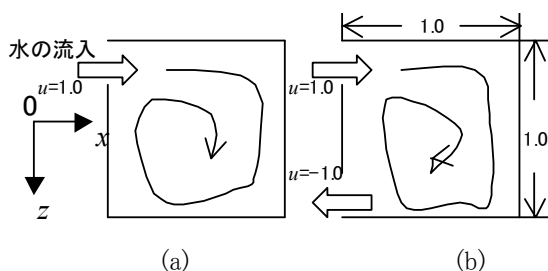


図1 初期渦生成の水槽モデル

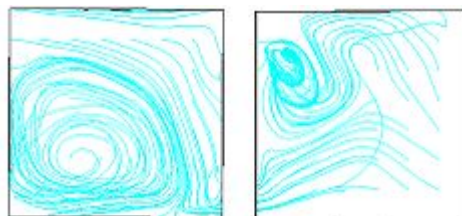
初期渦が切り替え現象に及ぼす影響を検証するために2つの異なる生成条件を考えた。今回考える水槽モデルを図1に示す。これらはともに1辺が1.0の立方体の水槽であり、図1(a)のモデルでは流入口は $0.0 < y < 1.0, 0.0 < z < 0.2$ のみとし、同図1(b)では(a)の流入口に加えて $0.0 < y < 1.0, 0.8 < z < 1.0$ に流出口がある。シミュレーションに用いた他の条件を表1に示す。

図2(a)と(b)に図1(a)と(b)の水槽モデルを用いて生成した初期渦を示す。同図(a)では水槽全体で流線を

描いているが、(b)では水槽の一部でのみ流線を描いている。以下の(a)と(b)をそれぞれ初期渦1と2と呼ぶことにする。

表1 シミュレーション条件[2]

| 格子幅($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) | 0.025 |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 格子数 | $40 \times 40 \times 40$ |
| 時間刻み幅(Δt) | 0.001 |
| 収束条件(δ) | 10^{-6} |
| 打ち切りステップ数 | 10^5 |
| 初期条件 | 全ての点で $u=0, p=0$ |
| レイノルズ数 | 250000 |



(a) 初期渦1

(b) 初期渦2

図2 時計回りの初期渦 ($\nu=0.5$)

2.2 切り替え現象のシミュレーション

発生させた初期渦を用いて切り替え現象の再現を行なうため、図3のような水槽モデルを考えた。このモデルでは水の流入は $x=0.0$ と 2.0 の面内の範囲 ($0.0 < y < 1.0, 0.0 < z < 0.2$) で行なわれる。また、図中の L は流出口間距離で、今回のシミュレーションの重要なパラメータである。

シミュレーション条件は格子数と打ち切りステップ数以外は表1と同じである。格子数は $80 \times 40 \times 40$ とし、初期渦として水槽左側に時計回りの初期渦、水槽右側に反時計回りの初期渦を用いた。また、時間方向に100ステップ毎に計算結果を保存し、それを初期値として計算を繰り返した。

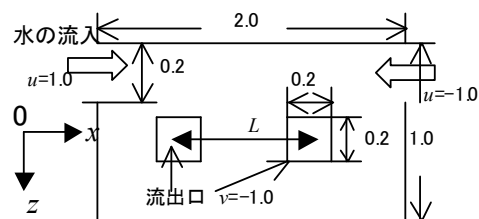
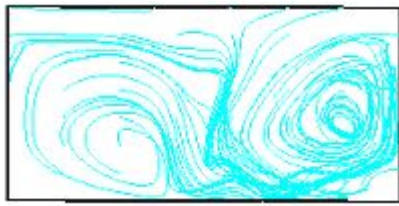
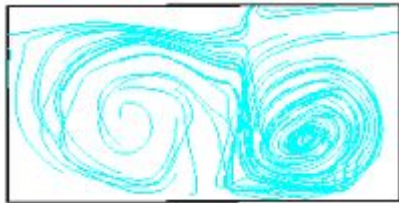


図3 切り替え現象の水槽モデル

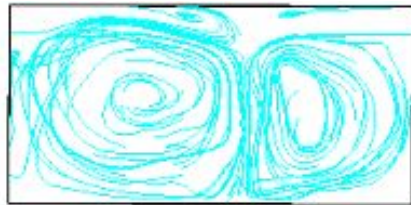
図4に初期渦1を用いた場合のシミュレーション結果を示す. この計算では $L=0.2$ に設定した.



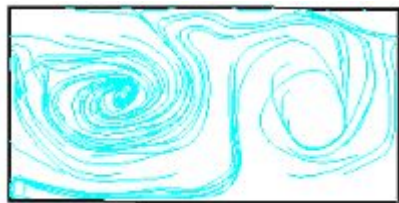
(a) ステップ数:300



(b) ステップ数:600



(c) ステップ数:900



(d) ステップ数:1200

図4 流線による渦の可視化 ($\nu=0.5$)

図4(a)では右側の渦が強く現れ, 左側は弱まっている. その後, ステップを重ねた同図(d)では左側の渦が強くなっており, それにともない右側は弱まっているのがわかる. この結果より, 今回用いた水槽モデルで渦の切り替え現象が再現できている.

次にシミュレーション結果から渦の切り替えの周波数 f [Hz]を求めて実験による測定値と比較した. 周波数は式(1)により求めることができる.

$$f = \frac{U_0}{\Delta t L_0 \times \text{step数}} \quad (1)$$

ここで, L_0 と U_0 は基準となる長さや流速でそれぞれ $L_0=0.3$ m, $U_0=0.1$ m/sである. また, step 数は渦の切り替えの周期に対応するステップ数で, 図4の例では1200となる.

求めた周波数の結果を表2にまとめる. 表2より図4に示した初期渦1および初期渦2を用いたシミュレーションでの周波数は同じ値となり, 実験値とも同程度の値となった.

表2 初期の状態での周波数

| | 実験 | 初期渦1 | 初期渦2 |
|---------|-----|------|------|
| 周波数[Hz] | 0.3 | 0.19 | 0.19 |

2.3 流出口間距離の違いによる変化

流出口間距離が切り替え現象に及ぼす影響を検証するため, 流出口間距離が0.2と1.0の異なる2つの場合でシミュレーションを行なった. そして, シミュレーション結果から式(1)を用いて周波数を求め, その結果を表3に示す. また, ここでは切り替え現象が安定したと考えられる50000ステップ以降のデータを用いて周波数を計算した.

表3 流出口間距離 L の違いによる周波数[Hz]

| | $L=0.2$ | $L=1.0$ |
|------|---------|---------|
| 実験 | 0.3 | — |
| 初期渦1 | 0.12 | 0.06 |
| 初期渦2 | 0.07 | 0.08 |

表3より初期渦1では流出口間距離の違いにより周波数に2倍の差がある. 一方, 初期渦2では周波数の差が0.01程度で大きな差は見られない. この結果は, 切り替えの周波数に初期渦の違いが影響する可能性を示唆している. また, 初期渦1と2ともにシミュレーションでの周波数が実験値と同程度となった.

3 まとめおよび課題

切り替え現象はベルヌーイの定理によりメカニズムを説明している. しかし, この現象にベルヌーイの定理が適用出来るか疑問がある. そのため, ベルヌーイの定理を用いることなく切り替えのメカニズムを検証するモデルを作成し, シミュレーションを行なった.

まず, 始めに切り替え現象を再現するために必要となる初期渦を発生させた. 次に切り替え現象を再現するモデルを作成し, シミュレーションを行ない, 切り替え現象を再現した. そして, モデルの有用性を検証するため, 流出口間距離が異なる2つの場合についてシミュレーションを行ない, 切り替え周波数を実験値と比較をした. その結果, 初期渦1と2ともにシミュレーション結果と実験値が同程度となった.

今後の課題としては, 作成したモデルをより実験条件に近づける改良を行ない, 切り替え現象のメカニズムを検証することが挙げられる.

参考文献

- [1] M.Shiraishi, T.Sato:Switching Phenomenon of a Bathtub Vortex ,(Transactions of the ASME Vol.61,1994)
- [2] 田名網七音:『Bathtub vortex シミュレーションの高精度化』, (茨城大学工学部システム工学科卒業研究論文, 2006)