

マンホールからの水の噴き上げのシミュレーション

理学専攻 情報科学コース 景山 彩璃 (指導教員: 河村哲也)

1. はじめに

近年の道路や土地の舗装により特に都心部において集中豪雨による氾濫の被害が多発している。氾濫の種類には大きく二つある。ひとつは外水氾濫とよばれるものであり、河川そのものの水位が上昇して氾濫するものである。もうひとつは内水氾濫というものであり、これは下水管処理能力を上回る雨量により下水管から地上に逆流するものである。都市部においてはこの内水氾濫による被害が深刻になっている。内水氾濫は、例えばマンホールからの水の噴出によって起こる。これは下水管処理能力を超えた場合に起こるもので、水が地上に逆流したり管内圧力によりマンホールの蓋が浮上・飛散したりする。安全性は下水管路の役割であるため、マンホールの蓋は重くされたり、また蓋に鍵が付けられていたり、圧力を逃すための穴があけられていたりしている。本研究ではこの現象をシミュレーションするため水と空気という大きな密度差をもつ流体の問題とみなし、マンホールの穴の有無による蓋の上下運動の差や、その周りの水の流れを調べた。

2. モデル化

本研究ではまずマンホールを細長い長方形形状として穴のあるものとないものの計算を行った。この場合、計算時間を短縮するため奥行き方向の格子は少なくした。次に現実に合わせて円板形状のマンホールに対するモデルをつくった。

3. 計算方法

本研究では水の噴出を考えるにあたり、まわりの空気と一緒にして密度に大きな差のある一種類の流体として取り扱った。実際の密度比は 1:1000 程度であるが、計算が困難であるためより小さな密度比を用いた。基礎方程式は以下の連続の方程式、非圧縮性ナビエストークス方程式、密度方程式である。

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right\} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{V} + \rho \vec{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \rho = 0$$

(\vec{V} : 速度ベクトル, p : 圧力変動, ρ : 密度, μ : 粘性率, \vec{g} : 重力ベクトル)
 解法にはフラクショナルステップ法を用いた。また非線形項の近似には 3 次精度上流差分法を用いた。粘性率は 0.0001 にし、密度比を変化させた。マンホールの上下運動は蓋の上下の圧力差を用いて計算した。

4. テスト計算

本計算方法の有効性を確かめるため、正方形領域内で中央部にすきまのある壁を隔てて密度の差がある流体が接している状況を考え、流体の運動のシミュレーションを行った。計算には、左側に密度 15, 30 の流体があり、右側に密度 1 の流体

があるとした。

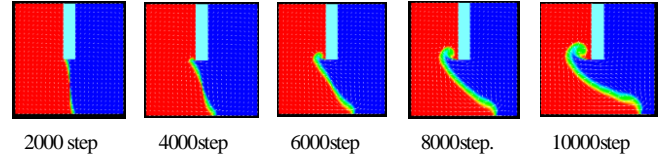


図 1: 密度比 15

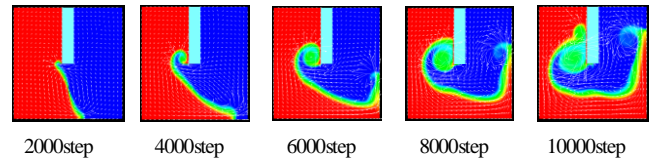


図 2: 密度比 30

二つの場合とも step 数が増えるに経つて左の密度の大きい流体が右に流れだすと同時に密度の小さい流体が左に流れ込む様子が再現された。この場合 密度比 30 のものの方が密度比 15 のものよりも流れが強く、速い。テスト計算より、密度による流れの違いが確認できた。

5. 格子生成

本研究では直交格子を用いて次の 5 種類の格子を作成した。Case1 はマンホールの計算で蓋の穴のあるもの、Case2 マンホールの蓋に穴の空いていないもの、Case1, Case2 は方向が 100, 軸方向が 100 の二次元の直交格子である。Case3 は円柱座標系を用い、軸対称性を仮定して計算した。格子数は半径方向は 50, 高さ方向は 100 である。Case4 はマンホールと円管が交差した格子で、x 方向に 200, 高さ方向に 50, z 方向に 150 の格子を用いた。Case5 は Case4 の穴の空いているものである。蓋は蓋に掛る圧力差によって逐次上下させて動くようにしており、蓋の上に掛る圧力が下に掛る圧力よりも大きければ蓋は下に、逆に上にかかる圧力が下に掛る圧力よりも小さければ上に動くようにしている。xy 平面がマンホールのある地面に平行な面であり、z 方向が地上方向とする。

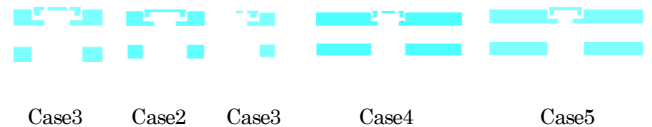


図 3: 5 種類の格子

6. 計算結果

赤色の地下の部分には密度の高い流体、地上部分に密度の低い流体を置き、下水管部分には図の右から左へ流れるように速度を与えた。

(1) 密度による比較

密度比 ρ を 30, 15 としてその違いを調べた。両方とも step 数が増えるにつれマンホールの穴から密度差のある二つの流体が混合していく様子が見られた。どちらも 4000step までは左側に流れが引伸られ、その後右から噴出し、さらに step 数が増えると主に左側から噴出していく様子が見られた。また管の下部ではキャビティ流れが起きている様子が見られた。密度比の小さいも

のはほぼ一定に細かく上下に運動し、密度比の大きいものの方上下運動が大きいことが分かる。

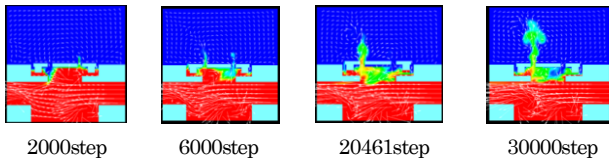


図 4: Case1 密度比 15

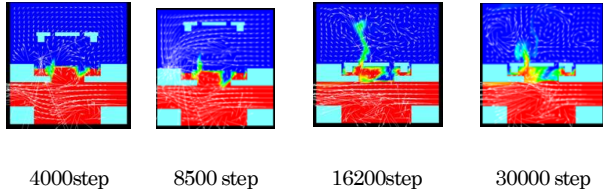


図 5: Case1 密度比 30

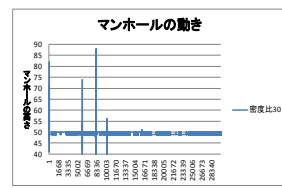
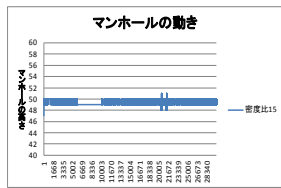


図 6: 密度 15 の上下運動のグラフ

図 7: 密度比 30 の上下運動のグラフ

(2) 穴の有無による比較

マンホールに穴をあけると圧力を逃がし急激な蓋の飛散を逃す効果がある。そこで穴の有無による上下運動と水の噴出の様子を調べた。図 9 よりステップ数の小さいときは穴のあるものもないものも両方とも急激な圧力変化により上下の運動が大きいことが分かる。穴のあいていないものは噴出せずに蓋の下で流体が渦を巻いている。噴出の頻度は穴の空いていないものの方が多く、噴出の高さは穴のあいているものの方が大きいことが分かる。

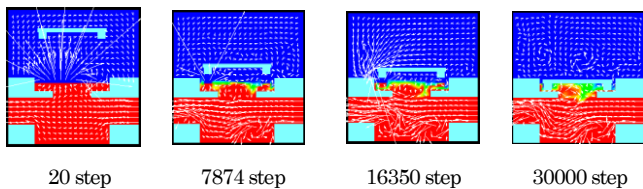


図 8: Case2

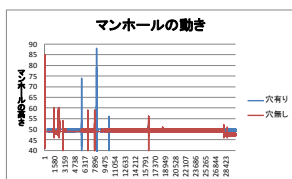


図 9: Case2 の上下運動のグラフ

(3) 軸対称の場合

密度比は 30 では発散したため密度比は 8 として計算している。図 10 と図 11 より噴出の高さ、流れの速さとも Case1 の場合よりも大きいことが分かる。また、蓋の上下運動は約 2000step までは激しく高く振動しその後高さは低くなるが継続的に細かく振動し続けることが分かる。

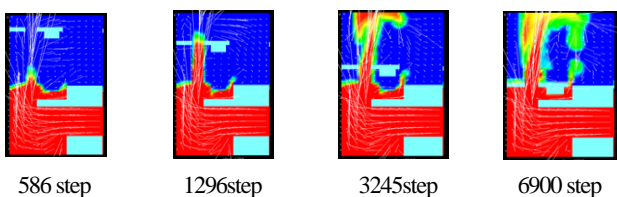


図 10: Case3

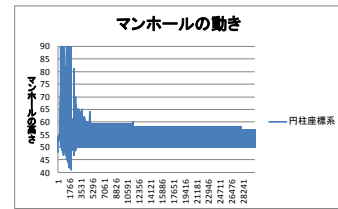


図 11: 上下運動のグラフ

(4) マンホールと円管

Case4, Case5 のマスクを用いて、密度比は 12 で計算した。

Case4 では主にマンホールの蓋の端の方から左右対称に噴き上がる様子が見える。Case5 は主にマンホールの穴から噴出し、より広域に噴出する様子が見えた。蓋の上下運動は、穴の有るものは高く吹き上げるが上下運動は主に step 数が小さいときにおこる。

穴の空いていないものは上下運動は有るものに比べると高さは低い、細かく頻繁に上下運動を起こしていることが分かる。

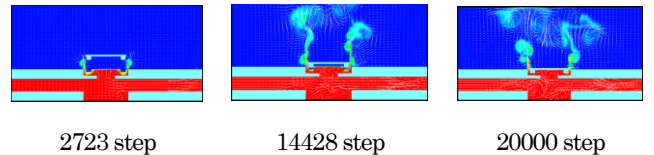


図 12: Case4

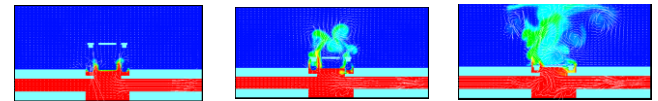


図 13: Case5

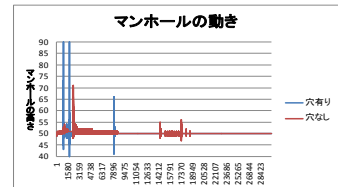


図 14: 上下運動のグラフ

7. まとめ

本研究ではマンホールからの水の噴出を、水および空気を密度差のある一流体として取り扱う方法によりシミュレーションした。

長方形形状のマンホールの計算結果から密度比によりマンホールの上下運動や流れの強さが変化することが明らかになった。また穴のあいているものとあいていないもののマンホールの上下運動で比較したところ、あいているものの方が動きが激しいことが分かった。

今後の課題では密度差を現実のものに近付けることや水と空気の境界面をはっきりさせるため密度の拡散をおさえることがあげられる。

参考文献

- (1) T. Kawamura and K. Kuwahara and H. Takami: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA Paper 84-0340 (1984).