

CFDを用いた管路内の流れの可視化（その1） ～合流部の流況の可視化についての報告

(株) 新日本エグザ 及川 直也, ○土屋 玄, 谷口 文武
横浜市道路局河川事業課 石川 眞

1. はじめに

管渠施設はマンホール間ごとに、マニング式またはクッター式を用いた等流計算により断面を決定するという設計手法が用いられている。この場合、マンホールの上・下流で落差が小さく、水面形が連続となるような流れに対しては特に問題はないが、落差の大きい箇所や合流部、圧送管の出口部等では水面形が大きく乱され、その結果として空気の連行が起き、さまざまな障害を引き起こしていると推測される。

また、現段階では、管路網の解析には分布型の流出解析モデルが用いられているが、これは基本的に一次元モデルであるということと、空気の連行についてもモデル化されていないということから、これら現象を十分には把握することができず、このため合理的に問題点を解決するに至っていない。この理由の一つとして、管渠内の流況が把握されていない（可視化がされていない）ことがあげられる。これらの問題解決をするために、流況を把握する手法としてCFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）を用いて可視化する手法を開発したので、本稿では「合流部の可視化」を、別稿において「圧送管の出口部とそれに接続された下流部に落差のある管渠の流況の可視化についてその成果を報告する。

2. 解析条件

2.1 モデルの構築

CFD そのものは従来からさまざまな分野で適用されてきたが、計算コストが高いことと、PCの計算能力が脆弱であったことから、実用レベルでの計算を行うには高機能のワークステーションないしはスーパーコンピュータ等に頼らざるを得なかった。このようなことから下水道への活用例は少なく[1][2][3]、また管渠施設への適用はなかったが、Linuxの普及によるソフトのオープンソース化やPCの高機能化により、PCでの解析が可能となった。今回、これらのことを背景に、LinuxのオープンソースであるCFDソフトを用いて並列計算により、管路の合流部の挙動の解析を行った。

図1に解析した管路の概要を示す。2箇所の流入管から1号マンホールに流入するものとして解析を行った（流入の落差はそれぞれマンホール底部に対して、流入管1は1000mm、2が500mmとした）。なお、流入条件は流入管1および2ともに、管径は250mmとし、水深は断面の50%、流速1m/秒を与えた（流量は $0.025\text{m}^3/\text{秒}$ ）。また、流出の管路は管径400と設定した。流体の解析にあたっては、連続の式と運動方程式により構成されるナビエ・ストークス式を用い、有限体積法で解いた。計算領域は約178,000セルとなっている。

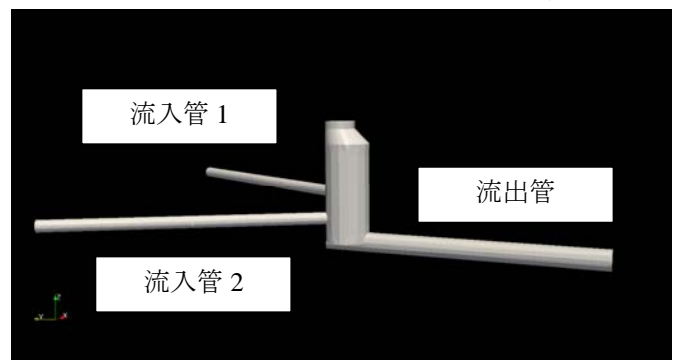


図1 解析した管路の概要

2.2 シミュレーション環境

今回のシミュレーションには、OSとしてUBUNTU10.04の64ビット版を、CFDのソフトウェアとしてはOpenFOAM2.10を用いて、8CPUで並列計算を行った。

本ケースのような場合には、管路内の流れは高レイノルズ数を持つ乱流となるが、後述のように、乱流におけるエネルギーの散逸に対して運動エネルギーが卓越していることと、本研究の目的が管路内の流れが、幾何学形状によってどのような影響を受けるかを知るための基礎的な「流れの可視化」であることから、計算速度と収束性の向上を目的として解析には層流モデルを用いた。また空気の混入と連行状況を確認するため、気液混相の流れを解くことが必要となったため、VOF (Volume of Fluid : 流体の体積分率) [4]を用いて計算負荷の軽減を図った。

2.3 解析手順

解析にあたっては、初期条件として流入管 1 および 2 の液面が断面の 50% であるとし、前述の流入条件を与えて非定常計算を行った。解析時間としては、約 10 秒後には流れが下流端に到達し、約 20 秒程度でほぼ安定状態になると推定し、余裕を見て 25 秒間とした。

3. 解析結果と考察

前述の条件により解析した結果を以下に示す。シミュレーションを可視化して確認した結果、約 25 秒後には流速分布および相比率が安定したことから、この時点の結果で評価を行うものとする。

3.1 流速の分布

図 2 に流速分布の計算結果を示す。図 2 において、管路の下部に比べて上部の相対速度が大きくなっている。これは、今回の解析で気相と液相を同時に計算している（上部が気相の流速を、下部が液相の流速を表している）ため、上部の気相の流速が下部の液相の流速よりも大きいことを意味している。今回の解析では下流端を解放としたため、水の移動の結果、下流端の開口部から空気の吸い込み現象が生じ、気相部分の流速が大きくなっていると考えられる。その他、液相については、流入管 1 の落差が大きいため、その流速も大きくなっていることが視認できている。

また、図 3 の流線の状況から、合流部の流線が大きく乱れており、今回の計算領域では、乱流モデルにおけるエネルギーの散逸に対して運動エネルギーの方がはるかに大きいと推測された。また、マンホール内では落差が生じている手前部ではインバートがあるにもかかわらず、液相に対して流線が生成されていないため、この部分で滞留が生じていると推測されることから、何らかの対策が必要と考えられる。

3.2 相比率

図 4 に相比率の解析結果を示す。空気の連行を伴わない場合には、気-液相の界面は比較的きれいに分離されるが、今回のケースのように水面が大きく変動し、跳水も生じていることから、液面付近のメッシュを細かくして、前述の VOF 法により、気相と液相の相互作用を表現した。図 3 において、下部の領域が液相を、上部の領域が気相を、そして中間部の領域が気-液が混合となった相をそれぞれ表している。液面の状況を把握するため、液相を 1、気相を 0 としてその比率を計算させた。図から分かるように、流入管からの落差によってマンホール内の水位が影響を受けている状況（図中の○部）が反映されており、下流部において液

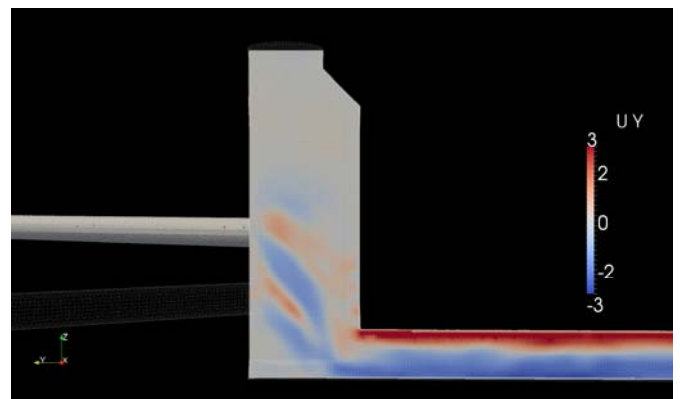


図 2 流速の分布

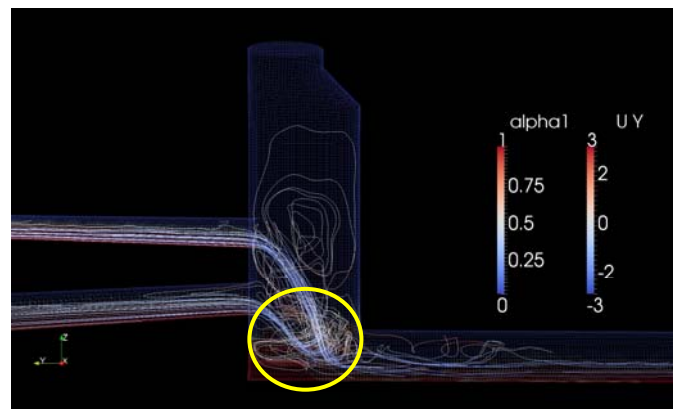


図 3 流線の分布

面が波打っている状況や管底部に空気が混入している状況を反映することができた。

4. まとめ

今回の解析により、VOF法を適用すれば、落差等により空気の連行を含む管路内の水の挙動と空気の挙動の可視化がCFDにより適切に表現できる目処がついた。ただし、今回はコンピュータ上の水理実験であることから、この結果をもって対策案を計画する際には、実際の水理実験施設により、このモデルが管路内の水の挙動を実用レベルで反映している

かどうかを確認する必要がある。特に、今回は計算時間の短縮と収束性の向上を目的とし、運動エネルギーが乱流におけるエネルギーの散逸に卓越するという仮定から、乱流モデルを適用していないが、その点の確認も必要と考えられる。

また、今回の解析により、上述の水理実験での確認を行えば、コンピュータ水理実験は、以下の長所があることも知見として得られた。

- モデルをPCで構築するため、条件を変えての実験を、低コストと短い期間で行うことが可能である。
- 液相だけでなく従前、可視化が難しかった気相の挙動についてもその可視化が可能であり、マンホール蓋の飛散の可能性についての検討も行える。
- 問題箇所の対策についても、さまざまな視点から解決策の提案に適用できるツールである。

これらのことから、CFDは例えばマンホールの形状や既存マンホール蓋の飛散防止策の検討など、下水道施設の設計や維持管理のためのツールとして有効な活用手段であると考えられる。

[謝辞] 本研究は、SW-CFD研究会における活動の成果を踏まえたものであり、解析作業においては関係各位に感謝の意を表する次第である。

[参考文献]

- [1] 功刀亮, 岡本幸彦, 大橋一聡, 斉藤功 (2004) 水中プロペラ式ODの酸素移動係数解析に関する研究, 第41回下水道研究発表会講演集, 918-920
- [2] 豊岡和宏, 古米弘明, 土屋玄, 谷口文武, 佐藤茂雄 (2004) CFDと活性汚泥モデルを用いたOD内容存酸素濃度の基礎的な解析, 第41回下水道研究発表会講演集, 792-794
- [3] 豊岡和宏, 古米弘明, 土屋玄, 谷口文武, 山田文隆, 佐藤茂雄 (2005) CFDと活性汚泥モデルを用いたOD内容存酸素濃度の基礎的な解析(2), 第42回下水道研究発表会講演集, 873-875
- [4] OpenFOAM, Version2.0.0 ユーザーガイド

【問い合わせ先】 ㈱新日本エグザ 東京事務所 土屋 玄
〒110-0015 東京都台東区東上野4-6-7
電話: (03) 5827-1216
e-mail: g-tsuchiya@shinnihon-exa.co.jp

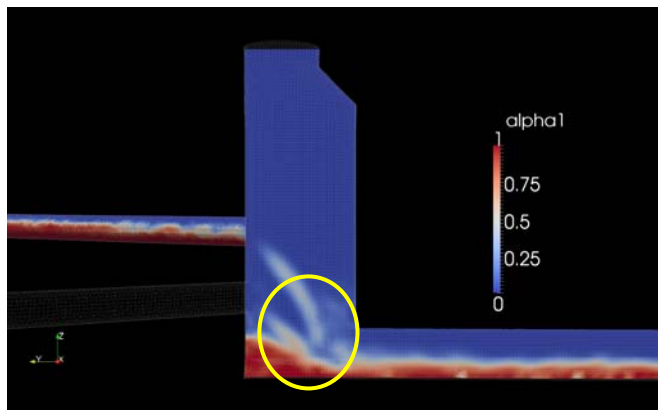


図4 液相と気相の相比分率