

PIV 解析を用いた管路内非定常流況シミュレーションモデルの開発 Development of the Simulation Model for Unsteady Flow in Pipelines Using PIV Analysis

○倉澤加奈恵*, 浅田洋平**, 福重雄大***, 石井敦**

○Kanae Kurasawa, Yohei Asada, Yudai Fukushige, Atsushi Ishii

1. はじめに

農業用水の配水等に用いられる管水路の設計と維持管理には、定常および非定常流れにおける水理解析が必要不可欠である。非定常流れにおける水理解析は特に、バルブなどの水利施設の操作時に発生する水撃圧の予測や、負圧時に発生しやすいキャビテーションを防止するための圧力変動全体の計算に用いられる。しかし、既に発達した理論が存在する定常流れとは異なり、非定常流れはその流動特性の複雑さから、非定常の摩擦損失をモデル化する既存のモデルによって精度良く計算することが難しい。したがって本研究では、管の設計・維持管理の適正化を図るために、PIV によって管内の流速分布を可視化、計測することで壁せん断応力の時間変動を導出し、それに応じた新たな非定常流況シミュレーションモデルを開発することを目的とする。

2. 新たな壁せん断応力を用いた数値モデル

管路流れに関する数値モデルとして、以下の連続式(式(1))と運動量方程式(式(2))で構成される 1 次元管路流れの支配方程式を用いた。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{4\tau_w}{D\rho g} = 0 \quad (2)$$

式(2)における壁せん断応力 τ_w を平均流速などで表した以下の新しいモデル、model 1~model 4 を提案し、各モデルの係数 a, b, c, d を PIV 解析の結果に基づいて求めた。

$$\text{model 1:} \quad \tau_w = aV + b \quad (3) \quad \text{model 2:} \quad \tau_w = aV + b \frac{\partial V}{\partial t} + c \quad (4)$$

$$\text{model 3:} \quad \tau_w = aV + b \frac{\partial V}{\partial t} + c \frac{\partial V}{\partial x} + d \quad (5) \quad \text{model 4:} \quad \tau_w = aV + b \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + c \quad (6)$$

式(1)、(2)と各モデル式に対して特性曲線法を用いた数値シミュレーションを行った。

3. 検証実験

壁せん断応力を用いた数値モデルの精度を検証するための実験を行った。実験装置の模式図を **Figure 1** に示す。実験には全長 1.81 m、内径 9 mm、厚み 2 mm のアクリル管を使用し、上流端と下流端からそれぞれ 0.405 m の箇所に圧力計を設置し、下流端付近に流量計を設置した。PIV は管の中央で実施し、PIV で使用するレーザー光の管湾曲部における屈折の影響をなくすために、管を囲むようにして全長 1.20 m の水槽を設置し、水槽内を水で満たした。実

*筑波大学大学院理工情報生命学術院, Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

**筑波大学生命環境系, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

***農研機構農村工学研究部門, Institute for Rural Engineering, NARO

キーワード：管路流れ

験条件は、test 1 ($Re=1227$), test 2 ($Re=3088$), test 3 ($Re=4597$), test 4 ($Re=7849$), test 5 ($Re=9463$)の 5 つを設定した。ここで、 Re はレイノルズ数である。各 test において管路内が定常流れとなっていることを流量計で確認した後、上流と下流での圧力の計測と管中央部での PIV 計測を開始した。下流端のバルブを閉塞して水撃圧を発生させ、一定時刻経過後計測を終了した。

4. 実験結果

既存の数値モデルである Brunone モデルと model 1~model 4 による test 5 の圧力変動シミュレーションの結果を **Figure 2** に示す。圧力変動シミュレーションの精度を評価するために、実測の圧力変動との二乗平均平方根誤差 (RMSE) を求めた。その値を比較し、各数値モデルの精度を評価した結果を **Table 1** に示す。

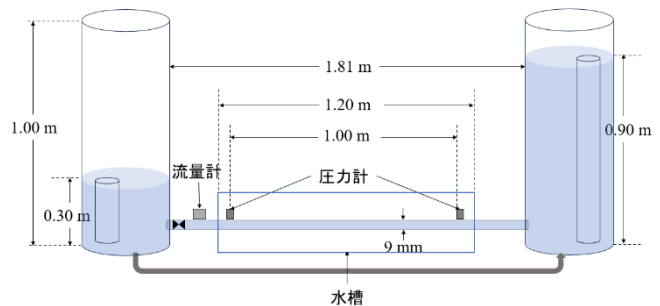


Figure 1 実験装置の模式図

Figure of the experimental equipment

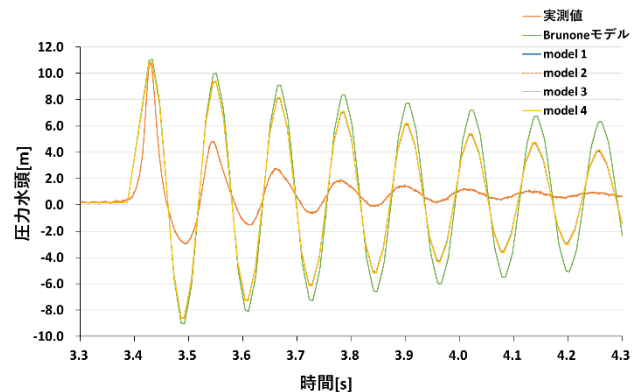


Figure 2 test 5 の圧力変動シミュレーションの結果

Results of pressure fluctuation simulation for test 5

Table 1 各数値モデルの圧力変動の再現精度 (括弧内の値は RMSE)

Accuracy of each numerical model

	低	←	モデルの精度	→	高
test 1	Brunone モデル(0.3692)	model 4(0.3243)	model 2(0.3159)	model 1(0.3156)	model 3(0.3026)
test 2	Brunone モデル(1.1391)	model 3(1.0563)	model 2(1.0561)	model 4(1.0559)	model 1(1.0558)
test 3	Brunone モデル(1.8150)	model 1(1.7650)	model 2(1.7639)	model 4(1.7511)	model 3(1.7451)
test 4	Brunone モデル(3.2732)	model 4(2.6987)	model 1(2.6199)	model 2(2.6158)	model 3(2.5673)
test 5	Brunone モデル(4.1500)	model 4(3.1595)	model 3(3.1440)	model 1(3.1032)	model 2(3.1011)

5. まとめ

Table 1 より、PIV 解析を用いた新しい数値モデル model 1~model 4 は、全ての test において既存の Brunone モデルよりも圧力変動の再現精度が高いことが分かる。また、model 1~model 4 の圧力変動の再現精度の優劣は test ごとに異なる結果となっており、model 1~model 4 の精度には差が見られないことが判明した。新しい数値モデルの圧力変動の再現精度の高さに影響を与える要素の 1 つとして、数値モデルによる壁せん断応力の時間変動の再現精度の高さが挙げられるため、今後は流量の変化に応じてそれがどのように変動するかを調べる予定である。また、数値モデルの精度をさらに高めるために、乱流の流動特性や管の材質を考慮したモデルの構築も課題として挙げる。