

# 油圧制御技術とシミュレーション

○真田一志\*

## Control technology and simulation for oil-hydraulics

Kazushi SANADA\*

This study presents a simulation model of pipeline dynamics as an example of control technology and simulation for oil-hydraulics. The author proposed the optimized finite element model of pipeline dynamics, which is finite element approximation of the equation of motion and the continuity equation of incompressible fluid flow in a pipe. Grid spacing for the finite element approximation is adjusted in order to improve accuracy of natural angular frequencies of the model against theoretical values. The optimized finite element model is represented by a state equation widely used in the field of control engineering. It is easy to implement the model to commercial simulation software. As an example, control technology and simulation using the optimized finite element model applied to common-rail injection system is introduced. Usage of the finite element model improves accuracy of control technology and simulation.

**Key Words :** Oil-hydraulics, Control, Simulation, Modeling, Pipeline dynamics

### 1. はじめに

油圧制御技術のモデルベース開発を目指して、シミュレーションの高度化の研究を行っている。管路の過渡現象のモデルとコモンレール式燃料噴射装置に応用した例を紹介する。

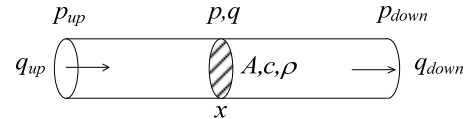


Fig. 1 Pipe model

### 2. 最適化有限要素モデル<sup>1)</sup>

Fig. 1 に示すように、断面が円形で、非圧縮性流体が流れる管路を考える。管路の軸に沿って圧力と流量の格子点を交互に設定する (Fig. 2)。流れの運動方程式 (式(1)) と連続の式 (式(2)) を、交互格子系をもとにした線形形状関数を用いて、有限要素近似すると式(3)で示す状態方程式が得られる。状態変数  $\mathbf{x}$  は式(4)に示すように、格子点の圧力と流量から成る。入力  $\bar{\mathbf{p}}$  は、管路の両端の圧力である (式(5))。

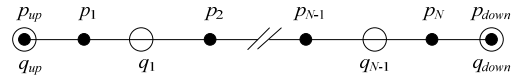


Fig. 2 Interlacing grid system

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - p_f(q) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}_p \mathbf{x} + \mathbf{B}_p \bar{\mathbf{p}} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T, \mathbf{p}^T]^T \quad (4)$$

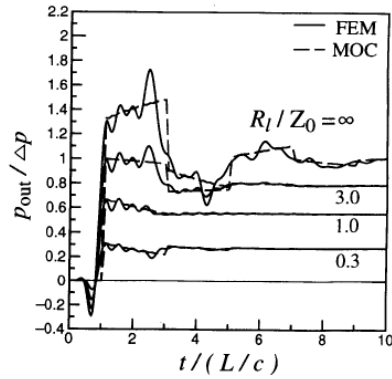
$$\bar{\mathbf{p}} = [p_{up}, p_{down}]^T \quad (5)$$

格子点の配置は、モデルの固有角振動数の近似精度が極力高くなるように最適化した。Fig. 3 に示す管路の一端の圧力がステップ状に増加した場合、他端の絞りの前の圧力をシミュレーションした結果を Fig. 4 に示す。下流端の絞りの強さ  $R_l / Z_0$  が無限大の場合は閉鎖端を意味し、ゼロの場合は圧力一定の開放端を表している。格子点を均等に配置した Fig. 4 (a) では、不自然な数値的な振動が表れている。モデル固有値の近似精度を評価関数として、格子点配置を数値探索手法により最適化した場合の結果を Fig. 4 (b) に示す。不自然な数値的な振動が低減されており、最適化の効果が現れている。そのため、本モデルを最適化有限要素モデルと呼んでいる。

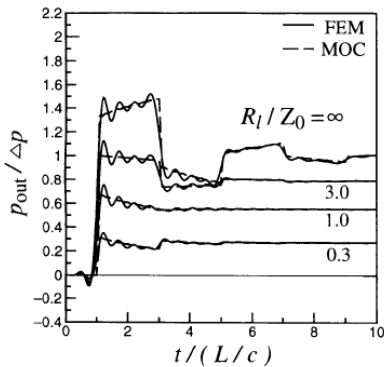


Fig. 3 Step input to a single pipe terminated with a restriction

\* 横浜国立大学大学院工学研究院  
(〒240 - 8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)  
(E-mail: ksanada@ynu.ac.jp)



(a) Uniform grid system



(b) Optimized grid system

Fig. 4 Transient pressures  $p_{out}$

## 2. 燃料噴射のシミュレーション<sup>2)</sup>

高圧燃料を貯蔵し、電気信号によって噴射を制御するコモンレール式 (Fig. 5) が普及している。噴射に伴う圧力脈動は燃料噴射率に影響する。

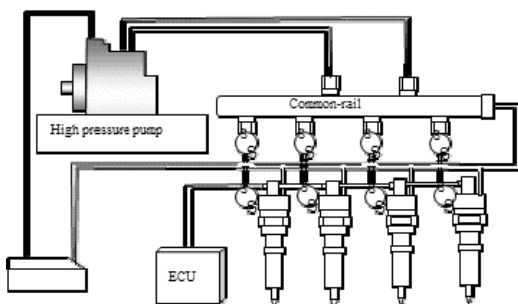


Fig. 5 Common-rail fuel injection system

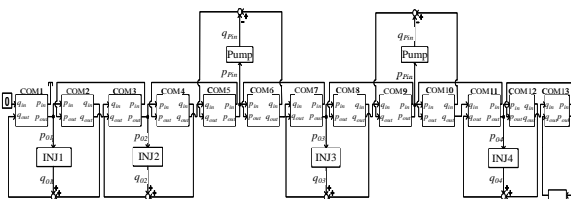


Fig. 6 Simulation model using the optimized finite element model

コモンレールを最適化有限要素モデルで近似した (Fig. 6)。燃料噴射に伴い変動する噴射弁圧力と燃料噴射率について、実験結果とシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。プレ噴射、メイン噴射、ポスト噴射を想定した。破線がモデルによるシミュレーション結果であり、実線の実験結果をよく再現している。燃料噴射率を精密に制御するため、シミュレーションによる挙動予測が活用できる。

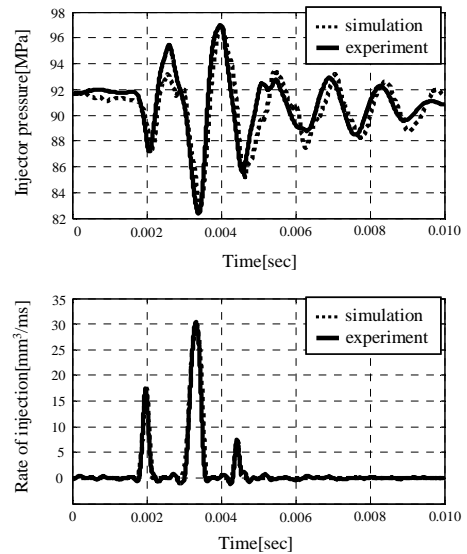


Fig. 7 Simulation results

## 4. おわりに

最適化有限要素モデルは制御工学の状態方程式で表現できることから、市販の数値計算ソフトで容易に使うことができる。管路の長さや内径、作動油の粘度などの必要な諸元を入力すれば係数行列を自動的に出力するソフトを開発しており、さまざまな事例に活用することができる。

## 参考文献

- 1) K Sanada, C W Richards, D K Longmore and D N Johnston, A finite element model of hydraulic pipelines using an optimized interlacing grid system, Proceedings of Institution for Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol.207, 1993, 213/222 (1993)
- 2) Hiroshi Akiyama, Hiroyuki Akiyama, Akira Kato, Toshinori Saiki, Kazushi Sanada, and Naoki Kado, Precise Fuel Control of Diesel Common-Rail System by Using OFEM, SAE Technical Paper (2010-01-0876), 31/40 (2010)