

論文の内容の要旨

論文題目 固有直交分解法と Galerkin 射影に基づく
縮約モデルによる配管系流れ解析の効率化に関する研究

氏 名 矢敷 達朗

発電プラント、および石油化学、水、医薬などの産業プラントでは、プラントの設計、運転・保守の最適化や標準化が求められている。これを受け、プラント CAD データ、および大量に蓄積したプラント運転データを活用して、プラントの状態を可視化することで、プラント特性の評価、プラント劣化状況の可視化によるプラント寿命予測等を通じて、プラント設計、運転・保守の最適化や標準化を実現しようという機運が高まっている。プラントの配管系を対象としてプラントの状態を可視化する例として、① 配管系内の旋回流れ場を可視化し、流量計の計測精度を予測することで、計測精度低下の要因を検討し、配管系設計にフィードバックする例、② 配管減肉現象を可視化し、プラントの運転条件、配管設置条件に応じて減肉速度の大きい部位や余寿命が短い部位を特定し、該当部位を集中的に検査することで定期点検での肉厚測定作業を効率化する例がある。いずれの例においても、配管内で生じる特徴的な流動現象である、オリフィス、エルボ、分岐等の組み合わせで生じる旋回流れが、流量計精度低下、配管減肉発生の主要な要因となるため、配管系を対象とした 3 次元流体解析により旋回流れを捉えることが重要となる。従来、主にプラントの機器単体を対象として 3 次元流体解析を適用することが多かったが、近年、機器、配管系を含むプラント全体を対象として 3 次元流体解析を適用し、プラントの特性を評価するニーズが高まっている。3 次元流体解析で用いる有限要素法、有限体積法、有限差分法等の離散化手法では、解析領域を格子と呼ばれる小さい領域に分割し、各格子における流速、圧力等の物理量を計算する。計算対象は高次元の流れ場であり、特に配管系に対しては機器単体と比較して流れ場のデータサイズが一桁以上大きくなるため、計算時間は数日から数週間かかる可能性があり、配管系流れ解析の計算時間を短縮することが必要である。

本研究では、配管系を対象とした 3 次元流体解析の計算時間を短縮することを目的として、固有直交分解法と Galerkin 射影に基づく縮約モデルを配管系流れ解析に適用して、流れ場を短時間に計算する手法を開発した。

第 2 章では、固有直交分解法を用いて配管系流れ解析結果から基底空間を抽出する手法を提案した。本手法では、高次元の流れ場に対して固有直交分解法を適用し、低次元の基底空間を抽出する。3 次元流体解析の流れ場のサイズを n とすると、固有直交分解法により、 n 次元のデータから情報の欠落が最少となるように r 次元の基底空間 $\varphi_i (i = 1, \dots, r)$ が抽出される。 n が $10^5 \sim 10^7$ のオーダーである場合、 r は n よりも十分小さい値 ($10^1 \sim 10^2$ 程度) となる。

提案手法をエルボ、分岐を含む模擬配管系流れ解析結果に適用して基底空間を抽出し、抽出した基底空間を用いた流れ場の近似精度について検討した。定常流れでは、最小流量と最大流量に対するレイノルズ数を含んだ上で、中間流量に対するレイノルズ数の数を増やし、同時に基底数を増やすことで、基底空間による近似精度が上昇する。レイノルズ数の数 4、基底数 3 の条件で、3 次元流体解析の流速を誤差 0.6[%]以下の精度で近似できることを確認した。非定常流れでは、時間方向のサンプリング数は基底空間による近似精度への影響は小さい。一方、最小流量と最大流量に対するレイノルズ数を含んだ上で、中間流量に対するレイノルズ数の数を増やし、同時に基底数を増やすことで、基底空間による近似精度が上昇する。レイノルズ数の数 4、基底数 100 の条件で、3 次元流体解析の流速を時間平均誤差 2.7[%]以下の精度で近似できることを確認した。

第 3 章では、プラントの配管系を対象とした流れ解析結果に対して、機械学習を用いて短時間に渦中心位置を抽出する手法を提案した。本手法では、流れ解析結果に対して、圧力ヘシアンに基づく数式モデルを適用して渦中心位置と渦中心での流れの回転速度を算出する。次に、流れ解析結果と数式モデルを適用して算出した渦中心位置と回転速度を訓練データとして、機械学習を適用することにより、流れ解析結果を入力として、渦中心位置と回転速度を出力する NN モデル (Neural Network モデル) を構築する。NN モデルを構築後、予測フェーズでは、流れ解析結果を NN モデルに入力し、渦中心位置と回転速度を出力する。

エルボ、分岐を含む模擬配管系を対象として、流れ解析結果から NN モデルを学習し、配管断面の流速・圧力分布を入力値として、渦中心の数、渦中心位置、回転速度を予測した。数式モデルによる結果と比較して、NN モデルの結果はノイズにより生じた渦を除去し、より妥当な結果が得られていることを確認した。また、渦中心位置を計算するために必要な CPU 時間は数学モデルに対して 131 倍加速されることを確認した。さらに、流れ解析結果に対して固有直交分解法を適用して流速基底空間を抽出した後、各流速基底に対して渦中心位置と回転速度を算出した。基底の次数が大きくなると、基底が保有している流速場のエネルギーが減少し、基底より抽出されるらせん渦の空間スケールが小さくなることを確認した。

第 4 章では、Galerkin Projection を用いて、流れ解析の基礎式を基底空間上に射影し、配管系流れ解析に対する縮約モデルを構築する手法を提案した。本手法では、3 次元流体解析

の基礎式である NS(Navier-Stokes)方程式、連続の式を満足する流れ場の物理量 z^* を平均成分 \bar{z} と変動成分 z' に分解する。ここで、変動成分 z' が、固有直交分解法を用いて求めた基底 $\bar{\varphi}_i$ の線形結合で表されると仮定する。

$$z = \sum_{i=1}^r a_i \bar{\varphi}_i \quad (1)$$

式(1)の a_i は未知の結合係数である。Galerkin 射影では、基底空間 $\bar{\varphi}_i (i = 1, \dots, r)$ に射影した NS 方程式と連続の式の残差がゼロとなる条件より式(1)中の a_i に関する方程式を導き、縮約モデルを導出する。3次元流体解析では直接 NS 方程式と連続の式を解く必要があるが、基底空間上では a_i に関する小規模な方程式を解くことで流れ場を計算することができる。NS 方程式と連続の式において解くべき未知数のオーダーは $10^5 \sim 10^7$ であるのに対して、 a_i の数は r と同様に n よりも十分小さい値であり、短時間に流れ場を計算することが可能である。

提案手法を乱流条件のキャビティー流れ、模擬配管系流れ解析に適用し、縮約モデルを用いた流れ解析の計算精度、計算時間短縮の効果を検討した。キャビティー流れに対して、レイノルズ数 $Re = 10^5$ の条件で、基底数40で縮約モデルを構築し、縮約モデルを用いて流れ場を計算した。縮約モデルの計算結果は3次元流体解析の計算結果に対して時間平均誤差2.64%で一致し、2回目以降計算時のCPU時間は、3次元流体解析を用いた場合と比較し87.0倍高速化された。次に、模擬配管流れに対して、レイノルズ数 $Re = 10^4$ の条件で、基底数6で縮約モデルを構築し、縮約モデルを用いて流れ場を計算した。縮約モデルの計算結果は3次元流体解析の計算結果に対して時間平均誤差0.43%で一致し、2回目以降計算時のCPU時間は、3次元流体解析を用いた場合と比較し38.0倍高速化された。一方、レイノルズ数 $Re = 10^5$ の条件では、流れは非定常性の強い流れとなり、基底数40で縮約モデルを構築し、縮約モデルを用いて流れ場を計算した。縮約モデルの計算結果は3次元流体解析の計算結果に対して時間平均誤差7.05%で一致し、2回目以降計算時のCPU時間は、3次元流体解析を用いた場合と比較し18.7倍高速化された。

第2章、第3章、第4章の結果より、配管系流れ解析結果に対して、固有直交分解法とGalerkin 射影を適用して基底空間上に流れ解析の基礎式を射影して縮約モデルを構築し、縮約モデルを用いて流れ場を短時間に計算できる見通しを得た。提案手法を用いて構築される縮約モデルを用いて、配管系の流量計精度評価、配管減肉速度評価に必要な配管内部の旋回流れを短時間に算出可能である。これにより、開発技術をプラント運転前の流量計精度評価結果の配管系設計へのフィードバック、配管減肉速度予測結果に基づくプラント定期点検での肉厚測定作業の効率化に活用でき、プラントの設計、運転・保守の最適化、標準化に貢献できる。