

# 非定常乱流解析コード SMART-fem の実用性向上

## 背景

発電プラントのトラブルのうち、流体の変動荷重を伴う構造物の振動が原因となる割合は少なくない。これらの現象解明や設計評価を数値解析によって行うには、流れの非定常性と構造物との連成を精度良く再現しうる実用的な解析手法を用いる必要がある。当所では、複雑形状の変動流れの取り扱いに優れた LES(Large Eddy Simulation)乱流解析コード SMART-fem を開発してきたが、これを実用的な振動問題へ適用するには、数値解析の高速化・安定化ならびに移動境界の取り扱い機能の追加が必要となる。

## 目的

SMART-fem に最新の高速行列解法と安定な時間積分法を導入し、大規模実用問題への適用性を向上させる。また、移動座標法の導入により、移動境界問題への適用をはかる。

## 主な成果

以下により、SMART-fem の実用性を大きく向上させた。

### 1. 時間積分の安定化

SMART-fem で採用している低次の有限要素(メッシュ生成が容易)では、圧力振動や数値発散が生じる場合があるため、非圧縮性条件に補正項を加えてこれらを回避している。この場合、長時間の時間積分で誤差が蓄積する場合がある。そこで、時間積分法を安定化近似投影法に改修し、その有効性を数値実験で確認した。

### 2. 高速行列解法の導入

これまで SMART-fem では、離散化した圧力ポアソン方程式の行列解法として要素行列に基づく共役勾配法(CG法)を用いていた。本研究では全体行列を新たに構築した上で、(1)全体行列に基づくCG法、(2)最新の行列解法である代数的マルチグリッド法(市販ソフト:SMS-AMG、SAMG)を導入した。その結果、合流管問題(図1)の場合、(1)では従来に比べて7倍程度の、(2)ではさらに6倍程度の行列解法の高速化が実現した(図2)。これにより、時間積分での計算負荷増大にも係わらず全体の計算時間が従来の1/30程度に短縮された。

### 3. 移動座標法の導入

移動座標法によって移動境界を処理するアルゴリズムを SMART-fem に導入し、SMART-fem を任意方向に移動・振動する構造物周りの流れへ適用可能なコードへ改修した。改修した SMART-fem を流れ方向に強制変位加振を受ける円柱周りの流れに適用し、振動数の増加に連れて、非対称なフローパターンから対称なフローパターンへ遷移する現象(図3)、および、ある特定の振動数範囲で非定常抗力が励振力として円柱に作用する特性を再現できることを確認した。

## 今後の展開

改良した SMART-fem を用いて 1000 万メッシュ規模の実用問題を 64 ビットの量販ワークステーションで解析しうるシステムを構築し、実用問題に適用する。

**主 担 当 者** 地球工学研究所 流体科学領域 上席研究員 江口 譲、主任研究員 西原 崇

**関連報告書** 「非定常乱流解析コード SMART-fem の実用性向上(その 1) — 行列解法の高速化と時間積分の安定化 —」 N05013, (2006 年 2 月)

「非定常乱流解析コード SMART-fem の実用性向上(その 2) — 振動剛体との連成解析手法の開発と検証 —」 N05030, (2006 年 X 月)

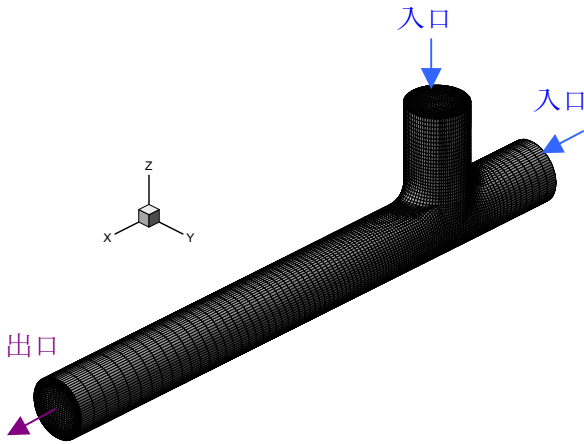


図1 合流管問題のメッシュ分割図

右上の2箇所から流れが流入し、逆T字状の合流部で合流した後、配管内を流れて左下の出口部から流出する問題を 256,160 の要素で分割した。この場合、未知ベクトル  $\mathbf{x}$  の要素数が 256,160 の離散化された圧力ポアソン方程式  $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$  を解く必要がある。ここで、 $\mathbf{A}$  および  $\mathbf{b}$  は既知の行列と右辺ベクトルである。

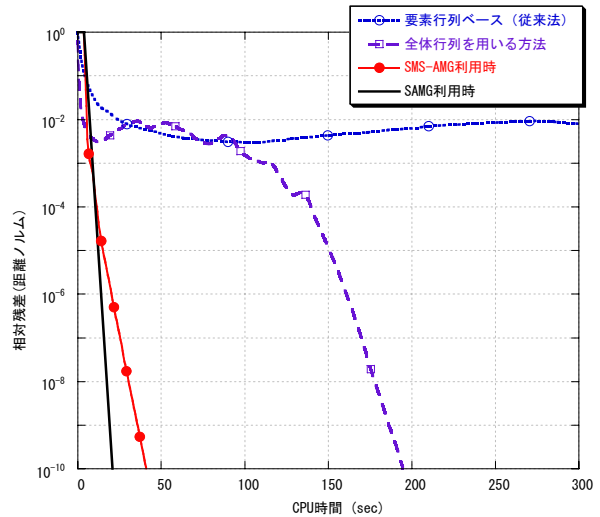


図2 各行列解法の残差とCPU時間の関係

従来法では計算時間 300 秒を費やしても、残差ベクトル  $\mathbf{Ax}-\mathbf{b}$  の大きさ(ノルム)は  $10^{-2}$  程度と比較的大きいが、行列  $\mathbf{A}$  を全体行列化したものを用いる方法では約 7 倍速く計算できるため約 200 秒で残差をほぼゼロとすることができる。さらにSAMGなどの代数的マルチグリッド法のソフトを用いる場合は数十秒以下で残差をほぼゼロとすることができる。

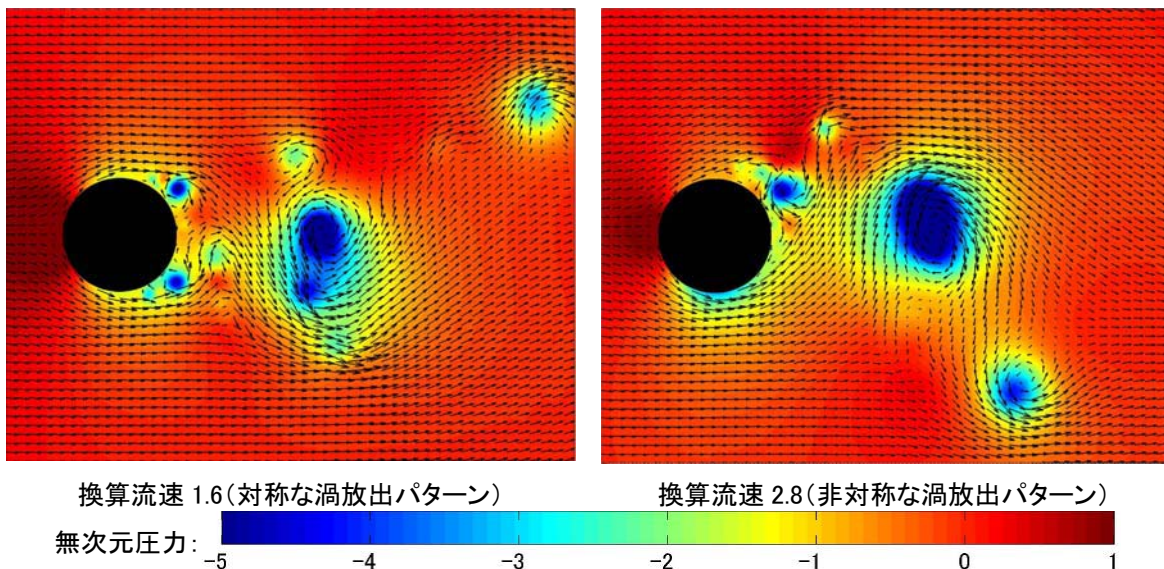


図3 SMART-femによる流れ方向に振動する円柱周りの流れ

レイノルズ数:  $1 \times 10^4$  の二次元解析結果(円柱が最下流に位置する瞬間の圧力分布(カラーコンター)と流速ベクトルである。ただし、換算流速 = 流速 / (円柱直径 × 振動数) である。低換算流速条件(左図)では、円柱の上下面からはく離れたせん断層が円柱の振動に同期して対称に巻き上がり、一对の対称な渦が放出され、高換算流速条件(右図)では、円柱の上下面からはく離れたせん断層の動きが非対称になっており、流れ方向に振動する円柱周りの流れが換算流速に応じて遷移の様子が再現されている。