

平成 2 8 年 7 月 7 日現在

機関番号 : 8 2 8 0 7

研究種目 : 若手研究(B)

研究期間 : 2012 ~ 2015

課題番号 : 2 4 7 6 0 1 4 8

研究課題名 (和文) 地震動下における配管内乱流機構および配管振動機構の解明

研究課題名 (英文) Investigation of interaction between an oscillation and a turbulence of pipe under an earthquake

研究代表者

木野 千晶 (Chiaki, Kino)

一般財団法人エネルギー総合工学研究所 (原子力工学センター) ・ その他部局等 ・ 研究員

研究者番号 : 4 0 4 6 5 9 7 7

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究では流路壁面が複雑に振動・変形する配管内の乱流機構を詳細に分析可能なシミュレーション技術の確立を目指す。境界面の取り扱いについては、複雑な壁面の振動・変形にも対応可能とするため、Immersed Boundary法を採用する。本研究ではImmersed Boundary法の欠点である境界面付近で発生する非物理的圧力振動を抑制する手法を新たに提案した。振動壁面上乱流に適用可能なLESモデルの確立を目指し、振動壁面条件を用いた乱流シミュレーション実施した。本解析結果では、Gris ScaleおよびSub Grid Scaleの間において逆エネルギー伝達成分が存在すること示している。

研究成果の概要 (英文) : To establish a turbulence model on an oscillating wall, new fluid-structure interaction simulation technologies have been developed. The technologies have been based on immersed boundary method (IBM) to treat complex geometry and transformation. In the IBM, it is known that certain remedies for non-physical pressure oscillations arising from a region near the interface are necessary. In the present study, a method for reducing the pressure oscillations has been proposed. Additionally, direct numerical simulations were conducted to establish a large eddy simulation model for a turbulent flow on an oscillating wall and scrutinize the energy transfer between the grid scale (GS) and sub-grid scale (SGS). Although energy is generally transferred from the GS to SGS, it is likely that energy is transferred from the SGS to GS (backward scatter) under specific conditions. The present numerical results indicated that backward scatter exists in the production term in the case of a wavy wall.

研究分野 : 流体工学

キーワード : Immersed Boundary法 カットセル法 安定化 振動場乱流 有限体積法 有限要素法 流体構造連成シミュレーション Large Eddy Simulation

1. 研究開始当初の背景

(1) 東北地方太平洋沖地震以降、原子力プラントや化学プラントにおける耐震性評価の重要性がますます増している。実験による大規模プラント実機の耐震性評価は、金銭的・時間的コスト、安全性の面からほぼ不可能であり、数値シミュレーションを用いた評価技術の確立が不可欠である。地震動下の大規模プラントで発生する物理現象を精緻に再現可能な数値シミュレーション技術が確立すれば、耐震性評価に必要な工学的情報を低コスト・短期間で安全に取得することができる。

(2) 原子力プラントや化学プラントは様々な工業機器・設備・配管系などで構成されているが、この中でも配管系は安全面においても最も重要な部位の一つである。現在の配管解析では流体は付加質量として考慮されているが、内部の流動現象はほとんど考慮されていない。しかし、配管内乱流機構が配管の振動機構(振動挙動、固有振動数、共振、発生する最大応力など)に影響を与えることが知られており、流路壁面の振動や変形が乱流機構に影響を与えることも指摘されている。これらは地震動下における配管の耐震性と深く関わるため無視できないが、そのメカニズムは不明な点が多い。よって、配管内の流動現象を考慮した配管振動解析技術の確立する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では流路壁面が複雑に振動・変形する配管内の乱流機構を詳細に分析可能なシミュレーション技術の確立を目指す。境界面の取り扱いについては、複雑な壁面の振動・変形にも対応可能とするため、Immersed Boundary 法を採用する。

(2) さらに、流路壁面が複雑に振動・変形する配管内の乱流機構を詳細に分析し、地震動下の配管内乱流解析に適した乱流モデルの確立を目指す。特に、地震動および配管内乱流機構が配管の振動機構に与える影響についての知見を得る。これにより、大規模プラント耐震性評価の精緻化に貢献する。

3. 研究の方法

(1) Immersed Boundary 法をベースとした流体・構造連成シミュレーション技術を開発する。流体シミュレーションには工学分野への応用を目指し、保存性に優れた有限体積法をベースに開発する。構造シミュレーションには構造物の複雑な振動・変形に対応可能な有限要素法をベースに開発する。

(2) Immersed Boundary 法を用いた振動壁面乱流に関する直接数値シミュレーションを実施する。特に工学的応用に有効な LES(Large Eddy Simulation)モデルの開発を念頭に置いた SGS(Sub Grid Scale)モデル

に基づく乱流統計量を計測し、振動壁面乱流に関する知見を得る。

4. 研究成果

(1) 構造解析コード(有限要素法)と流体解析コード(有限体積法)を用いて、Immersed Boundary 法をベースとした流体・構造連成手法を開発した。本手法を円柱の流動励起振動シミュレーションに適用し、理論値・実験値と比較することで、妥当性確認を実施した。

(2) 本手法では有限要素メッシュを用いて有限体積セル内に流体・構造境界面を設定する。しかしながら、大規模シミュレーションを実施する場合、この設定アルゴリズムの処理時間は決して小さくない。特に構造物の位置・形状によって一つの有限体積セルに複数の境界面が設定される場合が生じるため、それらを取り除く処理が必要となる。このような境界面設定アルゴリズムに CG アルゴリズムの一つマーチングキューブ法を組み合わせる手法を考案した(図1)。本手法により、実際の形状を正確に計算する手法と比べて最大で20倍以上の高速化を実現した。

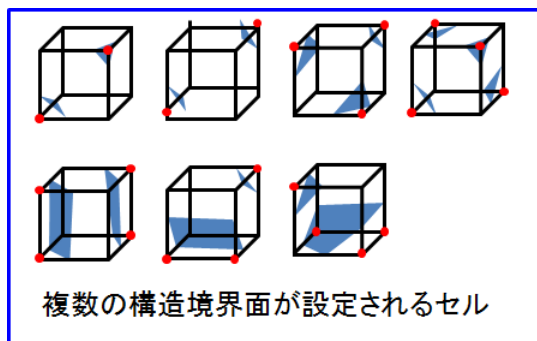
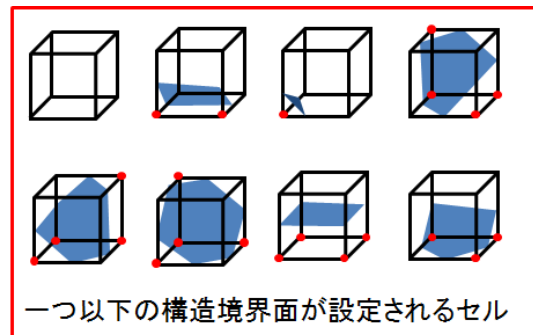


図1 マーチングキューブ法に基づく流体構造境界面の設定アルゴリズム

(3) Immersed Boundary 法では複雑な流路形状や構造物を簡便に扱うことができる反面、流体・構造境界面における非物理的圧力振動によって不安定化することが指摘されている。これは、ある時刻においてこれまで構造領域に存在していたセルが新たに流体領域のセルなる場合(Fresh Cell)、逆にこれまでに流体領域に存在したセルが新たに構造領域のセルとなる場合(Dead Cell)に発生すると考えられ、このようなセルの取り扱い

いがシミュレーションの安定化において重要である。本研究では、非物理的圧力振動を可能な限り抑制することを目指し、これらのセルの新しい取り扱い方を提案した。具体的には、Fresh Cell 生成時において、新たに Fresh Cell から周辺に向けて発生する流束に対し、制限関数を設定した。また、Dead Cell においては、Dead Cell 生成時にこれまで存在していた流束および圧力勾配が消失し、周囲の圧力場に影響を与えることが非物理的圧力振動の要因となっていた。よって、Dead Cell となった後も仮想的な流束・圧力勾配を設定し、周辺セルへの影響を徐々に減衰させていくことで、周囲の圧力場に与える影響を最小化する手法を考案した。図2には以上の手法を2次元強制振動カルマン渦解析に適用した結果を示す。本図は円柱周辺の抗力係数を示しており、提案手法を用いない場合（図中破線・黒）には Fresh Cell および Dead Cell 発生時に非物理的振動が発生していることが分かる。本手法を適用した場合（図中実線・赤）そのような振動は大幅に軽減されており、本手法が非物理的圧力振動の抑制に一定の効果があることが確認できる。

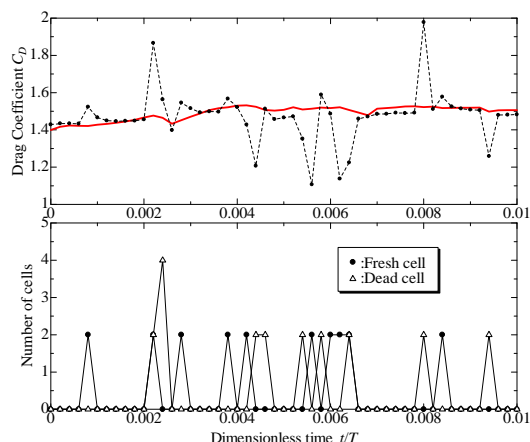


図2 円柱周辺の抗力係数および Fresh Cell/Dead Cell の発生数の関係

(4) 壁面が正弦波で変形する乱流シミュレーションを実施し、壁面変形が乱流に与える影響について詳細に検討した。特に振動壁が乱流構造に与える影響を捉える LES モデルを開発するため、SGS モデルに基づく乱流解析を実施した。正弦波振動壁は変形の状態によって、凸状態で上昇する半波長領域と凹状態で下降する半波長領域の二領域に分類することができる。本研究では各半波長領域に対する空間平均を用いて乱流統計量を評価した。その結果、凸領域の上昇局面において SGS 応力 τ における τ_{11} 成分および τ_{12} 成分が他の応力成分と比較して明らかに振動壁の影響を受けて発達していることを指摘した。それに対して、凹領域の下降局面においては、 τ_{22} 成分に若干の上昇が見られたのみであり、その他の SGS 応力成分において大きな変化は見られなかった。

(5) さらに、各領域に関するエネルギー伝達成分と壁面形状・振動の影響を検討した結果、明らかに逆伝達方向成分の卓越する瞬間が存在することがわかった。図3および図4には SGS モデルにおける GS(Grid Scale)成分と SGS(Sub Grid Scale)成分のエネルギー伝達を示す生成項 P の各成分が示されている。図3より、壁面が正弦波形状かつ振動しない場合、このエネルギー伝達成分 P_{11} および P_{13} は負値を取ることが分かる。これは逆方向エネルギー伝達が存在することを示している。図4abには壁面が正弦波形状かつ振動数 20Hz で振動する場合が示されており、凸領域においては全て正值であったが、凹領域においては同様に負値を示すことが分かった。標準的なスモグリンスキーモデルでは順方向伝達成分しか取り扱えないため、振動壁乱流を扱うには壁面との相互作用に起因して発生する逆伝達成分を的確に表現し得る LES モデルが必須となることを指摘した。

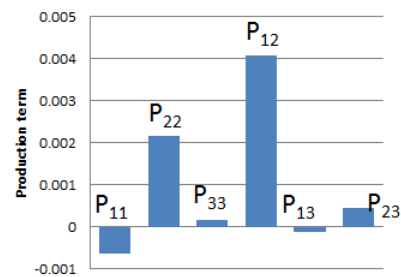


図3 時間空間平均エネルギー伝達成分（壁面形状：正弦波 振動無し条件）

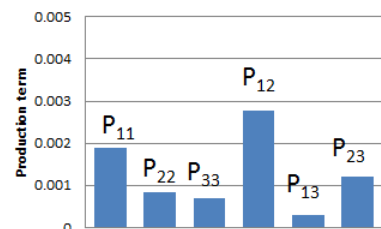


図4a 凸領域における空間平均エネルギー伝達成分（壁面形状：正弦波 振動数 20Hz）

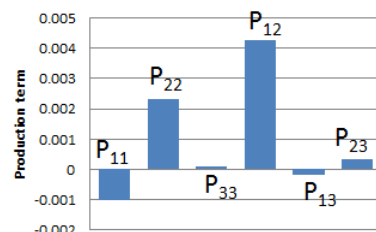


図4b 凹領域における空間平均エネルギー伝達成分（壁面形状：正弦波 振動数 20Hz）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

木野千晶、渡辺正、西田明美、武宮博、Immersed Boundary 法を用いた流れ方向強制振動円柱周辺の流動解析、日本機械学会論文誌 B 編、査読有、78、2012、2113-2126

〔学会発表〕(計 9 件)

木野千晶、西田明美、武宮博、Immersed Boundary 法における有限要素メッシュを用いた境界面設定手法の開発、日本原子力学会 2012 年秋の大会、2012 年 9 月 20 日、広島

木野千晶、Immersed Boundary 法を用いた円柱周辺の 3 次元流動解析、日本機械学会 第 25 回計算力学講演会、2012 年 10 月 8 日、神戸

木野千晶、渡辺正、西田明美、武宮博、原子力施設のための Immersed Boundary 法を用いた流体構造連成解析手法の開発、第 17 回計算工学講演会、2012 年 5 月 30 日、京都

木野千晶、Immersed boundary 法を用いた FVM-FEM 流体構造連成手法の開発、第 18 回計算工学講演会、2013 年 6 月 20 日、東京

Chiaki Kino, 3D-FLOW STRUCTURE ANALYSIS AROUND A CIRCULAR CYLINDER USING IB-METHOD, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013, 2013 September 18, Nagoya(Japan)

木野千晶、IB 法ベースの流体構造連成シミュレーションにおける圧力振動抑制手法、第 28 回数値流体力学シンポジウム、2014 年 12 月 9 日、東京

Chiaki Kino, Reduction of pressure oscillations when using cut-cell-based immersed boundary method, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (JSST2015), 2015 October 13, Toyama(Japan)

木野千晶、Cut-Cell ベース IB 法を用いた振動壁乱流シミュレーション、第 29 回数値流体力学シンポジウム、2014 年 12 月 15 日、福岡

Chiaki Kino, DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF A TURBULENT FLOW ON AN OSCILLATING WALL USING CUT-CELL BASED IMMERSED BOUNDARY METHOD, 24th International Conference on Nuclear Engineering(ICONE24), 2016 June 30, Charlotte (America)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

木野 千晶 (Chiaki Kino)

エネルギー総合工学研究所 主任研究員

研究者番号：40465977

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()