

# 流体構造強連成アルゴリズムの比較 (第2報 ~ 弱連成計算との比較 ~)

Comparison of direct coupling Fluid-Structure Interaction algorithm and sequential coupling algorithm

佐藤 暁拓<sup>1)</sup>, 川原 仁志<sup>2)</sup>, 亀岡 裕行<sup>3)</sup>

Akihiro Satoh, Hitoshi Kawahara, Hiroyuki Kameoka

1) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 計算科学技術部 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, akihiro.satoh@ctc-g.co.jp)

2) 博士(工学) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 計算科学技術部 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, hitoshi.kawahara@ctc-g.co.jp)

3) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 原子力・エンジニアリング部 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, hiroyuki.kameoka@ctc-g.co.jp)

We investigated fluid-structure interaction (FSI) problem of liquid sloshing in cylindrical vessel with direct coupling FSI algorithm and sequential FSI coupling. In sequential FSI coupling approach structural behavior and liquid motion are solved separately with two distinct solvers. Deformation of the vessel is solved by structural analysis code with finite element formulation. Motion and pressure distribution of liquid in the vessel is calculated with computational fluid dynamics code with finite volume method. In this paper, we compared accuracy and performance of sequential FSI coupling algorithm with direct FSI coupling algorithm.

**Key Words** : Fluid-structure interaction; Computational fluid dynamics; sequential coupling

## 1. はじめに

タンク等の容器内に満たされた液体のスロッシング現象は、容器構造物に大きな損傷を与える可能性があるため、スロッシング挙動を把握することは容器構造の耐震設計等に対して極めて重要である。そのため、スロッシング問題に対して容器構造と内部流体の挙動を考慮した流体構造連成解析による検討も行われている。

流体 構造連成解析手法としては、強連成アルゴリズムと弱連成アルゴリズムによるアプローチがある。強連成アルゴリズムでは、系の支配方程式を離散化して連立一次方程式を構築する際に、流体と構造の両方を含む1つの方程式を構築し、構造の変位と流体の圧力を同時に解く。汎用有限要素法コードに広く採用されている手法であり、比較的計算時間が短く、数値的安定性に優れているという利点があるが、流体はポテンシャル流れを仮定していることが多く、流体挙動の再現性の精度はあまり高くない。一方、弱連成アルゴリズムでは、構造と流体を個別の専用コードで解き、ある時間間隔でデータ交換を行いながら連成問題を解く手法である。構造と流体のそれぞれの現象を専用コードで解くため、個々の現象については精度良く計算できるが、データ交換の時間間隔が大きすぎると精度や安定性が落ちるため、計算時間は多くなる。そのため、弱連成アルゴリズムを簡便にし、流体解析のみを行って得られる圧

力分布を構造物に与えて強度検討を行うことも多い。

本報では、第1報として報告したスロッシング問題に関する強連成アルゴリズム[1]に対して、弱連成アルゴリズムによるスロッシング問題の数値シミュレーションを行い、計算時間及び解析精度の比較について報告する。

## 2. 計算方法

流体 構造強連成アルゴリズムの詳細については文献[1]を参照されたい。

弱連成アルゴリズムによる流体 構造連成計算には、有限要素法による構造解析コードと、有限体積法[2]による流体解析コードを使用した。また、弱連成アルゴリズムではそれぞれのコードの計算結果の受け渡しとシミュレーション時間の同期を取るための管理プロセスを用意した。管理プロセスでは、ソケット通信を利用して各コードのシミュレーション時間を管理すると共に、構造解析用モデルと流体解析用モデルの要素分割が異なる場合のデータマッピングを行う。連成の方法としては、流体解析により得られる圧力分布を構造解析の境界条件として渡して構造物の変形を解き、構造解析により得られる変位を流体のメッシュモデルに渡して変形後の形状に対して流れ場を解く、双方向の弱連成とした。

### 3. 計算対象

Fujitaら [3]が実施した高速増殖炉の原子炉を模擬した円筒容器の振動試験で用いられた直径1.76m、高さ2.897m、板厚25mmの円筒容器を計算対象とし、図1に示すメッシュモデルを作成した。構造物は四角形シェル要素（要素数：1260）でモデル化した。構造物の材料物性値は、ヤング率：159GPa、ポアソン比：0.3、質量密度：7400kg/m<sup>3</sup>とした。

内部流体領域は六面体セル（セル数：26790）で分割し、水（質量密度：1000kg/m<sup>3</sup>、粘性係数1.0×10<sup>-3</sup>Pa-s）及び空気（質量密度：1.2kg/m<sup>3</sup>、粘性係数1.8×10<sup>-5</sup>Pa-s）の2相流としてモデル化して、その挙動をVOF法[4]により計算した。

振動の入力条件としては、構造物上端に振動数0.71Hz、変位振幅19.8mm、6秒間の正弦波に相当する強制加速度を水平方向の一方向のみに入力するケース、及び構造物底面に最大加速度が約560Gal、20秒間の地震波三軸成分[1]を入力するケースの2条件とした。

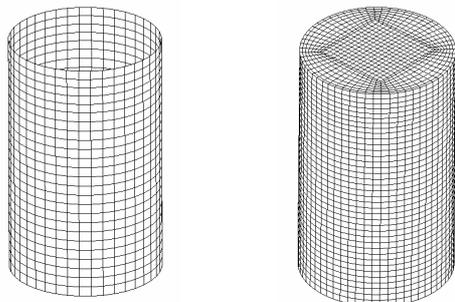


図1 メッシュモデル（左：構造解析用、右：流体解析用）

### 4. 計算結果

表1に、構造物壁面近傍におけるスロッシング波高の最大値及び最小値の比較表を示す。表1の正弦波入力時の値に関しては、試験結果[3]に対して弱連成解析結果は良く一致している。強連成解析については、試験結果に近い値が得られているものの、最大波高と最小波高の絶対値がほぼ同じ程度となり、試験結果に対して最大/最小波高とも低めとなる傾向が見られる。

表1 スロッシング波高の比較

波高 [cm]	試験結果	計算結果	
		強連成	弱連成
最大	34.5	30.1	33.4
最小	-23.5	-31.5	-24.1

図2に、弱連成解析による正弦波に対するスロッシング波高の時間変化を試験結果と共に示す。図2より、弱連成解析により得られた波高の時間変化は試験結果と良く一致しており、スロッシング挙動の時間変化の再現性も高い。

スロッシング挙動の特徴として、図2または表1の試験結果から分かるように、最大波高、すなわち液面上昇側の波

高の大きさは、最小波高、すなわち液面下降側のそれよりも大きくなり、この試験では10cm程度大きくなっている。弱連成解析では液体の流動をNavier-Stokes方程式に基づき解いているため、この挙動を再現できているが、強連成解析におけるスロッシング挙動は線形理論に基づいており、非線形的な挙動が再現できないため試験結果とのずれが生じている。

計算時間に関しては、弱連成解析にて20秒間の地震波に対して要した時間は、強連成解析[1]の約30倍であった。今回の弱連成解析においては、流体領域のメッシュ数を強連成解析用モデルの約3倍となっており、流体解析部分に多くの計算時間を要した。

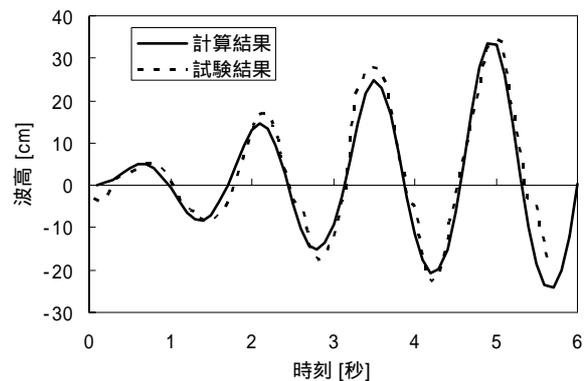


図2 正弦波に対するスロッシング波高の時間変化

### 5. まとめ

円筒容器スロッシング問題に対して、流体解析コードと構造解析コードを用いた弱連成アルゴリズムによる流体構造連成解析を行い、スロッシング挙動及び計算時間の比較を行った。弱連成アルゴリズムを用いた解析は、強連成アルゴリズムによる解析よりも多くの計算時間を要するものの、試験結果と良く一致し、妥当な計算結果を得ることが出来た。

#### 参考文献

- 1) C.Jin, S.Sakai, W.Zhang, H.Nakamura and K.Iida, "Performance Test of Fluid-structure Interaction Analysis of a Sloshing Problem", Proceedings of Computational Engineering Conference, Vol.15, 2010
- 2) J.H.Ferziger and M.Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, 2002
- 3) K.Fujita, T.Ito, T.Matsuo, T.Shimomura and M.Morishita, "Aseismic study on the reactor vessel of a fast breeder reactor", Nucl. Engng. Des. 83 (1984) 47
- 4) C.W.Hirt and B.D.Nicholls, "Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries", J. Comput. Phys., 39, pp201-221, 1981