

流体構造連成解析による津波越流状態でのタンク挙動解析

高木 洋平^{1†} 田澤 怜士¹ 日野 孝則¹ 川村 恭己¹

¹ 横浜国大院

The analysis of tank behavior under tsunami over flow with Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis.

Youhei TAKAGI^{*†} Reiji TAZAWA^{*} Takanori HINO^{*} Yasumi KAWAMURA^{*}

^{*}Yokohama National University

Abstract

A tsunami effect on the oil tank storage was numerically investigated with the Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis. The FSI solver is provided from the OpenFOAM extend project, and we customized the original FSI solver for incompressible single phase flow to the two-phase flow solver. The calculation was conducted for the tsunami water tank experiment. In order to investigate the dependency of tank stiffness on fluid and tank motion, the Young's module was numerically changed and the stress on the tank side was calculated. The FSI solver in OpenFOAM-extend could not consider shell element but we was able to simply model the oil tank storage with the solid element. When the tsunami arrived at the tank and the hydrodynamic force took a maximum value, it was found that the fixed tank with high stiffness had the large risk of buckling.

Keywords: Tsunami, Oil Tank Storage, FSI Analysis, OpenFOAM

1. 緒言

2011年に起こった東日本大震災では、宮城県気仙沼地域において湾岸にあった23基の石油タンクのうち、22基が津波によって破壊・転倒し、大規模な油流出が起こった。流出した油に自動車や破断した架線からの漏電によって火災が発生し、大規模な被害を引き起こした。このような津波による油流出と引き続いて起こる火災(津波火災)は東日本大震災で初めて観測されたが、湾岸地域に石油コンビナートを多数有する海洋国である日本では、南海トラフ地震のような大地震が起こった際の被害想定を行ない、津波火災に対する防災技術確立を必要とする。

津波による油流出に関する数値的研究としては、Kyaw *et al.* [1] が行なった広域津波計算と油粒子拡散計算を結合させた報告例が挙げられる。この解析では油流出拡散計算の初期条件、すなわちタンクからの初期油流出量に関して消防庁の被害推定 [2] を用いて初期値を与えており、任意性がある。実際の津波によるタンクの運動は、滑動、浮き上がり、転倒、側壁破壊、底抜け、などの様々なタイプがあり、タンクの自由度を考慮した流体解析 [3] だけでなく、タンクの構造解析も必要となってくる。しかしながら、流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction, FSI) 解析は要求される計算コストが多くなるため、解析事例がそれほど多くない。菅付ら [4] は OpenFOAM を用いて津波解析を実施し、その結果から算出される流体力を境界条件としてタンクの構造解析を SeanFEM を用いて行っているが、流体領域から固体領域への影響のみを考慮する one-way coupling となっており、強固な連成解析ではない。そこで本研究では、OpenFOAM-extend に備わっている単相流用 FSI 解析ソルバーを混相流に拡張し、津波によるタンクに働く流体力・応力を評価することを目的としている。

[†] E-mail address of corresponding author: takagi-yohei-hn@ynu.ac.jp

2. 流体構造連成解析

2.1. 連成手法の分類

格子法を用いた流体構造連成解析 (Fluid-Solid Interaction (FSI) analysis) では、計算領域と計算手法の取り扱い方で以下の 3 種類に分類される [5].

- 単調解法
- 分離解法・単一ソルバー
- 分離解法・個別ソルバー

単調解法は計算領域を流体領域・固体領域に分けずに単一のソルバーで解く方法である。一方、分離解法では計算格子作成の段階で流体領域と固体領域に分けて明示する方法で、さらにそれぞれの領域に対して同一のソルバーを用いるか別々のソルバーを用いるかで 2 種類に分類される。3 つめの分離解法・個別ソルバーでは流体領域と固体領域の界面において満たすべき条件を取り扱うためのライブラリが必要となる。OpenFOAM で利用することができる FSI ソルバーはこの分離解法・個別ソルバータイプである。

2.2. OpenFOAM ソルバーでの基礎方程式

上述したように、OpenFOAM での FSI では流体領域 (fluid region) と固体領域 (solid region) に計算領域を分離し、それぞれの領域に対する支配方程式を離散化して有限体積法にて解いている。流体領域での支配方程式は、以下に示す連続の式及び Navier-Stokes 方程式である。

$$\oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \mathbf{v} dV + \oint_S \mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_S) \mathbf{v} dS = \oint_S \mathbf{n} \cdot (\nu \nabla \mathbf{v}) dS - \frac{1}{\rho} \int_V \nabla p dV \quad (2)$$

ここで、 V は有限体積法での検査体積、 S は体積 V の要素の表面、 \mathbf{n} は表面 S 上の法線ベクトル、 \mathbf{v} は流体の速度、 \mathbf{v}_S は表面 S の移動速度、 ν は動粘性係数、 p は圧力、 ρ は流体の密度である。体積 V と表面移動速度 \mathbf{v}_S は以下の Geometric Conservation Law (GCL) を満たすように Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 格子移動法によって計算されている。

$$\frac{d}{dt} \int_V dV - \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_S dS = 0 \quad (3)$$

なお、ここで示した Navier-Stokes 方程式は单相流に対する式であり、VOF 法を用いた二相流解析では重力と表面張力による外力項が追加され、VOF 関数 (α) の輸送方程式を同時に解く必要があり、各計算セルでの平均流体密度は水及び空気の密度と α から算出される。

一方、固体領域での支配方程式は、total Lagrangian 法によるサンブナン体の線形運動量保存式で、第二 Piola-Kirchhoff 応力と Green-Lagrange ひずみを用いて最終的に以下のようになる。

$$\rho_0 \int_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) dV - \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot (2\mu + \lambda) \nabla \mathbf{u} dS = \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dS + \rho_0 \int_{V_0} \mathbf{b} dV \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{q} = & \mu(\nabla \mathbf{u})^T + \lambda \text{tr}(\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} - (\mu + \lambda) \nabla \mathbf{u} \\ & + \mu \nabla \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u})^T + \frac{1}{2} \lambda \text{tr}[\nabla \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u}^T)] \mathbf{I} + \Sigma \cdot \nabla \mathbf{u} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 ρ_0 は変形前の固体密度、 \mathbf{u} は変位、 μ , λ はラメ定数、 \mathbf{b} は体積力であり、第二 Piola-Kirchhoff 応力 Σ と Green-Lagrange ひずみ \mathbf{E} は以下のように定義される。

$$\Sigma = 2\mu \mathbf{E} + \lambda \text{tr}(\mathbf{E}) \mathbf{I} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (7)$$

分離解法では流体領域と固体領域を別々に解くため、流体-構造界面では運動学的・力学的条件を課している。OpenFOAM では連成として強連成、弱連成どちらも使用できるが、本研究では強連成ソルバーを使用する。

2.3. FSI 解析に用いるソルバーとカスタマイズ

OpenFOAM では FSI ソルバーは ESI 版, Foundation 版のいずれにも無いので, OpenFOAM-extend の最新バージョンである openfoam-extend-4.0 に含まれている FSI ソルバーを基本として利用する。openfoam-extend-4.0 をインストールした後に, OpenFOAM Wiki よりバージョンが対応したソースコードパッケージをダウンロードしてインストールする [6]。このパッケージを展開すると, FluidSolidInteraction/src 以下に,

- fluidSolidInteraction
- solvers
- ThirdParty
- utilities

を見つけることができる。solvers 以下に, fsiFoam という単相流用の FSI ソルバーを見つけることができるが, 自由表面を解く VOF 系ソルバーは無いので自分でカスタマイズする必要がある。solvers 以下にあるソルバーは fluidSolidInteraction にあるライブラリ (流体領域ソルバー fluidSolvers, 固体領域ソルバー solidSolvers, 流体固体界面ライブラリ fluidSolidInterface) をもとにしているので, このうちの fluidSolvers に interFoam に該当するものを作成して二相流用 FSI ソルバーを作成した。詳細については Chalmers 大学のレポート [7] を参照されたい。

3. 解析モデル・計算条件

既往の実験的研究 [3] では, 二次元津波を発生できる津波水槽を用いた単一モデルタンクの挙動解析を実施しており, 対応する二相流解析を実施して流体ソルバーの精度を検証した。津波水槽は図 1 に示すような長さ 22.7 m, 幅 0.75 m, 高さ 1.5 m の矩形水槽であり, 仕切り版上流部に揚水させた後に瞬間的に仕切り版を開放することによって津波を発生させる。津波の波高・流速は揚水量によって調整することができる。側面からの波形観察以外に, タンク前方 0.8 m 位置での電磁流速計による津波速度と, タンク下部に取り付けたロードセルによってタンクに働く流体力を測定することができる。FSI 解析を行う際には実験に対応する長い津波水槽では計算時間が多くかかるため, 図 2 に示す短縮水槽モデルを用いて計算を行った。どちらの解析モデルにおいてもモデルタンクのスケールは実タンクの 1/100 であり, 津波はタンクに対して越流が起こるように設定した。計算格子はすべて blockMesh を用いて作成し, タンク近傍及び水槽底面付近において格子幅が小さくなるように勾配を付けた。総格子点数は二相流計算のみの図 1 のケースで約 118 万点, FSI 解析の図 2 のケースで固体領域も含めて約 159 万点である。

実際の石油タンクの構造特性の正確な値を入手することは難しく, また OpenFOAM の構造解析では薄い鋼板でできているタンクを表現するためのシェル要素は用いることができずソリッド要素でのモデリングとなるため, タンクの構造特性を数値的に変化させた数ケースを計算条件とした。具体的には表 1 に示すように, ヤング率を鋼板のヤング率を基準として変化させた 3 ケースと, 二相流計算のみの 1 ケースを行なった。ただし, ここで設定したヤング率は OpenFOAM ではソリッド要素, すなわち中実の円柱状タンクしか取り扱えないので, 実際の中実円筒型タンクの断面二次モーメントから換算したヤング率を Case 1 としており, Case 2 は 100 倍のヤング率の硬いタンク, Case 3 は半分のヤング率の柔らかいタンクを想定している。

4. 結果と考察

FSI 解析を行う前に, 二相流ソルバー interFoam の津波解析への妥当性を検証するために, 図 1 に示した実験に対応した二相流解析を行った。実験では仕切板を開放する初期条件としているが, 計算では初期条件で揚水した領域に VOF 関数 alpha を与えるだけとした。はじめに津波がタンクに到達した時刻 ($t = 6.7$ s, 6.8 s, 6.9 s) に

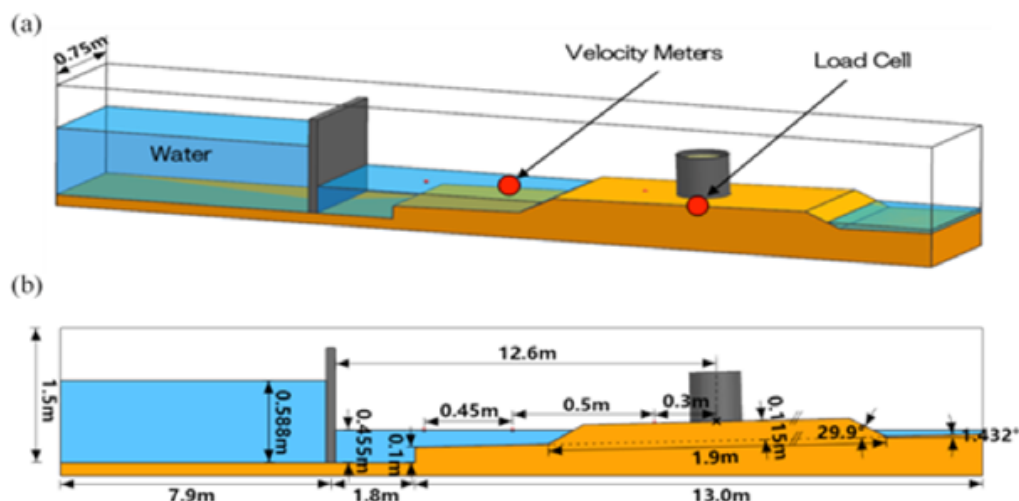


Fig. 1 Schematic of tsunami water tank: (a) bird view, (b) side view.

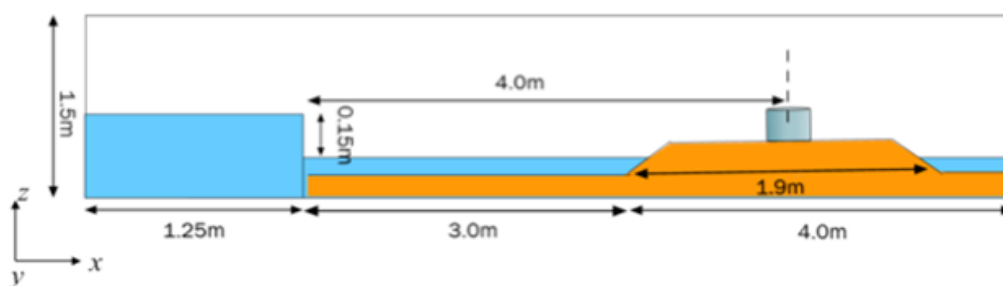


Fig. 2 Dimensions of short water tank for FSI analysis.

Label	FSI	Density [g/mm ³]	Young's modulus	Poisson's ratio
Case 1	ON	915	5.8×10^8	0.3
Case 2	ON	915	5.8×10^{10}	0.3
Case 3	ON	915	2.8×10^8	0.3
Case 4	OFF	-	-	-

Table 1 Numerical parameters of FSI analysis.

おけるタンク側面からみた津波波形を図 3 に示す。津波が到達する時刻は実験と計算で一致しており、障害物がない浅水波の性質は正確に表現できている。実験、計算のどちらにおいても越流が起こっており、実験の画像では波が崩れる砕波が観察されている。しかし計算では砕波の様子があまり見られず、津波が穏やかにタンク周囲に回り込む様子が見られた。飛沫が生じるような砕波現象を正確に捉えるためには VOF 法を用いた場合極めて細かい計算格子が必要となる [8] ため、今回の計算メッシュの解像度では不十分であったと考えられる。

解析精度を定量的に検証するために、タンク前方での津波流速とタンクに働く流体力の水平方向成分の時間発展を図 4 に示す。流速の時間発展を実験と計算で比較すると、全体的によく一致しているといえる。一方、流体力の時間変化を比較すると、第 1 波以降のピーク部分については概ね一致しているが、谷間部分、すなわち流体力が減少する現象は計算ではあまり捉えられていない。これは図 3 で見たように、砕波現象を計算では正確に表現できていないため、タンク側面に流れこんだ流体によって流体力が過大になったと考えられる。しかしながら津波の周期的な運動については定性的に捉えられているため、ある程度の格子解像度によってもタンク挙動解析に利用できると思われる。

次に図 2 の短縮モデルを用いて行った FSI 解析の結果を示す。図 5 はタンクに働く水平方向流体力の時間発展

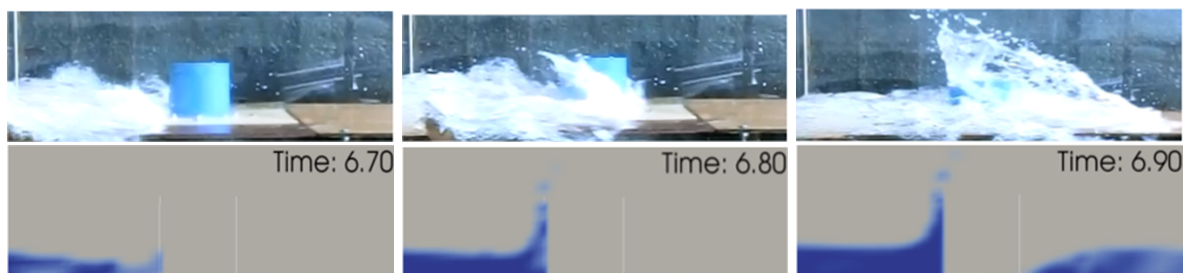


Fig. 3 Comparison of tsunami wave around the tank at $t = 6.7$ s, 6.8 s, and 6.9 s. The upper row is experimental result and the lower is calculation.

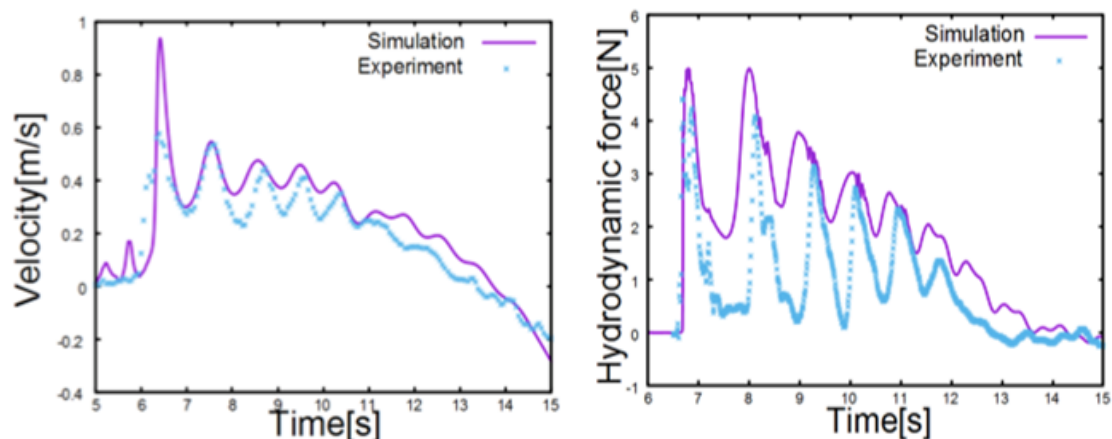


Fig. 4 Time developments of wave velocity at the front of the tank (left) and horizontal hydrodynamic force acted on the tank (right).

を示しており、ヤング率の依存性を比較している。石油タンクは大変形を伴うような柔軟な構造物ではないため、FSIを導入しても Case 4 に比べて全体的に大幅な違いは見られないが、津波第 1 波が到達する時刻 $t = 3.4$ s 付近の分布を拡大してみると、最も剛性が高い Case 2 が二相流計算のみの Case 4 の結果と同様な時間変化を示していることがわかり、本解析での FSI が妥当であるといえる。

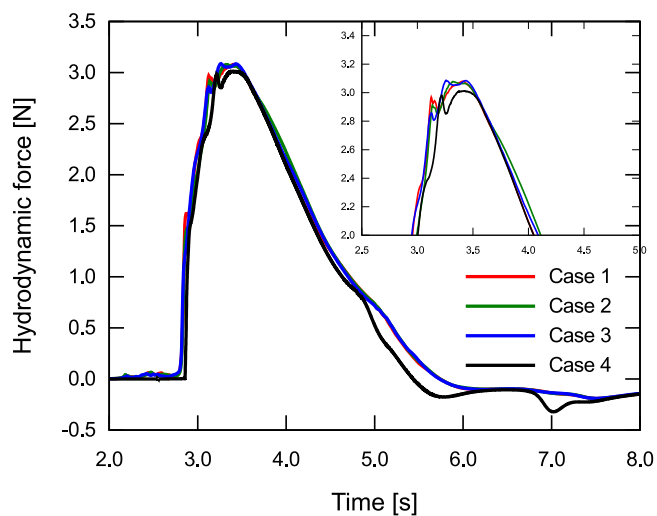


Fig. 5 Dependency of Young's modulus on horizontal hydrodynamic force acted on the tank.

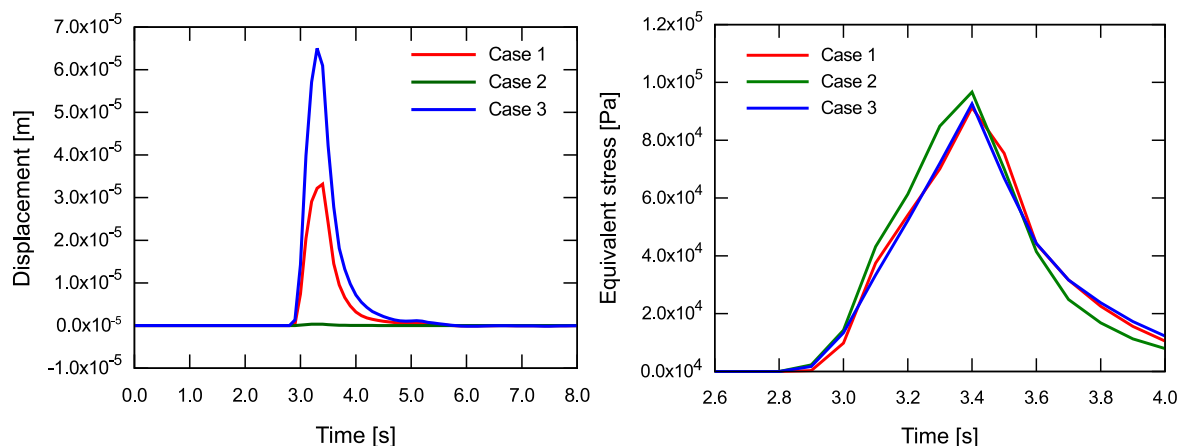


Fig. 6 Calculated displacement (left) and equivalent stress (right) on the side of tank.

FSI 解析を行うことによって得られる固体領域での変位及びミーゼス応力の時間変化を図 6 に示す。ここで変位はタンク前縁上部での x 方向成分、ミーゼス応力はタンク前縁下部での値をサンプリングしている。変位に関しては流体力の結果が示しているとおり、最も剛性が高い Case 2 に比べて柔らかい Case 3 が大きな変位を示している。ミーゼス応力の時間発展ではタンク前縁の水位が上がり続ける時刻 $t = 3.4$ s までは分布がどのケースでも直線的に増加し、その後急激に応力が減少している。最も剛性が高い Case 2 がピークで最も大きい応力を示しており、硬いタンクの土台付近では応力が集中し、側面座屈の危険性が高くなることを示している。

5. 結言

本研究では OpenFOAM の拡張版である OpenFOAM-extend の機能である FSI 解析を VOF 法を用いた二相流ソルバーに拡張し、石油タンクが津波浸水被害を受ける際の、タンク周りの流体挙動・構造変化を検討した。OpenFOAM の FSI ソルバーはシェル要素を用いることができないため忠実なタンクのモデリングは困難であるが、定性的な評価や相対的な構造パラメータの依存性調査には有用であることがわかった。今後は連成解析の構造ソルバーとして OpenFOAM 以外のシェル要素を考慮可能なオープンソースを取り入れることを検討していきたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18H01678 及び横浜国立大学・統合的海洋教育・研究センター平成 29 年度共同研究の助成を受けて行われた。また、大阪大学大学院工学研究科専攻横断的研究組織「石油コンビナート防災研究イニシアティブ」の協力により津波槽試験を実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] W. P. Kyaw, M. Sugiyama, Y. Takagi, H. Suzuki, and N. Kato. Numerical analysis of tsunami-triggered oil spill from industrial parks in osaka bay. *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 50, pp. 325–336, 2017.
- [2] 消防庁. 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書. 2009.
- [3] W. P. Kyaw, J. Liu, Y. Takagi, H. Suzuki, and N. Kato. Experimental and numerical analysis of tsunami triggered oil spill from storage tanks. In *ISOPE2017: Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp. 417–4262, 2017.
- [4] 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 馬越一也. 貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法. *土木学会論文集 B2*, Vol. 69, pp. I_826–I_830, 2013.
- [5] G. Hou, J. Wang, and A. Layton. Numerical methods for fluid-structure interaction - a review. *Communications in Computational Physics*, Vol. 12, No. 2, pp. 337–377, 2012.
- [6] Extend-bazaar/toolkits/fluid-structure interaction. <https://openfoamwiki.net/index.php/Extend->

[bazaar/Toolkits/Fluid-structure_interaction](#), (accessed 2018-11-01).

- [7] M. Li. Implement interFoam as a fluid solver in the FSI package. In *Proceedings of CFD with OpenSource Software*. Chalmers University, 2016.
- [8] 吉田 絢, ファム バンフック, 長谷部雅伸, 今津雄吾. OpenFOAM による多層流解析と水理実験との比較検証. オープン CAE シンポジウム 2015, p. GP2, 2015.