

# オープンソース CFD ツールを活用した流体構造連成解析の 実践的活用に関する基礎的研究

## Fundamental study on practical application of fluid structure interaction analysis using open source CFD tool

- 柴田 良一 1, 岐阜高専, 岐阜県本巣市上真桑 2236-2, ryos@gifu-nct.ac.jp
- 川畑 真一 2, ダイキン工業, 大阪府摂津市西一津屋 1-1, shinichi.kawabata@daikin.co.jp
- Ryoichi SHIBATA, NIT, Gifu, 2236-2 Kamimakuwa, Motosu-city, Gifu
- Shinichi KAWABATA, DAIKIN INDUSTRIES, LTD., 1-1, Nishi-Hitotsuya, Settsu, Osaka

Fluid structure interaction analysis is expected to be utilized in engineering and medical issues. However, in practical application at the design site, the excessive computational complexity becomes a problem, and it is difficult to practical use at present. In this research, we consider a method to realize practical FSI by using high-rise building structure etc as vertical mass point model. Specifically, we utilize the coupled analysis solver "Lumped point Fluid Structure Interaction" with the mass spectrometry analysis of OpenFOAM of the open source CFD tool. As an example, in the cantilever beam structure in the fluid, the possibility of analysis was verified by examining the vibration state and the like. From this, we examined a method to realize efficient fluid structure coupled analysis as practical problem solving method.

### 1. はじめに

機械系建設系などものづくりの世界で、CAE の活用が幅広い業種や様々な規模の企業でも取り込まれるようになってきている。この中で部分的ではあるものの、ソースコードが公開されたオープンソースによる CAE システムの活用も、ライセンスフリーによる無償利用のメリットやソースコードをプラットフォームとして研究開発を行う場面などで使われている。

また CAE に対する現場の問題意識において、現実の複雑な現象を再現し分析するためには、様々な物理現象を組み合わせた解析が必要になっており、実践的な問題解決手段としての連成解析への関心が高まっている。さらには医工連携分野においても、柔らかな構造をもつ人体を対象とした数値解析においても、流体と弾性体との連成解析が注目されている。

オープンソースの特徴を踏まえると、ソースコードの公開よりプログラム内部のデータや入出力ファイルのデータの内容や形式も公開されるため、異なるプログラムを連携させる連成解析に適したシステムとなっている。ただしこの場合には、利用者がシステムを統合するための研究開発が前提となる。

しかしながら、独立して開発されるオープンソース CAE プログラムに対して、共通基盤となる連成解析ツールとして公開されたものは少なく、公開されたものでも非常に高度なシステム構築技術が必要となるため一般的に活用できる状況ではない。よってものづくりにおける連成解析の実現においては、誰もが自由に利用できるツールが期待されている。

そこで本研究では、オープンソース流体解析ツールとして OpenFOAM に注目し、質点系構造を用いた実践的な流体構造連成解析機能を対象とした。この解析機能の概要と可能性を紹介するとともに、流体構造連成解析の 2 次元の基本的な例題解析により、その機能と性能を検討することを目的としている。

### 2. OpenFOAM での連成解析

OpenFOAM は、Open source Field Operation

And Manipulation の略称であり、数値流体力学が主目的ではあるが、広く連続体力学を対象とした偏微分方程式解法を実現する C++ 言語によるツールボックスである。GNU ライセンスで 2004 年より公開されたオープンソース CFD ツールとして様々な活用が展開している。

OpenFOAM はオープンソースで公開され様々な派生版が作られており、特に 2015 年に公開された ver3.0 の時点で、主要な 3 つの派生版 (Foam-Extend 【EXT 版】・OpenFOAM 【本家版】・OpenFOAM+ 【ESI 版】) が作られている。この状況については野村の報告<sup>(1)</sup>に Pablo Higuera による派生の状況の分析が Fig.1 としてまとめられており、それぞれの特徴を以下に示す。

【本家版】 OpenFOAM Foundation : <https://www.openfoam.org/> 中央にある大元の FOAM の流れを汲むもので、OpenFOAM の中心的な存在⇒ソースコードの開発を試みる場合、各種の独自ソルバーを利用する場合の基盤として活用される。毎年ほぼ 1 回、6-7 月に公開され最新版は v1806 である。

【ESI 版】 OpenCFD - ESI group : <https://www.openfoam.com/> 企業のニーズにも応える形で、先進的な機能を戦略的に開発し検証も進める有力な存在である。実用的な機能を実現する公開版の

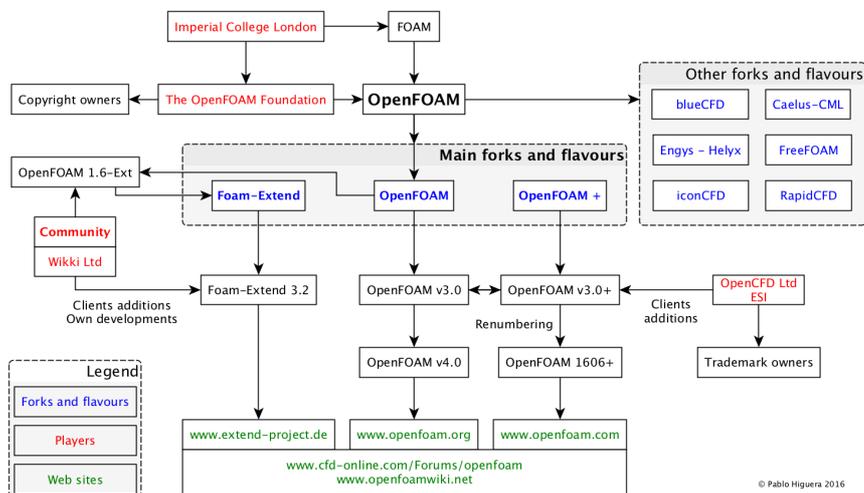


Fig. 1 Derivation and development of OpenFOAM

ソルバーとして本研究でも活用した。毎年2回、06月と12月に公開され最新版はV6.0である。

【EXT版】 OpenFOAM extension :  
https://sourceforge.net/p/openfoam-extend/  
先進的な機能開発を目的として、上記2つとは独立して開発を進めており特徴的な存在であり、流体構造連成解析など他よりも挑戦的な機能開発を狙っている。不定期に公開され、最新版はver3.2である。

OpenFOAMで対象とする流体现象においては、熱移動なども主目的となり、流体と固体の熱連成解析は全ての派生版で実現している。しかし流体の境界条件となる構造部分の変更を考慮した流体構造連成解析(以下FSIと略記)は、実験的な実装がEXT版でのみ実現されていた。

上記の実装では、OpenFOAMの計算スキームである有限体積法FVMによって構造解析を行っているが効果的ではなく、実用的な完成度ではなかった。よって流体部分はOpenFOAMの有限体積法が効果的であるが、構造部分は他ツールの有限要素法FEMを活用することが必要であった。

またFSIでは流体部分と構造部分の解析に加え、境界面での格子更新や収束計算が必要となるため、計算量の著しい増加も課題となっていた。そこで実用的なFSIを目指すためには、流体をFVMで構造をFEMで解析し、計算量が削減する工夫が必要とされていた。

これに対して2017年に公開されたESI版のOpenFOAM v1706では、構造解析を外部のFEMツールを活用する連成Interfaceを実現し、さらにこれを質点構造で簡略化することで計算力を削減する枠組みとして、「Lumped Point Fluid Structure Interaction(LP-FSI)」が実装された。本研究では、実践的なFSIを目指したLP-FSIを用いた検証を行った。

### 3. 連成解析の考え方

#### (1) 連成解析の種類

ものづくりにおける連成解析では、解析対象のモデル化の寸法レベルの扱い方によって2つの連成が考えられる。通常は現実物体の寸法に対応したモデル化(要素)を限定して、これを対象に複数の物理現象を分析しており、例えば流体中のカルマン渦による弾性体の振動現象などがある。

別の見方としては、現実物体をマクロモデルとし分子原子をミクロモデルとすることで、ミクロモデルの挙動がマクロモデルの変化を生じさせる階層化された連成解析もある。例えば金属分子の結合破断から材料の亀裂を評価して、さらには構造体の破壊までを検討する課題も今後は考えられる。

#### (2) 連成解析の対象

現在のところ、対象の規模に限定したモデルを用いた連成解析が多いなかで、実際の解析手順を考える場合には2つの手法がある。A: 1つの対象に複数の物理現象を適用する解析で、例えば金属製発熱体に対して電流が作用すると抵抗で発熱し、熱応力から構造体に変形する現象では、電流と熱流と構造の3つの物理モデルを用いて連成解析を行う。B: 複数の対象の複数の物理現象を適用する解析で、例えば流体中の弾性体の振動では、流体部分を流体解析で圧力などを分析し、これを構造側部分に荷重として与えて構造解析で変形を評価する。

#### (3) 連成解析の手法

例えば流体構造連成解析では、流体と構造の2つの解析を行うが、これらを1つのツールで行う方法を統合型とし、複数のツールで行う方法を分離型とする。特徴としては、統合型は活用が手軽だが大規模対象の高速計算が困難であり、分離型はこの逆になっている。実例としては、統合型ではEXT版OpenFOAMやElmer<sup>(2)</sup>

などがあり、分離型としては本研究のLP-FSIやpreCICE<sup>(3)</sup>などがある。

以上の考え方より、本研究で対象とするOpenFOAMのLP-FSIでは、種類としては現実寸法のモデル化を行い、対象としてはBの複数領域(流体と構造)に複数の物理現象を考慮する分離型の連成解析である。なお構造解析ツールとしては、オープンソース構造解析ツールのCalculix<sup>(4)</sup>を活用した。

### 4. Lumped Point FSIの概要

このLumped Point Fluid Structure Interaction(LP-FSI)は、ESI版OpenFOAM v1706で公開された機能であり、構造モデルを質点を連続させた棒状に限定し、高層ビルを想定した連成解析となっている。Fig.2はシステムに添付する例題の実行結果であり、建物の床面を質点とし、この質点は3次元中の移動と回転による6自由度を持つ。

この例題ではLP-FSIを実行するために、流体解析はpimpleDyMFoamを用いており、構造解析は外部ソルバーではなく簡略化のために、予め計算された時間ステップでの変形量をファイル読み込みで対応している。この流体解析のOpenFOAMと外部ソルバーとの連携をlumpedPointMovementモジュールが担当している。よってこの例題の状態では、外部の構造解析と連携したLP-FSIは実行できず、何らかの構造解析ツールとFSIの制御システムが必要である。

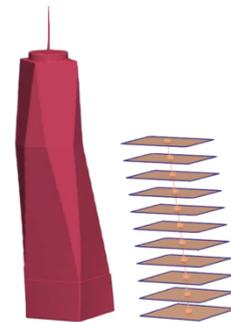


Fig.2 3D Real Shape model and Lumped Point model

このLP-FSIでは、Fig.3に示すように流体側処理をmasterとし構造側処理をslaveとしており、間のcommsディレクトリにあるファイルを用いて、連成解析の情報を共有している。

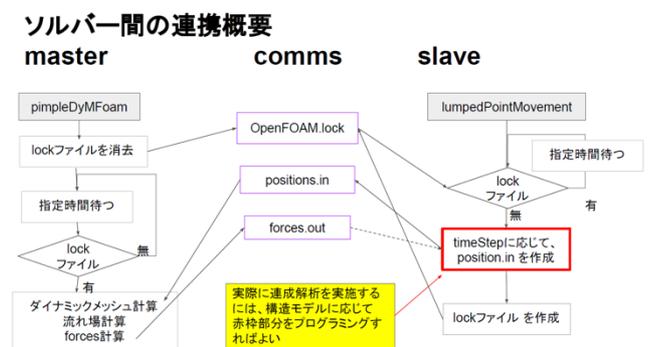


Fig.3 System Configuration of LP-FSI

この連成解析では、流体解析で求められた実形状の表面での圧力を元に、対応する質点に対して力とモーメントが伝達され、これにより質点構造の解析を行い、構造物の変形を求める。この変形量を流体解析に渡して、実形状を変化させて流体解析のメッシュも更新しながら、連成解析を実現している。

### 5. Lumped Point FSI の検証

この LP-FSI を活用するためには、構造解析において CalculiX などの独自ツールを統合し、入力データを生成するシステムが必要となる。本研究では、共著者の川畑が Python を用いて開発したシステムにより LP-FSI を実現している。

Fig. 3 の基本的なシステムのデータ移動を活用して、構造解析ツールとして CalculiX を Python で統合した「LP-FSI-CalculiX」の計算手順を、Fig. 4 に示す。

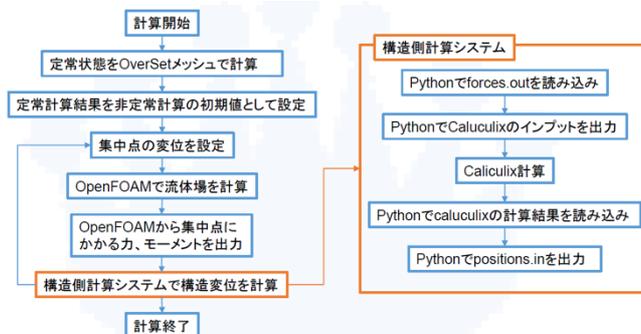


Fig. 4 System Configuration of LP-FSI with CalculiX

検証用例題としては、Fig. 5 に示すような Stefan Turek<sup>(5)</sup> らの 2次元モデルを用いた。

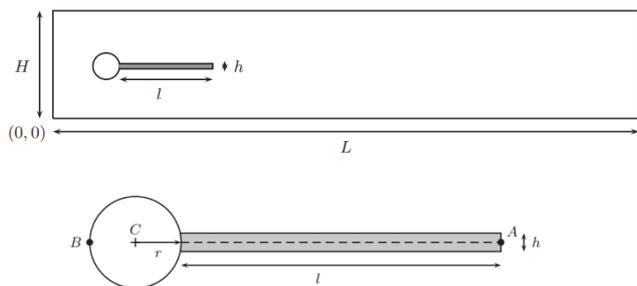


Fig. 5 Computational domain and Structure part

geometry parameters		value [m]
channel length	$L$	2.5
channel width	$H$	0.41
cylinder center position	$C$	(0.2, 0.2)
cylinder radius	$r$	0.05
elastic structure length	$l$	0.35
elastic structure thickness	$h$	0.02
reference point (at $t = 0$ )	$A$	(0.6, 0.2)
reference point	$B$	(0.2, 0.2)

Table 1 Overview of the geometry parameters

実際の LP-FSI のメッシュ構成については、ESI 版 OpenFOAM v1706 で公開された機能である OverSetMesh (重合格子) を用いて、Fig. 6 のような設定を行った。OverSetMesh は構造物の変形によってメッシュが潰れることを回避するために導入した。

構造解析では、片持梁構造を 10 分割して 11 質点を連携した棒状構造としている。

現在は予備検証としての連成解析を行い、Fig. 7 に示すような結果を得ている。流れの初期において、構造物の振動が確認されたが、時間の経過で安定した層流となり、振動も収束した。

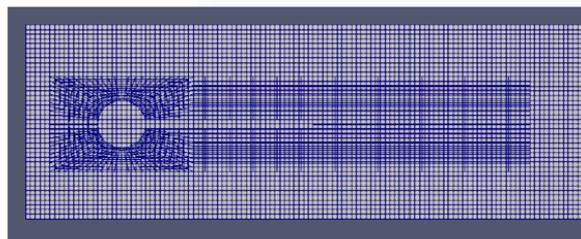
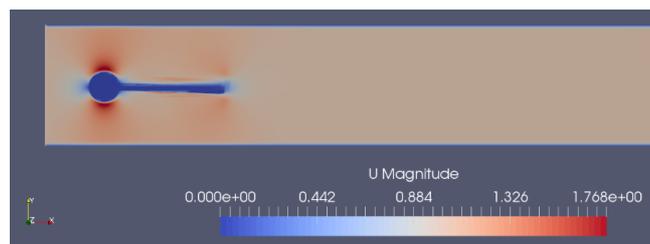
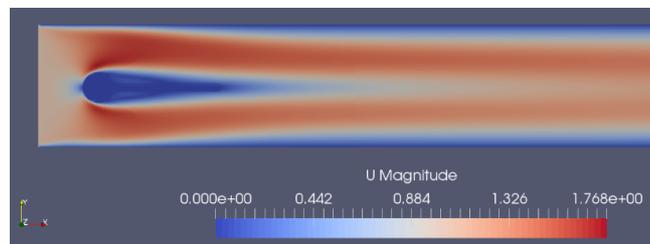


Fig. 6 Mesh configuration of LP-FSI with CalculiX



Velocity of 0.005sec



Velocity of 5.0sec

Fig. 7 Result of LP-FSI

### 7. まとめ

本検証によって、OpenFOAM v1706 から公開された実践的な流体構造連成解析機能である「Lumped Point Fluid Structure Interaction」を活用し、構造解析ソルバーとして CalculiX を用いるシステムの機能を確認した。

これより計算量を抑えた FSI が実現できることになり、高層建築物のモデル化に限らず、質点の連続でモデル化できる構造に対して実践的な活用が可能であることが確認できた。

今後は線状の構造物だけでなく、面状や立体の構造物への拡張を検討する予定である。

### 謝辞

本研究の実現においては、システムの検証や分析を OCSE<sup>2</sup> の野村悦治氏のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 野村, “流体解析のオープンソース DEXCS for OpenFOAM”, 日本設計工学会誌, 第 53 巻第 3 号, (2018), pp. 201-207.
- (2) オープンソース連成解析ツール Elmer の公式ウェブ <https://www.csc.fi/> <https://www.csc.fi/web/elmer/elmer>
- (3) オープンソース連成解析ツール preCICE の公式ウェブ <https://www.precice.org/>
- (4) オープンソース構造解析ツール CalculiX の公式ウェブ <http://www.calculix.de/>
- (5) Sterfan, “Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow”