

# Proceedings of the Open CAE Symposium 2016@Tokyo

# オープン CAE シンポジウム 2016@東京

講演会

講演概要集

会場:東京大学生産技術研究所 開催日:2016年11月26日(土) 主催:(社)オープン CAE 学会

### <オープン CAE シンポジウム 2016@東京開催にあたり>

### タブレット PC からスーパーコンピュータまで – オープン CAE がもたらす自己実現と社会発展

昨年,富山市での前回シンポジウムの際に東京開催が決定されて後,右往左往しながらも,この日が盛 会となりますこと,ご参加頂く皆様,施設見学会を受入れ頂く一般財団法人電力中央研究所様,基調講 演を頂く加藤千幸先生をはじめとする講師・講演発表者の方々,実行委員各位・事務局,各地区オープ ン CAE 勉強会等,ご協力頂いた皆様に深く感謝申し上げます.

メイン会場となる東京大学生産技術研究所は,非線形有限要素法の創成期における世界的な研究拠 点であり,小職自身大学院学生生活をここ(当時は目黒区駒場でなく港区六本木に所在)で送り,初め て有限要素法プログラムを(FORTRAN77で)書き,ベクトルプロセッサ上での動作を確認することで, 自力で解が得られる「またひとつ自由を得た喜び」を実感したことが思い起こされます.そうした体験 を契機として,その後も商用 CAE を利用する業務に就き,開発元による継続的な機能追加・性能向上 の恩恵にあずかって来ました.一方,オープンソース CAE には,「誰でも(タブレット PC でも)でき る」,「どこでも(自宅でも超並列スーパーコンピュータでも)使える」,個人の自己実現と産業・社会 の発展とを協調的に進めるポテンシャルがあるため,市民目線での透明性を確保しつつ,多様性を価値 向上につなげる現代の,グローバル社会に根差した発展が期待されます.

この度,関係機関著名技術者・研究者のご講演,ご参加を頂き,一部に(本学会に特徴的な)ハンドル名でご参加頂く個人研究者をお迎えし,付帯トレーニングのうち固体力学と熱流体力学分野関連コースに対して(社)日本機械学会様より,CAE技術者検定講習会認定を頂くなど,「個人の自己実現と 産業への貢献・社会発展の同時推進」の(社会的に認知された)場となるよう本シンポジウムの価値を 高めて参りました.

今後も引き続き,当学会,本シンポジウムをご活用頂き,ご参加,ご協力,ご指導賜るようお願いし, 開催にあたってのご挨拶とさせて頂きます.

> オープン CAE シンポジウム 2016@東京実行委員長 藤岡照高 (東洋大学理工学部・計算力学研究センター)

### 【プログラム】

※ 一般講演は1件あたり「発表12分+質疑応答6分(含ロスタイム)」です.時間厳守をお願いします.

【An 棟フォワイエ】

- 9:00-15:00 受付
- 11:00-15:00 賛助会員展示
- 12:40-13:10 ランチョンセッション/司会:新倉寿夫(オープン CAE 学会)
  - ・HPC システムズ株式会社
  - ・CEI ソフトウェア株式会社
  - ・CAE ソリューションズ
- ※ ランチョンセッションでは、参加賛助会員様のご厚意により、昼食をご用意させて頂きます.
- 17:50-19:50 懇親会

### 【A 室(An 棟コンベンションホール)】

#### 9:30-10:50 一般講演[粒子法]/座長:吉田正典(爆発研究所)

- A11 粒子法オープンソース実装 OpenMPS プロジェクトの開発
  - 青子守歌(OpenMPS プロジェクト)
- A12 Framework for Developing Particle Simulators
   岩澤全規(理研 AICS),谷川衝(東京大学),細野七月(京都大学),似鳥啓吾(理研 AICS),村主崇行,行方大
   輔,牧野淳一郎(神戸大学)
- A13 MPS-Code\_Aster による流体構造連成解析 廣瀬純一(OpenCAE 勉強会@関東)
- A14 最新のスーパーコンピュータ向けプロセッサにおける OpenFOAM および OpenMPS の性能評価 大島聡史(東京大学), 青子守歌(OpenMPS プロジェクト), 今野雅(OCAEL)

### 11:00-12:30 一般講演[流体解析(1)]/座長:大嶋元啓(富山県立大学)

- A21 赤外線熱画像を利用した建築物外壁はく離診断試験の OpenFOAM によるシミュレーション 中川慎二(富山県立大学),杉山友寿(アイペック),松谷治,森井一茂
- A22 燃料電池自動車の高圧水素容器の安全性検証に関する数値シミュレーション 山田英助(日本自動車研)
- A23 OpenFOAM の VOF 法ソルバにおける界面圧縮法の影響に関する検討 岡垣百合亜(原子力機構),与能本泰介,石垣将宏,広瀬意育(アドバンストアルゴリズム&システムズ)
- A24
   OpenFOAM ベース化学反応流ソルバーの開発

   吉田正典(爆発研究所), ディン スァン チェン, 石倉修一
- A25 表面形状変更による電線風圧抵抗の低減化
  - 高木洋平(大阪大院),岡野泰則

### 13:30-15:00 一般講演[流体解析(2)]/座長:THINK(木村)(オープン CAE 勉強会@関東(流体など))

- A31 OpenFOAM を使った竜巻状流れの再現 野田稔(徳島大学),八谷実(徳島大学大学院),長尾文明(徳島大学)
- A32 FMI を使用した Modelica 言語によるモデルと OpenFoam による CFD モデルの Co-Simulation 田中周(アマネ流研)
- A33 OpenFOAM を用いた Raspberry Pi クラスタ環境構築と CFD 計算 大嶋元啓(富山県立大学),中山勝之(オープン CAE 勉強会@富山),坂村芳孝(富山県立大学)

- A34 OpenFOAM on Windows/blueCFD-Core のすすめ へんぎん
- A35 流しそうめん機槽内を浮遊する物体の挙動予測 片山達也(オープン CAE 勉強会@関西),川畑真一,今川洋造,高木洋平
- 15:10-15:25 賛助会員紹介/司会:西剛伺(オープン CAE 学会)
  - ・株式会社ソフトフロー
  - ・NUMECA ジャパン
  - ・日本 ESI
- 15:30-16:20 基調講演/司会:吉田正典(爆発研究所)

講師:加藤千幸先生(東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター,センター長・教授) 演題:大規模数値シミュレーションの産業応用の現状と将来展望

### 16:30-17:20 パネル討論 / ファシリテータ:今野雅(オープン CAE 学会)

パネラー:加藤千幸先生(東京大学),奥田洋司先生(東京大学),三邉考志様(日本 ESI),青子守歌

(OpenMPS プロジェクト),藤岡照高(オープン CAE 勉強会@関東(構造など))

テーマ:オープンソース CAE の育て方

### 17:30-17:40 クロージング/司会:今野雅(オープン CAE 学会)

- ・最優秀学生講演表彰/オープン CAE 学会表彰委員会
- ・田辺賞表彰/オープン CAE 学会表彰委員会
- ・クロージング/藤岡照高(オープン CAE シンポジウム 2016@東京実行委員長)

### 【B 室(As 棟 313-314 中セミナー室 5)】

### 9:30-10:50 一般講演[コミュニティ活動と情報共有]/座長:藤岡照高(東洋大学)

- B11
   オープン CAE 合同勉強会を振り返って ~地域勉強会間の情報共有の重要性~

   THINK (オープン CAE 勉強会@関東(流体など))
- B12 東海地域のオープン CAE を担う岐阜勉強会のこれまでとこれから 柴田良一(岐阜高専)
- B13
   関西勉強会の取り組み -実験と CAE を併用した学習について 

   川畑真一(オープン CAE 勉強会@関西),高木洋平
- B14 オープン CAE 学会によるオープンソース CAE 普及支援
   今野雅(オープン CAE 学会)

### 11:00-12:30 一般講演[産業界における応用] / 座長:酒井秀久(富士通アドバンストテクノロジ)

- B21 Salome-Meca を用いた CAE 社内教育の取り組み 小南秀彰(富士フイルムエンジニアリング)
- B22 オープン CAE 構造解析を活用した様々な場面での教育活動の報告 柴田良一(岐阜高専)
- B23 オープンソース CAE ソフトウエアと商用 CAE ソフトウエア その効用と限界 新倉寿夫(オープン CAE 学会)
- B24 FrontISTR をベースとした車輪レール間動的転がり接触解析プログラムの開発と実用的な解析事例
   林雅江(鉄道総研),高垣昌和,相川明,殷峻(先端力学シミュレーション研究所),橋本学(東京大学),奥田<</li>
   洋司
- B25 ICT 機器開発におけるオープン CAE の活用 –現状と今後の展望– 山岡伸嘉(富士通),石川重雄(富士通アドバンストテクノロジ),登坂正喜,久保田哲行

- 13:30-15:00 一般講演[学生セッション] / 座長:福江高志(岩手大学)
- B31 Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析 三浦純哉(東洋大学),藤岡照高
- B32 OpenFOAM による固液相変化シミュレーションの検証西田樹生(富山県立大学),中川慎二
- B33 オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討 市島泰人(東洋大学),新藤康弘,藤岡照高
- B34 津波によるコンビナート地域におけるタンクからの重油流出の予測 渡邊健太(大阪大学),ワイピョーキョウ(大阪大院),高木洋平,岡野泰則,加藤直三(産業防災研)
- B35 OpenFOAM による低回転ボルテックス水車容器内の気液二相流解析清水貴昭(富山県立大学), 飴谷功佑, 中川慎二, 上坂博亨(富山国際大学), 伊藤宗康(川端鐵工), 佐藤弘規

### 【C室(As棟 303-304 中セミナー室 4)】

### 9:30-10:50 一般セッション[モデルベース設計] / 座長:片山達也(ダイキン工業株式会社)

- C11 モデルベースデザイン委員会の紹介と OpenModelica を用いた熱回路網構築について 西剛伺(オープン CAE 学会モデルベースデザイン委員会)
- C12 Modelica Standard Library の Examples 調査活動の紹介
   植田惠法(ISID エンジニアリング), 福江高志(岩手大学), 酒井秀久(オープン CAE 学会モデルベースデザイン委員会), 西剛伺
- C13 OpenModelica による強制空冷熱設計の試行
- 福江高志(岩手大学),西剛伺(オープン CAE 学会モデルベースデザイン委員会),廣瀬宏一(岩手大学)
   C14 Modelica Standard Library の Media パッケージの使い方
   田中周(アマネ流研)

### 11:00-12:30 一般講演[構造解析(1)]/座長:藤田拓生(オープン CAE 勉強会@関東(構造など))

- C21 非線形非定常弾塑性熱解析の検討(鋼焼入れ処理時の熱応力再現)広田憲亮(原子力機構),藤岡照高(東洋大学)
- C22 Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer 鄭宏杰 (東洋大学), 塩谷隆二
- C23 CMake を用いた FrontISTR のビルドプロセス改良の試み -FrontISTR v5.0 に向けて-小川道夫(海洋機構)

### 13:30-15:00 一般講演[構造解析(2)]/座長:小川道夫(海洋機構)

- C31 Peridynamics による火山避難シェルターの噴石衝突の安全性に関する基礎的検討 柴田良一(岐阜高専)
- C32 大学院講義への Calculix 導入の取り組み今井康貴(佐賀大学)
- C33 SfePy: Simple Finite Elements in Python の紹介 藤田拓生(オープン CAE 勉強会@関東(構造など))
- C34 Salome-Meca 活用研究会の活動 龍野潤(関西 CAE 懇話会)

### 粒子法オープンソース実装 OpenMPS プロジェクトの開発

青子守歌\* (OpenMPS プロジェクト)

### Development of OpenMPS, An Open Source Implementation of Particle Method

### aokomoriuta\* (OpenMPS project)

### Key Words: Particle Method, MPS, Free surface flow, Open Source, C++

### 1. 背景

MPS 法は,東京大学の越塚ら<sup>(1)</sup>が 1996 年に開発した 手法である.SPH<sup>(2)(3)</sup>法に比べ後発であるが,当初から射 影法型で提案されており,後に ISPH 法<sup>(4)</sup>が提案されるま で射影法型粒子法は MPS 法以外に皆無であった.

射影法型粒子法では、ナビエ・ストークス方程式にヘルムホルツ・ホッジ分解を適用し、圧力勾配項とそれ以外に分割し、ポアソン方程式によって圧力場を求める方法である. MPS の S は Semi-implicit の頭文字であることからも分かる通り、以前は半陰解法型と呼ばれていたが、Gotoh and Khayyer (2016)<sup>(5)</sup>で Pojection-based とまとめられたので、本プロジェクトでもその流儀に従っている.

MPS 法の詳細な計算手法については紙面の都合上省 略するので、参考文献<sup>(6)(7)</sup>を参照されたい.

### 2. OpenMPS プロジェクトの概要

著者は、OpenMPS プロジェクトにおいて、MPS 法を オープンソースで開発・公開している.現在、コードは Bitbucket<sup>(8)</sup>上で公開されており、簡易的なプロジェクト ウェブサイト<sup>(9)</sup>も存在する.複数ライセンスで提供され ており、基本はコピーレフトであるが、非商用の場合は 帰属表示のみで可能としている.

### 3. OpenMPS プロジェクトの現在

**OpenMPS** プロジェクトは現在も意欲的に開発が進ん でおり,本稿執筆時点でv2.1 が最新版となる.このv2.1 には Gotoh and Khayyer (2016)<sup>(5)</sup>で紹介されている高精度 手法のうち, MPS-HS-HL-GC-ECS-SPP-DS 法が適用され ており,最新の研究成果を積極的に導入する方針である.

図1は OpenMPS を実行した際に標準で構成されるダ ムブレーク問題の計算結果を可視化したものである. OpenMPS は,計算結果を csv で出力しており, ParaView での可視化が可能なように pvsm も標準で付属している. この図のように標準では2次元計算となるが, v2.1 から は実験的機能として3次元計算にも対応した.

開発環境は Visual Studio が主体だが Makefile も付属し ており,gcc や clang,icc などでも利用できる.コードは C++14 を基本として書かれており,研究成果の導入と同 様,最新の手法を積極的に取り入れている. OpenMP に よるスレッド並列も導入されている.

#### 4. OpenMPSの課題と将来の展望

**OpenMPS** 法プロジェクトの課題は Bitbucket の Issues で管理されている.本稿執筆時点では「SPP 法の導入」 「分散並列(MPI)対応」「SIMD 化」「剛体連成」「GPGPU 版」「V&V」「3 次元版の正式導入」の7 課題が挙がって おり,順不同で対応予定である.



Fig. 1 OpenMPS での計算例(副ダムありダムブレーク) 今後は、これらの課題を解決しつつ、OpenMPS を実際 に利用した成果で論文等の対外発表も進め、プロジェク トをより大きなものにしていきたいと考えている.

### 5. まとめ

本 OpenMPS プロジェクトは,研究成果・開発手法の いずれも先鋭的な手法を導入した,世界的に見ても希少 な射影法型粒子法(MPS)のオープンソースな CAE ソフト ウェアである.本プロジェクトの発展が,特に日本にお けるオープン CAE 界隈の発展につながると信じ,今後も 活発な開発を継続していきたい.

また,現在, OpenMPS を利用してみたい,あるいは開 発に参加したい人を募集しており,興味がある方はぜひ ご連絡いただきたい. レポジトリへの直接 Issue 投稿や pull request も大歓迎である.

- Koshizuka, S. and Oka, y. (1996) : "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", Nucl. Sci. Eng.
- (2) R.A. Gingold and J.J. Monaghan (1977) : "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars" Mon. Not. R. Astron. Soc..
- (3) L.B. Lucy (1977) : "A numerical approach to the testing of the fission hypothesis", Astron. J.
- (4) Shao S, Lo EYM (2003) :"Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface", Adv Water Resour,
- (5) Gotoh, H. and Khayyer, A. (2016) : "Current achievements and future perspectives for projection-based particle methods with applications in ocean engineering", J. Ocean Eng. Mar. Energy.
- (6) 越塚誠一 (2005): 『粒子法』,計算力学レクチャー シリーズ,丸善出版.
- (7) 越塚誠一,柴田和也,室谷 浩平 (2014): 『粒子法 入門」,丸善出版.
- (8) https://bitbucket.org/OpenMps/openmps
- (9) <u>http://openmps.bitbucket.org/</u>

### Framework for Developing Particle Simulators(FDPS)

岩澤全規*(理化学研究所)
細野七月(京都大学)
村主崇行 (京都大学)
牧野淳一郎(神戸大学)

谷川衝(東京大学) 似鳥啓吾(理化学研究所) 行方大輔(理化学研究所)

### Framework for Developing Particle Simulators(FDPS)

Masaki IWASAWA\* (RIKEN) Natsuki HOSONO (Kyoto Univ.) Takayuki MURANUSHI (RIKEN) Junichiro MAKINO (Kobe Univ.)

### Ataru TANIKAWA (Tokyo Univ.) Keigo NITADORI (RIKEN) Daisuke NAMEKATA (RIKEN)

Key Words : Particle simulation, High performance computing,

粒子法とは研究対象となる系を相互作用する多数の粒子 によって表現し、個々の粒子の発展方程式を解くことで 系の進化をシミュレートする方法である.粒子法では系 の運動に合わせて自動的に粒子が移動し、系を自然な形 で表現してくれる.そのため、物体の衝突や破壊等、形 状が大きく変わる系のシミュレーションや密度コントラ ストが高い系のシミュレーション等に適しており、科学 や工学などの分野で幅広く使われている.

近年,シミュレーションの解像度や精度を上げるために, 大規模並列計算機が使われ始めている.しかし,このような並列計算機上で効率よく動作する,粒子法シミュレ ーションプログラムを開発する事は容易ではない.効率 の良いアプリケーションを開発するためには,負荷分散 を考慮した計算領域の分割や通信量を考慮した相互作用 計算に必要となる粒子の情報の交換,更に,効率的な相 互作用計算や近傍粒子探査の為に粒子を木構造によって 管理する必要もある.これらの事柄を考慮したコードを 開発するには膨大な時間が必要となる.

そこで,我々は上記の問題を解決するために粒子法シミ ュレーションコードの開発を支援するフレームワーク,

FDPS(Framework for Developing Particle Simulator)の開発 を行った(文献 1). FDPS の基本的な考え方は, 粒子法 シミュレーションプログラムを開発するときに困難とな る部分(例えば, 領域分割や粒子交換, 粒子の木構造管理 等)を FDPS 側が担当することで, ユーザーは困難な部分 を意識すること無く任意の相互作用を持つ粒子法プログ ラムの開発が出来るようにする事である. これらの機能 を実現するために FDPS は C++のテンプレートライブラ リーとなっている。ユーザーは相互作用関数と粒子クラ スを定義し、FDPS の API にそれらをテンプレート引数 として渡し, その API を使ってプログラムを行う. 我々は, 実際に FDPS を使ったいくつかのプログラムの 開発も行い,「京」などのスパコンで実行した.その結果, 簡単なプログラムなら数百行で書け, また高い実行効率 が出る事を確認した(図 1).



Fig.1 FDPS を用いた N 体シミュレーションの弱スケ ーリング性能. 粒子数は1コア当たり約27万粒子.

参考文献

(1)"Implementation and performance of FDPS: a framework for developing parallel particle simulation codes", Iwasawa et. al, 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 54

http://pasj.oxfordjournals.org/content/early/2016/06/07/pasj.p sw053.full

### MPS - Code\_Aster による流体構造連成解析

廣瀬 純一\*(OpenCAE 勉強会@関東)

### Fluid-structure interaction analysis by MPS-Code\_Aster

### Junichi HIROSE \* (OpenCAE Workshop@kanto)

### Key Words : MPS,FEM,Code\_Aster,FSI

#### 1. はじめに

流体と構造体の相互作用を考慮した解析は,建設・製造・防災など多くの分野にとって重要な研究課題の一つである.

本研究では、構造体の変形解析を取り扱う有限要素法 (FEM) にオープン CAE である Code\_Aster (Ver.12.1.0) <sup>(1)</sup>を用い、自由表面を含めた流体解析に粒子法の一つで ある MPS 法<sup>(2)(3)</sup>を用いて、MPS 法と FEM のお互いのメ リットを生かした流体構造連成解析を提案する.

#### 2. 連成解析手法

MPS 法の壁粒子と FEM の節点を対応付ける. 流体から構造体への作用は, MPS 法の計算より求められた壁粒子の圧力値をもとに, FEM の節点に荷重として与える. 構造体から流体への作用は, FEM の計算より求められた 節点変位をもとに, MPS 法の壁粒子の位置を更新する.

MPS 法は外部関数として Code\_Aster (ASTK) の comm ファイル (Python 形式) より ctypes モジュールを用いて 計算する.尚,連成手法は逐次時差解法とする.

### 3. 検証計算

3.1 ダムブレイクと弾性障害物 図 1 に計算体系を示 す.弾性障害物は密度  $\rho_s = 2500[kg/m^3]$ , ヤング率  $E = 1.0 \times 10^6[kg/s^2m]$ , ポアソン比 0 で下辺に拘束条件が与え られている.要素数は縦横 40 × 6 で四角形二次要素を用 いている.流体は密度  $\rho_f = 1000[kg/m^3]$ ,動粘性係数  $v = 1.0 \times 10^{-6}[m^2/s]$ で,粒子間隔 0.002[m],流体粒子数は縦横 146 × 73 を配置している.重力加速度は  $g = 10.0[m/s^2]$ ,時間刻み幅は  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}[s]$ としている.

図 2 は弾性障害物の左上における *x* 方向の変位を時間 履歴で表している. ピーク値は Ryzhakov ら, Murotani らとよく一致している.

3.2 ダムブレイクと弾性ゲート 図 3 に計算体系を示 す.弾性ゲートは超弾性体 (Mooney-Rivlin model) とし て密度  $\rho_s = 1100[kg/m^3]$ , ポアソン比 0.499 で上辺に拘束 条件が与えられている.要素数は縦横 79×5 で四角形二 次要素を用いている.流体は密度  $\rho_f = 1000[kg/m^3]$ ,動粘 性係数  $v = 1.0 \times 10^{-6} [m^2/s]$ で,粒子間隔 0.001[m],流体粒 子数は縦横 140×100 を配置している.重力加速度は g =9.81[m/s<sup>2</sup>],時間刻み幅は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4} [s]$ としている.

図4は弾性ゲートの自由端における x, y 方向の変位を 時間履歴で表しており,実験結果に近い値を示している. 4. おわりに

Code\_Aster による連成解析を提案,検証し,その有効 性を確認した.連成解析ではカプラーの部分が重要であ り、SPH 法や DEM に置いても対応できると考える.



Fig. 2 Comparison of the upper left corner displacement of the elastic wall



Fig. 3 Dam-break flow through an elastic gate



Fig. 4 Comparison of the displacement of the free end of the elastic gate

- Code\_Aster, http://web-code-aster.org/, (accessed 2016-10-13).
- (2) 越塚誠一, 粒子法, 丸善, 2005.
- (3) 越塚誠一他, 粒子法入門, 丸善, 2014.



### 最新のスーパーコンピュータ向けプロセッサにおける OpenFOAM および OpenMPS の性能評価

大島聡史\*(東京大学) 今野雅(株式会社 OCAEL) 青子守歌(OpenMPS プロジェクト)

# Performance evaluation of OpenFOAM and OpenMPS on current processors of supercomputers

Satoshi OHSHIMA\* (The University of Tokyo) Aokomoriuta (OpenMPS project) Masashi IMANO (OCAEL Co., Ltd.)

Keywords : OpenFOAM, OpenMPS, Xeon, Xeon Phi, Performance Evaluation

### 1. はじめに

今日の多くの計算機環境(PC, ワークステーション)ではマル チコア CPU が用いられている. また一部の先進的な計算機 環境では、メニーコアプロセッサや GPU,FPGA などの利用も 始まっている.

一方,スーパーコンピュータに用いられているプロセッサ に注目すると、従来は専用プロセッサが多く使われていたの に対して、現在ではコンシューマ向けのプロセッサと同一もし くは類似のプロセッサが多く用いられている.そのため、最新 のスーパーコンピュータ向けプロセッサによるオープンソース ソフトウェアの性能を測定することは、現在スーパーコンピュ ータを利用しているユーザにとってだけではなく、今後、他の 計算環境にて同様なプロセッサを利用するユーザにも有益 である.

そこで本稿では、主に数値流体力学計算に用いられるオ ープンソースソフトウェア OpenFOAM と、Moving Particle Semi-implicit (MPS)法計算に用いられるオープンソースソフ トウェア OpenMPS について、最新のスーパーコンピュータ向 けプロセッサにて性能の初期評価を行った結果を報告する.

### 2. 実験環境

対象とする実験環境の構成は以下の通りである.

- 最新のマルチコア CPU(BDW): Intel Xeon E5-2695
   v4, Broadwell-EP, 18 コア, 2.1~3.3GHz, 1209.6GF, DDR4メモリ, 153.6GB/s, Intel コンパイラ 16.0.3
- 最新のメニーコアプロセッサ(KNL): Intel Xeon Phi 7210, Knights Landing, 64 コア(256 スレッド), 1.30~1.50GHz, 2662.4GF, MCDRAM メモリ,約 900GB/s, Intel コンパイラ 17.0.1
- 比較用マルチコア CPU(IVB): Xeon E5-2680 v2, IvyBridge-EP, 10 コア, 2,80-3.60GHz, 224GF, DDR3メ モリ, 59.7GB/s, Intel コンパイラ 16.0.3, LLVM 4.0

(マルチコア CPU の HT 機能は無効化している. KNL に搭載された DDR4 は未使用のため未記載.)

BDW とKNL は東京大学情報基盤センターにて 2016 年度 稼働開始のスーパーコンピュータにて利用されている,もしく はそれと同世代のプロセッサである.

### 3. 性能評価

各実験環境にて同一のプログラム(ソースコード)を用いて性

能を測定した. KNL については幾つかのスレッド数による実 行時間のうち最速のものを選んだ.

3.1 OpenFOAM オープン CAE 学会 V&V 委員会 OpenFOAM ベンチマークテスト WG で作成した, チャネル 流れ(Re\_tau=110)channelReTau110 を対象としたベンチマー クテスト OpenFOAM-BenchmarkTest-channelReTau110<sup>(1)</sup>を用 いて性能を測定した. 52 ステップのみ計算を行い, 第1ス テップから第 51 ステップまでの1 ステップあたりの平均解析 時間を算出した.

- BDW GAMG 4.70 [sec] PCG 7.42 [sec] (18 スレッド)
- KNL GAMG 1.73 [sec] PCG 1.81 [sec] (GAMG は 64 スレッド、PCG は 128 スレッド)

IVB GAMG 7.38 [sec] PCG 9.54 [sec] (10 スレッド)
 BDW, KNL ともに比較用の IVB と比べて性能が向上している. 特に KNL は高速であるが、PCG が GAMG 並に高速である点も興味深い。

**3.2 OpenMPS** 初期粒子間距離 1[mm], 50(幅) x 50(奥 行き) x 100(高さ)[mm]の水塊の自由崩壊問題(粒子数 52,573 個)を MPS-HS-HL-ECS-GS-DS 法で解いた際の, ス テップ数 33 における実行時間を測定し比較した.

- BDW 26.95 [sec] (18 スレッド)
- KNL 67.59 [sec] (62 スレッド)
- IVB 60.50 [sec] (10 スレッド)

KNL では各コア上で複数スレッドを用いると性能が低下した. 比較用の IVB と比較すると、BDW では大きく性能が向上している一方で KNL は性能が低下している.

### 4. おわりに

BDW ではソースコードを変更せずに大きな性能向上が得ら れた.一方 BDW よりも理論性能の高い KNL は、 OpenFOAM は高速である一方で OpenMPS は低速であった. KNL で十分な性能を得るには実行時パラメタの最適化やソ ースコードレベルの修正が必要であると考えられる.各プロ グラムとも、今後さらに詳しい性能の解析や高速化に取り組 みたい.

### 参考文献

 OpenFOAM Benchmark Test for Channel Flow (Re\_tau=110), https://github.com/opencae/Open FOAM-BenchmarkTest/tree/master/channelReTau110

### 赤外線熱画像を利用した建築物外壁はく離診断試験の OpenFOAM によるシミュレーション

中川 慎二\*(富山県立大学) 松谷 治(株式会社アイペック) 杉山 友寿(株式会社アイペック) 森井 一茂(株式会社アイペック)

OpenFOAM Simulation of Building Exterior Wall Diagnostic Using Infrared Thermal Imaging

Shinji NAKAGAWA \* (Toyama Prefectural University) Osamu Matsutani (IPEC)

### Tomohisa SUGIYAMA (IPEC)

Kazushige Morii (IPEC)

Key Words : OpenFOAM, chtMultiRegionFoam, Exterior wall diagnostic.

### 1. 概要

建築物外壁表面の温度分布を赤外線カメラで計測し, 得られた熱画像から外壁内部に発生した「はく離(浮き)」 を検出する技術がある.この技術の信頼性向上を目指し, 試験体による実験と OpenFOAM によるシミュレーショ ンを実施した.測定した日射を境界条件として与えるこ とで,壁内部はく離条件(はく離発生部位およびはく離 厚さ)に依存する実験結果を定性的に再現することが可 能となった.

### 2. シミュレーション方法

日射により加熱される建築物壁面温度を解析するため に、非定常計算と複数物質から構成される対象のエネル ギー式を扱うことが求められる.そのため、OpenFOAM 3.0.1 の chtMultiRegionFoam ソルバを使用した.

厚さ約 200mm, 1m 角のコンクリート試験体が対象で ある.この試験体表裏面には、モルタル層とタイルが配 置されている.物性値には、一般的な値<sup>(1)</sup>を使用した.

図1に、試験体とはく離部形状の概略を示す. 試験体 には、4 箇所の浮き(はく離)が存在する. はく離の厚 みは、0.1mmから 3mmである. 2 種類の試験体を用意し た.1 つは、タイルの裏面にはく離(空気層)が存在す るもの、もう1つは、モルタル層とコンクリートとの境 界にはく離が存在するものである.

メッシュの生成には blockMesh を使用した. topoSet お よび splitMeshRegions を使うことで、1 つの試験体を 10 の領域に分け、それぞれの物性を与えた.

測定した日射量に応じた熱量をタイル表面への温度境 界条件として与えた.ただし、周囲空気へ一定の熱が逃 げるとして、その熱量を差し引いた.

### 3. 結果

日中の高温時間帯におけるタイル表面温度分布を図 2 に示す.浮き部の厚みが大きい部分で,健全部よりも高 温となり,実験結果を定性的に再現できた.

### 参考文献

 建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST プログラム 壁体材料の熱性能値 http://www.ibec.or.jp/best/program/db/



Fig. 1 Overview of test section



Fig. 2 Surface temperature distribution

**謝辞** 本研究は,中小企業庁 平成26年度補正 ものづく り・商業・サービス革新補助金の助成を受けた.

### 燃料電池自動車の高圧水素容器の 安全性検証に関する数値シミュレーション

山田英助\*(一般財団法人日本自動車研究所)

### Numerical simulation of safety for compressed hydrogen tank for fuel cell vehicles

Eisuke YAMADA\* (Japan Automobile Research Institute)

Key Words : FCV, Hydrogen tank, OpenFOAM, fireFoam, sonicFoam

### 1. はじめに

化石燃料の代替エネルギー源の有力候補である水素を 燃料とした燃料電池自動車(FCV)が次世代の自動車と して注目されている.水素の単位体積あたりのエネルギ 一密度は著しく低いので,FCVでは水素を高圧にして専 用の容器に格納している.最大 70MPa に達する FCV の 高圧水素容器には高度な安全性が求められており,火災 を模擬した試験,充填時の容器内温度の評価試験などが 実施されている.より安全で有効な試験手法を開発する ためには,各試験で生じる物理現象を把握する必要があ る.本研究では,各試験の物理現象を把握するため OpenFOAM を利用した数値シミュレーションによる解 析を行った.OpenFOAM のソルバーの fireFoam で容 器の火炎曝露試験, sonicFoam で水素充填試験を解析し, それぞれのソルバーの適用可能性を検討した.

### 2. 火炎曝露試験

火炎曝露試験では、火災時の容器の安全性を検証する ために FCV の容器を火炎であぶる.ここでは、容器の周 囲を計算領域とし fireFoam で火炎を形成して容器をあぶ る解析を行った.一般的な形状(円筒の両端に半球)の 容器の下部 0.3m の位置からメタンの火炎を形成させた.

図1に十分に火炎が形成された時の容器の表面温度の 分布と1000Kと1500Kの等値面を示す.火炎が容器胴体 部を包み込むように形成されている.FDS (Fire Dynamics Simulator)で解析した結果<sup>(1)</sup>と同様の火炎が形成されて おり, OpenFOAMの fireFoamでも火炎曝露試験の解析が 十分可能と考えられる.FDS では扱えない曲面形状を模 擬できる OpenFOAM では、曲面で構成される現実的な 容器に対する物理現象の解明が期待できる.



Fig. 1 Temperature distribution for a bonfire test

#### 3. 水素充填試験

FCV へ燃料の水素を充填するとき,ユーザーの利便性 を考慮して3分程度の急速充填が求められている.一方, 充填時の圧縮の影響で容器内温度は上昇するが,安全性 の観点から容器内温度の上限は85℃とされており<sup>(2)</sup>,温 度上昇を抑制しつつ充填時間を短縮する急速充填が求め られている.ここでは,充填時の容器内の温度上昇を把 握するため sonicFoam で容器内の流体の挙動を解析した. 密閉性の高い FCV の高圧水素容器内を実験的に可視化 することは困難であるため,容器内の流体挙動の把握に 数値シミュレーションは有効な研究手法である.

図2に充填後0.02秒後の温度分布と流線を示す. 左側 に設置した充填口の境界条件を容器内圧より0.1MPa 高 く設定し,差圧による充填の初期過程を模擬した. 容器 の初期温度は298K であるが,充填口からの水素噴流は 膨張の影響により温度が260K 近くまで低下している. 噴流はほぼ直進しながら不安定になり,逆側の壁に衝突 して壁に沿って流れている様子が確認できる. また,容 器壁と中心軸の噴流近傍で温度が上昇傾向を示している.





Fig. 2 Temperature distribution and stream line

#### 4. まとめ

OpenFOAM で FCV の高圧水素容器の火炎曝露試験お よび充填試験を模擬した. 各試験の物理現象の把握には fireFoam と sonicFoam を用いることが有効である.

今後は、燃焼反応、壁面の境界条件、高圧水素に対応 した熱物性値および状態方程式のモデル等を検討し、精 度の高い数値シミュレーションのモデルを開発し、より 詳細な物理現象のメカニズムの解明をする必要がある.

- 山田, FDS による火災数値シミュレーション,オー プン CAE シンポジウム 2015.
- (2) SAE International, Fuelling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles, J2601, July 2014.

### OpenFOAM の VOF 法ソルバにおける界面圧縮法の影響に関する検討

岡垣 百合亜\*(原子力機構) 与能本 泰介(原子力機構) 石垣 将宏(原子力機構) 広瀬 意育(アドバンストアルゴリズム&システムズ)

### Study on the effect of an interface compression method in solvers based on VOF method within OpenFOAM

Yuria OKAGAKI \* (JAEA) Masahiro ISHIGAKI (JAEA)

### Taisuke YONOMOTO (JAEA) Yoshiyasu HIROSE (AA&S)

Key Words : Two-phase flow, VOF method, Interface compression method, Instability analysis, OpenFOAM

### 1. はじめに

原子力機構では,軽水炉の現象把握,安全評価や実験 装置の検討において生じる気液二相流現象を明らかにす るために VOF 法による数値解析を実施している.

OpenFOAM に導入されている VOF 法に基づくソルバ では、移流方程式に界面圧縮法を用いており、他の界面 追跡法等との比較検証がこれまでに数多く行われてきた <sup>(1)</sup>. しかし、格子数の条件及び界面圧縮法を特徴づける 界面圧縮パラメータが数値拡散も含む拡散挙動に影響を 及ぼす可能性については、明らかにされていない.本研 究では、OpenFOAM に導入されている VOF 法の妥当性 評価を通して、格子数、界面圧縮パラメータが結果に及 ぼす影響について明らかにした.

### 2. 解析条件

2.1 数値解析手法 OpenFOAM-2.3.x の非圧縮性二相流 VOF 法ソルバ interFoam を使用した. 運動方程式は比較 する線形理論解析に合わせ,一部修正した.

**2.2 問題設定** 妥当性評価は、Li ら<sup>(2)</sup>によって行われた 静止液相内におけるガスシートの不安定性解析と比較し た.解析体系を図1に示す.液相部は初期状態で静止し、 中央の気相部は速度  $U_g$ で一様に流れている.解析体系は 二次元であり、代表長さaはガスシート幅の半分に相当 し、主流(x)方向に 30a、垂直方向(y)に 4a とした. ここで、ガスシートに初期擾乱を生じさせるため、y方 向速度  $U_{y,initial}$ = $A_{initial}$ sin(kx) $U_{x,initial}$ , x方向速度  $U_{x,initial}$ を与 え、初期振幅  $A_{initial}$ を 0.05a、初期速度  $U_{x,initial}=U_g$  とした. k は波数である.

線形理論解析では、重力、気相粘性を無視し、液相粘 性の有無における気液界面の不安定性限界を気相 Weber 数  $We_g = \rho_g U_g^2 a/\sigma$  と無次元波数 m = ka の関係で示している <sup>(2)</sup>. ここで、 $\rho_g$  は気相密度、 $\sigma$  は表面張力である.本解 析では、 $a \in 1m$ 、 $U_g \in 1m/s$ 、 $\rho_g \in 1kg/m^3$ 、液相密度  $\rho_l$ を  $10kg/m^3$ 、液相を非粘性 (Reynolds 数  $Re \rightarrow \infty$ ) とし、 線形理論解析において不安定となる条件  $We_g = 2$  ( $\sigma$  は 0.5N/m)、m = 1 とした、境界条件は、静止液相の入口、 出口側、上下壁を速度勾配 0 とした。

2.3 解析ケース 格子は,縦横比 1:1 の直交格子となる ようにし,一波長あたりの格子数は, x 方向に約 63,約 157,約 314,約 628 の4 ケースとした.界面圧縮パラメ



Fig. 2 Comparison of the growth of the disturbance amplitude between CFD and linear theory

ータ *C*<sub>a</sub>は, 0, 0.5, 0.75, 1, 2, 4 の 6 ケースを対象と し,着目する条件に応じて,このケース中から組み合わ せを決定した.

#### 3. 結果·考察

ー波長あたりの格子数 314 と 628 において,  $C_a$ のケースごとに擾乱の振幅の対数を線形理論と比較した結果を図 2 に示す.格子数 314 では  $C_a$ =4,格子数 628 では  $C_a$ =2,4以外において,5秒から 12 秒付近の間で線形性が見られ,線形理論と一致する.従って,CFD 解析の計算の妥当性が確認できる。また,格子数が増加することで CFD と線形理論との差が大きくなることがわかる。これは格子数が少ないほど界面圧縮効果が現れることを示し,格子数に応じた  $C_a$ の適切な値が存在することが考えられる。40 秒間の線形理論との残差を求めると,格子数 314では  $C_a$ =2,格子数 628 では  $C_a$ =0.5 で最小値となる.いずれの場合においても標準設定の  $C_a$ =1 と差は5%以内であり, $C_a$ =1 を使用することに問題はないといえる。

- S. S. Deshpande et al., Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam, Computational Science & Discovery, Vol. 5 (2012) pp.1-36.
- (2) X. Li et al., Temporal instability of plane gas sheets in a viscous liquid medium, Physics of Fluids, Vol. 8, No. 1 (2007) pp.103-111.

### OpenFOAM ベース化学反応流ソルバーの開発

吉田正典\*(爆発研究所) 石倉修一(爆発研究所)

```
ディン スァン チェン (爆発研究所)
```

Development of OpenFOAM based chemical reaction flow solver

Masatake Yoshida \* (ERI Inc.,) Shiyuuichi Ishikura (ERI Inc.,)

Thien Xuan Dinh (ERI Inc.,)

Key Words : OpenFOAM, laminar flame speed, detonation, DDT, eriPisoCentralReactingFoam

### 1. はじめに

層流燃焼速度領域(燃焼波面速度 ~cm/s)から爆轟の領 域(~km/s)まで、全速度領域に適用可能な化学反応流解 析ソルバー開発の現状を報告する。

### 2. eriPisoCentralReactingFoam(PCRF)

rhoCentralFoam  $\natural$  Kurganov-Tadmor  $\mathcal{O}$  Central  $\land \neq - \land ^{1)}$ を用いており高速度領域の解析に適しているが多種気体 や反応は扱うことができない。一方 reactingFoam は PISO スキームを採用しており化学反応を扱うことは可能であ るが高速度領域での解析はできない。ここでは低速度領 域では PISO スキーム、高速度領域では Central スキーム を採用し、化学反応が取り扱えるよう、reactingFoam を ベースにソルバーをカスタマイズした。このソルバーを eriPisoCentralReactingFoam(PCRF)と呼ぶ。アルゴリズム を図1に示す。

### 3. 数值解析

まず層流燃焼速度が再現できるかどうかの検証を行った 結果を図2に示す。PCRF はおおむね実験値と良い一致 を示す。reactingFoam は熱拡散率と物質拡散係数に同じ 値を使用しておりそれを個別に入力できるようにしたの が eriReactingFoam である。低速度領域では PCRF とおお むね同じ結果になっている。また、PCRF を用いて、燃 焼速度式を変えることによって爆轟を再現できるかどう かの検証を行ってみた。計算領域は文献2)のものを使用 した。遅い反応速度と速い反応速度で計算した結果を図 3に示す。燃焼速度式パラメータを変化させることによ って、層流領域から爆轟領域まで適用可能である。今後、 爆轟を伴う構造体破壊現象などの連成解析への応用へと 展開する予定である。

### 参考文献

- (1) Kurganov, A., and Tadmor, E., New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection-Diffusion Equations, J. Comp. Phys., 160, pp. 241-282 (2000)
- F.Ettner et al, Numerical Simulation of the (2) Deflagration-to-Detonation Transition in Inhomogeneous Mixtures, https://www.hindawi.com/journals/jc/2014/686347/



Figure 1 The algorithm of eriPisoCentralReactingFoam







Figure 3 The effect of the reaction rate on the occurrence of detonation. (a) slow reaction rate. The detonation doe not occur even after 16 ms when pressure reached the other tube end. (b)-(d) fast reaction rate. The detonation occurs between 5ms and 6ms.



### 表面形状変更による電線風圧抵抗の低減化

高木洋平\*(阪大院基工)

岡野泰則(阪大院基工)

Wind pressure drag reduction of electric wire with surface shape change

Youhei TAKAGI \* (Osaka Univ.)

Yasunori OKANO (Osaka Univ.)

Key Words : Drag Reduction, Electric Wire, Surface Shape, OpenFOAM

### 1. 緒言

被覆形状を変更することによって風圧抵抗を低減でき る低風圧型電線が開発されている(例えば<sup>(1)</sup>など).電線の 被覆材料は押し出し加工などのプロセスで大量生産され るため、単純なパターンで抵抗低減効果が高い表面形状 を作製することが好ましい.本研究では実際の電線使用 条件である中レイノルズ数での滑面円柱及び表面形状変 更を行った円柱に対して OpenFOAM を利用した乱流解 析を行い、形状と風圧抵抗の関係を調べた.

### 2. 解析手法

対象とする電線被覆形状は直径 20 mm の滑面円柱及 び 25 mm, 50 mm のピッチを有する捻回楕円形状(らせん 形状)の 3 種類である. 支配方程式は非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式及び連続の式であり, OpenFOAM の 非定常非圧縮性流れ用の pisoFoam ソルバーを用いて Smagorinsky モデルを用いた LES 計算を行った. 捻回楕 円形状は STL 形状を計算幾何学的に直接出力し,表面格 子及び三次元 O 型格子を Pointwise を用いて作成した. 速度の境界条件は流出境界で対流流出条件,流入境界で 一様流条件,電線表面では no-slip 条件とした. 圧力の境 界条件は流入及び電線表面では勾配ゼロ,流出境界には 遠方圧力として固定値を与えた. また,スパン方向には 速度, 圧力いずれに対しても周期境界条件を適用した.

#### 3. 結果と考察

まず code validation のために,表面形状を変えない円 柱周りの流れについて,レイノルズ数 *Re* が 100 までの 乱流モデルを用いない層流計算を行い,算出した抗力係 数 *C<sub>D</sub>* が既往の実験(Wieselsberger *et al.*<sup>(2)</sup>)及び数値解析 (Park *et al.*<sup>(3)</sup>)とよく一致することを確かめた.遷移及び 乱流状態である *Re* = 3900, 10000 に対しても LES 計算を 実施し比較を行ったところ,本研究と同じ Smagorinsky モデルを用いた Park *et al.*<sup>(3)</sup>の計算結果とは一致したが, Norberg<sup>(4)</sup>の実験結果に対しては過大評価になり,標準的 な Smagorinsky モデルではエネルギー散逸を過大に見積 もる結果となった.しかしながら,本研究では表面形状 の相対的な違いによる検討を行うため,標準的な LES 計 算で十分であると判断した.

次に Re = 3900 の条件で,表面形状を変更したときの 各形状における抗力係数の時間変化を Fig. 1 に示す.時 間平均した抗力係数は円柱の場合が 1.17 であるのに対し, 捻回楕円形状ではピッチが 25,50 mm に対してそれぞれ 0.99,0.88 となり,これらの形状によって風圧抵抗が低 減していることがわかった.また, $C_D$  値の時間変動が円 柱に比べて穏やかになっており,流れ場の状態が異なっ ていることが予想される.円柱と 50 mm ピッチの捻回楕 円形状に対して速度勾配テンソルの第二不変量 Qの等値 面を可視化した結果を Fig. 2 に示す.Q値は乱流中の渦 構造を抽出するためによく用いられる量であるが,円柱 の場合は後流域に三次元的な縦渦構造が形成されている のに対し,捻回楕円形状では表面で発生した二次元的な 横渦構造が縦渦構造へと遷移する過程が抑制されている ことがわかる.このため,電線前後での圧力差が減少し, 抵抗低減につながったと言える.



Fig. 1 Time development of drag coefficients for circular and spiral elliptic cylinders.



Fig. 2 Snapshot of turbulent vortex structures: (a) circular cylinder, (b) spiral elliptic cylinder.

### 4. 結言

OpenFOAM の非圧縮性ソルバーである pisoFoam を用 いて捻回楕円形状である電線周りの LES 解析を行い,ら せん形状の導入によって抵抗低減効果が得られることが わかった. 今後は随伴解析(adjoint ソルバー)を活用して 最適な表面形状の検討を行う予定である.

- Y. Eguchi *et al.*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 90, pp. 293-304 (2002).
- (2) C. Wieselsberger, Phys. Z., 22, pp. 321-338 (1921).
- (3) J. Park et al., KSME Int. J., 12, pp. 1200-1205 (1998).
- (4) C. Norberg, J. Fluid Struct., 15, pp. 459-469 (1994).

### OpenFOAM を使った竜巻状流れの再現

野田 稔\*(徳島大学) 長尾 文明(徳島大学) 八谷 実(徳島大学大学院)

### Production of Tornado-like flow by OpenFOAM

Minoru NODA \* (Tokushima University) Minoru HACHIYA (Tokushima University) Fumiaki NAGAO (Tokushima University)

Key Words: pisoFoam, Funnel cloud, Wind-borne debris, paraview

### 1. はじめに

筆者らは、漏斗雲や飛散物によって可視化された竜巻の画像から、竜巻の特性を推定する方法を検討している. ここでは、水平シア場において生じる竜巻状流れを OpenFOAMによって生成し、paraviewを使って再現し た漏斗雲の例、OpenFOAMによる竜巻状流れ場内の飛 散物の運動解析について紹介する.

### 2. OpenFOAM による竜巻状流れの生成

竜巻は、上昇流の伴う収束場に回転が加わることで発 生する.実験によって竜巻状流れを生成する場合,収束 場に回転を与えるには,回転網や噴流,ベーンを使う方 法等があり、これまでに実施されている数値流体解析に おいても実験と同様の境界条件によって竜巻状流れを生 成することが多かった.筆者らは、漏斗雲などの実スケ ールならではの検討を必要とすること、竜巻状流れの規 模を決定する因子が不明であることから, 実スケールベ ースで現実に近いと考えられる水平シア場の境界条件に こだわってきた<sup>(1)</sup>. Figl.に著者らが使っている境界条件 の概要を示す. 基本的に幅 W=12km, 高さ H=3km の直 方体の計算格子であり,正負のx面をy方向に2分して 互い違いに流入流出面を設けている.本解析では、この 流入流出面の高さ h は h/H=1 としている. y 面と天井面 は slip 条件,地表面は no-slip 条件とし,前述の流入流出 境界に与える一応な流速の差分を天井に設けた d×d(こ こでは d/W=0.1)の自由境界より流出させ収束場を生成 している.計算は OpenFOAM 標準の pisoFoam により, 標準 Smagorinsky を適用した LES を用いて実施した.



Fig. 1 Numerical grid for LES

### 3. paraview による漏斗雲の再現

竜巻が我々人間の目に識別されるのは、漏斗雲あるい

は飛散物によって可視化されているからである.漏斗雲 は基本的に収束場に含まれる水蒸気が上昇と渦による圧 力低下による飽和水蒸気量の低下によって飽和し,水滴 となって形成されている.紙面の都合上詳細は省くが, paraviewの Python calculator で飽和水蒸気面として漏斗 雲の形成面を求め可視化することが可能である.Fig.2 に 本解析で可視化された漏斗雲の例を示すが,実際の漏斗 雲と同様の形が得られていることが分かる.



Fig. 2 an example of calculated funnel cloud

### 4. OpenFOAM による飛散物の運動解析

ここでは2.で生成した非定常な流れ場を使って飛散物 の運動を uncoupledKinematicParcelFoam を用いて解析し た.本ソルバーは飛散物の質量や代表面積を与えること で,球体を前提とした抗力のみによる飛散運動が解析で きる.ここでは地面に設けた 500m 四方のパッチから鉛 直初速度を与えて流れ場に飛散物を供給した.Fig.3 にこ こでの解析結果を示すが,実際の飛散物が形成するデブ リ雲様の飛散パターンが得られていることが分かる.



Fig. 3 an example of calculated funnel and debris clouds

### 参考文献

 野田他,「水平シアによって生じた竜巻状流れ場の 構造と漏斗雲の生成」,日本流体力学会年会梗概集, pp. 1-4, (2015).

### FMI を使用した Modelica 言語によるモデルと OpenFoam による CFD モデルの Co-Simulation

田中 周\* (アマネ流研)

### Co-Simulation of a Model described in Modelica and an OpenFOAM CFD Model using FMI

### Amane TANAKA \* (Amane Fluid Laboratory)

Key Words : co-simulation, FMI, FMU, OpenFOAM, Modelica

### 1. 背景

1.1 FMI (Functional Mock-up Interface) FMI は、様々 なシミュレーションツール間で、モデル交換や Co-Simulation を行うための規格である. 2010 年に MODELISAR によって FMI Ver.1.0 が定められ、2014 年 に Modelica Association によって FMI Ver.2.0 が定められ た.モデル交換とは、あるツールで作成したモデルのシ ミュレーションを、別のツールのソルバーで実行するこ とである。Co-Simulation は、異なるツールによるシミュ レーションの実行中に、モデル間でデータ交換を行うこ とである.オープンソースツールでは、OpenModelica (OSMC), JModelica.org (Modelon), FMU SDK(QTronic), Scilab/Xcos FMU wrapper (Scilab Enterprises) などが FMI をサポートしている。

1.2 OpenFOAMのCo-Simulation機能 OpenFOAMそのものは FMI に対応していない.しかしながら、 OpenFOAM+は、2016年3月にリリースされた Ver.3.0+から Co-Simulation のための機能が強化され、function object を使用することによって、ファイルベースによる 境界条件のデータ交換が容易に行えるようになった.こ の機能と FMU SDK に改造した FMU (後述)や Python によるたサーバプログラムなどを組み合わせることによ り、FMI 1.0 に対応したツールとの Co-Simulation が可能 となる.

### 2. Co-Simulation のソフトウェア構成と作成方法

対象とする現象は、簡単な熱対流であり、OpenFOAMの ソルバーで計算する CFD モデルの境界条件と、Modelica 言語によるモデルの境界条件を互いに交換する.FMI に よる Co-Simulation の一般的なソフトウェア構成は、マス ターツール、スレーブツールと FMU である.

2.1 マスターツール FMU を読み込んで、サブシステムの計算値の交換や同期、Co-Simulation の進行などを担当するツールである.これには、Windows版の Scilab に付属する Xcos を使用した. Xcos は Scilab/Xcos FMU wrapper というモジュールを読み込むことによって、FMI for Co-Simulation Ver.1.0 のマスターツールとして使用することができる.FMI for Model Exchange 1.0 に対応したモデル交換用 FMU をインポートすることもできる.

2.2 スレーブツール サブシステムのシミュレーショ ンを実行する役割を担う.これは、OpenFOAM+である. ファイルベースで境界条件の交換ができるように function object の設定を行った.

2.3 FMU (Functional Mock-up Unit) FMUは、マスタ ーツールに読み込まれて、マスターツールとスレーブツ ールの間の通信を担うモジュールである.本構成では、 マスターツールは Windows マシンで動作し、スレーブツ ールは Linux で動作する.この間は TCP/IP によるソケッ ト通信を行う.このために、Windows 側では、FMU SDK のソースコードを改造して TCP/IP のクライアント機能 を追加した FMU を作成した.Linux 側では Python で TCP/IP のサーバプログラムを作成し、FMU からの要求 によって OpenFOAM の制御やデータ交換を行うように した.

**2.4 モデル交換用 FMU** OpenModelida を使用して作成 した Modelica 言語によるモデルは、そのままでは Xcos 上で動作しにない. そこで, JModelica.org を用いてモデ ル交換用 FMU を作成し、Xcos にインポートした.

### 3. まとめ

以上に述べた構成及び方法によって, FMI を使用して OpenFOAM による CFD モデルと Modelica 言語によるモデ ルの Co-Simulation を行うことができた.

### 参考文献

- MODELISAR. Functional Mock-up Interface for Co-Simulation. Ver.1.0. 2010. https://www.fmi-standard.org/downloads
- MODELISAR. Functional Mock-up Interface for Model Exchange. Ver.1.0. 2010.

https://www.fmi-standard.org/downloads

- (3) finback. FMI1.0 FMI for Co-Simulation について. http://www.slideshare.net/AMANETANAKA/fmi10-fmi -for-cosimulation
- (4) finback. OpenFOAM+の Co-simulation 機能と FMU の 試作.

http://www.slideshare.net/AMANETANAKA/openfoam cosimulationfmu

### OpenFOAM を用いた Raspberry Pi クラスタ環境構築と CFD 計算

大嶋元啓\*(富山県立大学) 坂村芳孝(富山県立大学) 中山勝之(オープン CAE 勉強会@富山)

Construction of Raspberry Pi Cluster Environment with OpenFOAM and CFD Calculation

Motohiro OSHIMA \* (Toyama Pref. Univ.) Yoshitaka SAKAMURA (Toyama Pref. Univ.) Katsuyuki NAKAYAMA (Open CAE @Toyama)

Key Words : OpenFOAM, Raspberry Pi, Cluster PC, CFD

### 1. はじめに

Raspberry Pi は安価なシングルボードコンピュータであ り, IoT のみならず,学習教材として使用されている. 本研究は Raspberry Pi の計算能力に注目し, intel 製 CPU Xeon などの高性能 CPU を用いた計算機と同等の計算環 境を安価で構築する事を目指している.今回, Raspberry Pi を 2 台用いて安価な PC クラスタ環境を構築し, OpenFOAM を用いて多コアによる CFD 計算を試みた. 本研究では Raspberry Pi クラスタ環境構築方法について 述べ, コア数と計算速度の関係について報告する.

#### 2. 環境構築とベンチマーク手法

2.1 スペック 本研究では RS コンポーネンツ製の Raspberry Pi2 (以下, Raspi) を 2 台用いた. OS には ubuntu MATE 16.04 を用いて, OpenFOAM 環境を構築した. OpenFOAM のバージョンは 3.0.1 である.

3.2 構築方法 Raspi のクラスタ環境構築には 2 台の RaspberryPi を使用した(以下, Raspi クラスタ). それぞ れの raspi をスイッチングハブにより接続した.各 PC に は SSH の共有鍵を設定して接続することができる.本研 究ではそれぞれの計算機の同じパスに OpenFOAM の decomposePar コマンドで作成される processor\*フォルダ を配置した. PC クラスタ環境は文献を参考に構築した<sup>(2)</sup> 3.3 ベンチマーク手法とその条件 ベンチマークは SimpleFOAM のチュートリアル Pitzdaily ケースとした. Raspi は 1CPU に 4 コア搭載されている.そのため, 1CPU 使用時の計算の場合の使用コア数を 1,2,4 と変化させた. Raspi クラスタの場合は使用総コア数を 2(1 コア/CPU), 4 (2 コア/CPU), 8 (4 コア/CPU) と変化させた.

### 3. ベンチマーク結果

図1はノード増加による並列計算の台数効果を示した ものである. 台数効果  $S_p$ は1コア(または1ノード)で の実行時間  $T_s$ をPコア(またはPノード)での実行時間  $T_p$ で除した値である. ICPU 使用時においてはコア数が 増加すると計算速度の低下がみられた. これは HDD に SD カードを用いているためであると考えられる. Raspi クラスタでは4コア(1CPUにつき2コア)使用時で1.8 倍程度の高速化を達成し、その後、台数効果は飽和する.



### 4. おわりに

本研究では OpenFOAM を用いて 2 台の Raspberry Pi の PC クラスタ環境を構築することに成功した. simpleFoam の pitzdaily ケースの計算条件では Raspi クラスタでは使 用総コアが 4 コア以上では台数効果は飽和することが分 かった. なお, 4 コア使用時では 1.8 倍程度高速化する.

- Raspberry Pi foundation, http://www.raspberrypi.org, (accessed 2016-11-1).
- (2) Penguinunits, 大規模並列計算, http://www.geocitie s.jp/penguinitis2002/study/OpenFOAM/large\_scale\_para llel.html, (access 2016-11-1).



### 流しそうめん機槽内を浮遊する物体の挙動予測

片山達也\*(オープンCAE勉強会@関西)川畑真一(オープンCAE勉強会@関西) 今川洋造(オープンCAE勉強会@関西)高木洋平(オープンCAE勉強会@関西)

Dynamics of floating bodies in the Flowing-Noodle-Machine

Tatsuya KATAYAMA \* (OpenCAE LocalShinichi KAWABATA (OpenCAE Localuser group@KANSAI)user group@KANSAI)Youzou IMAGAWA (OpenCAE Local userYouhei TAKAGI (OpenCAE Local usergroup@KANSAI)group@KANSAI)

Key Words : Flowing-Noodle-Machine, FNM, OpenFOAM, assimulo, OpenCAE Local user group@KANSAI

### 1. はじめに

1.1 背景 川に笹舟を流し速さを競い合う遊びは多くの人が遊んだことのある定番の川遊びである.しかし笹舟の形状がどうあるべきかについての考察は多くない.
そこでオープン CAE 勉強会@関西では,流しそうめん機 の槽内を速く回流する舟を作るべく,流しそうめん機槽内の流れ及び槽内を浮遊する物体の挙動の予測を行った.
1.2 提案方法 本来浮遊する物体の挙動を予測するためには,流れ場と舟の挙動を連成して解析すべきである.しかし舟の形状を検討するためには多数の計算が必要となるため計算時間を短くする必要がある.そこで今回, 槽内に物体を浮遊させない状態の流しそうめん機単体の 槽内流れ解析と,その解析結果(流れ場)から物体が受ける力を推定し挙動を予測する方法を提案する.

### 2. 流しそうめん機槽内流れ解析

2.1 流しそうめん機 図 1 に流しそうめん機の全体図 を示す.2 基の渦巻きポンプを有している市販の流しそ うめん機に,駆動モータの電圧制御と回転数を計測でき るよう改造を加えている.

2.2 実測実験 槽内の流れを把握するため, 槽内の水流 の流速を手作りのピトー管で計測した.計測ポイントの 3D モデルとともに図2に示す





Fig. 1 Flowing Noodle Machine

Fig. 2 Sampling points and Pitot tube

**2.3 槽内流れ解析** 槽内の流れ解析には OpenFOAM の interDyMFoam を用いた. 実測と解析の結果を表 1 に記す. Table 1 Velocity in the Flowing-Noodle-Machine

point	experiment	interDyMFoam
а	1.47 [m/s]	1.21 [m/s]

#### 3. 槽内を浮遊する物体の挙動

**3.1 運動方程式** 槽内を浮遊する物体の運動方程式は 以下のようになる.

$$\ddot{\mathbf{x}} = \frac{1}{m} \{ F_{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + F_{w}(\mathbf{x}) - \mathbf{g} \}$$
(1)

ここで $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ は物体の位置,速度,加速度を表す.式1からわかるように,槽内の流れ場から物体の受ける力 $F_f$ 及び物体が壁面衝突時に受ける力 $F_w$ を適切に見積もることができれば,物体の運動を計算できる.尚,今回簡単のため浮遊する物体は球体とする.

3.2 流れ場から物体の受ける力の推定 OpenFOAM の 槽内流れ解析の結果から推定する.具体的には球体のメ ッシュを適切な位置に設置し,槽内解析流れ結果の速度, 密度,圧力をマッピングする.さらにマッピングした球 体壁面の速度,密度から球体壁面に作用するはずである 動圧を計算し,マッピングした圧力に加算する.球体壁 面の速度を0[m/s]とした後,Function Object にて圧力抗 力・摩擦抗力を計算し流れ場から物体の受ける力とする.

3.3 物体が壁面衝突時に受ける力の推定 今回物体が 球であるので接触判定は幾何学的に実施しその接触力は Hertz の接触応力より算出する.

3.4 数値積分 不連続な関数であるF<sub>w</sub>の数値積分には 注意が必要である. そこで数値積分には Python のパッケ ージである assimulo を利用する. assimulo は 1DCAE の オープンソースソフトでも知られる JModelic.org の内部 でも利用されており,不連続な関数の積分や代数微分方 程式の数値積分に有用なパッケージである.

#### 4. おわりに

今回,本要旨に挙動の予測結果まで掲載に至らなかった.しかしオープン CAE 勉強会@関西では,流しそうめん機に関する取組みは継続して行い,同勉強会にて逐次経過の報告を行う.取組みに興味がある方はオープン CAE 勉強会@関西に参加いただけると幸いである.

### オープン CAE 合同勉強会を振り返って ~地域勉強会間の情報共有の重要性~

THINK\* (オープン CAE 勉強会@関東(流体など))

The joint meeting of OpenCAE local user groups in Japan - Importance of knowledge sharing between the local user groups -

### THINK \* (Kanto OpenCAE local user group (division of fluid mechanics))

Key Words : OpenCAE local user group, Joint meeting, Knowledge sharing, Community activities

### 1. はじめに

現在,オープン CAE 勉強会は,関東("構造など","流体など"の2団体),富山,東海(岐阜),関西,岡山,広島そして北東北で開催されている.しかし,これら勉強会間の交流が少ない状態であったことから,各地域の勉強会主催者や参加者が一同に介しやすい時期に「オープン CAE 合同勉強会」を開催し,各勉強会間の情報共有を行うこととした.

本稿では、これまでに開催した合同勉強会を振り返り、 地域勉強会間の情報共有の重要性について議論する.

### 2. オープン CAE 合同勉強会の開催

オープン CAE 合同勉強会は、これまでに 2011, 2015, 2016 年に開催しているが、ここでは直近の 2015, 2016 年の合同勉強会を振り返る.これらの合同勉強会はオー プン CAE 学会総会/講習会(毎年都内開催)の翌日に関東 勉強会 2 団体主催で開催した.

表 1, 2 には, 2015, 2016 年の話題提供内容を記して いる. 合同勉強会では, 基本的に参加頂ける各勉強会の 活動紹介をお願いしているが, 個別のトピックとしては, OpenFOAM や Salome-Meca が多く, この二つのオープン CAE ソフトウェアが勉強会参加者の主たる関心である ことが伺える. 一方で, 2016 年合同勉強会では, OpenModelica(1DCAE ソフトウェア), Sfepy(python によ る FEM 解析), FreeCAD(3DCAD)の話題も出ており, 上 記二つのオープン CAE ソフトウェア以外への興味も同 時に広がっていることが分かる.

Table 1 Topics in the joint meeting	of
OpenCAE local user groups in Japan (	2015

2015年5月31日,目黑区東山社会教育会館			
No.	タイトル		
1	<b>GPGPU</b> のオープン CAE への適用 (関東, 流体)		
2	クラウドサービスを用いた OpenFOAM ベンチマーク (関東, 流体)		
3	Rapid CFD を用いた OpenFOAM ベンチマーク (関東, 流体)		
4	富山勉強会近況&CAD, メッシュ生成関連(富山)		
5	Code_Aster / Salome-Meca 中級者への道(広島)		
6	"関東-流体など"近況報告 (関東, 流体)		
7	"関東-構造など"近況報告 (関東,構造)		
8	勉強会間の総合討論		

### 3. 合同勉強会を通じた地域勉強会間の情報共有

地域勉強会ごとに注目しているオープン CAE ソフト ウェアに違いがあることは、勉強会関係者の間ではよく 知られている.上記の OpenModelica, FreeCAD のソフト ウェアは、その好例であり、OpenModelica は主に関東勉 強会"流体など"で、FreeCAD は主に富山、関西勉強会で 積極的に調査されている.

地域勉強会個別とは言え,積極的に試されているソフ トウェアは,他の勉強会でも有用なものである可能性が 高い.本合同勉強会は,各勉強会からこのような関心の 高いソフトウェアを他の勉強会の参加者と情報共有する ことを一つの重要な役割と考えている.

また,合同勉強会では,勉強会主催者が多く参加され ることもあり,各勉強会の課題共有の場としても活用さ れている.例えば,2016年の合同勉強会では,関西勉強 会から勉強会の活動に関する成果発表のあり方について 問題提起があり,多くの示唆に富む意見が交わされた.1 つの勉強会が抱える課題は往々にして他勉強会の課題と 重複するところもあり,これら課題の情報共有は,多く の主催者が勉強会運営における何かしらの気付きに繋が ると考えられる.

### 4. おわりに

2015,2016年のオープン CAE 合同勉強会を振り返った.合同勉強会は、地域勉強会間の多岐にわたる情報共有(オープン CAE ソフトウェアの情報共有、勉強会の課題の情報共有など)に寄与し、また今回の振り返りを通じ地域勉強会間の情報共有の重要性を改めて確認することが出来た.

Table 2 Topics in the joint meeting of OpenCAE local user groups in Japan (2016)

2016年6月25日,東洋大学白山キャンパス		
No.	タイトル	
1	スパコン&クラウドによる OpenFOAM 費用ベンチマーク (関東, 流体)	
2	モデルベースデザインと OpemModelica (関東, 流体)	
3	Salome-Meca 事例紹介(関東, 流体)	
4	Sfepy による音響解析 (関東, 流体)	
5	北東北勉強会活動東北&1DCAE研究活動紹介(北東北)	
6	関西勉強会活動報告と成果発表のあり方について (関西)	
7	富山勉強会活動報告 (富山)	
8	FreeCAD 普及状況と事例紹介 (関西)	

### 関西勉強会の取り組み -実験と CAE を併用した学習について-

川畑真一\*(オープン CAE 勉強会@関西) 片山達也(オープン CAE 勉強会@関西) 高木洋平(オープン CAE 勉強会@関西)

> Activity of OpenCAE Local User Group@Kansai - About A Learning Method of CAE Using Home Experiments -

Shinichi KAWABATA \* (OpenCAE Local User Group@Kansai) Youhei TAKAGI (OpenCAE Local User Group@Kansai) Tatsuya KATAYAMA (OpenCAE Local User Group@Kansai)

Key Words : Home Experiments, Learning Method, Output Media, OpenFOAM, Community Activity

### 1. はじめに

オープン CAE 勉強会@関西(以下,関西勉強会と称す) は 2010 年から活動している関西を拠点として活動する オープン CAE のコミュニティである.本発表では関西 勉強会の取り組みとして,家庭実験を併用したオープン CAE の学習方法,学習内容のアウトプット媒体について 整理した内容を紹介する.

### 2. 実験と CAE

関西勉強会では 2012 年ごろから家庭実験を併用した CAE の発表がなされてきた.家庭実験と CAE の併用学 習は関西勉強会の初代幹事の冨原,高木<sup>(1)</sup>による OpenFOAM を使用したミルククラウンの解析について の論文が起源である.図1は論文で示されたミルククラ ウンの計算結果である.これ以来,3D プリンターで作成 した Ahmed モデル周りの流れ可視化,流しそうめん機を 改造した回流水槽の可視化,計算などを実施してきた.

関西勉強会では現象イメージをつかむことを重要視し、 オープンソースコードの学習に家庭実験を併用してきた. CAE における解析専任者はオペレーションが主となり がちで、計算の対象となる現象・実験を実際に見ること は多くない.条件設定や解析結果の検討などにおいては、 現象のイメージをつかめない場合、検討内容、モデルの 定義が的外れとなることもある.

家庭実験を併用する学習はこうした計算コードだけで は見えてこない、実現象との対比について考えることが でき、学習効果の向上に役立っている.



Fig. 1 Calculation Result of the Milk Crow

#### 3. アウトプット媒体について

学習においては情報収集などのインプットだけではな く、資料の作成、発表などアウトプットが重要である.

関西勉強会では学習アウトプットのガイドラインを検 討し,図2に示すマトリクスの形式でアウトプットの媒 体に対する整理を実施した.

結果,アウトプットに対するレスポンスが多く労力の 小さい媒体は Qiita, SlideShare であること,労力が高い が業績になるのは論文であることをまとめた.なお,ブ ログなど個人サイトは公開する情報の形態に自由度が高 い反面,アクセス数は管理人の知名度や取り扱うアウト プットに影響されるため,レスポンスが得られにくいと 結論づけた.



Fig. 2 Matrix of a learning effect and the labor (The Size of Keywords Represented the Appeal)

### 4. おわりに

関西勉強会の取り組みとして,実験を併用した CAE の 学習とアウトプット媒体について整理した内容を紹介し た.関西勉強会では今後も家庭実験を効果的な学習と, アウトプットについて検討,検証しながらコミュニティ 活動を継続していく.

#### 参考文献

 オープンソース CFD コード OpenFOAM によるア ダプティブ メッシュ法を用いたミルククラウンの 解析,ながれ 31 p175-179,日本流体力学会,(2012)

### オープン CAE 学会によるオープンソース CAE 普及支援

今野 雅\* (オープン CAE 学会)

### Open Source CAE Promotion Support by the OpenCAE Society of Japan

### Masashi IMANO\* (The OpenCAE Society of Japan)

Key Words : Open Source, CAE, Promotion, OpenCAE Society of Japan

### 1. はじめに

オープン CAE 学会は OpenFOAM などのオープンソー スの CAE ツールの普及や促進を目的として 2009 年 11 月に設立された一般社団法人であり,筆者は現在会長を 務めている. 会員数は 2016 年 3 月 31 日現在,正会員 168 名,学生会員 33 名,賛助会員 11 社,公益会員 3 機関で ある.学会の主な年間行事を表 1 に示す.本報では,学 会によるオープンソース CAE の普及支援を概説する.

### 2. OpenFOAM Google グループ

OpenFOAM に関する掲示板は英語版が存在しており, 世界各国の方々により活発な情報交換がなされているが, 多くの日本人にとって英語での投稿は難しい.そこで, 筆者を含めた有志により,学会設立前の 2008 年 3 月に OpenFOAM ユーザ会として, OpenFOAM の Google グル ープを作成した. OpenFOAM ユーザ会がのちに学会を設 立している経緯があり,実は OpenFOAM Google グルー プが学会の母体である.2016 年 11 月 7 日現在でのメン バー数は 833 である.同グループは,初心者が手軽に質 間を行える駆け込み寺のような場所となっており,国内 において OpenFOAM の裾野を広げる役割を果している.

#### 3. マニュアルの和訳

表 2 に学会設立前から有志により行われていた OpenFOAM ユーザガイド和訳の歴史を示す<sup>(1)</sup>. 有志から和 訳整備を引き継いだ学会では, WEB 上で自由にダウンロ ードできるように公開するだけではなく, これまでも The ParaView Tutorial や FreeCAD online help などのオー プン CAE ツール関連文章の和訳を推進しており,英語の マニュアルを読むのに抵抗がある日本のユーザに貢献し ている. また, 2015 年度から資料翻訳委員会を立ちあげ, 構造, 流体, 可視化, プロット系等のオープンソース CAE 関連のマニュアル整備をさらに進めている.

#### 4. 国内における OpenFOAM に関する勉強会

2010年5月の第1回オープンCAE ワークショップ・総 会の懇親会において,筆者が参加者からOpenFOAMの初心 者勉強会の発足を相談され,翌月から「OpenFOAM勉強会 for beginner」がほぼ毎月行われるようになった.この 勉強会では,発表資料をWEB上で公開する以外に,遠 方の方々や都合により勉強会に参加できない方々のため にUstream 中継も行った.この勉強会発足を契機として, 表3に示す通り2011年以降にOpenFOAMをはじめとする オープンソースのCAE ツールに関する勉強会が多く発足 した.どの勉強会でも概ね月に一回の頻度で開催してお り,勉強会の後では懇親会が開かれる等,情報交換がな される.また,2015年から学会総会翌日に合同勉強会が 開かれ,勉強会運営のノウハウなども共有されつつある. 以上のように,国内ではオープンソース CAE ユーザによ る草の根的コミュニティが良好に機能していると言えよ う.ちなみに,このようなオープンソース CAE に関する 草の根的コミュニティは世界的に見てもかなり発達して いると言われている.実際,2012年6月にドイツで開催 された 7th OpenFOAM Workshop において,基調講演者の Hrvoje Jasak が日本の草の根的活動成果は実に印象的だ とコメントしている<sup>(2)</sup>.

#### 5. 最後に

会員の皆様には日頃の学会活動の支援に感謝すると共 に、今後の活動促進と安定化のため、益々の会員増加を 目標に、理事会・委員会等活動を進めていく所存である.

表1 オープン CAE 学会の主な年間行事

		-    ::::::::::::::::::::::::::::::::::
時期	名称	開催地
6月頃	総会・講習会(90 分間 3 コマ ×2 並列程度)	東京
8月頃	サマースクール(2泊3日)	日本各地
	シンポジウム[見学会・講演	日本各地
11月頃	会・講習会(90分間 3~4 コ	(隔年で東京
	マ×2~3 並列程度)]	開催)
3日頃	講習会(90 分間2コマ程度)	東京以外

表 2	OpenFOAM ユーザガイド和訳の歴史
2006年9月	筆者が作成した mixi の OpenFOAM グルー
	プにおける有志で和訳を開始
2006年10月	ユーザガイド和訳の共同作業や情報集約
	源として OpenFOAM Wiki 日本語版を作成
2008年12月	Wiki 上で 1.5 系の和訳完了
2009年6月	表も含めた LaTeX 化ソースが寄贈される
2016年11月	Foundation版 3.0.1 の和訳が終了
表3 オープ	。 シCAE 勉強会の発足時期(発足時の名称)
2010年6月	OpenFOAM 勉強会 for beginner
2010年12月	OpenFOAM 勉強会 for beginner@関西
2011年1月	オープン CAE 初心者勉強会@岐阜
2012 年 5 月	オープン CAE 勉強会@富山
2012年7月	オープン CAE 勉強会@広島
2014年10月	オープン CAE 勉強会@関東(構造など)

#### 参考文献

(1) 今野, OpenFOAM Wiki 日本語版のコンテンツ, 2008

(2) Hrvoje, A Year in the Life of OpenFOAM, OFW7, 2012

### Salome-Mecaを用いたCAE企業内教育の紹介 実践的活用と効率的な習得を目指した工夫

小南秀彰\*(富士フイルムエンジニアリング株式会社)

Introduction of CAE training in the company by using Salome-Meca Invent with the aim of practical utilization and efficient learning

Hideaki KOMINAMI \* (FUJIFILM Engineering Co., Ltd.)

Key Words : OpenCAE, Salome-Meca, Corporate training

### 1. Salome-Meca 導入の経緯

1.1 企業内講習会について これまで当社は富士フ イルム(株)の製品に特有な製造設備の設計を行っている。 報告者は主に CFD と CAE の商用ソフトを用いた化学プ ラント装置内の工程現象と装置の強度の解析を、社内か らの依頼により行ってきた。

今後は、比較的に簡単な解析を設計者と開発者が自ら 行えるようにして、設計と開発部門との打ち合わせや報 告のための時間を減らしてリードタイムの短縮化を図り、 かつ設計と開発のレベルを更に向上できるように、当社 と富士フイルムグループ内への普及展開を目指している。

効率的にグループ内への展開をするには、講習会を受 講する者を出来るだけ多くしてソフトを操作できる環境 を整備することが重要だが、高額な商用ソフトに追加投 資することを回避したかった。その問題に対してオープ ン CAE は有効な解決法だと考えられた。また Salome-Meca は、講習会の用途に留まらずに実務にも活 用でき、また設計者自らが行う簡単な解析内容だけでな く更に高度な解析機能を持っている点でも望ましいと考 えた。 図1に講習会の風景を示す。グループ内のPC研 修室を使って一人一台の実習環境を用意している。

1.2 使用者への支援体制について オープン CAE は 商用ソフトと比べると、取扱説明書等が不十分なため、 新たに習得しようとする人への支援体制が著しく劣って いる。この問題に対して、報告者自身がサポートセンタ ーになることによって解決を図った。これに伴って、当 初は社内だけへの普及だった計画を見直して富士フイル ムグループ内への普及に変更して、初期の準備作業とそ の後の継続的な支援にかかる作業負荷に対して費用対効 果を高めた。

1.3 **多彩な対象者** これまで有限要素法や CAE を使っていなかった者が対象であり、しかも出身学科が機械 工学に限らず、物理工学、化学工学、金属工学など多彩 である。連続体力学はおろか材料力学すら体系的に学ぶ 機会が無かった者もいるし、エンジニアリング部門を除 く開発部門では、ある装置もしくは工程という単位で担 当者となるため、これまで経験がなかった部品強度の計 算手法を学びたいという切実な動機で参加している者もいる。

### 2. 講習会内容の工夫

2.1 講習会の体系 講習は段階的に理解が進むよう

に、a.基本操作の説明会 b.自習用の練習問題による一連の解析作業の練習と要素の種類と疎密による結果への影響の体験、c.解析理論の講習会とモデル化を行う演習、 d.実地課題の OJT、という順序とした。

2.2 最小限の背景理論 CAE ソフトを適切に使うに は、有限要素法解析などの背景理論の知識が必要だと言 われている。商用ソフトのベンダーが主催する理論セミ ナーや市販の本ではガラーキン法(Galerkin Method)の ような定式化について説明するのが常のように思われる。 しかし、そのような理論を詳しく習得することを受講者 に課すと、学習のための負荷が高く心理的な抵抗も生じ ると思われた。実践的な活用の場面では知らなくても良 いとあえて割り切って、数式をできるだけ使わずに図な どの説明で済むように工夫した。

2.3 実践的教育のための工夫 前述の 2.1.c.では、企 業内での講習会という利点と、報告者自身もかつて設計 者や開発者として様々な社内設備に携わってきた経験か ら、受講者が抱えている課題についてモデル化の演習が 出来ている。このことが受講者の動機付けに有利に働い ていると考えている。図 2 に示す"たわみを測定する簡 易実験装置"で、座学と CAE 操作と実現象との関連を体 験するのを意図している。前述の 2.1.d.までを講習会の範 囲とし、CAE を実践活用できることを教育目的としてい るため受講生の職場からの理解と賛同が得られている。



図1 講習会風景



図2 たわみの実習装置



### オープンソース CAE ソフトウエアと商用 CAE ソフトウエア その効用と限界

新倉 寿夫\*(オープン CAE 学会会員)

The pros and cons about open source CAE software and commercial CAE software

Hisao Niikura \* (Member of The Open CAE Society of Japan)

Key Words : open source, license, support, maintenance, sales and marketing

#### 1. はじめに

オープンソースソフトウエア(以下 OSS)と商用ソフ

- トウエアの違いとして、一般に以下の各点が挙げられる。 (1) OSS は無料だが、商用ソフトウエアは有料(特
- に CAE の場合、かなり高額)
- (2) OSS はカスタマイズができ、また他人がカスタマイズしたものを利用することもできる。商用 ソフトウエアはそのような自由度はない
- (3) 商用ソフトウエアの方が完成度は高く、使い易い。マニュアルやチュートリアルも整備されていることが多い。ただし例外もある
- (4) 商用ソフトウエアはサポートが受けられるが、OSS にはそのようなものはない
- (5) 以上から、OSS は習得に時間がかかるが、商用 ソフトウエアは莫大な費用がかかる

本稿では、(1)の意味をさらに詳細に分析し、これ以外 の違いについて述べる。

#### 1. 価格差の実体

商用 CAE ソフトは、使用にあたって一般にかなり高額 な費用が必要になるが、ここにはライセンス使用料だけ ではなく、保守(バージョンアップ)費、サポート費、 そしてあまり意識されないが、営業・マーケティング活 動費がすべて含まれている。

たとえば、商用ソフトを新規に導入する場合、多くは ベンチマークテストを行ない、製品を導入することでど の程度のことが期待できるのか、あらかじめ定量的に把 握した上で決断する。この場合ベンチマークテストは通 常はベンダー側が行なう。時にこの作業は膨大な工数が 必要になるが、昨今はほとんどの場合、無償で行なわれ ている。

OSS の場合は、誰も無償ではやってくれないから、この調査を自分でやるか(工数が発生)、誰かに依頼しないといけない(費用が発生)。

また、多くの商用ベンダーはユーザー会をはじめ、各 種のセミナーを定期的に開催している。使用者にとって は、同業他社の活用事例が入手できる、有意義な場であ ると考えられるが、これも昨今ではほとんどの場合無償 で参加できる。

OSS の場合、そもそも使用者を統一的に管理している 機関が存在しないため、他の事例を入手すること自体が 困難であることが多い。 従って、ある商用ソフトウエアと OSS が、機能の上で ほぼ同等であるとしても、ユーザーの情報量には圧倒的 な差があり、同等の環境を構築しようとすると、相当な コストが必要となる。

逆にいえば、OSS を十分活用するためには、相応の予 算を確保するべきであると考える。

〔この点、リーズナブルなコストで有益な情報交換の場 を提供するオープン CAE 学会の存在価値がある。余談〕

#### 2. 製品の寿命

ソフトウエアには寿命がある。商用ソフトは以下の理 由により、長期間使い続けることが難しい(経験的には 20年が限度)。

- (1) 改良が限界に達し、後継製品を一から作り直す。
   新製品の方が機能は格段にすぐれているが、旧製品の機能をすべては引き継げない。
   例:STAR-CD ⇒ STAR-CCM+, SCRYU/Tetra ⇒ scFLOW, etc.
- (2) 開発会社の倒産または買収に伴う買収先の意向に より製品開発が止まる。

例: Flotran, FIDAP, CFDesign, etc.

開発会社がライセンス供給を停止すると、ユーザーは 使用することが不可能となる。仮に半永久的なライセン スを発行したとしても、開発の止まった製品は、OS の バージョンアップなどですぐに使えなくなる。

一方、OSS の場合、開発者が開発を止めたとしても、 手元にソースが残るから、自分が望む限りいつまでも使い続けることができる。機能の不足を感じたら、自分で 機能を追加すればよい。新 OS に対応していなければ、 対応するように修正すればよい。自分でできなくても、 どこかの開発会社に委託してやってもらう選択肢がある。

あるソフトウエア製品を、いつまで使うかという決定 権は、OSSの場合はユーザーが持っているが、商用ソフ トウエアの場合は開発会社が持っていて、ユーザーは持 っていないのである。

#### 3. 結論

OSS と商用ソフトウエアは、競合するものではなく、 異なる特徴を持ち、互いの欠点を補完しながら、その世 界を拡げていくべきものである。両者をうまく活用しな がら、CAE そのものがますます発展していくことを、筆 者は期待している。

### FrontISTR をベースとした車輪レール間動的転がり接触解析プログ ラムの開発と実用的な解析事例

林 雅江\*(鉄道総合技術研究所) 明(鉄道総合技術研究所) 相川 橋本 学(東京大学)

高垣 昌和(鉄道総合技術研究所) 峻(先端力学シミュレーション研究所) 殷 奥田 洋司 (東京大学)

Wheel/rail dynamic rolling contact analysis developed using FrontISTR and its practical applications

Masae HAYASHI\* (Railway Technical Research Institute) Akira AIKAWA (Railway Technical Research Institute) Gaku HASHIMOTO (The University of Tokyo)

Masakazu TAKAGAKI (Railway Technical Research Institute) Jun YIN (ASTOM)

Hiroshi OKUDA

(The University of Tokyo)

Key Words : FrontISTR, Parallel FEM, Strucutural Analysis, Wheel/Rail, Rolling Contact

#### はじめに 1

車輪フラットやレールの波状摩耗など、鉄道システム の車輪・レール間で生じる接触挙動や衝撃荷重に起因す る劣化現象の発生メカニズム解明に向け、「FrontISTR」 をベースに、鉄道車輪の転動現象が再現可能となるよう 解析機能を拡充した車輪・レール間転がり接触解析プロ グラムを開発した<sup>(1)</sup>. 車輪レール間の接触では十数 mm 程度の楕円領域に数百 MPa の大きな接触力が集中する ため、走行状態下で実験的にその接触挙動を測定するこ とは非常に困難である.本解析プログラムでは、軌道条 件の違いによる接触面での力学現象の変化や、レールや 車輪に種々の不整(凹凸)が存在する場合の動的接触挙 動に対する影響などを捉えることが可能である.本稿で は、その適用例の一つとして、 車輪が滑走したときに車 輪踏面に生じる摩耗である車輪フラットをモデル化し, 接触挙動に対する影響を評価した.



図 1 車輪フラット

#### 車輪フラットのモデル化 2.

解析モデルは図2左で示す一軸一輪の車輪モデルとレ ールモデルで構成される.このモデルでは、車輪はフラ ンジ部の無いディスク状に、レールは断面形状を矩形に、 それぞれ単純化している.メッシュは全て8節点6面体 要素で構成される.材料定数には新幹線車両の車軸と車 輪の鋼材および 60kg レール用鋼材の値を用いている.車 輪フラットのモデル化として、車輪踏面の一部に長さ 48mmの平らな部分を与える(図2右). レール下面は完 全拘束とし, 車軸半断面にはまくらぎ方向(車軸方向) 変位拘束の下,輪重 50kN と 1.94kNm のトルクを負荷す る. トルクー定の下, 車輪の転動は加速される. なお, この一連の加速運動を模擬するには非常に長いレールモ デルが必要だが、本計算には著者らが開発したキャタピ ラメッシュ機能(1)を利用しており、一定長さのレールメ ッシュ複数本分で再現される.



図 2 車輪フラットの解析モデル

#### 3. 解析結果

図3に車軸中心節点の並進方向速度の時刻暦結果とそ れに伴う鉛直方向変位を示す. 鋭いピークが立っている 箇所は車輪フラットがレールに接触した瞬間である.速 度上昇に伴い、ピークの間隔が狭くなると同時に、振幅 も小さくなる. この変動傾向は定性的に確かめられてい る.



### 図 3 車軸中心の鉛直方向変位と並進方向速度

### まとめ

フラット等の不整による接触挙動への影響が本プログ ラムによって評価可能であることを確認した. 今後は実 形状を用いた解析を進め、接触力等の定量的な評価を行 い、通過速度に対し、車輪フラットが車輪・レールに与 える影響の評価をすすめる.

### 参考文献

(1) 坂井宏隆, 高垣昌和, 林雅江, 相川明, 奥田洋司, 股峻,大規模並列計算による車輪/レール間の転がり接 触挙動の解析,鉄道総研報告,第27巻,第10号, pp.29-34, 2013.

### Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析

三浦 純哉\*(東洋大学理工学部機械工学科)藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科)

### Analytical Simulation of Thermal Fatigue Test using Salome-Meca

### Junya MIURA\* (Toyo University)

Terutaka FUJIOKA (Toyo University)

Key Words : Thermal fatigue damage, Analytical simulation, Thermal transient analysis, Equivalent stress range

### 1. 緒言

高温で使用される機械部品において、熱疲労による損 傷が頻発していることから、その評価は重要である.し かし、熱応力に関する疲労評価は手順が煩雑であり<sup>(1)</sup>, しかも実験的に高応力を発生させることが難しいため、 V&V (検証と妥当性確認)データや事例は少ない.本研 究では、Salome-Meca<sup>(2)</sup>を用いて過去に実施された熱疲労 試験<sup>(3)</sup>の再現解析を行い、試験での温度計測結果や、商 用ソフトである MSC.Marc<sup>(4)</sup>を用いて同じ条件下で実施 した解析結果と比較することで精度検証を行った.

### 2. 試験概要

再現解析の対象は、1989年に日本原子力研究開発機構 で実施された熱疲労試験<sup>(3)</sup>である.この試験は、TTS(構 造物熱過渡強度試験施設)においてSUS304厚肉円筒試験 体に高温と低温の液体金属ナトリウムを交互に流し込む ことで、熱応力の繰返しによる熱疲労現象を再現した試 験である.試験では、流量100リットル毎分の液体ナト リウム高速流により、温度600℃で40分の急熱と温度 300℃で10分の急冷の繰返しが2000回行われた.また、 試験中のデータとして試験体内部を流れるナトリウム温 度,試験体外面のいくつかの点の温度が計測された.

#### 3. 有限要素解析手順

Salome-Meca 2015.1 (Code Aster Ver. 11.7) を用いて,上 記試験を再現した.物性値は試験の報告書と同様にし, SUS304 の厚肉円筒試験体の軸対称モデル (最小肉厚 3.5mm,最大肉厚 30mm)を作成し,非定常熱伝導解析と その結果を使用した弾性応力解析を行った.熱過渡条件 として試験で計測された液体ナトリウム温度を再現し, 外表面は断熱と仮定した.応力解析の境界条件として, 最大肉厚部コーナーの軸方向の変位を0に設定した.

#### 4. 有限要素解析結果

### 4.1 非定常熱伝導解析

Salome-Meca での解析結果と試験での温度計測結果の 比較(急熱時)を図1に示す.厚肉部は温度追従が遅く, 薄肉部は温度追従が速いことが分かる.

### 4.2 弾性応力解析

非定常熱伝導解析で得られた温度分布を用いて熱応力 を計算した. Salome-Meca と MSC.Marc<sup>™</sup>において内表 面での最大応力範囲の計算結果を比較すると,最大応力 の発生する厚肉部ではほぼ一致した.



Fig. 1 Temperature changes at measured points



Z coordinates of the inner surface (mm)



### 5. き裂の発生状況との照合

試験で観測されたき裂の数と Salome-Meca での解析結 果から計算されたミーゼスの最大応力範囲の関係を図 2 に示す.最大応力範囲の大きい厚肉部では,深いき裂が 観測された.

### 6. 結言

日本原子力研究開発機構で実施された繰返し熱過渡試 験の再現解析による精度検証を行った.ミーゼスの最大 応力範囲を計算すると,厚肉部において,2つの解析ソ フトで近い値が得られた.試験でのき裂の発生状況は, 解析結果とよく一致した.

- (1) ASME, B&PVcode, sec. III, (2014).
- Code Aster, http://www.code-aster.org, (accessed 2016-11-16).
- (3) 石崎公人, SUS304 鋼の熱疲労試験, JAEA, PNC-TN9410 89-101, pp. 1-112, (1989).
- (4) MSC Software, http://www.mscsoftware.com/, (accessed 2016-11-16).

### OpenFOAM による固液相変化シミュレーションの検証

西田樹生\*(富山県立大学)

中川慎二(富山県立大学)

Validation of solidificationMeltingSource of OpenFOAM

Tatsuki NISHIDA \* (Toyama Prefectural Univ.)

Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural Univ.)

Key Words : solidificationMeltingSource, phase chage, OpenFOAM, CFD, heat-transfer

### 1. はじめに

OpenFOAM 2.4.0 で fvOptions の type の一つとして solidificationMeltingSource が追加された. Voller<sup>(1)</sup>らの方 法に基づき,流体中の固体領域の存在を気孔率と圧力損 失の関係を使い運動量式のソース項で表現する.さらに, 相変化に伴うエネルギをエンタルピ式のソース項に加え るとともに,相変化量と固液分率を算出する.

この相変化計算機能の使用例は、OpenFOAM 付属の例 題に含まれない. そのため、ユーザーにより提供された 例題<sup>(2)</sup>が存在する.しかし、計算結果の妥当性について は十分検証されていない.

本研究は、相変化計算機能を使う検証用例題を作成す ることを目的とする.理論解が得られる単純な系を計算 対象とし、計算結果と理論解とを比較する.

### 2. 検証モデルとシミュレーション方法

2.1 理論モデル 対流のない相変化を伴う1次元非定常 熱伝導を考える.図1に領域を示す.壁面に接した無限 に広い領域に相変化物質が存在する.壁面温度 Tw は一 定に保たれる.初期状態では,相変化物質の温度は融点 Tm とする.凝固試験では Tw<Tm,融解試験では Tw> Tm とする.壁面温度と融点との温度差によって壁面から相変化が始まり,その相変化界面は壁面から離れた位 置へと移動する.壁面から相変化界面までの距離 ξ は解 析的<sup>(3)</sup>に求められる.

2.2 シミュレーション方法 対流のない 2 次元領域を考 える.計算領域の広さ(壁面垂直方向)は,計算時間内 に生じる相変化領域の 4 倍とした.

**OpenFOAM 3.0.0** の buoyantPimpleFoam ソルバを用いた. 相変化物質として水(氷)を使用した. このソルバでは, 流体の物性値を thermophysicalProperties ディクショナリで設定する.

相変化を扱う solidificationMeltingSource を利用するため, fvOptions ファイルに,固体と相変化に関わる物性値(融点温度,潜熱,体膨張係数,参照密度)を与えた.

#### 3. 結果と考察

図2に融解試験での相変化界面位置の時間変化を示す. 理論解と数値解の差がほとんどないことが分かる.

図3に凝固試験での相変化界面位置の時間変化を示す. case1は、融解時と同様に、氷と水の物性値を使用した場合、case2は両設定ファイルに氷の物性値を与えた場合である.solidificationMeltingSourceでは、生成項を追加する形で使用するため、計算領域全体のエネルギ式では流体の物性が使われる.そのため、凝固試験ではこのような 差が生じた.本モデルのような計算には,このままの形 で使用できないことがわかる.これは,この機能が多孔 状の固相を想定してつくられているためである.

### 4. 結言

OpenFOAM の相変化機能を確認する例題を作成し,適 用範囲に注意が必要であることを確認した.

- V.R. Voller and C. Prakash (1987), Int. J. Heat Mass Transfer 30(8), 1709-1719.
- (2) http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/16
   6839-tutorial-functional-case-solidificationmeltingsource
   .html
- (3) 西川兼康ほか (1991), 伝熱学, 理工学社, 71-76.



Fig. 2 Time history of interface  $\xi$  (Melting)



Fig. 3 Time history of interface  $\xi$  (Solidification)

### オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた 膝関節半月板内における応力分布の数値的検討

市島泰人\*(東洋大学理工学部) 新藤康弘(東洋大学理工学部) 藤岡照高(東洋大学理工学部)

FEM analysis of contact pressure distributions inside knee by using the open source CAE software Salome-Meca

Yasuhito ICHISHIMA\* (Toyo University) Yasuhiro SHINDO (Toyo University) Terutaka FUJIOKA (Toyo University)

Key Words : Open source CAE, Human knee joint, Meniscus, Contact analysis, Code\_Aster

### 1. はじめに

医療診断装置の発達により,複雑な形状である人骨な どの3次元モデルの作成が容易となった.これにより整 形外科分野などで,力学的観点からの病因の究明や,イ ンプラントなどの耐久性に関する構造解析が行われてい る<sup>(1)</sup>.将来的には,解析結果をカラーコンター図で表示 できるので,患者への説明性の向上などに活用されるツ ールの1つになると考える.しかし,病院での利用には, コスト面や,有限要素法ソフトを使用するには,工学的 知識が必要とされることから難しいと考える.そこで, 本研究では低コスト導入可能なオープンソース CAE ソ フト Salome-Meca<sup>(2)</sup>の活用を提案する.

本研究は, Salome-Meca を用いて人骨などの複雑形状 モデルの接触解析の有用性を評価する.基礎検討として, 簡易膝関節モデルを作成し, Salome-Meca を用いて,立位 時における接触を伴う非線形解析を行い,半月板内にお ける応力分布図の数値的検討を行う.

#### 2. 解析方法

簡易膝関節モデルは,膝関節模型を基に3次元CADソフトを用いて作成した<sup>(3)</sup>.本モデルは大腿骨,脛骨,半月板,内側側副靭帯(MCL),外側側副靭帯(LCL)によって構成される.大腿骨長さ150mm,脛骨長さ150mmの範囲を簡易モデル化し,半月板は長軸80mm,短軸60mm,高さ6mmの楕円柱を基に作成した.Fig.1に本研究で用いた簡易モデルを示す.

荷重条件として, 脛骨下端断面を完全拘束し, 大腿骨 上面に 30kgf の荷重を負荷した解析を行った. 荷重制御 では, 剛体移動が発生するため, 大腿骨上面に変位制御 を用いて解析を行った. Fig.2 に境界条件を示す.

Master:半月板, Slave:大腿骨とし, Eficas 編集時にコマ ンド DEFI\_CONTACT で PENALISATION を選択し, ペ ナルティ法を用いて, 大腿骨骨頭と半月板表面に接触を 定義し, 関節面の接触を再現した.

#### 3. 結果と考察

Fig.3 に膝関節の応力分布図を示す.外側側副靭帯 (LCL)に高い応力集中が見られた.半月板に関しては, カラーコンター図に示す両端の白い部分に高い圧縮応力 が見られた.特に外側半月板に高い応力集中が確認でき た.本解析結果から,実際の膝関節内部においても,半 月板内部に局所的な応力集中が発生することが予想され る.また,オープンソース CAE ソフトを用いた,関節内 応力の可視化により計画治療の一助になると考えられる。



Fig. 1 Knee joint CADmodel Fig. 2 Boundary conditions



Fig. 3 Compressive Stress of Y-Axis

4. おわりに

Salome-Meca を用いて、各組織を、変形体解析かける ことにより、各組織を数値的に検討することができた. 今後、3次元立体スキャナを用いて、膝関節模型から型取 りしたより複雑なモデルで解析を行い、Salome-Meca の 有用性を確認していく.

- Y. Fukuda *et. al*, : Impact load transmission of the knee joint-influence of leg alignment and the role of meniscus and articular cartilage, Clinical Biomechanics 17, pp516-521,(2000).
- (2) http://www.code-aster.org (accessed 2016-11-17)
- (3) 新藤康弘,市島泰人,藤岡照高:大腿脛骨角が関節内応力 に及ぼす影響についての数値的検討,日本設計工学会2016 年度秋季大会講演論文集,pp.185-186,(2016).

### 津波によるコンビナート地域における タンクからの重油流出予測

渡邊健太\*(大阪大学) 高木洋平(大阪大学大学院) 加藤直三 (産業防災研究所) ワイピョーキョウ(大阪大学大学院) 岡野泰則(大阪大学大学院)

Prediction of oil spill from a tank on industrial complex area triggered from tsunami

Kenta WATANABE\* (Osaka univ.) Youhei TAKAGI (Osaka univ.) Naomi KATO (idp lab.) Wai Phyo KYAW (Osaka univ.) Yasunori OKANO (Osaka univ.)

Key Words : Tsunami simulation, Multiphase Flow, OpenFOAM

### 1. 緒言

近い将来,南海トラフ沖大地震,及びそれに伴う津波 の発生が予想されており,大阪湾のような化学工場が林 立するコンビナート地域では,重油タンクからの油流出 が懸念される.消防庁が提案している,タンクにかかる 流体力の推算式<sup>(1)</sup>を用いると,大阪北港では延べ 27,227 kL の重油が流出すると想定されている<sup>(2)</sup>.しかし,2011 年の東日本大震災に伴う重油流出事故では消防庁の推算 式及び流出判断基準が適切でないケースも多く見られた. 本研究では津波水槽実験とシミュレーションで従来の推 算式の妥当性を検証し,津波によるタンクからの重油流 出予測につながる流体解析技術の構築を目的とする.

### 2. 手法

図1に本研究での実験の概略を示す.タンクは内径 D =0.1 m,高さH=0.1 mの大きさで容量は0.785 L であり, 実タンクの100分の1の大きさであり,防油堤の有無も 検討する(図2).タンクから0.8 mの地点(水と陸の境界 付近)に電磁流速計を,タンクの下にロードセルを設置 することにより津波の流速とタンクに作用する水平方向 の流体力を測定した.一方,数値解析は実験と同様の解 析モデルを設定し,OpenFOAM 4.0の多相流解析ソルバ 一である multiphaseInterFoamを用い,3次元計算を実行し た.メッシュはタンク周り及び陸面において snappyHexMeshを用いて形状を再現し,その他の遠方領 域は blockMesh でヘキサメッシュを作成し,総格子点数 は317,362になった.乱流モデルを用いずに,層流モデル で計算を行った.

### 3. 結果

図3にシミュレーション及び実験における, 津波流速の時系列を, 図4にタンクに働く水平方向流体力の時系列を(a)防油堤なし, (b)防油堤ありの場合に分けて示す. 流速は第1波到達時に0.8 m/s で最大となり第2波以降は減衰して実験と同じ傾向を示した.水平方向の流体力は, 実験に比べて, ピーク付近で防油堤なしのときで約1.5 倍, ありのときで約2.0~3.0倍の過大評価となった. 実 験値では防油堤の設置により水平方向流体力の減少が見られたが, シミュレーション値では, その違いは微小な ものであった.



#### 4. 結言

100分の1スケールの津波水槽実験に対応する津波シミ ュレーションを OpenFOAM の多相流ソルバーを用いて 行い,津波の周期的運動を数値的に再現した.今後は乱 流モデルや格子解像度の影響を検証する予定である.

#### 引用文献

(1)消防庁,屋外貯蔵タンクに作用する津波波力の算出方法 (2011).

(2)大阪府石油コンビナート等防災本部,地震津波被害想 定等検討部会報告(第一次)(2014).

### OpenFOAM による低回転ボルテックス水車容器内の気液二相流解析

清水貴昭\*(富山県立大学) 飴谷功佑(富山県立大学) 伊藤宗康(川端鐵工) 中川慎二(富山県立大学) 上坂博亨(富山国際大学) 佐藤弘規(川端鐵工)

CFD simulation of gas-liquid two-phase flow in a low rotation vortex turbine vessel using OpenFOAM

Takaaki SHIMIZU \* (Toyama Prefectural Univ.) Kousuke AMETANI (Toyama Prefectural Univ.) Muneyasu ITOU (KAWABATA) Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural Univ.) Hiroyuki UESAKA (Toyama Univ of International Studies) Hiroki SATO (KAWABATA)

Key Words : Waterwheel, small hydroelectric generation, CFD, OpenFOAM, interFoam

### 1. 緒言

広く水力発電を普及するためには、様々な条件に適し た水車の開発が求められている.小水力発電に適した安 価な水車の1つとして、低回転ボルテックス水車(たら い式水車)が開発され、すでにいくつかの実用例がある. しかし、水車内部の流動についての十分な知見が得られ ておらず、効率向上のための研究が望まれている.

本研究は, OpenFOAM を使用し,たらい式水車内の気 液混相流を対象とした数値シミュレーションを実施する. 数値予測精度の検証するため,水車翼を設定しない状態 で,水車容器(たらい部)での水面形状や速度分布を再 現し,実験結果と比較した.

### 2. シミュレーション方法

2.1 解析対象および解析モデル 図1にたらい式水車の 解析モデルを示す.たらい部は直径1000 mm,高さ550 mmで、φ154 mmの流入口から水が流入し、たらい底面 中央のφ216 mmの穴から流出する.たらい上部にオー バーフロー流路を設置する.snappyHexMeshを使用し、約234 万のメッシュを作成した.

2.2 シミュレーション方法 OpenFOAM 2.4.0 の interFoam ソルバを使用した.基礎式は,連続の式,およ び,表面張力項に CSF(Continuous Surface Force)モデル<sup>(1)</sup> を採用したナビエストークス方程式である.VOF 法によ り水および空気の流れを扱う.乱流モデルとして,k-ω SST 乱流モデルを採用し,壁面では壁関数を用いた.

### 3. 結果と考察

たらい部内での水面形状を図 2 に示す. 液面の色は, 水面上での速度の大きさを表す. 流入口から流れ込む部 分で水位が高く,壁面に沿いながら流れている. 中央の 流出口に向かい水面が低下する.

水位および速度分布を実験と比較した.詳細について は,発表時に説明する.

#### 4. 結言

たらい式水車内での気液混相流を OpenFOAM により

解析し,実験と比較した.定量的な差異があり,数値モ デルを改善していく必要がある.

### 参考文献

 $(1) \quad J.U.Brackbill, et al. A \ vontinuum \ method \ for \ modeling$ 

surface tension.J.Comp.Phys.,100(2),pp335~354.1992 謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15K00643 の助成を受け たものです.



Fig. 1 Simulation model



Fig. 2 Water surface and velocity magnitude

### モデルベースデザイン委員会の紹介と OpenModelicaを用いた熱回路網構築について

西 剛伺\*(オープン CAE 学会モデルベースデザイン委員会)

Introduction of Model Based Design Committee and Thermal Network Creation with OpenModelica

### Koji NISHI\* (The Open CAE Society of Japan, Model Based Design Committee)

Key Words : Model Based Design, Modelica, OpenModelica, Modelica Standard Library, Thermal Network

### 1. はじめに

オープン CAE 学会モデルベースデザイン委員会では, Modelica 言語<sup>(1)</sup>をベースとするオープンソースソフトウ ェアを活用したシミュレーション技術について調査及び 普及活動を推進している.本稿では,モデルベースデザ イン 委 員 会 と オー プン ソース ソフト ウェア OpenModelica<sup>(2)</sup>について紹介し,活用事例の1つとして, OpenModelica を用いた熱回路網構築事例について説明 する.

### 2. モデルベースデザイン委員会

モデルベースデザイン委員会は、本年度からオープン CAE 学会に設置された委員会で、複数の物理ドメインを モデルとして定義し、連成させて解くモデルベースデザ インの、オープンソースソフトウェアによる普及推進活 動を実施している.

### 3. OpenModelica と熱回路網構築事例

3.1 OpenModelica OpenModelica は、Modelica 言語を ベースとしたオープンソースソフトウェアで、GUI 環境 でモデルを作成し、シミュレーションを実行することが できるツールである.

OpenModelica には、様々な物理ドメインの問題をモデル化するための基本的なコンポーネント群を提供する Modelica Standard Library<sup>(3)</sup>が同梱されている.そのため、 基礎的な物理問題については、上記のコンポーネントを 組み合わせて、簡単にモデルを作成することができる.

3.2 熱回路網構築事例 Modelica 言語は, クラスの概念 を取り入れており, Modelica Standard Library 等のライブ ラリにない機能, アルゴリズムについても, 比較的容易 に作成することができる.本発表では, マイクロプロセ ッサシステムの熱回路網<sup>(4)</sup>を OpenModelica上でフーリエ 級数による解析解等を用いて実装した事例を報告する.

### 4. まとめ

モデルベースデザイン委員会, OpenModelica とそれを 用いた熱回路網の実装事例について紹介した.モデルベ ースデザイン委員会では、学会主催のトレーニングや講 演会での発表を通じて、活動を継続推進していく予定で ある.

- Modelica® A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Language Specification, Version 3.3 Revision 1, Modelica Association (2014).
- OpenModelica User's Guide, Release v1.9.6, Open Source Modelica Consortium (2016).
- (3) Modelica Standard Library Version 3.2.1 (Build 4), The Modelica Association, <u>http://doc.modelica.org/help/Modelica.html</u> (accessed 2016-11-16).
- (4) K. Nishi, T. Hatakeyama, S. Nakagawa and M. Ishizuka, "Transient Thermal Analysis of The Microprocessor System One-Dimensional Thermal Network with Power Estimation Equation", ITherm2014 (2014).



Fig. 1 Thermal Network of A Microprocessor System<sup>(4)</sup>



### Modelica Standard LibraryのExamples調査活動の紹介

 西 剛伺 (オープン CAE 学会モデルベースデザ イン委員会)
 福江 高志 (岩手大学)

酒井 秀久 (オープン CAE 学会モデルベースデザ イン委員会)

### Introduction of the investigative action about Examples of Modelica Standard Library

Shigenori UEDA \* (ISID Engineering, Ltd.)

Hidehisa SAKAI (The Open CAE Society of Japan, Model Base Design Committee) Koji NISHI (The Open CAE Society of Japan, Model Base Design Committee) Takashi FUKUE (Iwate University)

Key Words : MBD,1D CAE,OpenModelica,Modelica Standard Library,Model Based Design Commitee

### 1. はじめに

1.1 本活動の背景 モデルベースデザインの隆盛に応 じてオープンソース 1D CAE ツール OpenModelica 及びモ デリング言語 Modelica の需要が高まっている. Modelica には様々な物理現象に応じたコンポーネントが Modelica Standard Library (以下, MSL) として用意さ れており,それらを利用することで多くの物理モデルを 簡便に作成することができる. MSL には利用例としてへ ルプ付きの多くの Examples が用意されており,学習のき っかけとして非常に有用である.しかし,英語を苦手と する初学者にとってはやや難解な部分がある.

そこでモデルベースデザイン委員会では,初学者や1D CAE を検討しているエンジニアの一助となるよう Examples について、日本語の解説資料を作成している. 1.2 MSLの概要 MSLはThe Modelica License2<sup>(2)</sup>に基 づいて modelica 協会により開発や保守がなされており, オープンソースかつ複製、改変や商用利用が可能である などの特徴がある. OpenModelica 1.9.6 に同梱される 3.2.1 では 1360 のモデル, 1280 の関数群が用意され, 表 1に示すように基本的な関数から流体解析や機構解析に 用いるライブラリがある. 各ライブラリには, 値の測定 を表す Sensors, ブロック同士が受け渡す物理量などを 規定する Interfaces, 境界条件を定義する Sources など のパッケージがある. これらのパッケージを利用して特 定の現象を解析した例が Examples であり, 300 以上にお よぶ数が存在する. Examples を参考に物理現象のモデリ ング方法や各ブロックの使い方などを学ぶことができ ろ

Table. 1 Parts of MSL content

名称	概要
Blocks	様々な入出力を表す部品
Math	共通の数学関数部品
Thermal	熱の移動現象に関わる部品
Fluid	1 次元流体解析部品
Mechanics	1次元及び3次元機構解析部品
Electrical	電子回路などの制御解析部品

2. 活動内容

本活動では、委員会メンバーが各々関心の高い個別の Examples に対して解説を行っている.主な使用ツールは OpenModelica であり、初学者も同様の環境で資料の内容 を確認することが出来る.解説資料は解析対象の概要, 各ブロックの相関関係、設定パラメータ、解析結果を中 心にまとめており、理論解との比較や各ブロックの計算 式について詳述しているものもある.これらの資料は SlideShare にアップロードされており、オープンな状態 で公開されている.資料の内容はオープン CAE 勉強会な どで定期的に報告し、精力的に活動を行っている.

3. まとめ

3.1 成果 本活動によって様々な Examples の解説資料 が作成されている(参考例<sup>(3)</sup>など).また,委員会メンバ ーが自ら Examples を検証し,勉強会で報告を行うことに より不明瞭な部分が明確になり,知見の共有やモデル作 成のヒントとなっている.

3.2 今後の活動 モデルベースデザインに関わるエン ジニアに向けて、今後も活動を継続していく.参加者は 随時受け付けており、一緒に活動していただけると幸い である.

#### 参考文献

(1) Modelica Standard Library - Version 3.2.1 (Build
4) , Modelica and the Modelica Association (2015-11-02).

http://doc.modelica.org/help/Modelica.html
(accessed 2016-11-07).

- (2) Modelica License Version 2, Modelica and the Modelica Association (2008-10-19). https://www.modelica.org/licenses/ModelicaLice nse2 (accessed 2016-11-07).
- (3) Modelica. thermal. heattransfer. examples. motor20 160907, Koji Nishi(2016-09-06). http://www.slideshare.net/KojiNishi1/modelicat hermalheattransferexamplesmotor20160907 (access ed 2016-11-07).

### Modelica Standard LibraryのMedia パッケージの使い方

田中 周\* (アマネ流研)

### How to use Media Packages in the Modelica Standard Library

### Amane TANAKA\* (Amane Fluid Laboratory)

Key Words : Modelica Standard Library, OpenModelica, Modelica, Model Based Design, MDB

### 1. はじめに

1.1 概要 Modelica Standard Library (MSL)の Media ラ イブラリには、流体の物性に関するパッケージ (Media パッケージ)が、数多く含まれている.また、熱流体現 象を扱う MSL の Fluid ライブラリでは、大多数のモデル で Media パッケージが使用されている.すなわち、Fluid ライブラリを参考にして熱流体現象のモデル化を行う場 合は、その前提として Media パッケージに関する知見が 必要とされる.筆者にとって、これは熱流体現象のモデ ル化を困難にするハードルとなっていた. Media パッケ ージは、Modelica 言語の特徴を活かした特殊な構造とな っている.本報告では、Media ライブラリの調査して得 られた Media パッケージを使用する上で最小限度必要な 事柄を、筆者なりにまとめて紹介する.

### 2. 調査内容

2.1 Modelica のクラスの概要 MSL など Modelica 言語 によるライブラリは, class, package, record, connector, mode, block, function, type などのキーワードによって 宣言される要素で構成される.これらは、それぞれ異な る特徴や目的を持つが, Modelica 言語では全てクラスと 呼ばれる概念で表現される.そして,これらのクラスは, 継承やインポート、ローカルクラスの宣言などの方法に よって,拡張したり相互参照したりすることができる. Media パッケージは, package として宣言され, 他のクラ スのローカルパッケージとして参照されることが多い. 2.2 Media ライブラリの概要 MSL の Media ライブラ リは,空気,水,純物質と混合物の理想気体,2相流体, 一般的な非圧縮性流体,圧縮性液体などに関する Media パッケージ集めたものである. これらのパッケージは, 抽象的な物質に関するベースパッケージ PartialMedium を継承することによって作られている. PartialMedium に は,(1)物質名などの情報の定数,(2)様々な物性値の型, (3) 熱力学的状態を表す ThermodynamicState レコード, (4) 基本的な物性値間の関係を表す BaseProperties モデル, (5) 熱力学的状態や粘性率,熱伝導率などを求めるため の関数,などの構成要素の雛形が含まれている.個々の 物質に関する Media パッケージは、これらの構成要素を

実装し直すことによって作られるため,基本的には PartialMedium と同じような構成となる.

2.3 Media パッケージの使い方 Media パッケージの最 も基本的な使い方は, ThermodynamicState レコードを利 用する方法と, BaseProperties モデルを利用する方法であ ろう.前者では, ThermodynamicState レコードを1つの 熱力学的状態を表す変数として定義し, これを引数とす る物性値関数を使用して他の状態変数や粘性率などの物 理量を得る.後者では, BaseProperties モデルに含まれる 物理変数間の関係式と質量保存則やエネルギー保存則を 連立させて物体のモデル化を行う.講演では簡単な例を 示す.

### 3. まとめ

**3.1 成果** 本調査により、Modelica Standard Library の Media パッケージに関する概略的知見が得られ、簡単 な使用方法を明らかにすることができた.

**3.2 今後の方針** 今後は, 個々の物質の物理的モデルの 調査や, Fluid ライブラリの調査を行いたいと考えている.

- Modelica Association. Modelica Standard Library -Version 3.2.1 (Build 4). 2015-11-02. http://doc.modelica.org/help/Modelica.html.
- Peter Fritzson 著. 大畠・広野訳. Modelica によるシ ステムシミュレーション入門. TechShare 株式会社, 2015,198p.
- (3) Peter Fritzson. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3:a cyber-physical approach. Wiley,2015
- (4) Michael M.Tiller 著. 古田・杉木・トヨタテクノサービス訳. Modelica による物理モデリング入門. オーム社,2003,353p

### Large-scale Analysis of ADVENTURE System on the K Computer

Zheng Hongjie\* (Toyo University)

Shioya Ryuji (Toyo University)

Key Words: Hierarchical Domain Decomposition Method, Supercomputing, ADVENTURE System

### 1. Introduction

We have been developing an advanced general-purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design named ADNVENTURE from 1997. The ADVENTURE system<sup>(1)</sup> can analyze a three dimensional finite element model of arbitrary shape over 100 million Degrees Of Freedom (DOF) mesh on massive parallel computers like a large-scale PC cluster or a super computer.

Today the ADVENTURE system has over 20 modules for user to download free. Due to its excellent performance in solving ultra-large scale mechanics problems together with its open source strategy, the ADVENTURE system is now being used by a variety of industrial and academic groups. Recently LexADV libraries<sup>(2)</sup> for ADVENTURE system are extended to pre and post processing parts including solver library and visualization of large scale data.

### 2. ADVENTURE System on the K Computer

The ADVENTURE system features several modules for the solid analysis, thermal analysis, fluid flow problems and magnetic problems, and so on. Owing to the standardized I/O format and libraries, modules are easily integrated in several ways. The ADVENTURE system has been successfully installed in various types environments, not only single PCs, but also the latest supercomputers. We have installed several modules on the K computer for large-scale simulations.

To install the ADVENTURE system, it is necessary to install the ADVENTURE\_IO first. The ADVENTURE\_IO is a common input/output library supporting the data format, which is used by all modules of the ADVENTURE system. For simply on the K computer, user can compile the ADVENTURE\_IO by configure script automatically using the interactive job mode.

The ADVENTURE system uses Hierarchical Decomposition Domain Method (HDDM) to provide parallel processing of analysis data. An entire-type model is decomposed in two steps by the ADVENTURE\_Metis module. Using the new version of ADVENTURE\_Metis Ver.2<sup>(3)</sup>, user can refine the original mesh easily and efficiently to get larger size of mesh data. Furthermore the ADVENTURE\_Metis Ver.2 can remain the boundary conditions when refines the meshes. We have created the larger size of meshes to test the parallel performance by using the refine function of the ADVENTURE\_Metis. Fig.1 and Fig.2 show the parallel performance of ADVENTURE\_Solid module and ADVENTURE\_Thermal module on the K computer, respectively. These results showed that the two codes can be effectively used on the K computer for large scale computing.



Fig.1 Strong scaling of ADVENTURE\_Solid



Fig.2 Strong scaling of ADVENTURE\_Thermal References

- ADVENTURE Project, http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/.
- (2) LexADV Library, http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/.
- (3) Kohei Murotani, Shin-ichiro Sugimoto, Hiroshi Kawai, and Shinobu Yoshimura, "The Hierarchical Domain Decomposition Pre-processing Module with the Parallel Mesh Refinement Function without Communication", The 20th International Meshing Roundtable, CD-ROM, Paris, France, October 23-26, 2011.

### Acknowledgements

This research is financially supported by one of Japan Science and Technology (JST), CREST projects named "Development of Numerical Library Based on Hierarchical Domain Decomposition for Postpeta Scale Simulation". This research was supported in part by the results of the HPCI Systems Research Projects (Project ID is hp150189).



### CMake を用いた Front ISTR のビルドプロセス改良の試み Front ISTR v5.0 にむけて

### 小川 道夫\*(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

### An attempt to improve building process of FrontISTR with CMake Towards releasing FrontISTR v5.0

### Michio Ogawa \* (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

### Key Words : FrontISTR, CMake, FEM, Compile, Multi-platform

### 1. はじめに

FrontISTR はオープンソースで提供される並列 FEM 構 造解析プログラムである.「京」や「地球シミュレータ」 での大規模解析の実績がある一方,パーソナルコンピュ ータでも実行可能である点が特徴である.

現在, FrontISTR は FrontISTR 研究会で次期バージョン v5.0 に向けて開発が行われている.

### 2. FrontISTR の普及に向けて

FrontISTR の普及に向けて FrontISTR 研究会では, 定期 的にチュートリアルやハンズオン, プログラム解説, 事 例紹介を行いユーザ間の情報交流を行っている. ユーザ 提案のプリ・ポストソフトの発表などもあり, 利便性の 向上が図られ, ユーザ数も増加傾向にある.

ユーザ数の拡大に伴い, FrontISTR を自らコンパイル し利用したいといった要望も多くなってきた. FrontISTR の構築を容易にし導入の利便性をはかるため,メタビル ドシステム CMake を FrontISTR へ適用し試行した.

### 3. CMake とは

CMake はクロスプラットフォームのメタビルドシス テムで, CMakeの文法に従い CMakeLists.txt (Fig.1) を記 述し, Make などのネイティブなビルドシステムのため の設定ファイル(Makefile など)を生成する.

ľ	****
	# Copyright (c) 2016 FrontISTR Forum, The University of Tokyo
	# This software is released under the MIT License, see License.txt
	cmake_minimum_required(VERSION 2.8.11)
	if(NOT WITH_PARACON)
	set(Fistr_MAIN_SRCS main/fistr_main.f90)
	else()
	set(Fistr_MAIN_SRCS main/fistr_main_contact.f90)
	endif()
	set(Fistr_SRCS
	lib/fstr_lczparm.f90
	lib/m_step.f90
	lib/m_Makrose.f90
	lib/m_MakrosePartMesh.f90

### Fig. 1 CMakeLists.txt

**3.1 コンパイル手順** CMake はプラットフォームやコ ンパイラに依存するコンパイルオプションや環境設定を 半自動的に行い Makefile を生成するため,導入手順が定 型的になる (Table 1).

UNIX 系の場合	Windows(MinGW)の場合
\$ cmake	\$ cmake -G "MSYS Makefiles"
\$ make	\$ make
\$ make install	\$ make install

Table 1 Procedure for compiling

また、オプションを指定する場合、GUI や CUI の設定ツ ールが付属するため、初めて FrontISTR を導入するユー ザにとって設定項目を把握することが容易になる(Fig. 2).



Fig. 2 CMake tools

**3.2 並行 make によるコンパイル時間の短縮** CMake で 生成した Makefile には,オブジェクトをコンパイルする 前にソースコードをスキャンし半自動的にコンパイル順 序を決定するルールが組み込まれる.

そのため、マルチコアを搭載した機械上では並行ビル ドを行うことができ、コンパイル時間の短縮が期待でき る. 従来の Makefile を直接編集する方法と、CMake によ り Makefile を生成し並行ビルドをしたコンパイル時間を Fig. 2 に示す.



Fig. 3 Compiling time of FrontISTR

並行 make 数が 1 の場合、従来方法よりもコンパイル 時間がかかるが,並行 make 数を増やすことにより,コ ンパイル時間が短縮されていることが分かる。

#### 4. まとめ

FrontISTR のコンパイルを容易にし、コンパイル時間を 短縮することができた.今後多くの環境での検証を行い、 FrontISTR の普及に役立てたい.

#### 参考文献

(1) FrontISTR 研究会

http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/ (2) CMake

https://www.cmake.org/

### Peridynamics による火山避難シェルターの噴石衝突の 安全性に関する基礎的検討

柴田良一\*(岐阜高専)

### Fundamental Study on Safety of Fire Erosion Collision of Fire-evacuated Shelter by Peridynamics

### Ryoichi SHIBATA \* (NIT, Gifu)

Key Words : Peridigm, Peridynamics, Fracture Analysis, Particle Model and Fire-evacuated Shelter

### 1. 研究目的

構造物の安全性を確保するために、従来は設計条件に おける強度仕様などを設定して、構造物の応力や変形な どの挙動が許容範囲内であることを確認してきた.しか しながら想定外の条件による破壊により、甚大な被害が もたらされる事実を踏まえて、構造物の最終的な破壊性 状を評価想定する事が求められている.

これに対して従来の連続体力学を基盤とする有限要素 解析では、破断や崩壊などの著しい非連続現象を分析す ることは困難であった.そこで粒子モデルによる破壊解 析理論として Peridynamics があり、支配方程式が積分形 式で作られるため、著しい非線形現象も連続体挙動と同 時に考慮することが可能である.

そこで本研究では、Peridynamicsの実装の1つである Peridigmを活用して、実用的な破壊解析を実現するため の解析システムを開発し、実践的な破壊現象を解明する 例題として、火山避難シェルターの粒子モデルによる破 壊解析の結果を報告する.

### 2. Peridigm による破壊解析

Sandia National Laboratory の Silling らによって提案された Peridynamics では、以下に示すような解析システムの実装があり、オープンソースとして公開され自由に使用可能なシステムがある.

・PDLAMMPS:分子動力学解析システムのLAMMPSの 粒子モデルの1つとして Peridynamics を実装しており, オープンソースとして公開されており,システムの構築 も容易であり手軽に破壊解析を実現できる.

・Peridigm:本理論の専用解析システムとして独自に開発されており、弾脆性や弾塑性や粘弾性などの様々な構造材料を表現する粒子モデルを備えている.Trilinos ライブラリを用いて高速な演算を実現する.

・EMU/Sierra:前者は研究専用で後者は実践的構造解析 用として開発され,有限要素法と連携して高度な解析機 能を実現しているが,輸出規制対象システムとなり現時 点では日本国内では利用できない.

### 3. Peridigm による破壊解析システム FRAXST の開発

実践的な専用解析システムの Peridigm では, 商用プリ ポストシステムの Cubit を用いて作成した Genesis 形式 を用いて,任意形状の粒子モデル配置が利用可能である. 本研究ではオープンソースのプリポストシステムの SALOME を用いて作成したメッシュ情報を変換して, Peridigm 用のメッシュデータを作成する支援システム の FRAXST (FRacture Analysis - eXtensible Support Tool:Fig.1参照)を開発している.

現在はメッシュ情報の変換機能のみを実装しているが, Peridigmによる破壊解析においては、粒子間力のモデル 化において単なる材料の物理特性だけではなく粒子間隔 が影響しており、微妙なパラメータ調節が必要になる. よって今後はパラメータの自動設定機能を目指して開発 を進めている.



Fig. 1 Configuration of FRAXST

### 4. 火山避難シェルターの解析結果

本研究では,鋼製の避難シェルターに対して粒子間に 弾塑性特性を設定することで,Fig.2に示す様に、実際の 被害状況と同様な破壊性状を再現することができ,この 時に噴石の飛来条件も推定することができた.



Fig. 2 Comparison of rupture properties

### 大学院講義への CalculiX 導入の取り組み

### 今井康貴(佐賀大学 海洋エネルギー研究センター)

### CalculiX Analysis in Lecture

### Yasutaka IMAI (Institute of Ocean Energy, Saga University)

### Key Words : CalculiX, FEM, gmsh, teaching

### 1. はじめに

ノート PC を活用することで拡がる数学および工学の 世界を紹介する講義を行っている。FORTRAN 言語や C 言語によるプログラム作成、高速フーリエ変換を用いた 実験データのノイズ除去、有限要素法などのトピックに ついてノート PC 演習を交えながら進行している。

講義の目的は、学部講義で学んだ知識を新たな視点から再確認すること、PCリテラシーの向上である。対象は 機械科大学院修士1年生および留学生の合計15人程度で ある。講義内容を表1に示す。90分講義を15回実施し、 テーマごとのプレゼンで評価する。

Table 1 Contents of lecture

トピック	内容
Cygwin	Linux コマンド復習
FORTRAN/C	テキストファイルの読み書き
	GPS 受診およびデータ処理
	Google Earth による GPS データマッピ
	ング
Maxima	微分方程式の数値解法
FFTW	フーリエ変換
CalculiX	片持ち梁の有限要素解析

### 2. CalculiX を用いた有限要素解析

学部の材料力学で学んだ荷重を受ける矩形断面片持ち 梁の変位を題材に取り上げ、同じ問題を有限要素法で解 析させる。粗い要素分割からはじめ、要素分割や形状関 数の変更により、変位が理論値に近づく様子を各自に確 認させる。

Windows 版 CalculiX は旧来 bConverged 版<sup>(1)</sup> のみであったが、近年 "CalculiX for Win"版<sup>(2)</sup> が作成され、2 種類が使用できるようになった (どちらもフリーで使用できる)。本講義では bConverged 版を使用している。

CalculiX はプリおよびポストプロセッサプログラム cgx と計算プログラム ccx から構成される。マニュアルの解 析手順は以下の通りである。

- 1. cgx プログラムで対話的に物体形状作成、要素分割、 拘束点設定、荷重設定を行い、その結果を計算入力 ファイルとして保存する。ファイル形式は Abaqus とほぼ同じである。
- ccx プログラムを実行して計算を行い、結果を保存 する。
- cgx プログラムで結果を表示する 講義をはじめた当初はこの手順で実施していたが、プ

リプロセッサ cgx はお世辞にも使い易いとは言えない ため、最近ではプリプロセッサに gmsh<sup>(3)</sup> を使用してい る。矩形断面の片持ち梁のような単純形状では手作業で 入力ファイルを作った方が早いが、そこは CAD ソフト と英語の勉強も兼ねて gmsh で行っている。







### 3. まとめ

外国人留学生が受講するため、初めから英語でマニュ アルが書かれているオープン CAE ソフトウェアを講義 で導入している。WEB にも英語情報が多数あるため (Youtube には動画もある)、自学するには問題が無い。 日本人学生には一部マニュアル翻訳を作成する必要があ り、それは研究室学生がカバーしている。

- CalculiX Windows (bConverged 版) ホームページ http://www.bconverged.com/products.php
- (2) CalculiX for Win ホームページ http://www.calculixforwin.com/
- (3) gmsh ホームページ http://gmsh.info/

### SfePy: Simple Finite Elements in Python の紹介

藤田 拓生\*(オープン CAE 勉強会@関東(構造など))

### Introduction of SfePy: Simple Finite Elements in Python

### Takuo FUJITA \* (Open CAE meeting@Kanto(structure))

Key Words : SfePy, PDE, FEM, Python, Robert Cimrman

### 1. SfePyとは

SfePy は一言でいうと, 偏微分方程式を有限要素法で 解く python モジュールであり, チェコ共和国の Robert Cimrman が中心のグループによって開発されている. 入 カファイルを python のディクショノリーとタプルで記 述し, 行列計算などの部分にはCと Fortranが使われてい る. 読み書きのしやすさ (python) とスピード (C, Fortran) に適する言語が採用されている.

物理現象は場(field)を支配する偏微分方程式 (partial differential equation, P.D.E.)によって記述 される(例→楕円型方程式,双曲型方程式,放物型方程式, 拡散方程式).これらの方程式は2階の偏微分方程式で, このまま(強形式のまま)解析的に厳密解を求めることが 難しいことが多い.そこで,1階の微分だけが含まれる式

(1次導関数の積分の形)(弱形式)に変形する.強形式で は解に2階微分可能であることが要求されるが,弱形式 では1階微分可能であればよいので,解きやすくなる.弱 形式の方程式は有限要素法によって近似解を求めること ができる.

現在,使用可能な有限要素は 2 次元の三角形と四角 形,3 次元の四面体と六面体でいずれも一次要素に限ら れる.シェル要素には,対応してきているが,ビーム要素 には対応していない.

また,プリ,ポストはなく,ソルバーのみである.

### 2. SfepPy の適用例

以下の偏微分方程式に適用できる.

- 1. 音響(aoustics)
- 2. 拡散(diffusion)
- 3. 均質化(homogenization)
- 4. 大変形(large\_deformation)
- 5. 線形弾性解析(linear\_elasticity)
- 6. その他(miscellaneous)
- 7. マルチフィジクス(multi\_physics)
- 8. 流体(navier\_stokes)
- 9. 音子(phononic)
- 10. 量子(quantum)

Fig. 1 に適用例を示す. 空間の音圧分布, 板の固有モード, 微細構造中のかん流, 量子力学の窒素分子モデルが可視化されている.





Fig. 3: Gallery of applications. Perfusion and acoustic images by Vladimir Lukes

Fig. 1 Gallery of applications. by Vladimír Lukeš.

### 基本的な使い方

./simple.py 入力ファイル名,により計算実行.
 例:./simple.py its2D\_1.py
 ./postproc.py vtk ファイル名,により結果表示.
 例:./postproc.py its2D.vtk
 Jupiter(Ipython)を使って interactive な使用も可能.

### 4. まとめ

SfePy = Simple finite elements in Python であり, 偏微分方程式を有限要素法で解く python モジュールで ある.プリ,ポストはない.

基本的な使い方は,./simple.py 入力ファイル名,により計算実行,./postproc.py vtk ファイル名,により結果 表示.

不明点はメーリングリストへ→ https://groups.google.com/forum/#!forum/sfepy-devel

- (1) http://sfepy.org/doc-devel/index.html#
- (2) <u>https://arxiv.org/pdf/1404.6391.pdf</u>
- (3) http://www.ondrejcertik.com/media/euroscipy2008.pdf