研究論文

オープンソース CAE ソフトウェアの利活用に関する研究（第 2 報）

片山　聡*　小林　泰則*　櫻井　貴文*

Research on the Utilization of Opensource CAE Software（Part2）

KATAYAMA Satoshi*, KOBAYASHI Yasunori* and SAKURAI Takafumi*

抄　録

県内製造業の DX 推進を目的に，オープンソース CAE ソフトウェアの利活用方法について検証した。対象分野は材料非線形解析，時刻歴応答解析，プレス成形解析および流体解析とし，操作が容易な GUI 環境下での計算機能や計算精度について確認した。その結果，材料非線形解析および時刻歴応答解析においては，商用 CAE ソフトウェアと同等の計算機能を有しており，接触をはじめとする計算設定を適正化することで，同等の解を得られることがわかった。プレス成形解析および流体解析においては，今回使用した GUI 環境下では計算範囲が限定されるものの，計算精度については商用 CAE ソフトウェアと同等であることがわかった。

1.　緒　　言

CAE（Computer Aided Engineering）はコンピュータ上で仮想実験を行い，製品性能や加工法案の妥当性を検証する設計支援ツールである。近年では人工知能技術やデータサイエンスとの連携も進み [1)2)]，製造業の DX 推進において，その重要度が増している。しかし，中小企業においては導入費用，維持費用の問題や，技術者育成の困難さから，十分に活用されていないのが現状である。この問題を解決する方法として，当所では昨年度，線形構造解析におけるオープンソース CAE ソフトウェアの計算精度を検証し，商用ソフトウェアと同等の結果が得られることを確認した [3)]。この成果を県内企業へ展開していく中で，他の解析分野や他のオープンソース CAE ソフトウェアについても同様の検証を望む声が多かったことから，今年度は材料非線形解析，時刻歴応答解析，プレス成形解析および流体解析を対象に，オープンソース CAE ソフトウェアの計算機能や計算精度について検証した。

* 下越技術支援センター

2.　使用したオープンソース CAE ソフトウェア

2.1　PrePoMax

PrePoMax はオープンソースの FEM（有限要素法）ソルバ CalculiX を組み込んだプリポスト一体型 CAE ソフトウェアで，メッシングから計算結果の表示まで，CAE で必要とされるすべての作業を GUI（Graphical User Interface）上で実行することが可能である。開発者は Maribor 大学（スロベニア共和国）の Matej Borovinšek 博士で，初期リリースは 2016 年，2025 年 3 月 1 日時点の最新バージョンは 2.2.11（CalculiX のバージョンは 2.22）となっている。本研究ではバージョン 2.2.10 を使用した。

PrePoMax では，接触非線形や材料非線形を考慮した構造解析のほか，定常・非定常伝熱解析，伝熱－構造連成解析，固有値解析，周波数応答解析（モード重ね合わせ法），時刻歴応答解析（モード重ね合わせ法・フル法），摺動状態をもとにした摩耗解析が実行可能であり，商用 CAE ソフトウェアと同等の解析機能を有している。また，v2.0 以降のバージョンではメッシング機能が強化されており，六面体要素の作成も

可能となっている。ただし，主応力ベクトルの描画や疲労解析が行えないなど，ポスト処理機能については，商用 CAE ソフトウェアに比べると限定されている。

CalculiX はオープンソースの CAD ソフトウェア FreeCAD にも搭載されている。FreeCAD ではモデリング環境とシームレスに CAE を実行できるという利点があるが，材料非線形などには対応していないため，その適用範囲は PrePoMax よりも限定的となる。

2.2 OpenRadioss

OpenRadioss は Altair 社が自社の商用 FEA（有限要素解析）コード Altair Radioss をオープンソース化したもので，2022 年 9 月より提供されている。2025 年 3 月 1 日時点における最新バージョンは 2025 年 2 月 20 日公開版となる。本研究では，2024 年 12 月 23 日公開版を使用した。

OpenRadioss は計算ソルバであり，メッシングや入力ファイル（rad ファイル）の作成および計算結果の表示には別途プリポスト処理ソフトウェア（以降，プリポスト）が必要となる。rad ファイルの書式は公開されており，テキスト編集することも可能であるが，本研究では Ansys LS-DYNA のインプットファイル（k ファイル）から直接実行させる方法 [4] を採用した。そのため，本研究における OpenRadioss の計算設定は Ansys LS-DYNA と同一である。ポスト処理には GUI 操作可能な Ansys LS-DYNA 用プリポスト LS-PrePost 4.10（フリーウェア）を用いた。計算データの変換には Vortex-Radioss を用いた。なお，ポスト処理には LS-PrePost のほか，オープンソースのデータ分析・可視化ソフトウェア ParaView を用いることも可能である。

2.3 OpenFOAM

OpenFOAM は C++で開発された連続体力学向け演算ライブラリ群で，特に CFD（数値流体力学）分野において広く用いられている [5) 6)]。

OpenFOAM は Linux 上での実行を前提としているため，WSL（Windows Subsystem for Linux）や仮想マシンにより，計算実行環境を構築する必要がある。FreeCAD の CfdOF アドオンを用いることで，Windows 環境でも OpenFOAM による流体解析が可能となるが [7)]，解析機能は限定される。

OpenRadioss と同様に，OpenFOAM においてもプリポストは別途必要となるが，これにはオープンソースの統合実行環境 DEXCS for OpenFOAM [8)] や Web 上で計算条件を設定する XSim [9)] といったツールを用いることが可能である。ただし，現在 OpenFOAM は提供元の違いから，Foundation 版と ESI 版とに分かれており [10)]，両者の間には完全な互換性はないため，関連するツールやソフトウェアの選定には注意が必要である。本研究では FreeCAD 上で実施可能な流体解析の範囲や計算精度について検証した。

3. 材料非線形解析

3.1 計算概要

JIS Z 3122 突合せ溶接継ぎ手の曲げ試験方法 6.3.1 ローラ曲げ試験を参考に，3 点曲げ解析を実施した。試験片およびジグ類の寸法を表 1 に，計算モデルを図 1 に示す。解析ソフトウェア（()内は以降の略称）は，Ansys Mechanical Enterprise 2023 R1（Ansys），Ansys LS-DYNA 2023 R1（LS-DYNA），SOLIDWORKS Simulation Premium 2024 SP5.0（SOLIDWORKS），PrePoMax および OpenRadioss とした。また，Ansys のプリポストには Ansys Workbench 2023 R1 を用いた。

表 1 試験片およびジグの寸法

項目	値
試験片寸法（mm） （幅×長さ×厚さ）	40×200×9
押しジグ先端直径（mm）	36
受けローラ直径（mm）	50
ローラ間距離（mm）	107
最大曲げストローク（mm）	60

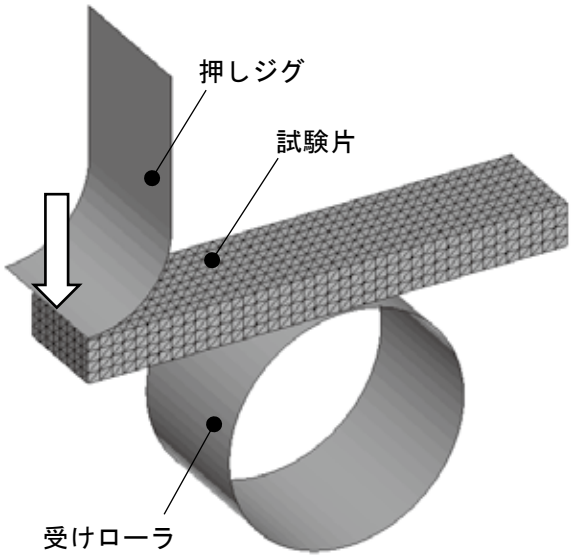


図 1　計算モデル(1/4 対称モデル)

3.2　計算設定

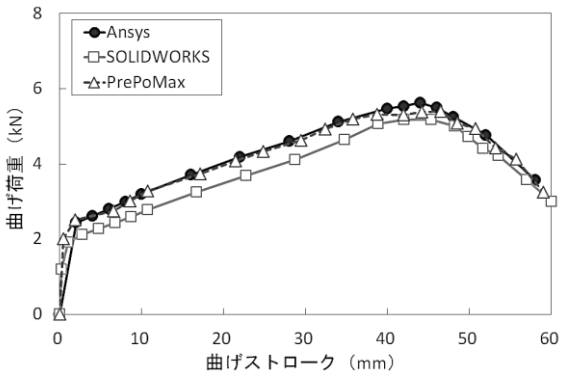
有限要素モデルは各ソフトウェアの標準メッシャーを使用した。要素形状は SOLIDWORKS と条件を揃えるため，押しジグと受けローラを高次三角形要素，試験片を高次四面体要素とした。要素寸法は 2.5mm とした。また，要素形状の影響を調べるため，SOLIDWORKS 以外のソフトウェアでは，低次四面体および低次六面体，高次六面体要素による計算も実施した。

試験片の材料モデルは 2 直線近似型等方性弾塑性モデル（ヤング率 200GPa，ポアソン比 0.3，降伏応力 250MPa，接線係数 1000MPa：等方硬化則）とした。押しジグと受けローラは剛体モデル（ヤング率 200GPa，ポアソン比 0.3）とした。各部の接触面は試験片をスレーブとする面－面接触とし，摩擦係数は 0.2 に設定した。そのほかの計算設定は各ソフトウェアのデフォルト値としたが，SOLIDWORKS と PrePoMax では曲げストローク 50mm 近傍で計算エラーが発生したため，SOLIDWORKS では特異点係数を，PrePoMax では接触剛性を調整した。

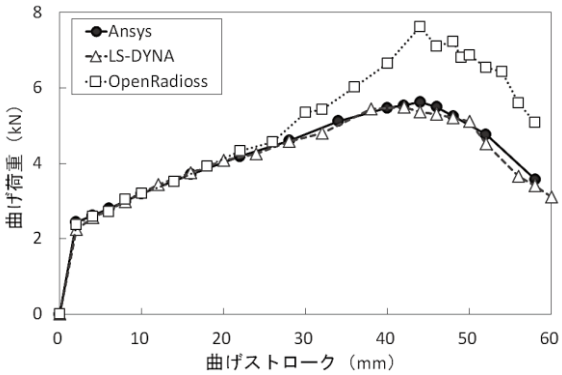
3.3　計算結果

曲げストロークと曲げ荷重（1/4 モデル値）の関係を図 2 に示す。Ansys，LS-DYNA および PrePoMax の結果は傾向，値ともよく一致した。SOLIDWORKS は，Ansys 等と傾向は一致しているものの，曲げ荷重は 20%程度小さくなった。これは特異点係数を調整したことが影響したものと考えられる。OpenRadioss では，曲げストローク 25mm 以降の曲げ荷重が他のソフトウェアよりも大きくなった。2.2 のとおり，本研究では OpenRadioss の解析に LS-DYNA で使用した k ファイルを転用している。今回，同一設定値で計算したにも関わらず，異なる結果となったことから，この差を解消できないか検証した。

OpenRadioss において，k ファイルの設定値を調整して再計算した結果を図 3 に示す。設定値でもっとも影響が大きかったのは摩擦係数で，次いで接触剛性であった。積分定式や減衰値，アワーグラス処理は接触設定ほどの影響を及ぼさなかった。



(1) Ansys，SOLIDWORKS，PrePoMax



(2) Ansys，LS-DYNA，OpenRadioss

図 2　曲げストロークと曲げ荷重の関係

要素の種類を変えた場合の計算結果を図 4～7 に示す。Ansys では大きな変化は見られなかったが，他のソフトウェアでは低次四面体要素を用いた場合に，高次四面体要素の 3～4 倍の曲げ荷重となった。これは低次四面体要素で生じる体積ロッキング等の影響であると考えられる [10]。なお，低次四面体要素においては，要素寸法を 1.0mm まで小さくした場合に，高次四面体要素と同等の結果を得ることができた（図 8）。要素数の増加により計算時間は 2～4 倍となるが，高次要素を使用した場合よりも接触挙動が安定するため [11]，計算エラーが発生した際の対応策のひとつになると考えられる。

低次六面体要素の影響は陰解法と陽解法で異なり，陰解法(PrePoMax)では高次四面体要素に対し 2 倍程度値が大きくなった。一方，陽解法では高次四面体要素と同等の結果を得ることができた。低次六面体要素の計算時間は高次四面体要素の 1/20 以下であり，メッシングが可能な形状の場合には優先的に使用すべきであるといえる。

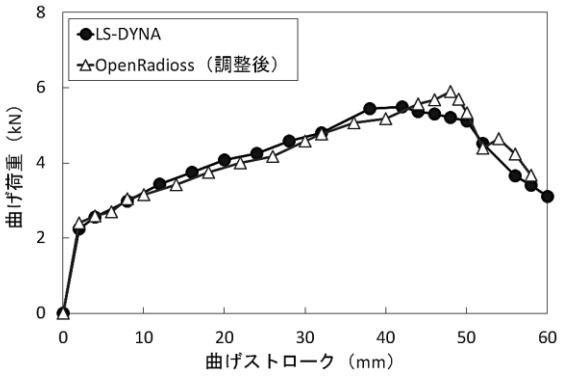


図 3　k ファイルの設定調整後の計算結果

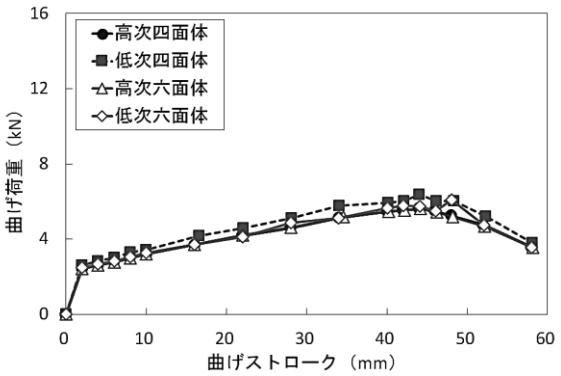


図 4　要素の種類による計算結果の違い (Ansys)

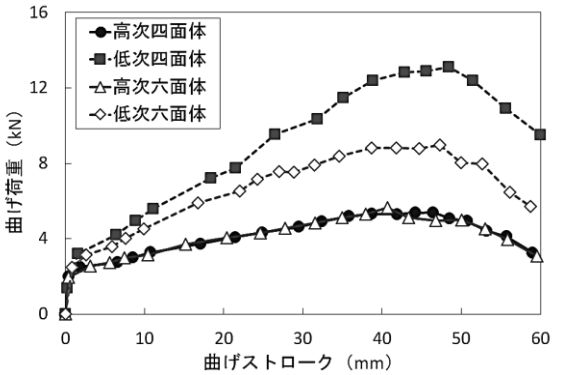


図 5　要素の種類による計算結果の違い (PrePoMax)

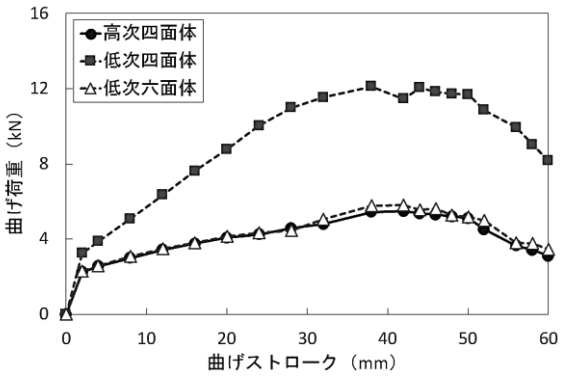


図 6　要素の種類による計算結果の違い (LS-DYNA)

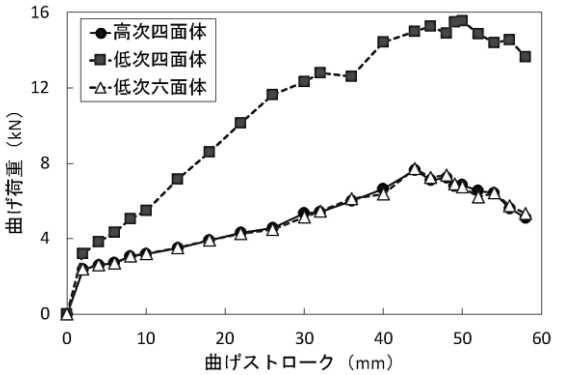


図 7　要素の種類による計算結果の違い (OpenRadioss)

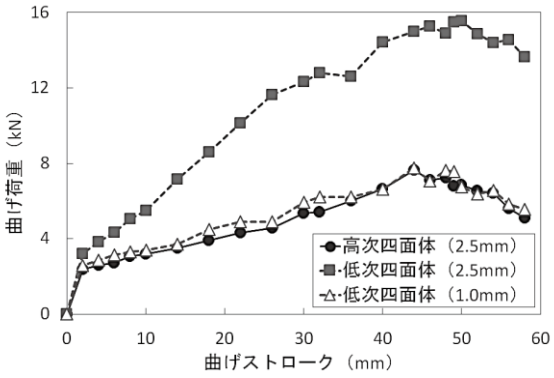


図 8　要素寸法を変えた場合の計算結果（OpenRadioss）

以上の結果より，塑性変形解析において，PrePoMax および OpenRadioss は，商用 CAE ソフトウェアと同程度の計算精度を有することがわかった。ただし，設定値によって計算の安定性や結果が変化したため，事前に計算設定の妥当性を検証してから使用する必要があるといえる。

4.　時刻歴応答解析

4.1　計算概要

動的問題に対する計算精度を検証するため，図 9 に示す落下衝突解析（時刻歴応答解析）を実施した。角材の寸法は□40×L800mm×t3mm，落下ブロック重量は 750kg とした。ただし，計算モデルを小さくするため，落下ブロック重量は重心位置に追加した質点で調整した。

角材の材料モデルは 2 直線近似型等方性弾塑性モデル（ヤング率 200GPa，ポアソン比 0.3，降伏応力 250MPa，接線係数 1000MPa：等方硬化）とし，3mm 間隔の低次四角形要素（シェル要素）でモデル化した。落下ブロックとベースプレートは剛体モデル（ヤング率200GPa，ポアソン比 0.3）とした。接触モデルは角材をスレーブとする点－面接触とし，摩擦係数は 0.2 に設定した。また，角材には面－面接触型の自己接触モデルを定義した。落下ブロックは落下（鉛直）方向の並進自由度のみ解放し，初速度として 5m/sec を与えた。

使用ソフトウェアは LS-DYNA，OpenRadioss および PrePoMax とした。PrePoMax の時刻歴応答解析では，計算ソルバとして陰解法と陽解法を選択できるが，今回は他ソフトウェアとの条件を揃えるため，陽解法を用いた。

4.2　計算結果

衝突から 0.02 sec 経過後の変形状態を図 10 に，落下ブロックと角材の接触力を図 11 に，落下ブロックの鉛直方向速度（落下方向が正方向）を図 12 に示す。なお，PrePoMax では，自己接触が発生したタイミングで計算エラーとなった。

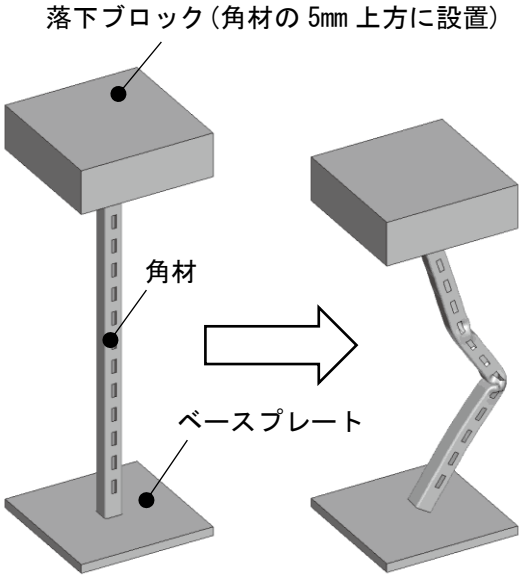
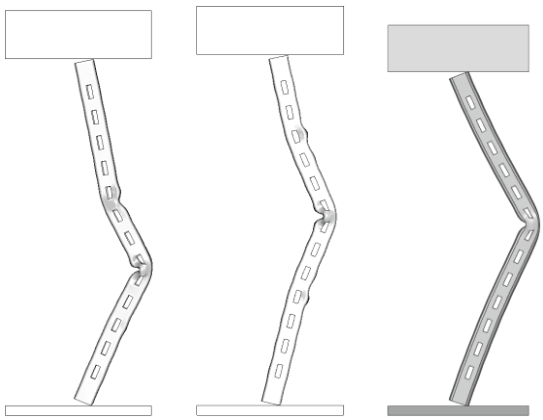


図 9　落下衝突解析モデル



(1)LS-DYNA　(2)OpenRadioss　(3)PrePoMax

図 10　衝突から 0.02 sec 経過後の変形状態

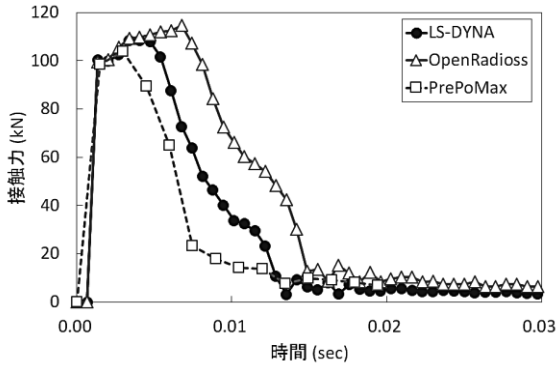


図 11　落下ブロックと角材の接触力

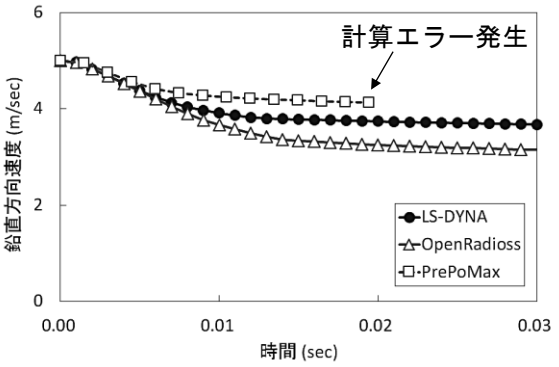
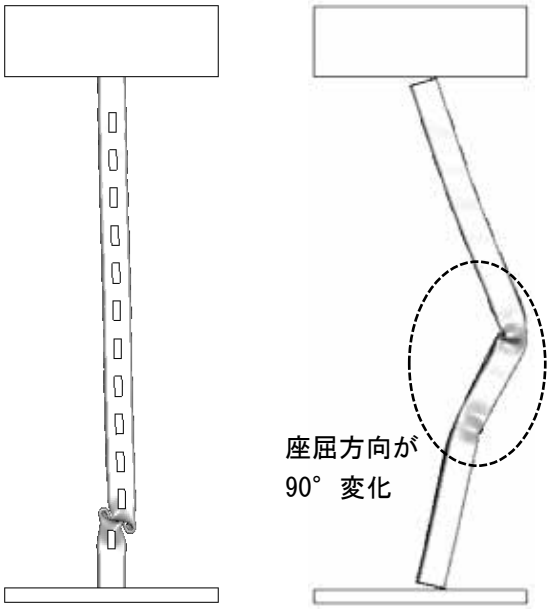


図 12　落下ブロックの鉛直方向速度



(1) 接触剛性：小　　(2) 接触剛性：大

図 13　接触設定による座屈モードの変化 (OpenRadioss)

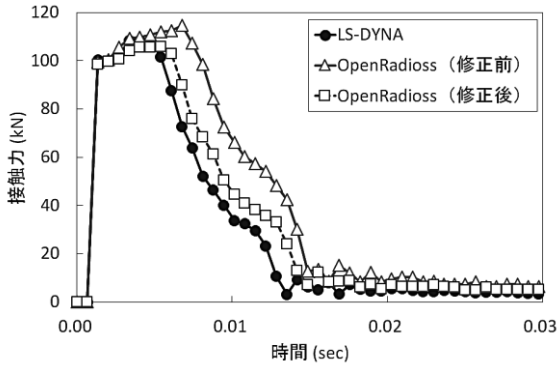


図 14　落下ブロックと角材の接触力（要素寸法変更後）

これらの図より，マクロ的な座屈モードは一致しているものの，その発生タイミングはソフトウェア間で異なっていることがわかる。時刻歴応答解析における計算ステップ間隔（時間刻み）はクーラン条件に基づいて決定されるが [12]，座屈直前の時間刻みは，LS-DYNA を 1 とすると，OpenRadioss は 0.82，PraPoMax は 0.61 と大きく異なっていた。時間刻みを算出する基準要素はそれぞれ角材両端のシェル要素となっており，接触設定による節点の掃き出し処理や減衰処理が座屈発生タイミングに影響を与えた可能性がある。そこで，材料非線形解析のように接触設定による調整を試みたが，設定した値によっては座屈モードが変化するなど（図 13），期待した効果は得られなかった。また，減衰設定による調整では，質量減衰を大きくした場合に LS-DYNA の結果を OpenRadioss に近づけることはできたが，その逆はできなかった。そのほか，シェル要素の積分定式やアワーグラスモード処理なども変更したが，どの方法も十分な効果は得られなかった。

OpenRadioss において，挙動が大きく変化したのは，材料特性や要素寸法を変更した場合であった。材料特性においては，接線係数を小さくすることで，LS-DYNA と同程度の結果を得ることができた。要素寸法は 2～4mm の間であれば座屈モードを変化させずに結果を調整することが可能であった（図 14）。要素寸法を 2mm

よりも小さくした場合には，図 13(1)に類似した座屈モードとなった。

以上の結果より，OpenRadioss は LS-DYNA よりも要素剛性を高く見積もる傾向があるものの，要素寸法や各種設定値を調整することで，LS-DYNA と同程度の結果を得られることがわかった。PrePoMax は LS-DYNA に比べると計算安定性に劣るほか，時刻歴ファイルの出力頻度や処理項目についても自由度が低く，現状では線形材料の動的問題に限定して使用するのが適当と考えられる。

所有する CAE ソフトウェアのモジュール構成上の制約から，衝撃荷重を静荷重に置き換えて構造解析（静解析）を行いたいという要望は多いが[13]，今後はオープンソース CAE ソフトウェアを用いた時刻歴応答解析により，衝撃荷重をそのまま扱うことも選択肢のひとつになるといえる。

5. プレス成形解析

5.1 計算概要

プレス加工解析は準静的問題であるが，接触挙動の複雑さから動的陽解法ソフトウェアが用いられることが多い[14]。そのため，実施する解析分野としては落下衝突解析と同じく，時刻歴応答解析となる。ただし，計算条件や結果の評価にはプレス成形に適した設定を用いる必要がある。本研究では OpenRadioss がこれらの設定にどの程度対応しているかを確認するため，角筒絞り成形解析を実施した。

計算モデルを図 15 に示す。パンチ外形は□40mm（コーナーR4mm）とした。パンチ肩およびダイ肩 R は 4mm，パンチとダイ間のクリアランスは 1.2mm とした。ブランク寸法は□70×厚さ 1mm とした。ブランクの材料モデルは 2 直線近似型等方性弾塑性モデル（ヤング率200GPa，ポアソン比 0.3，降伏応力 250MPa，接線係数 1000MPa：等方硬化）とした。金型はすべて剛体モデル（ヤング率 200GPa，ポアソン比 0.3）とし，ブランクとの摩擦係数は 0.15 とした。使用要素は 0.5mm 間隔の低次四角形要素（シェル要素）とした。

5.2 LS-DYNA と OpenRadioss の相違点

5.2.1 ブランク設定

OpenRadioss は，LS-DYNA のすべての設定を読み込めるわけではないため，事前に変換可能な設定を調べておく必要がある[4]。読み込んだ結果は out ファイル(_0000.out)に出力され，LS-DYNA の設定が OpenRadioss のどの設定に変換されたか調べることが可能である。

プレス成形解析のブランク設定では，要素細分化(*CONTROL_ADAPTIVE)やソリッド要素の初期状態設定(*INITIAL_STRAIN_SOLID, *INITIAL_STRESS_SOLID)に対応していない。要素細分化は，金型曲率やブランクの変形量をもとに要素を自動分割する機能である。要素細分化が行えない場合には，計算開始時から要素を細かくしておく必要があり，計算効率が低下することになる。ソリッド要素の初期状態設定機能は，計算終了時の応力やひずみを次の解析に引き継ぐ際に用いられる。シェル要素の初期状態設定には対応しているため，OpenRadioss で多工程のプレス成形解析を行う場合には，シェル要素を使用する必要がある。

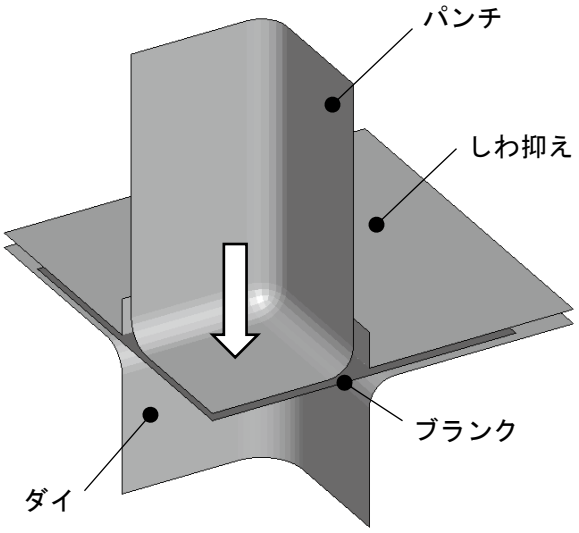


図 15 角筒絞り成形解析モデル(1/4 対称)

ブランクに使用する材料モデルにおいては，ランクフォード値（r 値）を使用する面外異方性モデル [15]に対応していない。SUS304 などの等方性に近い材料であれば問題はないが，それ以外の材料では成形限界や成形荷重を誤って見積もる可能性があるため，注意が必要である。

5.2.2 金型設定

プレス成形解析において，金型へ付与する計算条件は成形モーション（変位や速度）と荷重が中心となる。しかし，OpenRadioss では剛体への荷重付与設定(*LOAD_RIGID_BODY)に対応しておらず，しわ抑え荷重を設定するためには，ダミーのシェル要素（変形体）やバネ要素で代替する必要がある。本研究では簡易的な手法として，1.05mm（板厚+0.05mm）の定隙間法による計算を実施した。

5.2.3 接触設定

OpenRadioss では LS-DYNA のソルバ設定（コントロールカード）のほとんどを認識しないため，接触条件については LS-DYNA との相違点がいくつか存在する。

接触モデルは AUTOMATIC 型しか認識せず，またシェル要素における中立面オフセット機能（*SECTINO_SHELL 内の NLOC）も機能しないため，金型をサーフェスモデルで作成する場合には，*SECTION_SHELL で設定した板厚の 1/2 だけオフセットした位置に表面を作成する必要がある。オフセット困難な形状の場合には，ソリッドモデルで金型を作成する必要がある。

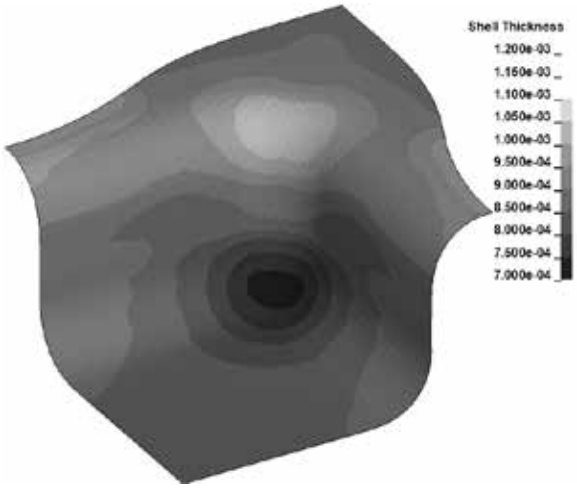
接触処理では，変形に伴うシェル要素の厚さ更新(*CONTROL_SHELL)に対応しておらず，ブランクに板厚の増減があっても初期板厚のまま計算が進むため，しわ抑えの接触圧力分布や材料詰まりを正しく再現することができない。そのため，OpenRadioss で板厚変化を考慮したプレス成形解析を実施する場合には，ソリッド要素を使用する必要がある。なお，計算中の接触処理には反映されないが，ポスト処理においては，シェル要素の面内変形量をもとに算出された板厚および板厚減少率を表示することが可能である。その場合，Engine の実行前に rad ファイル(_0001.rad)を直接編集し，出力設定(/ANIM/SHELL/THIC，/ANIM/SHELL/THIN）を追記する必要がある。LS-DYNA において，接触処理における板厚更新機能は板厚評価に必須の機能であるため，本研究ではこれを有効にして計算した。

5.2.4 その他の計算設定

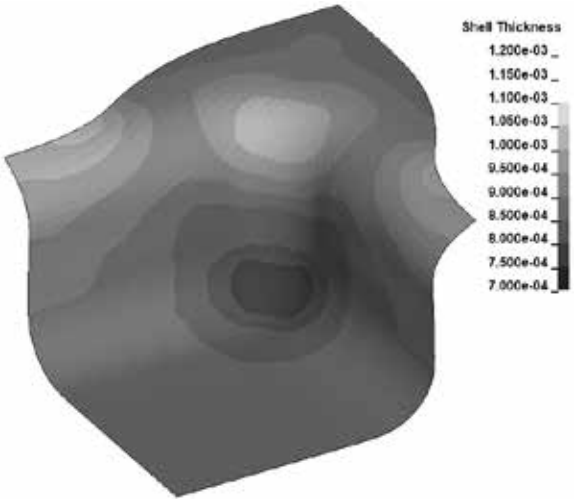
曲げ加工解析では，加工後のスプリングバック計算が必要となるが，OpenRadioss では LS-DYNA の陰解法設定(*CONTROL_IMPLICIT)を認識しないため，スプリングバック計算は陽解法でしか行えない。また，図 15 のような対称モデルを使用する場合，LS-DYNA では対称平面(*CONSTRAINED_GLOBAL)を利用できたが，OpenRadioss では節点グループ(*SET_NODE)に自由度拘束条件（*BOUNDARY_SPC_SET）を付与することで対応する必要がある。そのほか，金型や節点の移動量を基準とした計算停止設定(*TERMINATION)にも対応していないため，計算終了時刻は事前に求めておく必要がある。

5.3 計算結果

成形深さ 15mm におけるブランクの板厚分布を図 16 に示す。フランジ部の板厚分布はおおむね一致したが，側壁や底面の板厚分布は異なる結果となった。また，パンチ肩 R 部をはじめ，板厚減少率は OpenRadioss のほうが小さくなった。成形中のブランクとしわ抑えの接触力（フルモデル換算値）の変化を図 17 に示す。図より，LS-DYNA では成形深さ 9mm 前後から接触力が急激に上昇していることがわかる。これはブランクの板厚が定隙間法の設定値を超え，ダイとしわ抑えに挟まれることで生じたものと考えられる。一方，OpenRadioss の接触力はほとんど変化しておらず，前述のとおり，ブランクの板厚が初期値のまま計算されていることがわかる。



(1)LS-DYNA



(2)OpenRadioss

図 16　板厚分布(成形深さ：15mm)

しわ抑え力が作用した場合，ブランクには張力が付与される[16]。図 16 における板厚分布の違いは，接触状態による張力の差の影響を受けたものと考えられる。また，これはブランクの流入状態にも現れており，図 16 では OpenRaadioss のほうが多く流入していることがわかる。

LS-DYNA においてブランクの板厚更新機能を無効にして計算した結果（Z 方向ひずみを用いた板厚減少率分布）を図 18 に示す。結果は図 16(2) とよく一致するものとなった。板厚更新機能の有無がブランクとパンチの接触力の関係に及ぼす影響を図 19 に示す。両者の差は大きく，

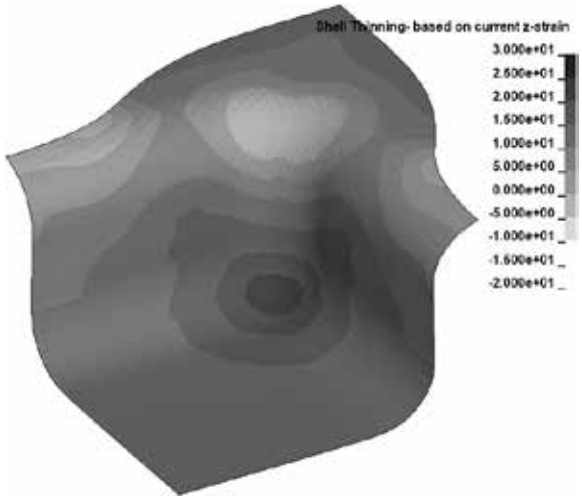


図 18　ブランク板厚を更新せずに計算した結果
(LS-DYNA・板厚減少率分布)

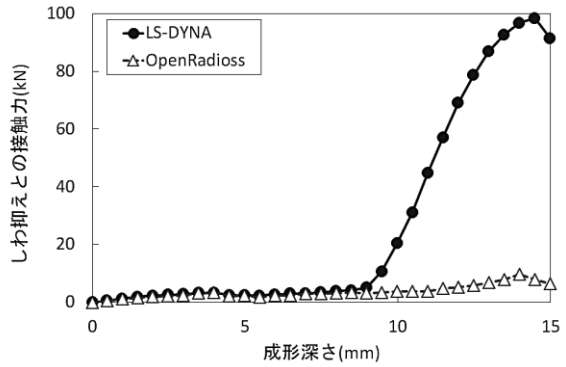


図 17　成形中のブランクとしわ抑えの接触力
（フルモデル換算値）

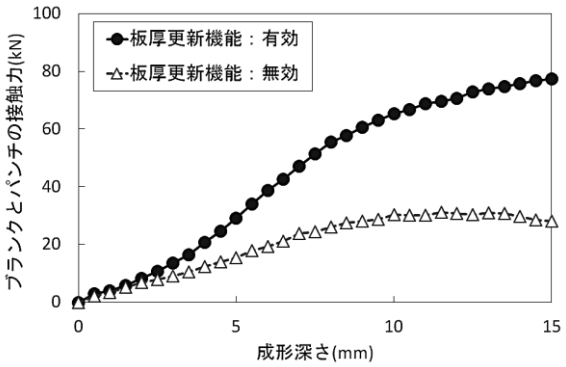


図 19　板厚更新機能の有無がブランクと
パンチの接触力の関係に及ぼす影響
(LS-DYNA・フルモデル換算値)

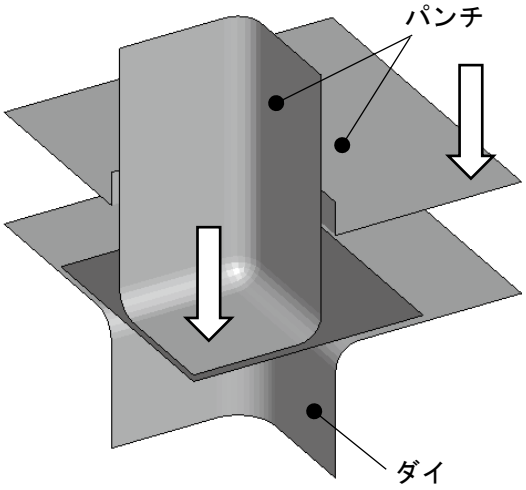
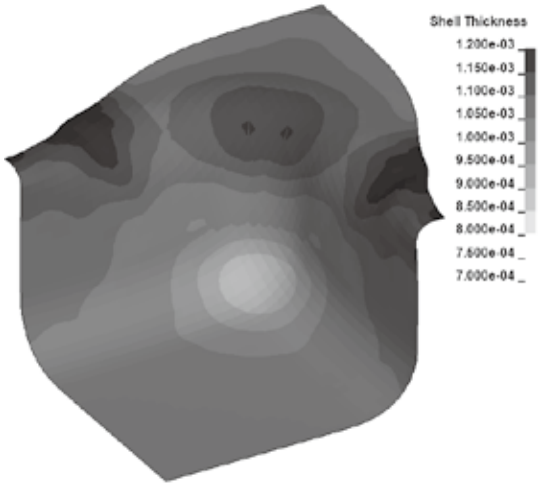
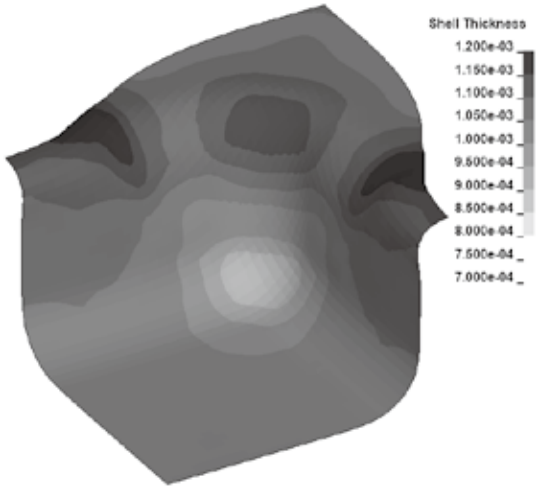


図 20　フォーム成形モデル



(1)LS-DYNA



(2)OpenRadioss

図 21　フォーム成形解析結果(板厚分布)

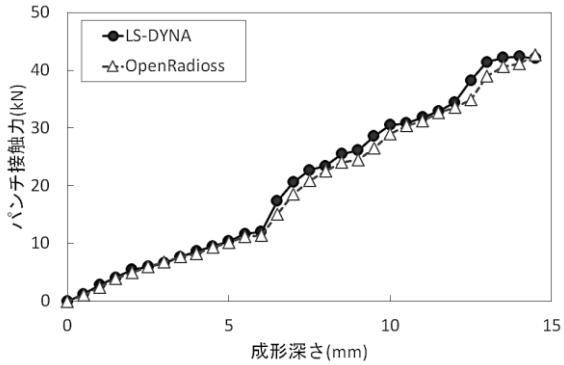


図 22　フォーム成形解析結果(パンチ接触力)

また，しわ抑え力が大きく変化する前から差が生じていることがわかる。これは隙間内におけるブランクの曲げ変形反力の影響を受けたものと考えられる。しわ抑えとの接触状態が結果に影響を与えているため，パンチとダイのみで構成されるフォーム成形解析を実施した。しわ抑えは上方に移動し，パンチと一体化した（図 20）。計算結果を図 21，22 に示す。LS-DYNA の結果はブランクの板厚更新機能を有効にして計算したものであるが，両者はよく一致していることがわかる。OpenRadioss は絞り成形よりもフォーム成形に適しているといえる。

以上の結果から，OpenRadioss を使用したプレス成形解析は，適用可能な範囲が限定的となることがわかった。また，解析可能な範囲内では LS-DYNA と同等の計算を得ることができた。

6.　流体解析

6.1　計算概要

FreeCAD の CfdOF アドオン（以下，FreeCAD）にて，流体解析を実施した。使用モジュールの詳細を表 2 に示す。商用 CAE ソフトウェアには Ansys AIM 2019 R3（以下，AIM）を用いた。

表 2　使用モジュールの詳細

名称	バージョン
FreeCAD	1.0.0
CfdOF アドオン	1.29.5
OpenFOAM	v2212(ESI 版)
ParaView	5.10.1

FreeCAD で実施可能な解析内容を表 3 に示す。解析対象は流体ボリュームのみに限定されており，流体と固体間の伝熱解析や構造連成解析は実施できない。また，適用できる乱流条件も限定的である。全体的に設定項目としては AIM よりも少なく，各種デフォルト値も用意されていないため，使用にあたっては流体解析に関する一定の知識が必要とされる。

作成した計算モデルを図 23 に，計算条件を表 4 に示す。メッシュモデルはそれぞれの標準メッシャーを使用したが，FreeCAD（cfMesh）では細かな分割条件を設定できず，またレイヤメッシュも 1 層しか作成できないため，AIM の設定を cfMesh に合わせた。作成されたメッシュモデルを図 24 に示す。なお， 本研究には使用しなかったが，system フォルダ内にある設定ファイル（meshDict）にレイヤメッシュ設定を追記することで，複数層のメッシュを作成することが可能である（図 25）。GUI 操作ではなく，テキスト編集となるが，壁面近傍の計算精度が向上するため，推奨される作業である。

表 3　FreeCAD で実施可能な解析内容

項目	内容
流体の種類	圧縮性，非圧縮性 粘性，非粘性
解析の種類	定常，非定常
乱流モデル	RANS（k-ωSST 等） DES（k-ωSSTDES 等） LES（KEqn 等）

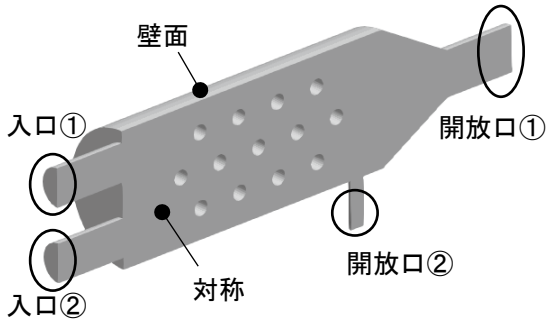


図 23　流体解析モデル

表 4　計算条件

項目	内容
種類	定常解析，非定常解析
乱流	RANS
流体	空気（粘性・浮力効果あり）
入口①	温　度　：50℃ 流　速　：0.1m/sec，1m/sec 流入方向：面直 乱流設定： 運動エネルギ k：0.01m²/sec² 渦周波数 ω　：1Hz
入口②	温　度　：100℃ 流　速　：0.1m/sec，1m/sec 流入方向：面直 乱流設定（輸送変数） 運動エネルギ k：0.01m²/sec² 渦周波数 ω　：1Hz
開放口 ①②	環境温度：20℃ ゲージ圧：0kPa 乱流設定（輸送変数） 運動エネルギ k：0.01m²/sec² 渦周波数 ω　：1Hz
壁面	速　度　：非滑り 環　境　：対流熱伝達 熱伝達係数：10W/（m²・K） 温度　：20℃

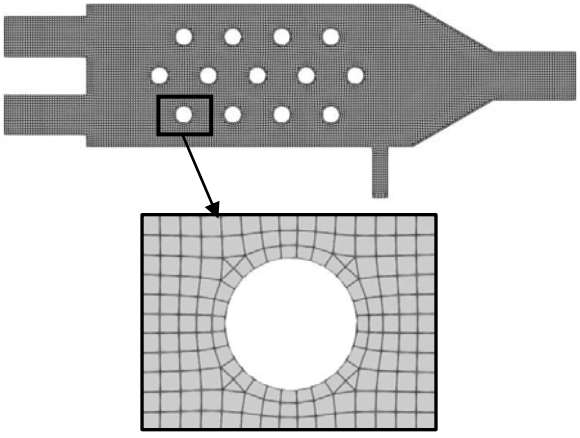


図 24　メッシュモデル（FreeCAD）

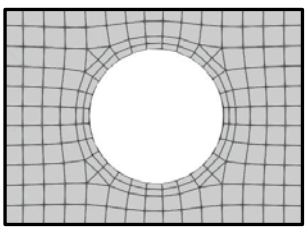
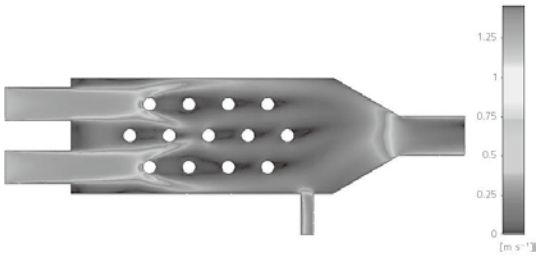


図 25　多層レイヤメッシュの例（3 層）

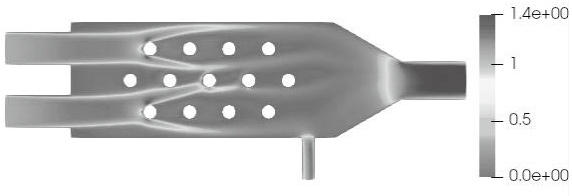
6.2　計算結果

定常解析の計算結果（流速分布，温度分布）を図 26～29 に，非定常解析における計算結果（0.2sec 経過後の流速分布，温度分布）を図 30，31 に示す。図より，解析の種類によらず，全体的な傾向はほぼ一致していることがわかる。ただし，収束性については FreeCAD のほうが劣っていた。GUI から設定できる項目が少ないため，エラー対応は設定ファイルを編集する必要があり，OpenFOAM に対する知識が求められる。

以上の結果より，FreeCAD を用いて流体解析を実施する場合，計算精度は商用 CAE ソフトウェアと同程度であるが，解析対象範囲は大幅に限定されることがわかった。そのため，実務よりも CFD 等の理論背景を学ぶツールとして使用するのが最適であると考えられる。

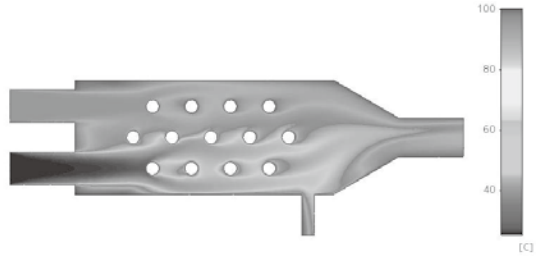


(1)AIM(単位：m/sec)

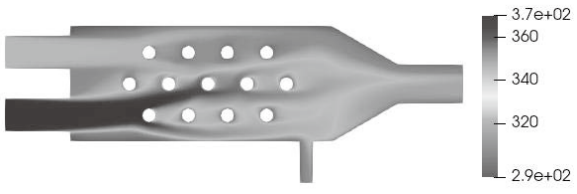


(2)FreeCAD(単位：m/sec)

図 26　流速分布(定常解析：1m/sec)

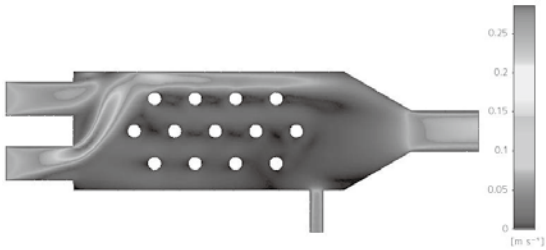


(1)AIM(単位：℃)

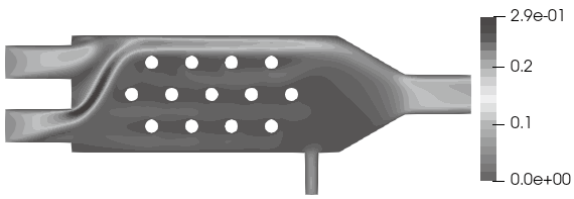


(2)FreeCAD(単位：K)

図 27　温度分布(定常解析：1m/sec)

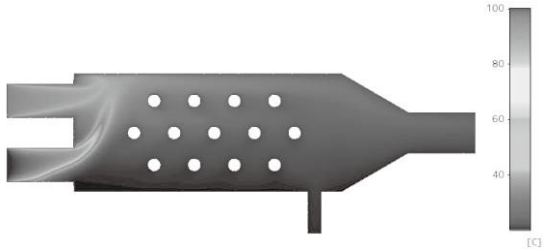


(1)AIM(単位：m/sec)

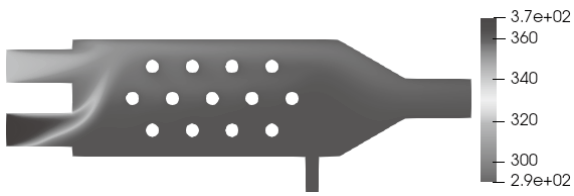


(2)FreeCAD(単位：m/sec)

図 28　流速分布(定常解析：0.1m/sec)

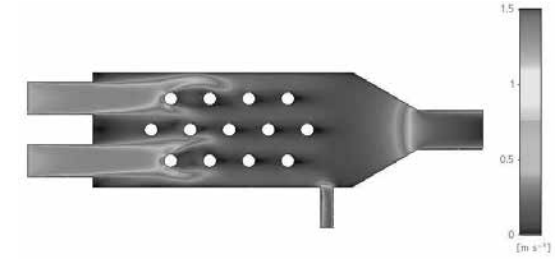


(1)AIM(単位：℃)



(2)FreeCAD(単位：K)

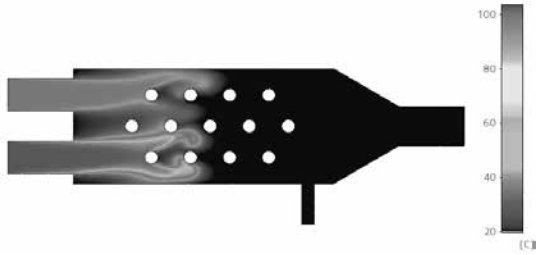
図 29　温度分布(定常解析：0.1m/sec)



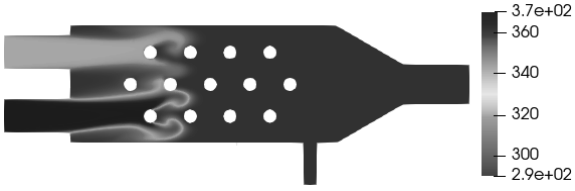
(1)AIM(単位：m/sec)

(2)FreeCAD(単位：m/sec)

図 30　非定常解析による計算結果：流速分布
（入口速度 1m/sec，0.2sec 経過後）



(1)AIM(単位：℃)



(2)FreeCAD(単位：K)

図 31　非定常解析による計算結果：温度分布
（入口速度 1m/sec，0.2sec 経過後）

7.　結　　言

オープンソース CAE ソフトウェア PrePoMax, OpenRadioss および OpenFOAM(FreeCAD)を用いて材料非線形解析，時刻歴応答解析，プレス成形解析および流体解析を実施し，以下の知見を得た。

(1) PrePoMax は材料非線形解析において，接触設定を適正化することで商用 CAE ソフトウェアと同等の結果を得ることが可能である。ただし，収束性については商用 CAE ソフトウェアよりも低い。陽解法による時刻歴応答解析においては，計算効率や安定性の観点から，自己接触が発生するほどの大変形問題には適用できない。

(2) OpenRadioss は LS-DYNA よりも剛性を高めに見積もる傾向があるが，計算可能な範囲においては，LS-DYNA と解析機能，計算精度とも同等である。ただし，プレス成形解析ではシェル要素へ設定できる条件が少なく，使用できる場面が限定される。

(3) OpenFOAM は FreeCAD の CfdOF アドインを使用することで，Windows GUI 上での流体解析が可能となる。ただし，解析範囲やメッシング条件が限定的となるため，詳細な設定を行うためには，設定ファイルの直接編集が必要となる。

参考文献

1) 片山ほか, “人工知能技術を用いた CAE 技術に関する調査研究”, 工業技術研究報告書, No.51(2022), pp.99-101.

2) 片山ほか, “人工知能技術を用いた金型設計手法に関する研究”, 工業技術研究報告書, No.53(2024), pp.3-5.

3) 片山ほか, “オープンソース CAE ソフトウェアの利活用促進に向けた精度検証”, 工業技術研究報告書, No.53(2024), pp.57-61.

4) Altair Radioss リファレンスガイド LS-DYNA 入力, https://2022.help.altair.com/2022/hwsolvers/ja_jp/topics/solvers/rad/ls_dyna_keywords_r.htm, (閲覧 2025-3-1).

5) 橋爪ほか, “OpenFOAM を用いた円柱まわりの流れ場の数値計算”, 平成 26 年度日本大学理工学部学術講演会論文集(2014), pp.783-784.

6) 辻ほか, “OpenFOAM を用いた翼型熱交換器の数値解析”, 日本機械学会熱工学コンファレン

ス 2018 講演論文集(2018), No.18-29.
7) Qiita【Win10】FreeCAD0.19 環境を構築して FEM と CFD を実行してみる, https://qiita.com/norisionori/items/4ee851f3322018662dd7, (閲覧 2025-3-1).
8) 吉川ほか, “流体解析技術高度化のための調査”, 宮城県産業技術総合センター研究報告, No.17(2020), pp.81-84.
9) 雷ほか, “OpenFOAM を活用した高専教育における卒業研究”, 広島商船高等専門学校紀要, No.43(2021), pp.121-125.
10) 柴田ほか, “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研究”, 第 32 回数値流体力学シンポジウム(2018), F02-2.
11) 渡邊ほか, “塑性加工における有限要素モデリングの基礎”, ぷらすとす, Vol.38, No.4(2021), pp.106-110.
12) 青村ほか, “LS-DYNA の事例紹介　～頭部有限要素モデルの衝撃解析～”, バイオメカニズム学会誌, Vol.34, No.1(2010), pp.79-82.
13) 須貝ほか, “重粉砕機異物混入時の回転刃の CAE による衝突解析”, 工業技術研究報告書, No.29(2010), pp.57-62.
14) 仲町, “板材成形加工における数値解析の現状”, 鉄と鋼, Vol.79, No.11(1993), pp.N761-N767.
15) 大上ほか, “円筒深絞り成形の耳の解析”, 日本機械学会論文集（A 編）, Vol.79, No.801(2013), pp.79-92.
16) 高ほか, “しわ抑え力が絞り加工の成形性に与える影響に関する実験調査”, 型技術, Vol.27, No.7(2012), pp.14-15.