

2015/03/28(土曜日)
オープンCAE勉強会@岐阜

各種オープンCAE（固体のFEM） の精度比較など

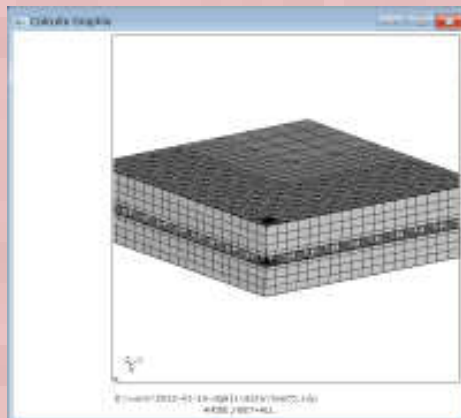
OpenCAE勉強会
S H

発表内容

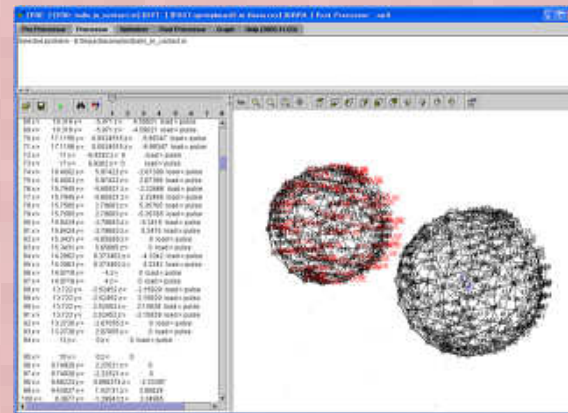
- オープンソースCAEソフト(構造系)の紹介
- 5要素のはり曲げ解析結果の比較
- 固有値(固有振動数)解析結果の比較
- 周波数応答解析結果の比較
- 熱伝導解析結果の比較
- 熱応力解析結果の比較
- 結合接触解析結果の比較
- 各ソフトの特徴などまとめ

代表的なオープンソース構造解析ソルバ

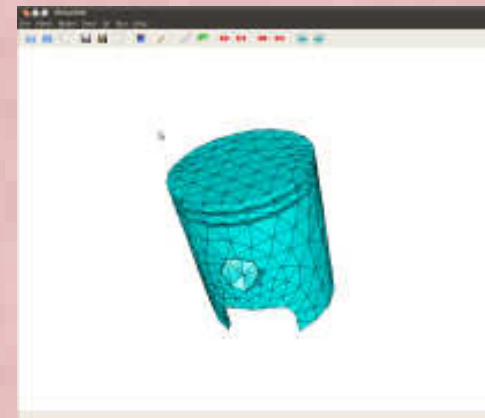
名前	URL	特徴など
Calculix	www.calculix.de	Abaqusライクな非線形構造解析、材料非線形、接触解析、動解析(ドイツ)
CodeAster (Salome-meca)	www.code-aster.org	大規模な非線形構造解析、日本では最近活用がさかん(フランス)
Impact	impact.sourceforge.net	陽解法非線形解析ソルバ(ロシア)
TOCHNOG	tochnog.sourceforge.net/	構造解析(非線形, 接触動解析etc.)
WARP3D	cern49.cee.uiuc.edu/cfm/warp3d.html	構造解析(き裂解析向けの非線形, 接触解析等)のソルバ(米国)
Elmer	www.csc.fi/english/pages/elmer	連成解析ソルバ(構造解析)(フィンランド)
Adventure	adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/	大規模構造解析ソルバ(日本)
FrontISTR	www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/dl/	大規模構造解析ソルバ(日本)



Calculix

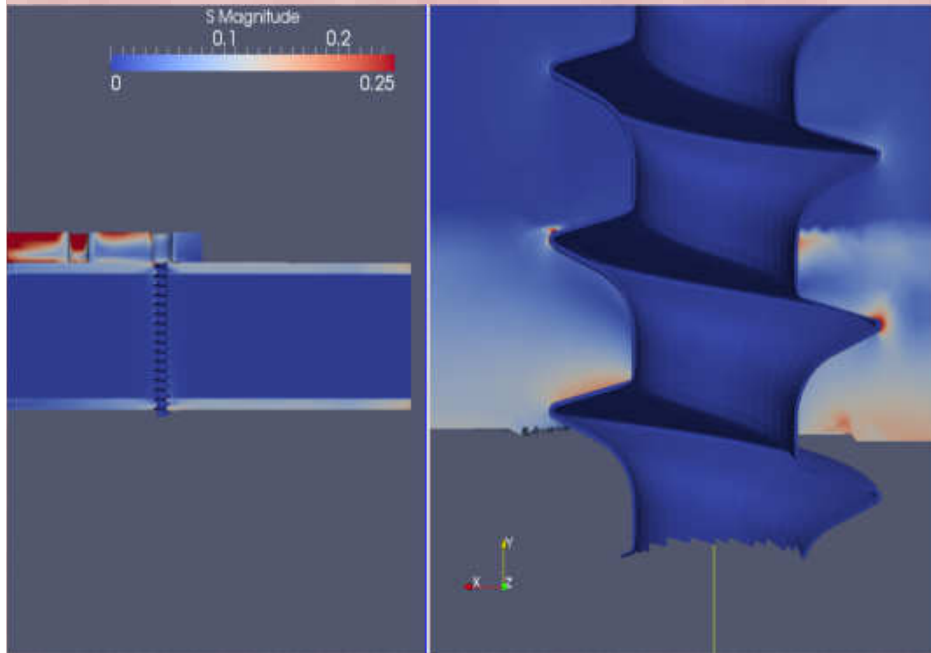


Impact

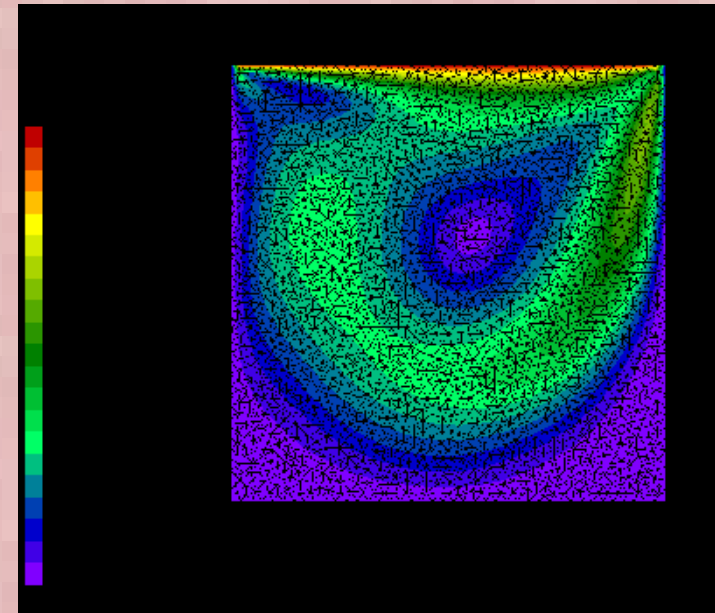


Elmer

Calculix



**CalculiX Extras
project 解析事例**



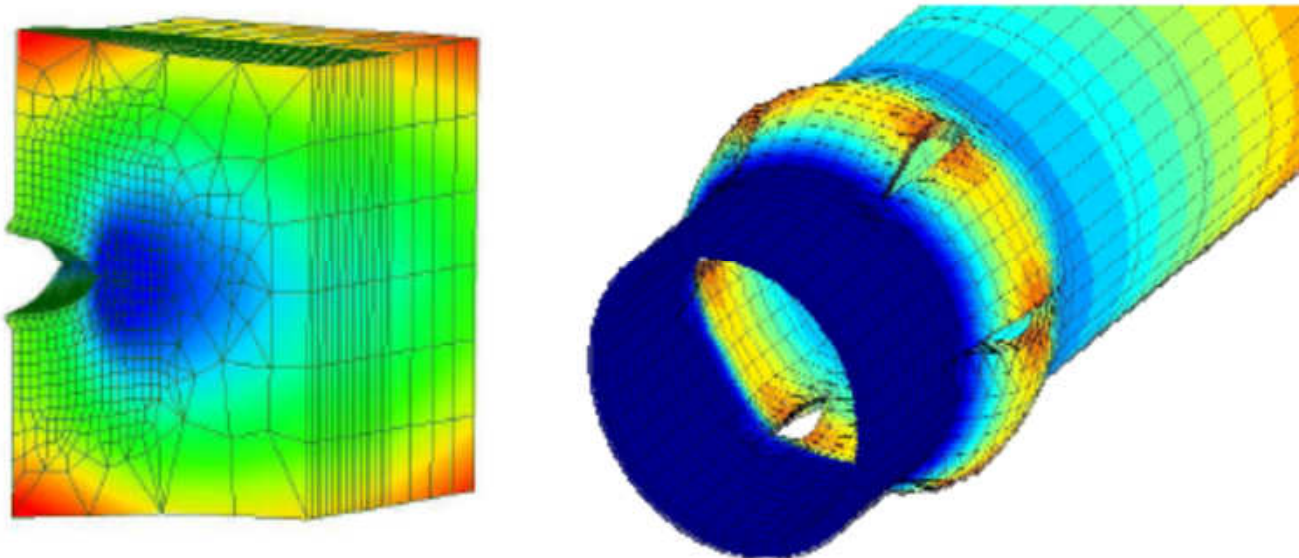
Cavity FLOW in Calculix

- 商用ソフトABAQUSと同様の入力書式をもつオープンソース ABAQUSを仕事で使っている人は文法を勉強しないでそのまま使える。知らない人もABAQUSのマニュアルを見れば大体使い方が分かる。
(テキスト入力ベースのモデラー、メッシャー、ソルバ、POSTを包含した非線形構造解析ソフト、一部流体解析も可能)
- <http://www.bconverged.com/calculix> にてWindows実行バイナリも公開
- Linux で利用する場合は本家のHP からソースをダウンロードしてコンパイル→ <http://www.dhondt.de/> するかCaelinux(DVD-iso)版を利用する。ソースのコンパイルは結構大変。
- 非線形(大変形、接触解析、材料非線形(塑性、クリープ、温度依存etc)が可能
- 課題;使っている行列ソルバ(Spools)が古い→ 標準設定ではあまり大規模な計算(100万メッシュ以上?)には対応できない。Extras プロジェクトで別ソルバ(CUDAベース行列ソルバ等Cuda-CUSP, Cholmod) のインターフェースプログラムが公開されている→ http://homepages.wmich.edu/~pjm8969/research/ccx_extras-dl.html

CodeAster / Salomemeca

- フランスEDF社(電力公社)が開発し、オープンソースとして公開している。自社の構造解析に利用
- 汎用構造解析ソフトの持つ材料非線形、接触解析、熱応力解析などほとんど機能を網羅する
- GUI(プリ/ポスト/Mesher)として、別オープンソースSalomeを利用する。
- SalomeとCodeAsterを一体化したモジュールがSalomeMECA
- 日本ではOpenCAE勉強会(岐阜/広島), 関西CAE懇話会のコミュニティで応用事例の検討、日本語化対応などが進められている

EDF 公開資料より、XFEMによる3次元亀裂進展解析



Impact

衝撃解析フリーオープンソフト : Impact

Impact はフリーのオープンソース動解析(陽解法プログラム)

<http://impact.sourceforge.net/>

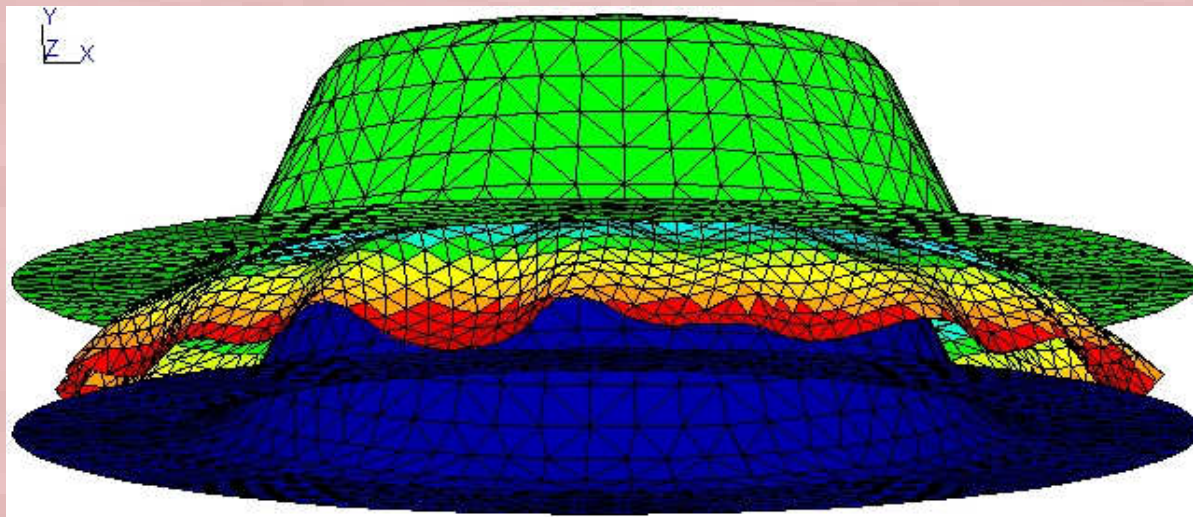
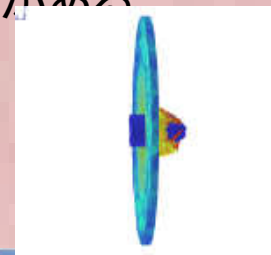
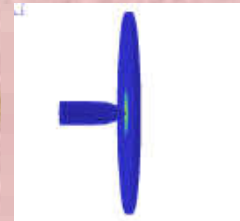
からプログラムをDownload可能。今は“Impact-0.7.xx.zip”が公開

—Java で開発されているため、JREまたはJavaがインストールされている必要がある

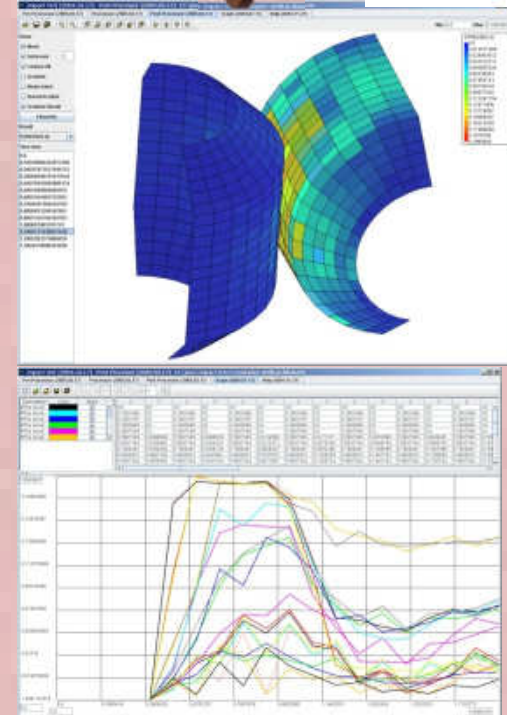
—Windows, LinuxなどJava動作可能なマシンで動作する。

—衝突解析などの他、塑性加工解析などにも適用できる。

<http://impactprogram.wikispaces.com/> に簡単な使用方法が記載

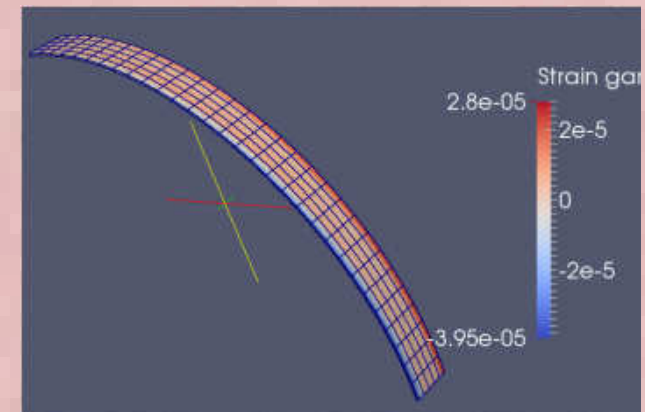
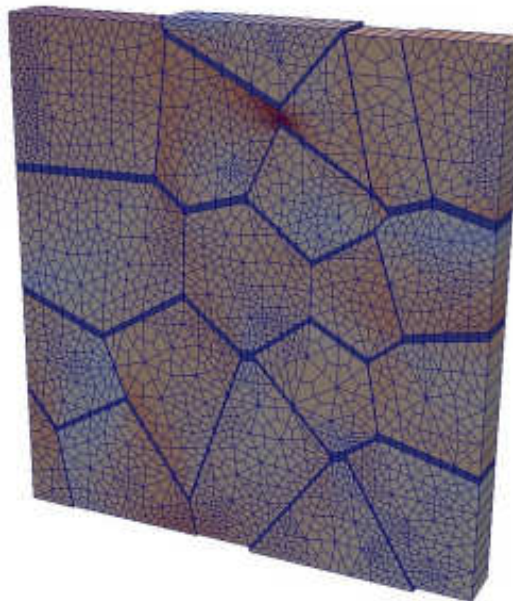
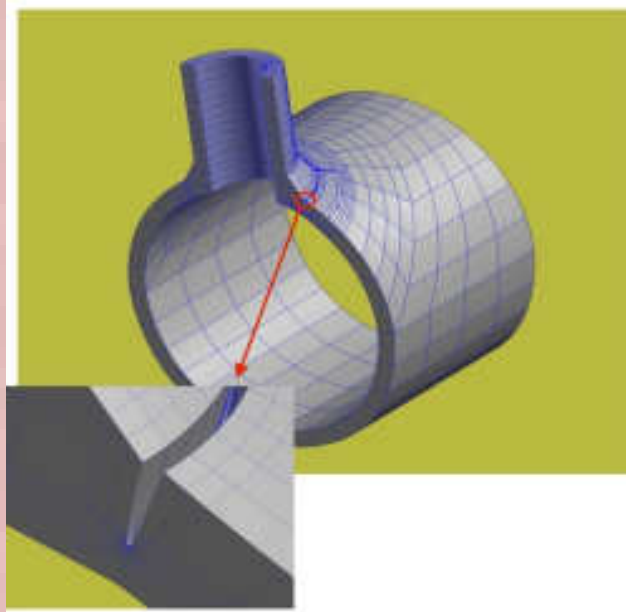


カップの塑性加工解析例

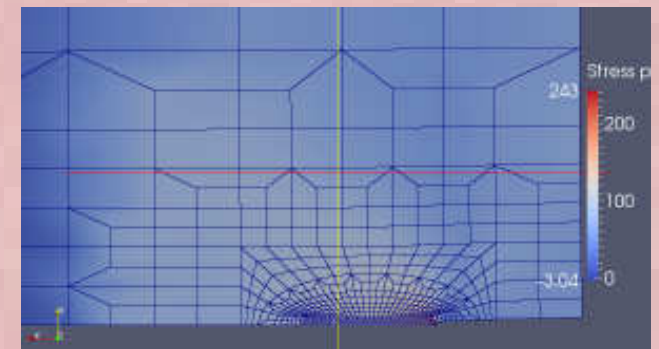


WARP3D

- 米国イリノイ大学で開発された3次元固体向けの非線形有限要素解析、主にき裂解析向けに特化。以下からダウンロードできる(ソース,マニュアル, 実行バイナリパッケージなど)
- <http://code.google.com/p/warp3d/>
- Linux, Windows, MacOSで実行できる
- 結晶塑性材料の解析機能などある
- GUIが無い、商用Patran形式からコンバート
- 最近版で結果処理だけParaViewで可能



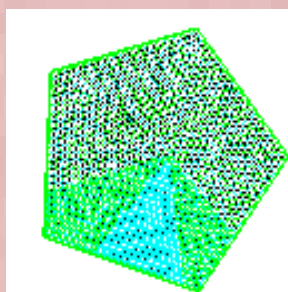
サンプル例題実行例1



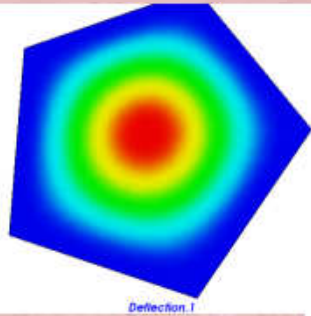
サンプル例題実行例2

Elmer

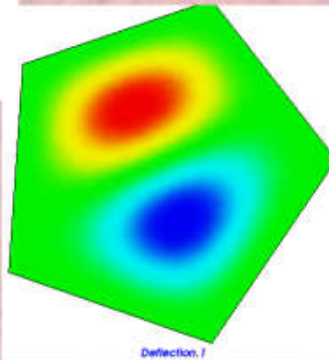
フィンランドIT Centerで開発



Elmer elastic
plate example
mesh

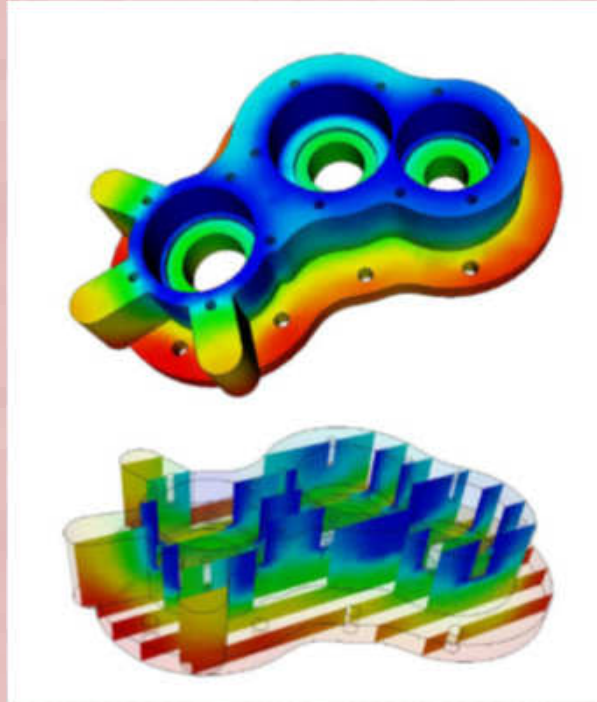


1 st
EigenValue
mode

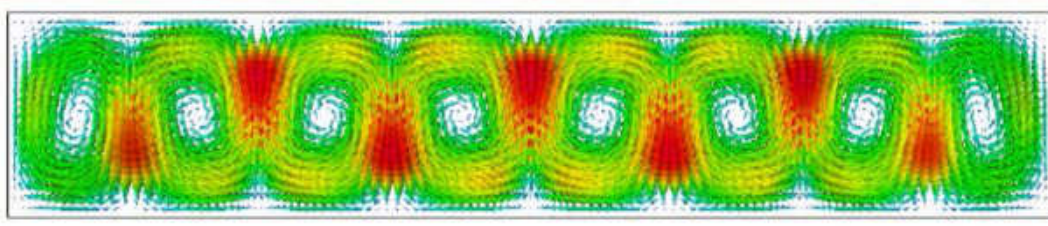


2nd
EigenValue
mode

固有値解析



熱伝導解析



流速ベクトル分布

自然対流 レイリー・ベナール対流解析

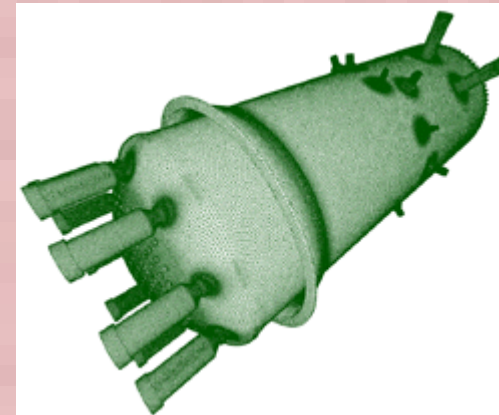
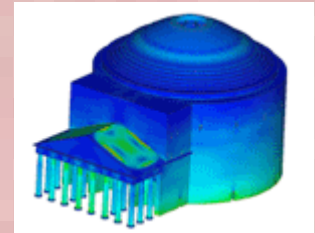
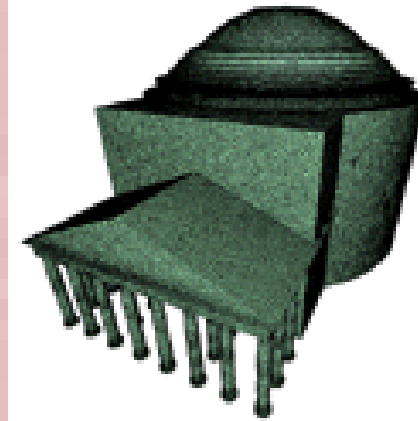
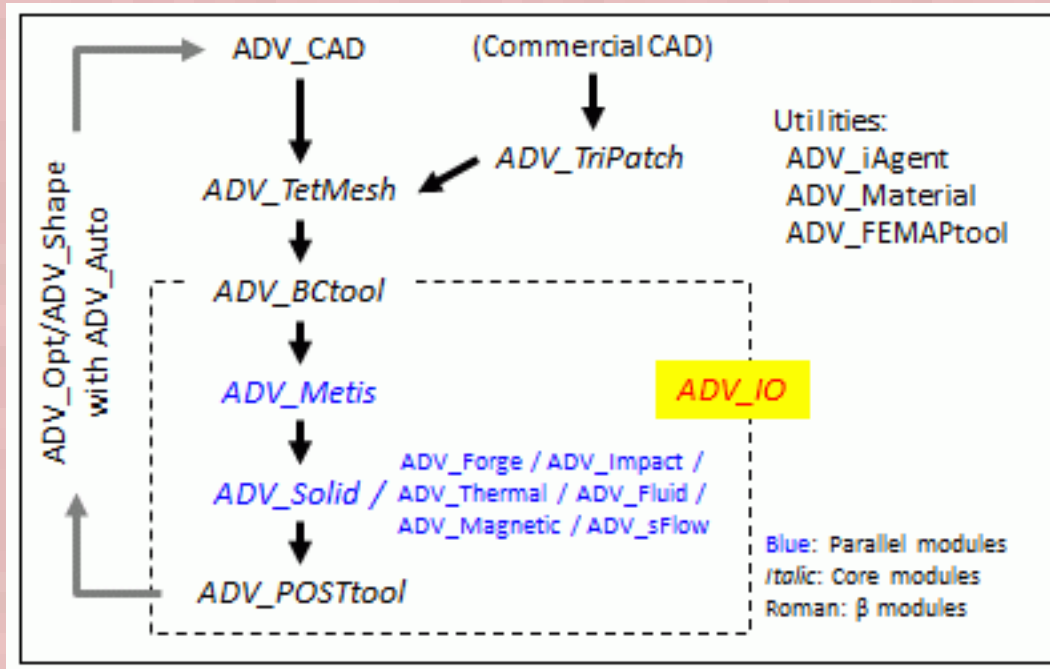
Elmer Tutorial日本語翻訳してくれている方



<http://digitalcreation-s.blogspot.jp/2012/08/elmer-programmers.html>

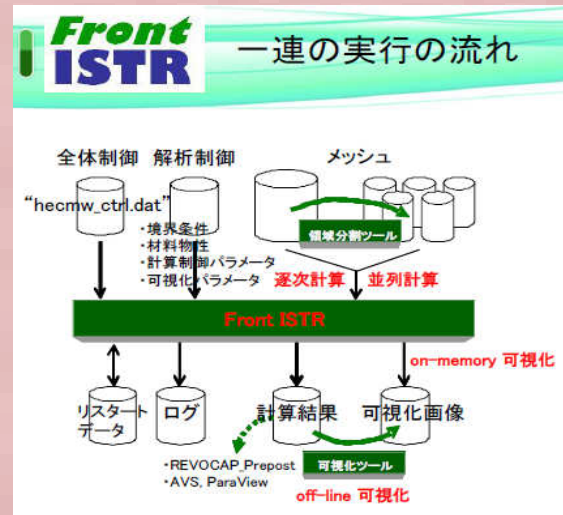
- マルチフィジクス向け汎用有限要素法ツール メッシャー, ソルバ, POSTを包含している。
- Windows版はGUIでパラメータ設定を行うため、比較的使いやすい
- Windows実行バイナリをダウンロードしてインストール可能 <https://www.csc.fi/web/elmer>
- Linux版はソースからコンパイルするか旧版バイナリはUbuntu系linux であればapt-get コマンドで簡単にインストールできる。またCaelineux2013(DVD-iso)にインストールされている 下記参照(日本語 SourceからElmerをコンパイルする) <http://freeplanets.ship.jp/FEM/Elmer/Elmer-compile.html>
- 構造解析、振動解析、熱伝導解析、熱流体解析機能など各種解析/連成解析に対応

Adventure



- 国プロで東大の吉村先生中心に開発された国産FEM(詳しくは前回の三好さんレポートを参照)
最近 V2(動解析機能)が新規公開
→ <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>
- 固体FEM機能(大変形、弾塑性材料など)、大規模計算向き(1000万自由度以上～)
- GUI関連機能は使いにくい, 柴田先生がまとめた”DEXCS-Adventure 2010”
<http://dexcs.gifu-nct.ac.jp/download/>
を使うのがおそらく一番簡単。またFrontシリーズで開発されたRevocap
http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/project/rss/software/06_info.htm もプリポストに使える

FrontISTR①



FrontISTRの機能一覧

注:赤字は平成24年度拡充機能

線形静解析	等方性／ 異方性 (熱応力解析を含む)
非線形静解析	材料非線形: 超弾性／弾塑性／熱弾塑性／ 粘弾性 ／クリープ 等方／移動／複合硬化 幾何学的非線形: Total Lagrange法／Updated Lagrange法 境界非線形(接触): Lagrange乗数法、有限すべり、摩擦
線形動解析	時刻歴応答(陽解法／陰解法)、 周波数応答
非線形動解析	陽解法／陰解法、接触解析機能
固有値解析	ランチョス法、変形後解析機能
熱伝導解析	定常／非定常(陰解法)
要素タイプ	四面体／六面体／五面体／ シェル ／トラス／ 梁 1次／2次、非適合モード、選択の次数低減積分
解析支援	境界条件ステップ制御、リスタート、ユーザーサブルーティン

~~ダウンロードは下記から~~

~~<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/>~~



<http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/index.html>

- FrontISTRとは東大が国プロで開発しているオープンソースソフトウェア
- 有限要素法構造解析ソフトウェア各種非線形解析機能を有する
- 分散領域メッシュ＋反復法ソルバによるノード間並列解析機能を有する
- ライセンスフリー(商業利用時は独自契約が必要)
- プリは同じプロジェクトで開発されたRevocapを使用, MeshはABAQUSに似た独自書式
- 変形・応力解析機能
 - 線形静解析, 非線形静解析, 大変形解析
 - 材料非線形解析(弾塑性・超弾性・粘弾性・クリープ・ユーザ定義材料)
 - 接触解析(拡張ラグランジュ、ラグランジュ法)
 - 動的陽解法は非接触解析のみ可能
 - 陰的時間積分法による接触を考慮した過渡解析(衝突解析)も2012年度に実装した

FrontISTR®

- **FrontISTR研究会として東大奥田研究室が独自に開発は現在も継続。研究会は平日実施だがだれでも無料で参加できるので、興味のあるかたは参加を検討ください。今年度開催予定下記**
- **非線形有限要素法ソースコード実装方法についてかなり詳しく解説してくれるので貴重**

<http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/index.html>

第15回FrontISTR研究会 <機能・例題・定式化・プログラム解説編「弾塑性解析／熱応力解析」>

日時: 2014年10月31日(金) 14時～17時30分

場所: 未定

第16回FrontISTR研究会 <機能・例題・定式化・プログラム解説編「MPC／接触解析」>

日時: 2015年1月16日(金) 14時～17時30分

場所: 未定

第17回FrontISTR研究会 <機能・例題・定式化・プログラム解説編「FrontISTRのカスタマイズ」>

(Element／Material追加およびユーザサブルーチン使用)」

日時: 2015年3月20日(金) 14時～17時30分

場所: 未定

FrontISTRによる弾性解析 (直交異方弾性体)

東京大学
新領域創成科学研究科
人間環境学専攻
橋本 学

2014年7月30日
第11回FrontISTR研究会
<機能・例題・定式化・プログラム解説編「弾性解析(直交異方弾性体を中心に)」>

直交異方弾性体の構成方程式 (1)

弾性定数が直交する三つの軸の方向で異なる

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{12} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{23} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{pmatrix}}_{\text{Complianceに相当}} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad \dots (1.6)$$

ひずみ 応力

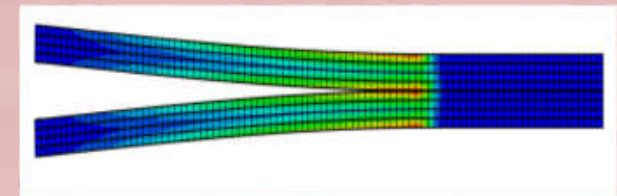
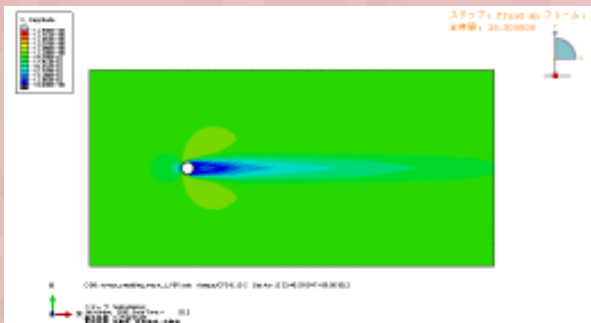
E_1, E_2, E_3 : Young率 [Pa] G_{12}, G_{23}, G_{31} : 横弾性定数 [Pa]
 $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{21}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{32}$: Poisson比 [-]

$$\begin{pmatrix} \nu_{12} \\ \nu_{21} \\ \nu_{13} \\ \nu_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nu_{12} \\ \nu_{21} \\ \nu_{13} \\ \nu_{31} \end{pmatrix}$$

(参考) ABAQUS Student Edition とは？

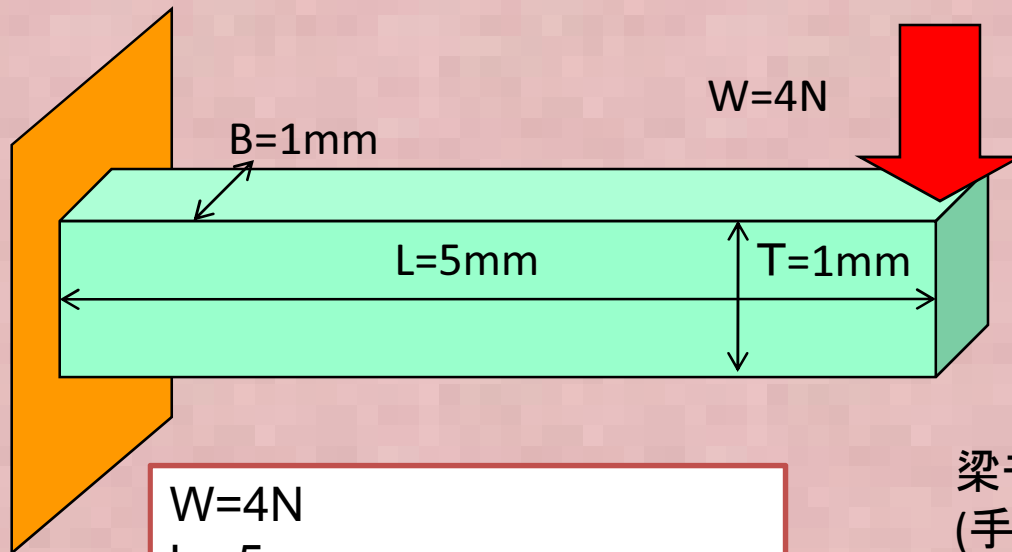
- ダッソー社の販売しているABAQUSの教育用機能制限版で、V6.12から無料ダウンロードできるようになった(それ以前は1万円くらいで横浜国立大学)山田先生が翻訳した有限要素法の本を買うと付録DVDでV6.9SEが使えた)
- 現在公開されているのはV6.13SE(Windows64bit版)
- 構造解析は1000節点、流体10000節点までの解析規模の機能制限あり(流体解析用にメッシュ出力すれば10000節点までメッシュ作成ツールとして利用することも可能 → **LS-PrePost (こちらも無料)**と同じような使い方)
- 解析機能は全て製品版と同じだが、ユーザプログラム(Fortran/C)は利用不可
- 使用中にネット接続する等の制限は無い
- 形状モデル作成機能の制限は無い
- 形状モデルはStepなどで出力可能(つまり簡易3D-CADとして使うなら無料?)
- V6.12 から無料化され、Dassault のホームページからダッソーラーニングにユーザ登録(無料)するとダウンロードできる。
→ 参考: **ABAQUS 6.12 Student Edition の入手(1)**

<http://deratege.ti-da.net/e4179729.html>



5要素モデルのはい曲げ解析結果比較①

- モデル寸法と拘束条件、材料、荷重は以下に示す通り。材料力学の公式では反りの理論解は以下で計算される。



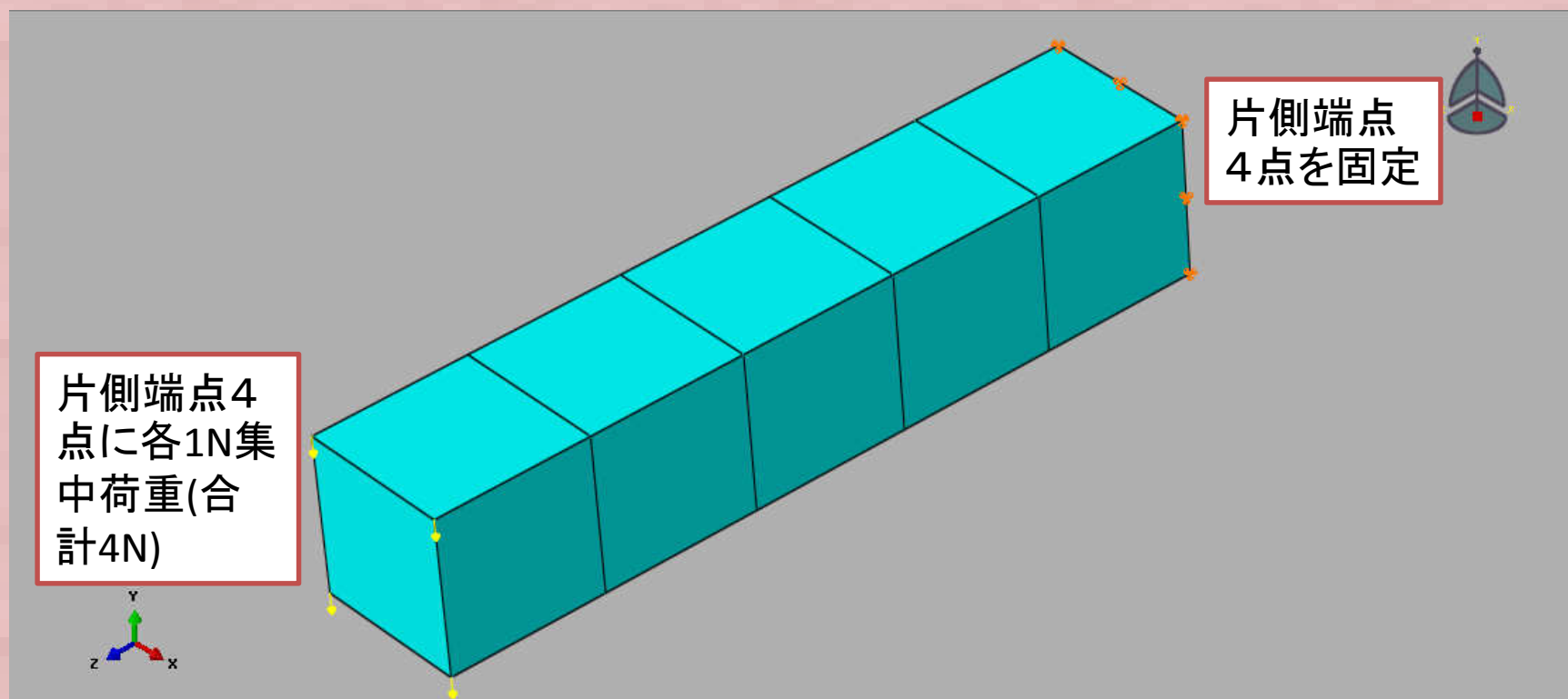
$W=4N$
 $L=5mm$
 $B=1mm$
 $T=1mm$
 $E=210000MPa$
($I = bt^3/12$)

梁モデルの反り理論解
(手計算)

$$\delta = \frac{WL^3}{3EI} = 0.009524mm$$

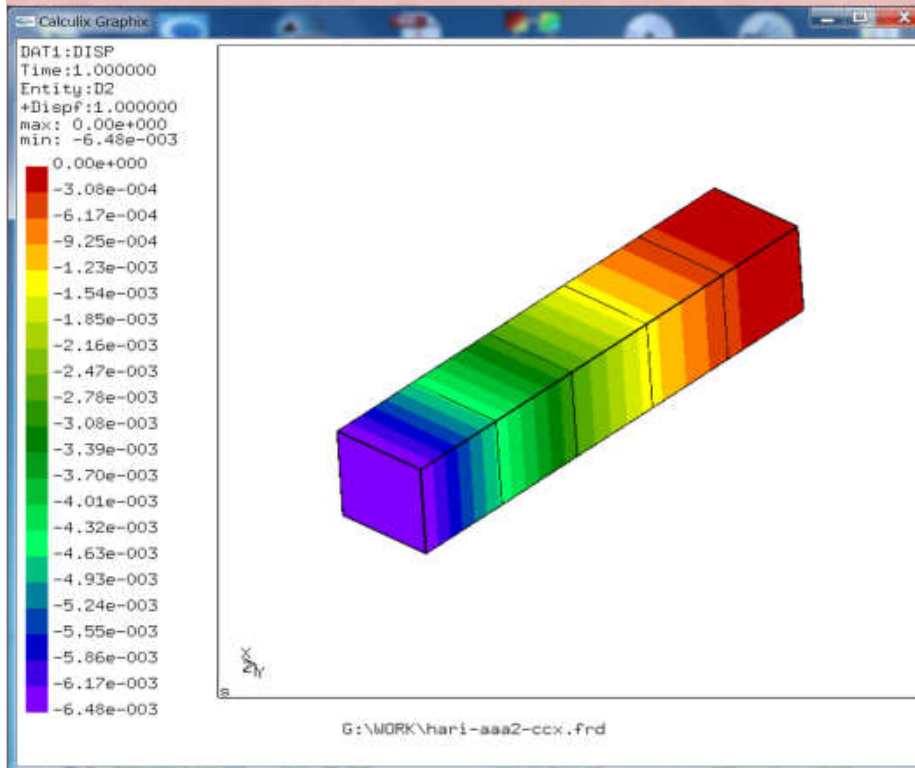
5要素のはい曲げ解析結果比較②

解析モデルはABAQUS/StudentEditionで作成, メッシュ数は東京構造勉強会FさんのEXCEL FEM 計算にあわせて5要素にて作成
各ソルバへのデータ変換等は後半スライドで説明

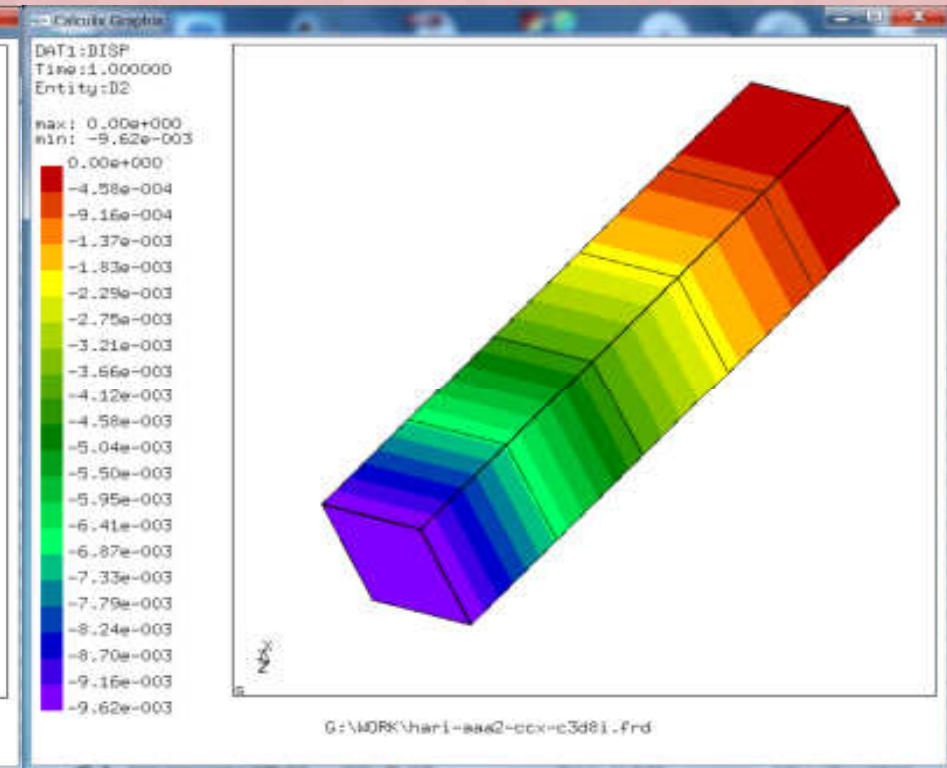


5要素のはい曲げ解析結果比較③

Calculixによる計算結果変形分布図を以下に示す。



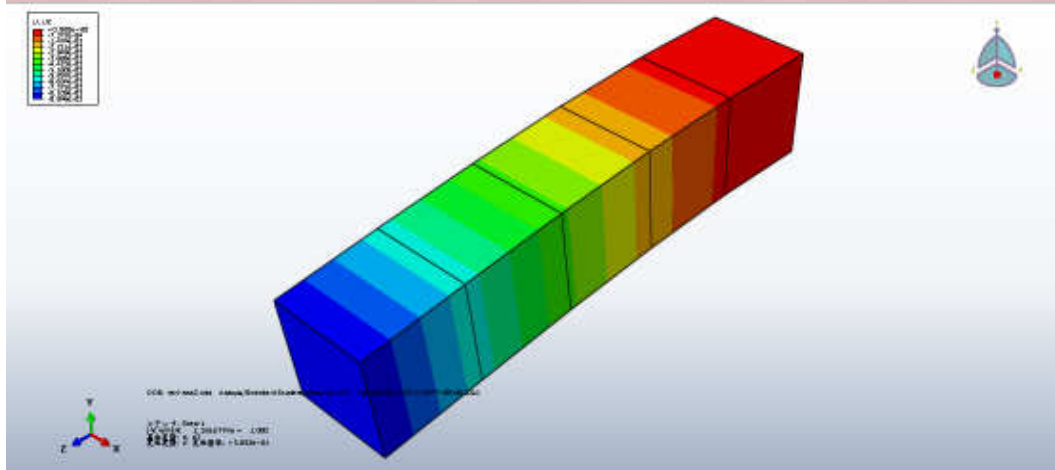
アイソパラメトリック要素C3D8:
最大反り=-6.476190E-03mm



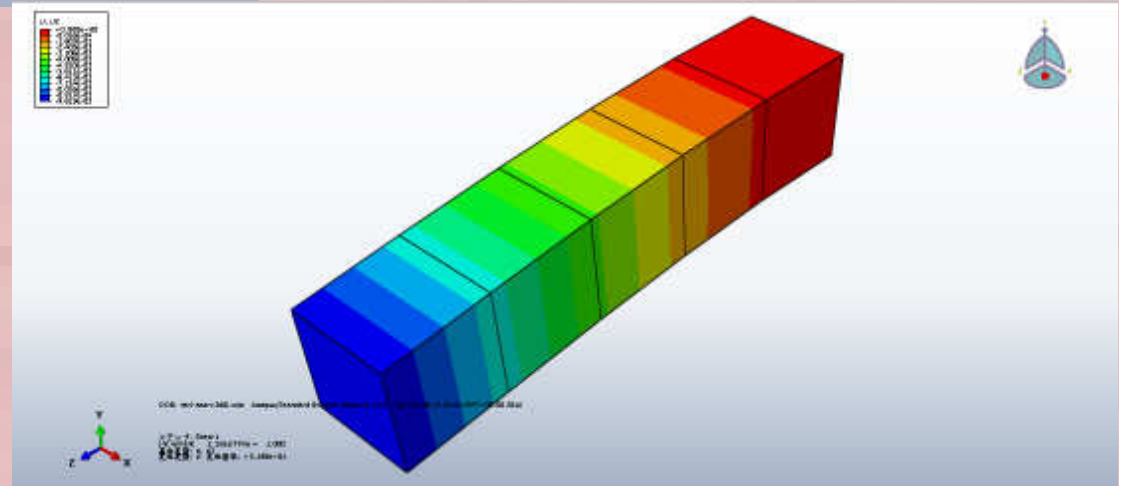
非適合要素C3D8I:
最大反り= -9.619048E-03 mm

5要素のはい曲げ解析結果比較④

ABAQUS/StudentEditionによる計算結果変形分布図を以下に示す。



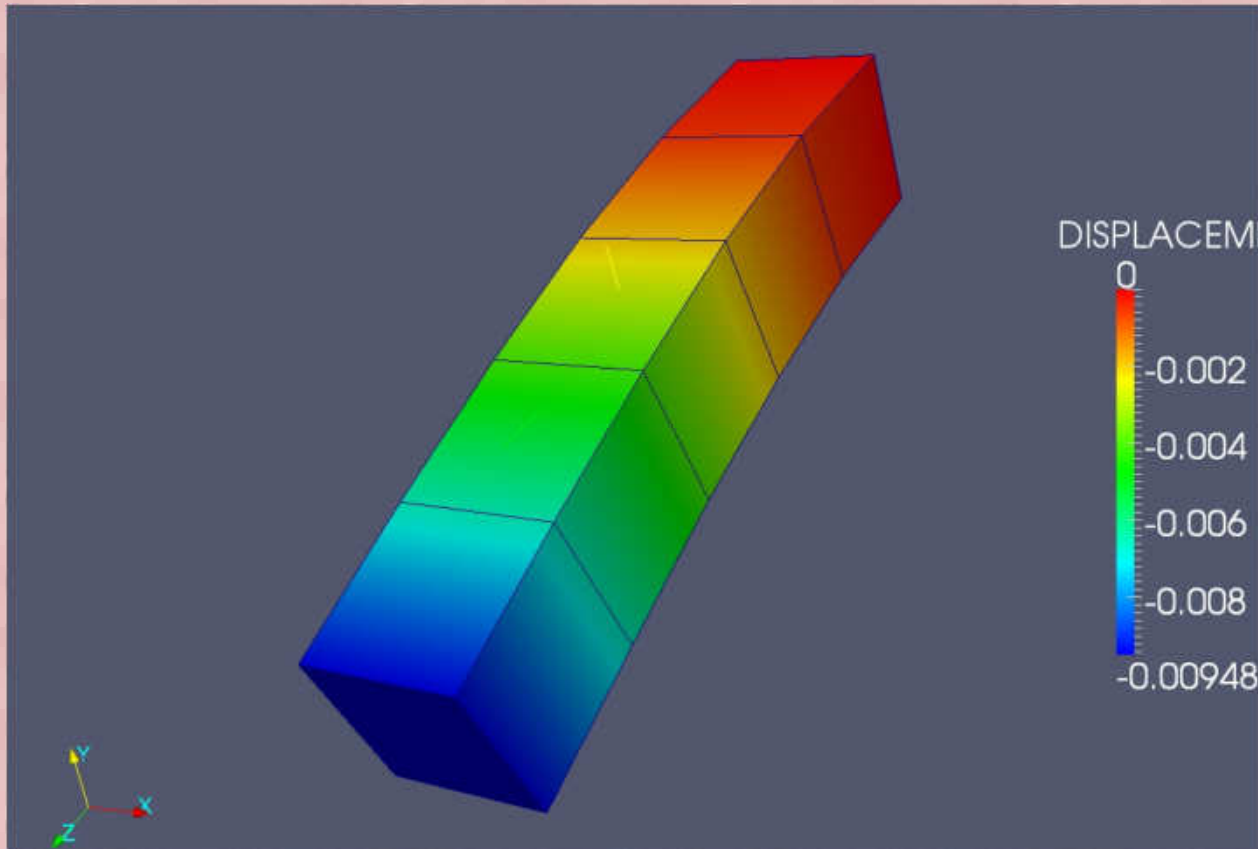
選択的次數低減要素?C3D8:
最大反り= -0.00884583 mm
(Abaqus ではCalculixのアイソパラ
メトリック要素名のC3D8 はアイソ
パラメトリック要素ではない)



非適合要素C3D8I:
最大反り= -0.00961905 mm

5要素のはい曲げ解析結果比較⑤

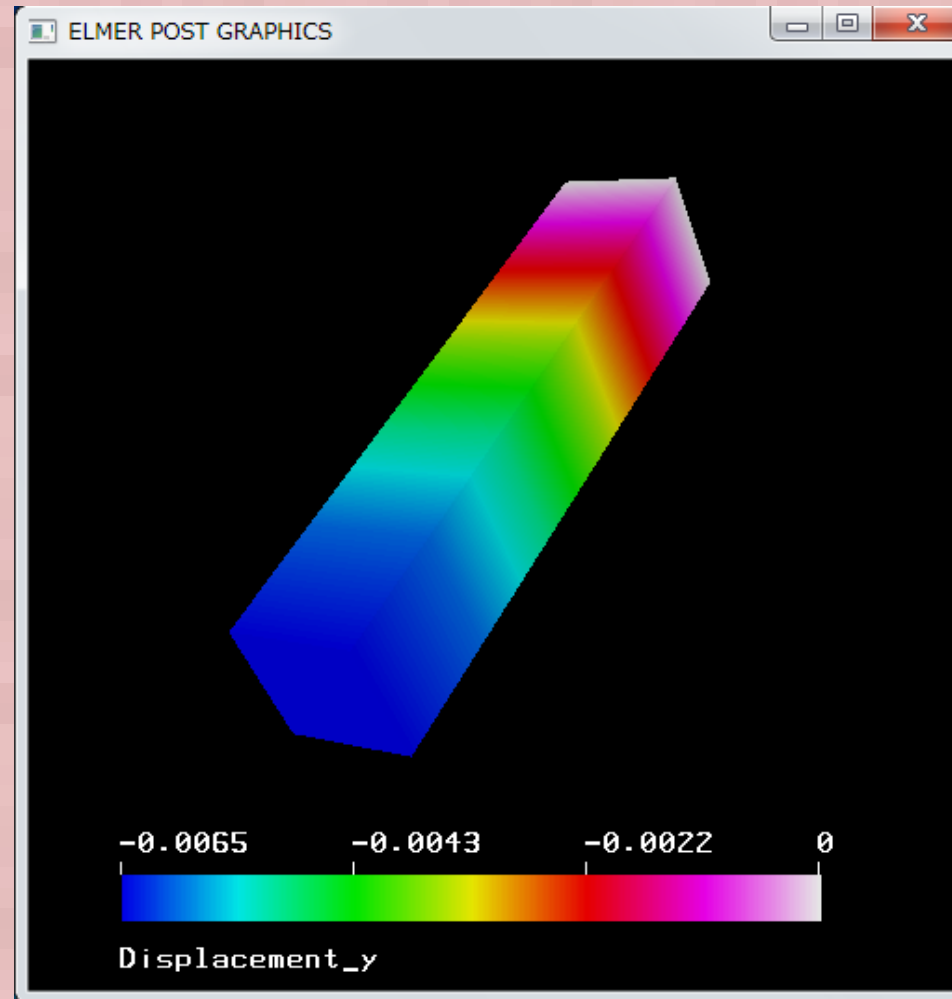
FrontISTRによる計算結果変形分布図を以下に示す。
(FrontISTRは線形解析の場合、自動的に要素タイプは非適合要素になる)
アイソパラメトリック要素は選択できない



非適合要素 361:
最大反り= --9.4799E-03mm

5要素のはい曲げ解析結果比較⑥

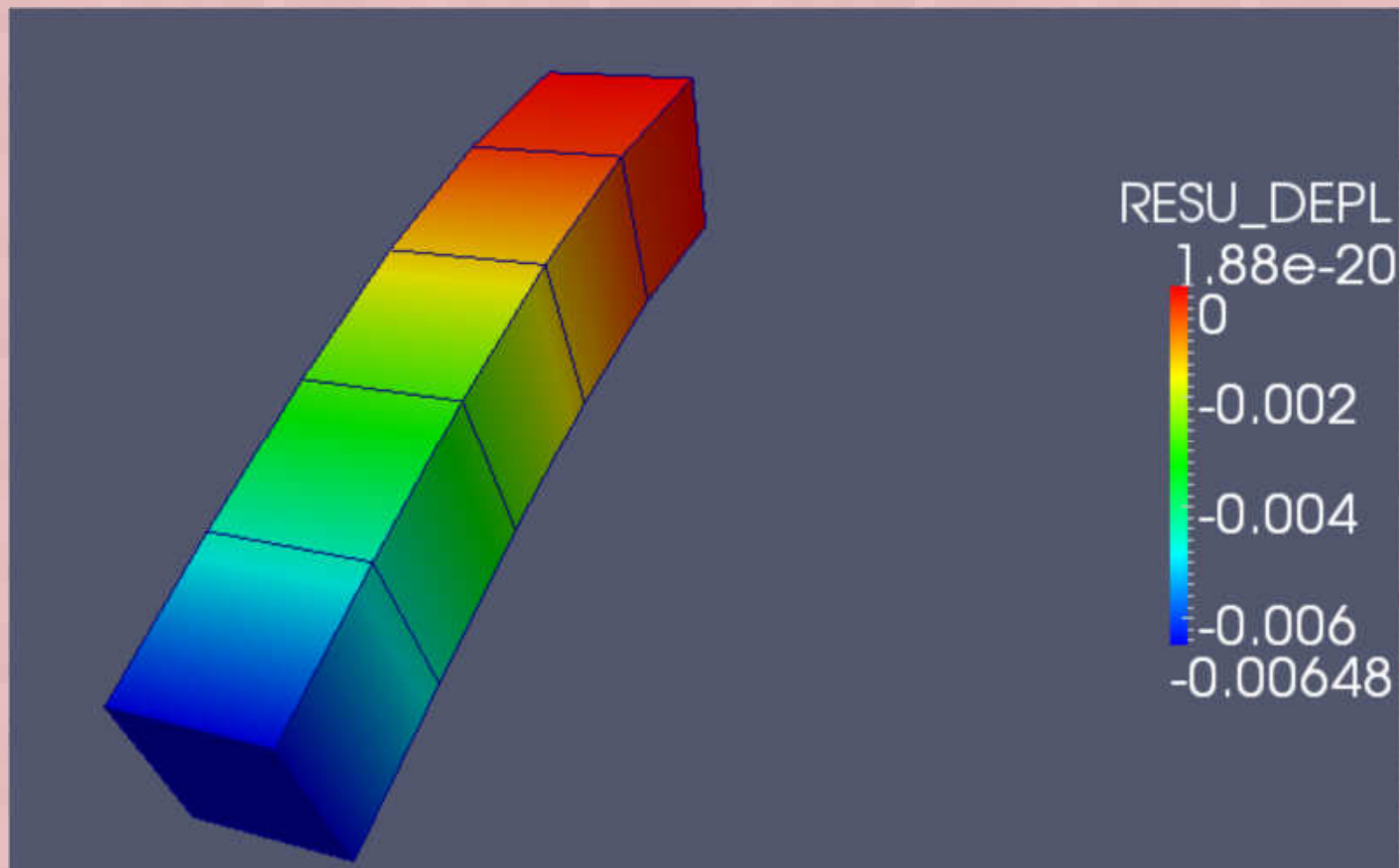
Elmerによる計算結果変形分布図を以下に示す。



アイソパラメトリック要素：
最大反り= -0.00647619 mm

5要素のはい曲げ解析結果比較⑦

Salome-meca (CodeAster) の結果を以下に示す

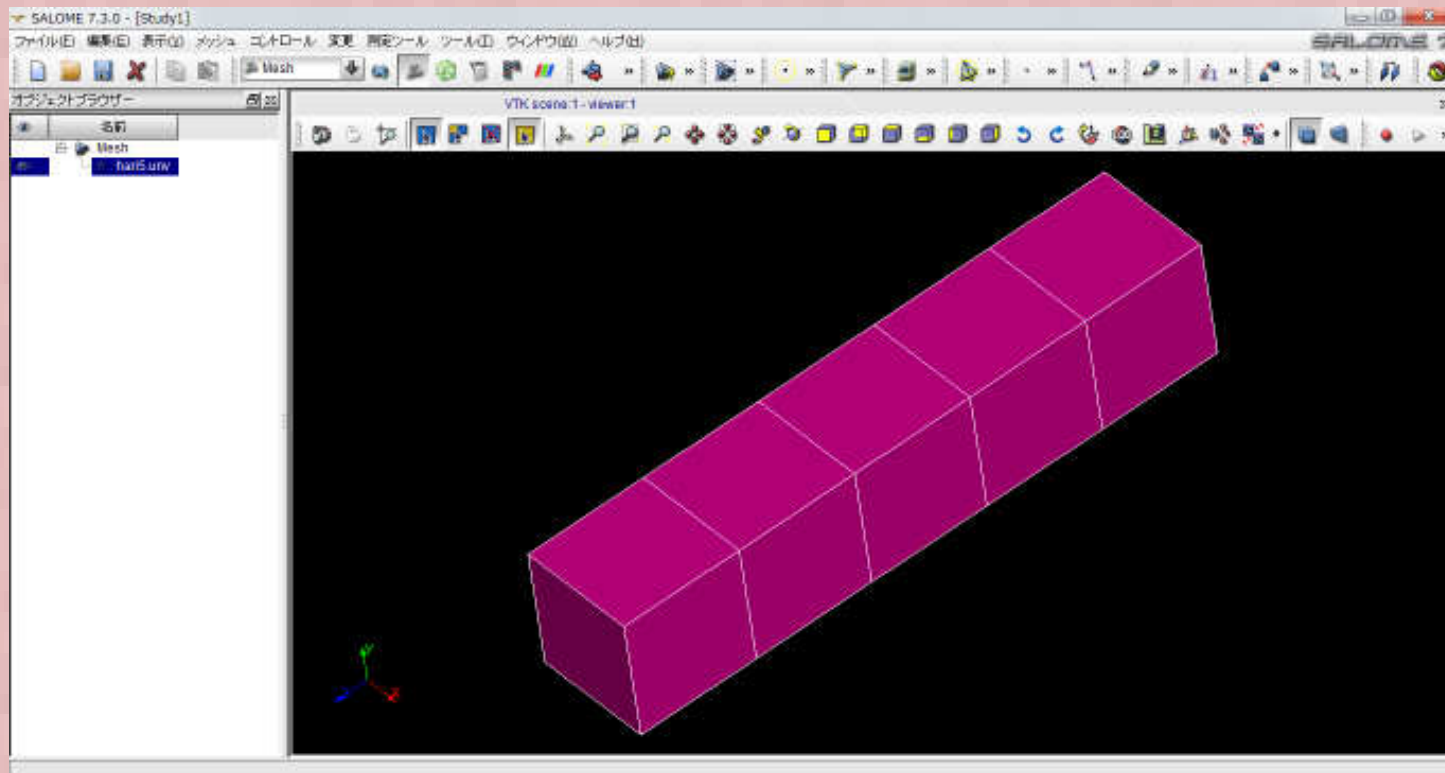


アイソパラメトリック要素 :
最大反り= -0.00647619mm

補足①.

- Salome-meca (CodeAster)計算での注意点

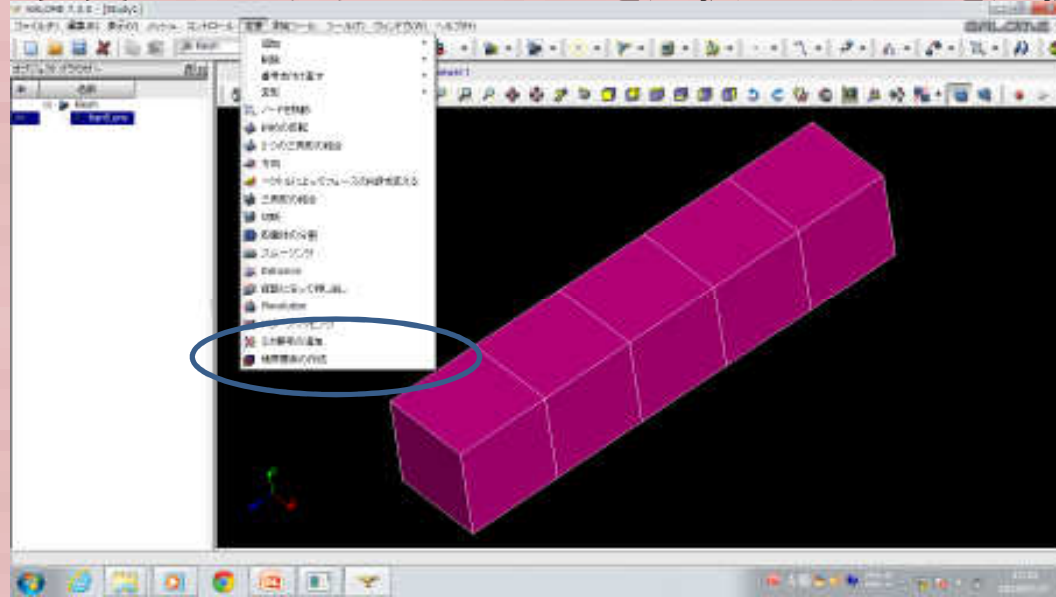
- ① 他のツールでメッシュ作成したファイルをSalomeメッシュモジュールにインポートするとそのままでは面グループの選択ができない。これは通常ソリッド要素部分しか出力されないため。これでは境界条件の選択がSalome無いので、以下のコマンドで表面メッシュを作成する必要がある。



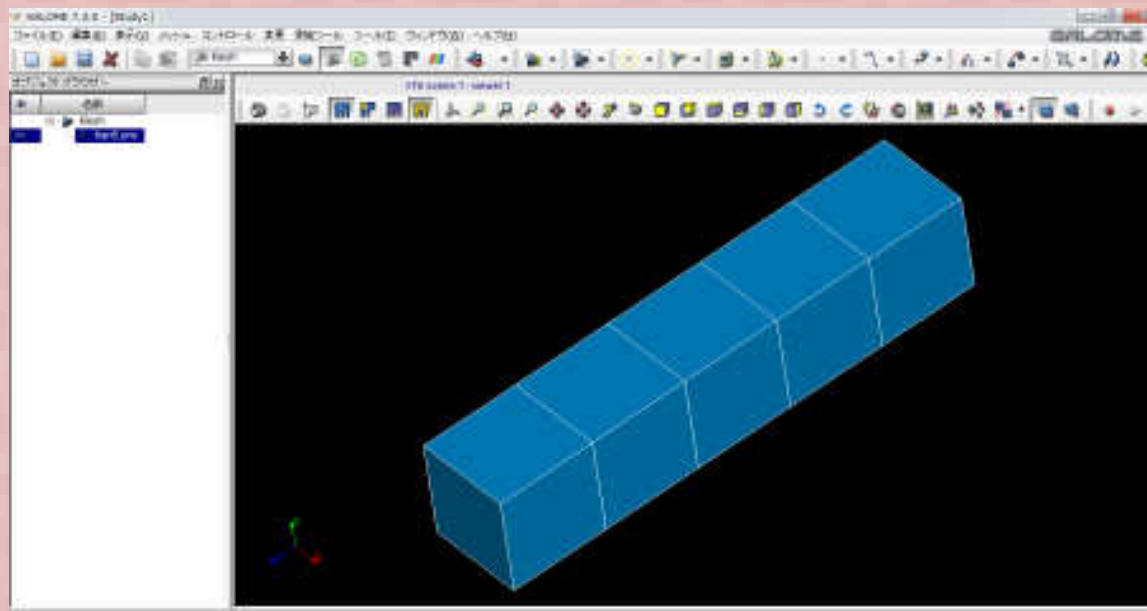
この状態では表面メッシュが無いので面グループ作成ができない

補足②

② 変更 → 境界要素の作成 を選択 3d→2d を選択して実行



成功すると下のよう
にメッシュが青色に
なり、この状態で表
面グループが選択で
きる



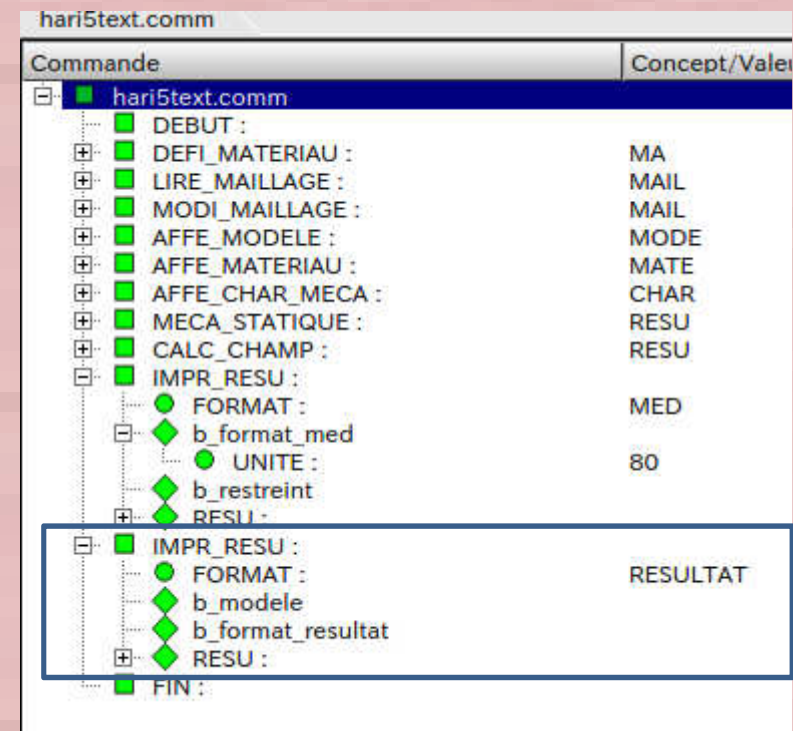
補足③

- 今回の用に節点反りの最大値を厳密に出力させたい場合は通常のポスト処理用の出力(MEDファイル)だけでなく、結果ファイルにテキスト出力させる。この場合は、commファイルに以下を追加する。結果*.resuファイルにテキストで節点変位、要素積分点応力、節点外挿応力などが出力される

```
IMPR_RESU(FORMAT='MED',  
UNITE=80,  
RESU=_F(RESULTAT=RESU,  
NOM_CHAM=('SIGM_NOEU','SIEO_NOEU','DEPL',)),);  
IMPR_RESU(FORMAT='RESULTAT',  
RESU=_F(RESULTAT=RESU,,));
```

Resu ファイル出力結果

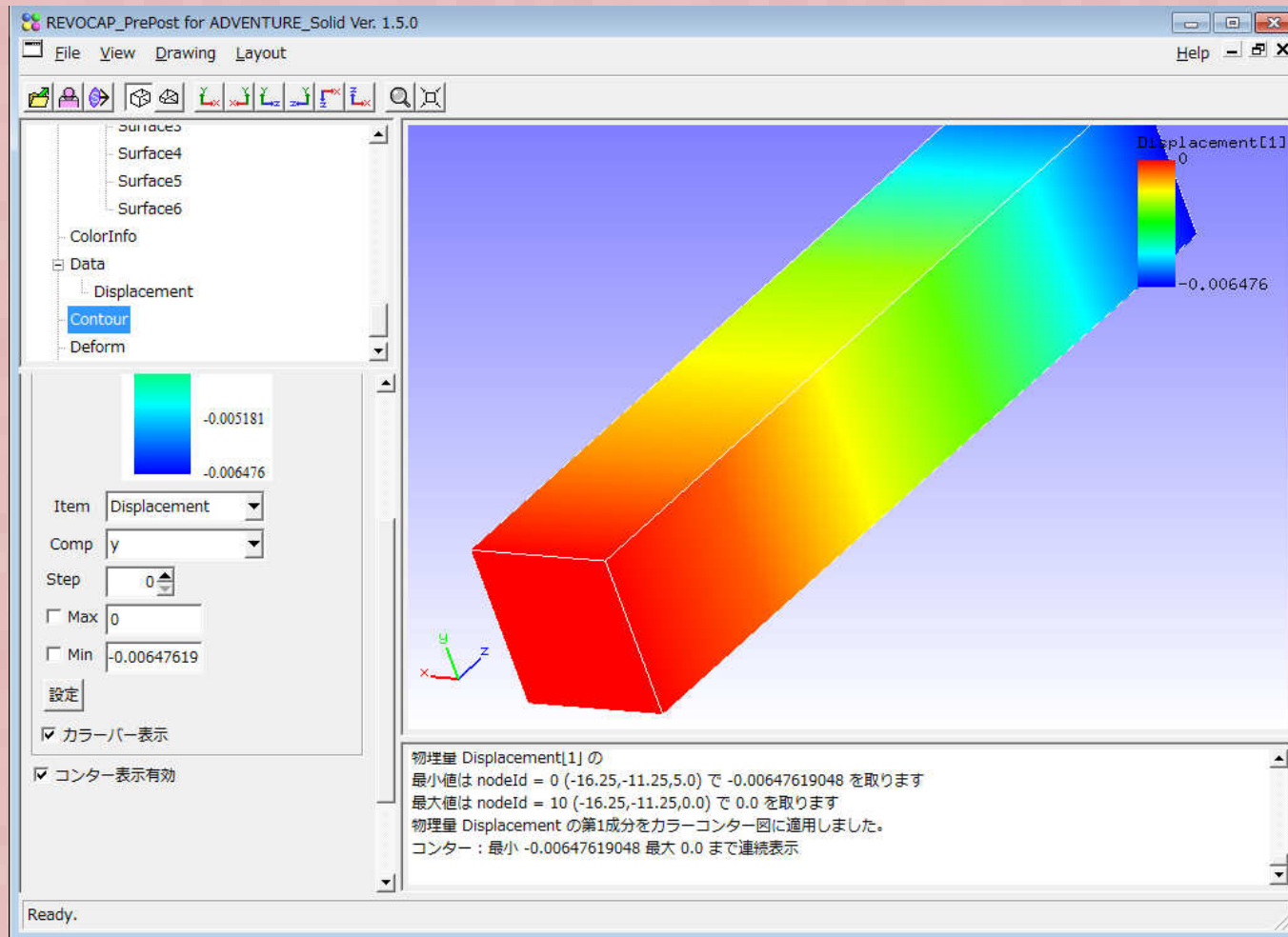
```
CHAMP AUX NOEUDS DE NOM SYMBOLIQUE DEPL  
NUMERO D'ORDRE: 1 INST: 0.000000000000000E+00  
NOEUD  DX  DY  DZ  N1  
7.69783542464708E-17 -6.47619047619105E-03 -9.52380952381023E-04 N2  
7.44643604590201E-17 -6.47619047619106E-03 9.52380952381047E-04 N3  
5.28006458000441E-17 -4.57142857142899E-03 -9.14285714285784E-04 N4  
4.85722573273506E-17 -4.57142857142899E-03 9.14285714285805E-04 N5  
3.33121117496171E-17 -2.81904761904789E-03
```



Eficus の画面ではこうなる

5要素のはい曲げ解析結果比較⑧

Adventure -Solid の計算結果を以下に示す



境界条件設定
結果処理は

Revocap
(CISSプロジェクト)
のオープンソース

を利用

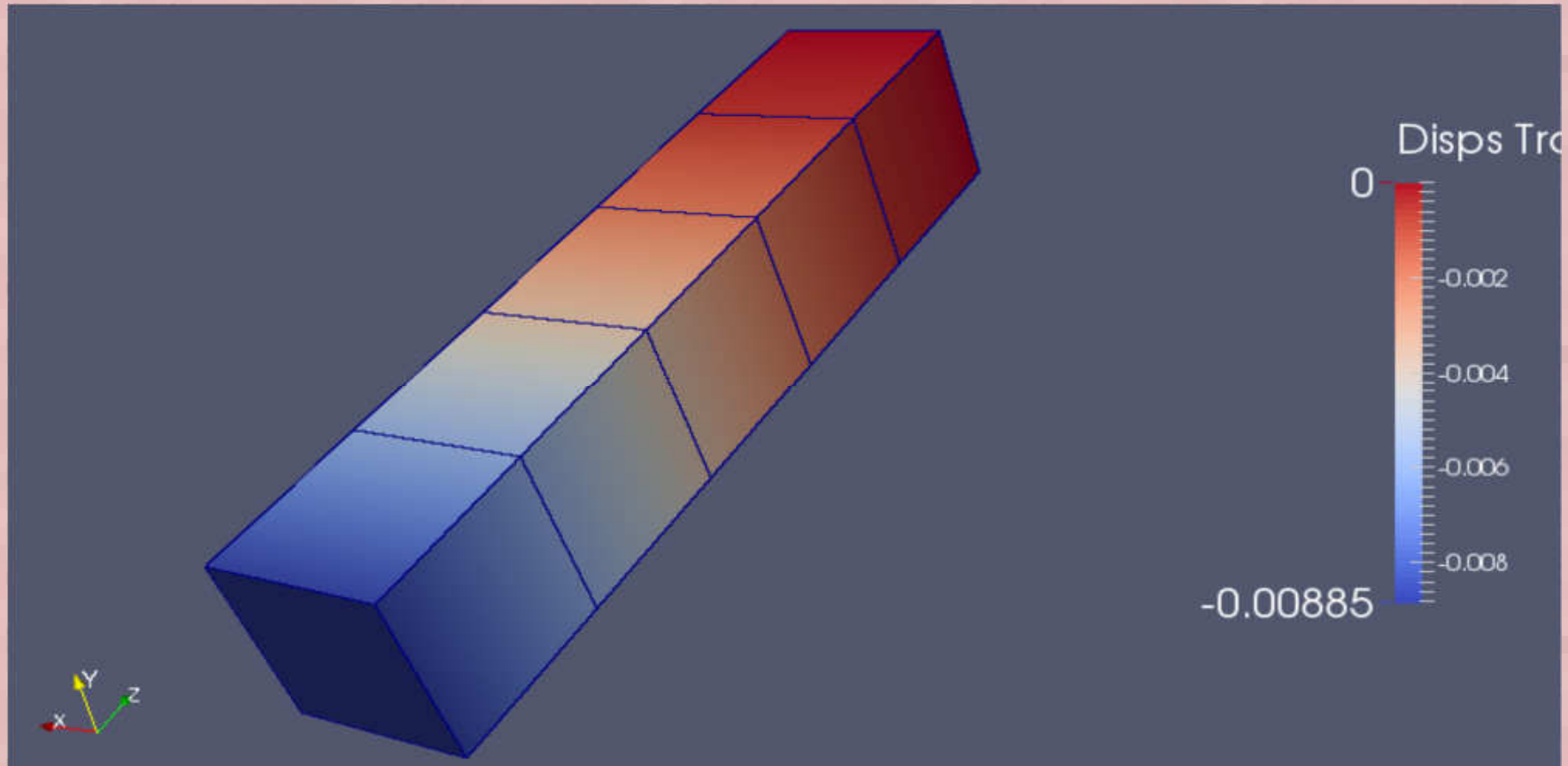
ソルバはDEXCS-
Adventure2010の
AdventureSolidを
利用

メッシュ変換が面
倒だった。。

アイソパラメトリック要素：
最大反り= -0.00647619mm

5要素のはい曲げ解析結果比較⑨

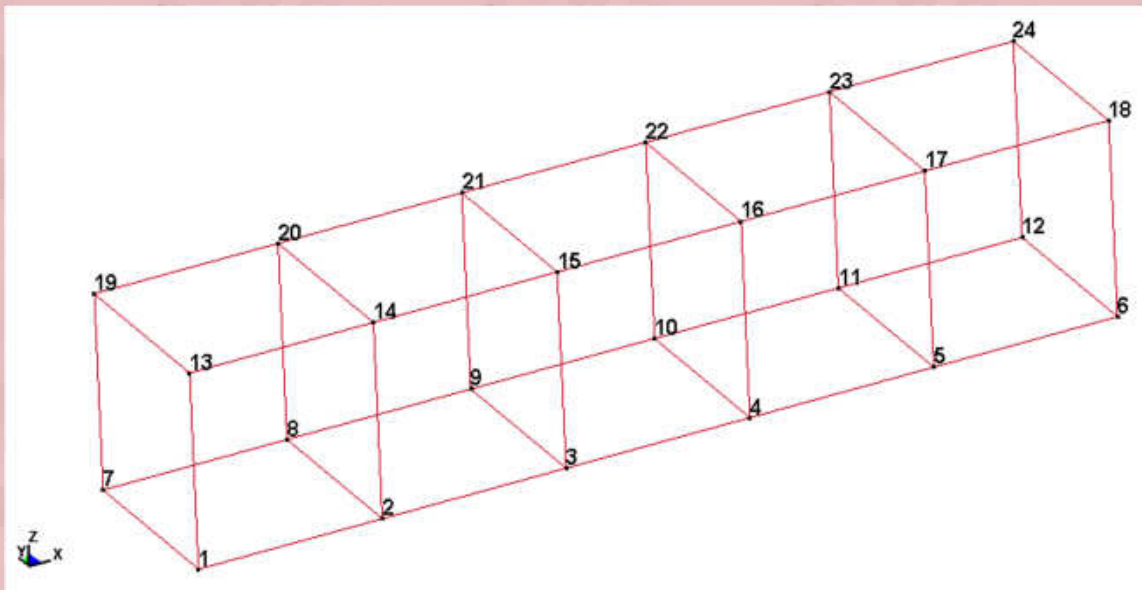
Warp3Dの計算結果を以下に示す



Warp3Dでアイソパラメトリック要素の指定方法わからずデフォルトの6面体要素を使用したら”B-bar要素”→せん断ロッキング(後述)を回避するために考えられた要素(選択的次數低減積分要素)になった：最大反り= -0.00885mm

5要素のはい曲げ解析結果比較⑧

- OpenCAE勉強会(構造など)FさんのExcel反り解析結果を以下に示す



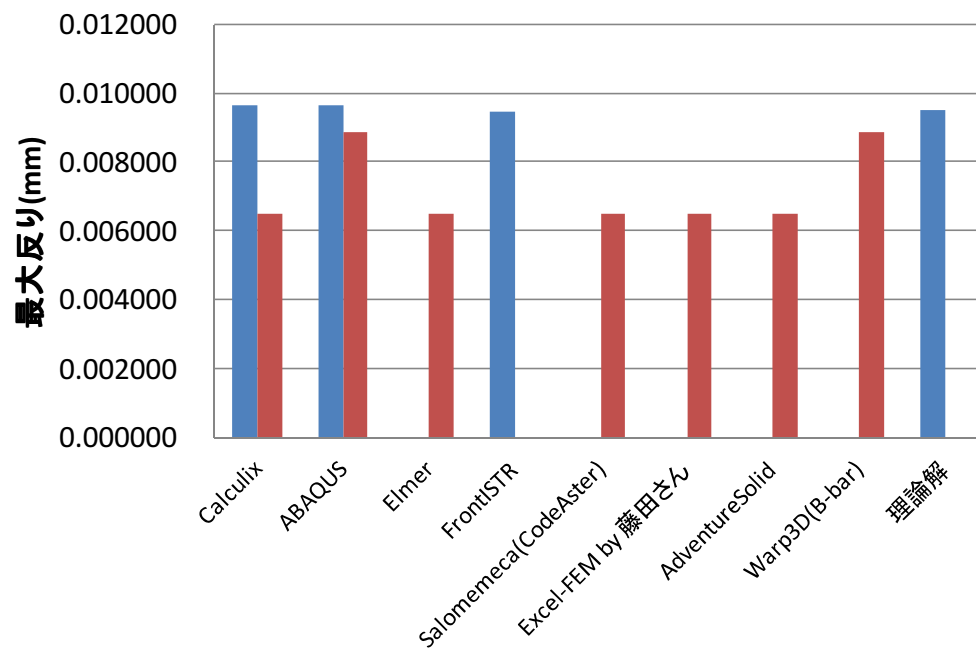
反り最大値: 計算結果
 -0.00647618597385924mm
 (140407_FEM_hexa_5ele_x.xlsm 計算結果)

	節点変位		
NID	disp_x	disp_y	disp_z
1	0	0	0
2	-0.00034	-8.6E-11	-0.00038
3	-0.00061	-3.5E-10	-0.00137
4	-0.0008	-7.4E-10	-0.00282
5	-0.00091	-1.4E-09	-0.00457
6	-0.00095	-3E-09	-0.00648
7	0	0	0
8	-0.00034	-8.4E-11	-0.00038
9	-0.00061	-3.6E-10	-0.00137
10	-0.0008	-7.1E-10	-0.00282
11	-0.00091	-1.5E-09	-0.00457
12	-0.00095	-3E-09	-0.00648
13	0	0	0
14	0.000343	-8.4E-11	-0.00038
15	0.00061	-3.5E-10	-0.00137
16	0.0008	-7.4E-10	-0.00282
17	0.000914	-1.8E-09	-0.00457
18	0.000952	-6.4E-09	-0.00648
19	0	0	0
20	0.000343	-9.1E-11	-0.00038
21	0.00061	-3.2E-10	-0.00137
22	0.0008	-9.2E-10	-0.00282
23	0.000914	-8E-10	-0.00457
24	0.000952	-8E-09	-0.00648

5要素のはい曲げ解析結果比較⑦

各ソルバによる梁の最大反り計算結果を以下に示す。

	非適合要素	アイソパラメトリック要素
Calculix	0.009619	0.006476
ABAQUS	0.009619	0.008846
Elmer	-	0.006476
FrontISTR	0.009480	-
SalomeMeca(CodeAster)	-	0.006476
Excel-FEM by Fさん	-	0.006476
AdventureSolid	-	0.006476
Warp3D(B-bar)	-	0.008850
理論解	0.009524	



Warp3D, Abaqusは
古典的なアイソパラメトリック要素ではなく
選択的次數低減積分要素を利用

非適合要素 > 選択的次數低減積分
要素 > アイソパラメトリック要素

の順番で理論解に近い解が得られて
いることを確認 それぞれの要素
ではソルバによらずほぼ一致する
解が得られている！

はりの反り報告まとめ

- はり曲げ解析についてABAQUS/studen, Calculix, FrontISTR各ソルバについてベンチマークを行い、計算結果を比較した。
- 非適合要素とアイソパラメトリック要素で各ソフトでおおよそ一致する結果になった。
- 非適合要素は理論解に近く1%程度大きめだがほぼ一致する結果、アイソパラメトリック要素では理論解より30%程度固めの結果になった
- 非適合要素ではCalculixとABAQUSは完全に一致、FrontISTRはやや低い。
- アイソパラメトリック要素はSalome, Calculix, Elmer、藤田さんのExcel計算と完全に一致する結果になった。
- B-bar要素を使ったWarp3Dの解析結果はABAQUSの標準6面体要素(C3D8)の解析結果と一致したので、ABAQUSのC3D8要素はB-bar要素(選択的次數低減積分要素)を利用していると確認できる

動的解析について

- a. 動的解析について：動的解析と静的解析の違いは、静的解析が慣性力を無視するのに対して、動的解析では慣性力項を考慮することである。ニュートン運動方程式を見れば違いは明瞭。
- b. 慣性力項を含まず、時間とともに物性値が変化する現象（応力緩和、粘弾性、クリープ）は動的解析とは区別して準静的問題という。

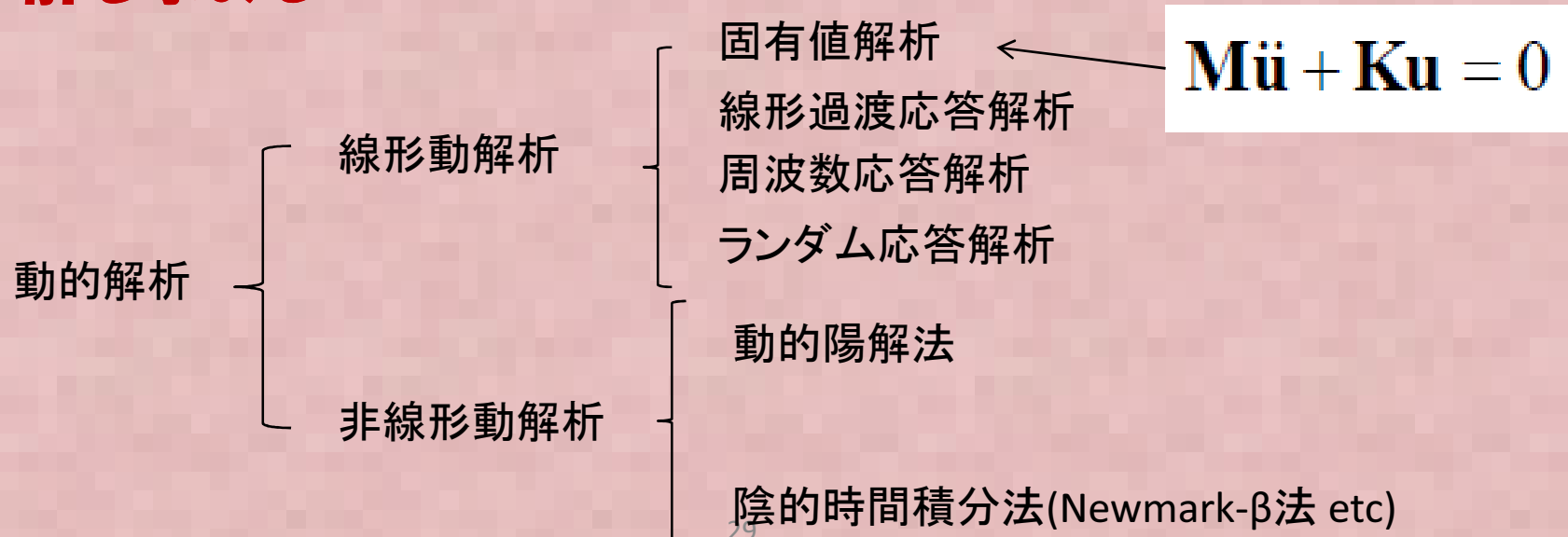
慣性力



$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + Kx = F$$

動的解析について

- 動的解析の分類：動的解析は大きく非線形性（物性（速度依存etc）、接触など境界非線形）を考慮するか、しないかで大きく2種類に分類できる。
- 線形解析の場合は通常固有値計算を行い、この結果をベースに周波数領域で計算を行う。これに対して非線形解析の場合は直接時間積分を行い時間領域で解を求める



固有値解析とその他の線形振動・ 過渡解析の関係①

- 固有値計算とは? $M \frac{d^2 u}{dt^2} + Ku = F$

荷重 F が周期的三角関数で作用する場合

$$F(t) = F_0 e^{i\omega t} = F_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

この場合、変位も同様に周期関数となることが想定される

$$u(t) = u_0 e^{i\omega t} = u_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

加速度はこの場合

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} = u_0 \frac{d^2 e^{i\omega t}}{dt^2} = -u_0 \omega^2 e^{i\omega t}$$

固有値解析とその他の線形振動・ 過渡解析の関係②

- 固有値計算とは?

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + Ku = F$$

運動方程式に代入し、両辺を $e^{i\omega t}$ で割る

$$(-\omega^2 M + K)u_0 = F_0$$

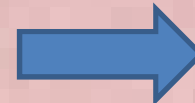
行列式 $\det(-\omega^2 M + K) \neq 0$ の場合は u_0 は自明解を持つ。

$\det(-\omega^2 M + K) = 0$ の場合も解を持ち、この時の解が固有モード

$$(-\omega^2 M + K)u_0 = 0$$

または u_0 を x また ω^2 を λ とおくと

$$Kx = \omega^2 Mx = \lambda Mx$$



固有値の数値計算方法

- サブスペース法
- ランチョス法
- その他(べき乗法 など)

上記の一般化固有値問題を解くのが固有値計算になる。

$\lambda = \omega^2$ が固有値 x は変位の固有ベクトルという。 ω は角速度

$\omega(\text{rad/sec})$ は固有周波数 $f(\text{Hz})$ と $\omega = 2\pi f$ の関係がある

動的解析の可能なオープンソースCAEソフト

	線形動解析				非線形動解析		備考
	固有値	線形過渡応答解析	周波数応答解析	ランダム応答	動的陽解法	陰的時間積分法	
CodeAster	○	○	○	○?	△?	○	
Calculix	○	○	○	×	○	○	
Elmer	○	○	△	?	×	×	
FrontISTR	○	×	△	×	△	○	
Impact	×	×	×	×	○	×	
AdventureV2	○	—	○?	?	×	×	

固有値解析については、代表的なオープンソースCAEソフトにて解析が可能である。今回はCodeAster, Calculix, Elmer, FrontISTRにて固有値計算のベンチマークを行い、それぞれのソフトでの計算結果・計算手順などをまとめた。

○×△は筆者の主観でつけており、間違っている可能性が高いです。

固有値計算理論解①

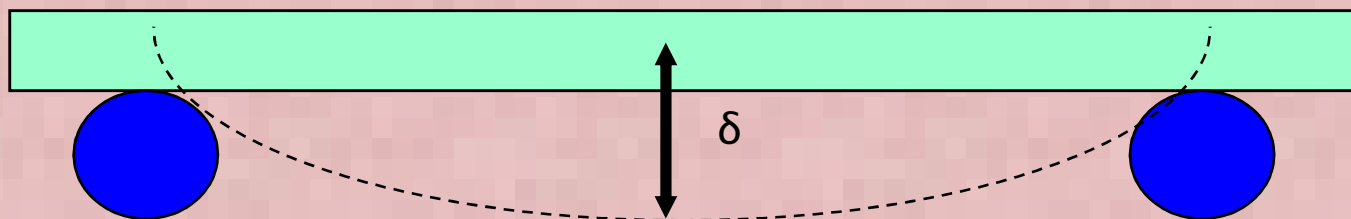
- 振動固有値

- 各種固定条件におけるはりの固有振動数は以下の式で表せる。

$$f = \frac{k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

ただし、 k は固定条件により定まる係数、 A は“はり断面積”

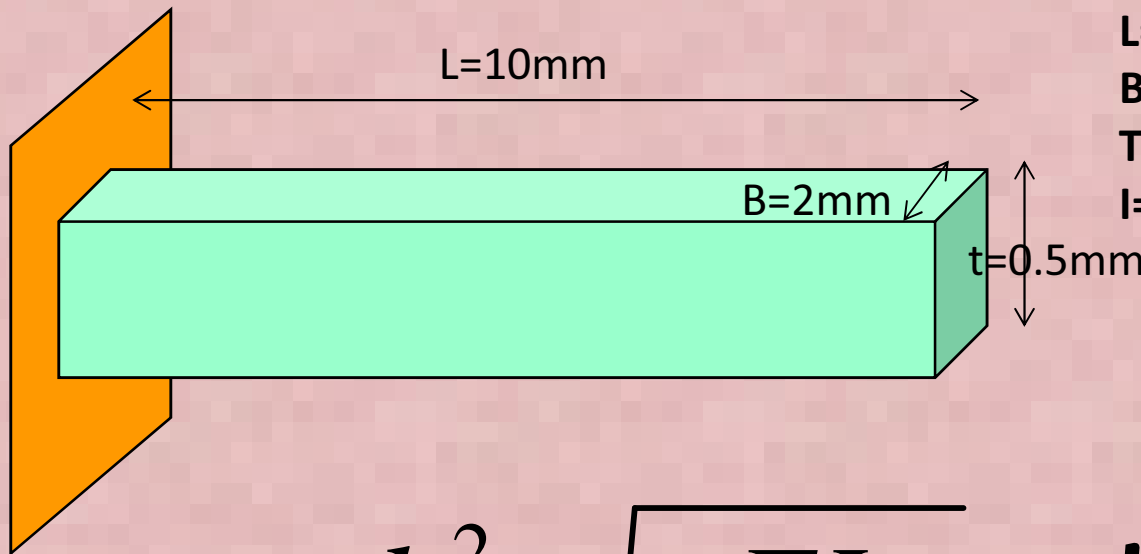
	k	1次	2次
① 両端固定		4.73	7.853
② 片端固定、片端支持		3.927	7.069
③ 片端固定、片端自由		1.875	4.694



両端支持の場合は
 $k = n\pi \cdot \sqrt{2\pi}$

固有値計算理論解②

- 以下の片持ちはりの固有値振動数を計算する。



$$E = 70000\text{MPa}$$

$$L = 10\text{mm}$$

$$B = 2\text{mm}$$

$$T = 0.5\text{mm}$$

$$I = bt^3/12 = 0.020833\text{mm}^4$$

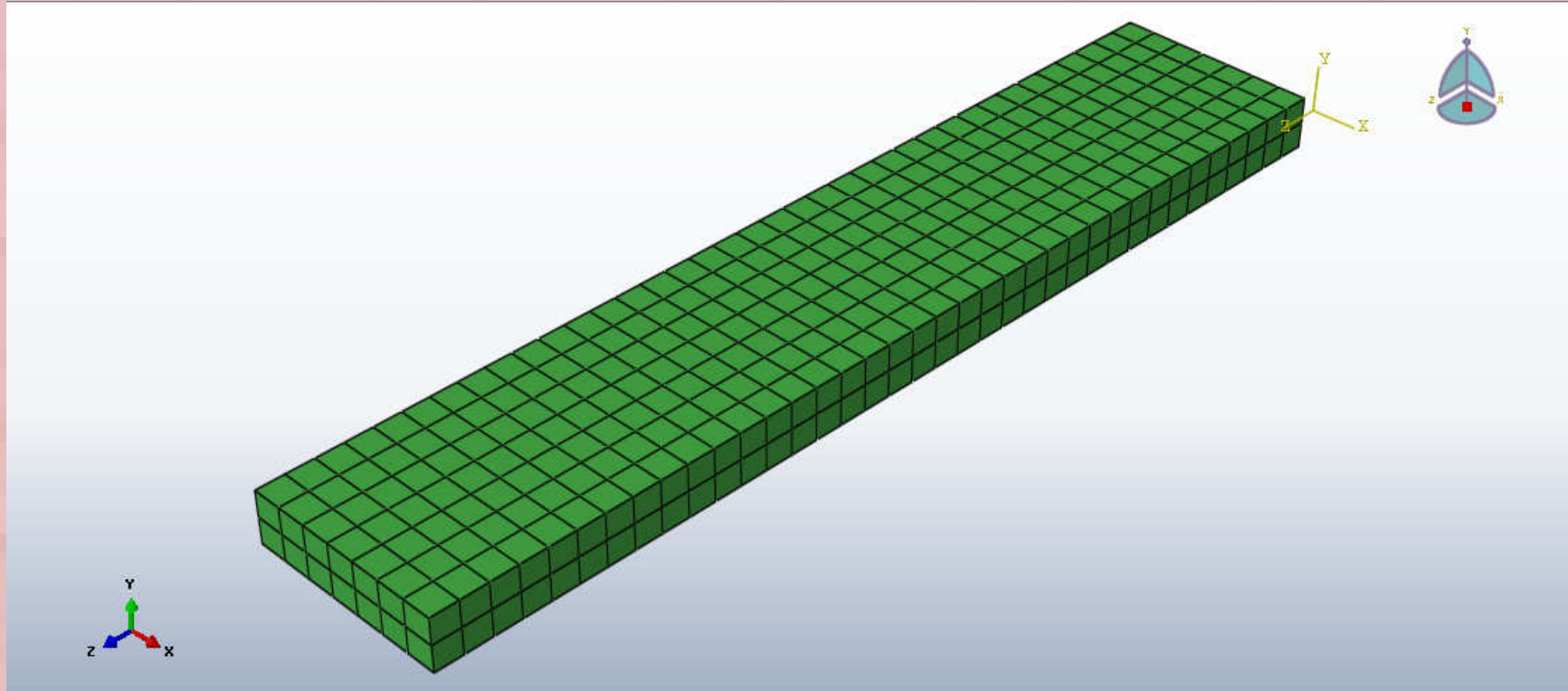
$$\text{密度} = 2.7\text{e-9}$$

$$k = 1.875$$

$$f = \frac{k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} = 4114(\text{Hz})$$

1次固有振動数

固有値解析モデル概要



メッシュ概要

-節点数=912

-要素数=518

(要素:3D ソリッド)

-ABAQUS(商用ソフト)結果と比較するために、無料版のABAQUS V6.12/studentedition でメッシュを作成, 計算した(計算できるのは1000節点まで)

入力ファイル設定例①

- 以下はCalculixの解析ファイルの例です。

```
*Material, name=alumi
*Density
2.7e-09,
*Elastic
70000., 0.3
**
```

← 密度

← ヤング率

```
** BOUNDARY CONDITIONS
**
```

```
*Boundary
Set-1, 1,3, 0.0
```

} 端点を固定

```
** -----
**
```

```
** STEP: Step-1
```

```
*Step
```

```
*Frequency
```

```
20,
```

```
*NODE PRINT, FREQ=9999, NSET=ALL
```

```
U
```

```
*NODE FILE, FREQ=9999, NSET=ALL
```

```
U
```

```
*End Step
```

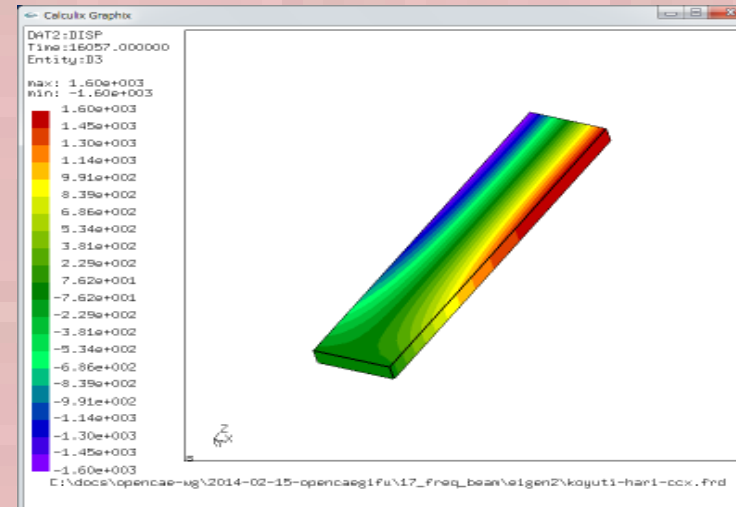
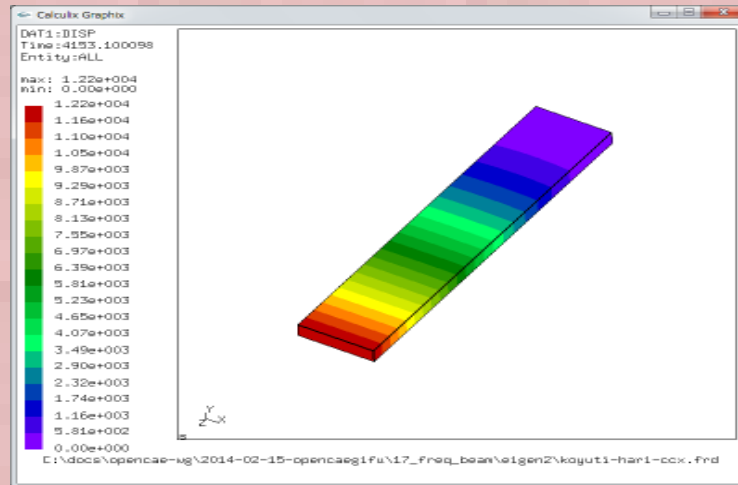
CalculixはAbaqusとほとんど同じ形式であり、1つの入力ファイル(input file)にテキスト形式で節点座標、要素コネクティビティ、材料物性、境界条件、解析条件を全て記述する

固有値解析を指示、20は20モードまで計算して、出力する指定

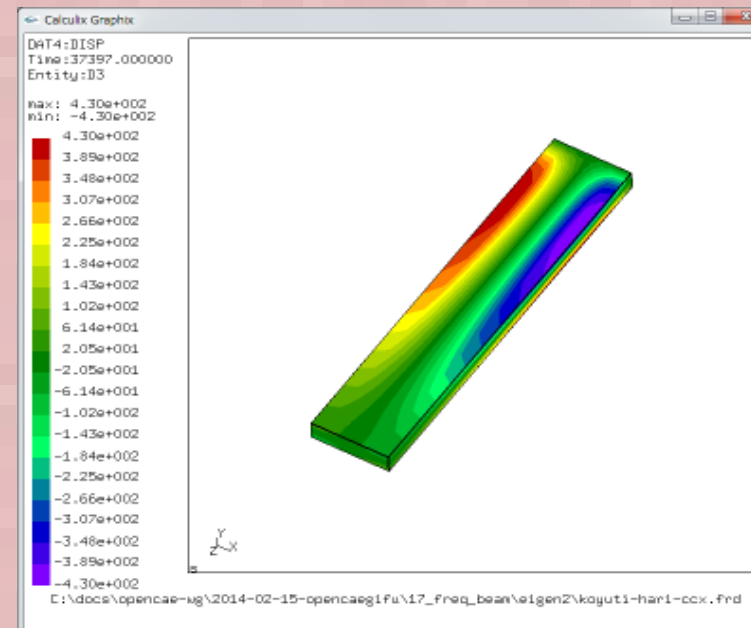
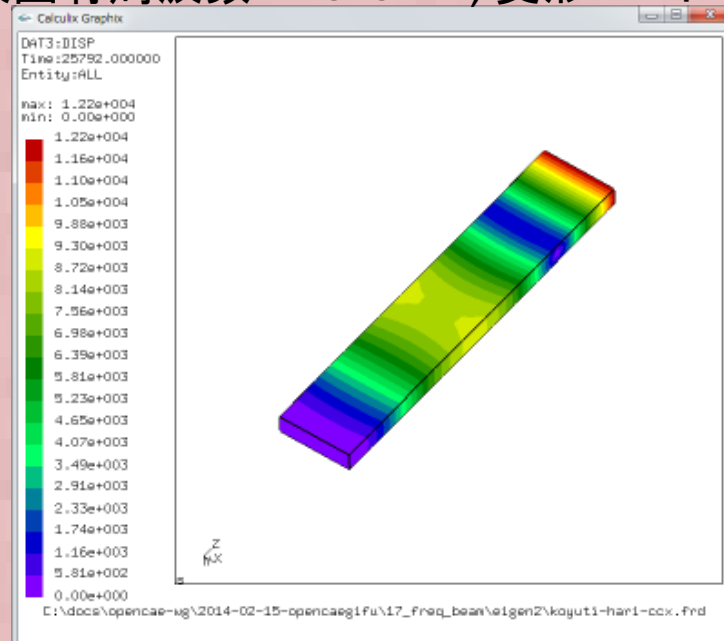
結果出力指示

Calculix解析結果

1次固有周波数=4153Hz, 変形モード↓ 2次固有周波数=16057Hz, 変形モード↓



3次固有周波数=25792Hz, 変形モード↓ 4次固有周波数=37397Hz, 変形モード↓



各種ソルバへのデータ変換方法

- Abaqus → Calculix : Abaqus Student editionからAbaqus input 形式ファイルを出力. Calculix向けに一部テキストを修正(出力関係のみ修正が必要で、あまり手修正の手間は無い)
- Calculix/Abaqus → FrontISTR こちらも基本的にメッシュデータはAbaqus形式なのでメッシュデータ(msh)はFrontISTR形式に手修正。その他(cnt, hecmw_cntl.dat)はFrontISTRの固有値解析チュートリアルデータを利用する
- Calculix/Abaqus → Salome-meca, Elmer Universalファイルに変換して読み込む。詳細は次ページ。

各種ソルバへのデータ変換方法②

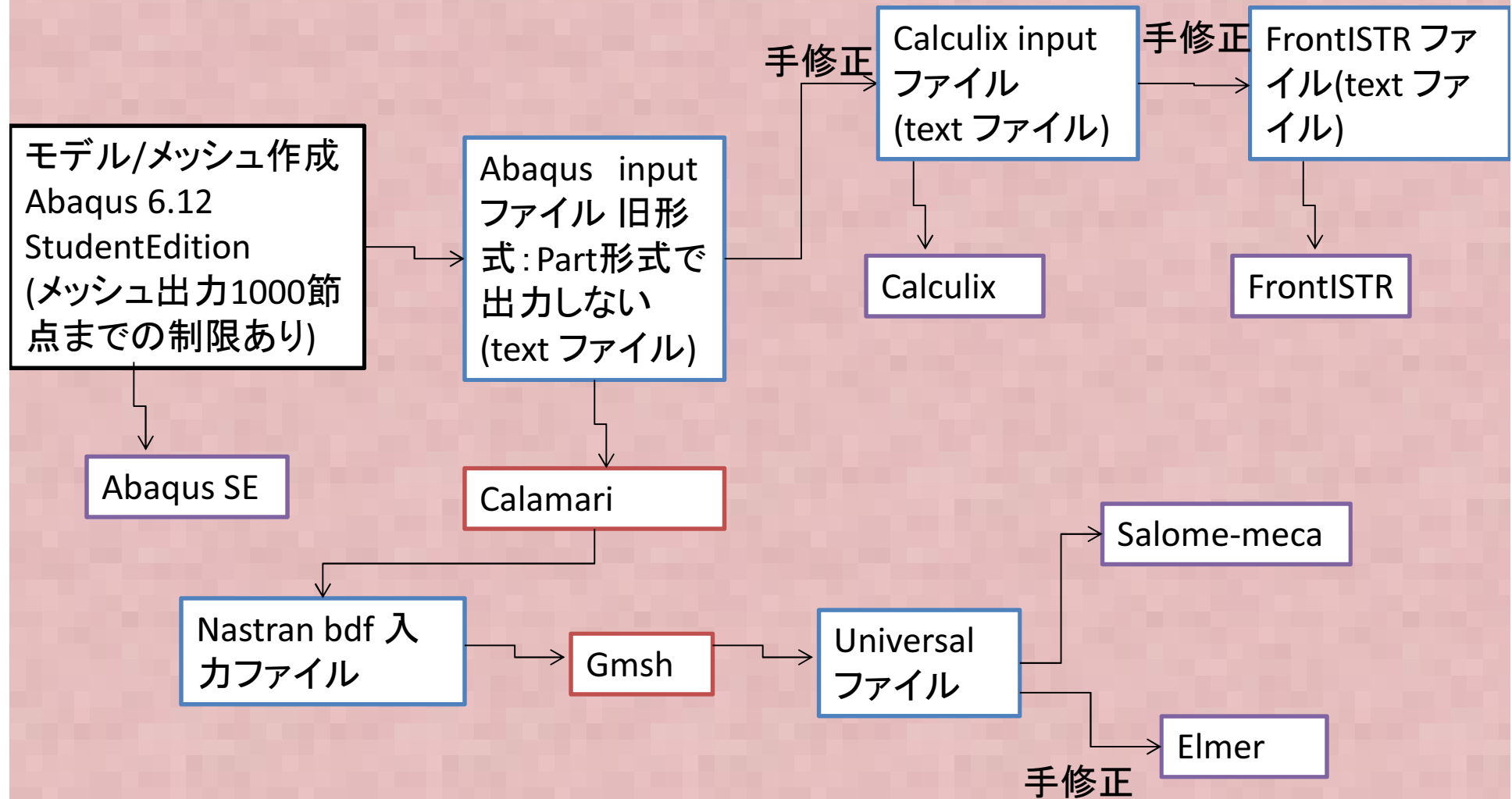
- Calculix/Abaqus → Abaqus形式ファイルは直接Universal ファイルに変換するフリーのツールが無いので、Abaqus 形式ファイルをNastran形式に以下のフリーソフトで変換してNastran形式ファイルをGmshに読み込み、GmshからUniversalファイルに出力する。

http://www.geocities.jp/morchin33/fem_prepost2/calamari.html

Calamari: Nastran, Marc, Abaqus, LS-Dyna 形式ファイルの相互変換ができるフリーソフト

・Elmer(Elmer GUI)はGmsh/Salome のUniversal ファイル形式で読み込みエラーをおこした。
→ 浮動小数点の “X.xxxxD+XX” の倍精度形式を “X.xxxxE+XX” に手修正必要

各種ソルバへのデータ変換方法③



各ソルバ固有値解析結果

梁モデル固有値解析結果<固有振動数>: 理論1次固有振動数=4114Hz

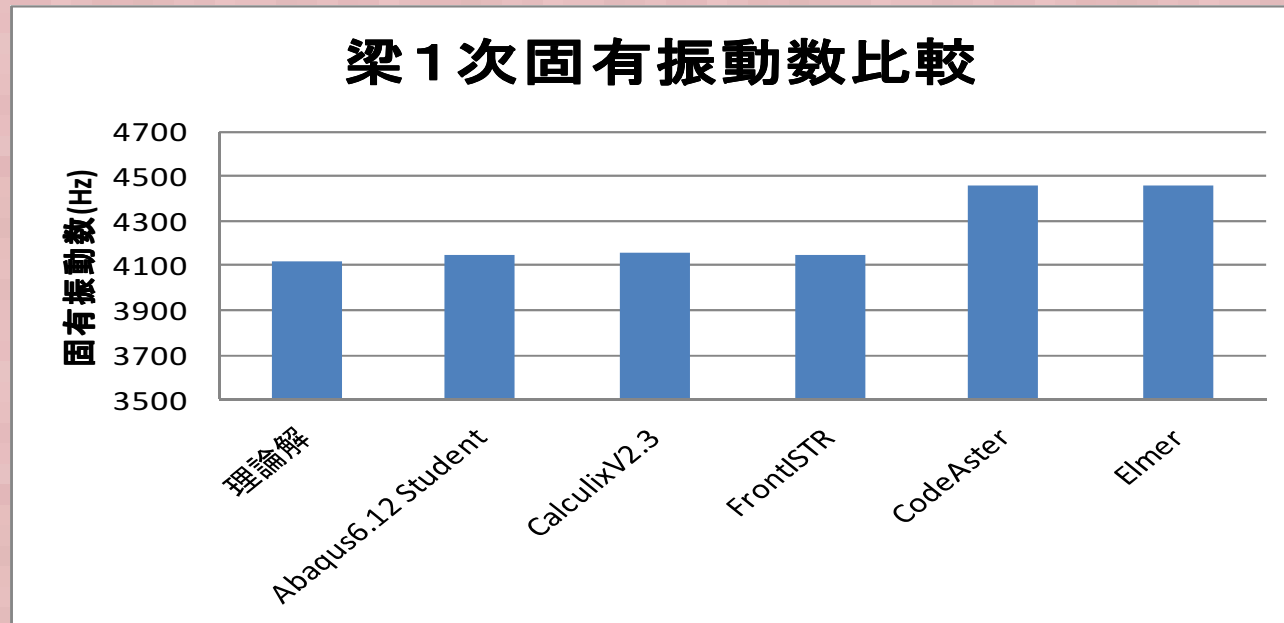
固有モード	Abaqus6.12 Student	CalculixV2.3	FrontISTR	CodeAster	Elmer
1	4150.8	4153.074	4150.88	4460.38	4460.380142
2	16047	16056.59	16047.6	16146.2	16146.21647
3	25698	25791.83	25698.4	27668.8	27668.76431
4	36179	37397.24	36182.1	37532	37531.98198
5	70797	71400.84	70799.8	76453.3	76453.26656
6	86620	86901.62	86620.9	87319.4	87319.38727
7	109863	113768.9	109879	114429	114429.4696
8	127788	127810.8	127788	127860	127859.6445
9	135698	137780.4	135704	147163	147162.6328
10	187263	194618.4	187307	196490	196490.2557
11	206675	207999.7	206677	208899	208899.3405
12	218246	223428.3	218259	237968	237968.3248
13	270147	282258.3	270240	286282	286281.8289
14	315693	326289.9	315716	346476	346476.1295
15	343763	347416.3	343766	348827	348827.0474
16	359617	378374.9	359785	382691	382690.6147
17	381882	382505.4	381882	385576	385575.7267
18	425021	444141.7	425059	470168	470167.7013
19	456213	484102	456480	495434	495433.8496
20	489206	496902.7	489211	498896	498895.7786

Abaqus, Calculix, FrontISTR の一次固有振動数は
CodeAster, Elmerより理論解に近い

CodeAster, Elmer の解は20次
までほぼ一致する

固有値解析結果差の考察

- 固有値解析の1次固有値で1割程度差の出た要因？
→ 要素内形状関数の違いによるものと推定される。
CodeAster(Salome-meca)とElmerは6面体の要素内形状関数は古典的なアイソパラメトリック要素を使用しているため曲げ剛性が実際より固めに計算される。
- CalculixとFrontISTR(とAbaqus)は曲げ剛性に精度の良い非適合要素を用いているためやや精度の良い結果が得られる
- 確認のため、Calculixにてアイソパラメトリック要素での解析結果を追加する(要素タイプを"C3D8I" から"C3D8" に変更)



非適合要素とは？

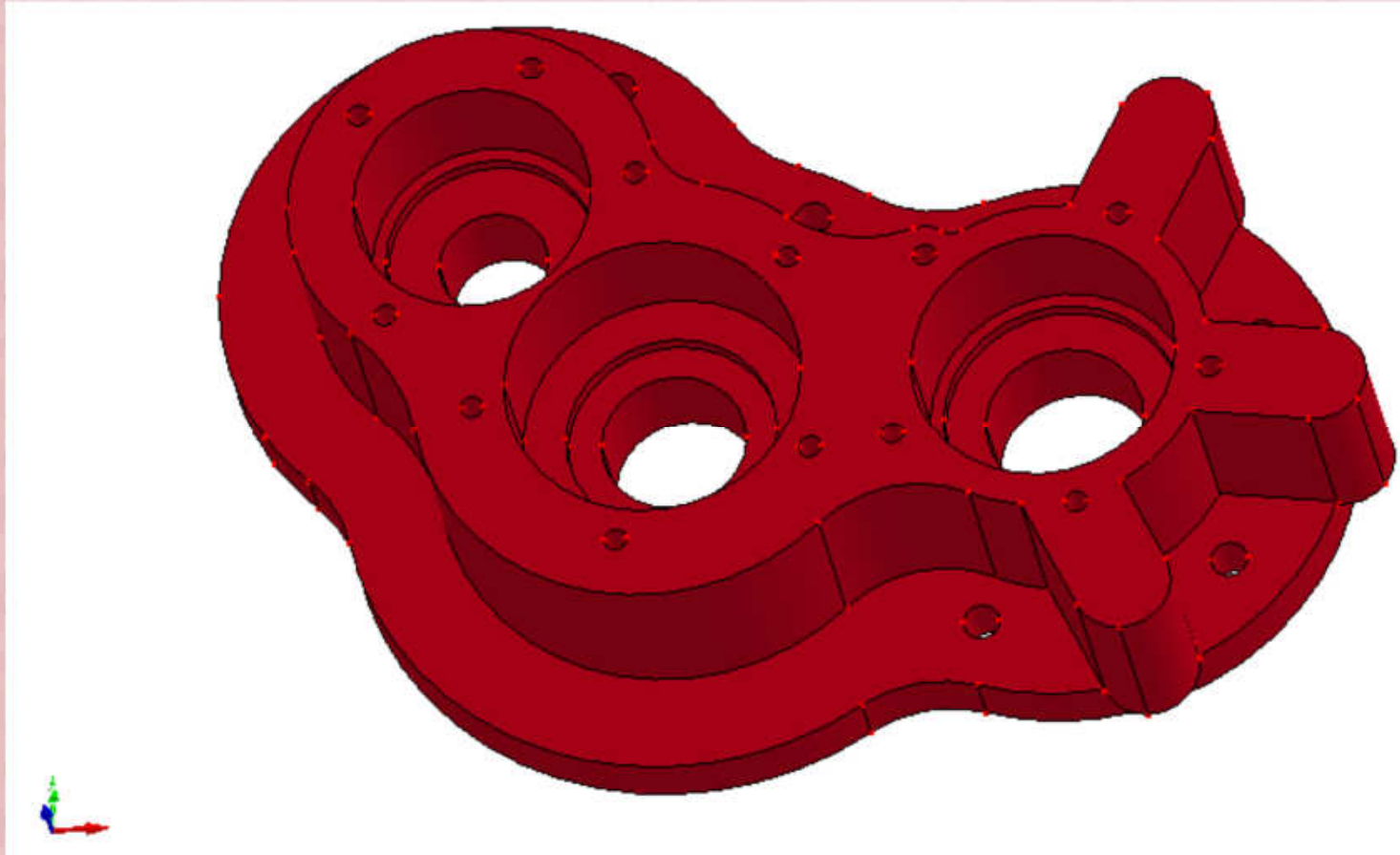
- 曲げ問題に対するせん断ロッキング(実際より曲げ剛性が硬めに計算される現象)に対して対応するために考えられた要素
- 具体的には要素の変位内挿関数に高次(通常2次)の非適合モードを追加する。ただし、要素間の変位整合性はとらないので、非適合モードは全体剛性マトリックスには影響しない。このため計算負荷は2次要素等と比べて相当少ない

6面体アイソパラメトリック要素をもちいた 各ソルバ固有値解析結果

固有モード	CalculixV2.3	CodeAster	Elmer
1	4460.4	4460.4	4460.4
2	16146.2	16146.2	16146.2
3	27668.8	27668.8	27668.8
4	37532.0	37532.0	37532.0
5	76453.3	76453.3	76453.3
6	87319.4	87319.4	87319.4
7	114429.5	114429.0	114429.5
8	127859.6	127860.0	127859.6
9	147162.6	147163.0	147162.6
10	196490.3	196490.0	196490.3
11	208899.3	208899.0	208899.3
12	237968.3	237968.0	237968.3
13	286281.8	286282.0	286281.8
14	346476.1	346476.0	346476.1
15	348827.1	348827.0	348827.0
16	382690.6	382691.0	382690.6
17	385575.8	385576.0	385575.7
18	470167.7	470168.0	470167.7
19	495433.9	495434.0	495433.8
20	498895.8	498896.0	498895.8

→ 3種類のソルバの解析結果が一致。よって要素内形状関数の曲げ剛性の違いで固有値が異なったことが確認できた

自動メッシュによる計算例



・より現実に近い計算例題として、Elmer のサンプルとして添付されている上図のStep file “pump_carter” を対象に固有値解析を実施した。

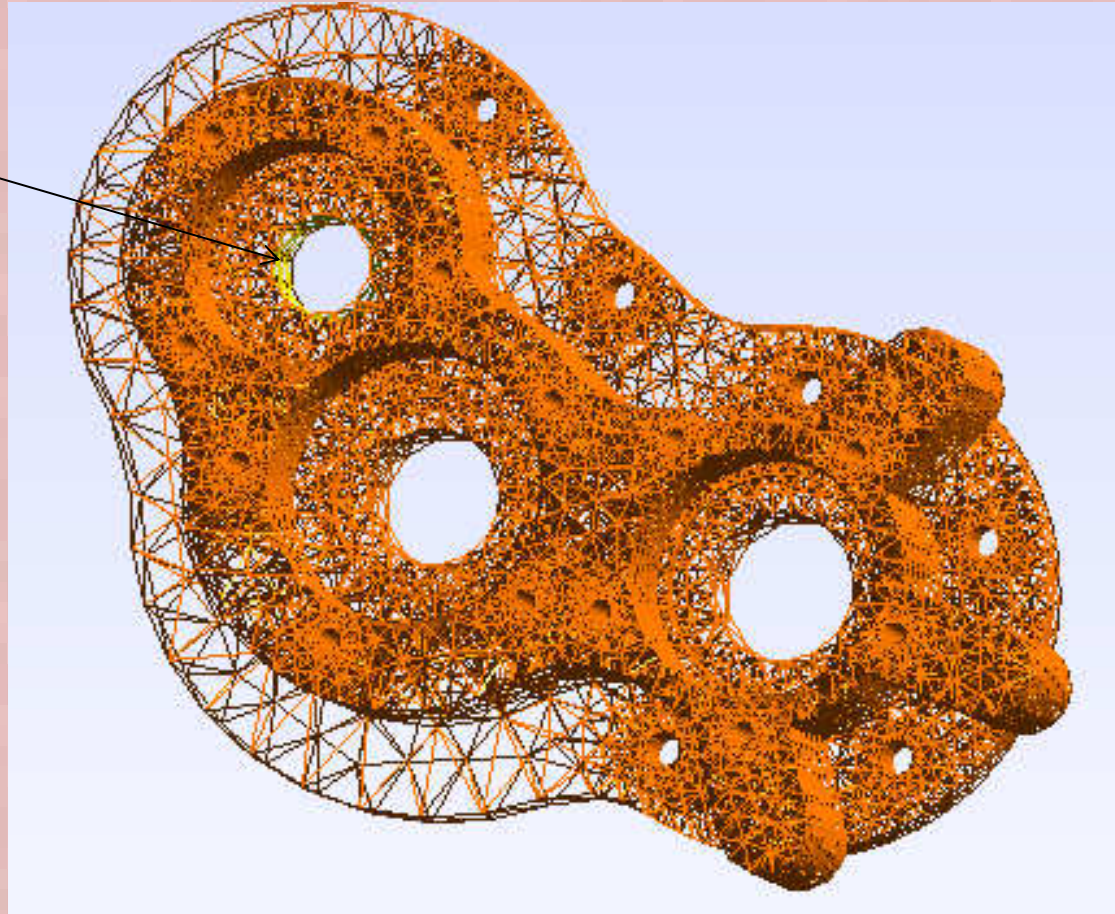
自動Mesh 作成

モデルは"m"にて
作成されているよ
うなので標準SI 単
位にてモデル化



物性値
 $E=2.1E+11\text{Pa}$
 $\nu=0.3$
密度= 7900kg/m^3

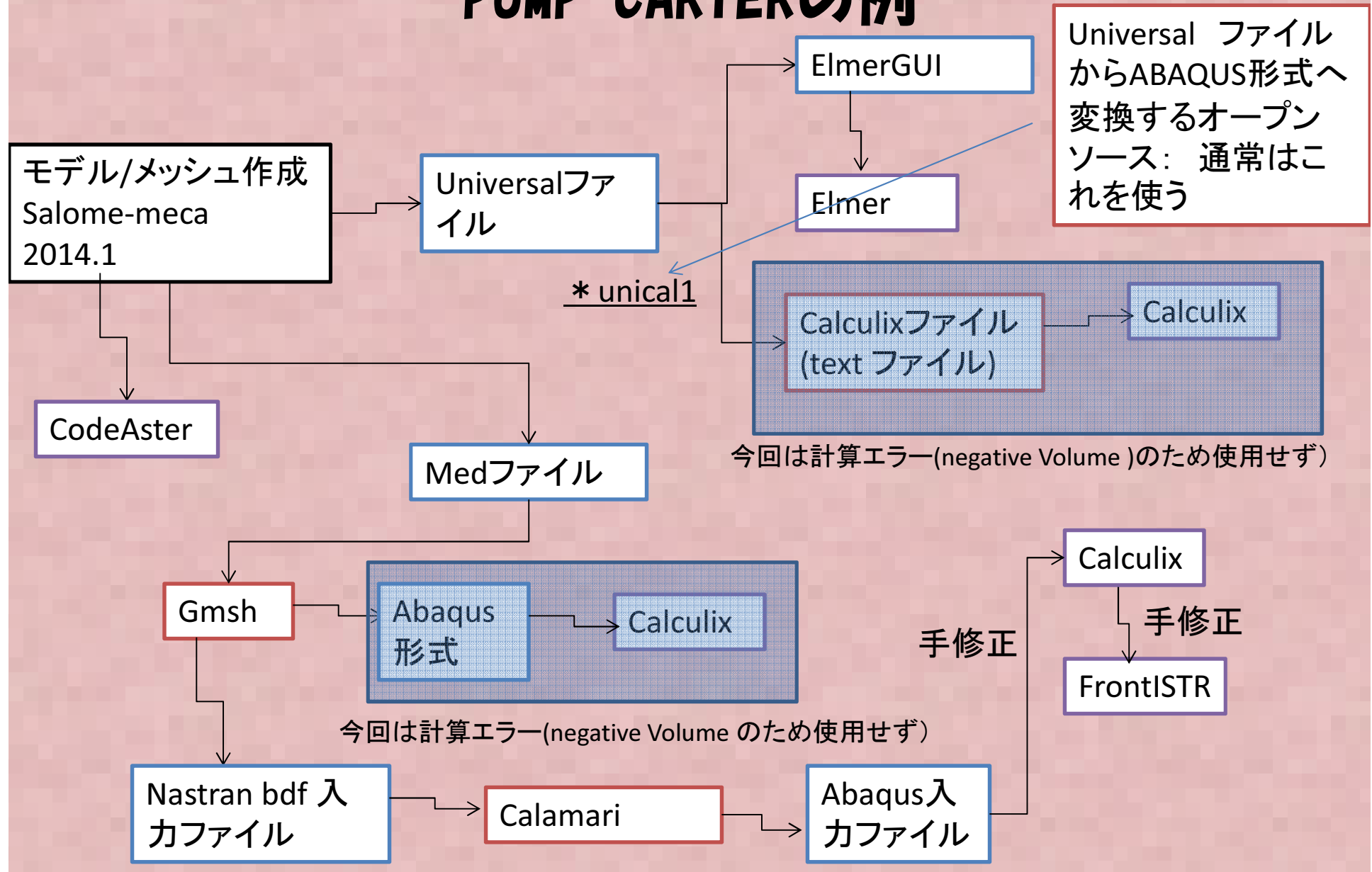
一番小さい
円筒の内側
面節点の
XYZ変位を
拘束



メッシュはSalome-meca 2014.1 でアルゴリズム Netgen 1D-2D-3D 利用して
作成 節点数=15039, 要素数=64578 要素は全てTetra (4面体)1次要素

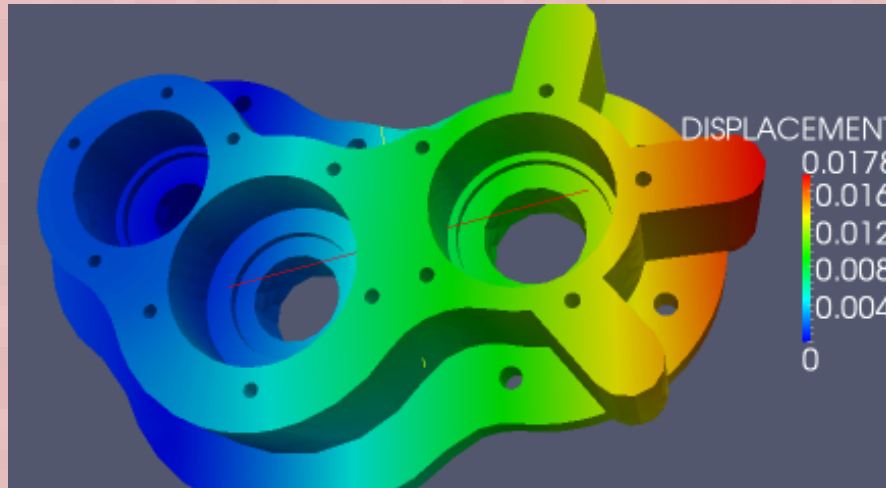
各種ソルバへのデータ変換方法

-PUMP CARTERの例-

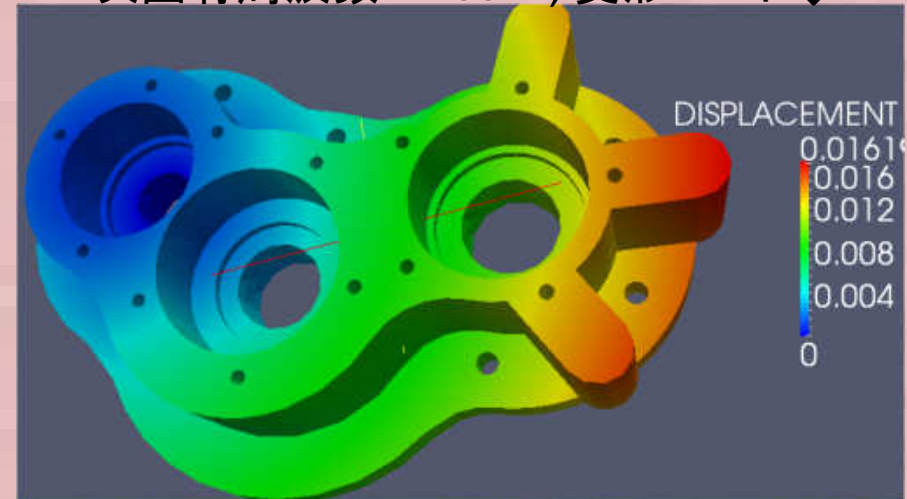


FrontISTR固有値解析結果

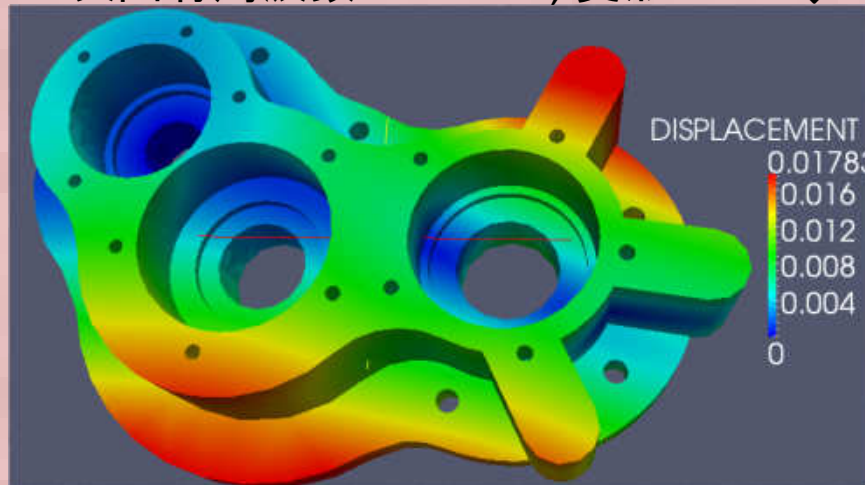
1次固有周波数=517Hz, 変形モード↓



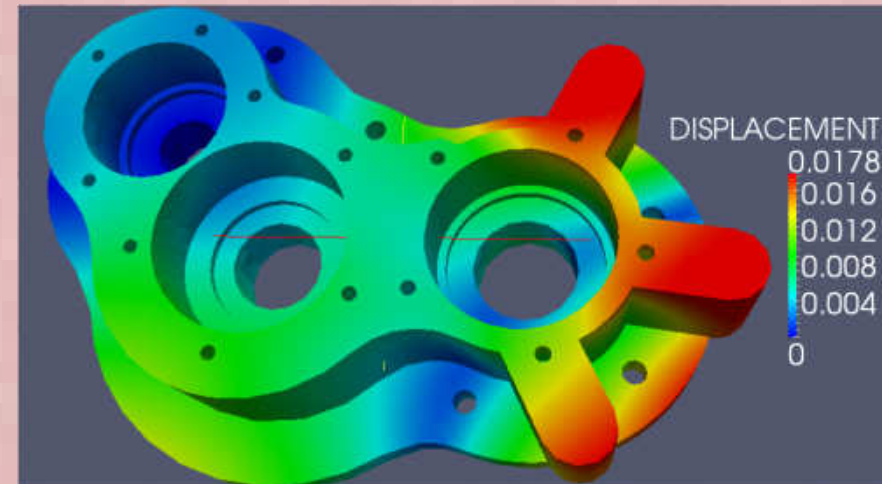
2次固有周波数=700Hz, 変形モード↓



3次固有周波数=1171Hz, 変形モード↓



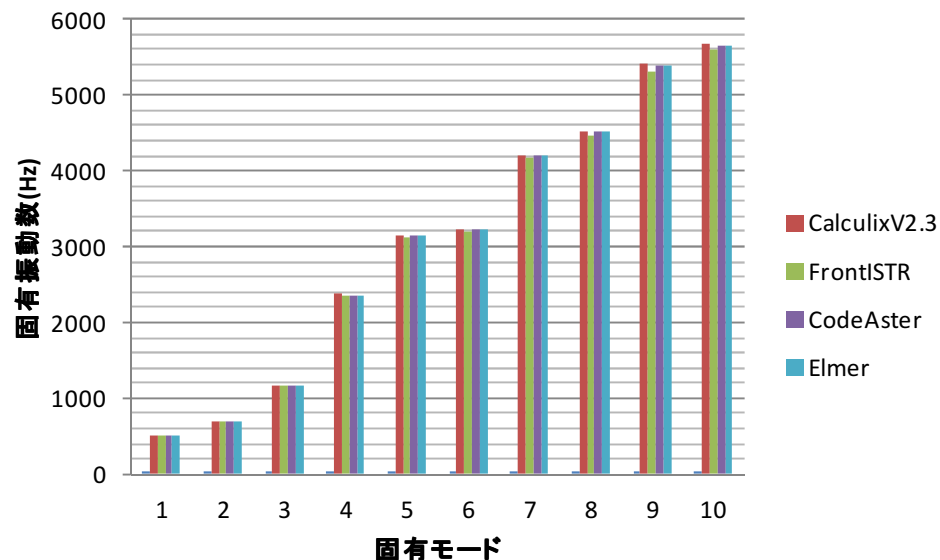
4次固有周波数=2357Hz, 変形モード↓



可視化はMicroAVS 形式で出力し、ParaView にて実施

各ソルバ固有値解析結果 -PUMP CARTERモデル-

固有モード	CalculixV2.3	FrontISTR	CodeAster	Elmer
1	517.9304	517.341	517.784	517.7838585
2	701.1953	700.441	700.997	700.9970096
3	1178.953	1171.45	1177.37	1177.373858
4	2369.892	2356.99	2367.17	2367.170326
5	3134.789	3130.53	3133.84	3133.835027
6	3230.732	3199.14	3224.27	3224.270491
7	4200.161	4182.3	4196.45	4196.4454
8	4516.047	4462.2	4505.09	4505.089556
9	5406.447	5313.49	5387.62	5387.624427
10	5678.462	5594.1	5661.04	5661.037207



全てのソルバで結果はほぼ一致したが、CodeAster, Elmer はほとんど同じ値で、Calculixがやや高め、FrontISTRがやや低めに結果がでた。

→ いずれにしろ四面体要素ではソルバによる差はほとんど無いものと考えられる。

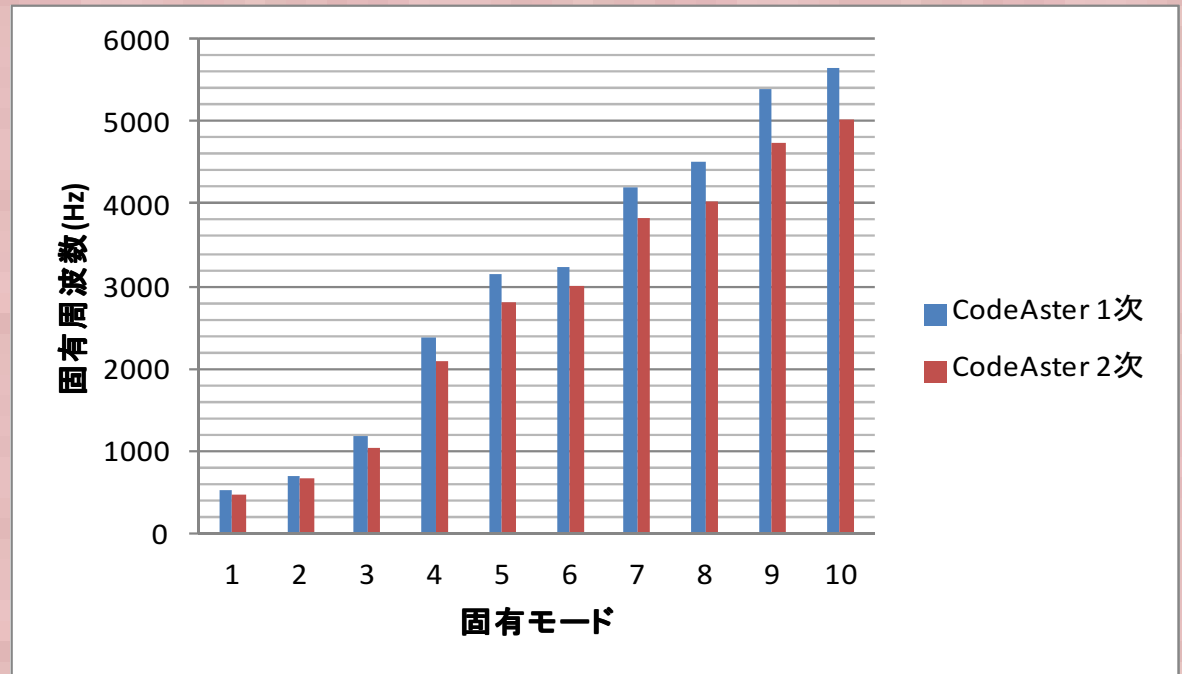
補足

- CodeAsterにてPumpCarterのモデルで2次要素に変更した場合の計算を実施し、1次要素の結果と比較

節点数(Nodes) = 102866, 要素数(2次要素 Elements) = 64578

参考: 1次要素 節点数=15039, 要素数=64578

固有周波数 (Hz)		
固有モード	CodeAster 1次	CodeAster 2次
1	517.784	460.649
2	700.997	667.441
3	1177.37	1034.75
4	2367.17	2095.17
5	3133.84	2787.2
6	3224.27	3014.42
7	4196.45	3835.69
8	4505.09	4027.46
9	5387.62	4750.75
10	5661.04	5032.65
要素タイプ	4面体一次	4面体二次



1次要素での計算が1割程度硬めに計算されているが、思ったほど差はなく、1次要素でも割と良い結果が得られる。2次要素では10倍近く計算時間が掛ったので傾向を見るだけなら、1次要素計算で十分と考えられる。

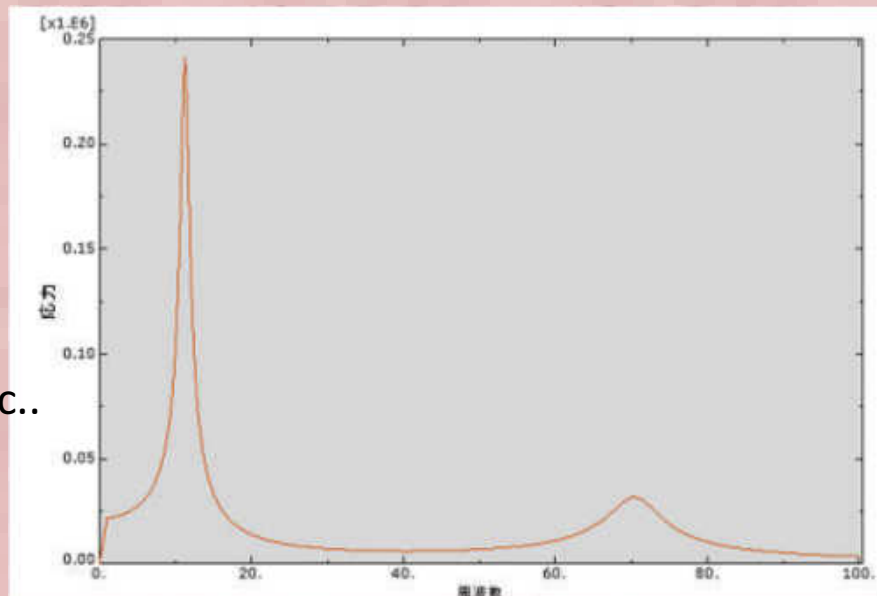
固有値解析比較報告まとめ

- 固有値解析についてSalome-meca, Elmer, Calculix, FrontISTR各ソルバについてベンチマークを行い、計算結果を比較した。
- 六面体要素ではアイソパラメトリック要素は非適合要素より1割程度高めに固有振動数が計算された
- 自動メッシュ(4面体要素)による計算結果は各ソルバで、ほとんど差は見られなかった。

周波数応答解析について

- 単純な正弦波($F=A\sin\omega t$)荷重 F に対する指定した周波数領域 ($\omega=2\pi f$ の関係で各速度 ω または周波数 f を変化させた場合)での応答(変位、速度、加速度、応力 など)を求める解析。以下のような周波数変化に対する、ある点の変位や加速度のカーブをアウトプットとすることが多い。

応力,
変位,
加速度 etc..

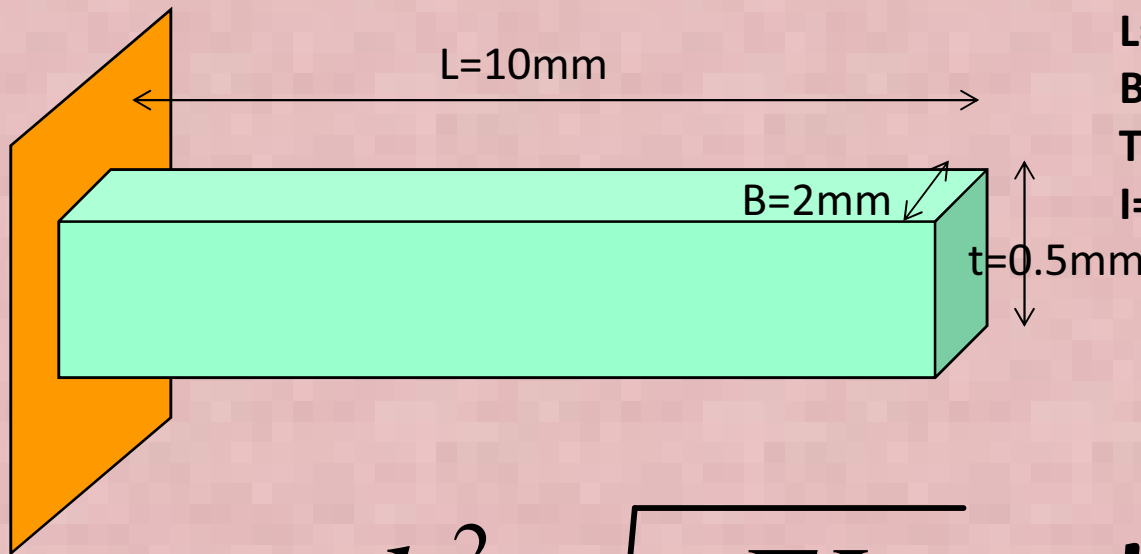


-通常は固有値解析の結果を利用するモード法が使われることが多い
- 荷重の他に一定の強制加速度、強制変位で加振することができるソルバが多い(商用ソフトでは)

周波数(Hz)

固有値計算理論解

- 以下の片持ちはりの固有値振動数を計算する。



$$E = 70000\text{MPa}$$

$$L = 10\text{mm}$$

$$B = 2\text{mm}$$

$$T = 0.5\text{mm}$$

$$I = bt^3/12 = 0.020833\text{mm}^4$$

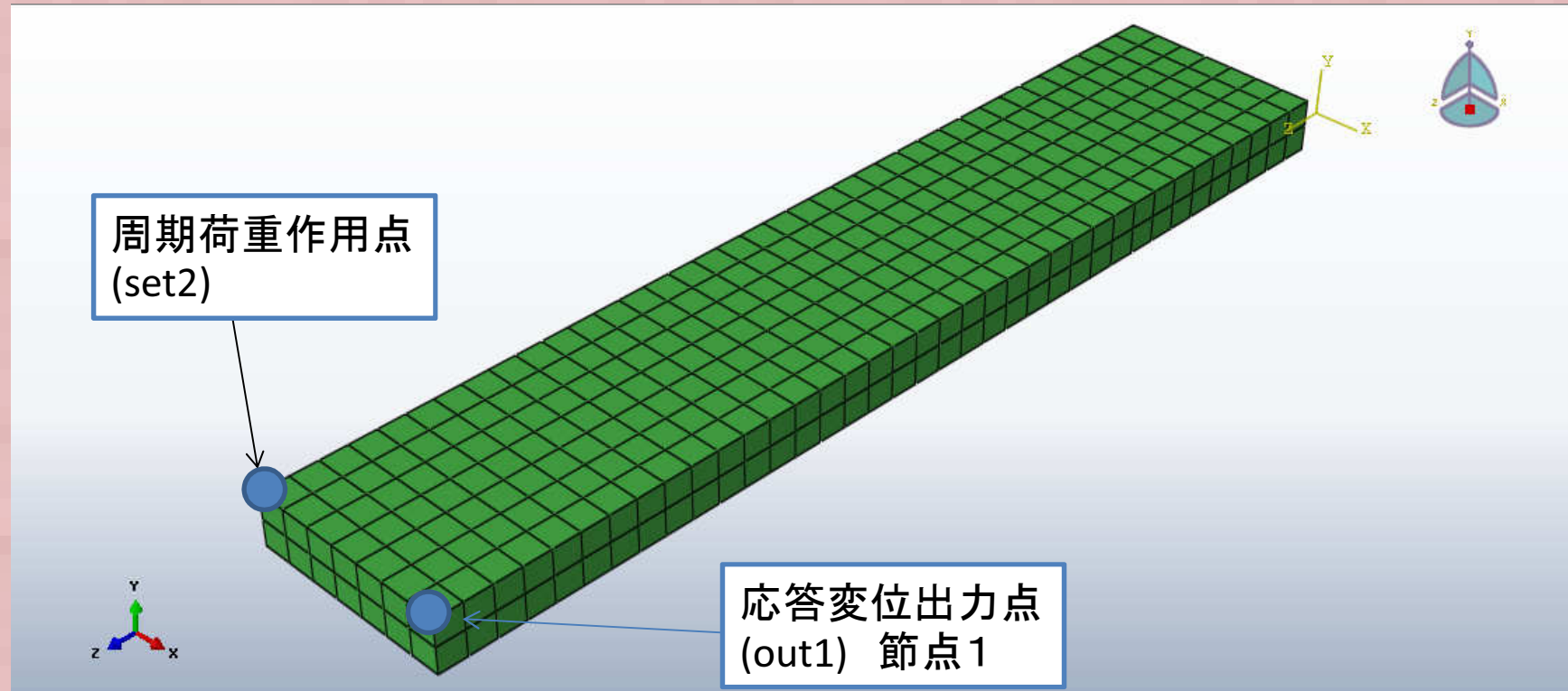
$$\text{密度} = 2.7\text{e-9}$$

$$k = 1.875$$

$$f = \frac{k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} = 4114(\text{Hz})$$

1次固有振動数

周波数応答解析テストモデル概要



メッシュ概要

-節点数=912

-要素数=518

(要素:3D ソリッド)

-ABAQUS(商用ソフト)結果と比較するために、無料版のABAQUS

V6.12/studentedition でメッシュを作成, 計算した(計算できるのは1000節点まで)

固有値解析の梁のベンチマークモデルをそのまま流用

入力ファイル設定例① Step1 固有値解析部

• 以下はCalculixの解析ファイルの例です。

```
*Material, name=alumi
*Density
2.7e-09,
*Elastic
70000., 0.3
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
*Boundary
Set-1, 1,3, 0.0
** -----
**
** STEP: Step-1
*Step
*Frequency, STORAGE=YES
20, , , , ,
*NODE PRINT, FREQ=9999, NSET=ALL
U
*NODE FILE, FREQ=9999, NSET=ALL
U
*End Step
```

密度

ヤング率

端点を固定

CalculixはAbaqusとほとんど同じ形式であり、1つの入力ファイル(input file)にテキスト形式で節点座標、要素コネクティビティ、材料物性、境界条件、解析条件を全て記述する

固有値解析を指示、Storage=Yes は Calculix 独特の指定(abaqus にはない)
Step2 にて周波数応答解析する場合に固有値解析結果をDISK に保存するという指定
“入力ファイル名.eig” というファイルが同じフォルダに出力される
20は20モードまで計算して、出力する指定

結果出力指示

入力ファイル設定例② 周波数応答解析部

• 以下はCalculixの解析ファイルの例です。

** STEP: Step-2

*Step

***Steady State Dynamics**

0., 50000., 20, 3.

***Modal Damping, Direct**

1, 20, 0.1

** LOADS

** Name: Load-1 Type: Concentrated force

***Cload,**

Set-2, 2, -1.

**

*NODE PRINT, FREQ=9999, NSET=out1

U

*NODE FILE, FREQ=9999, NSET=ALL

U

*End Step

周波数応答解析(Steady State Dynamics) を指定
0-50000Hz の範囲の応答を計算する、20 は各固有値間の
データ点数でデフォルト値はabaqusもCalculix でも20個。
データ点数を減らすと計算時間が早くなる。3はバイアスパ
ラメータだが、詳細は不明通常はデフォルトの3を使用

ダンピング係数、Direct は直接減衰率を指定
モードごとに減衰係数を変化させることもできる
ここでは1-20モード均一で0.1を指定

結果出力指示
Out1 点の変位(U) を出力

荷重点(set2: この例題では梁先端点(片側)を指定

各種オープンソースソルバでの周波数応答解析の実施方法が書いてある場所

- Calculix → <http://www.str.ce.akita-u.ac.jp/kako/j2011/sudo.html#i9>
または この資料
- Salome-meca/Code-Aster →
前田さんホームページ:
https://sites.google.com/site/codeastersalomemeca/home/code_aster-1/shuuhasuu

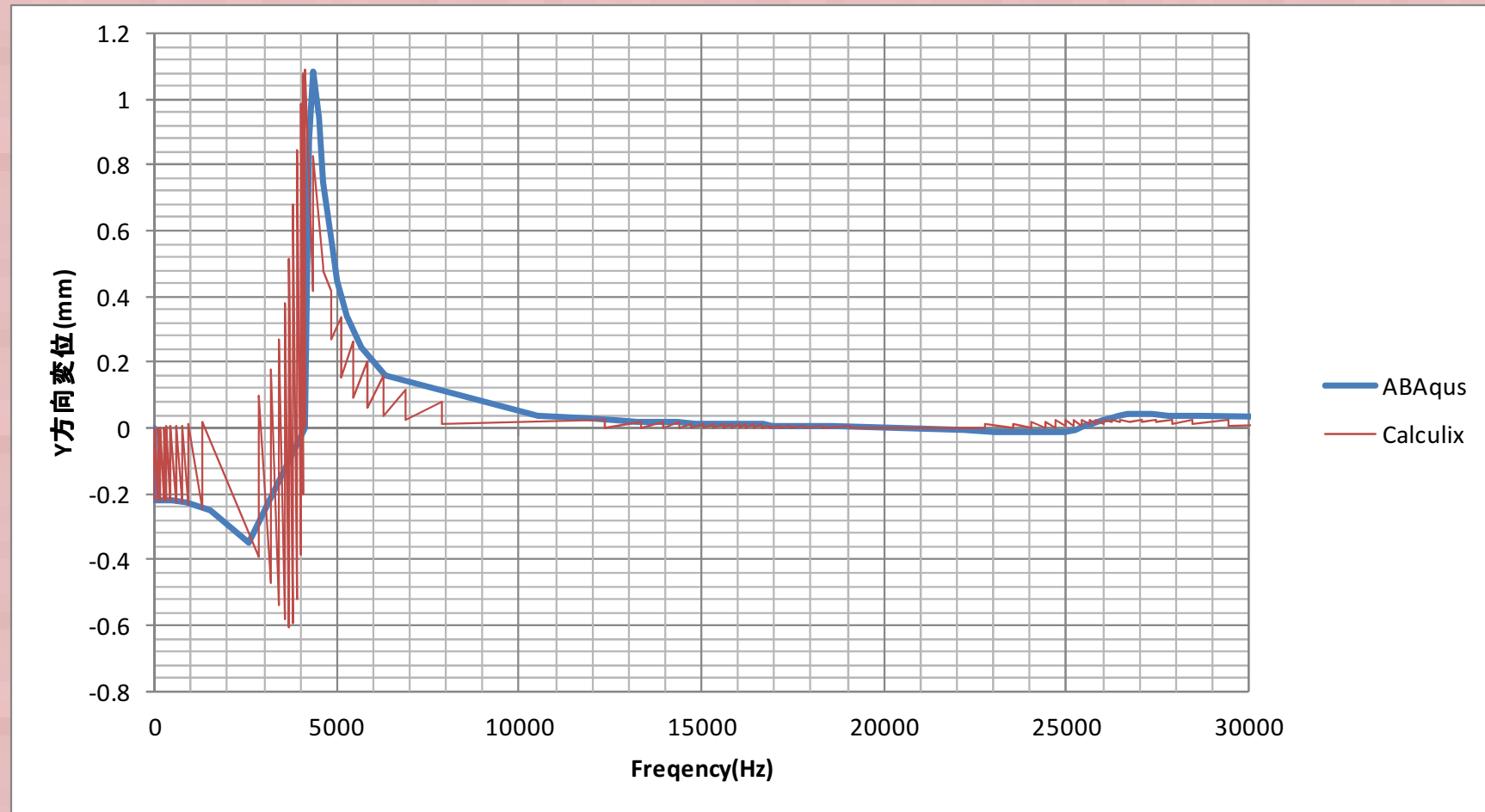
柴田先生のOpenCAE wiki にある藤井さん資料

<http://opencae.gifu-nct.ac.jp/pukiwiki/index.php?SALOME-Meca%A4%CE%BB%C8%CD%D1%CB%A1%B2%F2%C0%E2>

- FrontISTR → FrontISTRに同封されているチュートリアルガイドのP.46
- 参考: ABAQUS(student edition) での実施方法については下記参照→
<http://jikosoft.com/cae/abaqus/Abaqus16.html>

Calculix/ABAQUS解析結果比較

応答点 (OUT1) のY方向変位を比較する

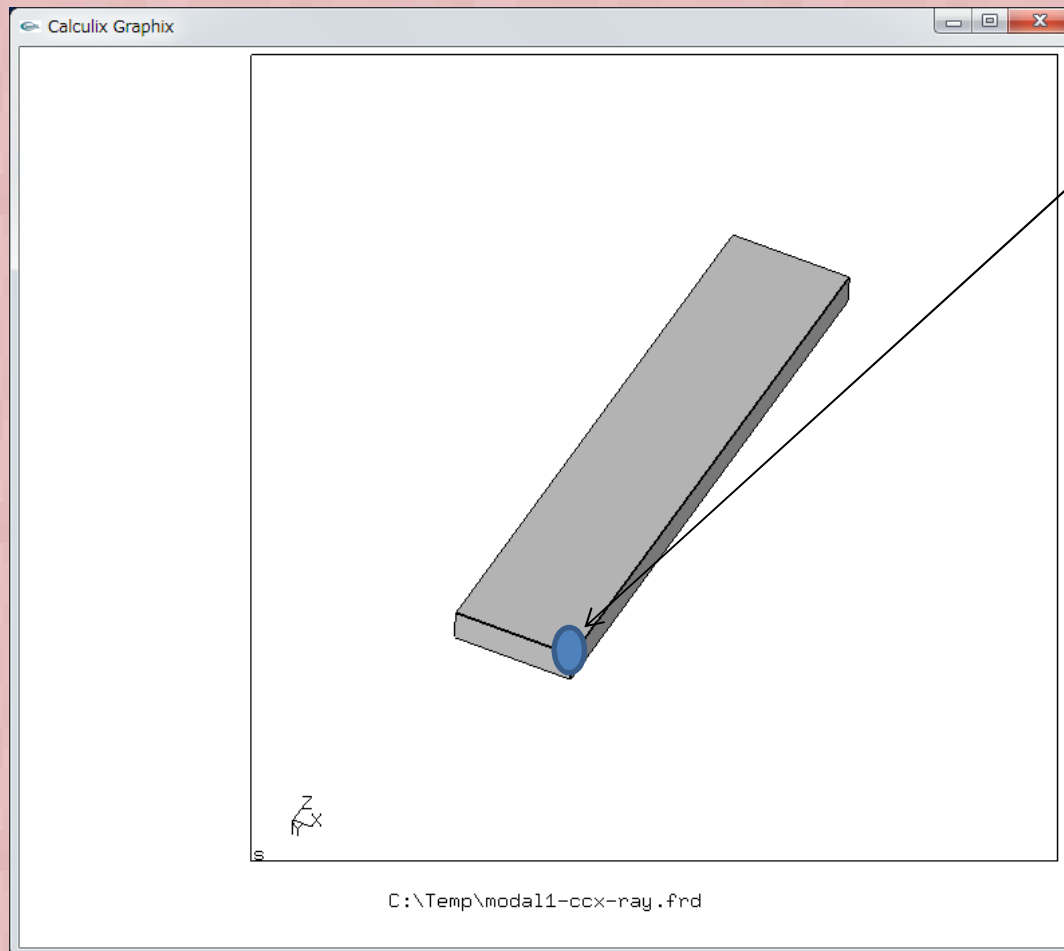


Calculix の変位が振動しており、おかしい。Calculix の変位の出力させ方 (ポスト処理?) の問題か？

(補足)Calculix解析結果 グラフデータ出力方法

応答点 (OUT1) の変位 (XYZ各方向、合成 (Magnitude) をCalculixのポストcgxから出力する方法を記載する

Calculix計算終了にできる “**”.frd という拡張子のファイルをダブルクリックすると以下のGUI が起動する(Windows 環境の場合)



- ① マウスカーソルをモデルが表示されているウインドウに移動させる
- ② 画面上で“qadd set” とコマンドを入力
- ③ マウスカーソルを応答を出力したい節点の上に移動させ、キーボード “n” を押す (節点 = NODE を set グループに指定する)
- ④ cgx を起動したDOS画面にて指定した節点の番号、座標情報が出力されているので、間違いがないか確認する
- ⑤ キーボードから“q” を入力 (set への入力を完了)
- ⑥ コマンドを入力
“graph set t DISP ALL”
フォルダにgraph_set_DISP_ALL.out というテキストファイルが出力される (各成分を指定する場合はALL のかわりに D1, D2, D3 など指定する)

入力ファイル設定例① Step1 固有値解析部

- 以下はFrontISTRの解析条件ファイルの例です。

```
# Control File for FISTR
```

```
!VERSION
```

```
3
```

```
!WRITE,RESULT
```

```
!WRITE,VISUAL
```

```
!SOLUTION, TYPE=EIGEN
```

```
!EIGEN
```

```
20,
```

```
!! 1.0E-8, 60
```

```
!BOUNDARY
```

```
Set-1, 1, 3, 0.0
```

```
!SOLVER, METHOD=CG, PRECOND=1, ITERLOG=NO, TIMELOG=YES
```

```
10000, 2
```

```
1.0e-8, 1.0, 0.0
```

```
!VISUAL, method=PSR
```

```
!surface_num=1
```

```
!surface 1
```

```
!output_type = COMPLETE_REORDER_AVIS
```

```
!END
```

FrontISTRもAbaqusとほとんど同じ形式であるが、3つの入力ファイル(msh, cnt, hecmw_cntl.dat)が必要。

テキスト形式でMSHファイルは節点座標、要素コネクティビティ、材料物性
CNT ファイルは境界条件、解析条件を記載

固有値解析を指示

20は20モードまで計算して、出力する指定

端点を固定

マトリックスソルバを指示
CGはCG法反復ソルバ

可視化結果出力指示

ParaViewで読めるAVIS形式で出力

入力ファイル設定例② 周波数応答解析部

• 以下はFrontISTRの解析ファイルの例です。

```
!VERSION
3
!WRITE,RESULT
!WRITE,VISUAL
!SOLUTION, TYPE=DYNAMIC
!DYNAMIC
11, 2
1, 50000, 200, 15000.0
0.0, 6.6e-5
1, 1, 0.0, 1.0e-5
10, 2, 1
1, 1, 1, 1, 1, 1
!EIGENREAD
eigen_0.log
1, 20
!BOUNDARY
Set-1, 1, 3, 0.0
!FLOAD, LOAD CASE=1
Set-2, 2, 1.
!SOLVER,METHOD=CG,PRECOND=1,ITERLOG=NO,TIMELOG=YES
10000, 2
1.0e-8, 1.0, 0.0
!VISUAL, method=PSR
!surface_num = 1
!surface 1
!output_type = COMPLETE_REORDER_AVS
!END
```

周波数応答解析を指定 (DYNAMIC 11,2)

1-50000Hz の範囲の応答を計算する、200 は出力データ点数

ダンピング係数、FrontISTRではレーリー減衰しか指定できない

おおよそABAQUSなどの結果とオーダを合わせるため、 $\alpha=0$, $\beta=1e-5$ で設定してみた。

FrontISTRは固有値解析とは別解析として周波数応答解析を実施する必要がある。
2度解析を実施する手間がかかる

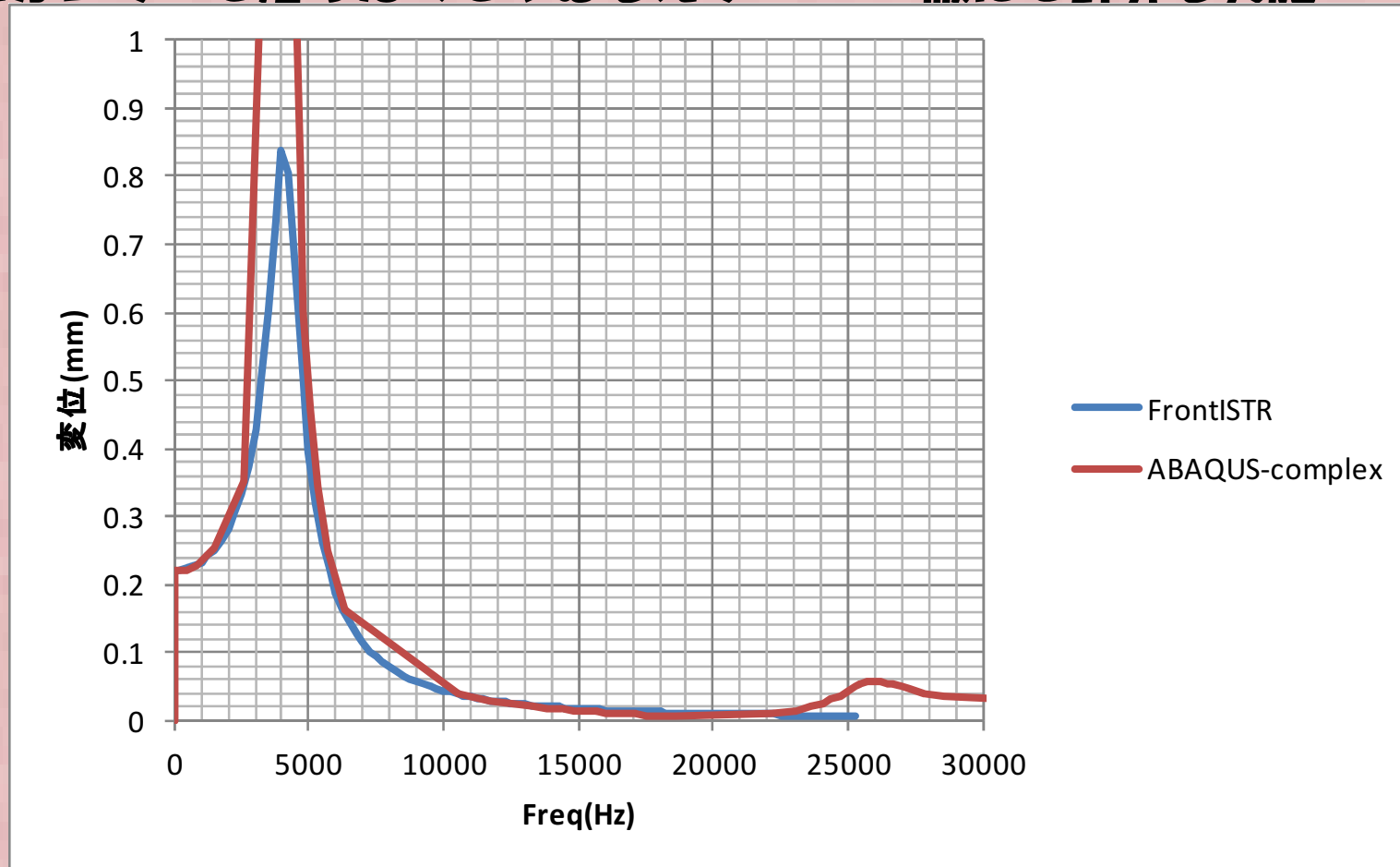
荷重点(set2: この例題では梁先端点(片側))を指定
CASE=1は実部, CASE=2虚部

FrontISTRは荷重での加振以外はできない
(加速度での加振機能は無い)

加速度で与えたい時は大質量法を使えば良い?

FrontISTR/ABAQUS解析結果比較

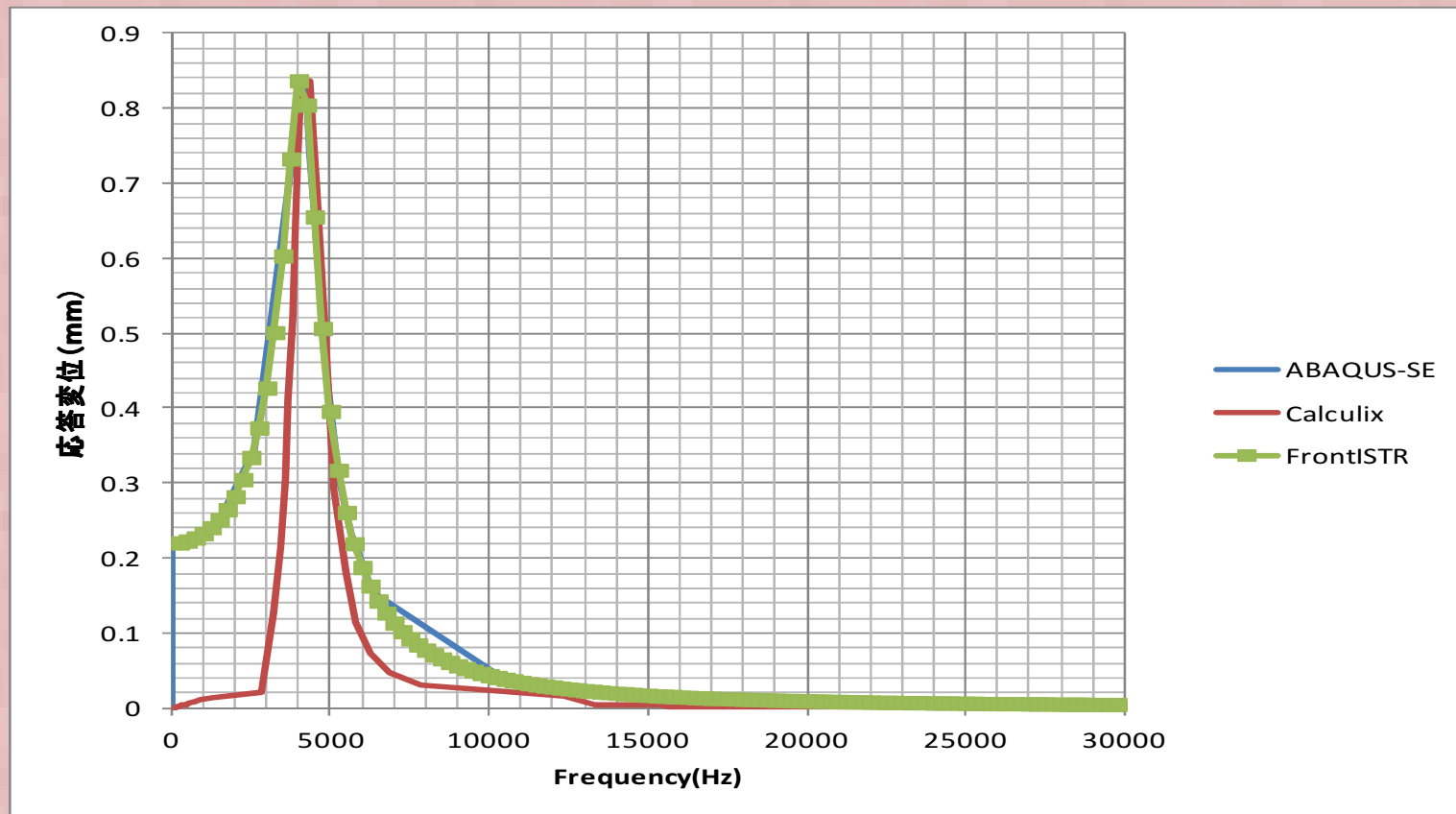
応答点 (OUT1) の変位 (大きさ) を比較する→ FrontISTRでは大きさしか出てこない模様、なおLinux版では固有値結果ファイルの読み込みでなぜかエラーで落ちたのでやむをえずWindows版にて計算を実施



おおよそ傾向は一致するが、値が違うのはFrontISTR とABAQUSで減衰係数の値が違うためと思われる。ABAQUSも同様にレーリー減衰を設定すれば同じになると思われる

FrontISTR/ABAQUS/Calculix解析結果比較

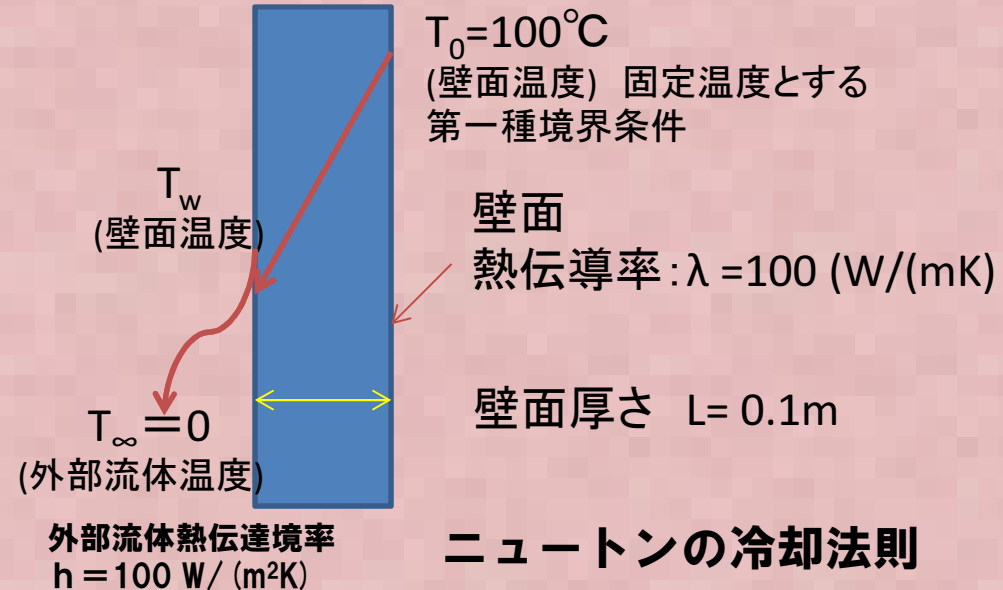
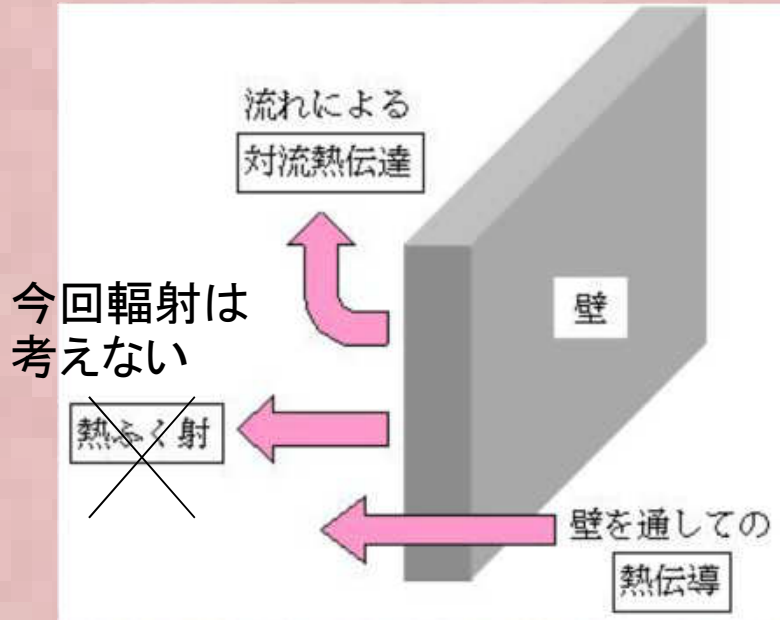
その後、FrontISTRのレーリー減衰に他のソルバも再度あわせ、応答点 (OUT1) の変位 (大きさ) を比較した。Calculixで振動していたように見えたのは同じ時間で実部と虚部が出力されていたためと判明、簡単なプログラムを作成して、大きさ ($\sqrt{\text{実部}^2 + \text{虚部}^2}$) を計算させた



ピークの応答は3ソルバで一致したが、FrontISTRとABAQUSでほぼ同じ上昇カーブを描くが、Calculixでは、途中の傾向が異なるが原因は不明です。

検証例題1. 単一材料 1 次元熱伝導

- 理論解 -



ニュートンの冷却法則

$$\frac{\dot{q}}{A} = h(T_w - T_\infty)$$

h: 熱伝達率

$$\frac{\dot{q}}{A} = -\gamma \frac{\nabla x}{\nabla L} : \text{フーリエの法則}$$

q: 単位時間当たりの透過熱量
A: 断面積, λ: 熱伝導率

$$R_1 = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} = \frac{0.1}{100} = 0.001$$

$$R_2 = \frac{1}{h} = \frac{1}{100} = 0.01$$

$$R = R_1 + R_2 = 0.011$$

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{(T_w - T_\infty)}{R} = \frac{100}{0.011} = 9090.90 (\text{W} / \text{m}^2)$$

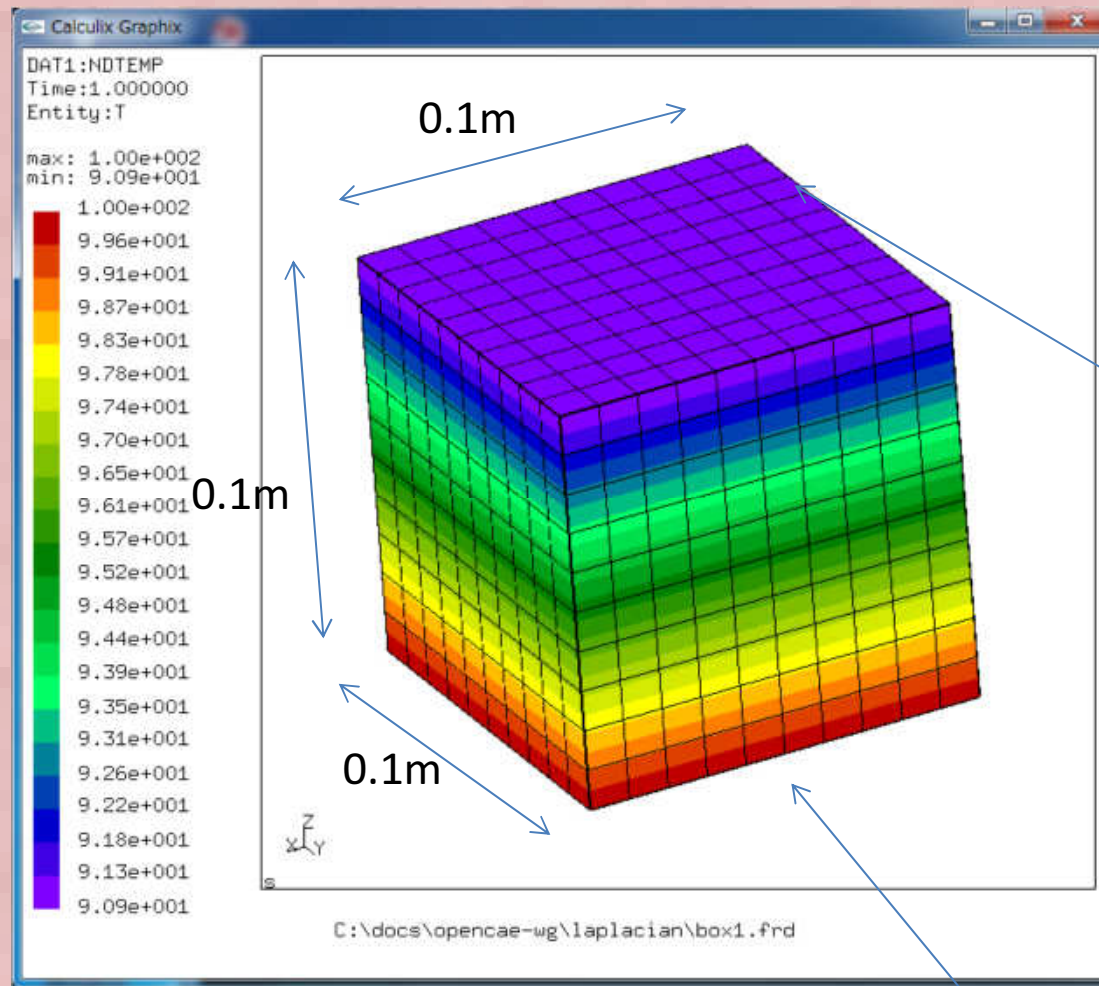
$$T_w = 90.9090^\circ\text{C}$$

熱伝導解析のできる オープンソースリスト

名称	入手先	特徴	解析手法	備考・OS
OpenFOAM®	www.opencfd.co.uk/openfoam	汎用FVM toolBox	有限体積法	laplacianFoam ChtMultiResion SimpleFOAM OS: Linux
CodeSaturne/ Syrthes	rd.edf.com	EDFツール 熱伝導は Syrthesで計算	熱伝導部分は 有限要素法?	OS: Linux, Syrthesのみは Linux/Windows
CodeAster	www.code-aster.org	EDF 汎用構造 解析ツール	有限要素法	OS: Linux
Elmer	www.csc.fi/english/pages/elmer	マルチフィジクス	有限要素法	OS: Windows
Calculix	www.calculix.de	構造解析, 熱 伝導	有限要素法	OS: Linux/Windows

国産:Adventurethermal/FrontISTRなどFEMも熱伝導解析機能がある

検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -Calculix-



Box1

(左:Calculix定常解)
モデル・メッシュはSalomeで作成
Universal fileに出力して
変換ツールunicalでCalculixに変換
(寸法は全て 0.1m)

上面:

0°C, 熱伝達係数
100W/(m²K)
の流体に接する

側面:断熱

(T:zeroGrad)

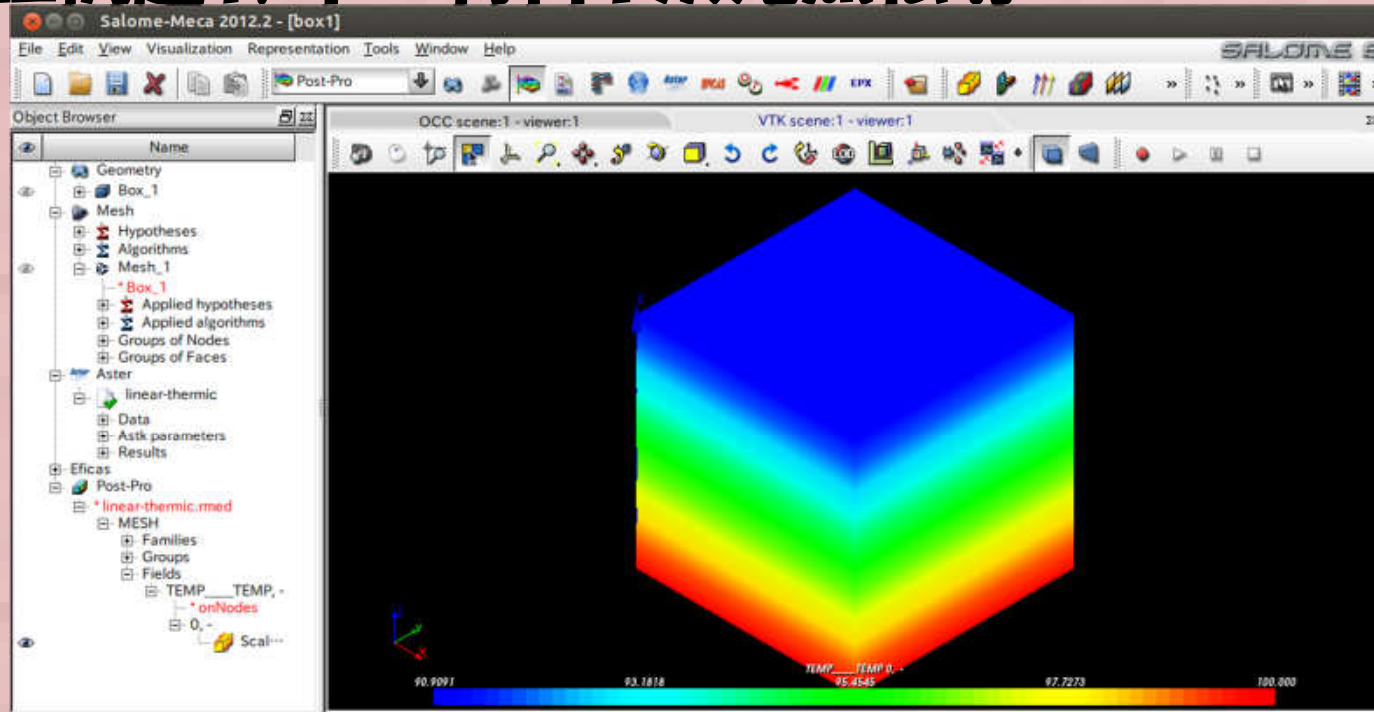
Calculix解析結果
上面温度90.9°C

初期全体:25°C

熱伝導率:100W/(mK), 密度: 2000kg/m³, 比熱:0.1

底面100°C固定

検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -CodeAster-



Python Console

```
Python 2.6.6 (r266:84292, Dec 9 2011, 18:30:59)
[GCC 4.1.2 20061115 (prerelease) (Debian 4.1.1-21)] on linux2
type help to get general information on environment
>>>
```

*** ポイント**

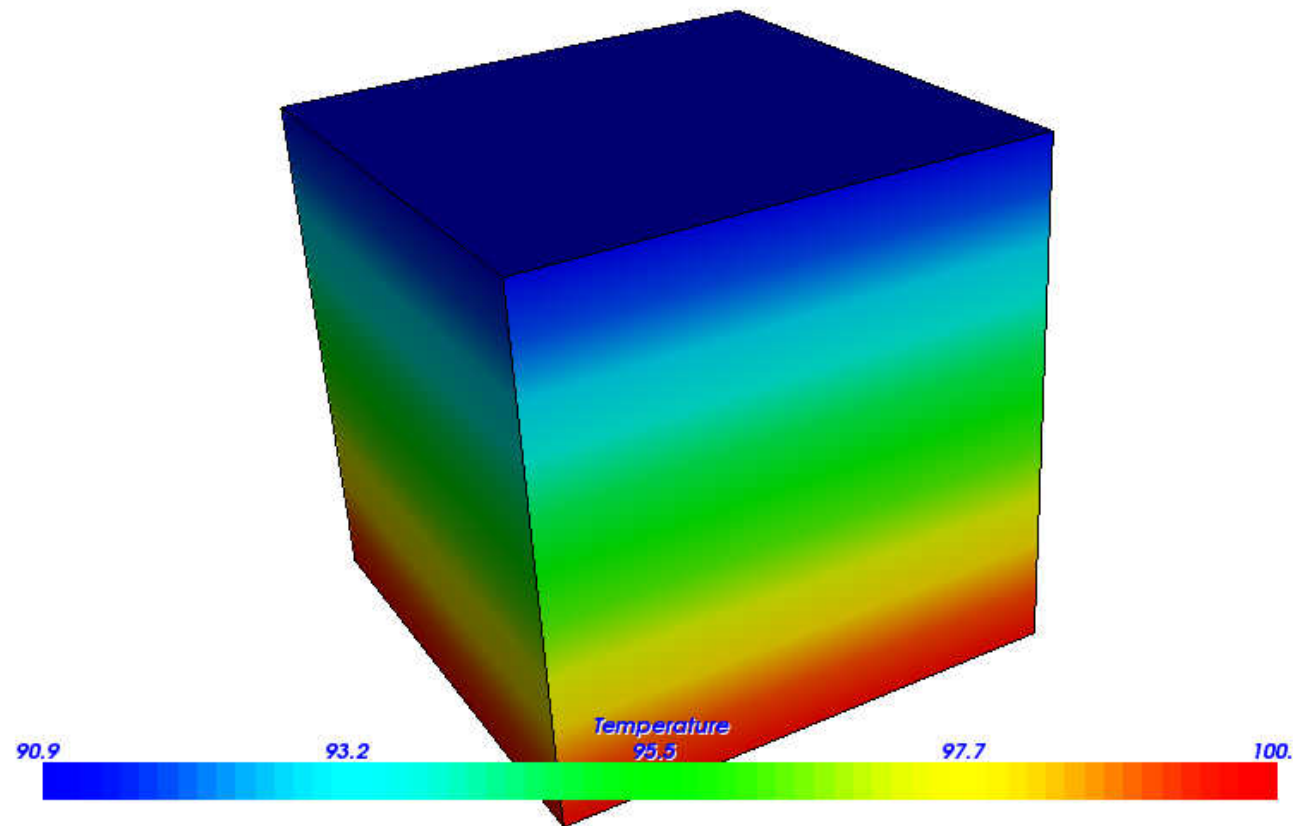
-Salome上で上面(top)/下面(bottom)に面グループ名を設定

-SalomeMechのlinearThermal Wizardで底面の温度条件(100℃ 1種境界条件=ディリクレ条件)を設定

-上面の熱伝達境界条件(3種境界条件)はWizardで
設定できないので、Eficas 上で設定する
AFFE CHAR THER の下にECANGE を挿入して
左画面の設定する

CodeAster解析結果
上面温度90.9°C

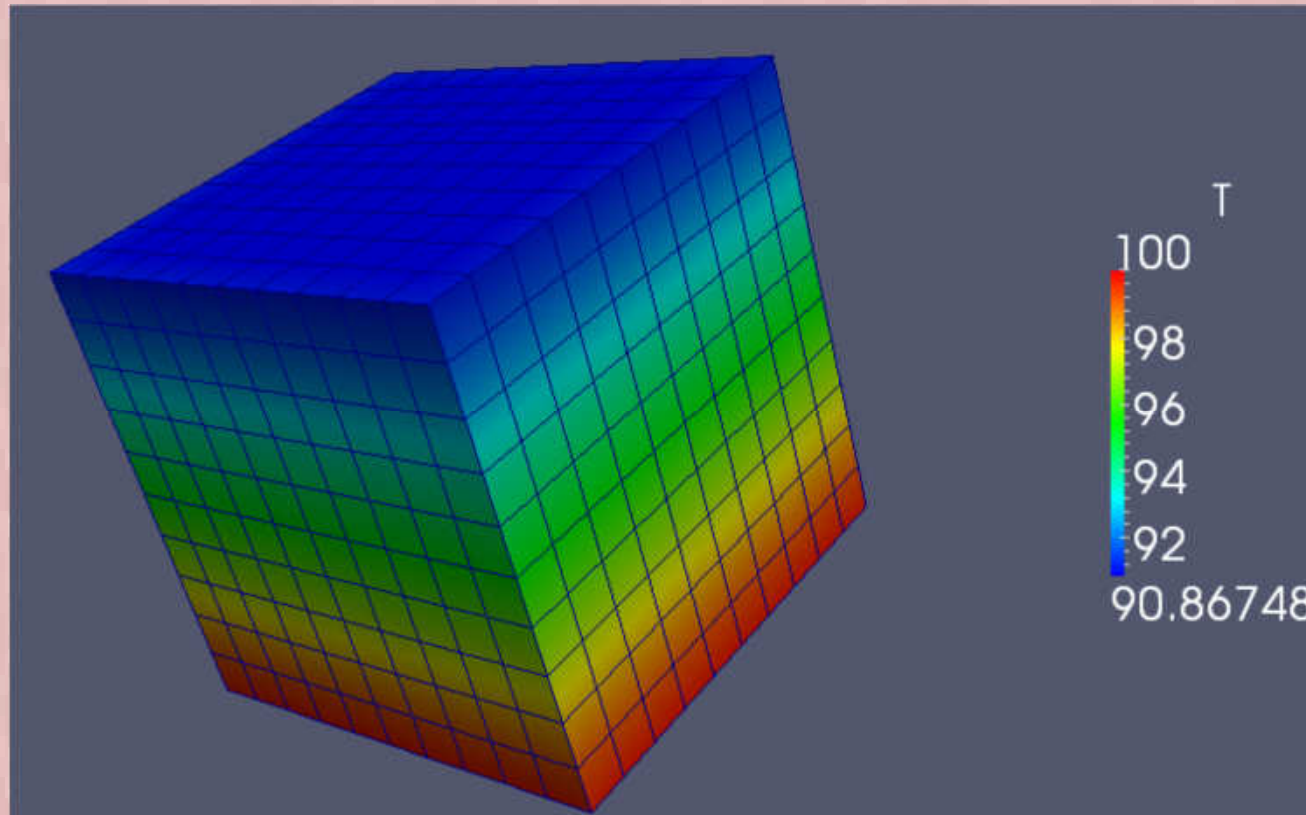
検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -Elmer-



-Elmer のサンプル例題を参照に設定。Elmer-GUI 上で熱伝達境界を含め全て条件設定できるので、今回調査した各ツール中、最も簡単に設定が可能。

Elmer解析結果
上面温度90.9°C

検証例題1. 単一材料 1次元熱伝導 -OpenFOAM v2.2 laplacianFoam-



OpenFOAMの
laplacianFoam
計算結果

t=1 上面温度
91.1687 °C
(ParaView WorkSheet)
90.86 °C
(コンター図)

メッシュはその他と同じくSalomeで作成、Universal File からOpenFOAMへ変換

-OpenFOAM laplacianFOAM は定常ソルバでは無い(非定常ソルバ)

-上面の境界条件設定に特殊な設定が必要(次ページ: 参照)

OpenFOAMの熱伝導解析結果比較

ParaViewで温度をSheetで出力すると値が少しずれるが、Cellの値をParaView
上で節点にマッピングする際にズれるのでParaView側に問題のようだ?

検証例題1. 単一材料 1 次元熱伝導 -OpenFOAM v2.2 laplacianFoam-

```
internalField uniform 25.0;
boundaryField
{
    defaultFaces
    {
        type zeroGradient;
    }
    bottom
    {
        type fixedValue;
        value uniform 100.0;
    }
    top
    {
        type groovyBC;
        refValue uniform 0;
        refGradient uniform 0;
        valueFraction uniform 1;
        value uniform 0;
        valueExpression "0";
        gradientExpression "gradT";
        fractionExpression "0";
        evaluateDuringConstruction 0;
        variables "Tout=0.0;h_conv=100;cond=100;gradT=h_conv*(Tout-internalField(T))/cond;";
        timelines (
        );
    };
    lookuptables (
    );
}
```

0/T の定義

-OpenFOAMでは第三種境界条件:熱伝達境界条件の設定は標準のOpenFOAM の機能には無い。
-groovyBCを使う必要があるためユーティリティ swak4Foamをinstallする必要がある(DEXCUSには最初からインストールされている)
-この例題では特に問題ないが、groovyBCを利用すると色々と計算中に問題がある事がある。

検証例題1. 単一材料 1 次元熱伝導

-まとめ-

解析ソフト	上面温度(°C)	備考
Calculix	90.90	
CodeAster	90.90	
Elmer	90.90	
OpenFOAM® (laplacianFoam)	90.86	非定常
理論解	90.9090	

-簡単な問題なので特に問題なく、正解が得られる。OpenFOAM は有限体積法(FVM) なので有効数字4桁目で結果がズレたが問題ない結果。

検証例題 2. 複数材料

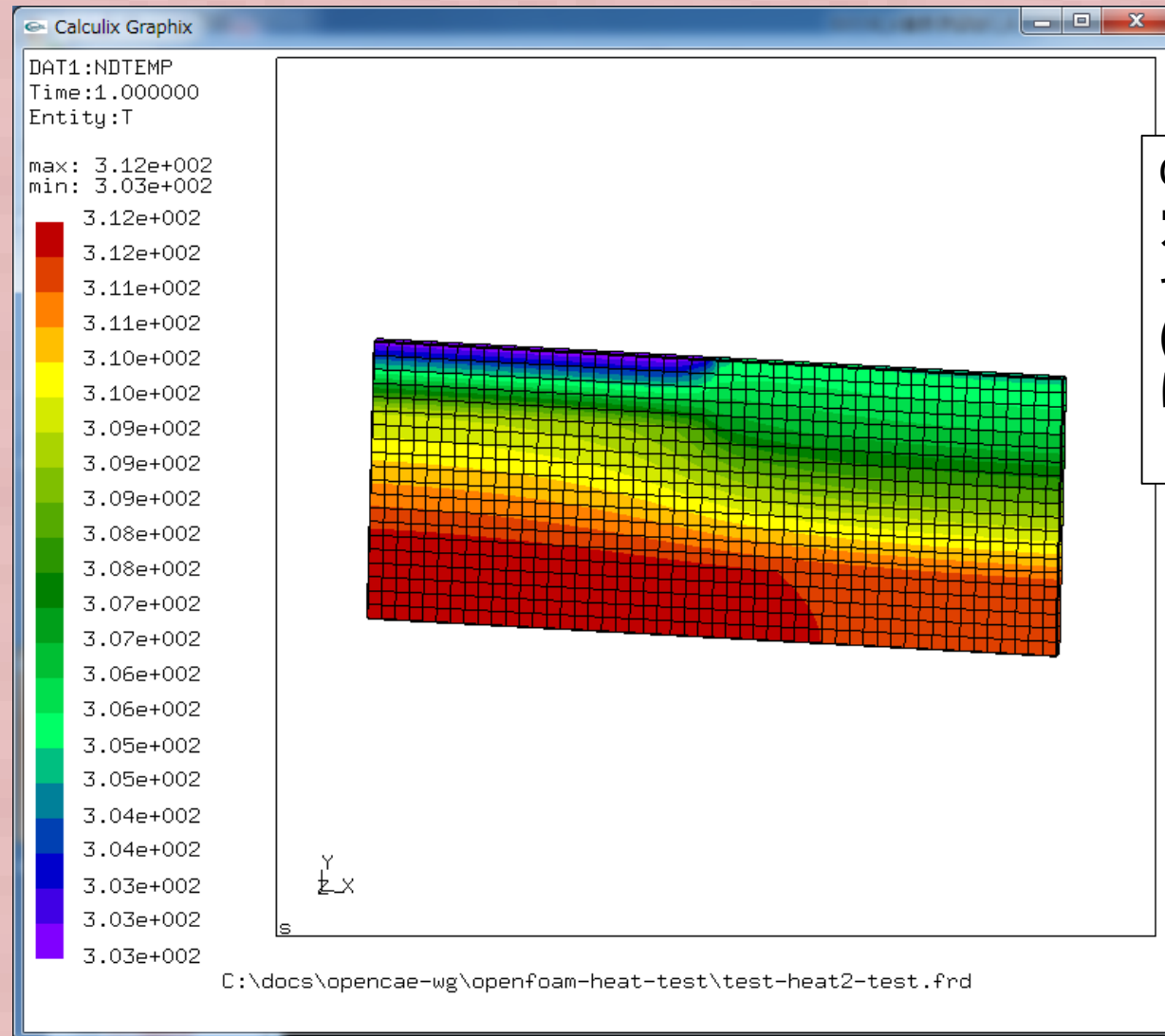


- 固体熱伝導定常解析.
- $0.02 \sim 100 \text{ W/mK}$ までの熱伝導率. 熱収支の確認.
- $0.5 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ の解析領域 (100×40 メッシュ).



まずはCalculixで計算

検証例題. 複数材料 固体熱伝導解析



Calculix
定常熱伝導計算
その2
(空気部の熱伝導率を5W/mK
に設定)

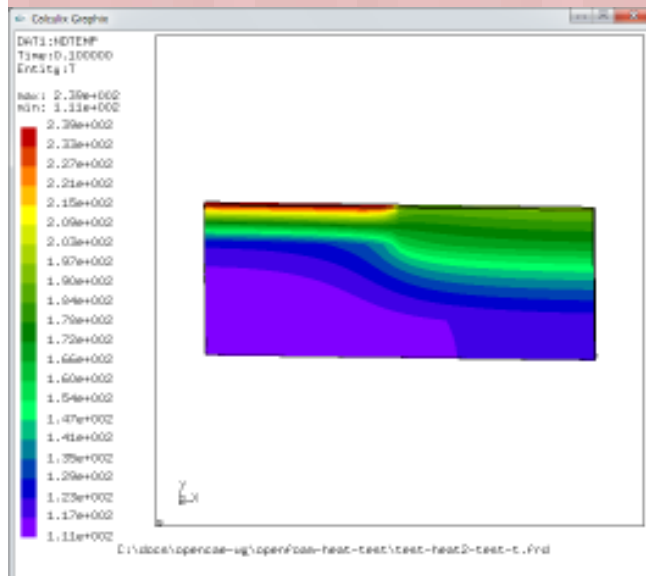
最高温度は312Kになり、一応それらしい結果

検証例題 2. 複数材料

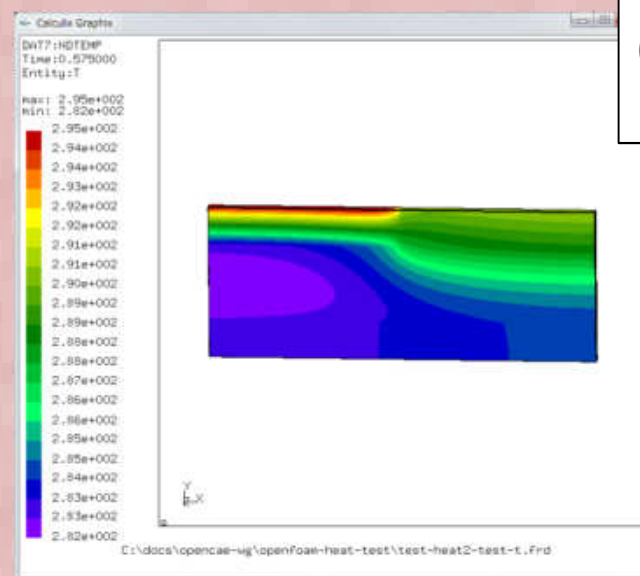
Calculix

非定常熱伝導計算

(空気部の熱伝導率を5W/mK
に設定したもの)

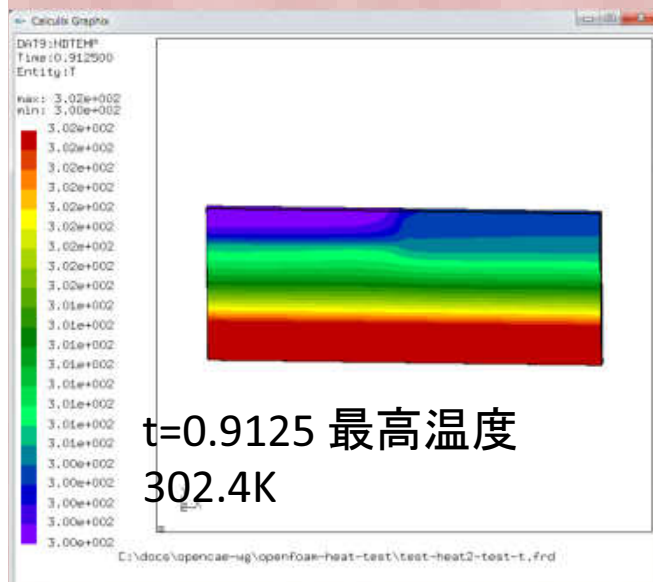


t=0.1 最高温度239.5K

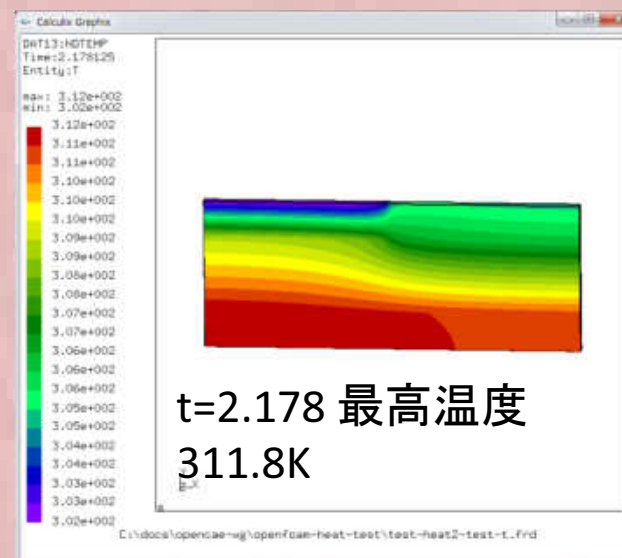


t=0.575 最高温度
294.9K

全ての材料に
密度=200
比熱=0.1
に仮設定



t=0.9125 最高温度
302.4K



t=2.178 最高温度
311.8K

2秒ほどで
最高温度312Kになり、定常
解へ収束

固体熱伝導解析のOpenFOAM解析での問題点

laplacianFoamは単一材料のみ取り扱うので複数材料は扱うことができない

→ laplacianFoamソルバ改良を行う or
ChtMultiRegionSimpleFoamを使う

laplacianFoamには発熱項(Source項)が無い

→ Source 項をソースに追加する

-ChtMultiRegionSimpleFoamは流体領域の無い固体だけの問題でも使用可能

検証例題 2. 複数材料

-複数材料物性への対応: 過去の東京勉強会資料
(Ogataさんのものあり)

-上記＋材料異方性＋ソース項追加:
オープンCAE富山の西さん
の公開資料あり

詳細は各資料を参照;

今回の問題は西さんの改良ソルバ
“laplacianFOAMSourceTensor”
を使って計算

第9回OpenFOAM勉強会for beginner

ソルバー改良事例発表

id:oga_shin

小縣信也

ogata shinya

2011.03.26 第9回OpenFOAM勉強会for beginner

OpenFOAMによる
電子機器シミュレーション
その1

オープンCAE学会 西 剛伺

検証例題 2. 複数材料

西さんの改良ソルバ “laplacianFOAMSourceTensor”

の設定例: 物性値、発熱量は全てsetFieldsで定義する

```
regions(  
boxToCell { box (0.00 0.00 0.00) (0.5 0.05 0.01);  
            // box-a Die, Need to Input as "Meter"  
fieldValues  
( volScalarFieldValue ST 200 ); }  
boxToCell { box (0.00 0.00 0.00) (0.5 0.05 0.01);  
            // box-a Die, Need to Input as "Meter"  
fieldValues ( volSymmTensorFieldValue DT (5.0 0 0  
5.0 0 5.0) ); }
```

boxToCellで領域指定して指定した領域単位で発熱量や物性値(熱伝導率(熱拡散係数))を指定する

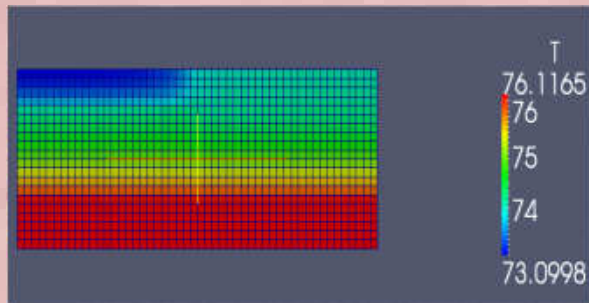
ST: 単位体積あたり発熱量を C_p で割ったもの

DT: 異方性熱拡散係数(λ/C_p)

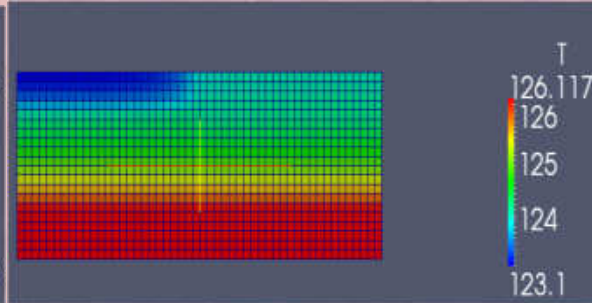
検証例題 2. 複数材料

-固体熱伝導解析-

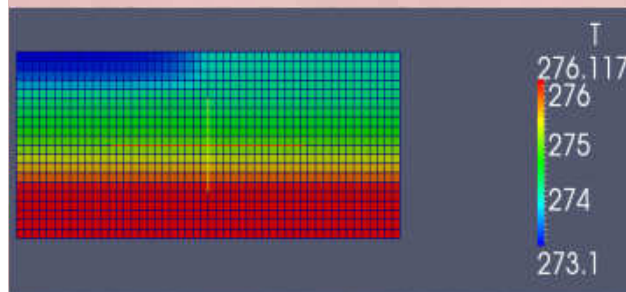
OpenFOAM
非定常熱伝導計算
(空気部の熱伝導率を5W/mK に
設定したもの)



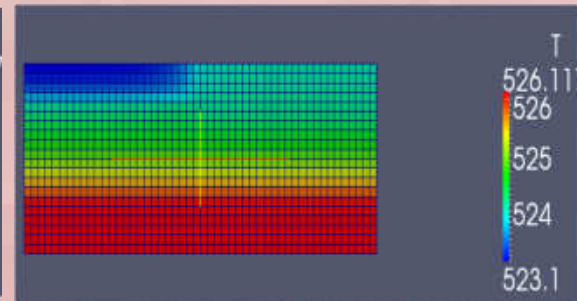
t=1 最高温度76.1K



t=2 最高温度126K



t=5 最高温度267K



t=10 最高温度526K

温度上昇傾向が
Calculixと異なる
最高温度が
上昇しつづける

面内温度分布は両者とも近い

境界条件を変更して再度確認

検証例題 2. 複数材料

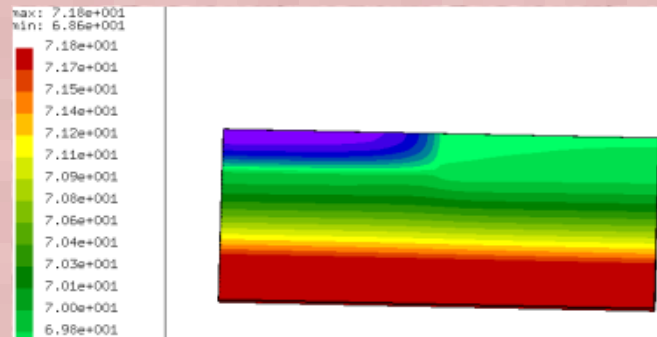
上面の温度条件を温度固定境界条件に変更



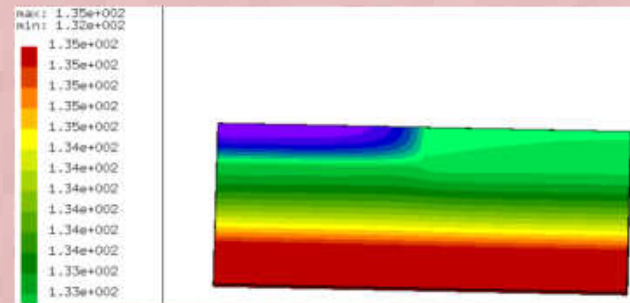
- 密度のみ温度依存性考慮, 定常解析.
- 空気, 粘性係数 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ (層流).
- $0.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ の解析領域 (100 × 40 メッシュ).

$$\begin{aligned} q/t &= 1\text{W} / (0.5 * 0.01 * 0.05) \\ &= 4000\text{W} / (\text{mm}^3) \\ (q/t) / (c_p) &= 4000 / 20 = 200 \end{aligned}$$

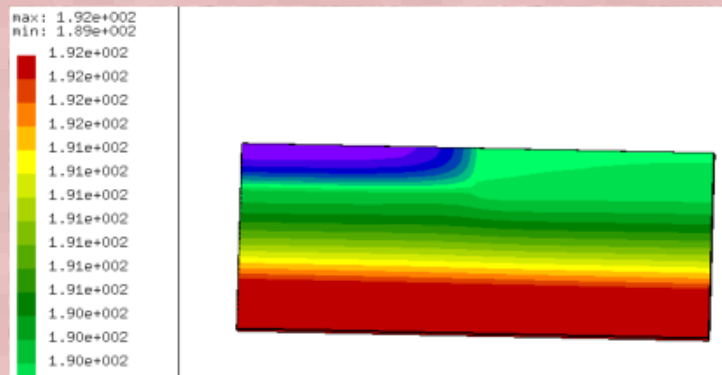
検証例題 2. 複数材料



t=0.9125
最高温度 71.85K

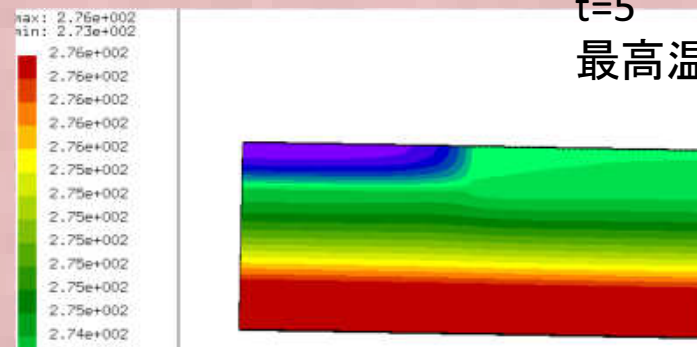


t=2.178
最高温度 135.1K

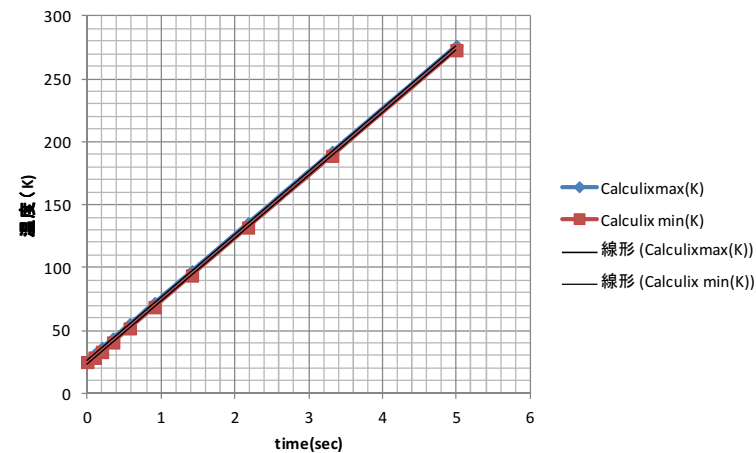


t=3.317
最高温度 192.1K

温度はリニアに上昇
最高温度はt=5sec
276K



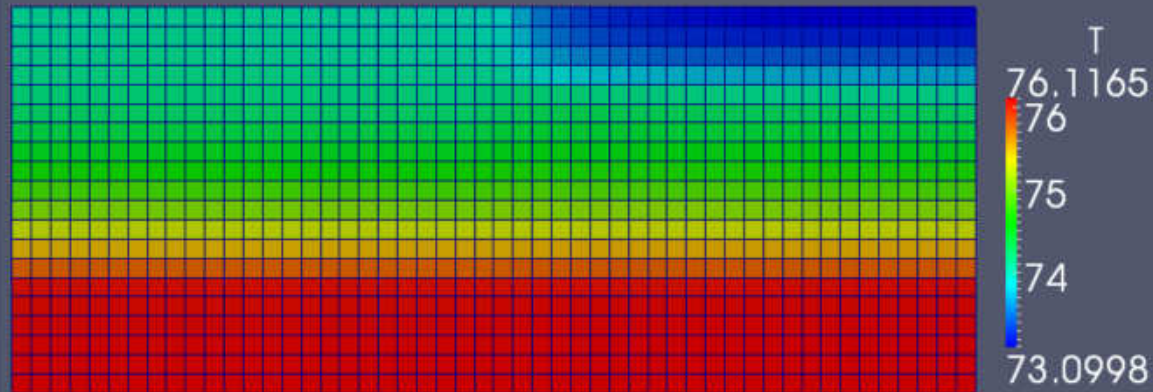
t=5
最高温度276K



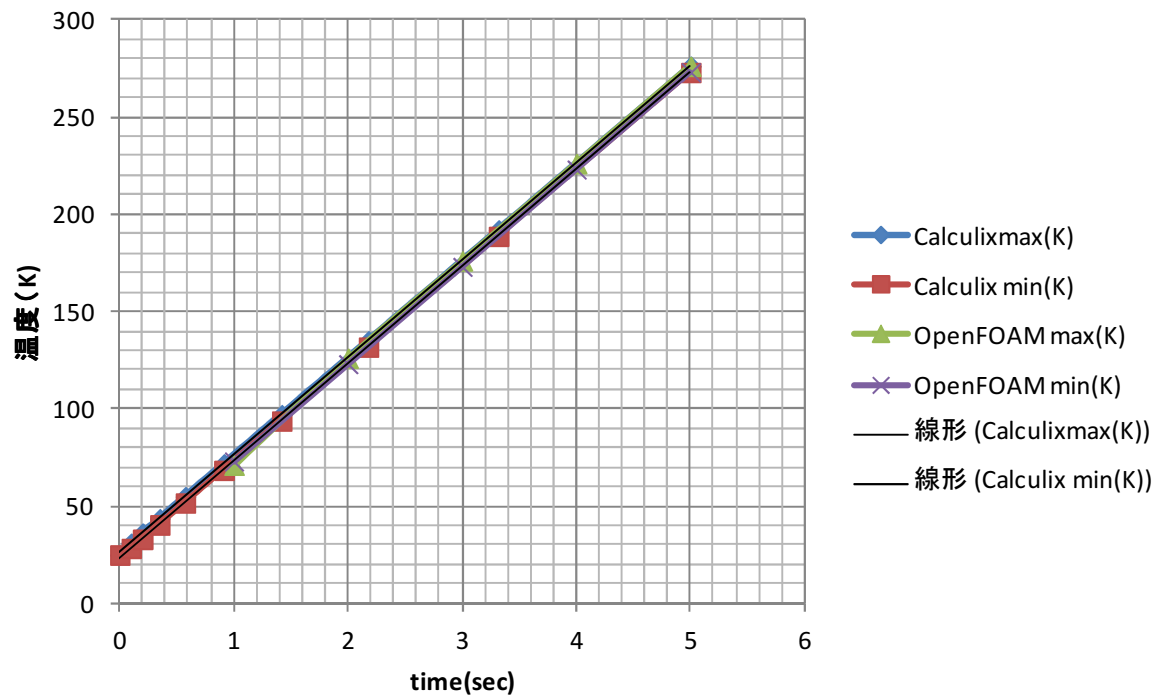
Calculix
計算結果

検証例題 2. 複数材料 固体熱伝導解析

OpenFOAM®
計算結果



$t=1$
最高温度 76.1
最低温度 73.1



境界条件を変更すると
OpenFOAM®と
Calculixの温度上昇が一致

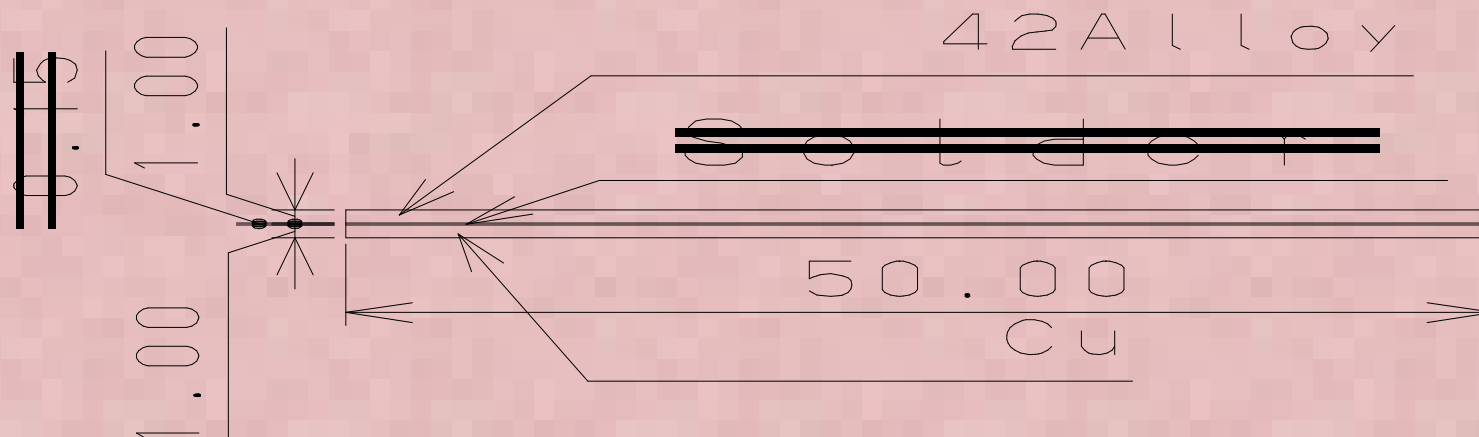
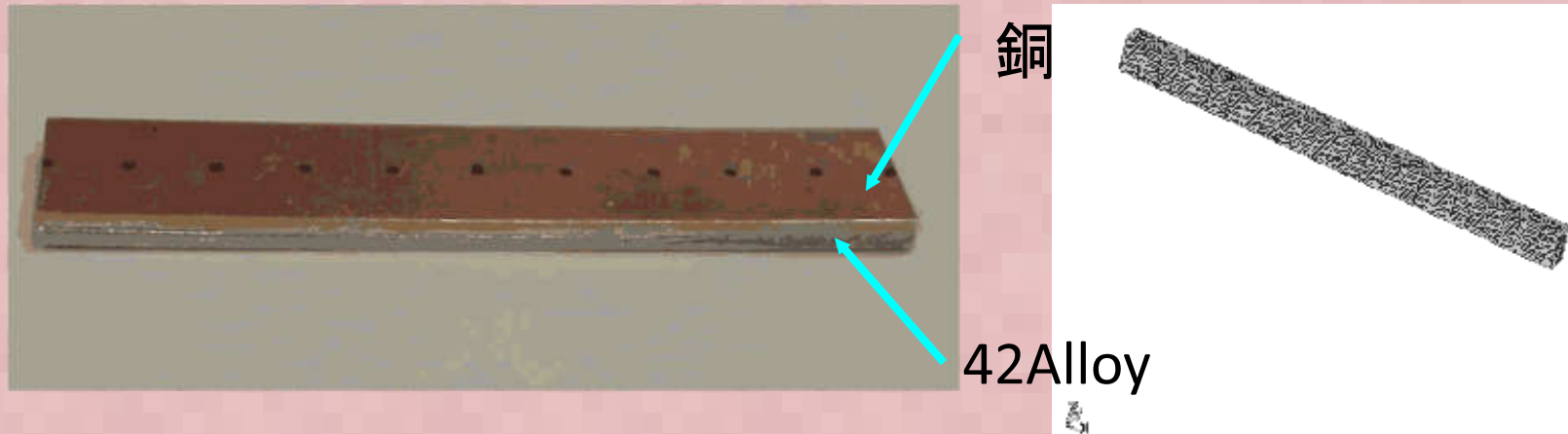


GroovyBCを用いない
場合は問題なく結果が
一致

熱伝導のまとめ

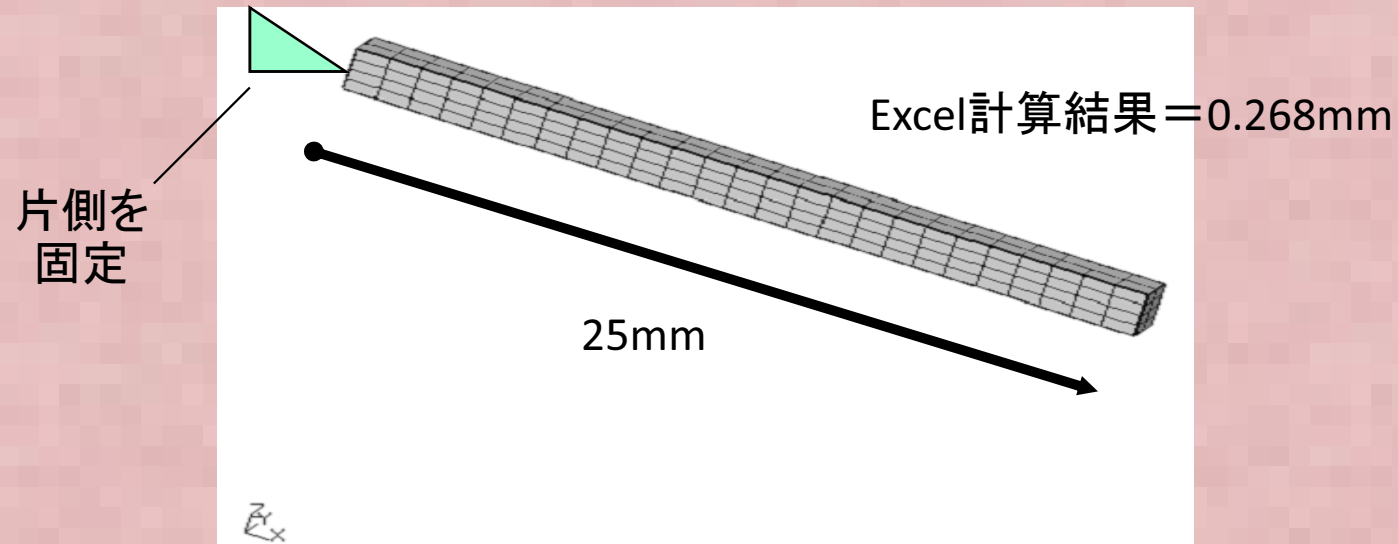
- ・OpenFOAM®の熱設計機能のV&Vを実施中。熱伝導計算の簡単な問題では妥当な結果が得られた。
- ・複数材料の実用的な問題では、境界条件設定などで正しい解を得られないことがあり、妥当性確認が重要
- ・熱流体、固体流体熱連成の検証を今後実施予定。

熱応力にたいする強度解析 バイメタルの熱曲げ応力評価の計算例



- バイメタルサンプルの反りシミュレーション

熱応力にたいする強度解析



No	Name	Melting Temp. (°C)	TCE (ppm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio
1	42Alloy	-	7.0	145140	0.25
2	Copper	-	17.2	136310	0.34

• 材料物性値

多層基板の梁近似による熱的曲げ応力評価

$$\delta = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T L^2 / A$$

$$A = t_1 + t_2 + 4Y(t_1 E_1 + t_2 E_2) / (b t_1 E_1 t_2 E_2 (t_1 + t_2))$$

$$Y = E_1 I_1 + E_2 I_2$$

$$\sigma_{x1} = P_1 / (b t_1) + E_1 z / R$$

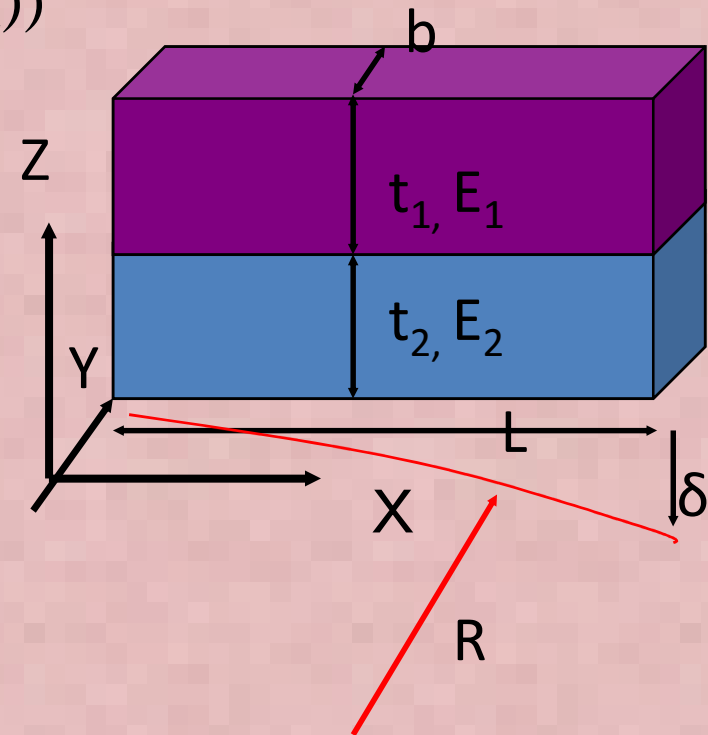
$$\sigma_{x2} = P_2 / (b t_2) + E_2 z / R$$

$$P_1 = -(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T / B$$

$$P_2 = -P_1$$

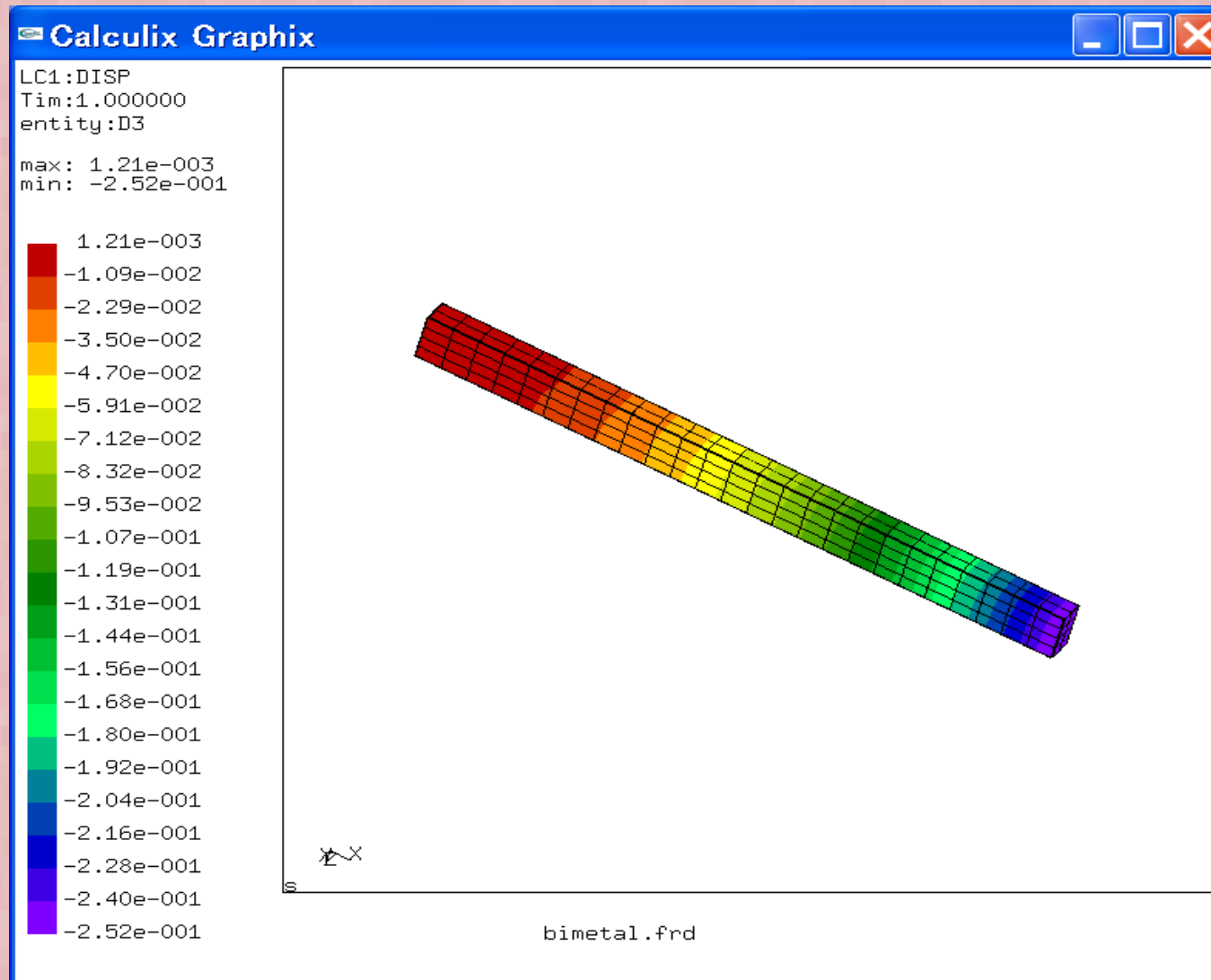
$$B = (t_1 E_1 + t_2 E_2) / (b t_1 E_1 t_2 E_2) + (t_1 + t_2)^2 / (4Y)$$

$$R = L^2 / (2 \delta)$$



- 2層積層はり理論による反り・応力評価

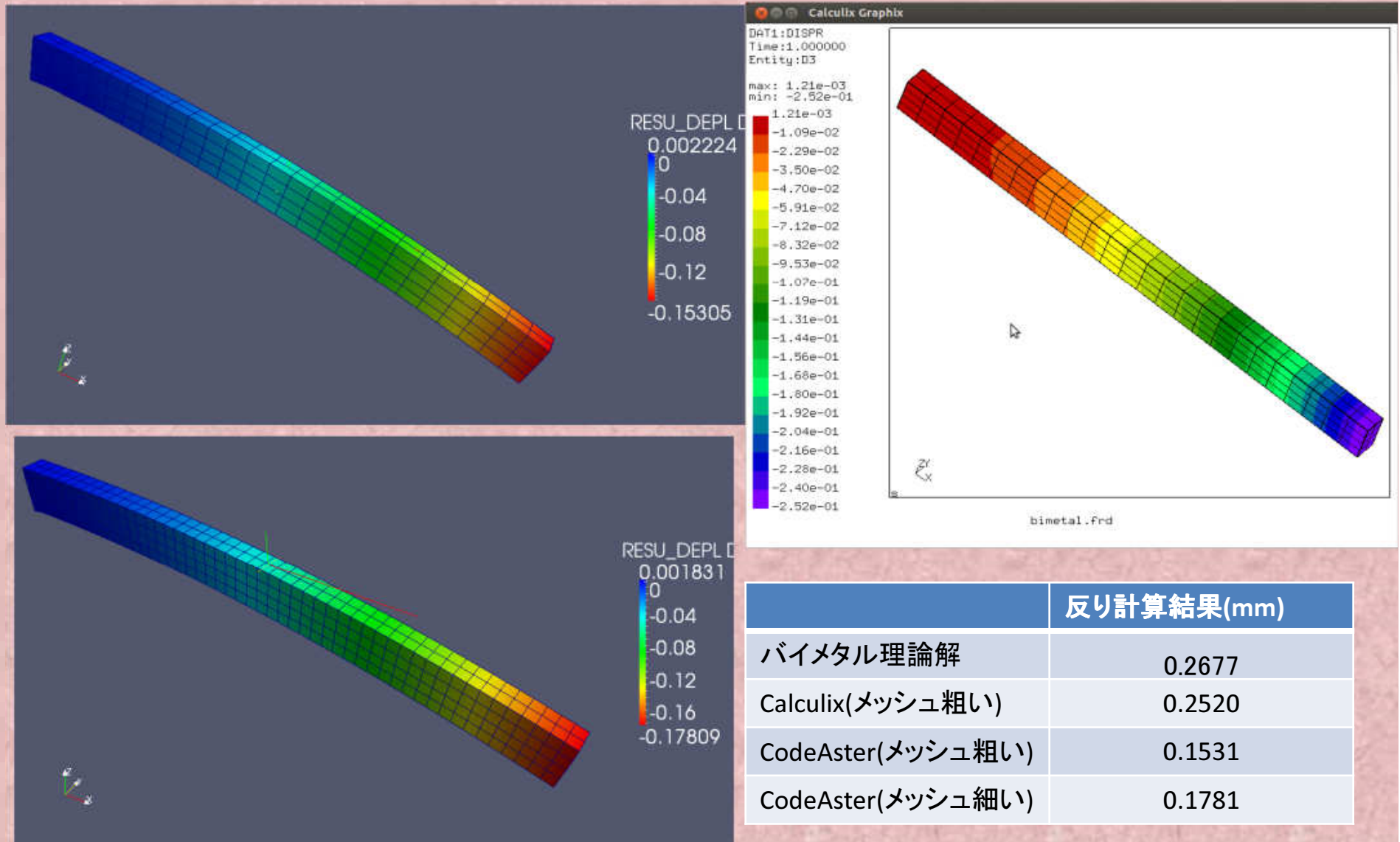
熱応力にたいする強度解析



- 反り計算結果=0.252mm (ABAQUS:0.2609mm)

CodeAster熱応力解析について①

- Calculix/ codeaster mesh変換機能を使って同じメッシュ分割で熱応力解析を実施した



CodeAster bimetal.comm File

```
DEBUT();

CU=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=136310.0,
    NU=0.34,
    ALPHA=1.72e-05,,));

A42ALLOY=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=1415140.0,
    NU=0.25,
    ALPHA=7e-06,,));

MAIL=LIRE_MALLAGE(FORMAT='ASTER',);

MODE=AFFE_MODELE(MALLAGE=MAIL,
    AFFE=_F(TOUT='OUI',
    PHENOMENE='MECANIQUE',
    MODELISATION='3D',,));

tempS=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
    OPERATION='AFFE',
    MODELE=MODE,
    AFFE=_F(TOUT='OUI',
    NOM_CMP='TEMP',
    VALE=25.0,,));

MATE=AFFE_MATERIAU(MALLAGE=MAIL,
    AFFE=( _F(GROUP_MA='CU',
    MATER=CU,,
    _F(GROUP_MA='A42ALLOY',
    MATER=A42ALLOY,,),
    AFFE_VARC=_F(GROUP_MA=('CU','A42ALLOY',),
    NOM_VARC='TEMP',
    CHAM_GD=tempS,
    VALE_REF=137.0,,));
```

```
CHAR=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODE,
    DDL_IMPO=_F(GROUP_NO='FIX',
    DX=0.0,
    DY=0.0,
    DZ=0.0,,));

RESU=MECA_STATIQUE(MODELE=MODE,
    CHAM_MATER=MATE,
    EXCIT=_F(CHARGE=CHAR,,));

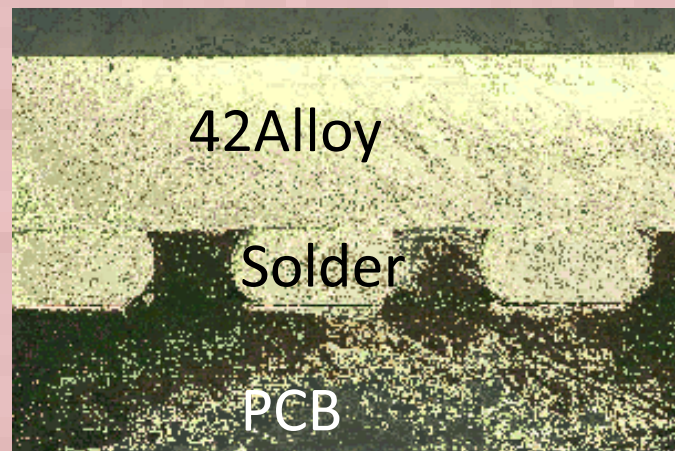
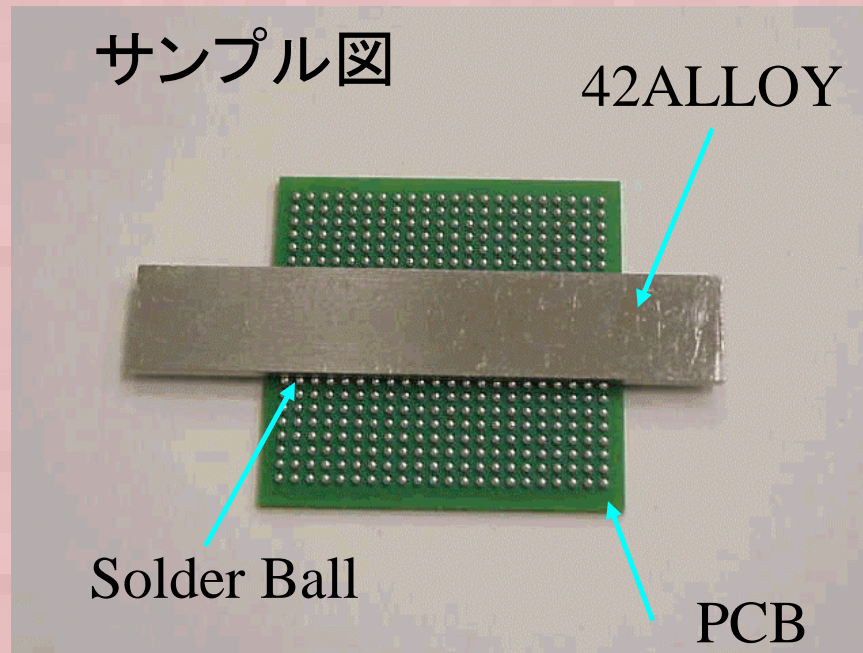
RESU=CALC_CHAMP(reuse =RESU,
    RESULTAT=RESU,
    CONTRAINTE=('SIGM_ELNO','SIGM_NOEU',),
    CRITERES=('SIEQ_ELNO','SIEQ_NOEU',,));

IMPR_RESU(FORMAT='MED',
    UNITE=80,
    RESU=_F(RESULTAT=RESU,
    NOM_CHAM=('SIGM_NOEU','SIEQ_NOEU','DEPL',,)),);

IMPR_RESU(FORMAT='RESULTAT',
    RESU=_F(MALLAGE=MAIL,
    RESULTAT=RESU,
    NOM_CHAM='DEPL',,));

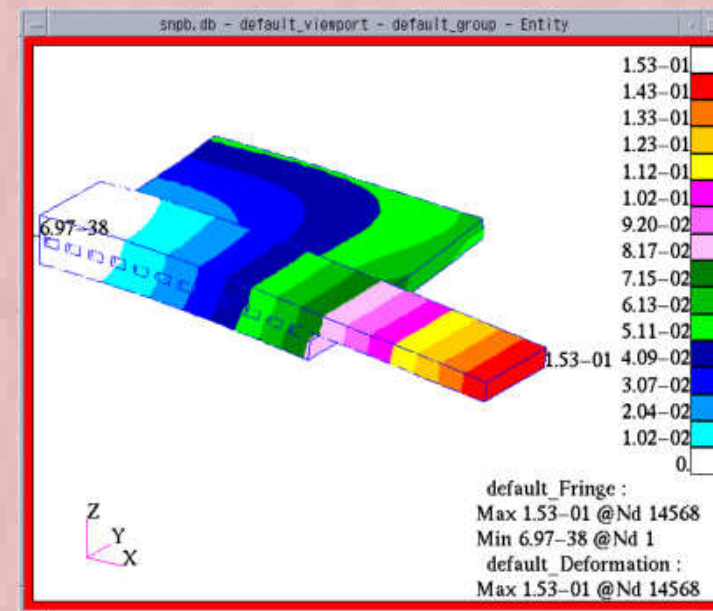
FIN();
```

熱応力にたいする強度解析 簡易サンプルの高温時反り計算精度検証



断面図

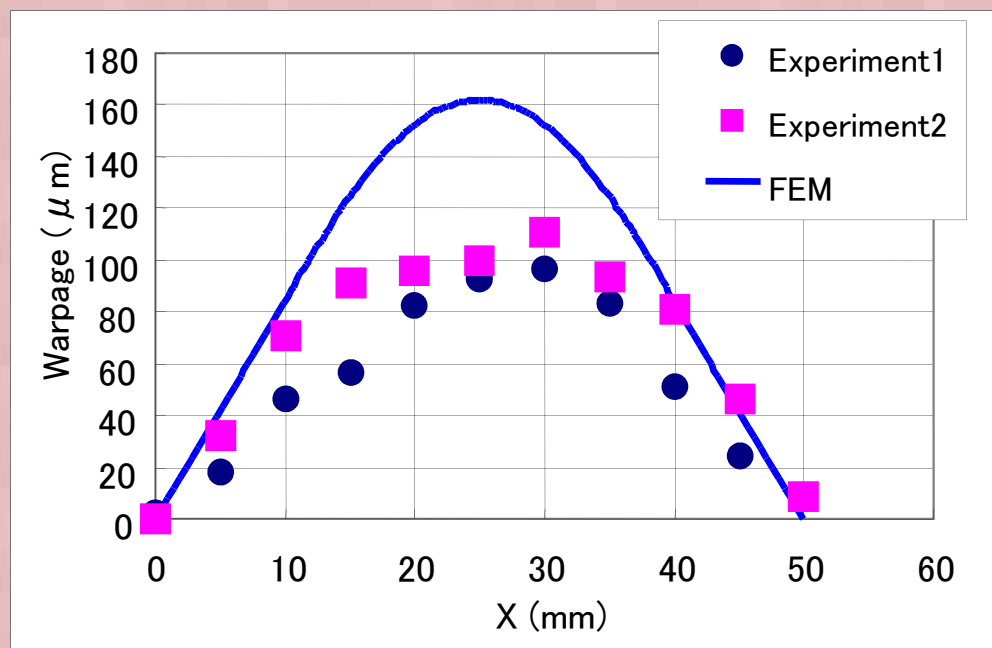
構成材料: PCB/42ALLOY
接合材料: SnPb共晶はんだ
温度条件: 183- \rightarrow 25 $^{\circ}$ C
はんだボール径:
0.6x0.6x0.5h



- 接合後常温での反り計測

d. 熱応力にたいする強度解析 簡易サンプルの高温時反り計算精度検証

No	Name	Melting Temp. (°C)	TCE (ppm)	Elastic Modulus (MPa)
1	63Sn37Pb	183	25.4	23950
2	42Alloy	-	7.0	145140
3	PCB	-	16.6	12000

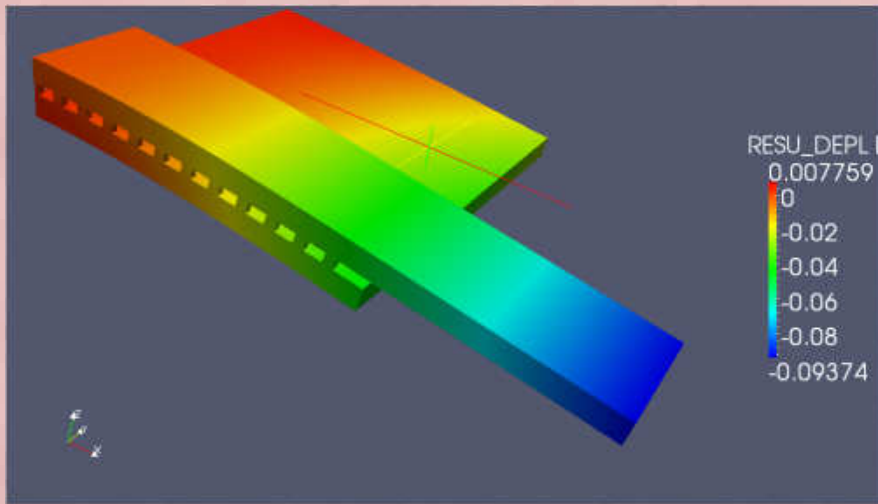


最大反り:
160μm (FEM解析)
120μm (実測)
→ 最大誤差40%
金属板間バイメタルと
比較して解析誤差が大きい。

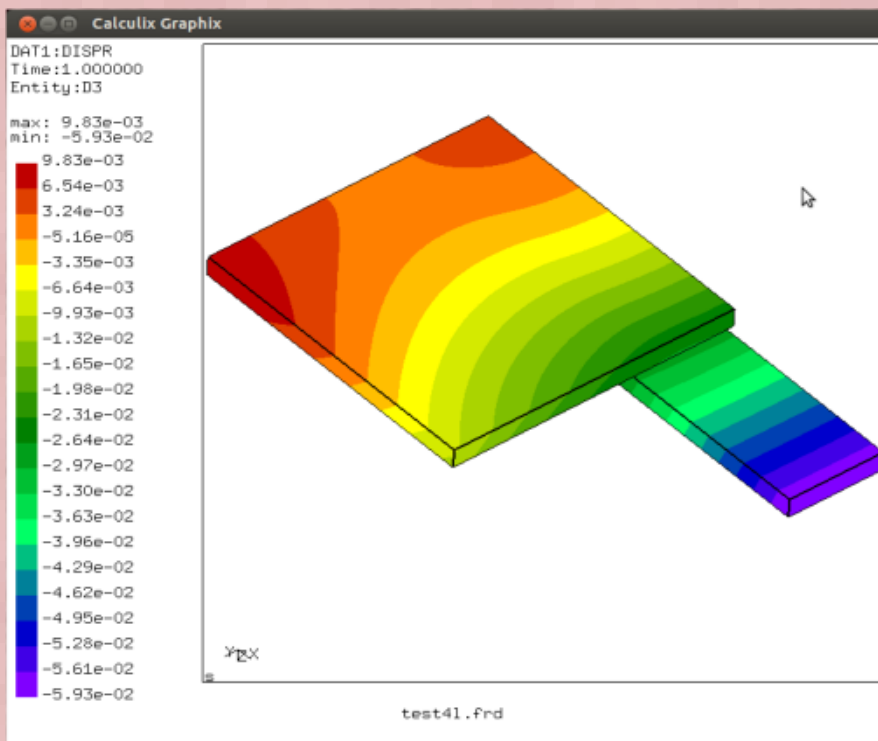
基板物性の温度依存性が原因

- 接合後常温での反り計測・解析結果比較

CodeAster熱応力解析について②



複合材の反り解析
Calculixと結構ずれる？
先ほどと逆にCodeAster
の方が反りが大きい



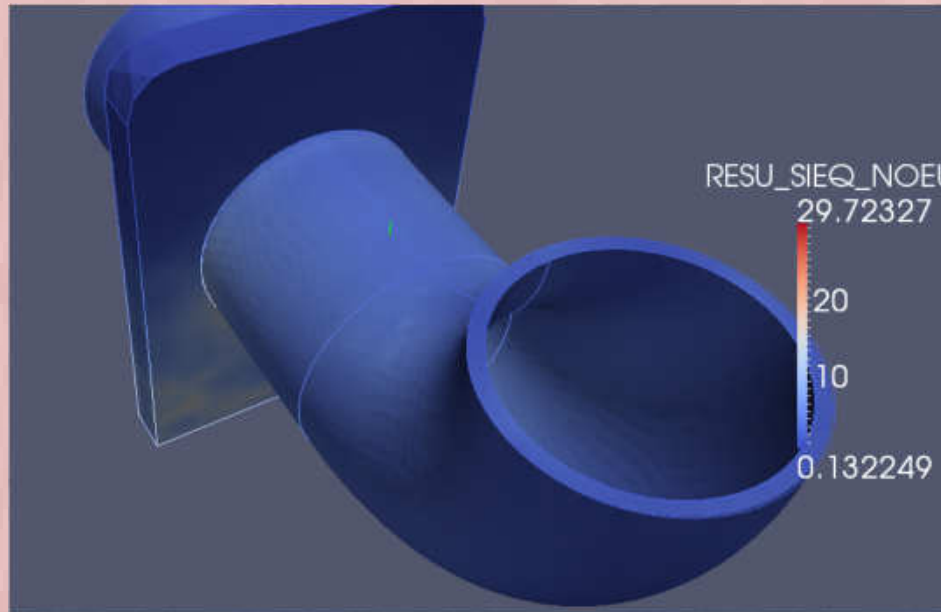
	計算結果反り(mm)
Calculix	0.05930
CodeAster	0.09374

配管解析の例

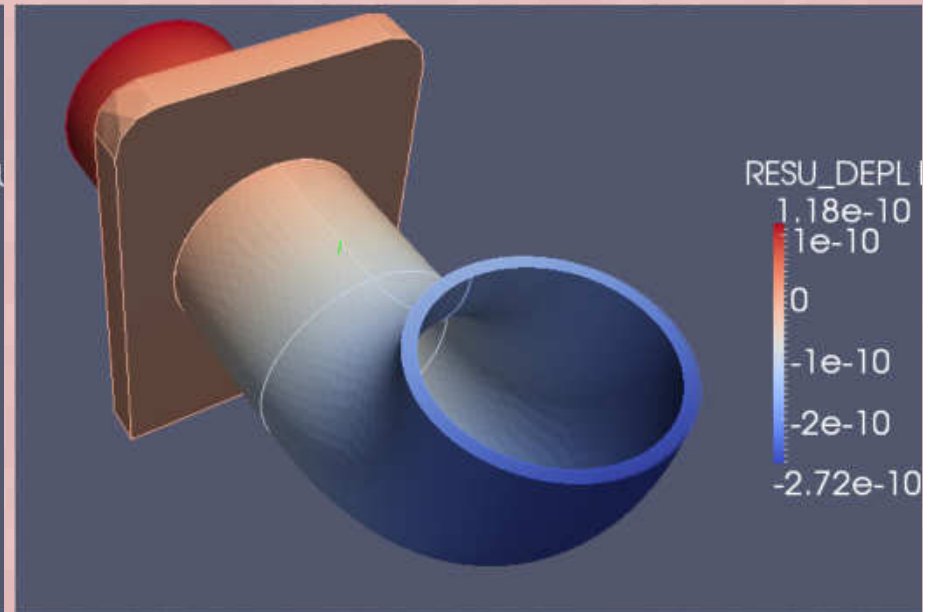
- Salomeの演習で行った配管解析をFrontISTRなどで実施してみる。

Abaqus とSalome-meca(CodeAster)はほぼ同じ結果であるが、FrontISTRは収束せず？

Salome-meca解析例



最大応力: 約30Pa

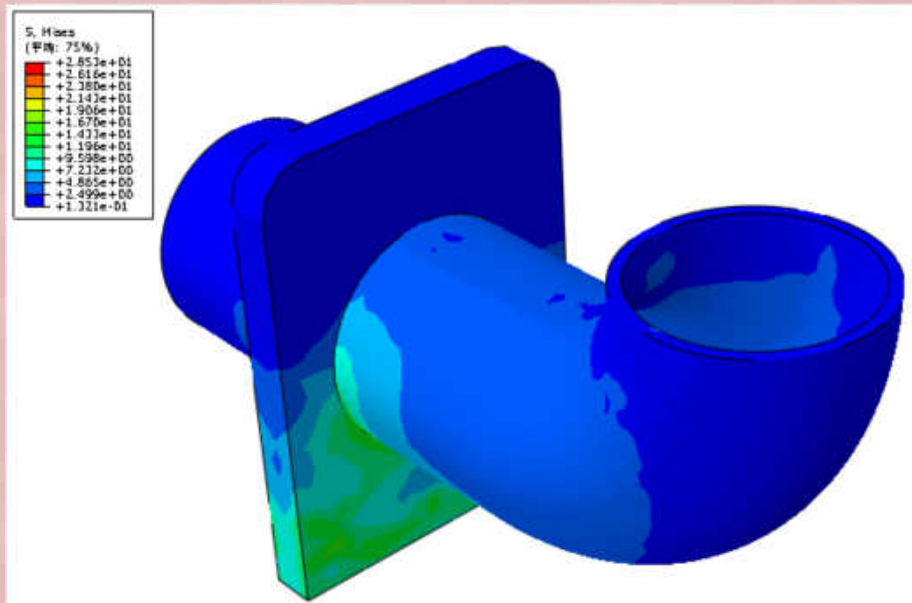


最大変位: + 1.18E-10m
- 2.72E-10m

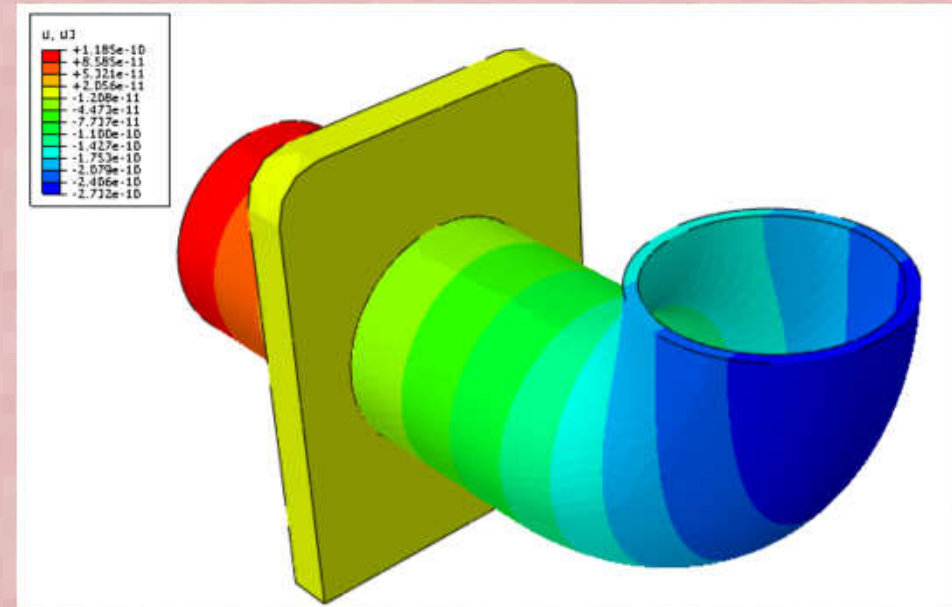
配管解析の例

- Salomeの演習で行った配管解析を実施してみる。最初に某環境を使ってABAQUSで解析、また同じデータでCalculixで解析を実施してみた。板と配管の間は結合処理した。

ABAQUS解析例



最大応力: 約28Pa

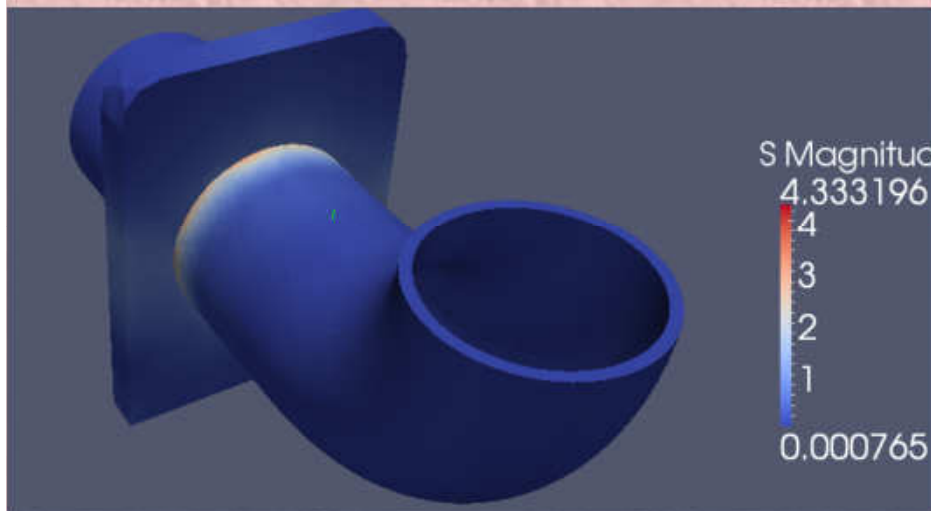


最大変位: + 1.18E-10m
- 2.73E-10m

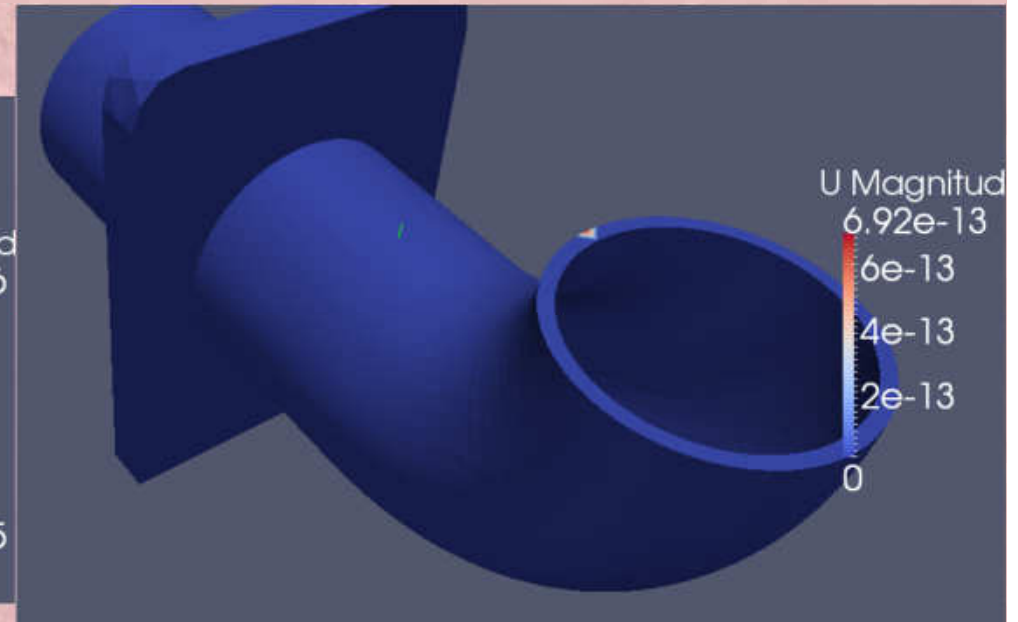
配管解析の例 (Calculix)

- 変位分布があきらかにおかしい？

Calculix解析例



最大応力: 約4Pa

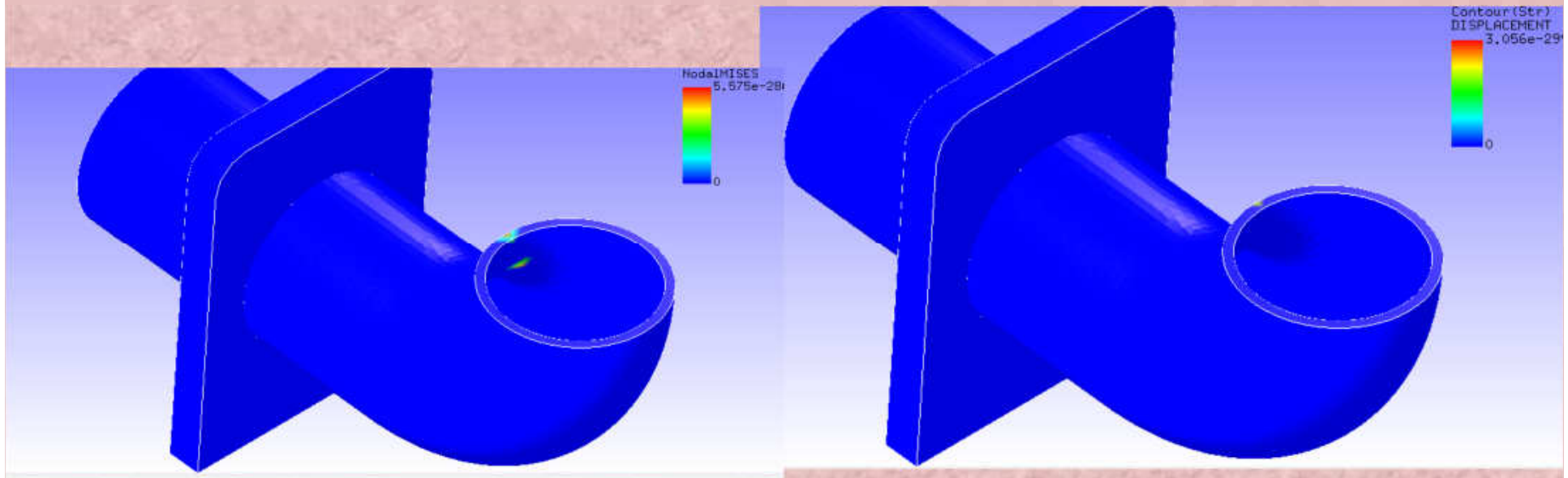


最大変位: $+ 6.92 \times 10^{-13} \text{m}$
0m

配管解析の例 (FrontISTR)

- 結果まともに出ず。あれれ？
(原因調査してわかったらお知らせします。)

FrontISTR解析例



最大応力: 約0Pa

最大変位: +0m

各ソフトの特徴などまとめ・各ソフト特徴

名前	解析機能	インターフェース・プリポスト	その他特徴など
Calculix	○ 非線形材料, 動解析、接触、熱伝導、流体など豊富	△ 一応GUIはあるが機能が貧弱, ABAQUS形式からコンバートが良い	Abaqus入力形式、Windowsで動くので便利、機能のわりにソースがコンパクト
CodeAster (Salome-meca)	○ 非線形材料, 動解析、接触、熱伝導、流体など豊富	○ オープンソースの中では最も充実、商用ソフト入力形式からの変換を充実してほしい	大規模な非線形構造解析、日本では最近活用がさかん(フランス)、ソースは膨大で読みにくそう
WARP3D	△ 詳細不明、非線形材のバリエーションは豊富	✕ 商用ソフト(PATRAN)を利用	さ構造解析(き裂解析向けの非線形、接触解析等)のソルバ(米国)
Elmer	△ 接触は不可?	△ 部品ならまあ使える	連成解析に向いている。本格的な解析をやるのは大変そう
Adventure	× 線形静解析, 非線形材の一部のみ	✕ 現在ほぼ使えない	大規模構造解析向け行列ソルバの機能はすごいと思う
FrontISTR	△ バリエーションはそこそこあり接触解析機能もあるが安定性悪い	△ 部品ならまあ使える	解析機能はそこそこ充実 ソース解説資料は良い

各ソフトの特徴などまとめ

- ・各ソフトとも商用ソフトと比較して得意不得意があるので、目的に応じて使いわけろべき、だがこれらの特徴を理解して使えば、ほとんどの解析はオープンソース(+各自のカスタマイズ)で実行可能と思われる。仕事で本格的に使用したい場合は自己流にコードをカスタマイズすることをお勧め