

2014/05/10
OpenCAE勉強会@岐阜

振動固有値計算機能の 各種オープンソースCAEソフト 間の結果比較検証

SH

発表内容

- **動解析について**
- **固有値解析とその他の線形振動・過渡解析**
- **オープンソースCAEソフト動的解析**
- **固有値解析ベンチマーク問題と結果**
 - **梁の固有値計算ベンチマーク**
 - **Pump Carterモデルベンチマーク**
- **まとめ**

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。

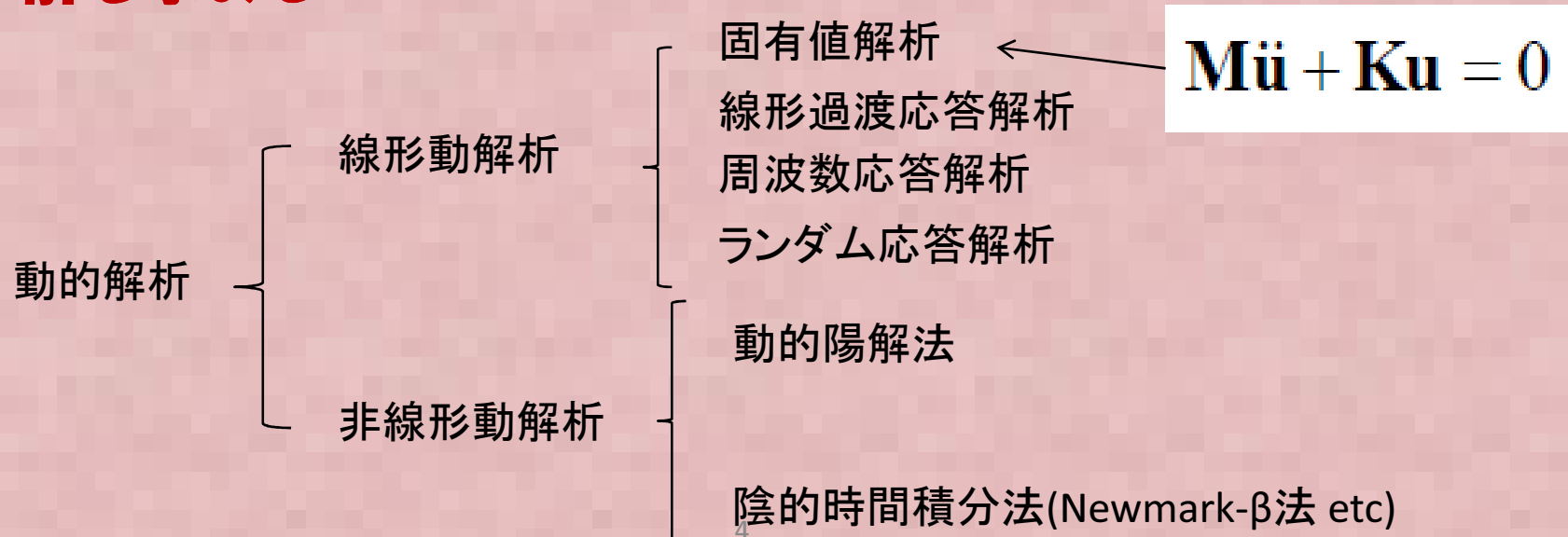
慣性力



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

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

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

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

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

または u_0 を x また ω^2 を λ とおくと

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

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

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)

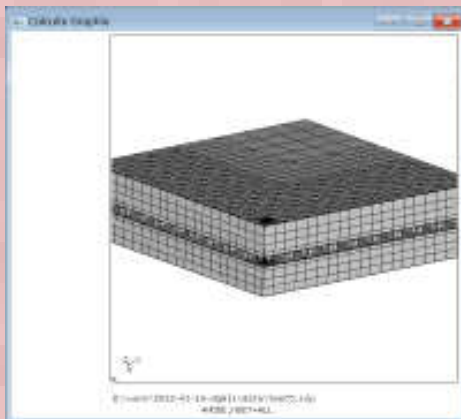
動的解析の可能なオープンソースCAEソフト

	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	○	—	○?	?	×	×	

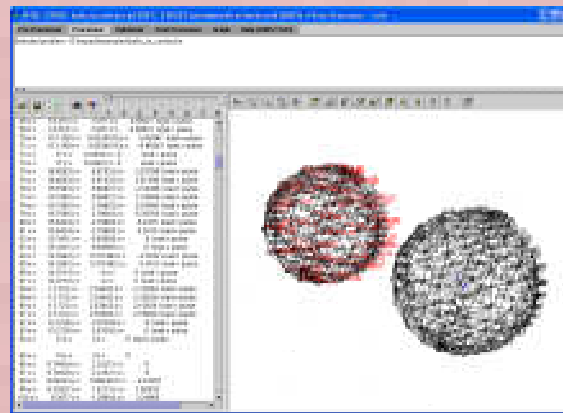
固有値解析については、代表的なオープンソースCAEソフトにて解析が可能である。今回はCodeAster, Calculix, Elmer, FrontISTRにて固有値計算のベンチマークを行い、それぞれのソフトでの計算結果・計算手順などをまとめた。

オープンソース構造解析ソルバ

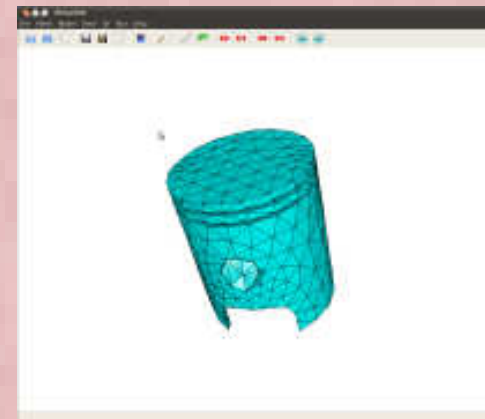
名前	URL	内容	License
Calculix	www.calculix.de	Abaqus的非線形構造解析	GPL
CodeAster	www.code-aster.org	非線形構造解析	GPL
FELyX	felyx.sourceforge.net	構造解析	GPL
Impact	impact.sourceforge.net	陽解法非線形解析ソルバ	GPL
Tahoe	sourceforge.net/projects/tahoe/	構造解析	OSL
WARP3D	cern49.cee.uiuc.edu/cfm/warp3d.html	構造解析(き裂解析)	GPL
Elmer	www.csc.fi/english/pages/elmer	連成解析ソルバ(構造解析)	GPL
Adventure	adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/	大規模構造解析ソルバ	独自
FrontISTR	www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/dl/	大規模構造解析ソルバ	独自



Calculix



Impact

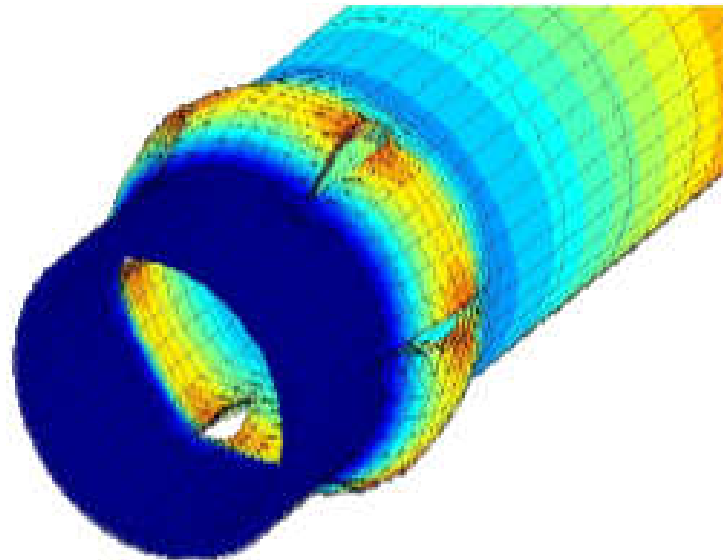
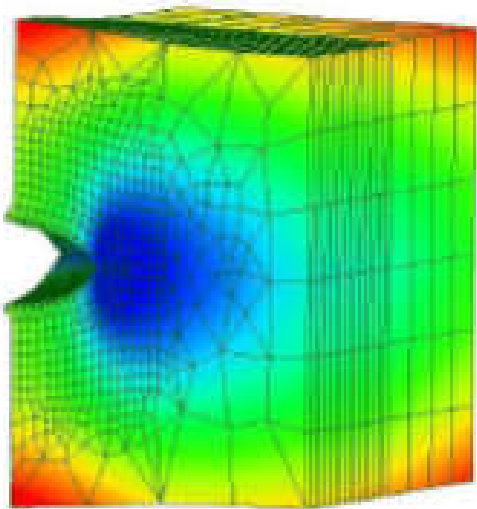


Elmer

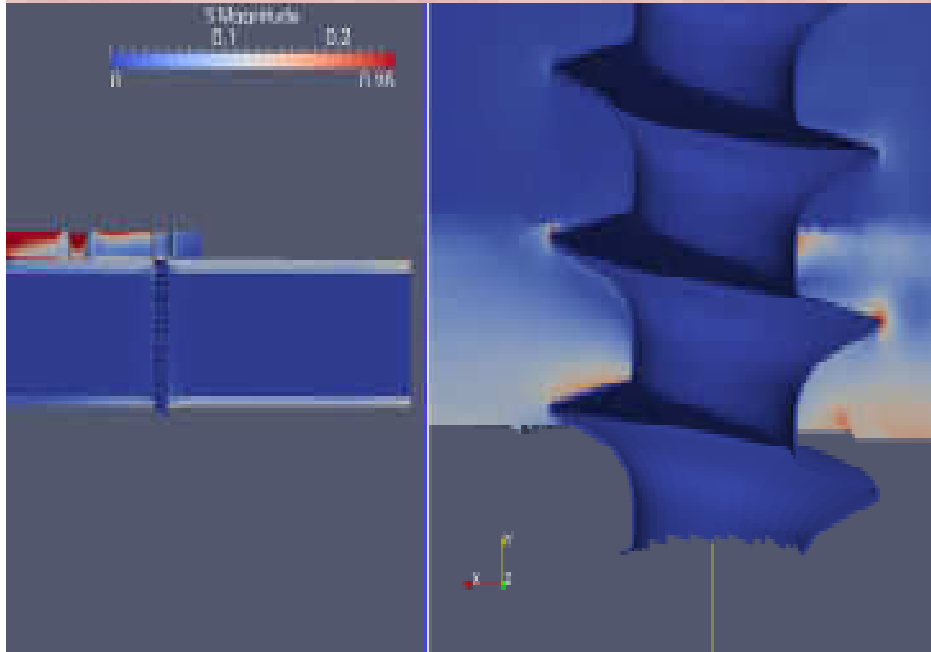
CodeAster

- 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

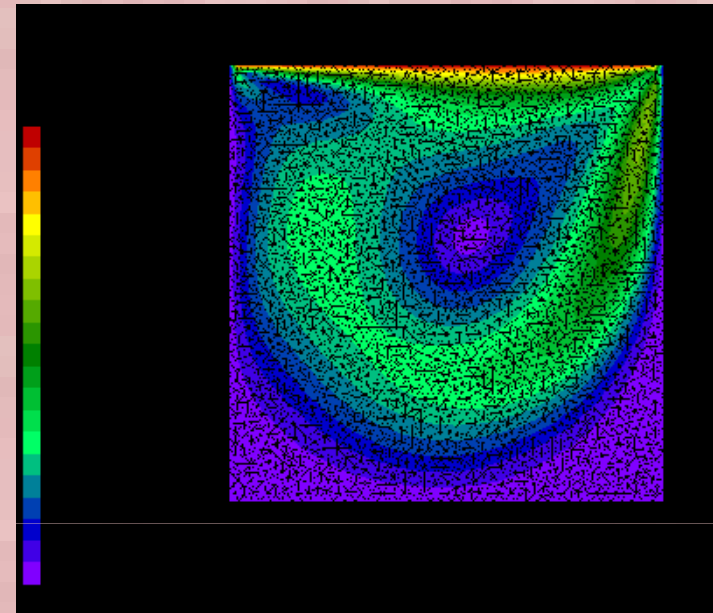
EDF 公開資料より、XFEMによる3次元亀裂進展解析



Calculix



CalculiX Extras project
解析事例から借用



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/> Windowsの実行バイナリを公開
- 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; 標準設定ではあまり大規模な計算(数10万メッシュ以上?)には対応していない。
使用している行列ソルバSPOOLS がシングルコアで実行するように設定されているため

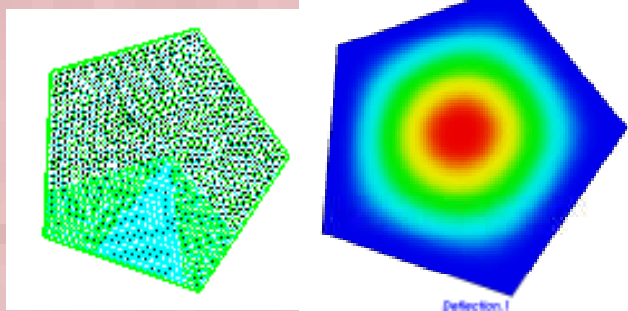
FrontISTR

ダウンロードは下記から

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

- **FrontISTRとは東大が国プロジェクト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(商業利用時は東大と契約)**
- **プリはRevocap, 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**

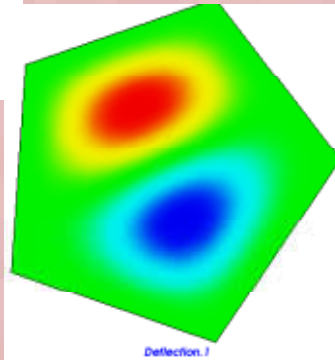
Elmer



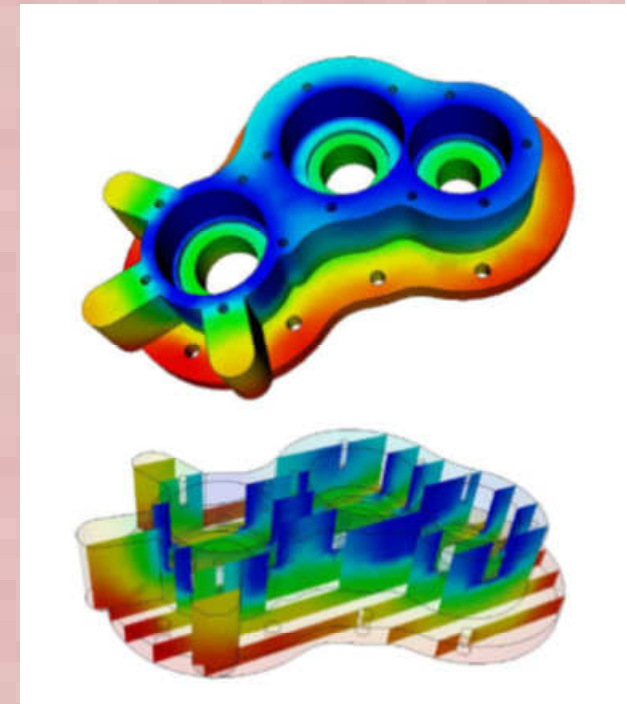
Elmer elastic
plate example
mesh

1 st
EigenValue
mode

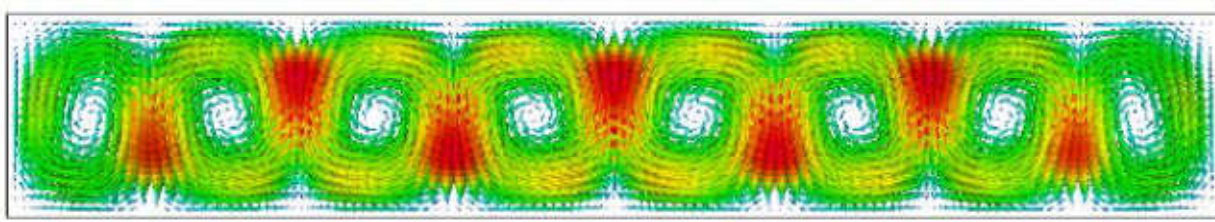
固有値解析



2nd
EigenValue
mode



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

- 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実行バイナリを公開
- Linux版はソースからコンパイルする。旧版バイナリはCaelinuxLIVEDVDにインストールされている
- 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と連成解析に対応

固有値計算理論解①

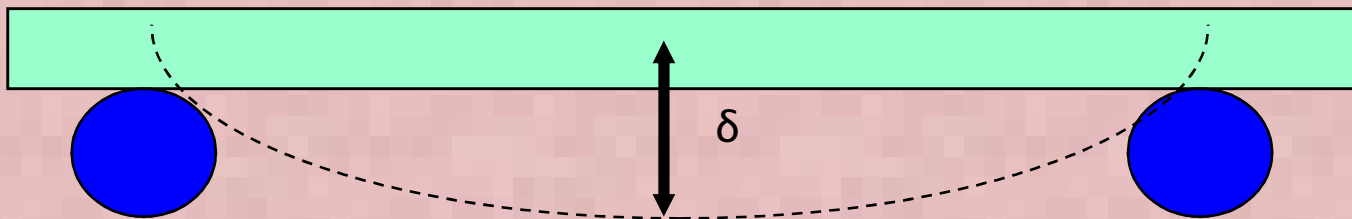
- 振動固有値

- 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”

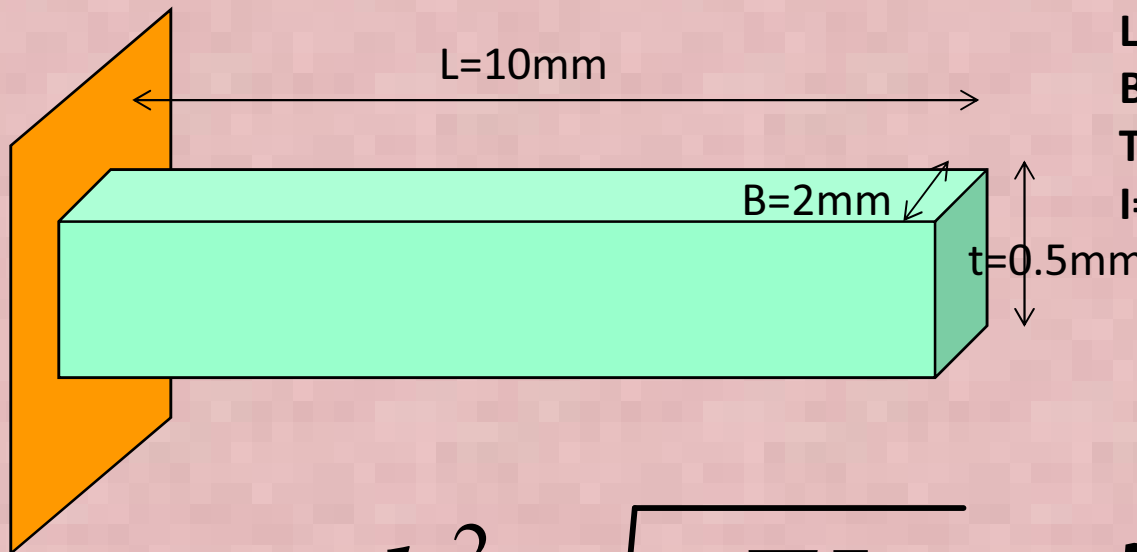
	k	1次	2次
① 両端固定		4.73	7.853
② 片端固定、片端支持		3.927	7.069
③ 片端固定、片端自由		1.875	4.694



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。



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

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

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

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

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

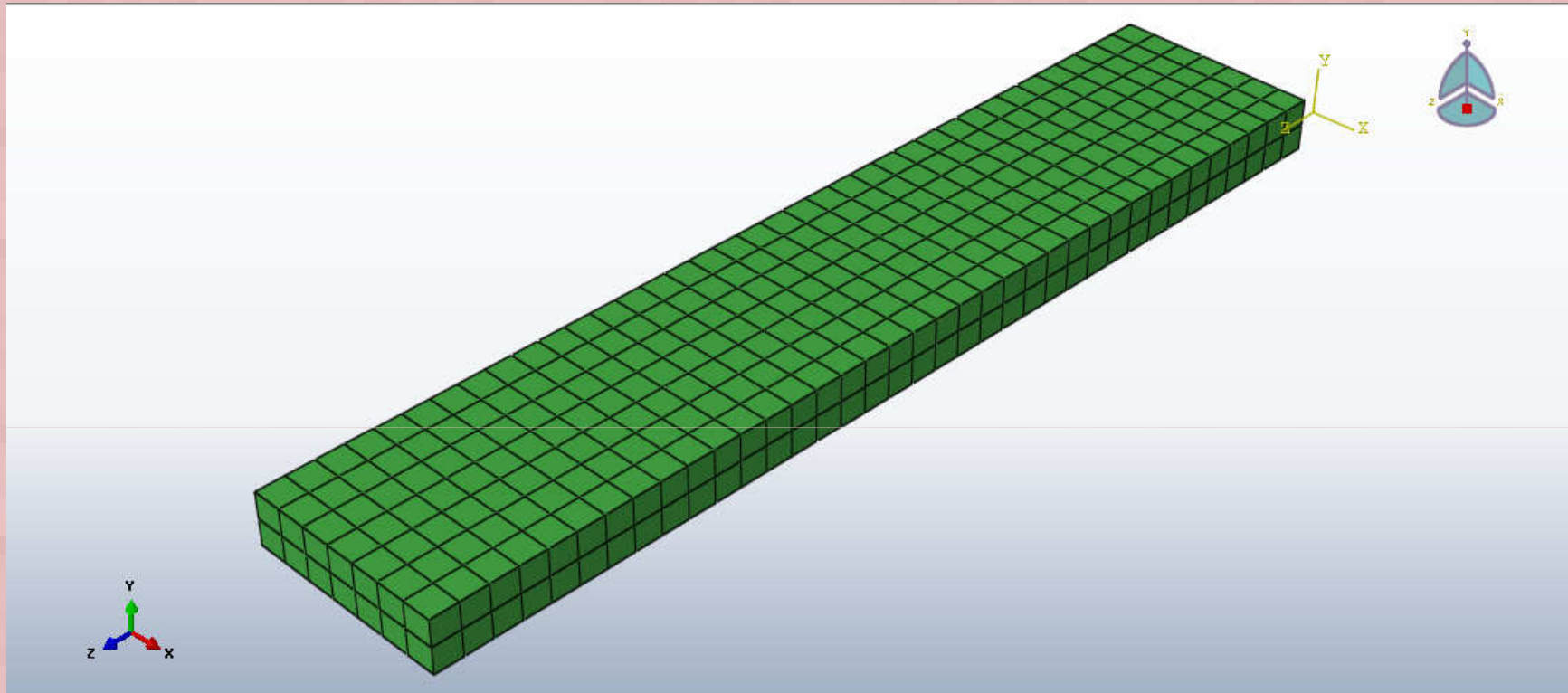
$$\text{密度} = 2.7 \times 10^{-9}$$

$$k = 1.875$$

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

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
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
*Boundary
Set-1, 1,3, 0.0
**
**
** STEP: Step-1
*Step
*Frequency
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

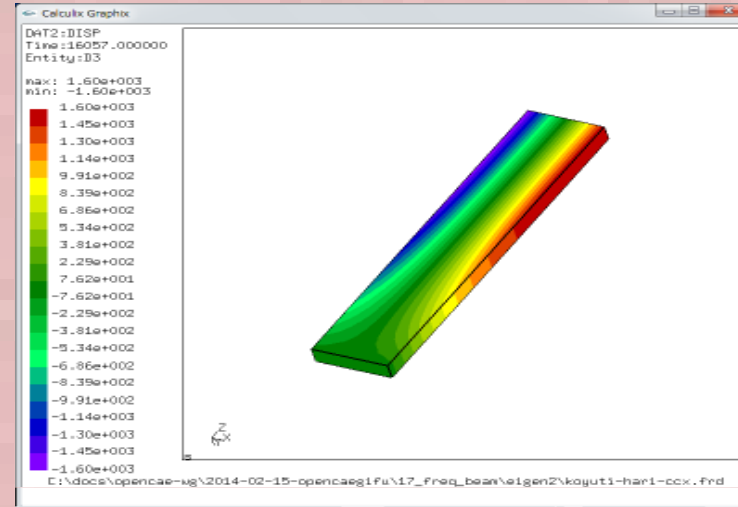
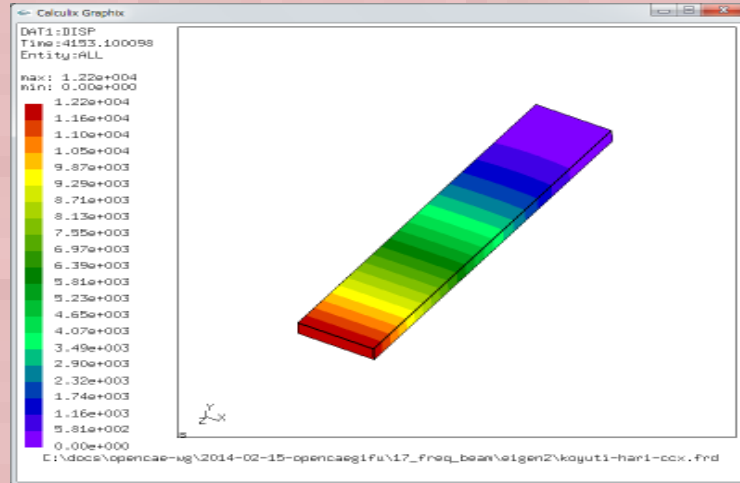
固有値解析を指示、20は20モードまで計算して、出力する指定

結果出力指示

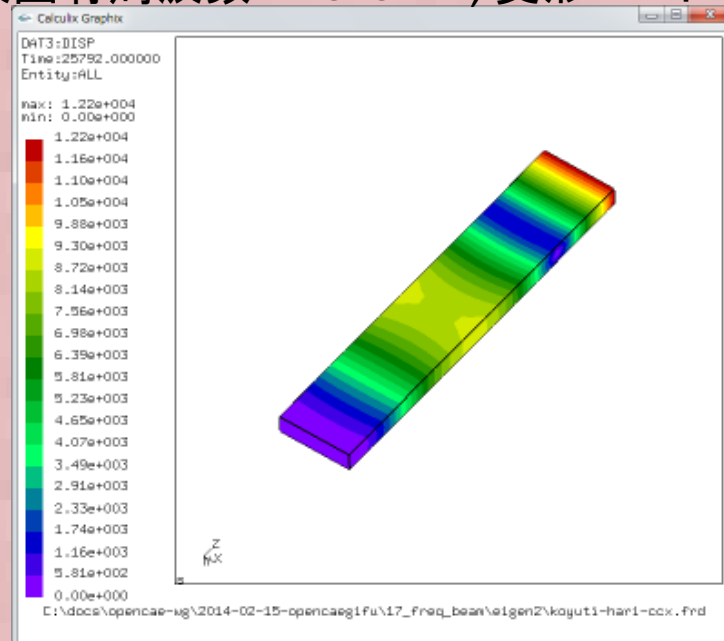
CalculixはAbaqusとほとんど同じ形式であり、1つの入力ファイル(input file)にテキスト形式で節点座標、要素コネクティビティ、材料物性、境界条件、解析条件を全て記述する

Calculix解析結果

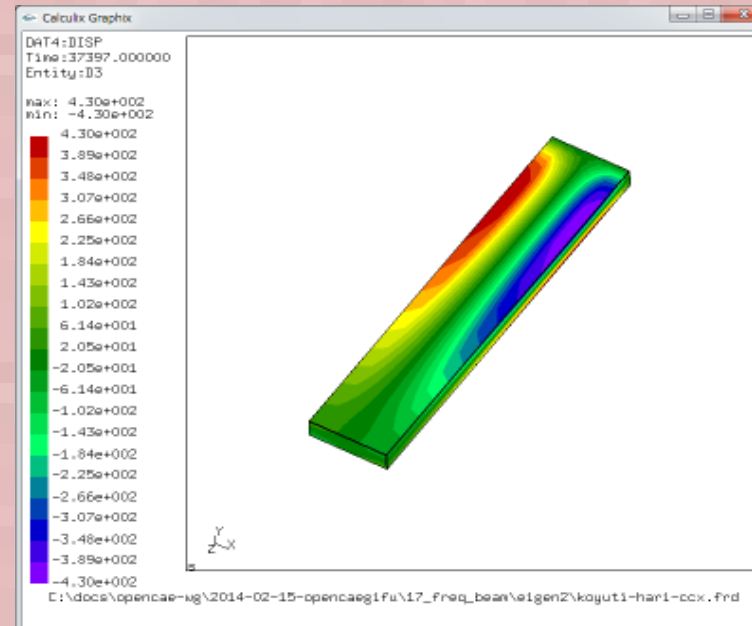
1次固有周波数=4153Hz, 変形モード↓ 2次固有周波数=16057Hz, 変形モード↓



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

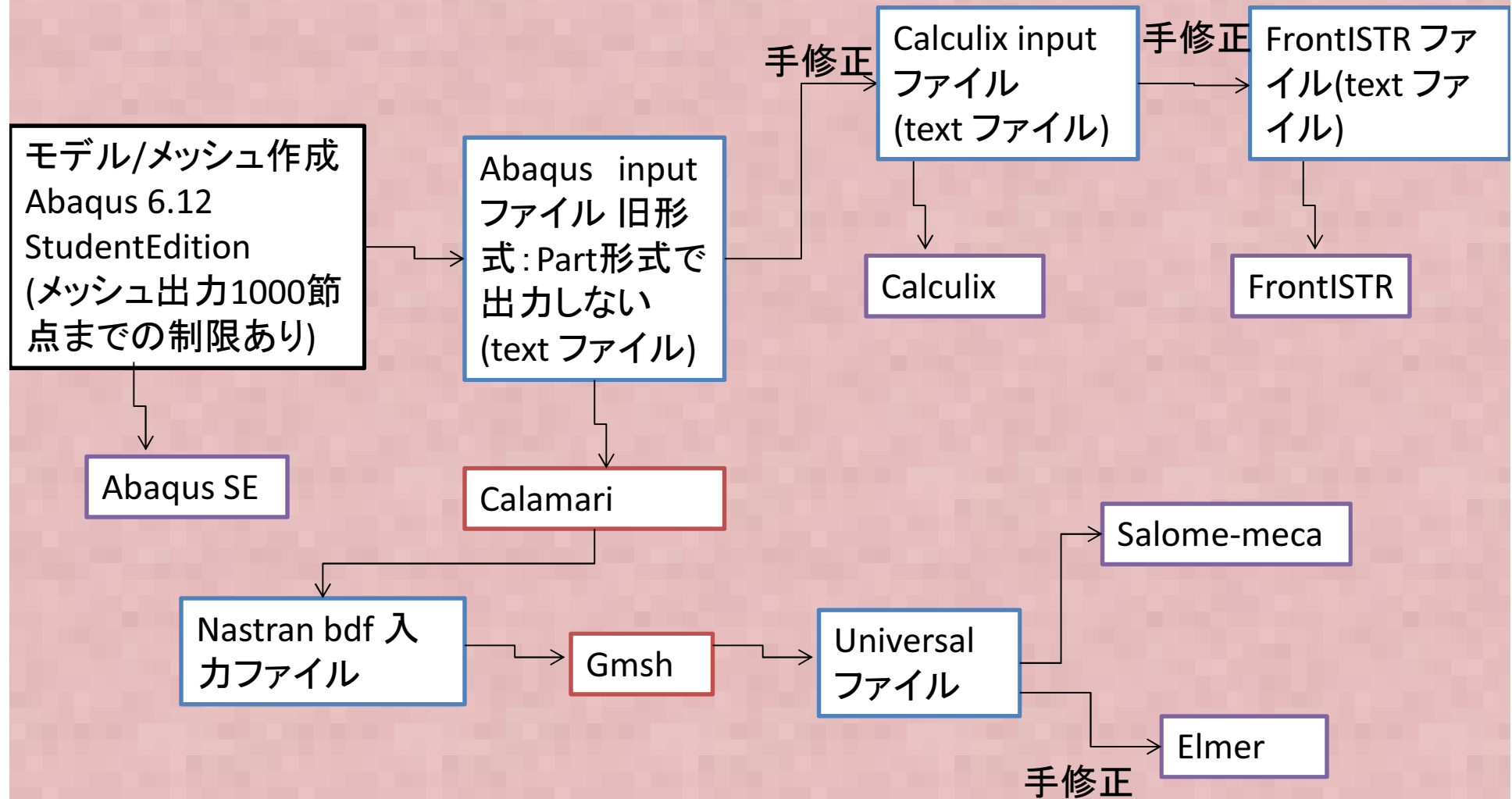
- Calculix/Abaqus → Abaqus形式ファイルは直接Universalファイルに変換するフリーのツールが無いので、Abaqus形式ファイルをNastran形式に以下のフリーソフトで変換してNastran形式ファイルをGmshに読み込み、GmshからUniversalファイルに出力する。

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

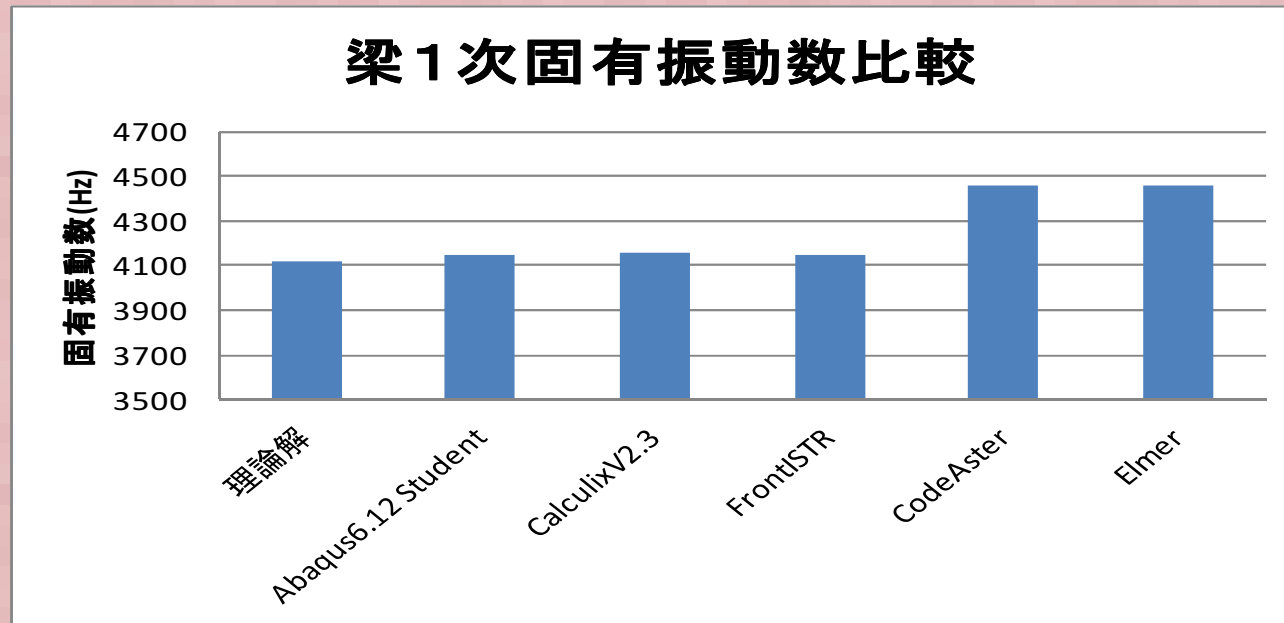
固有モード	Abaqus6.12 Student	CalculixV2.3	FrontISTR	CodeAster	Elmer
1	4150.8	4153.074	4150.88	4460.38	4460.380142
2	16047	16056.59	16047.6	16146.2	16146.21647
3	25698	25791.83	25698.4	27668.8	27668.76431
4	36179	37397.24	36182.1	37532	37531.98198
5	70797	71400.84	70799.8	76453.3	76453.26656
6	86620	86901.62	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①?

- 曲げ問題に対するせん断ロックング(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

非適合要素とは②?

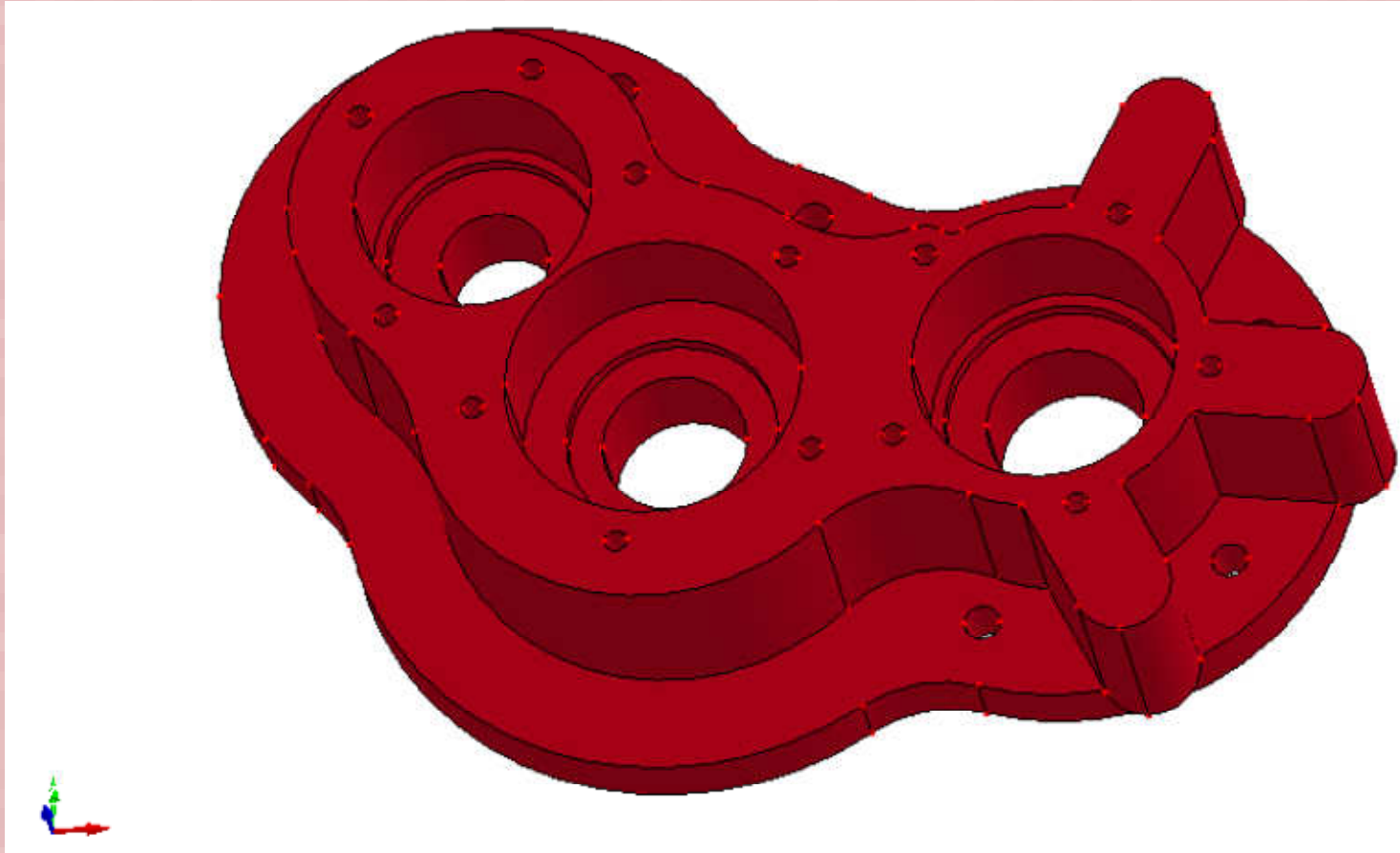
- 具体的には要素の変位内挿関数に高次(通常2次)の非適合モードを追加する。ただし、要素間の変位整合性はとらないので、非適合モードは全体剛性マトリックスには影響しない。このため計算負荷は2次要素等と比べて少ない

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。

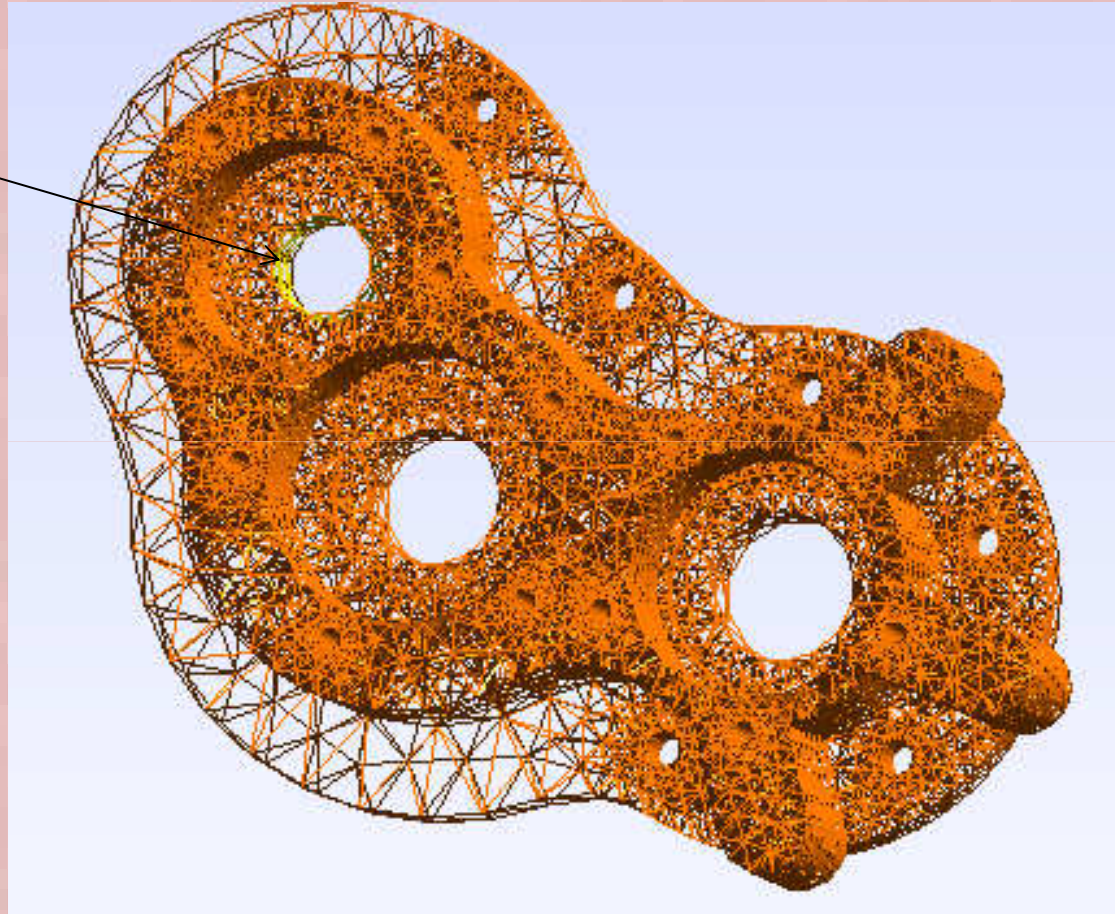
自動Mesh 作成

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+11Pa
NU=0.3
密度=7900kg/m³

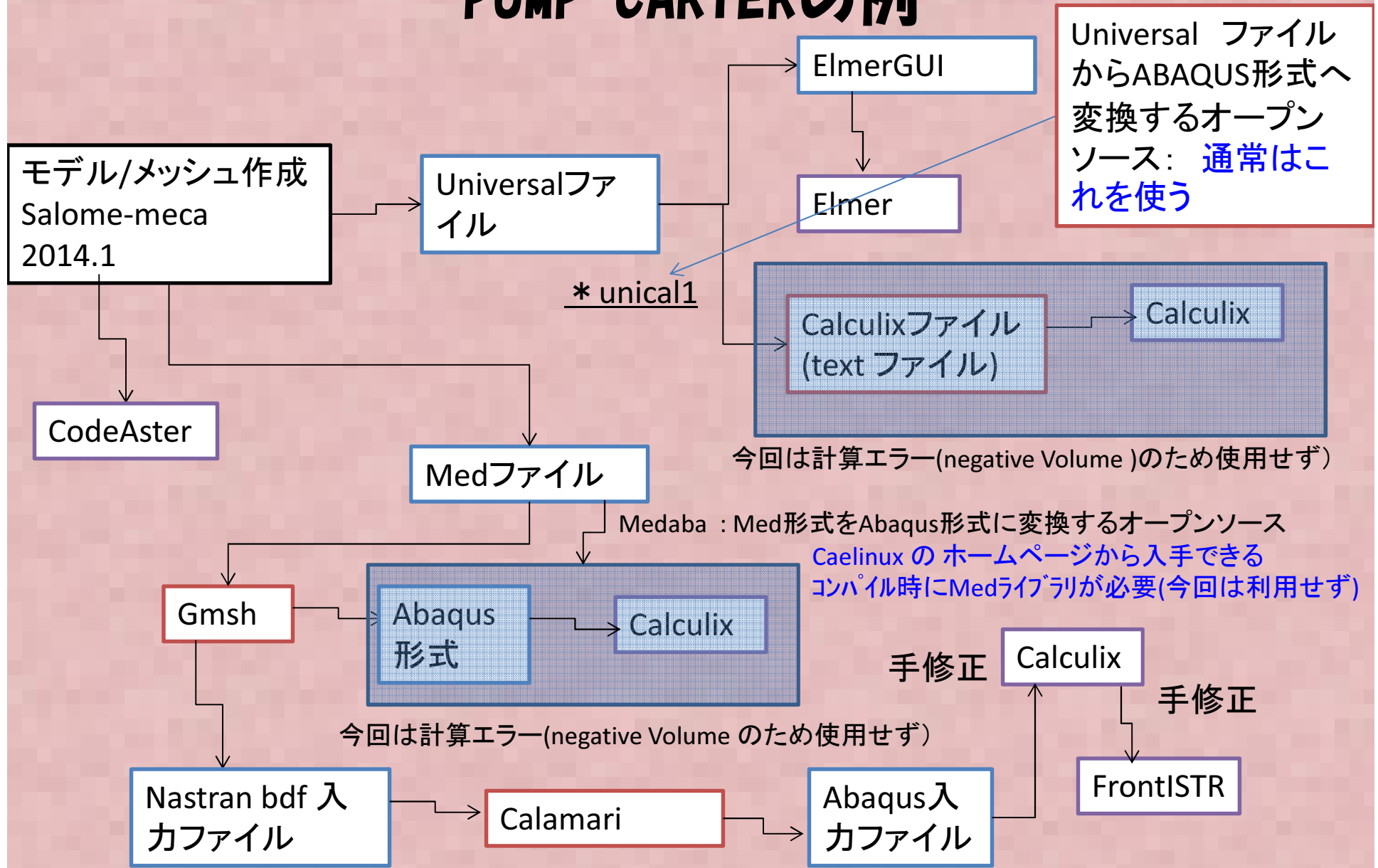
一番小さい円筒の内側面節点のXYZ変位を拘束



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

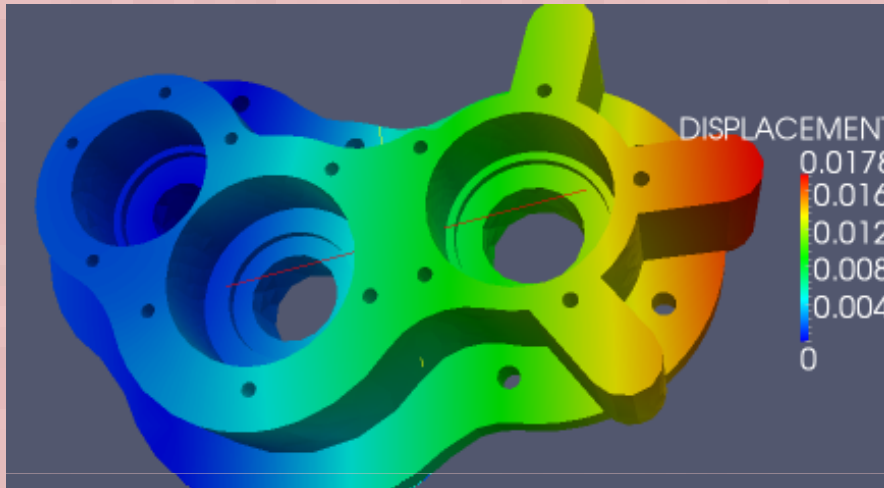
各種ソルバへのデータ変換方法

-PUMP CARTERの例-

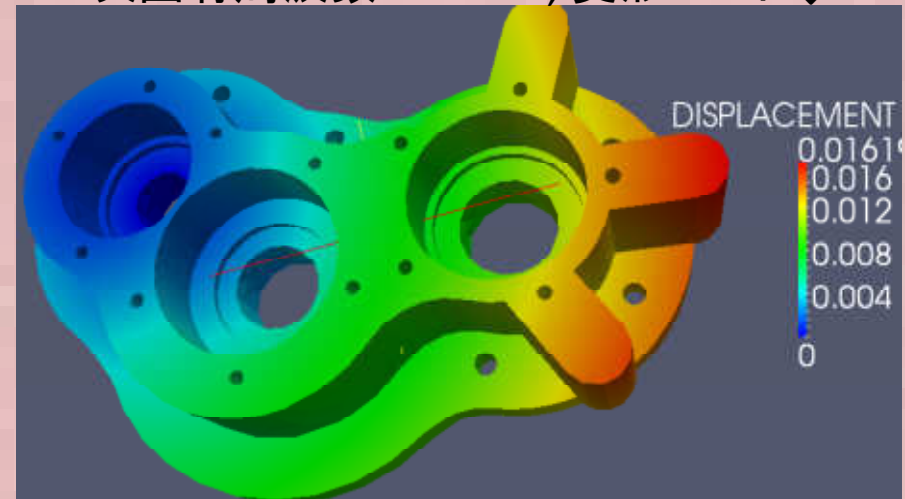


FrontISTR固有値解析結果

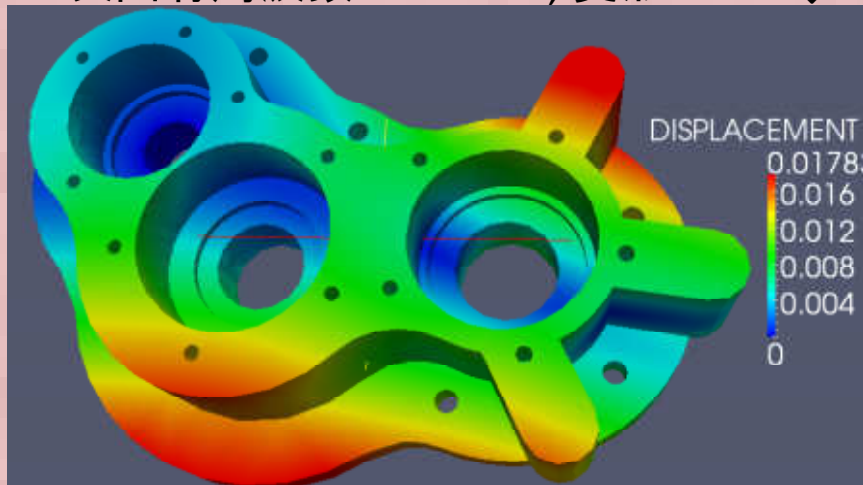
1次固有周波数=517Hz, 変形モード↓



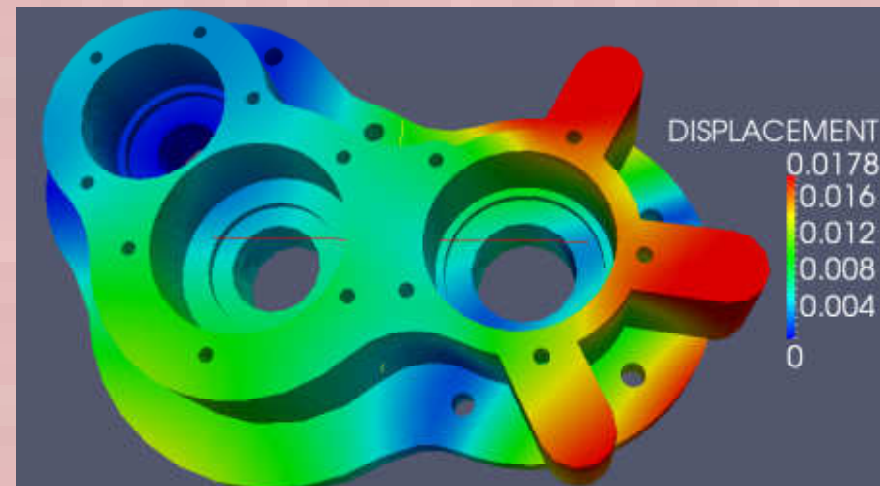
2次固有周波数=700Hz, 変形モード↓



3次固有周波数=1171Hz, 変形モード↓



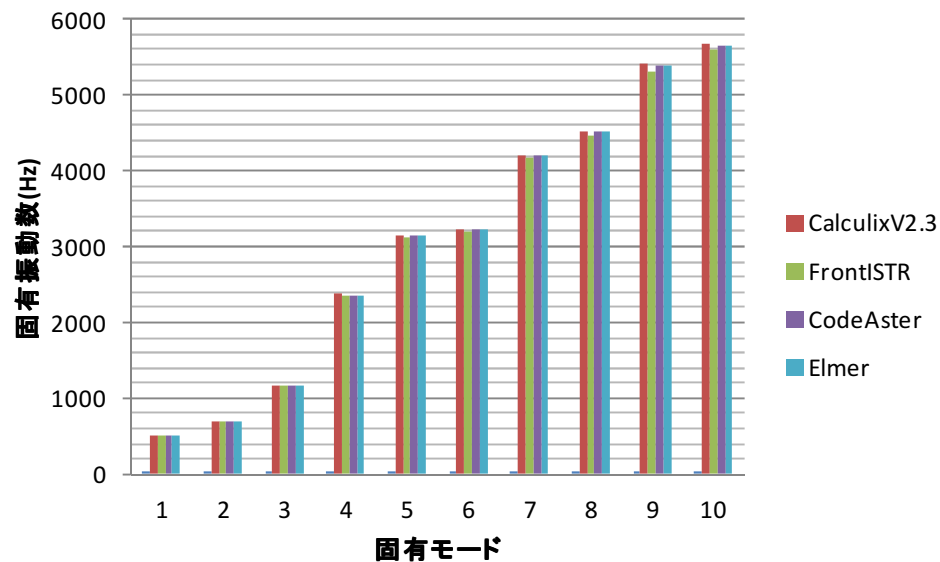
4次固有周波数=2357Hz, 変形モード↓



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。
→ いずれにしる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。

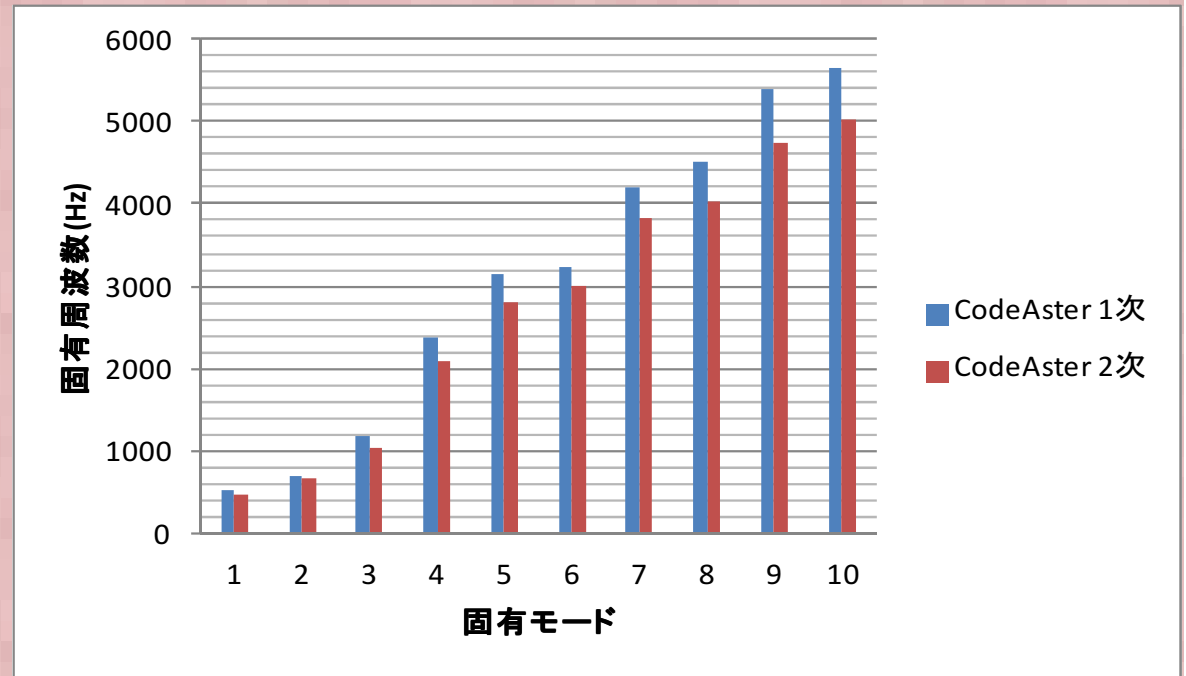
補足

- 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。

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。