

構造解析オープンソースCalculixによる電子パッケージの熱応力解析

OpenCAE学会員

酒井秀久

本日の発表内容

- 電気電子機器向けの構造解析の事例
- 構造解析オープンソースCalculixについて
- Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例
- 本日のまとめ

電気電子機器向けの構造解析の事例

◆ 圧迫など解析によるパッケージに剥離のないような構造提案

- ・鉛フリー半田の採用や薄型構造の進展により、底面圧迫で搭載BGA剥離発生有無の解析検証の重要性が増大

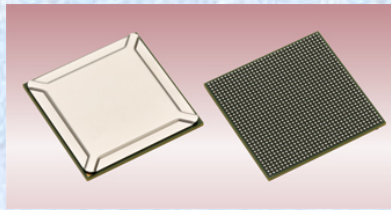
◆ 基板やパッケージの熱応力による反り、応力評価

◆ はんだ接合部の疲労寿命予測

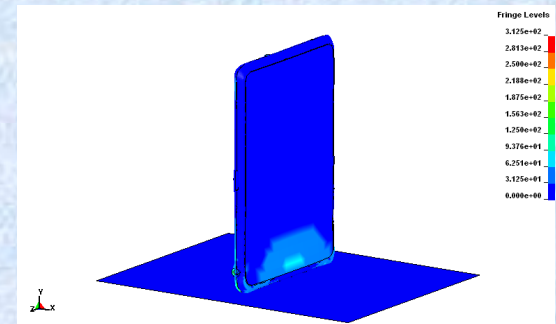
◆ 携帯機器の落下衝撃解析



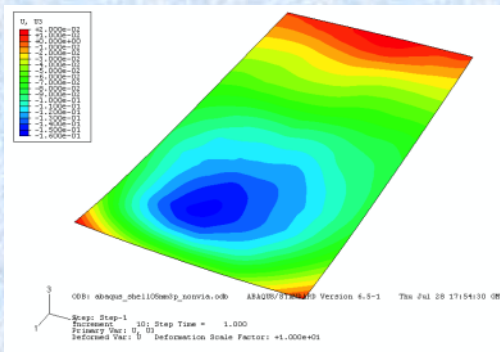
QFPパッケージ



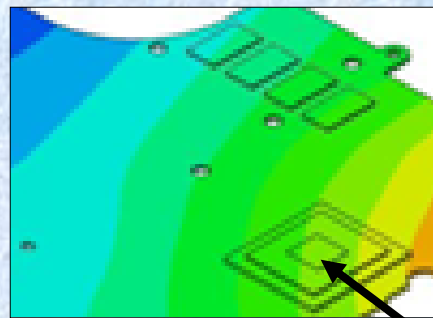
BGAパッケージ



落下衝撃解析

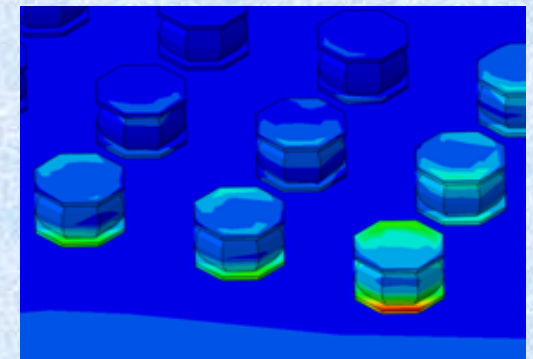


基板の熱応力解析



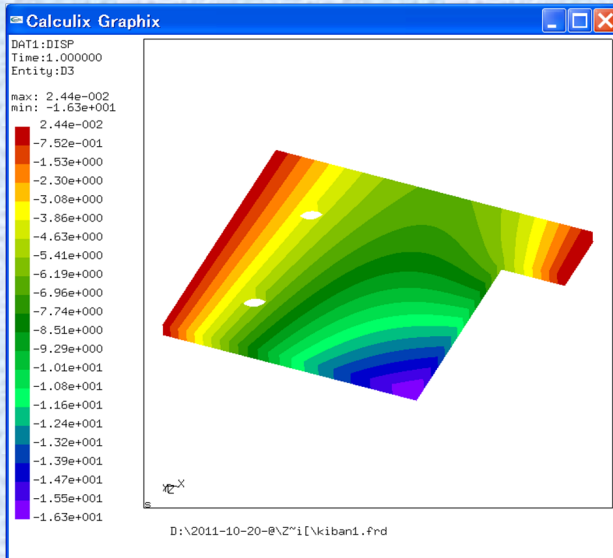
BGAパッケージ

BGA圧迫解析基板変形図

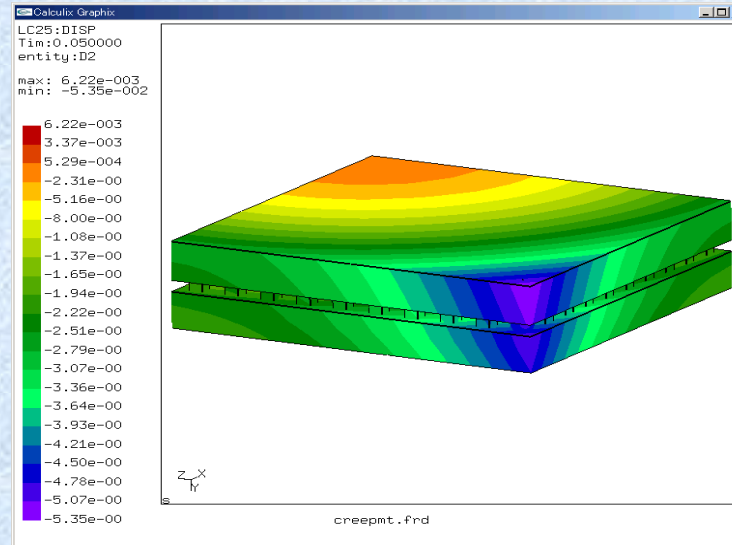


BGA圧迫解析BGA応力分布

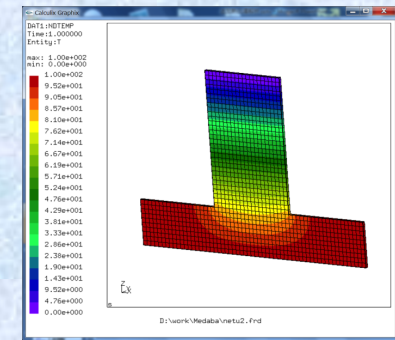
Calculixについて①



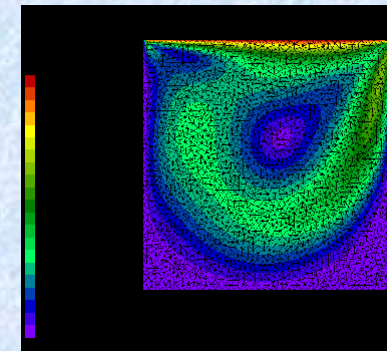
基板の反り解析



電子パッケージの反り解析



熱伝導解析



流体CavityFlow解析

- 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;あまり大規模な計算(10万メッシュ以上?)には対応していない模様?

Calculixについて②

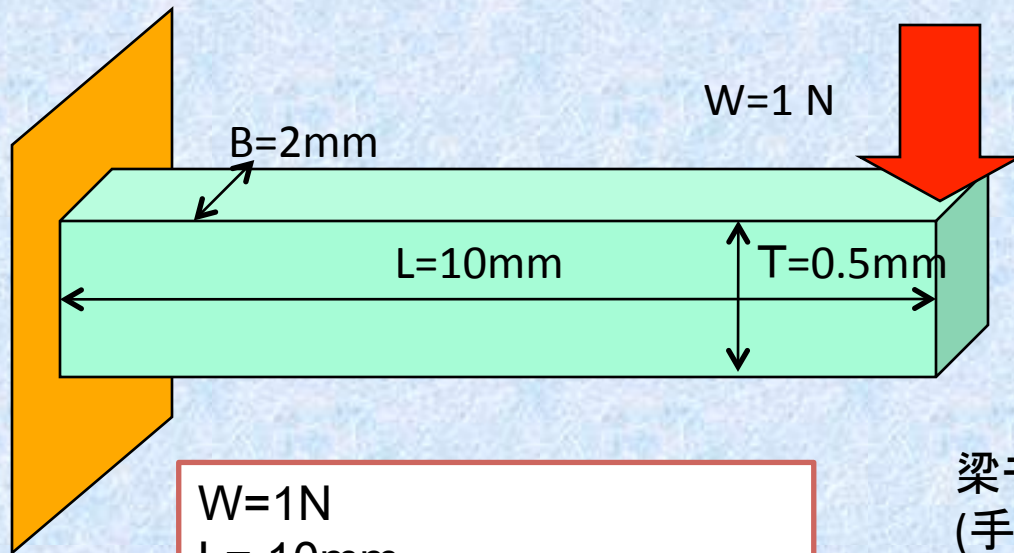
- ここではオープンソース有限要素解析ソフト Calculix を使用して片持ちはりのたわみを理論解との比較を行う手順を紹介する。

Calculixの特徴

- 非線形を含めたある程度実用的な解析が可能
- 高機能の商用ソルバ ABAQUS との入力データが殆ど同じで理解しやすい。
- プリ・ポストも無料で同時に提供されている。
(使いにくい)
- オープンソース

Calculixについて③

- 以下の 片持ちはりの反り計算の例題を有限要素解析ソフト Calculix により計算する。



$W=1\text{N}$
 $L= 10\text{mm}$
 $B= 2\text{mm}$
 $T= 0.5\text{mm}$
 $E=70000\text{MPa}$
 $I= bt^3/12= 0.020833\text{mm}$

梁モデルの反り理論解
(手計算)

$$\delta = \frac{WL^3}{3EI} = 0.2285\text{mm}$$

Calculixについて④

- インストール

以下の Home Pageからソフトをダウンロード

<http://www.bconverged.com/calculix/>

Calculix_xxxx.zip をダウンロードし、展開する
([CalculiX_2_3_win_001.zip](#))

出てきたCalculix_xxxx.exeを実行

(CGX : 解析ソルバ, CGX : プリポスト, Gmsh: メッシュャ)

インストールが完了したら、プログラムメニューの
bComverged から Calculix Command を選択すると
MS-DOSプロンプトが起動するので、以下のコマンドでCGXを起動
する。

“cgx -b test.txt”

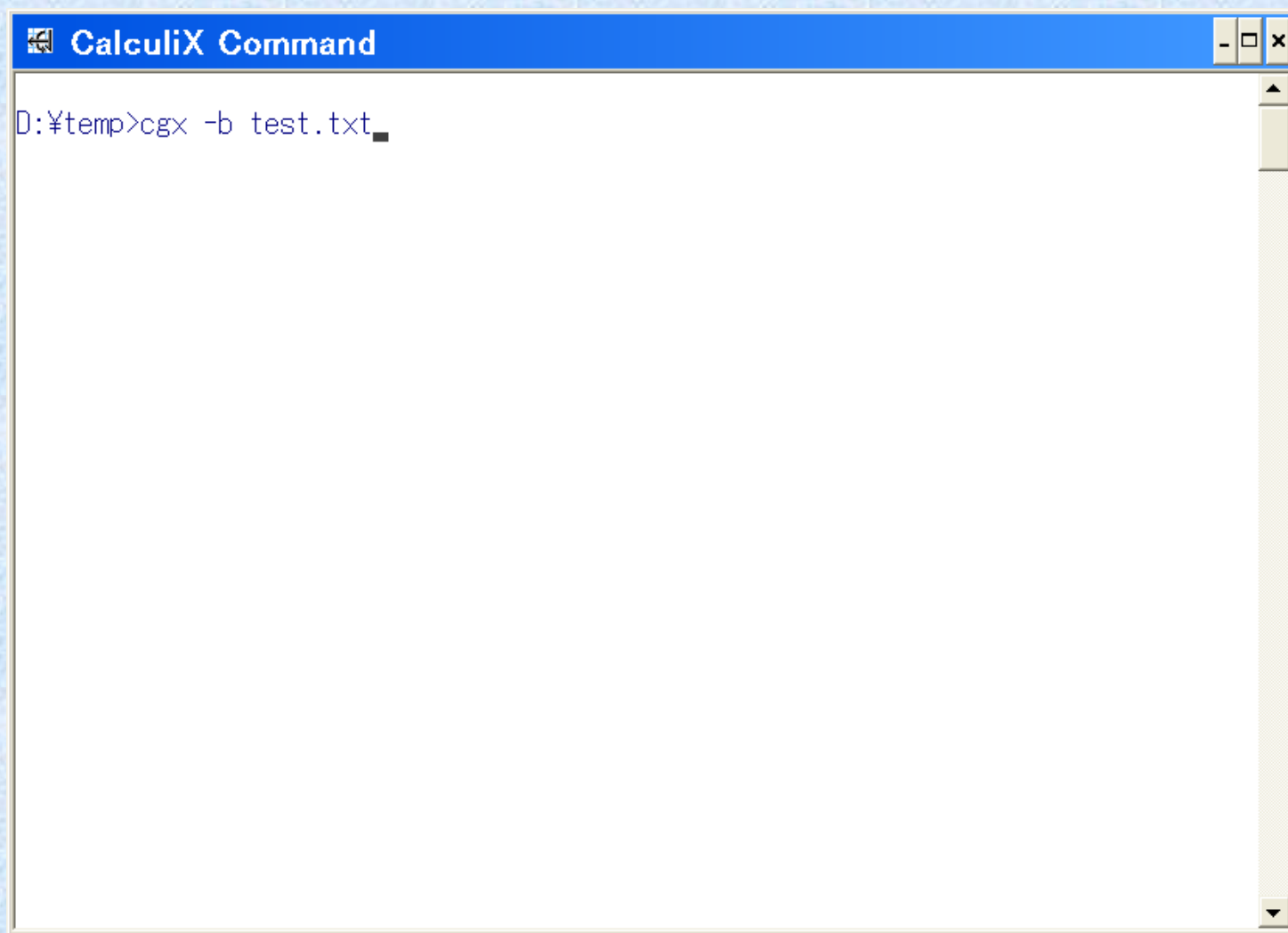
(あらかじめ以下の “test.txt” をNOTEPADなどで作成)

Calculixについて⑤

```
PNT p0      0.00000      0.00000      0.00000
PNT p1      10.00000      0.00000      0.00000
PNT p2       0.0        2.00000      0.0
PNT p3      10.00000      2.00000      0.00000
LINE L001 p0 p1 2
LINE L002 p0 p2 2
LINE L003 p3 p1 2
LINE L004 p3 p2 2
GSUR A001 + BLEND - L001 - L002 - L003 - L004
ELTY all QU8
mesh all
send all abq
save
```

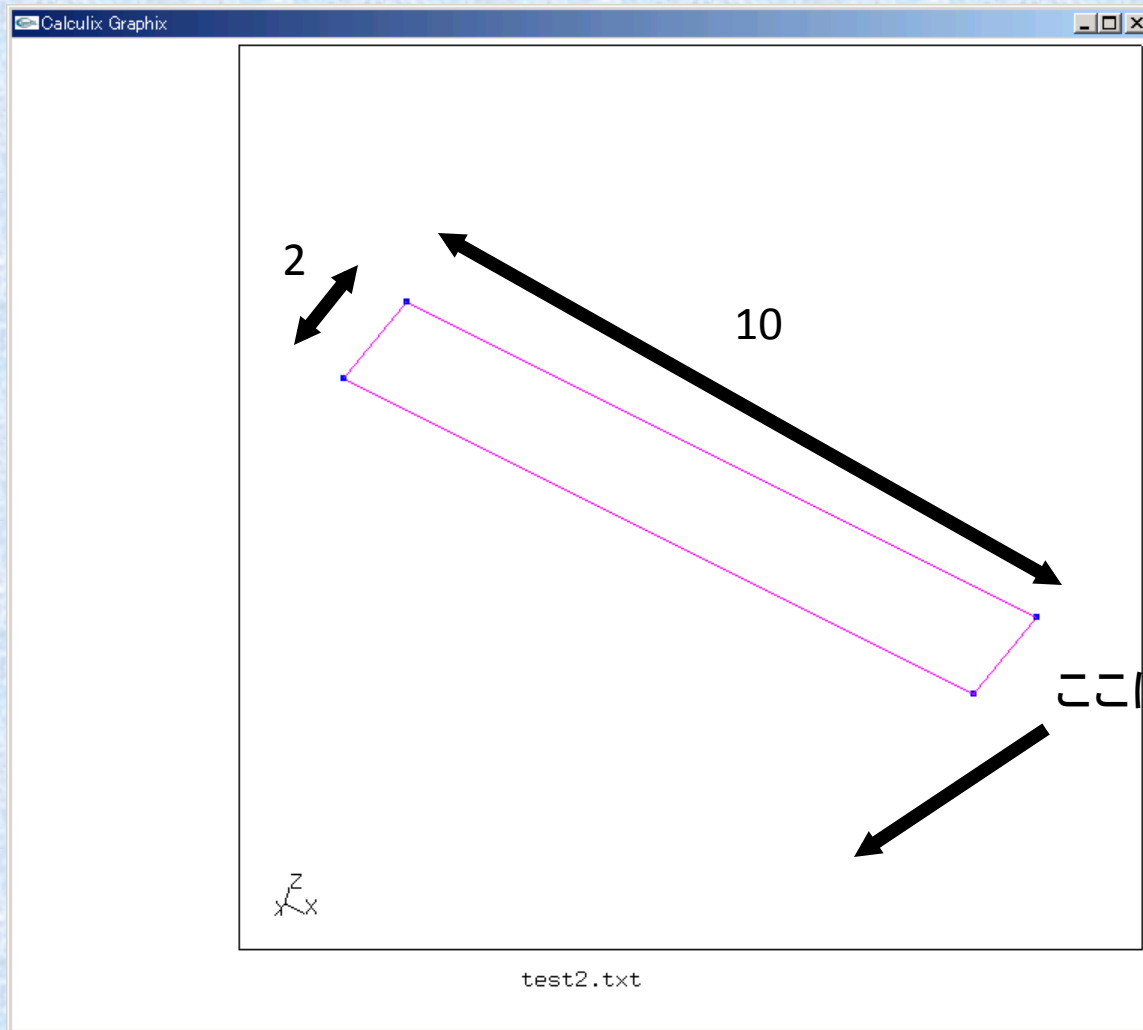
テキストファイル：test.txtの中身

Calculixについて⑥



Calculix のコマンドライン実行イメージ

Calculixについて⑦



- -C G Xの起動画面（モデルは自動作成）
- all.msh というメッシュファイルが作業フォルダに
- 作成されるのでtest.inpというファイル名に変更する。

Calculixについて⑧

- 以下のテキストをtest.inp末に追加する。

```
*SHELL SECTION, ELSET=Eall, MATERIAL=AL  
0.5, 5
```

← 板厚 = 0.5mm

```
*MATERIAL, NAME=AL
```

```
*ELASTIC
```

```
70000.0, 0.3
```

← ヤング率

```
*BOUNDARY
```

```
2,1,6,0.0
```

```
3,1,6,0.0
```

```
6,1,6,0.0
```

} 端点を固定

```
*STEP, AMP=RAMP
```

```
*STATIC
```

```
*CLOAD
```

荷重

```
8,3, -1.0
```

```
*NODE FILE, NSET=Nall
```

```
U
```

```
*NODE PRINT, NSET=Nall
```

```
U
```

} 結果出力指示

```
*END STEP
```

Calculixについて⑨

- ソルバを以下のコマンドで起動
- “ccx -i test”
- 解析が終了するとtest.dat に結果が出

```
CalculiX Command
D:\machine 600
parameters:3 arguments:2
GL_MAX_EVAL_ORDER:30

test.txt opened
reading file
please wait for 'ready'
ready
please wait for 'ready'
write abaqus data
file all.msh opened
ready
please wait for 'ready'
all.fbd opened

write fbd
ready

gtol set to:1.000000e-004

done

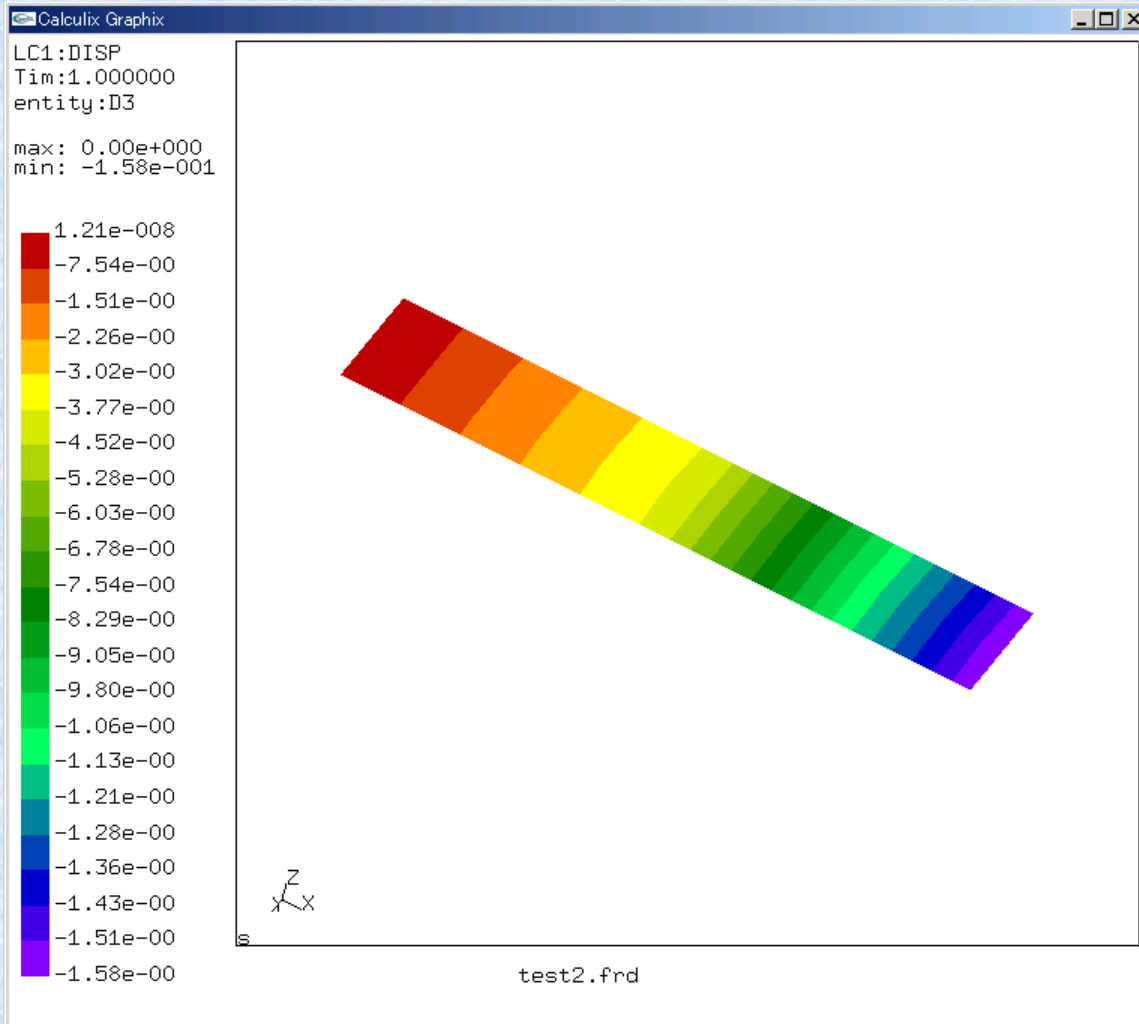
D:\temp>ccx -i test
```

displacements (vx, vy, vz) for set NALL and time 1.

1	-1.6694E-03	1.8824E-05	-1.5760E-01
2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4	-1.6694E-03	-1.8824E-05	-1.5760E-01
5	-2.3838E-04	-9.0869E-06	-3.9739E-02
6	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7	-2.3838E-04	9.0869E-06	-3.9739E-02
8	-1.6888E-03	4.4501E-15	-1.5831E-01

Calculixについて⑩

- 結果をポスト処理する
- `cgx test.frd`



CCXの解析結果では
最大変位 = 0.161mm

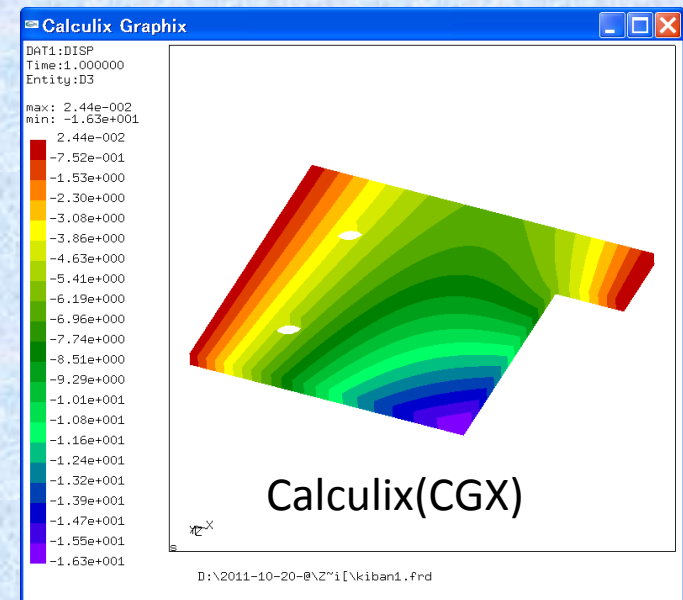
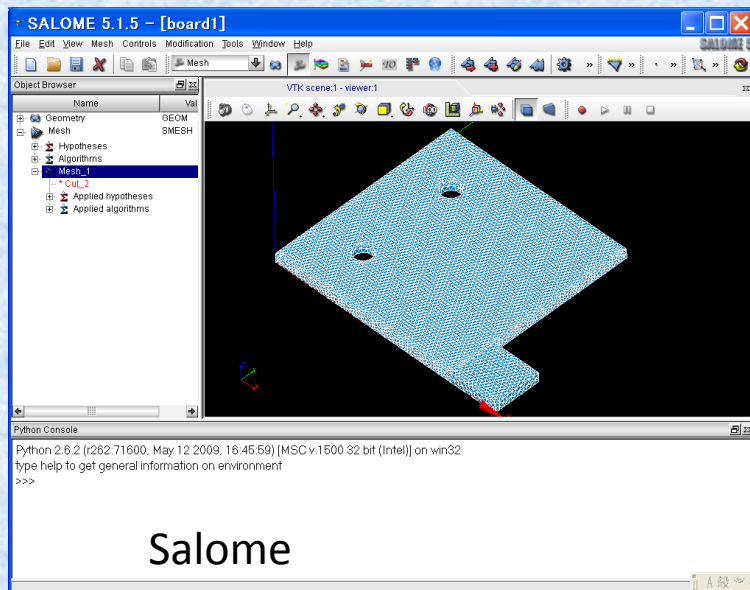
理論解0.2285mm
と比較して30%
ほど小さい反りとなる。

一方ABAQUSで同じ計算
を行うと
最大変位 = 0.2257mm
となり、理論解にほぼ
近い解となる。
(ABAQUSで実行する時
は要素タイプをS8R5に
変更)

Calculixについて⑫

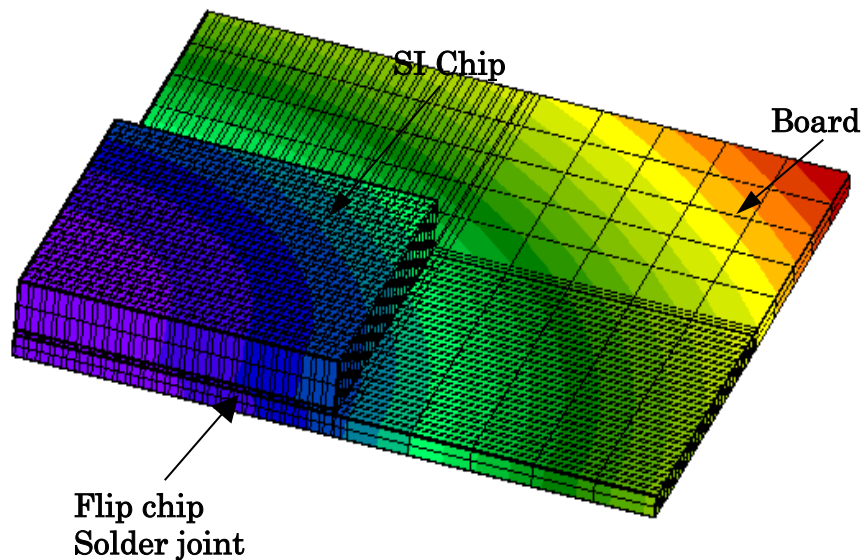
Salomeを使ってメッシュ作成する場合はSalomeからメッシュのexportでmed形式かunv形式で出力する

- メッシュデータを中間形式(med)ファイルまたはunv(NXの形式)でexportする。
- medaba(<http://www.caelinux.org/wiki/index.php/Proj:MedAba>)
- またはunv2abaqus(<http://www.caelinux.org/wiki/index.php/Proj:UNVConvert>)
- を使ってabaqus(Calculix)の形式に変換する。
- (ただし、上記プログラムはLinux上でのみ実行可能)
- -Gmsh(<http://geuz.org/gmsh/>)を使ってmedファイルを読み込み、abaqus形式で出力することも可能。



Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例①

・ L S I フリップチップ実装パッケージ解析モデル



Electronic package simulation model

温度条件: リフロー加熱を想定した温度変化
221°C(初期) ⇒ 25°C(室温)

設計変数: パッケージ基板材料特性
縦弾性率と線膨張係数(各温度)

目的関数: LSIチップ応力、基板反り量、
はんだの最大相当塑性ひずみを最小化

汎用非線形構造解析(D社A)

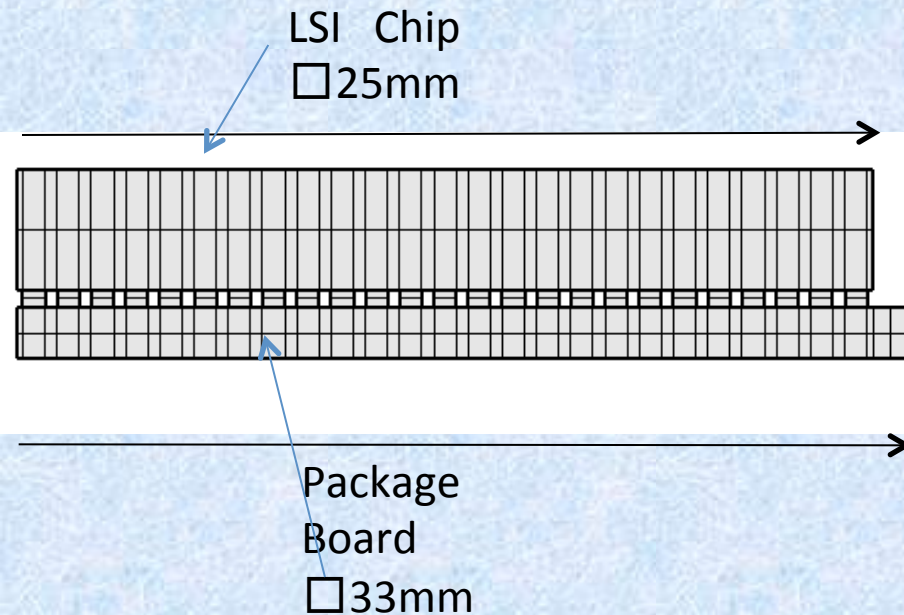
OSSソルバ: CalculiXv1.6比較

<http://www.calculix.de/>

※上記モデルから最適化ツール(modeFrontier)により自動的に多数の計算結果を得て
結果を統計的手法によって影響度を分析

Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例②

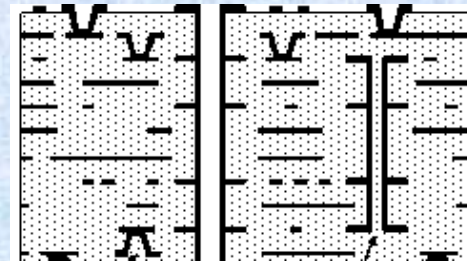
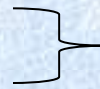
・ 解析モデル寸法と設計変数



パッケージ基板に用いられるビルドアップ基板はビルドアップ層・コア層・銅配線の複合材→マクロな材料物性をコントロール可

パッケージ基板材料物性 基準値

温度(°C)	弾性率(MPa)	線膨張係数(1/K)
25	10339	2.26E-05
50	10150	2.22E-05
75	10024	2.23E-05
100	9730	2.49E-05
125	8960	2.60E-05
150	7560	2.01E-05
175	5964	1.34E-05
200	4648	1.18E-05



ビルドアップ層

コア層

ビルドアップ層

パッケージ用ビルドアップ基板積層構成詳細

※設計変数: パッケージ基板の材料特性

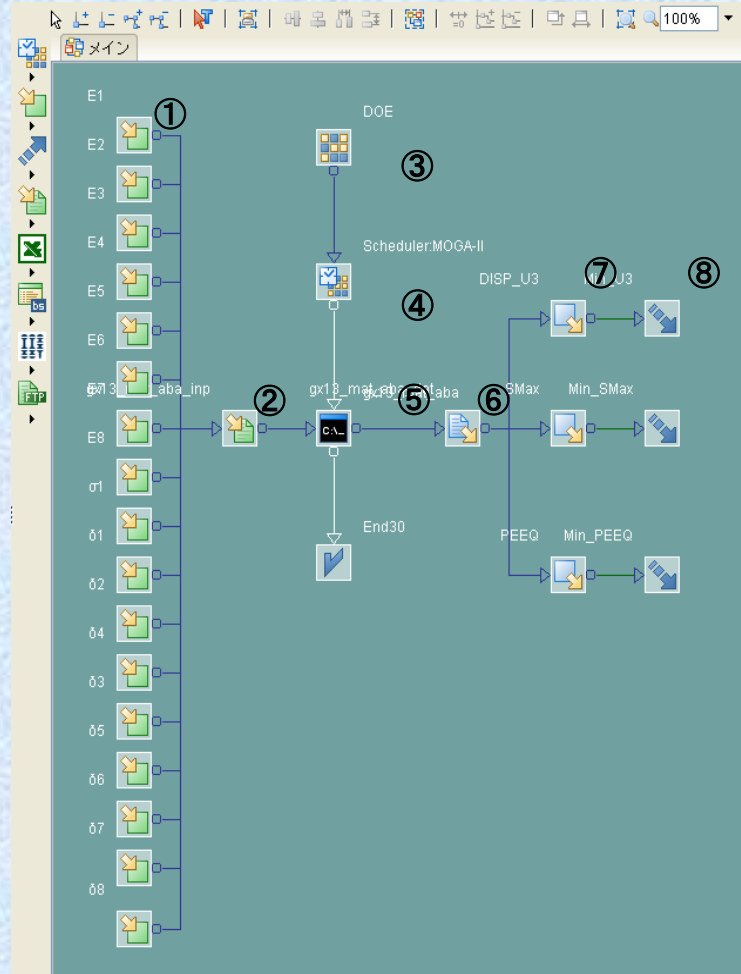
各温度弾性率(25-200°C温度)=1000~50000MPa 31分割

ポアソン比=0.1~0.49 7分割

各温度線膨張係数(25-200°C温度) = $5 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ (1/K) 15分割

Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例③

- 商用多目的最適化ツールによりパラメータSTUDYを実施



①左縦:入力変数(弾性率・線膨張係数)アイコン群

②A入力ファイルのパラメータ指定アイコン

③実験計画DOEアイコン 初期パラメータ生成
(準乱数法)

④遺伝的アルゴリズム MOGA-II 15世代指定

⑤A_JOB実行ファイル(.bat)指定

⑥A計算結果ファイル指定アイコン

⑦計算結果:最大変位、最大応力、最大ひずみ 抽出

⑧⑦を最小化するように次世代の①を探索

～ 自動的に2346件計算

(Aでは約1月, Calculix は2-3日)

MOGAのパラメータ:

進化世代数=15世代, 突然変異確率=10%

エリート戦略=有効, 拘束条件=ペナルティ関数

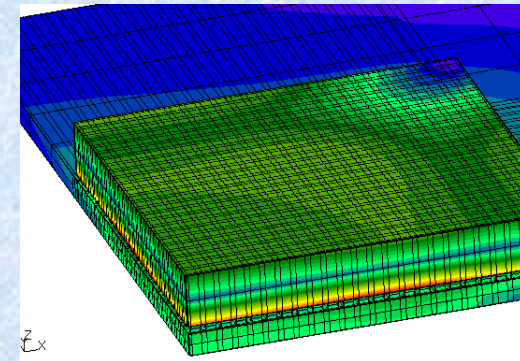
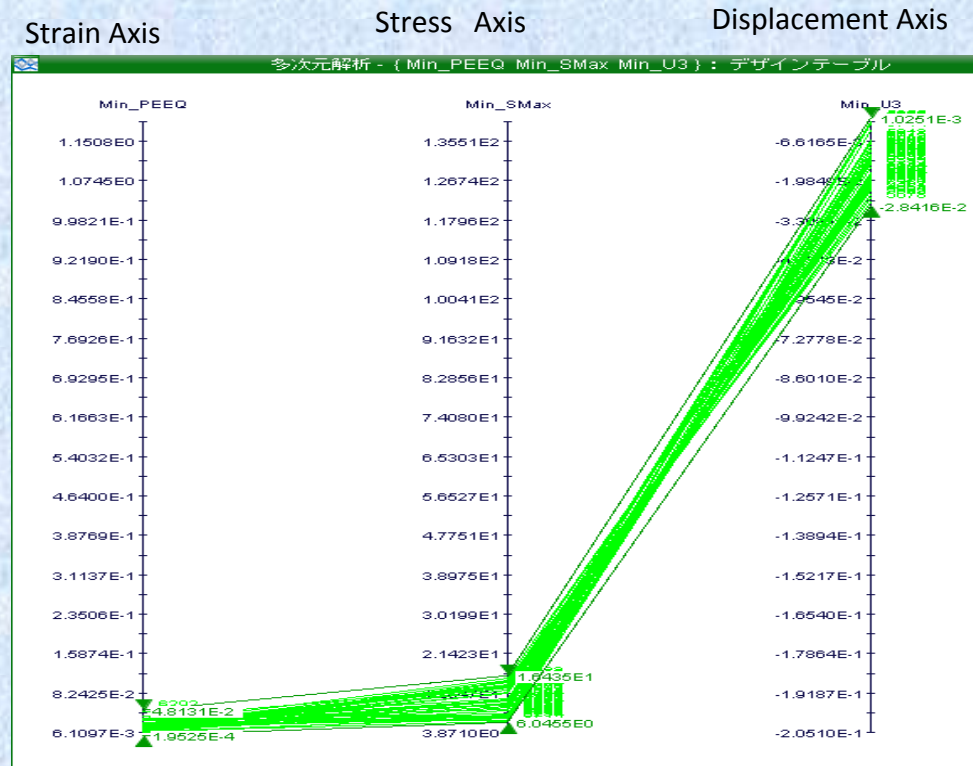
計算ハード環境:

17

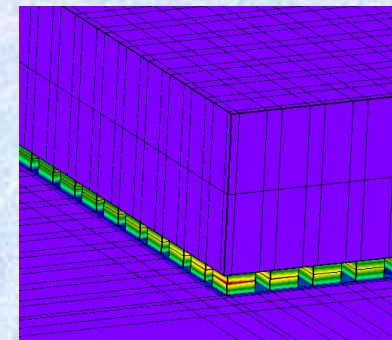
WindowsXP CPU:Xeon3.0GHz

Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例④

・ 解析・分析結果：多次元チャートによる解絞込み



LSIチップ応力分布



フリップチップはんだひずみ分布

- ・ 優良解：多次元チャートで絞りこみ： 最大ひずみ、最大応力、最大変位を選択軸
- ・ 各軸は上下に任意の範囲を選択
- ・ 3軸共に最小値に近い値を選択して123ケースの優良解を選択

Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例⑤

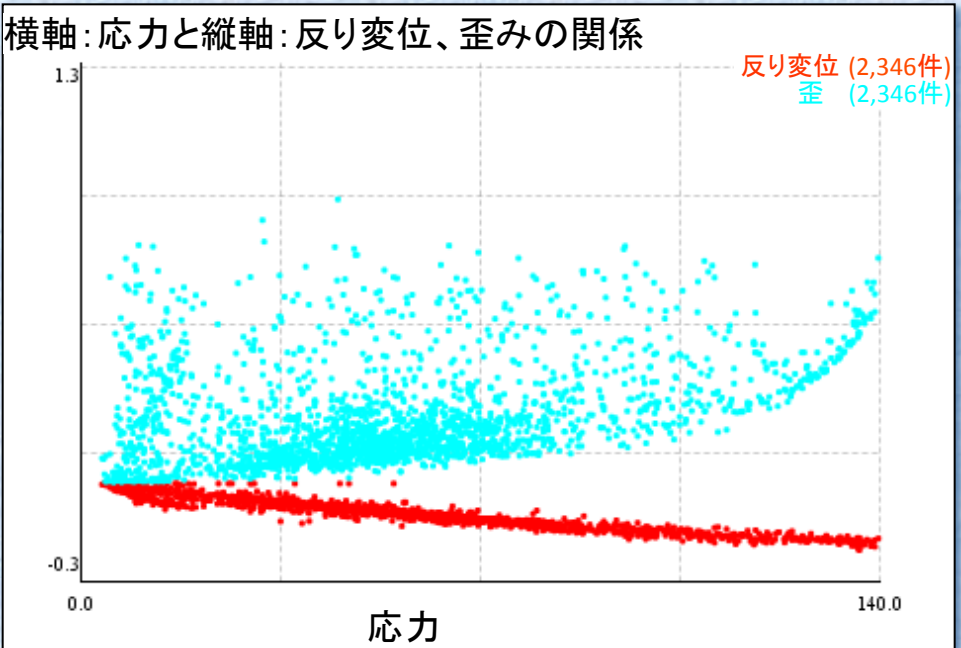
ー分析対象データの概観ー

- 各変数の相関係数と、目的変数の分布を示す
 - LSIチップ応力に対し、
 - パッケージ反り変位は負の強相関(-0.958)を示す
 - はんだ相当塑性ひずみとの相関は弱い
 - 高温での線膨張係数(δ6, δ7, δ8)は、反り変位またはひずみと強相関

相関分析の表(太枠は強い相関関係を表す)

	変数名	変位	応力	歪み
1	M	0.413	0.334	0.283
2	E1	-0.338	0.51	-0.002
3	E2	0.059	-0.029	0.152
4	E3	0.029	-0.025	0.256
5	E4	0.012	-0.003	0.25
6	E5	-0.184	0.15	0.401
7	E6	0.026	0.007	0.193
8	E7	-0.172	0.169	0.388
9	E8	-0.017	0.055	0.316
10	σ1	0.095	-0.067	-0.049
11	δ1	0.179	-0.13	-0.023
12	δ2	-0.298	0.213	0.262
13	δ3	-0.408	0.314	0.33
14	δ4	-0.44	0.359	0.277
15	δ5	-0.441	0.377	0.218
16	δ6	-0.517	0.416	0.507
17	δ7	-0.598	0.479	0.731
18	δ8	-0.468	0.376	0.559
19	Min_U3	1	-0.958	-0.434
20	Min_SMax	-0.958	1	0.363
21	Min_PEEQ	-0.434	0.363	1

Smax ... 応力、U3 ... 反り変位、PEEQ ... 歪み
δ... 線膨張係数、E ... ヤング率、σ ... ポアソン比、
δとEの添字1〜8は、25℃,50℃,75℃,100℃,125℃,150℃,175℃, 200℃の値に該当

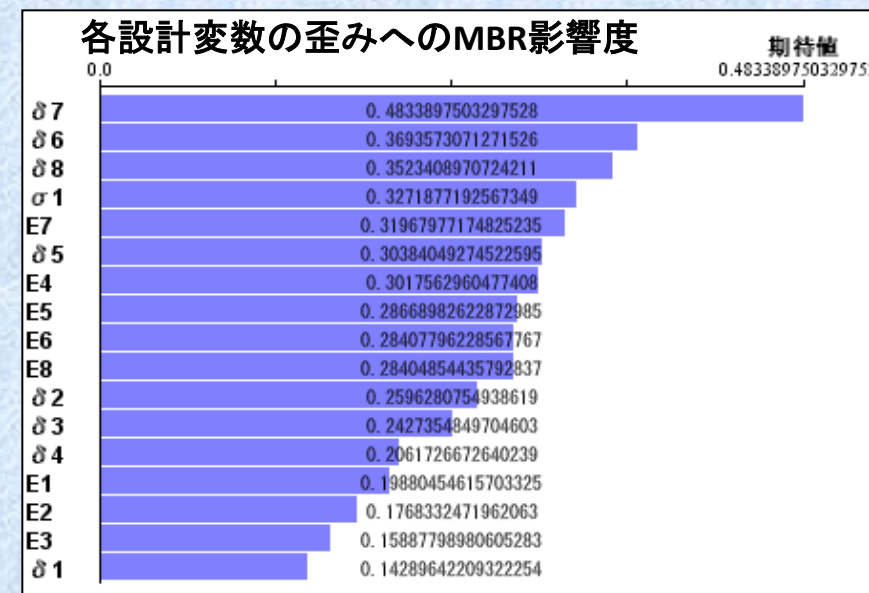
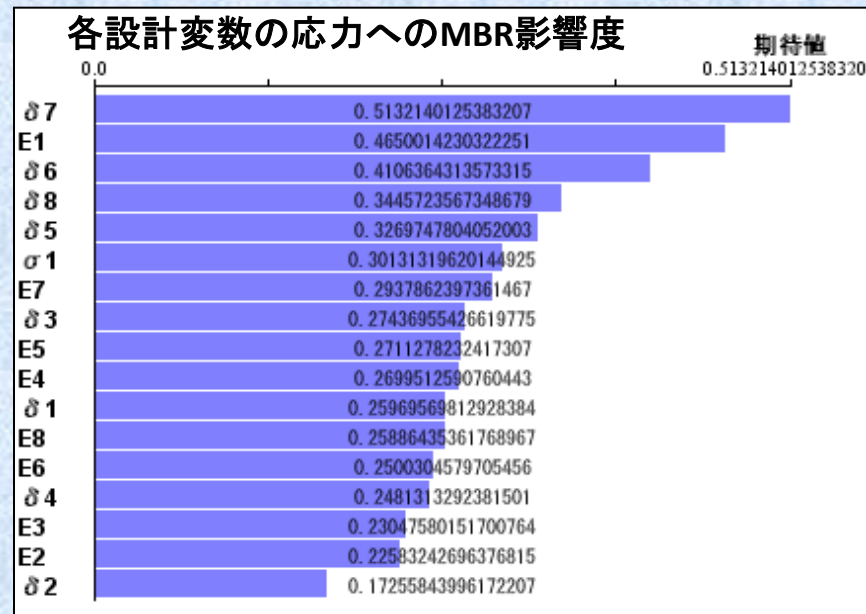
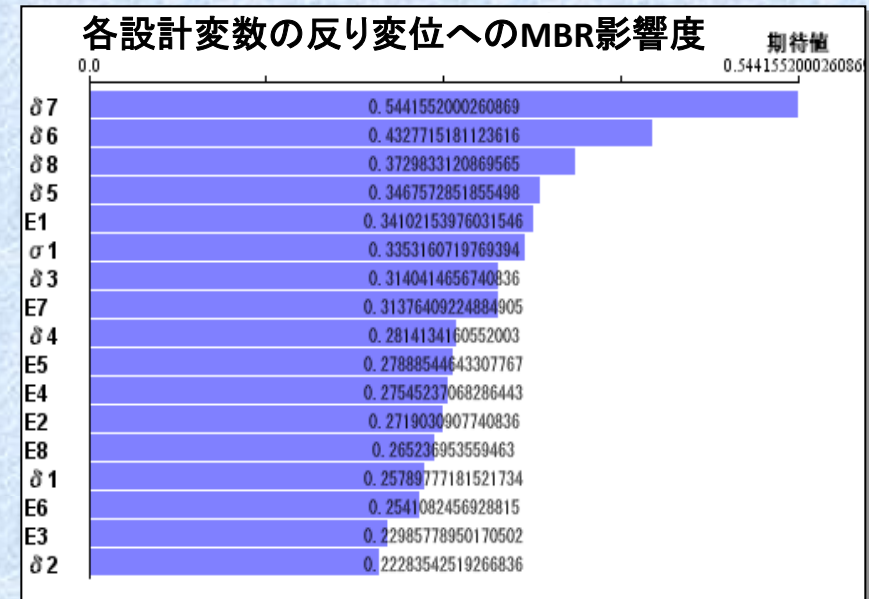


Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例⑥

影響度分析

- 反り変位、応力、歪みに対する各設計変数の影響要因を示す
 - 棒が大きいほど強い影響
- いずれも、高温時の線膨張係数（ $\delta 6$, $\delta 7$, $\delta 8$ 等）が影響を与えている

δ ... 線膨張係数、E ... ヤング率、 σ ... ポアソン比、
 δ とEの添字1～8は、25°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°Cの値



Calculixの電子パッケージ熱応力解析の事例⑦

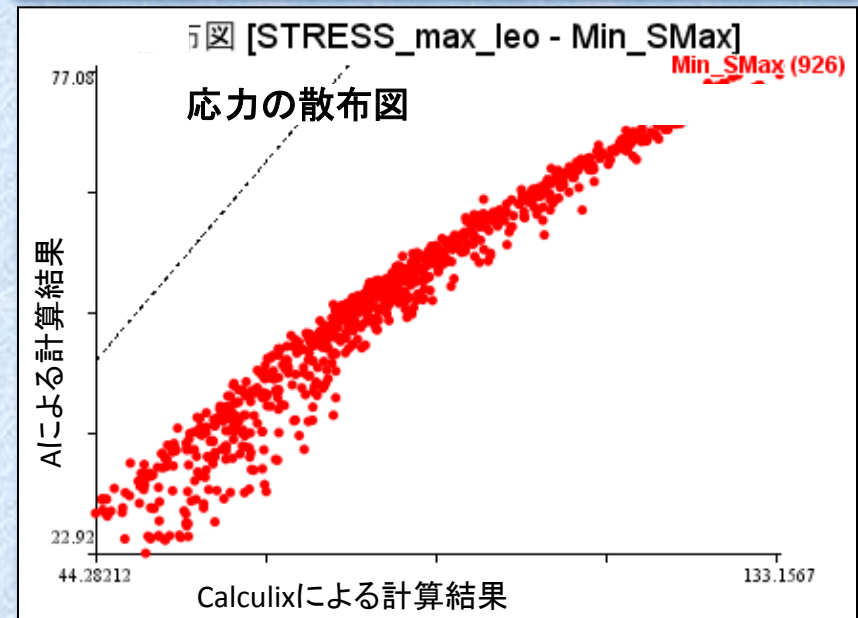
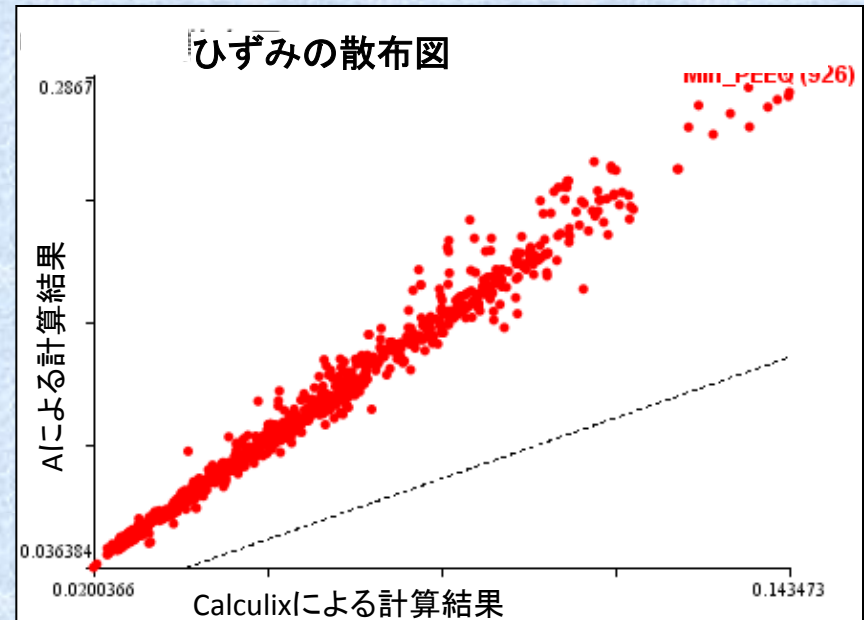
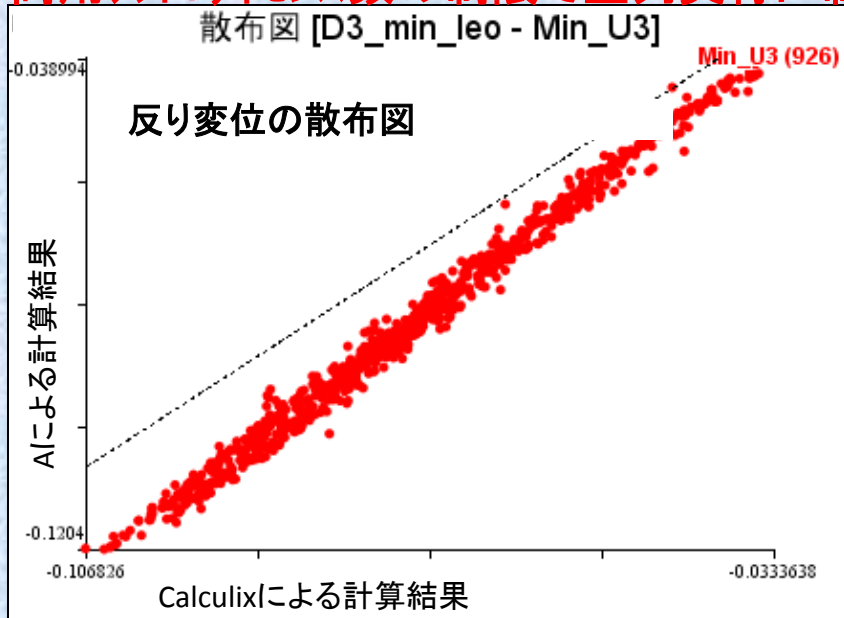
商用ソフトとCalculixの比較

- 同じモデルを与えた時の、フリーソルバ:
Calculix1.6と、商用ソルバの反り変位、応力、ひずみの計算結果比較
 - 横軸はCacluix、縦軸は商用ソフトA
 - 点線はx=yの直線
- 歪み、反り変位、応力ともおよその線形性
 - ただし、ひずみや応力の絶対値は異なる



Calculixの分析結果はAと同傾向

商用ソフト: ライセンス数の制限で並列実行に制約



結論

- 本研究では、高密度電子パッケージ信頼性に着目し、基板の弾性率、線膨張係数を設計変数として最適化シミュレーションを多目的GAを用いて複数回行い、得られた結果をマイニング技術で分析することで、熱ストレスに対して信頼性の高い、パッケージ基板の材料特性の検討を行った。
- 影響度分析結果から信頼性に大きな影響を与える因子は高温での線膨張係数であり、弾性率の寄与は低いことが分かり、今後の基板材料開発・設計指針として有効な結果が得られた。
- 影響度分析をすることで各因子の定量的寄与度が分析でき、影響度分析の有効性が確認できた。
- OSSと商用ソフトの比較を行い、絶対値では異なるケースのあるものの、影響度分析結果は全く同じであり、影響度のパラメータSTUDYのような多くの解析を実施する場合にOSSは非常に有効であることを確認できた。