

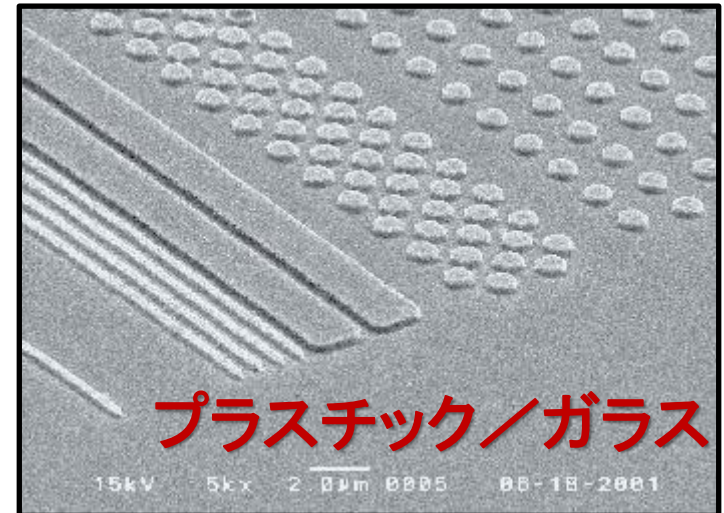
放射状メッシュ再分割を用いた 10節点四面体平滑化有限要素法の 動的な大変形性能評価

大西 有希 (東京工業大学)

研究背景

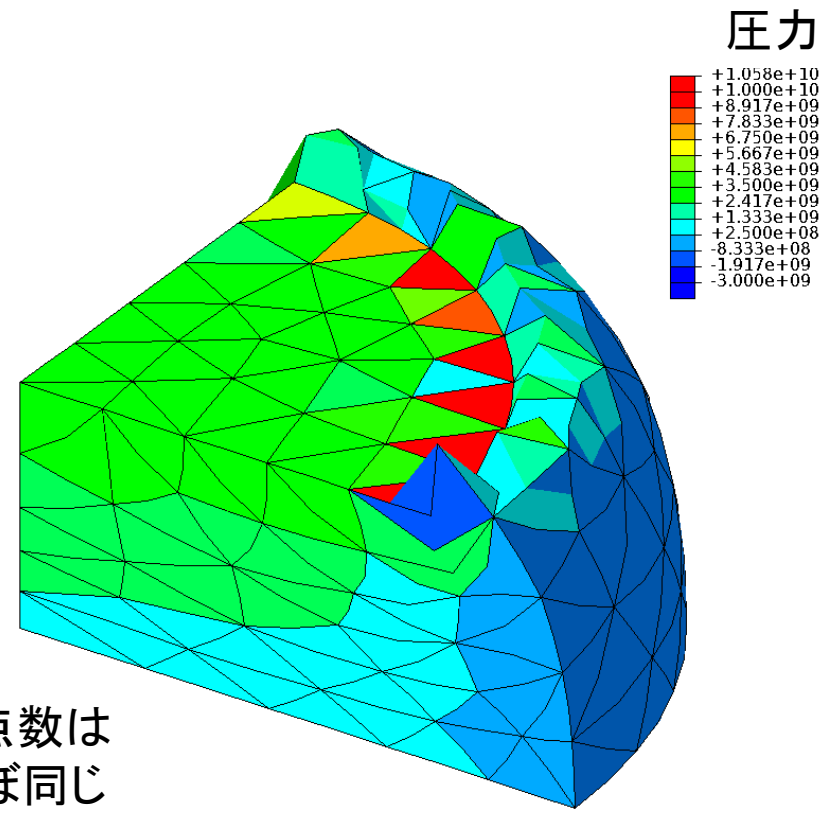
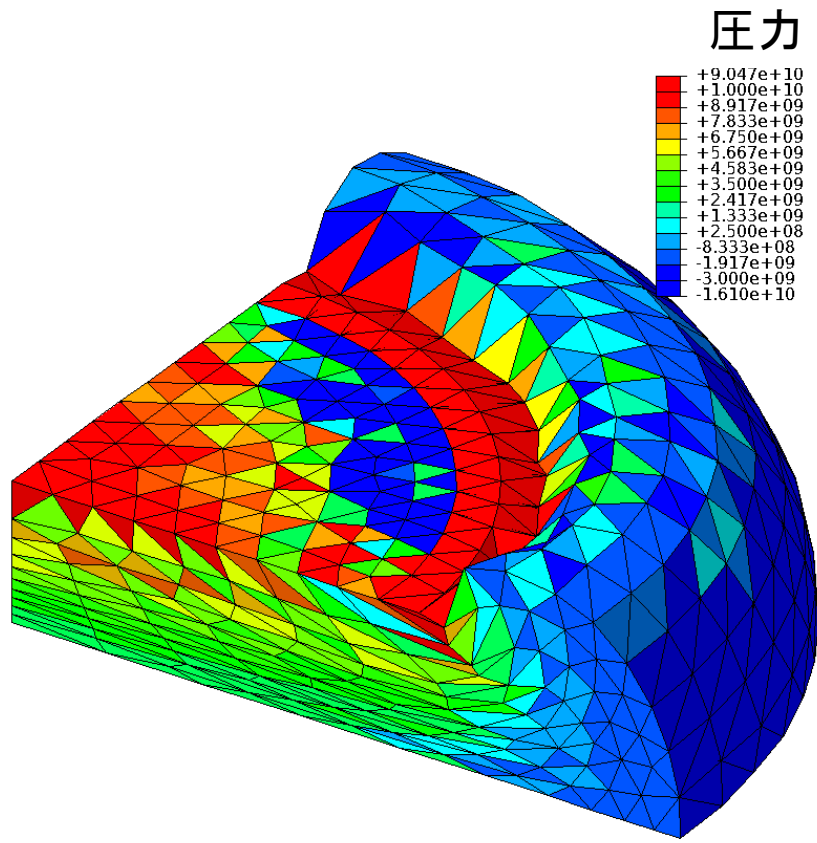
実現したい内容:

- 「超」大変形問題を高精度かつロバストに解きたい。
- 複雑形状を四面体で解きたい。
- 微圧縮性が現れる材料も解きたい。
- 自動リメッシングも実現したい。
- 接触も扱いたい。



既存手法の問題点 (ABAQUSの要素)

四面体解析例 材料: neo-Hookean 超弾性体, $\nu_{ini} = 0.49$



節点数は
ほぼ同じ

四面体1次ハイブリッド要素(C3D4H)

- ✓ 体積ロッキングなし.
- ✗ 圧力振動(チェッカーボード)あり.
- ✗ せん断/コーナーロッキングあり.

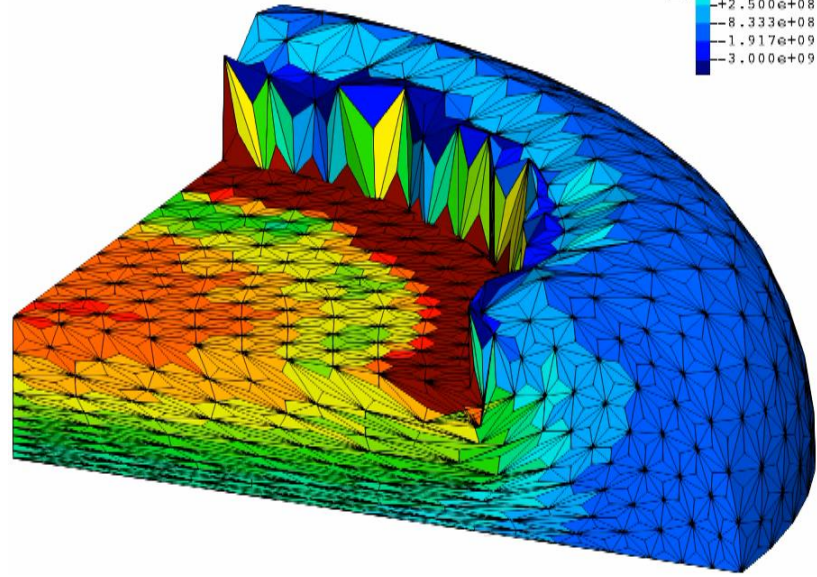
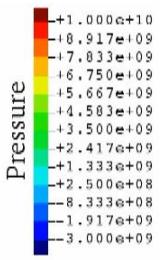
四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)

- ✓ せん断/体積ロッキングなし.
- ✗ 内挿の精度低下あり.
- ✗ 大変形で早期の収束困難あり.

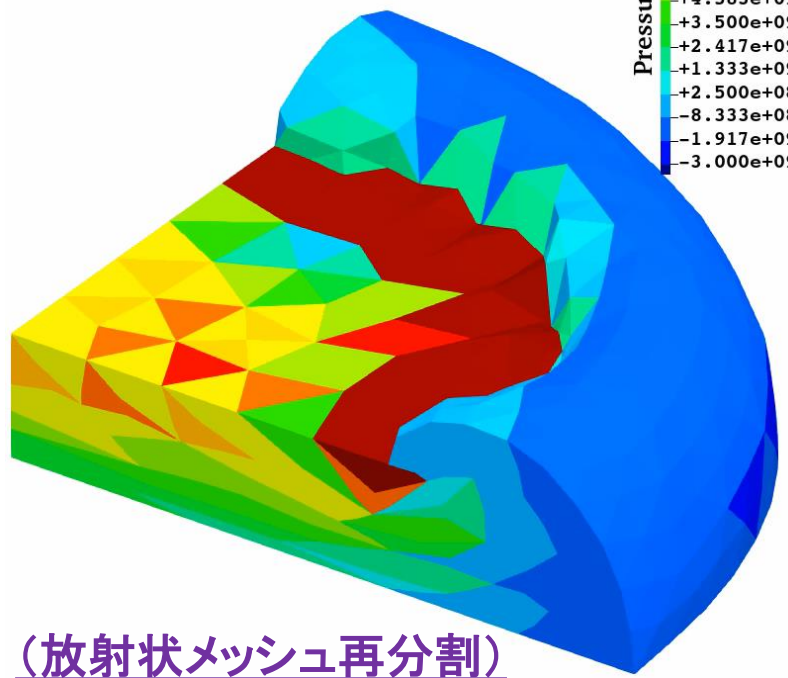
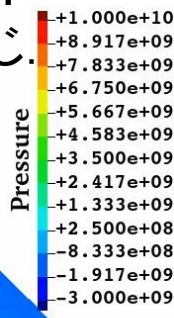
我々の手法（平滑化有限要素法）

四面体解析例 材料: neo-Hookean超弾性体, $\nu_{ini} = 0.49$

メッシュは先程のC3D4Hと同じ.



メッシュは先程のC3D10MHと同じ.



(放射状メッシュ再分割)

SelectiveCS-FEM-T10

F-barES-FEM-T4

- ✓ せん断・体積ロッキングなし.
- ✓ 圧力振動は充分小さい.
- ✓ コーナーロッキングも充分小さい.
- ✗ 計算時間, FEMとの親和性

- ✓ せん断・体積ロッキングなし.
- ✓ 圧力振動はある程度小さい.
- ✓ コーナーロッキングもある程度小さい.
- ✓ 計算時間, FEMとの親和性

こちらのほうが筋が良さそう.
動解析での性能評価は未済.

1. **大変形動解析**に対するSelectiveCS-FEM-T10の開発.
2. 開発した手法の大変形動解析における**精度と安定性の評価**.

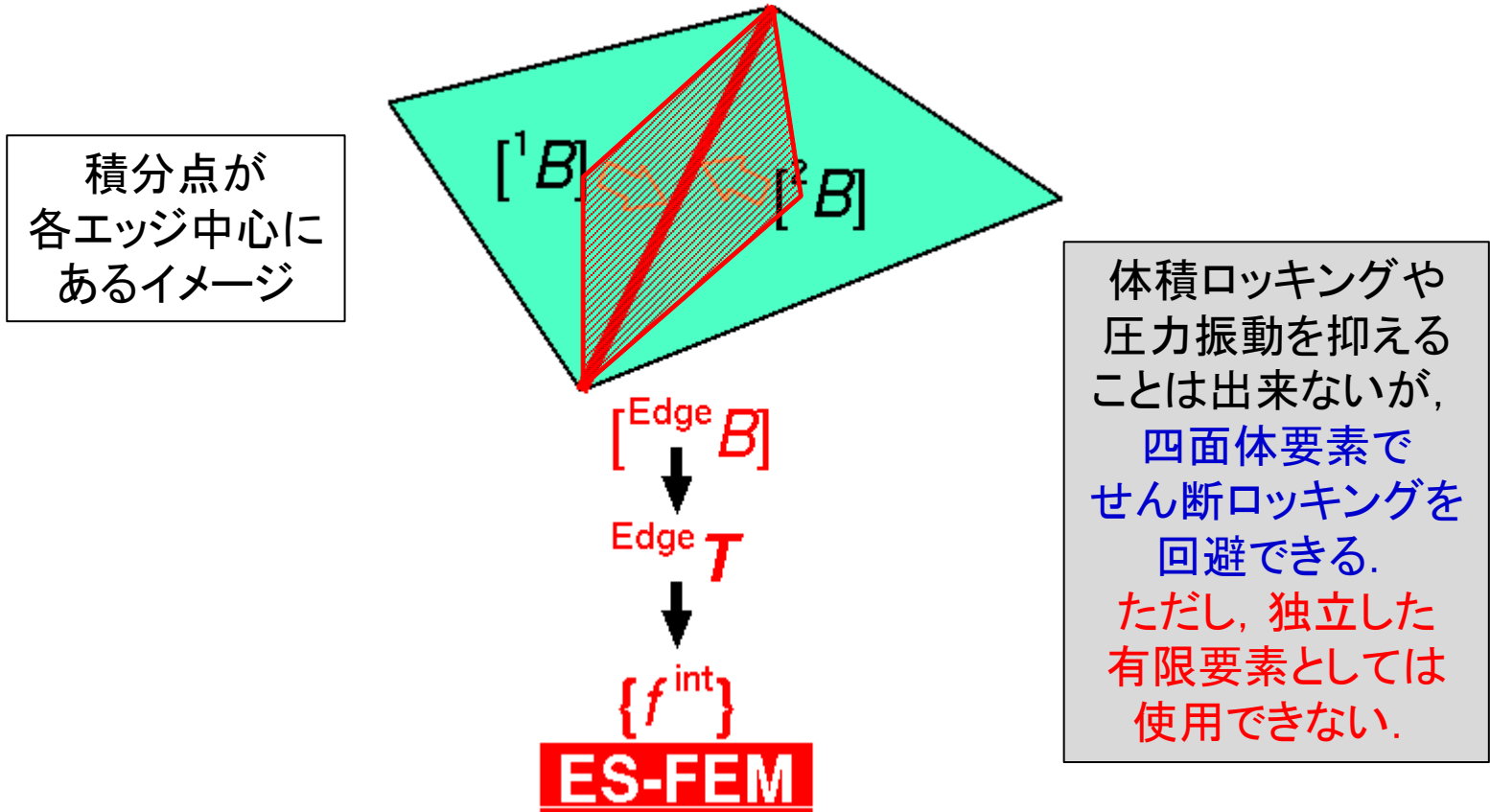
発表目次:

- 手法: 大変形動解析でのSelectiveCS-FEM-T10定式化概要
- 結果と考察: 解析例
- まとめ

手法：
大変形動解析での
SelectiveCS-FEM-T10
定式化概要

ES-FEMの定式化概要（おさらい）

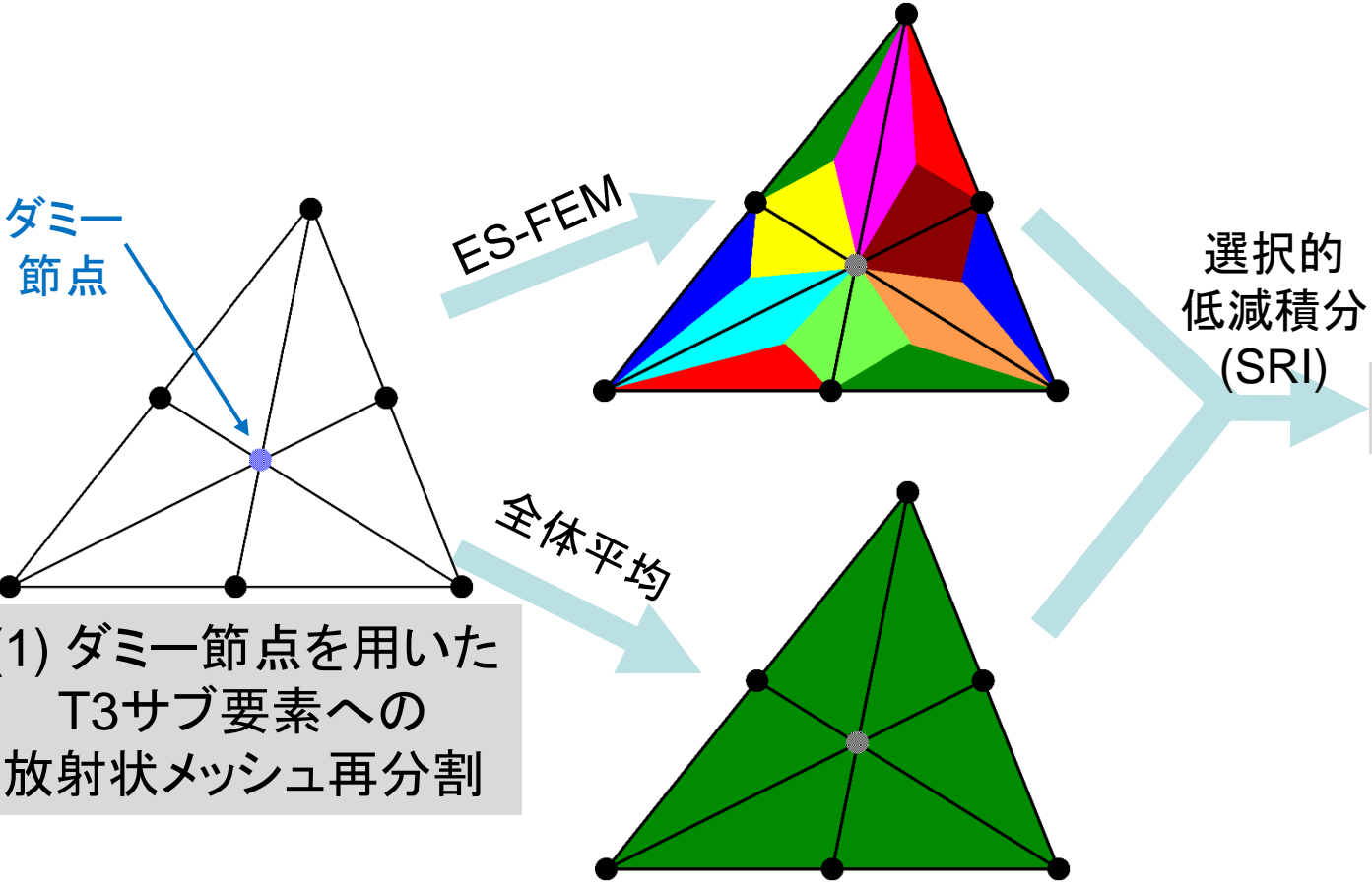
- 各要素の $[B]$ を通常のFEMと同様に計算する.
- 各要素の $[B]$ を周囲の**エッジ**に要素体積を重みとして配り,
エッジで平均化して $[^{\text{Edge}}B]$ を作る.
- **エッジ**の平滑化領域の量として歪み, 応力, 節点内力を計算する.



SelectiveCS-FEM-T10の定式化概要

2次元(6節点三角形要素)の場合の定式化概要

(2) 等積歪み成分のエッジベース歪み平滑



(1) ダミー節点を用いた
T3サブ要素への
放射状メッシュ再分割

(3) 体積歪み成分の全サブ要素での歪み平滑

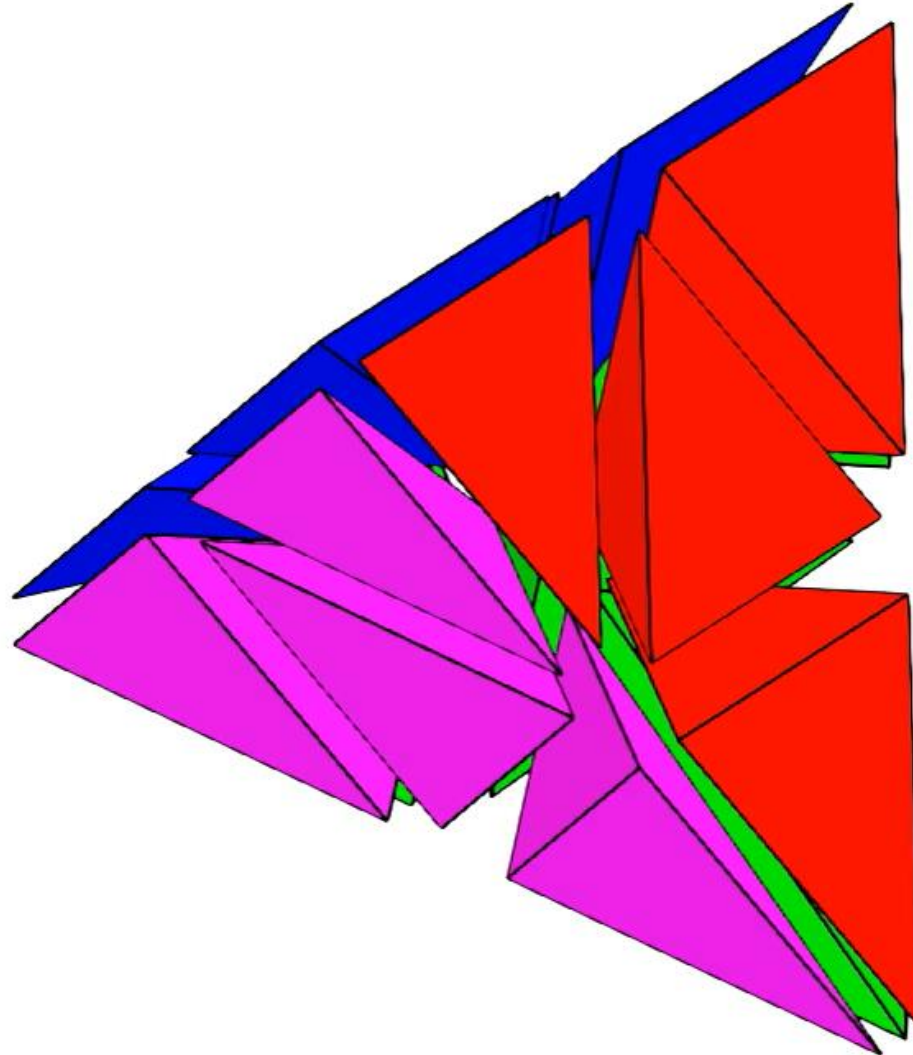
数ある定式化候補
を風潰しに調査した
結果, 現状最良の
方法がこの定式化.

自然なメッシュ
再分割を行わず,
敢えて不自然な
放射状のメッシュ
再分割を行って
いる点がミソ.

SelectiveCS-FEM-T10の定式化概要

3次元の場合の放射状メッシュ再分割 (30%縮小表示)

全部で16個の
T4サブ要素



34本のエッジで
ES-FEMによる
ひずみ平滑化

任意のエッジが
必ず2個以上の
T4サブ要素から
参照される。
⇒全てのエッジで
ひずみが平滑化
される。

T4サブ要素の
ゆがみは大きく
なるが、ES-FEM
は要素のゆがみ
に強いので問題に
ならない。

SelectiveCS-FEM-T10の定式化概要

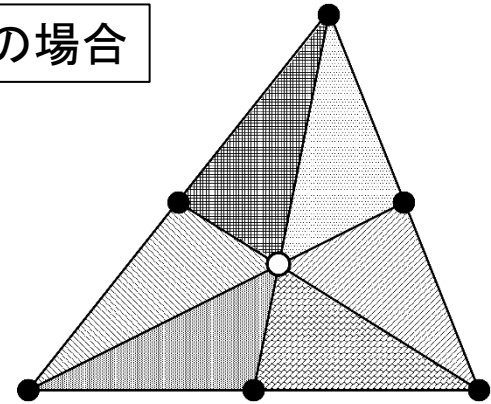
集中質量の計算

1. 各サブ要素の質量を計算.

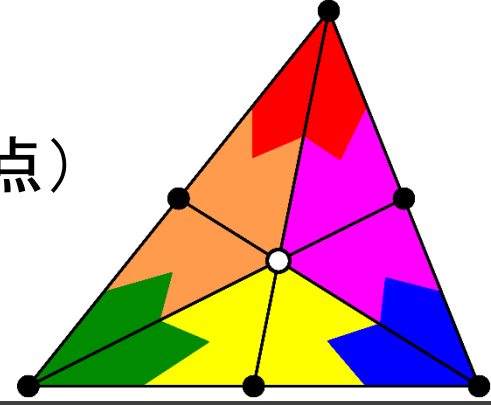
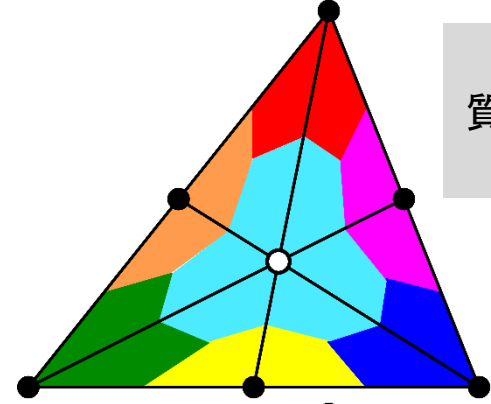
2. サブ要素の構成節点への質量の分配.
(2Dなら3節点, 3Dなら4節点)

3. ダミー節点質量の中間節点への分配
(2Dなら3中間節点, 3Dなら6中間節点)

2Dの場合

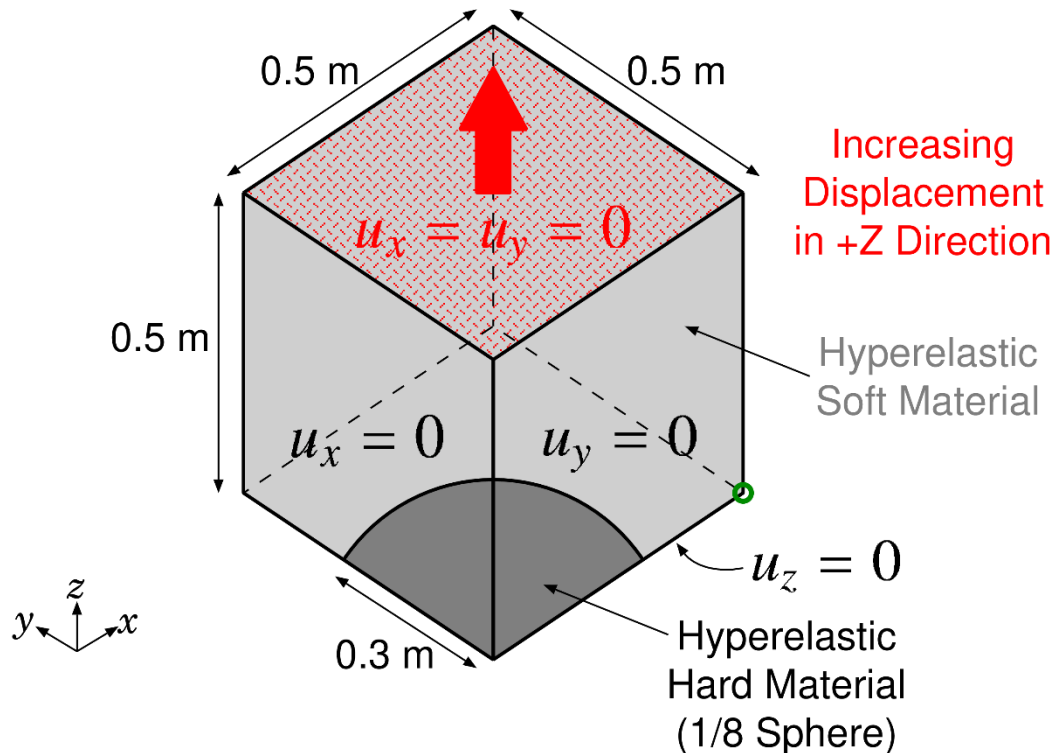


各色が質量の担当面積を表す



結果と考察： 解析例

概要



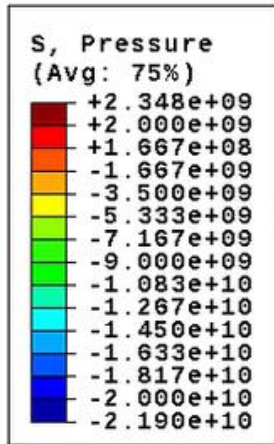
- ゴム: Neo-hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = \mathbf{0.49}$)
- ファイラー: Neo-hook超弾性体 ($E_{ini} = 260 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = \mathbf{0.3}$)
- T10メッシュを使用(節点数:約11,000, 要素数:約7,000)
- ABAQUS最良のT10要素(**ABAQUS C3D10MH**)と同じメッシュで性能比較

ファイラー充填ゴムの引張解析

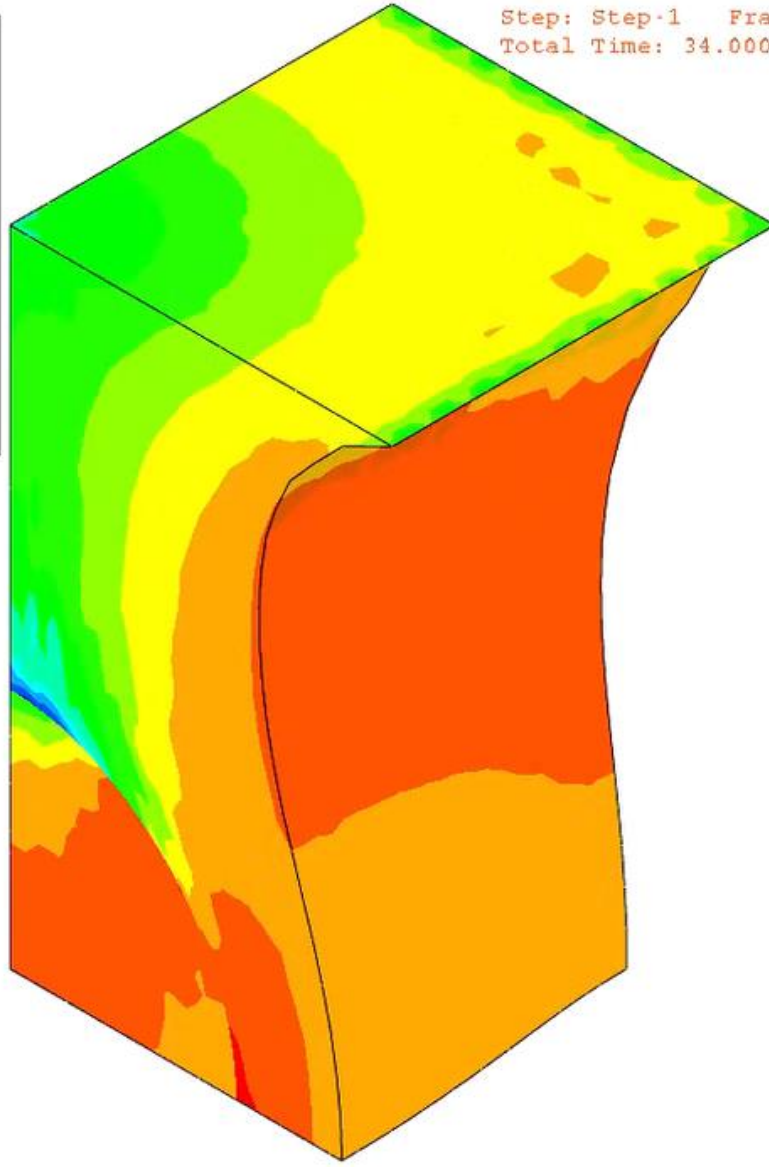
ABAQUS

C3D10MH

**の解析結果
(圧力分布)**

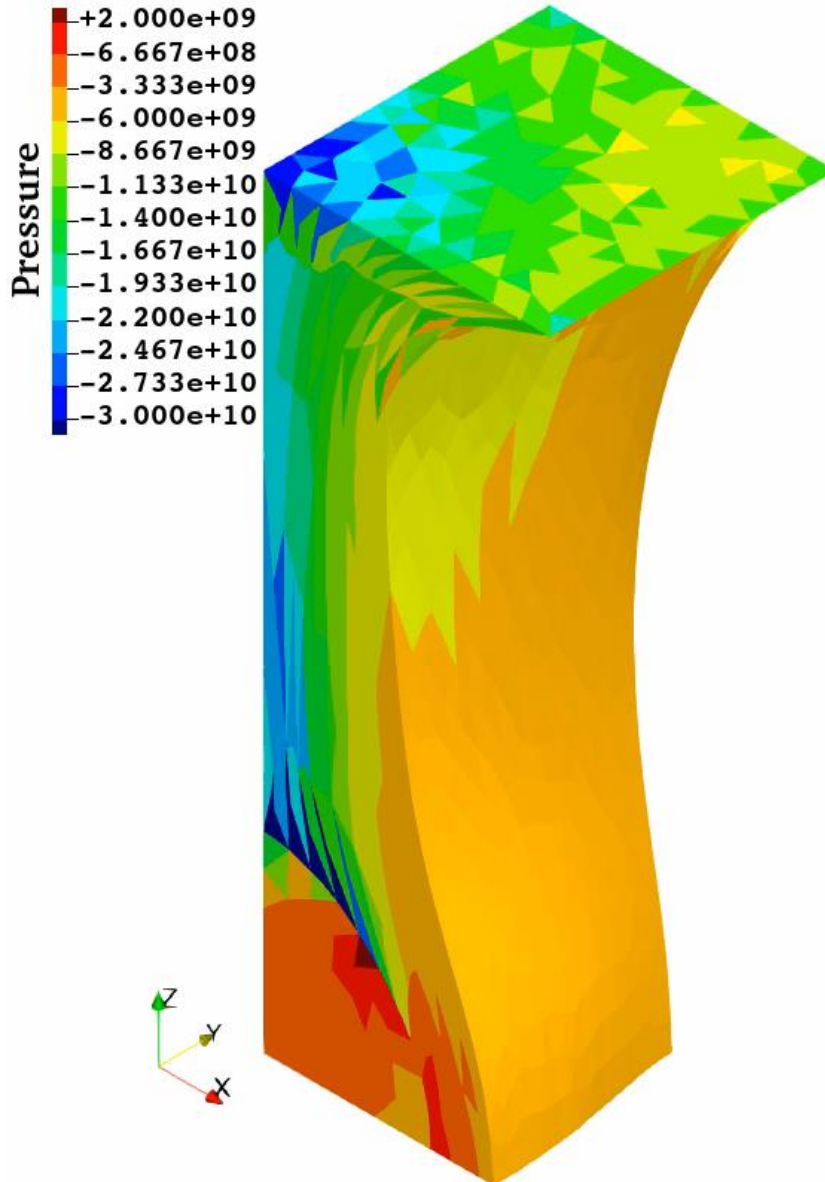


Step: Step-1 Frame: 34
Total Time: 34.000000



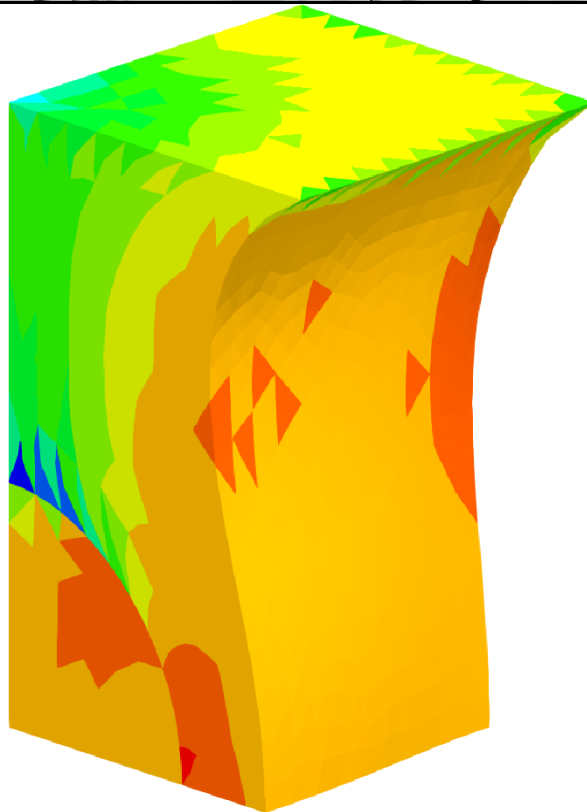
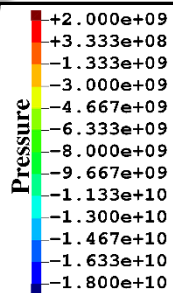
伸び約69%
で収束困難

Selective
CS-FEM-T10
の解析結果
(圧力分布)

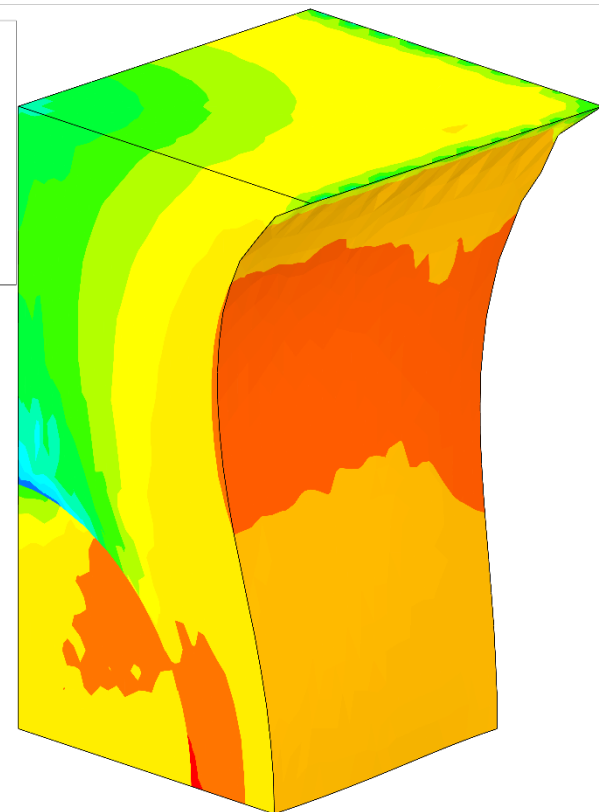
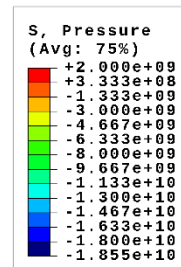


伸び約166%
で収束困難

伸び60%時点の圧力分布比較



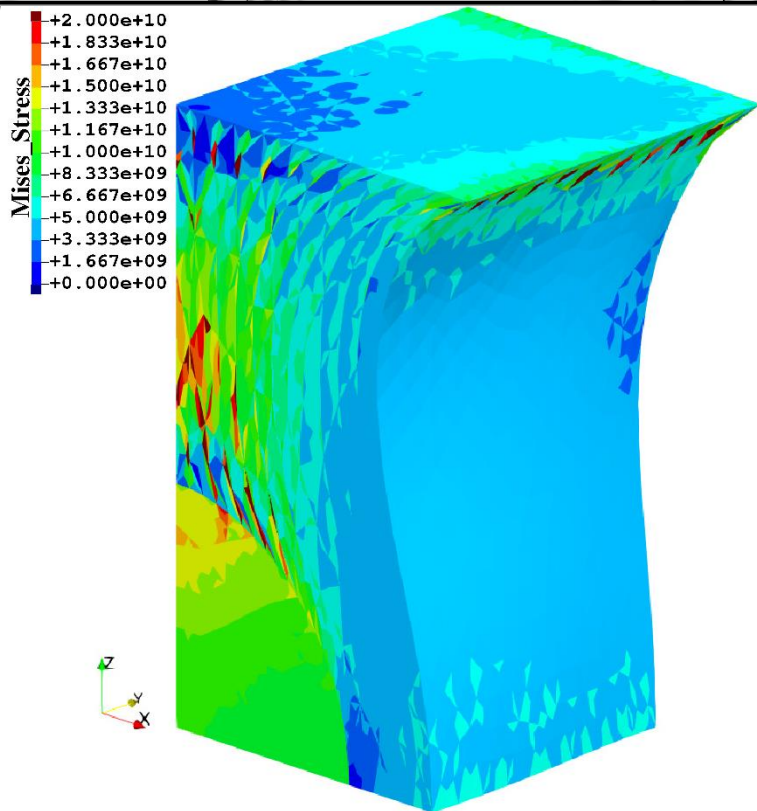
SelectiveCS-FEM-T10



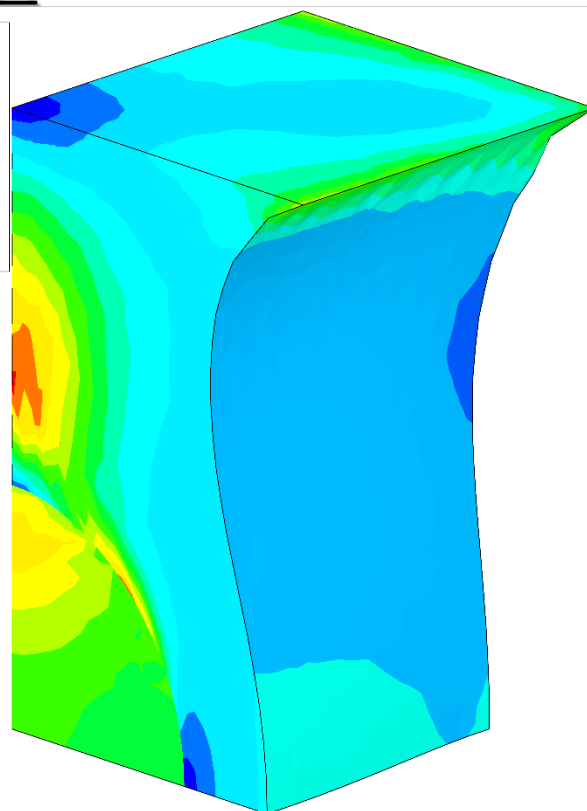
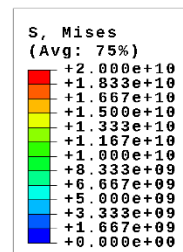
ABAQUS C3D10MH

SelectiveCS-FEM-T10は**十分な圧力の計算精度**を有している。

伸び60%時点のMises応力分布比較



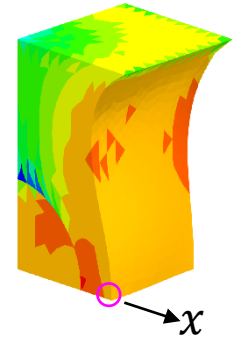
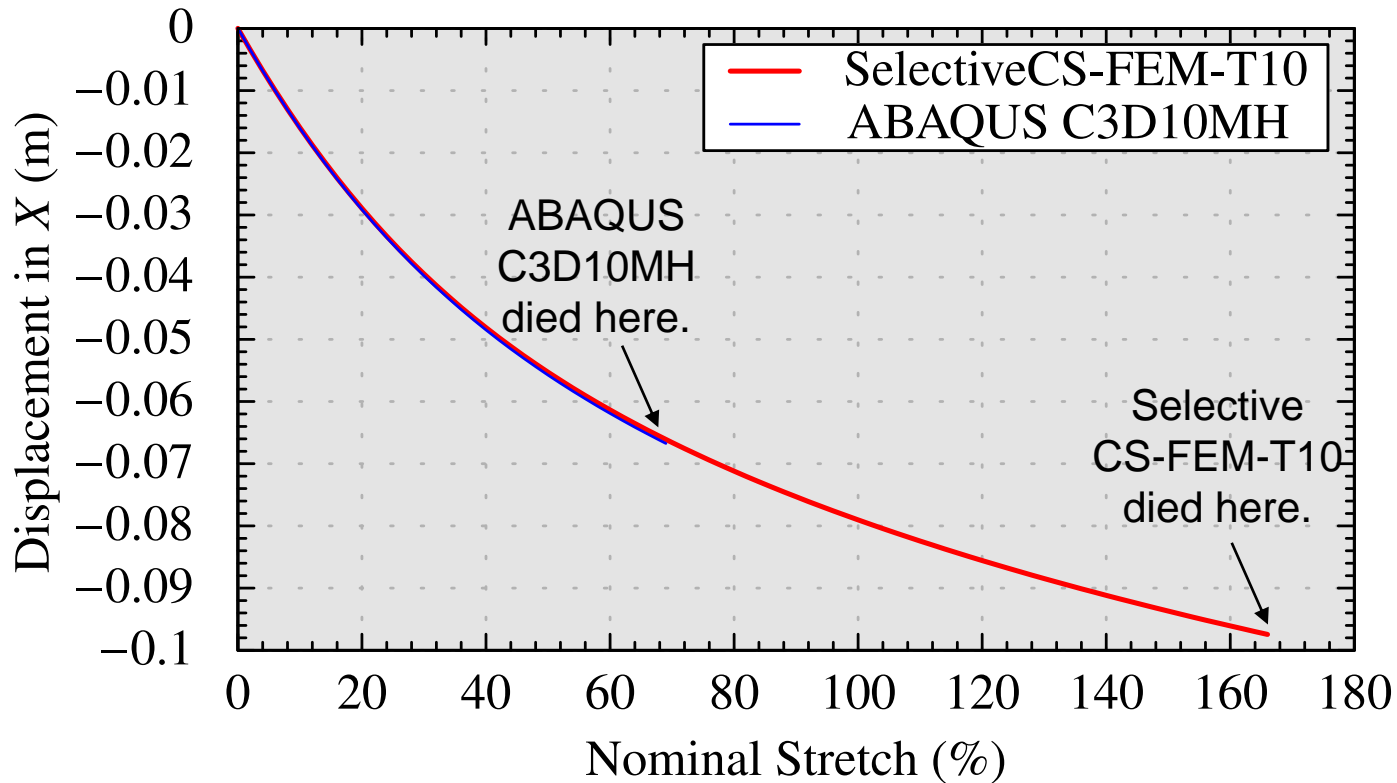
SelectiveCS-FEM-T10



ABAQUS C3D10MH

SelectiveCS-FEM-T10にはMises応力振動が見られる場合がある。
この問題の解決は今後の課題。

底面角点のx方向変位(u_x)履歴の比較



SelectiveCS-FEM-T10は大変形ロバスト性が極めて高く、
十分な変位(および荷重)の計算精度を有している。

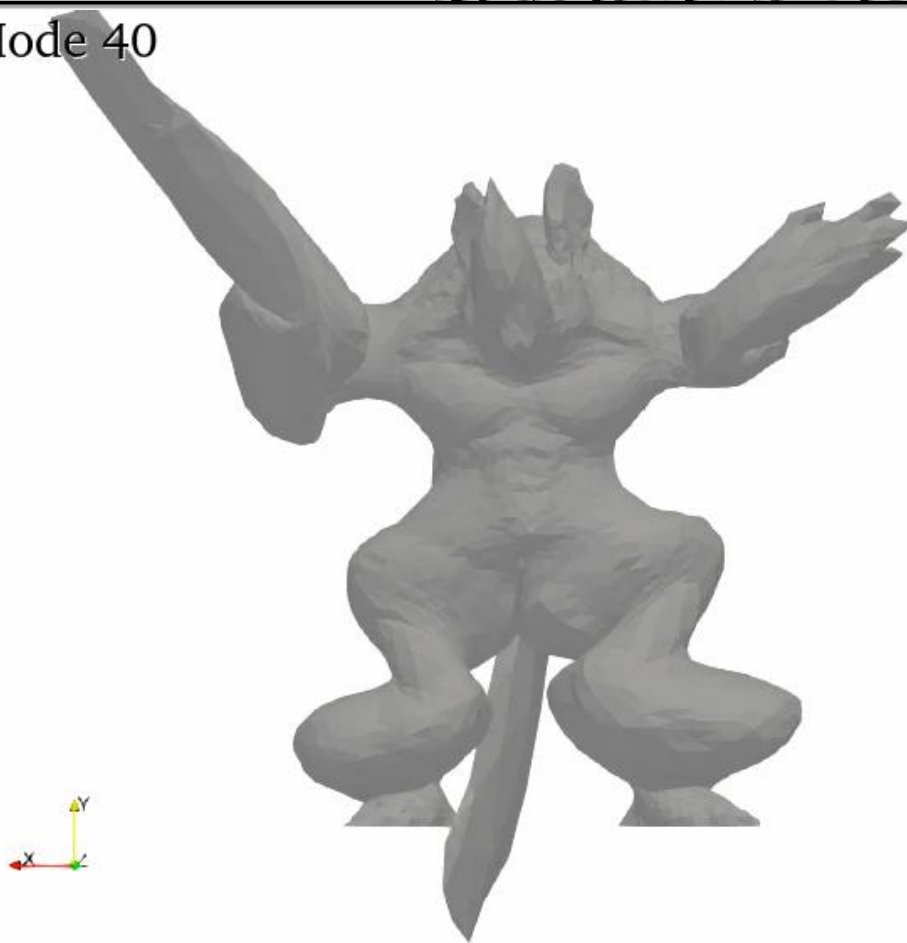
概要

- アルマジロ形の弾性体
(ヤング率: 5 MPa,
ポアソン比: 0.49)
- T10メッシュを使用
(節点数: 約80,000,
要素数: 約52,000)
- 両足の裏を完全固定
- 40次モードまでのモード解析
(大変形解析ではない)
- ABAQUS C3D10MHと
同じメッシュで性能比較.



SelectiveCS-FEM-T10の解析結果(固有モード)

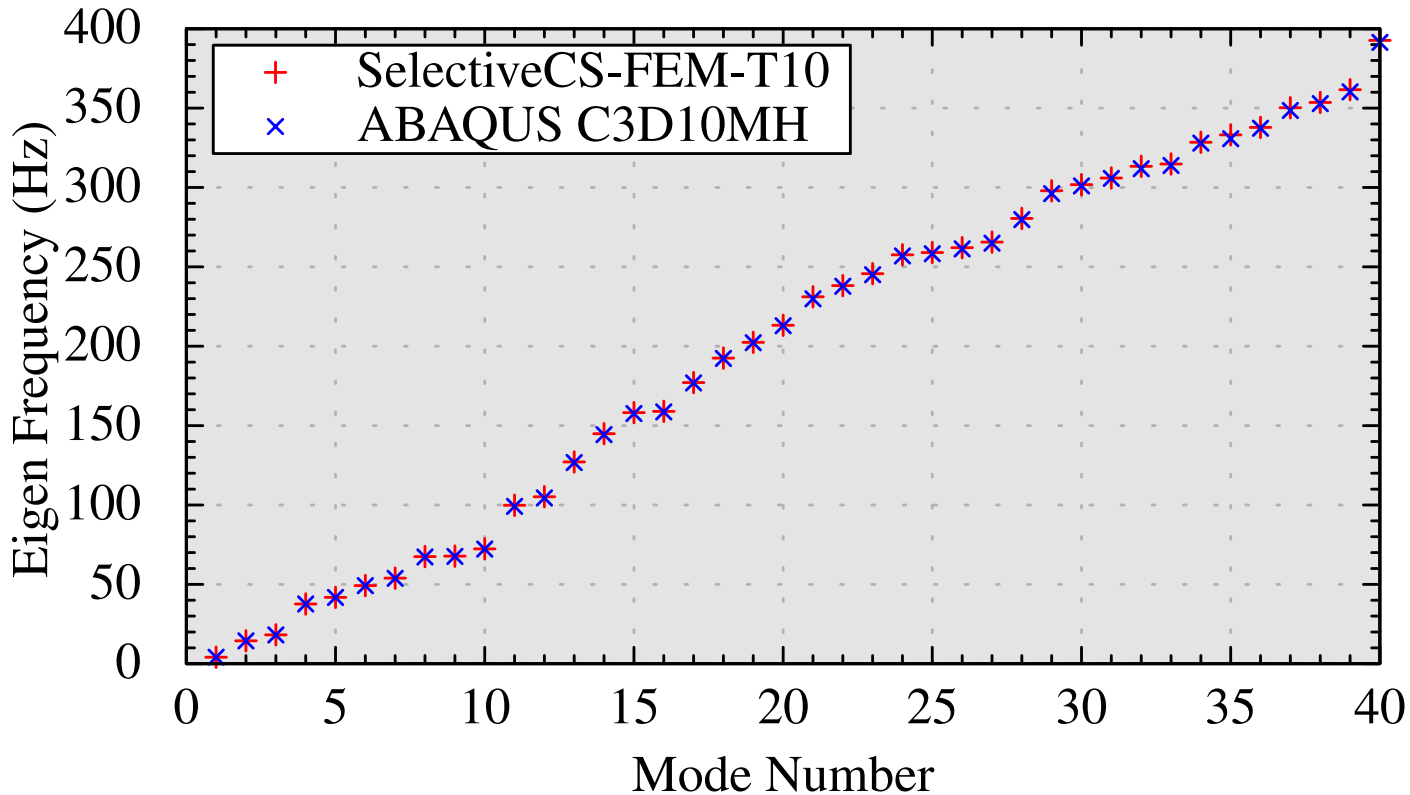
Mode 40



不自然なモード
は見られない。

SelectiveCS-FEM-T10はアワーグラスモードの様な
疑似低エネルギーモードを生じない。

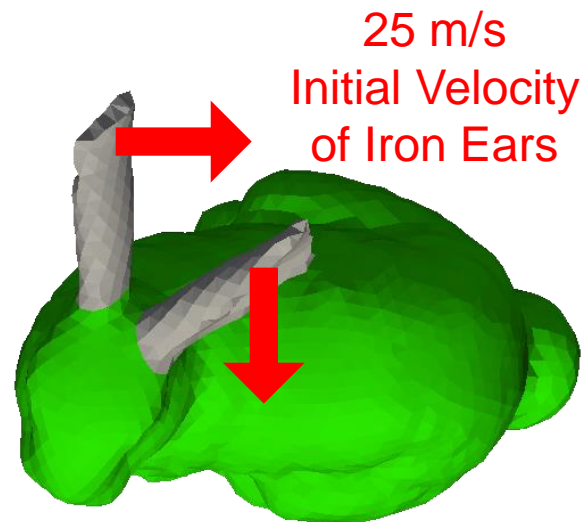
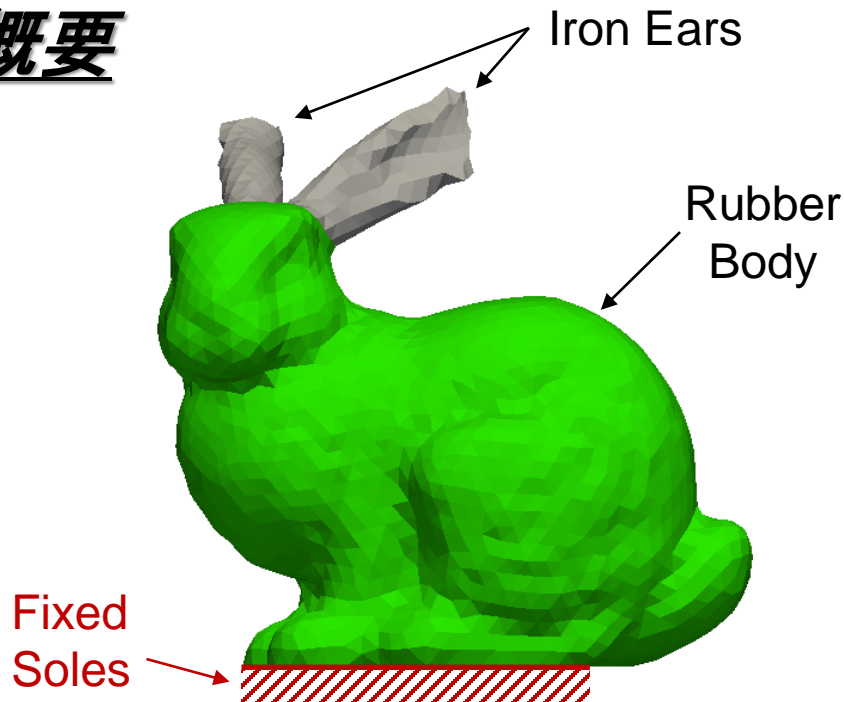
固有振動数の比較



SelectiveCS-FEM-T10は固有モード解析において
ABAQUS C3D10MHと同等の実用的な精度を有している。
従って、動解析でも精度と安定性が期待できる。

ウサギの耳の揺動解析

概要



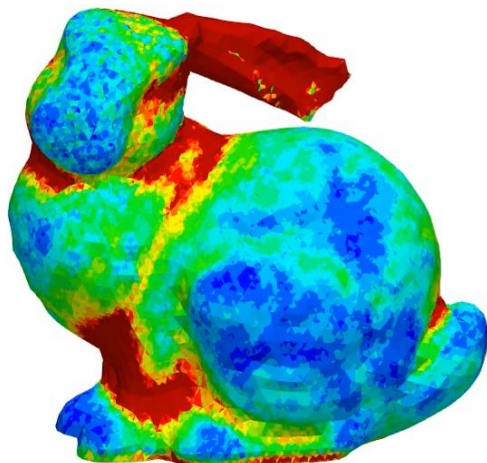
ABAQUS/Explicit推奨の $\Delta t = 0.05 \mu\text{s}$ を使用.

- 鉄製の耳: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 200 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = 0.3$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$)
- ゴム製の体: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ MPa}$, $\nu_{ini} = 0.49$, $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$)
- T10メッシュを使用(節点数:約61,000, 要素数:約41,000)
- 接触は不考慮.
- 同じメッシュ・同じ Δt でABAQUS/Explicit C3D10M(\neq C3D10MH)と精度比較.

Mises応力時刻歴の比較

Mises Stress

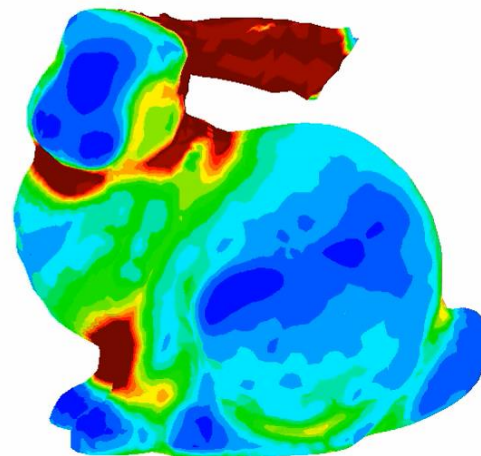
1.000e+06
9.167e+05
8.333e+05
7.500e+05
6.667e+05
5.833e+05
5.000e+05
4.167e+05
3.333e+05
2.500e+05
1.667e+05
8.333e+04
0.000e+00



Time: 37.3 (ms)

S, Mises
(Avg: 75%)

+1.623e+08
+1.900e+06
+9.167e+05
+8.333e+05
+7.500e+05
+6.667e+05
+5.833e+05
+5.000e+05
+4.167e+05
+3.333e+05
+2.500e+05
+1.667e+05
+8.333e+04
+0.000e+00



Step: Step-1 Frame: 373
Total Time: 0.037300

SelectiveCS-FEM-T10/Explicit

ABAQUS/Explicit C3D10M

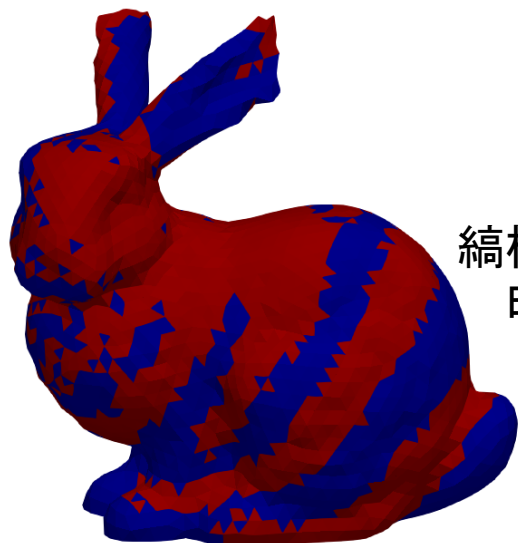
SelectiveCS-FEM-T10/ExplicitはABAQUS/Explicit C3D10Mと同等の変位およびMises応力の計算精度を有している。

ウサギの耳の揺動解析

$t = 0.4$ ms (開始直後) の圧力符号の比較

Step: Step-1 Frame: 4
Total Time: 0.000400

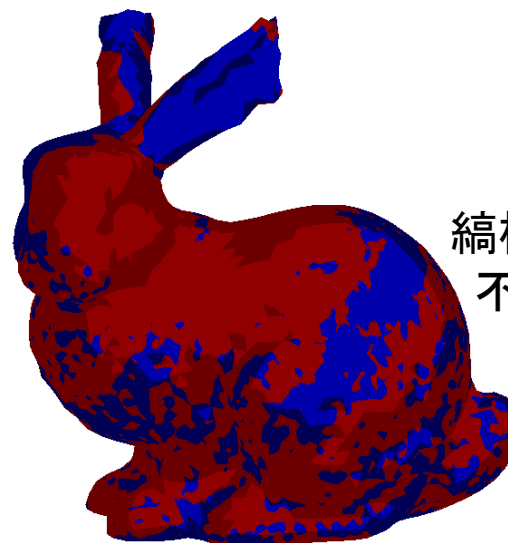
赤: 正圧
青: 負圧



縞模様が
明瞭

Time: 0.4 (ms)

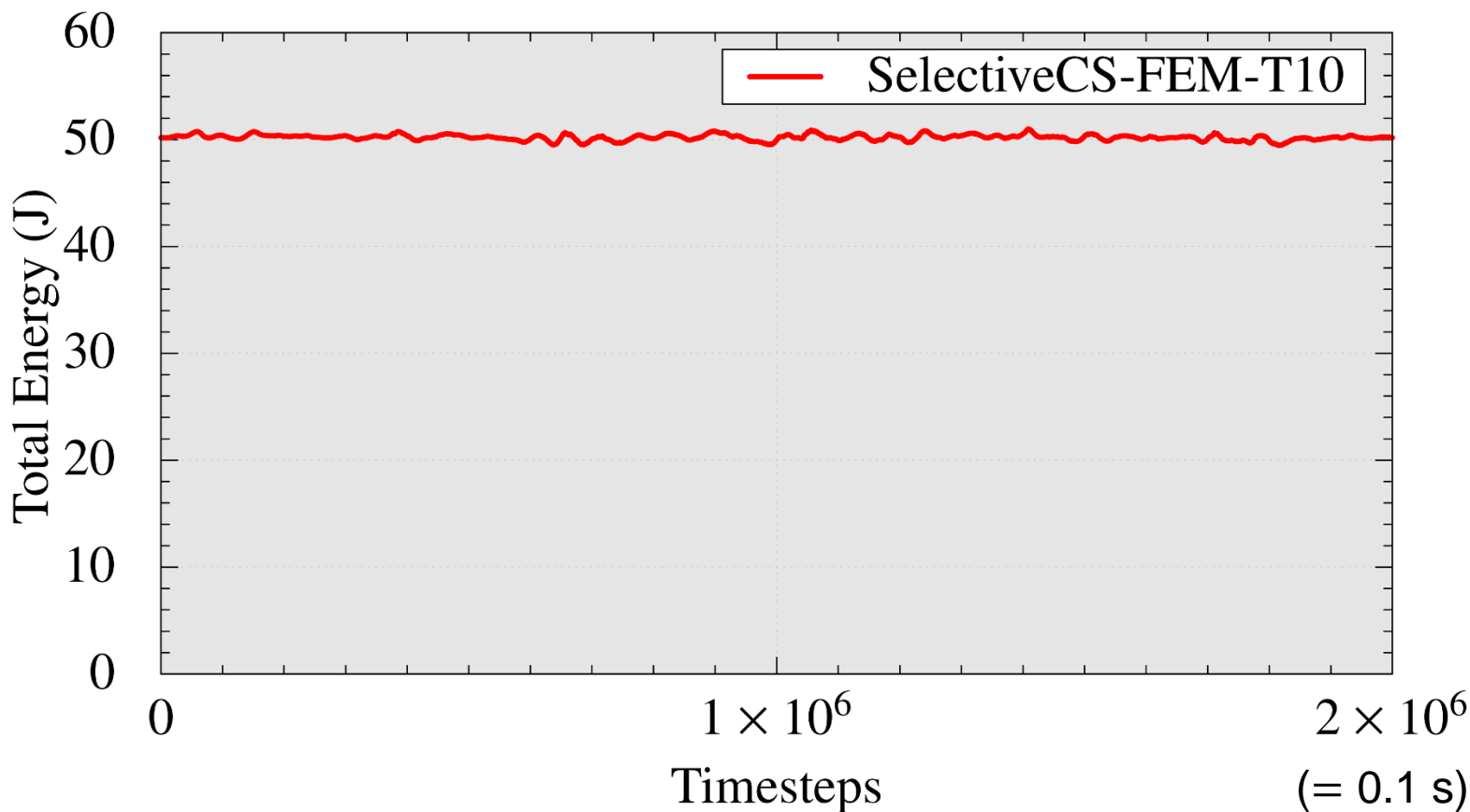
SelectiveCS-FEM-T10/Explicit



縞模様が
不明瞭

ABAQUS/Explicit C3D10M

SelectiveCS-FEM-T10/Explicitは初期圧力波の伝播を
ABAQUS/Explicit C3D10Mよりも正確に解析している。

全エネルギー(運動+ひずみ)の時間ステップ履歴

SelectiveCS-FEM-T10/Explicitは動解析において
十分なエネルギー安定性を有している。

まとめ

SelectiveCS-FEM-T10のまとめ

利点

- ✓ 高精度 (ロッキング・圧力チェッカーボード・反力振動無し)
- ✓ ロバスト (超大変形でも長持ち & 動解析も安定)
- ✓ 追加自由度無し (静的縮約が不要)
- ✓ (陰解法なら) 標準的なT10要素と計算時間が同じ
- ✓ 商用有限要素解析コードに実装可能

欠点

極めて実用に近い！！

- ✗ もはやT4要素ではない
- ✗ 超大変形時にMises応力の振動が時折みられる

Take-home message

皆様がお持ちのFEコードへの実装をご検討ください。
コーディングは簡単です。

ご清聴ありがとうございました