

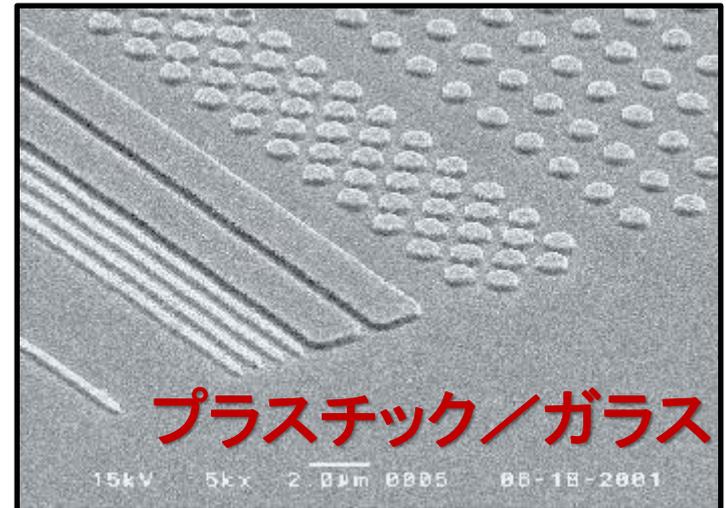
10節点四面体ひずみ平滑要素による 微圧縮大変形解析

大西 有希（東京工業大学）

研究背景

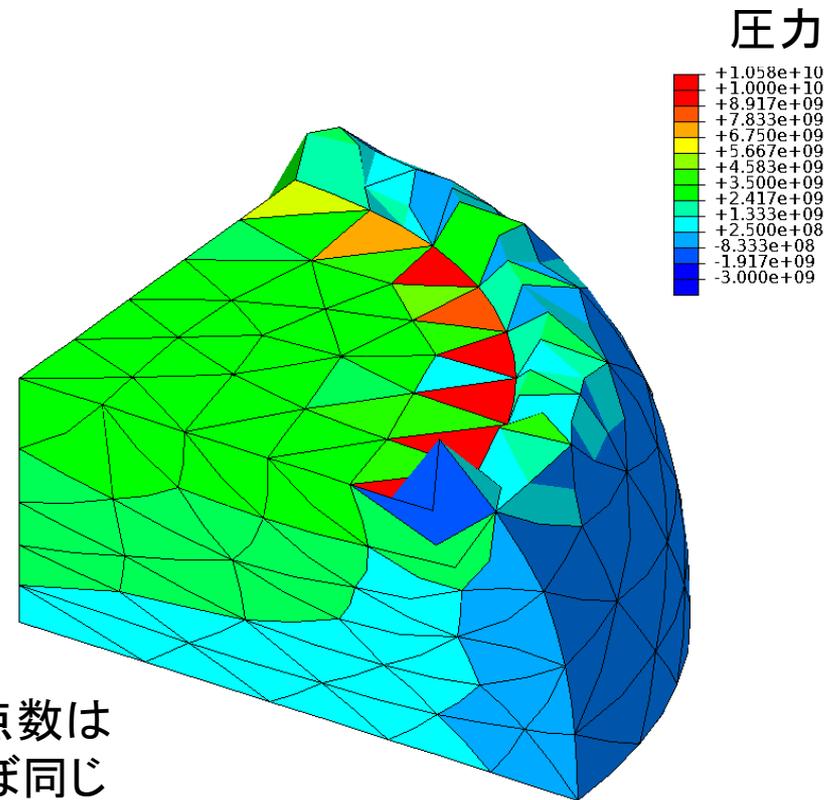
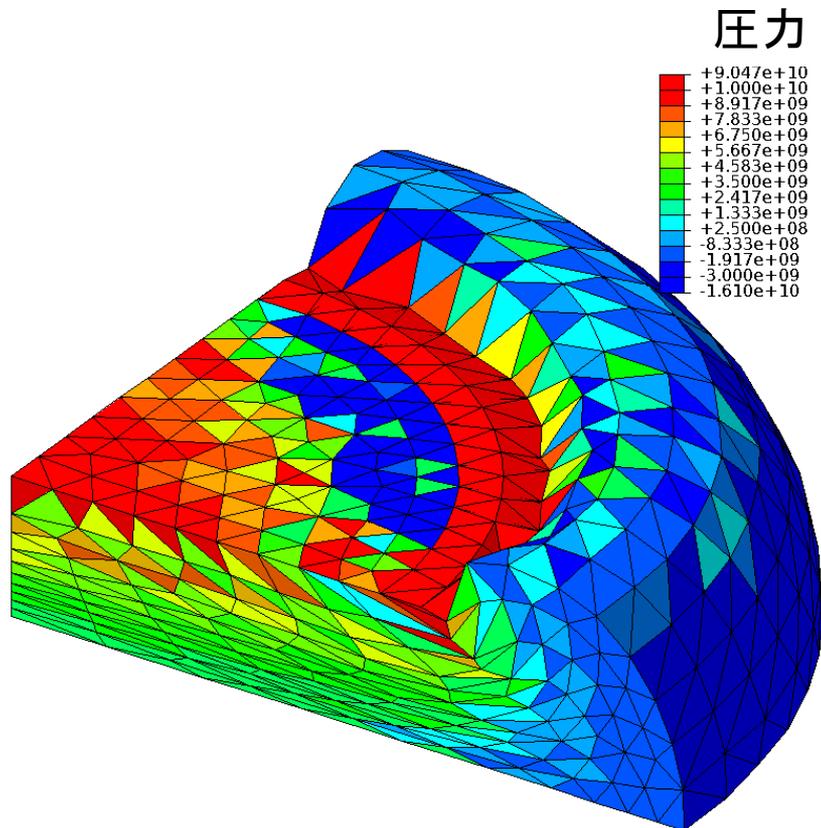
実現したい内容:

- 「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.

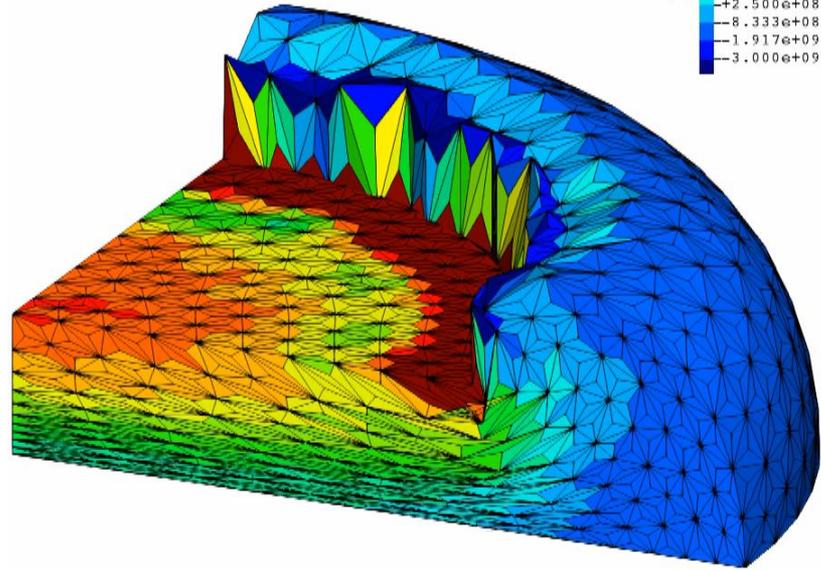
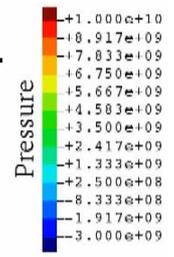
四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)

- ✓ 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.

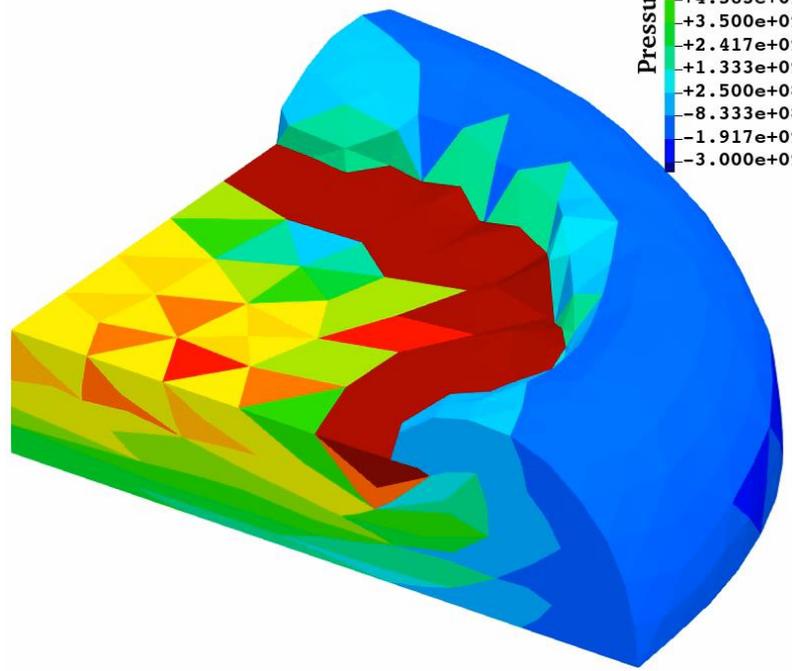
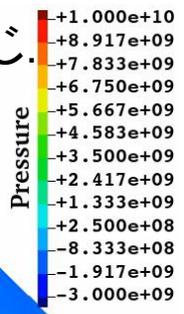
我々の従来手法（平滑化有限要素法）

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.



最近ではT10の研究を進めてきた.

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

SelectiveCS-FEM-T10

- ✓ 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

SelectiveCS-FEM-T10の問題点

Mises応力などが空間的に振動してしまう場合がある.

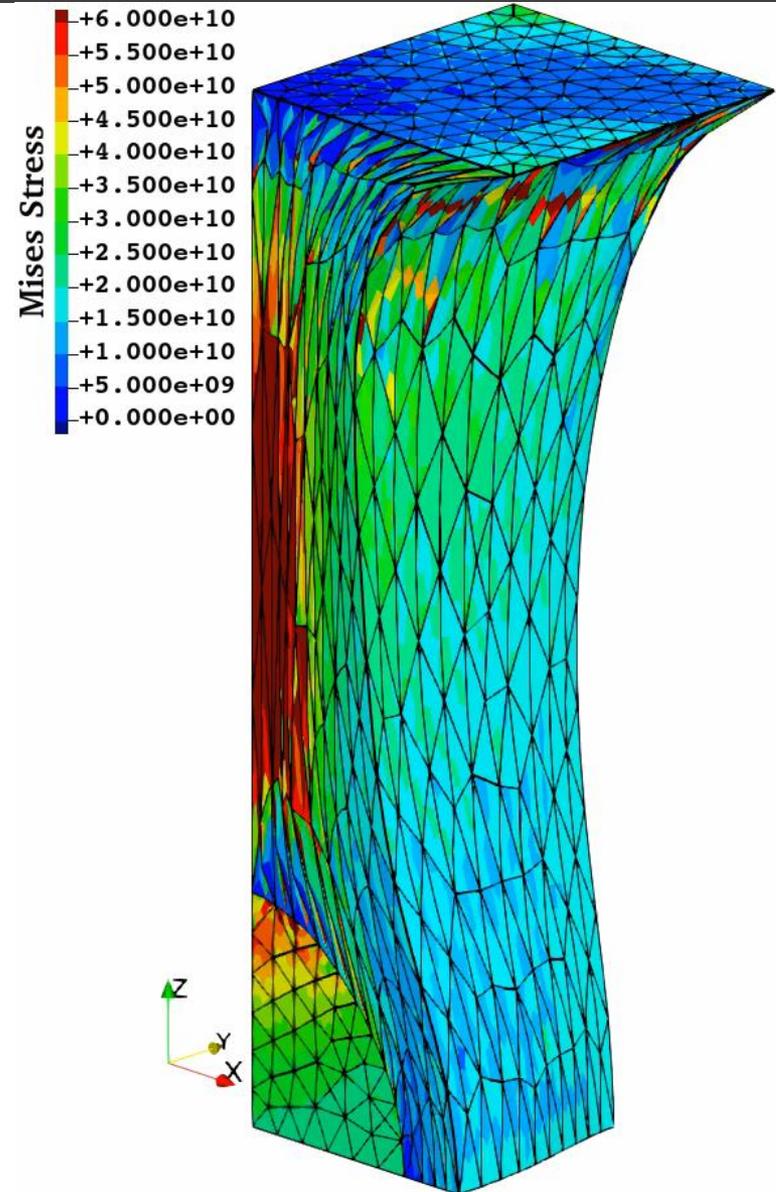
例) フィラー充填ゴムの引張解析

- フィラー(1/8球体)は鉄製
- ゴムは初期ポアソン比0.49

- 伸び約200%で収束困難.
- 大変形ロバスト性および変位・荷重・圧力の精度は優秀.
- 偏差応力・偏差ひずみ成分の精度が課題.

後述するひずみ平滑要素

(Strain Smoothed Element: SSE)の考え方を導入して解決できないか?



SSEの考え方を導入してMises応力振動を低減させる定式化「SelectiveCSSE-T10」の開発.

発表目次:

- 手法 : S-FEMとSSEの概要紹介と
SelectiveCSSE-T10の定式化提案
- 結果と考察 : 解析例
- まとめ

手法

— SSEとS-FEMの概要紹介と
SelectiveCSSE-T10の新定式化提案 —

Smoothed Finite Element Method (S-FEM)とは?

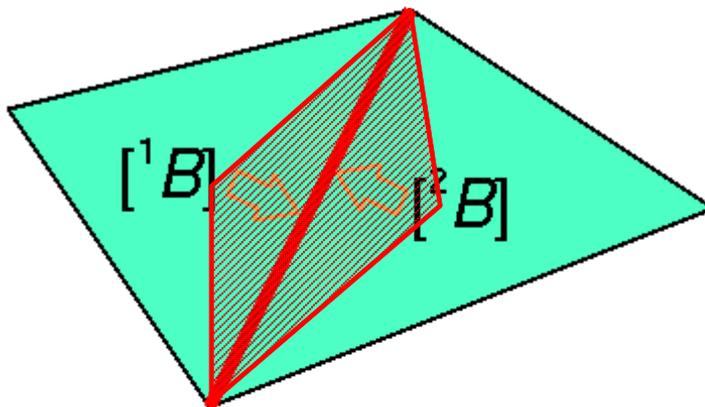
- 歪み平滑化(Strain Smoothing)手法の一種.
- ザックリ言うと, **近接要素間で歪みをならす**FEM定式化の総称.
- ロッキングや扁平要素による精度低下を起こしにくい.

- 古典的なS-FEMは次の4種.
 - 辺で平滑化するEdge-based S-FEM (**ES-FEM**)
 - 面で平滑化するFace-based S-FEM (FS-FEM) <3次元に限る>
 - 節点で平滑化するNode-based S-FEM (NS-FEM)
 - サブセルで平滑化するCell-based S-FEM (**CS-FEM**)
- 上記に選択的低減積分(SRI), B-bar法, F-bar法等を組み合わせる方法もあり, 多様なバリエーションがある.

ES-FEM-T3の定式化概要

- 各要素の $[B]$ を通常のFEMと同様に作る.
- 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.

積分点が
各エッジ中心に
あるイメージ



ひずみ/応力は
平滑化領域内で
一定

$[^{\text{Edge}}B]$

Edge T

$\{f^{\text{int}}\}$

ES-FEM

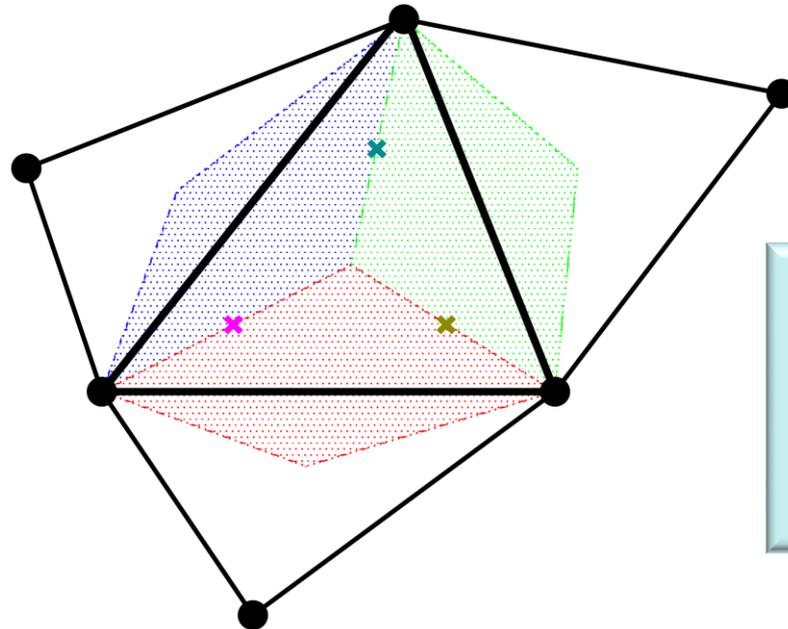
三角形/四面体要素で
せん断ロッキングを
回避できる.

SSE-T3の定式化概要

- 各要素の $[B]$ を通常のFEMと同様に作る.
- 各エッジの $[{}^{\text{Edge}}B]$ をES-FEMの手順で作る.
- $[{}^{\text{Edge}}B]$ を要素内の3ガウス点に配り, 平均化して $[{}^{\text{Gaus}}B]$ を作る.
- $[{}^{\text{Gaus}}B]$ を用いて歪み・応力を計算し, 三角形2次要素と同様にガウスの3点積分で節点内力を計算する.

ひずみ平滑化を
2回行って
積分点で応力を
評価・積分する.

ひずみ/応力は
平滑化領域内で
線形

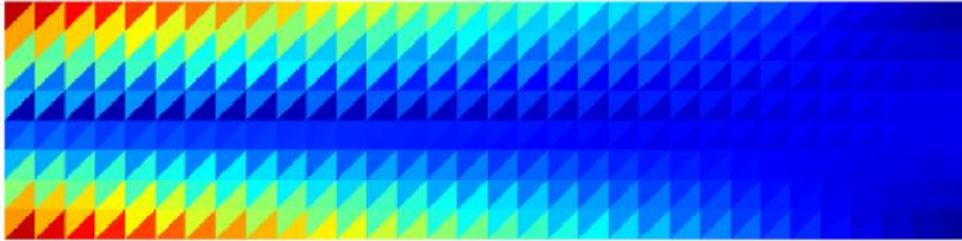


三角形/四面体要素で
せん断ロックを
回避できる上に,
ひずみ/応力の
メッシュ収束が速い.

SSE-T3の性能

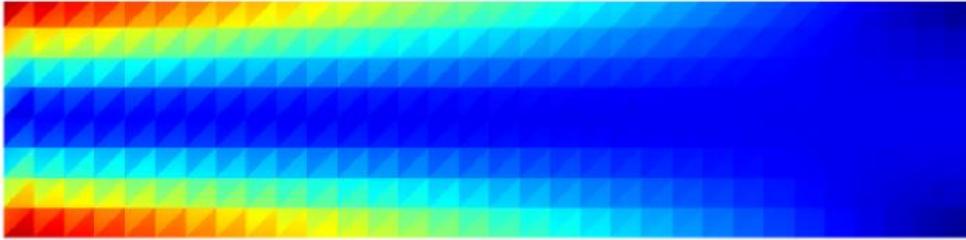
片持ち梁の曲げのMises応力分布比較

FEM-T3



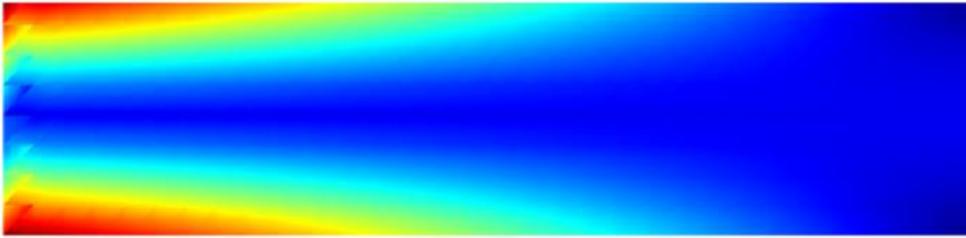
応力分布が階段状で低精度.
実は, せん断ロックンクも
起こしている.

SSE



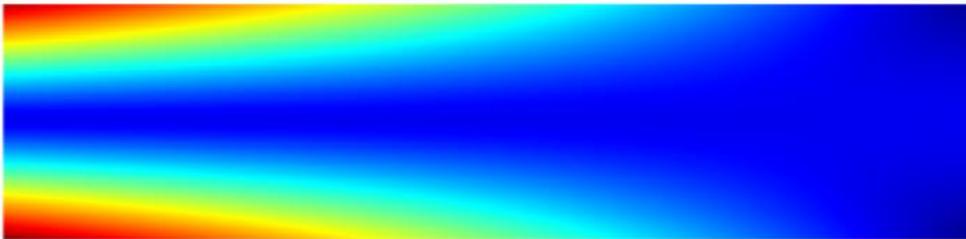
ひずみ/応力が要素内で線形
分布なので高精度.
せん断ロックンクもなし.

EC-SSE



ただし, SSE (およびES-FEM)
は要素をまたぐひずみ平滑化
を行うため, 標準的なFEMの
「要素」としては実装できない.
また, 体積ロックンクは回避
できない.

Analytic

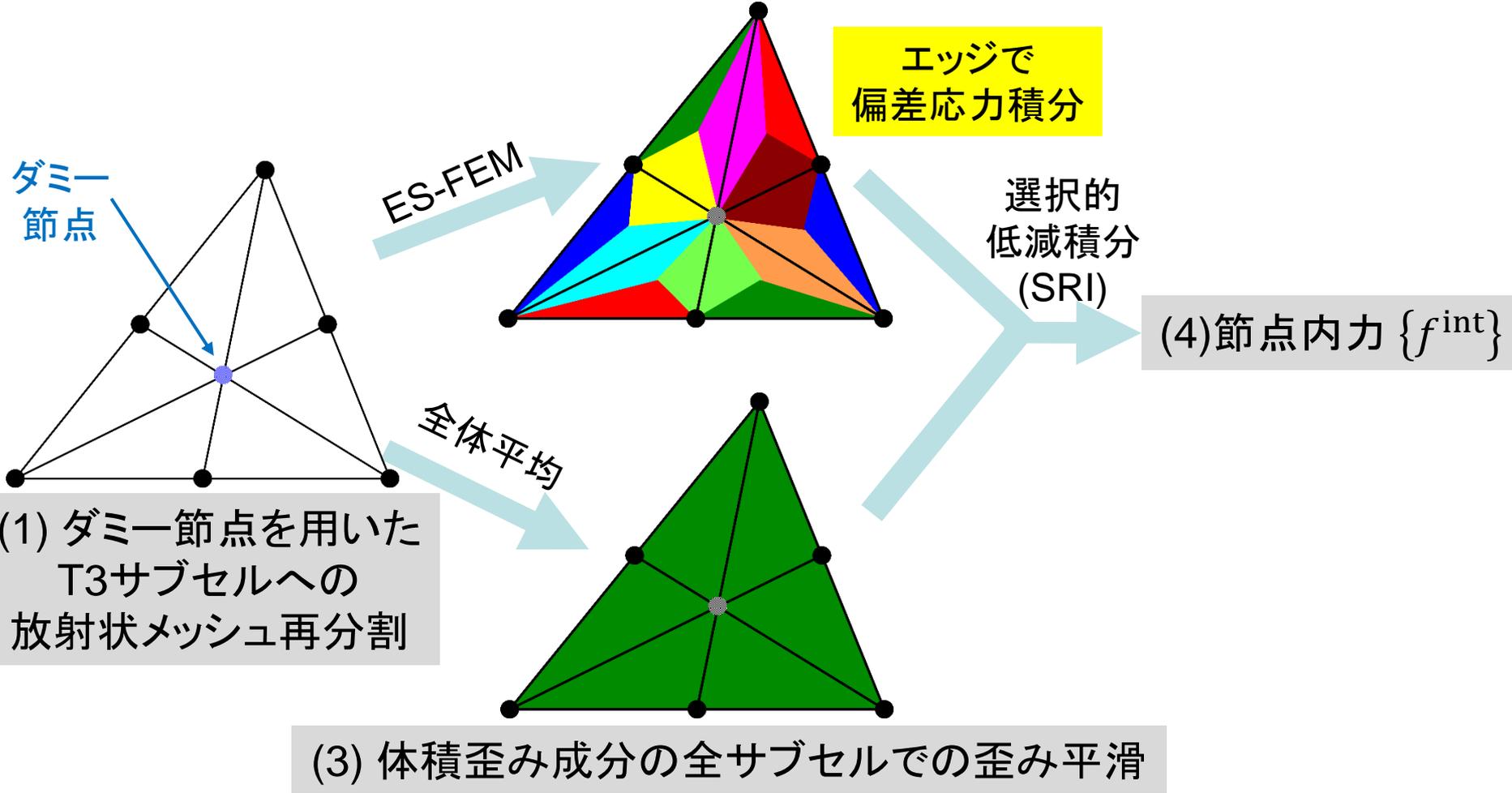


T. Jinsong *et al.*, Euro. J. Mech. /A, v95, 2022.

SelectiveCS-FEM-T6(従来法)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

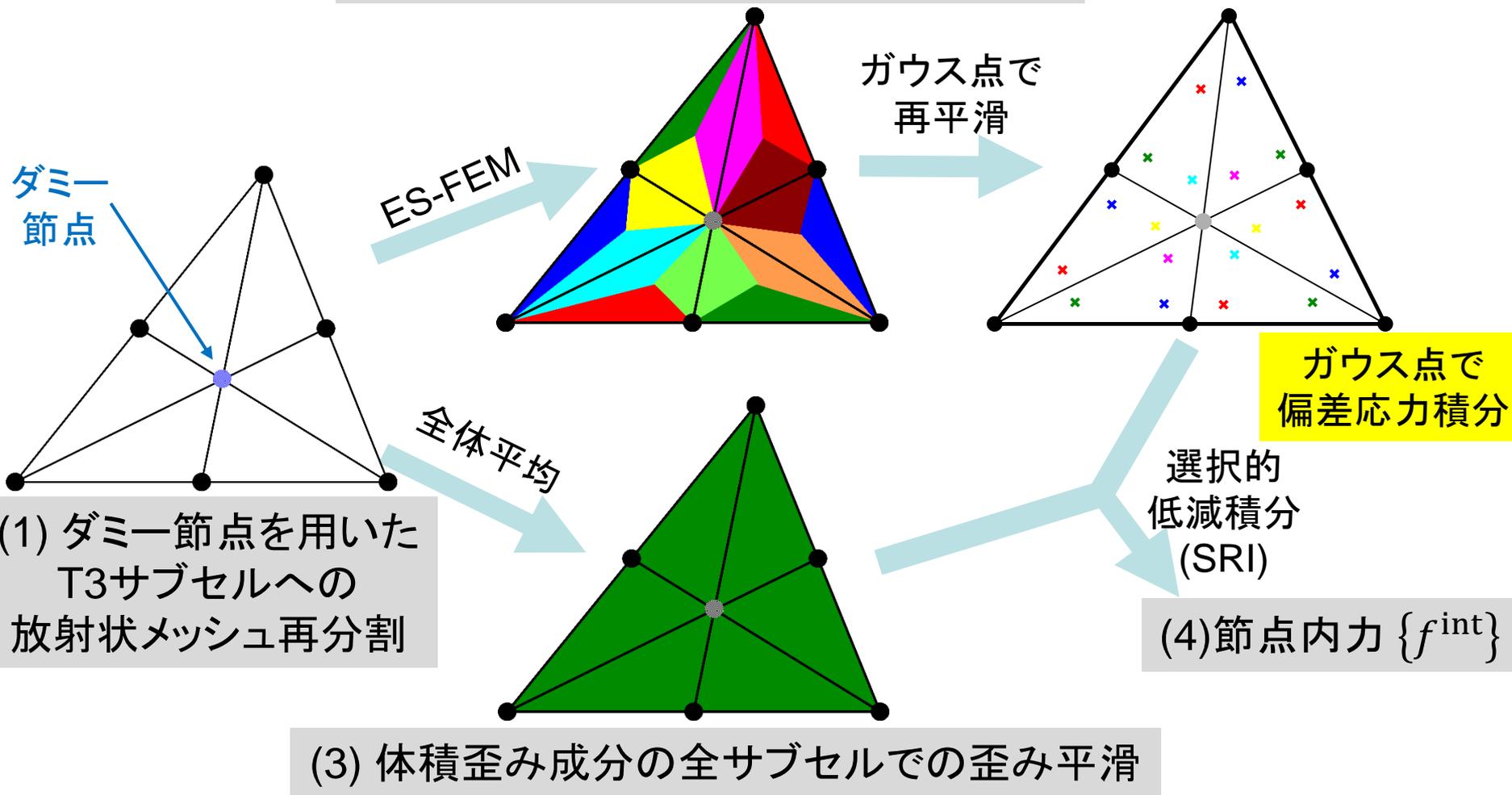
(2) 等積歪み成分のエッジでの歪み平滑



SelectiveCSSE-T6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

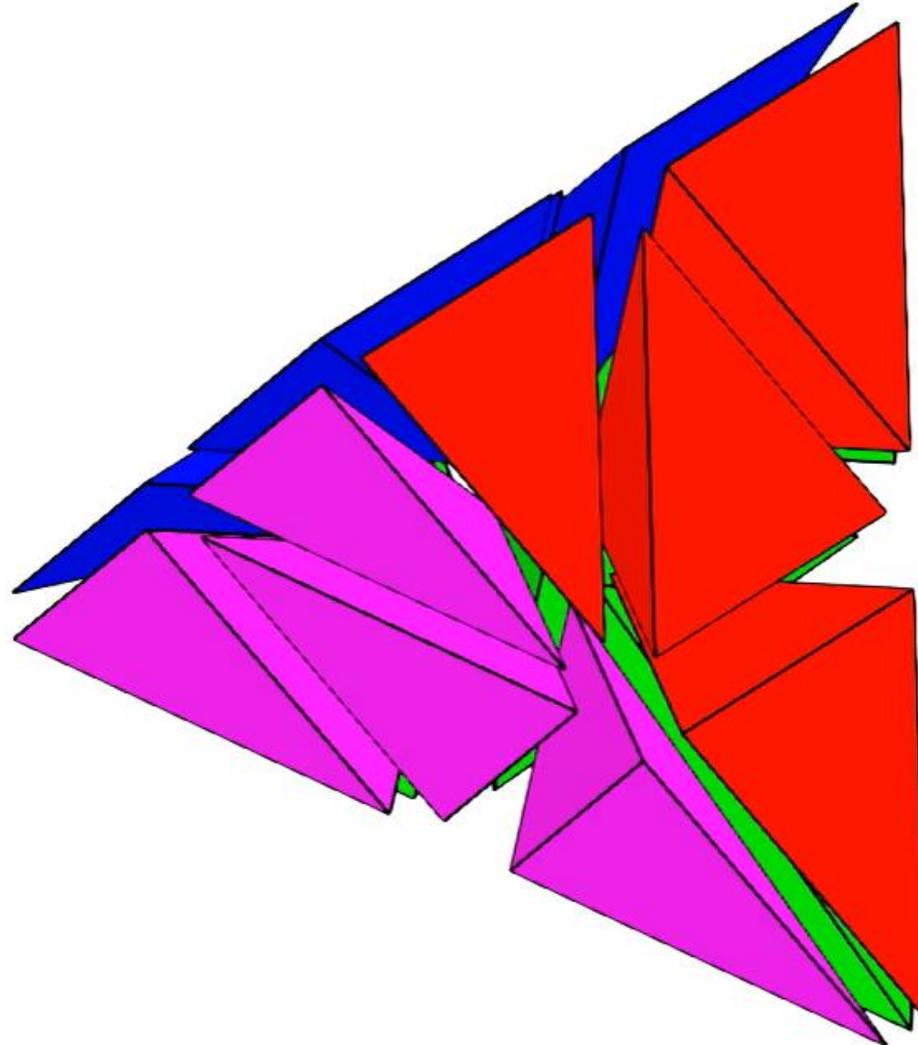
(2) 等積歪み成分のSSEでの歪み平滑



SelectiveCSSE-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サブセル



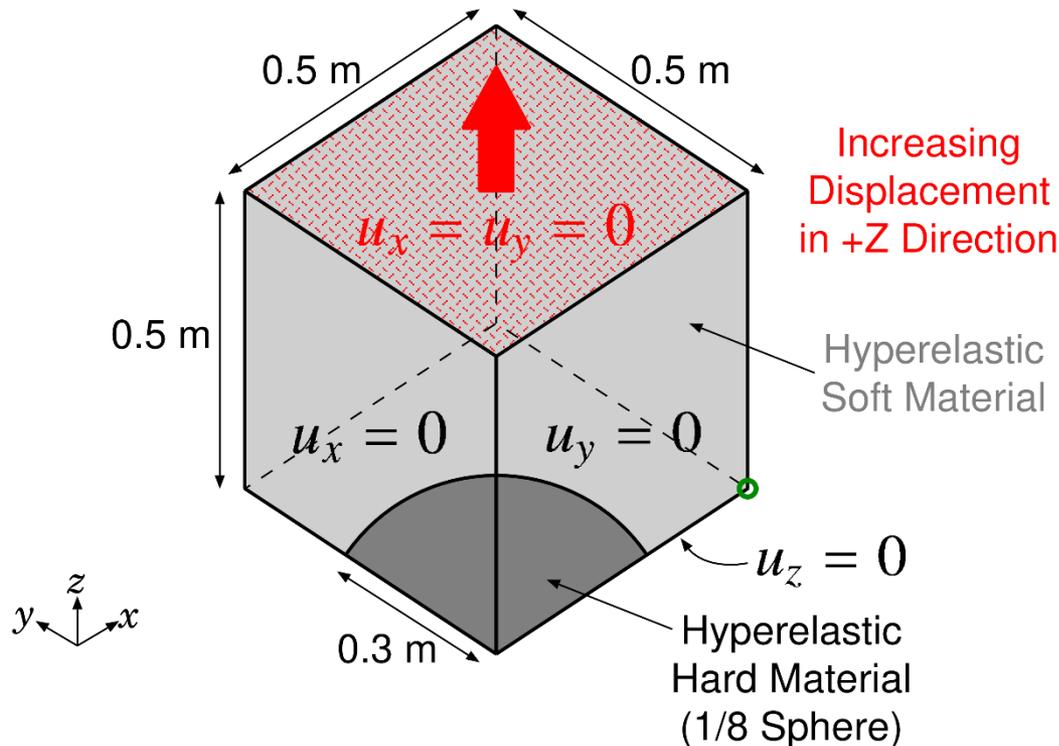
34本のエッジで
ES-FEMによる
ひずみ平滑化

16サブセルに
各4個のガウス点.
計 $16 \times 4 = 64$ 個の
ガウス点を使用.

結果と考察

— 解析例の紹介 —

概要



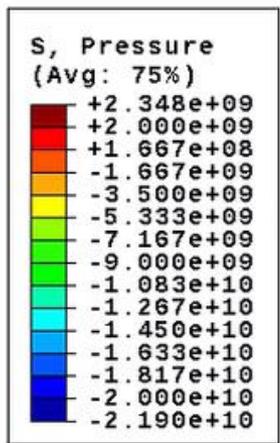
- ゴム: Neo-hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = \mathbf{0.49}$)
- ファイラー: Neo-hook超弾性体 ($E_{ini} = 260 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = \mathbf{0.3}$)
- T10メッシュを使用(節点数:約11,000, 要素数:約7,000)
- ABAQUS最良のT10要素(**ABAQUS C3D10MH**)と同じメッシュで性能比較

ファイラー充填ゴムの引張解析

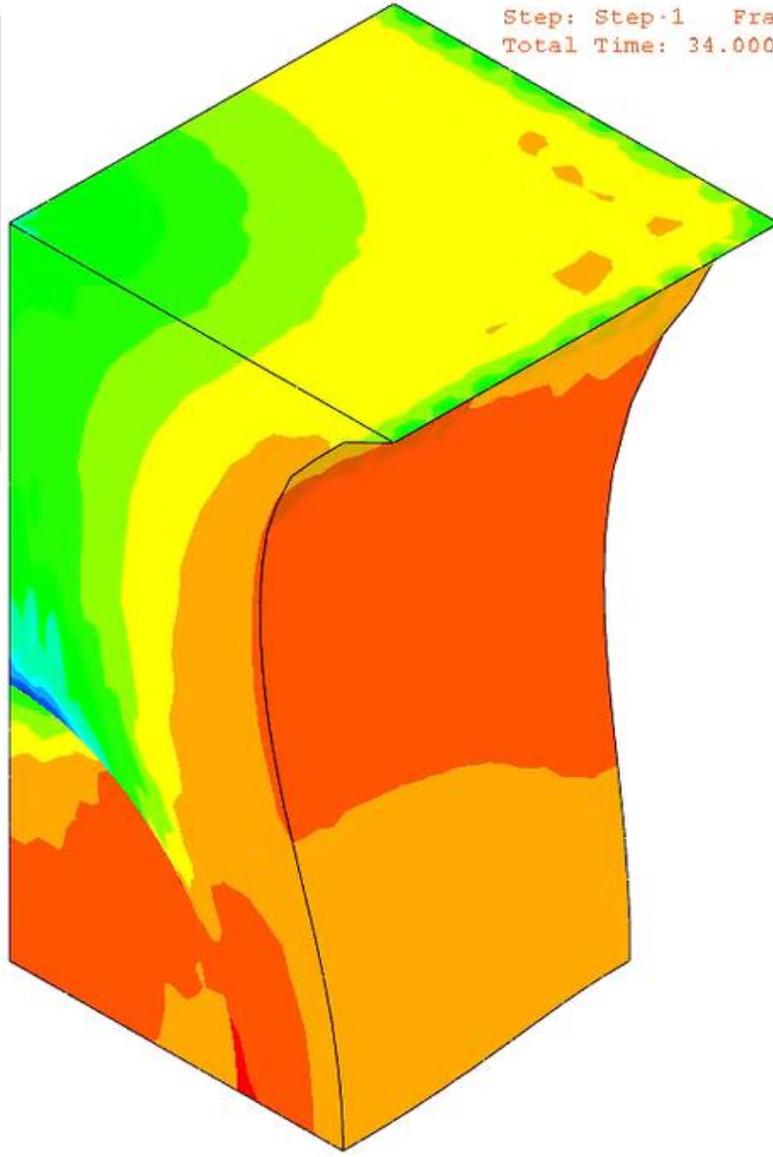
ABAQUS

C3D10MH

**の解析結果
(圧力分布)**



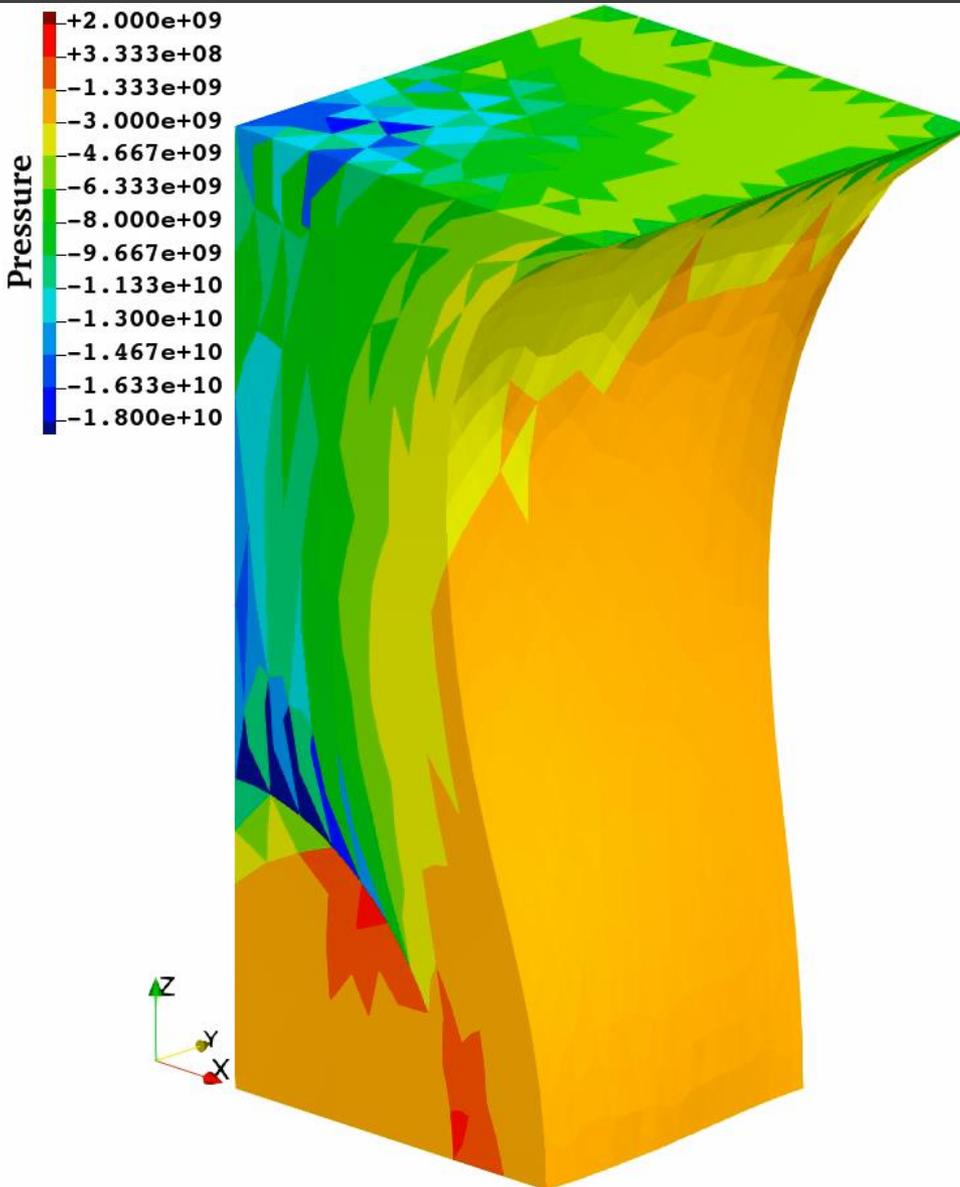
Step: Step-1 Frame: 34
Total Time: 34.000000



伸び約70%
で収束困難

ファイラー充填ゴムの引張解析

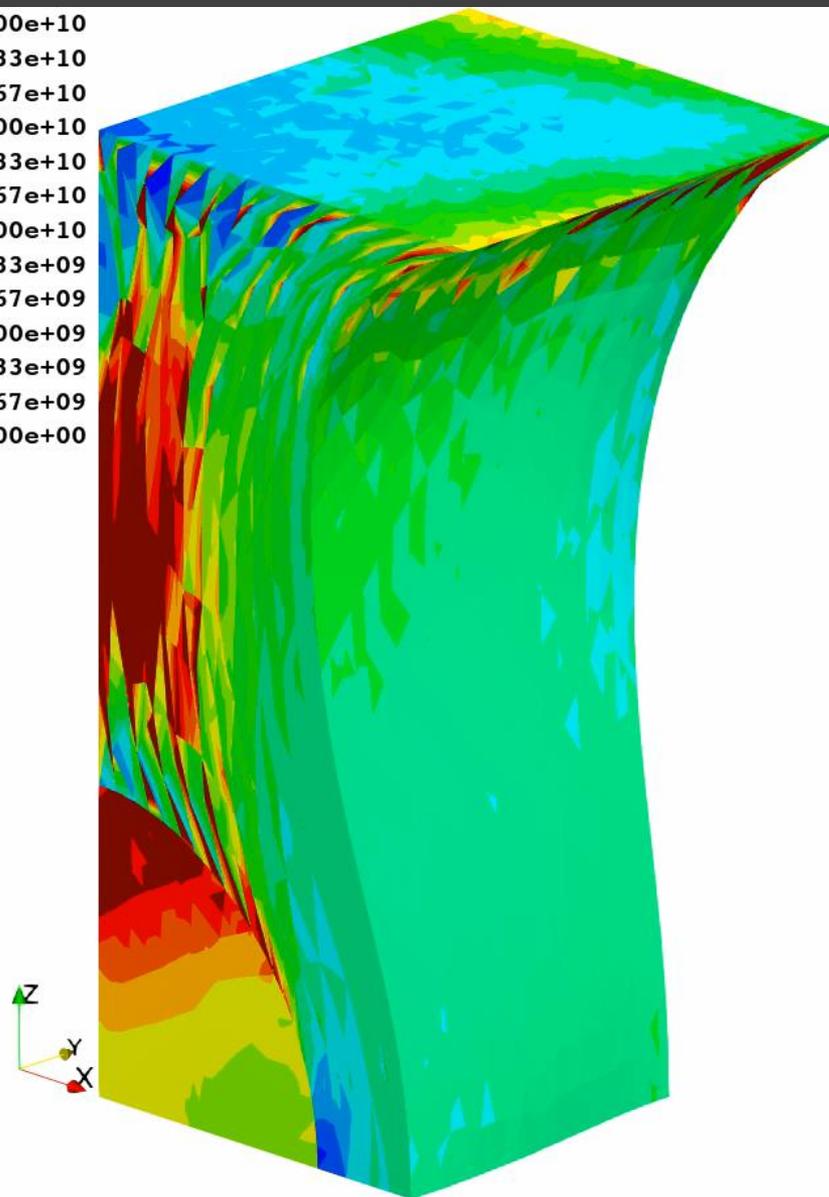
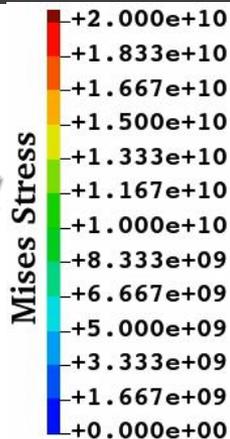
Selective CSSE-T10 の解析結果 (圧力分布)



伸び約100%
で収束困難.

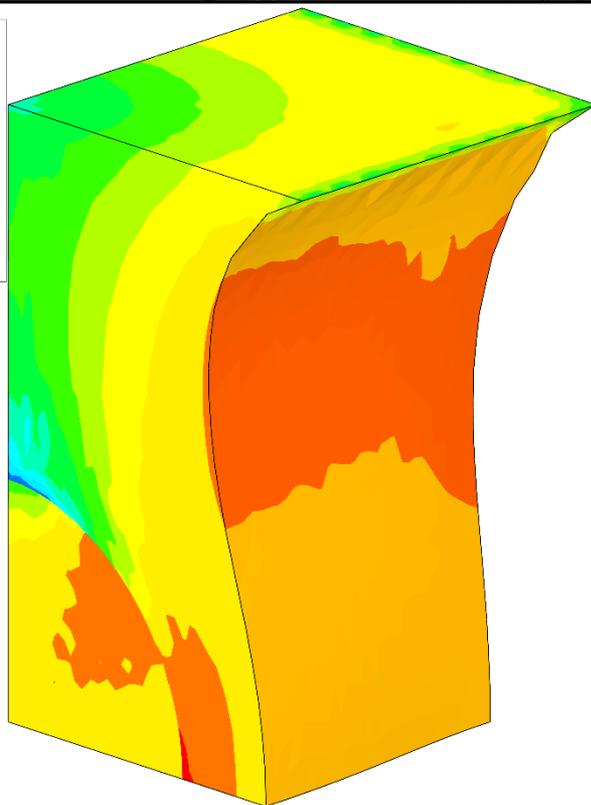
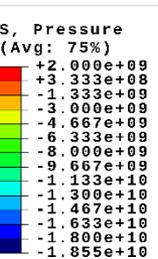
Selective
CS-FEM-T10の
伸び約200%
に比べると,
大変形ロバスト性
が低い.

Selective
CSSE-T10
の解析結果
(Mises応力
分布)

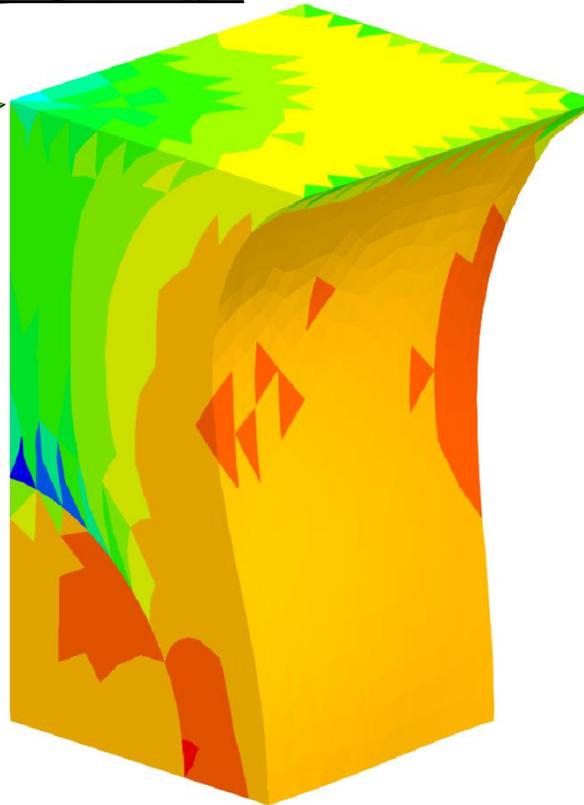


Mises応力振動
がほとんど解消
されていない...

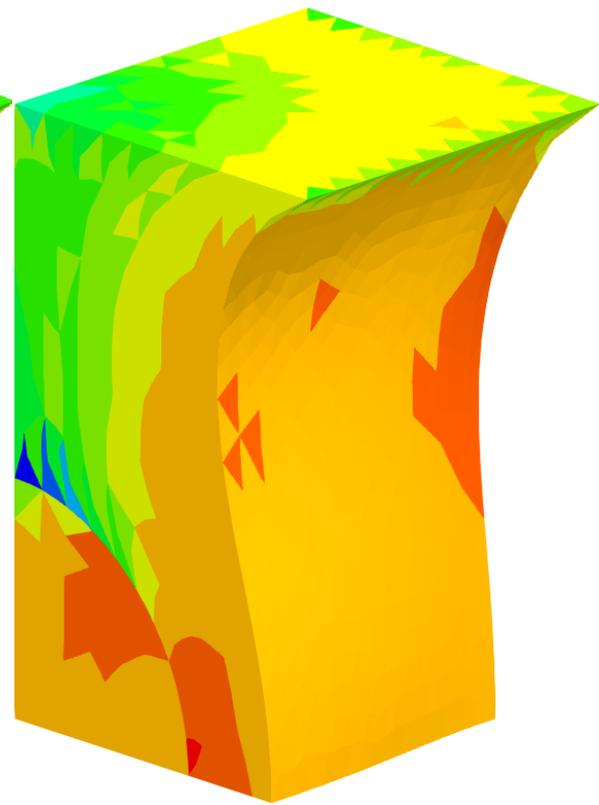
伸び60%時点の圧力分布比較



ABAQUS C3D10MH



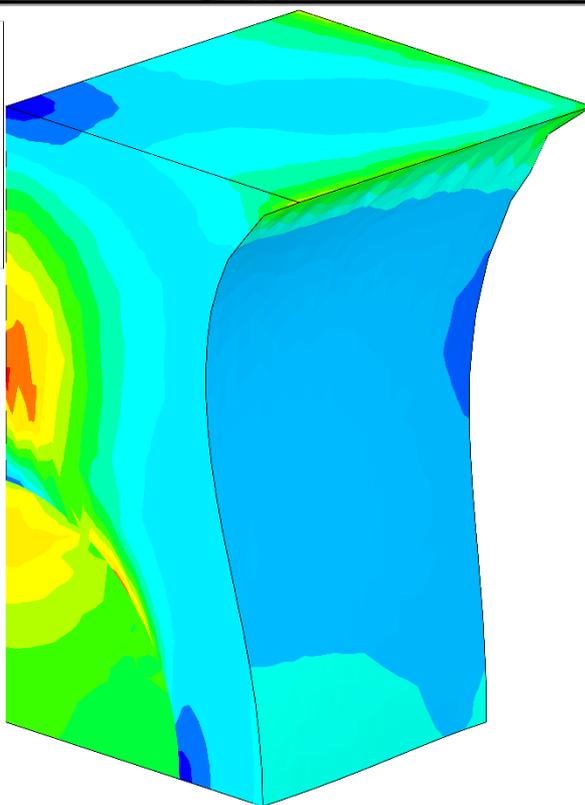
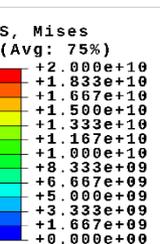
SelectiveCS-FEM-T10



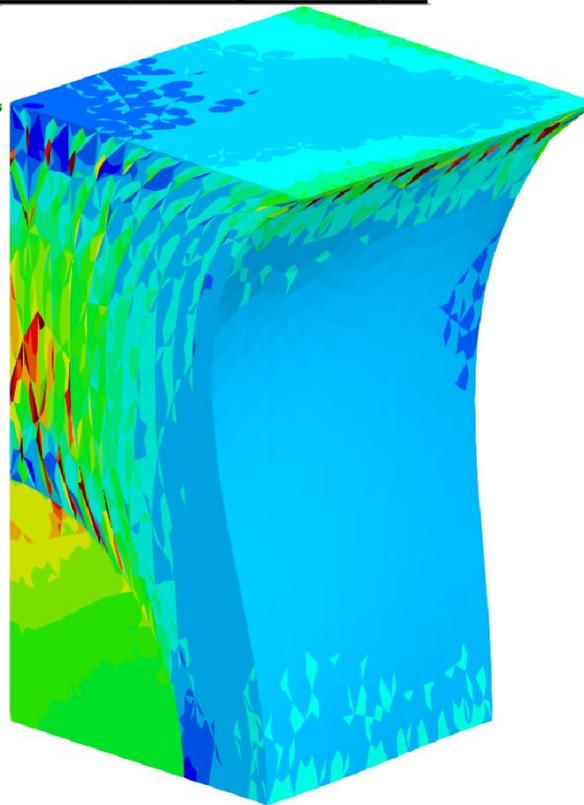
SelectiveCSSE-T10

SelectiveCSSE-T10は十分な変位・荷重・圧力の
計算精度を有している.

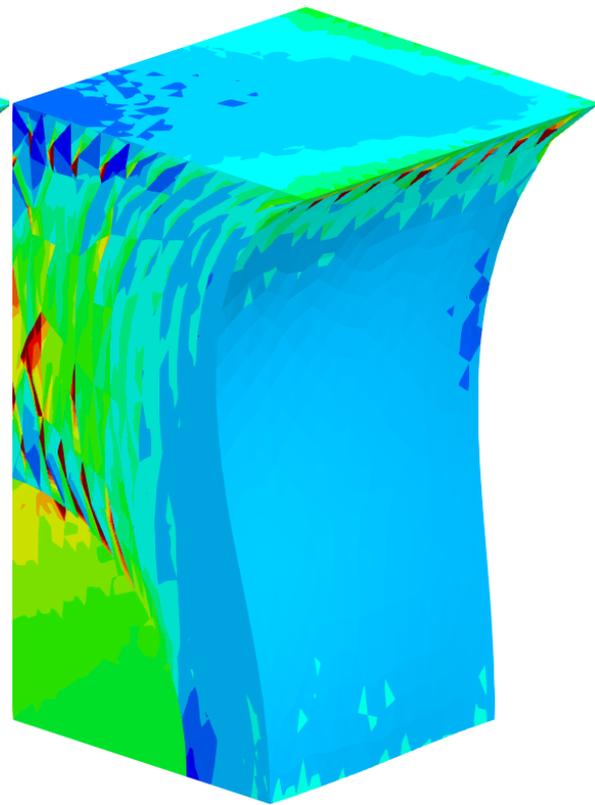
伸び60%時点のMises応力分布比較



ABAQUS C3D10MH



SelectiveCS-FEM-T10

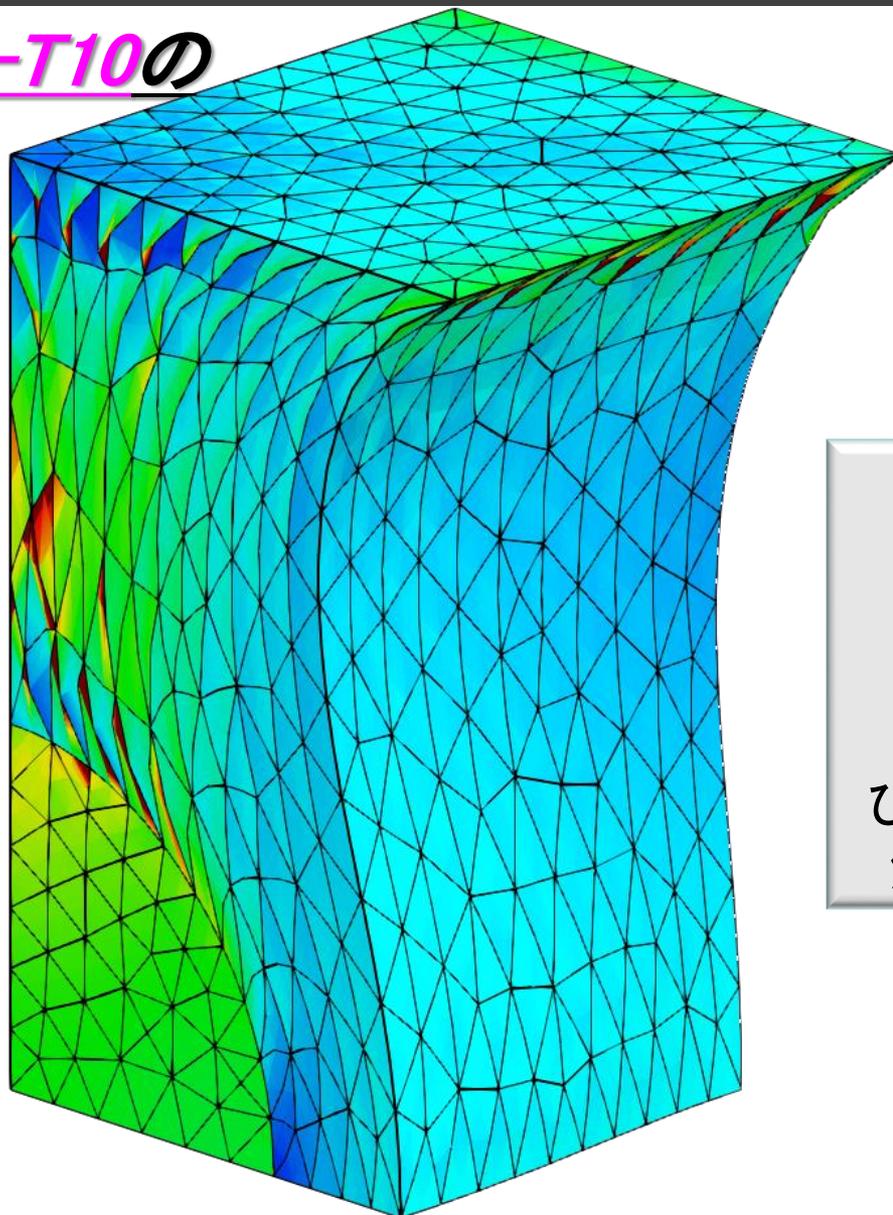


SelectiveCSSE-T10

SelectiveCSSE-T10では少しだけMises応力振動が低減しているが、根本的な改善は見られない...

SelectiveCSSE-T10の

伸び60%時点の Mises応力振動 の様子



要素界面で
Mises応力の値が
著しく不連続
になっている。
⇒ 要素をまたぐ
ひずみ平滑無しでは
解決困難かも...

まとめ

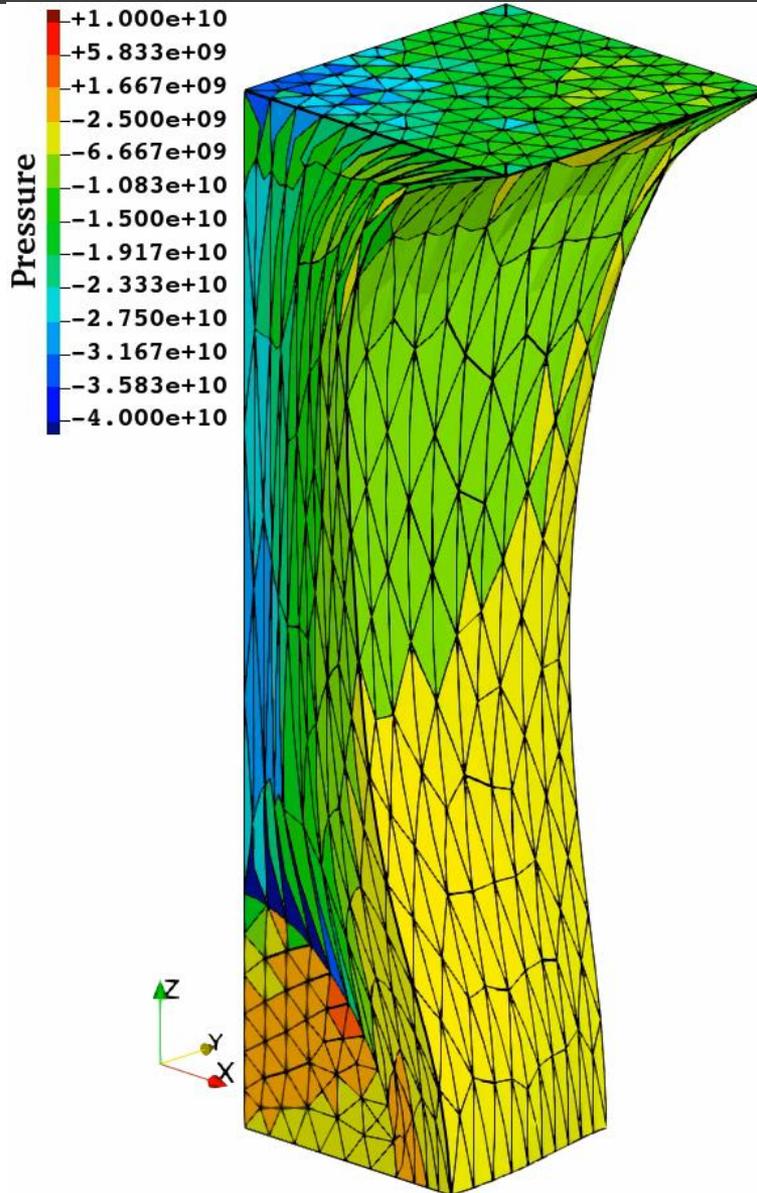
SelectiveCSSE-T10のまとめ

- 我々の従来法であるSelectiveCS-FEM-T10に**ひずみ平滑要素** (Strain Smoothing Element: **SSE**)の考え方を導入した新しい定式化「**SelectiveCSSE-T10**」を開発した.
 - SelectiveCS-FEM-T10の欠点である**偏差応力振動の問題点**が克服されることを期待したが、**全くと言って良いほど改善がみられなかった**.
 - Mises応力振動の様子を見ると、要素界面でMises応力の値が著しく不連続になっていることから、**要素をまたぐひずみ平滑無しでは解決困難**である可能性が高い.
- 体積ロッキングしないSSEを実現するため、今後は別のアプローチでSSEを適用する定式化を模索する予定.

ご清聴ありがとうございました

付録

Selective
CS-FEM-T10
の解析結果
(圧力分布)



伸び約200%
で収束困難.