

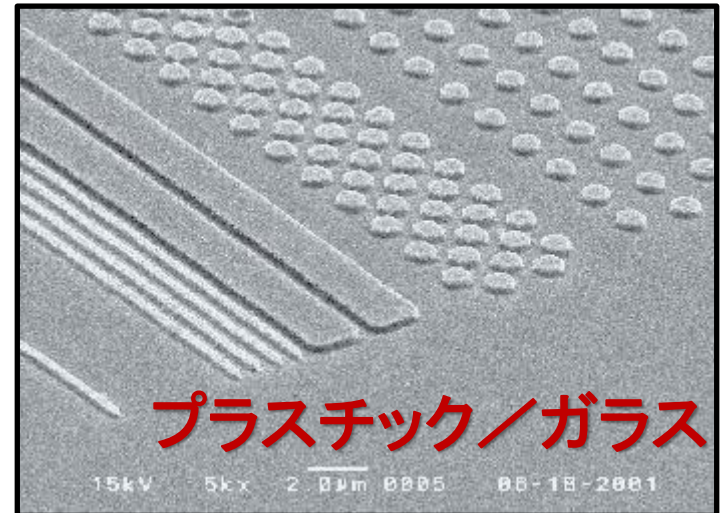
4 節点四面体ひずみ平滑要素(SSE-T4) に基づく微圧縮大変形解析

大西 有希 (東京工業大学)

研究背景

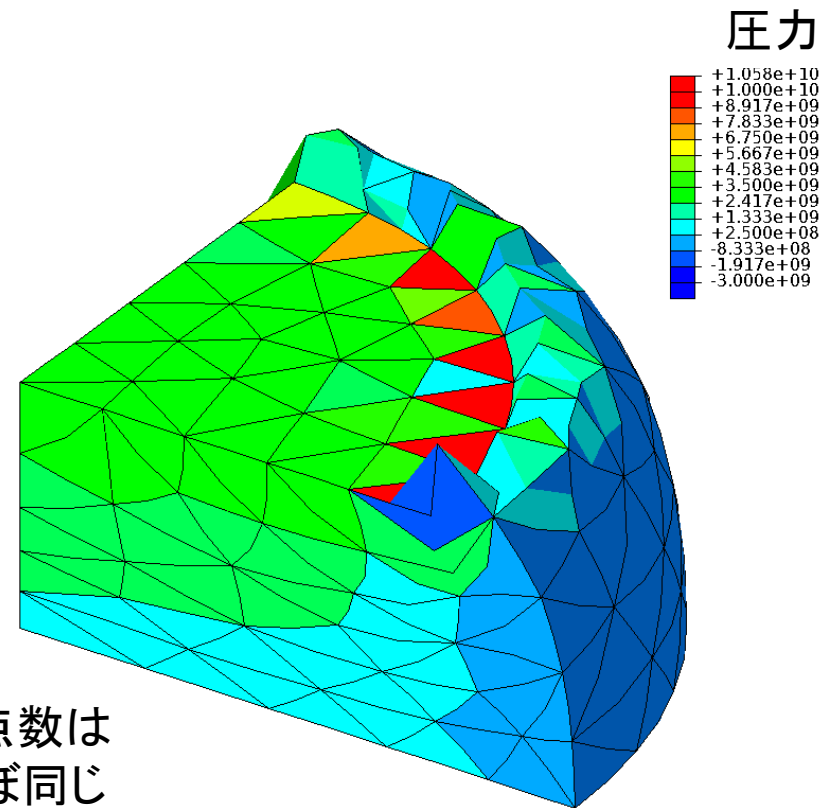
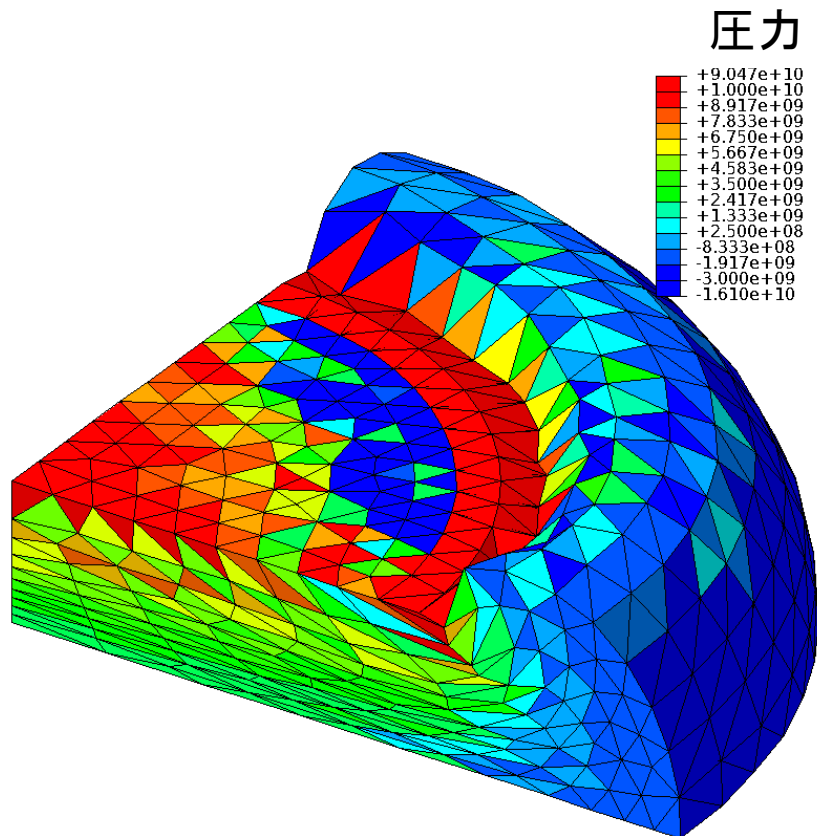
実現したい内容:

- 「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.

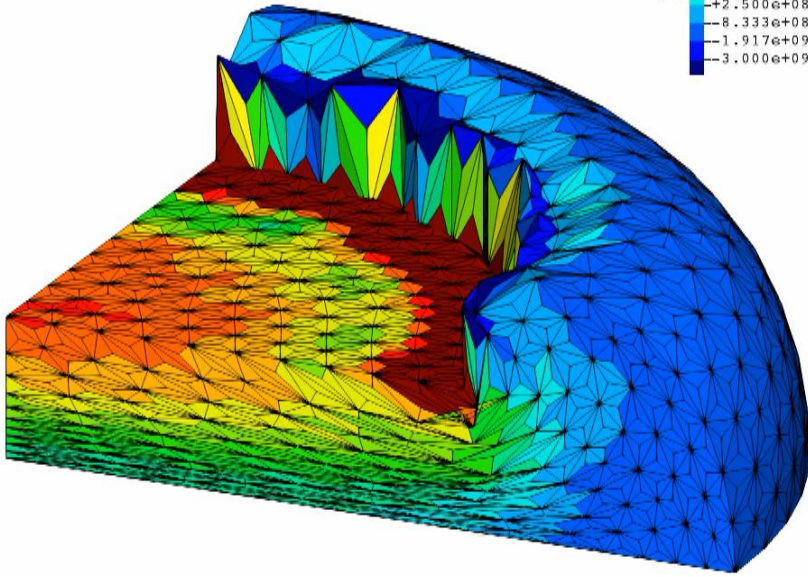
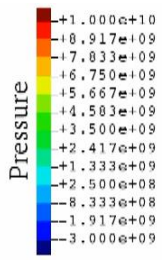
四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)

- ✓ 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.

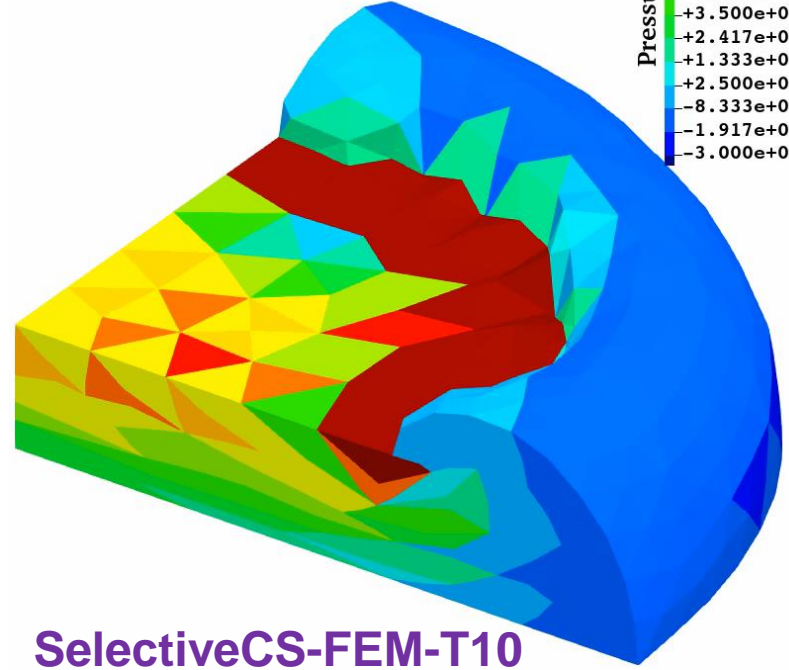
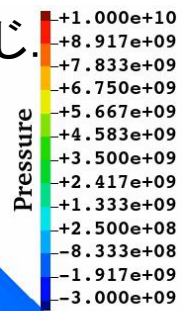
我々の手法 (平滑化有限要素法 : S-FEM)

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.



高速化のアイデアなし

F-barES-FEM-T4

- ✓ せん断・体積ロッキングなし.
- ✓ コーナーロッキングも充分小さい.
- ✓ 圧力振動は充分小さい.
- ✓ 偏差応力の精度も良好.
- ✗ 計算時間が長い. FEMと親和性なし.

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.
- ✗ 偏差応力に振動が現れる.
- ✓ 計算時間が短い. FEMと親和性あり.

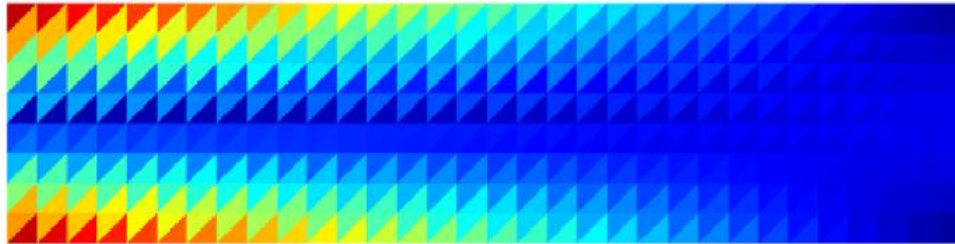
FEMとの親和性を保ったまま今以上の改良は困難

ひずみ平滑要素 (SSE) の登場

片持ち梁の曲げのMises応力分布比較 (3節点三角形メッシュ)

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

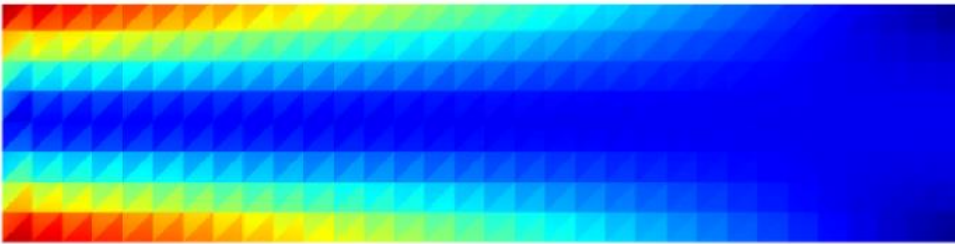
FEM-T3



応力分布が階段状で低精度.
実は, せん断ロックも
起こしている.

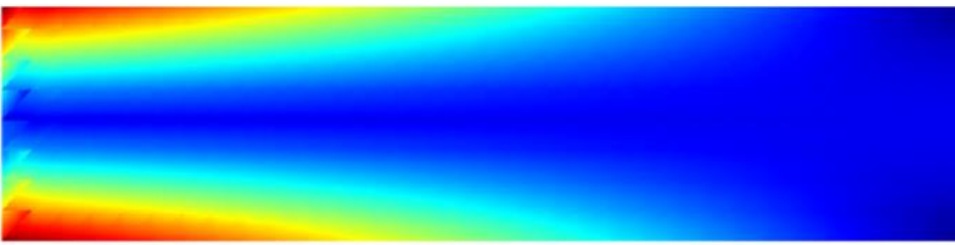
SSE

Strain
Smoothing
Element

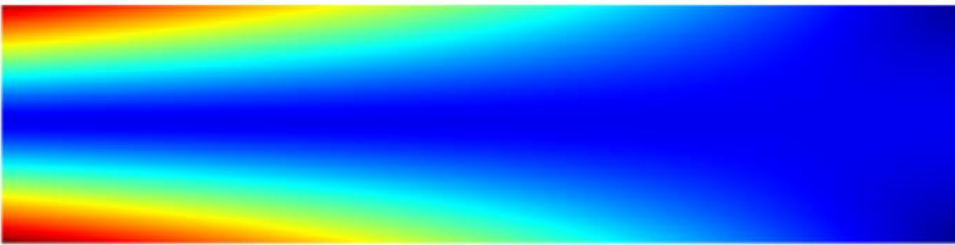


EC-SSE

Edge
Centered
SSE



Analytic



- ひずみ/応力が要素内で線形分布なので高精度.
 - せん断ロックなし.
- ただし,
- FEMとの親和性なし.
 - 体積ロックあり



とりあえずゴム大変形に
拡張して性能を確認しよう!

4節点四面体(T4)メッシュを用いた ひずみ平滑要素(SSE)を ゴム大変形に拡張してみる

発表目次:

- 手法: ES-FEM, SSE, EC-SSE, および提案手法の定式化概要の紹介
- 結果と考察: 解析例の紹介
- まとめ

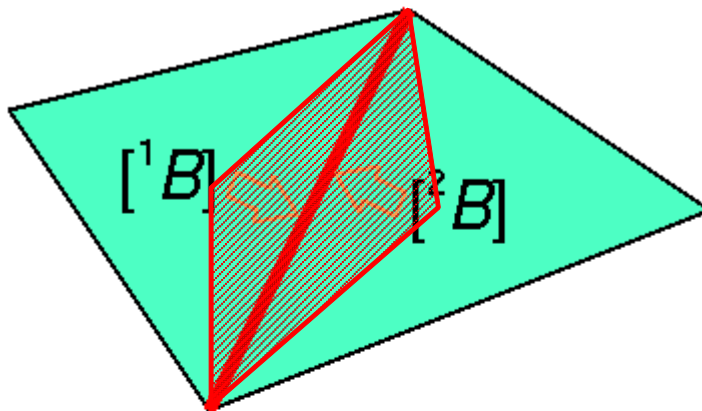
手法

ES-FEM, SSE, EC-SSE, および提案手法の定式化概要の紹介

ES-FEM-T3の定式化概要

- 各セルの $[B]$ を通常のFEMと同様に作る.
- 各セルの $[B]$ 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

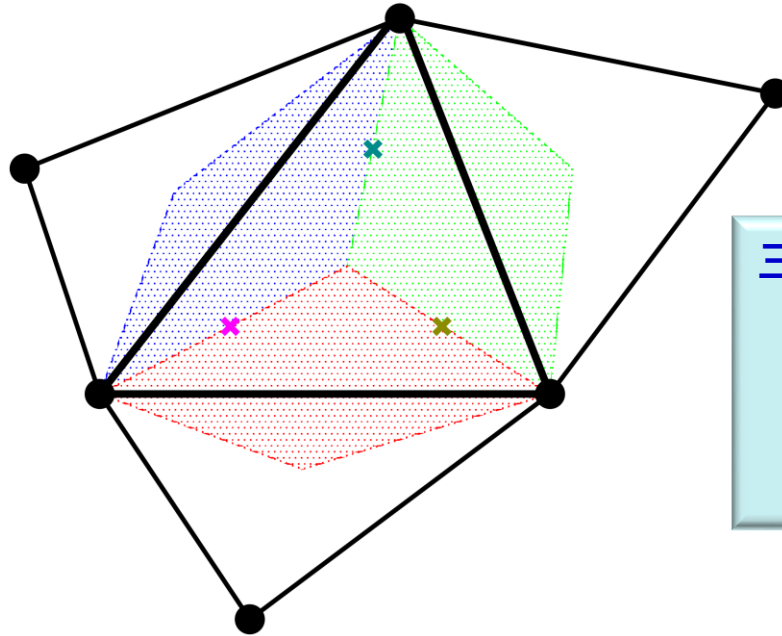
三角形/四面体メッシュで
せん断ロックを
回避できる.

SSE-T3の定式化概要

- ES-FEMと同じ手順で各エッジの $[^{Edge}B]$ を作る.
- $[^{Edge}B]$ は各エッジ平滑化領域内で一定だと考える.
- $[^{Edge}B]$ をセル内の3ガウス点で平均化して $[^{Gaus}B]$ を作る.
- $[^{Gaus}B]$ 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.

ひずみは
各セル内で線形



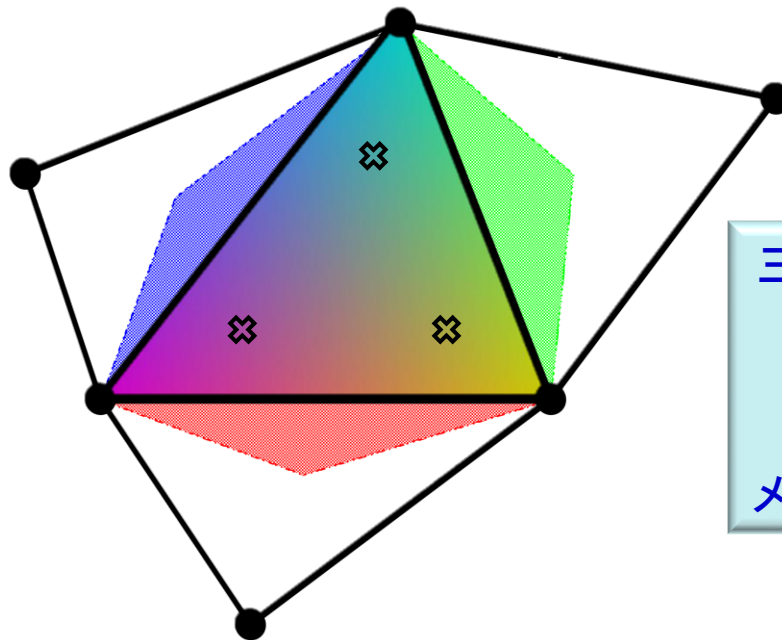
三角形/四面体メッシュで
せん断ロックを
回避できる上に,
ひずみ/応力の
メッシュ収束が速い.

EC-SSE-T3の定式化概要

- ES-FEMと同じ手順で各エッジの $[^{Edge}B]$ を作る.
- $[^{Edge}B]$ は各エッジ中心の物で, 各セル内で線形分布だと考える.
- $[^{Edge}B]$ をセル内の3ガウス点へと外挿して $[^{Gaus}B]$ を作る.
- $[^{Gaus}B]$ 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.

ひずみは
各セル内で線形
かつ
エッジ中心で連続

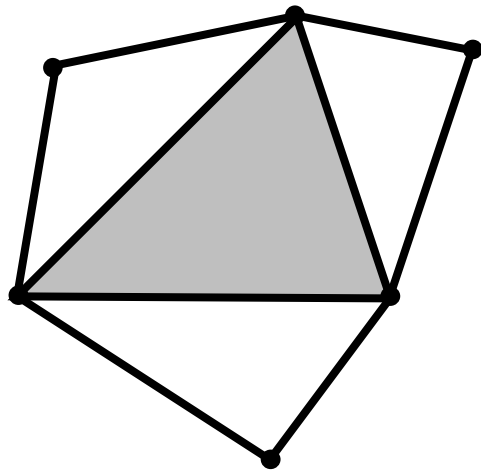


三角形/四面体メッシュで
せん断ロックを
回避できる上に,
ひずみ/応力の
メッシュ収束が更に速い.

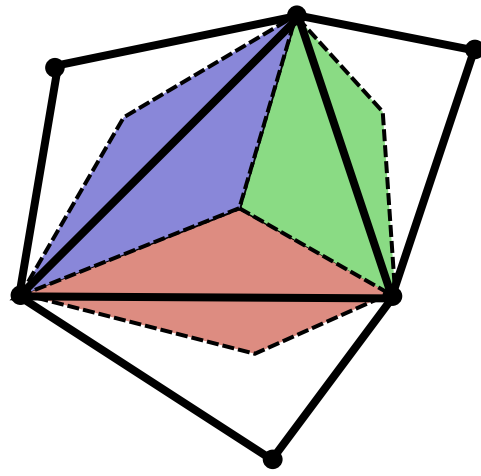
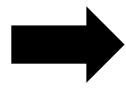
定式化の違い

各定式化のひずみ分布

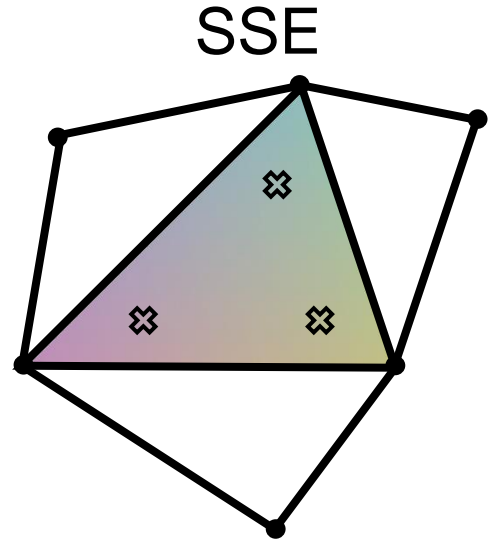
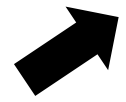
- FEMとES-FEMはひずみが区分一定で、区分が異なる.
- SSEとEC-SSEはひずみが区分線形で、連続性の有無が異なる.



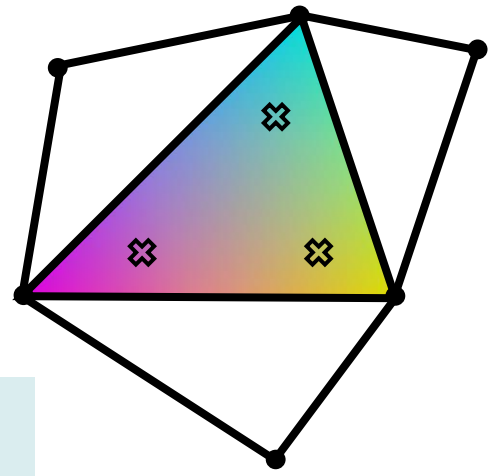
FEM



ES-FEM



SSE



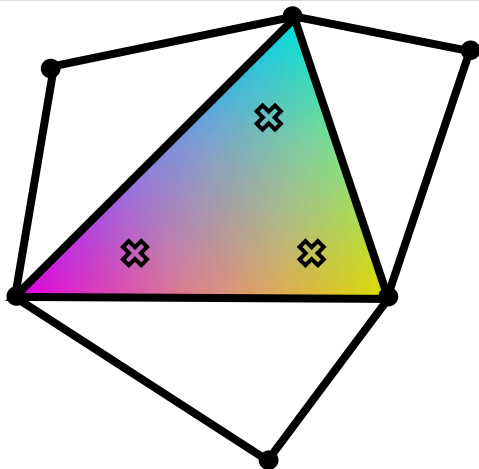
EC-SSE

計算時間を度外視すれば、
EC-SSEはT3/T4メッシュで
高精度なひずみ/応力が期待できる。

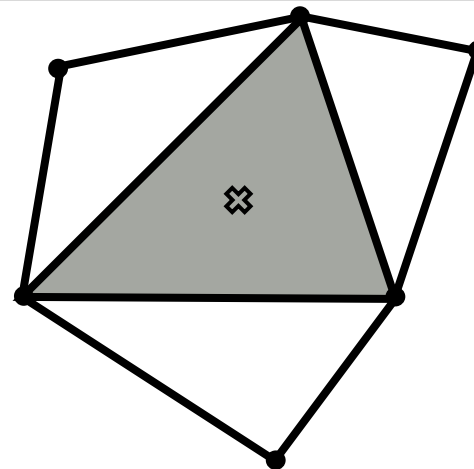
EC-SSE-SRI-T3 (提案手法) の定式化概要

微圧縮材の体積ロッキングに対応するため、EC-SSEにSRIを適用.

(1) EC-SSEによる
各積分点のひずみ計算



(2) セル内平均ひずみの計算



セル内平均

(3) 偏差応力の計算

(4) 静水圧応力の計算

選択的
低減積分
(SRI)

(5) 節点内力の計算

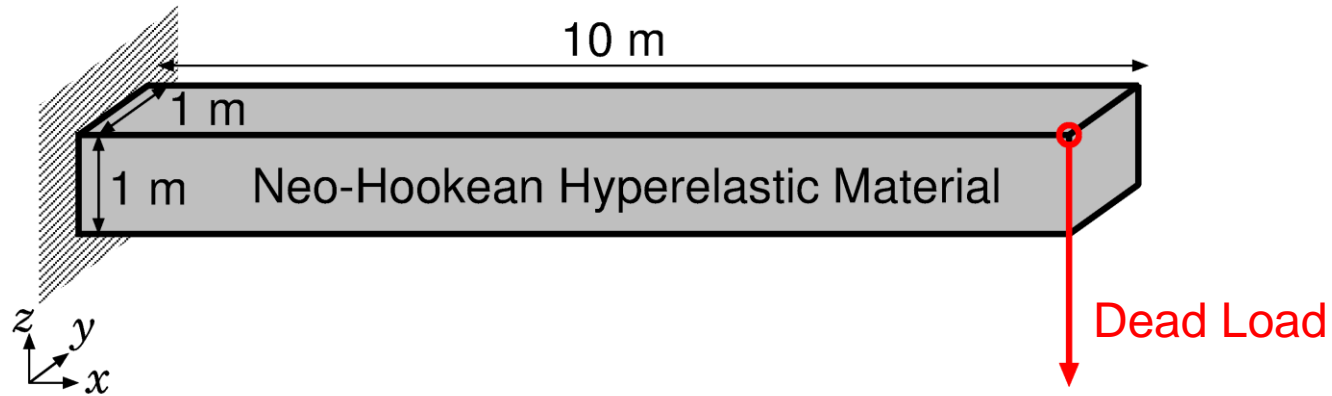
ちなみに、3次元四面体
の場合は、 $[{}^{\text{Face}}B]$ を
セル内の4ガウス点へと
外挿して $[{}^{\text{Gaus}}B]$ を作る.

結果と考察

解析例の紹介

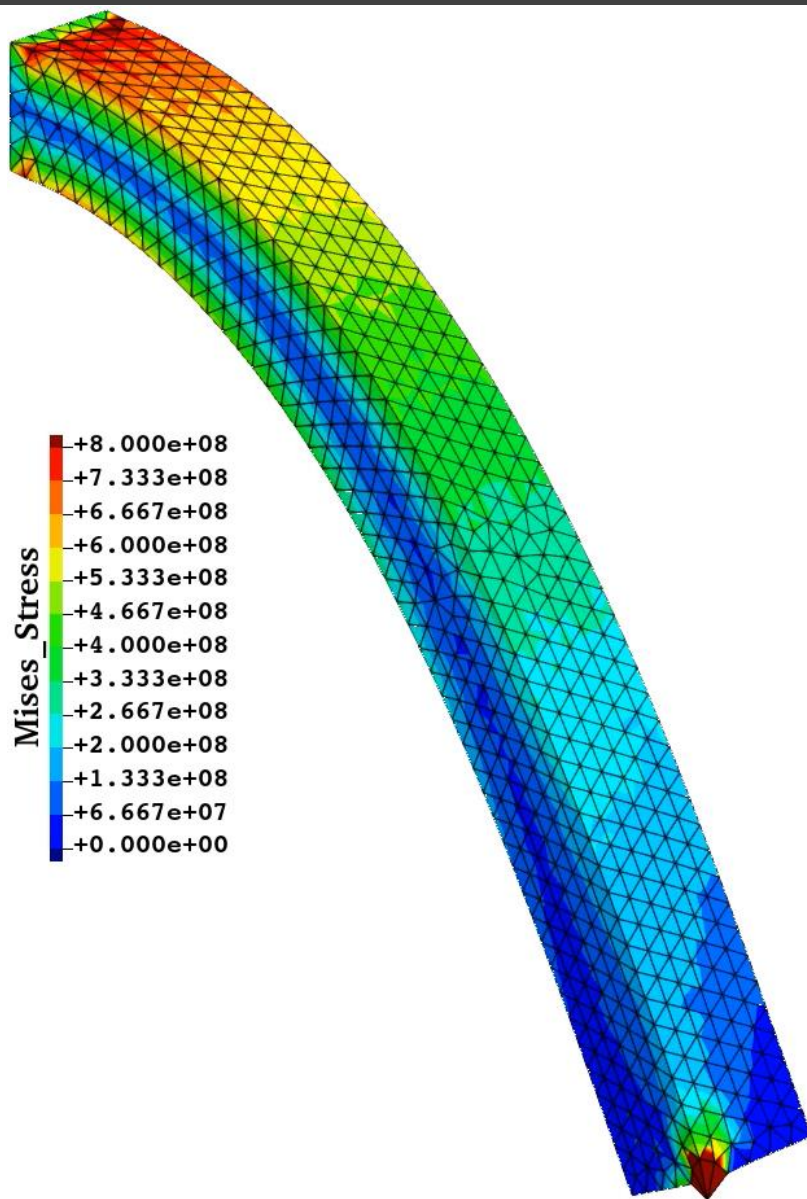
片持ち梁の曲げ解析

概要



- 10 m x 1 m x 1 m の片持ち梁の先端に死荷重.
- Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6$ GPa, $\nu_{ini} = 0.49$)
- 先端の最終たわみが約6.5 mの大たわみ問題.

EC-SSE
-SRI-T4
の解析結果
(Mises応力
分布)



滑らかなMises
応力分布が得
られており、体
積ロッキングも
回避できている。

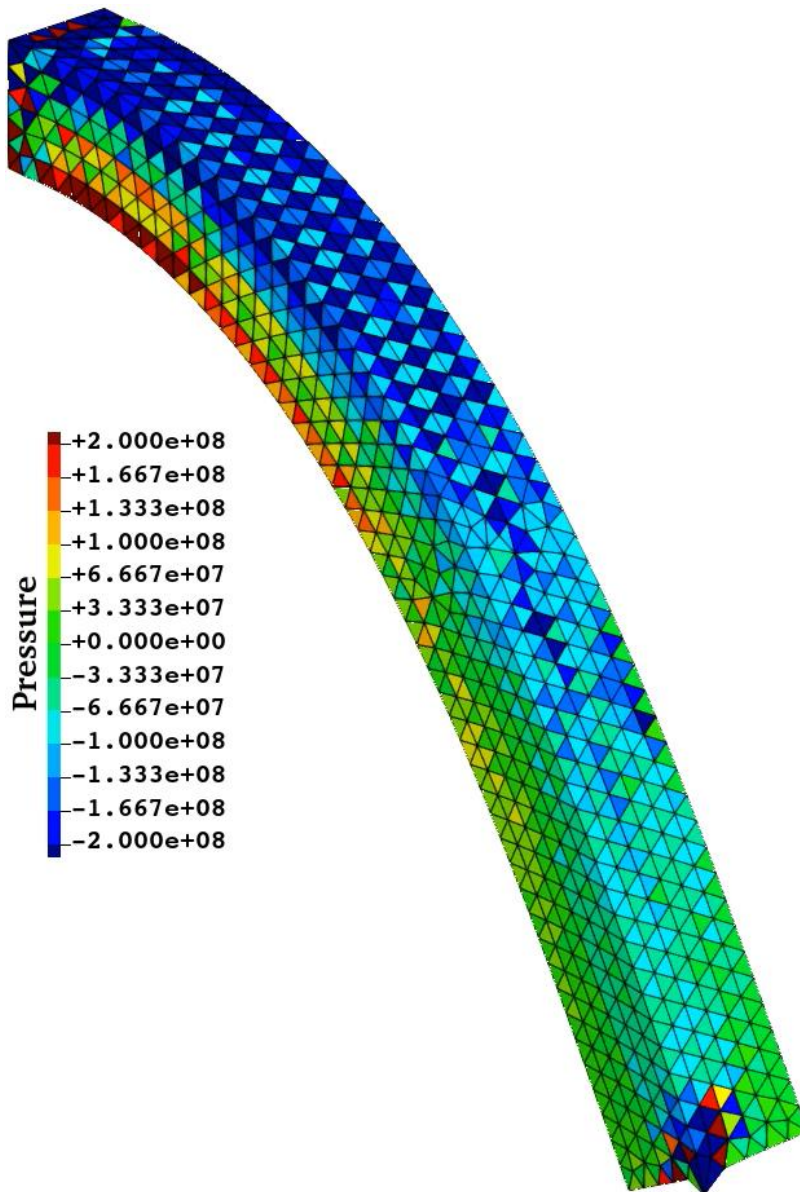
節点変位・反力
にも問題なし
(詳細略)

EC-SSE

-SRI-T4

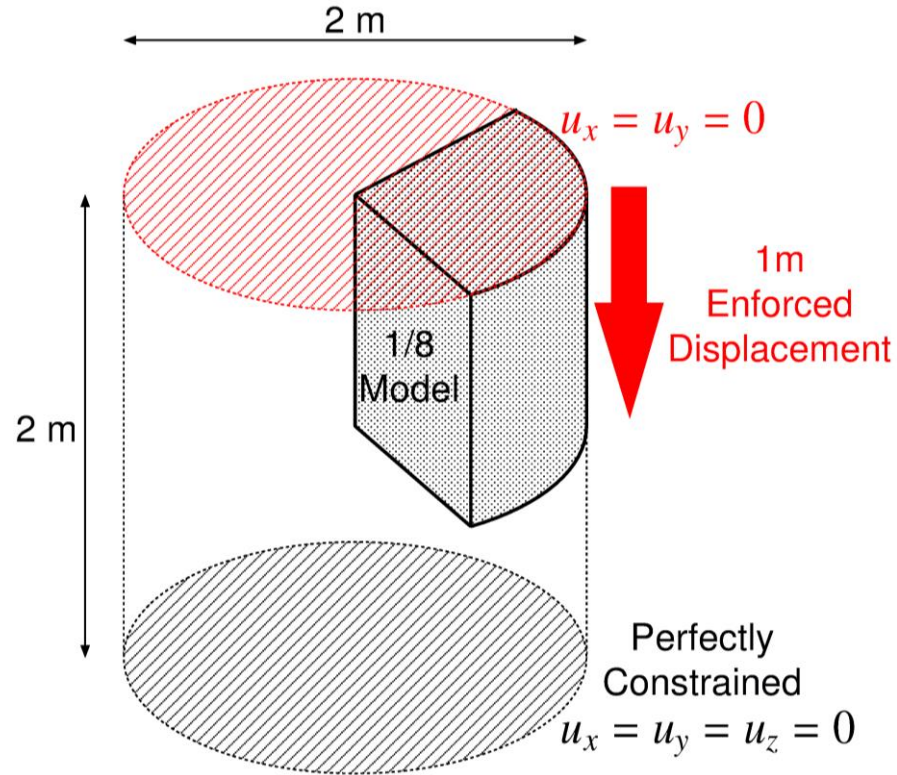
の解析結果

(圧力分布)



案の定，圧力
チェッカーボー
ディングが起き
てしまっている。

概要



- 上面を面内拘束し軸方向に下向き強制変位.
- Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = 0.49$)

円柱の押込解析

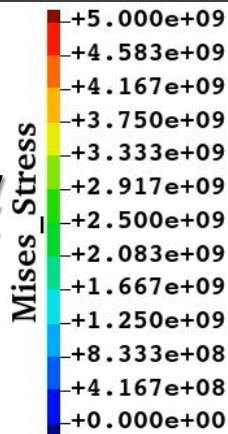
EC-SSE

-SRI-T4

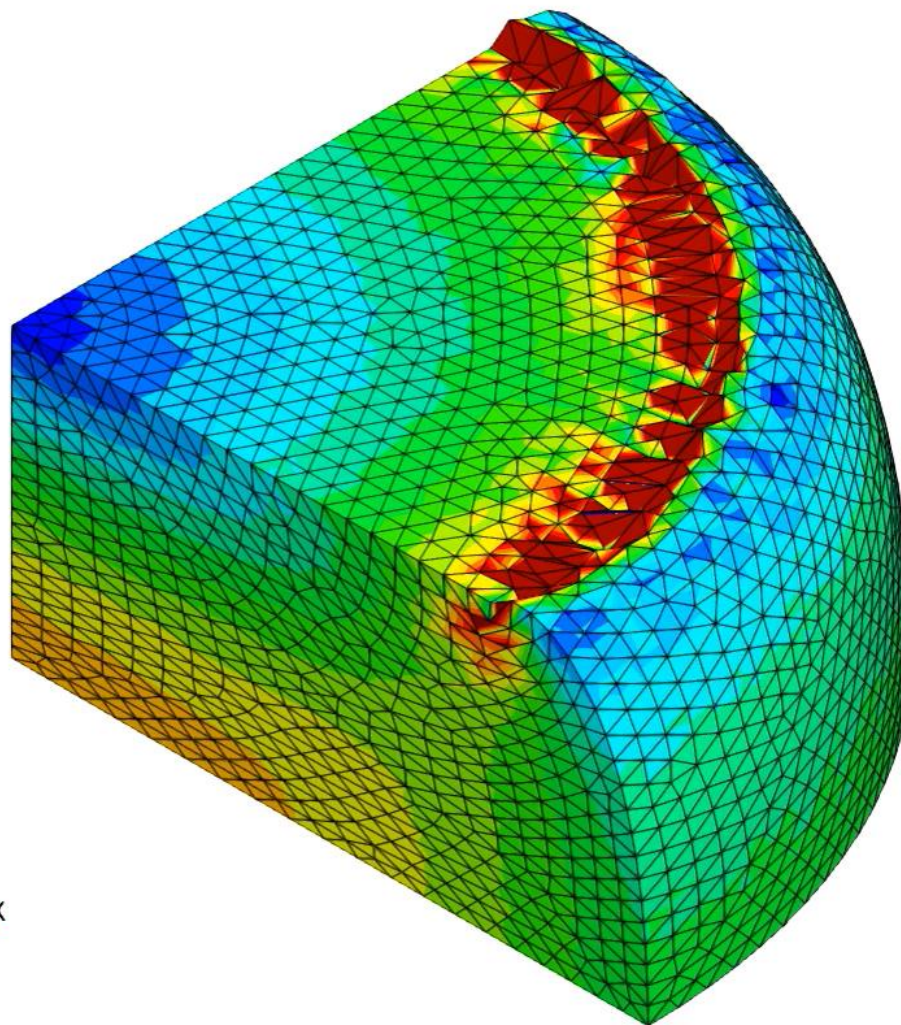
の解析結果

(Mises応力

分布)



約43%圧縮
で収束困難

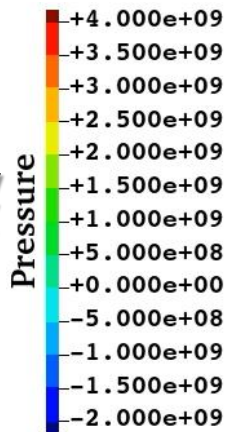


応力特異性を持つリム周辺を除き、Mises 応力分布に問題はなく、実用上十分な大変形ロバスト性がある。

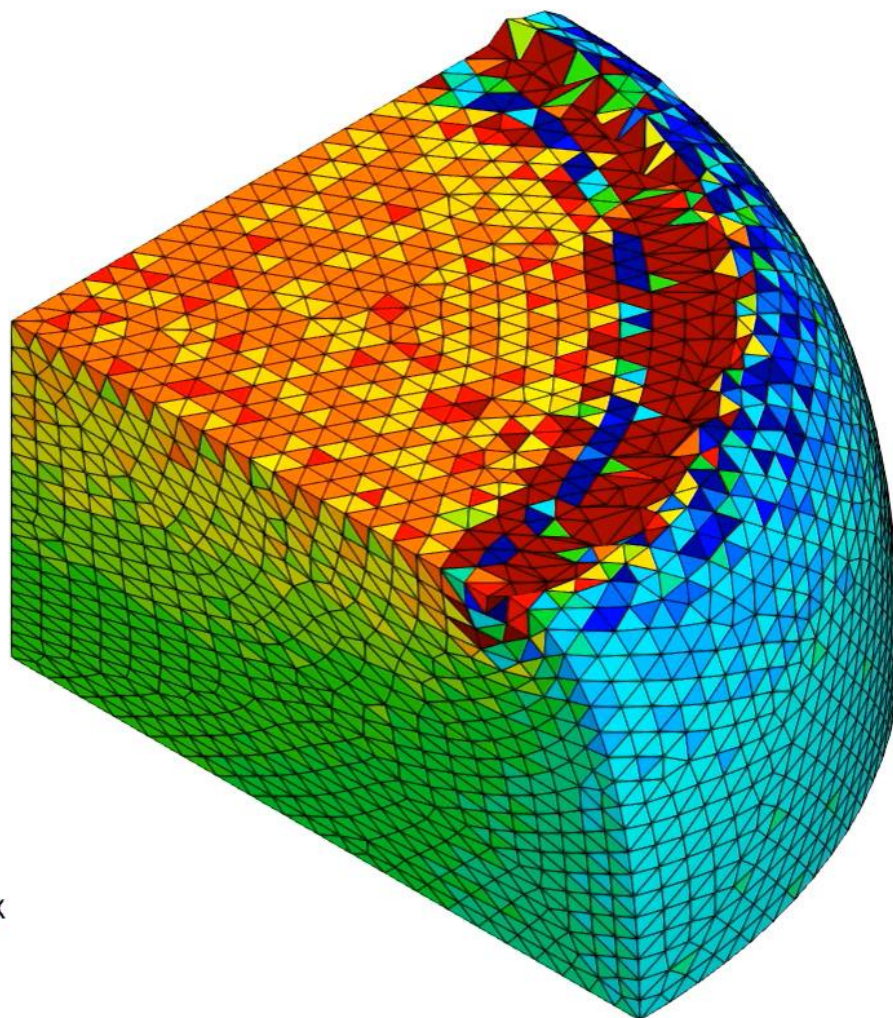
EC-SSE

-SRI-T4

の解析結果
(圧力分布)

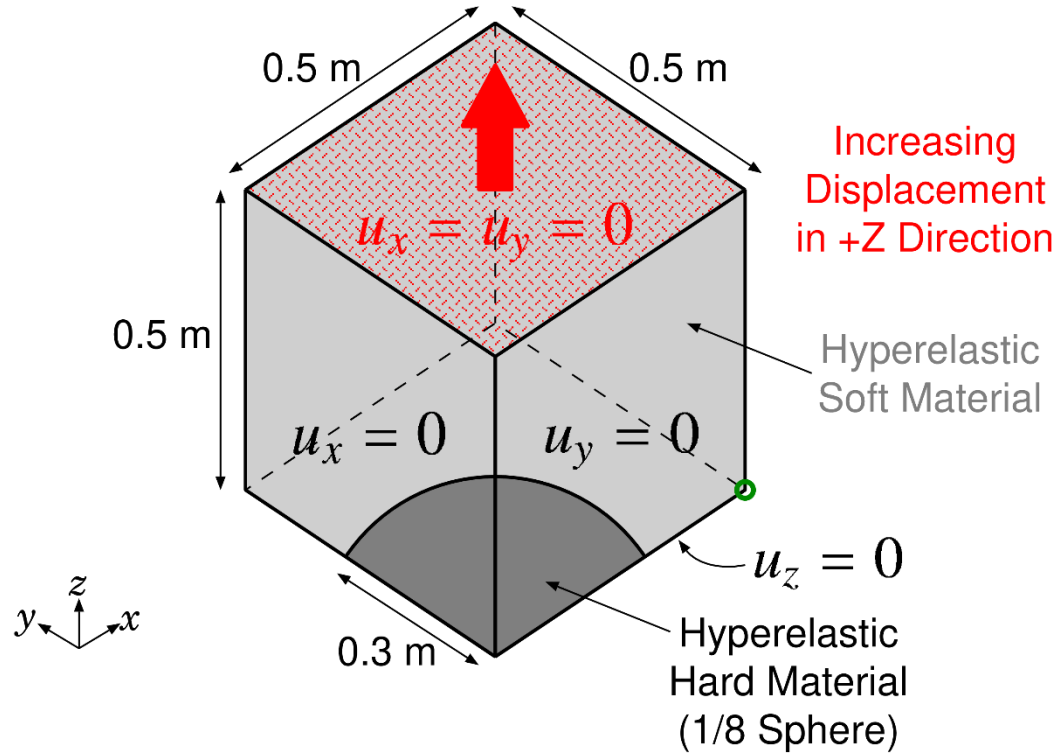


約43%圧縮
で収束困難



案の定、圧力
チェッカーボー
ディングが起
きてしまってい
る。

概要



■ 1/8モデル

■ ファイラー: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 260 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = 0.3$)

■ ゴム: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = 0.49$)

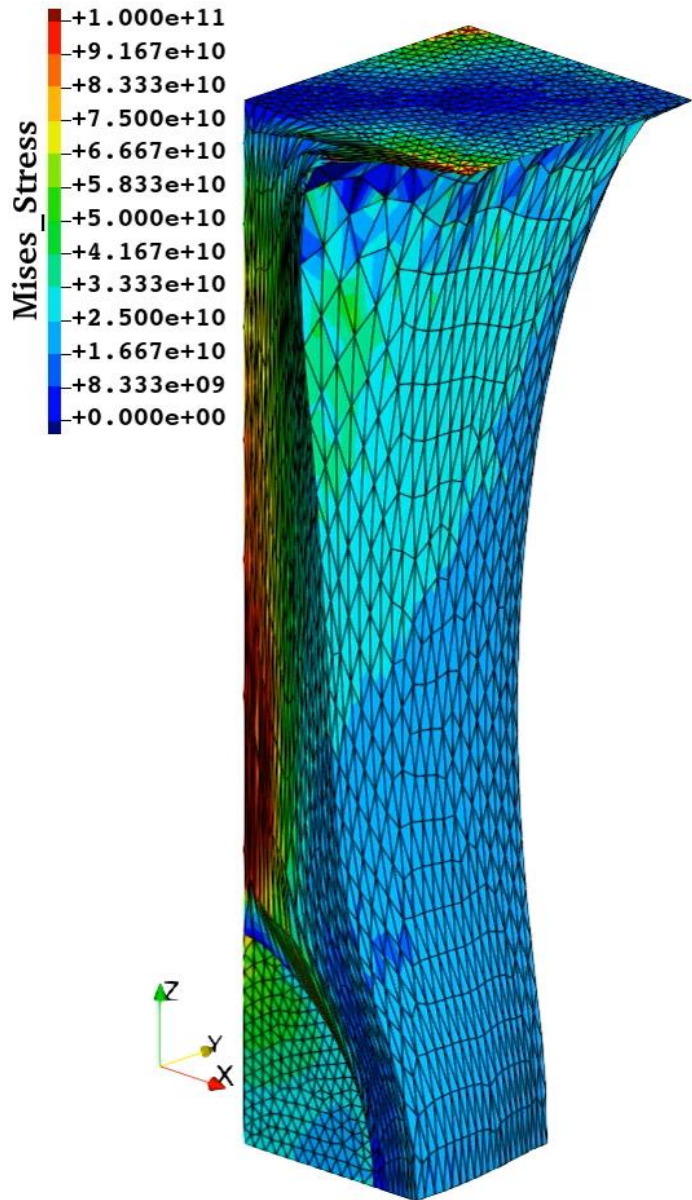
EC-SSE

-SRI-T4

の解析結果

(Mises応力

分布)



約256%伸張
で収束困難

Mises応力分布に
問題はなく、実用
上十分な大変形
ロバスト性がある。

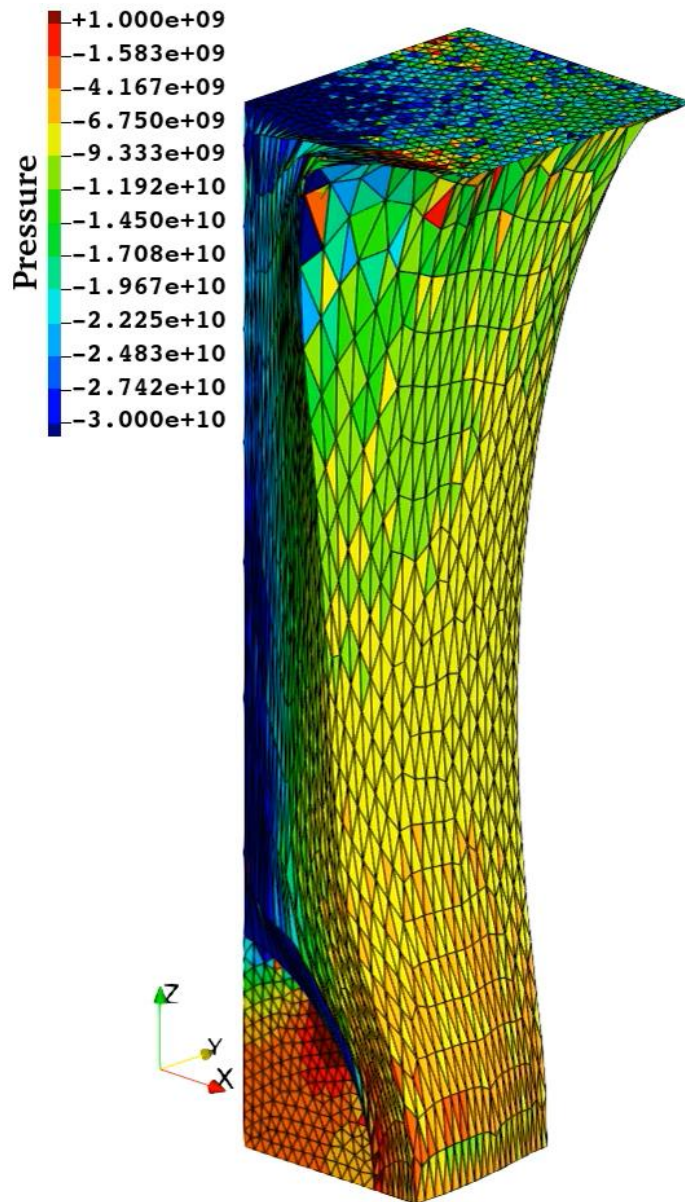
EC-SSE

-SRI-T4

の解析結果

(圧力分布)

約256%伸張
で収束困難



案の定、ゴム部にのみ圧力
チェッカーボーディングが起き
てしまっている。

まとめ

EC-SSE-SRI-T4のまとめ

- 2022年に提唱されたEC-SSE-T4の考え方を発展させ、選択的低減積分(SRI)を用いてゴム大変形に対応させた**EC-SSE-SRI-T4**を提案した.
- 複数回のひずみ平滑化により、**大変形ロバスト性は実用上充分**あり、疑似低エネルギーも無いことを確認した.
- 各フェイス中心でひずみが空間的に連続となることから、**滑らかなMises応力**が得られることを確認した.
- SRIにより**体積ロッキングは回避**されたが、案の定、**圧力チェックカーボディングは発生**した.
- EC-SSE-T4は剛性マトリックスのバンド幅がFEM-T4の約7倍となり、**計算時間が遅い**のも欠点である.
- 現在はT10のセルをまたぐSRIに取り組んでいる. 乞うご期待.

ご清聴ありがとうございました

付録

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.

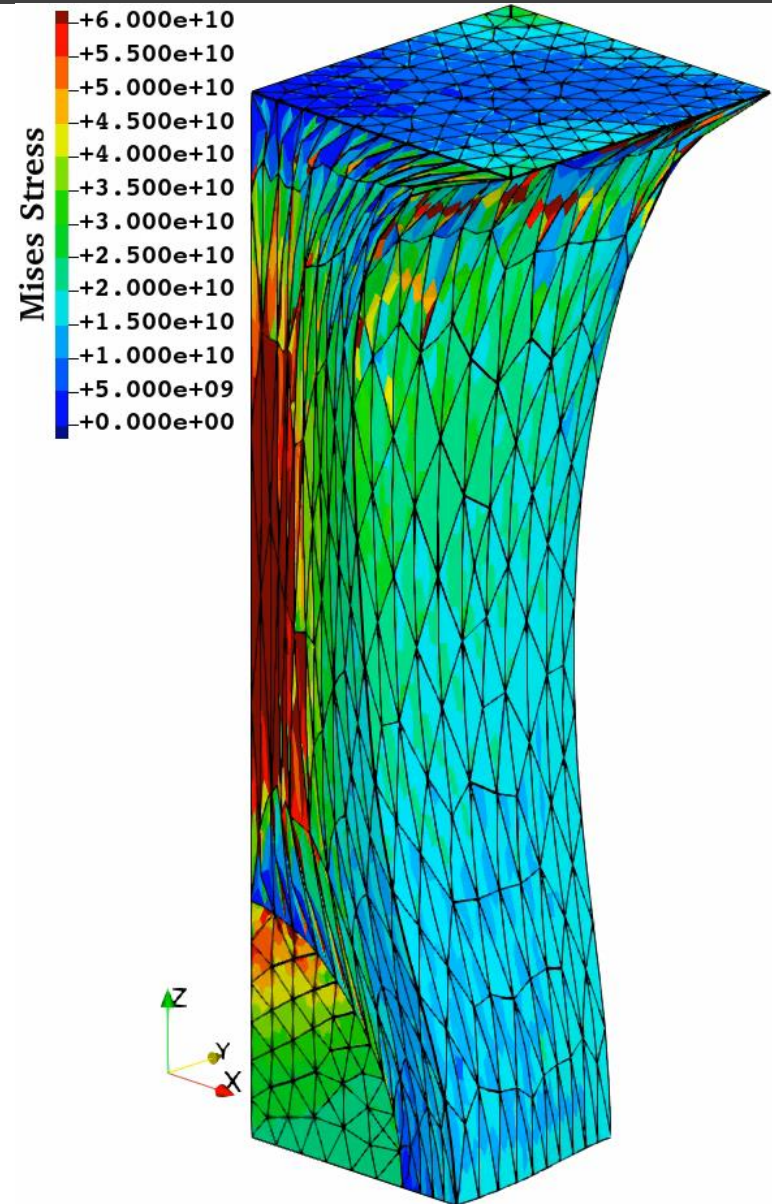
例) フィラー充填ゴムの引張解析

- フィラー(1/8球体)は鉄製
- ゴムは初期ポアソン比0.49

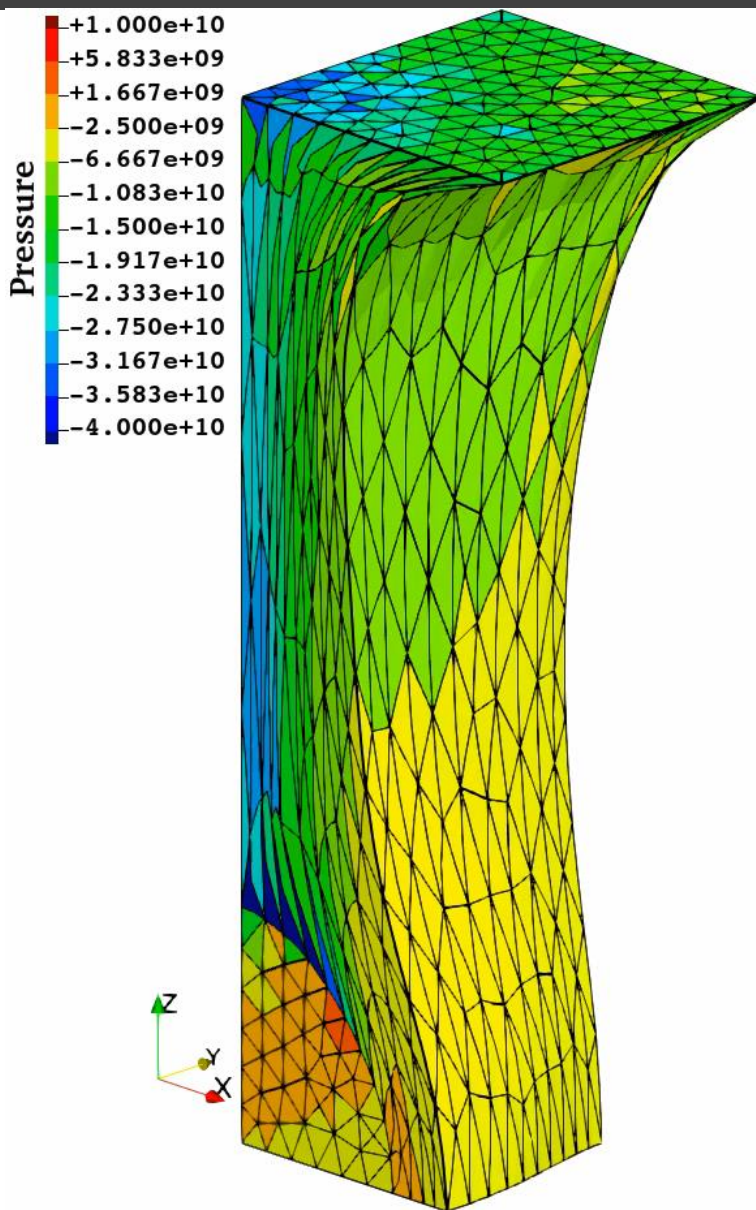
- 伸び約200%で収束困難.
- 大変形ロバスト性および変位・荷重・圧力の精度は優秀.
- 偏差応力・偏差ひずみ成分の精度が課題.

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？



Selective
CS-FEM-T10
の解析結果
(圧力分布)



伸び約200%
で収束困難.