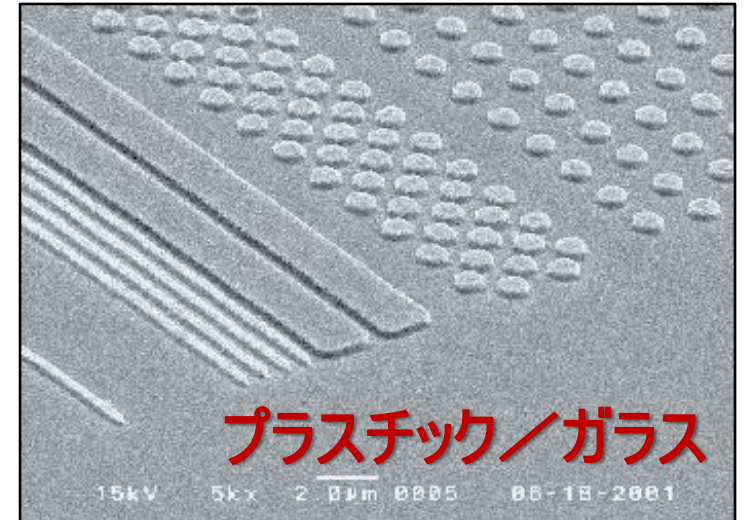


10節点四面体パッチを用いた 平滑化有限要素法による微圧縮大変形解析

大西 有希（東京工業大学）

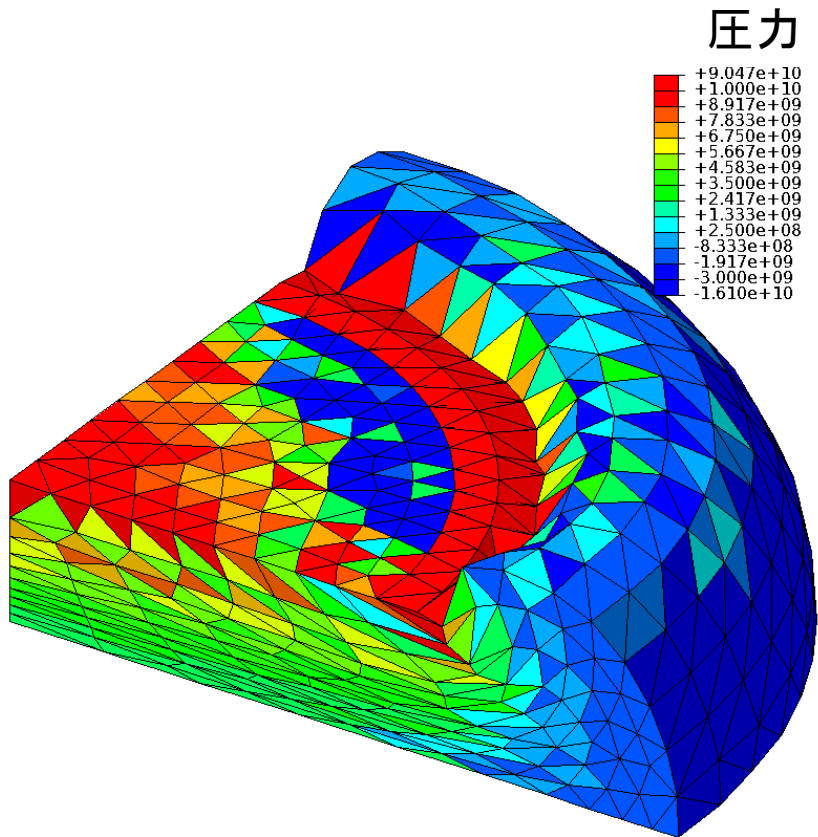
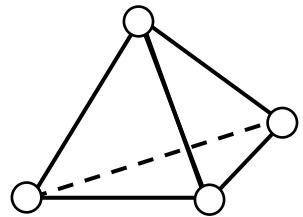
実現したい内容

- 「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。

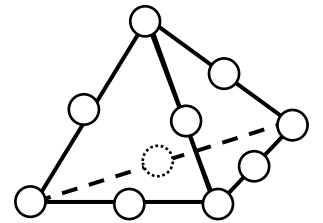
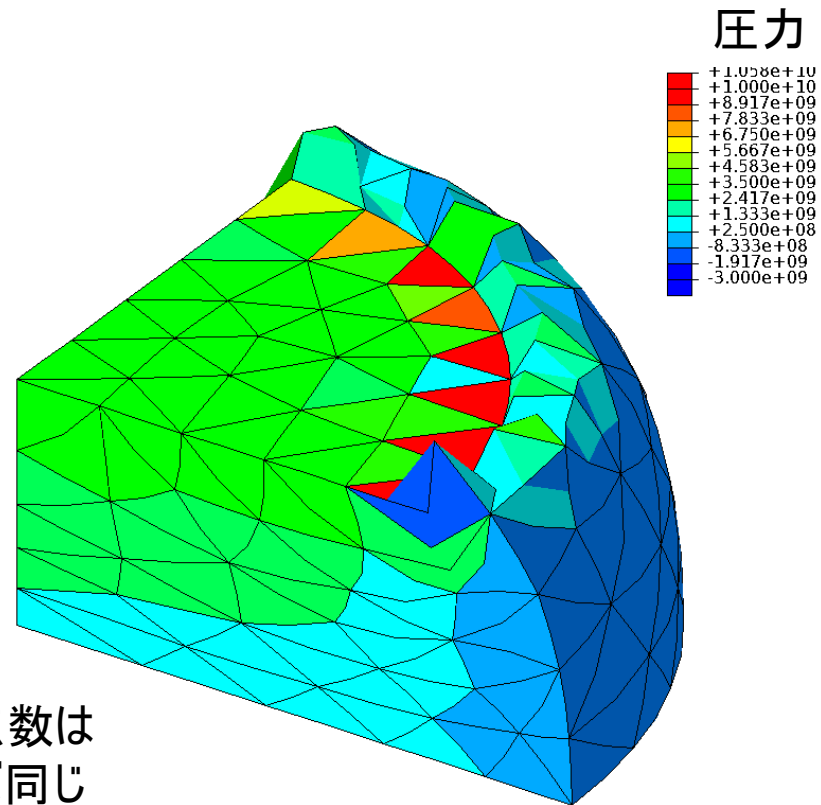


既存手法の問題点 (ABAQUSの要素)

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.

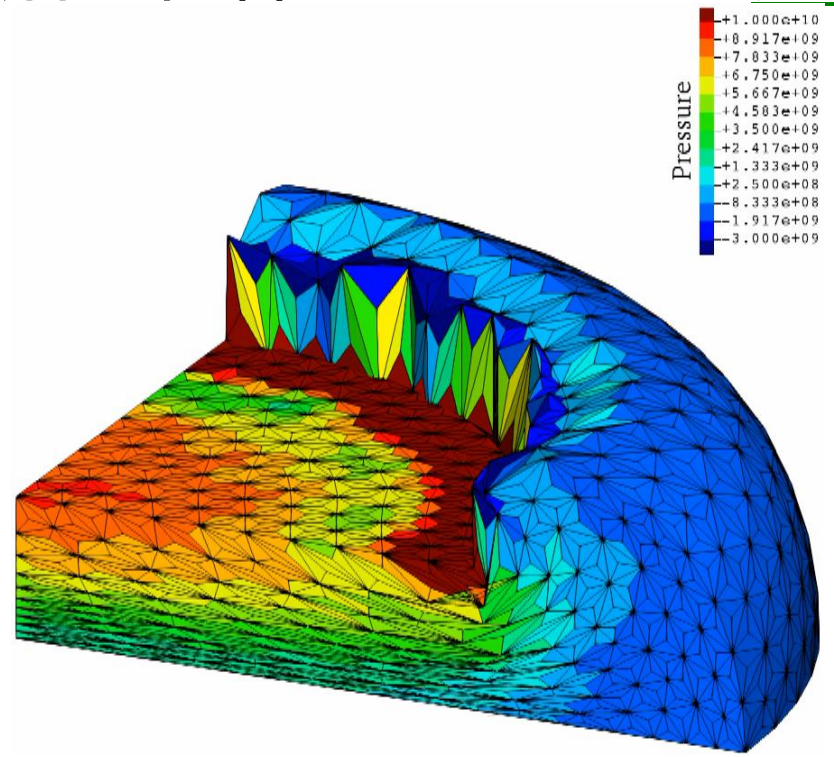
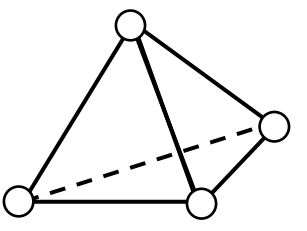
四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)

- ✓ 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, $\nu_{ini} = 0.49$

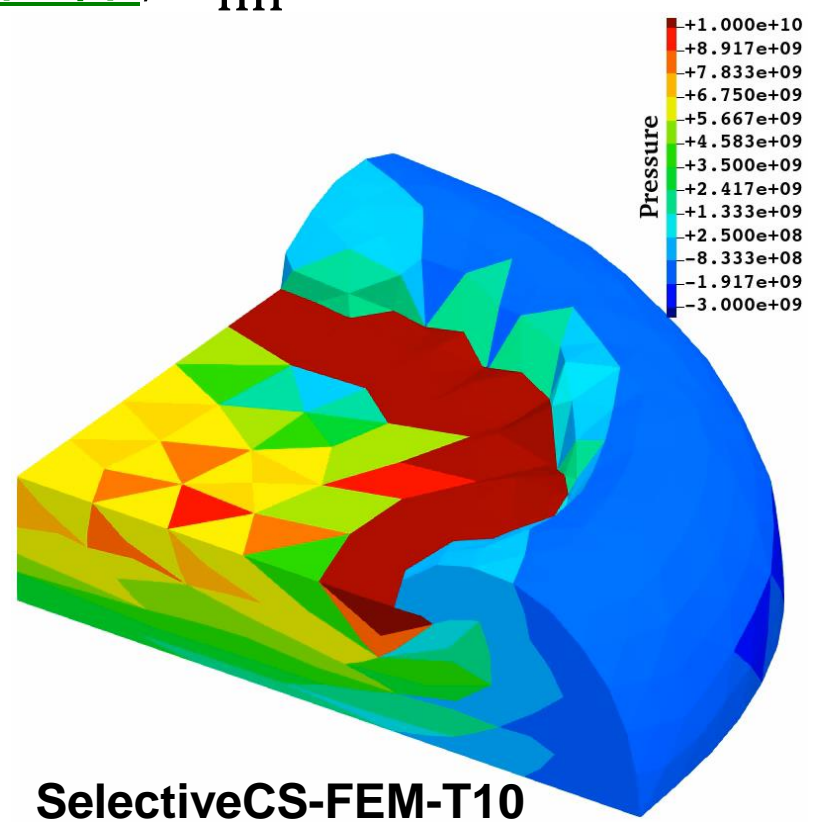
メッシュは先程のC3D4Hと同じ.



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.

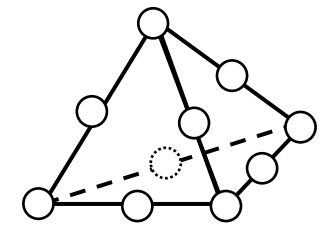
FEM-T4の10倍超の計算時間が掛かるが、高速化のアイデアが無い.



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.

メッシュは先程のC3D10MHと同じ.



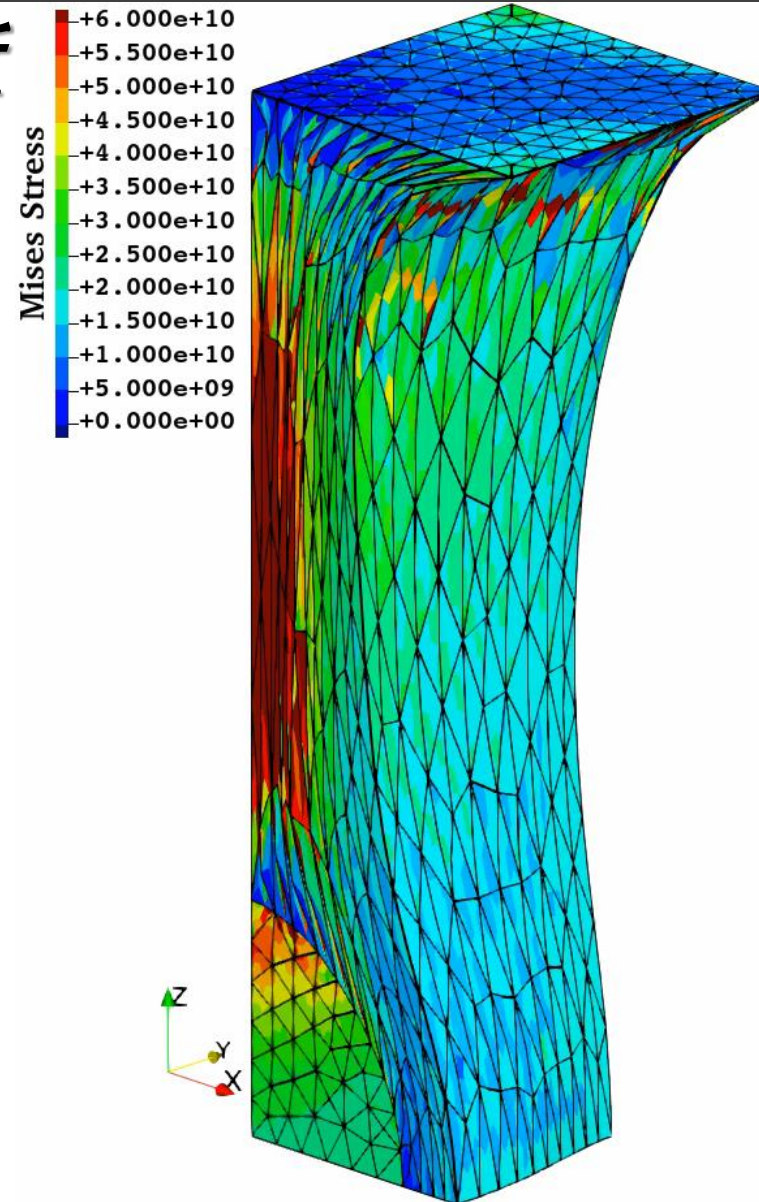
T4とT10
どちらにすべきか
悩み中で、
本発表はT10.

FEMとの親和性を保ったまま今以上の改良は困難.

SelectiveCS-FEM-T10の問題点（偏差応力振動）の実例

ファイラー充填ゴムの引張解析

- ファイラー(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.



- 最新のS-FEM定式化であるEC-SSEを含む様々な定式化をCS-FEM-T10で試したが、解決出来なかった…
- CS-FEMは諦め、セルをまたぐひずみ平滑化を解禁することにした.

F-barパッチ法とは？

- 主として定ひずみ要素のメッシュを数個の重ならないグループ(パッチ)へとクラスタリングし, パッチ単位で体積ひずみを評価する方法.

寺田賢二郎 監訳
「非線形有限要素法」
15.1.9章より抜粋

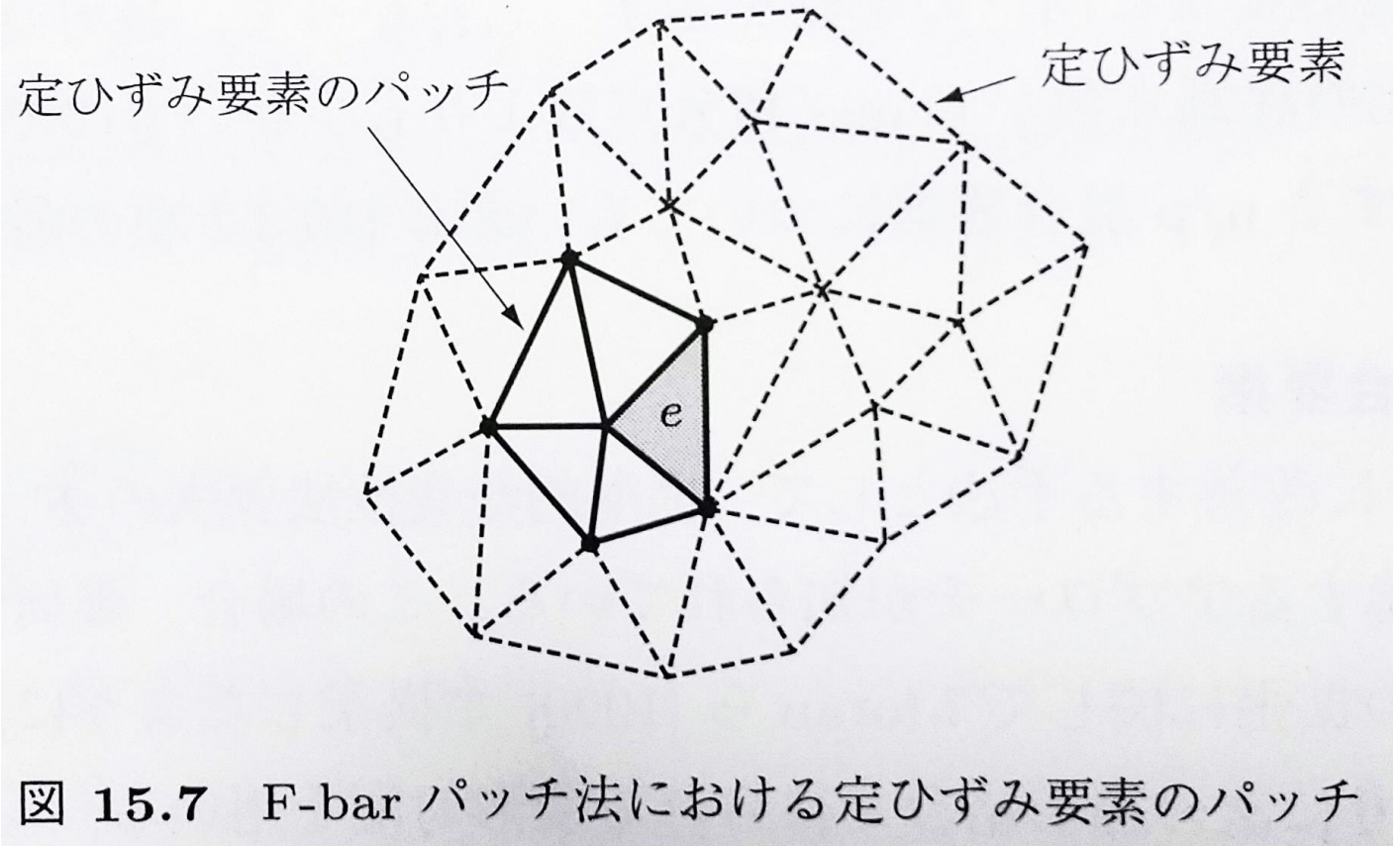
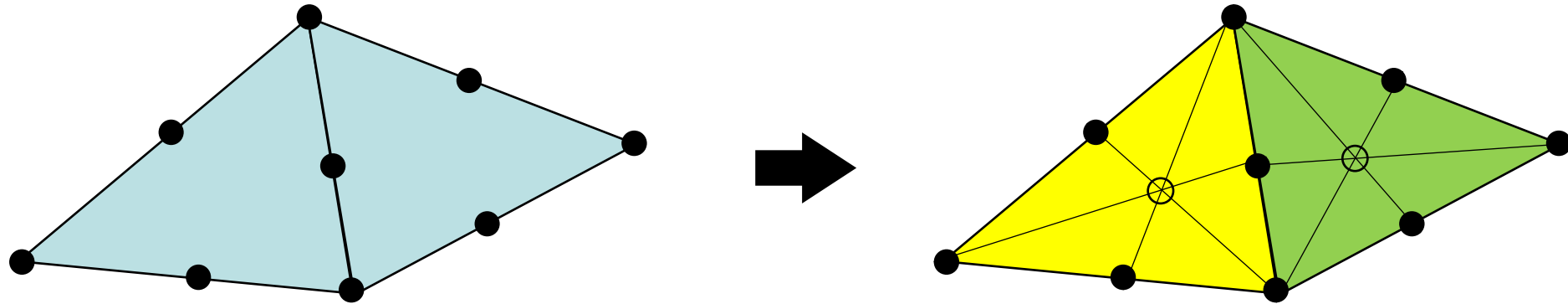


図 15.7 F-bar パッチ法における定ひずみ要素のパッチ

- 体積成分の評価点数を偏差成分のそれより少なくし, 体積ロッキングを回避できる. 加えて, 綺麗なパッチを作れたら圧力チェッカーボーディングも防げる.
- F-bar法だけでなく, 選択的低減積分(SRI)でも同様のパッチ法が使える.

本研究の着眼点

- ① 2次要素を1次要素に再分割したメッシュなら、元の2次要素がSRIパッチ法の綺麗なパッチになり得る。



→ 体積ロッキングと圧力チェッカーボーディングを回避できそう。

- ② 再分割したメッシュに対し、セルをまたぐ平滑化(ES-FEM)を施す。
→ せん断ロッキングはもちろん、偏差応力振動も回避できそう。

10節点四面体をパッチとみなしたSRIパッチ法と再分割された4節点四面体のES-FEMを組み合わせた新たなS-FEM定式化(ES-FEM-T10-SRI)をゴム大変形で試してみる

発表目次

- 手法: ES-FEM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

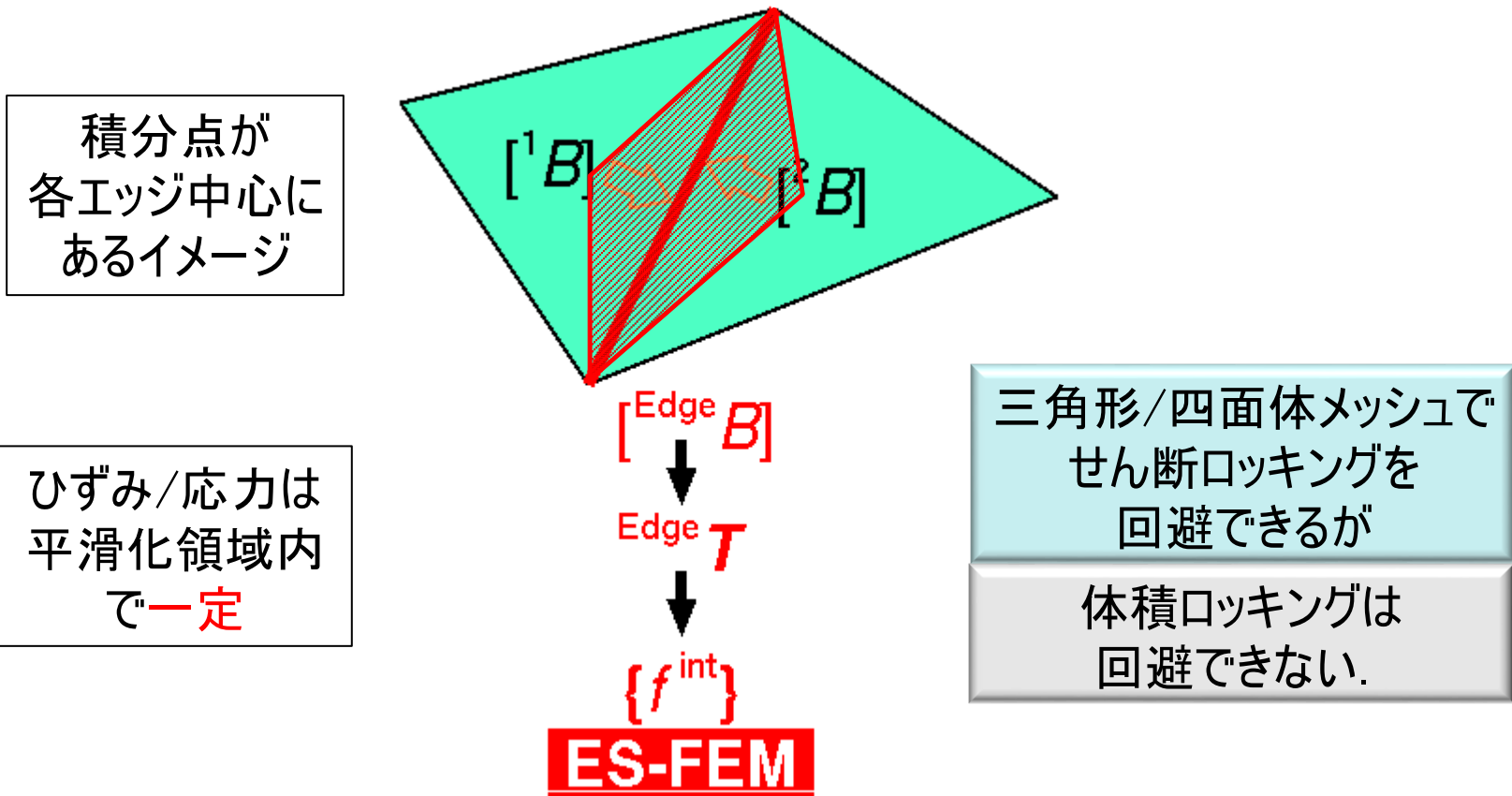
手法

ES-FEMおよび提案手法の定式化概要の紹介

ES-FEMの定式化概要

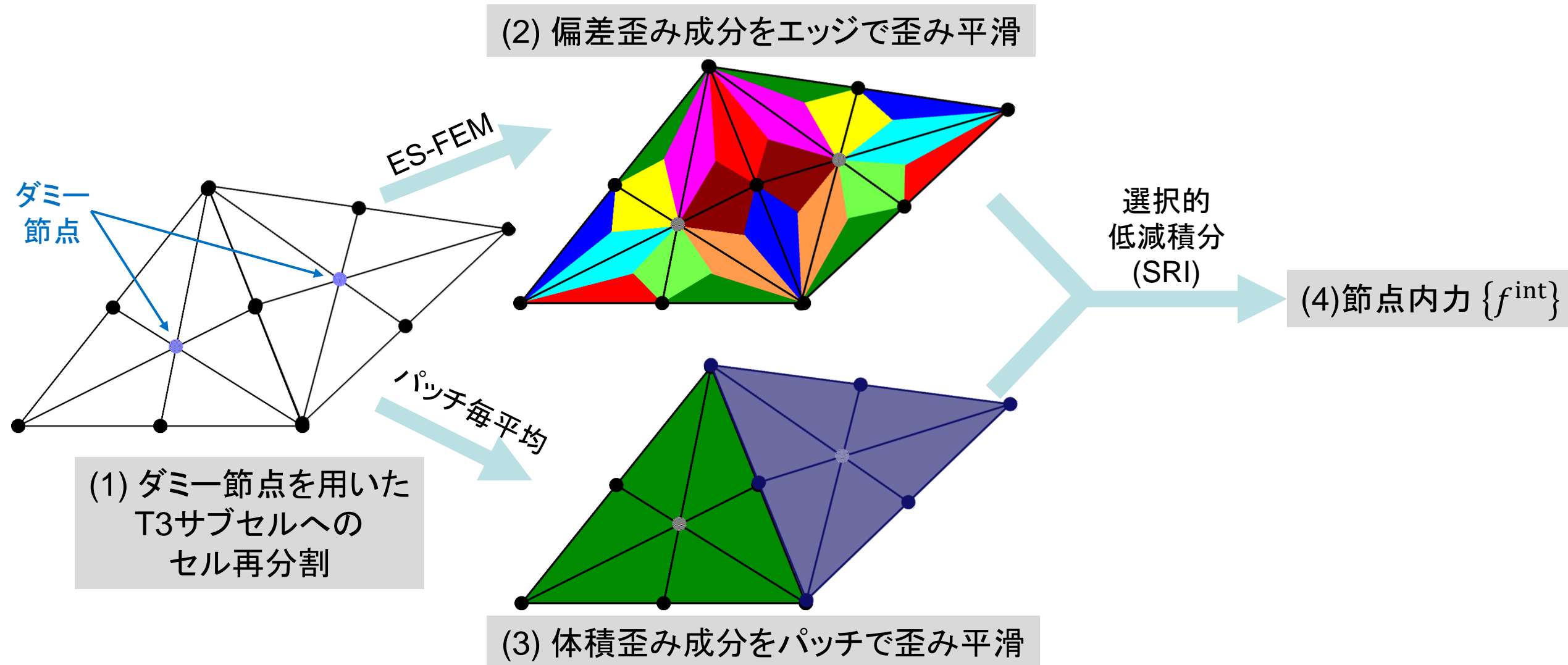
- 各セルの $[B]$ を通常のFEMと同様に作る.
- 各セルの $[B]$ を周囲の**エッジ**に要素体積を重みとして配り,
エッジで平均化して $[{}^{\text{Edge}}B]$ を作る.
- **エッジ**の平滑化領域の量として歪み・応力・節点内力を計算する.

簡単のため, 2次元の
3節点三角形メッシュ
の場合を例示する.



提案手法(ES-FEM-T10-SRI)の定式化概要

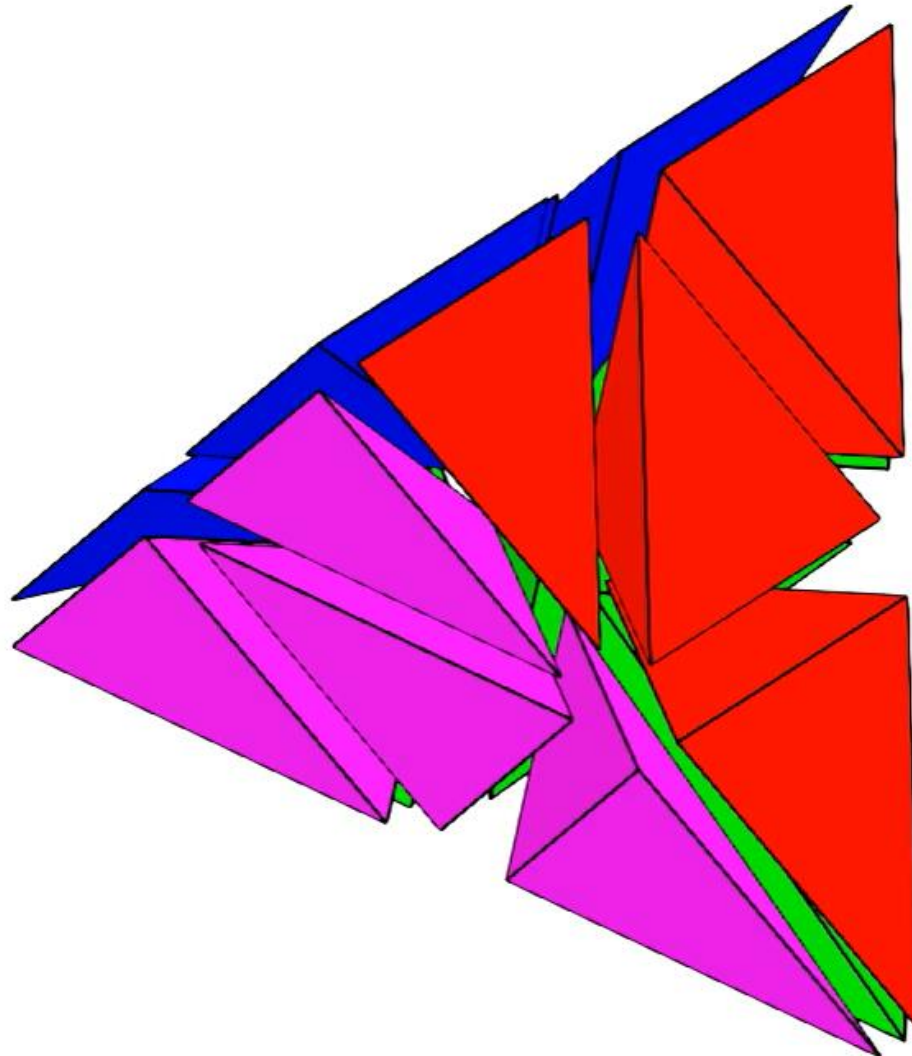
2次元(6節点三角形セルが2個)の場合の定式化概要



提案手法(ES-FEM-T10-SRI)の定式化概要

3次元の場合のセル再分割 (30%縮小表示)

各セルに
16個のT4サブセルと
34本のエッジ



内24本の表面エッジでは
ES-FEMにより
隣接するセルと平滑化

提案手法(ES-FEM-T10-SRI)の計算時間

- 計算時間の大部分は剛性方程式を解くことに費やされるため、剛性マトリックスのサイズが計算時間に直結する。
- ES-FEM-T10-SRIは純粹な変位形の定式化なので、剛性マトリックスの**行数/列数(自由度の数)**はFEM-T10と全く同じ。
- ES-FEM-T10-SRIは要素をまったく歪み平滑化を行うため、剛性マトリックスの**バンド幅はFEM-T10の約4倍**になる。

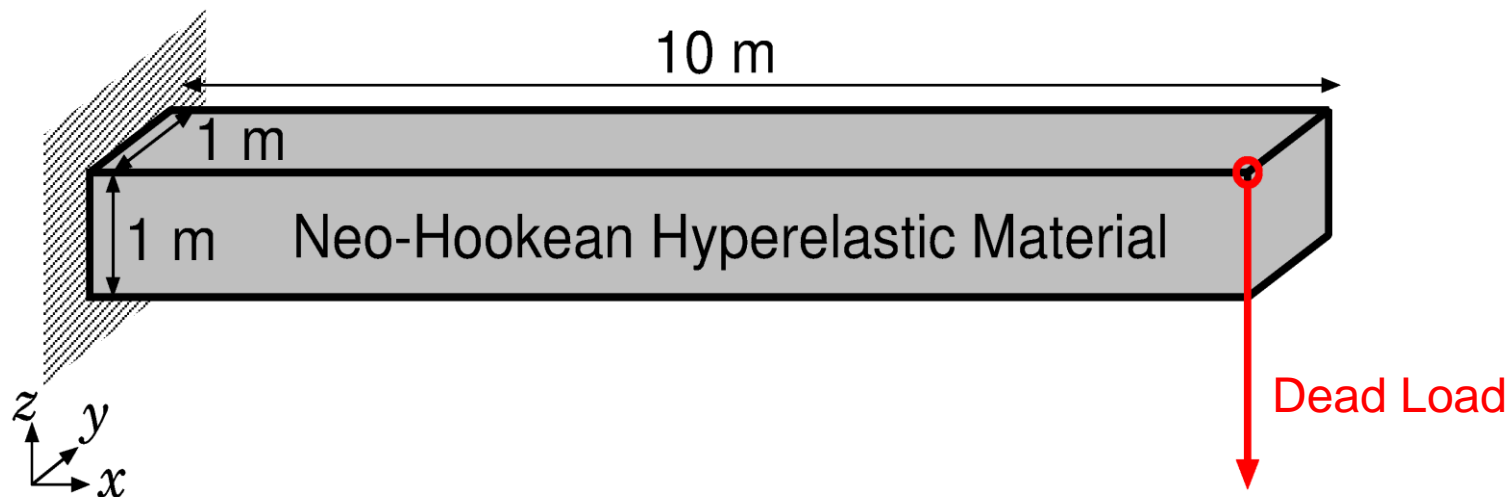
定式化	バンド幅	対FEM-T4比
FEM-T4	約15節点×3自由度	1
FEM-T10	約30節点×3自由度	2
ES-FEM-T4	約45節点×3自由度	3
EC-SSE-T4	約96節点×3自由度	6.4
ES-FEM-T10-SRI	約120節点×3自由度	8

- 従って、計算時間は**FEM-T10の3~4倍**になる。

結果と考察

解析例の紹介

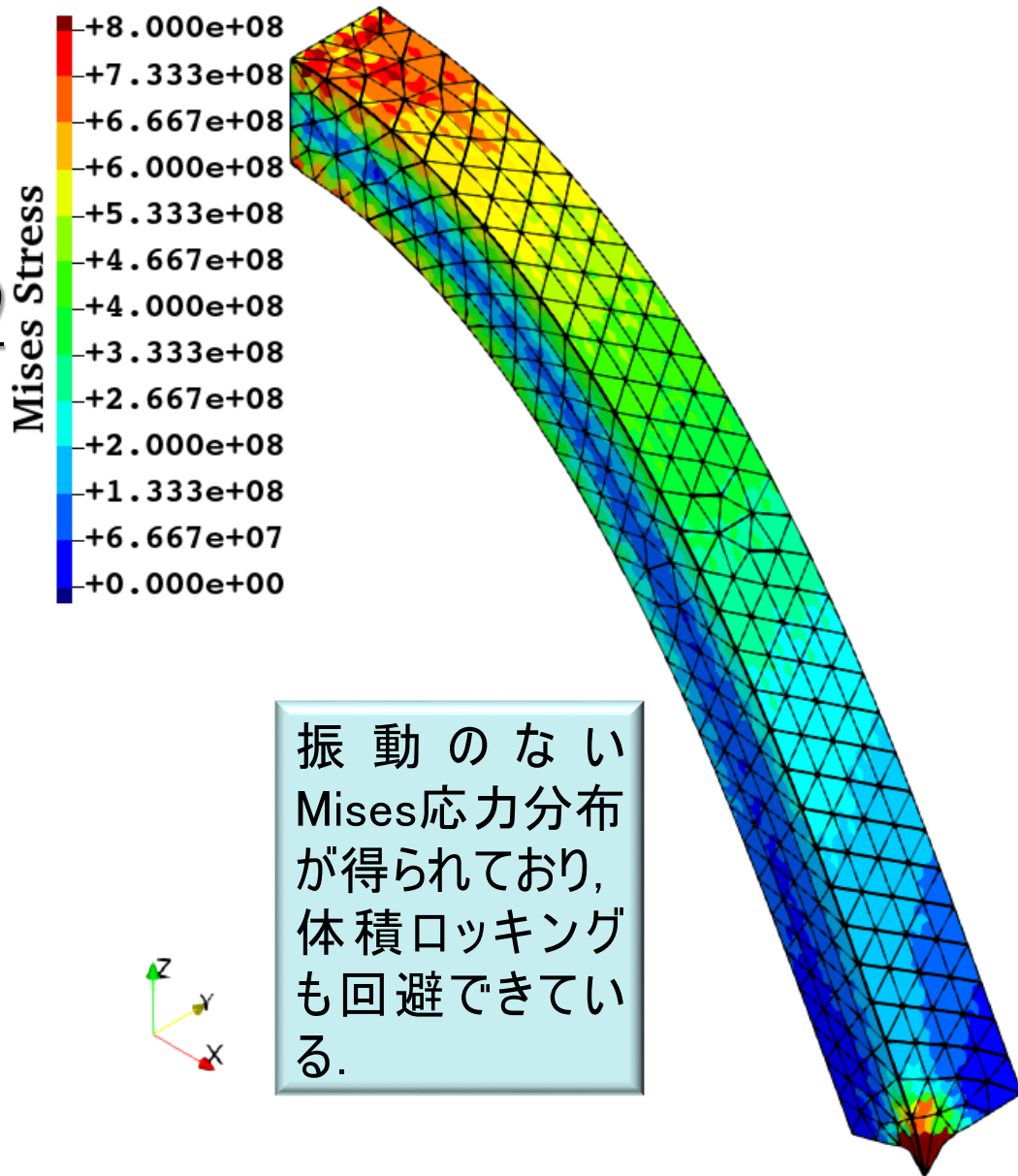
概要



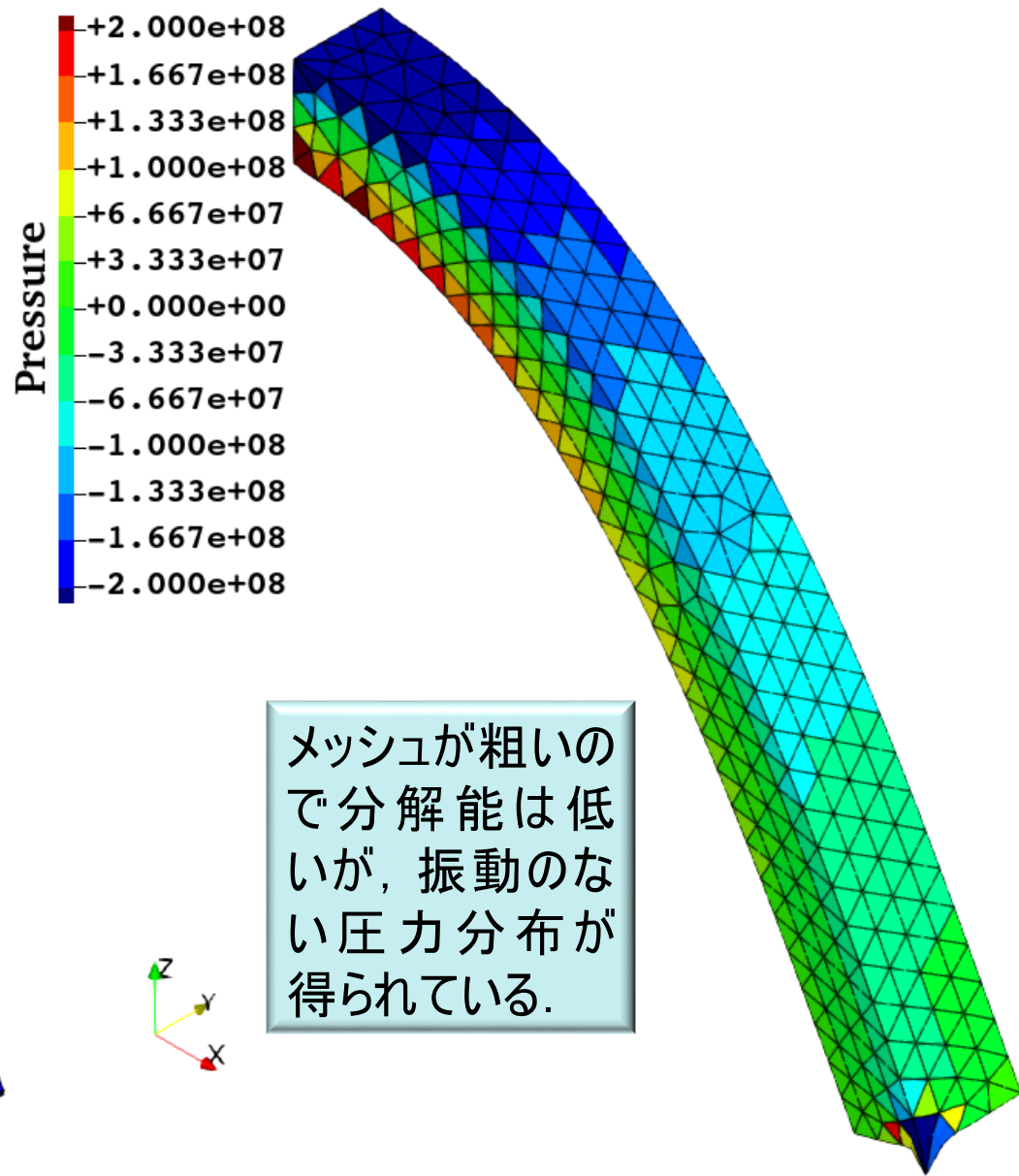
- 10 m x 1 m x 1 m の片持ち梁の先端に死荷重.
- Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6$ GPa, $\nu_{ini} = 0.49$)
- 先端の最終たわみが約6.5 mの大たわみ問題.

片持ち梁の曲げ解析

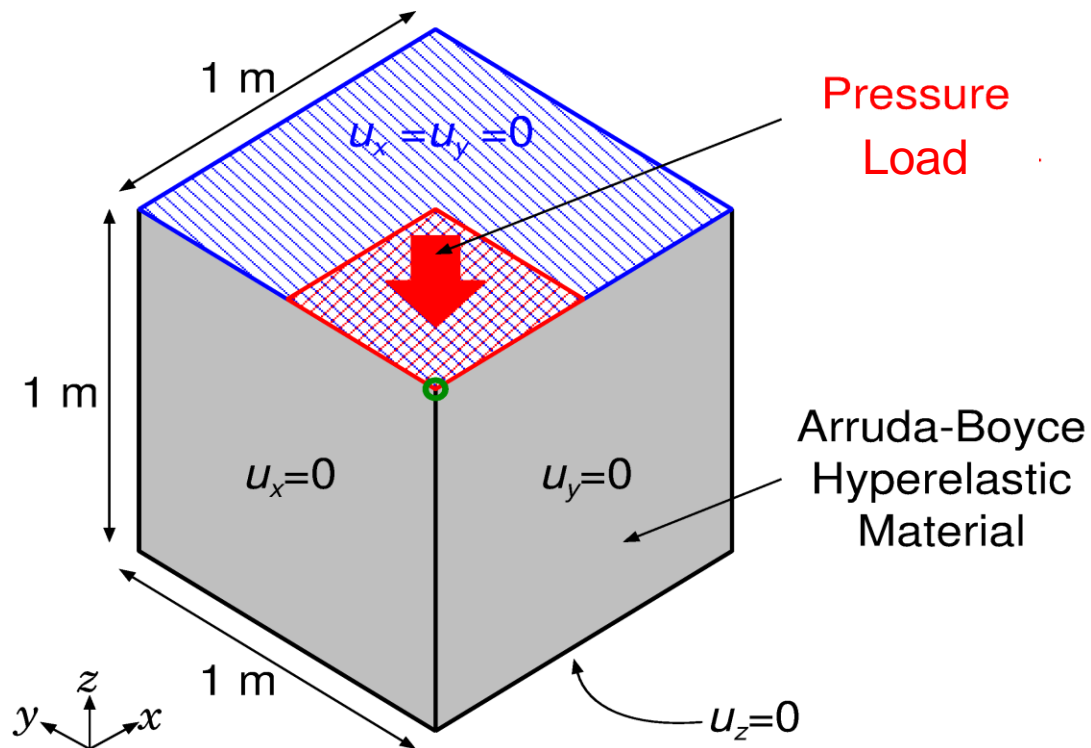
ES-FEM -T10-SRI の解析結果 (最終状態)



節点変位・反力
にも問題なし
(詳細略)

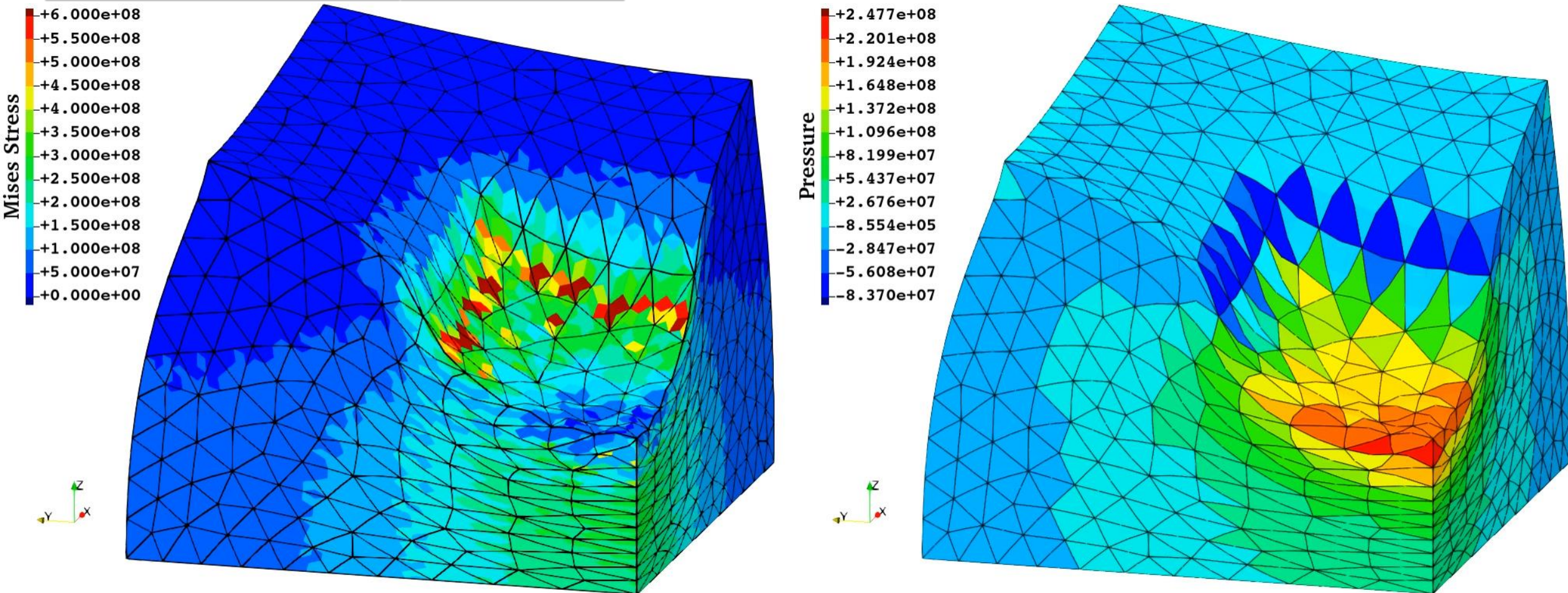


概要



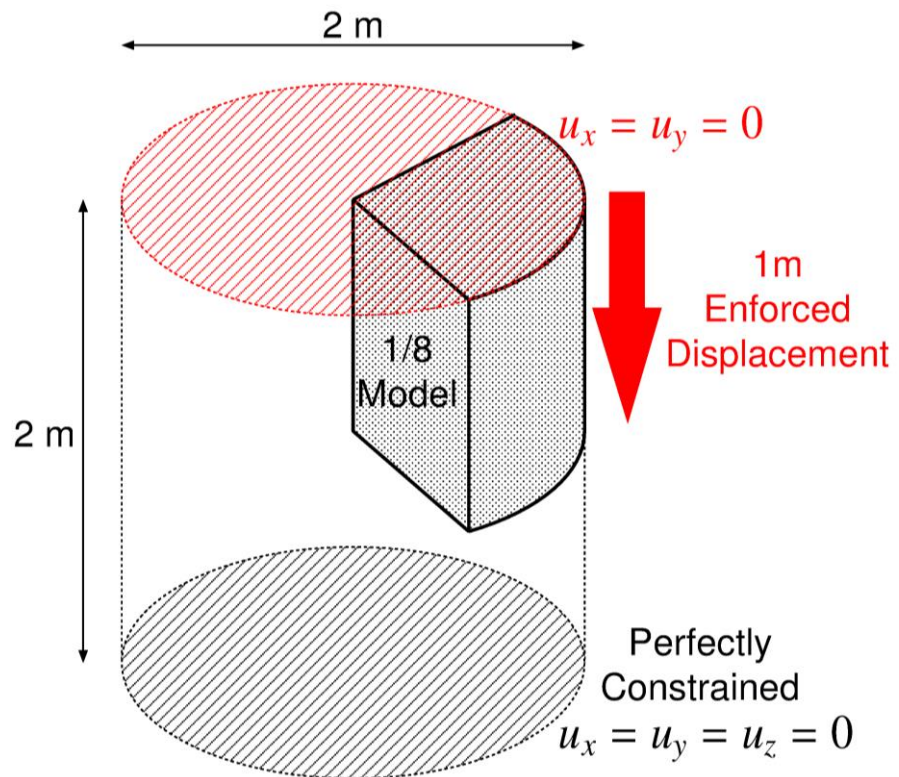
- 1/4モデル.
- Arruda-Boyce超弾性体 ($\nu_{ini} = 0.499$).
- 上面の1/4の領域に圧力を加えて押し込む.

ES-FEM-T10-SRIの解析結果



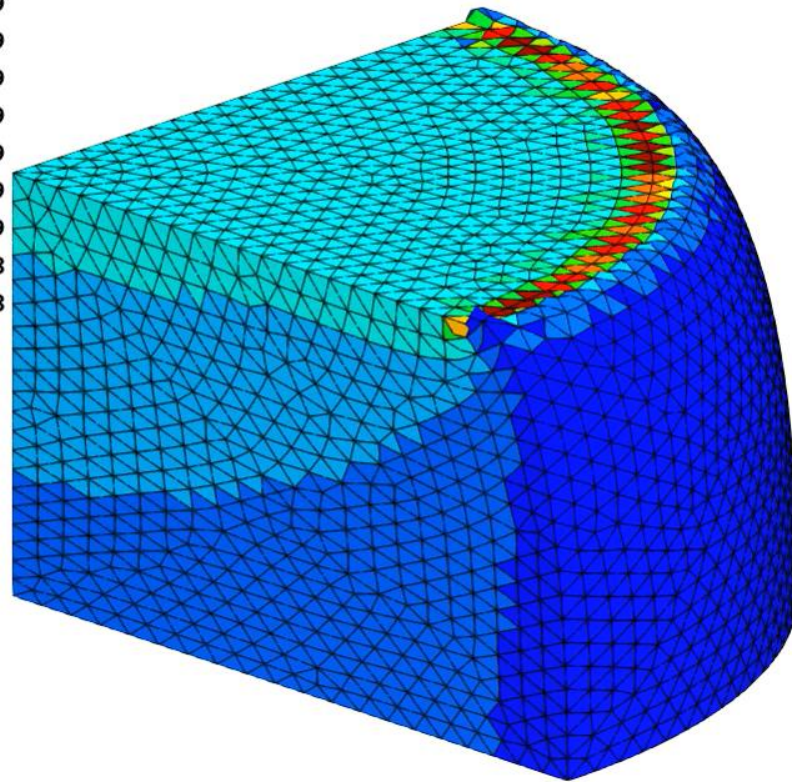
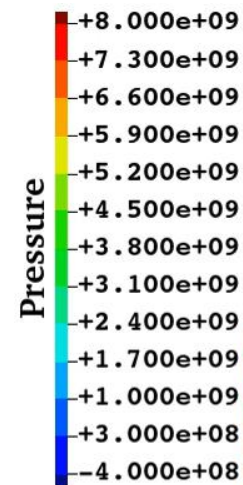
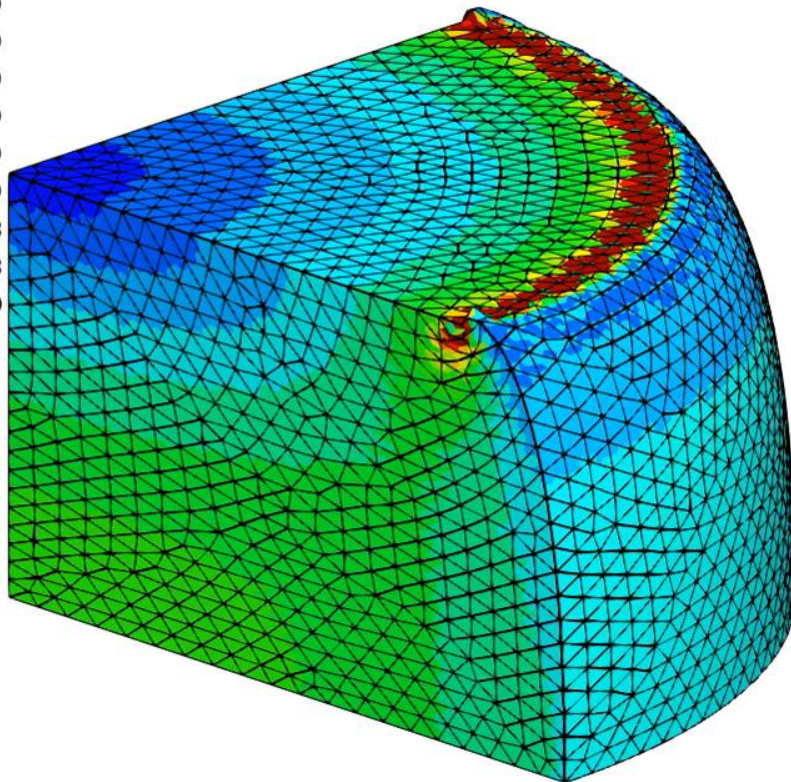
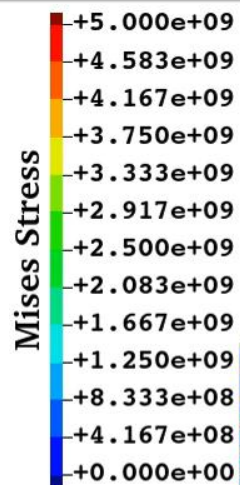
Mises応力/圧力分布に大きな問題はない。
しかし、かなり早期に収束困難に陥った。

概要



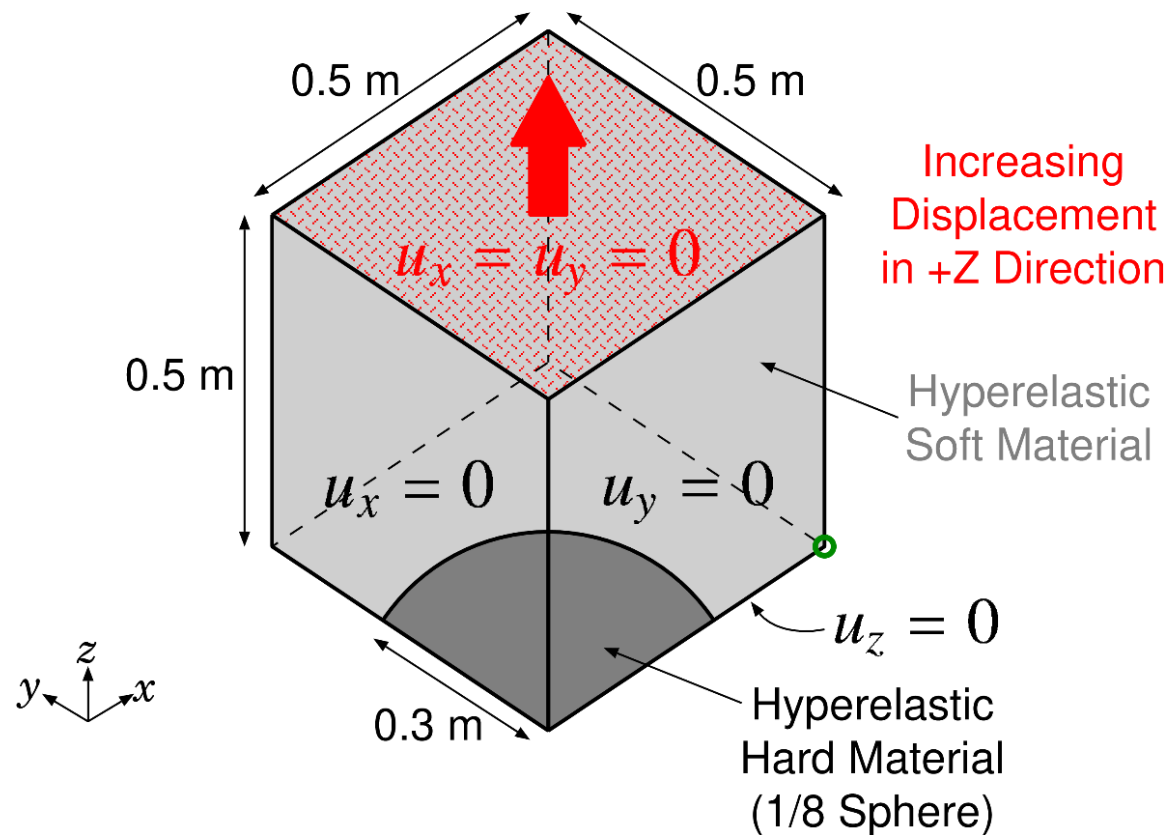
- 上面を面内拘束し軸方向に下向き強制変位.
- Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6 \text{ GPa}$, $\nu_{ini} = 0.49$)

ES-FEM-T10-SRIの解析結果



Mises応力/圧力分布に大きな問題はない。
しかし、わずか30%圧縮で収束困難に陥った。

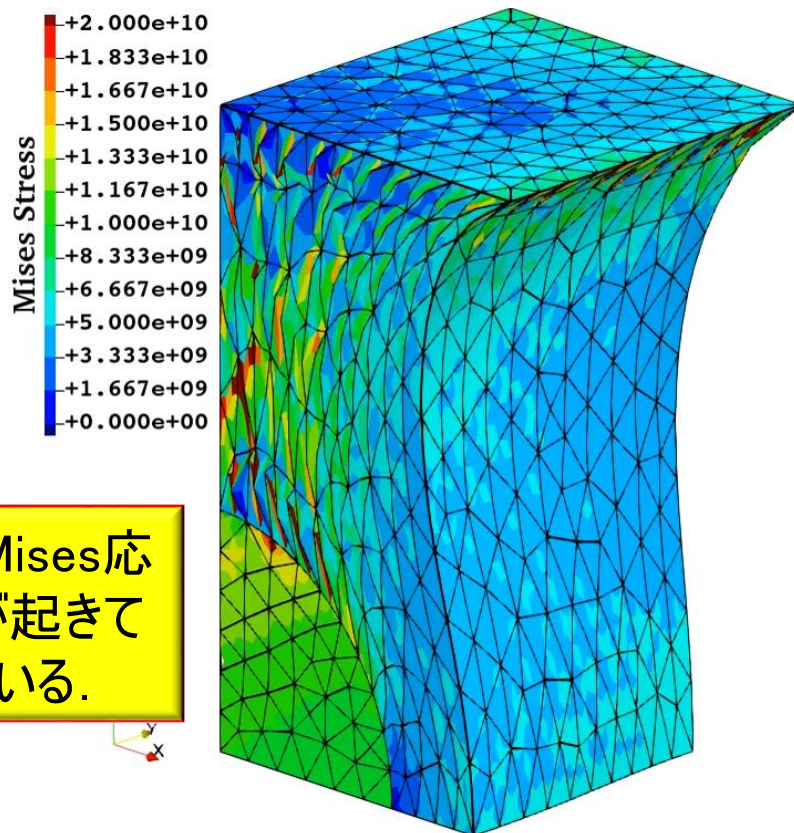
概要



- 1/8モデル
- 鉄ファイラー: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 260$ GPa, $\nu_{ini} = 0.3$)
- ゴム: Neo-Hook超弾性体 ($E_{ini} = 6$ GPa, $\nu_{ini} = 0.49$)

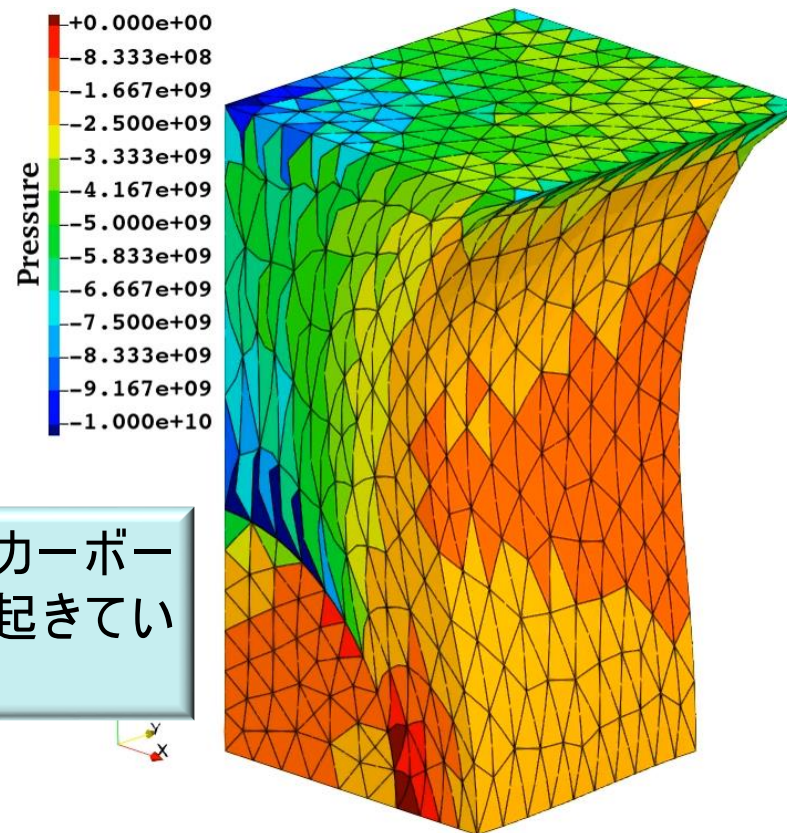
ES-FEM-T10-SRIの解析結果

わずか
68%伸張
で収束困難



ゴム部にMises応力振動が起きてしまっている。

圧力チェッカーボーディングは起きていない。



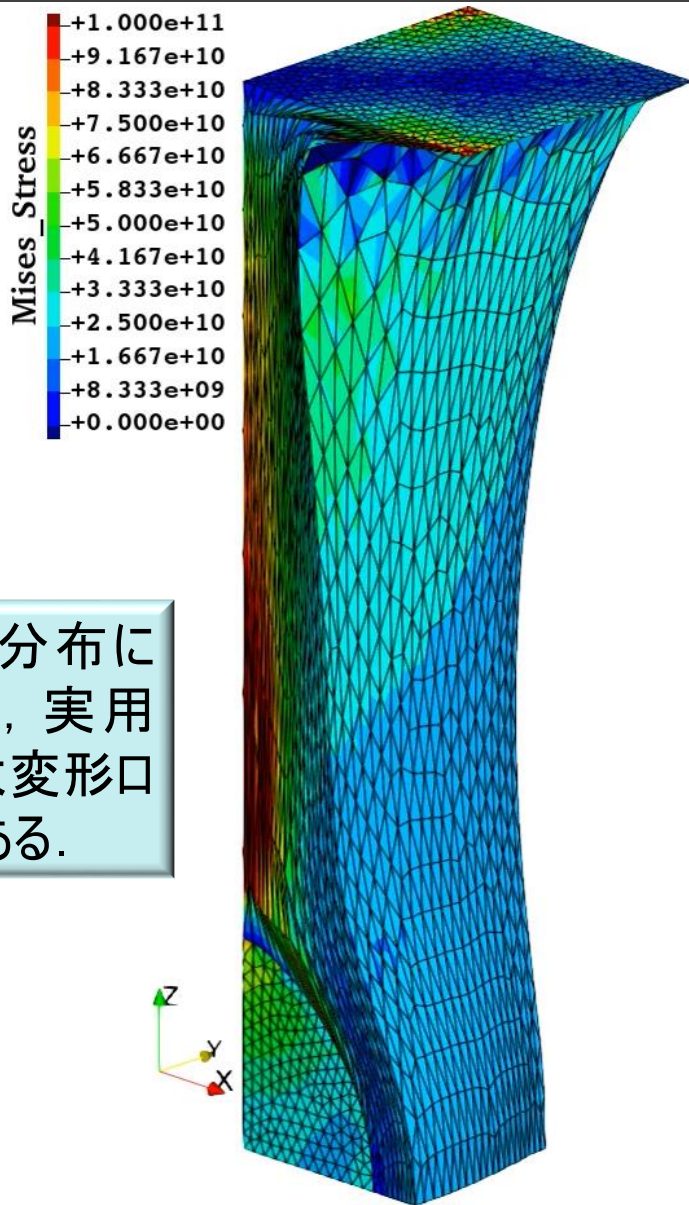
大変形ロバスト性が失われた上に、偏差応力振動が抑制できていない。

ファイラー充填ゴムの引張解析

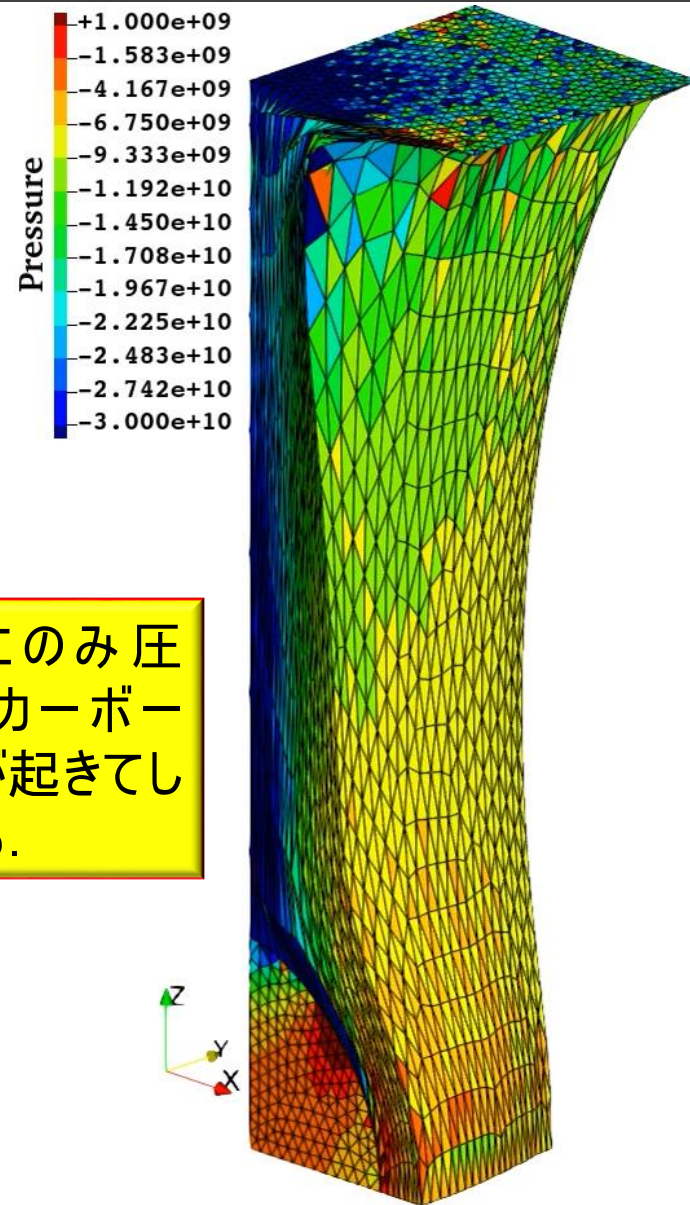
EC-SSE
-T4-SRI
の解析結果
【参考】

256%伸張
で収束困難

Mises応力分布に
問題はなく，実用
上十分な大変形口
バスト性がある。



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。



こっちを改良
する方が筋が
良いかも…

計算力学
講演会
2022
より抜粋

まとめ

ES-FEM-T10-SRIのまとめ

- パッチ法を用いた新たなS-FEM定式化「ES-FEM-T10-SRI」を開発した.
- 目論見通りせん断/体積ロッキングと圧力チェッカーボーディングを回避出来たが、**偏差応力振動は抑え切れなかった.**
- 加えて、我々の従来手法より**大変形ロバスト性が大幅に低下**してしまった.
- T10メッシュでこれ以上の偏差ひずみ平滑化を行うと剛性行列のバンド幅が激増する(**3次関数的にバンド幅が増える**)ため、現実的ではない.
- T4メッシュで最新のEC-SSEとSRIを組み合わせる方が筋が良さそうに思われる。(FEM-T4の10倍以内のバンド幅で抑えられる可能性はある.)

ご清聴ありがとうございました.