

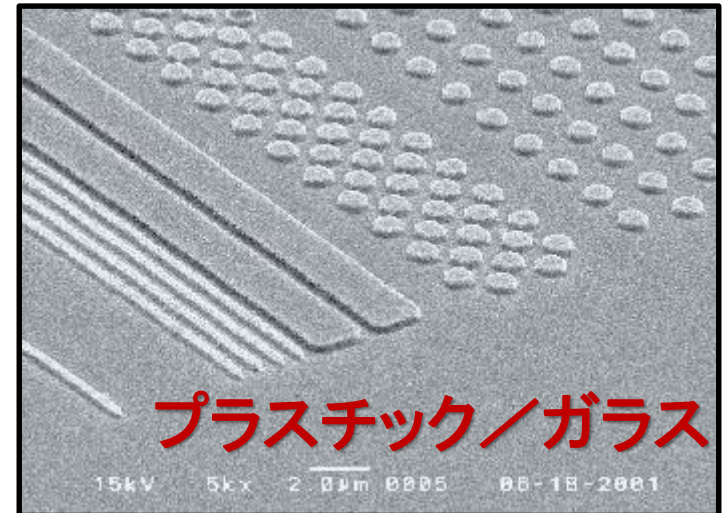
~~担当体積に平滑化を施した~~
10節点四面体平滑化有限要素による
微圧縮大変形解析

大西 有希
東京工業大学

研究背景

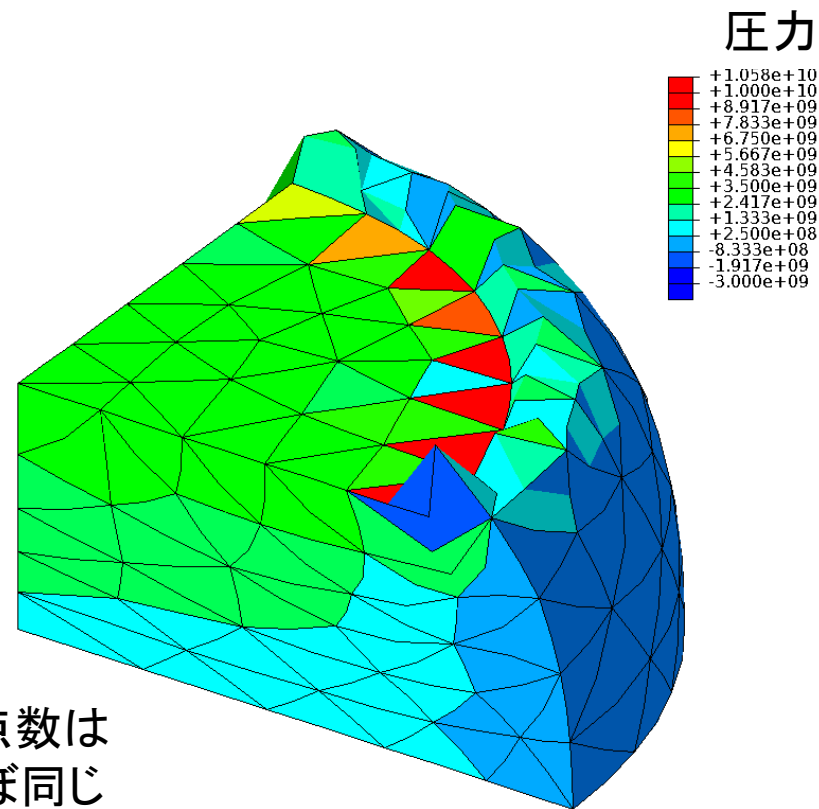
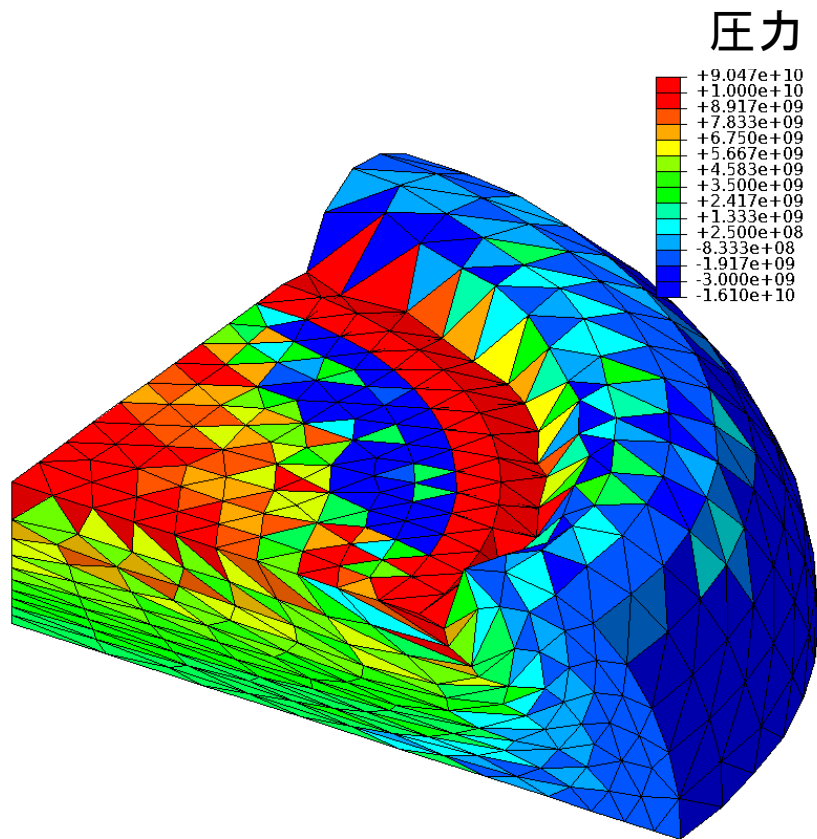
実現したい内容:

- 「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.

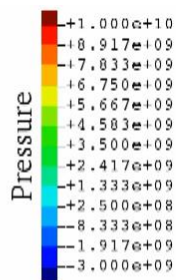
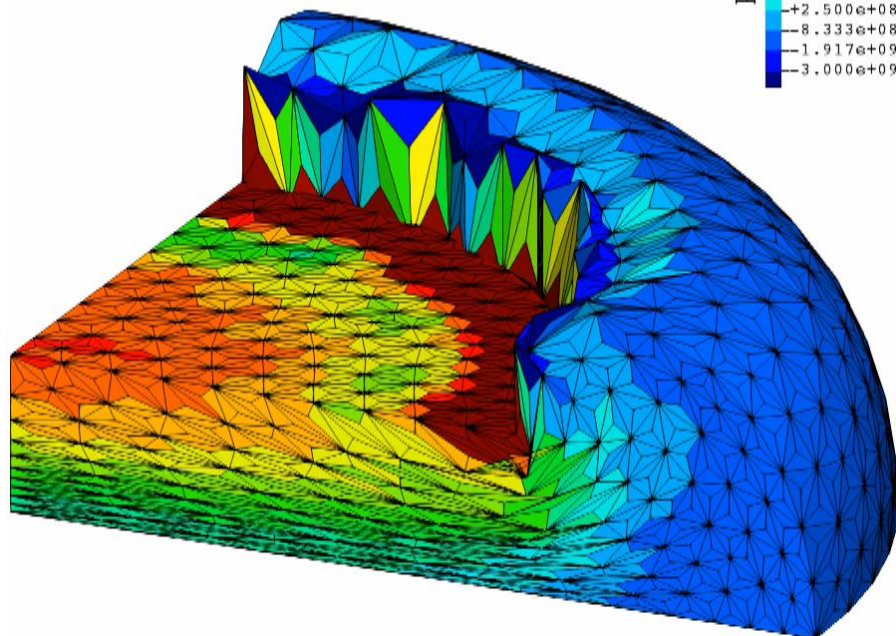
四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)

- ✓ 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.

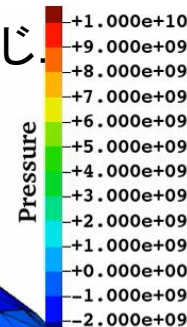
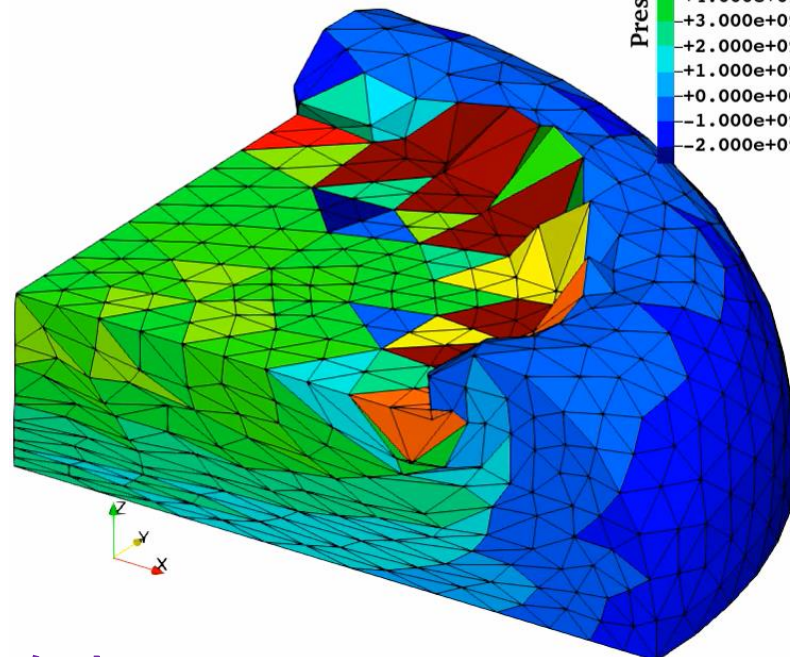
我々の従来手法（平滑化有限要素法）

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。



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

去年までの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

こちらの方が筋が良さそう

研究目的

10節点四面体を用いたS-FEM定式化群
「SelectiveCS-FEM-T10s」について
最も精度と安定性に優れる定式化を探る.

発表目次:

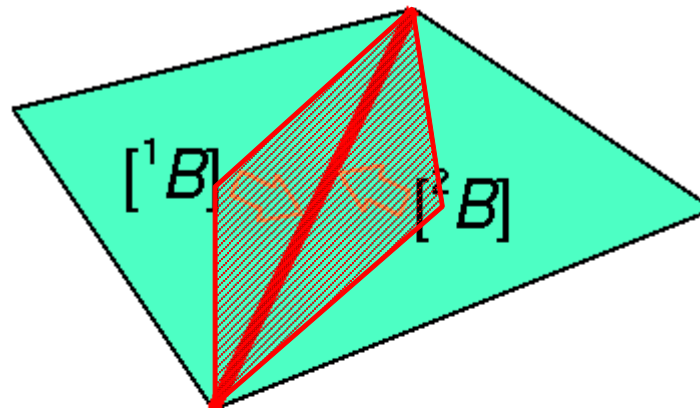
- 去年までのSelectiveCS-FEM-T10定式化概要
- 現状最善のSelectiveCS-FEM-T10定式化概要
- 解析例
- まとめ

去年までの SelectiveCS-FEM-T10 定式化概要

ES-FEMの定式化概要

- 各要素の $[B]$ を通常のFEMと同様に計算する.
- 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



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

Edge T

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

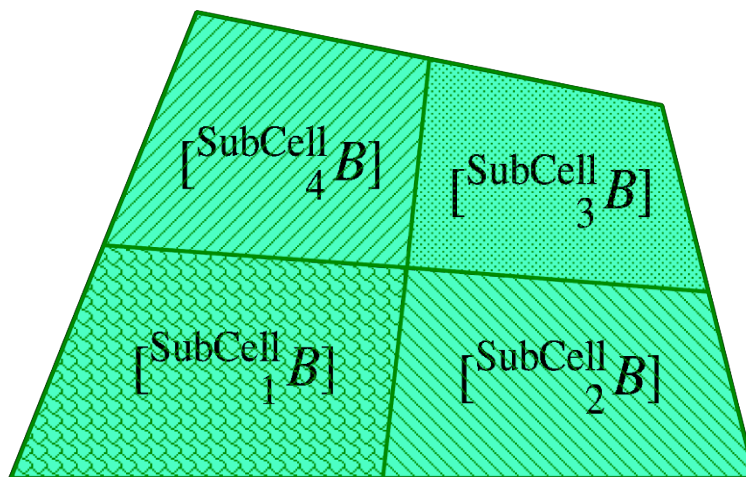
ES-FEM

体積ロッキングや
圧力振動を抑える
ことは出来ないが,
四面体要素で
せん断ロッキングを
回避できる.
ただし, 独立した
有限要素としては
使用できない.

CS-FEMの定式化の概要（一例）

- 歪み一定でない要素にダミー節点を追加し、サブセルに分割する。
- 各サブセルの $[SubCell_B]$ を低減積分要素と同様に計算する。
- サブセル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
各サブセル中心に
あるイメージ



$[SubCell_i B]$



SubCell_i^T



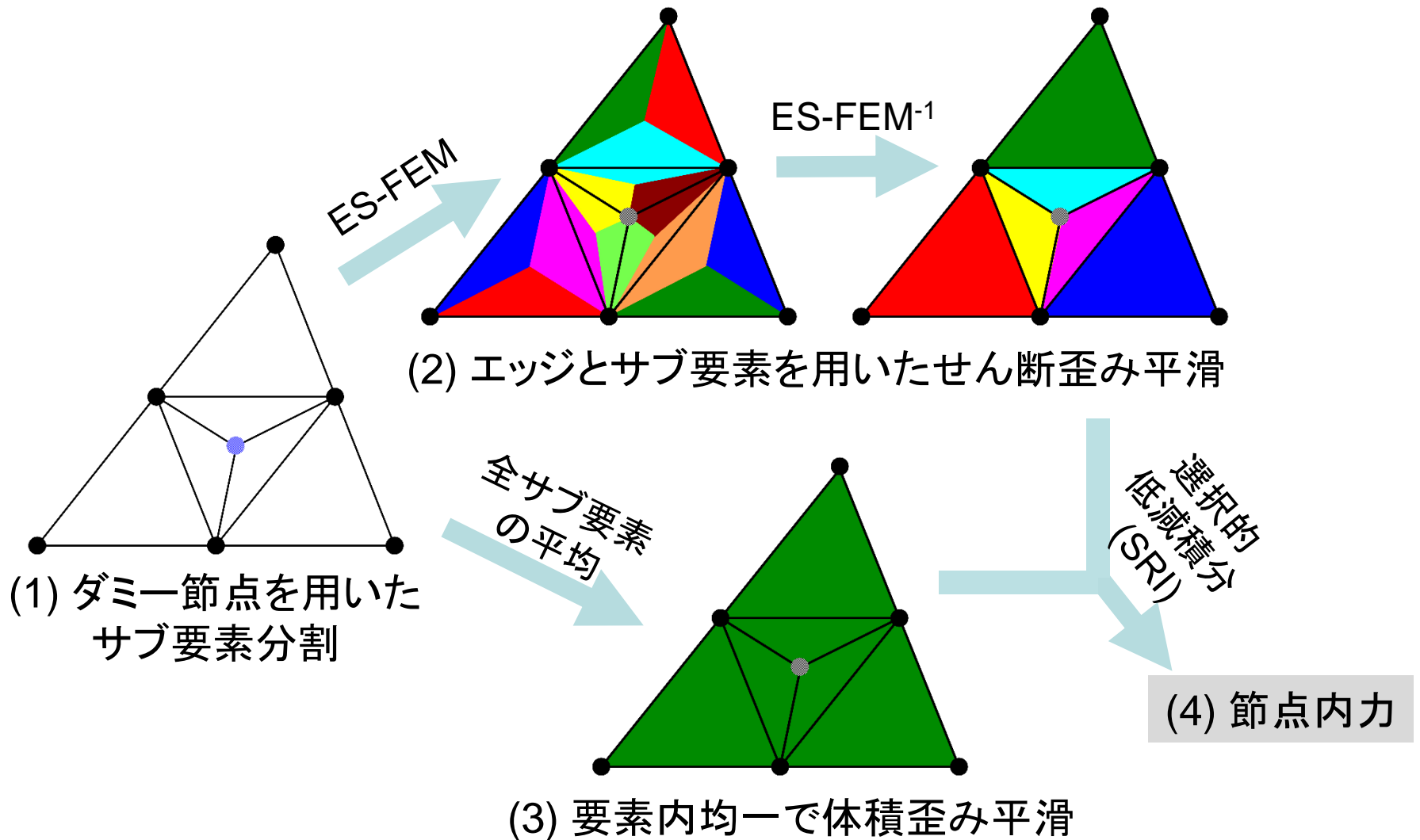
$\{f^{int}\}$

CS-FEM

独立した要素として
使用できる点が
最大のメリット。
SRIを併用すれば
ロッキングも回避
できる。

去年までのSelectiveCS-FEM-T10

(簡単のため, 6 節点三角形要素で説明)

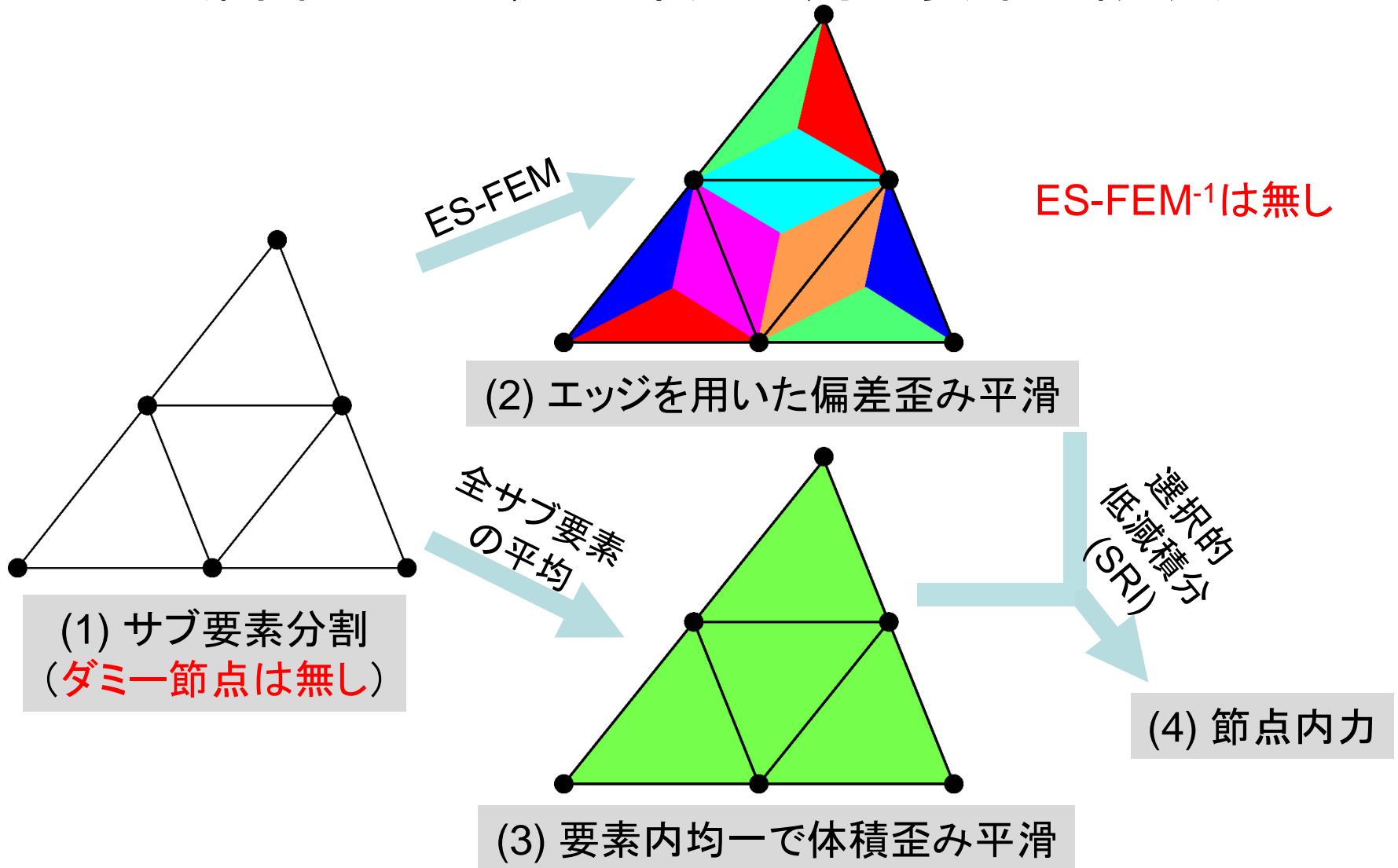


現状最善の SelectiveCS-FEM-T10 定式化概要



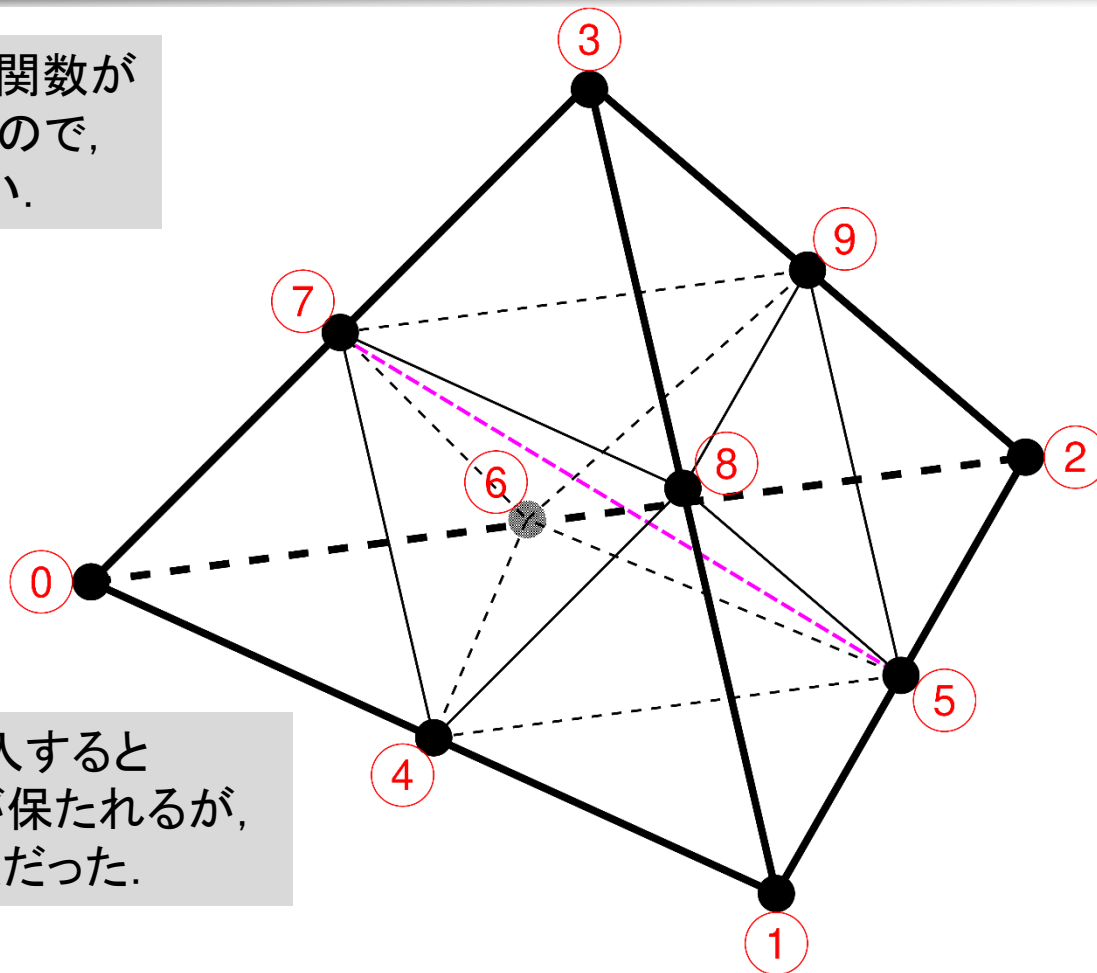
現状最善のSelectiveCS-FEM-T10

(簡単のため, 6 節点三角形要素で説明)



(1) T10要素のT4サブ要素への分割

大変形では形状関数が線形の方が良いので、要素を分割したい。

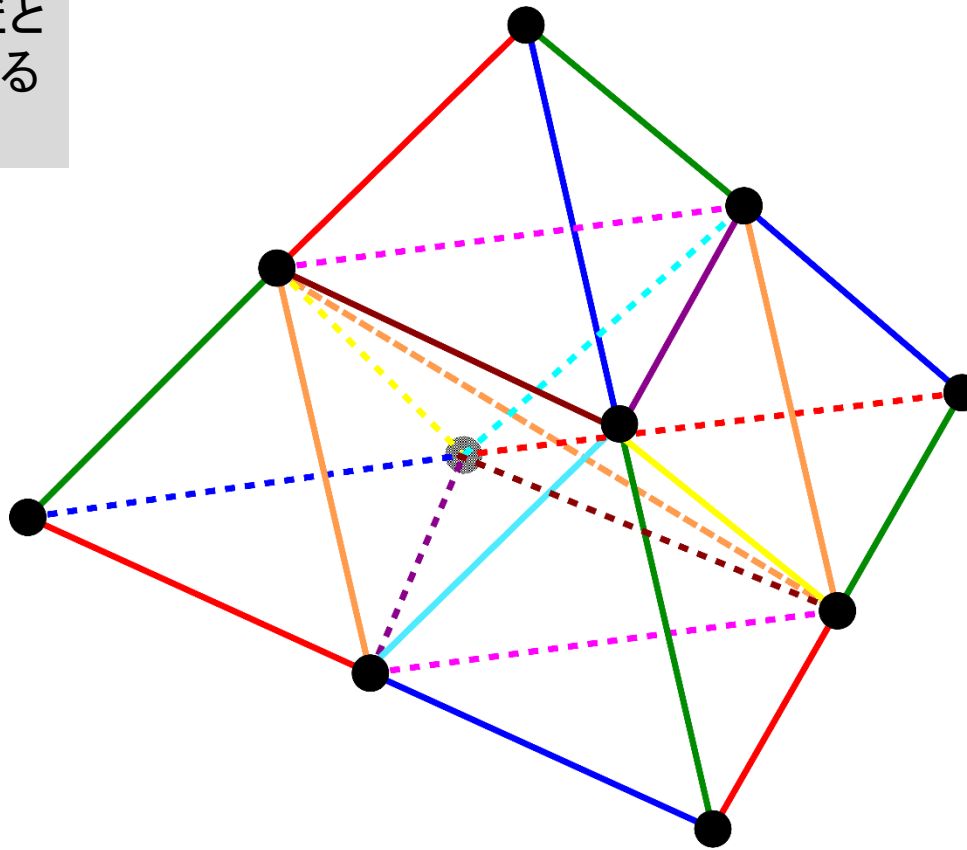


ダミー要素を導入すると要素の対称性が保たれるが、その効果は軽微だった。

- ダミー節点無しで分割（要素は非対称になる）
- T10要素を8個のT4サブ要素に分割し、各サブ要素で $[B]$ を求める。

(2) 要素内歪み平滑 (偏差歪み成分)

サブ要素そのままと
ロッキングが発生する
ので平滑化が必要.

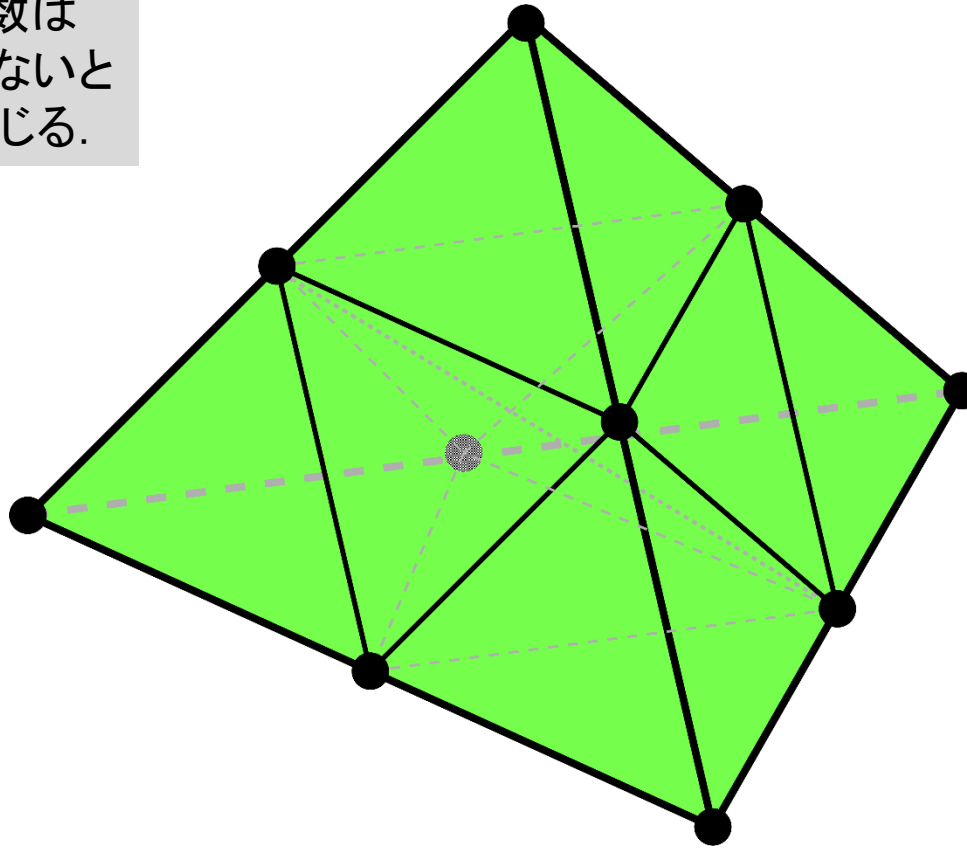


8サブ要素から
25エッジへ

- **ES-FEM**と同じ要領で偏差歪みの平滑化をエッジで行う.
- 偏差応力の評価を各エッジで行う. ES-FEM⁻¹は無し.

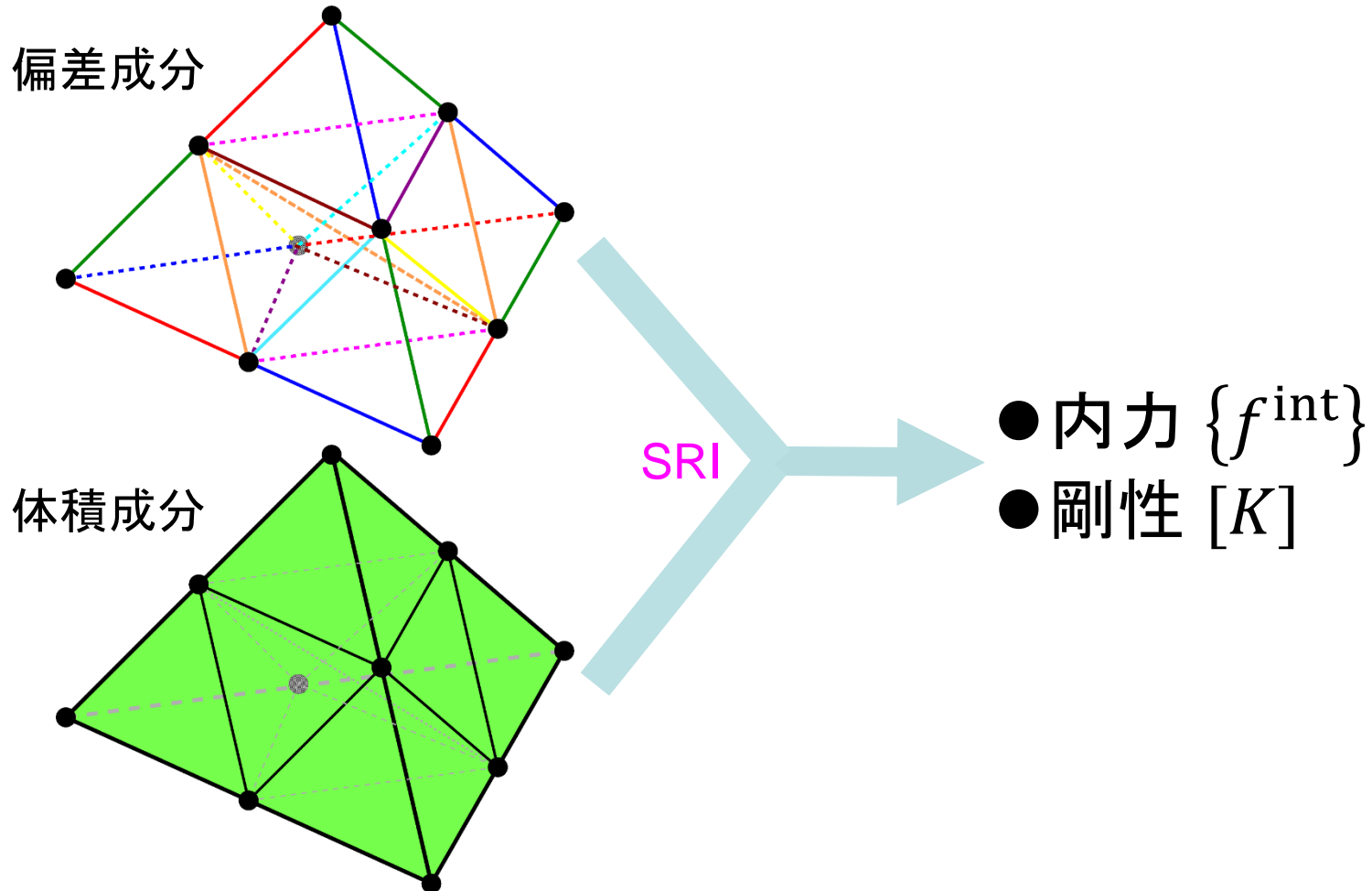
(3) 要素内歪み平滑 (体積歪み成分)

体積歪みの空間次数は
偏差歪みより落とさないと
体積ロッキングが生じる。



- 全サブ要素の体積歪みの平均を要素全体の体積歪みとする
(8節点六面体SRI要素と同じ発想)。

(4) 選択的低減積分(SRI)で合算



- 選択的低減積分(SRI)を適用し，偏差成分と体積成分を合算した内力 $\{f^{int}\}$ および $[K]$ を計算する。

去年までとの定式化の違い

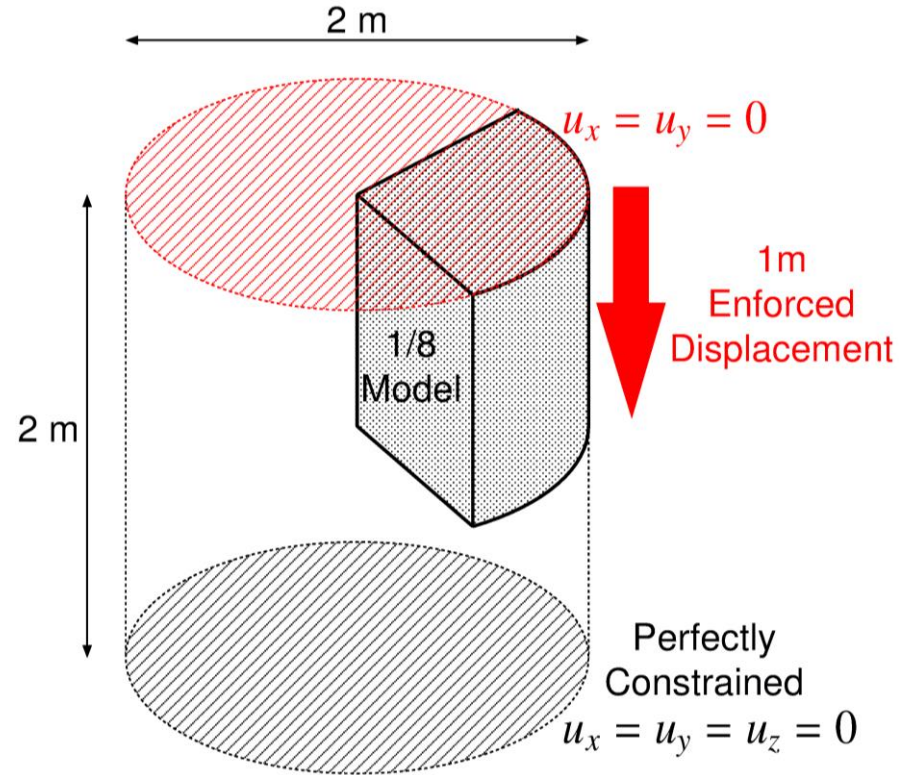
1. 要素中心に追加していた**ダミー節点を無くした**.
 - サブ要素数およびエッジ数が減少.
 - 要素が非対称に.
2. ES-FEMの後に行っていた**ES-FEM⁻¹を無くした**.
 - 偏差歪み・偏差応力の評価点がエッジに.
 - 輪郭エッジには歪み平滑化がかからなくなった.

要素の対称性が無くなることや
輪郭エッジの歪み平滑が無くなることは
直感的には改悪だと思われる。
しかし、実装してみると新定式化の方が高性能。
原因究明は今後の課題。

解析例

Barreling of Hyperelastic Cylinder

Outline



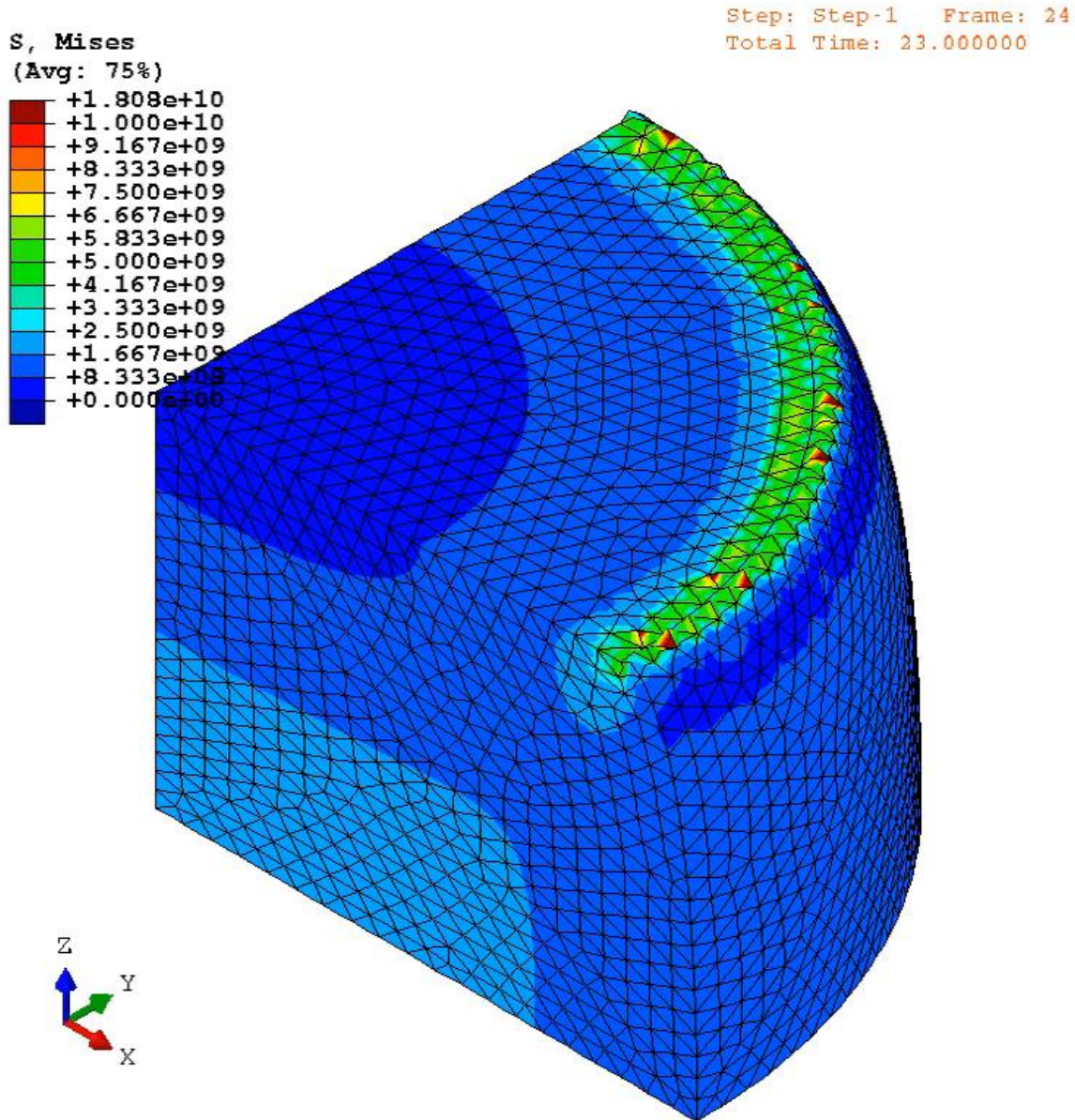
- Enforce **axial displacement** on the top face.
- Neo-Hookean body with $\nu_{ini} = 0.49$.
- Compare results with ABAQUS T10 hybrid elements (C3D10H, C3D10MH, C3D10HS) using the same mesh.

Barreling of Hyperelastic Cylinder

Animation of Mises stress (ABAQUS C3D10MH)

Convergence failure at **24%** compression

Unnaturally oscillating distributions are obtained around the rim.



Barreling of Hyperelastic Cylinder

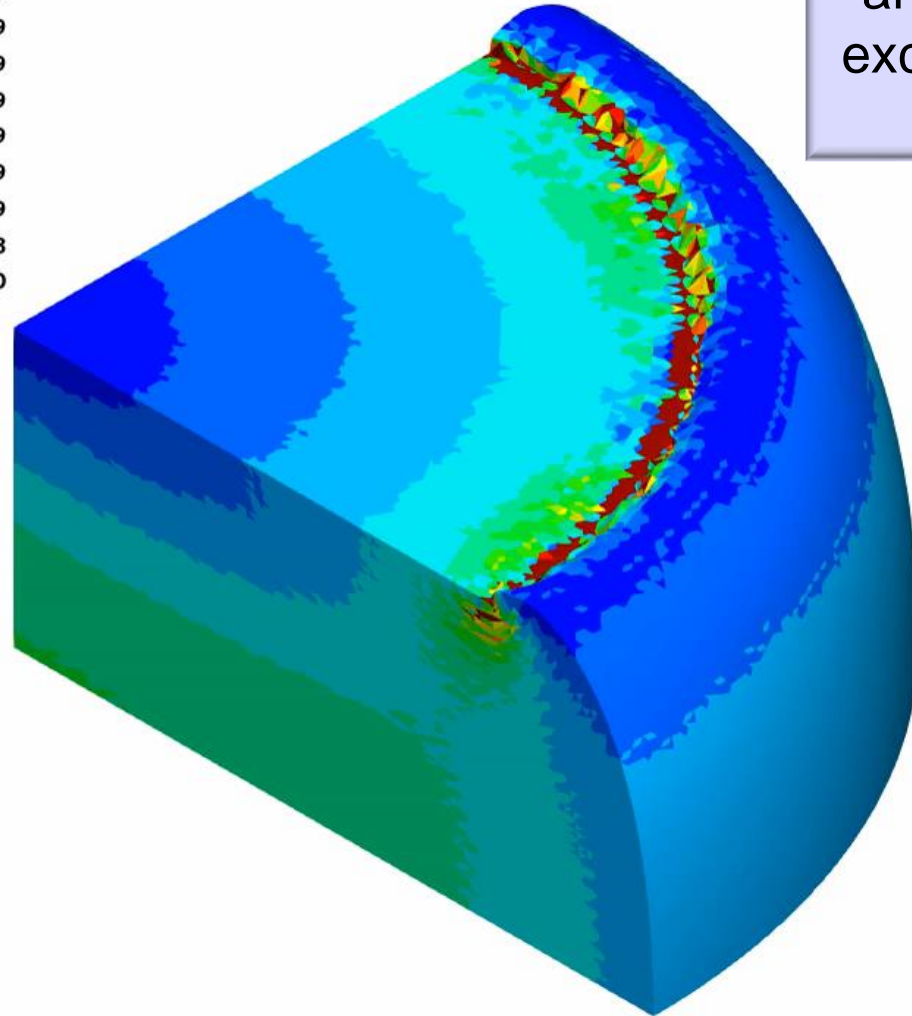
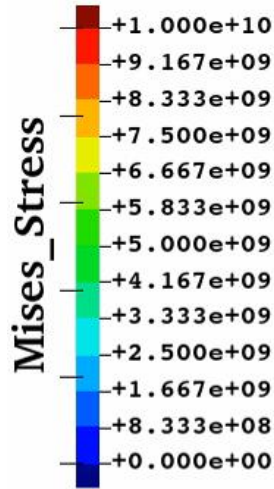
Animation

of Mises stress

(New Selective
CS-FEM-T10)

Convergence failure at **43%** compression

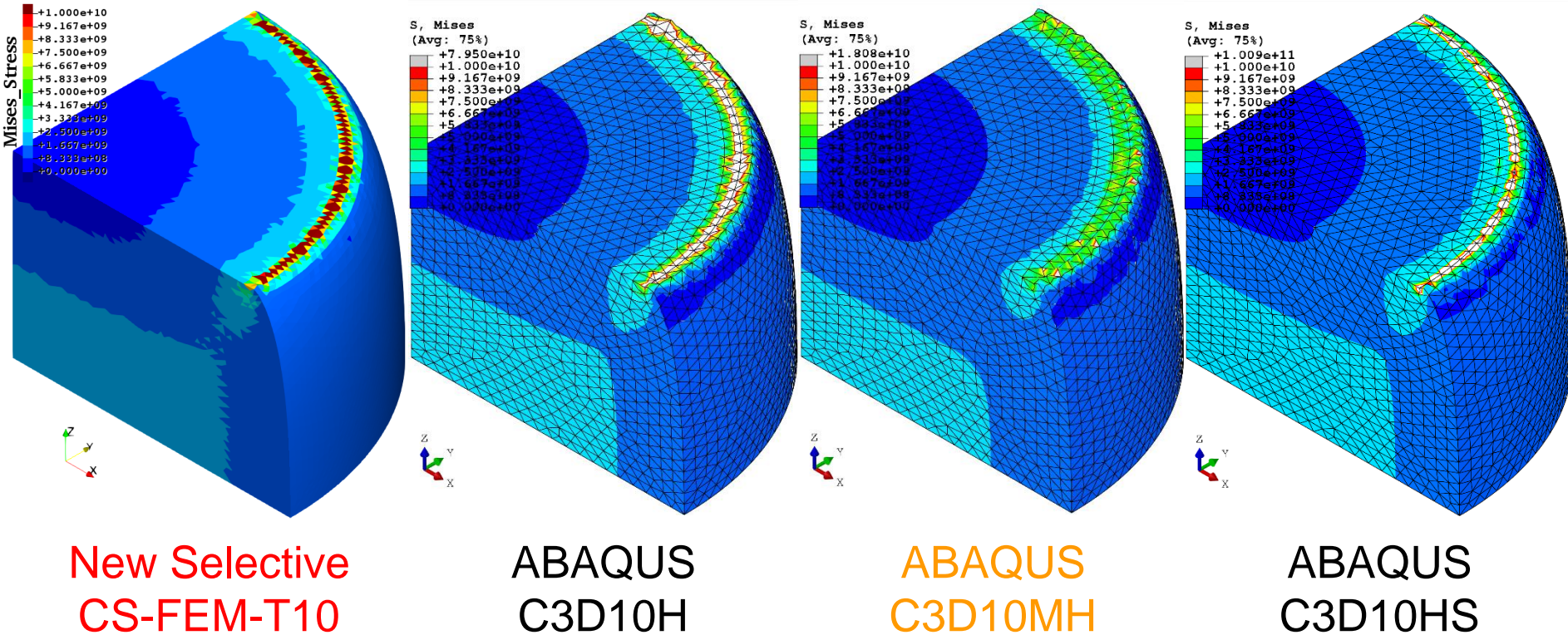
The present element is more **robust** than **ABAQUS C3D10MH**



Smooth distributions are obtained except around the rim.

Barreling of Hyperelastic Cylinder

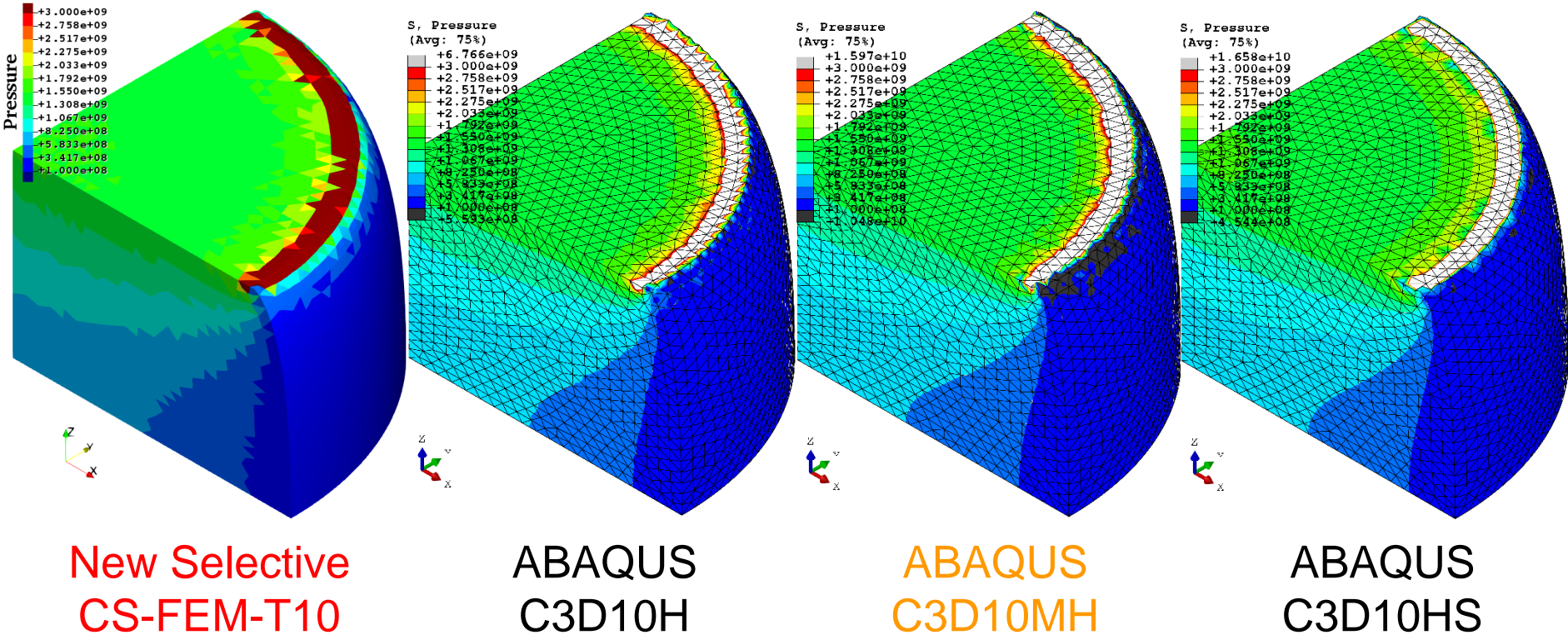
Comparison of Mises stress at 24% comp.



All results are similar to each other except around the rim having stress singularity.

Barreling of Hyperelastic Cylinder

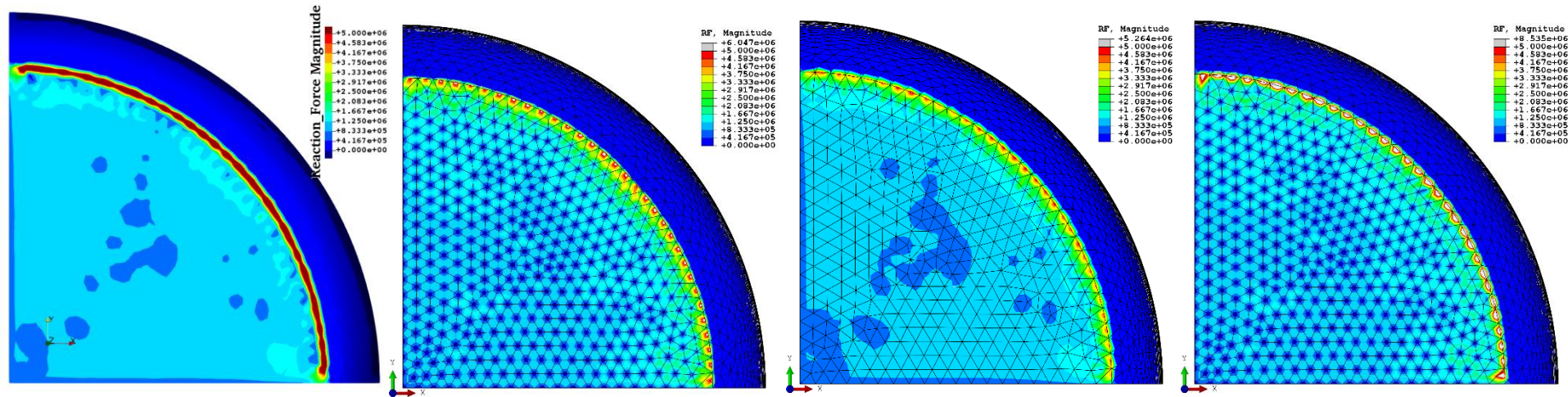
Comparison of pressure at 24% comp.



All results are similar to each other except around the rim having stress singularity.

Barreling of Hyperelastic Cylinder

Comparison of nodal reaction force at 24% comp.



New Selective
CS-FEM-T10

ABAQUS
C3D10H

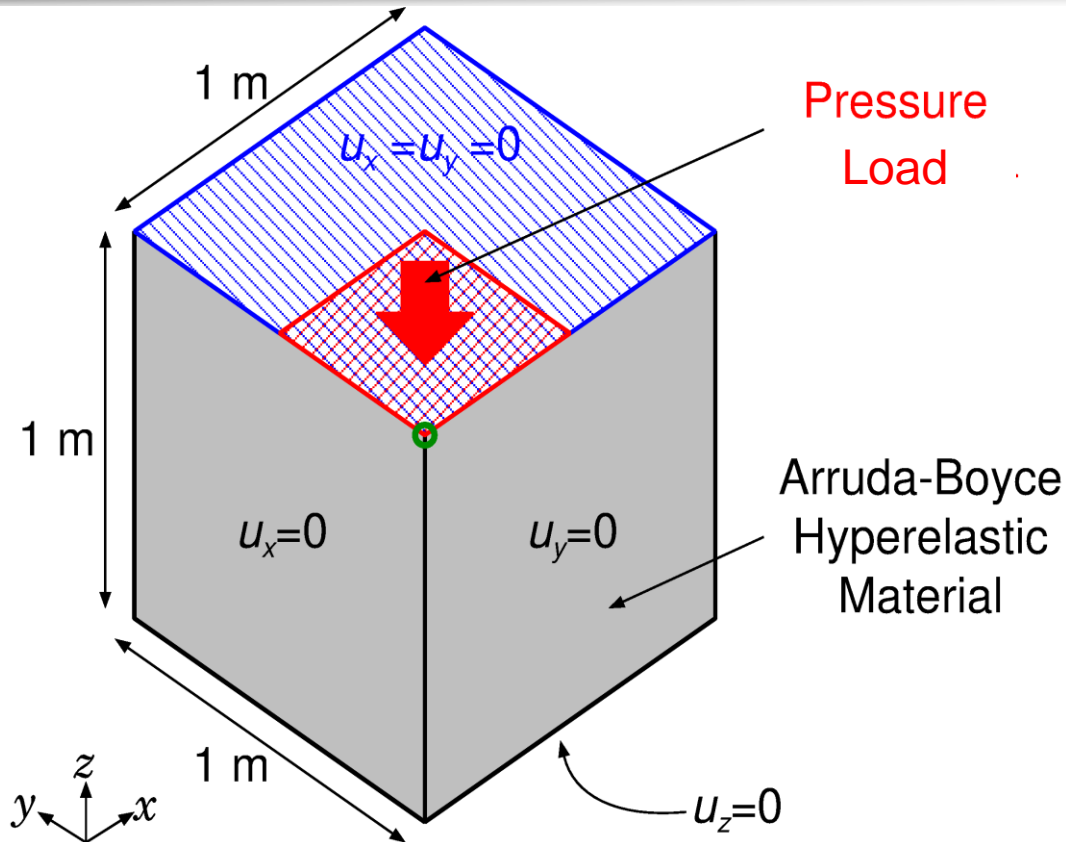
ABAQUS
C3D10MH

ABAQUS
C3D10HS

ABAQUS C3D10H and C3D10HS
suffer from nodal force oscillation.

Compression of Hyperelastic Block

Outline

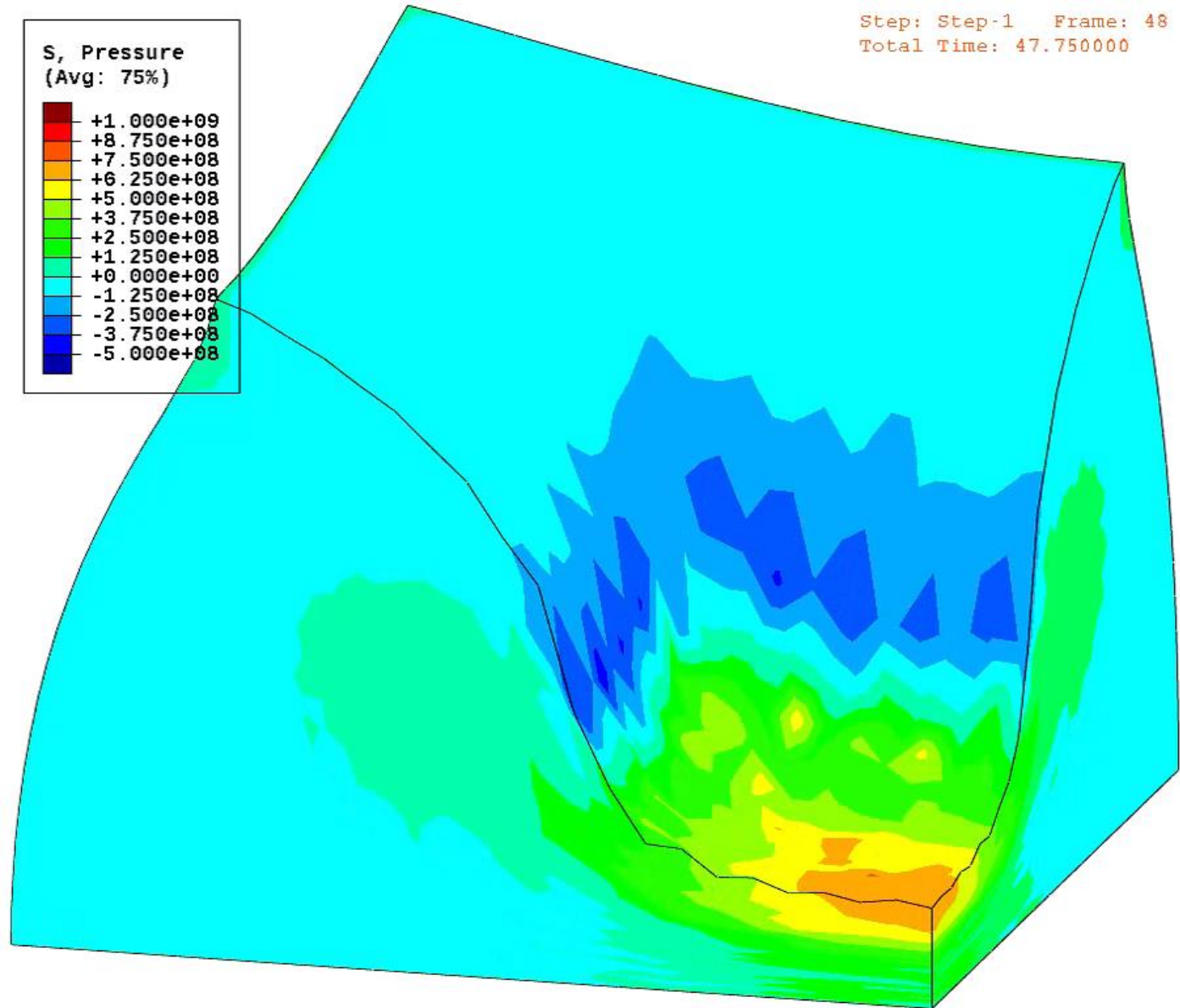
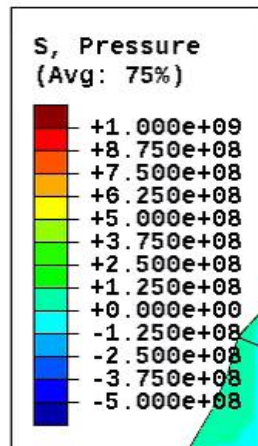


- Arruda-Boyce hyperelastic material ($\nu_{ini} = 0.499$).
- Applying pressure on $\frac{1}{4}$ of the top face.
- Compared to **ABAQUS C3D10MH** with the same unstructured T10 mesh.

Compression of Hyperelastic Block

Animation
of
pressure
dist.
(ABAQUS
C3D10MH)

Step: Step-1 Frame: 48
Total Time: 47.750000



Convergence
failure at
0.71 GPa
pressure

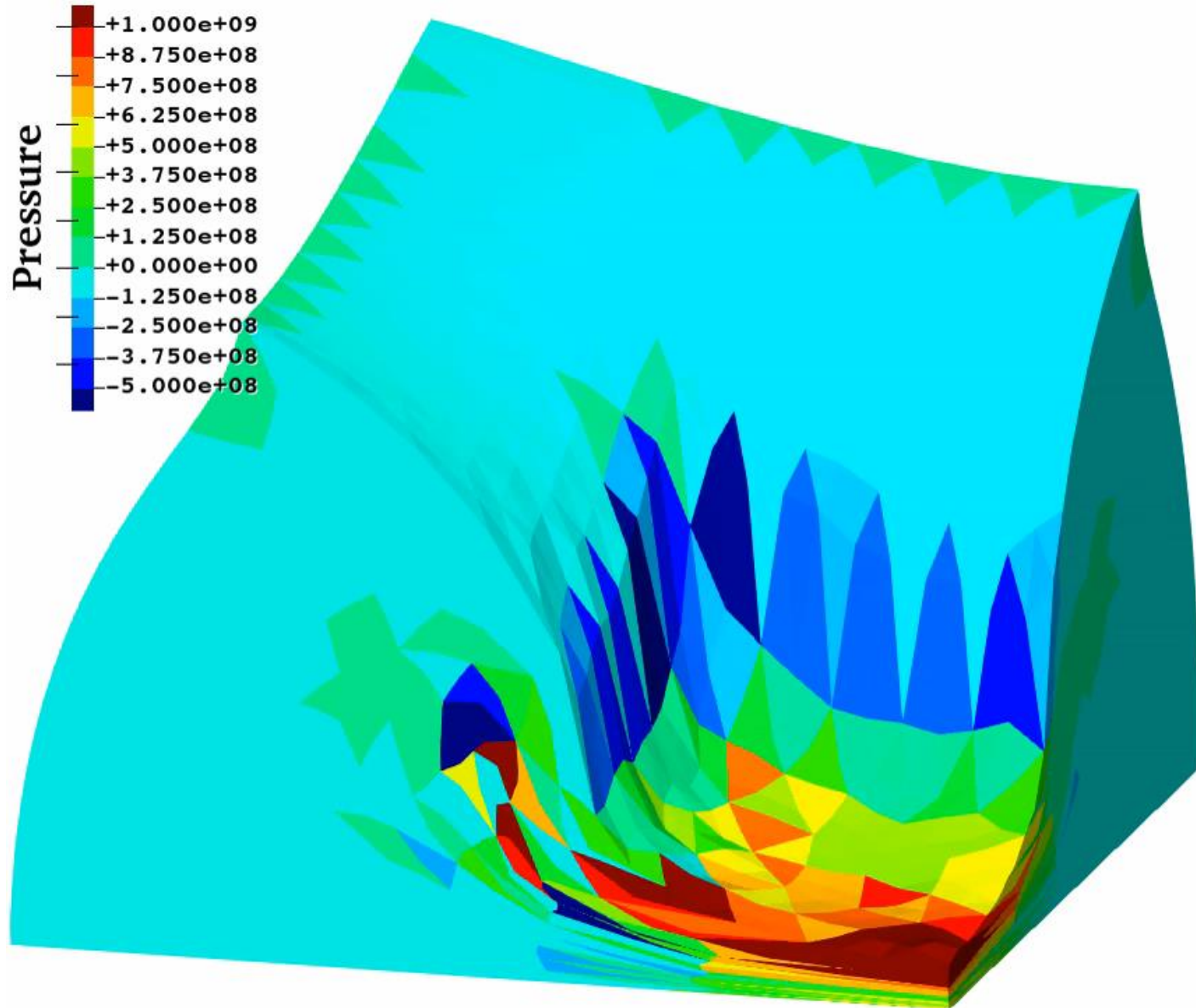


Compression of Hyperelastic Block

Animation
of
pressure
dist.
(New Selective
CS-FEM-T10)

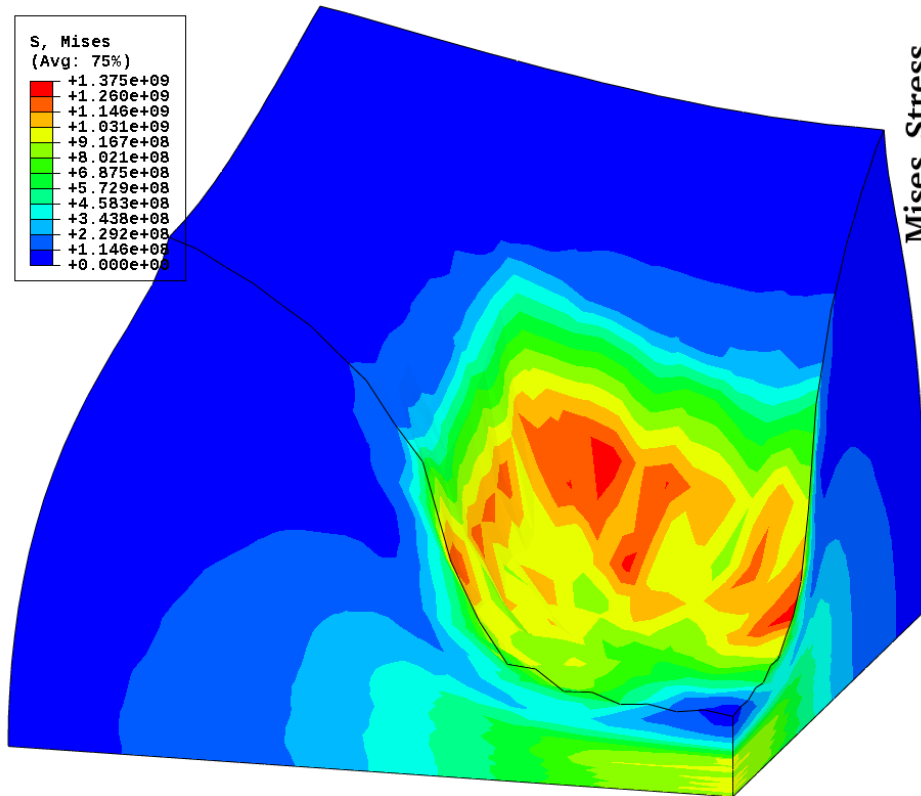
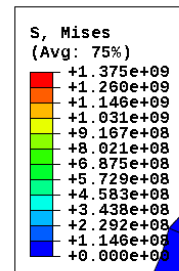
Convergence
failure at
1.35 GPa
pressure

The present
element
is more
robust than
ABAQUS
C3D10MH

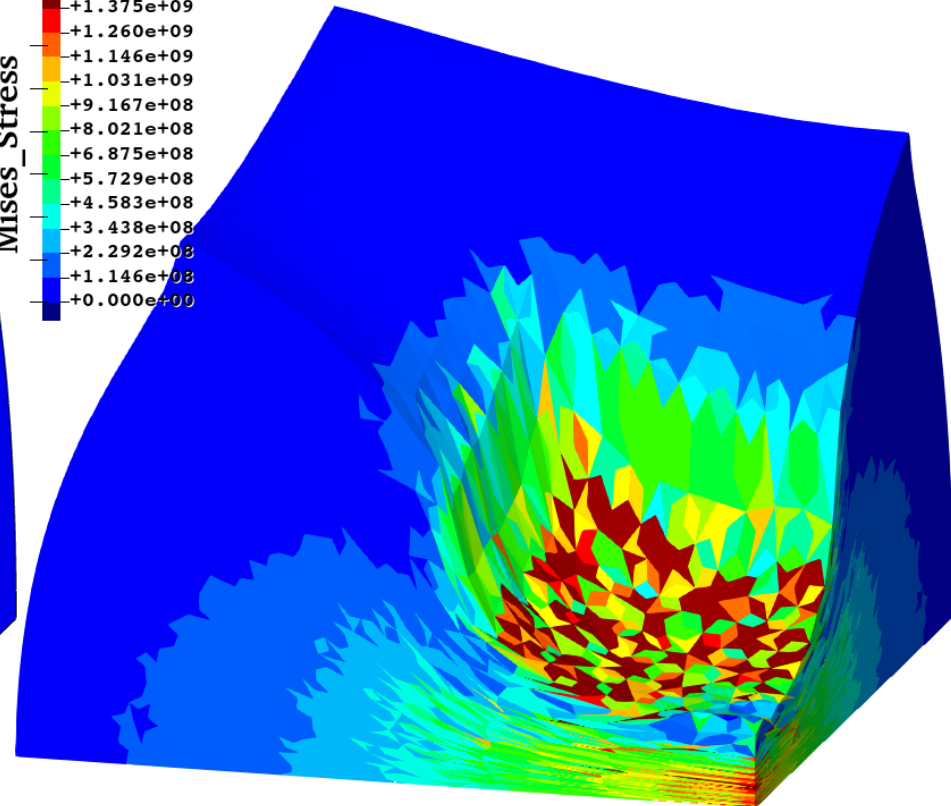
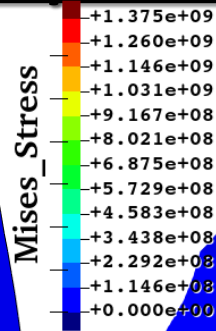


Compression of Hyperelastic Block

Mises stress dist. at 0.7 GPa pressre



ABAQUS C3D10MH



New SelectiveCS-FEM-T10

Less smoothed Mises stress is observed in New SelectiveCS-FEM-T10.
Further improvement is still required.

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)
- ✓ 追加自由度無し (静的縮約が不要)
- ✓ 標準的なT10要素とメモリ消費や計算時間が同じ
- ✓ 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応力の振動がみられる

Take-home message

皆様がお持ちのFEコードへの実装を是非ご検討ください。
コーディングは簡単・コストは従来通り・精度と耐久性良し!!

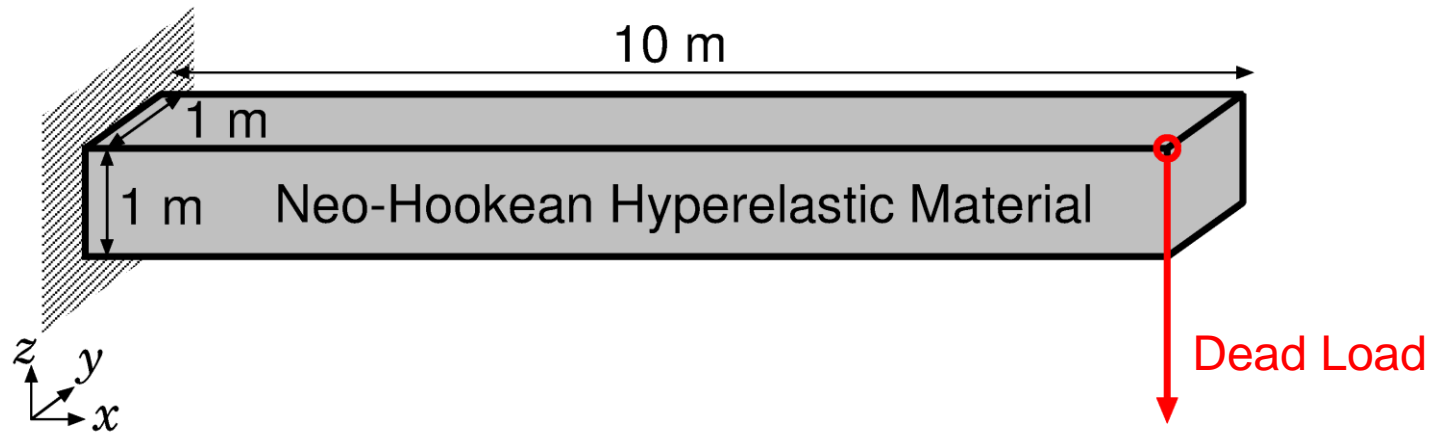
ご清聴ありがとうございました

付録



Bending of Hyperelastic Cantilever

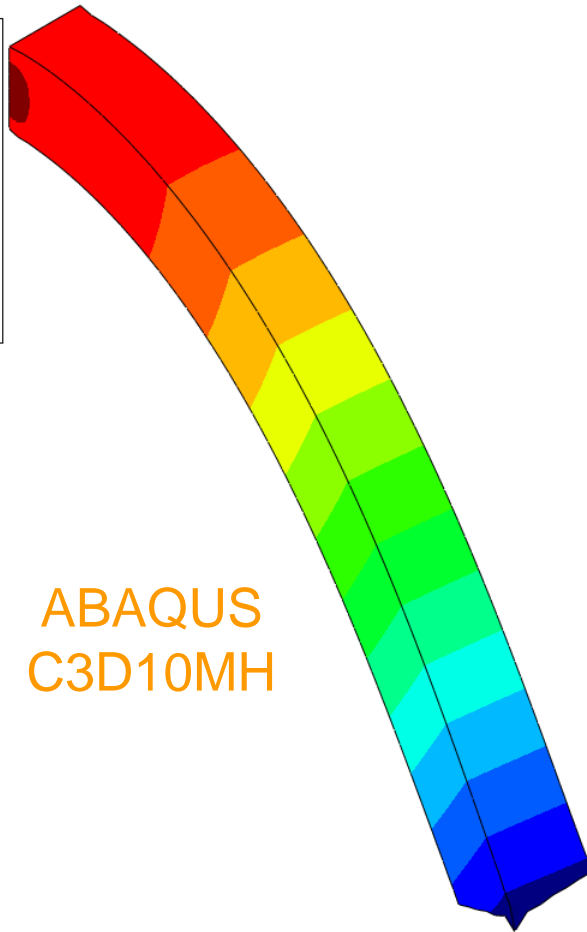
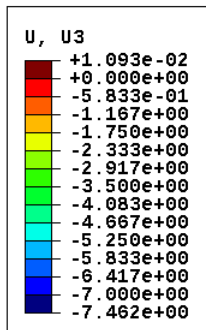
Outline



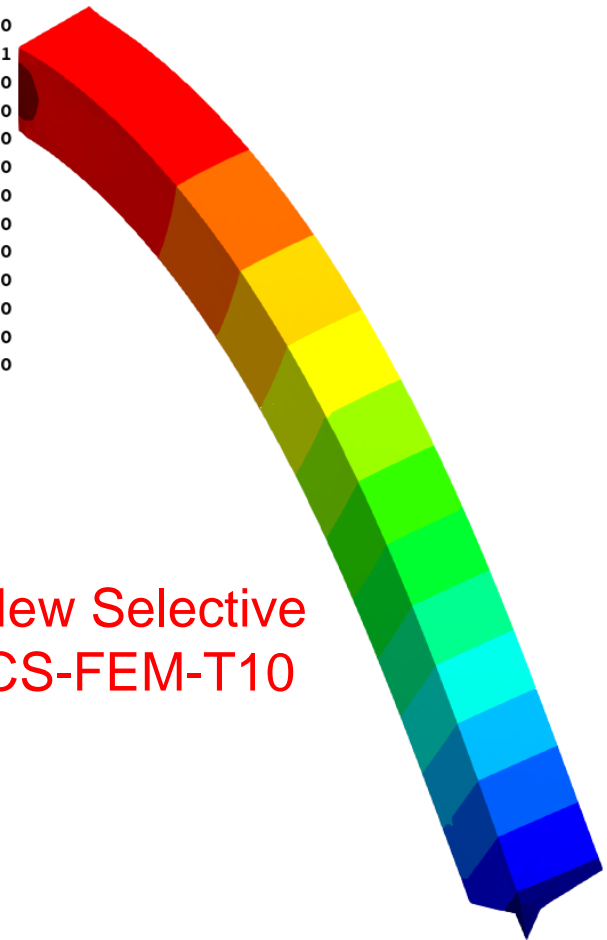
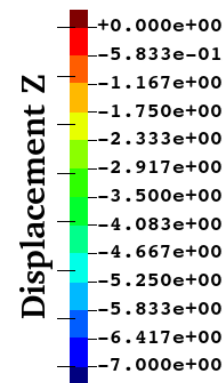
- Neo-Hookean hyperelastic material
- Initial Poisson's ratio: $\nu_0 = 0.49$
- Compared to **ABAQUS C3D10MH** (modified hybrid T10 element) with the same mesh.

Bending of Hyperelastic Cantilever

Comparison of the deflection disp. at the final state



ABAQUS
C3D10MH

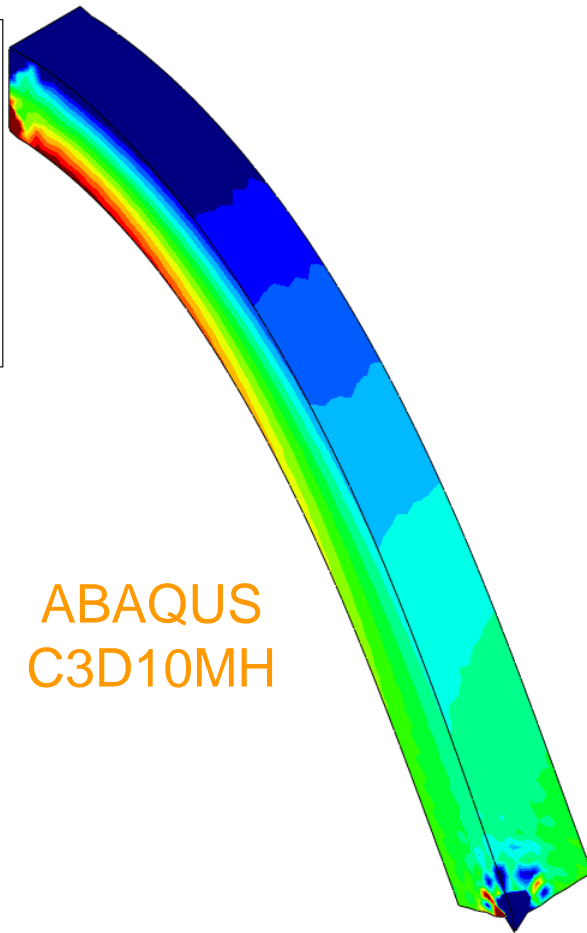
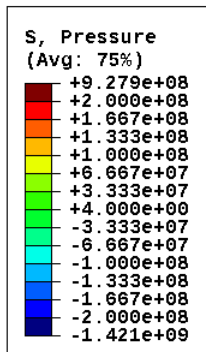


New Selective
CS-FEM-T10

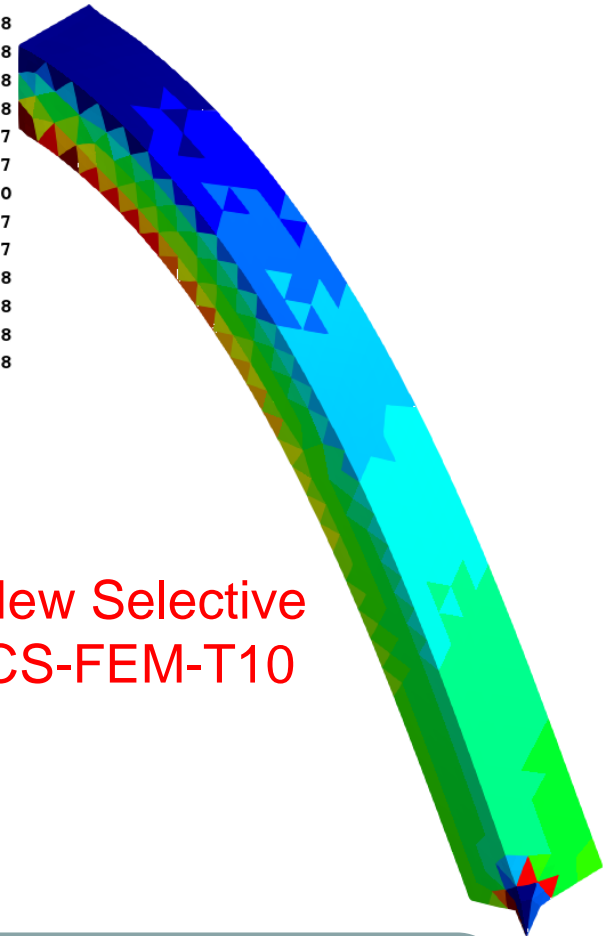
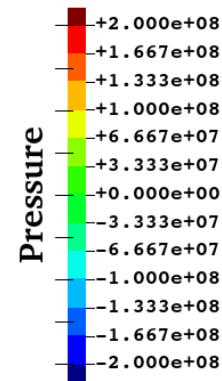
No volumetric locking is observed.

Bending of Hyperelastic Cantilever

Comparison of the pressure dist. at the final state



ABAQUS
C3D10MH



New Selective
CS-FEM-T10

Almost the same pressure distributions
with no checkerboarding.