

複雑形状を持つ微圧縮性材料の 大変形に対する**10節点**四面体要素を用いた 要素内選択的平滑化有限要素法

東京工業大学
工学院 システム制御系
大西 有希

研究背景

実現したい内容:

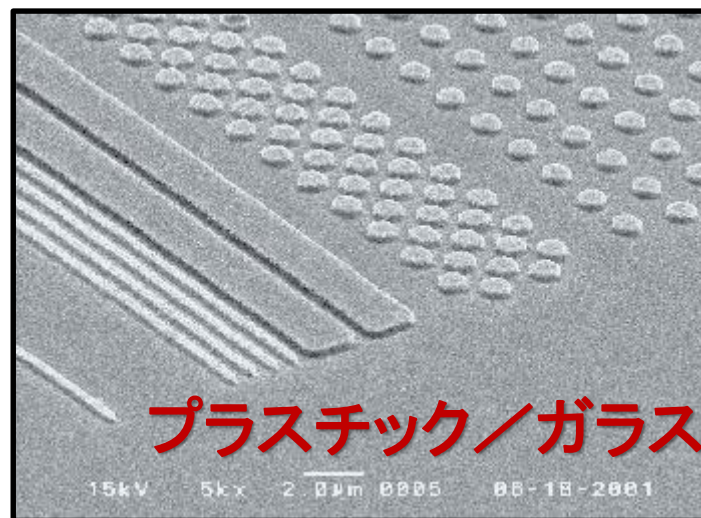
- 「超」大変形問題を高精度かつ安定に解きたい。
- 複雑形状を四面体で解きたい。
- 微圧縮性が現れる材料も解きたい。
- 自動リメッシングも実現したい。
- 接触も扱いたい。



ゴム



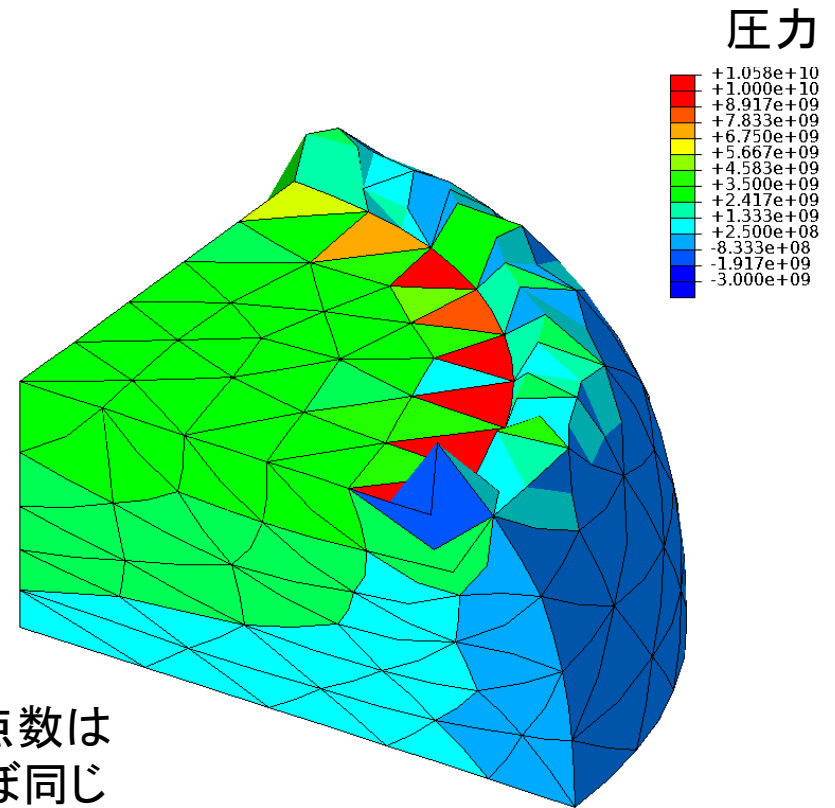
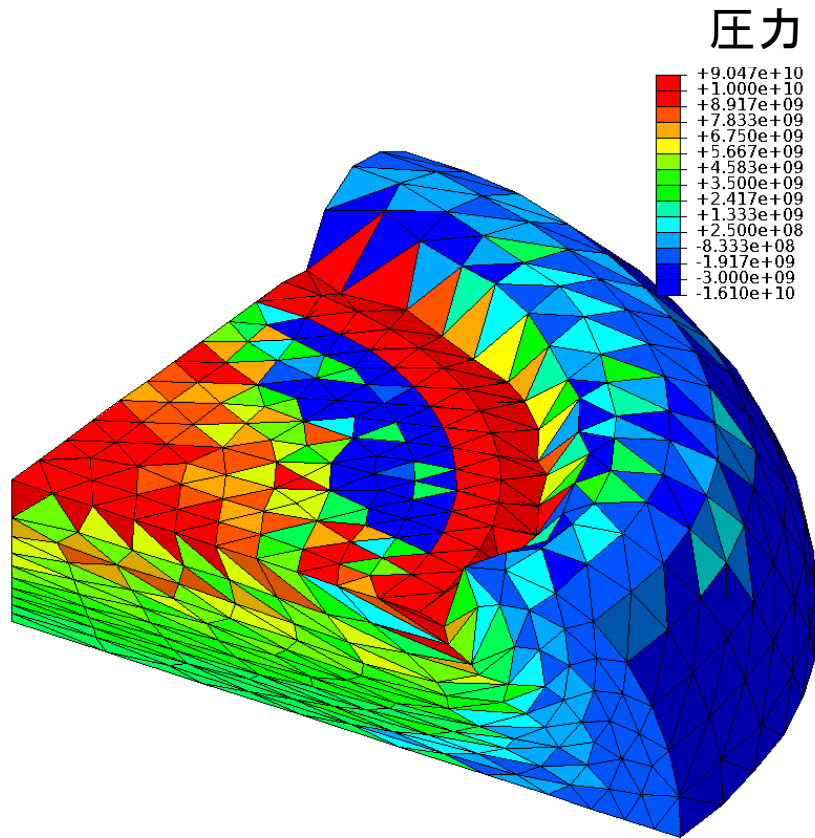
金属



プラスチック/ガラス

既存手法の問題点

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

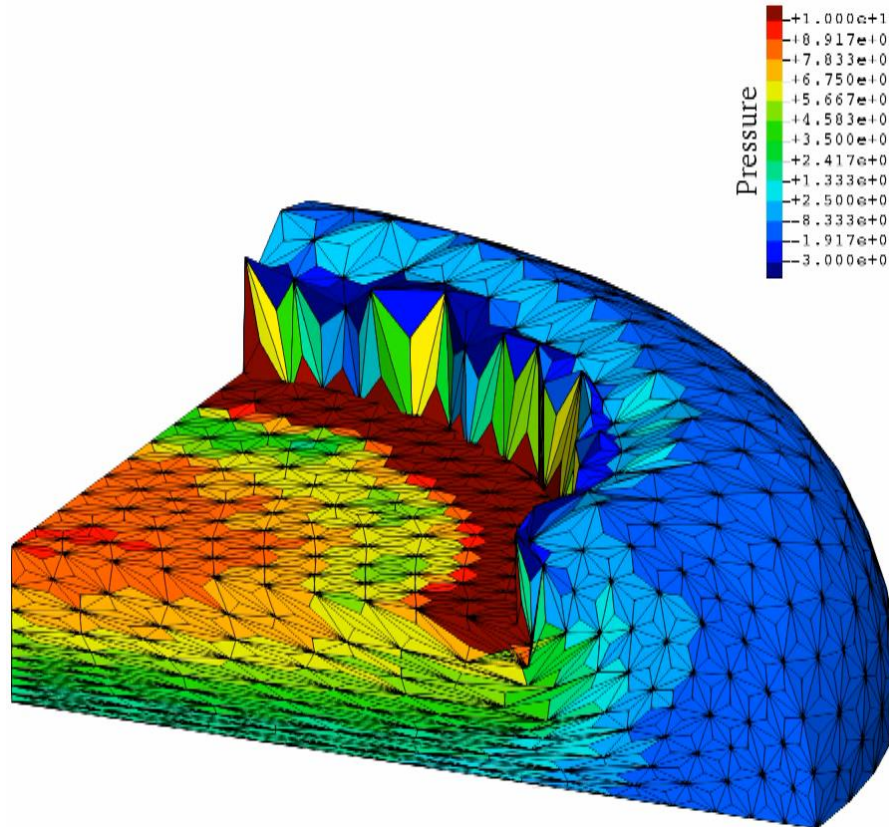
四面体1次ハイブリッド要素(C3D4H) **四面体2次修正ハイブリッド要素(C3D10MH)**

- ✓ 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.
- ✓ 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(S-FEM-T4)

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.



※注※
「S-FEM-T4」は
4節点四面体平滑化
有限要素法の意
(詳細は後述).

F-bar ES-FEM-T4 (S-FEM-T4の一種)

- ✓ 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.

【問題点】
四面体ES-FEM
は高精度ではあ
るものの、汎用
FEMコードに実
装できない.

研究目的

10節点四面体(T10)要素を用いることで
汎用FEMコードにも実装可能な
高精度かつ安定なS-FEM定式化を提案する。

発表目次:

- S-FEMのおさらい
- 提案手法の定式化概要
- 解析例
- ABAQUSへの実装
- まとめ

S-FEMのおさらい

Smoothed Finite Element Method (S-FEM)とは？

- G. R. Liuらが2007年に提案した新しいFEMの定式化.
- ひずみ平滑化(Strain Smoothing)手法の一種.
- 基本的なS-FEM定式化には次の4タイプがある.
 1. ノード(節点)で平滑化するタイプ (NS-FEM)
 2. エッジ(要素辺)で平滑化するタイプ (ES-FEM)
 3. フェイス(要素面)で平滑化するタイプ (FS-FEM)
 4. セル(要素内)で平滑化する (CS-FEM)
- 上記をSelective法やF-bar法などで組み合わせれば無数に定式化のバリエーションが存在する.

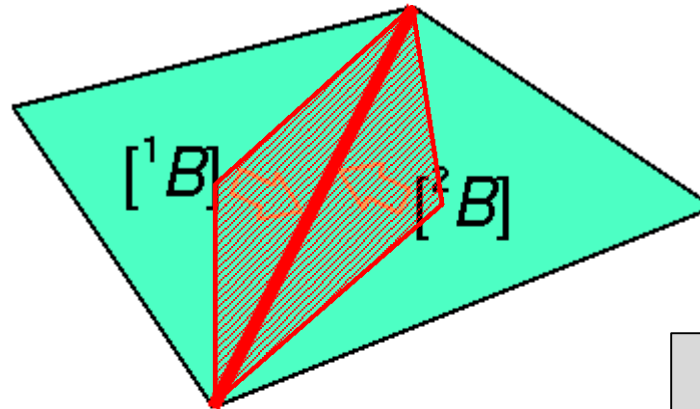
時間の都合, 2次元三角形要素を用いた
「ES-FEM」のみ解説します.



ES-FEMの定式化概要

- 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.**

一般的なS-FEMの課題

セル(要素内)でひずみ平滑化を行うCS-FEMを除き、
汎用FEMコードに実装できない。

- ∴ ノード, エッジ, フェイスでひずみ平滑化を行うと, 要素の境界をまたいだ(複数の要素を使った)計算が必要となり, 要素として完結しないから.

加えて, 4節点四面体(T4)要素はひずみが要素内一定なので, これ以上要素内でひずみを平滑化できない。



【本研究の提案】

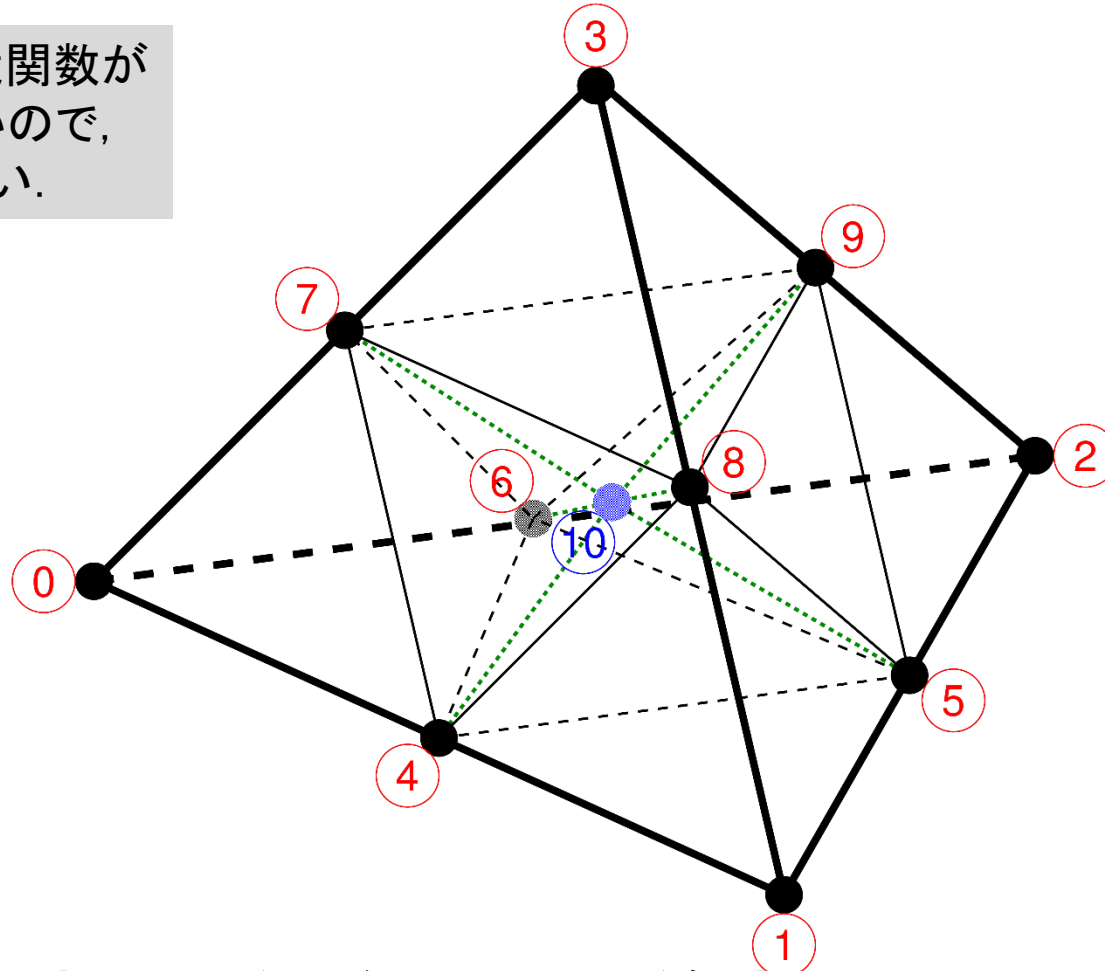
10節点四面体(T10)要素ならCS-FEMを適用できるので, 汎用FEMコードにも実装できる。



提案手法の定式化概要

1. T10要素のT4サブ要素への分割

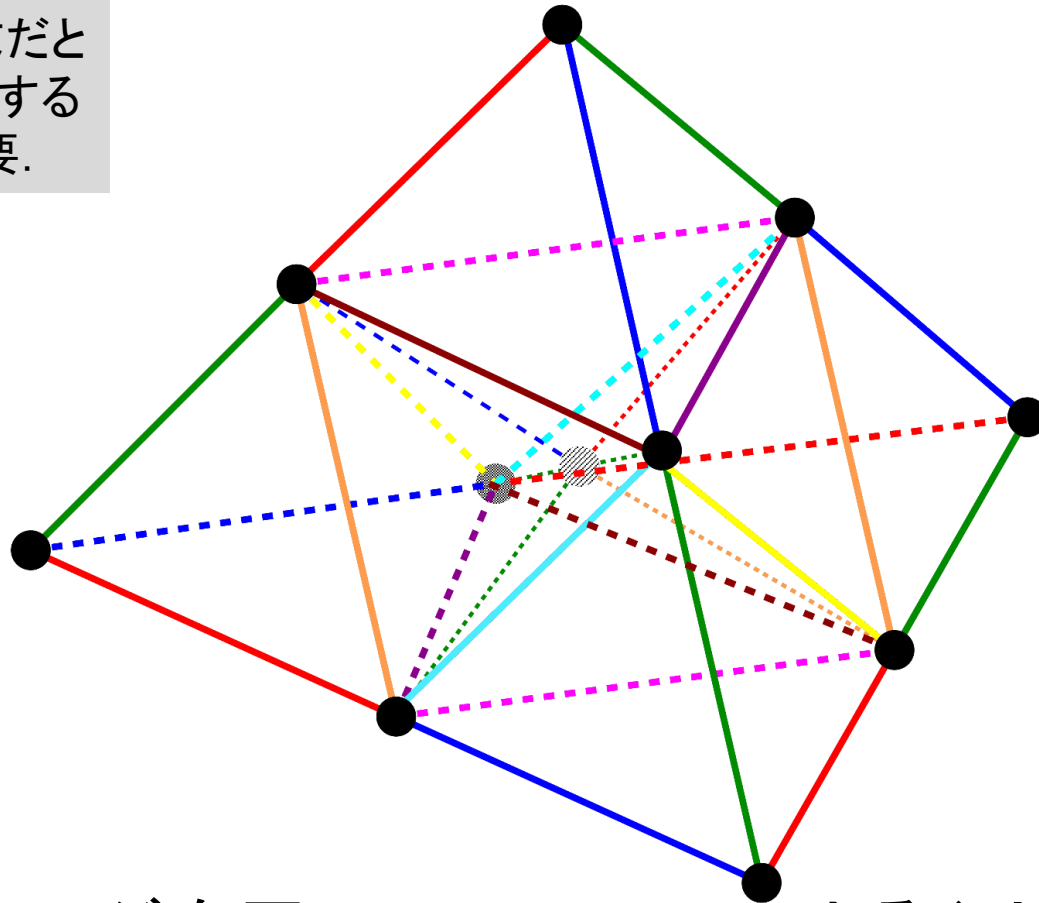
大変形では形状関数が線形の方が良いので、要素を分割したい。



- **ダミー節点(10)**を6個の中間節点の平均位置に置く。
- T10要素を12個のT4サブ要素に分割し、歪みを求める。

2. 要素内歪み平滑(せん断成分)

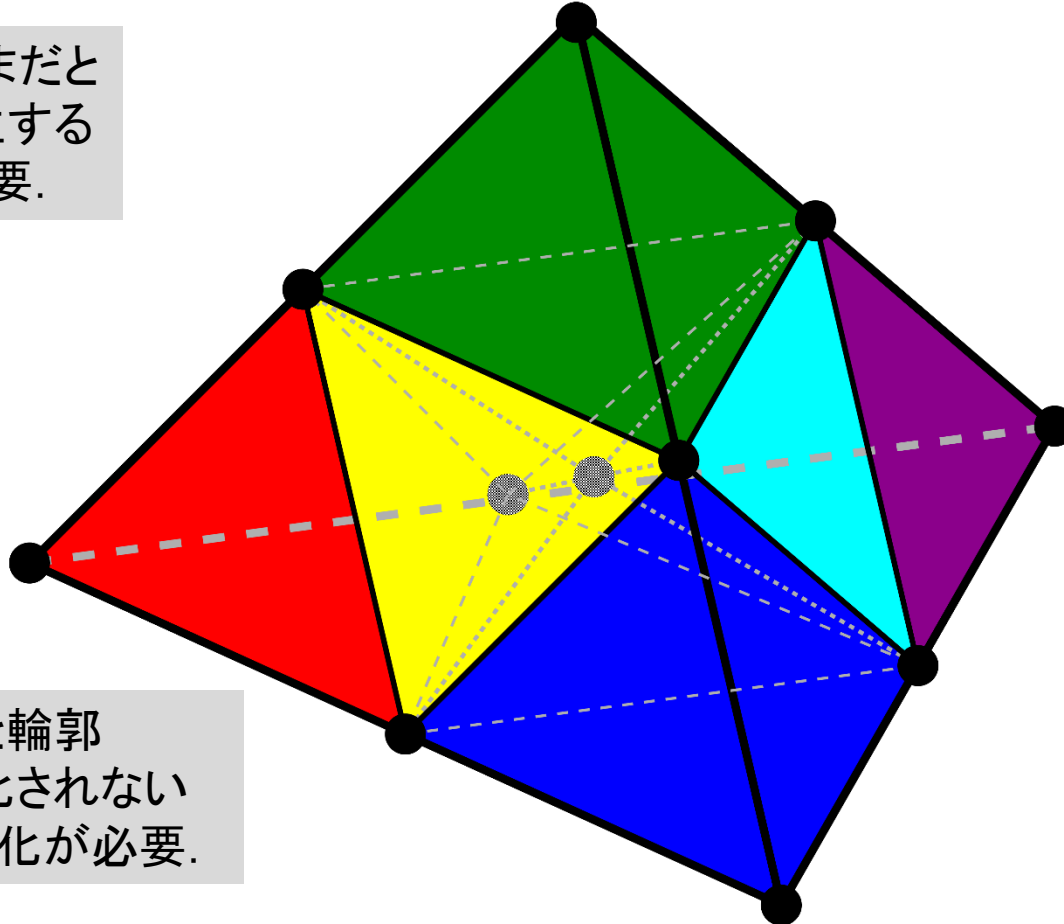
サブ要素そのままと
ロッキングが発生する
ので平滑化が必要.



- 30本のエッジを用い, ES-FEMによる(サブ要素→エッジの方向で)歪み平滑を実施. 続けて...

2. 要素内歪み平滑(せん断歪み成分)

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.

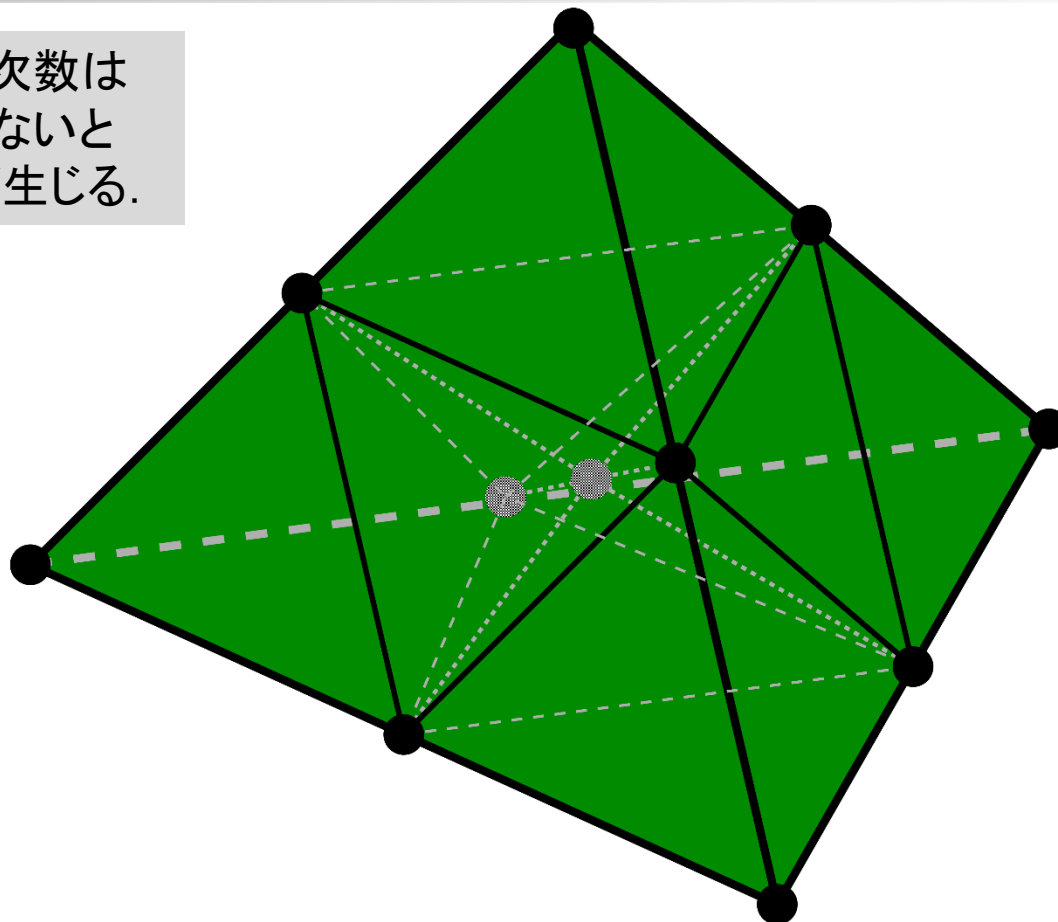


ES-FEMだけだと輪郭
のエッジが平滑化されない
のでもう1回平滑化が必要.

- 30本のエッジを用い, ES-FEMによる(サブ要素→エッジの方向で)歪み平滑を実施. 続けて...
- 逆手順で(エッジ→サブ要素の方向で)歪み平滑を実施.

3. 要素内歪み平滑(体積歪み成分)

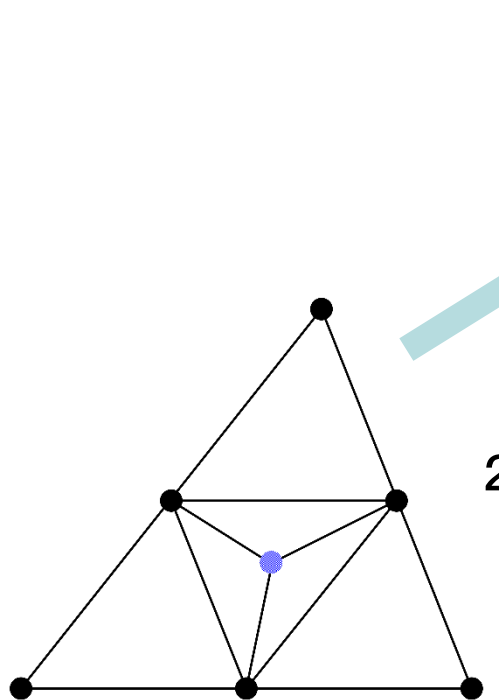
体積歪みの空間次数はせん断より落とさないと体積ロッキングが生じる.



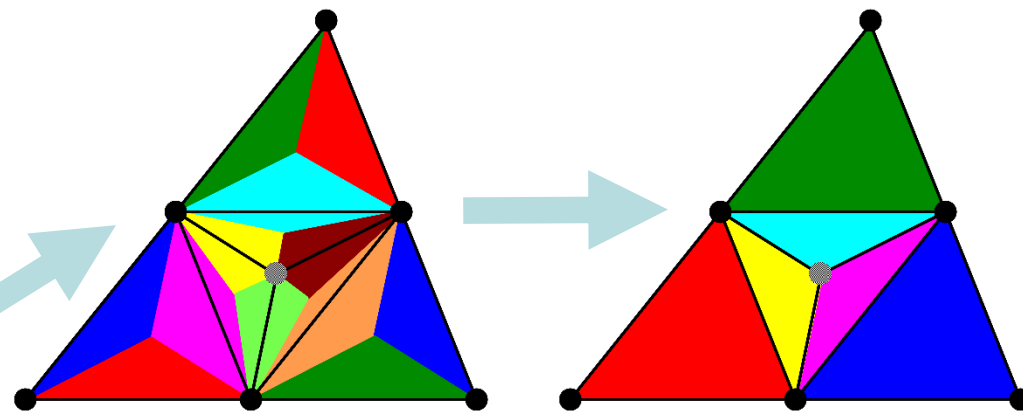
- 全サブ要素の体積歪みの平均を要素全体の体積歪みとする(8節点六面体Selective要素と同じ発想).

提案手法の定式化の流れ

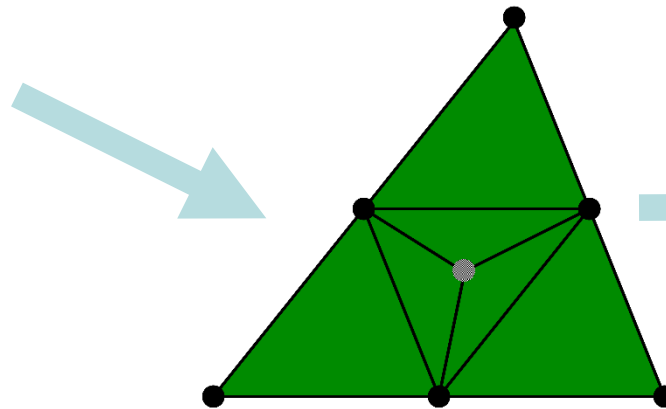
(簡単のため, 6節点三角形要素で説明)



1) ダミー節点を用いた
サブ要素分割



2) エッジとサブ要素を用いたせん断歪み平滑



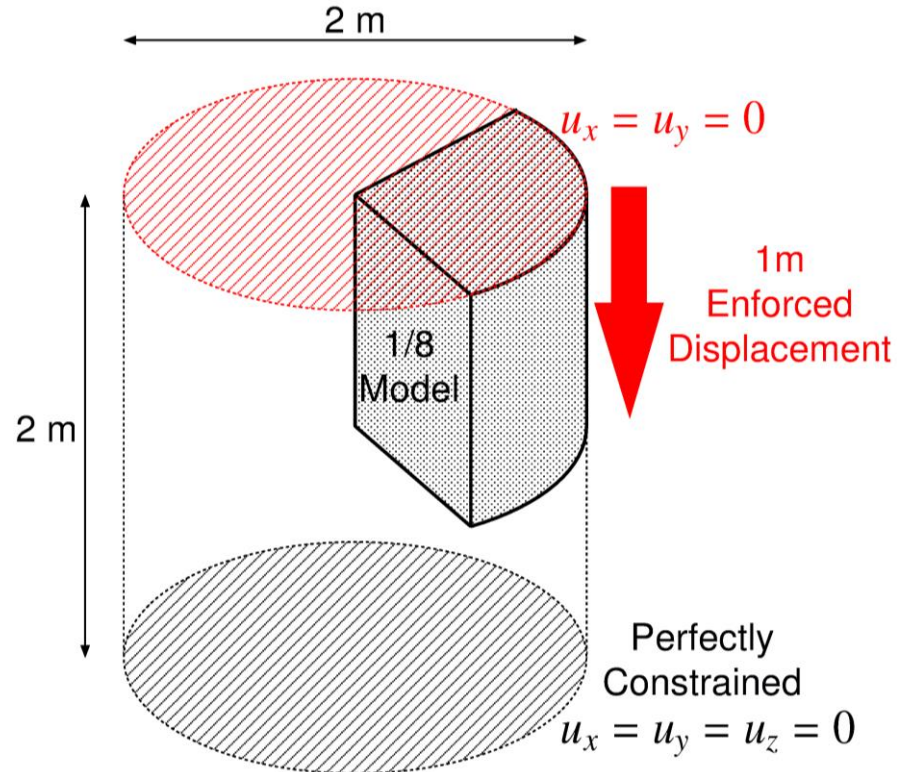
3) 全サブ要素平均を用いた体積歪み平滑

4) Selective法
で合成

解析例

超弾性1/8円柱のバレリング解析

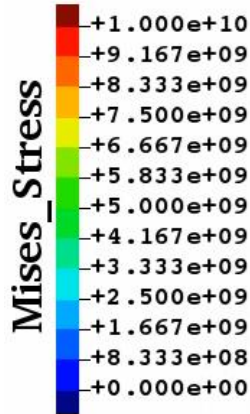
概要



- 上面に軸方向の**強制変位**を与えて圧縮.
- Neo-Hookean超弾性体, 初期ポアソン比 $\nu_{ini} = 0.49$.
- 同一メッシュでABAQUSの10節点四面体ハイブリッド要素(C3D10H, C3D10MH, C3D10HS)と比較.

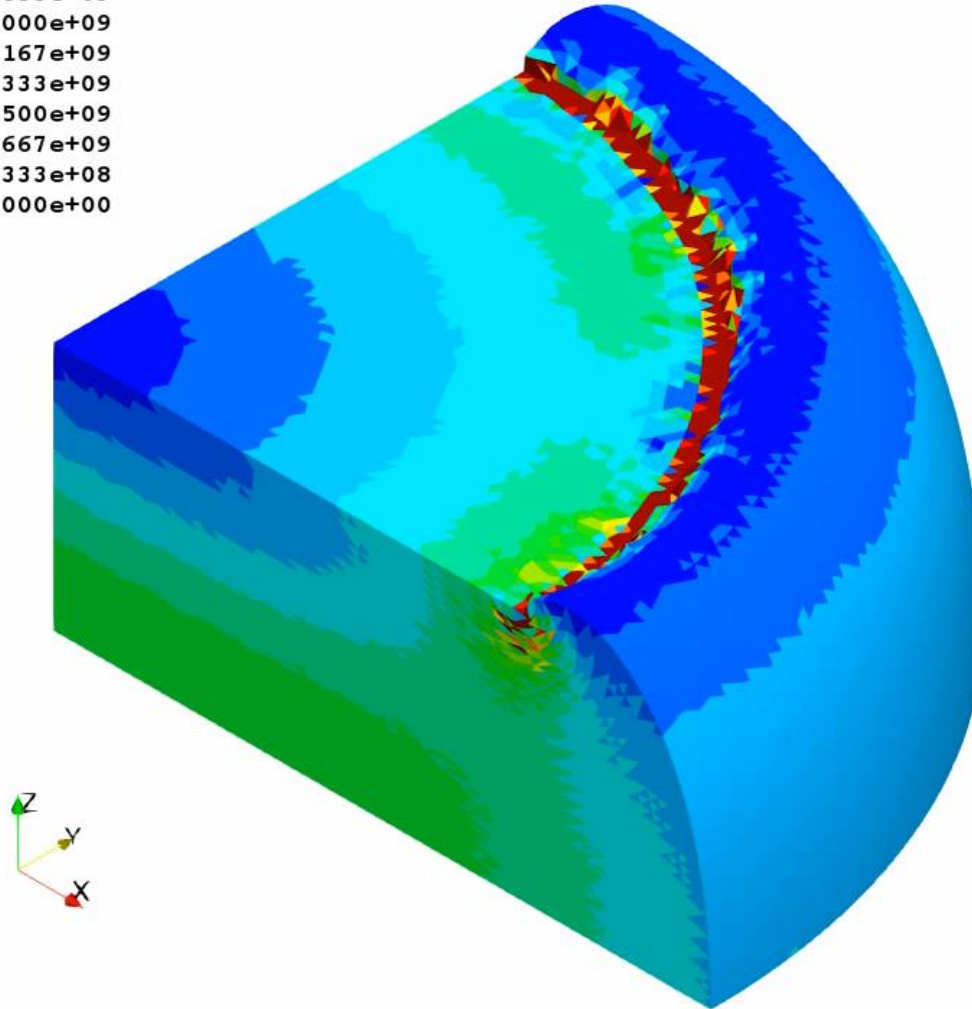
超弾性1/8円柱のバレリング解析

提案手法 の解析結果 (Mises 応力分布)



公称ひずみ
約47%圧縮
で収束困難

縁近傍を除き
ほぼ滑らかな
Mises応力分布
が得られている。

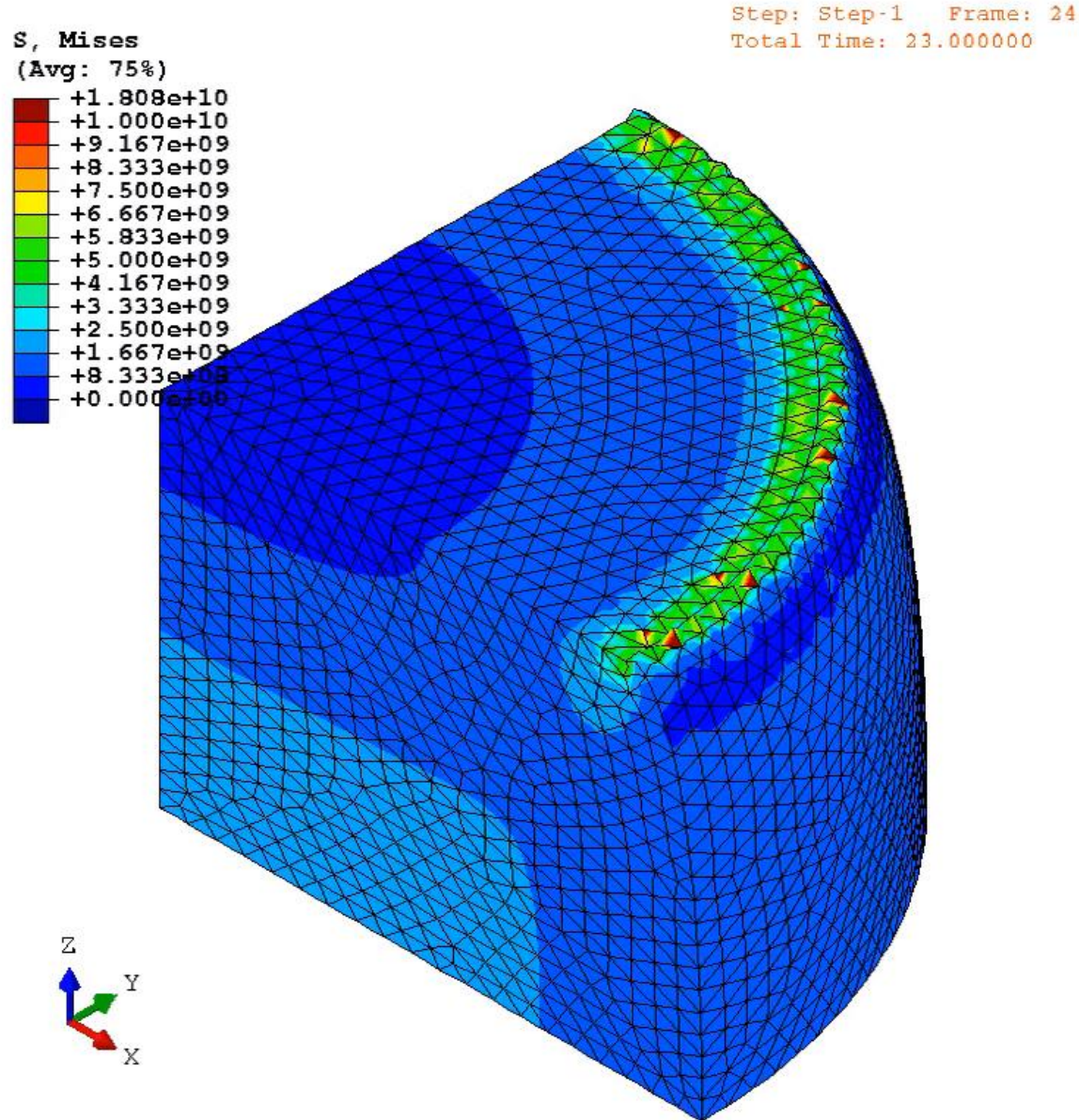


超弾性1/8円柱のバレリング解析v

ABAQUS C3D10MH の解析結果 (Mises 応力分布)

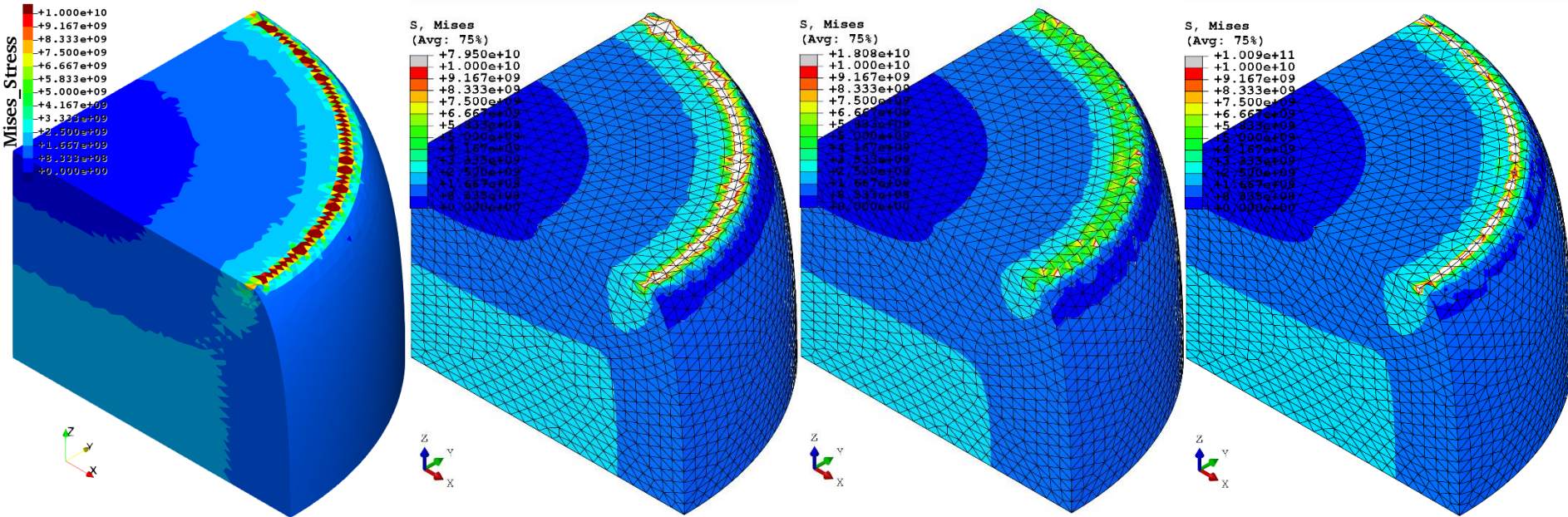
公称ひずみ
約24%圧縮
で収束困難

縁近傍の変形
が奇妙に振動
していることが
早期収束困難
の原因？



超弾性1/8円柱のバレリング解析

Mises応力分布 (24%圧縮)



提案手法

ABAQUS
C3D10H

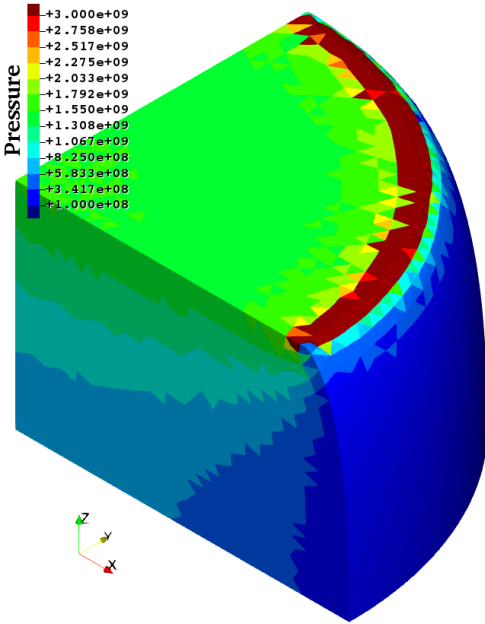
ABAQUS
C3D10MH

ABAQUS
C3D10HS

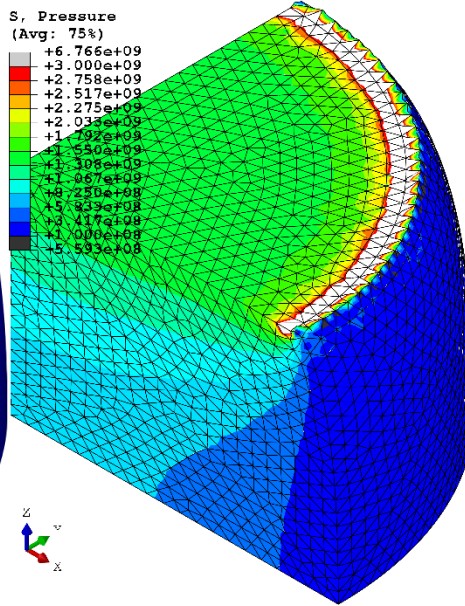
応力特異性のある縁の部分を除き、
Mises応力分布はおよそ一致している。

超弾性1/8円柱のバレリング解析

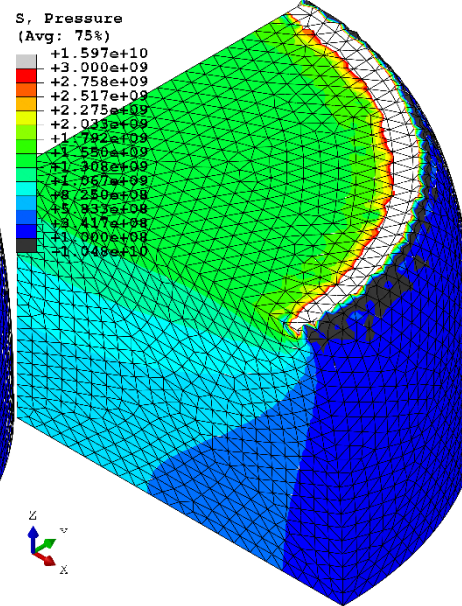
圧力分布 (24%圧縮)



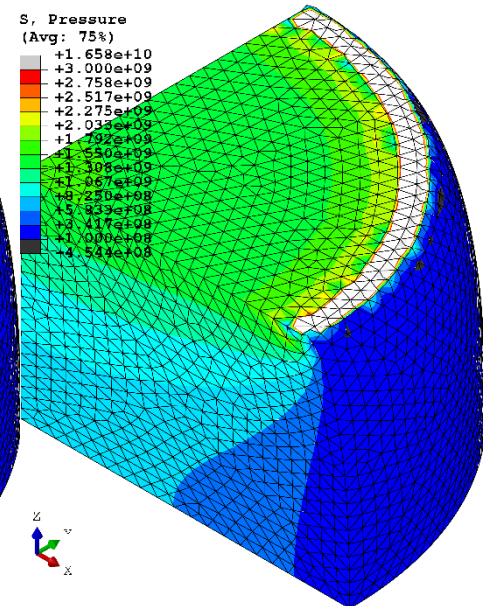
提案手法



ABAQUS
C3D10H



ABAQUS
C3D10MH

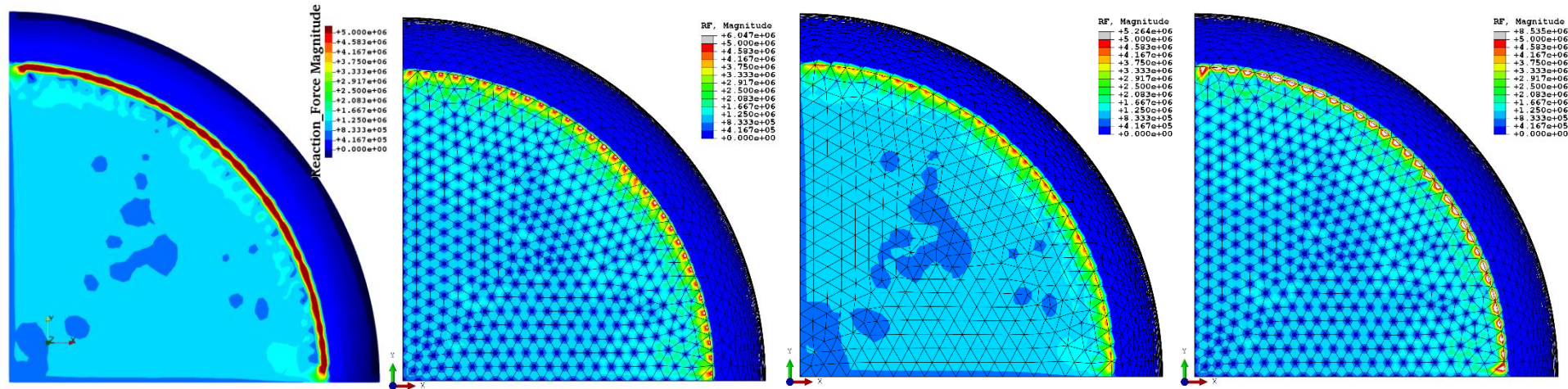


ABAQUS
C3D10HS

応力特異性のある縁の部分を除き、
圧力分布もおよそ一致している。

超弾性1/8円柱のバレリング解析

節点反力分布 (24%圧縮)



提案手法

ABAQUS
C3D10H

ABAQUS
C3D10MH

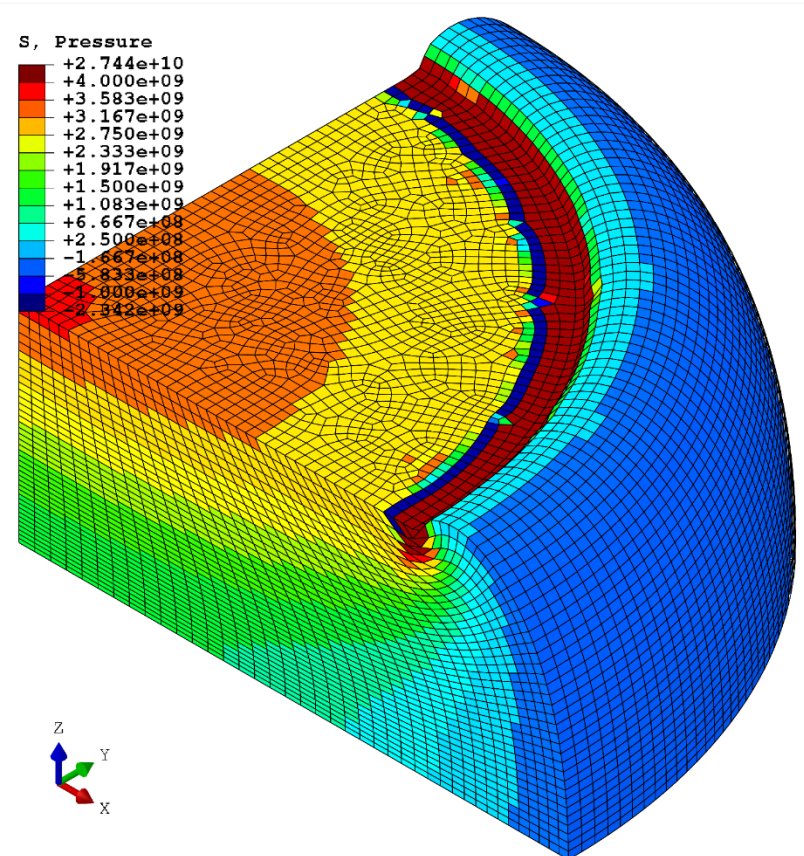
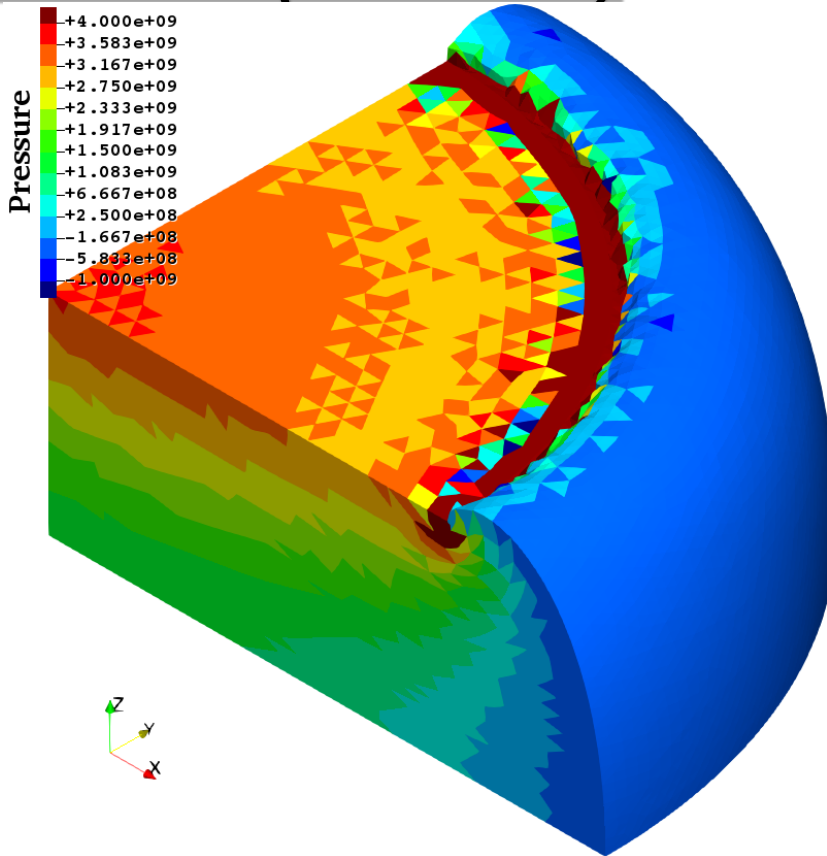
ABAQUS
C3D10HS

ABAQUSは修正要素(C3D10MH)のみ正常で、
提案手法とおよそ一致している。

超弾性1/8円柱のバレリング解析

応力分布 (47%圧縮)

節点数はほぼ同じ60k個



50%
圧縮
で
収束
困難

提案手法

ABAQUS C3D8

提案手法は六面体Selective要素(C3D8)とほとんど同等の精度と安定性を示している.

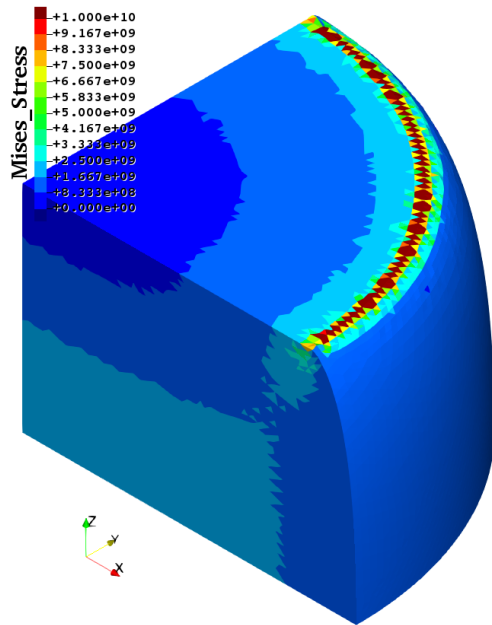
ABAQUSへの実装

ABAQUS UELについて

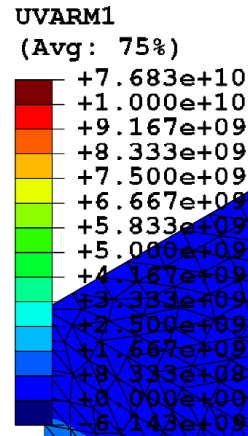
- ABAQUSにはユーザー定義要素「UEL」というユーザーサブルーチンを組み込む機能がある.
- マニュアルにはFortran77のコード例が載っているが、実はFortran90でも書ける.
- 「UEL」という名のサブルーチンを書き、コンパイルし、オブジェクトファイルをABAQUSに渡す.
> `abaqus job=test user=my_uel.o`
- ただし、odbファイル出力、接触や圧力荷重の与え方などUEL特有のデメリットは相当多い。
(詳細は割愛.)

ABAQUS UELの例題解析結果

Mises 応力分布 (24%圧縮)



In-houseコード

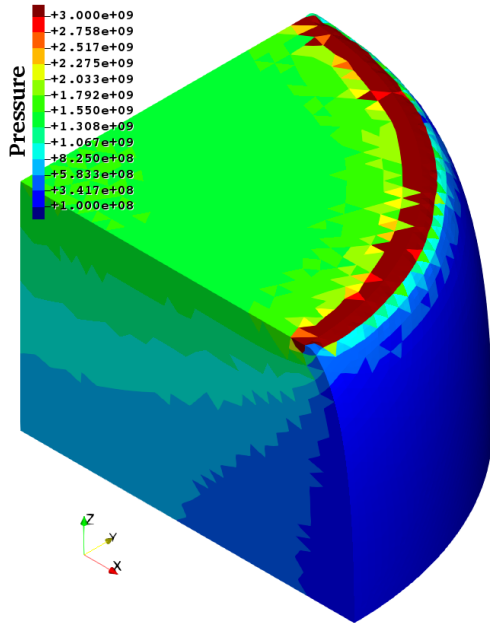


ABAQUS UEL

表示計算式の違いの範囲で一致。

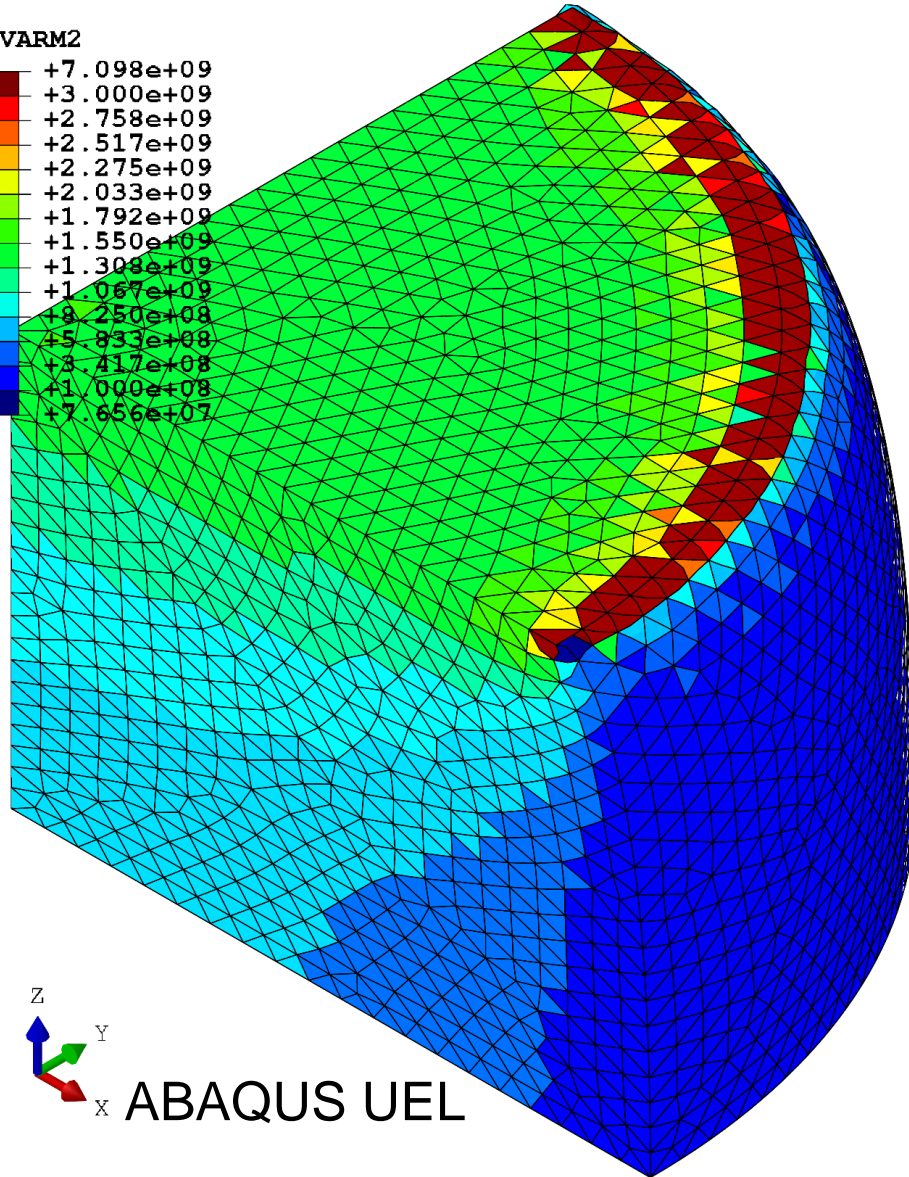
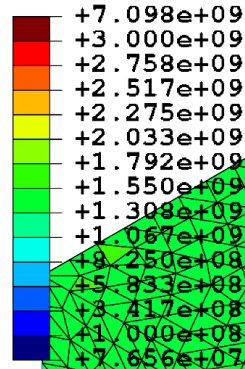
ABAQUS UELの例題解析結果

圧力分布 (24%圧縮)



In-houseコード

UVARM2



ABAQUS UEL

表示計算式の
違いの範囲で
一致。

まとめ

まとめ

- 10節点四面体を用いた新たなS-FEMを提案した.
- 提案手法は, 微圧縮材料の大変形解析において六面体要素に迫る精度と安定性を持つことを示した.
- 提案手法をABAQUSのユーザー定義要素として実装し, 自作コードと同等の解が得られることを確認した.
- 10節点四面体2次要素が実装されているIn-houseコードであれば, 提案手法を簡単に組み込むことができる.
- 計算時間は10節点四面体2次要素とほぼ同じ.
- 動的陽解法でもロッキングや圧力振動を起こさない.

是非, 実装をご検討ください.

ご清聴ありがとうございました.

