

# ゴム大変形解析における F-barES-FEM-T4の 接触安定性評価

大西 有希, 飯田 稜也, 天谷 賢治  
東京工業大学



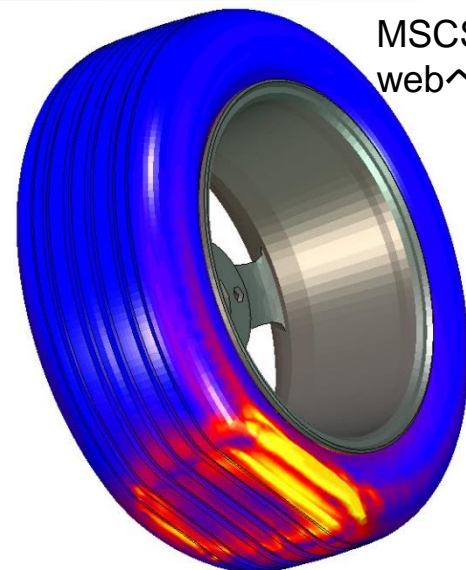
# 研究背景

## 【実現したい内容】

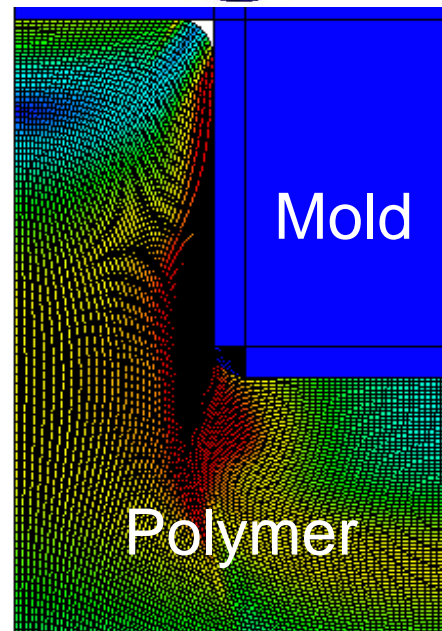
- 「超」大変形問題を高精度かつ安定に解きたい.
- 複雑形状を四面体で解きたい.
- 微圧縮性材料も解きたい.
- 自動リメッシングも実現したい.
- 接触解析も扱いたい.

## 【最終目標】

- ゴム材料の大変形解析(超弾性)
- 樹脂材料の大変形解析(粘弾性)
- 金属材料の大変形解析(弾塑性)



MSCSoftware  
webページより



# 既存手法の問題点

四面体を用いる既存のFEMは微圧縮性材料の解析において**精度と安定性などに問題**がある。

## ■ 高次要素:

✗ 体積ロッキングが不可避。

中間節点の存在による大変形や**接触**の精度低下と不安定。

## ■ 拡張ひずみ仮定法(EAS):

✗ 擬似ゼロエネルギーモードにより不安定。

## ■ B-bar法, F-bar法, Selective法:

✗ 四面体要素にはそのまま適用できない。

## ■ F-barパッチ法:

✗ 良いパッチを作ることが難しい。

## ■ u/p混合(ハイブリッド)法:

✗ 今のところ完全に満足できる定式化が提案されていない。

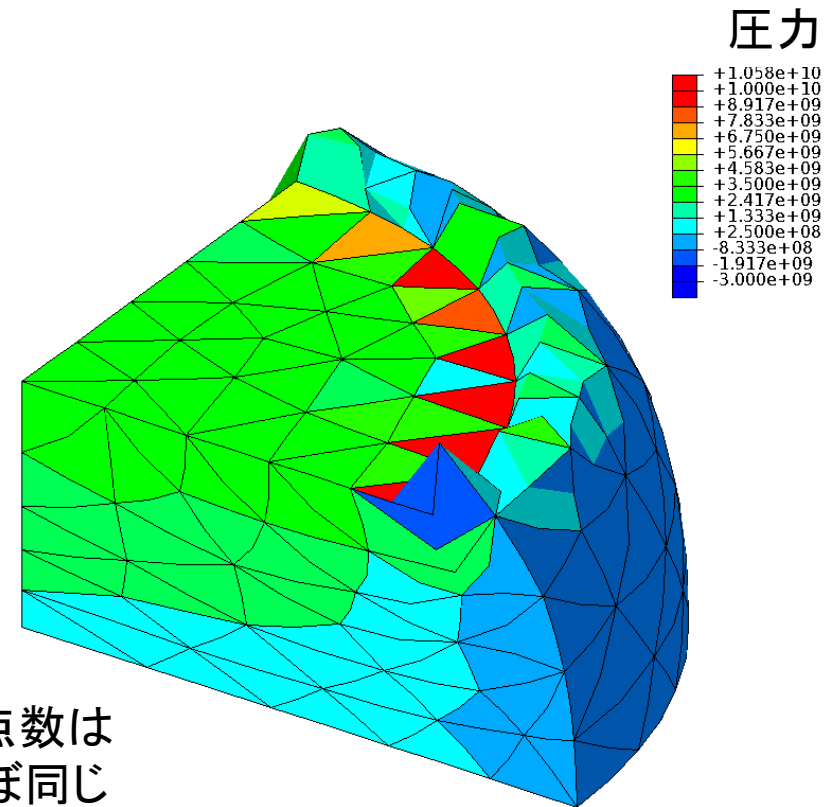
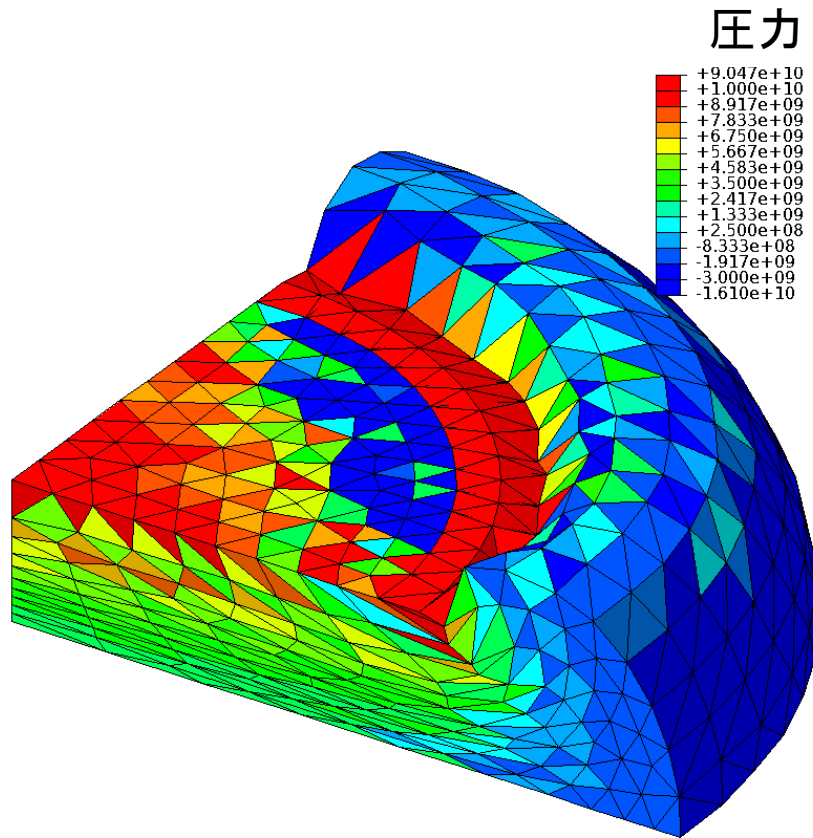
ただし, ある程度許容出来るものは提案されている。

(例: ABAQUS/Standardの「**C3D4H**」や「**C3D10MH**」など)



# 既存手法の問題点(つづき)

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)

- ✓ せん断・体積ロッキングなし.
- ✗ 圧力振動あり.
- ✗ 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, 圧力振動なし.
- ✗ 内挿の精度低下あり.
- ✗ 早期の収束困難あり.

# 解決策

平滑化有限要素法 (Smoothed Finite Element Method: S-FEM) という新しい有限要素定式化のアイデアが近年提案され、研究が進んでいる。

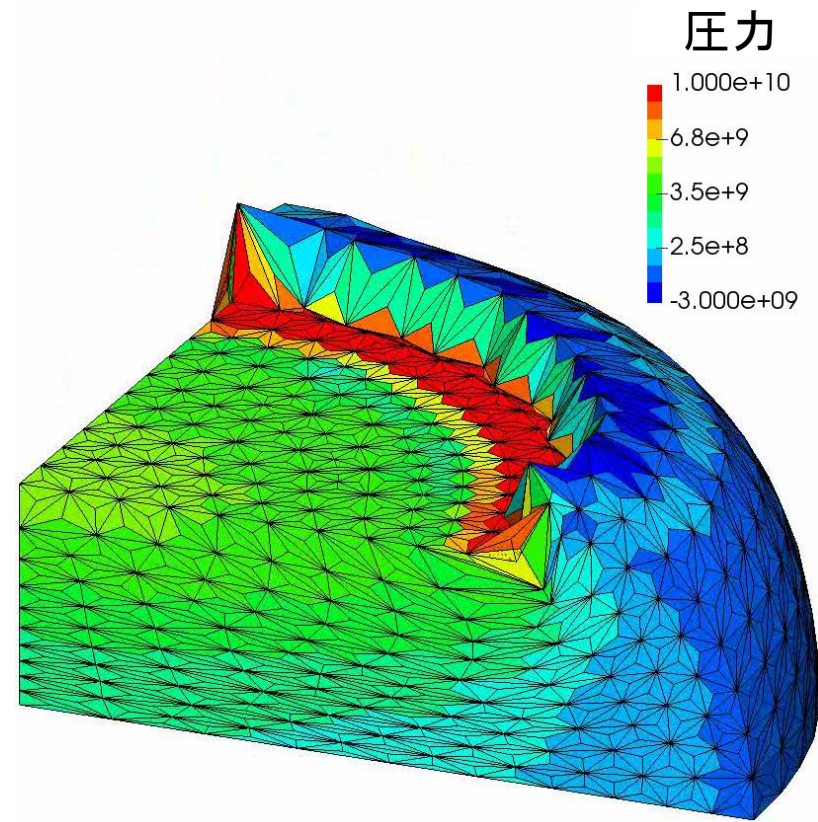
特に、最新のS-FEM定式化であるF-barES-FEM-T4は

- 4節点四面体要素 (中間節点なし)
- せん断 / 体積 / コーナーロッキングフリー
- 圧力振動フリー
- 大変形でも安定

の全てを満足することが超弾性体や弾塑性体の静解析で確認された。

# 解決策(つづき)

四面体解析例) 材料: neo-Hookean超弾性体,  $\nu_{ini} = 0.49$



メッシュは  
先程と同じ.

超弾性と  
弾塑性で  
性能を確認.

粘弾性も  
たぶん大丈夫.

ただし,  
**接触解析**  
での性能は  
未確認.

F-barES-FEM-T4 (最新の平滑化有限要素法)

- ✓ 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.

# 研究目的

最新の平滑化有限要素法(S-FEM)定式化である  
F-barES-FEM-T4を用いて**接触解析**で~~安定した~~  
精度良い解が得られるか否かを検証する.

## 発表目次:

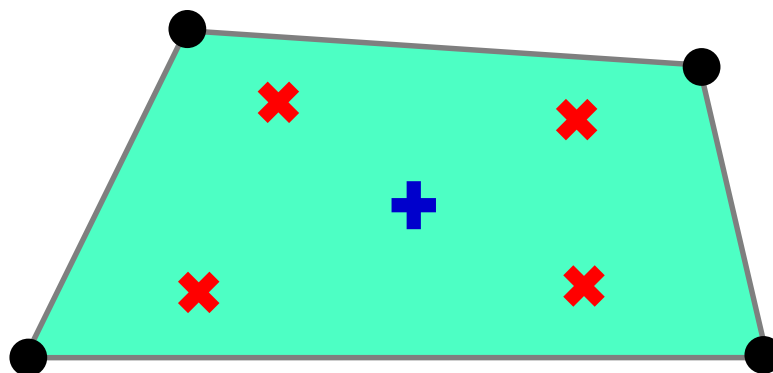
- F-barES-FEM-T4接触解析の定式化
- 超弾性接触解析例
- まとめ

# F-barES-FEM-T4接触解析の定式化



# F-bar法のおさらい

四角形(Q4)要素  
および  
六面体(H8)要素  
のための手法



体積変形対する  
一種の  
ローパスフィルター

## アルゴリズム

- 標準的FEMと同様, **各積分点**で変形勾配  $F$  を計算する.
- **要素中心**でも変形勾配  $F$  を計算し, その体積変化率  $\det(F)$ を  $\bar{J}$  とおく.
- **各積分点**の変形勾配を次式により修正し, **合成された  $\bar{F}$** を得る.

$$\bar{F} = \bar{J}^{1/3} F^{\text{iso}}.$$

- $\bar{F}$  を**各積分点**変形勾配とみなし, 応力・内力・剛性等計算する.

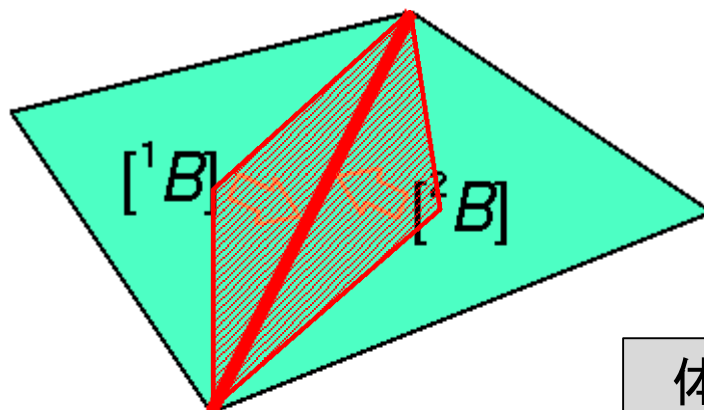
Q4およびH8要素でせん断ロッキングは回避できないが  
**体積ロッキングを回避できる.**



# Edge-based S-FEM(ES-FEM)のおさらい

- 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**辺**に要素体積を重みとして配り,  
**辺**で平均化して $[^{\text{Edge}}B]$ を作る.
- **辺**の平滑化領域の量として歪み, 応力, 節点内力を計算する.

要は, 積分点を  
辺に置くイメージ.



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

Edge  $T$

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

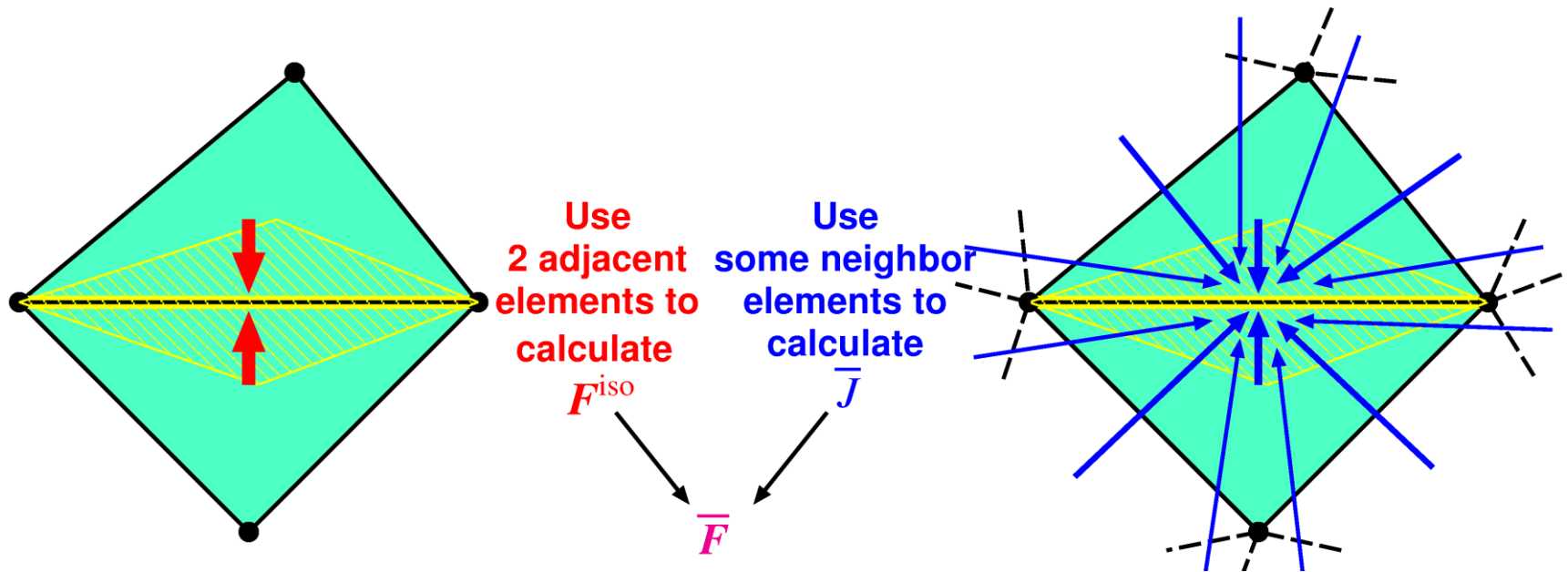
**ES-FEM**

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.**



# 提案するF-barES-FEMの概要

- エッジの  $F^{iso}$  をES-FEMを用いて計算する.
- エッジの  $\bar{J}$  にはNS-FEMを繰り返し適用して空間的にローパスフィルタされた  $J$  の値を用いる(詳細は後述).
- F-bar法を用いてエッジの  $\bar{F}$  を合成する. 以降の計算はES-FEMと同様.



- せん断／体積／コーナーロッキングおよび圧力振動が発生しない.
- 未知数が一切増加しない純粋な変位型FEMが良い.

# 接触の定式化

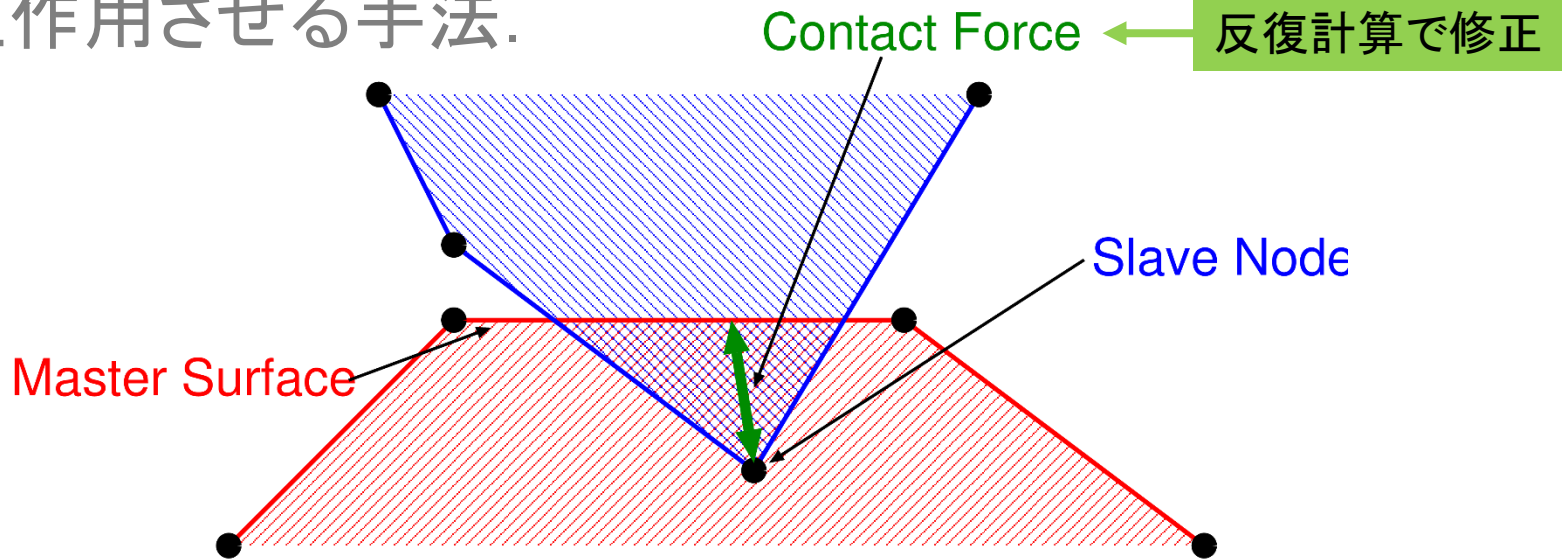
## ■ Augmented Lagrangian法を採用

Lagrange乗数(=接触力)を反復計算によって得る方法。

⇒ 未知数が一切増加しないS-FEMの特徴を踏襲できる。

## ■ 古典的なNode-to-Surface接触

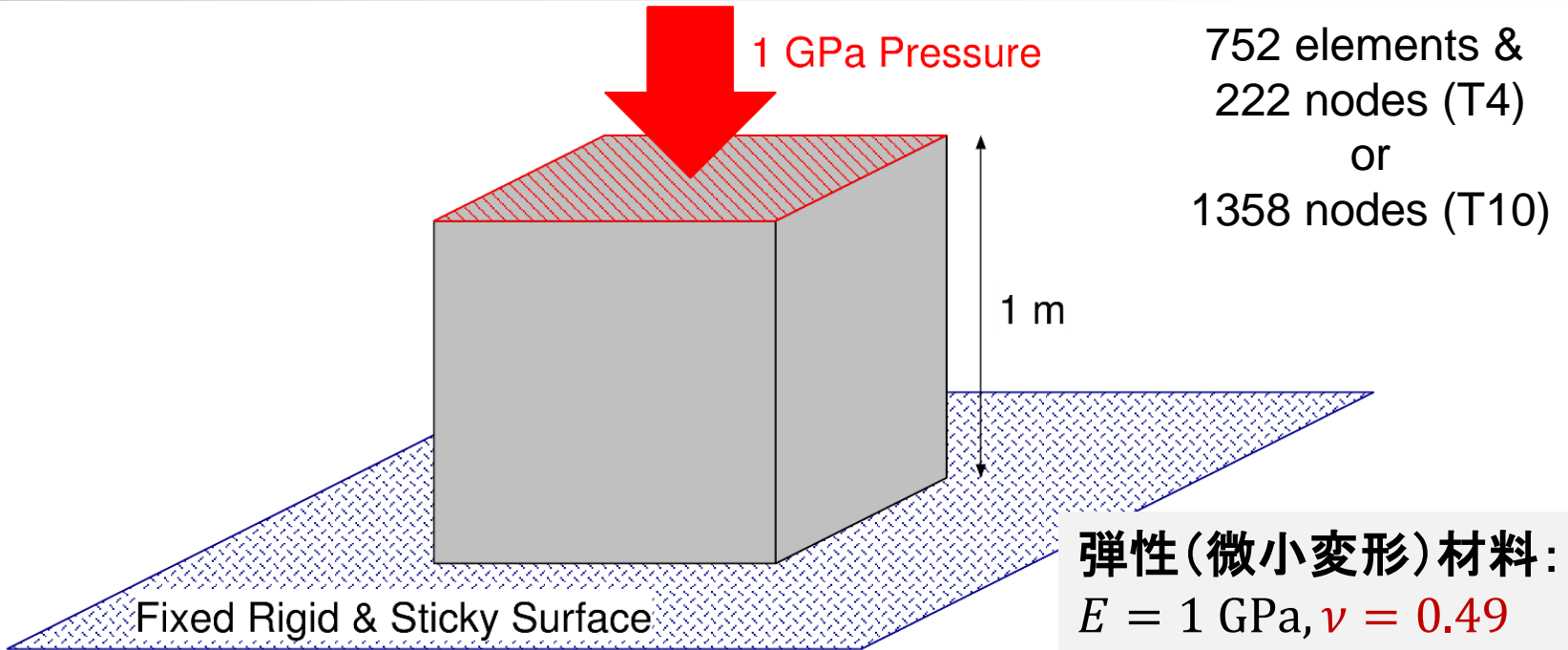
マスターサーフェスにスレーブノードが貫入しない様に相互作用させる手法。



# 超弾性接触解析例

# ブロックの押し当て

## 概要

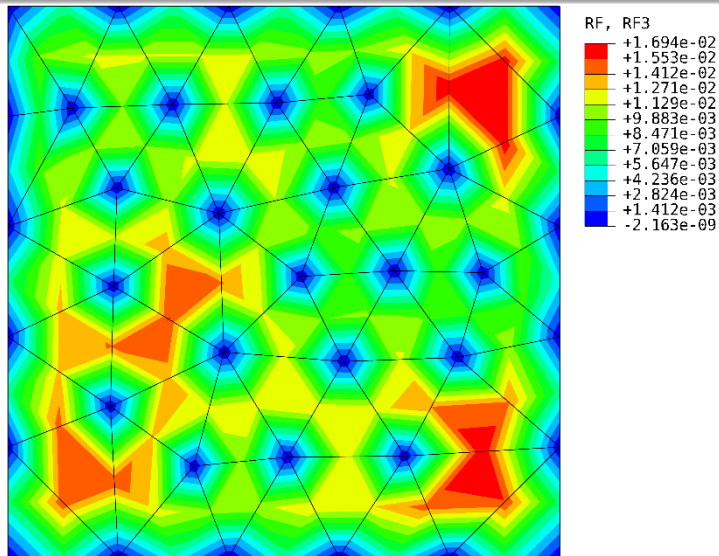


- 固定された剛体平面と立方体ブロックが滑りなしで接触.
- ブロック上面に微小な圧力荷重.
- つまり, 下面を完全拘束して上面を押し出すのと同様.
- 同一の非構造T4メッシュでABAQUS C3D10H, C3D10HS, C3D10MH, C3D4Hと比較.

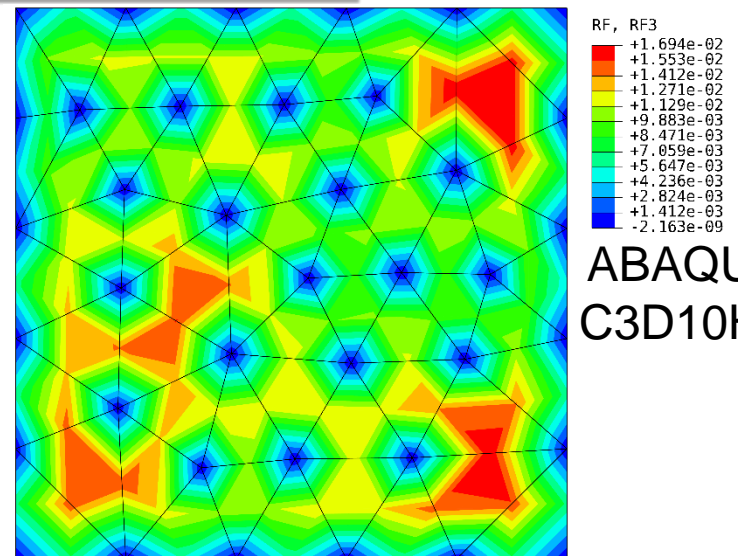
# ブロックの押し当て

## 接触面の接触力(法線方向節点荷重)分布

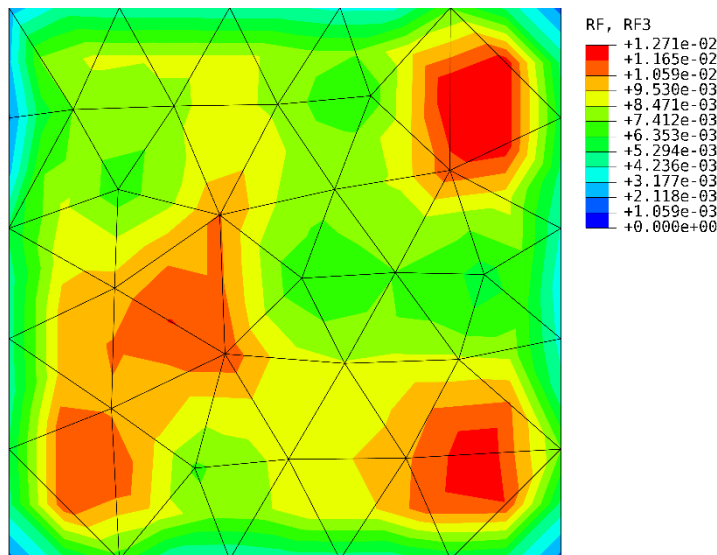
ABAQUS  
C3D10H



ABAQUS  
C3D10HS



ABAQUS  
C3D10MH

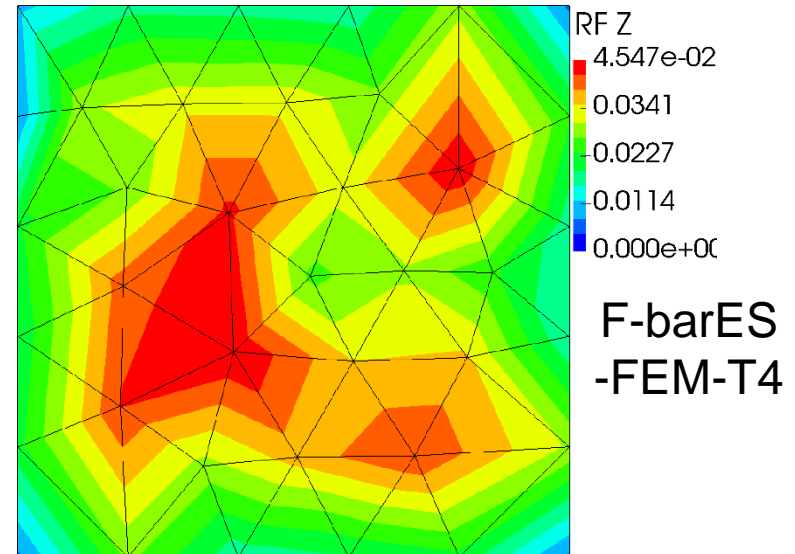
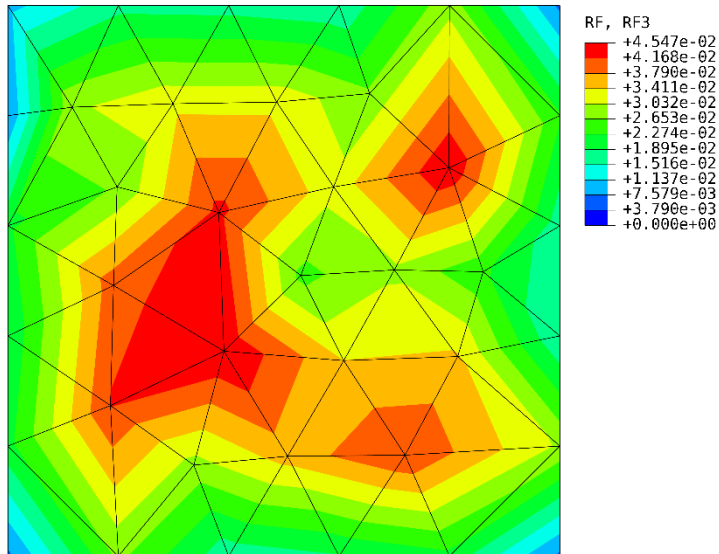


C3D10MH  
(修正10節点四面体  
ハイブリッド要素)  
以外は**接触力振動**  
を起こしている.

# ブロックの押し当て

## 接触面の接触力(法線方向節点荷重)分布

ABAQUS  
C3D4H

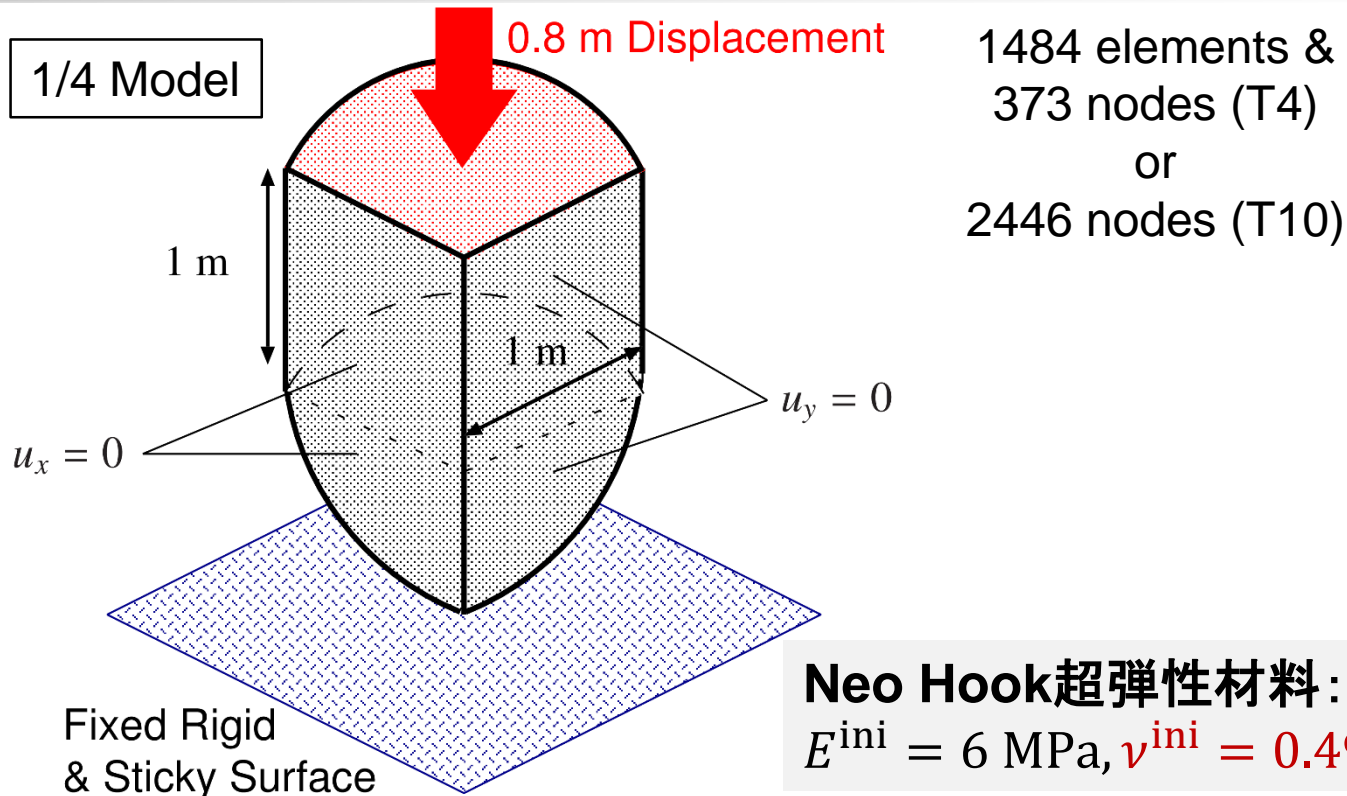


4節点四面体要素は、提案手法を含め、  
接触力振動を起こしていない。



# 弾丸状物体の押し込み

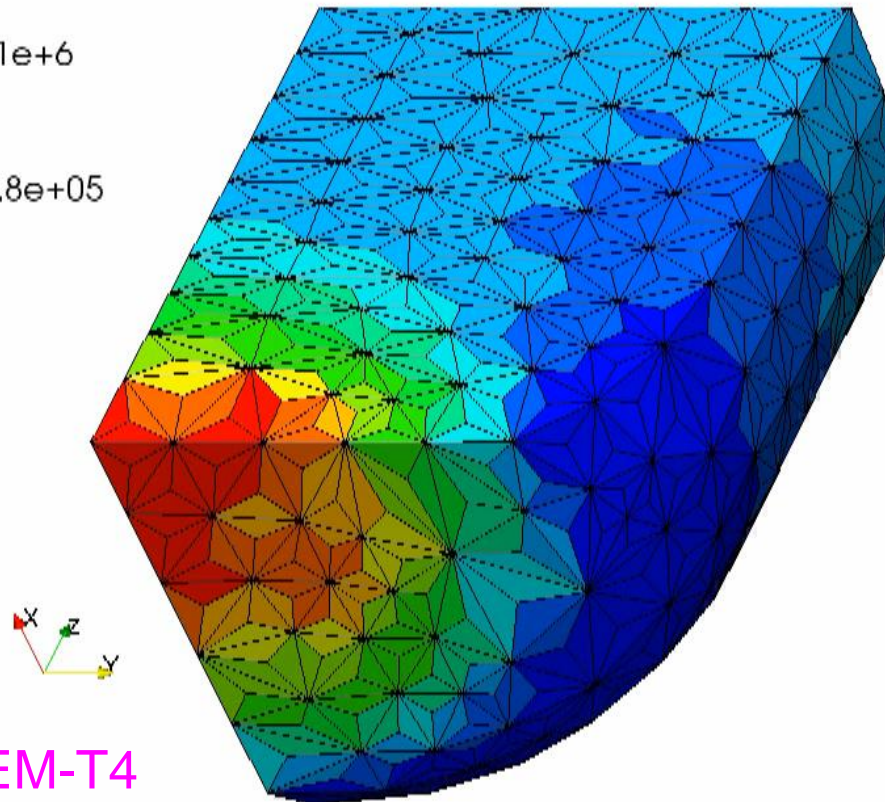
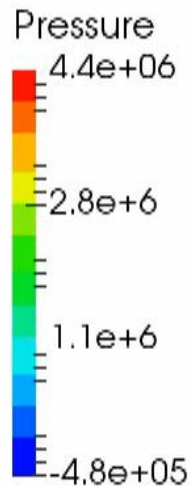
## 概要



- 固定された剛体平面と弾丸状物体が滑りなしで接触.
- 弾丸上面を剛体面に垂直に強制変位(大変形).
- 同一の非構造T4メッシュでABAQUS C3D10H, C3D10HS, C3D10MH, C3D4Hと比較.

# 弾丸状物体の押し込み

## 変形と圧力分布の時刻歴



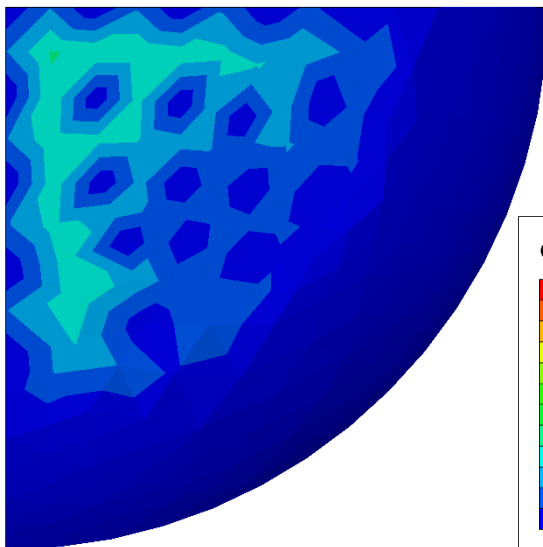
F-barES-FEM-T4



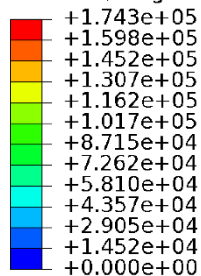
# 弾丸状物体の押し込み

## 接触面の接触力(節点荷重のノルム)分布

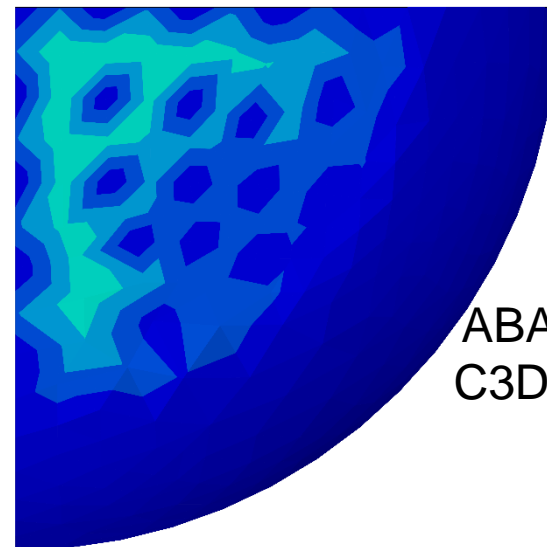
ABAQUS  
C3D10H



CNORMF, Magnitude



ABAQUS  
C3D10HS



ABAQUS  
C3D10MH



やはり, C3D10MH  
以外は**接触力振動**  
を起こしている.

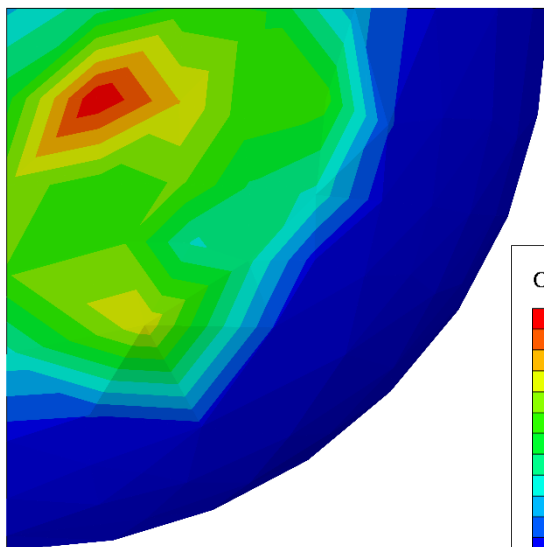
本例題程度の大変形  
では要素が原形を留めて  
いるため, C3D10MH  
でも収束解が得られる.



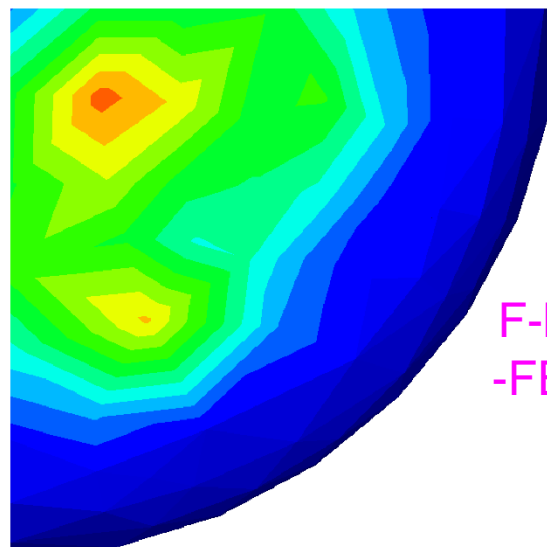
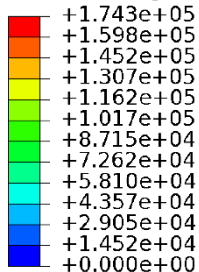
# 弾丸状物体の押し込み

## 接触面の接触力(節点荷重のノルム)分布

ABAQUS  
C3D4H



CNORMF, Magnitude



F-barES  
-FEM-T4

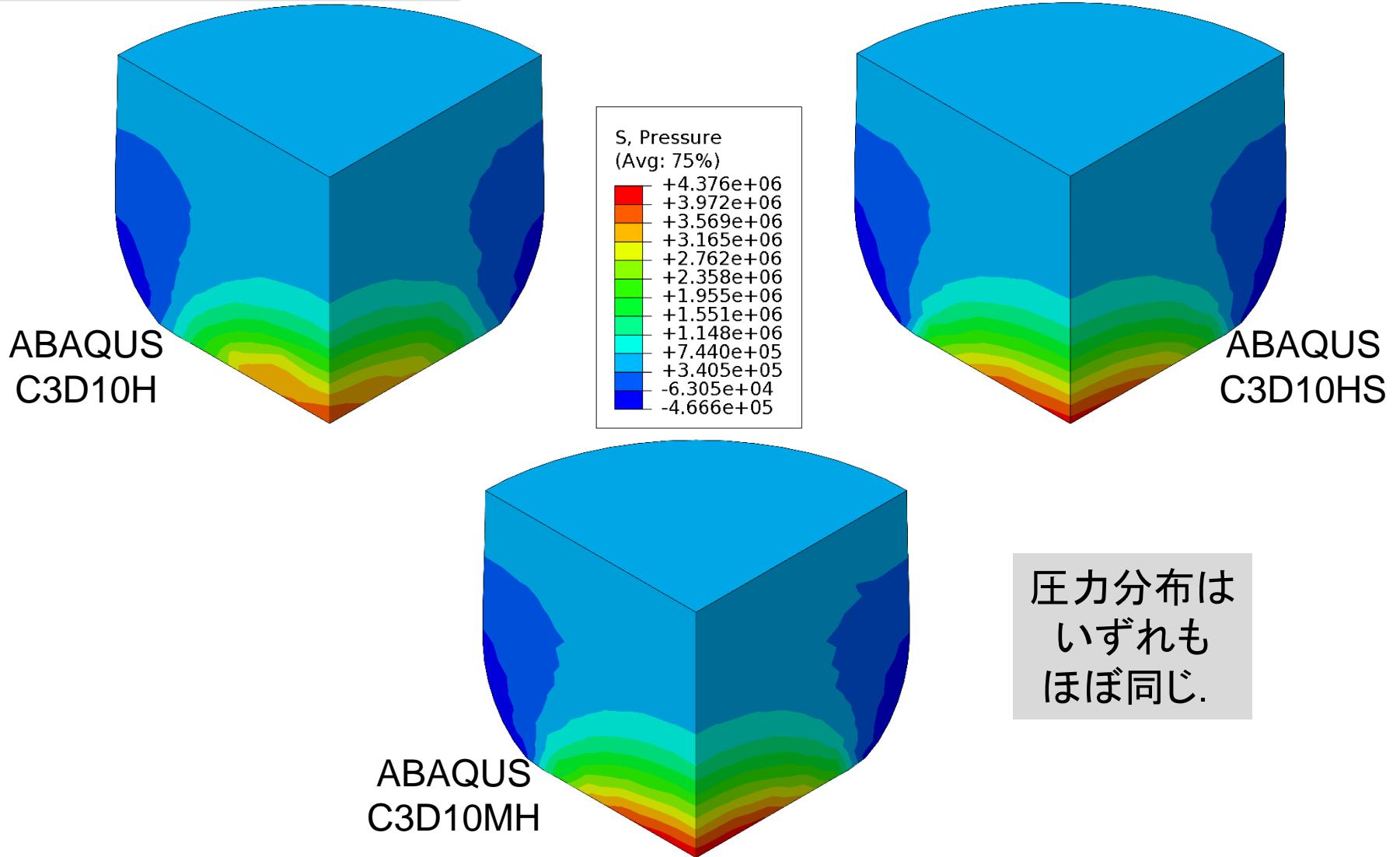
4節点四面体要素は、提案手法を含め、  
大幅な接触力振動は起こしていない。

ただし、Node-to-Surface接触に起因する小幅な接触力振動は起こる様子。



# 弾丸状物体の押し込み

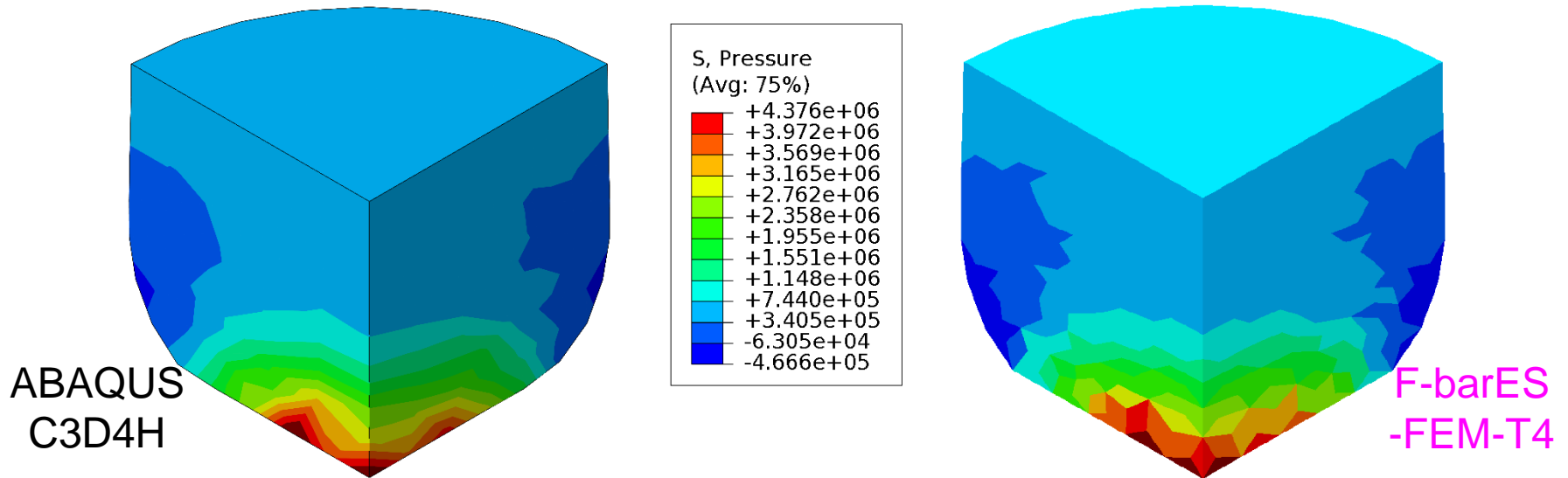
## 対称面の圧力分布



圧力分布は  
いずれも  
ほぼ同じ。

# 弾丸状物体の押し込み

## 対称面の圧力分布



本例題ではC3D4Hでも圧力振動は見られず、  
全ての四面体要素でほぼ同じ圧力分布となった。

なぜ本例題でC3D4Hに圧力振動が出なかったのかは不明。

# まとめ

# 星取表

	接触力振動 なし	圧力振動 なし	超大変形 収束
C3D10MH	✓	✓	✗
C3D4H	✓	✗	✓
F-barES-FEM	✓	✓	✓

- ・C3D10MHはもはや2次要素でないため曲げに弱い
  - ・C3D4Hはコーナーロッキングを起こす
- なども考慮すると, F-barES-FEMは悪くない選択.



# まとめ

- 最新の平滑化有限要素法であるF-barES-FEM-T4の接触解析における精度評価を行った.
- Augmented Lagrange法を用いることにより, 未知数を一切増やすことなくゴムの接触が扱えることを確認した.
- Node-to-Surface接触において, 一般的な四面体2次要素に現れる大幅な接触力振動が発生しないことを確認した.
- ただし, Node-to-Surface接触で起こりがちな小幅な接触力振動を取り除くことは出来ない.
- Surface-to-Surface接触やモルタル接触による高精度化は今後の課題.

ご清聴ありがとうございました.