

Lagrangeマーカー粒子を用いた Euler型有限要素法による SPRの数値解析的検討

M2 出口 皓太

- 研究背景、目的
- 解析理論
- 妥当性評価
- 各種パラメータ検討
- 結言

研究背景

環境問題(地球温暖化)

自動車:CO₂総排出量の約20%



車体の軽量化

- ・燃費向上
- ・性能向上

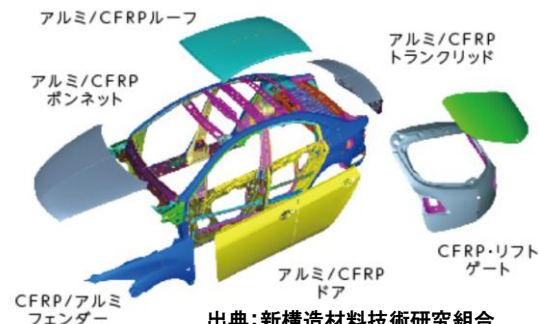
アルミニウム合金板の自動車車体への適用が注目



異種材料を接合する技術が必要不可欠

SPRの接合技術に対する期待大

マルチマテリアル化



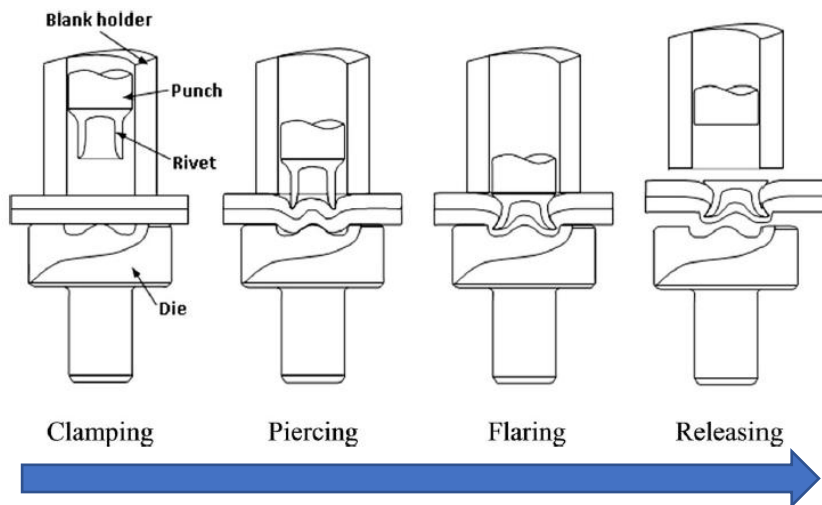
- ・軽金属(Al, Mg)
- ・繊維複合材(CFRP)
- ・高張力鋼板

・ 研究目的

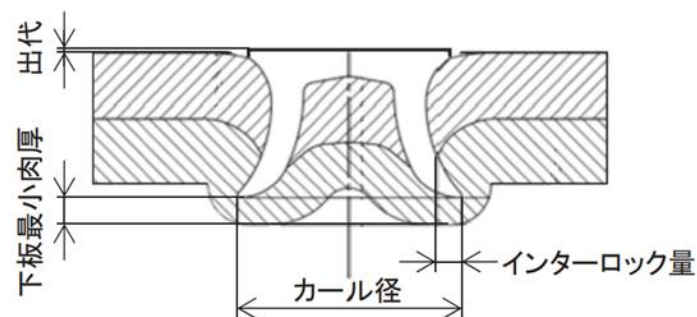
SPRとは

セルフピアスリベットと呼ばれるピンを2枚以上の接合母材に直接打ち込み塑性変形させて接合する技術

接合プロセス



接合判定



判定項目	判定基準
出代	0mm狙い
インターロック	0.10mm以上
下板最小肉厚	0.10mm以上

インターロック量は
接合品質に影響大

メリット

- ・接合母材同士の溶融温度の考慮が不必要
⇒異種金属や異種材料の接合が可能に
- ・母材への下孔が不必要
- ・非溶融のため環境良、自動化が容易

SPRの課題

- ① 塑性流動に伴うメッシュの変形が大きい
⇒ 通常の解析では困難
- ② 実験的な研究が多い
⇒ 接合プロセスが詳細に解明されていない

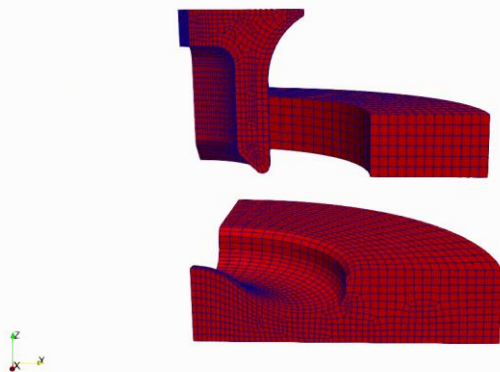
本研究の目的

- ① SPRに対するMarker粒子を用いたEuler型有限要素法による解析手法の適用性を検討(妥当性評価)
- ② 摩擦係数やひずみ速度などの各種パラメータを変更し、リベット接合形状への影響を検討

解析理論

Lagrange型

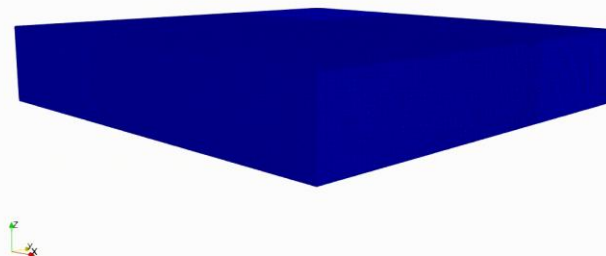
- ・ 計算メッシュが物体に固定
⇒形状の影響を検討可能
- ・ 大変形計算などのメッシュの変形が大きい解析
⇒解析困難



ツールの解析に適用

Euler型

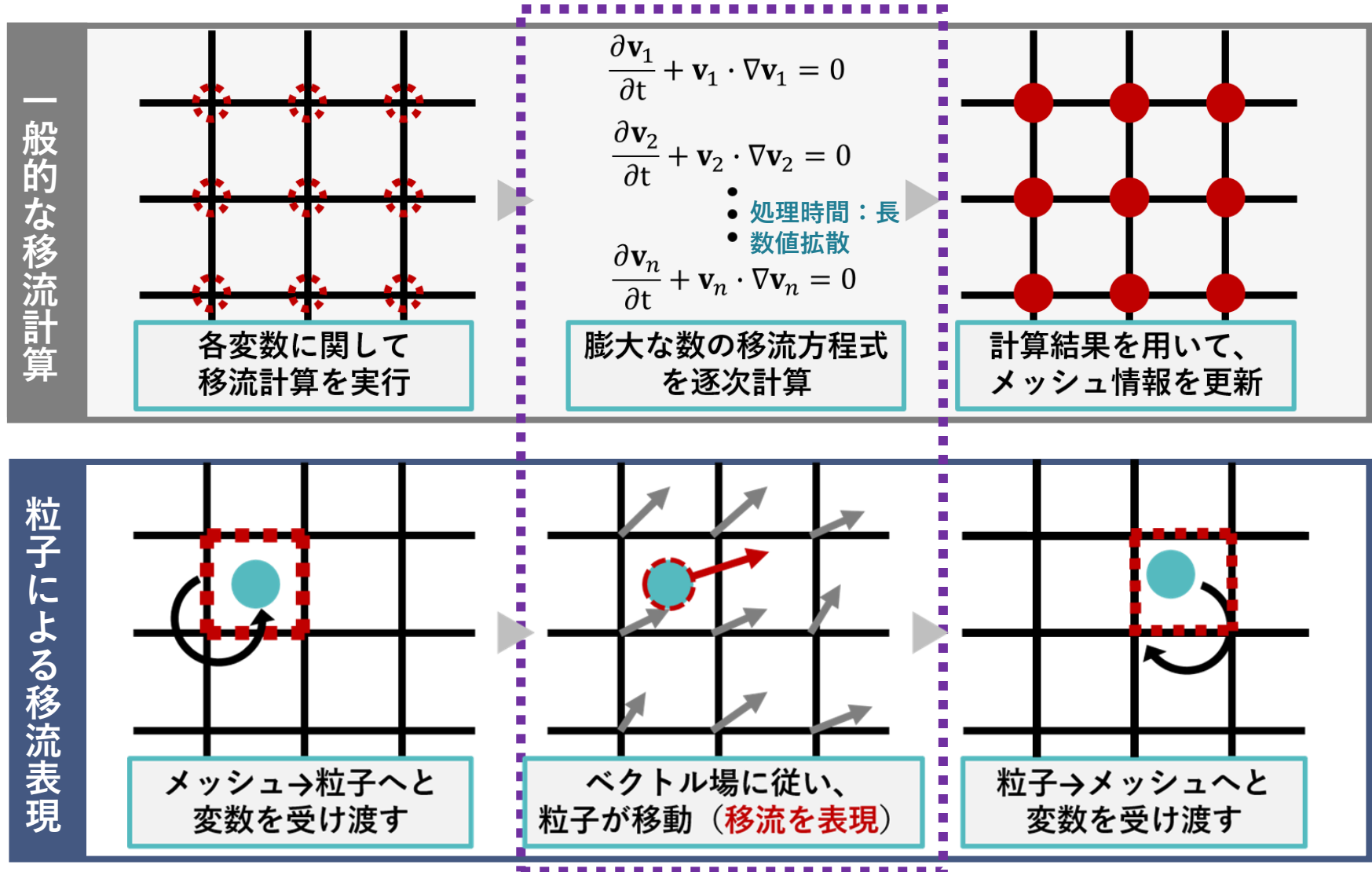
- ・ 計算メッシュが空間に固定
⇒空間メッシュを超えるような物体の変形が可能
- ・ メッシュ変形が大きい場合でも、
安定的なシミュレーション



母材の解析に適用

Lagrange要素をEuler要素に接触させることで力学的挙動を検討

理論 Lagrangeマーカー粒子法



→計算コストの軽減、数値拡散が起きない計算(理論上)

VOF法による界面の表現

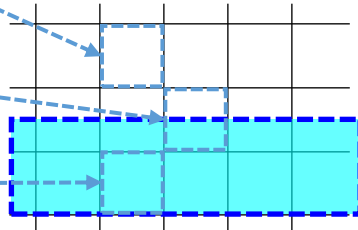
ϕ : 固体界面識別子 ($\phi = 0.0 \sim 1.0$)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0$$

$\phi = 0.0$: ボイド

$\phi = 0.5$: 界面

$\phi = 1.0$: 固体



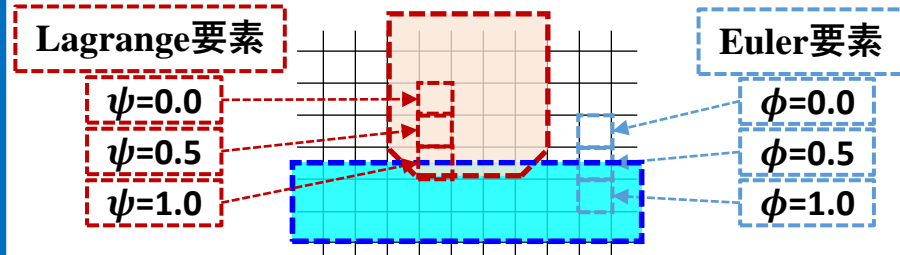
接触モデル(penalty法ベース)

体積接触力

$$f_c = \alpha(T)\phi\psi$$

$\alpha(T)$: ペナルティ係数

Φ, ψ : 空間内の識別子



各空間の固体割合と温度



接触反力を算出

・ 移流計算時の固体界面を $\phi = 0.5$ で表現

発熱モデル

1要素当たりの塑性発熱量 $\int \eta \bar{\sigma} \Delta \bar{\epsilon}_p dV$

接触部分の摩擦発熱量 $\int \eta * F_f \cdot v_r dS$

(η : 熱効率 $\bar{\sigma}$: 相当応力 $\Delta \bar{\epsilon}_p$: 相当塑性仕事増分
 V : 単位体積 F_f : 摩擦力 v_r : 相対速度 S : 接触面積)

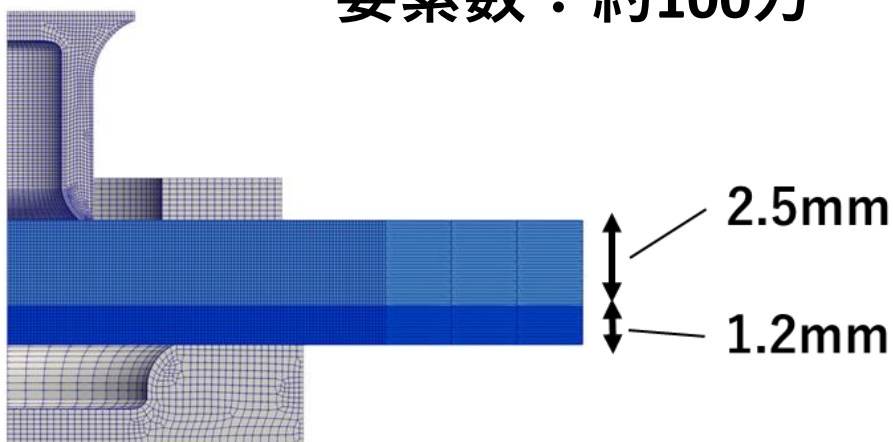
塑性仕事増分による **塑性発熱量** と **摩擦熱** を使って熱伝導解析

妥当性評価

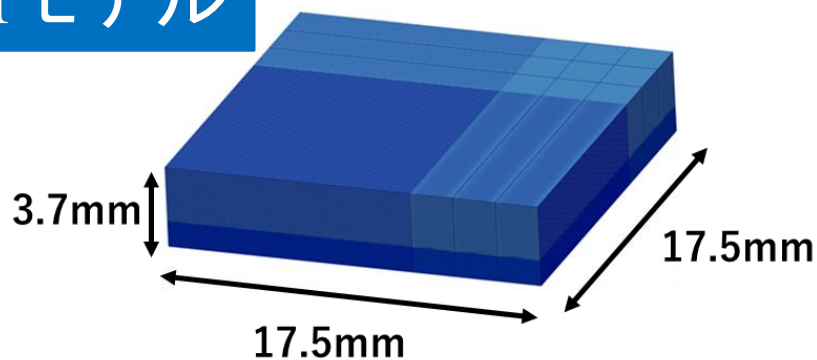
・ 解析モデル (1/4モデル)

解析モデル

要素数：約100万

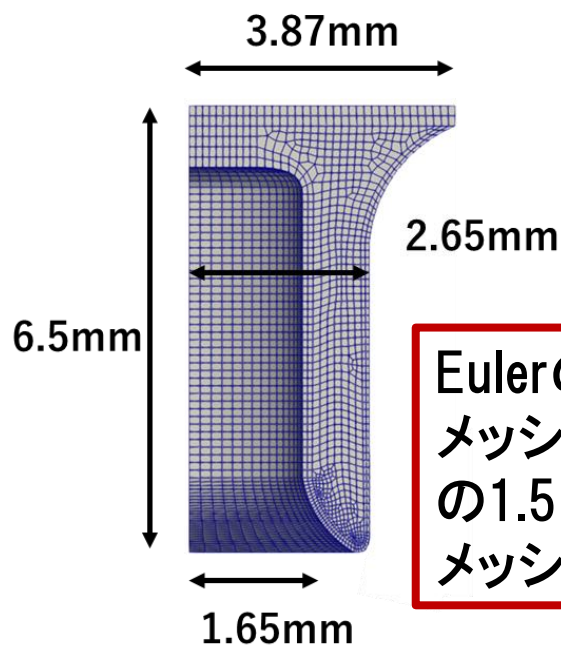


Eulerモデル

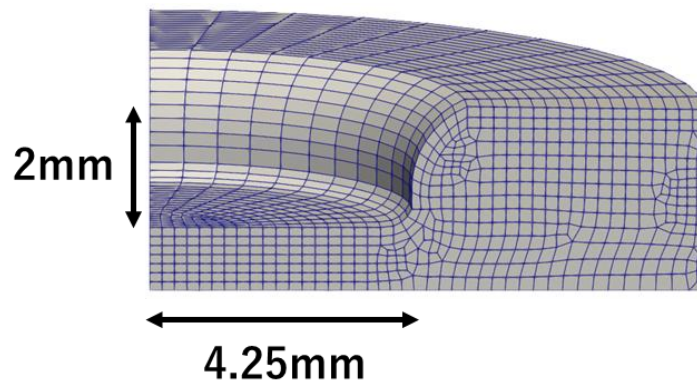


母材の最小メッシュ分割の大きさは
1要素 $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ [mm³]

Lagrangeモデル



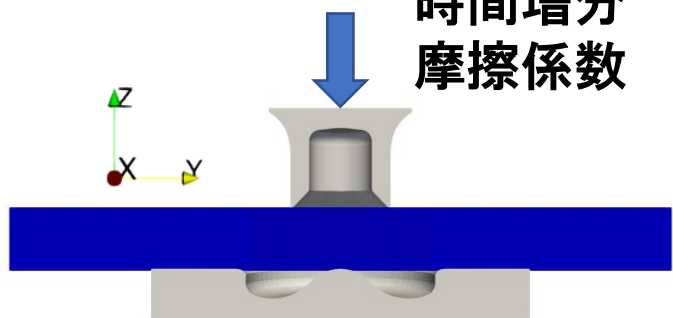
Eulerの最小
メッシュサイズ
の1.5~2.0倍で
メッシュ分割



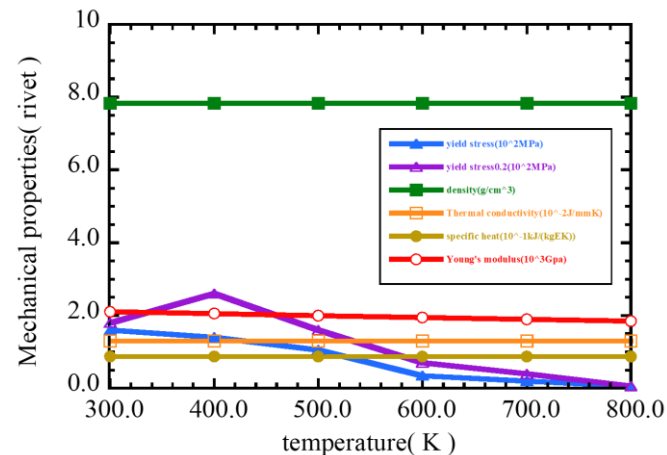
解析条件

解析パラメータ

挿入速度 : $0.6 [m/s]$
 時間増分 : 5×10^{-6}
 摩擦係数 : 0.25

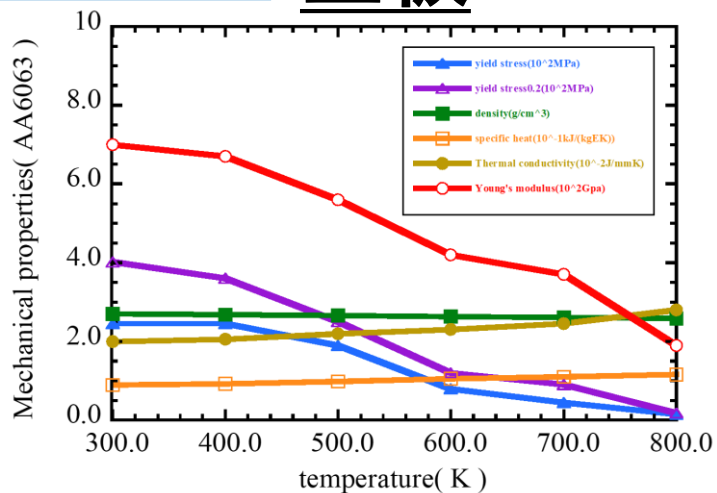


Toolの材料定数

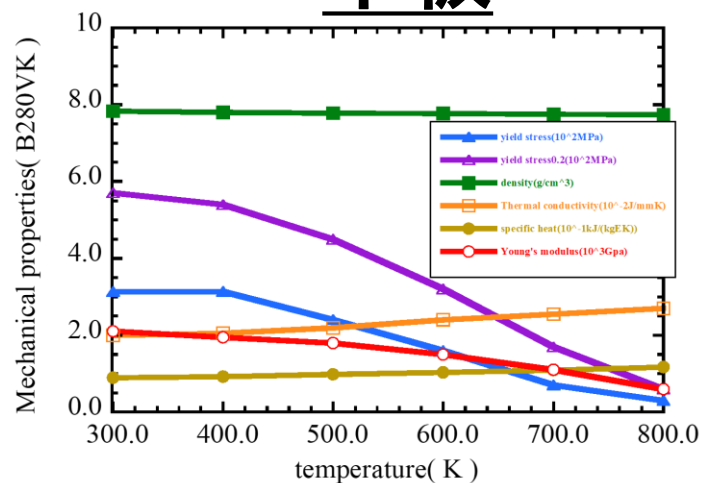


母材の材料定数

上板

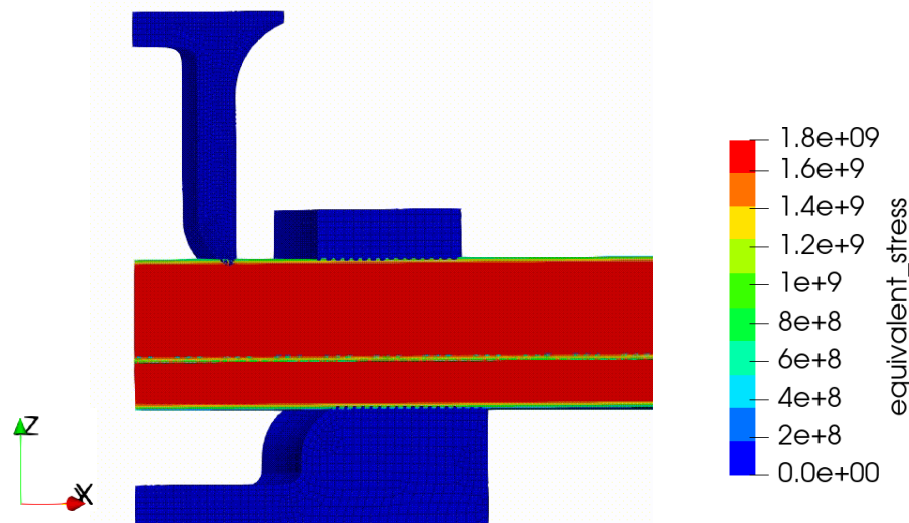


下板

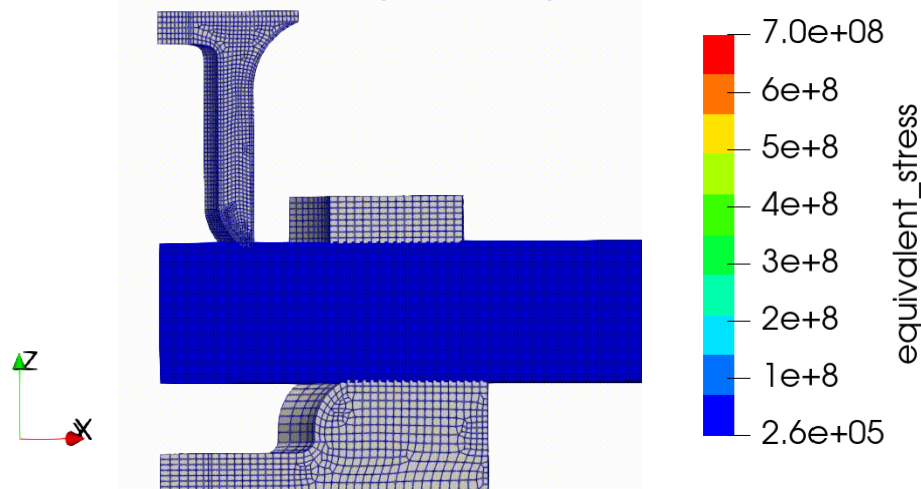


解析結果、接合評価

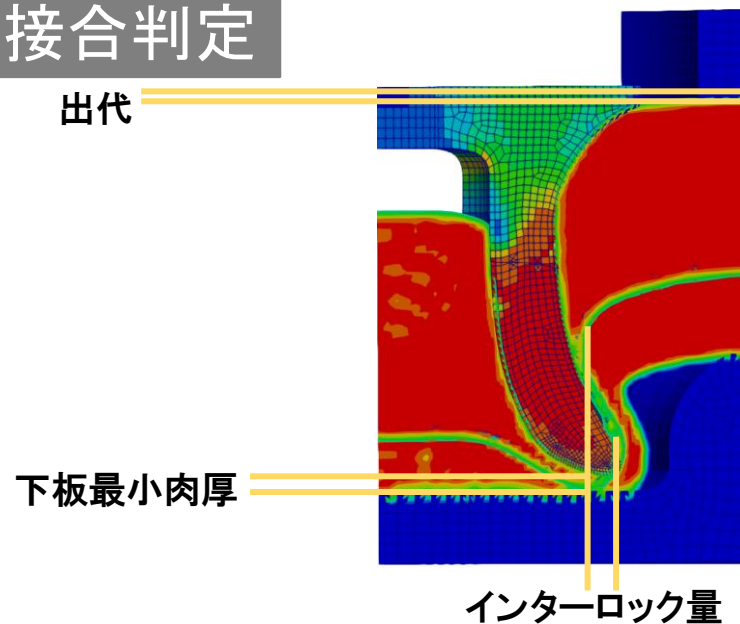
相当応力 (Lagrange)



相当応力 (Euler)



接合判定

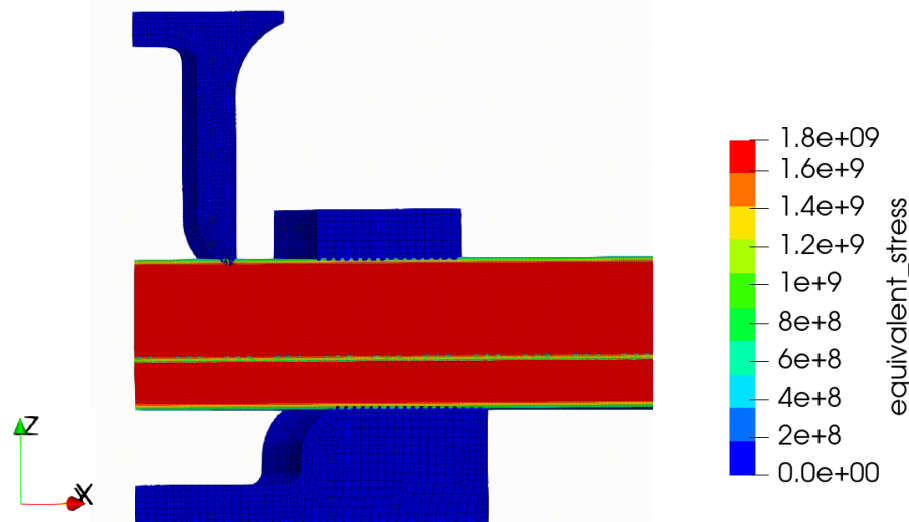


判定項目	判定基準	解析結果
出代	0mm狙い	0.002mm
インター ロック量	0.10mm 以上	0.261mm
下板最小肉厚	0.10mm 以上	0.24mm

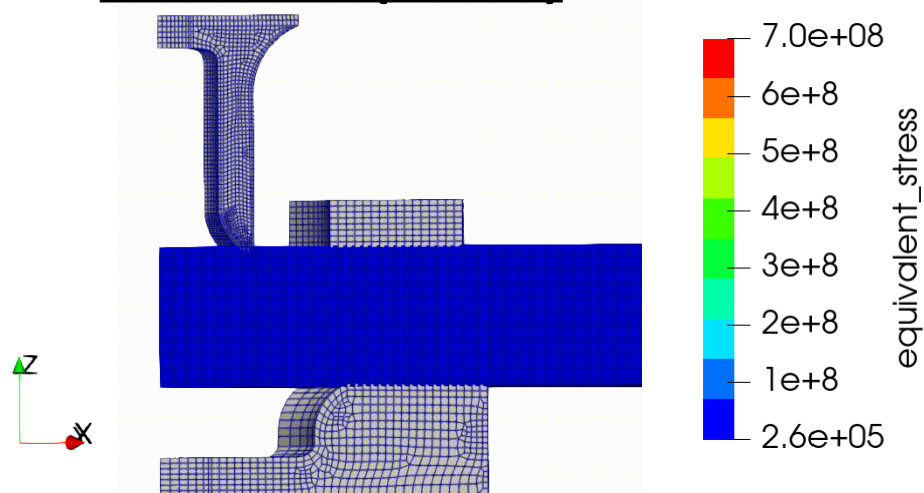
上記の表より、接合○

解析結果、Lagrangeマーカー一粒子

相当応力 (Lagrange)

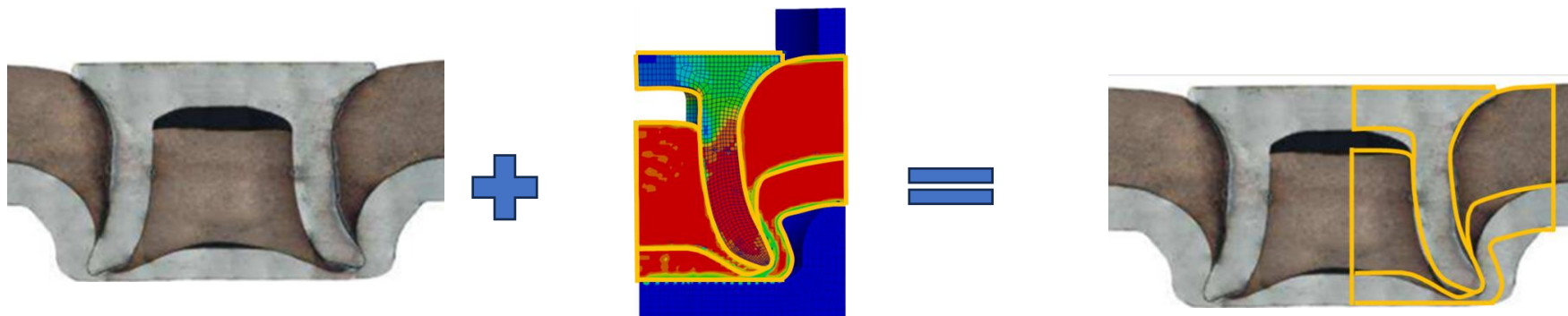


相当応力 (Euler)



・ 妥当性評価

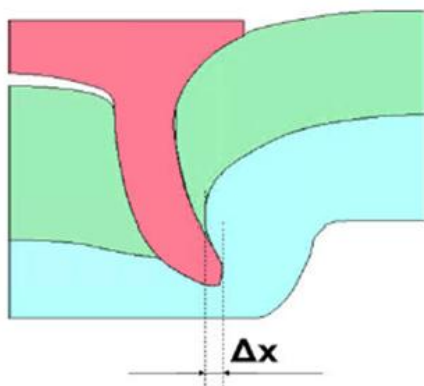
接合形状による評価



実験値の断面形状

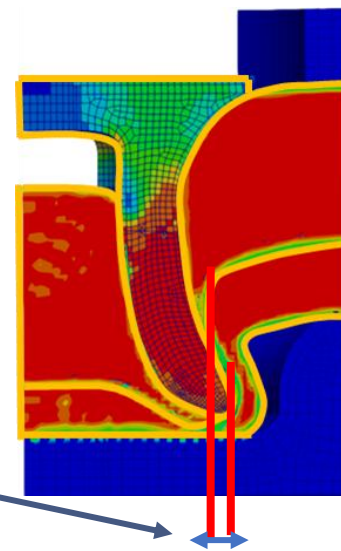
解析値の断面形状

インターロック量による評価



実験値 : 0.202[mm]

解析値 : 0.261[mm]

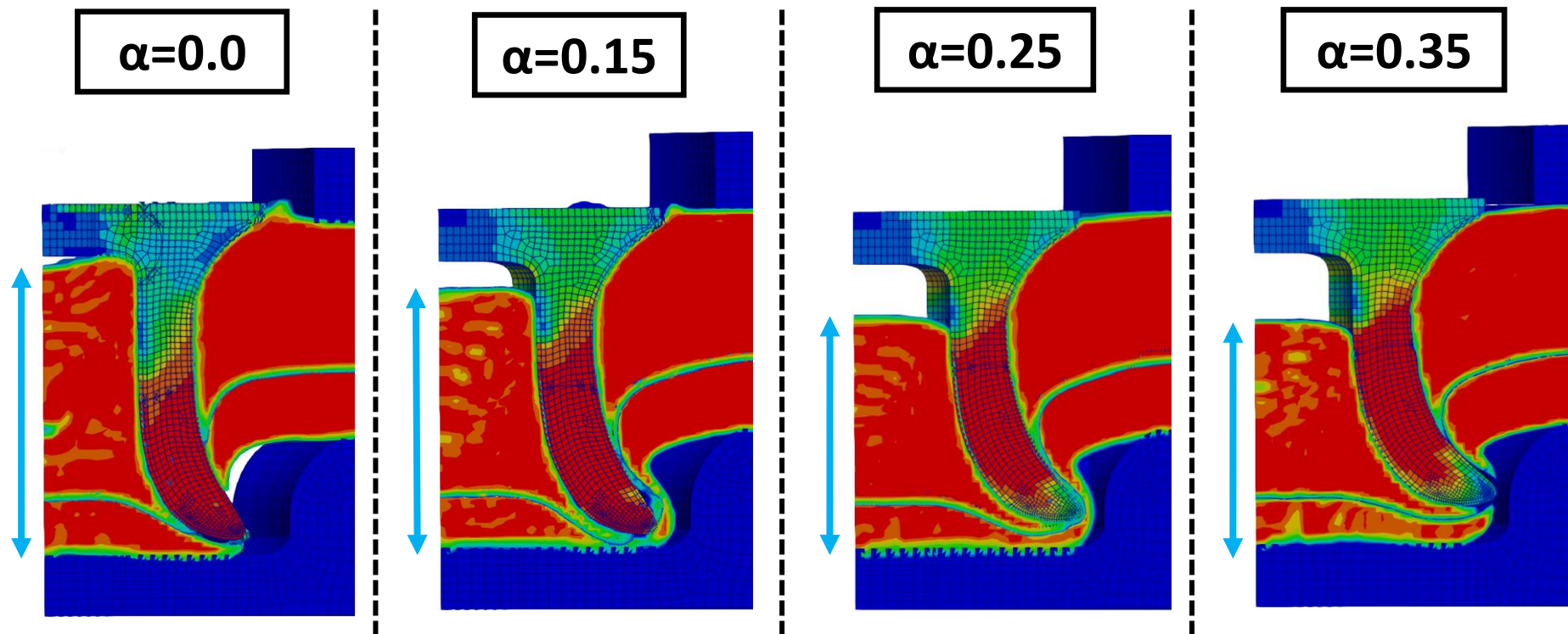


リベットの塑性変形形状、インターロック量は良好に一致している

摩擦係数の検討

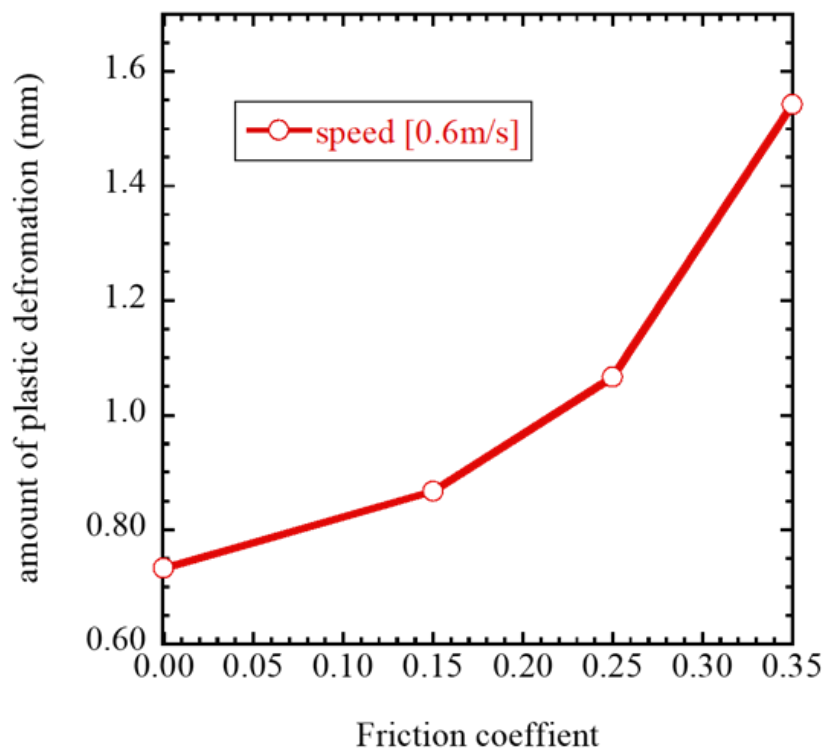
・ 摩擦係数の検討

摩擦係数

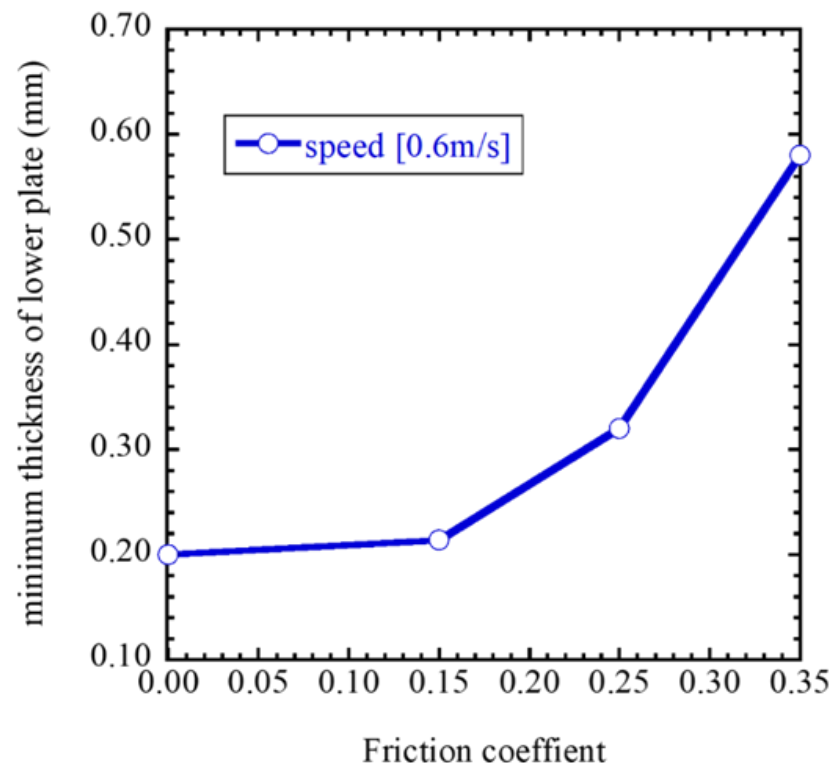


摩擦係数が0と0.35はリベットが下板を貫通
母材の流動に影響

塑性変形量



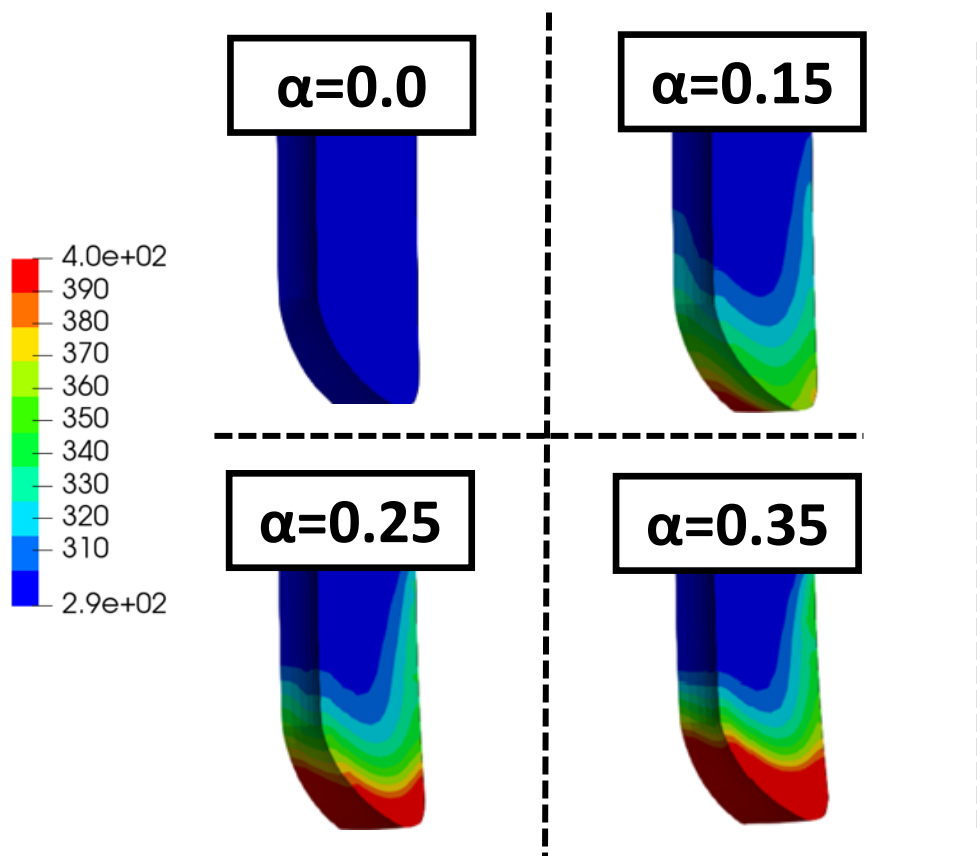
下板最小肉厚



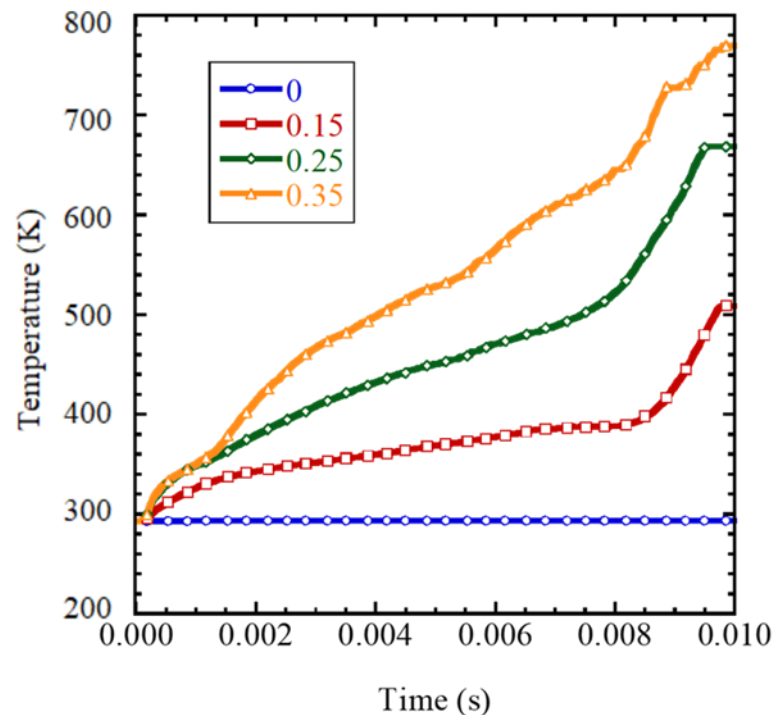
摩擦係数が大きくなるに伴い
リベットの塑性変形量と下板最小肉厚が増加

・ 摩擦係数の検討

先端温度分布[K]

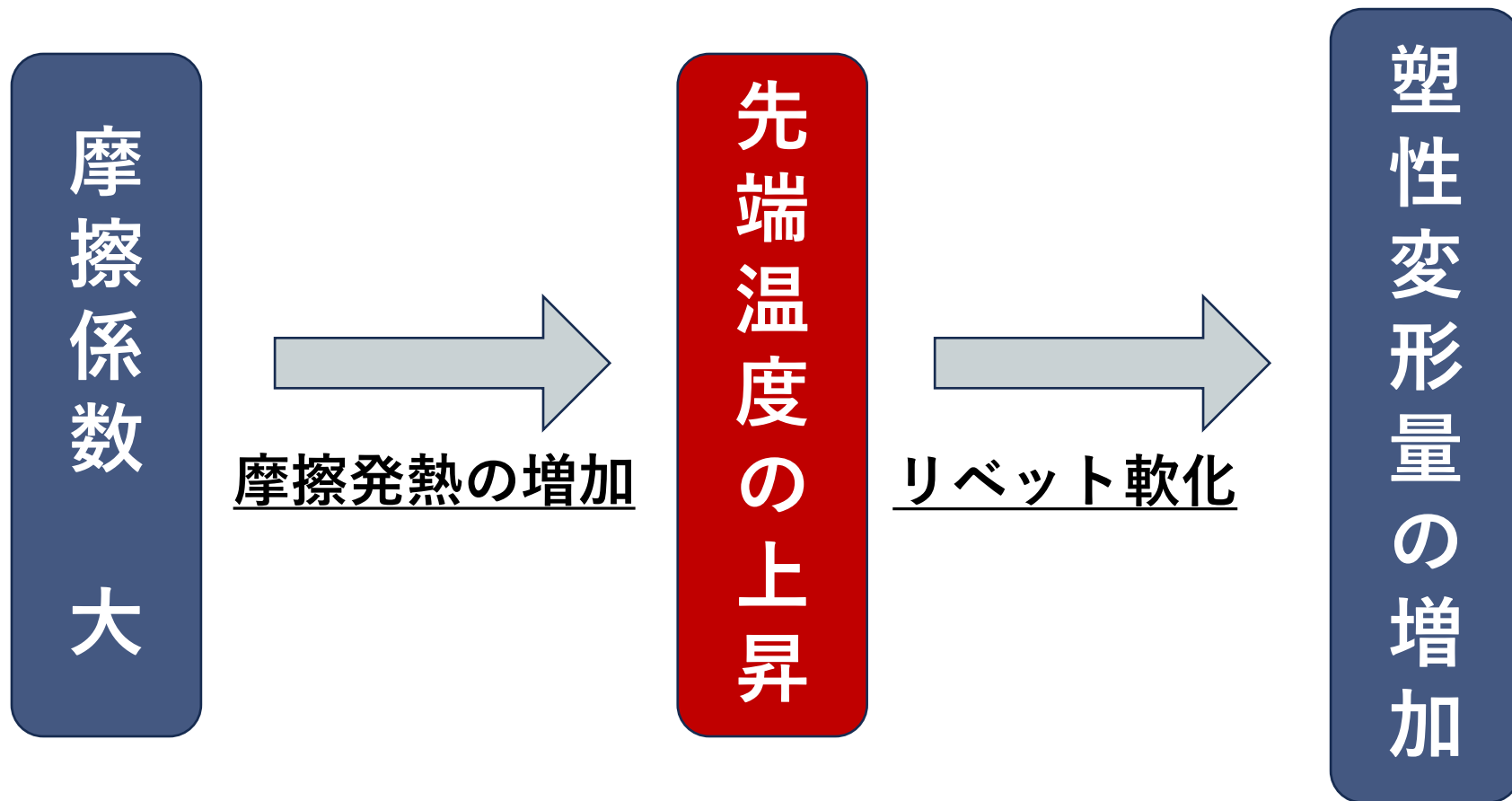


先端温度履歴



摩擦発熱量の増加に伴い、リベットの先端温度が上昇
⇒リベットが軟化して塑性変形量が増大

接合への影響

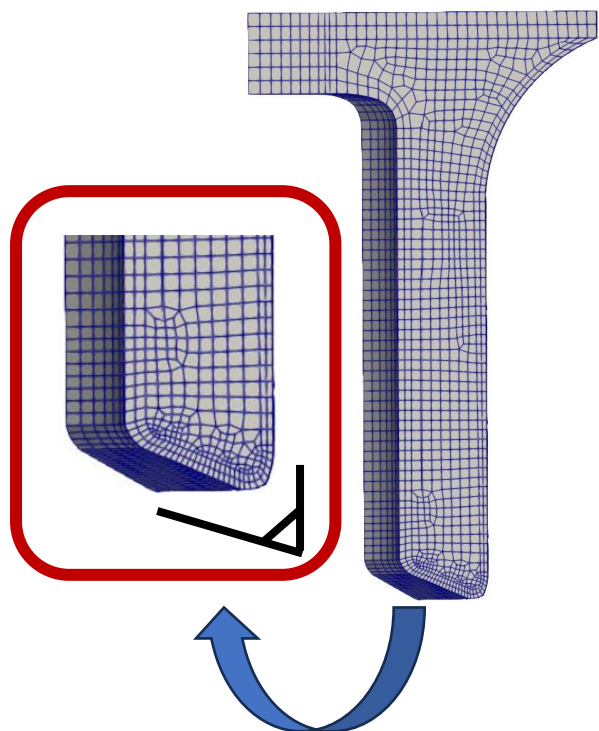


先端角度の検討

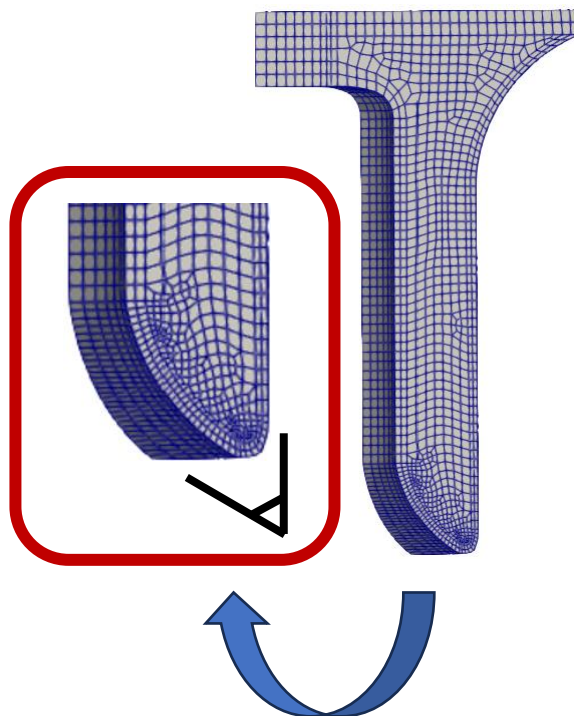
・先端角度 β の検討

リベット先端形状

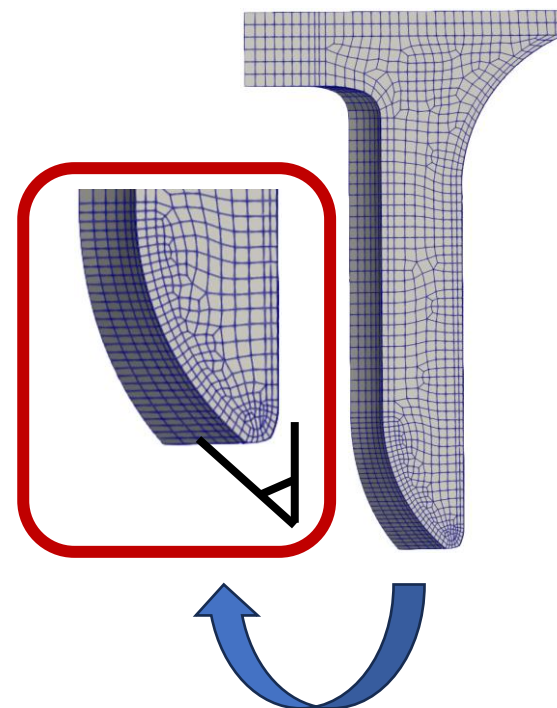
$\beta=75^\circ$



$\beta=60^\circ$

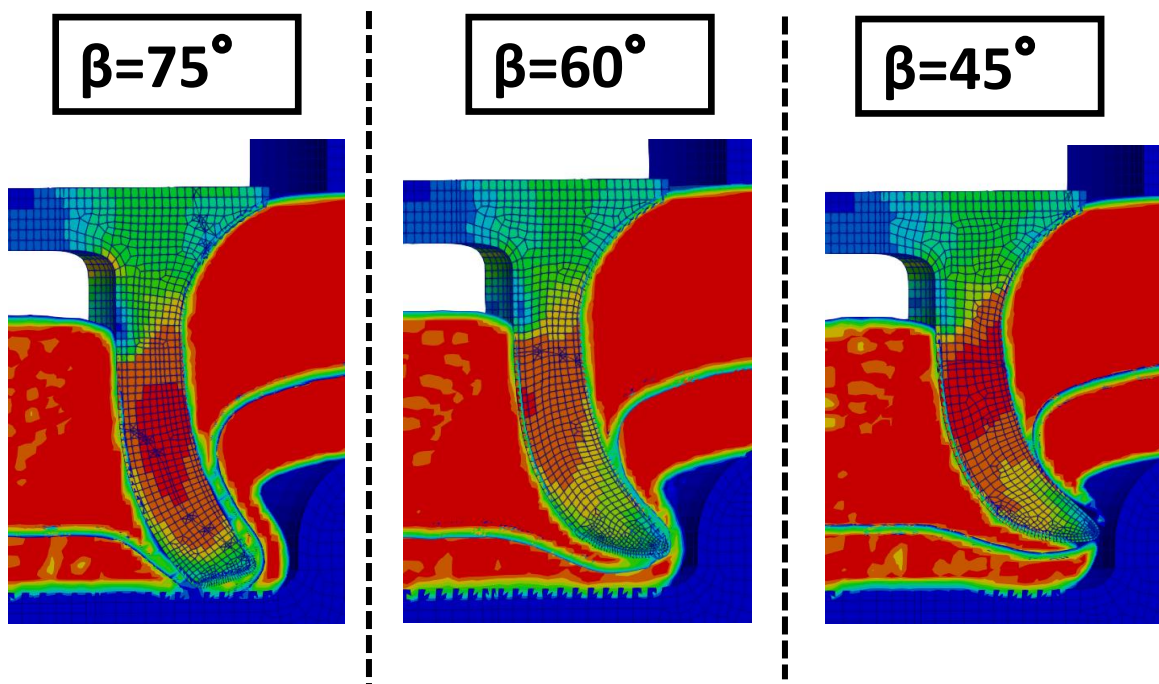


$\beta=45^\circ$

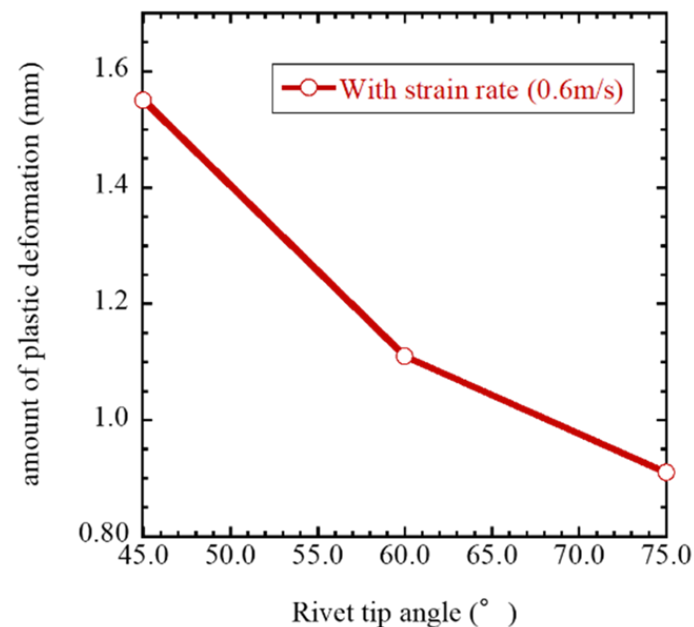


・先端角度 β の検討

接合最終形状



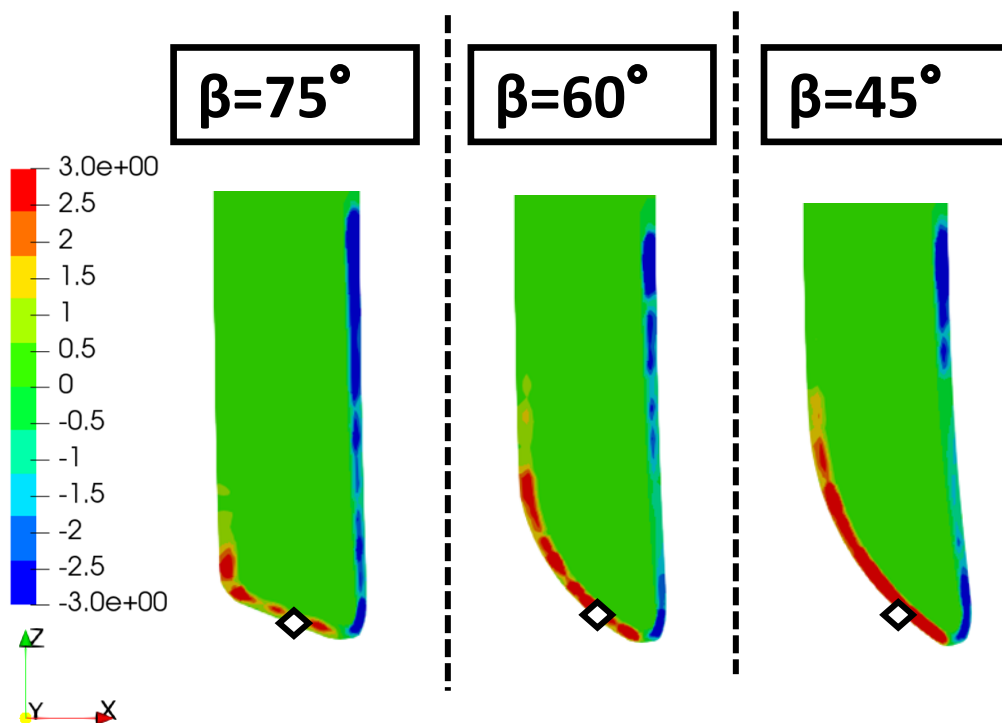
塑性変形量



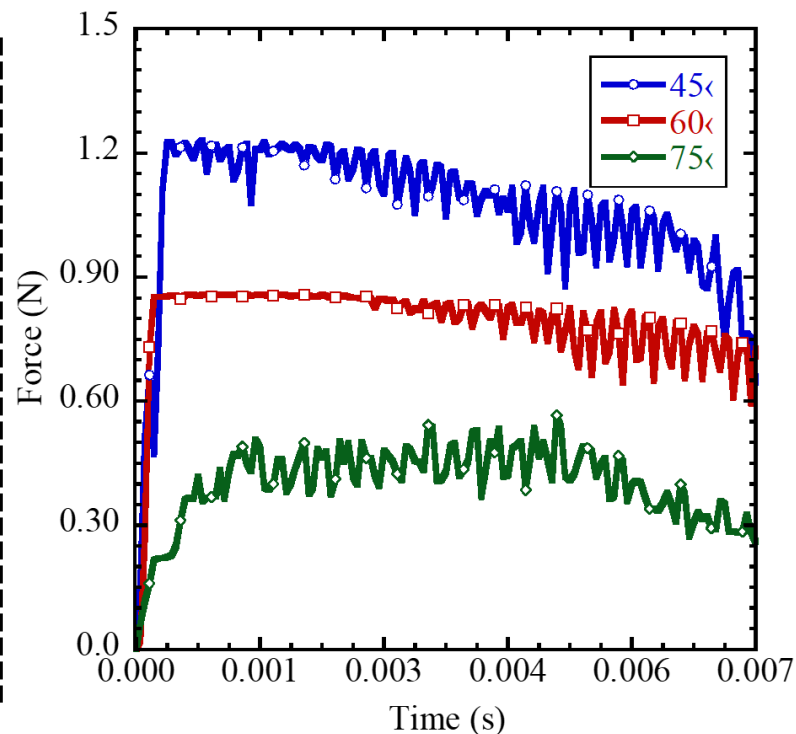
角度が鋭角になるほど、リベットの塑性変形量が増加

・先端角度 β の検討

X+方向接触力分布



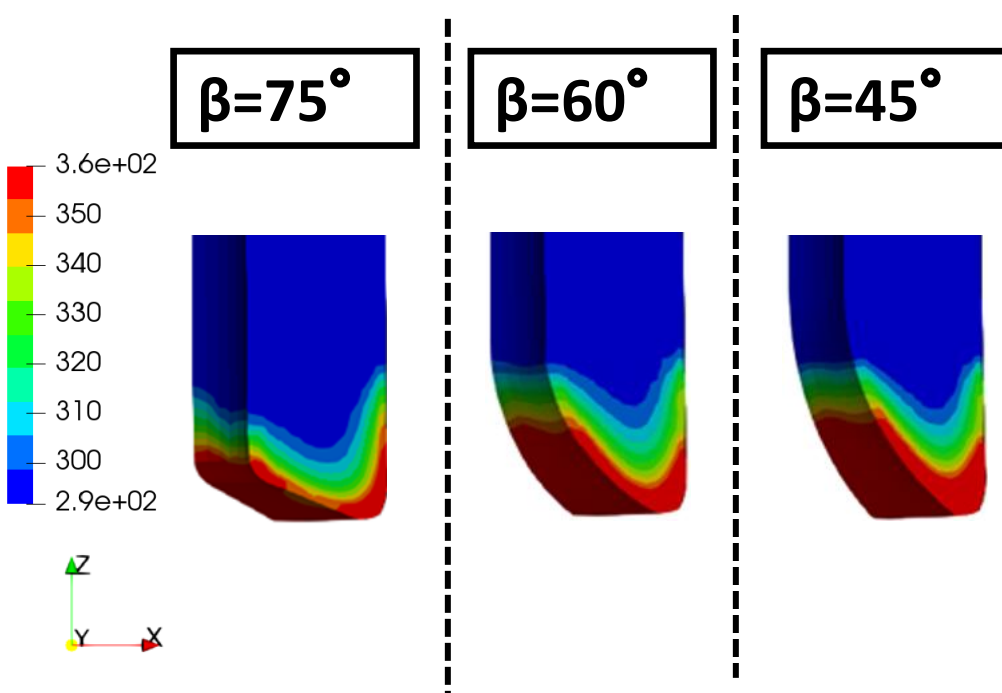
接触力密度履歴



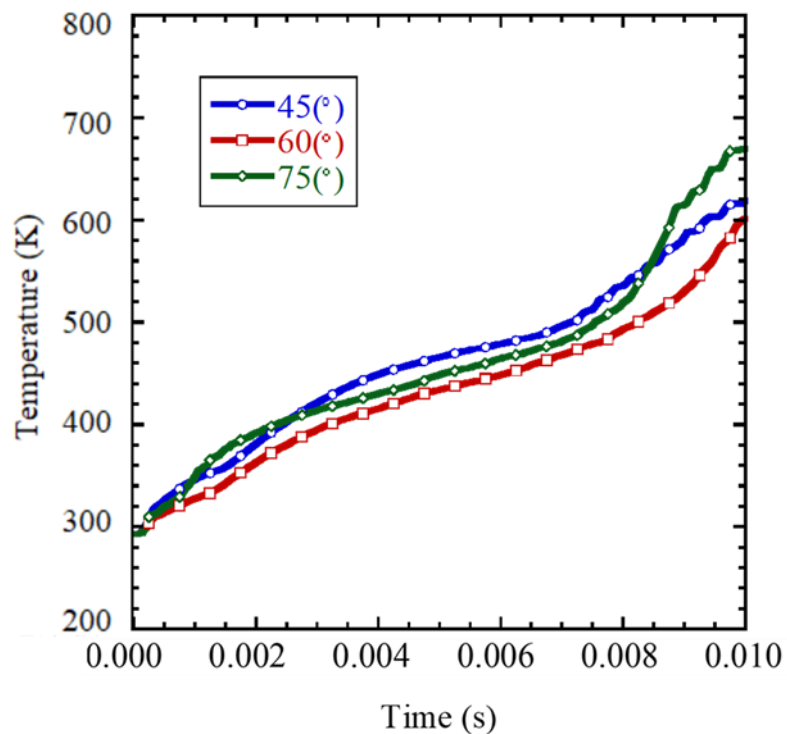
先端角度が鋭角になるほど、X+方向の反力が増加
(また、X+方向の反力が生じる面積も増加)

・先端角度 β の検討

リベット温度分布[K]



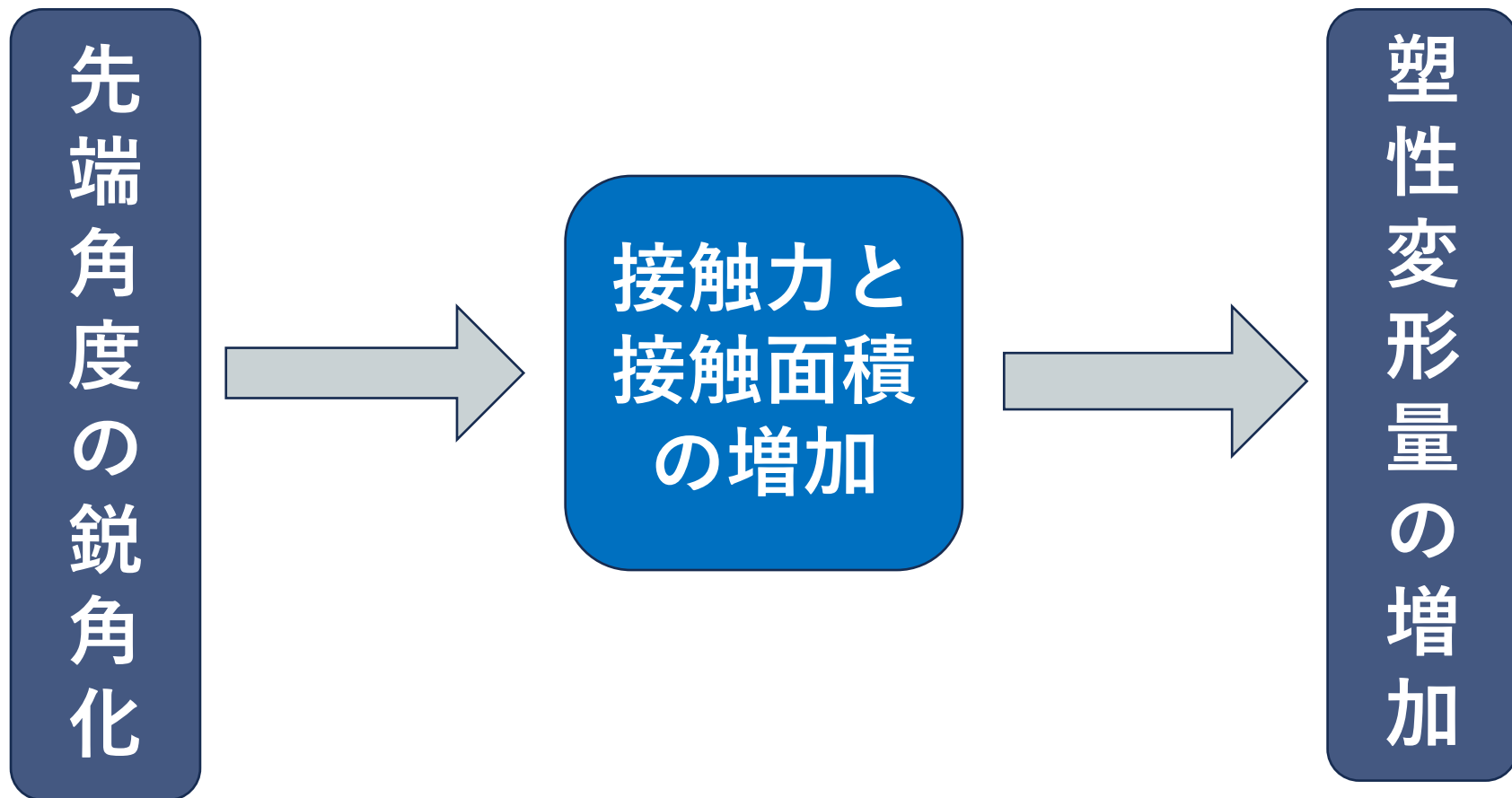
温度履歴



先端角度に関わらず、リベット先端温度の変化量は小さい
⇒リベットの軟化への先端角度の影響力は小

・先端角度 β の検討

接合への影響



挿入速度の検討

挿入速度の検討

挿入速度

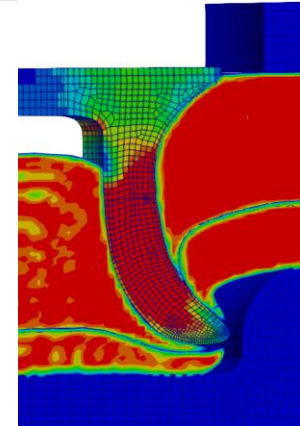
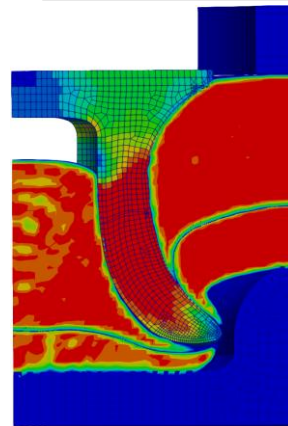
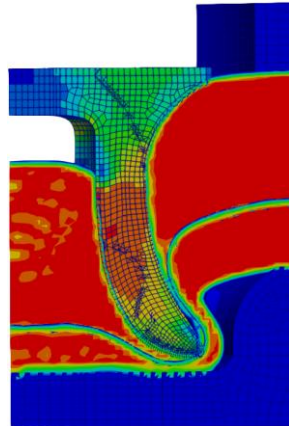
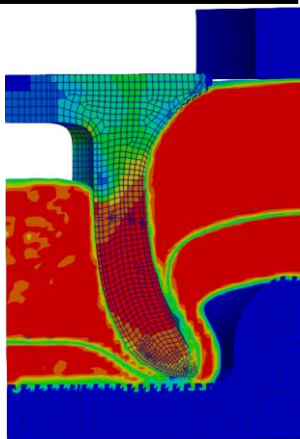
$v=0.3\text{m/s}$

$v=0.6\text{m/s}$

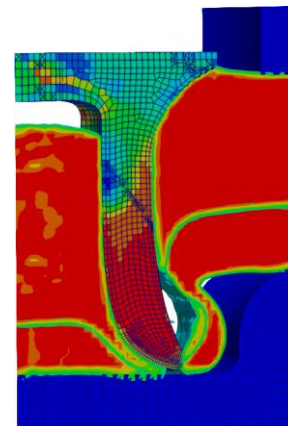
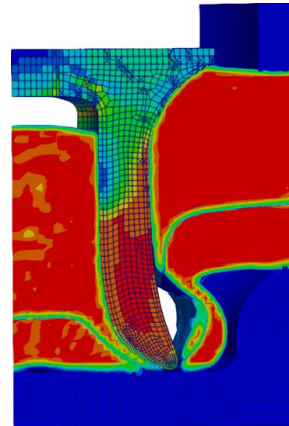
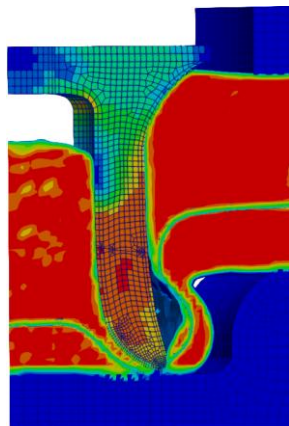
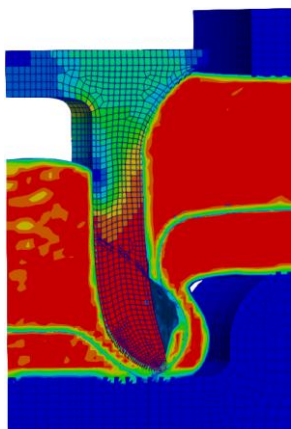
$v=0.9\text{m/s}$

$v=1.2\text{m/s}$

歪速度有

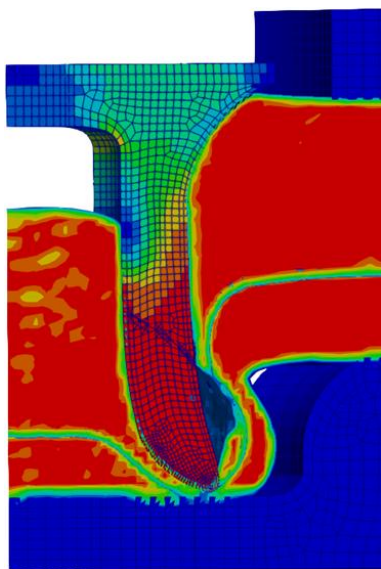


歪速度無

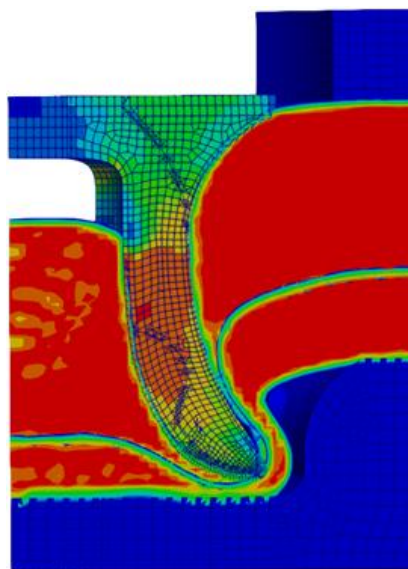


挿入速度の違い

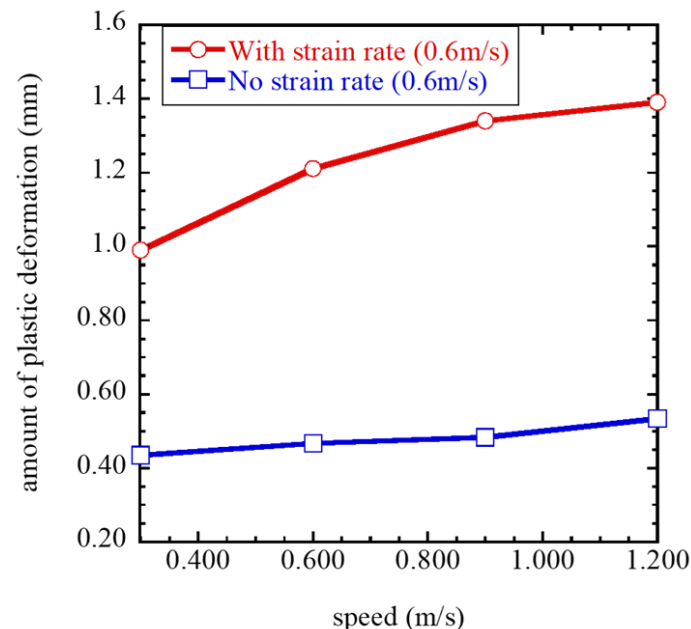
ひずみ速度無



ひずみ速度有



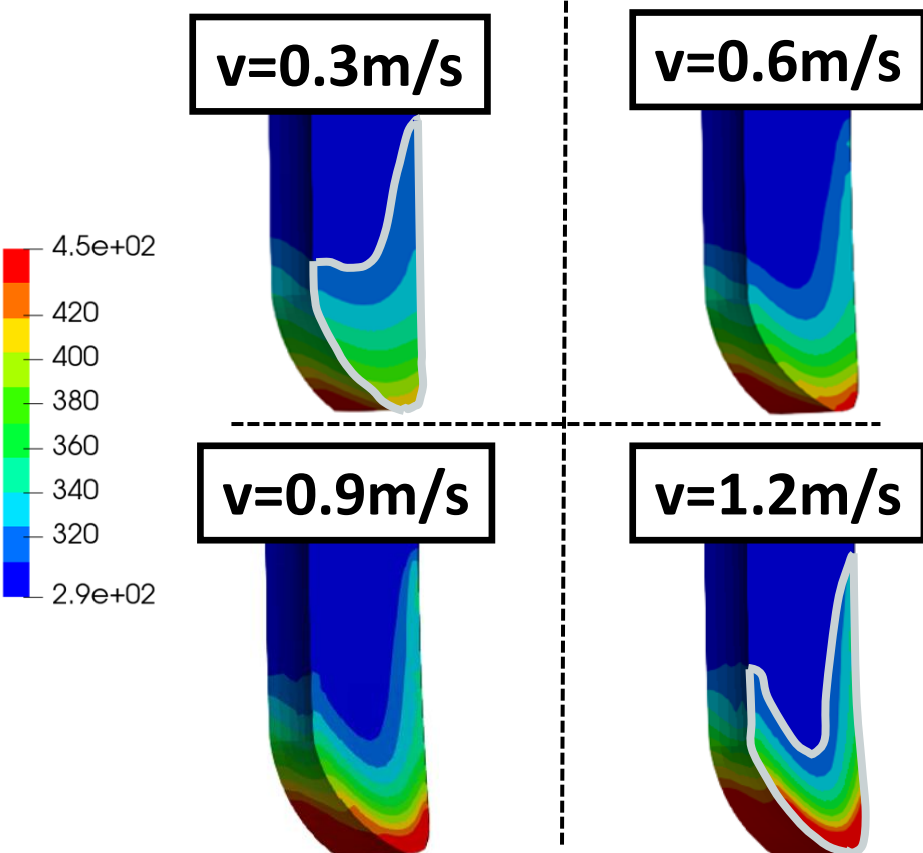
塑性変形量



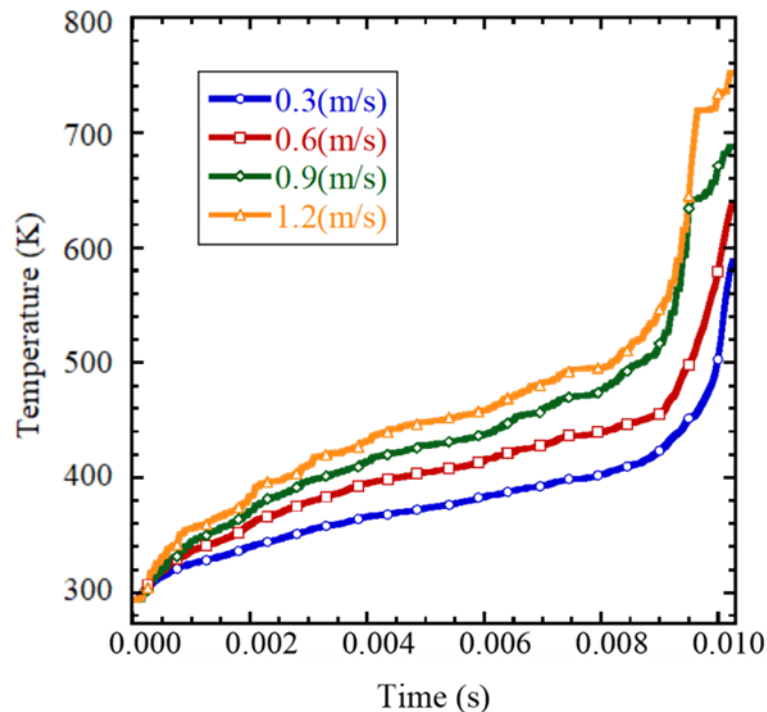
挿入速度の増大に伴い、塑性変形量は増加
歪速度の有無において塑性変形量と形状が大きく異なる
⇒高速下のひずみ速度の影響力は大きい

挿入速度の検討

先端温度分布

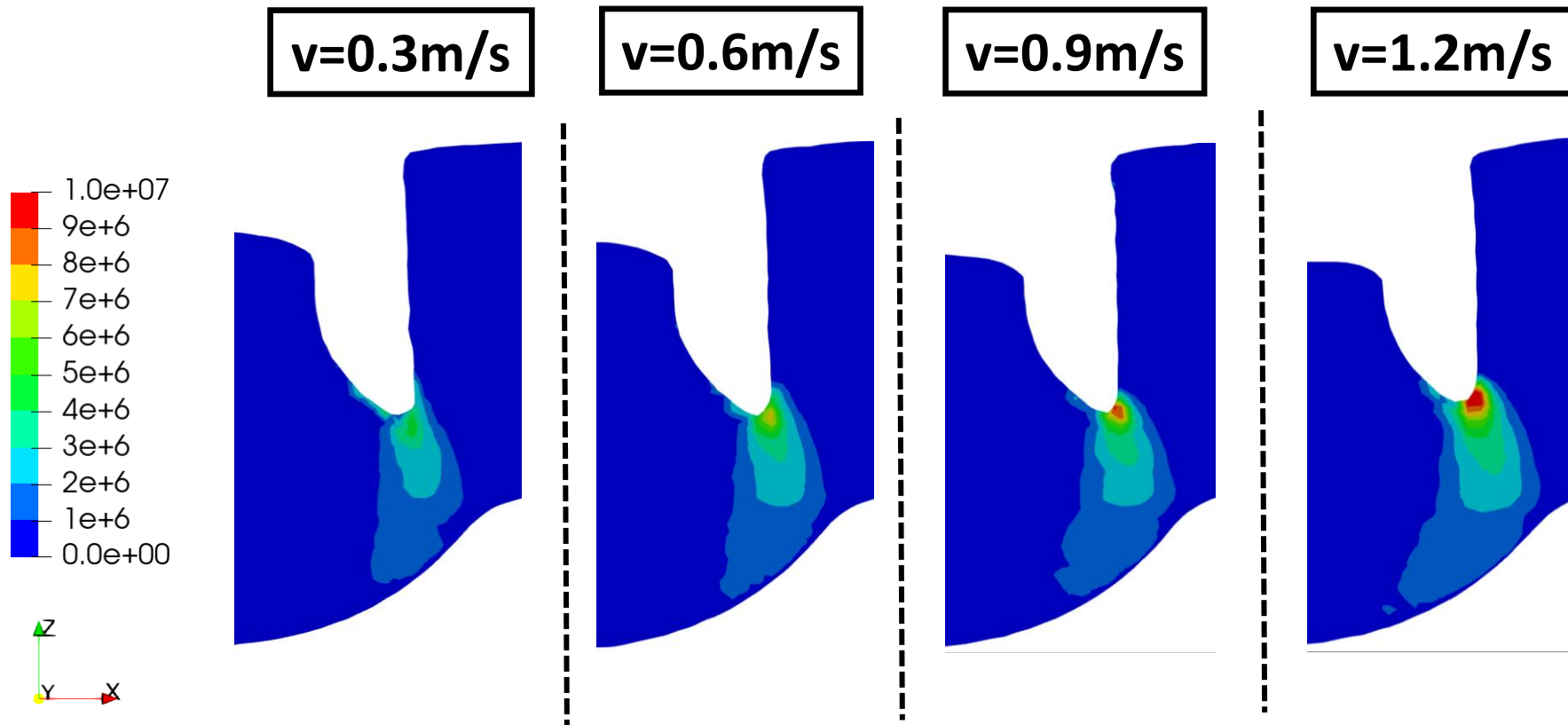


温度履歴



挿入速度の増加に伴い、熱伝導の時間が少なくなり熱集中
⇒リベットの先端が局所的に高温化、リベットの軟化

歪仕事増分分布



挿入速度の増大に伴い、ひずみ仕事増分が局所集中
⇒母材が硬化(降伏応力が増加)

挿入速度の検討

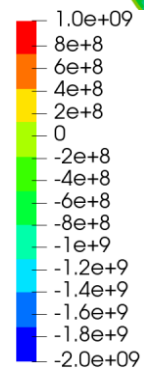
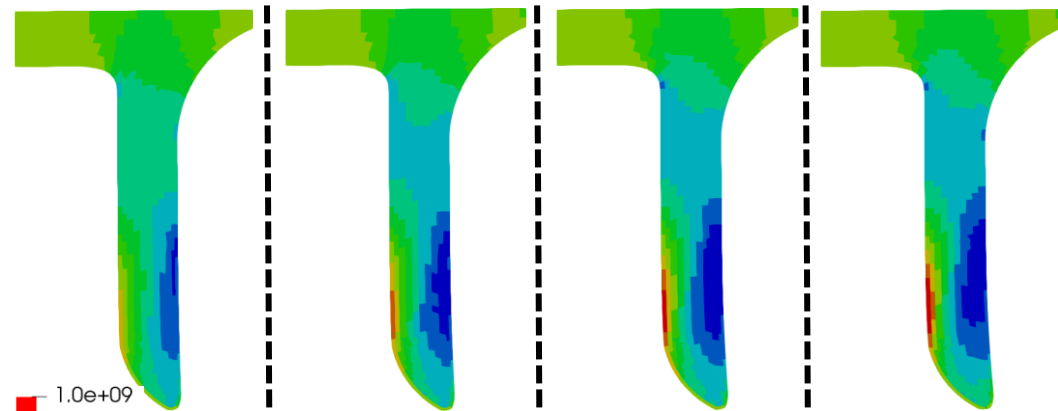
リベット応力分布

0.3m/s

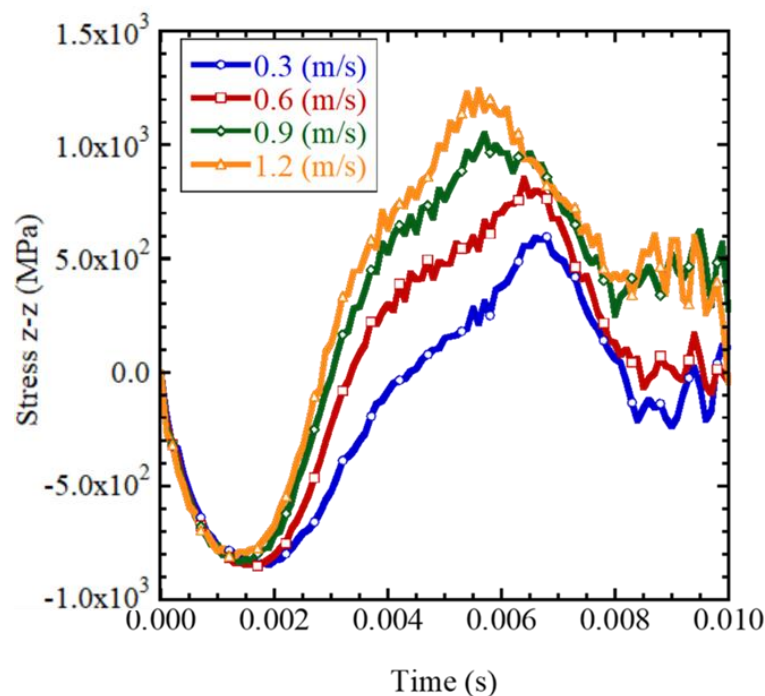
0.6m/s

0.9m/s

1.2m/s

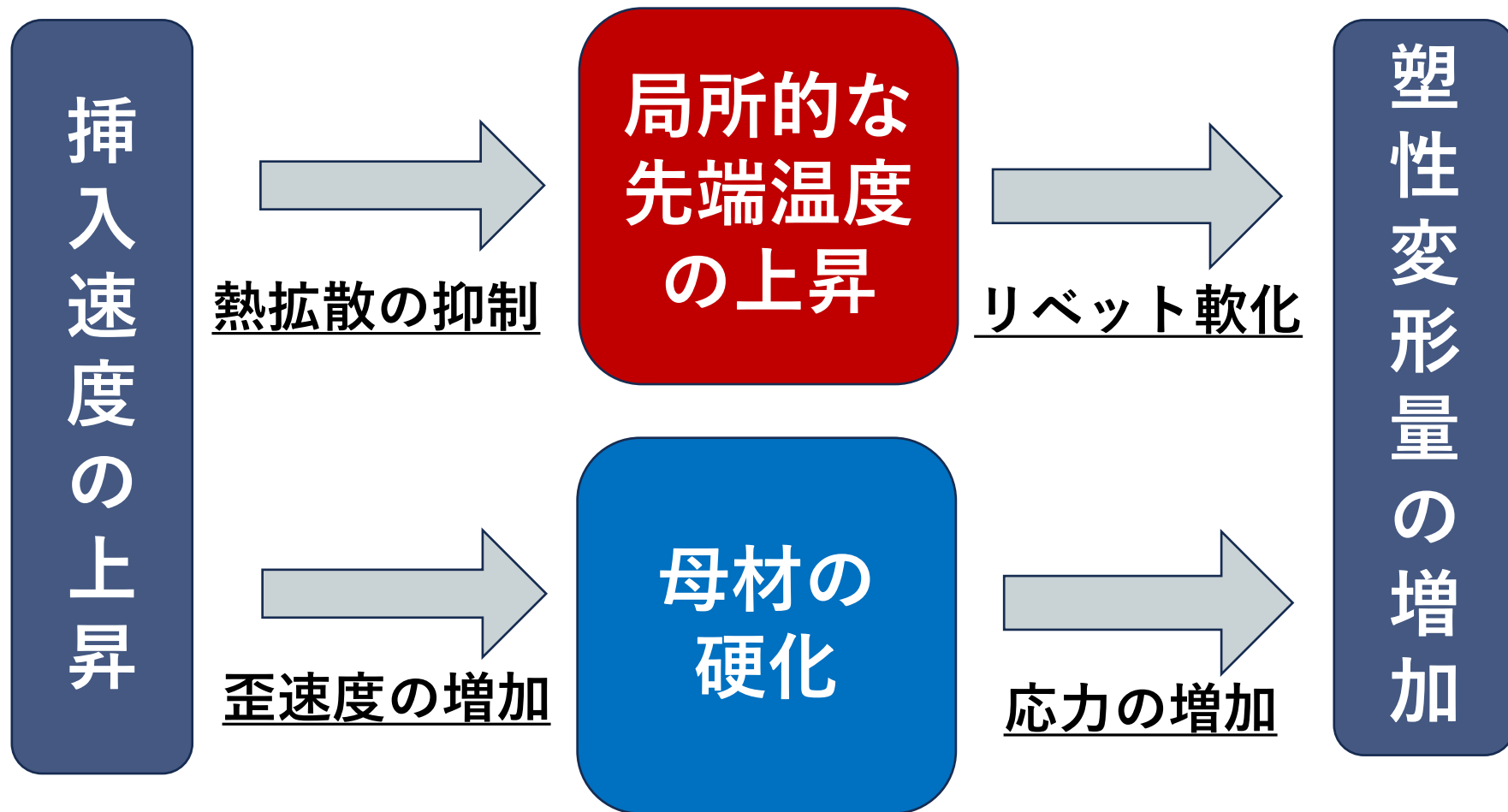


応力 σ_{z-z} 履歴



挿入速度の増大に伴い、母材が硬化(降伏応力が増加)
⇒リベットの引っ張り応力が上昇

接合への影響



結言

本研究では、SPRの数値シミュレーションに対してLagrangeマーカー粒子を用いたEuler型有限要素法を用いて、その適用性を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1. Lagrangeマーカー粒子を用いたEuler型有限要素法によりリベットの塑性変形と2枚の異種母材の変形を再現した。また、SPR接合の妥当性評価を行った。断面形状における解析値と実験値との比較により、高い精度の再現を確認した。
2. その上で、摩擦係数や挿入速度、リベット脚の先端角度の比較を行い、摩擦係数は母材の流動とリベットの軟化に、先端角度は接触力に、挿入速度は母材の硬化とリベットの軟化に影響を及ぼすことを確認した。