

結晶塑性解析による 種々の変形を受けた アルミニウム合金板の 応力-ひずみ曲線の予測

静岡大学大学院 総合科学技術研究科
工学専攻 機械工学コース
吉田研究室 渥美 慎也

研究背景

プレス成形：
多段プレスによる複雑な変形

成形シミュレーションによって
生産の効率化

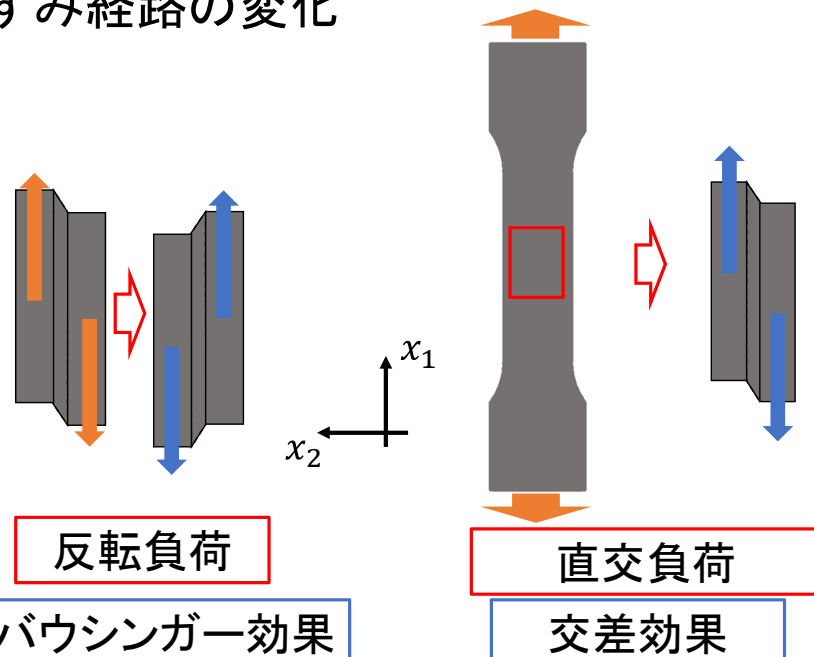
シミュレーション技術の精度向上のためには
様々な変形挙動を再現できる構成則が必要

バウシンガー効果, 交差効果

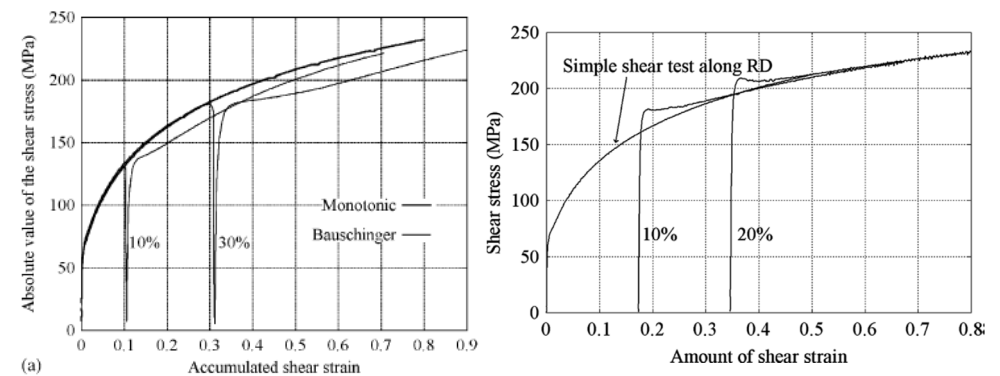
JFEスチール(株)
● センターピラーのスプリングバック解析例



ひずみ経路の変化



DC06鋼の反転負荷と直交負荷



反転負荷経路

バウシンガー効果

直交負荷経路

交差効果

H. Haddadi, S. Bouvier : Int. J. of Pla., 22 (2006), 2226–2271

S. Bouvier, B. Gardy : J. of Mat. Pro. Tec., 174 (2006), 115–126

ひずみ経路の変化の定式化

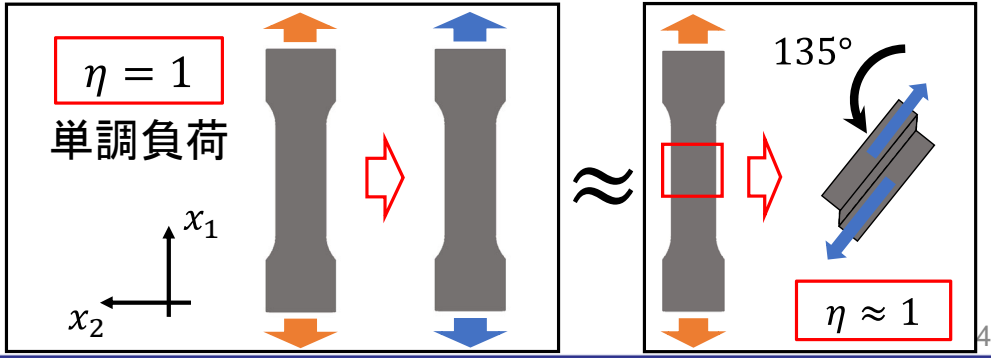
第一負荷のひずみ経路

第二負荷のひずみ経路

ひずみ経路の内積で負荷方向の変化を数値化

$$\eta = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^I \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{II}}}{|\boldsymbol{\varepsilon}^I| |\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{II}}|}$$

$$-1 \leq \eta \leq 1$$

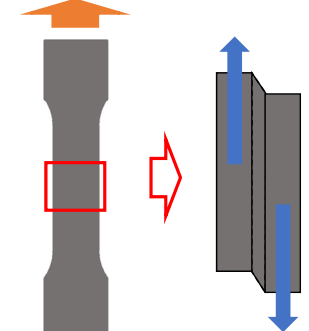
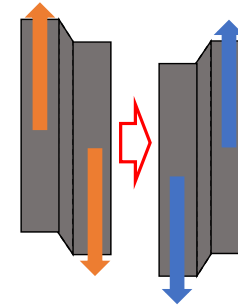


ひずみ経路の変化

$$\eta = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^I \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{II}}}{|\boldsymbol{\varepsilon}^I| |\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{II}}|}$$

$$\eta = -1$$

$$\eta = 0$$



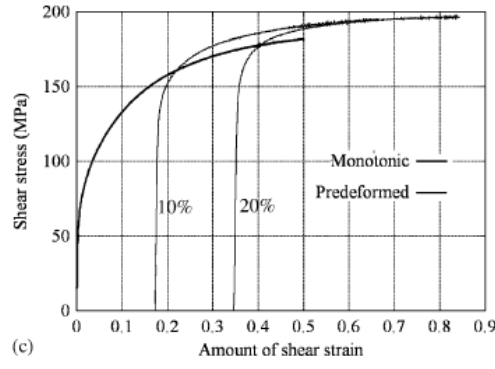
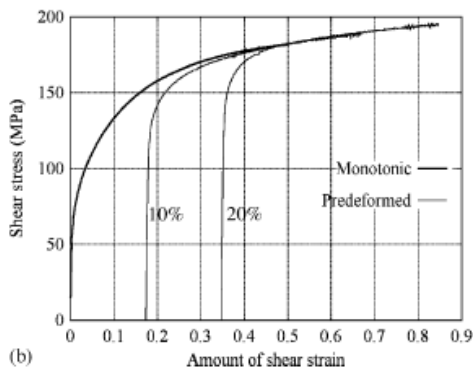
反転負荷

直交負荷

バウシinger効果

交差効果

AA6016-T4材の単軸引張→単純せん断



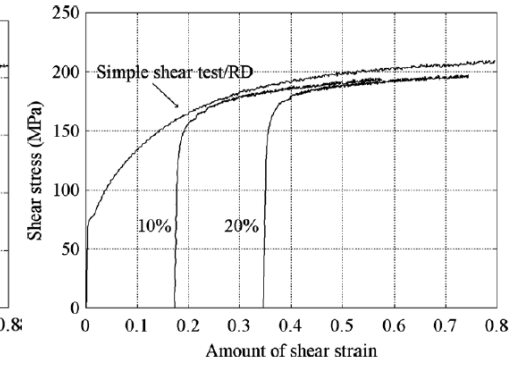
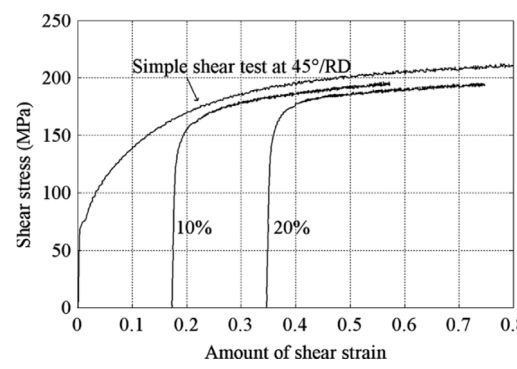
反転負荷経路

直交負荷経路

バウシinger効果

交差効果

AA5182-0材の単軸引張→単純せん断

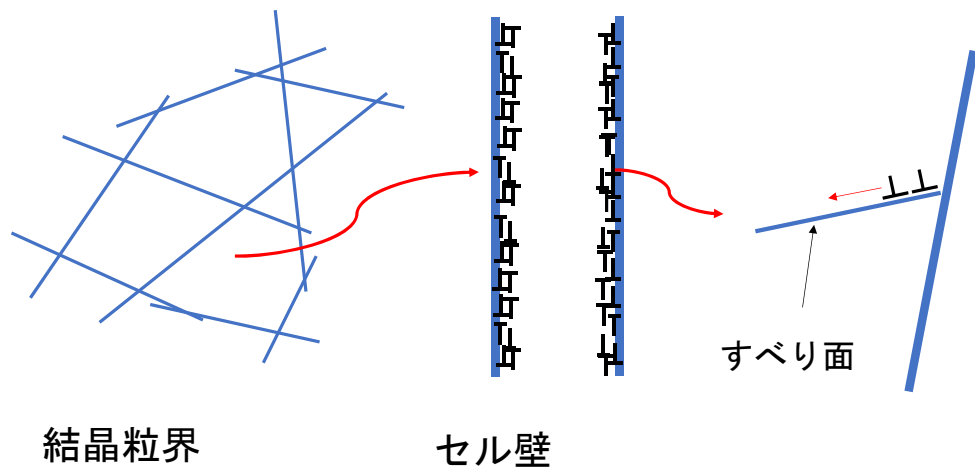


反転負荷経路

直交負荷経路

材料によって応力-ひずみ曲線の挙動が異なる

バウシinger効果

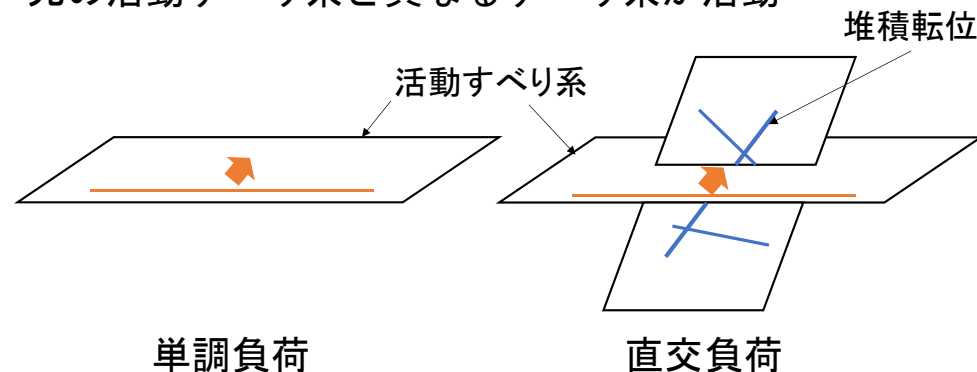


堆積転位から受ける反力(背応力)
によって再降伏応力が低下

8

交差効果

元の活動すべり系と異なるすべり系が活動



刺さっているすべり系が転位運動の障害となり
結晶のすべり抵抗が上昇→潜在硬化

→ 結晶塑性

9

研究目的

- A5052-O材を用いて反転負荷試験を行い、応力-ひずみの関係を測定.
- A5052-O材を用いて単軸引張試験をした後、 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ に切り出して単純せん断をする2段階負荷試験を行い応力-ひずみの関係を測定.
- 実験結果を予測する結晶塑性解析を行う。
 - (1) 背応力を考慮しないモデル
 - (2) 背応力を考慮するモデル
 - (3) 潜在硬化を考慮するモデル
 - (4) 背応力と潜在硬化を考慮するモデル

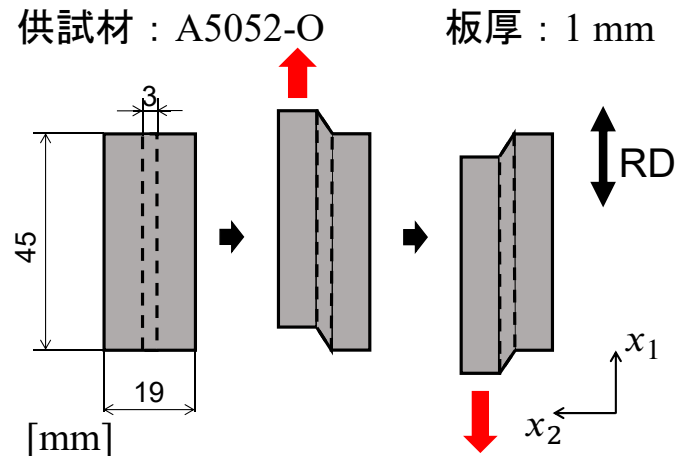
実験結果と解析結果を比較して予測精度について調査

10

実験方法と実験結果

11

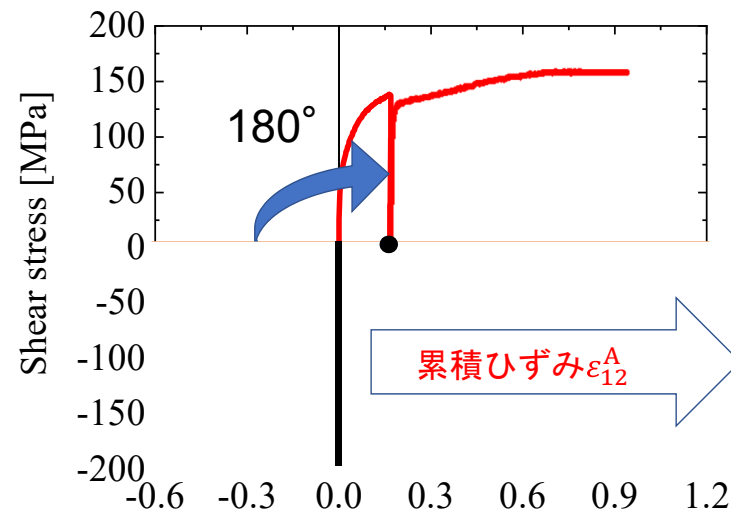
反転負荷の実験方法



反転負荷するせん断ひずみ ε_{12}^r :
0.05, 0.11, 0.17, 0.22, 0.28, 0.34

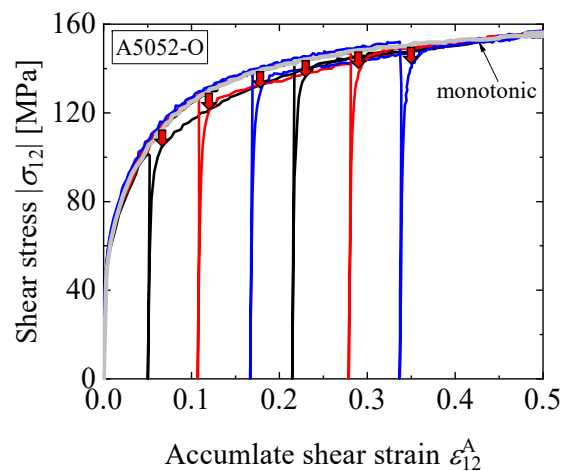
12

せん断応力-ひずみ曲線の表示方法



13

反転負荷のせん断応力-せん断ひずみ曲線

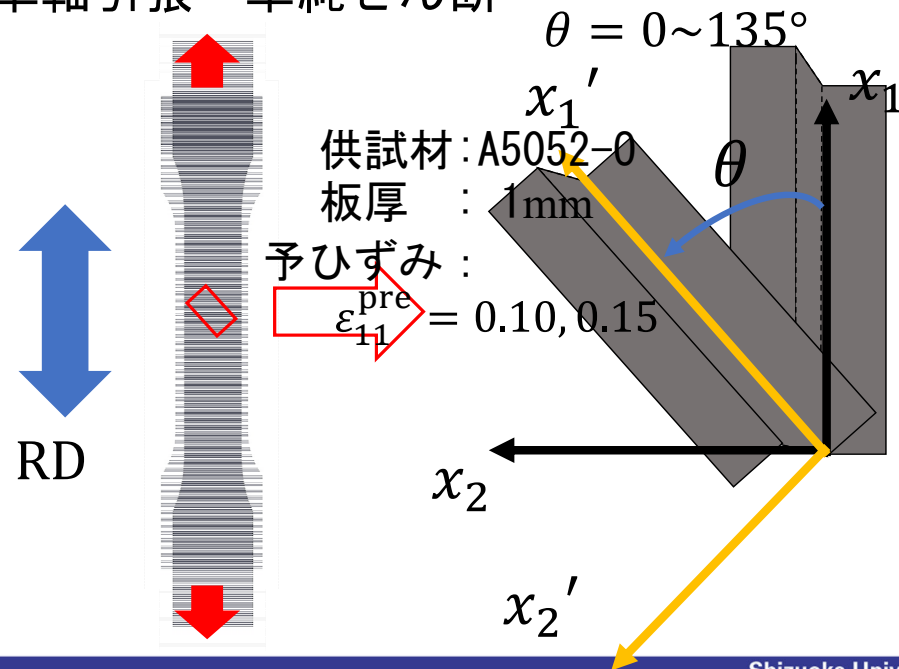


再降伏応力が低下し、応力低下を継続しながら変形

反転するひずみが大きくなると
バウシinger効果が小さくなる傾向

14

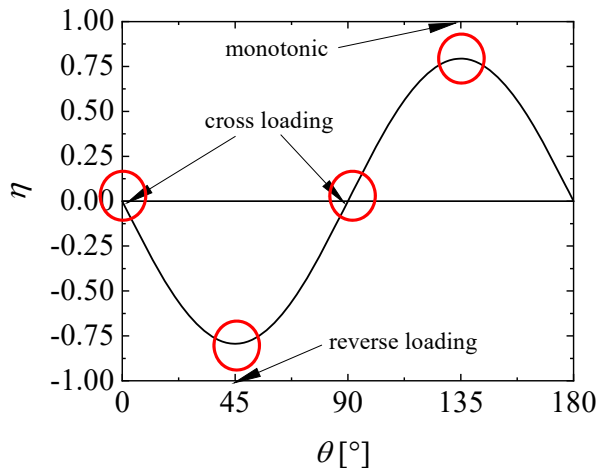
単軸引張→単純せん断



15

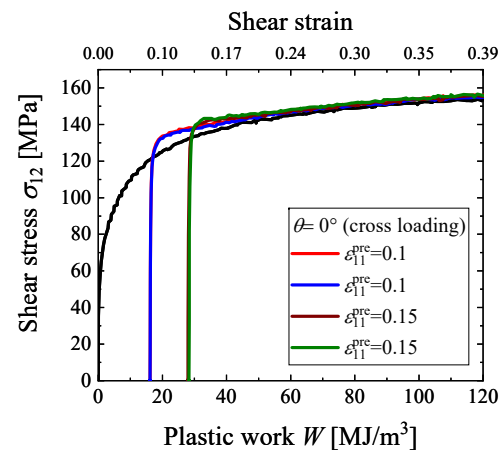
単軸引張→単純せん断のひずみ経路の変化

$$\eta = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^I \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^II}{|\boldsymbol{\varepsilon}^I| |\boldsymbol{\varepsilon}^II|} = -\frac{2R+1}{\sqrt{R^2+R+1}} \sin \theta \cos \theta$$



A5052-O
R = 0.63
|η|の最大値: 0.79

塑性仕事

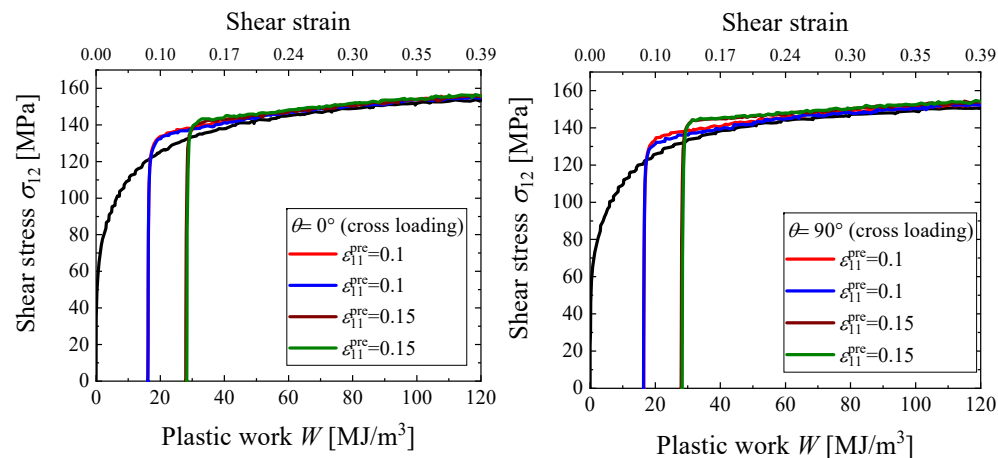


$$\Delta W = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \Delta t$$

$$W = \sum_{k=1}^n \Delta W$$

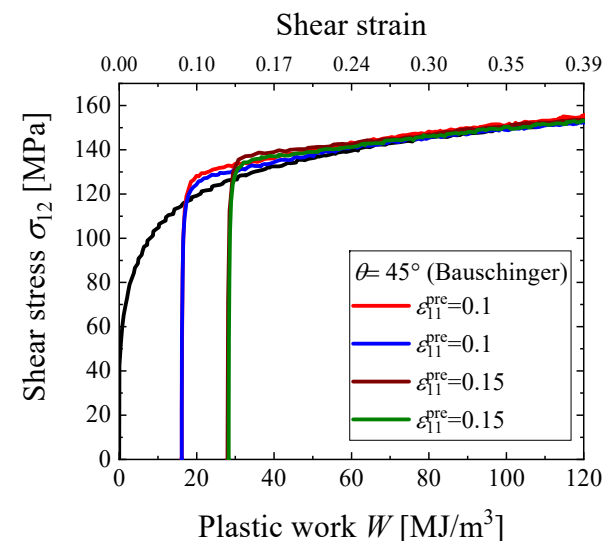
σ: 応力テンソル
D: 変形速度テンソル

θ = 0°, 90°, 直交負荷経路



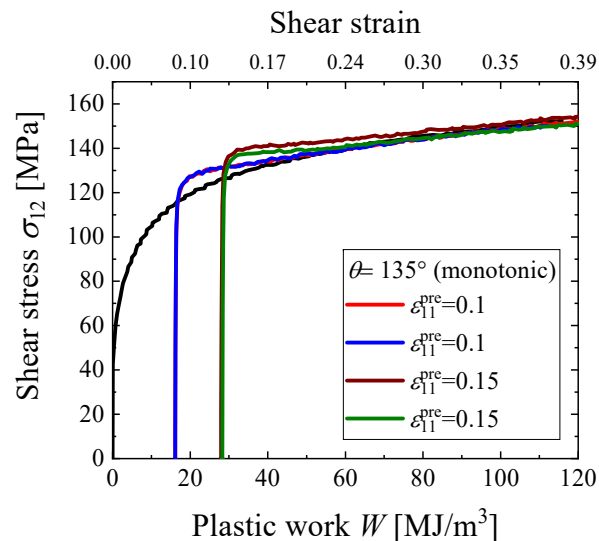
再降伏応力が上昇 単調負荷の流動応力に近づく

θ = 45°, 仮想的な反転負荷経路



再降伏応力が上昇 単調負荷の流動応力に近づく

$\theta = 135^\circ$, 仮想的な単調負荷経路



再降伏応力が上昇

単調負荷の流動応力に近づく

結晶塑性解析

結晶塑性解析の条件

塑性速度勾配

$$\mathbf{L}^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{(\alpha)} \mathbf{s}^{(\alpha)} \otimes \mathbf{m}^{(\alpha)}$$

\mathbf{s} : すべり方向ベクトル
 \mathbf{m} : すべり面法線ベクトル

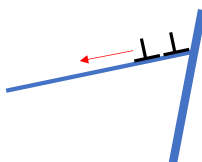
ひずみ速度依存型

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^{(\alpha)} - \tau_{\text{kin}}^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{\frac{1}{m}} \text{sgn}(\tau^{(\alpha)} - \tau_{\text{kin}}^{(\alpha)})$$

$g^{(\alpha)}$: すべり抵抗
 $\tau^{(\alpha)}$: 分解せん断応力
 $\dot{\gamma}_0$: 基準すべり速度
 m : ひずみ速度感受性指数

Armstrong-Frederic型の背応力の発展則

$$\dot{\tau}_{\text{kin}}^{(\alpha)} = C_1 \dot{\gamma}^{(\alpha)} - C_2 \tau_{\text{kin}}^{(\alpha)} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}|$$



結晶内部の堆積転位から受ける逆応力を表現

すべり抵抗の発展則 $\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h^{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}|$

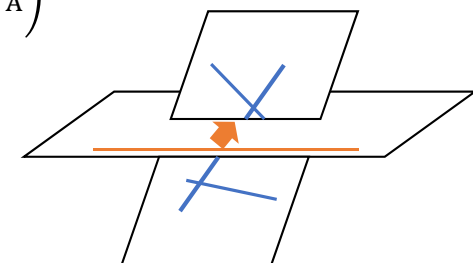
硬化係数行列 $h^{\alpha\beta}$

$$h^{\alpha\beta} = h \begin{bmatrix} A & qA & qA & qA \\ qA & A & qA & qA \\ qA & qA & A & qA \\ qA & qA & qA & A \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = h_1 + (h_0 - h_1) \exp\left(-\frac{h_0 - h_1}{\tau_1 - \tau_0} \gamma_A\right)$$

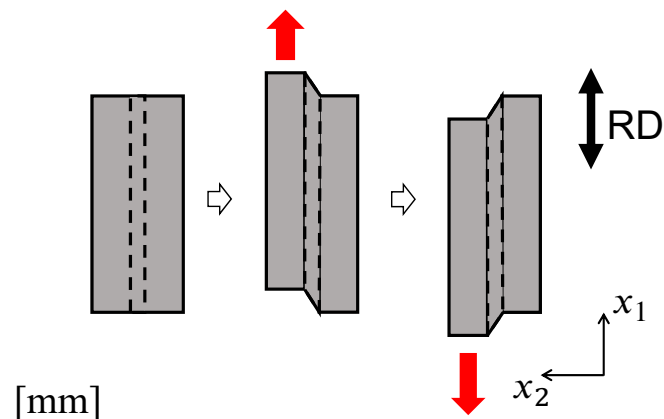
$$\gamma_A = \int_0^t \sum |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt$$

$q = 1$ 活動すべり系が共面にある
 $q \neq 1$ 活動すべり系が共面でない



アルミニウムでは $q = 1.4$

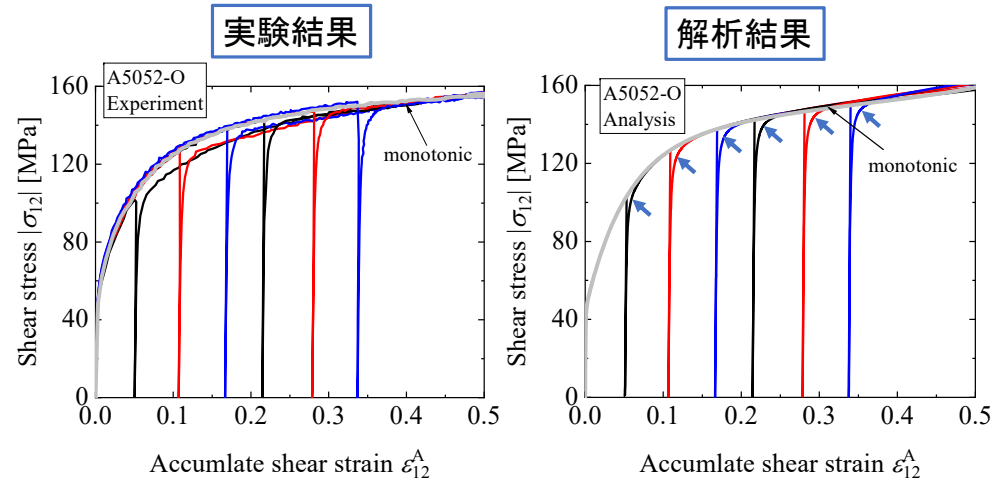
反転負荷の解析



24

Shizuoka University

反転負荷, 背応力を考慮しないモデル



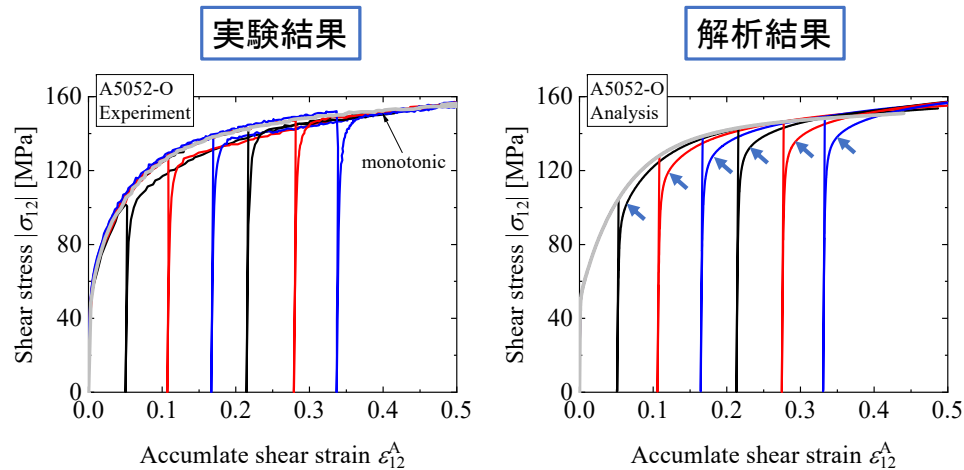
再降伏応力は低下した

流動応力の再現はできていない

25

Shizuoka University

反転負荷, 背応力を考慮するモデル



再降伏応力が低下

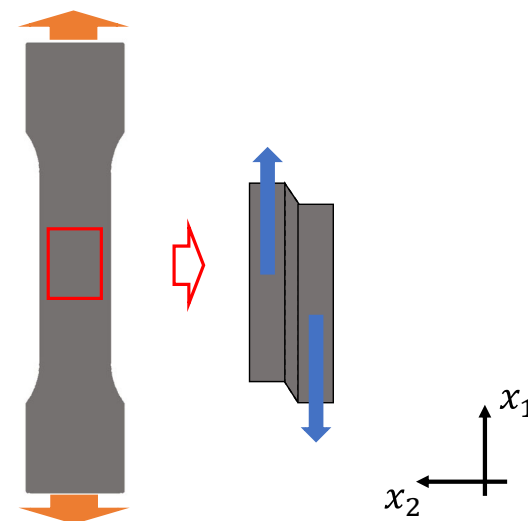
流動応力の予測精度が向上

反転負荷するひずみが高くなるとバウシinger効果が大きくなる

26

Shizuoka University

$\theta = 0^\circ$, 直交負荷の解析



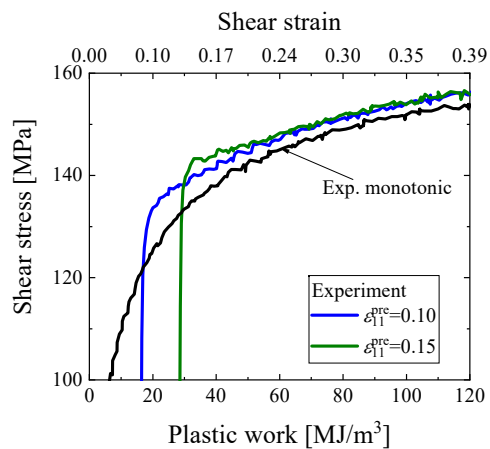
27

Shizuoka University

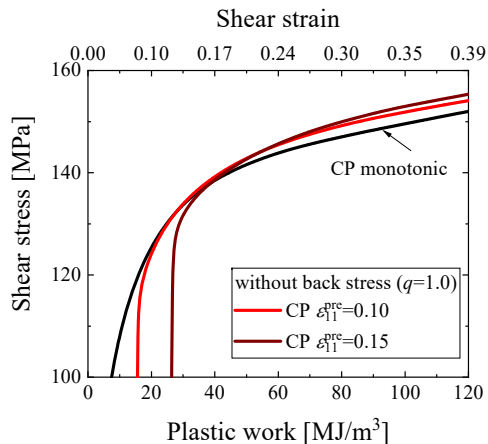
直交負荷経路, $\theta = 0^\circ$

潜在硬化なし

実験結果



解析結果

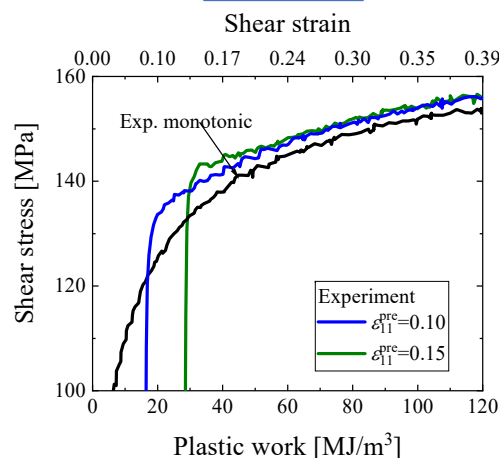


再降伏応力が上昇しない

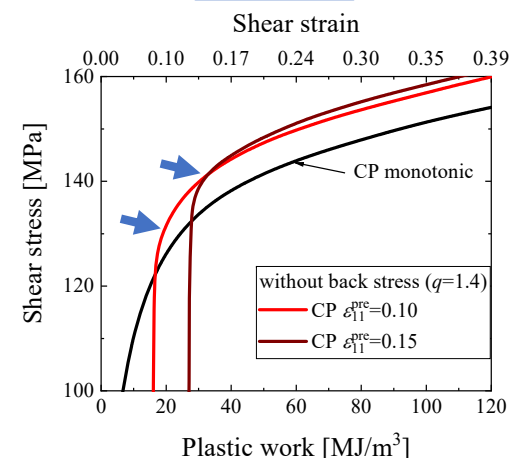
直交負荷経路, $\theta = 0^\circ$

潜在硬化あり

実験結果



解析結果



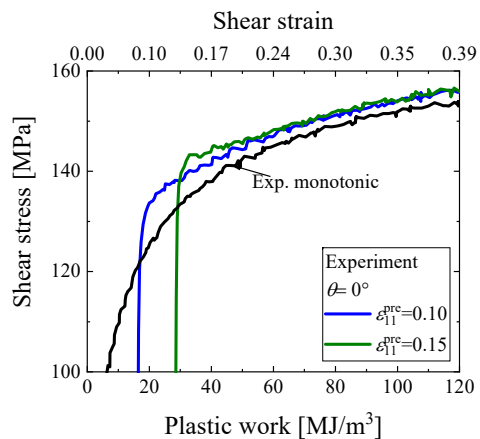
再降伏応力が上昇

再降伏後の流動応力の挙動は予測できない

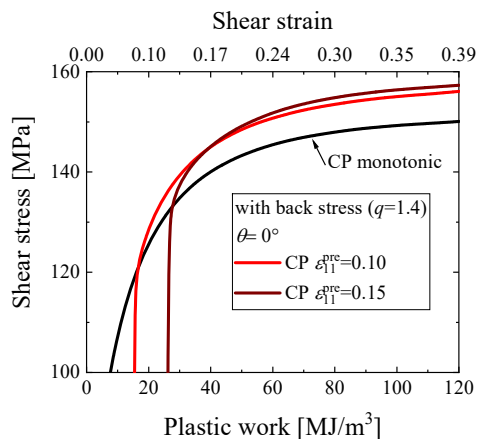
直交負荷経路, $\theta = 0^\circ$

潜在硬化 背応力

実験結果



解析結果



緩やかに硬化

予測精度が悪化

結論

実験

- A5052-O材の反転負荷試験より再降伏応力が低下するバウシinger効果が起きた。
- A5052-O材が直交負荷, 仮想的な反転負荷, 仮想的な単調負荷受ける際は, 単調負荷の流動応力に対して再降伏応力が高くなり単調負荷の流動応力に近づきながらひずみが進展した。

解析

- 背応力を考慮することで再降伏応力が低下する挙動を得たが予測できない挙動もあった。
- 潜在硬化を考慮することで直交負荷を受ける際に再降伏応力が上昇する予測はできたが, それ以降の流動応力の予測はできなかった。
- 背応力と潜在硬化を考慮すると直交負荷における応力-ひずみ曲線の予測精度が悪化した。