

# 潜在硬化を考慮した 結晶塑性解析によるA6016板の 塑性異方性の予測

吉田研究室 修士2年  
山崎 康人

0

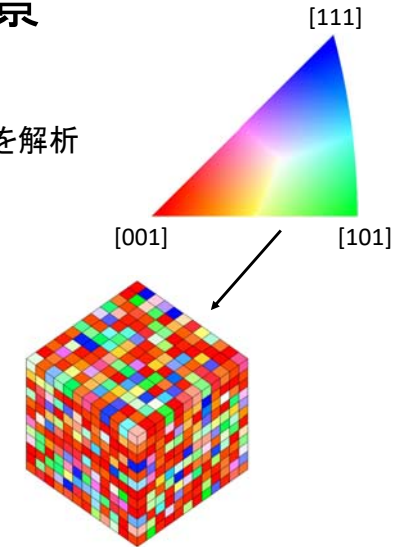
# 研究背景

## 結晶塑性解析

材料の集合組織を取込, 材料挙動を解析

- 利点  
いかなる応力状態も模擬可能  
実験では測定できない領域の  
予測が可能
- 課題  
解析の高精度化

➡ 様々な材料モデルが提案



1

# 結晶塑性モデル

弾粘塑性型モデルにおけるすべり速度

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{1/m}$$

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

すべり抵抗  $g^{(\alpha)}$  の発展式

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^{N_{slip}} h^{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}|$$

$$h^{\alpha\beta} = q^{\alpha\beta} h$$

$\dot{\gamma}^{(\beta)}$ :  $\beta$ 系におけるすべり速度  
 $h^{\alpha\beta}$ : 硬化係数行列  
 $q^{\alpha\beta}$ : すべり系の相互作用行列  
( $\beta$ 系のすべりが $\alpha$ 系のすべり抵抗  
に及ぼす影響)  
 $h$ : 硬化率

2

# すべり系の相互作用行列 $q^{\alpha\beta}$

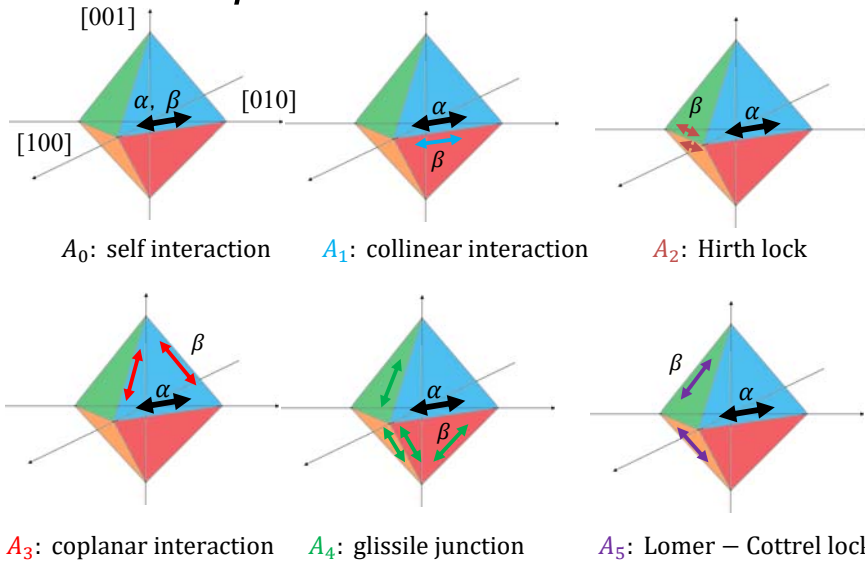
fcc金属  
すべり面: {111} すべり方向: <110> ➡  $q^{\alpha\beta}$  は 12 × 12 行列 (144 成分)  
計 12 個のすべり系が存在

$$q^{\alpha\beta} = \begin{matrix} & \beta \\ \alpha & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1 & A_0 & A_3 & A_3 & A_5 & A_4 & A_2 & A_1 & A_4 & A_4 & A_2 & A_5 & A_4 \\ 2 & & A_0 & A_3 & A_4 & A_1 & A_4 & A_4 & A_5 & A_2 & A_5 & A_2 & A_4 \\ 3 & & & A_0 & A_2 & A_4 & A_5 & A_4 & A_2 & A_5 & A_4 & A_4 & A_1 \\ 4 & & & & A_0 & A_3 & A_3 & A_4 & A_1 & A_4 & A_4 & A_5 & A_2 \\ 5 & & & & & A_0 & A_3 & A_5 & A_4 & A_2 & A_4 & A_2 & A_5 \\ 6 & & & & & & A_0 & A_2 & A_4 & A_5 & A_1 & A_4 & A_4 \\ 7 & & & & & & & A_0 & A_3 & A_3 & A_2 & A_4 & A_5 \\ 8 & & & & & & & & A_0 & A_3 & A_5 & A_4 & A_2 \\ 9 & & & & & & & & & A_0 & A_4 & A_1 & A_4 \\ 10 & & & & & & & & & & A_0 & A_3 & A_3 \\ 11 & & & & & & & & & & & A_0 & A_3 \\ 12 & & & & & & & & & & & & A_0 \end{matrix} \end{matrix}$$

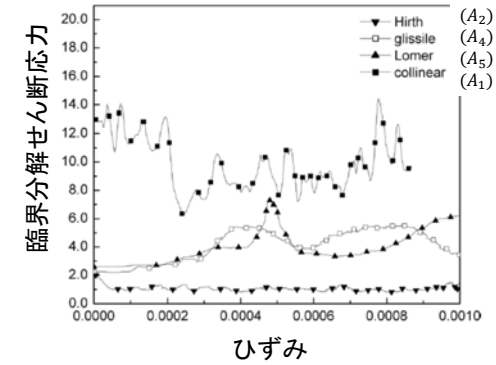
sym.

転位の相互作用を考慮 → 12 × 12 成分のうち独立な成分は 6 つ 3

# α, βすべり系の相互作用



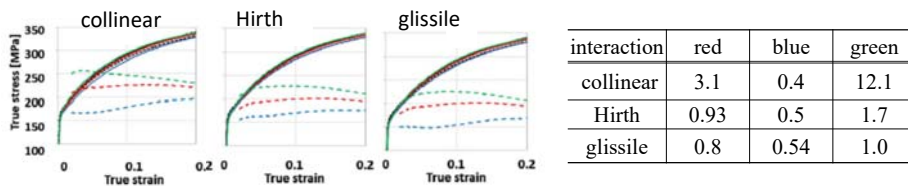
# 転位動力学による相互作用係数の影響



Alankar, A. et al.: J.Eng.Mat.Tech., **134** (2012), 012-018

それぞれの相互作用による硬化量が異なる

# 結晶塑性解析での材料挙動予測



相互作用行列による材料挙動の変化なし

Xie, Q. et al.: Mater. Sci. Eng. A, **721** (2018), 154-164.

• cube方位    潜在硬化係数の変更    異方性への影響小

• Goss方位    異方性への影響大

潜在硬化係数の影響は、集合組織に依存

Pham, M. S. et al.: J. Mech. Phys. Solids, **99** (2017), 50-69.

相互作用行列が材料挙動に与える影響が不明瞭

# 研究目的

- 実用アルミニウム合金を対象とし、単軸引張および二軸引張における塑性異方性を実験で測定
- 異なる硬化係数行列を用いた多結晶塑性解析により、実験の予測



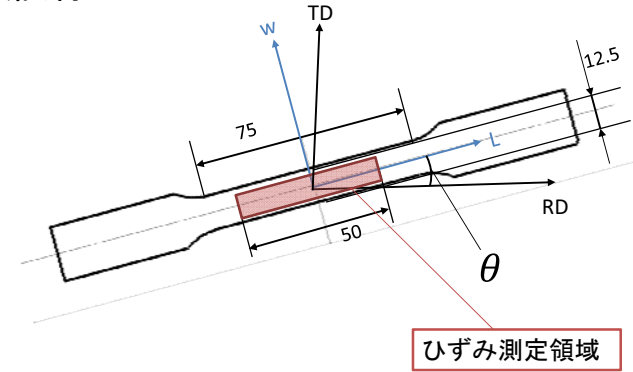
- 硬化係数が解析に与える影響の調査
- 実用金属の変形の予測

# 実験

8

# 単軸引張試験 実験方法

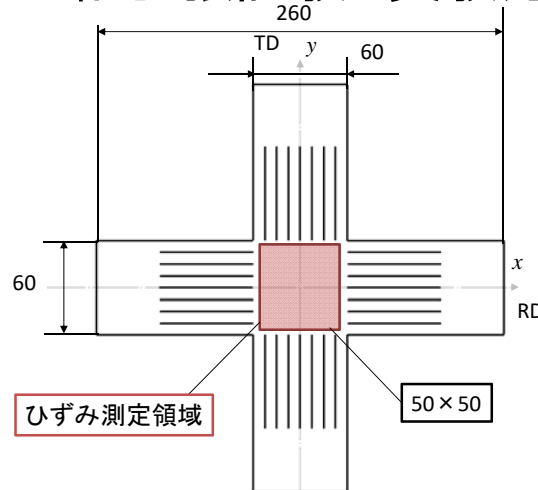
供試材: A6016-T4



負荷方向 $\theta$ : 圧延方向からの角度  $0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$  まで測定

9

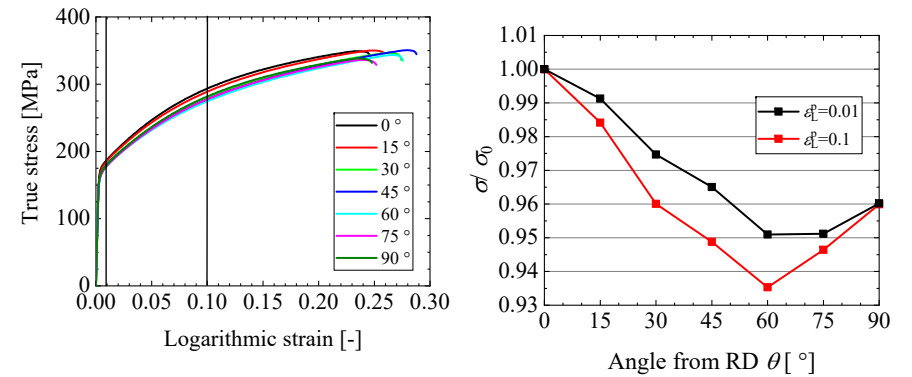
# 二軸引張試験 実験方法



荷重比 $F_x:F_y = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$

10

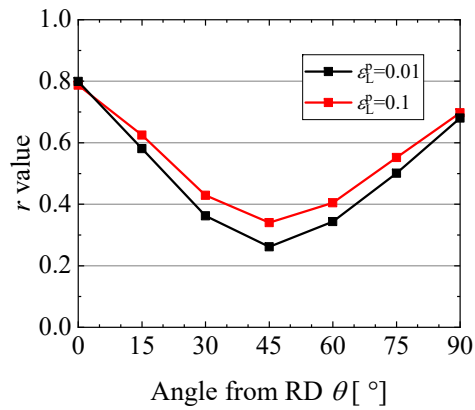
# A6016-T4材単軸引張試験結果



圧延方向( $\theta = 0^\circ$ )の応力で正規化  
 $\theta = 60^\circ$ で最小となる, 下に凸になる傾向

11

# A6016-T4材単軸引張試験結果

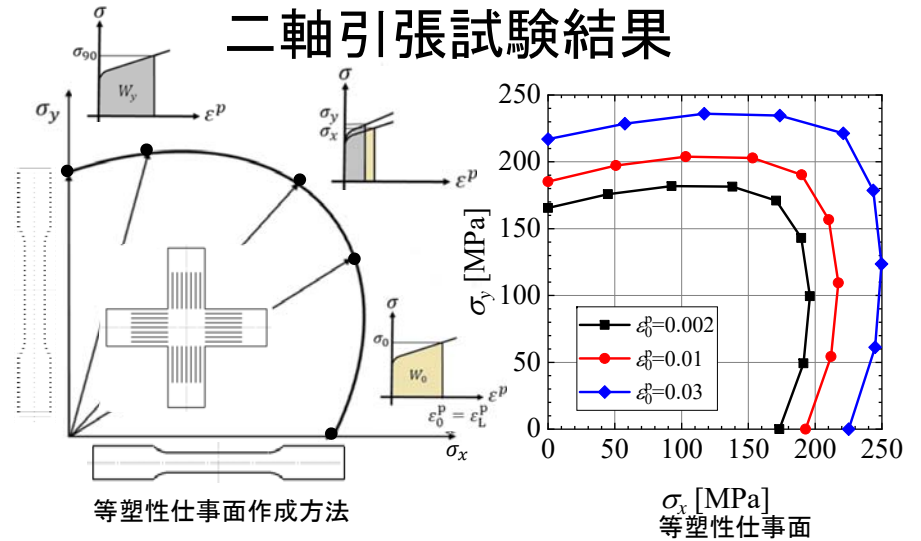


$$r = \frac{\dot{\epsilon}_W^p}{\dot{\epsilon}_T^p} = - \frac{\dot{\epsilon}_W^p}{\dot{\epsilon}_L^p + \dot{\epsilon}_W^p}$$

$\dot{\epsilon}_L^p$ : 引張方向の対数塑性ひずみ速度  
 $\dot{\epsilon}_W^p$ : 幅方向の対数塑性ひずみ速度  
 $\theta = 45^\circ$ で最小

12

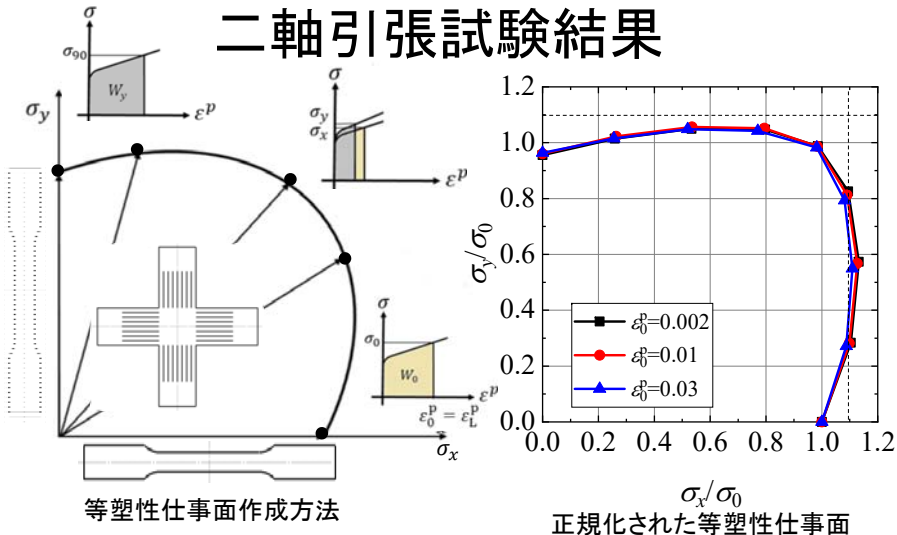
# 二軸引張試験結果



RD方向が最大主応力となる領域で強度高

13

# 二軸引張試験結果



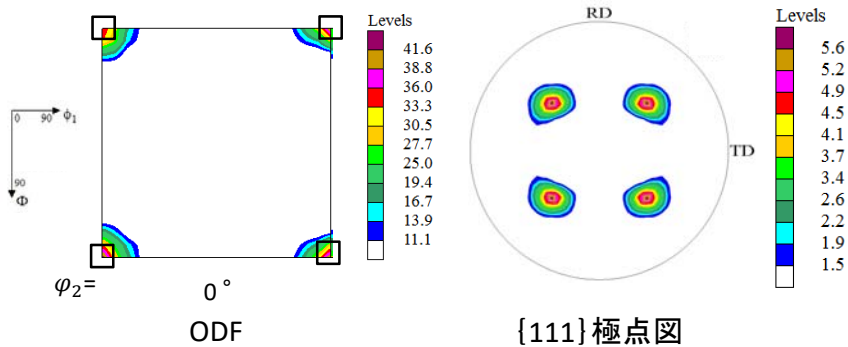
RD方向が最大主応力となる領域で強度高

14

結晶塑性解析

15

# 集合組織測定結果



X線回折により集合組織測定  
 供試材はcube方位が発達した材料

# 結晶塑性モデル

ひずみ速度依存型

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

基準すべり速度 $\dot{\gamma}_0$	0.002
ひずみ速度感受性指数 $m$	0.002

すべり抵抗  $g^{(\alpha)}$  の発展式

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^{N_{slip}} h^{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}|, \quad h^{\alpha\beta} = q^{\alpha\beta} h$$

$h^{\alpha\beta}$ : 硬化係数行列  
 $q^{\alpha\beta}$ : すべり系の相互作用行列

硬化率  $h$

$$h = h_0 \exp\left(-\frac{h_0 \gamma_A}{\tau_\infty - \tau_0}\right) + h_1, \quad \gamma_A = \sum_{\alpha=1}^{N_{slip}} \int |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt$$

Voce

線形項

# すべり系の相互作用行列 $q^{\alpha\beta}$

$q^{\alpha\beta} =$	$A_0$	$A_3$	$A_3$	$A_5$	$A_4$	$A_2$	$A_1$	$A_4$	$A_4$	$A_2$	$A_5$	$A_4$	
	$A_0$	$A_3$	$A_4$	$A_1$	$A_4$	$A_4$	$A_5$	$A_2$	$A_5$	$A_2$	$A_4$	$A_4$	
	$A_0$	$A_2$	$A_4$	$A_5$	$A_4$	$A_2$	$A_5$	$A_4$	$A_4$	$A_4$	$A_1$		
		$A_0$	$A_3$	$A_3$	$A_4$	$A_1$	$A_4$	$A_4$	$A_5$	$A_2$	$A_5$		
			$A_0$	$A_3$	$A_5$	$A_4$	$A_2$	$A_4$	$A_2$	$A_2$	$A_5$		
				$A_0$	$A_2$	$A_4$	$A_5$	$A_1$	$A_4$	$A_4$	$A_4$		
					$A_0$	$A_3$	$A_3$	$A_2$	$A_4$	$A_5$	$A_2$		
						$A_0$	$A_3$	$A_5$	$A_4$	$A_4$	$A_2$		
							$A_0$	$A_3$	$A_1$	$A_4$	$A_4$		
								$A_0$	$A_3$	$A_3$	$A_3$		
									$A_0$	$A_3$	$A_3$		
										$A_0$	$A_3$		
											$A_0$		
												$A_0$	
													sym.

$$h^{\alpha\beta} = q^{\alpha\beta} h$$

相互作用を5に設定

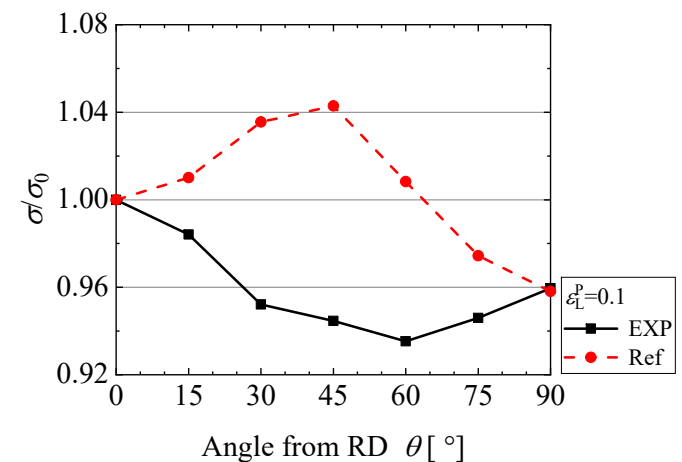
硬化率を5倍

- ①  $A_0 \sim A_5 = 1$  参照値(Ref.)
- ②  $A_1 = 5$  その他1
- ③  $A_2 = 5$  その他1
- ④  $A_4 = 5$  その他1
- ⑤  $A_5 = 5$  その他1

➡ 塑性流動応力,  $r$  値, 等塑性仕事面への影響の調査

# 参照値における流動応力分布

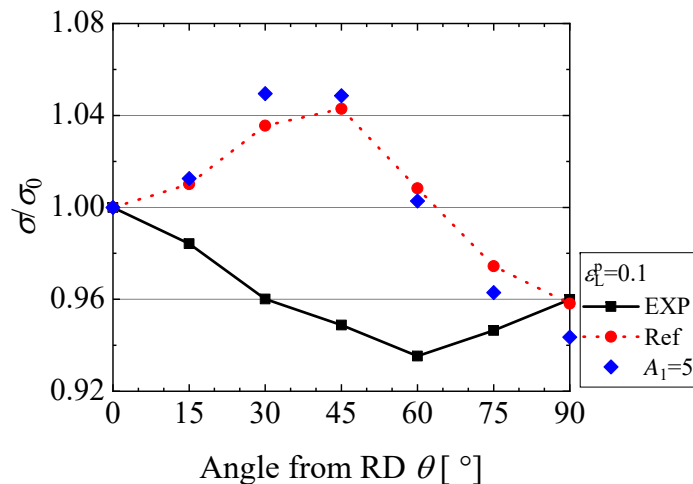
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



実験値が解析値と逆の傾向

## collinear interaction ( $A_1$ ) 流動応力分布

$A_0$	1
$A_1$	5
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1

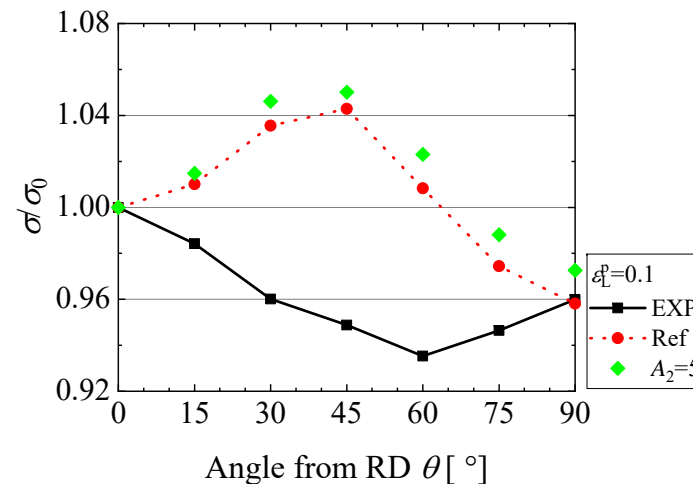


参照値と大きな変化なし

20

## Hirth lock ( $A_2$ ) 流動応力分布

$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	5
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1

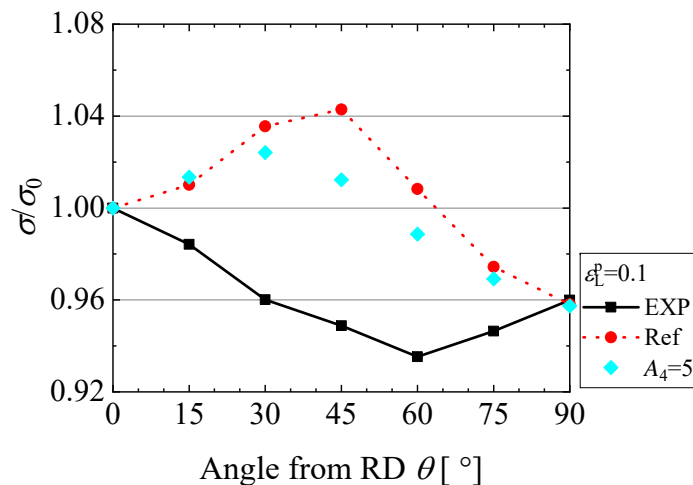


参照値と変化なし

21

## glissile junction ( $A_4$ ) 流動応力分布

$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	5
$A_5$	1

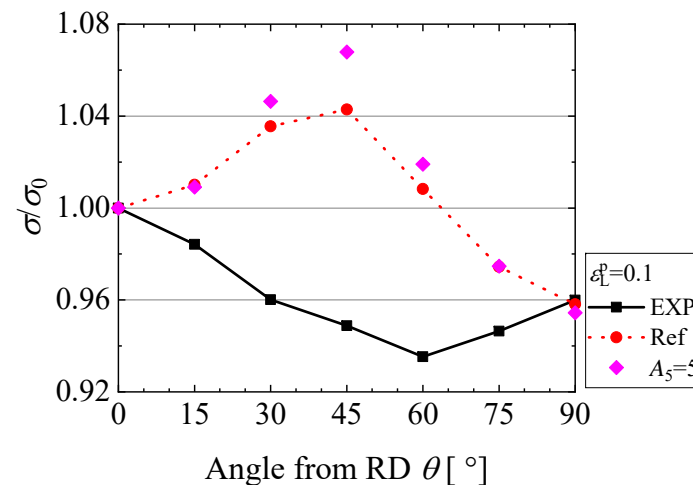


負荷方向45°の解析結果が実験結果に近づく  
 実験値の傾向は示さない

22

## Lomer-cottorel lock ( $A_5$ ) 流動応力分布

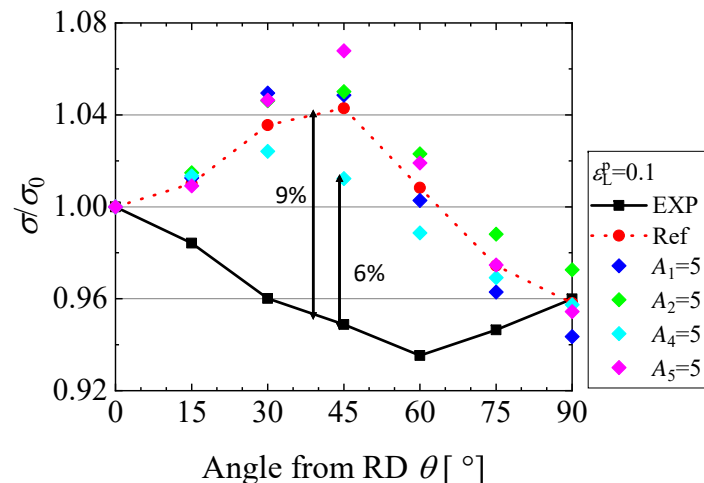
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	5



負荷角度  $\theta = 30 \sim 60^\circ$  の解析結果が参照値より大きくなる

23

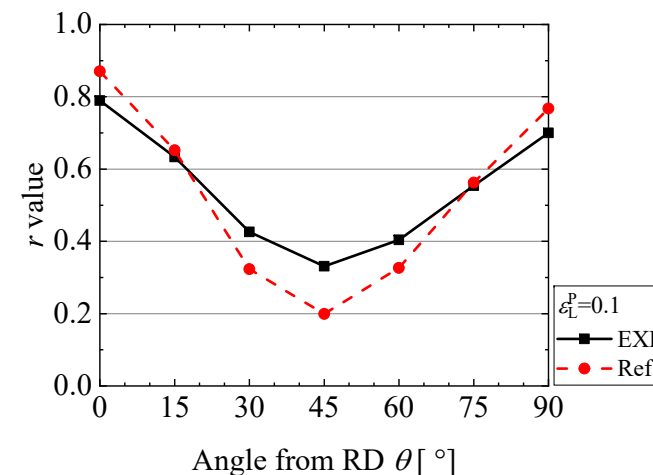
# A6016-T4材 流動応力分布



$A_4$  (glissile junction) の影響が大きい

# 参照値における r 値

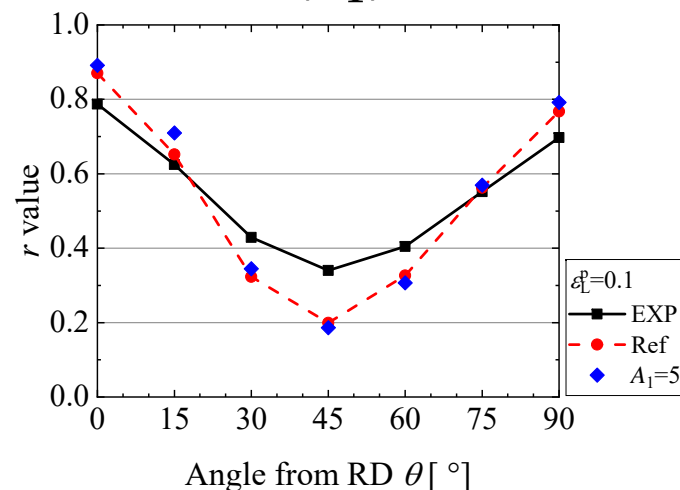
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



実験の傾向を示すことができる

# collinear interaction ( $A_1$ ) r 値分布

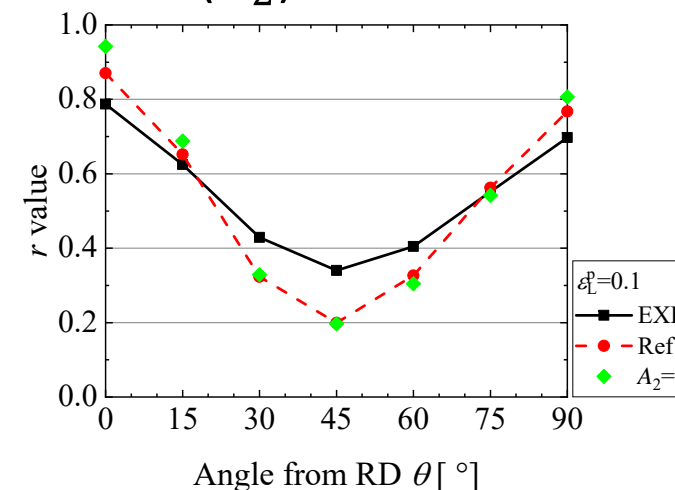
$A_0$	1
$A_1$	5
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



解析結果と参照値で大きな差なし

# Hirth lock ( $A_2$ ) r 値分布

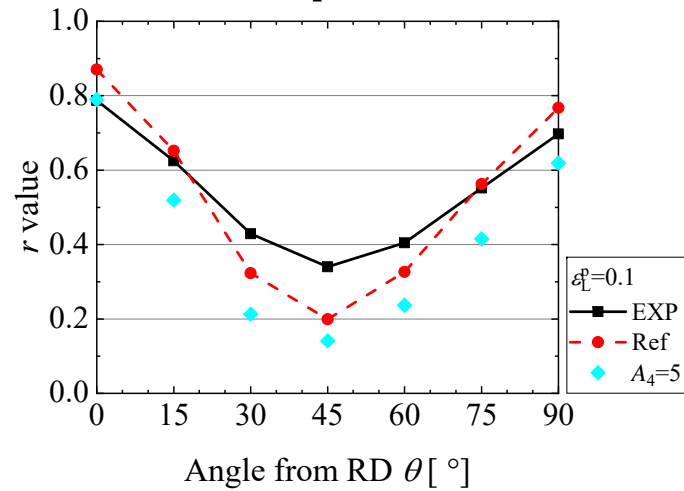
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	5
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



$A_1$  (collinear interaction) と同様な傾向

## glissile junction ( $A_4$ ) $r$ 値分布

$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	5
$A_5$	1

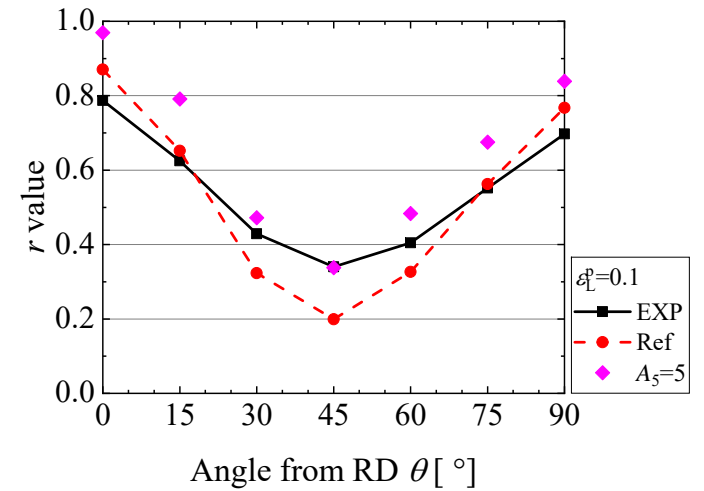


$A_4 = 5$ とすることで参照値より低くなる

28

## Lomer-cottorel lock ( $A_5$ ) $r$ 値分布

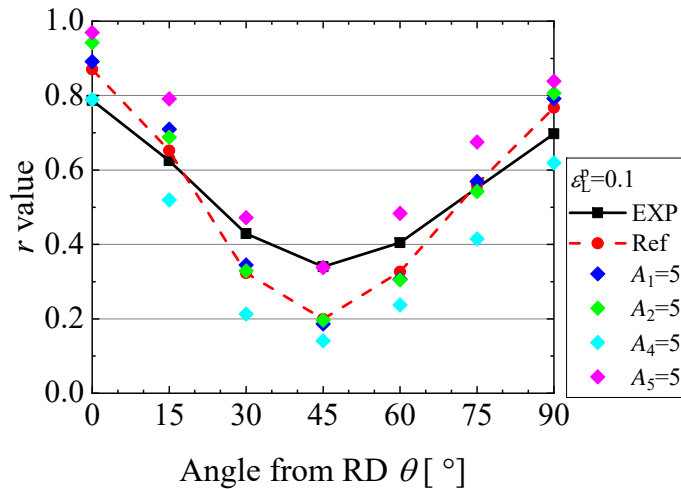
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	5



$A_5 = 5$ とすることで高くなる

29

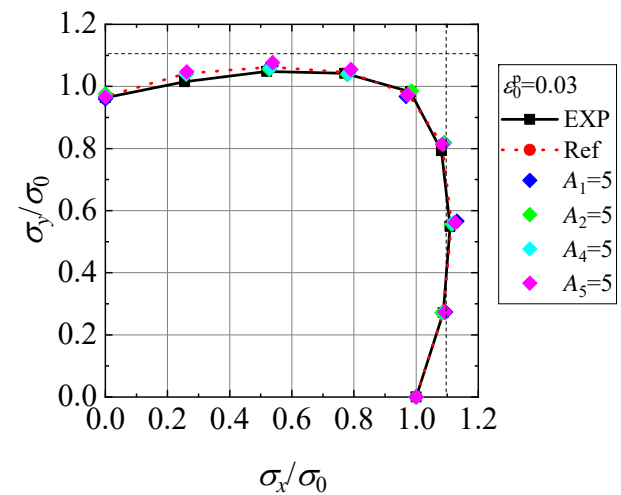
## A6016-T4材 $r$ 値分布



解析結果と参照値で傾向の変化なし

30

## A6016-T4材 等塑性仕事面

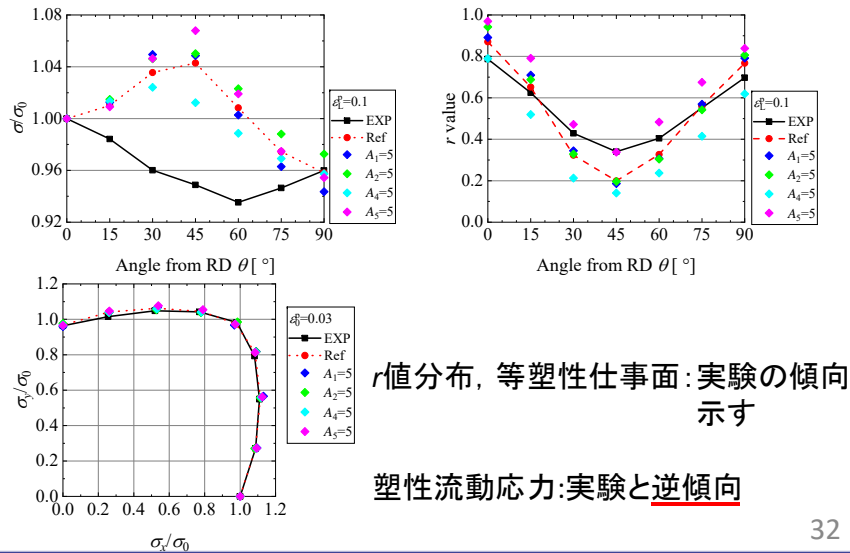


最大主応力は最大3%の差, RDの強度高

31



# 実験-解析結果まとめ

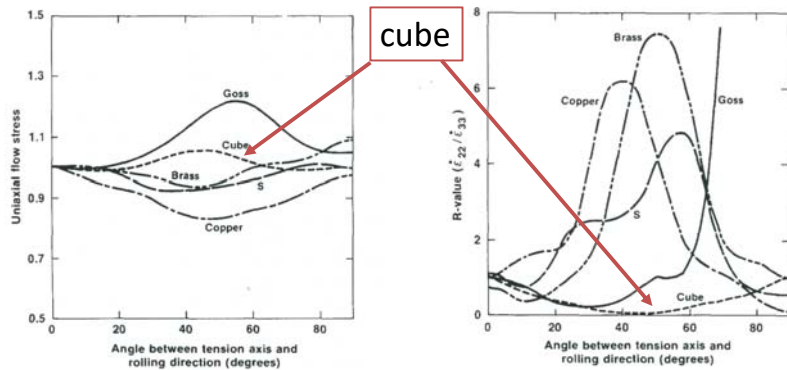


r値分布, 等塑性仕事面: 実験の傾向  
示す

塑性流動応力: 実験と逆傾向

# 考察

# 理想方位による流動応力分布とr値分布

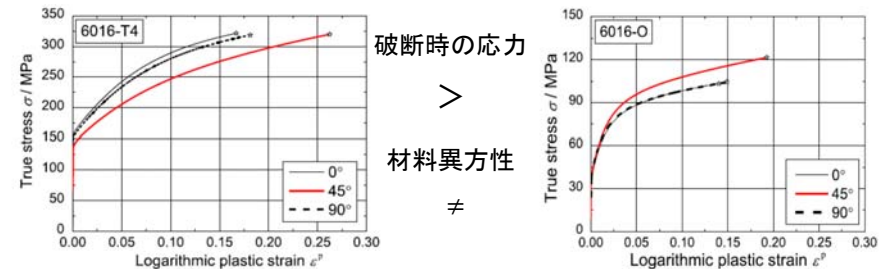


解析モデル: TBH(Taylor, Bishop-Hill)モデル

理想cube方位では, 本研究結果と同じ傾向

(Barlat F. et al.: Mat.Sci.and Eng., 95(1987), 15-29)

# 介在物が流動応力に与える影響



介在物有

介在物無

破断時の応力

>  
材料異方性  
≠

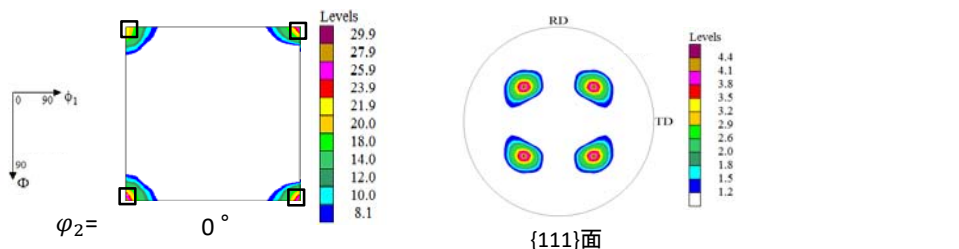
真応力-対数塑性ひずみ曲線

(Kuwabara, T. et al.: Int. J. Plasticity , 93 (2017), 164-186.)

# T4材→O材 焼鈍結果

焼鈍条件  
400±15 °Cを3 h保持

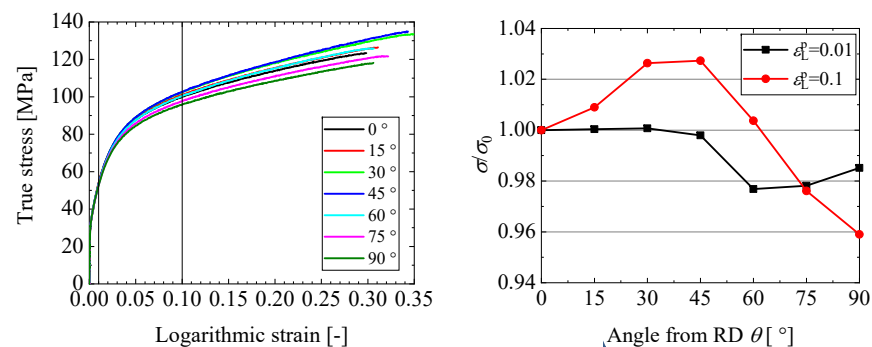
結晶粒径  
A6016-T4 : 30 μm  
A6016-O : 30 μm



A6016-O材の主要方位: cube

焼鈍による結晶粒径・結晶方位の変化なし

# A6016-O材単軸引張試験結果

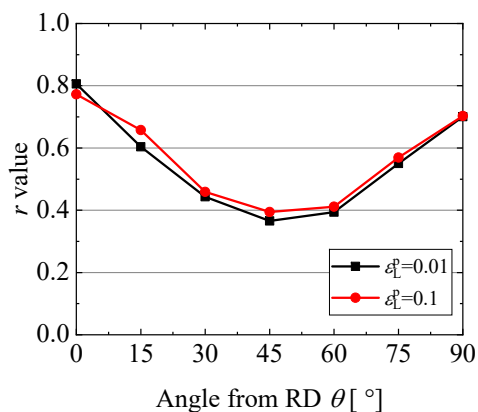


圧延方向( $\theta = 0^\circ$ )の応力で正規化

$\theta = 45^\circ$ で最大となる, 上に凸になる傾向

T4材と逆傾向

# A6016-O材単軸引張試験結果



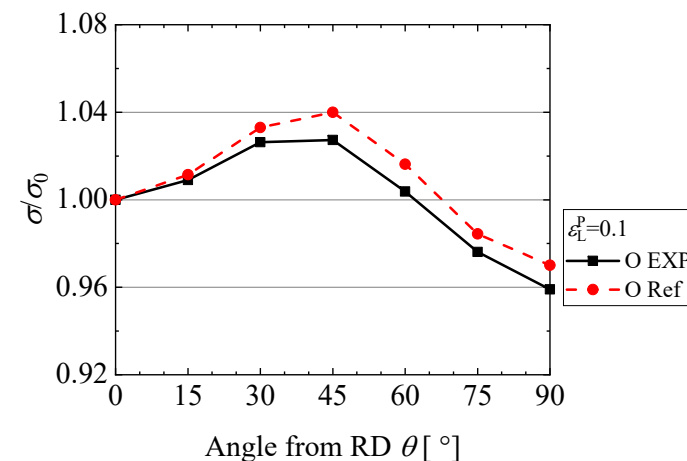
$$r = \frac{\epsilon_W^p}{\epsilon_T^p} = -\frac{\epsilon_W^p}{\epsilon_L^p + \epsilon_W^p}$$

$\theta = 45^\circ$ で最小

T4材と同傾向

# 参照値における流動応力分布

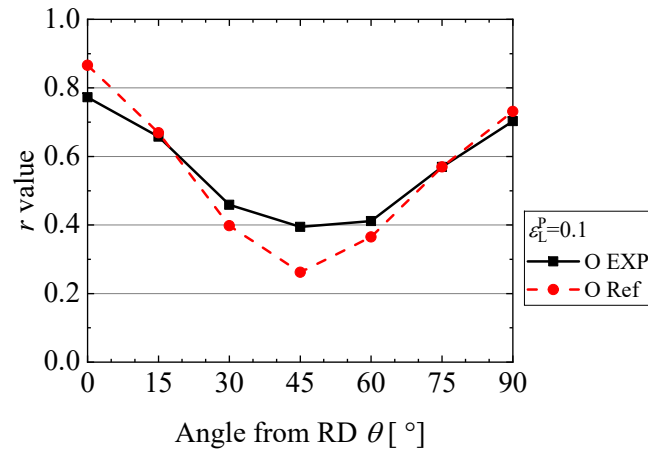
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



O材は実験値が参照値と同じ傾向

## 参照値における $r$ 値

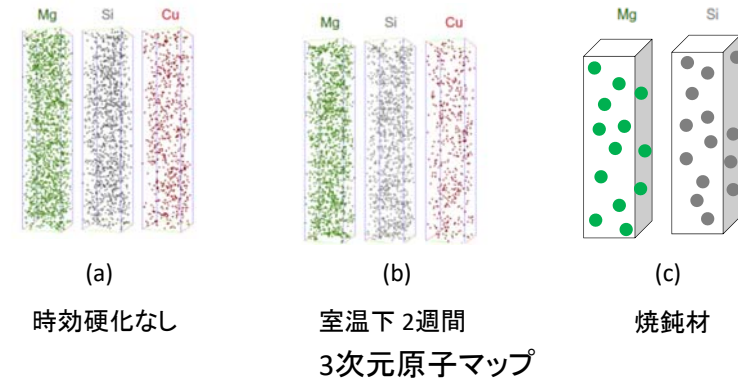
$A_0$	1
$A_1$	1
$A_2$	1
$A_3$	1
$A_4$	1
$A_5$	1



実験の傾向を示すことができる

40

## 自然時効後の原子分布



時効硬化材  
・原子が分散  
・原子分布変化なし



すべりに起因

41

## 結論

- 塑性流動応力分布は $A_4$  (glissile junction)の値を大きくすることで実験結果に近づくが、実験と逆傾向である
- $r$ 値は $A_5$  (Lomer-Cottrell interaction)の値を大きくすることで増加し、 $A_4$ の値を大きくすると減少する傾向がある。
- 等塑性仕事面は実験結果の傾向のみならず、その値を精度よく再現することができる。
- 相互作用行列の変更により、塑性異方性の傾向を変化させるほど大きく影響しない。

42