

## 予引張を受けたアルミニウム合金の 塑性流動挙動の測定

吉田研究室  
M2  
岡田 成正

## 研究背景

塑性加工の際に重要：シミュレーション解析

- 
- ・コスト削減
  - ・加工の効率化
  - ・破断や割れなどの成形不具合の予測

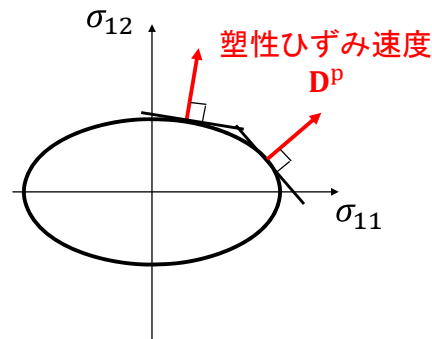
塑性変形：降伏条件，加工硬化則，**塑性流動則**

塑性流動則では，**関連流動則**が一般に用いられている。

## 研究背景

### 関連流動則

ある応力状態において  
降伏曲面が滑らか  
→塑性ひずみ速度は  
降伏曲面の法線方向に発生



$$D_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda}$$

$f$  : 降伏関数  
 $\dot{\lambda}$  : 塑性乗数

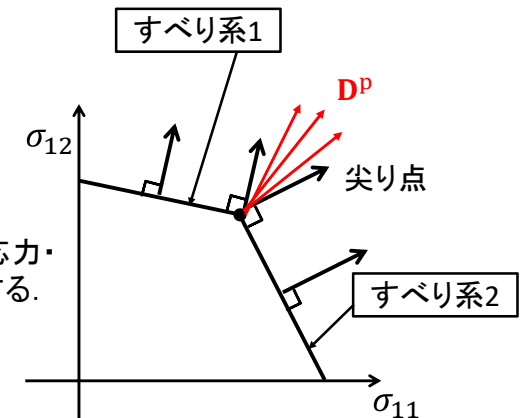
→ 応力が決まれば，塑性ひずみ速度の発生方向は  
唯一に決定できる

## 研究背景

### 結晶塑性論

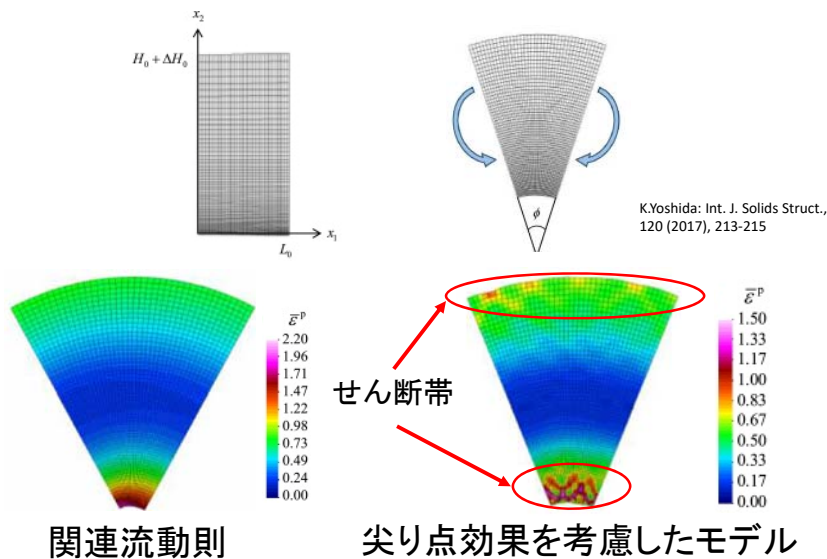
降伏面に尖り点を持つ。  
複数のすべり系の相対的な  
活動に影響を受ける。

すべり系の活動は，応力，応力・  
ひずみ速度の方向に依存する。



→ 応力状態だけでなく，応力・ひずみ速度にも依存する。

# シミュレーション: 曲げ



- ・尖り点の影響を考慮した塑性流動則を提案  
尖り点はひずみ量の変化の影響を受けて成長する  
M.Gotoh: Eng. Frac. Mech., 21 (1985), 673-684  
J.Christoffersen, J.W.Hutchinson: J. Mech. Phys. Solids, 27(1979), 465-487
- ・多結晶塑性解析によるモデルを提案  
ひずみ量は、塑性ひずみ速度の方向にほとんど影響がない  
K.Yoshida: Int. J. Solids Struct., 120 (2017), 213-215

塑性流動則に関する実験研究の多くが小ひずみ領域

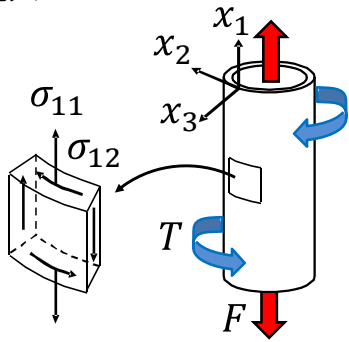
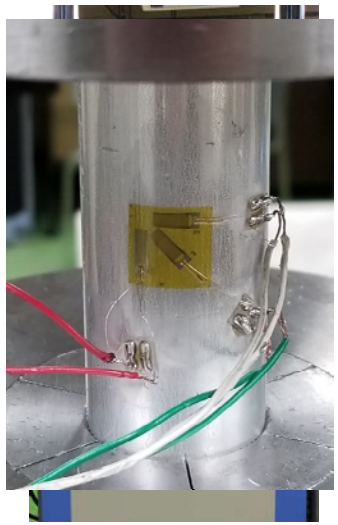


ひずみレベルが塑性流動に及ぼす影響が明らかでない

塑性加工: 大変形の際に起こる破断や割れの予測

→ 予ひずみを与えることでひずみ量を大ひずみまで拡大し、  
塑性ひずみ速度の方向に及ぼす影響を明らかにする

# 実験



ひずみゲージを用いて、  
3方向のひずみを測定

→ 変形勾配 F

速度勾配テンソル:  $L = \dot{F} \cdot F^{-1}$

加算分解

$$L = D + W$$

変形速度      連続体スピン

フックの法則  $D^e = S : \dot{\sigma}$

→ 塑性ひずみ速度:  $D^p = D - D^e$

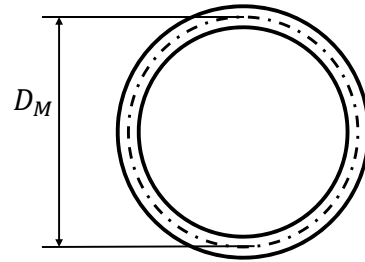
## 応力の算出

**軸方向応力** → 円管の軸方向の力のつり合い

$$\sigma_{11} = \frac{F}{\pi D_M t}$$

**せん断応力** → トルクのつり合い

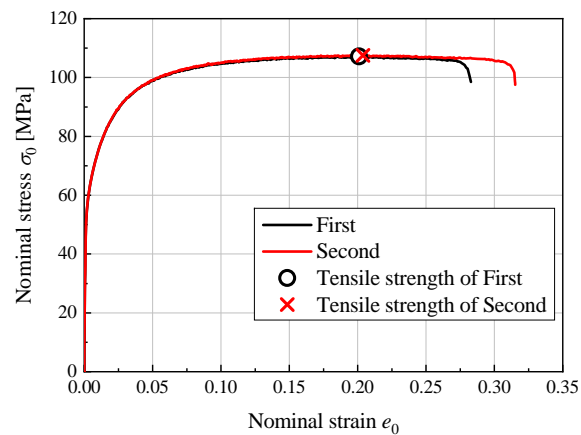
$$\sigma_{12} = \frac{2T}{\pi t D_M^2}$$



$F$ : 軸方向の力,  $T$ : トルク,  $D_M$ : 肉厚中央直径,  $t$ : 板厚

## A3003-O材

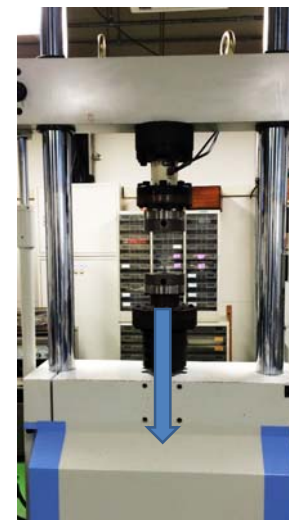
## 供試材 A3003-O円管



外径 [mm]	肉厚 [mm]
30	1.2

$E$ [GPa]	$G$ [GPa]	$\nu$	$n$
67.6	28.2	0.330	0.19

## 非線形負荷試験



A3003-O 肉厚円管

単軸引張で  
予ひずみを与える

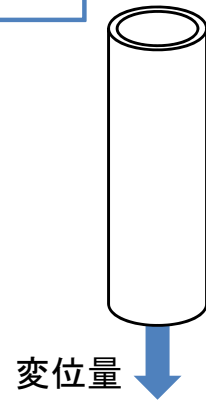
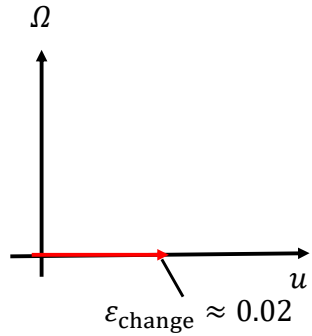
Prestrain(対数ひずみ)

0.00  
0.13  
0.20 } 3種類



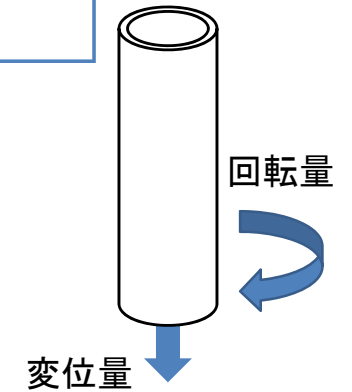
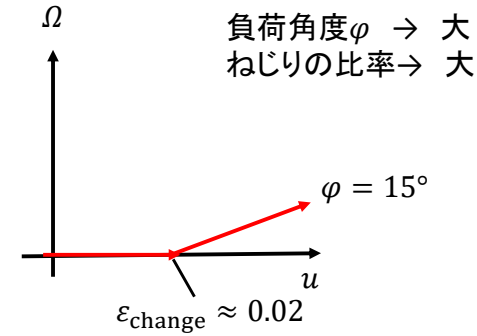
## 非線形負荷試験

- 軸ひずみが約0.02まで単軸引張



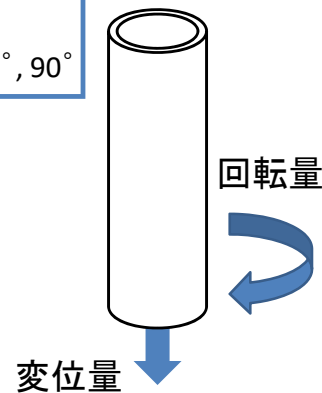
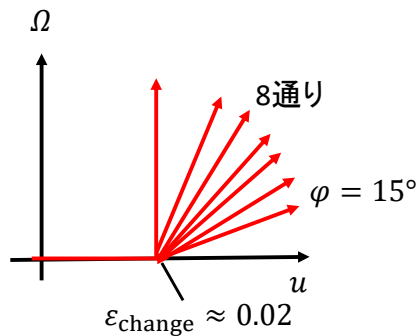
## 非線形負荷試験

- 軸ひずみが約0.02まで単軸引張
- ねじりを加え、非線形的に負荷を与える

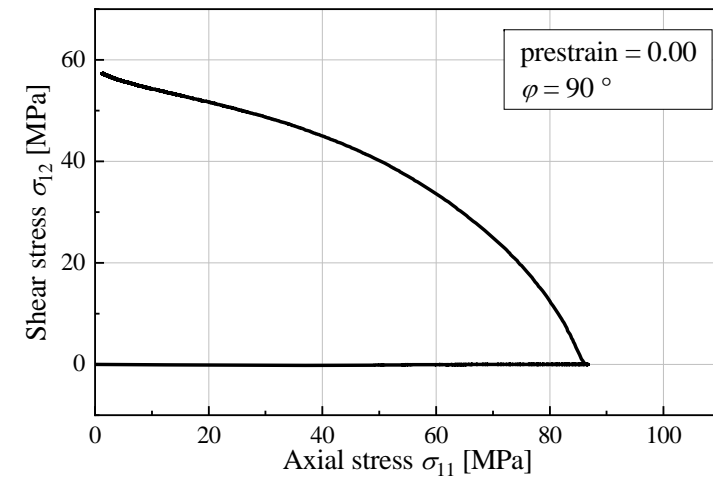


## 非線形負荷試験

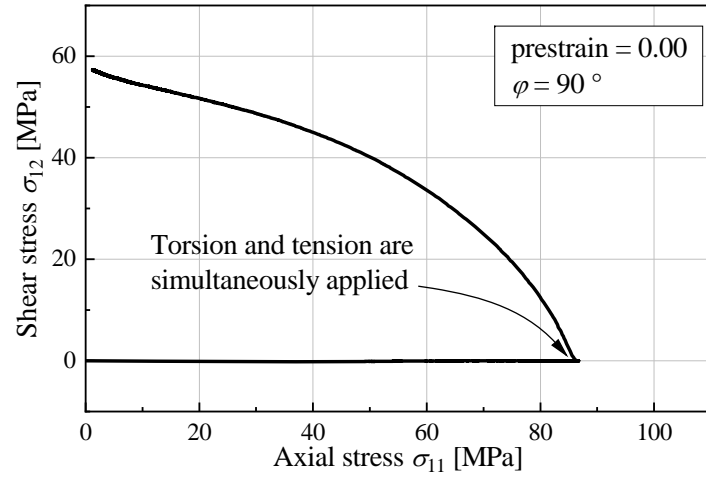
- 軸ひずみが約0.02まで単軸引張
- ねじりを加え、非線形的に負荷を与える
- 負荷角度  $\varphi$ : 15°, 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75°, 90°



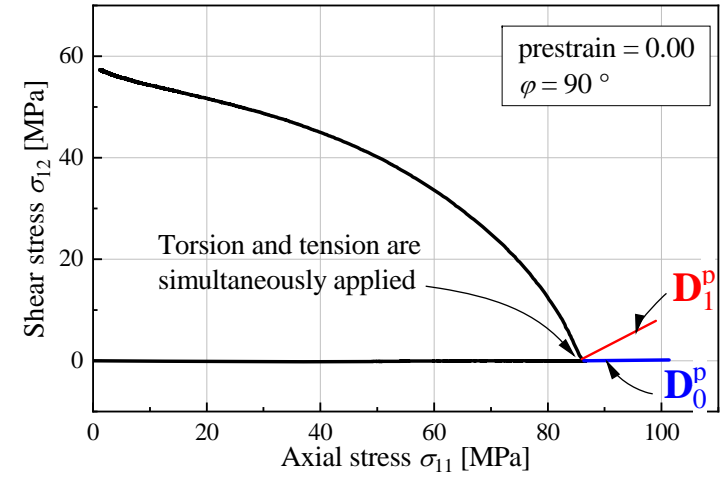
## 応力経路



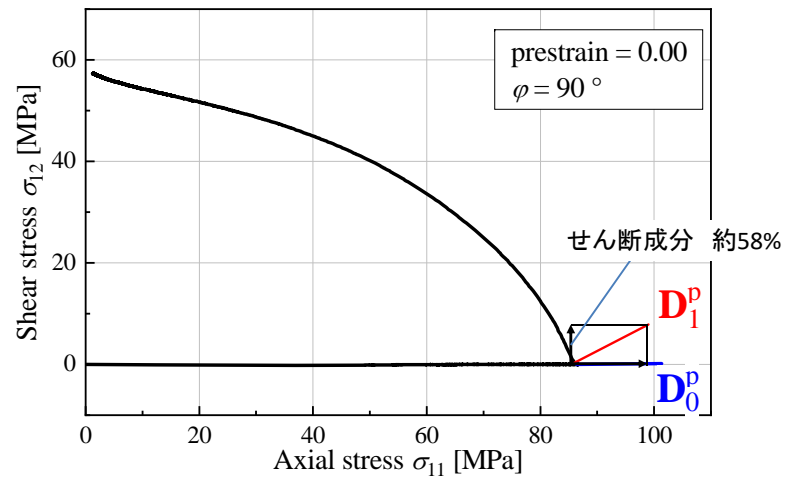
## 応力経路



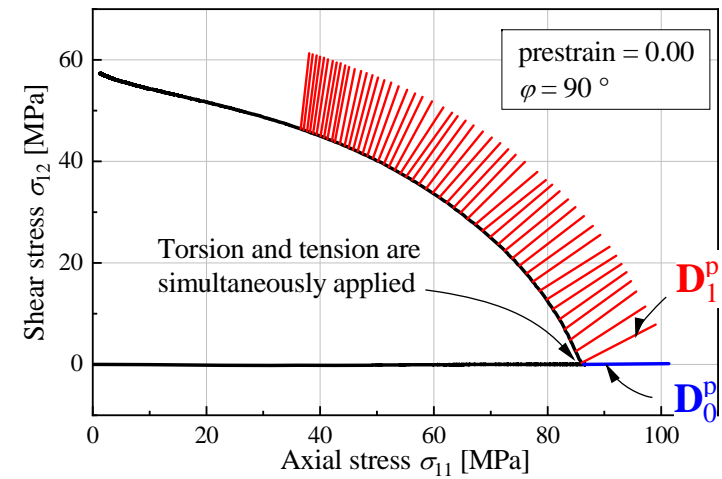
## 応力経路



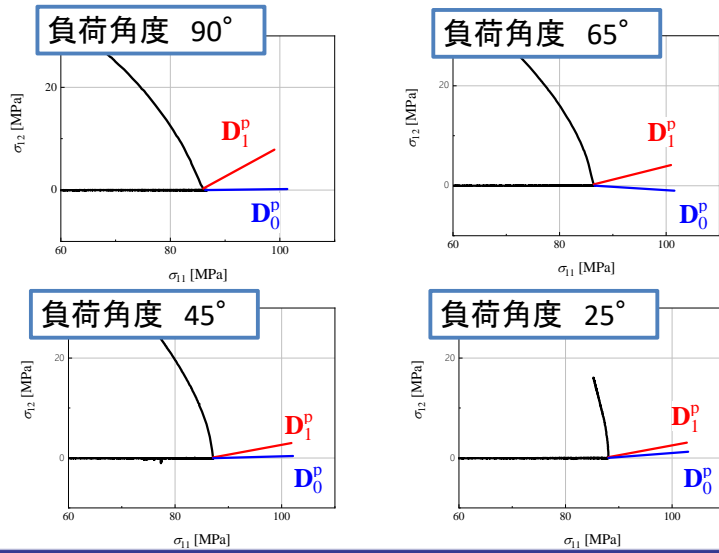
## 応力経路



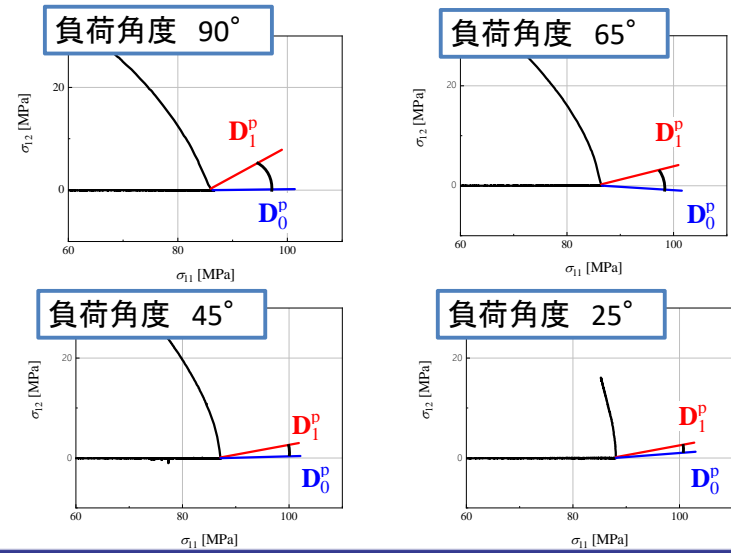
## 応力経路



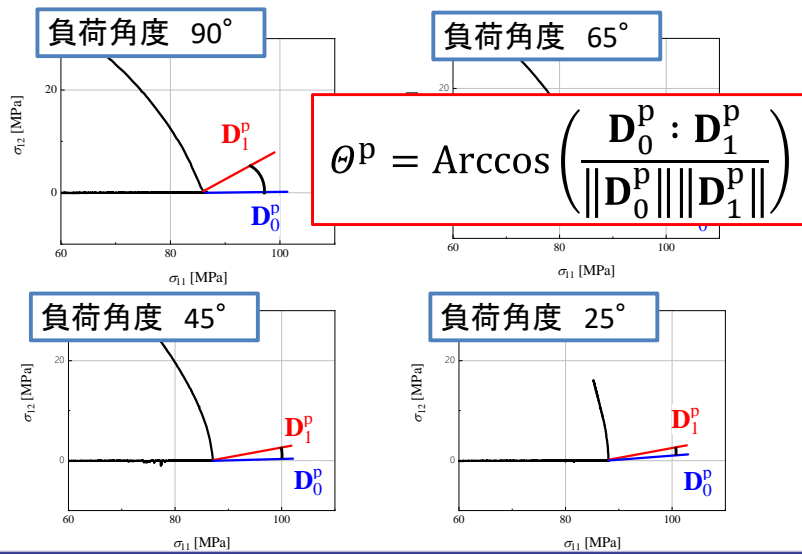
# 負荷経路の影響 塑性ひずみ速度



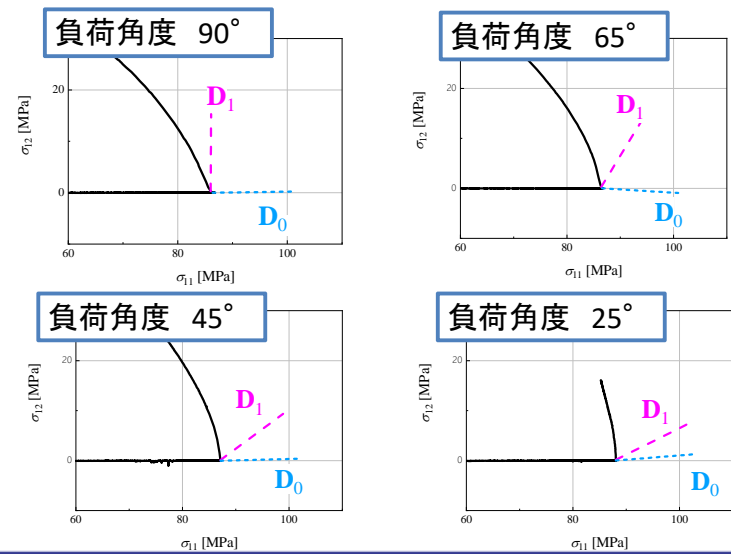
# 負荷経路の影響 塑性ひずみ速度



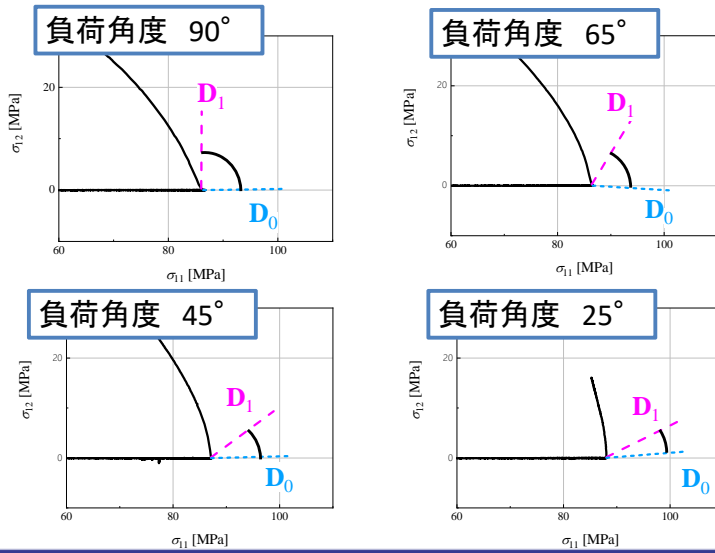
# 負荷経路の影響 塑性ひずみ速度



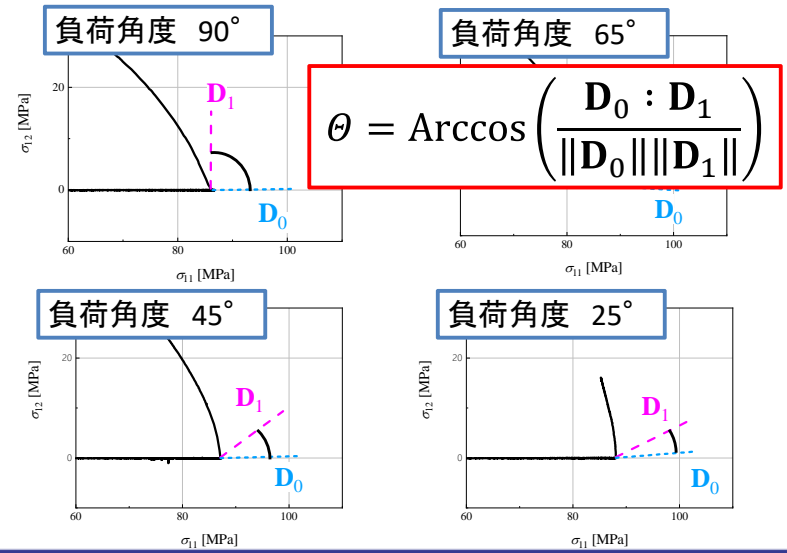
# 負荷経路の変化量の評価



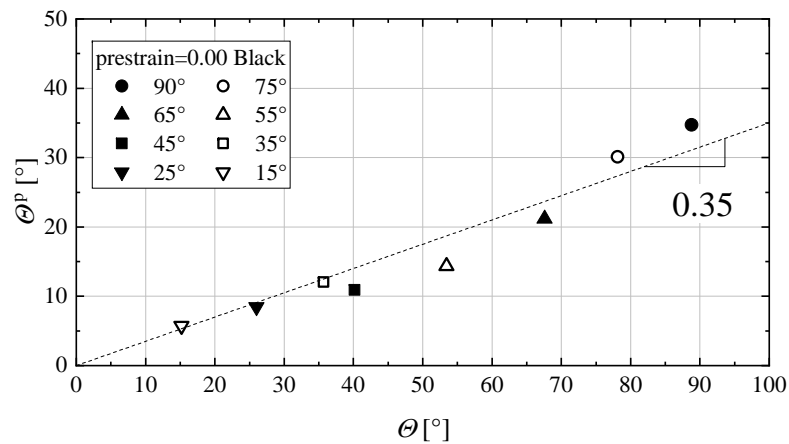
# 負荷経路の変化量の評価



# 負荷経路の変化量の評価

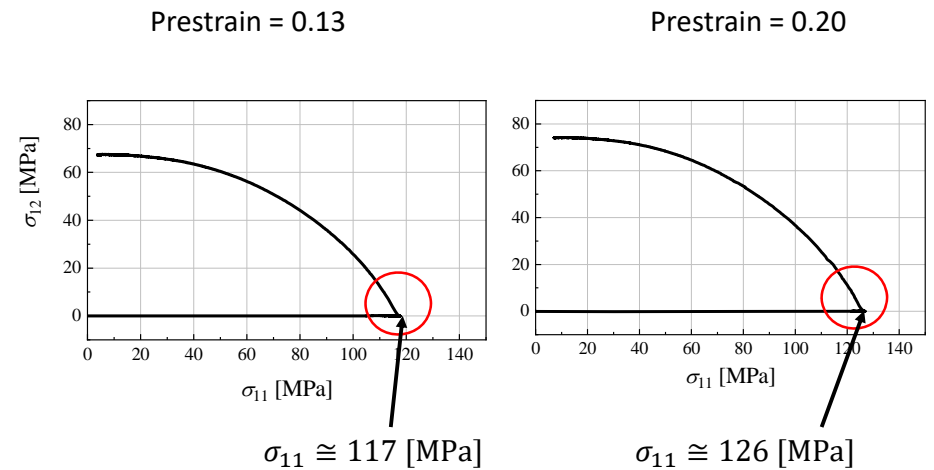


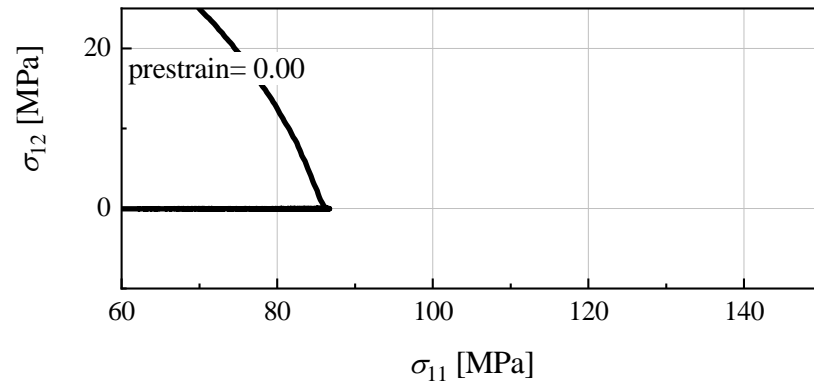
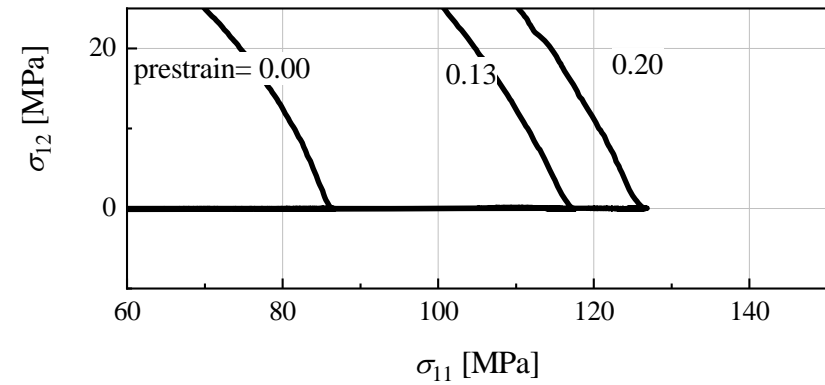
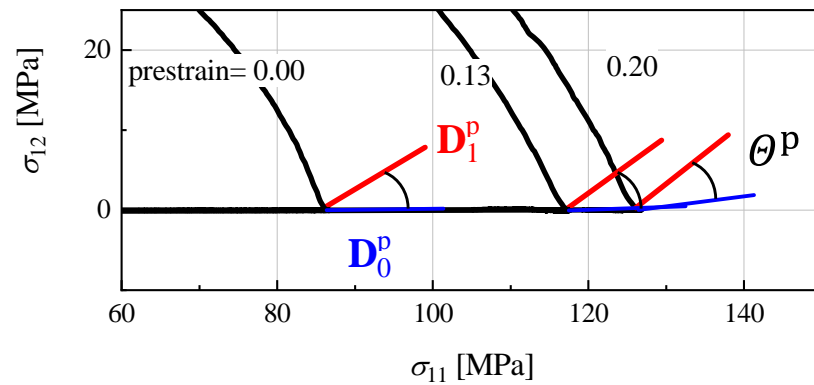
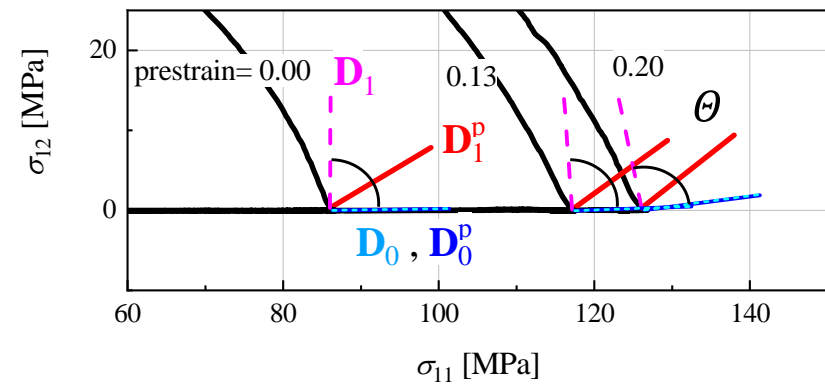
Prestrain = 0.00



$\theta - \theta^p$ の関係は0.35程度の傾きで直線的に増加している

# ひずみ量の影響 負荷角度 90°

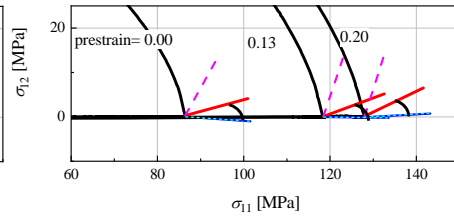
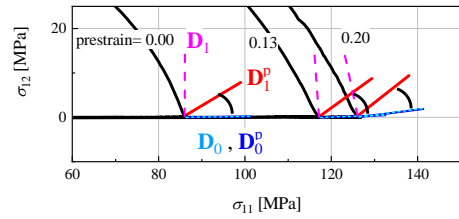


ひずみ量の影響 負荷角度  $90^\circ$ ひずみ量の影響 負荷角度  $90^\circ$ ひずみ量の影響 負荷角度  $90^\circ$ ひずみ量の影響 負荷角度  $90^\circ$ 



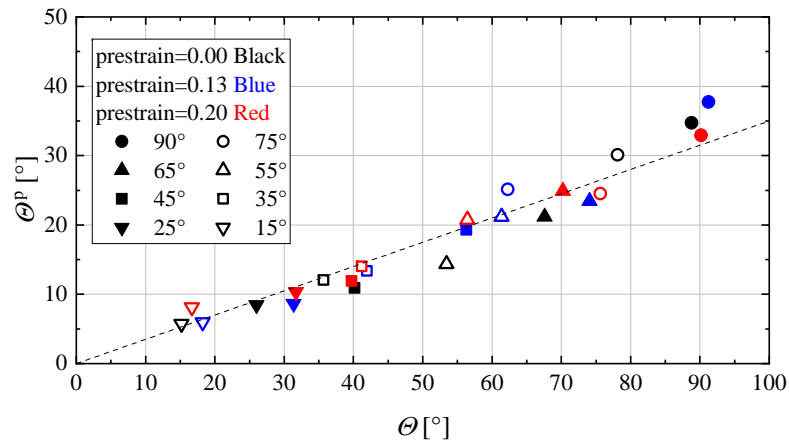
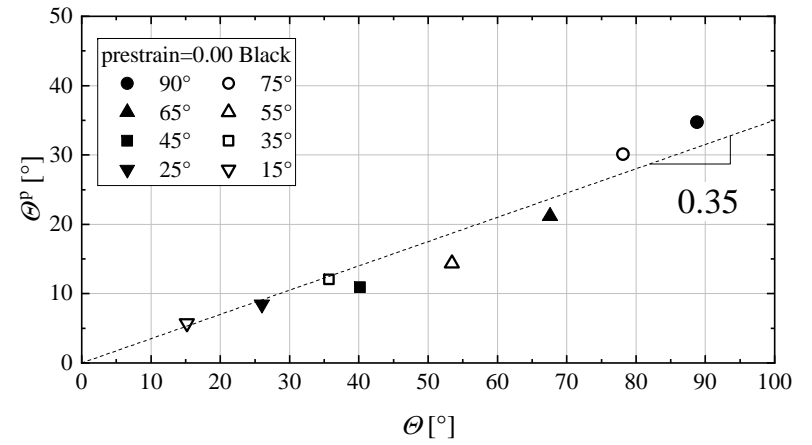
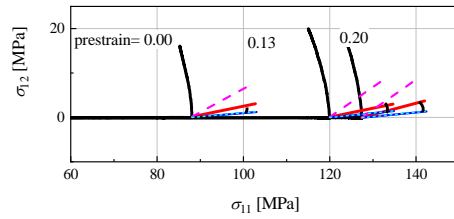
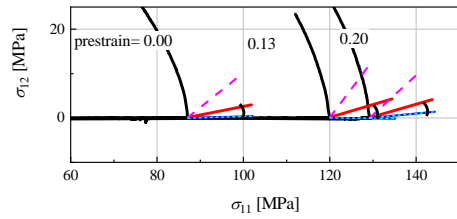
負荷角度 90°

負荷角度 65°



負荷角度 45°

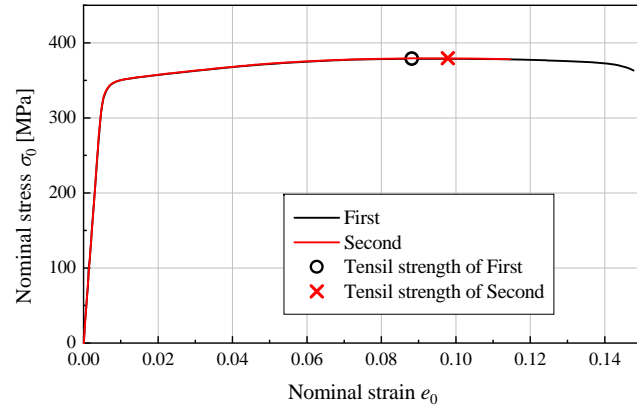
負荷角度 25°



全ての実験結果が同一線上に分布

A6061-T6材

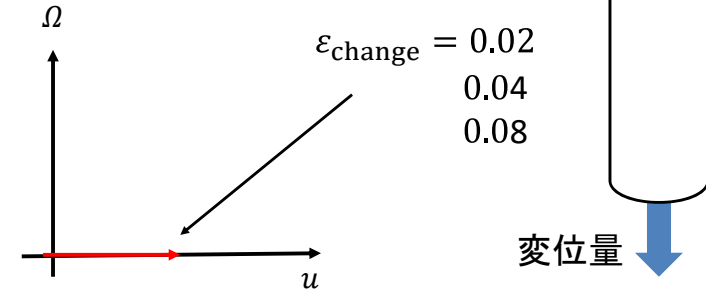
# 供試材 A6061-T6円管



外径 [mm]	肉厚 [mm]	E [GPa]	G [GPa]	$\nu$	n
30	1.2	66.5	27.1	0.386	0.076

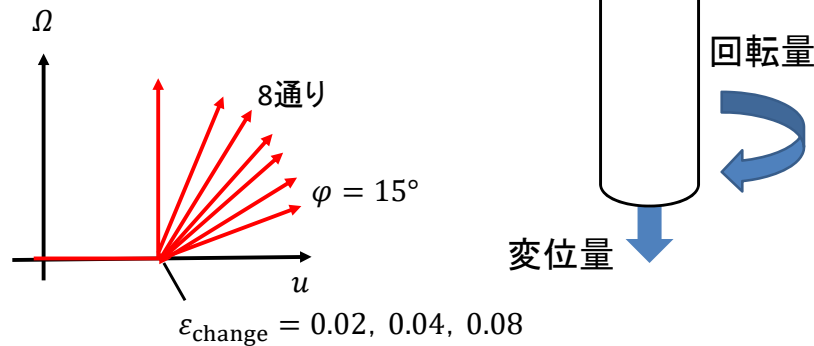
# 非線形負荷試験

一定の軸ひずみまで単軸引張

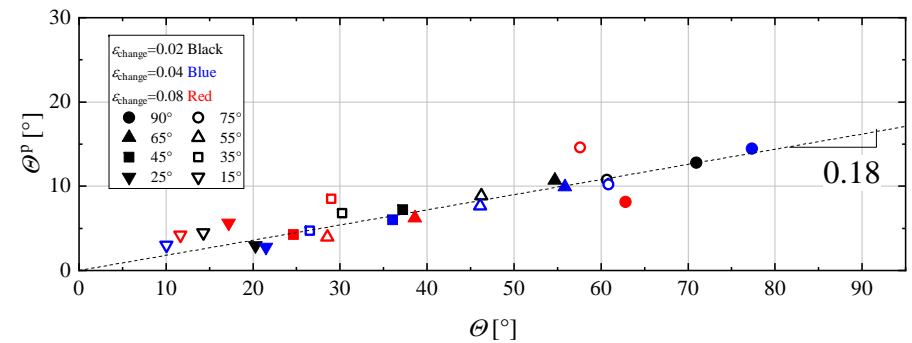


# 非線形負荷試験

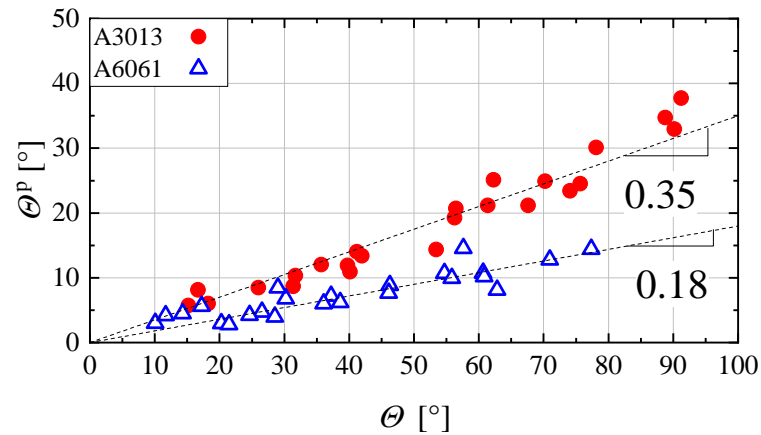
- 一定の軸ひずみまで単軸引張
- ねじりを加え、非線形的に負荷を与える
- 負荷角度  $\varphi$ : 15°, 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75°, 90°



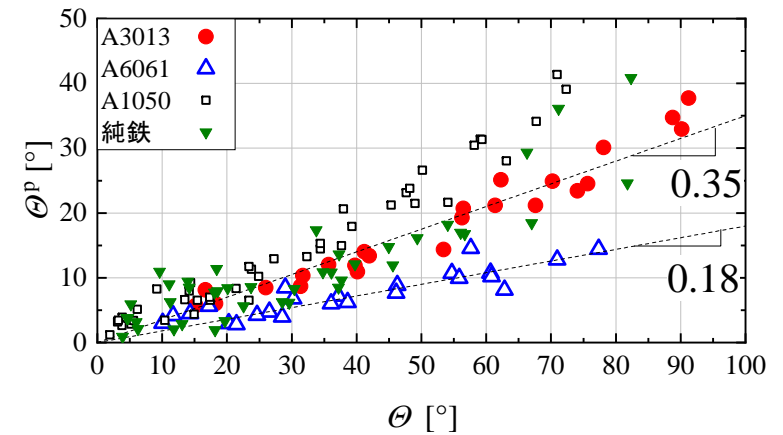
# 塑性ひずみ速度とひずみ速度の相関



## $\theta^P - \theta$ の相関の比較



## $\theta^P - \theta$ の相関の比較



## 結論

- 非線形負荷試験において、ねじりを負荷する直前と直後では、ほぼ同一の応力状態でも塑性ひずみ速度の発生方向は異なる
- 塑性ひずみ速度の方向はひずみ速度の方向に線形に依存する
- 塑性ひずみ速度とひずみ速度の線形的な相関は、ひずみレベルに依存しない
- 塑性ひずみ速度のひずみ速度への依存度合いは、材料ごとに異なり、A6061よりA3003の方が大きかった