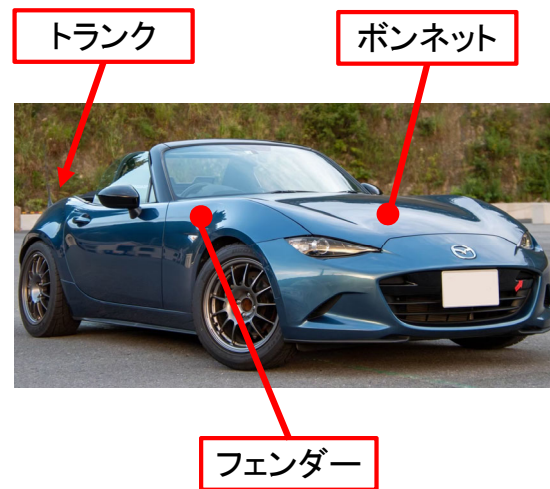


# 結晶塑性解析を援用した A6016-T4材の 円筒深絞り成形シミュレーション

静岡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 本家 智久

## 研究背景

自動車へのアルミニウム合金板の適用



異方性が強く  
成形性が低い

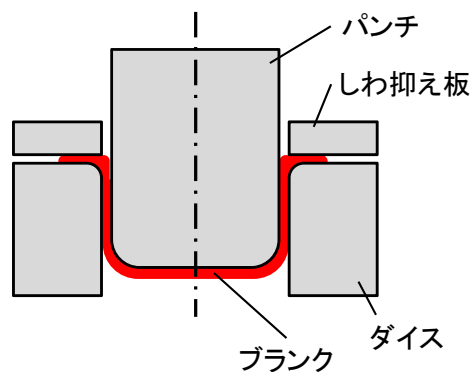


成形不良が  
発生しやすい

## 研究背景

深絞り加工

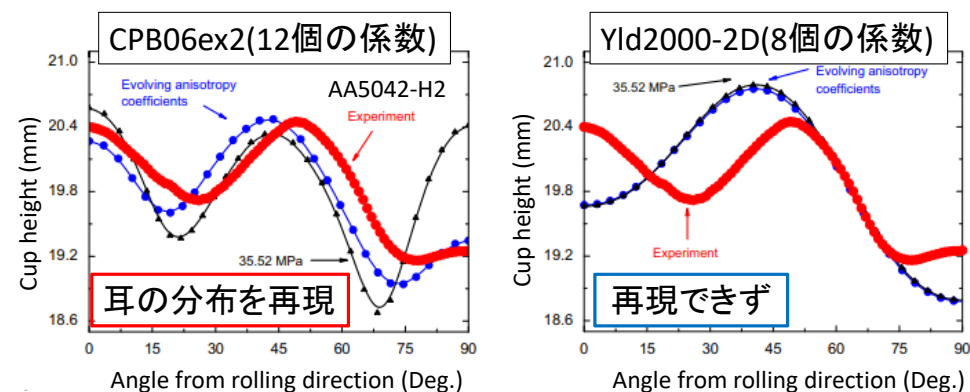
成形不良



異方性降伏関数を用いた  
成形シミュレーションにより予測する

## 先行研究

Jong-Hun Yoon et al. (2010)<sup>[1]</sup>

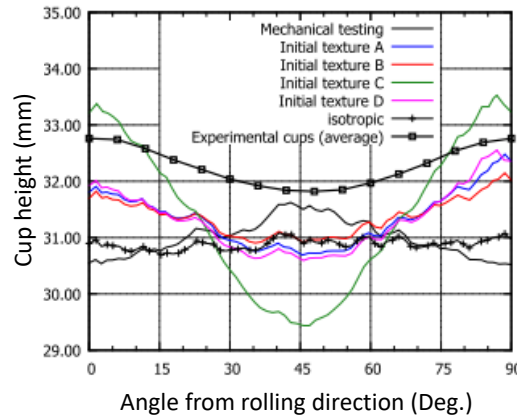


- 異方性係数が多いほど、複雑な異方性を再現可能
- 単軸試験や二軸試験などの実験コストの増大が課題

[1] Jong-Hun Yoon et al. Int. J. Mech. S., 52(2006), 1563-1578.

# 先行研究

J. Gawad et al. (2015)<sup>[2]</sup>



- 結晶塑性モデルを成形シミュレーションに組み込むことで、実験コストを削減

- 汎用成形解析ソフトのみでは実施不可能
- 解析時間が長い

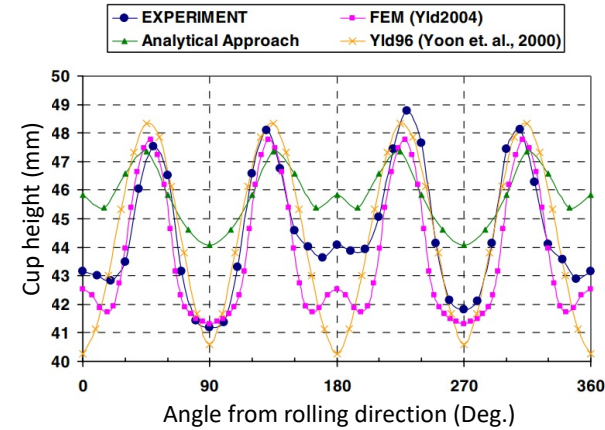
5

[2] J. Gawad et al. Int. J. Plast., 75(2015), 141-169.

Shizuoka University

# 先行研究

J.W. Yoon et al. (2006)<sup>[3]</sup>



- 結晶塑性解析により一部の材料特性値を計算

- 異方性係数の数より多い材料特性値を使用

結晶塑性解析は補助的な扱い

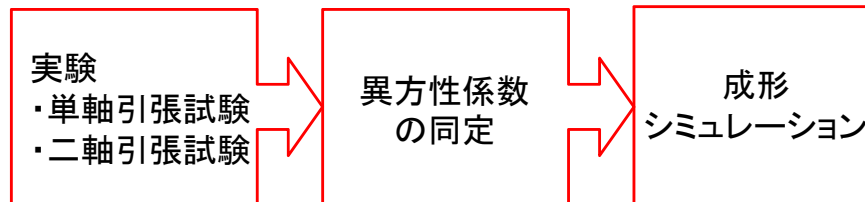
6

[3] J.W. Yoon et al. Int. J. Plast., 22(2006), 174-193.

Shizuoka University

# 結晶塑性解析の援用

従来の手法

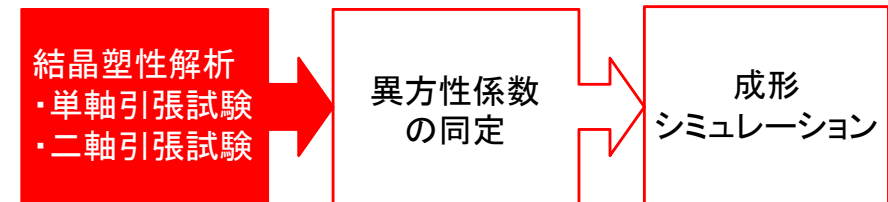


7

Shizuoka University

# 結晶塑性解析の援用

本研究



▶ メリット

- 実験コストを大幅に削減
- 一般的な成形解析ソフトのみで解析可能
- あらゆる応力状態の材料特性値を利用可能

8

Shizuoka University

# 研究目的

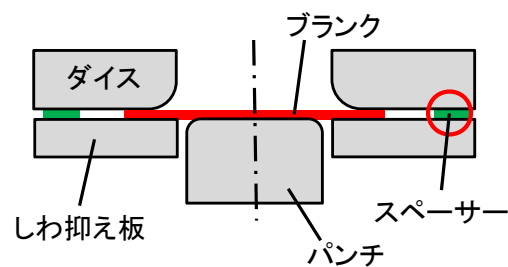
- ・ 結晶塑性解析を援用して同定した降伏関数の円筒深絞りシミュレーションにおける予測精度を調査し、有効性を検証する.
- ・ 異方性係数より多くの材料特性値から同定した降伏関数の予測精度を調査する.
- ・ 供試材: A6016-T4

# 円筒深絞り試験

# 円筒深絞り試験



エリクセン社製  
薄板成形試験機  
Model 142-20 Basic



## 試験条件

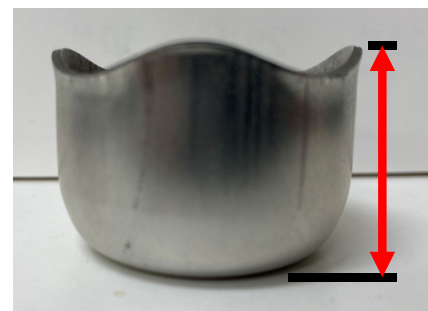
blank直径 [mm]	66.0
blank板厚 [mm]	1.00
絞り比 [-]	2.0
スペーサー板厚 [mm]	1.25
しわ抑え力 [kN]	5.0

※潤滑剤: 牛脂  
※隙間一定

# 円筒深絞り試験

## 測定項目

- ・ カップ高さ分布



- ・ 0~360° まで
- ・ カップ6個に対し測定

- ・ 板厚分布

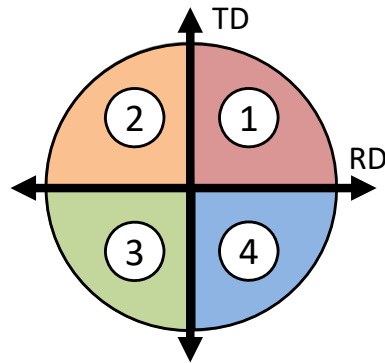


- ・ RDから0, 45, 90° 方向
- ・ 各方向, カップ2個に対し測定

# 円筒深絞り試験

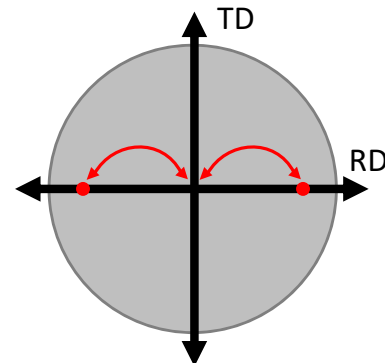
## 測定項目

- ・ カップ高さ分布



- ・ 直交異方性を考慮し、4領域を平均化

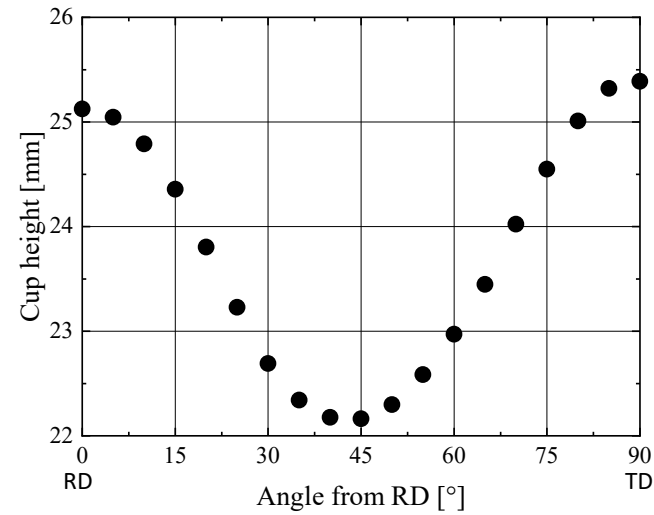
- ・ 板厚分布



- ・ 中心から等距離の測定値を平均化

13

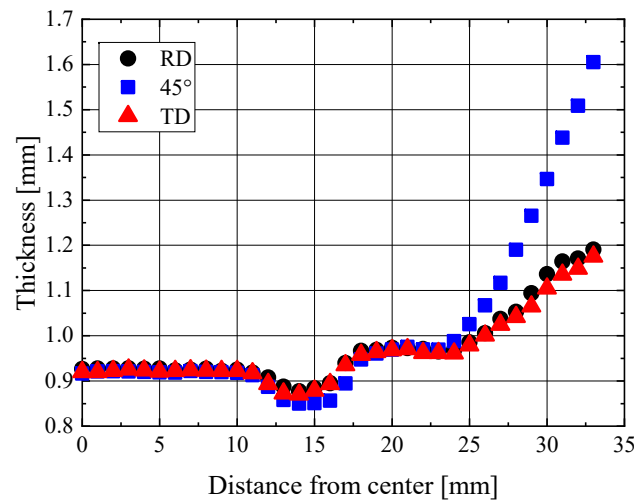
# 実験結果(カップ高さ)



- ・ RDとTDで山、45°で谷
- ・ TDで高さ最大

14

# 実験結果(板厚分布)



- ・ 中心から15 mm 付近で板厚最小
- ・ 45° 方向で 顕著に増大

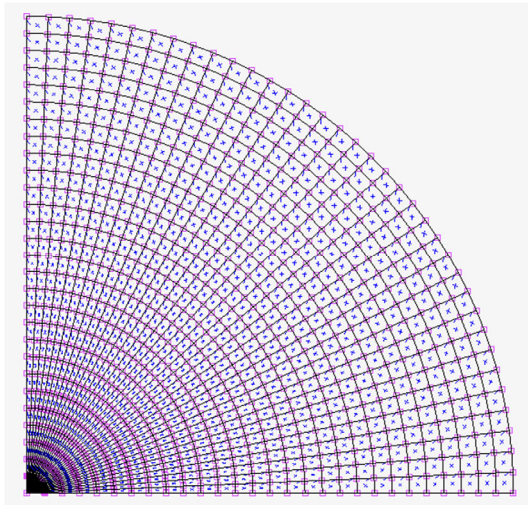
15

成形シミュレーション

16

# 成形シミュレーション

使用ソフトウェア: Marc, Marc Mentat 2016



## 解析条件

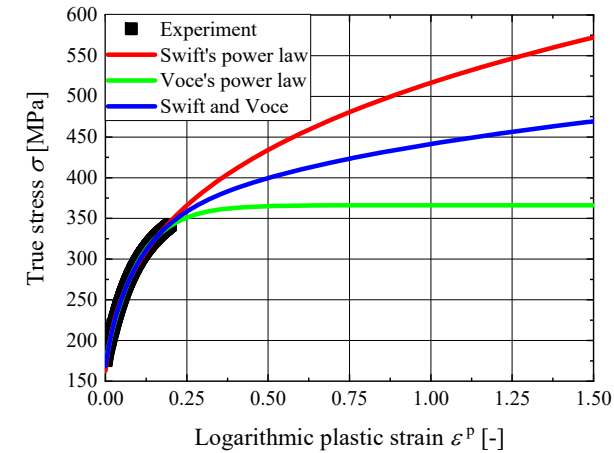
- 要素: 4節点薄肉シェル
- メッシュ分割  
円周方向: 36(2.5° 間隔)  
半径方向: 33(1 mm間隔)
- 摩擦なし
- 異方性降伏関数  
Yld2004-18p

17

Shizuoka University

# 成形シミュレーション

真応力-対数塑性ひずみ曲線<sup>[4]</sup>



Swift, Voceの式で  
近似, 平均化

近似範囲:  
対数塑性ひずみ  
0.002~0.2

$$\sigma = 0.5 \times [515.22 \times (0.011 + \epsilon^p)^{0.25} + \{366 - (366 - 174) \exp(-10.2\epsilon^p)\}]$$

18

Shizuoka University

[4] 山崎康人, 吉田健吾, 第70回塑加連講, 2019, 308

# 異方性係数の同定

Yld2004-18p

異方性係数14個(平面応力状態)

## Ex1

- 実験値  
基準対数塑性ひずみ  
 $\epsilon_0^p = 0.02$
- 単軸引張(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° )  
流動応力,  $r$ 値
  - 二軸引張(応力比 $\sigma_x:\sigma_y = 1:1$ )  
流動応力, 塑性ひずみ速度比

19

Shizuoka University

# 異方性係数の同定

Yld2004-18p

異方性係数14個(平面応力状態)

## Cp1

- 結晶塑性解析<sup>[5]</sup>  
Kocks-Meckingモデル  
基準対数塑性ひずみ  
 $\epsilon_0^p = 0.02$
- 単軸引張(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° )  
流動応力,  $r$ 値
  - 二軸引張(応力比 $\sigma_x:\sigma_y = 1:1$ )  
流動応力, 塑性ひずみ速度比

結晶塑性解析による予測値に変更

20

Shizuoka University

[5] 吉田健吾, 山崎康人, 第71回塑加連講, 2020, 306

# 異方性係数の同定

Yld2004-18p

異方性係数14個(平面応力状態)

Ex2

- 実験値  
基準対数塑性ひずみ  
 $\epsilon_0^p = 0.02$
- ・ 単軸引張(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° )  
流動応力,  $r$ 値
  - ・ 二軸引張(応力比 $\sigma_x:\sigma_y =$   
 $4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ )  
流動応力, 塑性ひずみ速度比

二軸データ数を変更

21

Shizuoka University

# 異方性係数の同定

Yld2004-18p

異方性係数14個(平面応力状態)

Cp2

- 結晶塑性解析<sup>[5]</sup>  
Kocks-Meckingモデル  
基準対数塑性ひずみ  
 $\epsilon_0^p = 0.02$
- ・ 単軸引張(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° )  
流動応力,  $r$ 値
  - ・ 二軸引張(応力比 $\sigma_x:\sigma_y =$   
 $4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ )  
流動応力, 塑性ひずみ速度比

結晶塑性解析による予測値に変更  
二軸データ数を変更

22

[5] 吉田健吾, 山崎康人, 第71回塑加連講, 2020, 306

Shizuoka University

# 異方性係数の同定

Yld2004-18p

異方性係数14個(平面応力状態)

Cp2

- 結晶塑性解析<sup>[5]</sup>  
Kocks-Meckingモデル  
基準対数塑性ひずみ  
 $\epsilon_0^p = 0.02$
- ・ 単軸引張(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° )  
流動応力,  $r$ 値
  - ・ 二軸引張(応力比 $\sigma_x:\sigma_y =$   
 $4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ )  
流動応力, 塑性ひずみ速度比

入力値と予測値の2乗誤差が最小になるよう最適化

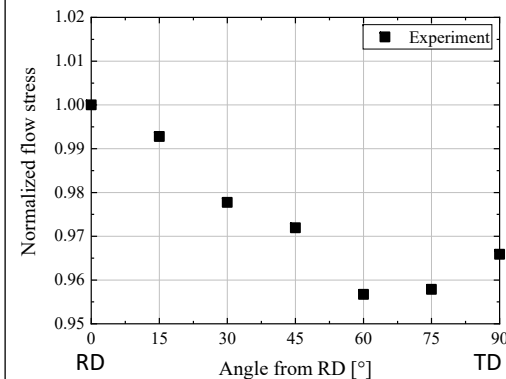
23

[5] 吉田健吾, 山崎康人, 第71回塑加連講, 2020, 306

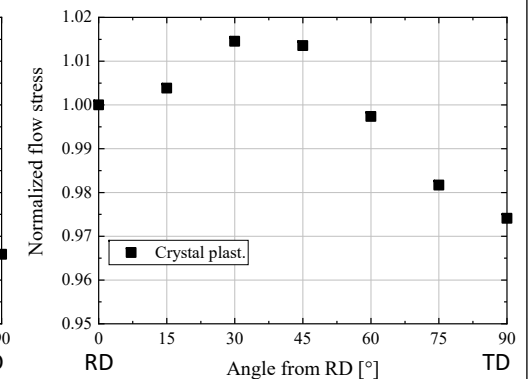
Shizuoka University

# 近似結果(単軸流動応力)

実験



結晶塑性解析



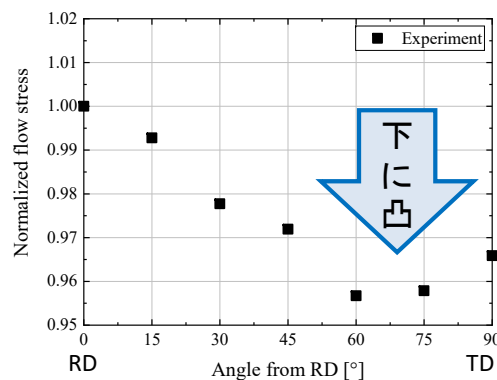
24

Shizuoka University

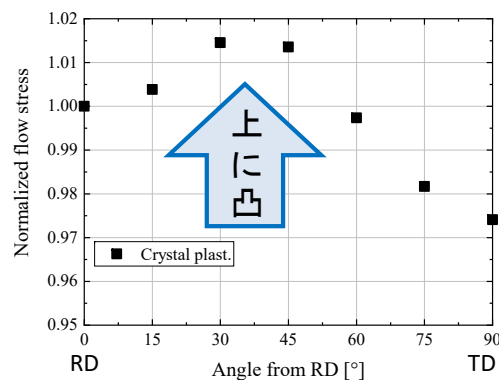


# 近似結果(単軸流動応力)

実験



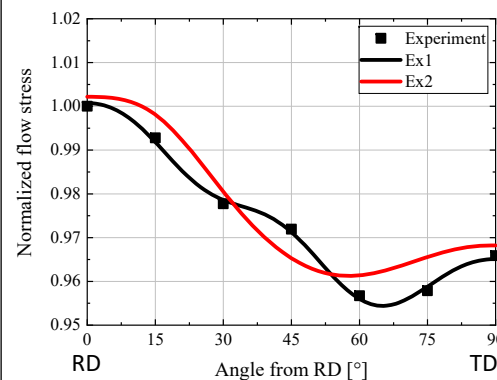
結晶塑性解析



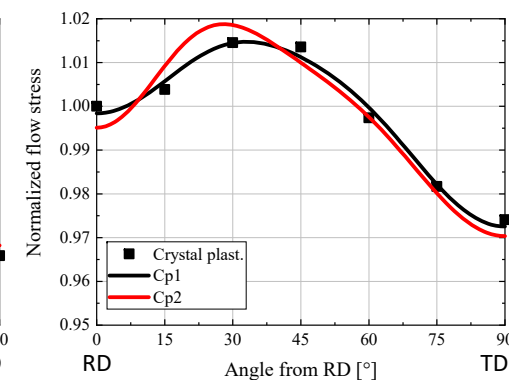
結晶塑性解析は実験値の傾向を再現できず

# 近似結果(単軸流動応力)

実験



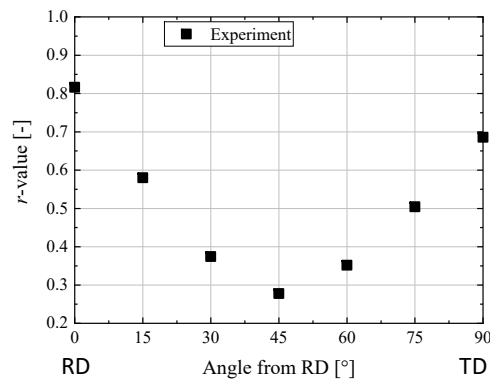
結晶塑性解析



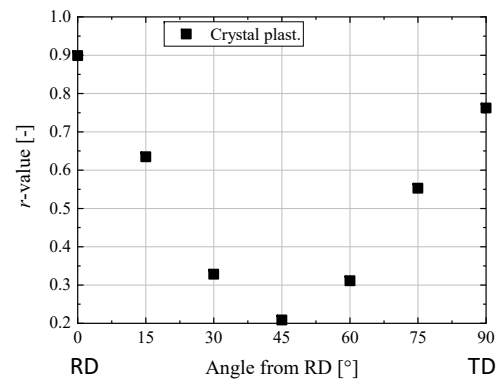
二軸入力値が多いモデルは精度低下

# 近似結果( $r$ 値)

実験

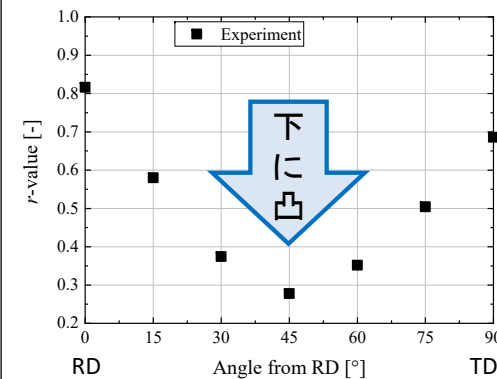


結晶塑性解析

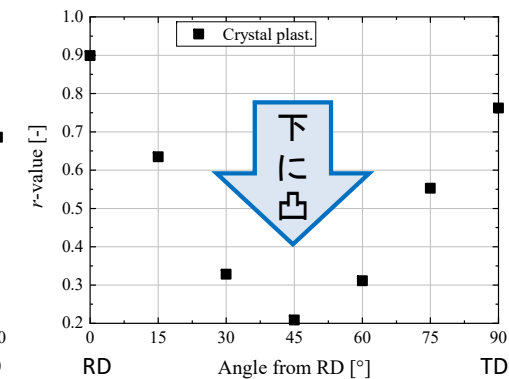


# 近似結果( $r$ 値)

実験

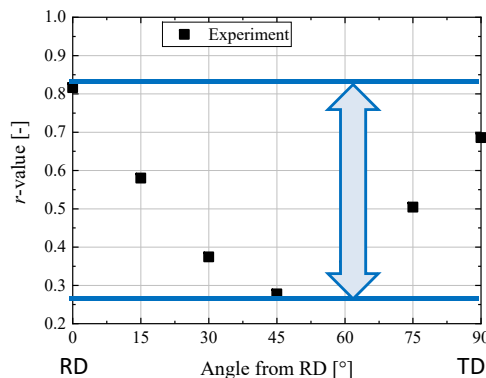


結晶塑性解析

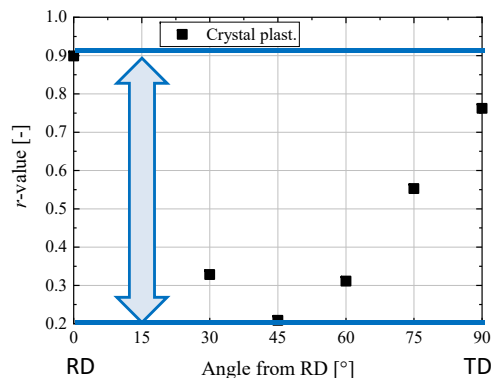


# 近似結果( $r$ 値)

## 実験



## 結晶塑性解析

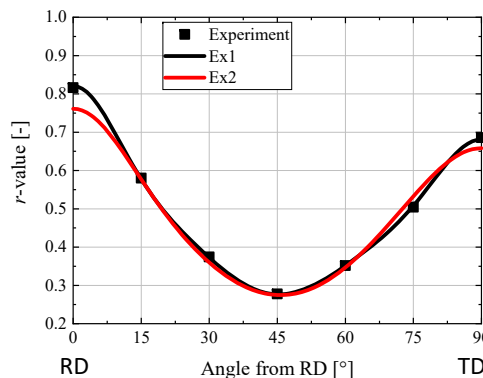


結晶塑性解析は変動幅が拡大

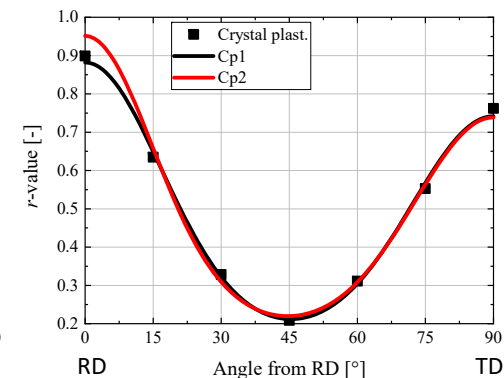
29

# 近似結果( $r$ 値)

## 実験



## 結晶塑性解析

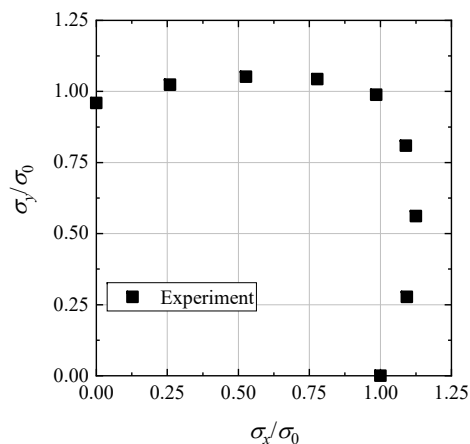


二軸データを多く含むモデルは精度低下

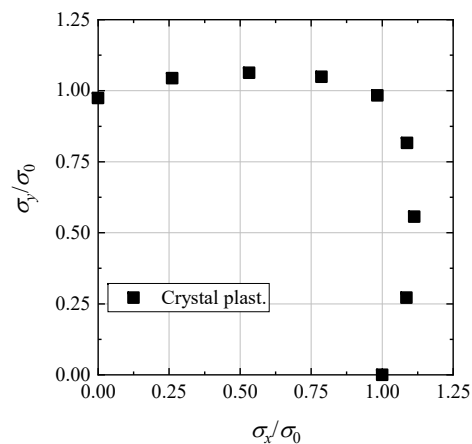
30

# 近似結果(等塑性仕事面)

## 実験



## 結晶塑性解析

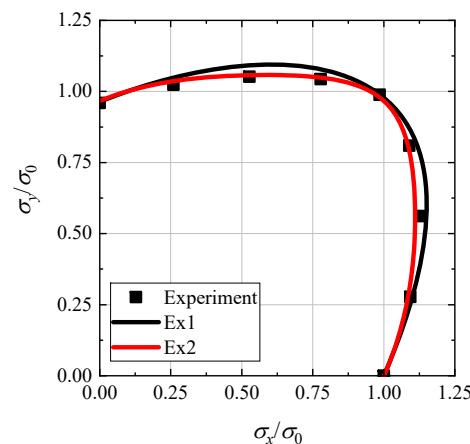


実験値と結晶塑性解析の主応力差は2.1%以下

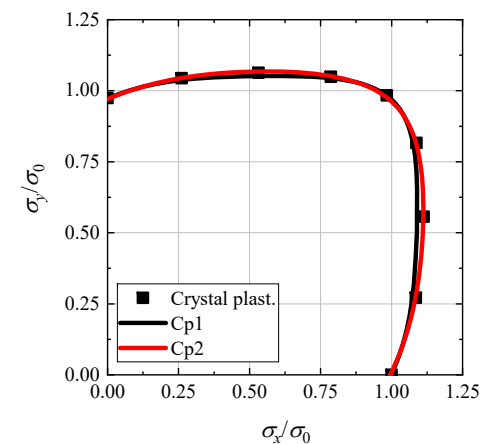
31

# 近似結果(等塑性仕事面)

## 実験



## 結晶塑性解析



Ex1は実験値より外側へ

Cp1は予測値より内側へ

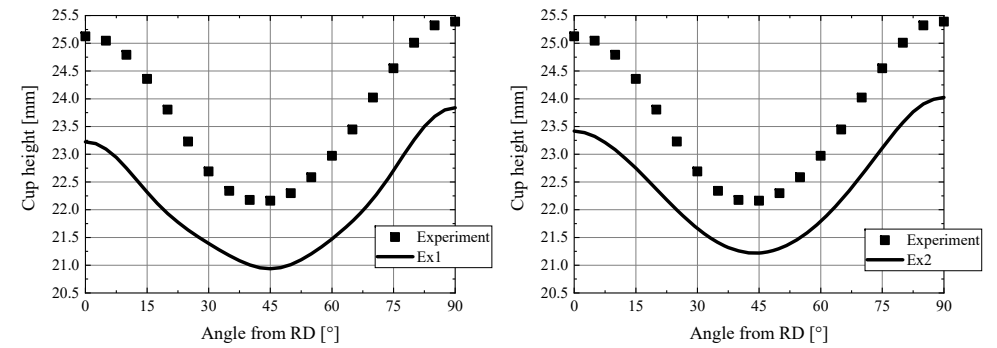
32



# 解析結果

# 解析結果(カップ高さ分布)

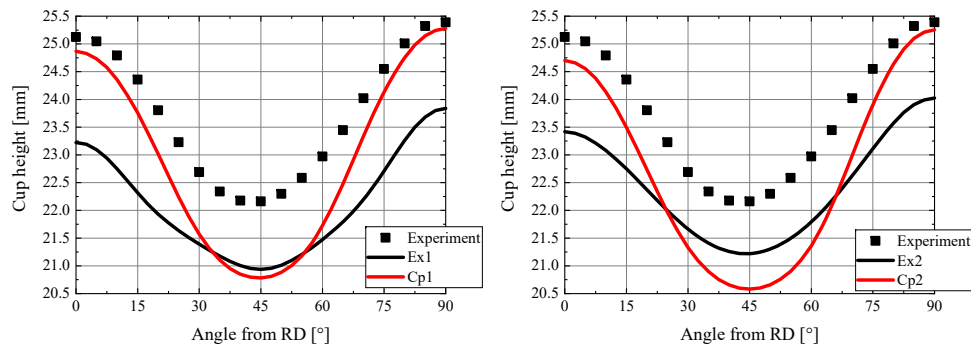
## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較



実験値モデルは全体的に1~2 mm  
低い解析結果

# 解析結果(カップ高さ分布)

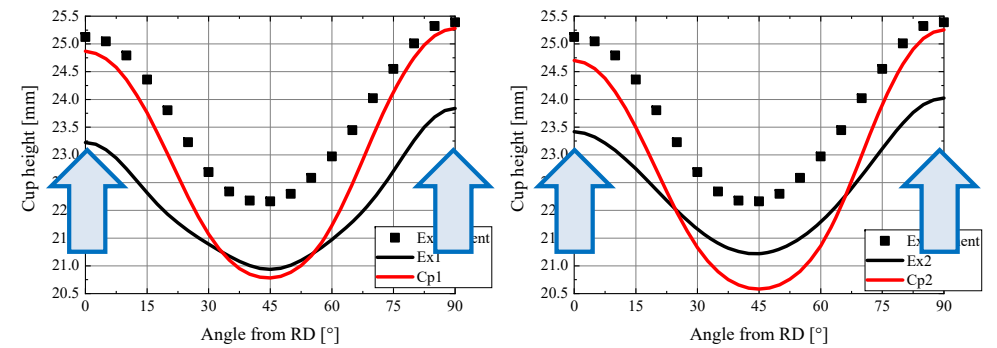
## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較



結晶塑性モデルは  
 ・ RDとTDでは、実験値に近づく  
 ・ 45° では、実験値から乖離

# 解析結果(カップ高さ分布)

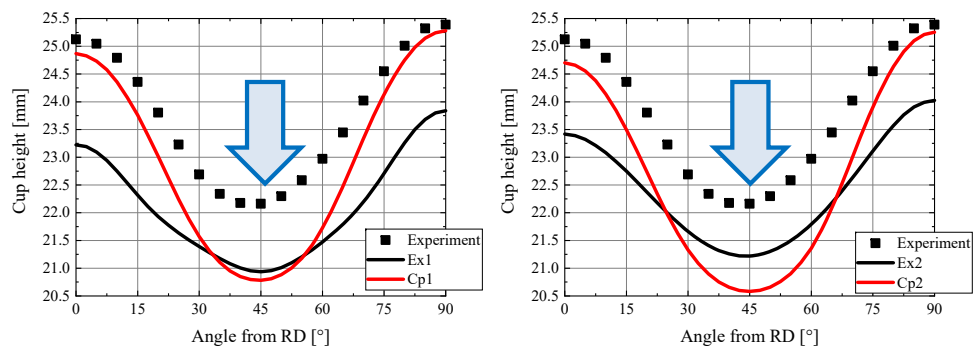
## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較



結晶塑性モデルは  
 ・ RDとTDでは、実験値に近づく  
 ・ 45° では、実験値から乖離

# 解析結果(カップ高さ分布)

## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較



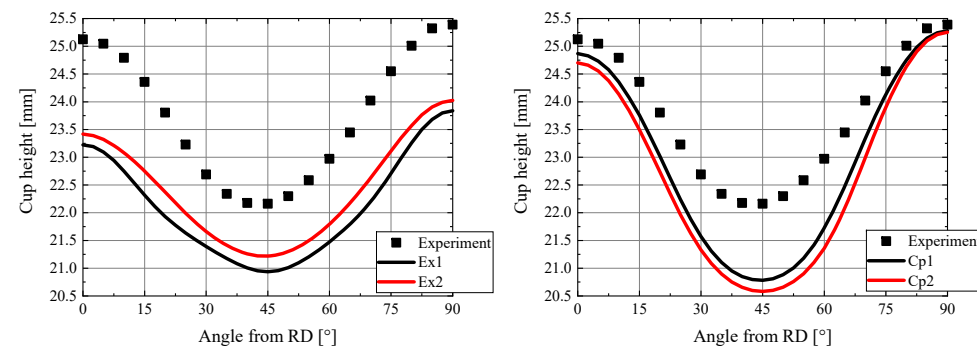
結晶塑性モデルは

- ・ RDとTDでは、実験値に近づく
- ・ 45° では、実験値から乖離

37

# 解析結果(カップ高さ分布)

## 二軸引張データ数の比較

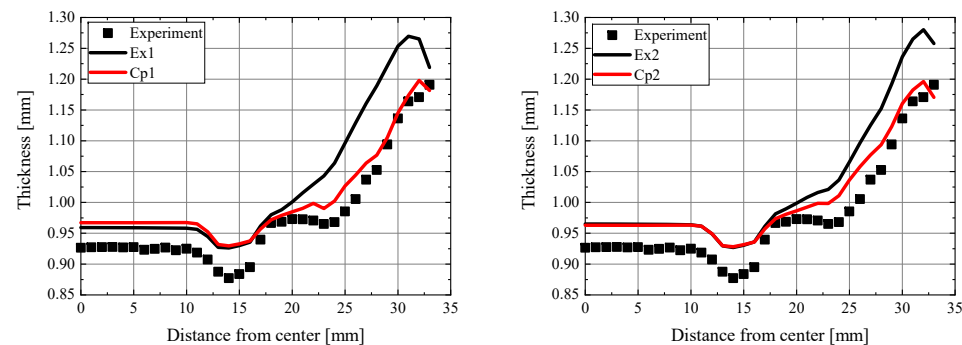


実験値モデルでは改善  
結晶塑性モデルでは低下

38

# 解析結果(板厚分布, RD)

## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較

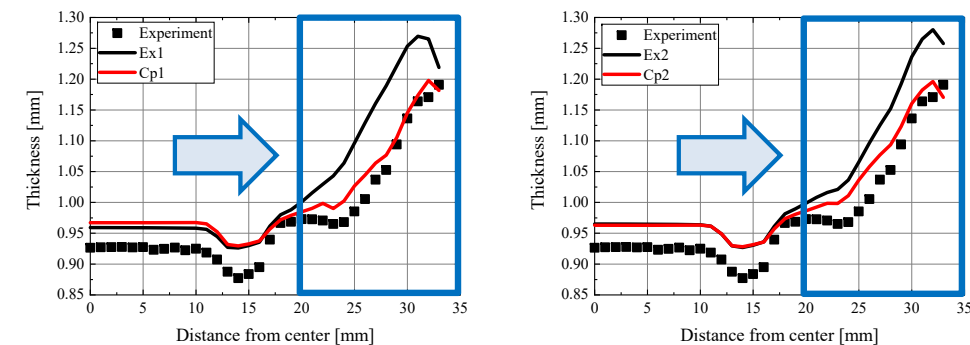


全体的に過大に予測された  
壁端部において減少傾向

39

# 解析結果(板厚分布, RD)

## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較

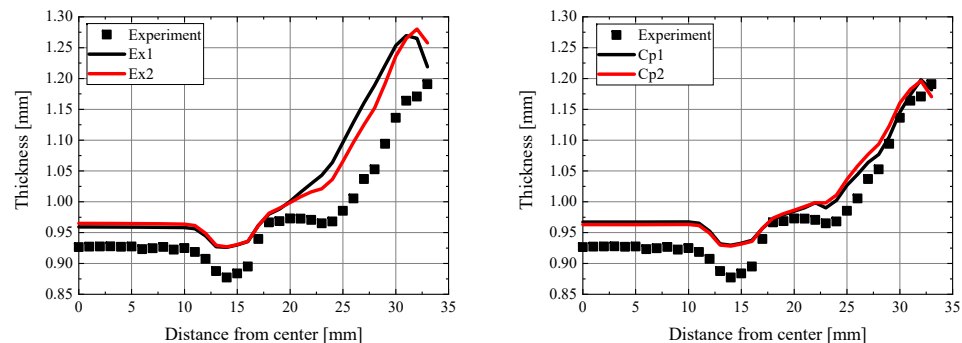


結晶塑性モデルは20 mm以降の  
側壁部において実験値に近づいた

40

# 解析結果(板厚分布, RD)

## 二軸引張データ数の比較



大きな変化は見られず

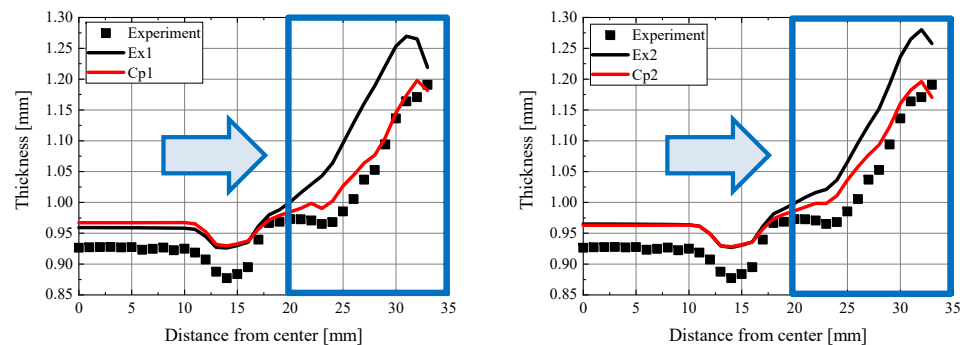
41

考察

42

# 考察

## 実験値モデルと結晶塑性モデルの比較

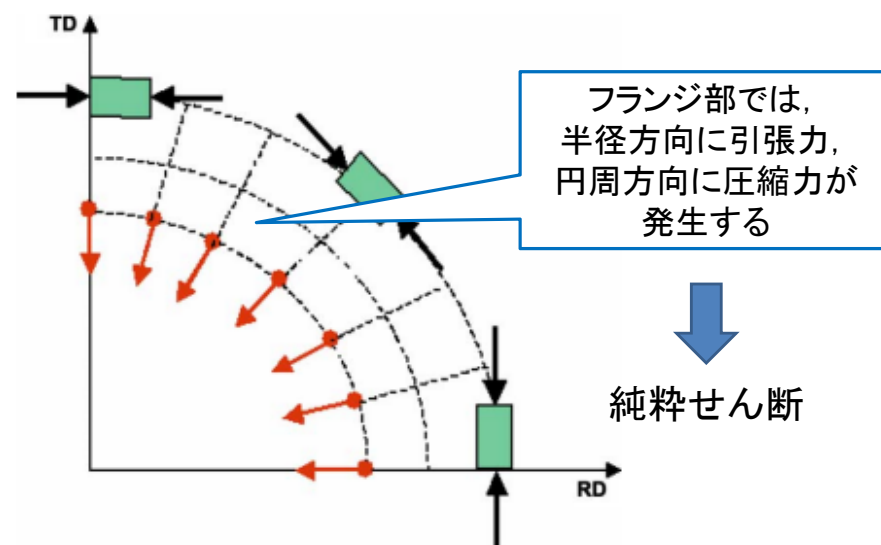


側壁部の解析結果が大きく異なる

43

# 考察

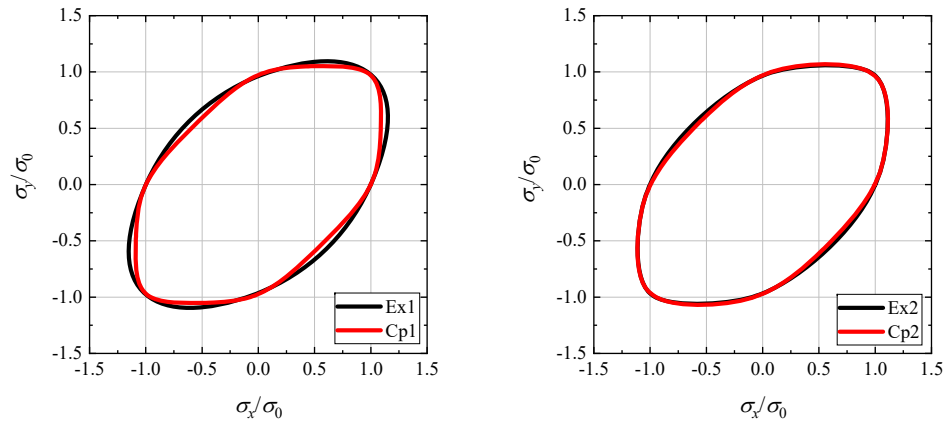
## フランジ部の応力状態



44

# 考察

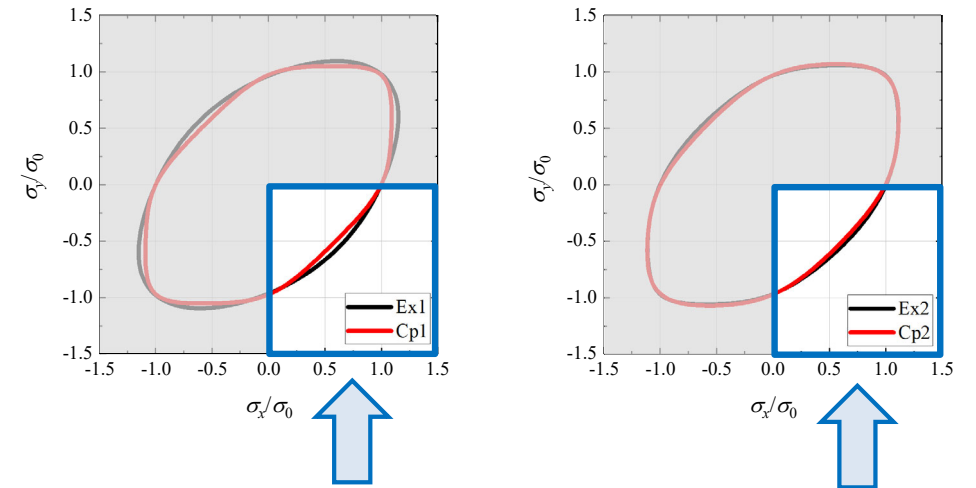
純粋せん断領域の等塑性仕事面



45

# 考察

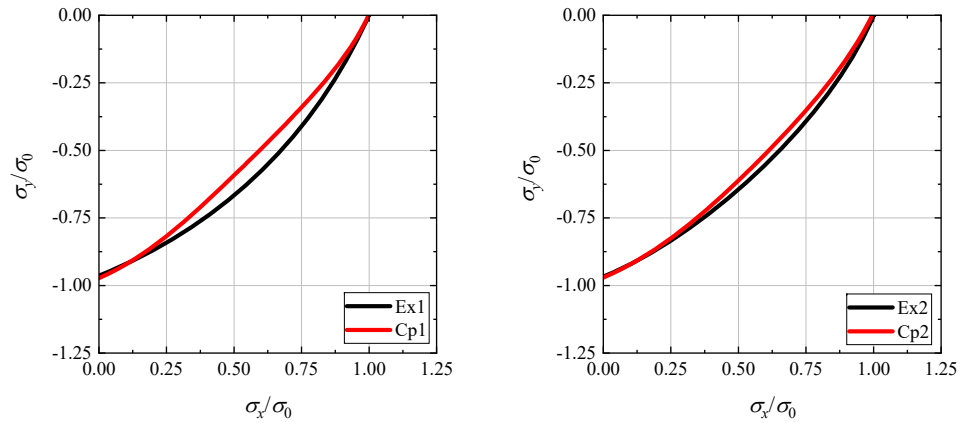
純粋せん断領域の等塑性仕事面



46

# 考察

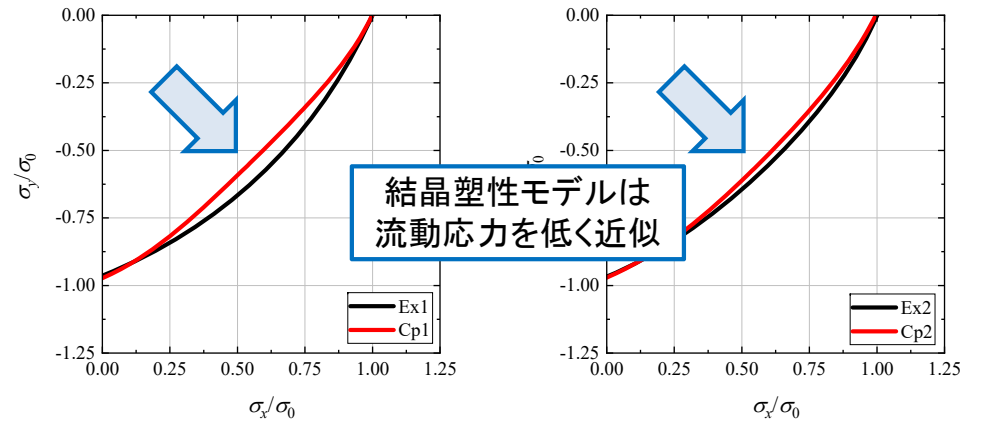
純粋せん断領域の等塑性仕事面



47

# 考察

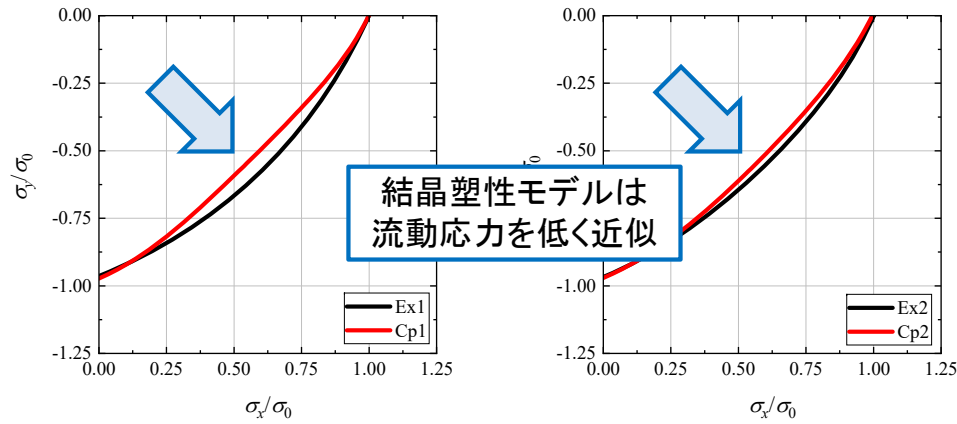
純粋せん断領域の等塑性仕事面



48

# 考察

純粋せん断領域の等塑性仕事面



結晶塑性モデルは  
流動応力を低く近似

半径方向の引張ひずみ  
が増加し、板厚が減少



カップ高さは増加

# 結論

- ・ 結晶塑性解析を援用して同定した降伏関数は、RD、TDのカップ高さと同定した降伏関数より高精度に予測した。したがって、結晶塑性解析を援用するアプローチには、十分な解析精度が期待できる。
- ・ 異方性係数の同定に用いる二軸引張の入力値数を変更しても、解析精度は改善しなかった。