

# マグネシウム合金板の常温における 双晶発生量にひずみ状態が与える影響

吉田研究室 修士2年

田口誠

# マグネシウム合金の特徴

## 《利点》

- 比強度・比剛性に優れる  
→ 構造の軽量化を図ることができる

## 《欠点》

- 冷間プレス成形性が悪い
- 温間加工やダイカストにより加工される  
→ 加工コストが高い

冷間での低延性の原因究明が必要

# マグネシウム合金の破断原因

## 《双晶》

- 結晶中で局所的に方位が変わる
- 主に引張双晶と圧縮双晶, 二重双晶が観察される

## 《先行研究》

- 引張双晶はボイド形成に関与しない

### 圧縮

(T. Al-Samman, "Materials Science and Engineering A 488(2008)", pp. 406-414)

- 二重双晶により局所的な塑性流動が発生して一様伸びが低下

### 圧縮

(M. R. Barnett, "Material Science and Engineering A 464(2007)", pp. 8-16)

- 適度な応力三軸度とともに双晶による破壊が抑制され延性が向上

### 引張

(Babak Konbori, "Metallurgical and Materials Transactions A Volume 45A Issue 8 (2014)", pp. 3239-3307)

## 《課題》

- 引張か圧縮かの比較的単純な変形を扱った研究が多いが  
プレス成形を想定すると平面ひずみ引張や等二軸引張の研究も必要

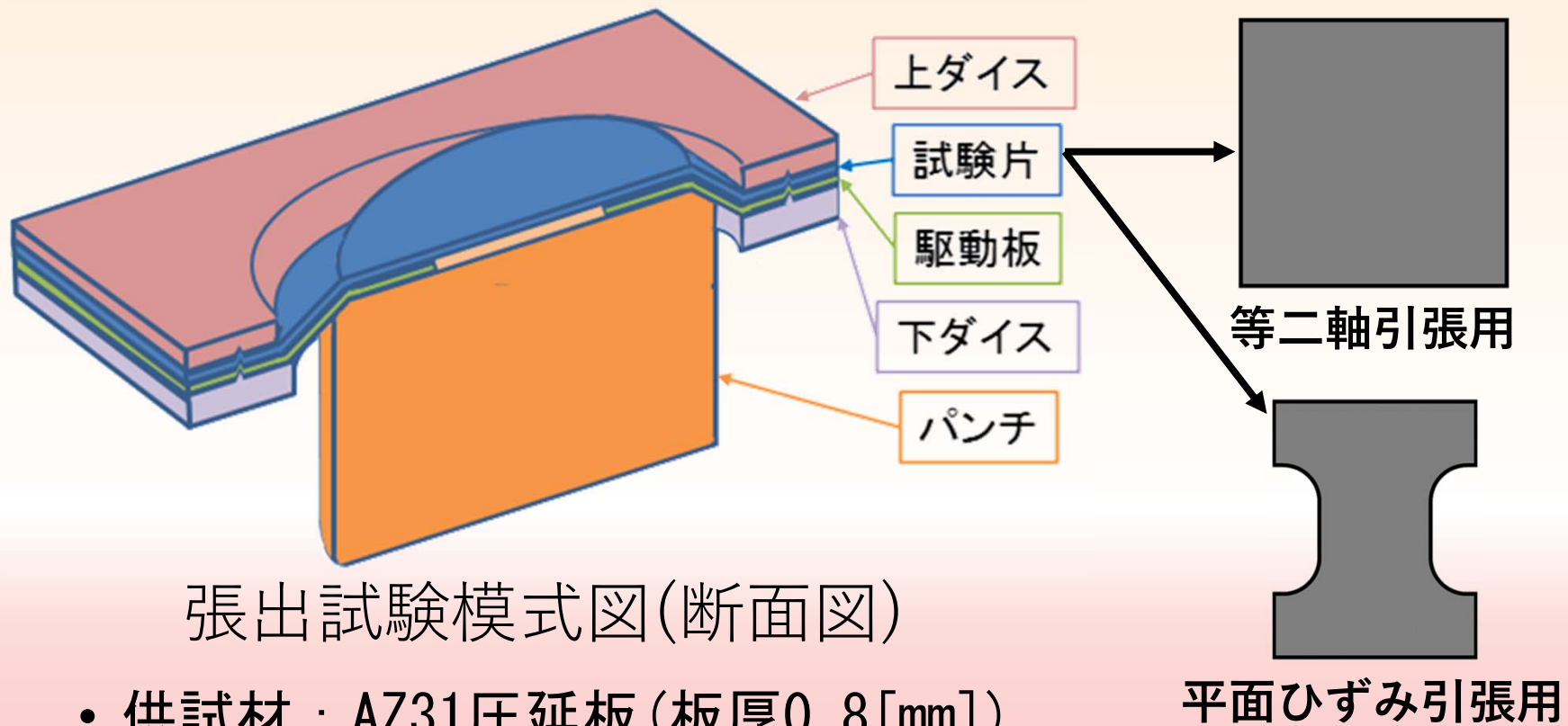
# 研究目的

## 《研究目的》

- 常温のマグネシウム合金圧延板について  
ひずみ状態と発生する双晶の種類と量の関係を明らかにする
- 単軸引張試験および張出試験  
→ 単軸引張, 平面ひずみ引張, 等二軸引張でひずみ負荷
- X線回折により極点図を作製  
→ 巨視的な結晶方位の変化を観察
- EBSDにより結晶方位マップを作製  
→ 個別の双晶について観察
- ひずみ状態から応力を概算して双晶界面の分解せん断応力を導出

# 張出試験

- 張出試験 . . . 板をダイスで挟みパンチで押し上げる



張出試験模式図(断面図)

- 供試材 : AZ31圧延板 (板厚0.8 [mm])

# 応力計算

- HiIIの異方性降伏関数と単軸引張における応力-ひずみ線図からひずみ状態毎の応力を導出

$$\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (\text{swift})$$

$k$	$\varepsilon_0$	$n$
451	0.00824	0.216
ヤング率 $E$ [GPa]	ポアソン比 $\nu$ [-]	$r$
44.6	0.35	1.94

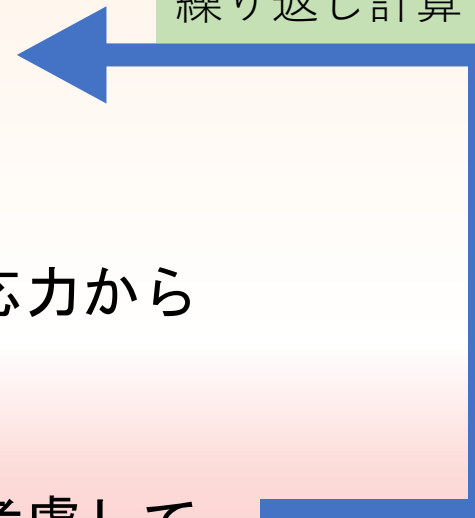
AZ31の材料定数

# 応力計算

## 《計算の流れ》

1. 全ひずみから弾性ひずみを無視して  
相当塑性ひずみを導出
2. 単軸引張の応力-ひずみ線図から  
相当応力の導出
3. ひずみ比から応力比を求めて相当応力から  
各方向の応力を導出
4. 応力から求められる弾性ひずみを考慮して  
再び相当塑性ひずみを導出

繰り返し計算



# ひずみ負荷量と応力

	ひずみ		応力 [MPa]	
	圧延方向	圧延直角方向	圧延方向	圧延直角方向
単軸引張(破断)	0.346	-0.226	345	0
単軸引張 pre-2	0.194	-0.129	303	0
単軸引張 pre-1	0.111	-0.073	270	0
平面ひずみ引張(破断)	0.045	0.002	407	272
等二軸引張(破断)	0.047	0.051	355	361

与えたひずみ量と概算した応力



# ひずみ負荷量と応力

	ひずみ		応力 [MPa]	
	圧延方向	圧延直角方向	圧延方向	圧延直角方向
単軸引張(破断)	0.346	-0.226	345	0
単軸引張 pre-2	0.194	-0.129	303	0
単軸引張 pre-1	0.111	-0.073	270	0
平面ひずみ引張(破断)	0.045	0.002	407	272
等二軸引張(破断)	0.047	0.051	355	361

与えたひずみ量と概算した応力

# ひずみ負荷量と応力

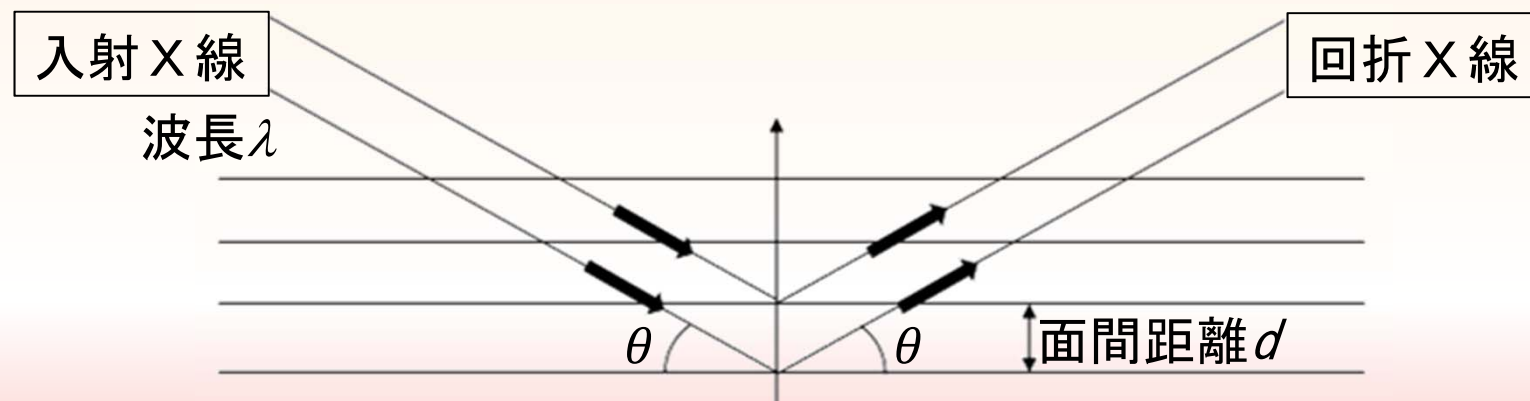
	ひずみ		応力 [MPa]	
	圧延方向	圧延直角方向	圧延方向	圧延直角方向
単軸引張(破断)	0.346	-0.226	345	0
単軸引張 pre-2	0.194	-0.129	303	0
単軸引張 pre-1	0.111	-0.073	270	0
平面ひずみ引張(破断)	0.045	0.002	407	272
等二軸引張(破断)	0.047	0.051	355	361

与えたひずみ量と概算した応力

# X線回折

X線回折・・・結晶面を回折格子に見立てて  
回折X線の強度分布から結晶方位を計測する

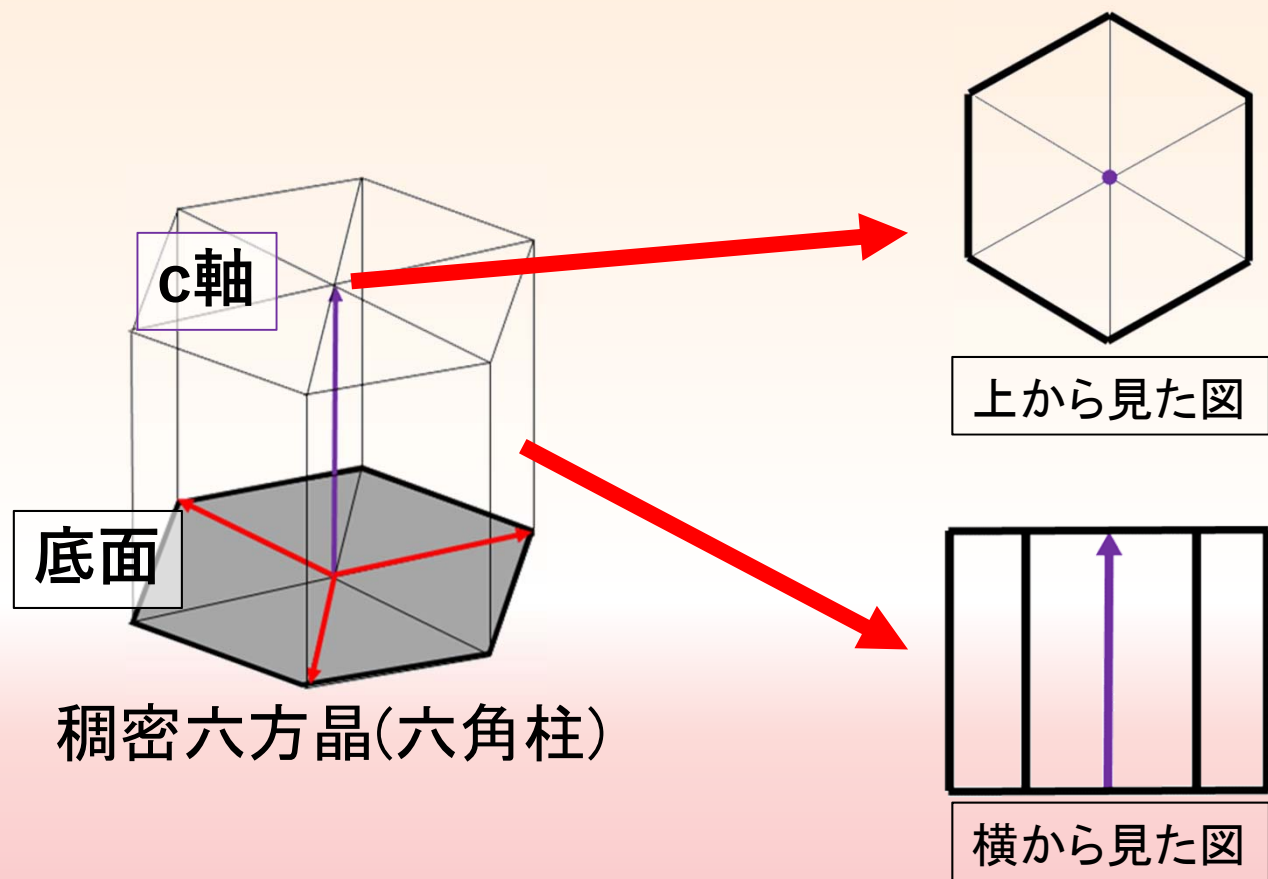
《Braggの回折条件》



- 回折X線が強め合う条件

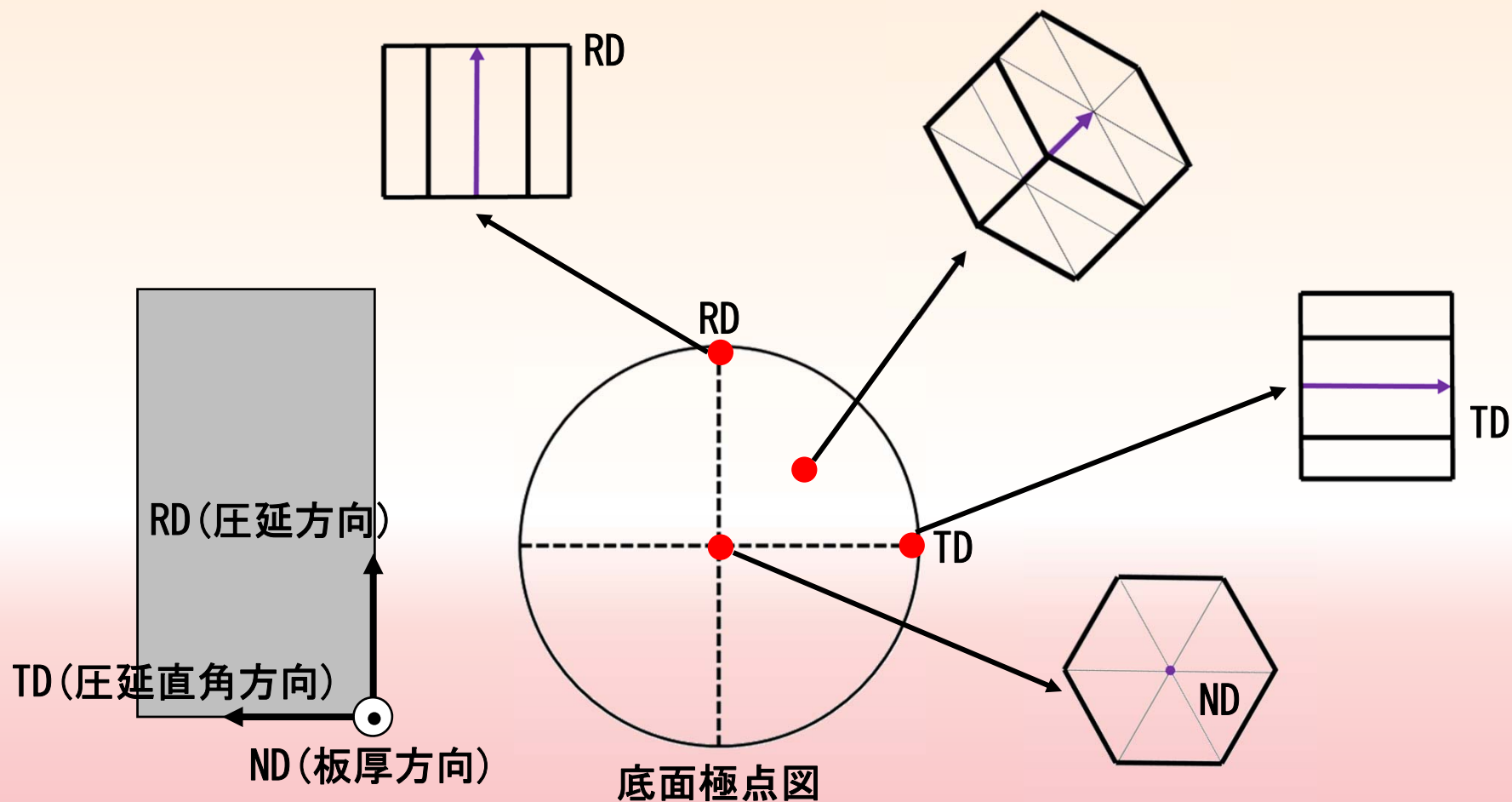
$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (n \text{は整数})$$

# マグネシウム合金の結晶構造

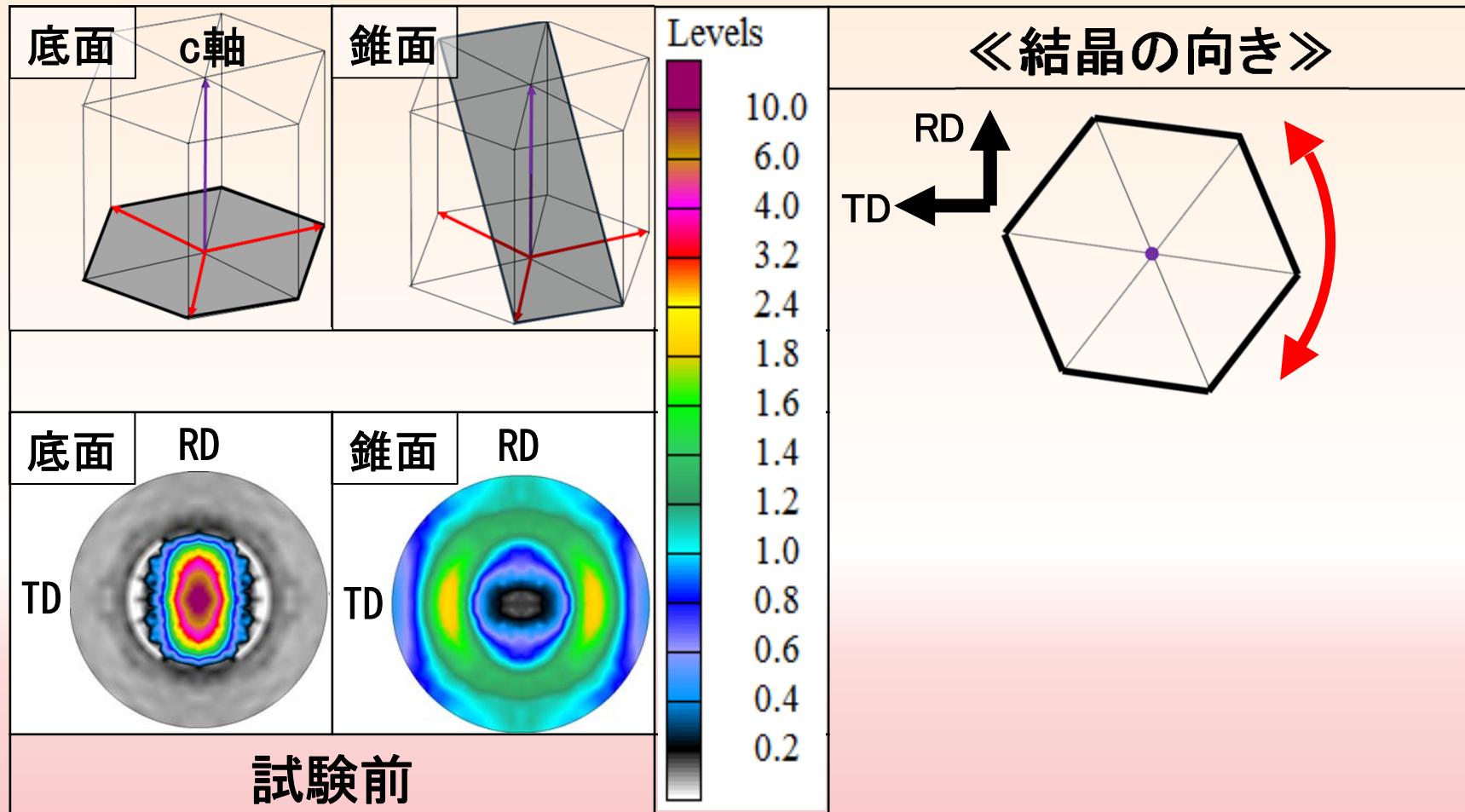


# 極点図上の位置と結晶方位の関係

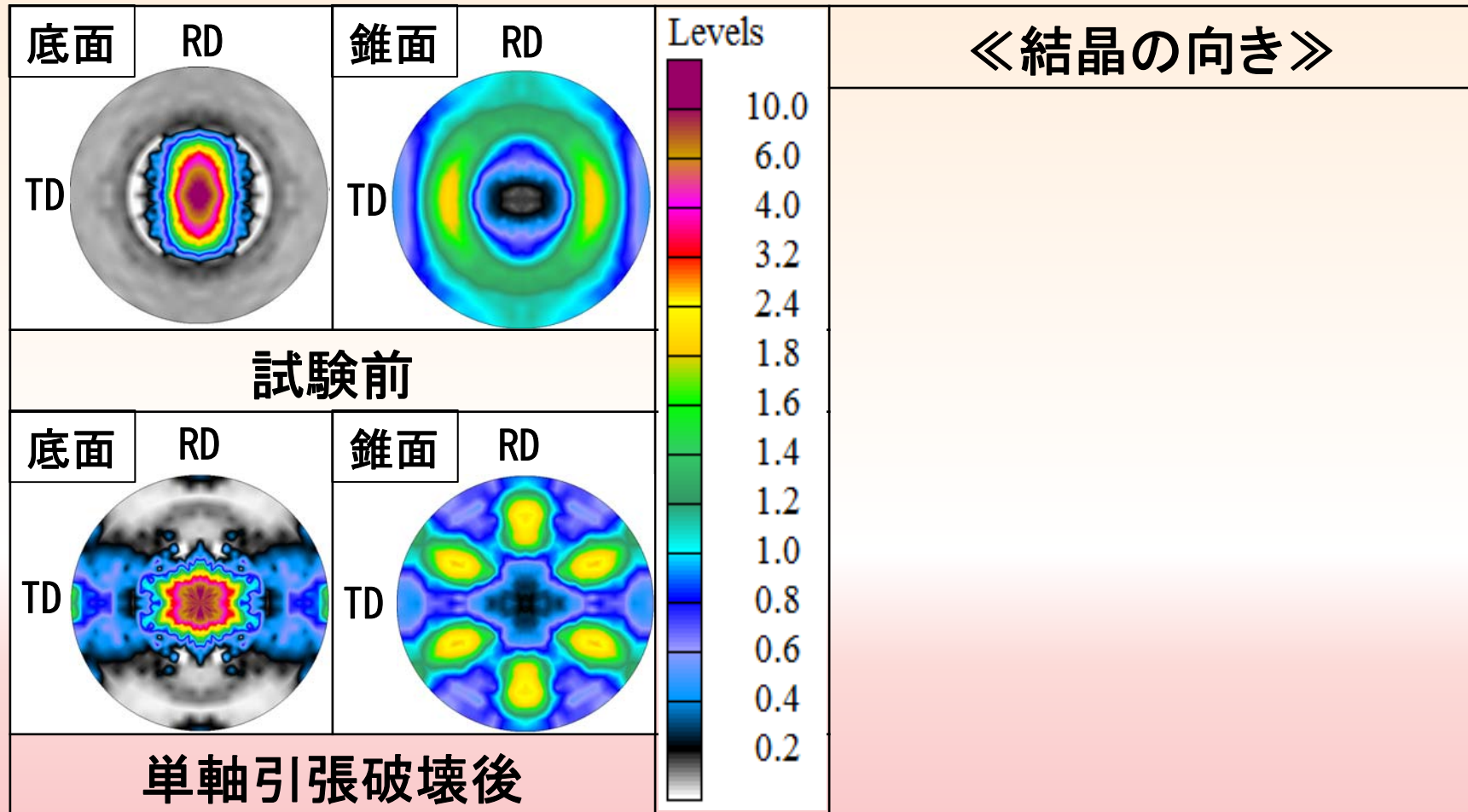
《底面の極点図》



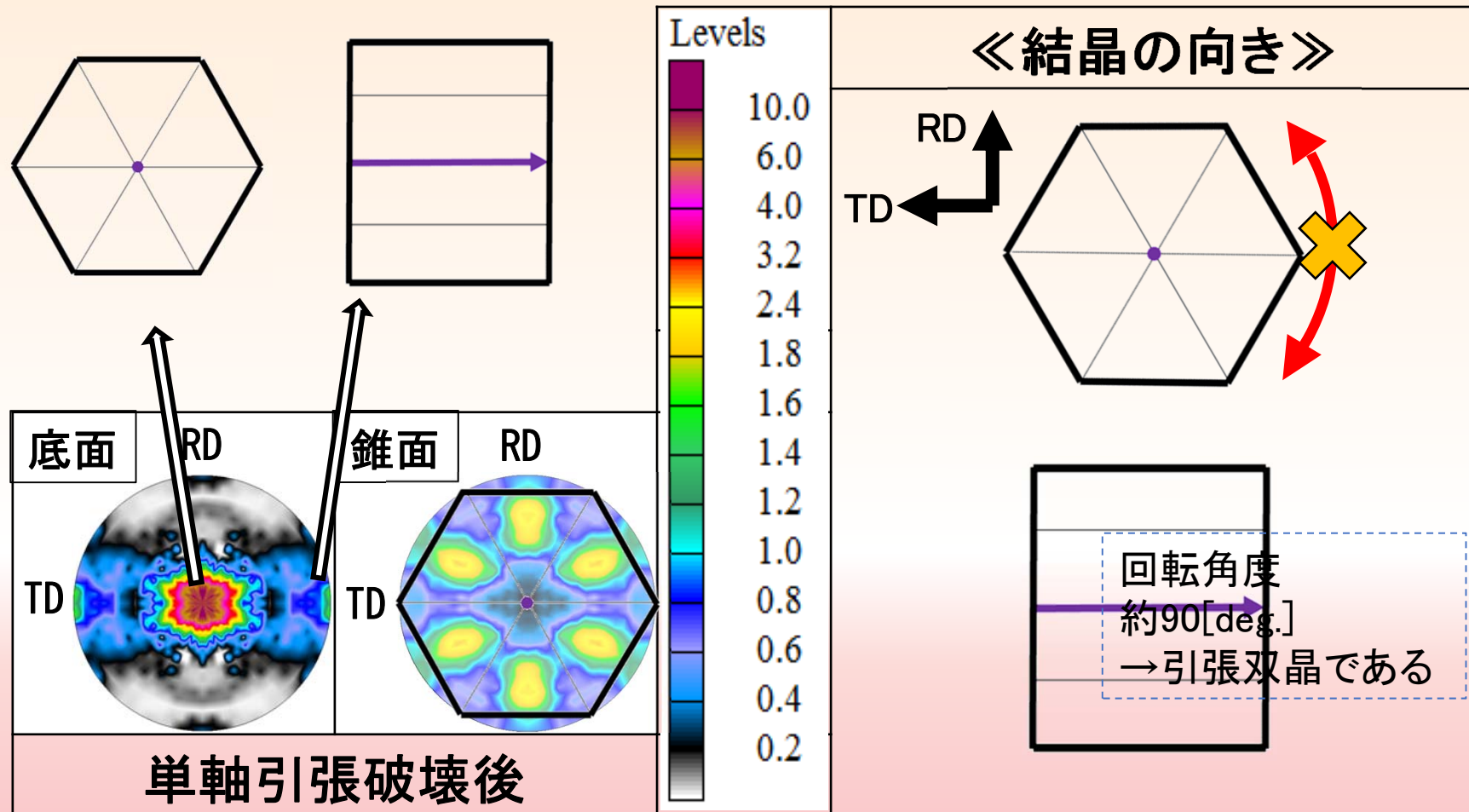
# 極点図 (試験前)



# 単軸引張破壊後

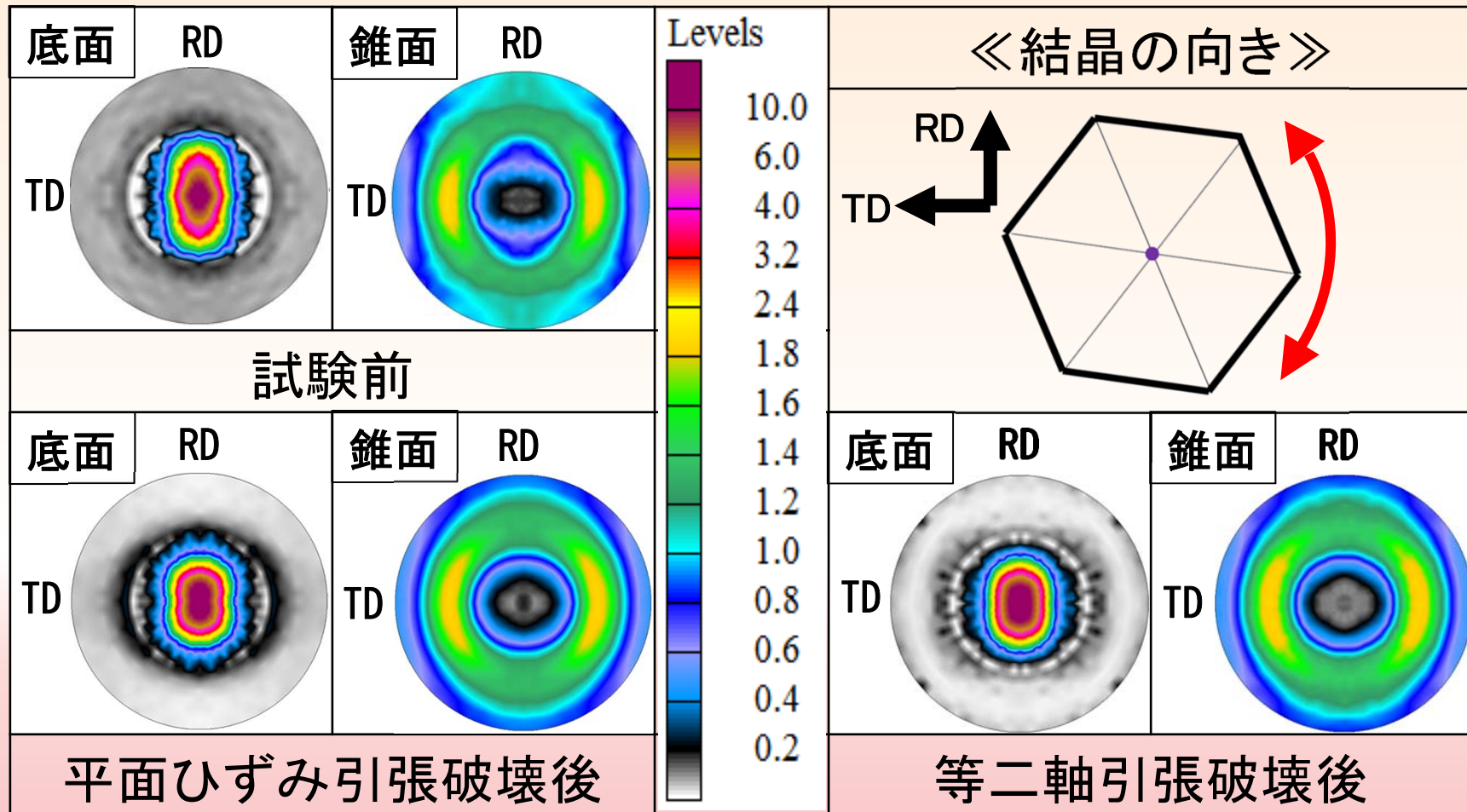


# 単軸引張試験後





# 平面ひずみ引張・等二軸引張破壊後



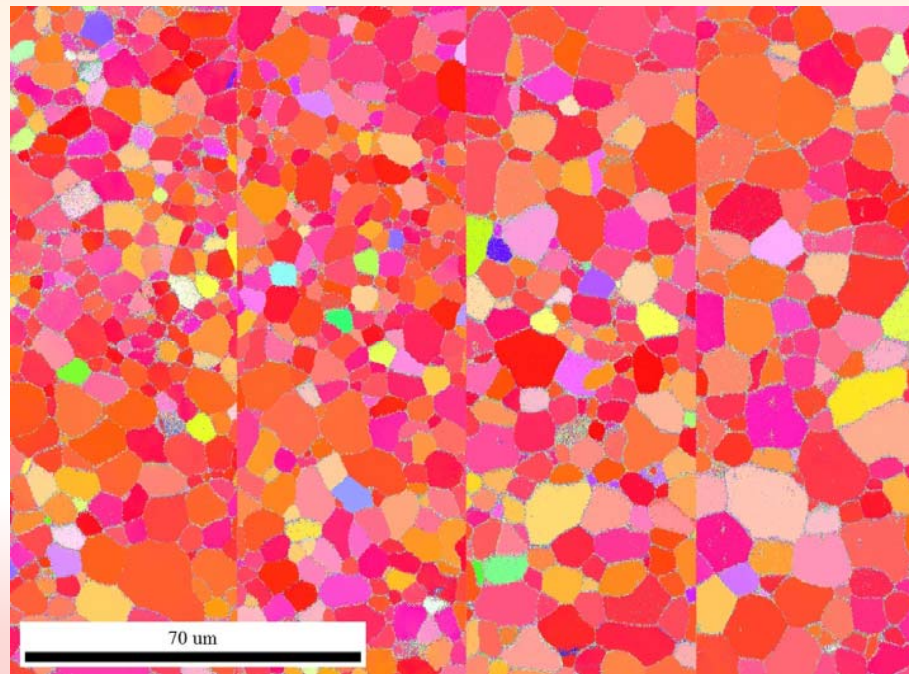
# 双晶の活動

《極点図（XRDの結果）》

- 単軸引張  
→ 引張双晶がある
- 平面ひずみ引張・等二軸引張  
→ 見られない

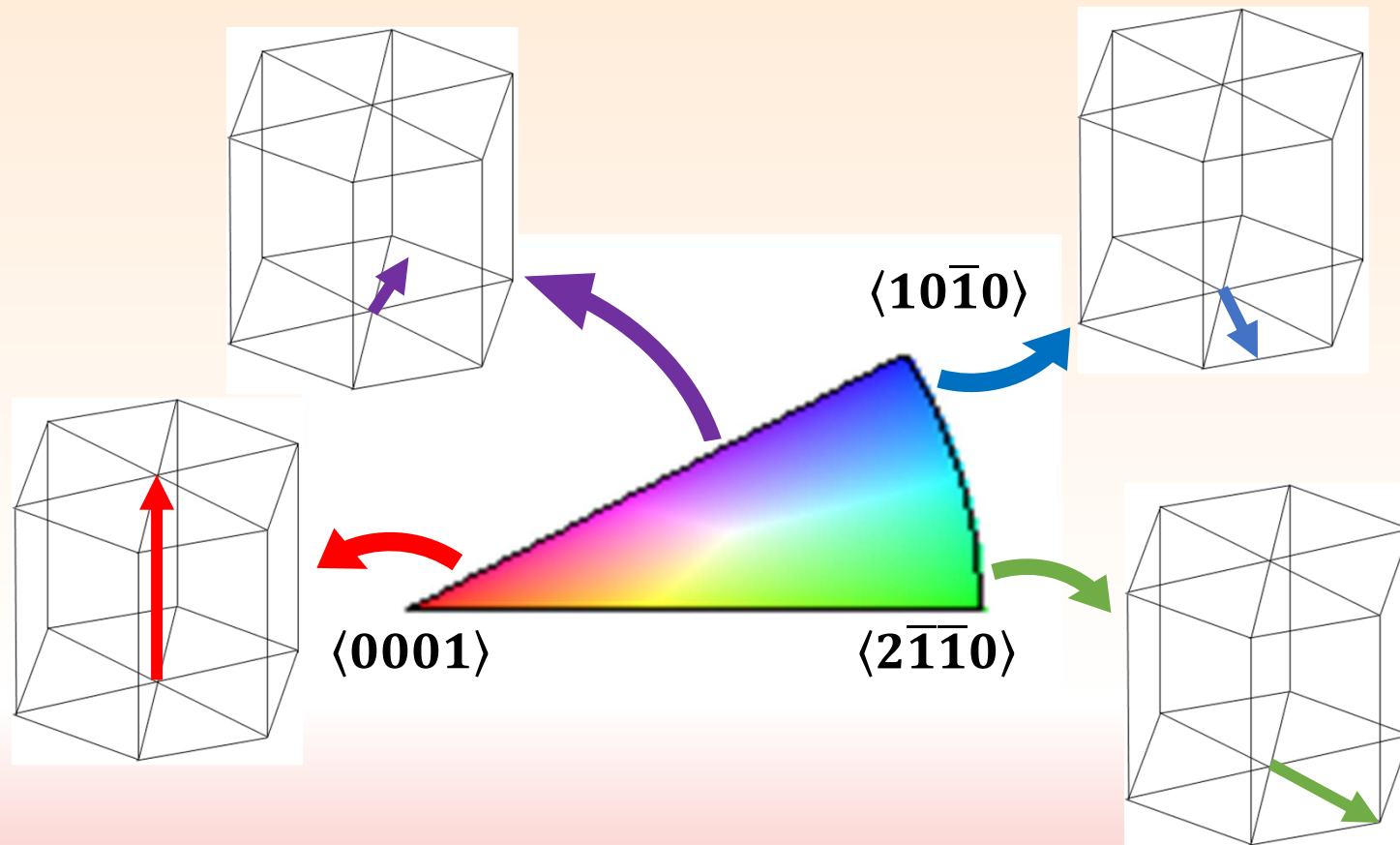
# 結晶方位マップ

結晶方位マップ・・・材料座標系の任意の一方向を  
結晶座標系で表した方位分布



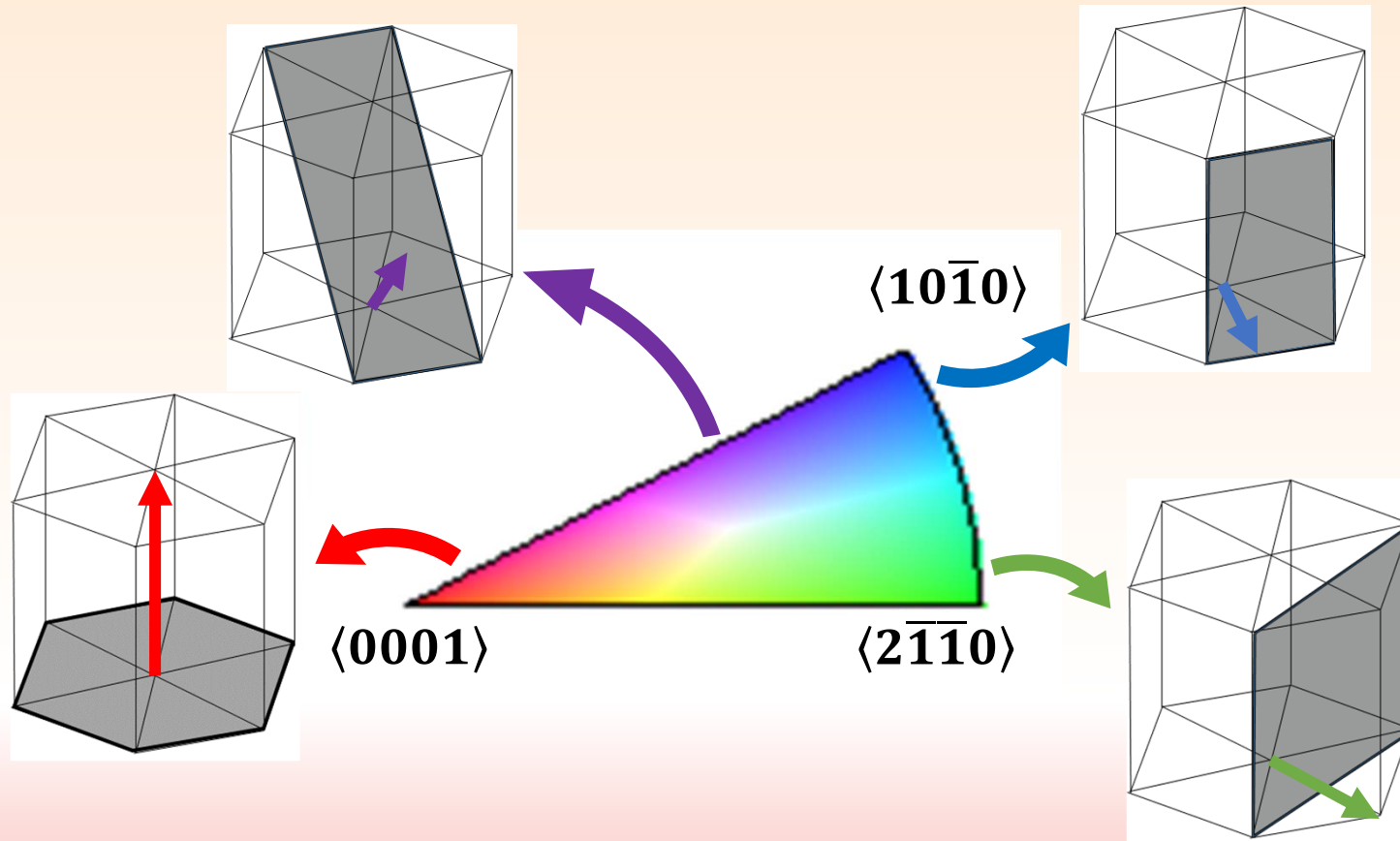
結晶方位マップの例

# 結晶方位と色の関係



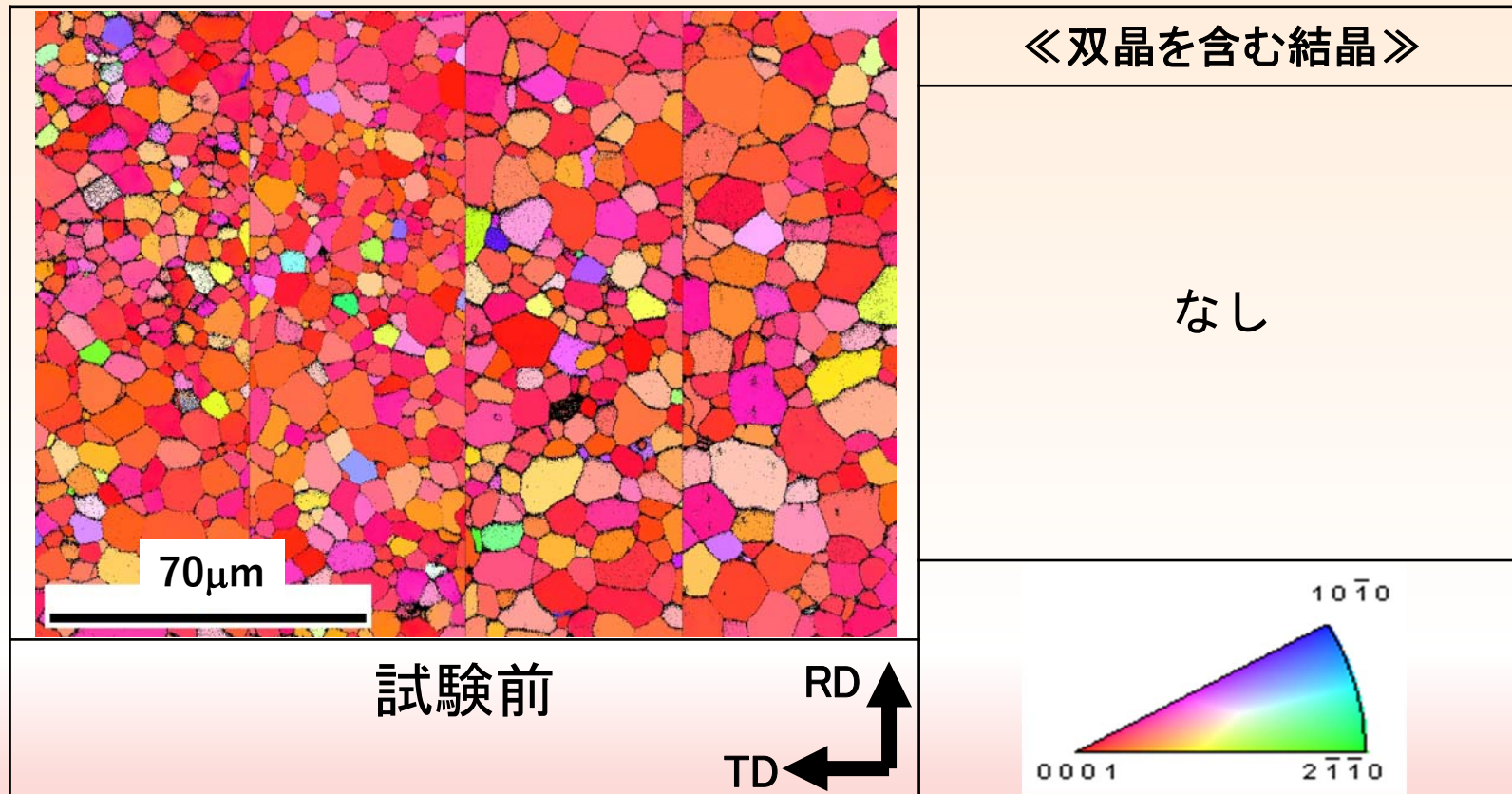
- 本研究では板厚方向 (ND) をこれらの結晶方位で表す

# 結晶方位と色の関係



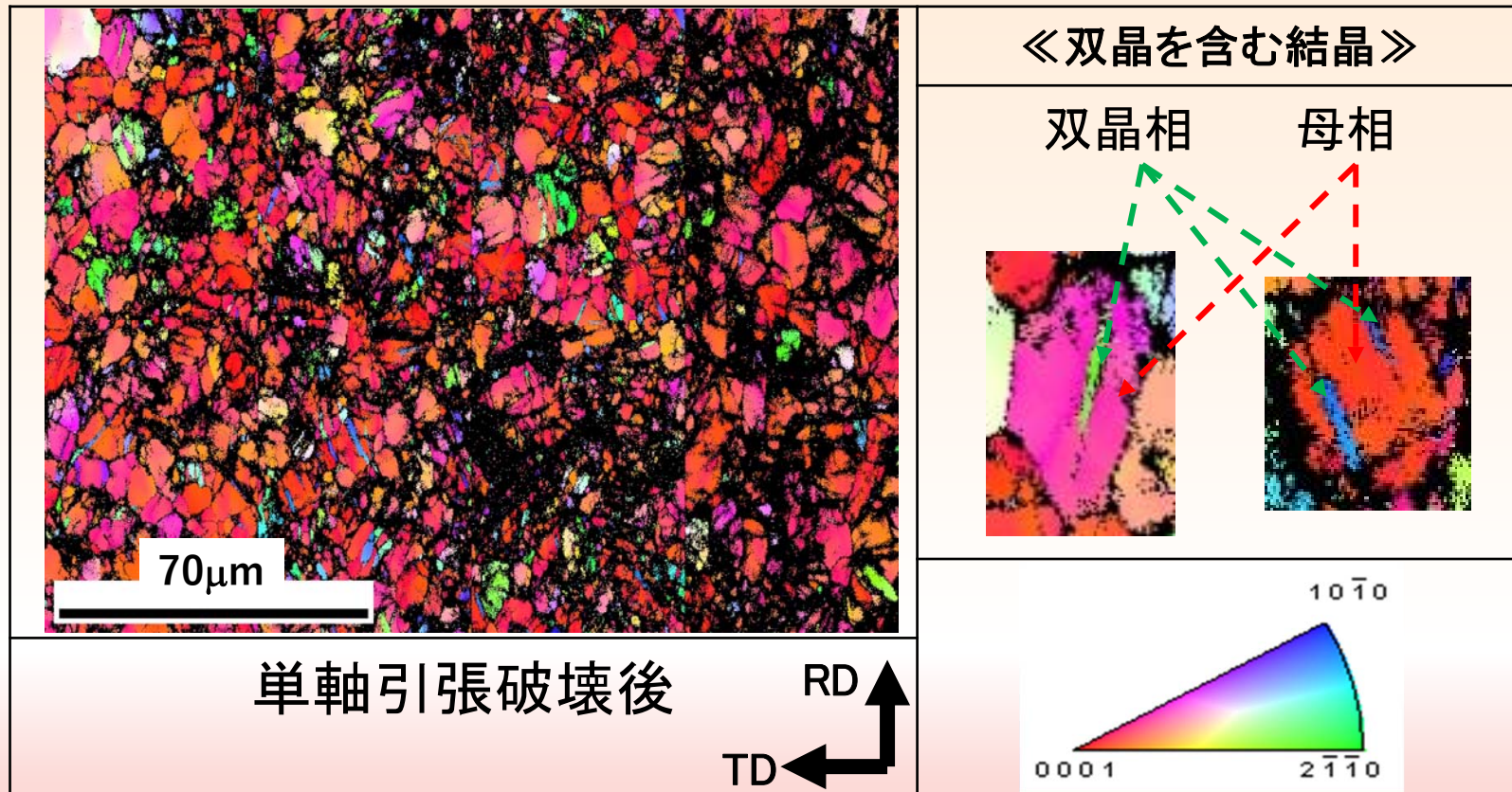
- 本研究では板厚方向 (ND) をこれらの結晶方位で表す  
(= これらを法線とする面が板面と平行である)

# 試験前の結晶方位マップ



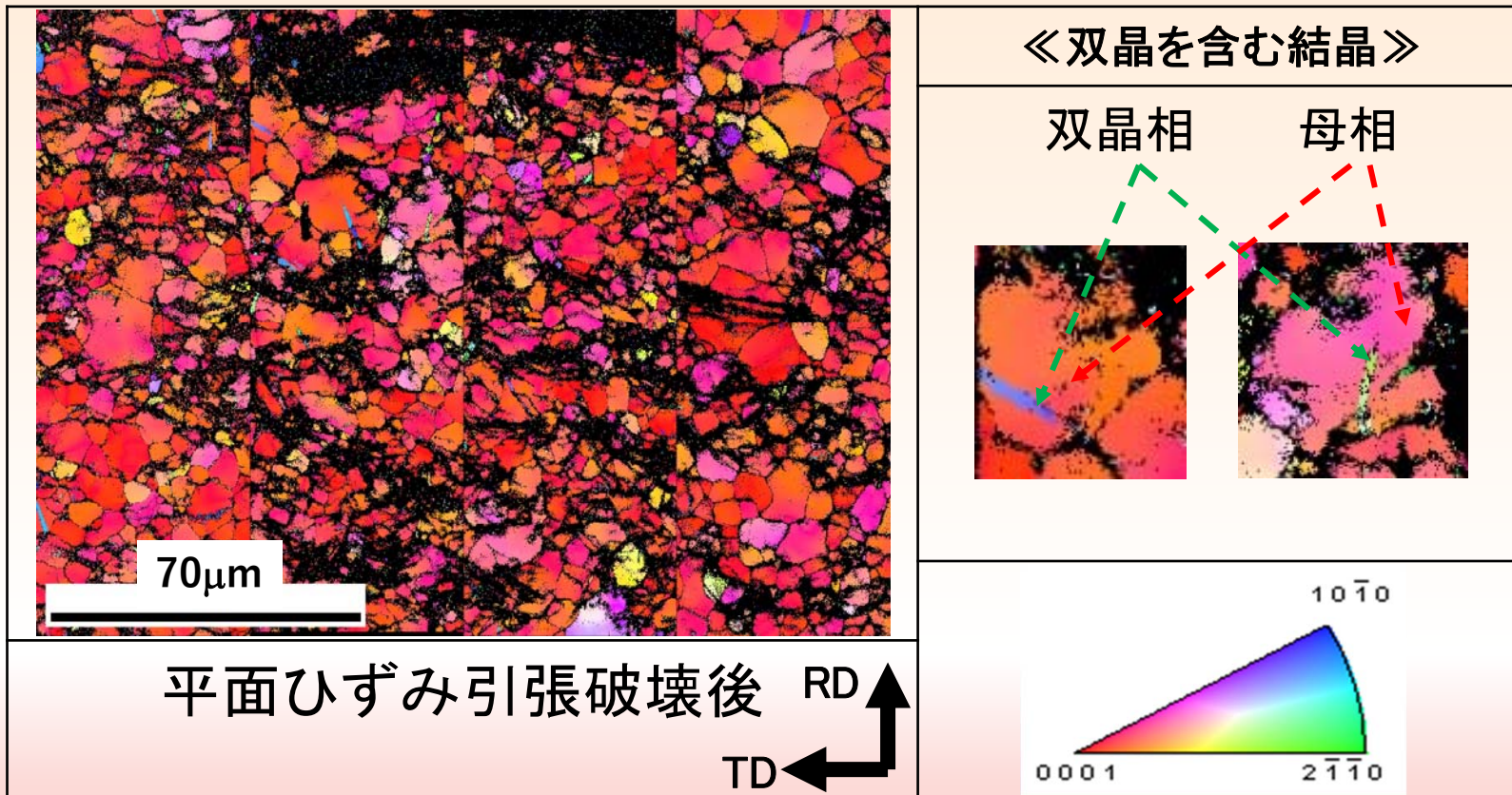
- 赤色系の面積が広い  
→c軸が板厚方向を向いた結晶が多い

# 単軸引張破壊の結晶方位マップ



- 試験前よりも青や緑の面積が多い

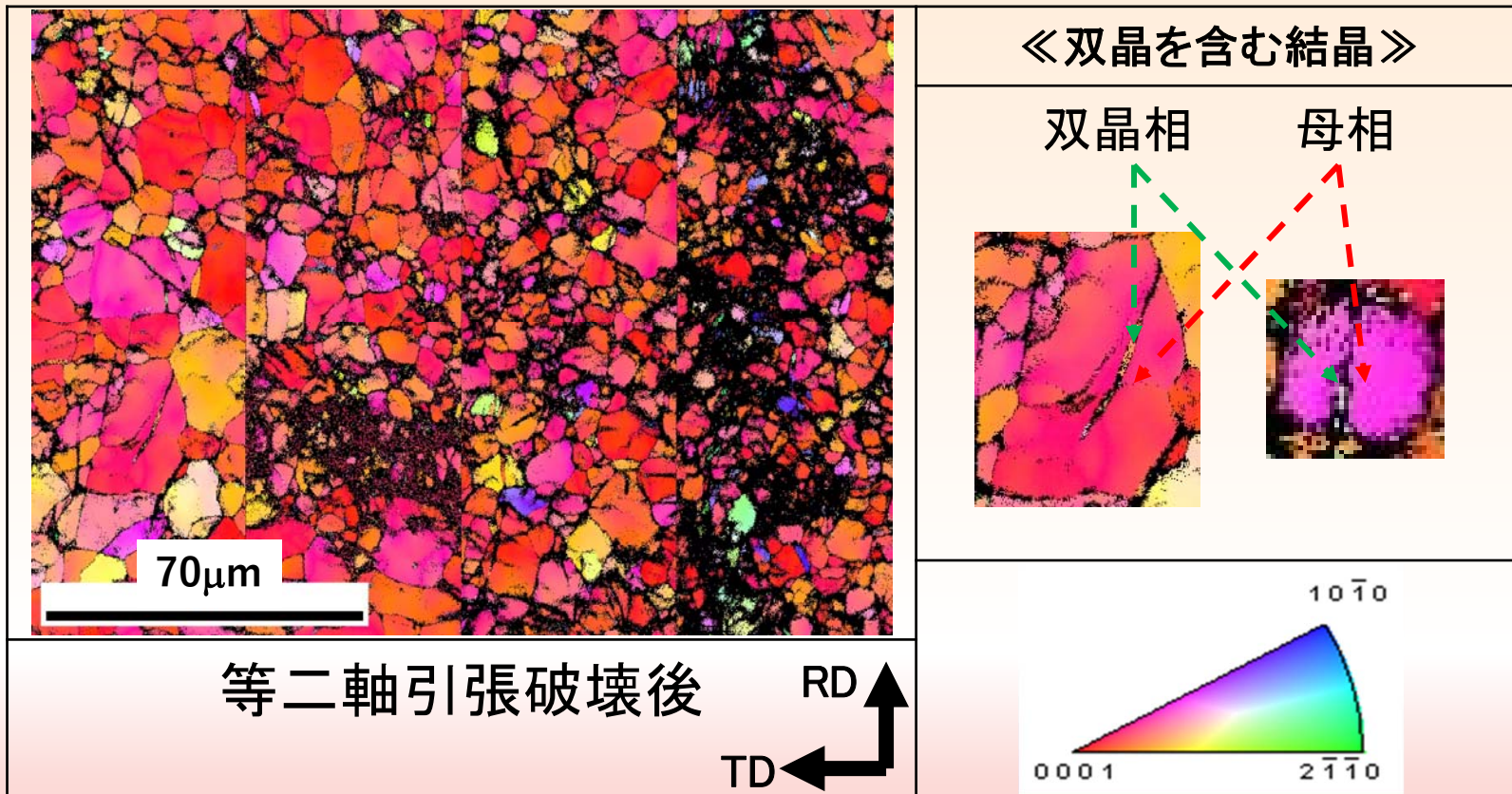
# 平面ひずみ引張破壊後の結晶方位マップ



- 全体的に目立った結晶方位の変化は見られない



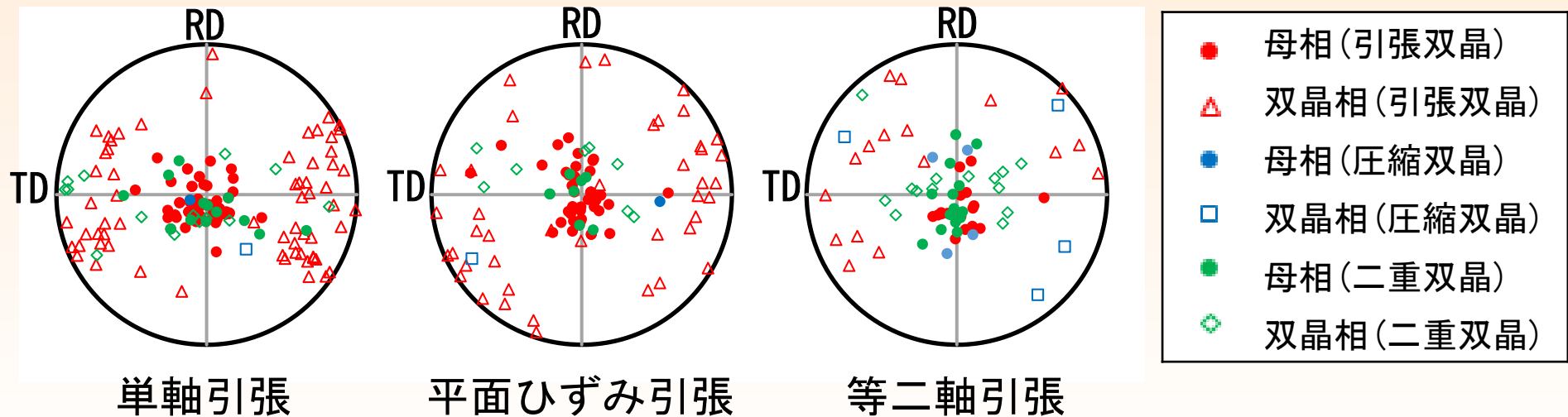
# 等二軸引張破壊後の結晶方位マップ



- 全体的に目立った結晶方位の変化は見られない

# ひずみ状態毎に発生した双晶

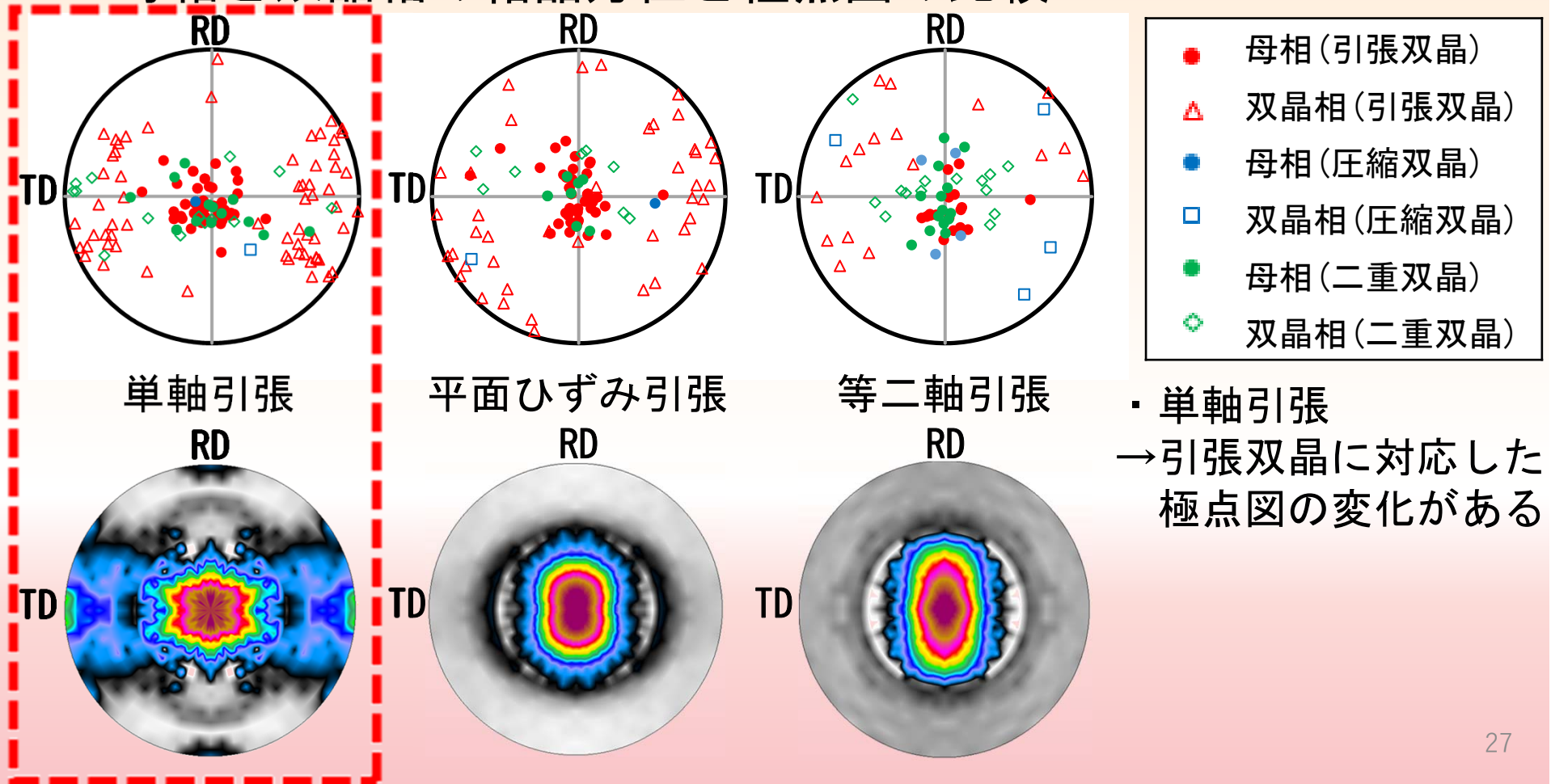
母相と双晶相の結晶方位を底面極点図上の表示



- 引張双晶の双晶相は単軸引張で圧延直角方向にあるものが多い
- 二重双晶の双晶相は等二軸引張で板厚方向にあるものが多い  
単軸引張では板厚方向から圧延直角方向に広く分布する

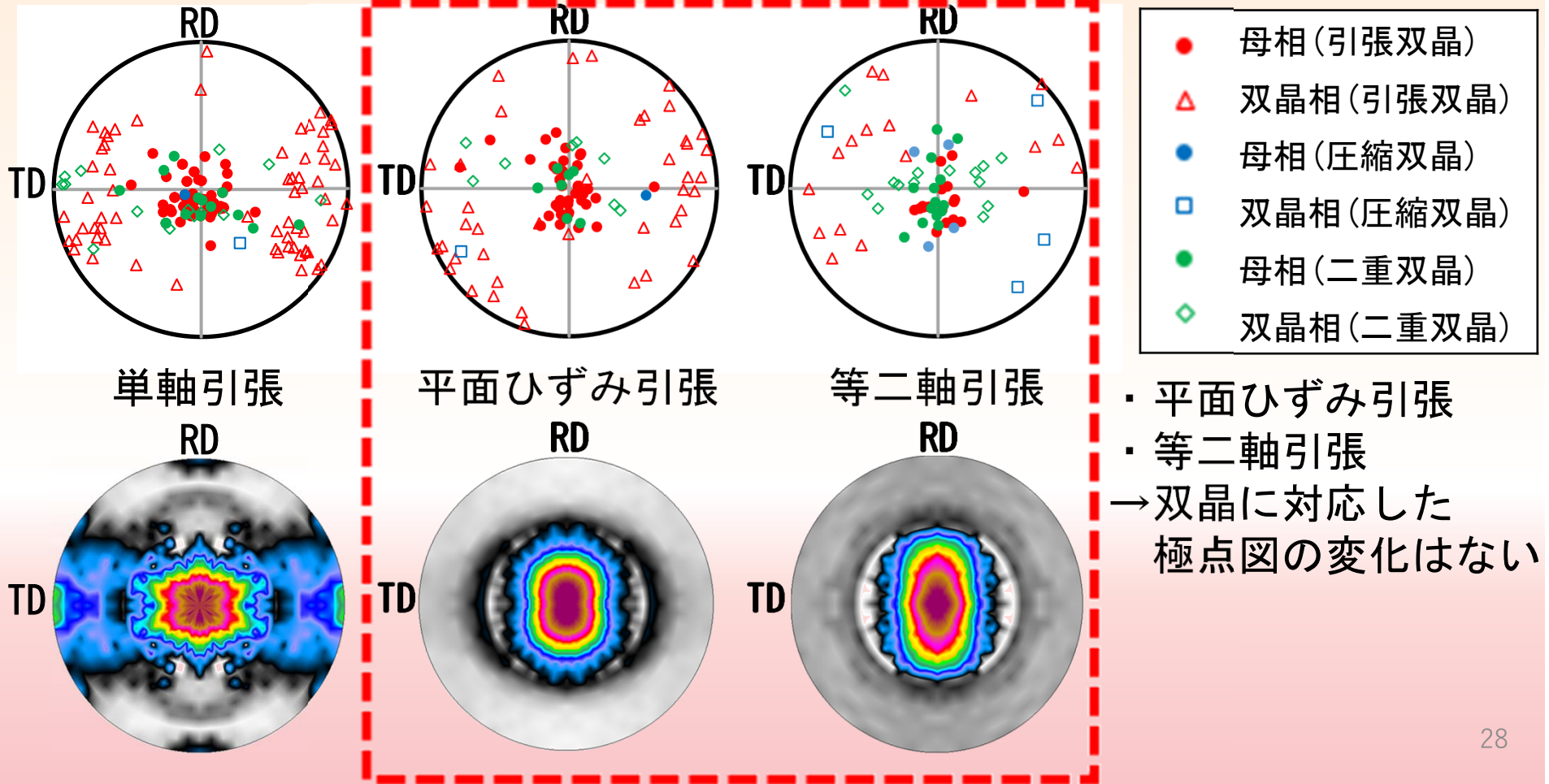
# ひずみ状態毎に発生した双晶

## 母相と双晶相の結晶方位と極点図の比較



# ひずみ状態毎に発生した双晶

## 母相と双晶相の結晶方位と極点図の比較



# 双晶の発生数

- 等二軸引張と平面ひずみ引張は双晶の数が少ないため探索面積を2倍とした

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	64	1	14
単軸引張 pre-2	69	7	2
単軸引張 pre-1	25	3	4
平面ひずみ引張	21	0.5	4.5
等二軸引張	8.5	2	7

同一面積当たりの双晶の種類別発生数（結晶方位マップ）

全てのひずみ状態で引張双晶，圧縮双晶，二重双晶が発生している

# 双晶の活動

《極点図（XRDの結果）》

- 単軸引張  
→ 引張双晶がある
- 平面ひずみ引張・等二軸引張  
→ 見られない

《結晶方位マップ（EBSDの結果）》

- 単軸引張・平面ひずみ引張・等二軸引張  
→ 引張双晶・圧縮双晶・二重双晶がある

## 双晶の発生数

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	64	1	14
単軸引張 pre-2	69	7	2
単軸引張 pre-1	25	3	4
平面ひずみ引張	21	0.5	4.5
等二軸引張	8.5	2	7

同一面積当たりの双晶の種類別発生数（結晶方位マップ）

数が多い双晶により極点図が変化する  
数が少ない双晶では極点図は変化しない

## 発生した双晶系の分解せん断応力

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	-23	75	49
単軸引張 pre-2	-26	60	60
単軸引張 pre-1	14	48	52
平面ひずみ引張	-112	71	46
等二軸引張	-140	139	85

活動した双晶系の平均分解せん断応力 ([MPa])



## 発生した双晶系の分解せん断応力

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	-23	75	49
単軸引張 pre-2	-26	60	60
単軸引張 pre-1	14	48	52
平面ひずみ引張	-112	71	46
等二軸引張	-140	139	85

活動した双晶系の平均分解せん断応力 ([MPa])

- 引張双晶系の分解せん断応力は単軸引張の方が高い  
→ 単軸引張で引張双晶が多かったことと整合する

## 発生した双晶系の分解せん断応力

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	-23	75	49
単軸引張 pre-2	-26	60	60
単軸引張 pre-1	14	48	52
平面ひずみ引張	-112	71	46
等二軸引張	-140	139	85

活動した双晶系の平均分解せん断応力 ([MPa])

- 圧縮双晶系，二重双晶系の方が分解せん断応力が高い  
→ 引張双晶の方が多かったことと矛盾する

# 発生した双晶系の分解せん断応力

原因：今回は応力が均一であると仮定した

	引張双晶	圧縮双晶	二重双晶
単軸引張	-23	75	49
単軸引張 pre-2	-26	60	60
単軸引張 pre-1	14	48	52
平面ひずみ引張	-112	71	46
等二軸引張	-140	139	85

活動した双晶系の平均分解せん断応力 ([MPa])

- 引張双晶系の分解せん断応力はひずみが大きくなると正から負に転じた → 応力集中と考えられる

# 結論

マグネシウム合金，AZ31の圧延方向を主ひずみ方向とする単軸引張，平面ひずみ引張，等二軸引張と双晶の観察によって次の知見を得た．

- 単軸引張における引張双晶内のc軸は圧延直角方向へ向くものが多く，等二軸引張における二重双晶内のc軸は板厚方向を向くものが多い．
- 単軸引張では引張双晶による極点図の変化が確認されたが，平面ひずみ引張，等二軸引張では双晶が発生したものの，極点図ではその変化は現れない．
- 全てのひずみ状態で引張双晶が圧縮双晶や二重双晶よりも多かった．しかし，予想した分解せん断応力は引張双晶の方がかなり低かった．単軸引張においてひずみの増加とともに分解せん断応力の低下が見られたことから応力集中が発生していることが考えられる．