

# 白色X線マイクロビームによる ステンレス鋼結晶粒の 歪分布測定技術の開発

佐藤 眞直

(財)高輝度光科学研究センター  
産業利用推進室

# 開発チームメンバー

- 内部スタッフ

梶原 堅太郎

(財)高輝度光科学研究センター

橋本 保

(財)高輝度光科学研究センター

- 共同研究者

山田 卓陽 (株) 原子力安全システム研究所

寺地 巧 (株) 原子力安全システム研究所

福村 卓也 (株) 原子力安全システム研究所

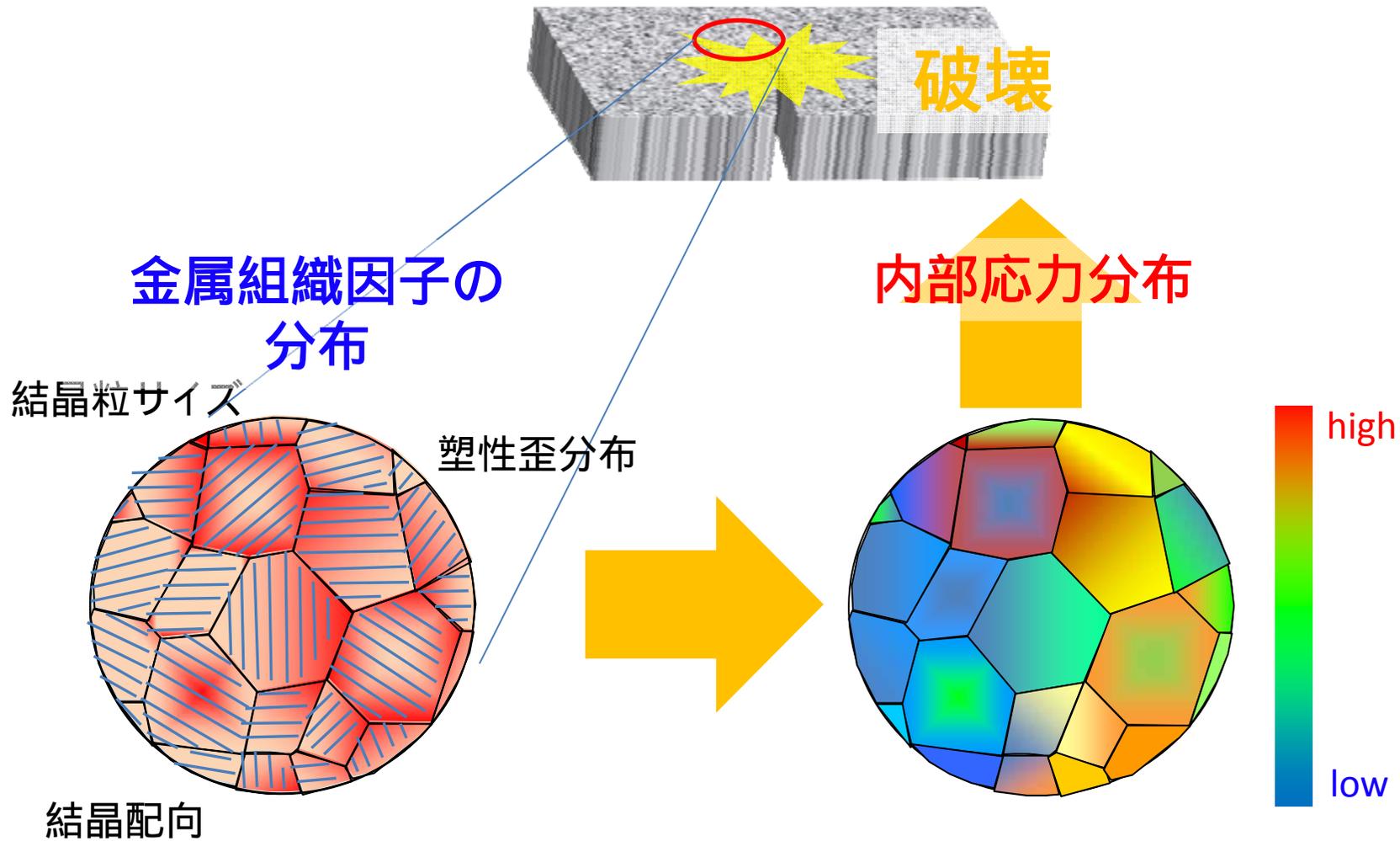
有岡 孝司 (株) 原子力安全システム研究所

# 内容

- 背景 & 目的
  - 金属材料の内部応力マイクロ分布測定技術の重要性について
- 実験
  - 金属結晶組織中の弾性歪分布測定技術
  - 金属結晶粒界イメージング技術
- 解析手法
  - 内部応力テンソルの解析手法
- 結果
  - 応用事例: 引張外力下のSUS316ステンレス鋼中の内部応力分布評価
- まとめ

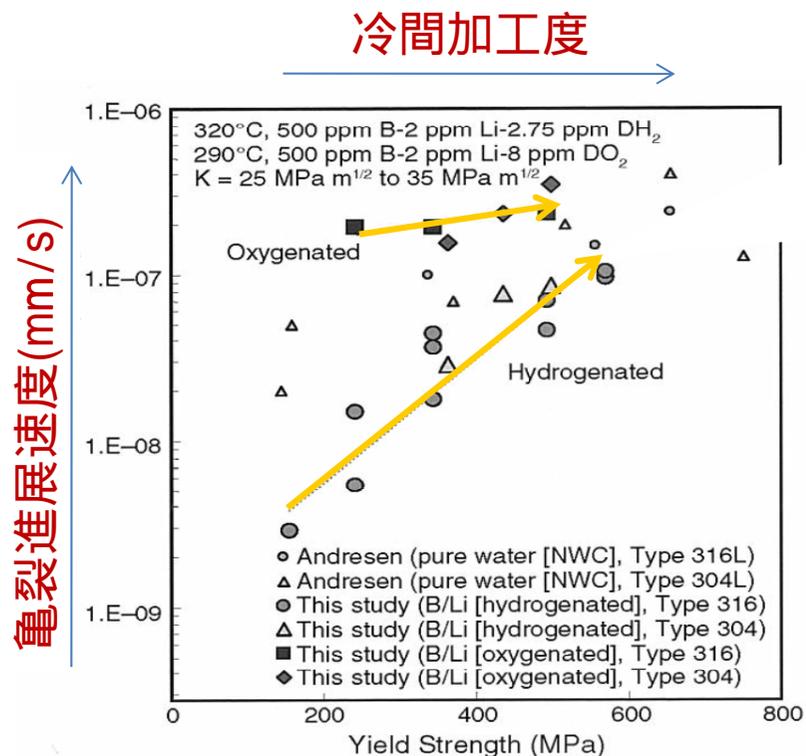
# 背景

## 金属材料の機械的特性

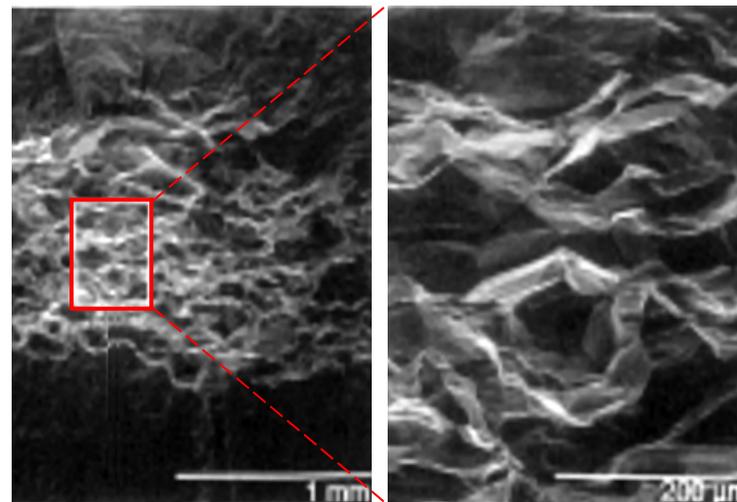


# 背景

## ステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)



Ref.: K.Arioka, T.Yamada, T.Terachi, G. Chiba, Corrosion,2007, Vol.63, No.12, p.1114



SCC破断面

粒界割れ(IGSCC)

SCC感受性の冷間加工度依存性



結晶粒界近傍の  
内部応力集中



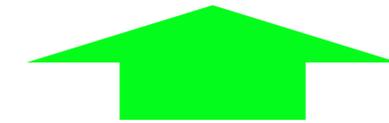
SEM/EBSP, TEM



金属組織因子の  
分布

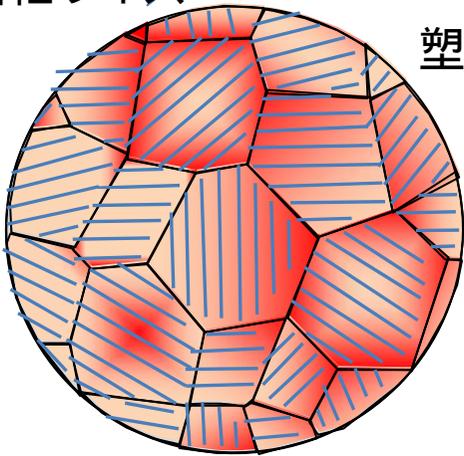


評価手法



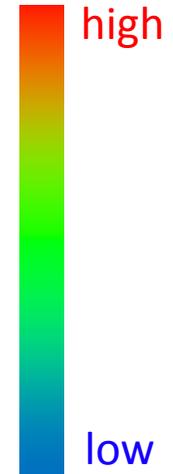
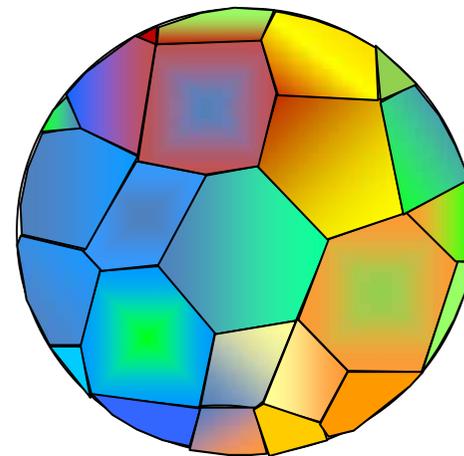
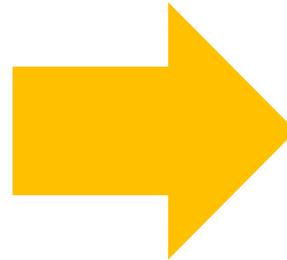
内部応力分布

結晶粒サイズ



結晶配向

塑性歪分布



# 目的

結晶格子面に生じる  
弾性歪

金属結晶組織中の  
内部応力 ミクロ分布の  
測定技術の開発

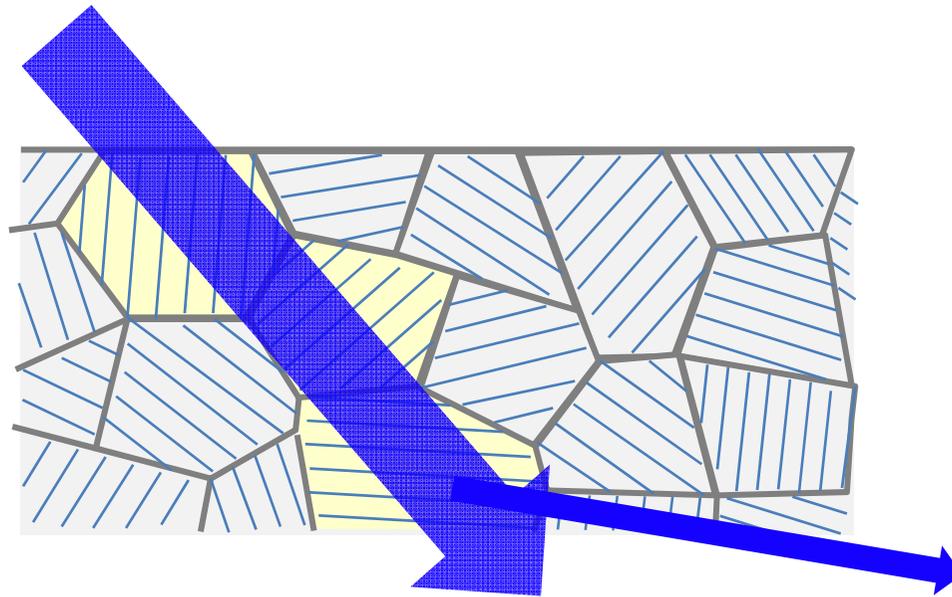
白色X線マイクロビーム  
X線回折測定技術

**EXDM**

(Energy-dispersive X-ray Diffraction Microscopy)

# 実験 白色X線のメリット

単色X線

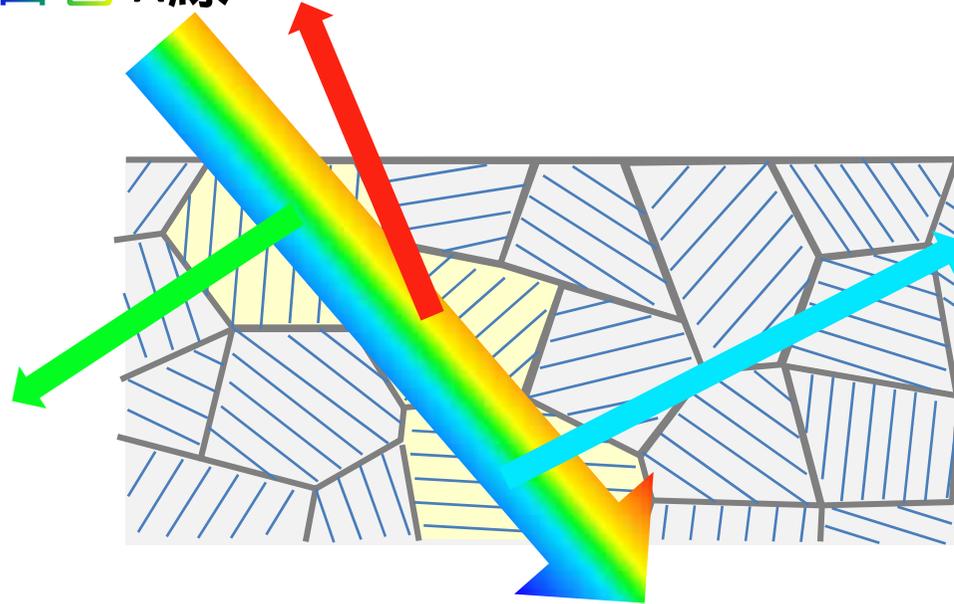


試料方位の走査 必要

高い装置精度  
長い測定時間

# 実験 白色X線のメリット

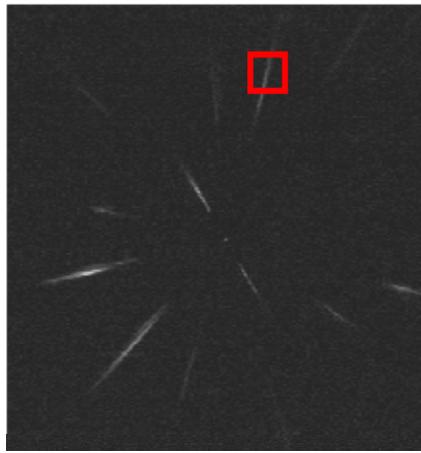
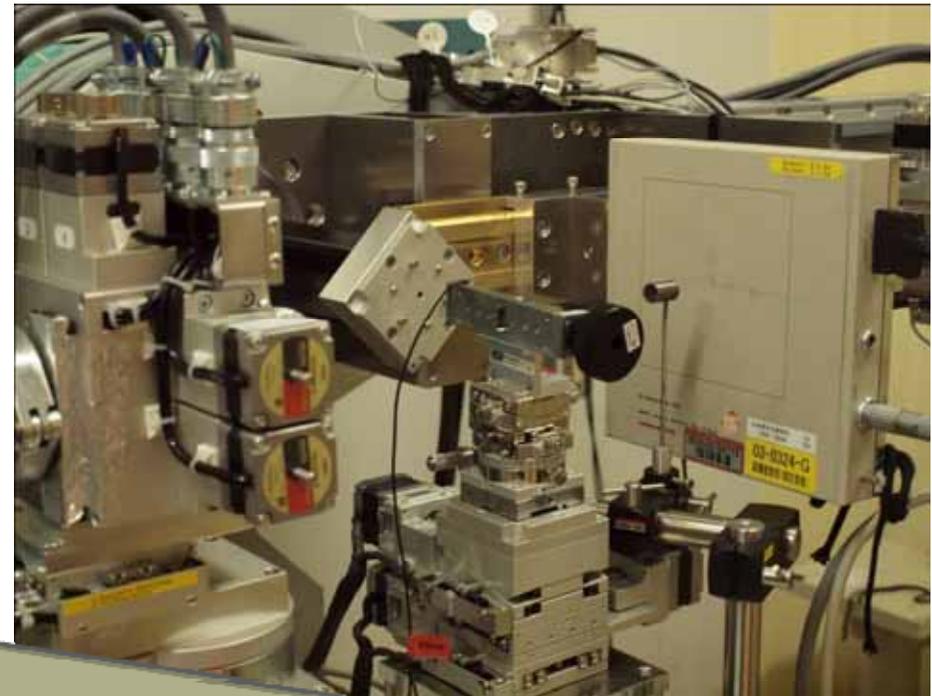
白色 X線



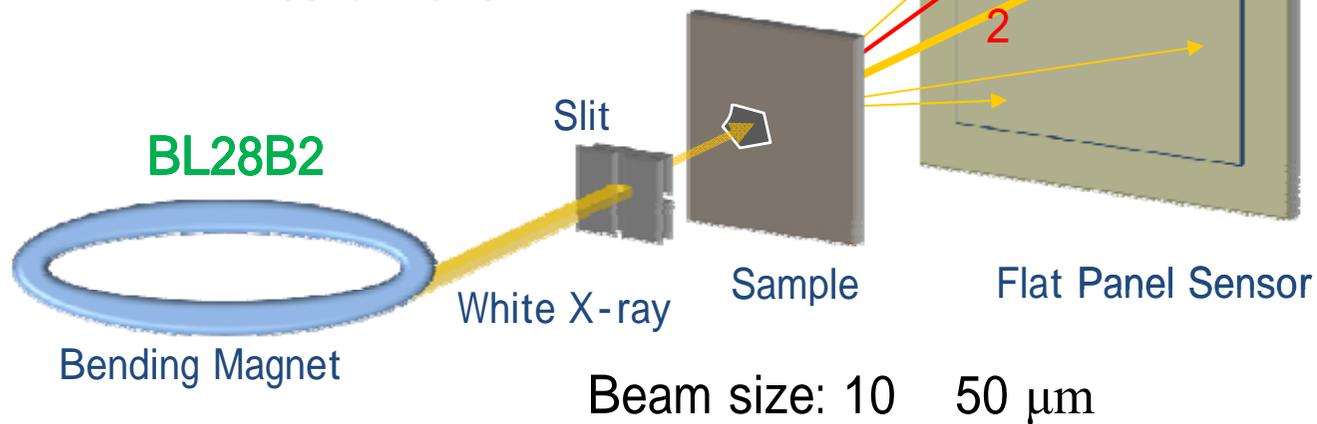
試料方位の走査 **必要なし**

~~高い装置精度~~  
~~長い測定時間~~

# 実験 装置レイアウト

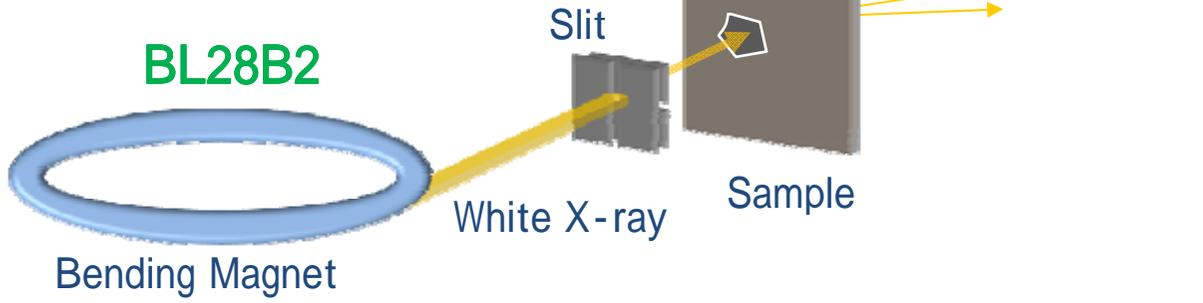
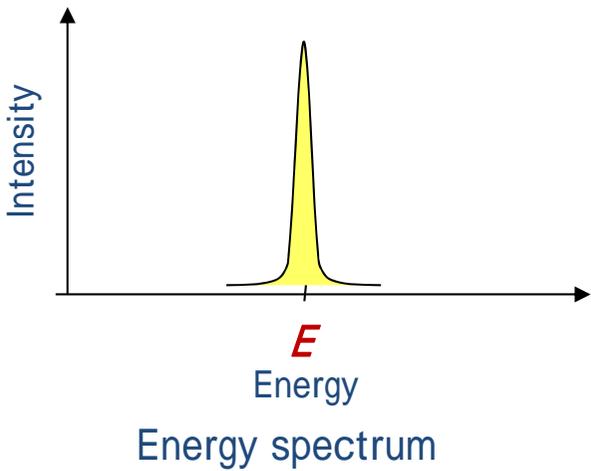


Diffraction Pattern



$$2d\sin\theta = \lambda$$

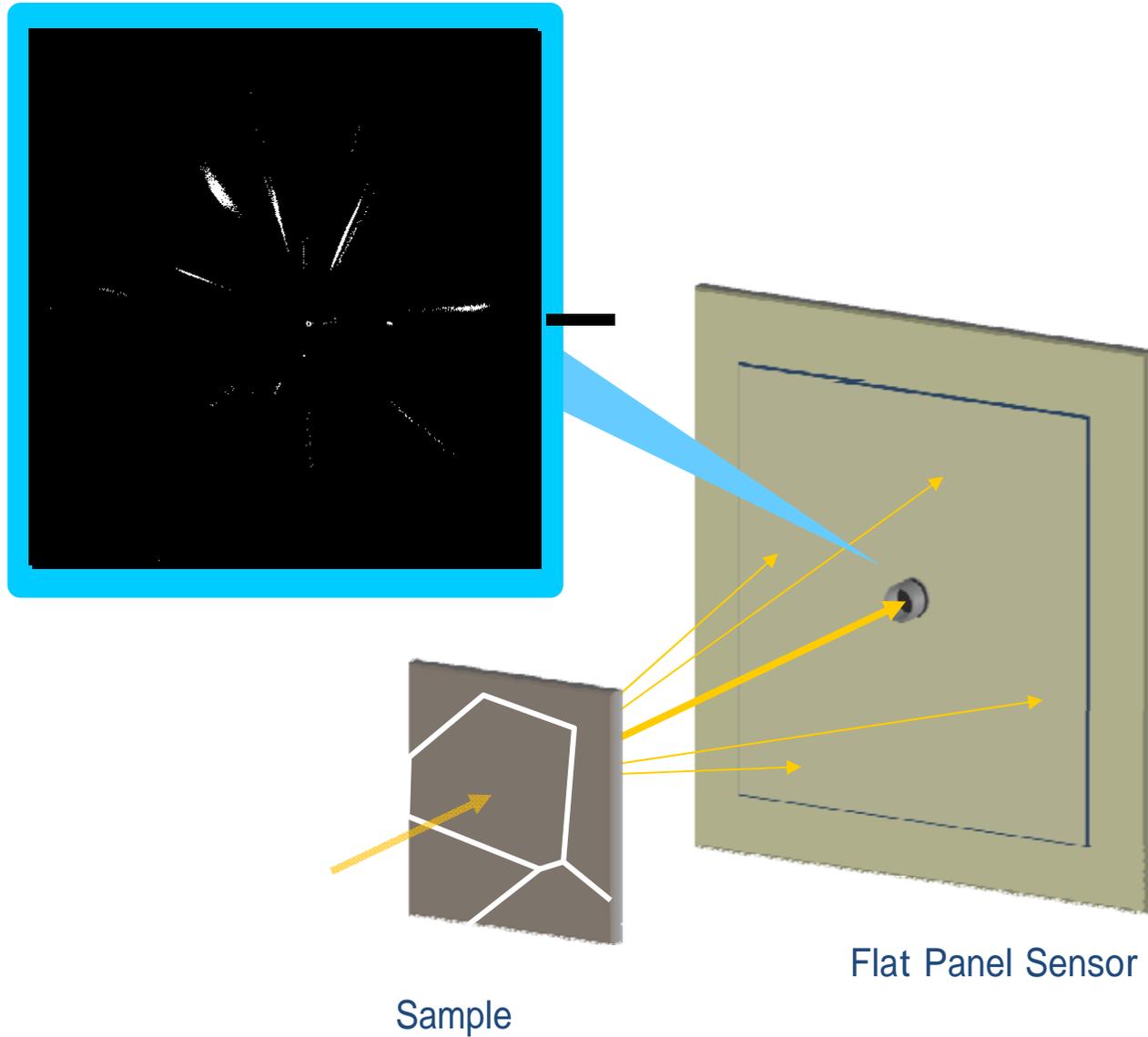
# 実験 装置レイアウト



$$2d \sin \theta = \lambda$$
$$= \hbar v / E$$
$$\Delta d / d \approx 4 \times 10^{-4}$$

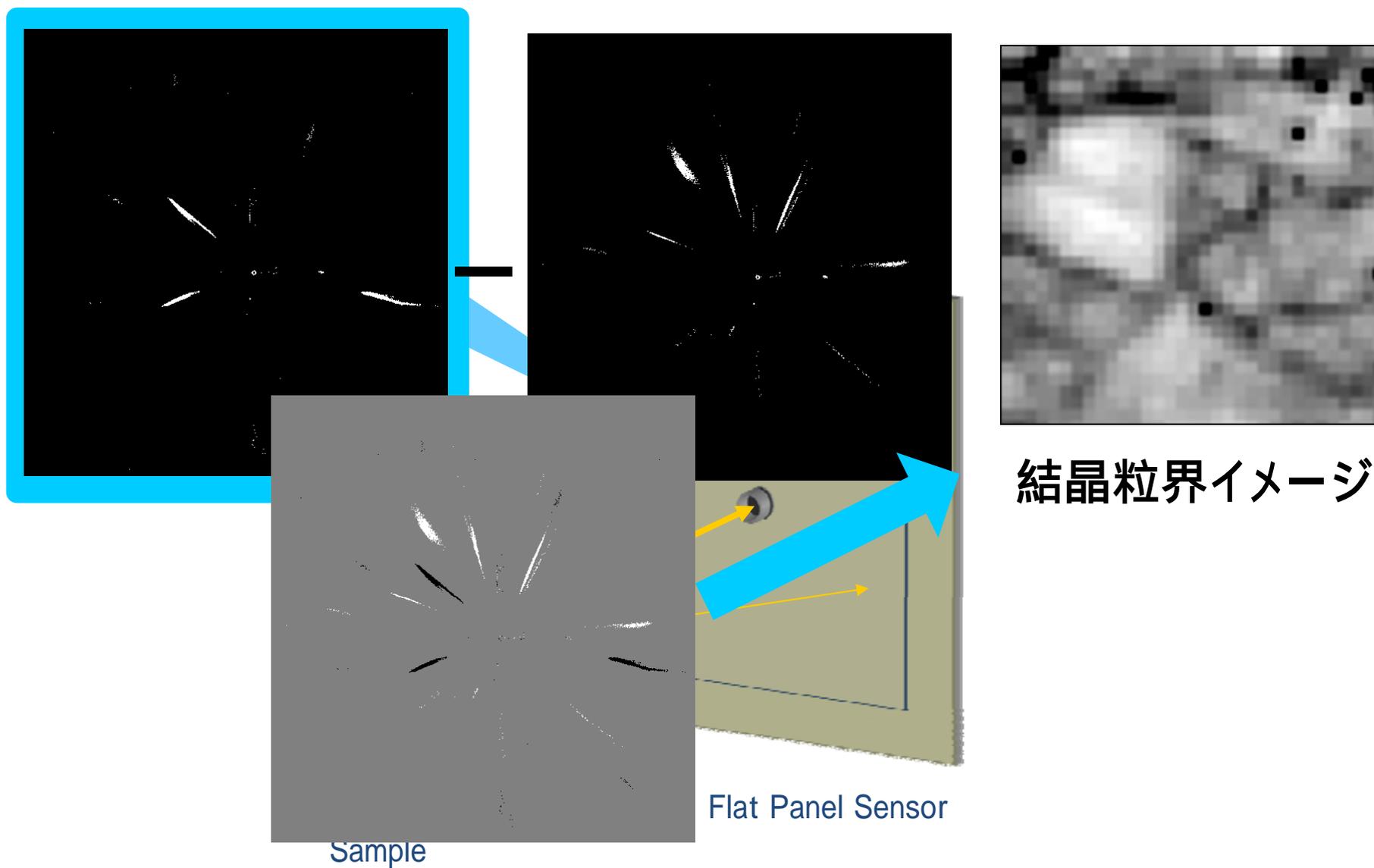
# 実験

## 結晶粒界の可視化技術



# 実験

## 結晶粒界の可視化技術

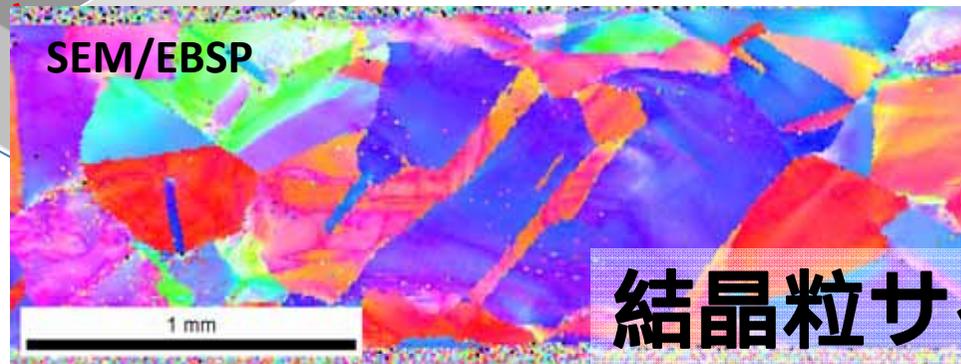


# 実験 測定試料

ステンレス鋼: SUS316

引張試験片

20% 冷間加工



結晶粒サイズ =  
300~1000 $\mu$ m

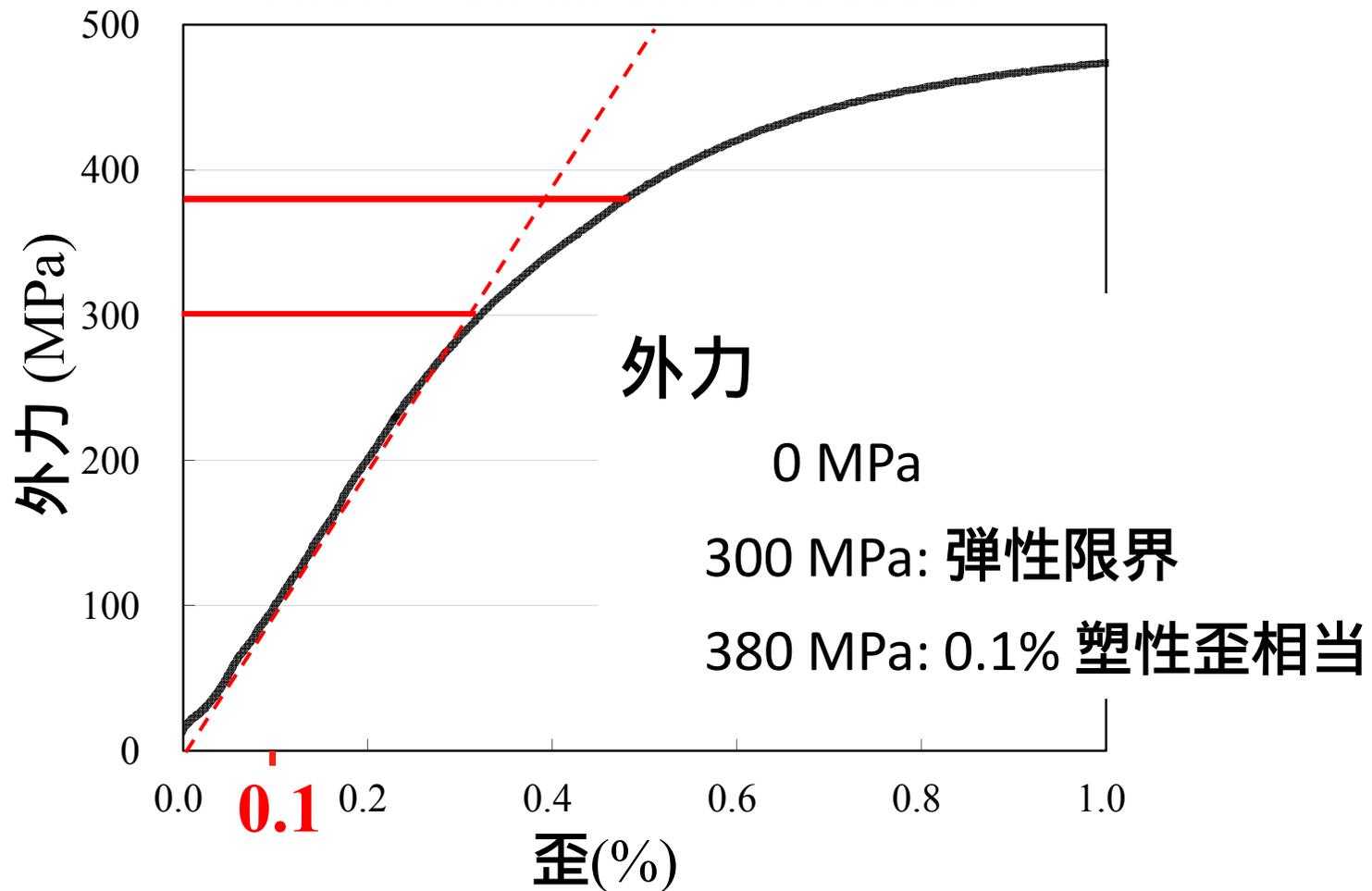


3mm

試料厚さ = 300 $\mu$ m

# 実験 引張外力の印加

Stress – Strain Curve : SUS316

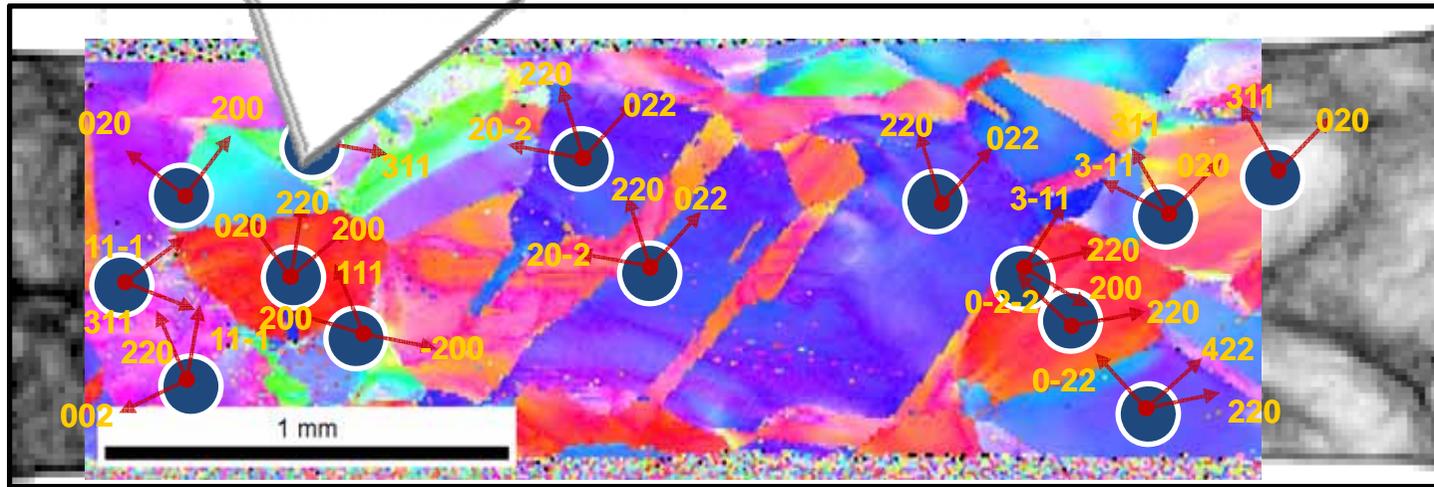


# 解析

弹性歪  $\varepsilon$  ←  $d$ : 格子面間隔

$$\varepsilon(h, k, l) = \frac{d(h, k, l) - d(h, k, l)_0}{d(h, k, l)_0}$$

$d(h, k, l)_0$ : 無歪



1mm

# 解析

弹性歪  $\varepsilon$



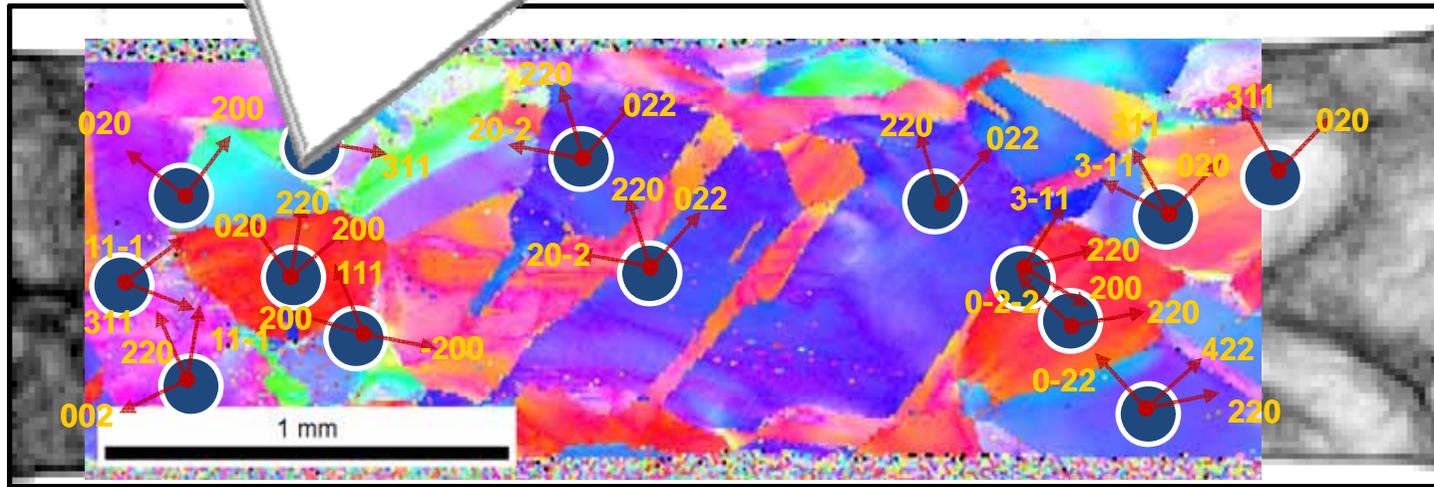
$a$ : 格子定数

$$a(h, k, l) = d(h, k, l) \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

$$\varepsilon(h, k, l) = \frac{a(h, k, l) - a_0}{a_0}$$

$a_0$ : 無歪

$$a_0 = \langle a(h, k, l) \rangle$$



1mm

# 解析 内部応力

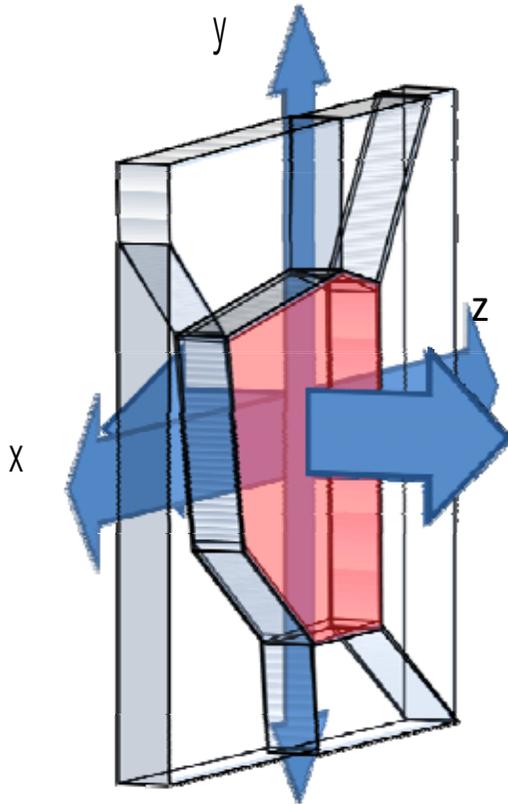
## 応力テンソル

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

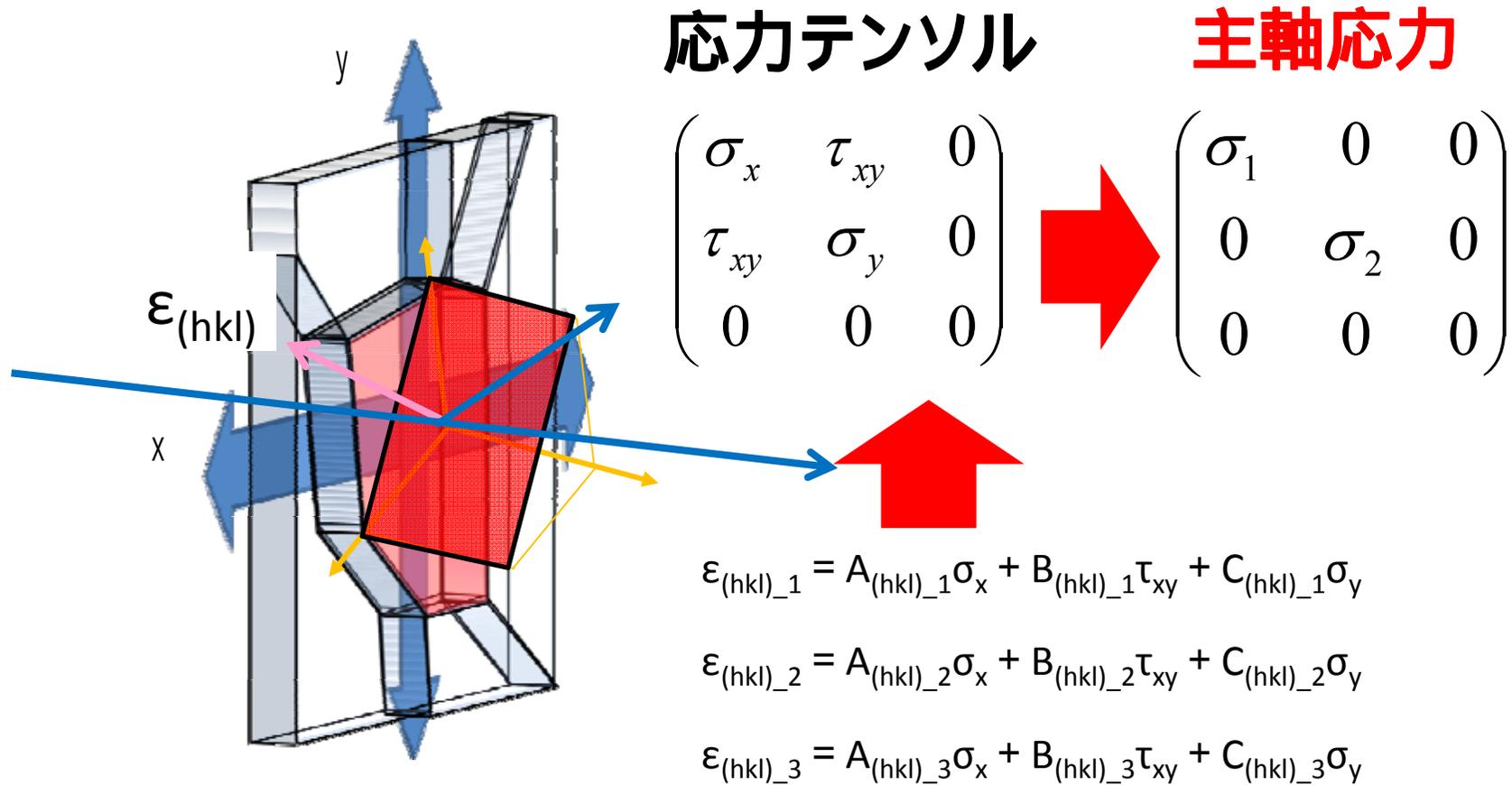
$\sigma$ : 垂直応力

$\tau$ : せん断応力

**z 軸方向 (試料表面法線方向):  
無応力と仮定**



# 解析 内部応力



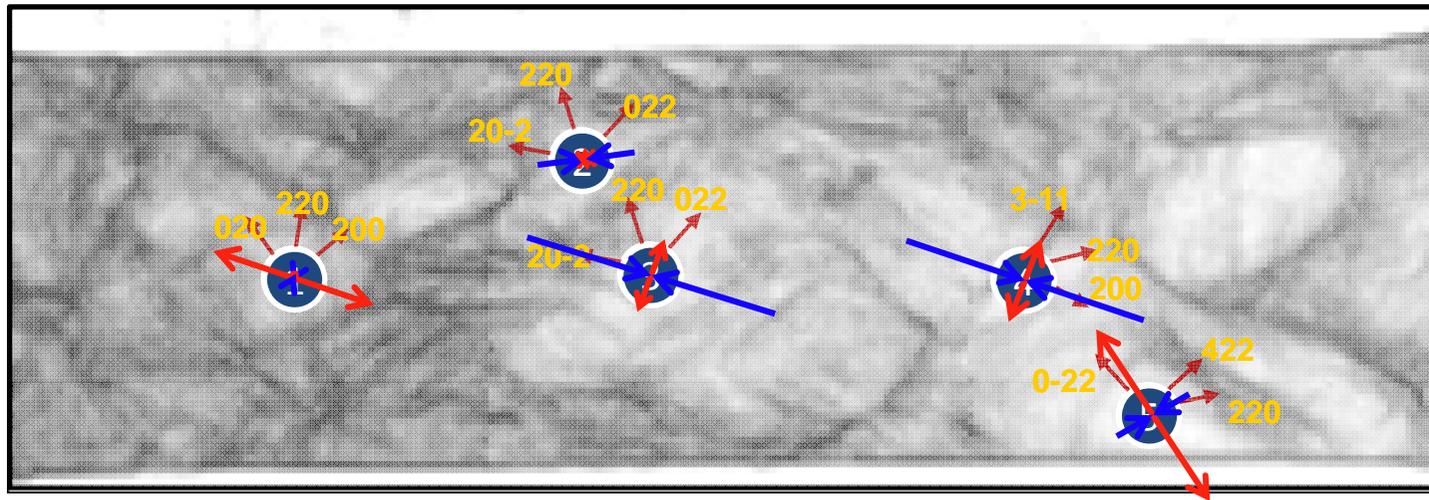
係数A,B,C: 下記の情報から計算

- SUS316 の結晶弾性異方性
- 結晶粒の配向

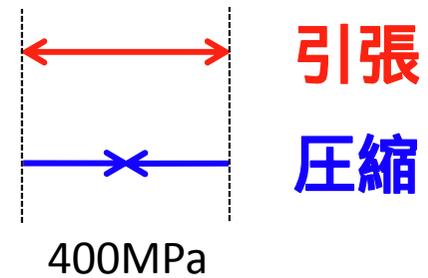
# 結果 内部応力分布

外力

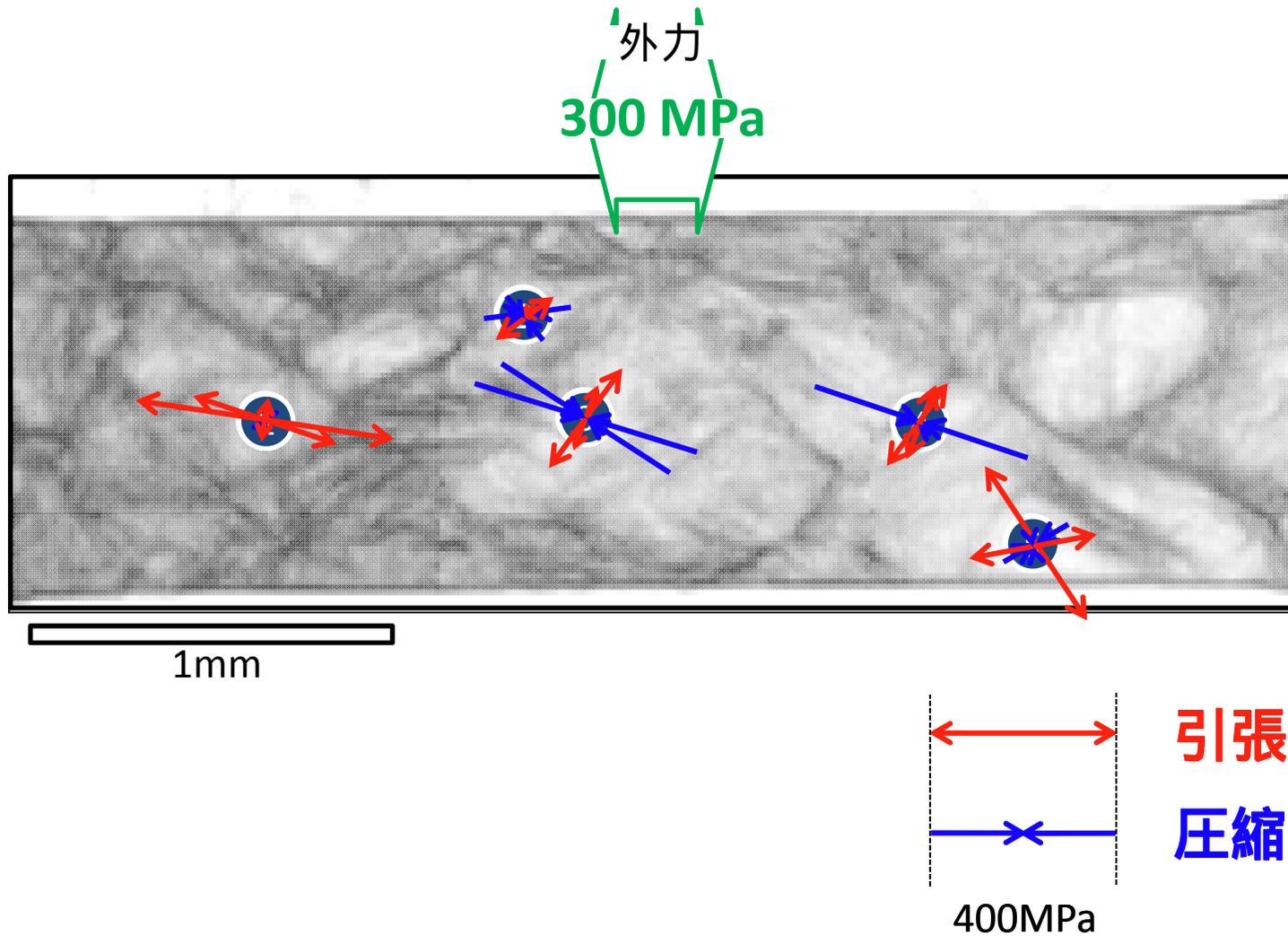
0 MPa



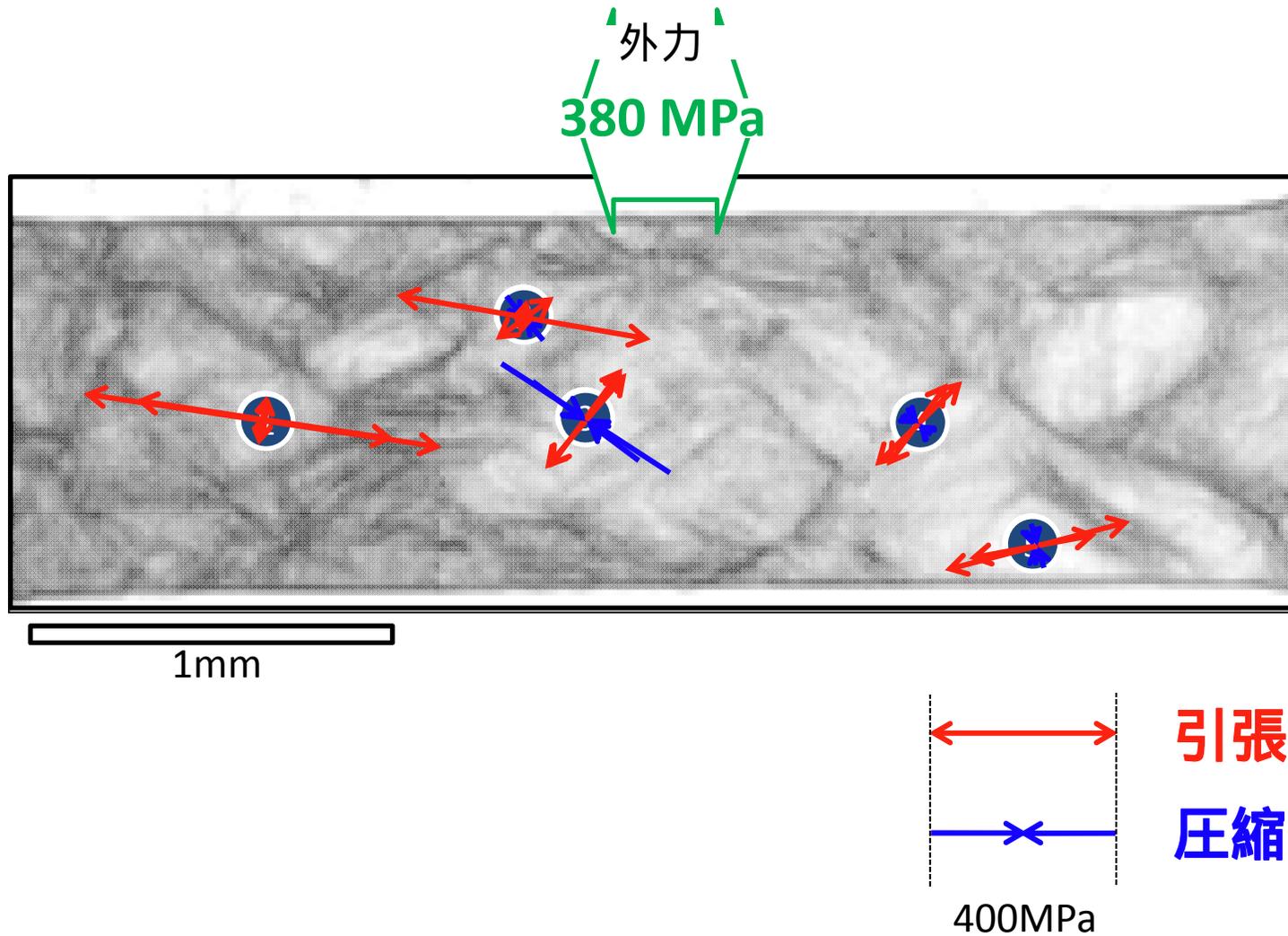
1mm



# 結果 内部応力分布

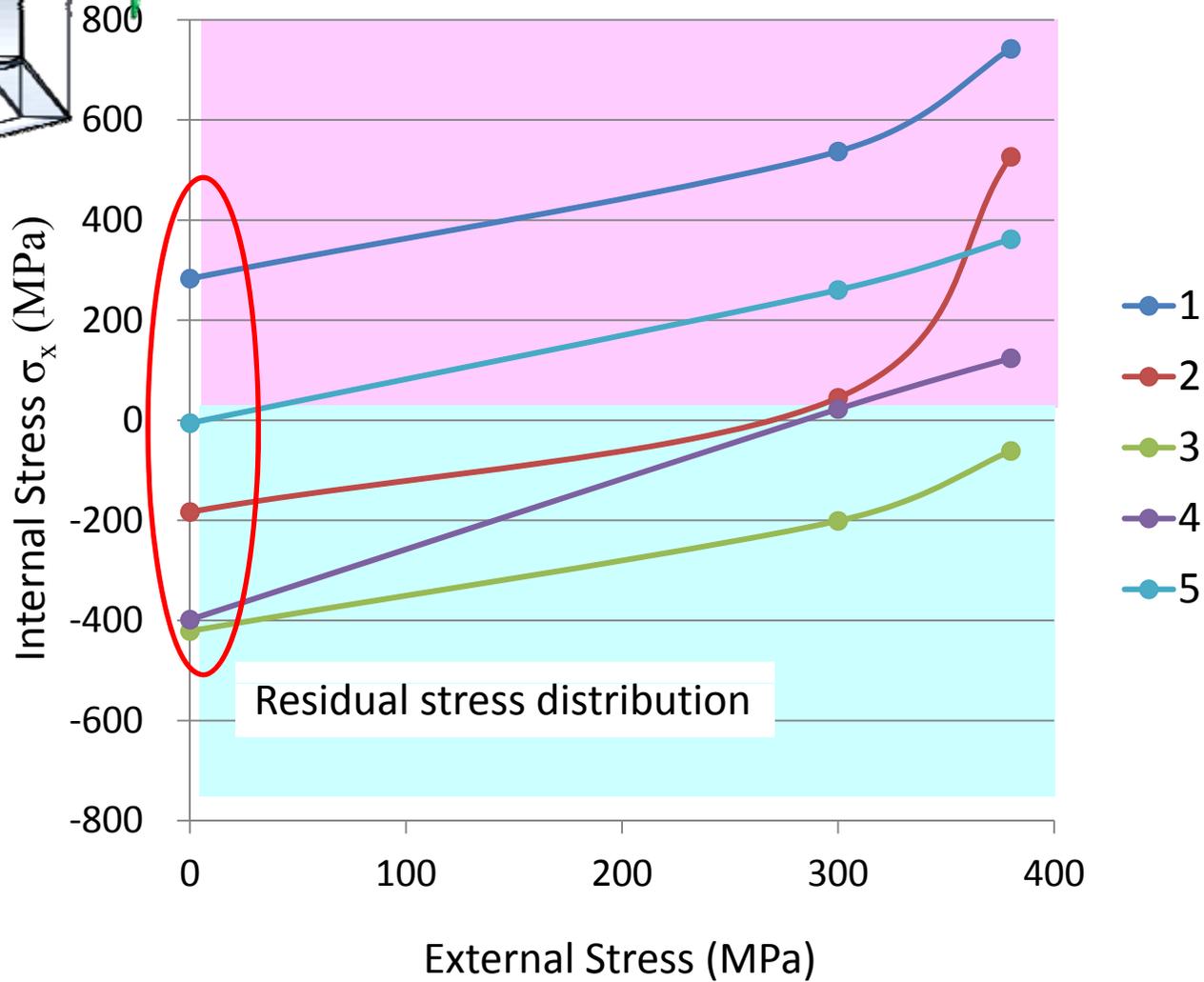
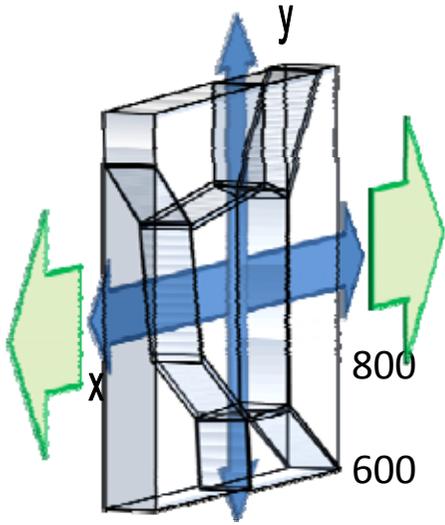


# 結果 内部応力分布

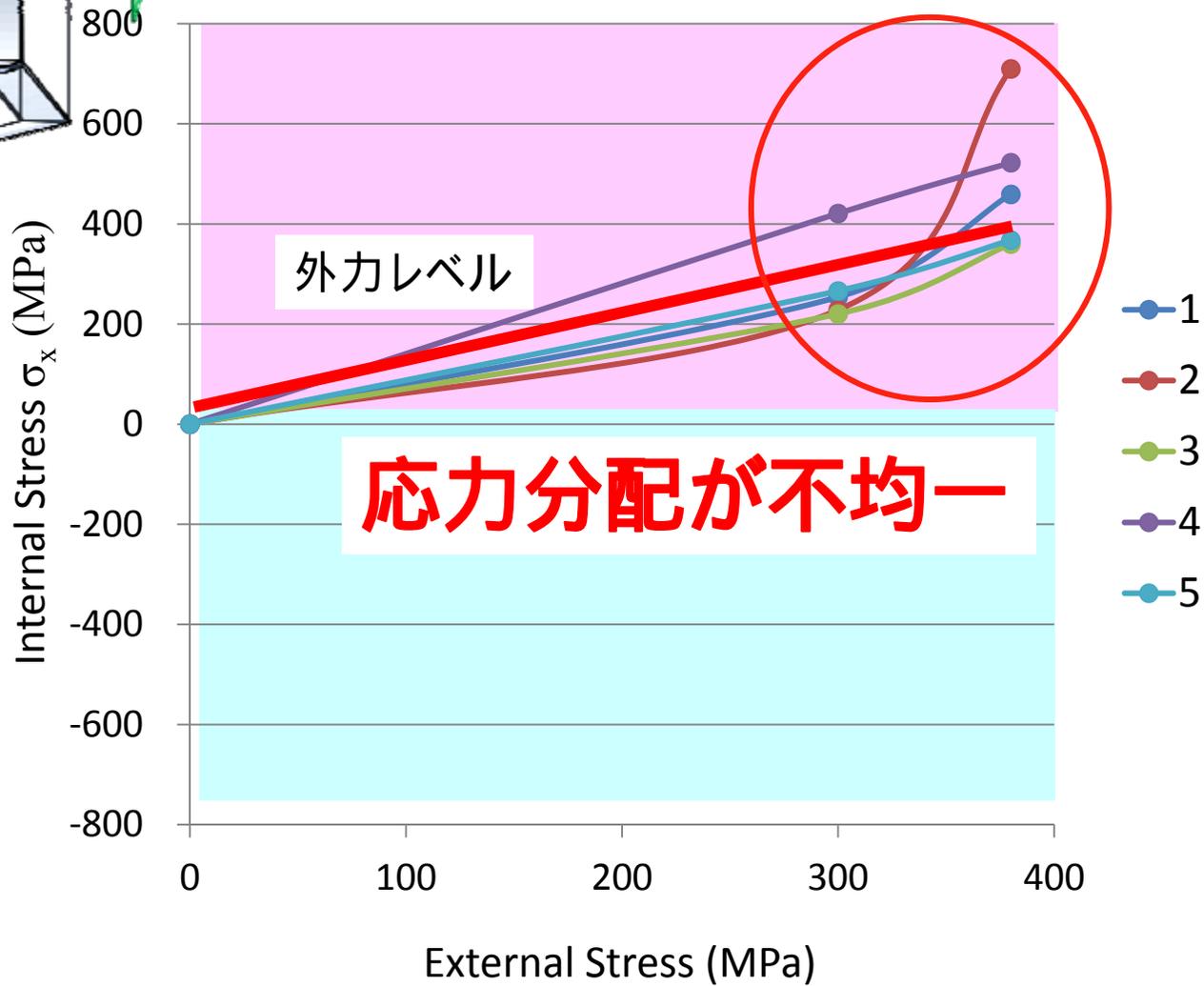
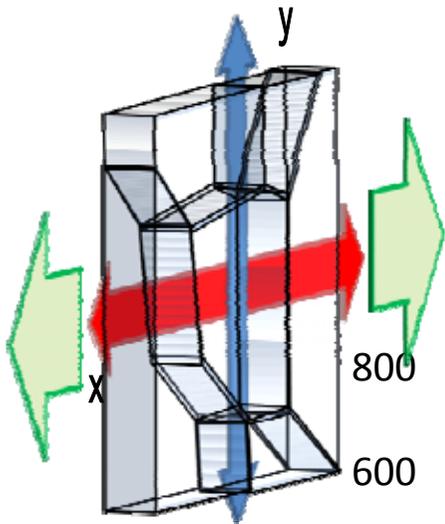


# 結果

## $\sigma_x$ VS 外力



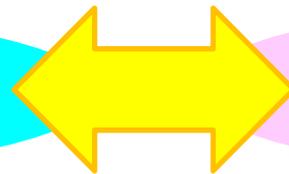
# 結果 応力分配



# まとめ

- ◆ 白色X線マイクロビームX線回折を応用した金属結晶組織中の内部応力マイクロ分布測定技術 (**EXDM: Energy-dispersive X-ray Diffraction Microscopy**)を開発
- ◆ SUS316 ステンレス鋼(冷間加工度20%)の引張外力下における結晶粒単位の内部応力評価
  - ✓ 不均一な残留応力分布の検出
  - ✓ 不均一な内部応力分配の検出

組織の不均一性



材料機械特性