

# Ni-Cr合金の粒界における塑性変形挙動のマクروسケールその場観察

In-situ macroscale observation of plastic deformation behavior in the vicinity of grain boundaries in Ni-Cr alloy

## 背景

粒界強化：延性・靱性を損なわず強化可能

Hall-Petchの式

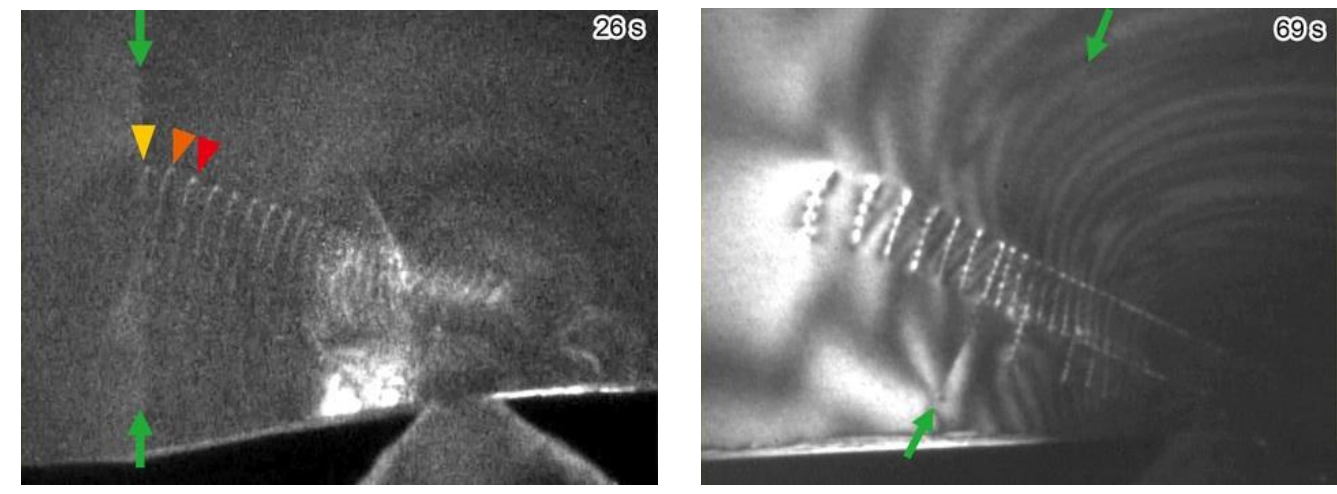
$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

← 粒界の平均の  
変形抵抗

粒界ごとに、変形抵抗として  
働く度合いが異なる。

個々の粒界の変形挙動をより  
詳細に捉えることが材料の更なる  
高強度化につながる。

TEM 内ナノインデンテーション試験  
高角粒界 低角粒界



転位が粒界に堆積 転位が粒界を越えて伝播

S. Kondo, T. Mitsunaka, N. Shibata and Y. Ikuhara, Science Advances, vol. 2, No. 11 (2016)

課題：実験手法の難しさ、サイズ効果の影響

## 目的

汎用のインストロン型引張試験を用いた粒界の変形挙動観察手法の確立  
→粗大粒試験片を用いた塑性変形挙動のマクروسケールその場観察

粗大粒 (数1000 μm)

- 個々の粒界の塑性変形挙動を観察
- 隣接結晶粒の相対方位に着目

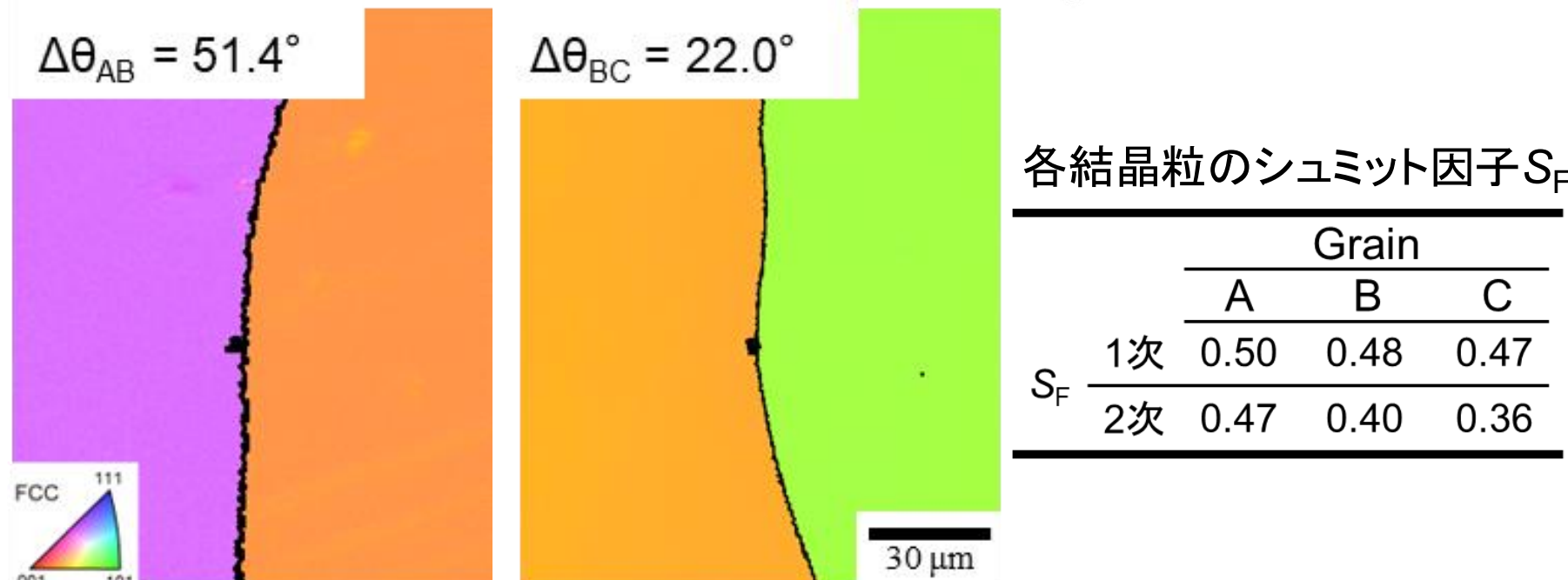
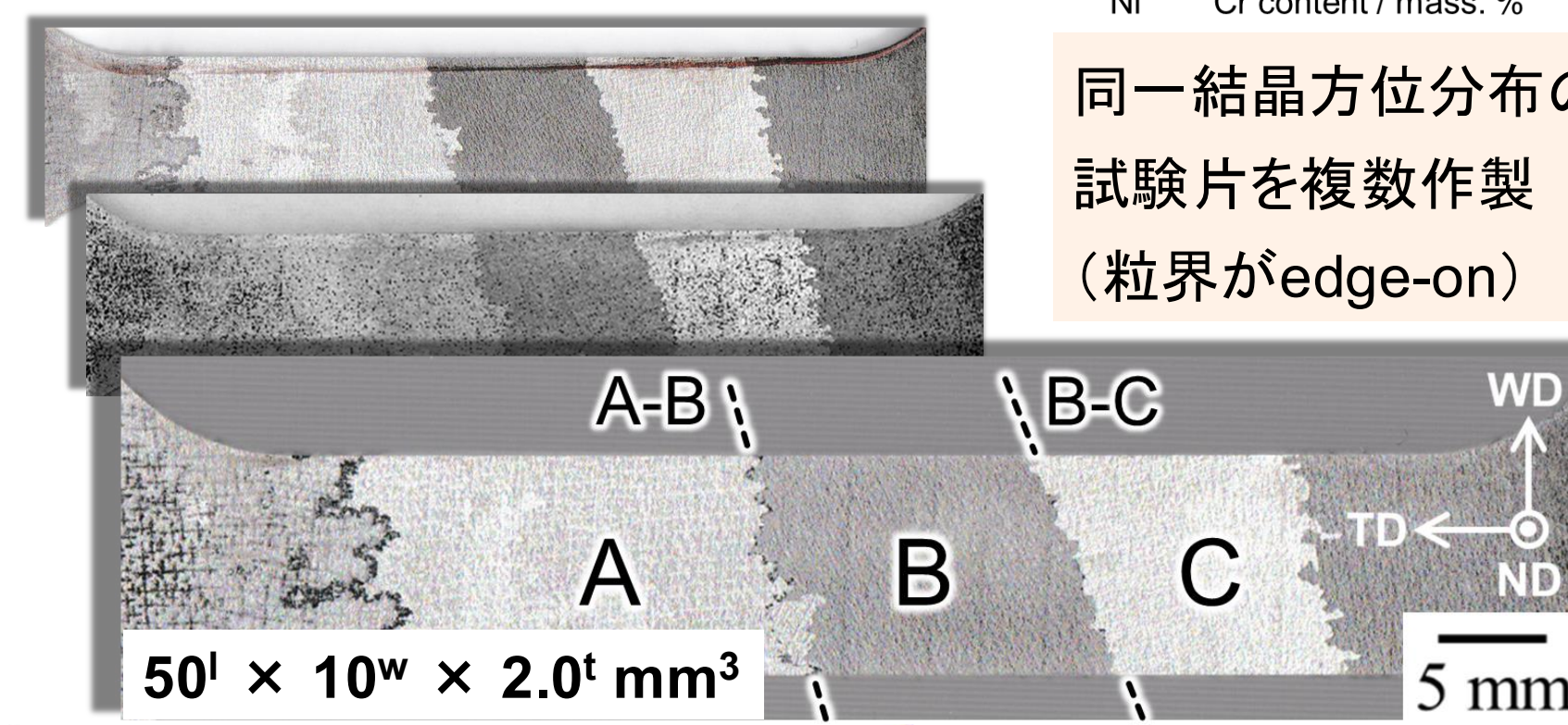
## 試料作製

合金組成 : Ni-45mass%Cr

溶製方法 : 砂型鋳造法

溶体化熱処理 : 1250°C / 6 h

試験片外観と初期組織

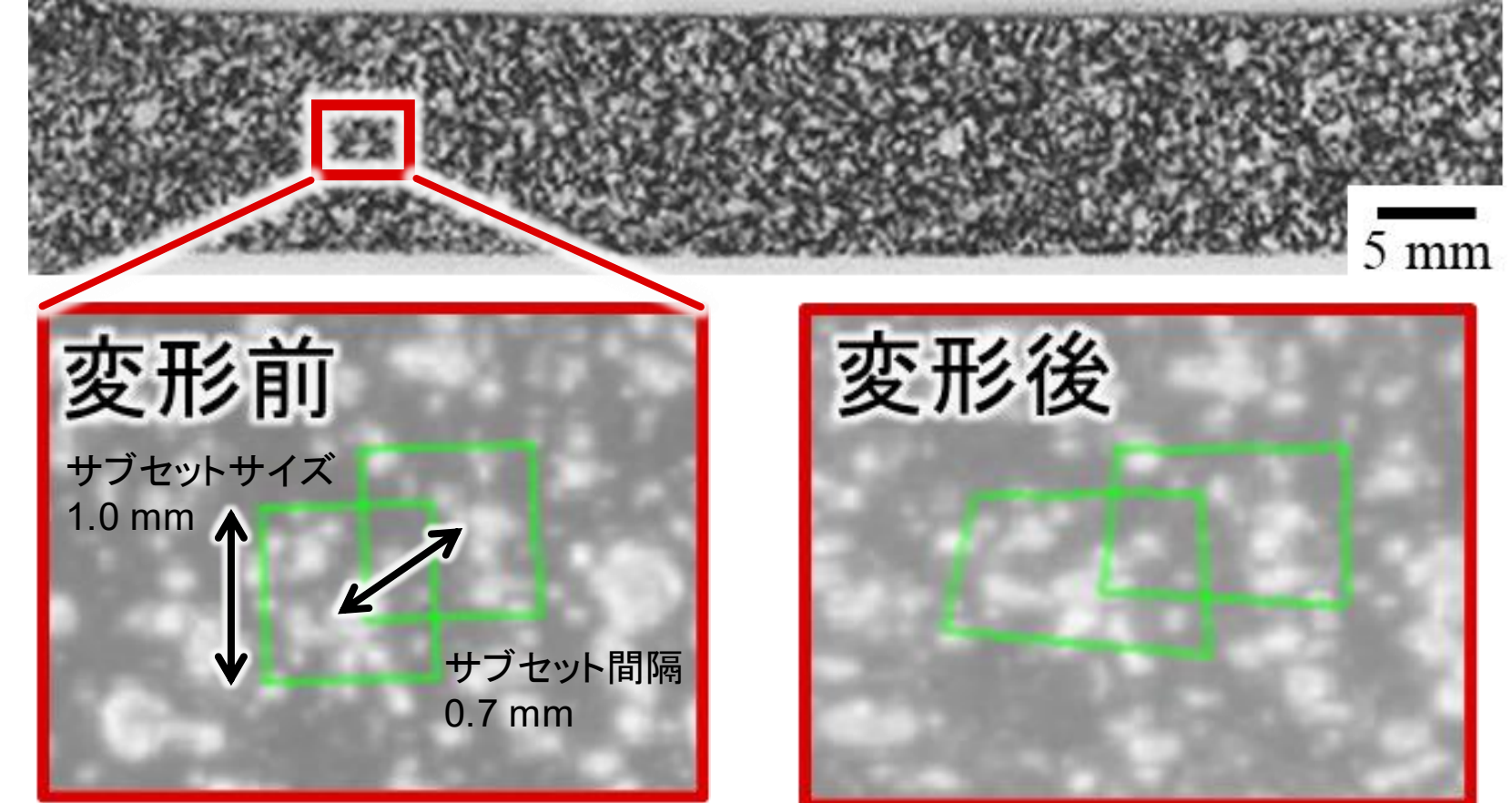


## 引張試験

ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_N = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

ひずみ測定：デジタル画像相関法(DIC)

DIC用ランダムパターンニング



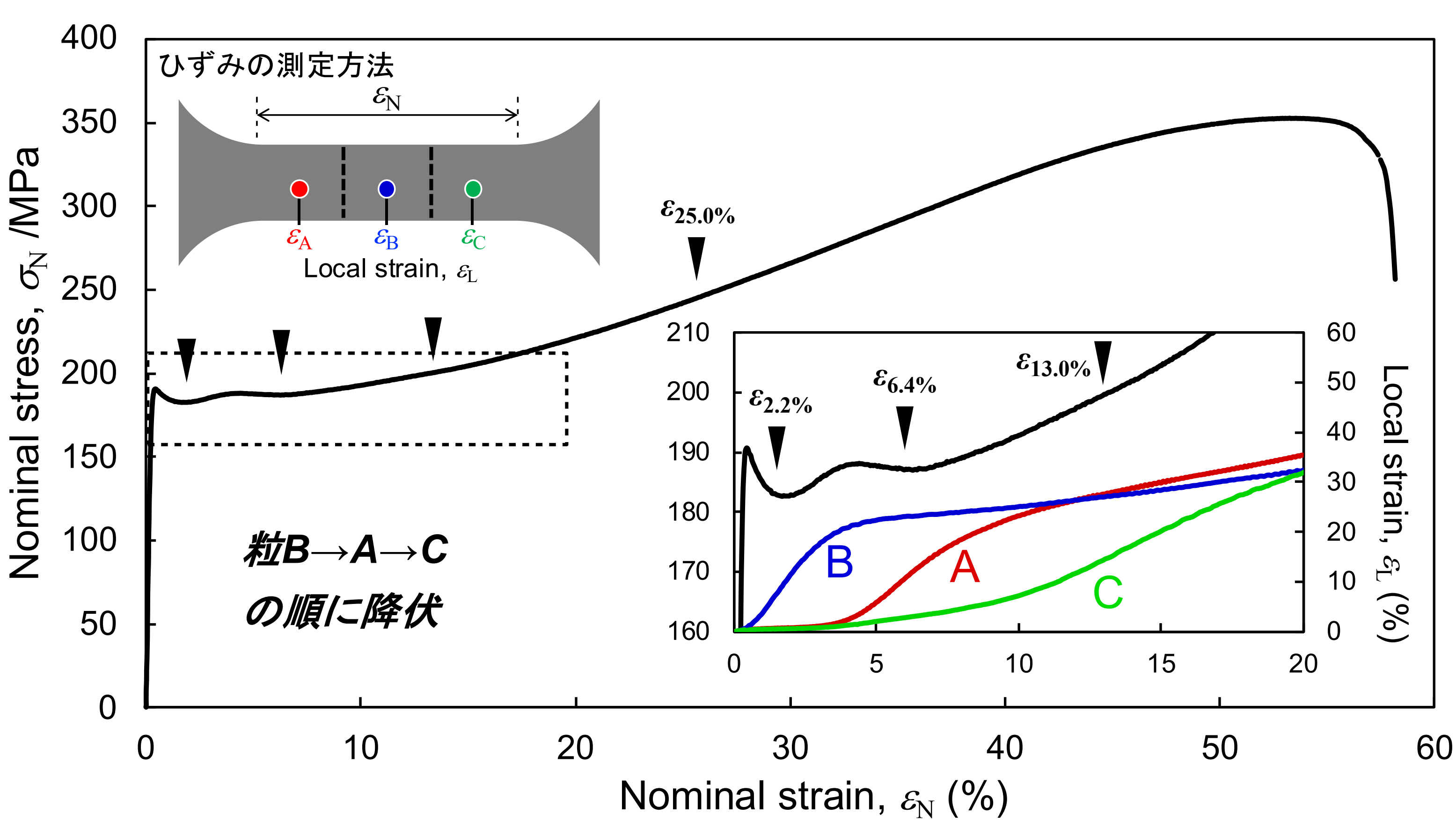
変形勾配

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

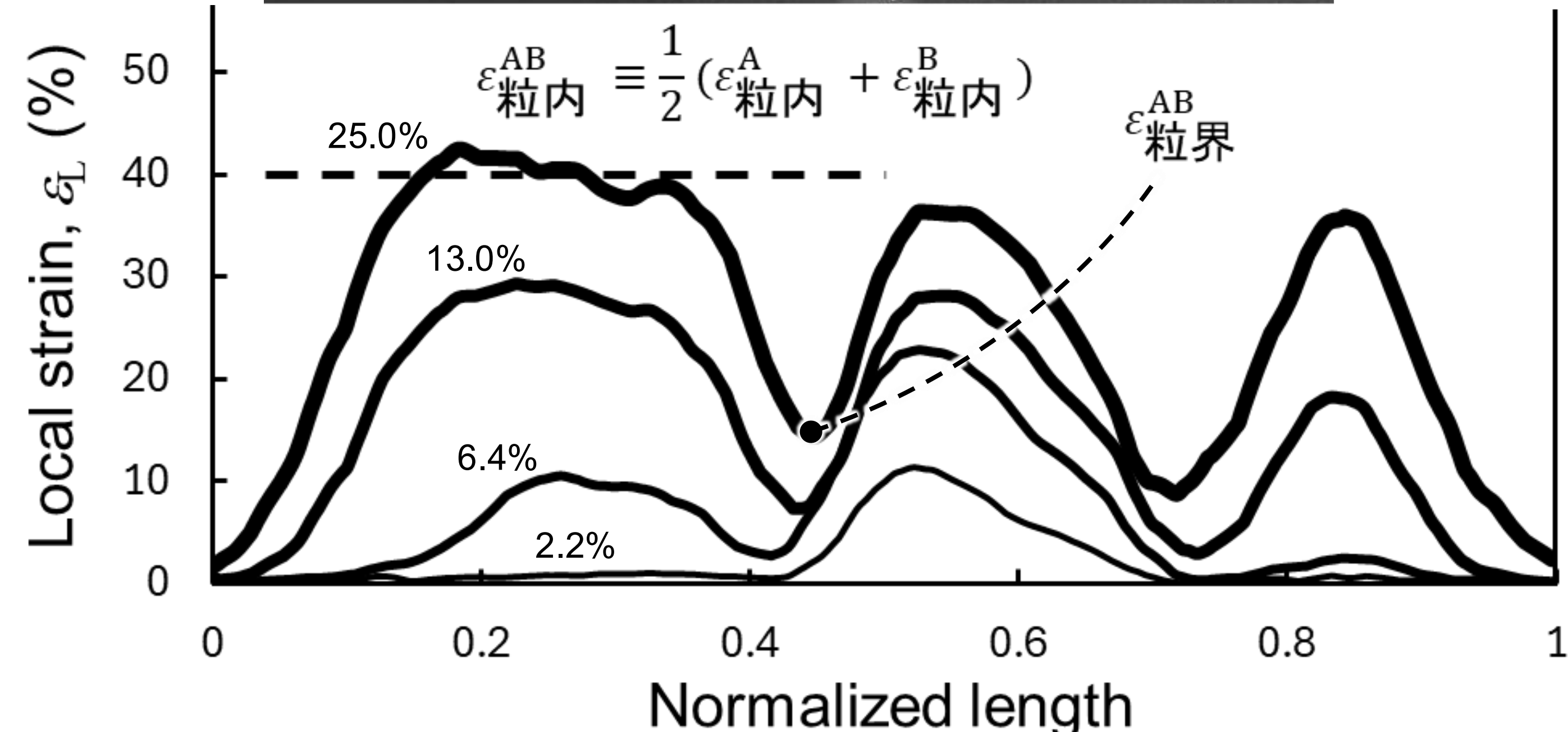
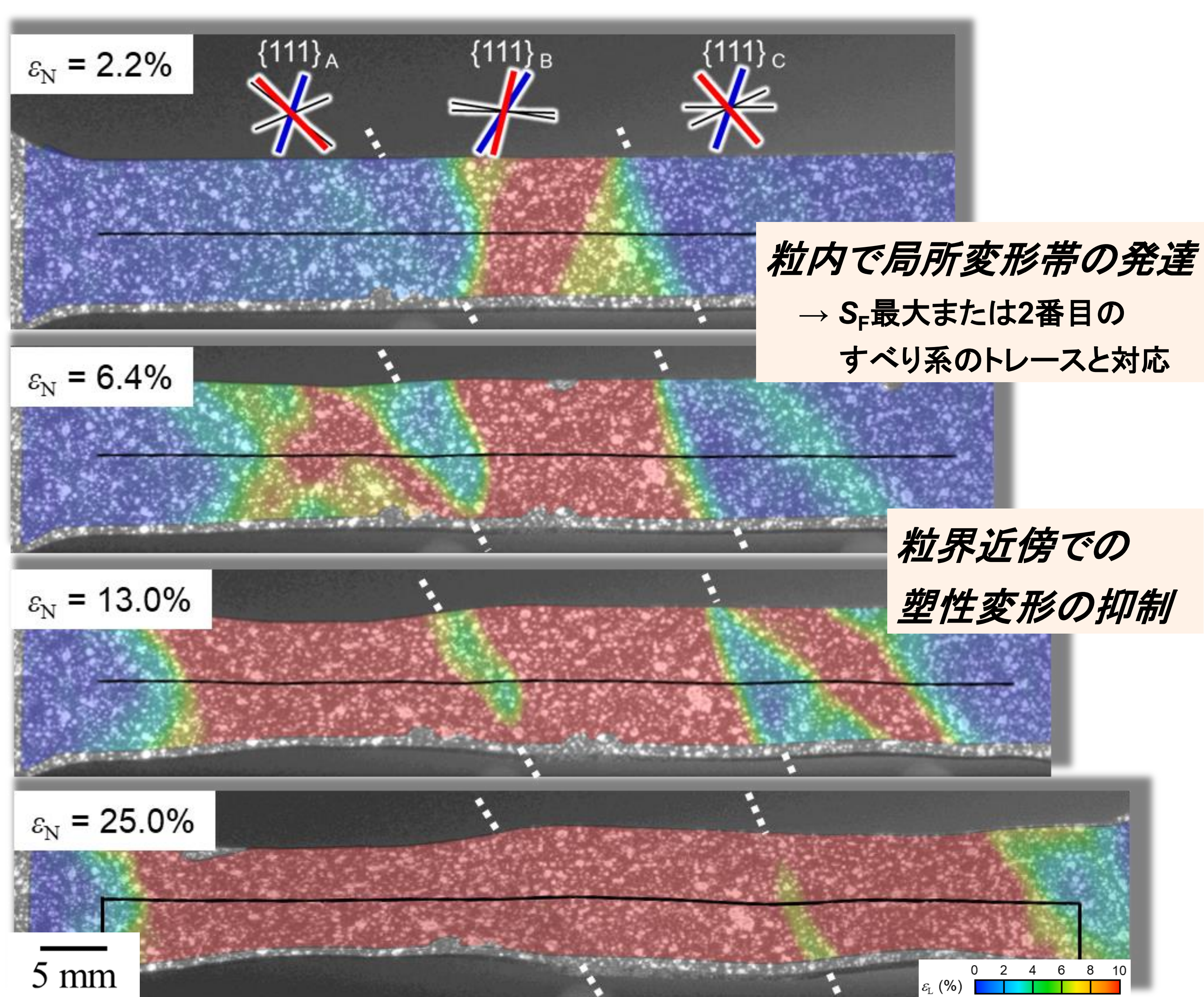
ひずみ  $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

サブセット単位でFを取得 → ひずみ  $\epsilon_{ij}$  をマッピング

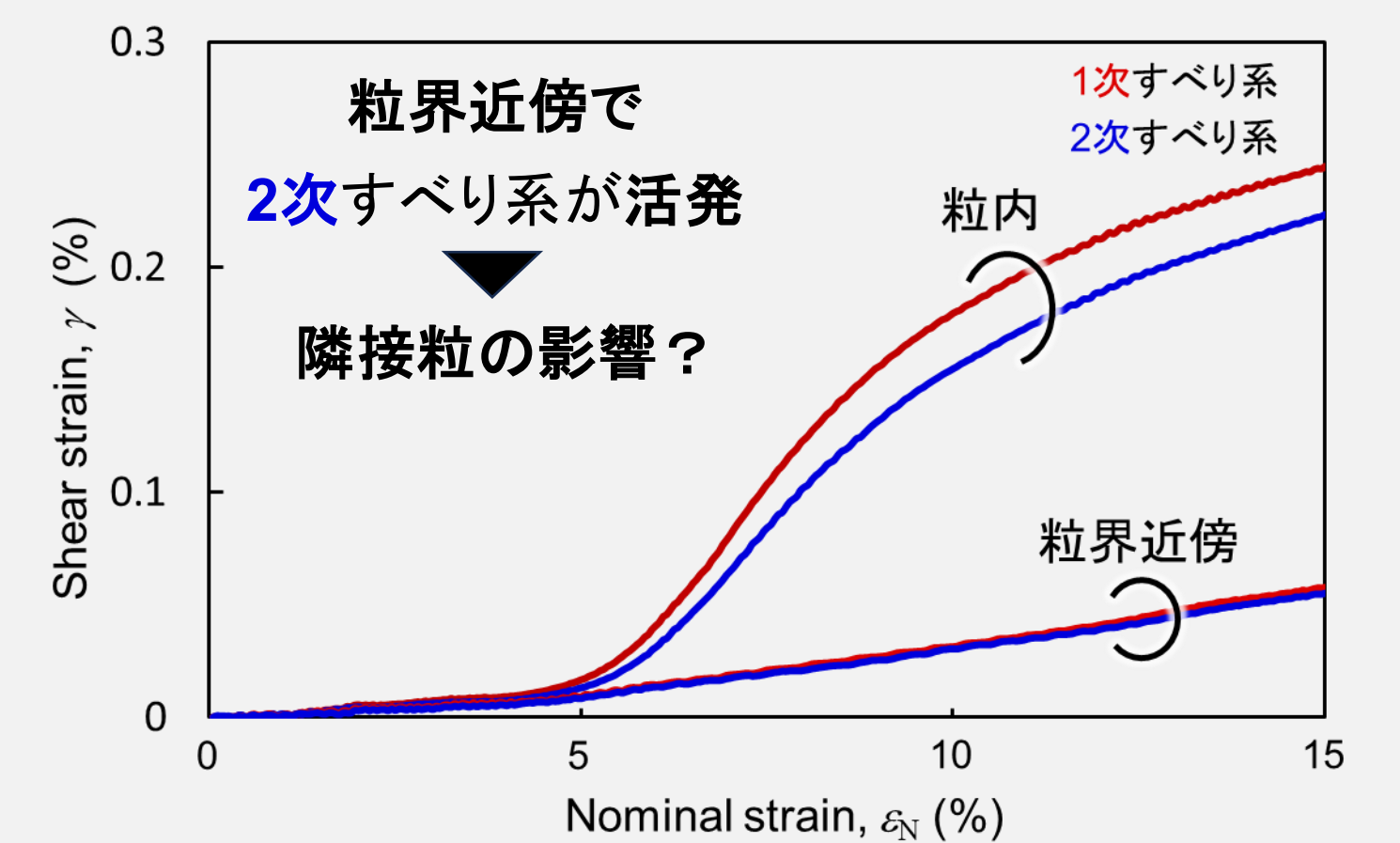
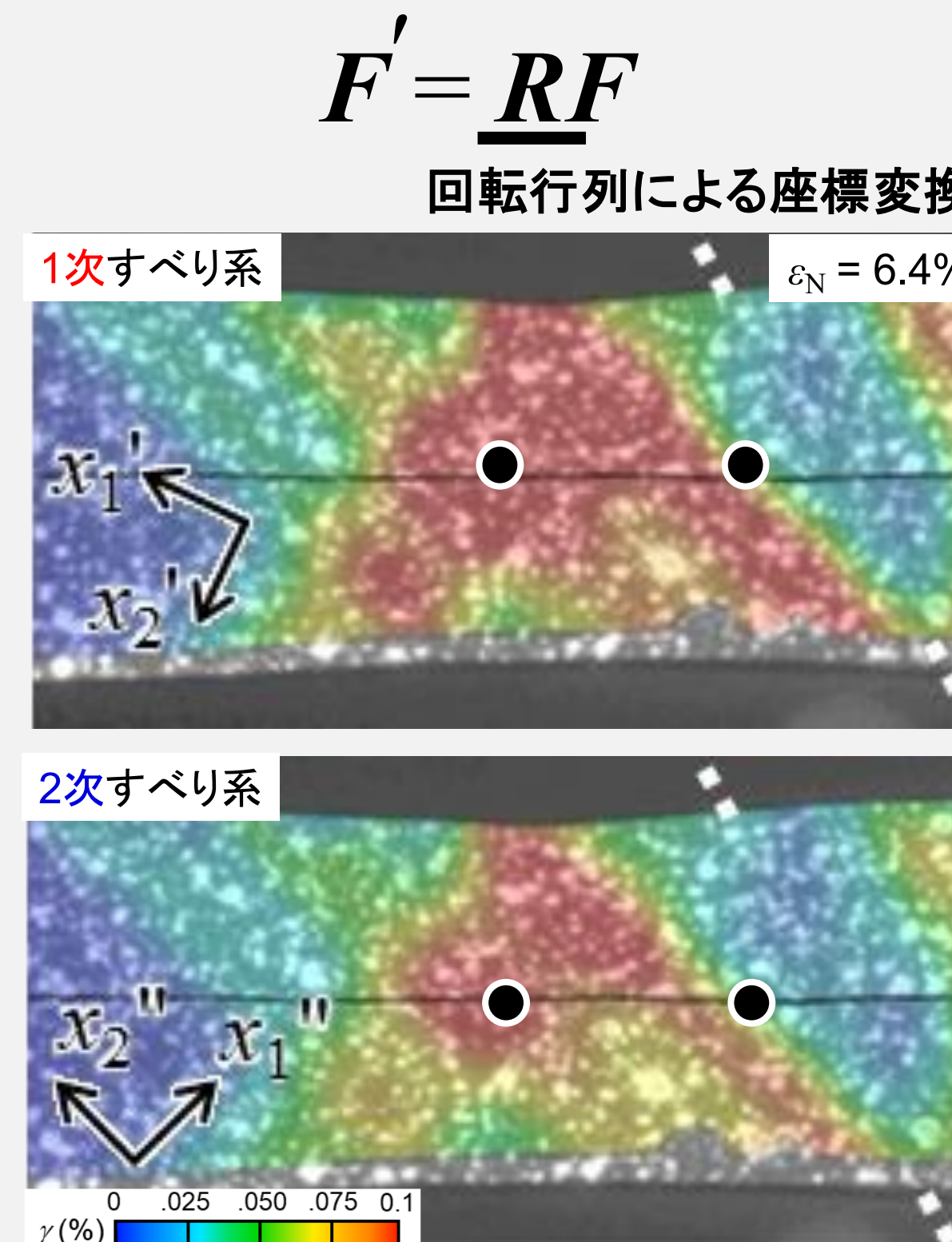
## 引張試験中の局所ひずみのその場観察



## 垂直 $\epsilon_{xx}$ ひずみの二次元マッピング



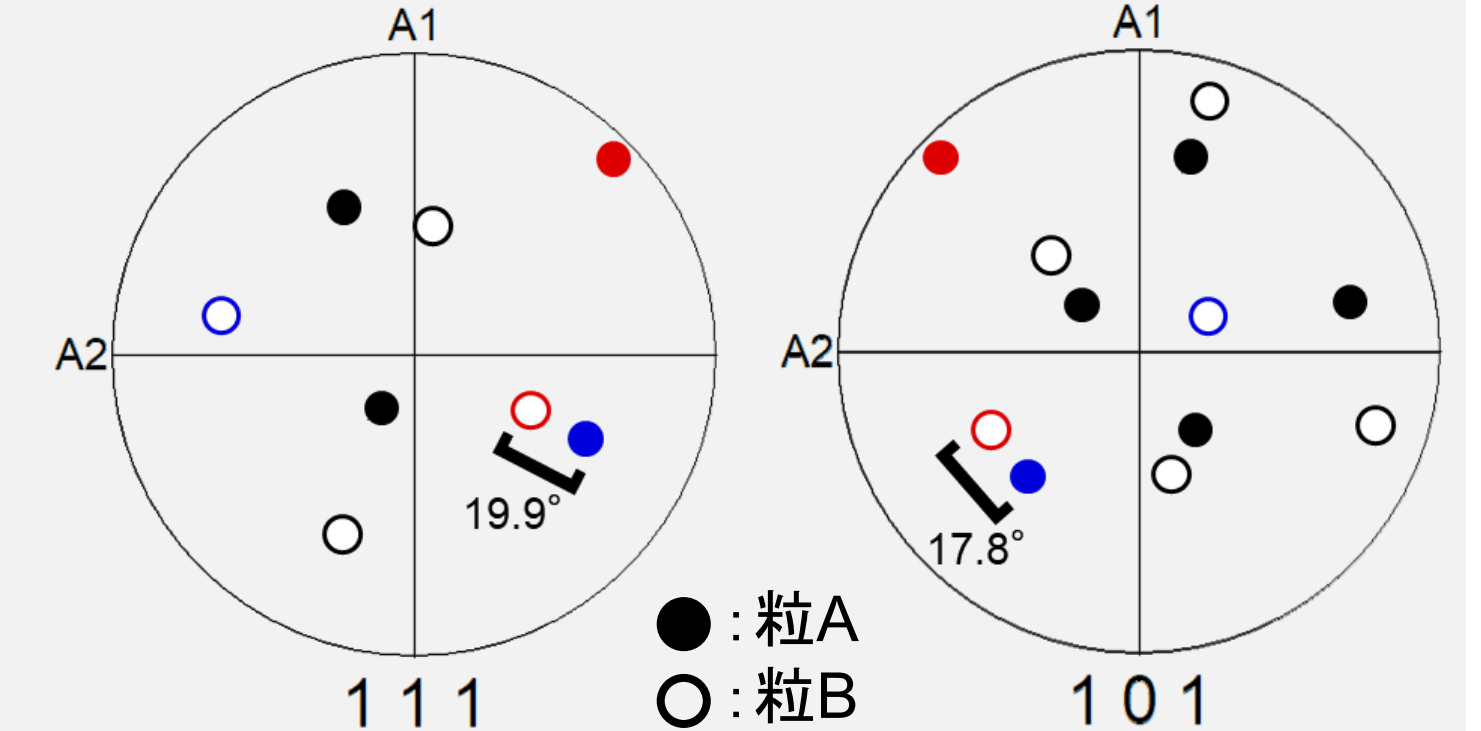
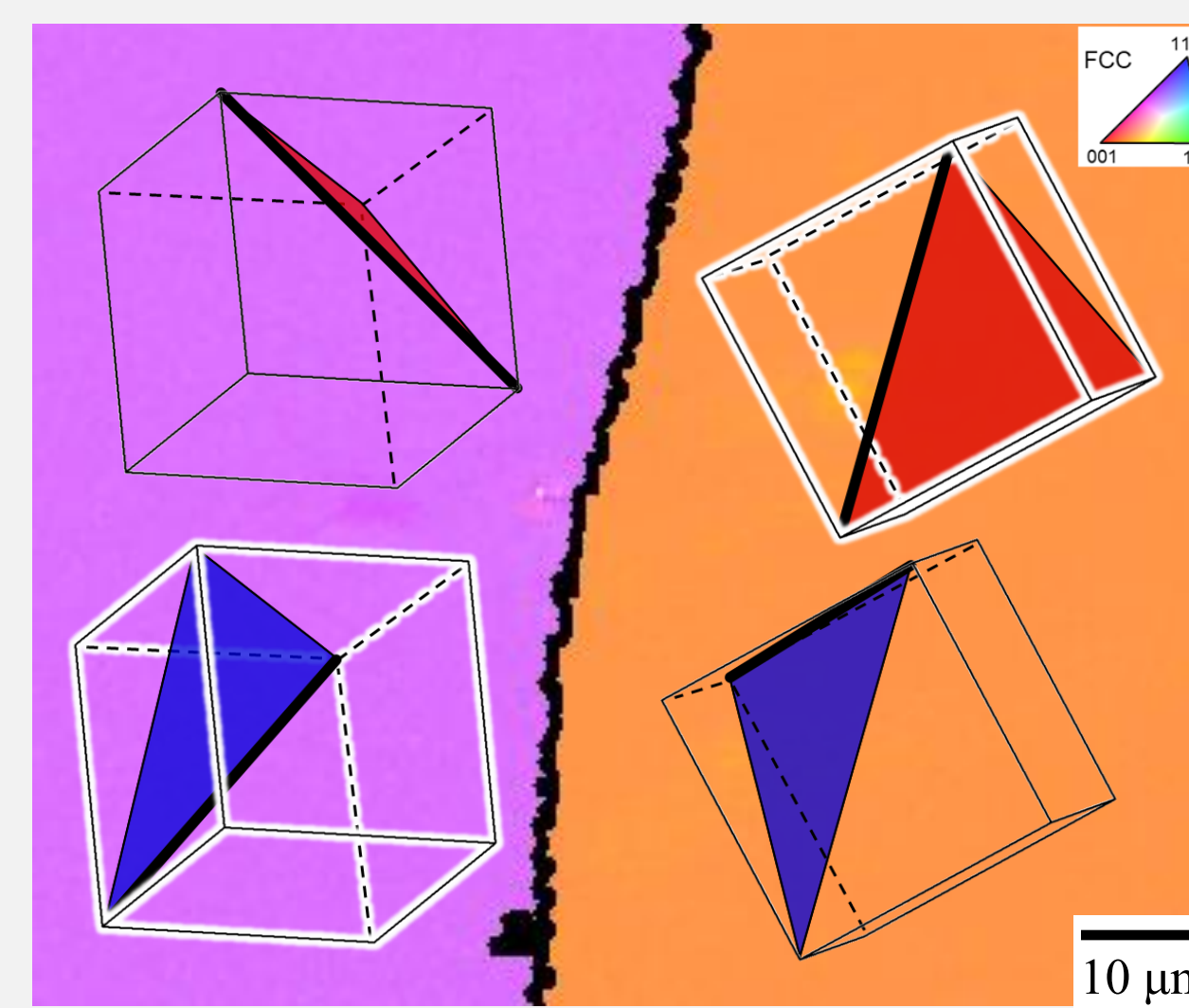
## すべり系ごとのせん断ひずみ $\gamma$ の算出



1次すべり系と2次すべり系のせん断ひずみの比

	A	B	C
$\gamma_1$ / 粒内	1.19	0.58	1.20
$\gamma_2$ / 粒界近傍	1.03	0.83	0.75

## 粒界近傍の変形に及ぼす活動すべり系の影響



粒界近傍ではすべり面とすべり方向が  
ともに近いすべり系が活動

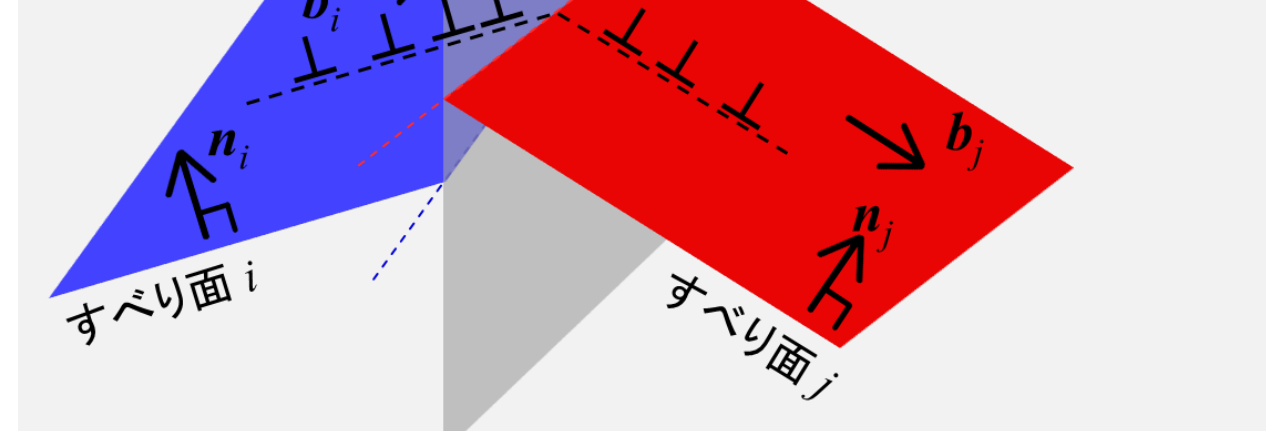
幾何学的適合係数

$$m = \frac{(n_i \cdot n_j)(b_i \cdot b_j)}{|b_i||b_j|}$$

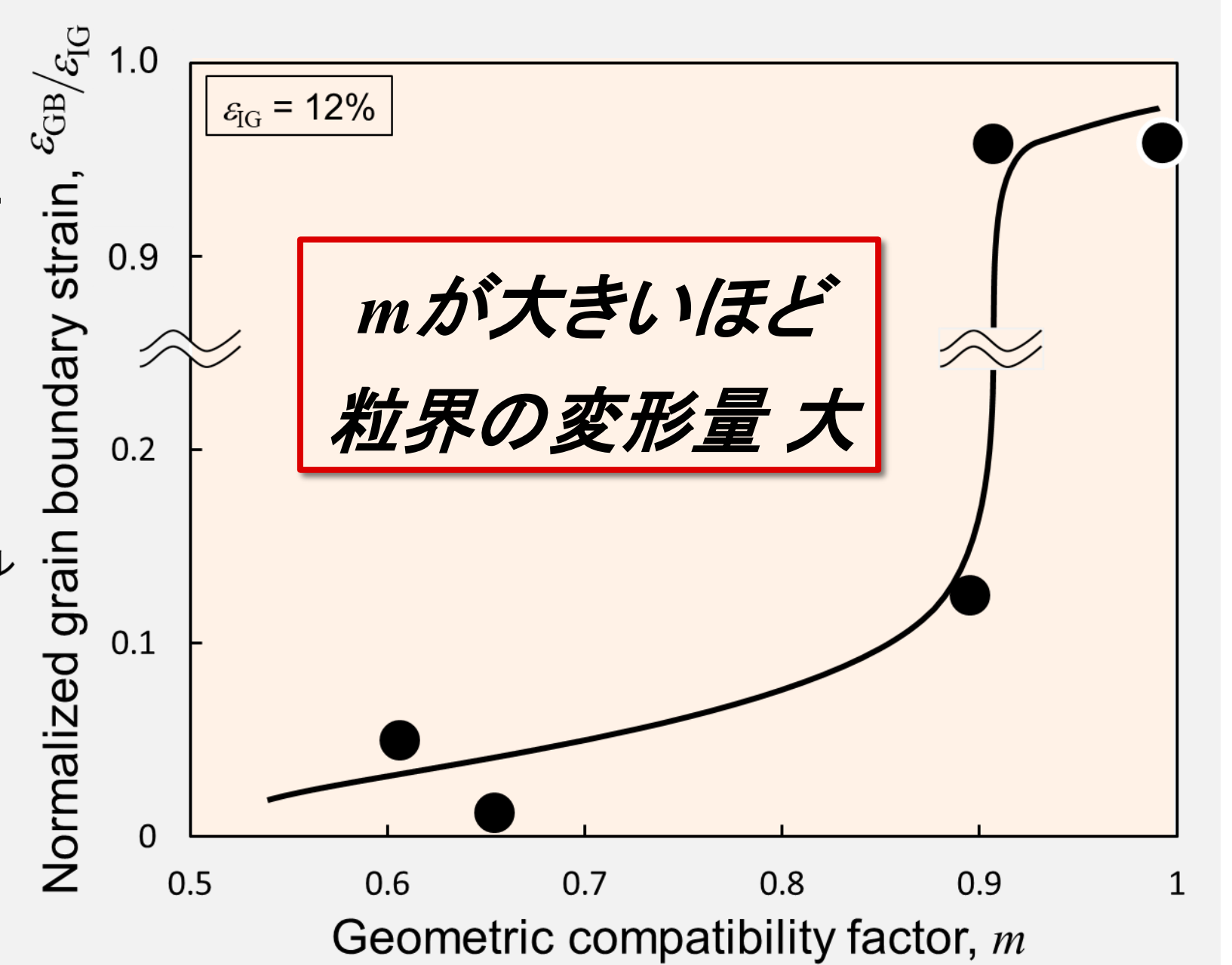
(0 ≤ m ≤ 1)

b: バーガスベクトル

n: すべり面法線ベクトル



J. Luster and M.A. Morris, Metall. Mat. Trans. A, 26 (1995), 1745-1756.



## 結言

- 粒界では粒内と比較して塑性変形が著しく抑制される。
- 粒界近傍では、隣接した粒のすべり系と幾何学的に近いすべり系が活動する。
- 粒界での塑性変形はすべり系の整合性を加味した粒界性格によって整理できる。

## 謝辞

本研究は、本研究は公益財団法人JKAの補助により実施されました。