

# ナノ領域・マクロ領域での強度解析の紹介

## ナノ領域

- ・原子炉圧力容器の照射脆化に関する原子レベルの解析

## マクロ領域

- ・耐圧PETボトルの強度解析

岡山県立大学 情報工学部 情報システム工学科  
福田忠生

## 中性子照射脆化のマイクロ機構

### 材料の硬化に対応する 脆化マイクロ因子

#### Cu析出物

その他の析出物

MnNi析出物, リン化物,  
炭化物

欠陥クラスター

格子間原子集合体,  
空孔集合体

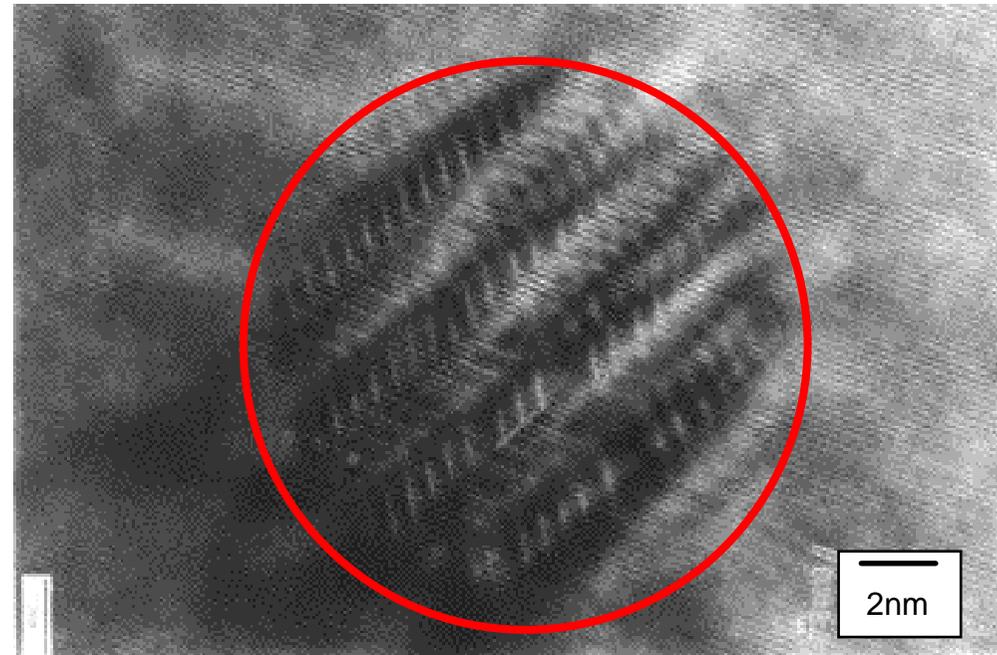
### 照射条件の脆化への影響

照射温度

フラックス効果

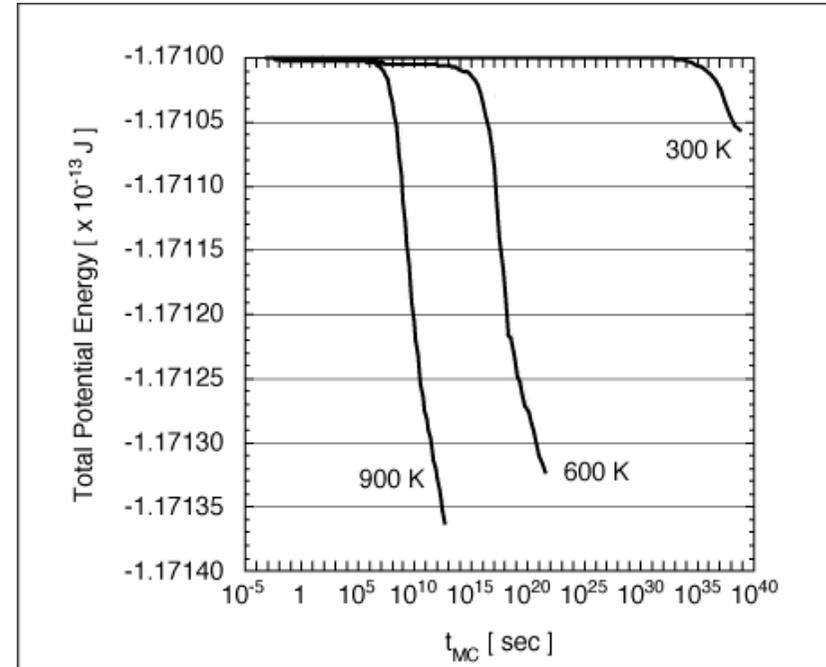
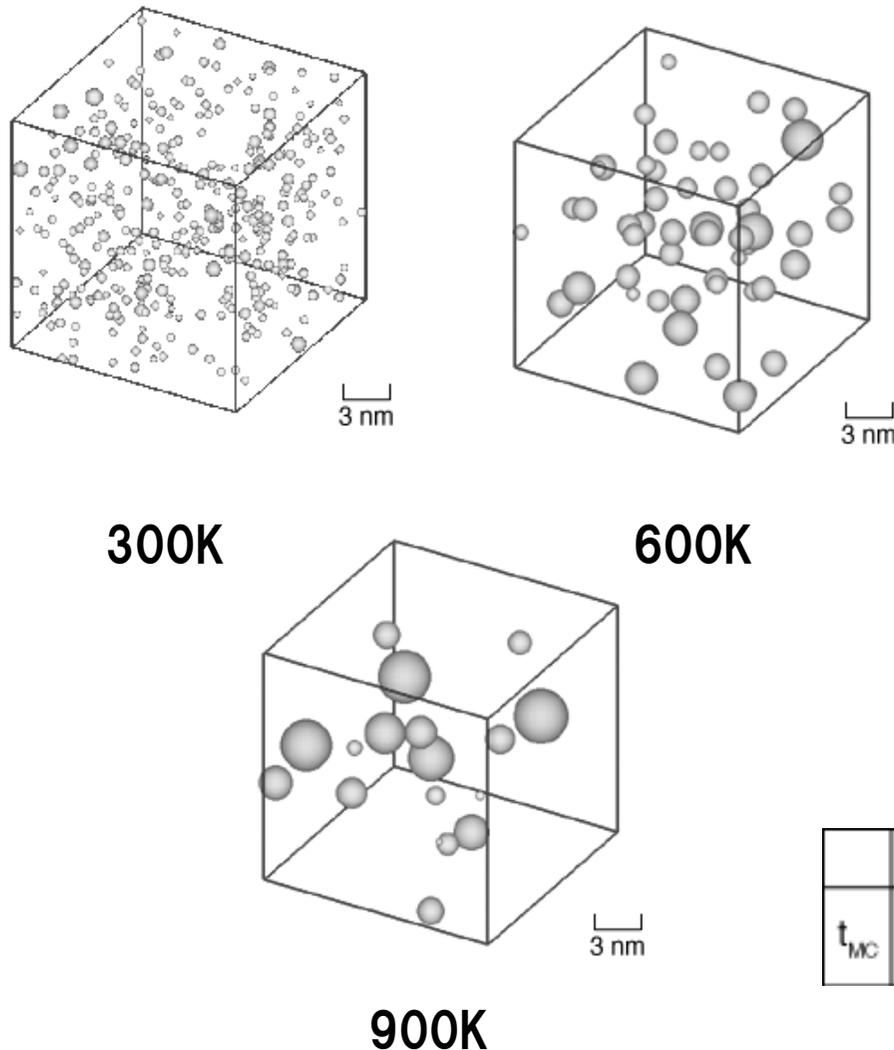
中性子スペクトルの効果

### HRTEM 観察によるナノレベルでの析出



Philosophical Magazine A, 1994, Vol. 70, No. 1, pp. 1-24  
By P. J. OTHERN et. al.

# 析出解析結果と総ポテンシャルエネルギーの変化

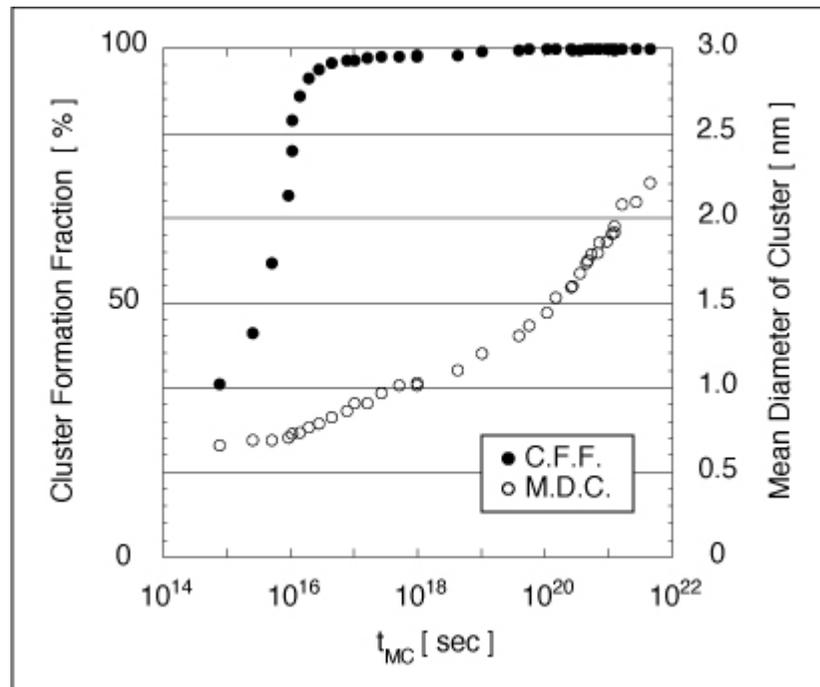


時間に伴うエネルギー変化

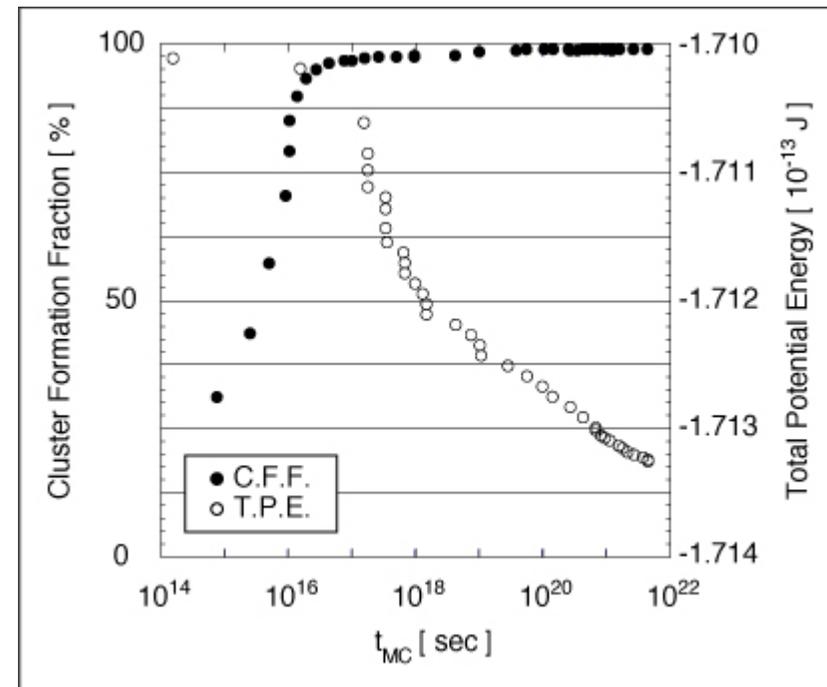
	300 K	600 K	900 K
$t_{MC}$	3114 year ( $6.8 \times 10^{38}$ sec)	26 year ( $8.4 \times 10^{21}$ sec)	1 day ( $5.6 \times 10^{12}$ sec)

# クラスタ形成率と平均クラスタ半径の変化

$$\text{クラスタ形成率} [\%] = \frac{\text{クラスタ化したCu原子数}}{\text{モデル内の総Cu原子数}} \times 100.0$$



時間に伴うクラスタ形成率の変化

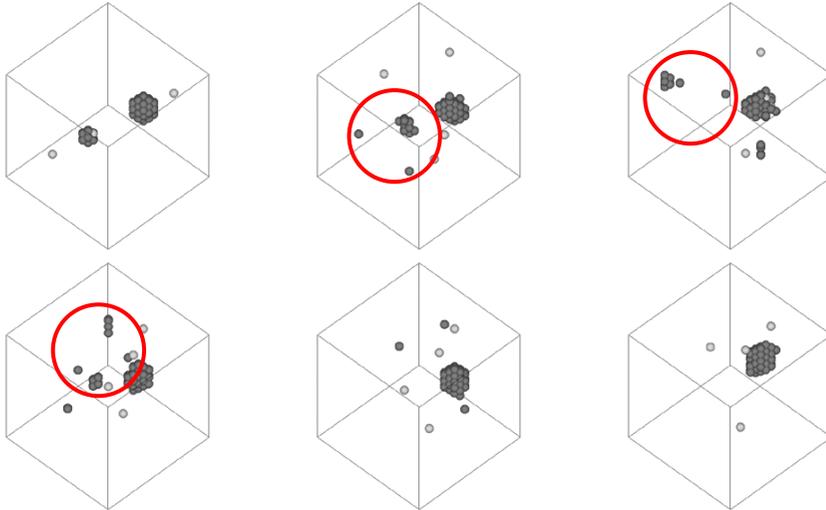


クラスタ形成率と平均直径の関係

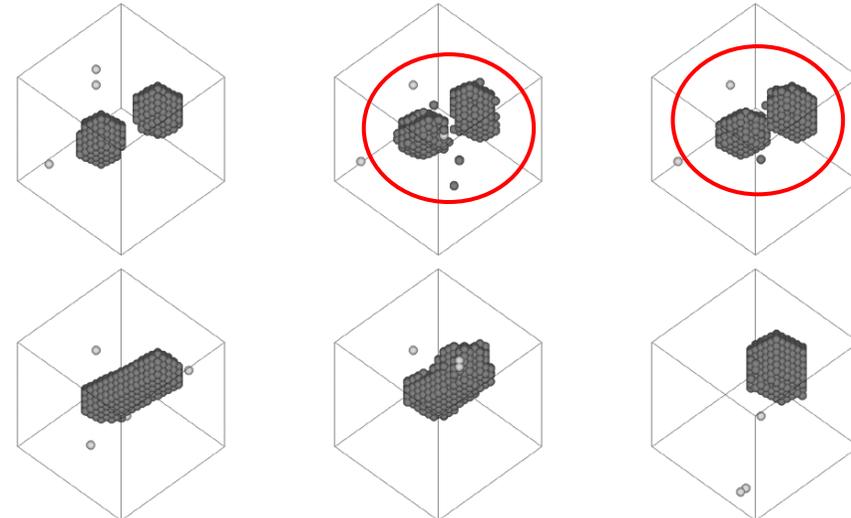
形成率100%未満の段階はナノクラスタの形成と飽和過程

形成率100%に達してからは平均直径の急激な上昇(クラスタの成長過程)

## クラスタ合体の詳細



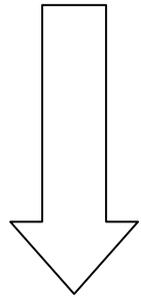
クラスタがさらに小さなクラスタに分離し、  
吸収合体されている



クラスタの分離はおこらず、  
クラスタが空孔を含んだまま移動、合体している

## 解析手法 -せん断ひずみ下-

### 圧力容器鋼の長期使用によるクラスタの形成および成長を確認

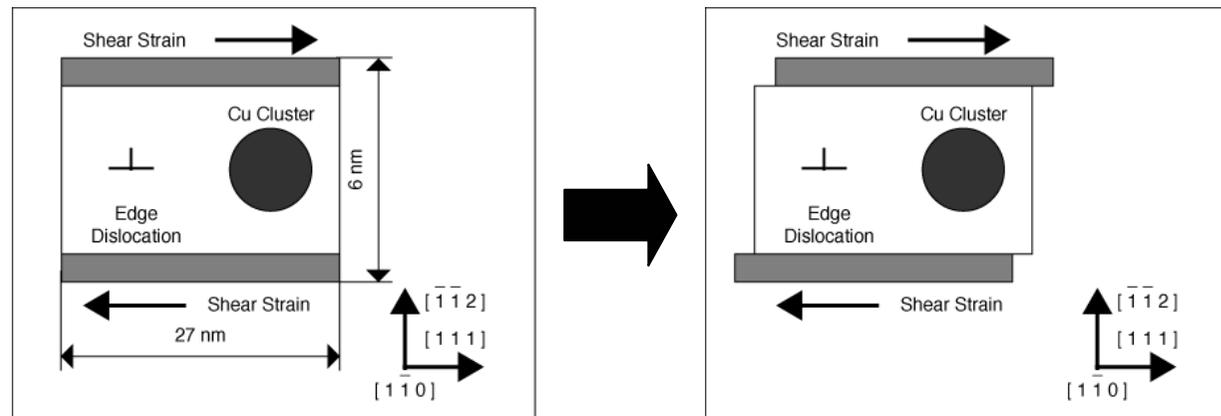


経年劣化(脆化)への影響

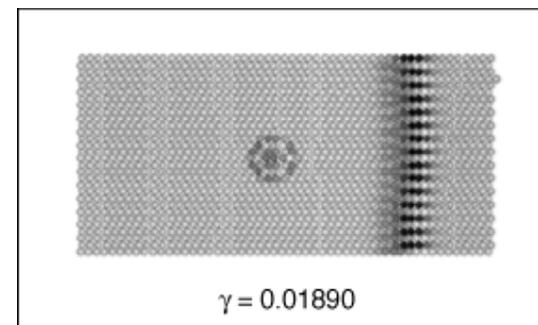
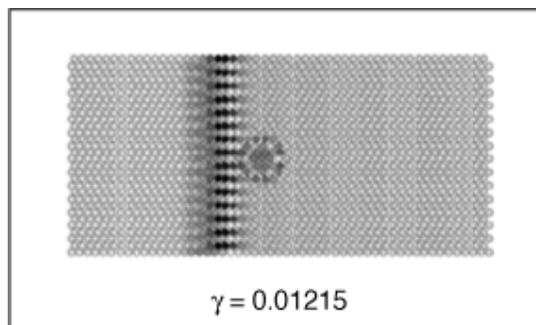
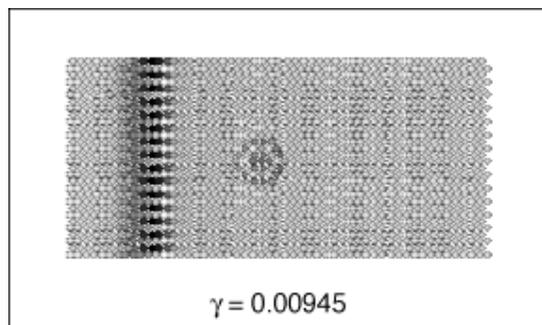
脆くなる = すべり変形にたいする変形能を低下

### 転位(刃状転位)へのピンニング効果

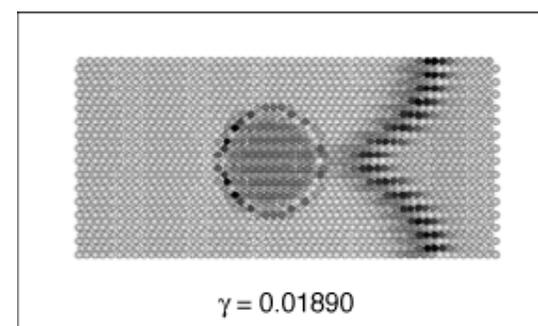
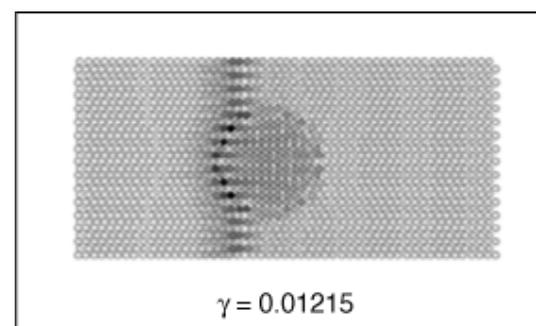
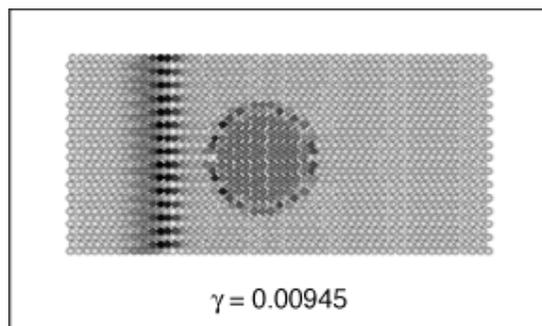
1 stepを1 fsec として,  
10,000 fsec の緩和計算後, 一様せん断ひずみを負荷



## 転位の運動観察

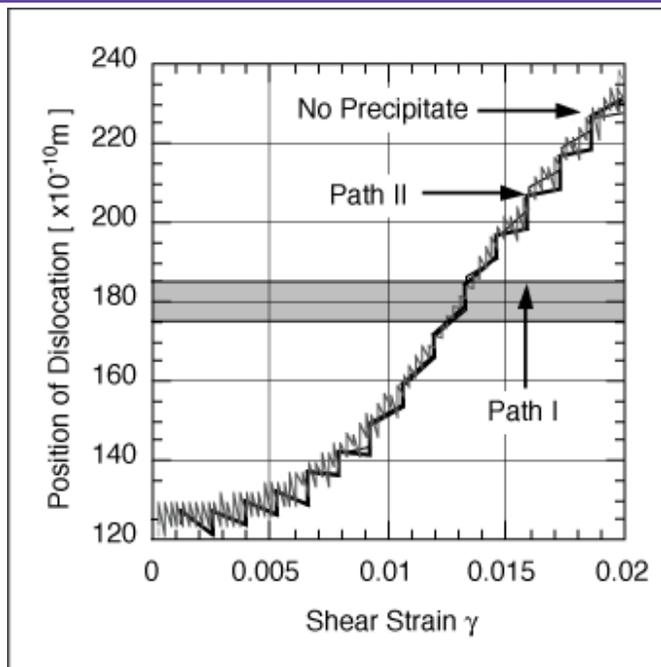


転位の運動 クラスタ直径 1 nm



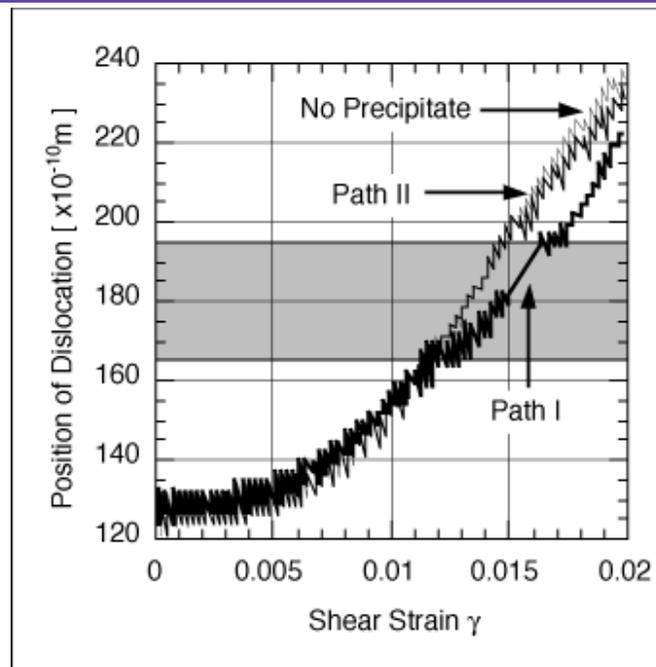
転位の運動 クラスタ直径 3 nm

## 積層欠陥エネルギーでの考察



転位位置の計測

Case 4-3-1(クラスター直径 1 nm)



転位位置の計測

Case 4-3-2(クラスター直径 3 nm)

### 積層欠陥エネルギーの比較

Cuが35%低く, 安定

	[ J/m <sup>2</sup> ]
BCC-Cu	1.1964
BCC-Fe	1.8391

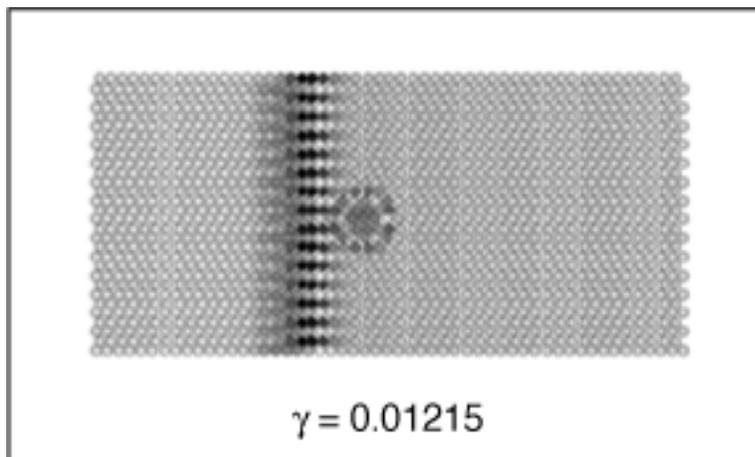
## 積層欠陥エネルギー

### 積層欠陥エネルギーの比較

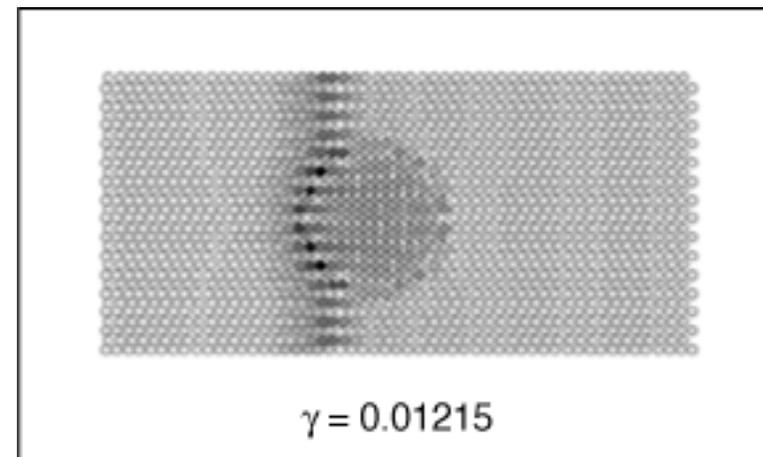
Cuが35%低く, 安定

	[ J/m <sup>2</sup> ]
BCC-Cu	1.1964
BCC-Fe	1.8391

拡張した刃状転位の運動 = 拡張転位 → 完全転位  
→ 拡張転位 → 完全転位 ...

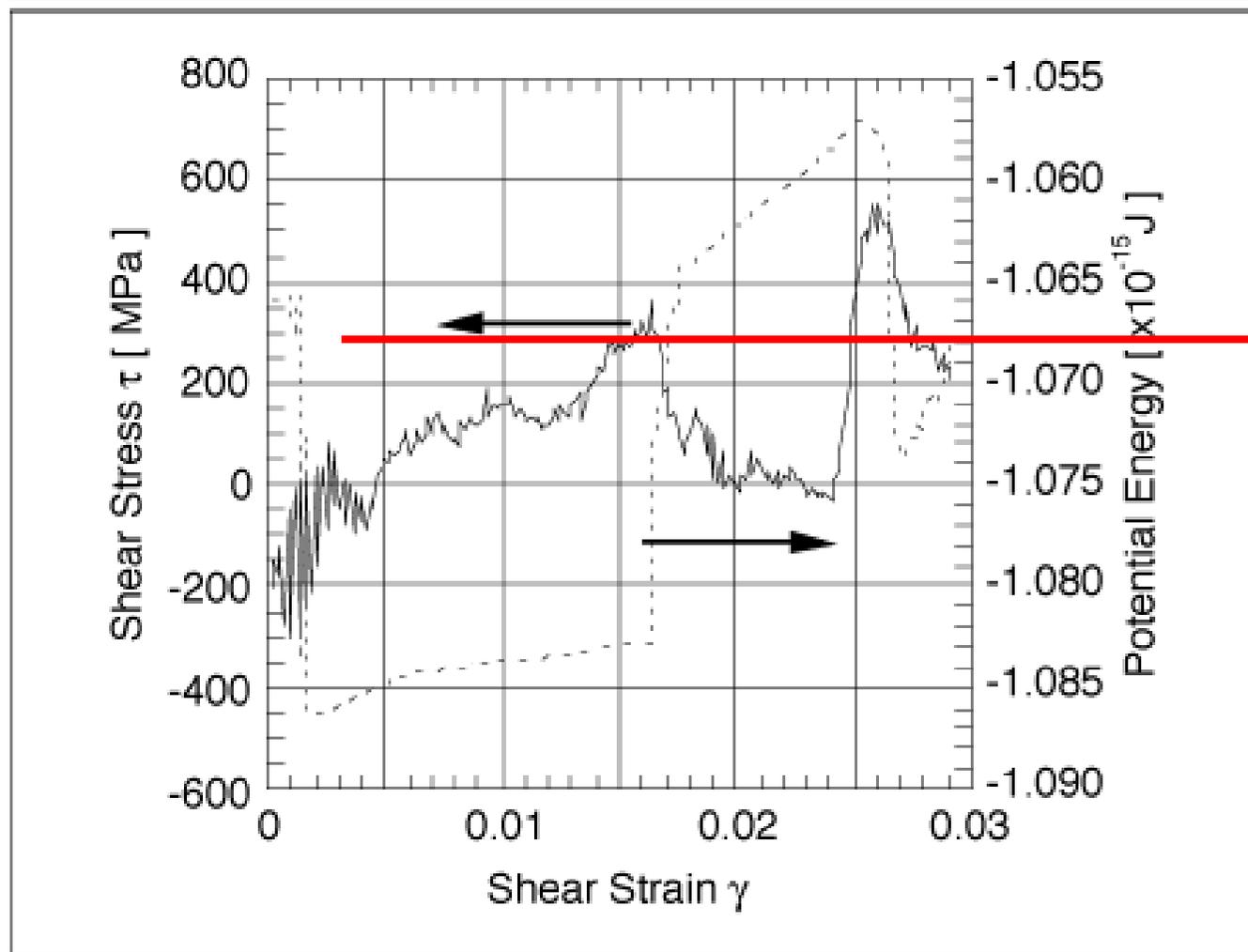


拡張転位の幅 > クラスタサイズ



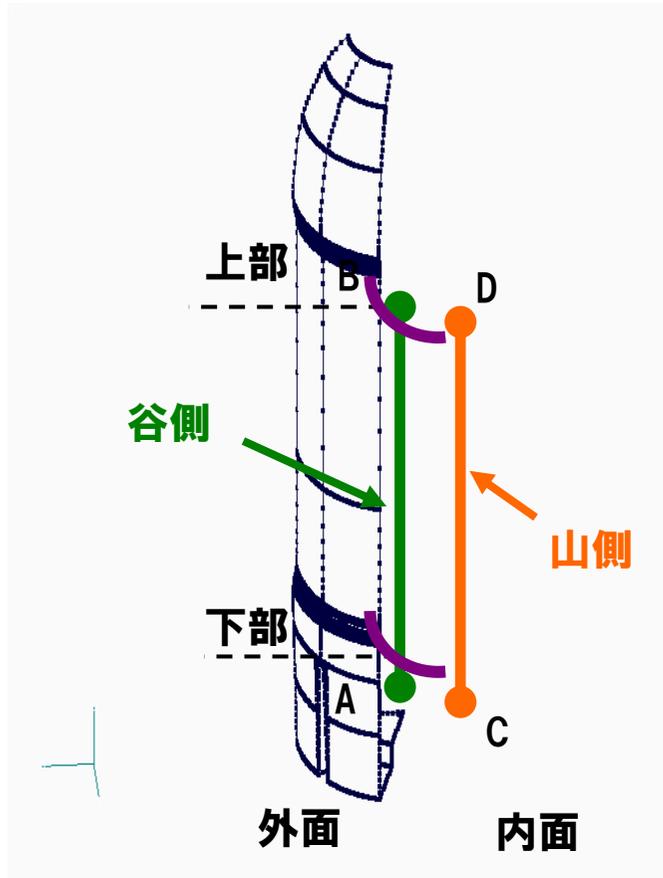
拡張転位の幅 < クラスタサイズ

## 転位通過時のせん断応力の変化



10 Kにおける  
純Feの降伏せん断応力  
300 MPa

# 耐圧PETボトルの強度解析



解析ソフト : MSC/NASTRAN for windows

解析法 : 弧長増分法による大たわみ材料非線形解析

モデル : 72° (1/5)モデル

材料特性 : n乗硬化式  $\sigma = 667.94 \varepsilon^{0.7455}$   
ポアソン比 0.4

要素 : 板要素  
(節点数11423 , 要素数 11740)

拘束条件 : モデル上面を完全拘束  
両境界面を周方向変位拘束

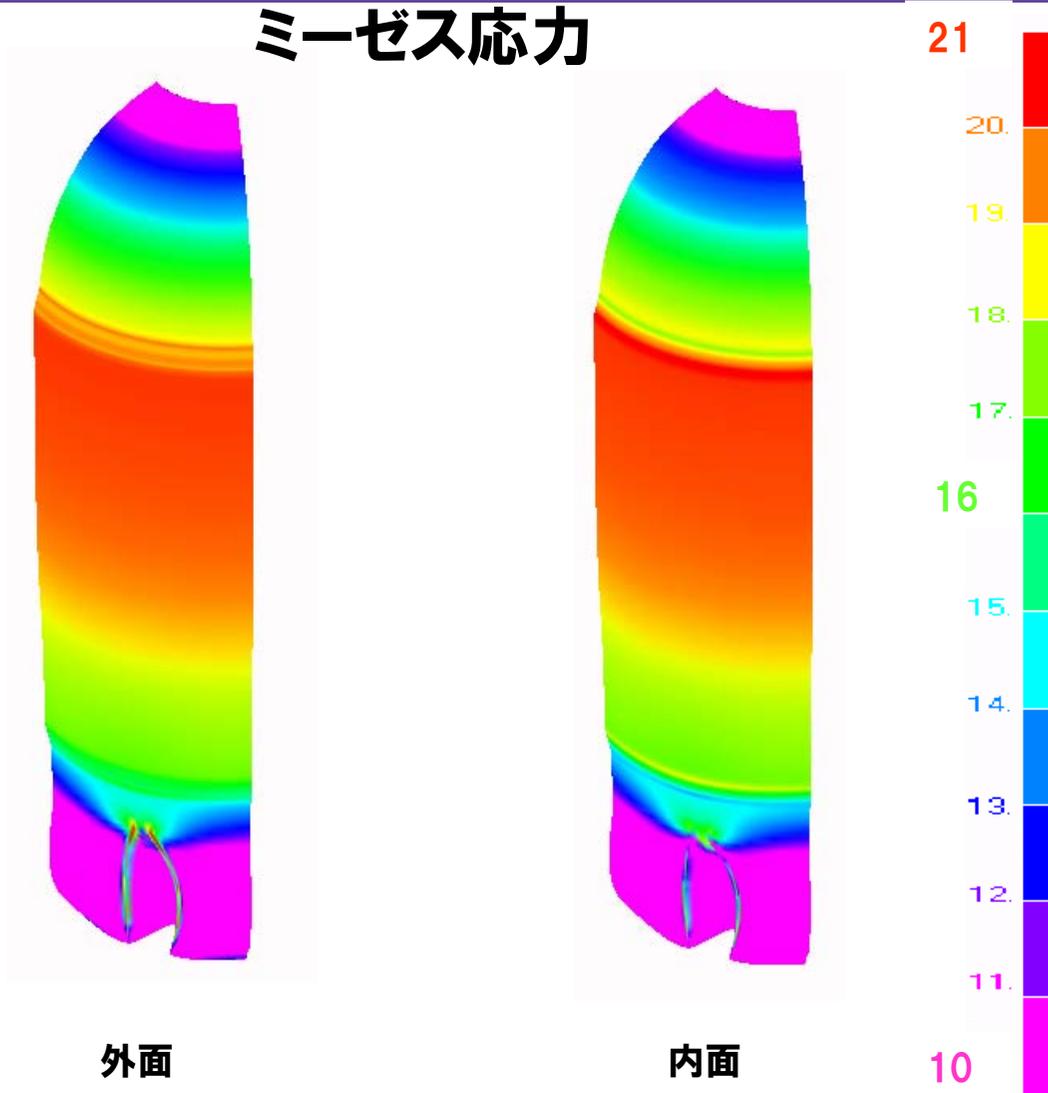
荷重条件 : 内圧 2 MPa



ペタロイド部付き周期対称モデル

## 解析結果(応力分布)

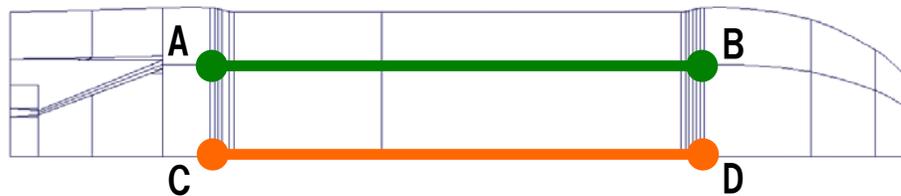
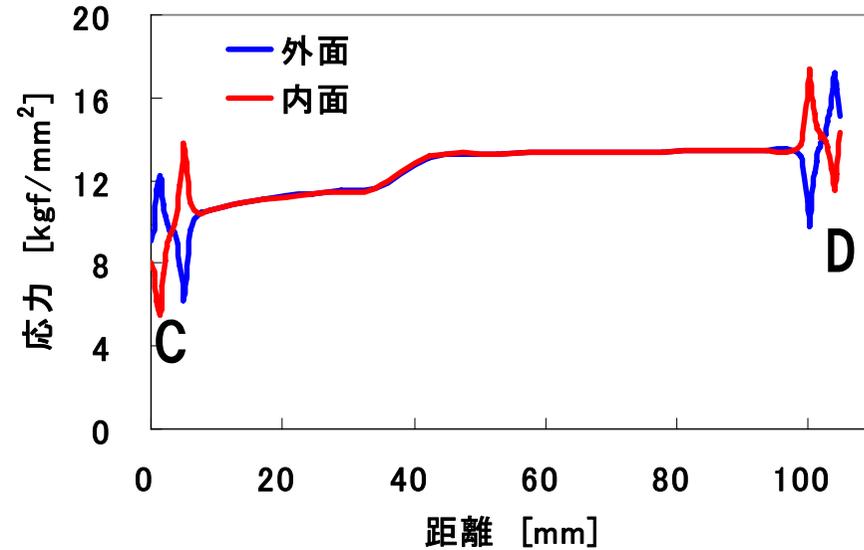
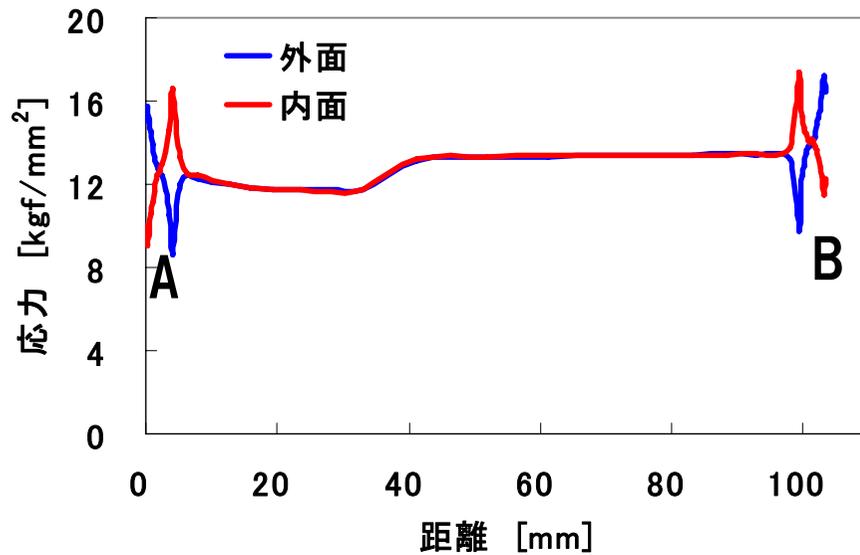
### ミーゼス応力



外面と内面では、差がなく、円筒部に最大応力の分布が見られた。

## 解析結果(応力分布)

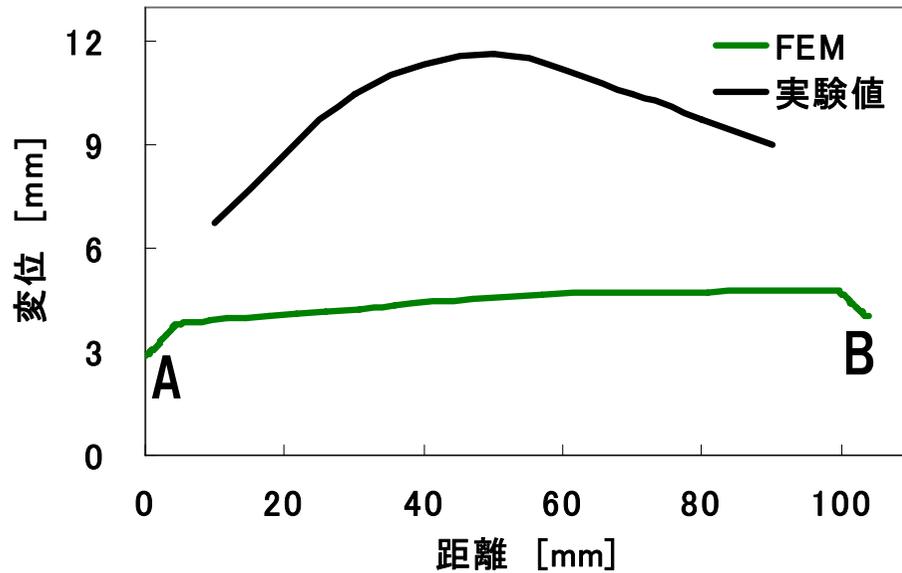
### 子午線方向応力



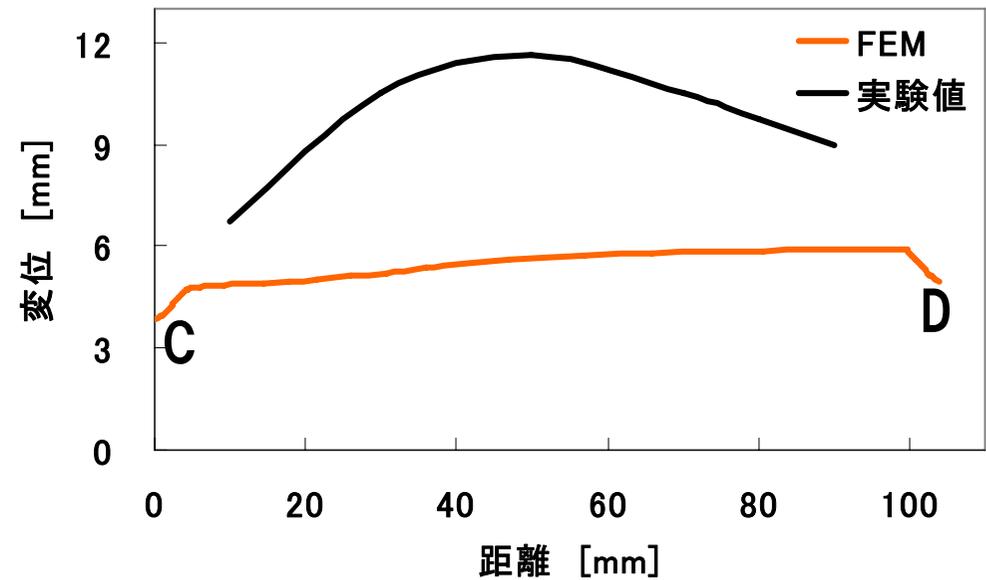
(点A, 点C近傍の)  
下部に多少の差が見られる。

# 解析結果(変位)

## 半径方向変位



谷側



山側



- ・両端の内圧が低い傾向は同じ
- ・実験値と解析結果には誤差がある