

# 金属組織3-D可視化技術の最先端

豊橋技術科学大学  
生産システム工学系  
小林 正和

- ・ ミクロ組織の定量評価
- ・ ミクロ組織特徴点追跡による  
3Dひずみマッピング

材料保証研究室

<http://sp-mac4.pse.tut.ac.jp/>

## ミクロ組織の定量評価

- ・ 3Dの形態が見たい
- ・ 分布状態を知りたい
- ・ 配向状態・接続性を知りたい

} 多様な目的

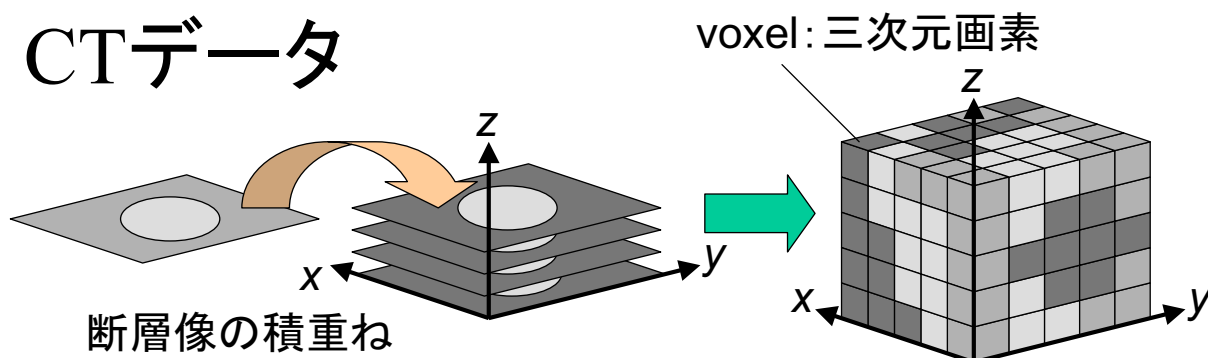
画像処理・解析によるデータ定量化

障害: 3D + 高分解能 → データサイズ大

要求に答えるソフトウェア少ない

- |   |
|---|
| <p>(△)可視化ソフトウェア: 産業・医療診断用<br/>3D表示, 物体を分ける, 抽出する</p> <p>(×)定量的情報を得る解析ソフトウェア</p> |
|---|

# CTデータ



- 断層像(tiff形式)のセット: 高分解能 → データ量大
  - $(2000\text{pixel} \times 2000\text{pixel}) \times 1312\text{slice} \times 8\text{bit} = 4.88 \text{ Gbyte}$
  - $(2000\text{pixel} \times 2000\text{pixel}) \times 1312\text{slice} \times 16\text{bit} = 9.78 \text{ Gbyte}$ 
    - $8 \text{ bit} = 1 \text{ byte} = 0 \sim 255$ ,  $16 \text{ bit} = 2 \text{ byte} = 0 \sim 65535$
    - $1024\text{byte} = 1\text{kbyte}$ ,  $1024\text{kbyte} = 1\text{Mbyte}$ ,  $1024\text{Mbyte} = 1\text{Gbyte}$

## 解析環境(PC)の制限

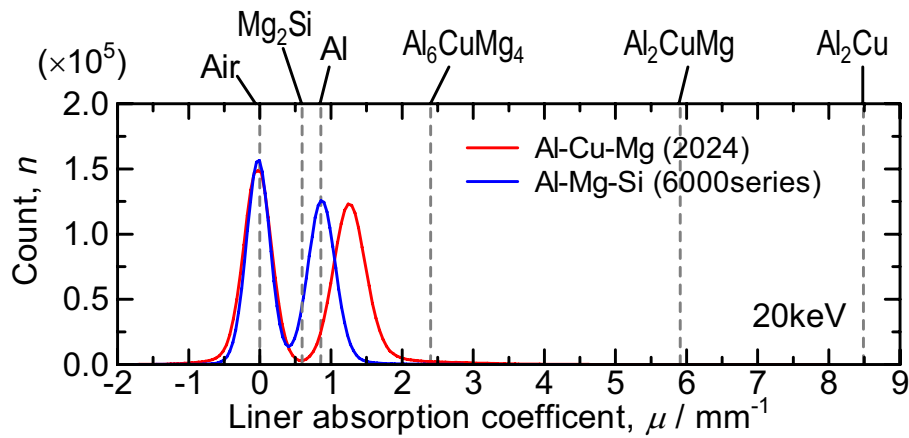
- メモリの利用: 最大4GB for 32bit System
- ハードウェアの制約 =  $2\text{GB} \times 4\text{スロット} = 8\text{GB}$
- ※ワークステーションなどの計算機が必要

## 基本的な処理手順

- STEP1: 物体の抽出(二値化)
  - しきい値
  - 不要部分の除去
- STEP2: 物体の特定(ラベリング)
  - 三次元の接続
  - ラベリング結果の保存
- STEP3: 物体の計測
  - 物体領域の読込
  - 体積, 表面積の計算
  - 重心位置の計算
  - 形態の評価

# 物体の抽出(二値化)

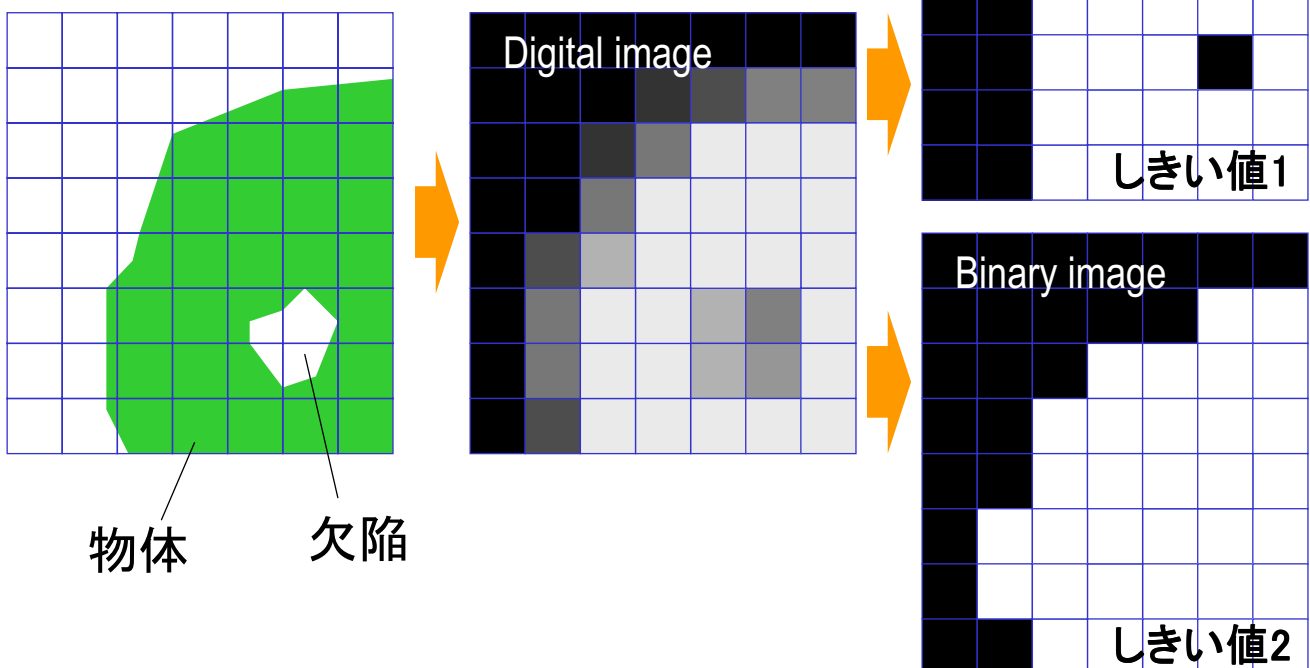
二値化のしきい値が決まれば, slice by sliceで処理可能  
(2D画像処理)



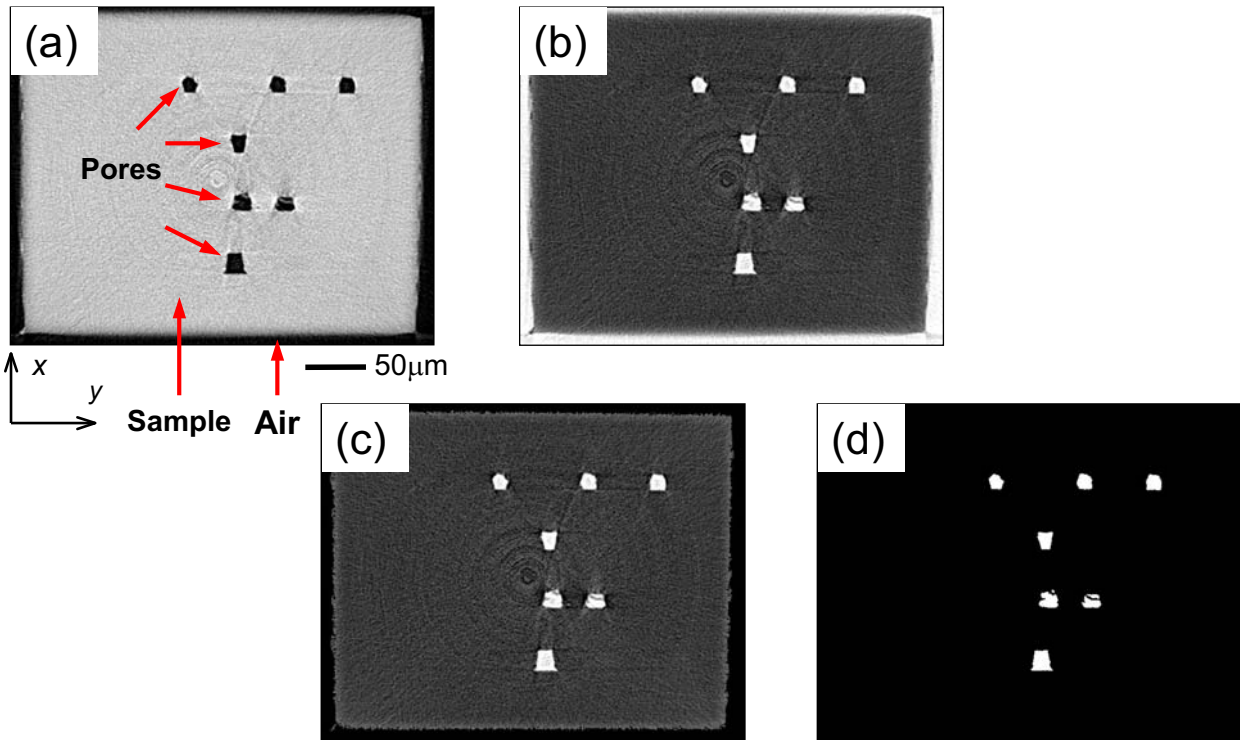
解析対象をCT値(線吸収係数)で分ける

しきい値の与え方で, 物体のサイズが若干変わること  
→ 境界部の部分体積効果など

## 部分体積効果



# 不要部分の除去



解析対象であるポアと同等の線吸収係数を示す周囲の空気を除去し、二値化

## 物体の特定（ラベリング）

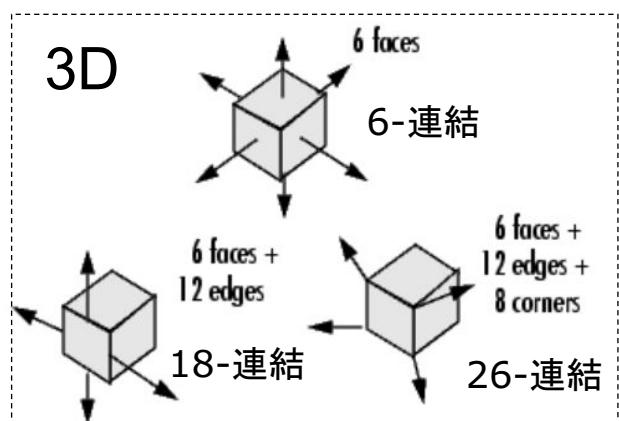
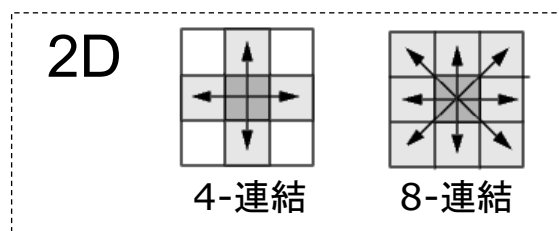
- 隣接画素との連結関係のチェックを基本とする
- どの画素がどの物体に所属するのか情報を保存

0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0



0	1	1	0	0	2	2	0	0	0
0	1	1	1	0	0	2	2	2	0
0	1	1	0	0	0	0	2	0	0
0	0	1	0	3	0	0	2	0	0
0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
0	0	0	3	3	3	0	0	4	0
0	0	0	3	0	4	4	4	0	0
0	5	0	0	0	0	4	0	0	0
0	5	5	0	0	0	0	0	0	0
0	0	5	0	0	0	0	0	0	0

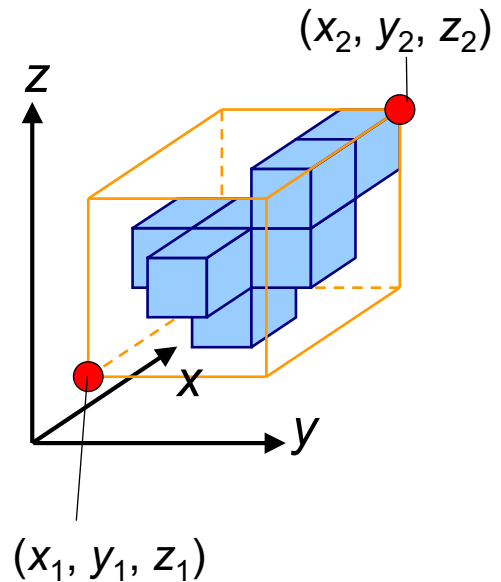
2bit → 16bit  
データ量 × 8倍  
↓  
データ保存の工夫



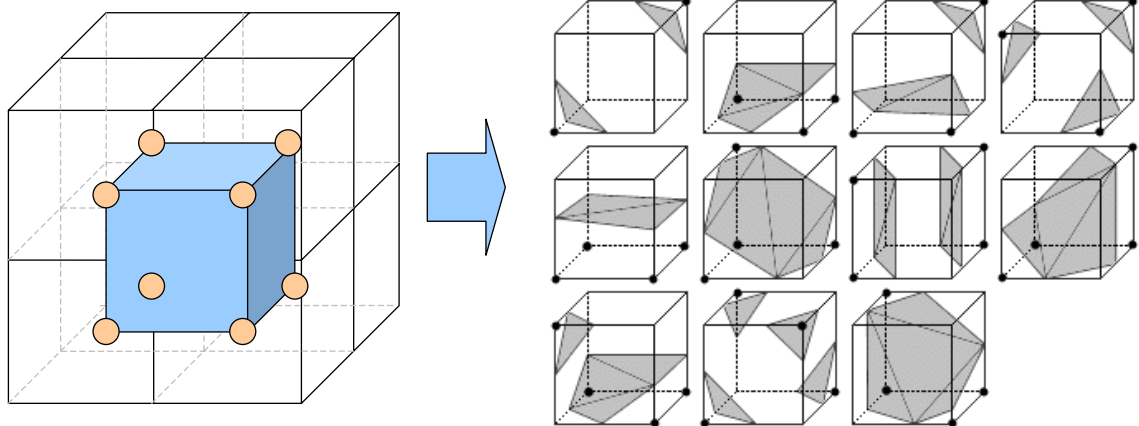
# 物体の計測

- ラベリング順に検索して、物体含まれる座標の最小( $x_1, y_1, z_1$ )と最大( $x_2, y_2, z_2$ )を求める
- ( $x_1, y_1, z_1$ )-( $x_2, y_2, z_2$ )に囲まれた部分をメモリにコピー

- ◆ 個数
    - ◆ 密度
  - ◆ 体積
  - ◆ 表面積
  - ◆ 重心位置
    - ◆ 平均間隔
    - ◆ 最隣接間隔
  - ◆ 形態
    - ◆ アスペクト比
    - ◆ 配向性
- ラベリング
- Marching Cubes法
- モーメント



## Marching Cubes法



隣接する8個のvoxelからセル(立方体)を生成,  
15種類の平面に分類することによってメッシュを生成し,  
体積および表面積を算出

# モーメントを使った物体の形態評価

定義: 3D画像のモーメント

$$m_{ijk} = \sum_{x,y,z} x^i y^j z^k f(x,y,z)$$

ここで,  $f(x,y,z) = \begin{cases} 1 & (x,y,z) \text{が物体} \\ 0 & \end{cases}$

**重心位置:**  $(g_x, g_y, g_z) = (m_{100}/m_{000}, m_{010}/m_{000}, m_{001}/m_{000})$

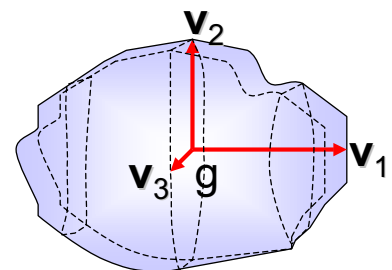
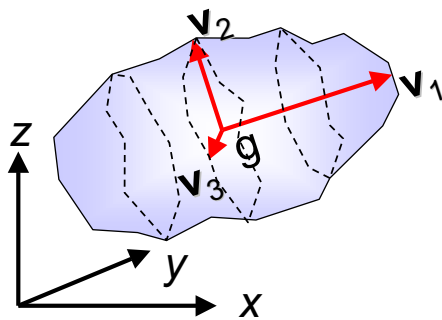
重心周りのモーメント:  $M_{ijk} = \sum_{x,y,z} (x-g_x)^i (y-g_y)^j (z-g_z)^k f(x,y,z)$

$$\text{慣性マトリックス: } I = \begin{pmatrix} M_{020} + M_{002} & -M_{110} & -M_{101} \\ -M_{110} & M_{200} + M_{002} & -M_{011} \\ -M_{101} & -M_{011} & M_{200} + M_{020} \end{pmatrix}$$



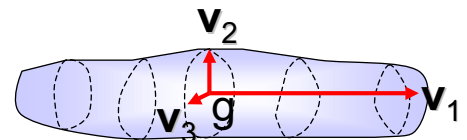
固有値:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , 固有ベクトル:  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$   
ただし,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ とする

## 軸比により形態を評価



a) 板状:  $\lambda_2 / \lambda_1 \rightarrow 1$

b) 球状:  $\lambda_3 / \lambda_1 \rightarrow 1$   
(アスペクト比)

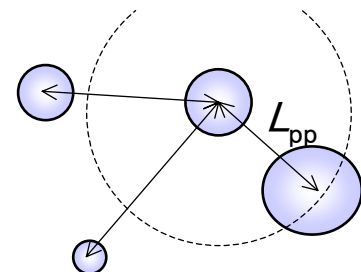


c) 棒状:  $\lambda_2 / \lambda_1 \rightarrow 0$

## その他

・球形度 =  $\frac{(36\pi V^2)^{\frac{1}{3}}}{S}$

- ・最隣接間隔
- ・平均間隔



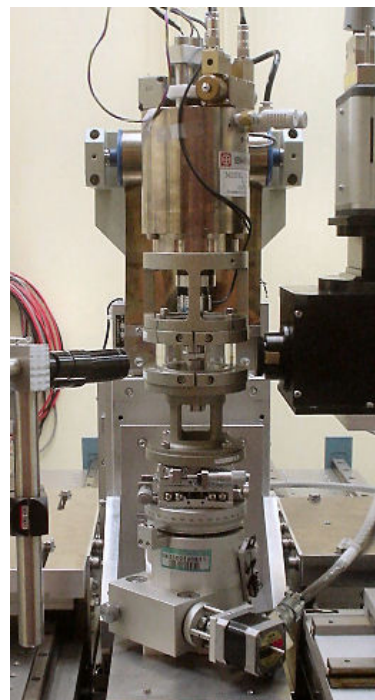
# マイクロ組織特徴点追跡による3D ひずみマッピング

★材料内部に数多くのマイクロポア  
や粒子が見られる(数万~数十万)

- ✓高分解能SR-CT
- ✓数万~数十万点/FOV

★材料の破壊過程を観察可能

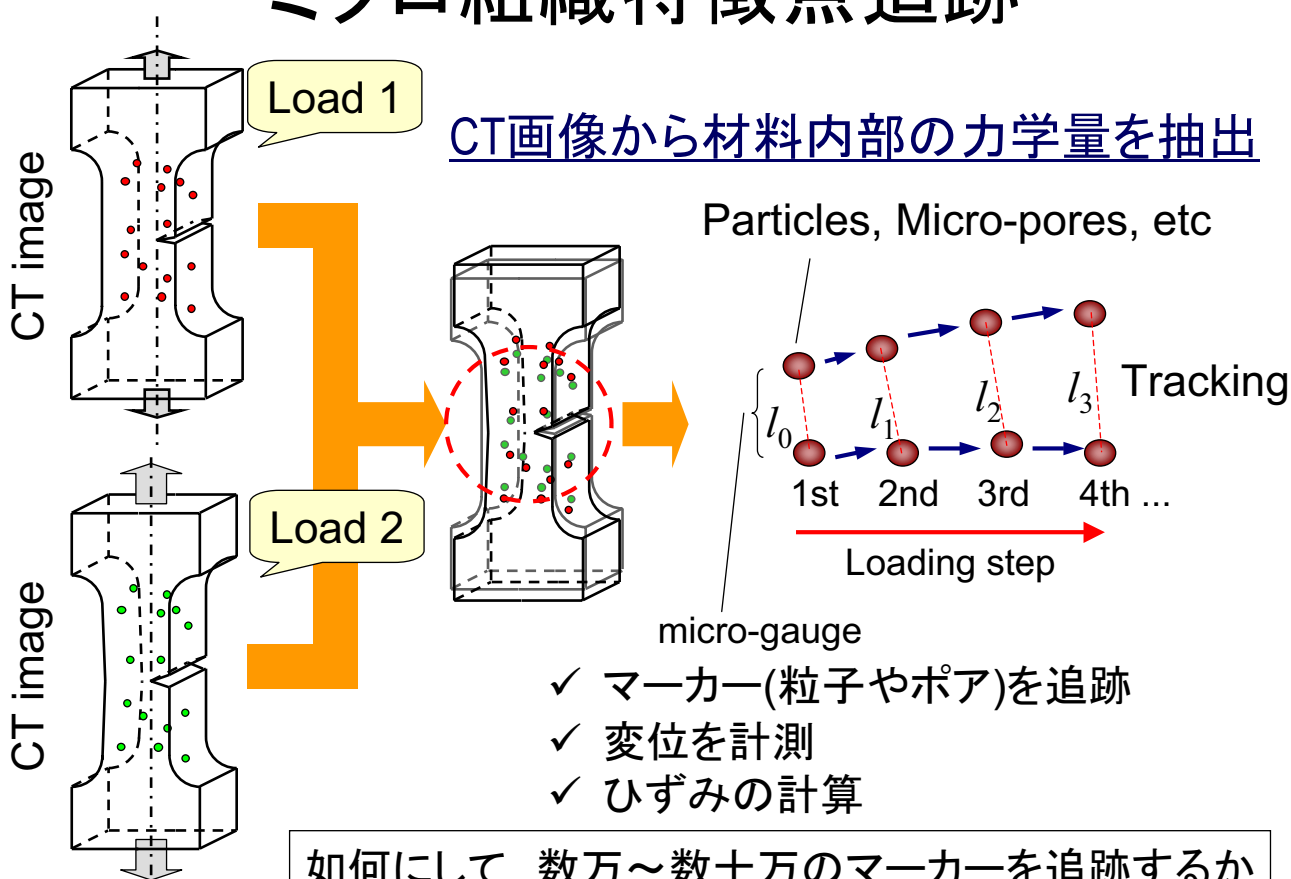
- ✓非破壊検
- ✓三次元



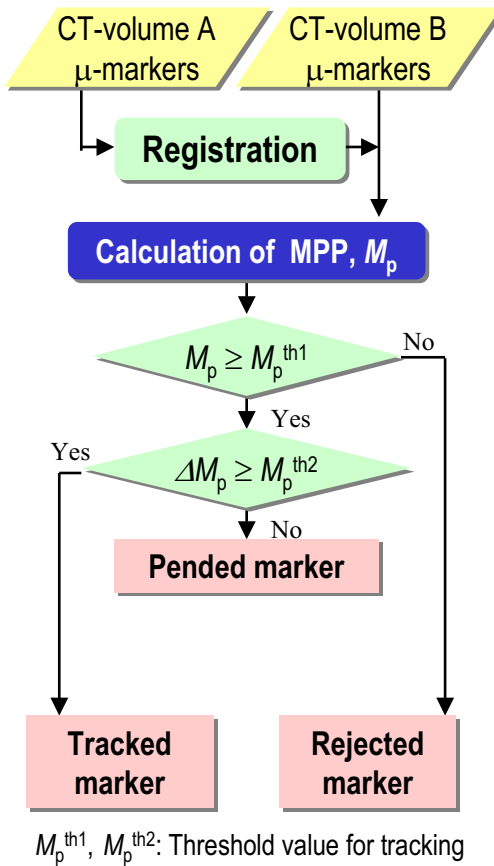
## SPring-8用小型材料試験機

容量: 2kN(圧縮), 1kN(引張)  
ストローク: ±7.5mm      重量: 6kg  
安定性: 変位hold変動0.1μm以下

## マイクロ組織特徴点追跡

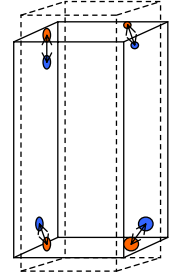


# マイクロ組織特徴点追跡法(MPP)



## Registration

目視で対応を確認できるマーカーの距離の二乗和が最小になる位置へ



## Matching Probability Parameter (MPP), $M_p$

$$M_p(i, j) = \alpha \times M_L(i, j) + \beta \times M_V(i, j) + \gamma \times M_S(i, j)$$

$M_L$ : Parameter for **Location**

$M_V$ : Parameter for **Volume**

$M_S$ : Parameter for **Surface area**

$\alpha, \beta, \gamma$ : Parameter's weight ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$ )

## 対応マーカーの探索

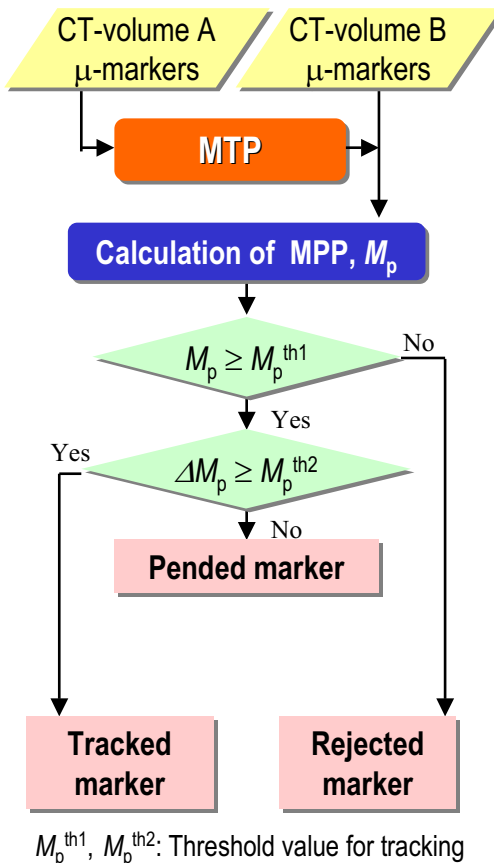
必要条件:

$$(1) \max(M_p) \geq M_p^{th1}$$

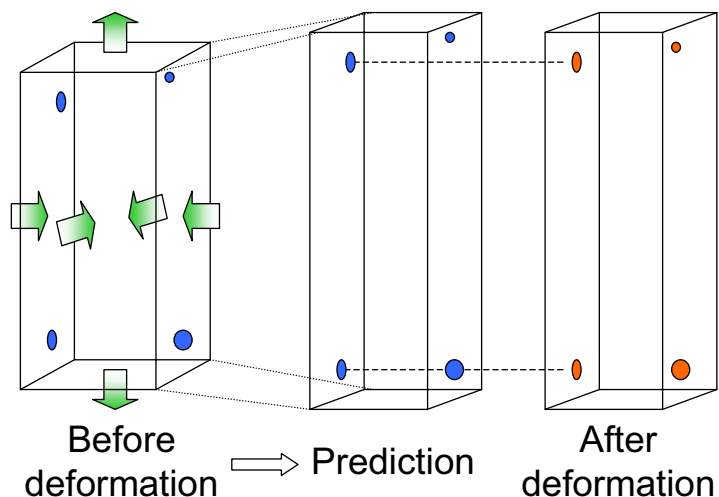
$$(2) \Delta M_p = \max(M_p) - \max^{2nd}(M_p) \geq M_p^{th2}$$

第一候補と第二候補の差のチェックで誤対応を排除

# マイクロ組織特徴点追跡法(MTP)



## Macroscopic Trajectory Prediction (MTP)



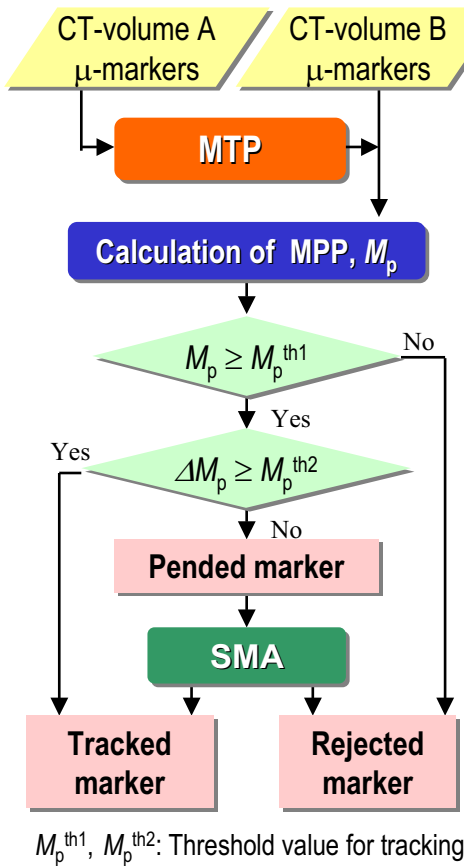
引張試験の場合簡単に、  
均一ひずみ分布

Poisson比が0.5を仮定

複雑な変形はそれに応じて移動先を予測

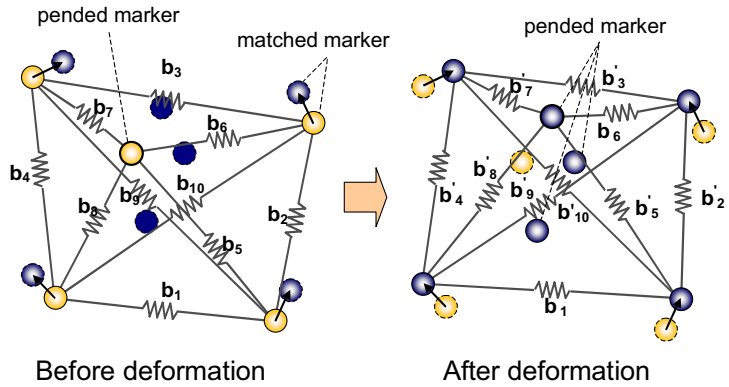


# マイクロ組織特徴点追跡法(SMA)



## Spring Model\* Algorithm (SMA)

\* 流体力学分野で利用されるPIV法の一つ  
追跡数を増やすため、Pended markerに適用

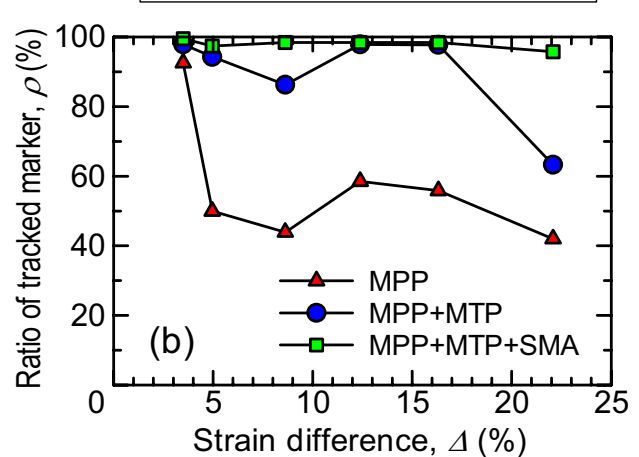
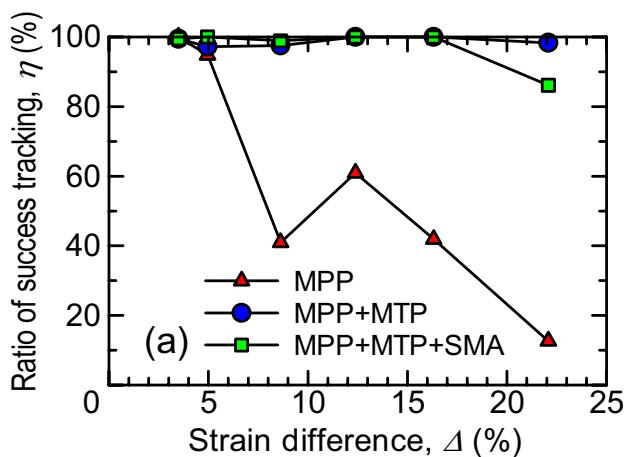


マーカークラスタの総バネエネルギー  $E_{sp}$  を最小にする組み合わせを解とする

$$E_{sp} = \frac{1}{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_{sp}} \frac{|\mathbf{b}'_i - \mathbf{b}_i|}{|\mathbf{b}_i|}$$

$N_{sp}$ : number of springs  
 $\mathbf{b}$  and  $\mathbf{b}'$ : spring vectors

## 各追跡法の精度評価

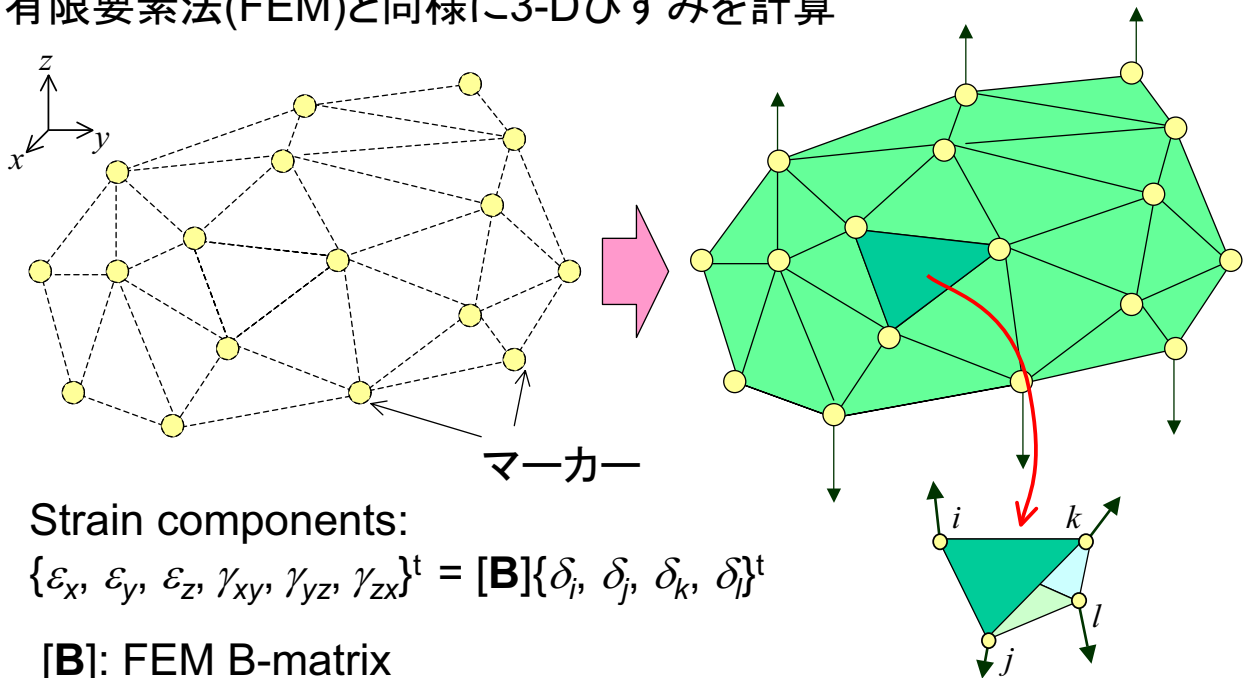


$\alpha: \beta: \gamma = 1: 0: 0$   $M_p^{th1} = 0.8$   
 $r_s = 118.5 \mu\text{m}$   $M_p^{th2} = 0.1$

- ✓ MPP法は変形が大きくなると追跡率低下
- ✓ MPP + MTP 法は高い追跡効率
- ✓ SMAを適用すると追跡マーカー数が増加

# 三次元ひずみの計算

Delaunay分割アルゴリズムによってマーカーを頂点に四面体を生成  
有限要素法(FEM)と同様に3-Dひずみを計算



Strain components:

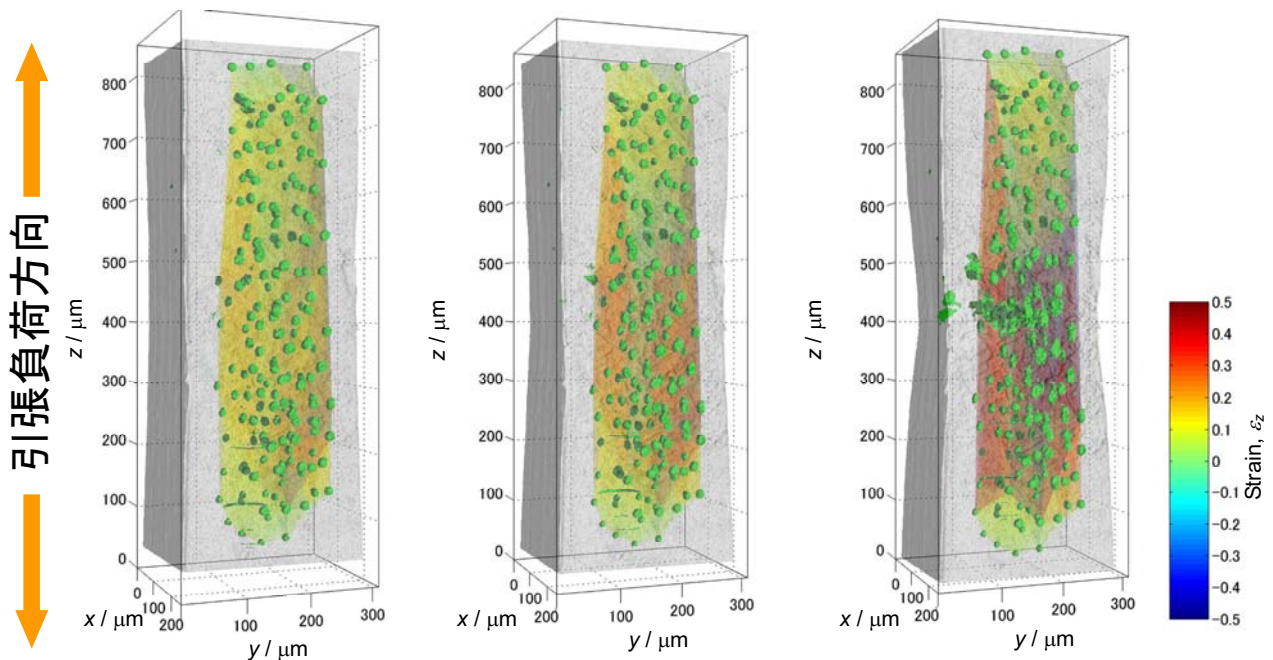
$$\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^t = [\mathbf{B}]\{\delta_i, \delta_j, \delta_k, \delta_l\}^t$$

$[\mathbf{B}]$ : FEM B-matrix

$\delta$ : marker displacement

四面体内部の均一変形を仮定

## 三次元ひずみマップ(モデル試料)



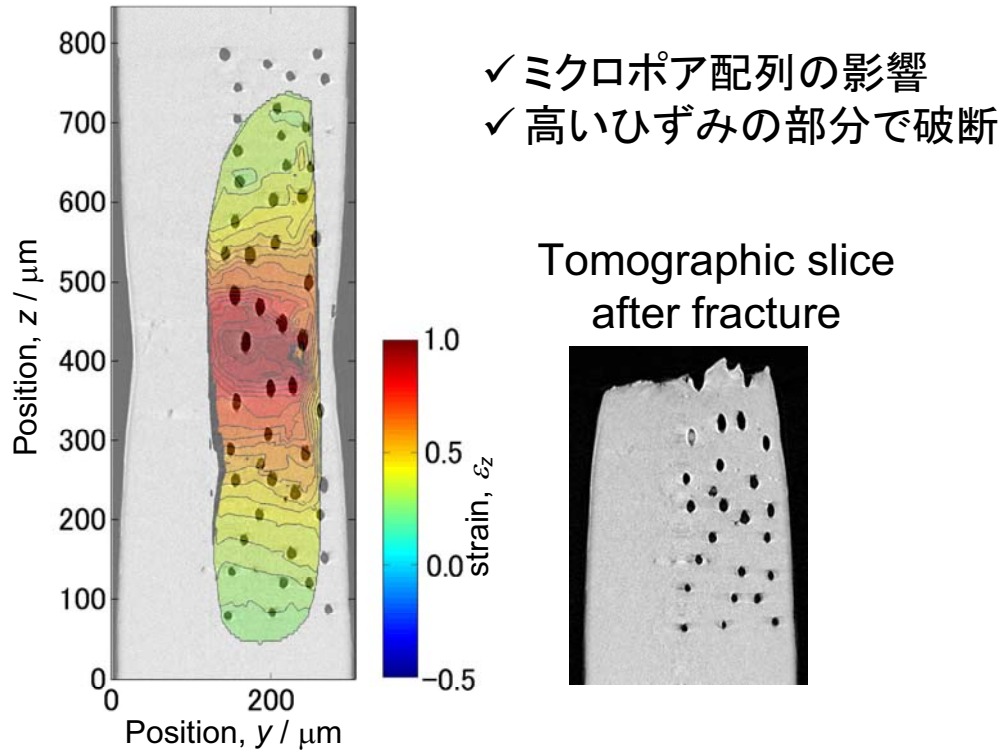
(a)  $\Delta=12.4\%$  (1st-2nd)  
 $\rho = 97.9\%$ ,  $\eta = 100\%$

(b)  $\Delta=16.3\%$  (1st-3rd)  
 $\rho = 97.7\%$ ,  $\eta = 100\%$

(c)  $\Delta=22.1\%$  (1st-4th)  
 $\rho = 63.3\%$ ,  $\eta = 98.3\%$

荷重負荷に伴いくびれ部に高いひずみが観察できる

# 断層像による実際の破面との比較

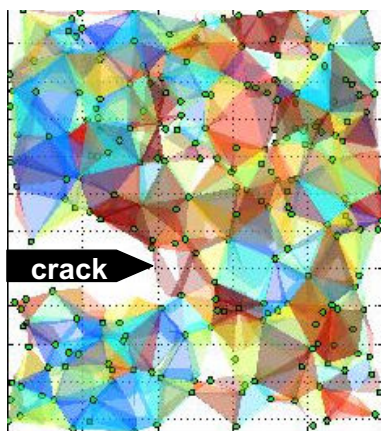


- ✓ ミクロポア配列の影響
- ✓ 高いひずみの部分で破断

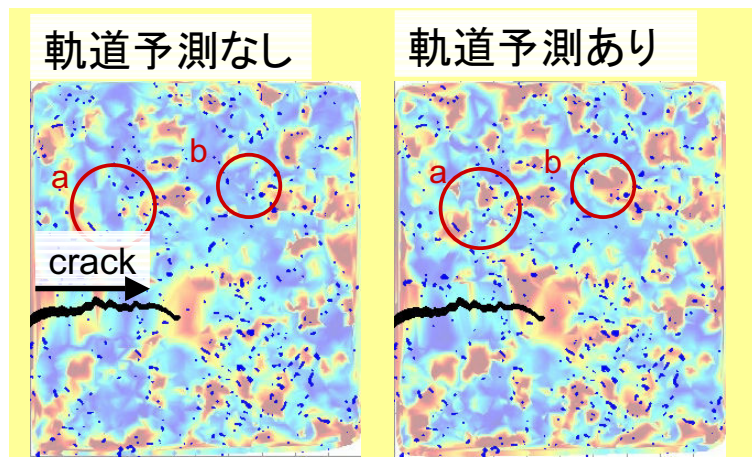
Sectional strain map of  $\epsilon_z$  at  $x=100\mu\text{m}$

## 応用(1): き裂材への適用

き裂周りの不均一変形:  
弾・塑性破壊力学に基づく軌道予測を導入



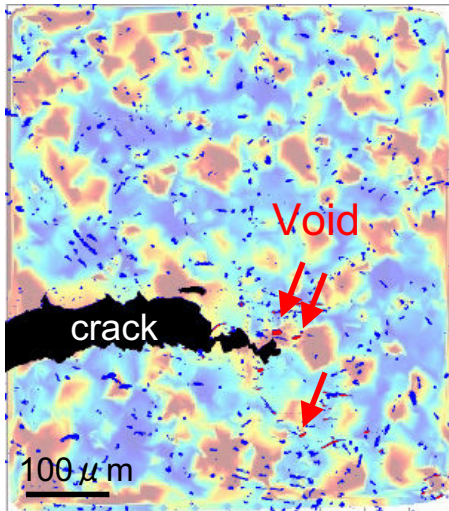
ひずみの算出(●特徴点)



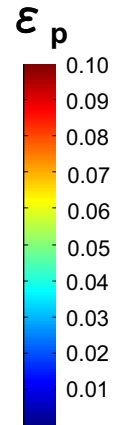
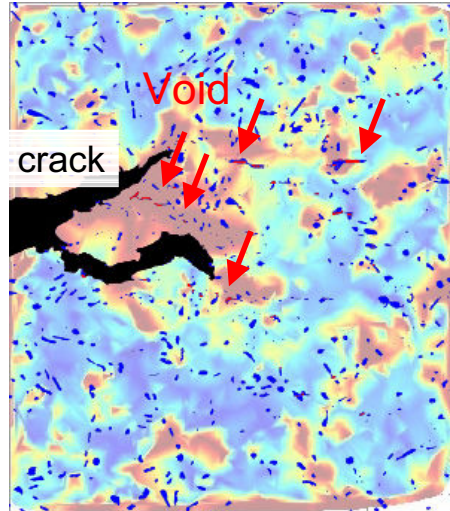
- 軌道予測を行うことで、追跡成功率が6.6%増加
- 軌道予測なしでは確認できなかった、ひずみの上昇点を確認

# ひずみ分布と損傷の評価

直線き裂部分



分岐き裂部分



● particle  
● void

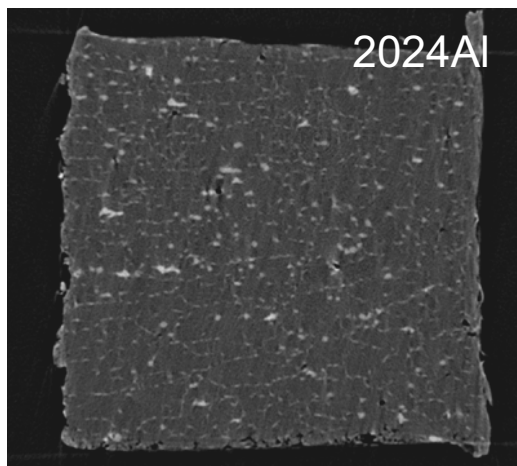
- 歪の非常に不均一な分布: き裂先端への応力集中よりミクロ組織の影響が顕著
- 共晶部の歪が比較的高い部分で、歪な形の粒子が損傷

- き裂先端に歪が集中
- き裂先端付近の共晶部で損傷発生

## 応用(2): 結晶粒の変形挙動解析

### ✓ 液体金属(Ga) wetting による結晶粒界の3-D可視化

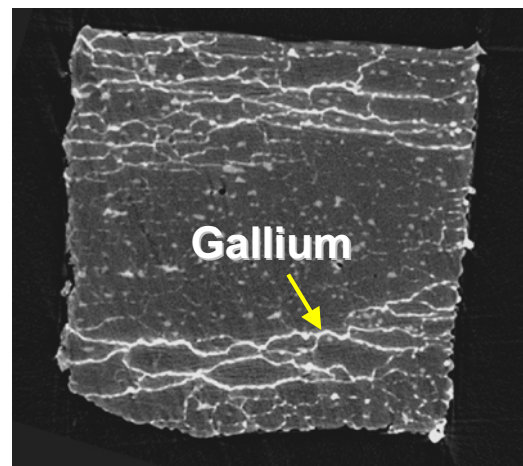
結晶粒界に液体金属を拡散、線吸収係数(LAC)の違いによるコントラストを利用し可視化



Ga塗布



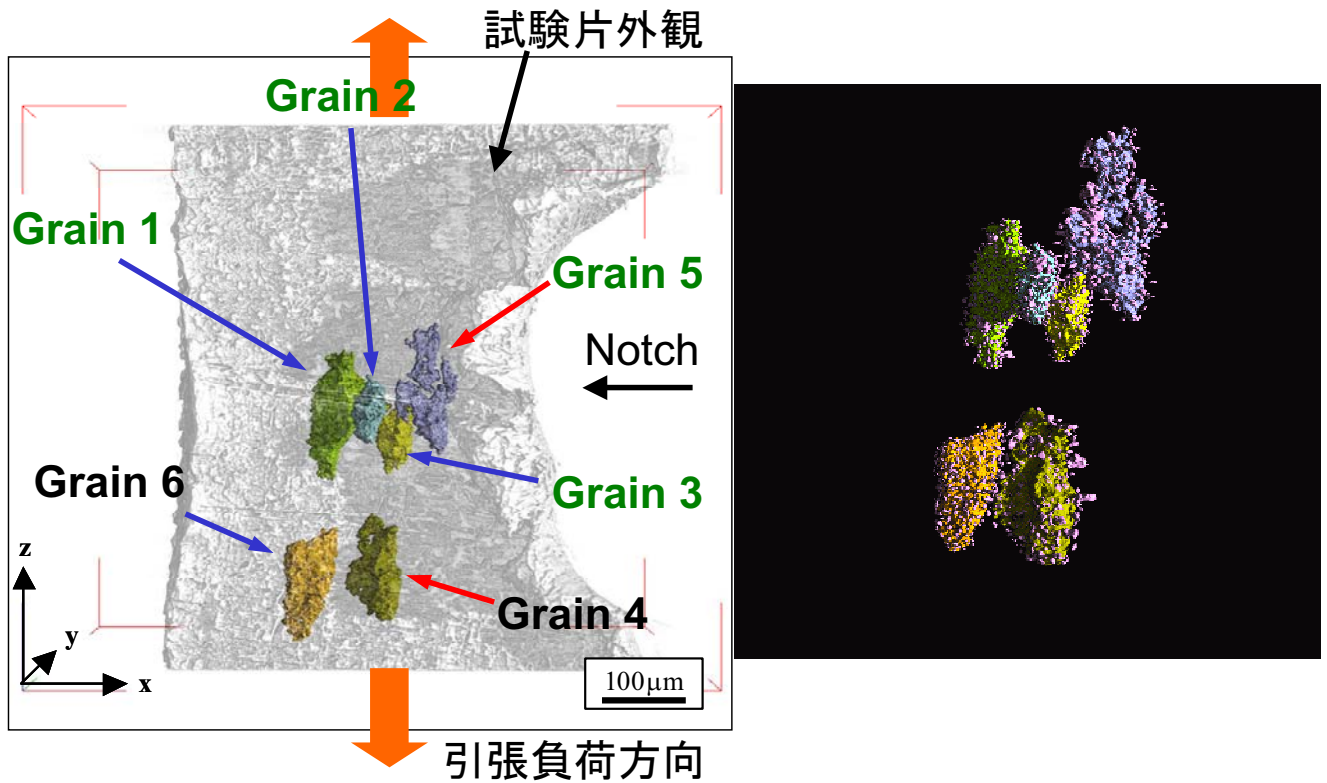
CT



粒界位置および粒界上の粒子を特定可能

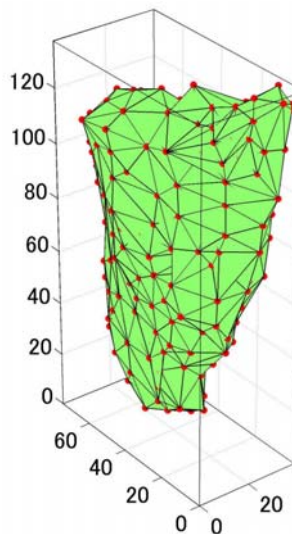
→ 粒界上粒子を追跡することで、結晶粒の変形を捉える

# 画像解析によって抽出された結晶粒領域とそれを囲む粒界上粒子

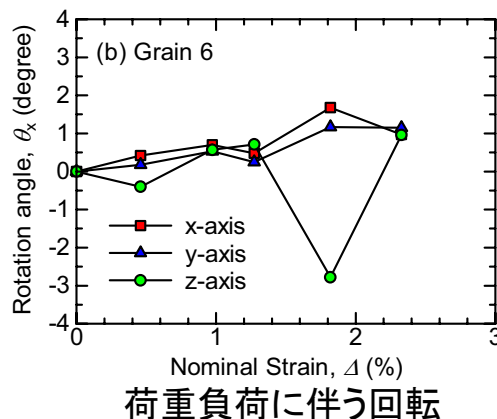
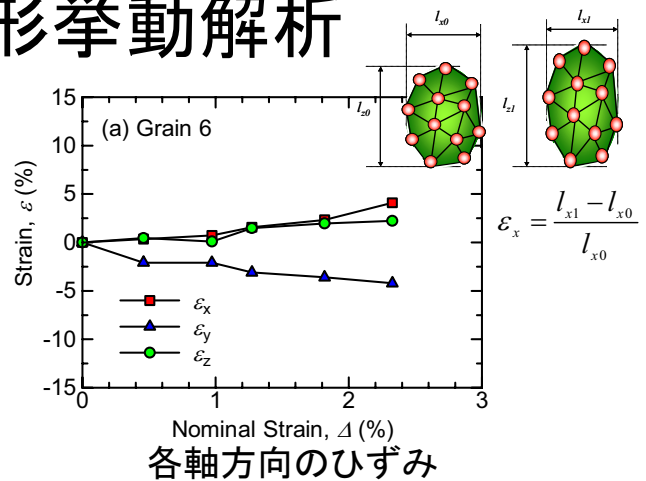


## 個々の結晶粒の変形挙動解析

Grain6 (284 particles)



粒界上の粒子を頂点として面を構成することで再現した結晶粒形態

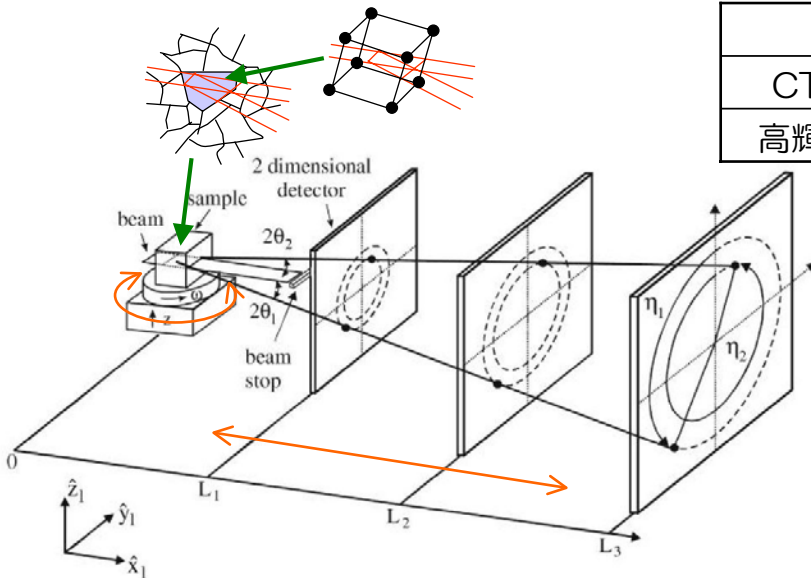
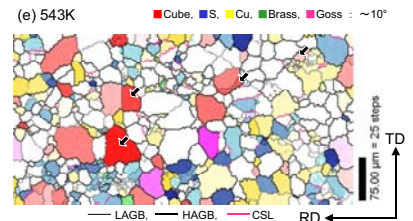


# まとめ

- 3D画像処理・解析によって、マイクロ組織を定量的に評価することが可能
  - 体積, 表面積, 位置, 形態など...
  - 解析時間, 高価な設備 → 情報技術の進歩で解消
- 高分解能CTの特徴を生かし、マイクロ組織特徴点追跡によって、材料内部の力学量の3D可視化が可能
  - 追跡の高精度化・信頼性向上 → 幅広く使える手法に
  - 真の材料評価・メカニズムの検討が可能  
→ 3Dシミュレーションとの比較
  - 複雑な現象も可視化(き裂, 結晶粒)
- CTは材料内部が3Dで見えるだけでない, 内部を3Dで知ることができる

## 結晶方位3D解析手法(3DXRD)の開発

- **実用材料(バルク)の変形・破壊メカニズム**  
結晶学的な影響 → 成形性, き裂進展パス
- **CTと同時に可能**
- **材料研究用ビームライン欲しい**



3次元	2次元
CT/3DXRD	SEM/EBSD
高輝度単色X線	電子線

回折パターン



位置・方位を決定



3Dマッピング

X線回折を利用した三次元結晶方位解析

ESRF, APSでは実施可能