

# 重イオン照射を用いた高温超伝導体の 臨界電流特性の制御

熊本大学 先端科学研究部

末吉 哲郎

# 超伝導体に対するイオン照射効果

粒子線照射  
(電子, 中性子, イオン)



超伝導材料の臨界電流密度  $J_c$  の制御

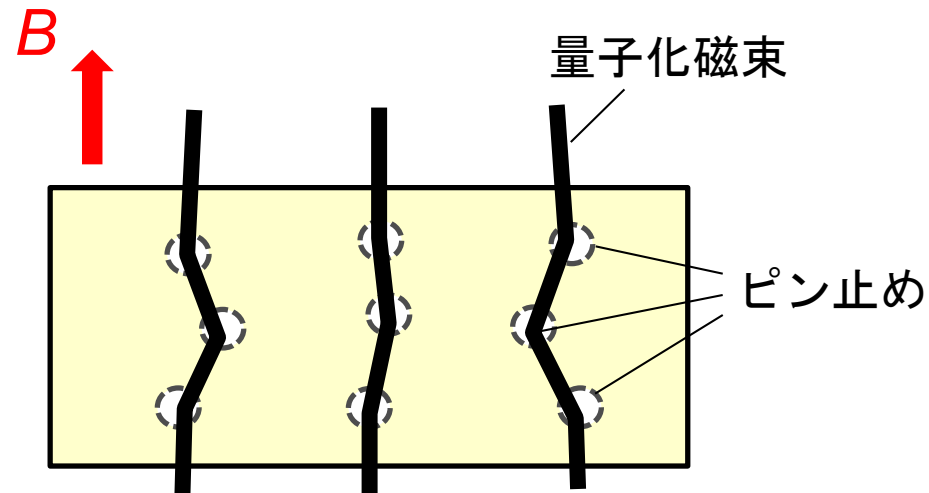
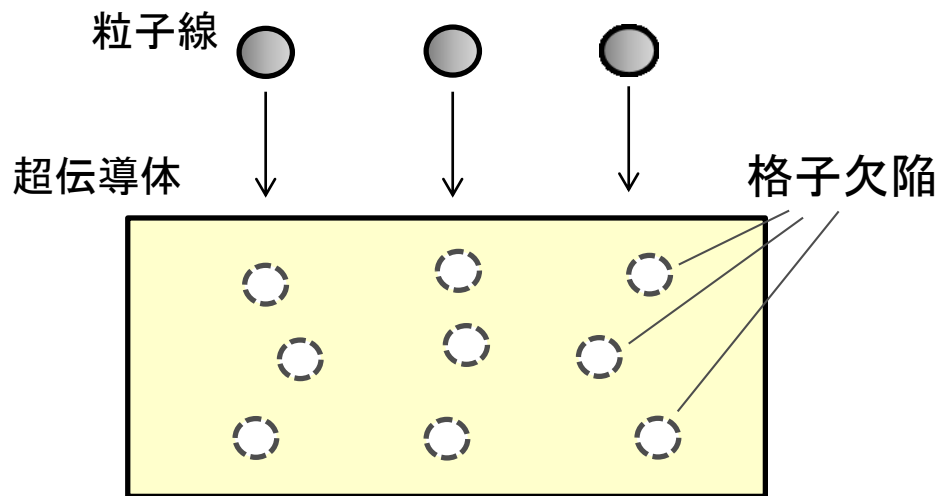
照射で形成される格子欠陥

ピン止め点として有効に作用

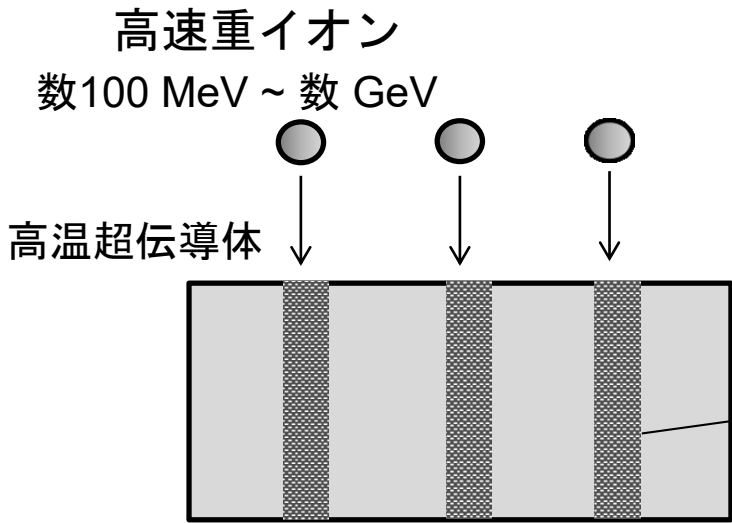


超伝導転移温度  $T_c$  がわずかに低下する程度の照射量で

磁場中の  $J_c$  を向上



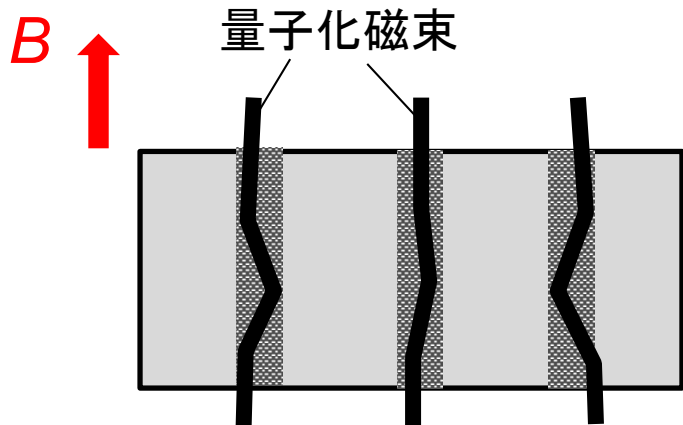
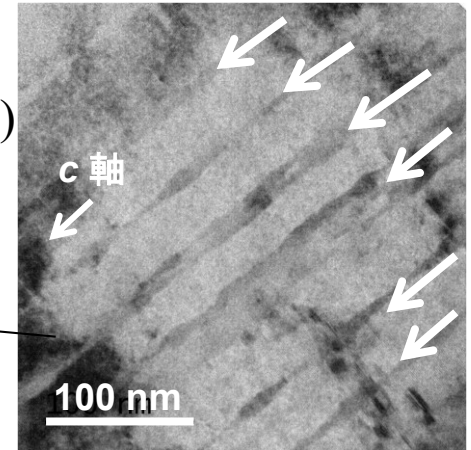
# 高温超伝導体に対する重イオン照射効果



イオンパスに沿った  
アモルファス領域(径: 数 nm)  
の結晶欠陥を形成

柱状欠陥

270 MeV Xeイオン照射した  
GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>線材

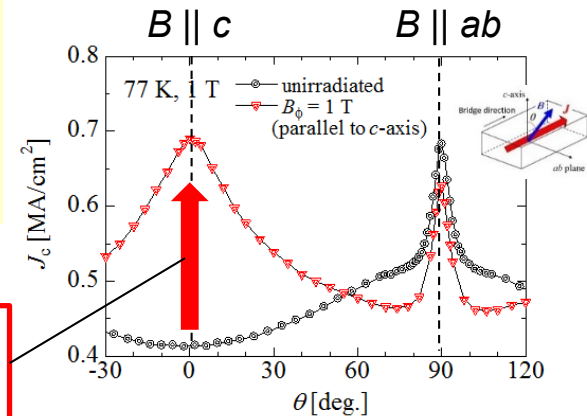


量子化磁束と同じ線状  
同程度のサイズ

→ 強いピン止め

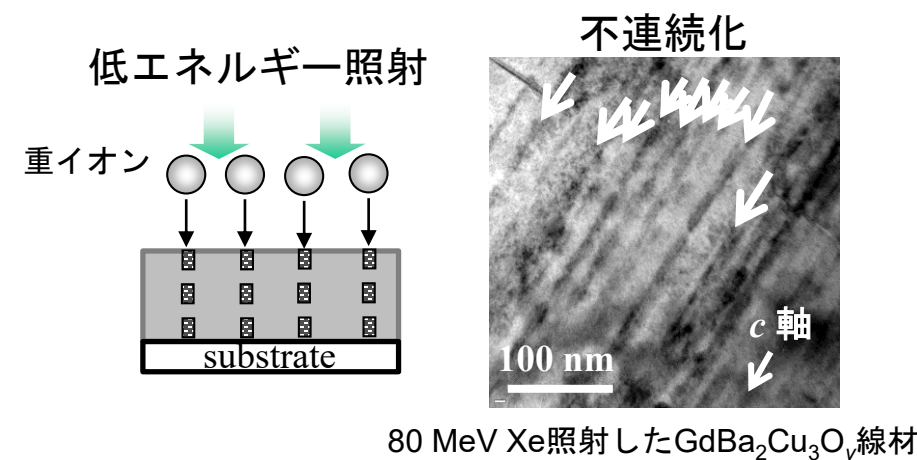
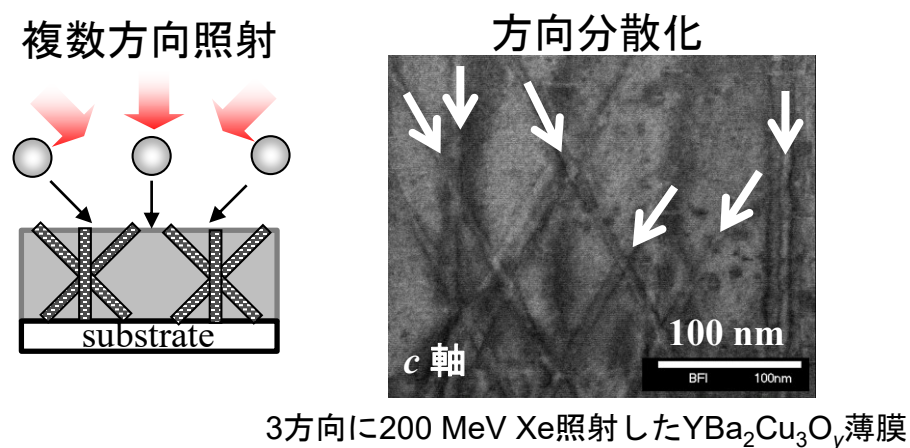
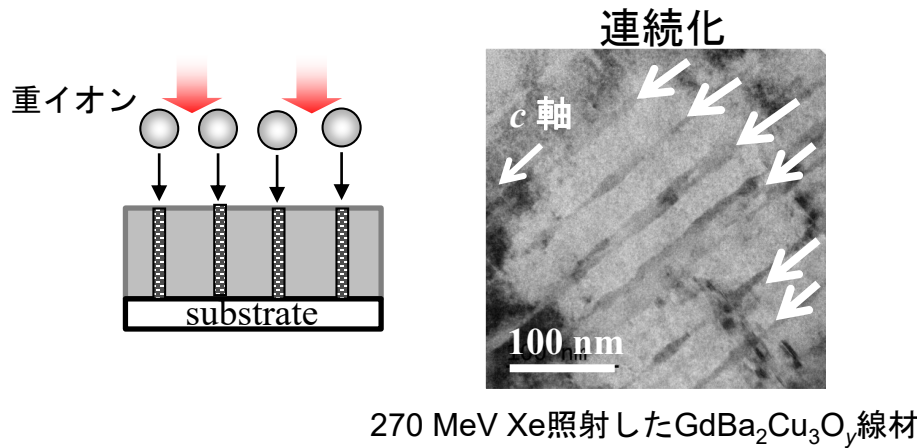
高臨界電流密度  $J_c$  化

c軸に平行に200 MeV Xeを  
照射したYBCO薄膜



# 重イオン照射欠陥を用いた高温超伝導材料の高機能化

- ◆ 重イオン照射：照射条件（照射種，エネルギー，方向，照射量）の制御より様々な構造（サイズ，形状，分布）のピン止め点を形成・導入できる



導入可能なピン止め点の選択肢が広い

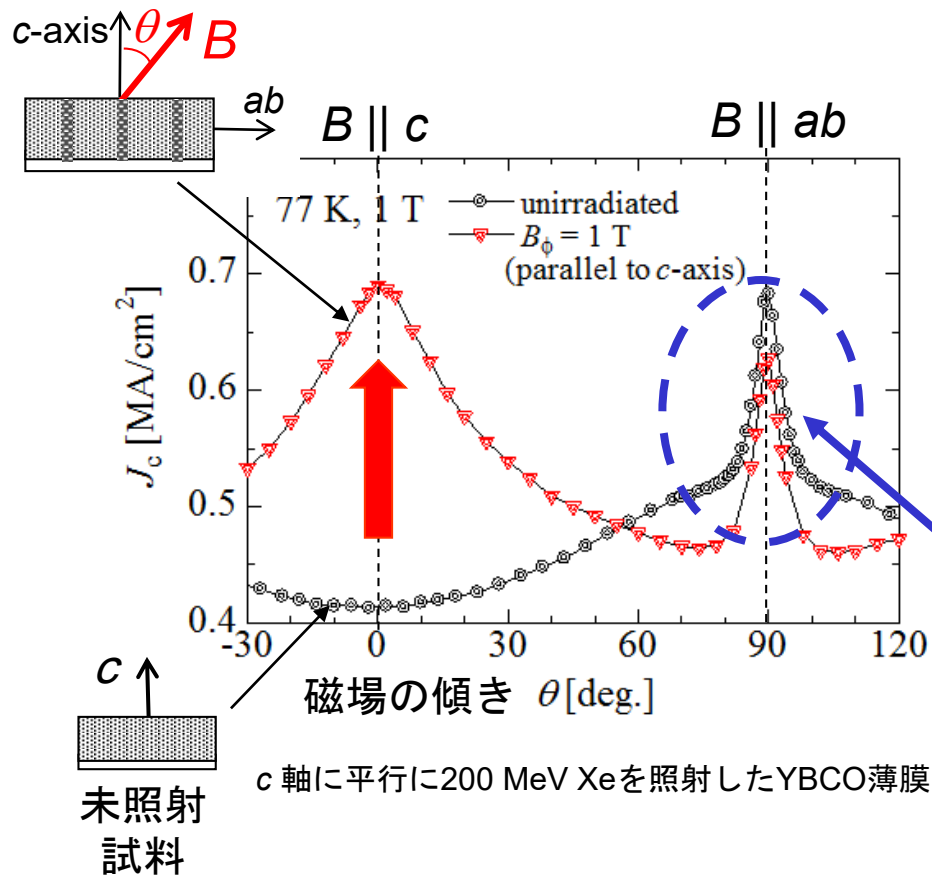
用途に合ったピン止め構造を効率的に構築できる可能性

重イオン照射—高機能なピン止め構造をデザインする手段

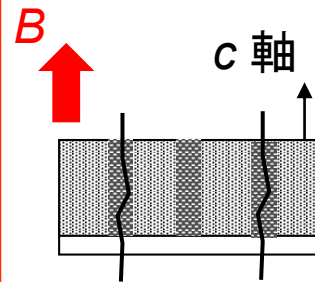
# 重イオン照射欠陥を用いた $J_c$ の異方性の制御

## ◆ 高温超伝導体に対する柱状欠陥の導入

➔  $J_c$  が最小値を示す  $c$  軸方向に柱状欠陥を導入



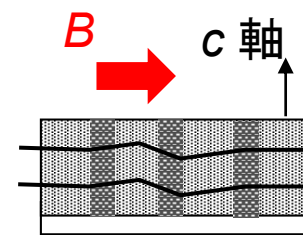
$B \parallel c$  の  $J_c$  制御



$$J_c @ B \parallel c < J_c @ B \parallel ab$$

$$J_c @ B \parallel c > J_c @ B \parallel ab$$

$J_c @ B \parallel ab$

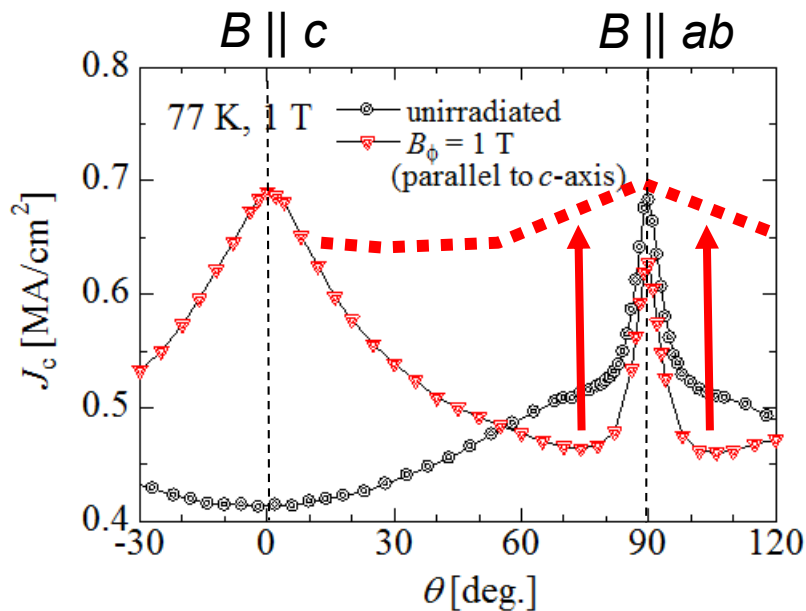
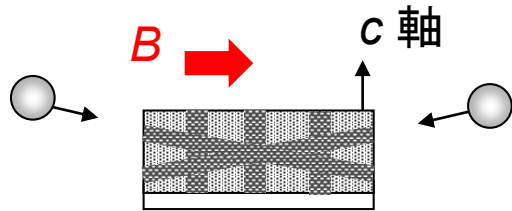


$$J_c @ B \parallel ab < J_c @ B \parallel c$$

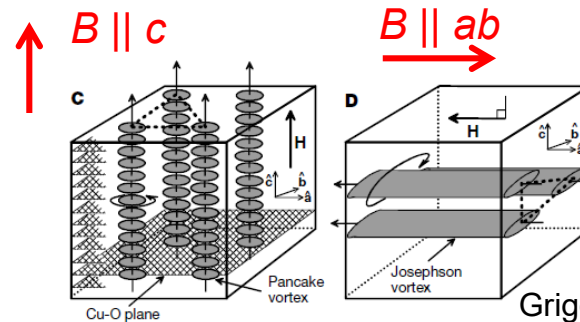
$J_c$  の異方性の低減  
→  $B \parallel ab$  の  $J_c$  制御も必要性

# $B \parallel ab$ での柱状欠陥による $J_c$ 制御の試み

$B \parallel ab$  の  $J_c$  制御 —  $ab$  面方向近傍にも柱状欠陥を同時に導入



- $B \parallel ab$  : 元々の  $J_c$  が高いため、ピン止め点導入による積極的な高  $J_c$  化の試みはほとんどない
- $B \parallel c$  と  $B \parallel ab$  で磁束構造が異なる



Grigorenko *et al.*  
Nature 414 (2001) 728.

$ab$  面方向での柱状欠陥のピン止め特性？

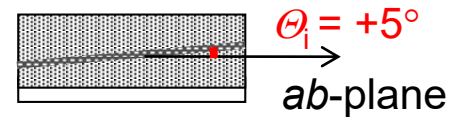
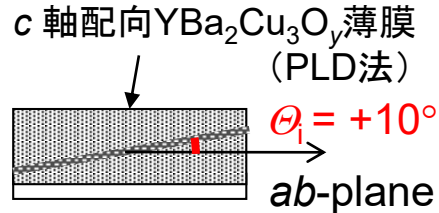
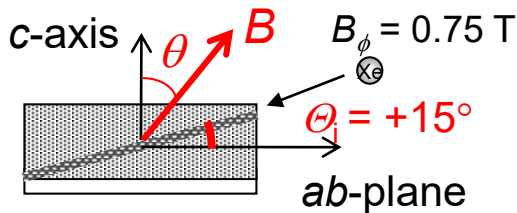
# ab 面方向への柱状欠陥の導入

重イオン照射 — YBCO薄膜に対して入射角度を制御して柱状欠陥を導入

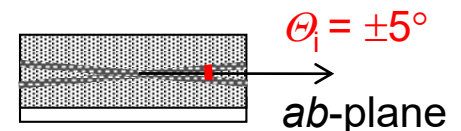
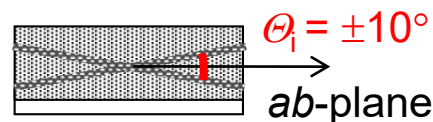
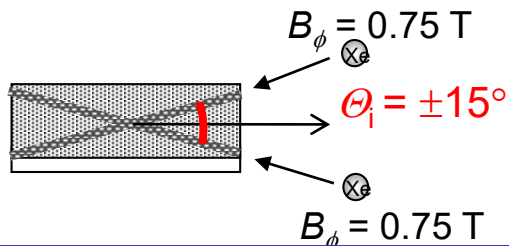
➡  $B \parallel ab$  近傍の磁束ピン止め現象を系統的に整理・その全容を解明

- ✓ 照射イオン: 200 MeV Xe
- ✓ 照射量: (傾斜)  $3.60 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> ( $B_\phi = 0.75$  T)
- ✓ 照射方向:  $ab$ 面に対して  $\pm\theta_i$
- (交差)  $7.20 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> ( $B_\phi = 1.5$  T)

## 傾斜した柱状欠陥

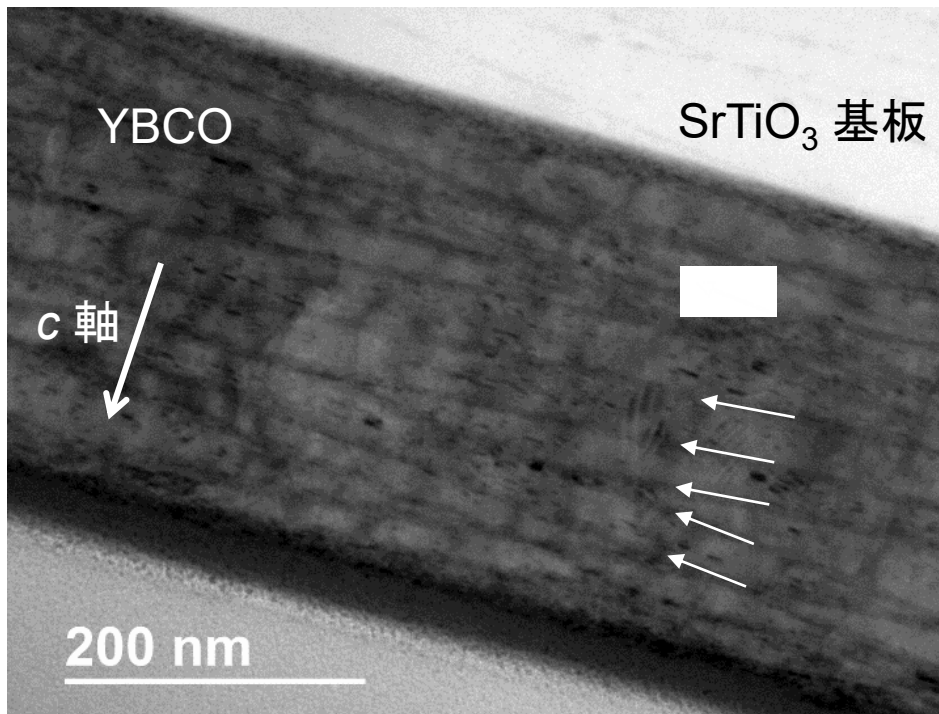


## 交差した柱状欠陥



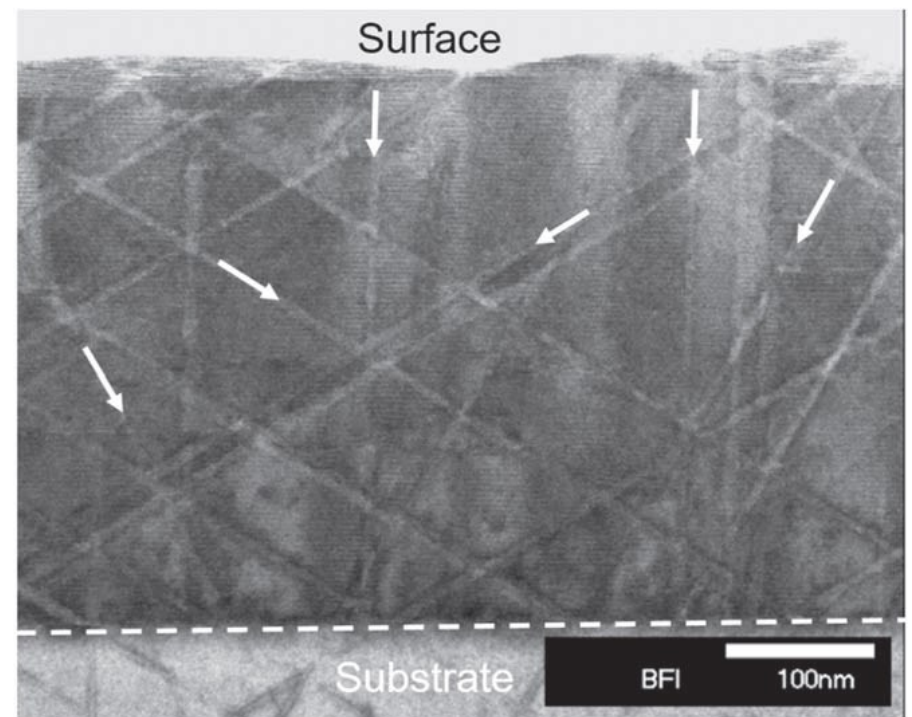
# ab面に低角度で導入した柱状欠陥の構造

200 MeV Xeイオン照射したYBCO薄膜の断面TEM像 ( $ab$ 面に対して $\pm 5^\circ$ )



径 5-6 nmの直線状の欠陥が薄膜を貫通

200 MeV Xeイオン照射したYBCO薄膜の断面TEM像 ( $c$ 軸に対して $0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ )

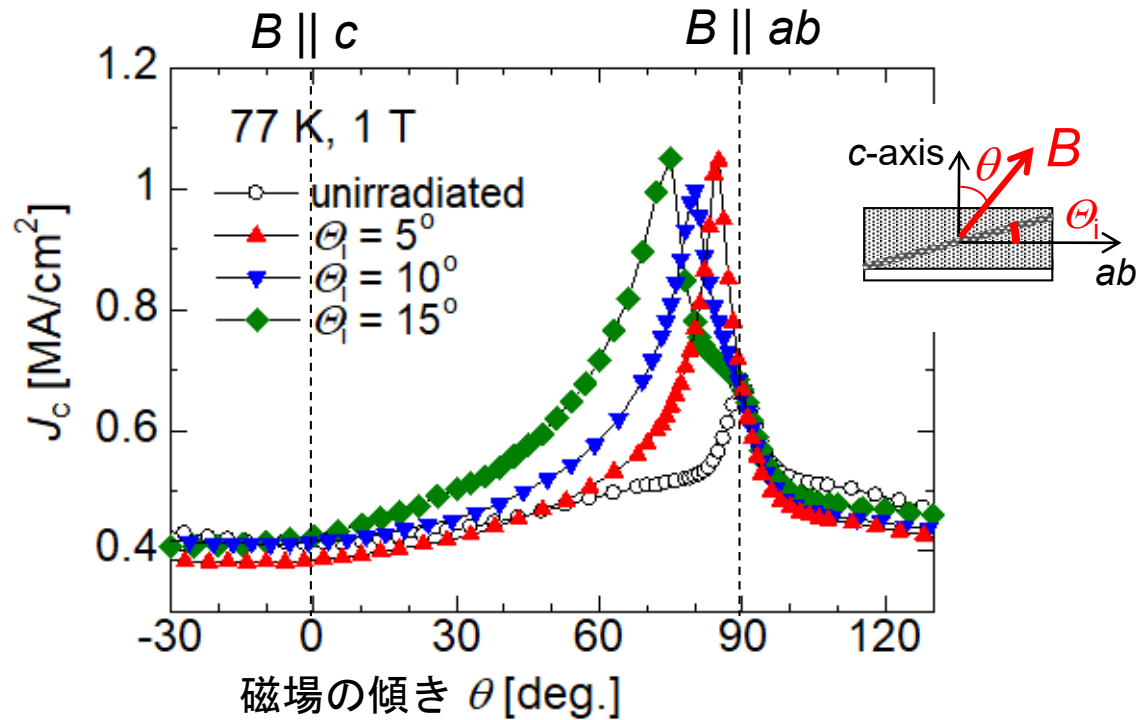


径 5-7 nmの直線状の欠陥が薄膜を貫通

Sueyoshi *et al.* SUST 31 (2018) 125002.



# ab面に傾斜した柱状欠陥を導入したときの $J_c$ 特性



✓ 照射方向で  $J_c$  のピークが出現

磁場と柱状欠陥の方向が一致したときに最大のピン止め



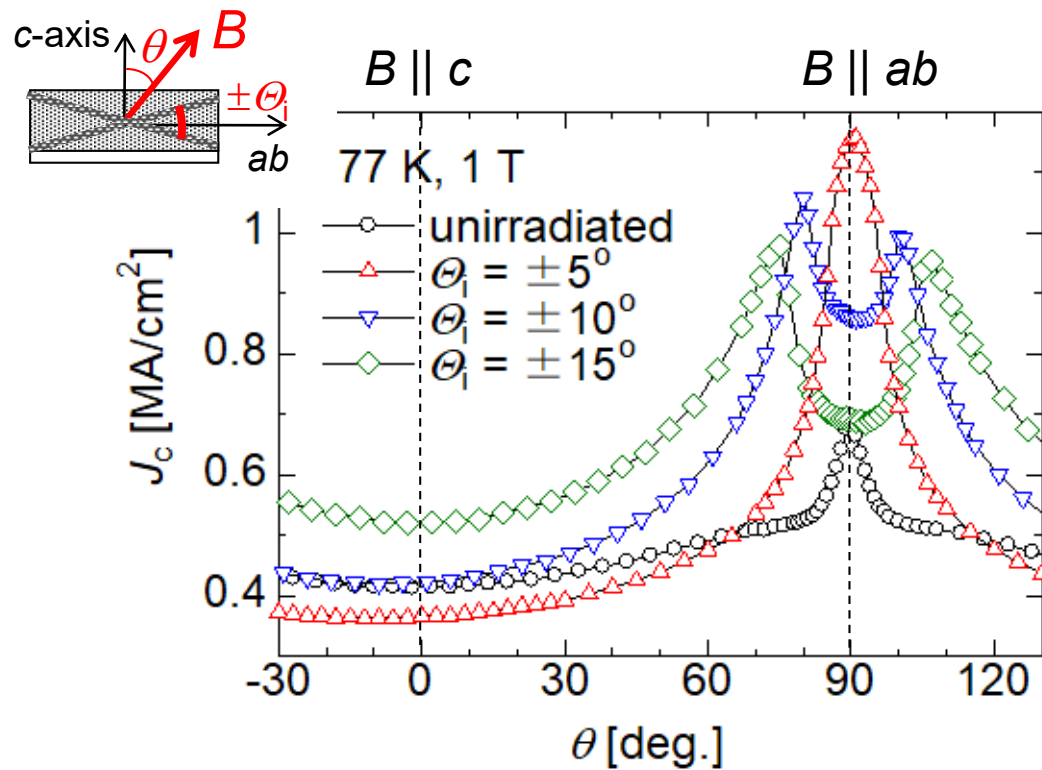
c軸方向に傾斜した柱状欠陥のピン止めと同様

✓ 照射角度に関わらず  $B \parallel ab$  および  $ab$  面に関して対称な磁場方向での  $J_c$  に変化が見られない



c軸方向に傾斜した柱状欠陥—広範囲にピン止めに寄与

# $ab$ 面に交差した柱状欠陥を導入したときの $J_c$ 特性



✓  $\theta_i \geq \pm 10^\circ$  :  $J_c$  のダブルピーク

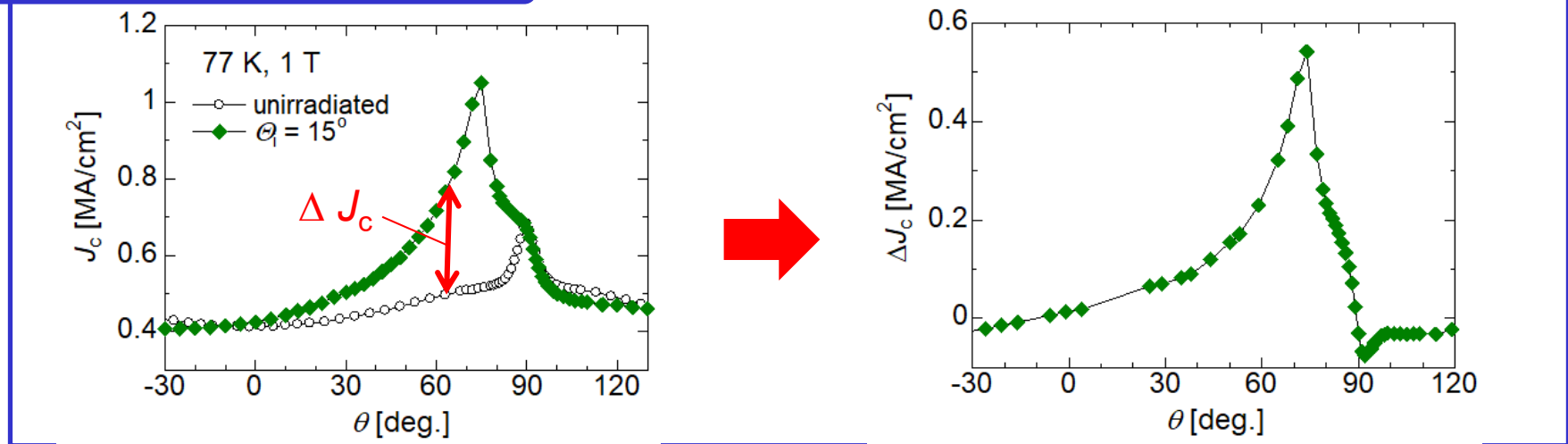
✓  $\theta_i = \pm 5^\circ$  :  $B \parallel ab$ で  $J_c$  の単一ピーク

$\theta_i = 5^\circ$  の傾斜した柱状欠陥では  
 $B \parallel ab$ で  $J_c$  の増加はない

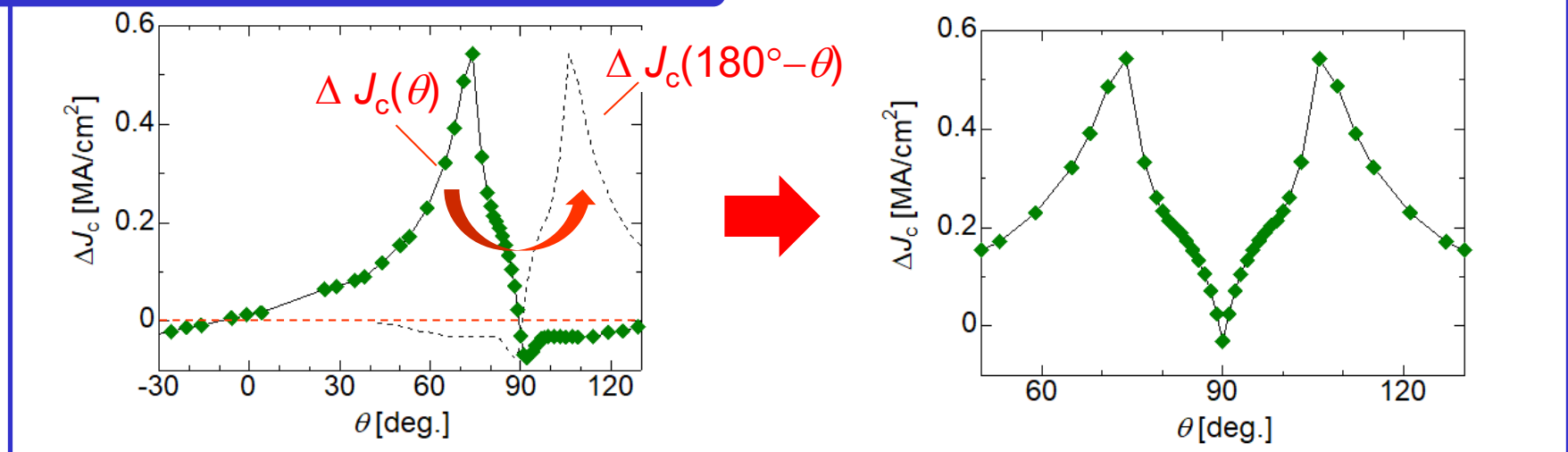
それぞれの傾斜した柱状欠陥の単純和？

# $B \parallel ab$ 付近の $J_c$ に対する柱状欠陥の評価

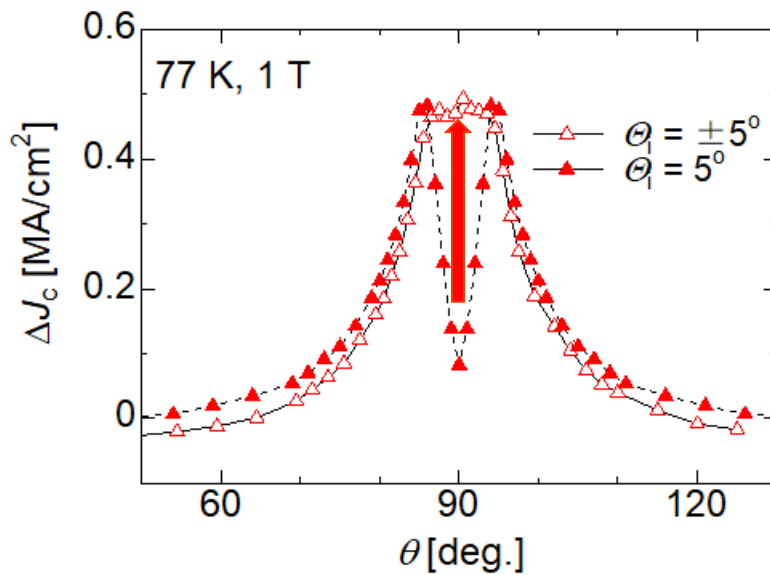
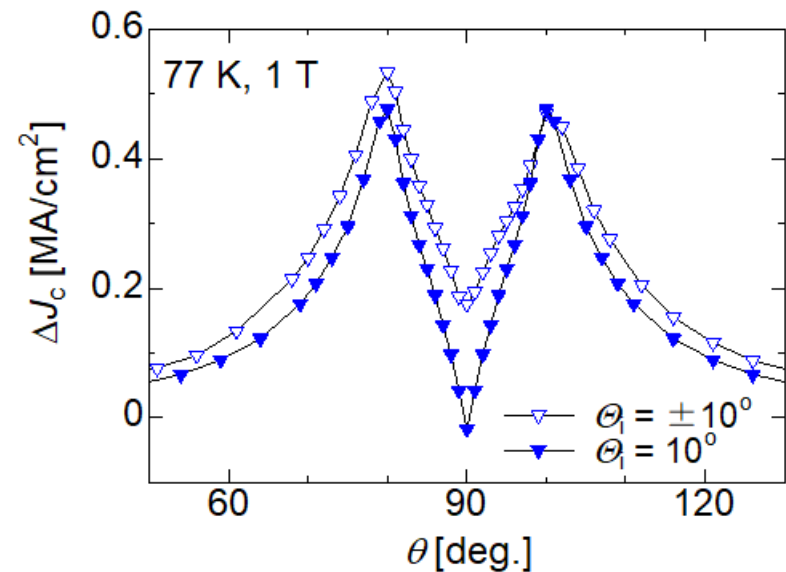
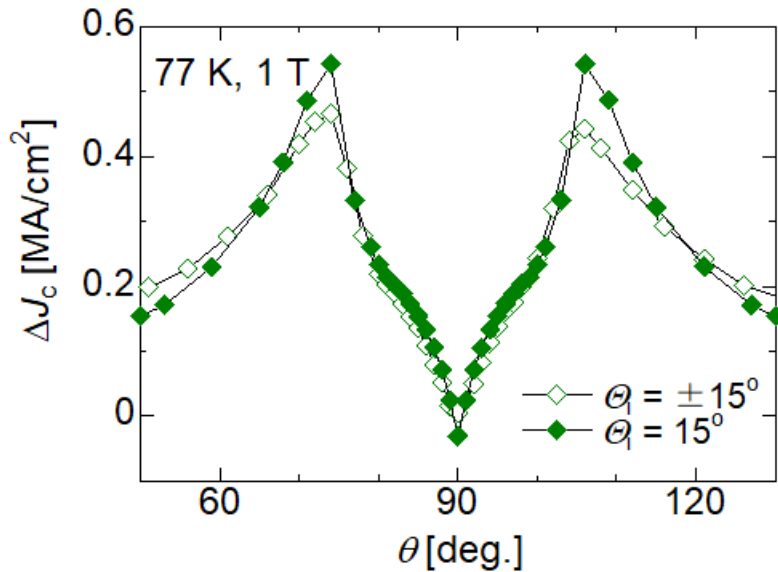
## 柱状欠陥の寄与—差分 $\Delta J_c$



## 傾斜した柱状欠陥の寄与の足し合わせ



# $B \parallel ab$ 付近の $J_c$ に対する柱状欠陥の寄与



- $\theta < 90^\circ - \theta_i$  ,  $\theta > 90^\circ + \theta_i$ 
  - ✓ 傾斜と交差の  $J_c$  — ほぼ同じ曲線
- $90^\circ - \theta_i < \theta < 90^\circ + \theta_i$ 
  - ✓  $\theta_i \leq \pm 10^\circ$  の交差した柱状欠陥において  
単純和と比較して  $B \parallel ab$  の  $J_c$  が増加

↓  
交差による相乗効果

