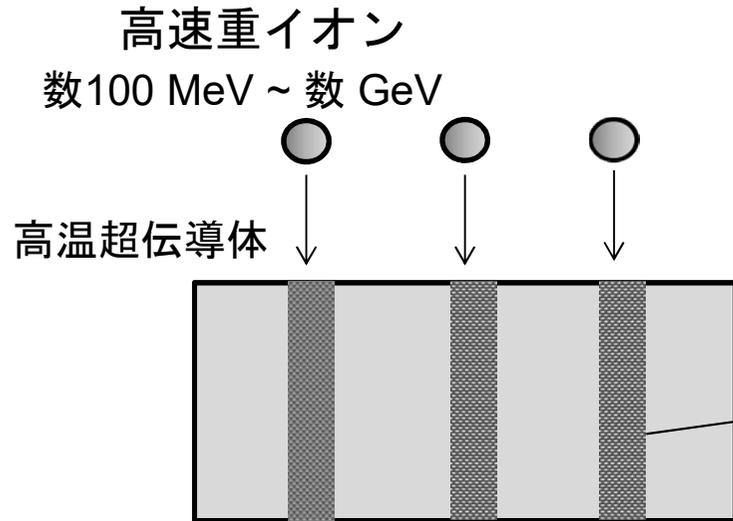


# 重イオン照射を用いた高温超伝導体の 臨界電流特性の改善

熊本大学 先端科学研究部

末吉 哲郎

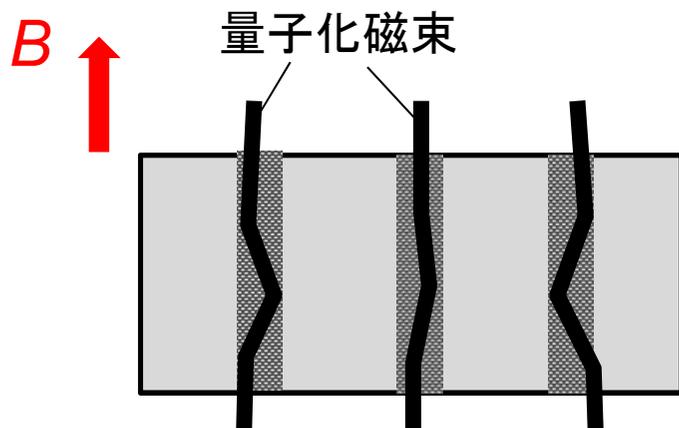
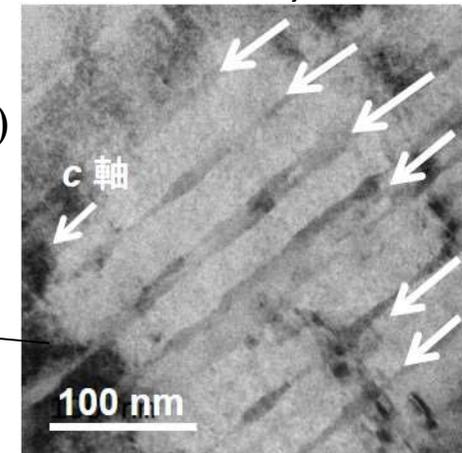
# 高温超伝導体に対する重イオン照射効果



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

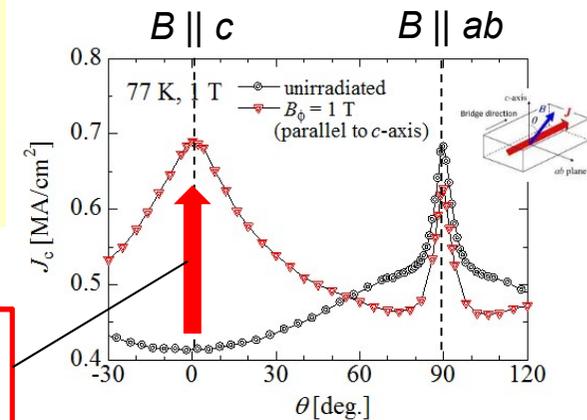


量子化磁束と同じ線状  
同程度のサイズ

→ 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

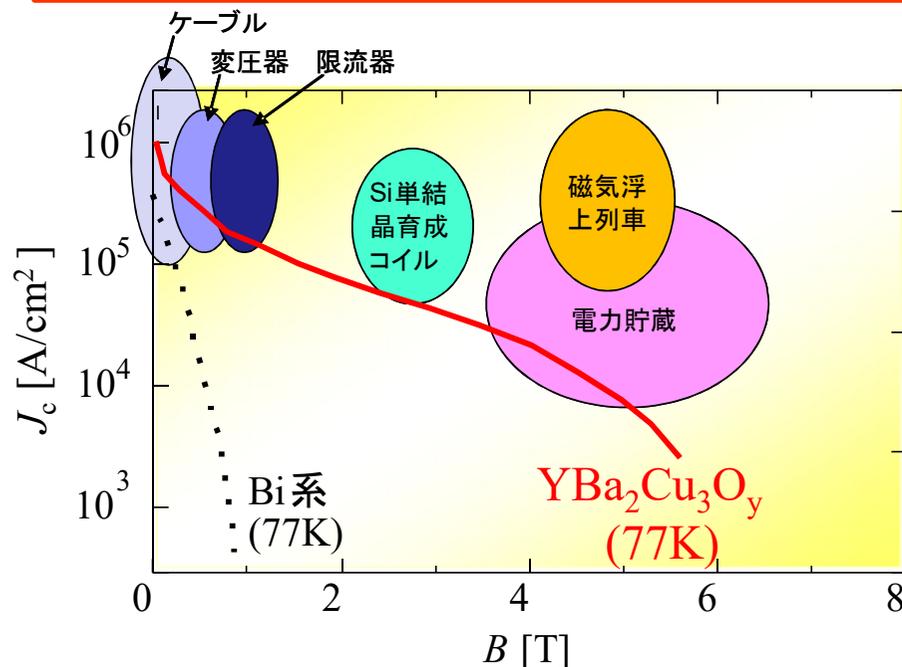


# 高温超伝導体を用いた線材開発の現状

- 希土類系高温超伝導体  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (RE: Y, Gd, Sm, etc.)

- ✓ 液体窒素温度以上の高い超伝導転移温度  $T_c$  (90 ~ 94 K) を示す.
- ✓ 高温超伝導体の中でも磁場中の臨界電流密度  $J_c$  が高い.

次世代高温超伝導線材の母材料として利用 — 各メーカーより市販化



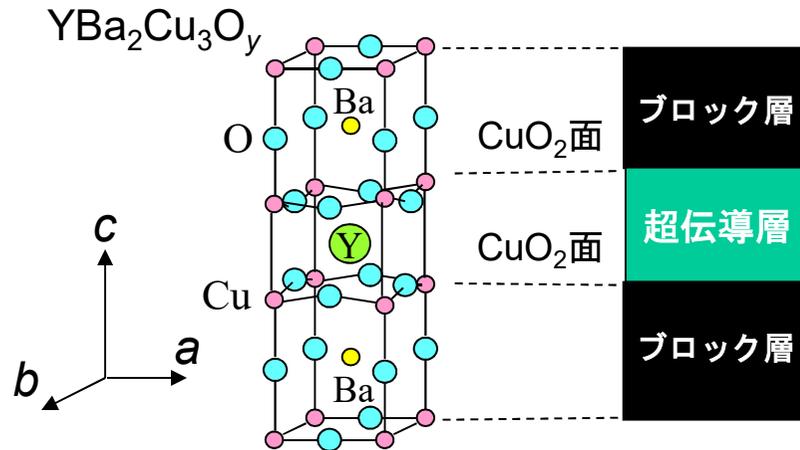
磁場中での超伝導応用

$J_c$  値が不足

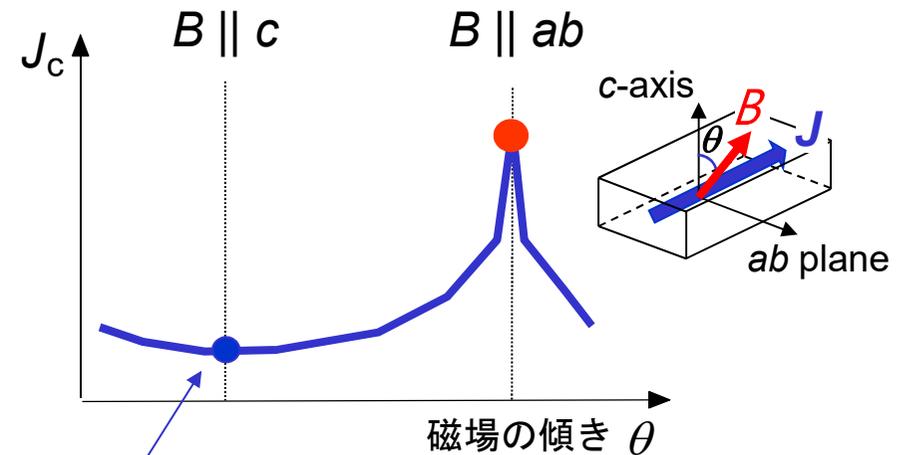
磁場中の量子化磁束のピン止めに  
十分なピン止め点の導入

# 高温超伝導線材のもう一つの課題 - $J_c$ の異方性

高温超伝導体 — 層状構造

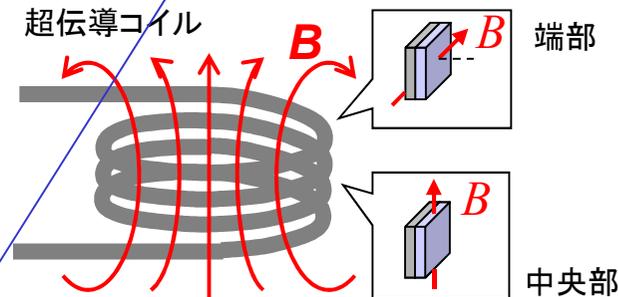


$J_c$  に異方性



## ● 高温超伝導線材 — コイル応用

コイルの中央部, 端部で  
異なる磁場方向に晒される

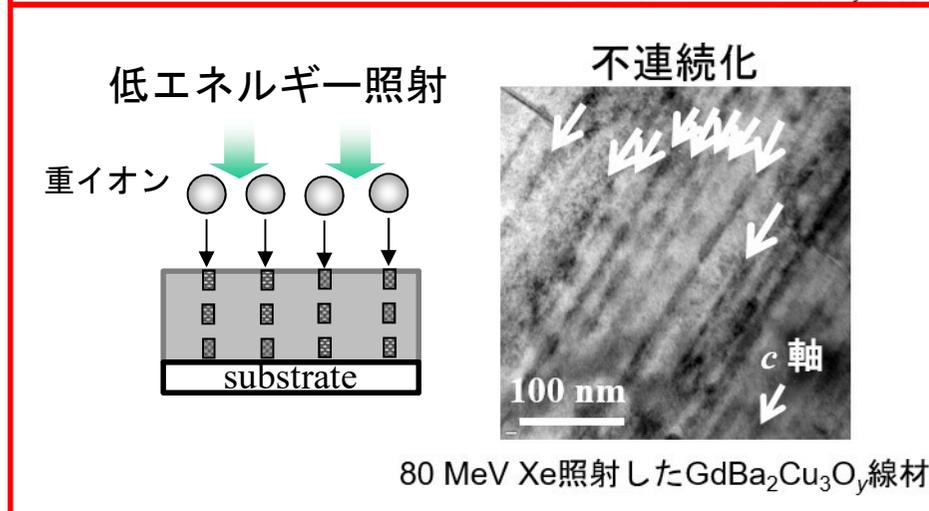
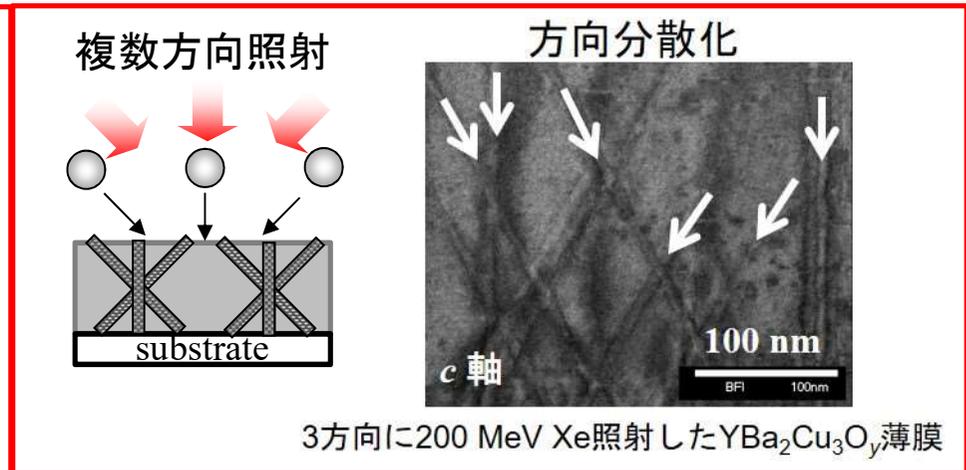
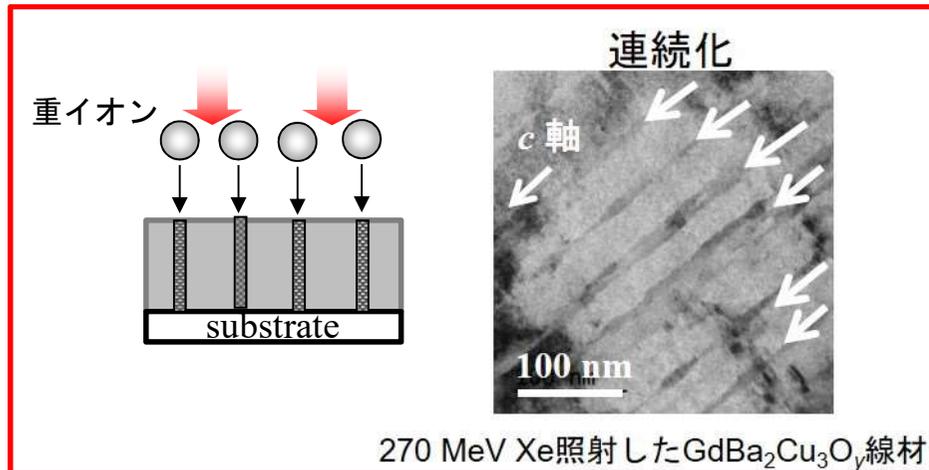


超伝導コイルの駆動電流 -  $J_c$  の最小値に制限

高  $J_c$  かつ  $J_c$  の異方性も改善  
可能な高機能ピン止め点の導入

# 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

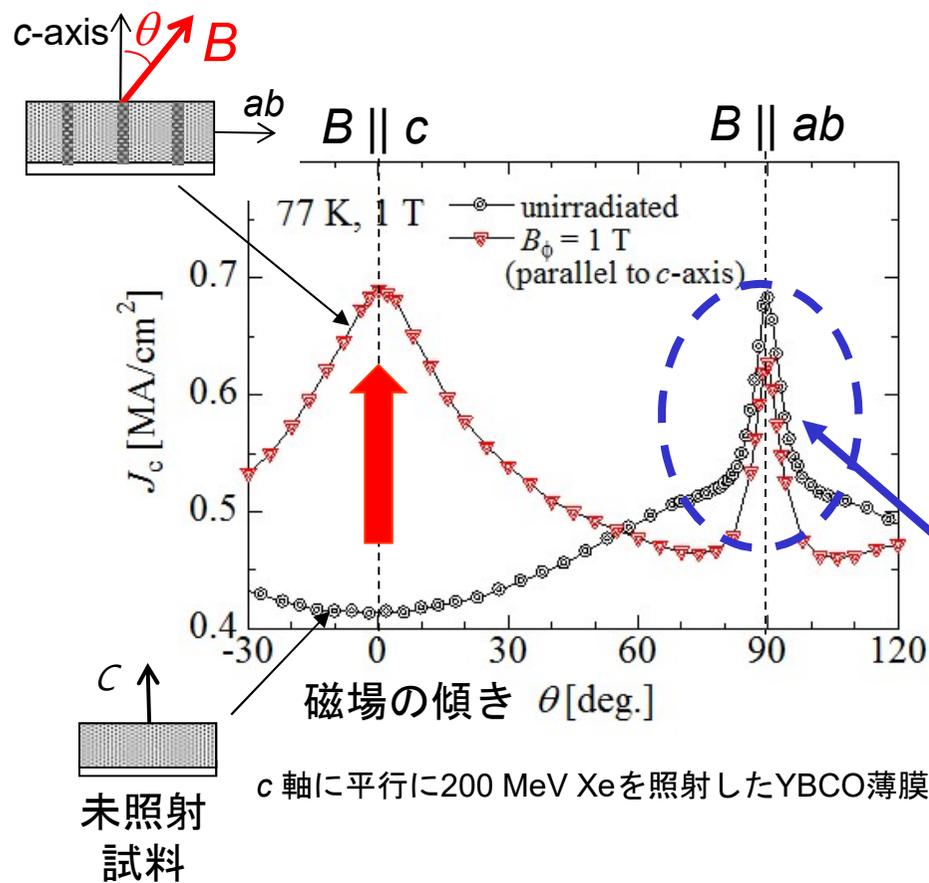
用途に合ったピン止め構造を効率的に構築できる可能性

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

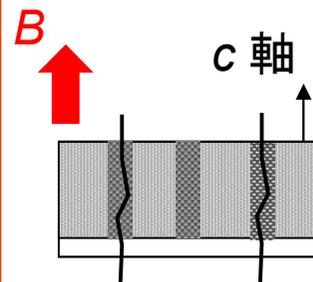
# 重イオン照射欠陥を用いた $J_c$ の異方性の制御

## ◆ 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



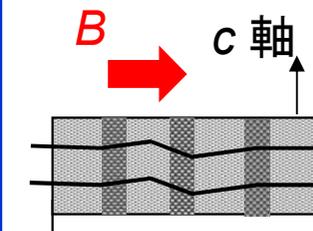
### $B \parallel c$ の $J_c$ 制御



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

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

### $J_c @ B \parallel ab$

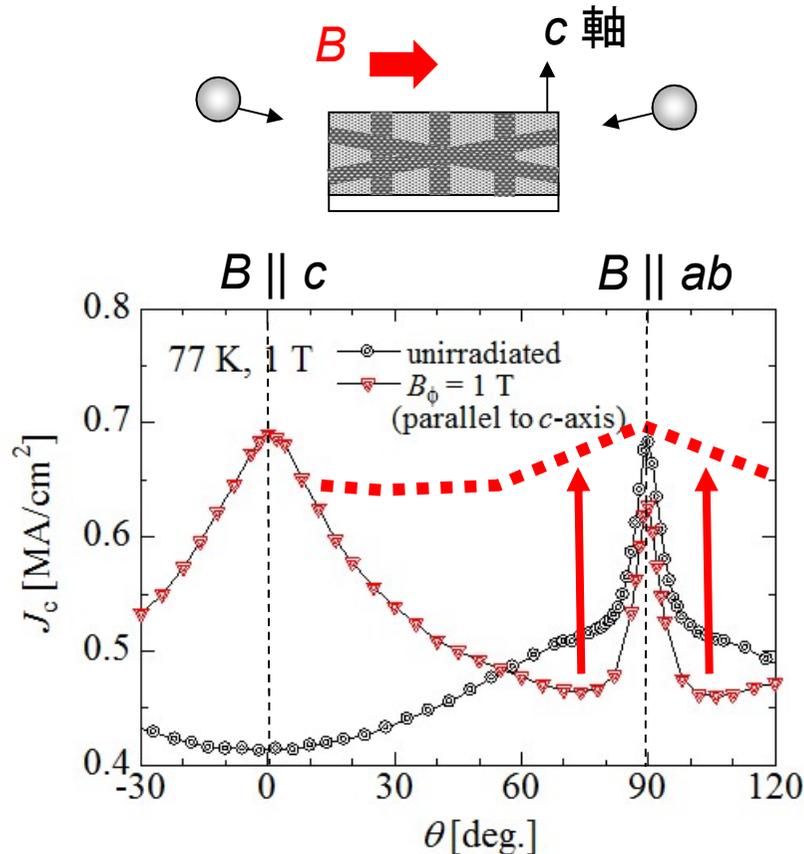


$$J_c @ B \parallel ab < J_c @ B \parallel c$$

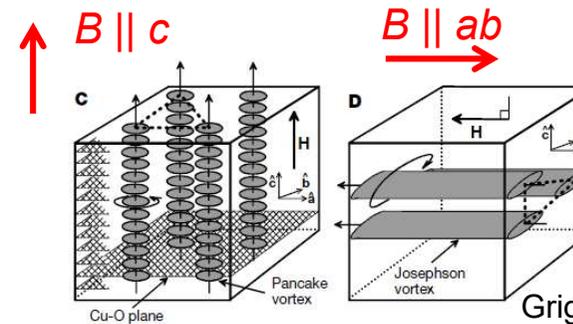
$J_c$  の異方性の低減  
 →  $B \parallel ab$  の  $J_c$  制御も必要性

# $B \parallel ab$ 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？

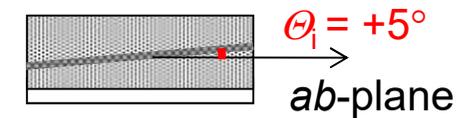
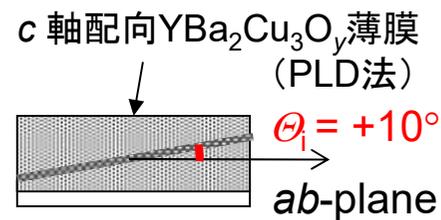
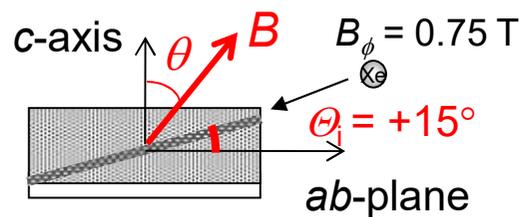
# ab 面方向への柱状欠陥の導入

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

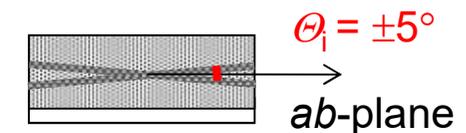
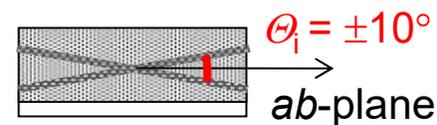
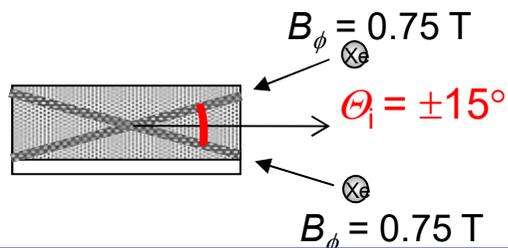
➡  $B \parallel ab$  近傍の磁束ピン止め現象を系統的に整理・その全容を解明

- ✓ 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

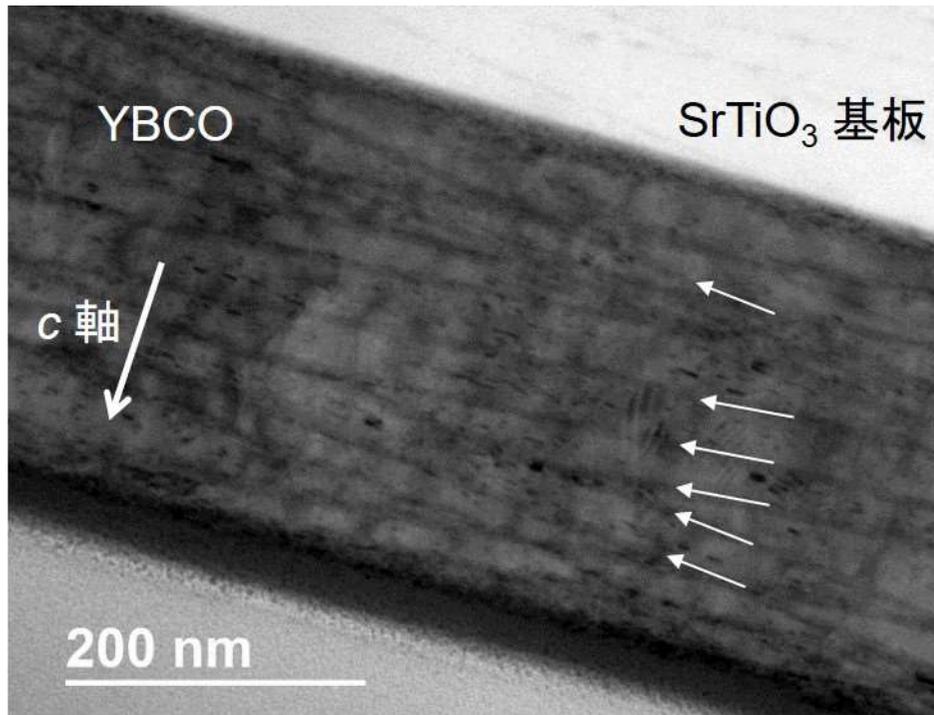


## 交差した柱状欠陥



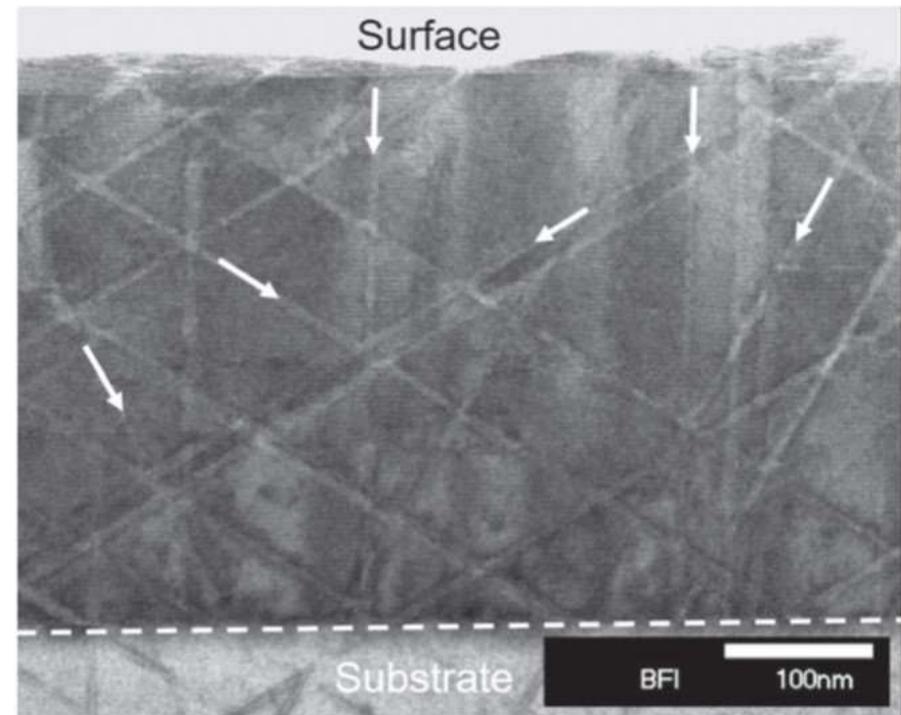
# $ab$ 面に低角度で導入した柱状欠陥の構造

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 $0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ )

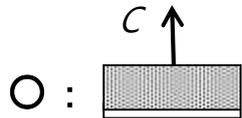


径 5-7 nmの直線状の欠陥が薄膜を貫通

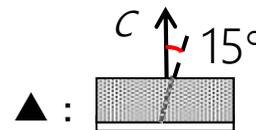
Sueyoshi *et al.* SUST 31 (2018) 125002.

# c 軸に傾斜/交差した柱状欠陥を導入したときの $J_c$ 特性

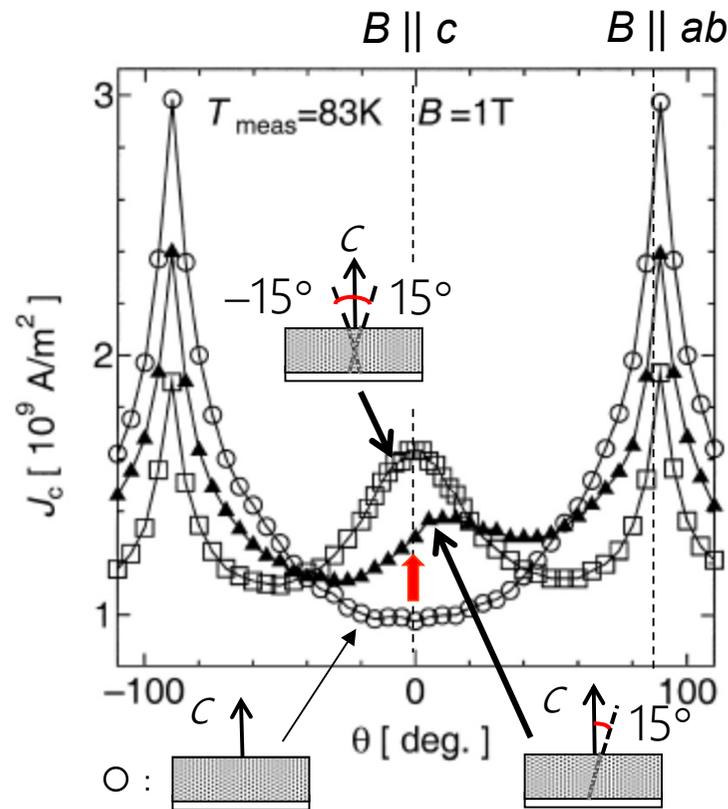
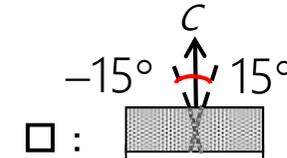
1. 照射前測定



2. 傾斜照射後に測定



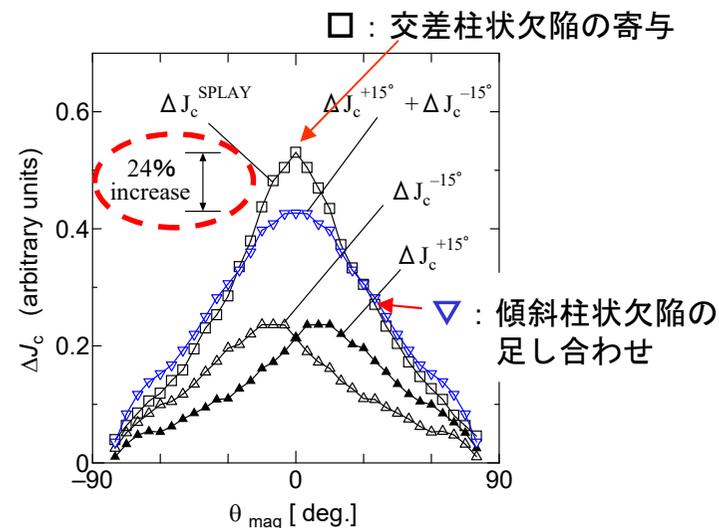
3. 交差照射後に測定



Ishikawa et al. Physica B 284-288 (2000) 873.

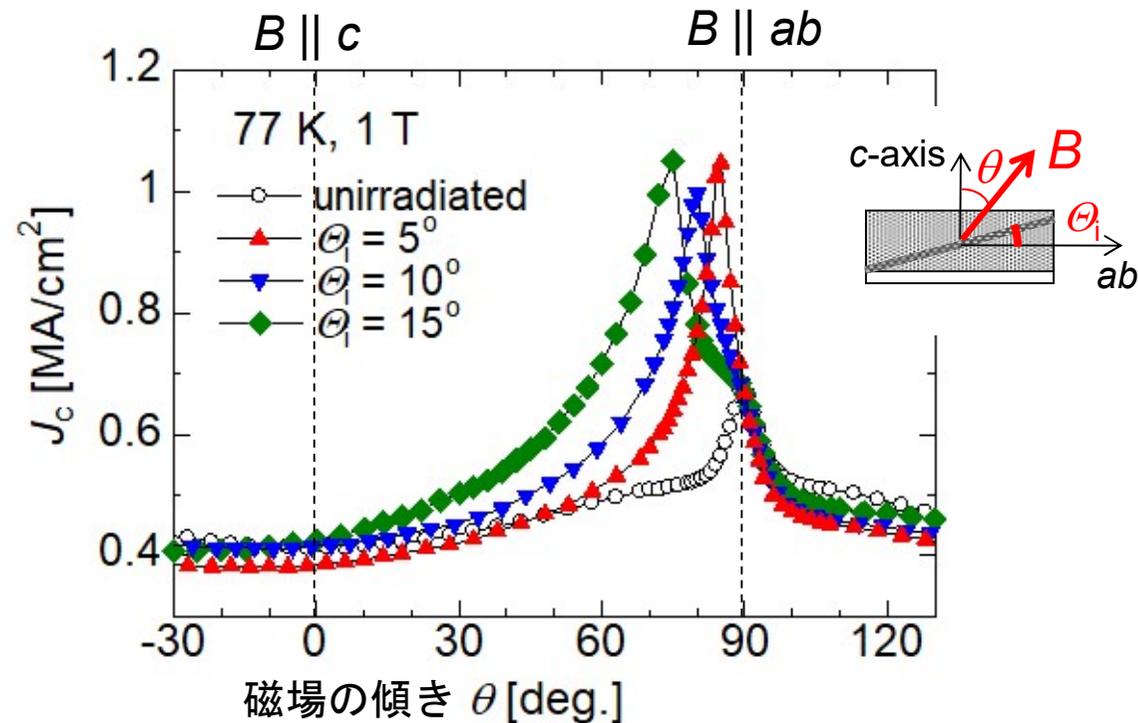
- ◆ 傾斜した柱状欠陥 :  
導入方向を中心とした  $J_c$  のピーク  
 $J_c$  の増加 : c 軸方向を含めた広範囲の磁場方向にわたる
- ◆ 交差した柱状欠陥 :  
~  $\pm 30^\circ$  までの交差角において  
c 軸方向を中心に  $J_c$  の増加

傾斜した柱状欠陥の  
寄与の足し合わせ  
以上の増加



交差による相乗効果  
(スプレイ効果)

# $ab$ 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

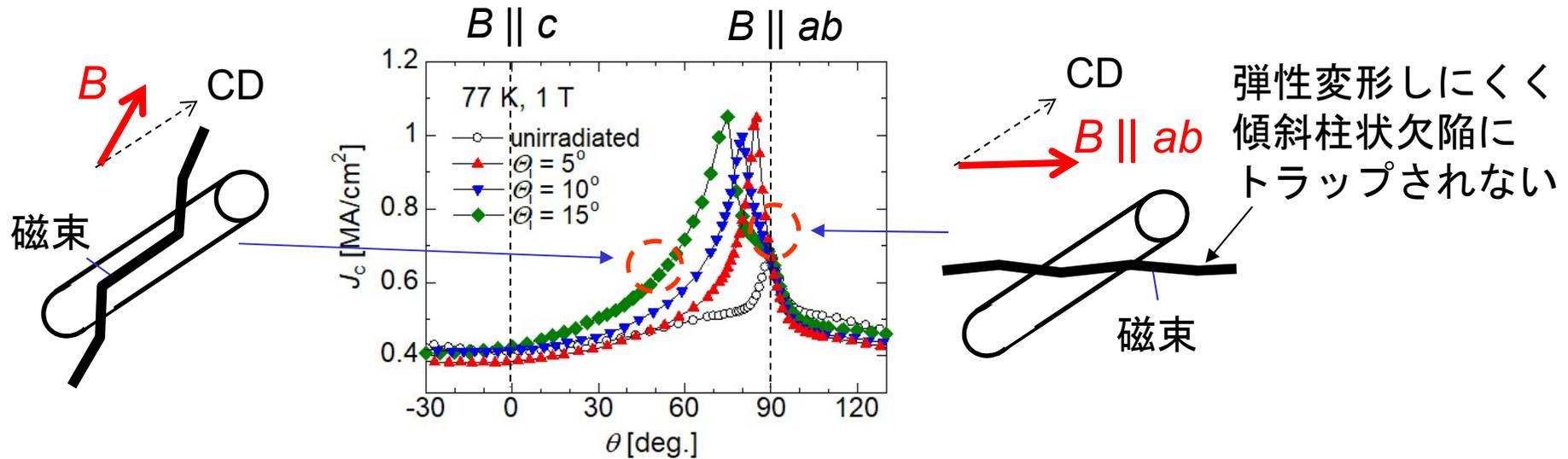
✓ 照射角度に関わらず  $B \parallel ab$  および  $ab$  面に関して対称な磁場方向での  $J_c$  に変化が見られない



$c$  軸方向に傾斜した柱状欠陥—広範囲にピン止めに寄与

# B || ab での傾斜した柱状欠陥によるピン止め

✓ 磁束線の弾性特性の異方性 — 磁束が B || ab 面付近では“固くなる”



Flux line

CuO<sub>2</sub> plane

$\xi$

$\xi$

$\varepsilon(\Theta)\xi$

$\Theta$

$$\varepsilon_l^\perp(\Theta) \sim \frac{\varepsilon_0}{\gamma^2 \varepsilon(\Theta)^3}$$

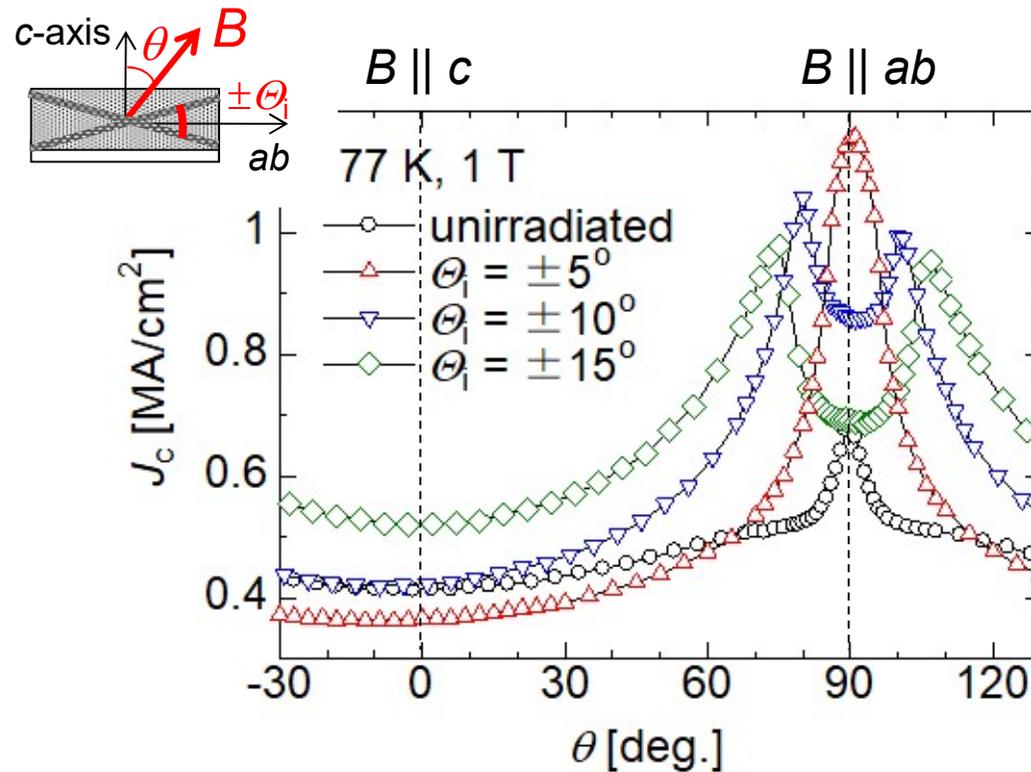
$$\varepsilon(\Theta) = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} \cos^2 \Theta + \sin^2 \Theta}$$

(Blatter et al. Rev. Mod. Phys. 66 (1994) 1125.)

$\varphi_t \sim \sqrt{\frac{2\varepsilon_p}{\varepsilon_l}}$  : 柱状欠陥の  
トラップ角  
(ピン止めの影響が  
及ぶ範囲)

- $\theta_1 = 15^\circ \rightarrow \varphi_t \sim 7-8^\circ$
- $\theta_1 = 10^\circ \rightarrow \varphi_t \sim 5-6^\circ$
- $\theta_1 = 5^\circ \rightarrow \varphi_t \sim 4^\circ$

# $ab$ 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

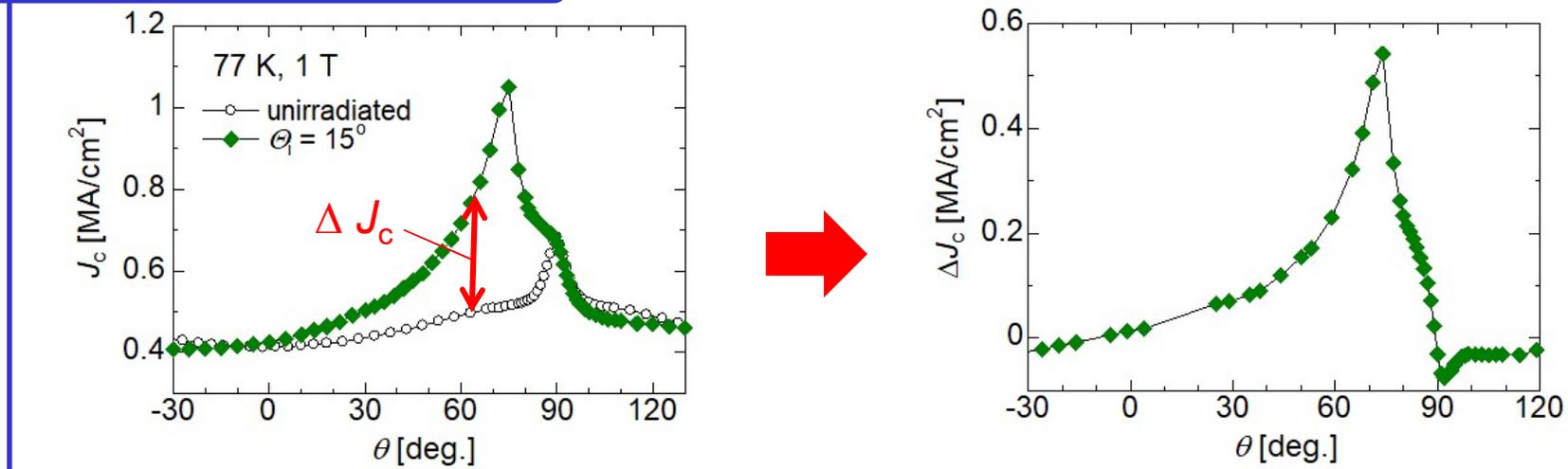
✓  $\theta_i = \pm 5^\circ$  :  $B \parallel ab$  で  $J_c$  の単一ピーク

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

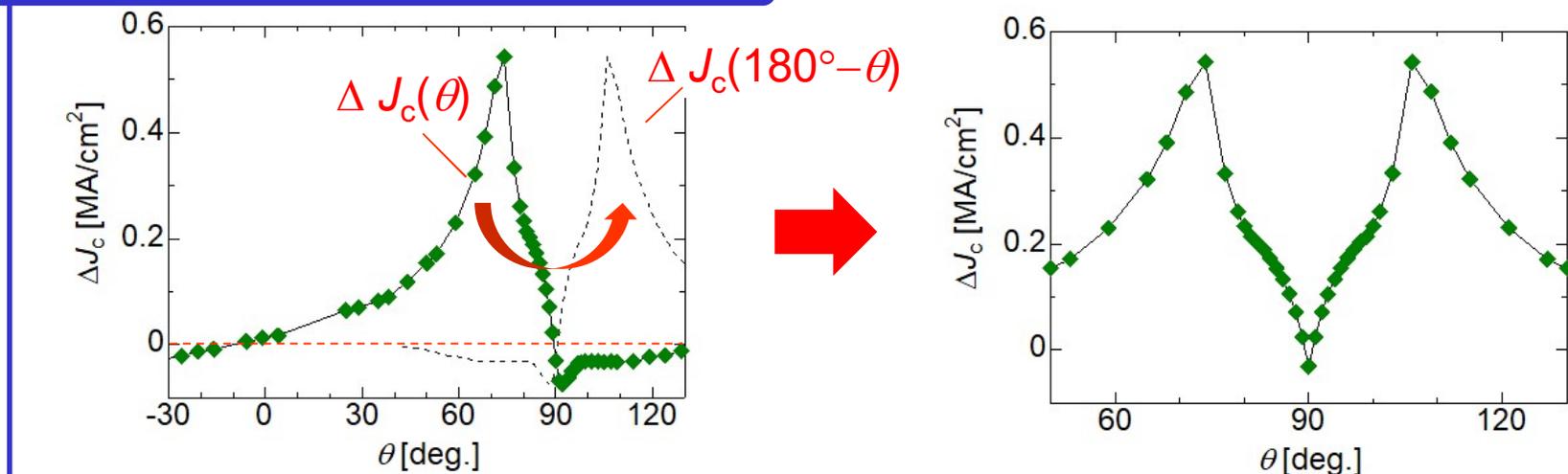
それぞれの傾斜した柱状欠陥の単純和？

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

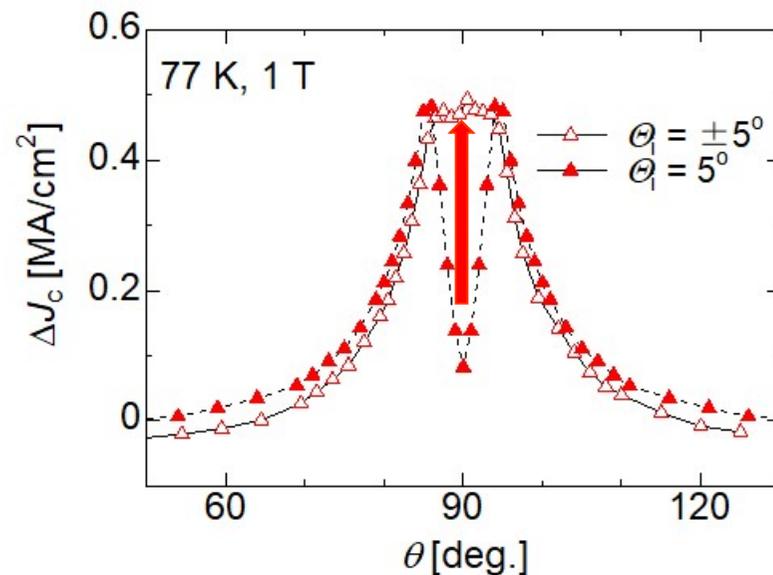
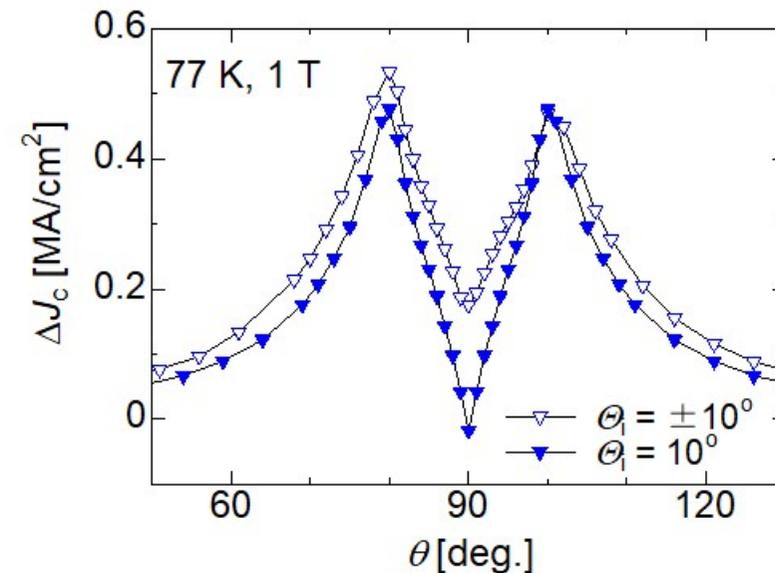
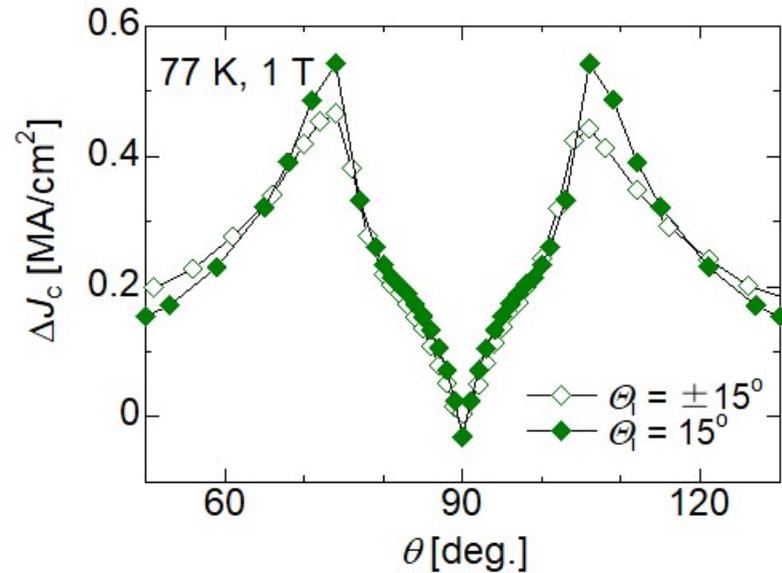
## 柱状欠陥の寄与 - 差分 $\Delta J_c$



## 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

## まとめ

- $ab$  面に交差した柱状欠陥
  - $ab$  面に傾斜した柱状欠陥
- 重イオン照射によりYBCO薄膜に導入



高温超伝導体の  $B \parallel ab$  での磁束ピン止めに対する柱状欠陥の影響

- 照射方向での  $J_c$  のピーク -  $B \parallel ab$  付近でも柱状欠陥のピン止め：有効
- $B \parallel ab$  での傾斜した柱状欠陥のピン止め
  - ✓ 傾斜角  $\theta_i = 5^\circ$  においても,  $B \parallel ab$  の  $J_c$  への影響がない
- $B \parallel ab$  での交差した柱状欠陥のピン止め
  - ✓  $\theta_i = \pm 5^\circ$  において,  $B \parallel ab$  の  $J_c, n$  値が増加

傾斜した柱状欠陥の単純和では説明できない

様々なピン止め点を導入可能な重イオン照射

➡  $B \parallel ab$  での柱状欠陥のピン止めによる  $J_c$  制御の指針を明らかにした