

# パルス中性子を用いた日本刀 製造過程試料の結晶組織変化の研究

堀元紀<sup>1)</sup>、田中真奈子<sup>2)</sup>、山崎淳<sup>1)</sup>、渡辺賢一<sup>1)</sup>、鬼柳善明<sup>1)</sup>、瓜谷章<sup>1)</sup>  
名大工<sup>1)</sup>、東京芸大<sup>2)</sup>

## 鉄文化財

- ・日本刀
  - ・火縄銃
- などの鍛造品や鑄造品

## 不明な点

製造方法  
材料特性

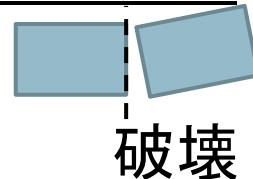
産地  
年代

それらの解明のため、  
結晶組織情報の収集が  
望まれる。

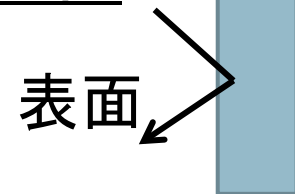
文化財保護のため  
**非破壊分析**が  
望ましい

〈現状〉

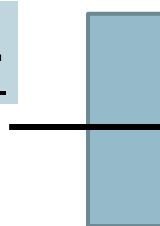
断面観察



X線



中性子



バルク内部  
透過

- ・金属に対する透過性が高い

中性子は  
金属の**非破壊分析**に  
非常に有効

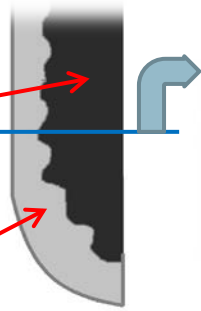
# 日本刀の材料特性と製造工程の一例

## 材料特性

軟らかい鉄

硬い鉄

断面図例



刃先

内側(心鉄)

炭素少ない  
0.5~1.2mass%C

炭素多い  
1.0~1.5mass%C

外側(皮鉄)

$\alpha$ -Fe(フェライト)+パーライト

- ・純鉄に微量のCが固溶した鉄
- ・軟らかい

マルテンサイト( $\alpha'$ )

- ・Cを多く固溶した鉄
- ・硬くてろい・急冷(焼入れ)で得られる

パーライト+セメンタイト( $\theta$ -Fe)

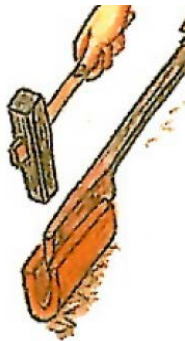
- ・鉄炭化物: $Fe_3C$
- ・硬くてろい

## 製造工程

組み合わせる



炭素の量調整

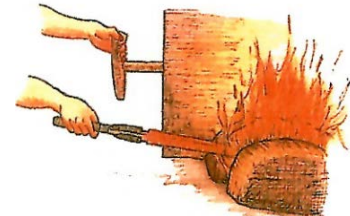


鍛える



炭素量の減少・増加

加熱 ・冷やす



水 [1]

マルテンサイト、セメンタイトの形成

製造過程によって炭素量や特性が変化する

パルス中性子透過法



応用

鉄文化財

- これまで不明だった製造方法や材料特性の解明
- 非破壊分析の確立(系統的な研究に繋がる)

## 日本刀の製造過程の測定

鍛造や熱処理加工による結晶組織の変化を非破壊で確認

⇒各製造過程における組織情報の2Dマッピング像の作製

今回の発表内容:

製造過程試料毎に棟から刃にかけて、  
1.6mm×1.6mmごとに細かく解析を行い、  
場所による格子面間隔(110)の変化を調査  
⇒製造方法(鍛え方、熱処理)の影響を見る

## 製造過程

製造過程途中の10種の試料

一部試料

組み合わせる



積み沸かし材

鍛える



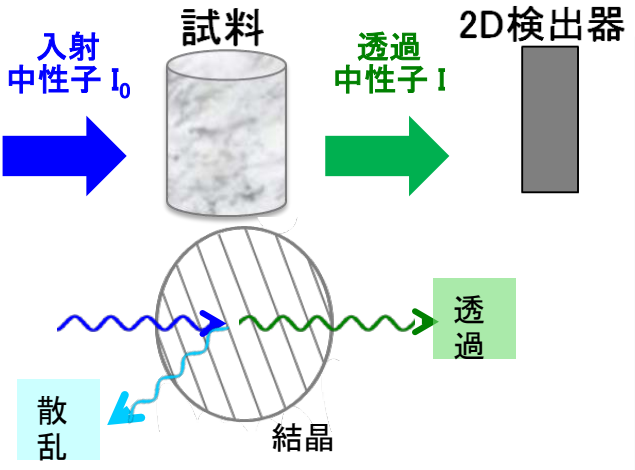
火造り材

冷やす

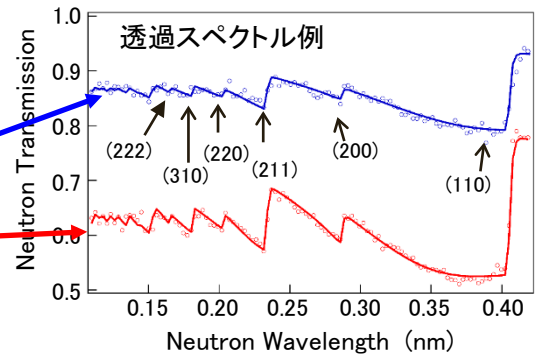
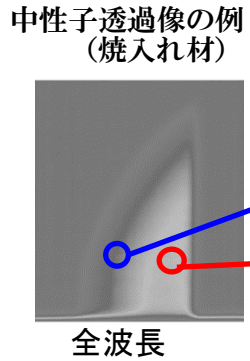


焼入れ材

# パルス中性子透過測定



## ブラッグエッジ(透過スペクトル)



## 中性子飛行時間と中性子数の測定

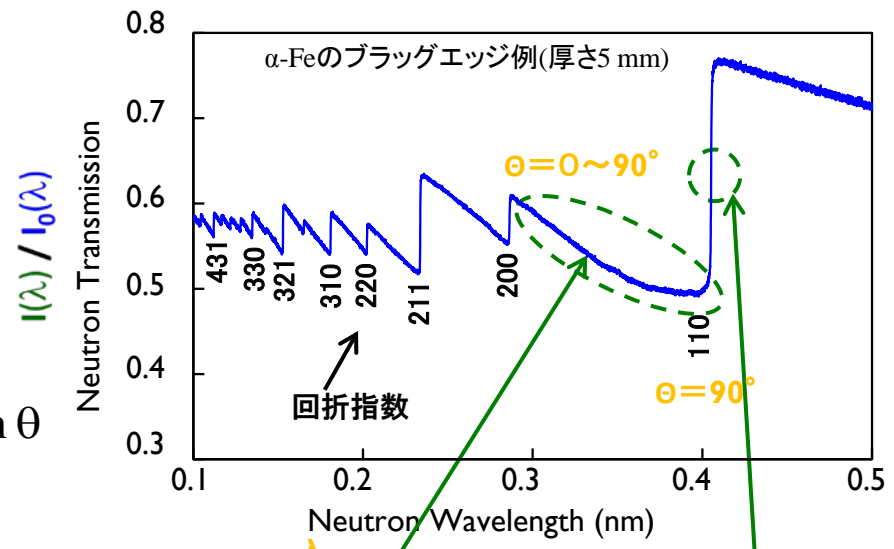
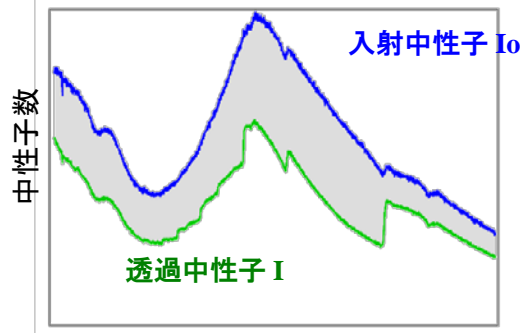


$$I / I_0$$

ブラッグの法則

$$\lambda = 2d_{hkl} \times \sin \theta$$

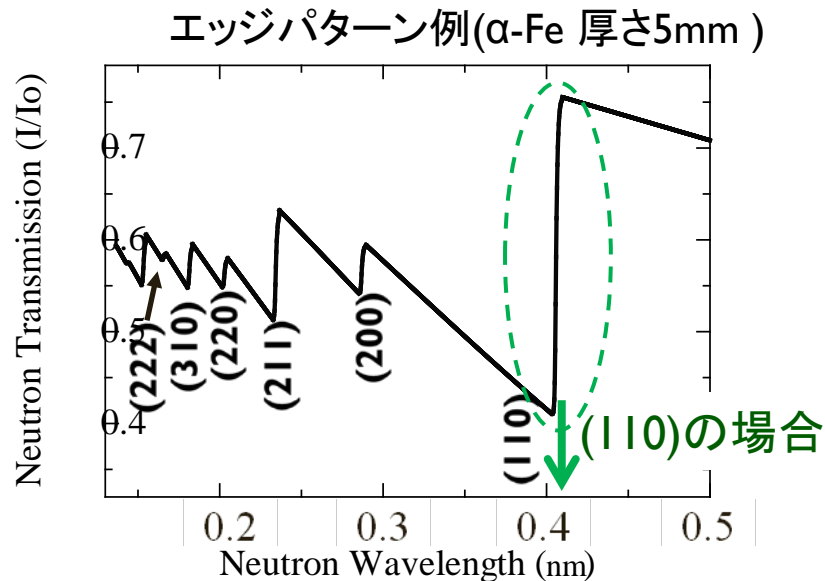
- エッジパターン (位置 & 高さ)
- 結晶構造
  - 結晶相



- 形状変化 & 強度増加
- 集合組織 (配向性)
  - 結晶子サイズ

- エッジ出現波長
- 結晶格子面間隔

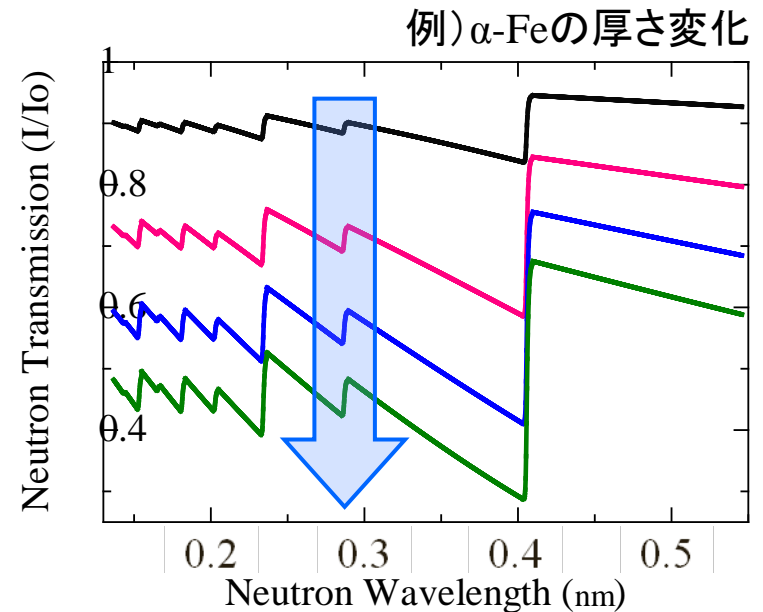
## 格子面間隔 $d$



エッジの所 ( $\theta=90^\circ$ )  $\lambda = 2d \times \sin 90^\circ$   
 $= 2d$











- エッジの位置から  
格子面間隔  $d$  の算出が可能

## 厚さ(面密度)



- 厚いほど透過率が下がる

# 日本刀の製造過程試料①

<p>①積み沸かし材 (皮鉄用)</p>	<p>②下鍛え材</p>	<p>③上鍛え材 (皮鉄)</p>	<p>④心鉄</p>	<p>⑤素延べ材</p>
 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>
<p>厚さ 7.8 mm</p>	<p>厚さ 19.5 mm</p>	<p>厚さ 15.2 mm</p>	<p>厚さ 9.2 mm</p>	<p>厚さ 9.5 mm</p>
<p>⑥火造り材</p>	<p>⑦焼入れ材</p>	<p>⑧荒研ぎ材</p>	<p>⑨赤かまし材</p>	<p>⑩鍛冶研ぎ材</p>
 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>	 <p>10 mm</p>
<p>厚さ 5.1~0.1 mm</p>	<p>厚さ 5.2~0.1 mm</p>	<p>厚さ 5.6~0.4 mm</p>	<p>厚さ 5.8~0.5 mm</p>	<p>厚さ 5.7~0.1 mm</p>

# 日本刀の製造過程試料②

①積み沸かし材  
(皮鉄用)



炭素量  
1.0~1.5mass%C

積み沸かし材  
(心鉄用)

炭素量  
0.5~1.2mass%C

②下鍛え材



折り返し  
鍛錬6回

③上鍛え材  
(皮鉄)



折り返し  
鍛錬6回

④:心鉄



折り返し  
鍛錬8回



じ字を使って曲げ  
Shaped, using a  
皮鉄完成  
kawagane



心鉄完成  
shingane

皮鉄と心鉄を  
組み合わせ  
棒状に打ち延ばす

⑤素延べ材



断面予想図

心鉄

皮鉄

⑥火造り材



叩いて  
刃側を  
打ち出す

800~900°C  
に加熱した後  
水に入れ急冷  
(焼き入れ)



⑦焼入れ材

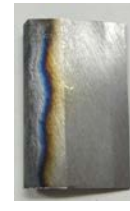
やすりなどを  
用いて研ぎ、  
表面の酸化被膜  
を取り除く

⑧荒研ぎ材



200~300°Cで  
焼き戻し、  
約900°Cの銅の  
上に棟の部分  
を置き、棟の部分  
のそりを調整する

⑨赤かまし材



⑩鍛冶研ぎ材

叩いたり  
砥石で  
研ぐこと  
で形を調  
整する  
(特に真  
中)

断面予想図





# 実験方法（実験施設・検出器）

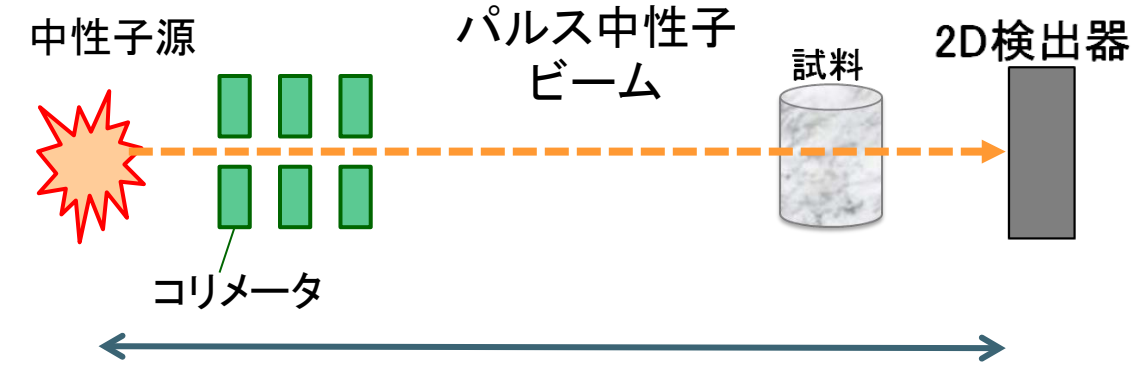
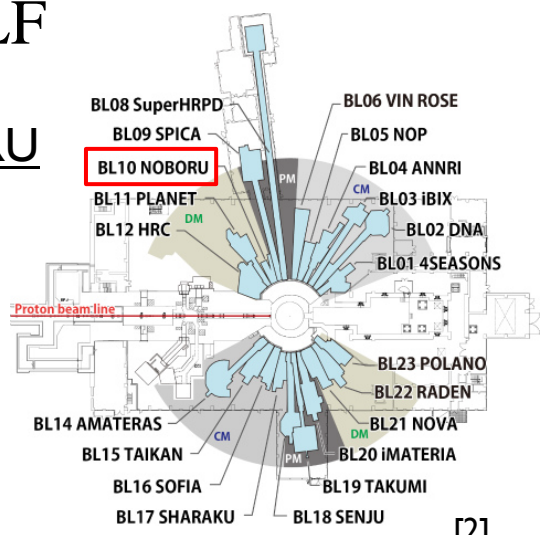
## 実験施設

大強度陽子加速器施設  
J-PARC (茨城県東海村)



物質・生命科学実験施設  
MLF

BL10  
NOBORU



中性子飛行距離L(m)  
BL10: 14.6 (m)  
BL22: 23.9 (m)

## 検出器



GEM型2次元  
中性子検出器  
(GEM:Gas Electron  
Multiplier)

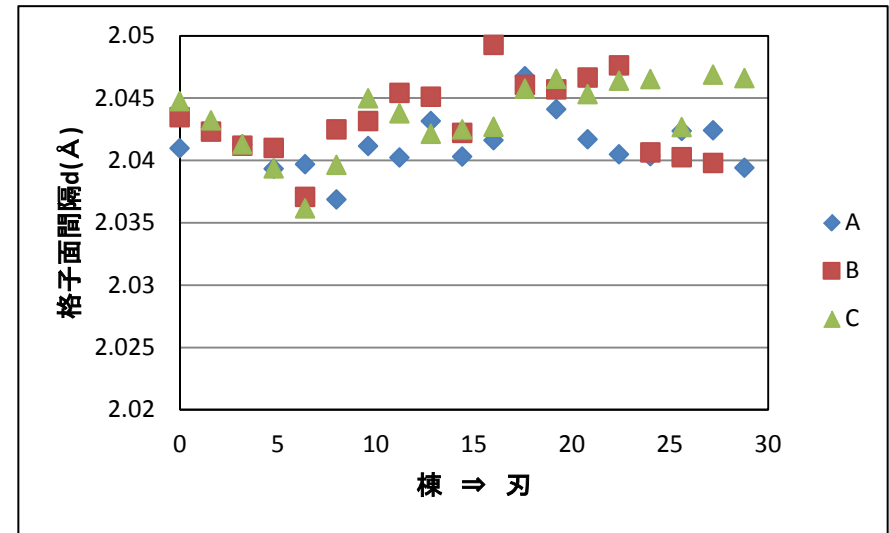
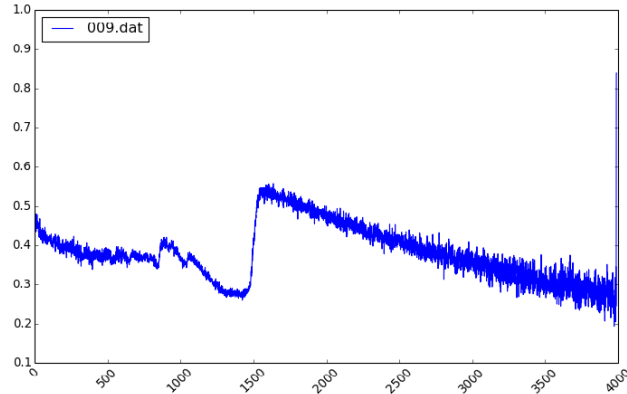
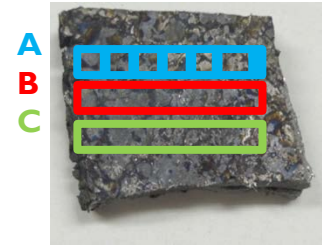
画素サイズ:  
800  $\mu$ m  
検出面積:  
10 cm  $\times$  10 cm

[2]

# 格子面間隔d

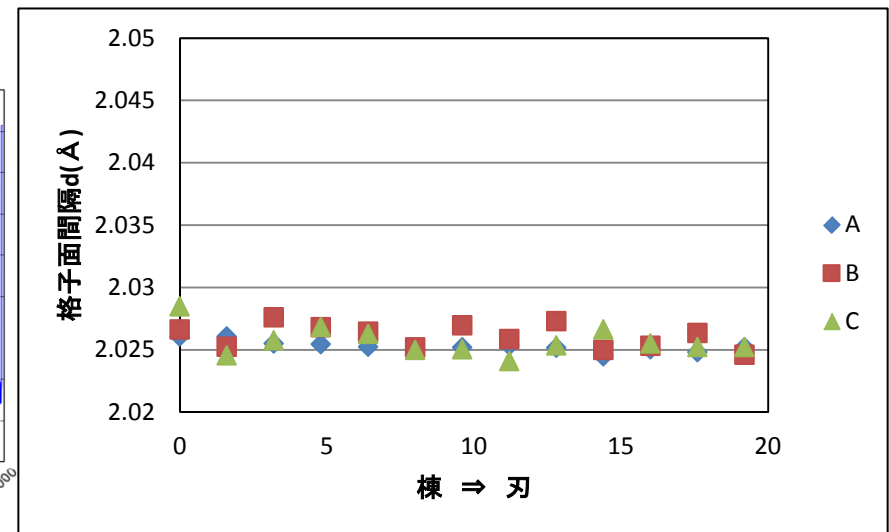
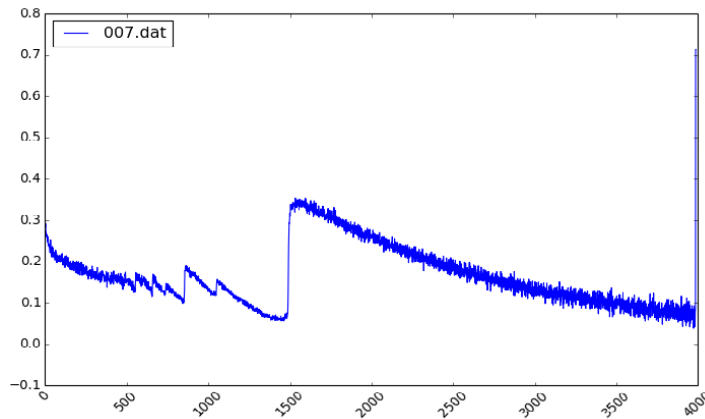
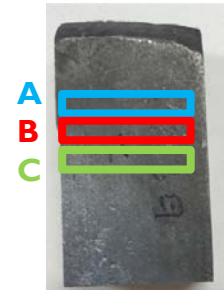
## ①積み沸かし材(皮鉄用)

1.0~1.5mass%C



## ②下鍛え材

積み沸かし材を折り返し鍛錬6回



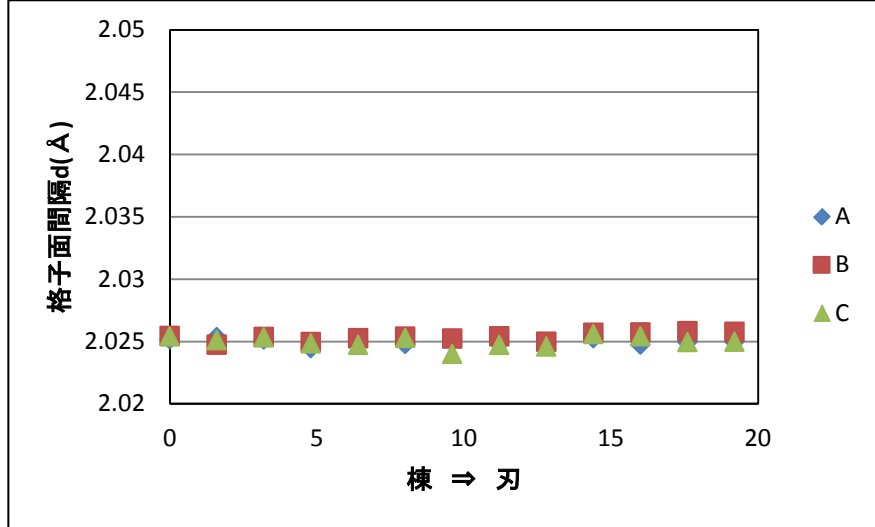
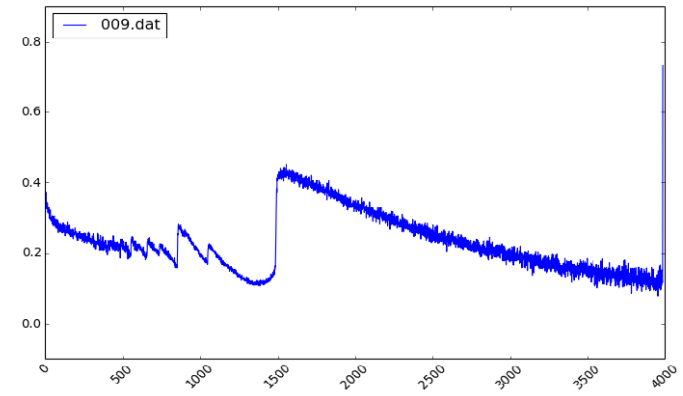
②下鍛え材: 面間隔が小さくなり、場所の差もなくなった

⇒ 折り返し鍛錬をすることで脱炭と炭素量の平均化が進んだため

# 格子面間隔d

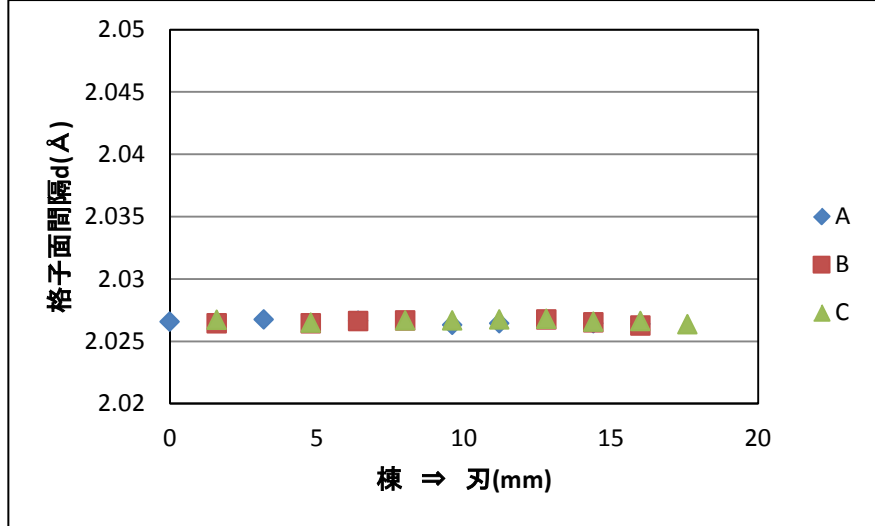
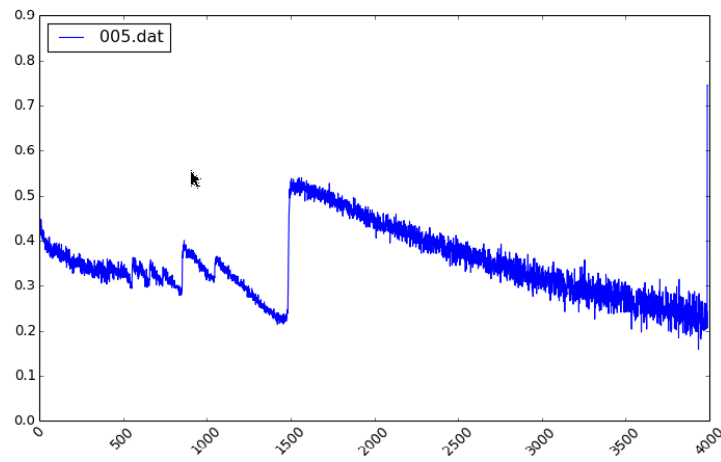
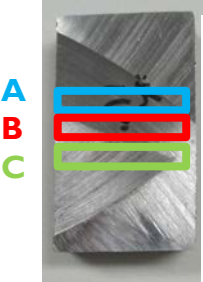
## ③上鍛え材(皮鉄)

下鍛え材を折り返し鍛練6回



## ④心鉄

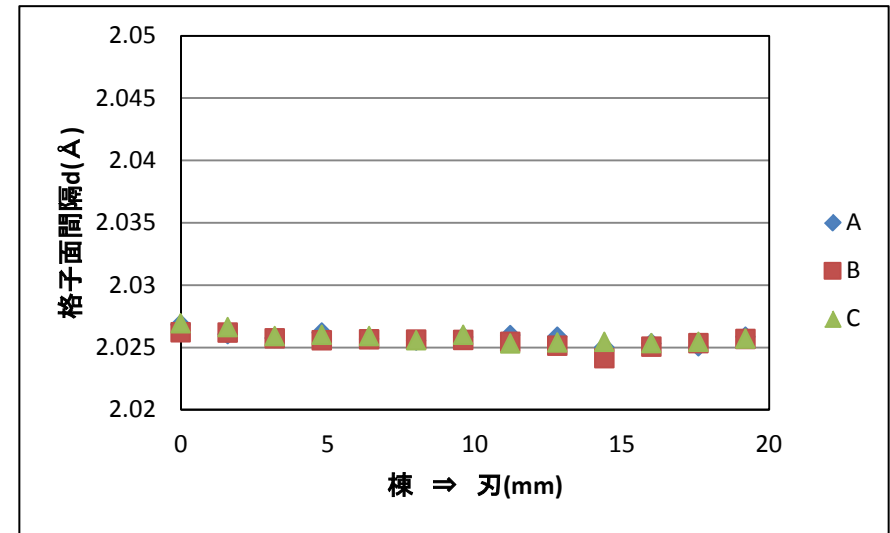
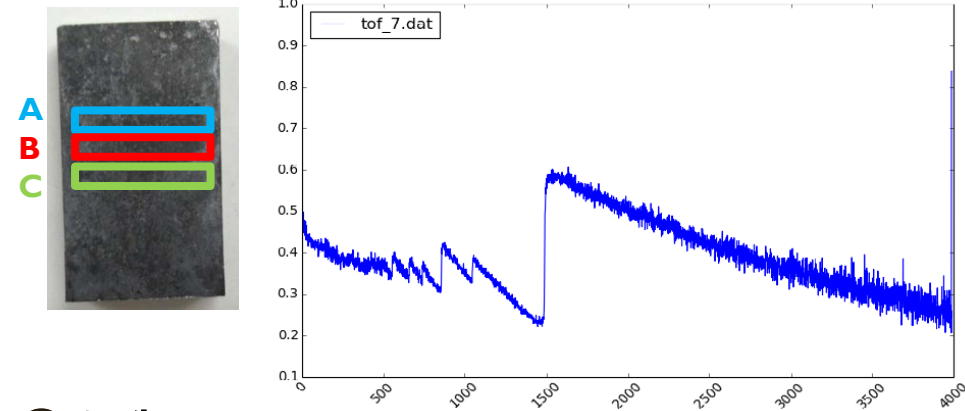
0.5~1.2mass%Cの積み沸かし材を折り返し鍛練8回



# 格子面間隔d

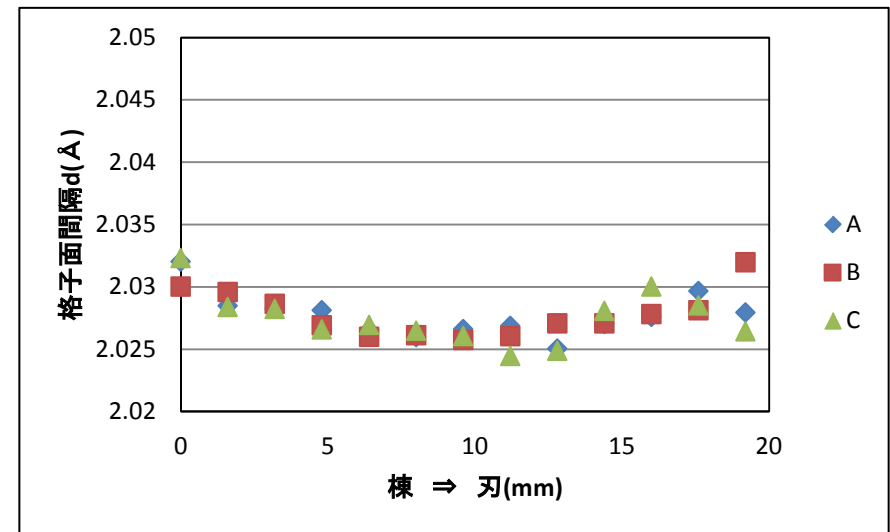
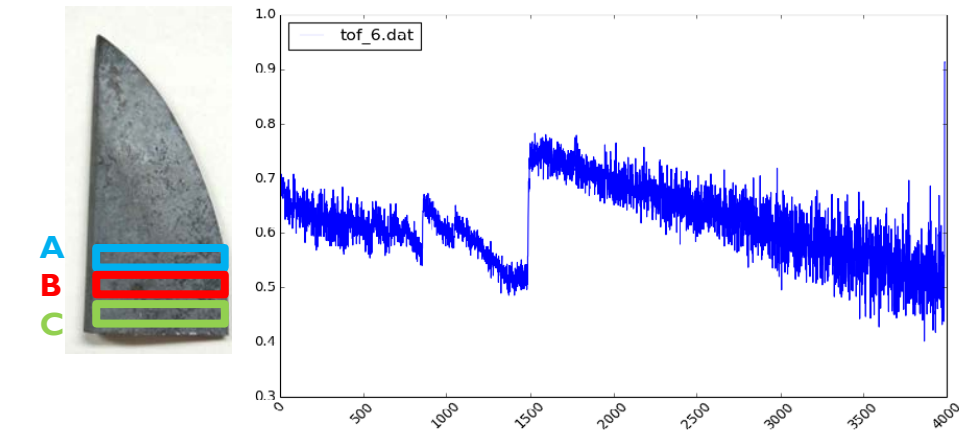
## ⑤素延べ材

皮鉄と心鉄を組み合わせ棒状に打ち延ばす



## ⑥火造り

叩いて刃側を打ち出す



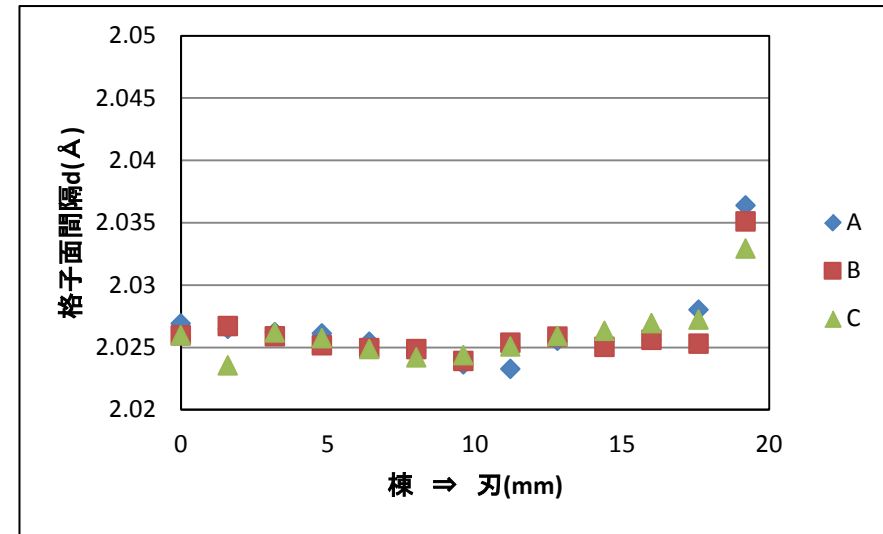
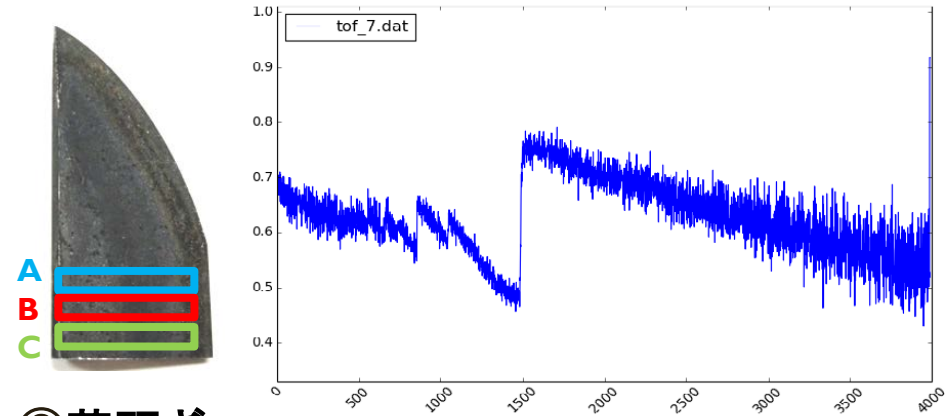
⑤素延べ材: 棟から刃にかけてほぼ一定

⑥火造り: 強く叩くため歪みが生じて変化した

# 格子面間隔d

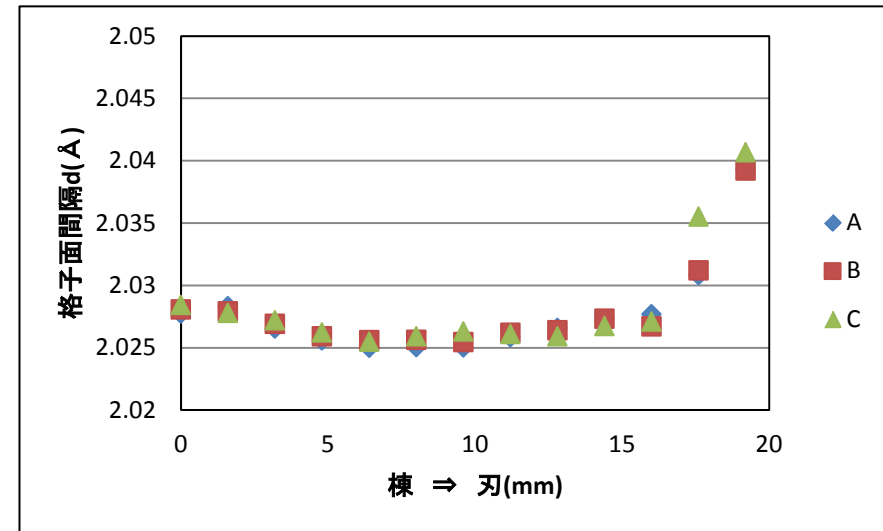
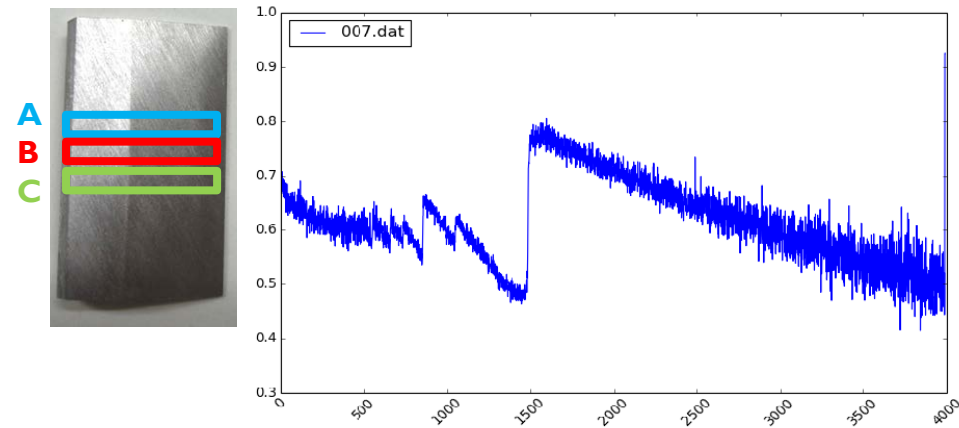
## ⑦焼入れ

800~900°Cに加熱した後水に入れ急冷(焼き入れ)



## ⑧荒研ぎ

やすりなどを用いて研ぎ、表面の酸化部分を取り除く

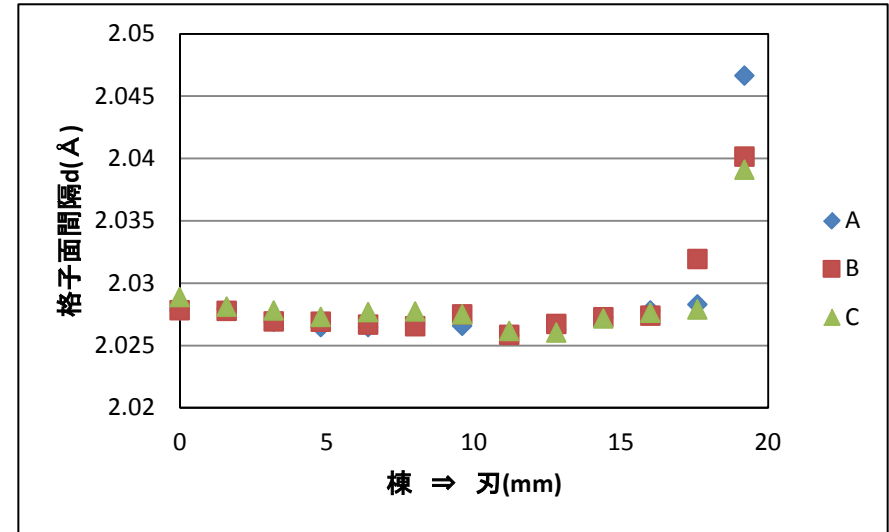
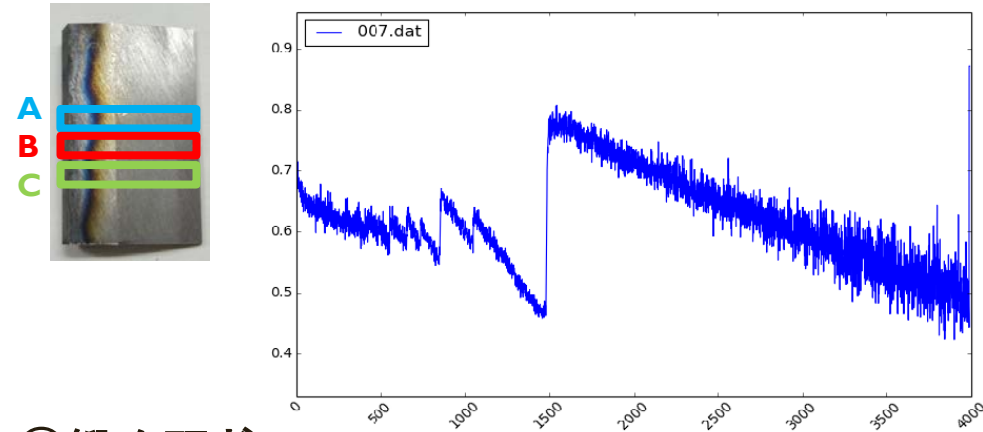


⑦焼入れ: 刃側が上昇⇒急冷したことで炭素が鉄に侵入型に固溶し、  
フェライトからマルテンサイトに組織変化したことで面間隔が上昇した

# 格子面間隔d

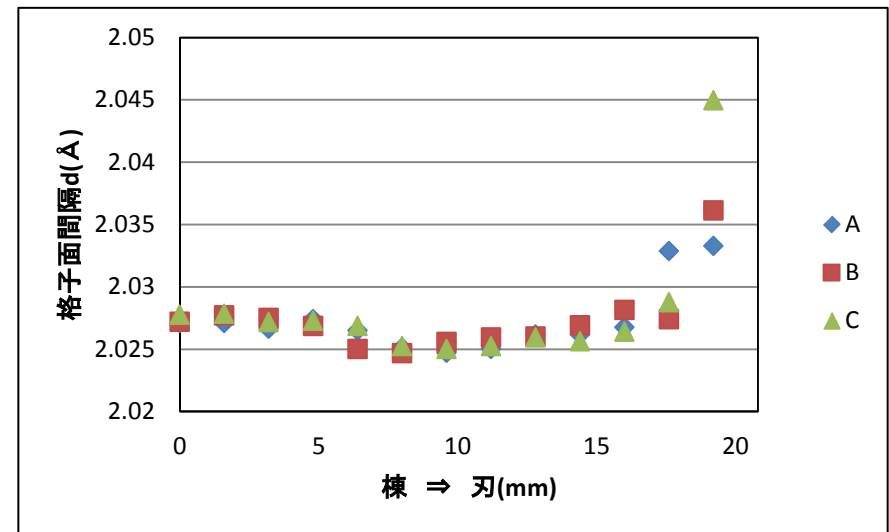
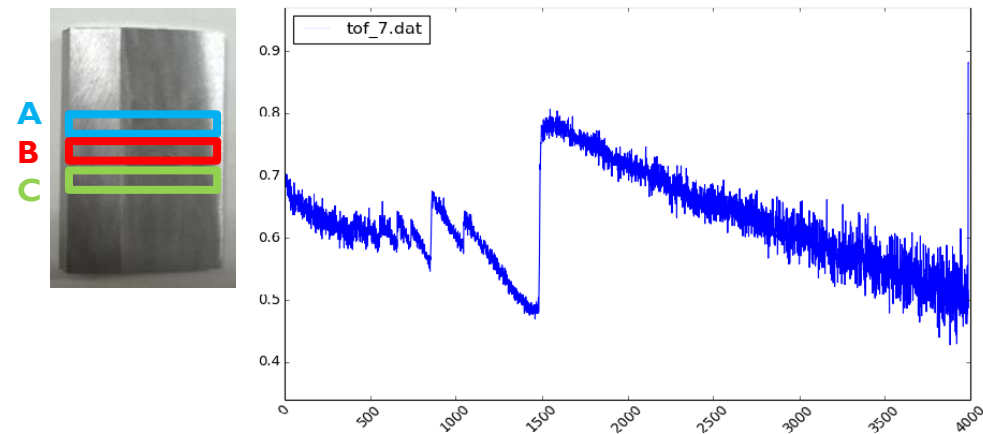
## ⑨赤かまし

200~300°Cで焼き戻しし、約900°Cの銅の上に棟の部分置き、棟の部分のそりを調整する



## ⑩鍛冶研ぎ

叩いたり砥石で研ぐことで形を調整する



# 焼入れによる組織変化

## ⑥火造り材

- フェライト( $\alpha$  - Fe)
- 常温で安定、体心立方格子構造(bcc)

焼  
入  
れ

加熱

## オーステナイト

- 高温で安定、面心立方格子構造(fcc)
- 純鉄に炭素を固溶した $\gamma$ 固溶体(fcc)であり、フェライトより多く炭素を固溶する

急冷(刃)

徐冷(棟)

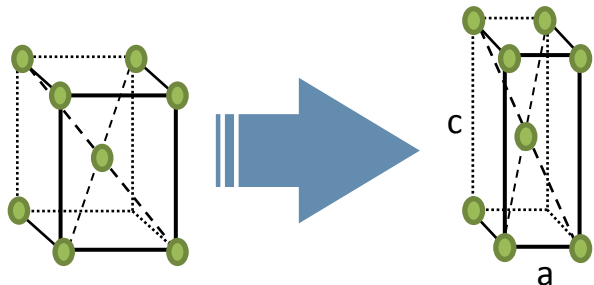
## ⑦焼入れ材

## マルテンサイト

- 炭素を多く固溶した $\alpha$ 固溶体(bct)
- 炭素が固溶した分、**面間隔が変化する**

## パーライト

- $\alpha$  - 鉄とセメンタイトの層状組織



Ferrite: bcc

Martensite: bct

刃: 焼刃土を薄く塗る⇒急冷  
棟: 焼刃土を厚く塗る⇒徐冷

パーライト( $\text{Fe}_3\text{C}$ ): 鉄炭化物

焼刃土: 少量の炭の粉などが混じった粘土

## パルス中性子を用いて製造過程試料の格子面間隔を調査した

- 鍛造と熱処理(焼き入れ)で格子面間隔が変化したことを確認した
  - 鍛造: 形状が変わるほど強く叩くことで歪が生じるためと考えられる
  - 熱処理: 熱処理とその後の急冷で炭素が固溶したためと考えられる



加工方法による格子面間隔の変化が調べられた

### 今後の課題

- 試料全体で解析を行い、2Dマッピング像の作製
- 格子面間隔だけでなく結晶子サイズや結晶配向性なども調査し、加工方法による組織の違いを非破壊でより明瞭に把握する



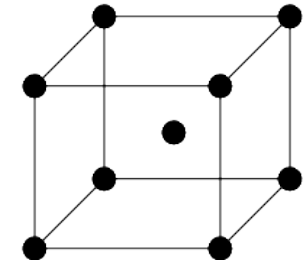
**ご清聴ありがとうございました**

# 補足資料

# 試料

## フェライト( $\alpha$ - Fe)

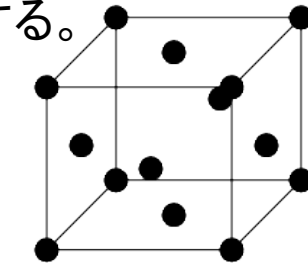
体心立方格子構造(bcc)、常温で安定  
純鉄に微量(常温で0.00004%)のCを固溶した $\alpha$ 固溶体。



bcc: body centered cubic  
体心立方格子構造

## オーステナイト

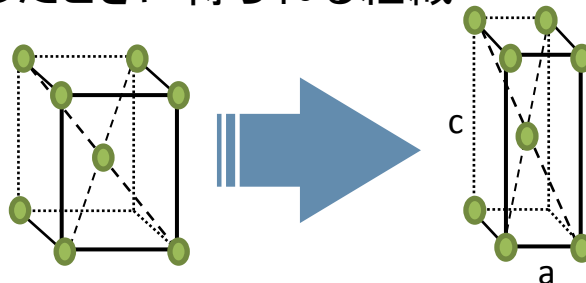
面心立方格子構造(fcc)、高温で安定  
純鉄にCを固溶した $\gamma$ 固溶体(fcc)であり、フェライトより多くCを固溶する。



fcc: face centered cubic  
面心立方格子構造

## マルテンサイト

Cを多く固溶した $\alpha$ 固溶体(bct)  
オーステナイトを急冷(焼入れ)したときに得られる組織



Ferrite: bcc

Martensite: bct

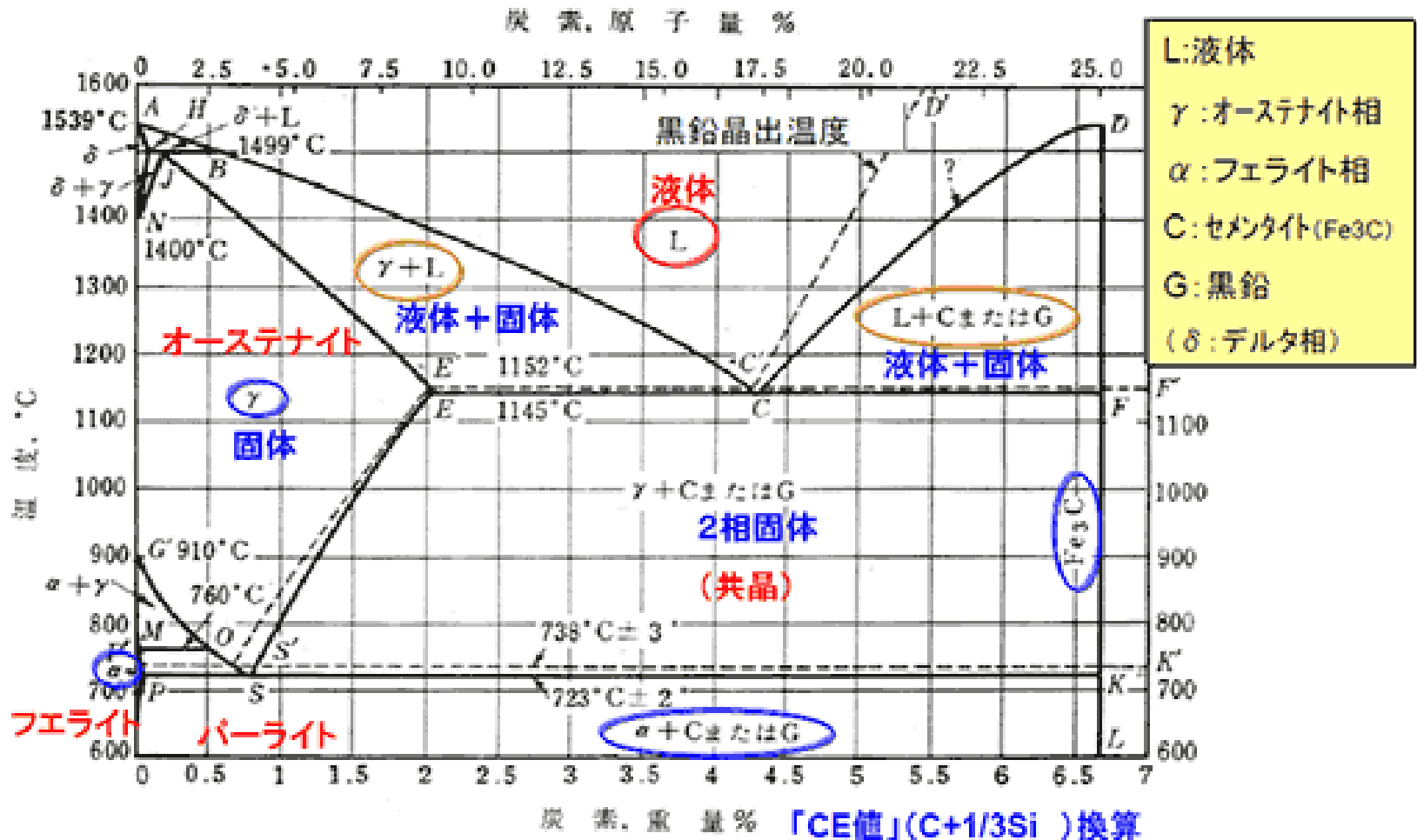
## セメンタイト

鉄炭化物:  $\text{Fe}_3\text{C}$

## パーライト

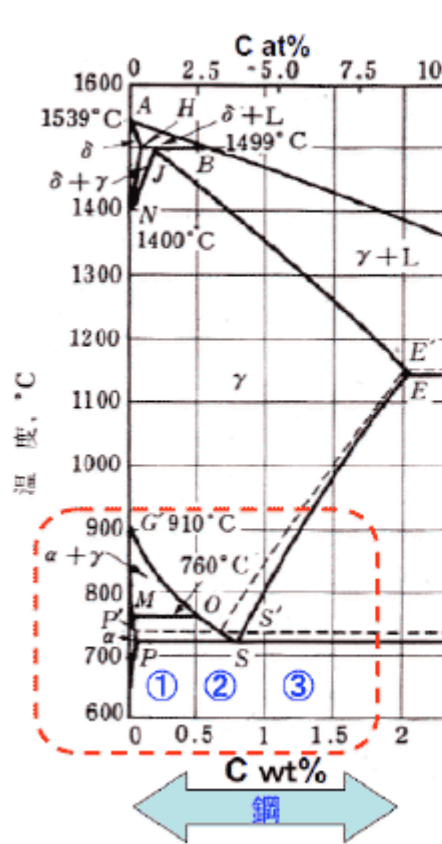
$\alpha$  - 鉄とセメンタイトの層状組織  
オーステナイト状態の鋼を、ゆっくり冷やした時に得られる組織

# Fe-C系状態図

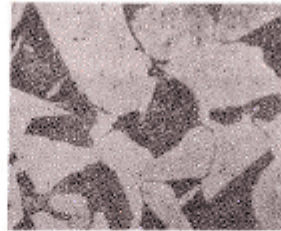


- L: 液体
- $\gamma$ : オーステナイト相
- $\alpha$ : フェライト相
- C: セメント石 ( $Fe_3C$ )
- G: 黒鉛
- ( $\delta$ : デルタ相)

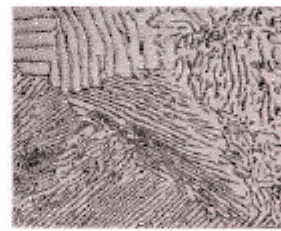
図 鉄-炭素系の新平衡状態図 (F. Neumann, H. Schenck, W. Patterson)



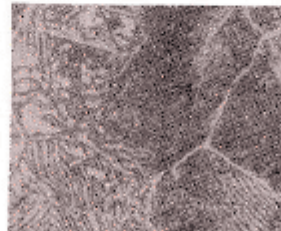
### 鋼の基地組織



- ① 亜共析鋼  
フェライト+パーライト  
( $\leq C0.8\%$ )



- ② 共析鋼  
パーライトのみ  
( $C0.8\%$ )



- ③ 過共析鋼  
パーライト+セメンタイト  
( $\geq C0.8\%$ )

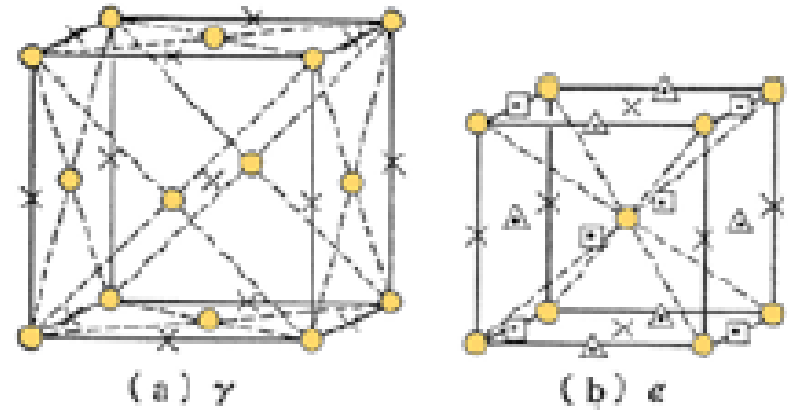
鋼の共析変態点付近の状態図(約0.8%が共析組成)

本来フェライト ( $\alpha$ -Fe : bcc鉄) は炭素をほとんど固溶しない。しかしマルテンサイト変態は無拡散 (炭素の分配を伴わない) のため、鋼のマルテンサイトは炭素の過飽和固溶体である。

炭素は鉄の副格子中に侵入型に固溶する。

$\gamma$  または  $\alpha$ -Fe 中に炭素が除用できる位置は、八面体位置 (octahedral site) である。

bcc鉄 ( $\alpha$ ) 中で、x、 $\Delta$ 、 $\square$  のいずれか特定の八面体位置に規則的に入るため、格子が一方向に伸張して bct 構造になる。



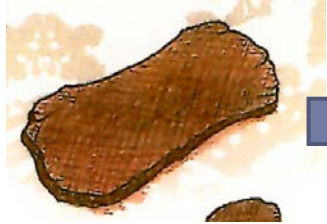
- 鉄原子
- x  $\Delta$   $\square$  炭素原子の入りうる位置

オーステナイト ( $\gamma$ )、フェライト ( $\alpha$ ) 中の固溶する炭素原子の位置

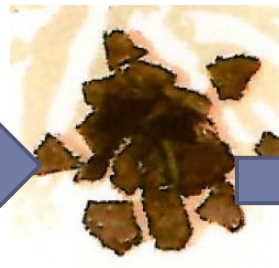
# 製造過程の試料①



玉鋼 (原料)



平らに打ち延ばす

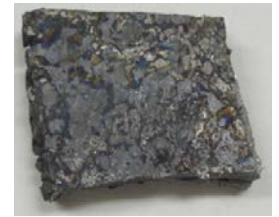


割る

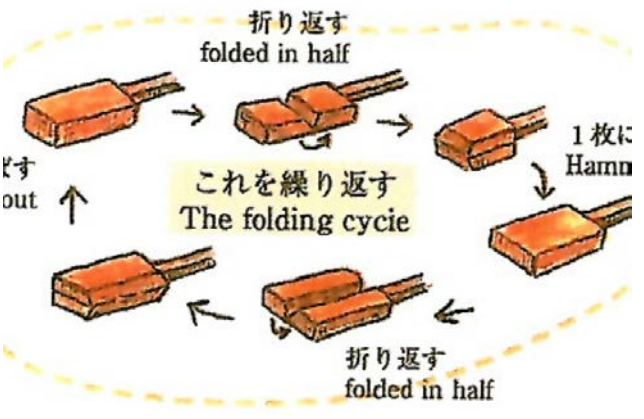


1300度に加熱して固まりとする

①積み沸かし材



## 折り返し鍛錬例



②下鍛え材



折り返し鍛錬 6回

③上鍛え材 (皮鉄)



さらに折り返し鍛錬 6回

④心鉄



鍛錬8回



[1]引用:河内國平、真鍋昌生: 刀匠が教える日本刀の魅力、里文出版(2003)

# 製造過程の試料②

## ⑤素延べ材



皮鉄と心鉄を  
組み合わせ  
棒状に  
打ち延ばす



## ⑥火造り材



刃側を  
打ち出す



## ⑦焼入れ材



800~900°Cに  
加熱した後  
水に入れ急冷  
(焼き入れ)





# 製造過程の試料③

## ⑧荒研ぎ材

焼入れ後荒研ぎし  
表面の酸化部分を取り除く



## ⑨赤かまし材

200～300℃で焼き戻しし、  
約900℃の銅の上に棟の部分を  
置き、棟の部分の焼きを取り、  
そりを付ける



## ⑩鍛冶研ぎ材

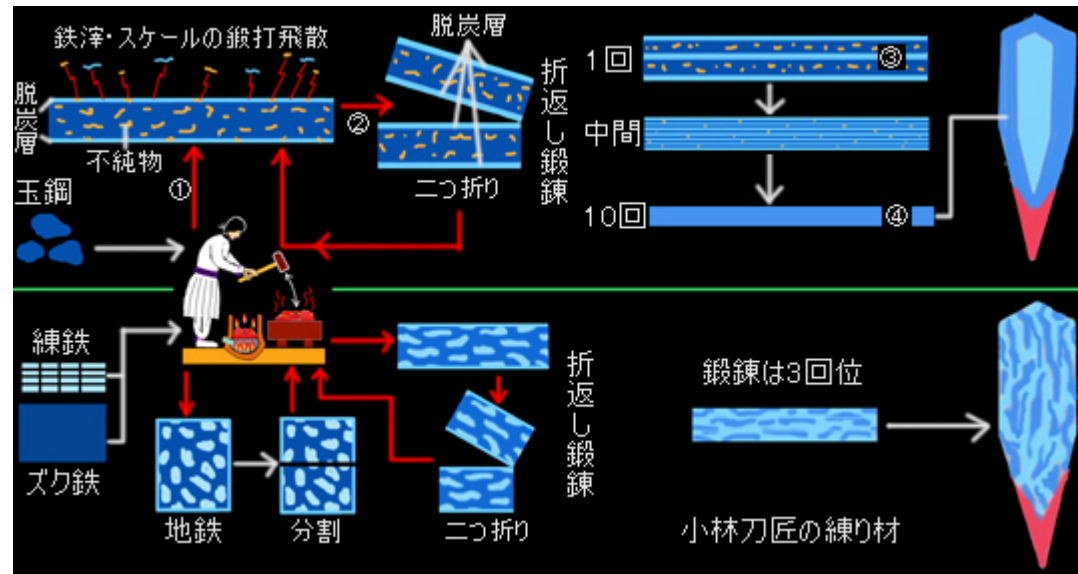
砥石で研ぐ



## 鍛錬と刀身構造模式図

新刀以降の玉鋼折返し鍛錬と  
二枚鍛え 皮鉄(硬鋼)の例 →

硬・軟鋼練り合わせ材と  
丸鍛え 古刀想定 →



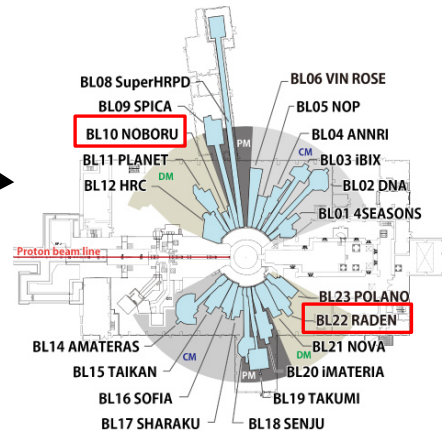
新々刀の折り返し鍛錬(上図の上の流れ)

- ① 量産鋼を赤熱鍛打して平らに打ち延ばす。火炉の赤熱で表面は酸化脱炭される(錬鉄の場合は吸炭させる)。鍛打に依って表面に出てきた不純物はスケールと共に飛散除去される。
- ② この鋼を二つに折り曲げる。その結果、
- ③ 鋼の中に脱炭層が形成され、元の炭素量と低炭素量との複合組織となる。鋼の中の不純物は依然と残ったままである。残存不純物を表面に出す為に、折り返し鍛錬を何回も繰り返すことになる。
- ④ 鍛錬を10回も繰り返すと1,024の折り返し鍛接層が形成される。一つの層は、元の炭素層を脱炭層が夾むので、二倍の2,048の炭素層が形成される。

一方、鍛打毎に表面層が飛散して、10回も折り返し鍛錬すると鋼材の量は1/2に減じ、鋼材の厚みが半分になる。従って各層は限りなく薄い。これだけの薄層だと、既に途中の段階で炭素交換に依って高・低炭素量の差が消滅してしまう。折り込まれた脱炭層で全体が充満され、炭素含有量は1/2に減少し、且つ、炭素の分布が均質になる。

## 物質・生命科学実験施設 MLF

J-PARC

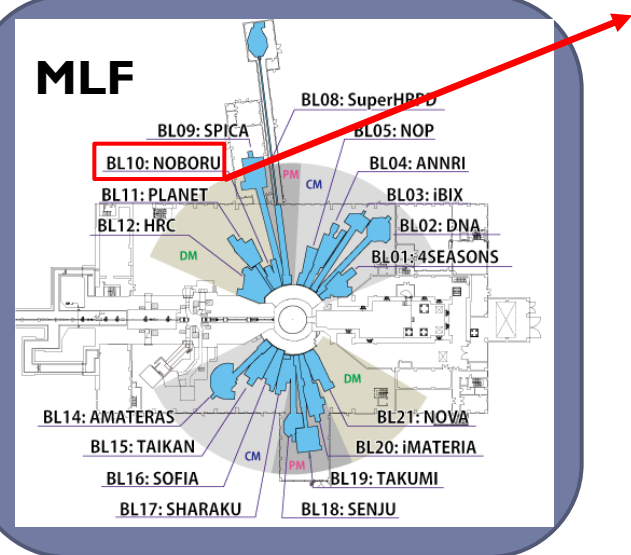
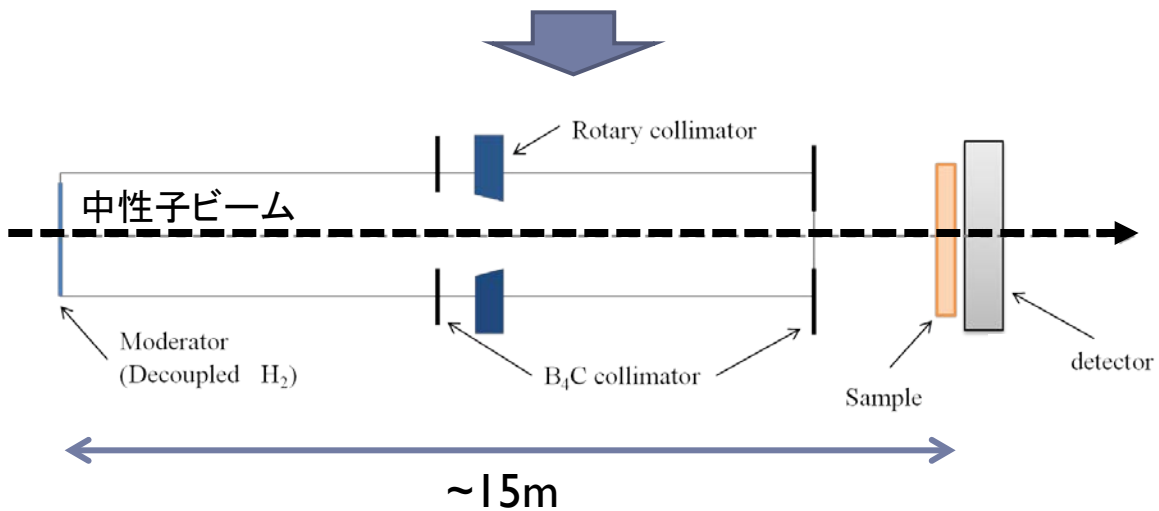
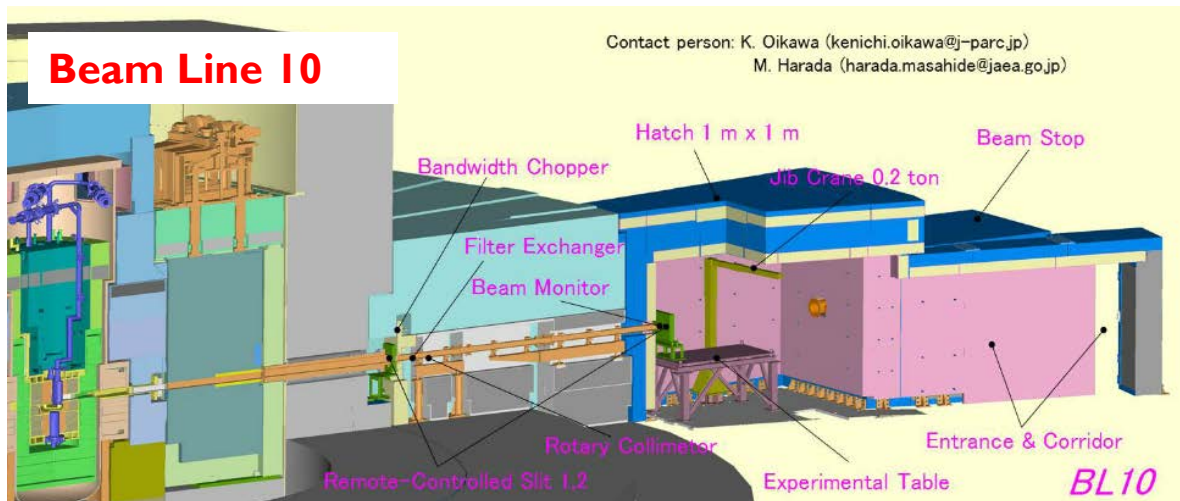


装置名称	中性子源特性試験装置 (NOBORU)
装置の目的・概要	NOBORUでは、様々な検出器やデバイス、新たな実験手法、そして高エネルギー (MeV) 中性子照射に適した環境を提供している。
ビームライン番号	BL10
モデレータ種類	比結合型モデレータ
利用波長範囲	$\lambda < 10.5 \text{ \AA}$ (25Hz)
分解能 ( $>d/d$ )	0.33% (@ $2\theta=170 \text{ deg}$ )
中性子強度 (試料位置での中性子束 @1 MW)	$4.8 \times 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ ( $< 0.4 \text{ eV}$ ) (試料位置L1=14.0 m) $1.2 \times 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ ( $< 1 \text{ MeV}$ ) $1.2 \times 10^6 \text{ n/s/cm}^2$ ( $< 10 \text{ MeV}$ )
ビームサイズ (試料位置)	最大 $10 \times 10 \text{ cm}^2$

# 大強度陽子加速器施設 J-PARC / MLF / BL10@ (茨城県東海村)



## 物質・生命科学実験施設



# 飛行距離L

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{ドブロイ波長}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$$

$$m = 1.675 \times 10^{-27} \text{ (Kg)}$$

$$L = v \times \text{TOF} = \frac{3956 \times 10^{-10}}{\lambda_{\text{hkl}}} \text{TOF}_{\text{hkl}}$$

単位換算

$$\text{TOF}_{\text{hkl}} [\mu \text{sec}] = \lambda_{\text{hkl}} [\text{\AA}] \frac{L[\text{m}]}{3956 \times 10^{-6}} + \Delta \text{TOF} [\mu \text{sec}]$$

$$L = (\text{TOF} - \Delta \text{TOF}) \frac{3956 \times 10^{-6}}{\lambda}$$

$\lambda$ :中性子波長

$m$ :中性子の質量

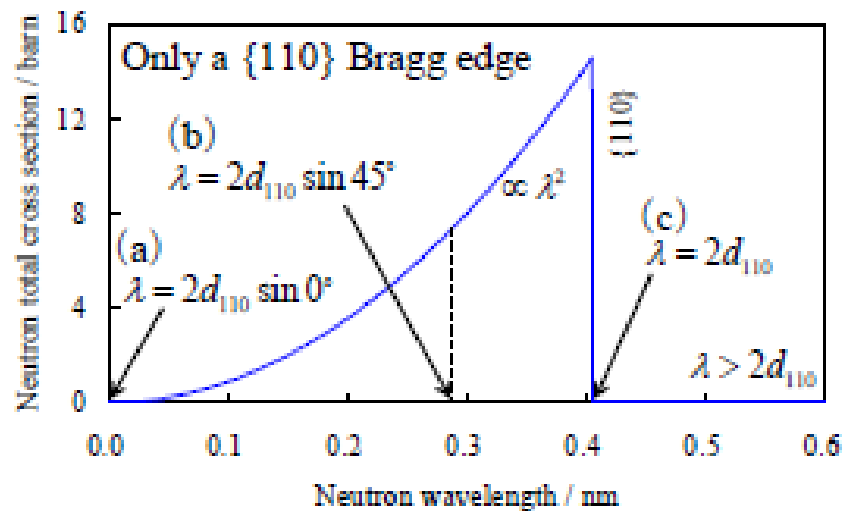
$h$ :プランク定数

$v$ :中性子の速度

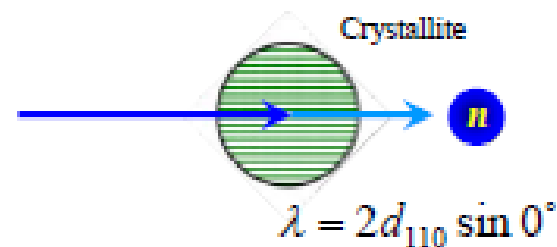
$\text{TOF}$ :中性子飛行時間

$\Delta \text{TOF}$ :装置による電氣的遅れ

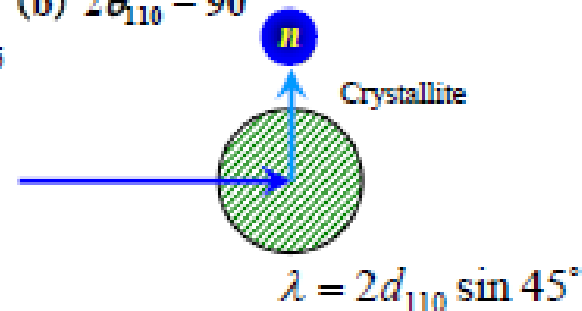
$L$ :中性子飛行距離



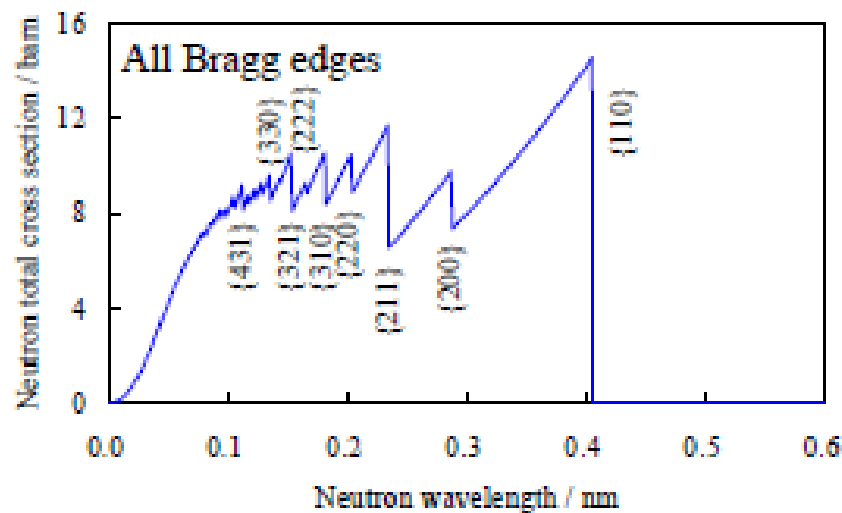
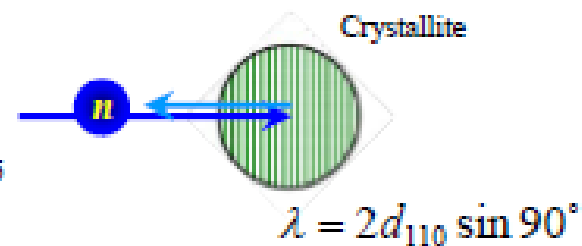
(a)  $2\theta_{110} = 0^\circ$  Transmission



(b)  $2\theta_{110} = 90^\circ$

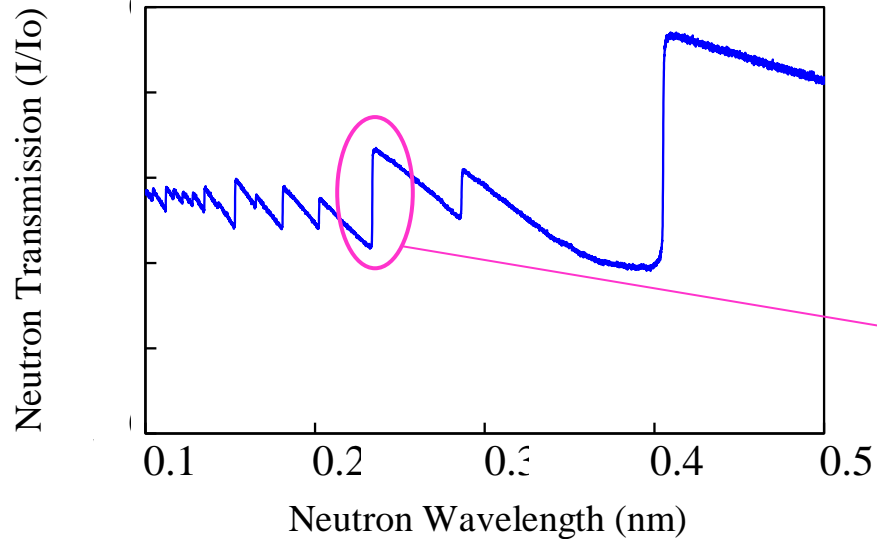


(c)  $2\theta_{110} = 180^\circ$  Back scattering

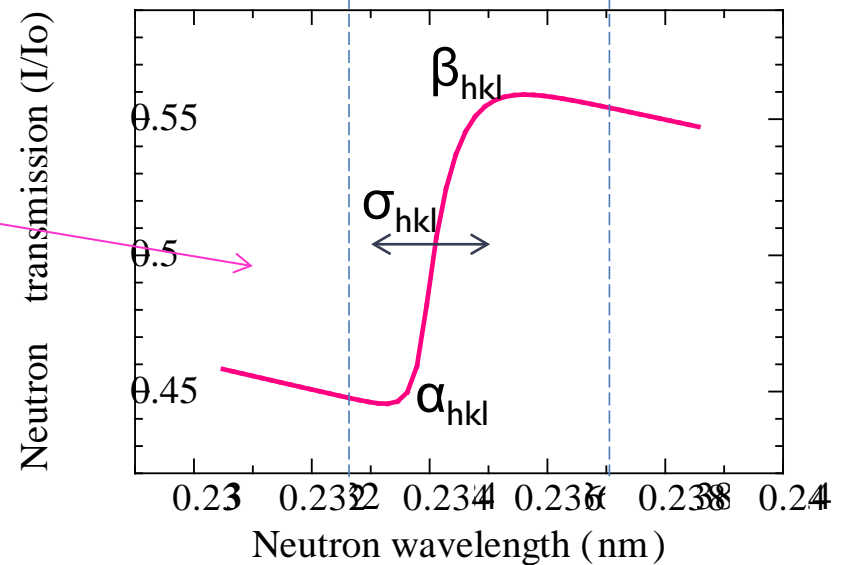


# エッジ幅

$\alpha$ -Feのブラッグエッジ例(厚さ5 mm)



シングルエッジ計算例



$\sigma_{hkl}$ : エッジ幅

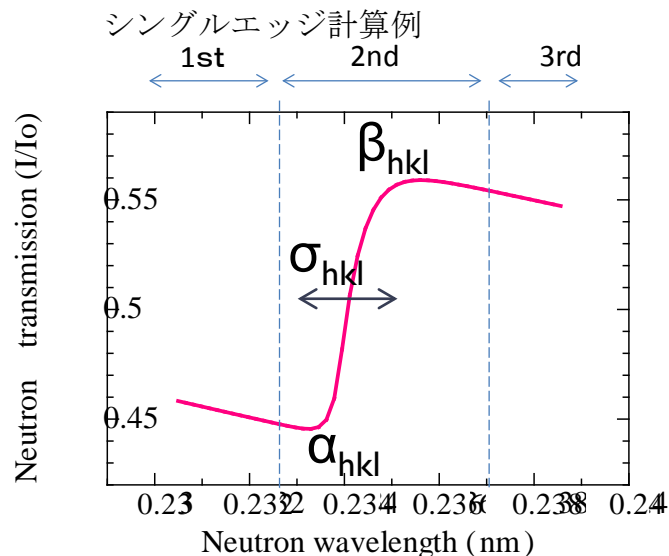
$\alpha_{hkl}$ : エッジの形状

$\beta_{hkl}$ : エッジの形状

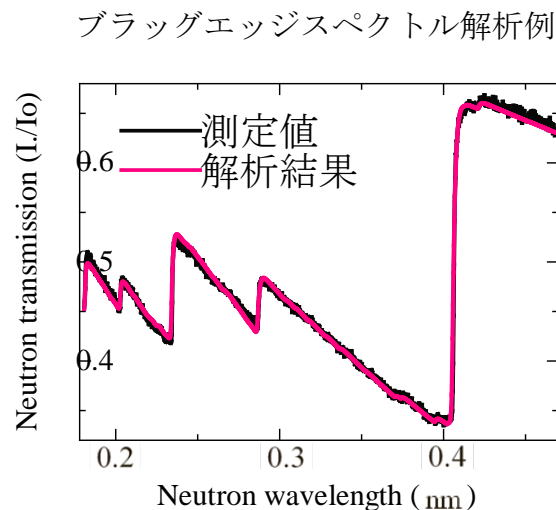
# ブラッグエッジ解析 (RITSコード)

- RITSコード<sup>[3]</sup> (Rietveld Imaging of Transmission Spectra  
:透過率スペクトルのリートベルトイメージング)  
:コード内で結晶組織構造モデルを構築し、それに基づいて透過率スペクトルをシミュレーション計算し、それを実験データにフィッティングする。

## シングルエッジ解析



## スペクトル解析



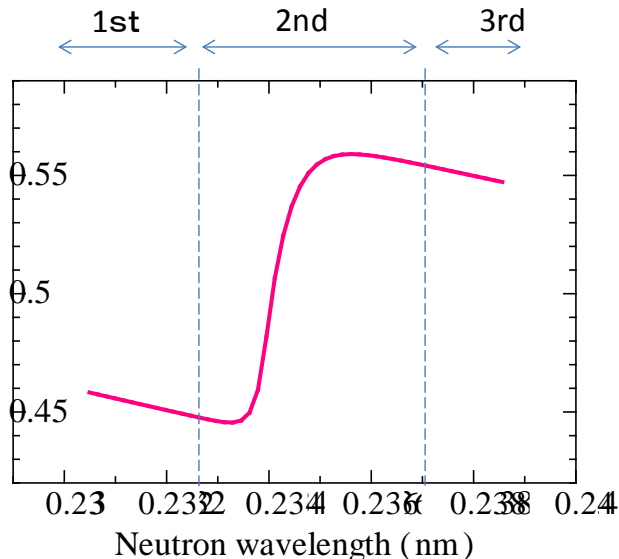


# 仮ブラッグエッジ解析 (RITSコード) ①

## シングルエッジ解析

シングルエッジ計算例

Neutron transmission (I/I<sub>0</sub>)



### 1st範囲

$$\sigma_{hkl}(\lambda) = a_{hkl} + b_{hkl}\lambda \quad \dots (1)$$

### 2nd範囲

$$D_{hkl}(\lambda - 2d_{hkl}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{hkl}} \exp\left[-\frac{(\lambda - 2d_{hkl})^2}{2\sigma_{hkl}^2}\right] \quad \dots (2)$$

### 3rd範囲

$$\sigma_0(\lambda) = a_0 + b_0\lambda \quad \dots (3)$$

### 分解能関数

$\sigma_{hkl}$ : ピーク幅(標準偏差)

$\alpha_{hkl}$ : 1st-2nd形状

大きいほど鋭い

$\beta_{hkl}$ : 2nd-3rd形状

大きいほど鋭い

### 解析できる結晶構造情報

格子定数:  $a$

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

相対エッジ幅:  $\Delta W/d$

格子面間隔  $d$  のばらつきを表す

$$\Delta W = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_{hkl}$$

$d_{hkl}$ : 格子面間隔 (Å)

$a_0, b_0, a_{hkl}, b_{hkl}$ : 直線の傾きと切片

$\sigma_{hkl}, \alpha_{hkl}, \beta_{hkl}$ : 分解能関数

$\lambda$ : 中性子波長

$\sigma_{hkl}(\lambda)$ : 1st範囲の波長依存全断面積

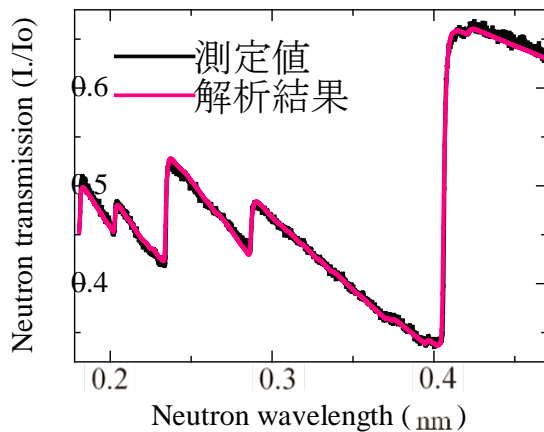
$\sigma_0(\lambda)$ : 3rd範囲の波長依存全断面積

$D_{hkl}(\lambda - 2d_{hkl})$ : パルス中性子TOF回折法における分解能関数

# ブラッグエッジ解析 (RITSコード) ②

## スペクトル解析

ブラッグエッジスペクトル解析例



主なパラメータ

- ・結晶構造  
(現状2相のみ)
- ・結晶子サイズ
- ・結晶配向性
- ・分解能関数  
:  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2,$   
 $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$

解析できる結晶構造情報

セメントイト量

結晶構造を $\alpha$ -Feとセメントイトの2相の情報で面密度を計算し算出する

結晶子サイズ

結晶配向性

分解能関数

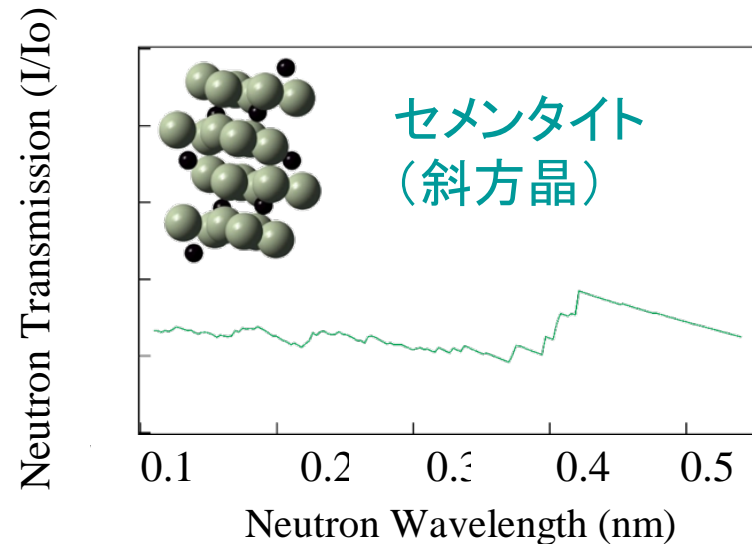
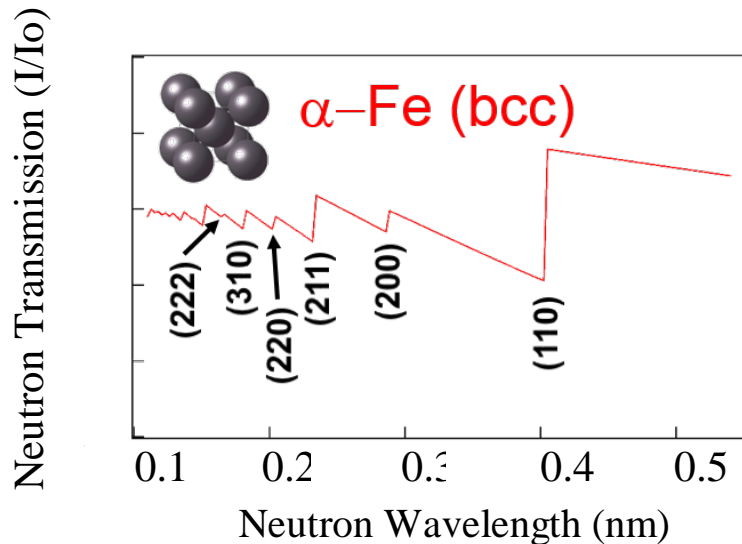
$$\alpha_{hkl} = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{d_{hkl}} \dots (4)$$

$$\beta_{hkl} = \beta_0 + \frac{\beta_1}{d_{hkl}^4} \dots (5)$$

$$\sigma_{\Delta k l} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 d_{hkl}^2 + \sigma_2^2 d_{hkl}^4} \dots (6)$$

## 結晶構造

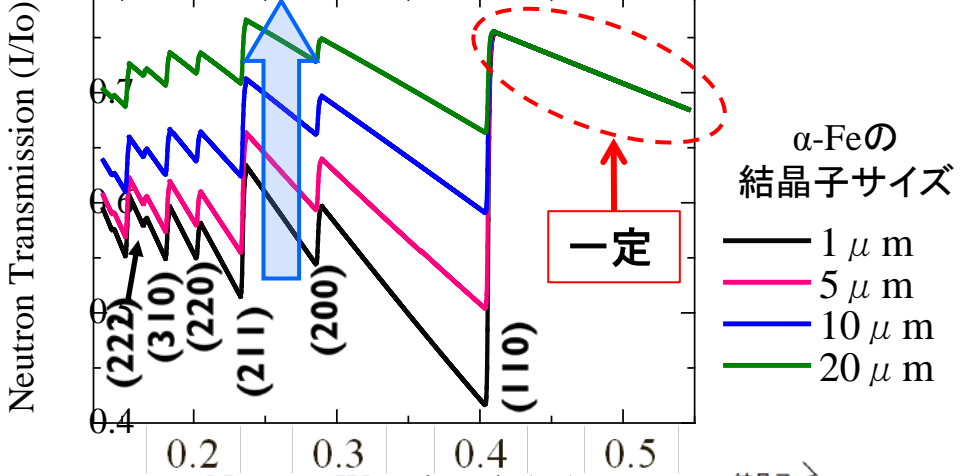
$\alpha$ -Feとセメンタイトのブラッグエッジ (厚さ5mm)



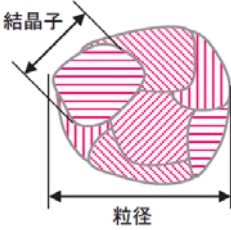
- 結晶構造によってブラッグエッジパターンが異なる

## 結晶子サイズ

例) α-Feの結晶子サイズ変化(厚さ5 mm)



結晶子サイズ:小      結晶子サイズ:大

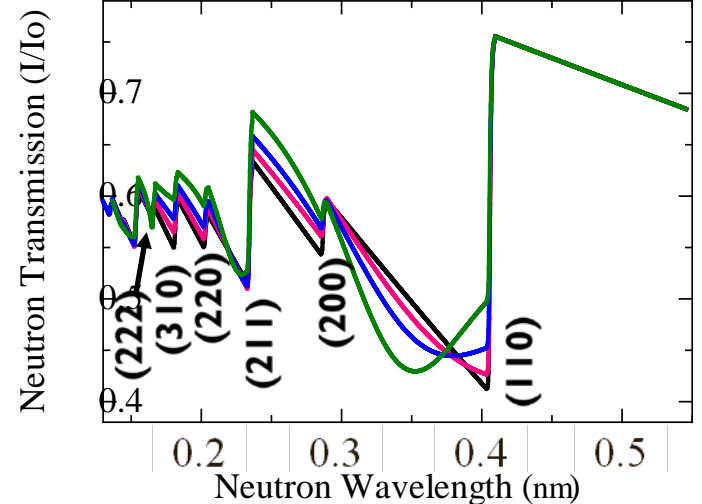


ブラッグ散乱数の変化の模式図

結晶子サイズが大きい試料では  
複数回ブラッグ回折が起こる → 中性子透過率が上昇する

## 結晶配向性

例) 透過方向にα - Fe(III)が配向 (厚さ5 mm)



R: 結晶配向性パラメーター  
⇒ 1に近づくほどランダム  
(March-Dollae-coefficient)

- R=1.0
- R=0.6
- R=0.5
- R=0.4

ブラッグの法則

$$\lambda = 2d_{hkl} \times \sin \theta$$

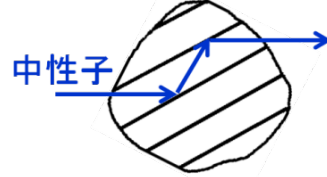
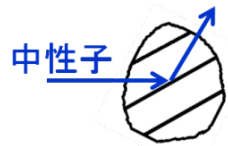
- 結晶子サイズが大きいとエッジの透過率が上がる
- 結晶の配向によりブラッグエッジの形状が変化する

# ブラッグエッジ③ (結晶子サイズ)

## 結晶子サイズ

結晶子サイズ:小

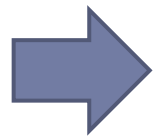
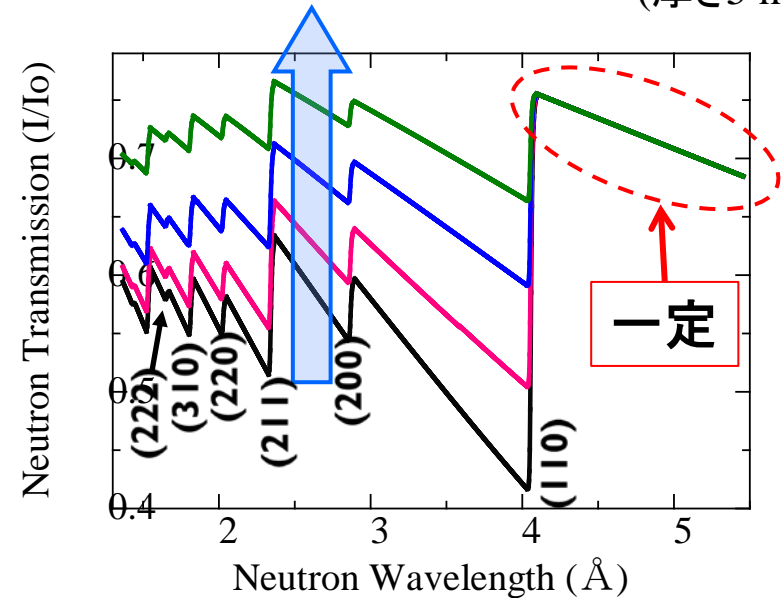
結晶子サイズ:大



ブラッグ散乱数の変化の模式図

結晶子サイズが大きい試料では  
複数回ブラッグ回折が起こる

$\alpha$ -Feのブラッグエッジ例  
(厚さ5 mm)



中性子透過率が上昇する

$\alpha$ -Feの  
結晶子サイズ

- 1  $\mu$  m
- 5  $\mu$  m
- 10  $\mu$  m
- 20  $\mu$  m

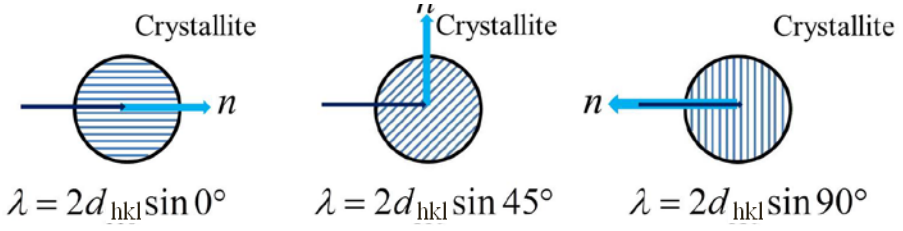
- ▶ 結晶子サイズが大きいと(110)以下のエッジの透過率が大きくなる

# ブラッグエッジ④ (結晶配向)

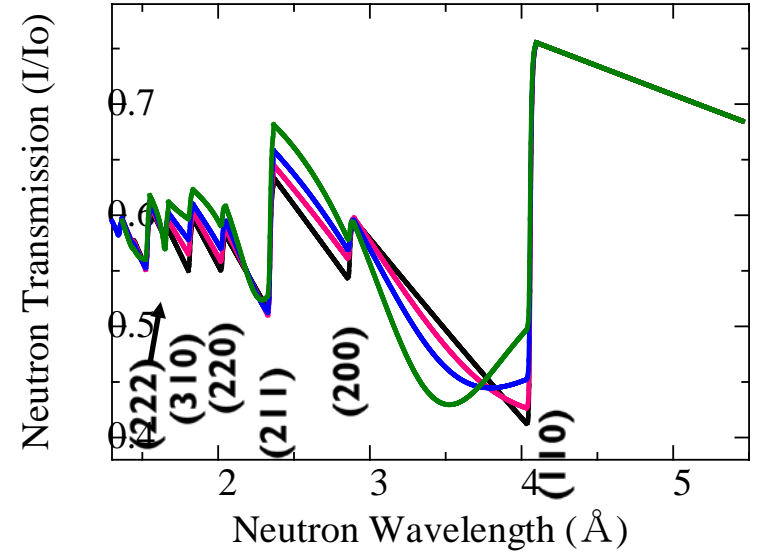
## 結晶配向性

ブラッグの法則

$$\lambda = 2d_{hkl} \times \sin \theta$$



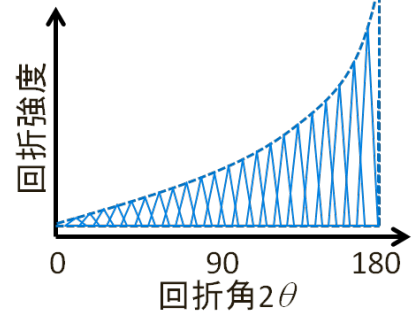
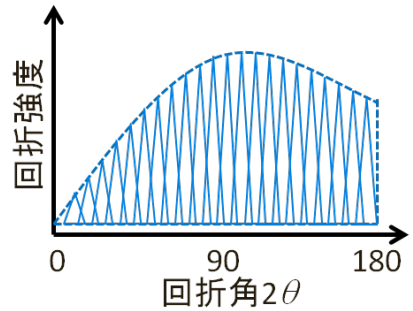
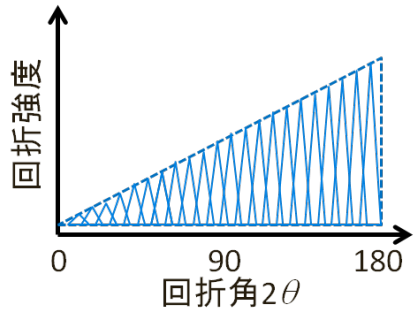
α-Feのブラッグエッジ例(厚さ5 mm)



ランダム配向

45° に配向

90° に配向



α - Fe(III)の配向性

- R=1.0
- R=0.6
- R=0.5
- R=0.4

R: 結晶配向性パラメーター (March-Dollae-coefficient)

▶ 結晶の配向によりブラッグエッジの形状が変化する