NAGOYA UNIVERSITY

パルス中性子イメージングによる日本刀の研究

名古屋大学大学院工学研究科　**塩田佳徳**、磯野真理子、櫻井貴浩，瓜谷章、鬼柳善明
東京藝術大学　田中眞奈子、**北海道大学**　長谷美宏幸

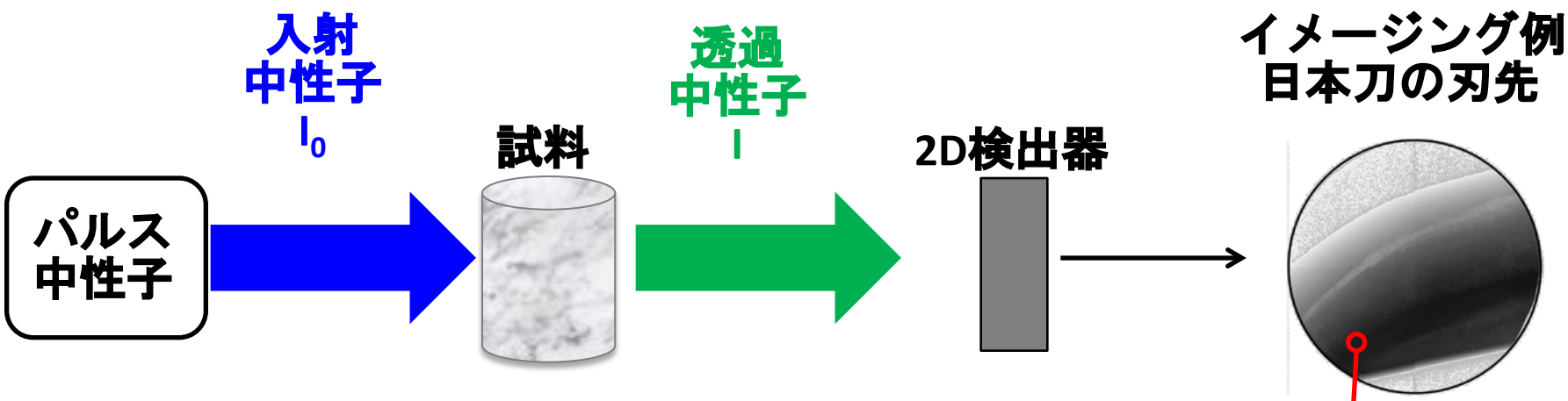
本研究はJSPS科研費 23226018の助成を受けたものです

背景・目的

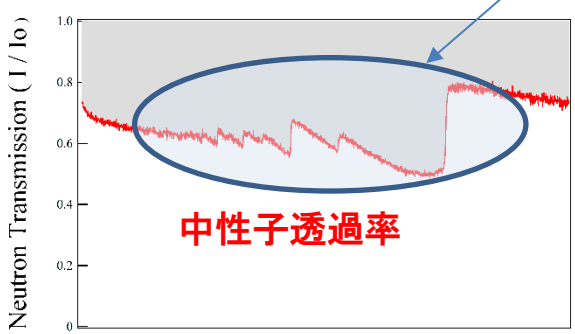
日本刀の金属結晶組織構造を調べることは，その特徴および製造法を明らかにするうえで重要である。
非破壊測定が望ましい。パルス中性子イメージングでどこまでの情報が得られるかを明らかにする。
これまでは，日本刀断片の測定であった。

・本研究では中性子透過分光法ブラッグエッジ解析によって日本刀全体のひずみ、結晶子サイズ、集合組織を評価する。

測定原理（中性子イメージングとブラッグエッジ

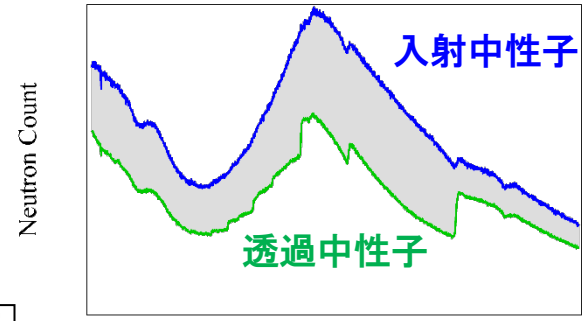


検出器1ピクセルで測定される中性子スペクトル



$I(\lambda) / I_0(\lambda)$

$I(tof) / I_0(tof)$



Time Of Flight method

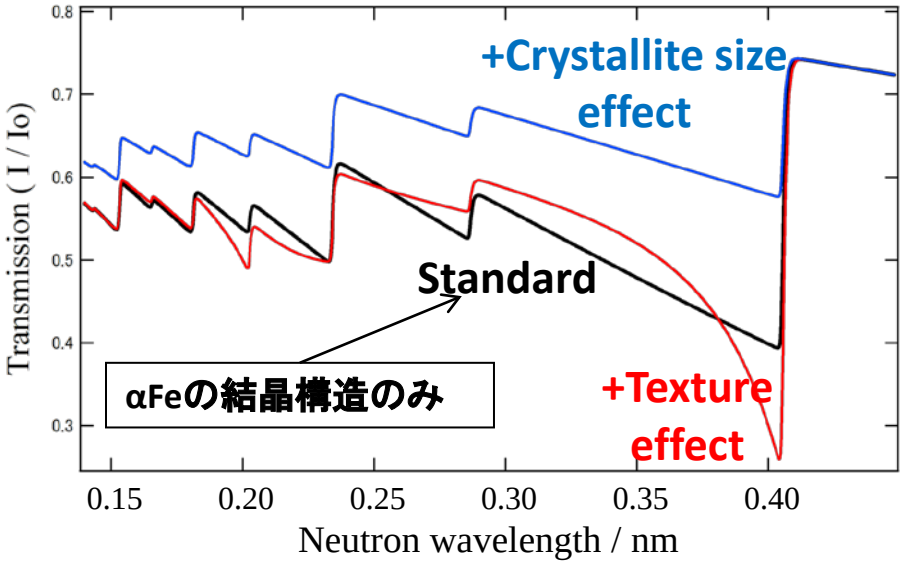
Pulse neutron wavelength $= \lambda = \frac{h}{mv}$

$$\lambda = \frac{h}{m(l_1 + l_2)} t$$

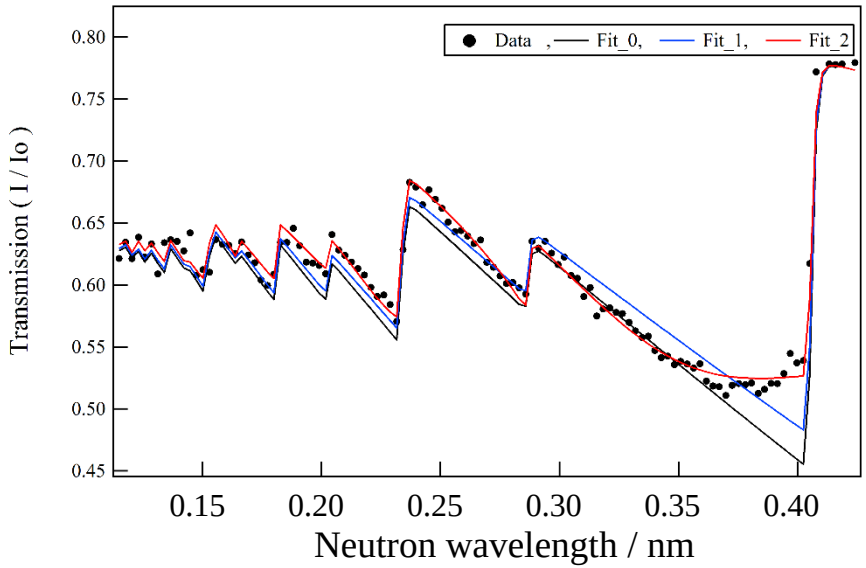
$$d = \frac{h}{2m(l_1 + l_2)\sin\theta} t$$

金属組織状態とブラッグエッジ形状

シュミレーション
Bcc,α鉄の組織変化



解析例
測定ブラッグエッジとフィティング



解析プログラム

Rietveld Imaging of Transmission Spectra

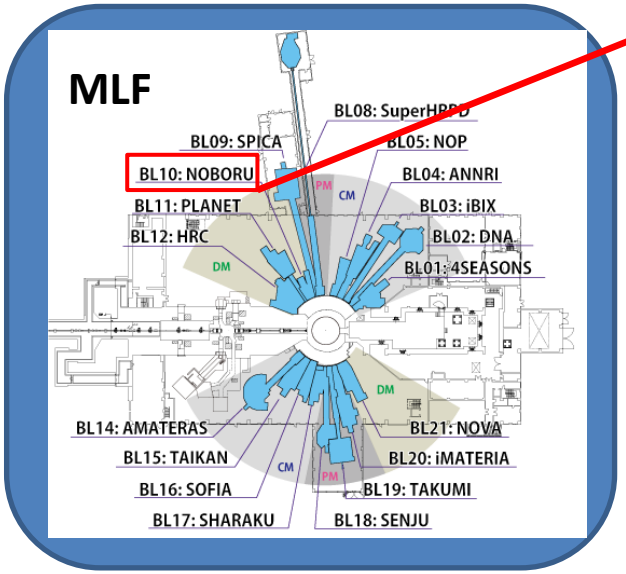
RITS（開発・北大・佐藤博隆）

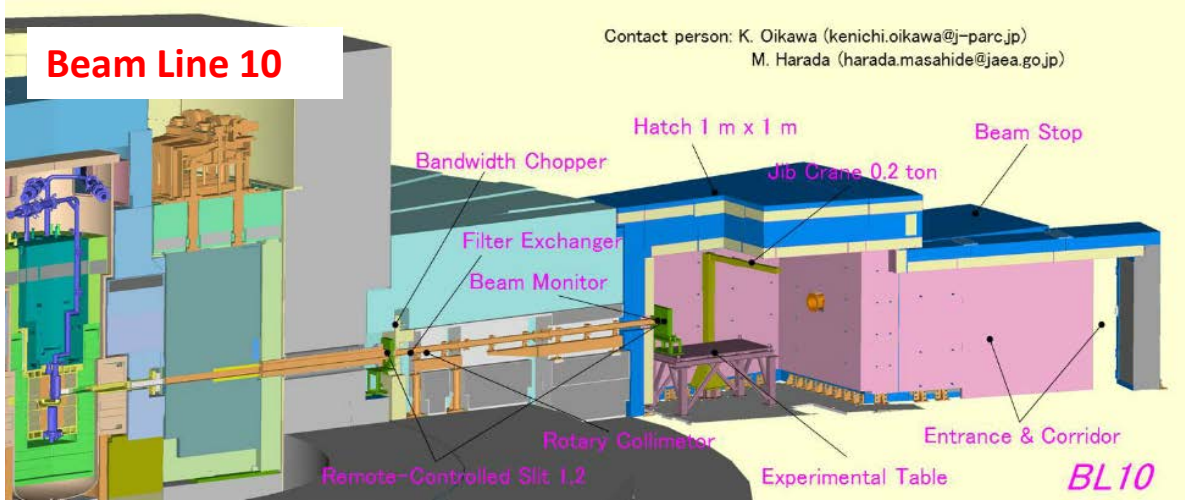
多結晶材料の透過中性子ブラックエッジについて分解能関数と材料由来のパラメーターを精密化し材料の組織構造因子を算出する解析プログラム

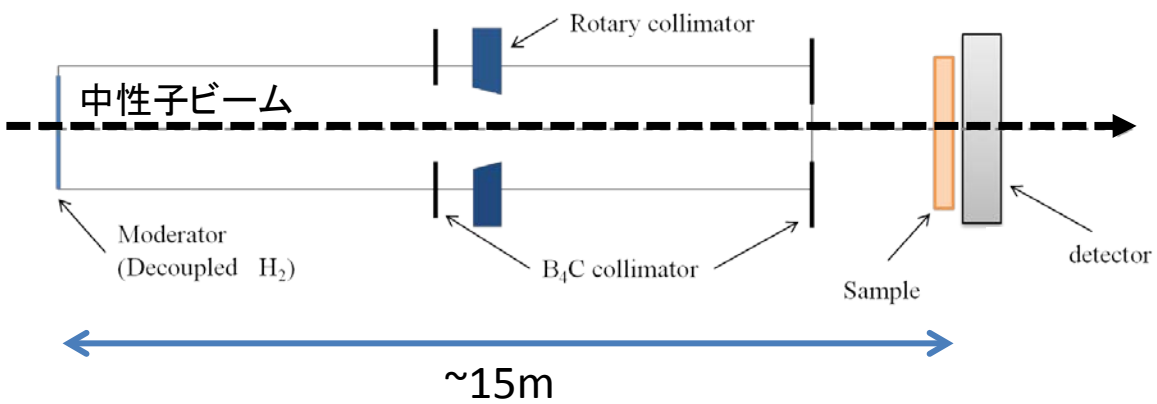
実験施設

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







試料および検出器

試料, 日本刀 (備前長船之住則光之作)

（ご提供）名大・広田先生

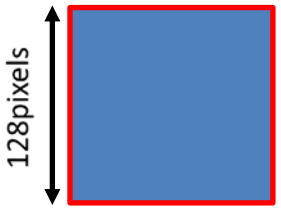
刃渡45.4cm

2次元 中性子検出器

GEM検出器

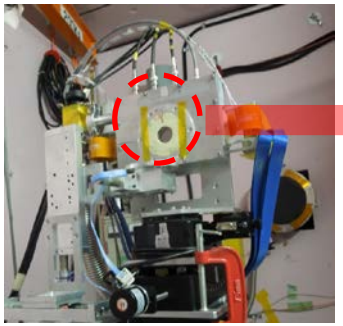
検出面積大
計測効率大

検出面
100mm



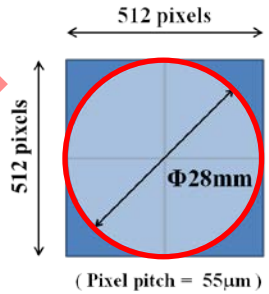
Spatial resolution = 800μm

MPC検出器



高空間分解能

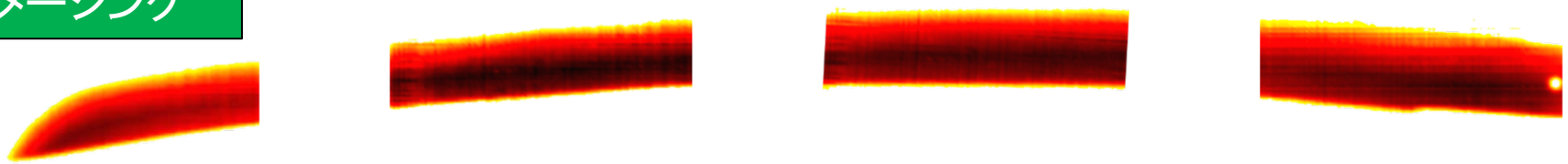
検出面

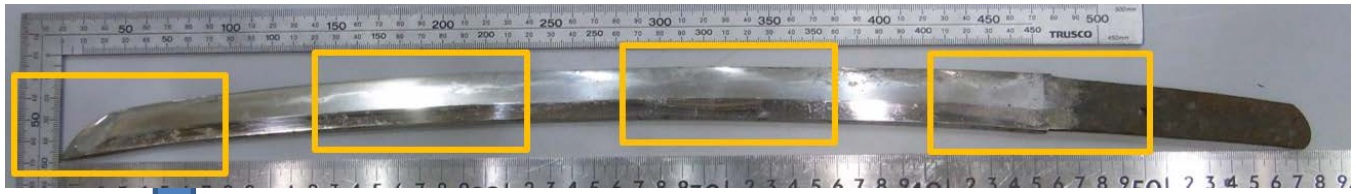


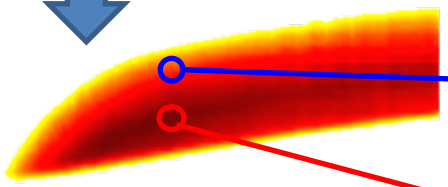
Spatial resolution = 55 μm

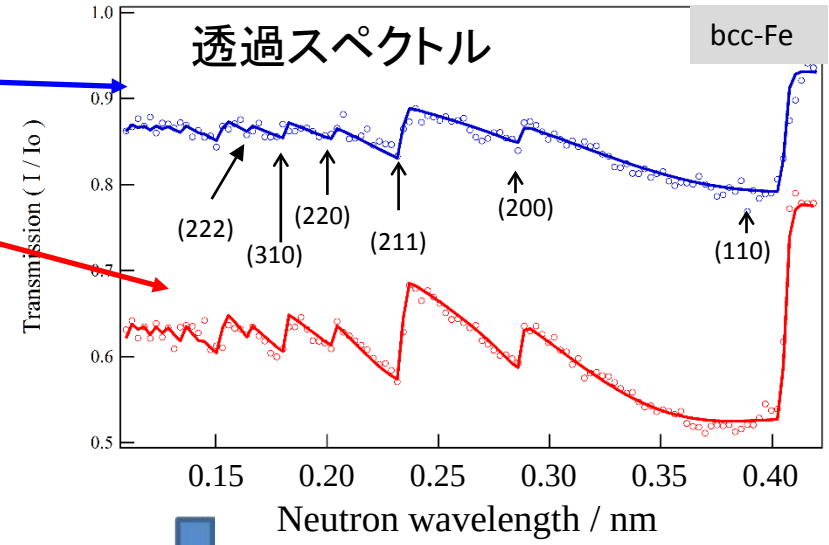
測定結果

イメージング





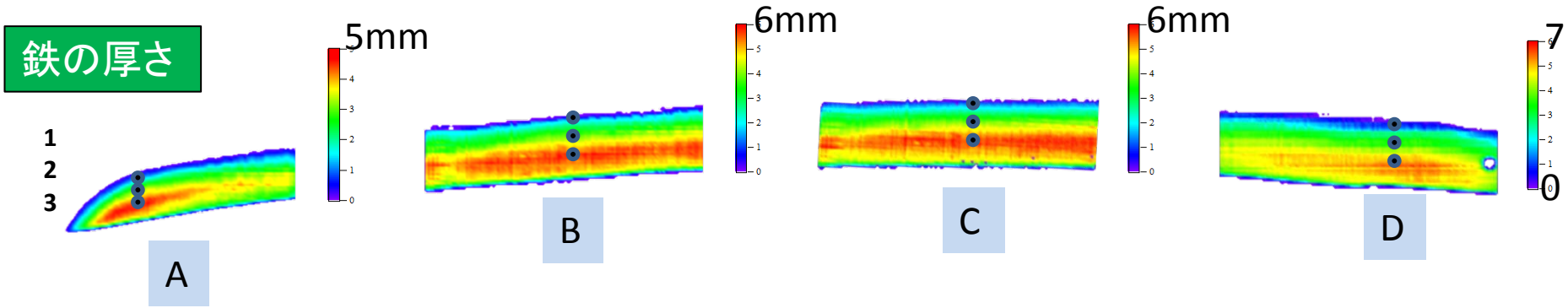




解析値

- 格子定数
- 原子個数密度 → 厚さ
- R111、(111)面の結晶配向
- R001、(001)面の結晶配向
- 結晶子サイズ

密度分布と部位毎の結晶子サイズ



結晶子サイズ

単位等		A	B	C	D
	1	0.88	2.33	1.41	3.45
μm	2	1.49	3.85	1.38	2.59
	3	2.36	3.23	1.75	2.71

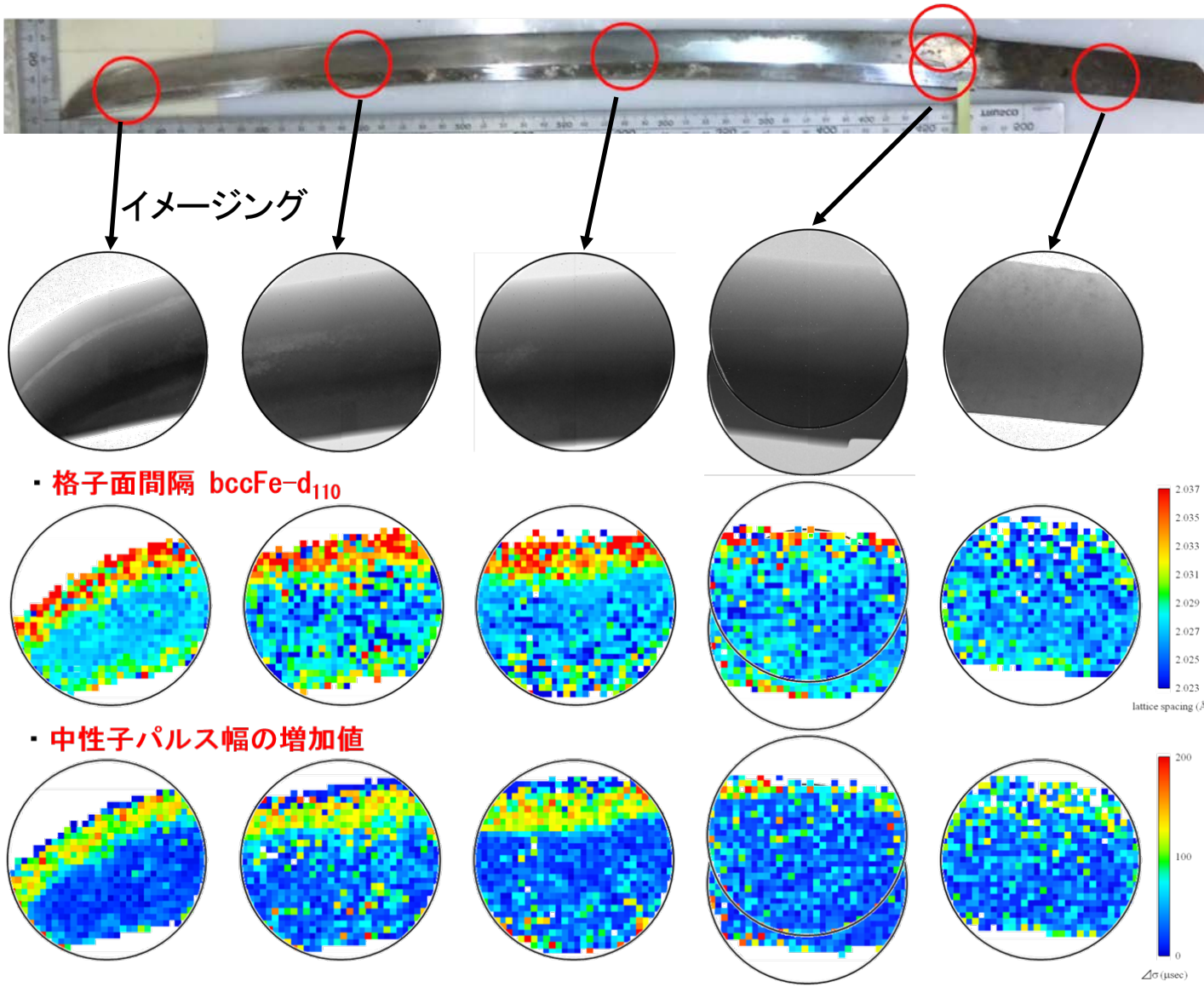
中心から刃先にかけて結晶子は小さくなる傾向

マルテンサイト組織分布

鉄マルテンサイト変態

格子定数の増加
- 変態時の変形
- 炭素固溶

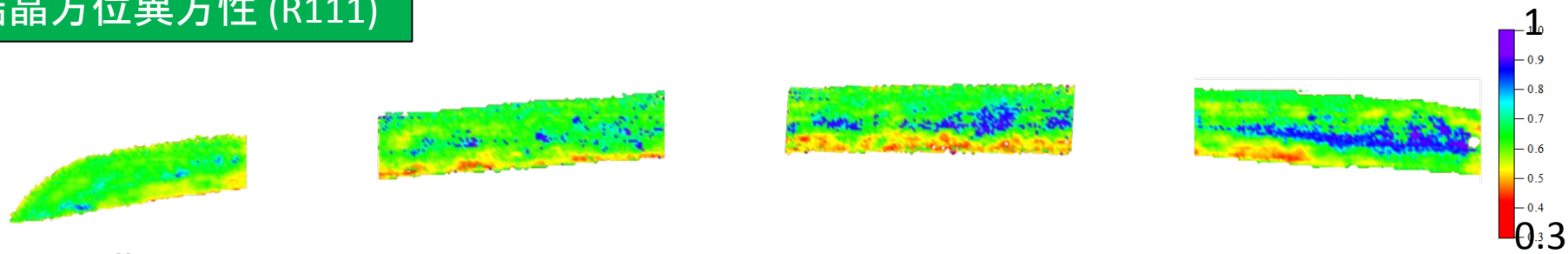
マイクロストレインの増加
- 粒間ひずみ
- 粒内ひずみ
- ：高密度転位

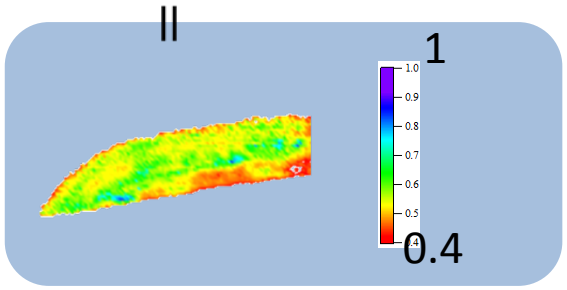


マルテンサイト組織　　**低炭素フェライト組織**

結晶配向　ND(111)繊維集合組織

結晶方位異方性 (R111)





（青）・茎、刃区周囲、刀身中心に等方的な結晶

（緑）・刃部は一様なND(111)繊維集合組織

（赤）・峰側に強いND(111)繊維集合組織

ND(111)繊維集合組織
α鉄の熱間加工後に見られる集合組織
加工量、加熱温度、加熱時間が影響する

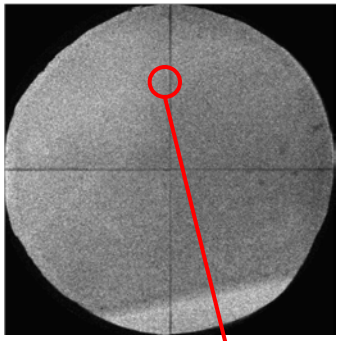
↓

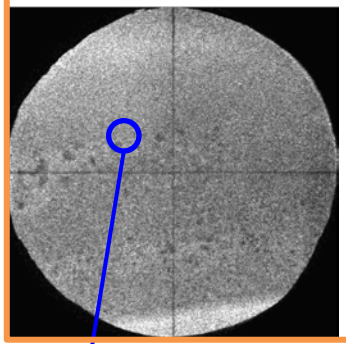
製造法による特徴

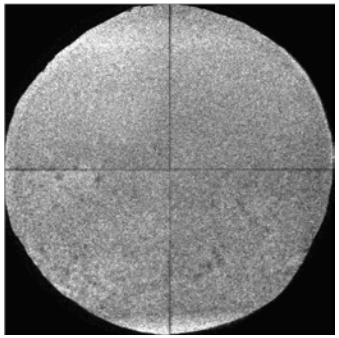
一例）日本刀の製作工程と温度
・刀の形に延ばす（1300℃→800℃
・火造り（700℃）
・焼入れ前（800℃→900℃

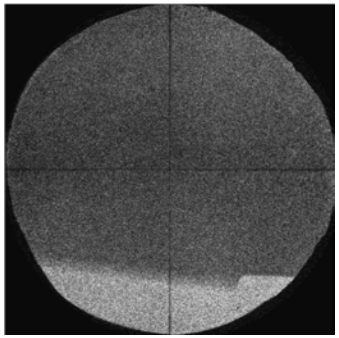
日本刀の結晶粗粒分布

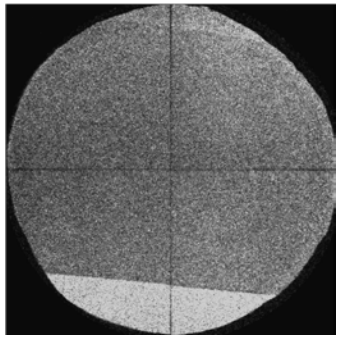
特定の中性子波長を選択して画像化

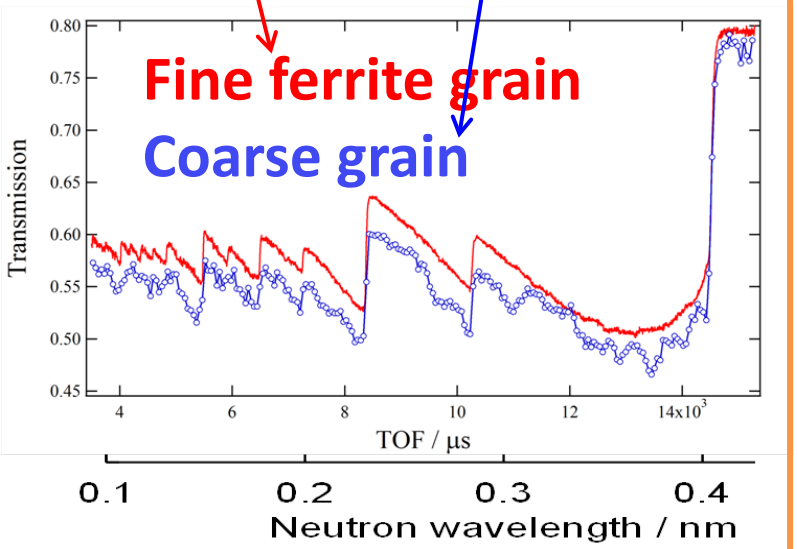


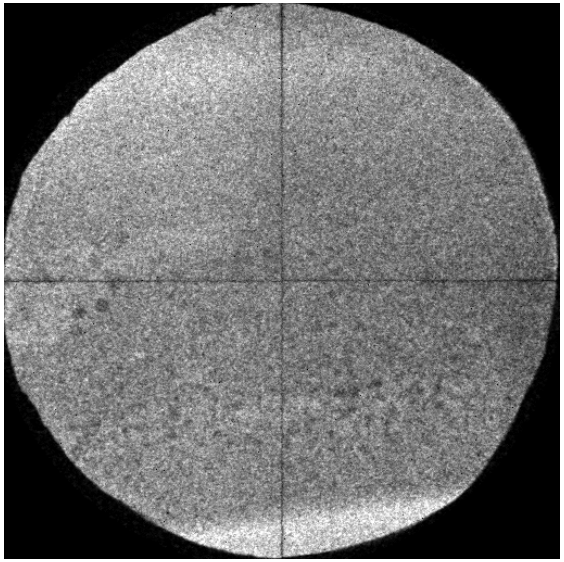












波長順に表示

粗粒結晶の可視化

- 透過方向からの見た目の大きさ
- 分布と位置

- 大きな結晶が黒い点として見える
- 刀身中心、数100μmの結晶粒

日本刀の鉄組織（解析のまとめ）

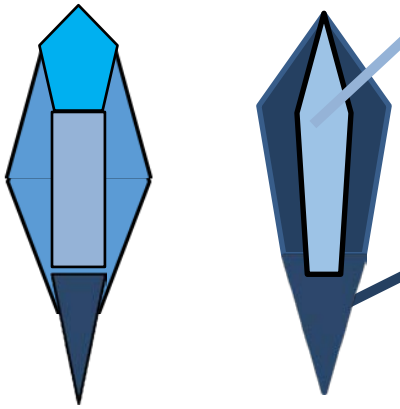
切先に向かって顕著
（刃）マルテンサイト組織、大きなマイクロひずみ

（刀身中心）
フェライト鋼、部分的に粗大粒

（峰側）強い(111)繊維集合集合組織

（茎）
・低炭素鋼、軟鋼
・組織状態から心鉄に近い鋼

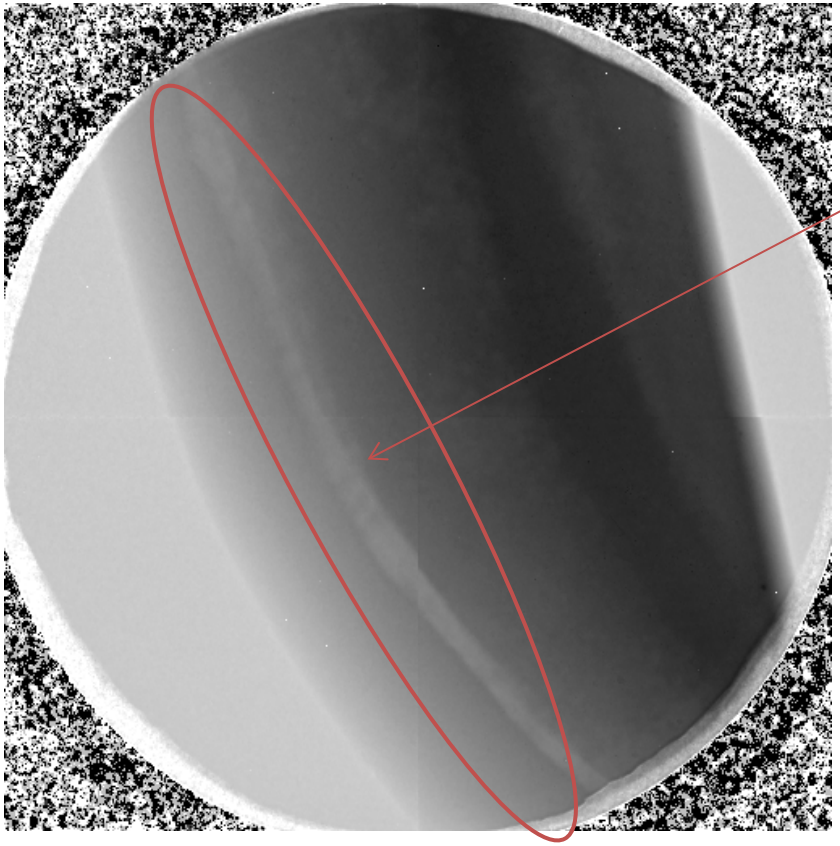
刀身断面



内側(心鉄)
・低炭素鋼、軟鋼
・フェライト鋼、部分的に粗大粒
・刃区(はまち)周囲に顕著な等方的結晶配向

外側(皮鉄)
・高炭素鋼、硬鋼
・刃はマルテンサイト組織、大きなマイクロひずみ
・結晶子サイズが小さい

昨年度発表の課題

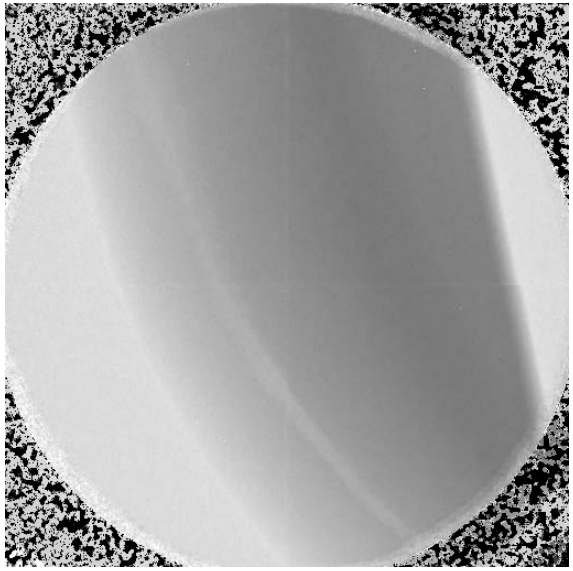


白い領域がどうなっているか？
を調べる。

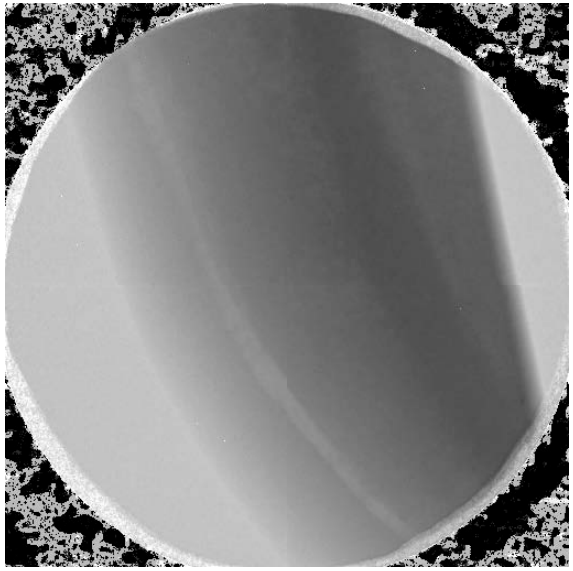
→最初の足し合わせ画像の波長を狭めて、どの波長域で白いラインが現れるか検証

Braggエッジなど、特別の波長でなにかが起きているのか？
両端5channelずつ除外した、透過率の画像

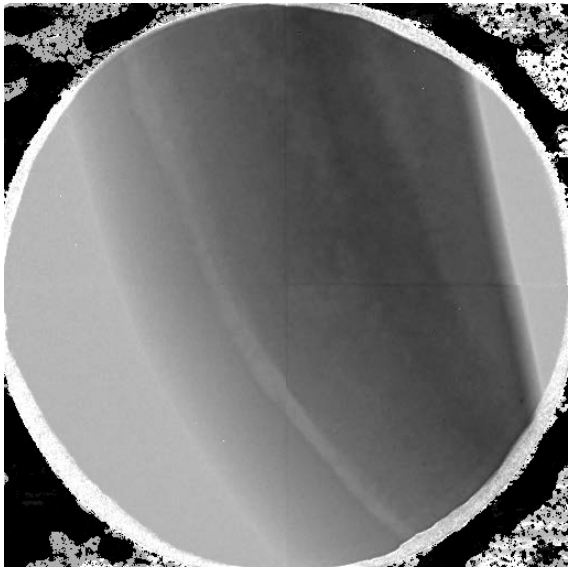
波長範囲を狭くしての画像



50-700ch



700-1400ch



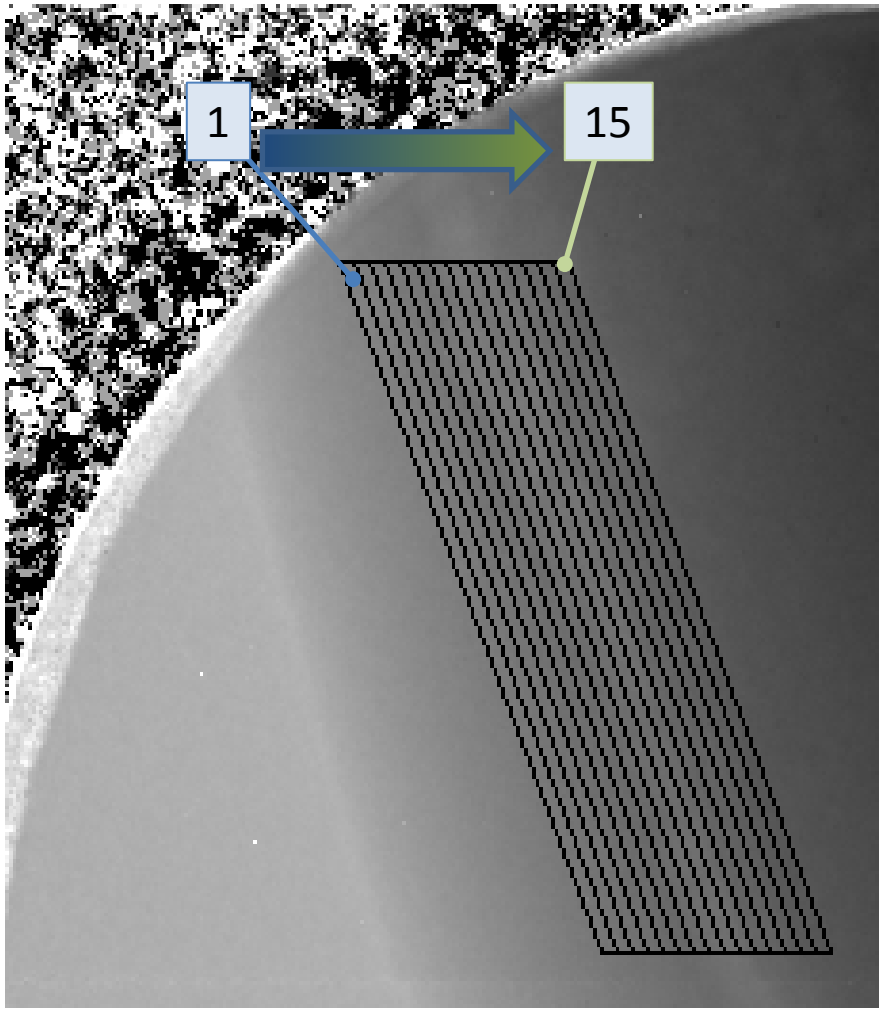
1400-2300ch

- 範囲を狭めた場合も白線が確認でき、どの波長域でも現れた。

白線周辺の解析

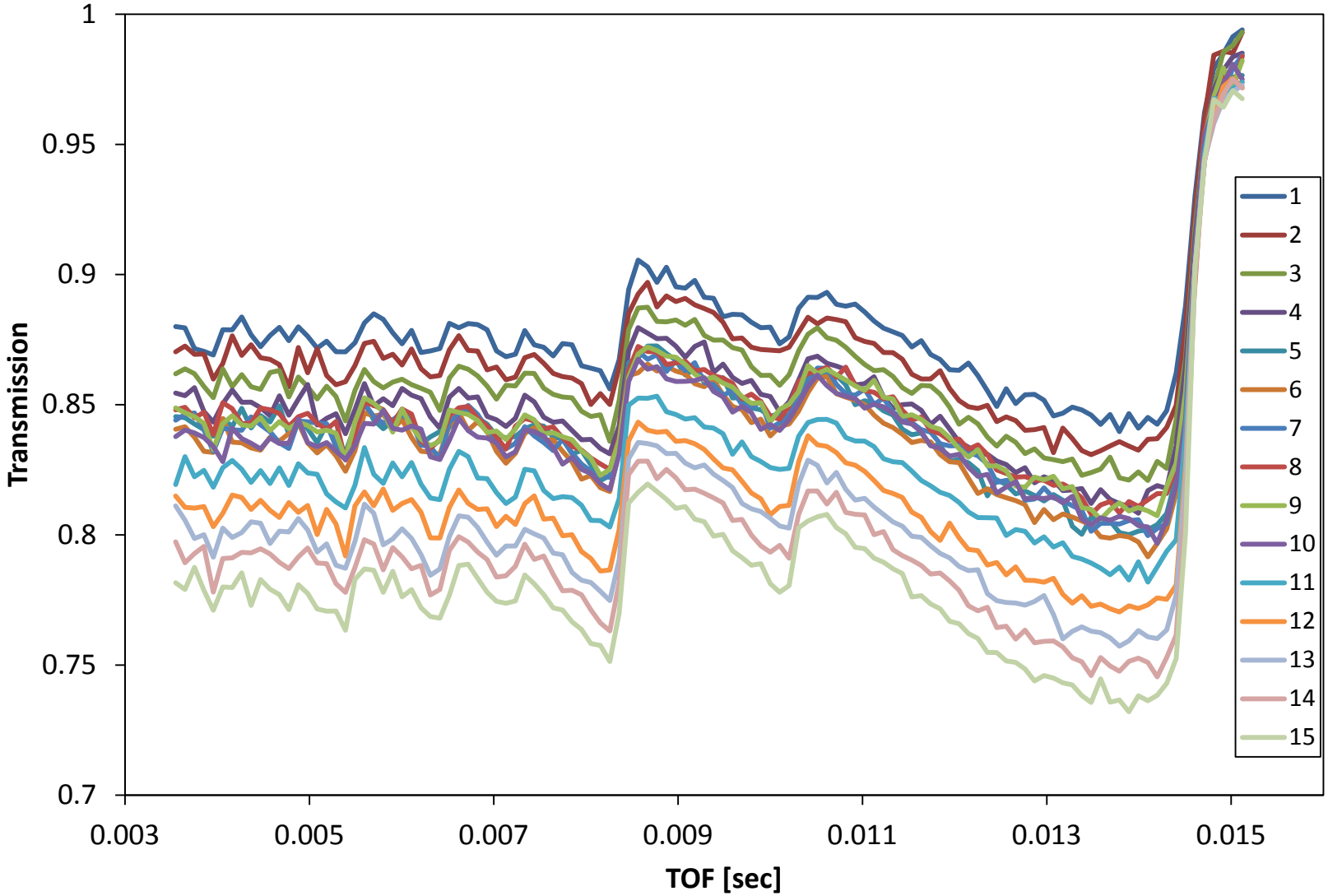
- 白線周囲を、刃先→峰 方向に15分割
- 1～15番で割振り。番号が大きいほど、右図で右方向に移動しています。
- 白線はおおよそ、7~11あたりに対応

狭い領域で、位置も近く透過率が重なって見辛いため、binの幅を広げて解析。



白線周辺の拡大図
（全体画像の左上に対応）

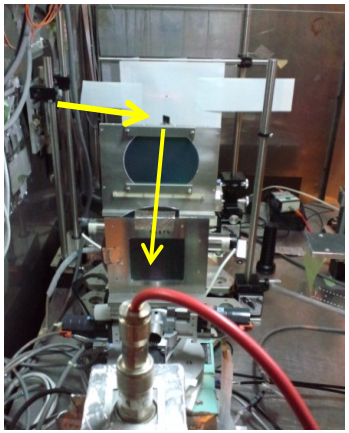
各分割範囲の透過率（20bin）

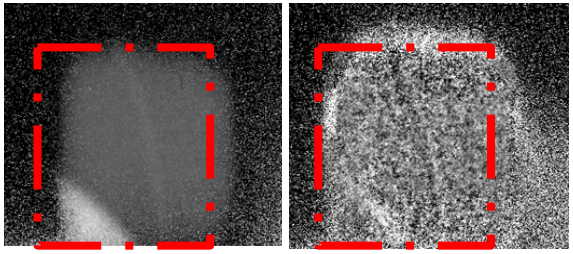


- 厚くなるに従って透過率は落ちるが、白線周辺(4~10)の透過率が密集している事が確認できた。(白線はおよそ7~11)
- 白線の領域は厚さの変化が無くなっているらしい。CTイメージングが必要。

（付録） 中性子イメージング法

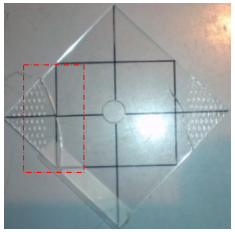
- 白色中性子イメージング（**原子炉**、加速器）
- エネルギー分析イメージング
  - ◎ブラッグエッジイメージング（**加速器**、原子炉）
  - ○共鳴イメージング（特定元素の空間分布）（**加速器**）
  - ○磁気イメージング（加速器、原子炉）
  - △位相コントラストイメージング （原子炉、加速器）





吸収　　干渉

大竹さんデータ@JRR3



（開発研究）

J-PARC： 篠原、理研： 関、大竹、東北大： 矢代、百生 名大：鬼柳

まとめ

・中性子分光法によって金属組織情報の非破壊測定が可能であり、
本研究では、日本刀全体の組織状態を評価した。

中性子科学会で発表してください。
イメージングのパワーを伝えましょう！
学会員になってください。
来年は理研です。