

令和5年度 中性子イメージング専門研究会 2023年12月27日

日本刀剣類の内部構造の比較検討

北大名誉教授・日本中性子工学

鬼柳善明

内 容

- ▶ 目的と今日の話
- ▶ 日本刀類のこれまでの研究
- ▶ 中性子ブラッグエッジ透過法の原理とBE・CTで得られる情報
- ▶ 日本刀剣類のブラッグエッジ解析およびCTの結果と考察
- ▶ まとめ

日本刀研究グループ (中性子非破壊測定・従来型破壊測定の研究者の融合)



北海道大学

代表: 鬼柳善明(名誉教授)、佐藤博隆



島根大学

森戸茂一、

Pham Hoang Anh

大庭卓也(名誉教授)



J-PARC

及川健一、篠原武尚、甲斐哲也、
Stefanos Harjo

CROSS 松本吉弘



九州大学 渡辺賢一



熊本大学 峯洋二

目的と今日の話

日本刀類の金属学的特性や構造などを調べる。

→個々の刀剣類の特徴を明らかにする。ひいては時代や場所による製造方法の違い、技術の伝搬について明らかにする。

* 中性子ブラッグエッジ透過法

結晶組織構造などを調べることで金属工学的特徴を調べる。

* 中性子CT

介在物や空孔また鉄の境界など、鉄の状態や構造を調べる。

* ミュオン

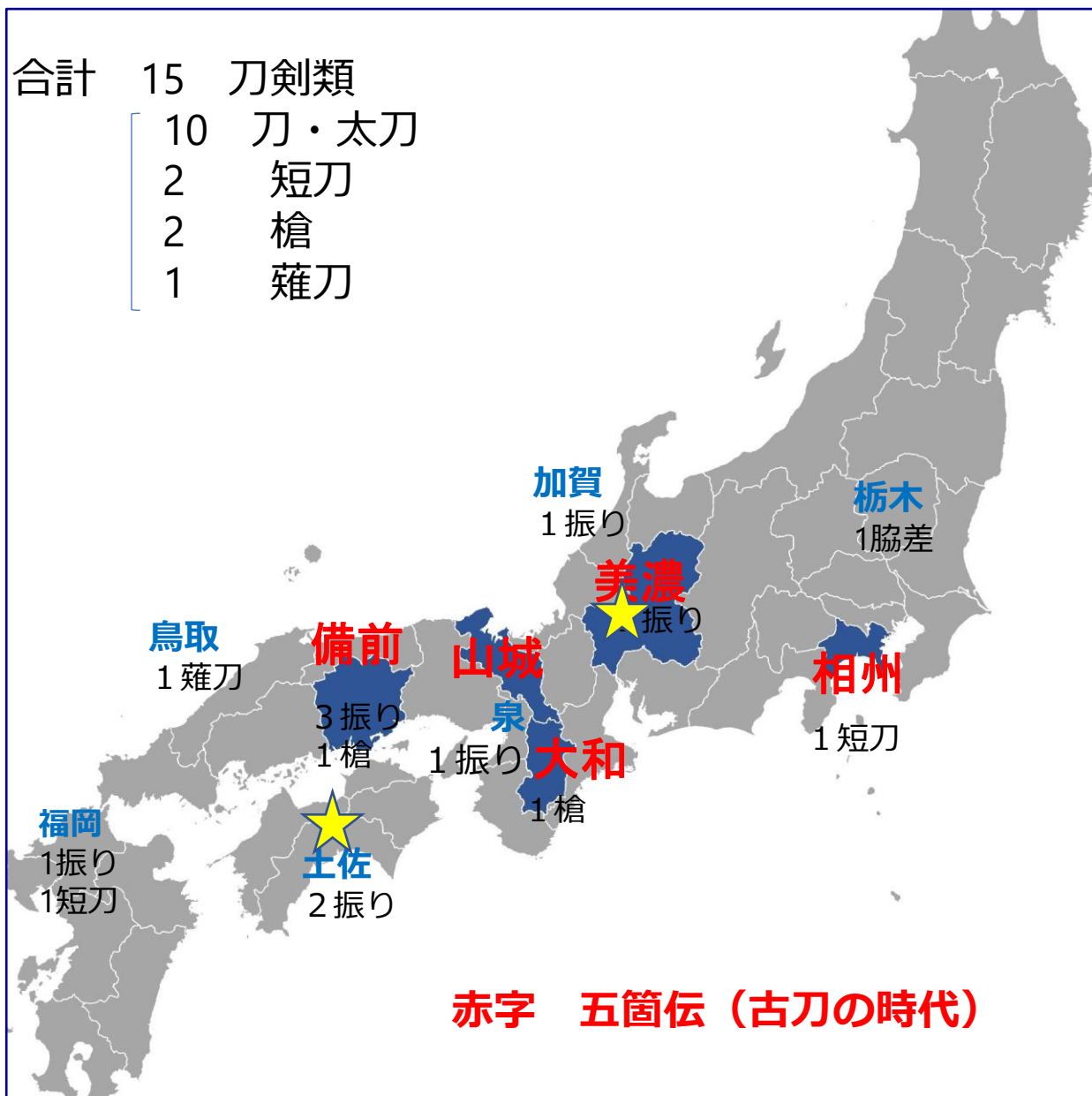
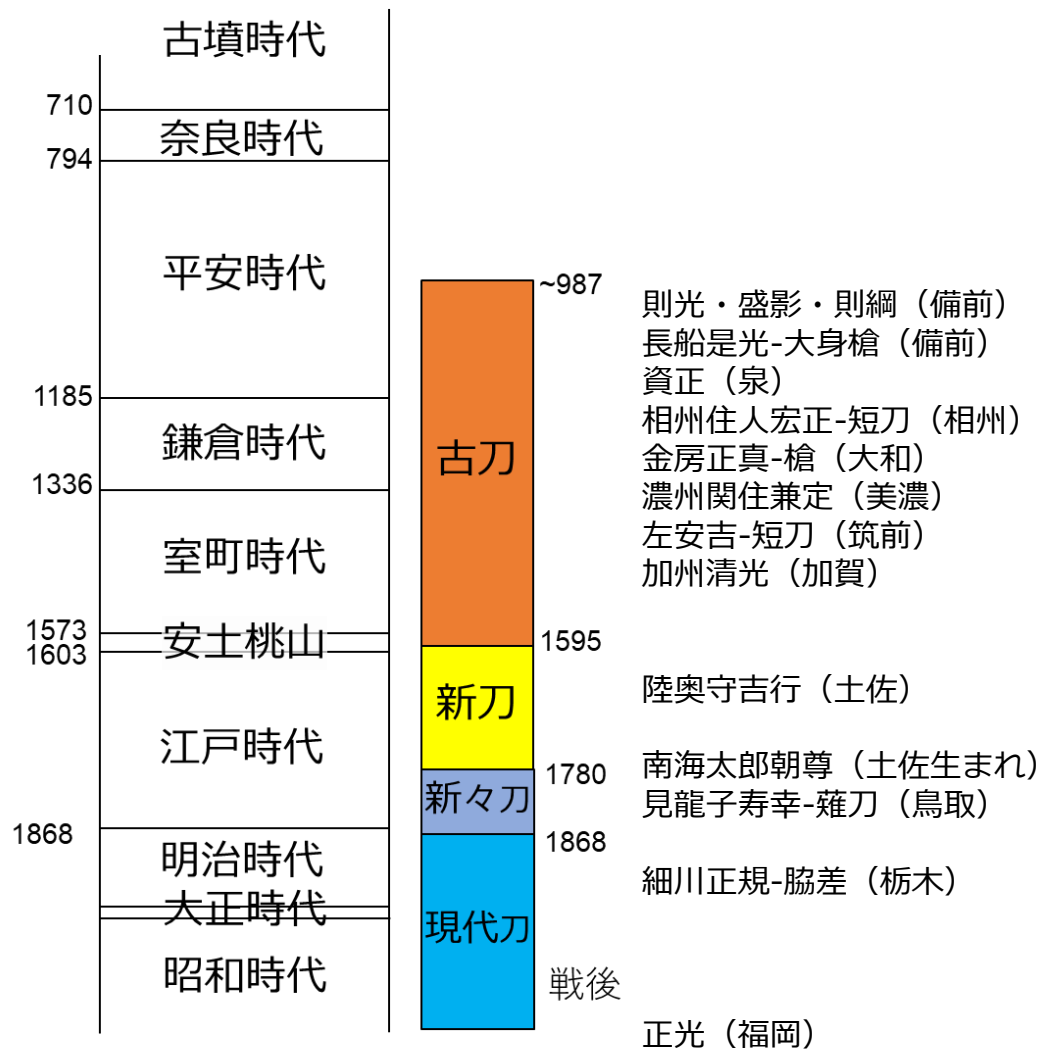
炭素濃度を調べることによって心鉄や皮鉄などの構造を明らかにする。

今日は、これまで測定してきた刀剣類のいくつかについて、中性子のデータの比較を試みたので、それについて報告する。

測定した刀剣類（古刀はおよそ江戸時代以前）

No.	刀工	作成年代	種別	地域	長さ
1	備州盛景	南北朝時代(1356-1361)	太刀(古刀)	備州(岡山県)	全長 約104cm
2	加州清光	南北朝時代	刀(古刀)	加州(石川県)	刃長 約69.6cm
3	備州則綱	室町前期(1405)	太刀(古刀)	備州(岡山県)	全長 約97cm
4	濃州関之住兼定	南北朝時代(永正3年:1506年)	刀(古刀)	濃州(岐阜県)	刃長 約61.3cm
5	資正	室町後期	刀(古刀)	和泉(大阪)	全長 約79cm
6	陸奥守吉行	江戸時代	刀(新々刀)	土佐(高知)	刃長 約68.3cm
7	南海太郎朝尊	江戸時代(天保6年)(1836)	刀(新々刀)	土佐(高知)	刃長 約70.8cm
8	正光	昭和(1996)	現代刀	福岡	全長 約94cm
9	備州則光	室町時代	脇差(古刀)	備州(岡山県)	刃長 約46cm
10	細川正規	明治時代	脇差(新刀)	栃木県	刃長 約31.3cm
11	見龍子寿幸	江戸時代後期	薙刀(新々刀)	鳥取	刃長 約31.3cm
12	左安吉	南北朝時代中期ごろ	短刀(古刀)	筑前(福岡)	刃長 約28cm
13	相州広正	室町初め	短刀(古刀)	相州(神奈川)	刃長 約27cm
14	長船是光	室町時代中期	大身槍(古刀)	備前(岡山)	刃長 約54.6cm
15	金房正真	室町時代	槍(古刀)	大和(奈良)	刃長 約26cm

測定刀剣類の時代と産地



太刀、刀、脇差、薙刀 (本日の話)

① 盛景 太刀 (備前) 南北朝(1356-1361)



② 則綱 (備前) 太刀 室町 (1405)



③ 則光 脇差 (備前) 室町



④ 清光 刀 (加州) 南北朝



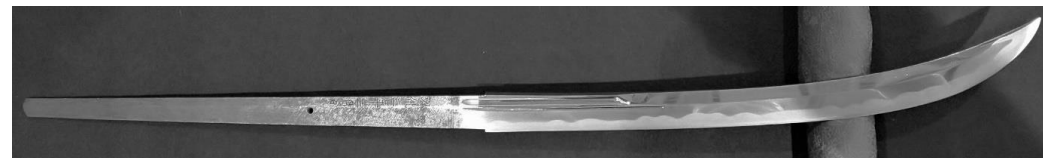
⑤ 資正 刀 (和泉) 室町(1504-1526)



⑥ 南海太郎朝尊 刀 (土佐) 江戸(1836)



⑦ 見龍子寿幸 薙刀 (鳥取) 江戸(1846年)



⑧ 細川正規 脇差 (栃木) 明治



⑨ 正光 太刀 (福岡) 昭和(1996)



中性子ブラッグエッジ透過法の原理とBE・CTで得られる情報

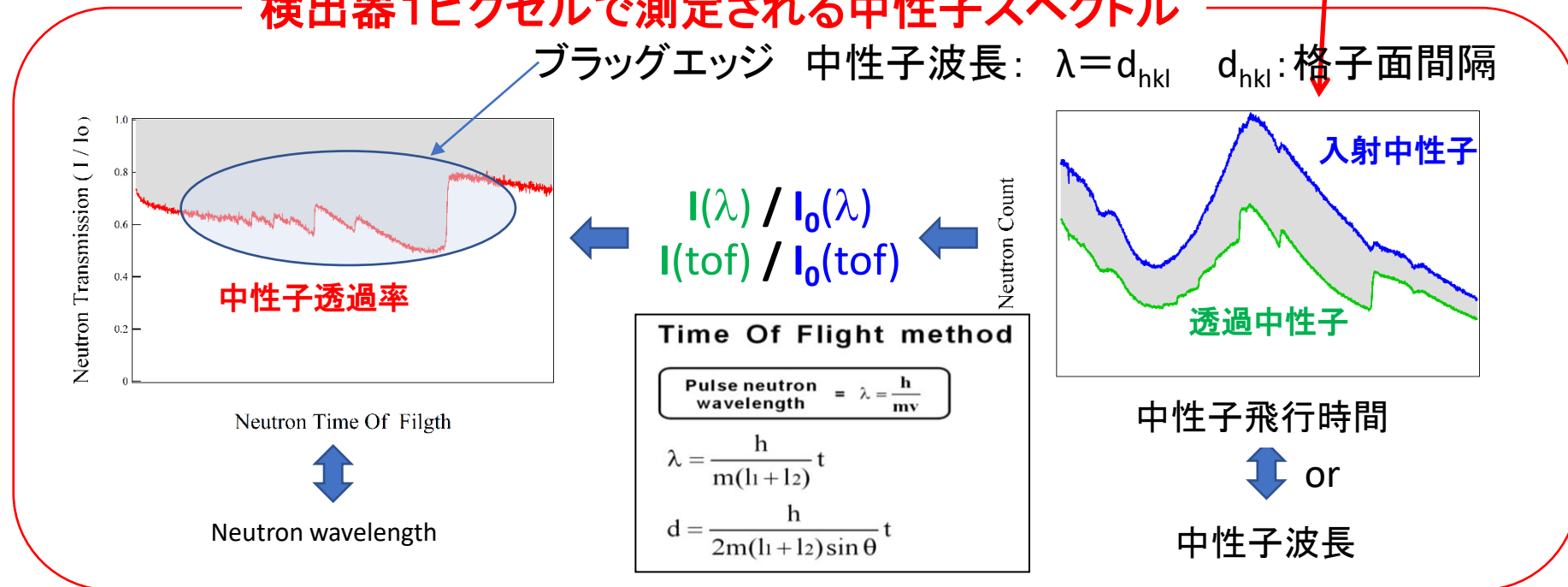
パルス中性子イメージングとブラッグエッジ解析

中性子エネルギー（波長）毎に透過率を取得する。



検出器1ピクセルで測定される中性子スペクトル

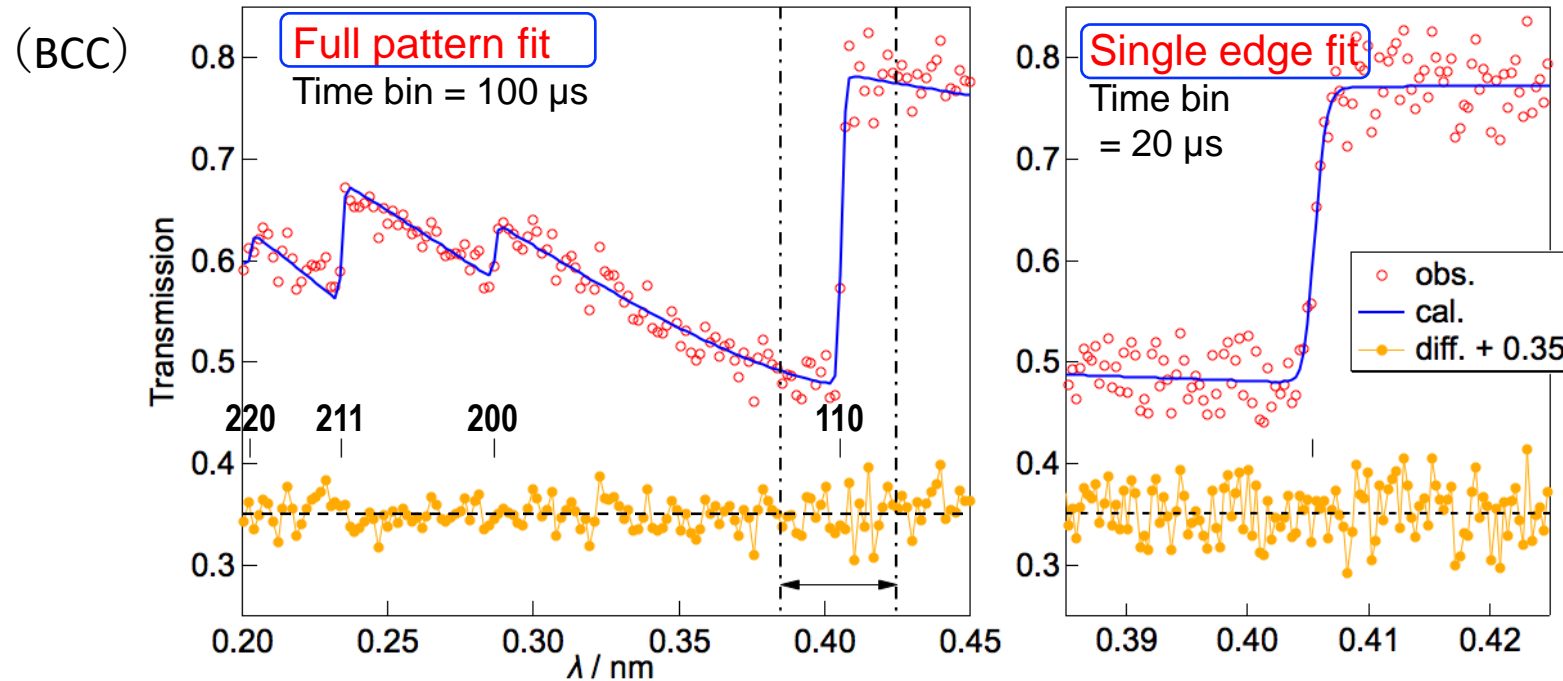
ブラッグエッジ 中性子波長: $\lambda = d_{hkl}$ d_{hkl} : 格子面間隔



ブラッグエッジ解析

- 密度 ρ_t 、結晶子サイズ s 、
選択配向パラメータ r

- 格子面間隔 d_{110} 、エッジ幅 w_{110}



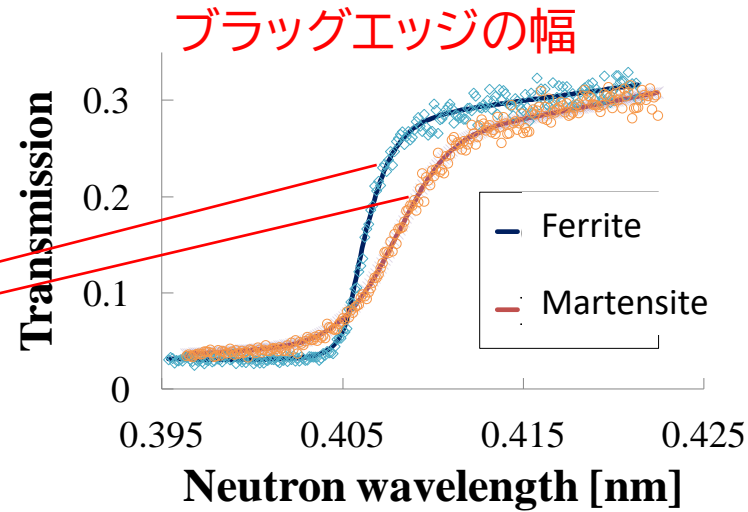
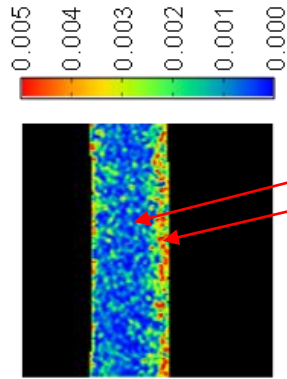
GUI-RITSを用いて解析

ブラッグエッジ解析コード **RITS**

H. Sato, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi: Materials Transactions, 52, pp.1294-1302, (2011)

ブラッグエッジ透過法による焼入れ、歪み、結晶子サイズと日本刀の特性

1. 焼入れの状況



2. 棟側の焼入れの影響(残留応力)

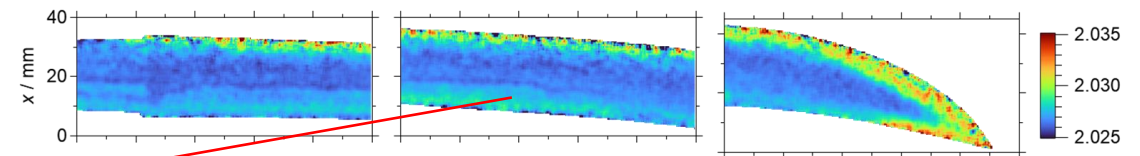
火造り



焼入れ



格子面間隔



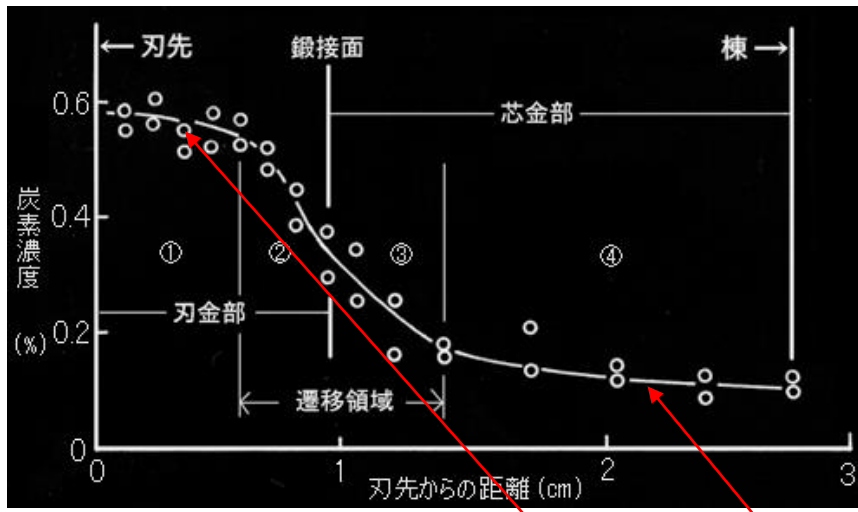
焼入れで曲る棟側に圧縮応力
→厚さ方向に格子面間隔が大きくなる歪みが表れる

3. 鉄粒子サイズと炭素量

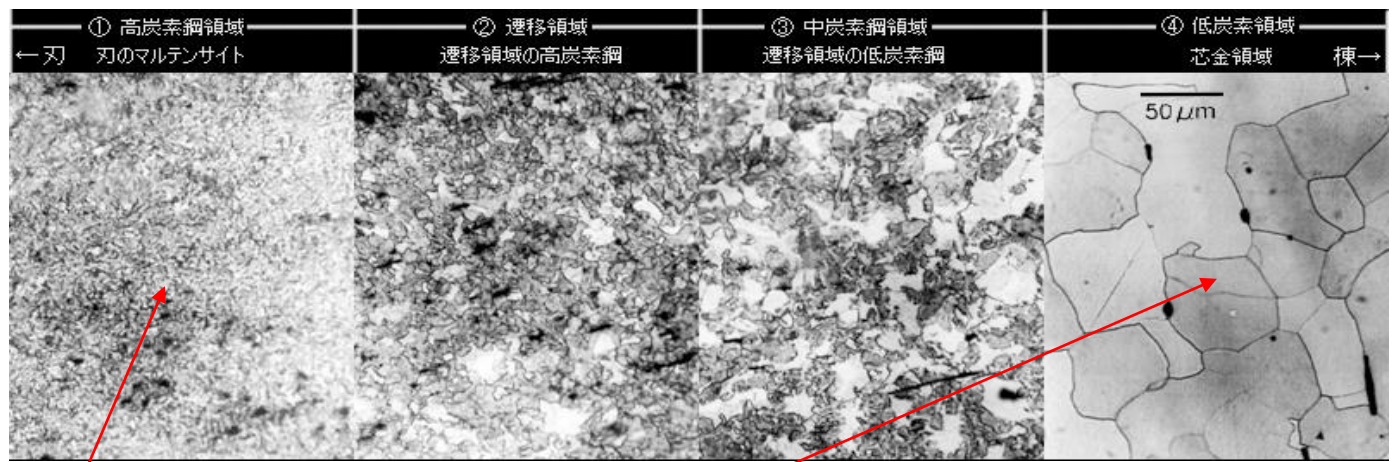
炭素量は刃先(約0.6%)から棟に向かって減少していく(約0.1%)。それとともに粒が大きくなっていく。

北田正弘著 室町期日本刀の微細構造- 日本刀の材料科学的研究、内田老鶴圃 (2008)

刃から棟に至る炭素濃度分布



粒の大きさ

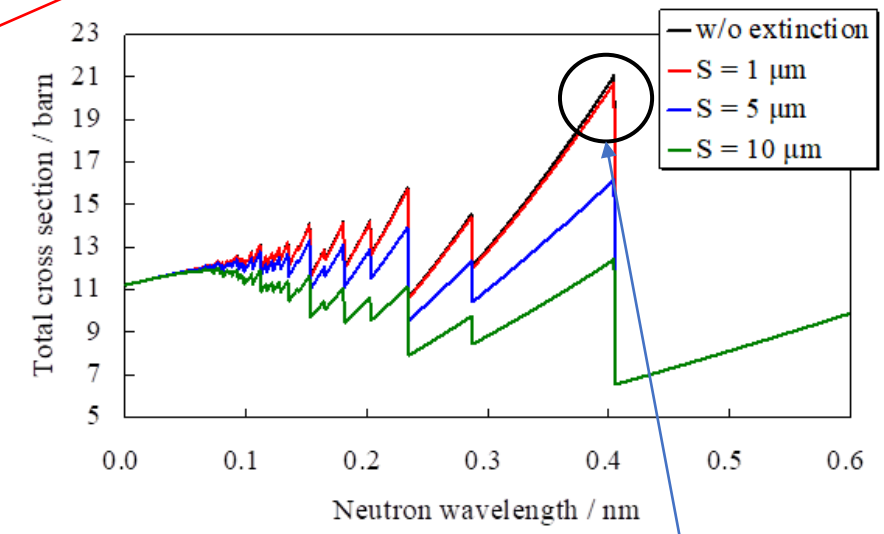
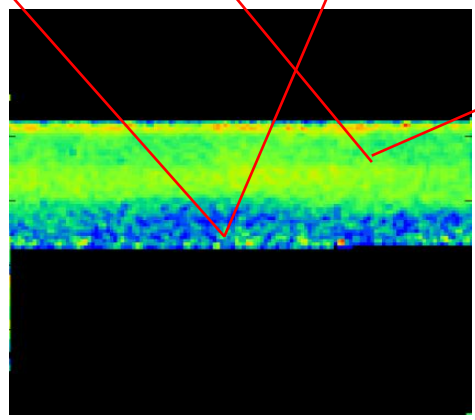


心鉄がある刀の刃先側からの変化

刃先側 (マルテンサイト) 遷移領域 (高炭素) 遷移領域 (低炭素) 心鉄領域 (低炭素)

ブラッグエッジから
求めた結晶子サイズ

大
小



但し、ブラッグエッジでは小さい所の差が見えにくい。

4. 集合組織(結晶配向)と鍛錬の仕方や度合い

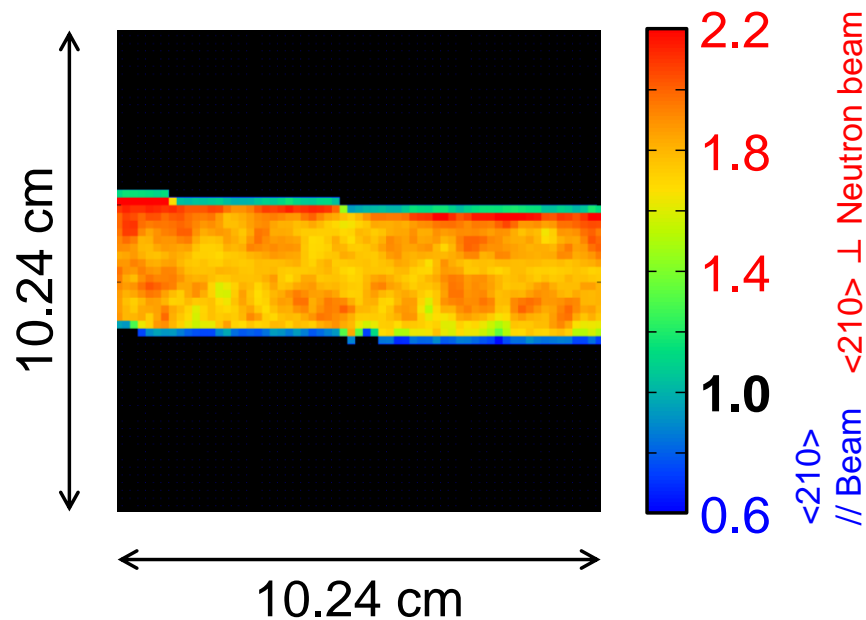
結晶配向は現在の製鉄においても圧延方向に揃うということがある。

従って、刀類の鍛錬の仕方、強さと関係があると思われる。

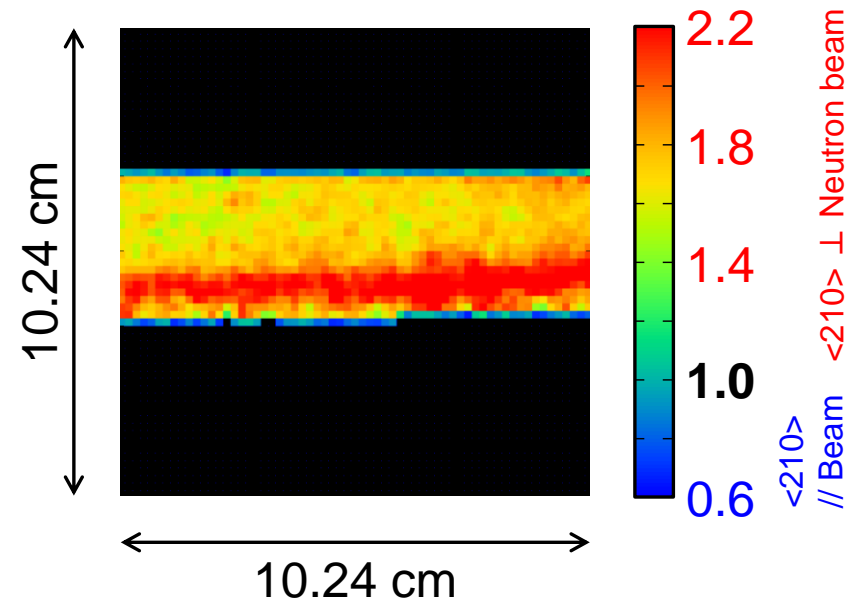
しかし、その関係性についてはまだ良く分かっていない。

異なった刀の集合組織の例

Degree of crystallographic anisotropy
(March-Dollase coefficient)

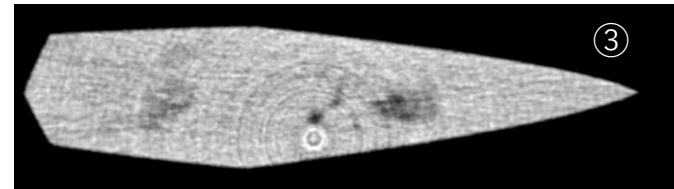
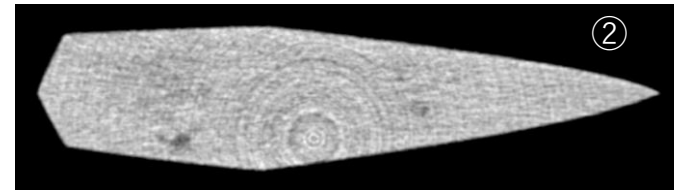
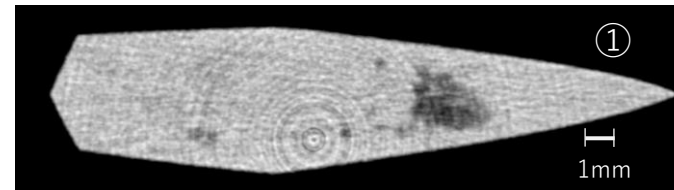
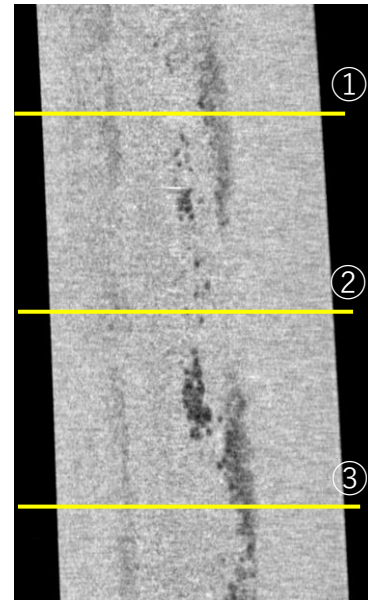
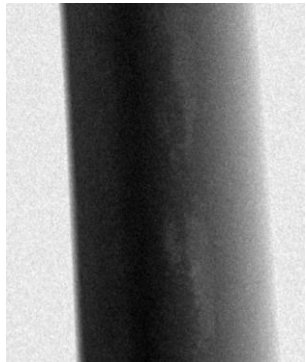
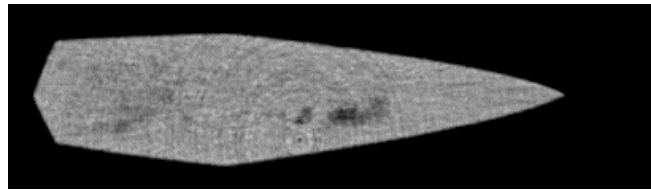


Degree of crystallographic anisotropy
(March-Dollase coefficient)



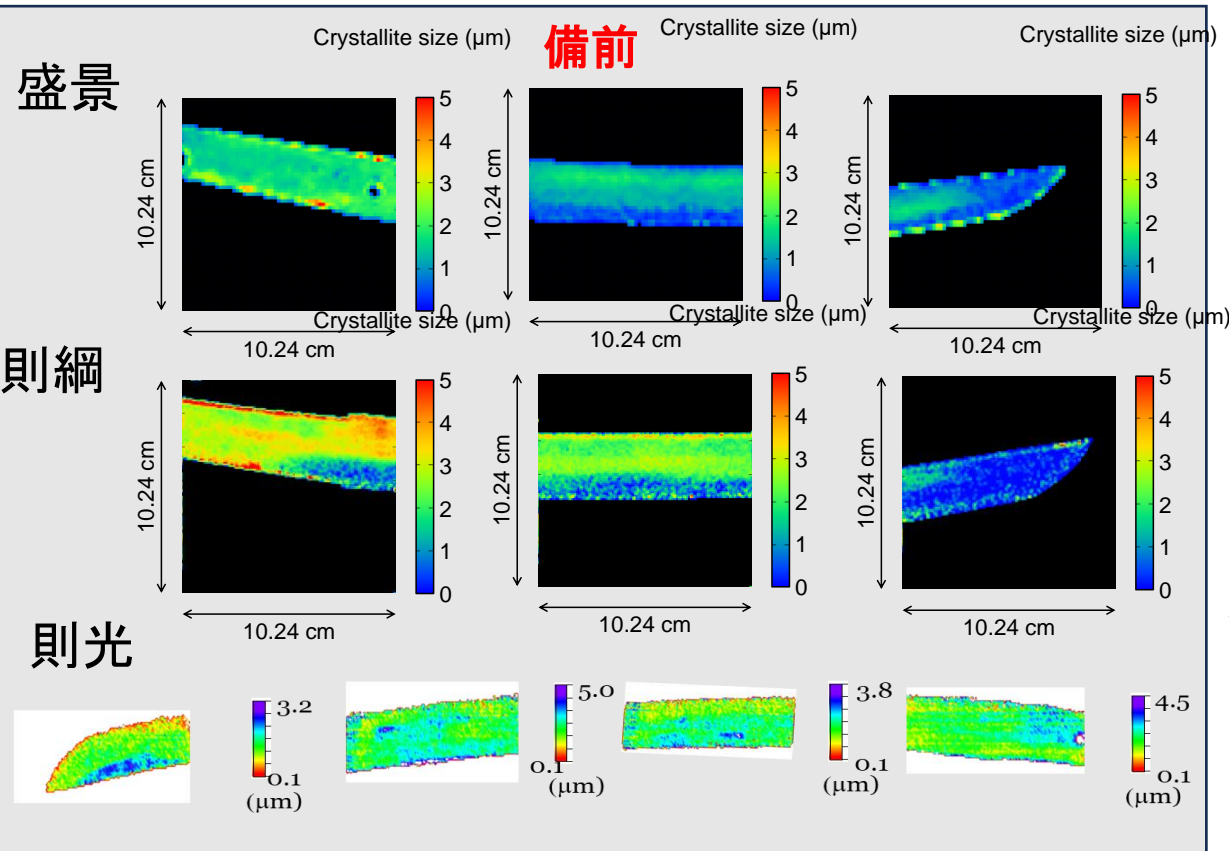
中性子CTによる介在物・空隙などの測定

■ 刀身部分の断層像(0.1mm厚さごとの変化)

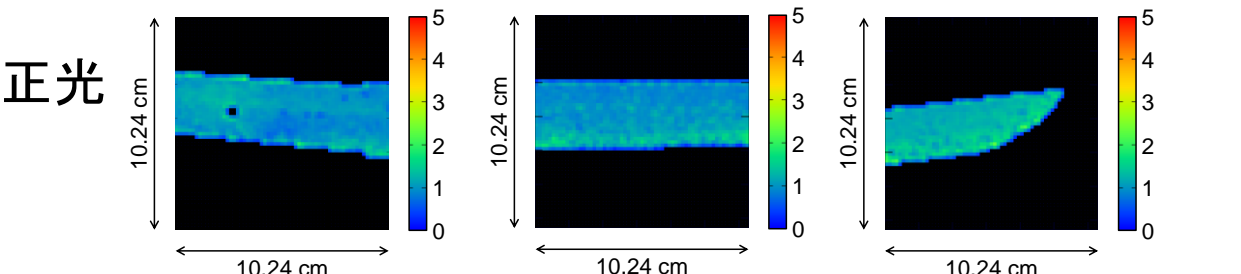
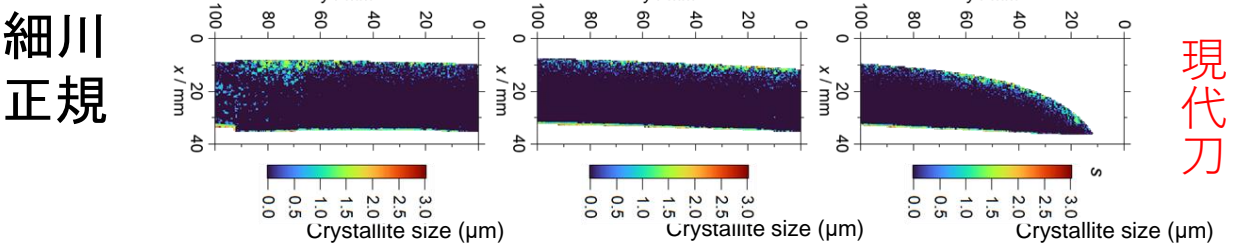
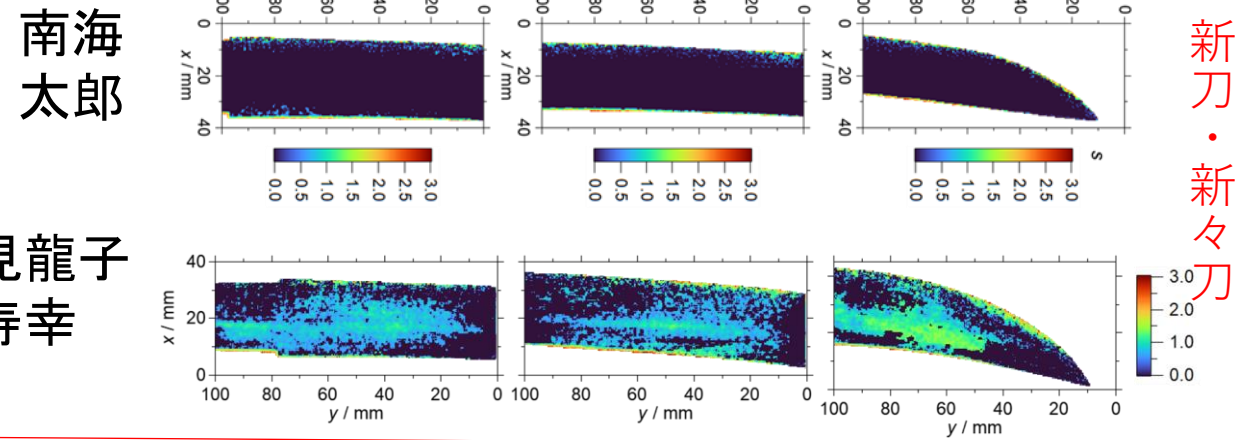
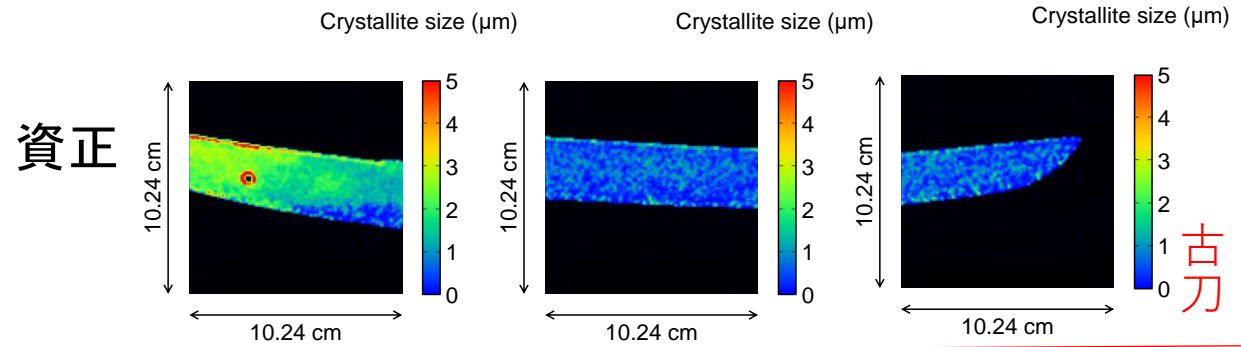


日本刀剣類のブラッグエッジ解析およびCTの結果と議論

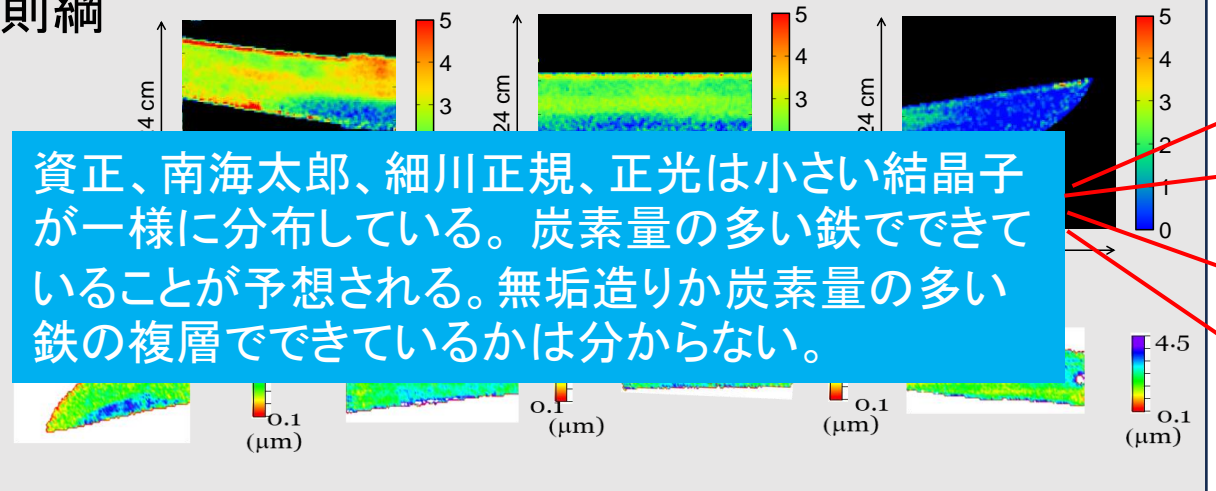
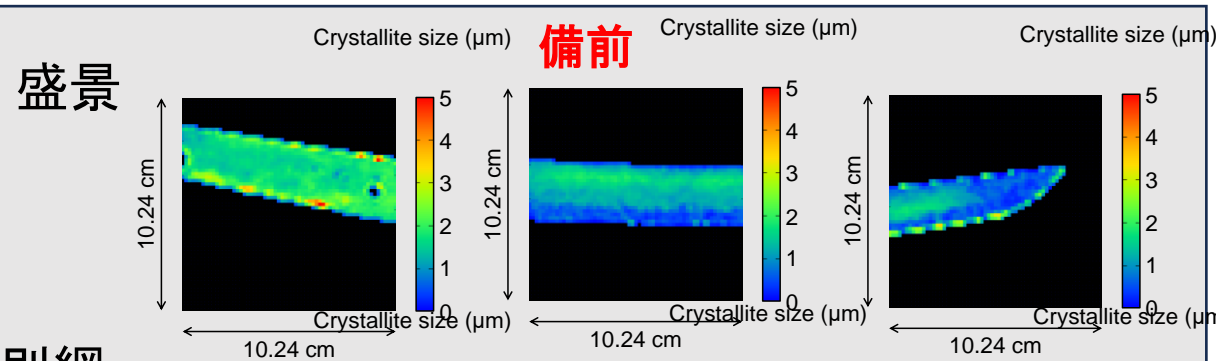
結晶子サイズ(μm)



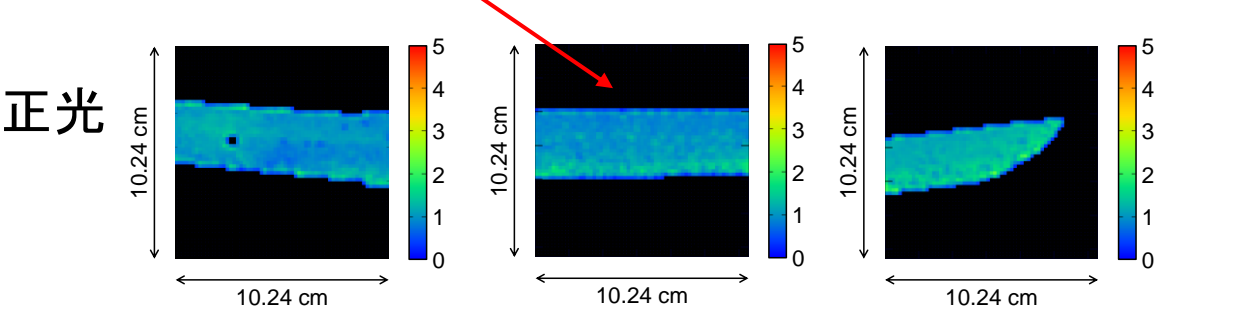
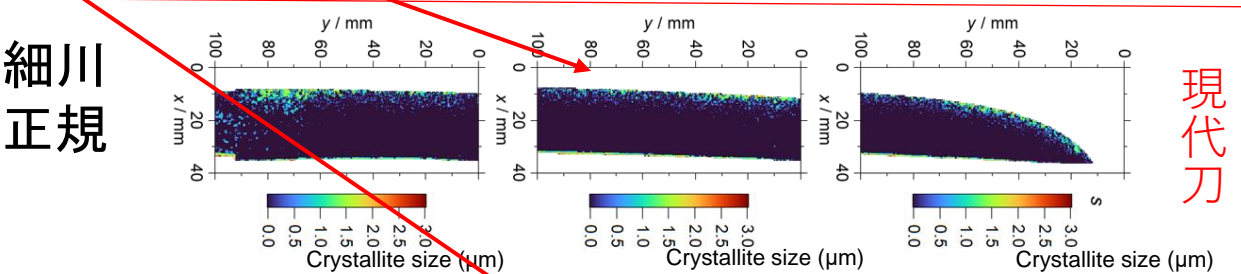
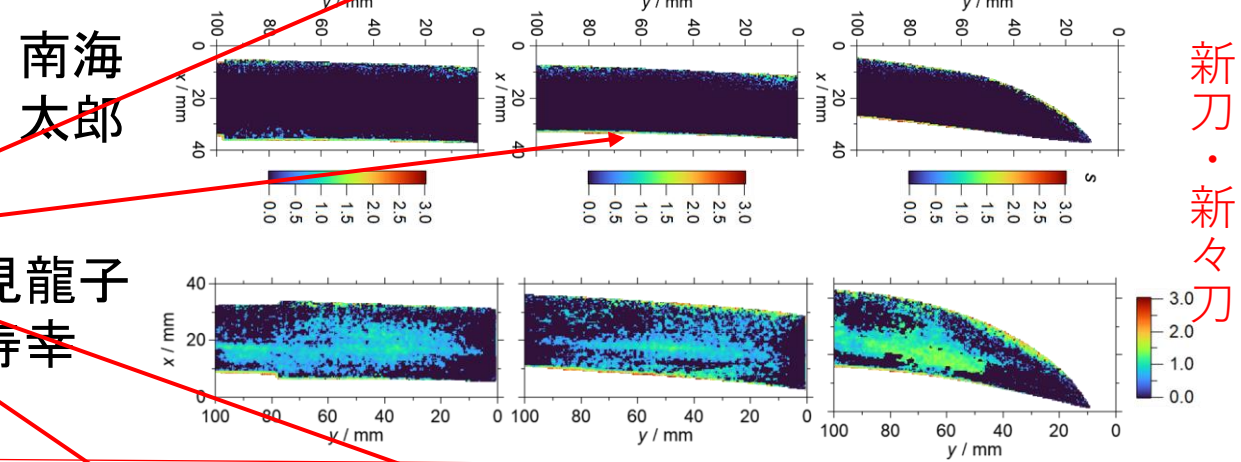
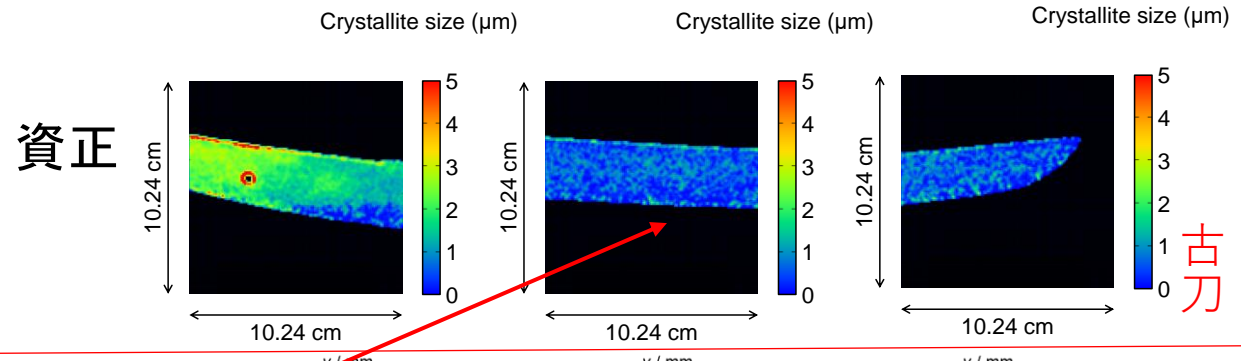
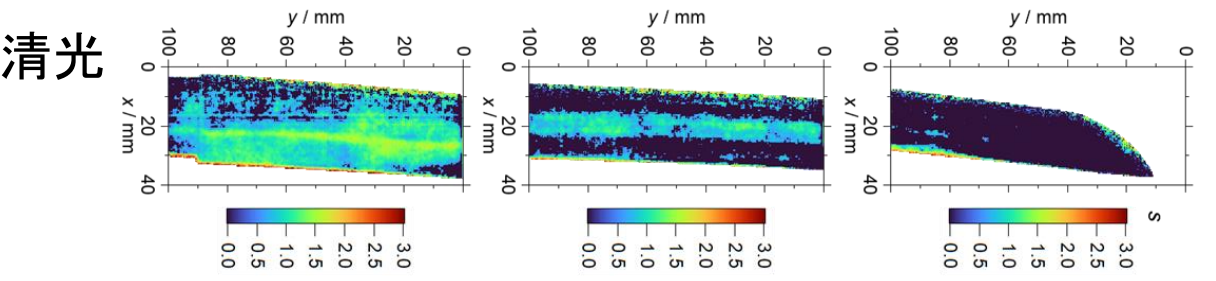
盛影、則綱、則光の備前の3振りには、棟側が大きく、刃側に向かって小さくなるという分布をしている。これは、棟側に心鉄(低カーボン量)、刃側で皮鉄(高カーボン量)の影響が現れていると考えられる。盛影が則綱より小さい。



結晶子サイズ(μm)



資正、南海太郎、細川正規、正光は小さい結晶子が一様に分布している。炭素量の多い鉄でできていることが予想される。無垢造りか炭素量の多い鉄の複層でできているかは分からない。

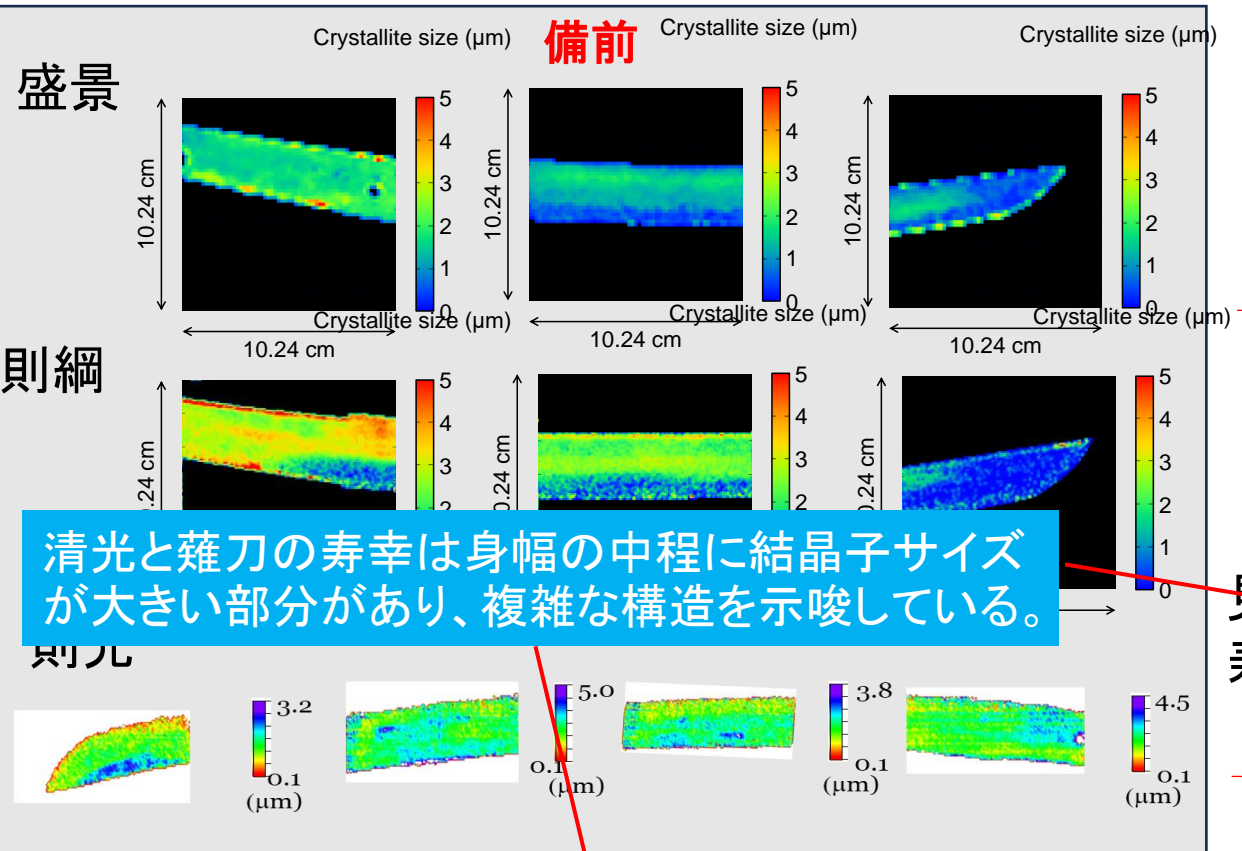


古刀

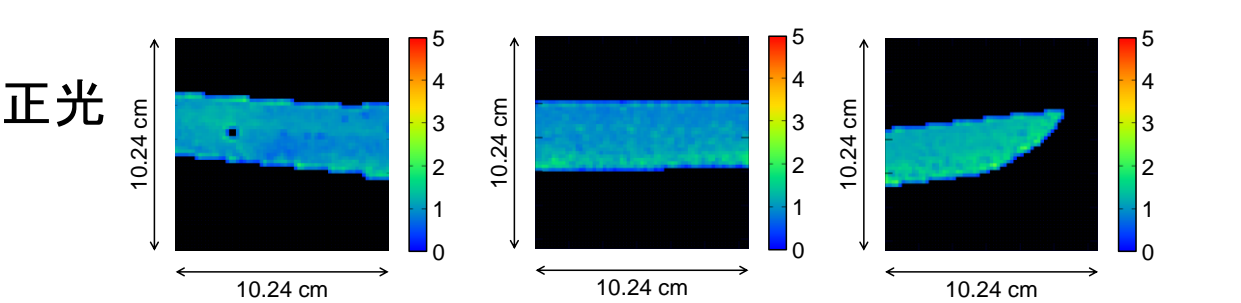
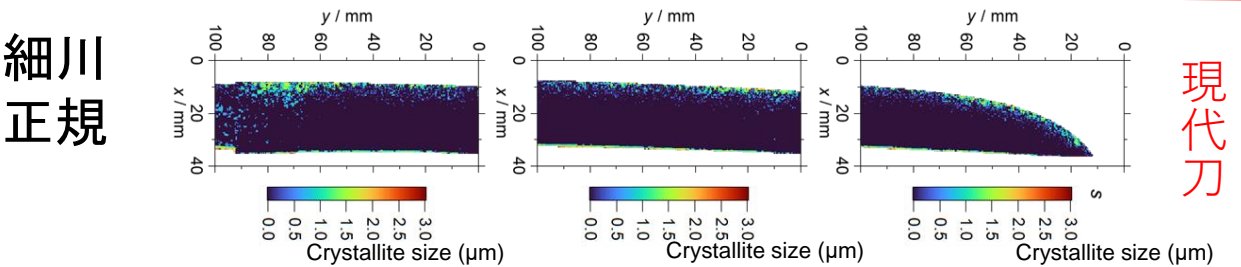
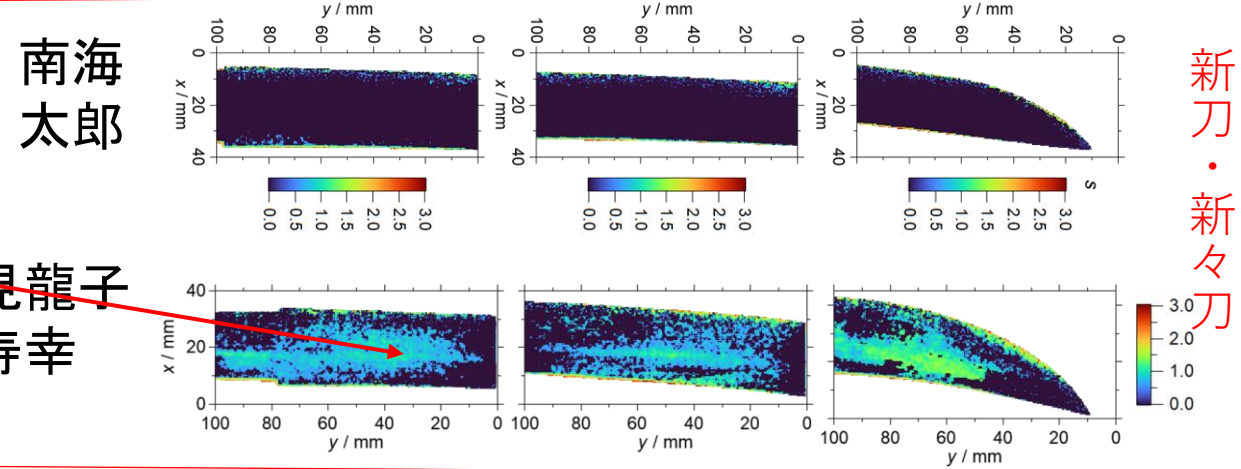
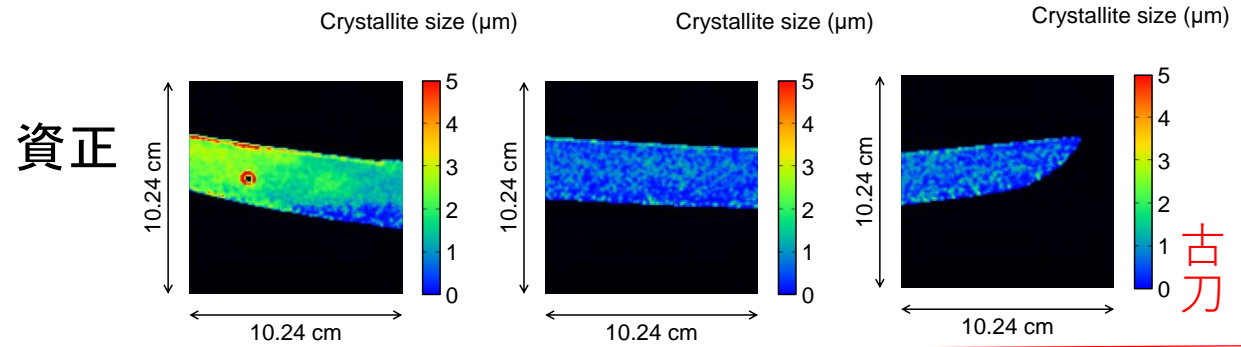
新刀・新々刀

現代刀

結晶子サイズ(μm)



清光と薙刀の寿幸は身幅の中程に結晶子サイズが大きい部分があり、複雑な構造を示唆している。

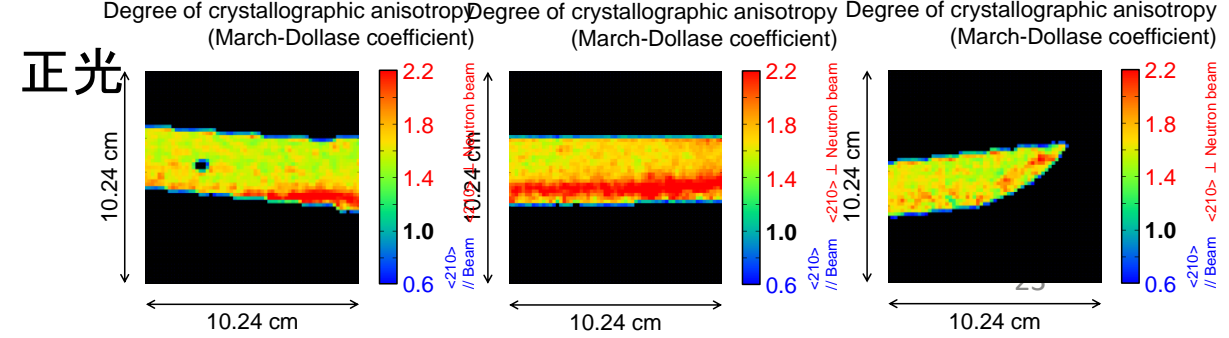
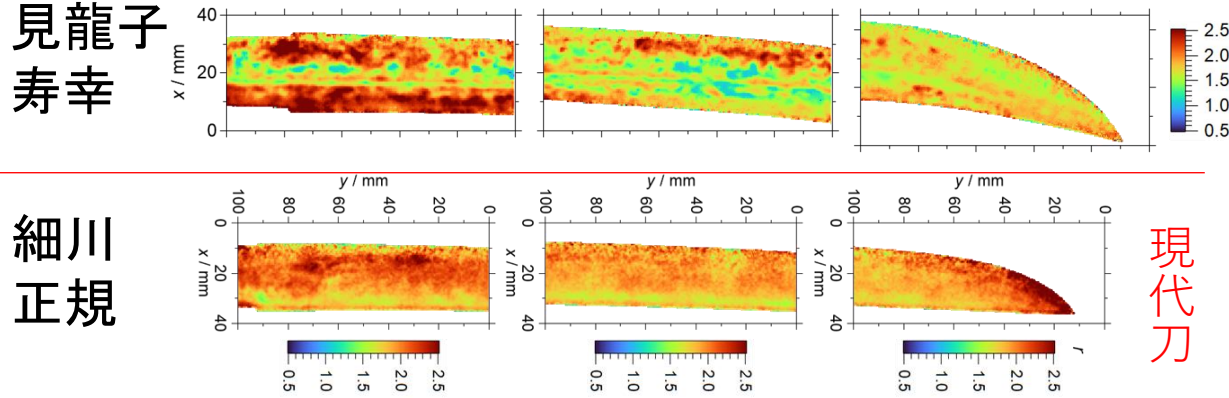
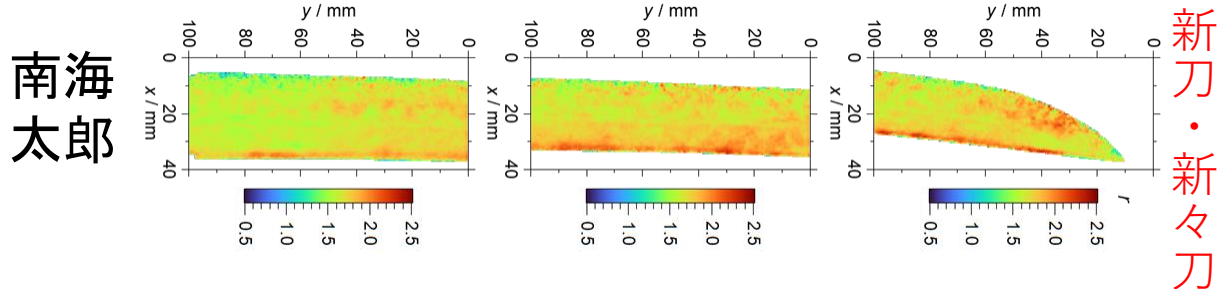
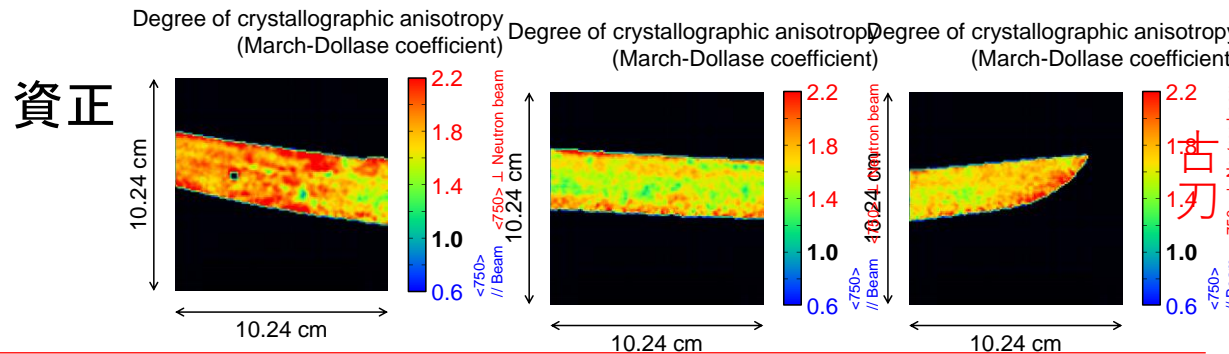
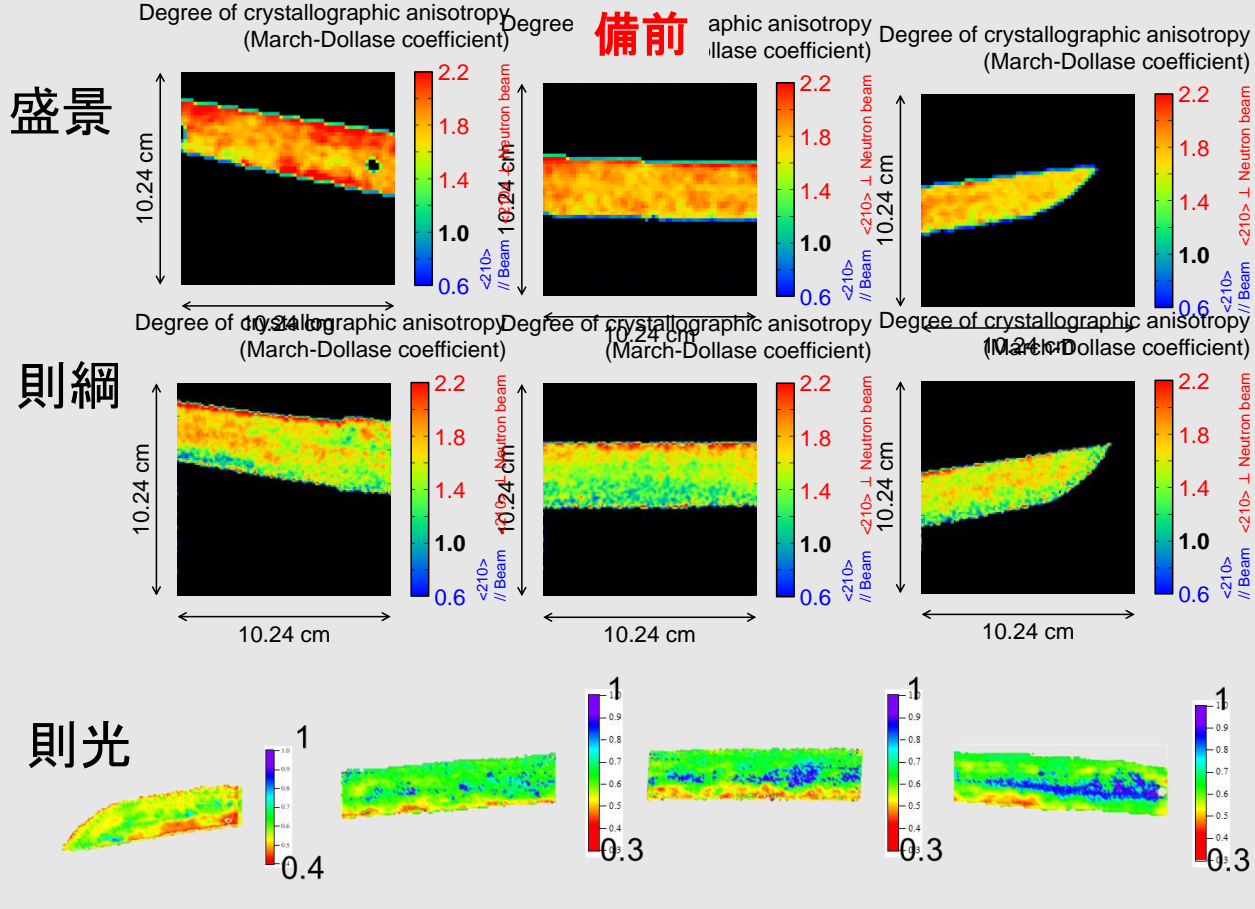


古刀

新刀・新々刀

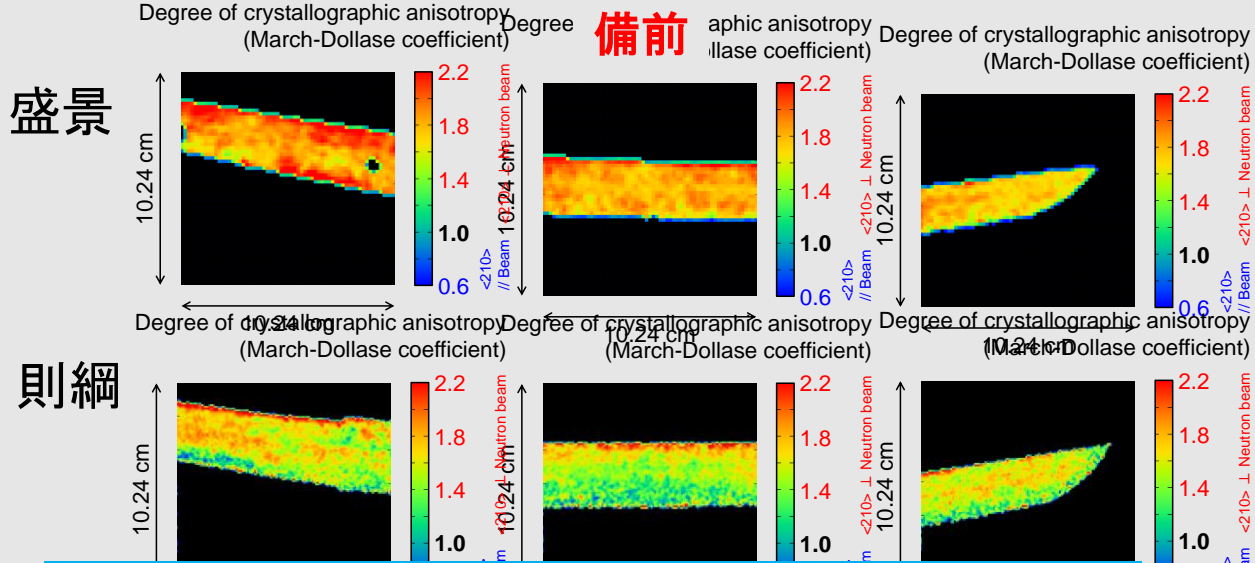
現代刀

集合組織(結晶配向)の発達度



集合組織は刀工によって違う。備前刀の間でも傾向が違う。盛影は他の二振りの備前刀と比べて強い集合組織を持っている。盛影の結晶子サイズが小さいのに対応している。則光は等方的な所が中央付近にある。

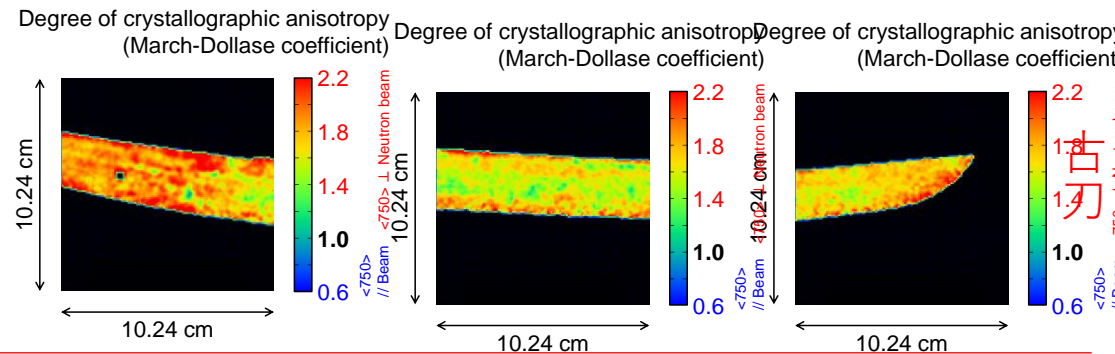
集合組織(結晶配向)の発達度



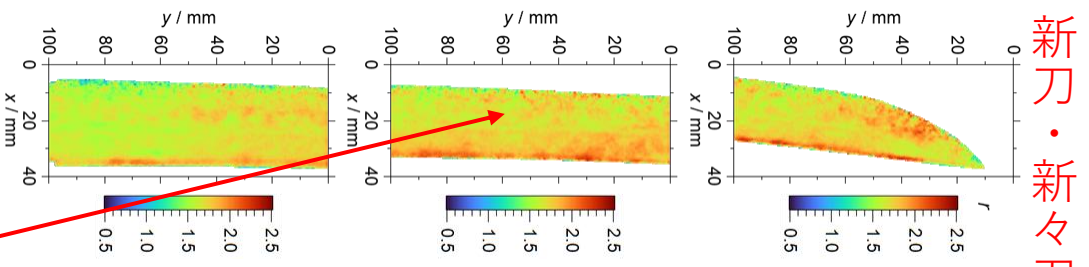
南海太郎は棟側に少し強い集合組織がある。

細川正規は中央付近に強い集合組織があり、それ以外はあまり集合組織は発達していない。

資正

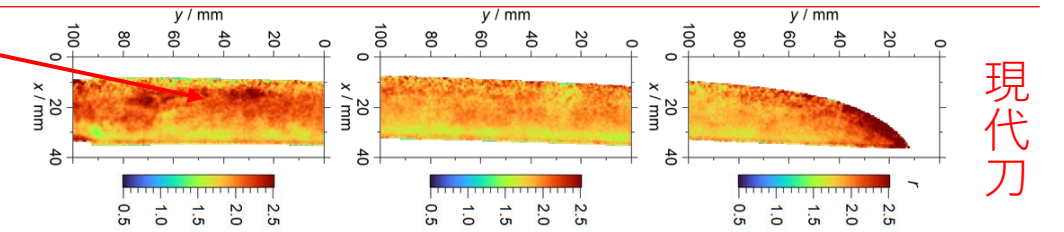


南海太郎



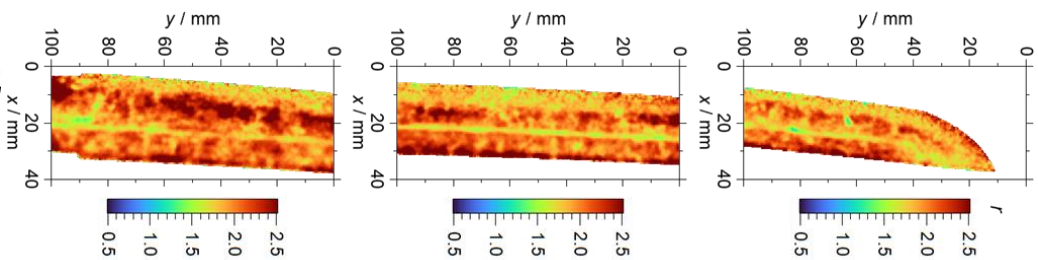
見龍子
寿幸

細川
正規

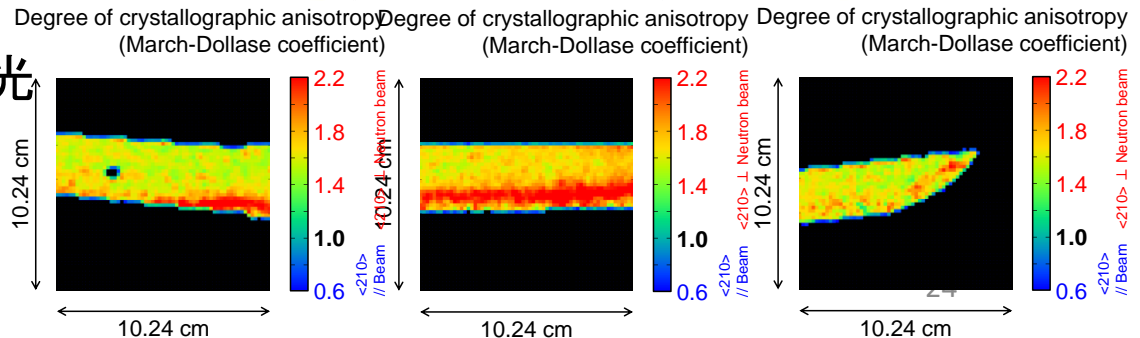


現代刀

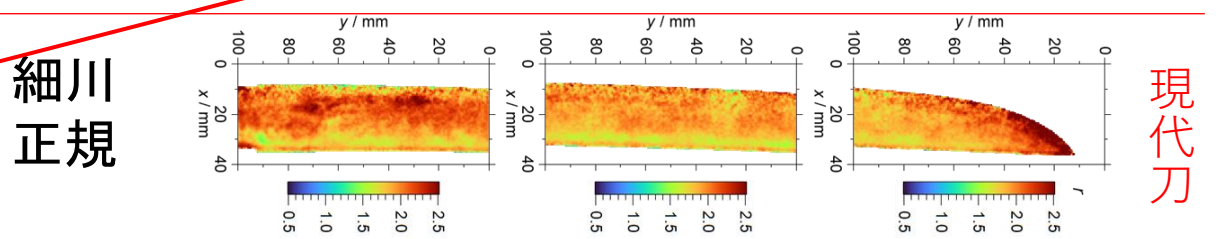
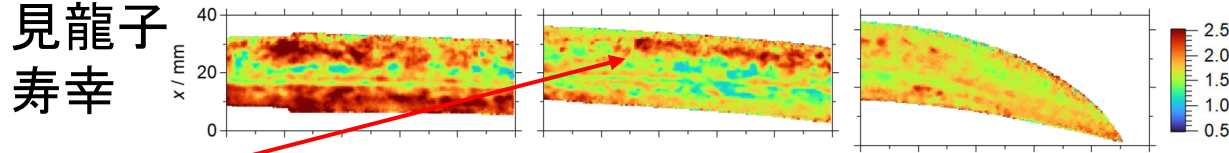
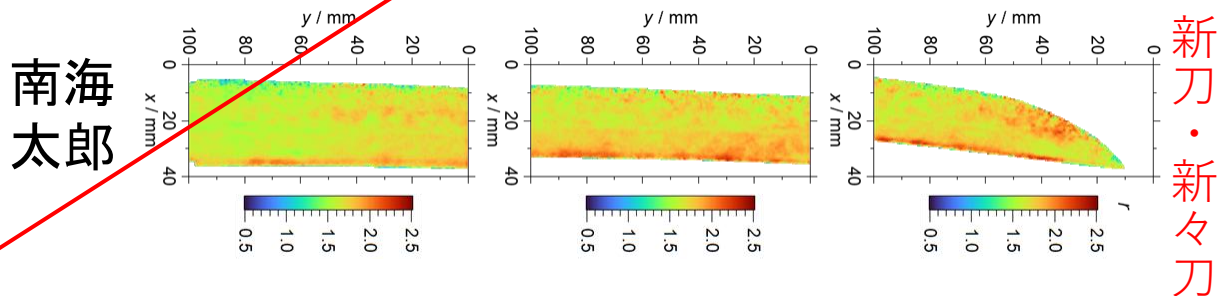
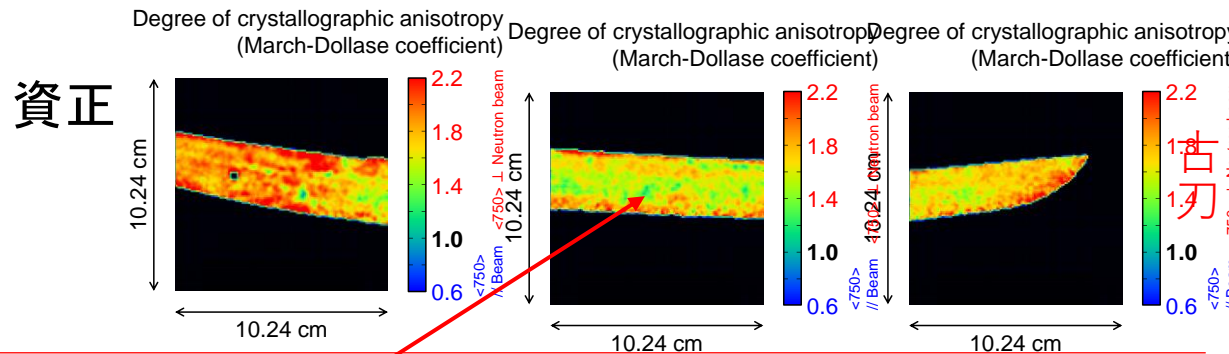
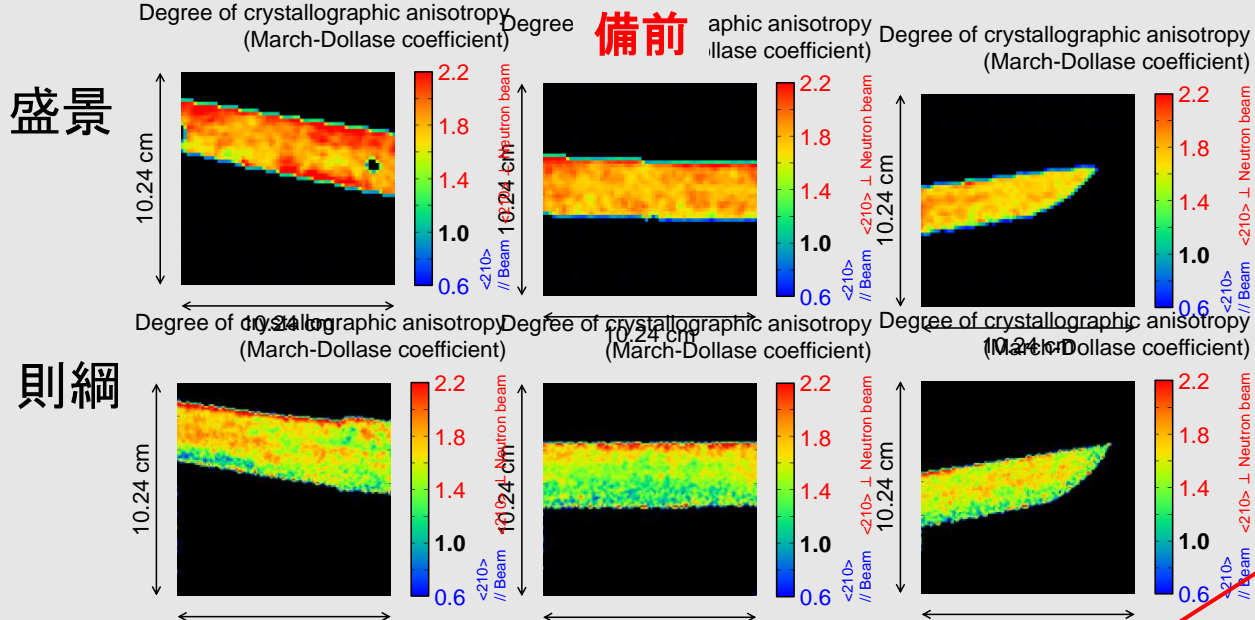
清光



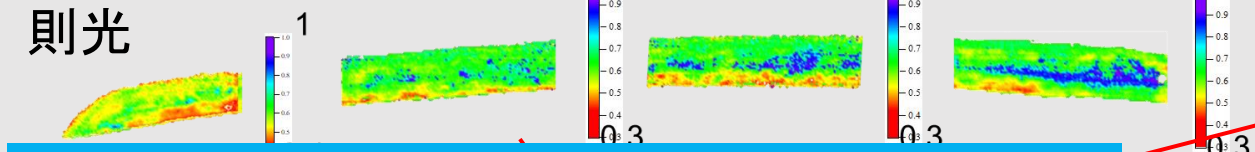
正光



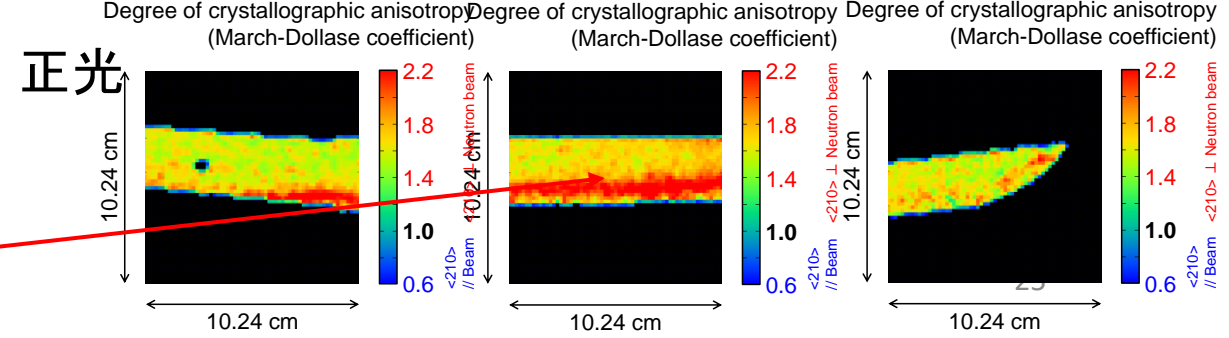
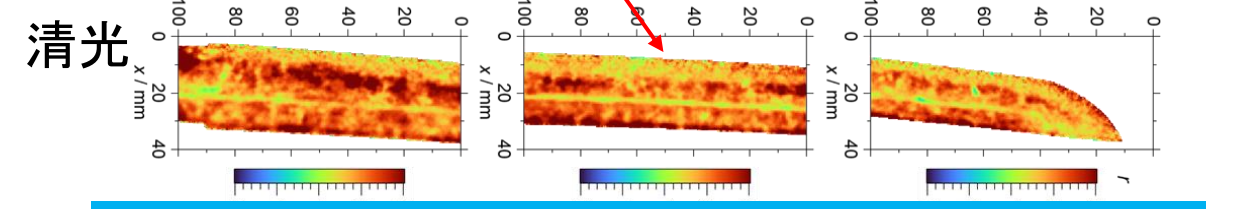
集合組織(結晶配向)の発達度



資正は棟側と刃側で強い傾向を示している。



清光と寿幸は複雑な様相を示しており、結晶子サイズの傾向を反映しているように見える。

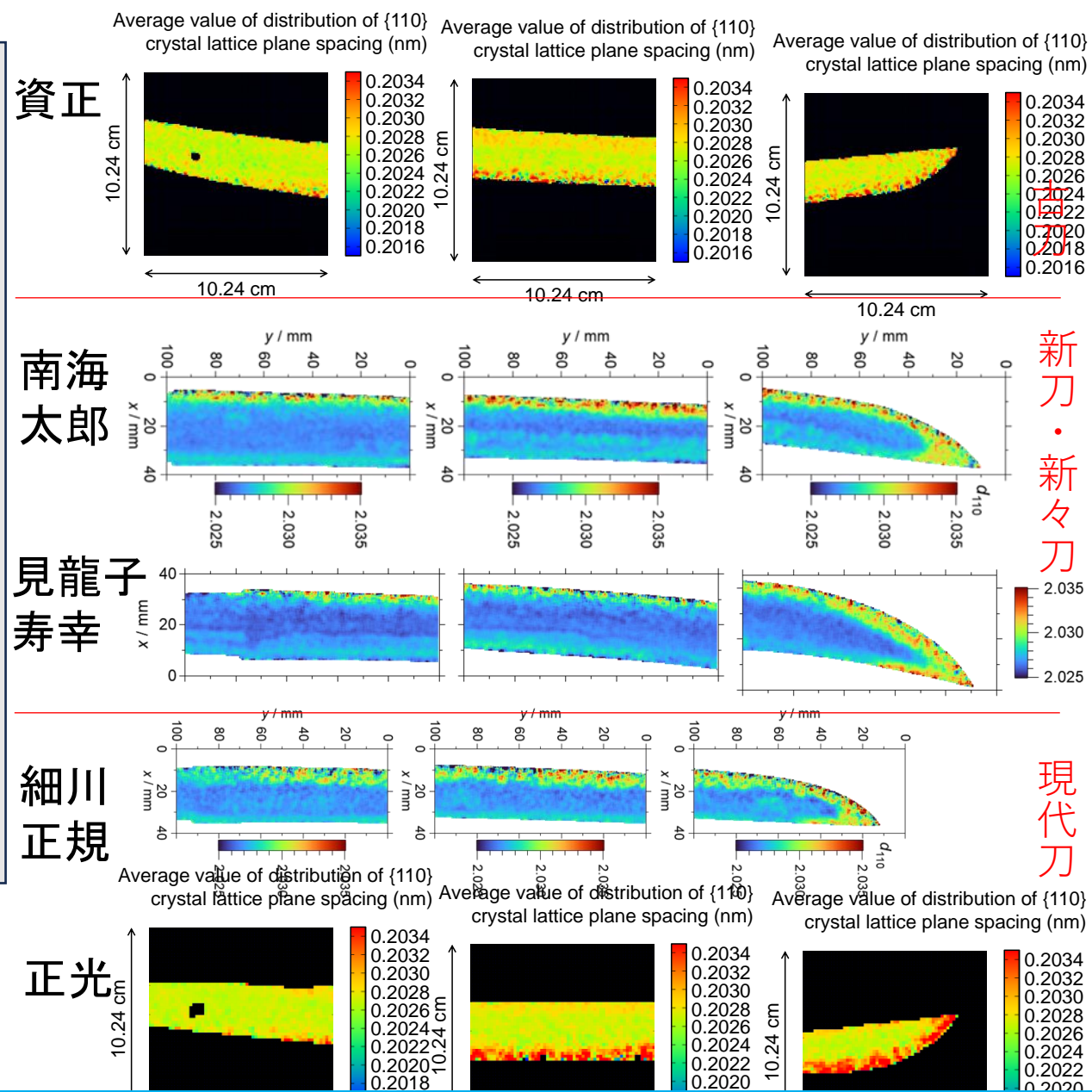
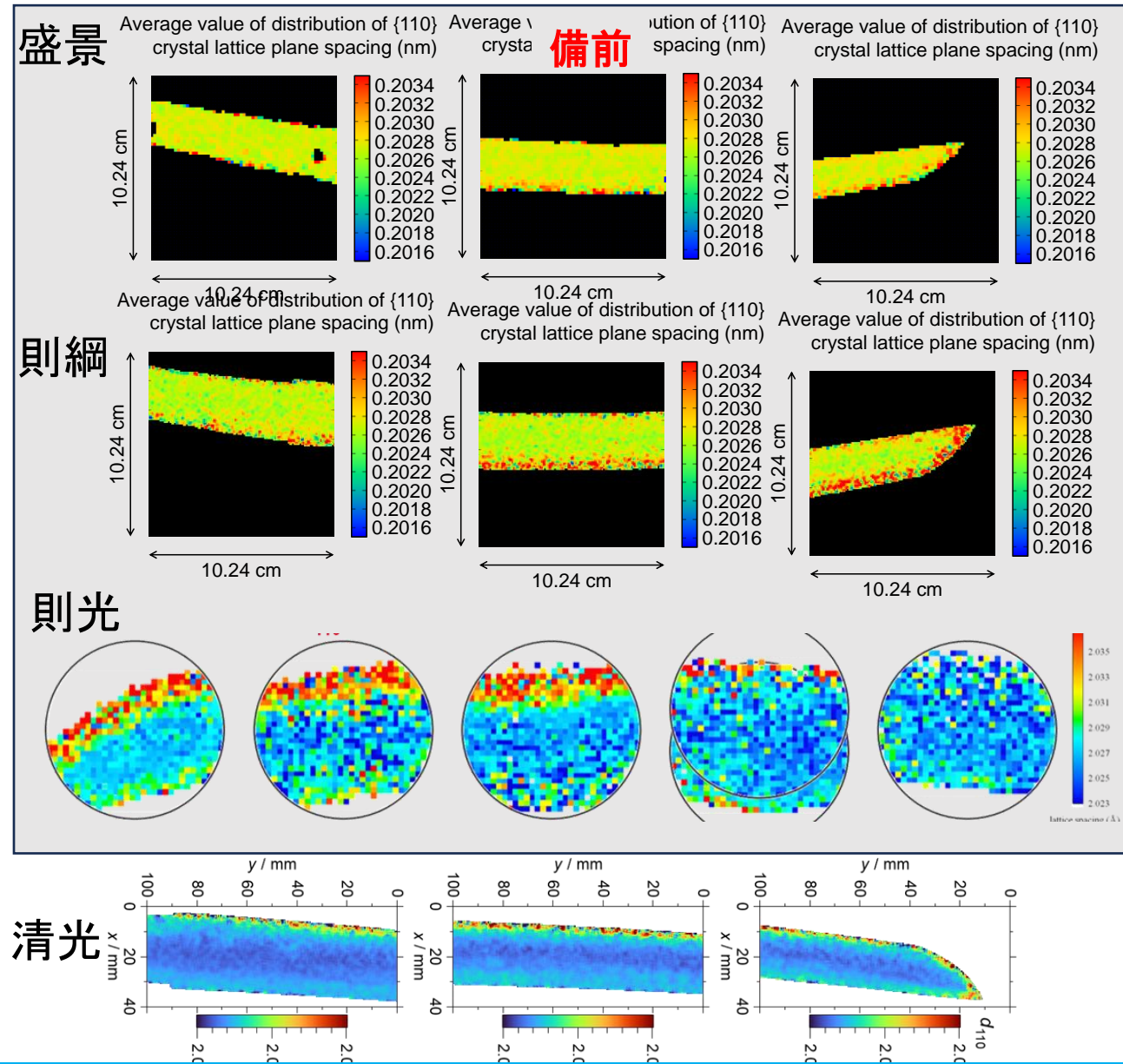


正光は区から中央部分に掛けて非常に強い集合組織が見られる。ここで鉄を鍛接した可能性がある。

新刀・新々刀

現代刀

結晶格子面間隔



刃側には格子面間隔が大きい所が全ての刀に表れている。これは焼入れでできたマルテンサイトのためである。これは次に説明するエッジ幅でよりはっきりと見られる。

結晶格子面間隔

盛景

則綱

則光

清光

備前

資正

南海太郎

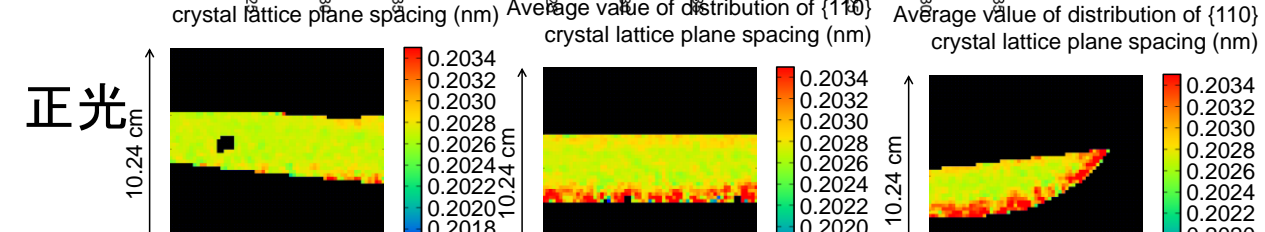
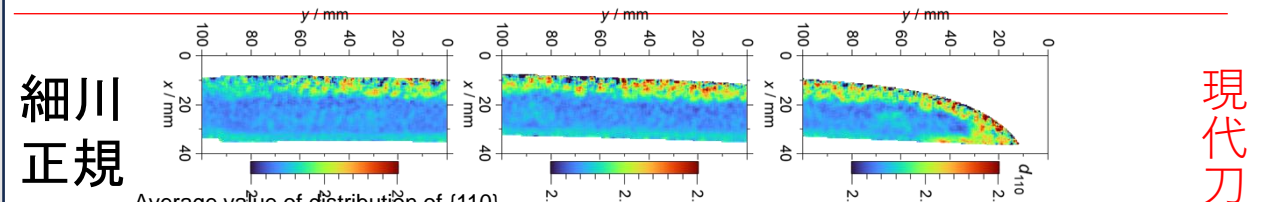
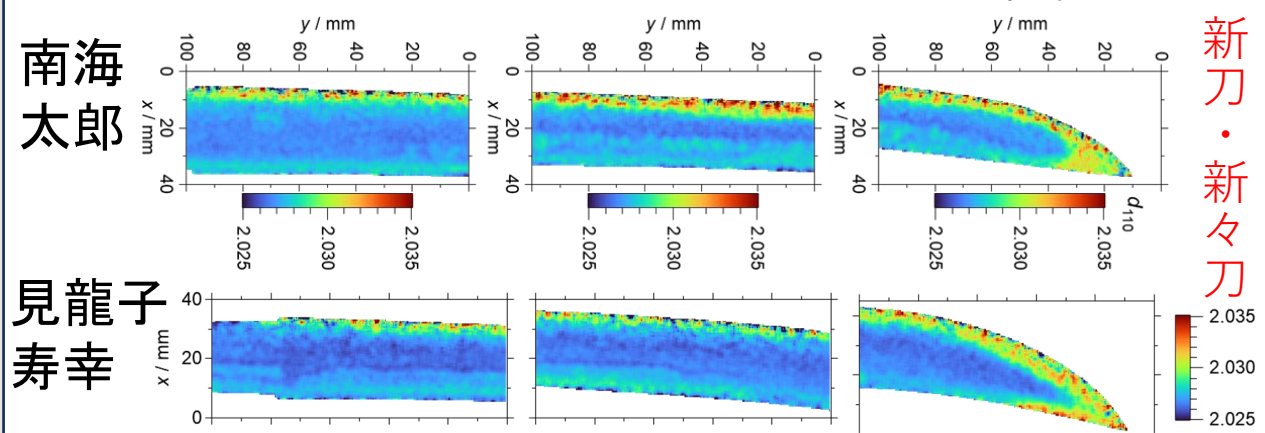
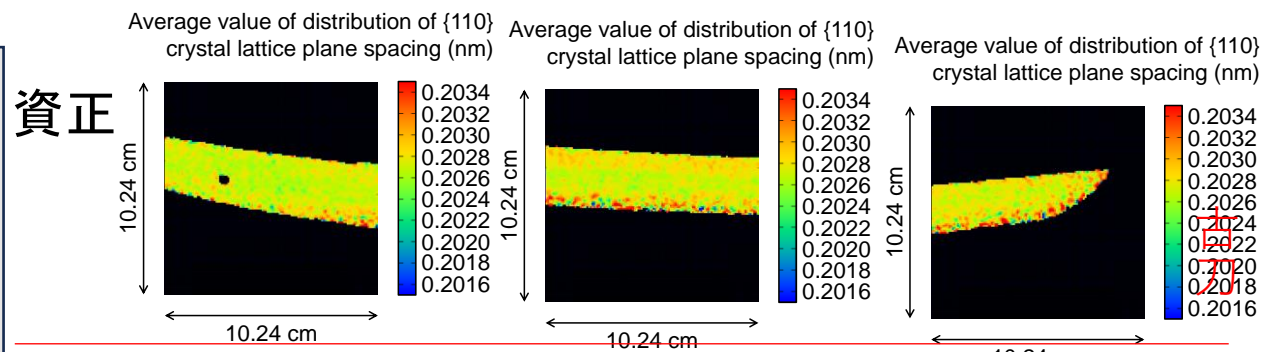
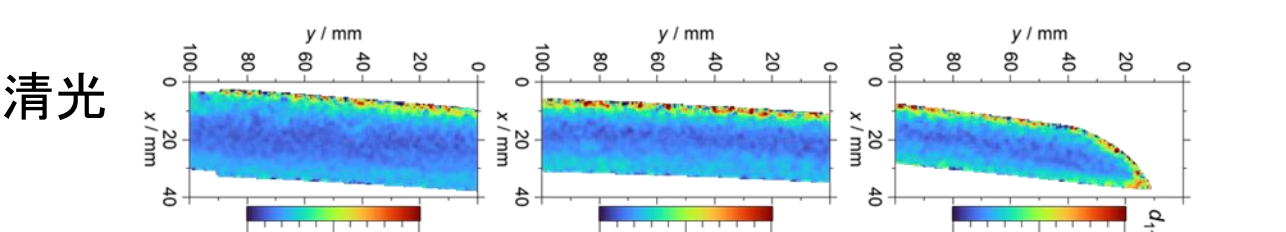
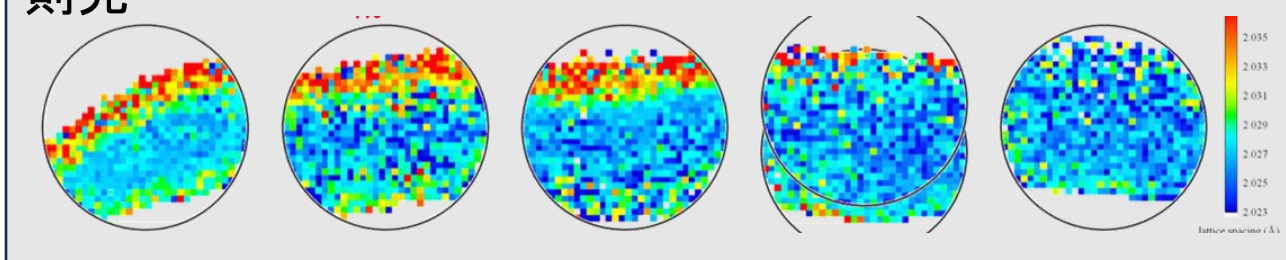
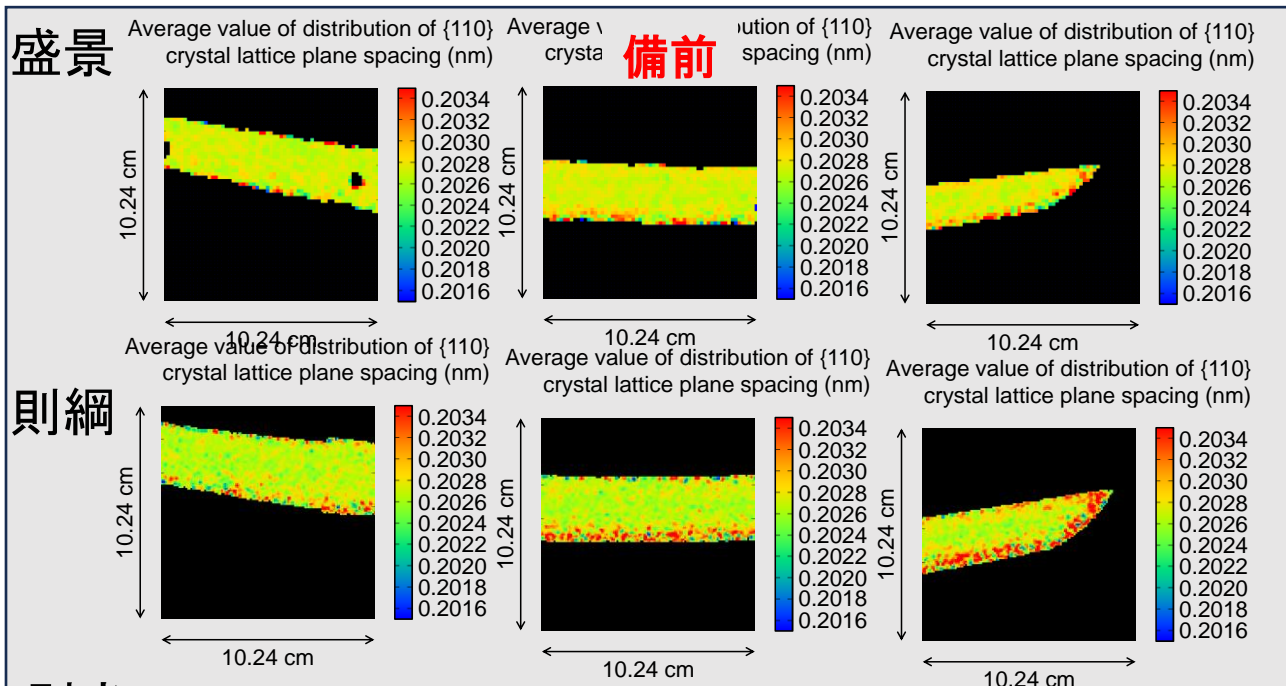
見龍子寿幸

細川正規

正光

新刀・新々刀

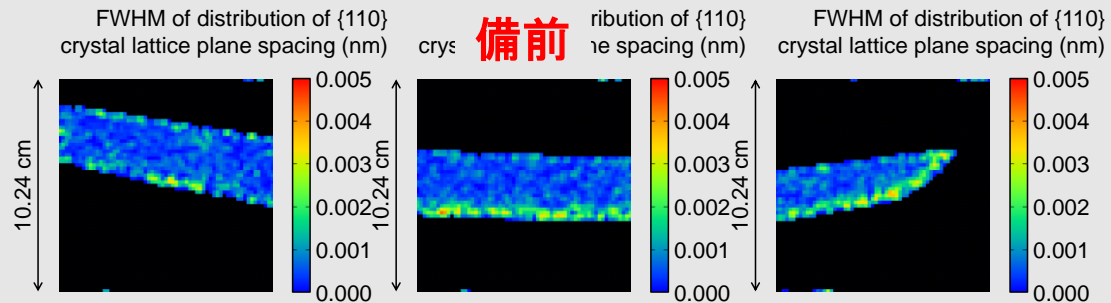
現代刀



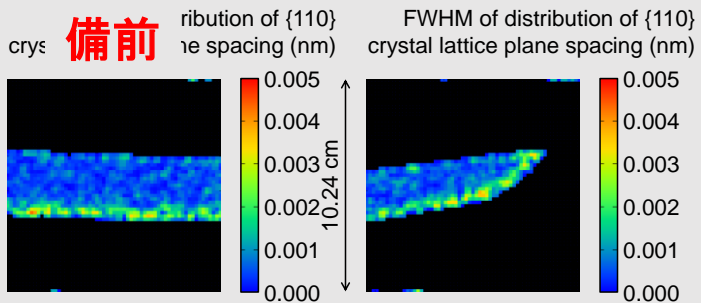
棟側に面間隔が広がっている刀がある。これは、焼入れで刀が反ることによってできた厚み方向の歪みと考えられる。備前刀ではその傾向がはっきり見られないので、焼入れ後に熱処理が行われていた可能性がある。

ブラッグエッジ幅の半値幅

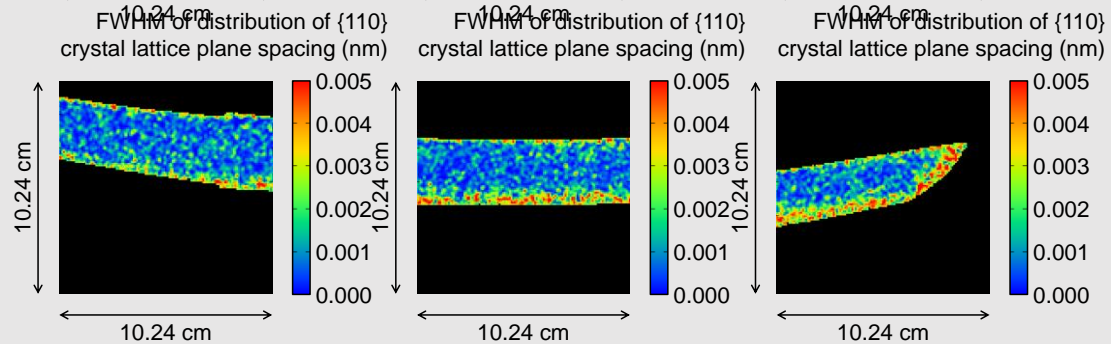
盛景



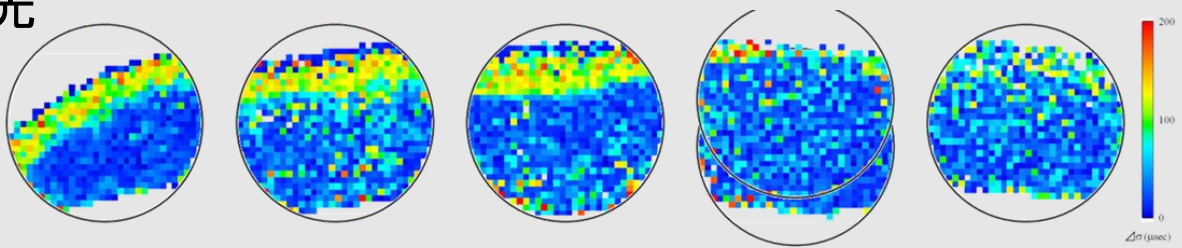
備前



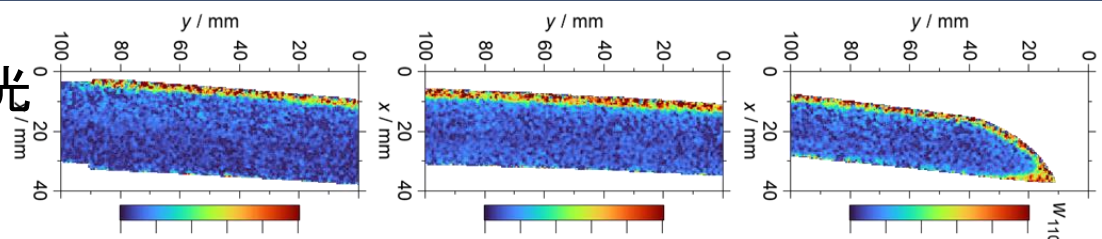
則綱



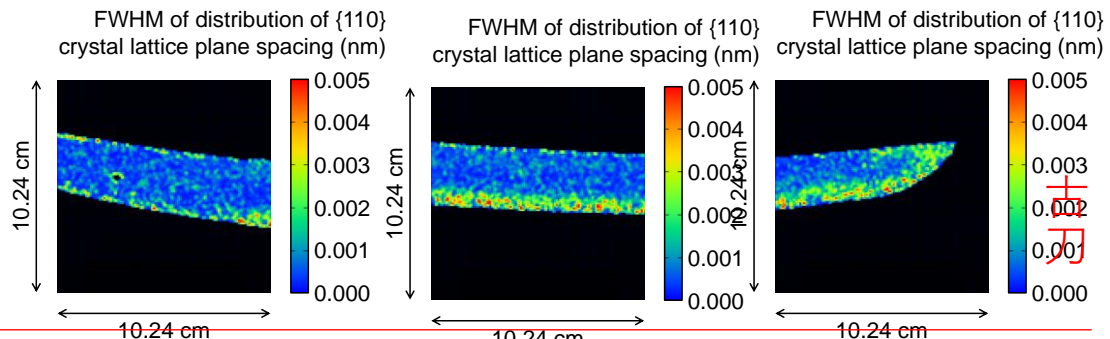
則光



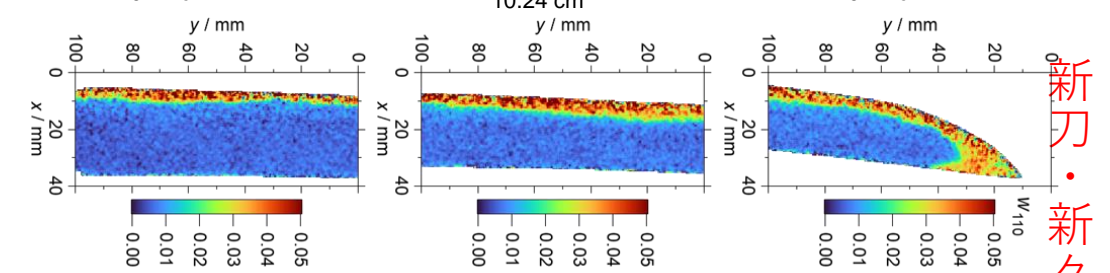
清光



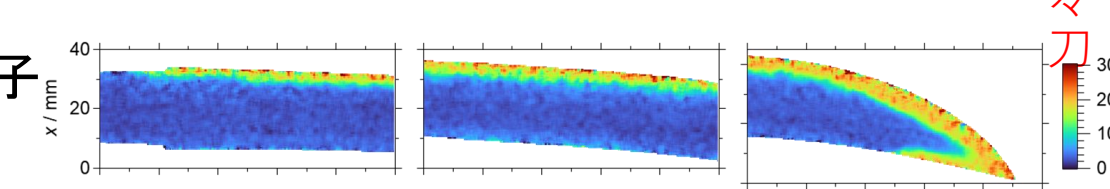
資正



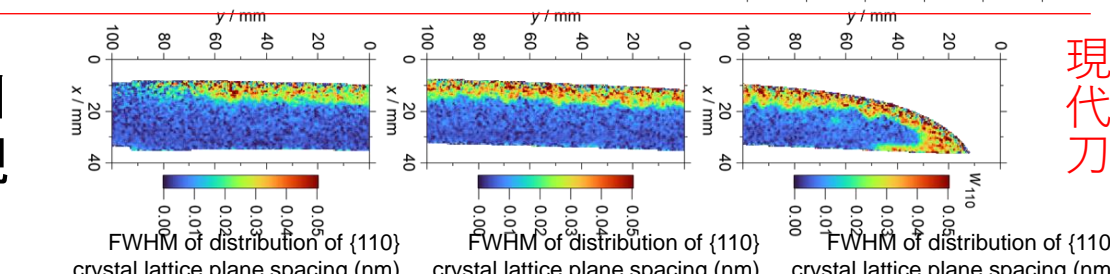
南海太郎



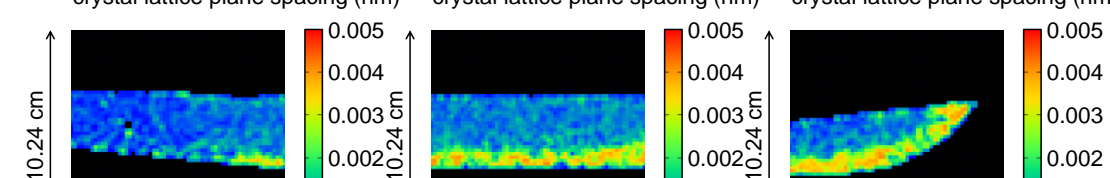
見龍子
寿幸



細川
正規



正光



新刃・新々刀
現代刀

全ての刀剣類に刃側にブラッグエッジの広がっている領域がある。資正より後の方が焼入れがはっきりと入っている傾向がある。則光が比較的はっきりしているのは、後世の再刃のためではないかと考えられる。

CT イメージ

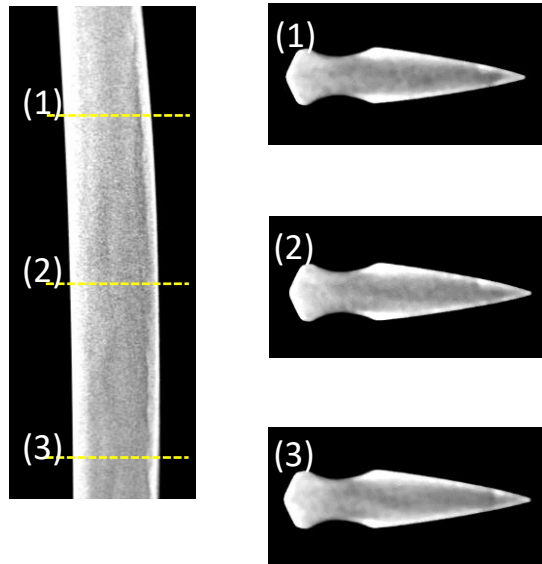
盛景 (南北朝) (1356-1361)



■ Top and side view of 3D image
361 projections (1 degree step)



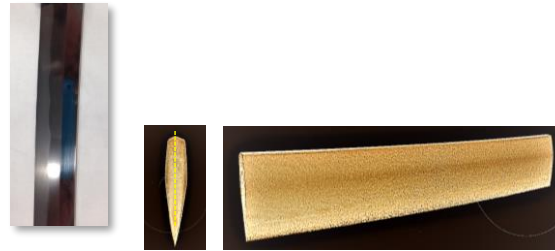
■ Tomograms



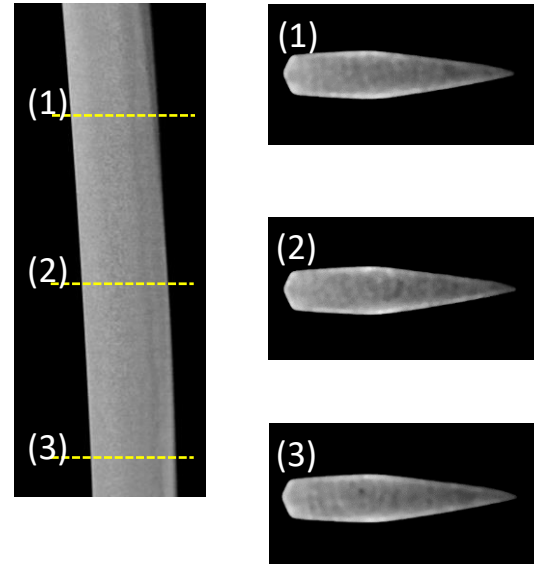
資正 (室町) (1504-1526)



■ Top and side view of 3D image
172 projections (1 degree step)



■ Tomograms



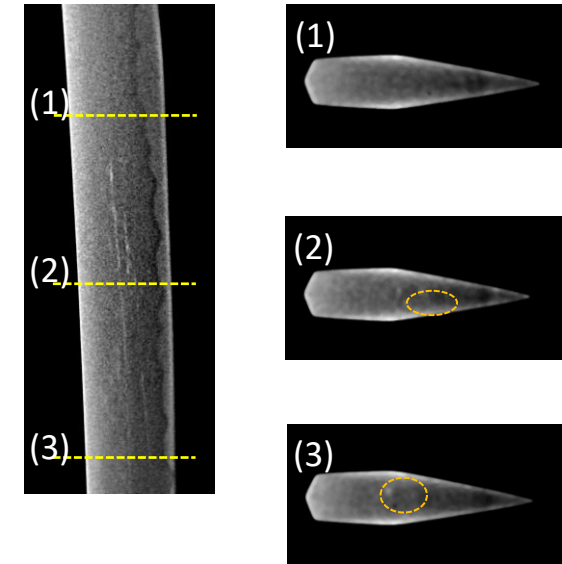
正光 (昭和) (1964)



■ Top and side view of 3D image
361 projections (1 degree step)

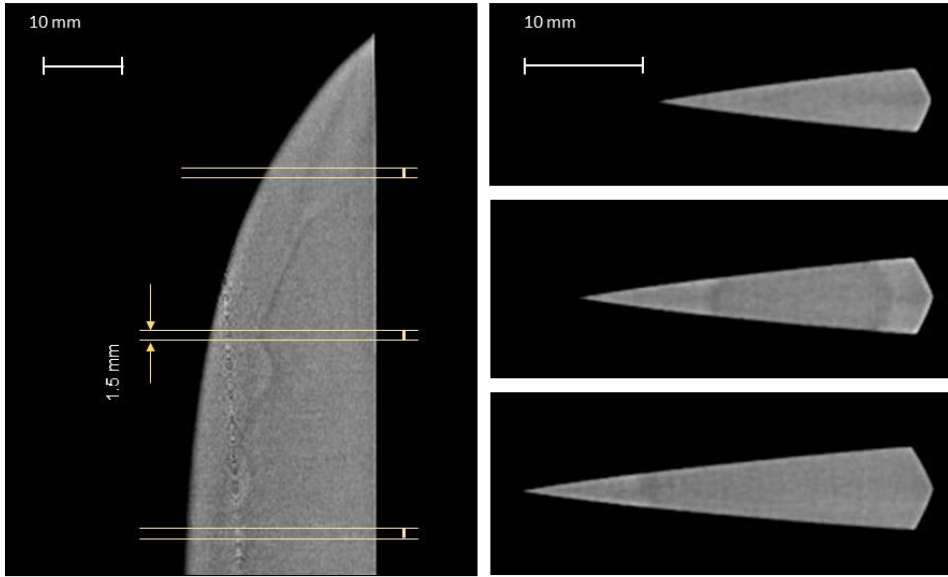


■ Tomograms



細川正規

Cutting tip

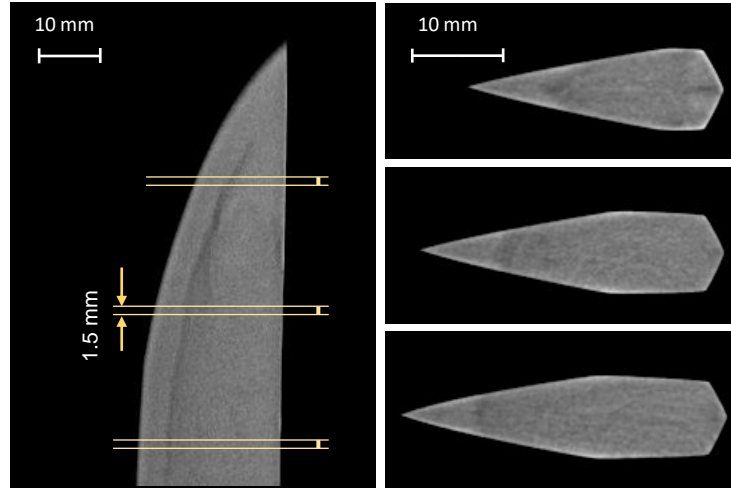


Longitudinal plane

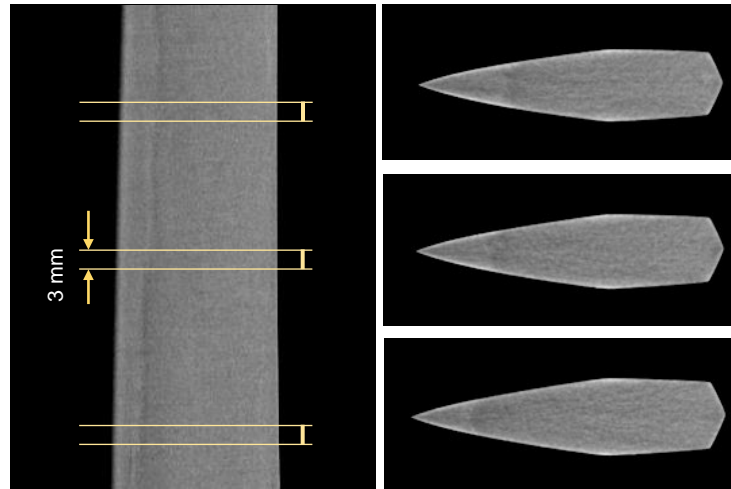
Transverse plane

南海太郎朝尊

Cutting tip



Middle

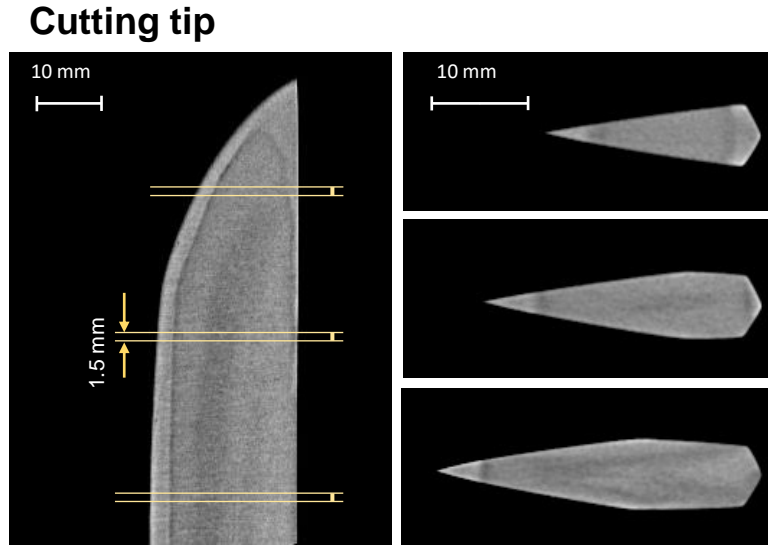


Longitudinal plane

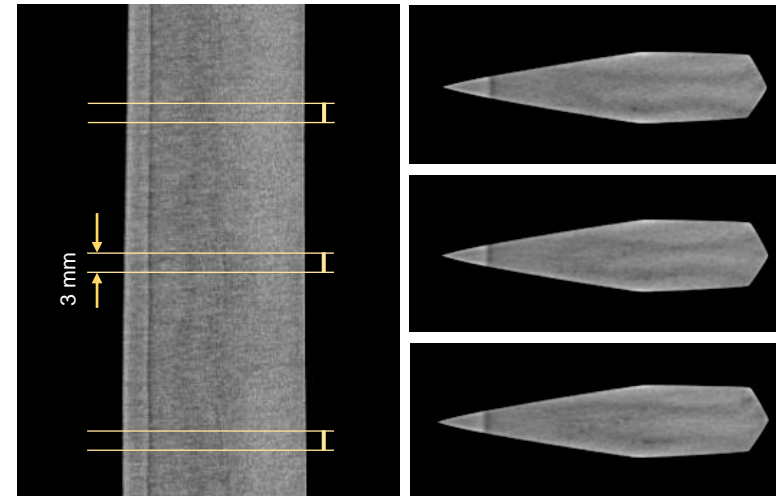
Transverse plane

加州清光

Cutting tip



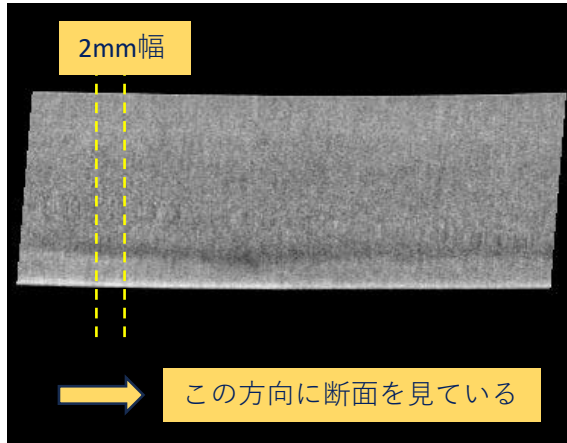
Middle



Longitudinal plane

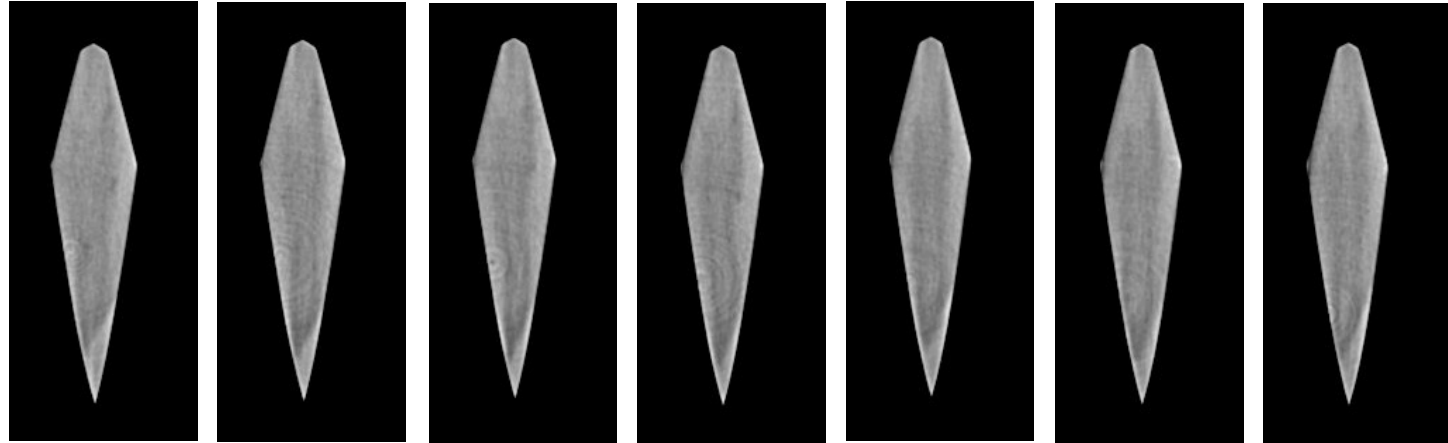
Transverse plane

■ 薙刀 見龍子寿幸: 断層像
中央付近 一箇所



縦割り断面：X軸, Y軸, Z軸を全て0.1mm刻みで出力 → X軸とY軸を2x2ビニング処理

X, Y軸は0.1mm刻み、z軸（槍の長手方向）は2mm厚さ分の平均処理



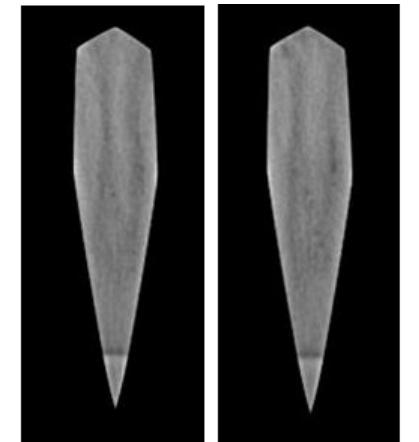
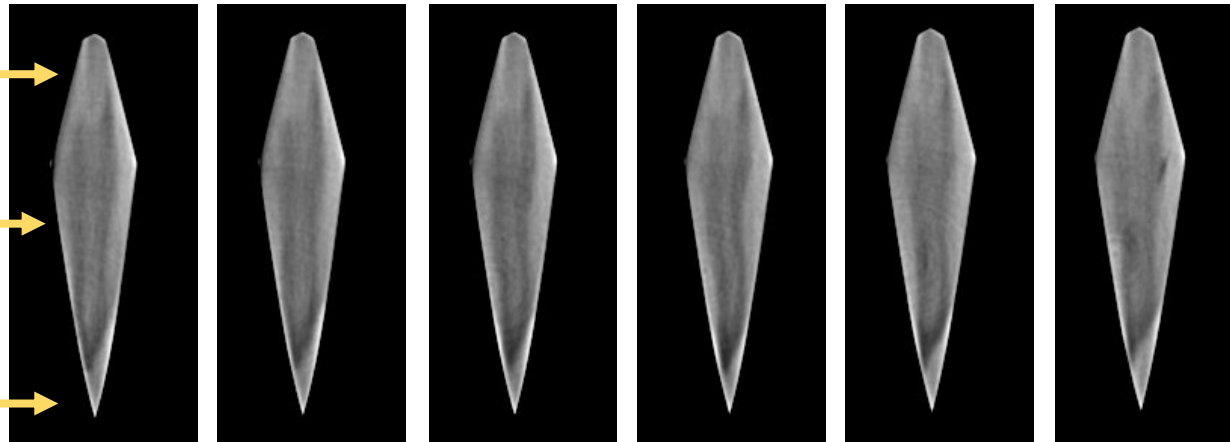
X, Y軸は0.1mm刻み、z軸（槍の長手方向）は10mm厚さ分の平均処理

清光（南北朝）

峯側は四方詰めみたいに塞いでる？

内部構造あり。
寿幸は江戸後期の鳥取藩
加州清光に似てる感じ？

焼入れの深さはそこそこな印象



Transverse plane

この濃淡が何から来ているかまだ分かっていない。

まとめ

日本刀類について中性子ブラッグエッジ透過測定やCT測定を行うことによって、個々の刀剣の特徴や構造などについても少しずつ説明が進んできた。

- 結晶子サイズはいくつかのパターンに分けられる。それは、炭素濃度に関係していると思われる。
- 結晶配向の様子は刀毎に異なっている。結晶子サイズ分布と関係する場合も見られる。
清光、寿幸は多層構造か。
- 多くの刀剣類の棟側に、焼入れによる歪みが観測される。
- エッジ幅から、時代が新しくなるほど焼入れ幅は大きく顕著になる傾向が見られた。

得られたデータについて、観測結果の原因が十分説明されていないものもある。今後、日本刀全体の測定と平行して、破断刀の測定なども実施し、より深い解釈ができるようにしていく予定である。

これらの測定は、J-PARC proposals of 2017A0099, 2020B330, 2021B0248, 2022A0154, 2022B167, 2023A0177によって行われたものである。