

文化財：量子ビームを用いた非破壊分析の最新動向

田中 眞奈子

1 はじめに

近年、様々な分野で量子ビームの応用が進んでいるが、文化財分析分野も例外ではない。文化財分析は、非破壊、非接触が原則であり、それ故、国内外において古くから赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線にわたる広い波長領域の電磁波が用いられてきた^{1)~3)}。また、中性子や放射光など、その時代における最先端の非破壊分析技術の応用や相補利用も行われてきた。日本では、X線ラジオグラフィを補完するものとして1983年に初めて刀子と鉄剣の分析に中性子ラジオグラフィが応用され⁴⁾、1987年には世界に先駆け放射光を用いた陶磁器片の分析がPhoton Factory (PF)で行われた⁵⁾。現在では第三世代の大型放射光施設SPring-8の高輝度・高エネルギー放射光を用いて、広範な文化財研究が行われている。具体的には陶磁器、ガラス、木製仏像、金属文化財、絹、漆、絵画などに関して秀でた研究成果が得られている。中性子施設においては、中性子ラジオグラフィの他、中性子放射化分析⁶⁾においても意義ある成果が多く得られているが、2018年に日本初のパルス中性子源であるJ-PARCが稼働したことを契機に、中性子やミュオンを用いた新たな分析技術の文化財分析への応用も始まっている。また、平成22年11月に定期検査のため運転を停止し、翌年3月の東日本大震災に伴い長期運転停止状態だった研究用定常原子炉JRR-3も原子力規制委員会から許可を得て2021年2月に運転を再開し、供用運転も7月から始まった。これにより、パルス中性子源J-PARCと定常中性子源JRR-3という二つの異なる特徴を持つ大強度中性子源が稼働することとなる。放射光、中性子、ミュオンは、それぞれ物質と特徴的な相互作用をするため、それらの特性を生かすことで物質から多くの有用な情報を得ることができる。また、複数の量子ビームを相補利用することで多角的・総合的に物質の性質を解明することが可能となる。本報告では、文化財の中でも鉄鋼文化財に焦点を当て、放射光と中性子を相補利用した最新の研究成果^{7)~9)}を報告する。

2 鉄鋼文化財の非破壊分析への放射光の応用

日本刀や火縄銃などの日本の伝統的な鉄鋼文化財に用いられている鉄は和鉄と呼ばれ、砂鉄製錬(たたら製鉄)

により製造された。洋鉄や現代鋼とは異なり、和鉄には光学顕微鏡スケールで観察できる数十～数百マイクロサイズの非金属介在物が多く含まれている。非金属介在物は、原料である砂鉄や製錬時に外部から入る不純物、更には和鉄(鋼や鉄)が鍛錬・加工される際にフラックスなどとして用いられる藁灰や泥(粘土)、ホウ砂などに由来している。和鉄中の非金属介在物に含まれる元素はFeの他、Si, Al, Ca, K, Mg, Na, Ti, P, Mnなどである¹⁰⁾。Tiは一般的に和鉄の原料である砂鉄の指標元素として知られている¹¹⁾。和鉄内の非金属介在物は、組成だけでなくその配列にも特徴がみられる。一般的に和鉄は、何度も折り返し鍛錬されたうえで用いられるが、その工程によって、炭素量が平均化され鋼の層が重なると共に、鋼中の非金属介在物も折り返しされ微細化・均質化する。それにより鋼の強度が増し、また地鉄に特有の模様(地肌)が生まれる。また、非金属介在物の分布は加工に影響されたものとなる¹²⁾。例えば、鋼板の製造・成形過程を通して、非金属介在物は層状になり、一定方向に分布する¹³⁾¹⁴⁾。一方、鍛接部分では、鍛接面に沿って非金属介在物は配列する¹⁴⁾¹⁵⁾。このように、鉄鋼文化財内部の非金属介在物の分布を調べることで、その文化財がどのように加工・製造されたのか、具体的な技術の推定が可能となる。

鉄鋼文化財内部の非金属介在物の分布を調べるには、従来は鉄鋼文化財を切断して観察することが必要であった。一方、近年高エネルギー且つ高分解能のX線CT装置が開発されている。通常のX線エネルギーでは鉄の厚さの影響で鉄鋼文化財内部の詳細情報を得ることは難しいが、高エネルギーX線を用いることで、鉄鋼文化財中の非金属介在物の分布や配列を観察することができるのではないかと考えた。岐阜県産業技術総合センターの管電圧出力225 kVの工業用X線CT装置(Y. CT Precision S エクスロン・インターナショナル(株))を用いて、日本刀断片、火縄銃断片、和釘、鏝片、南蛮鉄など様々な鉄鋼文化財を測定し、鉄鋼文化財内部の非金属介在物を確認できるか検証を行った¹⁶⁾¹⁷⁾。その結果、鍛造品である火縄銃断片や和釘、鏝などは、内部の非金属介在物を3次元的に観察することができた。また鍛造品である南蛮鉄は、内部に鋳物に特徴的な鬆(す)を観察することができた。一方で、日本刀断片は内部の非金属介在物を明瞭には観察することができなかった。

その理由として、鉄の厚みの影響が考えられた。火縄銃は銃身の最も肉厚な部分の鉄の厚みは7 mm程度で、筒であるため鋼の厚さは合計14 mm程度、和釘の最も厚みのある頭部は12 mm程度である。一方日本刀は、幅が広いもので30 mm程度あり、その厚さの鉄を透過できるX線のエネルギーが必要であることがわかった。更に、日本刀内部の非金属介在物は火縄銃や和釘などに比べてサイズが小さいため空間分解能が不足していたこともX線CTで観察できなかった理由として考えられた。火縄銃や和釘等には、包丁鉄といわれる炭素量0.1~0.3%程の軟鉄が用いられていた。鉄は貴重品でもあったため、古鉄をリサイクルしてそれらをつくることもあったと言われている。一方、日本刀には、玉鋼といわれる炭素量1.0~1.5%程の良質な和鉄が材料として用いられ、折り返し鍛錬や焼き入れ、焼きなまし等、様々な高度な技術を組み合わせ丁寧に制作された。日本刀内部の非金属介在物のサイズや配列には、原料である玉鋼や折り返し鍛錬といった制作技術が影響を与えていると考えられる。以上の工業用X線CT装置を用いた検証を通して、大型放射光施設SPring-8の放射光X線を鉄鋼文化財分析に応用することに思い至った。輝度の高い放射光の高エネルギーX線マイクロCTを用いれば、非破壊でも高い空間分解能で日本刀内部を明瞭に観察できるのではないかと考えた。X線管球でなく高輝度のシンクロトロン放射を光源として使うことで、分光器で単色化したX線を利用することができ、これにより、幅広い組成やサイズの試料に対して定量的な線減弱係数の測定も可能である¹⁸⁾。

まず、実験当時SPring-8で最も高いエネルギー(116 keV)のX線を使用できたBL08Wで実験を行った。116 keVの高エネルギーX線を用いれば、厚さ2 cmの鉄で透過率1%が得られ、十分な信号強度でCT像を再構成できる。分析試料には、幕末期の水戸藩を代表する刀工である勝村徳勝作日本刀断片(井戸誠嗣氏所蔵)を用いた。この刀は既に何らかの理由で切断されており、所有者から断片試料の提供を受けたものである。刀の茎には「水府住勝村徳勝作之」、「慶應三年八月」と銘が切られており、大政奉還の年に作られた刀と考えられる。同試料の光学顕微鏡像(岐阜県産業技術総合センターによる、図1)にみられる黒色の点状あるいは線状の部分が非金属介在物である。非金属介在物のサイズは、

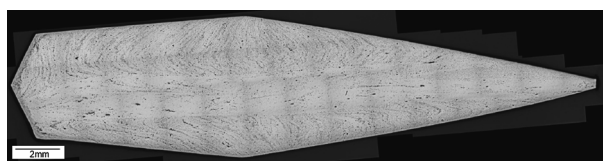


図1 勝村徳勝作日本刀断面の光学顕微鏡像
岐阜県産業技術総合センターによる

100 μm程度のものもあるが、大部分が30~60 μm前後と非常に微細である。本試料の非金属介在物は、筆者らがこれまで観察してきた中でも特徴的に微細であることから、放射光X線で本試料の非金属介在物が非破壊で観察できれば、日本刀をはじめとする大部分の鉄鋼文化財の観察においても適用可能であると考えた。非金属介在物の配列から、この日本刀は、皮鉄(かわがね)の中に心鉄(しんがね)を入れ鍛錬した「甲伏せ造り」によるものと推定される。また、皮鉄は層構造をしている。鋼が層状になっているのは^{まきめ}柾目鍛えによるものと考えられる。柾目鍛えとは、地肌(地鉄の模様)が木を縦に切った時の模様 に似ていることから、そのように呼ばれている。勝村徳勝の刀は大和伝法の柾目鍛えを特徴としており、本試料は徳勝の代表的な制作技術で作刀されていると考えられる。同試料の光学顕微鏡による金属組織観察(研磨後5%ナイタールでエッチングを施した、岐阜県産業技術総合センターによる、図2)により、心鉄はα-Feで構成されているのに対し、皮鉄はα-Feと、α-Feとパーライトからなる組織が層状になっていることが明らかになった。非金属介在物の配列(図1)と金属組織(図2)を比較すると、非金属介在物は心鉄と皮鉄の鍛接面ならびに皮鉄の異なる金属組織の境界に沿って分布しており、これらの非金属介在物の分布を調べることで、鋼の組み合わせ方や鍛接の仕方など、具体的な作刀技術の推定が可能であることがわかる。

BL08Wのステージ上に、日本刀断片を立てて固定し、360°回転させてX線CT撮影を行った。CT撮影にはビームモニタ(AA40)とデジタルCMOSカメラ(ORCA-Flash)を用いた。SPring-8 BL08Wで得られた勝村徳勝作日本刀断片のX線CT像を図3に示す。

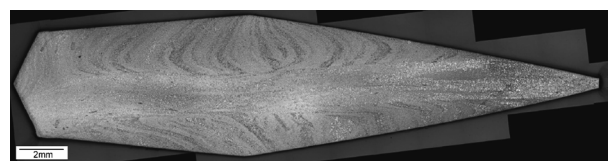


図2 勝村徳勝作日本刀断面の光学顕微鏡像
研磨後5%ナイタールでエッチングを施した、岐阜県産業技術総合センターによる

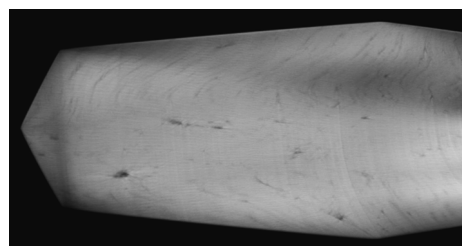


図3 勝村徳勝作日本刀断片のX線CT画像
SPring-8 BL08W, X線エネルギー116 keV, 画素サイズ18.4 μm/pixel, 露光時間300 msec/3600 投影

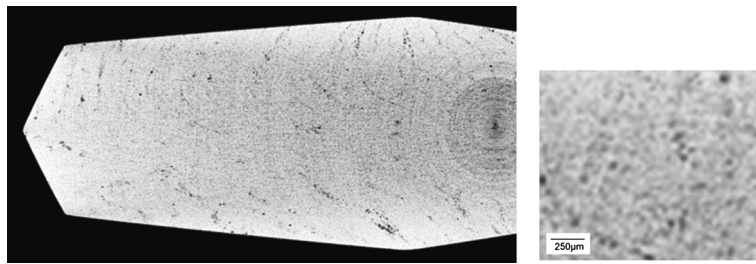


図4 勝村徳勝作日本刀断片の X 線 CT 画像

SPring-8 BL28B2, X 線エネルギー 200 keV, 画素サイズ 16.09 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 露光時間 200 msec/1800 投影, 200 枚の画像を平均化したものとその一部拡大像

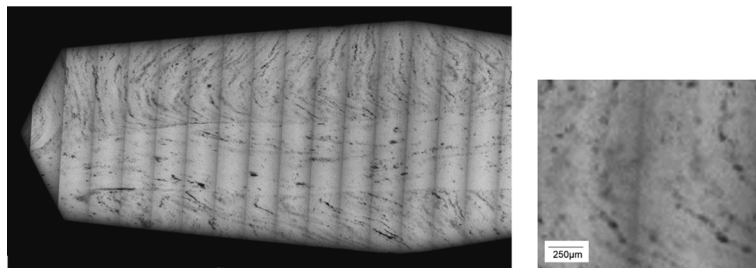


図5 勝村徳勝作日本刀断片の X 線 CT 画像

SPring-8 BL20B2, X 線エネルギー 72.3 keV, 画素サイズ 4.54 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 露光時間 700 msec/1800 投影, 200 枚の画像を平均化したものとその一部拡大像

画素サイズは 18.4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 視野は 5.0 mm \times 2.5 mm, 露光時間は 1 投影 300 msec で 3600 投影である。116 keV の高エネルギー X 線を用いることで、完全ではないが、勝村徳勝作日本刀断片内部の非金属介在物を観察することができた。ただし、BL08W は視野が小さいため、画像再構成に非常に労力がかかることなどが課題となった。

その後、SPring-8 BL28B2 において、更に高エネルギーの 200 keV をピークエネルギーとする白色 X 線を用いた CT 撮影が可能となったため、同一試料の X 線 CT 撮影を実施した。200 keV の高エネルギーを用いれば、厚さ 2 cm の鉄で透過率 10 % が得られる。日本刀断片のセッティングは BL08W と同様に行った。検出器には可視光変換型画像検出器¹⁹⁾を用いた。BL28B2 で得られた勝村徳勝作日本刀の X 線 CT 像（取得した断層像 200 枚を平均化したもの）を図 4 に示す。画素サイズは 16.09 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 視野は 30 mm \times 1.7 mm, 露光時間は 1 投影 200 msec で 1800 投影である。日本刀の場合、切先から刃区・棟区にかけての領域に構造的な違いは基本的にないはずである。そのため、取得した断層像 200 枚を平均化することは、1 枚では不明瞭な非金属介在物の分布を明確に確認する有効な手法であると考えられる。

次に、SPring-8 の放射光 X 線を用いて非破壊でどこまで鋼内部の微小な非金属介在物を観察できるか、現状得られるベストの CT 像を確認した。具体的にはビーム

が大きく最高 72.3 keV の単色 X 線を使用でき、2 mm 程度の厚さの日本刀内部の微細な非金属介在物を観察するのに相応しい BL20B2 にて実験を行った。2 mm 程度の厚さにスライスした勝村徳勝作日本刀を薄い方向から（通常日本刀を測定する方向に対して垂直に試料を設置して）X 線 CT 撮影を行った。検出器には BL08W の時と同様に可視光変換型画像検出器を用いた。得られた X 線 CT 画像（取得した断層像 200 枚を平均化したもの）を図 5 に示す。画素サイズは 4.54 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 視野は 9 mm \times 900 μm , 露光時間は 1 投影 700 msec で 1800 投影である。BL20B2 での X 線 CT 撮影により、勝村徳勝作日本刀内部の微細な非金属介在物を明瞭に観察できた。前述の破壊分析による光学顕微鏡像（図 1）での非金属介在物の見え方とほとんど違いがないことがわかる。BL20B2 での CT 撮影により、現状 SPring-8 で得られるチャンピオンデータを取得することができた。ただし、BL20B2 は X 線エネルギーが低いため、日本刀を切断せず観察することは難しい。価値ある日本刀をそのまま非破壊で分析するには、X 線エネルギーの高い BL28B2 を用いるしかない。現在、ビームライン担当者らの協力により、BL28B2 で空間分解能や密度分解能の調整と改善を行っており、最新の状況として、BL20B2 で得られた日本刀のベストの CT 像に近い画像を BL28B2 でも得られるようになってきた。リングアーティファクトなどの装置由来のノイズの軽減など、

まだ改善すべき点はあるが、放射光 X 線 CT を用いた日本刀の非破壊分析も一步一步成果を上げている。現在、本報で紹介した事例の他、幅広い時代や地域、流派の日本刀の CT 撮影ならびに検証を進めている。放射光 X 線を用いることで鉄鋼文化財内部の非金属介在物の配列を 3 次元的に明らかにすることができ、それらから鉄鋼文化財の具体的な制作技術を推定できるという画期的な成果を得つつある。本技術を用いることで、日本刀をはじめとして秘伝とされてきた多くの鉄鋼文化財の制作技術の解明につながるものと期待される。

3 鉄鋼文化財の非破壊分析への中性子の応用

中性子は物質透過能力が高く、X 線が透過しづらい金属も内部まで透過することが出来る。また、X 線とは異なる物質との相互作用が特徴でもある。X 線は物質を透過する際に原子核の外側にある電子と相互作用をするため、原子番号が大きい（電子数が多い）物質ほど相互作用が強くなる。一方中性子は、原子核と相互作用し吸収・散乱される。X 線とは異なり、水素や酸素、窒素などの軽元素との相互作用が強い。以上のような特徴から、中性子を用いて対象物の透過像を得る中性子ラジオグラフィは、前述の通り X 線ラジオグラフィを補完する非破壊分析手法として古くから文化財分野でも応用されてきた⁴⁾。分析に使用する中性子源として、従来の原子炉を利用した定常中性子源に、加速器をベースにしたパルス中性子源が近年加わった。定常中性子源では、時間的には一定強度の中性子が発生する一方、パルス中性子源では、一定の繰り返しで中性子が発生する。その長を最大限に生かし様々な実験が可能であるが、例えば、発生した時間を基準として検出器までの飛行時間 (Time of Flight: TOF) を測定することで、TOF に対応した中性子のエネルギーを知ることができる²⁰⁾。このパルス中性子を用いたエネルギー分析型透過イメージング (パルス中性子透過分光法) のブラッグエッジ解析を用いることで、非破壊でも鉄鋼内部の結晶歪、配向、結晶子サイズ、格子面間隔などの結晶組織情報を空間イメージとして得られることが近年明らかになってきた (図 6)²¹⁾。具体的には、ブラッグエッジのフィッティングパルス関数から結晶面間隔が、March-Dollase 関数からは結晶配向が得られ、消衰効果関数からは結晶子サイズを求めることができる。また、2D 検出器を用いることで、材料組織情報の 2D マッピング像を得ることが可能である。

鉄鋼文化財の材料科学研究においては、内部の非金属介在物の配列 (図 1) のみならず、結晶組織情報 (図 2) を知ることは非常に重要であり、且つ非破壊でそれらの情報を取得する分析技術が求められている。前述の通り非金属介在物の配列の非破壊での観察については放射光の応用に取り組んでいるが、結晶組織情報の把握に

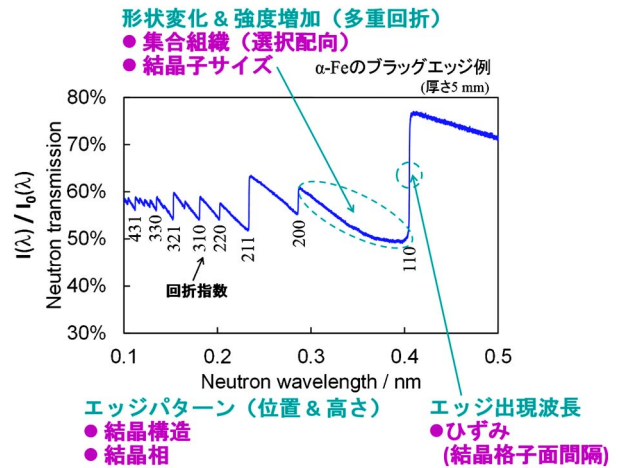


図 6 ブラッグエッジ透過率スペクトルに含まれる結晶組織情報 (H. Sato, et al. 2013²¹⁾)

においてはこのパルス中性子を用いた分析技術が有効であると考え、鉄鋼文化財の非破壊分析への中性子の応用に取り組んでいる。最終的には放射光 X 線とパルス中性子で得られた分析結果の総合的な解析を目的としている。

図 2 に示した勝村徳勝作日本刀断片の金属組織観察より、心鉄は α -Fe からなるが、皮鉄は α -Fe からなる組織と、 α -Fe とパーライトからなる組織が層状になっていることがわかった。また、刃先部には針状マルテンサイトの生成も観察された。このような結晶組織や炭素量に関する情報をどのくらいパルス中性子透過分光法を用いて非破壊で得ることができるか、検証を行った。本分析技術はまだ開発中の技術であることから、鉄鋼文化財実物の分析に先立ち、JIS (日本工業規格) に規定される炭素量の異なる鉄鋼標準試料など、炭素量や結晶構造が明確な試料を分析した。

大強度陽子加速器施設 J-PARC MLF BL10 と BL22 において、炭素量の異なる四つの鉄鋼標準試料 {JIS に規定される S25C (約 0.25 mass% C), S50C (約 0.50 mass% C), SK3 (約 1.0 mass% C), FC350 (約 3.0 mass% C)} のパルス中性子透過実験を行った²²⁾。中性子エネルギー分別測定可能な 2 次元検出器で試料の中性子透過スペクトルを測定し、中性子イメージング像を得るとともに、ブラッグエッジ解析を行った。パルス中性子透過分光法に用いる 2 次元検出器として、検出面積や空間分解能の異なる 3 種類の 2 次元検出器 (GEM 型検出器, MCP 型検出器, μ NID 型検出器) があるが、本実験においては GEM 型検出器²³⁾を用いた。

炭素量の異なる四つの鉄鋼標準試料の中性子透過スペクトルを得た後、パルス中性子イメージング用結晶組織解析ソフトウェア RITS²¹⁾を用いてブラッグエッジのフィッティングを行い、格子面間隔 (格子定数) や結晶子サイズなどの解析を行った。得られた結果の一例として、図 7 に α -Fe の格子定数の解析結果を示す。鍛造品

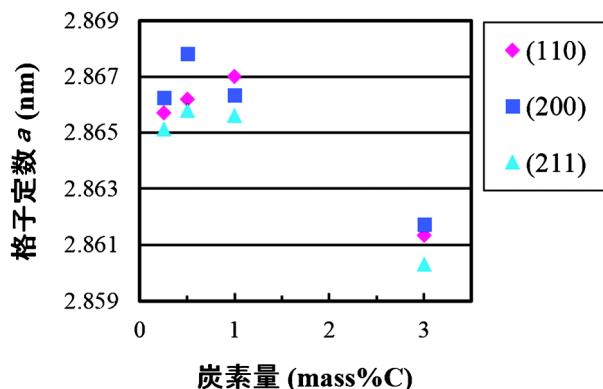


図7 JISに規定される炭素量の異なる四つの鉄鋼材料（グラフ左からS25C, S50C, SK3, FC350）の α -Feの格子定数の解析結果

(S25C, S50C, SK3)と铸造品(FC350)では α -Feの格子定数 a に違いがあることが明らかになった。铸造品(FC350)で格子定数 a が減少した理由として、黒鉛の形成や、不純物の増加などが推定される。このことから、格子定数 a は、鍛造品(低～高炭素鋼)と铸造品(铸鉄)の非破壊判別の指標として使える可能性がある。続いて、鍛造品(低～高炭素鋼)における炭素量の違いをどのくらいの精度で把握することができるかを確認するため、S25C, S50C, SK3のブラッグエッジ解析を行った。試料の解析に先立ち、シミュレーションにより、高純度鉄と共析鋼のブラッグエッジを確認した(図8)。共析鋼では、パーライトやセメントタイトの生成により、細かいギザギザの形状でセメントタイト(Fe_3C)のブラッグエッジ(図8の共析鋼のブラッグエッジの丸で示した領域)が現れることが確認された。続いて、S25C, S50C, SK3の3試料のブラッグエッジの形状の比較を通して、炭素量の高い試料ほど、セメントタイト(Fe_3C)のブラッグエッジが増大することがわかった。更に、セメントタイトのスペクトルが顕著に現れた波長0.38 nm付近のブラッグエッジを解析することでセメントタイト量を定量化することもできた。鉄鋼文化財のなかでも大筒や大砲などは、外観からは鍛造製か铸造製か判別がつかないため、調査において表面の一部を研磨したり、微小試料を採取したりといったことが国内外で行われている。非破壊で鉄鋼文化財の炭素量を判別できる技術の開発は強く望まれており、本技術は大きな可能性を持つものと期待される。

続いて、鉄鋼文化財の結晶組織構造の詳細を非破壊で把握・検証することを目的に、日本刀の各制作過程(小割り、下鍛え、上鍛え、心鉄、素延べ、火造り、焼き入れ、荒研ぎ、合い取り、鍛冶研ぎ)を再現した10試料を現代刀匠の協力のもと制作し、パルス中性子透過実験を行った²⁴⁾。得られたブラッグエッジの形状の違いから結晶組織の変化を把握するとともに、RITS解析により、各試料の結晶子サイズ、結晶配向、歪などを定量し

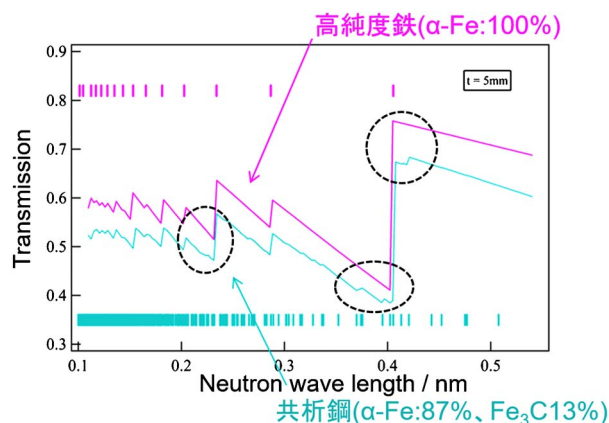


図8 高純度鉄と共析鋼のブラッグエッジ(シミュレーションによる)

た。折り返し鍛練や焼き入れなどの加工が施された試料は、結晶子サイズや結晶配向の変化が確認された。更に、解析結果をもとにパラメータごとに2Dマッピング像を作成した。代表例として、焼き入れ前の試料と焼き入れ後の試料の α -Feの格子面間隔 d の2Dマッピング像を図9に示す。焼き入れ後の試料は格子面間隔が広がっている。焼き入れにより、マルテンサイトが形成され、鉄の結晶中に炭素が侵入・固溶したためと考えられる。10試料の解析を通して日本刀の制作工程における結晶組織構造の詳細の変化を非破壊で確認することができた。

一連の分析により、パルス中性子透過分光法が鉄鋼文化財の非破壊分析、特に炭素量の推定や、結晶面間隔、結晶配向、結晶子サイズ、歪などの結晶構造の把握に非常に有効であることが明らかになった。一方で、中性子を用いた文化財の分析においては、放射化に十分注意する必要がある。放射化により放射線量があがり、施設から長期間試料を持ち出せなくなるリスクがあるためである。筆者らのこれまでの分析においては、事前にハンドヘルド蛍光X線分析装置を用いて分析試料表面の組成を確認し、放射化のリスクがあるものは分析を行わず、また表面の組成は問題がない場合も、分析に先立ち短時間試料に中性子を照射して放射化のリスクを確認する、という手順を厳守してきた。具体的には材質が鉄の場合、放射線核種の半減期が長いCoやTi, Mnなどが不純物として含まれていないか注意が必要である。先端的な装置や手法であるほど、分析手順、測定条件、データの信頼性はもとより、試料の取り扱い・設置方法や文化財の安全性をより厳格に確認・検証することが大切である。また、非破壊分析であるからこそ、今回報告したように、既知試料を用いた予備実験を行い、必要に応じて破壊分析との比較・検証を行いながら慎重に研究を進めていく必要がある。

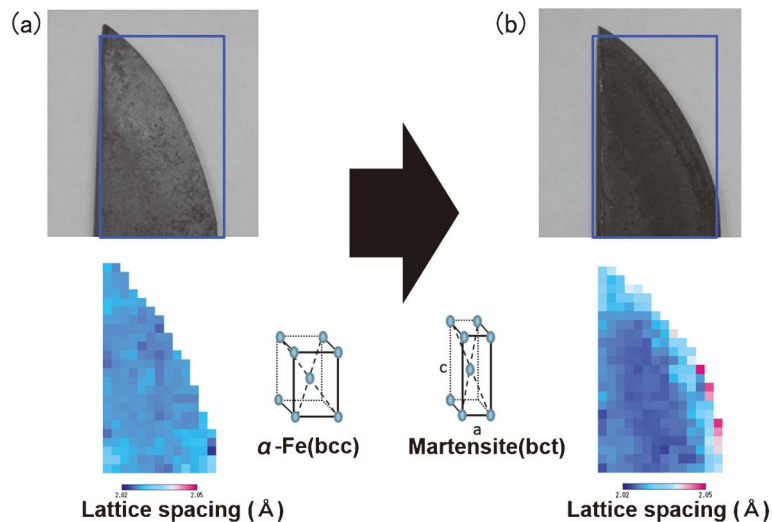


図9 日本刀制作過程再現試料 ((a)焼き入れ前, (b)焼き入れ後) の α -Fe の格子面間隔 (Å) の 2D マッピング像

4 まとめ

近年、放射光、中性子、ミュオンといった量子ビームを用いた分析技術の改良・高度化や新規分析技術の開発が進み、非破壊でも多くの情報が高い分解能で得られるようになってきている。本報では、放射光 X 線 CT ならびにパルス中性子透過分光法の鉄鋼文化財の非破壊分析への応用事例を紹介した。日本において X 線と、異なる特性を持つ中性子（パルス中性子）を用いて鉄鋼文化財を分析し、得られた結果を総合的に解析した事例はこれまで確認されておらず、本研究は文化財の非破壊分析の新しい事例と言える。既にミュオン特性 X 線を用いた鉄鋼文化財の分析も開始しており、2021 年中には定常中性子源である JRR-3 での即発ガンマ線分析にも取り組む予定である。文化財を守り、後世に伝えていくことは文化財保存の基本である。しかし同時に、文化財を調査することでその価値を伝え、活用していくことも大切なことである。これまで鉄鋼文化財の調査においては、破壊分析が避けられなかったが、非破壊分析技術の進展により非破壊分析でも破壊分析に近い情報を得られるようになってきた。非破壊であれば所蔵者から分析の許可も得やすいため、文化財の体系的な調査が可能となる。今後も分析化学（放射光科学、中性子科学）をはじめとする近隣分野の研究者達と連携しながら、鉄鋼文化財の非破壊分析に一步一步取り組んでいきたい。

謝辞 本稿で紹介した放射光 X 線による実験は、東京藝術大学客員教授・ふくやま美術館館長の原田一敏氏、岐阜県産業技術総合センターの水谷予志生博士、JASRI の星野真人博士、上杉健太郎博士と筆者が行ったものである。中性子による実験は、名古屋大学の鬼柳善明特任教授、金属技研株式会社

の塩田佳徳博士、名古屋大学大学院修士学生の磯野真理子さん、堀元紀さん、J-PARC MLF BL10 と BL22 の装置担当者の皆様と筆者が行った結果である。本研究は SPring-8 の実験課題 2012B1493, 2015A1606, 2015B1826, 2016B1798, 2016B1799, 2017B1760, 2018B1745, 2019A1519, J-PARC の実験課題 2013B0137, 2014A0270, 2014B0144, 2015A0151, 2016A0267, 2016B0264 にて行われた。本研究の一部は、科学研究費補助金 (No.19H01358, No.26702004, No.23800023 ならびに No.23226018), 日本鉄鋼協会第 24 回鉄鋼研究振興助成, 池谷科学技術振興財団平成 26 年度研究助成によるもので、ご支援に深謝致します。

文献

- 1) 東京国立文化財研究所光学研究班：“光学的方法による古美術品の研究”，p. 1 (1955), (吉川弘文館).
- 2) 田口 勇：国立歴史民俗博物館研究報告, **38**, 1 (1992).
- 3) 三浦定俊：非破壊検査, **44**, 621 (1995).
- 4) 増澤文武, 平岡英一, 古田純一郎, 桂山幸典, 辻本 忠, 米田憲司, 岡本賢一：出土遺物への中性子ラジオグラフィの試み, The KURRI Technical Report-252, pp. 39-43, (1984), (京都大学原子炉実験所).
- 5) I. Nakai, A. Mochizuki, T. Kawashima, S. Hayakawa, Y. Goshi and A. Iida: *Photon Factory Activity Report*, **5**, 135, (1987).
- 6) 平井昭司：国立歴史民俗博物館研究報告, **38**, 129 (1992).
- 7) 田中真奈子：波紋, **25** 8 (2015).
- 8) 田中真奈子：非破壊検査, **67**, 233 (2018).
- 9) 田中真奈子：“日本刀の内部構造を探る—放射光 X 線を用いた非破壊分析の可能性, 名刀大全 (解説編)”, pp. 36-40 (2020), (小学館).
- 10) 田中真奈子, 北田正弘：日本金属学会誌, **76**, 489 (2012).
- 11) 北田正弘：“日本刀の材料科学”, (2017), (雄山閣).
- 12) 齋藤 努, 坂本 稔, 高塚秀治：国立歴史民俗博物館研究報告, **177** 127 (2012).
- 13) 齋藤 努, 高塚秀治, 宇田川武久：国立歴史民俗博物館研究報告, **136**, 237 (2007).

- 14) 田中眞奈子, 北田正弘: 日本金属学会誌, **73**, 778 (2009).
- 15) 田中眞奈子, 北田正弘, 西嶋雅彦: 日本金属学会誌, **74**, 779 (2010).
- 16) M. Tanaka, K. Nagata, M. Ito, T. Hayashi: Non-destructive analysis of Nanban-tetsu, Abstracts book of BUMA8, p. 109, (2013).
- 17) M. Tanaka, Y. Shiota, Y. Mizutani, K.-D. Liss, J. Parker, Y. Kiyonagi: Nondestructive study of Japanese iron nails excavated from Saga castle using X-ray and neutron imaging techniques to clarify material characteristics and manufacturing techniques, Abstracts book of BUMA IX, pp. 48-49, (2017).
- 18) 上杉健太郎, 竹内晃久, 鈴木芳生: 非破壊検査, **58**, 420 (2009).
- 19) 上杉健太郎, 星野真人, 竹内晃久, 鈴木芳生, 八木直人: 放射線, **36**, 205 (2010).
- 20) 鬼柳善明: *Radiotopes*, **61**, 281 (2012).
- 21) H. Sato, T. Shinohara, R. Kiyonagi, K. Aizawa, M. Ooi, M. Harada, K. Oikawa, F. Maekawa, K. Iwase, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi: *Physics Procedia*, **43**, 186 (2013).
- 22) 磯野真理子, 田中眞奈子, 塩田佳徳, 渡辺賢一, 鬼柳善明, 瓜谷 章: 応用物理学会秋季学術講演会予稿集, p. 02-066, (2015).
- 23) S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, K. Miyama, M. Shoji, E. Nakano, T. Koike, K. Morita, H. Satoh, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi: *Phys. Procedia*, **26**, 142 (2012).
- 24) M. Tanaka, M. Isono, Y. Shiota, Y. Kiyonagi: Metallurgical analysis of traditional Japanese sword through manufacturing process by pulsed neutron imaging, Abstracts book of the synchrotron radiation and neutrons in art and archaeology conference, p. 26, (2016).



田中眞奈子 (Manako TANAKA)
 昭和女子大学歴史文化学科 (〒154-8533
 東京都世田谷区太子堂 1-7-57)。東京藝
 術大学大学院美術研究科文化財保存学専攻
 博士後期課程修了。博士 (文化財)。《現
 在の研究テーマ》放射光, 中性子, ミュオ
 ンを用いた鉄鋼文化財の材料科学的研究。
 《主な著書》宇田川武久編: “日本銃砲の
 歴史と技術” (2013) (雄山閣)。《趣味》
 スキューバダイビング。
 E-mail: ma-tanaka@swu.ac.jp

原稿募集

話題欄の原稿を募集しています

内容: 読者に分析化学・分析技術及びその関連分野の話題を提供するもので, 分析に関係ある技術, 化合物, 装置, 公的な基準や標準に関すること, 又それらに関連する提案, 時評的な記事などを分かりやすく述べたもの。

但し, 他誌に未発表のものに限ります。

執筆上の注意: 1) 広い読者層を対象とするので, 用語, 略語などは分かりやすく記述すること。2) 啓蒙的であること。3) 図表は適宜用いてもよい。4) 図表を含めて 4000 字以内 (原則として

図・表は 1 枚 500 字に換算) とする。

なお, 執筆者自身の研究紹介の場とすることのないよう御留意ください。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記へお願いします。

〒141-0031 東京都品川区西五反田 1-26-2

五反田サンハイツ 304 号

(公社) 日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

[E-mail: bunseki@jsac.or.jp]