

連携記事

受け継がれる日本刀の加工熱処理

Heat Treatment Processing of Japanese Swords Passing from Generation to Generation

島根大学
次世代たたら協創センター
教授 森戸茂一
Shigekazu Morito

島根大学
自然科学研究科
助教 ファム・ホアン・アン
Anh Hoang Pham

1 日本刀

日本刀についての科学的な研究は俵先生より始まり¹⁾現在に至るまで多くの研究が報告されている^{2,6)}。その内容は光学顕微鏡による断面観察から透過型電子顕微鏡を利用した介在物の解析、中性子を利用した刀身内部の構造解析など多岐にわたる。このような研究が多く行われていた理由の一つに、日本刀は伝統的な技法で作られた美術品であると同時に、高い力学特性を要求される実用品であることが挙げられる。

伝統的な日本刀では、1) 素材を作り込み、2) 次に素材を組み合わせて接合し形状を整え、3) 整えた鋼材に熱処理を施し、4) 最後に研磨及び仕上げを施すの工程が一般的とされている⁷⁾。それぞれ時代の変遷はあるが、平安時代に日本刀作製工程が完成されたといわれる²⁾。このように古くから変わ

らない手法で作られている日本刀であるが、鋼材の能力をどの様にして最大限に引き出していたかという観点は現在にも通じるものがある。本稿では古くから受け継がれている日本刀の作製方法について、現在の熱処理の原点として考えてみる。あと、ここでは日本刀を、伝統的な作製法に従い、片刃になるように作刀され、刃には焼入処理が施され、刀身に反りを入れた刀剣として話を進める。

2 折返し鍛造と組織

素材の作り込みについて図1を元に説明する⁷⁾。一般的に日本刀の素材となる鋼はたたら製鉄で作られた海綿状鋼塊から得られる。鋼塊の組成は均一ではないため、鋼塊を分塊し板状にしてから必要な鋼材を選別する。そのとき、鋼材の

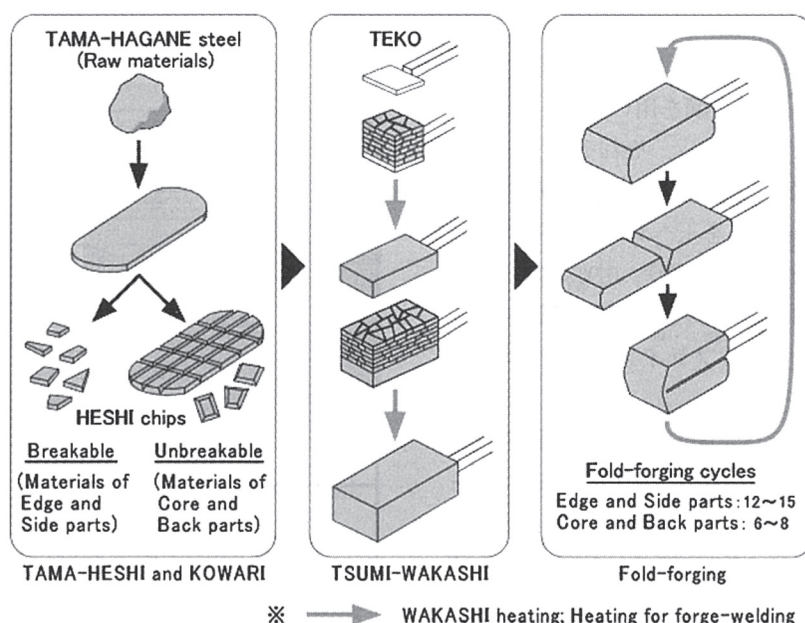


図1 伝統的な日本刀素材の作り込み⁷⁾

延性から鋼材中の炭素量を見積り、適宜分けて利用することになる。

分塊された小片は一つの塊状に積み重ねられる。積み重ねられた小片は和紙でくるまれ、藁灰と粘土汁で被覆される。この塊を加熱し鍛接する事で一つの鋼塊となる。この工程は「積み沸かし」と呼ばれ、これを複数回行い一振分の鋼材を作る。

次に、この鋼材を加熱しうち伸ばし、たがねを入れて折り返し、またうち伸ばすといった工程を繰り返す。この工程は折返し鍛錬と呼ばれる工程で、日本刀の鋼材作製上重要な工程となる。折返し鍛錬回数は流派や時代にもよるが、日本製鋼所の瑞泉鍛刀所では刃鉄は12から15回で心金は6から8回としている。

この折返し鍛造は鋼材内の成分を均一化させるだけでなく、鋼材内の固溶炭素量の調整も行っている。図2は折返し鍛造の回数と炭素量の関係を示している。ここで1Bは玉鋼1級（炭素濃度1.0～1.5mass%）、2Aおよび2Bは2級（炭素濃度0.5～1.2mass%）を示している⁸⁾。また、2BH、2BMおよび2BLは2B材の中でも硬さごとに分けて積み沸かしされた鋼材で、鋼材の硬さ順に表記している。この図を見ると比較的炭素量の高い1B、2Aおよび2BH材では炭素量が減少していることが分かる。これは表面部及び鍛接部における脱炭が原因である。一方で、鋼材内の炭素量が低い2BL材では固溶炭素量はほとんど変化せず、固溶炭素量はより低い鋼材では逆に炭火による加熱により浸炭傾向が見られていた。これらの報告は、適切な浸炭雰囲気での加熱および適切な折返し鍛造処理により、鋼材の炭素量を日本刀の刃に適した0.6～0.8mass%に調整していたことを示している。

折返し鍛造によって組織も微細化し均一化する⁹⁾。図3は

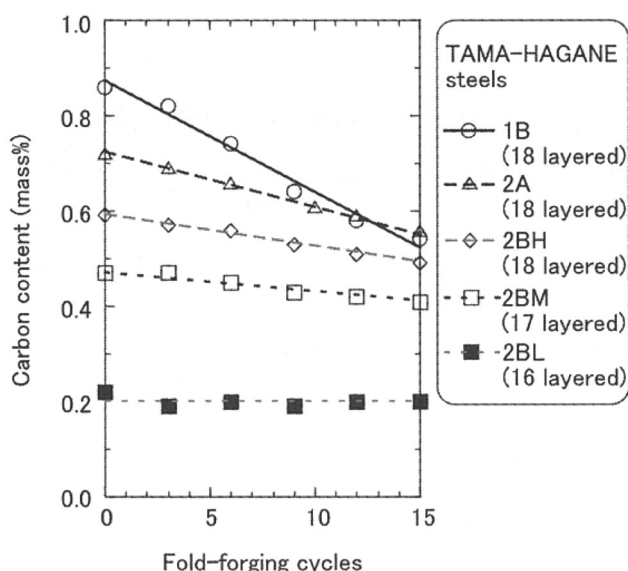
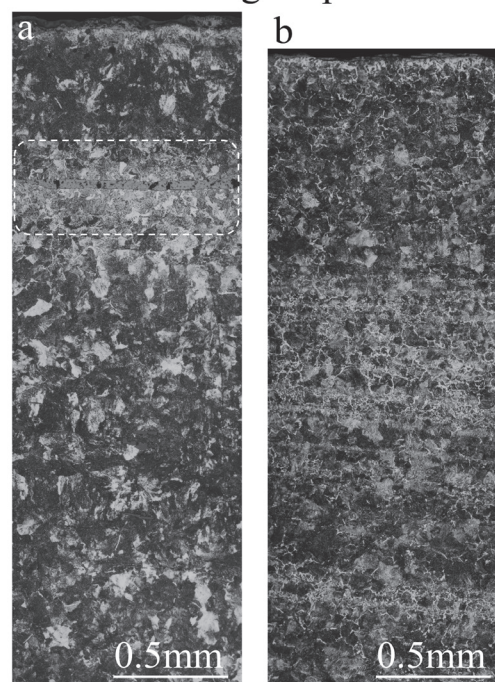


図2 折返し鍛造と積み沸かし回数と玉鋼に含まれる炭素量の変化⁷⁾

折返し鍛造を施した鋼材の断面写真である。試料はすべて玉鋼2級であり、鍛錬は三上貞直刀匠に実施していただいた。この鋼材の炭素量は0.76mass%で、折返し鍛造の実施回数は図3 (a) と (b) それぞれ1回と6回である。鍛造回数が1回の試料では全面パーライト組織となっており、白破線で示す介在物周囲にフェライトが密集している事を見ることが出来る。鍛造回数が6回目となると試料全体に網の目状の初析フェライトが観察されるようになる。このときの炭素量は0.65mass%まで低下しており、前述の脱炭効果が確認される。また、鍛造面に平行に0.1mm程度の間隔でフェライトの集積部が確認され、炭素濃度の異なる領域が層状に並ぶことを示している。図4はエッチングを施していない試料の写真で、黒い線は介在物を示している。これらの写真から鍛造回数の増加と共に介在物が微細化し、均一に分散することが分かる。このような介在物の微細化と均一分散は他にも報告されており、この様な介在物の微細化により介在物を基点とした破壊を抑制すると考えられている。

鋼に内包される介在物は積み沸かしなどで使われる粘土由来のものもあるが、砂鉄や木炭など原料由来のものも少ない。折返し鍛造により原料由来の微量元素はほぼ変化しない⁷⁾ことから、これらの元素は何らかの化合物となって鋼材に残っていると考えられる。北田⁴⁾は多くの日本刀につ

Surface of forged specimens



Center of forged specimens

図3 折返し鍛造による組織の変化：(a) 1回目及び (b) 6回目の鍛造後の光学顕微鏡写真 (3%ナイタール腐食)

いてその介在物を分析しており、ガラスやファイアライト (Fe_2SiO_4) といった非金属介在物が多く、その中に固溶もしくは内包された微量元素を観察している。また、ガラス質の介在物内に100nm程度のTi酸化物粒子も見いだしている。これらの結果から微量元素もしくはその金属間化合物は折返し鍛造により鋼材中の非金属介在物に取り込まれるか加工により微細化され则认为られる。

Surface of forged specimens



Center of forged specimens

図4 折返し鍛造による組織の変化：(a) 1回目及び (b) 6回目の鍛造後の光学顕微鏡写真（研磨まま）

3 オーステナイト化処理

鋼材が完成した後、鋼材を組み合わせて接合し形状を整える。鋼材の組み合わせ方には多数の種類がある。刃先や側面を高炭素鋼とし、内側を低炭素鋼とする場合が多いが、時代や流派によってだいぶ異なる。組み合わせた後で延ばし、形状を整え、スケールを除去し、加熱後に焼入れを施す。焼入れ前の加熱はオーステナイト化処理であり、その温度は流派ごとに異なるが、だいたい A_3 温度直上の780～850℃程度^{7,10)}とされている。

実際にオーステナイト化温度の変化によってどれくらい組織が変わるのか調べた研究がある¹¹⁾。この実験では1945年に作刀された日本刀の小片（刃先部の炭素量は0.71mass%）を800℃で600sの焼ならし処理後760～860℃でオーステナイト化し水焼入れを施した試料を観察している。実験の結果、オーステナイト化温度が760℃以上では全面マルテンサイトとなっており、それらの試料に対して後方散乱電子回折法 (EBSD) による測定を行い旧オーステナイト粒の再構築を行った。図5はEBSD測定から求めた旧オーステナイト粒マップである¹²⁾。この図を見ると、オーステナイト化温度が760℃以下では微細な旧オーステナイト粒が現れているが、780～820℃では明らかな異常粒成長が観察される。これは日本刀に含まれる微細介在物によるオーステナイト粒のピン留めが、780℃以上では外れるためと考えることが出来る。また、日本刀に含まれる炭素量が均一に分布していない事も原因ではないかと考えられる。

この実験では完成した日本刀を試料としたり焼ならしを施したりしていることから単純に実際の熱処理と比較することが出来ない。また、時代や流派ごとに鋼材中の炭素量も異なるので一概にオーステナイト化温度と組織の関係を決めるこ

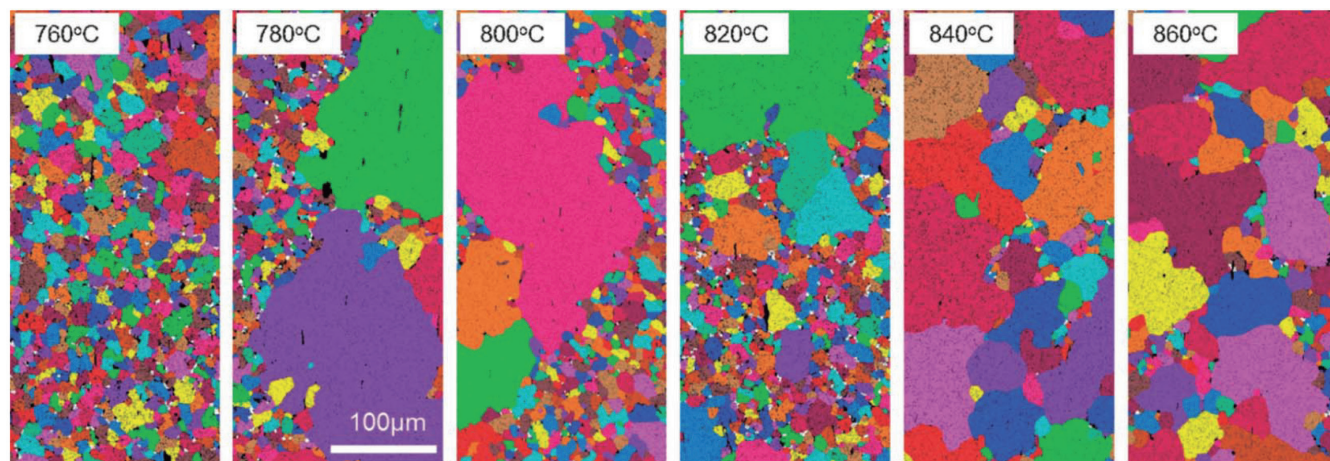


図5 オーステナイト化温度の上昇に伴うオーステナイト組織の変化¹²⁾。カラー（冊子版ではコントラスト）は個々のオーステナイト粒を示す

とは出来ない。しかし、日本刀に含まれるラスマルテンサイトの旧オーステナイト粒径が数 μm であるという報告が多く、刀匠は意図的にオーステナイト化温度を制御することでオーステナイト粒の粒成長を制御していたと考えられる。

4 焼入処理

オーステナイト化後に焼入処理を施すが、一連の熱処理前に粘土を主体とした焼刃土を刀身に塗布する必要がある。焼刃土は焼入時の鋼材表面での水の膜沸騰を押さえることで冷却速度を上げることが出来、厚く塗ると冷却速度が落ちる。井上らは銀棒に焼刃土を塗布し焼刃土の厚さと試料温度の関係を測定している。焼刃土を塗布しない場合の銀棒の冷却速度は 800°C 近傍で約 $190^{\circ}\text{C}/\text{s}$ であったが、焼刃土を 0.15mm 以下塗布した場合は約 $900^{\circ}\text{C}/\text{s}$ まで冷却速度が上昇することを示している。この結果から、刃先となる場所に焼刃土を薄く塗布することで焼入速度が上がり、焼入れの難しいFe-0.6mass% C程度の鋼でも水焼入処理を行うことができる。また、厚めに焼刃土を置くことで冷却速度が低下する事を利用しわざと刀身に焼刃土を厚く塗布することでパーライトを生成させる事ができる。この様に刃先の焼刃土の置き方で組織を変えることが出来、その組織の違いが日本刀特有の刃文として現れる。

刃文は刀身を研ぐことによって現れる模様であり、その中でよく知られている刃文に匂(におい)と沸(にえ)がある。匂は「春霞がたなびく」ように見えるといわれ、沸は「銀の砂子を撒きたるが如し」とされている²⁾。刃文に関する研究は古く、「日本刀の科学的研究」¹⁾において、匂と沸はマルテンサイトとトルースタイト(焼戻マルテンサイトもしくは微細パーライト)の混在組織であるとしている。マルテンサイトの集団が粗大であるときに沸、微細であるときは匂になるとされている。

図6に日本刀に含まれる刃文の観察例を示す¹³⁾。試料は和

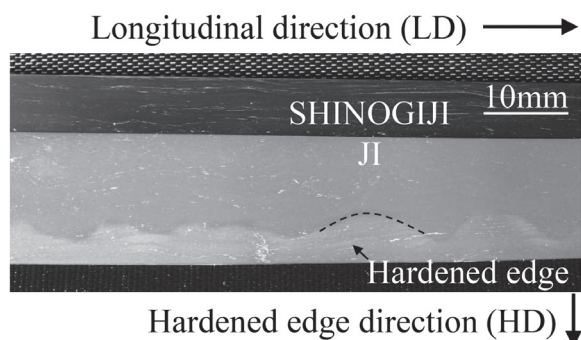


図6 脇差・無銘³⁾の刃文及び地金の様子

鋼博物館所蔵の脇差・無銘(応永期備前伝)³⁾で、刀身部に波状の刃文が観察される。図の黒破線が刃と地金の境界で、その内側に白く観察される領域が匂となる。図7に刃先部の走査型電子顕微鏡像(SEM)とEBSDによる結晶方位解析結果を示す。SEM像を見ると、旧オーステナイト粒の三重点あたりには白矢印で示す微細パーライトが現れているが、ほぼマルテンサイトで構成されている。この観察から旧オーステナイト粒径 $4\mu\text{m}$ のマルテンサイトである事が分かる。視野を変えてEBSD測定を行ったデータから結晶方位図(図7(b))を作成した。図上の白破線は結晶方位解析により判明した旧オーステナイト粒界である。旧オーステナイト粒内を見るとパケットとブロックを確認することが出来、典型的なラスマルテンサイトである事が分かる。次に匂の観察結果を示す。図8(a)は刃に内包される匂を観察した結果であり、マルテンサイト地内に刀身方向に沿った白い組織が観察される。図8(a)の矢印の箇所にビッカース圧痕があり、その周囲を拡大した写真が図8(b)である。この写真内には周囲より白く見える微細な組織が多く観察される。この白い組織は粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の微細パーライトであり、肉眼では粒子として識別できないために「春霞がたなびく」ように見えると

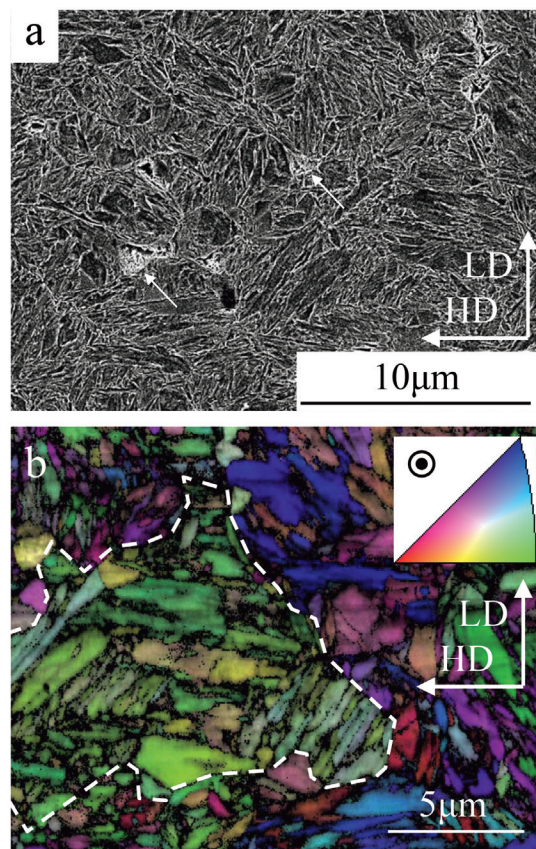


図7 刃先の(a)SEM写真と(b)結晶方位図。ステレオ三角のカラー(冊子版ではコントラスト)は結晶方位図における紙面垂直方向の結晶方位を示す

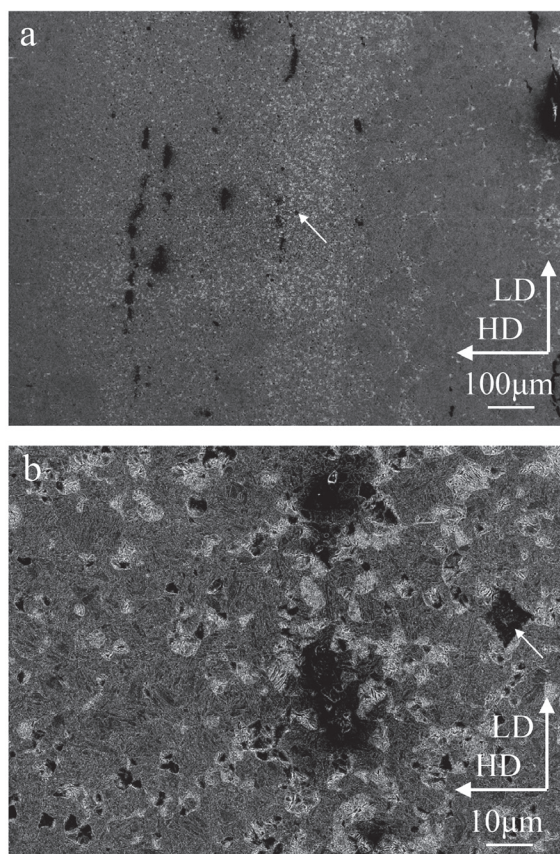


図8 刃に含まれる匂近傍の (a) SEM像と (b) 中央部の拡大像

考えられる。図9は刃境付近のSEM像で、刃境を白破線で示している。先述のSEM像と同じく白い組織が微細パーライトで灰色の組織がラスマルテンサイトである。刃境から棟方向にマルテンサイトとパーライトの二相組織が観察されており、刃境はラスマルテンサイトから微細パーライトへと急に組織が変わるわけではなく、双方の組織が互いに混ざった組織となっている。図10 (a) は地金に含まれる地沸と呼ばれる刃文のSEM像である。地沸は地金内でざらついて見える刃文で、SEM像では刀身方向に沿った粗大なマルテンサイト領域の集団として観察される。EBSD測定を行い解析した結果を図10 (b) に示す。この結晶方位図に描かれた白破線は旧オーステナイト粒界を示している。解析の結果、個々の旧オーステナイト粒径自体は数十 μm 程度と肉眼で見るサイズではないが、集団としてまとまっているため肉眼で点として観察されることが考えられる。

最後の熱処理として、流派によるが、焼刃土を落とし「合い取り」と呼ばれる焼戻しを施す。この処理は日本刀内の過剰な残留応力を落とすために施されている。実際に日本刀の表面には高い圧縮応力がかかっていることが分かっている。坂井田らの報告¹²⁾によると、刃先には刀身方向に1GPa以上の2軸圧縮応力がかかっているとしている。また、刃のつい

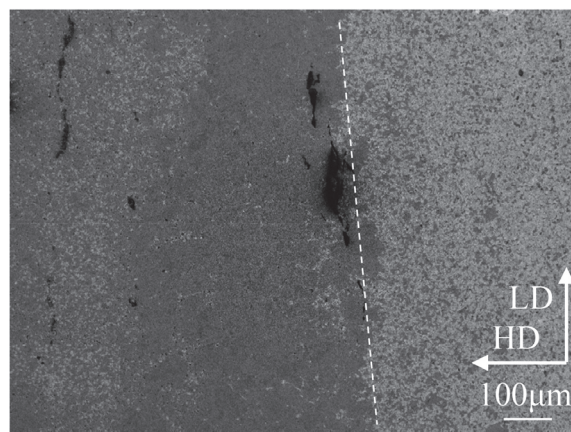


図9 刃境のSEM像

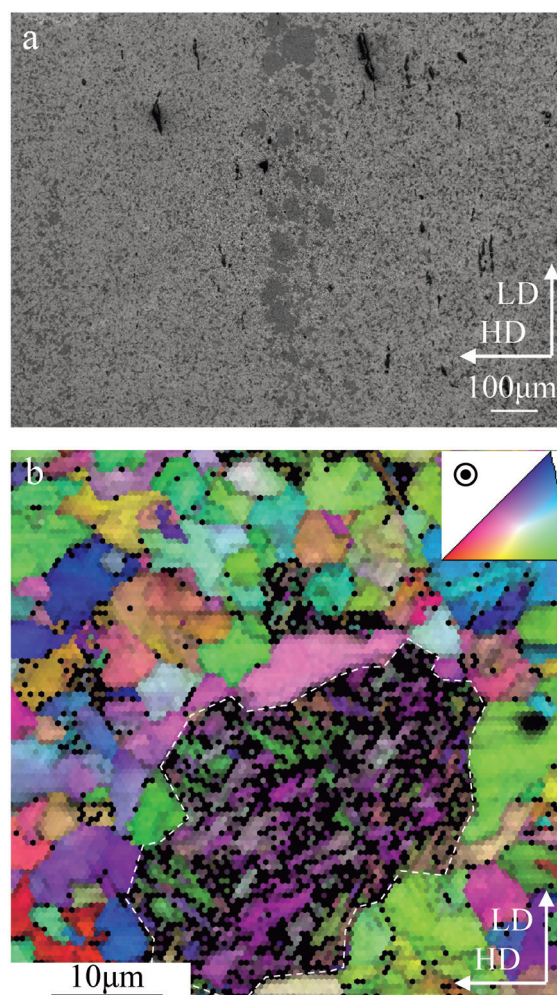


図10 地沸の (a) SEM写真と (b) 結晶方位図。ステレオ三角のカラー(冊子版ではコントラスト)は結晶方位図における紙面垂直方向の結晶方位を示す

ていない部分にも500MPa程度の2軸圧縮応力がかかっており、これは熱処理による残留応力の他に研ぎによる残留応力も影響しているとしている。この残留圧縮応力は日本刀のじ

ん性を向上させていると考えられる。

刀匠は局所的に熱処理を変化させることにより日本刀内の組織を制御し、刃先を微細組織のラスマルテンサイトとし、一部微細パーライトが混ざった二相組織を入れ、棟側をパーライト組織とするように日本刀を作り込んでいる。また、異種鋼材を組み合わせることでマルテンサイトからフェライトまでの組織を日本刀内に作り込んでいる。さらに残留応力を付与することで日本刀のじん性を向上させている。これらの処理の考え方は現在でも二相鋼や表面処理法として使われている。

5 結言

日本刀は伝統的な手法で作製されている。その一方で、それぞれの工程は理にかなっており、組織制御のお手本ともいえる。当時は組成や組織について正確に理解していなかったと考えられるが、感覚的に違いを理解し、素材や熱処理を最適解へ導いている。いかにして鋼材の能力を引き出すかという考え方は熱処理の根本であり、鋼材や技法や時代によって変わっても熱処理の本質は今も受け継がれている。

6 謝辞

本稿は、島根大学の太田卓也教授が主催された2008～2011年の島根大学「たたらプロジェクト」と2014～2019年の島根大学「たたらナノテクプロジェクトセンター」、2011年から和鋼博物館が主催となり開かれた「安来たたら研究会」での研究成果が含まれている。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 俵国一：日本刀の科学的研究，日立論評社，(1953)。
- 2) 谷村潤：鉄と鋼，67 (1981)，497。
- 3) M.Yaso, T.Takaiwa, Y.Minagi, T.Kanaizumi, K.Kubota, T.Hayashi, S.Morito and T.Ohba : J. Alloys and Comp., 577S (2013), S690.
- 4) 北田正弘：日本刀の材料科学，雄山閣，(2017)。
- 5) 朝倉健太郎：一刃物の金属組織学—身近な刃物・日本刀・隕鉄 驚きの真実，アグネ承風社，(2018)。
- 6) K.Oikawa, S.Harjo, A.H.Pham, T.Kawasaki, S.Morito, Y.Kiyanagi, T.Shinohara, T.Kai, T.Ohba and M.Ito : JPS Conf. Proc., 33 (2021), 01106.
- 7) 佐々木直彦，桃野正：鉄と鋼，93 (2007)，792。
- 8) 永田和宏，鈴木卓夫：鉄と鋼，86 (2000)，64。
- 9) G.Takami, T.Ohba, S.Morito and A.K.Das : Mater. Sci. Forum, 654-656 (2010)，134。
- 10) 井上達雄：材料，66 (2017)，804。
- 11) A.H.Pham, T.Ohba, S.Morito and T.Hayashi : MATEC web conf., 33, 07001 (2015)，1。
- 12) A.H.Pham, 太田卓也，森戸茂一，林泰輔：まてりあ，55 (2016)，584。
- 13) 森戸茂一，太田卓也，八十致雄，三奈木義博，高岩俊文，久保田邦親，金泉豪史：日本金属学会講演概要，146 (2010)，207。
- 14) 坂井田喜久，村井俊之，吉田始：材料，62 (2013)，430。

(2021年8月2日受付)