

日本刀の内部性状について

材料・化学系 (材料物性工学科) 藤原幹男

1 緒言

日本刀は、日本を代表する伝統工芸品であり、「折れず、曲がらず、よく斬れる」と言われる。武器としての刀剣に要求される機械的性質は、鋭い切れ味を保持するための高硬度と、容易に折損しないための高靱性を兼ね備えることである。この相矛盾する性質と機能を、先人たちは、折返し鍛錬、異なる炭素量の鋼素材を複合材料化した造り込み、粘土被覆厚さの違いによる焼入れ冷却速度制御により実現している。焼入れ冷却速度制御による刃先部マルテンサイト組織と刃境部・棟部パーライト組織が、武器として要求される高強度—高靱性バランスを担うと同時に、両組織の境界部に美しい刃文を出現して美術品としての価値を高める。この日本刀の材料組織観察は、過去にいくつか^{1) 2) 3) 4) 5)}研究されてきた。しかしながら、日本刀の機械的性質については、硬度測定のみにとどまっており、衝撃靱性値を調べた研究はほとんどなされていない。日本刀が有する刃先から棟にいたる優れた高強度—高靱性の傾斜機能的バランスに着目した局部靱性特性を、組織と対応づけて直接評価する必要がある。

通常、金属材料の衝撃靱性評価は、標準寸法 ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$) の試験片 (JIS 2202) を用いたシャルピー衝撃試験法によって実施されている。近年、上記の標準寸法を採取できない薄鋼板、細鋼線、金属間化合物、溶接接合金属や、中性子照射材の衝撃靱性値を直接評価すべく、標準衝撃試験片を超小型化した微小試験片材料評価技術^{6) 7) 8) 9)}が進歩し、材料局部の衝撃靱性値の直接評価が可能である。

そこで、本報告では、日本刀に関する以下の2つの調査実験を行った。最初に、微小衝撃試験片法を用いて、刃先から棟まで連続的に局部衝撃靱性値を直接評価し、日本刀の高強度—高靱性の傾斜機能的バランスについて検討した。次に、日本刀刃先素材の折返し鍛錬回数と炭素含有量、焼入れ硬さ、衝撃靱性値の関係を調べて、日本刀製作における経験的技術伝承である折り返し鍛錬終了回数12~15回の材料学的意義を明らかにした。

2 実験方法

2.1 用いた日本刀試料の製作過程

日本製鋼所瑞泉鍛刀所の堀井刀匠により、図1に示す「四方締め (しほうじめ)」造り込み (つくりこみ) で、以下の作業により日本刀試料を製作していただいた。

原料である玉鋼 (たまはがね) を、熱間加工により薄鋼板 (約5mm厚) にした後、水焼入れする。これをハンマーで小片 (約20mm角) に割り、容易に割れる高炭素鋼と割れない低炭素鋼に分別する。素材に合わせて炭素量の異なる小片を選択し、隙間なく積み重ねて、融点に近い温度まで加熱してから槌打ちし、小片同士を圧着させる「積み沸し (つみわかし)」を行う。再び加熱し、槌打ちして延ばしてから、切り込みを入れて折返し鍛錬を行う。折返

し回数は刀匠により異なるが、図1の折返し鍛錬に示した折返し回数で素材を製作する。

折返し鍛錬が終了すると、炭素量の異なる素材を組み合わせる造り込みを行う。一般に日本刀は、折損を防ぐため内側に低炭素鋼を入れ、それを高炭素鋼で周りから包み込むようにして複合材料化されている。図1の造り込みに示したように、心鉄を3種類の素材（刃鉄、皮鉄、棟鉄）で四方から囲むようにして組合わせた後、加熱、槌打ちを繰り返して板棒状に延ばす。所定の長さには達すると、慎重に槌打ちを行い、曲率の無い日本刀の形状に打ち出す。

次に焼入れを行うが、焼入れに先だって、刃先部分は粘土で薄く被覆し、その他の部分は粘土で厚く被覆する「土置き」を行う。塗布された粘土が乾燥すると、部屋を暗くし、刀身を加熱する。赤熱した刀身の色から温度を確認し、適当な温度（800℃⁵⁾に達した時、水槽に刃先を下にして焼入れを行う。

焼入れ後、すぐに低温焼戻し作業である「合い取り（あいとり）」を行う。

2.2 組織観察と硬度測定

日本刀を長さ方向に垂直な面で薄板状に切りだし、試料とした。試料の断面（以降、日本刀断面とよぶ）をエメリー研磨およびバフ研磨により鏡面仕上げした後、3 mass% ナイタルで腐食し、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて日本刀断面の組織観察を行った。

その表面をもう一度バフ研磨により鏡面仕上げし、日本刀断面の刃先一棟方向に沿ってマイクロピッカース硬度測定を行った。試験荷重は1000 g、負荷時間は1.5秒間とした。

2.3 微小衝撃試験片と微小衝撃試験法

試験片の寸法は断面積が1.0×1.0mm²、0.7×0.7mm²の2種類であり、全長は20mmである。以下、それぞれ1.0mm角、0.7mm角試験片と呼ぶことにする。全

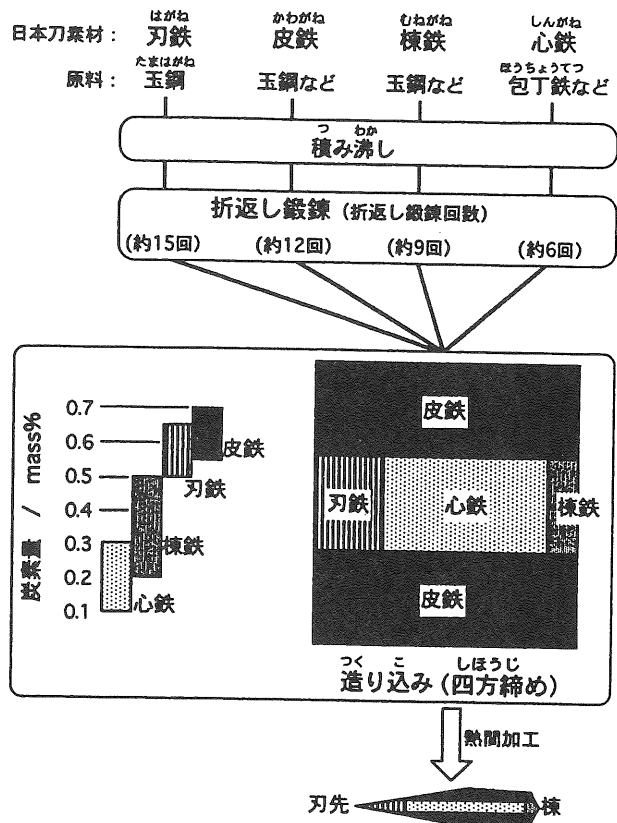


図1 しほうじ 四方締めによる造り込み

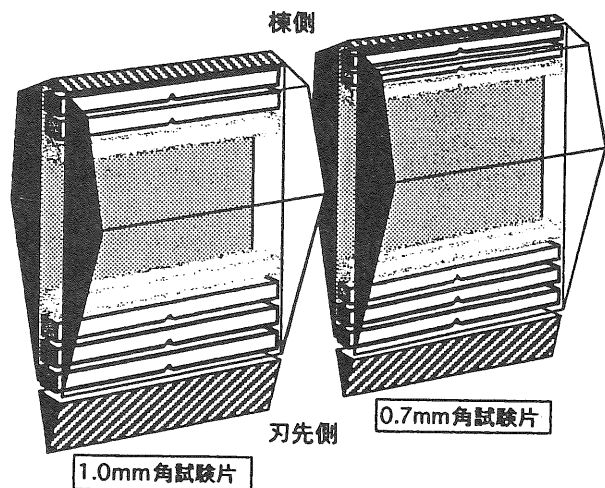


図2 微小衝撃試験片の採取要領

て試験片には、無歪放電加工によって曲率半径 $R=0.08\text{ mm}$ 、開き角 30° 、深さ20% (1.0、0.7mm角試験片に対してそれぞれ0.20、0.14 mm) のV型ノッチを施してある。日本刀断面の刃一棟方向に沿って微小衝撃試験片を採取し、Vノッチが刃先側となるように加工した。その要領を図2に示す。Vノッチを刃先側に施したのは、武器として日本刀を用いるとき、刃が欠けるなどの原因により、き裂は刃先から進行することが多いと考えられるからである。

衝撃試験機は、これまでの試験機⁹⁾を改良したものをを用いた。試験機は計装化加速型衝撃試験機^{10) 11)}であり、試験片はVノッチを下向きにしてホルダーにセットされる。圧縮ガスで駆動するシリンダーロッドの下部に取り付けられたブレードが、毎秒 $1\times 10^3\text{ m m/s}$ の衝撃速度で落下し、試験片に垂直に負荷する。衝撃試験中の荷重は、ブレードシャフトに取り付けられたひずみゲージから測定され、ブレードの変位および速度は、ブレードシャフトについている反射板を利用した半導体レーザ変位計によって測定した。本試験機の改良点は、荷重測定感度をあげるためにブレードシャフトの一部を薄く加工し、そこにひずみゲージを取り付けたことであり、これまでのロードセルより荷重測定感度は飛躍的に向上した。試験はすべて室温で行った。衝撃吸収エネルギーは、計測された衝撃荷重-変位曲線下の面積を算出して求めた。その後、SEMを用いて破面観察を行った。

2. 4 日本刀刃先素材の折返し鍛錬

折返し鍛錬における折返し回数は、素材、刀匠より異なることは前述したが、心鉄の周囲の高炭素素材は、刀匠によらずおよそ12~15回とされる。本実験では、刃鉄素材(図1参照)の折返し鍛錬が材料に及ぼす影響を調べるため、折返し回数15回以内(1~15回)および15回以上(17、20、22、25、27回)に分けて試料を採取し、炭素量分析、マイクロビッカース硬さ測定、シャルピー衝撃試験を行った。炭素量は燃焼赤外吸収法により求めた。

刃先に位置する刃鉄は、焼入れ部分となるため、焼入れ処理後、硬さを測定した。焼入れは、 800°C 30分保持後、水冷にて行った。硬さ試験の測定条件は、荷重1000 g、負荷時間15秒間とした。

衝撃試験は、不均一な鍛錬組織を平均的に扱うため、微小衝撃試験法ではなく、通常のシャルピー衝撃試験を行った。また、各折り返し回数につき50~100 gの試料しか採取できなかったため、試験片の寸法を、JIS4号試験片のサブサイズ試験片(幅2.5mm)とした。試験片長さが鍛錬方向に垂直となり、折り返し鍛錬層を最も多く含む方向で試験片を加工した。ハンマー重量5 kgの試験機を用いた。

3 結果および考察

3. 1 日本刀断面の組織と硬さ分布

日本刀中央断面のマクロ組織を図3(a)に示す。図から、焼入れ部と徐冷部の境が明確に認められた。これは、前述の土置きにおける粘土被覆厚さの違いを反映している。この試料では、粘土を薄く塗布された部分が比較的広がったため、刃鉄部分はほぼ全域にわたって焼入れされていた。刃鉄以外の部分は徐冷部となり、焼入れされていない。焼入れ部と徐冷部の境界線は非常に入り込んでおり、この部分を刃境部と呼ぶことにする。

日本刀中央断面のミクロ組織を図 3(b) に示す。焼入れ部は、ラスマルテンサイト組織を示した(写真は図中 I ; 刃先から 6mm の部分)。一方、徐冷部は、フェライトと微細パーライトの混合組織を示したが、棟鉄部より炭素量の低い心鉄部(写真は図中 III ; 刃先から 12mm) では初析フェライト(写真中の黒い部分)の占める面積が大きいのにに対し、棟鉄部(写真は図中 IV ; 刃先から 30mm) では微細パーライトの占める面積が大きい。また、刃境部は、母相であるラスマルテンサイトの旧オーステナイト粒界上に過冷却されたパーライトが析出している混合組織を示した(写真は図中 II ; 刃先から 9mm)。

日本刀断面の刃一棟方向の硬さ分布を図 4 に示す。硬さは、焼入れ部で最も高く、およそ Hv 800 であり、刃境部で著しく低下し、徐冷部で Hv 200 程度でほぼ一定となる分布を示す。図 4 中の I ~ IV は図 3 と対応している。徐冷部において、炭素量の異なる III と IV の間に、硬さの大きな差は見られない。この硬さ分布は、文献にある硬さ測定^{3) 5)}と同様の結果となった。

3. 2 日本刀断面の局部衝撃靱性遷移

1.0mm 角および 0.7mm 角試験片の衝撃荷重-変位曲線を図 5 に示す。試験片の採取位置 I ~ IV は図 3 と対応している。日本刀中央断面の各部位における衝撃荷重-変位曲線は、荷重変位の非常に小さな焼入れ部から、荷重変位の大きい徐冷部まで連続的に変化していることがわかる。また、1.0mm 角と 0.7mm 角の衝撃荷重-変位曲線を比較すると、試験片の採取位置が同一であれば、衝撃荷重-変位曲線の形状も酷似することがわかる。

日本刀断面(刃一棟方向)の衝撃吸収エネルギーおよび衝撃値分布を図 6 に示す。図 6 から、衝撃吸収エネルギーは、下部棚である焼入れ部脆性域で非常に小さく、刃境部から徐冷部の一部にわたる遷移域(刃先から 8mm ~ 刃先から 15mm の部分)で傾斜靱性を示し、

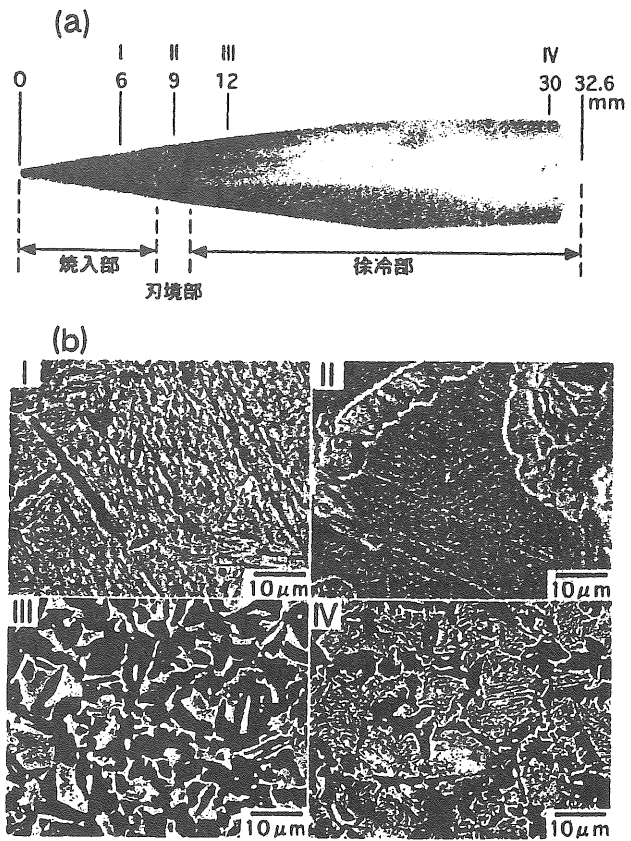


図 3 日本刀断面のマクロ組織(a)と各部位のミクロ組織(b)

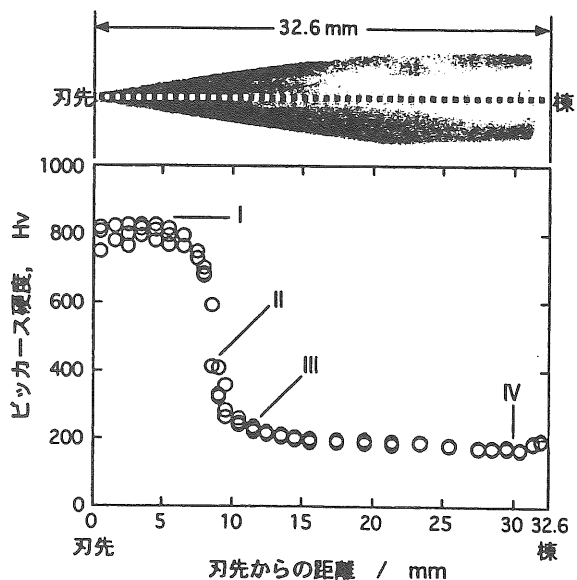


図 4 日本刀断面の刃先から棟までの硬さ分布

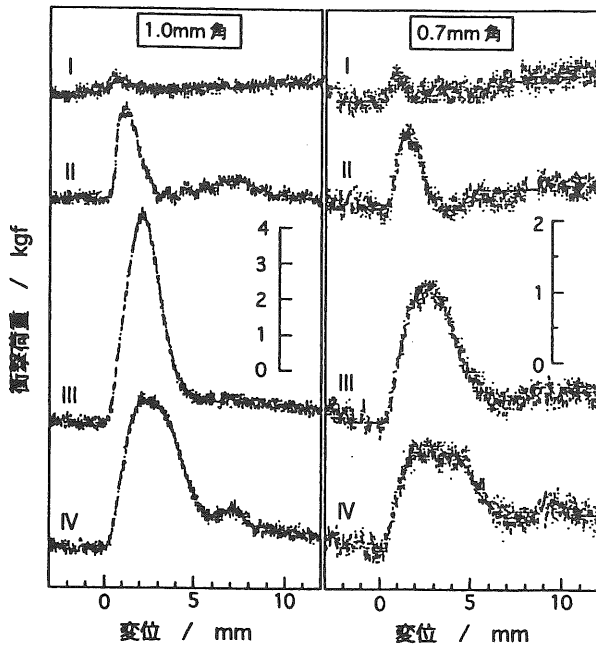


図5 日本刀断面の刃先から棟までの衝撃荷重-変位曲線

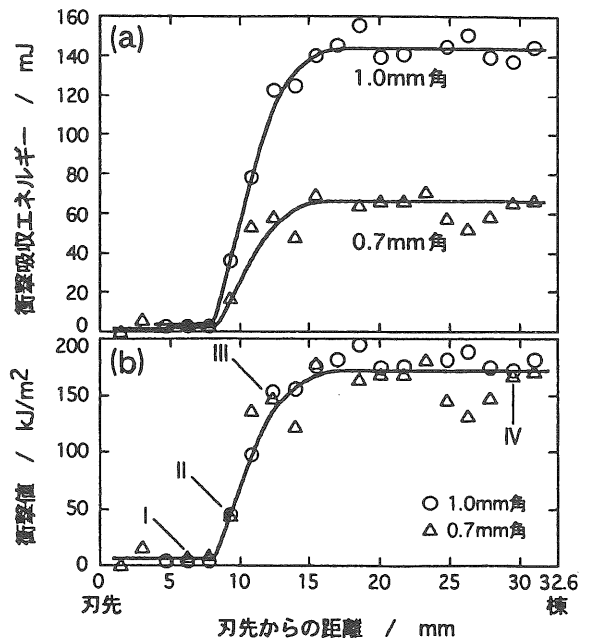


図6 日本刀断面の刃先から棟までの衝撃吸収エネルギー(a)と衝撃値(b)

上部棚である徐冷部延性域ではほぼ一定となった。これは、図4に示した硬度分布の逆形状に近い。しかし、硬度分布と衝撃吸収エネルギー分布の異なる点は、硬度が大きく変化したのは刃境部(8mm~刃先から10mmの部分)であったのに対し、衝撃吸収エネルギーは広領域で変化していることである。

一方、上部棚である徐冷部において、心鉄と棟鉄の違いによる衝撃吸収エネルギーの明確な変化は見られなかった。1.0mm角と0.7mm角の衝撃吸収エネルギーを比較すると、寸法の小さな0.7mm角は衝撃吸収エネルギーも小さいが(図6(a))、衝撃吸収エネルギーを試験片の断面積で除して求めた衝撃値(図6(b))においては、両者はほぼ一致する。

さらに、衝撃吸収エネルギー E を、荷重開始から最大衝撃荷重までの衝撃荷重-変位曲線下の面積であるき裂発生エネルギー(E_1)、および最大衝撃荷重からき裂進展終了までの衝撃荷重-変位曲線下の面積であるき裂進展エネルギー(E_2)に、分離^{10) 11)}した結果を図7に示す。図7から、 E_1 、 E_2 のグラフ形状は、ともに E と酷似し、延性域において、 E_1 、 E_2 は、およそ1:2となった。

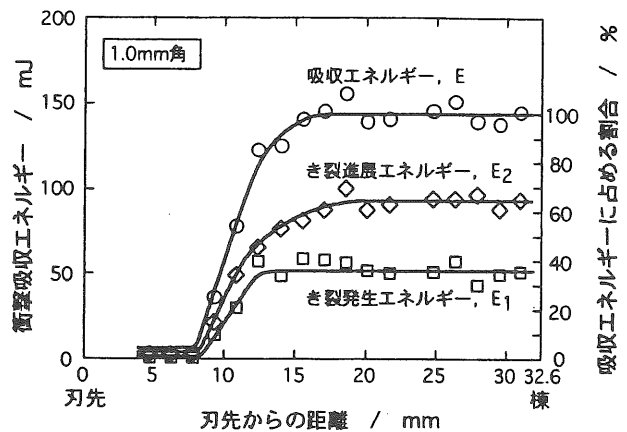


図7 き裂発生と進展に分離した衝撃吸収エネルギー

3.3 破面観察結果

衝撃試験後の破面の破壊形態を図8に示す。番号I~IVは図3と対応している。1.0mm角と0.7mm角の破面の形態は一致していた。焼入れ部(図8 I)では脆性破面である粒界破

面を示し、徐冷部（図8Ⅲ、Ⅳ）では延性破面である介在物を起点とするディンプル破面を示した。刃境部（図8Ⅱ）では、劈開破面を含む前者2つの混合破面が観察された。破面形態は、土置きによる焼入れ冷却速度の違いを強く反映し、造り込みによる炭素量の違いに影響されていない。焼入れ部において観察された粒界破面の原因は、合い取りと呼ばれる焼戻しによる低温焼戻し脆化だと思われる。合い取りは、加熱された刀身表面に垂らした水滴が球状化する温度、かつ、テンパーカラーが呈色しない温度で行われる。この温度域が、焼戻し脆化温度域と重なっている可能性がある。破面に介在物が多く観察されたため、光学顕微鏡による観察とEPMA分析を行い、それを図9に示す。図9(a)に示す光学顕微鏡による日本刀断面観察により、鍛錬方向に粘性変形する介在物であるA系介在物が多く観察された。図9(b)のEPMA分析から、破面ディンプル中の粒状の介在物は、 MnS に代表される硫化物系の A_1 系介在物と SiO_2 に代表されるケイ酸塩系の A_2 系介在物であることが示された。 MnS について、日本刀中の Mn は $0.01\text{mass}\%$ 程度⁵⁾だが、直径数 μm の粒状介在物として極めて多く存在している。その他、 B_1 系介在物である Al_2O_3 の存在、及びPの介在物への偏析が認められた。

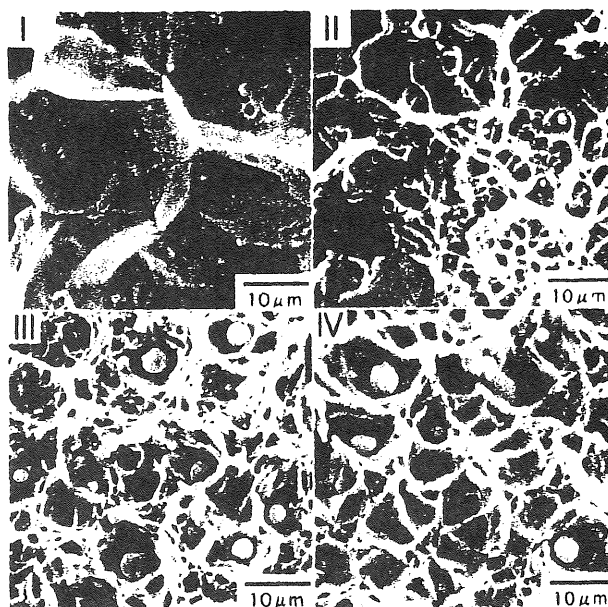


図8 衝撃試験後のSEM破面観察

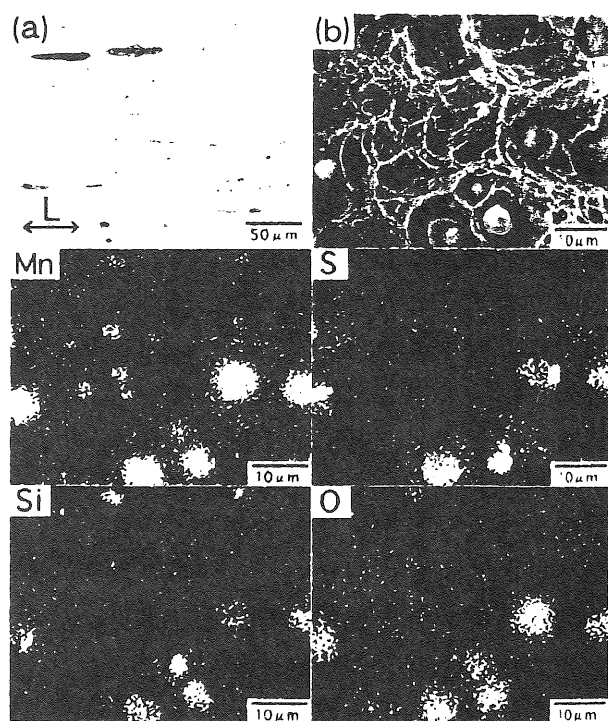


図9 日本刀中の介在物
(a)光学顕微鏡による観察
(b)EPMAによる分析

3. 4 折り返し鍛錬における炭素量 および焼入れ硬さ

折返し回数の増加に伴う、刃鉄素材中の炭素量および刃鉄素材の焼入れ硬さの変化を図10に示す。

図10(a)から、折返し回数の増加に伴い、折返し回数が12回ほどまでは、炭素量は直線的に減少し、13回以上で炭素量の減少量は小さくなる。直線部における炭素量の減少量は、折返し回数毎に、およそ $0.02\text{mass}\%$ である。原料である玉鋼中の炭素量が $1.38\text{mass}\%$ で

あることを考慮すると、積み沸かし直後の含有炭素量0.89mass%までに著しく脱炭していることがわかる。前述のとおり、玉鋼から積み沸かしの間には、玉鋼を小片に加工する作業がある。この作業過程において、薄板状にされた材料の表面積は増加し、材料内部から表面までの距離も短くなるため、脱炭が進行したと考えられる。

図10(b)から、折返し回数の増加に伴い、焼入れ処理した刃鉄素材の硬さは、折返し回数が13回以上で著しく低下した。試料は、造り込みにおける刃鉄になる部分である。刃鉄部は、武器として高靱性、高強度が要求される部分である。一般に炭素量が低いほど高靱性であり、硬さが高いほど高強度である。図10(a)、(b)から、この相矛盾する性質を合わせ持つことができるのは、折返し鍛錬を13~15回で終了した時であることが示された。技術伝承における高炭素素材の折返し回数は12~15回であり、長い伝統の中で培われた経験則の正確さを裏付けることができた。

折返し回数の増加に伴う鍛錬ままの刃鉄素材のシャルピー衝撃値を図11に示す。破断面の状態により、階段状の破断面、鍛錬接合面き裂を伴う破断面、平坦な破断面の3種類に分類した。折返し回数の増加に伴い、衝撃値の分散が小さくなった。折返し回数の増加に伴い、折返し時の素材同士の接合性が向上するためだと考えられる。

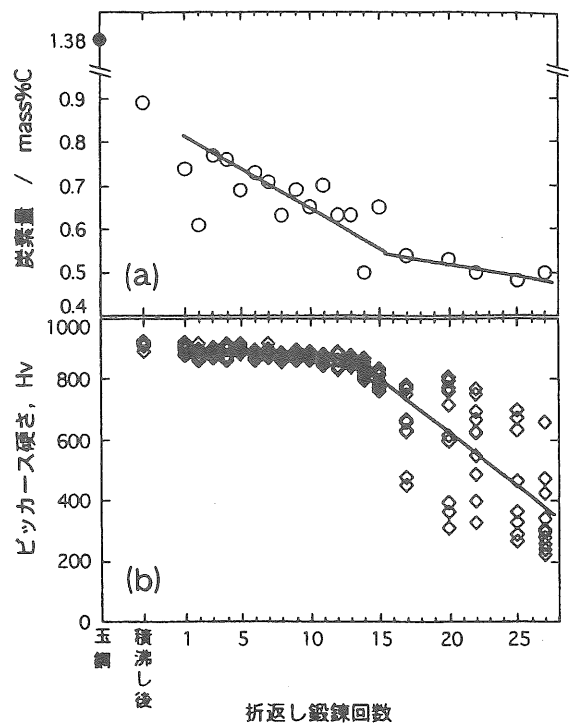


図10 折返し鍛錬された刃鉄素材の炭素量(a)と焼入れ硬さ(b)

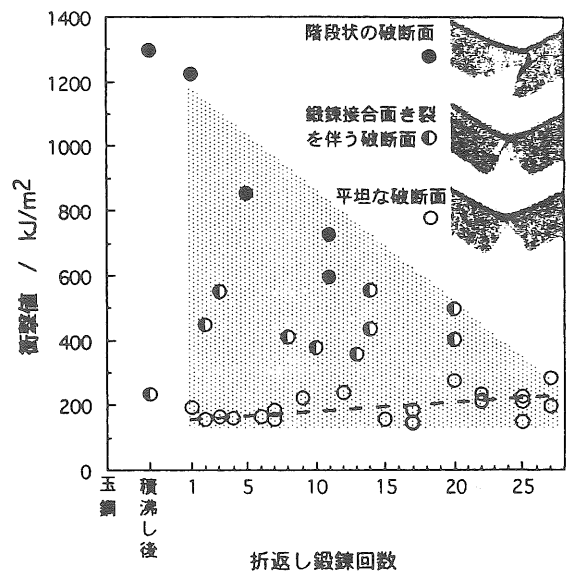


図11 折返し鍛錬された刃鉄素材のシャルピー衝撃値

4 結 言

日本刀の高強度—高靱性バランスを、組織・硬さ・衝撃値の3つの局部特性に分けて直接評価したこと、および、折返し鍛錬回数と材料特性の関係の調査から、以下の結論を得た。

- (1) 造り込みによる炭素量、焼入冷却速度の制御により、日本刀中央断面の組織は、焼入れ部である刃鉄部マルテンサイト組織から、徐冷部である心鉄部、棟鉄部のフェライ

トとパーライトの混合組織に変化する。

- (2) 中央断面に沿った硬さは、焼入部で高く、刃境部で著しく低下し、徐冷部で低く一定となる分布を示し、組織変化とよく対応している。
- (3) 中央断面に沿った衝撃値は、焼入れ部で脆性域、刃境部から徐冷部の一部にわたる広領域にわたって延性脆性遷移域、徐冷部で延性域となり、硬さ分布とほぼ逆の分布となる。
- (4) 衝撃破面観察およびE P M A分析から、焼入れ部では低温焼戻し脆化により粒界破面、延性域ではA系介在物を起点としたデンプル破面を示し、刃境部では劈開破面とデンプル破面の混合破面を示した。
- (5) 刃鉄素材鍛錬の折返し回数の増加に伴って、炭素量は直線的な減少傾向を示し、その炭素量減少の傾きは約13回以上で小さくなること、および、焼入れ硬さが13回以上で著しく低下することから、日本刀の技術伝承における折返し回数が12～15回となっていることの合理性を、材料学的観点から示すことができた。
- (6) 折返し回数と衝撃値の分散との関係から、鍛錬の折返し回数の増加に伴い、折返し時の素材同士の接合性が向上すると考えられる。

おわりに、多くの御教示をいただきました工学博士 三澤俊平 教授ならびに (株) 日本製鋼所 佐々木直彦氏、貴重な資料の提供や有益なご助言をいただきました瑞泉鍛刀所 堀井胤次 刀匠、堀井胤匡 刀匠、また、試料の分析や有益なご助言をいただきました日鋼検査サービス (株) 小澤幸男氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 俵 国一：日本刀の科学的研究、日本刀講座、第九巻 科学篇 (上)、雄山閣、東京 (1936)。
- 2) 俵 国一：日本刀の科学的研究、日立評論社、東京、(1953)。
- 3) 谷村 熙：鉄と鋼、67 (1981)、497。
- 4) Hiromu Taniura：Journal of Metals、32 (1980)、63。
- 5) 鈴木卓夫：たたら製鉄と日本刀の科学、雄山閣、東京、(1993)。
- 6) 日本原子力学会：微小試験片材料評価技術の進歩、「微小試験片材料評価」技術研究専門委員会成果報告書、(1992)、p. 151。
- 7) 三澤俊平：日本金属学会会報、31 (1992)、1008。
- 8) 木村晃彦：まてりあ、36 (1997)、260。
- 9) 三澤俊平・高佐成樹・中野義文・安田功一：鉄と鋼、82 (1996)、707。
- 10) 日本規格協会：金属用衝撃試験機—計装化装置 (JIS B7755)、(1993)。
- 11) 日本規格協会：高分子材料用衝撃試験機—計装化装置 (JIS B7756)、(1993)。