



日本刀の強度-靱性バランスと刃金用玉鋼の折返し鍛錬による炭素量, 焼入れ硬さの変化

佐々木 直彦*・堀井 胤匡*²・藤原 幹男*³・斎藤 英之*³・三澤 俊平*³

Strength-toughness Balance of the Japanese Sword and Changes in Carbon Content and as Quenched Hardness of HAGANE Steel with Cyclic Folding Forging

Naohiko SASAKI, Tanetada HORII, Mikio FUJIWARA, Hideyuki SAITOH and Toshihei MISAWA

Synopsis : Micro-structure, micro-hardness and micro-absorbed impact energy in the Japanese sword have been investigated to clarify excellent mechanical properties of the Japanese sword. The Japanese sword specimen used in the present research has been made by using TSUKURIKOMI process which combines four kinds of steels; HAGANE (edge), SHINGANE (core), MUNEGANE (back) and KAWAGANE (side) steels, with different carbon contents. By this process, HASAKI (edge) side becomes high carbon steel and MUNE (back) side possesses low carbon steel. The cooling velocity in quenching of the Japanese sword is controlled by TSUCHIOKI treatment which coats the clay thinner in the HASAKI side and thicker in the MUNE side. The HASAKI side is quickly cooled and the MUNE side is slowly cooled. The micro-structure in the HASAKI side shows martensite while the MUNE side shows the coexist structure of ferrite and pearlite. The HASAKI side has a lower value while the MUNE side shows a higher value in the micro absorbed impact energies obtained with the 1.0 and 0.7 mm square miniaturized specimens. It has been shown clearly that the TSUKURIKOMI and the TSUCHIOKI processes give the excellent graded balance of strength-toughness to the Japanese sword.

The ORIKAESHI (folding) forging has an effect both on the carbon content and as quenched hardness in HAGANE steel. The most suitable times of ORIKAESHI cycles which adjust to the carbon content of 0.55–0.60 mass% and hardness of 800HV1 have been determined to be thirteen times. These times of ORIKAESHI cycles correspond to the optimum traditional cycles lying between twelve and fifteen times. The present research from the viewpoint of the metallurgy sheds light on the empirical rule in the traditional Japanese sword processing.

Key words: Japanese sword; micro-impact test; Tsukurikomi process; Tsuchioki process; Orikaeshi forging; Tamahagane steel; strength-toughness balance.

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」と言われている。古来より、武器としての刀剣は、鋭い切れ味を保持するための硬さと、容易に折損しないための靱性を兼備することが要求されてきた。この相矛盾する性質は、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および粘土被覆厚さの違いによる焼入れ冷却速度制御からなる3つの工程により実現されてきた。焼入れ冷却速度制御により形成される、焼入れ部のマルテンサイト組織と徐冷部のパーライト組織が、日本刀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させて美術品としての価値を高める。たたら製鉄による玉鋼(たまはがね)の製作および玉鋼から作られる日本刀の金属組織については、俵^{1,2)}、谷村^{3,4)}、鈴木⁵⁾、永田⁶⁾およびKishida et al.⁷⁾により研究されてきた。これらの研究の中で、日本

刀の機械的性質は、硬さ測定により評価されてきたが、衝撃靱性について調べた研究はなされていない。日本刀が有する、刃先(はさき)から棟(むね)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ことは極めて興味深い。

通常、金属材料の衝撃靱性は、標準寸法(10×10×55 mm³)の試験片(JIS Z 2202)を用いたシャルピー衝撃試験法によって評価されている。しかしながら、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、中性子照射材の衝撃靱性を直接評価するために、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^{8,9)}が開発され、超小型衝撃試験片を用いた木村¹⁰⁾による高温動的破壊靱性や三澤ら¹¹⁾によるレーザ溶接鉄鋼材料の延性脆性遷移の評価が報告されている。

そこで、本研究では、日本刀および刃金(はがね)鍛錬素材を用いて以下の2つの調査実験を行った。はじめに、

平成11年9月8日受付 平成11年10月18日受理 (Received on Sep. 8, 1999; Accepted on Oct. 18, 1999)

* 室蘭工業大学学生 (現:(株)日本製鋼所瑞泉鍛刀所) (Student, Muroran Institute of Technology, now ZUISEN Japanese Sword Center, The Japan Steel Works, Ltd.)

* 2 (株)日本製鋼所瑞泉鍛刀所 (ZUISEN Japanese Sword Center, The Japan Steel Works, Ltd.)

* 3 室蘭工業大学 (Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho Muroran 050-8585)

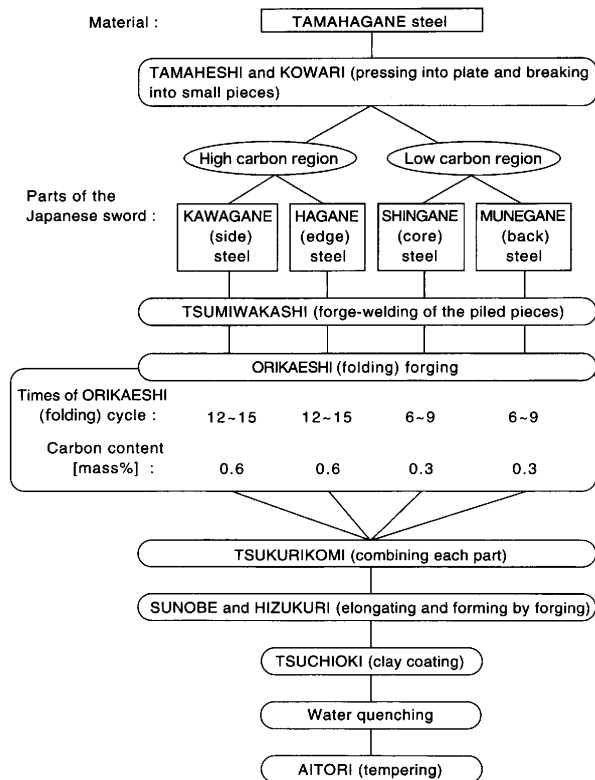


Fig. 1. Flow chart of the Japanese sword processing.

微小衝撃試験機を用いて、刃先から棟までの局部衝撃靱性値を連続的に測定し、日本刀の有する高強度と高靱性の傾斜機能的バランスについて検討した。次に、日本刀刃先素材となる刃金用玉鋼の折返し鍛錬回数による炭素含有量の変化と焼入れ硬さの関係を調べて、日本刀製作における経験的伝承技術である折返し鍛錬終了回数12~15回⁵⁾が有する材料学的意義を明らかにする。

2. 実験方法

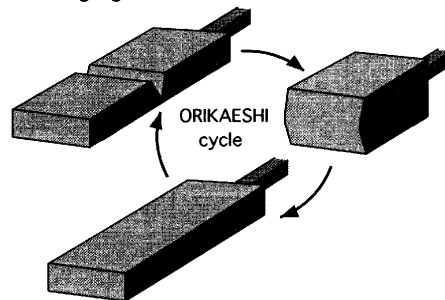
2.1 日本刀試料の微小衝撃試験法

2.1.1 日本刀試料の製作過程

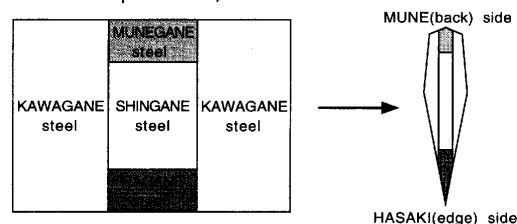
本研究で用いた日本刀試料は、木炭中で原料の玉鋼を加熱して、以下の作業により製作した。Fig. 1に日本刀製作工程のフローチャートを、Fig. 2に日本刀製作の工程を模式的に示す。

玉鋼は、炭素濃度分布が均一でなく、場所によって大きく異なる^{1,4,7)}。本研究では、玉鋼を熱間で約5mm厚さの板状に潰した後、焼入れする「玉へし」を行い、その板を小片状に割る「小割り」を行って、割れるものと割れない物に大別した。容易に割れるものは炭素濃度の高い領域であり、これを刃金および側金(かわがね)の材料とした。容易に割れなかった低炭素の領域は、心金(しながね)および棟金(むねがね)の材料とした。刃金、側金、心金および棟金の4種類の日本刀素材それぞれについて、小片を

(a) ORIKAESHI forging



(b) TSUKURIKOMI process ; SHIHOUJIME method



(c) TSUCHIOKI process

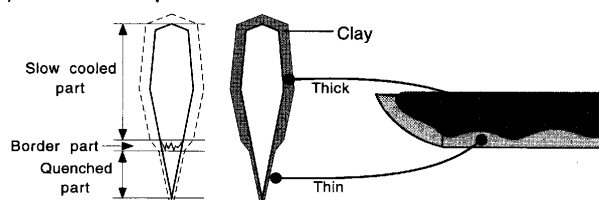


Fig. 2. Illustration of the Japanese sword making processes of ORIKAESHI forging (a), TSUKURIKOMI (b) and TSUCHIOKI (c).

隙間なく積重ねて熱間で小片同士を鍛錬接合させる「積み沸し(つみわかし)」を行った。積み沸し後、Fig. 2(a)に示すように、加熱、鍛接、打延ばし、切込みを入れて折返しという作業を繰り返す「折返し鍛錬」を行った。伝承技術としての鍛錬における折返し回数は、刃金および側金で12~15回、心金および棟金で6~9回であり、本研究で用いた日本刀試料作製においてもこれに従った。折返し鍛錬終了後、Fig. 2(b)に示すように、4種類の日本刀素材を組合わせて鍛接する「造り込み(つくりこみ)」を行った。造り込みには幾つかの方法があり、そのうちの一つである四方締め(しほうじめ)法が用いられた。4種類の日本刀素材が一つの塊となった後、加熱、鍛造を繰り返して、日本刀の形状に打ち延ばした。焼入れに先立ち、この日本刀の表面に粘土を塗布する「土置き(つちおき)」を行った。Fig. 2(c)に示すように、刃先部分には粘土を薄く塗布し、それ以外の棟側の部分には粘土を厚く塗布した。塗布した粘土が乾燥した後、刀身を加熱し、約800°C⁵⁾に達した時、水冷した。この水冷により日本刀独特の反りが生じる。焼入れ後、すぐに低温焼戻し作業である「合い取り(あとり)」を行った。

2.1.2 組織観察と硬さ分布測定

日本刀の長手方向と垂直に厚さ5mmに切出して、試料

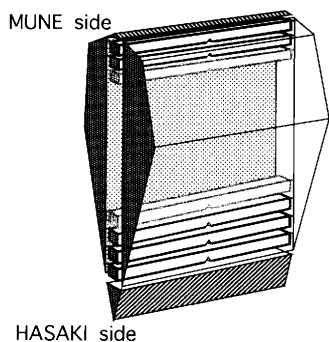


Fig. 3. Cutting of miniaturized impact specimens from a Japanese sword.

とした。試料をエメリー紙研磨およびダイヤモンドペーストを用いた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。その後検鏡面を再度鏡面仕上げし、日本刀断面の刃先-棟方向に沿って、刃先から同じ距離の位置3点のマイクロピッカース硬さを測定した。この時の荷重は1 kgf、負荷時間は15 sとした。

2・1・3 超小型衝撃試験片と微小衝撃試験法

超小型衝撃試験片は、Fig. 3に示すように、日本刀断面の刃-棟方向に沿って切出した。試験片の寸法は断面が $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ および $0.7 \times 0.7 \text{ mm}^2$ の2種類であり、全長は20 mmである。以下、それぞれ1.0 mm角および0.7 mm角試験片と呼ぶ。試験片には、無歪放電加工によって曲率半径 R 0.08 mm、開き角 30° 、深さ20% (1.0および0.7 mm角試験片に対してそれぞれ0.20および0.14 mm)のV型ノッチを施した。Vノッチは刃先側となるように加工した。

試験機は、計装化加速型衝撃試験機^{12,13)}であり、三沢ら¹⁴⁾によって報告された試験機を改良したものである。これまでのロードセル方式に比べて荷重測定感度は著しく向上している。試験片は、Vノッチを下向きにしてホルダーにセットする。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は、1 m/sの衝撃速度で試験片に垂直に落下する。衝撃試験中の荷重は、ブレードシャフトに貼付けたひずみゲージから測定し、ブレードの位置および速度は、ブレードシャフトに取り付けた反射板を介して半導体レーザー変位計によって測定した。試験はすべて室温で行った。衝撃吸収エネルギーは、衝撃荷重-変位曲線下の面積を計測して算出した。

衝撃試験後の破面をSEMで観察して脆性破面率を求め、破面に観察された介在物を光学顕微鏡およびEPMAにより調べた。

2・2 刃金用玉鋼の折返し鍛錬実験

Fig. 1に述べたように、刃金および側金の折返し鍛錬回数は、刀匠によらず12~15回とされている⁵⁾。そこで、折返し鍛錬回数1~15回および15回以上の17, 20, 22, 25, 27回において試料を採取した。炭素含有量は、燃焼赤外吸収

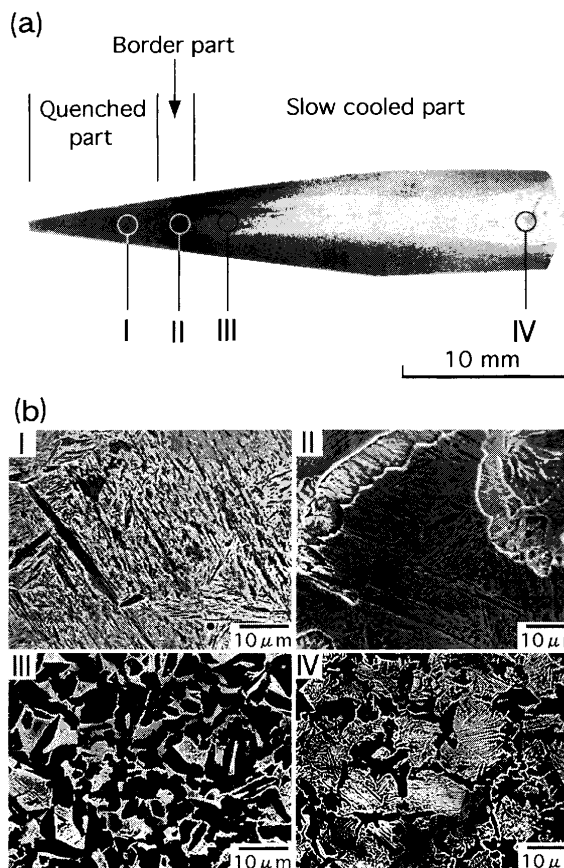


Fig. 4. Macro (a) and micro (b) structures of the respective numbered area in (a) on a cross section of the Japanese sword.

法により求めた。刃金は、焼入れ部分となるため、上記折返し鍛錬ごとに試料を採取して、焼入れ処理(電気炉中 800°C -30 min/水冷)を施した後、荷重1 kgf、負荷時間15 sで研磨面でのマイクロピッカース硬さを測定した。

3. 結果および考察

3・1 日本刀の強度・靱性バランス評価

3・1・1 日本刀断面の組織と硬さ分布

日本刀断面のマクロ組織を、Fig. 4(a)に示す。焼入れ部、徐冷部およびその両者の境界線が入組んだ境界部が明瞭に観察される。このようなマクロ組織の相違は前述した土置きにおける粘土被覆厚さの違いによる焼入れ冷却速度の違いを反映している。

日本刀断面のミクロ組織を、Fig. 4 (b)に示す。焼入れ部(I)は、マルテンサイト組織である。徐冷部(III, IV)は、初析フェライトと微細パーライトの混合組織を示し、心金部(II)の方が、棟金部(IV)より初析フェライト(写真の黒色部)が多い。中間の焼入れ冷却速度となる境界部(II)は、マルテンサイト中に結節状パーライトが析出した混合組織である。

日本刀断面の刃-棟方向の硬さ分布を、Fig. 5に示す。

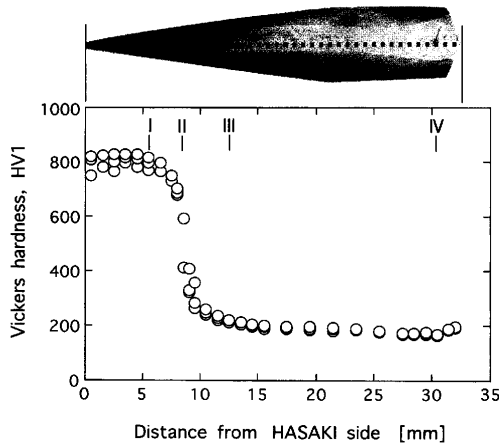


Fig. 5. Distribution of micro-Vickers hardness on a cross section of the Japanese sword. The symbols I~IV in the figure correspond to the position I~IV in Fig. 4.

Fig. 5 中の I~IV は Fig. 4(a) 中の各部位と対応している。硬さは、焼入部(I)で最も高く、およそ 800HV1 であり、境界部(II)で著しく低下し、徐冷部(III, IV)ではほぼ一定の 200HV1 となる。この硬さ分布は、これまでの硬さ測定の結果^{3,5)}と類似している。

3・1・2 日本刀断面の衝撃吸収エネルギー分布

1.0mm 角および 0.7mm 角試験片の衝撃荷重-変位曲線を、Fig. 6 に示す。試験片の採取位置 I~IV は Fig. 4(a) 中の各部位と対応している。1.0mm 角試験片の衝撃荷重-変位曲線に見られるピークの大きさは、焼入部(I)では非常に小さく、徐冷部(III, IV)では大きい。境界部(II)では、両者の中間となっている。より小型化した 0.7mm 角試験片の衝撃荷重-変位曲線に見られるピークの大きさは、1.0mm 角試験片に比べて小さくなるが、同じ採取位置における 0.7 および 1.0mm 角試験片のピークの変化は、類似の傾向を示す。

刃-棟方向に沿って測定した衝撃吸収エネルギー、およびそれをノッチ部原断面積で除した衝撃値を、Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) に示すように衝撃吸収エネルギーは、下部棚となる焼入部脆性域で非常に小さく、境界部から徐冷部の一部にわたる遷移域(刃先から 8mm~15mm の部分)で傾斜靱性を示し、上部棚となる徐冷部延性域でほぼ一定となっている。衝撃吸収エネルギー分布は、Fig. 5 に示した硬さ分布の逆形状に近い。しかし、硬さ分布と衝撃吸収エネルギー分布の大きな違いは、硬さが大きく変化したのは境界部(刃先から 8mm~10mm の部分)であるのに対し、衝撃吸収エネルギーは境界部を含む広領域で変化している点にある。衝撃吸収エネルギーは、寸法の小さな 0.7mm 角の試験片が当然のことながら低いですが、衝撃値は、試験片の寸法に依存せず、0.7mm 角および 1.0mm 角の試験片の両者でほぼ一致する。

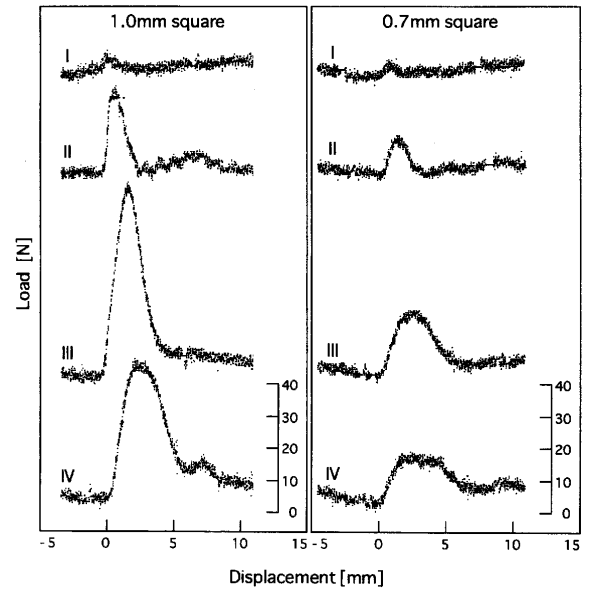


Fig. 6. Load-displacement curves of micro-impact test on the position I~IV shown in Fig. 4.

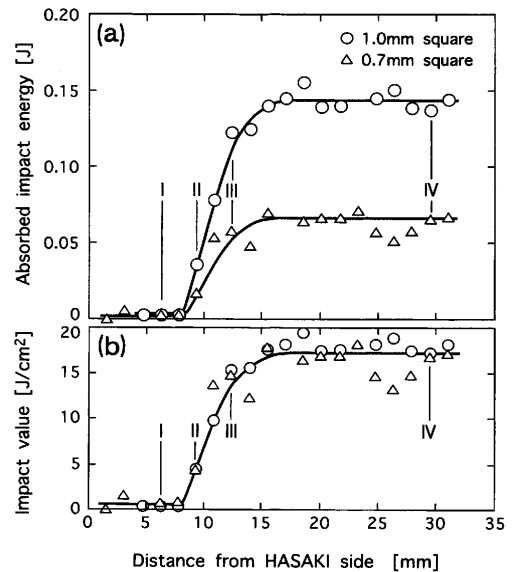


Fig. 7. Absorbed impact energy (a) and impact value (b) on a cross section of the Japanese sword. The symbols I~IV in the figure correspond to the position I~IV in Fig. 4.

3・1・3 破面観察および心鉄部の介在物分析

Fig. 7 に I~IV で示した位置の各破断試料について観察した破面形態を、Fig. 8 に示す。焼入部(I)では、粒界破面が観察され、徐冷部(III, IV)ではディンプル破面が観察された。境界部(II)ではディンプル破面と劈開破面の混合破面が観察された。観察された破面から示される破壊形態は、Fig. 7 の延性脆性遷移曲線から示される破壊様式とよく対応している。合い取りと呼ばれる低温域焼戻しは、送風下の炭火炎の上部である作業である。通常、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し、かつテンパーカラーが発色しないような温度域で行われる。この合

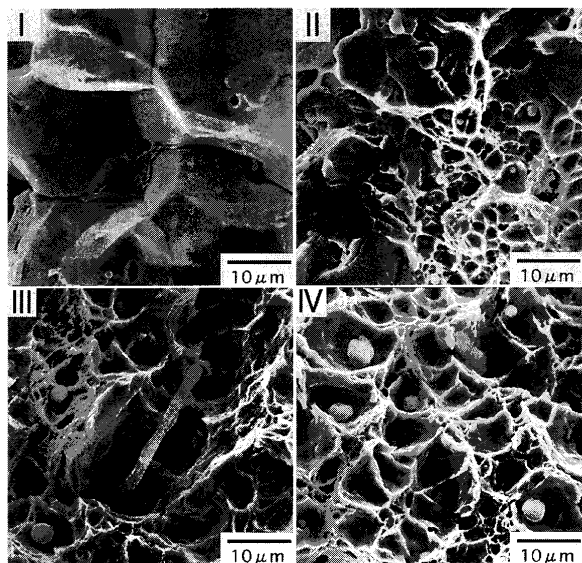


Fig. 8. Fractograph after micro impact test on the position I~IV shown in Fig. 4.

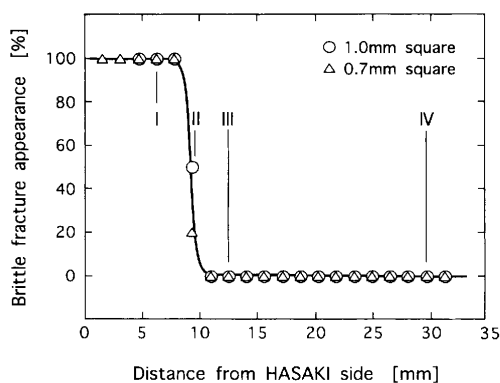


Fig. 9. Change of brittle fracture appearance on a cross section of Japanese sword in micro-impact test.

い取りの温度は低温焼戻し脆性温度より若干低い温度であると考えられる。本実験で行われた合い取りは低温焼戻し脆性温度域に達したため、焼入部(I)において粒界破面が観察されたと推測される。

Fig. 9に日本刀断面(刃-棟方向)の脆性破面率分布を示す。Fig. 9中のI~IVはFig. 8中の各部位と対応している。脆性破面率分布は、硬さ分布とよく対応する。

用いた日本刀試料の心金部における、介在物の光学顕微鏡写真、および破面に現れた介在物のEPMAイメージを、Fig.10に示す。鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法(JIS G 0555)では、介在物の種類をA系(MnS, SiO₂など加工によって粘性変形する介在物)、B系(アルミナなど加工方向に不連続に並んだ粒状介在物)、C系(不規則に分散する介在物)に分類している。Fig.10(a)から、鍛錬方向(L)に粘性変形した介在物が多く観察される。Fig.10(b)より、その介在物の組成がMnSとSiO₂の混合介在物であることから、介在物はすべてA系であり、BおよびC系は観察されなかった。その清浄度は、dA34×400=0.21%であった。

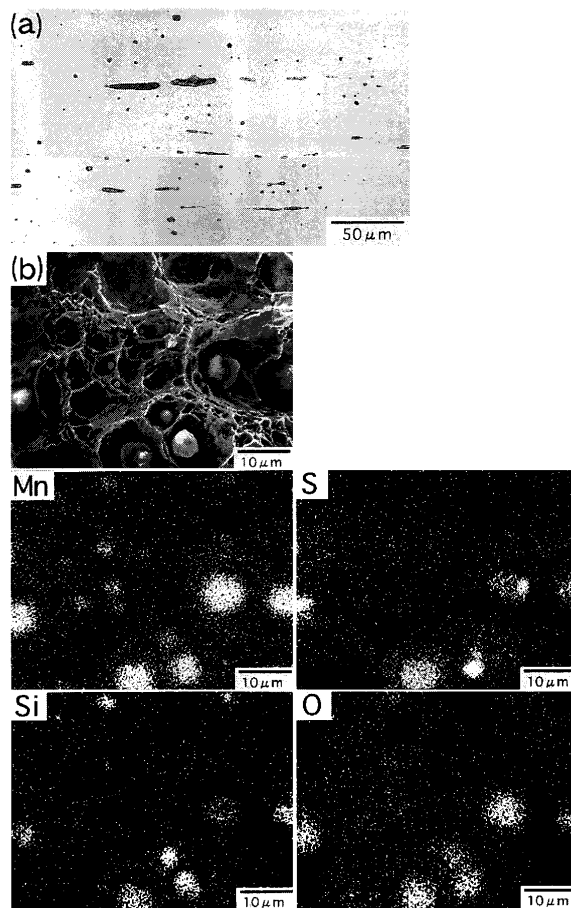


Fig. 10. Optical micrograph (a) and SEM and EPMA micrographs (b) of inclusions in the Japanese sword at area III in Fig. 4.

実用材では、 $dA60\times400\leq 0.10\%$ であるとされており、日本刀は、実用材と比較してかなり介在物が多い。MnSは、直径または長さが数 μm の微細な介在物として多く存在している。このように、日本刀の清浄度は良くはないが、介在物の多くが微細かつ方向性を持って、日本刀中に均一に分散することにより、靱性劣化の防止に寄与していると考えられる。

3・2 刃金用玉鋼の折返し鍛錬回数に伴う炭素量および焼入れ硬さ

炭素含有量の高い部分を用いる刃金用玉鋼の、折返し鍛錬回数に伴う炭素量および焼入れ硬さの変化を、Fig.11に示す。

Fig.11(a)に示すように、炭素含有量は、木炭中加熱による脱炭のため、0.5~0.6 mass% Cとなる折返し鍛錬回数13回までほぼ直線的に減少する。炭素含有量は、およそ0.02 mass%/回で減少するのに反して、Fig.11(b)に示すように、焼入れ硬さは、鍛錬回数に依存せず、800HV₁以上を維持している。折返し鍛錬回数が13回以上では、炭素含有量はゆるやかに減少を続けるが、焼入れ硬さは著しく減少する。刃金部に要求される800HV₁以上の高い硬さを損なわず、かつ、高靱性に必要な低い炭素含有量とするため

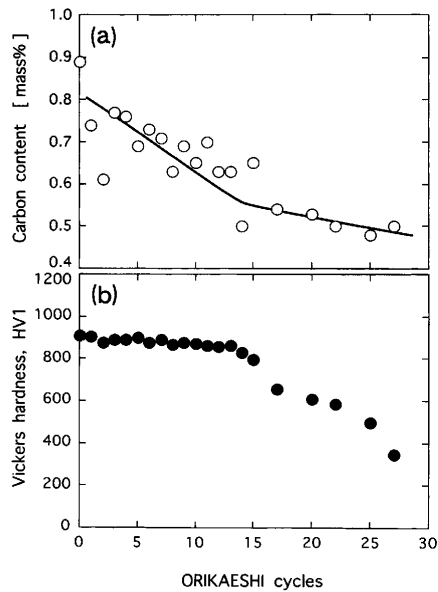


Fig. 11. Effects of the times of ORIKAESHI cycle on the carbon content in HAGANE steel (a) and as quenched Vickers hardness (b).

には、折返し鍛錬回数13回前後が最適である。長い伝統の中で培われてきた日本刀という「もの造り」技術伝承における経験則としての刃鉄素材の折返し鍛錬回数が12~15回となっている。伝統技術が、経験的に最適条件を選んでいたことになる。

4. 結言

日本刀の高強度・高靱性バランスを、刃-棟方向に沿った組織、硬さ、衝撃値の3つの局部特性に分けて直接評価するとともに、折返し鍛錬回数と炭素量および焼入れ硬さの関係を調査して、以下の結論を得た。

(1) 土置きによる焼入冷却速度の制御および造り込みによる炭素量の差により、焼入部である刃金部では800HV1であるマルテンサイト組織、徐冷部である心金部・棟金部では200HV1のフェライト・パーライト組織を示し、境界部では両者の混合組織となる。

(2) 刃-棟方向に沿った衝撃値から、焼入部では脆性域、境界部から徐冷部の一部にわたる広領域では延性脆性

遷移域、徐冷部では延性域となる。硬さ分布が急激に変化する領域は、境界部のみであり、衝撃値が変化する延性脆性遷移域よりも狭い。

(3) 衝撃破面観察から、焼入部では脆性破面、徐冷部では延性破面を示す。脆性破面率の分布は、硬さ分布とよく対応する。

(4) 刃金用玉鋼鍛錬の折返し回数と炭素量および焼入れ硬さの関係から、低炭素・高い焼入れ硬さを有するのは約13回程度である。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。

終わりに、貴重な試料の提供や研究に対する有益なご助言を頂いた(株)日本製鋼所瑞泉鍛刀所 堀井胤次刀匠、試料の分析や研究に対する有益なご助言を頂きました日鋼検査サービス(株)小澤幸男氏ならびに渋谷輝雄氏に対しまして深く感謝致します。なお本研究は、著者の一人(T.M.)の受けた(財)川鉄21世紀財団技術研究助成金および文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)(10555224)によりなされました。記して謝意を表します。

文 献

- 1) 俵 国一：日本刀の科学的研究(一)、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) H.Tanimura: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 497.
- 4) H.Tanimura: *J. Met.*, **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) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998) 715.
- 7) T.Kishida, Y.Satoh, H.Miyake, Y.Murakawa, T.Suzuki, A.Kihara and Y.Kubo: Proc. of 4th Int. Conf. on the Beginning of the Use of Metals and Alloys (BUMA-IV), BUMA-IV Organizing Committee & the Jpn. Inst. Met., Sendai, (1998), 41.
- 8) 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、日本原子力学会、東京、(1992), 151.
- 9) T.Misawa: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **31** (1992), 1008.
- 10) A.Kimura: *Materia Jpn.*, **36** (1997), 260.
- 11) T.Misawa, H.Takasa, Y.Nakano and K.Yasuda: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 707.
- 12) JIS B 7755: 金属用衝撃試験機—計装化装置、日本規格協会、東京、(1993)。
- 13) JIS B 7756: 高分子材料用衝撃試験機—計装化装置、日本規格協会、東京、(1993)。