

日本刀素材の金属学的解析—実用刀を中心に—

星 秀夫*・佐々木 稔*²

Metallurgical Research on Japanese Swords—Focusing on Swords for Practical Use—

Hideo HOSHI and Minoru SASAKI

Abstract : Following research into methods for making practical use of Japanese swords, the following points were noted,

- (1) Upon examination of the forging face, it was found that the microstructure, hardness, and residual stress differed
 - (2) In order to discover more about clad forging, a pre-heat treatment of the full annealing process was necessary
 - (3) Especially in the core steel, non-metallic inclusion was noted in the area of the sharp side of sword
 - (4) Upon examination of sample A, B, and C, all were found to contain pure material, the sample C however had high amount of Ti, Ca and V
 - (5) Ordinary a core hardness of Hv 200 is obtained by adding 0.1% C while quenching, however, an edge hardness of Hv 700~800 can be easily obtained by the addition of 0.5~0.6% carbon
 - (6) Compared to other research materials, sample C had a low residual stress after compressive stress, however, sample C showed signs of past tempering and grinding that may account for the low residual stress. It is assumed not to be an error in measurement
 - (7) Upon examination of the microstructure, the central portion of the sword showed overheating in low carbon steel ferrite
- Follow-up research on old and new sword should include the traditional Japanese sword virtues of strength, cutting ability, and flexibility

Key words: Japanese sword, clad forging, curvature (sori), full annealing, residual stress, non-metallic inclusion

1. 緒言

日本刀の金属学的研究は、俵 国一博士が明治末から大正時代にかけて古刀を科学的に解明した名著「日本刀の科学的研究¹⁾」がある。

最近では高橋恒夫²⁾らによって、室町から江戸時代中期にかけての素材の解析が行われ、材質に関する新しい知見を得ている。また井上達雄³⁾らは、焼入れ過程に生じる“反り (ひずみ)”について相変態を考慮した有限要素法による解析を、藤原晴夫⁴⁾らは、X線残留応力解析の実験から、刃先部の大きな圧縮残留応力は打撃時に衝撃的に切刃部に発生する引張応力を打ち消す作用で、日本刀が折れにくい要因となっているとの報告がある。

今回三振りの日本刀を入手する機会に恵まれたので、従来の解析手法で切断面の金属学的解析、成分分析、残留応力の測定を試みた。その結果を報告する。

2. 供試刀および調査方法

調査した日本刀三振りのうちの二振り (供試刀B, C) は、

岡山県長船町の刀匠青木盛家氏からご提供いただいたものである。

その押形をFig. 1に示す。供試刀の計測および切断箇所とその測定値をFig. 2に、マクロ組織 (供試刀B, C) および残留応力 (供試刀Cのみ) の測定箇所等もFig. 2に示す。ただし供試刀Cの残留応力測定^{†1)} (X線回析法) は切断する前に行った。化学組成の分析には顕微鏡試料の一部^{†2)}を採取して高周波誘導プラズマ発光分光分析法で測定した。

3. 断面のマクロ・ミクロ組織

Fig. 3に供試刀Aのマクロ・ミクロ組織を示し、Fig. 4に供試刀B, C断面のマクロ組織を示す。

供試刀Aは刀身全体の錆がひどく、切先と刃区にわずかに刃鋼が残っている程度で硬さはなかった。心部では低炭素鋼の焼入れ硬さを示している (Fig. 5参照)。鍛法は確認できる状態ではなかった。

Fig. 4に示した供試刀B, Cの断面のマクロ組織は、一振りにつき3箇所 (Fig. 2参照) を切断研磨して硝酸アルコール溶液で腐食した拡大写真 (6倍の大きさ) である。

平成16年5月7日受付 平成16年8月17日受理 (Received on May 7, 2004, Accepted on Aug. 17, 2004)

* 金屑文化研究会 (Metallurgical Culture Association, Taishin-mura, Nishishirakawa-gun Fukushima 969-0307)

* 2 神奈川大学 (Kanagawa University)

†1 残留応力測定には、理学電機 (株) Strainflex装置を使用し、表面をφ5mmの範囲を電解研磨し測定面とした。条件: 30kV×10mA、格子定数2.8664、波長CrKα、回析面(211)、回析角156.08、応力定数K=303.3 MPa/deg

†2 分析試料採取位置及び採取量 サンプルA: 切先から300mmの位置の横断面 (棒樋下の平肉部分)、サンプルB: 切先から370mmの位置の横断面 (鎗筋下の平肉部分)、サンプルC: 切先から570mmの位置の横断面 (鎗筋下の平肉部分)、○各試料から切粉2g採取

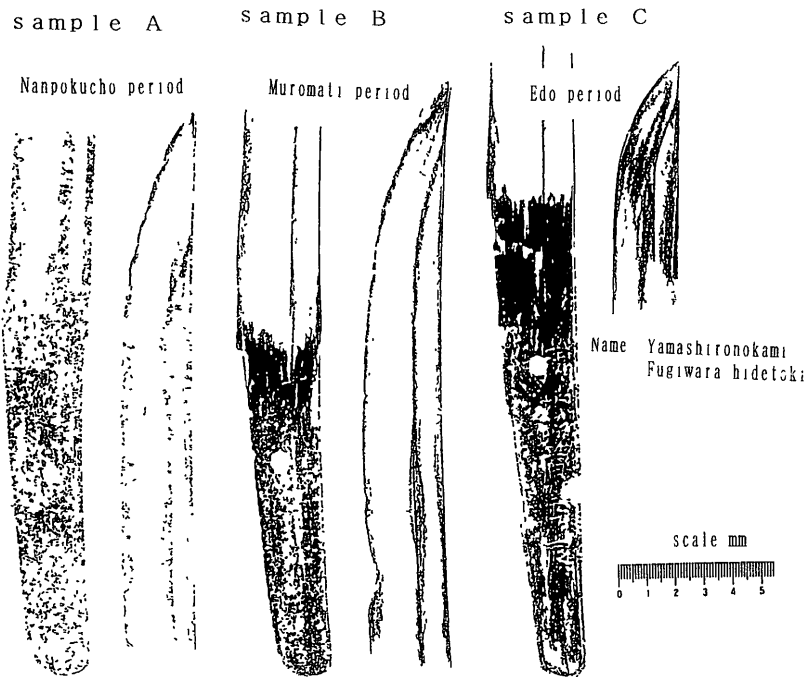


Fig. 1 Oshigata of samples.

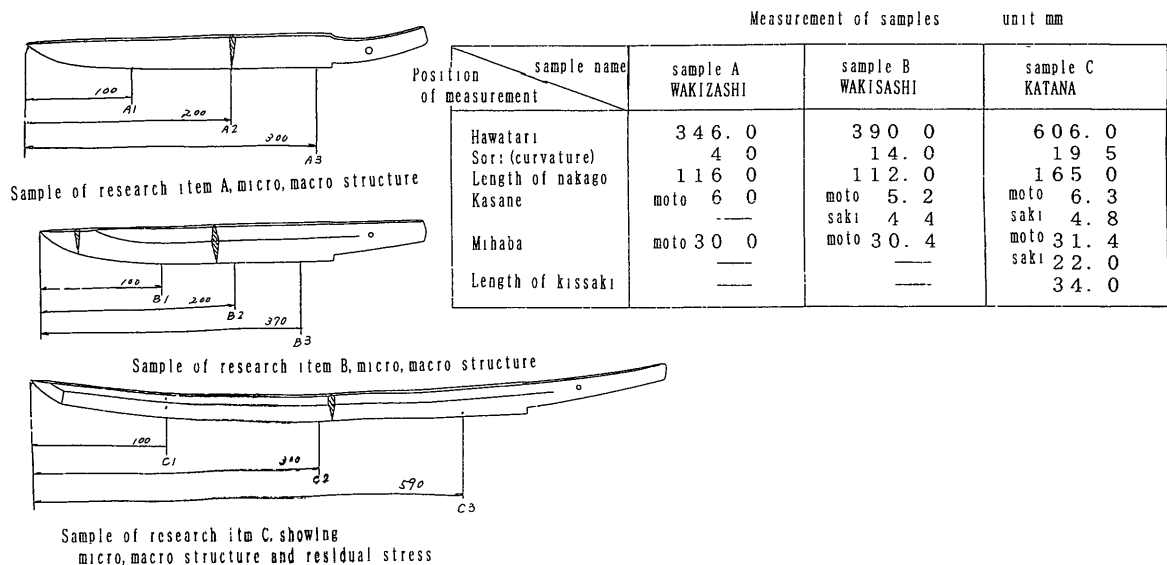


Fig. 2 Measurement of sample and respective cross-section

この写真から供試刀各個所での鍛接合層が明瞭に識別され、どのような鍛法で作刀されたかが判る。

鍛法にもいろいろあるが供試刀B, Cについて考察すれば、供試刀Bはもとは薙刀であったものを刀に直したもので、鍛法としては珍しい逆甲伏せ鍛えであり、供試刀Cは甲伏せ鍛えである。

組織写真で刃先が黒色に腐食されている部分が焼入れ硬化された部分、灰色の部分は不完全焼入れ部である。心部では白色部分と灰色の部分が交互に層状をなしているが、白色の部分は低炭素で、灰色がかった部分は少し炭素量の多い材料が層状を呈している。

一振りの刀を数ヶ所を切断すると、有心構造にも肉厚不同がみられ、鍛練の困難さが理解できる。

ミクロ組織（紙面の制約から割愛する）をみると、供試刀のいずれにも心部材には極めて炭素の低い銅が使われ、なかには結晶粒の粗大化した過熱組織もみられる。

鍛接面には非金属介在物（A系）が棟部から刃先にかけてながれており、分散の度合は折り返し鍛錬比によるものとする。銅滓が結晶を包んで鍛接合時の溶剤として働くという説もあるので、これらを前提にした介在物の調査が今後の課題の一つである。

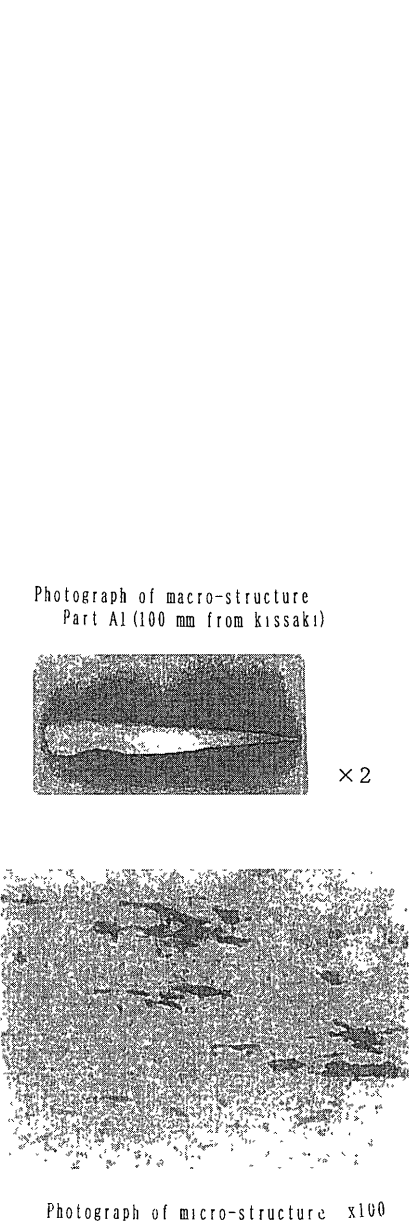


Fig 3. Micro and macro strcture of sample A

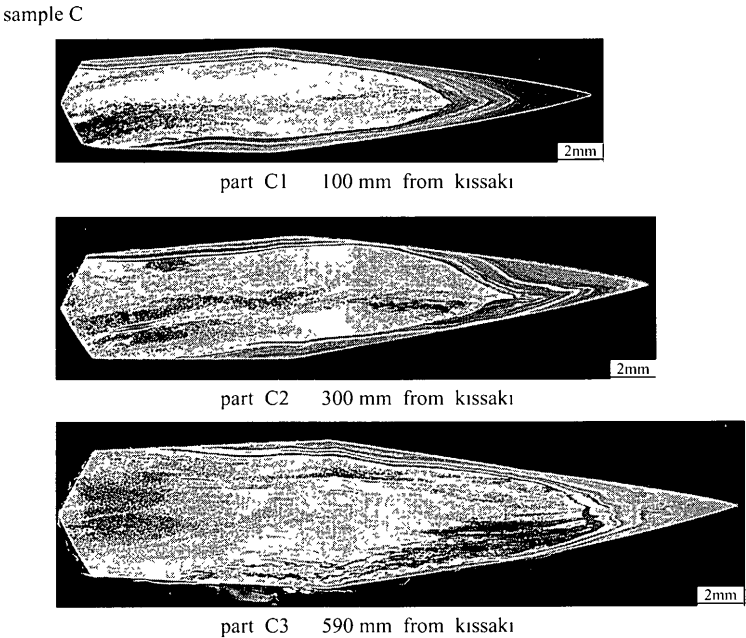


Fig 4 Cross-section macro-etching structure of B and C.

Table 1 Chemical composition of samples.

	Chemical composition (%)												
	T. Fe	Cu	Mn	P	Ni	Co	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	
sample A	97.31	0.008	0.001	0.042	0.010	0.011	0.009	0.011	0.020	0.027	0.006	0.007	
sample B	99.31	0.008	0.001	0.011	0.012	0.018	0.002	0.001	0.017	0.029	0.004	0.006	
sample C	97.44	0.009	0.003	0.040	0.011	0.011	0.020	0.035	0.023	0.020	0.006	0.014	

by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry

4. 化学成分

Table 1は供試刀の一部¹²から採取した試料を高周波誘導プラズマ発光分光分析法で得た値である。他の報告書²⁾にもみられるように、不純物の極めて少ない高純度炭素鋼で

あることが判る。炭素、硫黄以外の不純物の合計量も相対的に少なく、供試刀Aが0.152、Bが0.102、Cが0.191%の値である。なかでも供試刀Cが他の供試刀と比較してTi、Si、Caの含有量が幾分多いのは、始発原料によるものかあるいは製法によるものかは決めがたい。

5. 断面の硬さ分布

Fig 5に切断面の中央を刃先から棟部にかけてのピッカース硬さ（荷重1kg）分布を示す。焼入硬化した刃先の硬さはHv 700～800，硬化深さは約3～7mm，心部硬さはHv 150～200の値をしめす。ただ供試刀Aの表面が錆で朽ち落ちていたので焼入硬さの確認は出来なかった。心部硬さにはその影響はなかった。供試刀Bは切先から250mmくらいのところまでは焼入硬化しているが，370mm近くでは焼入れがされていない。また供試刀Cを切断する前にかるく腐食してみると，切先から物打付近にかけて約270mmのところまで焼入れられ，刃区（はまち）付近で

Table 2 Residual stress of sample C.

Position of measurement Residual stress Mpa	Distance from kissaki in mm		
	100	300	590
Sinogiri center a	-224.0	0	-221.1
Hirasi center b	-303.3	-303.3	-182.0
Hasaki c	-236.5	-291.2	-134.34

Position at which residual stress was measured

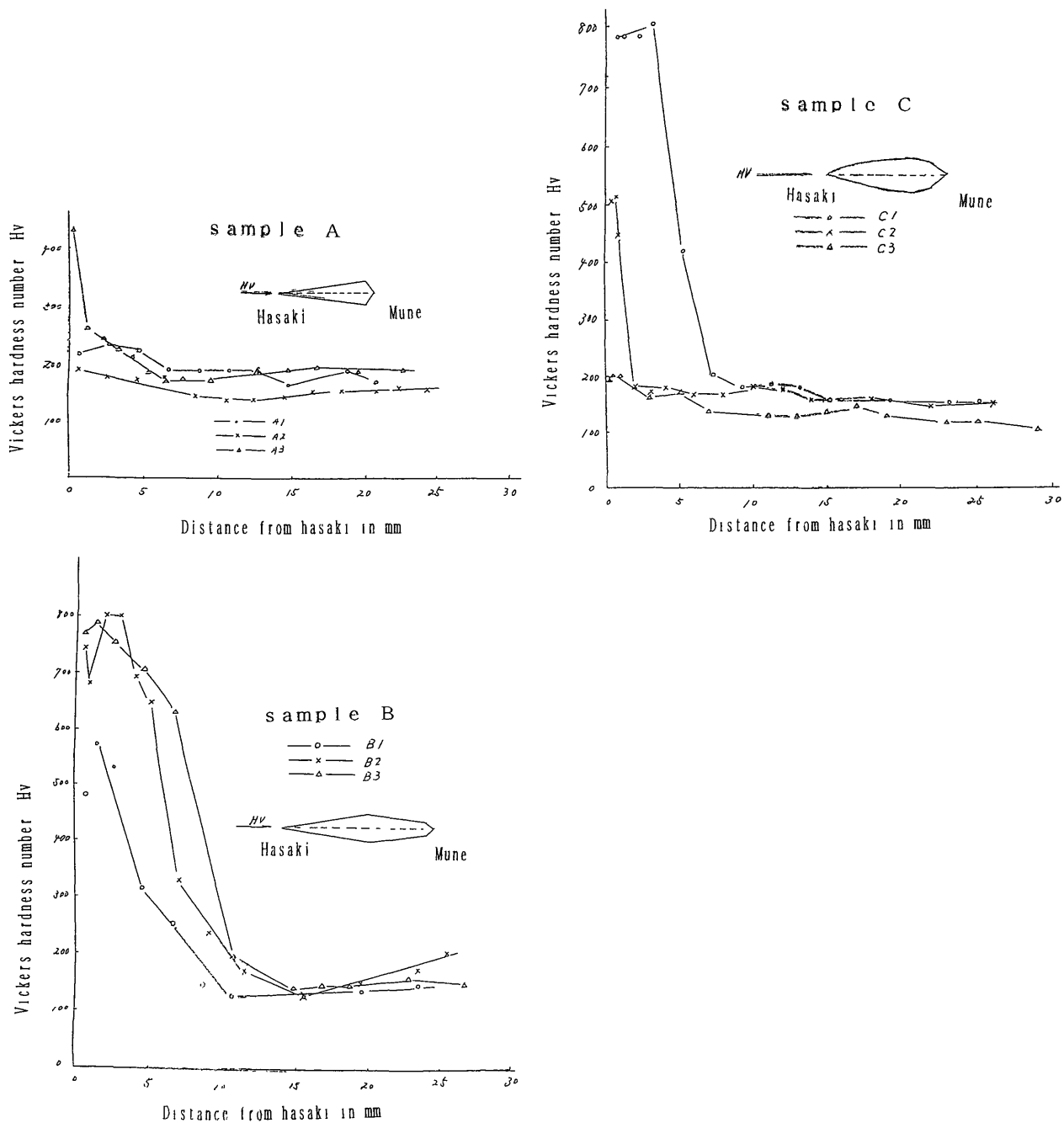


Fig 5 Vickers hardness distribution in cross-section of samples.

は焼入れされてなかった。二振りとも焼落し技法を屈指しているが、実用刀としての意図は定かではない。

6. 残留応力

折れず、曲がらず、よく斬れることが昔から武器としての特徴であると言われてきた。これらの特徴には残留応力が重要な役割をなしていることが最近の研究⁴⁾で明らかになった。鋼がマルテンサイト変態を起こすと、炭素固溶量に依存して体積膨張する。特に炭素含有量の多い刃先部が大きく伸長する。しかしながら地と鎗地では炭素の含有量が少ないので、相変態による大きい体積膨張が生じない。このとき刃先部の伸長は地か鎗地によって拘束されるから刃先部は外側へ湾曲して刀身に反りをつけ、自ら大きな圧縮残留応力をもつようになる。この場合心部の残留応力はゼロか引張応力になる。刀身全表面が圧縮残留応力であることが日本刀の靱性をさらに強化している。供試刀Cの測定で刀身全表面が圧縮残留応力を示すことが確認できた。しかし刃先から300mmの位置で応力がなぜ低かったのかは原因がつかめなかった。焼入れ硬さがHv 750では圧縮

残留応力は約650 Mpa位の値になる。炭素含有量と焼入れ硬さ、炭素含有量と圧縮残留応力にはそれぞれの関連性がある。

7. 総括

供試材である日本刀の三振りを切断し多くの項目について調査した結果、炭素以外の諸元素が極めて少ない高純度の炭素鋼であることが鍛接性を良くし耐食性を高め、また刀身全表面に圧縮残留応力をもたせることが日本刀の靱性をさらに強化すること等が確認できたことである。

おわりに、試料をご提供いただいた青木盛家氏、また解析についてご教示を賜った藤木 栄氏、赤沼英男氏に謝意を表する。

文 献

- 1) 俵 国一：日本刀の科学的研究，日立評論社，東京，(1953)
- 2) T Takahashi *et al* *Tetsu-to-Hagane*, **71** (1985), No 15
- 3) T Inoue *J Soc Mater Sci, Jpn*, **42** (1993), No 483
- 4) 藤原晴夫他：徳島大学工学部研究報告，No 38, (1993), 1