

# 伝統的鍛錬工程における日本刀材料の炭素量変化

佐々木 直彦\*・桃野 正\*<sup>2</sup>

Changes in Carbon Content of Materials of the Japanese Sword under Traditional Forging Process

Naohiko SASAKI and Tadashi MOMONO

**Synopsis** : The Japanese sword has excellent strength-toughness balance given by two traditional processes. One process is compounding of inner tough iron and outer strong steel. And the other process is cooling-rate control quenching by using thickness of clay-coating before quenching. However, it is a precondition for acquiring high strength-toughness that carbon content of sword parts are regulated in proper quantities. Carbon content of sword parts is very important and controlled under forging process which contains TSUMI-WAKASHI (forge-welding piled steel chips) work and fold-forging.

Therefore, changes in carbon content of TAMA-HAGANE steels and carbon steels under traditional forging process were investigated in this study. Changes in carbon content depended on enclosing decarburized or carburized surface in steel as forge-weld interface. Total changes in carbon content were proportional to total layers of included surface in steel. Changes in carbon content per one forge-welded layer. “ $d$  (mass%/layer)” was ruled by carbon content of raw materials “ $C_0$  (mass%)”. When  $C_0$  is over 0.2 mass%, carbon content of forged steel is decreasing and the more  $C_0$ , the more  $|d|$ .  $C_0$  is under 0.2 mass%, carbon content is increasing. The mass of forged steels is 4% increasing per one fold-forging cycle, but  $d$  is not affected by changes in mass of them.

**Key words**: Japanese sword; TAMAHAGANE steel; fold-forging; forge-welding; carbon content; carbon concentration; decarburization; carburization; diffusion.

## 1. 緒言

日本刀の優れた高強度・高靱性バランスは、低炭素鋼を高炭素鋼で包み込む「複合材料化」、および粘土被覆厚さの違いを利用する「冷却速度制御焼入れ」という二つの強靱化プロセスによるものである。ただし、これら二つの伝承工程により、日本刀が強靱性を獲得するための前提条件は、鍛錬工程において、日本刀部材が適正な炭素量に調整されていることである。

前報<sup>1)</sup>で、日本刀刃金部材が、伝承されてきた折返し鍛錬回数 12~15 回を経て、靱性と焼入れ硬さが保証される約 0.55~0.60 mass% C に調整されることを報告した。しかし、鍛錬工程における日本刀材料中炭素成分の、詳細な変化およびその機構は、いまだ明らかにされていない。これまで経験則に頼っていた鍛錬材中炭素量を、理論的に予測・制御する方法が確立されれば、日本刀製作に多いに役立つ、また学術的にも興味深い結果を示すものと期待される。

そこで本研究では、玉鋼および玉鋼成分を模して作成した炭素鋼を用いて、日本刀鍛錬工程での化学成分変化と、表面および鍛接面の炭素濃度に関する基礎調査を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 玉鋼鍛錬材の化学成分変化調査

Fig. 1 に、日本刀鍛錬工程図を示す。

Fig. 2 に、本研究で用いた玉鋼とヘシ金を示す。日本刀の原料である玉鋼は、たたら製鉄<sup>2-5)</sup>により造られる海綿状の鋼塊（ケラと言う）を小さく砕いたものであり、使用した玉鋼は、島根県仁多郡横田町の「日刀保たたら」において生産されたものである。玉鋼は、品質によりいくつかの等級に分別され<sup>2,3)</sup>、そのうち、一級品 B、二級品 A および二級品 B を使用した。

玉鋼を熱間で約 5 mm 厚さの板状に潰した後、焼入れする「玉ヘシ」、その板をハンマーで、小片（ヘシ金と言う）に割る「小割り」を行うと、一級品 B と二級品 A は、全て小割りできた（以降、それぞれ 1B, 2A と呼ぶ）。一方、二級品 B は、割れるもの、割れにくいもの、割れないもの（それぞれ、2BH, 2BM, 2BL と呼ぶ）の 3 種類に分類した。

5 種類のヘシ金をそれぞれ約 2.3 kg 用意し、テコ台に積み重ね、その表面にワラ灰と粘土汁を塗布して加熱（沸かし加熱と言う）した。頃合いを見計らって材料を取り出して、ヘシ金同士を鍛接し一塊にまとめる「積み沸かし」を行った。2.3 kg のヘシ金を 2 回に分けて積み沸かし、積み

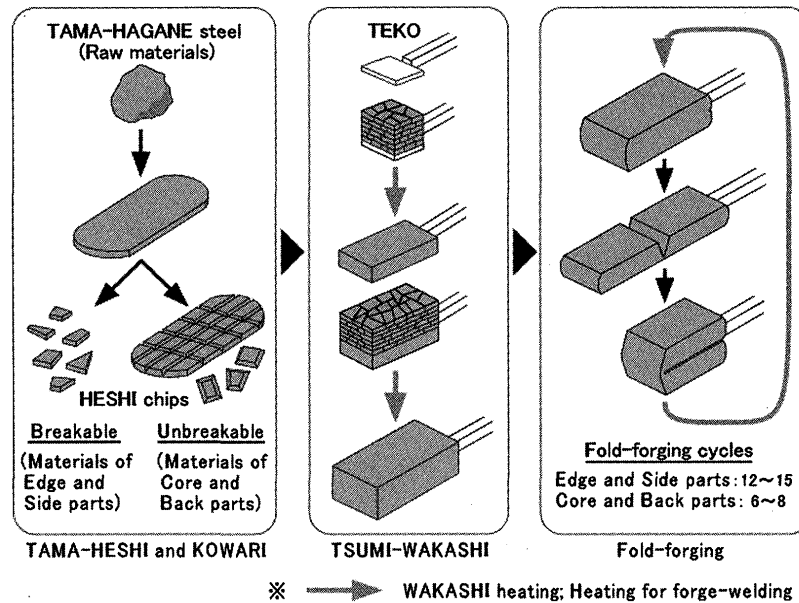


Fig. 1. Illustrations of the Japanese sword forging process.

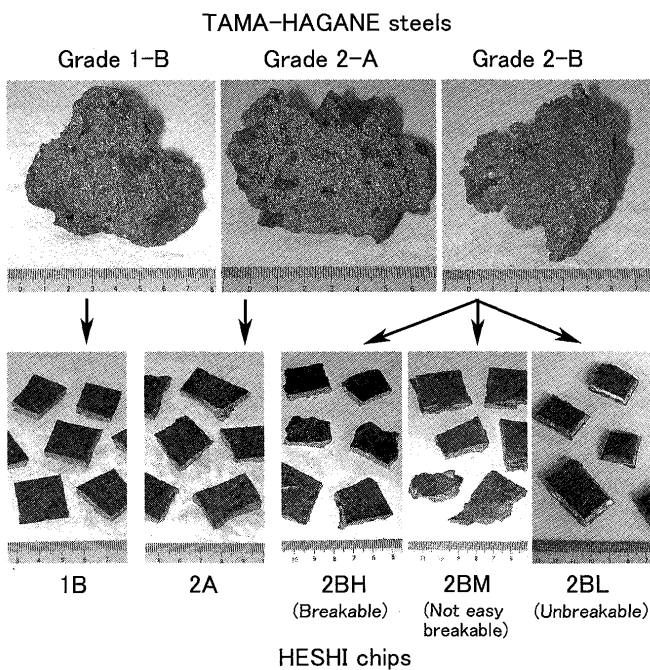


Fig. 2. TAMA-HAGANE steels and HESHI chips used in this study.

Table 1. Chemical compositions of TAMA-HAGANE imitation carbon steels used in this study. (mass%)

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
1.0%C	0.99	0.03	0.01	<0.003	0.0005	0.01	0.01	0.01
0.9%C	0.91	0.03	0.01	<0.003	0.0005	0.01	0.01	0.01
0.8%C	0.79	0.03	0.01	<0.003	0.0005	0.01	0.01	0.01
0.6%C	0.58	0.03	0.01	<0.003	0.0006	0.01	0.01	0.01
0.3%C	0.29	0.02	0.01	<0.003	0.0007	0.01	0.01	0.01
0.0%C	0.003	0.01	0.01	<0.003	0.0005	0.01	0.01	0.01

湿式成分分析により Si 量, P 量および Ti 量を分析した。玉鋼および鍛錬材の成分量は, 切粉採取位置により, 大きくばらつくことが知られている<sup>6)</sup>。切粉採取方法として, 鍛錬材側面でのフライス切削を用いた理由は, 特に成分濃度のばらつきが大きい鍛錬材厚さ方向(鍛接面に垂直な方向)に, 長く切削された切粉が得られるので, 成分分析値のばらつきを小さく抑えることができると期待されたためである。

またフライス加工面を, 耐水研磨紙 #400 まで研磨し, 10% 硝酸水で腐食後, マクロ組織観察を行った。

### 2.2 折返し鍛錬による炭素鋼鍛錬材の炭素量変化調査

玉鋼は, 原料の炭素成分が一定ではないため, 実験材に適さない。そこで, ほぼ完全な Fe-C 二元系合金である玉鋼成分を模した炭素鋼を作成し, 玉鋼の代替材として, 実験を行った。

Table 1 に, 本研究で用いた 6 種類の炭素鋼の化学成分を示す。以降, 6 種類の鋼をその炭素量により, それぞれ 0.0%C 鋼, 0.3%C 鋼, 0.6%C 鋼, 0.8%C 鋼, 0.9%C 鋼および 1.0%C 鋼と呼ぶ。このうち, 本調査では, 0.9%C 鋼を除く, 5 種類の炭素鋼を用いた。それぞれ約 2.3 kg に切り出した後, 積み沸かしをせず, テコ棒に溶解し, 折返し鍛錬回数が 0, 3, 6, 9, 12, 15 回後の鍛錬材側面からフライス

上げたヘシ金の合計層数は, 1B, 2A, 2BH, 2BM および 2BL において, それぞれ, 18, 18, 18, 17 および 16 層であった。

ヘシ金同士が完全に一体化すると, タガネで切り込みを入れて折り返し, 沸かし加熱, 鍛錬接合, 打ち延ばし, また切り込みを入れて折り返す, 繰り返す作業「折返し鍛錬」を行った。折返し鍛錬回数が 0, 3, 6, 9, 12, 15 回後の鍛錬材側面を, 表面から深さ 1 mm 以上フライス切削してからフライス切粉を採取し, 炭素成分と, 玉鋼に含まれる微量元素のうち機械的性質に影響を与える 4 元素について, 成分分析した。燃焼赤外吸収分析により C 量および S 量を,

切粉を採取し、炭素量を測定した。

### 2.3 積み沸かしによる炭素鋼の炭素量変化調査

本調査では、0.9% C 鋼と1.0% C 鋼を用いた。0.9% C 鋼については、2.3 kg 鋼塊を二つ用意し、それぞれ、6 枚と12 枚の板に熱間加工した後、重ね合わせて積み沸かしを行った。1.0% C 鋼は、2.3 kg 鋼塊を玉ヘシ小割りして、18 層ヘシ金を積み沸かした。0.9% C (6層), 0.9% C (12層) および1.0% C (18層) において、折返し鍛錬回数が0, 3, 6, 9, 12, 15 回後の鍛錬材側面からフライス切粉を採取し、炭素量を測定した。

### 2.4 0.9% C 鋼鍛錬材を用いた表面および鍛接面の調査

0.9% C 鋼 1.4 kg をテコ棒に溶接し、1 回目の折返し面を鍛接後、2 回目の折返しまで済ませた。ノッチを入れて折返す直前では、鍛錬材寸法が 25 mm 厚さ×50 mm 幅×約 140 mm 長さとなるように加工した。その表面部および鍛接面部を、10 mm 角の立方体状に切り出し、打ち延ばし方向に垂直な面を鏡面として、樹脂に埋めた。樹脂埋め込みされた試験片を鏡面仕上げし、2 mass% ナイタル腐食液にてマイクロ組織観察を行った。

腐食された鏡面を耐水研磨紙 #400 で充分除去してから、鏡面仕上げし、EPMA を用いて炭素定量線分析を行った。鍛錬材表面または鍛接面に垂直な方向で、それぞれ3 ラインずつ測定し、最も平均的なものを代表とした。測定条件は、加速電圧 10 kV、照射電流  $5 \times 10^{-7}$  A、ビーム径 50  $\mu\text{m}$  および測定ピッチ 25  $\mu\text{m}$  であった。

EPMA 後、炭素定量線分析と同じ方向に、荷重 0.3 kgf、負荷時間 15 s で、マイクロビッカース硬さ測定を行った。硬さのばらつきが大きいため、5 ライン測定し、同じ距離の測定値を平均した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 日本刀鍛錬材の炭素量変化

#### 3.1.1 玉鋼鍛錬材の成分変化

Table 2 に、積み沸かし後、折返し鍛錬における玉鋼の化学成分を示す。成分別に検討すると、Si, P および S 量は、ヘシ金の種類や鍛錬回数に関係なく、それぞれおおよそ 0.28 mass%, 0.040 mass% および 0.0030 mass% と、一定値を示す。Ti 量は、ヘシ金の種類によって多少値が異なるが、折返し鍛錬回数に依らず 0.01 mass% 前後で一定と見なすことができる。つまり、本実験で分析した5 元素の中で、折返し鍛錬において変化している成分は C のみである。

Fig. 3 に、積み沸かし後、折返し鍛錬における玉鋼の炭素量変化を示す。変化が認められない 2BL を除く4 種類の玉鋼鍛錬材において、炭素含有量は、折返し鍛錬回数の増加に伴い、折返し 15 回まで直線的に減少する。0 回折返し鍛錬時の炭素量が多いものほど、1 回折返し鍛錬当たりの炭素量変化も大となり、1B, 2A, 2BH, 2BM, 2BL の値は

Table 2. Chemical compositions of TAMA-HAGANE steels under fold-forging after TSUMI-WAKASHI work. (mass%)

TAMA-HAGANE steels	Fold-forging cycles	C	Si	P	S	Ti
1B (18 layered)	0	0.86	0.27	0.042	0.0029	0.003
	3	0.82	0.27	0.040	0.0027	0.003
	6	0.74	0.28	0.040	0.0025	0.003
	9	0.64	0.29	0.039	0.0025	0.003
	12	0.58	0.28	0.042	0.0025	0.004
	15	0.54	0.28	0.040	0.0023	0.004
2A (18 layered)	0	0.72	0.28	0.039	0.0040	0.009
	3	0.69	0.27	0.036	0.0032	0.010
	6	0.66	0.28	0.035	0.0031	0.010
	10	0.61	0.25	0.033	0.0032	0.009
	12	0.59	0.28	0.033	0.0030	0.009
	15	0.56	0.28	0.034	0.0030	0.010
2BH (18 layered)	0	0.59	0.27	0.040	0.0031	0.010
	3	0.57	0.26	0.039	0.0027	0.014
	6	0.56	0.26	0.042	0.0027	0.016
	9	0.53	0.27	0.042	0.0025	0.014
	12	0.51	0.27	0.042	0.0021	0.014
	15	0.49	0.28	0.040	0.0027	0.014
2BM (17 layered)	0	0.47	0.28	0.043	0.0022	0.015
	3	0.47	0.28	0.043	0.0025	0.016
	6	0.45	0.28	0.041	0.0025	0.016
	9	0.43	0.26	0.039	0.0027	0.015
	12	0.42	0.28	0.042	0.0025	0.015
	15	0.41	0.28	0.042	0.0025	0.014
2BL (16 layered)	0	0.22	0.25	0.043	0.0033	0.010
	3	0.19	0.26	0.042	0.0040	0.006
	6	0.20	0.28	0.042	0.0040	0.010
	9	0.19	0.28	0.043	0.0032	0.009
	12	0.20	0.29	0.041	0.0033	0.008
	15	0.20	0.28	0.041	0.0031	0.010

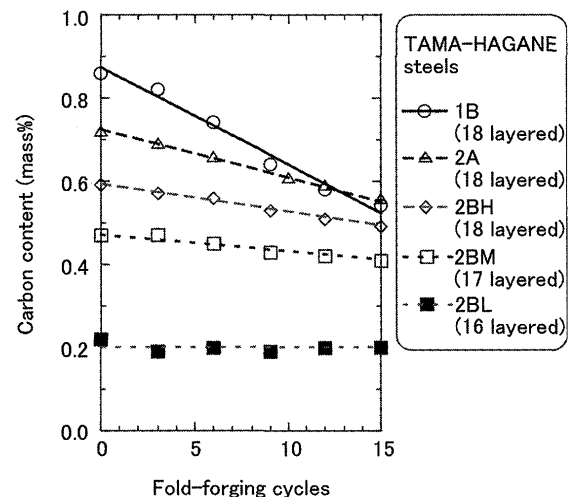


Fig. 3. Changes in carbon content of TAMA-HAGANE steels under fold-forging after TSUMI-WAKASHI work.

それぞれ、 $-0.023$ ,  $-0.011$ ,  $-0.007$ ,  $-0.004$ ,  $0.000$  mass%/回となる。また、日本刀の刃金および側金部材として一般的に用いられる 1B および 2A の炭素量は、折返し鍛錬回数 12~15 回において、共に靱性と焼入れ硬さが保証される 0.6 mass% 前後に低下している。

Fig. 4 に、折返し鍛錬における 1B および 2BL の側面マイクロ組織を示す。エッチングにより、黒色に観察される部

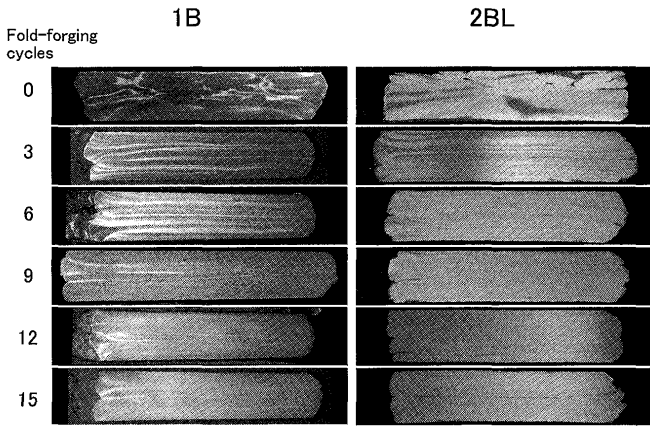


Fig. 4. Macro structures on a side section of 1B and 2BL under fold-forging.

分は炭素濃度の高い領域であり、白色部分は低炭素領域である。折返し鍛錬回数が0回である積み沸かし直後のものを比較すると、黒い面積が大部分を占める1Bは、ほぼ全面が白い2BLより、遙かに炭素量が多いことが見て取れ、分析結果をよく反映している。1Bを観察すると、ヘシ金の周囲に沿って白い線状領域が存在し、鍛接領域では炭素が減少していると考えられる。1B, 2BLともに折返し鍛錬回数の増加に伴い、炭素濃度は平均化していくように観察される。村川ら<sup>6)</sup>は、折返し鍛錬回数の増加に伴い、炭素量のばらつきが小さくなっていくことを報告しており、本実験のマクロ組織変化は、そのことを端的に示している。

3・1・2 折返し鍛錬における炭素量変化

Fig. 5に、積み沸かしをしていない炭素鋼の、折返し鍛錬における炭素量変化を示す。0.0% C鋼を除く鋼の炭素量は、玉鋼鍛錬材の時と同様に、折返し鍛錬回数の増加に伴い、定量的に減少する。また炭素量が多いものほど、炭素減少の傾きも大きく、1.0% C, 0.8% C, 0.6% C, 0.3% C鋼における、1回折返し鍛錬当たりの炭素量変化は、それぞれ-0.014, -0.009, -0.005, -0.002 mass%/回である。一方、0.0% C鋼では、折返し鍛錬回数の増加に伴い、炭素量は0.005 mass%/回ずつ増加する。

3・1・3 積み沸かしにおける炭素量変化

Fig. 6に、積み沸かし直後における試料の側面マクロ組織を示す。鍛接された領域が白い筋として観察され、炭素が減少していると考えられる。

Fig. 7に、積み沸かし後、折返し鍛錬における炭素鋼の炭素量変化を示す。3試料とも折返し鍛錬回数の増加に伴い、炭素量は直線的に減少する。1回折返し鍛錬当たりの炭素量変化は、原料炭素量と同じである0.9% C (6層)と0.9% C (12層)においては-0.011 mass%/回と等しく、1.0% C (18層)では-0.014 mass%/回であり、前述の1.0% C鋼と同値を示す。これらのことから、1回折返し鍛錬当たりの炭素量変化は、原料炭素量により決定されると認められる。また、積み沸かししたヘシ金の合計層数が

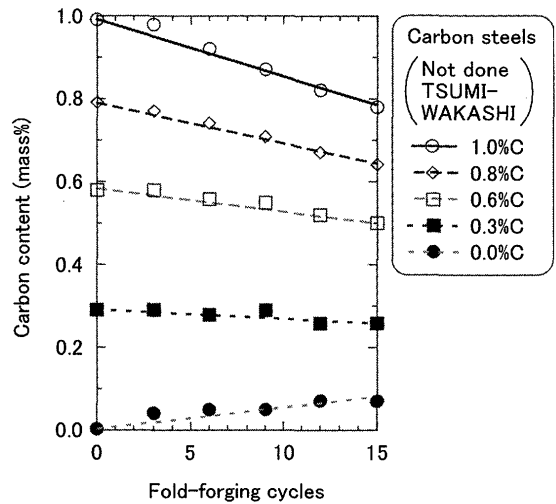


Fig. 5. Changes in carbon content of carbon steels under fold-forging.

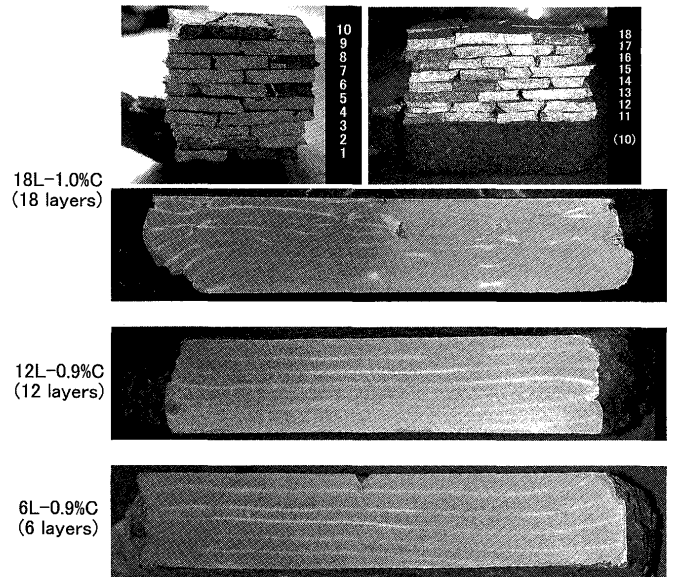


Fig. 6. Macro structures on a side section of samples just after TSUMI-WAKASHI work.

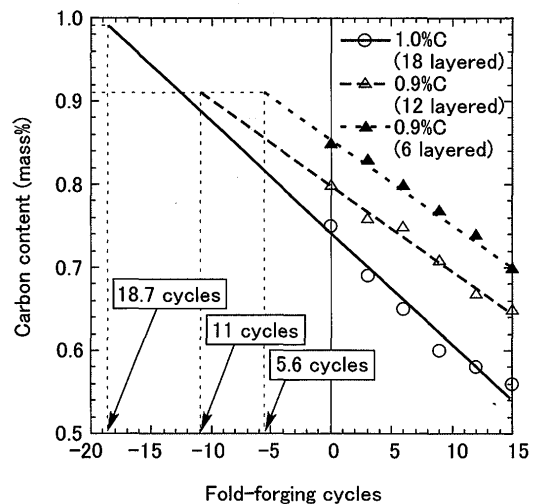


Fig. 7. Changes in carbon content of carbon steels under fold-forging after TSUMI-WAKASHI work.

多いものほど、積み沸かしでの炭素減少量も大きくなることが示される。積み沸かしにおける炭素減少量が、折返し鍛錬回数に換算すると何回分に相当するかグラフから読み取ると、0.9% C (6層), 0.9% C (12層), 1.0% C (18層) において、それぞれ 5.6回, 11.回, 18.7回折返し鍛錬相当と求められる。積み沸かしにおける炭素減少量は、積み沸かしたヘシ金の合計層数と同数回分、折返し鍛錬したときの合計炭素減少量に等しくなっている。これは、Fig. 6 において観察される鍛接面の層数と関係があると考えられる。

### 3・2 表面および鍛接面の炭素濃度分布

Fig. 8 に、1回折返し鍛錬された 0.9% C 鋼の断面マクロ組織 (I) と、その表面部および鍛接面部における、ミクロ組織 (II), 炭素濃度分布 (III) および硬さ分布 (IV) を示す。

Fig. 8(III) に示す炭素濃度分布から、表面部および鍛接面部は脱炭していることが認められる。鍛接面部炭素濃度分布図は、表面部炭素濃度分布図が、鍛接面を中心として左右対称に位置しているような形状をしている。表面および鍛接面における炭素濃度は約 0.5 mass% であり、表面および鍛接面からの濃度遷移領域である脱炭層深さは、おおよそ 0.7 mm と読み取れる。硬さ分布 (Fig. 8(IV) 参照) から、脱炭層深さが、確かに約 0.7 mm であることが示される。

この新しい鍛接面 1 層が、材料炭素量をどの程度減少させているかを  $d$  (mass%/層) とすると、 $d$  は、脱炭領域の炭素濃度分布と母相炭素濃度とで囲まれる三角形の面積を、鍛錬材厚さで除したものと表される。脱炭層深さ 0.7 mm、鍛接面炭素濃度 0.5 mass%、母相炭素濃度 0.9 mass%、鍛錬材厚さは 25 mm であるので、実際に鍛接面 1 層あたりの炭素量変化  $d$  を計算すると、

$$d = -(0.7 \times (0.9 - 0.5)) / 25 = -0.011 \text{ (mass%/層)}$$

となり、15回折返し鍛錬から求めた 0.9% C 鋼の 1回折返し鍛錬あたりの炭素量変化と一致することが確認される。

以上のことから、鍛錬工程での炭素量変化は、脱炭あるいは浸炭した表面が、鍛接面として材料中に取り込まれるために生じ、合計炭素変化量は、新たに取り込まれた鍛接面の累計層数に比例すると言える。数式を用いて整理すると以下ようになる。いま、原料炭素量  $C_0$  (mass%) のヘシ金を、合計  $p$  (層) 積み沸かした後、 $f$  (回) 折返し鍛錬したところ、材料の炭素量は  $C$  (mass%) になったとする。鍛接面 1 層あたりの炭素量変化が  $d$  (mass%/層) であるとき、鍛接面の累計層数  $n$  を用いて、これらの関係は次式で表される。

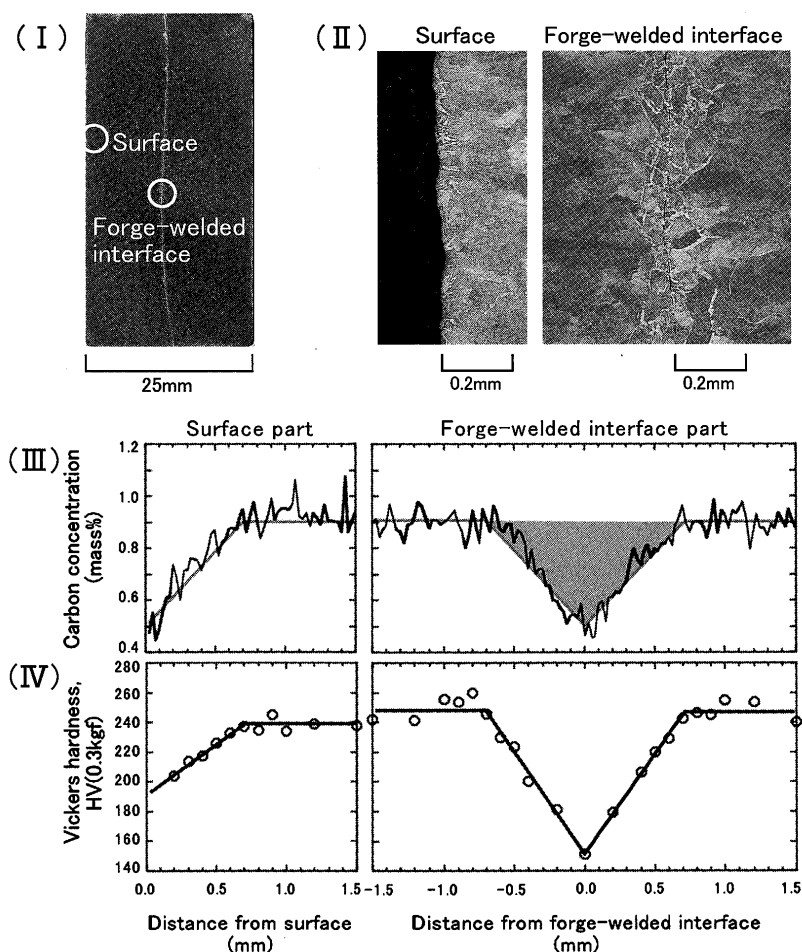


Fig. 8. Macro structure on a cross section of 1 cycle fold-forged 0.9% C steel (I), and micro structures (II), carbon concentration distribution (III) and Vickers hardness distribution (IV) on a surface part and a forge-welded interface part shown in (I).

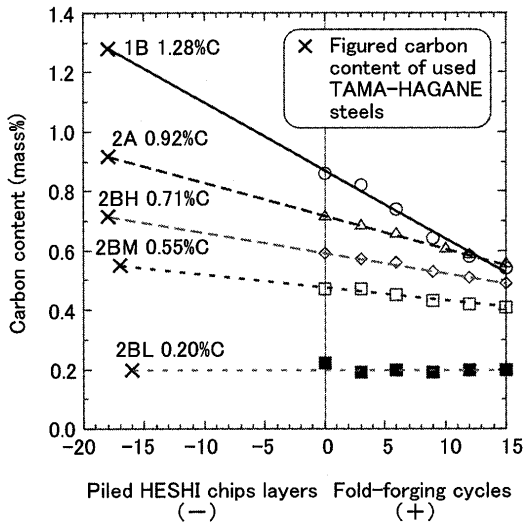


Fig. 9. Figured average carbon content of TAMA-HAGANE steels as raw materials used in this study.

$$n = p + f \dots \dots \dots (1)$$

$$C - C_0 = dn \dots \dots \dots (2)$$

Fig. 8(II) に示すマイクロ組織を観察すると、表面および鍛接面においてスケールが認められないこと、また、永田ら<sup>4,5)</sup>は、同じ木炭加熱中に冶金学的反応が起こるたたら製鉄において、COの分圧が75%以上になることを報告していることから、炭素は還元性雰囲気中で拡散していると考えられる。

3.3 用いた玉鋼の平均炭素量

炭素量のばらつきが大きい玉鋼とほとんど無い炭素鋼を、それぞれ用いた鍛錬での炭素量変化が、ともに同様の結果を示したことから、玉鋼鍛錬材の炭素量分析値は、実際の平均炭素量に近いことが確認された。そこで、(1)および(2)式をもとに、玉鋼(原料)の平均炭素量を求めてみた。

Fig. 9に、本研究で用いた玉鋼の算出平均炭素量を示す。1B, 2A, 2BH, 2BM および 2BL の積み沸かしにおけるヘシ金積層数は、それぞれ 18, 18, 18, 17 および 16 層であるので、玉鋼の炭素量は、それぞれ 1.28, 0.92, 0.71, 0.55 および 0.20 mass% と求められる。玉鋼の炭素量は、一級品, 二級品, 三級品において、それぞれ 1.0~1.5, 0.5~1.2, 0.2~1.0 mass% とされており<sup>2,3)</sup>、小割りでも容易に割れなかった 2BM と 2BL を三級品相当と考えると、計算値は文献値の範囲内によく収まる。よって、算出した玉鋼の炭素量は、実験で用いた玉鋼のほぼ正確な平均炭素量を表していると言える。

3.4 原料の炭素量 C<sub>0</sub> と鍛接面1層あたりの炭素量変化 d の関係

Fig.10 に、原料炭素量 C<sub>0</sub> と鍛接面1層あたりの炭素減少量 d の関係を示す。玉鋼および炭素鋼の d 値は、C<sub>0</sub> に対して、ともに同一曲線上にあることから、鍛接面1層あたり

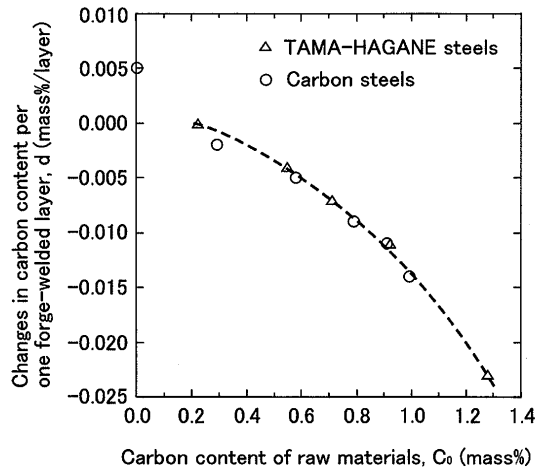


Fig. 10. Relationship between carbon content of raw materials, C<sub>0</sub> and changes in carbon content per one forge-welded layer, d.

Table 3 Changes in mass of materials of the Japanese sword under fold-forging.

Fold-forging cycles, n	Mass of materials, M <sub>n</sub> [kg]	Rate of mass, M <sub>n</sub> /M <sub>n-1</sub>
Total HESHI chips	2.25	—
0	1.96	—
1	1.88	0.96
2	1.81	0.96
3	1.74	0.96
4	1.66	0.95
5	1.59	0.96
6	1.54	0.97
7	1.48	0.96
8	1.42	0.96
9	1.35	0.95
10	1.29	0.96
11	1.24	0.96
12	1.19	0.96
13	1.15	0.97
14	1.11	0.97
15	1.07	0.96

の炭素量変化は、原料炭素量により決定されると言える。原料炭素量が 0.20 mass% 以上では、沸かし加熱中に、鍛接する表面が脱炭されるため、鍛錬により炭素量は減少していく。C<sub>0</sub> が高くなるに伴い、|d| も大きくなることから、表面脱炭量も増えていくと考えられる。またグラフの曲線形状から、|d| は C<sub>0</sub> の 2 乗に近い関係を有している。一方、原料炭素量が 0.20 mass% 未満では、沸かし加熱において、鍛接する表面が浸炭されるため、鍛錬材の炭素量は増加していくと考えられる。

3.5 折返し鍛錬における日本刀材料の重量変化

Table 3 に、折返し鍛錬における日本刀材料の重量変化を示す。沸かし加熱を行うと鍛錬材の材質に依らず、1回の折返し鍛錬あたり、およそ 4% ずつ重量が減損する。沸かし加熱後の鍛錬加工で生じる脱離スケールは、ほとんど重量が無い。また、細い材料を沸かし加熱すると、目視で明瞭に判別できる程度、材料が更に細くなる。よって、重量減損は、沸かし加熱末期、融解したワラ灰と粘土のフ

ラックス中に、鍛錬材表面が溶け込んだことによるものと言える。

鍛錬により重量が変化するにも関わらず、鍛接面1層あたりの炭素量変化  $d$  は、一定であり続けることから、鍛錬材の大きさ（代表長さ）と、沸かし加熱における炭素の拡散量との間には、比例関係があると考えられる。

#### 4. 結言

玉鋼および玉鋼を模した炭素鋼を、日本刀鍛錬方法により、0~15回折返し鍛錬し、それらの化学成分変化を調査するとともに、表面および鍛接面の炭素濃度分布に関する基礎調査を行い、以下の結論を得た。

(1) 玉鋼に微量含まれる、Si, S, P および Ti の成分量は、鍛錬によりほとんど変化しない。

(2) 日本刀鍛錬工程において炭素量が増加するのは、沸かし加熱中に脱炭あるいは浸炭した表面が、鍛接面として材料中に取り込まれるためである。高炭素日本刀部材の鍛錬では、脱炭を上手に利用して、適正な炭素量に調節していることになる。

(3) 鍛錬による合計炭素変化量は、材料中に取り込まれる鍛接面の累計層数に比例する。鍛接面の累計層数は、積み沸かしにおけるヘシ金積層数と、折返し鍛錬回数の和である。

(4) 鍛接面1層あたりの炭素量変化  $d$  (mass%/層) は、

原料炭素量  $C_0$  (mass%) により決定される。

$C_0 \geq 0.20$  mass% では、鍛接する表面が脱炭されるため、鍛錬材中炭素量は減少する ( $d \leq 0$ )。また、 $|d|$  は  $C_0$  の2乗に近い関係を有する。

$C_0 < 0.20$  mass% では、沸かし加熱中に表面が浸炭されるために、鍛錬材の炭素量が増加する ( $d > 0$ ) と考えられる。

(5) 鍛接面1層あたりの炭素量変化  $d$  (mass%/層) は、体積変化に依存しない。

次報では、鍛錬工程において、鍛錬材炭素量が鍛接層数に比例して変化するメカニズムについて報告する。

終わりに、著者の一人である佐々木が本研究に取り組むことをご理解いただいた(株)日本製鋼所 瑞泉鍛刀所 堀井胤匡刀匠に対しまして深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) N.Sasaki, T.Horii, M.Fujiwara, H.Saitoh and T.Misawa: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 45.
- 2) 鈴木卓夫：たたら製鉄と日本刀の科学，雄山閣，東京，(1993).
- 3) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 911.
- 4) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 633.
- 5) J.Tanabe, S.Kishi, S.Sato and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 515.
- 6) 村川義行，岸田民也，佐藤 豊，三宅博士，鈴木卓夫，木原明，久保善博：1998年度秋期社会鉄鋼工学会シンポジウム論文集「西日本から見た製鉄の歴史」，(社)日本鉄鋼協会，東京，(1998)，77.