



鉄鋼材料の強さを作するための有効な手段の一つが、組織制御である。同じ材料の中に結晶構造、固溶した合金元素、微細な析出物、表面構造など、さまざまな組織が入り混じり、これらの組合せが鉄鋼材料の特性を作り出している。最近ではナノテクノロジーを活用し、いっそう微細な組織を制御する取り組みが各方面で進んでいる。しかし鉄作りの長い歴史を振り返れば、現代の工業技術とは違う形で組織を制御してきた例も多く見られる。その1つが日本刀である。

PART 1

鉄の組織を操ってきた匠の技—

日本刀

鍛錬は、人間の手によるハンマーと機械を使って行う。鍛錬によって、素材の重量は半分近くまで減少する。約1,300℃の火花が周囲に飛び散る。

火を操り、鉄を鍛える刀作り

日本刀には、日本独自のすぐれた鉄作りの技術が凝縮されている。平安時代末期から全国で本格化したという日本刀の作刀は、明治時代以降もその伝統が受け継がれ、一時中断された時期もあったが、現在でも日本独自の伝統技術を守っている刀匠は数多い。日本刀の武器としての特徴は、「折れず、曲がらず、よく切れる」ことであるといわれる。これらの特性を兼ね備えるための技術は、匠の技として長年にわたり伝承されてきた。現在も、伝統的な技術を守って日本刀の制作を続ける(株)日本製鋼所・室蘭製作所瑞泉鍛刀所を訪れた。

日本刀作りの工程は、大きく「鍛錬」「組合せ」「焼き入れ」の3つに分けられる。

まず「鍛錬」は、刀の原料である玉鋼から、刀を構成する部位に応じ各種の材料を作る工程である。玉鋼を叩き割り、刀の刃の部分(刃金)や側面の部分(側金)になる材料と、刀身の芯になる部分(心金)や刃と逆側の部分(棟金)になる材料を分ける(玉へし、小割り)。次に、それぞれの材料を積み重ね、わら灰と粘土を混ぜたものをかけてから加熱する(積み沸かし)。材料の加熱には高温の炭を使うが、最適温度は炭から上がる炎の色の具合のみで判断する。高温になると、材料中の水分が沸騰する音が聞こえるため、この工程は「沸かし」の名で呼ばれる。

こうしてできた材料はそれぞれ「折返し鍛錬」で鍛えられる。加熱した材料をハンマーで鍛錬する。鍛錬して延ばした鉄の塊

は2つに折り返され、再び鍛錬する。この作業が、刃金・側金では12~15回、心金・棟金では6~8回繰り返される。

次の「組み合わせ」の工程では、鍛錬で作られた刃金、側金、芯金、棟金のそれぞれの材料を刀の形に組合せ(造り込み)、加熱、鍛錬を行う(沸かし延べ)。さらに加熱、鍛錬を行いながら、刀の幅や厚さを形作っていく「素延べ」、六角形の断面形状を整える「火作り」などの工程を経て、刀の形ができあがる。

最後に「焼き入れ」を行う。焼入れでは、あらかじめ行う土置きで冷却速度を制御する。刃先では粘土を薄くして冷却速度が速くなるようにし、それ以外の部位では粘土を厚くして冷却速度が遅くなるようにしている。

続いて、刀の表面に粘土を塗る(土置き)のだが、刃先には粘土を薄く、それ以外では粘土を厚く塗る。これを乾燥した後、刀を加熱、水冷する焼き入れを行う。さらに低温焼き戻しを行い(合い取り)、刀身を作る工程は終了する。これに砥ぎ、鞘などの職人が手間をかけた後、ようやく1本の日本刀が誕生する。

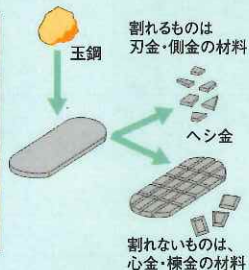
刀作りの現場に立ち会うと、火を起こし、そこから得られる熱を操り、鍛錬する力をかけることによって、鉄の刀ができるのだということを、改めて実感させられる。



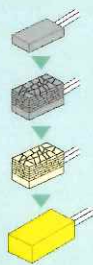
積み沸かし工程では、材料にワラ灰及び粘土汁をかける。ワラ灰及び粘土汁は、高温で溶けて材料の表面に浸潤し、空気を遮断して、材料同士の拡散接合を助ける働きをされると考えられている。

■日本刀の製作工程

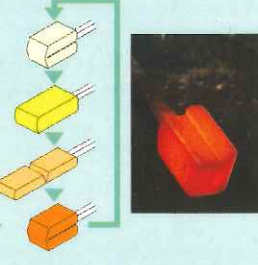
1. 玉へし・小割り



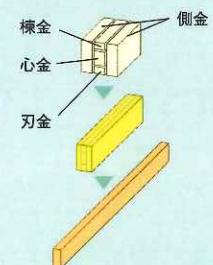
2. 積み沸かし



3. 折り返し鍛錬



4. 造り込み・沸かし延べ



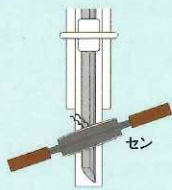
5. 素延べ



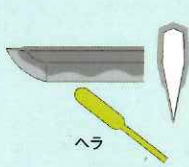
6. 火造り



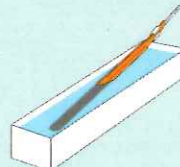
7. セン仕上げ



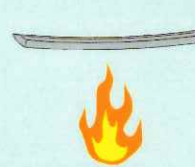
8. 土置き



9. 水焼き入れ



10. 合い取り



炭素濃度の異なる材料の複合化

日本刀は、それぞれに違う成分組成を持った鋼の複合材料であり、刀の部位によって最適な材料と焼き入れが組み合わせられている。

材料としては、心金・棟金は炭素濃度の低い材料、刃金・側金は炭素濃度の高い材料を使用する。玉鋼を叩き割った時、炭素濃度の高い部分(0.5~1.5%)は容易に割れ、低い部分(0.2~0.5%)は割れにくいことから判別ができる。

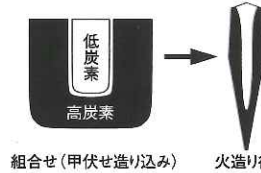
このような材料と焼き入れの組合せにより、刃先はマルテンサイト組織となり、棟側は初析フェライトと微細パーライトの混合組織となる。また境界部では、マルテンサイト中に結節状パーライトが析出した混合組織となる。

瑞泉鍛刀所の刀匠である佐々木胤成氏は、「別々の材料を組合せ複合化する「造り込み」と、粘土厚さを変えて冷却速度に変化をつけながら熱処理を行う「焼き入れ」によって、高い強度と靱性が得られる。しかし、この工程だけで十分な特性が得られるわけではなく、その前提として、折返し鍛錬において炭素量が適正に制御されていることが重要である」と言う。

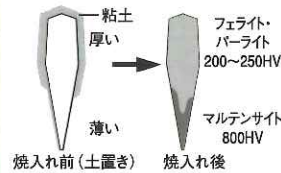
折返し鍛錬では、鍛錬のたびに、材料表面の成分が溶け込んだフラックスが鋼滓として炉底に溜まり、また一部は火花となって飛散する。これにより、鍛錬1回当たり約4%が重量減少する。このとき材料に含まれるケイ素、リン、硫黄、チタンなどの成分組成はほとんど変化しないが、炭素だけが鍛錬の回数に伴い濃度が低下していく。また鍛錬回数が多くなるにつれ、接した層と層が1つ

■日本刀の強靱化プロセス(造り込み、焼き入れ)

造り込みにおける高炭素材料と低炭素材料



焼き入れによる組織と硬さの変化



の組織に一体化していく。

佐々木氏によれば、鍛錬工程において、材料の炭素量は鍛接面の累計総数に比例して減少し、また原料の炭素量が多いものほど顕著な減少になるという。これは、表面で脱炭が起こった組織が鍛接面として材料内部に取り込まれるため、と推察されるという。玉鋼から小割りできた平均0.9%C以上の材料を用いて、鍛接面の累計層数を約30層(積み沸かしヘシ金積層数16~18層及び折り返し鍛錬回数12~15回の合計)にした場合、炭素量は、800HVの焼き入れ硬さを維持しながら0.55~0.60%Cまで減少する。また低炭素の材料では、鍛錬工程を経ても炭素量はあまり減少せず、高い靱性が約束される約0.2%Cにとどまる。

強い内部組織を作る折返し鍛錬

折返し鍛錬の過程では、層と層の間を完全に鍛接することが重要である。そのためには適切な温度と圧力が必要だが、この加減もまた刀匠の経験と技である。折返し鍛錬は通常12~15回



日本刀には独特の沸と匂の刃文があり、古くから刀匠たちはその美しさをも競ってきた。刃文は、焼き入れによって作られるマルテンサイト組織とフェライト・パーライト組織の境界線が明るく反射して見えるものである。

繰り返されるが、これにより15回なら層の数は 2^{15} 、約33,000層が積層した構造となる。

砂鉄から作られる玉鋼には、多くの炭素や介在物が含まれている。心金部には混合介在物(酸化ケイ素など)が多く見られ、鍛錬方向に粘性変形した介在物が多く含まれているが、介在物の多くが微細で、かつ方向性を持って組織中に均一に分散していることから、靱性劣化の防止に寄与していると考えられる。

折返し鍛錬により、介在物は微細化及び分散化し、そのピン止め効果のため結晶粒の成長が阻害され、結晶粒は微細化していくと予想される。折返し鍛錬後、沸かし延べ、火造り、焼き入れと多くの工程を経るため、結晶粒の大きさが折返し鍛錬時のまま保存されるとは限らない。しかし、完成した日本刀では、組織は確かに微細化しているのが認められる。日本刀製作工程における結晶粒の変化については、今後の詳細な調査が待たれるところである。しかし、刀匠たちは、このような複雑な組織を制御する技術を、いわば暗黙知として体に刻み込んできたのである。

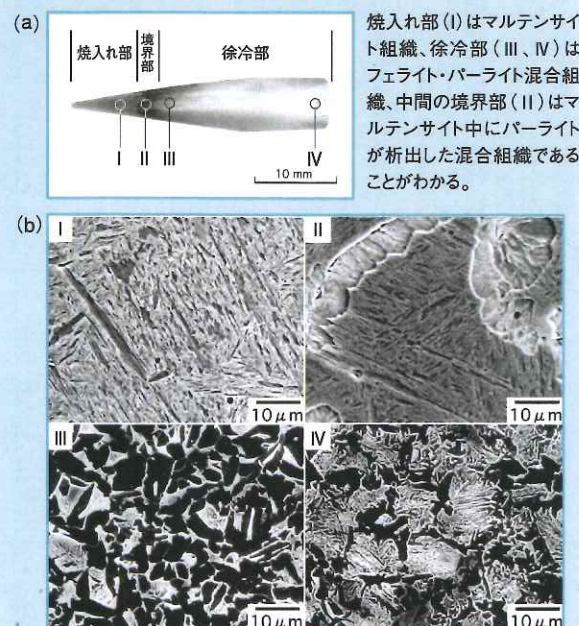
美術品としての日本刀の大きな魅力に刃文がある。刃文と刀の地との境目に沸や匂と呼ばれる模様が現われる。沸は粒子が粗く、肉眼でもよくわかるが、匂は粒子が細かい。よく「夜空に輝く星のようにきらきら光る沸、天の川のようにぼうっと霞んで見えるのが匂」といわれる。

焼き入れによって、刃と棟の境目にマルテンサイト組織とトルースタイト組織が混在した組織ができ、研磨することによって、柔らかい組織の中でマルテンサイト組織が浮き上がって見える。これが沸であることが、明らかになっている。(日本刀の科学的研究、俵国一、1953年)

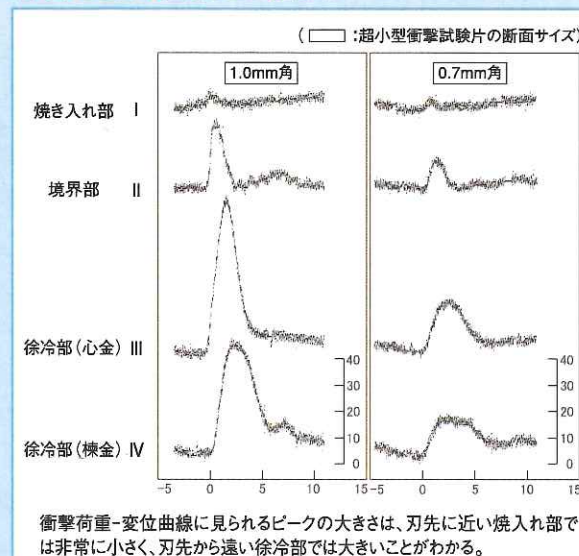
マルテンサイト部を生かした刃文もまた、刀匠の意図的な組織制御の所産ともいえるのではないだろうか。

●取材協力 (株)日本製鋼所 ●文 杉山香里

■日本刀断面のマクロ及びミクロ組織



■日本刀各部の衝撃荷重-変位曲線



■18層積み沸かしを行った玉鋼鍛錬材の折返し鍛錬による化学成分の変化

折返し鍛錬を繰り返すことにより炭素濃度が減少していく。(%)

玉鋼	折返し鍛錬回数	C	Si	P	S	Ti
サンプル A	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
サンプル B	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