

鉄鋼のマルテンサイト変態と作刀技術

千星 聡

はじめに

金属素形材の製造プロセスの工程では、相変態に基づく組織制御が施され、所望する特性が付与される。これまでは、金属全般に共通する溶解-凝固-熱間/冷間加工-熱処理の各工程における組織形成の基礎を概説してきた。トピックスの中心は、溶解-凝固、回復・再結晶、粒成長、析出などであり、いずれも拡散変態に関連することであった。

最終となる本稿では、無拡散変態^{*1}(マルテンサイト変態)を取り上げる。そもそもマルテンサイトという名称は、高温で赤めた鋼を水中へ焼入れた時に形成される緻密な針状組織に対して名付けられたものである。非常に硬くて脆いことが特徴であり、実用的な重要さゆえに19世紀末の光学顕微鏡の普及とともに焼入れ鋼の組織変化に関する研究が盛んに行われた。その結果、今日では鉄鋼材料に限らず、銅やチタンなどをベースにした非鉄合金、ジルコニア(ZrO₂)などのセラミックスでも無拡散変態が起こることが見出され、マルテンサイト変態は高強度鉄鋼材料において極めて重要であること、形状記憶や超弾性効果の発現にも大きな役割を担うことが認知されるようになった。

本稿では、構造用材料の代表格である鉄鋼材料(主に炭素鋼)のマルテンサイト変態に焦点を絞る。

その大枠を解説する。後半では日本刀の作刀技術を紹介する。以上を通して、鉄鋼材料の熱処理に対する理解を深めていきたい。

鉄鋼材料の相、組織の名称

鉄鋼材料が構造用材料として重宝されているのは、広範囲な強度レベルをカバーできるからである(図1)。これは、鉄(Fe)-炭素(C)系合金では多様な組織形態があり、それら組織の強度レベルがそれぞれ異なっているからである。つまり、我々は熱処理を駆使して、これら組織を巧みに組み合わせて、強度特性をコントロールしているのである。従って、鉄鋼材料の特性を自在に引き出すには、Fe-C合金

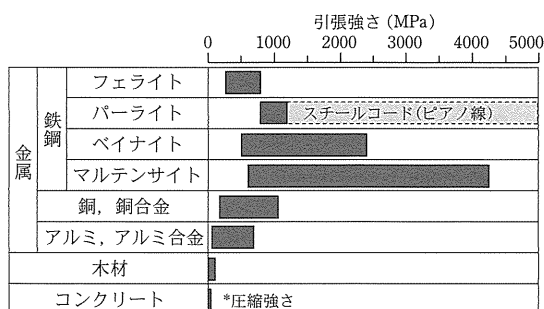


図1 各種構造用材料の強度レベルの比較¹⁾。スチールコードはパーライト組織もつ鋼材を伸線加工して得られる線材。

*1 無拡散変態では拡散を伴わないので、変態前に隣に位置していた原子は変態後も隣に位置する。図に無拡散変態における原子の位置の変化を示す。(a)は異方的に膨張・収縮のみする無拡散変態であり、錫(Sn)での体心正方晶(bct)からダイヤモンド構造への相変態が代表例となる。(b)はシャフリングであり、チタン合金における β 相(bcc)から ω 相への変態が一例になる。(c)がマルテンサイトであり、せん断的に将棋倒しのように原子が移動して起こる。

無拡散変態の中でマルテンサイト変態が最も重要であるため、広義では無拡散変態はマルテンサイト変態を指す。

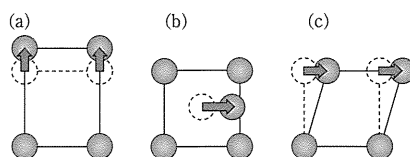


図 無拡散変態前後における原子の位置変化。

の相変態挙動を十分に理解することが重要である。

図2にFe-C二元系状態図を示す。鉄鋼材料で見られる相や組織には慣用的な名称が付いている。初学者にとっては鉄鋼材料を敬遠する一因であるかもしれないが、下記にまとめるので慣れてほしい。

素材の名称

一般に、炭素量 0.025% (αFe の最大炭素濃度) 以下のものを「(純)鉄」、炭素量 0.025~2.0% (γFe の最大炭素含有量) のものを「鋼」、炭素量 2.0% 以上のものを「鋳鉄」もしくは「銑(ずく)鉄」と呼ぶ。共析組成 (0.8%C) の鋼を「共析鋼」、それよりも低炭素量の鋼を「亜共析鋼」、高炭素量の鋼を「過共析鋼」と分類する。

相の名称

「フェライト (ferrite)」: 結晶構造が体心立方晶

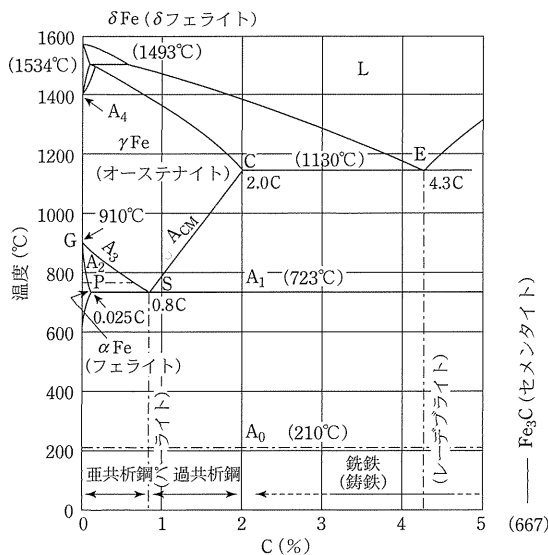


図2 Fe-C系二元合金の部分状態図²⁾。

(bcc) の固溶体 (αFe)。高温で同じく bcc 構造をもつ固溶体は δ フェライト (δFe)。

「オーステナイト (austenite)」: 結晶構造が面心立方晶 (fcc) の固溶体 (γFe)。通常、鋼の熱処理の出発組織となる。

「セメンタイト (cementite)」: Fe_3C (θ)。

組織の名称

「パーライト (pearlite)」: オーステナイトから共析変態した αFe と Fe_3C の積層組織 (図3(b))。図2から推察されるように、共析鋼をオーステナイト域から徐冷した時は単独のパーライト組織、亜共析鋼では初晶フェライト + パーライト組織 (図3(a))、過共析鋼では初晶セメンタイト + パーライト組織 (図3(c)) になる。

「マルテンサイト (martensite)」: オーステナイト域から十分急速に冷却した時に無拡散変態により生じる過飽和フェライト相 (α')。低炭素鋼 (<0.6% C) では針状 (ラス状) (図4(a))、高炭素鋼 (>1.0% C) では笹の葉状 (レンズ状) (図4(b))、0.6~1.0% C の鋼はラス状とレンズ状の混在となる。詳細な説明は次節に譲る。

「ベイナイト (bainite)」: オーステナイト域から 250~550°C 付近まで急冷して、その後等温変態した処理 (オーステンパ (austempering)) で得られる組織。等温処理温度が 450~550°C と高い場合は粒界から羽毛状 (パーライトに近い) の組織が、また、400°C 程度では針状 (マルテンサイトに近い) の組織となる。前者を上部ベイナイト、後者を下部ベイナイトと呼ぶ。いずれも、通常の焼入れ鋼と比べて粘り強い性質を持つ。低温で等温変態するほど硬くなる。

「トルースタイト (troostite)」, 「ソルバイト

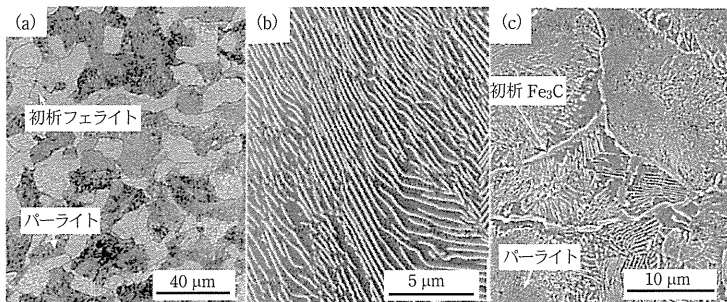


図3 完全焼鈍した (a) 亜共析鋼 (Fe-0.45% C), (b) 共析鋼 (Fe-0.8% C), (c) 過共析鋼 (Fe-1.0% C) の組織写真³⁾。

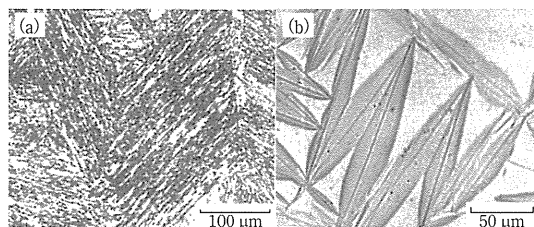


図4 炭素鋼の典型的な α' マルテンサイトの光学顕微鏡写真。(a)ラス状マルテンサイト、(b)レンズ状マルテンサイトおよび残留オーステナイト相(白部)(図6参照)³⁾。

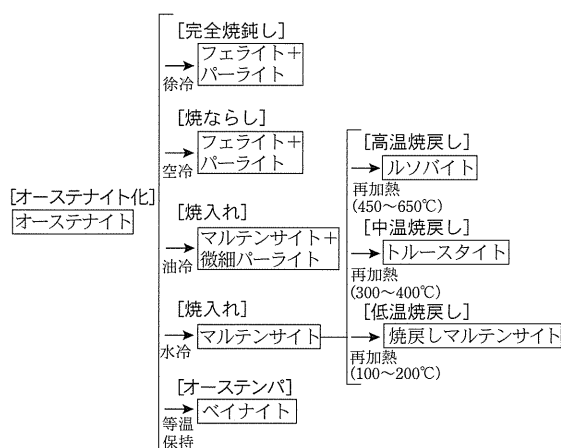


図5 亜共析鋼における熱処理操作と組織の名称。一般的に、冷却速度は空冷 < 油冷 < 水冷の順。マルテンサイト組織を得るためには、臨界冷却速度で焼入れる必要がある。

(sorbite)]: 焼入れ鋼を300~400℃で焼戻した時の組織をトルースタイト、450~650℃で焼戻した時の組織をソルバイトという。どちらも組織はマルテンサイトからフェライトとセメントタイトの微細混合組織になり、硬さはトルースタイト > ソルバイトとなる。現在はこの名称はほとんど見られなくなり、全ての焼戻し材の組織は「焼戻しマルテンサイト」と呼ばれる^{*2)}。

鉄鋼材料の分野では熱処理の操作にも独特の名称が多い。図5に熱処理操作と組織の対応をまとめる。

鉄鋼のマルテンサイト変態

鉄鋼材料が他の金属材料と比べて強度が高いの

はマルテンサイトの形成に起因するところが大きい。鉄鋼材料におけるマルテンサイト変態の特徴として下記のことが挙げられる。なお、①~⑤の特徴は鉄、非鉄合金でみられるマルテンサイト変態に共通するが、⑥⑦は炭素を含む鉄鋼材料で特筆すべきものである。

- ①単相→単相への相変態で、組成の変化がない。
- ②母相(オーステナイト相)とマルテンサイト相の間には一定の結晶方位関係がある。
- ③マルテンサイトは母相の特定の面に沿って生成する。つまり、一定の晶癖面が存在する。
- ④変態によって表面起伏や形状変化が起こる。
- ⑤マルテンサイト中には高密度の格子欠陥(転位、双晶、積層欠陥)がある。
- ⑥変態速度が非常に速い
- ⑦非常に硬くて脆い

①の特徴は重要である。図2で示されるように、オーステナイトには最大2.0%の炭素が固溶する。これを急冷するとオーステナイトはフェライトになろうとするが、炭素原子の拡散が間に合わず、強制的に炭素が固溶されたフェライトになる。これがマルテンサイトであり、フェライト(αFe)と対比して、「 α' マルテンサイト」と呼ぶ^{*3)}。

マルテンサイト変態にともなう結晶構造の変化をみてみよう。オーステナイトは図6(a)に示すようなfcc構造を示すが、見方を変えれば、図6(b)のような体心正方晶bctとみなせる。純鉄の $\gamma \rightarrow \alpha$ 同素変態では、図6(c)のようにfcc格子はc軸が収縮し、これと垂直なa軸が膨張して $c/a = 1$ 、つまりbcc構造になる。炭素量が0.6%以下の鋼でも、純鉄と同様に、マルテンサイト変態後にはfccの八面体

*2 「焼戻しマルテンサイト」という名称ではあるが、実際には、高温焼戻した炭素鋼はフェライトとセメントタイトの混合組織。誤解のないように。

*3 α' マルテンサイト(bccまたはbct)は炭素鋼(Fe-C)やFe-Niなど多くの鉄合金でみられる。これに対して、Fe-Cr-Ni(18-8ステンレス鋼)やFe-Mnなど積層欠陥エネルギーの小さい合金では、最密六方晶(hcp)をもつ「 ϵ マルテンサイト」に、Fe-PdやFe-Pt合金では、面心正方晶(fct)をもつ「fctマルテンサイト」に変態する。

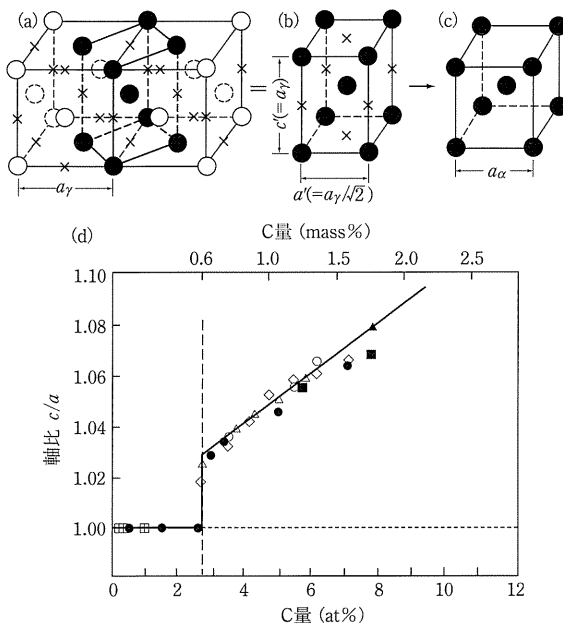


図6 (a)~(c) オーステナイト (fcc) から α' マルテンサイト (bcc または bct) への変態の説明。×は八面体位置であり、炭素が侵入しやすい。(d) α' マルテンサイトの軸比 (c/a) と炭素量の関係¹⁾。

位置 (図6中の×印) の一部に炭素原子がランダムに侵入した bcc 構造となる。一方、高炭素鋼 (>0.6% C) では、炭素原子同士の相互作用により炭素原子が特定の八面体位置に規則的に占有しやすくなる。このため、マルテンサイト変態後では、bcc 構造の一軸が伸長した bct 構造をとる。炭素量が高くなるほど bct 構造の c/a 比は増加する (図6(d))^{*4}。

炭素鋼では、マルテンサイトは図4に示すように針状もしくはそれに派生した形態で生成する。この時、マルテンサイトはオーステナイトと原子配列の最密な面 (晶癖面) に沿ってせん断的に形成されるため、マルテンサイトとオーステナイトの間には特定の結晶方位関係や晶癖面が存在する。結晶方位関係は、Kurdjumov-Sachs (K-S) 関係 ($(111)_\gamma // (011)_{\alpha'}$, $[\bar{1}01]_\gamma // [\bar{1}\bar{1}1]_{\alpha'}$)、西山-Wasserman (N-W) 関係 ($(111)_\gamma // (011)_{\alpha'}$, $[121]_\gamma // [10\bar{1}]_{\alpha'}$) などが提唱されているが、両者の結晶方位関係の差は 5.3° と非常に小さい。晶癖面は低炭素鋼では $\{111\}_\gamma$ 、炭素量が高くなったり焼入れ温度が低くなったりすると $\{225\}_\gamma$ や $\{259\}_\gamma$ になる。なお、これらの結

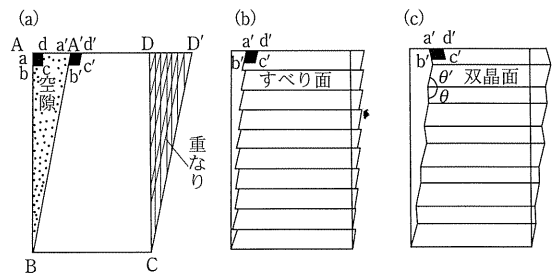


図7 マルテンサイト変態時の外形変形および補足変形の説明³⁾。(a) 拘束のない場合、母相 ABCD がせん断機構によりマルテンサイト A'B'C'D' になる。拘束がある場合は、(b) すべり変形および (c) 双晶変形の補足変形が起こるため変態後も外形が大きくは変わらない。abcd $\rightarrow$ a'b'c'd' は格子変形。

晶方位関係や晶癖面は標準的なものである。実測値はそれから幾分ずれており、同じ試料でも個々のマルテンサイトごとにばらつきがある。

マルテンサイト変態では、充填率の高い fcc 構造から充填率の低い bcc あるいは bct 構造に変態するため格子膨張が起こる。炭素量が多いほど、また焼入れ温度が低いほどマルテンサイト変態による膨張は大きくなる^{*5}。このため、マルテンサイト変態により外形が変化する。このひずみは、表面では表面起伏として現れる。内部ではマルテンサイトの周囲はオーステナイトに拘束されているため図7(a)のように変形できず、実際には図7(b)や(c)のようにマルテンサイト相内部にすべりや双晶変形など補足的な塑性変形を起こさなければならない。この結果、マルテンサイト中には多量の格子欠陥が導入される。低炭素鋼ではマルテンサイトは比較的すべり変形しやすいので転位密度が多く^{*6}、炭素量が増

*4 図6での説明は原子の対応だけを考えてモデルである。実際にはせん断変形を含んだ変態を説明するために、いくつかの変態理論が提案されている。

*5 例えば、高炭素鋼 (>0.6% C) を常温まで焼入れた時、体積変化は 0.9% 以上。高炭素鋼では体積膨張に起因して焼曲がりや焼割れの問題が起こりやすくなる。

*6 高炭素鋼でのマルテンサイト中の転位密度は $10^{16}/\text{m}^2$ 以上になる (通常の冷間加工での転位密度は $10^{12} \sim 10^{15}/\text{m}^2$ 程度)。

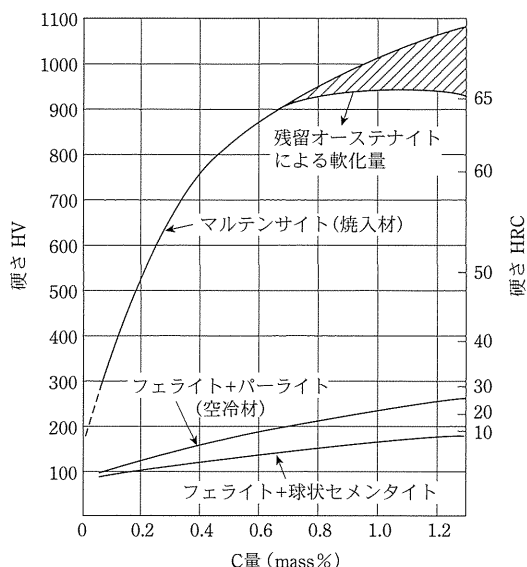


図8 炭素鋼に現れる種々の組織の硬さに及ぼす炭素濃度の影響¹⁾。0.6%C以上の高炭素鋼を焼入れた時には100%マルテンサイトにならず、部分的にオーステナイトが残留する。

えるにつれて双晶変形も起こるようになる。

以上の変態挙動にともなって、マルテンサイト変態させた鉄鋼材料は非常に硬くなる。つまり、マルテンサイトは、(i) 炭素を過飽和に固溶していること(固溶強化)、(ii) 高密度の格子欠陥を含むこと(転位強化)、(iii) 一種の微細組織であること(粒界強化)などの強化機構が重複している。マルテンサイトの硬さは図8に示したように、炭素量依存性が非常に大きい。つまり、高炭素鋼ほど焼入れ材は非常に硬くなるが、低炭素鋼の場合にはそれほど硬くなく、焼入れたままでも十分延性がある。

マルテンサイトの焼戻し

マルテンサイトは非常に硬くて脆いので、炭素量が少ない場合を除いて、通常は熱処理(焼戻し(tempering))を施して強度を調整する(図5)。

マルテンサイトは過飽和に炭素を固溶し、高密度の転位を含んでいる。これを共析温度(A_1 点 723°C)以下の温度で熱処理すると、Fe-C状態図(図2)から予測されるように、一種の時効現象と

回復・再結晶現象が起こる。時効現象としては、マルテンサイトからセメンタイト($\theta\text{Fe}_3\text{C}$)が析出して、フェライト+セメンタイトの二相平衡状態へ組織変化しようとする。ただし、その組織変化の過程は焼戻し温度で異なる。焼き戻しではこれを利用して、強度を制御する。硬さや耐摩耗性が必要なときは、高炭素鋼を用いて $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ で低温焼戻しを行う。低温焼戻しでは、光学顕微鏡レベルの観察ではマルテンサイト組織のようにみえるが、実際には、母相マルテンサイトから非常に微細な準安定な炭化物($\epsilon\text{Fe}_2\text{C}$)が析出し、これにともなってマルテンサイト中の炭素量は0.25%Cまで低下し、bcc構造をとる。

一方、強度や硬さを多少犠牲にしても靱性をもたせるためには、低炭素鋼を用いて 650°C 近傍で高温焼戻しをする。高温焼戻しでは、マルテンサイトからセメンタイトが板～粒状に微細分散する。このときマルテンサイトは炭素量が減少してフェライト相になる。

$250\sim 400^{\circ}\text{C}$ での中温焼戻しでは、伸びや絞りの異常な低下(低温焼鈍し脆化)が起こるため、通常はこの温度域での焼戻しは避けられる。

日本刀の作刀工程⁴⁾⁵⁾

ここでは、現代でも神秘とされる日本刀の作刀技術を紹介し、そこに潜む熱処理の役割りを見ていきたい。

玉鋼とたたら製鉄

日本刀の素材には「玉鋼(和鋼)」が用いられる。玉鋼は文字通り鋼で、少量の不純物も含まれているものの基本的には鉄と炭素の二元系とみなせる。玉鋼は日本古来の「たたら製鉄法」によってつくられる。たたら製鉄では酸化鉄が主成分となる山砂鉄が原料になる。特に、中国山地で採取・選鉱された真砂砂鉄は、鉄鋼に有害なリン(P)、硫黄(S)などの不純物が少ないので原料として適している。たたら炉に選鉱された砂鉄と木炭を交互に入れて、三日三晩燃やし続けると、砂鉄中の酸化鉄

が木炭により還元されて「鋳(けら)」と呼ばれる鋼塊がつくられる。鋳は図9のように炭素量のまちまちな玉鋼片や銑(ずく)、半還元鉄、鋳滓(ノロ、スラグ)、木炭から混成されている。鋳を鉄製のたわしで粉砕して、玉鋼、銑の小塊を採取する。

玉鋼の小塊は、さらに破面の状態より玉鋼の炭素量を判断して級分けする。玉鋼の級分けでは、一級品は炭素量1.0~1.5%、二級品は0.5~1.2%、三級品(大割下)は0.2~1.0%で破面が粗いものとしている。

選鋼工程

玉鋼片によって炭素量は異なる。このため、作刀工程は、玉鋼片を炭素量ごとに選別する作業(図10)から始まる。まず、玉鋼片を780~800℃(オーステナイト域)まで熱し、厚さ5mm程度に打ち延ばして、その後水焼入れする。「水圧し(みずべし)」と呼ばれる作業に当たる。これをハンマーで叩き割るのが「小割り」である。ここで、玉鋼は割れるものと割れないものに分けられる。

水圧しでは、鋼を水焼入れで急冷するのでマルテンサイト変態が起こる。マルテンサイトは図8に示した通り、炭素量に従って硬くなるので、小割りによって容易に割れたものは高炭素鋼、割れなかったものは低炭素鋼と分類できる。高炭素鋼は「刃先」や「皮鉄」のような硬さが必要な部位へ、低炭素鋼は延性の必要な「心鉄」や「棟鉄」に用いられる(図12参照)。

鍛錬工程

小割りした玉鋼から一つの塊(ブロック)をつくる(図11)。まず、てこ棒の先にてこ板をつくり、その上に小割りにした玉鋼を積み上げて、水で濡らした和紙で全体を包み、藁灰をまぶして、泥水をかけて、火床に入れて熱する。藁灰や泥水をかけるのは、空気を遮断して鋼表面の酸化や脱炭を防ぐためである。火床で熱すると、玉鋼は赤色~黄色になりジクジクと音になる。このような状態を「鋼が沸く」と表現し、この工程を「積沸かし」と呼ぶ。積沸かし後、鍛錬接合して一塊にする。

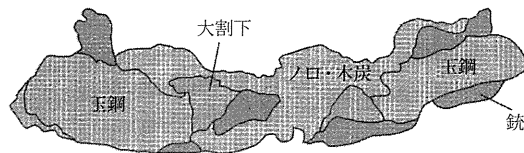


図9 たたら製鉄から得られた鋳の構成(模式図)⁴⁾。



図10 選鋼工程の模式図。焼入れた玉鋼の割れ方から炭素量ごとに級分けする。

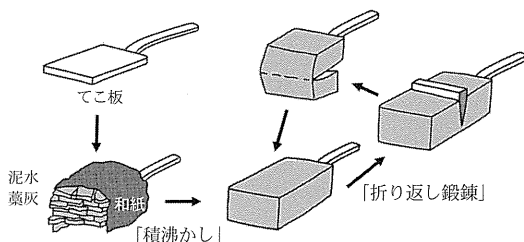


図11 鍛錬工程の模式図。「積沸かし」で炭素量の異なる玉鋼ブロックをつくる。「折り返し鍛錬」で玉鋼中の不純物を減らし、炭素量を調整する。

積沸かしの後、「折り返し鍛錬」に移る。折り返し鍛錬では、玉鋼を繰り返して鍛えることによってその中に含まれる不純物を除去し、炭素量を調整することが目的となる。鍛錬の方法は、十分に沸かした玉鋼を平たく打ち延ばし、鑿(たがね)で切れ目を入れて2つに折り返し、さらに打ち延ばすという作業を繰り返す。鍛錬により不純物が火花となって飛散し、表面が極めて清浄になるため、折り返しにより界面が密着する。

折り返し鍛錬の仕方は流派や刀匠によって異なるが、「刃先」や「皮鉄」に用いられる硬い高炭素鋼では12~15回、「心鉄」や「棟鉄」に用いられる柔らかい低炭素鋼では5~6回繰り返される^{*7}。「刃

^{*7} 折り返し鍛錬を15回行えば、 $2^{15} = 32,768$ 層の積層となり、層間は1μm以下となる。折り返し鍛錬された積層は、最終的に刀身の「皮鉄」表面に「地肌文様」あるいは「鍛え肌」として現れる。鍛え肌の美しさも日本刀の醍醐味の一つである。

先」や「皮鉄」の炭素量は15回ほどの鍛錬で0.6%程度まで減少する。この炭素量が焼入れによって良好な硬さと靱性とを両立する最適な組成とされている。これは、焼入れによってオーステナイトが100%ラス状のマルテンサイトに変態する炭素量に対応する(図8)。

造込み工程

鍛錬した玉鋼ブロックを組み合わせて日本刀の形に造込む工程となる。先にも述べたように、柔軟かつ強靱な日本刀を実現させるための、造込み方はいくつかある(図12)。いずれも基本的には炭素量の少なく柔らかい「心鉄」や「棟鉄」と、炭素量が多くて硬い「皮鉄」や「刃鉄」とを複合した構造をもつ。刀をこのような構造にするために、炭素量の異なる玉鋼のブロックを図12(上)のように組み合わせ、これを沸かしながら刀身の形状に打ち延ばしていく。この工程は「素延べ」、「火造り」と呼ばれる。

造込み工程では、最初はオーステナイト域の高め温度に玉鋼を沸かしてから打ち延ばしをはじめ、徐々に低い温度で成形していく。こうすることにより、鉄の組成ムラをなくしつつ、動的再結晶による結晶粒の粗大化を防ぐ。最後に全体を均一に過熱し、そのまま徐々に冷まして焼鈍しをする。この後、曲りやねじれなどを矯正し、大まかな日本刀の形状にする。

焼入れ工程

造込み工程で日本刀の形状となった素材に命を吹き込むのが焼入れ工程である。焼入れでは、刃先を硬い鋼に、棟および刀身内部を柔らかく靱性のある鋼にすることが目的となる。

手順としては、刀身に粘土、粉炭、砥石などの細粉を混ぜ合わせた「焼刃土」を塗り置く(「土置き」)。刃になる部分には厚さが約0.1mmになるように薄く、棟側には1mm程度に厚く塗る。火床で780℃程度に刀身を一樣に過熱する。この時の温度は刀の色を見て、芯まで熱くなったかを判断する。そのため、刀匠の仕事は夜間の暗い中で行われる。頃合いに赤めた刀は「湯舟」と呼ばれる水

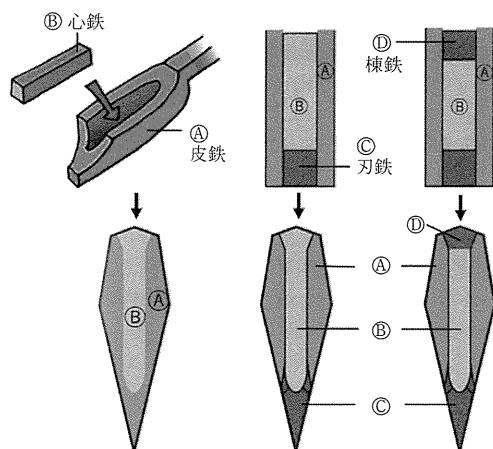


図12 造込み工程の模式図。上図は炭素量の異なる玉鋼ブロックの組み合わせ方で、左から「甲伏せ」、「本三枚」(断面)、「四方詰め」(断面)と呼ばれる。下図は造込んだ後の刀身の断面図⁵⁾。

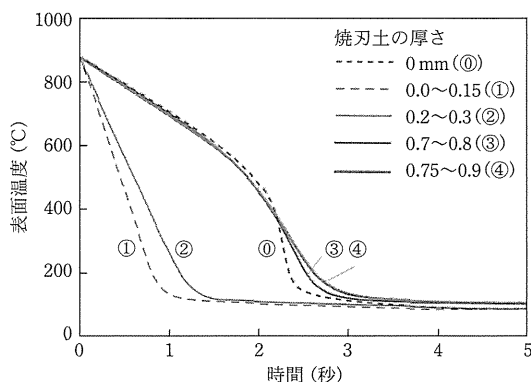


図13 焼刃土を塗布した銀棒を水中に焼入れたときの冷却速度⁴⁾。

槽に一気に沈めて急冷する。これにより、日本刀に強靱さが付与される。

なぜ刀身に焼刃土を塗り置くのか？ 焼入れで最も重要なのが焼入れ温度と冷却速度である。刀身は「皮鉄」や「刃鉄」の刃先側に炭素量が0.6~0.7%と比較的高い玉鋼を、「心鉄」や「棟鉄」の棟側に炭素量が低い玉鋼を用いている。刃先側を硬くするために、焼入れ温度は780℃前後のオーステナイト単相域から臨界冷却速度以上の速度で急冷する必要がある。図13に金属表面に焼刃土を塗布した時の冷却速度を示す。もし焼刃土を塗らず

に玉鋼を水中へ冷却すると、刀身の周りは水蒸気の膜に覆われて断熱状態になり、冷却速度が遅くなる。これに対し、焼刃土が薄く塗られていると、表面に細かな気泡ができて、水蒸気の膜を破るため、鋼と水が直接接触するようになり、急激に冷却される。一方、棟側は延性を出すためゆっくりと冷やしたい。そのためには焼刃土を厚く塗る。つまり、図 13 のように焼刃土の断熱効果のため徐冷されて、オーステナイトがフェライト＋パーライト組織に変態する。この組織では硬さは低い(図 8)、延性に富む。刀匠が焼刃土の塗り方で焼入れ加減を調節する術を独自に見出していたことは驚きである。

焼入れ工程で日本刀特有の反りが生じる。これは、刃先側の高炭素鋼では焼入れにより体積膨張の大きいマルテンサイト組織が、棟側にはそれと比べて体積膨張の小さなパーライト組織が形成されるためである。その結果、刀身の長さ方向への刃の部分の伸びは、棟側の伸びに比べて大きくなり、湾曲変形することによって、力学的バランスが保たれる。

焼入れで生じたマルテンサイトは硬くて脆いので、焼入れたままだと刃こぼれしやすい。そのため、再加熱して粘さを加える焼戻し(作刀においては「合い取り」と呼ばれる)が行われる。前述の通り鉄鋼では 200~400℃では低温焼戻し脆性があるため、200℃以下の低温焼き戻しが施される。

研磨・仕上げ工程(刃付け)

以上のように、玉鋼から鍛錬、造込み、焼入れによって刀の基本がつくられた。刀匠はここから反りや曲がりを取り、姿形や表面の肉付きを整える。さらに、日本刀独特の輝きや刃文を十分に引き出すために、刀匠は研ぎ師に研磨を依頼する。研ぎ師が日本刀の姿形を整え、「地」、「刃」、「棟」、「鋒/切先」といった部位をひとつずつ研磨していくことで、地と刃のコントラストが鮮明になり、光沢が増し、地肌や刃文が美しく浮かび上がる。こうして、機能美の極致である日本刀が誕生する。

おわりに

鉄鋼を焼入れると非常に硬くなることは古くから経験的に知られていた。例えば、紀元前 1,200~1,400 年に古代オリエントで栄えたヒッタイト帝国に由来する遺跡で鉄製の武具が見つけられている。日本でも 11 世紀にはすでに日本刀が武器や美術工芸品として作られていた。現代の金属学の知識がなかった千年以上前の時代から刀匠は経験と勘で鉄鋼を焼入れ、焼戻しを行っていたことになる。当時「鍊金術」とされていたことが、今日でようやく「金属学」として開花した。重厚な構造物を構成する鉄鋼材料が、ミクロ・ナノレベルでの多様かつ緻密な組織制御によって、その特性を発揮しているのである。人類が長年にわたって鉄鋼、ひいては金属材料に向き合い、英知を培ってきたことを改めて感じていただきたい。

本稿に限らず本連載では、ものづくりを担う初学者の方々が馴染みやすいことを念頭に執筆した。金属材料の魅力を感じてもらうために、難解な説明は割愛し、なるべく身近な例を取り上げたつもりである。興味を持った部分や物足りない部分は他書で補って、さらに理解を深めていただきたい。本連載が読者の方々にとって金属材料を見直すきっかけになったなら幸甚である。

参考文献

- 1) 牧正志：鉄鋼の組織制御, 内田老鶴圃, (2015).
- 2) 須藤一 編：鉄鋼材料, 日本金属学会, (1997).
- 3) 仁平宣弘：熱処理のしくみと技術, (2017).
- 4) 井上達雄 編：日本刀の科学, 日刊工業新聞社, (2017).
- 5) 臺丸谷政志：日本刀の科学—武器としての合理性と機能美に科学で迫る, SB クリエイティブ, (2016).

せんぼし・さとし SEMBOSHI Satoshi

2001 東北大学にて博士(工学)取得。2003 大阪府立大学工学研究科助手。その間、ゲッティンゲン大学材料物理研究所在外研究員(2007)として活動。2009 より東北大学金属材料研究所に講師として着任。2013 同所准教授。現在に至る。現在は、主に非鉄金属(アルミ、銅、チタン、ニッケル等)の合金設計と組織制御、透過型電子顕微鏡による微細組織観察を中心に研究を進めるとともに、産学官連携活動に従事している。