

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360349

研究課題名（和文） 日本刀のナノ組織を手本にした新超鉄鋼の開発

研究課題名（英文） Development of new super-steel by using Japanese sword-making technique model.

研究代表者

北田 正弘 (KITADA MASAHIRO)

東京芸術大学・大学院美術研究科・教授

研究者番号：70293032

研究成果の概要：

日本刀はわが国が世界に誇る鉄鋼の文化財である。その美術的な価値はもちろんのこと、手作りに近い技術水準の時代に、非常に高品質の鋼を生産し、異なる鋼種を使い分け、加工・熱処理技術も高い水準に達していたとみられる。大量生産には適する技術ではなかったが、その技術には現代でも学ぶべきものがあると考えられ、先端科学的な研究が必要である。しかし、日本刀に関する現代の材料科学水準での研究は全く行われておらず、その評価内容は伝承と鑑賞面だけのものであった。そこで、日本刀の材料科学的評価に着手し、鋼の微細構造、非金属介在物の微細構造、機械的性質、化学的性質などを総合的に検討してきたが、その結果の中に工業的に得られる平均結晶粒径(25~30 $\mu\text{m}$ )より小さいものが見出された。これが日本刀における標準的なものなのか、あるいは見出された刀だけのものなのかを判断するには、ある程度の数の日本刀を調べなければならない。

そこで、鎌倉時代から江戸時代末期までに造られた日本刀の微細組織を調べ、日本刀における微細結晶粒の状況と、これらの結果から導かれる微細結晶粒の生成機構について追及した。その結果、鎌倉時代から室町時代末までに製作された日本刀には、平均結晶粒径が 10~20 $\mu\text{m}$  のものが多く観察され、最も小さいものでは数  $\mu\text{m}$  の結晶粒径をもつ日本刀が観察された。しかし、江戸時代の刀では結晶粒径の小さいものは少なく、時代によって変遷のあることが明らかになった。最も結晶粒径の小さい日本刀は室町中期頃に製造されたものである。ただし、統計的に時代の変遷あるいは特徴を把握するだけの数の試料は分析していないので、上述の時代依存性は実験の範囲内に限った傾向である。

微細結晶粒は刃に使われている鋼および刃と芯金の境界領域で観察される。刃の非金属介在物を観察すると、結晶粒径の小さいものほど非金属介在物が小さい傾向を示す。これは、鋼の鍛錬の回数が多いことを示し、鍛錬加工と結晶粒度に深い関係があることを示す。また、非金属介在物の微細構造を観察すると、芯金の非金属介在物が融解して複雑な構造を示すのにたいし、刃金の非金属介在物は比較的単純な構造を示し、かつ、破壊された形状を示すものが多い。これは、刃の部分の加熱温度が低いことを示唆するものと考えられる。実際の加熱方法は不明であるが、比較的低い温度で熱間の鍛錬が行われ、導入された転位等の欠陥による再結晶が生じて、低温のため結晶粒成長が少なく、小さな結晶寸法を保っているものと考えられる。また、鍛錬の回数が多いため、蓄積されるひずみエネルギーが大きく、再結晶における結晶核の生成数が多く、結晶粒の微細化を促しているものと推定される。また、刃金と芯金の境界に微細な結晶粒が存在するものもある。刃金の炭素濃度は平均で約 0.6mass%の中炭素鋼であり、芯金の炭素濃度は 0.1mass%以下の低炭素鋼である。刃金と芯金は鍛接されるが、加工熱処理の段階で炭素の拡散が生じ、これと同時に加工によるひずみが導入される。これが再結晶の核形成頻度を増大させているものと考えられる。定量的データを取得する段階には達していないが、これらの結果は、微細結晶粒を鋼に付与する方法として有効な成果と考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,200,000	0	3,200,000
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	3,150,000	16,850,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：日本刀、鋼、超鉄鋼、ナノ構造、透過電子顕微鏡、FIB、介在物

### 1. 研究開始当初の背景

鉄鋼は青銅時代以後の鉄器時代に発展し、現在も社会と工業の基盤は鉄鋼に支えられている。鉄鋼材料は組織の改良、合金化などによってその強度を増大し、社会、産業の発展に大きな寄与をしてきた。鉄鋼の強度増大は、たとえば、自動車の軽量化などによる燃費の改善とそれによる環境の保全に役立ち、究極までの強度増大が期待されている。そのため、超鉄鋼の開発が急がれており、試験片程度の大きさでは確かめられつつある。しかし、実用的なサイズの超鉄鋼の開発は非常に難しく、解決法が待たれていた。本研究者は文化財としての日本刀を材料科学面から研究してきた。日本刀はその美術的な価値は勿論のこと、手作りに近い技術水準の時代に、非常によい品質の鋼を生産し、異なる鋼種を使い分け、加工熱処理技術も高い水準に達していたと見られている。透過電子顕微鏡などを用いて微細構造、機械的性質などで研究した結果、一部に工業的に得られる平均結晶粒径(25~30 $\mu\text{m}$ )より小さいものが見出され、その理由を解明し、かつ、その応用を考え、本研究を提案した。

### 2. 研究の目的

日本刀で観察された微細結晶粒の作られる要因を追求し、現代の超鉄鋼開発の参考となる技術的因子を抽出するのが本研究の目的である。得られた成果については、日本刀が複雑な構造の金属材料であることから、研究を断片的に学術誌に発表してもまとまりがないため、公表方法として著書としてまとめることを目標にした。

### 3. 研究の方法

試料は鎌倉時代から江戸時代末までの日本刀である。これらは本研究者が所蔵するも

ので、美術館および博物館所蔵のものではない。鎌倉時代の日本刀としては、中期に作られた大和(奈良)の包永(かねなが)、南北朝時代の來国次(らいくにつぐ)、備前長船政光(びぜんおさふねまさみつ)、備前長船勝元、室町時代の次広(つぐひろ)、信国吉包(のぶくによしかね)ほか、江戸時代の肥前忠吉(ひぜんただよし)、越前下坂(えちぜんしもさか)、祐定(すけさだ)、室町から江戸時代の無名刀 10 数本である。

金属組織と構造は主に試料の断面をマクロ像、光学顕微鏡および走査型顕微鏡(SEM)で、微細構造は SEM および透過電子顕微鏡で観察した。マルテンサイト変態している領域の結晶粒径は EBSP で観察した。また、成分および結晶構造は EDS、X 線回折および EPMA で求めた。表面の構造については、XPS を用いた。透過電子顕微鏡で求めた結晶格子像の解析にはフーリエ変換法を用い、電子回折像、それからの再生格子像を得た。

### 4. 研究成果

#### 4.1 日本刀の微細組織

鎌倉時代から江戸時代末までの日本刀約 30 振について、それらの金属組織を調べた。それらの中から主な研究結果を述べる。

##### (1) 鎌倉時代刀

鎌倉時代中期に作られた包永(かねなが)刀では、刃領域は SEM および EBSP によれば約 10 $\mu\text{m}$  の平均結晶粒径をもつマルテンサイト組織である。ここでの平均結晶粒径は高温相である  $\gamma\text{Fe}$  の結晶粒径であり、マルテンサイト晶は  $\gamma\text{Fe}$  結晶内で数個に分かれている。マルテンサイトは針状のいわゆるラス・マルテンサイトであり、結晶内には高密度の転位が存在する。これは靱性の優れたマルテンサイトであり、靱性を損なうレンズ上の双晶は存在しない。刃と芯金の間にも結晶粒径が約

10 $\mu\text{m}$ 以下の $\alpha\text{Fe}$ 結晶あるいは同寸法のパーライト組織の結晶粒が存在する。芯金は低炭素鋼で結晶粒径は50~100 $\mu\text{m}$ と大きく、ここに存在する非金属介在物も大きいものでは数10 $\mu\text{m}$ であるが、刃金領域の非金属介在物は数 $\mu\text{m}$ 以下である。これは刃金領域の鋼の鍛錬回数が多いことを示している。このことから、結晶粒径の低減には、鍛錬の回数も影響していることを示している。非金属介在物の構造も芯金領域では複数の酸化物の晶出とガラスの中にナノサイズの析出物が複数存在する極めて複雑な構造を示すが、刃領域の非金属介在物では、析出物がなく、単純な構造となっている。これはガラス転移温度の冷却速度が異なることを示している。南北朝から室町初期に作られた上記の日本刀においても、ほぼ同様の結果が得られた。

## (2) 室町時代刀

室町時代中期に作られた信国吉包刀では、芯金領域の低炭素鋼での平均結晶粒径が約50 $\mu\text{m}$ で一般の炭素鋼に見られるものである。これに対して、刃領域の結晶粒径(オーステナイトの結晶サイズを反映したもの)は1-5 $\mu\text{m}$ で、極めて小さな結晶からなっている。また、刃と芯金の境界領域でも同様な粒径の結晶粒が存在する。

透過電子顕微鏡観察によれば、焼き入れられた刃の組織はラス・マルテンサイトからなり、包永刀と同様にマルテンサイト結晶内には極めて高密度の転位が観察される。また、靱性を損なうレンズ状の双晶は観察されない。ただし、格子像の観察では、ナノ・メートルサイズの極めて小さな双晶とみなされる像が稀に存在する。一般に双晶が出現しやすいのは、焼入れ時のマルテンサイト生成温度が低い場合である。刃鋼の炭素濃度は約0.6mass%で、経験式によるMs点は300-325 $^{\circ}\text{C}$ である。この温度はそれほど高くないが、観察されたマルテンサイトは高温型であり、純度などが影響しているものと考えられる。ラス・マルテンサイトの幅は25-200nmであり、微細である。このように、微細な組織をもつ優れた炭素鋼になっている。

刃と芯金境界領域の刃に近いでは、マルテンサイト結晶とパーライト組織の結晶粒が混在する。結晶粒径は1-5 $\mu\text{m}$ であり、ナノ・メートルサイズのセメンタイト( $\text{Fe}_3\text{C}$ )が分散している。セメンタイトは球状から針状まであり、その方位は3次元的で、靱性が優れていることを示している。さらに、パーライト組織の中には、5-10nmの非常に微細な析出物とみなされる像が観察される。電子線回折では斑点が明瞭に得られるが、知られている炭化物、窒化物などには該当しなかった。これらは準安定な炭化物あるいは炭化物生成前のギニア・プレストン帯で、250 $^{\circ}\text{C}$ 以下の温度で生成したものである。このような微細な

析出物は強度の増大に大きな寄与をすると考えられる。

刃と芯金境界領域の芯金に近い領域では、結晶粒径が0.3-5 $\mu\text{m}$ のパーライト組織が観察された。この結晶は多角形になっており、パーライト組織を構成する $\alpha\text{Fe}$ 粒は極めて微細であり、超鉄鋼とみなせる寸法である。セメンタイトも非常に細かく、配置も3次元であり、比較的高密度の転位が存在する。一般に、高温のオーステナイト相結晶から複数の $\alpha\text{Fe}$ 核生成で生じたベイナイトは針状の $\alpha\text{Fe}$ 結晶からなり、多角形にはならない。したがって、高温におけるオーステナイト結晶がそのままの形を保って $\alpha\text{Fe}$ に変態したもので、針状のベイナイトのように、オーステナイト結晶粒の粒界から多く $\alpha\text{Fe}$ 核が発生して変態したものではない。この原因はオーステナイト結晶が小さいために、結晶のもつ変態エネルギーが低く、変態にあたって複数の $\alpha\text{Fe}$ 結晶核の生成と成長に十分な駆動力がないためである。このような超鉄鋼と定義できる粒径の結晶が日本刀の仲に存在することは、非常に驚きである。

よく知られているように、多結晶金属の強度は結晶粒径の減少とともに増大し、強度はホール・ペッチの式で示される。上述の微細な結晶寸法を用いて $\alpha\text{Fe}$ 地結晶の強度を推計すると、0.45mass%程度のパーライト組織では、約2000MPa以上の強度となる。この値は炭素鋼としては非常に高い。現代の超鉄鋼を得る研究では、特殊な塑性変形技術を用いて微細結晶粒を得ているが、極端なひずみを加えていない日本刀では、高温でのオーステナイト結晶粒の微細化がなされていると結論される。

鉄-炭素系の高相であるオーステナイトの結晶粒径は、合金が冷却されて変態するとき、 $\alpha\text{Fe}$ 結晶にいくつかのパターンで引き継がれる。もっとも単純にはオーステナイト粒がそのまま極く短距離の拡散によって $\alpha\text{Fe}$ 粒に変態するものであるが、オーステナイト粒が大きいときには短時間・短距離の拡散で粒全体を変態させることはできないので、いくつかの $\alpha\text{Fe}$ 結晶核が発生し、オーステナイト粒より小さい複数の $\alpha\text{Fe}$ 結晶が生ずる。このときの変態に必要な冷却を促す熱流には一般に方向性があるので、ベイナイトのように針状の結晶になる。上述のように、日本刀で観察された $\alpha\text{Fe}$ 結晶を地とする結晶粒は多角形であり、一個のオーステナイト粒が複数の $\alpha\text{Fe}$ 結晶に分かれた形跡はない。

これらの結果は、日本刀の鍛錬において、オーステナイト結晶が大きく成長するような熱的条件にないことを示す。また、再結晶核の生成に必要な鍛錬によるひずみ条件なども結晶成長を抑える条件になっている。定量的な条件の把握は日本刀の分析だけでは

困難であるが、優れた刀匠がかなり低温で鍛錬し、かつ短時間の作業によって手際よく作ったためと推定される。

刃領域の非金属介在物はいくつかに破壊して分離された状態が観察される。これは鍛錬によって破壊されたもので、鍛錬の回数が増えれば非金属介在物の寸法も小さくなる。芯金中の非金属介在物は大きいもので 50 $\mu\text{m}$ 以上に達するものがあり、これに対して刃金中の非金属介在物は数  $\mu\text{m}$  以下であり、それぞれの  $\alpha\text{Fe}$  結晶の寸法に比例している。すなわち、鍛錬の回数が多いほど  $\alpha\text{Fe}$  結晶粒は微細化する。したがって、鍛錬回数も結晶微細化の大きな因子である。

### (3)江戸時代中期の刀

江戸時代の日本刀について越前下坂、肥前忠吉、国光等の刀試料について上述と同様の観察を行った。江戸時代に作られた日本刀試料の多くは、刃領域の結晶粒径は非常に大きく、20-30 $\mu\text{m}$  で室町時代の刀に比較してひと桁大きく、結晶粒内のパーライト組織も非常に大きく、鍛錬温度の高いことが知れる。時代が進むにつれて、加熱技術などが進歩し、高温が比較的容易に得られるようになり、上述のオーステナイト結晶の成長が促されたものとみられる。また、再結晶核の密度を増す鍛錬の回数も減少したと考えられる。

## 4.2 微細結晶の生成機構

日本刀の微細組織 微細なマルテンサイト結晶、 $\alpha\text{Fe}$  結晶およびパーライト組織結晶を生成するためには、変態前の  $\gamma\text{Fe}$ 、すなわちオーステナイト結晶粒が小さくなければならない。その要因の一つは鍛錬温度である。鍛錬温度は結晶粒成長を支配する重要な因子で、結晶粒は温度の高いほど、また、保持時間が長いほど大きく成長する。

結晶粒が小さいことの一因として、鍛錬温度の低いことが推定される。日本刀のような小型の鋼片では、ふいごの木炭による加熱温度は鍛錬中に急速に低下し、低下して鍛錬が困難になった時点で鍛錬は終了し、再び加熱する。実際に、現代の刀匠の鍛錬の状況を観察すると、一回の鍛錬時間は数分以内の短時間である。結晶粒成長に許される時間は鍛錬中の時間も含めて極めて短く、大きな結晶粒となることは困難である。鍛造前の加熱温度が低ければ、鍛造中の温度低下により鍛造可能時間が短くなる。

鍛造温度が低いと、加工により増殖した転位も消滅しにくくなる。通常、転位の消滅は空孔の働きによる上昇運動によるもの、新しい結晶の発生による再結晶による。これらは基本的に原子の拡散に支配されており、温度が低くなるほど低下する。

鍛錬によるひずみの面から考えると、鍛錬による転移密度の増大などでひずみは増加

して硬化し、そのひずみの開放のために再結晶核が生じ、これが成長する。このとき、加熱温度が低ければ、最結晶粒の成長は遅くなり、結晶粒は微細化される。鍛錬温度が低いと一定の形状に加工するための鍛錬数も多くなり、結晶粒成長も抑えられる。

結晶成長は以上の因子だけでは決まらない複雑な減少であり、その他の因子も合わせて考察する必要がある。また、日本刀で観察された微細結晶粒を具体的に超鉄鋼の製造に適用するには、シミュレーションによる実験を行い、定量的な条件を確立する必要があり、これらは今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

(1) ステファン・メーダー、北田正弘: 8 世紀頃にドイツで作られた剣の微細構造、日本金属学会 2007 春講演 (No. 198) 大会 (140 回) 概要集 p. 236.

(2) 北田正弘: 鎌倉時代中期の名刀「包永」の金属組織と介在物の組成、日本金属学会 2008 春講演 (No. 220) 大会 (142 回) 概要集 p. 272.

(3) 北田正弘: 鎌倉時代中期の名刀「包永」の非金属介在物の微細構造、日本金属学会 2008 秋講演 (No. 634) 大会 (143 回) 概要集 p. 355

(4) 北田正弘: 室町期日本刀の微細構造、東京藝術大学美術学部紀要 45 (2007) pp5-56.

(5) 北田正弘: 古墳から出土した古代刀 (直刀) の微細構造と機械的性質、東京藝術大学美術学部紀要 46 (2008) pp5-32.

[図書] (計 2 件)

(1) 北田正弘: 室町期日本刀の微細構造-日本刀の材料科学的研究-、内田老鶴圃、東京 (2008) pp. 56.

(2) 北田正弘: 材料科学から見る美術工芸と文化財の美、内田老鶴圃、東京 (2009) pp. 104.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北田 正弘 (KITADA MASAHIRO)  
東京芸術大学・大学院美術研究科・教授  
研究者番号: 70293032

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者