

鉄鋼の世界遺産である日本刀の材料科学的研究 -古代刀を中心にして*-

代表研究者 東京芸術大学大学院美術研究科 教授 北田 正弘

1. 緒言

人類の歴史は石器時代と青銅時代を経て、現代につながる鉄器時代をつくった。我々の文明の礎になった鉄は洋の東西を問わず、非常に重要な歴史遺産である。その中で、わが国の日本刀は世界に誇るものであるが、現在の大方の関心は鑑賞が主であり、鉄鋼としての詳細については殆んど明らかになっていない。このため、著者は現代の先端科学の水準での研究を推進しているが、多様な日本刀の科学的内容はきわめて複雑であり、文化財であるので試料の入手も難しく、研究には非常に時間を要する(1)(2)(3)(4)。

日本刀は製作年代および形状などによって数種に分類されている。一般に、古墳(2-6世紀頃)から発掘された刀剣は時代分類として古代刀、上代刀あるいは荘太刀と呼ばれている。また、形状が直線的であることから、直刀とも呼ばれる。発掘される古代刀には、片刃と両刃の2種がある。刀剣は戦乱時に武器として使われたが、武器としてだけでなく、古代から現在まで神聖な宝物、権力の象徴、美術品などとしても扱われている。わが国の皇室では、その象徴として金属鏡、勾玉とともに刀(剣)が三種の神器のひとつになっている。一方、平安時代(794-1191)から現在までに造られた刀は日本刀と呼ばれている。日本刀は古代刀と異なり、曲率をもっている。さらに、日本刀は時代によって分類されており、安土桃山時代(1604年以前)までのものを古刀、江戸時代前半(1605-1750年)に作られたものを新刀、江戸時代後半(1750-1867年)までを新新刀、明治から現代までに製作されたものを現代刀という。

古墳から発掘された古代刀については未知の事柄が多く、鉄鋼の微細構造、機械的性質、製造法、使われた鉄鋼材料の由来などについては不明な点が多い。この原因のひとつは文化財であるために、博物館などの所蔵品や出土したものからの試料の採取が難しいことにある。また、試料採取が出来ても小片であり、自然科学的な全体像を得ることは困難である。これらの不明な点を明らかにするために、本研究では著者所蔵の古代刀を破壊分析し、その微細構造、非金属介在物の組成と組織、機械的性質などを総合的に検討した。さらに、自家製のたたら鉄を使用して構造の再現を試みることを目的とした。

2. 実験法

研究に用いた古代刀試料は2種で、試料Aは1885年に東京近郊の「将軍塚」と呼ばれる古墳から発掘され、試料Bは三室山古墳から出土したものである。これらの試料は何れも著者の所蔵品である。古代刀の全体像の一例をFig.1に示す。図には同時代の古墳から出土する両刃の発掘刀(著者蔵)も参考に示す。試料は長年土中に埋まっていたため、外側は完全に錆によって被われている。試料によって異なるが、本研究に用いた試料の内部には金属が残っている。参考までだが、出土品の中には完全に錆びているものも少なくない。試料Aおよび試料Bとも片刃のもので、重量はAが約2kg、Bは1.5kgである。試料Aの光学顕微鏡組織は刀の長手方向の断面を含め3次元的に観察した。試料Bは代表的な部分を観察した。炭素濃度は電子線プローブ法で分析した。微細構造は走査型電子顕微鏡(SEM)および透過電子顕微鏡(TEM)によって観察した。透過電子顕微鏡用試料は収束イオンビーム法(FIB)によって切り出した。非金属介在物などの成分は電子分散型X線法(EDX)、機械的性質は引張試験およびマイクロビッカース硬度計で測定した。引張試験片は試料の寸法が限定されているので、JISの寸法の試料は採取できず、JISの寸法を比例縮小したものをを用いた。引張試験後の破壊面(フラクトグラフ)はSEMで観察した。

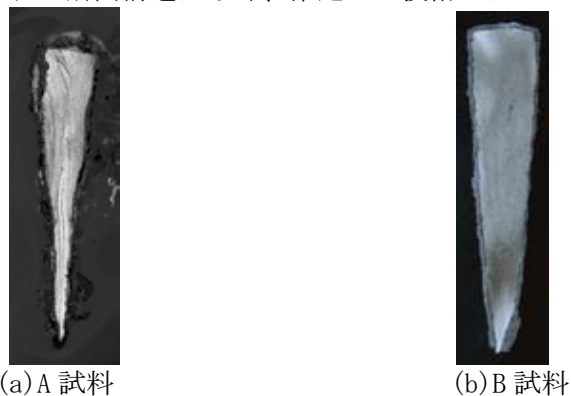


図1 古墳から出土した古代刀。上から本研究に用いた試料B、中が試料A、下は両刃の参考図(著者蔵)

3. 結果と考察

3.1 マクロ組織および微細組織

用いた試料Aの腐食後の断面像を図2(a)に示す。前述のように、表面側は錆によって被われているので、原寸より幅は狭く高さは低くなっている。この試料の組織からは、焼入れ部(マルテンサイト組織)は観察されなかったが、縞状の組織が観察された。試料Bの断面マクロ像(b)では、縞状組織は観察されず、幾つかの組織領域に分かれ、それぞれの領域では比較的均一な組織であった。このように、古代刀では試料によって組織は様々で、日本刀のような統一された断面構造はなく、確定した技術には乏しかったと考えられる。



(a)A 試料

(b)B 試料

図2 試料の断面マクロ像

図3に試料A刀の長手方向に垂直な断面、長手方向で刀の棟(峰)に沿った断面、および刀の側面の光学顕微鏡像を示す。特徴的な点は、前述のように、断面組織が縞状(带状)組織(stripe または band structure)を示すことである(10)(11)。縞状組織は下記に述べるように軟鋼と半硬鋼(低炭素鋼)からなっている。側面は縞状組織に平行であるため、明瞭な組織は顕われない。日本刀の場合、刃は焼入れされてマルテンサイト組織になっているが、本試料の低炭素領域はパーライト組織であり、焼き入れは行われていない。

図4に断面の拡大像を示す。明るい带状領域は軟鋼(α -Fe)であり、暗い带状領域は α -Fe結晶粒とFeの炭化物が分散したパーライト組織からなる結晶粒の混合状態で低炭素鋼帯である。縞状組織における軟鋼帯と低炭素鋼帯のそれぞれの幅は凡そ40-70 μ mおよび150-200 μ mである。これらの領域にみられる結晶粒は多角形状であり、強く加工を受けた状態ではなく、再結晶あるいは焼きならし組織とみられる。すなわち、高温で再結晶した γ 相が室温に徐冷された組織である。

軟鋼(α -Fe)帯の炭素濃度には若干ばらつきがあり、0.01から0.05 mass% Cである。このばらつきは測定誤差のほか、微細な炭化物の析出等の影響も考えられる。低炭素帯では、

α -Fe とパーライト組織からなる結晶粒を含めた領域の炭素濃度が 0.25 から 0.35 mass% C である。低炭素鋼帯は炭素量の少ない α -Fe とパーライト組織からなる結晶粒の混合組織であり、場所によってその占面率が異なるため、炭素量測定値のばらつきが大きい。軟鋼帯結晶粒 (α -Fe) の寸法 (平均直径) は平均約 50 μm であり、低炭素鋼帯の結晶粒の寸法は 20 から 60 μm であるが、図 4 でみられるように、暗く見えるパーライト組織結晶粒のほうが明るく見える α -Fe より小さく、低炭素鋼の一般的組織である。

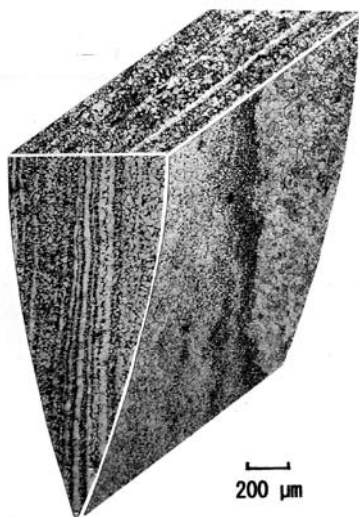


図 3 断面光学顕微鏡像

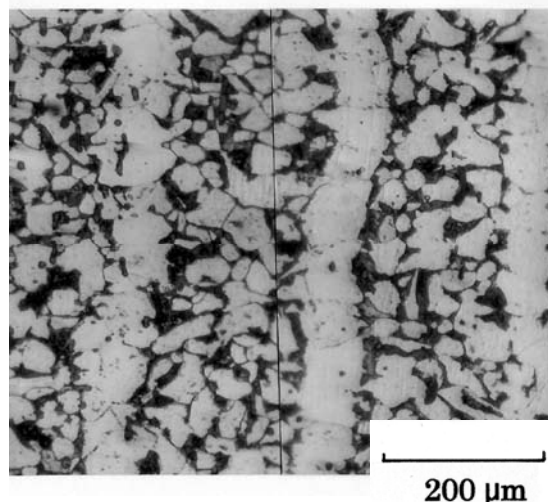


図 4 断面の拡大像

低炭素鋼帯におけるパーライト組織は微細で光学顕微鏡では内部観察できない。この微細構造を明らかにするため、透過電子顕微鏡で観察した。図 5 にパーライト組織の透過電子顕微鏡像を示す。針状炭化物 (セメントイト: Fe_3C) の直径は約 0.05 μm 、長さは 0.2 から 0.7 μm と比較的微細である。これは、鍛造温度あるいは γ 相温度からの冷却速度がマルテ

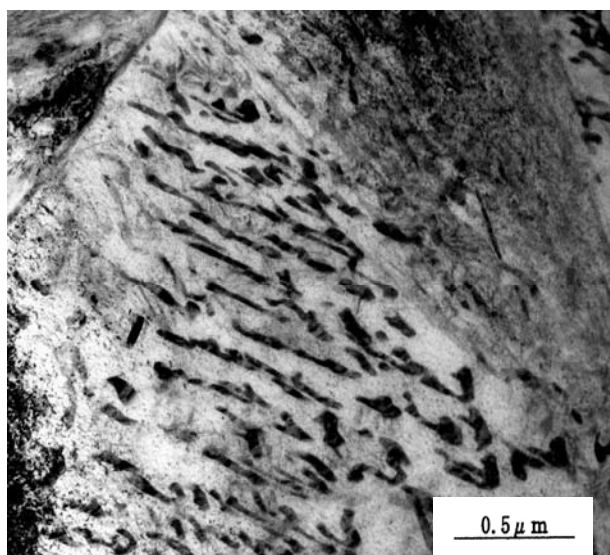


図 5 パーライト組織の透過電子顕微鏡像

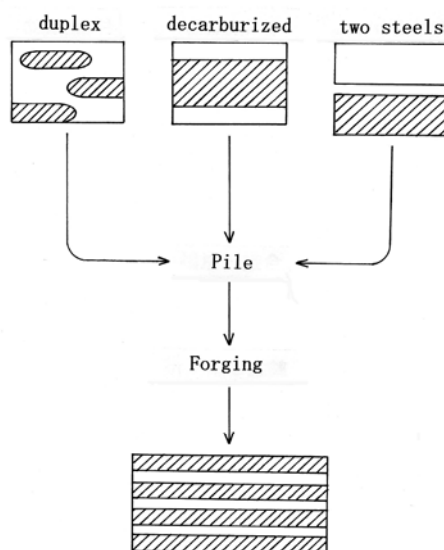


図 6 縞状組織とする鋼の組合せ

ンサイトが生ずるほどではないが、徐冷より若干高速で冷却されたためと推定される。

縞状組織の生成原因として、鍛造する前のいくつかの材料組織あるいは組み合わせが考えられる。縞状組織が形成され得る鍛造前の鋼の組織等として、可能な構造例を図 6 に示す。(a)は α Fe とパーライトの 2 相組織から出発するもの、(b)は鋼板の外部が脱炭して α Fe となり、内部が半硬鋼となっているもので、内外がこの逆でも同様である。(c)は 2 種の異なる炭素量の鋼を 2 枚使用する場合である。現代の製鋼法において、低炭素鋼を鋳塊とした時、初期の炭素、硫黄、燐等の偏析が著しい場合、熱間鍛造した鋼にはしばしば縞状組織が顕われる(5)。(b) および (c)は当初から 2 種の鋼が使われるので、縞状組織になって当然であるが、(a)に比較すると技術的に進歩したものである。刀は砂鉄等の鉄鉱石を還元した素材を鍛錬して使いやすい塊状あるいは板状とし、これをそのまま長く伸ばしたか、あるいは折り返し鍛錬したものである。(b)と(c)の場合は単に伸ばすだけでは細かな縞状組織にならず、やはり折り返し鍛錬が必要である。これに対して、(a)は素材であるが素材を鍛錬した状態で縞状組織が自然に生ずる可能性があり、(b)は鍛造過程で鋼表面において脱炭が生ずれば縞状組織になる。古代において、技術が初歩的であった時代には (a)あるいは脱炭現象をともなった(b)の可能性が高い。これの再現実験は後述する。

試料 B では、前述のように領域によって組織が異なる。図 7 に代表的な光学顕微鏡組織を示す。(a)は刃金の領域で、一般に刃は中高炭素鋼あるいはこれを焼入れたマルテンサイトであるが、軟鋼に分類される鋼である。刃が軟鋼であるのは、意識的に軟鋼にしたのではなく、原料の軟鋼部が偶然に刃の領域にきたものとみられる。

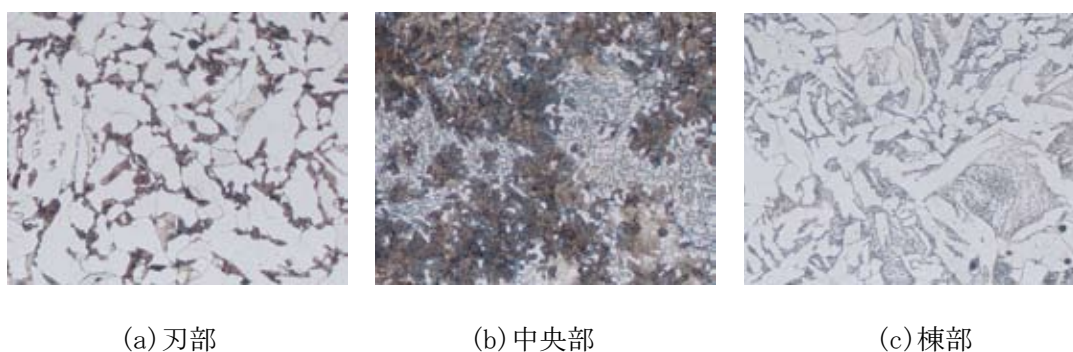


図 7 試料 B の代表的な光学顕微鏡組織

3.2 非金属介在物

試料 A の非金属介在物の配列には多少のばらつきはあるが、長手方向あるいは縞状組織と平行な方向に整列している。その多くは低炭素鋼帯の中あるいは軟鋼帯との境界付近に存在する。これは縞状組織の生成と関連があるものと考えられる。非金属介在物には粗大なものと微細なものとが観察される。試料 A の非金属介在物における典型的な光学顕微鏡像と一部領域の EDX スペクトルを図 8 に示す。光学顕微鏡組織では、明るい領域とこれを囲むくらい領域に大別され、複数の相からなっている。組織から判断すると、凝固組織である。非金属介在物全体に含まれる主な元素は酸素(O)と Fe のほか、主な不純物元素として Al, Si, K, Ca であり、少量の Mg と P、そのほかに痕跡量の V, Mn が存在する。明るい領域の EDX から検出される金属系元素は Fe が主で、暗い領域からはその他の多くの元素が検出される。主な不純物元素の酸化に関するギブスの自由エネルギー(- ΔG)は Fe より大きく、Fe より優先的に酸化物となる。これらの元素は鉄鉱石に由来するものであり、精錬の過程で巻き込まれ、鍛錬のときに刀の長手方向に配列したものである。同様の組織は 20 世紀初までのパドリング法等の錬鉄でも観察される(11)。非金属介在物は固溶している不純物元素とは異なるが、不純物偏析のひとつであり、前述の縞状組織生成の原因と成り得る。

日本刀の中に観察される非金属介在物の多くからは Ti が検出される。これは日本刀に使

用された鋼(たたら鋼)が Ti を含む砂鉄を使用しているためである。含有量は異なるが、日本産砂鉄の中にはイルメナイト(FeTiO_3)として必ず Ti が存在する(8)。しかしながら、本試料からは明瞭な量の Ti は検出されなかった。したがって、直刀の製作に日本産の砂鉄を使用した可能性は低い。近隣のアジア諸国の鋼には Ti が含まれない場合が多く、直刀には輸入された鋼が使われた可能性もある。この場合、多分、塊状の鋼あるいは鋳鋼素材として、また、完成した刀として輸入されたものとも考えられる。

一方、Ti を含まない日本産の塊状鉄鉱石、たとえばライモナイト(limonite: $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、ヘマタイト(hematite: Fe_2O_3) およびマグネタイト(magnetite: Fe_3O_4)が使われていたとすれば、試料から Ti はほとんど検出されない。しかしながら、初歩的な技術で塊状の鉱石をそのまま製錬するのは困難であり、この可能性は低い。ただし、塊状鉱石を砕いて使った可能性は否定できないが、考古遺跡の結果も合わせて考えなければならない。また、極めて可能性の低いことであるが、Ti が精錬過程などで 除かれた可能性も排除は出来ないが、Ti を含むスラッグは粘性が高いため、極めて除去しにくい。さらに、砂鉄製の鋼では検出されない P が検出されるので、この点からも砂鉄以外の原料を用いたことが考えられる。

前述のように、寸法の大きな非金属介在物では複数の相が存在し、組織的には明らかに凝固組織になっている。したがって、刀を鍛錬している温度において、非金属介在物は液体の状態にあるものとみられる。観察される組織の中で、明るい粒子が初晶である。

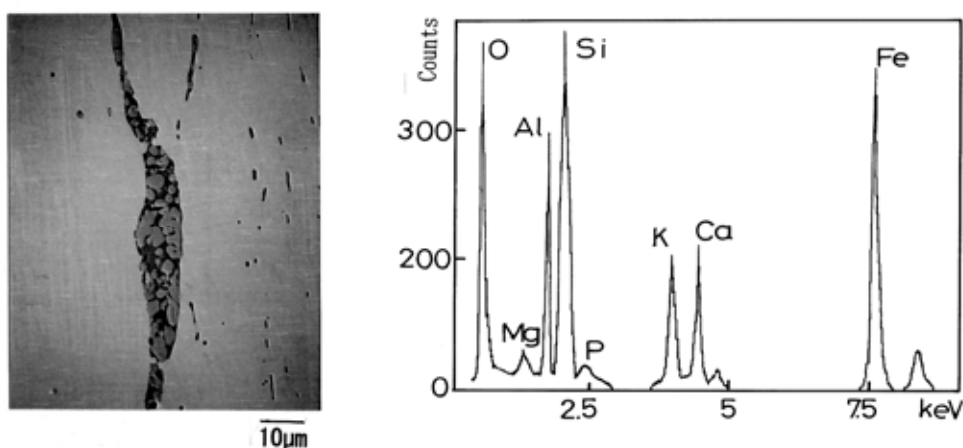
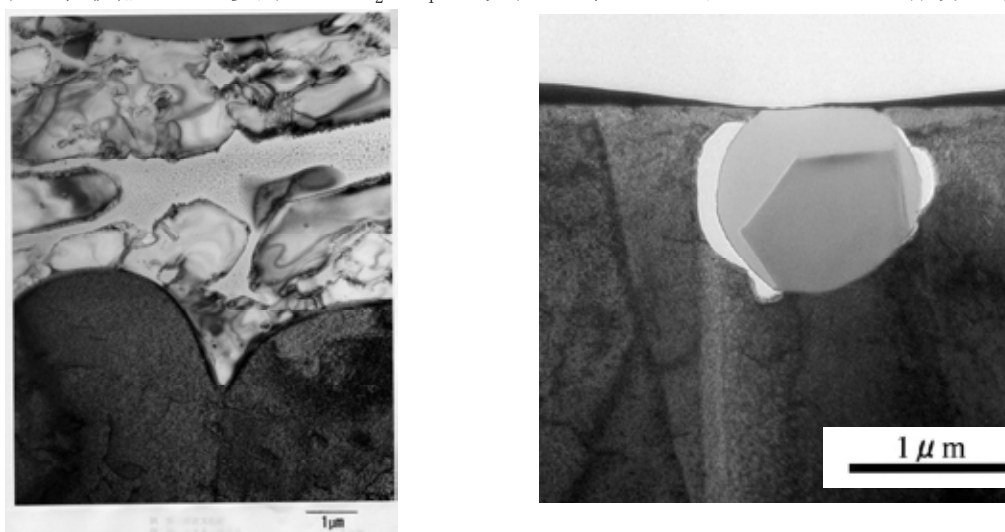


図 8 試料 A 中の非金属介在物像(SEM)と EDX スペクトル

比較的大きな寸法の非金属介在物の透過電子顕微鏡像を図 9(a)に示す。この像はナノメートル・サイズまでの粒子を含み、非常に複雑な組織をもっている。電子線回折および EDX 分析によって得られた相は、酸化鉄(FeO)、 Fe_2SiO_4 および Si を主成分とし微細な析出物を含むアモルファス相である。 μ EDX の結果も含めて組織を解析すると、マトリックス(α Fe)に近接して存在するのは FeO であり、マトリックスに接した部分から熱が奪われて凝固するので、 FeO が初晶である。次に Fe と Si を含む Fe_2SiO_4 とみなされる相が FeO に近接して晶出している。残った液相はその他の不純物を含んでおり、 Fe_2SiO_4 が凝固した後に凝固する。 Fe_2SiO_4 結晶の表面には鋸歯状の結晶が晶出している。これは、 Fe_2SiO_4 が凝固した後に残留している液相から Fe_2SiO_4 がエピタキシャル成長したものとみなされる。最後に残ったのは K, Ca, Al などを含む液相で、Al-Si(アルミノシリカ)系ガラスとして凝固する。しかし、このガラスの中にはきわめて微細な粒子が分散しており、その中には FeO も存在する。したがって、液相がガラスとして凝固したのち、温度の低下に伴ってガラス相から微細な結晶析出物(FeO など)が生じたものである。図 9(a)の透過電子顕微鏡像の上下に存在するのが FeO 初晶であり、その内側の結晶が Fe_2SiO_4 、中央がアモルファス領域である。微細結晶がガラス中に析出するのは日本刀の非金属介在物でも観察されている(2)。

一方、微小な非金属介在物の典型的な透過電子顕微鏡像を図 9(b)に示す。内部構造は非常に単純で、初晶である多角形の Fe_2SiO_4 が観察され、マトリックスは Si を主成分とする



(a) 粗大介在物

(b) 微小介在物

図 9 非金属介在物の代表的な透過電子顕微鏡像

アモルファス(ガラス)で、多角形 Fe_2SiO_4 の外側に円形(球)に近い形になっている。採取試料の位置で FeO が観察されなかった可能性もあるが、 Fe_2SiO_4 が単純な形状であり、アモルファス・マトリックス中にも微細析出物がないので、由来の異なる非金属介在物の可能性もある。非金属介在物の周囲には、凝固時の鋼と非金属介在物の収縮率の差に基づくとみなされる空洞が存在する。一般的には、鍛錬により粗大な非金属介在物が分離して微小になったものと考えられるが、それであれば、凝固組織は大差ない。ただし、凝固に伴う熱の放散量(冷却速度)は微小な物質のほうが大きいので、この影響を排除できない。

試料 A の非金属介在物の光顕鏡像では複数の相が存在し、凝固組織とみなされる。同様の組織は鍛錬でもみられる(11)。これに対して、試料 B では複数の相は観察されず、単相組織のようにみえる。詳細は省略するが、介在物の SEM 像で、外側と中心部の明るさが異なりコントラストがついている。しかし、相境界などは認められない。非金属介在物の代表的な EDX スペクトルでは、濃度の高い順に Si、Ca、Al、K、Fe が主成分として検出され、微量元素として Na、Mg、Ti、Mn が存在する。また、V が痕跡量として存在する。これらの中、Ti は Ti 含有鉱石あるいは砂鉄の成分である。しかし、砂鉄を原料としている日本刀中の非金属介在物から検出される濃度よりかなり低く、5-10 分の 1 程度である。Ti は石炭あるいはコークス中にも含まれているが、古代刀でこれらの還元剤を使ったとは考えにくい。

国内の主要鉄鉱石に Ti は殆んど含まれていない(7)。一方、国内主要な砂鉄中の Ti 量(TiO_2 濃度)は島根産の 0.8-1.63mass%を除けば、他は 8.51-13.7mass%と高く、Ti は砂鉄に由来する可能性が高い。また、南アジア、東南アジアおよび東アジアの鉄鉱石で Ti を含む鉱石は非常に少なく、中国の石碌、マラヤのエンダオおよびケダーなどであるが(7)(8)、 TiO_2 濃度は 0.3mass%以下で、介在物に多量の Ti が存在する可能性は低い。したがって、試料 B で輸入鉄等を使った可能性は低い、このデータだけでは産地の決め手にはならない。

試料 B 中の介在物には Si が多く、組織像も結晶性の相が観察されない、Si、Ca、K、Alなどを成分とするガラスが主体とみられる。ただし、日本刀ではガラス介在物中に Ti 酸化物のナノ結晶などが存在するので(2)、微細構造が存在する可能性もある。これについては TEM 観察が必要で、今後の検討課題である。

3.3 機械的性質

引張試験片は刀の長手方向に沿って採取した。試料片の形状を図 10 に示す。両端は引張

試験を行なうための固定用ネジである。試験片の直径は採取場所によって異なり、1-3 mm である。A 試料の試験片を用いて引張試験した応力-伸び曲線を図 11 に示す。



図 10 試験片の形状

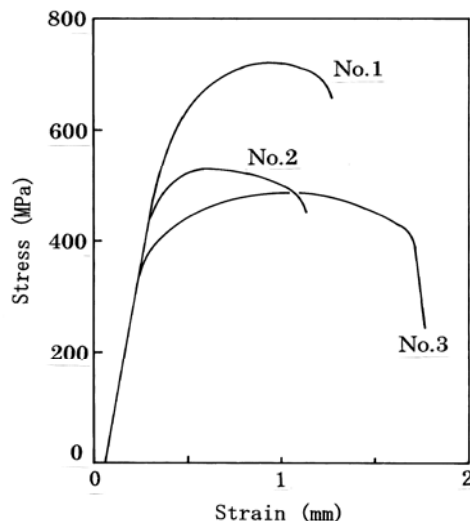


図 11 典型的な応力-伸び曲線

試料採取位置によって異なるが、引張強度は 450 から 700 MPa (44-69 kg/mm²) であり、伸びは 15 から 30% である。これらの値は C を 0.2-0.5mass% 含む現代炭素鋼と同等の値である。刀の棟に近い部分から採取した試験片の強度が最も低く、刃に近づくにしたがって強度は高くなる。原因は刃に近づくるとパーライト組織が増えるためである。

機械的性質には、金属組織と非金属介在物が強く影響する。しかしながら、縞状組織は α Fe 帯と α Fe + パーライト帯を取り出して引張り試験することは不可能なので、マイクロビッカース硬度 (Hmv) を求めた。 α Fe 組織の Hmv は平均で 218、パーライト組織では平均で 345 であった。試験後の典型的な破面像を図 12 に示す。(a) のマクロ組織では粗大な非金属介在物が断面上部にみられる。これらを除く多くの領域では、(b) で示すように微細ディン

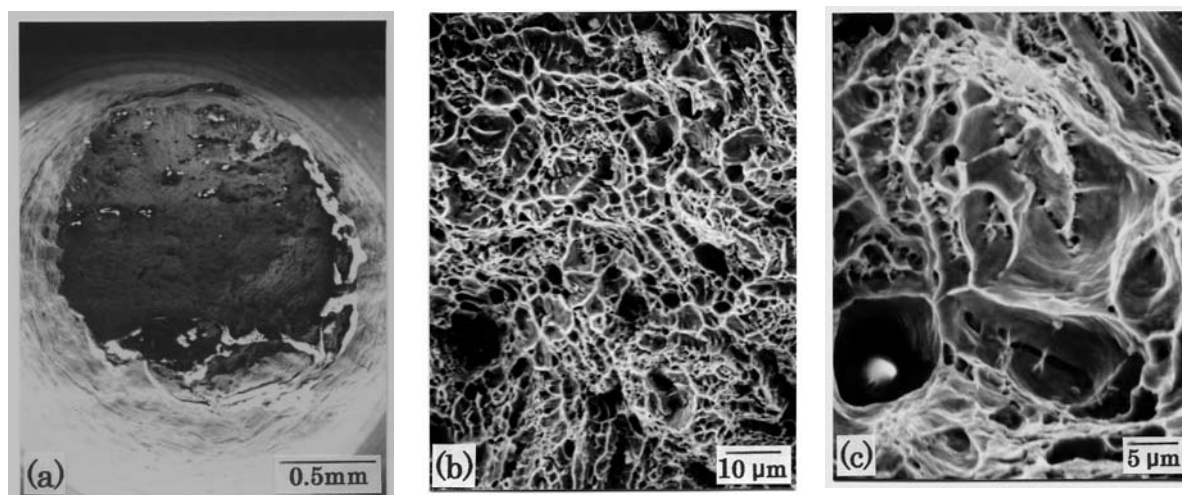


図 12 引張試験片の破面 (SEM 像)

(a) マクロ像 (b) ディンプル紋様 (c) 非金属介在物周辺

プル状破面になっており、破壊モードは靱性に富むものである。ただし、非金属介在物が存在する場所では、(c) で示すように破面のディンプル寸法が大きくなっており、介在物の

周囲に空洞が生じているので、ここでは局部的に強度が下がっているとみられる。

3.4 古代刀構造の再現

古代刀の構造は一つではないが、本研究でも得られた縞状組織を持つ刀剣の再現をするために、簡易型のたたら法で作成した鉄塊を使って、構造の再現を試みた。

(1) たたらによる原料鉄の作成

この研究で試みた原料鉄の作成法は東京工業大学・永田和宏教授が考案した簡易型のたたら炉法である。原料は砂鉄である。これを 20kg 使用し、還元剤として松炭を用いた。耐熱煉瓦製のたたら炉を築き、この上に鉄板製の排気筒を置いた。予め燃焼させた炭の上に、順次、砂鉄と炭を筒の上部から投入し、砂鉄の還元を進めた。図 13 にたたら炉の操業風景を示す。操業時間は約 6 時間である。終了後、炉を壊して炉底に凝固している鉄塊を取り出した。図 14 に得られた鉄塊の外観を示す。得られた鉄塊の重量は約 4.7kg であった。



図 13 たたら操業風景



図 14 たたら操業で得た鉄塊

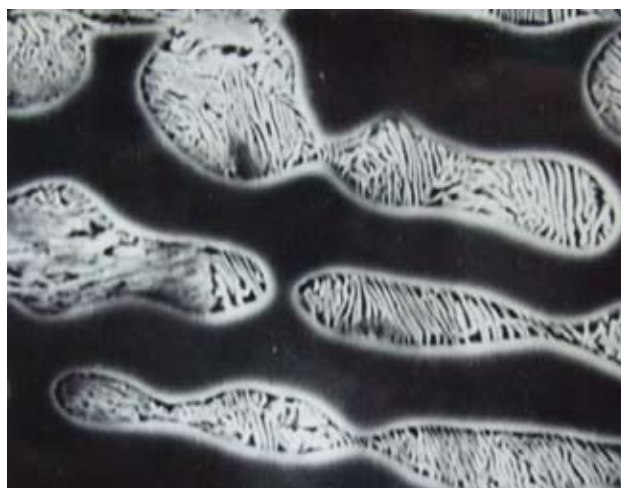


図 15 たたら鉄の組織の一例(x3000)

たたら鉄の組織の一例を図 15 に示す。組織は場所によって異なり、低炭素の部分、高炭素の部分、グラファイトの存在する銑鉄の部分などがある。全体的には低炭素の組織が多

かった。試料 A は全体として炭素量が低く、したがって、試料 A と同様な縞状組織をもつ刀の再現に作成した鉄塊は適しているとみなし、実験に供した。

(2) 刀剣状試料の作成

上述の鉄塊を使って刀形状の薄板の作成を行った。これには、刀匠の河内國平氏の協力を得た。鉄塊を加熱して 4 個の鉄塊に切り分け、これを鍛錬して圧板状とした。これを 6 回重ねて鍛錬し、刀形状とした。図 16 に作成した試料の外観を示す。全長約 35cm、厚さは最大 6mm である。断面形状の錆のない平作りで、空冷および水焼入れ試料を作製した。



図 16 再現実験した鍛錬鉄の外観

(3) マクロ組織

図 17 に空冷試料の断面マクロ組織を示す。断面中央の小さな矩形の列はビッカース硬度の圧痕である。断面のマクロ組織から明らかなように、縞状組織が再現されている。縞の間隔は断面上部から下部に向かって狭くなっており、これは試料の刃側を薄くするために鋸打ちしたのが原因である。棟を山形の形状とするため上部から鋸打ちしたため縞の乱れがあるが、その下部の縞は非常に整然としている。刀匠が注意深く鋸打ちしたために整然とした縞状組織が得られた。断面の上部から下部への硬度分布を調べると、硬度は下部に向かって高くなっており、これは縞の間隔が狭くなって、炭素量が増えたためであろう。



図 17 再現実験した試料の断面マクロ像

4. 結言

古代刀の微細構造、非金属介在物および機械的性質について検討した。一つの試料(A)では断面組織が軟鋼帯と半硬鋼(低炭素鋼)帯からなる縞状組織で、韌性に富む。他(B)は炭素量の異なる領域からなる組織であった。試料 A の非金属介在物は凝固組織を示し、大小の 2 種がある。Fe, Si, K, Ca などを含み Ti 検出されない。鉄鋼原料は砂鉄由来ではなく、他の鉱石の使用したものである可能性が高い。縞状組織(A)の古代刀を再現するために自家製

のたたら鉄を使用して鍛錬した試料では、縞状のマクロ組織が再現できた。試料 B については、さらに詳細な検討を進めている。

謝辞

たたら鉄の作製を指導して戴いた東京工業大学・永田和宏教授、再現試料を鍛錬して戴いた刀匠・河内國平氏、本研究を支援して戴いた JFE21st 財団に深謝する。

参考文献

- * 一部は BUMA-VI で発表: Proc. The 6th International Conf. on the Beginning of the Early Use of Metals and Alloys, Beijing, China (15-20 September 2006)88-93.
- (1) 北田正弘: 日本金属学会春季講演大会概要集 (2006)361.
 - (2) M. Kitada: Proc. of the arts and science of archaic steel and sword making in Japan and Nordic countries, UNESCO, Stockholm (2005) 34-55.
 - (3) 俵国一: 日本刀の科学的研究 (原典: 鉄と鋼, 5(1919)ほか) 日立評論社 (1953)378-419.
 - (4) 近重真澄: 東洋錬金術(1915)91-107.
 - (5) 佐藤忠雄: 鉄鋼材料, 今井勇之進編, 朝倉書店 (1960)59.
 - (6) 北田正弘: 東京藝術大学美術学部紀要 47(2007)5-48.
 - (7) 鉄鋼精錬 I, 新制金属講座 金属学会(1960)8-9, 製銑製鋼法 日本鉄鋼協会編(1960)11.
 - (8) 製銑製鋼法, 日本鉄鋼協会編 (1960)87.
 - (9) 佐久間健人, 相沢龍彦, 北田正弘: マテリアルの事典, 朝倉書店(2001).
 - (10) 谷野満, 鈴木茂: 鉄鋼材料の科学 内田老鶴圃 (2002).
 - (11) R. S. Williams: Principle of Metallography, McGraw-Hill (1919)125, 142.