

造仏素材としての鉄に関する考察

— 東アジアの鉄仏と製鉄技術についての実証的研究 —

やま もと こう じ
山 本 浩 二

はじめに

今から約 2,000 年前、西インドで造られはじめた仏像は仏教の伝播とともに主に東アジア全域に広まり、種々の荘厳、建築を含めた仏教美術として発展してきた。仏像を造る素材の代表的なものとしては石、金属、土、木、漆などがあげられ、その土地の風土、技術に合わせて様々な素材や技法が選択されてきた。

古くから優れた青銅加工技術を誇る中国では銅の産出量が少なく、歴代皇帝によって「禁銅令」が度々出された。金属で仏像を造るには青銅が適しているが、上記のような理由から銅の代替として鉄が素材として用いられたと考えられる。朝鮮半島も同様であったが、日本においては産銅国であるにもかかわらず鉄で仏像が造られた。それらのほとんどは東日本に集中しており、国内で約 100 体ほどである。鉄仏は高温溶解のため鑄造するのが難しく、鑄肌が荒れることに加え、その硬さゆえに仕上げもままならない。造仏素材としては扱いにくい鉄について、鉱石からの還元溶解と浸炭、脱炭について検証し、鉄仏と製鉄についての考察を加える。

1 鉄仏の歴史

1-1 仏像の誕生

仏像が誕生したのは釈迦入滅後はるか後年、紀元 1 世紀から 2 世紀のころ、ガンダーラやマトゥラーにおいてであった。インドから東アジアにかけて、仏教が伝播していった道筋は大きく分けて南方ルートと北方ルートがあり、日本に伝わって来たのは北方ルートを通してである。

釈迦が入滅したのは紀元前 4 世紀中頃のことだが、聖なる存在を偶像化することをタブーとしていた当時のインドでは、偶像の代わりに聖なるシンボルとしての宝輪や悟りを

象徴する菩提樹、または仏足石などによって表現している。

紀元1世紀の半ばごろ、アフガニスタンから北西インド（現パキスタン北部）まで勢力を拡大したクシャーーン王朝期において、ヘレニズム・ローマ文化の影響を受けた仏像がつくられることになった。最初は金貨に王の像と表裏になるように仏像が浮き彫りにされていたが、仏塔（ストゥーパ）や寺院内の祠堂に礼拝対象としての仏菩薩が表されるようになる。やや遅れて、中部インドのマトゥラーでも仏像が造られ始める。ガンダーラの影響をほとんど受けない古代インド以来の伝統的な造形は量感的な特徴がある。

1-2 中国における鉄仏

シルクロードを通して仏教が初めて中国に伝えられたのは前漢時代の末期、紀元前後のころだったといわれている。仏像が造られたのは、文献上では後漢の時代で、桓帝（147～167年）が仏像を造って祀ったとある。在銘の独立像としては五胡十六国時代の石趙で造られた金銅仏坐像（338年）がある。この像のようにガンダーラ風を示す小金銅仏は、殷（商）、周時代の銅器以来の高度な鑄造技術を駆使して造られたと思われ、遺品もかなりの数にのぼる。このころ各地に寺院が建立されたことが文献から知られるが、それらは戦乱の中で失われ、今では見ることができない。それに比べて石窟寺院は山間の不便なところにあり、石という堅固な素材でできているということもあって、今では中国における仏像の代表的存在となっている。

中国においては、製鉄は紀元前7世紀に始まっており、鑄鉄による鑄物製造は紀元前5世紀に行われていた。中国鉄仏の最も古い例は六朝、北齊の河清2年（563年）まで遡ることができる。その後隋、唐にかけて文献上鉄仏が存在したことが知られ、高さ七丈や三丈などかなり巨大な鉄仏があったことがわかる。唐代にも非常に多くの鉄仏が造られ、仏像ばかりでなく天尊像などの道教像もあったという。さらに宋代に入りますますます盛んとなり、その後もながく鉄仏は造られた⁽¹⁾。中国は銅資源が潤沢ではないかわりに銑鉄の生産が盛んであり、木炭を燃料として赤鉄鉱と磁鉄鉱から鉄を得ていた。この時期すでに鑄鉄を再加熱し、脱炭して可鍛鑄鉄に近づけるなどして鑄鉄の持つ脆性を補う工夫がなされていたが、その技術は日本にまで伝わることはなかったようである⁽²⁾。

南北朝時代の孝文帝や梁の武帝のように仏教が手厚く保護された時代ばかりではなく、三武一宗の法難とよばれる国家的弾圧も度々行われた。北魏の武帝、北周の武帝、唐の武帝と後周の世宗である。なかでも北魏の武帝は道教を広めるため7年間も弾圧している。そのため道教寺院の山西省太原普祠の神像（1097年）や狛犬など道教にまつわる像が多数見られ、特に釣り鐘が多いが、鉄仏は少ない⁽³⁾。仏教弾圧は宗教的理由以外に経済的理由において、貨幣材料としての銅や武器材料としての鉄を仏像や梵鐘から得るといった目的

もあったと考えられる。

中国は古代より優れた青銅鑄造技術を発達させたが、銅資源には乏しく、そのためたびたび禁銅令が出された。唐代中期以後に禁銅令が多く出され、玄宗皇帝以後のほとんど歴代の皇帝がその取り締まりをおこなっている。宋代に入るとさらに厳しくなり、国外への銅の流出が激しかったことから、いっそう厳重なものとなった。これらのことから、中国において鉄仏が盛んに造られた最も大きな理由は禁銅令であったと考えられる。

1-3 朝鮮における鉄仏

仏教が朝鮮半島に及んだのは高句麗、百濟、新羅の三国鼎立の時代で、高句麗や百濟には4世紀の後半に伝えられたという。朝鮮における仏教は中国の直接、間接の影響下であって発展したが、朝鮮独特の像である半跏思惟像などは中国の影響とは別の感覚で造られており、この様式は日本の白鳳、天平時代の仏像にも影響を与えている。9世紀後半になり、従来の銅仏に代わって鉄仏の鑄造がはじまり、仏の種類も阿弥陀、薬師如来から大日如来、毘盧遮那仏が多くなり、密教的傾向が強くなった。高麗初期には新羅の伝統を受け継ぐ多くの鉄仏が造られ、そのうちには新羅とは異なる趣の清新ですなおな微笑を見せる傑作も見られるが、それも一時代であり、11世紀になると忠州大圓寺鉄仏坐像のように形式化した彫刻になってしまった⁽⁴⁾。その後1394年に李朝朝鮮は儒教を国教として仏教を弾圧し、仏国寺だけを除いて仏像を廃棄させた。この時多くの仏像が地中に埋められたが、難を逃れたものが戦後になって発掘され、現在は博物館に収蔵されている。

韓国に現存する鉄仏は数が多く、大型のものが多く、日本にある朝鮮の鉄仏をあわせると約40体ほどである。中でも韓国国立中央博物館所蔵の鉄造仏坐像はその大きさ、優美な造形から韓国を代表する鉄仏といってよい。この坐像は、^{キョンギド}京畿道・^{ハナムシ}河内市・^{ハサンナムドン}下司倉洞寺跡から出土したもので、戦後の発掘調査により、高麗時代の仏像であることが明らかになった。現在も寺跡には石の台座の一部が残っている。高さ2.88m、重さ6.2トンに達し、韓国最大の鉄仏である。

この仏像の鼻の部分と両手は後に補修されたものであり、石窟庵の本尊仏と同形式の服装と手印であるが、腰が急激に細くなるなど、不自然な造形と抽象化された細部の表現を見ると、統一新羅時代の仏像を継承した、高麗初期の作品と推定される。仏像の両膝に固まった漆の痕跡が残っていることから、仏像全体に厚く漆塗りした後、金彩の処理が施されたことがわかる⁽⁵⁾。

朝鮮は中国同様銅の産出が少なく、高麗時代には日本から銅を輸入していたほどである。この点も中国と同じく鉄仏鑄造の大きな理由といえるだろう。朝鮮における製鉄炉は日本のたたら製鉄炉よりもやや大きめで、^{しいてつ}沙鉄、土鉄（どちらも褐鉄鉱が風化して細粒

化したもの)を原料としていたため、銑鉄生産量は日本より多かったといわれている。そのため大きな鉄仏を鑄造する際にも大量の銑鉄を用いて複数の溶解炉によって一気に鑄造することで欠陥のない鉄仏をつくることができたと考えられる。大きな像であるにもかかわらず、肉厚が薄く、鑄肌の荒れも少ないことから高温で鑄造したのではないかと考えられる⁽⁶⁾。

1-4 日本における鉄仏

日本に仏教が伝えられたのは欽明天皇の7年(538年)、百済の聖明王が「釈迦仏金銅像、経論幡蓋若干」を送ってきたことによる⁽⁷⁾。日本で最も古い時代に金属でつくられた飛鳥大仏をはじめ初期の日本の仏像は青銅で鑄造され、表面には鍍金が施された金銅仏が主流であった。7世紀半ばになると乾漆、塑造が仏像の新しい技法として取り上げられるようになり、奈良時代に流行することになる。時代が下るにつれて金銅仏は衰退し、平安時代に入ると貞観彫刻に代表される木彫仏が主流となっていく。その後定朝があらわれ寄木造を生み出し「和様」を確立する。そして平安貴族によって確立された雅な和風美術を継承しながら、新しい時代に入って力強い作風を展開した慶派へとひきつがれていくのである⁽⁸⁾。

金属による造仏素材としての青銅は平安期には衰退し、室町時代に入って善光寺式阿弥陀三尊像の流行に伴って再び造られるようになる。仏教美術の中心は京都、奈良をはじめとする関西地方であり、日本における造仏の初期段階においては文化的に遅れた土地であった東国との技術的格差は大きかった。文化の中心からはずれた東国において、さかんに鉄仏がつくられるようになるのは鎌倉時代である。現存する古い像としては約100体が数えられ、在銘像で最も古いのは栃木県上石川薬師堂の薬師如来坐像で建保6年(1218年)の銘がある。銘はないが、鎌倉市覚園寺の不動明王坐像は鎌倉時代もごく早い頃の作と考えられている⁽⁹⁾。

現存する鉄仏の中で最も数が多いのは阿弥陀如来で29体である。次に地藏菩薩が13体、薬師如来が9体、不動明王が5体、十一面観音が5体、その他如来像が5体、聖観音が4体、その他(宝塔、狛犬、鉄燈籠、梵鐘等を含む)が29体である⁽¹⁰⁾。

仏教が伝来して約200年後の730年頃から関東地方にも仏教が広まるようになった。大和政権からみれば蛮国である東北地方の鎮めとして現在の栃木県に最初の薬師寺が建立された。その後国分寺も建立され、その本尊も薬師仏であったことから薬師信仰が盛んとなる。このことが栃木に薬師如来像が多く残されている理由として考えられる。

また、愛知県に現存する鉄仏がすべて地藏菩薩像であることから当地における信仰の様子をうかがい知ることができる。木曾川沿岸地区では古くから製鉄が行われており、鉄

地金の入手も容易であったことと鑄造技術水準が高かったことにより、等身大で仕上がりも良い鉄仏が見られる⁽¹¹⁾。鉄仏というと素朴な造形性とつたない技術というイメージが想起されるが、高度な鑄造技術をもっていた大阪河内地区の鑄物師等の技術者が各地で造仏に携わっていった。当時の鑄物師は諸役免除、往来の自由、関所の通行料免除などの特権を得ており、地方に出向いて鑄造することを「出吹き」と呼び、そのまま定住するものもあった。栃木県の西方薬師堂像の銘には「藤原重吉」「安部光信」「丹治宗彦」などの名があり、これらは大阪河内鑄物師に多い姓である⁽¹²⁾。

鎌倉時代は旧来の南都仏教、平安仏教に対する新興仏教として念仏による極楽往生を説いた浄土系宗派、座禅を思想の中心においた禅宗、法華経をよりどころとした日蓮宗など現在の主要な日本仏教の宗派が相次いで成立した時期である。1214年、越後に流罪となっていた親鸞は東国布教のため現在の茨城県下妻市に向かい、その後約20年間布教活動をおこなった。東国に根付いた念仏の信仰によってこの地に数多くの阿弥陀如来像が残されることとなった。

鉄仏の内部構造はさまざまであるが、造像年代の初期のものや小型のものはむく（内部が充填されている）が多い。静岡県袋井宗円寺の薬師如来像は1.2mの像高ながらむくであり、珍しい⁽¹³⁾。

むくの鑄造は中子なかこが必要ないので型をつくるのは楽だが、体積が大きく、鑄造後の引けによって欠陥が出やすいことに加えて多くの材料が必要となり、出来上がりも重くなってしまふ。そのため鑄物の厚み分を削った中子を中心部分に仕込むのだが、このとき中子がずれるのを防ぐ目的でこが筭と呼ばれる鉄棒を使って外型と組み合わせる。通常筭は鑄造後に取り除かれるが、これが残ったままの鉄仏も見られる。

また、体の前半分だけ仏像の形になっており、背面は平らな状態で鑄造されたものや「肉盗み」といって最中の皮のように背面中心部を削りとったような形状のものもある。

鉄仏において腕を鑄ぐるむという例は多く、群馬県前橋善勝寺の阿弥陀如来坐像、神奈川県伊勢原大山寺の不動明王坐像、童子立像、埼玉県入間長和泉寺の不動明王立像などの腕は事前につくっておき、本体の型に組み込んで鑄ぐるまれたものである。鑄ぐるまれた箇所から腕が脱落して穴が空いている像もある。鑄込まれた鉄仏の多くは下地が施され、漆箔、あるいは彩色によって仕上げられた⁽¹⁴⁾。

鎌倉時代をはじめとする中世に鉄仏が造られた理由として、東国武士の好みに合致したという佐藤の意見に同調する。自らの身を守る武器としての鉄に対する信頼感が、鑄鉄によって造形された仏像が持つ硬さとして表されたのではないだろうか。銅は金属とはいえ柔らかく、粘りのある材質である。青銅になって硬くなったとしても鉄に比べれば柔らかい。腐食という観点では実際には銅のほうが考古遺物として良く残るが、鉄の持つ硬さは

永続的に後世に残り続ける素材として映ったのかもしれない。

初期の鉄仏が東国の有力な武士たちの発願によって造られたのに対して、中世後半以降の鉄仏はその様相が変化している。愛知県観聴寺の地藏菩薩立像のうち1体は銘文に「大工炭人迄帰真」と書かれており、この場合の「帰真」は「寄進」と同じ意味である⁽¹⁵⁾。この時代になると有力者の呼びかけに応じて大工や炭焼きの工人といった一般民衆がさまざまなものを寄進して仏像を造っている。多くの民衆が割れた鍋釜や燃料となる木炭を寄進した様子がこの銘文から想像できる。

2 造仏素材としての鉄について

2-1 炭素量による鉄の種類

表1にみられるように、鉄は炭素含有量によって様々な呼び名がある。0.35%を境にして焼き入れによって硬くなる硬鋼と焼きが入らない軟鋼とに分けられる。また、炭素が2.1%以上含まれる鉄を鑄鉄といい、非常に硬いが融点が低くなるという特徴がある。鑄鉄には2%程度のケイ素が含まれているが、ケイ素も鑄鉄の融点を下げることに貢献している。

鉄仏のほとんどは割込型でつくられており、土でできた胴体前後の型を合わせるときにできる隙間に溶湯が流れてバリができる。このバリは青銅であれば鑄ざらいという工程で

表1⁽¹⁶⁾

0.35% 未満	0.35-2.1%	2.1% 以上
軟鋼	硬鋼	鑄鉄



図1(左) 図2(右) 阿弥陀如来立像
茨城 常陸太田市阿弥陀堂⁽¹⁷⁾

きれいに取り除くものだが、鑄鉄の場合は硬くて刃が立たないため、そのままにしているものがほとんどである。

鑄物としての欠陥はこれ以外にも液体が固体になる際の収縮によって「引け巣」ができたり、中子が動いて外型との隙間が狭くなり、溶湯がまわりきらずに穴があいてしまったり、鑄造時の圧力で型がずれて漏れることで溶湯が足りなくなり、つぎ足した所に湯境ゆざかいができることなどがある。いずれも青銅であれば補修可能であるが、同様の理由で鉄仏の場合は鑄っぱなしということがほとんどである。

鑄鉄の硬さについて、鑿の材料である炭素工具鋼（炭素量約1%）と青銅とを比較すると以下のようになる。

表2⁽¹⁸⁾

金属の種類	青銅 BC 1	炭素工具鋼 SK 95	ねずみ鑄鉄 FC 150
ブリネル硬さ	HBW 55	HBW 187~212	HBW 212以下

鑿やヤスリの材料である炭素工具鋼に焼きを入れても鑄鉄をたやすく切削できるほどの硬さになることはない。青銅に比べて鑄鉄がはるかに硬く、作業が困難であることが想像できる。

鉄仏には在銘のものも多くみられるが、ほとんどすべての場合において型に文字を彫り込み陽刻としている。青銅であれば鑄込んだ後に鑿で彫ることができるが鑄鉄は不可能だからである。中には型に文字を彫り込む際に間違っただけでそのまま彫り、鑄物には反転した文



図3 薬師如来坐像背面
栃木 西方薬師堂



図4 狛犬
栃木 二荒山神社⁽¹⁹⁾



図5 中国雲南省納西族の鑄造



図6 合理的なとりべ

字で陽刻されているものもある。

鉄は不純物を含まない純鉄であれば融点は 1540°C と非常に高温だが、炭素が混ざることによって凝固点降下がおこり、約3%の炭素量の鑄鉄であれば融点は 1200°C まで下がることになる。筆者が中国雲南省の少数民族納西族の鑄鉄工房を調査旅行で訪ねたとき、牛引き用の犁を生産している揚氏は内径300mmほどの簡易的な溶解炉を使って松炭の熱量だけで鑄造を行っていた。材料は断面の表情から白銑鉄あるいはねずみ鑄鉄と考えられ、約20分の溶解時間で3~4kgの鑄鉄を溶解していた。昔は鞴を人力で動かしていたが、最近では電気ブロワーを使っており、次から次へと慣れた手つきで犁を鑄込んでいた。

工房は雨をしのぐための屋根が納屋から張り出しているだけのほほ屋外といってよい土間で、使う道具は溶解炉と土で出来た型のみである。鑄鉄がこんなに簡単にできるのかと驚かされたのを覚えている。彼のような鑄物師はあちこちの村にいるのであろう。中国の鑄鉄文化の一端を垣間見たように思う。日本でも同様のこしき甌炉と呼ばれる簡易的な溶解炉があり、主に茶釜を制作する個人作家や小規模な工房で使用している⁽²⁰⁾。構造やサイズが納西族の溶解炉と似ているのは、扱いやすく手頃な大きさであることを示している。円筒形の炉の底に溶湯がたまるというのは共通だが、銑鉄を出湯してとりべで受けて鑄込むか、円筒の胴体を外して溶湯の溜まった底部に棒をとりつけてそのままとりべとするかという違いがある。炉に空気を送り込むための先端部分をはぐち羽口という。双方とも羽口は胴体下部に位置し、溶湯付近に空気を供給できるよう斜め下に向けて取り付けられる。以上のように、古くからの鑄鉄技術を伝承している納西族の仕事から、中国において鉄の鑄造が広くおこなわれてきたことがうかがえる。銑石から鉄を得る方法として、中国ではるつぽ坩堝を使った製鉄法が発明された。それに対して日本では砂鉄を原料としたたたら製鉄が主流であった。鉄仏の素材である鉄のでき方と生産量の盛衰が造像に及ぼす影響について考察するため、これらの製鉄法についての再現を試みた。

2-2 たたら製鉄

日本に鉄がもたらされたのは弥生時代早期といわれている。石器時代→青銅器時代→鉄器時代という主要利器による時代区分法にあてはまらない形で、青銅期と鉄器が大陸からほぼ同時に入ってきたと考えられている。舶載品としての鉄材料は新羅で作られていた鉄挺である。その後砂鉄を木炭で還元するたたら製鉄によって鉄を製造することができるようになった⁽²¹⁾。

たたら製鉄の開始時期は5世紀前後と考えられているが、現在確認されている最古の製鉄遺跡としては岡山県久米郡久米町の大蔵池南遺跡などがあり、6世紀後半から7世紀初頭とされている。その後奈良時代、平安時代と時代が進むにつれて製鉄技術が進展していったことは現存する優れた鉄製品や「延喜式」にみられる記述から読み取ることができ、そして鎌倉時代に入るとさらに生産能力が高くなり、この時代に多くの鉄仏が生産されたことにつながってくる⁽²²⁾。

以下に2008年に武蔵野美術大学で実施された簡易的なたたら製鉄の概要を示す。

まず千葉県の九十九里浜飯岡海岸で砂鉄を採取した。砂浜にできた風紋の黒い部分に砂鉄が多く含まれている。九十九里浜の砂鉄の成分は鉄80%、チタン10%、シリカ5%である。

砂鉄の採取には磁石を使用した。ほとんどの砂鉄は磁鉄鉱、チタン鉄鉱であり、黒色を呈する。出雲地方では山陰側の純度が高い真砂砂鉄と山陽側のチタン鉄鉱系列の赤目砂鉄とに分け、その性質に応じて使い分けてきた。海岸の砂鉄はその量を問わなければ全国の多くの海岸で堆積している。

たたら製鉄には2種類の操業スタイルがあり、一方を「鉬押し」もう一方を「銑押し」という。鉬とは砂鉄を還元する過程で完全に溶解せず様々な炭素濃度の鉄が塊となったも



図7 九十九里浜 飯岡海岸

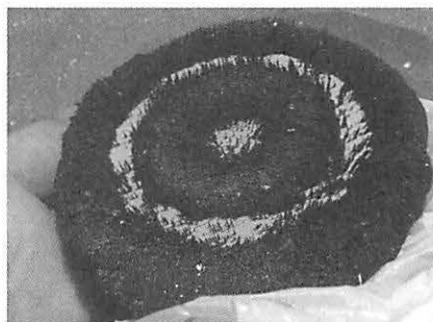


図8 磁石で集められた砂鉄



図9 比重選鉱

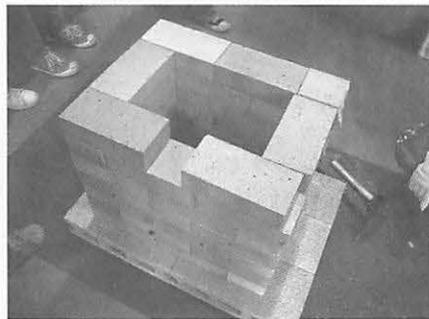


図10 耐火煉瓦による炉



図11 たたら



図12 炭切り

ので、原料には真砂鉄が用いられる。鳥根県の安来市にある日刀保たたらで操業しているのは日本刀の原料となる玉鋼を得るための鋸押し法である。それに対し鉄を完全に溶解して鋸をつくらないように操業するのが銑押し法である。できた銑鉄は炉底から流し出して固める。

砂鉄を水に入れて比重選鉱を行う。量が少ないのであれば磁石を使って選鉱するほうがより高品位な砂鉄を選り分けることができる(図9)。

耐火煉瓦を用いて炉をつくり、炉底には割った木炭を敷いておく(図10)。本来のたたら製鉄では粘土で炉壁をつくり、高温で砂鉄を還元する際に炉壁も後述する「ノロ」の材料となるため徐々に薄くなっていき、これ以上炉壁が耐えられなくなったところで操業が終わる。鉄が分離した後、それ以外の成分である「ノロ」は高温ではガラス状の熔融状態となる。「スラグ」または「鉄滓^{てっさい}」ともいう。

足踏み式の鞆をたたらという。箱と踏み板の間のわずかな隙間から空気が漏れてしまうため、動物の毛皮を使って圧力が下がることを防いだ。羽口は耐火性の粘土で覆われている(図11)。



図 13 操業風景

燃料の炭は松炭で、数 cm 角ぐらいになるよう包丁を使って刻んでいく。これを炭切りという（図 12）。松炭がなければクスギなどの堅炭を用いる。昔は砂鉄を運ぶより木炭にする木を運ぶほうが難しかったので、炭焼きできる場所を求めてたたらも移動した。

木炭が燃焼する際に発生する一酸化炭素には強力な還元力があり、酸化鉄の酸素を奪い二酸化炭素となって排出される。空気を多く送れば高温を得やすいが、還元性雰囲気を維持するため酸素の量を制御しなければならない。

木炭のみを投入して火入れ後、はじめ正面の羽口から炉底をあたたため、炎が炉底から 70cm まで来たらノロづくりのための砂鉄 1kg を 2 回投入する。羽口を側面に切り替えて以後 10 分ごとに砂鉄 1.5kg ずつ、木炭の量はおおよそ炉内に 10cm たまるぐらい投入し、10 分で 10cm 木炭が減るよう風量を調整する。砂鉄 15kg 投入で 1 回ノロ出しして様子を



図 14 炉の解体



図 15 鋳

見る。その後20分の時点でも出してみる。あとは適宜ノロ出しを行う。ノロ出し口は木炭を突っ込み、隙間はモルタルで塞ぐ。ノロ出しの際ノロが固まっている場合は鉄棒でノロを割ってかき出す。

30kgの砂鉄から5kgの鉞ができた(図15)。この中には炭素量の少ない軟鋼と炭素を多く含む硬鋼が混在しているため、刀鍛冶は薄く叩き延ばして急冷した後に割り、断面の表情から炭素含有量を見極めて使用する。

2-3 坩堝による製鉄

鉞石を還元し製鉄する際に難しいのは酸素量の少ない状態で高温を作り出すという点である。木炭に空気を多く送り込めば高温を得ることができるが、酸化状態となってしまう。古代中国では、坩堝を用いた製鉄法が発明された。坩堝の中で密閉することで強烈な酸化炎でも還元を行うことが可能となる。砂鉄と木炭の粉を混ぜて接触面積を大きくし、坩堝に入れてコークスの火力で周りから加熱するという方法による還元を試みた。



図16 準備物

準備したもの

砂鉄 300g 木炭粉末 150g 黒鉛坩堝 ハシ 掻き取り棒 コークス炉 耐火煉瓦

坩堝に砂鉄と木炭を混ぜたものをいれ、コークス炉で加熱する。坩堝の口は耐火煉瓦でふさいである(図17)。

2回に分けて材料を投入したが、ノロが暴れて吹き出しそうになったので、上の部分を取り除いた。高炉による製鉄では鉄鉞石とコークスに加えて石灰石を投入するが、その目



図 17 コークス炉



図 18 ノロを取り除く

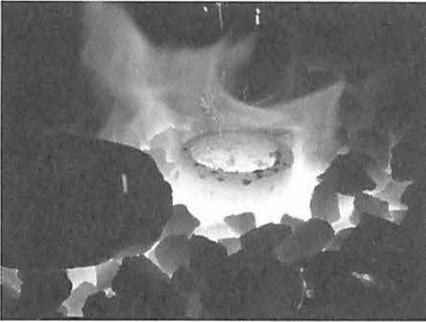


図 19 火花が出る

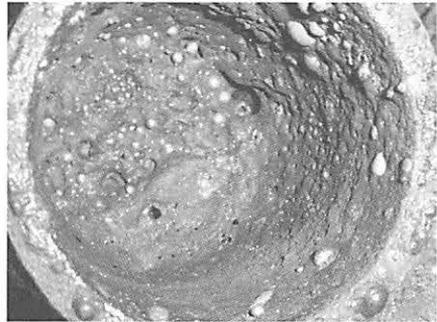


図 20 坩堝内部



図 21 ノロを割る



図 22 できた鉄の塊

的はできたノロの流動性を高め、スムーズに鉄と分離しやすくするためである (図 18)。

全ての材料を溶かし終わったところで、炭素を含む鉄に特徴的な、先端が割れる形の火花が出ていた (図 19)。

冷めた後の坩堝内部には球状の鉄粒がノロの間に浮いた状態が見られる (図 20)。

300gの砂鉄を投入して100gの鉄を還元することができた (図 21、22)。非常に硬かつ

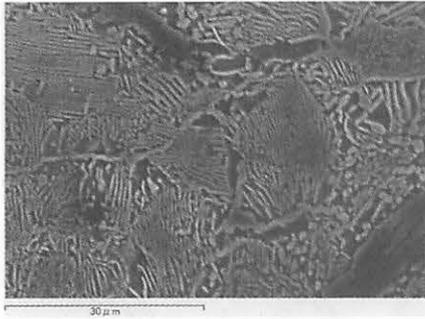


図 23 走査型電子顕微鏡画像



図 24 偏光顕微鏡画像

たため、熱間で鋳を使って割りを入れ、折り曲げを繰り返して切断した。

断面を研磨してエッチングを施し、走査型電子顕微鏡で観察するとパーライト組織が確認できた (図 23)。

結晶粒界にセメントライト (Fe_3C) が見られないことから過共析鋼ではなく、炭素含有量は 0.765~1.0% と思われる。

坩堝内の鉍石を溶かすために 1500℃ 以上の高温を必要としたが、還元性雰囲気を維持しなければならないという制約がないため、燃焼自体は合理的である。この実験により、銑鉄を得ることはできなかったが、炭素含有量の高い鉄を得る方法としては有効であることがわかった。

2-4 アセチレン製鉄

たたら製鉄、坩堝製鉄を通して、鉄の還元に必要な条件が見えたが、還元の間を視認で確認したいと考え、溶解皿の中でアセチレントーチの炎によって還元することを試みた。反応を合理化するため、黒鉛坩堝に木炭と砂鉄を混ぜたものを詰めて都市ガス炉を使い 1000℃ で 5 時間加熱し、半還元状態の材料を準備した。

左の画像が加熱前、右の画像が加熱後である。(図 25、26) 800℃ 程度の温度でも還元反応は進行するはずなので、坩堝の中で海綿状の鉄ができるかと期待したが、砂鉄の色がやや銀色に変わるとどまった。しかしこの工程によって砂鉄から直接還元するよりも時間短縮がはかられた。

準備したもの

予備還元を施した砂鉄と木炭粉、アセチレントーチ 耐火煉瓦 セラミック溶解皿

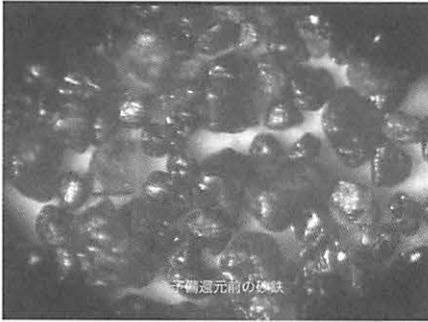


図 25 (左) 図 26 (右) 砂鉄の拡大写真 (筆者作成 DVD より)

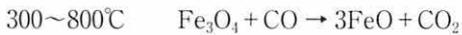
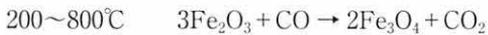


図 27 アセチレン還元

図 28 溶解皿内部

溶解皿に半分ぐらいの材料を入れ、アセチレン過多の還元炎で加熱する (図 27)。

少しずつ表面の材料が融けはじめ、次第に溶解皿全体を覆うようになる。炎によって加熱されている箇所から泡のようなものが出ているのが見えるが、溶融鉄がその箇所から出て来ているようには見えない (図 28)。鉄の還元過程 (高炉の場合) を化学式で書くと以下のようになる。



一酸化炭素によって還元された酸化鉄 (Ⅲ) は二酸化炭素を放出し、 Fe_3O_4 、 FeO と変化しながら還元が進行する。950°C 以上になると直接炭素によって還元される。これによりノロから出ている泡は二酸化炭素と考えられる。

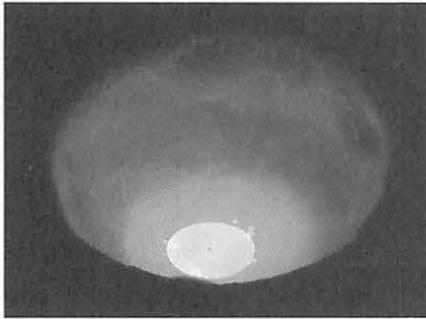


図 29 溶融鉄

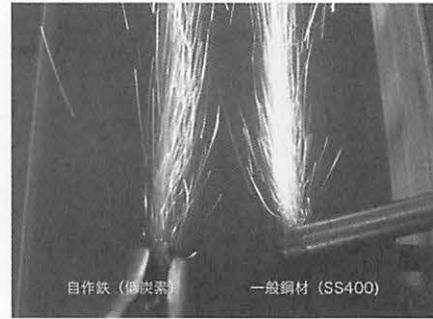


図 30 火花試験 1

ノロが表面を覆うことによって下の粉末状の材料を加熱しにくいので、あえて炎を揺さぶってノロを左右に寄せながら加熱する。少しずつノロの下に赤く光る溶融鉄が集まってくる (図 29)。

こうして分離された鉄の炭素含有量を調べるために火花試験を行った (図 30)。火花試験とは、研磨の際の熱を持った鉄粉が酸素と反応して激しく燃え、中に含まれる炭素の量によって異なる火花を発生することを利用して炭素量を目視で判断する方法である。JIS G 0566 にも「鋼の火花試験方法」とあり、簡易的に炭素含有量を確認する方法として知られている。

一般的軟鋼材である SS400 の丸棒と並べてベルトサンダーで研磨したところ、ほぼ同じ形の火花が出たことから、炭素量は約 0.16% と判断した。炭素量の少ない鉄になった理由としては、還元炎とはいえアセチレントーチの炎の酸素濃度が高く、炭素を奪ってしまったことが考えられる。炭素量が低くなるにつれて融点上がることになるので、還元溶解は困難になる。

2-5 浸炭と脱炭

鋼材の脱炭は酸素が十分な状態で約 700℃ で起こりはじめる。また、炭素過多の状態ですら約 900℃ 以上で浸炭がはじまる。溶融状態の鉄に木炭粉を直接接触させ、浸炭の過程を観察した。

木炭粉投入直後は激しく反応して火花が出るが、次第におさまりながら溶融鉄の周辺が泡立つようになり、ノロができ始める (図 31)。溶融、木炭投入を 3 回ほど行くと鉄から出る火花が線香花火のようになり、炭素量が増したことがみてとれる (図 32)。それに伴い徐々に溶解に必要な熱量も下がっていった。

再び火花試験を行ったところ、炭素工具鋼と同じぐらいの炭素量であることがわかった

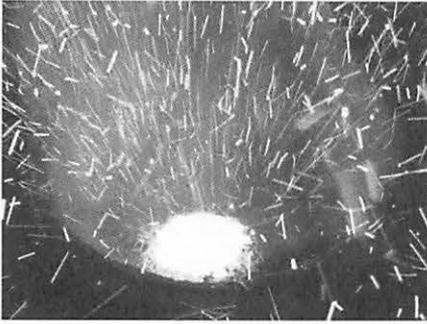


図31 木炭粉投入時

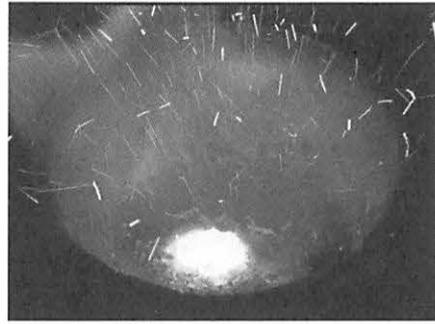


図32 火花

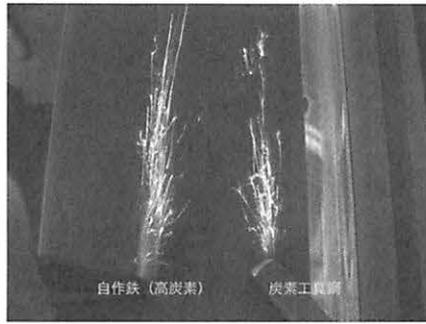


図33 火花試験2

(図33)。鑄鉄をベルトサンダーで削ると、炭素工具鋼よりも赤暗い火花となり、その伸びも短い。

たたら製鉄の作業スタイルとして、銑鉄を得る銑押し法と熔融しきらないで鉚を生成する鉚押し法とがあることは前に述べたが、鉄の用途に応じて精製が必要な場合も出てくる。鉄仏のように鑄鉄として用いる場合は銑鉄を再度溶かせば良いが、刀のように炭素量約1%の鋼を得るためには銑鉄の炭素量を減らす工程が必要になる。これを「下げ」という。「下げ」を行うには銑鉄の板を炉の中でアーチ状に積み上げて木炭で覆って加熱し、空洞になったところに空気を送り込んで脱炭する。このとき銑鉄は溶かさないう注意し、なるべく均等に空気に触れるよう注意しながら木炭の火力で約1時間加熱する⁽²³⁾。

また、鉚押し法によってつくられた鋼は炭素含有量にばらつきがあるため、種類の異なる鋼片を鍛接して折り返し鍛錬することで刃物作りに適した炭素含有量にしている。こうしてできた鋼を「卸し鉄」という。

産業革命期のヨーロッパにおいて銑鉄に圧縮空気を送り込んで脱炭し、鋼を生産するベッセマー転炉が発明されるまでは高温の坩堝のなかで炭素が含まれない錬鉄と木炭を封



図34 パイプと木炭

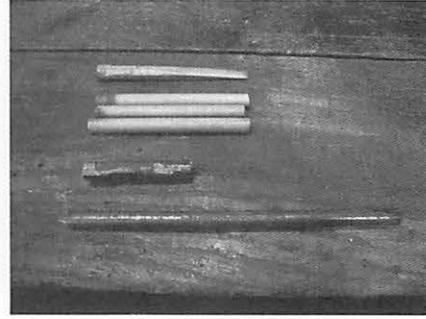


図35 上4本が浸炭した鉄

入して浸炭させて鋼とする方法が主流であった。これにない鉄パイプに低炭素の一般鋼材と木炭を封入して約 1000℃で 4 時間加熱し、浸炭させる実験を行った。鉄の表面の酸化皮膜がきれいになくなり、全体的に明るい灰色になった。火花試験を行った結果、表面の炭素量が増えていることが明らかとなった（図 34、35）。

中国では鑄鉄でできた鑄物を加熱することで表面を脱炭し、韌性を持たせるという技術が生まれたが、この技術は日本には伝わらなかったようである。北京にある元代の鉄鐘は脱炭処理をしたためか炭素濃度が低くなっている。これに対し日本に唯一現存する京都広隆寺の梵鐘には鑄放しのためか亀裂が大きく入っている⁽²⁴⁾。

刀鍛冶が鋼を鍛える際にてこ台にのせた鋼を藁灰と泥でくるんで火床に入れるのは脱炭を防ぐためである。よく燃えている炭火であれば脱炭の条件が整っているからである。

2-6 鑄鉄と鑄

鑄鉄も鑄びるが、内部にまで進行しにくいという特徴がある。船の部品に鑄物が多く使われるのも同じ理由である。鉄は赤錆が内部まで進み腐食するのに対し、鑄鉄はやがて黒錆になり、表面は安定する。日本の鉄仏の中には鑄放しのもも多くみられ、それらは耐候性が良く、造像時の鑄肌に近い状態を維持できている⁽²⁵⁾。

まとめと今後の課題

鉄仏を鑄込むときに用いる銑鉄は炭素濃度の高さゆえに融点が下がり、少ない熱量でも十分に溶かしきることができる。まず銑鉄をつくり、鑄造にはそのまま使い、鋼を得るには脱炭を行うというのが現代主流となっている間接製鉄法である。これに対し原料からある炭素濃度をもった鋼を固体の状態を得たたら製鉄のような方法を直接製鉄法という。

たたら製鉄と坩堝製鉄の実験を通して、高炭素の鉄を得るために必要な条件が見えてくる。いずれも酸素が少ない状態で高温を維持する必要があるということだが、中国で用いられた坩堝製鉄法の方が合理的であるにもかかわらず、日本では普及しなかった。日本において製鉄が始まる時期は5世紀後半ごろとされているが、古墳時代以前の日本において鑄鉄製品が作られなかった理由は貴重な鉄を鍛造によって加工する技術が確立していたためとも考えられる。奈良時代に入ると鑄鉄製品があらわれるが、平安時代になると停滞し、製鉄炉遺跡の数も減少する。

たたら製鉄の歴史的経緯から見ると、銑鉄を得る銑押し法が鎌倉時代に入って発達し、飛躍的にその生産量が増えた結果として日本各地で鉄仏の造像がさかんになったといえる。日本橋大観音寺の仏頭は頭部だけで高さが1.72mもあり、失われた胴体を含めると5mを越える大仏だったといわれている。もっとも、同時代の中国においては湖北省当陽王泉寺の鉄塔（高さ17.8m 60トン）など、豊富な銑鉄供給により桁違いの巨大鑄物を製造している。日本では鎌倉時代から室町時代にかけて数多くの鉄仏が造られたが、だいにその数は減り、天文24年が区切りとなる。輸出のため大量の刀剣が必要となった室町後期において、播州千草の白鋼に代表される銑押し法が開発されたのがちょうどこの頃で、鉄の需要が急変したことが推察される⁽²⁶⁾。戦国時代になると刀剣以外にも鉄砲のための鋼も必要となり、直接加工できる銑押し法が加速していったとも考えられる。鉄砲の銃身を鍛造で加工した日本では江戸時代にはいって大砲さえも鍛造で造ることになる。このことは日本の鉄加工技術が鍛造に重きをおいていたということを示すとともに、鍛造に適した鋼を得るために坩堝製鉄法ではなくたたら製鉄法を選択したこととも符合する。これらの検証を通して鉄仏が鎌倉時代に流行し、室町時代に衰退したことと製鉄技術によってもたらされる素材とのかかわりが見えてくる可能性があり、そのことから古代以来の製鉄技術の時代的な盛衰とその背景について明らかにされるものと期待する。

今後の課題として、鑄鉄製品表面を高温下で脱炭させる方法について様々な方法で検証したいと考えている。また、鑄鉄の鑄肌が荒れる理由とその対処法について、材料学的研究を行うとともに真土型による造仏工程について研究を進めていきたい。

註

- (1) 佐藤昭夫『日本の美術 No.252 鉄仏』至文堂 1987年 p43
- (2) 中野俊雄『中世、近世の我が国の鉄仏と中国、韓国との対比』鑄造工学 第75巻 公益社団法人 日本鑄造工学会 2003年 第9号 p630
- (3) 中野 前掲書 2003年 p629
- (4) 小杉瑪里 資料翻訳『韓国美術二千年略史(その一)』白梅学園短期大学紀要 第20号 1984年 p18
- (5) 韓国国立中央博物館 HP より抜粋 <http://www.museum.go.kr/site/main/index001>

- (6) 佐藤 前掲書 p 44
- (7) 佐藤昭夫監修『日本の仏像 100 選』主婦と生活社 2002 年 p 120-124
- (8) 辻惟雄『日本美術の歴史』東京大学出版会 2005 年 p 38-185
- (9) 佐藤 前掲書 p 24
- (10) 佐藤 前掲書 p 94-96
- (11) 中野俊雄『日本の鉄仏の成立とその鑄造方法』鑄造工学 第 69 巻 公益社団法人 日本鑄造工学会 1997 年 p 768
- (12) 佐藤 前掲書 p 31
- (13) 中野俊雄『中世、近世の我が国の鉄仏の総覧』鑄造工学 第 75 巻 公益社団法人 日本鑄造工学会 2003 年 p 699
- (14) 佐藤 前掲書 p 23
- (15) 佐藤 前掲書 p 80
- (16) 鹿取一男『工芸家のための金属ノート』株式会社アグネ 1987 年 p 63、p 65 より 筆者作成
- (17) 佐藤 前掲書より転載 筆者トリミング
- (18) 青銅のブリネル硬さ数値は J マテ・カッパープロダクツ株式会社 HP より、炭素工具鋼とねずみ鑄鉄は OKAMOTO HP より引用
- (19) 図 3、図 4 とも佐藤 前掲書より転載 筆者トリミング
- (20) 鹿取 前掲書 p 113
- (21) 佐々木稔によれば、中、後期古墳出土の鉄器の組成から推定される始発原料鉱石は磁鉄鉱の場合が多く、砂鉄を使用する国内製鉄の証拠は見いだされないとの見解もある。佐々木稔『鉄の時代史』雄山閣 2008 年 p 90
- (22) 鈴木卓夫『鉄仏の製作年代と古伝書「古今鍛冶備考」からみた銚押し法と鋤押し法の成立期の検討』鉄と鋼 Vol. 91 一般社団法人 日本鉄鋼協会 2005 年 p 97
- (23) 鈴木 前掲書 p 99
- (24) 中野 前掲書 2003 年 p 630
- (25) 中野 前掲書 1997 年 p 767
- (26) 鈴木 前掲書 p 99