

たたら製鉄とものづくり教育

東京藝術大学 教授 永田 和宏
大学院美術研究科文化財保存学専攻

1. はじめに

製品に対する使う人の評価が高ければその技術は代々長く受け継がれ伝統技術と呼ばれる。しかし、その製品の質が悪くなる、あるいは後継者がいない、生活できないなどの理由で伝統技術は消えてゆく。伝統技術は職人によって維持され継承され、そして改良を重ねてきた。それは古い技術ばかりでなく、現代産業の技術にもある。例えば、1日に1万トンの銑鉄を造る巨大な高炉の操業において、その炉の状況を判断する「宿老」という熟練技術者がいる。様々なデータを時々刻々測定し、コンピュータで制御していても最後は「宿老」が判断し指示する。

我国の伝統技術の伝承は、修練と口伝による。親方の技術を盗めというやり方である。したがって、技術を体系的に記述した文書はほとんど無い。一方、現代にも脈々と続いている技術もある。刀鍛冶の技術や、陶磁器の技術、織物や染色の技術などである。これらは、それらを撮った写真や映像、技術書が存在する場合もある。職人に弟子入りして技術を学ぶこともできる。一方、これらの技術は昔の技術と同じではない。需要や技術の進歩によって少しずつ改良されてきたからである。すなわち、昔の技術は分からない場合が多い。刀鍛冶は鎌倉期の名刀を再現する願望を持っているがその技術は分からない。

たたら製鉄は現在、鳥根県奥出雲町横田町で1か所、日本美術刀剣保存協会が主催する「日

刀保たたら」が毎冬3代（みよ、3回）行われている。たたら製鉄の技術は、6世紀後半に朝鮮半島を経て我国に伝えられ、江戸中期には完成した。しかし明治に入り、安価な洋鉄が輸入されると経済的に成り立たなくなり、大正12年に商業生産を終えた。その後軍部の援助で細々と続けられたが、昭和20年の敗戦で、武器としての日本刀の製作が禁止され、たたら製鉄も行われなくなった。昭和26年に我国が独立し、美術刀剣の製作が始まったが原料となる玉鋼の枯渇が危惧され、昭和52年に「日刀保たたら」が復元された。たたら製鉄の製品は、江戸中頃までは銑鉄（銑：ズク）であり、その後、江戸期と明治期を経て昭和19年までは銑鉄と銅塊（鋸：ケラ）が1.5トンずつ造られていた¹⁾。しかし、「日刀保たたら」ではほとんどケラを造っている。このように、たたらの技術は変遷してきたのである。

失われてしまった技術もある。たたら製鉄でズクを造る技術や、ズクを脱炭して低炭素濃度の鋼である包丁鉄や割鉄を造る大鍛冶の技術は現在出来る職人はいない。幸い昔の映像と文献がある。しかし、実際に操業を行って製品を造るとなると、そのコツまでは分からない。

さらに作品は残っているが、映像も技術文献もない場合がある。神社仏閣などの建造物や仏像は、解体修理時にその材料や製法を研究することができる。しかし、日本刀や銅鏡など金属

製品や陶磁器などの文化財は破壊して調査する事ができない。

このような場合は、試行錯誤で作品を操作する。この時、重要な指針となるのが科学である。科学は自然の仕組みを解明する学問である。例えば、製鉄技術において鉄ができる条件は今も昔も同じである。原料の違い、用途の違い、周辺技術の進歩で少しずつ操業方法は異なるが原理は同じである。炉の状態を、炎の色、廃棄物であるノロの状態、炉内からの音などから判断し手当てする。このように職人は状況判断を体験的に認識するが、これを「コツ」と呼んでいる。「コツ」は最も自然に則った最良の技術であり科学的でもある。

ものづくり教育とはこの「コツ」を体験的に科学的に学ぶことである。如何に技術を伝承し保存するか、たたら製鉄を事例に私見を述べる。

2. たたら製鉄工程の流れ

たたら製鉄の映像は大正から昭和初期に撮られたものがある。また、文献は俵國一²⁾が明治30年代に出雲と石見地方のたたら製鉄を記録した「明治期における古来の砂鉄製錬法」がある。古くは、江戸後期に書かれた下村重仲著「鉄山必要記事³⁾」がある。前者は操業技術を克明に記述した記録であり、後者はたたら経営者としての覚書である。

たたら製鉄の工程は、砂鉄の採取、たたら炉の構築、操業、大銅場、大鍛冶と続く。大銅場では大きな鉞を破碎し小塊にして、玉鋼と呼ぶ拳大の高炭素鋼などを等級付けする。大鍛冶では銑を脱炭して包丁鉄や割鉄の低炭素鋼を製造した。これらの材料を小鍛冶と呼ばれる鍛冶屋

組成	C	Si	Mn	P	S	Ti
銑(價谷)	3.63	Trace	Trace	0.10	0.003	Trace
鉞(砺波)	1.32	0.04	Trace	0.014	0.006	Trace
高炉製鋼用銑	>3.5	<0.40	>0.40	<0.30	<0.05	—

注: 1) 鉞(砺波)は最も優良な部分の分析値、2) 高炉製鋼用銑は規格1種1号
表1 たたら製鐵で生産した銑と鉞の成分組成(mass%)

が日本刀や道具、生活用品に加工した。たたら製鉄で造った銑や鉞は表1に示すように不純物が非常に少ない。錆び難く、鍛接し易いなど現代製鉄で造る鋼と比べ優れた特長を持っている。

3. 砂鉄採取

砂鉄は風化した花崗岩を切り崩し、谷の水流を利用して比重選鉱により重い砂鉄を選別し濃化した。花崗岩には砂鉄は僅か1%程度しか含まれておらず、これを90%まで濃縮する。「鉄穴流し」(かんなながし)と呼ぶ幅約1m、長さ10数mの樋に堰を設け、ここに砂鉄を沈殿させる。これを3段階の樋で濃縮した。99%の泥は下流に流れ、川床を上げ、田に流入したので農民との争いが絶えなかった。そこで鉄穴流しは農閑期である秋の彼岸から春の彼岸までに行い、農民の収入になるようにした。現在、「鉄穴流し」は禁止で、砂鉄は磁石に吸引されるので磁力選鉱法で採取されている。

花崗岩は火山性の岩石なので、火山列島である我国では河川の淀みや海岸の砂浜の黒くなった所で砂鉄は磁石で容易に採取できる。しかし、ほとんどの河川や海岸で採れる砂鉄にはチタン酸鉄鉱石(イルメナイト)が含まれており、これは磁鉄鉱の砂鉄と一緒にいるので分離が困難である。酸化チタンが多いとノロが流れにくくなり、炉の温度を高くする必要があるので、燃料代が高み、鋼も脆くなり品質が落ちる。したがって、平安時代になるとチタン酸鉄鉱石の含有量が少ない砂鉄が使われるようになった。島根県の斐伊川や鳥取県の日野川、兵庫県北部の宍粟、広島県北部、青森県久慈川流域などではたたら操業が盛んになり、他地域では消滅していった。砂鉄中の全鉄組成に対する酸化チタンの重量比は約0.05で、他の地域は約0.15と酸化チタン成分が多い⁴⁾。

4. たたら製鉄操業

平成9年2月2日から6日まで日刀保たたら炉造りから鉞出しまでを見学した⁵⁾。日刀保

たたらは横田町字大呂の鳥上木炭銚工場内にあった。たたら操業を行っている建屋は「高殿」(たかどの)と呼ぶ。高殿に近づくと窓からたたら炎が立ち上がっているのが見えた。小さな木製の観音扉を押し開けて中に入り村下(むらげ、技術責任者)に挨拶をした。中は薄暗く、小さな照明はあるが炎の明りが辺りを照らしていた。中央の盛土の上にたたら炉があり、人の呼吸のように間欠的に炎が2mほど立上っていた。

図1に示すように、この地下に湿気の防止と保温のための大がかりな構造がある。中心に「本床」と呼ぶ木炭を詰めたる層がある。その両脇に「小舟」というトンネルがある。これらは粘土で造る炉に含まれる水分を炉外に逃す役割をしており、これらの下にある「カワラ」と呼ぶ粘土層は地下水の上昇を防ぎ、排水溝に流す仕組みである。

炉を造る粘土は「釜土」と呼ばれる。「真砂」と良質の粘土をセメントミキサーで水と混練し、土町に広げてさらに素足で踏む。これは粗粒を除くと同時に中の空気を抜くためである。空気

は高温になると膨張し釜土塊を破碎する。炉造りの時、「土刀」(つちがたな)で約20cm角に切出して使う。この作業は月曜日に行われる。

火曜日の朝、炉造りに先立って下灰(したはい)と呼ぶ作業を行う。まず木材を井桁に積み重ねこれを燃やす。燠(おき)となったところを村下が「炭掻き熊手」で掻きならし、続いて「しなえ」と呼ぶ長柄の木の棒(約3.5m)で表面を叩き締める。しなえは弾力性のあるリョウブの生木で作られている。本床の縁に4人ずつ並び、しなえで交互に「そうれ」と号令を掛けて打ち下ろす。バタンと打ち下ろす度に、細かい火の粉が飛び散る。村下が「灰えぶり」(木製)や「灰もそろ」(頭は金属製)の道具で燠を平らに掻きならし、しなえで叩き締める。炉床を固く叩き締めておくことにより炉床の損耗を少なくすることが出来る。それでも2.5トンの鋸は20cm程沈む。

本床上に「筋金」と呼ぶ鋳鉄製の角棒(幅12cm、厚さ9cm)が4本設置してあり炉の輪郭を造っている。その上に箱形の炉を粘土で築く。

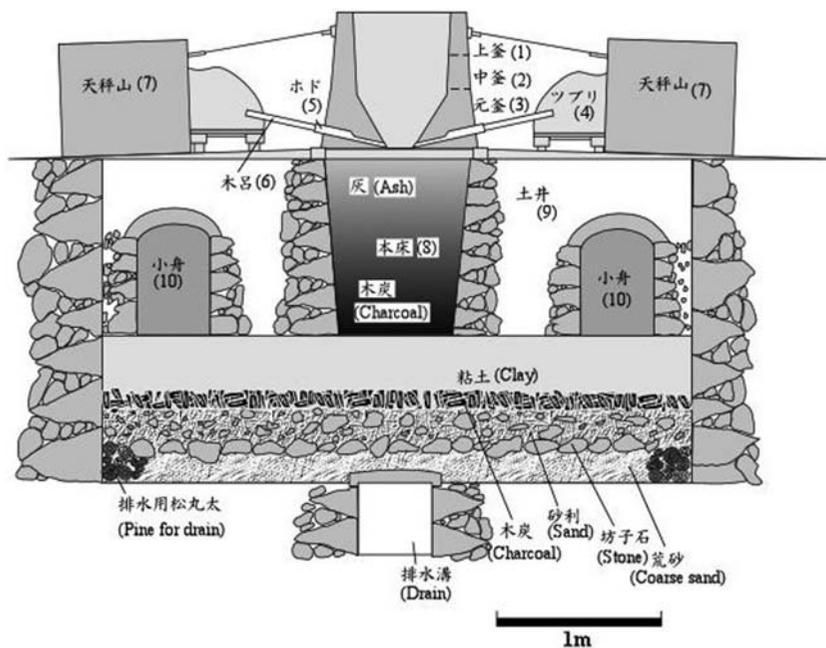


図1 たたら炉と地下構造

炉は長さ2.7m、高さ1.2m、幅0.873mで壁の中央が少し膨らみ少し低くなっている。炉は下から元釜、中釜、上釜と3段になっており、この順に造る。炉底はV字型になっており、中央の溝は幅約10cmある。この側面に「ホド穴」(羽口)を炉内に向かって角度19~24°で斜め下に開け、12cm間隔で片側20本ずつ両側に合計40本を設けた。ホド穴の大きさや角度は操業に大きく影響するので村下が季節や製品を勘案して決め、その開け方は秘伝とされてきた。ホド穴は中を補修できるように開いており、木呂管から吹込まれる風の勢いで空気が吸い込まれるようになっている。操業中ごろまでは「ほど蓋」と呼ぶ木栓で塞いである。

元釜の上に中釜が築かれる。塀状に高さ40cmほど積み上げる。内外の壁面を、「とうじ」と呼ぶ粘土水を「藁箒」(わらぼうき; わらの束)で塗って綺麗に仕上げる。この段階で炉を乾燥する。乾燥は火曜日昼過ぎから17時間、翌朝7時までかかる。翌朝、水曜日、上釜を築く。木炭を上釜の中程まで装荷し、午前11時30分送風を開始する。乾燥の際の火種が残っているのですぐに木炭の燃焼が始まり、徐々に炉の温度が上昇する。火勢を強くし、木炭を炉一杯に装荷する。

送風は別棟に設置された4台の鞆(ピストン型電動送風機、送風能力750~950m³/時)を用い、間欠的に送られる。炉の両脇には「天秤台」と呼ばれる炉と同程度の高さの台があり、ここにそれぞれ送風管が来ており、「つぶり」と呼ぶ送風分配箱から「木呂管」と呼ぶ送風管を通して羽口に送風された。江戸期から明治初期までは、炉の両脇に「天秤鞆」(てんびんふいご)が置かれ送風した。天秤鞆は2枚の板を両端を支点として真中で交互に踏んで送風するようになっており、「番子」が1人乗って踏んだ。2つの天秤鞆の番子は「たたら歌」で調子を合せながら踏んだので、送風は脈動になり、

炉の状態を均一に出来た。

午前12時30分、送風開始より約1時間後に村下と炭坂(裏村下)は金屋子神に拝礼し、操業が開始された。村下と炭坂は、炉を半分ずつ担当した。まず、「初種」と称する最初の砂鉄を装入した。小鉄町に集積してある砂鉄を数回「種鋤」と呼ぶ木製のシャベルで数回掬っては落とした後、半分ほど(約4kg)掬ってたたら炉に運んだ。砂鉄は壁際から約15cm辺りに壁に沿って入れて行く。その後、木炭を壁際に装荷する。30分毎に砂鉄と木炭の装荷を繰り返す。毎回、砂鉄は16杯64kg、木炭は6杯90kg装荷した。砂鉄は、斐伊川上流の羽内谷で採れる「真砂砂鉄」1種類を用いた。

操業は、送風開始より約20時間までを「籠り」(こもり)、以後16時間までを「上り」(のぼり)、以後28時間30分を「下り」(くだり)に3区分して管理した。各区分で砂鉄に含ませる水分量を調整した。昭和20年までのたたら操業では「籠り」を「籠り」と「籠り次」に分けて全体で4区分で操業しており、それぞれに異なる種類の砂鉄を用いた。

村下は多年の経験から、炎の色は「山吹ボセ」あるいは「キワダホセ」(木の名前で黄色をしている)とも呼んで、赤みが少なく黄色の強いものを良い炎とした。

水曜日午後4時、ホド穴から温度測定を行った。1250℃であった。村下がホドを「ホド突き」と呼ぶ先の尖った細い鉄棒で突付き常に掃除をしていた。午後7時に初ノロが出た。炉の両端の炉底には直径10cm程度の穴が開けられており、操業の「籠り」期は中心の穴の「中湯路」(なかゆじ)から、「上り」後は両脇の2つの穴の「四つ目湯路」(よつめゆじ)からノロ(スラグ)を流出させた。

木曜日午前0時15分に中湯路を閉じ、四つ目湯路に切り替えた。2つの湯路を繋いで深さ10cm位のU字型の溝を掘る。ここにノロが自然に

流れ出す。この頃「上り」に入った。午前9時、湯路の温度は1358℃を示した。炎は山吹色で炉の状態は順調である。ノロは自然に安定して流出し、粘らず流動性のあるものが良い。色は黄赤色で表面は蟹の甲羅のようにしわが見える。これを「蟹ノロ」という。炉内からは「ジ・ジ・ジ」という音がする。これを「しじる音」と言い、多く聞こえるほど良い。

午後7時、ホド穴の温度は1377℃で徐々に上昇した。村下はホド穴を常に「ホド突き」で掃除し、穴が丸く満月色の状態で続くようにした。

金曜日、早朝から炉況は良くない。オモテの炎が弱い。10時40分回復、下りに入る。午後にも操業が不安定である。ノロの温度は1250℃程度に下がっている。村下は「早種」という十分乾燥した真砂砂鉄を状態の悪い所に装荷し、炉況を早く回復させるよう努めた。

土曜日午前0時頃、突然炉の調子が悪くなりウラ側の炎が出なくなった。結局回復はしなかった。午前3時半砂鉄装入終了、両村下は金屋子神に一礼した。5時17分送風止め、6時多くの見学客が見守りの中で炉の解体が始まった。1時間程で終了、関係者一同金屋子神に礼拝しお神酒を頂戴した。9時、クレーンとチェーンを

使ってまだ熱い鋳塊を建屋の外に引き出した。たたら炉は1代目(代とは操業回数を示す単位)毎に壊された。

5. 小型たたら製鉄実験

たたら炉で起こっている現象を解明するために、図2に示す小型たたら炉を考案し実験を行った⁶⁾。鋳製造用の小型たたら炉の構造は、炉の内法断面積は奥行きレンガ1.5枚分、幅は1枚分であり、上羽口は1本である。また、炉底から8段目までがレンガで、その上には角型の鉄板のシャフトを置いた。シャフトの代わりに軽量ブロックを積んでも良い。炉の底には木炭粉を詰め灰床とした。送風は、電動式の送風機を用いた。

炉内の状態を測定するために、酸素センサーと熱電対を羽口の反対側の壁とその上に設置した。センサーは $ZrO_2 \cdot 15mol\%MgO$ の一端閉管型固体電解質で、 MgO 管の中に入れて保護し、 $0.5mm \phi$ のPt電極を巻いた先端が炉内雰囲気気に露出するようにした。管の中にはシリカ管で参照極として空気を少量流した。温度は白金熱電対で測定した。

最初は、底羽口から送風して木炭を燃焼させた。送風量はいずれの炉の場合も木炭の燃焼速

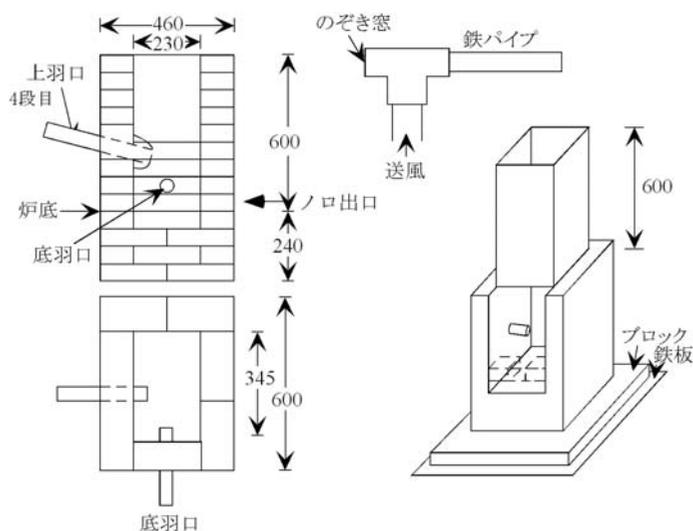


図2 小型たたらの設計図

度が10分間に約15cm降下する程度に設定した。木炭の燃焼領域（赤く見える）の最上部が炉底から約50cm辺りに達した時を指標にして砂鉄を装入する。この頃には炉底温度が1200℃以上に上昇している。

本研究で用いた砂鉄はニュージーランドのタハロアの浜砂鉄であり磁力選鉱してある。この砂鉄は Fe_3O_4 の他、3.82%の SiO_2 、7.65%の TiO_2 をイルメナイト（ FeTiO_3 ）として含むので、このままでは融点が高く溶けたノロが出口で固まってしまい排滓し難い。そこで砂鉄に珪砂を3 mass%混合した。最初砂鉄1 kgと木炭約2 kgを10分間隔で2回装荷した。その後、羽口を上羽口に切替え、底羽口を除去して、送風を継続すると共に、10分間隔で砂鉄1.5kgと木炭2 kgを装荷した。砂鉄を全て装荷し終えたら、そのまま送風を続け、羽口上部まで木炭を燃焼させた。木炭が羽口上まで燃焼した時点で送風を止め、炉内から発する「しじむ音」を確認する。音が消えたら鉄棒で鉬塊とレンガを離し、炉底に出来ている鉬塊を取出し、水中に投入して冷却した。

鉬塊の収率は装荷した砂鉄の約20~25%で、砂鉄中の鉄分の半分以上がノロとして廃棄された。鉬塊の燃料比は木炭約10kg/鉬kgで砂鉄装荷量が20kgと30kgの場合でも同じある。

炉内の状態は、羽口前面の壁近傍で温度は約1350℃、酸素分圧は約 1×10^{-11} atm、羽口上部450mmの位置では $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-14}$ atmである。これは酸化鉄は還元して鉄になるが、シリカなどはそのままノロに溶解する状態である。鉬の組成はSiとSの濃度はそれぞれ0.012~0.019mass%、0.019~0.040mass%と高炉に比べて非常に低い。

羽口から吹き込まれた空気は羽口前の木炭を燃焼して CO_2 ガスを発生し、さらに木炭と反応し CO ガスになる。 CO ガスは砂鉄を還元する。これは吸熱反応なので砂鉄を入れ過ぎると炉の

温度が下がる。砂鉄は、レンガ部分の炉上部から羽口上までの高温領域を通過する間に還元と浸炭が起こる。還元した砂鉄は羽口上部から羽口前にかけて、木炭と接触して直接炭素を吸収し溶融鉄粒となる。したがって、高温領域を広く取るか、ゆっくり降下させて滞留時間を長くすることにより、炭素を吸収する時間を長くでき、炭素濃度の高い鉬塊や鉄が生成する。

炭素を吸収して溶融鉄鉄となった粒、あるいは表面が溶融鉄鉄で覆われた固体鉄粒は、羽口下の溶融したノロ中に落ちる。これらは表面張力により互いに溶融し大きな粒に成長する。ノロ中に取り込まれた溶融鉄粒の炭素濃度はばらついており、鉬生成の場合、平均濃度は最大1.5%程度で固液共存状態にあり、10~20%の液体が固体鉄を包んでいる。粒鉄は、温度の低下に伴ってオーステナイト固相を晶出し鉬塊に溶着して次第に成長する。したがって、鉬塊中の炭素濃度は場所により異なる。羽口から吹込まれる空気は鉬塊で遮断されるので炉下部の木炭は燃焼せず温度が低下する。ノロは鉬塊の下に流れ込むが、温度の低下により固まるので鉬は押し上げられ、下に凹状の椀型のノロ塊が成長し、鉬塊は押し上げられる。また、ノロは鉬塊全体を被い酸化を防止し保温するが、鉬塊の上に大量に滞留すると粒鉄がノロ中に分散し、鉬塊は分裂してまとまりが悪くなる。

ノロはレンガ炉の上部、1100℃近傍で起こり砂鉄中のマグネタイトとイルメナイトおよび珪砂が反応して TiO_2 約15mass%や Al_2O_3 約10mass%などを含むファイヤライト（ $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ）を生成する。鉬や鉄中のSi、Ti、Alなどの濃度は非常に低いので、砂鉄中のこれらの成分はほとんどノロ中に溶解している。ノロ中の TiO_2 は重要な役割をしている。ファイヤライトの融点は1213℃であるが、これに TiO_2 が溶解すると融点が下がり9.5mass%で1134℃になる。さらに溶解すると融点が急上昇し、15mass%では1230

℃になる。ノロ中のTiO₂組成が9.5mass%の時ノロの流動性が最も良くなるので比較的低い温度でも操業が可能になる。TiO₂は溶剤の役割を果たしており、斐伊川の砂鉄のようにTiO₂濃度が2mass%程度のものが操業し易いことが分かる。しかし、一般の河川や浜で採取される砂鉄はTiO₂濃度が高いので操業は高温で行わねばならず、鉄は脆くなり燃料費も嵩んで経済的に不利になる。

羽口に設けた窓から観察すると、還元した鉄粒が木炭上で浸炭・溶融し落下する。また、ノロが木炭の間を流れ落ちる。ノロの役割は鉬塊や銑の再酸化防止と保温である。現代製鉄の高炉は塊鉱石を使うため反応に時間がかかり、背の高い巨大な反応炉になった。そのため、炉内の酸素分圧は 1×10^{-16} atmと非常に低く、銑鉄の温度は1550℃と高い。したがって、全ての酸化物が還元される状態にあるので、銑鉄中の不純物濃度が高くなる。

6. たたら製鉄のコツ

たたら製鉄は微粉末の砂鉄が原料なので、コツは飛散しないよう弱い風を吹きこむことである。たたら炉は、風を弱く吹いても高温領域を得られるように様々な工夫がされている。炉底をV字型にして両壁から1対のホドを近づけ、さらにホド穴を次第にすぼませ、先端直径を数mmにすることにより、風を強く噴き出して木炭を燃焼させ高温領域を造る。火吹き竹の原理である。次第に細くなる穴は空気抵抗は小さく、人力で十分送風可能である。生産量を上げるためホドを並べるので炉形は箱型となった。

炉の高さ1.2mは、炉内の酸素分圧が酸化鉄だけを還元し鉄にする程度の値にすると同時に炉床の温度も高くする。還元鉄粒は木炭との接触により炭素を吸収して一部、あるいは全部が溶融した状態になり、互いに凝集して大粒になり落下する。

第2のコツは溶けた流動性の良いノロを作る

ことである。生成した溶鉄粒は溶けたノロ溜め中に入り空気による再酸化を防止している。たたら場では初ノロが出ると餅を焼いて祝ったと言う。

第3のコツは炉の温度をゆっくり上げ、全体が均一な温度になるようにすることである。早く温度を上げようと強く送風すると、炉内の酸素分圧が上がり、酸化鉄の還元が抑制されノロの生成が多くなる。また、強く吹いて温度を高くすると、鉬や銑中のリン濃度が高くなる。

7. おわりに

たたらは、微粉末の砂鉄を原料に用い直接銑鉄を製造する製鉄法で、製鉄4千年の歴史上唯一の方法である。高炉で用いるくるみ大の大きさの塊の赤鉱石は還元し銑鉄になるまで8時間かかるので高炉の高さも30mにもなった。一方、微粉末の砂鉄は難還元性である磁鉄鉱であるが、体積に対する比表面積が非常に大きいのでわずか30分で銑鉄が生成する。反応時間が短いだけ炉を小さくできるので、エネルギー消費量が小さくなる。18世紀のたたらと木炭高炉を比べると、銑鉄1トン当たり高炉は木炭を5トン消費したが、たたらでは3.8トンである。さらにたたらで製造した銑鉄や鋼中の不純物濃度は非常に低く、錆び難いなど優れた特長を持っている。

以上、たたら製鉄技術の原理について述べたが、技術を再現するためには実験を繰り返し、様々な種類の砂鉄を使って製鉄を行い、体験的にコツを掴むことが重要である。ものづくり教育はこのコツを科学的な原理を基礎に体得することである。

文献

- 1) 高橋一郎：ふえらむ, 1 (1996), p854.
- 2) 依国一：古来の砂鉄製錬法, 丸善, 東京, 1933.
- 3) 下原重伸：鉄山必要記事, 館充訳, 丸善, 2001.
- 4) 永田和宏：金属, 81 (2011), p.435.
- 5) 永田和宏, 鈴木卓夫：鉄と鋼, 86 (2000), 64.
- 6) 永田和宏：鉄と鋼, 84 (1998), 715.