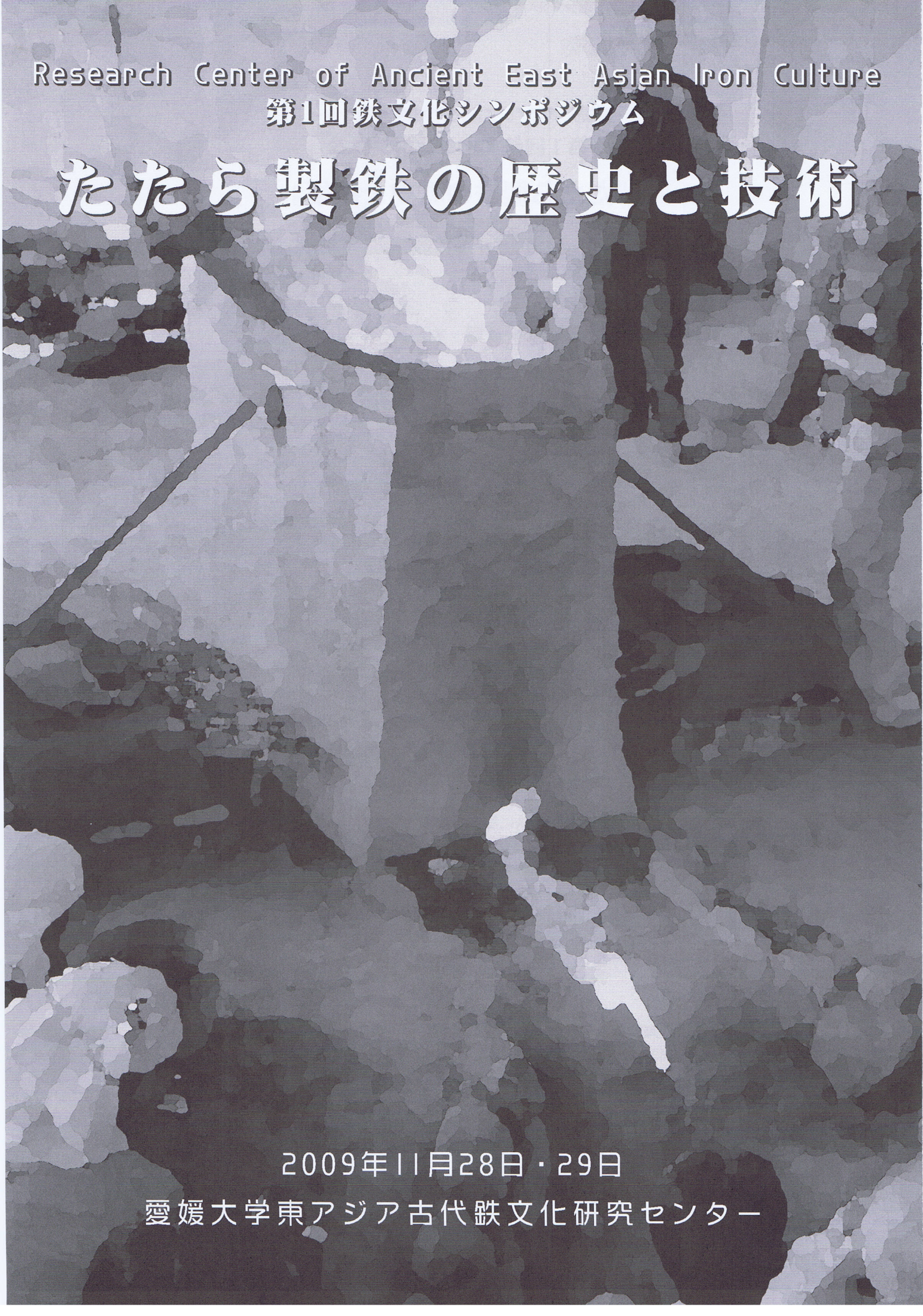




Research Center of Ancient East Asian Iron Culture

第1回鉄文化シンポジウム

たたら製鉄の歴史と技術

2009年11月28日・29日

愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター

愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター
第1回鉄文化シンポジウム
『たたら製鉄の歴史と技術』

主催：愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター

日時：2009年11月28日・29日

会場：愛媛大学総合情報メディアセンター1階 メディアホール

《プログラム》

11月28日（土）

12：00 受付開始

13：00 開会

13：35－14：20

村上恭通（AIC）「東アジア製鉄史とたたら製鉄技術成立史」

14：20－15：05

上梶 武（古代吉備文化財センター）「たたら吹製鉄の成立過程」

《休憩》

15：20－16：05

木原 明（国選定保存技術保持者）「たたら製鉄と古代・中世の製鉄復元」

16：05－17：10

永田和宏（東京芸術大学）「たたら製鉄に関する冶金学的解析」

《懇親会》

11月29日（日）

9：30－11：00 討論会

11：00 閉会

11：10～ 製鉄実験資料見学会（in 愛媛大学ミュージアム）

東アジア古代鉄文化研究センター 第1回鉄文化シンポジウムによせて

2007 年度の開所以来、東アジア古代鉄文化研究センターは2回の国際シンポジウムを開催しました。2007 年の第1回においては、現在調査進行中である四川省の製鉄遺跡に関する講演を行い、第2回では、トルコ・アナトリア高原、モンゴル、そして中国における国家形成と鉄との関係について議論を交わしました。これにより、われわれの研究の目的である東アジアにおける鉄文化研究が、ユーラシア規模でも推進する必要があることを認識しました。

また、アイアン・ロードを西方に追究する一方で、足下である日本列島における鉄技術や文化もわれわれの重要な研究課題です。もっと限定的に言えば、伝統的製鉄技術であるたたら製鉄の源流を探るということかもしれません。発掘資料や文献のみならず、現代にも継承されるたたら製鉄技術は、製鉄の歴史について多くを物語ってくれます。特に、わがセンターも推進している復元実験的研究手法は、製鉄炉内の詳細な点のみならず、炉周りの工人の動きなど製鉄の風景復元にも大きな示唆を与えています。

今回は第1回鉄文化シンポジウムとして、日本列島独自のたたら製鉄に焦点を当て、考古学、伝統的製鉄技術、金属学といった多角的視点から“たたらを科学する”試みを行いたいと思います。

2009 年 11 月 28 日

愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター
センター長 村上 恭通

一巻くサ究研計文越升古てて東
アサムコムやむ本くベ計文越回！第

例 言

1. 本書は東アジア古代鉄文化研究センター第1回鉄文化シンポジウムの予稿集である。
2. 本書所収の資料の引用に当たっては、各講演者に照会してください。
3. 本書の編集は佐々木正治が担当しました。

目 次

村上恭通「東アジア製鉄史とたたら製鉄技術成立史」	1
上村 武「たたら吹製鉄の成立過程」	7
木原 明「たたら製鉄と古代・中世の製鉄復元」	20
永田和宏「たたら製鉄に関する冶金学的解析」	22

アジア製鉄史とたたら製鉄技術成立史

愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター 村上 恭 通

現代にその技術を伝えるたたら製鉄は設備、材料、原料、燃料、そして人が織りなす技の結晶である。その成立の主たる舞台を中国山地とし、完成までには1000年をはるかに超える時間を要した。古墳時代後期（6世紀後半）にその祖型が誕生し、近世に全長約3m、幅約1mの大型箱形炉に発展するまでには数々の試行錯誤があったものと推測される。

稼業にあたって「その費用の大半を投ずる」〔俵 1933〕とされる炉の地下構造は規模、構造ともに注目される。防湿のための地下構造は古墳時代後期の6世紀後半から認められるが、小舟の祖型が登場するのは平安時代である。その後、地域や技術によって変差があるものの、地下両側の防湿設備は維持され、近世を迎えて、大規模化、複雑化を見せる。

地上施設の核心は製鉄炉であり、横長箱形の炉は両側に多数の木呂穴を穿ち、また両小口に複数の湯口をもつ。操業の際には、天秤轆からの風が木呂穴を通して炉内に送られる。木呂穴は細く絞られているため風は先端に行くほど圧力を増し、炉内では木呂穴の前面に最高温帯を形成する。原料、燃料は村下たちが立位でほぼ顔の高さから投入し、鉄滓や銑鉄を湯口から排出する。高殿内の作業は天秤轆と番子を除けば、通常の見線以下での動きである。

製鉄施設と作業に従事する人の動きは基本的に古墳時代後期の6世紀後半も同じであった。製鉄炉は平面形が円形ないしは楕円形を呈していたと推測されるが、すでに両側に複数の木呂穴をもち、送風管の先端はここに挿入された。湯穴も両側と直行する位置にそれぞれ設けられ、土坑や溝が敷設された。原料に含まれた不純物がうまく分離され、鉄が生成された場合の製鉄炉高は1m、あるいはそれよりやや高かったと推測され〔村上編 2006〕、たたら製鉄炉のそれとあまり大きな違いはない。また生成される鉄には塊状（鋼・錬鉄の集合体）以外にもすでに銑鉄もあったことが指摘されている〔村上 2007、村上編 2006〕。原料とともに、炉底が粘土で堅く、操業中、炉底付近の浸食を受けにくく鉄塊が成長しづらかったこと、鍛冶炉の羽口と同様に絞り込んで強風を複数の穴から送ることができ点、そしてなにより多くの研究者が想定する以上に小さい炉内容量が銑鉄生産を可能にしたものと思われる。中国山地では8世紀前半代まで炉長・炉幅がほぼ同じで、小型であり、吉備では縮小する傾向すら見られる。

その一方で、吉備に誕生した製鉄炉を基礎に、7世紀の近畿地方で登場する製鉄炉は倍以上に長大化する。全体の掘りかたが鉄アレイ形を呈するこの製鉄炉が7世紀後半以降、日本列島各地での国家的事業で必要とされた鉄の生産をまかなっていったのである〔村上 2007〕。そうすると、たたら製鉄炉の長大な箱形という特徴は、究極の源を中国山地にもちながらも、一旦国家的製鉄集団に吸収され、改造されてできたものが、逆に故地に影響を与えて成立した可能性がある。その後、小舟相当施設が備後で登場し、中国山地における鉄生産がますます高揚するのである。

さて、鉄器の使用や生産は中国、朝鮮半島より受容したものである。6世紀後半、一定規模で、しかも集中的に開始される鉄生産も朝鮮半島より受け入れられた「渡来技術」と考えられる場合が多い。しかしながら、中国およびその影響を受けて成立・展開した朝鮮半島の製鉄炉は古墳時代後期相当時期よりはるか以前にすでに高炉の形をとっている。中国や朝鮮半島に箱

形製鉄炉の存在を想定する考え方もある。しかし、漢代の中国でも、炉外壁を立方体にした場合でも、炉内部は円筒形である。しかも、送風は複数の木呂穴を介するものではなく、炉内に挿入された大口径送風管1本によって行われ、銑鉄と鉄滓の排出は送風方向とは反対の炉前方に向かってのみ行われた。炉頂部からL字形送風管を挿入したと想定する説もあるが、送風管屈曲部直上が熔融し、しばしば溶解途中の鉱石粒が付着していることから、やはり熔融帯近くに送風管が挿入されたと考えざるを得ない。燃料、原料の送風は高い炉長より行われるため、中国では2000年以上前から炉にランプ（斜道）が付けられ、同様の方法は現代まで引き継がれた。中国は戦国時代以降、生産される鉄は銑鉄が卓越し、銑鉄を鋼にかえる技術も同時に獲得されたために鑄造・鍛造双方が栄え、朝鮮半島もこれに倣った。

しかし、日本列島の製鉄炉は十分に倣うことができなかったがゆえに、当初から炉の規模と形と送風法が異なった。ただ、先述のごとく古墳時代の製鉄炉は超小型（細型）でありながらも一定の高さを有していたため銑鉄生産ができた。当然、条件の異なった炉では鋼や錬鉄もできた。こういった初期の経験を前提に、そののち、鉄の量産化に対応すべく炉長を増加するにしたがい、木呂穴を増やしながらか、良質の銑鉄や鋼をつくる努力が費やされたに違いない。その結果、低い長方形箱形炉で銑鉄生産も可能としながらか、その一方で良質かつ大型の鋳塊を炉内において熟成するという中国や朝鮮半島にはない技術に到達したのである〔村上2007〕。

製鉄炉の形や規模、そして生成された鋼の質は、日本列島、東アジアといういずれの視野においても、人と技術の流れを如実に物語っているのである。

参考文献

依 国一 1933『古来の砂鉄製錬法』丸善

村上恭通編 2006『日本列島における初期製鉄・鍛冶技術に関する実証的研究（平成15～平成17年度科学研究費補助金基盤研究B研究成果報告書）』

村上恭通 2007『古代国家成立過程と鉄器生産』青木書店

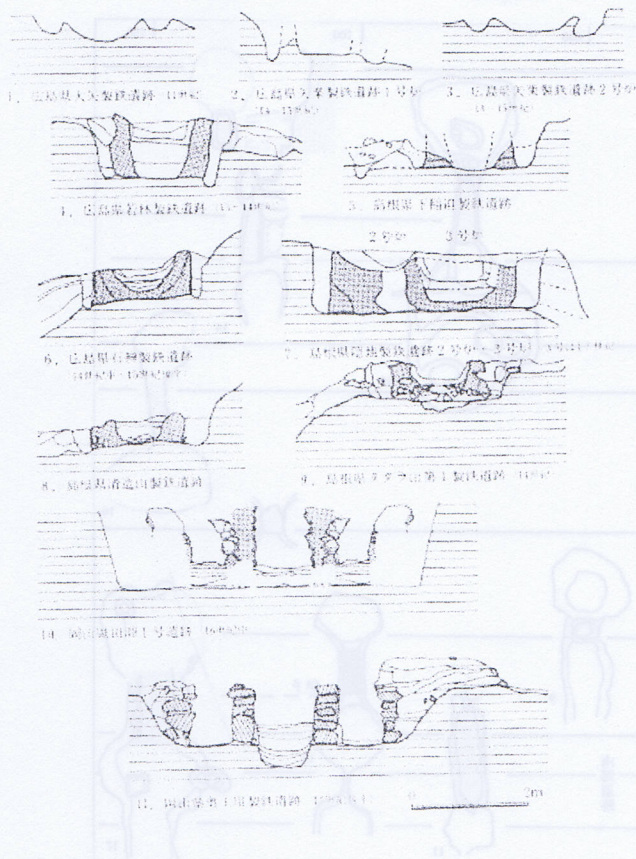


図1 中国山地における製鉄炉地下構造の系統的変化

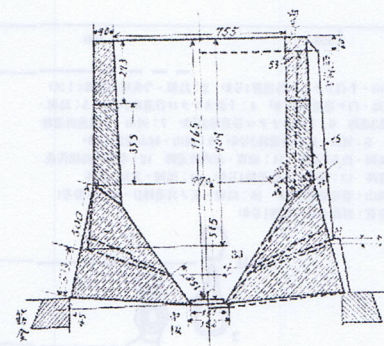


図2 伯耆国砺波たたら・製鉄炉断面図

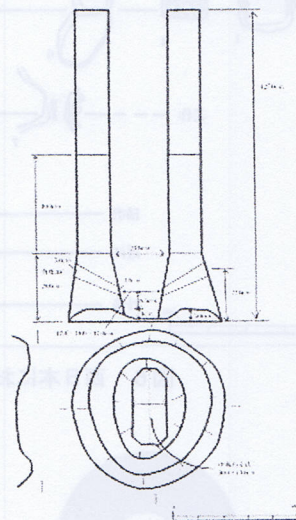


図3 古墳時代後期製鉄炉復元模式図



図4 古墳時代復元製鉄炉の操業風景
(愛媛大学城北キャンパス)

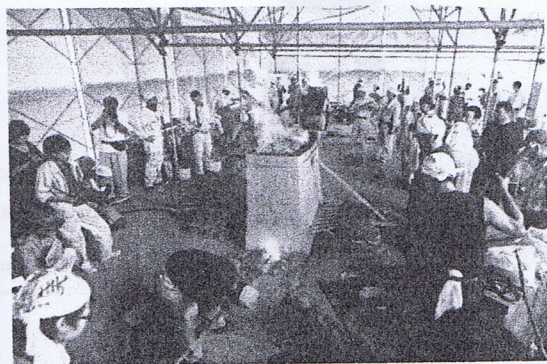


図5 古代復元製鉄炉の操業風景
(愛媛県今治市)





図8 韓国・沙村遺跡製鉄炉と送風管

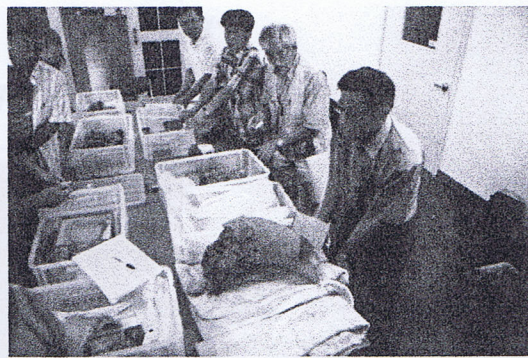


図9 韓国・石帳里遺跡出土遺物検討会（上）
と送風管（下）

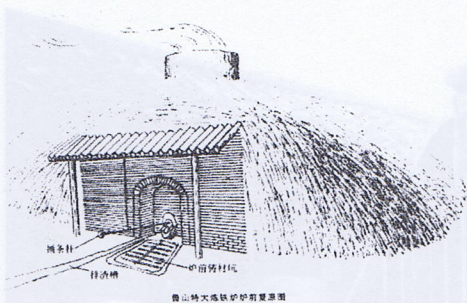


図10 中国・漢代製鉄炉の復元図
(河南省・魯山製鉄炉)

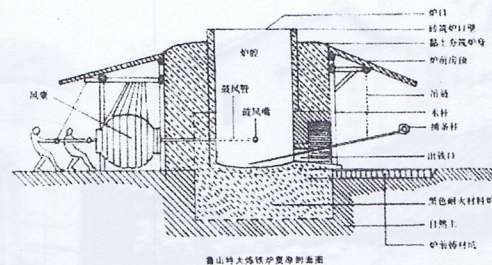


図11 河南・魯山製鉄炉の操業復元図



図12 愛媛大学調査中の漢代製鉄炉
(四川・古石山遺跡C地点)



図13 四川・鉄牛遺跡出土の炉壁用煉瓦



図 14 四川・邛崃市にのこる高炉（1950年代稼働）



図 14 四川・邛崃で現在稼働中の鑄造炉

たたら吹製鉄の成立過程

岡山県古代吉備文化財センター 上村 武

はじめに

「たたら」という言葉は①送風装置、②製鉄炉、③製鉄炉のある建物（高殿）、④製鉄場全体（鉄山あるいは山内）と複数の意味を持つ〔俵 1933、河瀬 1995〕。また、『広辞苑』には「たたら」として「足で踏んで空気を吹き送る大きなふいご」とあり、踏鞴の字を当てている。そして、「踏鞴吹き」として「砂鉄・木炭を原料とし、たたらを用いて行う和鉄製錬法。古代以降わが国中国地方などで行われた。その製錬場をも鑪（たたら）と呼ぶ」とある。さらに、『たたら吹製鉄の技術と構造の考古学的研究』を著した河瀬正利氏は、たたら吹製鉄法を保温・防湿のために「床釣り」という地下構造をもち、「天秤鞴」を使った本格的な製鉄法と定義した〔河瀬 1995〕。

上記のように「たたら」は複数の意味を持ち、複数の要素から成り立つ。たたら吹製鉄の成立を追求するためには、複数の意味、要素それぞれについて検討する必要がある。そこで、上記特徴のうち考古学的検討が概ね可能と考える①砂鉄、②木炭、③地下構造、④製鉄炉、⑤高殿、⑥山内を素材として、たたら吹製鉄の成立過程について検討したい。

1. 原料

原料は、鉄鉱石を主としながら砂鉄も使用していた古代以前に対し、中世以降には砂鉄のみに一本化した。そして、使用原料の変化に伴うように製鉄遺跡の分布状況も大きく変化する。すなわち、古代以前の製鉄遺跡は岡山県南部を中心に確認されていたが（図1）、中世以降には中国山地でも島根県南部に中心が移る（図2）。上記のような使用原料の変化は、生産の隆盛に伴って当時の技術で入手可能な鉄鉱石が枯渇したことに起因すると考える。このことは製鉄関連遺物の金属学的調査成果からも窺える。岡山県総社市に所在する古代製鉄遺跡出土の製鉄関連遺物を分析した大澤正己氏は、「8世紀代は、高品位磁鉄鉱の露頭脈は枯渇気味になり、これに代わって砂鉄主流へと変化するものと考えられる」と推察し（図3）〔大澤 1999、447頁〕、新資料からの検証の必要性を説いた。使用原料の変化は、古代以前と中世以降の鉄生産の大きな差として留意すべきで、たたら成立を追求する上でも重要である。

たたら吹製鉄では、砂鉄を水流利用の比重選鉱法である鉄穴流しにより採取する。大量の砂鉄を効率的に採取するという意味で、鉄穴流しの確立は重要な意味を持つ。しかし、その確立時期を断定的に求めることは困難である。ただ、禁止令から間接的に鉄穴流しの上限時期に迫ることは可能である。鉄穴流しの禁止令は慶長15年（1610）に斐伊川上流で、太田川筋では寛永5年（1628）に出された。さらに、江川支流の可愛川筋でも寛永10年（1633）に禁止令が出された。これらのことから広島県域や島根県域では、少なくとも17世紀前葉には鉄穴流しが実施されていたことが分かる。さらに、備後国では18世紀後半頃から鉄穴場が増加し、奴可郡では幕末期までほとんど変化は認められないと指摘されている〔河瀬 1995〕。18世紀後半の変化は、原料需要の拡大および鉄増産を示唆し、たたら吹製鉄の成立、発展を考察する上で重要な変化と考える。

2. 燃料

たたら吹製鉄では黒炭を燃料とし、製鉄遺跡の発掘調査で炭窯が検出されることがある。炭窯

は焚口、焼成室、煙道から構成されるが、古代末以降の中国地方の炭窯は煙道構造に共通点が見出せる〔上村 2005〕。すなわち、煙道は奥壁に縦溝を掘り込んでその前面を粘土や礫で被覆するが、下部は排煙口として開口させる構造である（図4）。排煙口を窯の下部に設置する煙道は、北陸、東北南部において9世紀代には出現しており〔菅原 2008〕、中国地方では少なくとも古代末には設置するようになる。そして、中近世・近代を経て現在に至るまで採用され続けている。

ただし、中国地方の炭窯は古代末～中世前葉、中世、近世で相違点も見られる（図5）。古代末～中世前葉の炭窯は奥壁、側壁に石を積む長方形の炭窯で、長方形石積み型木炭窯と呼ばれる〔安間 2005〕。煙道は奥壁に1か所設置する。中世炭窯は長方形もしくは羽子板状の平面形である。壁体に石を用いる事例もあるが、土壁を基本とする。煙道は奥壁中央部に1か所のみ設置。近世炭窯の平面形は楕円形に近い。土壁を基本とするが、壁体全体もしくは焚口のみを石積みとする事例も確認できる。煙道は奥壁中央に主となるものを設置し、その左右もしくは片側に副煙道を配する場合もある。主煙道の排煙口は床面を掘り窪めて設置する場合がある。対して副煙道は窯壁の中位から掘りこむ。

古代末～中世前葉の炭窯は長方形石積み型木炭窯という独特の構造であるが、煙道は中近世炭窯と共通する。さらに中世と近世を比較すると、基本構造は共通するものの規模の差が大きい（図6）。炭窯の大型化は平面形の変化とも関わる。近世炭窯の平面形は楕円形で、最大幅が最小幅（焚口部）より著しく広がっている。炭窯の大型化は、1回の生産で焼成できる木炭の増産を目的としたものとする。

3. 地下構造

たたら吹製鉄では、製鉄炉の直下に保温、防湿を目的とした床釣りと呼ばれる地下構造を構築する。床釣りは掘り方内に築く上下2層構造で、本床と小舟からなる本床釣りと石や鉄滓、粘土を層状に重ねた床釣り（下部）から構成される。本床は炉の直下に位置し、内部にカーボンベッドを設ける。小舟は本床を挟むように位置し、内部は空洞である。この床釣りの萌芽的な構造は古代末に出現しており、中世から近世前期にかけて漸次的な変化が確認できる〔上村 2007・2008〕。

中世製鉄遺跡の地下構造は大きく2分類できる。すなわち、カーボンベッドを持つ本床状遺構と内部を焼土などで充填する小舟状遺構からなるA型と、小舟状遺構を設置しないB型に大別できる〔上村 2007〕。このうちA型がたたら吹製鉄の床釣りへと発展する。以下ではA型についてのみ触れたい。

A型は本床状遺構、小舟状遺構ともに溝を掘削して築くタイプと、大型の掘り方を掘ってその内部に平行する2枚の壁体を設置し、壁体で本床状遺構と小舟状遺構を築き分けるタイプに大別できる。構築方法から前者を「溝型」、後者を「穴型」とし〔上村 2005〕、広島県今吉田若林製鉄遺跡で溝型→穴型という変化が切り合い関係で判明している。また、両者の折衷的構造（A3型）も存在する（図7）。

溝型は小舟状遺構が「コ」字状を呈するA1型、直線状のA2型に分類できる。また、穴型は3細分できる。掘り方内に立てた2枚の壁体の間にカーボンベッドを設けて本床状遺構とするA4型、本床状遺構部分に粘土などを積み重ねて底上げを行ってカーボンベッドを設けるA5型、掘り方底部に炉壁を敷き並べて、その上にA5型と同様の構造物を築造するA6型である。なお、溝型と穴型の折衷的構造と言えるA3型は、小型の掘り方を掘って礫を並べ、その礫列を芯にし

て粘土を厚く貼り付ける。それから小舟状遺構となる溝を掘る構造である。

A型は上記のように細分でき、①安芸北西部から石見南東部、②安芸南東部、③備後北東部から備中北西部、④出雲に地域的まとまりも認められる(図8)。

①の安芸北西部はA1型が唯一検出された地域で、A1型→A2型という前後関係が層序から(矢栗製鉄遺跡)、A1型→A5型という関係が切り合いから(今吉田若林製鉄遺跡)判明している。さらに構造の特徴からA1型→A2型→A4型→A5型→A6型という変遷が推測できる。石見南東部では溝型は見つかっておらず、穴型の段階で技術移転の可能性も考慮する必要がある。ただ、石見では古代末のB型が見つかっており、そこでは安芸北西部と共通する作業場(後述)が確認できた。その共通性から一括りの地域と理解しておきたい。②ではA5型のみが確認され、①からの工人の移転の可能性を考える。①→②という工人の動きは、後述する作業場の共通性からも示唆される。③ではA2型→A3型→A4型という変遷が想定できる。この地域では、在地工人が小舟状遺構の設置という技術情報を入手してA2型を確立した可能性を考える。以降、独自の展開であるA3型を経て、A4型まで転換した。ただ、A5型、A6型という転換は辿らずにたたら吹製鉄の床釣りへと発展するようである。備後北東部はA4型1基に留まる。備中北西部および備後北東部は、後述のたたら吹製鉄床釣りに共通の特徴が認められるため、一括りとして考えておきたい。④は小地域性がある。出雲西部の神戸川流域ではA2型が長期間築造され続けたようで、以降の展開が認められず、溝型で終始したと推測する。また、南東部の旧横田町ではA5型のみが見つかり、現時点ではA5型を構築する工人移動の可能性を考えたい。

以上のようにA型は中世に漸次的な変遷を辿るが、地域差もある(図9)。このことは、中国地方ではA型という共通する技術体系の中に、複数の工人集団が存在することを示す。

さらにA型(穴型)から床釣りへの発展も漸次的である。[上村 2008]。その発展過程はA型(穴型)の小口部の閉塞、小舟状遺構上面の強化(板石、粘土)→床釣り下部の設置→小舟状遺構の小舟化(内部の空洞化、小口部に焚口と煙出しを設置—炭窯構築技術の援用)→本床状遺構の本床化(本床と小舟それぞれの壁体独立、甲掛け、内部焼成)という流れである。このようにA型から床釣りへの発展は漸次的である。このことはA型の小地域性が床釣りにも継続する可能性を示す。

ところで、床釣りの地域性については、河瀬氏[河瀬 1995]や竹広文明氏[竹広 1996]らが論じている。河瀬氏は本床と小舟の設置高の差から3分類し、時期差や地域性にも触れた。本床基底面を小舟基底面より非常に高く設けたⅠ型(18世紀後半以降—出雲)、小舟の基底面よりやや高い本床基底面のⅡ型(18世紀前半—備後、美作、伯耆、出雲)、本床と小舟を同一基底面とするⅢ型(18世紀中頃—備後、美作)という分類である。竹広氏も同様の分類案を示し、出雲については小地域性まで論じた。本稿でも本床と小舟の基底面の差に着目して、A型と近世前期床釣りの関わりについて検討したい。

①の島根県旧瑞穂町ではA6型のタタラ山第1遺跡、畑ヶ迫口製鉄遺跡と16世紀後半～17世紀の床釣りが見つかった立岩3号製鉄遺跡が近接する。立岩3号製鉄遺跡では炉壁敷きの床釣り下部を備えており、A6型からの流れと認識できる。さらに、A6型は本床状遺構の底部が小舟状遺構のそれより高いが、立岩3号製鉄遺跡でも本床の基底面が小舟のそれより高く、この共通点も重視したい。

③の岡山県旧神郷町の大成山たたら遺跡群A区では、17世紀初頭のA4型が見つかった。同地

域の京坊たたら第7地点では18世紀前半の床釣りが確認されている。両者の共通点は本床状遺構（本床）と小舟状遺構（小舟）の設置基底面が同一である点に見出せる

④島根県旧横田町の隠地製鉄遺跡では17世紀前半の床釣りがA5型を切って築造されていた。両者は本床状遺構（本床）の基底面が小舟状遺構（小舟）のそれよりも高い点で共通する。

以上から各地のA型最終型の特徴は、近世前期の床釣りへと継続する可能性を考えたい（図10）。

河瀬氏や竹広氏が論じたように近世中期の床釣りには地域性が存在するが、それは各地のA型最終型の特徴の一部を継承した、近世前期床釣りからの継続と考える。ただし、そこに至るまでに大きな飛躍も存在する。それは地下構造の規模に関するものである。地下構造の規模は、中世から近世前期にかけて漸次的に拡大する。しかし、近世中期には飛躍的な拡大が見られた（図11）

〔上村 2008〕。地下構造の拡大により構造の複雑化が可能となり、脇小舟や下小舟、火渡しや伏樋の設置などに繋がったと考える。以上のことから掘り方規模が著しく拡大した近世中期を、地下構造発展の画期と評価したい。

4. 製鉄炉

たたら吹製鉄では操業直後に製鉄炉を壊して鉄を回収する。そのため遺跡で自立状態の製鉄炉が見つかることはなく、壊された炉壁片が破棄された状態で出土する。ここでは炉壁片や遺構に残された痕跡から中近世の製鉄炉について概括したい。

まず、近代たたら製鉄の製鉄炉について、俵國一氏の記録から見てみる〔俵 1933〕。鋤押し法が実施された鳥取県砥波たたら製鉄炉は、内法長 2.967m、高さ 1.165mの長方形箱形炉である。送風孔は片側 19 個で、炉外面で高さ 21 cmに揃えて設置する。装入角度は 26°。断面形は楕円形で、サイズは外面で 6.5×3 cm、内面で 0.6×0.3 cmを測る。他方、銑押し法が実施された島根県備谷たたらでも長方形箱形炉を使用。規模は内法長 2.485m、高さ 1.1mで、送風孔は片側 16 個である。その設置高は炉外面で 10.6 cmに揃え、装入角度 9~10°に穿つ。外面は 2.1×1.8 cmの円形、内面は 2.4×0.6 cmの楕円形である。

近代たたら吹製鉄の製鉄炉は長方形箱形炉で、長軸側から複数の送風孔を設置する。ただし、送風孔の形状やサイズ、設置高や装入角度は鋤押し法と銑押し法で違いが認められた。

次にたたら吹製鉄が確立する前段階の製鉄炉について検討したい。

広島県坤束製鉄遺跡では送風孔が確認できる炉壁が多く出土したが、その中に送風孔が5個残った炉壁も1点含まれる。図12-1は長さ65 cm、高さ47 cm、厚さ33 cmである。送風孔の設置高は19~25 cmと高低差がある。送風孔は内面が直径3 cmの円形で、外面が5×3 cmの楕円形状を呈し、15~20°の傾斜で穿たれていた。坤束製鉄遺跡では、送風孔の設置高がほぼ水平になるものや傾斜角が10°前後のもの、25°前後のものなども認められた。また、今吉田若林製鉄遺跡では送風孔が2個残る炉壁と4個残るものが出土した。図12-2は送風孔が4個残存するが、いずれも鉄滓により塞がれていた。両側面は炉壁粘土が露出して、その間に熔融物が挟まれるような状態である。設置高は6~7 cmと低い。内外面とも楕円形で、サイズは4×3 cmである。図12-3は内外面とも直径4~5 cmで、設置高は14 cmと16 cmでやや高低差が見られる。図12-2、3いずれの送風孔も10°の角度であった。

上記2遺跡ではA5型が見つかった。A5型は掘り方を掘削してその内部に平行する2枚の土壁を立てるが、製鉄炉は土壁の上面を基準として築いた可能性がある。俵氏はたたら吹製鉄

の本床壁体の上端を土居と称すること、そして土居は築炉の際に基準となることを報告した〔俵 1933〕。同様にA型（穴型）でも土壁上面を基準として築炉を行った可能性が高い。それは土壁上面に著しい被熱痕跡が認められることから窺える。そして、土壁の被熱痕跡からA5型の炉長は2～2.5mと推測された。

B型地下構造の製鉄遺跡でも炉壁が多く出土した事例がある。特に大志戸Ⅱ鉦跡の発掘調査では製鉄炉に関する重要な成果が多く得られた。大志戸Ⅱ鉦跡では4基の地下構造が見つかり、2号炉と3号炉では製鉄炉の復元まで試みられている（図13）〔松尾 2009〕。

13世紀後葉の大志戸Ⅱ鉦跡2号炉からは40t以上の製鉄関連遺物が出土し、そのうち炉壁が10tを占める。出土した炉壁には送風孔が複数個残存するものや小口部に当たるものなどが含まれており、送風孔の水平角度を利用して製鉄炉の復元が行われた（図13-1）。製鉄炉の内法長は2.5～2.6mと判断され、片側20個の送風孔が設置された箱形炉となる。また、内面の状況を総合して、高さは80cm以上と想定された。送風孔の角度は16°のものと30°のものが確認されている。

大志戸Ⅱ鉦跡3号炉は16～17世紀前半に比定されて、1.7tの製鉄炉壁が出土した。3号炉でも製鉄炉の復元が行われ、内法長2mで片側14～15個の送風孔を設置した箱型炉が想定された（図13-2）。送風孔の設置高は23cmで、角度は15°、20°であった。また、送風孔の設置高が水平に並ぶものと高低差があるものが確認された。高低差を持って設置された送風孔は、中央ほど高いと判明している。

炉高については広島県榎ヶ原製鉄遺跡出土遺物から良好な情報が得られた（図14）。出土炉壁としては、送風孔から上部側65cmの資料と送風孔から底部まで20cmの資料があり、いずれも送風孔は直径4.5cmである。これらの情報から榎ヶ原製鉄遺跡の炉高は少なくとも約90cmはあったと分かる。

中世製鉄炉について、現状では地域性や時期差など詳細な検討はできないが、おおまかな特徴は抽出できた。まず、A型、B型ともに長方形箱形炉で、複数の送風孔を長軸壁体に設置する点で共通する。内法長は2～2.5mで、炉高は80～90cm以上というところまで判明した。基本構造や内法長は、近代の価値たたらに類似する。ただ、送風孔の設置高や装入角度は遺跡によりバラツキがあり、中世の特徴として抽出することは困難であった。さらに、炉外面における送風孔の設置高は、水平に揃えられたものと高低差が認められるものが存在した。

近世たたら炉については、全量や高さが復元できるような資料は揃っていない。近世たたら遺跡で出土した最大の炉壁は広島県耳木第1たたらのもので、長さ60cmの炉壁に送風孔が6個確認できた。送風孔は10°の角度で穿たれており、設置高は12～13cmである。また、島根県志谷たたらの出土炉壁では、送風孔の設置高に高低差（15.5～19.8cm）が認められた。送風孔の高低差は中世製鉄炉でも確認できた特徴である。送風孔の高低差が生産に及ぼす影響についても検討すべき課題と言えよう。

5. 高殿

高殿は製鉄操業を行う建物で、平面形から丸打ち（平面円形）と角打ち（平面長方形、方形）がある。また、内部には小鉄町（砂鉄置き場）、炭町（木炭置き場）、土町（粘土置き場）と休憩部屋などを設置する。たたら遺跡の調査でも柱穴や原燃料置き場、材料置き場、休憩部屋などが

確認できる場合があり、柱穴のみが残った事例もある。ただ、高殿のような大規模で複雑な覆屋は中世製鉄遺跡では確認できないが、柱穴や原燃料置き場などは中世段階の製鉄遺跡でも認められる。中世A型の覆屋は2分類でき、地域差も指摘できる。

S1型は地下構造の地域性として識別した①、②の地域に分布する。丘陵斜面を断面L字状にカットして平坦面を造成するが、その際に山側中央付近に高まりを造り出し、その背後に土壌を設置するタイプである(図15-1)。高まりの両脇には原料、燃料置き場や鉄の小割り場、鍛冶場として活用する平坦面を設ける。高まりは地山削り出しと盛り土の2種類が確認でき、周囲にピットが伴う場合も認められる。覆屋を支える主柱は認められないが、側柱穴を掘削する事例は存在する。今吉田若林製鉄遺跡では側柱穴から直径11mほどの円形覆屋が復元されている。他の遺跡でも明確な配列は確認できないものの柱穴が複数見つかる場合があり、簡易な建物の存在が想起される。なお、S1型は、村上恭通氏により「設計図」の存在が想定された構造である[村上1994]。

S2型は③、④の地域で確認された。四本柱を主柱とし、側柱穴は認められない(図15-2・3)。

③に位置する大成山たたら遺跡群ではA型が3基確認されたが、いずれもS2型の建物を伴う。A2型には柱穴4個が伴う。規模は長径30~60cm、深さ25~50cmほど。柱間は4mで方形配置である。A3型には3個の柱穴が伴うが、四本柱建物と推測する。柱穴は円形で、直径50~60cm、深さ20cm前後。柱間距離は4.2mである。近世初頭のA4型もS2型を伴うが、上記2遺構とは異なる様相を呈していた(図15-5)。柱穴は48~65cm、深さ46~57cmで、4個を長方形に配置していた。柱間距離は3.6×4.2m。柱穴の周囲は粘土を叩き締めて作業面とし、そこから10.8m四方の隅丸方形の建物と判明した。さらに砂鉄置き場、木炭置き場、被熱面も認識された。また、粘土置き場もしくは休憩部屋と想定される空間を石列で区画した点も重要な特徴である。

④の出雲に位置する隠地製鉄遺跡ではA5型を切って床釣りが築造されていた。A5型である第3炉床では、小舟状遺構の端部付近を掘り込む位置で柱穴4個が見つかった(図15-3)。柱穴は直径20~30cmで、柱間距離は長軸4.3m、短軸2.5mを測る。なお、側柱穴は認められない。

上記のように中世段階にも覆屋は存在し、A型については大きく2分類できた。さらに地域的偏りも認められた。次に、それぞれについてたたら吹製鉄高殿への継続の可能性について検討したい。

まず、①、②に分布するS1型は、近世以降には継続しないようである。①に位置する近世前期の立岩3号製鉄遺跡は、S1型とは異なる作業場と建物が見つかった(図15-4)。立岩3号製鉄遺跡は丘陵裾部をカットして2か所のテラスを造り出し、斜面側に若干の盛り土を施して平坦面を造成。平坦面の中央にある地下構造のすぐ脇には、主柱穴4個とその中間に補助的な柱穴5個を設置していた。さらにそれらを取り巻くような配置で側柱穴17個がおおよそ円形状に並んで検出され、直径11mほどの建物が想定された。立岩3号製鉄遺跡ではS1型と同様に山側をカットして平坦面を造成するが、S1型で見られた高まりやその背後の土壌、明確な原料、燃料置き場は認められなかった。ただ、今吉田若林製鉄遺跡(S1型)でも側柱穴は見つかっており、この点は共通点として認識できる。それでも立岩3号製鉄遺跡には主柱穴や補助柱穴なども備えており、覆屋構造は大きく相違すると考える。

S 2型は、③の備中北西部の大成山たたら遺跡群で中世から近世初頭までの継続が、さらに④の出雲に位置する隠地製鉄遺跡で中世と近世前期の事例が切り合い関係で確認できた。

③の大成山たたら遺跡群ではS 2型が中世から近世初頭の3遺構で確認でき、大型化、複雑化していった様子が窺える。近世初頭のA 4型覆屋は隅丸方形であるが(図15-5)、この平面形は近世中期以降の備中北部の高殿と共通する。また、A 4型覆屋は石列で内部を区画した部分があったが、石列で内部区画する高殿は近世中後期の③や美作、伯耆に分布する。このことから備中北部の高殿は、中世に発現したS 2型が、近世前期にかけて大形化、複雑化して、その延長に成立したと推測する。

④の隠地製鉄遺跡ではA 5型(第3炉床)を切って床釣り(第1炉床)が築造されていた(図15-6)。4個の主柱穴は第1炉床の周囲に台形状に配置して、周囲に側柱穴を円形状に配置。柱穴は直径30~50cmである。柱間距離は山側8.2m、谷側5.0m、南北5.0mで、建物規模は直径12mであった。第3炉床と第1炉床の建物を比較すると、四本柱という点では共通するが、柱や柱間距離など規模の点では差が認められた。また、近世段階には側柱も設置して、建物の構造や耐久性の差は大きいと考える。

以上のように覆屋は中世製鉄遺跡にも存在する。構造から地域性も指摘でき、地下構造の地域性とおおよそ関連する。また、中世覆屋の一部の特徴は近世前期たたらの高殿にも反映する。このことは、中世覆屋が高殿の前身であることを示す。18世紀には一辺10間の高殿も出現しており、近世前期よりも飛躍的と言えるほどの大型化が図られた。さらに構造の地域性も明確になった。近世中期の備中北部では近世前期と同様に18世紀以降も平面円形もしくは隅丸方形の丸打ち高殿を建て、内部は石列により区画する。同様の構造は備後北部や美作、伯耆の高殿にも共通する。また、出雲では平面長方形の角打ち高殿が新出する。さらに19世紀には石見西部と長門で石列区画や石敷き、礎石など石材を多用した角打ち高殿が分布する。高殿の地域性については俵氏も指摘しているが、それは安芸北西部、石見は角打ちで、出雲、伯耆、備後では丸打ちが中心というもので、発掘調査成果との間に齟齬がある。〔俵1933〕。高殿については資料の蓄積が一層求められると言えよう。

6. 山内

たたら吹製鉄の大きな特徴の1つに生産の場と生活の場の一体化があげられる。すなわち、山内の形成である。山内の施設には高殿以外に鍛冶場や元小屋、下小屋、材料や製品、食料の保管蔵などがあり、さらに炭焼き場や砂鉄洗い場などを付設する場合もあった。山内は街道に近いが人里離れた山深い場所を選地して形成するが、これは原料、燃料の調達と製品の出荷という2つの条件を考慮した選択である。人的規模は小規模な山内でも100人前後、多い場所では300人程度にもなった。山内形成の最大の効果は通年操業が可能になったこととされている〔河瀬2003〕。

しかし、たたら重要な特徴である山内全体に対する発掘調査はほとんどなく、山内の形成過程に関する考古学的な検討例は少ない。その数少ない検討例として、河瀬氏は覆屋の成立が中世後半、本床と小舟からなる床釣りの成立が17世紀半ば、天秤轆の採用が17世紀後半と推定されることなどから、山内の成立を17世紀後半と考えた〔河瀬1997〕。河瀬氏は製鉄技術を分析の基軸に据えて山内成立を追求した。ただ、山内成立については生産技術よりも生産の場と生活の場が一体化した点を重視したい。そこで生活用具の検討を通して、山内成立について考える。

中世製鉄遺跡および近世・近代たたら遺跡出土の生活道具について、一覧表にまとめた。表1は中世製鉄遺跡出土の生活道具で、表2は近世・近代たたら遺跡出土生活道具一覧である。これらの表からは近世中期以降に生活道具の出土が目立つことが分かる。中世～近世前期段階には作業場のみの調査も多いため生活道具の出土数が少ないとも考えられるが、近世中期以降のたたら遺跡では高殿内や地下構造内から生活道具が出土する事例も多い。これは生活の場が生産の場に近づいたことより、生産の場に生活道具が入り込む機会が増えたためと考える。これらの調査成果は、近世中期以降に生産の場と生活の場が近づいたことを推測させ、当該期には山内が成立していたことを示唆する。

6. まとめ

たたら吹製鉄の成立過程について検討した。その結果、大きく2つの画期が見出せそうである。

第1の画期は古代末～中世初頭で、たたら吹製鉄成立の萌芽期と考える。この段階にたたら吹製鉄床釣りの祖型と考えられるA型地下構造が出現した。さらに、この時期以降には製鉄原料は砂鉄に一本化されており、燃料の木炭を製造する炭窯の基本構造、特に煙道構造が統一される。

中世段階にはA型の複雑化（溝型→穴型）が図られ、床釣り下部の祖型も出現する（A6型）。その間、中国地方内で技術交流が行われ、A型の分布域は拡大した。近世前期には小舟状遺構の小舟化が達成され、床釣りへ進展していく様子が確かめられた。規模も中世から近世前期へと漸次的な大型化が図られた。さらに覆屋を持つ製鉄遺跡も存在するが、明確な覆屋跡が認められない遺跡が多いこともこの段階の特徴である。覆屋を示す遺構としては柱穴が確認できる程度で、複雑な構造物は想定しにくい。ただ、S1型のように「設計図」を基礎としたと考えられる共通構造の作業場が確認できる点は重要である。近世前期には主柱と側柱を持つ丸打ちの覆屋が出現するが、規模は中世S1型と大差ない。製鉄炉については、基本構造、規模ともに近代たたら吹製鉄のそれと同等のものがこの段階にはすでに出現していた。ただ、送風孔の穿孔位置は近代同様に水平な場合と高低差が見られる場合があった。このような状況から中世～近世前期はたたら吹製鉄成立への熟成期と考えたい。

たたら吹製鉄の基本的要素が完備する段階は近世中期で、たたら吹製鉄の確立期と考える。この段階には床釣りが著しく大型化し、それに伴って構造はより複雑になっていった。また、高殿の大型化、複雑化も果たされた。これらの変化は製鉄技術や建築技術の向上という観点のみでは説明できない。その背景には山内の形成、つまり生産の場と生活の場の一体化、生産の場の長期固定化が想起される。特定場所での長期操業は、その土地に手を加える機会と労力を増やす。土地改変に要した労働に見合うだけの増収が見込まれるからこそ、地下構造や高殿の巨大化・複雑化が可能となったと解釈したい。その動きはさらなる鉄の増産に反映した。鉄の増産は砂鉄採取量の増加と不可分の関係で、そのことは18世紀中頃に備後国で鉄穴場が増加したことからも推察できよう。上記のことから近世中期をたたら吹製鉄（永代たたら）の確立期と考え、大きな画期として評価したい。

参考文献

- ・安間拓己 2005 「中国地方の木炭窯」『たたら研究』第45号 たたら研究会
- ・上栢 武 2005 「中国地方における中世製鉄遺跡－たたら製鉄の萌芽として－」『中国地方のたたら製鉄の成立と発展』社団法人 日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部門「鉄の歴史－その技術と文化－」フォーラム
- ・上栢 武 2007 「中国地方における中世製鉄炉地下構造の構造的特質」『たたら研究』第47号 たたら研究会
- ・上栢 武 2008 「たたら吹製鉄床釣りの成立」『たたら研究』第48号 たたら研究会
- ・大澤正己 1999 「奥坂遺跡群出土製鉄関連遺物の金属学的調査」『奥坂遺跡群』総社市教育委員会
- ・河瀬正利 1995 『たたら吹製鉄の技術と構造の考古学的研究』溪水社 1995年
- ・河瀬正利 1997 「島根県邑智郡大和村上野たたら発掘調査の意義」『上野鉦跡』島根県大和村教育委員会
- ・河瀬正利 2003 「永代たたらへの確立過程」『近世たたら製鉄の歴史』丸善プラネット株式会社
- ・菅原祥夫 2008 「木炭窯構造の特徴」『小迫遺跡・朴迫D遺跡』福島県教育委員会・財団法人 福島県文化振興事業団
- ・竹広文明 1996 「たたら吹製鉄の成立とその展開」『たたら研究』第36・37号 たたら研究会
- ・俵 國一 1933 『明治時代における古来の砂鉄製錬法』丸善
- ・松尾充晶 2009 「中世製鉄炉の構造と系譜」『大志戸Ⅱ遺跡』島根県教育委員会
- ・村上恭通 1994 『倭人と鉄の考古学』青木書店

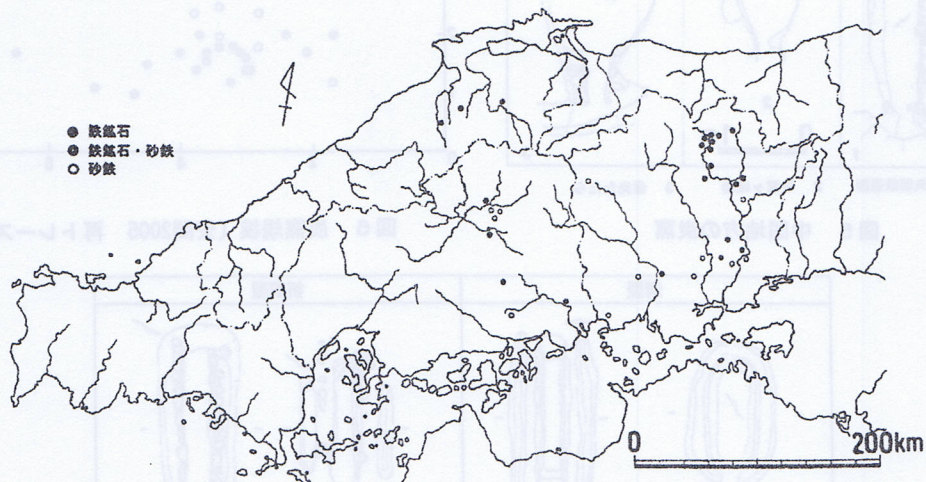


図1 古代以前製鉄遺跡分布図

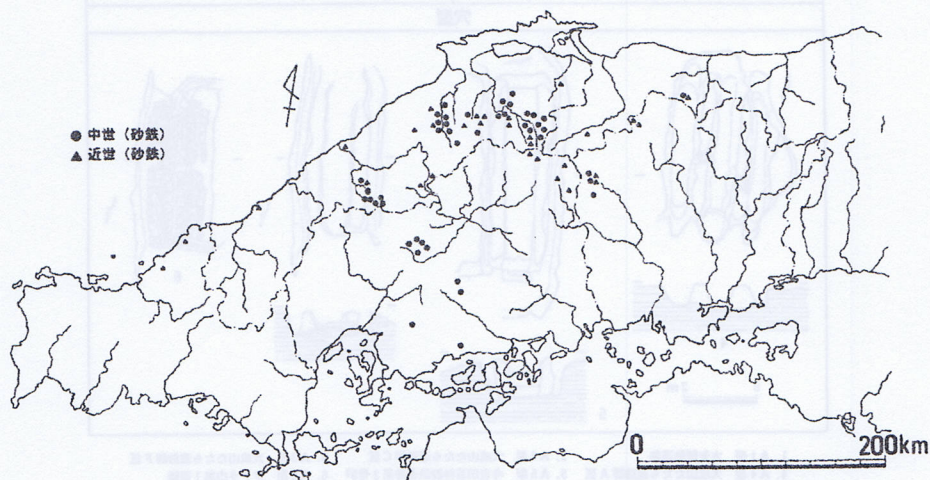


図2 中世以後製鉄遺跡分布図

遺跡		千引カナクログ谷 (6 C後半～末)	宮原谷 (6 C後半～7 C)	林崎 (7 C前半)	新地奥 (8 C初葉)
鉄鉱石成分	全鉄分 (Tatai Fe)	63.61%	65.32%	63.98%	58.27%
	ガラス質成分 (不純物)	9.7%	7.9%	10.0%	13.1%
産石製鉄		→			
砂鉄製鉄		製鉄所 (1号御溝)			鉄地系遺物 (大皮スツグ) (排澤だまり)
製鉄直後冷却：水中投入			SOJ-44 (マムランゴイ)		SOJ-30 (マムランゴイ)

図3 岡山県奥坂製鉄遺跡群の製鉄原料と操業動向【大澤1999】

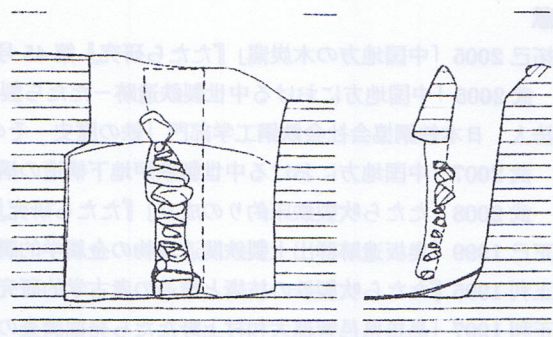
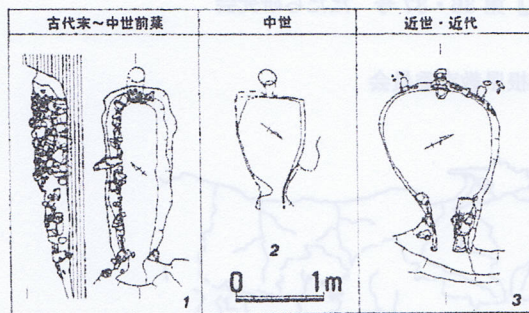


図4 炭窯の煙道
(広島県平家ヶ城跡第9号炭窯跡)



1 大矢製鉄遺跡 2 平家ヶ城跡 3 保光たたら

図5 中国地方の炭窯

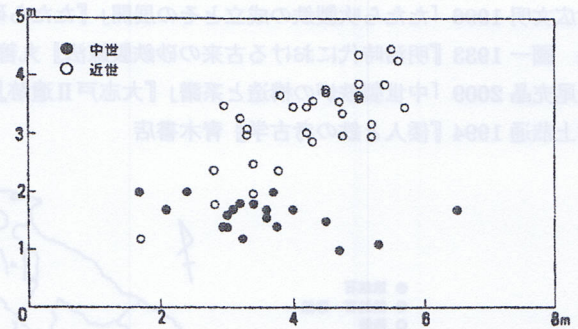
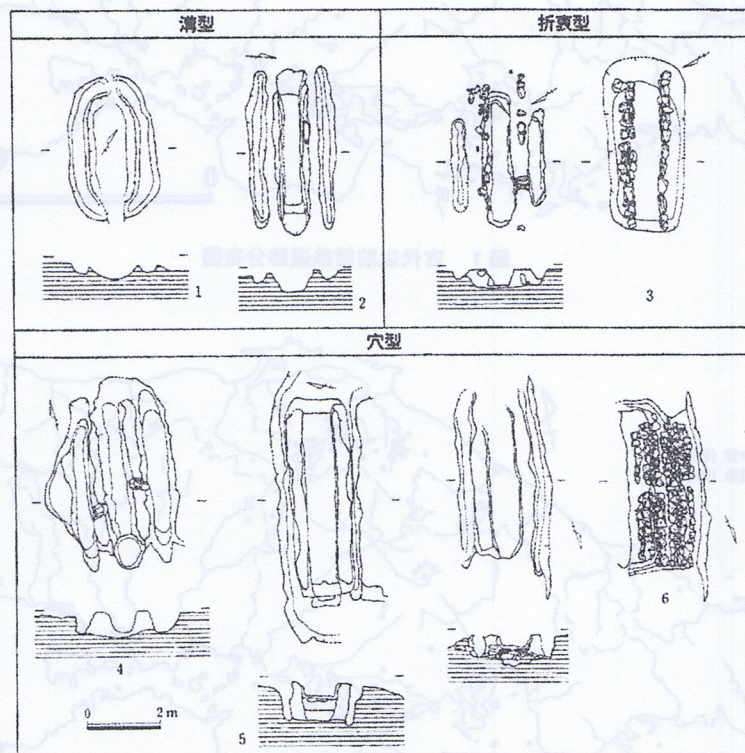


図6 炭窯規模【安間2005 再トレース】



1. A1型 大矢製鉄遺跡 2. A2型 大岡山たたら遺跡群C区 3. A3型 大岡山たたら遺跡群F区
4. A4型 大岡山たたら遺跡群A区 5. A5型 今吉田若林製鉄遺跡第2号跡 6. A6型 タカラ山第1遺跡

図7 中世製鉄炉地下構造A型の細分類【上村2008】

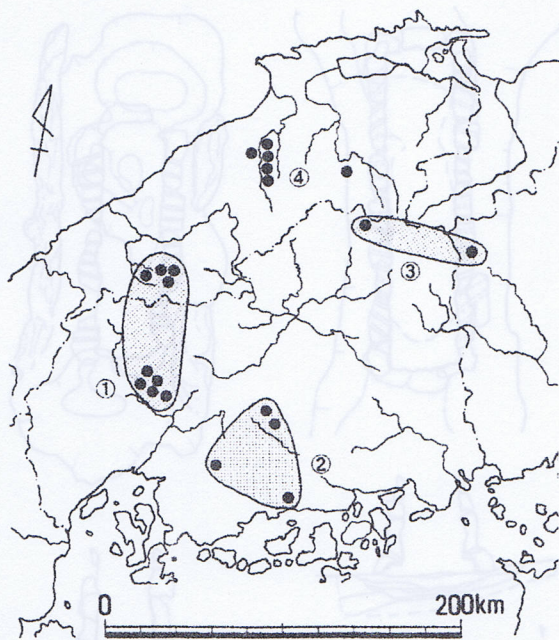


図8 A型分布図

①	②	③	④
A1型			
A2型		A2型	A2型
		A3型	
A4型		A4型	
A5型	A5型		A5型
A6型			

図9 A型の地域性

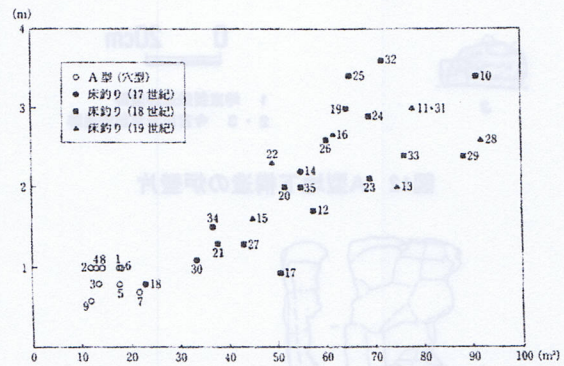
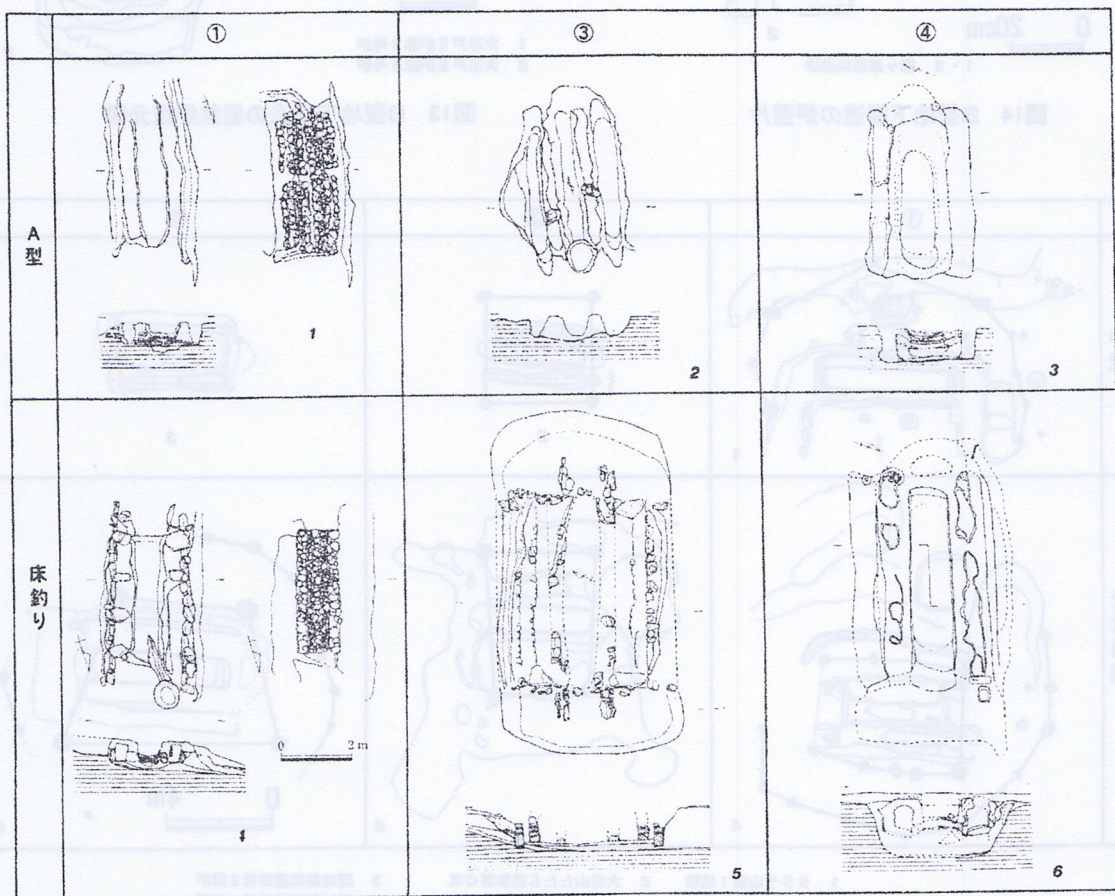


図11 地下構造の掘り方規模[上村2008]



- 1 タタラ山第1遺跡 2 大成山たたら遺跡群A区 3 隠地製鉄遺跡第2郷炉
4 立岩3郷製鉄遺跡 5 京坊たたら第7地点 6 隠地製鉄遺跡第1郷炉

図10 A型から床釣りへの流れ

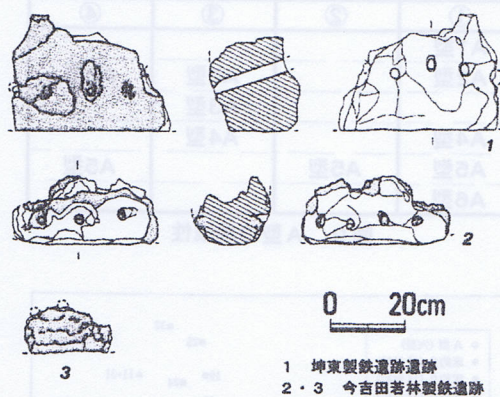


図12 A型地下構造の炉壁片

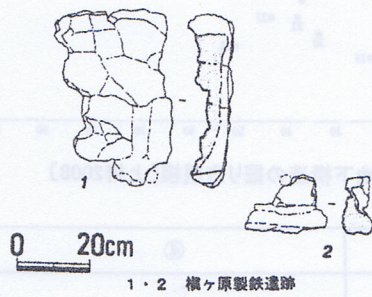


図14 B型地下構造の炉壁片

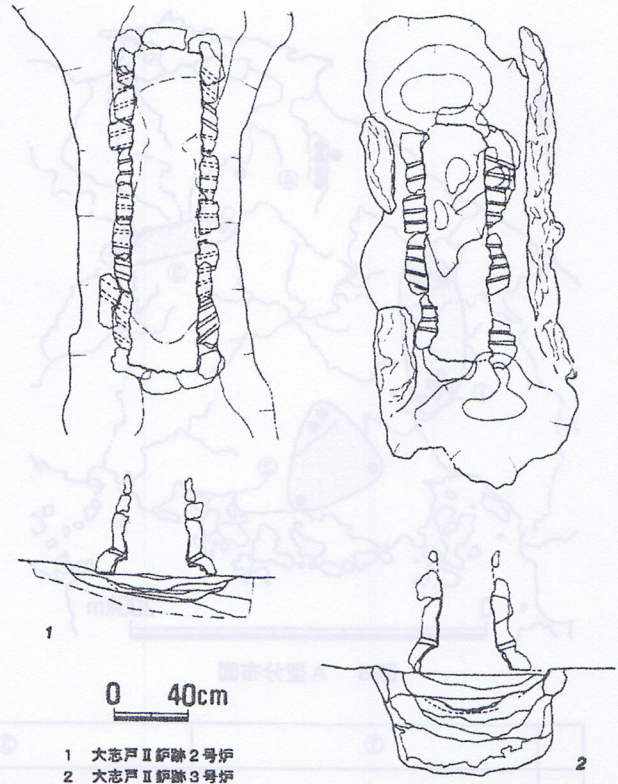


図13 B型地下構造の製鉄炉復元図

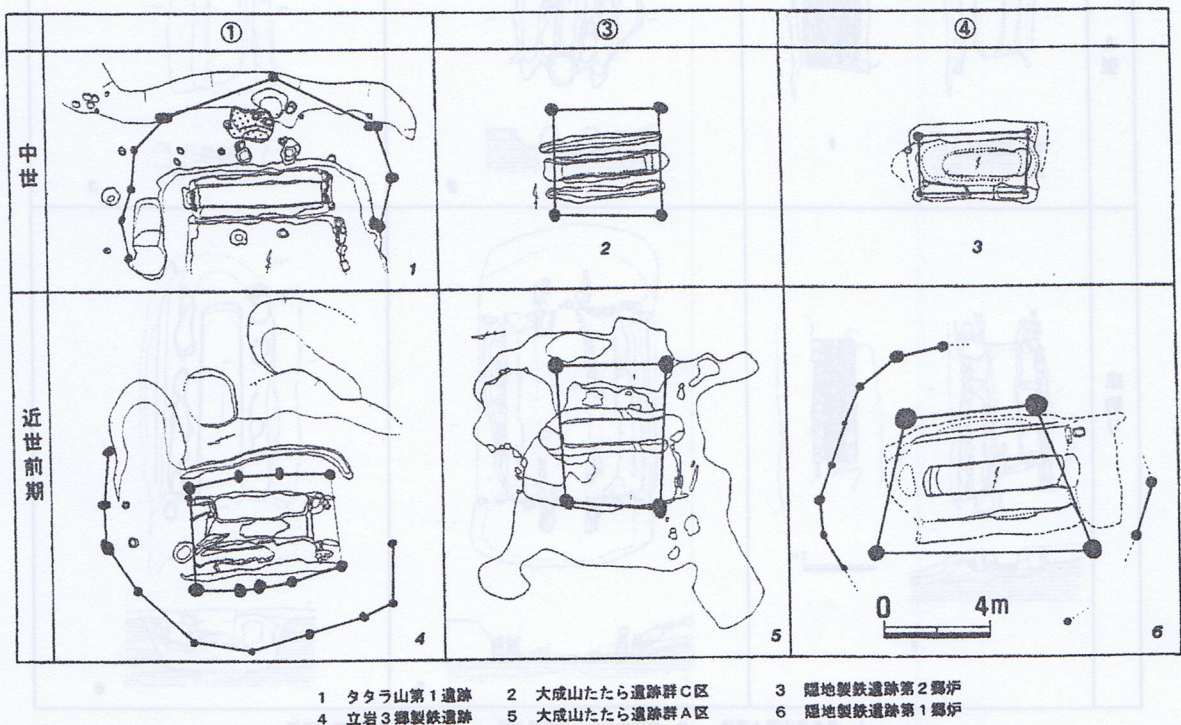


図15 中世製鉄覆屋から高殿への流れ

表2 たたら遺跡出土生活道具一覧

所在	遺跡名	出土遺物	出土地点	時期	備考
石見	立岩3号製鉄遺跡	陶磁器・銭貨1	本床(操業後の埋土中)	16世紀後半～17世紀	寛永通寶
	久谷たたら跡	釘3	跡坪内	18世紀中頃～19世紀初頭	
	白ノ平たたら跡	陶磁器1	5区(9区に北接)	18世紀後半～19世紀前半	
	上野跡跡	陶磁器3	9区(高蔵の西側)	18世紀後半～19世紀初頭	寛永通寶
	伊所跡跡	陶磁器・煙管・銭貨	跡坪区内	1650～1730・1750～1830年	
	堀谷跡	陶磁器7	堀谷中	19世紀末	
	堀谷跡	陶磁器6・瓦2	堀谷跡付近	18世紀代	
	堀谷跡	陶磁器1・土管1	高蔵内および近辺	19世紀前半	
	堀谷跡	陶磁器5・銭貨1	大蔵治場から下小屋にかけて	18世紀前半	
	堀谷跡	陶磁器100以上	堀谷跡	19世紀前半	
備中	美作	金ヶ谷たたら遺跡	金ヶ谷たたら遺跡	18世紀前半	
	美作	京坊たたら遺跡第2地点	京坊たたら遺跡第2地点	18世紀	
	美作	京坊たたら遺跡第7地点	京坊たたら遺跡第7地点	18世紀中頃	
	美作	大成山たたら遺跡群D区	大成山たたら遺跡群D区	18世紀中頃	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀中葉	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀末	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀末	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀末	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀末	
	美作	大成山たたら遺跡群B区	大成山たたら遺跡群B区	19世紀末	
備前	小倉山第2たたら	陶磁器1・銭貨25	小倉山第2たたら	18世紀中頃～19世紀中頃	寛永通寶
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
備後	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
出雲	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	
	小倉山第2たたら	陶磁器3・銭貨25	小倉山第2たたら	19世紀末	

表1 中世製鉄遺跡出土生活道具一覧

型式	所在	遺跡名	出土遺物	出土地点	備考
A型	安芸	大矢	土器片1	包舎跡	成平元寶・元豐通寶
		大矢	銭貨2	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
B型	出雲	大矢	土器片1	包舎跡	成平元寶
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	
		大矢	土器片1	包舎跡	

たたら製鉄と古代・中世の製鉄復元

国選定保存技術保持者（玉鋼製造） 木原 明

わが国の伝統的製鉄技術であるたたら製鉄技術を継承し、現代の日本刀製造に必要とされる玉鋼を生産する一方で、考古学的な発見に基づく製鉄炉の復元や実験にも常日頃関与している。近世に完成するといわれるたたら製鉄技術は、一朝一夕になったものではなく、当然、中世、古代における営みがあってこそはじめて成立したものと容易に推測できる。これまで大阪府柏原市教育委員会、交野市教育委員会、熊本県立装飾古墳館、そして愛媛大学で古墳時代の製鉄炉を復元し、炉内の仕掛けの違いに伴う炉内環境や生成物の相違点を多々経験してきた。また愛媛県今治市教育委員会・愛媛大学とは高橋佐夜ノ谷Ⅱ遺跡の製鉄炉に基づいた古代製鉄炉を、そして岡山県新見市ではさらにそれより大型の中世製鉄炉操業を指導し、たたら製鉄に通ずる技術を追体験している。

今回は古代・中世における製鉄炉の性能に関して、復元操業の経験や検討成果を通じ、また現代に伝えるたたら製鉄技術と比較しながら考察してみたい。

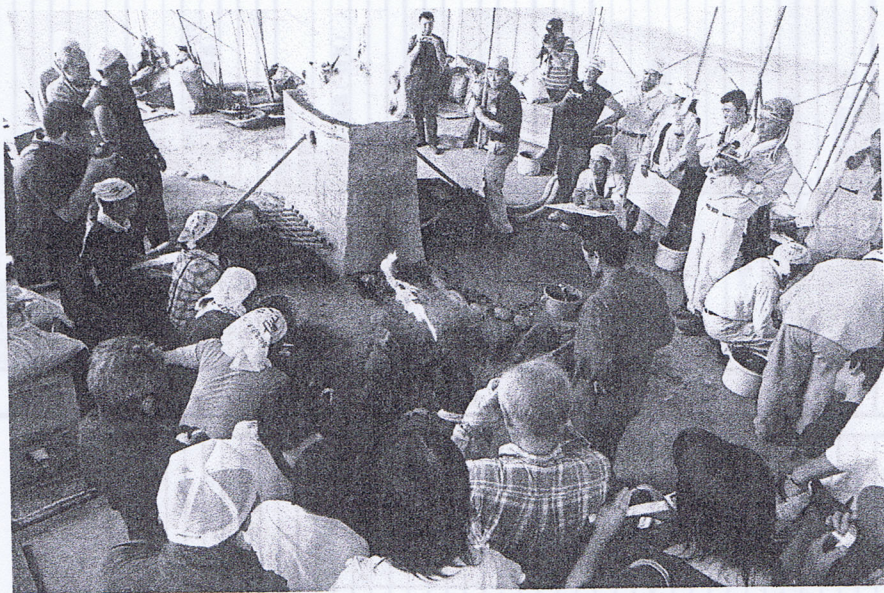


図1 今治市における古代製鉄炉復元実験（2006年9月17日）

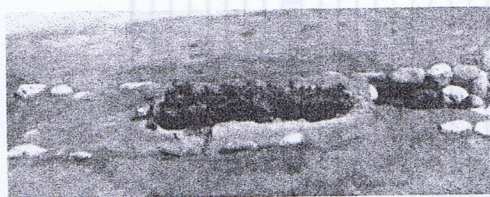


図2 実験で生成した鋤（けら）1

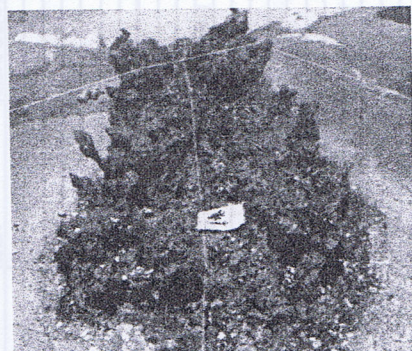


図3 実験で生成した鋤2

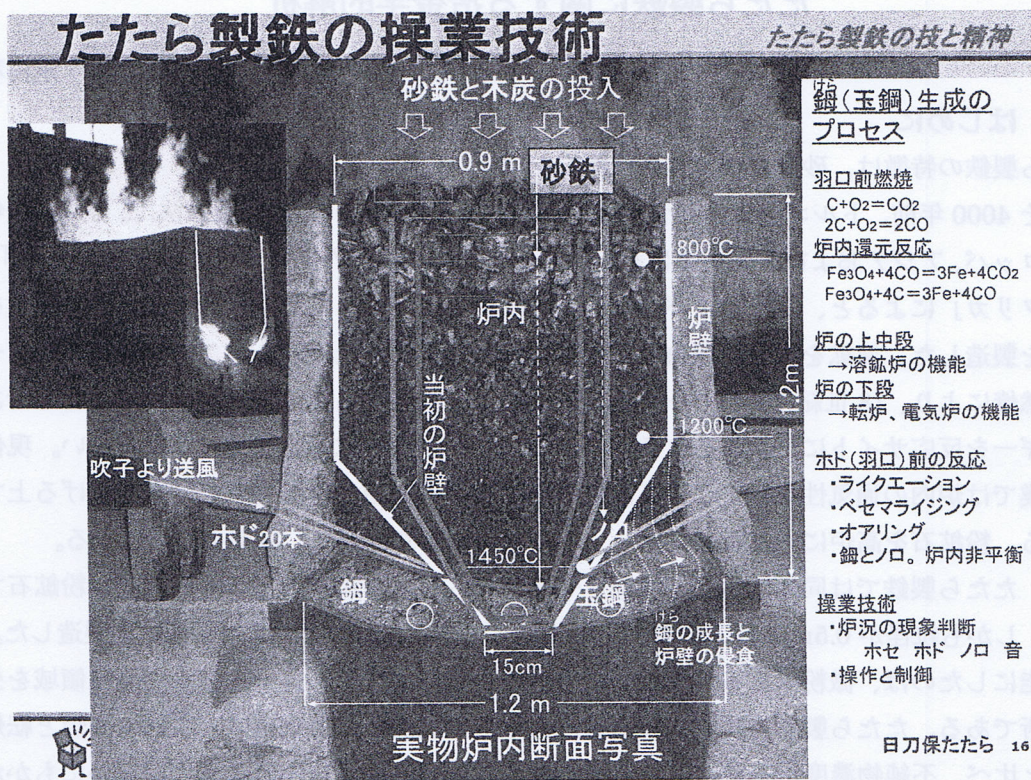


図4 たたら製鉄の操業技術

表 古代・中世・近世製鉄炉の比較

佐夜ノ谷遺跡発掘流出滓・炉壁の比較

佐夜ノ谷発掘流出滓・炉壁の比較

遺物名称	推定年代	※ ※ ※ ※ ※ ※														Σ※
		TFe	Feo	Fe2O3	SiO2	Al2O3	CaO	Mgo	K2O	Na2O	MnO	TiO2	Cr2O3	S	P	
炉外流出滓	古代	41.5	49.1	4.7	26.0	5.4	4.2	0.8	1.2	0.4	0.7	4.2	0.03	0.03	0.15	38.0
	中世	35.0	41.6	2.1	30.2	6.8	2.7	0.8	2.0	1.2	1.0	4.0			0.25	43.7
流出滓	近世	41.2	50.2	3.8	30.2	7.0	2.0		2.8	0.9	0.5	2.5~4			0.1	42.7
流出滓(5)		40.9	50.5	1.1	26.7	9.4	2.7	0.8	1.8	0.9	0.7	3.3		0.3	0.3	42.1
" (7)	中世末	44.2	50.7	7.4	24.4	7.0	2.5	0.9			0.5	1.9		0.1		34.8
"	6C後半	38.2	42.8	6.8	17.6	5.9	1.8	1.2			1.1	21.8	0.08	<0.01	0.1	26.3
炉壁		3.6	0.2	4.9	65.4	17.6	0.2	0.7	2.2	0.4	0.03	0.83	0.03	<0.01	0.02	86.5
釜土		2.1	0.1	2.9	70.8	14.8	0.8	0.5	3.2	1.9						92.0
真砂砂鉄		61.4	20.8	64.6	8.3	3.3	0.5	0.2	0.4	0.4	0.43	1.5			0.04	13.1

たたら製鉄に関する冶金学的解析

東京藝術大学 永田和宏

1. はじめに

たたら製鉄の特徴は、砂鉄すなわち粉鉄鉱石を鉄原料に用いることにある。

およそ 4000 年前、トルコ半島のアナトリア地方で始まったといわれる製鉄法は、約 3000 年前にヨーロッパ、アジアおよびアフリカにその技術が伝播していった。15 世紀の技術書である「デ・レ・メタリカ」によると、ヨーロッパでは、木炭高炉に原料としてくるみ大の大きさの塊鉄を用い銑鉄を製造した。塊鉄を使った理由は、原料の加熱および還元反応を起こさせるエネルギーが木炭の燃焼により、18 世紀以降はコークスの燃焼により発生する高温ガスを利用したためである。エネルギーを反応サイトに供給するためには高温ガスを原料の隙間を通さねばならない。現代の高炉操業では炉内の通気性を良くし、高温ガスを中心近傍に通す送風分布が効率を上げる上で重要である。粉鉄石を高炉に入れると飛散し、あるいは目詰りを起こし操業不可能になる。

一方、たたら製鉄では同様に木炭を燃焼させ高温ガスをエネルギーとしているが、粉鉄石である砂鉄、しかも粒径が 0.5mm 以下の微粉末を用いてズク（銑鉄）とケラ（鋼塊）を製造した。これを可能にしたのは、微粉鉄鉱石が飛散しない弱い送風（ソフトブロー）でかつ高温領域を生成する技術である。たたら製鉄で銑鉄を製造し、大鍛冶で脱炭して得た鋼は、現代の高炉と転炉で造る鋼と比べ、不純物濃度が非常に低い。特に表 1¹⁾ に示すように、炭素濃度が高いにもかかわらずシリコン、マンガン、アルミニウム、チタンなどがトレース程度で、リンや硫黄は現代銑鉄の 10 分の 1 程度である。その結果、鑄び難く、鍛接性が良く、高温加工性が良いなど非常に優れた性質を持っている。

本報告は、たたら製鉄の冶金学的特徴と微粉末を用いる送風技術について述べる。

表 1 日刀保たたらと砥波鑪、價谷鑪、鉄鋼協会復元たたら玉鋼と銑の組成(mass%)

砂鉄	鋼	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Co	Cu
籠り砂鉄と真砂砂鉄	1 級	1.42	0.01	<0.01	0.025	0.004	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01
	2 級	1.19	0.02	<0.01	0.025	0.005	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
	3 級	0.60	0.02	<0.01	0.025	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
真砂砂鉄	1 級	1.30	0.02	0.01	0.057	0.012	0.01	0.01		0.01		0.01
	2 級	0.44	0.02	0.01	0.057	0.018	0.01	0.01		0.01		0.01
	3 級	0.19	0.31	0.01	0.021	0.004	<0.01	0.01		0.01		0.01
砥波鑪	最上	1.33	0.04	tr.	0.014	0.006						
	玉鋼	0.89	0.04	tr.	0.008	Tr.						
	銑(上り)	3.61	0.03	0.01	0.033	0.01						
	銑(下り)	3.55	0.02	tr.	0.043	0.01						
價谷鑪	ヤリヲ銑	3.63	tr.	tr.	0.10	0.003				無し		tr.
鉄鋼協会(2代)	鋳	0.80	0.02	0.003	0.035	tr.						
	銑(籠り)	3.58	0.0006	tr.	0.117	tr.						
	銑(上り)	3.21	0.0015	tr.	0.044	tr.						

2. たたら炉の構造

埼玉県入間郡大井町東台製鉄遺跡製鉄²⁾は8世紀中葉奈良から9世紀前半の円筒状の堅型炉である。炉の内径は67～87cmで炉高は不明であるが復元図から推定して150cm程度である。焼成した粘土製の羽口が炉背後中央近傍から斜め下、炉底中央に向って設置してあるが、その内径は10～15cm、長さ約50cmで土管状である。

明治期における鋤押炉と銑押炉の形態について、俵³⁾は前者として伯耆国日野郡阿毘縁村砥波鑪を、後者として石見国那賀郡下松山村價谷鑪を調査した。まず、たたら炉の形状を比較する。表2に示すように、炉の特徴は箱型で複雑な地下構造の上に構築されている。銑押炉では炉壁上部が少し狭まっており、鋤押炉では逆に上部に少し広がっている。羽口の位置は前者が後者より低く、傾斜は緩やかになっており、その径は後者の方がより細くなっている。これらの炉の構造を比較すると、銑押炉では炉の幅を狭くし送風が炉の中にまで吹き込まれるようにして熱が溜まるようにしている。また、これは高温の還元領域を炉の上部にまで広げることになる。

表2 價谷鑪（銑押し）と砥波鑪（鋤押し）の炉と羽口の大きさ(単位:mm)

たたら 名	炉				羽口				
	長さ	幅 (上部)	幅 (中段)	高さ	高さ (外側)	角度	本数	間隔 (外側)	直径 (縦 x 幅)
價谷鑪	2967	860	800	1120	218	26°	19x2	136	24x9
砥波鑪	2485	635	697	1150	127	9-10°	16x2	145	6x3

日刀保たたら炉の地下構造は昭和初期から第2次大戦終了まで操業された「靖國鑪」の遺構を改築したものである。深さ333cm、幅485cm、奥行き364cmの長方形の穴底に排水溝があり、下から荒砂、坊主石、砂利、木炭、粘土の層が重なり、その上に中心に本床、その両脇に小舟が配置されている。本床の上に構築された箱形炉の構造を図1に示す。炉の長さは2,700mm、高さは両端で1,200mm、中で1,100mm、幅は両端で761mm、中で873mmと中が少し低く、膨らんでいる。ほど穴（羽口）は片側20本ずつ両側に合計40本が一行に開けられた。炉底（元釜）

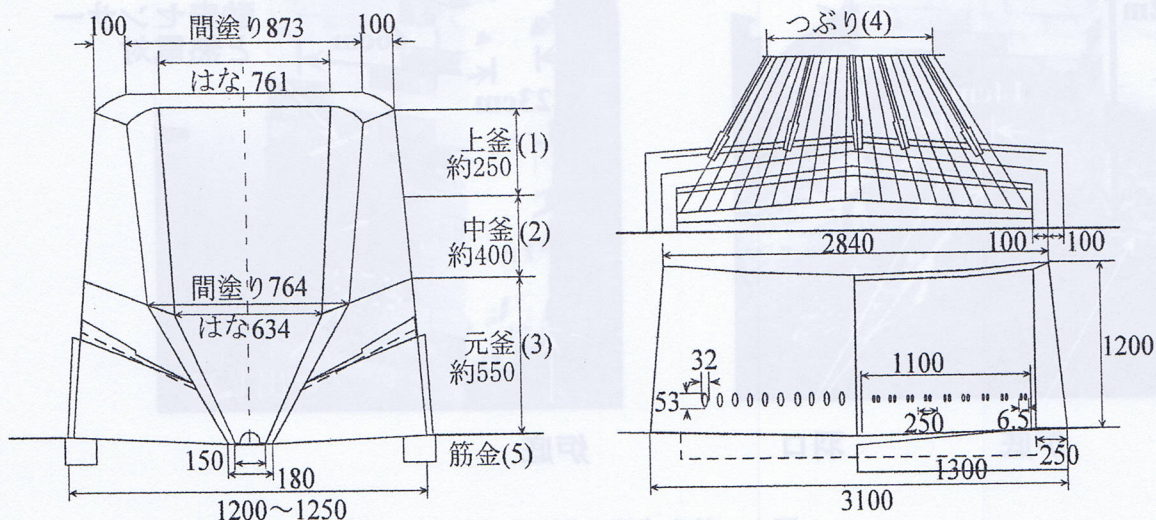
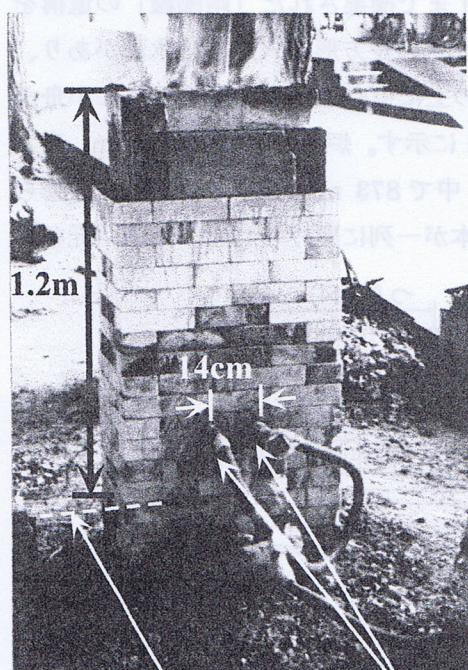


図1 日刀保たたら炉の断面図と羽口

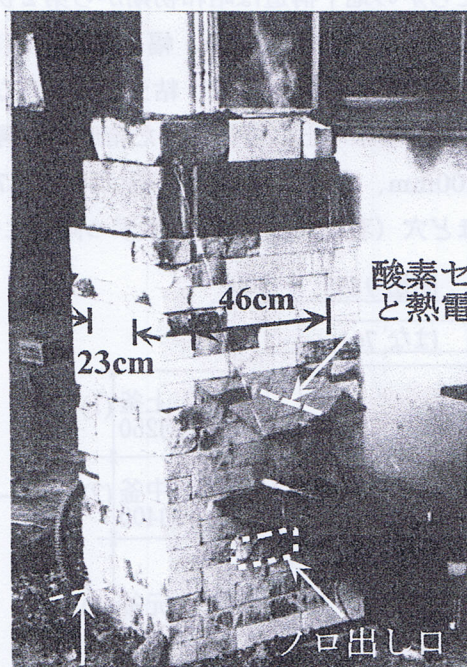
はV字型になっており、羽口の角度は $19\sim 24^\circ$ で炉底に向かって斜めに開けられる。羽口の間隔は 120mm である。炉は1代目（ひとよめ、代とは操業回数を示す単位）毎に壊される。送風は別棟に設置された4台の軸（ピストン型電動送風機、送風能力 $750\sim 950\text{m}^3/\text{時}$ ）を用い、間欠的に送られる。炉の両脇には天秤台と呼ばれる炉と同程度の高さの台があり、ここにそれぞれ送風管が来ており、「つぶり」と呼ぶ送風分配箱から「木呂管」と呼ぶ送風管を通して羽口に送風される。炉の両端の炉底には熔融スラグ（ノロ）を流出させるための直径 10cm 程度の穴が中心と左右に3本開けられており、通常は木炭粉を詰めて塞いでいる。中心の穴を「中湯路」（なかゆじ）と呼び、操業の初期に開けられる。両脇の2つの穴を「四つ目湯路」（よつめゆじ）と呼び、中湯路を粘土で閉じた後、操業中頃から使われる。

筆者が開発した鉄製造用の小型たたら炉を、図2に示す。ロウ石レンガ（ $230\times 115\times 65\text{mm}$ ）を積んだ箱型の炉である。レンガの接着は耐火モルタルを水で薄く溶いたものを用いた。平坦な地面に湿気防止のために鉄板を敷き、その上に建築用のブロックを敷き詰め、さらにその上にレンガで横2枚、縦3枚、高さ4枚の箱を作った。内法で横1枚、縦2枚、高さ3枚になる。このここは通常耐火モルタルで塞いでおいた。入口1段目にレンガを置き、2段目には中央に鉄パイプ（通称1インチ管）を水平に、炉内に5cm程度入るように入れた。これを下羽口とした。この部分を灰床とした。この箱の上に入口の広さをレンガ1枚分として“コ”の字型にレンガを積んだ。この位置を炉底とし、入口の右側炉壁にレンガ半分の大きさのノロ（スラグ）出口を作った。下羽口は後に取り外すので、耐火モルタルで固定した。左側の炉壁4段目には羽口（上羽口）として2本の鉄パイプ（通称1インチ管）を14cmの間隔で平行に斜め下に向けて設置した。この角度はレンガの断面（ $115\times 65\text{mm}$ ）で決まる大きさで、水平面に対し 0° と約 15° で変化させた。レンガは“コ”の字型に炉底から8段積み、その上に箱型に6段積んだ。入口のレンガ8段分は



炉底

羽口



炉底

図2 鉄生成用小型たたら炉

操業後取り外すので耐火モルタルで固定しなかった。炉底から14段積んだレンガの上には建材用ブロックを箱型にさらに2段積み上げ、炉底から約1.2mの高さにした。送風は吹出口付きの家庭用電気掃除機を利用し、電圧を制御して送風量を調整した。塩ビのT型管で風を分割し、両方の羽口に送風した。羽口には覗き窓を設置し、内部を観察した。

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。ただし、灰床を設けたこと、ノロ出し口を炉床位置の右炉壁中央に設置したこと、また、上羽口の角度を約15°および29°にしたことが異なっている。

3. 羽口の構造

俵³⁾の記録では明治期の砺波たたら炉について次のように記述されている。ホドを開けるには「ホド差し」という細長い円錐形の棒を用いる。ケラ押しの場合の羽口位置は、壁の外側で筋金から218mm、内側で炉底から158mmに、間隔は内側で152mm、外側で136mmに取って設置する。まず「初差（はつざし）」で壁内外の2点を見通して孔を開け、ついで「木呂差（きろさし）」で目的の大きさに広げる。最後に「シラベ」で掃除をする。最終的な孔の大きさは壁内側で縦6mm、幅3mm、外側で縦65mm、幅30mmとなっており、楕円形をしているが、孔は中央で断面積が410mm²から720mm²に急に広がっている。図5のホド穴の形状を参照されたい。この事は、操業で壁が浸食されると途中で風の吹込み速度が変化することを示している。この変化はケラ押しの場合で、ズク押しの場合はこの変化はない。

風は「龍の口」から「つぶり台」に設置された扇形の風箱に送られる。風箱の扇型の板（雲板）は扇の弧の方を狭くしてあるので、中央は狭く両側は少し広がっている。ここから内径31mmの竹製の木呂管19本でホドに送られる。木呂管の先端には先細りの鉄製の管が取り付けられ、先端はホドに取り付けられる。ホド孔は縦長の楕円形なので、孔の上部は開いている。この木呂管の長さは炉の中央で短く582mmで、両側では長く1180mmある。管が長いほど空気抵抗が大きいので、炉の中央の方が両脇より強く風が吹込まれる。炉の幅は中央が少し広がっている。日刀保たたらでは、炎は3つに分かれており、両脇にも均等に風が供給されるように調整されている。この孔の開け方は「一家相伝」の秘密とされているので筆者には詳細は分らないが、両脇の穴の大きさを調整しているのではないだろうか。俵の記録にも、ホドの形状を作る際、「シラベ」を上下に動かしてこれを修正し、その手加減でその寸法を定めているとある。

4. 鞆（ふいご）の構造と送風能力

天秤鞆の概念図を図3に示す。備後國小鳥原の土天秤鞆の踏み板の大きさは長さ1590mm、幅848mmで、踏み込み深さは最大0.315mである。片方の踏み板の1踏みの体積は0.212m³である。伯耆国砥波鑪では操業初期は毎分28踏みで後半40踏みした。送風量は操業初期に片側98.9 l/s、356 m³/hrである。羽口は砥波鑪で片側19本なので、羽口1本当たり5.21 l/sとなる。操業後半で141 l/s、羽口1本当たり7.44 l/sである。送風圧力は操業初期で水注3cm (294Pa)、炉壁が半分浸食され羽口の断面積が大きくなると低圧になった。これは天秤鞆を1人で踏むとすると40.4 kgで踏んでいることになる。番子は綱に掛りながら踏台を踏むのでこの程度の値になるであろう。

石見国價谷鑪の櫓天秤鞆では、踏み板の大きさは長さ1450mm、幅910mmである。踏み込み深

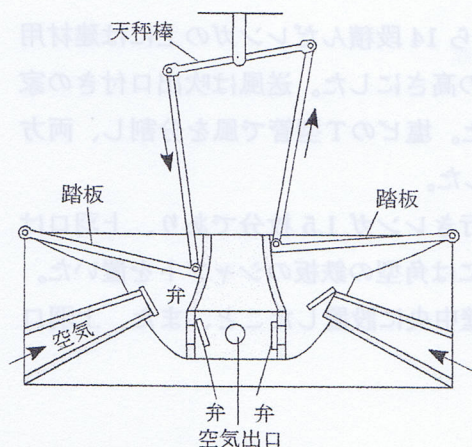


図3 天秤鞆

さは0.28mである。片方の踏み板の1踏みの体積は0.185m³である。操業初期では毎分40踏みで後半は49踏みする。羽口は片側16本なので羽口1本当りの送風量は、操業初期で7.70 l/s、後半で9.44 l/sとなる。送風圧力は操業8時間25分後で水柱1.8cm (176Pa)、10時間25分後以降3cm (294Pa)である。この圧力は番子1人が操業初期では23.7kgで少し軽めに踏むが、操業のほとんどは39.6kgで踏んでいる。

図4に示す踏み鞆は、2008年10月に東京工業大学で用いたものである。板の長さは2.35m、幅0.63mで中心に支点がある。踏込み深さは約10°である。片側の体積は0.0759m³である。毎分10回の踏み数の場合、25.3 l/sとなる。踏み板と箱の隙間にはシール材が入ってなく、0.5mm位の隙間があって空気は多少漏れていたの、実質10 l/s程度であろう。板の両側に2人ずつ乗り50kgで踏むとすると、圧力は662Paになる。この時の炉に用いた羽口は1本で1インチ鉄管を使った。

図5には靖国たたらで用いられていた水車動力の差吹き鞆を示す。日刀保たたらでは4台の差吹き鞆を電動モーターで同期させて駆動し、間歇風を炉に吹き込んでいる。操業初期の送風の圧力は水柱で6.5cm (637Pa)で、後半は一時12cmの時もあるが大半は9cm (882Pa)である。この送風圧は天秤鞆の場合より2から3倍大きい。現在、年3回冬季に行われている日刀保たたらの操業における送風量と圧損を表3に示した。羽口は合計40本である。送風量は872 m³/hrで羽口1本当りの送風量は6.05 l/sである。これは小型たたらの10 l/sより少ない。

江戸中期以降のたたら炉では炉壁下部の片側20本の羽口に木呂管で風を送るための「つぶり」と呼ぶ分配箱は、天秤鞆に密着するように作られた熱遮蔽用の土壁の出口「龍の口」に直接設置されていた⁴⁾。明治以降水車動力による差吹き鞆を4台で送風するようになると、河畔に水車を作るため、10m以上の長い送風管を必要とした。この管は内径が約20cmもある。現在、島根県奥出雲市横田町字大呂で唯一毎冬に操業している日刀保たたらでは、水車の代わりに電動モーター

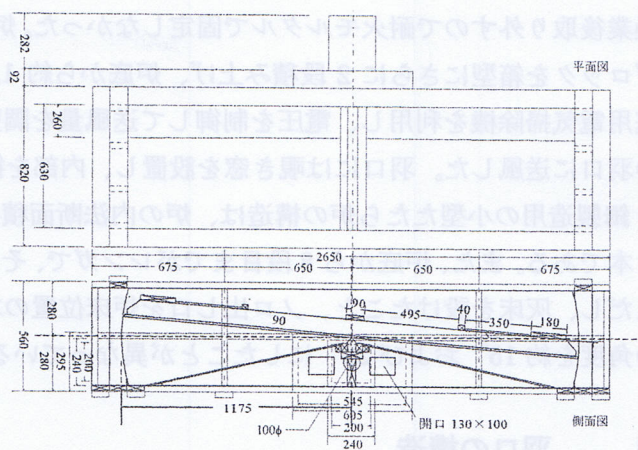
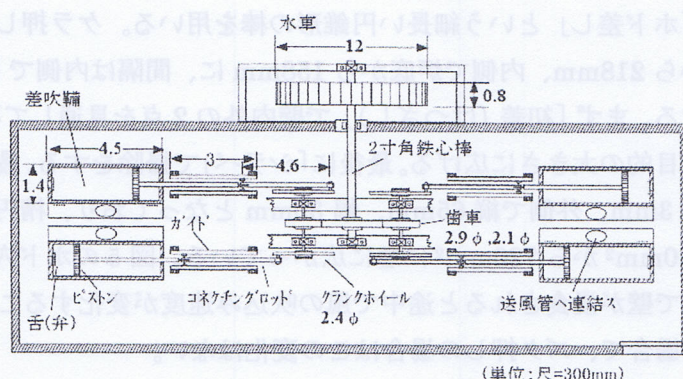


図4 足踏み鞆（羽場睦美氏設計・製作）



(単位: 尺=300mm)

容量: 0.39m³/ストローク

図5 水車動力の差吹き鞆

3 平成10年度日刀保たたら3代の送風条件(平成11年2月3日から6日)

操業時刻	操業時間	送風量(m ³ /hr)	圧損(H ₂ O;cm)	湯路温度(℃)	備考
1日目 8:30	0				操業開始
13:17	5:43	775 (5.38)			籠り期
2日目 8:38	24:08		6.5	1358	上り期
10:07	25:37	872 (6.05)			
14:03	27:33		12		
18:59	32:29			1377	
3日目 10:10	49:40		9		下り期
11:37	51:07			1266	
14:25	53:55		ワテ9, マエ6	ワテ1248, マエ1274	
18:09	57:39	904 (6.28)			
20:00	59:30	872 (6.05)			
4日目 3:37	67:07	839 (5.82)	ワテ8, マエ7		砂鉄・木炭終了
5:17	68:47				操業終了

注1：送風量の()は羽口1本当りの送風量(1/s)

注2：平均砂鉄総量 10,233 kg、木炭総量 10,545 kg、ケラ 2,326 kg

注3：送風は電動モーターによる4台の差吹轆による。

ターを利用しており、太い送風管で風を送っている。

小型たたら送風の送風は、電動式のブロワーを送風機に使用して洗濯機のビニール製の長さ約2m、内径約4cmの排水管用に羽口に連結して行なった。羽口は内径1インチの鉄管である。2008年10月に東京工業大学の大学祭で行った踏み轆では、その両側に2人ずつ立って4人で交互に板を踏み送風した。しかし、内径約4cmのホースでは炉内に全く風が通らない。板の隙間から風が抜けてしまうのである。そこで、ホームセンターで売っている内径約10cmのアルミ箔製のフレキシブルな管を買ってきて踏み轆に使ってみた。風が通りたたら操業は成功した。送風管の通風抵抗がこれほど大きいとは驚きであった。

5. 操業時の風の流れと炎の出方

送風は呼吸するように間欠的に行われ、そのたびに炎が高く燃え上がる。炎は図6に示すように、箱型炉の長手方向の中央から、真中に大きな炎とその両脇に少し低い炎の3つが立ち上がり、壁際からも小さい炎が立ち上がる。さらに両端の4つの湯路からも炎が噴出す。

木炭は炉の壁際に装入されるので中央は常に凹んでおり、羽口から吹込まれた風のほとんどは、圧力損失の少ない中央に向かって流れる。また、壁際はやはり隙間が出来るので一部の風が上昇する。すなわち、両方の壁際近傍の木炭には風はあまり通らない。この風の通り方を図7に示す⁵⁾。羽口前の木炭が燃焼して発熱、消費され、上から新たな木炭が降下して供給される。砂鉄は壁際15cm近傍に装荷されるので、強い風に曝されることなく、木炭の燃焼に従って降下してゆく。たたら製鉄では粉鉱石が使われるので、直径0.5mm程度の細かい砂鉄が飛散しないように風の主

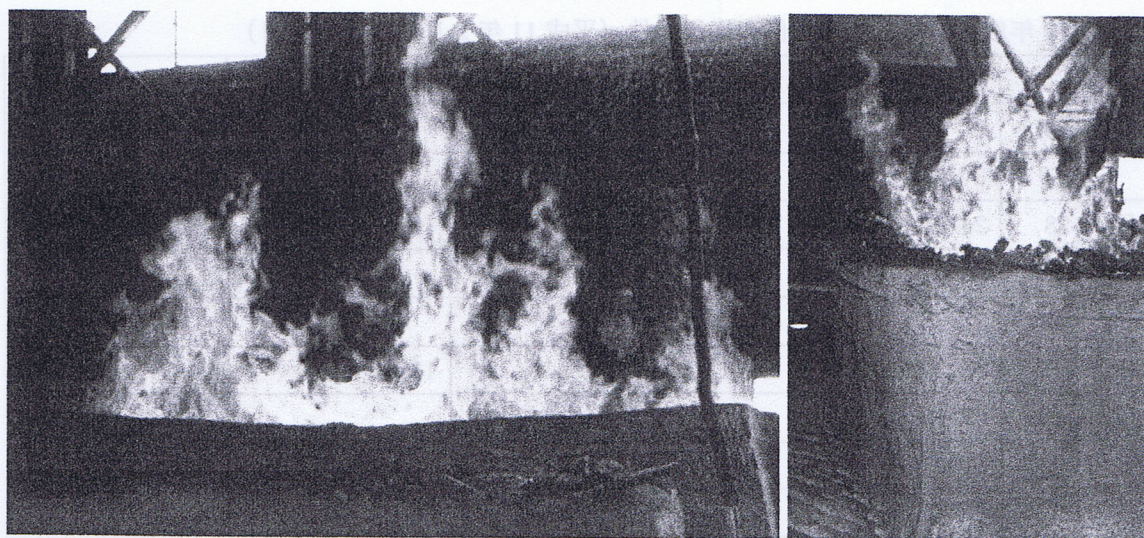


図6 日刀保たたら炉の炎⁵⁾

要な通り道と砂鉄の装入場所を分けているといえる。

6. 操業による炎の色と高さの変化

明治期の砺波たたらは4段階に分けて管理された。³⁾「籠り」、「籠り次」、「上り」、「下り」である。「籠り」期では、ホド孔に栓をして送風した。送風開始から約1時間後、ようやく火勢が強くなったら「籠り砂鉄」を入れ始めた。このときの炎の高さは60cm程度で色も暗赤色である。4時間40分後にノロとズク（銑鉄）が出、6時間後からは「籠り次砂鉄」を装入し始めた。炉壁が溶解すると、ホドの先

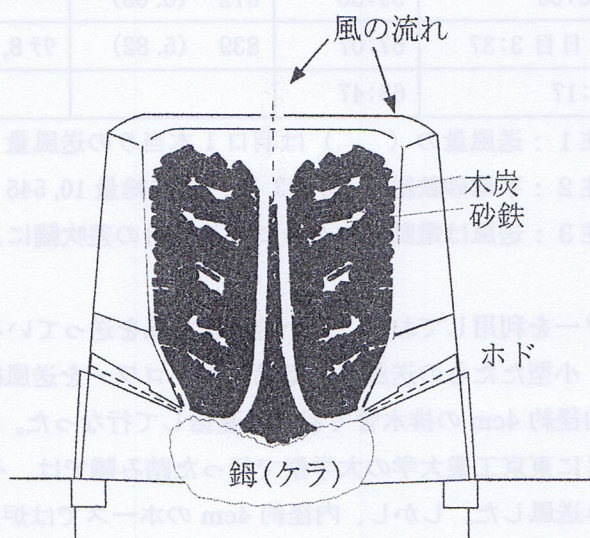


図7 たたら炉中の挿入物分布と風の流れ⁵⁾

端が後退するので孔が次第に大きくなる。すると風速が減じるので少しずつ増風する。このときの炎の高さは約90cmであった。10時間50分で「上り砂鉄」を入れ始めた。ここまでは天秤鞆の踏み数は毎分27回程度であるが、12時間後から踏み数を毎分31回に上げ送風をさらに強めた。このときの炎の高さは約1.2mであった。23時間半で中湯路を塞ぎ、左右の湯路を開けて使った。送風をさらに強め、28時間半から「下り砂鉄」を装入し始め、送風の踏み数は毎分37回であった。壁が次第に侵食されて32時間後頃ホド孔の断面積が大きくなった。送風の踏み数は毎分40回に達した。炎の色は暗黄色から紫色になる。この頃ホドの栓を取る。36時間20分後、火焰の長さは2から2.5mに達して白光を帯びた。次第に炉内にケラが生成し、炉の温度が下がる炎の高さが減じ、色も暗赤色に変わった。67時間40分で砂鉄装入を止め、68時間でケラ出しを行った。

炎の色は「キワダホセ」や「ヤマブキホセ」と呼ばれるように、黄色が最も状態の良い色である。日刀保たたらの観察⁵⁾によると、操業が順調な時は「籠り期」に赤黄色の炎が出て、「上り

期」と「下り期」には火勢の強い黄色になる。砂鉄を入れすぎて温度が下がると黒味がかった炎が出て、これを「黒ボセ」と呼んだ。また、砂鉄が少ないと木炭が燃焼して赤みがかった炎「赤ボセ」がでる。ホドが詰まって風が流れないとこの上部の木炭から紫がかった炎が出る。これは一酸化炭素の燃焼による炎で「ヤカンボセ」と呼ばれる。

7. 操業温度と炉内酸素分圧分布

小型たたら炉のシャフト部の温度分布は、鋳生成炉では鋼製筒の部分で急激に温度が低下し、レンガ上部 5cm で赤熱状態でなくなり 600℃程度にまで下がっている。表 4 に示すように羽口上部 450mm の位置での温度は約 1150℃なので、20cm の間に 550℃温度低下していることが分かる。一方、銑生成炉の場合は羽口上部 450mm の位置での温度は約 1080℃で鋳生成炉より低い。この炉では上部までレンガ構築なので急激な温度低下は無い。これ以外の炉内条件は鋳生産の場合でも銑生産の場合でもほとんど同じであった。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 の位置では鋳生成炉で $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-14}$ atm、銑生成炉で $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-15}$ atm となっており十分還元が進行する条件にある。

この低温度と高酸素分圧下では、酸化鉄は還元して鉄になるが他の金属酸化物は還元されずノ

表 4 小型たたら炉の操業条件と生成物鋳と銑の重量および炉内温度と酸素分圧

試料 No.	砂鉄 (kg)	珪砂 (kg)	木炭 (kg)	生成物 (kg)		温度(℃)			酸素分圧(気圧)	
						炉底	羽口	シャフト	羽口	シャフト
1	30	0.0	74.2	鋳	5.0	1091	1349	1159	3.5×10^{-11}	3.6×10^{-14}
2	29.7	0.90	63.6	鋳	7.7	1074	1330	1123	7.6×10^{-12}	1.5×10^{-14}
3	30	0.90 ⁺	80.8	鋳	7.8 [#]	1153	1316	1126	2.4×10^{-12}	1.1×10^{-14}
4	30	0.45	51.6	鋳	6.9	1176	1385	1156	1.8×10^{-11}	1.5×10^{-13}
5	30	0.45	67.4	鋳	6.0	1189	1416	1247	—	—
6	30	0.45	65.0	鋳	9.5	1247	1371	1148	2.4×10^{-11}	1.0×10^{-13}
7	30	0.45	51.9	鋳	5.4	1211	1370	1140	7.3×10^{-11}	1.6×10^{-13}
8	20	0.45	41.6	鋳	2.0 [*]	—	—	—	—	—
9	20	0.45	37.1	鋳	1.3 [*]	—	—	—	—	—
10	20	0.40	42.4	鋳	3.7	1288	1353	1064	—	—
11	20	0.60	37.4	鋳	4.2	1180	1345	1125	—	—
12 ^{\$}	30	0.90	68.3	銑	5.7	1134	1381	1062	9.4×10^{-10}	—
13 ^{\$}	30	0.60	72.8	銑	8.6	1212	1319	1089	4.0×10^{-11}	1.3×10^{-15}
14 ^{\$}	30	0.60	70.9	銑	10.1	1048	1359	1056	1.3×10^{-10}	1.1×10^{-14}
15 [%]	20	0.50	46.8	鋳	5.5	—	—	—	—	—
16 [%]	30	0.60	65.6	鋳	8.0	—	1368	1082	—	—

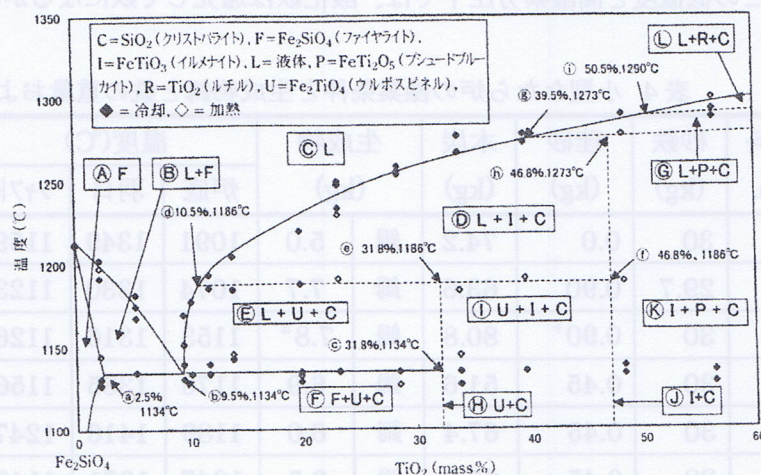
注：+：最初の 3 チャージだけ計 3kg に珪砂を添加。#：鋳塊が上 1.5kg と下 6.3kg に 2 つに分離。

*：複数の鋳に分散。\$：銑生成炉は 2 本羽口を平行に設置。鋳生成炉は 1 本。%：No.15 and 16 の羽口の角度は約 29°、No.12 は水平、他の炉は 15°。

表6 砥波鑪と價谷鑪および鉄鋼協会還元たたらノロの成分組成(mass%)

たたら炉	操業 段階	T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	V ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ FeO
砥波鑪 ³⁾	籠り	49.52	58.85	5.40	22.52	5.10	5.40	1.23	0.18	0.14	0.24	0.092
	上り	34.40	39.47	5.32	30.16	9.24	10.81	2.28	1.16	0.51	0.31	0.135
	下り	27.20	30.76	4.62	41.30	9.51	9.21	1.16	1.49	0.69	0.16	0.150
價谷鑪 ³⁾	降り	34.82	43.64	1.24	17.42	19.08	5.32	1.92	0.54	0.71	0.84	0.028
鉄鋼協会	1代	籠り	35.50	38.66	7.88	28.27	12.75	6.85				0.204
		下り	43.90	51.84	5.27	22.96	9.23	5.29				0.102
	2代	籠り	35.29	40.01	6.08	29.57	12.60	6.41				0.152
		下り	46.50	53.64	9.99	21.11	8.43	4.72				0.186
	3代	籠り	40.96	48.27	5.02	25.73	9.02	5.54				0.104
		下り	47.80	56.02	6.20	21.57	6.91	4.76				0.111

ロに溶解する。しかもこの高酸素分圧下で還元鉄が木炭と接触して炭素を吸収し銑鉄になる。またノロは表5に示すように2FeO・SiO₂のファイヤライト組成にTiO₂が溶解している。図8に示すように、TiO₂が10%近傍に共晶点があり1134℃でノロが融解する。しかし、これ以上の組成では融点が急速に上昇する。ノロの役割は生成した鉄は空気による再酸化を防止することにある。砂鉄中のSiO₂濃度5%程度でかつTiO₂濃度2%程度が適当であり、斐伊川の砂鉄が対応する。

図8 2FeO・SiO₂-TiO₂系状態図

8. たたら操業における物質収支と熱収支

日本鉄鋼協会の還元たたらノロの熱収支では、炉から排出されない銑鉄やケラの潜熱と定常状態にある炉体の保有熱が考慮されているので、これを除いた熱流の分布を計算すると、空気加熱に使われた熱は60.4%になる。小型たたらは35%なので、この比が送風量の比になっている。吹き込む空気中の酸素量は、日刀保たたら全体で2.08 mol/sである。これにより燃焼する炭素は4.16 mol/s、49.92 g/sである。砂鉄の還元に使われる炭素は2.72 g/s、一部還元してノロを生成するために消費される炭素は1.19 g/sである。合計した炭素の消費量は、53.83 g/sである。一方、木炭総量(灰分8%)から計算した平均炭素消費量は40.15 g/sである。この不足分は空気中の酸素0.57 mol/sが燃焼に使われていない、すなわち、吹き込まれた空気のうち27.4%が炉中心部を吹き抜け

ていることを示している。有効に使われている酸素は 1.51 mol/s である。

9. たたら製鉄に必要な送風量

9.1 木炭燃焼で 1350℃の温度を発生するための送風速度

木炭に火を起すとき火吹き竹を用いる。これは竹筒の一端が節になっており、その真中に約 1 mm の穴を開けた道具である。竹筒に息を吹込むと小さな穴から勢い良く風が木炭に吹付けられ、その部分の火が赤熱する。この時、顔が真っ赤になるくらい強く吹く。この時掛ける圧力を圧損という。ここでは木炭の燃焼で空気を 1350℃に加熱するための空気の吹き付け速度を求める。

木炭の燃焼速度は吹き付けられた空気中の酸素の供給速度に依存し、発生した燃焼熱は木炭を加熱すると同時に空気の加熱に使われる。その燃焼反応は



で表される。この時の燃焼熱は次式で与えられる。

$$\Delta H^0 = -394,762 - 0.836T \quad (\text{単位は J/mol、T は絶対温度 K}) \quad (2)$$

1350℃で ΔH^0 は 396,000 J/mol である。

生成した CO_2 ガスはさらに木炭と反応し CO ガスを生成する。ブードワー反応と呼ぶ。



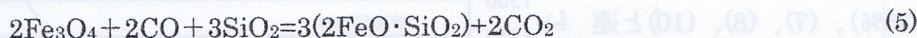
CO ガスは砂鉄中のマグネタイトを還元して鉄を生成させ、鉄は羽口上部で炭素を吸収して一部あるいは全部が銑鉄として溶解する。銑鉄は炉底のノロ中に落ち、互いに融着して平均炭素濃度約 1.0mass% から 1.5mass% のケラ塊を生成する。

9.1.1 質量収支

小型たたらでは、羽口から空気を 10 l/s で吹き込む。この中の酸素量は 0.086 mol/s であり、(1) 式に従って、燃焼する炭素量は等モル、1.03 g/s である。さらに(2)式で同量の炭素が反応し CO ガスになる。砂鉄は 10 分毎に 1.5kg 投入する。この中にマグネタイトは約 85% 存在する。鉄分の供給量は 1.53 g/s である。この内、生成するケラ塊は平均砂鉄重量の 25% 程度なので 0.625 g/s が鉄になる。マグネタイトの還元は



で起こる。この CO_2 ガスは(3)式で炭素を消費し CO ガスを生成する。この還元反応で消費される炭素量は 0.175 g/s である。残りのマグネタイトは FeO に還元され SiO_2 と反応してファイヤライト組成のノロを生成する。



すなわち、0.905 g/s の鉄がノロ中に移行する。この還元反応で消費される炭素量は 0.065 g/s、ケラ中に溶解する炭素は 1.0mass% として 0.006 g/s である。結局、消費される全炭素量は 2.931 g/s である。松炭の灰分は約 4.5% なので、松炭の消費量は 3.07 g/s である。これは 10 分間に 1.84 kg となる。これは操業における木炭供給速度約 2 kg と一致する。

9.1.2 熱収支

羽口前で燃焼する炭素量は 1.03 g/s で空気中の酸素の流量 J_{O_2} 、0.086 mol/s に等しい。この時の発熱量は次式で表わされる。

$$q = J_{\text{O}_2} \times (-\Delta H^0) \quad (6)$$

炉下部で発生した熱は、空気の加熱に使われる他、炉壁から放熱される。炉底の本床には木炭粉

が詰めてあり断熱されている。加熱された空気は、炉内を上昇して砂鉄と木炭を加熱し、砂鉄の炭素熱還元反応の吸熱に使われ、数百℃の温度の排ガスとして放出される。

昭和44年に日本鉄鋼協会が行った復元たたら熱収支では、炉体からの放熱が20%、ノロの顕熱が10%となっている。日刀保たたらの体積に対する炉壁面積は $3.58 \text{ m}^2/\text{m}^3$ で、小型たたらでは、 $14.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ である。さらに炉材が粘土とレンガと違い、厚さも異なっているので、熱伝達の違いを考慮すると小型たたらの炉壁からの放熱は日刀保たたらに比べて約5倍大きい。炉壁からの放熱は55%程度で、ノロの顕熱を10%とすると、空気の加熱に使われた熱量は35%になる。

空気の加熱に必要な熱量は次式で与えられる。

$$q = f_{\text{air}} C_p (\rho / M) (T_g - T_r) \quad (7)$$

ここで、 f_{air} は空気の流量、 d は羽口先端の内径、 C_p は空気の熱容量($2.5R$)である。 M は空気の分子量($28 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$)である。 T_g と T_r はそれぞれ空気の燃焼温度と室温(298 K)である。

定常状態では酸素の供給速度は、木炭近傍の拡散に律速される。羽口前の燃焼面積を A とする。酸素の供給量は、

$$J_{\text{O}_2} = A(D / \delta RT_s) \{P_{\text{O}_2}(\text{空気}) - P_{\text{O}_2}(\text{木炭表面})\} \quad (\text{mol/s}) \quad (8)$$

P_{O_2} (空気)は 0.21 気圧($0.21 \times 10^5 \text{ Pa}$)、 P_{O_2} (木炭表面)は炭素と炭酸ガスの平衡酸素分圧とすると、 1×10^{-16} 気圧であり無視できる。 D は酸素と炭酸ガスの相互拡散係数($1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)で、 δ はガス境膜層の厚さである。 R は気体定数($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)である。

$$\delta / L = 5.3 \text{ Re}^{-1/2} \quad (9)$$

ここで Re はレイノルズ数で $\text{Re} = \rho L v / \mu$ で表される。 ρ は空気の密度(1.184 kg/m^3 , 25°C)、 μ はガスの粘性係数($38.3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 600°C)、 v はガスの速度(25°C)である。 ρv はガスが加熱されて膨張しても値は変わらない。

送風速度 10 l/s で内径 2.54 cm の羽口を通る空気の速度 v は 19.7 m/s である。この時の Re は 3.06×10^4 で乱流領域にある。ここで L は木炭の大きさ 5 cm をとった。ガス境膜層の厚さは $1.51 \times 10^{-3} \text{ m}$ である。

このガス境膜層を通して木炭で発生した熱が空気に伝達されるとすると、

$$q = (A / \delta) \lambda (T_s - T_r) \quad (10)$$

で表わされる。ここで λ は空気の熱伝導度であり、 1000°C で $7.6 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$ である。 T_s は木炭の表面温度である。

(6)式に 0.35 を掛け(空気の加熱に使われる熱の割合35%)、(7)、(8)、(10)と連立して解く。 T_s は 1421°C 、 T_g は 1377°C となる。

小型たたら炉の羽口前温度と送風量の関係は図9に示すように、送風量を増すと羽口の前 23 cm 離れたレンガ表面近傍に設置した熱電対の温度は高くなった。送風量 10 l/s で約 1350°C に達しており実測値と計算値は一致している。なお、反

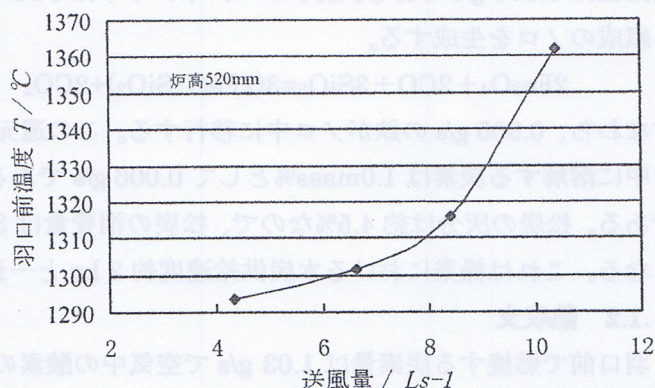


図9 小型たたら炉(羽口1本)における送風量と羽口前の温度⁸⁾

底面積Aは0.170m²で5cm角の木炭11個分である。羽口前の木炭塊が燃焼していることになる。

以上の計算から、ガス温度1377℃を得るためには羽口前の空気速度は19.7m/sが必要である。

10. 送風管内の圧力損失

10.1 踏み鞆を用いた小型たたらへの送風の場合

管内を流体が流れる場合、円管内の圧力損失は次式で表わされる。

$$\Delta P = \lambda \rho L v^2 / 2d \quad (7)$$

ここで、 λ は係数で、層流の場合、 $64/Re$ 、乱流の場合、0.06である。送風量を10 l/sとすると、ホースの長さLを2m、内径dを4cmとして速度は12.6m/sである。粘性 μ は $18.2 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}$ (25℃)なので、レイノルズ数 Re は代表長さをdに取ると 3.28×10^4 となり乱流である。この管による圧力損失は、282.0Paである。また、1インチ鉄管(内径2.54cm、長さ30cm)の羽口では速度が19.7m/sとなり、圧力損失は162.8Paである。

狭い管に流入する時の圧力損失、逆に広い空間に流出する時の圧力損失は

$$\Delta P = \xi (1 - (A_1/A_2))^2 \rho v_1^2 / 2 \quad (8)$$

で表わされる。 ξ は風上の管(断面積 A_1)から風下の管(断面積 A_2)に流入時0.5、逆に広い管に流出時速度がゼロとなる場合は1であるが、たたら場合はそのままの速度で流出するので、羽口の先端出口での圧力損失は無いとする。今、内径4cmの管から1インチ管(2.54cm)に空気が入ると、羽口管入り口では圧力損失は28.0Paである。結局、全体の圧力損失は472.8Paとなる。踏み鞆の圧力は1324Paであるが、空気はほとんど漏れてしまっており、全体の圧力損失以上には掛っていなかった。

内径10cmの管の場合、速度は1.27m/sで Re は 8.26×10^3 、 λ は0.05である。 ΔP は1.0Paとなる。羽口との接続は長さ10cmのじょうご型の塩ビパイプを使った。この場合、圧力損失はほとんど生ぜず1Pa程度である。1インチ管での圧力損失は162.8Paである。したがって、全体の圧力損失は164.8Paで、ほとんど羽口管で生じる。

広がる管は流れが乱れるため、(8)式と同様に圧力損失を生じる。一方、細くなる管は流れの方向に圧力が下がるため流れに無理がなく、(7)式で表わされる管摩擦以外の圧力損失はほとんど起こらない。

このように考えると、踏み鞆を使ったたたら操業の送風成功は、送風管の径を大きくしたことと、羽口管への接続に管の径が次第に細くなるじょうご型を用いたことにある。さらに効率を上げるためには空気が逃げないよう隙間を詰めることが重要である。

10.2 明治期のたたら製鉄炉の場合

伯耆国砥波鑪は片側19本の羽口があり、つぶりから木呂で空気が送られる。空気は炉の脇にある天秤鞆から一辺が126mmの角型の通風管(龍の口)で導かれ、扇形の風配りを差し込み、木呂でそれぞれの羽口に分配している。ここまでの圧力損失はほとんど無い。つぶりは粘土で密閉されている。

木呂は内径31mmの竹製の管で、長さは炉中心部で0.58m、両端で1.18mである。長さが壁までの距離に比例しているとする、平均長さは0.896mである。操業初期踏数が毎分28回なので1本当りの平均送風量は5.21 l/s、平均速度は、6.90 m/sである。圧力損失は48.9Paである。

羽口は元釜に炉内に向かって下に26°の角度で開けられており、木呂差しを用いて炉内壁面で

上下 6mm、幅 3mm、外壁面で上下 65mm、幅 30mm の楕円形に成形されている。長さは 450mm で、外壁側の断面積は 1532mm²、真中で幅 16.5mm、高さ 55.6mm、断面積 720mm² である。ここで急に断面積が 410mm² に減少して幅 16.5mm 高さ 31.6mm になり、炉内壁面側で 14.1mm² になっている。空気の流れは外側半分は平均断面積を 1126mm² として 4.63m/s、内側での平均断面積は 212mm² なので平均空気速度は 24.58m/s である。圧力損失は外側で 4.5Pa、内側で 293.9Pa である。木呂管と羽口で圧力損失は合計 347.3Pa になる。一方、天秤軸の圧力は 294Pa なのでこれだけの空気は通らない。空気を通るためには、送風量は 4.65 l/s 以下でなくてはならない。これ以上踏んでも空気は軸の板の隙間から洩れてしまうことになる。

俵の記録では操業開始 1 時間 18 分後の羽口先端直径は 9mm となっているので、炉壁が浸食されて厚さが薄くなるにつれ、軸の踏み込み深さを徐々に大きくしていったのであろう。

式(7)の管内の送風速度 v を送風量 f で置き換え、(1)木呂管と(2)羽口外側、(3)羽口内壁側による総合の圧力損失を求めると、

$$\Delta P = 8 \lambda \rho L (f^2 / \pi^2) (L_1/d_1 + L_2/d_2 + L_3/d_3) \quad (9)$$

で表される。 L_1 、 L_2 、 d_1 、 d_2 は一定値で、 L_3 と d_3 を形状に合わせて比例させる。計算結果では、送風圧 294Pa で毎分 28 回軸を踏み 5.21 l/s の最大送風が出来るのは壁が侵食により 12.0cm 減った時点からである。毎分 31 回踏み送風量 6.03 l/s では、13.6cm 減った時からである。毎分 37 回踏み送風量 6.88 l/s では、14.8cm 減った時からである。俵の記録では、12 時間後に踏み数 31 回、27 時間半に 37 回となっている。図 10 には日刀保たたら炉の侵食状況を示した。これを見ると 15 時間から 20 時間で 12cm 程度侵食している。したがって、羽口の侵食状況に応じて踏み回数を徐々に上げ送風量を増したと考えられる。踏み数 40 回で送風量 7.44 l/s では壁の溶損が 15.0cm 以上のときである。操業後半で壁が浸食されて半分になる時、踏み数毎分 40 回で羽口 1 本当たりの送風量は 7.44 l/s で、全体の圧力損失は 108.9Pa である。したがって、この時から軸の踏み込みはかなり軽くなる。

全体の圧力損失は管の長さにかかわらず同じなので、送風速度が管の長さの平方根に逆比例し変化する。炉の中心では早く炉の端では遅い。中心では 9.2 m/s、端では 6.5 m/s である。炉から上る炎の高さは、炉中心をピークに凹状に低くなる。炉の端と中心に同量の空気を通るためには少なくとも炉内壁面での羽口の直径は端の方で大きくなっている必要がある。中心から端の羽口にまで同じ送風量の空気を送るためには、端の内壁側穴の大きさを幅 3mm、上下 9.6mm にすると良い。図 7 に示すように、炎は炉中心で最も高く、両

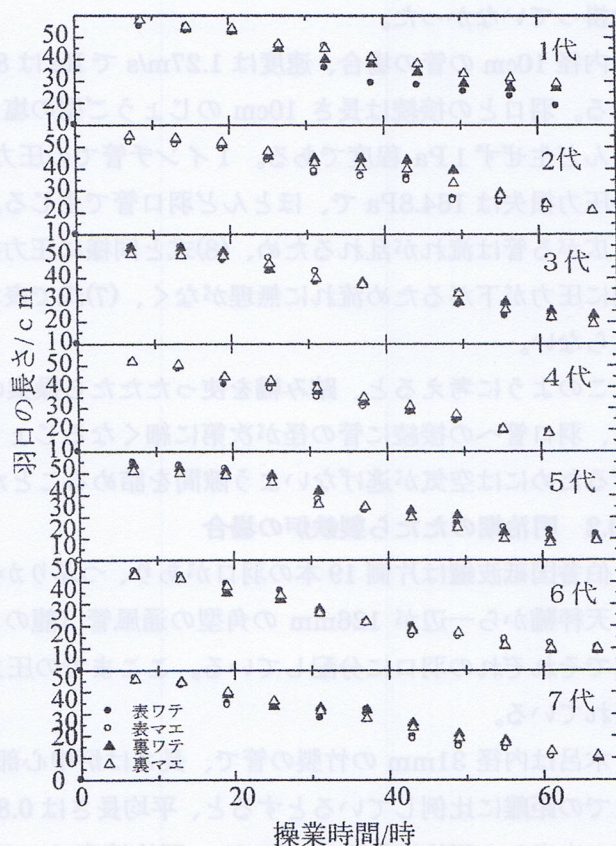


図 10 日刀保たたら操業中の炉壁の減少

端で炎が上っている。村下は、炉中心部の内壁の羽口径を小さめに端の内壁の羽口の径を大きめに調整したと考えられる。

木呂竹管の先端には鑄鉄製の鉄木呂を取り付け元釜の羽口穴に置く。鉄木呂は長さ 197mm、先細りで先端の内径は 18mm である。圧縮性流体のベルヌーイの式は水平の管に対し、

$$v^2/2 + (RT/M)\ln P = \text{一定} \quad (10)$$

で表わされる。ここで R は気体定数、T は室温 (298K)、M は空気の分子量である。先端での速度は 23.6m/s なので羽口穴で速度が 3.9m/s に落ちると圧力は 0.3%程度下がる。いわゆる霧吹き効果による羽口穴からの空気の吸入はそれほど期待できない。

石見国價谷鑪では、木呂管は 16 本でその長さは炉中心で 747mm、両端で 1188mm である。管内径は不明であるが、砥波鑪と同じとすると 31mm である。平均長さは 967.5mm である。平均送風量を 6 l/s とすると風速は 7.95m/s である。圧力損失は平均 70.1Pa である。木呂管の先端には鉄木呂が取り付けられている。長さ 333mm、元の内径は 42mm、先端の内径は 18mm である。

羽口は炉内壁面で 24x9(mm)、外壁面で 21x18(mm)の大きさの楕円である。長さは 331mm で途中に段差はない。風速は 25.7m/s である。この場合、羽口での圧力損失は 451.5Pa となり、木呂管との合計は 521.6Pa となって輔での圧力 680.5Pa 以下となり、風は通る。

11. 送風における砂鉄の飛散条件

前述したように、炉中央部の木炭の層は凹んでおり、熱風はここを通る。空気は木炭を燃焼して CO ガスになるので、20%の酸素を含む空気は、窒素ガスと一酸化炭素ガスになって体積は 1.2 倍になる。さらにこのガスは加熱されて膨張する。ガスの平均温度を 900℃とするとガスの体積は室温の時の約 4 倍になる。日刀保たたら炉の内容積は約 2.6m³であり、ここに毎秒 0.25m³の空気が吹き込まれると、炉が空筒の場合ガスの滞留時間は平均約 10 秒となる。木炭が同体積の空隙を作って炉に詰められて入るとすると滞留時間は平均 5 秒程度である。炉の高さ 30m の高炉では滞留時間が 1 秒と言われており、これと比較すると約 1/150 である。たたら炉では羽口前の風は非常に速く噴出されるが、その後はゆっくりと木炭の間を上昇するので砂鉄粉が風に巻き上げられ飛散することを防いでいる。また、ガスが炉の中央を流れ、砂鉄が炉壁近傍に装荷されるのでガスの流れを目詰まりさせることもない。

砂鉄が飛散する条件は砂鉄を球状とすると風が砂鉄を吹上げる力 F_k と重力により落ちる力 F_s 。

$$F = -F_s + F_k \quad (11)$$

が正の時である。 F_s と F_k はそれぞれ粒子にかかる重力とガスによる摩擦力である。

$$F_s = (4/3)\pi R^3 \rho_s \quad (12)$$

$$F_k = \pi R^2 \cdot (1/2) \rho_g V_\infty^2 f \quad (13)$$

ここで、R は砂鉄の半径、 ρ_s と ρ_g はそれぞれ砂鉄と空気の密度 (5, 200kg/m³ と 1.25kg/m³)、 V_∞ は炉壁上端部における加熱した空気 (約 900℃) の速度である。f は摩擦係数であり、Re 数の大きさににより次のように表わされる。

$$\text{層流の場合: } f = 24/\text{Re} \quad (\text{Re} < 1) \quad (\text{ストークス則})$$

$$\text{中間流の場合: } f = 18.5/\text{Re}^{3/5} \quad (1 < \text{Re} < 10^3) \quad (\text{中間則})$$

$$\text{乱流の場合: } f \approx 0.44 \quad (\text{Re} > 10^3) \quad (\text{ニュートン則})$$

日刀保たたら炉では、炉上部の大きさは幅平均 817mm、長さ 2640mm で面積は 2.16m²である。ここに、872 m³/hr で風が吹き込まれるので、空気の 27.4%が吹き抜けており、反応した酸素が全て CO ガスになっているとして、900℃では吹き込んだ空気は 4.5 倍になる。したがって、炉上での空気の平均速度は 0.50m/s となる。

ここで、飛散するかもしれないかの限界の直径 R_c は $F=0$ の場合で、次式で与えられる。

$$R_c = (3/8) (\rho_g / \rho_s) V_\infty^2 f \quad (14)$$

f が $Re = \rho_g R_c V_\infty / \mu$ の関数であることを考慮して(14)式を解くと、 $R_c=0.2\text{mm}$ 、127 メッシュになる。砥波釜で使われた砂鉄の粒度分布を図 11 に示す。127 メッシュ以下の大きさの粒子は飛散する可能性があり、装荷砂鉄の 20%程度がそれに対応する。ただし、間歇風の場合は風が周期的に吹き止まるので、吹き上がった粉がその間に炉に戻る可能性があり、歩留まりはもう少し良いであろう。連続風の場合、小型たたらではやはり炉上部でのガスの速度は 0.5m/s 程度なので、20%程度の砂鉄は飛散している。價谷釜では送風量が 444~544m³/hr に対し、炉の幅平均 588mm、長さ 2425mm で面積は 1.42m²なので炉上部でのガスの流速は 0.3~0.4m/s であり、砂鉄の飛散を防止する程度の吹き方をしている。

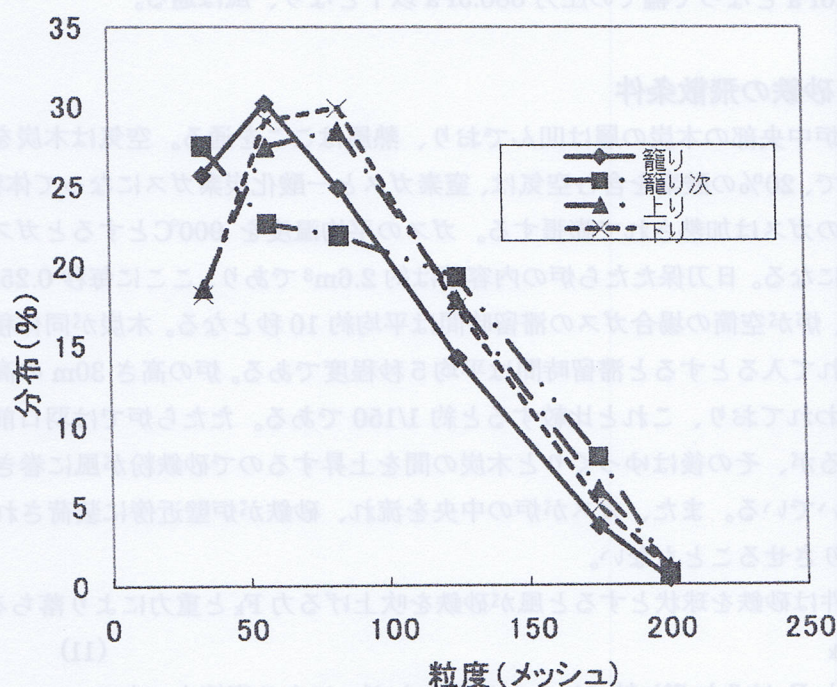


図 11 砥波釜で使われた砂鉄の粒度分布

11. おわりに

たたら製鉄法は砂鉄という粉鉄鉱石を用い、空気でも炭を燃焼させて加熱と還元を起させて銑鉄までを商業的に造るプロセスとしては製鉄の歴史上世界で唯一の方法である。それは空気を炉内に羽口から比較的弱く吹き込むことにより、粉体を飛散させたり空気の通り道を目詰まりさせたりしないようにしたことである。空気を 1350℃に加熱するためには、羽口前の吹込み速度を 19.7m/s 以上にする必要があり、一方、砂鉄をなるべく飛散させないようにするためには炉上部でのガス速度を 0.5m/s 以下にする必要がある。小型たたら炉を含め明治期のたたら炉および日刀

保たたら炉はほぼこの範囲内に入るよう操業を行っている。さらに明治期や日刀保のたたら炉では、上昇するガスを炉の長手方向中央部に集中させ、炉壁近傍に装荷した砂鉄を飛散させないようにしている。

参考文献

- 1) 本報告で用いた図と表：永田和宏、たたら製鉄の技術論(1)～(36)、金属,vol.75(2005)No.7～vol.78(2008)No.7.
- 2) 東台製鉄遺跡：埼玉県大井町教育委員会・遺跡調査会、文化財調査報告書、第35集、(2005), p.268-273.
- 3) 俵国一：古来の砂鉄製錬法、丸善、東京、1933.
- 4) たたら 日本古来の製鉄：JFE21世紀財団、(2004),p.26-27.

東アジア古代鉄文化研究センター
第1回鉄文化シンポジウム
たたら製鉄の歴史と技術（予稿集）

2009年11月28日

主 催 東アジア古代鉄文化研究センター
編集・発行 東アジア古代鉄文化研究センター
印 刷 平和印刷



<http://www.ccr.ehime-u.ac.jp/aic/>