

まほろん4号炉による製鉄操業

—平成21年度イベント「古代の鉄づくり」報告—

専門学芸員 能登谷宣康

1 はじめに

まほろん（福島県文化財センター白河館）では、平成15年度から2年に1度、イベント「古代の鉄づくり」を実施している。また、その翌年には、それぞれの炉で生成された鉄を原料に「古代の鍛冶体験」を実施し、砂鉄から鉄をつくり、さらに、製品づくりまで体験するという一連のスタイルが定着しつつあると言える。

平成19年度までのイベントでは、南相馬市原町区大船迫A遺跡15号製鉄炉（平安時代の箱形炉、国井1995）をモデルにして、平成15年度はモデルの半分サイズの製鉄炉（まほろん1号炉：吉田2005）、平成17・19年度は原寸大の製鉄炉（まほろん2号炉：吉田2007、まほろん3号炉：能登谷2009）を構築して操業した（表1）。その結果、まほろん1・2号炉では低炭素鋼の鋳を生成し、3号炉では低炭素鋼から一部ネズミ鑄鉄の白鑄鉄を含む高炭素鋼まで成分にばらつきのある鉄が生成され、平安時代の工人が作ったと想定される銑鉄の生成に少し近づいたのではないかと考えている。

平成21年度に実施したまほろん4号炉においても、同じ炉をモデルにした原寸大の炉による操業で、当時の操業及び生成鉄にさらに近づくことが期待されたが、平成20年度中の素案の段階で、これまでの夜を徹した操業は負担と制約が大きいことが検討課題となり、具体的には、朝に火入れを行い、晩に操業を終了することはできないかとの提案があった。このことは操業時間の短縮を意味するが、そのことを踏まえつつ、これまでの操業目的を大きくはずさない手段としては、復元する製鉄炉の規模を縮小することがより良い対策と考えられたことから、これまでに福島県内において発掘調査された古代の製鉄炉の中で、規模が小さく、復元するための多くの情報を有した製鉄炉を探すことにした。規模が小さな製鉄炉と言え、竪形炉が思い浮かぶが、まほろん3号炉の操業の際に達成できなかった流れ銑の生成、つまり、銑鉄の流し出しという課題を達成させることが先かと考え、まほろん

4号炉に関しても箱形炉を復元することにした。そこで復元対象の候補に挙げたのが、大船迫A遺跡に隣接する、南相馬市原町区長瀨遺跡から見つかった15号製鉄炉（安田1992）である。

本稿はこのまほろん4号炉の操業報告である。

表1 まほろん1～4号炉の操業記録

炉名		1号炉	2号炉	3号炉	4号炉	
操業年		平成15年	平成17年	平成19年	平成21年	
規模 (cm)	炉頂部	長さ	78	210	185	110
		幅	26	50	40	40
	炉底部	長さ	65	185	185	110
		幅	13	18	18	20
高さ		110	120	127	120	
羽口角度(°)		35	30	12	10	
砂鉄投入量(kg)		132.3	188.5	306	92	
木炭投入量(kg)		293.5	655.6	937.4	432.8	
操業時間		15時間34分	11時間39分	30時間12分	11時間	
生成鉄重量(kg)		34	49	60	10	

2 モデルとした炉について

まほろん4号炉のモデルとした製鉄炉は、南相馬市原町区長瀨遺跡15号製鉄炉（以下、長瀨15号炉と略す。）である。長瀨遺跡は、東北電力株式会社原町火力発電所建設に伴う発掘調査で明らかになった金沢地区製鉄遺跡群を構成する遺跡の一つであり、同遺跡群のほぼ中央部に位置している。長瀨15号炉の特徴は、以下のとおりである（写真1、図1）。

ア、丘陵南斜面中位に所在し、上下2段の平坦面と廃滓場から構成されている。上位の平坦面はふいご座で、下位の平坦面は製鉄炉が設置された作業場である。

イ、上位の平坦面は長軸385cm、短軸195cmの長方形で、南辺以外には溝が巡り、その中央部に踏みふいご掘形が存在する。踏みふいご掘形は長方形を呈し、上部で長軸295cm、短軸105cm、底面で長軸270～280cm、短軸70cm、深さは中央部で30cm、両短辺で50cmを測る。つまり、底面は中央部から両短辺に向けて緩く下降しており、横断面形は山形を呈している。また、踏みふいご掘形の南辺2箇所から下位の平坦面へ溝が伸びている。この溝は本来トンネル状で、ふいごからの風を製鉄炉側へ送る役目を担っていたと推測されている。

ウ、下位の平坦面は上位の平坦面より15cm低く造り出されている。南側は後世に削平されており、東西長5.2m、南北長1.5mを測る。平坦面の中央部には製鉄炉が踏みふいご掘形の主軸と直交して設置され、東辺には砂鉄置場が存在したと推測されている。

エ、製鉄炉は基礎構造を持つ長方形箱形炉で、炉底部の還元面が2面あることから、操業回数は2回と推測されている。

オ、製鉄炉が設置されていた場所には、2回目の操業時に炉底に溜まった炉底滓の一部とその東西両脇に幅・高さとも10cmの炉壁最下部の粘土帯が残存し、東側の粘土帯上には8本の羽口が炉内に向かって並列していた。東西の粘土帯それぞれの外側の距離は約50cmを測る。なお、炉底滓は操業時に生成されたノロが炉外に流れ出さずに炉内に溜まったもの



写真1 モデルとした長瀨遺跡15号製鉄炉

であり、東側の粘土帯上の羽口の先端はこの上部に接していた。

カ、羽口は炉の解体時に原位置を移動している可能性が高いが、報告によると、芯心間が8～10cmで、炉内に向かって緩く下降するように設置されており、羽口の装着角度は10°と推測されている。

キ、検出された炉底部の還元

面は長さ 110 cm、幅 30 cm であるが、本来は長さ 120 cm と推測され、炉の長辺に羽口が片側 10 本ずつ、両辺合わせて 20 本セットされていたと推測されている。

ク、基礎構造は幅 120 cm、深さ 40 cm を測り、焼土塊を含む土や締りの強い還元土、木炭を多量含む土が堆積している。

ケ、廃滓場からは 216 kg の鉄滓が出土している。

コ、年代は 9 世紀中葉頃と推測される。

3 まほろん4号炉の設計

モデルとした長瀬 15 号炉の調査結果及びまほろん 2・3 号炉の設計を参考にして、まほろ

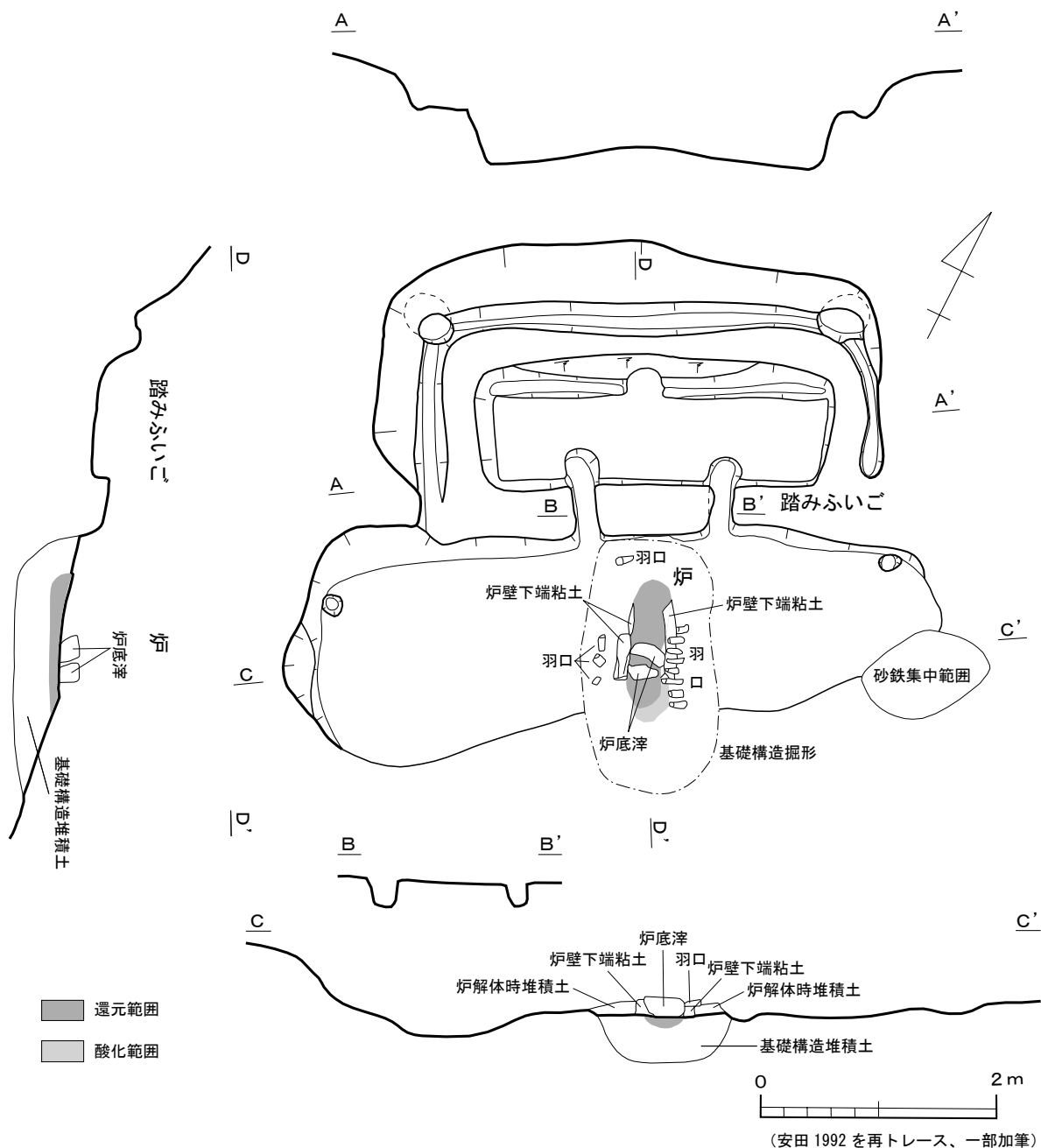


図1 モデルとした長瀬遺跡 15 号製鉄炉

ん4号炉の設計を行った(図2)。

炉 長瀨15号炉の調査結果では、炉底部の還元面は長さ110cm、幅30cmで、本来の長さは120cmと推測されている。この炉底部の還元面の規模が実際の炉の規模をどの程度反映しているのかは不明といわざるを得ないが、炉を復元する際の一つの手掛かりであることに違いはない。また、炉底に残存していた炉底滓の下面幅は25cmを測るが、この炉底滓は操業中に炉壁下部を侵食して「育っている」ことが観察された。これらのことから、設計する炉の規模は、炉底の長さが約120cmで、炉底幅は25cmを超えないものとした。

炉の構造：上釜・中釜・下釜から構成される長方形箱形炉。

内壁：長辺の下釜は、まほろん3号炉と同じく72°の傾斜とし、それ以外の壁は直立する。

炉底の長さ：羽口の芯心間距離を10cmとし、両長辺に設置する羽口の両端のものから両短辺の炉壁までの距離も10cmとして羽口の設置本数を片側10本ずつとすると、炉底の長さは110cmと規定される。

炉底付近の炉幅：長瀨15号炉の炉底に残存していた炉底滓の東西両脇から検出された粘土帯が、東西それぞれの炉壁の基底部外縁に当たるとすると炉幅は50cmとなるが、残存している粘土帯が構築・操業時の姿を留めているとは思えず、操業後の炉壁解体時に基底部粘土の大部分は破壊されている可能性があることから、本来の炉幅は不明である。なお、装着する羽口の長さが約20cmであることから、炉壁基底部の厚さを25cmとし、炉底幅を20cmとしたことから、設計した炉幅は70cmとなった。

炉底幅：まほろん2・3号炉では中央部で18cm、両端で15cmとしたことから、これと同様にする案、狭くする案、広めにする案が考えられたが、広めに設定し、20cm均一とした。

炉高及び炉壁の厚さ：長瀨15号炉の出土資料の中に炉高及び炉壁の厚さを推測できる資料が存在しないことから、炉高は、まほろん3号炉と同じ120cmとし、上釜40cm・中釜50cm・下釜30cmとした。炉壁の厚さは、上釜では10cm、中釜では上部で10cm、下部で15cm、下釜では上部で15cm、下部(基底部)で25cmとした。

羽口の設置：長瀨15号炉の炉底滓の東脇に残存していた羽口は、先端側が折損ないしは溶融していることから、本来の長さが不明であるが、先端が溶融しているものは溶融度合いが少なく17cm以上であることから、まほろん3号炉と同じ20cmとした。また、調査所見から、炉底上10cmの所に装着角度10°で羽口を設置する。

湯路の設置：炉の南壁の下端中央に径10cmの貫通孔を設置する。この孔は、炉内の状況を観察したり、炉内に生成された流動性のある鉄滓(ノロ)や銑鉄を流し出すためのものである。

ふいご 長瀨15号炉の踏みふいご掘形は、平面形が長方形で、横断面形が山形を呈している。規模は、底面で長軸270～280cm、短軸70cm、深さが中央部で30cm、両短辺で50cmを測ることから、まほろん3号炉の操業の際に製作した木製箱形の踏みふいごの規模(長さ270cm、幅60cm、踏み込み深さ44cm)と大きな違いはない。また、掘形の南辺2箇所から製鉄炉の作業場へ延びる溝があり、北端部は掘形底面に約25cm突出している。まほろん3号炉のモデルとした大船迫A遺跡15号製鉄炉の踏みふいご掘形底面にも同様の溝が存在し、まほろん3号

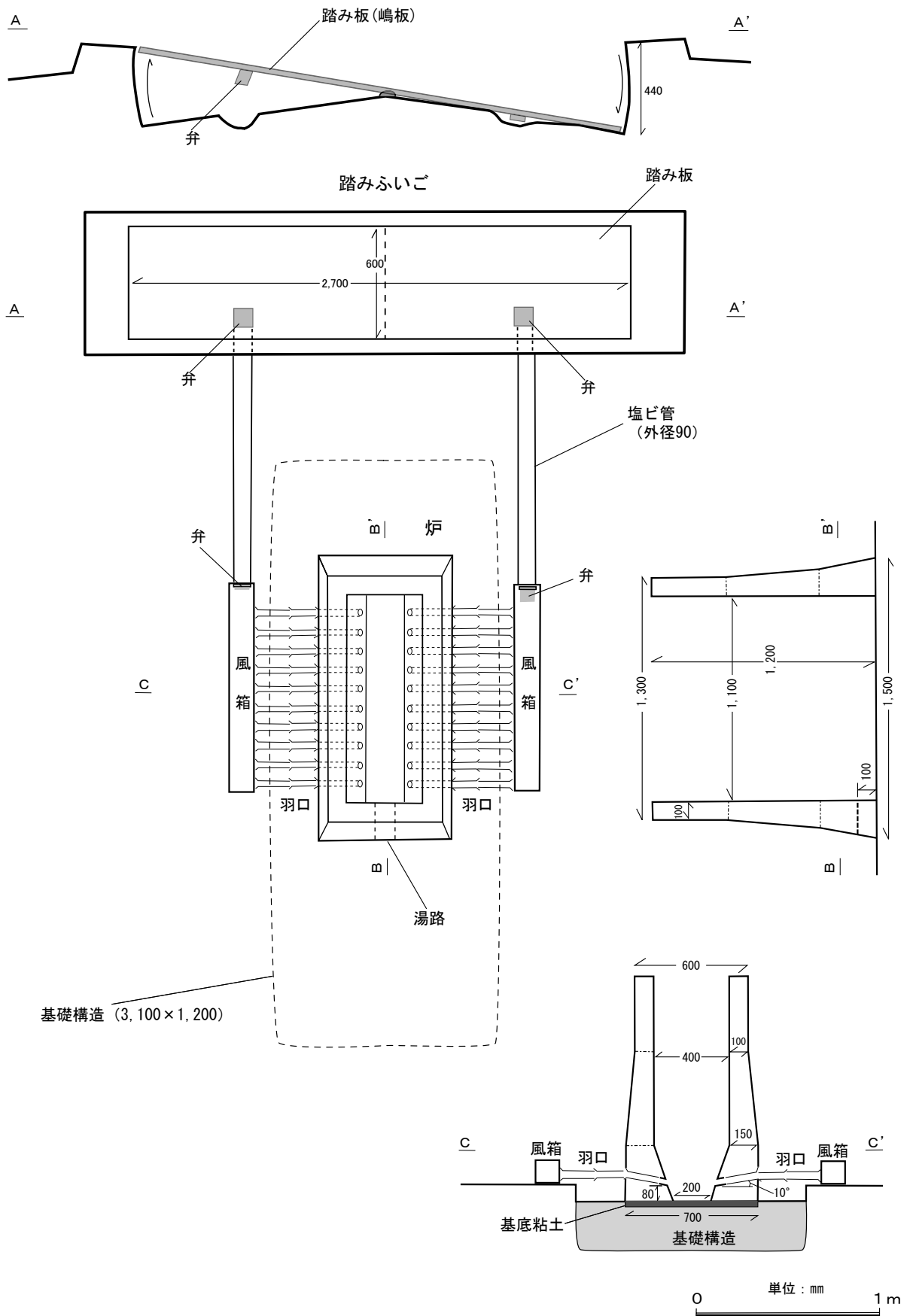


図2 まほろん4号炉設計図

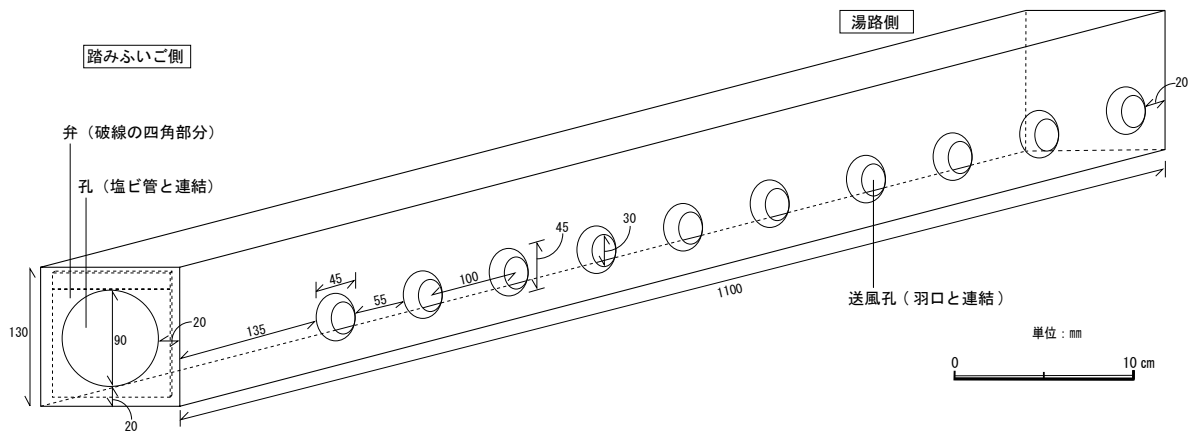


図3 東側風箱設置図

炉の操業の際に製作した踏み板（嶋板）は、空気取り入れ弁がこの突出部（送風孔）の真上に位置するように設定し、弁が製鉄炉側に向かって開くようにしていた。これらのことから、まほろん3号炉の操業の際に使用した木製箱形の踏みふいごと踏み板（嶋板）を今回も使用することにした。

風箱 (図3) 長瀬15号炉において、踏みふいご掘形の南辺2箇所から製鉄炉の作業場へ延びる溝が存在することは前述のとおりである。この溝は、ふいごからの風を製鉄炉側へ送る役目を担ったもので、まほろん1～3号炉同様、この部分に径90mmの塩ビ管を埋設し、炉の長辺と並行させて設置した風箱と連結させる。さらに、風箱と炉下部に設置した羽口を木呂羽口で連結させ、炉内にふいごの風を送るようにした。風箱は、まほろん3号炉の風箱を参考に今回新たに設計した。炉側の側面には芯々間が10cmとなるように径4.5cmの孔を炉壁に設置する羽口の数に合わせて10個開け、ふいごの風をロスなく炉内に送るために、容積をなるべく小さくするとともに、炉側の側面に開けた孔には先細りの突起を付け、ふいご側の内面には弁を設置した。なお、不意の焼損を避けるため、まほろん3号炉の風箱と同様に鉄製とした。

4 まほろん4号炉の操業

以上のような設計を基に、炉・ふいご・風箱の準備作業を進めるとともに、原料・燃料・羽口を準備し、平成21年11月7・8日に操業（イベント）を行った。

今回の操業は、踏みふいごによる送風を約10時間連続して行い、約100kgの砂鉄と、約250kgの木炭を炉内に投入する計画で、前回のまほろん3号炉の操業で目指したが達成できなかった、当時の工人が作ったと想定される流れ銑の生成、つまり銑鉄の炉外への流し出し（出銑）を目標とした。

(1) 操業前準備

砂鉄準備 前回のまほろん3号炉の操業で銑鉄（高炭素鋼）も生成されていたことから、今回も同じ産地の砂鉄を使用することにした。過去の操業（イベント）と同様に、今回もまほろん野外に設置した緩傾斜の簡易の樋に水を流し、そこに平成20年7月に白河市大信の隈戸川より採取した粗粒の砂鉄を含む土砂を入れて、来館者に上流でもみ洗いしてもらい、所謂「鉄

穴（かんな）流し」の要領で、比重の差により砂鉄を採集した。採集の際に磁石を使用していないことから、非磁性の砂粒も含まれている。この作業は、平成20年7月19日～8月24日（平成20年度夏休み特別体験メニュー）と平成21年8月8～23日（砂鉄選別イベント、平成21年度夏休み特別体験メニュー、写真2-①）に実施し、合計約130kgの砂鉄を準備した。また、まほろん3号炉の操業後の炉解体時に炉底塊上及びその周辺、炉底塊を冷却のために投入した鉄池内から磁石で採集した被熱砂鉄も7kg準備した。

木炭準備 5～8cm大に小割りした岩手県産マツ炭と栃木県産ナラ炭を準備した。これらは、まほろん3号炉の操業の際に準備したが使用しなかったものである。マツ炭は、砂鉄投入までの炉内温度上昇時に投入し、ナラ炭は砂鉄投入時に同時に投入することにした。

羽口準備 「羽口づくり」イベント（平成21年9月12日）で製作した羽口その他、まほろん3号炉の操業の際に製作した羽口を準備した。操業で使用する羽口には炉壁に装着するものと木呂に使用するものがあるが、どちらも同じ規格（長さ20cm、内径3cm、吸気部ラップ状）である。なお、「羽口づくり」イベントで製作した羽口は、1箇月間日陰で乾燥した後に野焼きした（写真2-②）。

粘土ブロックづくり 白河市大信地区採取の粘土（山砂）と南相馬市原町区赤柴地区採取の粘土を2：3の割合で混合し、さらに、水適量と稲わらを短く切ったスサ少量を混合させた粘土を内法19×11×7.5cmの箱状の木型に押し込んで粘土ブロックを製作した。混合した2種類の粘土は、まほろん3号炉の炉壁にも使用したものであるが、前者は大小の長石を多く含むことから、5mmメッシュの篩に掛けるとともに、今回は両者の混合割合を変えた。

炉の構築と自然通風実験 下灰づくり（平成21年10月11・12日）後、粘土ブロックを積み上げて、下釜（10月17～23日）・中釜（10月24～28日）・上釜（10月29日～11月1日）の3段階に分けて構築し、それぞれの構築後には、薪あるいは木炭を燃やして強制乾燥した。

下灰づくりは、炉を構築する部分を一度深く掘り下げ、その中で薪の空焚きと熾きの叩き締めを繰り返し、熾きの叩き締めの後にはその都度熾きの上に土を被せて順次底面を嵩上げていった（写真2-③・④）。

下釜は基底粘土上に長さ110cm、幅20cmの中板を敷き、これを基準に周囲に粘土ブロックを30cmの高さまで積み上げて構築した。下釜の長辺には、炉底から約10cmの高さの位置に内径30mmの羽口を片側10本ずつ芯々間10cmで並列させ、内壁を炉内に向かって10°傾斜させて設置した。また、下釜の南辺下部中央には径約10cmの竹を芯材にして湯路を設けた（写真2-⑤～⑧）。

上釜・中釜は内壁をほぼ直立させ、それぞれの高さは中釜が50cm、上釜が40cmとした。なお、中釜の構築後（写真3-①）に下釜の上位まで木炭を入れて炉内で木炭を燃焼させて強制乾燥を行い、同時に炉内温度の測定を試みた（写真3-②）。つまり、人工送風ではなく、下釜長辺に設置した羽口と湯路から自然に外気を導入する煙突効果（自然通風）による炉内の温度を測定してみることにした（表2）。その結果、炉中央部の羽口前における温度は、計測を開始して約30分で温度計の計測限界の1,200℃近くまで達



写真2 準備作業 (1)

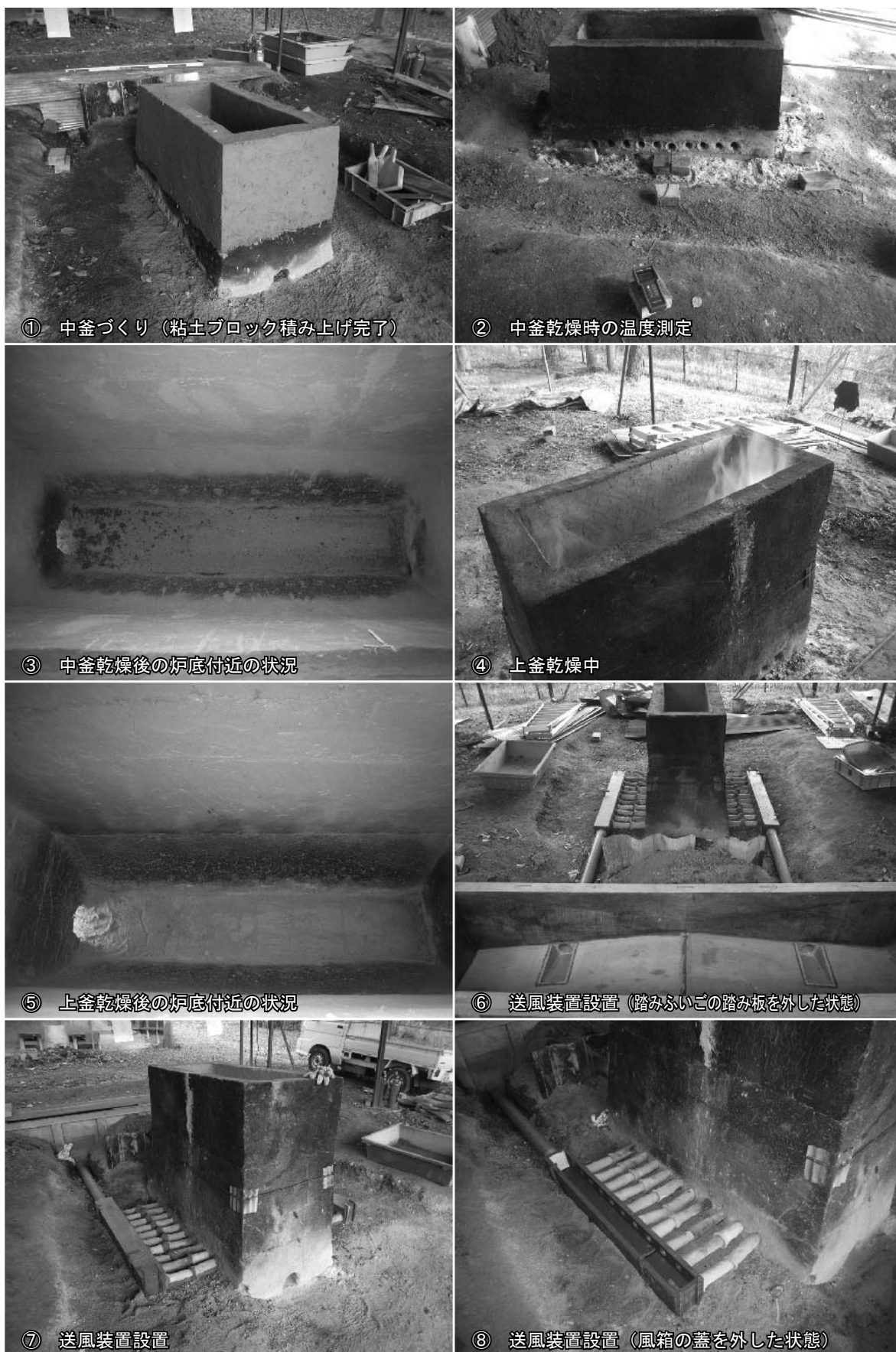


写真3 準備作業（2）

表2 まほろん4号炉中釜乾燥時における自然通風炉内温度測定

回数	時刻	温度(℃)	備考	回数	時刻	温度(℃)	備考
1	12:30	620		7	12:46	1,100	
2	12:35	466	木炭約12kg投入。	8	12:48	1,186	
3	12:40	740		9	12:51	1,174	木炭約6kg投入。
4	12:41	940		10	12:53	1,192	
5	12:42	927	木炭約6kg投入。	11	12:55	1,198	計測終了。
6	12:43	1,000	木炭約6kg投入。	※測定日:平成21年10月28日、測定位置:西羽口⑥前、炉高:80cm			

し、測定中止後も炉内の温度は上昇しているように見受けられた。また、乾燥終了後に炉内を清掃したところ、下釜の下半部壁面が熔融してガラス化して黒色を呈していることが確認された(写真3-③)。さらに、上釜の構築後に中釜の上位まで木炭を入れて炉内で木炭を燃焼させて強制乾燥を行ったところ、壁面のガラス化範囲は下釜の上位まで及んでいることが確認された(写真3-④・⑤)。

なお、操業直前には操業中の炉内温度を計測するために、東壁中央部の炉頂から54cmと102cm(羽口上7cm)に孔を開け、炉の中央部の温度を計測するように温度計を挿入した(写真4-①)。

送風装置の設置 炉背部に炉の主軸と直交するように木製箱形の踏みふいごを1基設置し、ふいご下部から炉の長辺に沿って配置した東西の風箱へ径90mmの塩ビ管を接続させ、さらに、風箱と炉の間を木呂羽口で連結した(写真3-⑥~⑧)。

(2) 操業及び炉の解体

前回までのまほろん1~3号炉では、まほろん職員が炉づくりから砂鉄・木炭投入まで全て行っていたが、今回の操業では一般募集の9名の「村下体験者」と共に行い、鉄づくりをより近くで感じていただいた。また、ふいごを踏む「番子」も事前に一般募集するとともに、当日来館の多くの方々にもふいごを踏んでいただいた。

操業(図4、表3・4) 11月7日8時00分に炉内に火入れを行い、マツ炭を順次投入するとともに、踏みふいごによる緩い送風により炉内温度を徐々に上昇させた。炉内温度は、炉頂から54cm(測点1)と102cm(測点2)の上下2箇所計測したが、8時20分頃には木炭の燃焼がまだ炉の上部に及んでいないことから測点1では100℃以下あるのに対して、測点2では900℃を超え、8時25分には温度計の計測限界の1,200℃近くまで達した。8時52分に9回目の木炭投入(合計98.4kg)を行ったところ、炉頂部まで木炭が達した。9時過ぎには測点1の温度が1,000℃を超え、さらにすぐに1,100℃も超えたが、そこからの上昇は緩やかであった。

9時30分になり、イベント開始とともに来館者による本格的な踏みふいご送風を開始した(写真4-③)。踏みふいごによる送風は1分間あたり片側20回を目安としたが、しばらくの間は回数が安定しなかった。9時50分の13回目の木炭投入からは投入する木炭をナラ炭に変え、10時5分には1回目の砂鉄投入(初種)を行った。この1回目の砂鉄と2回目の砂鉄の一部はまほろん3号炉の操業後に磁石で採集した「被熱砂鉄」であり、3回目以降は「鉄穴流

し」の要領で採集した「生砂鉄」を投入した。なお、投入する砂鉄は乾燥したままでは炉下部からの風に吹き飛ばされることと、炉底まで短時間で降下することが予想されたことから、炉内滞留時間を長くするため、手で握って締まる程度に霧吹きにより湿らせ（写真4-④）、砂鉄投入の際には、先に木炭を投入し、その後に砂鉄を羽口の前に落下するように、それぞれの長辺の炉壁から5～10 cmの範囲内に線状に投入するようにした（写真4-⑥）。また、木炭の投入する高さは炉頂までとし、炉頂から約10 cm下がったら、次に炉頂まで継ぎ足すということを繰り返した（写真4-⑦）。

次第に踏みふいごによる送風（写真4-⑧）は1分間あたり片側20回と安定し、測点1の温度が約1,200℃となり、炉頂部から上がる炎（ホセ=炎勢）の高さが約3 mを超えたことから、炉内の状況は順調であると判断された。10時20分には、炎の色も山吹色気味となり、それまで開放していた湯路を閉塞したが、ほぼ同じ頃、既に1,200℃を超えて計測していた測点1の温度計の熱保護管が破損して炉内に落下し、炉内の温度測定が全て計測不可能になった。

砂鉄の投入間隔は当初約10分であったが、11時3分の7回目から12時1分の11回目までは約15分となった。この砂鉄投入間隔が広がっていることは、炉内の通気性の低下により木炭の下がりが遅くなっていることを示し、羽口前に障害物が形成されつつあるものと推測された。12時30分頃より湯路から炉内の状況を確認し、炉内に形成された障害物を除去・流出させる作業を行った（1回目出銑・ノロ出し）。この作業の結果、木炭の他、南壁の溶融物2点、細い流出物（長さ約6 cm）1点のみが炉外に掻き出され、炉内の状況が改善されたとは言えなかった。なお、この時の細い流出物は、当初ノロ（鉄滓）と軽視していたが、冷却後に鉄であることが確認された。

その後、木炭の下がり次第に遅くなり、砂鉄の投入間隔は20分を超え、14時3分の16回目の投入時には前回の投入から30分の間隔が空いた。また、13時過ぎにはふいごの西側が重くなり、炎の色・上がりも時々不調になった。さらに、北壁外側の裾からは水蒸気が細く上がっていることが確認された。

さらに木炭の下がり遅くなった14時35分、炉内の状況を確認するため、再び湯路を開口し、炉内を鉄棒で突いてみたところ（写真5-①）、炉底に液状の生成物を確認したことから、これを炉外へ導き出した（2回目出銑・ノロ出し、写真5-②）。この流出物は非常に流動性が良く、冷却後に確認したところ、鉄であった。つまり、流れ銑と考えられた。

この流れ銑に浮かれていたわけではないが、15時頃には炉頂から上がる炎の高さが約30 cmまで低下した。慌てて湯路から炉内を覗くが、見えるのは真っ赤に燃える木炭ばかりで、解決の糸口が見えない。15時20分には炎の高さが約50 cmまで回復するが、炎の色が紫色で、炉内の状況が芳しくないことが分かる。17回目の砂鉄投入までは1時間3分の間隔が空き、最後の手段として、木呂羽口を1個ずつ外して炉壁に設置した羽口から炉内を覗き、障害物がある場合には鉄棒で炉内に押し出すことにした（写真5-③）。この作業により、炎の勢いは改善されたが、しばらくすると、また勢いが弱くなり、再度、この作業を繰り返すことになった。しかし、この作業の繰り返しにより、一応、砂鉄の投入間隔は約30分に回復した。

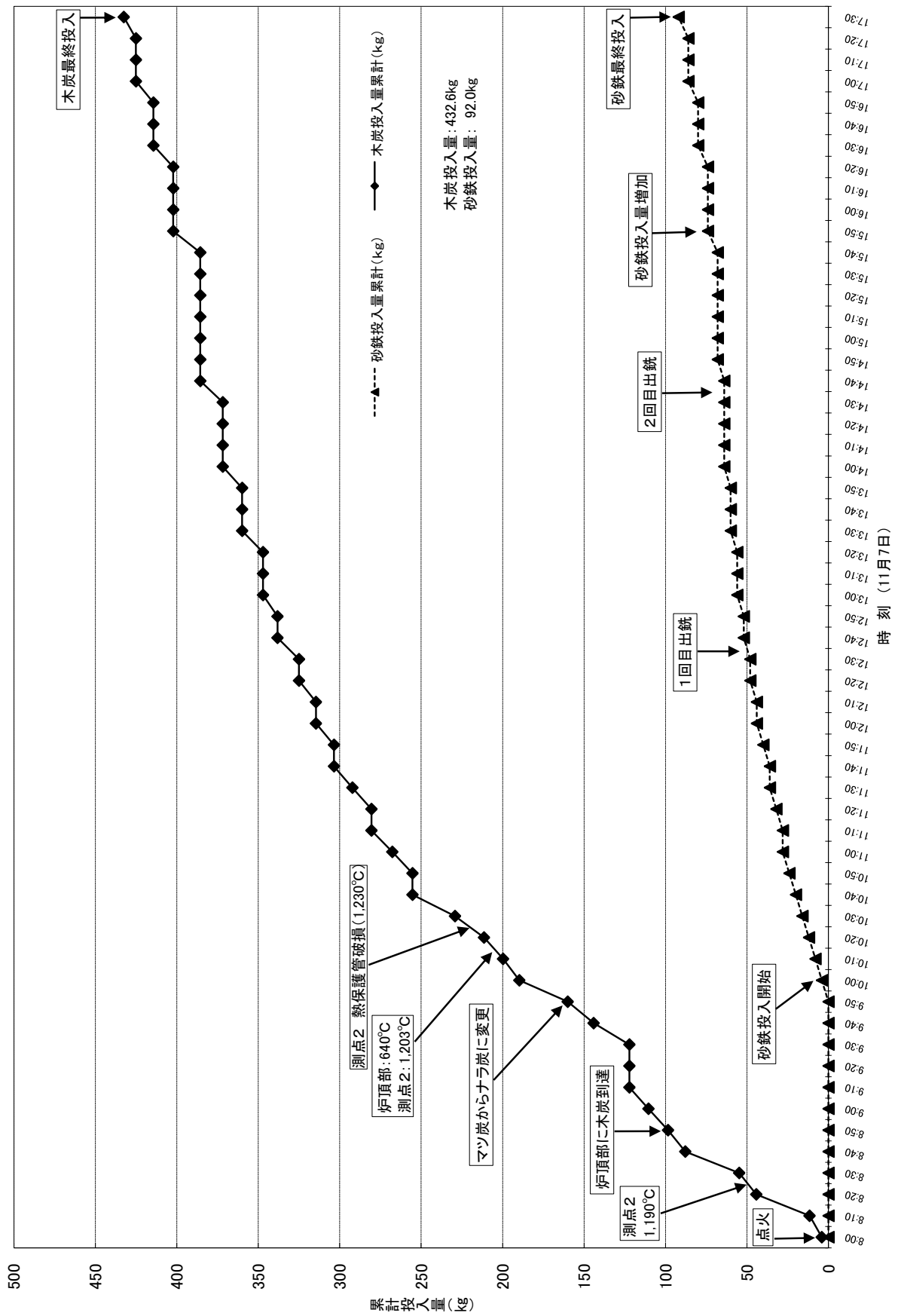


図4 まほろん4号炉の砂鉄・木炭累計投入量

表3 まほろん4号炉操業記録

月日	時刻	経過時間	砂鉄(単位:kg)				木炭(単位:kg)				備考
			回数	種類	投入量	累計	回数	種類	投入量	累計	
11月7日	8:00	0:00									点火。
	8:05	0:05					1	マツ	4.0	4.0	
	8:15	0:15					2	マツ	7.5	11.5	
	8:20	0:20					3	マツ	21.8	33.3	
	8:27	0:27					4	マツ	10.9	44.2	
	8:35	0:35					5	マツ	10.5	54.7	
	8:45	0:45					6	マツ	9.7	64.4	
	8:47	0:47					7	マツ	11.9	76.3	
	8:49	0:49					8	マツ	11.5	87.8	
	8:52	0:52					9	マツ	10.6	98.4	木炭炉頂部到達。以降、炉頂部まで木炭を投入。
	9:00	1:00					10	マツ	12.0	110.4	
	9:17	1:17					11	マツ	11.7	122.1	
	9:40	1:40					12	マツ	22.0	144.1	9:30イベント開始。
	9:50	1:50					13	ナラ	15.9	160.0	
	10:05	2:05	1	被熟	4.0	4.0	14	ナラ	29.7	189.7	木炭投入後に砂鉄(初種)を投入。
	10:10	2:10	2	被熟3、生1	4.0	8.0	15	ナラ	10.0	199.7	
	10:20	2:20	3	生	4.0	12.0	16	ナラ	11.7	211.4	10:20出銑口閉塞。ふいご片側20回/分。
	10:30	2:30	4	生	4.0	16.0	17	ナラ	17.8	229.2	
	10:40	2:40	5	生	4.0	20.0	18	ナラ	12.4	241.6	
	10:48	2:48	6	生	4.0	24.0	19	ナラ	13.7	255.3	
	11:03	3:03	7	生	4.0	28.0	20	ナラ	12.4	267.7	
	11:15	3:15	8	生	4.0	32.0	21	ナラ	12.8	280.5	
	11:30	3:30	9	生	4.0	36.0	22	ナラ	11.7	292.2	
	11:46	3:46	10	生	4.0	40.0	23	ナラ	11.3	303.5	
	12:01	4:01	11	生	4.0	44.0	24	ナラ	11.1	314.6	
	12:20	4:20	12	生	4.0	48.0	25	ナラ	10.4	325.0	
	12:42	4:42	13	生	4.0	52.0	26	ナラ	13.2	338.2	12:35炉内状況確認。第1回出銑・出滓(ノロ出し)。
	13:05	5:05	14	生	4.0	56.0	27	ナラ	8.9	347.1	
	13:33	5:33	15	生	4.0	60.0	28	ナラ	12.8	359.9	
	14:03	6:03	16	生	4.0	64.0	29	ナラ	11.9	371.8	
	14:47	6:47	17	生	4.0	68.0	30	ナラ	13.8	385.6	14:35炉内状況確認。第2回出銑・出滓(ノロ出し)。
	15:50	7:50	18	生	6.0	74.0	31	ナラ	16.6	402.2	16:00羽口詰まり除去作業。
	16:30	8:30	19	生	6.0	80.0	32	ナラ	12.2	414.4	16:30羽口詰まり除去作業。
	17:01	9:01	20	生	6.0	86.0	33	ナラ	10.7	425.1	17:00羽口詰まり除去作業。
	17:30	9:30	21	生	6.0	92.0	34	ナラ	7.5	432.6	砂鉄・木炭最終投入。以降、ふいご送風による吹き下ろし。
	17:45	9:45									ふいご片側33回/分。
	18:20	10:20									羽口詰まり除去作業。
	19:00	11:00									ふいご送風停止。第3回出銑・出滓(ノロ出し)。操業終了。炉頂から10～15cmまで木炭落下。以降、投入木炭を自然焼却させる。
	19:35	11:35									送風用羽口撤去。炉壁装着羽口内詰まり除去。
	20:35	12:35									わらを被せて焼く。
	20:40	12:40									炉頂から25cmまで木炭落下。
	22:00	14:00									炉頂から35cmまで木炭落下。
11月8日	2:00	18:00									炉頂から40cmまで木炭落下。
	5:35	21:35									炉頂から50cmまで木炭落下。東羽口⑦及び西羽口⑥からハンディーブローで送風開始。
	5:50	21:50									第4回出滓(ノロ出し)。
	7:10	23:10									第5回出滓(ノロ出し)。

※砂鉄の種類 被熟:平成19年度に実施したまほろん3号炉の操業後に炉内及び炉の周囲より磁石で採取した砂鉄。

生:平成21年度に実施したイベント「砂鉄選別」及び夏休み特別体験メニュー「砂鉄選別」で比重選鉱した砂鉄。

表4 まほろん4号炉炉内温度

回数	時刻 (11月7日)	温度(°C)		備考
		測点1	測点2	
1	8:22	46	932	
2	8:25	210	1,190	測点2の計測終了。
3	8:36	532	—	
4	8:45	790	—	
5	8:47	552	—	マツ炭約20kg投入(8:45・8:47)。約300°C下がる(460°C)。
6	8:53	815	—	ふいご踏み7分で約300°C上がる。
7	9:02	1,019	—	マツ炭12kg投入(9:00)しても温度下がらず。
8	9:07	1,100	—	1,100°Cから温度の上昇は緩やか。
9	9:20	1,140	—	
10	9:25	1,160	—	
11	9:43	1,140	—	ナラ炭投入。
12	10:00	1,179	—	
13	10:10	1,197	—	
14	10:12	1,203	—	10:16炉頂で640°C。
15	10:25	1,230	—	熱保護管破損。

※測点1:炉頂から54cm 測点2:炉頂から102cm=羽口上7cm

17時30分、操業前から予定していた砂鉄・木炭の最終投入を行い、その後、19時00分までふいごのみによる吹き下ろしを行った。踏みふいごによる送風は、17時45分からは1分間あたり片側33回で行った。

19時00分、3回目の出銑・ノロ出しを行った後、ふいごによる送風を停止し、1日目のイベント(操業)を終了した。なお、3回目の出銑・ノロ出しの際に炉内から12gの鉄を採取した。この後、19時35分に木呂羽口を全て外し、翌日の早朝まで炉内の木炭を自然焼却させた。

明けて11月8日の早朝、5時頃に炉内を観察したところ、炉内の木炭は炉頂から約50cmの所まで下がっていた。また、炉壁に設置した羽口から炉の内部を観察したところ、炉内はオレンジ色でまだかなりの高温を保っているようであったことから、木炭の消化速度を上げるため、羽口前の生成物を鉄棒で突くとともに、東西それぞれの壁の中央部の貫通した羽口孔を通してハンディーブローア^(註1)で強制送風してみることにした(写真5-⑤)。ブローアの送風量は6段階中のレベル4(大きい方から3番目)に固定し、ブローア送風を開始してから15分後に湯路から炉内の生成物の上部を鉄棒で突いてみたところ、粘性のあるノロがゆっくりと湯路手前まで移動してくるのが確認できた。このノロを引き出したが、量は少量で、他にガサガサした生成物も少量引き出された。さらに送風を続け、7時10分に再び湯路から炉内の生成物を鉄棒で突いてみたところ、再び湯路手前まで粘性のあるノロがゆっくりと移動してきた。今回はこのノロの他、ガサガサした生成物が多量に引き出された。なお、このハンディーブローアによる強制送風は、羽口の位置を変えながら9時頃まで行ったところ、中釜下部まで木炭が下がった。

ふいごによる送風を停止するまでの操業延べ時間は11時間00分で、砂鉄投入量は92kg、木炭投入量は432.6kgで、出銑・ノロ出しを計3回行った。砂鉄は21回投入したが、1回当たりの投入量は1回目から17回目までが4kgで、それ以降は6kgとした。これに対して、木



写真4 操業の様子



写真5 操作及び炉解体の様子

炭は10～13 kgを基本としながら適宜量を増減させて調整した。

炉の解体 ハンディーブローアによる送風により木炭が炉の下部まで下がったことから、送風を停止し、炉壁解体前に炉内各壁の状況を確認したところ、各壁とも上釜及び中釜は構築時同様に直立しているが、南壁の中釜下部が熔融して大きく湾曲していることが見て取れた。また、北壁以外では中釜の下半に砂鉄が焼結付着しており、下方に下がるにつれて砂鉄焼結塊となって多く付着しているようであった

炉の解体は、11月8日10時より行った。最初に、炉の南壁をチェーンソーで切断して除去し、東西の炉壁の内面を観察した。両炉壁とも中釜中位から上方は熔融・侵食していないが、中釜下半は下方に下がるにつれて熔融・侵食が大きくなり、所々ひび割れ、砂鉄焼結塊が多く付着していることが認められた。特に、両短辺から中央に行くにつれて、その度合は大きくなっていった。また、東西炉壁の断面の色調は中釜下部では内側から順にガラス質で黒色→赤褐色→橙色→白色→褐色と変化し、それより上部では橙色ないしは白色から褐色へと変化していた。内壁の色調は、東・西・北壁の上釜では赤褐色ないしは橙色を呈し、中釜では全体的に黒味がかっているが、中釜中位では橙色と青灰色が互層になっている。なお、砂鉄が付着している範囲は、壁面の熔融範囲とほぼ一致している（写真5-⑥）。

次に、東壁・西壁・北壁の順に引き倒し、炉底塊を露出させた。この段階で上釜・中釜が全て除去されたことになる。さらに、この炉底塊を水の張った特製の鉄池に入れて水冷させるために、下釜の炉壁粘土及び羽口を除去し、移動しようとしたところ、この炉底塊がほぼ中央部で南北2つに割れてしまった（写真5-⑦）。なお、炉底塊を水の張った鉄池に入れて水冷させることは、いわゆる水鋼（みずはがね）と同様な生成物の冷却方法である（写真5-⑧）。

この2つの炉底塊を鉄池に入れてから約2時間後、炉底塊を鉄池から取り上げ、重量を計測したところ、合計120 kgであった。（写真6-①）

5 まほろん4号炉の生成物の採集

生成物の採集は、操業中、炉壁解体時、日を改めて行った炉底塊の小割作業の3回行った。採集した生成物の重量は表5のとおりである。

操業中 前述の操業記録のように、湯路から炉内生成物を流し出すあるいは引き出す作業を合計5回実施した。1回目は長さ約6 cm（重さ9 g）の細長い鉄が流れ出し、2回目には長さ14 cm（重さ89 g）の鉄と長さ約8 cm（重さ52 g）の鉄が二股に分かれて流れ出した（写真5-②）。この他に、1・3回目には粒鉄、2回目には長さ約6 cm（重さ33・56 g）をはじめとした不整形な鉄や粒鉄、鉄滓が採集された。ハンディーブローアによる送風を始めた後の4・5回目には、粘性のある流出滓が少量と磁性のあるガサガサした鉄滓が多量に引き出された。

小割前の観察 上面の長辺際には羽口の位置に対応した高まりと剥落した部分が確認でき、この剥落した部分は空洞であったと推測される（写真6-③・④）。裏面を観察すると、まず長石を多く含むオリーブ色の固い土が広く付着していることが目に留まる（写真6-②）。この土は基礎構造構築時に底面を嵩上げするために投入した土と推測される。また、基底粘土が

蜘蛛の巣状にひび割れ、そのひびの多くに鉄が侵入していることが確認された（写真6-⑤・⑥）。なお、炉解体時に炉底塊が2つに割れた位置は、東羽口⑦と西羽口⑥を結んだラインである。

2つに割れた炉底塊の内、北側の炉底塊の北端の断面と破断面を観察すると、下釜の炉壁はそれぞれ羽口の上方・下方とも熔融・侵食してガラス質化しており、その内部には磁性のある鉄滓が詰まり、破断面ではひび割れた基底粘土に鉄が侵入していることも確認できた（写真6-⑦・⑧）。

小割作業 鉄塊・鉄滓の生成位置や生成状況を把握するため、金鋤等で小割しながら生成物を回収した。小割作業は、北側の炉底塊についてのみ行い、羽口単位で幅10cmずつ、羽口⑥前から順に羽口①前方向へ進めた。炉底塊は一体の大きなケラ状ではなく、金鋤で小割できる状態であり、鉄塊や粒鉄などは鉄滓と分離が容易であった。

炉底塊の内容物は、羽口より上位に生成された鉄塊及び鉄滓、羽口前の鉄滓、羽口より下位に生成された鉄塊及び鉄滓、さらに、生成物ではないが燃え残りの木炭である（写真7-①）。この内、鉄滓は鉄分をまだ多く含んで磁性が強いものが大半を占め、表面はガサガサして断面は緻密であり、羽口前のものは重く、それより内側で羽口より上位のものは若干軽めである。羽口より下位に生成された鉄塊には、炉壁下端に生成されたもの（東羽口②下、西羽口②下、東羽口③下、西羽口④下）と炉底の主軸線上に南北方向で溜まった状態のものがある。なお、炉底の鉄塊上には空孔が多い軽い鉄滓が付着している。

南側の炉底塊については、館内の展示物とするため、金属用サンダーを使用して羽口⑧のラインで切断した。この断面を見ると、羽口前にはやはり鉄滓が詰まっており、それより上位には椀状の鉄塊が認められ、最上層は薄い膜で覆われている（写真7-②）。また、炉底には鉄塊があり、その上に木炭細片が認められた。しかし、炉底の鉄塊は金属用サンダーで切断することができず、作業中に炉底塊から外れてしまった。

この小割作業において回収した鉄塊は9,505g、鉄滓は29,668gである。

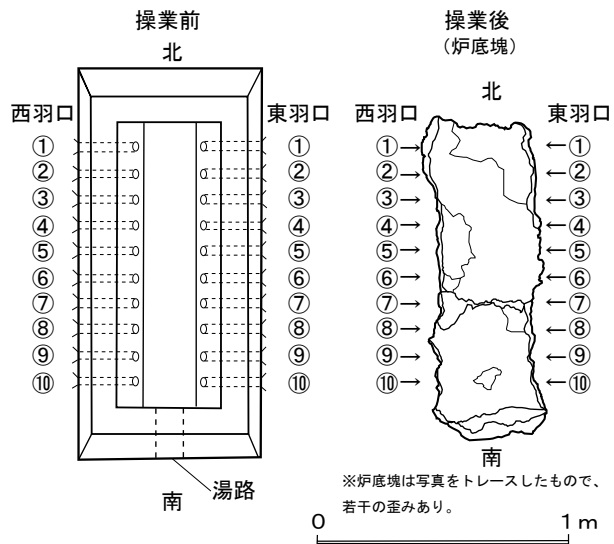


図5 まほろん4号炉羽口の位置と名称

6 まほろん4号炉の生成物について

(1) 鉄塊の分類

生成鉄は外観から大きく3種類に分かれる。

A類：粒状鉄 径約2～10mmの球状のもの（A1類）と長さ10～20mmの空豆状ないしは饅頭形のもの（A2類）がある（写真8-①）。A1類は単体のものが多いが、2個以上が連結

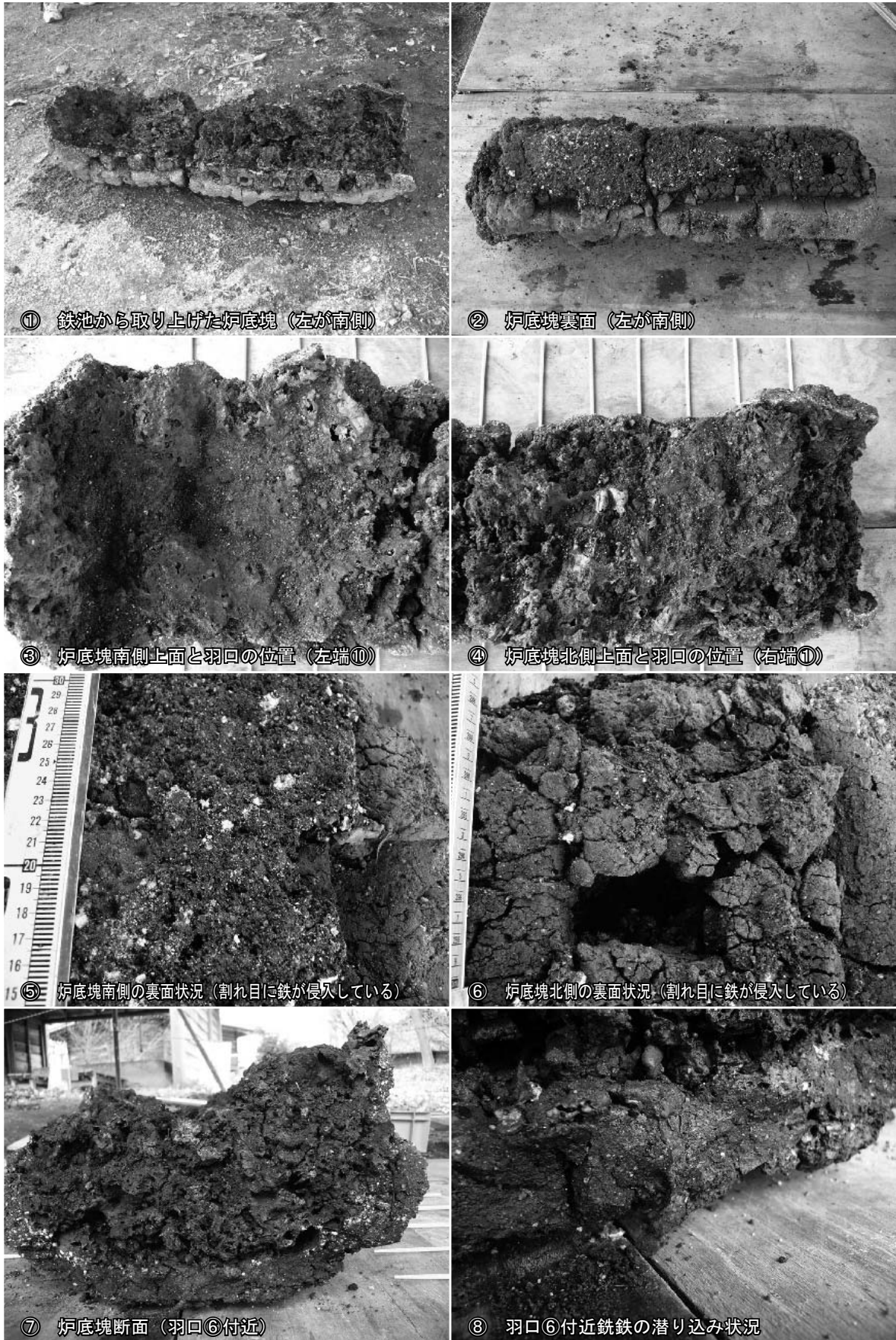


写真6 炉底塊の観察と断面

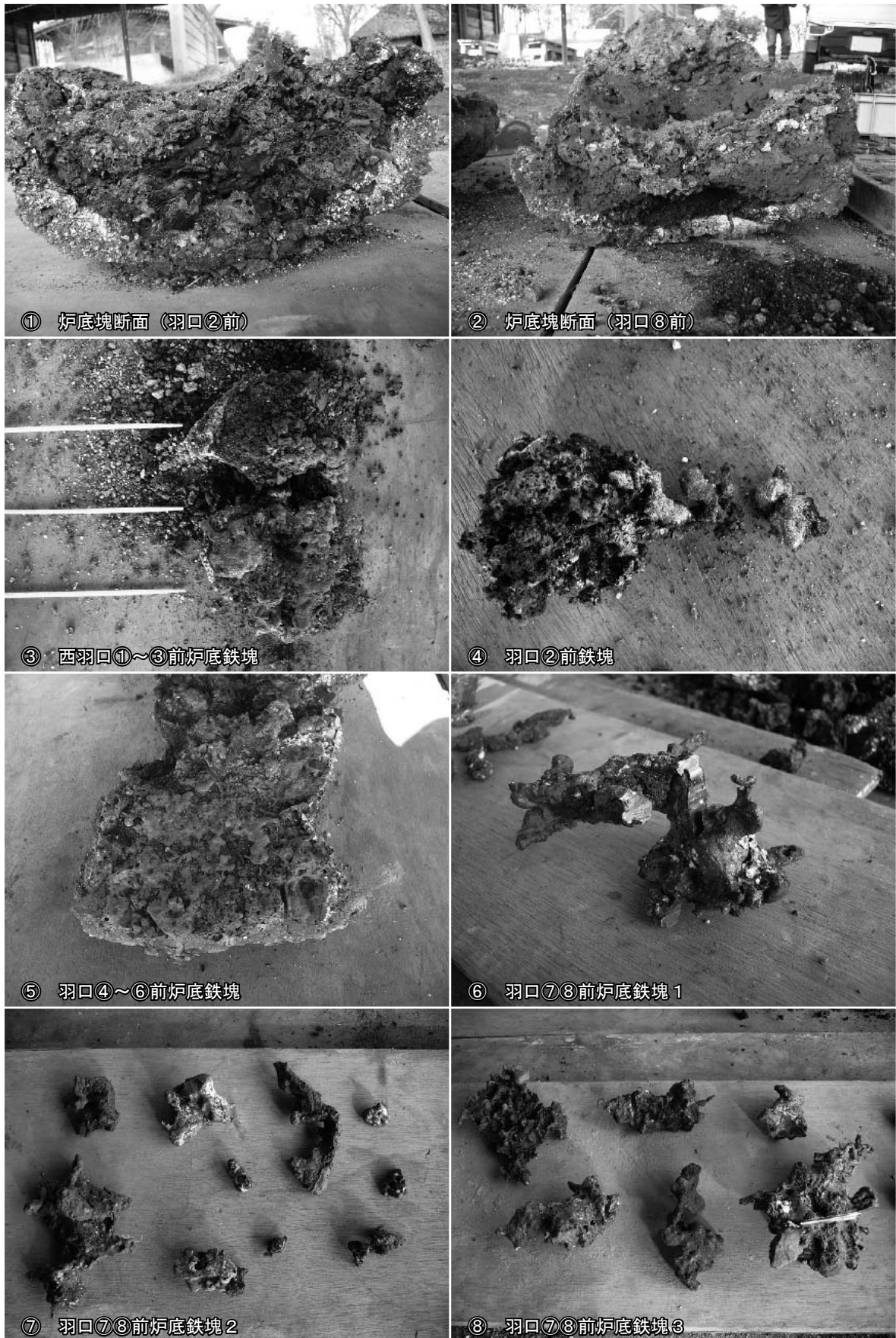


写真7 炉底塊の断面と鉄塊

表5 まほろん4号炉鉄塊・鉄滓重量表

採集位置		鉄塊 (g)	鉄滓 (g)	備考
1回目出滓・出銑		15		11月7日12:35 銑鉄
2回目出滓・出銑		470	607	11月7日14:35 銑鉄
3回目出滓・出銑		12		11月7日19:00 銑鉄?
4回目出滓			481	11月8日5:50
5回目出滓			3,499	11月8日7:10
11月8日解体時炉底塊上		202	7,700	
東羽口①前	炉底	285		
東羽口①前	下位		1,080	
東羽口①前～②		635		
東羽口②前	炉壁下端	580		
東羽口②前			1,491	
東羽口③前	東羽口③下炉壁下端	447		
東羽口④下	炉壁下端	65		
東羽口④前		150	381	
東羽口⑥	羽口内		14	
東羽口⑥前	生成物上位	85		
東羽口⑩	裏銑	11		
西羽口①前	炉底	319		
西羽口①前	羽口～炉底		1,180	
西羽口②前	羽口下	139		
西羽口②前			4,420	
西羽口④下	炉壁下端	352		
西羽口④前			106	羽口上位の薄皮状生成物及び磁性あり砂鉄未熔融生成物
西羽口④前			230	他に黒鉛化木炭170g
西羽口⑤前		445		
羽口①②付近	基底粘土裏	38		
羽口①前	羽口より上位		1,780	
羽口②③前	炉底	1,780		
羽口②前	羽口より上位		351	
羽口③前			4,070	
羽口④前		145	2,425	
羽口④前	炉底	491		
羽口⑤⑥前	炉底	1,340		
羽口⑤前			3,750	
羽口⑥前	羽口より上位	303		
羽口⑥前	羽口より下位	158		
羽口⑥前			4,160	
羽口⑦⑧間	生成物中	205		
羽口⑦⑧間	中央部(炉底上4cm)	528		
羽口⑦⑧間	炉底	1,004		
羽口⑦⑧間			4,230	
不明		30		粒鉄
合計		10,234	41,955	

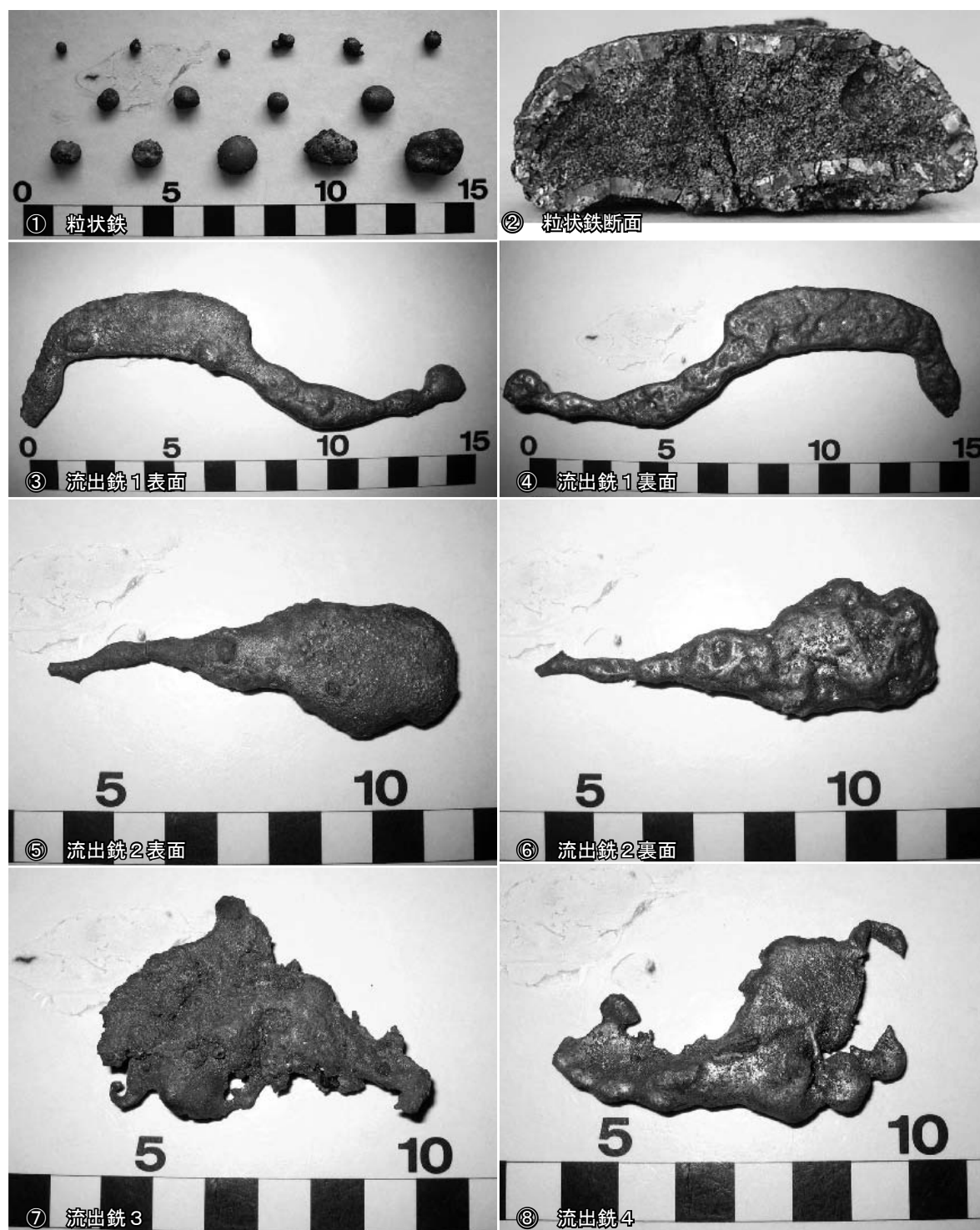


写真8 粒状鉄と流出鉄

しているものもある。A2類はA1類が成長して偏平化したものと推測され、裏面は平坦である。また、A2類も単体のものが多いが、2個以上が連結しているものもあり、生成位置は羽口より下位で、炉底上あるいはその上方から多く採集した。

B類：不定形で大きな塊の鉄 偏平なもの（B1類）と塊状のもの（B2類）がある（写真7-③～⑧）。B1類は上面に流れ痕跡を留め、横方向に伸びる突起や下方に伸びる突起が認められるものがある。炉底に生成されたものであり、下方の突起は基底粘土のひび割れへの侵入

痕跡である。B2類には、炉壁下端にへばり付いていたものや炉底より上位の鉄滓と同居していたもの、A2類が多量に結合したようなものなどがある。

C類：棒状ないしは紐状の鉄及び紐状の痕跡がある鉄 2回目の出銚・ノロ出しの際に炉外に流出した鉄で、表面は滑らかで、裏面は平坦である（写真8-③～⑧）。写真8-③・⑤は写真5-②に見える二股に分かれて流れ出たものである。

D類：木炭の周囲を覆った薄い膜が不規則に展開しているもの この被膜は燃焼中の木炭あるいは燃え尽きなかった木炭の表面を覆ったものと推測され、膜の外側には別の膜が付着しており、全体の形状は不整形である。この被膜は磁性があり、表面は銀色を呈し、被膜間にはガラガラした塊も認められる。体積のわりに軽量である。生成位置は不規則で、羽口②～④前と羽口⑧前に認められ、羽口④前の断面では上位から炉底付近まで、羽口②・③・⑧前の断面では上位に認められる（写真7-①・②）。

(2) 鉄滓

まほろん4号炉の鉄滓の内、大半は磁性が強いものである。炉内に残留したものは、小割作業の際に簡単に分離され、表面がガサガサした感じのものであった。また、羽口前の鉄滓は断面が緻密で重量感があるのに対して、それより内側で羽口より上位のものは若干軽めの感触を得た。炉外に少量流出した鉄滓は、流動性は低いが、表面は滑らかであった。なお、砂鉄焼結塊も鉄滓に含めて重量を計量した。

(3) 分析及び専門家のコメント

藤安将平さん(刀工)のコメント 2回目の出銚・ノロ出しの際に採取した粒鉄（A2類、径2cm弱、写真8-②）を福島市在住の藤安将平さん（刀工）に見ていただいたところ、金鋸で2分割した断面について、「周囲は白銚で、内部は炭素分1%くらいの鋼であり、まほろんで今までに生成した鋼の中で最も硬い鋼である。」とのコメントを頂いた。また、炉内に生成された磁性のある鉄滓を平成22年度に実施する「古代の鍛冶体験」用の素材鉄を得るために持ち込み、下げ作業を行っていただいたところ、「かなりノロが出た。」とのことであった。

吉澤治さん(村下体験者)のコメント 今回の操業において村下体験者として参加された吉澤治さん（熱処理関係の会社勤務）に炉解体時に採集した粒状鉄（A2類）と鉄滓を提供したところ、以下のようなコメントを頂いた。

「1）ノロ（不純物）について

写真9の白い蜂の巣状の部分はレデブライトと推定します。ビッカース硬さ試験機（試験力2.9N）で測定した結果、250HVでした。また、写真10は写真9の灰色に見える箇所を拡大したものです。製錬滓の写真と類似していると思われるのでそれぞれの部位と判定してみました。

2) ズクについて

写真11の白い蜂の巣状の部分はレデブライトと推定します。ビッカース硬さ試験機（試験力2.9N）で測定した結果550HVでした。黒い片状の物はグラファイト、灰色部分はフェライト（純鉄）とセメンタイトの層状組織のパーライトと判定します。また白い帯状の組織は1000HVの硬さを示したのでセメンタイトと判定しました。以上の結果から、今回得られたズクの組織の

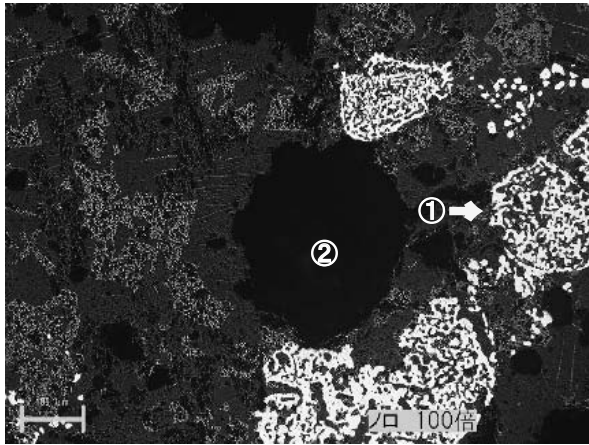


写真9 まほろん4号炉のノロ 100倍

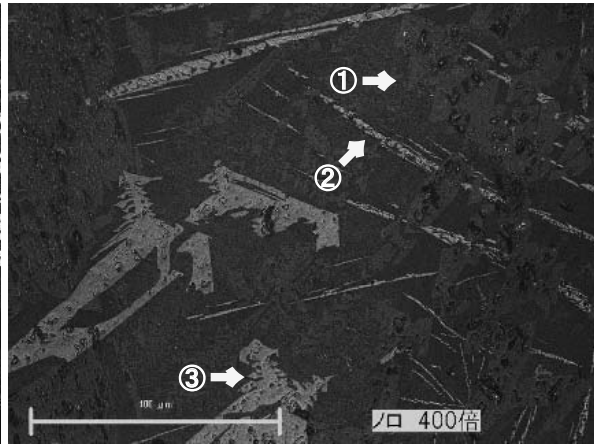


写真10 まほろん4号炉のノロ 400倍

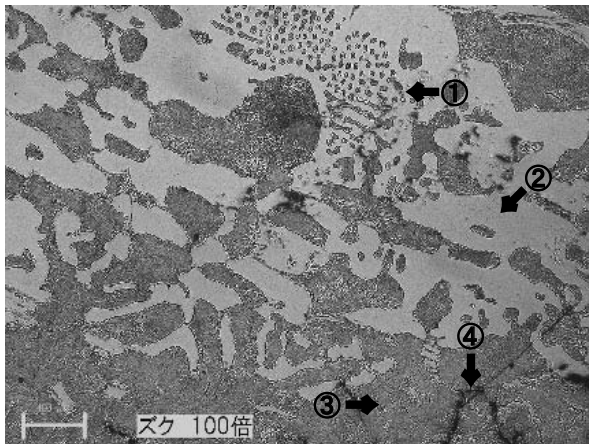


写真11 まほろん4号炉のズク 100倍

凡例 各写真中の—は100 μ

写真9 ①レデブライト

②ガスが抜けた時の空洞

写真10 ①基質

②ファイヤライト

③ウルボスピネル

写真11 ①レデブライト（鉄に炭素が約4.3%固溶）

②セメンタイト（鉄に炭素が約6.67%固溶）

③パーライト（鉄に炭素が約0.77%固溶）

④グラファイト（黒鉛）

写真撮影・提供：吉澤治氏

構成は白鑄鉄に近いものと推定します。ちなみに、白鑄鉄は鑄鉄が凝固からの冷却速度が速い時にセメンタイトを多く析出したものです。冷却速度が遅い時は黒鉛を多く析出させねずみ鑄鉄になります。」

九州テクノリサーチのコメント 2回目の出銑・ノロ出しの際に炉外に流出した鉄（写真5-②）の左側の資料（写真8-⑤）と炉底塊小割時に羽口⑦⑧間の炉底部から採集した鉄塊について、九州テクノリサーチより断面の顕微鏡組織写真撮影の協力を得、以下のようなコメントも頂いた。

「まほろん4号炉の生成鉄塊2点の断面顕微鏡観察を実施した結果、2点とも銑（鑄鉄塊）であることが明らかとなった。

操業中に炉外に流れ出た鉄塊（写真12）は、全面亜共晶組成白鑄鉄組織（C < 4.26%）を呈する。表面に製錬滓の付着はみられない。

炉底塊から小割された鉄塊（写真13）はねずみ鑄鉄で、内部には燐偏析（Steadite: Fe-Fe₃C-Fe₃P）や硫化物が確認された。また表面には砂鉄製錬滓が付着する。滓中の淡褐色片状結晶はシュードブルッカイト（Pseudobrookite: Fe₂O₃・TiO₂）と推定される。高チタン（TiO₂）砂鉄を高温製錬した時に生じる晶癖であり、少なくとも当鉄塊の生成位置では高温が保持されていたものと推察される。」

鉄塊
 ①マクロ組織、3%ナイトルetch
 ②～⑥亜共晶組成白鑄鉄組織、
 素地部分:マルテンサイト、水冷痕跡、
 黒色点状部:ステダイト($\text{Fe-Fe}_3\text{C-Fe}_3\text{P}$)

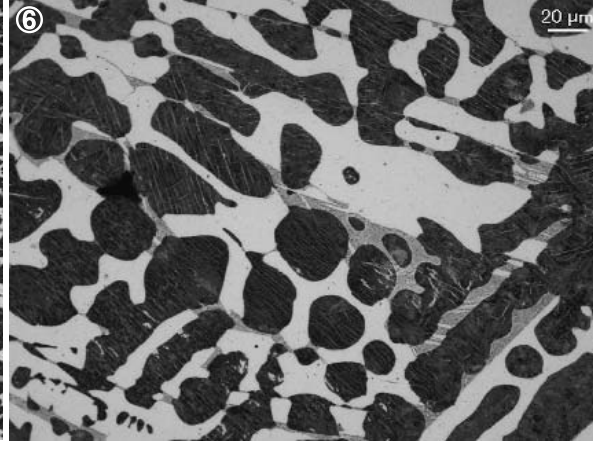
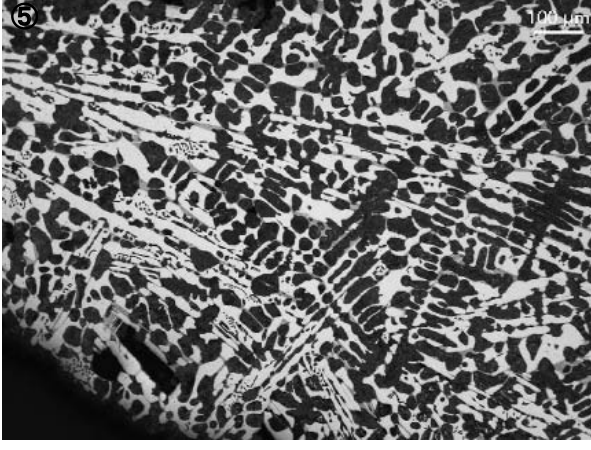
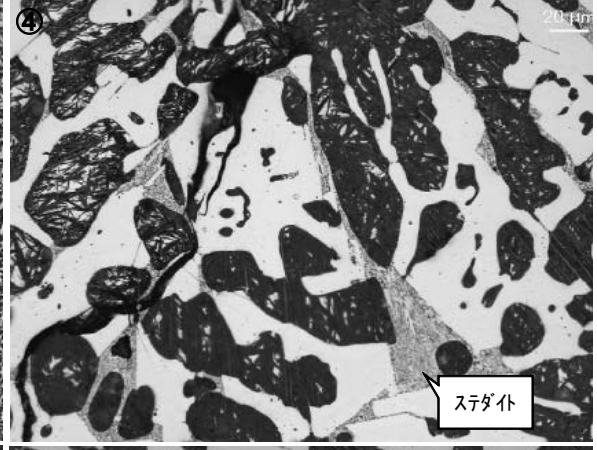
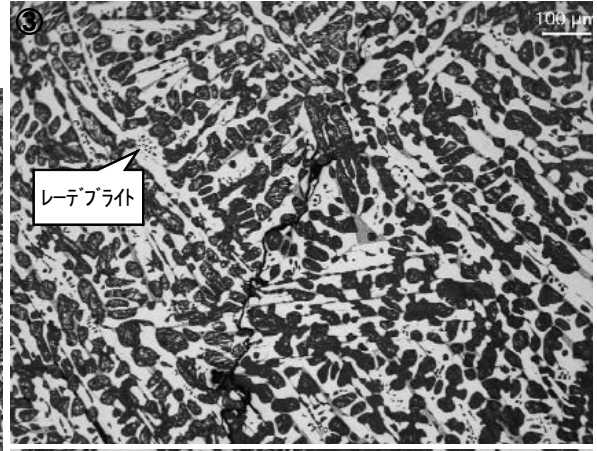
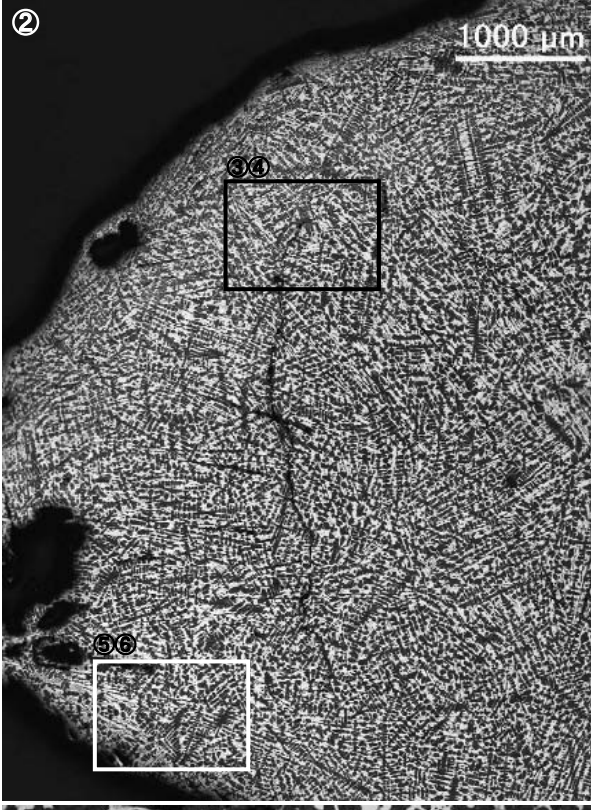
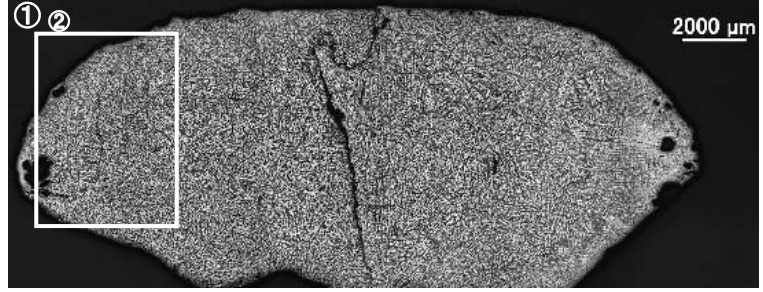


写真 12 鉄塊（操業中採取）の断面顕微鏡組織

写真撮影：九州テクノリサーチ

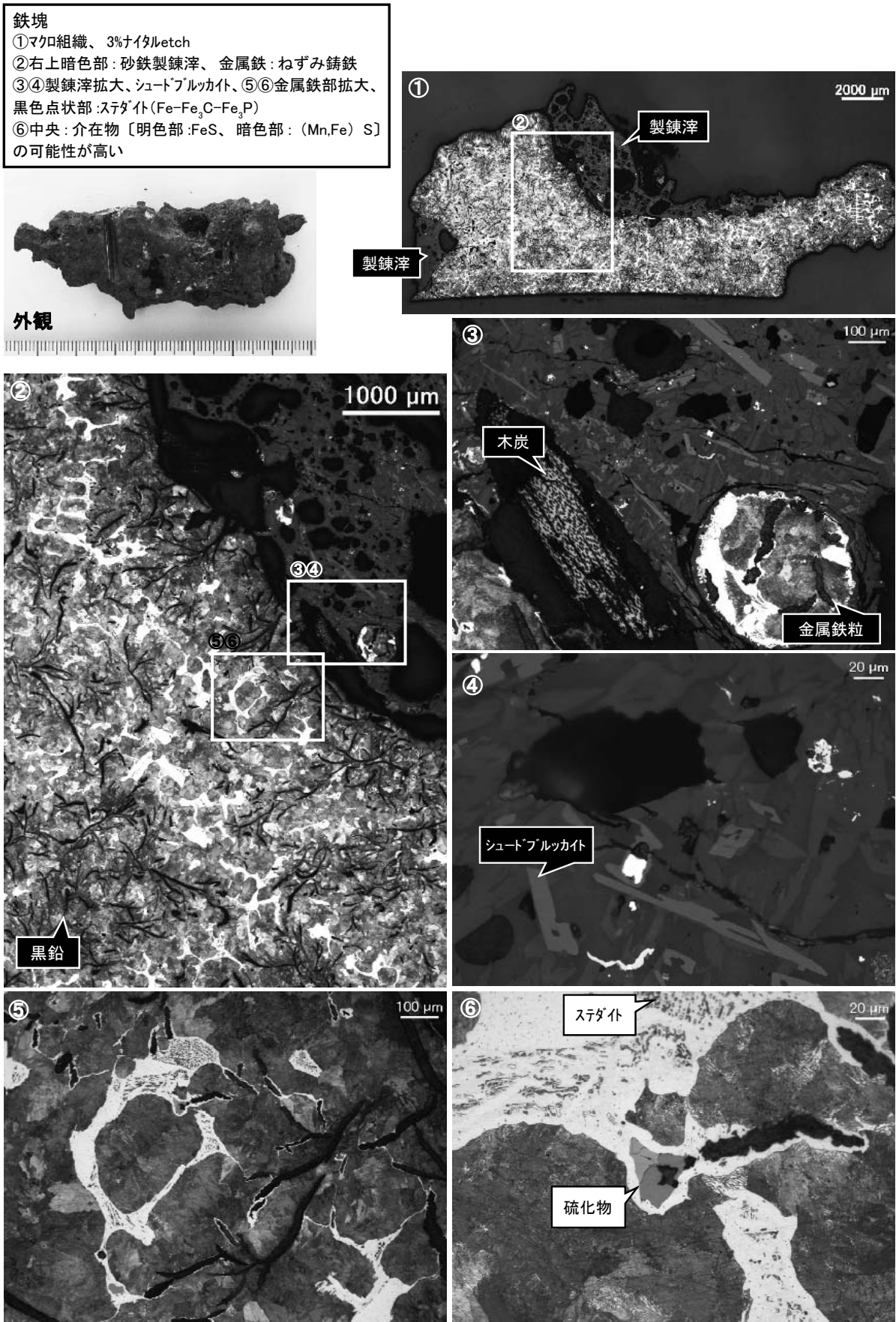


写真 13 鉄塊（操業後炉底より採取）の断面顕微鏡組織

写真撮影：九州テクノリサーチ

7 考察と課題

今回の操業に関してまとめるとともに、若干考察を加えてみることにする。

(1) 炉について

構築 操業に当たり、炉の基礎（地下）部分を乾燥する下灰づくりを行い、粘土を積み上げて炉を構築したが、この作業に21日間を費やし、その後、送風装置の設置などを行い、操業までさらに5日掛かった。「炉づくりから操業まで共に行う」村下体験者を募集したことから、炉壁ブロックを平日に準備し、炉構築作業は週末に行うというパターンになり、このように期間を長くせざるを得なかった。この期間中には、雨に見舞われることはなかったが、操業本番時には作業場内及び炉基礎部分の乾燥を行った意味が無くなっていたのではないかと危惧している。中国地方における近世たたらは勿論のこと、現在、島根県奥出雲町の日刀保たたらや岡山県新見市のたたらをはじめ、各地で行われているたたら製鉄の炉づくりは、操業前に短期間で行っていることから、今後は短期集中で炉づくりを行うべきと考える。

炉壁 短辺の南北壁では内壁を炉頂から炉底まで直立させたが、長辺の東西壁では内壁を上・中釜は直立させ、下釜では 72° で傾斜させた。これは、砂鉄の投入位置（ライン）とも関係することで、砂鉄を羽口の前に降下させることを前提としたことから、このような構造にした方がスムーズに砂鉄が下釜の羽口前に至ると考えたからである。また、下釜粘土と砂鉄が反応してノロ（鉄滓）が生成されることを期待（予測）したのもである。

操業による内壁の溶融範囲は中釜中位まで広がり、下釜の溶損は羽口より下方が大きく、砂鉄と炉壁粘土が一応反応しているように推測された。しかし、まほろん3号炉の際にも粘性の強いノロ（鉄滓）が多く流出したように、この炉壁粘土は溶けにくい、あるいは、砂鉄との反応が悪いのか、ノロ（鉄滓）の生成がうまくいかなかった。

羽口 羽口は長瀬15号炉の調査成果から、 10° の傾斜で設置した。設置角度は、まほろん1号炉の 35° からその度に緩くなり、まほろん3号炉では 12° 、今回はさらに緩いものとなった。対面する炉壁との関係をみると、羽口の主軸の延長は対面する炉壁の羽口の下方約3~5cm、炉底から約5cmの高さの所である。つまり、炉底上約5cmは風が当たらないことになる。炉内における風の流れについて、十分な知識を持っていないが、炉内に木炭が多量に充填されている状況で、はたして、一方の炉壁側の羽口から出た風が対面する炉壁にどの程度当たるのか（届くのか）疑問である。ふいごから送られる冷風が炉底上の生成物に直接当たらないようにするため、また、還元された炉底上の生成物とその風により酸化しないためにも、この炉底上5cmの空間は必要と考える。

炉底 今回の炉底幅はまほろん1~3号炉よりも大きめの20cmとし、炉底の平面形も単純な長方形とした。操業の結果が炉底幅・平面形に左右されたのかどうかは不明であるが、今後、同規模の炉で操業する際には炉底幅を狭くし、平面形も変えて比較してみるべきであろう。なお、今回の操業で大きな過ちは、炉底の粘土（基底粘土）を強固なものにしなかったことであろう。やや水分多めの粘土を約3cmの厚さで敷き、空焚き後にその縁に下釜粘土を積み上げ、

さらに、下釜乾燥のための空焚きを行い、その後に中釜構築後及び上釜構築後にも空焚きを行っており、操業前に4回の空焚きを実施していたことになる。その度に、ひび割れが確認でき、補修しながら次の作業を進めてきたが、やはり、本操業の高温下では長持ちせず、そのひびに炉底上に溜まった鉄が侵入するとともに、このひび割れが炉底の温度を奪いかねなかったのではないかと考えている。また、炉底はほぼ水平に構築したが、生成鉄を流し出すためには、炉底を湯路側に緩く傾斜させることも必要であったと言えよう。

(2) 操業について

ぶつつけ本番の操業 まほろん1～3号炉の操業では、本操業（イベント）前に1～数回のプレ操業を行ってきた。しかし、まほろん2・3号炉の操業時から、「多くの時間と労力をかけて炉を作ったのに、短時間の操業で炉を壊すのはもったいない。」との意見があり、今回の操業ではプレ操業を行う時間的余裕もないことから、一発勝負のぶつつけ本番の操業となってしまった。このことは、前回までの操業を経験していない多くの職員が占める当日のスタッフの動きにも混乱をきたした。

ホセ（炎勢）の管理 今回の操業は、前回までご指導いただいた刀工の藤安将平氏の指導を得ずに職員と一般募集の村下体験者で行った。古代の製鉄復元は、遺跡の考古学的情報、考古資料の金属学的分析、炉の構築から操業までコントロールする技術が揃って初めて可能であると言われている（村上2006）。炉は復元しても、炎の色や勢いからみた炉内の状況把握、炎の管理、砂鉄・木炭を投入するタイミングなどは技術者が長年培った技であり、筆者らが一朝一夕に真似出来るものではない。なお、今回の操業は朝8時に火入れを行い、当日の午後7時に操業を停止するという日中の操業であり、会場は周囲に壁がなく、オープンな状態であることから、ホセの色を判断することは少々困難な状況にあったと言える。近世以来のたたらの高殿や現代でも鍛冶工房などは薄暗い空間となっており、日中の操業にも支障はないが、今回のようなオープンな状況の場合には、夜間操業を行うとホセの色が判るのではないだろうか。

砂鉄と木炭 箱形炉において、間欠的に行われるふいご送風を行った場合、羽口を通して炉内に送られた風は、炉の主軸及び両長辺の壁際を上昇してくるという考えがある（永田2009）。この考えを支持し、砂鉄の投入位置をこれらの風の道を避け、羽口の前面に砂鉄が降下するように、炉壁から5～10cmの範囲内に線状に設定して投入した。操業後に炉を解体し、下釜の状況を確認したところ、羽口上方の炉壁と下方の炉壁では、その溶損状況が異なり、下方がその度合いが大きいことから、砂鉄の多くは羽口前に降下して炉壁と反応していたことが推測された。

投入する砂鉄の種類は、まほろん3号炉操業時に炉内に投入された「被熱砂鉄」と鉄穴流しの要領で得た「生砂鉄」である。被熱砂鉄は一度火を受けていることから、炉に投入した場合、生砂鉄よりも反応が速く、炉底部を保温するための鉄やノロ（鉄滓）を生成するのではないかと推測し、先行して投入した。

また、6回目までの投入では約10分間で木炭が約10cm下がるペースでの操業であり、炉高が120cmであることから、投入された砂鉄・木炭の炉内滞留時間（炉頂から炉底まで至る時間）

は約 120 分となり、最初の投入砂鉄が炉底に達するのは 12 回目の砂鉄投入後という計算になるが、その後、7～11 回目は木炭の下がるペースが約 15 分となり、12 回目以降は約 20 分となったことから、最初の砂鉄が炉底に達したのは約 150 分後の 11 月 7 日 12 時 30 分頃ということになる。つまり、第 1 回目の出銑・ノロ出しを行った時刻であり、その際に採集された鉄は、1 回目に投入された砂鉄（初種）が熔融したものと推測される。

砂鉄と木炭の投入割合を見てみると、余熱段階で投入した木炭はマツ炭で、投入量は 160 kg であった。その後、砂鉄を入れ始めてからはナラ炭に変えたが、その投入量は、砂鉄 4 kg の時（1～17 回目）は砂鉄の 2～3.5 倍（平均 3.3 倍）、砂鉄 6 kg の時（18～21 回目）は 1～2.7 倍（平均 1.9 倍）であった。まほろん 3 号炉では、おおよそ砂鉄 1 に対して木炭 2 の割合で投入していたことから、今回の、特に 1～17 回目は明らかに木炭過剰と言える。砂鉄を木炭の後に投入していたことから、木炭の投入量を基に砂鉄の量を調整するべきであったと考えている。なお、木炭を使い分けた理由は、それぞれの性質の違いからで、マツ炭はすぐに高温になる性質を持つことから余熱段階で投入し、ナラ炭は燃焼速度が遅く、一定の温度で燃焼を継続し、火持ちが良いという性質を持つことから砂鉄と同時に投入することにした。

羽口前の障害物除去作業 中国地方における近世のたたらや島根県奥出雲町の日刀保たたらでは、ホセ（火勢、炎勢）から炉内の状況を判断し、炉の下部に開けた羽口^{（註2）}の上部から炉内を覗くとともに羽口前の障害物を除去していた（俵 2007）。

まほろん 4 号炉では、炉頂部は別にして、南壁下端に設けた湯路しか炉内を覗く孔がない。操業中にふいごが重くなり、ホセの上がりも悪くなった時には、羽口前に障害物が生成されたかノロが羽口に侵入したと推測され、まほろん 3 号炉同様、操業を途中で中止する危機に直面したが、今回は近世たたらを参考に少々強引ではあるが、木呂羽口を外して各羽口前の状況を確認し、障害物があるような場合には鉄棒で突いてみることにした。その結果、ホセは一時的に回復し、この作業が効果的であることが分かった。なお、この作業の際に、その羽口前は一時的に温度が下がるが、炉全体の温度低下に繋がるものではないと推測する。まほろん 3 号炉の報告の際にも記したが、日刀保たたらの国選定保存技術保持者の木原明村下が、「羽口 1 本 1 本が溶鉱炉であり、それらを制御しなくてはいけない」と述べられているように、羽口前面の状況はそれぞれ異なっており、地道に羽口 1 本 1 本と向き合っていくことが炉全体の操業の改善に繋がることを実感した。

操業後に判明した事実 1 日目の操業を終え、木呂羽口を全て取り外して炉壁の状況を確認したところ、西壁において中釜下端が下釜上端より約 5～10 mm 外側にせり出し、上部中央が約 2～3 cm 張り出していた。これは、高温操業を物語るものと理解している。

また、炉壁に設置された羽口の内面は白くなっており、炉内から炎が入り込んでいたことがうかがえた。

さらに、踏みふいごの踏み板（鳴板）を撤収時に判明したことであるが、踏み板の東側の弁を支える 2 本の糸の内 1 本が破断していた（写真 14）。もう 1 本の糸はすぐに破断する状態ではなかったが、まほろん 2 号炉のようにふいごの弁の故障により操業を中止することにならな

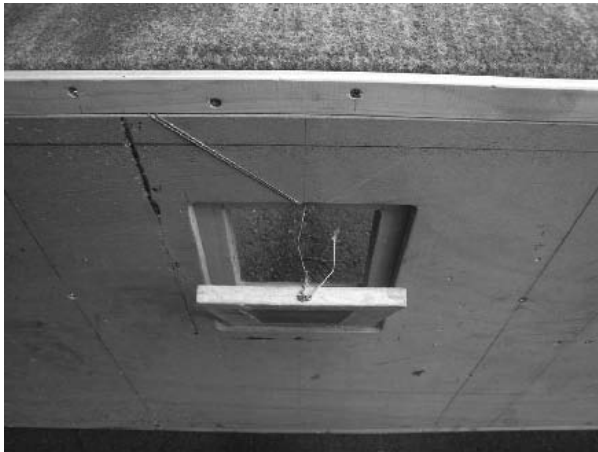


写真14 踏み板東側の弁の状況

範囲が広がっていた。人工送風を一切行わないことから、羽口及び湯路から自然に引き込まれる風と煙突効果により、温度が上昇したものと推測される。しかし、これはあくまで木炭のみによる燃焼であり、これに砂鉄を投入した場合、はたして高温を保持できるのかは不明である。今後、いずれかの機会に再度実験してみたいものである。

(3) 生成物について

鉄塊 鉄塊は羽口より下位から採集されたA・B2類、炉底に生成されたB1類、炉外に流れ出したC類、羽口より上位の中央部から採集したD類に分類された。D類は降下するとともに粒状化してA1類となり、さらに、下方に滴下しながらA2・B2類へと成長し、そして、これらがB1・C類へと成長するものと推測される。なお、前述の3者の分析コメントにあるように、A・B・C類とも銑鉄あるいは高炭素鋼であった。木炭過剰での操作であったことから、常に還元雰囲気吸炭し、炉底に降下した生成鉄も羽口からの風を直接受けることもなく、酸化されなかったのであろう。

鉄滓 長瀨15号炉の炉底に残された炉底滓の生成ができれば、その炉でどのような操作が行われ、その過程でどのような鉄や鉄滓が生成されたのかを推測できるのではないかと考えている。しかし、当時と同じ原料砂鉄・燃料木炭・炉材粘土を使用しての操作ではないことから、遺跡に残された炉底滓と全く同じものを生成することは困難と言える。今回の操作で生成された炉底塊は鉄塊と鉄滓が混在したもので、容易に小割ができ、大きな塊状の長瀨15号炉の炉底滓とは異なるものであった。特に、ほとんどの鉄滓は磁性があり、鉄分を多く含有して、鉄分と滓分が完全に分離していない状況であった。羽口前を塞いだ鉄滓は羽口上方の炉壁が熔融して垂れてきたものではなく、羽口下方に熔融・流出することなく溜まった鉄滓（ノロ）の上に順次上方から砂鉄が供給され、鉄分と滓分が分離しないまま、さらに溜まったものではないかと推測している。なお、前述の分析コメントにもあったように、炉底上の生成鉄塊に付着していた鉄滓中には、高チタン砂鉄を高温製錬した時に生じるシュードブルックイト（Pseudobrookite： $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ ）と推定される結晶が認められたことから、操作当初、炉底では高温が保持されていたものと推測される。

くて安心している。

自然通風について 中釜乾燥時及び上釜乾燥時に、下釜に設置した合計20本の羽口と湯路を開口させて、炉内で木炭を燃焼した。羽口前における温度を測定したところ、温度計の測定限界の約1,200℃まで上昇し、さらに、それ以上の温度に上昇していることが推測された。また、それぞれの作業の後に、内壁を観察してみると、表面が薄くガラス質化していることが確認され、上釜乾燥後はその

(4) 成果と展望

今回の操業で長瀬 15 号炉の実態に迫ったとは到底言えない。ただ、一番の成果は、前回のまほろん 3 号炉の操業で目指したが達成できなかった、生成鉄の炉外への流し出し（出銑）が実現できたことであろう。しかし、炉底の不備により、その量は少量であり、操業自体も不安定なものであった。次回以降の操業では、今回の課題を検討すると共に、安定操業を目指すためにも製鉄技術者の再度の協力を得ることが必要不可欠と考える。また、操業中の炉内状況を把握し解析するためにも温度計測の専門家や科学分析の専門家の協力も必要であろう。

おわりに

平成 22 年 9 月 10 日に藤本強前館長が滞在先のドイツのローテンブルグで急逝された。毎回好評を博していた館長講演会や当館イベントにおけるお姿が忘れられない。イベント「古代の鉄づくり」では、埃や炭にまみれながら奮闘する職員を励ますばかりでなく、来館者と一緒にふいごを踏んでいる姿を何度も目にしました。今回報告したまほろん 4 号炉の操業の際には、操業中の製鉄炉を眼前にして、「へえー、今回の炉はずいぶん小さいねえ。」と、前回・前々回のまほろん 2・3 号炉に比べて規模が小さい 4 号炉の第一印象を語られたことを覚えています。操業中に炉内に生成されたノロ（鉄滓）を炉外に流出させることができず、少々気分が落ち込んでいた筆者であったが、イベント 2 日目に炉を解体し、炉底塊の取り出しを行った際、どれ程の鉄がその中に入っているのか知れない炉底塊を前にして、拍手と慰労の言葉を頂いた時には、筆者はじめ担当職員の疲れが癒されました。謹んでご冥福をお祈り申し上げます。



まほろん 2 号炉でふいごを踏む藤本前館長
(平成 17 年 11 月 5 日)

まほろん 4 号炉の閉会式にて
(平成 21 年 11 月 8 日)

最後になりますが、この度のまほろん 4 号炉の操業及び本報告に当たり、以下の方々と機関より多大なるご指導・ご協力をいただきました。記して感謝申し上げます。

穴沢義功 有賀一久 上椋武 門脇秀典 木原明 笹澤泰史 笹田朋孝 三瓶秀文 新海正博 杉原和樹
鈴木瑞穂 中西裕也 藤井勲 藤安正博 星秀夫 真鍋成史 村上恭通 安田稔 吉澤治 吉田秀享
吉田利江 財団法人鉄の歴史村地域振興事業団 株式会社九州テクノリサーチ

<註>

(註1) 風量 1.7 ~ 3.5 m³/min、風圧 1.3 ~ 5.5kpa

(註2) 中国地方のたたらでは、下釜(元釜)に穿った送風孔を羽口と呼称しており、福島県内における古代の製鉄炉やまほろん4号炉に設置された土製の羽口とは異なる。この羽口は先細りの孔で、縦に長い楕円形を呈している。炉外面側ではその底面に鉄木呂が置かれ、操業中はその上部の隙間を粘土あるいは栓で塞いでいる。そして、操業中に炉内の状況を見る際にはその粘土や栓を外し、あるいは外したままで操業することもある。

<参考文献>

- 安田 稔 1992 「第4編長湊遺跡 第3章第1節 15号製鉄炉」『原町火力発電所関連遺跡発掘調査報告書Ⅲ』福島県教育委員会
- 国井秀紀 1995 「第2編大船迫A遺跡 第4章第1節 15号製鉄炉」『原町火力発電所関連遺跡発掘調査報告書Ⅴ』福島県教育委員会
- 吉田秀享 2005 「まほろんイベント「鉄づくり」報告」『福島県文化財センター白河館研究紀要2004』財団法人福島県文化振興事業団
- 村上恭通 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』愛媛大学法文学部
- 俵 國一 2007 『復刻解説版 古来の砂鉄製錬法—たたら吹製鉄法—』慶友社
- 吉田秀享 2007 「まほろん2号炉による製鉄操業—平成17年度「鉄づくり」イベント報告—」『福島県文化財センター白河館研究紀要2006』財団法人福島県文化振興事業団
- 能登谷宣康 2009 「まほろん3号炉による製鉄操業—平成19年度「古代の鉄づくり」イベント報告—」『福島県文化財センター白河館研究紀要2008』財団法人福島県文化振興事業団
- 永田和宏 2009 「たたら製鉄の送風管と羽口の形状および炉内の空気の流れ」『第12回公開研究発表会(2009年度夏季)論文集』社団法人日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会「鉄の歴史—その技術と文化—」フォーラム