

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—

吉田 秀亨

1 はじめに

まほろん（福島県文化財センター白河館の愛称、以下まほろんと称す。）の事業の一つに、研究復元事業がある。この事業は、遺跡で確認できた遺構や、出土した遺物を対象とし、その素材や製作技術を可能な限り検討して、今に甦らせるというものである。これまでに、横穴墓から出土した種々の副葬品（馬具・刀剣・容器類等）や、古墳出土の青銅鏡などを復元製作し、まほろん内で、出土資料と復元品の並列展示を行っている。

平成14年度からは、「古代の鉄」をメインテーマに掲げ、製鉄遺跡出土の鋳型からの鋳鉄製品の復元や、調査された製鉄炉をモデルにした製鉄操業などを行い、その成果は、本年度まほろん開館五周年記念特別展「クロガネの鋳物」で、展示に供している（注1）。

今回報告する「鉄づくり」イベントも、第1回目が平成15年11月1・2日に行われ（まほろん1号炉）、その報告は既に発表されている（以下、先の報告と略す。注2）。2回目は平成17年11月5・6日に開催された（まほろん2号炉）。本論は、このまほろん2号炉の操業報告である。

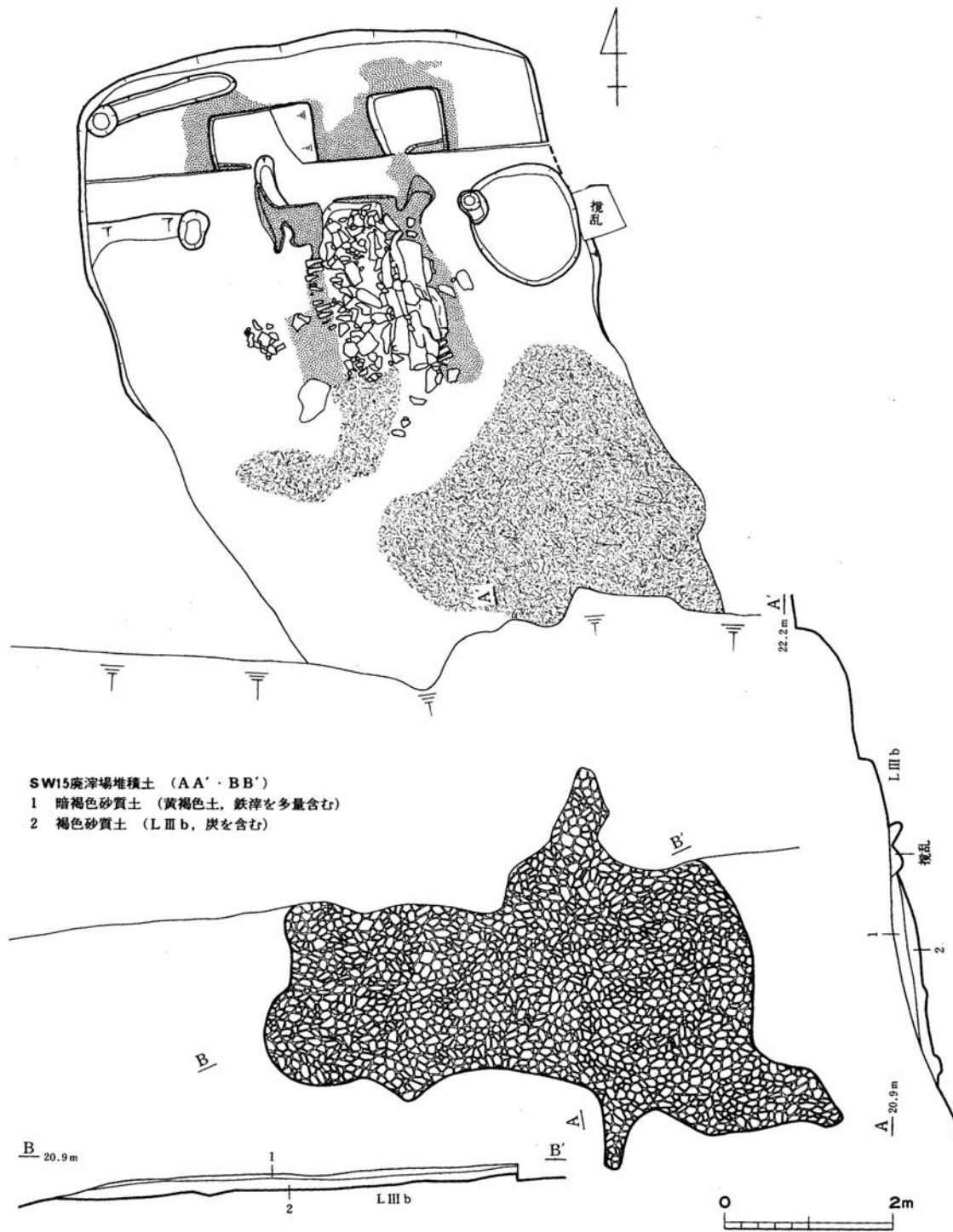
2 復元した製鉄炉の特徴と復元炉との相違

今回、復元の対象とした製鉄炉は、前回同様、南相馬市原町区にある大船迫A遺跡15号製鉄炉である（写真1、図1・2）。先の報告において、復元炉の候補とした事由は既述したが、再度概略を述べると、15号製鉄炉は以下のような特徴を持った箱形炉である。

・この炉は箱形炉で、平安時代9世紀前半に機能し、廃絶されたものである。



写真1 15号製鉄炉



15号製鉄炉出土鉄滓等重量一覧

単位(kg)

(国井1995より転載加筆)

出土位置	炉底	炉壁	炉内滓	流出滓	備考
A面炉内	8.6	—	5.0	2.4	2回目の操作に伴うもの。炉壁は計量していない。
作業場 Q1	7.0	14.9	7.6	221.7	流れ込みのため、本炉の操作には直接関連しない。
作業場 Q2	0.0	1.8	0.0	0.3	2回目の操作に伴うもの。
作業場 Q11	0.0	2.9	8.9	6.5	2回目の操作の基礎構造部内から出土したもの。
廃滓場 Q1	22.1	23.0	24.9	585.5	1回目の操作に伴うもの。
廃滓場 Q2	3.0	4.3	7.8	35.0	1回目の操作に伴うもの。

本表は、報告書から抜粋したものである。ただ、報告書中作業場Q3出土およびQ16出土は、作業場内堆積土中に該当する層がないため、除いている。更に、廃滓場Q2には、報告書中でQ3出土と示された量を合算している。

図1 15号製鉄炉(1)

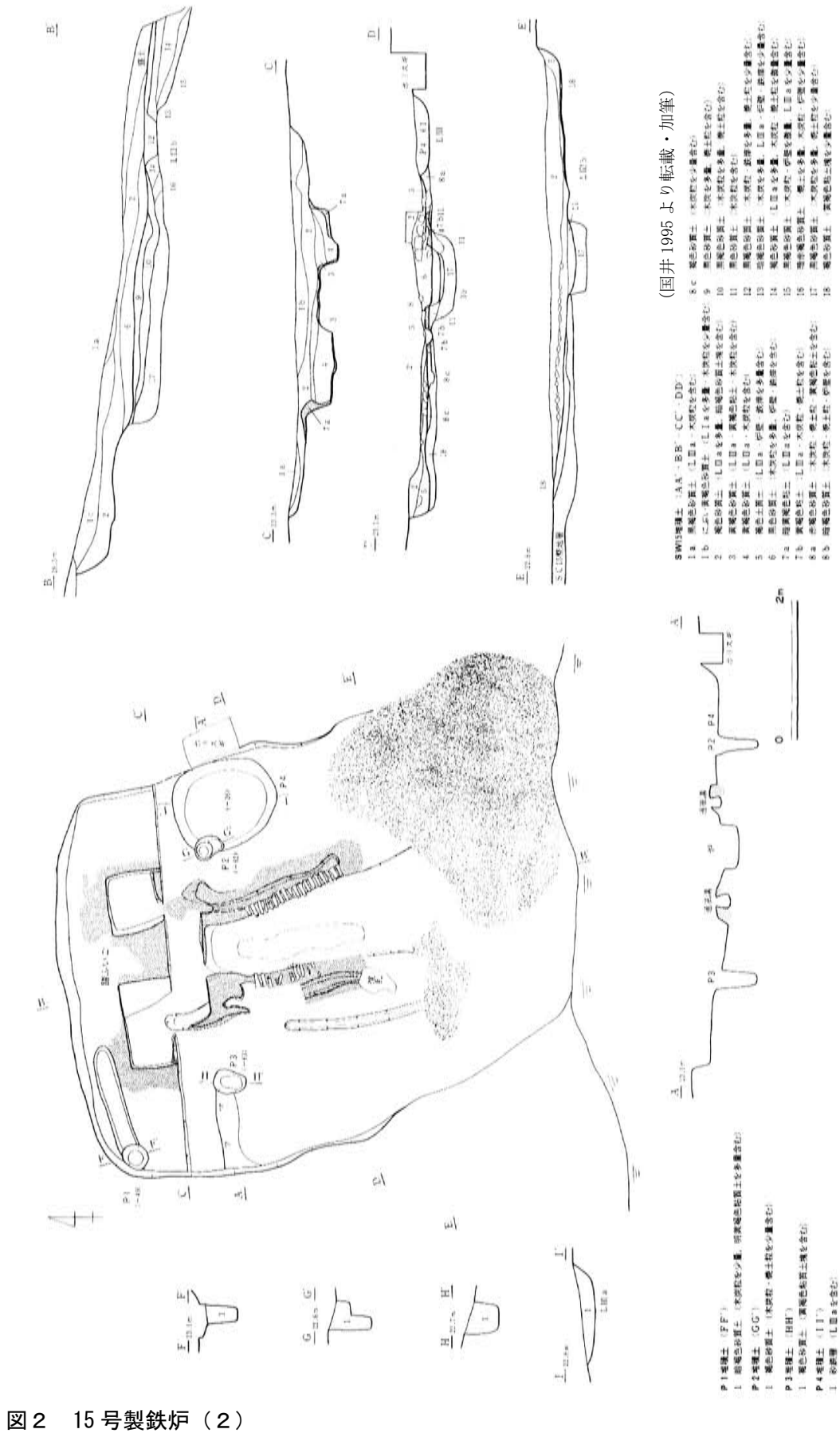


図2 15号製鉄炉 (2)

- ・送風装置は、踏みふいごであり、ふいごの長軸に直交するように炉が配置されている。ふいご掘形より推定した踏みふいごの規模は、幅60cm、長さ270cmである。
- ・調査の結果、本炉では、最低でも2回の操業が行われたことが推測できる（図1内の出土鉄滓等重量一覧表参照）。
- ・2回目の操業において、炉の東側壁が倒壊し、炉壁が操業停止時のままの状態を確認された（写真1参照）。
- ・このため、倒壊した炉壁から、炉底から炉頂までの高さが推定でき、さらに炉の規模が推定できる。推定した炉の規模は、外寸で、幅60cm、長さ210cm、高さ110cmである。
- ・基礎構造の規模は、報告書掲載図面から幅120×長さ360×深さ40cmとした。
以上のようなことから、製鉄炉を復元して操業をおこなったが、次の点で、明らかに当時のものとは異なる燃料・原料、材料を使用している。
- ・使用する木炭の樹種…当時はコナラ・クヌギ炭が多用されているが、復元炉では、マツ炭を使用した。
- ・使用する砂鉄の種類…当時はおそらく浜砂鉄を原料にしたと思われるが、復元炉では白河市大信の隈戸川採取の川砂鉄を原料とした。このため、砂鉄の粒度・形状・成分比などが大きく異なる。
- ・使用する粘土の問題…当時の炉壁を構成する粘土の吟味が全くできていないため（注3）、復元炉では山砂と製鉄遺跡が立地する箇所から採取した粘土（南相馬市原町区割田製鉄遺跡群採取）をブレンドして使用している。
これらの他、送風管には塩ビのパイプ、送風溝にはコンパネ製の風箱を使用し、踏み板（嶋板）やふいご外枠もコンパネや角材を使用して製作している。

3 復元炉の操業目標と操業に関わる各種施設の規模

今回復元した炉の実測図は図3に示した。復元に際しての根拠は先の報告で述べているため、まほろん1号炉と2号炉の目標とした操業の質の差や、先の報告では詳細に提示できなかったふいごの踏み板や風箱の規模について説明する。

1) まほろん1号炉と2号炉の操業目標について

まほろん1号炉の規模は、外寸で幅60cm、長さ110cm、高さ120cmであり、炉壁厚は、構築時の炉底直上を30cm、羽口付近を24cmとした。このうち、炉の長さのみを、実際の遺構から推定した規模の半分とした。これは、砂鉄から鉄を産出するとはどういうことであるのか、製鉄操業とは、どのようなプロセスが必要であるのかといった、製鉄の基礎知識を担当者が全く認識できていなかったためである。このため、当初から大規模な炉で操業するよりは、その半分の大きさのほうが負担が少ないと判断した次第である。

結果として、132.3kgの砂鉄を投入し、操業時間15時間36分で、34kgの鉄塊が産出され、製鉄操業の一端を垣間見ることとなった。

3 復元炉の操業目標と操業に関わる各種施設の規模

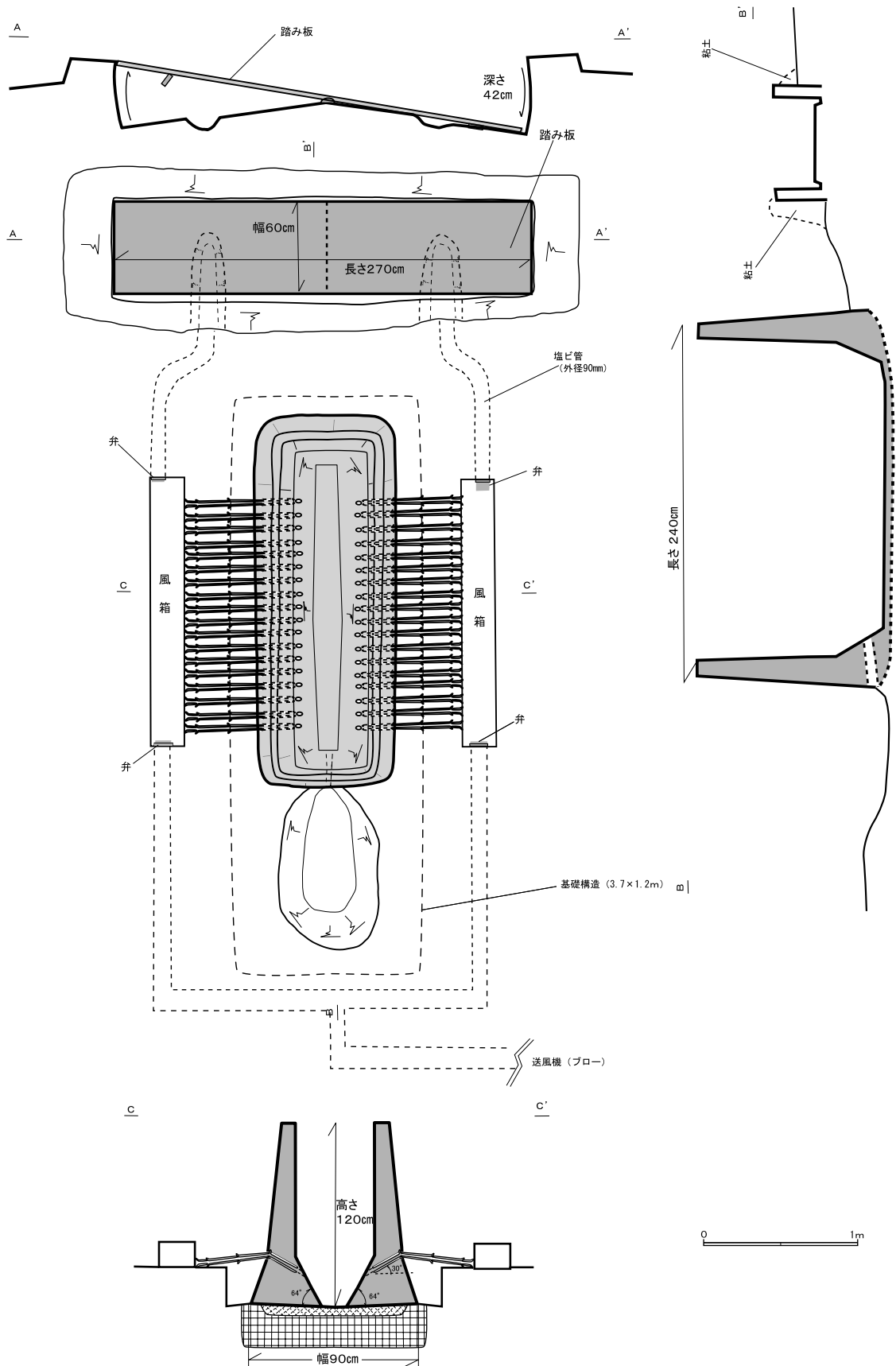


図3 まほろん2号炉

表1 製鉄遺跡出土鉄塊炭素量一覧

今回の2号炉で

試料番号	遺跡名	出土位置	時期	T.Fe (%)	炭素量 (%)	推定される鉄	報告書名
FBI970021	鳥打沢A	15・16号炉(箱形炉;両側廃滓)廃滓場1層	8c代	97.0	3.180	鉄鉄	原町IX
FBI970014	鳥打沢A	15・16号炉(箱形炉)廃滓場1層	8c代	83.4	0.220	鋼(低炭素鋼)	原町IX
FBI920006	鳥打沢A	12号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c前半	72.1	1.990	鋼(高炭素鋼)	原町IV
FBI960002	山田A	1号炉(箱形炉)廃滓場8層	9c前半	72.0	0.130	鋼(低炭素鋼)	相馬V
FBI960004	山田A	2号鑄造遺構P2底面	9c前半	70.0	5.430	鉄鉄	相馬V
FBI960010	山田A	2号鑄造遺構廃滓場2層	9c前半	84.0	4.330	鉄鉄	相馬V
FBI960007	山田A	3号炉(竪型炉)廃滓場11層	9c前半	71.0	0.500	鋼(中炭素鋼)	相馬V
FBI910076	山田A	3号炉(竪型炉)廃滓場1層	9c前半	74.1	2.260	鉄鉄	相馬V
FBI960006	山田A	3号炉(竪型炉)廃滓場1層	9c前半	81.0	2.790	鉄鉄	相馬V
FBI930501	猪倉A	1号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	—	2.780	鉄鉄	相馬IV
FBI930502	猪倉A	1号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	—	2.900	鉄鉄	相馬IV
FBI930503	猪倉A	1号炉(箱形炉)廃滓場3層	9c後半	—	2.580	鉄鉄	相馬IV
FBI930504	猪倉A	1号炉(箱形炉)廃滓場3層	9c後半	—	3.170	鉄鉄	相馬IV
FBI930509	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場3層	9c後半	—	2.180	鉄鉄	相馬IV
FBI930505	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	—	2.720	鉄鉄	相馬IV
FBI930506	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	—	2.390	鉄鉄	相馬IV
FBI930508	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	—	3.100	鉄鉄	相馬IV
FBI930507	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	—	2.060	鋼(高炭素鋼)~鉄鉄	相馬IV
FBI930510	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場3層	9c後半	—	1.670	鋼(高炭素鋼)	相馬IV
FBI930512	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場4層	9c後半	—	2.990	鉄鉄	相馬IV
FBI930511	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場4層	9c後半	—	1.790	鋼(高炭素鋼)	相馬IV
FBI930513	猪倉A	2号炉(箱形炉)廃滓場5層	9c後半	—	2.820	鉄鉄	相馬IV
FBI920033	猪倉B	1号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	96.2	2.990	鉄鉄	相馬IV
FBI920029	猪倉B	1号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	99.0	0.086	鋼(低炭素鋼)	相馬IV
FBI920030	猪倉B	1号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	97.0	2.330	鉄鉄	相馬IV
FBI920032	猪倉B	1号炉(箱形炉)廃滓場2層	9c後半	94.7	4.510	鉄鉄	相馬IV
FBI951005	大迫	1号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	—	1.240	鋼(高炭素鋼)	原町VII
FBI930043	大船迫A	2号炉(炉形不明;箱形炉?)廃滓場1層	9c前半	96.8	2.540	鉄鉄	原町V
FBI970007	大迫	7号炉(箱形炉)廃滓場1層	9c後半	78.6	1.410	鋼(高炭素鋼)	原町IX
FBI960002	大迫	2号炉(箱形炉?)廃滓場2層	10c代	—	0.700	鋼(高炭素鋼)	原町VIII
相馬IV; 1996	『相馬開発関連遺跡発掘調査報告』IV			福島県文化財調査報告書第326集			
相馬V; 1997	『相馬開発関連遺跡発掘調査報告』V			福島県文化財調査報告書第333集			
原町IV; 1994	『原町火力発電所関連遺跡調査報告』IV			福島県文化財調査報告書第297集			
原町V; 1995	『原町火力発電所関連遺跡調査報告』V			福島県文化財調査報告書第310集			
原町VII; 1997	『原町火力発電所関連遺跡調査報告』VII			福島県文化財調査報告書第336集			
原町VIII; 1998	『原町火力発電所関連遺跡調査報告』VIII			福島県文化財調査報告書第343集			
原町IX; 1998	『原町火力発電所関連遺跡調査報告』IX			福島県文化財調査報告書第344集			
各報告書内の分析値より抜粋							

は、当初より、遺跡から推定した製鉄炉の原寸大操業を目標にし、さらに、生成物の“質”を吟味することとなった。製鉄炉の規模は、推定した長さ210cm、幅60cm、高さ110cmとしたが、後述するように、実際に炉を構築した結果、長さ240cm、幅90cm、高さ120cm(炉中央部付近での規模)となった。

1号炉で生成された鉄塊は、炭素量0.2~0.3%の低炭素鋼であった。

炭素量から解るように、非常に軟らかい鉄であり、平安時代においては、次の作業工程原料としては不適切なものである(注4)。遺跡より出土した鉄塊の炭素量一覧を表1に示したが、これを見ても古代においては炭素量の高い鑄鉄を主に生成していたことが考えられる。

2号炉の操業においては原寸大炉の操業の他、いわゆるズク押し操業を目指し、藤安将平刀匠の鍛刀場での7回の予備実験と、まほろんでのプレ操業を1回行った。その結果、後述するように炭素量の高いズクは産出できなかった。このため、イベント本番の2号炉の操業では、原寸大の炉で鉄塊ねらいの目標(いわゆるケラ押し操業)に変更した。

ただ、1号炉と全く異なる原材料を使用する場合は、前回の結果との比較ができないため、前回同様の原材料とし、羽口の角度も30°とやや浅くなる程度の変更とした。

2) 踏みふいごと風箱

踏みふいごは、図4に示した調査事例から、長さ270cm、幅60cm、深さ42cmのふいご掘形に設置されたものと推測した。これの設計図が図5であるが、この送風装置は1号炉操業時に

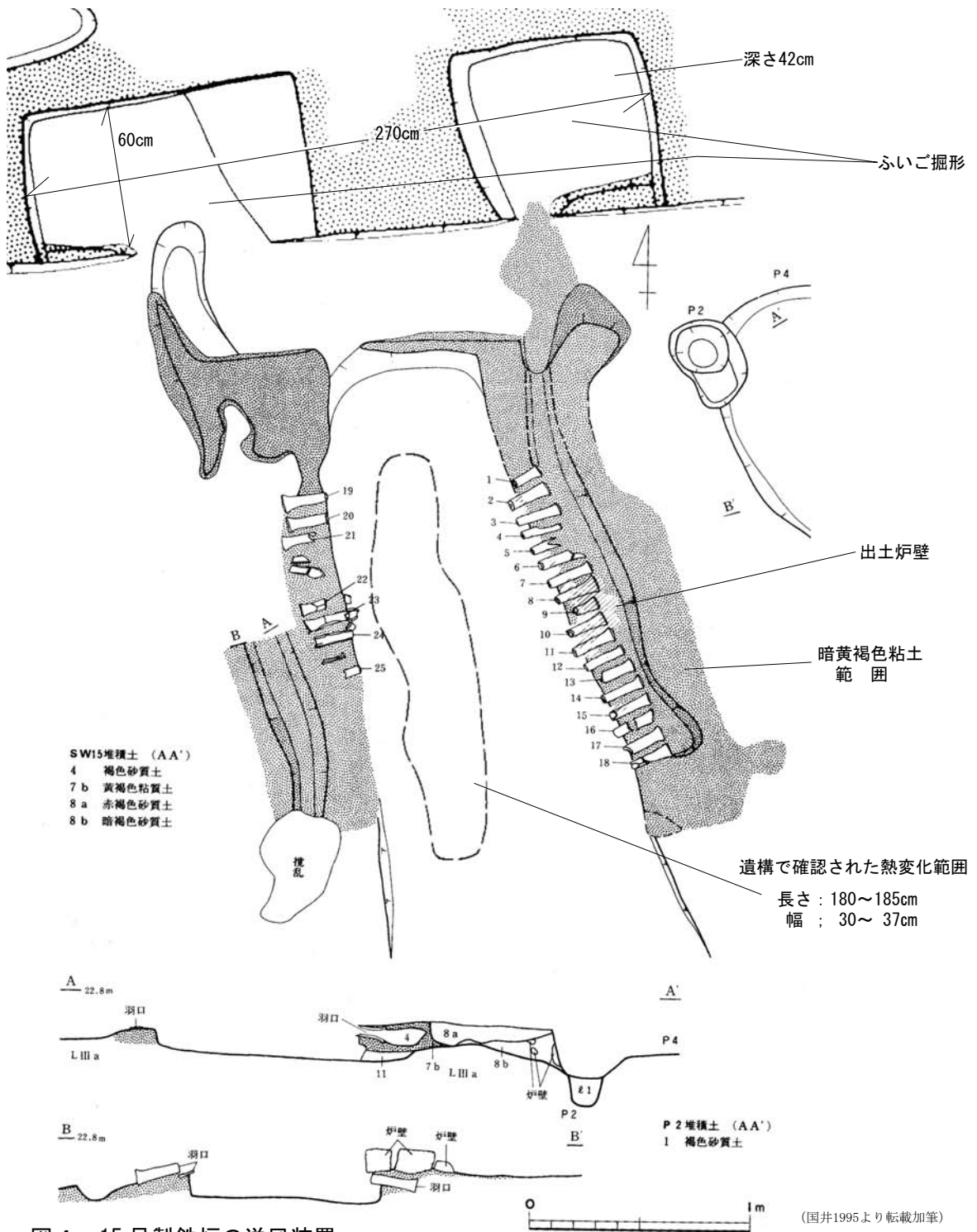


図4 15号製鉄炉の送風装置

製作したものであり、2号炉においても同様のものを使用している。

踏み板の大きさは長さ268cm、幅60cmとした。長さを2cm短くしたのは、風の漏れを少なくするため、短辺両側に貼ったジュウタンマットの厚み分を見込んだためである。このように、踏み板の大きさはおよそ推定できるものの、板の厚さや、空気取り入れ弁の位置とその大きさ、弁の形状などは全く推測できなかった。このため、図6の坪井氏が示した鋳物用踏み板を参考にした。この踏み板の長さが300cmであったため、90%縮小して270cmとした上で、空気

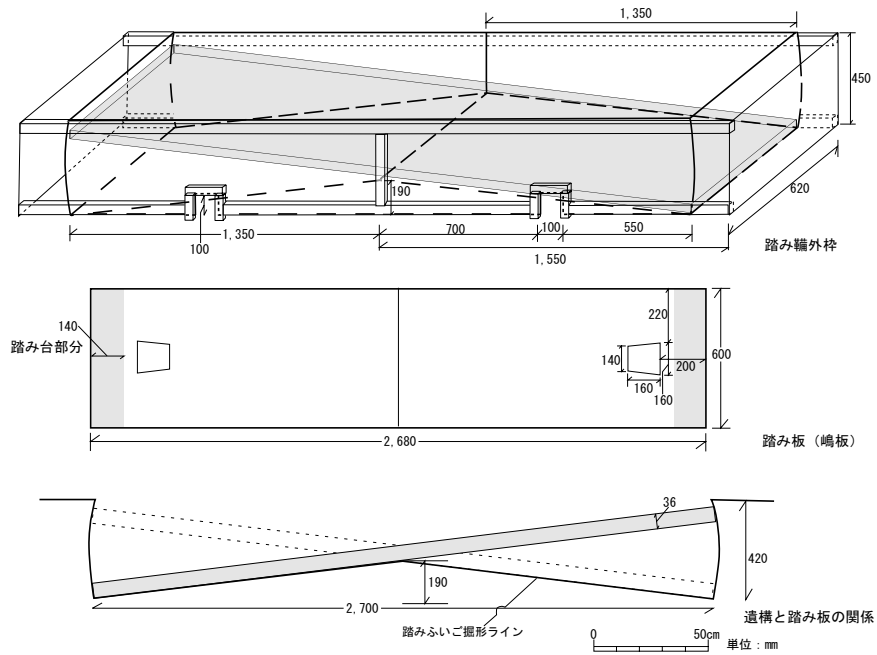
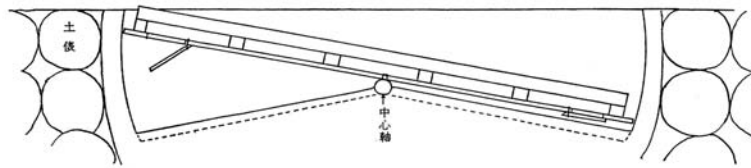
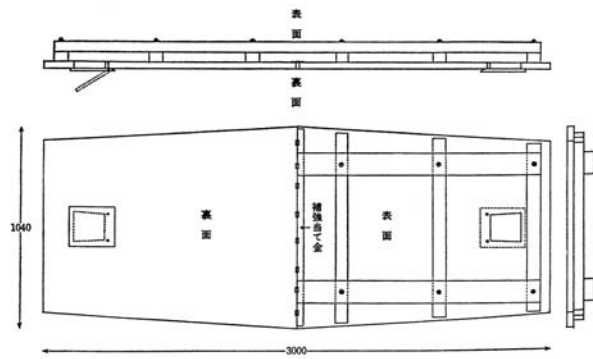


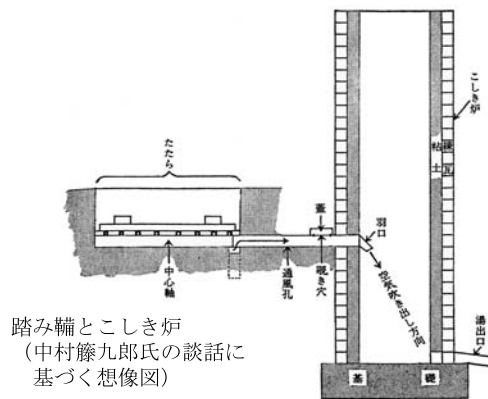
図5 まほろん2号炉の踏みふいご設計図



踏躰 (中村藤九郎氏の談話に基づく想像図)



踏躰の踏み板 (京都市, 高橋鑄工場蔵)



踏み躰とこしき炉
(中村藤九郎氏の談話に基づく想像図)

(坪井 1970『日本の梵鐘』より転載加筆)

図6 参考にした踏み躰

取り入れ弁の位置や形状もこれに合わせて。

後述するように、この参考にした取り入れ弁の位置が、実は操業に大きな支障を来すことになるとは、2号炉操業前は予想だにできなかった。ましてや、まほろん1号炉の操業では、大きな支障もなく順調に稼働していたのであったからなおさらの感があった。

この他、送風孔の位置は調査事例と同様にし、ふいご掘形底面には、これの延長部に溝状のくぼみを造った。

風箱の設計図は図7に示した。遺跡から出た炉では、幅20 cm前後、長さ260 cm（図4の東側送風溝での計測値。ふいご掘形南側の粘土北端から送風溝南端まで）の送風溝から直接木呂羽口に

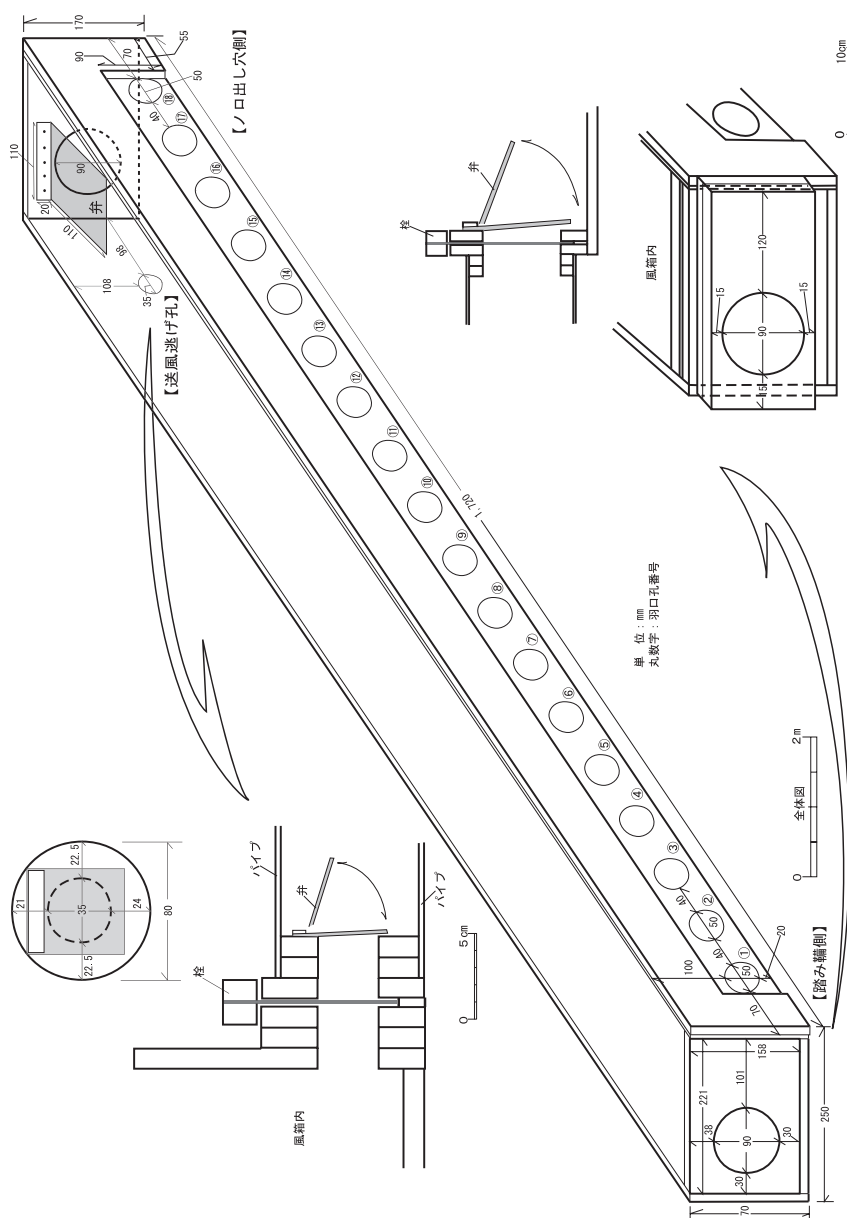


図7 まほろん2号炉の風箱設計図

連結しているが、今回も風箱（幅25 cm、長さ172 cm、高さ170 cm）を片側に1個ずつ設置し、この風箱から木呂羽口を連結した。木呂羽口の数は確認できた製鉄炉同様の片側18個とし、羽口間の距離も出土例の7～9 cmに則り（隣り合う羽口と羽口の中心距離）、木呂羽口設置孔の口径を5 cm、孔間は4 cmとした。

この他、送風溝あるいは送風孔のいずれかの位置に、空気の逆入を防ぐ“弁”が取り付けられていたと推定されるが、調査では確認できなかったため、今回も風箱内に設置した。

さらに、1号炉の操業においてたびたび風箱から風漏れが生じたため、風量を制御するための逃げ孔を設置した。ただ、実際の操業ではこの逃げ孔を使用することはなかった。

ふいご底面から延びる塩ビ管で製作した送風溝は、くの字に屈曲し、実際の溝位置より西側で西に50 cm、東側で東に20 cm離れている。これは、土中に埋めた塩ビ管や風箱が、炉の強制

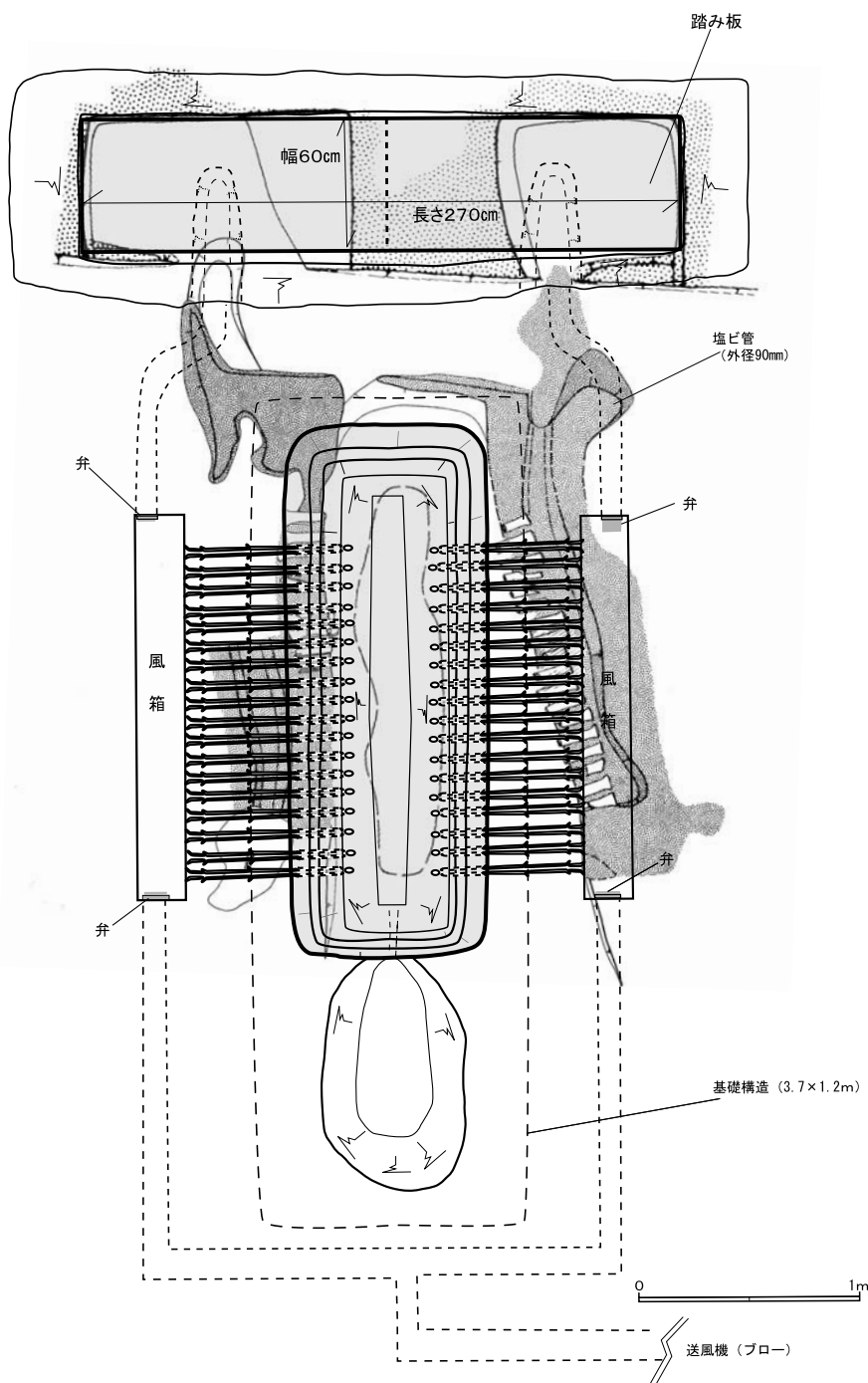


図8 まほろん2号炉と15号製鉄炉

乾燥時の燃焼熱等により変形・焼損することを防ぐためである。ただ、プレ操作時では風箱の蓋の一部が燃失し、イベント時では風箱内に設定した送風量測定器具が、熱により変形してしまった。遺跡から出た製鉄炉と、復元した製鉄炉の位置関係については、図8に示した。

4 操作について

1) 「鉄づくり」イベントまでの準備作業およびプレ操作

鉄づくりに向けての準備作業の内容は、前回とほぼ同様である。来館者参加型の準備作業として、砂鉄選別と羽口づくりを行った。また、イベント前にプレ操作を行った他、前述したように予備実験を7回行った（予備実験は、いずれも藤安将

平刀匠の鍛刀場にて実施）。これらの準備作業については、写真2～4に示した。

①砂鉄選別（平成17年8月13・14日実施：8/13 79人参加 8/14 49人参加。延べ128人）

選別作業に使用した砂鉄は、白河市大信の隈戸川から採取した川砂鉄である。幅90cm、長さ180cmの板の両脇に1寸5分角の枠木を取り付け、これを3枚連結した簡易なトイを設置した。トイには緩やかな勾配を付け、上方より水道水を流して、砂鉄をもみ洗いするような方法で選別を行った。下流に流れ去った石英や長石の混じった白い砂の一部は、プレ操作時に炉内に最初に投入した（9kgほど）。

②羽口づくり（平成17年9月10・11日実施：9/10 18人参加 9/11 21人参加。延べ39人）

羽口用粘土の質量は、木呂羽口を1本700g、炉壁装着羽口1,000gとした。材料は、平成17年度原町火力発電所関連で調査していた製鉄遺跡の、地山面を薄く削って採取した粘土（以下、原町粘土とする）と、炉壁にも使用した白河市大信の通称“山砂”（以下、大信粘土とする）を使用した。

木呂羽口は原町粘土のみで製作し、装着羽口は大信粘土7：原町粘土3の割合で混合させ、製作した。羽口の芯棒には、いずれも直径30mm、長さ27cmの丸材を使用し、これに粘土を巻



写真2 砂鉄の選別作業

き付け、長さ21cmほど、内径30mmの羽口としたが、乾燥後に電気炉で焼成した結果、長さ19cm、内径27mmと1割弱ほど収縮した。

羽口吸気部先端は製作者各自各自がラッパ状に広げたが、羽口の連結を考えると、図9に示したような形状のものが理想形であった。

③ 炉壁の粘土ブロックづくり

炉の構築に使用する粘土ブロックづくりは、当初幅10×厚さ10×長さ20cmほどの大きさを基準として直方体の粘土ブロックをつくったが、形状がまちまちになることから、最終的には写真4に示した横断面形が梯状を呈した型枠（内寸の上端で幅11×長さ19×深さ7.5cm、



写真3 羽口づくり

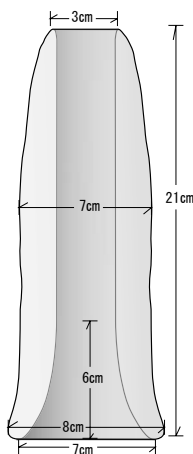


図9 羽口の形 ④木炭の小割作業

燃料として使用する木炭は、岩手県産のマツ炭を購入して使用した。1袋12kg入りで、小割りする前の木炭は、長さ28cm、幅5～12cmの大きさで、幅10cm前後のものが最も多い。これを、1本ずつ重さと木炭から見た原木の割り方状況を調べた結果が図10である。

木炭1本の重さでは、100g～400gが大半を占め、その中でも200gと300gが多い。割りの状況では、1/4割りと1/6割りが多い。また、割りの状況と木炭からの推定直径では、1/2割りでは直径15cm程度のもが多く、1/3割りでは20cm程度のもが半分ほどを占め、1/4・1/6・1/8割りと割り方が細くなるほど太いものとなっている。この結果は、当たり前といえば当たりの結果であり、太いものは割り数を多くし、仕上がり幅を10cm前後に統一しようとした意図が伺えるものである。一般に、原木から木炭になった段階での収縮率は3割程度と考えられているため、直径20cmのものは原木で径25cm程度、30cmならば40cm程度の原木が推定できる(注5)。

燃料に使用した木炭はすべて小割りしたが、小割り後の大きさは、プレ操業では4～5cm前後角と8×5cm前後のもの2種、イベント本番では8×5cm前後の割り炭となった。

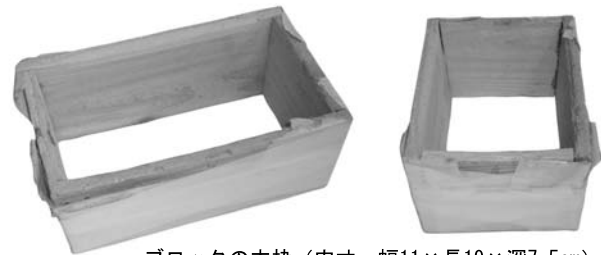
⑤予備実験とプレ操業

「鉄づくり」イベントの予備実験として、藤安刀匠の鍛刀場にある製鉄炉で計7回、まほろんにてプレ操業を1

下端幅10×長さ17cm)を使用して製作した。

この型枠内に、大信粘土7：原町粘土3：スサ0.1の割合で混合して練った粘土を叩き締めながら入れて、その後に取り出して若干成形して1個のブロックを製作した。

1個の炉壁ブロックの大きさは、幅8×長さ20×高さ10cm程度であり、重さは、製作時平均3.18kg、操業後は2.24kgに減少した。1回の炉の構築に使用したブロック数は約920個であるので、構築時の粘土量は3.18×920個=2,925.6kg、1回の操業で約2.9tもの粘土が必要であることが推測できた。



ブロックの木枠(内寸：幅11×長19×深7.5cm)



炉壁ブロックづくりのようす



①木枠に粘土を入れて、叩き締めます。

②できあがった炉壁ブロック

写真4 炉壁ブロックづくり

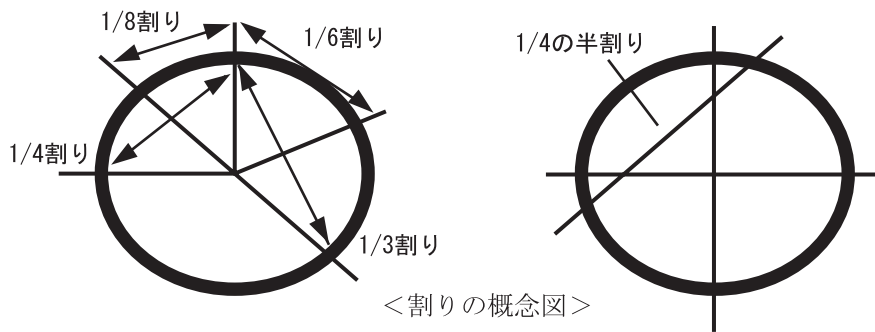
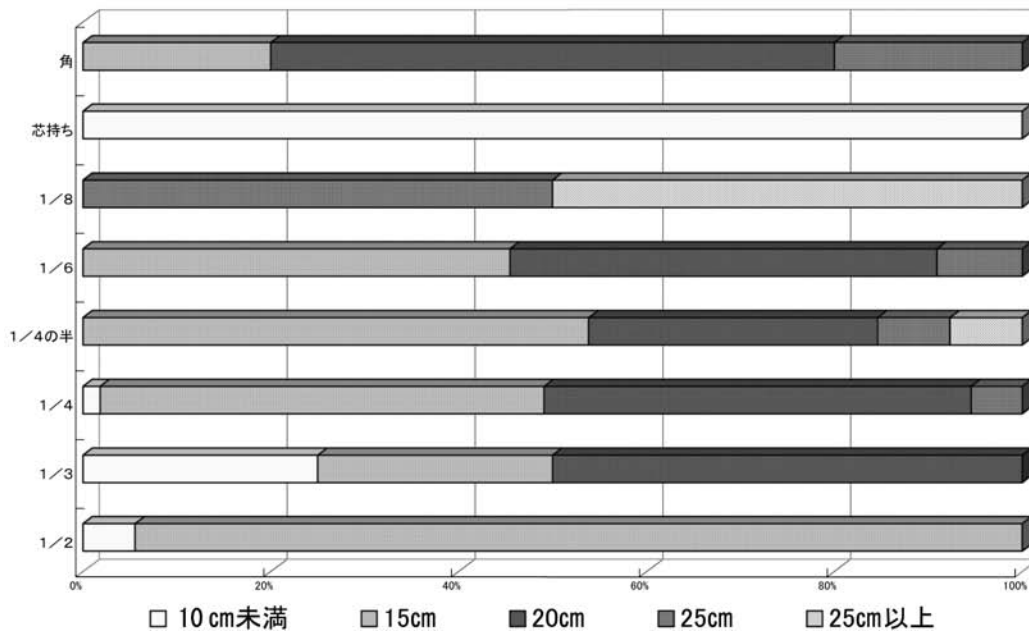
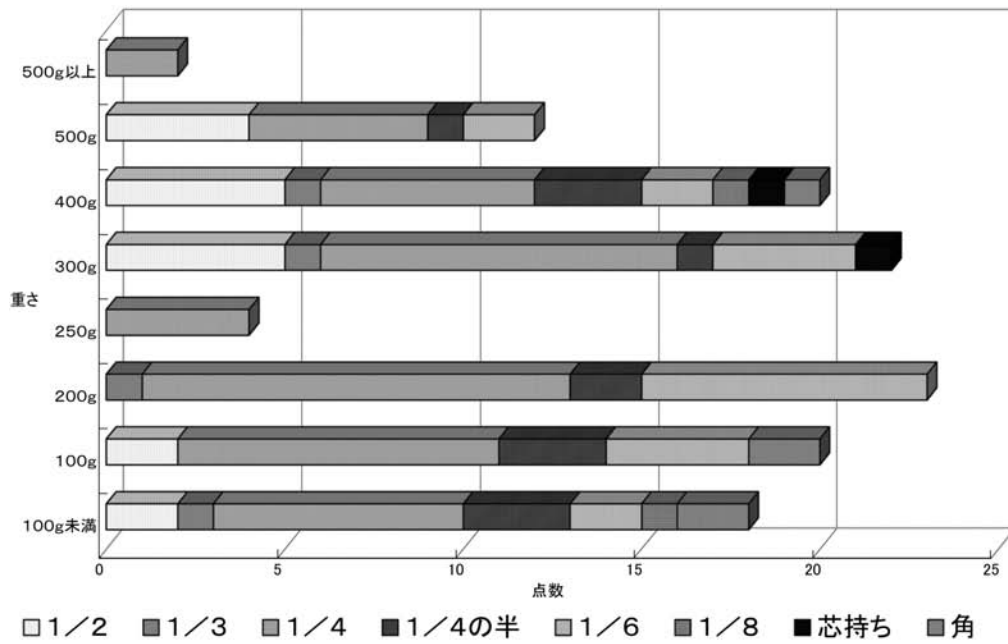


図10 木炭の小割りと重さ及び推定直径

回おこなった。これは、今回の製鉄操業がズクねらいであったため、ズクの産出を目指したためである。

・藤安将平刀匠の鍛刀場での予備実験

詳細な記録を作成していないが、平成17年9月中旬～10月中旬にかけて、藤安刀匠の鍛刀場にある製鉄炉（注6）で計7回の予備実験を実施した（写真14参照）。使用した砂鉄・木炭・羽口の粘土は、すべてまほろん炉の操業と同一ものを使用している。内、5回の内容について概述する。

- 1回目…羽口角度 10° 、砂鉄・木炭投入間隔15分。ズクできず、鉄がまとまらない。
- 2回目…羽口角度 10° 、先端絞る。マツ炭を細かに小割りしたもののみで操業。投入間隔5分。ズクできず、まとまらない。
- 3回目…羽口角度 10° 、先端絞る。マツ炭を細かに小割りしたものと粗いもの、雑木炭を混ぜて操業。投入間隔25分。ズクできず、まとまらない。
- 4回目…羽口角度 10° 、先端絞る。マツ炭を細かに小割りしたものと粗いものを混ぜて操業。炉底幅を広げる。投入間隔20分。ズクできず、まとまらない。
- 5回目…羽口角度 $30\sim 34^{\circ}$ 、先端部内径24mm。マツ炭を細かに小割りしたもののみで操業。投入間隔10分。ケラとなり、ズクできず。

以上が概略であるが、これ以外の2回を加え計7回の実験操業にかかる経費等は、すべて藤安刀匠の自己負担によっている。筆舌に尽くしがたいこの貢献に、衷心より深甚なる感謝の念を申し上げたい。

さて、これらの予備実験からは、送風の羽口角度を急にするとケラが生成され、浅くするとケラすらできないことが予測できた。さらに、木炭を細かに小割りすると、消費時間が極端に短くなり、これを防ぐために粗割り炭や雑木炭を混ぜて燃焼させる必要があることが理解された。これらの結果を受けて、まほろんでのプレ操業に臨んだ。

・プレ操業（平成17年10月8・9日実施）

プレ操業では、ズクをねらって操業を行った（写真5・6参照）。木炭は小割りしたものと粗割りしたものの2種を使用し、最初に細粒砂を2回投入し、その後に砂鉄を投入した。また、砂鉄と木炭の投入方法は、小割木炭→叩き締め→砂鉄投入→粗割り木炭の順番で行った。この方法は、俵氏が紹介した銑押しの操業方法を参考にしている（注7）。

炉の羽口角度は 12° とし、羽口先端部を三角形状に絞り込んだ（底辺15mm、高さ20mm）。この羽口角度は、モデルである15号製鉄炉より出土した炉壁に装着された状態で確認できた2個の羽口と同一である（報文142図9）。8時間ほどの操業の結果については、投入量や経過を表2に示したが、操業当初に炉がへたったり、風箱や木呂羽口のジョイント箇所から風が漏れたりして、炉内温度は上がらず、砂鉄から鉄に変化する反応もおきなかった。当然のことながら、ズクは産出できなかった。

ただ、原寸大の製鉄炉操業では、炉内温度が上昇し、それを維持する状態になるまで3時間ほどかかること、原料・燃料の必要量がある程度把握できた。さらに、踏みふいごの構造的欠



写真5 プレ操業炉構築



写真6 プレ操業のようす(1)

陥(すなわち、炉内のノロ出し側の送風力が強く、ふいご側が弱い。)が理解でき、平安時代当時、炉内の木炭消費状態が不揃いにならないような何らかの工夫があった可能性が推測された。

炉を解体したところ、写真7に示したように、羽口から2～3 cm直下(炉底から8 cmほどの高さ)のところに、幅22 cm、長さ167 cm、厚さ4 cmほどの四角形で棚状のものが形成されていた。

この棚状のものは、主に鉄滓層で形成され、上面付近には、僅かに仁丹状の鉄塊が混じっている。プレ操業時の炉の形状は短辺側が弧を描く楕円形であったため、形成された四角状の棚の両端部の間は、これが認められないスペースとなっていた。このことから、製鉄炉の平面形を楕円形にするよりも四角形の方が効率がよいと判断し、イベント本番での炉の形状を四角形にした。

2)「鉄づくり」イベント(平成17年11月5・6日実施:11/5 270人参加 11/6 145人参加。延べ415人)

上記のような予備実験やプレ操業を経て、イベント本番を迎えた。イベントでは、羽口角度を 30° とし、炉の形状を楕円形から台形に近い四角形にした。ズクねらいの操業は断念し、遺跡出土の原寸大製鉄炉での製鉄操業に目標を変更した。操業時間11時間39分で、49kgの鉄を産出した。砂鉄や木炭の投入量や操業状態については、表3・4及び図11に示したが、

表2 プレ操業の木炭砂鉄投入量一覧

【砂鉄：白河市大信採取】					【木炭：松炭】					1回の投入量	木炭合計	操業の状態・備考		
回数	投入時間	経過時間	量(kg)	累計	回数	投入時間	経過時間	粗割炭量(kg)	累計				小割炭量(kg)	累計
					1	10:08		6.8	6.8	0.0	0.0	6.8	6.8	
					2	10:24	0:16	8.8	15.6	0.0	0.0	8.8	15.6	炉西側上釜へたりはじめる。
					3	10:41	0:33	8.8	24.4	0.0	0.0	8.8	24.4	
					4	10:54	0:46	11.0	35.4	0.0	0.0	11.0	35.4	
					5	11:10	1:02	13.2	48.6	0.0	0.0	13.2	48.6	11:05炉東側上釜ひび割れ
					6	11:37	1:29	13.2	61.8	0.0	0.0	13.2	61.8	
					7	11:50	1:42	15.4	77.2	0.0	0.0	15.4	77.2	11:59炉西側ひび割れ
					8	12:03	1:55	15.4	92.6	0.0	0.0	15.4	92.6	
					9	12:15	2:07	17.6	110.2	0.0	0.0	17.6	110.2	12:10炉押さえ用鉄パイプ設置。
					10	12:34	2:26	22.0	132.2	0.0	0.0	22.0	132.2	
					11	12:55	2:47	19.8	152.0	0.0	0.0	19.8	152.0	炉満タン。13:10炉東側ひび割れ。
					12	13:34	3:26	13.2	165.2	0.0	0.0	13.2	165.2	炭叩き締め開始。以後、木炭投入後同操作行う。
					13	14:12	4:04	11.0	176.2	0.0	0.0	11.0	176.2	
					14	14:40	4:32	6.6	182.8	0.0	0.0	6.6	182.8	ブロウ止め・踏みふいご開始：踏み数 1m/5回前後
					15	15:02	4:54	13.2	196.0	0.0	0.0	13.2	196.0	
1	15:29	5:21	4.5		16	15:28	5:20	4.4	200.4	6.6	6.6	11.0	207.0	洗い砂投入（ホタテ貝碎片5g投入）
2	16:01	5:37	4.5		17	16:01	5:53	6.6	207.0	6.6	13.2	13.2	220.2	洗い砂投入（ホタテ貝碎片5g投入）
3	16:29	5:48	9.0	9.0	18	16:28	6:20	6.6	213.6	4.4	17.6	11.0	231.2	砂鉄投入開始
4	16:59	6:05	9.0	18.0	19	16:57	6:49	6.6	220.2	6.6	24.2	13.2	244.4	炉西側上釜のへたりが直りはじめる。
5	17:26	6:16	9.0	27.0	20	17:26	7:18	4.4	224.6	4.4	28.6	8.8	253.2	18:00より踏みふいごピッチ早める。1m/90回前後
6	18:14	6:37	9.0	36.0	21	18:13	8:05	6.6	231.2	6.6	35.2	13.2	266.4	18:36ノロ出し試みるものの、確認できず。送風停止
計	18:36	8:28	45.0	36.0	計	18:36	8:28	231.2	231.2	35.2	35.2	266.4		

プレ操業結果報告

操業の状況

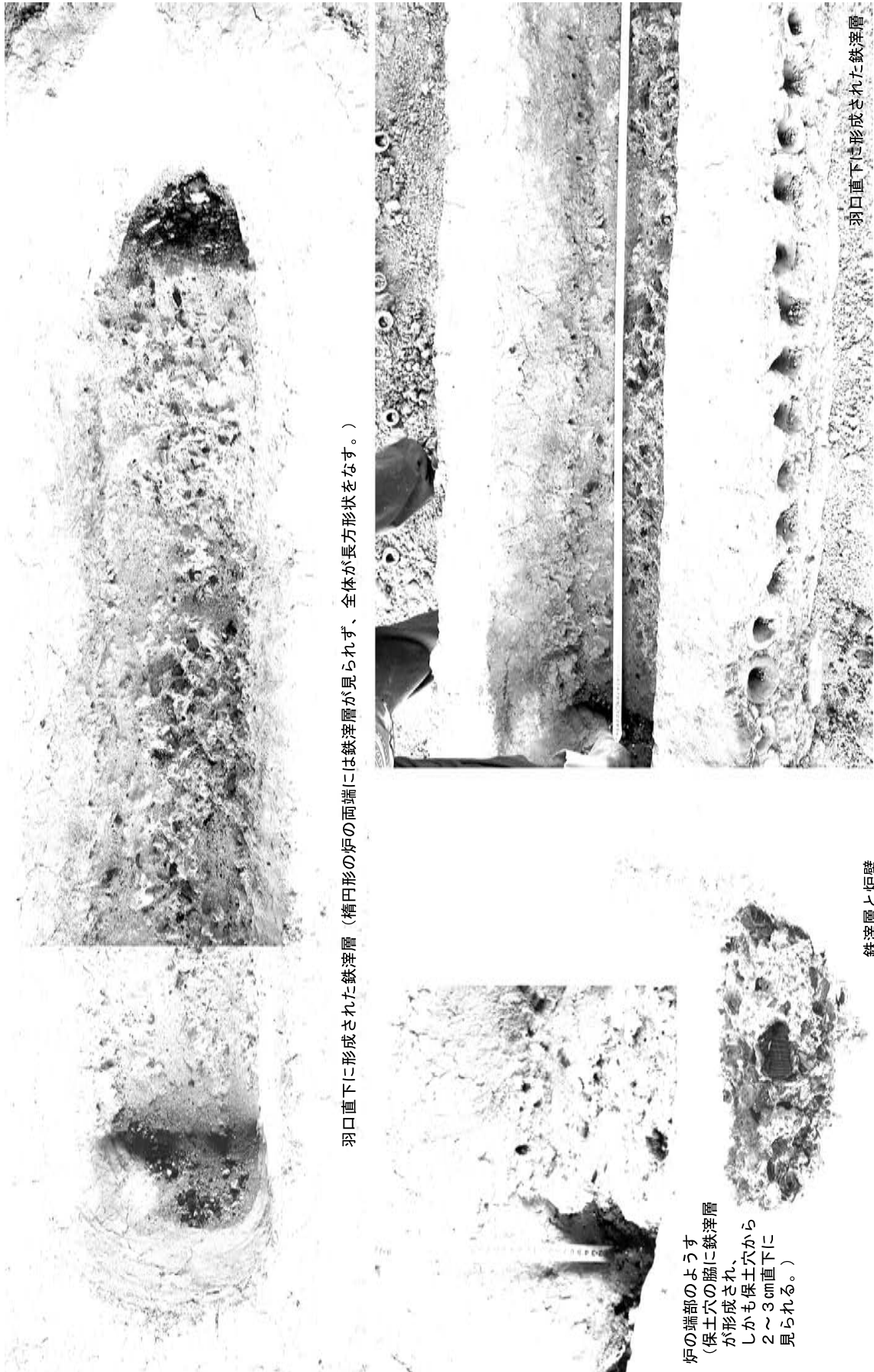
- 9:00 木呂羽口から風漏れ確認。粘土で押さえるものの漏れ止まらず。そのまま操業開始する。
- 9:50ごろ 操業前の趣旨説明。
- 10:08 炉内に木炭投入開始。ブロウにて送風開始。
炉上釜ひび割れ、上釜西側へたる。
- 12:55 炉内木炭で一杯になる。
- 13:34 木炭投入後、叩き締め行う。以後、25分前後の間隔で投入。
- 14:42 ブロウ停止。踏みふいごにて送風開始。1分間51回前後。
- 15:29 洗い砂投入開始。投入方法は、①小割木炭→②叩き締め→③砂投入→④粗割木炭
- 16:29 砂鉄投入。
- 17:26 木炭消費少なくなる。炉内温度上がらず。
- 17:45 ノロ出し側羽口穴広げるものの、炎変わらず。
- 18:00 ふいご踏み数増加し、送風量上げるものの、炎の状態変わらず。
- 18:36 送風停止。

【状況の推測】

- 1 木呂羽口から空気が漏れた。→風箱の蓋が余熱時に燃えてしまっていた。
- 2 炉内の温度が上がらない。→送風量が少なかったこと、羽口先端を絞ったことから、木炭の消費（燃焼）が少なかった。
- 3 砂鉄が反応しない。→炉内温度が上がらなかったため、反応が進まなかった。砂鉄は凝固し、一部が反応したに過ぎなかった。ただ、そのため、炉底には、砂鉄から鉄が形成される初期段階の状態が認められた。

問題点

- 1) 炉の余熱について…余熱にかなりの時間を要することが解った。余熱時間約3時間弱。
- 2) 木炭の投入量について…木炭量が膨大になる。炉が一杯になるまで152kg。1回の投入量：平均13kg。
送風量を増加させ、15分間隔で投入するとすれば、4回×12時間×13kg=624kg。624+152=776kg
- 3) 木呂羽口の設置について…風箱から木呂羽口の設置は、接合部からの風漏れが起きないように、直線状に接続できるようにする必要がある。
- 4) 木炭の消費について…炉内の木炭消費はノロ出し側がはやく、ふいご側が遅い。その結果、炉内の木炭レベルはノロ出し側に向かって下がる斜めのラインを呈するようになる。これは、操業では不利な点であるため、イベント本番ではこれを同一レベルで消費するよう、ノロ出し側の風量を抑える必要があるが、どの程度押さえれば同一消費レベルになるか不明。
- 5) 砂鉄の消費について…砂鉄の量はほぼ木炭の量にひとしい。そのため、木炭1回の投入量と同量が必要になる。砂鉄必要量は約600kgと推定。



羽口直下に形成された鉄滓層（楕円形の炉の両端には鉄滓層が見られず、全体が長方形形状をなす。）

羽口直下に形成された鉄滓層

鉄滓層と炉壁

炉の端部のようす
（保土穴の脇に鉄滓層
が形成され、
しかも保土穴から
2～3cm直下に
見られる。）

写真7 プレ操業のようす（2）

以下、炉の構築と操業について概述する。

①炉の構築（写真8参照）

炉底は、幅90cm、長さ220cmの範囲に、2～3cmほどの厚さで原町粘土を貼り、さらにその上に大信粘土を3～4cmほどの厚さに貼り、十分に叩き締めた後で、強制乾燥させた。炉は中央に基準となる幅18cm（両端は15cm）、長さ185cmの“中板”をしき、これの両脇に炉壁ブロックを積み上げ構築した。

構築当初は、炉底直上の炉壁厚を35cmと設計していたが、プレ操業時に炉がへたったため、炉壁の厚さを増すこととした。炉底直上の炉壁厚は、10cmほど厚くして45cmとした。さらに、風箱から延びる木呂羽口のジョイントをほぼ水平にし、そこから30°の羽口装着角度で炉内に送風し、少しでも接合部から風漏れがないようにした。ただ、この結果、炉壁に装着する羽口の高さが炉底から30cmと高くなり、さらに羽口吸気部側が炉内に食い込み、羽口直上の炉壁を羽口に覆い被さるように厚くして対応することになってしまった（図15参照、後述する）。

出土遺構からの推定では、羽口設置高は炉底から13cmであったので（注8）、やむを得ず、羽口先端部の高さを13cmとした。先端部はプレ操業同様絞り込んだが、幅20mm、長さ40mmの楕円形にした。

完成した炉は、最下端の外寸で長さ260cm、幅110cm、羽口直上の外寸で長さ252cm、幅90cmであり、高さは前回に比べ10cm高い120cmとした。なお、高さを10cm増したのには、少しでもズクができるように願ったから（うまくいけば、ケラ押しでも裏ズクができるため）で、根拠はない。ただ、この規模の炉になると、110cmも120cmも大勢に影響が無いようには感じられた。

②炉の操業（写真9・10参照）

操業は当初順調に推移した。砂鉄と木炭の投入方法は、最初に木炭を投入し、次に砂鉄を投入し、さらにその上から木炭を投入するという順番で行った。状況が変わったのは、投入する砂鉄量を増やしてからである。砂鉄が反応する際の吸熱反応を軽んじてしまい、炉内温度が一挙に低下した。このため、踏みふいごの回数を増加させ、炉内温度の上昇につとめたが、この踏み数の増加が、踏み板の弁の損傷につながった。

さらに、この規模での操業は初めてであったため、操業経過を推測できなかった。表4の操業状況に記してあるが、送風開始から2時間ほど経ってはじめて1,200℃の温度に達している。

これが、1号炉の場合、送風開始から30分で1,400℃に達し、操業から2時間ほど経った時点では鉄の反応が起き、3時間後には最高潮になり、ノロが炉外に流れ出していた。この状況に比べると、明らかに今回は反応が遅く、炉内温度の上昇が緩やかであった。イベントに参加していただいた多くの方の必死なふいご踏みのお陰で、ようやく炉内温度が1,300℃に回復したのは、操業から8時間を過ぎたあたりであった。温度低下から2時間が過ぎていた。

その後、ふいご踏みのピッチがさらに上がり、1分間に90回を超えたあたりから、踏み板の弁が破損し、それに伴い炉内温度が若干降下した。

このため、さらにピッチを上げ、ついに1分間110回の回数となった。実に1秒間に2回と

表3 まほろん2号炉の木炭砂鉄投入量一覧

【砂鉄：白河市大信採取】							【木炭：マツ】					
回数	投入時間	量(kg)	累計(kg)	ノロ出し時間	経過時間	ノロの量(kg)	回数	投入時間	経過時間	量(kg)	累計(kg)	
							1	11:48		2.2	2.2	
							2	11:50	0時間02分	4.4	6.6	
							3	11:59	0時間11分	6.6	13.2	
							4	12:05	0時間17分	17.6	30.8	
							5	12:15	0時間27分	30.8	61.6	
							6	12:25	0時間37分	39.6	101.2	
							7	12:40	0時間52分	33.0	134.2	
							8	12:50	1時間02分	39.6	173.8	
							9	13:04	1時間16分	50.6	224.4	炉満タン
							10	13:40	1時間52分	15.4	239.8	15.4
							11	13:59	2時間11分	17.6	257.4	33.0
1	14:17	6.5	6.5				12	14:16	2時間28分	15.4	272.8	48.4
2	14:35	6.0	12.5				13	14:18	2時間30分	11.0	283.8	59.4
							14	14:35	2時間47分	8.8	292.6	68.2
							15	14:37	2時間49分	8.8	301.4	77.0
3	14:57	6.0	18.5				16	14:55	3時間07分	11.0	312.4	88.0
							17	14:58	3時間10分	8.8	321.2	96.8
4	15:22	12.0	30.5				18	15:20	3時間32分	11.0	332.2	107.8
							19	15:23	3時間35分	8.8	341.0	116.6
5	15:52	12.0	42.5				20	15:52	4時間04分	15.4	356.4	132.0
							21	15:54	4時間06分	8.8	365.2	140.8
6	16:21	15.0	57.5				22	16:20	4時間32分	11.0	376.2	151.8
							23	16:22	4時間34分	6.6	382.8	158.4
7	16:47	15.0	72.5	16:31	4時間43分	0.60	24	16:46	4時間58分	8.8	391.6	167.2
							25	16:48	5時間00分	8.8	400.4	176.0
8	17:15	15.0	87.5				26	17:14	5時間26分	11.0	411.4	187.0
							27	17:16	5時間28分	6.6	418.0	193.6
9	17:39	15.0	102.5				28	17:39	5時間51分	11.0	429.0	204.6
							29	17:40	5時間52分	6.6	435.6	211.2
10	18:02	15.0	117.5	18:00	6時間12分	0.10	30	18:01	6時間13分	11.0	446.6	222.2
							31	18:04	6時間16分	8.8	455.4	231.0
11	18:35	15.0	132.5	18:40	6時間52分	0.50	32	18:35	6時間47分	11.0	466.4	242.0
							33	18:36	6時間48分	8.8	475.2	250.8
12	19:46	6.0	138.5				34	19:16	7時間28分	15.4	490.6	266.2
							35	19:45	7時間57分	8.8	499.4	275.0
							36	19:46	7時間58分	8.8	508.2	283.8
13	20:13	6.0	144.5				37	20:11	8時間23分	8.8	517.0	292.6
							38	20:12	8時間24分	11.0	528.0	303.6
14	20:41	6.0	150.5				39	20:40	8時間52分	11.0	539.0	314.6
							40	20:42	8時間54分	6.6	545.6	321.2
15	21:07	6.0	156.5				41	21:06	9時間18分	11.0	556.6	332.2
							42	21:07	9時間19分	8.8	565.4	341.0
16	21:40	6.0	162.5				43	21:40	9時間52分	15.4	580.8	356.4
							44	21:41	9時間53分	6.6	587.4	363.0
17	22:10	6.0	168.5				45	22:09	10時間21分	13.2	600.6	376.2
							46	22:10	10時間22分	8.8	609.4	385.0
18	22:37	10.0	178.5				47	22:36	10時間48分	15.4	624.8	400.4
							48	22:37	10時間49分	6.6	631.4	407.0
19	23:10	10.0	188.5	23:00	11時間12分	35.60	49	23:10	11時間22分	15.4	646.8	422.4
							50	23:12	11時間24分	8.8	655.6	431.2
							51	23:27	11時間39分	0.0	655.6	431.2
計			188.5			36.80	計		11時間39分		655.6	

表4 まほろん2号炉の操業のようす

時刻	操業時間	状 況
11時23分		開会式
11時39分		舞ギリで火をおこす。
11時41分		炉内へ点火。
11時48分	0時間00分	炉内に木炭投入し、操業開始。踏みふいご送風開始。
12時25分	0時間37分	炉内への木炭投入量、ようやく半分になる。送風が西側が東側より強い。
12時50分	1時間02分	ふいご掘形西側の粘土を除去し、東西で同程度の送風量に調整する。踏みふいご本番突入。
13時04分	1時間16分	炉内頂部まで木炭が充填される。
13時25分	1時間37分	炎の高さ約1mになり、赤紫色の炎確認される。炉内温度1,000℃を超える。
13時58分	2時間10分	炉内温度1,200℃を超える。
14時17分	2時間29分	砂鉄投入。炎一瞬オレンジ色に変化し、のち赤紫色になる。壁面温度980℃になる。
14時44分	2時間56分	炎の高さ1mほどをキープしている。赤紫色とオレンジ色の炎確認。
14時54分	3時間06分	炉の中央部の炎、赤色に変わる。砂鉄反応始まる。
15時02分	3時間14分	ノロ出し穴ふさぐ。
15時22分	3時間34分	砂鉄投入量、6kgから12kgに増加する。炉内観察用窓から壁が少々溶解していることを確認。炎、赤紫色で、高さ1m弱。
15時42分	3時間54分	砂鉄の反応が遅い。炎の色、炉中央部が赤色であり、炎の高さも低い。
16時10分	4時間22分	炉内温度1,350℃を超える。炎の色、黄色味を帯びる。踏みふいご回数、1分間に30回前後。
16時30分	4時間42分	ノロ出しを行うが、ほとんど確認できない(ノロ量; 0.6kg)。炎の色、青色にオレンジ色が混じる。
17時08分	5時間20分	炎の色、青紫色と黄色の混合色になる。高さ1m弱。
17時45分	5時間57分	炉内観察用窓から炉内に鉄棒を挿入。鉄が生成されていることを確認。
18時00分	6時間12分	2回目ノロ出し。ほとんど確認できず(ノロ量; 0.1kg)。
18時12分	6時間24分	炉内温度下がっていると村下。踏みふいごのピッチ上げるように指示する。踏みふいご回数、1分間に40回前後。
18時20分	6時間32分	東側風箱より風漏れ。粘土で補修する。炉内温度を上げるため、踏みふいごのピッチさらに上げる。1分間で60回となる。
18時28分	6時間40分	炉内の木炭をつつく。
18時55分	7時間07分	東側風箱より再度風漏れ。粘土で補修する。炉内温度下がってきている。
19時05分	7時間17分	炉内温度1,200℃に低下。炉内を棒をつつくが、炭が落下しない。炎の高さも70cmほどと低くなっている。
19時16分	7時間28分	砂鉄投入を一時中断し、操業状況を観察する。
19時30分	7時間42分	炎の色、青と黄色の混合色。炎の高さ1m弱。
19時46分	7時間58分	砂鉄の投入量を12kgから6kgに減ずる。観察用窓から炉内部をつつく。棒の先に僅かにノロ附着。
20時00分	8時間12分	炉内温度、1,280℃に上昇。
20時35分	8時間47分	観察用窓からノロが形成されていることを確認。炉内温度1,300℃に上昇。
20時43分	8時間55分	炉内温度1,340℃。炎の色、青色と黄色の混合色。
21時13分	9時間25分	観察用窓から砂鉄の反応確認。炎は、青色とオレンジ色になり、高さは1mを超える。
21時31分	9時間43分	炎、青白く変化。ふいごのピッチ早くなる。
21時48分	10時間00分	炎の高さ1m前後を維持。炉内温度1,270℃。踏みふいごの回数、1分間に72回。
22時07分	10時間19分	観察用窓から炉内部をつつく。棒の先端にノロ附着。
22時11分	10時間23分	炉内温度1,400℃を記録。村下コメント「青い炎が多い」。
22時30分	10時間42分	青白い炎の先が黄金色に変化。炎の高さ1mほど。踏みふいごの回数、1分間に92回。
22時40分	10時間52分	炉内温度1,233℃に低下。踏み板の東側の弁から風漏れ。
22時49分	11時間01分	踏みふいごの回数さらにアップ。1分間に110回になる。踏み板の弁が破損。風がふいごから漏れる。
22時54分	11時間06分	炉内温度1,258℃に上昇。
23時00分	11時間12分	4回目ノロ出し(ノロ量: 35.6kg)。ノロの長さ1m80cmほどに達する。
23時07分	11時間19分	ノロ出し穴をつつくと、さらにノロが出る。
23時08分	11時間20分	炎の色、青白い色と黄金色の混色。
23時27分	11時間39分	番子に状況を説明後、“蛍の光”のBGMに合わせ送風停止。

木炭投入量: 655.6kg 砂鉄投入量: 188.5kg 生成鉄量: 49.0kg ノロ量: 36.8kg

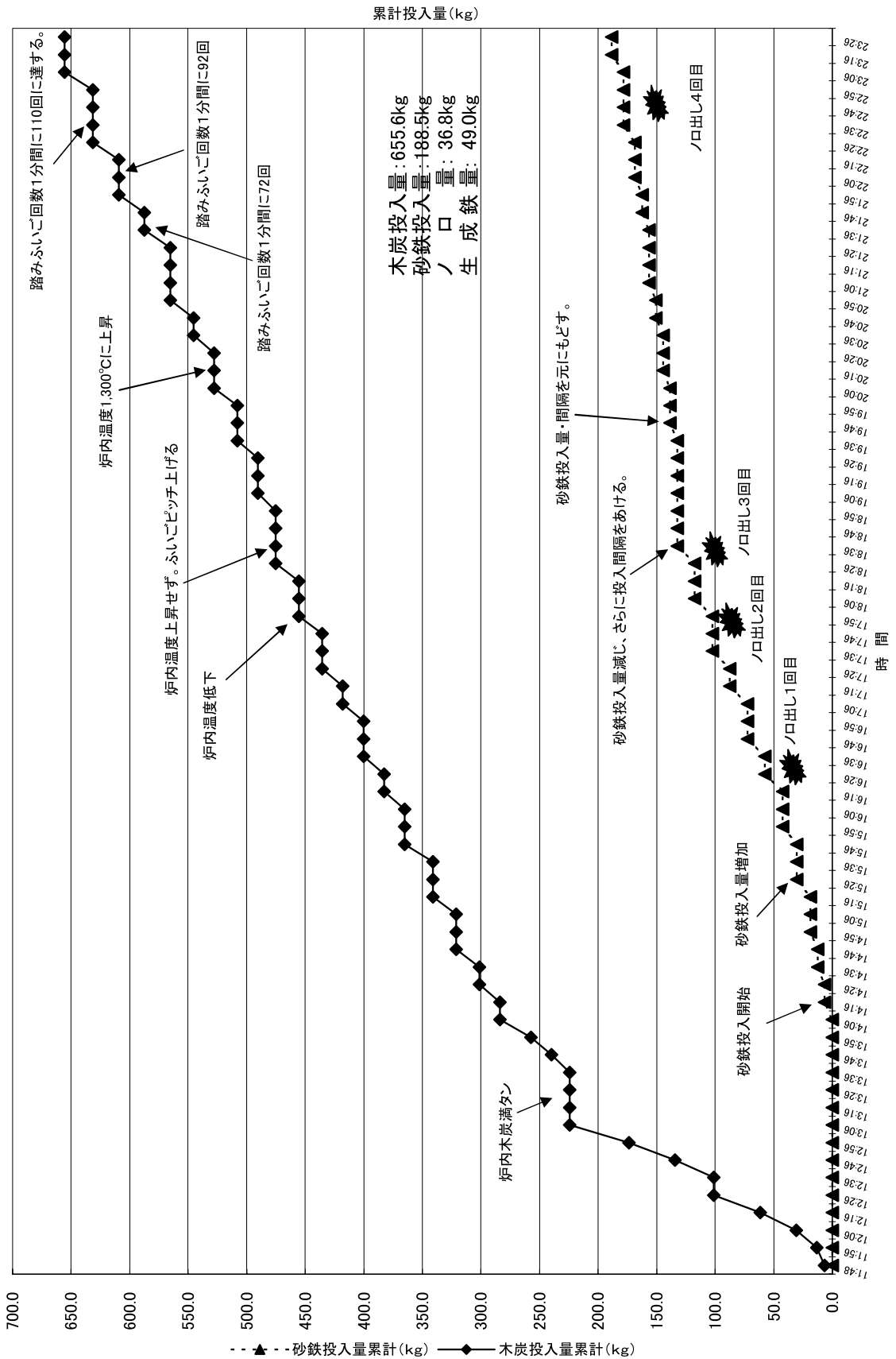


図 11 まほろん2号炉の木炭・砂鉄投入量累積表

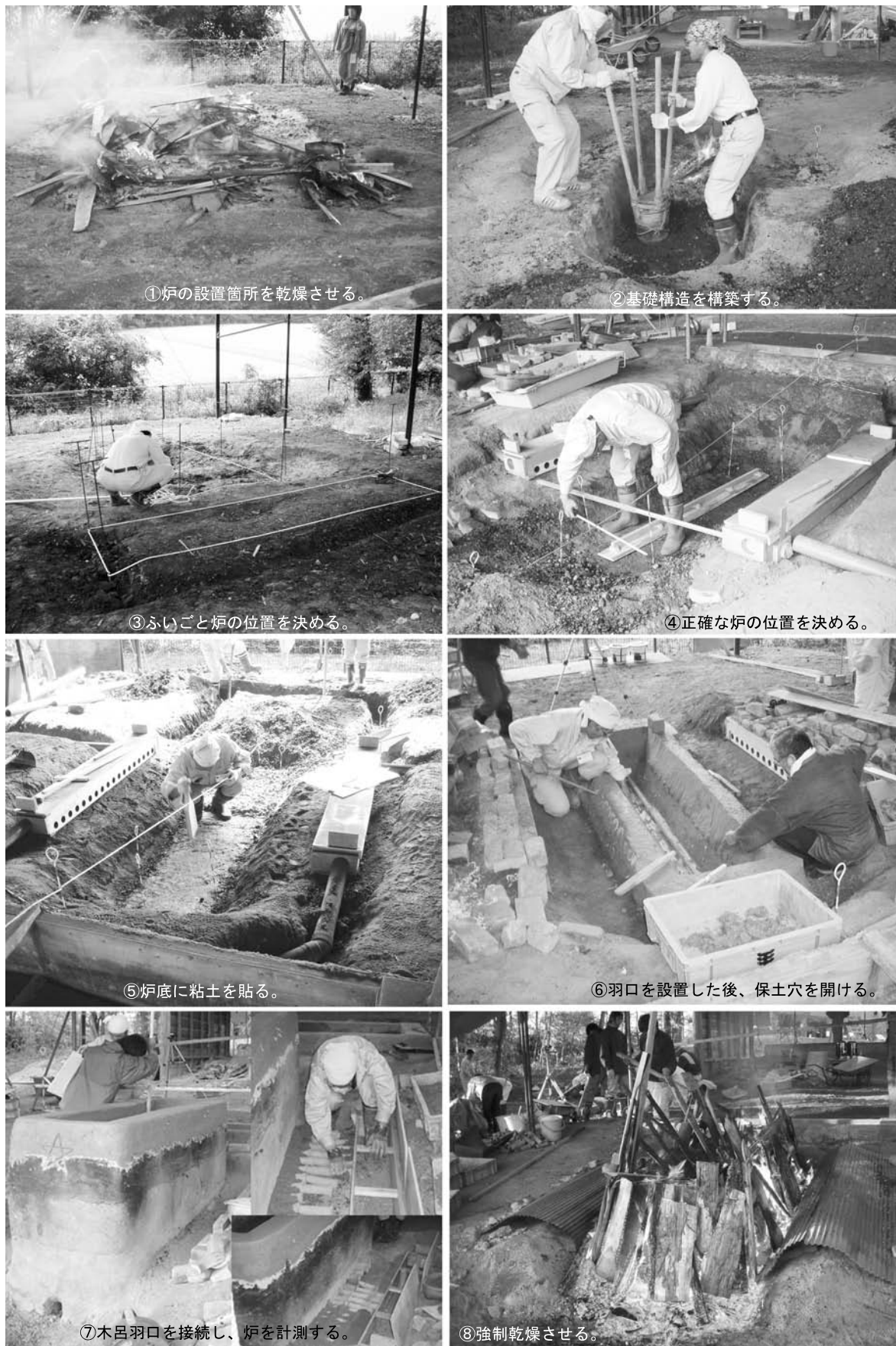


写真8 まほろん2号炉の構築



写真9 まほろん2号炉の操業

いう、驚異的で非人道的な速さとなった。弁の破損に加え、踏み板の周囲からも風が漏れ、これ以上の操業は不可能となった。ノロを炉外に出すのが精一杯であり、ようやく鉄の反応が始まったところでの操業終了となった。

なお、この踏み板の弁の損傷は、空気取り入れ位置の設置箇所とふいご掘形の送風孔の位置のズレから生じている。

すなわち、図12に示したように、踏み板の取り入れ口は、送風孔の直上に設置されてい

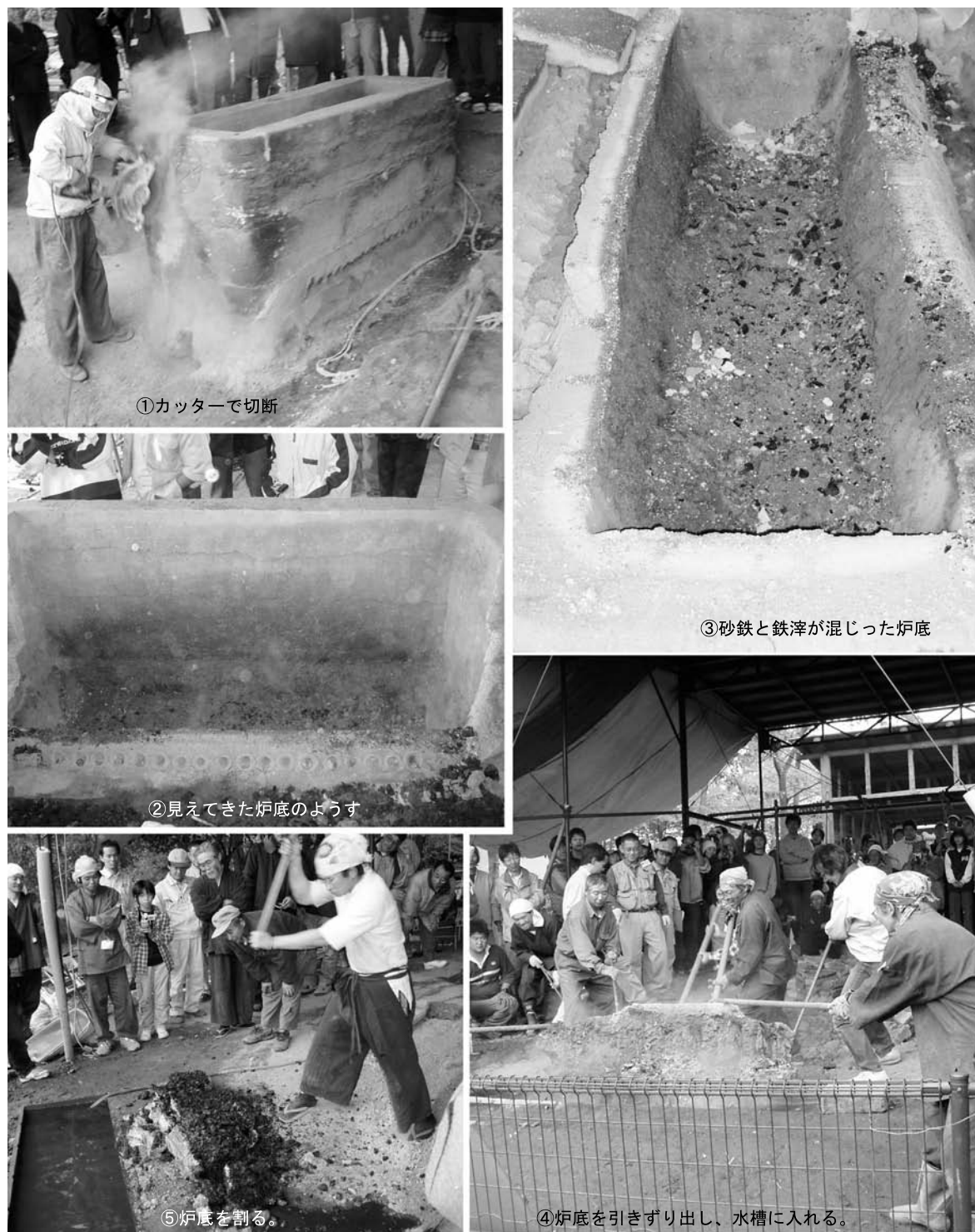
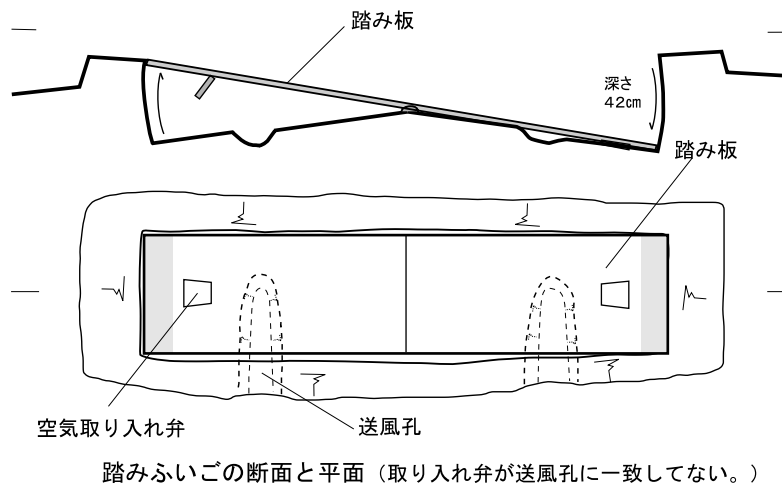


写真10 炉の解体



— ければならないのである。気づいてしまえば当たり前のことだが、この当たり前のことが、実際に体験して初めて理解できることを痛感した次第である。

— ところで、プレ操業の際に確認できた踏みふいごの構造に関する致命的欠陥であるが、操業当初は気になっていたが、のちに改善された。まるで、炉自身が自助作用するがごとくであった。

この状況を図 13 に模式化した。操業前半はプレ操業と同様の現象が確認できていたが、砂鉄の反応が始まるころから認められなくなり、最終的には図の下段に示した状況に変化した。

操業の終了間近では、炉頂から上る炎は黄金色になり、送風の脈動に伴い、炉の中央に向かって全体的にピラミッド形になる炎が形成されていた。さらに、炎外縁に沿って黒いガス状のものが認められ、危惧していた欠陥は徒勞に帰した。

操業翌日には、炉を破壊し、生成物を取り出した（写真 10 参照）。



図 12 空気取り入れ弁と送風孔のズレと風箱内のような

真 10 参照)。炉壁の浸食はほとんど見られず、炉底には、砂鉄が炉の長辺に沿って 2 列帯状に認められ（注 9）、砂鉄を除去すると、無数の穴開きの鉄塊とノロが混じり合った状態で観察できるケラが形成されていた（写真 11 参照）。操業の経過時間から見るとプレ操業とあまり変わらないが、生成された状態は全く異なっていた。

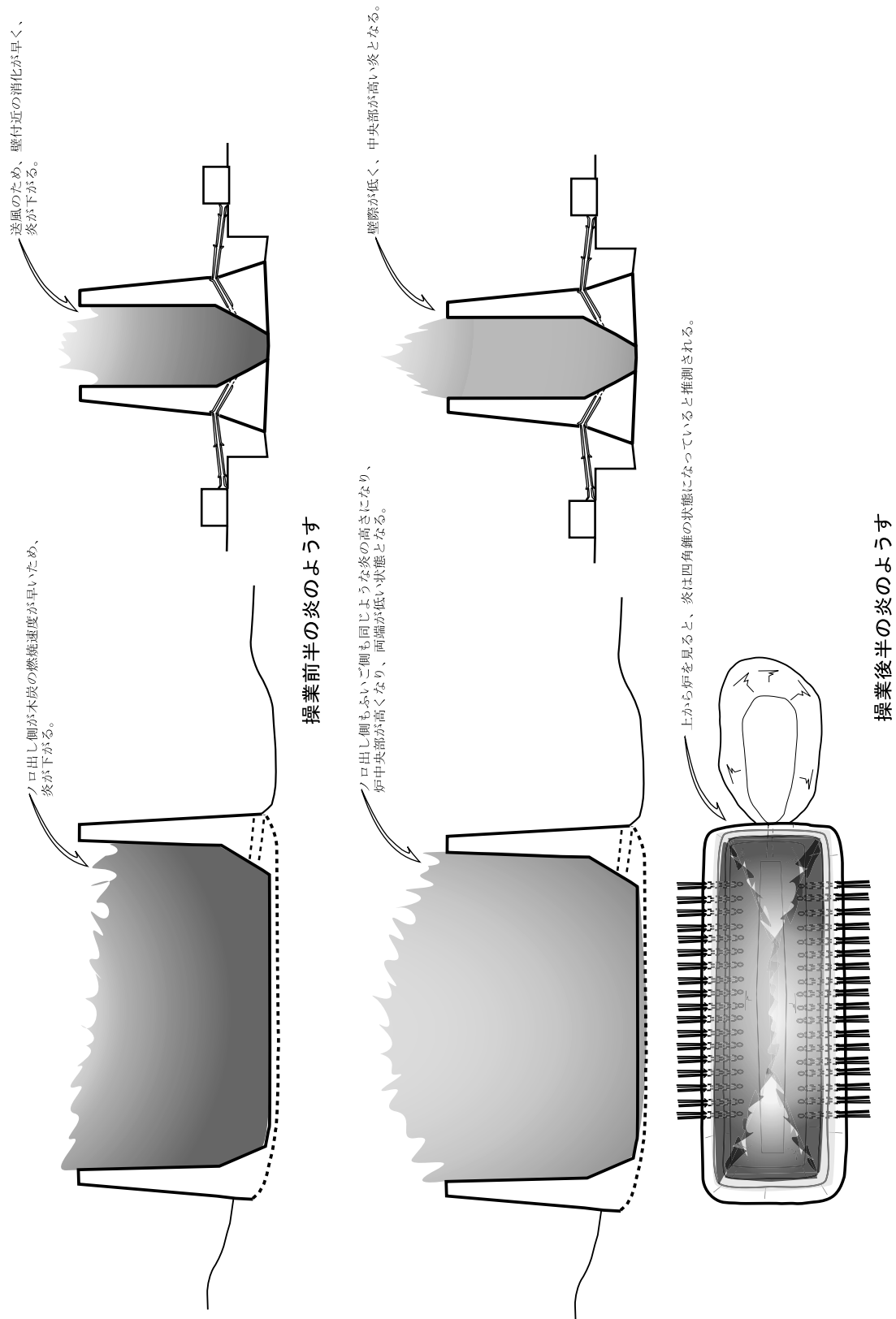


図13 まほろん2号炉操作のようす（概略図）

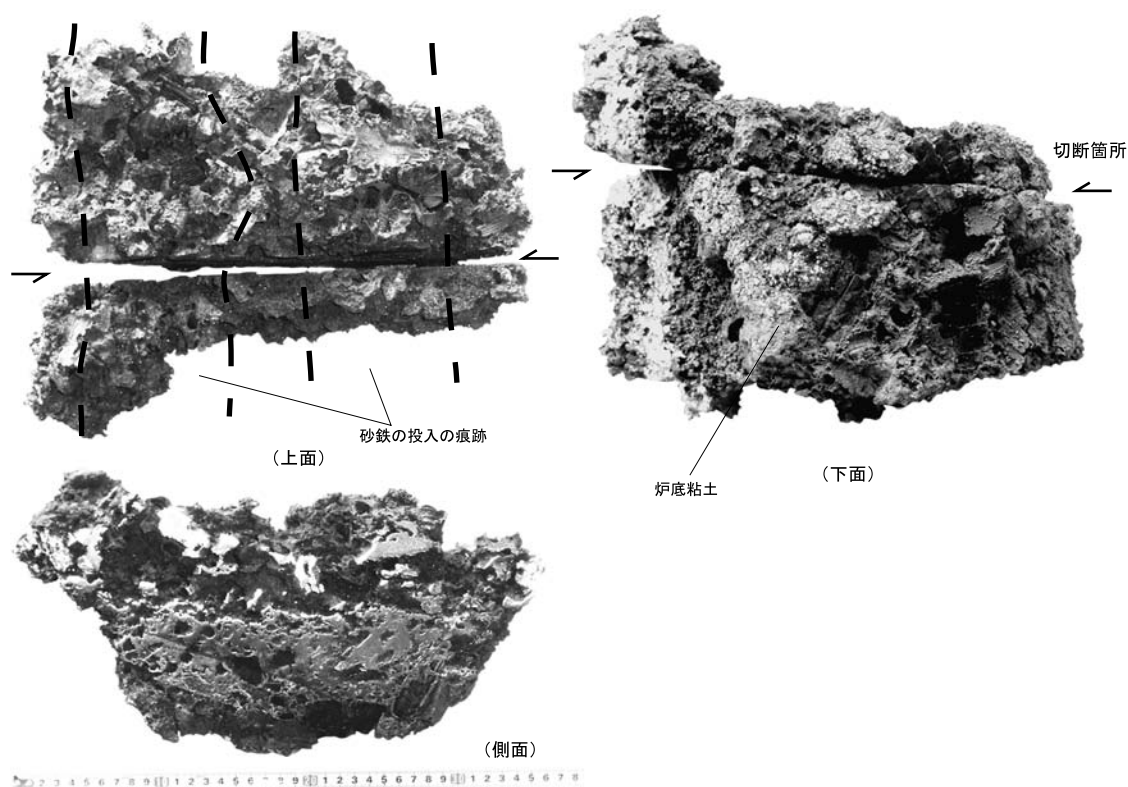


写真11 まほろん2号炉で生成された鉄塊（一部）

5 まほろん2号炉の操業から見てきた古代製鉄炉

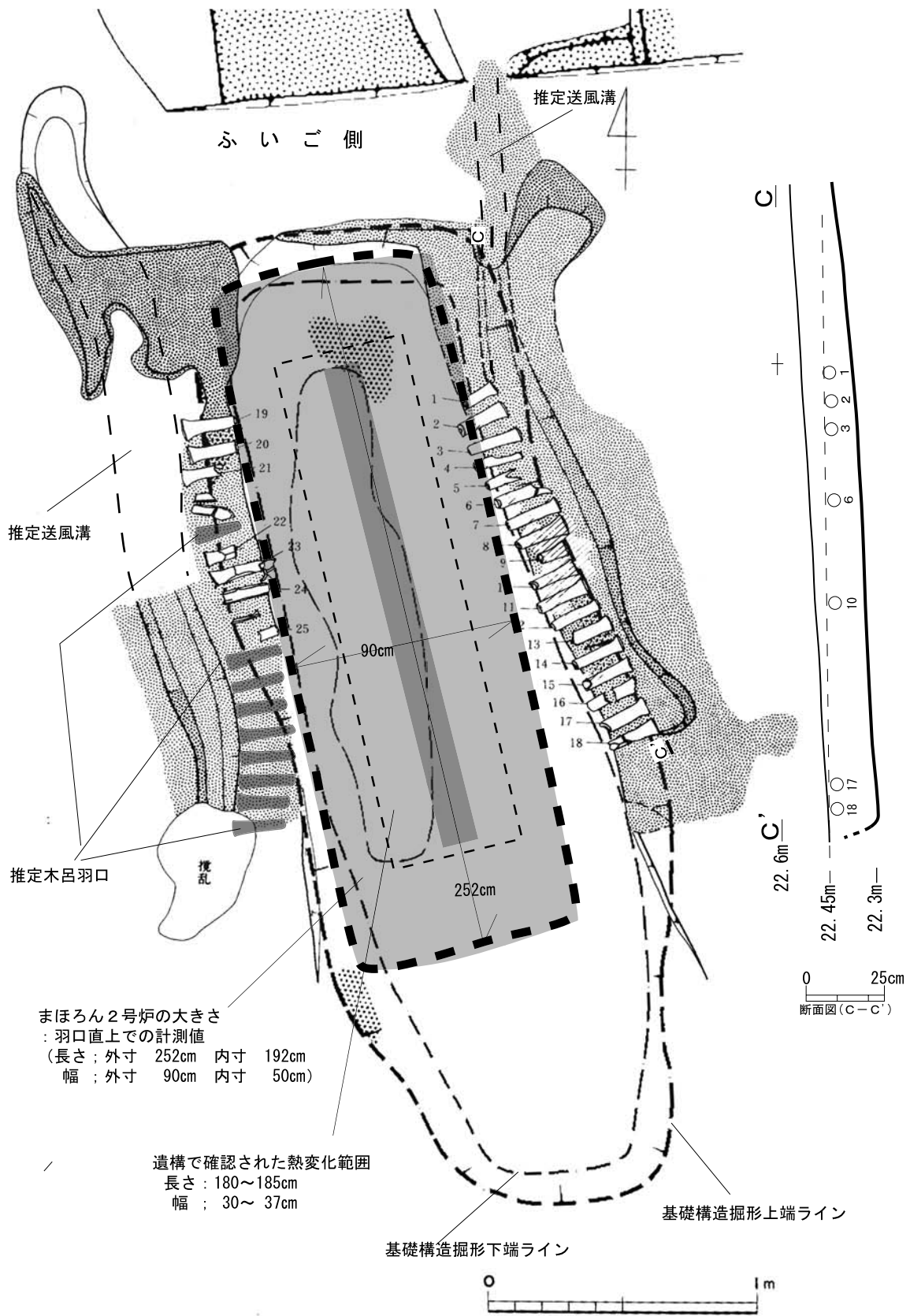
1) 炉の構築から見た古代の製鉄炉と近世たたら炉の規模

今回の出土製鉄炉原寸大の操業により、復元候補とした平安時代の15号製鉄炉の構築時の規模がおおよそ把握できるようになった（注10）。前述したが、再度まとめておく。

今回復元した炉の規模は、炉底直上の炉壁厚を45cmとして構築した場合、外寸の最大で長さ260cm、幅110cm、高さ120cmとなった。壁は炉底直上がもっとも厚く、その後厚みを減じて羽口付近では18cmになり、炉頂部では9cmとなった。このうち、復元炉の羽口付近の大きさを15号製鉄炉の図面に合わせたのが、図14である。

この図を見ると、遺構で確認できた木呂羽口と炉壁に装着された羽口は、ふいご側では直接接続された可能性が高く、ノロ出し側では、さらにもう一つ別の接続管が必要であることが推測できる。さらに、この接続管の長さは、ふいご側から徐々に長くなり、ノロ出し側が最も長い。当然のことながら、木呂羽口と装着羽口は直接ジョイントした方がリスクは少ない。それにもかかわれず、すべての羽口を直接ジョイントしない工夫、ここに古代製鉄工人の知恵があり、これの効果が、操業当初に見られるノロ出し側とふいご側の燃焼速度の調整を担っているのではないだろうか。すなわち、リスクをかける部分とかけない部分を設置することによって、炉全体の送風状況を調整していた可能性が高いのである。

ただ、実際の操業の状況からは、前述したように鉄の反応が始まると徐々にこの燃焼速度の遅速はなくなるため、この推測は成り立たないかもしれない。しかしながら、実際に炉を構築



(国井 1995より転載加筆)

図14 まほろん2号炉の炉壁厚と15号製鉄炉

してみると、片側18本の木呂羽口と炉壁装着羽口を直接ジョイントできるように配置するのは非常に困難であり、どこかに“遊び”が必要で、この接続状態のゆとりが、送風調整になった可能性は考えておきたい。

また、同図中に遺構図面から起こした木呂羽口と送風溝のエレベーションを示したが、これを見ると、木呂羽口の設置高は、ノロ出し側とふいご側でほぼ水平であり、ノロ出し側が溝の上方から、ふいご側が溝のほぼ中央から送風していることが解る。送風溝の構造が判明していないが、木呂羽口設置箇所のみかな高低差は、送風状況になんらかのギャップがあったのではないだろうか。

この他、この図からは、装着羽口が、ほぼ水平に炉に装着されていた可能性が示唆できる。この状況は、写真12の出土炉壁の装着羽口からも肯首でき、木呂羽口と炉壁装着羽口は、ほぼ水平にジョイントされていたものと思われる。

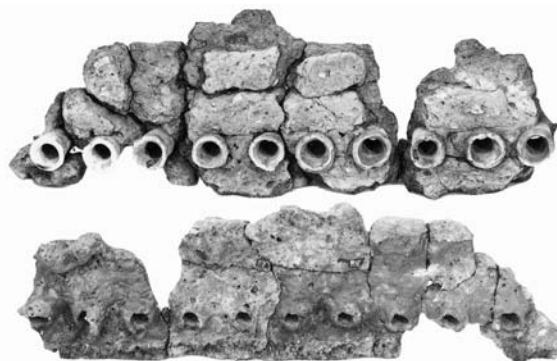
次に、構築時の製鉄炉の壁の厚さと炉壁装着羽口の長さについて、気づいたことを述べておく。

遺跡から出土した未装着羽口（先端部にノロが付着していないもの）は、全長20cm前後のものが多い（15号製鉄炉の木呂羽口の全長も、18.3～19.8cmである。）。この長さの羽口を製鉄炉に装着する場合、羽口吸気部側が広がっているため、どうしても装着位置の炉壁の厚さは最大でも20cm弱になる。羽口は若干角度を持って装着されるため、炉壁厚は、これ以下にならざるを得ない。そうすると、炉長2mほどの炉では、炉壁が薄すぎて上方まで積み上げてから、炉がへたってしまう危険性が高くなるのである。さらに、操業を開始すれば、羽口装着付近の炉壁は最も溶解し、薄くなっていく。

このため、この羽口設置部分の炉壁厚は、最低でも30cm弱ほど必要と思われ、出土した羽口の長さで推定した製鉄炉の炉壁厚では、10cm前後の差が生じることとなる。そこで、この10cmほどの差は、何らかの方法で壁を穿孔し、送風を確保しなければならなくなる。実際、今回の操業でも羽口先端部から炉内部に向かって、約10cm装着羽口の延長に保土穴を穿孔した。

すなわち、2m規模の製鉄炉では、構築時において、炉内面には保土穴が開けられ、羽口先端が炉内部に突出していない状況が想定できるのである。当然、羽口装着付近の炉壁厚が20cmの炉壁でも、構築することは可能であろう。

ただ、当時の工人たちは、あえてリスクの高い状態を選択するよりは、少しでも安全で効率よく鉄を産出していたと思うので、このような羽口と保土穴による送風方法を想定しておきたい。なお、この保土穴は、今回幅20mm、長さ40mmの楕円形状に絞り込んだ。操業が順調に推移し、炉壁の溶解が進めば、やがて浸食された壁は羽口付近まで達する。これは、



(小暮1997より転載)

写真12 山田A遺跡出土炉壁装着羽口

操作に応じて送風量が異なる2段階送風方式であり、当時この方法があった可能性を示唆しているのではないだろうか。

さて、上記のようなことから、まほろん2号炉を構築したわけであるが、構築してみると、

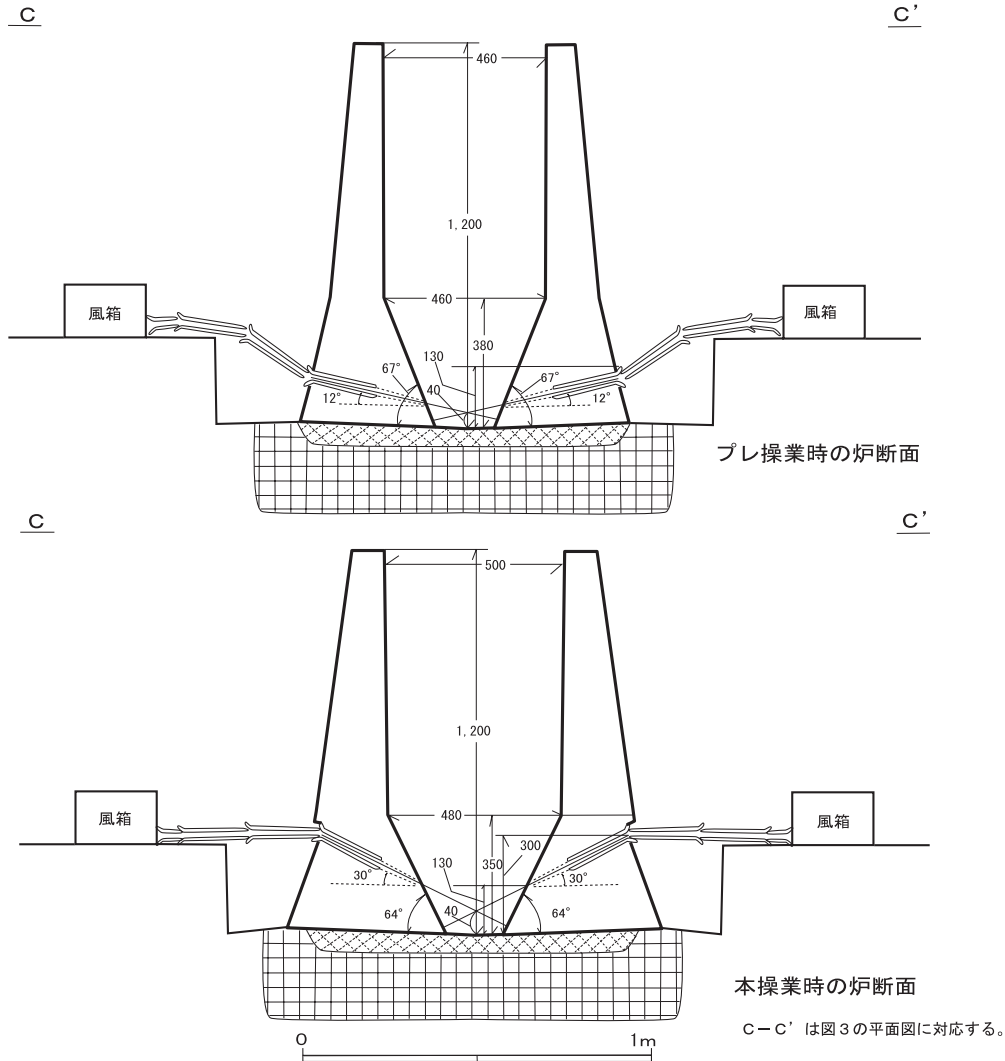


図15 まほろん2号炉の断面（構築時）

表5 まほろん2号炉と近代に記録された「たたら」の規模

	炉全長	炉幅	炉高	炉底の炉壁厚	羽口の装着角度	羽口の設置高	羽口設置状況
まほろん2号炉	260	110	120	45	30(12*1)	30(13*2)	水平
佃谷たたら(*3)	284.5	107.8	115	44.8	9~10 1	2.7(*4)	水平
砺波たたら(*3)	338.7	104.0	116.5	39	26	21.8	炉中央部若干高い

* 佃谷たたらや砺波たたらの数値は、俵氏の「古来の砂鉄製錬法」1933より抜粋した。

* 1：出土遺物からの角度。プレ操作時の設置角度。

* 2：遺構から推測した高さ。木呂羽口の設置箇所と炉底の熱変化痕跡の高低差。

* 3：各数値は、間塗（炉中央部）での規模で、最大値を示す。

* 4：実測図では内壁に沿って96mmとなっているが、文中(p66)では「銑押の場合は（中略）外壁に沿い127ミリメートル、内壁に沿い112乃至115ミリメートル位にしてその羽口の有する勾配も著しく緩やかなり。」と記載されている。

* 5：実測図では内壁に沿って158mmとなっているが、文中(p65)では「鑪の外壁に沿い約218ミリメートル、内壁に沿い約158ミリメートル位の高さになし。鑪の間塗に於ては更に外壁24ミリメートル、内壁30ミリメートル丈高めにするものとす。」と記載されている。

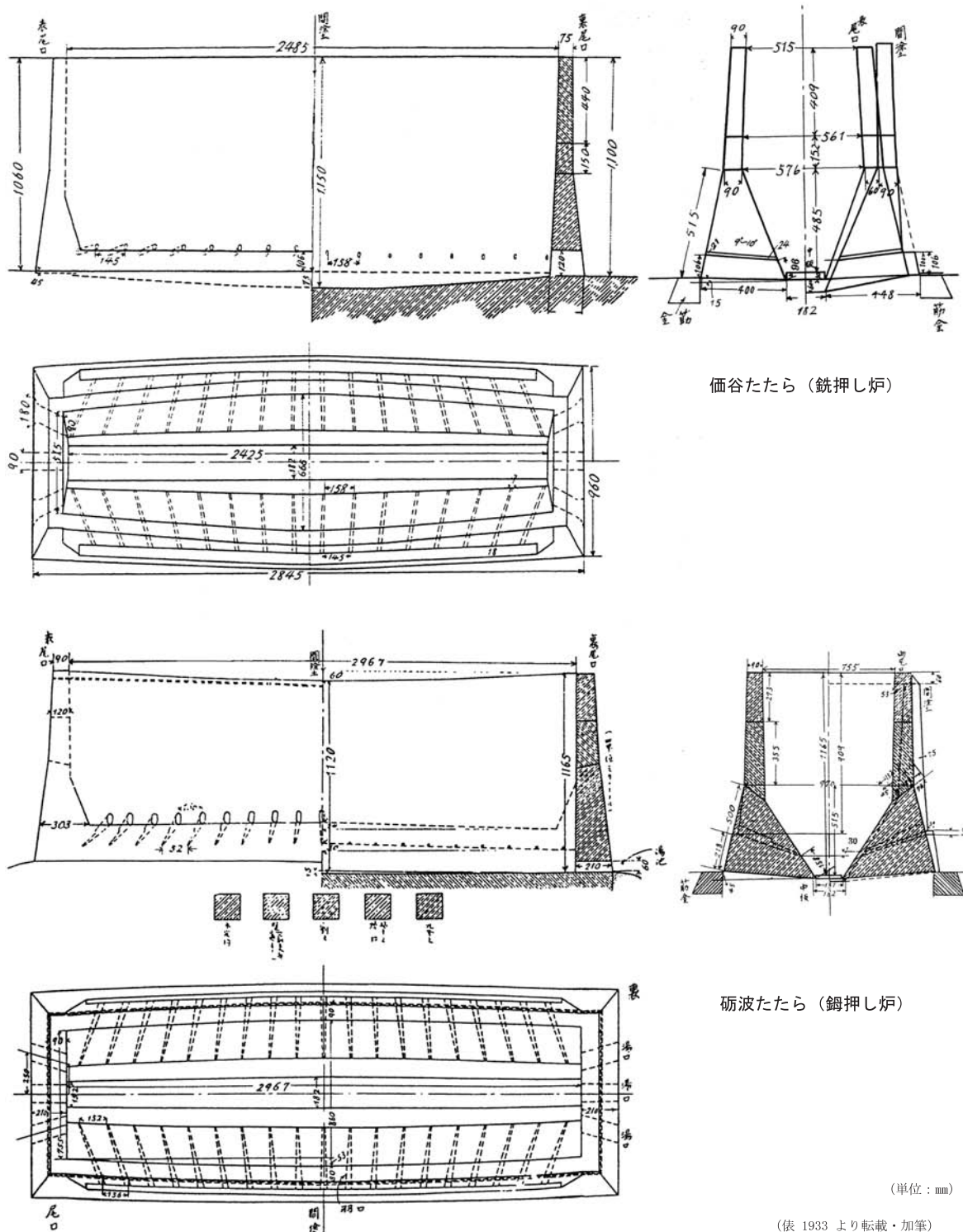


図16 価谷たたらと砺波たたら実測図

所謂近世たたらに類似していることが判明した。図15にまほろん2号炉の断面、図16に価谷たたら（銑押し）・砺波たたら（鋤押し）の図を示した。これらの炉底直上の規模や羽口設置箇所の計測値を表5に示した。

この表と図からは、価谷たたらのズク押し炉は、今回復元した炉と非常に規模が類似していることが解る。特に、炉底の炉壁厚、羽口の装着角度、設置状況や羽口の設置高など、操業に

関わる最も重要な炉の下部構造が酷似しているし、炉の断面形状も似通ったものとなっている。このような状況と、表1に示した鉄塊炭素量の測定値からは、15号製鉄炉では、ズクを産出していたものと判断できる。それは、平安時代の製鉄技術が、綿々と近世、近代までつながっていたことへの一つの証左であると思われる。

さらに、操業の時間であるが、1号炉の操業結果からは10時間程度の操業（炉中央部付近の規模：長110cm、幅60cm、高110cm）を考えたが、2号炉の規模（炉中央部付近の規模：長240cm、幅90cm、高120cm）になると、24時間から48時間程度の操業が推測されるのである。炉内で1,300℃を維持するための必要時間や砂鉄の反応開始時間でも、1号炉が1時間から1時間半程度であったのに対し、2号炉では3時間～4時間を要している。すなわち、大まかに言って1号炉の3ないし4倍の時間が必要であることになり、1昼夜半から2昼夜の操業が予想される。この推測操業時間は、いわゆる近世たたらの一（ひとよ：ケラ押し3日3晩、ズク押し4日4晩）に近づくような操業であった可能性が推測される。

2) 炉の操業から見えた消費量について

今回の炉の操業では、前述したように多量の粘土、木炭、砂鉄を消費した。再度、まとめて平安時代の1回の製鉄操業にかかる消費量を試算しておきたい。

炉構築の粘土量：約2.9 t

砂鉄投入量：188.5 kg

木炭投入量：655.6 kg

産出鉄：49.0 kg

鉄滓量：流出滓36.8 kg

上記がまほろん2号炉の消費量である。1回の投入量は、プレ操業とイベント本番を平均すると、砂鉄約10kg、木炭約20kgである。これを約25分間隔で投入したが、仮に48時間操業するとすれば、以下のような消費積算式が成り立つ。

投入回数： $48\text{ h} \times 60\text{ 分} \div 25\text{ 分} / \text{回} = 115.2\text{ 回}$

砂鉄量： $115\text{ 回} \times 10\text{ kg} = 1,150\text{ kg}$

木炭量： $115\text{ 回} \times 20\text{ kg} + 188\text{ kg} (*1) = 2,488\text{ kg}$

*1：炉内が木炭で満タンになるまでの木炭消費量。2回の操業での木炭消費量を足して、2で割った数値。

すなわち、1回の操業で、砂鉄は1.2 t、木炭は2.5 t、粘土は2.9 t消費する可能性が考えられる。今後は、これらの試算結果を実際に確認するための操業実験と、調査された木炭窯からの産出木炭量の試算、特に1回の木炭窯の焼成で産出できる木炭量と製鉄炉の操業回数、廃滓場で確認された廃滓量からの操業回数などをさらに検討し、古代の製鉄技術の解明を試行していきたい。

6 おわりに

今回行ったまほろん2号炉の操業は、49kgの鉄を産出して終了した。分析の結果では、炭

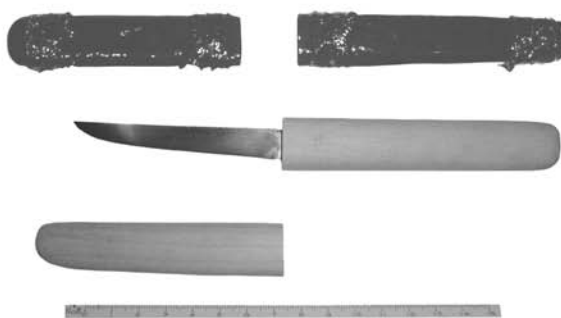
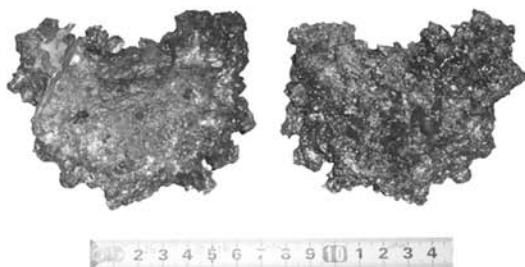


写真13 まほろん2号炉の生成鉄塊のその後

素量0.25%の低炭素鋼であり、1号炉と同質の鉄が産出できたわけである。原料・燃料・材料が同じで、羽口角度が同程度であり、10時間程度の操業では、同質の鉄が産出するのだろうか。生成される鉄の性状と、原材料や羽口の装着角度との関連を今後も検討していきたい。産出した鉄塊のその後の経過を記述して終わりとしていたい。

49kgの鉄塊は、その後、一部を残して親指の爪程の大きさに小割りし、藤安刀匠のもとで、“下げ”工程を行った(写真13参照)。

径30cm程、高さ40cm程の下げ用鍛冶炉に投入された鉄塊は、投入から15～20分で、鉄とノロに分離した。鉄は羽口直下にハート状にまとまり、鍛冶炉の底にはノロが液状に溜まった。あまりの時間の短さに、「あれだけ苦勞して砂鉄から鉄に変えたのに、何でこんな簡単に鉄がまとまるのですか。」と、刀匠に率直な疑問をぶつけると、「鉄は、砂鉄から鉄にするのは難しいが、一旦鉄になってしまえば、後は簡単なんだよ。」と、笑いながら答えてくれたことを思い出す。

このまとめた鉄塊は、その後、鍛錬され、素延べを経て、平成18年11月25・26日に実施した「鉄器づくり」(まほろん開館五周年記念特別文化体験プログラム)の素材となった(写真13参照)。鉄器づくりでは、平安時代の刀子をモデルとし、できあがった刀子は計24本であった。“1次製錬の鉄は、あくまでも次の工程での素材でしかない”、このことを改めて実感した次第である。

最後になりましたが、いつもながら、まほろん炉の操業に際して、ありとあらゆるご指導・ご援助をくださった藤安将平刀匠、有賀一久氏、並びに炉の構築から操業まで、多くの時間を費やしてくれましたまほろん職員、以下に名前を記した個人の方々や機関、さらにはお手伝いいただいた多くみなさまに厚く感謝申し上げますとともに、こんな拙い報告になったことをお詫び申し上げます。

平成19年度、まほろん3号炉の操業において、今度こそ“ズク”を産出できるよう、がんばります。また、力を貸してください、お願い致します。

今回の鉄づくりでお世話になった方々と機関(敬称略)

砂鉄の入手：星 秀夫(白河市大信) 福島県南建設事務所

粘土の入手：東北電力株式会社原町火力発電所 福島県教育庁文化財グループ

福島県文化振興事業団遺跡調査部原町火力発電所関連遺跡発掘調査班のみなさんと作業員の方々

鉄づくりに関する様々なデータ：星 秀夫 能登谷宣康 福田豊彦 真鍋成史 井原 聡 加藤将彦

愛媛大学法文学部 東北大学大学院国際文化研究科科学技術交流論講座科学史・科学技術論研究室

操業時の援助：中西裕也 宮城典真 星 秀夫

温度・送風量測定：佐藤健二 渡部友太郎

各種分析：平井昭司 武蔵工業大学 JFEテクノロジー株式会社

(注1) 吉田秀享 2006「平安時代の鑄鉄製品—出土鑄型からの研究復元—」『福島県文化財センター白河館研究紀要2006』

福島県文化振興事業団福島県文化財センター白河館 2006「クロガネの鑄物」展示解説図録

(注2) 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』

なお、この報告中で以下の誤りがあった。正誤の提示により、お詫びし訂正したい。

紀要2004 p1 下から6行目 62kg → 650kg
 p17 表下段 投入木炭量 279.1kg → 293.5kg
 p18 表最下段 投入時間の計 15時間34分 → 15時間36分
 p20 下から6行目 木炭投入量 279.1kg → 293.5kg
 p24 注1 発行年 2006 → 2005

(注3) 粘土の吟味は、その成分組成は分析等で明らかになっているが、各成分の数値のみでは、当時の炉材粘土は解明できないのではないだろうか。おそらく、複数箇所から採取した粘土をブレンドし、使用している可能性が考えられ、土壌学的分析も取り入れ、地質の様相把握が必要不可欠ではないだろうか。

(注4) 当時の製鉄工程を推測すれば、砂鉄からの1次製錬後に生成物は小割りされ、次の精錬作業に移されたものと思われる。すなわち、1次製錬時の生成物は小割りされなければ、最終目的の製品に加工できない。まほろん1号炉での低炭素鋼では、小割作業は至難を極める。

(注5) ここでの値はおおよその目安である。マツの根元と先端では太さが異なるため、当然のことながら一概には言えない。

(注6) 藤安刀匠の鍛刀場での予備実験操業のようすは、写真14に示した。製鉄炉は、長さ87cm、幅62cm、高さ120cmの規模の箱形炉であり、片側に3本の羽口を設置している。羽口の内径は33mmで、羽口の芯々間18cmで、炉底から38cmの高さに水平に設置されている。操業時は、炉底に25cm弱の厚さに、木炭粉によるカーボンベットを構築するため、操業時の炉底からの高さは、概ね15cm程度となる。大きき的には、まほろん1号炉とほぼ同様であり、ブローによる送風が可能のため、数度の実験を行った。

なお、この他に、刀匠の鍛刀場には円形の製鉄炉があり、この製鉄炉により、2年前の1号炉の操業前にも予備実験を行っていただいた。操業の結果、羽口角度35°でケラができ、この結果を受けて、まほろん1号炉では炉壁に装着する羽口角度を決定している。生成された鉄塊は分析にも供している(平井昭司他 2005「まほろん」における復元たたら製鉄からの鉄塊とスラグ中の元素濃度及び金属学的組織『福島県文化財センター白河館研究紀要2004』)。

(注7) 俵 国一 1933『古来の砂鉄製錬法』丸善の「第5章銑押し」による。この他、和銑製造の場合、ノロを作り出すため、砂鉄挿入の最初の2回目までは、砂鉄を精洗した時の洗い滓を投入したり、投入する砂鉄の割合は、山小鉄3、浜小鉄7で、そのうちの1/3は、砂鉄焙焼炉にてあらかじめ燃焼するとある。この他、燃料の木炭には、操業後3時間まではマツ炭、その後は雑木炭を使用するとの記載がある。

(注8) 注2の報告でその根拠を示している。出土する炉壁は操業後の状態であるため、構築時の炉底からの高さは不明であるが、木呂羽口と熱痕跡のレベル差から算出した値である。

(注9) 炉底に認められた砂鉄の帯は、砂鉄が瞬時に炉底に到達してしまったことを伺わせる。実際、5cm程の大きさの木炭をいくら敷き並べたと言っても、径0.4mmの砂鉄粒が木炭上にとどまることは可能なのだろうか。図17に一般に言われる炉内の状況概念図を示したが、炉内に投入した砂鉄は数秒で炉底に達するのではないだろうか。



写真14 藤安将平刀匠の予備実験のようす

「如何に、炉中に砂鉄を留ませるかが大事」と思われるが、日本鉄鋼協会で実験した際にも、同様の現象が指摘されている(坂田 1971 p69)。この他、倉林炉の操業実験では、砂鉄と粉炭、貝殻の粉末を正麩のりでまとめた砂鉄玉を作り、これを投入している(桂 1982 p216)。この正麩のりで固めたもの、あるいはなんらかの“のり”を使用して砂鉄をせんべい状にしたものも、炉頂部の温度が900℃前後とした場合、粘着用の“のり”は、燃焼しないのであろうか。“のり”

が燃焼してしまえば、以後は、何ら処置を施さない砂鉄と同様に炉底に落下する可能性がないのであろうか。水をまいた砂鉄を投入することも、同様の感がある。ただ、のりが燃焼する僅かな時間が、砂鉄の反応、あるいは生成鉄の形成に必要であり、それを経験的に知っていたが故に、採用していたことを否定はしない。

(注10) 遺跡の調査で出土する炉壁は操業後のようすを示しているため、構築時の規模は全く不明である。この当たり前のことに、得てして気づかないことが多い。さらに、製鉄炉は1回ごとに炉を壊すため、構築時の炉の規模は全く解らない。天田昭次刀匠も同様のことを述べている(天田 2004 p 185)。

<参考・引用文献>

- 天田昭次 2004 「鉄と日本刀」慶友社
 愛媛大学法文学部 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」
 大蔵明光 1970 「“たたら”復元で何がわかったか?」『金属』4月15日号
 桂 敬 1982 「V古代製鉄原理の探求第1章伝承炉(倉林炉)と復元実験」『古代日本の鉄と社会』平凡社
 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」『原町発電所関連遺跡発掘調査報告書V』福島県文化財調査報告書第310集
 小暮伸之 1997 「第2編山田A遺跡」『相馬開発関連遺跡調査報告V本文2』福島県文化財調査報告書第333集
 小塚寿吉 1966 「日本古来の製鉄法“たたら”について」『鉄と鋼』昭和52年第12号
 坂田武彦 1971 「たたら製鉄の復元とその鋸について 4章操業記録」日本鉄鋼協会
 鈴木卓夫 2000 「「鋸押し法」と「銑押し法」における築炉法の比較」『製鉄史論文集たたら研究会創立40周年記念』たたら研究会
 俵 国一 1933 「古来の砂鉄製錬法」丸善
 角田徳幸他 2005 「銜谷鋸跡発掘調査報告書」島根県古代文化センター調査研究報告書26
 坪井良平 1970 「日本の梵鐘」角川書店
 日本鉄鋼協会 1971 「たたら製鉄の復元とその鋸について」
 福田豊彦 2000 「近世における『和鉄』とその技術—中世の『和鉄』解明のために—」『製鉄史論文集たたら研究会創立40周年記念』たたら研究会

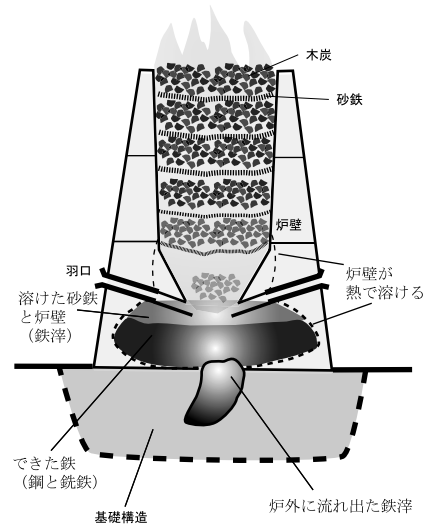


図17 一般に考えられる炉内状況

「鉄づくり」イベント産出鉄塊等の分析調査

J F E テクノリサーチ株式会社 分析・評価事業部埋蔵文化財調査研究室

1 はじめに

まほろんイベント「鉄づくり」における復元炉の操業状態や鉄生産の実態を明らかにするための一環としてイベントで得られた鉄塊、鉄滓、炉材原料である粘土等の化学成分分析・顕微鏡組織観察を含む自然科学的観点での調査を依頼された。組成分析、マクロ的特徴観察、ミクロ組織観察、などを中心に調査した結果について報告する。

なお、この調査は提供された 50 頁の 7 資料について従来から当社で行っている遺跡出土品の分析項目にもとづき実施したもので、操業条件を加味して検討したものではありません。操業との関連については化学成分、顕微鏡観察から前回操業との差について簡単な考察を加えた。

2 調査項目および試験・観察方法

1) 調査項目

調査資料の注記および調査項目を 50 頁の表 1 に示す。

2) 調査方法

(1) 重量計測、外観観察および金属探知調査

資料重量は電子天秤を使用して計量し、少数点 2 位以下で四捨五入した。各種試験用試料を採取する前に、資料の外観を mm 単位まであるスケールを同時に写し込みで撮影した。資料の出土位置や資料の種別等は提供された資料に準拠した。

着磁力調査については、直径 30mm のリング状フェライト磁石を使用し、6mm を 1 単位として 35cm の高さから吊した磁石が動きは始める位置を着磁度として数値で示した。遺物内の残存金属の有無は金属探知機 (MC : metal checker) を用いて調査した。金属検知にあたっては参照標準として直径と高さを等しくした金属鉄円柱 (1.5mm ϕ x1.5mmH、2.0mm ϕ x2.0mmH、5mm ϕ x5mmH、10mm ϕ x10mmH、16mm ϕ x16mmH、20mm ϕ x20mmH、30mm ϕ x30mmH) を使用し、これとの対比で金属鉄の大きさを判断した。

(2) 化学成分分析

化学成分分析は鉄鋼に関する J I S 分析法に準じて行っている。

- ・全鉄 (T. Fe) : 三塩化チタン還元－二クロム酸カリウム滴定法。
- ・金属鉄 (M. Fe) : 臭素メタノール分解－EDTA 滴定法。
- ・酸化第一鉄 (FeO) : 二クロム酸カリウム滴定法。

- ・酸化第二鉄 (Fe_2O_3) : 計算。
- ・化合物 (C. W.) : カールフイッシャー法。
- ・炭素 (C)、イオウ (S) : 燃焼—赤外線吸収法。
- ・ライム (CaO)、酸化マグネシウム (MgO)、酸化マンガン (MnO)、酸化ナトリウム (Na_2O)、珪素 (Si)、マンガン (Mn)、リン (P)、銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、コバルト (Co)、アルミニウム (Al)、ヴァナジウム (V)、チタン (Ti) : ICP 発光分光分析法。
- ・シリカ (SiO_2)、アルミナ (Al_2O_3)、酸化カルシウム (CaO)、酸化マグネシウム (MgO)、二酸化チタン (TiO_2)、酸化リン (P_2O_5)、酸化カリウム (K_2O) : ガラスビード蛍光 X 線分析法。
但し CaO , MgO , MnO は含有量に応じて ICP 分析法またはガラスビード蛍光 X 線分析法を選択。
- ・酸化ナトリウム (Na_2O) : 原子吸光法。

なお、鉄滓中成分は、18 成分（全鉄 T. Fe、金属鉄 M. Fe、酸化第一鉄 FeO 、酸化第二鉄 Fe_2O_3 、シリカ SiO_2 、アルミナ Al_2O_3 、ライム CaO 、マグネシア MgO 、酸化ナトリウム Na_2O 、酸化カリウム K_2O 、二酸化チタン TiO_2 、酸化マンガン MnO 、酸化リン P_2O_5 、コバルト Co、化合物 C. W.、炭素 C、ヴァナジウム V、銅 Cu）を化学分析している。分析は各元素について分析し、酸化物に換算して表示している。

粘土・炉壁は、13 成分（全鉄 T. Fe、酸化鉄 FeO 、シリカ SiO_2 、アルミナ Al_2O_3 、ライム CaO 、マグネシア MgO 、化合物 C. W.、灼熱減量 Ig. Loss、二酸化チタン TiO_2 、酸化マンガン MnO 、酸化ナトリウム Na_2O 、酸化カリウム K_2O 、炭素 C、）を化学分析している。

鉄製品中成分の化学分析は、13 成分（炭素 C、シリコン Si、マンガン Mn、リン P、イオウ S、銅 Cu、ニッケル Ni、コバルト Co、アルミニウム Al、ヴァナジウム V、チタン Ti、カルシウム Ca、マグネシウム Mg）を化学分析している。

（3）顕微鏡組織観察

資料の一部を切り出し樹脂に埋め込み、細かい研磨剤などで研磨（鏡面仕上げ）する。炉壁・粘土などの鉱物性資料については顕微鏡で観察しながら代表的な鉱物組織などを観察し、その特徴から材質、用途、熱履歴などを判断する。滓関連資料も炉壁・羽口などと同様の観察を行うが、特徴的鉱物組織から成分的な特徴に結びつけ製・精錬工程の判別、使用原料なども検討する。金属鉄はナイタール（5%硝酸アルコール液）で腐食後、顕微鏡で観察しながら代表的な断面組織を拡大して写真撮影し、顕微鏡組織および介在物（不純物、非金属鉱物）の存在状態等から製鉄・鍛冶工程の加工状況や材質を判断する。原則として 100 倍および 400 倍で撮影を行う。必要に応じて実体顕微鏡（5 倍～20 倍）による観察もする。

（4）耐火度測定

耐火物及び耐火物原料の耐火度試験は、JIS R 2204（耐火物及び耐火物原料の耐火度試験法）及び JIS R 8101（耐火度試験用標準コーン）に準拠して測定する。

資料を粉砕し、規定（量的に少量であるから寸法は第2種の小型：幅7mm、高さ27mm）のゼーゲルコーンを成型する。このゼーゲルコーンを傾斜80°で受台に装着し、毎分5℃で加熱する。コーンの先端が曲がり始め、受台に接触したときの温度を耐火度（溶倒温度）とする。

3 調査結果および考察

分析調査結果を図表にまとめて50頁～54頁に示す。表1に調査資料と調査項目をまとめた。表2に金属鉄の化学成分分析結果を、表3-1、表3-1に滓の化学成分分析結果を、表4に粘土の化学成分分析結果を、表5は耐火度測定結果をそれぞれ示す。本調査では資料1、資料3、資料7は試料採取に際しメタルと滓の分離が難しく、滓中に金属鉄が多く含まれている。滓としての性格を明瞭にするため金属鉄（M. Fe）を0%に補正した分析値を表3-2に示した。

全資料の外観写真を54～62頁に、資料の切断位置を56頁に、顕微鏡試料の埋込写真を57頁に、金属鉄試料のマクロ写真を57、58頁に、滓の顕微鏡組織写真を58～60頁に、金属鉄の顕微鏡組織写真を61、62頁に示す。以下、資料の番号順に各資料の調査結果を述べ、最後に全体をまとめた。なお、炉底上部で形成された資料No. 1（MH06001-1）では十分な金属鉄が得られなかったため、炉底下部から採取された資料MH06001-2を資料No. 7として追加調査した。

1) 資料番号 No. 1 (MH06001-1) 鉄塊 (⇒製錬滓)、着磁度：5、MC：16mm 大相当
資料の概要：本資料は「まほろん2号炉」の操業で炉底上部に生成した鉄塊である。

外観：総重量111.3g、長さ67.5mm、幅35.2mm、厚さ62.3mm。レンガ部分、長さ63.3mm、幅32.1mm、厚さ21.0mm。炉壁に溶着した鉄塊資料であるが、鉄塊部分には滓の巻き込みも多く、通常の鉄塊に比べ重量感がない。鉄塊部分の破面は発泡した黒色の滓である。炉壁胎土には白色の珪砂が多量に混ぜられており、滓が5～8mm位胎土側に侵入している。滓部分には16mm大相当のメタル反応があり、着磁度5の強い磁着がある。滓を分析し、検鏡はメタルと滓について行う。

顕微鏡組織：断面の概要を埋込試料写真（試料No. 1）に、断面の5倍の低倍率組織をマクロ写真1（資料No. 1）に示す。試料全体は滓であり、白く輝く金属鉄は埋込試料写真にも見られるように試料下側の周囲と空隙の周りに薄皮状に分布しているのみである。通常の鉄塊に比べ重量感が無かったのは空隙が多く、滓が主体のためと判断できる。また、メタル反応と磁着力が比較的大きく現れたのは薄皮状に金属鉄が表面側に広く分布した結果と思われる。

(滓の組織)：滓組織を顕微鏡組織写真1-1、1-2（資料No. 2）に示す。試料のほぼ全面が写真1-1の組織である。多角形が崩れた様な形状で微細な気孔を含むあばた状のウルボスピネルが圧倒的に多く、その背後に沈むようにやや薄い灰色のファイヤライトが観察される。そのほかはガラス質で、顕微鏡で観察される鉱物組織としてはこの2種類のみである。資料中には写真1-2に示すような棒状ファイヤライトが多く、小さな骸晶状ウルボスピネルが観察される部分もあるが資料全体をとおしても数カ所と少ない。

(鉄の組織)：金属鉄の組織を鉄組織写真1（資料No. 1）に示す。100倍の写真に見られるようにウルボスピネルの周囲に金属鉄が未凝集状態で存在している。金属鉄そのものはCをほとんど含まないフェライト（ α 鉄）である。滓の中には金属鉄粒はほとんど観察されないので還元が不十分と言うよりはむしろ金属鉄の大部分が滴下したあとの残りと思われる。

化学成分：滓の分析結果を表3-1と表3-2に示す。既述の通り、資料1、資料3、資料7は試料採取に際しメタルと滓の分離が難しく、滓中に金属鉄が多く含まれた分析となっている。滓としての性格を明瞭にするため金属鉄（M. Fe）を0%に補正した分析値を表3-2に示した。以下、補正した表3-2の結果をもとに考察した。全鉄34.35%で、FeOは43.86%、 Fe_2O_3 は0.37%で Fe_2O_3 とFeOの比率は99.2：0.8で鉄酸化物としては還元側によっている。 SiO_2 は22.7%で Al_2O_3 は6.48%である。 TiO_2 は17.9%で高 TiO_2 砂鉄を使用した滓の特徴がよく現れている。 $\text{FeO}_n\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ の3成分系に換算するとそれぞれ52.4%、26.8%、21.1%となり、参考の $\text{FeO}_n\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ の3元系平衡状態図ではイルメナイトとクリストバライトとの境界に近い組成である。状態図からはイルメナイト、ウルボスピネル、ファイヤライトが晶出すると見られるが、顕微鏡観察ではイルメナイトが見られず、この差は資料の不均質によるものと思われる。

図1は各地の遺跡から発掘された鉄滓についてT. Feと TiO_2 の関係から製造工程を分類した図で、本資料は当然ながら砂鉄系製錬滓の領域にある。図2は同じくT. Feと造滓成分の関係から砂鉄系製錬滓、砂鉄系鍛冶滓・鉍石系製錬滓の判別を検討する図であるが図中の位置から見ると本資料はT. Feに対して造滓成分が多い製錬であったことを示している。資料4と比べると資料1の方が TiO_2 、T. Feが高く、造滓成分が少なくなっている。発泡していることを考慮すると資料1の滓の方が流動性は悪かった可能性や融点が高かった可能性などが考えられる。

これらの結果を総合的に見れば本資料は、金属鉄が流下して残ったやや発泡している造滓成分が比較的多い炉底上部の製錬滓と見ることができる。良好な製錬滓とは言い難い。

2) 資料番号 No. 2 (MH06002) 卸鉄塊、着磁度：5～6、MC：16～30mm 相当

資料の概要：2号炉で生成した鉄塊を卸炉で精錬した精錬鉄塊である。資料5（MH06005）はこの精錬時に生成した滓である。

外観：重量31.3g、長さ38.2mm、幅25.9mm、厚さ21.9mm。不定形な鉄塊で、切断面で見ると滓などの巻き込みは少ない鉄塊である。折られた破面はにぶく輝いている。メタルについて分析し、組織観察はメタルを検鏡するが滓が残っていれば滓も観察する。

顕微鏡組織：断面のマクロ組織をマクロ写真2（資料No. 2）に、埋込試料の概観を埋込試料写真（試料No. 2）に示す。空隙、気孔が非常に多く、凹凸の著しい鉄塊である。滓は大きな窪み部分に少量観察される。**(鉄の組織)**：顕微鏡組織を鉄組織写真2（資料No. 2）に示す。鉄そのものはCをほとんど含まない純鉄（ $C < 0.02\%$ 、 α 鉄）である。素材の鉄塊は資料7（ $C = 0.25\%$ ）なので脱炭されている。資料全体を観察しても脱炭途中の組織は観察されず、脱

炭がほとんど完全に起こっていると判断される。

(滓の組織)：鉄塊中に残っていた滓の組織を顕微鏡組織写真 2-1、2-2 (資料 No. 2) に示す。微細な樹枝状のウルボスピネルが主要鉱物相となっている。資料 4 の流出滓と比較すると (顕微鏡組織写真 4-1、4-2 参照) ウルボスピネルの大きさにやや差はあるもののよく似た組織である。一方、本資料の精錬滓である資料 5 と比べると (顕微鏡組織写真 5 参照) ウルボスピネルは形状が多角形状と微細な樹枝状の違いがあり、本資料ではファイヤライトが観察されない。このことは鉄塊中に残留している滓は精錬時に生成したものではなく、製錬滓が除去されずに残った可能性が高い。

化学成分：金属鉄の化学成分分析結果を表 2 に示した。C は 0.01% と非常に低く、素材である資料 7 の C は 0.25% なので精錬工程で脱炭したと見られる。Si は 0.097% 含まれているが Ti も 0.087% 含まれていることから砂鉄由来の製錬滓が分離できずに介在物として含まれていたものと思われる。その他の Ca、Mg、Al も同様である。P は 0.099% 含まれている。S は 0.005% と低く、Cu も 0.007% と少ない。

以上を総括すると本資料は製錬滓が少し残り、ほぼ完全に脱炭が進んだ卸鉄塊である。

3) 資料番号 No. 3 (MH06003) 鉄滓、着磁度：3、MC：10～16mm 大相当

資料の概要：2号炉のプレ操業で生成した鉄滓である。羽口角度を 12° と浅くし、銑押しをねらって操業した滓である。

外観：重量 58.9 g、長さ 78.2mm、幅 68.0mm、厚さ 38.2mm。資料全体にわたって 10mm 大相当以上のメタル反応があり、位置によっては 16mm 大に近い反応がある。10～20mm 大の木炭を巻き込んでいる滓で、激しく発泡している。発泡した破面でみると滓は黒く輝いている。メタル検知反応の状況からは数 mm 大の金属鉄が結合し網目状になっているのではないかと思われる。分析はメタルを出来るだけ除いて滓を分析し、検鏡は滓を中心に観察する。

顕微鏡組織：顕微鏡試料は 2 個使用した。断面の概観を埋込試料写真 (試料 No. 3-1、3-2) に示す。資料全体は滓でこの中に薄皮状の金属鉄 (試料 No. 3-1) や粒状化した金属鉄 (試料 No. 3-2) が存在している。

(滓の鏡組織)：試料 3-1 では顕微鏡組織写真 3-1 に見られるようにガラス質主体の中に薄灰色の針状イルメナイトと薄褐色の棒状ファイヤライトが観察され、未凝集の金属鉄が網の目状に連なっているのが観察される。また、組織写真 3-2 では基本的には同じ組織であるが多角形が崩れたウルボスピネルも見られる。組織写真 3-3 (試料 3-2) の組織も本質的に前二者と同じである。ガラス質が多く、ファイヤライトが多いことから SiO₂ が高濃度に含まれると推察される。

(鉄の組織)：鉄組織写真 3-1 に試料 3-1 の薄皮状金属鉄の組織を示す。C をほとんど含まないフェライト (α鉄) で、結晶粒の中に多量の微細な空洞や介在物を残している。鉄組織写真 3-2 (試料 3-2) に粒状金属鉄の組織を示すが 3-1 と同じ特徴を持つフェライト (α鉄) である。

化学成分：滓の化学成分分析結果を表 3-1、3-2 に示した。以下、補正した表 3-2 の結果をもとに考察した。全鉄は 20.14% に過ぎず FeO は 20.67%、Fe₂O₃ は 5.82% で Fe₂O₃ と FeO の比率は 78 : 22 である。SiO₂ は 40.9% と多量に含まれており、顕微鏡観察と一致している。Al₂O₃ は 7.49% で、TiO₂ は 9.3% である。FeO_n-TiO₂-SiO₂ の 3 成分系に換算するとそれぞれ 34.5%、53.3%、12.2% となり、参考の FeO_n-TiO₂-SiO₂ の 3 元系平衡状態図ではクリストバライト領域にあり、ガラス質滓になりやすいと思われる。本資料の成分的特徴は CaO、MgO がそれぞれ 5.09% と 4.89% と非常に高い点にある。この成分の由来物質としては砂鉄、耐火材の炉壁が考えられる。しかし、砂鉄由来とすると平成 15 年度の分析結果（参考表 1）で TiO₂ 11.0%、CaO 0.5%、MgO 1.49% が得られており、還元されない TiO₂ に対する CaO、MgO は高過ぎ、資料 3 の高 CaO、高 MgO の説明にならない。一方、耐火材由来とすると同じく、平成 15 年度の分析結果（参考表 2）で SiO₂ に対する CaO、MgO は砂鉄よりも相当小さく砂鉄の滓を耐火材が溶けて薄めたとしては説明が付かない。木炭灰分の可能性もあるが、この場合には資料 1、4、7 との差が説明できない。プレ操業の最初にノロ作り促進のため長石類を含む砂を 4.5kg ずつ 2 回、計 9kg 装入しているとのことであるが、長石類は CaO、MgO に比べ Na₂O や K₂O の方が多く含まれているのが一般的で滓の成分としては K₂O、Na₂O に比べ CaO、MgO の方が遥かに高濃度でこれも原因としては考えにくい。資料 3 の特徴として高 CaO、高 MgO をあげられるがその原因は明らかにできない。

T.Fe と TiO₂ の関係から製造工程を分類する図 1 では砂鉄製錬滓では炉壁との反応が多い炉壁付着滓に近い組成になっている。図 2 は同じく T.Fe と造滓成分量の関係から砂鉄系製錬滓、砂鉄系鍛冶滓・鉍石系製錬滓の判別を検討する図であるが本資料は造滓成分量が 60% を越えており、炉壁付着滓に近い製錬滓であったことを示している。

資料 4 との差異について：資料 4 の調査結果は後述するが、化学成分、顕微鏡組織の観点からは資料 3 の SiO₂ と造滓成分が高く、その結果として砂鉄由来の TiO₂ が低くなり、TiO₂ 含有鉍物量が少ない組織になっている。また、理由ははっきりしないが CaO、MgO が高い特徴がある。熔融状態に関しては明らかに資料 3 の方が熔融不十分である。本資料は炉内から採取されたものであり、十分熔融・流動化しなかったために炉内に残ったと考えれば流出滓である資料 4 とは流動性の差は明らかである。しかし、プレ操業における羽口角度を浅くして銑押しをねらった操業の結果かどうかに関しては現時点では判断は困難である。

以上から本資料は CaO、MgO が高い特徴を持ち、炉壁との反応が多い製錬滓である。また、流動性は余り良くなく激しく発泡している。

4) 資料番号 No. 4 (MH06004) 流出滓 (最終ノロ出し)、着磁度：<1、MC：無

資料の概要：2号炉操業の最終ノロだしで流出した鉄滓である。

外観：重量 131.5 g、長さ 51.8mm、幅 45.6mm、厚さ 29.6mm。破面は 3 を持つ典型的な流出滓で黒光りし緻密である。2号炉の最終ノロ出しで流出したもので前回と同様原料のため、成分比較を行う。

滓の顕微鏡組織：顕微鏡組織を顕微鏡組織写真4-1、4-2に示す。両組織とも視野全面に小さな樹枝状のウルボスピネルが発達し、小さな金属鉄粒子が散見される。ガラス質の中にファイヤライトではないかと思われるやや褐色の部分が観察されるがファイヤライトと同定できるほど明瞭ではない。写真4-1、4-2ともに本質的な差はなく、同質である。樹枝状ウルボスピネルの小ささやファイヤライトが明瞭に観察されないのは比較的冷却速度が速かったためと見られる。

化学成分：分析結果を表3-1、3-2に示した。金属鉄を0%に補正した表3-2の結果をもとに考察した。化学成分としては SiO_2 、 TiO_2 に多少の差は見られるが資料1と同質である。全鉄は32.62%と少ない。また、 FeO は39.72%、 Fe_2O_3 は2.50%で Fe_2O_3 と FeO の比率は94.1:5.9で SiO_2 は29.7%である。 FeO_n - TiO_2 - SiO_2 の3成分系に換算するとそれぞれ50.2%、35.3%、14.6%となり、参考の FeO_n - TiO_2 - SiO_2 の3元系平衡状態図ではウルボスピネルの境界よったクリストバライト領域にある。ガラス質主体の滓となりガラス質の中にウルボスピネル、ファイヤライトが晶出すると想定される。顕微鏡観察と概略一致している。

T.Feと TiO_2 の関係から製造工程を分類する図1、T.Feと造滓分量の関係から製造工程を分類する図2で、本資料は当然ながら砂鉄系製錬滓の領域にあり、資料1と比較的近い位置にある。前回操業（図中15-4、15-5のプロット）と比較すると図1では TiO_2 がやや高く、T.Feがやや低い位置にあり、図2では造滓量がやや高い位置づけにある。

前回操業との比較：平成15年度の4回目と7回目のノロ出し時の流出滓と比較する。このときの滓の分析結果を参考表3に示す。同一の原材料を使用した操業なのでT.Fe、 TiO_2 、 SiO_2 、造滓分量を比較することにより操業状態を比較し、評価することができる。砂鉄中の鉄の還元状態はT.Fe/ TiO_2 で判断できる。今操業ではT.Fe/ TiO_2 は2.65であるのに対して、前回の4回目と7回目はそれぞれ4.00と3.68で、今回の方が小さくより多く還元して鉄を作ったことを示している。 TiO_2 のソースが砂鉄のみと仮定し、物質収支がとれていると仮定すると砂鉄のT.Fe/ TiO_2 は5.25なので、これとの差が鉄生産歩留まりとなる。本操業の場合歩留まりは約50% ($1-2.65/5.25=0.50$) であるのに対して、15年度の4回目と7回目のノロ出しではそれぞれ23.8%、30%となる。絶対値の比較は問題はあるかもしれないが大幅な操業改善が認められる。一方、造滓量に関する TiO_2 あたりの SiO_2 量と造滓量を比較すると今回操業では $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ は2.41であるのに対し、15年度の4回目と7回目はそれぞれ2.56、2.92となり、造滓量/ TiO_2 は3.53に対して3.80と4.35と高い。すなわち、今回の操業の方が砂鉄あたり(TiO_2 当たりと等価)の炉壁溶解量が少なく操業できていることを示している。

以上を総括すると、今回の操業では大幅な操業改善が図られ、鉄歩留まりの向上と炉壁溶損の抑制ができたと言える。

5) 資料番号 No. 5 (MH06005) 精錬滓、着磁度：2、MC：10mm 大相当

外観：重量46.6g、長さ46.9mm、幅42.2mm、厚さ32.0mm。No. 2の卸し金を精錬した鉄滓である。ウスタイトやマグネタイトなど、鉄が酸化溶融して生成するガス溶断時のスラグと同じ

やや暗褐色や黒褐色を呈する滓で不断に滓が滴下した様子が明瞭である。メタル反応も比較的強く、最大の場所で10mm大相当のメタル反応がある。

滓の顕微鏡組織：ミクロ組織を顕微鏡組織写真5（資料No. 5）に示す。多角形が崩れた様なやや乳白色のウルボスピネルとその背後の棒状のファイヤライト、ガラス質からなる組織である。部分的に金属鉄粒子も見られる。

化学成分：化学成分分析結果を表3-1, 3-2に示す。表3-2で考察する。全鉄41.89%でFeOは50.7%、Fe₂O₃は3.54%でFe₂O₃とFeOの比率は93.5：6.5でSiO₂は20.2%である。造滓成分量は32.57%である。FeO_n-TiO₂-SiO₂の3成分系に換算するとそれぞれ64.0%、23.9%、12.1%となり、参考のFeO_n-TiO₂-SiO₂の3元系平衡状態図ではファイヤライトとの境界に近いウルボスピネルの領域にある。ウルボスピネルとファイヤライト主体の組織になると推察され、顕微鏡観察と概略一致している。製錬滓である資料4と比較するとT.FeとFeOが高くSiO₂が低く、TiO₂もやや低くなっている。資料4の滓が酸化鉄FeOで薄められた感の強い滓である。鉄が一部酸化されて生成した熔融酸化鉄と製錬滓が反応しながら滴下した精錬初期の滓の様相を示している。

T.FeとTiO₂の関係から製造工程を分類する図1、T.Feと造滓成分量の関係から製造工程を分類する図2で見ると精錬滓と言うよりも製錬滓に分類できる位置にある。図3で見ると製錬滓に近い精錬鍛冶滓の位置にあり、精錬初期の滓に分類するのが妥当ではないかと思われる。

6) 資料番号No. 6 (MH06006) 粘土(原町遺跡採取)、着磁度：無、MC：無

外観：重量 112.2 g黄土色をした山土風の粘土である。原町火力発電所関連遺跡から採取した粘土である。生の粘土で粒子は小さく粒状物は少ない。

化学成分：分析結果を表4に15年度に調査した粘土、割田遺跡から出土、採取した粘土とともに示す。比較材1は15年度に調査した粘土採掘坑から採取した粘土で、割田遺跡の別調査で分析した粒状鉱物を余り含まない田圃の土のような粘土の分析値である。SiO₂とAl₂O₃以外の成分に関しては余り大きな差はないように見える。SiO₂は64.0%と通常の粘土の約60%より高く、アルミナは18.4%と通常の粘土の約15～18%の高い側にあり、耐火度面では有利である。一方、造滓成分(SiO₂+Al₂O₃+CaO+MgO+Na₂O+K₂O)中の軟化性を持つアルカリ土類成分(CaO+MgO)は1.98%とやや低く、耐火度を低下させるNa₂O+K₂Oは2.53%と一般的な範囲にある。軟化性に不利なT.Feは3.46%とやや高めである。Al₂O₃はやや高いもののSiO₂はそれほど高くなく化学成分的には耐火度はあまり高くないと思われる。

耐火度：耐火度の測定結果を表5に表4に引用した他の粘土の測定値とともに示す。耐火度は1250℃で余り高くなく、他の資料とほぼ同じである。本資料、比較材2、比較材3はいずれも石英粒のような粒状物は観察されず粘土そのものであるのに対して比較材4は粒状物が観察されている。炉壁材として使用するには石英粒の配合など耐火度向上対策が必要な粘土の可能性はある。

7) 資料番号 No. 7 鉄塊 (MH 06001-2)、着磁度：6、MC：>30mm

資料の概要:本資料は「まほろん2号炉」で生成した鉄塊で炉底最下部に形成されたものである。

外観:重量 122.8 g、長さ 61.4mm、幅 53.0mm、厚さ 32.0mm。資料1に比べ遥かに重量感のある鉄そのもののイメージを持つ鉄塊資料である。2号炉の炉底最下部で採取されたものでメタルの凝集が十分進んでいると見られる。メタル反応は 30mm 大相当以上あり、磁着も強く着磁度は6ある。

顕微鏡組織 (鉄の組織):顕微鏡試料の概観を埋込試料写真 (試料 No. 7) に、5倍のマクロ組織をマクロ写真 (資料 No. 7) に示す。資料の凹部にわずかに滓が見られるが黒色の孔や空隙を除き全て金属鉄である。金属鉄で白く見える部位分はCをほとんど含まないフェライト(α 鉄)で暗く見える部分はパーライト組織 (フェライトとセメンタイト (Fe_3C) の層状組織) である。フェライト部分とパーライト部分が共存しており、浸炭の不均一性を示している。金属鉄のミクロ組織を鉄顕微鏡組織 7-1、7-2に示す。鉄組織写真7-1は大部分がフェライトで一部にパーライト組織の結晶粒が観察される部分で、鉄組織写真7-2はパーライト結晶粒が多くフェライト結晶粒が少ない部分である。

(滓の組織):顕微鏡組織写真7 (資料 No. 7) に金属鉄の凹部に付着していた滓の組織を示す。100倍の写真ではあばた状の大きなウルボスピネルが観察され、細い針状のイルメナイトも観察される。ガラス質の中に小さな樹枝状ウルボスピネルと板が崩れた形状のファイヤライトが観察される。製錬滓などに見られる組織である。

化学成分:分析結果を表2に示す。Cは0.25%で亜共析鋼の組成である。Si、Ti、Alは通常では還元できない成分なので滓が介在物として分離できず混入したと思われる。Mn、Cuなども含まれるが0.003%、0.004%と低い。

以上を総括すると本資料は炭素を0.25%含む低炭素の亜共析鋼の鉄塊で比較的良好な鋳塊と思われる。

4 まとめ

1) まほろん2号の操業について (成分・組織面から)

得られた鉄は組織的にはフェライト主体の部分とパーライト主体の部分とが観察されるがCは0.25%含まれる良好な鋳である。踏み鞆の弁が破損したため操業を早めに終了したが操業は定常状態に達していたとみられ、一昨年度に比べ炉壁の浸食も少なく、鉄歩留まりも約50%と推定され、良好な操業であったと考えられる。

2) 個別資料

(1) 資料 No. 1 (MH06001-1) 鉄塊 (⇒製錬滓)

金属鉄が流下して残ったやや発泡している造滓成分が比較的多い炉底上部の製錬滓である。良好な製錬滓とは言い難い。

(2) 資料 No. 2 (MH06002) 卸鉄塊

製錬滓が窪みにわずかに残る程度まで除去され、ほぼ完全に脱炭が進んだ卸鉄塊である。

(3) 資料 No. 3 (MH06003) 鉄滓

CaO、MgO が高い特徴のある炉壁との反応が多い製錬滓である。また、流動性は余り良くな
く激しく発泡している。

(4) 資料 No. 4 (MH06004) 流出滓(最終ノロ出し)

ウルボスピネルとガラス質主体の良好に熔融した TiO₂ を約 12% 含む製錬滓で、砂鉄成分か
らは鉄歩留まりは約 50% と推定される。15 年度の 7 回目のノロ出しでは歩留まりは 30% と比
べ大幅な操業改善が見られる。また、炉壁の溶損も改善が認められる。

(5) 資料 No. 5 (MH06005) 精錬滓

高温加熱により生成した酸化鉄と製錬滓が反応して滴下した製錬滓に近い成分の精錬鍛冶滓
である。

(6) 資料 No. 6 (MH06006) 粘土(南相馬市遺跡採取)

耐火度は 1250℃ で余り高くなく、他の割田地区から採取した資料とほぼ同じである。炉壁
材として使用するには石英粒の配合など耐火度向上対策が必要とおもわれる。

(7) 資料 No. 7 (MH 06001-2) 鉄塊

炭素を 0.25% 含む低炭素の亜共析鋼の鉄塊で比較的良好な鋳塊と思われる。

5 参 考

(1) 鉄滓の顕微鏡組織について

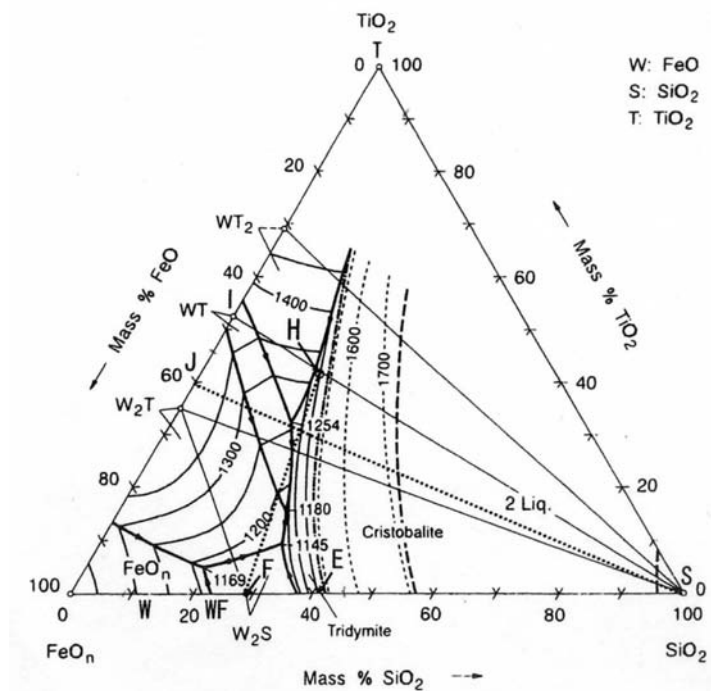
鉄滓を構成する化合物結晶には、一般的に表 A1 のような鉱物組織がある。酸化鉄 (Fe₂O₃、
Fe₃O₄、FeO)、二酸化ケイ素(シリカ: SiO₂)、アルミナ (Al₂O₃) および二酸化チタン (TiO₂) を

表 A 1 鉄滓の顕微鏡鉱物組織とその観察状況

鉱物組織名(和)	鉱物名(英)	化学式	偏光顕微鏡観察状況
ヘマタイト	Hematite	α-Fe ₂ O ₃	赤褐色～赤紫色
マーグマイト	Maghemite	γ-Fe ₂ O ₃	赤紫色～黒紫色
マグネタイト	Magnetite	Fe ₃ O ₄	白青色、四角または多角盤状
ウスタイト	Wustite	FeO	灰白色、繭玉状または樹枝状
ファイヤライト	Fayalite	2FeO・SiO ₂	薄い青灰色、短冊状の長い結晶
ウルボスピネル	Ulvospinel	2FeO・TiO ₂	白色、四角～角形板状結晶
イルメナイト	Ilmenite	FeO・TiO ₂	白色、針状・棒状の長い結晶
シュードブルツカイト	Pseudobrookite	FeO・2TiO ₂	白色、針状の結晶
ハロイサイト	Halloysite	Al ₂ O ₃ ・2SiO ₂ ・2H ₂ O	X線で同定できたが組織は不明
ハーシナイト	Hercynite	FeO・Al ₂ O ₃	ウスタイト中に析出、ごま粒状。
アカゲナイト	Akagenite	β-FeOOH	X線で同定できたが組織は不明
ゲーサイト	Goethite	α-FeOOH	白～黄色、リング状が多い。

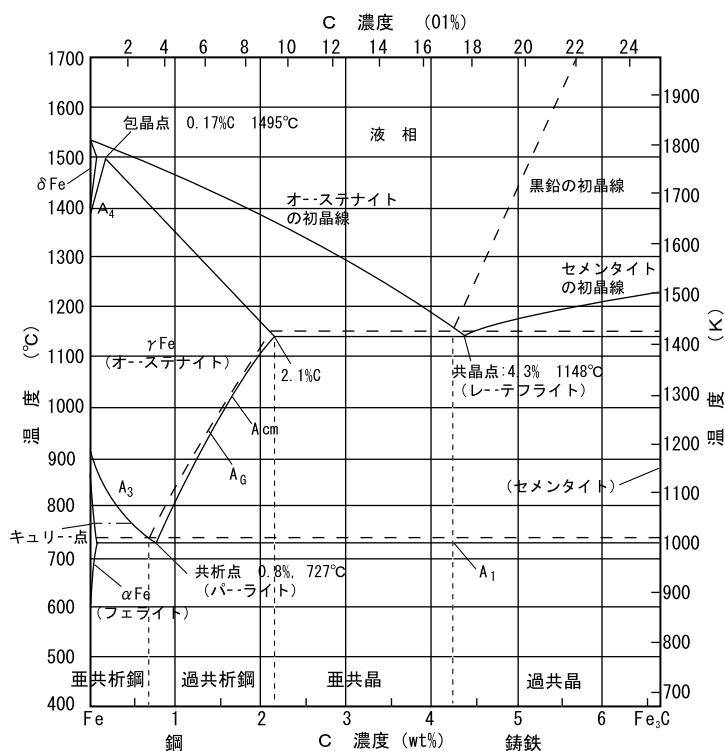
組み合せた化合物（固溶体）が多く、これら鉱物結晶は含有量にも依存するが、X線回折により検出され確認できる。鉄滓中の低融点化合物はガラス相（非晶質）を形成する傾向があり、X線回折では検出されない場合が多い。

(2) 鉄滓の平衡状態図



FeO_n-SiO₂-TiO₂ 系平衡状態図

(3) 鉄-炭素系状態図



6 図表・写真

・調査資料と調査項目

表1 調査資料と調査項目（鉄づくりイベント産出鉄塊等）

資料No	種別 位置等	重量 g	着磁度	M C 反応	化学成分	外観写真	マクロ写真	ミクロ写真	耐火度
1	炉底上部生成鉄塊	111.3	○	○	○	○	○	○	
2	精錬鉄塊	31.3	○	○	○	○	○	○	
3	プレ操業時生成の鉄滓	58.9	○	○	○	○		○	
4	流出滓（最終ノロ出し）	135.1	○	○	○	○		○	
5	精錬滓（No.2 精錬時）	46.6	○	○	○	○		○	
6	粘土（原町火力関連遺跡採取）	1122.2	○	○	○	○			○
7	炉底最下部生成鉄塊	122.8	○	○	○	○	○	○	

・化学成分分析結果

表2 鉄塊の化学成分分析結果（%）

資料No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Co	Al	V	Ti	Ca	Mg
2	0.01	0.097	0.006	0.099	0.005	0.007	0.018	0.07	0.084	0.005	0.087	0.024	0.015
7	0.25	0.022	0.003	0.094	0.004	0.004	0.009	0.041	0.008	0.003	0.032	0.005	0.007

表3-1 鉄滓の化学成分分析結果（%）

資料No.	T. Fe	M. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	比率(%)	
											FeO	Fe ₂ O ₃
1	42.5	12.5	38.3	0.33	19.8	5.66	1.12	1.61	1.21	0.71	99.2	0.8
3	39.5	24.3	15.6	4.39	30.9	5.65	3.84	3.69	1.24	0.89	78	22
4	33	0.56	39.5	2.48	29.5	7.18	1.7	2.07	1.75	1.04	94.1	5.9
7	46.5	8	46.6	3.26	18.6	6.63	1.44	1.56	1.11	0.6	93.5	6.5

資料No.	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Co	C. W.	C	V	Cu	TiO ₂ /T. Fe	MnO/TiO ₂	造滓成分%
1	15.6	0.61	0.222	0.018	0.26	0.04	0.63	0.005	0.367	0.039	30.11
3	7.05	0.52	0.469	0.018	0.3	0.13	0.12	0.005	0.178	0.074	46.21
4	12.2	0.68	0.322	0.013	0.25	0.03	0.23	0.004	0.37	0.056	43.24
7	9.4	0.48	0.308	0.014	0.28	0.43	0.26	0.005	0.202	0.051	29.94

C. W. = 化合水、造滓成分 = SiO₂+ Al₂O₃+ CaO+ MgO+ Na₂O+ K₂O

表 3-2 鉄滓の化学成分分析結果 (M. Fe を 0% に補正) (%)

資料 No.	T. Fe	M. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	比率 (%)	
											FeO	Fe ₂ O ₃
1	34.35	0	43.86	0.37	22.7	6.48	1.28	1.84	1.39	0.81	99.2	0.8
3	20.14	0	20.67	5.82	40.9	7.49	5.09	4.89	1.64	1.18	78	22
4	32.62	0	39.72	2.5	29.7	7.22	1.71	2.08	1.76	1.05	94.1	5.9
7	41.89	0	50.7	3.54	20.2	7.21	1.57	1.7	1.21	0.65	93.5	6.5

資料 No.	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Co	C. W.	C	V	Cu	TiO ₂ /T. Fe	MnO/TiO ₂	造滓 成分%
1	17.9	0.7	0.2542	0.021	0.298	0.046	0.721	0.006	0.52	0.039	34.48
3	9.3	0.69	0.6213	0.024	0.397	0.172	0.159	0.007	0.464	0.074	61.22
4	12.3	0.68	0.3238	0.013	0.251	0.03	0.231	0.004	0.376	0.056	43.48
7	10.2	0.52	0.3351	0.015	0.305	0.468	0.283	0.005	0.244	0.051	32.57

C. W. = 化合水、造滓成分 = SiO₂+ Al₂O₃+ CaO+ MgO+ Na₂O+ K₂O

表 4 粘土化学成分分析結果 (%)

資料No.	T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
6	3.46	0.11	4.11	64	18.4	1.09	0.89
比較材1	2.82	0.54	3.43	70.5	14.8	1.86	0.89
比較材2	2.99	0.39	3.84	65.9	17.3	1.02	0.96
比較材3	3.63	0.55	4.58	68.4	16.1	1.09	0.59
比較材4	4.14	0.36	5.52	62.9	17.4	1.03	1.07

資料No.	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	化合水	C	強熱減量
6	1.19	1.34	0.7	0.04	5.68	0.44	7.42
比較材1	1.02	1.51	0.73	0.06	3.72	0.53	4.81
比較材2	1.29	1.67	0.72	0.04	5.39	0.13	8.19
比較材3	1.03	1.45	0.65	0.02	3.1	0.19	5.95
比較材4	1.26	1.63	0.66	0.09	6.11	0.43	7.33

比較材 1: 「鉄づくり」イベント産出鉄塊等分析調査 (平成 17 年 3 月) の資料 No. 7 (粘土・南相馬市鹿島産)、比較材 2、3: 割田 C, D, E, G 遺跡出土製鉄関連遺物分析調査 (平成 17 年 3 月) の資料 No. 1 (粘土) と No. 17 (粘土)、比較材 4: 原町火力発電所関連遺跡 (割田 C 遺跡) 出土製鉄関連遺物分析調査 (平成 16 年 3 月) の資料 No. 1 (粘土)

・耐火度

表 5 粘土の耐火度試験結果

資料番号	耐火度 SK 番号	耐火度 (°C)	備考
6	SK8	1250	試験方法: 耐火煉瓦の耐火度の試験方法 (JIS R2204) に準拠 試験条件: 酸素プロパン炉法 * 耐火温度: 下表のゼーゲルコーン溶倒温度比較表を参照
比較材1		測定なし	
比較材2	SK8	1250	
比較材3	SK7+ 1240		
比較材4	SK13 1380		

「鉄づくり」イベント産出鉄塊等の分析調査

参考表 1 砂鉄（大信村・隅戸川産）の化学成分分析結果（%）平成 15 年度調査

資料No.	T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	比率(%)	
										Fe ₂ O ₃	FeO
2	57.7	33.1	45.71	3.13	2.06	0.5	1.49	0.06	0.05	42	58

資料No.	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	V	C. W.	TiO ₂ /T. Fe	MnO/TiO ₂	V/TiO ₂	造滓成分%
2	11	0.58	0.346	0.24	0.24	0.19	0.01	0.0218	7.29

C. W. = 化合水、造滓成分 = SiO₂+ Al₂O₃+ CaO+ MgO+ Na₂O+ K₂O

参考表 2 粘土（大信村産）化学成分分析結果（%）平成 15 年度調査

資料 No.	T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C. W.	灼熱減量
6	0.81	0.46	0.65	78	11.9	0.26	<0.1	1.13	1.64

資料 No.	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	C
6	0.17	0.03	2.18	4.44	0.08

参考表 3 流出滓の化学成分分析結果（%）平成 15 年度調査

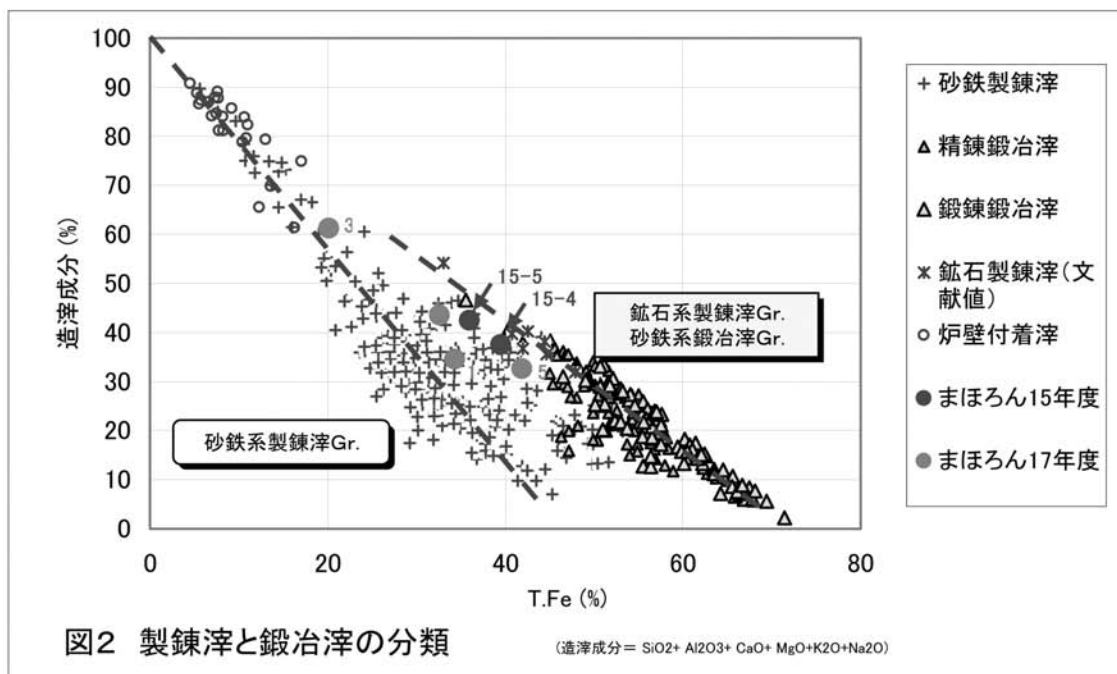
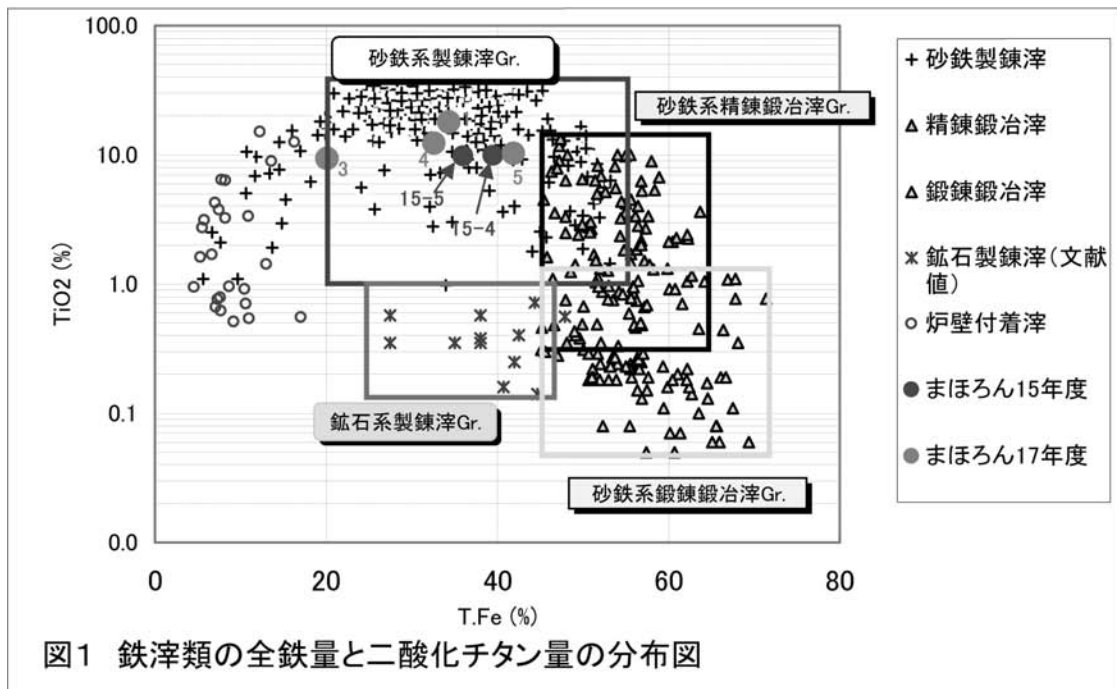
資料No.	T. Fe	M. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	比率(%)	
											Fe ₂ O ₃	FeO
4	39.5	0.36	46	4.79	25.3	6.97	1.63	1.58	0.72	1.36	90.57	9.43
5	36	0.28	44.2	1.89	28.5	8.01	1.95	1.82	0.8	1.4	95.9	4.1

資料No.	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Co	C. W.	C	V	Cu	TiO ₂ /T. Fe	MnO/TiO ₂	造滓成分%
4	9.88	0.56	0.32	0.008	0.25	0.01	0.22	0.001	0.25	0.014	37.56
5	9.77	0.58	0.294	0.008	0.26	0.01	0.21	0.001	0.27	0.016	42.48

C. W. = 化合水、造滓成分 = SiO₂+ Al₂O₃+ CaO+ MgO+ Na₂O+ K₂O

資料 4 : 4 回目ノロだし時の流出滓、資料 5 : 7 回目ノロだし時の流出滓

・ 製造工程上の鉄滓分類



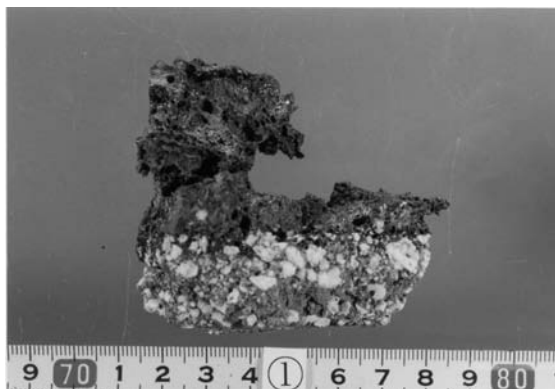
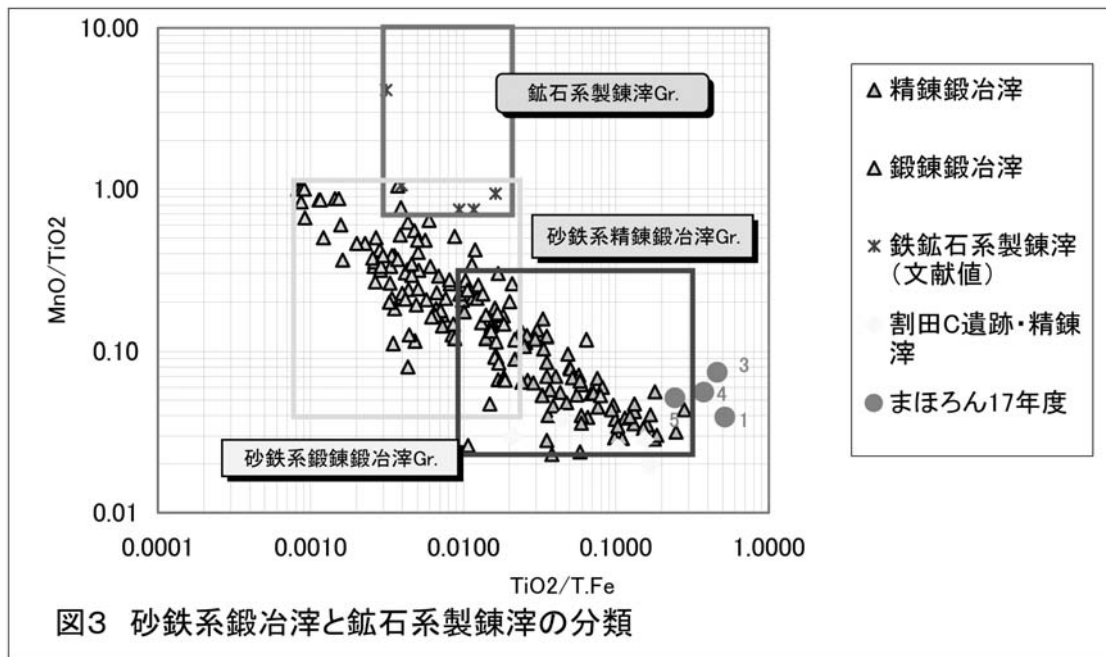


写真1 資料 NO. 1 外観 1

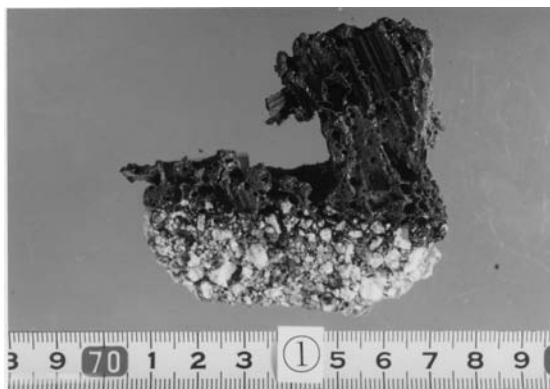


写真2 資料 NO. 1 外観 2

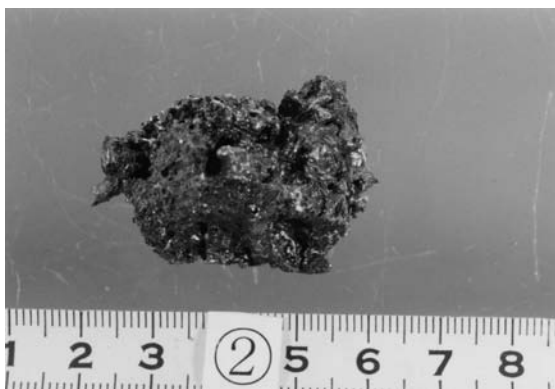


写真3 資料 NO. 2 外観 1

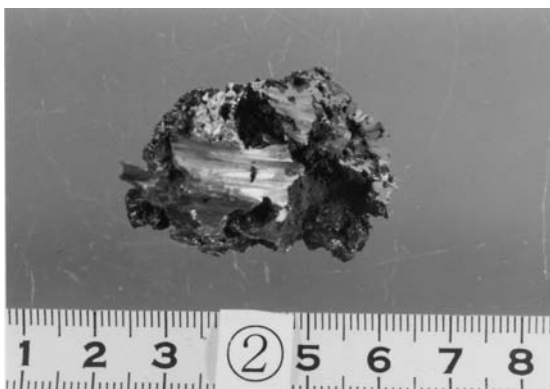


写真4 資料 NO. 2 外観 2

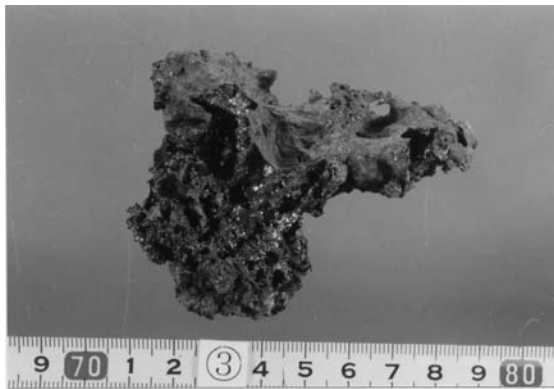


写真5 資料 NO. 3 外観 1

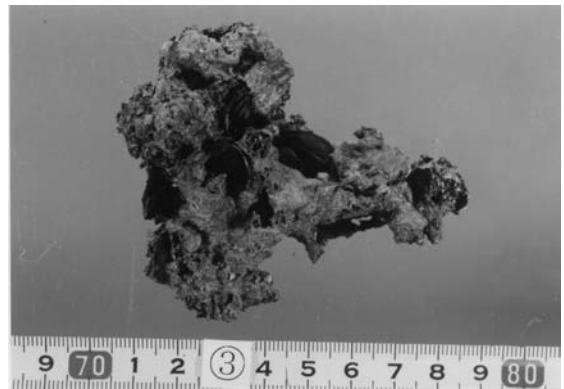


写真6 資料 NO. 3 外観 2

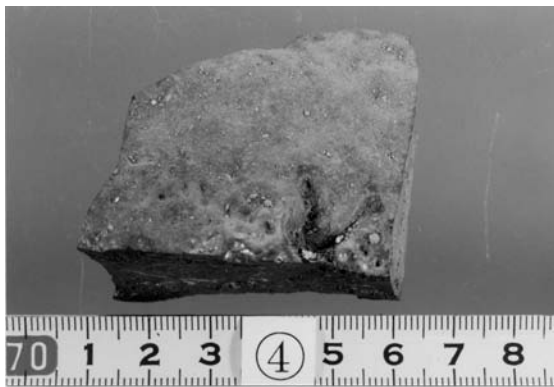


写真7 資料 NO. 4 外観 1

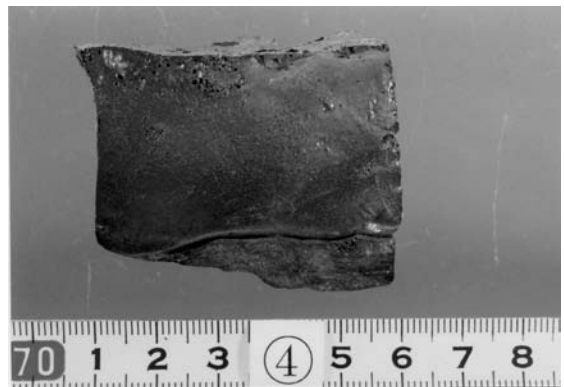


写真8 資料 NO. 4 外観 2

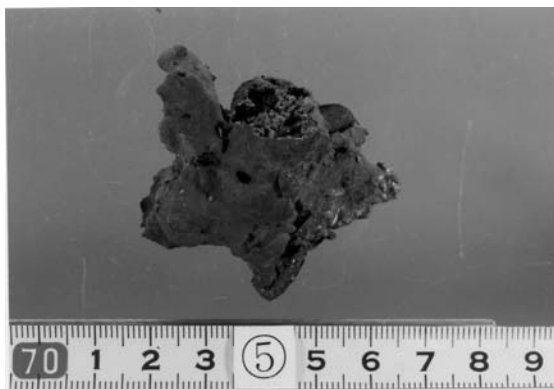


写真9 資料 NO. 5 外観 1

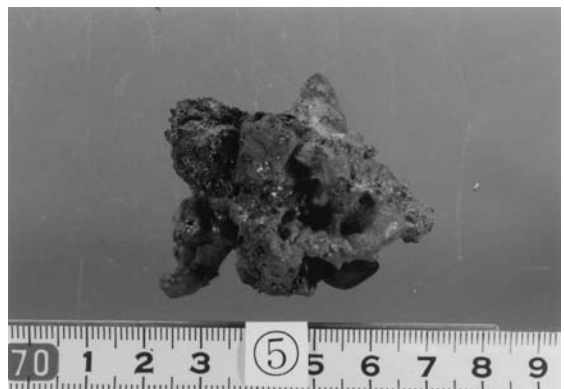


写真10 資料 NO. 5 外観 2



写真11 資料 NO. 6 外観 1



写真12 資料 NO. 6 外観 2

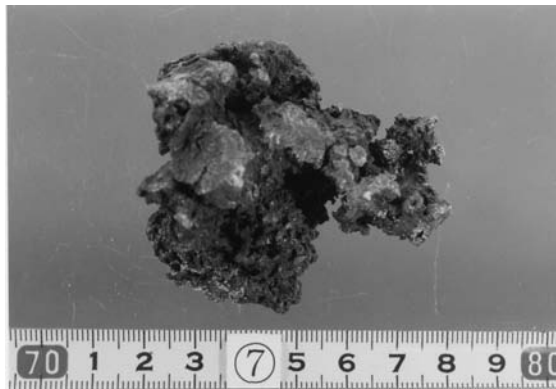


写真 13 資料 NO. 7 外観 1

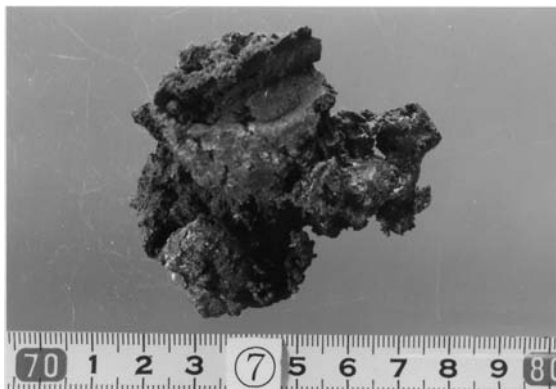


写真 14 資料 NO. 7 外観 2

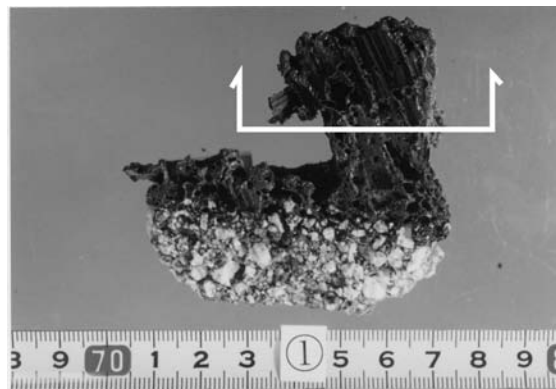


写真 15 資料切断位置 (NO. 1)

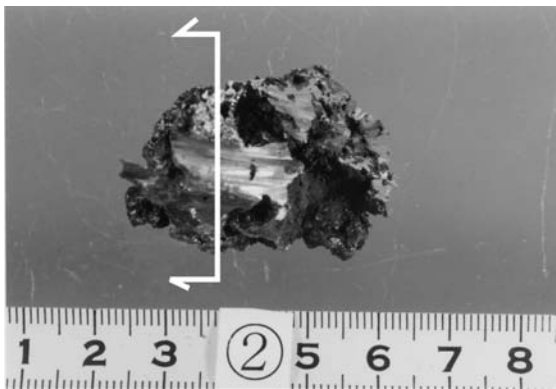


写真 16 資料切断位置 (NO. 2)

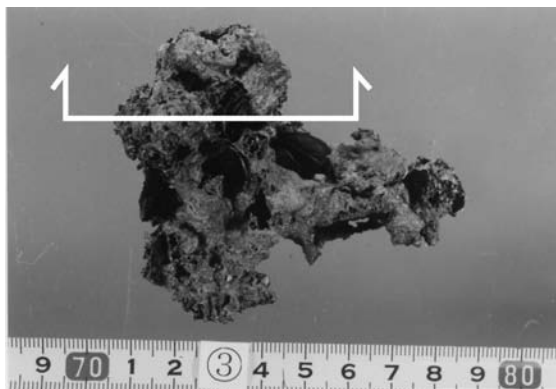


写真 17 資料切断位置 (NO. 3)

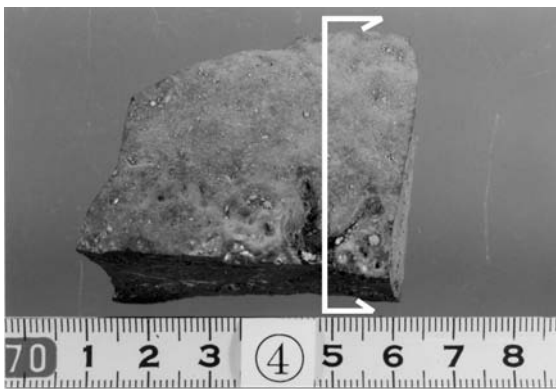


写真 18 資料切断位置 (NO. 4)

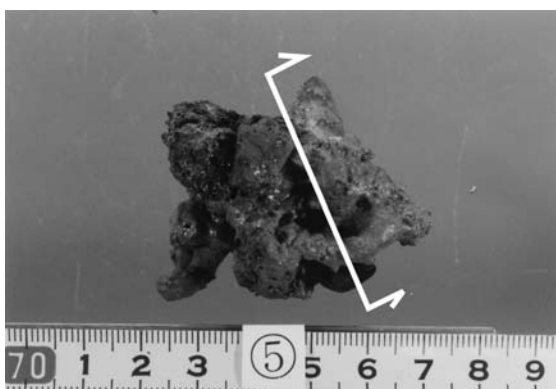


写真 19 資料切断位置 (NO. 5)

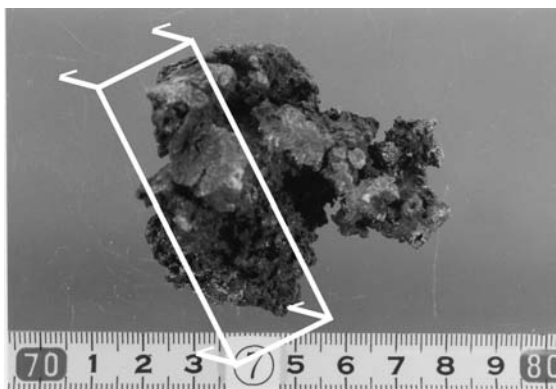


写真 20 資料切断位置 (NO. 7)

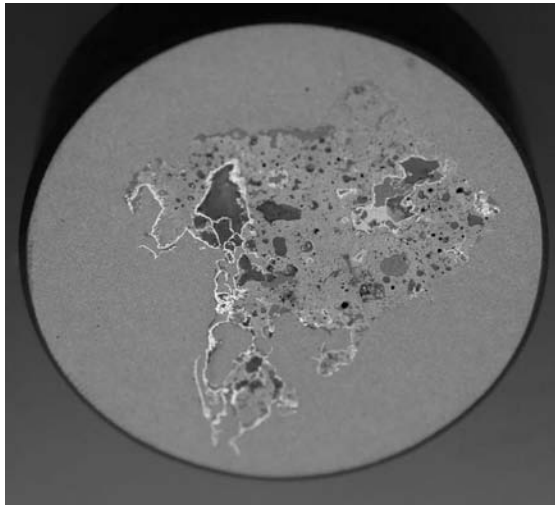


写真 21 埋め込み資料 (NO. 1)

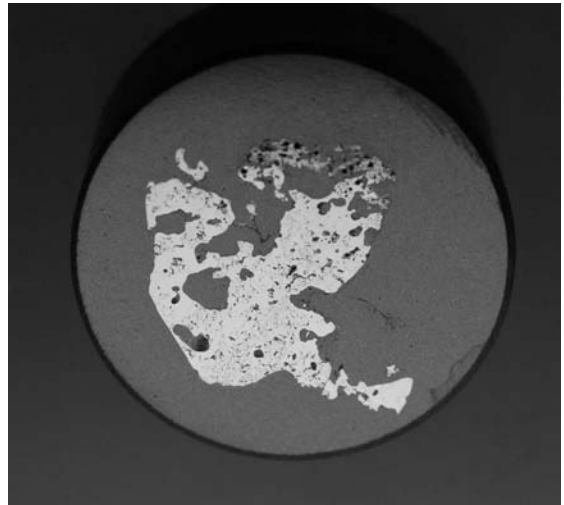


写真 22 埋め込み資料 (NO. 2)

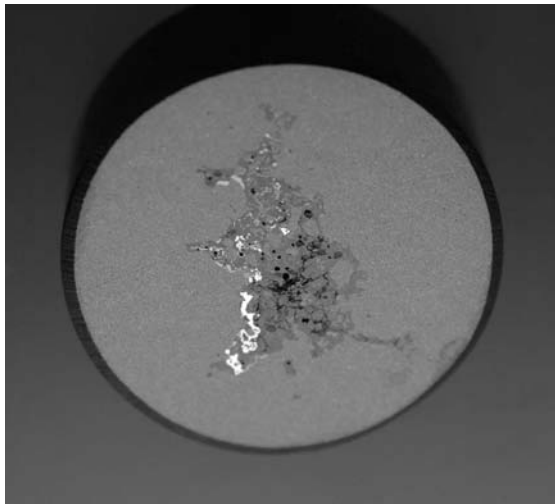


写真 23 埋め込み資料 (NO. 3-1)

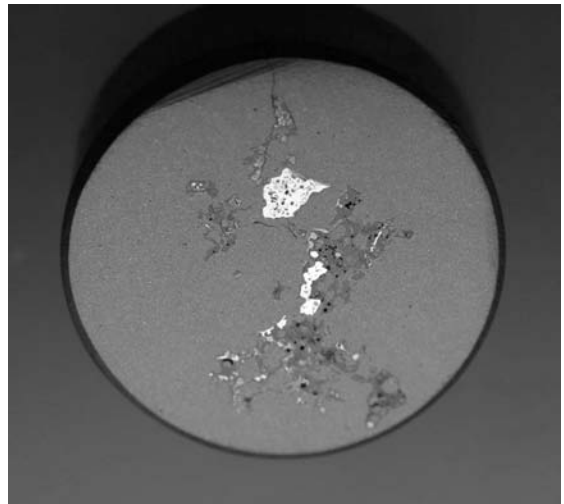


写真 24 埋め込み資料 (NO. 3-2)



写真 25 埋め込み資料 (NO. 7)

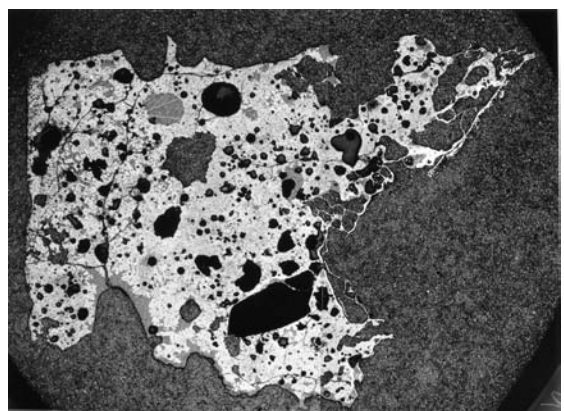


写真 26 マクロ写真 (NO. 1) × 5

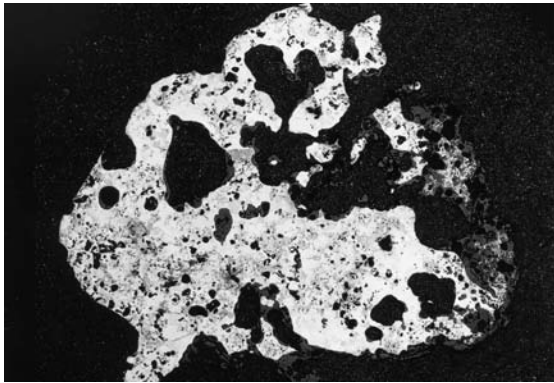


写真 27 マクロ写真 (NO. 5) × 5

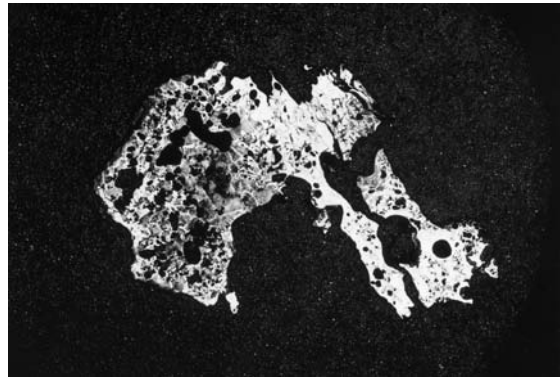


写真 28 マクロ写真 (NO. 7) × 5

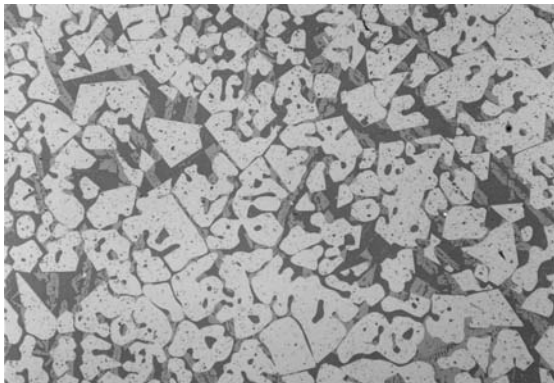


写真 29 顕微鏡写真 (資料 NO. 1-1) × 100

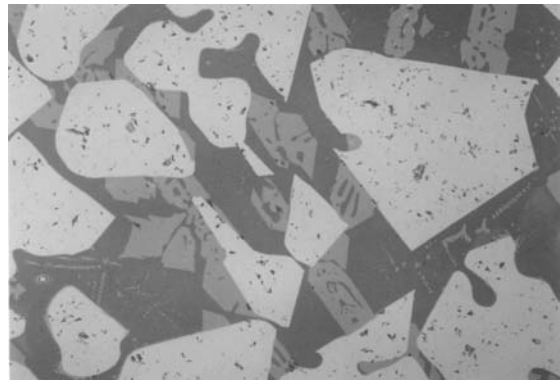


写真 30 顕微鏡写真 (資料 NO. 1-1) × 400

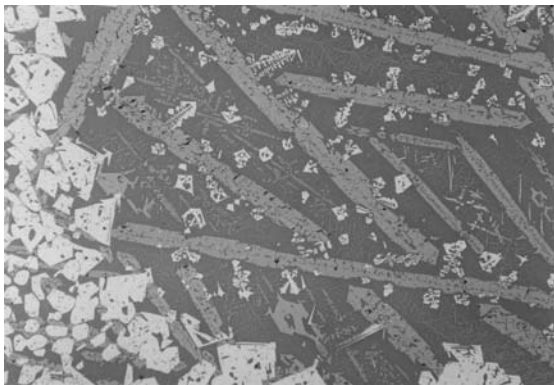


写真 31 顕微鏡写真 (資料 NO. 1-2) × 100

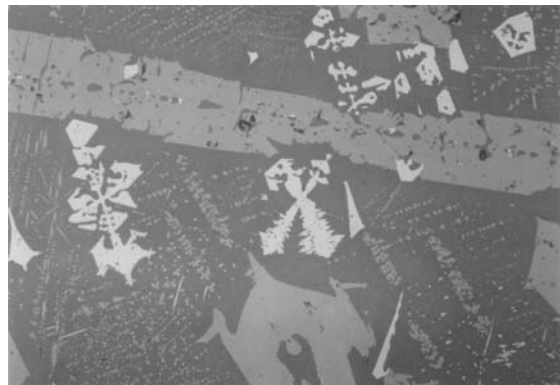


写真 32 顕微鏡写真 (資料 NO. 1-2) × 400

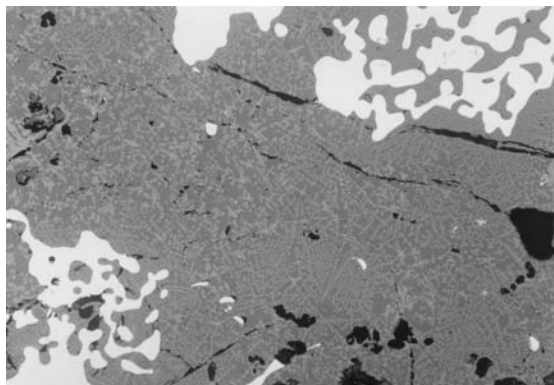


写真 33 顕微鏡写真 (資料 NO. 2-1) × 100

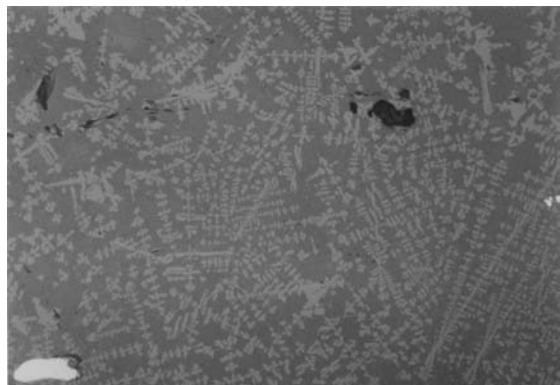


写真 34 顕微鏡写真 (資料 NO. 2-1) × 100

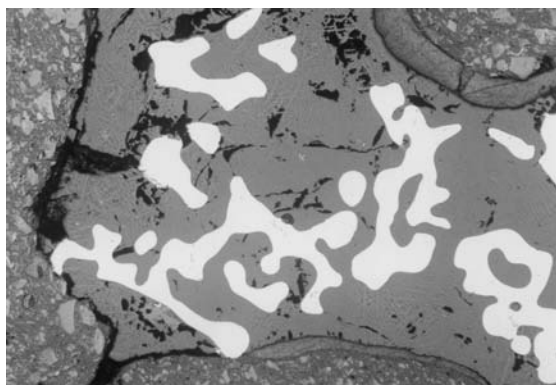


写真 35 顕微鏡写真 (資料 NO. 2-2) × 100

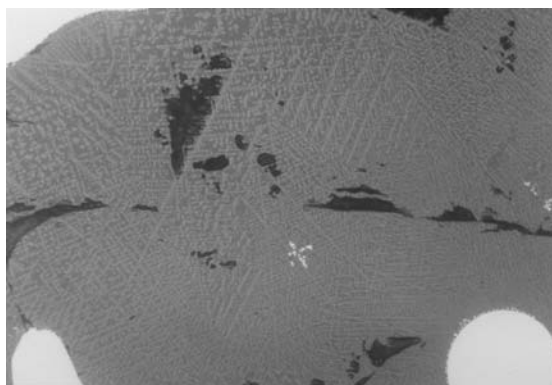


写真 36 顕微鏡写真 (資料 NO. 2-2) × 400

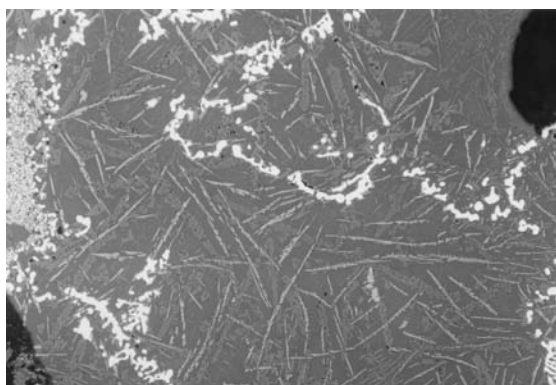


写真 37 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-1) × 100

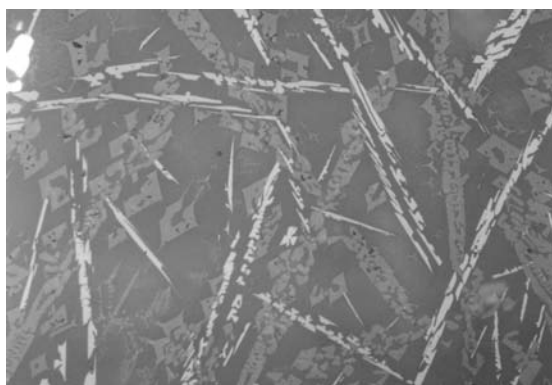


写真 38 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-1) × 400

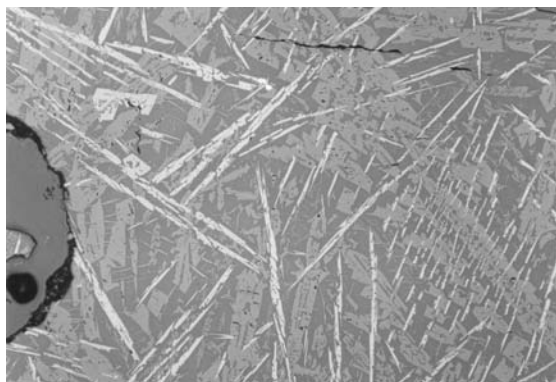


写真 39 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-2) × 100

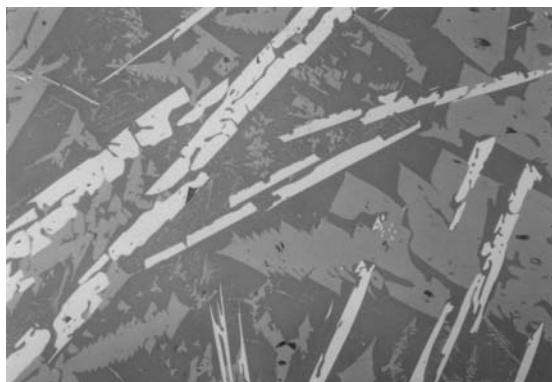


写真 40 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-2) × 400

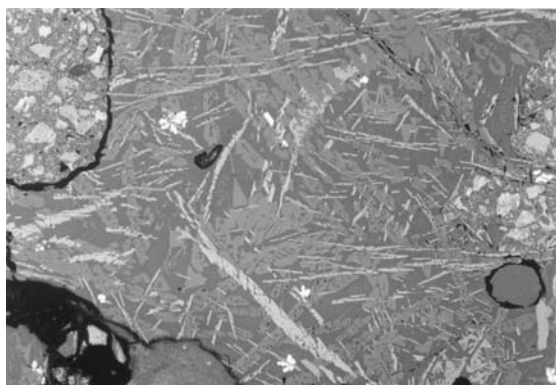


写真 41 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-3) × 100



写真 42 顕微鏡写真 (資料 NO. 3-3) × 400

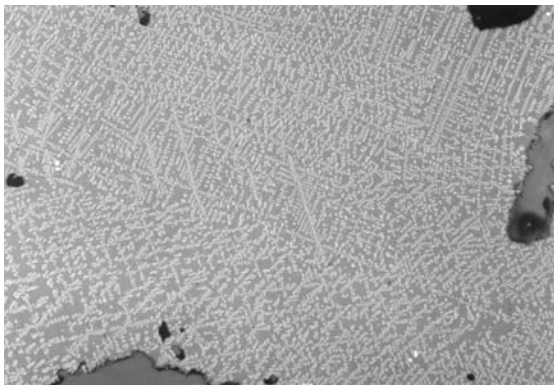


写真 43 顕微鏡写真 (資料 NO. 4-1) × 100



写真 44 顕微鏡写真 (資料 NO. 4-1) × 400



写真 45 顕微鏡写真 (資料 NO. 4-2) × 100

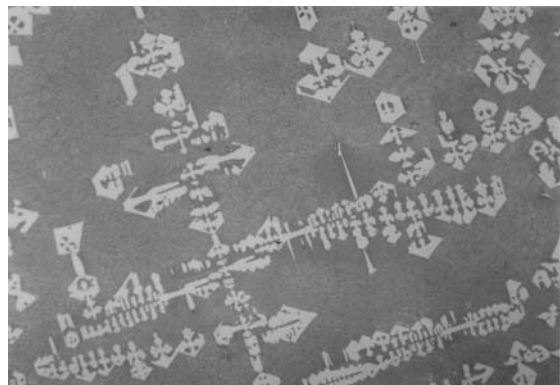


写真 46 顕微鏡写真 (資料 NO. 4-2) × 400

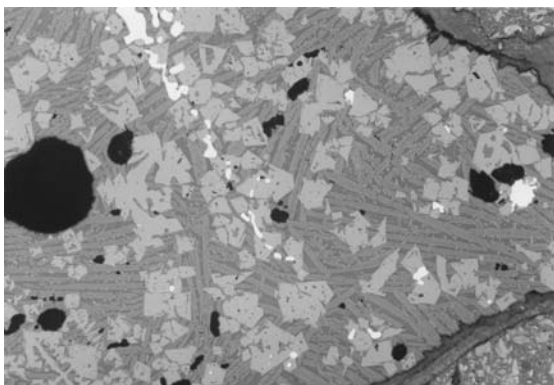


写真 47 顕微鏡写真 (資料 NO. 5) × 100

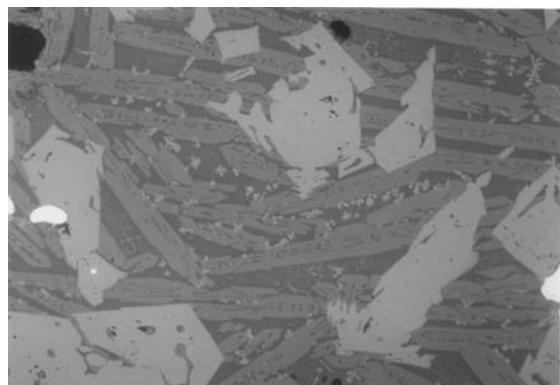


写真 48 顕微鏡写真 (資料 NO. 5) × 400



写真 49 顕微鏡写真 (資料 NO. 7) × 100

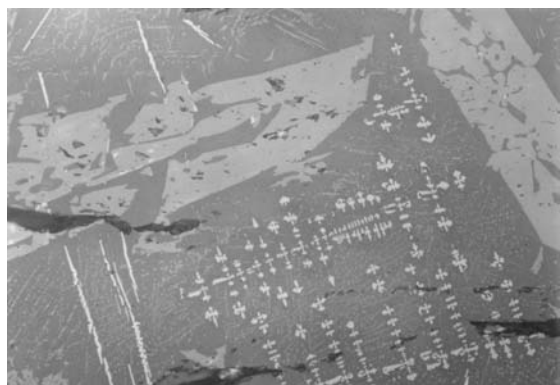


写真 50 顕微鏡写真 (資料 NO. 7) × 400

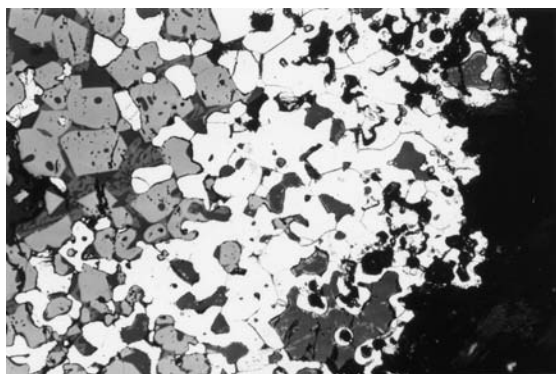


写真 51 鉄組織写真 (資料 NO. 1) × 100

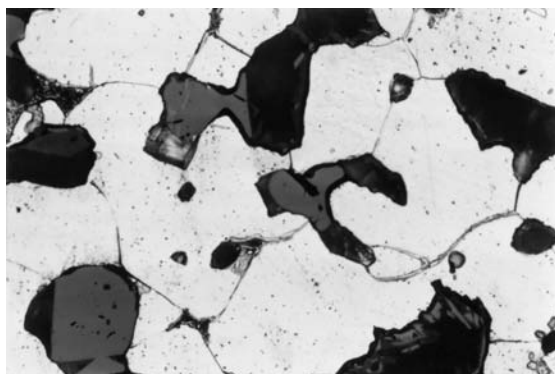


写真 52 鉄組織写真 (資料 NO. 1) × 400

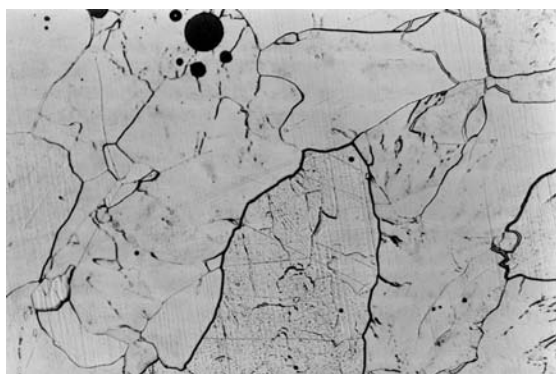


写真 53 鉄組織写真 (資料 NO. 2) × 100

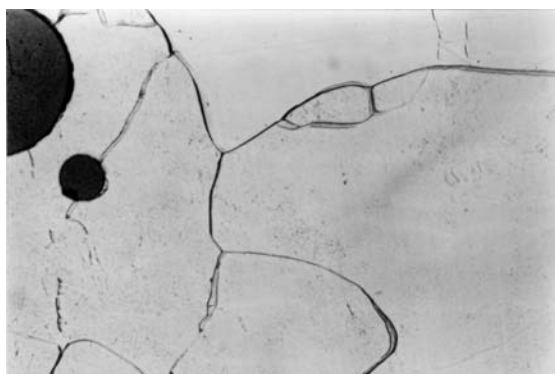


写真 54 鉄組織写真 (資料 NO. 2) × 400

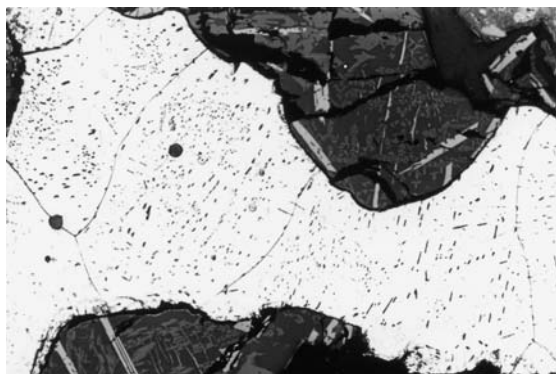


写真 55 鉄組織写真 (資料 NO. 3-1) × 100



写真 56 鉄組織写真 (資料 NO. 3-1) × 400

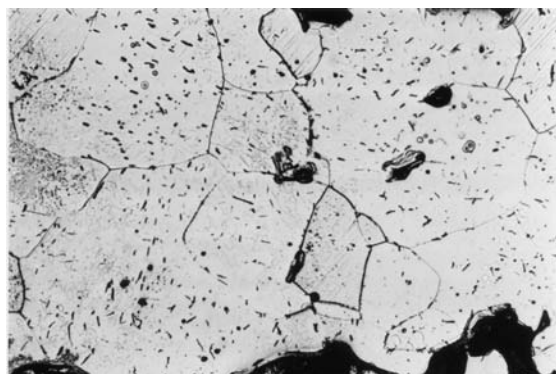


写真 57 鉄組織写真 (資料 NO. 3-2) × 100

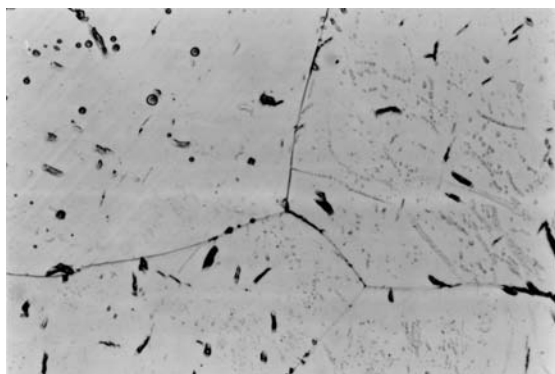


写真 58 鉄組織写真 (資料 NO. 3-2) × 400



写真 59 鉄組織写真（資料 NO. 7-1）× 100

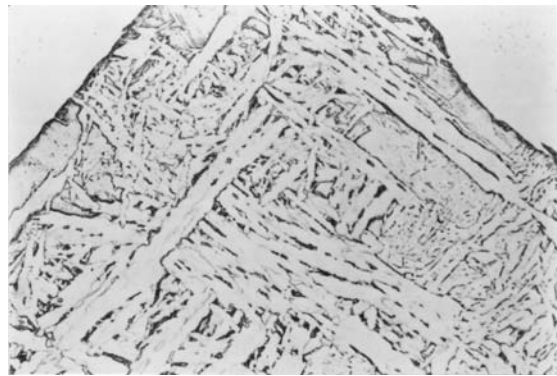


写真 60 鉄組織写真（資料 NO. 7-1）× 400



写真 61 鉄組織写真（資料 NO. 7-2）× 100

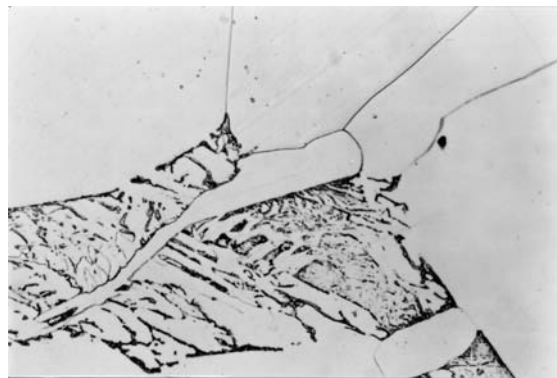


写真 62 鉄組織写真（資料 NO. 7-2）× 400

まほろん 2 号炉における復元たたら製鉄からの 製鉄関連資料中の元素濃度及び金属学的組織の調査

平井昭司、加藤将彦、小椋幸司、鈴木章悟、岡田往子（武蔵工業大学）

1 調査目的

2005 年 11 月 5 日～6 日に福島県文化財センター白河館『まほろん』において「鉄づくり」イベントが行われた。このイベントでは、平安時代の製鉄炉を原寸大に復元し、砂鉄を原料としてたたら炉を操業する鉄作りが行われた。一昨年行われた鉄づくりイベントの際には炉の大きさ（炉長）を約半分にしてケラ押し法を試みて炉底に鉄塊を作り出すことに成功した。今回は原寸大の炉によるケラ押し法を試みて鉄塊を作り出すことを目標とした。

本報では、この鉄製錬過程において生産された製鉄関連資料中の含有元素濃度及び金属学的組織から、これらの物質を評価することを目的とした。

2 復元たたら

たたら炉は、大船迫 A 遺跡・15 号製鉄炉を原寸大（炉幅：60cm、炉長：270cm、炉高：120cm）に復元した「まほろん 2 号炉」である。原料には砂鉄（福島県白河市大信隈戸川産）、燃料には木炭を用い、空気供給に踏み鞆を使用して操業を行った。総計、砂鉄：188.5kg と木炭：655.6kg を投入して、鉄塊：49kg が生成された。

3 資料

1) 分析試料

たたら炉より分析資料を採取した箇所の概略を図 1 に示す。鉄塊は A、B、1、2、3、4 の 6 種類と、製鉄により得られた粗鉄を後日鍛冶により精錬した鉄塊（下げ）の 1 種類、計 7 資料である。スラグは 1、2、4A、4B と鍛冶の際に得られた鍛冶滓の計 5 資料である。また、炉壁粘土 1 種類を資料とした。分析試料は、自動切断機及び手動ダイヤモンドカッターを使用して切片採取を行った。資料の概観と、分析のため切削した箇所を図 2-1 及び図 2-2 に示す。写真中に示す直線は自動切断機によって切断した部分を示し、内部の○印部分より分析に用いる試料の採取を行った。鉄塊試料については金属部より切り出したもの、スラグ及び炉壁粘土試料は約数 g の試料をメノウ製乳鉢により十分に粉碎・均

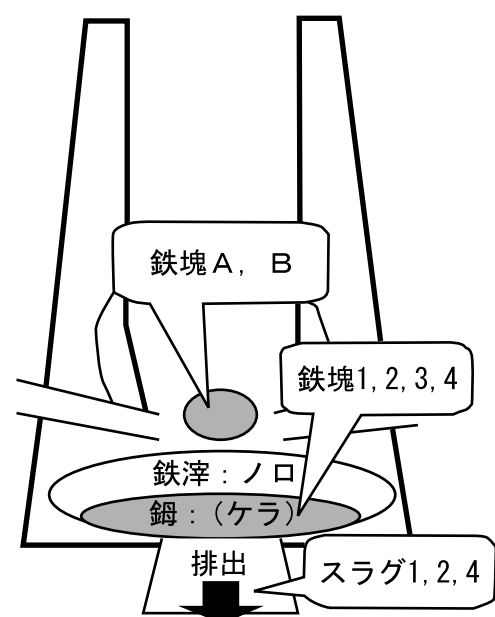


図 1 分析試料の採取場所

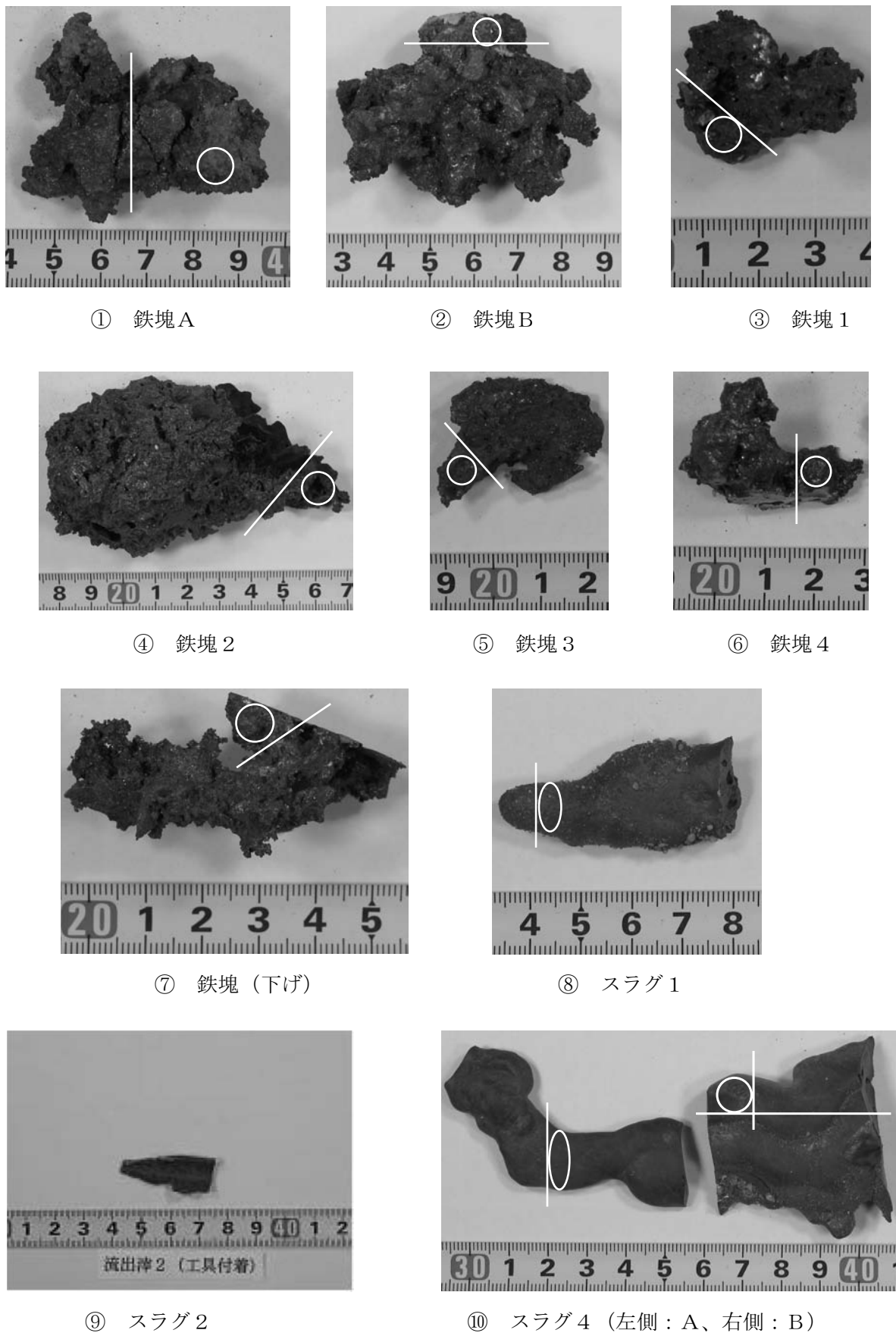
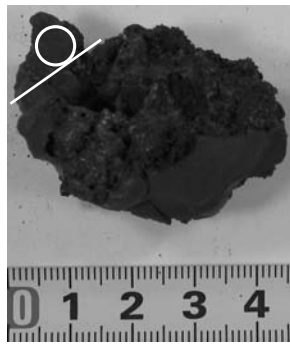
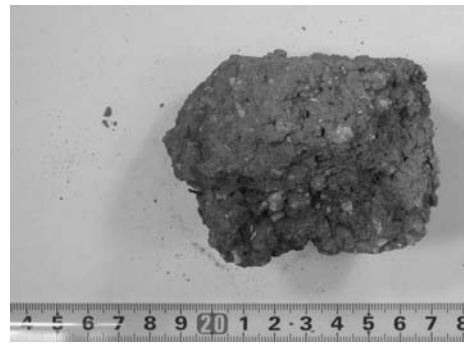


図2-1 資料概観と分析試料の採取箇所(1)



⑪ 鍛冶滓



⑫ 炉壁（粘土）

図 2-2 資料概観と分析試料の採取箇所（2）

質化したものを分析試料とした。

2) 資料観察

図 2-1 及び図 2-2 に示されている鉄塊、スラグ及び粘土の分析資料の外観の様子及び特徴を以下に記述する。

① 鉄塊 A（重量：43.3 g 着磁性（強））

操業終了後、炉を解体したとき炉底塊の上部から得た鉄塊試料である。表面はゴツゴツとしていて、強い着磁性を持っている。表面は黒色であるが、一部には既に酸化して赤茶色のサビが付着している。切断後、内部にはまばらに滓を含んだ金属光沢部分が存在している。

② 鉄塊 B（重量：99.5 g 着磁性（強））

鉄塊 A と同様にして得られた鉄塊試料であり、表面はゴツゴツとしてところどころ空孔部分が見られ、強い着磁性を持っている。表面は黒色であるが、一部には既に酸化して赤茶色のサビが付着している。切断後、内部には空孔部分と金属光沢をした部分が存在している。

③ 鉄塊 1（重量：19.9 g 着磁性（強））

炉底に生成した大きな鉄塊をハンマー等で砕いてから採取した鉄塊である。後述する鉄塊 2、3、4 とは同一鉄塊からの粉碎した一部である。そのため、4 つ資料の外観は類似している。ゴツゴツとした表面状態でところどころ空孔部分も見られる。強い着磁性を持ち、表面の大部分が輝いた黒色をしている。黒色の部分には、ところどころ細かい白色のガラス質と見られる粒状のものが存在しているところと所々赤茶のサビが付着しているところがある。また、切断した内部には金属光沢になっているところと黒色の滓成分が混在しているところがある。

④ 鉄塊 2（重量：108.7 g 着磁性（強））

鉄塊 1 よりも大きな資料であり、表面には鉄塊 1 よりは大きめの空孔になっているゴツゴツした黒色に輝いた滓が付着している。その一部には赤茶のサビが付着しているところもある。また、写真右上の黒色部分には木炭が燃焼し切らないでそのままの状態で喰い込んでいる。切断面には、金属部分と黒色の滓部が存在している。

⑤ 鉄塊 3（重量：10.0 g 着磁性（強））

小さく平たい形状で、表面は黒色になっているが、滓が付着した様子ではない。一部、銹化

し赤茶色になっているところがある。切断すると、大部分が金属光沢を有していた。

⑥ 鉄塊4 (重量: 21.7 g 着磁性 (強))

鉄塊1、2、3と同様に、表面はゴツゴツとした黒色で無数の空孔を含んだ細長い鉄塊である。切断面の大部分は、金属光沢を残している。

⑦ 鉄塊 (下げ) (重量: 20.7 g 着磁性 (強))

まほろん2号炉による製鉄実験の後、製鉄の際に得られた小さな鉄塊を集めて鉄塊片をまとめる下げの鍛冶作業(精錬過程)を行って得られた鉄塊である。小ぶりの割には重量感があり、着磁性が他の鉄塊(製錬時に得られた鉄塊)に比べて非常に強い。また、試料表面に金属光沢が多く見られ、製錬時の不純物が多く取り除かれた様子が感じられる。

⑧ スラグ1 (重量: 16.9 g 着磁性 (無))

本操業における最初のノロ出し作業の際に得られたスラグである。炉内から流出した際に細かい砂利を含み、割れた断面には空孔が見られるが蜜になっている。全体的に黒色で表面は滑らかであり、一部は赤茶色をしている。

⑨ スラグ2 (重量: 2.5 g 着磁性 (無))

2回目のノロ出し作業の際に流出滓が得られず、滓を掻き出すために炉内に工具を入れた際に工具に付着した小さなスラグ試料である。全体に黒色をしている。試料量が少ないために全てを粉砕し、分析に使用した。

⑩ スラグ4 (A(左) 重量: 23.2 g 着磁性 (無)、B(右) 重量: 54.5 g 着磁性 (無))

4回目のノロ出し作業の際に、多量に流出したスラグの一部である。細長い部分と塊状の部分の2種類を採取し、共に表面は滑らかで、黒色及び赤茶色をしている。また、裏面には砂利を含み、鈍い光沢が見られる。切断面は蜜になっており、全体に重量感がある。

⑪ 鍛冶滓 (重量: 34.0 g 着磁性 (弱))

ゴツゴツした塊状のものの表面になめらかな滓成分が付着している。内部の塊状部分には褐色のサビが付着しており、その他の部分は濁った黒色の滓部分となっている。

⑫ 炉壁粘土 (重量: 224.1 g 着磁性 (無))

たたら炉に使われていた粘土ブロックの一部分である。全体の大部分が黄土色で、内部に直径数mm程度の白色の粒状のものが多く見られる。炉壁の内部に当たる部分には製鉄時の熱による焦げが見られ、黒ずんでいる。

表1 EMIA-510 分析条件

燃焼管温度		1450°C
測定時間	炭素	60s
	硫黄	70s

表2 使用した鉄鋼標準物質

試料No.	濃度 (%)	
	炭素	硫黄
JSS057-6	0.52	0.0057
JSS030-7	0.196	0.0076
JSS102-6	4.73	0.0177
JSS174-7	0.042	—
JSS242-10	—	0.030
JSS243-4	—	0.346

4 分析法

1) 燃焼赤外線吸収法

炭素及び硫黄濃度の定量のため、(株)堀場製作所製 炭素・硫黄分析装置 EMIA-510 を使用した。本装置は管状電気抵抗炉式の燃焼赤外線吸収法を用いた装置である。分析条件を表1に示す。また、事前に表2に示す(社)日本鉄鋼連盟製の鉄鋼標

準物質（炭素濃度：0.042～4.73%、硫黄濃度：0.0057～0.346%）を用いて分析をし、補正曲線を作成した。試料重量が0.1 g程度であれば炭素については1%以下、硫黄については5～6%程度の誤差範囲内で分析できることを確認した。そのため分析用の試料を手動ダイヤモンドカッターで切り出す際、各試料の重量は0.1 g程度になるようにした。

2) 機器中性子放射化分析法

機器中性子放射化分析法は、試料に含まれる主成分元素から微量元素を定量する方法である。鉄塊試料の分析には、できるだけ健全な金属部を削り出し、スラグあるいは粘土試料は、均一部分の約2 gを削り出し、メノウ製乳鉢で粒径が $100 \mu\text{m}^{\phi}$ ぐらいになるまで粉砕した。その後、鉄塊、スラグ及び粘土試料のそれぞれ約50mgを秤量した後、ポリエチレン袋に二重に詰めたものを照射・分析用試料とした。表3には、

表3 中性子放射化分析に使用した試料重量

各試料の中性子放射化分析した試料量を記すが、原子炉を利用する都合上、一部の資料は同一資料の近辺から二つの試料を削り取り、一つを短寿命核種測定用、もう一方を中・長寿命核種測定用とした。定量のための比較標準試料についても同様にして試料作成を行った。比較標準試料は、日本鉄鋼連盟製の高純度鉄認証標準物質（JSS 001-3、001-4、003-4）及び国立環境研究所製の粉塵認証標準物質（NIES 8）を使用した。分析試料の中性子照射には日本原子力研究開発機構の研究用原子炉：JRR-4（熱出力100kW）を使用した。放射化した試料の γ 線測定には高純度Ge検出器と4096チャンネル波高分析器よりなる γ 線スペクトロメトリーを用い、本研究室で開発したGAMA03プログラムで解析を行った。放射化するための中性子照射及び γ 線測定の条件を表4に示し、元素定量のための着目する放射性核種及び γ 線エネルギー等の核データを表5に示す。なお、Mnの定量においては、 $^{59}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$ 反応により ^{56}Mn が生成するので、高純度鉄（Mn極微量）を用いてFeからの寄与（Mn 28.5 $\mu\text{g}/\text{Fe}$ 1g）を計算し、補正を行った。また、Crの定量においては、 $^{54}\text{Fe} (n, \alpha) ^{51}\text{Cr}$ 反応により ^{51}Cr が生成するので、高純度鉄（Cr極微量）を用いてFeからの寄与（Cr 8.32 $\mu\text{g}/\text{Fe}$ 1g）を計算し、補正を行った。

試料番号	試料名	試料重量(mg) 短寿命核種 測定用	試料重量(mg) 中・長寿命核種 測定用
③	鉄塊 1	61.8	52.2
④	鉄塊 2	59.1	56.0
⑤	鉄塊 3	60.7	55.4
⑥	鉄塊 4	54.8	66.7
⑦	鉄塊 (卸し)	62.4	67.5
⑧	スラグ 1	46.6	46.6
⑨	スラグ 2	48.9	48.9
⑩	スラグ 4A	49.6	49.6
⑪	スラグ 4B	59.5	59.5
⑫	鍛冶滓	57.4	60.7
⑬	炉壁粘土	64.5	58.7

表4 中性子照射条件及び γ 線測定条件

熱中性子束密度 ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 照射場所	分析目的核種	照射時間	冷却時間	測定時間	測定位置 Ge検出器 からの距離	分析元素
9.1×10^{11} 気送管 (Pn)	S1 (短寿命核種)	60 sec	3~6 min	7 min	100 mm	Na Mg Al Cl Ca Ti V Mn
1.5×10^{12} Tパイプ(水力)(TA)	L1 (中寿命核種)	6 hr	2 days	60 min	150 mm	K Ga As Br Mo Sb La Sm W U
	L2 (長寿命核種)	6 hr	7 days	120 min	2 mm	Sc Cr Fe Co Ni Zr Sb Cs Ba Ce Yb Lu Hf Au Th

表5 中性子放射化分析に使用する核データ

元素	核反応	生成核種	半減期	γ線エネルギー (keV)	元素	核反応	生成核種	半減期	γ線エネルギー (keV)
Na	(n, γ)	Na-24	15.02 h	1369, 1732	Cd	(n, γ)	Cd-115	2.23 d	336
Mg	(n, γ)	Mg-27	9.46 m	1014	In	(n, γ)	In-116	54 m	417, 1097
Al	(n, γ)	Al-28	2.24 m	1779	Sn	(n, γ)	Sn-113	115 d	392
Si	(n, p)	Al-29	6.6 m	1273	Sb	(n, γ)	Sb-122	2.8 d	564
S	(n, γ)	S-37	5.1 m	3102	Sb	(n, γ)	Sb-124	60.2 d	603, 1691
Cl	(n, γ)	Cl-38	37.3 m	1642, 2168	Te	(n, γ, β-)	Te-131	8.04 d	365
K	(n, γ)	K-42	12.36 h	1525	I	(n, γ)	I-128	25 m	443
Ca	(n, γ)	Ca-49	8.72 m	3084	Cs	(n, γ)	Cs-134	2.063 y	605, 796
Sc	(n, γ)	Sc-46	83.8 d	889, 1121	Ba	(n, γ)	Ba-131	12.0 d	496
Ti	(n, γ)	Ti-51	5.8 m	320	La	(n, γ)	La-140	40.3 h	329, 478, 1596
V	(n, γ)	V-52	3.76 m	1434	Ce	(n, γ)	Ce-141	32.5 d	145
Cr	(n, γ)	Cr-51	27.7 d	320	Pr	(n, γ)	Pr-142	19.2 h	1576
Mn	(n, γ)	Mn-56	2.58 h	84, 1811	Nd	(n, γ)	Nd-147	11.0 d	91.1
Fe	(n, γ)	Fe-59	44.6 d	1099, 1292	Sm	(n, γ)	Sm-153	46.8 d	103
Co	(n, γ)	Co-60	5.27 y	1173, 1333	Eu	(n, γ)	Eu-152	13.1 y	1408
Ni	(n, p)	Co-58	70.8 d	811	Tb	(n, γ)	Tb-160	72 d	879, 966, 1178
Cu	(n, γ)	Cu-66	5.1 m	1039	Dy	(n, γ)	Dy-165	2.33 h	95
Zn	(n, γ)	Zn-65	244 d	1116	Yb	(n, γ)	Yb-175	101 h	396
Ga	(n, γ)	Ga-72	14.1 h	630	Lu	(n, γ)	Lu-177	6.71 d	113, 208
As	(n, γ)	As-76	26.3 h	559	Hf	(n, γ)	Hf-181	42.4 d	482
Se	(n, γ)	Se-75	121 d	136, 265	Ta	(n, γ)	Ta-182	115 d	1221
Br	(n, γ)	Br-82	35.34 h	777	W	(n, γ)	W-187	23.9 h	686
Rb	(n, γ)	Rb-86	18.8 d	1077	Ir	(n, γ)	Ir-192	74.2 d	317
Sr	(n, γ)	Sr-85	64.0 d	514	Au	(n, γ)	Au-198	2.696 d	412
Zr	(n, γ)	Zr-95	64.0 h	724, 757	Hg	(n, γ)	Hg-203	46.8 d	279
Mo	(n, γ)	Mo-99	2.75 d	141	Th	(n, γ, β-)	Pa-233	27.0 d	312
Ag	(n, γ)	Ag-110	252 d	658	U	(n, γ, β-)	Np-239	2.35 d	106, 227, 278

これらの補正は、主に鉄塊試料の定量に影響を及ぼし、滓あるいは粘土の定量にはほとんど影響がない。

3) 光学顕微鏡観察

採取した試料を直径1インチの型に入れ、ウッドメタル (Bi-Pb-Sn-Cd 合金：融点70℃) で埋め込み、硬化させた後に研磨を行った。研磨後、試料表面を超音波洗浄し、鉄塊系試料については3%ナイトル液 (硝酸：エタノール=3：100) によりエッチングを行って金属組織の現出を確認し、スラグ系試料については超音波洗浄後、そのままの状態で見極顕微鏡観察を行った。観察にはNikon EPIPHOT 300を使用し、倍率100倍で行った。

4) EPMA (電子線プローブマイクロアナリシス) 法

光学顕微鏡観察を終えた後、EPMA分析のために、再度試料表面の研磨を行った。研磨後、非金属部の非導電体による帯電の影響を防ぐため、分析面に今回の分析対象元素には影響しないAuを選択して蒸着を行った。

装置は日本電子製JXA-8200を使用し、加速電圧：15kV、照射電流： $10^{-9} \sim 10^{-6}$ A (自動設定) の測定条件で行った。ここでは面分析を行い計15元素 (C、O、Na、Al、Si、P、S、Cl、Ca、Ti、Fe、Co、As、Cd、Sb) のマッピングを行った。

5 結果及び考察

1) 燃焼赤外線吸収法による結果

①鉄塊A、②鉄塊B、③鉄塊1、④鉄塊2、⑤鉄塊3、⑥鉄塊4および⑦鉄塊（下げ）資料の近接する3箇所から試料（約100～200mg）を削り取り、炭素濃度および硫黄濃度を定量した。その結果を表6に示す。また、図3に炭素濃度の定量結果を棒グラフで表したものを示す。図中の誤差棒は、3回の分析の標準偏差である。鉄塊A、B、1、2、3、4の6資料中における含有炭素濃度は約0.01～0.05%程度のものであることから炭素濃度からだけ判断すると軟鉄あるいは軟鋼に属する鉄になっている。本来、製錬において得られる鉄は銑鉄であることが望ましく、炭素濃度が高い鉄の生成を期待したが、送風量が多かったため、含有された炭素が燃焼して少ない結果になったと思われる。しかし、鉄塊（下げ）には約1%程度にまで濃度が高まった鋼になっていた。すなわち、濃度が低い鉄であっても鍛冶により、吸炭させることが可能であることをこのことは示唆している。

図4に硫黄濃度の定量結果を棒グラフで表したものを示す。今回の製鉄には砂鉄を使用しているため、いずれの試料においても硫黄濃度は0.03%以下の低い値となっている。中でも鉄塊（下げ）は鍛冶によって下げを行ったことで、製鉄後の鉄塊よりさらに不純物成分が取り除かれ、不純物成分の指標となる硫黄濃度が最も低い結果となっている。

2) 機器中性子放射化分析による結果

表7に鉄塊試料（③～⑦）を機器中性子放射化分析した定量結果を示す。また、表8にはスラグ試料及び炉壁粘土を機器中性子放射化分析した結果を示す。表7に示される砂鉄試料の分

表6 たたら鉄試料中の炭素及び硫黄濃度

試料名		1回目	2回目	3回目	平均値	標準偏差	相対標準偏差 (%)
①鉄塊A	試料重量 (g)	0.091	0.093	0.105			
	C濃度 (%)	0.020	0.021	0.019	0.020	0.0009	4.3
	S濃度 (%)	0.021	0.031	0.021	0.024	0.0059	25
②鉄塊B	試料重量 (g)	0.094	0.103	0.101			
	C濃度 (%)	0.042	0.050	0.056	0.049	0.0072	15
	S濃度 (%)	0.0059	0.0058	0.0036	0.0051	0.0013	26
③鉄塊1	試料重量 (g)	0.105	0.210	0.14			
	C濃度 (%)	0.018	0.006	0.018	0.014	0.0070	50
	S濃度 (%)	0.021	0.013	0.025	0.020	0.0063	32
④鉄塊2	試料重量 (g)	0.097	0.120	0.104			
	C濃度 (%)	0.026	0.025	0.028	0.026	0.0018	6.7
	S濃度 (%)	0.019	0.019	0.014	0.017	0.0030	17
⑤鉄塊3	試料重量 (g)	0.100	0.104	0.096			
	C濃度 (%)	0.047	0.049	0.045	0.047	0.0021	4.4
	S濃度 (%)	0.0066	0.0054	0.0075	0.0065	0.0010	16
⑥鉄塊4	試料重量 (g)	0.124	0.112	0.118			
	C濃度 (%)	0.035	0.041	0.040	0.039	0.0028	7.2
	S濃度 (%)	0.020	0.006	0.011	0.012	0.0067	55
⑦鉄塊 （下げ）	試料重量 (g)	0.143	0.101	0.162			
	C濃度 (%)	0.810	0.900	1.160	0.96	0.18	19
	S濃度 (%)	0.004	0.002	0.003	0.0027	0.0009	35

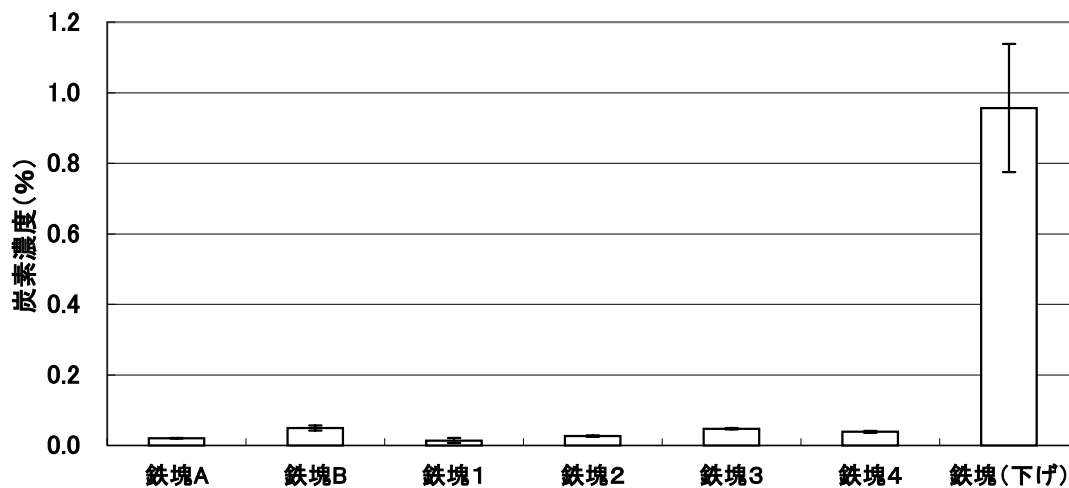


図3 鉄塊試料中の炭素濃度

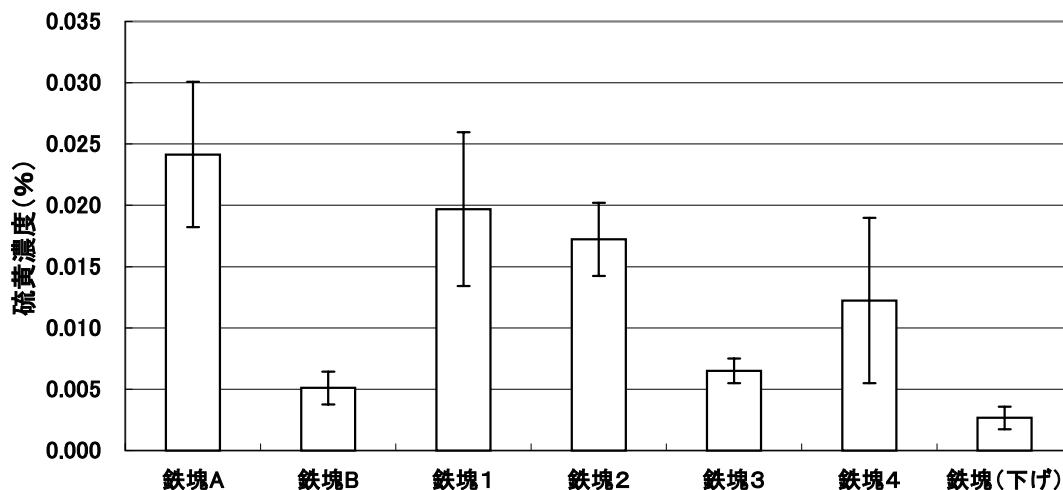


図4 鉄塊試料中の硫黄濃度

析結果は、2003年にまほろん1号炉¹⁾を操業したときの砂鉄の分析結果であり、今回使用した砂鉄とほぼ同じ所から採取した砂鉄(白河市大信を流れる隈戸川産の砂鉄)であることから参考のため記した。Fe濃度に注目したとき、全ての鉄塊試料で砂鉄試料の濃度より高く、逆にスラグ試料では低い濃度であった。すなわち、炉中での操業中にFeの分離が有効に働いていたものと思われる。また、鉄塊試料の1~4(③~⑥)を比較したとき、鉄塊3(⑤)試料が最もFe濃度が高く、鉄塊1(③)が最も低かった。試料観察のところでも記したが、Fe濃度が低い試料には金属部とスラグ部が混在しているため、混在の程度によりさまざまな値になっていたものと思われる。また、表9には製鉄過程で滓部側に、あるいは金属部側に濃集する典型的な元素V、Ti、As、Sbの濃度とTi/V濃度比、As/Sb濃度比を示した。従来からの調査・研究により砂鉄中のTi/V濃度比が、スラグ中でもほぼ等しいこと、As/Sb濃度比は砂鉄中と金属中でほぼ等しいことが明らかになっている。本実験操業においても、このことは表から明らかであるが、僅かながらスラグ中においてTi/V濃度比が高い値になっていた。恐らく、炉

表7 中性子放射化分析による定量結果(1)

(濃度: $\mu\text{g/g}=\text{ppm}$)

	③ 鉄塊1	④ 鉄塊2	⑤ 鉄塊3	⑥ 鉄塊4	⑦ 鉄塊(下げ)	*1 砂鉄
Na	4400	2050	270	2020	51.9	800
Mg	9100	<4700	<2700	10000	<630	17000
Al	24000	9900	3800	19000	150	10000
Cl	<160	<100	<54	<140	<45	-
K	9600	4500	650	4300	110	250
Ca	9000	3000	790	8300	<690	4500
Sc	41	21	3.2	20	0.62	62.00
Ti	41000	23000	6100	29000	170	69000
V	1500	970	230	640	11	2500
Cr	84 *3	55 *3	40 *3	50 *3	29 *3	44
Mn	3200	1400	500 *2	2500	<29 *2	4500
Fe	680000	870000	1000000	930000	1000000	610000
Co	340	380	910	290	580	120
Ni	<120	<110	<120	110	210	—
Cu	<270	<200	<110	<220	93	—
Zn	<69	<47	<40	<37	<34	—
Ga	50	58	68	58	67	28
As	39	19	36	32	29	3.6
Br	<2.0	<1.4	<0.83	<1.3	<0.70	—
Zr	<71	<68	<69	<63	<61	—
Mo	<44	<31	21	<28	26	—
In	<0.65	<0.52	<0.31	<0.62	<0.070	—
Sb	4.8	<2.9	2.0	2.8	2.4	0.49
I	<29	<22	<13	<27	<3.2	—
Cs	<0.76	<0.71	<0.69	<0.65	<0.62	—
Ba	120	110	<110	81	<110	—
La	8.8	4.5	0.88	4.4	0.56	7.0
Ce	27	<6.5	<5.8	<9.2	<5.2	31
Sm	3.3	1.6	0.25	1.6	<0.070	3.4
Yb	2.8	1.2	<0.32	1.7	<0.29	—
Lu	0.53	<0.090	<0.090	<0.080	<0.080	0.44
Hf	5.1	2.0	<0.090	2.3	<0.83	7.6
W	0.75	<1.10	<0.64	<1.0	<0.90	<0.53
Au	<0.0067	<0.0065	<0.0067	<0.0063	<0.0063	—
Th	3.9	2.4	<0.50	2.2	<0.44	1.0
U	<2.3	<1.6	<0.85	<1.4	<0.67	0.39

<: 検出下限値以下の値

*1: 「福島県文化財センター白河館研究紀要2004、p41」

*2: Mnの補正: $29\mu\text{g/Fe } 1\text{g}$ *3: Crの補正: $8.3\mu\text{g/Fe } 1\text{g}$

表8 中性子放射化分析による定量結果(2)

(濃度: $\mu\text{g/g}=\text{ppm}$)

	⑧ スラグ1	⑨ スラグ2	⑩ スラグ4A	⑩ スラグ4B	⑪ 鍛冶滓	⑫ 炉壁粘土
Na	2500	3900	6800	6800	3800	12000
Mg	23000	13000	15000	11000	17000	<13000
Al	25000	24000	36000	36000	38000	48000
Cl	<240	<220	<240	<220	<170	<150
K	5200	9000	15000	15000	9200	20000
Ca	13000	12000	12000	12000	11000	4100
Sc	600	61	56	58	48	15
Ti	82000	77000	73000	74000	50000	1400
V	2500	1900	2300	2200	2500	34
Cr	120	50	62	57	150	4.4
Mn	5700	5700	4900	5000	3400	100
Fe	430000	460000	340000	340000	450000	24000
Ni	<130	<130	<120	<110	15	3.4
Co	7.0	5.2	3.2	3.2	<93	<62
Zn	<27	<28	<26	<22	<410	<240
Cu	<520	<440	<500	<400	<66	<54
Ga	20	33	31	25	47	22
As	<1.1	<1.3	<1.6	<1.5	<1.1	16
Br	<1.7	<2.0	<2.6	2.9	<0.70	<2.9
Zr	<22	17	<20	<19	<59	<31
Mo	<35	<41	<50	<45	<35	<58
In	<0.65	<0.66	<0.65	<0.55	<0.80	<0.74
Sb	<0.82	<0.95	<1.2	<1.1	0.15	1.3
I	<36	<34	<33	<30	<37	<26
Ba	190	300	270	200	<0.63	2.7
Cs	<1.1	<1.1	<1.3	1.3	160	250
La	11	14	15	14	12	12
Ce	<89	32	30	32	37	43
Sm	1.8	0.61	5.3	5.1	4.3	4.0
Yb	4.1	4.5	4.5	4.3	3.0	3.3
Lu	1.1	1.0	1.0	0.91	<0.090	<0.070
Hf	9.0	9.0	8.6	8.1	5.4	5.3
W	<1.4	<1.7	<3.0	<2.0	<0.73	<2.4
Au	0.013	0.013	<0.012	<0.011	<0.0061	<0.0036
Th	3.0	3.1	5.2	5.3	4.8	11
U	<2.6	<3.1	<3.9	<3.5	<1.4	<2.1

<: 検出下限値以下の値

表9 鉄塊、スラグ、砂鉄及び炉壁中の Ti/V 濃度比及び As/Sb 濃度比

試料番号	試料名	Ti	V	Fe	As	Sb	Ti/V	As/Sb
		(濃度: $\mu\text{g/g}=\text{ppm}$)						
③	鉄塊1	41000	1500	680000	39	4.8	27	8
④	鉄塊2	23000	970	870000	19	2.9	24	7
⑤	鉄塊3	6100	230	1000000	36	2.0	27	18
⑥	鉄塊4	29000	640	930000	32	2.8	45	11
⑦	鉄塊 (下げ)	170	11	1000000	29	2.4	15	12
*1	砂鉄	69000	2500	610000	3.6	0.49	28	7
⑧	スラグ1	82000	2500	430000	<1.1	<0.82	33	—
⑨	スラグ2	77000	1900	460000	<1.3	<0.95	41	—
⑩	スラグ4A	73000	2300	340000	<1.6	<1.2	32	—
⑩	スラグ4B	74000	2200	340000	<1.5	<1.1	34	—
⑪	鍛冶滓	50000	2500	450000	<1.1	0.15	20	—
⑫	炉壁粘土	1400	34	24000	16	1.3	41	12

*1: 「福島県文化財センター白河館研究紀要2004、p41」

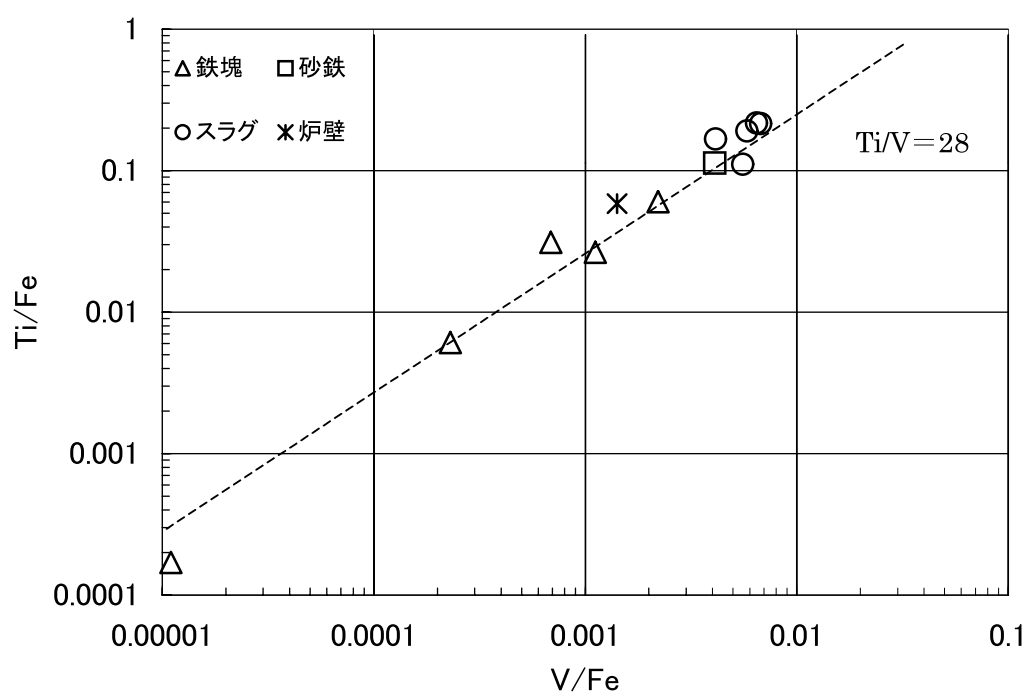


図5 各試料中の V/Fe 濃度比と Ti/Fe 濃度比の相関図

壁粘土の Ti / V 濃度比が砂鉄よりは高い値を示していたため、この影響があったためかとも思うが、粘土中の Ti や V 濃度が砂鉄よりは低いことを考えると、粘土からの寄与の仕方があまりにも大きすぎる。これらの関係を図に示したのが、図 5 である。縦軸及び横軸の値は、それぞれの濃度を Fe 濃度で除している。図中の直線は、Ti/V 濃度比が 28 の 45 度の直線である。前述したように、砂鉄を原点に考えてこの直線上の右側には、Ti と V とが同じ割合で滓側に濃集することを表わしている。鉄塊の場合は、直線の左下側であるが、直線上よりは少し下側に分布する。しかし、図から明らかなように多くの鉄塊試料もこの直線上にほぼ位置している。このことは、滓の部分も含有して分析してしまった結果、このようになっていると推察される。表 7 における鉄塊試料の多くの微量元素で濃度が高くなっているのは、この滓部の濃度の影響が現れている証拠である。

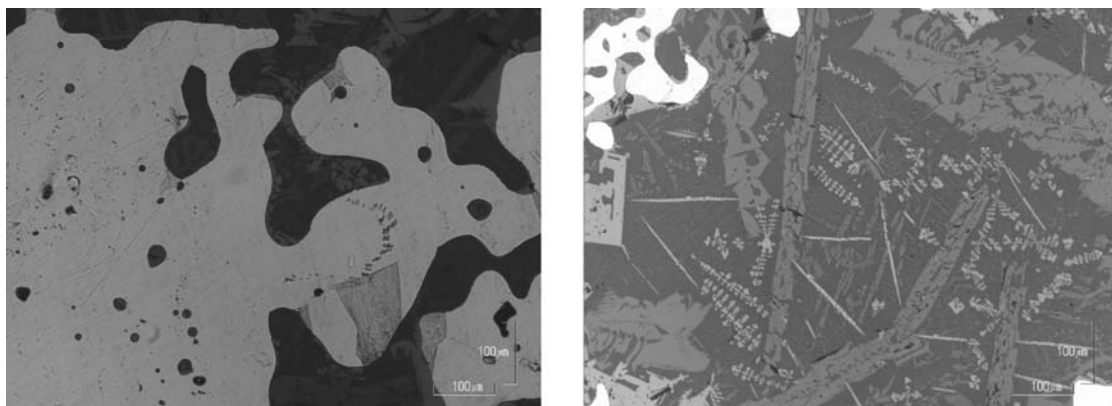
一方、鉄金属部に濃集する As と Sb の濃度比 (As/Sb) を注目すると、鉄塊 3 の試料を除いて砂鉄とほぼ同様な値になっていた。Fe 濃度と As 濃度とは、ほぼ相関関係が成り立っていることから、鉄塊 3 における Sb 濃度が半分近く下回っていた。なぜこのような値になったか不明である。

3) 光学顕微鏡による組織観察及び EPMA 解析結果

全ての試料につき、光学顕微鏡による観察と EPMA による解析像を得ているが、紙面の都合上、光学顕微鏡は鉄塊 1、スラグ 1、スラグ 4B、鉄塊 (下げ)、鍛冶滓の写真を示した。また、EPMA 解析像も同様な試料を分析し、O、Na、Al、Si、Ca、Ti、Fe の元素に着目し、元素分布を求めた。検出されなかったが、C、P、S、Cl、Co、As、Cd、Sb についても分析を行った。

(1) 鉄塊試料

鉄塊 1 を操業後の炉から採取された鉄塊の代表として示す。図 6 の (a) に金属部分、(b) にスラグ部分の光学顕微鏡観察像を、図 7 に滓部の EPMA 解析像を示す。図 6 をみると明らかなように金属と滓成分が混じった状態になっており、大部分で (b) のように滓成分中に鉄が存



(a) 鉄塊 1 金属部分

(b) 鉄塊 1 スラグ部分

図 6 鉄塊 1 の光学顕微鏡観察像

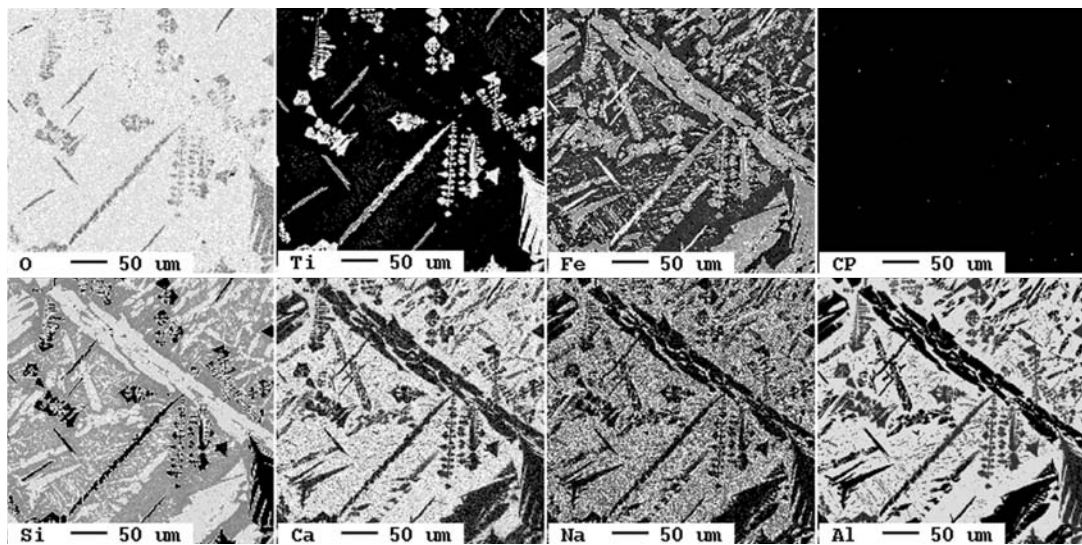


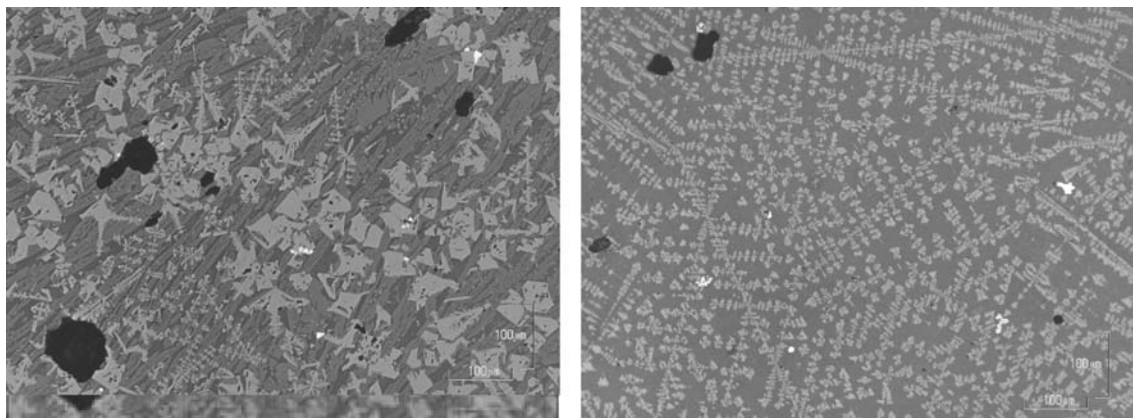
図7 鉄塊1のEPMA解析像

在している状態となっている。このことは、中性子放射化分析の結果とも一致する。

図7に示すEPMA解析像より、針状部分及び多角形状部分ではTiの分布しており、それぞれイルメナイト (Ilmenite: FeTiO_3) 及びウルボスピネル (Ulvospinel: Fe_2TiO_4) が析出していると思われる。また、薄片状のSiの強度が比較的弱い箇所にはFeの存在も見られ、ファイヤライト (Fayalite: Fe_2SiO_4) となっている様子が窺える。また、これらのFe化合物の周囲部分にはO、Na、Al、Si、Caが分布していることが確認でき、Siの最も強く現れている部分ではガラス質の SiO_2 となっており、 Al_2O_3 、 CaO といった化合物も混在していることが推察される。Naについては分布しているように見られるが、測定強度が弱く、ほとんど分布していないと考えられるが、もし微量に存在するのであれば Na_2O といった化合物となっている可能性がある。この他の鉄塊A、B、2、3、4でも同様な結晶の析出傾向が見られた。

(2) 製錬滓試料

スラグ1及びスラグ4Bの試料を製錬滓の代表として取り上げ、ここでその観察像を示す。



(a) スラグ1

(b) スラグ4B

図8 製錬滓試料の光学顕微鏡観察像

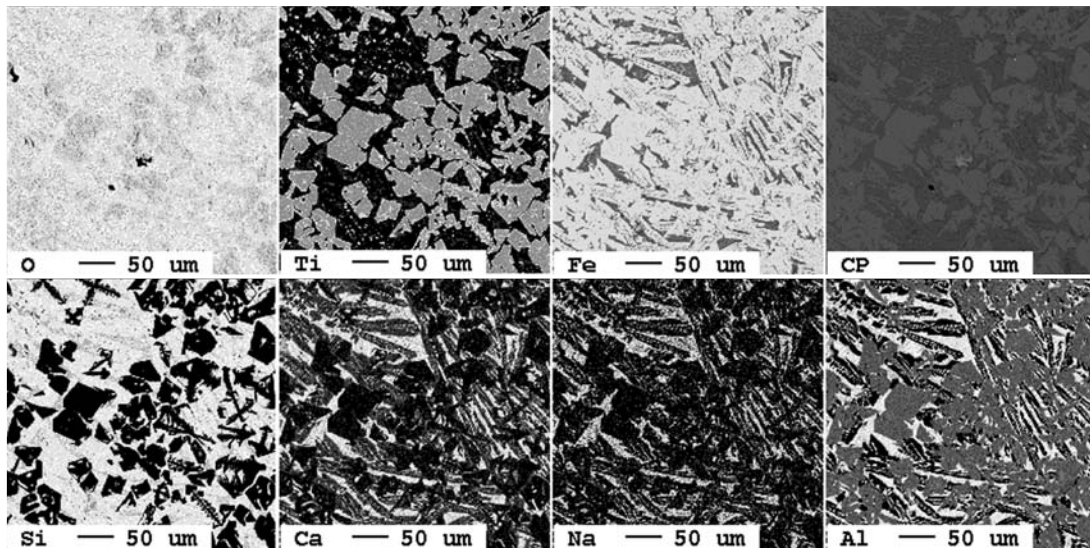


図 9 スラグ 1 の EPMA 解析像

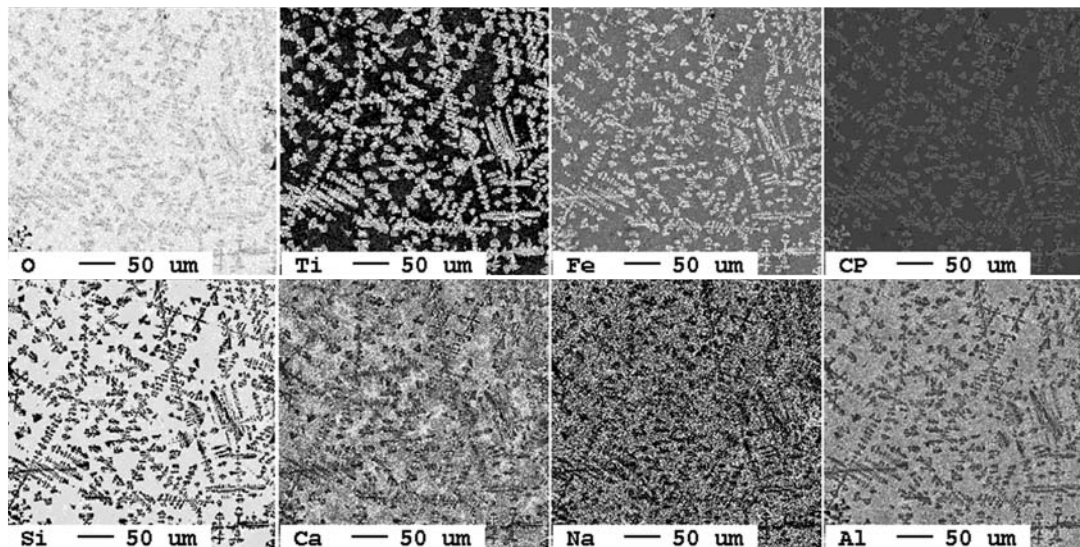


図 10 スラグ 4B の EPMA 解析像

図 8 の (a) にスラグ 1、(b) にスラグ 4B の光学顕微鏡写真を示す。また、図 9 にスラグ 1 の EPMA 解析像、図 10 にスラグ 4B の EPMA 解析像をそれぞれ示す。図 8 の (a) のスラグ 1 では多角形状及び樹枝状の結晶が析出しており、(b) のスラグ 4 では細かい樹枝状の組織が多数析出している様子が見られる。図から明らかなように、スラグ 4B の方が結晶の大きさが小さい。

EPMA 像の図 9 よりスラグ 1 の結晶部分には Fe と共に Ti の高い強度と O の強度も表れている様子が確認できる。これらの元素の分布状態より、チタン鉄鉱であるイルメナイトあるいはウルボスピネルといった化合物となっていることが考えられる。また、素地部分には Si、O が高い強度で表れている様子が見られ、 SiO_2 といったガラス質の化合物となっている様子が窺える。またこの濃い灰色部分には黒色に近い灰色部分も僅かに見られ、その部分では Si、O に加えて Al、Ca や僅かに Fe といった元素の分布が見られた。この部分では SiO_2 に加えてファイ

ヤライトや Al_2O_3 、 CaO といった化合物が混在していることが推察される。

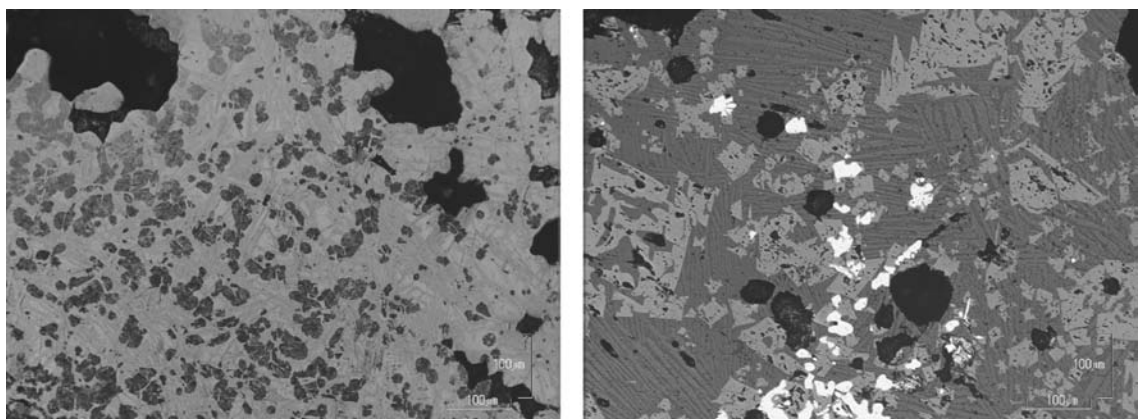
図10よりスラグ4Bの樹枝状の結晶部分にはTi、FeとOの分布が見られ、ここでもチタン鉄鉱となっている様子が分かり、結晶の形状からウルボスピネルとなっていることが推察される。素地部分ではスラグ1とほぼ同様な傾向が現れており、Si、Oが強い強度を示す部分で SiO_2 のガラス基質となっていることが分かる。また、Al、Caも僅かに分布しており、 Al_2O_3 、 CaO といった化合物も混在していることが推察される。

(3) 鍛冶試料

鍛冶試料については、図11の(a)に鉄塊(下げ)を(b)に鍛冶滓の光学顕微鏡写真を示す。また、図12に鉄塊(下げ)のEPMA解析像、図13に鍛冶滓のEPMA解析像をそれぞれ示す。図11(a)の金属部分からはパーライトの析出が、図6(a)の鉄塊1と比べて多く見られ、不純物成分の存在がほとんど見られない。(b)の鍛冶滓からは鉄滓組織中に鉄が僅かに取り込まれている様子も見られた。

図12の鉄塊(下げ)のEPMA解析像は、試料内部について解析したものであり、Feが全体的に強い強度で表れている中で、Fe強度の弱い部分の存在が見られる。この部分ではO、Tiの強度が高く、チタン鉄鉱であるイルメナイトやウルボスピネルといったFe、Ti、Oからなる化合物となっていることが推察される。また、Al、Si、Caも弱い強度ながら表れている事から、ファイヤライトや SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO といった滓成分も僅かに混在している様子が窺える。また、鍛冶過程を経て製錬直後の鉄塊試料よりも非金属介在物の大きさが細かく細分化されている様子も見られる。

図13の鍛冶滓のEPMA解析像では、多角形状の結晶が存在し、そこにはSi、Ti、FeとOの分布が見られ、チタン鉄鉱であるイルメナイトあるいはウルボスピネルといった化合物に加え、ファイヤライトが混在していることが推察される。素地部分にはSi、Oの分布が見られガラス基質となっている様子が見られる。同時にAl、Caも僅かに分布しており、 Al_2O_3 、 CaO といった化合物も若干混在していることが考えられる。また、所々に黒色の空孔と白色のFeの存在



(a) 鉄塊(下げ)

(b) 鍛冶滓

図11 鍛冶試料の光学顕微鏡観察像

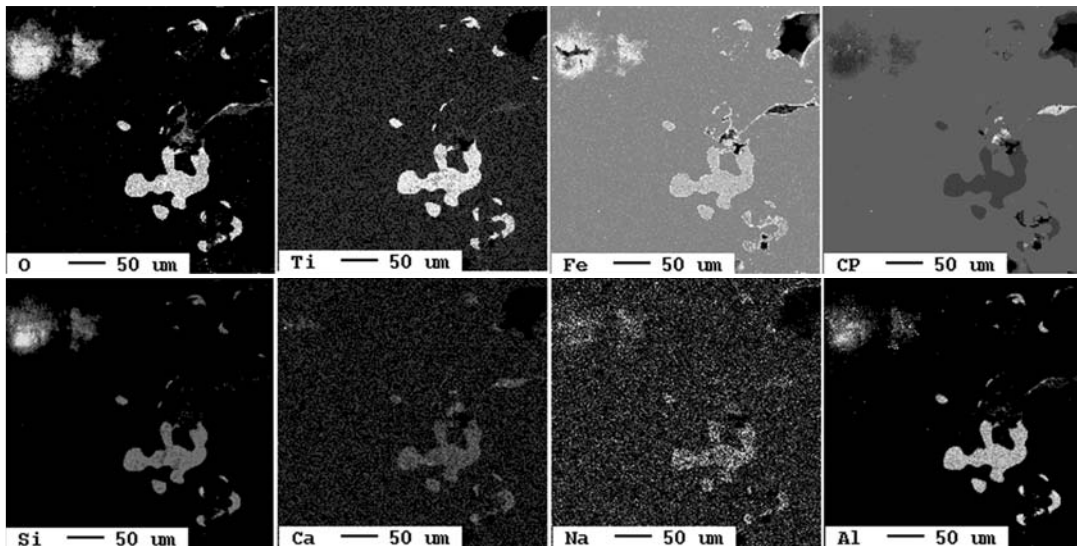


図12 鉄塊（下げ）のEPMA画像

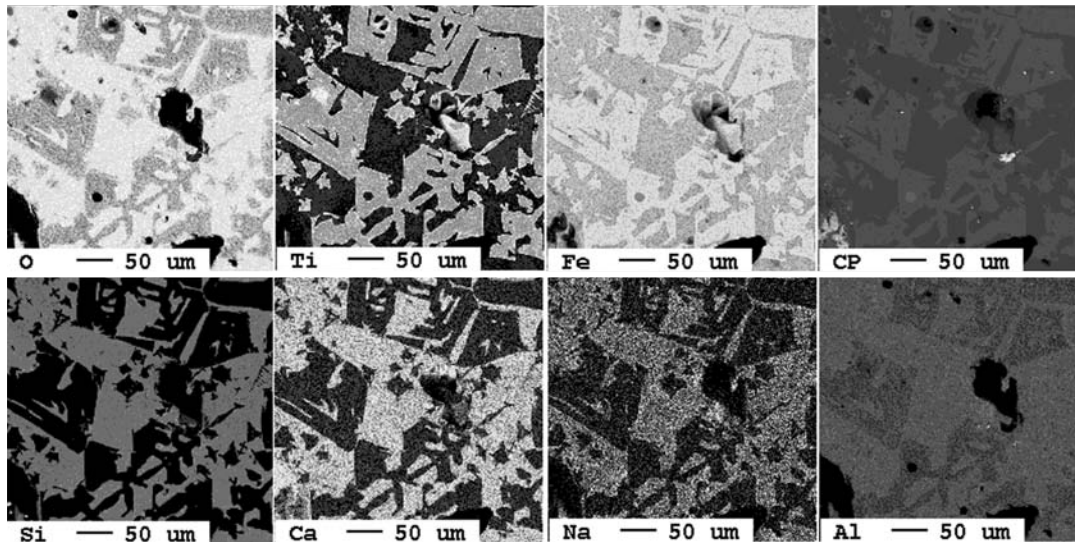


図13 鍛冶滓のEPMA画像

が確認できる。

6 まとめ

まほろん2号炉による製鉄実験では、原寸大で復元した炉によるケラ押し法であり、炉底に銑鉄（ズク）を生成するつもりであったが、結果的には炉底に鉄塊と鉄滓が明瞭に分離できない状態で生成した。また、鉄滓を混合した鉄塊の金属部分を燃焼赤外線吸収法により各試料中の炭素の定量分析の結果、製錬で得られる銑鉄の炭素濃度（約2%以上）から大幅に低い、約0.01～0.05%の軟鉄あるいは軟鋼に属する鉄が生産されたことが分かった。この結果は、2003年のまほろん1号炉から生産された鉄塊よりも低い炭素濃度¹⁾であった。その理由としては送風量の影響が考えられ、炉内へ送る風が多過ぎ、一度は鉄中に吸炭した炭素が再度燃焼してしまったことが考えられる。

中性子放射化分析からは炉内より採取した鉄塊からは約 100%の Fe 濃度が定量されたが、100%に満たない 90%前後のものや、砂鉄 (61%) とさほど変わらないものも存在した。これらの結果より、鉄金属と滓 (スラグ) との分離があまりうまくいかなかったためかと思う。そのことを裏付けるように、光学顕微鏡観察及び EPMA 分析からは、大部分の鉄塊で鉄滓中に鉄が取り込まれている様な鉄と鉄滓が入り混じったような状態が見られた。

これらの理由としては、製鉄中に炉内で鉄が反応を始めた頃に、踏み鞆が壊れてしまったことが考えられる。そのため炉への送風を継続することができなくなってしまい、反応始めに生成した少量の小さな鉄塊のみしか今回の操業では得られなかったことになる。

また、生産された鉄塊を集めて鍛冶を行った下げ鉄では、炭素濃度が約 1%まで上昇しており、鋼となっていた。鉄塊から多く存在していた鉄滓成分が取り除かれ、鍛冶滓中には鉄とチタンの酸化物結晶である、イルメナイトあるいはウルボスピネルのような結晶が見られた。鍛冶滓中に通常多く見られるようなウスタイト (FeO) の結晶は確認できなかった。

7 補 足

2003 年のまほろん 1 号炉による製鉄実験では、製鉄に伴い生産される鉄塊やスラグ等を蛍光 X 線分析法により、主成分元素を定量した。今回も前回同様に蛍光 X 線分析を行い、定量値を表 10 に示したが、その値に多少の疑問があるので参考とした。すなわち、本分析では、標準岩石試料 ((独) 産業技術総合研究所 : <http://www.aist.go.jp/RIODB/geostand/>) の JA-1、

表 10 蛍光 X 線分析法 (WDX 及び EDX) と中性子放射化分析法 (INAA) による定量値の相違 (濃度 : %)

	砂鉄				スラグ1				スラグ2			
	WDX	EDX	EDX共存補正	INAA	WDX	EDX	EDX共存補正	INAA	WDX	EDX	EDX共存補正	INAA
Na	0.12	—	—	0.08	0.28	—	—	0.25	0.24	—	—	0.39
Mg	0.78	—	—	1.7	1.0	—	—	2.3	0.95	—	—	1.3
Al	0.89	—	—	1.0	2.2	—	—	2.5	1.9	—	—	2.5
Si	8.0	7.8	—	—	13	12	—	—	12	12	—	—
K	0.0078	0	—	0.025	1.1	0.75	—	0.52	0.98	0.68	—	0.90
Ca	0.67	0.41	—	0.45	1.7	1.4	—	1.3	1.6	1.4	—	1.2
Ti	9.9	9.6	9.1	6.9	11	11	10	8.2	11	10	9.8	7.7
V	0.55	0.51	0.79	0.25	0.46	0.56	0.71	0.25	0.46	0.50	0.70	0.19
Cr	0.0036	0.0021	—	0.0044	0.0024	0.0024	—	0.012	0.0021	0.0031	—	0.005
Mn	0.43	0.26	0.46	0.45	0.51	0.36	0.46	0.57	0.51	0.36	0.42	0.57
Fe	47	45	—	61	35	33	—	43	36	35	—	46

	スラグ4A				スラグ4B			
	WDX	EDX	EDX共存補正	INAA	WDX	EDX	EDX共存補正	INAA
Na	0.5	—	—	0.68	0.35	—	—	0.68
Mg	1.1	—	—	1.5	0.85	—	—	1.1
Al	3.0	—	—	3.6	2.5	—	—	3.6
Si	16	16	—	—	15	16	—	—
K	1.7	1.4	—	1.5	1.5	1.4	—	1.5
Ca	1.5	1.3	—	1.2	1.4	1.3	—	1.2
Ti	9.7	9.4	8.9	7.3	9.1	9.2	8.8	7.4
V	0.46	0.46	0.63	0.23	0.43	0.45	0.71	0.22
Cr	0.0026	0.0031	—	0.0062	0.0022	0.0059	—	57
Mn	0.47	0.33	0.41	0.49	0.44	0.33	0.32	0.50
Fe	29	27	—	34	28	27	—	34

JA-2、JA-3、JB-1、JB-1a、JB-3、JF-1、JF-2、JG-1、JG-1a、JG-2、JG-3、JGB-1、JP-1、JR-1、JR-2 の 16 種類を検量線作成の試料として用いた。各標準岩石試料に示されている推奨値（濃度%）の検量線を作成した範囲と、実際試料を測定したとき得られた値が、大きく濃度範囲を超えた場合にも得られた検量線を使用して濃度を算出したので、これらの元素の濃度に対しては信頼がおける値ではないが、参考として示した。分析した試料はスラグと砂鉄試料で、約 2 g を削り出し、メノウ製乳鉢で $100 \mu\text{m}^{\phi}$ まで粉碎し、その内 1 g を塩化ビニール製（内径 13mm、厚み 5mm）容器に入れ、7 t・10 秒の加圧成型で測定試料とした。蛍光 X 線分析では、エネルギー分散型の装置（EDX: 島津製作所製、EDX-800）と波長分散型の装置（WDX: 理学電機製、RX-3000）によって行った。EDX では、注目する X 線のピークが重なり、相互に影響するので、一部の元素についてその補正（共存補正）を行って濃度を算出した。V に対する Ti の重なり及び、Mn に対する Fe と Cr の重なりである。表 10 には共存補正前の値と共存補正した値を参考に示している。また、比較のため、機器中性子放射化分析（INAA）した値も示している。前回の報告書¹⁾には Si と Fe しか示さなかったが、Si の検量線範囲は 20 ~ 36%、Fe の範囲は 0.001 ~ 11%であることを記しておく。

<参考文献>

- 1) 平井昭司、加藤将彦、村岡弘一、岡田往子「まほろんにおける復元たたら製鉄からの鉄塊とスラグ中の元素濃度及び金属学的組織」『福島県文化財センター白川館研究紀要 2004』p 35、2004 年

まほろん2号炉（南相馬市大船迫A遺跡15号製鉄炉 の復元炉）における操業条件

東京都立産業技術研究センター 佐藤健二

1 はじめに

福島県南相馬市原町区で発掘された大船迫A遺跡15号製鉄炉（平安時代9世紀前半）の炉体外形は210cm（長さ）×60cm（幅）×102cm（高さ）の規模の構造と推定された（注1）。この炉構造を基に170cm（長さ）×70cm（幅）×110cm（高さ）の炉体外形寸法の製鉄炉（まほろん1号炉）を復元し、白河市大信産の砂鉄からの鉄づくりの再現実験を2003年11月に行った。この復元炉は実際に推定される炉体寸法よりも小型であったが、15時間40分の操業で、砂鉄132.3kg、炭293.5kgの投入量に対し、34.0kgの鉄塊が得られた。また、操業時の炉内温度は羽口のやや上の炉内壁面から5cmの位置で1440°Cの温度まで達した（注2）。しかし、踏み鞆（ふいご）は発掘炉の寸法に合わせたが、復元炉体寸法を小さくしたため、炉内容積に対して風量が多い条件で行っている。

これまで、たたらへの復元実験は長方形箱形炉による3日間の連続操業（注3）、小型の簡易角形たたら炉（注4～6）、円筒型簡易炉（甌炉型）（注7、8）などの報告がある。これらの条件の全てが送風機による強制送風で行っているが、本復元実験は人手による踏み鞆の送風によって行った。

今回の復元実験では、踏み鞆（ふいご）と炉体寸法を発掘炉の寸法に合わせた条件で操業を行い、操業時の炉内温度の測定結果と得られた鉄塊組織の観察結果を報告する。

2 操業条件及び測定条件

1) 炉内温度の測定

写真1に復元炉の外観を示す。炉体外形寸法は240cm（長さ）×90cm（幅）×120cm（高さ）で、まほろん1号炉よりも長手方向を70cm、幅を20cm、高さを10cm長くした。矢印位置が炉内温



写真1 まほろん2号炉の外観と熱電対設置位置（矢印）

度測定のための熱電対設置位置である。

炉体の概略図と熱電対の設置位置を図1に示す。一点鎖線は地面の位置を表す。羽口角度は 30° とした。炉内温度の測定位置は炉底から $2/3$ の高さ、炉頂から 42cm の位置（以下、温度（上））と、炉底から $1/3$ の高さ、羽口中央から 17.5cm 上で、炉頂から 84.5cm の位置（以下、温度（下））の2カ所とした。温度（下）の熱電対は 10° の傾斜で下方に差し込んでいる。熱電対はいずれも炉体長手方向の中央部に設置し、熱電対保護管の

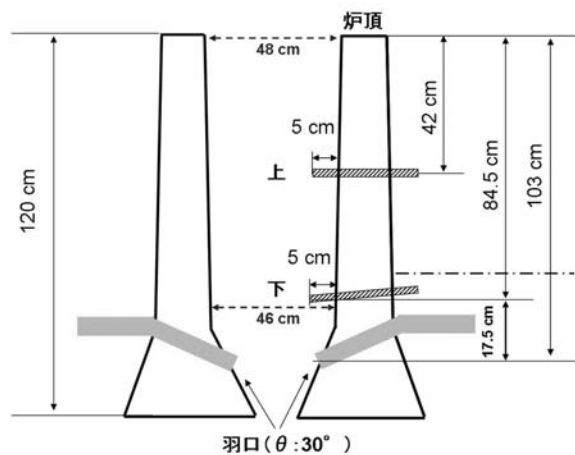


図1 炉の断面図と熱電対の設置位置

先端位置は、温度（上）及び温度（下）はいずれも炉内壁面から 5cm の位置である。熱電対用保護管は上下共に高純度アルミナを用い、保護管破損時に容易に交換できるようにガイドのアルミナ管を炉壁に埋め込んだ。

温度測定には $\phi 0.5\text{mm}$ のR熱電対（Pt/Pt-13%Rh、PR）を用いた。炉内温度データはデータロガー（データ記憶装置）に取り込み、火入れからのサンプリング時間を2秒とした。

さらに、作業途中で熱電対先端の位置を変え、炉内の温度分布を測定した。位置決めを行った後、3分間その位置に保持し、安定した時の温度を測定した。

2) 送風量の測定

送風量は番子が踏み鞆を踏んだ際の風の圧力変化から求めた。風圧の測定には圧力センサ（共和電業社製、PS-05KD：定格容量 50kPa ）を用いた。圧力センサの径は $\phi 6.0\text{mm}$ で、センサ保護のため、外径 $\phi 6\text{mm}$ 、内径 $\phi 4\text{mm}$ のアルミナ管に接着剤で固定した。センサは空気抵抗を少なくするため、送風管内の中央に固定できるよう針金で組み上げ、管中心への位置決めを行った。送風時の圧力データはサンプリング時間を 0.0125 秒でデータロガー（データ記憶装置）に取り込み、火入れから30分おきに5分間測定した。

送風管は焼成した粘土製で、長さが $15\sim 20\text{cm}$ 、内径が約 30mm である。写真2に風箱内の圧力センサの設置位置を示す。白い矢印が送風の方向を示し、東側風箱内の18ヶ所ある送風管の、鞆の吹き出し口側から2番目と遠い位置にある17番目の2ヶ所で測定を行った。風箱側の送風管の中間位置で、管内径 $\phi 30\text{mm}$ の中央部にセンサを設置しており、センサは管の奥に入り込んでいる。

このような条件設定を行ったが、作業開始の初期にセンサ自体のトラブルが生じたため、送風管のデータ解析はできなかった。

3) 作業時の気温と湿度

製鉄炉の作業時の気温と湿度は通風乾湿計を用い、踏み鞆の踏み板隅から 1.9m 離れた地

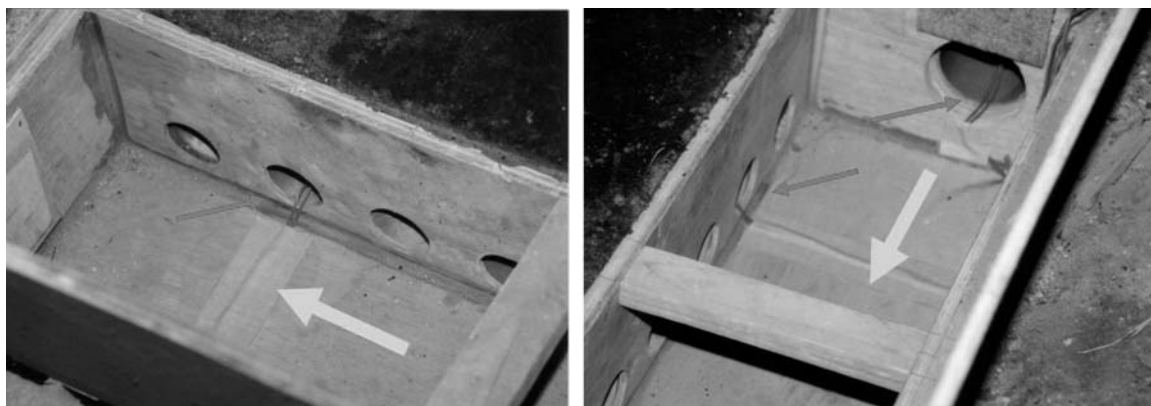


写真2 風箱内での圧力センサーの設置位置 (太い矢印が風の方向、細い矢印がセンサの設置位置)

上 1.35 m の位置で測定した。図 2 に作業時の温度と湿度の測定結果を示す。16:30 頃は気温 16.5℃、湿度 86%であったが、時間経過に伴い、次第に気温が低下し、湿度は上昇した。日没後の湿度は 100%で、その後、気温は 8℃まで低下し、湿度は作業停止まで 100%であった。

4) 鉄塊のミクロ組織観察

今回の作業実験で得られた鉄塊を切断し、断面のミクロ組織観察を行った。鉄塊切断面の外観を写真 3 に示す。四角で示す 3 箇所から試料を切り出し、観察試料とした。腐食液には 5% ナイタル (硝酸-エチルアルコール) を用いた。

3 作業条件の結果と鉄塊の組織

1) 炉内温度

火入れ (11:41) の約 1 時間後から作業停止 (23:27) までの炉内温度の測定結果を図 3 に示す。作業初期から 2 時間半は木炭のみを投入し、炉内温度を上昇させた。なお、円でマークした部分で急激な温度上昇が認められるが、この時間帯でそれぞれの熱電対を用いて炉内温度分布を測定したためである。

温度 (下) は火入れから 1 時間で 900℃まで達した。その後、緩やかに上昇し、17:00 頃には 1175℃となった。20:00 頃までは炉内温度が停滞したが、その後、再び緩やかに上昇し、作業を停止した時点では 1255℃である。

温度 (上) はほぼ同様な傾向で推移し、砂鉄投入開始から 15:00 までの急激な温度上昇時には、温度 (上) は 700℃から 1 時間半で 920

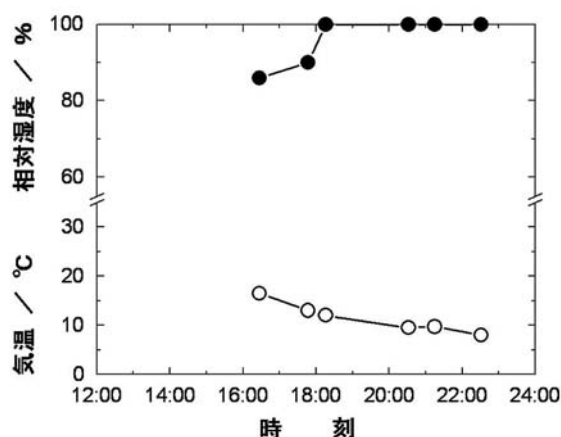


図2 作業中の気温と湿度

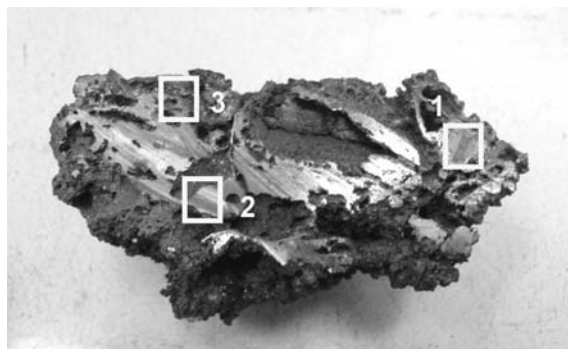


写真3 鉄塊断面と組織観察位置 (断面: 11.7 × 7 cm)

℃まで上昇し、温度（下）との温度差は160℃から130℃まで縮まった。16:00以降は900℃程度から緩やかに上昇しており、操作停止時は1020℃である。16:00頃以降で温度（上）と温度（下）の差は比較的安定しており、200～250℃である。

図4に操作時の砂鉄及び木炭の累積投入量を示す。炉内温度との関係は次のようである。13:00過ぎに炉頂まで木炭が投入され、13:30頃から再び木炭の投入量が増加する。この間、温度（上）の上昇が著しく、温度（下）も上昇している。16:00頃からと20:00頃からも木炭投入量が若干増加しているが、これらは温度（上）と温度（下）の緩やかな上昇として現れている。20:00からの温度上昇が大きいが、砂鉄の投入量が減少したことの影響も考えられる。

操作中に幅方向の炉内温度分布を測定した。15:45分頃の結果を図5に示す。通常の炉内温度の測定位置は炉壁面から5cmの位置である。それぞれの測定位置で3分保持し、一定温度になったことを確認したため、測定時間にずれがある。温度（上）は炉中央部に向かって緩やかな温度勾配が認められ、壁面から5cmで827℃、20cmで933℃であり、約100℃の温度差がある。温度（下）は壁面から15cmまでは温度勾配が大きい、15cm、20cmでは、ほぼ同程度である。炉壁面から5cmで1040℃、20cmで1243℃であり、約200℃の温度差がある。

温度分布測定には、約20分間の時間を要しており、この間での炉温の変化があるため、温度測定の際に一方の測定位置を固定して温度分布を測定した。図6に温度（上）の熱電対を炉壁から5cmの位置に固定した時の温度（下）の温度分布を示す。温度（上）は温度（下）の測定時の温度を表しており、炉壁から5cmの位置において931℃から938℃に変化したが、ほぼ一定と見なして良い。この時の温度（下）は、5cmで1167℃、20cmで1235℃、26cmで1270℃と中央から向かい側の温度が高く、温度差は70～100℃である。同様に温度（下）を5cmの位置に固定し、温度（上）を測定した結果を図7に示す。温度（下）は5cmの位置で

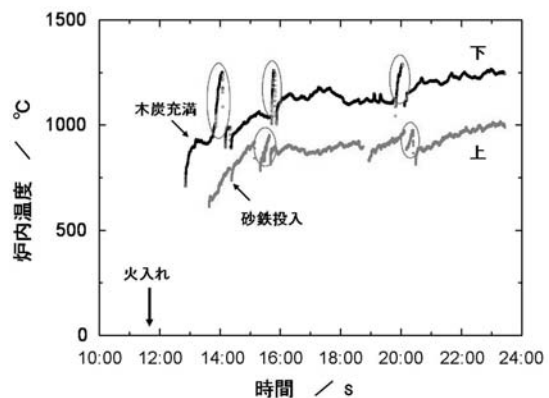


図3 操作時の炉内温度の推移

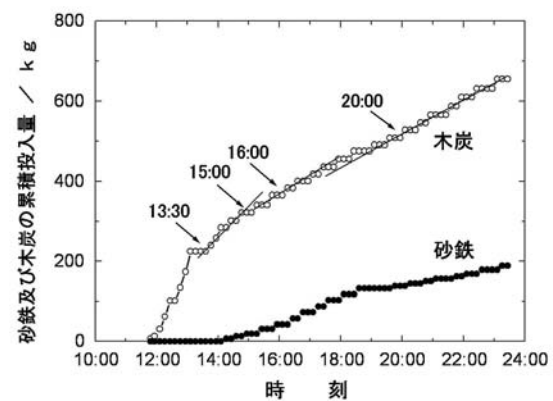


図4 砂鉄と木炭の累積投入量

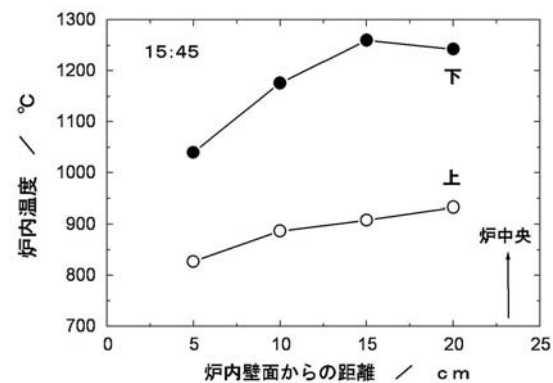


図5 15:45における炉内温度分布

1151℃から1164℃まで変化したが、同様に一定と見なして良い。この間の温度（上）分布は炉壁から炉中央に向かって緩やかな温度上昇が認められる。

これらをまとめた測定結果は図8のようである。いずれも炉内温度は徐々に上昇している時のデータである。温度（下）は炉壁面から5cmの位置から約15cmまで緩やかな温度勾配があり、15cmから炉中央の23cmまでの間はほぼ一定と見られ、壁面5cmの温度よりも200～250℃程度高い温度域を形成している。炉内温度分布が幅方向で対象であると仮定するならば、この位置において炉の中央部の幅16cmの最も高温の均熱帯を形成していることになる。

温度（上）は炉壁面から5cmの位置から炉中央に向かって緩やかに上昇する温度分布を示し、温度（下）で見られるような一定の高温域を形成していない。炉断面の中央部では、炉壁面5cmよりも80～100℃程度高温となっている。

写真4にまほろん2号炉の解体した断面を示す。炉の内部はほとんど浸食されておらず、矢印に示す羽口部直上の煉瓦も表面側から熱影響を受け、変色している様子が見られるが、まほろん1号炉のような激しい浸食はほとんど見られない。煉瓦の表面はスラグ化しているが、約80mmの厚さの表面から5mmであり、損傷は極めて少ない。煉瓦の損傷については、炉体が大きくなったため、炉容積に対する鞆からの風量が少なくなり、炉内温度が上昇しにくい条件であったことが考えられる。

まほろん1号炉は壁面から5cmの位置で最高温度は1460℃で、その後の操業でも1250～1450℃の炉内温度であったと推定される。（注2；火入れから1時間後に熱電対のトラブルが発生したため、炉壁面から1cmの位置に変更し、温度（上）の値から温度（下）の値を概算した）。これに対し、まほろん2号炉の温度（下）は砂鉄投入開始時には900℃であり、その後、徐々に温度が上昇し、操業停止時には1250℃と、約200℃低い温度である。また、操業時間も、

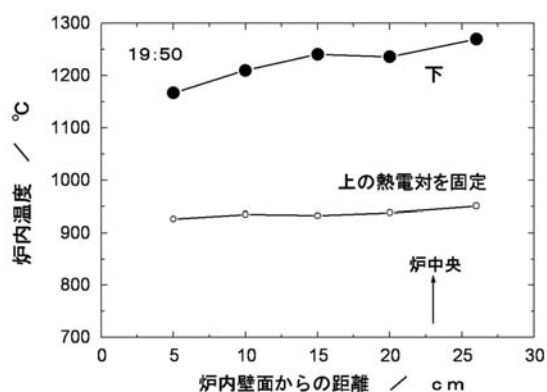


図6 温度（上）位置を固定した時の温度（下）の幅方向の温度分布

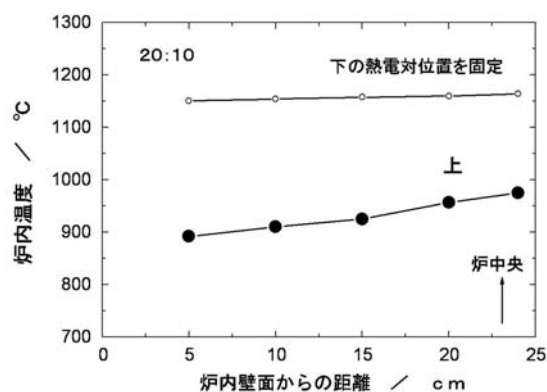


図7 温度（下）位置を固定した時の温度（上）の炉断面方向の温度分布

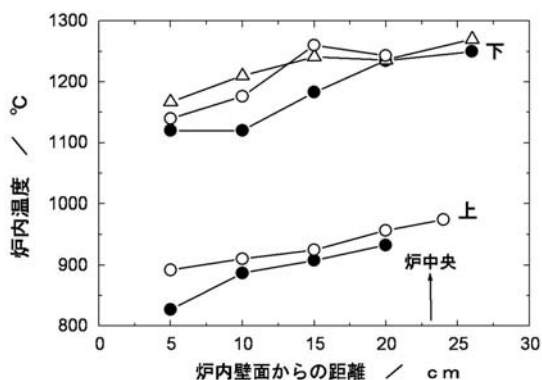
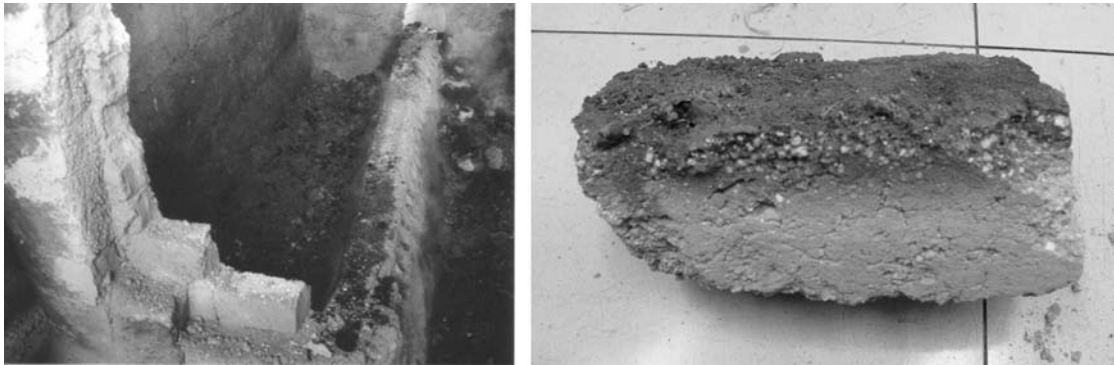


図8 温度（上）と温度（下）の炉の炉断面方向の温度分布



(a) 操業後の炉体断面

(b) 羽口直上の煉瓦 (19 × 9.5 × 8 cm)

写真4 解体したまほろん2号炉の状況

まほろん1号炉は15時間36分に対し、まほろん2号炉は11時間39分と短い。

これより、炉体の長さや幅を広げることで、炉壁面側の温度が低く、中央部が高温となる温度分布を持つため、最も高温となる羽口の上では、炉壁面の浸食による損傷が抑制されたと考えられる。

これらの結果から、まほろん2号炉は羽口のやや上の中央部に幅16cmの高温の均熱帯があり、さらに3の2)項で述べるように羽口に送風する送風管（木呂羽口）内に設置したセンサの損傷状態の大きな違いから、明らかに踏み鞆側よりもノロ出し口側の温度が高いと推定される。

このため、効率良く砂鉄の還元を行い鋳（けら）あるいは銑（ずく）を得るためには、より高温の炉温を維持し、砂鉄をより長時間高温域に滞留させることが必要である。例えば、今回の温度測定の結果からは、中央部の均熱帯付近に砂鉄を投入すること、さらには高温域のノロ出し口側により多くの砂鉄を投入することが考えられる。

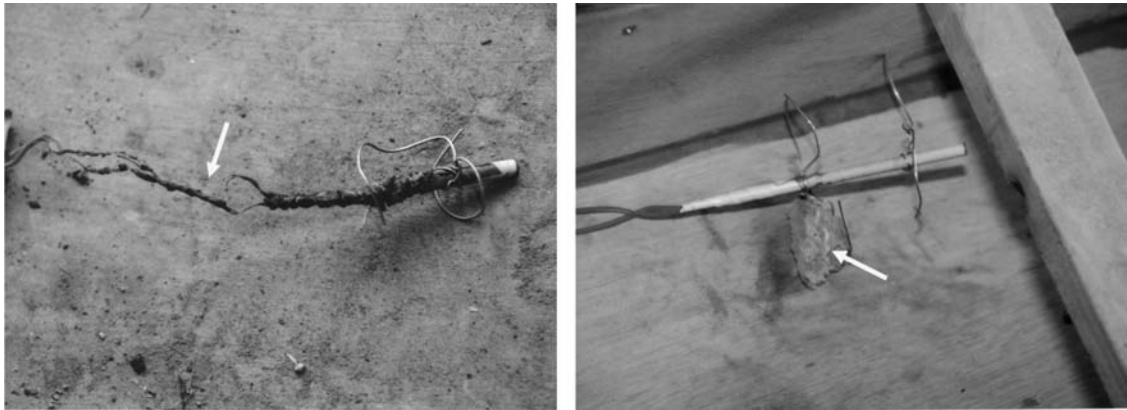
2) 踏み鞆及び羽口からの送风量測定の状況

まほろん2号炉の操業初期に測定電圧が不安定となるセンサの致命的なトラブルが生じた。写真5にこれらの状況を示す。

炉体の両側に設置されたそれぞれの送風管は炉体内を経て相互に風が送られる構造となっている。ノロ出し側の17番目の羽口への送風管内に設置したセンサは、鞆で交互に送風する際、向かい側の送風時に炉内からの高温の風が送られ、その高熱で被覆銅線が完全に焼け焦げ、炭化し（矢印）、測定不能となった。まほろん1号炉よりも炉体が大きくなった分、炉体から風箱の距離が短くなり、センサ部への熱影響が大きくなったためである。同様に鞆側から2番目の送風管内のセンサも17番目程ひどくはないが、熱で被覆銅線が溶け、絶縁不良を起こした。

一方、踏み鞆から風箱間の送風管内に設置したセンサには鞆の踏み板が破損した木ぎれが衝突し（矢印）、センサは管内から風箱内へ外れた。このため、測定圧力が極端に小さくなった。

ここで、前回のまほろん1号炉の測定データを基にまほろん2号炉の踏み鞆からの送风量を見積もった。図9に踏み鞆の概略図を示す。踏み鞆は踏み板中央部が山形になっており、2ヶ



(a) 17 番目羽口の送風量測定センサ

(b) 鞆の風量測定センサ

写真5 圧力センサのトラブル状況

所に送風のための吹き出し口（送風管）が設けられている。矢印で示した踏み鞆の底と踏み板の支点となる部分は粘土を踏み固めて造られている。前回の操業実験から踏み鞆は何ら手を加えていない。今回の操業終了後に測定した踏み板端の可動する高さは26cmである。まほろん1号炉の風量の計算の際には、この高さを38cmと見積もったが、1号炉の操業

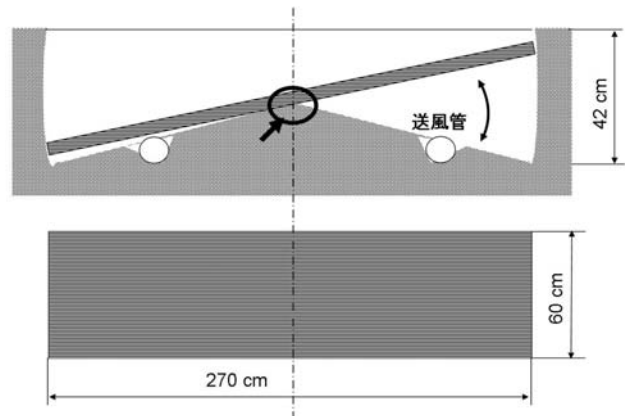


図9 踏み鞆の概略図

時の開始時には、これより5cm程低く、33cmであった。前回と今回の2回の操業の踏み込みで7cm低下した。これは踏み鞆の支点の矢印部の粘土が押しつぶされた結果と考えられる。

まほろん1号炉の踏み鞆からのセンサで測定した平均送風量は $0.114\text{m}^3/\text{回}$ であるため、33cmの高さで計算すると85%の送風効率となる。ここで、まほろん2号炉の踏み板端の可動高さを28cmと仮定すると $0.113\text{m}^3/\text{回}$ となり、送風効率が同じとすると、1回の踏み込みで片方の送風管から送られる風量は 0.096m^3 となる。従って、まほろん1号炉の操業時に比べ、84%の送風量であったと推定される。風量の減少は炉内温度が1号炉の時ほど上昇しなかったことに影響した要因の一つであると考えられる。

3) 鉄塊のミクロ組織

鉄塊断面の目視観察から、層状あるいは斑状に鉄が分布していた。鉄塊の位置関係を考慮し、それぞれの位置におけるミクロ組織写真撮影を行った。

No. 1の位置では小さな粒状の鉄（写真6）と粗大な粒子（写真7）が観察される。粒状の粒子はその形態から一部3次元的な網目状の構造を取っていると思われる。素地は低炭素のフェライトであり、一部に鉄-炭素系で観察されるパーライトとは異なる形態の析出相が観察される。粗大粒子の結晶粒の大きさからは、粒状粒子が焼結し、成長していることが解る。

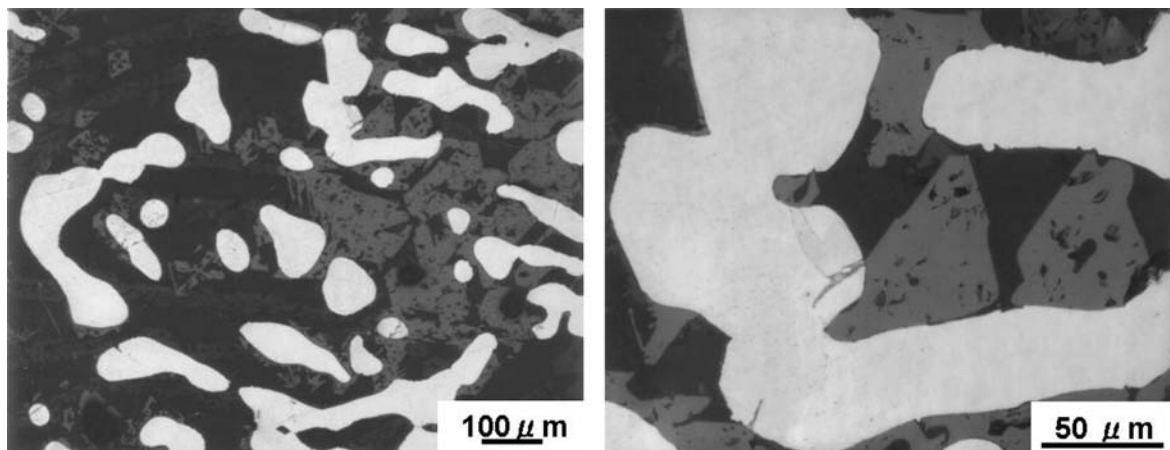


写真6 No. 1位置の小さな粒状鉄のミクロ組織

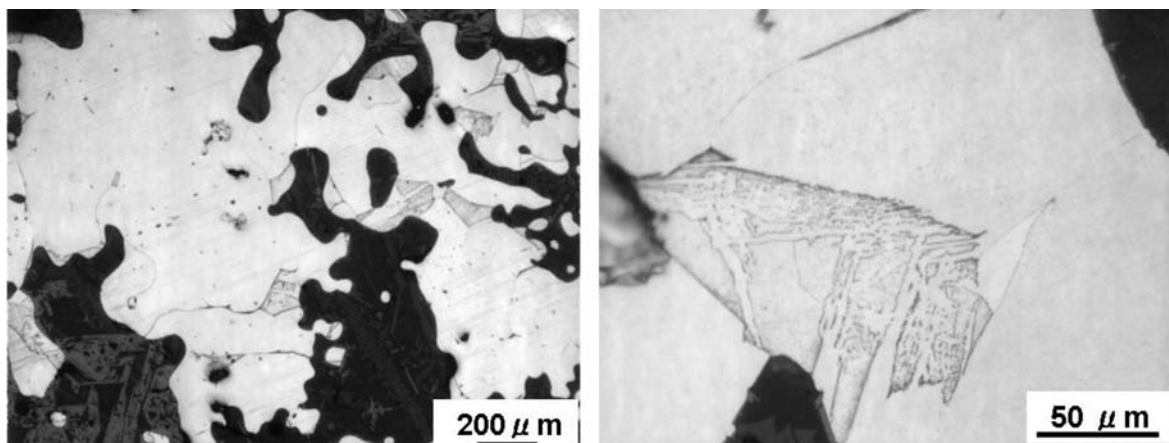


写真7 No. 1位置の粗大な粒状鉄の組織

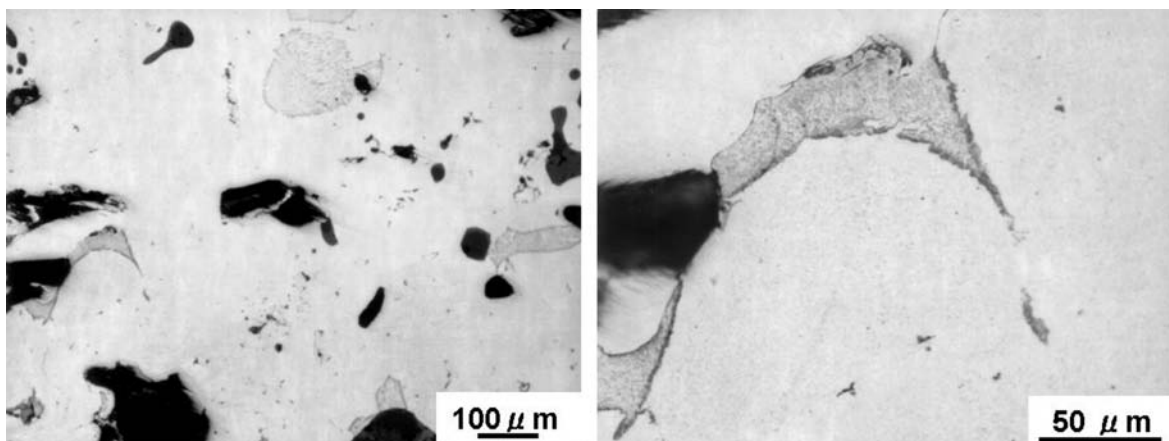


写真8 No. 2位置の粗大な粒状鉄のミクロ組織

No. 2の位置でも小さな粒状と粗大な粒状の鉄が分散する同様な分布状態である。粗大粒の代表例を写真8に示す。ここで、灰色の斑模様の析出相の領域は結晶粒界に生成している。

No. 3は前者とは異なり、砂鉄の還元途中の様子が見られる。矢印で示した粒内には微細な鉄の粒子が観察され（写真9）、その拡大写真から、微細な鉄粒子は1 μm以下～数 μmであり、砂鉄の特定の結晶面に沿って分布している。また、中央の30～40 μmの鉄粒子表面に鉄に突起が観察され、この部分で微細な鉄粒子を取り込んで成長していると見られる。

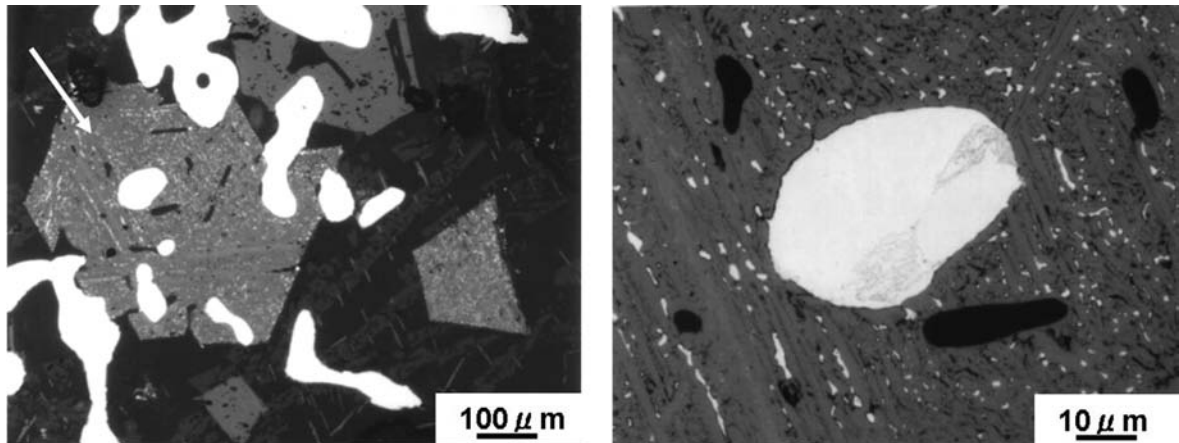


写真9 No. 3位置の微細な粒状鉄と還元途中の砂鉄内の鉄の様相

今回の操業で得られた鉄塊の素地組織は低炭素のフェライトであり、高炭素の銑（ずく）は認められなかった。操業時に炉温が予定したほど上昇せず、低かったため、還元効率も低く、また、還元された鉄への浸炭や加炭が進まず、鋳（けら）が主体となったと考える。

4 おわりに

長さ 240cm、幅 90cm、炉高が 120cm のまほろん 2 号炉の還元炉による操業状況は以下のようである。

1) 炉内温度

炉底から約 1/3 の高さの羽口中央の上部 17.5cm、炉内壁面から 5 cm の位置（温度（下））では、炉内温度は炉の火入れから 1 時間後に 900℃であり、その後、徐々に温度が上昇し、操業停止時には 1255℃である。炉底から約 2/3 の高さで、炉壁面から 5 cm の位置（温度（上））では、同様に 700℃から温度上昇し、操業停止には、1020℃である。定常操業中の温度（上）と温度（下）の温度差は 200 から 250℃である。

炉体内の幅方向の温度分布は、温度（上）では炉壁面から炉中央部に向かってなだらかな山形の温度分布を示し、炉壁面 5 cm の位置に対し、中央部では 80 ～ 100℃高い。温度（下）では、炉中央部に向かって台形の温度勾配を示し、炉中央部付近に幅 16cm 程度の高温の均熱帯が形成される。炉壁面 5 cm の位置に対し、炉中央部では 200 ～ 250℃高い。

送風管（木呂羽口）内設置した風量測定の圧力センサの熱的なダメージの観察から、踏み鞆側よりもノロ出し口側の温度が高いと推定される。

2) 送風量の測定

踏み鞆、風箱の送風管内に設置した風量測定用圧力センサは、操業初期に全てトラブルが生じ、風量の測定ができなかった。特に羽口系の風量測定を行う場合には、反対側の送風時に炉内から吹き込まれる高温の熱風に曝されるため、高温で耐えられる風力測定法を考慮し、構造と仕様を決める必要がある。

踏み鞆の可動高さともほろん1号炉の風量測定結果から見積もった片側の踏み鞆からの風量は 0.096m^3 ／回で、まほろん1号炉操業時の84%である。まほろん1号炉に対するまほろん2号炉の炉内容積の増加に対しては、大きな風量の低下となるため、炉内温度が上昇しにくい要因になったと考える。

3) 鉄塊の組織

鉄塊の組織は低炭素のフェライトであり、鋳（けら）のみで銑（ずく）は生成していなかった。これは、炉内温度がやや低かったこと、操業時間が短かったことなどによると思われる。また、組織観察では、砂鉄が還元し、鉄粒子として成長していく過程が認められた。

<参考文献>

- 注1 吉田秀享：「まほろんイベント「鉄づくり報告」-まほろん1号炉による操業について-」、福島県文化財センター白河館研究紀要2004、1-24
- 注2 佐藤健二：「まほろん1号炉（原町市大船迫A遺跡15号炉の復元炉）における操業条件」、福島県文化財センター白河館研究紀要2004、25-34
- 注3 たたら製鉄復元計画委員会報告「たたら製鉄の復元とその鋳について」、日本鉄鋼協会、（昭和46年）
- 注4 澤田滋：「たたらにチャレンジ!」、BOUNDARY（1987年.9月号）、40-45
- 注5 永田和宏：「小型たたら炉による鋼製錬機構」、鉄と鋼、84(1998)、715-720
- 注6 永田和宏：「現代によみがえるたたら製鉄」、ふえらむ、5(2000)、231-236
- 注7 小松芳成、後藤正治、麻生節夫：「たたら製鉄に関する実験的検討」、秋田大学工学資源学部研究報告22(2001)、53-60
- 注8 小松芳成、後藤正治、麻生節夫：「たたら製鉄に基づく向浜砂鉄の精錬と铸造」、秋田大学工学資源学部研究報告23(2002)、23-32

狩猟文を持つ土偶について

－福島県本宮市高木遺跡出土の土偶から－

大河原 勉

1 はじめに

まほろん（福島県文化財センター白河館）は、「遺跡から学ぶ自然と人間のかかわり」をメインテーマとした、“見て・触れて・考えて・学ぶ”体験型フィールドミュージアムであるとともに、5つの大きな役割も担っている。その内の1つが、埋蔵文化財の収蔵・保管や活用である。

今年度も、まほろんに収蔵されている埋蔵文化財を活用した「体験学習」や「文化財研修」が開催され、当館に収蔵された「土偶」に関連する講座類（実技講座「土偶づくり」、文化財研修入門考古学講座Ⅰ「信仰の考古学」、同講座Ⅱ「福島県の宝物～土偶～」）も行われ、多くの受講者にご参加いただいた。

福島県本宮市高木遺跡出土の土偶は、文化財研修の中で展示・紹介され、狩猟文を持つ土偶として、注目を集めた土偶の一つである。今回は、文化財研修時に紹介のみに留まった高木遺跡出土の狩猟文を持つ土偶の文様やその系譜等についての報告である。

なお、報告するにあたり、県内の市町村名については、合併後の新名を用いているが、県外については調査報告時の市町村名で明記している。

2 遺跡の概要

狩猟文を持つ土偶（図1）は、福島県本宮市本宮字高木に所在する高木遺跡9区から出土した。高木遺跡9区は、平成の大改修工事にかかる本宮市の阿武隈川右岸築堤工事に伴い平成11年度～12年度にわたり発掘調査が行われ、飛鳥時代を中心とした集落と縄文時代中期後葉～後期前葉にかけての集落が確認された。いずれの時代も、当該地域の中心となる集落であり、多くの遺構に伴って、遺物も多数出土している。

この内、縄文時代の遺構は、竪穴住居跡117軒（複式炉64軒、石囲炉19軒、敷石住居18軒、地床炉3軒、その他14軒）、土坑235基、屋外焼土遺構8基、配石遺構66基、土器埋設遺構91基、屋外ピットなどが検出されている。

また、遺物は、縄文時代中期後葉から後期前葉の土器（縄文土器片約121,100点）を中心に、土製品（約460点）、石器・石製品（約1,300点）が出土している。

土偶は、破片資料も含め20点出土している。土偶の大半は、遺物包含層からの出土で、用途が判断できる出土状況にあるものは少ないが、高木遺跡土偶集成（図2）に示した5・6は配石遺構に伴って出土している。特に、5は配石遺構上に伏せられた状態で見つかっている。

狩猟文を持つ土偶は、遺物包含層からの出土である。土偶が出土した包含層には、縄文時代中期後葉～後期前葉の遺物が含まれている。

高木遺跡9区からは、狩猟文を持つ土偶以外に、図2に示したような土偶が出土している。出土した土偶については、平成15年度に刊行された報告書（筆者が担当報告）の中で、形状や文様などから大きく3つに大別した。（高木遺跡2003）

1つは、同図1～4に代表されるような板状を呈した中実・中空の土偶で文様が施文されるもの。1・2は、胴部の形状が奴舩状を呈し、脚部に台座が付く。1～4に施文される文様については、共通する点も認められるが、正面に「Y」字隆帯が施されている点（4）や、幅の広い凹線（1～3）で施文されるなど、相違点も認められる。この他に、同図5・6のような板状を呈した中実土偶で、文様が施文されないものと、同図8・9に見られる所謂「ハート形土偶」に形状に近いものが認められる。

これらの土偶については、形状や施文される文様、施文方法、検出状況などから1～4は縄文時代中期後葉～末葉、5～7が後期初頭、8・9については後期初頭～前葉に帰属するものと考えている。

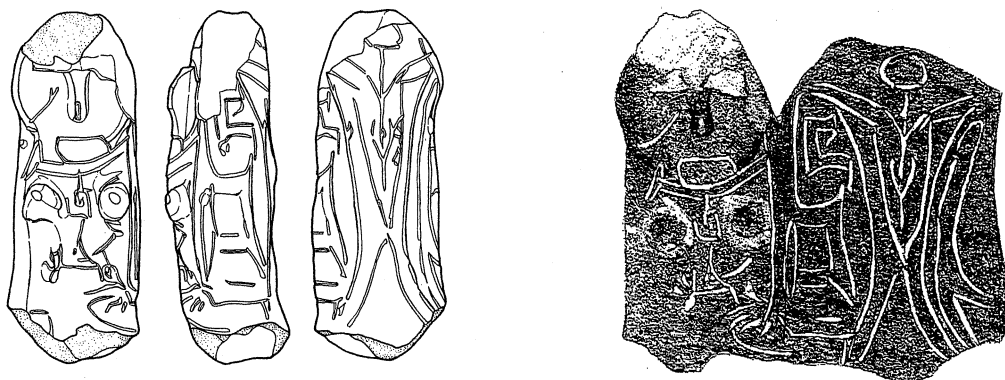
3 狩猟文を持つ土偶

1) 資料概要（図1）

ここでは、報告対象となる狩猟文を持つ土偶の概要について述べる。土偶の形状は、棒状を呈しているが、土偶下端には、接合痕が認められることから、突起のような形で土器などに付いていたか、あるいは台座のようなものを有していた可能性もあり、本来の形状については不明である。土偶の断面形は、隅丸形状となり、板状土偶の断面形態に近い。大きさは、遺存値で最大長8.7cm、最大幅、3.5cm、最大厚3.0cmを測る。

狩猟文を持つ土偶については、棒状の形が男性性器を象っているようにも見て取れる。また、体部中央には乳房も表現されていることから、この土偶については、男女両性を1つの土偶で表現したものと考えられる。

形状については、縄文時代後期初頭～前葉に関東地方で認められる所謂「筒形土偶」に近い。顔の表現についても、土偶上部を面取りした後、粘土を両脇に貼り付け「筒形土偶」や「ハート形土偶」の特徴でもある上向き気味の扁平な顔を作り出している。しかし、本資料について



1a 実測図 (S=1/2)

1b 展開模式図

図1 高木遺跡出土狩猟文土偶

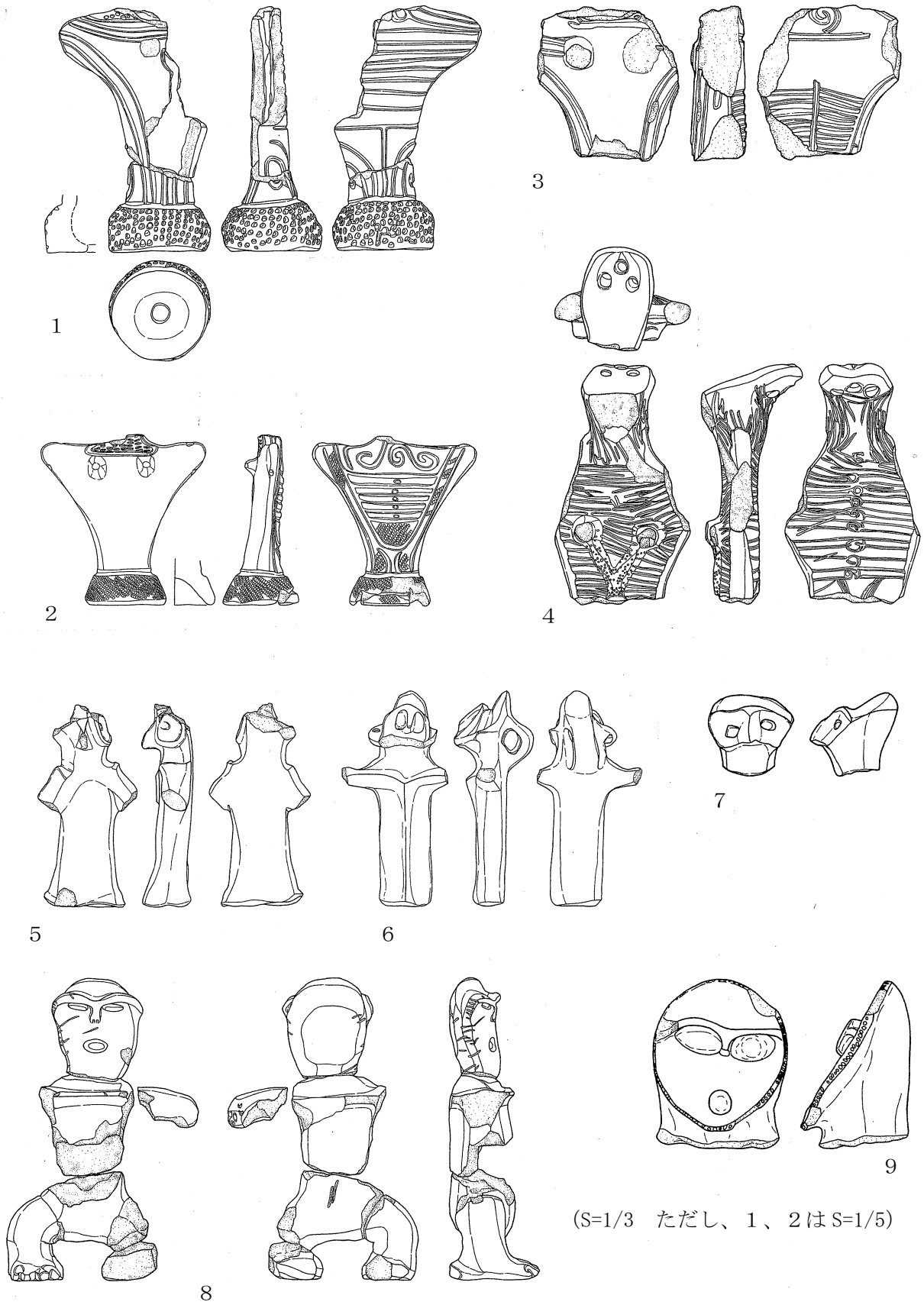


図2 高木遺跡土偶集成

は「筒形土偶」の多くが中空で、断面形が円形を呈している点で大きく異なる。

次に土偶に施文された文様について述べる。文様は、鼻と乳房と目以外、いずれも幅の狭い沈線で施文されている。なお、鼻と乳房は粘土を貼り付けて表現している。工具は、沈線の観察から先の細い棒状の工具と角棒状の工具を用いたものと考えているが、同一工具を部分的に使いつけたのかもしれない。

土偶の顔については、やや幅広の沈線で目を真横に描き、目と直行するように粘土を貼り付けて鼻を作りしている。口は楕円形状を呈している。また、右頬に見られる斜めの沈線は、刺青のように見える。

胴部には、両面及び側面に文様が描き出されている。正面の文様は、顔の口に当たる楕円形を起点に文様が描かれている。正面の文様を詳しく観察すると、本来土偶の口を表す楕円形が頭、両脇に横位に描かれた2本の沈線は腕、楕円形の下端に方形状に施文された短沈線は胴、この方形状の文様から、「人」字状に描かれた沈線は、脚を表したように見える。また、右腕の先端には「弓」、左腕には、「矢」か「槍」あるいは「釣り竿」のようなものが描かれている。これら正面に見られる文様は、まるで人が狩猟に関係する道具を持って、万歳をしているような構図となっている。

背面についても正面と同様に人物を模した文様が観察できる。頭部は円形に表現され、頭部から沈線を垂下させ頸部を表す。胴部は「V」字状に描かれ、「V」字内部には、胸部と腹部を区別するのか「Y」字を2つ連結させている。腹部の「Y」字については、縮小過程で潰れてしまうため、報告時には繋げて表現しているが、本来は幅細の短沈線を6本繋げて「Y」字を構成している。腕は、正面の文様と同様に2本の沈線で表現される。脚については、長めの沈線で「ハ」字状に描き出されている。

背面に描かれた人物の両腕にも、正面と同様に狩猟に関係する文様が施文されている。右腕（胴部側面）には、まるで獣が吊るされているような文様が沈線で描かれている。（側面の剥離した部分については、沈線の痕跡が認められたため、復元して模式図にして表した。）

獣の顔に当たる部分には、「J」字状の文様が牙のように表現され、「猪」を連想させる。左腕についても、獣が吊るされているようにも見えるが、下端には尾びれや背びれのような文様が描かれていることから、魚（サケ）と考えている。（福島県田村市岡平遺跡の中期末葉の住居跡複式炉石囲部にはサケが線刻された礫が転用されている。岡平遺跡 1998）

背面に描かれたこれらの獣（猪）、魚（サケ）は、縄文時代には欠かせない狩猟対象物であり、正面に描かれた狩猟具に背面の狩猟対象物が対応することは、大変興味深い。

表 1 東北地方狩猟文遺物出土遺跡一覧

No	遺跡名	所在地	遺物	時期	備考	No	遺跡名	所在地	遺物	時期	備考
1	上ノ台A	福島県飯館村	深鉢片	中期末葉	住居内堆積土	9	丹後谷地1・2	青森県八戸市	深鉢	後期初頭～前葉	住居内堆積土
2	和台	福島県飯野町	深鉢	中期末葉	住居内堆積土	10	菫窪	青森県八戸市	深鉢	後期初頭	住居内床面
3	間沢	青森県平館村	壺形	後期前葉	遺構外	11	西山	青森県福地村	壺形	後期初頭	再葬墓壺棺
4	小牧野	青森県青森市	鉢形	後期初頭～前葉	住居内堆積土	12	馬立Ⅱ	岩手県二戸市	壺形	後期前葉	土坑、遺構外
5	山野峠	青森県青森市	鉢形	後期前葉	再葬墓壺棺	13	米沢	岩手県二戸市	壺形	後期前葉	遺構外
6	沖附(2)	青森県六ヶ所村	深鉢片	後期初頭～前葉	遺構外	14	館Ⅳ	岩手県北上市	深鉢	中期末葉	住居内堆積土
7	湯の沢 1	青森県六ヶ所村	深鉢	後期初頭～前葉	遺構外	15	江ノ上B	福島県田村市	線刻礫	後期中葉～後葉	遺構外
8	上尾駝(2)	青森県六ヶ所村	深鉢片	後期初頭～前葉	遺構外	16	山ノ神	福島県郡山市	線刻礫	後期後葉	表面採集

2) 県内及び東北地方出土の狩猟文(図3、表1)

次に、福島県を含めた東北地方の狩猟文を持つ遺物について見てみる。東北地方から出土する狩猟文を持つ遺物には、図3に集成したような狩猟具及び狩猟対象動物などをモチーフにした特殊な土器、所謂「狩猟文土器」がある。

「狩猟文土器」については、表1に示したように分布が東北北部の青森県や岩手県に集中し、時期も中期末葉～後期前葉といった限られた時期の出土が目立つ。出土状況を見ると、甕棺以外は、住居跡の埋没過程に廃棄される状況にあるものが多く、土器も赤彩されているなどその特異性が窺える。

県内の狩猟文を持つ遺物には、飯舘村上ノ台A遺跡(上ノ台A遺跡2次1990)及び飯野町和台遺跡(和台遺跡2003)から出土した「狩猟文土器」がある。この他には、郡山市山ノ神遺跡(鳴原1994)、田村市江ノ上B遺跡(江ノ上B遺跡1999)に見られる線刻礫なども認められる。

上ノ台A遺跡及び和台遺跡の「狩猟文土器」については、出土状況から住居跡の埋没過程に廃棄されたと考えられ、土器の施文方法や特徴、出土状況や共伴する遺物などから、中期末葉に位置づけられている。特に和台遺跡の「狩猟文土器」は、土器の器形や文様構成が分かる貴重な資料である。県内で確認された「狩猟文土器」は東北地方の中では最も古く、県内以外では岩手県北上市館IV遺跡(館IV遺跡1993)の「狩猟文土器」のみである。

「狩猟文土器」の文様構成については先述したように、狩猟具及び狩猟対象動物、植物、人物などが認められるが、これらの文様構成及び施文手法や器形には、時期的な特徴をもつことが報告されている。(小山1997、成田1998、福田1998、和台遺跡2003)

文様を中心に時期的な特徴を見てみると、中期末葉では、出土数は少ないが和台遺跡のように狩猟具、狩猟対象物、人物などを組み合わせ、ストーリー性を持たせるものが認められる。また、後期初頭～前葉では、青森県八戸市葦窪遺跡(葦窪遺跡1983)や岩手県二戸市馬立II遺跡(馬立II1988)のようにストーリー性を持つが文様構成の組み合わせが少なくなり、青森県青森市小牧野遺跡(小牧野遺跡1996)のように単独の文様として施文される土器もある。

高木遺跡から出土した狩猟文を持つ土偶については、土偶と土器、施文方法(隆帯と沈線)などの相違はあるものの、これら東北地方から出土する「狩猟文土器」の文様構成(人物・狩猟道具・狩猟対象物)と同じ構成を持つ。新井達哉氏は和台遺跡の報告の中で、「東北北部の狩猟文と時期的な違いは認められるが、狩猟・動物儀礼に関わる祭器として土器が東北地方南部と北部で共通していた」点を指摘している。(和台遺跡2003)

3) 文様の系譜(図4)

高木遺跡の狩猟文を持つ土偶の文様については、先に述べたように「狩猟文土器」と施文方法や対象物に相違はあるものの、同様の文様構成を持つようである。ここでは、狩猟文を持つ土偶の文様の系譜について述べてみたい。

高木遺跡の狩猟文土偶の文様系譜については、筆者が報告書(高木遺跡2003)の中でも指摘したように図4-1～4の福島市月崎A遺跡出土土偶(月崎A遺跡3・4次1991、6・18次1997)

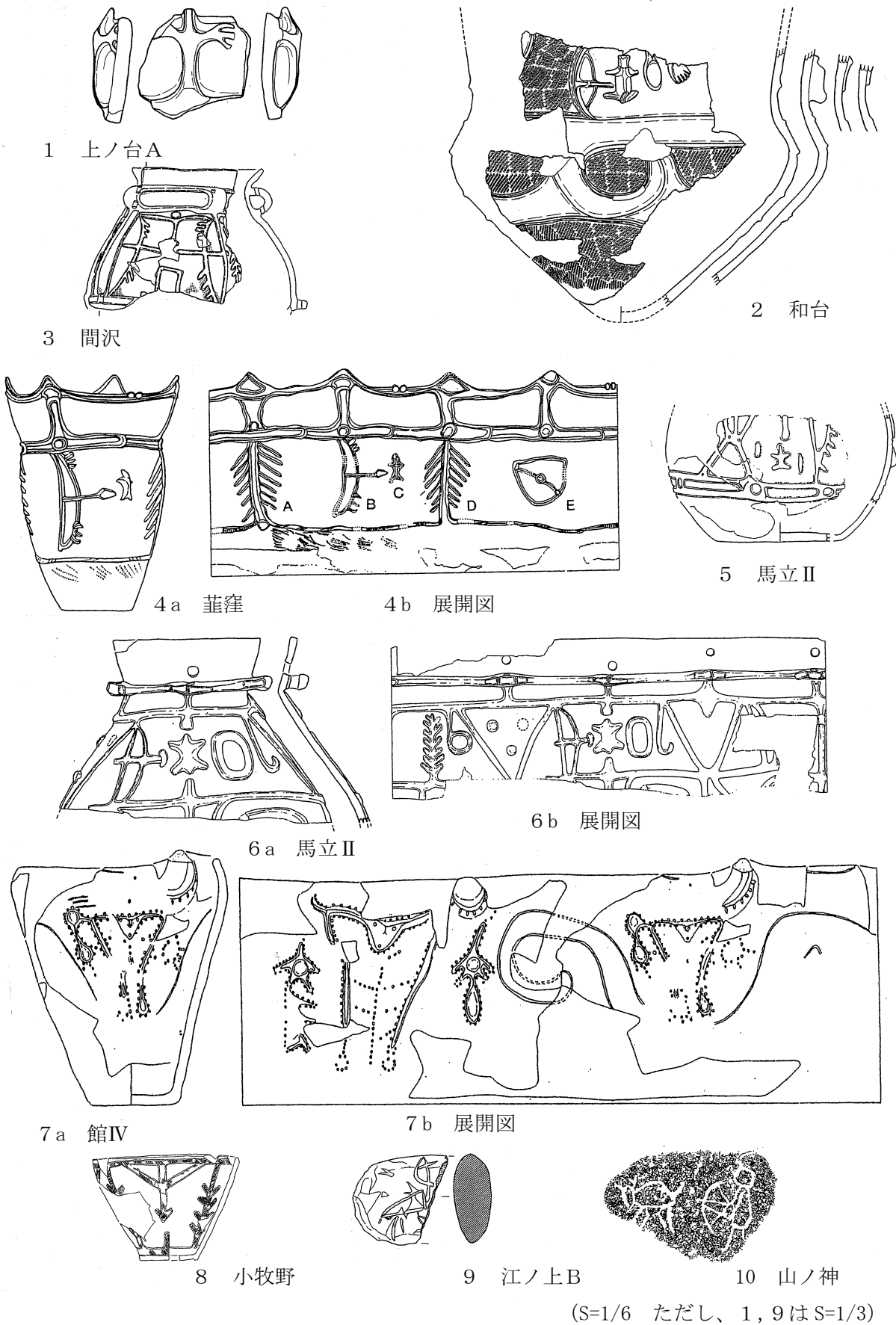
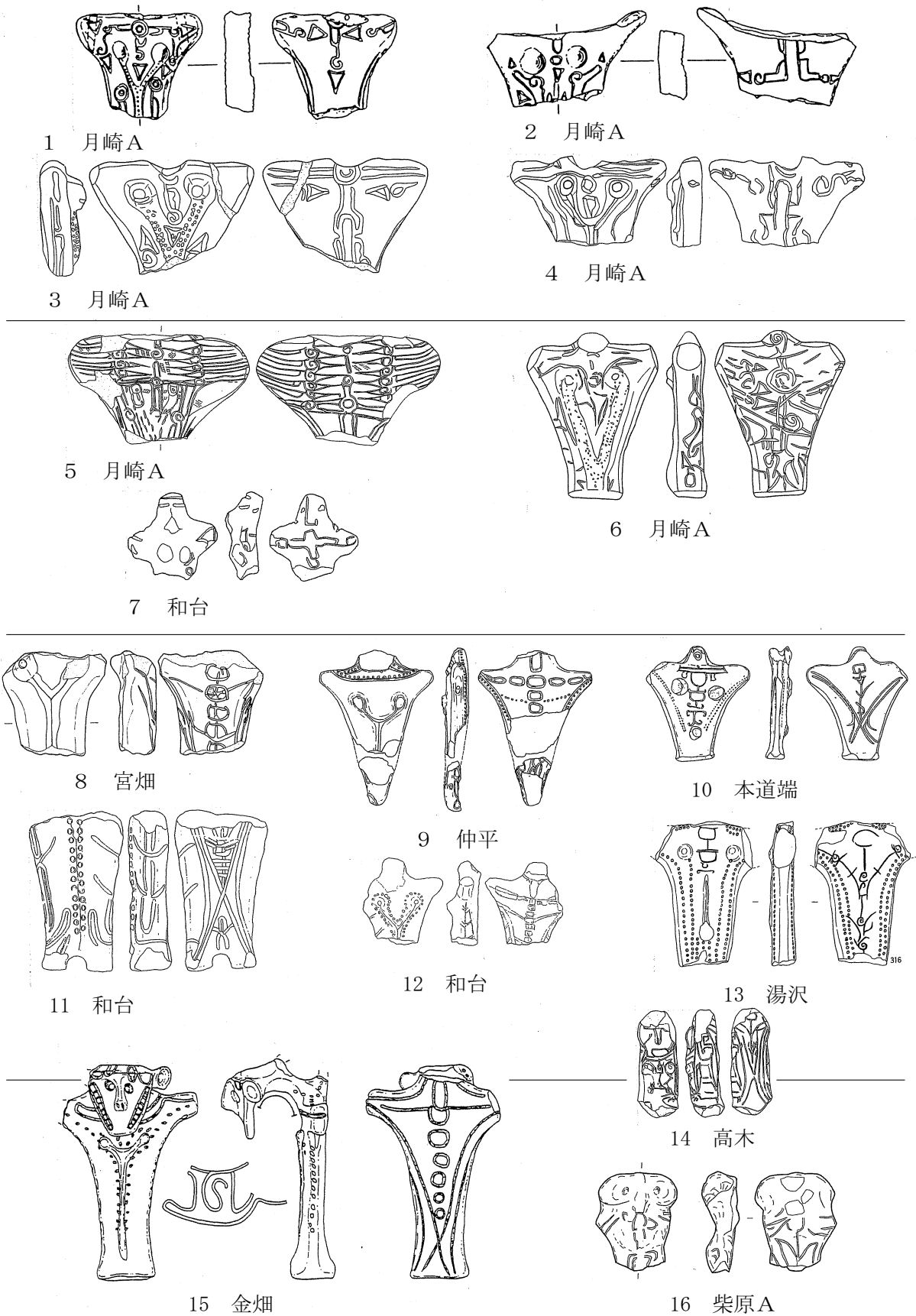


図3 東北地方の狩猟文遺物



(S=1/3 ただし、9~14は1/5、15は任意)

図4 文様の系譜

に施文された「同心円」、「5字状文」、「三角文」（伊藤・八巻 1969）に求めた。

同図1～4については、中期中葉に位置づけられるが、3・4では文様に簡略化が認められることから、同時期ながらも時間差を持つものと考えている。

県内の土偶については、相原淳一氏（大梁川遺跡・小梁川遺跡 1988）、山内幹夫氏（山内 1992）、上野修一氏（上野 1997）により詳細な検討が加えられている。中でも、上野氏は東北地方南部の中期後葉から後期初頭の土偶に施文された文様を系列化し、各系列の時間的な位置づけをまとめ、月崎A遺跡出土土偶の文様「同心円」、「5字状文」、「三角文」については、中期後葉～末葉にかけて東北地方北部に見られる土偶の文様に影響を与えたことを指摘されている。（上野 1997）

図4には、県内出土の土偶を中心に「同心円」、「5字状文」、「三角文」を系譜とする土偶について集成した。遺構に伴って出土するものが少ないため、各時期の設定については、時間幅を持たせている。1～4については、大木8b式土器の文様のモチーフとなる剣先文・渦巻文・楕円形区画文との共通性から、山内氏・上野氏と同様に大木8b式期と考えている。先述したように3・4については、文様が簡略化されているため、同時期の中でも1・2より、新しい時期に位置づけたい。

5～7については、部分的に前段階の文様が残るものの簡略化され、各文様の連結も見られる。時期については、宮城県七ヶ宿町大梁川・小梁川遺跡（大梁川・小梁川遺跡 1988）第IV・III層から、5の形状と文様を持つ土偶が出土している。第IV・III層は大木9式期に比定される土器を包含しており、5については同時期に位置づくものと考えられる。また、7は和台遺跡の大木9式期後半に位置づけられる竪穴住居跡のピット内から出土している。これらのことを踏まえ、5～7については、大木9式期の範疇に収まるものと考えている。

8～13は、5・6に見られるような文様が整理され、高木遺跡の狩猟文土偶の文様と多くの共通性を持つ。特に10の秋田県比内町本堂端遺跡（本道端遺跡 1986）や13の岩手県都南村湯沢遺跡（湯沢遺跡 1983）の土偶の文様については、刺突文の有無などに相違はあるものの、両面の文様構成は、ほぼ一致する。

8～13の時期は、8～12の大半が大木10式期後半の住居跡堆積土から出土し、13についても遺構外からの出土ではあるものの、検出された遺構と遺物の多くが大木10式期に位置づく。これらのことから、8～13については大木10式期後半の所産と考えている。

なお、11の飯野町和台遺跡出土の土偶については、短いものの脚部が意識的作り出されていることから、中期末葉～後期初頭に位置づくものかも知れない。15の二本松市金田遺跡出土の土偶についても、板状土偶で脚部が台状を呈しているものの、後出する「ハート形土偶」に見られる顔を突き出すような表現（頸部から頭部に見られるアーチ）もあり、中期末葉～後期初頭の所産と考えられる。

16は三春町柴原A遺跡（柴原A1次 1989）の包含層から出土した土偶で、前段階（8～13）の文様が簡略化されている。時期については、包含される遺物などから、後期初頭～前葉に位置づけられる。この時期以降、「同心円」、「5字状文」、「三角文」の系譜をなす文様が認められ

なくなることから（上野 1997）、16 については、この文様系譜の最終形態と考えている。

高木遺跡出土の狩猟文土偶の時期については、報告時に文様の系譜や後期初頭～前葉と判断した高木遺跡出土の土偶に文様が施文されていないことなどから、中期末葉後半と位置づけた。しかしながら、この文様の系譜は、他地域においては後期初頭まで受け継がれていることや、顔の形状が「筒形土偶」や「ハート形土偶」の特徴に近似することなどから、中期末葉～後期初頭の範疇で捉えておきたい。

4 おわりに

以上、高木遺跡から出土した狩猟文を持つ土偶について、文様及び系譜について簡単に述べてきた。文様については、中期末葉～後期前葉に東北南部（福島県）と北部（青森県、岩手県）を中心とした地域に認められる「狩猟文土器」と同じ構成を持つ。文様の系譜については、月崎 A 遺跡出土土偶に認められる大木 8 b 式期の「同心円」、「5 字状文」、「三角文」を祖形とし、文様の系列化の中で狩猟文が生み出されたものと考えた。また、これらの文様が東北北部の本道端遺跡、湯沢遺跡の土偶の文様にも認められ、東北北部にまで文様の影響があったことが窺がえる。（これらの文様については、宮城県白石市菅生田遺跡、山形県遊佐町神矢田遺跡出土の土偶にも認められる。）

このように、東北北部と南部においては、「狩猟文土器」ばかりではなく、「土偶」といった縄文時代の「マツリ」に関係する道具が共通性を持つことは大変興味深い。「狩猟文土器」と「土偶」これらの道具に共通する点は、狩猟・採集を中心とした縄文社会の中で、安定した「恵み」とその再生を願うものである。

これら「狩猟文」が認められる縄文時代中期末葉～後期前葉にかけては、気候変動による大きな環境の変化（安田 1994）があったものと考えられている。高木遺跡でもその痕跡が認められる。遺跡は中期末葉～後期前葉にかけて、阿武隈川の度重なる洪水を受けている。後期前葉には大規模な洪水に見舞われ、集落全体が砂に覆われ、終焉を迎える。この後、古墳時代まで高木遺跡に集落は営まれていない。このような被害を受けた事例は、福島市や郡山市、三春町の阿武隈川やその支流に所在する各遺跡でも認められる。

こうした縄文社会の中で、狩猟・動物儀礼を目的とした「狩猟文土器」が東北南部の一地域と北部で作られ、高木遺跡では、「土器」から「マツリ」の道具である「土偶」にキャンパスを代え、安定した「恵み」とその再生を願い込めて、狩猟文を持つ土偶が生み出されたものと考えられる。（高木遺跡では、中期末葉～後期初頭の時期に、複式炉を伴う住居跡から石囲炉及び敷石住居跡への変化、配石遺構の増加など、集落の変遷を辿る上で大きな画期となる時期である。このことは、大木文化の終焉とも重なる。）

今回は、狩猟文土偶の文様系譜などの報告に留まった。本来は系譜となる文様を持つ土偶が出土する東北地方全ての遺跡や関係する遺構、共伴する土器（施文道具や施文方法）について詳細な検討を加え、縦横の時間軸の設定、当該時期の土偶以外の「マツリ」に関する道具との関係などについても明らかにすべきであった。また、次の機会に再整理し報告できればと思う。

最後になりましたが、本報告をするにあたり多くの方々のご協力を得た。中でも東北地方の土偶については山内幹夫氏、本間宏氏に、高木遺跡の狩猟文土偶の文様については吉田秀享氏にご教示・ご助言をいただいた。末尾ながら、この場を借りて御礼申し上げます。

<参考・引用文献>

- 青森県教育委員会 1983『葦窪遺跡』
青森県教育委員会 1983『牛ヶ沢(3)遺跡』
青森県教育委員会 1985『沖附(2)遺跡』
青森県教育委員会 1985「間沢遺跡」『今津遺跡・間沢遺跡』
青森県教育委員会 1987『上尾沢(2)遺跡Ⅱ』
青森県教育委員会 1990「西山遺跡」『雷遺跡・西山遺跡』
青森市教育委員会 1996『小牧野遺跡発掘調査報告書』
飯野町教育委員会 2003『和台遺跡』
伊藤玄三・八巻正文 1968「福島市月崎出土の土偶」『考古学雑誌』第53巻第4号
(財)岩手県埋蔵文化財センター 1983『湯沢遺跡発掘調査報告書(遺物編)』
(財)岩手県文化振興事業団埋蔵文化財センター 1988『馬立Ⅱ遺跡発掘調査報告書』
(財)岩手県文化振興事業団埋蔵文化財センター 1988『米沢遺跡発掘調査報告書』
(財)岩手県文化振興事業団埋蔵文化財センター 1988『館Ⅳ遺跡発掘調査報告書』
上野修一 1997「東北地方南部における縄文時代中期後葉から後期初頭の土偶について」『土偶研究の地平』
江坂輝彌 1990『日本の土偶』六興出版
大越町(現田村市)教育委員会 1998『大越・岡平遺跡』
大越町(現田村市)教育委員会 1999『大越・江ノ上遺跡』
小山彦逸 1997「縄文時代の狩猟文について」『青森考古学』10
小林達雄編 1988「縄文土偶の世界」『季刊考古学』30 雄山閣
国立歴史民俗博物館編 1992「土偶とその情報」『国立民俗博物館研究報告』第37集
佐原真 1997『原始絵画』講談社
鳴原靖彦 1994「山の神遺跡採集の線刻礫」『福島考古』35
成田滋彦 1998「縄文時代後期の動・植物意匠文」『北方民族学研究』6
能登健 1995「土偶」『縄文文化の研究』9
八戸市教育委員会 1984『丹後谷地遺跡(1)(2)』
原田昌幸 1995「土偶」『日本の美術2』345 至文堂
比内町教育委員会 1986『本堂端遺跡』
藤沼邦彦 1997『縄文の土偶』講談社
宮城県教育委員会 1982「菅生田遺跡」『東北自動車道遺跡調査報告Ⅶ』
宮城県教育委員会 1988『大梁川遺跡・小梁川遺跡』
(財)福島県文化財センター 1989「柴原A遺跡(第1次)」『三春ダム関連遺跡発掘調査報告2』
(財)福島県文化財センター 1990「仲平遺跡(第3次)」『三春ダム関連遺跡発掘調査報告4』
(財)福島県文化財センター 1990「上ノ台A遺跡(第2次)」『真野ダム関連遺跡発掘調査報告XⅣ』
(財)福島県文化振興事業団 2003「高木・北ノ脇遺跡」『阿武隈川右岸築堤遺跡発掘調査報告3』
(財)福島市振興公社 1991「月崎A遺跡」『飯坂南部土地地区画整理事業関連遺跡調査報告Ⅰ』
(財)福島市振興公社 1994「月崎A遺跡」『飯坂南部土地地区画整理事業関連遺跡調査報告Ⅳ』
(財)福島市振興公社 1997「月崎A遺跡」『飯坂南部土地地区画整理事業関連遺跡調査報告Ⅴ』
(財)福島市振興公社 2006『宮畑遺跡(岡島)』
福田友之 1998「狩猟文土器再考」『北方の考古学』
安田喜憲 1994「気候変動」『縄文文化の研究』1
山内幹夫 1992「福島県の土偶」『国立民俗博物館研究報告』第37集
遊佐町教育委員会 1972『神矢田遺跡』

炉壁、羽口、鉄滓などからみた古代製鉄炉の技術革新

福島 雅儀

はじめに

1980年代の後半、古代製鉄に関連する遺跡が、福島県浜通り北部の新地町と相馬市の丘陵地帯で数多く発見された。続いて近接する南相馬市地域でも、関連遺跡が広範囲に存在していることが明らかになった。この地域は、東日本でも古代の製鉄に関連する遺跡が集中する場所である。

これまでに検出された最古の製鉄炉跡は、大船迫A遺跡29号製鉄炉跡（以下、大船迫29号等と略記する）である。炉底の形状と排滓方式から、長方形箱形二方向排滓炉としておく。この型式の製鉄炉跡からは、善光寺3式、7世紀中葉の須恵器が出土している。また、これより古い特徴のある製鉄炉跡も検出されている。製鉄技術がこの地域に導入されたのは、各遺跡から出土する土器、須恵器や瓦生産の改革が開始される時期と関連させれば、善光寺2式期（TK217型式期）より古くなることはないであろう。そこで、7世紀中頃から7世紀末までを導入期とする。

これに続くのは、長瀨33号、大船迫A6号、などである。同じく炉形と排滓方向から、長方形箱形一方向排滓炉としておく。この製鉄炉跡からは、国分寺下層式の土師器が出土している。8世紀前半中頃の年代が想定される。製鉄炉数が増加する時期である。またこの頃、新しい構造の製鉄炉も導入される。円筒形の炉体で、これに踏鞴が装着されている。これを踏鞴付筒形炉としておく。この型式の製鉄炉は、8世紀中頃までに出現する。8世紀前半から中頃にかけては、製鉄炉の改良期である。

長方形箱形一方向排滓炉に踏鞴が装着されて、踏鞴付長方形箱形炉となる。この製鉄炉の初期例では、古い段階のロクロ土師器が伴っている。8世紀後半のなかで出現しているのであろう。これとともに踏鞴付筒形炉も、平行して存在している。古代製鉄技術の到達点で、完成期である。この状況は10世紀代まで継続した。

発掘調査によって出土した鉄滓、羽口や炉体は、鉄の生産によって生じる廃棄物である。この観察と分析は、考古学的に製鉄技術を解明する基礎作業である。鉄滓の表面・裏面、内部の形状、羽口の胎土、作り方、熔融過程、付着する熔融物の特徴、炉体構造、その構成物、浸蝕過程、付着物などは、鉄が作り出される過程で生じた製鉄炉内の状況や当時の製鉄技術を反映している。

ところがこれまでの調査報告では、炉体内部の観察や操業による羽口の変化等の分析は、ほとんどなされていない。炉体内部の実測図や写真が報告書に掲載された例の少ないことは、研究の状況を端的に示している。小論では、これらを観察することから、古代製鉄技術の改良について考えてみた。

1 製鉄技術の導入

長方形箱形二方向排滓炉は、基本的に丘陵尾根の上に造られている。遺存しているのは、炉体の下部構造である。丘陵の尾根線と直交する溝状の掘形を造り、この内部を焼き固め、さらに川原石や砂土・焼土などを詰めている。防湿・保温のための造作である。炉体は掘形の中央に造られている。炉体の両端辺に接して排滓溝が設けられ、その先は鉄滓廃棄場となっている。基底部に残された操業時の熱変化から、炉体の大きさは、2～4 m程度と推定されている。

炉体 白河館に収蔵されている炉体破片のうち、確認できたのは炉体中位破片と下端破片である。中位の壁片は、熱変による3層の操業痕が生じている。炉内表面の熔融物、これと接する青灰色の還元部、そして赤褐色の酸化部である。壁土は、泥土とスサで作られている。スサは、茎や葉も比較的長く、量も多い。茎を短く切ったスサの場合は、茎の方向が揃わない状態となる。塗り壁方式で作られたのであろう。スサを含む壁は、操業によって浸食され、また壁自体の保持強度も脆弱なことから、これを支える別の外壁があった（原町Ⅷ、大迫5号など）。そこで、スサ等を混ぜた炉体内側の壁体を内壁、外側を外壁とする。

炉体中部では、木炭と砂鉄が炉底に向かって燃焼温度を上げながら沈下する。木炭が炉内で燃焼して還元雰囲気となり、砂鉄の還元が進む部位である。高炉でいう還元帯に相当する場所である。説明のため、小論でもこの名称を使用する。付着する熔融物は粘りがあり、内部の発泡跡も少ない。また鉄分が乏しく、磁石には反応しない。炉壁が熔けてガラス化した滓である。生成する部位から、これを還元滓としておく。操業時に粘土が熔ける温度まで達し、1,200度（原町Ⅶ）以上の高熱にあったことを示している。

炉体下部の炉内では、分厚いガラス状熔融物と木炭片が混ざった痕跡が残されている。羽口や送風孔から送り込まれた空気と木炭が反応して、高熱の還元雰囲気の中かで砂鉄から鉄が生成する部位である。顕著な発泡が生じ、操業時の温度は約1,500度（原町Ⅶ）以上であろう。

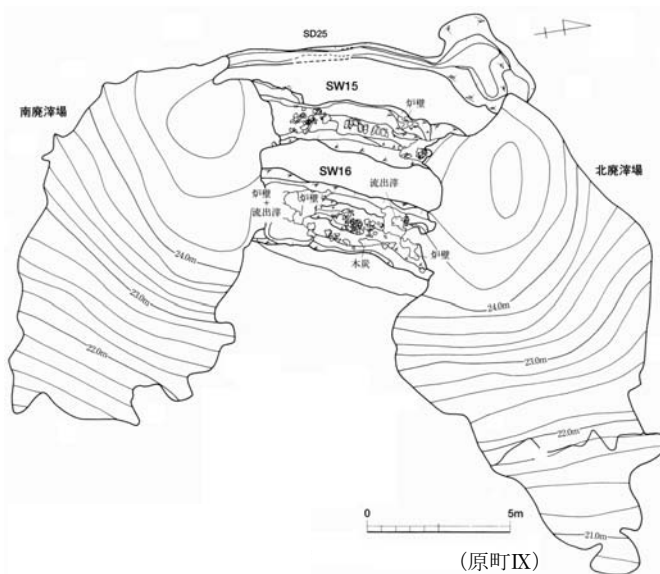
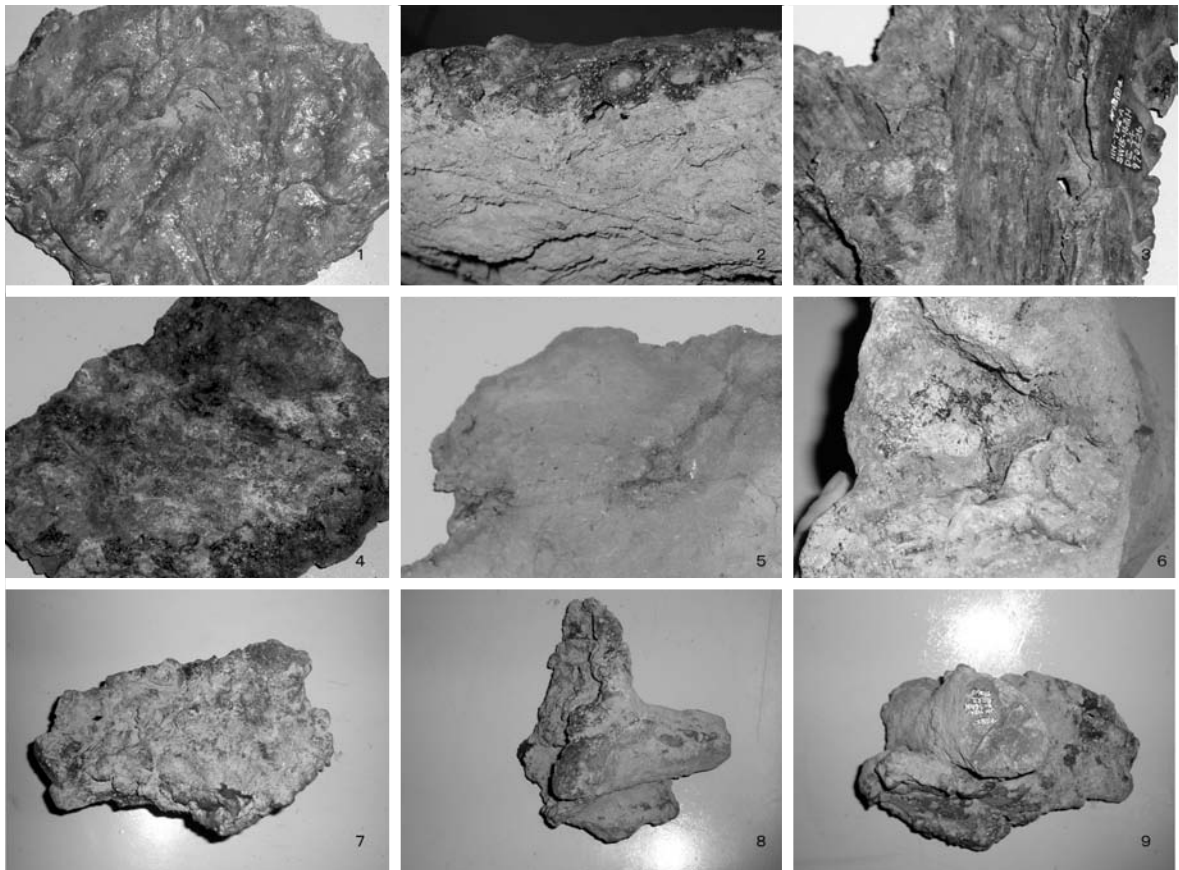


図1 鳥打沢A 15・16号

木炭の痕跡は、幅3 cm程度、長さ6 cm前後の大きさである（原町Ⅵ、鳥打沢A第13図4）。木炭の端部は、直裁された形になっている。小割を行う前に、鋸で長さを切り整えた痕跡であろうか。操業が終了する時点で炉内の温度が下がり、熔融物の硬化が始まった時点の形状を伝えている。鉄滓の形状から、これを発泡滓としておく。

大迫5号（原町Ⅷ）から、炉壁に開口部を設けて送風孔とした痕跡を確認した。長さ35cm、高さ24cmの炉体破片である（図2の4～6）。表面には、



鳥打沢 A 15・16 号 1 炉壁内面 2 炉壁断面 3 発泡滓木炭痕
 大迫 5 号 4 炉壁内面 5 炉壁裏側 6 送風孔側面
 鳥打沢 A 15・16 号第 12 図 13 7 炉壁内面 8 側面 9 裏側 (1～3、7～9 原町 IX、4～6 原町 VIII)

図 2 長方形箱形二方向排滓式製鉄炉跡出土資料

還元滓が厚く付着している。内壁にはモミガラ片やスサが多量に含まれ、熱変化により赤褐色になっている。被熱温度は、素焼き土器の焼成程度であろう。壁体は脆く、手に持っても表面が細かく剥離する状態である。

確認した送風孔の痕跡は、2 個である。芯芯間で 14 cm 離れている。裏面から見て炉壁片中央部の孔は、還元滓が侵入した状態で塞がっている。孔の周辺は還元状態になっている。逆方向の炉体内部からは、還元滓に覆われて確認できない状態である。

もう一つは、断面で確認した。送風孔の断面形は、矩形か三角形と推定され、その二辺が遺存している。孔の底面幅は、6 cm 以上である。還元滓がへばり付くように付着している。この直下の壁面は、厚さ 5 mm 程度で還元している。上方は失われているが、遺存する部分は、還元滓が付着している。炉壁に孔を穿けて送風孔とすれば、垂下する還元滓による閉塞を避ける工夫が必要である。還元滓が、孔の開口部を避ける垂下する道筋を作って、閉塞を防止したのであろう。このほか長瀬 24 号でも、炉体に設けられた送風孔が確認されている（原町 V、第 13 図）。

鳥打沢 A 15・16 号（原町 IX、第 12 図 13）からは、湯口（排滓孔？）付近の炉内滓とされた資料が報告されている。この炉内側上端は還元滓で、そのほかは発泡滓である。炉体下部の

資料である。破片の裏面側には、スサ入り炉壁の形状を反映した痕跡が残っている。下面には、いわゆる流出滓の底面と同じ、表面張力により盛り上がった流入痕のある熔融物が付着している。湯口痕とされる熔融物の断面形は、略三角形である。炉内側が大きく、反対側は小さくなっている。そうして、通常の送風孔と同じく炉内側に傾斜している。

つまりこの資料は、炉壁に設けられた送風孔に、炉内に溜まった鉄滓が流入して生成したと考えられる。発泡滓と送風孔の位置関係からみても、矛盾はない。送風孔を越える高さにまで鉄滓が溜まり、送風孔に空気が送入されない状態が生じたと推定される。

鉄 滓 出土した鉄滓は、大きく二つに分かれた。一つの表面は、ホットケーキの生地をフライパンに流したような状態で硬化した形状と近似している。表面張力による盛り上がりがあり、滑らかな表皮が生成している。いわゆる流出滓である。また下面も同様な表皮が形成され、表面張力による凹凸がある。内部には気泡の痕跡がある。あるいは、結晶が発達している場合もある。還元滓と比べて金属分が多く含まれている。比較的重い。滓の成分・硬化、環境による相違であろう。

もう一つは、いわゆる炉内滓の一種である。小さな凹凸や発泡痕がある。多くは小割にされている。また錆の進行によって割れ、崩壊の進む資料もある。還元滓と比べれば重く、表面に大きな泡や木炭片の痕跡はない。

この製鉄型式の炉跡では、操業が終了した時点で、炉底滓が生成した状況の確認された例はない(原町VI、吉野滋夫の指摘)。炉体下部に生成した発泡滓と半熔融を鉄取り出して割り砕き、鉄が取り出したのであろう。操業の終了時に、炉底を除去する必要があったのである。

操 業 スサを多量に混ぜることにより、内壁の熔融が進む。熔けた壁土から生じた熔融物は、炉底に溜まることにより炉内の保温を高め、砂鉄の反応を促進させる。送風孔は、炉体側面に設けられていた。炉体の長辺は、送風装置の操作、炉内管理作業を行う場所である。炉体を大きくして、効率的な半熔融鉄を生成したのである。

生成された半熔融鉄は、タタラ製鉄で鋺が作られた状況と同様な形状となる。タタラ製鉄の鋺は、炉壁に沿った送風孔の下部に成長し、炉底中央部は溝谷状の形状になる。この部分に鉄滓が溜まることになる。炉体も大型で、長瀬 21・31 号では、長さが 3.9 m もある。細長い炉体から、滓を支障なく排出するためにも、炉体の短辺に排出孔が設けられたのであろう。そこで、炉体の主軸を尾根線に直交させ、あるいは斜面の等高線に沿って炉体主軸を設けたのであろう。

この型式の製鉄炉では、排滓量にばらつきがある。大船迫 29・30 号では、合わせて 36 t の排滓が確認されている。これに対して長瀬遺跡では、2 t の 11 号が最大で、多くは 1 t 未満である。

2 送風技術の改良、羽口の装着

長方形箱形一方向排滓炉は、羽口が装着され、炉体短辺の片方から鉄滓が排出される造りで

ある。丘陵南斜面をL字状に削り出して平坦面を造り、炉体の主軸を等高線と直行させて据えられている。炉体から少し離れて、直径1～2mの浅い土坑が配置されている。炉体側面の左右が、操業時の作業場である。

炉壁は、操業が終了する時点で取り壊されている。遺存するのは基底部である。炉底部は還元面となり、まわりには酸化面が形成されている。この型式の製鉄炉跡では、炉底滓がそのまま残されていることも少なくない。炉底面に形成された酸化面や炉底滓からみて、製鉄炉操業前の基底部は、長さ1m以上、幅0.5m程度の大きさである。

炉体の掘形は、隅丸長方形の箱形である。酸化面の約2倍程度である。炉体に比べて大きな掘形である。炉体は、掘形の底面に造られている。操業を繰り返すことにより、炉底の重なりが生まれている。炉体と関連して、尾根側の左右に土坑に連続する溝が設けられている。これは、送風装置との関連が指摘されている（能登谷 2005 など）。丘陵麓側の還元面端付近から下方に向かって、鉄滓廃棄場が広がっている。

炉体 鳥井沢B1号（原町Ⅲ）では、炉壁中部と下部の資料を確認した。中部の破片は、還元滓が付着している。ガラス質で粘りがあり、蜂蜜を流したような形状で垂下している（図5の1・2）。泡の発生は少ない。裏面は酸化により赤褐色になっている。脆い焼土層である。スサが多く含む壁土である。スサの茎方向は一様ではないので、塗り壁方式で貼り付けられたのであろう。

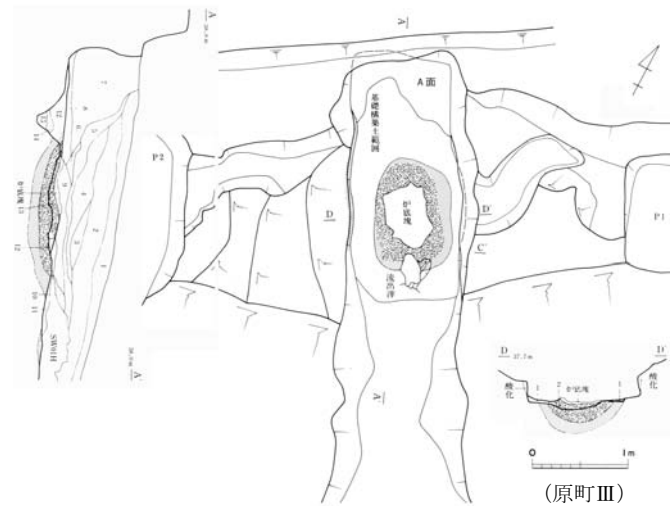
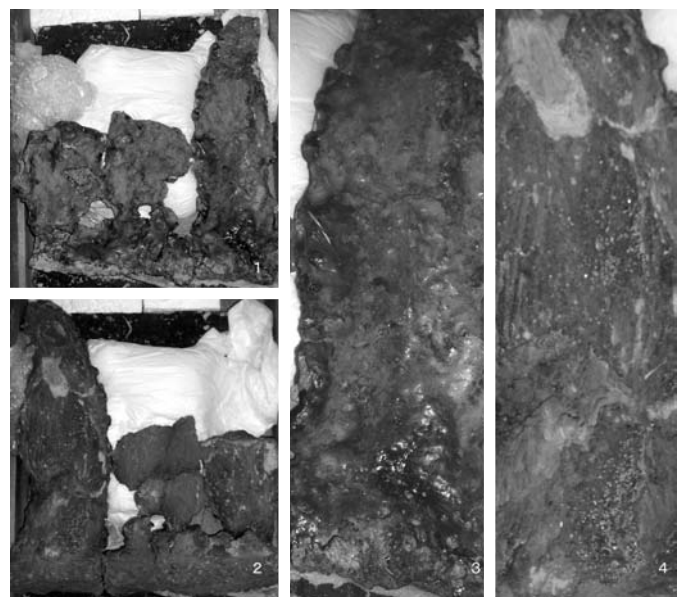


図3 鳥井沢B1号

図5の3・4は、羽口が装着される付近の破片である。熔融物に覆われた木炭が、燃焼によって消滅した痕跡が明瞭である。表面に錆が付着している。しかし、磁石の反応は鈍い。還元滓には、細かな泡が含まれている。激しい発泡状態ではない。炉壁の内部まで、深くガラス質に変化している。炉壁の熔融する温度が、比較的長時間続いたのであろうか。

裏面は弱い還元面である。このうち上半分の壁土には、スサが含まれている。炉体の粘土帯は水平方向に延びて



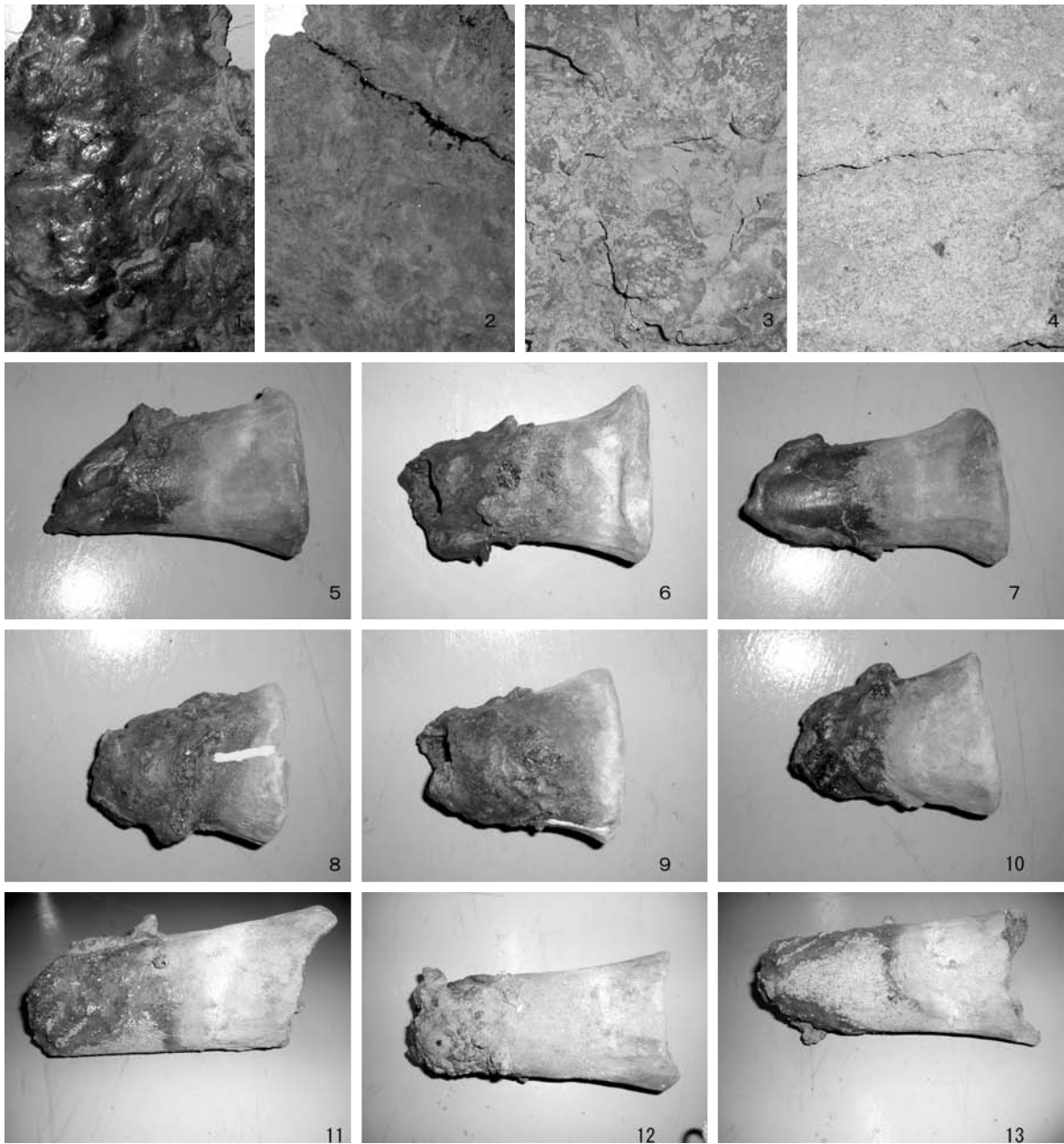
1内面 2裏側 3内面拡大 4裏側拡大（相馬Ⅰ）

図4 相馬市向田G1号炉壁

いる。下半分は砂を含む粘土である。また下端は凹面で、薄いガラス状熔融物が付着している。

向田G1号（相馬Ⅰ）では、縦方向にスサの茎を揃えた柱材様の構築材を3本並べて板塀状とした炉壁が出土している（図4）。長さ40cm以上、幅15cm、厚さ10cm前後の破片である。スサの藁茎に切れ目はなく、下部では大きく曲がっていた。粘土にスサを混ぜたのではなく、藁茎を泥土に沈めて粘土を含着させ、これを固めたものであろうか。藁茎の間隙にある泥土は精良で、砂粒はほとんど見えない。現状の横断面は、表面が浸食を受けて半円形になっているが、本来は円形であろう。

内壁材の表面は、還元滓に覆われている。基底部から30～40cmは、軽いガラス質で、表面



鳥井沢B1号 1 炉体付着還元滓 2 同裏側 3 熔融滓表面 4 同裏側
 長瀬6号 5、8、11 羽口側面 6、9、12 羽口上面 7、10、12 羽口下面（原町Ⅲ）

図5 長方形箱形一方向排滓式製鉄炉出土遺物

が水ぶくれ状に発泡している。それより下は次第に粘りが強くなり、厚さも増してゆく。炉壁内面は、柱材の接合部に沿って垂下する流路が生じ、下部に溜まって瘤状になっている。報告書（相馬Ⅰ）では、この部分に羽口が装着されていたと考え、それが外れた痕跡と考えられている。

羽口 羽口は比較的大型で、器壁も厚い。胎土には細かな砂粒を多く含まれている。耐火温度は $1,404 \sim 1,580^{\circ}\text{C}$ （原町Ⅴ）、スサ入り炉壁と比べて高温である。作業時の浸食によって変形しているが、吸気部から先端に向かって円錐形の形状を残している。これは吸気部が開いているためである。羽口は、髓抜棒に砂粒を含む粘土板を巻きつけて作られている。外面はナデとオサエによる整形、内面はヌタを付けた髓抜棒の引き抜き痕がある。羽口の横断面は、製作時に粘土板が重なって片側が厚くなる。

作業の初期段階では、対応する壁面に設けられた羽口からの送風を正面に受ける（図5の11～13）。浸食は、羽口の先端から均等に進み、全体に丸くなる。あるいは、丸刃彫刻刀で抉ったように先端が凹む。これとともに炉壁が熔けて、垂下する還元滓が羽口に付着する。初期で作業が停止される一因は、還元滓による羽口の閉塞である。

使用された羽口には、先端に還元滓が付着し、吸気部に向かって還元層、さらに酸化層が形成される。還元層と酸化層は、羽口の主軸とほぼ直交する角度である。設置された羽口の形状は、側面・上面・下面で大きな変化はない。

作業が進むと、設置された羽口は、先端から斜め上に向かって浸食が進み、上半部から後退する（図5の5～7）。そうして、先端部から斜め上に削ぎ落とした形状となる。羽口壁の厚い部分を上にして据えるのは、この浸食に対応するためである。同時に、炉体の内壁も変形する。羽口自体は、炉壁より耐火温度が高いことから、炉壁から突き出した状態になる。

作業を進めば、還元滓は垂下して羽口の上面を覆うようになる。羽口下面に付着する還元滓は、先端を基点として左右に分離する。また羽口の先端下面には、水滴状の特徴的な形状の熔融物が生成する。羽口下面の表面は露出して、一部に釉薬状の熔融物が付着する。

羽口の遺存長は、製鉄炉の作業時間の長短と関連している。発泡滓あるいは還元滓が羽口の先を塞げば、製鉄炉の作業を継続することは困難になる（図5の8～10）。順調な作業では、吸気部付近まで浸食が及ぶ。羽口の先端は、開口して作業が終わる。当然、遺存長は短くなる。長く遺存している羽口は、作業に支障が生じた場合である。

羽口装着角度 小暮伸之は、この型式の製鉄炉羽口装着方法について、大迫46・47号の資料（原町Ⅴ、第330図の8）か

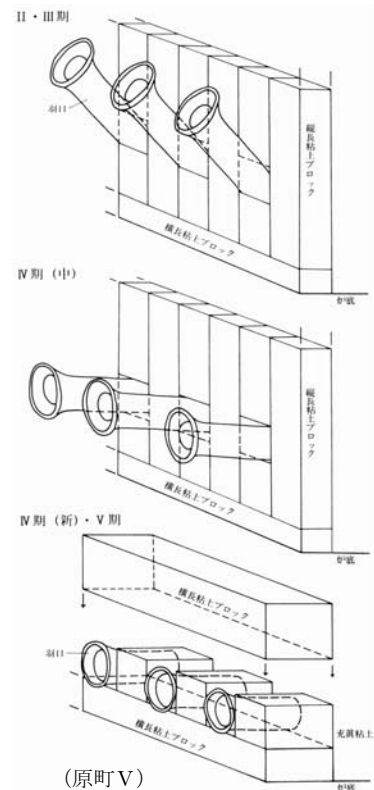


図6 小暮伸之による羽口装着案

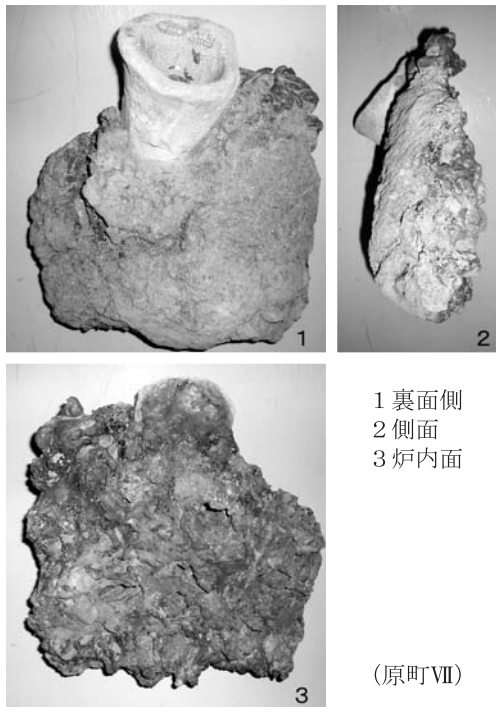


図7 大迫46・47号炉壁

ら、図6（原町V、第4篇第図14）に示した方法を復元している。「炉底に長方形の粘土ブロックを設置し、その上に縦長の粘土ブロックを横方向に立て並べて炉壁を構築していることがわかる。羽口はこの縦長の粘土ブロックの間に挟まれ、更にその上下からも粘土ブロックによって押さえられるようにして固定されており、装着角度は48°を測る。」としている。

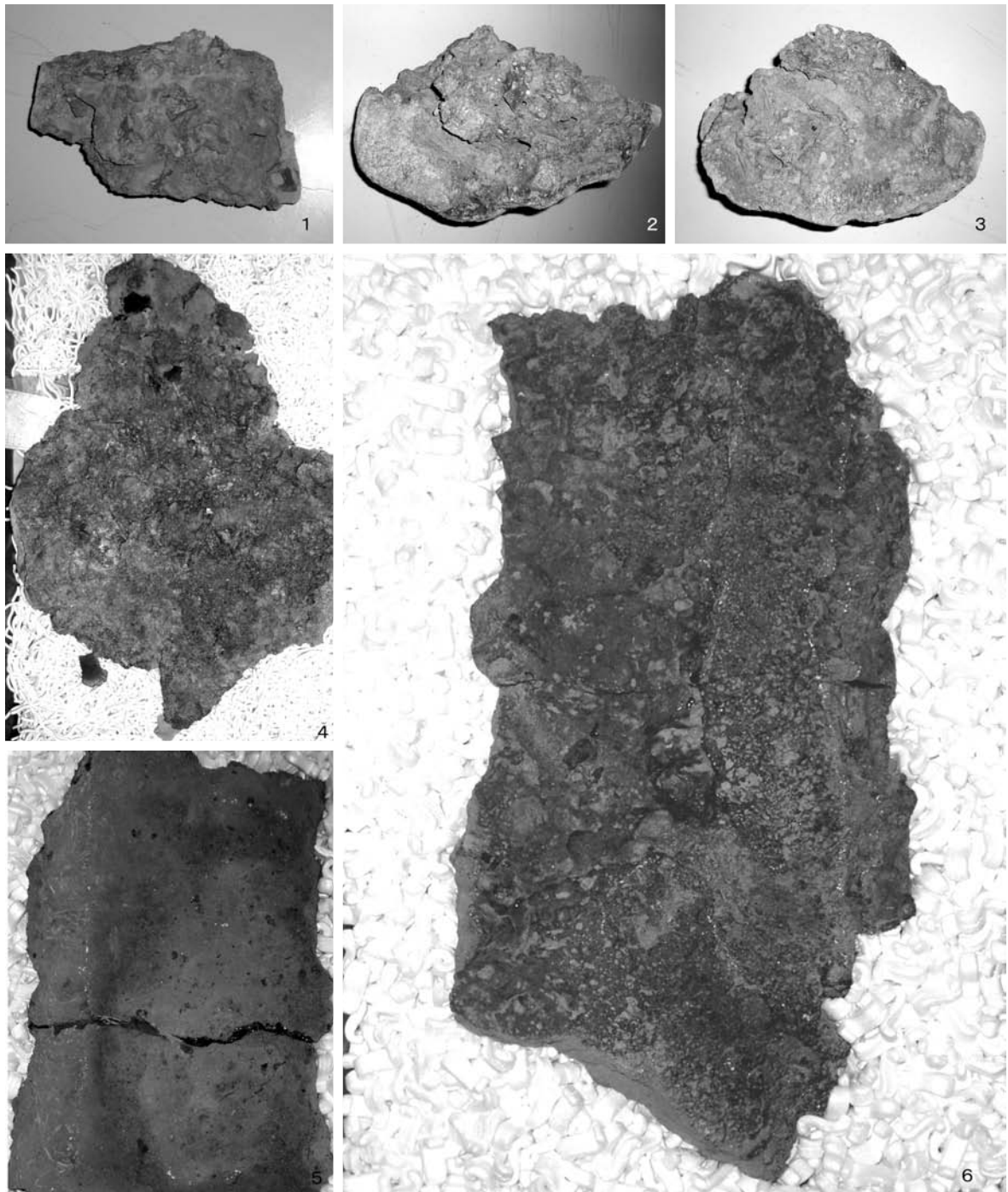
そこで、大迫46号第330図の8（原町V）に示された資料の観察を行った（図7）。この資料は、長さ24cm、高さ24cmの熔融帯破片である。羽口は、吸気部から遺存する先端までは13cmである。羽口上側は、吸気部まで熔融物が付着している。炉壁が耐える限界まで操業が続けられた資料である。吸気部から8cmまでは外壁である。羽口の先端は開口している。最後まで順調な操業が行われたのであろう。内壁には多量のスサが含まれている。

羽口上面から上の炉壁は、ガラス質で比較的粘性がある還元滓が付着している。還元滓の表面には、焼結した砂鉄が付着している。羽口の下側は、木炭を噛みこんだ発泡鉄滓で、盛んな発泡痕がある。羽口下面と外壁の底端とは約15cmを測る。つまり、炉床面から15cm高い位置に、羽口が設置されていたことになる。熔融帯の炉壁は、1,500度以上の高温状態になったことを示している。

この羽口は、先端は下がって、吸気部が大きく上がった状態になっている。これは、吸気部近くまで熔融した炉壁が安定性を失い、垂下する鉄滓に先端が引きずられて羽口本来の設置位置を失った結果である。この資料は、羽口の装着角度を示してはいない。ほかの羽口を見ると、主軸と直行して垂下する熔融物で覆われ、下面の先端には、羽口の主軸方向と直交して、水滴状熔融物が付着している（原町V、第330図の2）。これも羽口が、水平方向に設置されていた痕跡である。

羽口主軸線と還元面や熔融物が交わる角度は、羽口を設置した角度の痕跡と理解されている。しかしこれは、操業が行われる過程で熔融進行が進行した痕跡である。計測された装着角度が一定していない（原町Vなど）のは、この誤認である。羽口の手前から送風を受ける部分は、炉内で最も高熱となる部位である。羽口を小暮の想定する急角度で設置すれば、熱風を受ける炉底の溶解を防止する工夫が必要である。それがなければ、炉底に熱風を受けた浸食や熔融によって、炉内が不安定になる。

炉底滓 炉体底面に堆積した鉄滓が、操業終了後に固まったものである。炉体の浸食が限界に至り、操業は終了する。この時、炉内は燃焼している木炭が詰まった状況となる。炉内温度は徐々に下がり、炉底滓表面の凹凸も次第に滑らかになるであろう。



長瀬 15 号 1 上から 2 断面南から 3 断面北から 鳥打沢 A 1 号 4 表面 鳥井沢 1 号 5 裏面 6 表面

図 8 炉底滓

1～3、5～6 原町Ⅲ 4 原町Ⅰ

表面は、流出滓や発泡滓と近似しているが、形態と裏面に特徴がある。平らな隅丸長方形の形状で、長さ 1 m、幅 0.5 m に達するものがある。裏面は、熔融物が付着する床面の内部に浸み込んでいる。

羽口の下にある炉底滓は、踏鞴付長方形炉も含めて海綿状となり、中央部から排滓孔にかけては、滑らかな面が形成されている。順調に操業を終えた状態で、徐々に冷却が進んだ結果である。これに対して、何かの事情で操業を中止すれば、その状況を反映した炉底滓が生成する

はずである。

長瀨 15 号（踏鞴付長方形箱形炉）（原町Ⅲ）からは、操業時の状態を伝える分厚い炉底塊片が出土している（図 8 の 1～3）。幅 30cm、羽口下端から炉底端まで 9 cm、炉底中央とは 12cm 程度である。炉底滓の東端は炉体に装着された羽口と接続し、装着状態を伝える羽口片が付着している。東部の炉底は、浸食により当初の形状が失われていた。東部は、かすかに内湾して真直ぐに立ち上がる側壁、船底状に深くなる炉底面の状況を良好に伝えている。

この炉底滓は、大きく上下の 2 層に分かれている。下層は結晶が発達し、気泡はみられない。羽口の先で生成し、熔融の進んだ鉄滓が、側壁と底面に沿って堆積したのであろう。上層は、木炭の喰い込みと盛んな発泡痕がある。上層は、両側で羽口まで達している。発泡滓が羽口を塞ぎ、操業の継続が難しくなって放棄されたのであろう。盛り上がりは、砂鉄が炉体中央部へ集めて投入され、これが降下した痕跡である。これは、還元帯の炉壁に砂鉄がほとんど付着しないこととも関連していしょう。

鳥打沢 A 7 号（踏鞴付長方形箱形炉）（原町 I）の炉底滓では、3 層に分かれた堆積の痕跡が確認されている。各層ごとに、上に滑らかな表皮層、下に発泡部が形成されている。いわゆる流出滓と近似しているが、鉄滓は炉床の砂に食い込んでいることから、これと区分することが出来る。また大船迫 A 8 号（原町 V）からは、発泡した層が二重になった炉底滓が出土している。これは、炉底部で溜滓と排滓が繰り返された操業の痕跡である。

これに対して、鳥打沢 A 1 号（踏鞴付長方形箱形炉）（原町 I）から出土した炉底滓は、表面に細かな泡が弾けた状態である（図 8 の 4）。急に操業が停止され、発泡状態を保ったまま急激に硬化したのであろうか。あるいは、操業を継続できない異常事態が発生したのであろうか。確認したのは、この一例のみである。

鳥井沢 B 1 号（長方形箱形一方向排滓炉）（原町 II）から出土した炉底滓には、東半部に平らなヘラ先で押し引いたような痕跡が残されている。押し引に部の側端には、盛り上がりがある。高熱時に生成した痕跡である。この部分では、堆積した鉄滓の表面が損なわれて、小さな泡が生じている。中央から右下部にかけては、先端の丸い棒状工具を押し引いた痕跡がある。操業が終了した後に落下した木炭が、何らかの事情で移動した痕跡と想定できないであろうか（交野市教育委員会真鍋成史の教示）。痕跡の先端が丸くなっているのは、燃焼により形状が変化した木炭の刺突痕であろう。

流出滓 長瀨 6 号（原町 II）では、排滓口に接して鉄滓が流出した状況を遺して出土している（図 9）。製鉄操業の終了後に予熱により痕跡である。炉内の排滓孔近くにも鉄滓が残っている。表面には細長い表皮層は、ホットケーキの生地を細長く流したような筋が、幾重にも重なっている。裏面は、表面張力による小さな凹凸があり、これに小石や滓片が噛みこまれている。この内部は 3 層に別れている。表皮と裏面近くは発泡が少ないのに対して、中間層では、発泡痕跡がみられる例もある。

流出滓に対して、炉内滓として保管されているサンプルは少量しかない。表面に錆が生じ、細かな泡の表出も見られる。また不定形に割れて、碎片化も進行している。炉内で生成したが、



図9 長瀨6号

1 炉底部 2 流出滓表面 3 同拡大 4 流出滓裏面 (原町Ⅱ)

最終段階の炉底には残れなかった鉄滓である。熔融帯に付着する発泡滓に近い形状である。

操業 この型式の製鉄炉は、前段階の長方形箱形二方向排滓炉と比べて、次の4点が改良されている。①、羽口が装着される。②、炉体の長さが半分程度の小さくなる。③、いわゆる炉底滓が数多く残されている。④、鉄滓の主体は流出滓で、発泡鉄滓の割合は少ない。

①によって送風孔の耐火性が大きく向上し、高熱状態でも安定的な送風が可能になる。古墳時代には鉄器を作る鍛冶作業によって使用されていた羽口が、製鉄炉に転用されたのであろう。③は、炉内の最終状態である。操業によって生成した鉄は、炉外に排出されたことになる。炉内が高熱を維持できるようになり、銑鉄と流出滓を作り出した結果である。操業の失敗ではない。④は、半熔融鉄が作られたのではないことを示している。

炉体が小型化する②は、送風装置の能力と関係するのであろう。この送风量に合わせて、適正な大きさの炉体としたのであろう。これによって鉄滓の流動性が良くなる高温操業が可能になり、排滓孔は1箇所となった。

出土する流出滓と炉内滓の割合は、製鉄炉跡によって大きく異なることが吉野滋夫によって指摘されている(原町Ⅴ)。この原因は、作られた鉄の相違ではないだろうか。長方形箱形一方向排滓炉で銑鉄が出来たのであれば、半熔融鉄の製造も可能である。半熔融鉄を作れば、流出滓とともに、炉内滓が副産物として生成する。

排滓量は、長瀨 27 号（原町Ⅴ）が 17 t で最も多い。次に 2.5 ～ 6 t 程度でまとまりがある。これらが通常の排滓量であろう。しかし、排滓量が 1 t に満たないものも少なくない。これは、導入期と同じである。

3 新製鉄技術の導入

踏鞴付筒形炉は、炉体・送風装置とは全く異なる構造である。従来の技術に工夫改良を加えるだけでは生み出されない新しい技術である。踏鞴付筒形炉は、丘陵斜面の中腹に造られている。尾根から沢に向かって、鞴付送風装置、筒形の炉体、この左右に設けられた作業場、炉体前面に広がる鉄滓廃棄場という順序で配置されている。相馬地区の報告書などでは、鉄滓廃棄場を作業面としている。この部分は、排出した鉄の掻き出しが想定される場所である。炉体に砂鉄と木炭を投げ入れる場所は、炉体の開口部付近であり、風箱の前が合理的であろう。

この型式の製鉄炉は、宮城県多賀城市柏木遺跡で 8 世紀前半の操業が確認されている（石川・相沢 1988）。相馬地域での出現は、これより少し遅れるようである。

送風装置 導入された送風装置は踏鞴である。中央に支点となる丸太を置き、シーソーの原理で踏み板を動かして、左右の風箱から木管を通して炉体に空気を送る構造である。検出された風箱遺構は、長さ 3 m 程度、幅 1 m 弱で、縦の断面は、中央の溝を境に左右へ傾斜している。これから考えられる鞴は、香取忠彦が大仏鑄造を解説したなかで復元した「タタラ」と同じ構造である（香取 1981）。

炉体に一本の大きな送風管を据え付、空気を送り込む構造である。これまでの長方形箱形製鉄炉と大きく異なる形態、送風装置である。技術の継続ではなく、新しい技術が導入されたのである。これにより、強力で安定した送風が可能になった。

炉体 長瀨 2 号（原町Ⅱ）の炉底平面形は、隅丸長方形で、幅は 0.4 m である。長さは 1.4 m と報告されているが、実測図から判断して、0.7 m 程度であろうか。近接する同型式の 3 号製鉄炉跡では、0.5 m と報告されている。炉底面は、奥端から鉄滓廃棄場に向かって約 10 度の傾きを設けていた。同 3 号（原町Ⅱ）では、約 15 度の角度である。炉底面は平坦ではなく、鉄滓廃棄場に向かって斜面になっていたことを確認しておく。炉底と作業場平坦面の比高差は 1 m 程度である。

長瀨 2 号の出土資料（図 11 の 3 ～ 10）をみていこう。炉体内壁面は、スサを混ぜた粘土で、かなり厚く造られている。還元帯でも 5 cm 以上の厚さがある。スサ入り粘土自体は、構築物を作るには脆弱な材質である。造り替えの痕跡もあることから、作業場より上部では、スサ入り壁土の外側に、より頑丈な外壁が存在していたのではないだろうか。

炉の内部は、付着する熔融物の状況により、いくつかの部位に分けることが出来る。通風管より上部は、ガラス状熔融物が付着する還元帯である（図 11 の 2・3・4）。さらに熔融物の形状から上下に分かれている。下半部（図 11 の 2）には、ガラス状熔融物が厚く付着している。炉壁を垂れ下がるように流れた痕跡である。発泡痕は少なく、粘り気のある熔融物である。長方形箱形一方向排滓炉などの還元滓と区分することは難しい。同様に還元滓としておく。

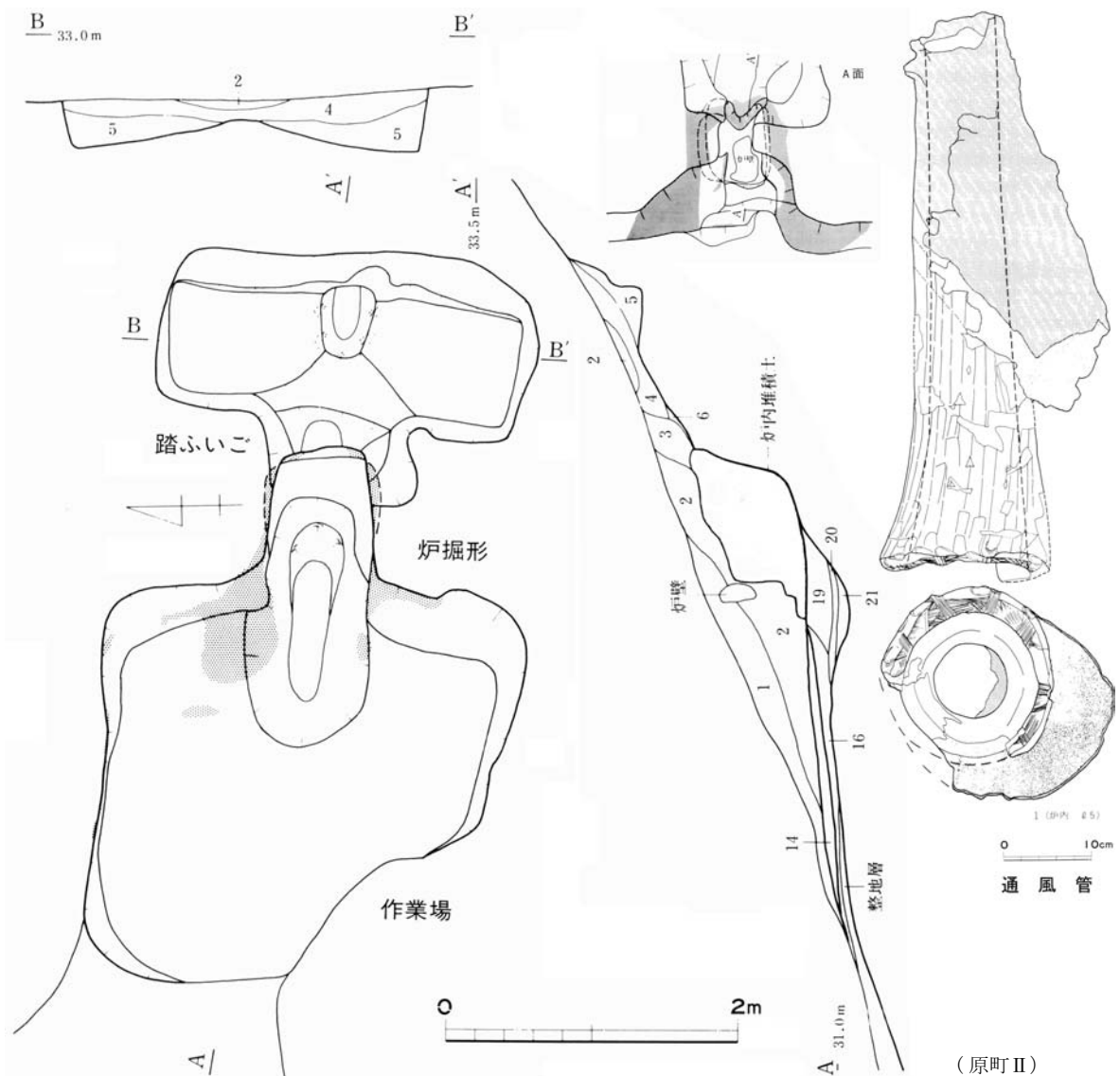


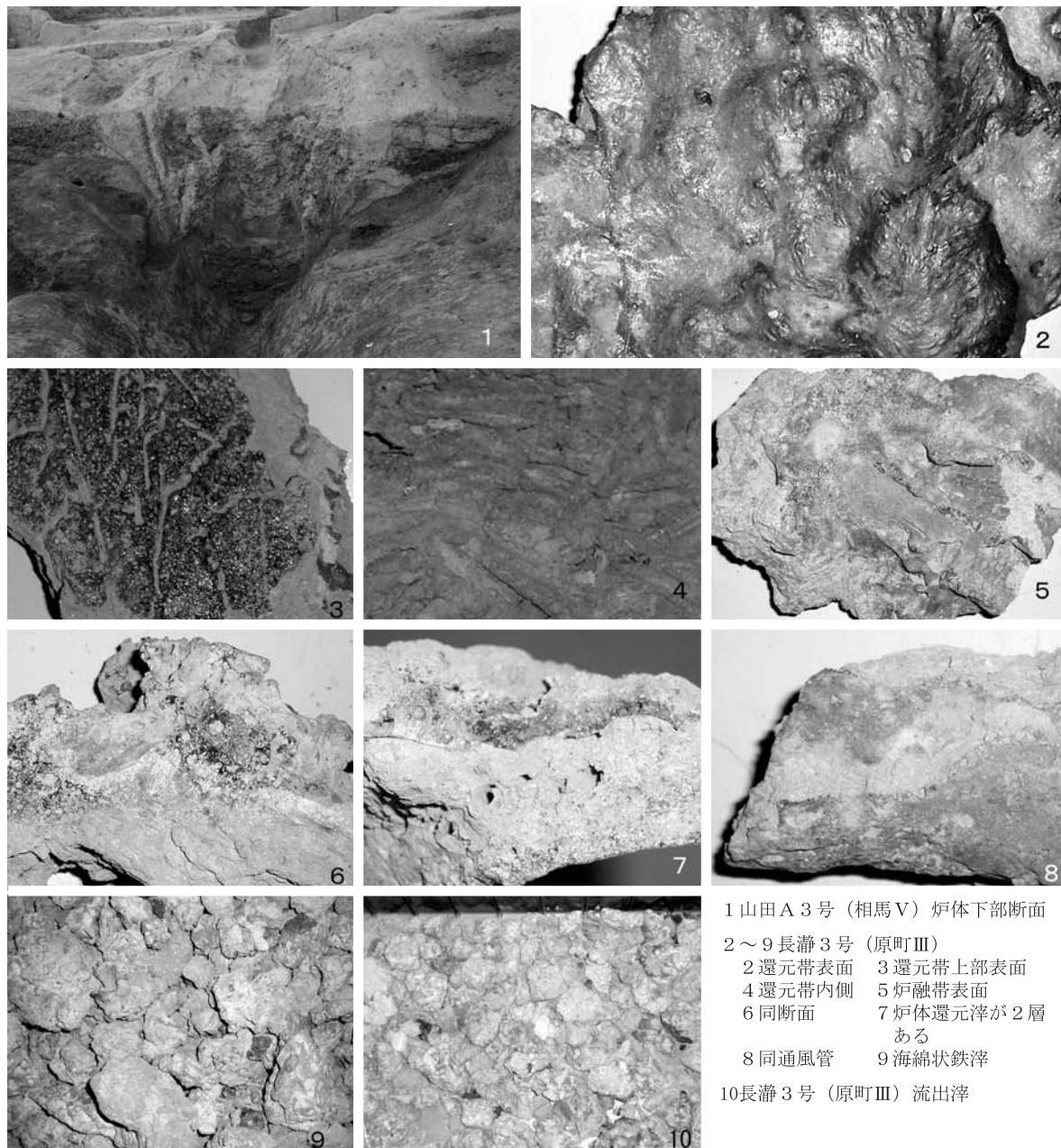
図10 長瀨3号製鉄炉跡

さらにその上部は、薄いガラス質で覆われた陶器質となり、細い溝縦が発達している（図11の3）。溝は、スサが加熱によって消失した痕跡であろう。炉壁上端は未確認である。

還元帯では、還元滓で覆われたスサを含む炉壁が、2層になっている破片を確認した（図11の7）。同様な痕跡は、通風管でも確認している（図11の8）。さらに炉体の下部でも同じ炉壁の重なりがある。製鉄炉が1回ごとに造り替えられたのではなく、破損部に補修を加えて、複数回の操作が行われたことを示している。

通風管 長瀨3号からは、良好な状態の通風管が出土している。截頭円錐体で長さ64.6cm、基底部外径19.2cm、先端部内径8.3cmである。装着角度は、付着する炉壁の状況から、約45度と推定されている。これは、長瀨2号などで検出された通風管の敷設掘形とも、それほど相違はない。通風管の前半部は、付着する熔融物の長さから判断して、炉体下部の奥壁から0.2m、長さで0.3m以上は突き出していたと推定される。

通風管の表面は、報告書でいうヘラケズリ（原町II）ではなく、主軸方向あわせて強いナデ



1 山田A 3号（相馬V）炉体下部断面
 2～9 長瀨3号（原町Ⅲ）
 2 還元帯表面 3 還元帯上部表面
 4 還元帯内側 5 炉融帯表面
 6 同断面 7 炉体還元滓が2層ある
 8 同通風管 9 海綿状鉄滓
 10 長瀨3号（原町Ⅲ）流出滓

図11 筒形製鉄炉関連資料

ツケで整えられ、横断面は小さな凹凸面となっている。胎土には砂粒が含まれ、高熱環境に対する耐浸食性と支持強度を保つことが図られている。これとともに上半部には、スサ入り粘土が厚く塗り上げられている。操業時の浸食に対する備えであろう。

熔融帯 送風管の先端から下の部分が、熔融帯である（図11の1）。この部分は半地下式になっている。長瀨22号は、炉体下部が地山を掘り込んで造られていた。この炉の前壁は、地山を利用して造られていた。炉体は直径0.45mの円筒形で、高さ1.2mまで遺存していた。遺存する炉体の上半部はすぼまっていた。炉底から20～30cmの範囲には、熔融滓は付着していない。また前壁には、床面からの高さが30cmの開口部が設けられていたらしい。

熔融帯は、さらに上下に分かれている。上半部は厚いガラス質の熔融物と木炭片の痕跡が絡

み合った状態である（図 11 の 5・6）。木炭の端部は、真直ぐである。踏鞴付長方形箱形炉の木炭片よりは、全般的に大きめである。熔融物はガラス化が進み、断面で 3 cm 以上の厚さに発達している部分もある。一方で、鉄分はそれほど含まれていない。

下半部では、熔融物の顕著な発泡が特徴的である。熔融物の泡は大小さまざまで、不定形に変形して海綿状になっている。炉壁から分離すれば、上下と表裏の判断も困難である。鉄分を多く含む資料があり、錆が進行して、黒く変色している部分もある。いわゆる炉内滓と呼ばれる資料であるが、これにガラス質の滑らかな熔融物が混ざっている。長方形箱形一方向排滓炉などの発泡滓と区別する意味で、海綿状鉄滓としておく（図 11 の 9）。小さく割られ、鉄滓廃棄場からも多量に出土している。

炉内で最も高熱になるのは、通風管の先端部で送風を受ける部分である。送風された酸素と木炭が激しく反応する部分である。山田 A 3 号では、底面から 20 ～ 30 cm 範囲に、錆びた鉄の熔着した帯が確認されている。鉄が生成した場所である（図 11 の 1）。

送風管の反対側にあたる炉壁は、発生する熱風を受けて浸食が進むことが想定されよう。出土した炉壁のなかには、厚さ 20 cm を超えるものが含まれていた。さらに炉形が、送風管方向に細長くなっているのも、浸食の影響を避ける工夫であろう。この部分は、沸騰するガラス質の熔融物から、1,500 度以上の温度になり、還元された砂鉄が熔ける部位である。

操業 この製鉄炉跡で、半熔融鉄塊が生成したのであれば、これを取り出すためには、少なくとも炉体下半部は除去しなければならない。しかし多くで、この部分が遺存している。また、炉底滓も遺存した例は確認されていない。炉底が斜めになっていることは、生成物を炉外に排出していた工夫であろう。埼玉県猿貝北遺跡の鉄滓廃棄場からは、長さ 40 cm、幅 35 cm、高さ 14 cm の石枕状の鉄塊が出土している。意図の外に生成した鉄塊で、処理が出来ないために廃棄されたと考えられている（松井 2001）。

この型式の製鉄炉跡から出土する鉄滓について吉野滋夫は、炉内滓と流出滓の割合を検討している（原町Ⅱ）。長瀨 2 号で炉内滓 18.7%、流出滓 61.3%。同 3 号で炉内滓 5.9%、流出滓 85.6%。同 10 号で炉内滓 70.9%、流出滓 22.3%。向田 A 2 号で炉内滓 54.6%、流出滓 47.6%。同 3 号炉製鉄炉跡で炉内滓 51.9%、流出滓 30.8%。という数字である。

これは、操業を反映した数字であろうか。図 11 の 10 は、長瀨 3 号の流出滓として保管されている資料であるが、流出滓と炉内滓を区分することは難しい。むしろ炉内滓に近い。表面が水銀のように平滑な部分もあるが、これは小さい。裏面も、表面張力による盛り上がりはない。長瀨 3 号で報告されている流出滓は、長方形箱形一方向排滓炉の流出滓とは全く違う形状である。

踏鞴付筒形炉の下半部は、直径 0.5 ～ 0.7 m 程度である。床面から通風管の先端までを 0.4 m、錆びの付着する部位を 0.3 m とすれば、炉体内には液状の鉄や鉄滓を溜める容量はない。したがって生成した鉄を継続して排出する構造とすることが不可欠である。炉体底部には鉄滓廃棄場に開口が設けられていたはずである。

鉄滓廃棄場には、銑鉄や滓の流れ出た痕跡は確認されていない。銑鉄が生成したのであれば、

軽い流出滓と分離して炉外に排出されるはずである。鉄滓廃棄場からは、海綿状鉄滓が出土している。この炉で生成した鉄は、海綿状鉄滓に混ざった状態で炉外に排出されたのであろうか(穴澤 2003 など)。

廃棄された鉄滓の量は、最も多い長瀨 2 号では、約 5 t である。また、炉体の熔融帯自体が小型であるが、原料の投入と生成した鉄の排出を連続して行う作業により、生産量を確保したのであろう。炉体の補修を繰り返して、一基あたりの耐久度を高めた結果である。これに対して、半数前後の製鉄炉では、排滓量が 0.5 t にもなっていない。

踏鞴付筒形炉の周辺には、鍛冶関連遺構が検出される例が少なくないことを寺島文隆が指摘している(相馬 V)。相馬市向田 A 遺跡や旧原町市長瀨遺跡、宮城県柏木遺跡などである。生成した鉄の精錬を行うためである。これとともに鑄造鉄器の製造施設の併設されていることが多い。この炉からは、銑鉄が生成され他ののであろうか(大澤 1982)。

4 古代製鉄炉の完成、踏鞴の普及と炉体の改良

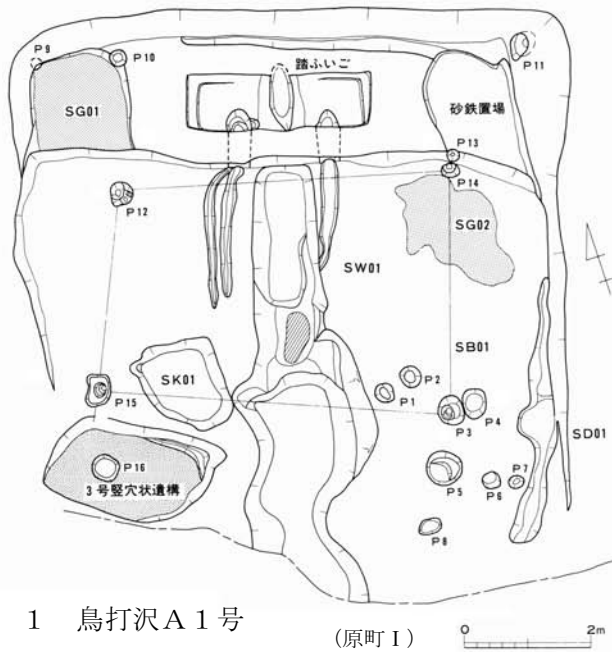
踏鞴付長方形箱形炉は、炉丘陵緩斜面の中腹に造られ、上から下にむかって、踏鞴、炉体と左右の作業場、さらに鉄滓廃棄場が並んで配置されている。風箱の構造は、踏鞴付筒形炉と同じである。近接する製鉄施設間で技術の交流があったであろうから、踏鞴付筒形炉が導入されて、それほど時を置かずに、踏鞴は長方形箱形一方向炉に導入されたのであろう。

風箱の大きさは、長さ 3 m、幅 1 m 程度である。送風は炉体の形状に対応して、左右の風箱から導風管を通して炉体に送風を行う方法である。導風管の設置跡は、溝状の遺構として検出されている。大船迫 48 号炉(原町 V)では、風箱から出る溝状遺構から、筒状に加工されたクリ材の炭化物が出土している。木管の外部を焼き焦がして、腐食を防いでいる。直径 22 cm の管である。内径は不明である。

炉体は下部構造をもっている。炉体規模より一回り大きな箱形土坑である。土坑の底面は、排滓孔側が少し低く造られている。土坑は、踏鞴側が深く、鉄滓廃棄場側が浅くなっている。これは作業面が傾斜しているためである。踏鞴側の深さは、0.8 m 前後である。空焚きにより内部を焼き固めたなかに、焼土や木炭を詰めて防湿効果を高めている。炉体の長さとは幅は、風箱の半分程度である。長さ 1.5 m、幅 0.5 m 前後である。炉体の大きさは、踏鞴の送風量に制限されるからであろう。

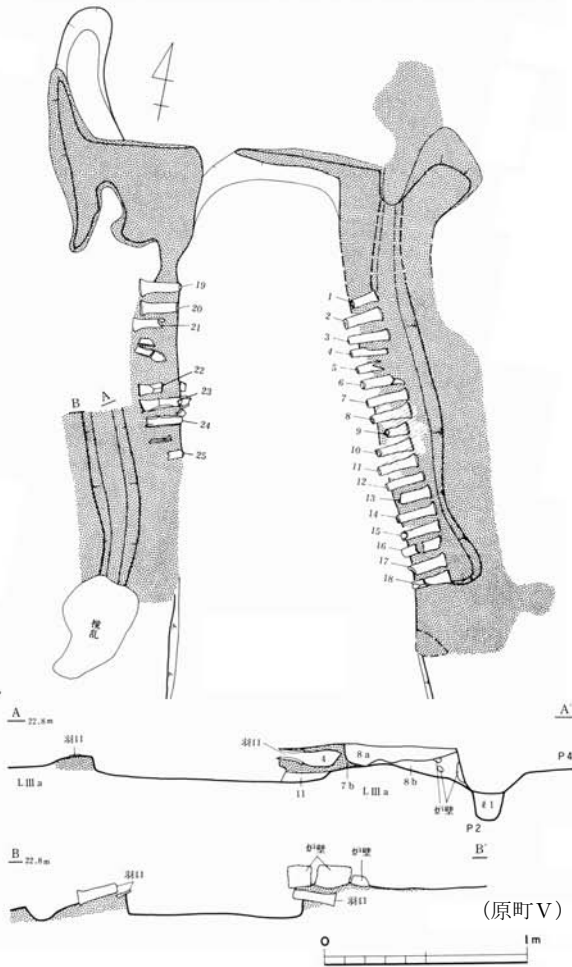
炉体の左右には土坑が設けられ、この中から木炭や砂鉄が出土することがある。さらに、粘土採掘穴も確認されている。鉄滓廃棄場は、炉体端から斜面下方に広がっている。踏鞴と炉体の上には、上屋があった。鳥打沢 A 1 号で、踏鞴の設置された平坦面の丘陵側隅で柱穴が検出されている。この柱穴は、斜めに造られる特徴がある。炉体が設置された部分では、これを大きく囲むように柱穴が矩形に設けられている。踏鞴部は葺き下しの屋根、炉体部は東屋構造で、壁も設けられていたであろう。

炉体上半部 長瀨 23 号からは、炉体の上端まで遺存する長さ 1.1 m、高さ 0.6 m 程度の炉壁(図 13)が出土している(原町 IV、第図 68)。数少ない遺存例である。炉壁の比重は、約



1 鳥打沢 A 1号

(原町 I)



2 大迫 A 15号羽口設置状況

図 12 踏鞴付長方形箱形炉

1.4 である。

内壁には、操業の痕跡が残されている。上端から 20cm 程度までは、すべて酸化面で、そのうち 10～20cm の間が強く焼けている。焼土面となり劣化が著しい。上端から 20～40cm は還元面になっている。この部分で、斜め左下方向の整形ナデが施されている。さらに上端から 40cm より下には還元滓が付着し、下方に向かって流下している。ガラス質で、細かな発泡痕がある。この部分では、壁面の浸食は少ない。

炉体の上端部では、炉壁の断面から左右から粘土塊を合わせたような痕跡も残っていた。しかし炉壁の中部では、これは確認できなかった。粘土には、細かな砂が多く含まれている。炉体の幅は、上端部で 7cm 内外、それより下側は 11cm 程度である。構築単位は、高さ 7～10cm 程度である。下方に向かって、粘土帯の厚さが増している。水平方向の長さは明確ではない。粘土を長く加工しながら積み上げたのであろう。資料炉内壁の下部で、少量のスサ含まれていると報告書では指摘されているが、保護剤が塗布されていることもあって、確認は出来なかった。

炉体下半部炉 大迫 1号 (原町 VII) 第 28 図 1 は、炉壁に羽口の一部が融着している資料である。長さ 32cm、高さ 16cm、厚さ 4cm である (図 14 の 4・5)。内壁には、モミガラが多量に含まれている。熔融物の断面は、表面近くで小さな発泡が見られる程度である。炉内の温度が十分な高熱を得られなかった結果であろう。羽口の先端は、還元滓により塞がっている。早い段階の操業で停止に至った資料である。羽口は、外壁の粘土帯に、押し付けるように据えられ

ている。羽口と羽口の間隙は、短い単位の粘土帯で押さえて塞いでいる。この上には、厚さ7cm前後の粘土帯を積み上げている。かなり軟らかい粘土である。

大迫1号第26図2（図14の1・2・3）は、長さ34cm、厚さ12cm、高さ18cmである。羽口の間隔は、5～7cm程度で、その間には粘土が詰められていた。羽口の吸気部先端から還元滓の端までは、8cmである。羽口の先は、還元滓で塞がっている。炉体の粘土は、羽口の吸気部から6cm前後を境として、スサの有無から大きく2層に分かれていた。内壁は、粘土中にスサを含み、荒壁土に近似している。外壁は、細粒を多く含む粘土である。

外壁では、羽口吸気部の下面に接して、厚さ2cm、幅4cm程度の薄い帯が敷かれている（原町Ⅶ、第26図1、第29図1など）。これは吸気部端が外反することから、形状に合わせて設置面を安定する工夫であろう。羽口が設置された粘土帯の上面が、ほぼ水平に調えられていたとすれば、先端と吸気部側の直径差で、少し先端が下に傾くことになる。

外壁の側面には、指頭圧痕やナデ・オサエの痕跡が遺されている（第26図1、29図1など）。整形の痕跡である。この部分は酸化焼成で、還元状態にある内壁に続いている。内壁側が強く焼けでいるので、炉体外部からの加熱ではない。築炉時に加熱による内壁の強制乾燥を行えば、酸化面が形成されるはずである。

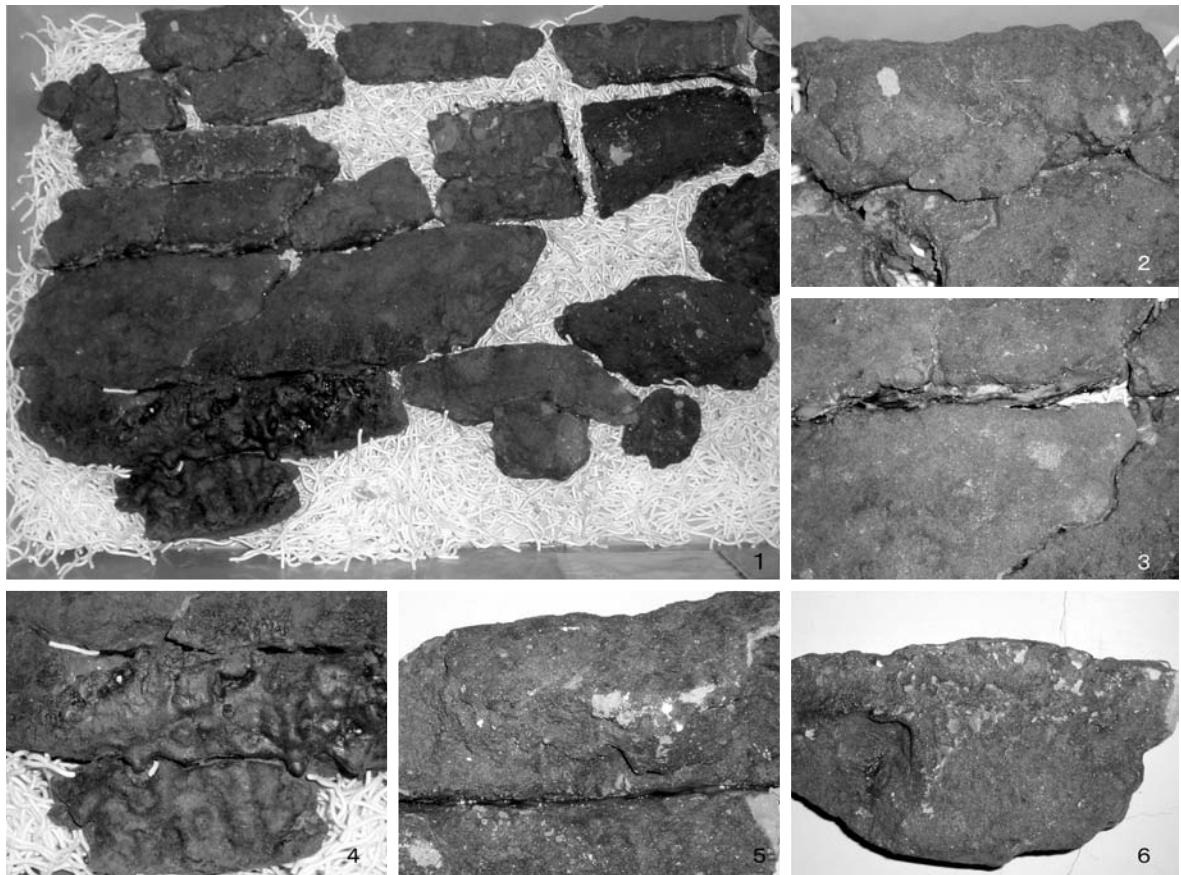
この痕跡が熔融帯の外壁から、確認された例はない。大迫21号・23号木炭窯跡（原町Ⅸ）からは、炉体外壁が遺存した破片が出土している。これは、木炭の焼成に伴った再加熱により、外壁が加熱された結果であろう。外壁面は、羽口吸気部の外端とそろえて作られている。またこの資料では、羽口上端から40cm以上も、熔融滓が厚く付着していた。

羽口の装着方法 大船迫A27号から出土した資料（原町Ⅴ、第200図の1など）をもとに、小暮伸之は、羽口と炉壁の関係を次のように考えている（原町Ⅴ）。①、Ⅳ期（中）、基底部に水平に据えた横長粘土ブロックの上に、縦長粘土ブロックを立て、その一つ置きに羽口を配置する。②、Ⅳ期（新）の壁、羽口は縦長粘土ブロックを分割して、その間に羽口を挟んでいる。

大船迫A27号の第200図1（原町Ⅴ）の炉壁資料は、小暮が根拠として示した資料の一つである。大き目の羽口が使用された炉体の破片である。小暮は炉壁を縦長粘土ブロックとしているが、スサの方向は一定で、切れ目がないことから、やはり藁束に泥土を含ませたものである。また、羽口の下に詰められた炉壁には、スサが含まれていないようである。吸気部が失われているが、羽口の浸食は比較的少ないとみられる。

羽口の上側には、還元帯の熔融物が付着している。この部分の炉壁は、すべて浸食により失われたことになる。この点は、大船迫A48号（原町Ⅴ）でも同様である。羽口先より下には発泡滓が付着し、これにより先端は塞がっていた。操業が炉壁・羽口の限界まで達した資料である。原町Ⅴ第200図2では、吸気部端まで還元帯の熔融物が付着している。

炉壁の浸食が羽口の吸気部近くまで進んだ段階で、小暮の炉壁復元図（図6）では炉壁が失われたことになり、炉体の崩壊は免れない。それを防ぐには、外壁がなければならない。羽口の浸食が少ない段階の炉壁資料、大迫1号などでは、スサの含まない横長粘土帯の上に羽口が設置されている。また羽口と羽口の間には粘土塊が詰め込まれている。小暮が示した①は内壁、



1 全体 2 上端内面 3 予熱帯 4 還元帯上部 5 上端外面 6 同水平断面下から

図 13 長瀬遺跡 23 号製鉄炉跡出土炉壁

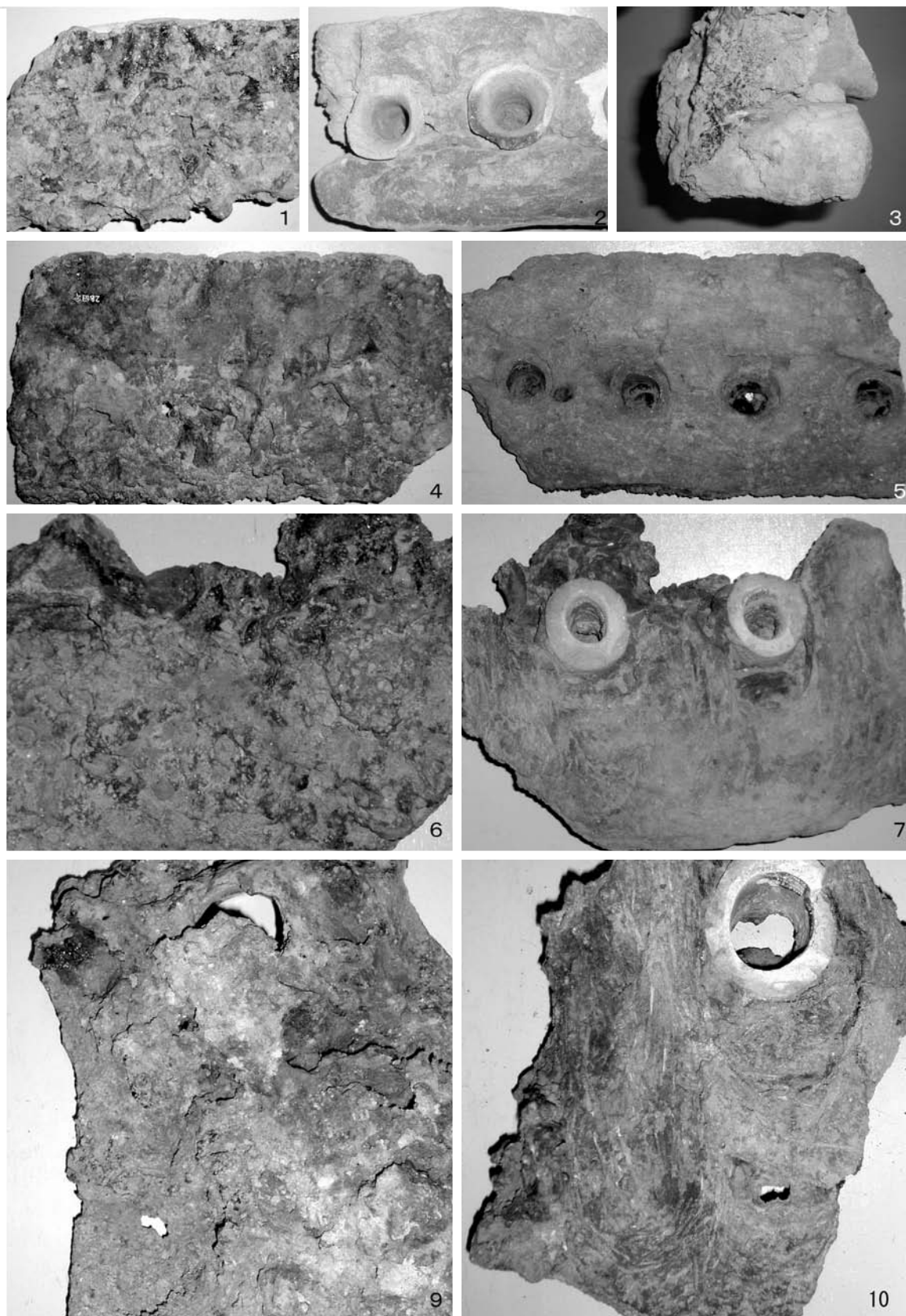
②は外壁と理解されよう。①と②をあわせて、炉体が造られたのである。また能登谷宣康は、大迫遺跡の羽口の設置方法で、吸気部の下に敷かれた薄い粘土帯の有無から、炉壁の積み方を二分している（原町Ⅶ）。しかしこれも、同様に炉壁の浸食差による見かけの相違であろう。

炉壁構造の変化 踏鞴付長方形箱形炉が盛行するなかで、新しい改良が炉体に加えられる。①内壁挟雑物の変化、②羽口の小型化、③羽口設置方向の3点である。

①では、それまでのスサに代わって、モミガラが多くなる。壁中に含まれるモミガラは破片が多く、この有無を確認することが難しい資料も少なくない。内壁土に入れられたのは、生のモミガラではなく、モミガラ灰ではないだろうか。粘土に灰を混ぜいれて焼けば、壁の比重が小さくなり、多孔性が増すことになる。ただしこのほか、スサやモミガラの確認できない内壁もある。

この改良により、内壁の耐火性が高くなり、熔融による浸食に耐えるようになる。内壁が熔融することにより生成する熔融物は、炉内温度を保つため役割があり、古代の長方形箱型製鉄炉の操業には不可欠である。内壁の浸食が少なくなれば、投入する砂鉄に含まれる砂土等の比率を上げることによって、これに対処することも可能であろう。

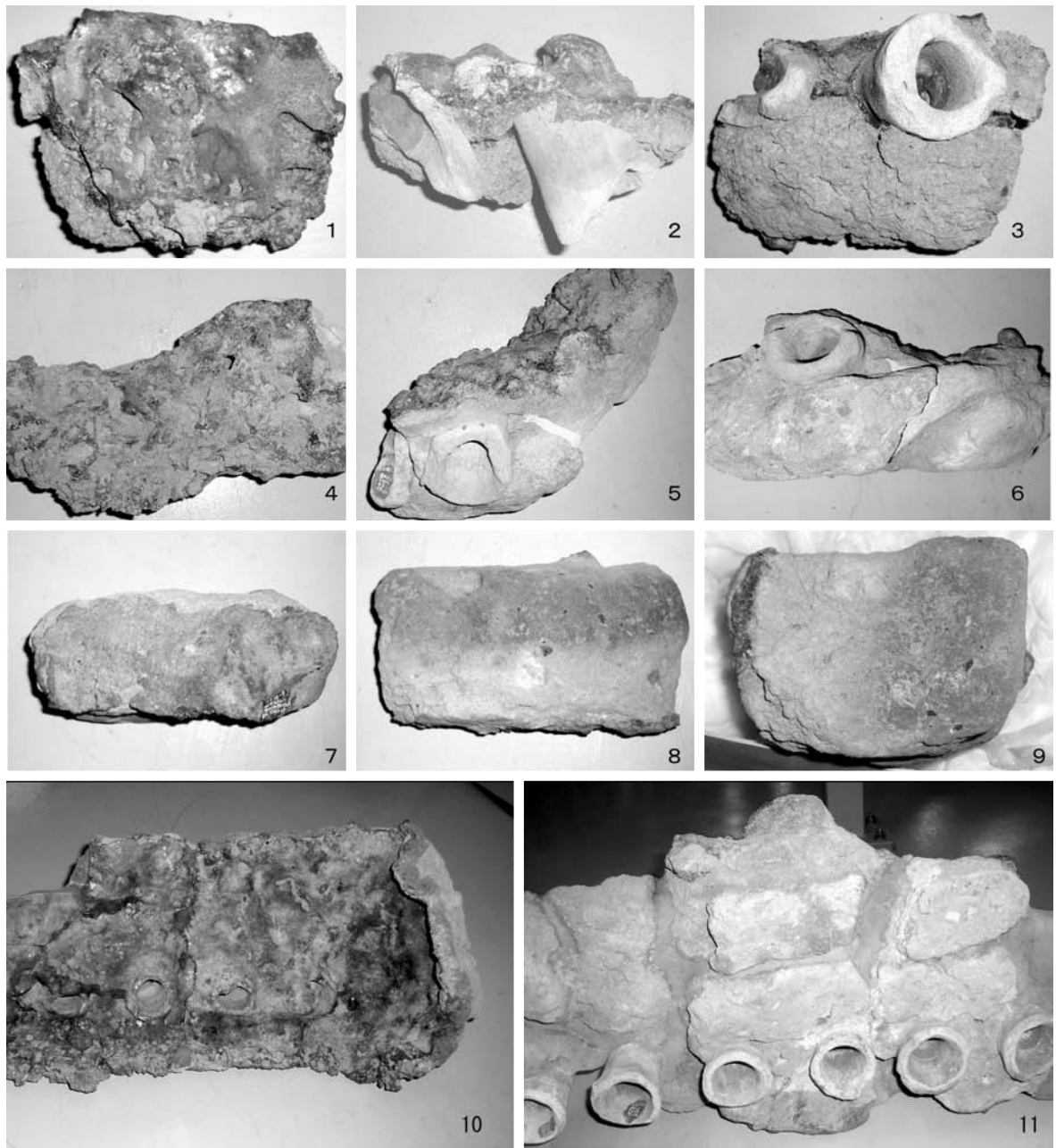
②に対応して、羽口の設置間隔が短くなり、また1基の製鉄炉に使用される羽口数も増加する。③は、水平方向の設置角度である。羽口の中央部では、炉壁に対して垂直に据えられてい



1～3大迫1号第26図2 4、5第28図1、6、7大船迫A27号第200図1

7、8大船迫A12号 9、10大船迫A12号第86図1

図14 踏鞴付長方形箱形炉炉体1



1、2、3 猪倉A1号第18図3 4、5、6 猪倉A1号第20図1
7、8、9 猪倉1号第25図3 10、11 山田A2号第182図

図15 踏鞴付長方形箱形炉炉体資料2

るが、端側では短辺に向けて斜めになっている。つまり、扇の骨を開けたような配置である。

猪倉A5号は、同1号製鉄炉跡の鉄滓廃棄場で、本来は一体の製鉄炉跡である（相馬V）。この遺構から出土した炉体破片のなかで、相馬IV第18図3（図15の1・2・3）、19図1・3、第20図1（図15の4・5・6）は、羽口の主軸が炉壁側面に対して水平方向に傾いている。この角度は、第18図3で45度近くになっている。このほかにも15度以上はある。広がる角度が一定しないのは、羽口を扇形の骨形に配置するためである。

羽口が設置された炉体下部の構築方法は、前段階と大きな相違はない。粘土の帯を基本に外

壁を作り、内壁はモミガラとスサを混ぜた土を貼り付けて造られている。粘土紐の切れ目、あるいはブロックを積み上げた痕跡と割れ口との区別を明確に区別することは、筆者にとっては困難であった。羽口は、粘土帯に押し付けるように据えられ、さらにこれを粘土帯で押さえて設置されている。吸気部から先端部へは、ほぼ水平になっている。

炉内熔融物の付着状況も、特異な点はない。羽口より上は還元滓が内壁表面に付着し、羽口より下は熔融滓である。還元滓は、比較的薄く付着して、発泡も少ない。また炉壁の浸食は、前段階と比べて少ないが、熱変化による変色は壁の奥部まで及んでいる。温度の高さよりも、作業時間の長さに関連しているであろう。

炉体上部の破片は、相馬Ⅳ第 25 図 1・2 に示されている（図 15 の 7・8・9）。1 は、炉壁を積み上げたブロック状の資料で、長さ 19cm、幅 9cm、厚さ 6cm で、短面の一方が凸面、反対側が凹面となっている。壁土は多孔性で、比重は 1.4 程度である。胎土に木炭片が含まれている。またスサ・モミガラも若干含まれているが、上面などでは確認することが難しい。内壁側の表面の下端に、スサ入り粘土が付着している。内壁の表面は凹凸がある。荒壁状で、表面には砂鉄が焼固していた。炉壁の下辺側に沿った部分はガラス質の還元滓が付着し、上辺側に熔融物はほとんど付着していない。還元帯最上部の炉壁であろう。作業による熱変化は、内壁の表面から 4cm が還元、外壁側は黒青色になり、外側は淡い赤褐色という状況であった。

この資料をもとに、略直方体短部の一方を尖らせ、片方を凹ませてホゾを組むようにする特殊な積み方が想定されている（相馬Ⅳ）。しかも横目地と縦目地が通るように想定されている。いわゆる通目積で、炉壁とするには、強度の点で問題のある積み方である。またこの積み方で作られた炉壁は、筆者の見た範囲では、確認できなかった。相馬Ⅳ第 25 図 1・2 の資料は、特異な例であろうか。

操業 炉壁に付着する熔融物や鉄滓・羽口の基本的な特徴は、長方形箱形一方向排滓炉のそれと同じである。銑鉄と半熔融鉄を作ったのであろう。大きな違いは、製鉄炉 1 基あたりの生産量である。鉄滓廃棄場から出土する鉄滓量は、7 t から 10 t にもなる。鳥打ち沢 A 1 号で 43 t、同 1 号では 47 t の排滓量があるのに対して、逆に 1 t にみまない製鉄炉跡も少なくない。膨大な排滓量は、順調な操業の結果である。1 t にもみまないのは、不具合が生じて放棄された結果であろうか。不具合を修正する技術は保持していたであろうが、それを試みた痕跡は確認されていない。

内壁に含まれるスサ含有を減らせば、作業による内壁の浸食を押さえることが出来る。作業による炉体の消耗を抑え、より長く作業を継続することになる。また炉体の大きさも、長方形箱形一方向排滓炉より大きくなって、長さ 2 m 程度となる。

炉壁の改良によって、炉体の耐火度は向上する。さらに羽口の数を増やし、送風方向を広げれば、空気を満遍なく熔融帯に供給することが出来る。温度管理がより容易になり、作業効率は格段に向上する。これらの結果、操業効率は大きく向上して、素鉄の生産量は増大し、多量の鉄滓が残されたのである。

おわりに

製鉄遺跡の発掘調査によって明らかになるのは、遺構と遺物である。製鉄技術を解明するには、製鉄炉を復元するとともに、その操業状況を明らかにしなければならない。遺構として検出されるのは、製鉄炉の基底部や排滓場・各種付属施設である。なかでも炉体の復元と製鉄操業における炉内状況の解明が重要なことはいうまでもない。

これを明らかにするには、出土する炉壁の観察と接合が不可欠である。羽口や鉄滓も同様である。遺跡から出土する炉壁や羽口は、操業により、築造当初の形状から大きく変形している。その変化の過程をあきらかにするには、まず観察を行い、次にそれが生み出された状況を把握することである。そうして製鉄炉の復元、操業によるその変化、生み出される鉄滓、砂鉄や木炭の解明、さらには遺跡の環境を含めて、対象とした製鉄技術を考えて、仮説を立てることになる。

つぎに、この仮説を検証する実験を行うことになる。想定した技術が、古代の技術と共通することの検証である。実験によって、遺跡から出土する炉壁・羽口・鉄滓と同じ物を作ることである。出来たものにより、仮説の当否を判定する目安とすることが出来る。検証に耐える炉壁・羽口・鉄滓が出来れば、これとともに鉄も生成するはずである。

鉄は、生み出されて以来、社会を支える基本物資となった。律令時代の日本列島でもこのことには変りはない。律令体制が陸奥南部に導入されるとともに鉄の生産も開始されている。そして律令体制がこの地域で衰退するとともに製鉄関連施設も維持されなくなる。福島県浜通北部で明らかにされた製鉄遺跡は律令体制と結びついている（相馬Ⅰ）ことは言うまでもない。

鉄の生産が急増する時期、8世紀後半から9世紀前半にかけて、東北地方では対蝦夷戦争が国政の急務となっていた。多くの研究者は、このことと鉄生産の増大を関連付けている（飯村2006など）。確かに、この地で生産された鉄から武器・武具は作られたであろう。

一方この時期は、大開墾時代でもあった。東北地方南部において、古墳時代の山間部には広大な無集落地帯が存在していた。これが急速に減少するのが、8世紀後半から9世紀にかけてである。律令体制の成熟とともに、集落は爆発的に増大し、山間丘陵地帯に進出して行く。またこの時期の集落からは、以前と比べて多量の鉄器が出土している。この大開墾時代を生み出したのが、地元で飛躍的に生産量を増した鉄である。

鉄は日常生活全般に不可欠な物資であり、社会経済の基盤となる物資である。蝦夷戦争を遂行、寺院や地方行政施設の建設、通信交通・農業施設など社会基盤の整備それを支える経済的裏づけがなければならない。律令体制をこの地域に導入し、それを維持する一環のなかで、鉄が作られたのである。律令体制の発展が、東北地方南部にける大開墾を可能にしたのである。

追記

寺島文隆さんと、考古学のことを最後に話したのは、2004年の2月である。私が、浪江町太刀洗遺跡から出土した約4tの製鉄関連遺物の分類していた頃である。仕事の遅れを心配さ

れたのであろうか。小論で述べた見方から、分析を進めていることを説明した。小論をもって追悼にかえたい。

<参考文献>

- 相馬開発関連遺跡調査報告Ⅰ 1989 福島県教育委員会
相馬開発関連遺跡調査報告Ⅳ 1996 福島県教育委員会
相馬開発関連遺跡調査報告Ⅴ 1997 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅰ 1990 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅱ 1991 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅲ 1992 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅳ 1993 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅴ 1995 a 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅵ 1995 b 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅶ 1997 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅷ 1998 福島県教育委員会
原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅸ 1998 福島県教育委員会
穴澤義功 2003 「古代製鉄に関する考古学的考察」『近世たたら製鉄の歴史』
石川俊英・相沢清利 1988・1989 『柏木遺跡』Ⅰ・Ⅱ
大澤正巳 1982 「千葉県下遺跡出土の製鉄関連関係遺物の分析調査」『千葉県文化財センター研究紀要』7
大道和人 2003 「半地下式堅形炉の系譜」『同志社大学考古学シリーズⅧ』
香取忠彦 1981 『奈良の大仏』草思社
関 清 1991 「各地域の製錬・鍛冶遺構と鉄器研究の現状」『日本古代の鉄生産』六興出版
寺島文隆 1989 「古代・中世の製鉄遺跡（東日本）」『考古学ジャーナル』NO 313
寺島文隆 1991 「東北地方」『日本古代の鉄生産』六興出版
能登谷宣康 2005 「大会報告4：金沢地区の古代鉄生産」福島県考古学会
松井和幸 2001 「古代鉄生産論」『日本古代の鉄文化』雄山閣
光永真一 1980 「キナザコ製鉄遺跡第3章第3節 考察」『古代吉備』4
森浩一編 1974 『鉄』社会思想社
村上恭通 1998 『倭人の鉄と考古学』青木書店
村上恭通ほか 2006 『日本列島における初期製鉄・鍛冶技術に関する研究』
吉岡恭暢編 1994 「日本・韓国の鉄生産技術」『国立歴史民俗博物館研究報告』第58集
和島誠一 1967 「製鉄技術」『日本の考古学』Ⅵ河出書房
飯村 均 2006 『律令国家の対蝦夷政策』新泉社