

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℃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）

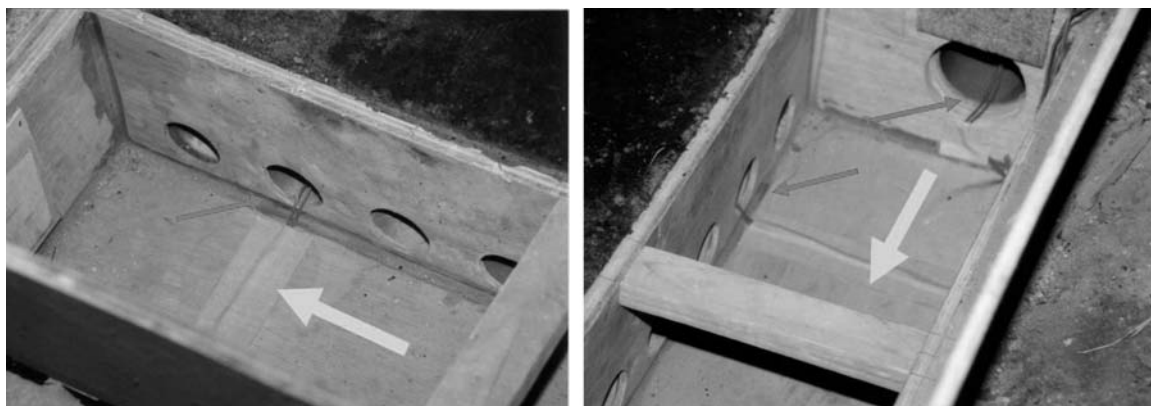


写真2 風箱内での圧力センサーの設置位置 (太い矢印が風の方向、細い矢印がセンサの設置位置)

上 1.35 m の位置で測定した。図 2 に操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、湿度は操業停止まで 100%であった。

4) 鉄塊のミクロ組織観察

今回の操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 操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 時間後から操業停止 (23:27) までの炉内温度の測定結果を図 3 に示す。操業初期から 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、操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

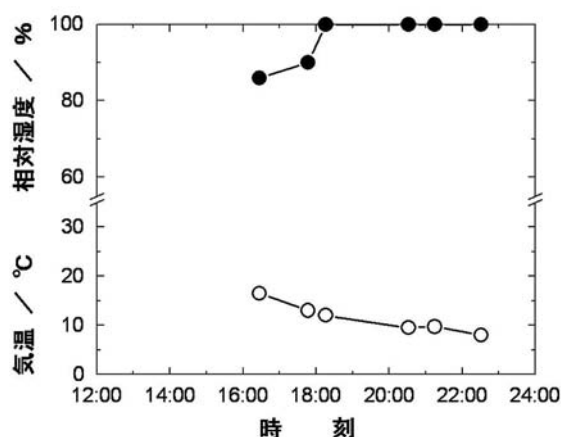


図2 操業中の気温と湿度

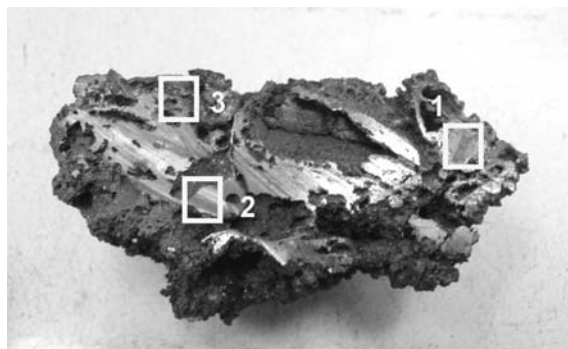


写真3 鉄塊断面と組織観察位置 (断面: 11.7 × 7 cm)

℃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が、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

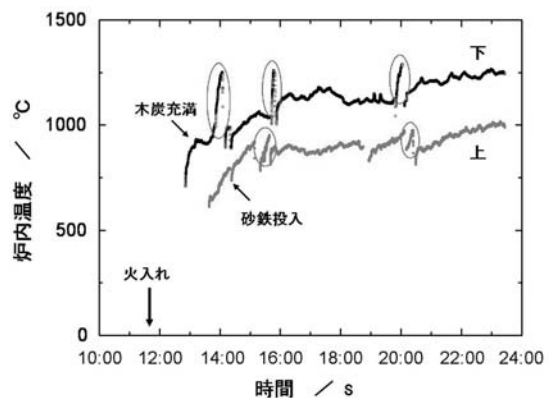


図3 操作時の炉内温度の推移

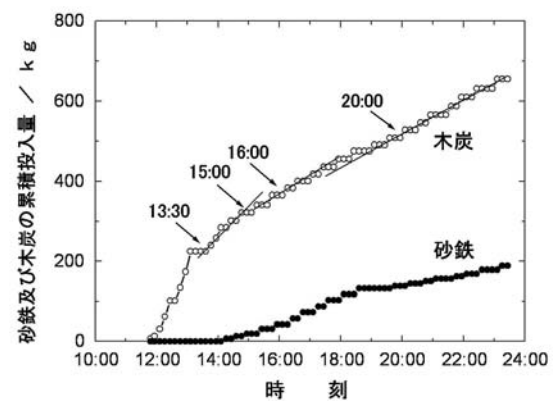


図4 砂鉄と木炭の累積投入量

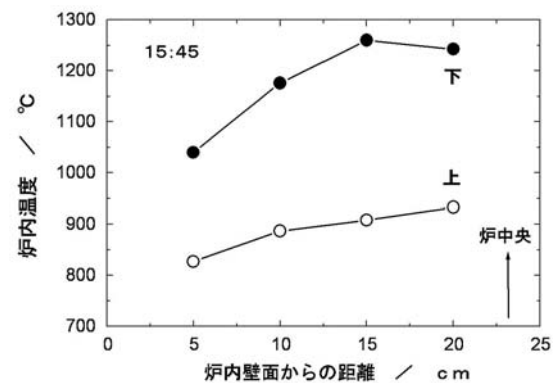


図5 15:45における炉内温度分布

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、

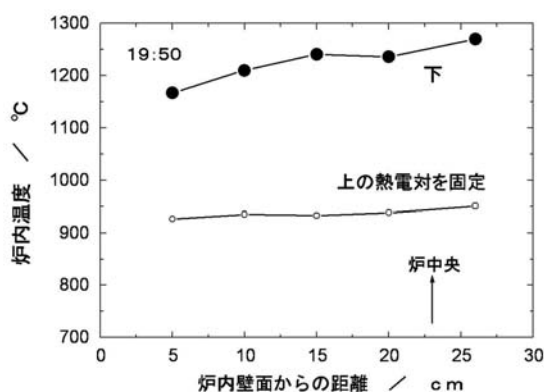


図6 温度（上）位置を固定した時の温度（下）の幅方向の温度分布

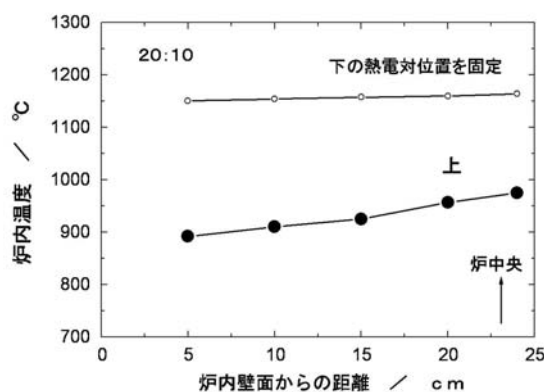


図7 温度（下）位置を固定した時の温度（上）の炉断面方向の温度分布

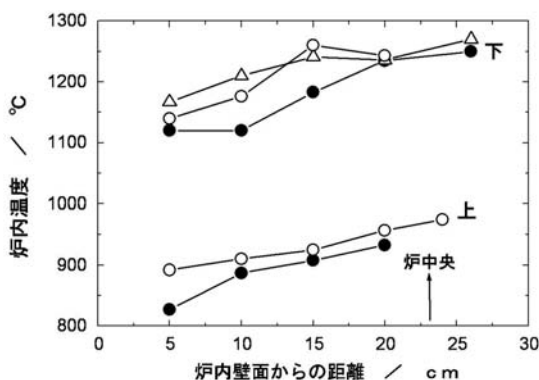
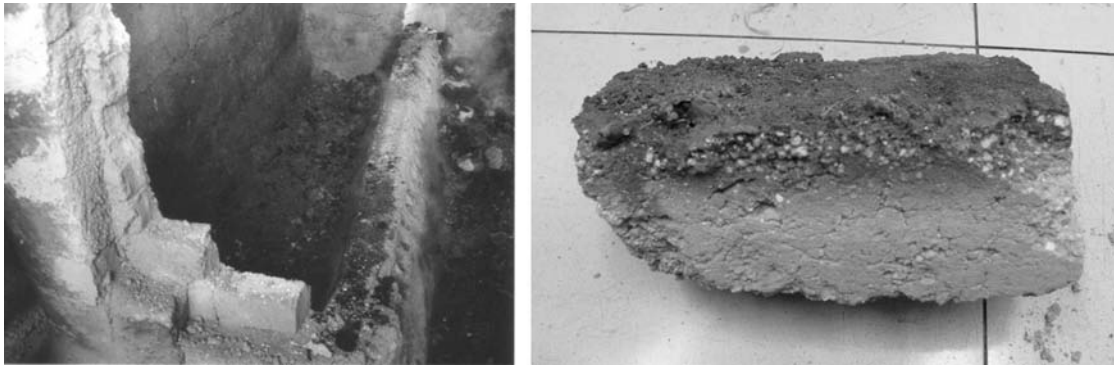


図8 温度（上）と温度（下）の炉の炉断面方向の温度分布



(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。

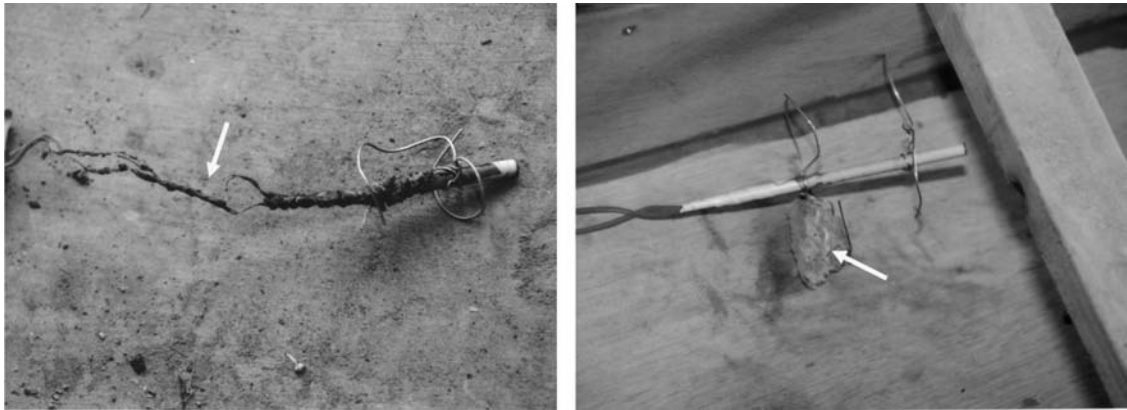
2) 踏み鞆及び羽口からの送风量測定の状況

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

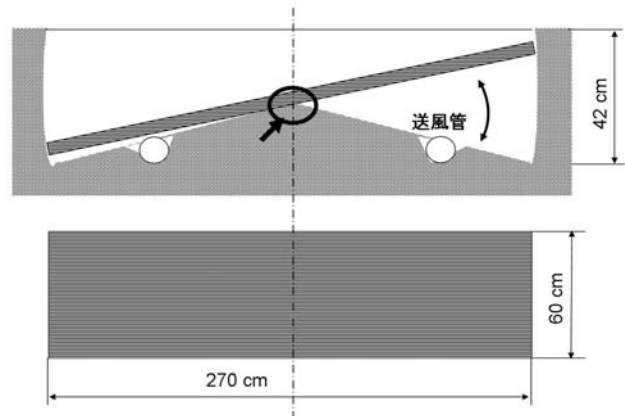


図9 踏み鞆の概略図

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。

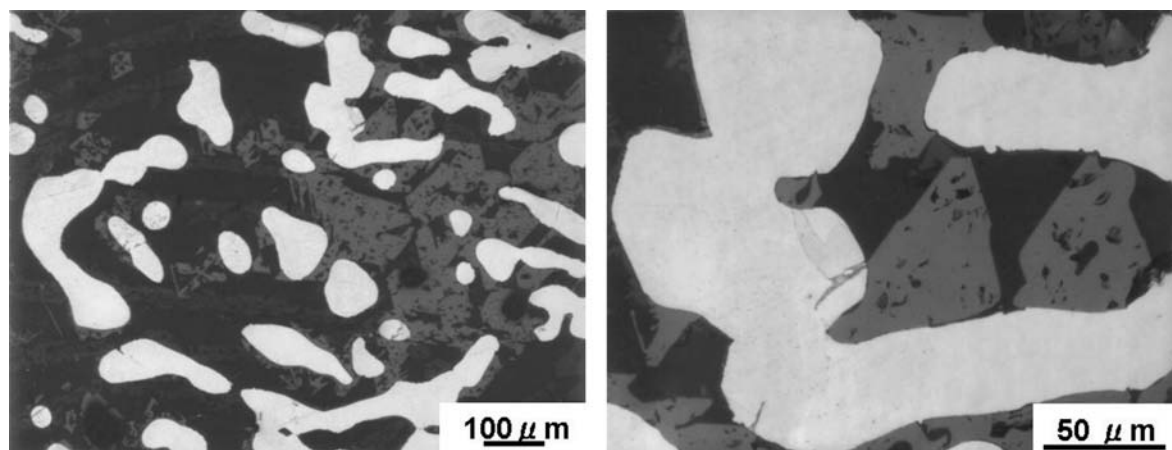


写真6 No. 1位置の小さな粒状鉄のミクロ組織

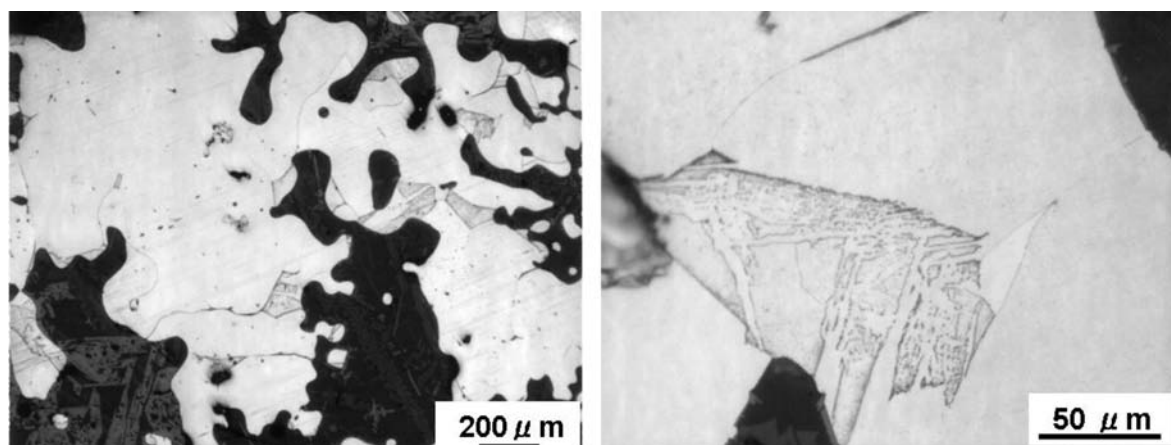


写真7 No. 1位置の粗大な粒状鉄の組織

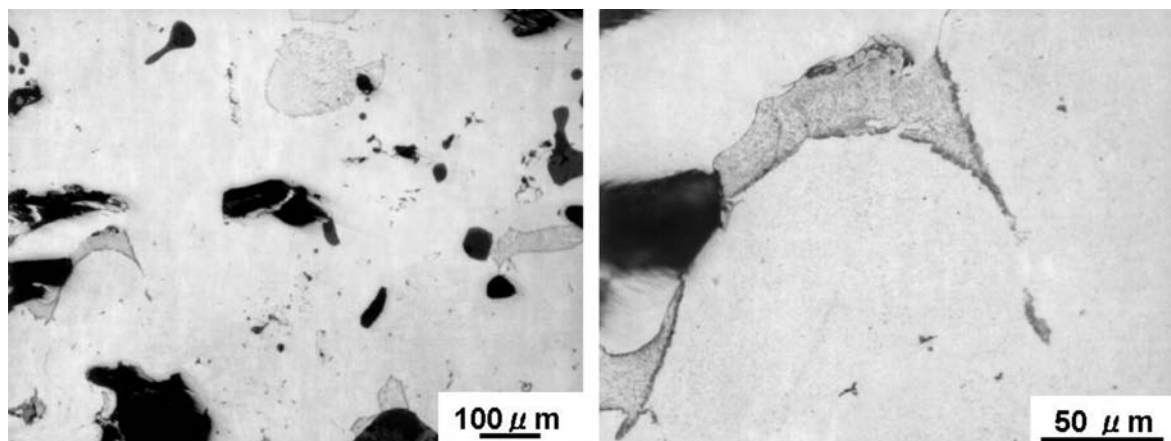


写真8 No. 2位置の粗大な粒状鉄のミクロ組織

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。

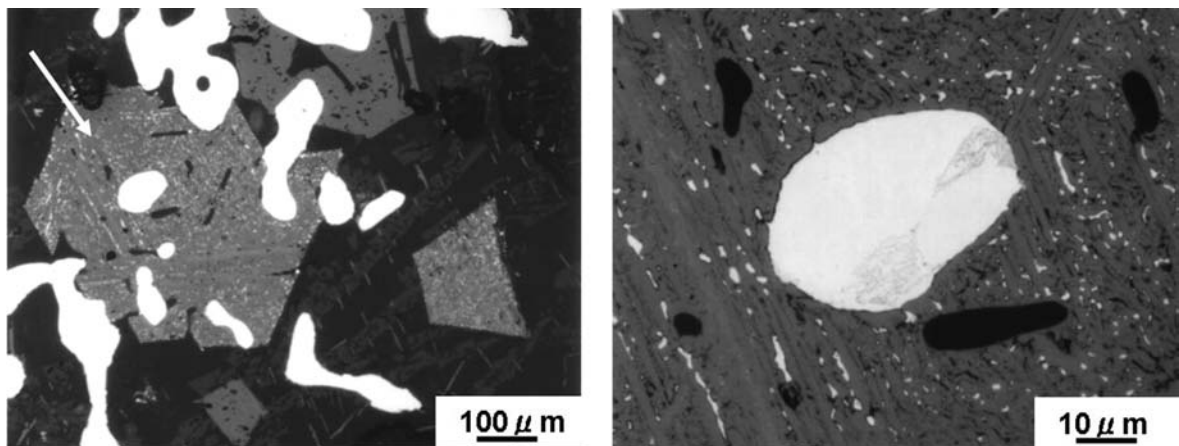


写真9 No. 3位置の微細な粒状鉄と還元途中の砂鉄内の鉄の様相

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5cm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5cm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5cm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5cm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