

まほろん3号炉（南相馬市大船廻A遺跡15号製鉄炉の復元炉）における操業条件と鉄塊の組織観察

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廻A遺跡15号製鉄炉（平安時代9世紀前半）の炉構造^(註1)を基に、やや小型のまほろん1号炉を復元し、砂鉄からの鉄づくりの再現実験を2003年11月に行った。この復元炉において16時間弱の操業で炉底に鉄塊が得られた^(註2)。さらに2005年11月に発掘炉と同程度の外形寸法のまほろん2号炉を作り、操業を行った。操業途中で踏み轍（ふいご）が破損するトラブルで12時間弱の操業で、1号炉操業時よりも少ないが、鉄塊が得られた^(註3)。

これら2回の操業で得られた鉄は、炭素量が極めて低い0.12～0.25%の範囲の低炭素鋼の鉢（けら）であった。特に2回目の操業では、高炭素量の銑（ずく）を造ることを目的に行つた。羽口の角度を小さくし、炉構造も発掘炉に近づけた条件で行ったが、鉄の炭素量は若干増加したが、銑はできなかつた。操業時間が短かったことの他、炉の大型化によって炉内温度がさほど上昇しなかつたことも考えられた。

銑を造るためには高温操業と木炭との接触時間を長くすることが必要である^(註4)。砂鉄をそのままの状態で投入すると、降下速度が大きいため、炉内の高温域での滞留時間が短く、還元効率が悪い。さらに還元された鉄に浸炭、加炭が充分に行われない。また、還元された鉄を炉底で長時間保持しても銑までの炭素量に増加しないことは、まほろん1号炉の結果から明らかである。このため、高温の燃焼帯での滞留時間を長くするための投入材の砂鉄の工夫、もちをバインダにして固めて投入することを行い、円筒型小型炉（クロガネくん）で実験を繰り返し、銑を得ることができた。

そこで、発掘炉の推定寸法に合わせた踏み轍（ふいご）と製鉄炉を用いて、投入砂鉄の形状を改善し、安定した条件での操業を試みた。送風は基本的には踏み轍で行ったが、一部プロアによる強制送風を行つた。本報告では、まほろん3号炉の復元実験における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。また、小型実験炉（クロガネくん3号炉）で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)×80cm(幅)×130cm(高さ；炉底から炉頂まで)で、まほろん2号炉と同程度の寸法である。炉の内壁面から突き出ているアルミナ管（矢印位置）が炉内温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12°とした。羽口中央から炉頂まで109cmであるため、炉内温度の測定位置は羽口中央から

1/2の高さ、炉頂から54cmの位置（以下、温度（上））と、羽口中央から7cm上で、炉頂から102cmの位置（以下、温度（下））の2カ所とした。温度（下）の熱電対は5°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、熱電対保護管の先端位置は、温度（上）及び温度（下）のいずれも炉内壁面から5cmの位置とした。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ガイドのアルミナ管を炉壁に埋め込み、その中を通した。

温度測定にはφ0.5mmのR熱電対（Pt / Pt-13%Rh、PR）を用いた。炉内温度はデータロガー（データ記憶装置）に取り込み、サンプリング時間を2秒とした。



写真1 まほろん3号炉の外観と熱電対の設置位置

さらに、操業途中で熱電対先端の位置を変え、温度（上）と（下）における炉断面の水平方向の温度分布を測定した。所定の位置に設置した後、1分間その位置に保持し、安定した時の温度を測定した。

また、操業時の気温は、踏み鞴左隅から1.65m離れた地上1.0mの位置で測定した。図2に操業時の温度を示す。操業開始時には、15～16°Cであったが、次の朝方は9°Cまで下がり、昼には20°Cぐらいまで上昇する比較的気温の高い条件で行った。

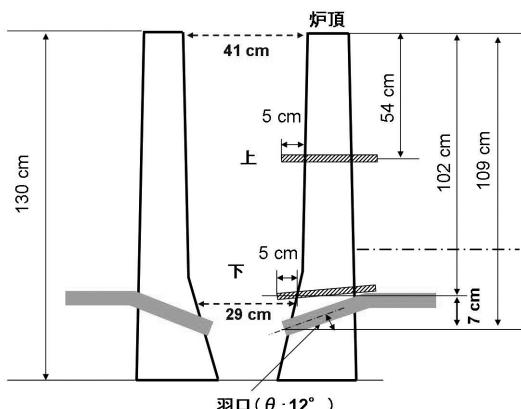


図1 炉断面と炉内温度の測定位置

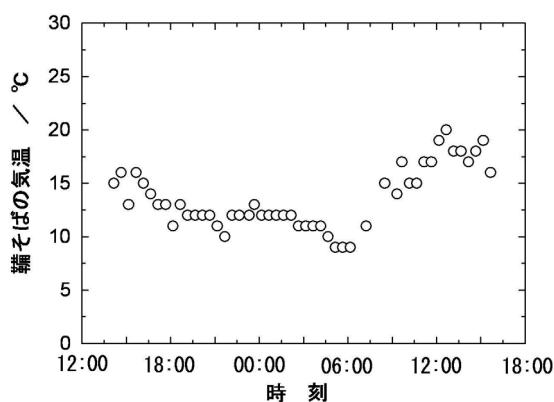


図2 操業時の気温の変化

(2) 鉄塊のミクロ組織観察

まほろん3号炉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。鉄塊及び切断面の外観を写真2に示す。四角で示す鉄塊表面近くの2箇所から試料を切り出し、観察試料とした。

写真3のクロガネくん3号炉で得られた鉄塊断面の2箇所から試料を採取した。

また、たたら製鉄における組織の比較材として島根県で造られた玉鋼の組織観察を行った。写真4に鉄片の外観と断面のマクロ組織を示す。本試料は、現在の木原村下の師匠である安部村下によって昭和時代に造られたものである。ナイタルで腐食した断面のマクロ組織から、黒色の針状の組織が分布している様子が観察される。撮影時の光の反射によるもので、研磨面では、粗大な針状組織は光沢があり、セメンタイトと推測される。従って、本試料は高炭素量の過共析鋼の鉄(けら：玉鋼)である。

ミクロ組織観察用の腐食液には5%ナイタル(硝酸-エチルアルコール溶液)を用いた。

3 実験結果

(1) 操業条件と炉内温度

実際の操業は9:50ごろから火入れを行い、炉内に木炭を投入した。13:40から、本格的な操業に入り、炉内が木炭で充満された時点で熱電対を所定の位置に設置し、炉内温度の計測を行った。図3に14:00から操業を停止した翌日の16:00までの炉内温度を示す。プロア送風前までの羽口側の温度(下)は1400

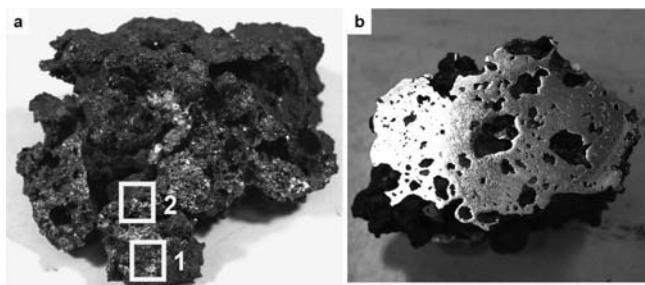


写真2 まほろん3号炉鉄塊と断面写真

(a) 鉄塊の外観、(b) 断面の形態

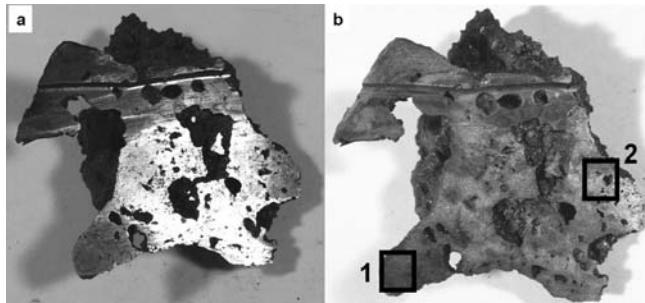


写真3 クロガネくん3号炉の鉄塊の断面写真

(a) 鉄塊の切断面、(b) ナイタルで腐食

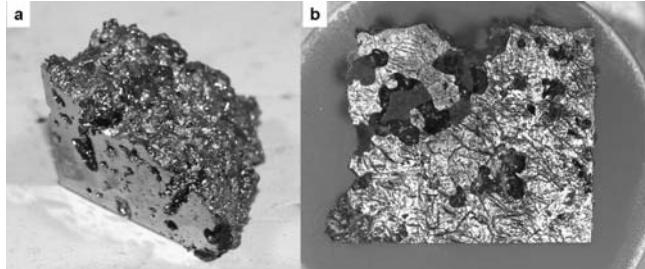


写真4 島根県のたたら製鉄鉄片の断面写真

(a) 試料外観、(b) ナイタルで腐食

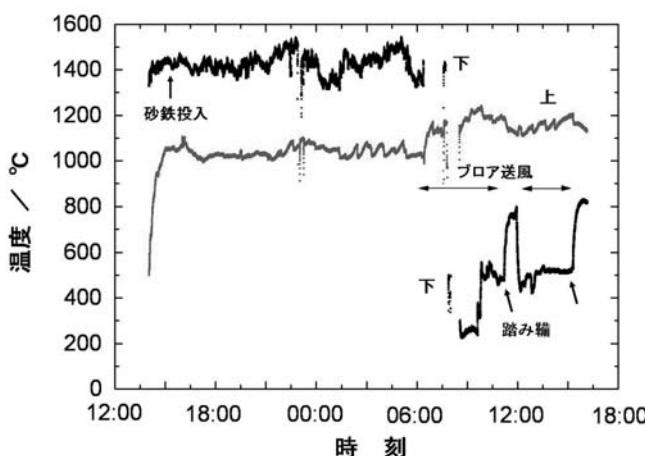


図3 操業時における炉内温度の推移

℃～1500℃で推移した。温度（下）での最高温度は1542℃で、この温度近傍で操業した場合には、スラグ（ノロ）によるアルミナ保護管の浸食が急速に進み、熱電対が断線するトラブルが起こった。温度（上）は1000℃～1050℃の間で比較的安定して推移した。

6:00頃から踏み轍からプロアによる強制送風に切り替えた際に、温度（下）の熱電対保護管がガイド管から抜けなくなった。送風の切り替えで熱電対付近の温度が低下し、スラグ（ノロ）が固まることによって起こったものである。温度（上）はプロア送風にすることで100～150℃程度上昇した。その後、熱電対を引き出し、再設置を行ったが、（下）の測定位置では、踏み轍時の温度まで上昇しなかった。さらにプロアを停止後の踏み轍による2回の送風では、（下）が上昇するのに伴い、（上）が低下することが認められた。

図4に砂鉄材と木炭の累積投入量を示す。ここで、砂鉄材の重量は、砂鉄に砂鉄重量の1%の貝殻を添加し、餅をバインダにして固め、乾燥した材料の総重量を表す。木炭と砂鉄材の投入量は18:10から、ほぼ一定であるが、プロア送風に切り替えた後に木炭と砂鉄材の投入量を増加した。この18:10からの定常操業時の12時間40分間における木炭の投入量は300kg、1時間あたり23.7kg、砂鉄材の投入量は130.5kgで、1時間あたり10.3kgである。これより、砂鉄材／木炭の比は、0.44であるが、砂鉄材のバインダを除いた砂鉄の割合は94%であるため、実際の砂鉄／木炭比は0.41である。

貝殻はスラグ（ノロ）の成分調整のために20:50頃から炉況を見ながら投入した。

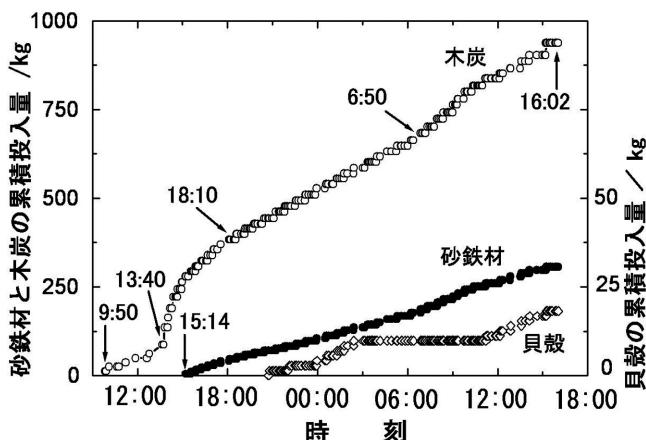


図4 砂鉄材と木炭の累積投入量（ただし、砂鉄はバインダを含む砂鉄の重量である）

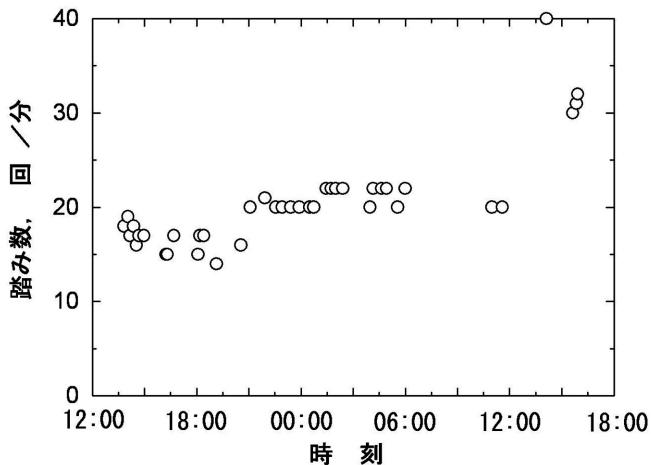


図5 1分間当たりの轍の踏み数（片側）

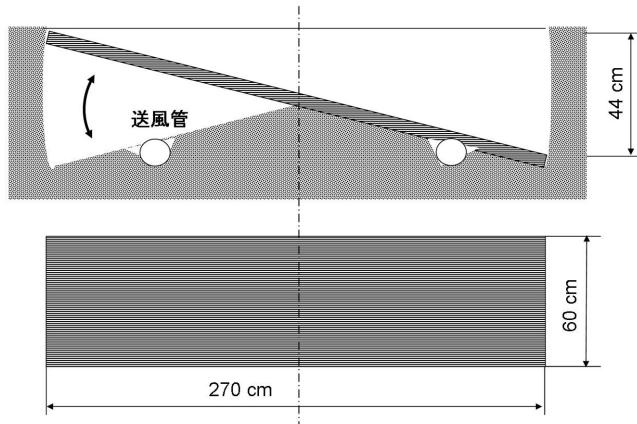


図6 轪の概略図 上：轍断面、下：踏み板寸法

実際の砂鉄／木炭比は0.41である。

図5に1分間あたりの踏み轆片側の踏み数を示す。踏み数は15～22回／分に制御した。21:00以降は、20～22回／分に回数を増した。炉内温度に対して、木炭と砂鉄の投入量はさほど影響しないが、踏み数が増えた21:00以降は炉内温度が上昇しており、轆の踏み数が炉温の制御に効果的であることを示す。

踏み轆は、まほろん2号炉寸法と同じであるが、轆の摺動する高さは44cmで2号炉に比べ、16cm長い(図6)。片側からの1回あたりの送風量は 0.18m^3 であり、例えば、片側15回の踏み数では、両方の羽口から炉内に吹き込まれる空気の風量は $5.4\text{m}^3/\text{分}$ 、20回では $7.2\text{m}^3/\text{分}$ である。ここで、85%程度の送風効率と仮定すると、15回では、 $4.59\text{m}^3/\text{分}$ 、20

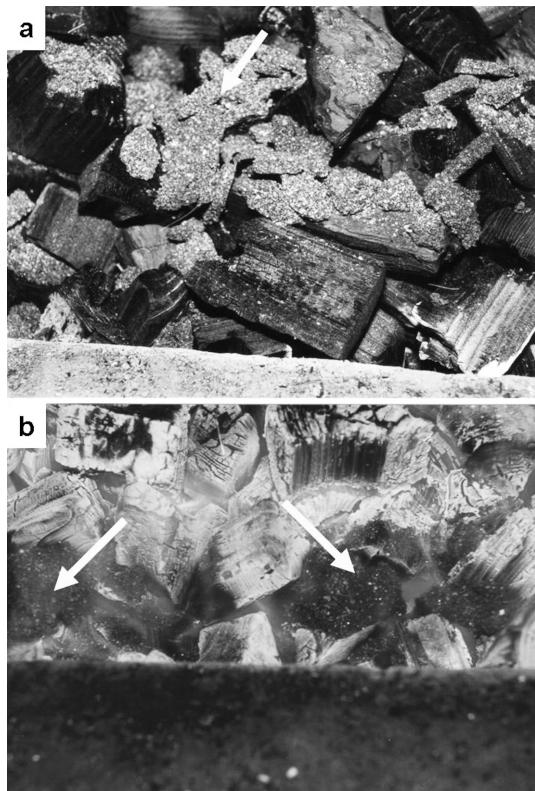


写真5 投入砂鉄の形態

(a) 低い炉頂温度、(b) 高い炉頂
温度、矢印は砂鉄材

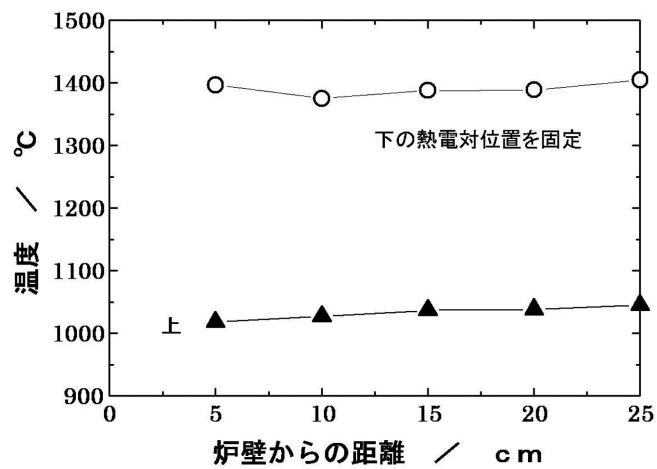


図7 19:20における上熱電対位置での炉内温度分布

温度(下)の熱電対位置は炉壁面から5cmの位置

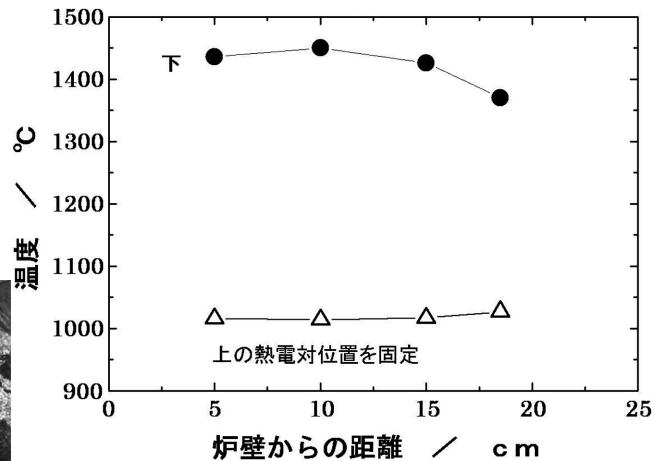


図8 19:50における下熱電対位置での炉内温度分布

温度(上)の熱電対位置は炉壁面から5cmの位置

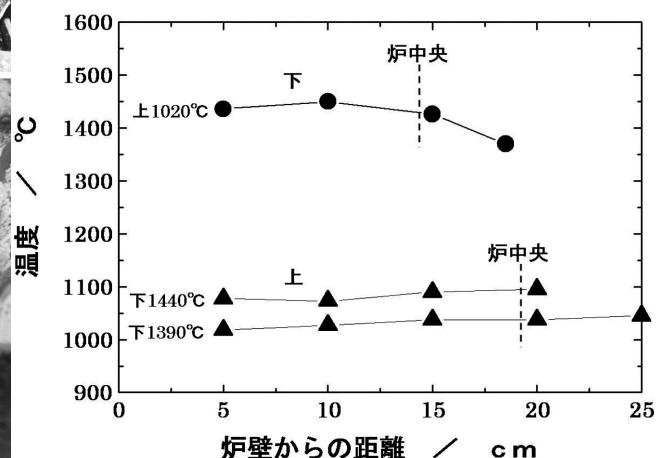


図9 炉内温度分布のまとめ プロットの表示温度は固定位

置側の熱電対の平均炉内温度を表す

回では $6.12\text{m}^3/\text{分}$ となる。

まほろん2号炉の1分間当たりの片側の踏み数は40～50回であり、片側からの1回当たりの風量を 0.096m^3 とすると、45回／分の踏み数では、 $8.64\text{m}^3/\text{分}$ となる。まほろん3号炉の炉内容積を2号炉の90%とし、踏み数を20回／分と仮定すると、2号炉に比べ、1分当たりの送風量は約80%である。

写真5に砂鉄の投入時の様子を示す。投入材料の砂鉄は3～10cmの大きさの平板状の形状をしており、投入後も木炭の上に乗っている。加熱された状態でも餅は炭化するが、形状はさほど崩れていらない。木炭の隙間を通って降下する砂鉄が少なくなることで、高温域の滞留時間が長くなり、燃焼雰囲気、木炭あるいは炭化した餅との還元反応が進むことが十分予想される。

図7に操業中の炉内温度分布を示す。（下）の熱電対位置を壁面から5cmに固定し、（上）の熱電対を移動した。（下）の温度は（上）の温度の計測時の温度を示す。温度（上）は炉の中央に向かって緩やかに上昇している。

同様に（上）の熱電対を壁面から5cmの位置に固定し、（下）位置での温度分布を計測した結果を図8に示す。炉の中央に向かって低下し、中央からやや手前側に最高温度域を生じている。

炉内温度分布をまとめた結果を図9に示す。炉体の内壁面が炉底側に向かって若干傾斜しているため、壁面から炉の中央位置までの距離が異なる。羽口上部の（下）は中央から若干手前側で最高温度を示した。この理由として次の二つが考えられる。手前側に比べ、反対側の風量が若干少なく、羽口からの風量がややアンバランスになったこと、また、計測時に熱電対が若干下側に向かって挿入されているため、中央部で2.5cm下、羽口中央ラインから4.5cm上を測定したことが考えられる。羽口が 12° の角度で下向きであることと操業時の状況から、羽口からの送風のアンバランスが主な原因として考えられる。また、温度（上）での炉内温度分布は比較的平坦であり、温度（下）に追随している。

写真6に操業後解体した炉体の断面を示す。羽口周辺の黒っぽい領域が浸食されているが、まだ、操業するためには十分な炉壁面厚さを保っている。炉の内壁面にはノロが付着している。熱電対（上）の位置はノロが付着している部分と、ほとんど付着していない部分のちょうど境界に相当する。大きな熱影響部は炉材断面の色の違いとなって現れる。熱電対（下）の位置は浸食が大きく、ノロが付着している部分、（上）の位置は炉壁断面が白から灰色に変化している長さが最も長い部分である。

（2）踏み轍とプロアによる送風の違い

これまでの炉内温度計測結果から、踏み轍による送風とプロアによる送風では、明らかに操



写真6 解体した炉の断面

業状態が異なることが分かる。図10に踏み轍とプロア送風の空気の流れのモデルを示す。踏み轍は踏み込んだ側の羽口から交互に送風されるが、プロア送風の場合には、両側の羽口から同時に送風される。

踏み轍では、実線の矢印で示すように一方の羽口から送られた空気は相手側の炉内壁面に向かって流れ、壁面を加熱する（楕円で囲った領域）。その後、壁面に沿うように炉頂に向かつて空気は広がる。これを交互に繰り返されるため、炉内壁面温度が上昇する。また、同時に相手側の羽口内に熱風が流れるため、羽口内を加熱する。この現象が起こることはまほろん2号炉の操業で、風箱に繋がっている送風管の入り口付近に設置した圧力センサとリード線が高熱で炭化したことから分かった。この加熱された送風管は熱交換器の役割を果たし、轍から送られた空気を加熱し、より高温の空気を炉内に送り込むことになり、操業効率を上げる要因となる。

プロア送風の場合には、両側の羽口から同時に連続的に空気が送り込まれるため、空気が衝突し、上方へ流れしていく。このため、炉壁面温度が踏み轍の場合よりも低くなると推察される。また、轍からの連続送風によって羽口と送風管は空冷された状態になる。

以上のことから、炉内温度分布は炉の中央が高い山形の分布を示すが、踏み轍送風の場合には、その山が緩やかになる傾向にあることを示唆する。プロア送風の場合には、炉内壁面温度が低くなるため、温度分布の山のピークが高くなることを意味する。炉内温度に依存するが、炉の寿命はプロア送風の方が長くなると思われる。

炉の内壁面温度の違いは、炉壁の浸食によるスラグの形成に影響する。踏み轍の場合、炉内壁面温度が高くなるため、炉壁面の浸食が大きく、炉材、砂鉄、木炭によって生成されたスラグ組成になるが、プロア送風の場合、炉材の混入量が少ないスラグ組成になると推察される。

(3) 鉄塊のミクロ組織観察

1) まほろん3号炉の鉄塊

まほろん3号炉で作られた比較的大きな塊で、破断面が蜂の巣状になっている鉄塊のミクロ組織観察を行った。

写真7に鉄塊断面のマクロ組織を示す。写真上で針状の黒っぽい組織が観察されるが、この針状組織は光沢がある。

写真8に写真2位置1のミクロ組織を示す。
(a) 及び (c) の針状で白い組織がセメントタイト

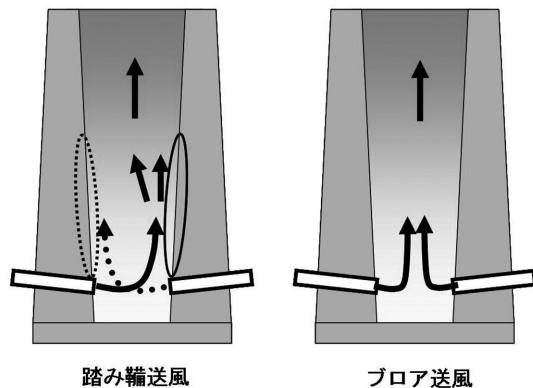


図10 踏み轍送風とプロア送風の違い

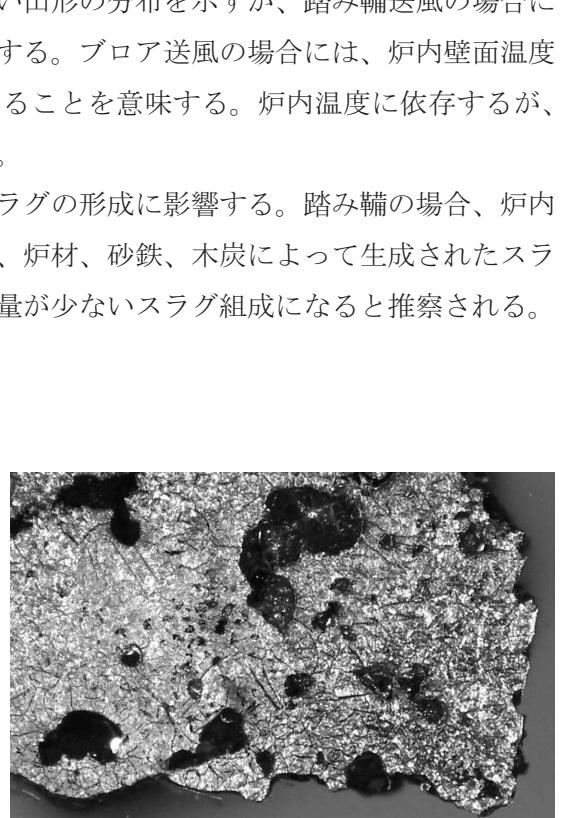


写真7 まほろん3号炉鉄塊断面のマクロ組織

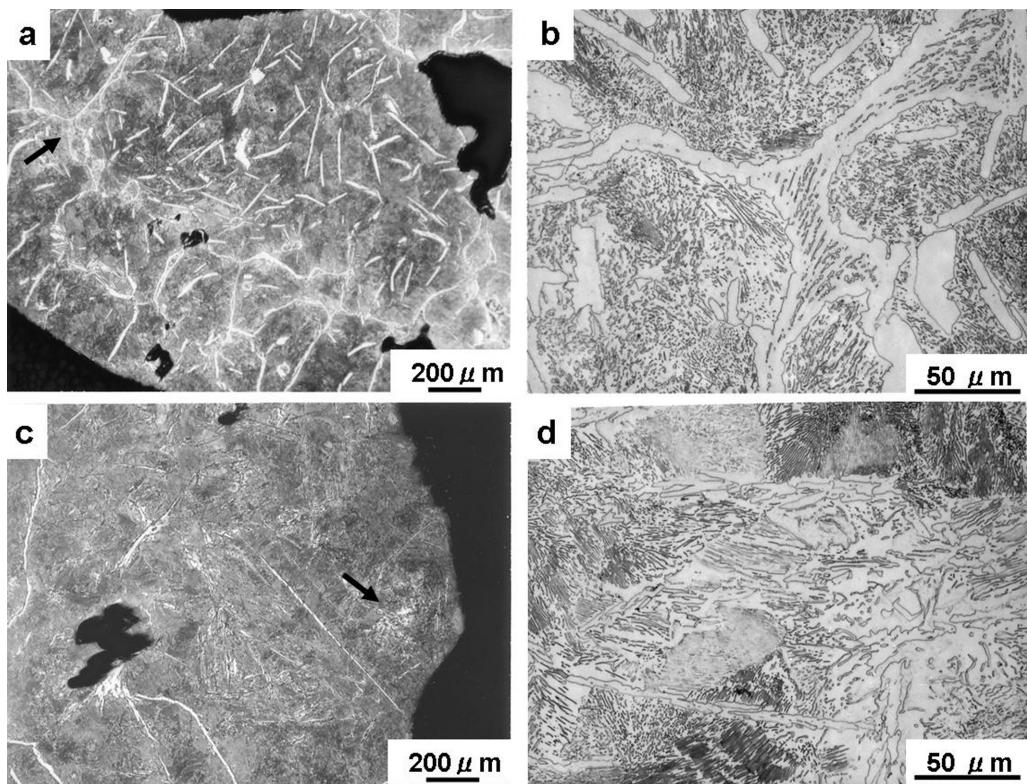


写真8 まほろん3号炉鉄塊のミクロ組織－位置1 (a) 初析セメンタイトの多い領域、
(b) (a) 矢印の拡大、(c) 初析セメンタイトの少ない領域、(d) (c) 矢印の拡大

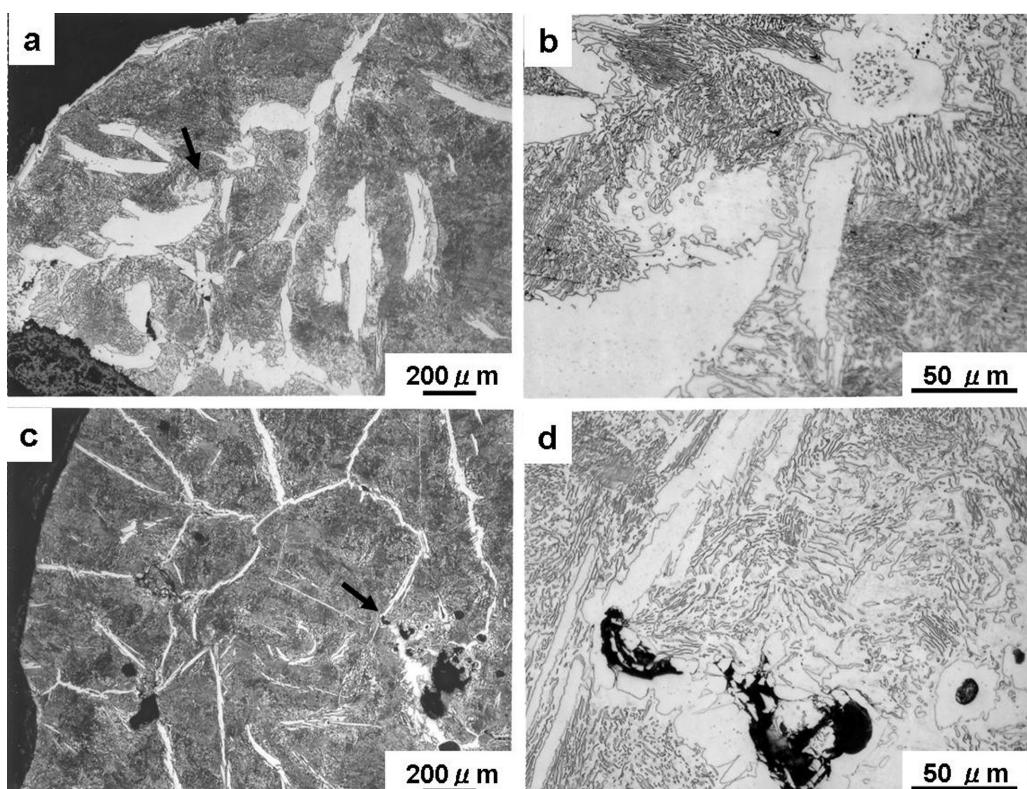


写真9 まほろん3号炉鉄塊のミクロ組織－位置2 (a) 塊状セメンタイトの領域、
(b) (a) 矢印の拡大、(c) 針状セメンタイトの領域、(d) (c) 矢印の拡大

で、素地はパーライトである。セメントタイトの析出状態から、過共析鋼であり、(a) が (c) よりも炭素量が高い。(d) では、層状パーライトが観察されるが、(b) では、セメントタイトは微細な粒状（球状）となっている。

過共析鋼を高温で長時間保持する焼き戻し処理によってセメントタイトが球状化することが知られている。粗大なセメントタイトは分断されるような形態で球状化する。オーステナイト領域から徐冷した場合には、層状パーライトが析出せず、球状セメントタイトとなる。保持時間が長くなると、粗大組織の球状化と微細組織の粗大化が起こる。亜共析鋼では徐冷によってパーライトになりやすい。従って、(b) の組織から、素地は粒状セメントタイトであり、(d) の素地は層状パーライトであるため、小さな鉄片の中においても炭素量が過共析と共に近い領域が混在していることを表している。

写真 9 に写真 2 位置 2 のミクロ組織を示す。いずれも過共析鋼の形態である。(a) は写真 8(a) よりもセメントタイトが粗大に成長しており、鉄への浸炭が進んでいる。(c) では、長い針状のセメントタイトが観察される。(d) では、空隙を取り囲むように粗大なセメントタイトが析出している様子が観察される。

2) クロガネくん 3 号炉の鉄塊

予備実験として行った円筒型の小型炉の実験で得られた鉄塊のマクロ組織を写真 10 に示す。組織の形態から、(a) は、すべてが白銑である。配向性を持って晶出したセメントタイトが観察される。(b) は白銑鉄と過共析鋼との混合組織で、矢印が過共析鋼の領域である。

写真 11 に写真 10 (a) のミクロ組織を示す。(a) の試料内部では、粒状のセメントタイトが縦方向に配向している。(b) の拡大組織から、セメントタイトは粒状の形態をしており、素地はパーライトである。通常の白銑鉄のようなレデブライト組織とはなっていないが、亜共晶の白銑鉄である。(c) の表面側には片状の黒色の組織が分散している様子が観察される。(d) の拡大組織から、片状の組織は黒鉛であることが分かる。素地は層状パーライトで、片状の黒鉛と白

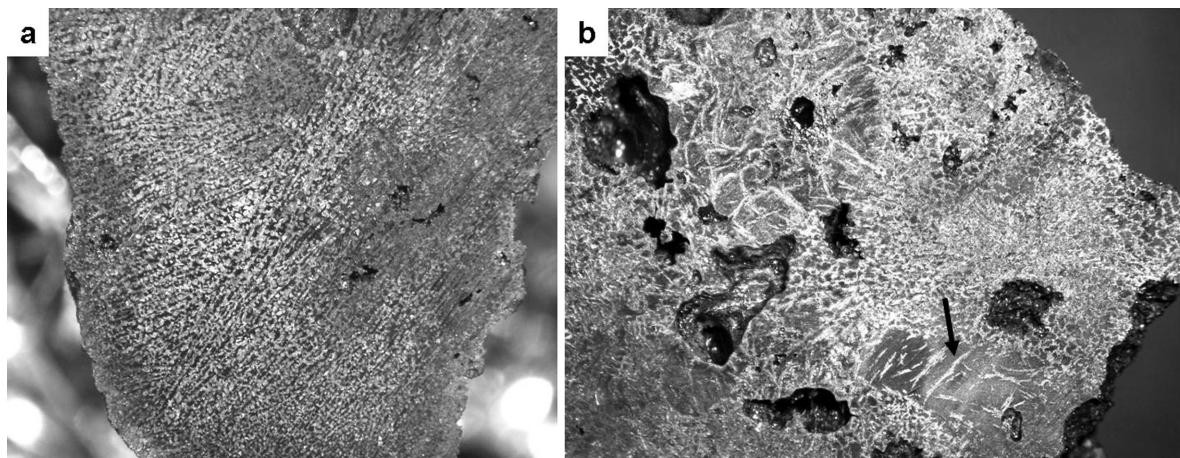


写真 10 クロガネくん 3 号炉の鉄塊断面のマクロ組織 (a) 白銑 : 写真 3 の位置 1 の拡大写真、(b) 白銑+過共析鋼 (矢印) ; 写真 3 の位置 2 の拡大写真

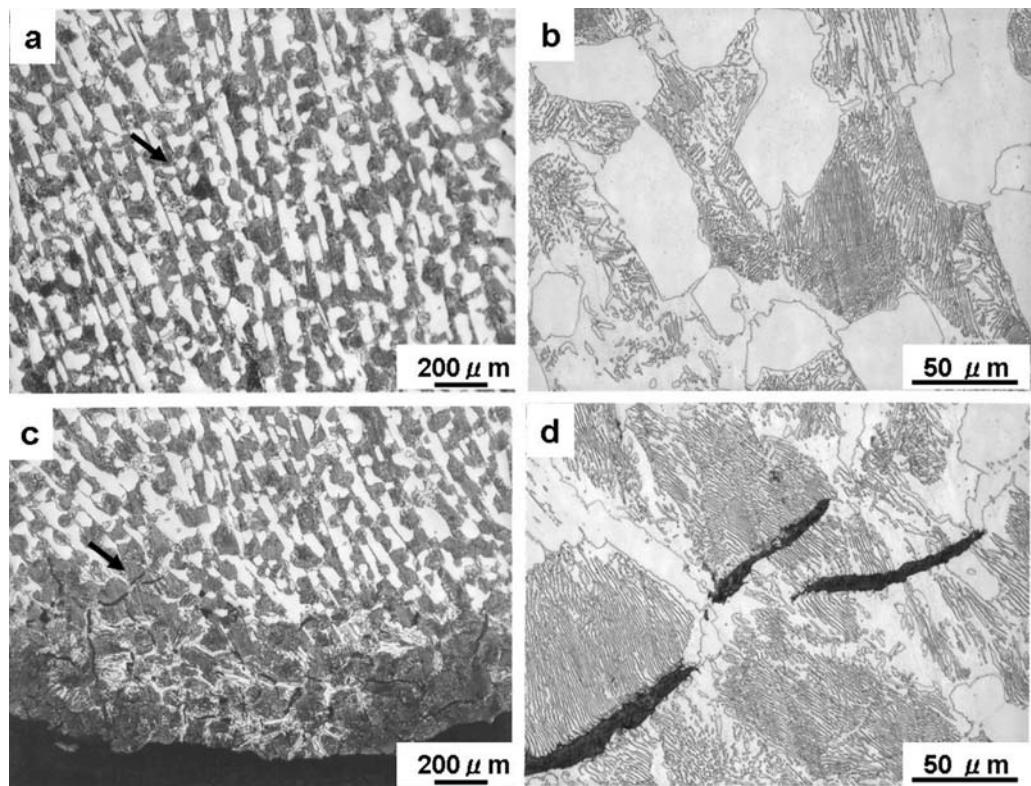


写真11 クロガネくん3号炉のミクロ組織（写真10（a））（a）中央部、（b）（a）の拡大、（c）表面近傍、（d）（c）の拡大

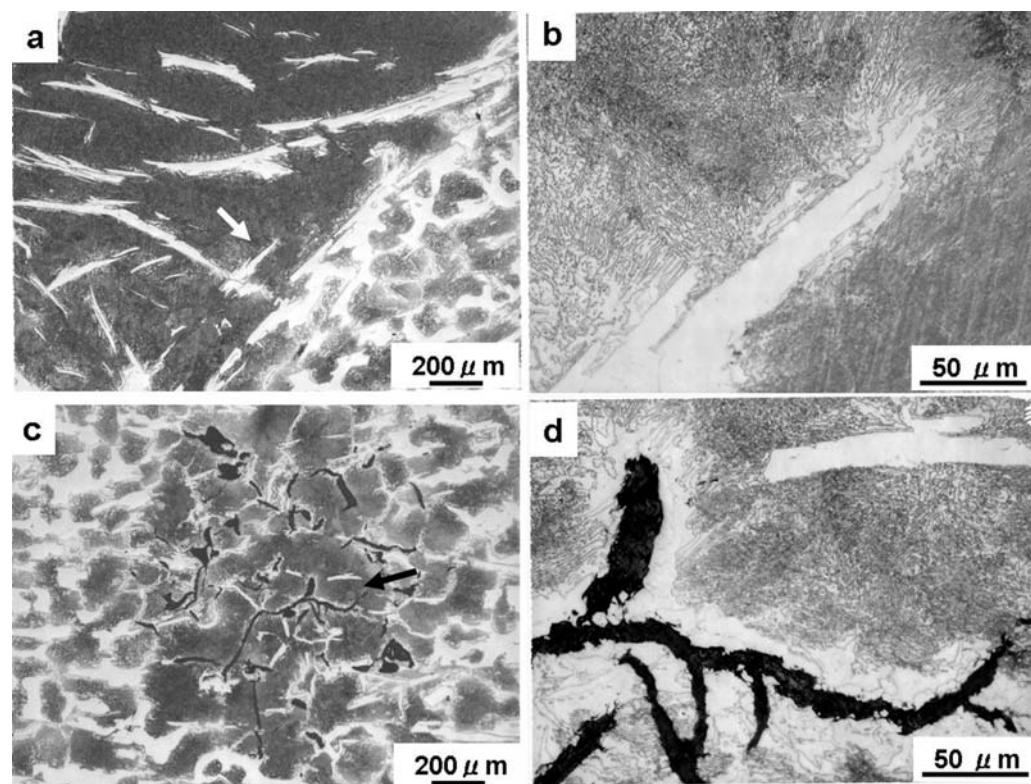


写真12 クロガネくん3号炉のミクロ組織（写真10（b））（a）過共析鋼と亜共晶鋳鉄の境界、（b）（a）矢印の拡大、（c）黒鉛の晶出領域、（d）（c）矢印の拡大

色の粗大なセメンタイトが混在している。黒鉛の周囲はパーライトであり、部分的に粗大なセメンタイトと接している。

写真 10(b) のミクロ組織を写真 12 に示す。(a) は亜共晶鑄鉄と過共析鋼との境界部であり、それぞれの領域でのセメンタイトの形態が異なる。(b) は過共析鋼の拡大組織であり、初析セメンタイトの先端部の形状に沿った形態で層状のパーライトが析出している。(c) は黒鉛が観察される領域であり、周囲が白銑となっている。黒鉛は片状であるが、湾曲した形態をしている。この領域も黒鉛と初析セメンタイトが混在している。(d) の黒鉛の右上に粗大な棒状の初析セメンタイトがあり、黒鉛周囲は多数の粒状のセメンタイトで覆われている。

3) 島根県のたたら製鉄の鉄片

写真 13 に鉄片のミクロ組織を示す。(a) 初析セメンタイトは長く成長しており、その幅も広い。(b) の拡大写真から、素地の黒く見える領域では、層状のパーライトが析出しており、

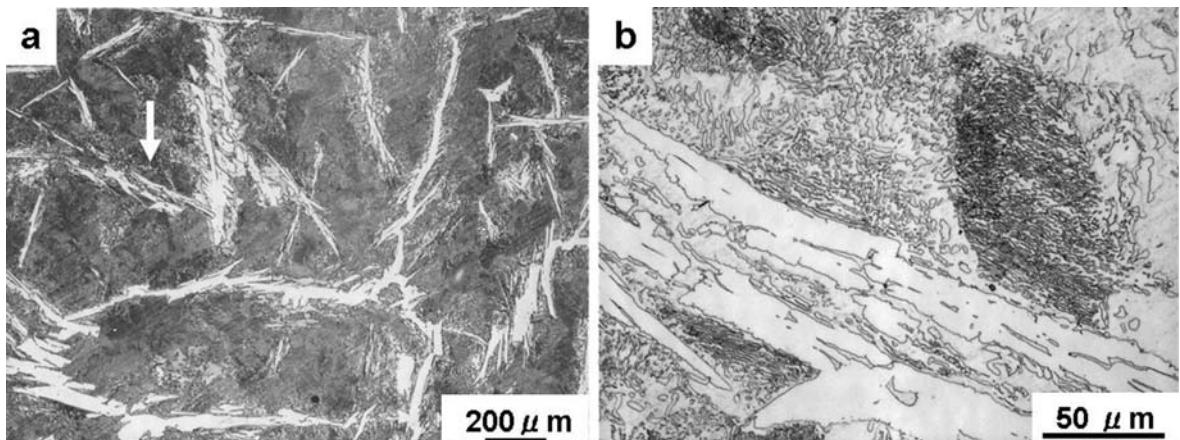


写真 13 島根県のたたら鉄のミクロ組織 (a) セメンタイトの析出形態、(b) (a)矢印の拡大

やや薄い灰色の素地領域ではセメンタイトが球状化している。そのサイズも微細な粒から、やや大きな細長い形態の粒が混在している。炭素量はまほろん 3 号炉の鉄塊 - 位置 2 の (a) と (c) の間と推定される。

4 おわりに

これまでの 2 回の復元炉と円筒型の小型実験炉の結果を踏まえ、高炭素量の銑（ずく）を造る目的で、まほろん 3 号炉による操業実験を行った。得られた結果は以下のようである。

(1) 炉内温度

炉内温度は木炭の投入量と鞴の踏み数を制御することで、安定操業時には羽口の直上 (7cm 上) で 1400 ~ 1500°C、羽口と炉頂の間、1/2 の位置では、1000 ~ 1100°C の高温操業を行うことができた。炉内温度分布は羽口直上の水平方向では、中央部が高くなる傾向があるが、鞴からの送風量のアンバランスで最高温度のピーク位置がずれる。羽口と炉頂との 1/2 の位置では、ほぼ平坦な温度分布であった。

（2）鉄塊の組織

まほろん3号炉で得られた鉄塊は、高炭素量の過共析鋼であった。鉄塊の位置によって炭素量の違いによる組織形態の違いが認められる。まほろん1号炉と2号炉の鉄塊に比べ、炭素量が著しく増加したが、鋸までの炭素量までは至っていない。

円筒型小型炉で得られた鉄塊は白銑鉄が大部分を占めるが、過共析鋼の領域が局所的に点在する。鉄塊の表面近傍では片状の黒鉛、粒状セメンタイト、パーライトから構成される領域が一部観察された。片状の黒鉛は、 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒状のセメンタイトで覆われていた。

最後に島根県のたたら製鉄で造られた玉鋼を提供していただきました島根県産業技術センターの尾添伸明氏に深く感謝いたします。

<註>

- (註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
- (註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
- (註3) 佐藤健二：「まほろん2号炉（南相馬市大船迫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 2007, 81-90
- (註4) 俵國一：「鐵と鋼製造方法及性質」，丸善，大正9年12月（第10版），133-134