

まほろん1号炉（原町市大船迫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所 佐藤 健二

1 はじめに

福島県原町市で平安時代、9世紀前半の製鉄炉が発掘され、調査結果から、炉の規模は210cm(長さ)×60cm(幅)×102cm(高さ)の規模をもつ箱形炉の構造と推定された。この炉を復元し、西白河郡大信村産の砂鉄からの鉄づくりの再現実験を行った。この復元炉での操業時の炉内温度と輔(ふいご)及び風箱の送風管による炉内への送風量を測定した結果を報告する。

これまで、たたらの復元実験は、たたら製鉄復元計画実行委員会^(註1)によって炉高110cmの長方形箱形炉で3日間の連続操業が行われ、温度・雰囲気ガス・炉壁の損耗などが計測された。操業時の炉底部の温度は1,400～1,520℃である。炉内へは送風機で連続的に送風する条件である。また、小型の簡易角形たたら炉による試みも行われ^(註2-4)、同様に送風機による送風で、ピーク時には羽口前で1,500℃を越える温度となっている。送風機送風による炉の内径約18cmの円筒型簡易炉(甌炉型)の実験^(註5,6)では、操業中に炉底側の温度は1,200～1,450℃となり、1回の投入量が少ないこともあり、砂鉄の投入によっても炉内温度変化は少ない結果である。これらの実験は、全て送風機による操業であり、復元炉操業で人手による踏みふいご送風によった炉況の測定事例はこれまで報告されていない。

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110cm(長さ)×60cm(幅)×110cm(高さ)で、15号製鉄炉の推定寸法よりも長手方向を100cm短くしている。矢印位置が炉内温度の測定位置である。また、炉内の長手方向の両端を丸く仕上げた構造である。

炉内の概略構造と炉内温度の測定位置を図1に示す。炉内温度の測定位置は、炉高の中央やや下の炉頂から65cmの位置(以下、温度(上))と、羽口のやや上、炉頂から84cmの位置(以下、温度(下))の2カ所とした。いずれも炉体長手方向の中央部とし、熱電対保護管の先端位置は、温度(上)は炉内壁面から5cm、温度(下)は炉内壁面から5cmの位置である。ただし、温度(下)熱電対の破断後(12:00～)は、炉壁面から1cmの位置にした。それぞれの熱電対位置の炉壁幅は炉頂から65cmの位置で24cm、84cmの位置で21cmと若干羽口の上端が狭くなっている。熱電対用保護管は上下共に高純度アルミナを用いた。

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4時間まではサンプリング時間を0.1秒とし、4時間後から、炉の操業停止までの約12時間はサンプリング時間を0.2秒とした。



写真1 炉の外観と熱伝対の設置位置



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(株)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 $\phi 4\text{mm}$ のアルミ管に接着剤で固定した(写真2)。矢印がセンサーで、空気抵抗を少なくするためと、送風管内の中央に固定できるように針金で組み上げ、管中心への位置決めを行った。

送風時の圧力は温度測定と同時に行い、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4時間まではサンプリング時間を0.1秒とし、4時間後から、炉の操業停止までの約12時間はサンプリング時間を0.2秒とした。

踏み鞆は、踏み板中央部が山形になっており、長手方向の端中央・下の2ヶ所に送風のための吹き出し口が設けられている。写真3に踏み鞆のセンサーの設置位置(矢印)と内径 $\phi 83\text{mm}$ の吹き出し口での設置状態を示す。圧力センサの設置位置は、踏み鞆の東側と2ヶ所の東側風箱の送風管内とした。

写真4に風箱から炉内へ空気を送風する送風管の外観を示す。送風管は焼成した粘土製で、長さが15~20cm、内径が約30mmである。写真5に風箱内のセンサーの設置位置を示す。白い矢印が送風の方向を示し、東側風箱内の8ヶ所ある羽口への送風口の鞆側から2番目(以下、No. 2)と最も遠い位置にある8番目(以下、No. 8)の2ヶ所で測定を行った。送風管同士を繋ぎ合わせるため、口が広く、テーパがついている。このため、管中部の $\phi 30\text{mm}$ の平行部分にセンサーを設置しており、センサーは管の奥に入り込んでいる。

3) 操業時の気温と湿度

製鉄炉の操業時の気温と湿度は通風乾湿計を用い、踏み鞆隅から約40cm離れた地上1mの位置で測定した。

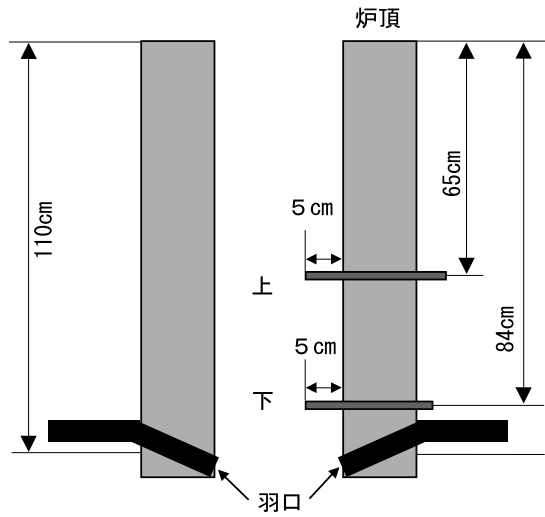


図1 炉内温度の測定位置

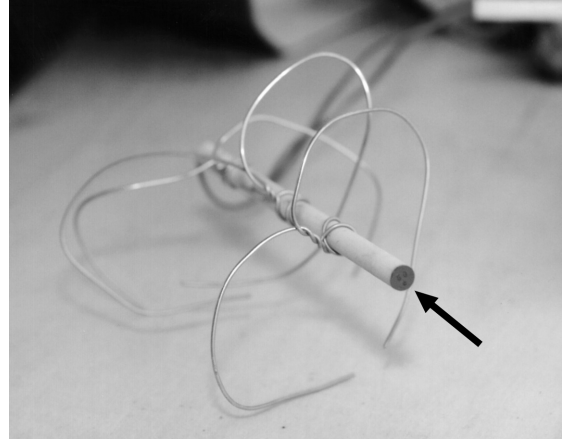


写真2 組み上げられた圧力センサの外観

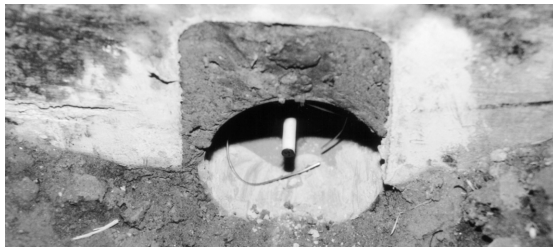


写真3 踏み鞆の外観と圧力センサーの設置位置

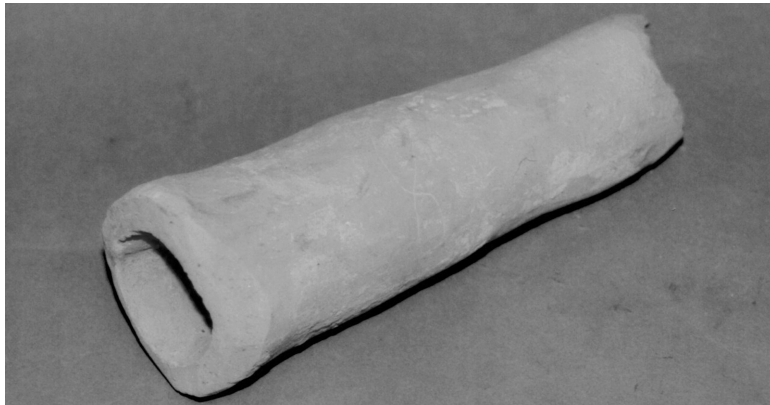


写真4 送風管の外観

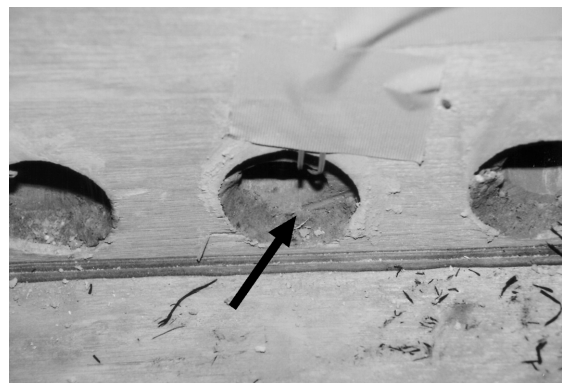


写真5 風箱内のセンサ設置状況

図2に操業時の温度と湿度の測定結果を示す。操業開始の約1時間後の正午ごろは気温24℃、湿度58%であったが、時間経過に伴い、徐々に気温が低下し、湿度は上昇した。日没時の17:00では、気温17.5℃、湿度は100%で、その後、気温は約10℃まで低下するが、湿度は操業停止まで100%であった。

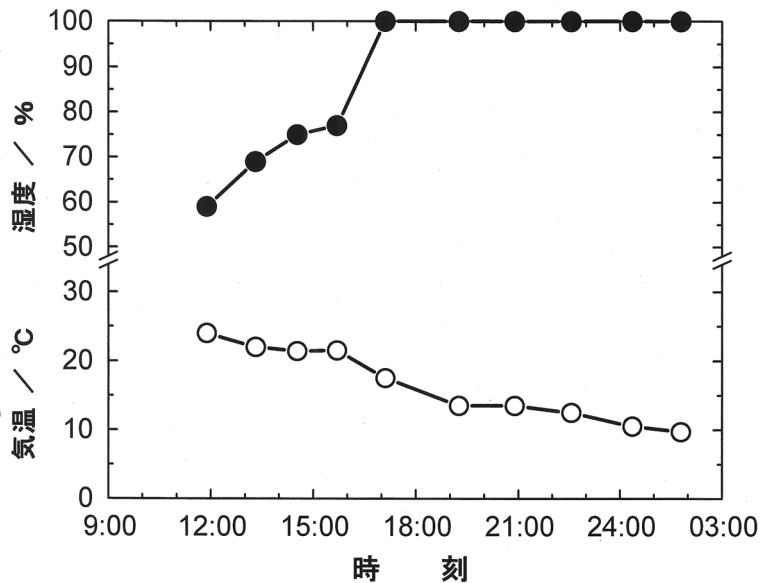


図2 操業時の気温と湿度

3 炉内温度と送風量の測定結果

1) 炉内温度

図1に示す位置での火入れ(10:52)から次の日の操業停止(02:32)までの炉内温度の測定結果を図3に示す。操業初期は松炭のみを投入し、炉内温度を上昇させた。火入れから炉内温度は急速に上昇し、火入れ後の30分間で温度(上)は960℃、温度(下)は1,410℃まで達した。11:09から炭と同時に砂鉄を投入したが、11:45まで温度(下)は1,400℃以上を維持した。また、温度(上)は上昇し続け、11:37で最高温度の1,150℃を示したが、その後、炭と砂鉄の投入毎に対応して温度が低下し、12:00直前には約1,000℃まで低下した。12:00直前の矢印Aで温度(下)の熱電対が切断したため、熱電対を入れ替えると同時に、温度(下)の測定位置を変えた(炉壁面から1cm)。炉温は12:00頃から緩やかに低下し、温度(上)は14:00頃に900℃前後の最低値

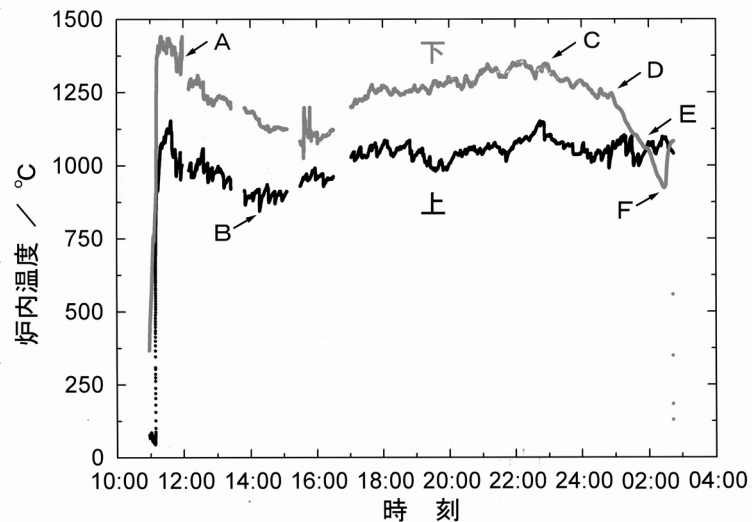


図3 炉内温度の経時変化

(矢印B)を示し、その後緩やかに上昇した。この間、温度(下)は16:00頃に最低値、1,100℃となり、その後23:00頃(矢印C)まで緩やかに上昇した。

矢印Cから、操業調整のため、炭と砂鉄の投入を抑えた。これによって温度(下)は低下した。温度(上)も同様に低下している。00:00頃から、再び炭と砂鉄を投入し始めた。01:00頃(矢印D)から、温度(下)が急激に低下したが、温度(上)は緩やかに上昇し続けていた。02:00頃(矢印E)で温度(上)と温度(下)が逆転し、温度(上)が高くなった。矢印Fで

上から棚の部分をついて一部を落とし、若干温度が上昇したが、その後、炉況が不安定と判断されたため、02:32 に送風を停止した。

図4に操業初期の11:30～12:00間の炉内の温度変化を示す。温度(上)は1,000～1,100℃の間で規則性のある上下変化を繰り返しているが、温度(下)の変化は温度(上)に比べて小さい。村下(むらげ)が、細い鉄棒で炭や砂鉄の投入前に、炉頂から炉内の燃焼炭を突いて隙間を少なくする作業の際(矢印・村下)に温度降下が起こり、さらにその後の炭と砂鉄の投入の一連の作業によって温度(上)は100～120℃低下する。温度(下)は30℃程度の温度降下である。

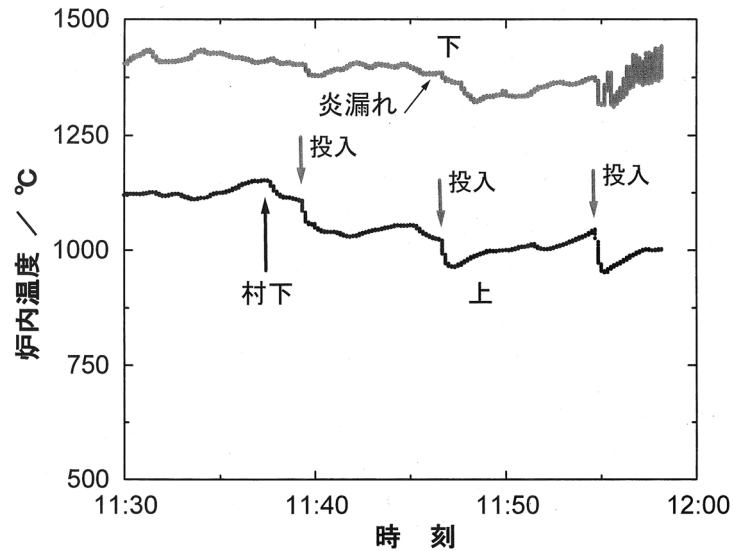


図4 操業状態による炉内温度変化(11:30～12:00)

11:48に炉の下部から炎が漏れたため、炉の補修を行った。炉の下部での亀裂によって温度低下が認められ、温度(下)は1,350℃

まで低下したが、その後、再び温度は上昇した。12:00前に温度(下)が不安定になり、熱電対が切断した。12:00前までの温度(下)の最高温度は1,440℃である。

熱電対の再設置の際、高温操業によるアルミナ保護管と熱電対の損傷を考慮し、温度(下)の熱電対の先端位置を炉内壁面(操業前の測定位置)から1cmに変更した。9分後の再設置後の温度(下)が1,290℃、温度(上)が982℃であり、熱電対切断前の温度(上)から、温度(下)を見積もると1,390℃程度であるため、温度(下)での炉内温度は初期の設置位置に比べ、約100℃低いと推定される。

図5に操業終期の23:00～02:30間の炉内の温度変化を示す。23:00過ぎから、炭、砂鉄の投入を抑える操業調整を行ったことで、温度(下)は1,300℃から次第に低下した。00:00からの炭、砂鉄の投入再開によっても、温度(下)は低下傾向にある。温度(上)は1,100℃にほぼ維持されている。01:00前(矢印)からは、温度(下)の温度低下が大きくなり、02:00頃には温度(上)より

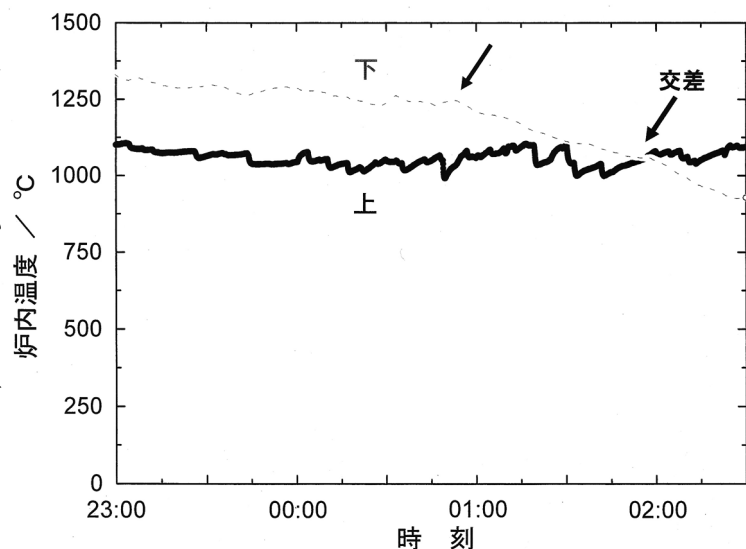


図5 23:00からの炉内温度変化

も低くなり、02:30には900℃まで低下した。この現象は、炉内の羽口上部に棚吊りが生じたために起こったことによる。棚吊りは還元された鉄・砂鉄・炭が焼結し、炉壁に支えられながら、この塊が宙づりになった状態である。羽口から空気を送っても砂鉄が十分還元されず、熔融鉄が連続的に炉底へ落ちていかない。また、羽口からの空気は棚吊りの脇の空気が通りやすい所を通過して上に抜けていったため、温度（上）は順次投入された炭の燃焼によって1,100℃程度に維持されていたと思われる。

写真6に還元炉の解体した断面を示す。熱電対の位置を、それぞれ矢印で示す。解体時に羽口上部での棚吊りが確認された。温度（上）の熱電対位置では、炉の内壁はほとんど浸食されていない。しかし、温度（下）熱電対位置では、炉壁の浸食が激しく、内側の煉瓦がほとんど残っておらず、炉内壁面が14～15 cm程度後退している。温度（下）は操業時間の経過に伴い、炉壁が浸食されることで、炉壁面からの距離が次第に長くなり、操業停止の際には実際の炉壁面から15～16 cmの位置での測定結果となる。

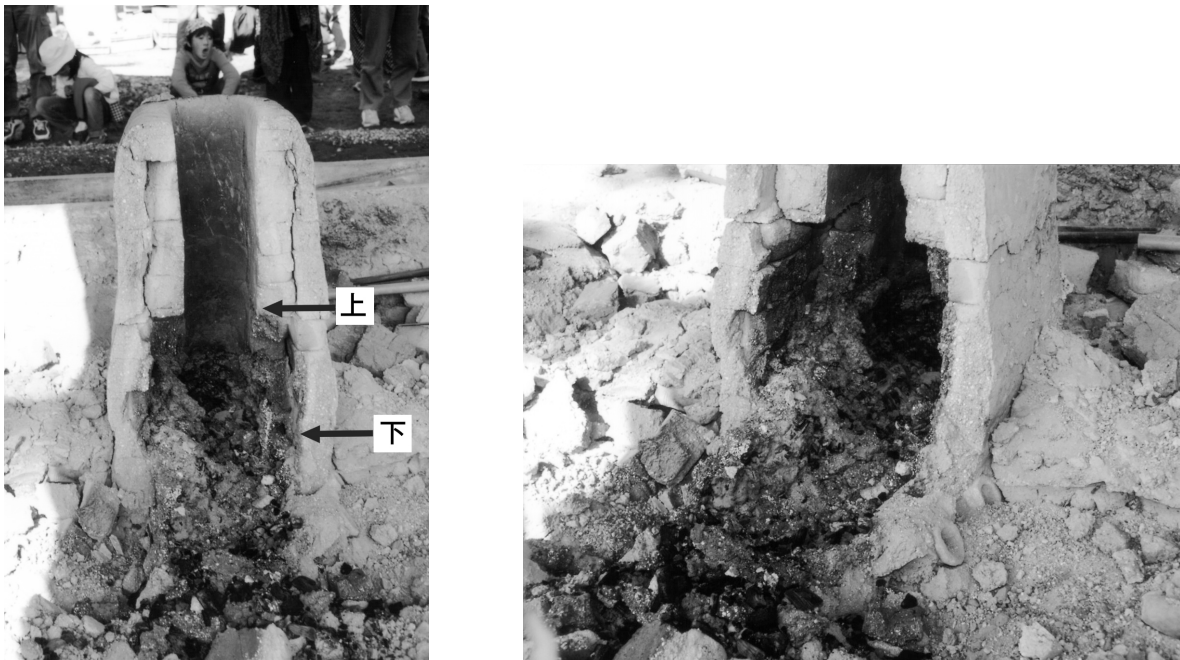


写真6 炉内部の侵食の状況

2) 踏み鞆及び羽口からの送風量

砂鉄投入前で炭のみを炉内に投入し、炉内温度を上昇させた11:00における踏み鞆の吹き出し口でのセンサの圧力変化を図6に示す。周期的な最高及び最低圧力ピークは鞆を一回踏んだときの圧力変化を示し、1分間に25回のペースで風が炉内に送られている。ただし、踏み鞆の吹き出し口は東側と西側にあり、交互に送風されることから、炉内にはその倍の50回/分で送風されている。ここで圧力変化は風速の変化を意味する。

鞆の圧力と風箱の入り口から2番目（No.2）と8番目（No.8）を重ね合わせた結果が図7である。最大ピークの生じる位置はほぼ一定しているが、鞆の最低ピークの際に風箱の送風管との圧力変化が対応していない。また、No.2のセンサは非常に不安定であるため、以降は鞆と

No. 8 について比較を行った。

図 8 に 6 秒間の鞆と送風管の圧力変化を示す。鞆の圧力は実線で示す最低値から上昇し、一旦一定となり、その後最大値を示すが、上昇の時と同様に下降の際に一旦一定となり、最低値まで低下する様式を示す。鞆の実線の圧力は一定で、0 の値（基準線：炉内が空の状態で行った、鞆を停止した状態がこの実線になることを確認した）の圧力を示し、この線よりも下側で負の圧力が生じている。鞆と風箱からの送風状況が若干異なる。風箱 No. 8 の送風管の基準線を破線で示す。圧力変化の形態はほぼ同じであるが、鞆の最低圧力の位置（矢印 A）で風箱の No. 8 は圧力が高くなっている（矢印 B）。この現象は鞆には、風の逆流防止弁が設置されているが、風箱から炉内、反対側の風箱までは通じていることが原因と考えられる。一方が風を送った後は風速が低くなるが、反対側風箱送風管からの送風による風圧を受ける。炉内に導入された空気は高温にさらされることで 5 倍ほど膨張し、炉内圧を上昇させる。この結果、鞆の最低圧力時では風箱の圧力上昇となったと考えられる。

図 9 に砂鉄と炭を投入してからの 11:30 における鞆の圧力変化を示す。鞆の送風回数は 37 回/分

(両側で 74 回/分)である。図 10 に 11:30 における 6 秒間の鞆と風箱の送風管圧力の変化を示す。基準線からの一回の圧力差も 11:00 では 0.05 kgf/cm^2 であったのが、送風のサイクルが短く

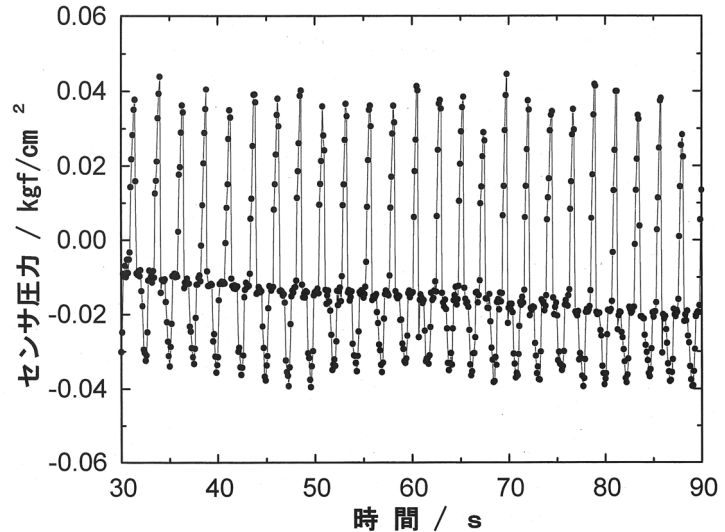


図 6 11:00 における踏み鞆の圧力変化

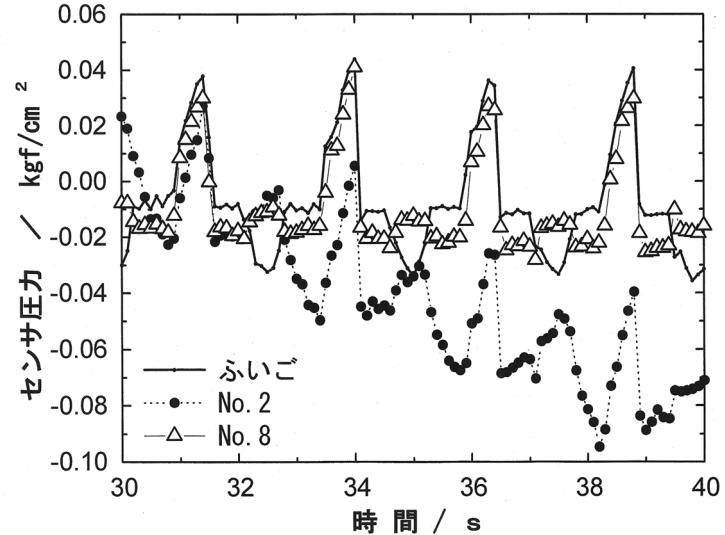


図 7 踏み鞆及び送風管の風量変化

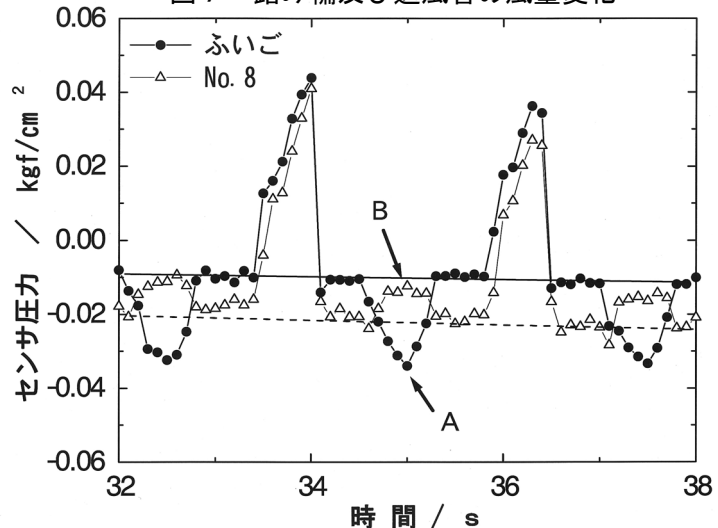


図 8 6 秒間の踏み鞆と送風管の風量変化 (11:00)

なったことで0.08 kgf/cm²程度まで増加している。

図11に17:00における6秒間の鞆と風箱の送風管の圧力変化を示す。データのサンプリング時間は0.2秒であるため、やや波形の形状が単純であるが、鞆の踏み数が増えるのに伴い、基準線からの圧力差が大きくなる傾向にある。また、No.8の圧力差は17:00では、0.06 kgf/cm²であったが、踏み数が増した例えば、01:30では、0.08 kgf/cm²に増加している。

ここで、実際の鞆の吹き出し口と風箱の送風管内の風速を(1)式のベルヌーイの式によって求めた(註7)。

$$V = (2 / \rho \times \Delta P)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、Vは風速、 ρ は空気の密度、 ΔP は圧力差である。

センサは鞆の吹き出し口径と送風管径との面積比から、鞆で0.5%、送風管で4%を占めるが、誤差が小さいため、計算上無視した。また、空気の断熱圧縮によって4%程度の密度変化が見積られるが、これも計算上無視した。

また、鞆及び送風管円筒管の中心にセンサを設置していることから、最大風速(V_{max})は中心で得られ、風量(Q)は(2)式によって求めた(註8)。

$$Q = 0.83 \times (\pi / 4) \times d^2 \times V_{max} \quad (2)$$

ここで、dは送風管の径である。

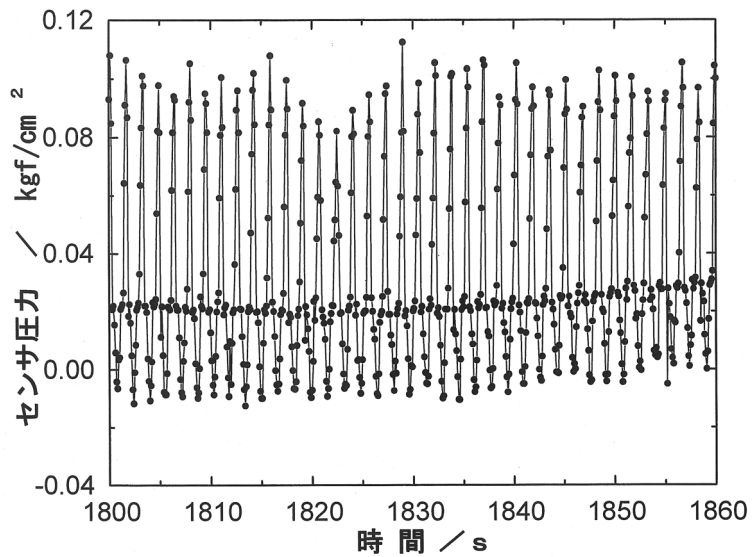


図9 11:30における踏み鞆の圧力変化

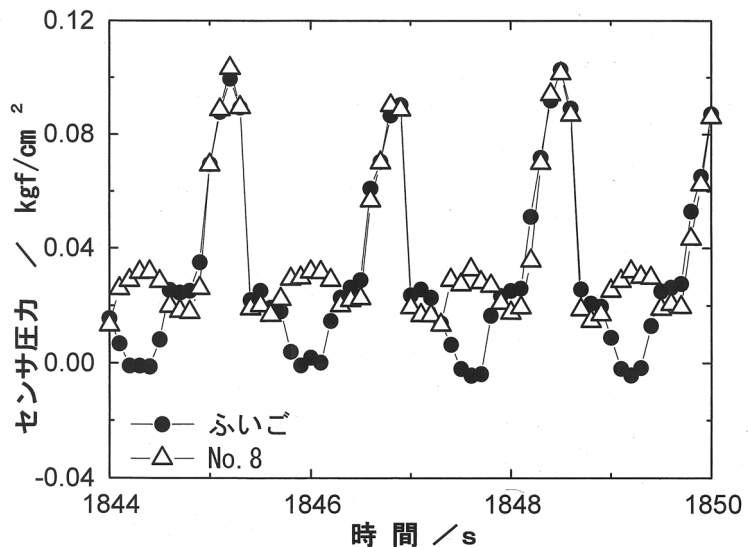


図10 6秒間の鞆と送風管の圧力変化(11:30)

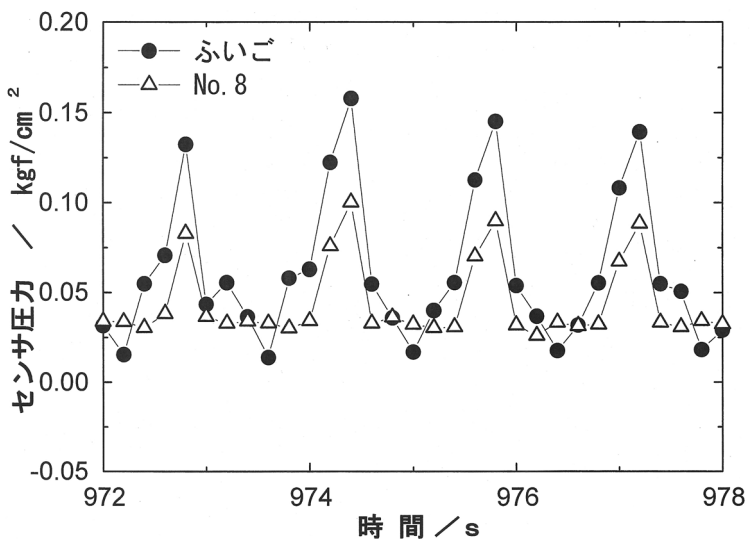


図11 鞆の送風管の風量の変化(17:00)

図12に11:00における鞆と送風管の風速の変化を示す。計算の都合上この時間幅の中での最小圧力を0として、補正した。それぞれ風速のばらつきを考慮し、鞆は図中の実線、No. 8の送風管は破線を基準線と見なすと、鞆の送風管では最大風速が50m/s、No. 8の送風管では、65m/sである。同様に11:30からの鞆の踏み数が増えた場合、鞆の送風管は65 m/s、風箱の送風管は90 m/sと一回当たりの送風速度が高い。

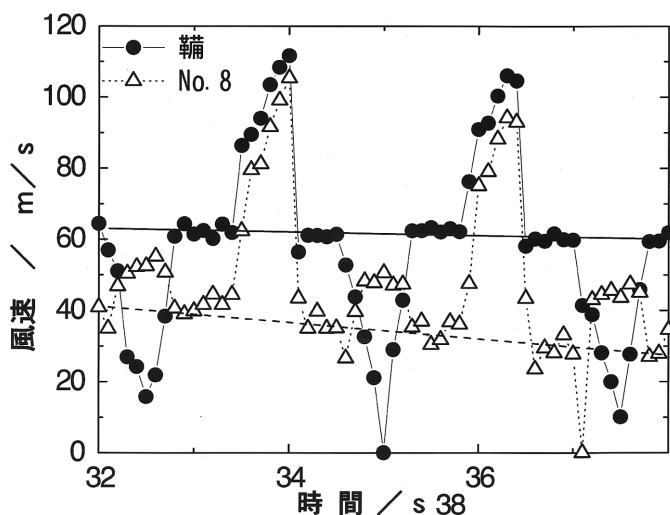


図12 11:00における踏み鞆と羽口の風速変化

表1 踏み鞆による送風条件 (東側)

時刻	送風回数 回/分	鞆の送風管		風箱のNo. 8送風管	
		送付量/回 m ³ /回	送風量(1分間) m ³ /min	送付量/回 m ³ /回	送風量(1分間) m ³ /min
11:00	25	0.107	2.67	0.0182	0.45
11:30	37	0.115	4.24	0.0204	0.75
17:00	43	0.097	4.19	0.0138	0.59
01:30	49	0.137	6.70	0.0238	1.16

※送風回数 15:30 ; 46回/分、21:00 ; 41回/分

これより、1分間当たりの送風量を求めた値を表1に示す。1回当たりの送風量は0.1～0.14m³で、一分間では、踏み鞆の踏み数(送風回数)に応じて、時間経過と共に増えている。風箱の送風管

からの一回の送風量は0.014～0.024m³であり、鞆からの送風量の増減にほぼ対応している。

ここで、図13に示す踏み鞆の概略寸法から、一回当たりの送風量の概算を行った。送風管下の位置から踏み鞆の外壁高さは42cmであるが、実際の有効稼働高さを38cmとすると、片方の踏み板下の空間の体積は、0.154m³となる。この空気が100%送風されたとすると、それぞれの時間における送風量は69～88%であり、センサ圧力から求めた値はほぼ妥当と考える。

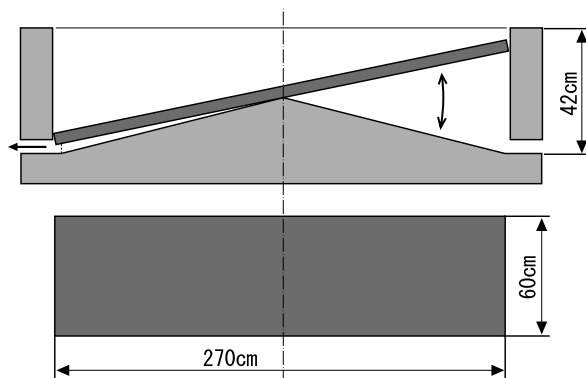


図13 踏み鞆の概略図

本測定では、風箱送風管No. 2のデータは採れなかったが、鞆から送られた送風量がNo. 8の送風管から送られた割合を表2に示す。風箱から羽口を通して炉内へは8本の送風管で送風されるが、平均的に送風されると1本当たり、12.5%の送風量となる。作業中の羽口の状況がノロかみ、溶損など、また、羽口前方の炉内の状況も変化する。このため、風箱の各送風管の送風量も変化していると思われるが、火

表2 風箱のNo. 8送風管の送風量の割合

時刻	鞆の送風量 m ³ /回(A)	No. 8送風量 m ³ /回(B)	B/A %
11:00	0.107	0.0182	16.9
11:30	0.115	0.0204	17.8
17:00	0.097	0.0138	14.2
01:30	0.137	0.0238	17.4

入れからの時間が短く、炭のみで操業を行った11:00では約17%であり、以降の送風量の割合も17%前後であることを考慮すると、No.8側（出滓口側）での送風量が多いことが解る。

鞆から風箱へ送風される際には、強い風の流れ（流束）が生じているため、風箱内の全ての送風管の圧力変化が同一とは考えられず、流れが衝突する先端側がより風圧が高くなると考えられる。このため、鞆からの風が直接風箱の壁に衝突するNo.8側の風圧が高くなるため、当然、風量が増加すると考える。

4 おわりに

復元炉による操業時の温度及び送風量を測定した。その結果は以下のようなものである。

(1) 炉内温度

炉内壁面から5cm、羽口中心上部13cmの位置（温度（下））では、炉内温度は炉の火入れから30分で1,400℃以上の温度となり、1時間までの最高温度は1,440℃である。温度（下）より19cm高い位置（温度（上））では、温度（下）より375～400℃低い温度であった。熱電対の損傷によって炉内壁面から1cmへ移動したことによる表示温度の低下は約100℃である。その後、棚吊りが起こるまでは（上）と（下）の温度差は200～250℃であった。

1回の炭と砂鉄の投入によって温度（上）は明確な温度低下が認められ、100～120℃低下するが、温度（下）は約30℃の低下であった。

棚吊りによって温度（下）では、急速な温度低下が認められ、温度（上）よりも低下した。

(2) 送風量

鞆と風箱の送風管の圧力変化から、送風回数、風速、送風量を測定した。11:00の送風回数は50回/分（両側の合計）で、砂鉄投入時からは80～100回/分の間で推移した。鞆と風箱の送風管の圧力変化は、ほぼ同様な圧力波形を示すが、鞆の最低圧力部で風箱の送風管は炉の反対側からの風圧の影響を受け、圧力がわずかに増加する現象が見られる。

鞆1回の平均送風量は0.114m³で、鞆の有効体積から求めた値の3/4である。鞆の送風口から最も遠い位置の風箱No.8送風管の平均送風量は鞆の送風量の約17%である。

<参考文献>

- (註1) 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罎について」、日本鉄鋼協会、(昭和46年)
- (註2) 澤田滋：「たたらにチャレンジ!」、BOUNDARY (1987年.9月号)、40-45
- (註3) 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
- (註4) 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
- (註5) 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
- (註6) 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鑄造」、秋田大学工学資源学部研究報告 23(2002)、23-32
- (註7) 例えば、谷一郎：”流れ学” 岩波全書、(1981)、P.16
- (註8) 例えば、真島正市編：”工業測定便覧” コロナ社、(昭和29年)、P.573