前近代大鍛冶工程の再現にむけた予備実験の結果について

齋藤　努[1)]・服部　晃央[2)]・高塚　秀治[1)]

●キーワード：脱炭（decarbonizing），精錬（refining），銑鉄（pig iron），軟鉄（wrought iron），金属組織（metallurgical structure）

1．はじめに

わが国における前近代の製鉄では，製錬遺跡が確認され始める6世紀から8世紀ころまでの初期段階でわずかに鉄鉱石の使用例はあるものの，ほとんどの場合は砂鉄を原料とし木炭を燃料・還元剤として使用して製錬を行っていた。主として鋼を作ることを目的とした「鍛（けら）押し」と，主として銑鉄を作ることを目的とした「銑（ずく）押し」があったが，操業記録や現代の再現実験などからみると，炉内反応は不均一でありすべての生成物が目的とするものであったわけでもない。

製鉄の工程は，原料となる砂鉄の採取から始まり，これを還元して粗金属を得る「製錬（smelting）」，不純物の除去と，鉄の性質を左右する炭素濃度の調整を目的とする「精錬（refining）」，そして製品とするための「鍛造」「鋳造」を経る。このうち，「製錬」については，日本美術刀剣保存協会による「日刀保たたら」の操業によって近世たたら技術の継承が行われており，さらに文書の研究や遺跡の調査，それらに基づく多くの再現実験も行われ，その内容がかなり明らかにされている（鈴木卓夫 1990；田口・尾崎 1994 など）。また，「精錬」のうち，鍛冶職人が自分の作業目的にあった素材を得るために炭素濃度を調整する「卸金（おろしがね）」とよばれる技法は，現在も全国に残る刀剣鍛冶などによって伝承されている。

しかし，本来は製錬に続く工程として行われ，銑鉄の中の炭素を大幅に減少させて包丁鉄（軟鉄）を作るための技法である「大鍛冶」については，わずかに文献上の記録は残っているものの技術の伝承が途絶えており，現在ではその実態がよくわからなくなっている。われわれは，その大鍛冶においてどのような反応が炉内で起きているかの詳細を明らかにするために，再現実験を行う計画を進めている。本論文では，まだ温度や送風など条件の設定は不十分ながら，予備的な実験によって，比較的短時間の操業で銑鉄からきわめて低炭素の鉄を作ることができたので，その報告を行う。

2．これまでの調査記録

明治・大正期まで伝えられてきた前近代の大鍛冶技法が，山田（1918），俵（1933）によって調査報告されている（なお2つの報告で，同じ内容を異なる漢字や用語で表現している場合があるが，以下原則として，より詳細な内容が記されている俵（1933）の表記に従い，山田（1918）において異なる表記が使われている場合は初出のところで［　］内にそれを示すことにする）。本研究で参考としたのはいずれも中国地方（鳥取県）における記録であり，わずかに傾斜した炉床上で，羽口の前に原料の銑鉄をアーチ形に積み重ねた上を小炭で覆い，送風・加熱してアーチ形の内面から漸次銑鉄を熔融させると，それが滴下する際に高温度の酸化炎にふれることによって鉄の脱炭がおきる，というのが両報告に共通する基本

[1)] 国立歴史民俗博物館　〒285-8502 千葉県佐倉市城内町 117

[2)] 国際基督教大学　〒181-8585 東京都三鷹市大沢 3-10-2

的な工程である。操業は反復して2回行われ，それぞれ「下げ場［左下場］」「本場」とよばれる。これらの炉の断面図を図1，図2に，原料銑鉄の積み方（俵 1933）を図3に示した。

それぞれの報告における作業工程の概略を以下に記す。ただし，原料・生成物の量や作業時間などの条件がすべて詳細に記述されているわけではない。

山田（1918）：

左下場・・一回の操業で白銑120貫～400貫を処理する。原料白銑1トンに対し，木炭63貫～90貫を使用。歩留は約95%。炭素濃度は原料銑鉄で3%以上，左下鉄（左下場における生成物）で0.7%以下。

本場・・・左下場とまったく同じ火床を使用。一回の操業で左下鉄7貫～20貫を処理する（鉧を混ぜることもある）。左下鉄1トンに対し，木炭135貫～180貫を使用。左下鉄に対する歩留は65～70%。1回の作業工程に約1時間。1日に包丁鉄50貫～100貫を得る。本場の生成物の炭素濃度については記載がないが，その後折り返し鍛錬を行って，炭素0.2%以下となる。

俵（1933）：

下げ場・・6～15cm大の銑鉄塊を複数組み合わせ，一回の操業で総量0.319トンを処理する。

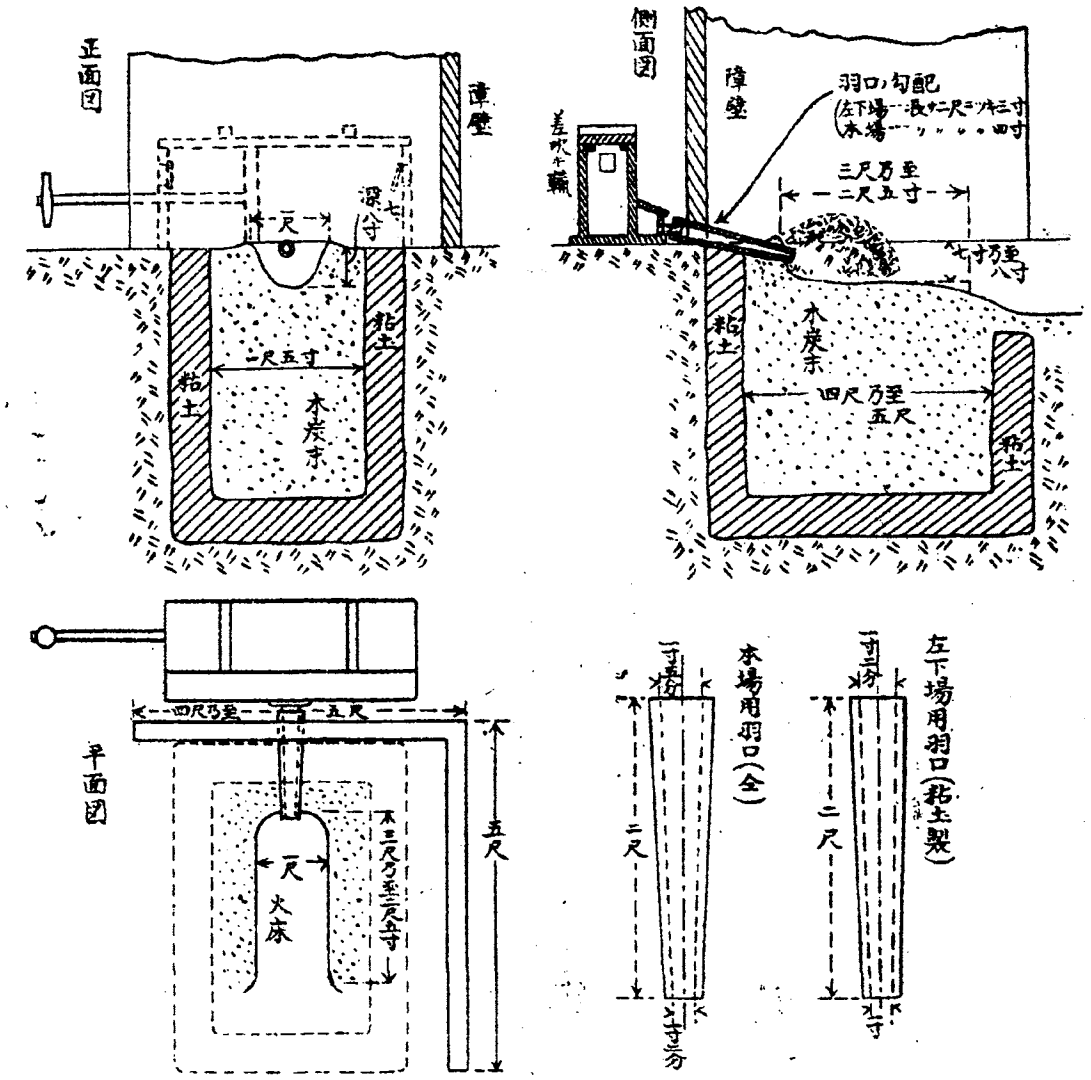
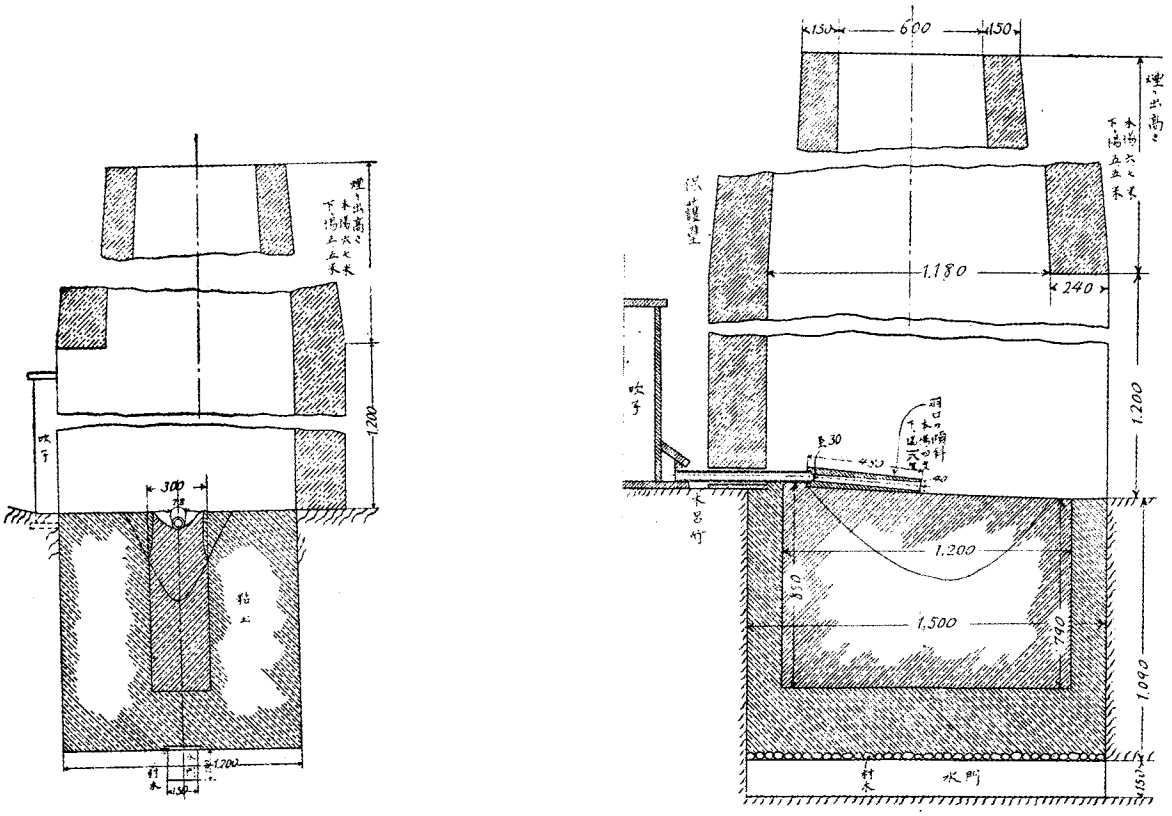


図1　鳥取で調査された大鍛冶炉の概略図（山田，1918）
Fig. 1　A sketch of *ookaji* furnace in *Tottori* (Yamada, 1918)



正面図　　側面図

図2　鳥取で調査された大鍛冶炉の概略図（俵，1933）
Fig. 2　Another sketch of *ookaji* furnace in *Tottori* (Tawara, 1933)

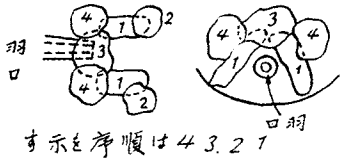


図3　大鍛冶における羽口前の原料銑鉄塊の組み合わせ方（俵，1933）
Fig. 3　An assortment way of raw marerial, pig iron, in front of tuyere (Tawara, 1933)

始めは風孔を1/3に絞って送風を弱くし，1時間ほど経ったら風孔を全開にして温度を高める。さらに20～30分経過したところから，数分おきに少しずつ生成物（下げ鉄）を引き出す。操業終了まで約2時間。生成物は滓を含むため原料とほぼ同じ0.3トン。木炭は0.45トンを使用（生成物1トンに対し木炭1.5トン）。生成物は炭素量が不均一で，部分的に1.5%のところもあるが，大部分はほとんど炭素を含まない純鉄である。

本場・・・下げ鉄を10個にわけ，それぞれ約30kgを一回の処理量とする（鉧を，多い時は1割程度加えることもある）。一日にこれを10回繰り返す。送風は，はじめ風孔を半開にし，約20分経って7割ほどが反応して火窪にたまったころに風を強くする。生成物は，炭素濃度1.0%に達する部分もわずかにあるが，ほぼ均一で炭素はほとんど含んでいない。生成物は加熱してたたきながら4片にわけ，さらに加熱・鍛打を行って帯状に成形していく（一例として，長さ600mm×幅110mm×厚さ10mm）。これを庖丁鉄という。俵（1933）による調査の際に生成した庖丁鉄の炭素濃度は0.12%，庖丁鉄ができるまでの操業時間は本場開始から1時間40分，鉄塊を鍛打し始めてから1

時間9分であった。

なお，俵（1933）にはこの他に，奥州の方法として岩手県での操業の状況も記されており，水で炉内を湿らせた「水炎土」を使用する方法が紹介されているが，これについては「昔時は（中略）空炎土を使用」していたものとされ，「著しく近代製鐵技術の影響を受け改良せられたる觀あり」とのことであるので，ここではその方法は採らなかった。

3．本研究における大鍛冶の操業工程

3.1　大鍛冶炉の炉底部の構築

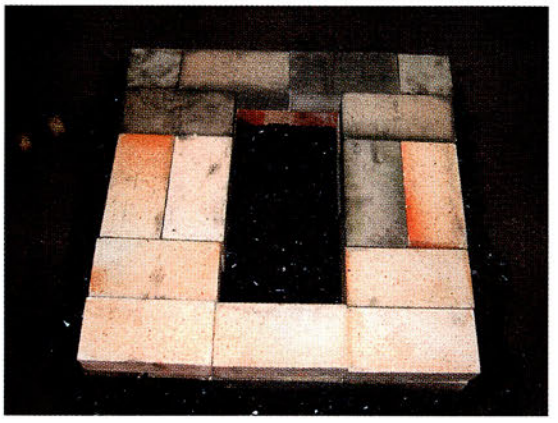
われわれの操業は宮城県在住の刀匠・法華三郎信房氏と法華三郎栄喜氏のご協力により，両氏の工房内に炉を構築して行った。

図1をみるとわかる通り，山田（1918）の記録している大鍛冶炉は開放型であり，おそらく熱よけと考えられる障壁が少し離れたところに設置されているだけである。図2の俵（1933）の方法では周囲の2方に壁があり2方が口を開けており，炉の上に長大な煙突が取り付けられている。この煙突はおそらく上昇気流を利用した自然通風を意図したものであろうと考えられるが，再現実験においてこれと同スケールの煙突（高さ：下げ場5.5m，本場6.7m）を作ることは困難であり，またこれに相当する効果を上げられる他の方法をとることも，どの程度の通風が得られていたかを見積もることが難しいため，容易なことではない。今回は山田（1918）の記録をモデルにした「開放炉」と，煙突を取り付けたことによる効果を通風以外のものを含めて予備的に検証するため，開口部の上方に高さ67cmの煙突を取り付けた「煙突炉」の，2種類の炉で操業を試み，下げ場を想定した1回のみの作業で銑鉄中の炭素がどの程度まで脱炭されるかを調べることにした。いずれも実験規模の操業であるため，炉の大きさ，使用した原料や木炭の量などは記録にあるものよりもスケールダウンしてある。また炉の構築に使用した材料やその組立については，反応に直接かかわらない部分を簡略化した。

炉の構築は下記の手順で行った。はじめに2つの炉に共通な構造の部分から述べる。

まず，作業場内の地表に川砂を2～3cmの厚さで敷き，水平面を作る。文献では炉の下には地下構造があり，深さ1m以上におよぶ四角い穴の内側に粘土を張った中に木炭が詰めてある（図1，2）が，これはたたらなどの製錬炉に見られるのと同様の作りであり，地中からの水分を遮断するためと解すことができる。ここでは厚さ3.3mm，90cm角の鉄板を砂の上に置くことによってこれと同様の効果が得られるようにした。この上に，鉄板へ熱が逃げるのを防ぐため，断熱材として細かく割った木炭を約3cmの厚さで敷いた。両炉の炉底は耐火レンガ（長さ23.0cm×幅11.5cm×高さ6.5cm）で組み立て，隙間は耐火モルタルで埋めた。炉底部はタテ70cm×ヨコ70cmにレンガ2段を積んで作り，中央部にはレンガを置かずに「火窪［火床］」となるタテ46cm×ヨコ23cmの長方形の凹みをあけた（写真1a）。火窪に耐火モルタルを敷いて底部の大まかな形状を定め，この火窪内に向けて，水平からやや下向きの傾斜をつけて羽口（送風管）を設置した（写真1b）。水平からの角度は，山田（1918）では下げ場で9度，本場で12度とあり，また俵（1933）では下げ場で18度，本場で4度と，かなり相違が見られる。炉内で均一に効率良く加熱が行われるための条件は，羽口の角度の他に火窪内の微妙な形状の違いにも左右される（いわゆる「風の周り具合」）ため，実際の操業時にはこの数値の間で角度を少しずつ変えながら送風状況を調べ，最もうまく加熱が行われる角度をとることとした。羽口は内径5cm，長さ1mのステンレスのパイプであるが，送風量調整のため，鍛冶遺跡から出土する羽口の平均的な内径に準じ，炉内に入る先端部から約6cm長の部分は内側に耐火モルタルを塗って内径3.5cmとなるように成形し，また熱による損傷を防ぐため先端約20cmまで外周に耐火モルタルをかぶせた。

火窪にはさらに，底面の形状や傾斜を整えながら木灰を1～3.5cm程度の厚さにしきつめた。なお，反応直後の生成物がじかに接することになるこの箇所の素材は，山田（1918）によると下げ場・本場とも「木炭末」が，俵（1933）によると下げ場では「素灰」，本場では「粘土に木の小枝を混ぜ」たものが使用されているが，いずれも操業時の加熱によって，少なくとも表面は灰もしく



a.

b.

写真1　炉底の構築
a. 炉底部　b. 羽口の取り付けと火窪の成形
Photo. 1　Forming of *Ookaji* furnace bottom
a. Furnace bottom　b. Fixing of tuyere and forming of hearth part

は灰の混ざったケイ酸塩になると考えられ，またこの部位は脱炭反応そのものには関与せず，生成物が炉底や周辺部に付着せず容易に回収できるようにすることが主目的と判断されるので，本研究では木灰を使用することにした。

開放炉，煙突炉ともに，炉を構築後，火窪に木炭を積んで点火し送風しながら1時間程度加熱して，乾燥を行った。

3.2　開放炉による操業

開放炉では，上述の様にして構築した炉底部のみを使って操業を行った。羽口は約14度の角度になるように設置した。

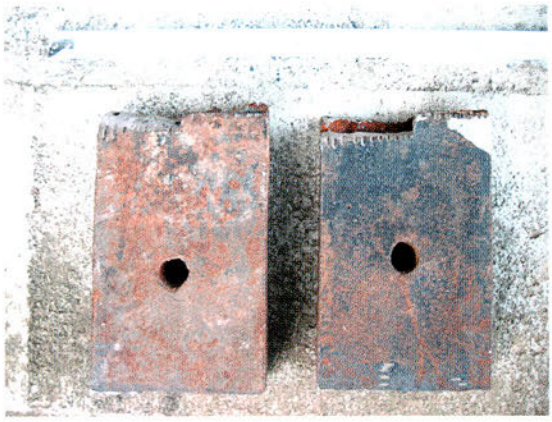
原料となる銑鉄は，江戸時代の建築物の門に使用されていた肘金（ヒンジ，写真2a）である。これを適当な大きさに切断し，2片の上部が寄り掛かりあうようにして羽口の前面に置き，風がその下を通り抜けるようにした。使用した原料を写真2bに示した。タテ14.5cm×ヨコ9.0cm×厚さ2.7～3.6mmで重量2.58kgのものとタテ14.5cm×ヨコ8.8cm×厚さ2.3～3.4cmで重量2.35kgのものの2片の原料をアーチ状に組み合わせた。写真2c，2dは原料の設置状況である。硬めの松炭7.5kgを用意し，はじめに3.5kgを原料の上に積んで点火・送風して操業を行い，炭が燃えて少なくなったところで残りを少しずつ足していった。送風は，100V電源で定格送風量毎分2.3m^{3}のハンドブロアを使い，変圧器で送風効率10%とし，さらに弁で風孔を半分程度に絞った。従って送風量はごく大ざっぱに見積もって毎分0.1m^{3}前後ではないかと考えられる。操業中に炉内状況に応じて多少の微調整を加えたが，送風量は操業の始めから終わりまでほぼ一定のままである。操業の様子を写真2eに示す。操業の経過は以下の通りである。

時刻	経過時間	状況
14時05分	00分	あらかじめ点火しておいた炭に送風開始
14時25分	20分	鉄酸化物粉末が炎に混ざる。 銑鉄の燃焼する火花が見える。
14時55分	50分	木炭がほとんど消費され，羽口の先が見える。 原料の原形は失われ，木炭越しには見えない。
15時05分	60分	送風停止，操業終了。生成物取り出し。

計器による炉内温度の測定はしていない。ただし，法華氏は経験的に，肉眼観察によって炎の色から炉内のおおよその温度を見積もることができ，1300℃程度と推定された。

写真2fは操業中の炉内状況の写真である。中央に羽口の先端が，その左右にアーチ状に組んだ原料が見える。原料の内壁面に木炭は接触しておらず，赤熱の状況からみて，おそらくアーチの下部にわきから入り込んだ木炭に風があたって高温になり，その輻射熱によって原料の内壁面が加熱されているのではないかと考えられる。また銑鉄中の炭素の燃焼熱も温度上昇に寄与しているであ

a.



b.

c.

d.

e.

f.

写真２　開放炉の操業

a. 銑鉄の肘金　b. 大鍛冶の原料（肘金を切断したもの）　c. 原料の設置状況（上から）

d. 原料の設置状況（前から）　e. 操業の様子　f. 操業中の大鍛冶炉内

Photo. 2　Operation of open-type furnace

a. Hinge, made from pig iron　b. Raw material for *Ookaji*, piece of the hinge

c. Fixing of raw material on hearth part (overhead view)　d. Fixing of raw material on hearth part (from an anterior view)

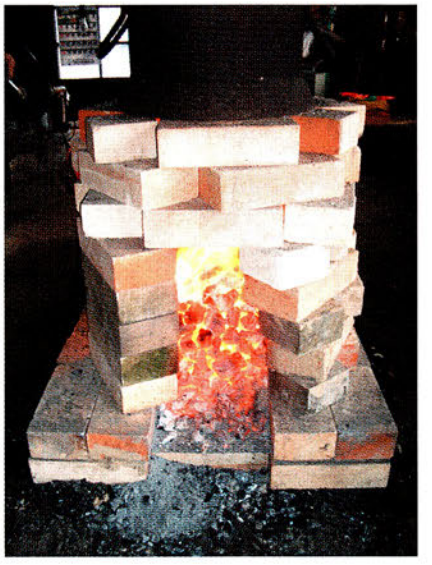
e. Appearance of operation　f. Inside of furnace during operation

a.

b.

c.

d.



e.

写真3　煙突炉の操業

a. 構築途中の炉　b. 炉外観（正面）　c. 炉外観（側面）　d. 原料の設置状況（前から）　e. 操業の様子

Photo. 3　Operation of chimney-type furnace

a. Chimney-type furnace in the middle of forming　b. Appearance of the furnace (front)

c. Appearance of the furnace (side)　d. Fixing of raw material on hearth part (from an anterior view)

e. Appearance of operation

ろう。

3.3 煙突炉による操業

煙突炉では，「3.1.」のようにして作った炉底の上に耐火レンガ8段を積み重ね，下部で内径45cm，最上部で内径30cmとなる半円状の壁面（写真3a）と，これの対角に煙突をのせる支えとするための柱状のレンガ詰みを構築した。レンガの壁面の高さは炉底の2段積みのレンガの上面から53cmであり，その上に高さ67cm，内径33cmの鉄製の筒を載せて煙突とした。レンガ壁の前面（写真3b）と，向かって左の側面（写真3c）に開口部を備えている。送風管は約10度の角度になるように設置した。

原料やその設置の方法は，開放炉と同様である（写真3d）。使用した原料は，タテ14.6cm×ヨコ8.9cm×厚さ2.8～3.2cmで重量2.36kgのものとタテ14.8cm×ヨコ8.8cm×厚さ2.7～3.1cmで重量2.17kgのものの2片である。松炭は7.0kgを用意し，はじめに3.5kgを原料の上に積んで点火・送風して操業を行い，炭が燃えて少なくなったところで残りを少しずつ足していった。送風方法も開放炉とほぼ同様だが，ブロアの不具合によって風量が開放炉よりも少なくなり，炉内温度も明らかに低くなってしまった。操業の経過は以下の通りである。操業状況を写真3eに示した。

時刻	経過時間	状況
10時20分	00分	送風開始。
10時47分	27分	鉄酸化物粉末が炎に混ざる。 銑鉄の燃焼する火花が見える。
11時20分	60分	木炭がほとんど消費され，羽口の先が見える。 原料の原形は失われ，木炭越しには見えない。
11時27分	67分	送風停止，操業終了。生成物取り出し。

開放炉と比較して，木炭量が若干少ないにもかかわらず，それを消費するのにより長い時間がかかっていることからも，風量が開放炉に比べて少なかったことがわかる。炉内温度は法華氏の観察により1200℃かそれ以下と推定された。送風条件の相違が大きかったため，本来の調査目的である煙突の効果や役割については，はっきりしたことがわからなかった（開口部からの空気の吸い込みが確認された程度である）。しかし，温度の違いによる反応の差異についての概略を調べることは可能であるので，今回はそこに焦点をあてて解析を進めることにした。

3.4 折り返し鍛錬

開放炉，煙突炉とも，大鍛冶によって得られた脱炭生成物の一部は金属組織分析用に切断し，残部に対しては炭素濃度の均一化と，滓や酸化物など異物の排除を目的として折り返し鍛錬を施した。開放炉生成物のうち2.20kg，煙突炉生成物のうち2.23kgを使用した。刀匠が通常実施しているのと同様の方法で，まず脱炭生成物を加熱し，軽く鍛打して鉄をまとめる。これを赤熱して四角く成形し，わら灰をまぶしたのち（写真4a）粘土汁で表面を覆って（写真4b）また赤熱させ（写真4c），鍛打して厚さが半分くらいになるまでたたき延ばす（写真4d）。中央で2つに切断し，これを重ね（写真4e），わら灰・粘土汁で覆って赤熱・鍛打を繰り返す。ここでは5回の折り返し鍛錬を行って生成物とした（写真4f）。操業時間は各30分程度であった。

4．生成物の状況

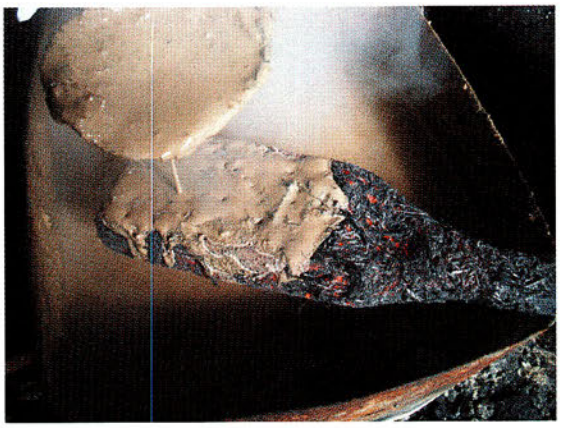
いずれの炉においても，生成物は大きく2種類にわかれていた。この判断は，目視および火花試験（操業現場で生成物の炭素濃度を正確に知ることはもちろんできないが，グラインダーをあてて発生する火花の状態からごく大まかに濃度を推定できる）によってなされたものである。

1つは火窪の傾斜の比較的下の方に位置しており，銑鉄が高温で熔融し，原料のもとあった場所と比べて明らかに下部に向かって流れていったような形状のもの（以下「流銑（りゅうせん）」とよぶ）である。もう1つは原料のあった場所のほとんど真下あたり（従って流銑よりも火窪の傾斜に沿って上の方）に位置しており，スラグ（滓）をかみ込み，多くの気孔がみられる鉄の塊である。後者が脱炭反応の生成物（以下「脱炭生成物」）と考えられる。

4.1 開放炉

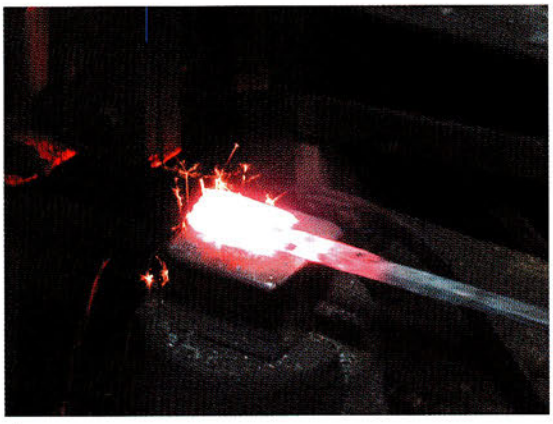
生成物の炉内状況を写真5aに示した（鉄棒で指し示しているのが脱炭生成物，その手前が流銑）。流銑の重量は1710g，脱炭生成物の重量は2710gであった。写真5bで上部の塊が脱炭生成物（タテ12cm×ヨコ23cm×

a.



b.

c.



d.

e.

f.

写真4　折り返し鍛練

a. わら灰をまぶす　b. 灰汁をかける　c. 炉内で加熱する　d. 叩いて成形する　e. 細長く延ばし2つに折り返す　f. 生成物

Photo. 4　*Orikaeshi-tanren* (forging)

a. Dredging straw ashes　b. Sousing ash turbid water　c. Heating in smith-furnace

d. Forming by hammering　e. Lengthening and folding　f. Product

厚さ3～6cm程度)，下部の流動状のものが流銑である。かなりの量の流銑が生成してしまった点については，原料のアーチ内側がはじめから高温にさらされたため，その表面で一度に多量の融解がおこり，滴下する途中で酸化反応がほとんどおこらず炭素濃度の高い銑鉄のままで下にたまってしまったためと考えられる。

操業終了後の炉内を調べたところ原料の脚部が残存していたが，厚さ1mmほどの外皮一層分だけが熔解せずに原形をとどめており，その内部は熔解して失われた状態であった（写真5c)。これについては後述する。

4.2　煙突炉

生成物を炉外に引き出した状況を写真6aに示した(炉の手前にあるもののうち，炉に近い方が脱炭生成物，手前が流銑)。流銑の重量は310g，脱炭生成物の重量は

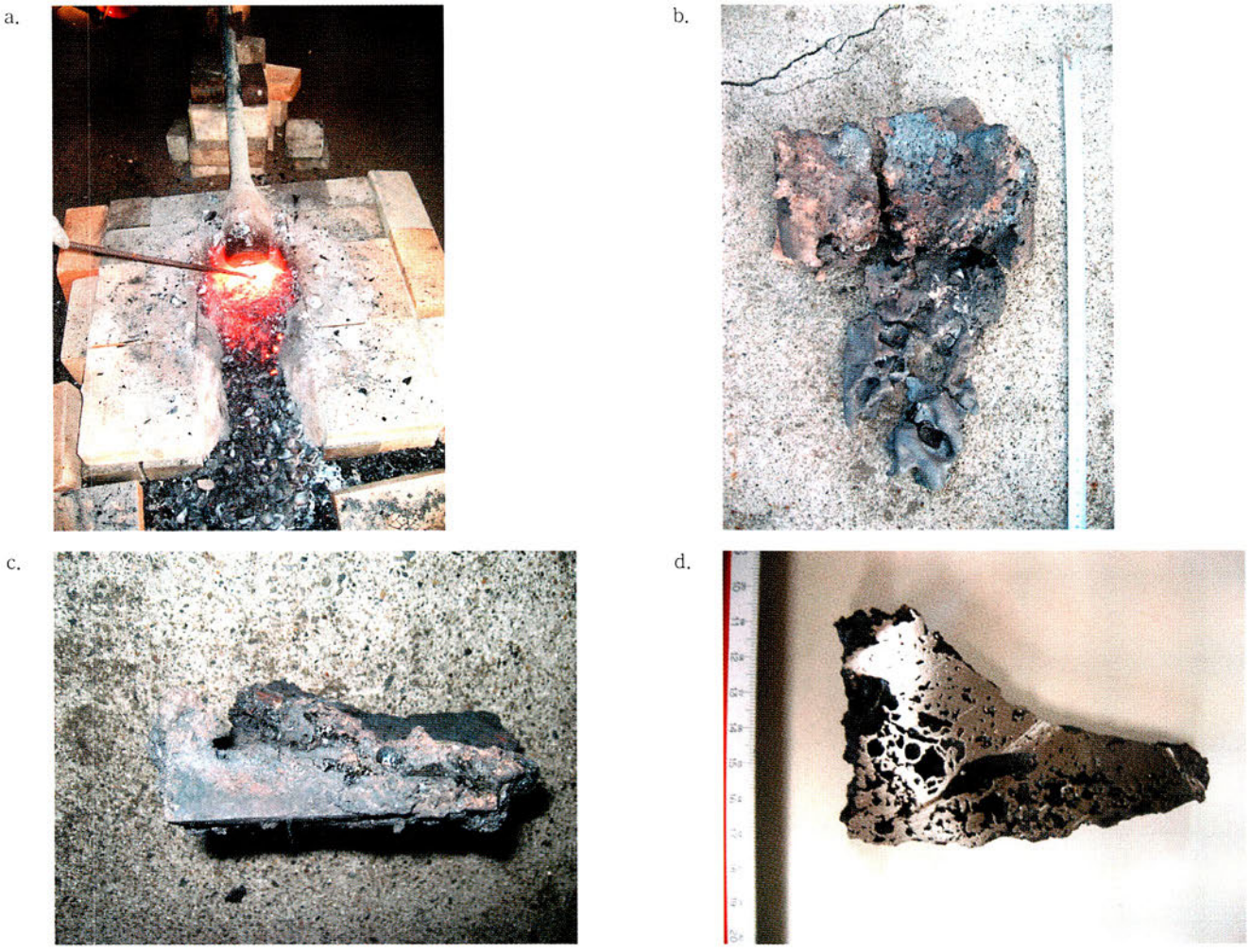


写真５　開放炉の生成物
a. 火窪内の生成物の状況　b. 取り出された生成物（上が脱炭生成物，下が流銑）
c. 表面層のみが残存していた原料脚部　d. 脱炭生成物の断面（図５に対応）

Photo. 5　Product of open-type furnace
a. Product on hearth part　b. Product (upper: decarbonized iron product, lower: melted pig iron)
c. Bottom of raw material, only the surface layer remained
d. Cross section of decarbonized iron product, corresponding to Fig. 5

4730g であった。写真６ｂで上部の塊が脱炭生成物（タテ９～19cm×ヨコ 15cm×３～10cm 程度），下部にある小さな流動状のものが流銑である。開放炉と異なり，脱炭生成物の下部に，わずかに銑鉄の層が含まれているのが火花試験から予測された。原料の脚部の一部が残存しており，開放炉と同様に外皮一層分が原形をとどめる状態が観察された。流銑の生成量が開放炉よりも少ないのは，炉内温度が低いため，操業初期に銑鉄がそのまま融解・滴下する現象が開放炉ほどは起こらなかったためと考えられる。

4.3　折り返し鍛錬

開放炉生成物から 1040kg，煙突炉生成物から 990g の，折り返し鍛錬生成物ができた。

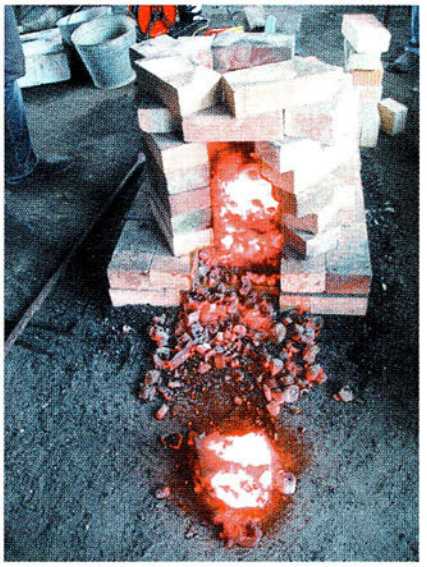
肉眼では，大鍛冶生成物に顕著にみられたスラグや孔はなくなっているように見える。

5．金属組織に基づく各部の炭素濃度測定

5.1　分析方法

生成物を切断してエポキシ樹脂（Strues EPOFIX）に埋め込み，断面をダイヤモンドペーストで鏡面研摩した。これを１％ナイタールでエッチングし炭素蒸着を施したのち，電子線マイクロアナライザー（EPMA，日本電子 JXA-8200）を用い二次電子像による金属組織の観察を行って，各部位の炭素濃度を求めた。また大鍛冶の脱炭生成物中に含まれるスラグの鉱物組織を反射電子像で観察した。

a.



b.

c.

写真6　煙突炉の生成物

a. 操業終了直後に炉の前に引き出した生成物　b. 取り出された生成物（上が脱炭生成物，下が流銑）

c. 脱炭生成物の断面（図8に対応）

Photo. 6　Product of chimney-type furnace

a. Product got out of furnace, immediately after the finish of operation

b. Product (upper: decarbonized iron product, lower: melted pig iron)

c. Cross section of decarbonized iron product, corresponding to Fig. 8

原料と折り返し鍛錬の生成物については，一部を採取し，燃焼赤外線吸収測定装置（堀場 EMIA520）によって炭素濃度の測定を行い，金属組織から求められた結果と比較を行った。大鍛冶の脱炭生成物はきわめて不均一であり，金属組織と対比できるようにして試料をサンプリングすることが困難であるので，燃焼赤外線吸収法による測定は行わなかった。

5.2　原料

原料の肘金を5cm角ほど切り取って金属組織観察に供した。図4にその結果を示した。図の左にみられるような片状黒鉛がわずかに存在するが，おおむね均一な白銑組織を示しており炭素濃度3～3.5%程度と判断できる。燃焼赤外線吸収法による炭素濃度測定は5ヶ所から

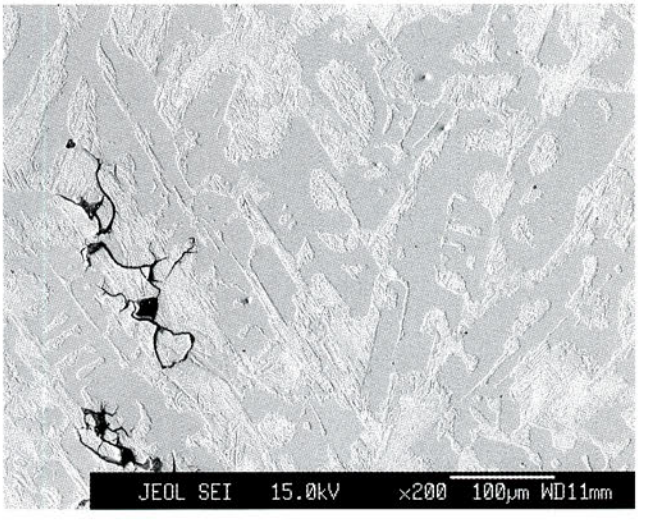


図4　本研究で用いた原料銑鉄（肘金）の金属組織（C：3%程度）

Fig. 4　Metallurgical structure of raw material, hinge bracket, in this study.
Pig iron (C: approx. 3%)

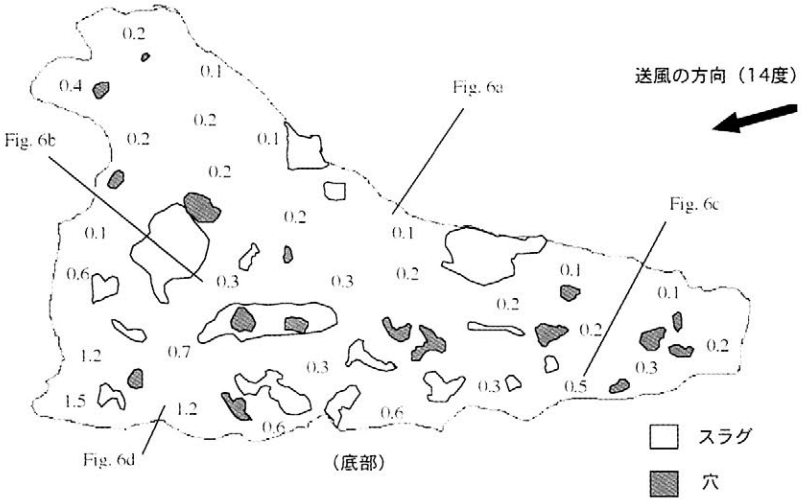


図5　開放炉における脱炭生成物の断面図
（＊数字はその箇所の炭素濃度（%），"Fig" は金属組織観察部位を示す）

Fig. 5　Cross section of *ookaji* product in open-type furnace
(*The numbers show the carbon content and "Fig" symbols show the area at which metallurgical structure is observed.)

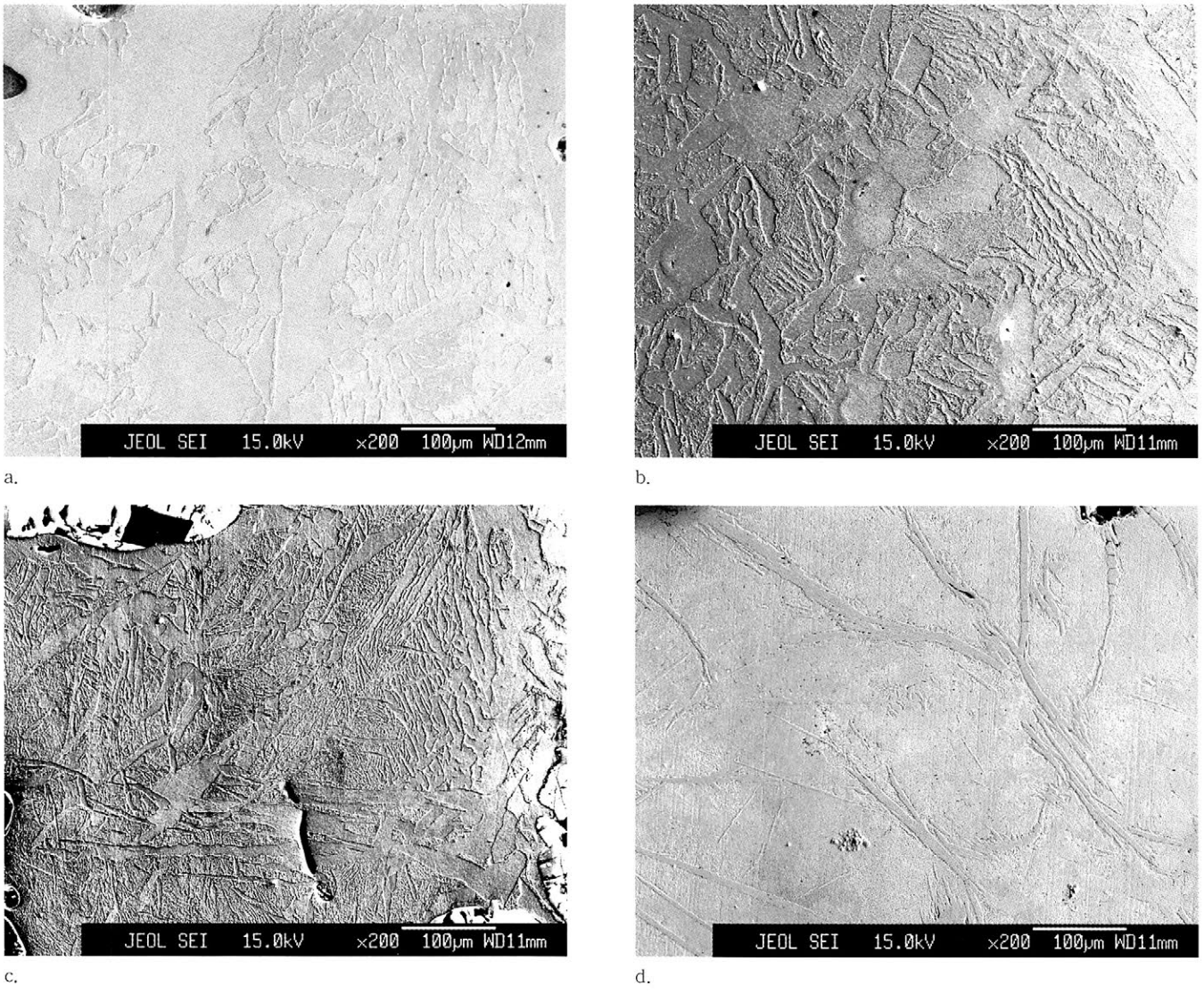


図6　開放炉における脱炭生成物の金属組織
a. C：0.1%　b. C：0.3%　c. C：0.5%　d. C：1.2%

Fig. 6　Metallurgical structure of *ookaji* product in open-type furnace
a. C: 0.1%　b. C: 0.3%　c. C: 0.5%　d. C: 1.2%

試料を採取して実施したが，それぞれ3.34%，2.98%，2.94%，3.38%，2.98%の結果が得られ，金属組織から求めた結果とほぼ同じであった。

5.3 開放炉の脱炭生成物

開放炉の脱炭生成物を縦軸方向（羽口の長軸方向）にスライスし，断面（写真5d，図5）の金属組織を調べた。スラグが各所に見られるほか，この図には示しきれないような多くの小さな孔が観察される。図6は，図5に矢印で示した記号の位置の金属組織を例として掲げたものであり，図5中の数値はそれぞれの部位の炭素濃度である。

これをみると，脱炭生成物は，下部に炭素濃度1.2～1.5%とやや高めのところもあるが，全体としては，原料の肘金と比較して炭素濃度がきわめて低くなっている。下部から上にいくに従って炭素濃度の低くなるような勾配がみられ，羽口からの風があたる箇所では炭素濃度0.1%にまで下がっている。

スラグの鉱物組織観察結果を図7に示した。樹状の鉄カンラン石と繭状のウスタイトが観察されるが，これは鍛冶遺跡から出土するスラグ（鍛冶滓）の基本的な鉱物組成（国立歴史民俗博物館 1994）と同じである。

5.4 煙突炉の脱炭生成物

開放炉の生成物と同様，煙突炉の脱炭生成物を縦軸方向にスライスし，断面（写真6c，図8）の金属組織を調べた。大きなスラグ塊がかみこまれており，小さな孔が数多く分布している。図9は，図8に矢印で示した記号の位置の金属組織を例として掲げたものであり，図8中の数値はそれぞれの部位の炭素濃度である。

生成物の下部には，原料に比べ若干炭素濃度が低くなっているものの，銑鉄に分類される高炭素濃度の鉄がわずかに存在しており，そこから羽口の風があたっていた低炭素濃度（0.1%以下）の上部まで，濃度勾配がみられる。全体としてみると開放炉よりも少し炭素濃度が高めであるが，原料の肘金と比較すると相当量の脱炭がおきていることがわかる。

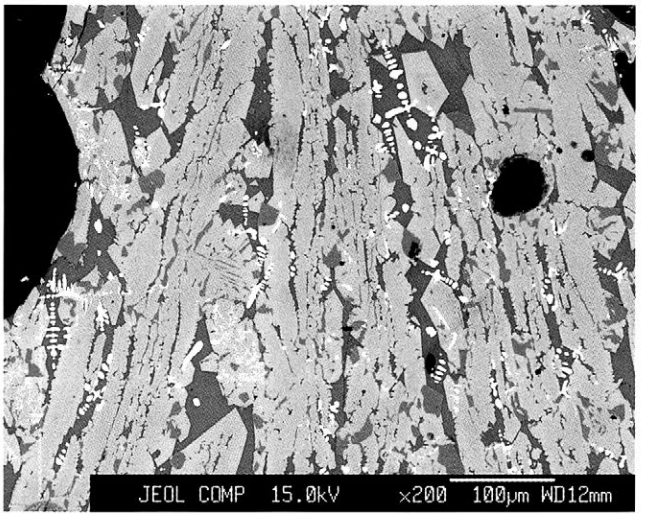


図7 開放炉における脱炭生成物内のスラグの鉱物組成（反射電子像）

Fig. 7 Back scattered electron image of slag in *ookaji* product in open-type furnace

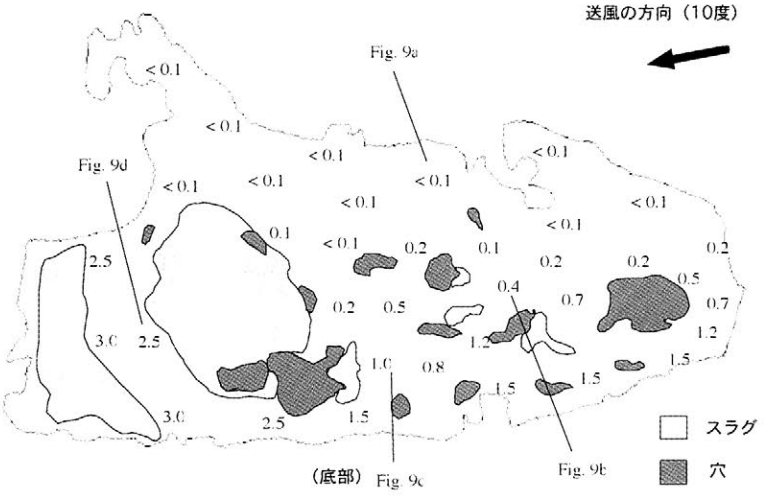
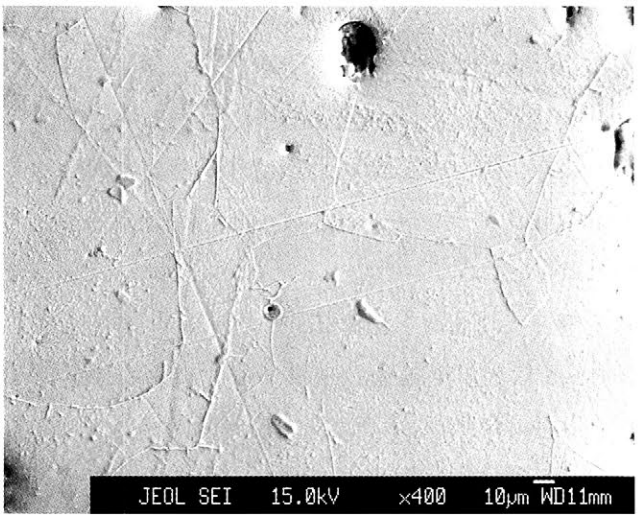
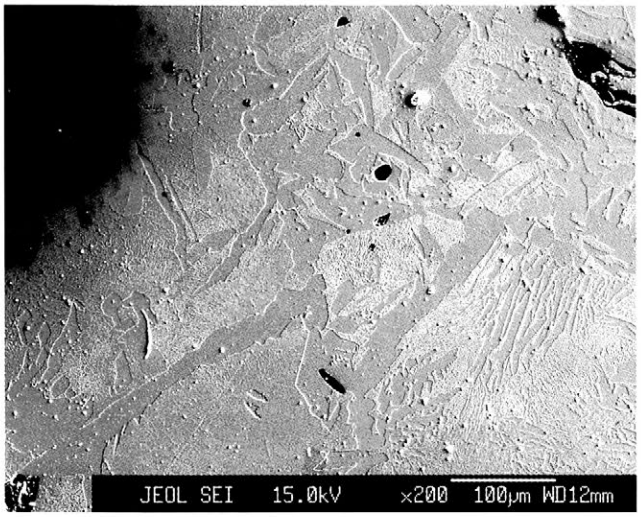


図8 煙突炉における脱炭生成物の断面図
（＊数字はその箇所の炭素濃度（%），“Fig”は金属組織観察部位を示す）

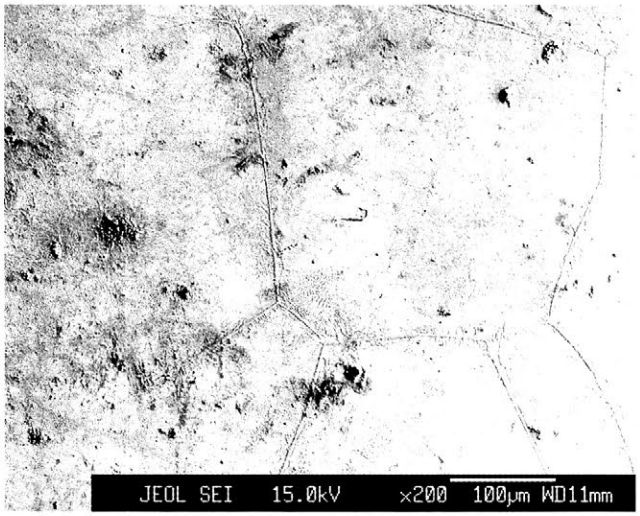
Fig. 8 Cross section of *ookaji* product in chimney-type furnace
(*The numbers show the carbon content and “Fig” symbols show the area at which metallurgical structure is observed.)



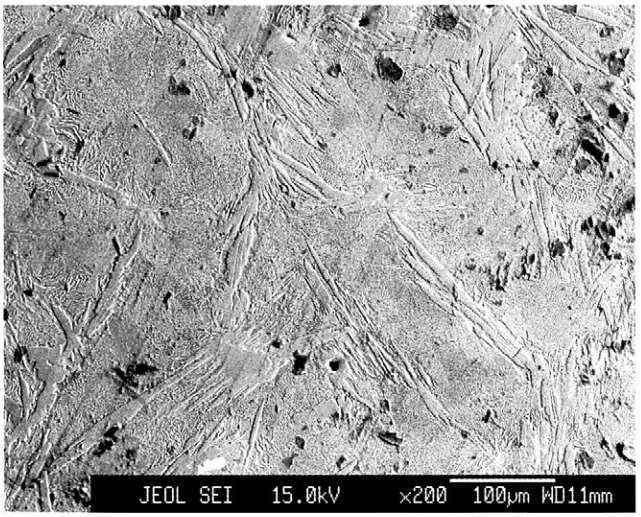
a.



b.



c.



d.

図 9　煙突炉における脱炭生成物の金属組織
a. C：<0.1%　b. C：0.4%　c. C：1.0%　d. C：2.5%

Fig. 9　Metallurgical structure of *ookaji* product in chimney-type furnace
a. C: <0.1%　b. C: 0.4%　c. C: 1.0%　d. C: 2.5%

スラグの鉱物組織観察結果を図 10 に示した。開放炉と同様に，鍛冶遺跡から出土する滓に一般的にみられる樹状の鉄カンラン石と繭状ウスタイトが観察された。なお 2 つの炉で鉱物の存在比率が異なっているのは，分析部位の局所的な酸化還元雰囲気の差異を反映しているものと思われる。脱炭生成物にみられるように炉内は不均一であるので，これがそのまま各操業における平均的な雰囲気をあらわしているとはいえない。

5.5　折り返し鍛錬生成物

一部をスライスし，断面の金属組織を調べた。いずれも，均一性の高い生成物が得られていた。脱炭生成物の段階で大量に含まれていたスラグはほとんどなくなり，また観察を行った範囲内に孔は存在しなかった。

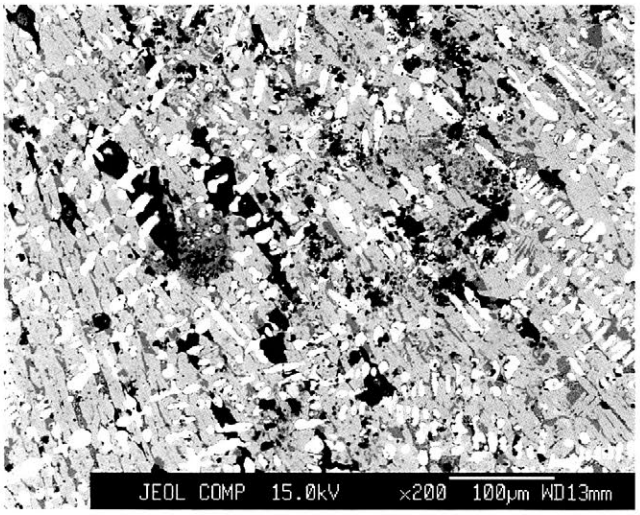


図 10　煙突炉における脱炭生成物内のスラグの鉱物組成（反射電子像）

Fig. 10　Back scattered electron image of slag in *ookaji* product in chimney-type furnace

開放炉の脱炭生成物に対する折り返し鍛錬の生成物の金属組織を図11に示した。右側のようにほとんど炭素を含まない部分もところどころ見られるが，かなりの部分で左側のような組織を呈しており炭素濃度は0.1%と判断される。燃焼赤外線吸収法による測定結果でも炭素濃度0.108%とほぼ同様の結果が得られた。

煙突炉の脱炭生成物に対する折り返し鍛錬生成物の金属組織を図12に示した。炭素濃度は開放炉のそれよりも若干高く，0.2%と判断される。燃焼赤外線吸収法の測定結果でも炭素濃度0.199%であった。

これらの結果を「5.3.」,「5.4.」と比較すると，折り返し鍛錬を行う前の全体としての炭素濃度の差異が生成物の段階まで反映されてはいるが，折り返し鍛錬の工程でも若干の脱炭が進行していることがわかる。

6．考察

比較的簡易な構造の炉を使用し，約1時間という短時間の大鍛冶による操業とそれに続く約30分間の折り返し鍛錬によって炭素濃度およそ3%の銑鉄を脱炭して，炭素濃度0.1～0.2%という軟鉄に近い低炭素鋼にすることができた。

ただし，より実態に近い再現実験にむけて，今後の課題はまだ数多く残されている。特に大きな問題としては以下の点がある。

開放炉において，脱炭生成物の重量が2710gであったのに対し，ほとんど未反応の流銑が1710gもできてしまった。これは生成物全体の40%近くにあたり，きわめて歩留まりの悪い非効率的な操業と言わざるを得ない。一方煙突炉では，流銑の重量はわずかに310gで脱炭生成物の重量が4730gであり，開放炉に比べると，かなり歩留まりが良いようである。脱炭生成物の下部にあまり脱炭の進行していない高炭素の鉄が存在しているが，その量は脱炭生成物の高々1/15程度であり，この分を除いても，歩留まりの点では開放炉よりは高いようにみえる。

しかし，脱炭生成物の炭素濃度分布を調べてみると，開放炉では最も炭素濃度の高い箇所でも1.5%で，半分以上の部分で0.5%以下であった。俵（1933）の記録している中国地方の「下げ鉄」でも「多きは一・五%に達する局部ある」とのことであるので，開放炉の生成物では脱炭の進行がかなり良好に行われたと考えてよいであろう。これに対し，煙突炉では，羽口からの風があたっている箇所の表層部付近では炭素濃度<0.1%～0.2%と低くなっているものの，全体としてみると，開放炉の生成物より炭素濃度が高めになってしまっており，脱炭反応自体はあまり十分に進んでいるとは言い難い。

前述したように，今回操業した開放炉と煙突炉では炉の構造による差異を明確にすることができず，生成物に

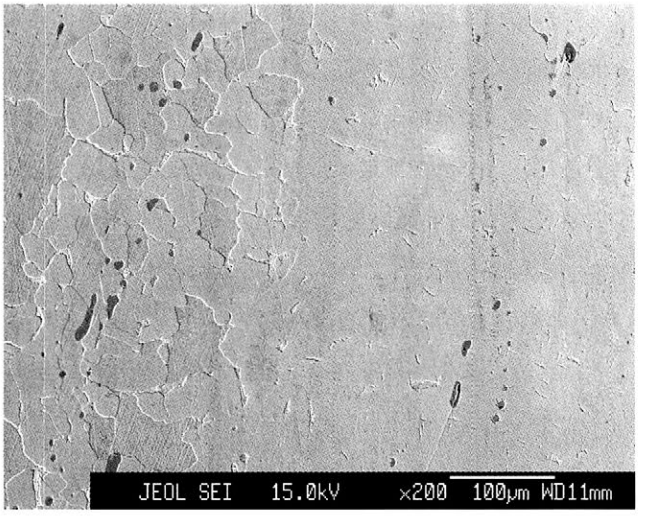


図11　開放炉の脱炭生成物を折り返し鍛錬した生成物の金属組織
Fig. 11　Metallurgical structure of *orikaeshi-tanren* forged product made from decarbonized material in open-type furnace

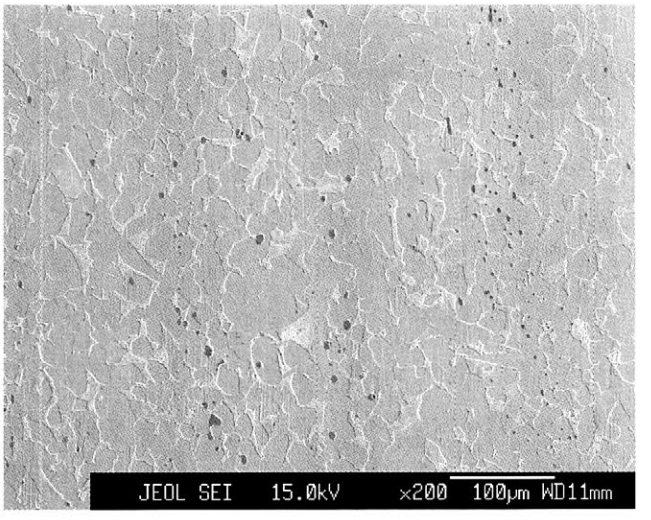


図12　煙突炉の脱炭生成物を折り返し鍛錬した生成物の金属組織
Fig. 12　Metallurgical structure of *orikaeshi-tanren* forged product made from decarbonized material in chimney-type furnace

影響を与えた最大の要因は温度の違いであると考えられる。そこで，温度の観点から，これらの結果についてまとめ直してみる。

上述のように開放炉では大量の流銑が底にたまっていたのに対し，煙突炉はそれが比較的少なかった。大鍛冶においては，原料の銑鉄が熔融して下に落ちていく途中，高温下で風にあたり，そこで酸化を受けて脱炭反応がおきるものと理解される。しかし流銑は，反応の初期に原料のアーチ内側が高温になって融点を超え，表面で一度に大量の熔解がおき，体積が大きかったために酸化作用が十分に液体の内部にまで及ばないうちに下に落ち，炉底にたまったものであると考えられる。開放炉で流銑の量が多かったのは，高温下の操業によって，この初期の加熱が急速におこったためであり，煙突炉の方は，温度が比較的低かったために，それほど速やかに進行しなかったのであろう。この点，いずれにしても流銑は多かれ少なかれ発生してしまってはいるが，いくらかでも流銑の生成を押さえ歩留まりを良くするためには低温で操業した方が有利といえる。

ただし，脱炭反応についてみると，開放炉ではかなり内部まで脱炭が進んでいたのに対し，煙突炉の方は，風のあたっている表層付近では炭素濃度が低くなっているものの，全体として開放炉よりも炭素濃度が高めになっている。送風が強く，温度が高ければより多くの酸化がおこると考えられるので，これは当然の結果といえる。すなわち脱炭反応の進行という観点からみると，実験の結果からもまた理論的に考えても，高温の方が有利である。

この「歩留まり」と「脱炭の進行」という相反する操業条件の問題は，以下のように考えれば解決できるのではないかと思われる。

まず，実際に行われていた大鍛冶の操業についての記録をみると，山田（1918）の記述に「銑鉄はアーチ形の内面より漸次熔融し氷柱状をなして滴下す」とある。また実際に大鍛冶の操業現場を観察した人たちの話を各所で伝聞したところでは，いずれにも共通しているのは「合掌（アーチ形）に組んだ銑鉄から，熔けた鉄がポタポタとしたたり落ちているのがみえた」という点である。はじめから高温下に銑鉄がさらされれば，開放炉で顕著にみられたように，一度に大量の銑鉄の熔解がおこり，「滴下」や「ポタポタとしたたり落ち」るような状態にはならないはずであり，このようにコントロールされた状態を作り出すための工夫が必要ということになる。

ここで，低温で操業された煙突炉で流銑が少なかったという実験結果と，「4.1.」，「4.2.」で報告した，操業後に残っていた原料銑鉄の脚部の状態が問題解決のヒントになると考える。この残存していた脚部は，厚さ1mmほどの外皮一層分だけが熔解せずに原形をとどめており，その内部は熔解して失われた状態であった。外皮の部分は金属組織観察の結果，炭素濃度がきわめて低い（0.1%～0.2%）鉄になっていることがわかった。このことは，加熱・酸化によって表面から脱炭がおこり，外観を保ったままで，表層部分が低炭素で融点の高い鉄に変化していたということを示している。

このことから，これらの操業においては，はじめは銑鉄が表面からそのまま融解し液体状態で下に落ちていたが，その後，時間の経過とともに表層で脱炭が進行して鉄の融点が高くなっていくことで，同じ炉内温度下でも熔けにくい鉄の状態に移行していったため，表面での急速な融解が次第に収まっていき，抑制された定常的な融解，羽口前への滴下とそれに伴う脱炭反応が進行するようになるに至ったのではないかと考えられる。上記の外皮が残存していた原料脚部は，それほど多くの送風があたらない場所にあり，また炉底と接触していたために温度上昇が急激に起こらず，銑鉄の融点まで温度が上昇する前に表面の脱炭反応が進行したものであろう。

もう一度大鍛冶の記録を見直してみると，俵（1933）の記述に「はじめは風量を少なく」すなわち低温で操業を開始し，「一時間餘の後」「鉄中の炭素稍々減して底に溜まれるものを底突にてつゝき見るに粘気生じるに至り」「吹子の風孔を全開して」送風量をふやし温度を上げることによって酸化作用を高める，とある。全体の操業時間は2時間余りと記されているので，そのうちのおよそ半分にあたる始めの1時間余りは，熔融がわずかにおこる程度の比較的低い温度での加熱が行われていたということになる。

以上の諸点より，大鍛冶における反応の実態は下記のように推定される。

はじめに銑鉄の熔融があまり起こらない程度の低温で送風・加熱する。すると，鉄の表面から脱炭が進行し，低炭素で融点が高く，高温下でも熔融しない軟鉄の皮膜が表層に形成される。そののちに温度を上げると，この軟鉄皮膜の内側の高炭素の部分で徐々に熔融がおこるが，皮膜によってブロックされているため，すべてがただちに外部へは出ていかない。おそらく，皮膜のところどころにある層の薄い部分や亀裂などを通して少しずつ外に出ていくか，あるいは皮膜の一部へ内部の高炭素部分から炭素原子の拡散がおこって局所的に炭素濃度の高い部分ができて融点低下し，その箇所だけが融解して滴下する，などといった現象がおこり，急速な大量の融解は抑制され，コントロールされた状態で「ポタポタと」「滴下」が起こる。

この推定を確かめるためには，送風のより精密な調整と，温度をモニターしながら変化させることによる現象の観察，銑鉄内部（特に表層付近）での脱炭反応の進行状況の調査が必要であり今後の課題である。

なお銑鉄を脱炭する方法として，ここで対象としている大鍛冶のほかに，熔かした銑鉄に砂鉄や鉄鉱石紛を混合することによって鉄中の炭素を酸化して除く技術があったのではないかとの説（以下「砂鉄脱炭精練法」説）が唱えられている（佐々木 1985；赤沼 1990，1992；福田 1993；赤沼・福田 1997 など）。しかし，このような方法は前近代の文献に明確な記録がない（佐々木（1985）の論文中に「炒鋼法における鉄鉱石紛と同様に，脱炭を目的として砂鉄を熱浴中に添加した」といった説明が行われているが，その前論文（佐々木ら 1983）で炒鋼法の記録としてあげている朱應星『天工開物』の当該箇所（下巻，十四 製錬「鉄」の項）には鉄鉱石紛を使用するとの記述はない）上に，再現実験の報告例もみあたらず，熱経済的・技術史的観点からの検証も行われていない。その一方で，リンの濃度や熱収支に関する視点からこの説を疑問視する考察が提起されている（新井 2000）。この「砂鉄脱炭精練法」説は当初，前近代の鉄製品の介在物（金属内に残存したスラグ）中に観察されるウスタイト・鉄カンラン石の存在について，鉄鉱石紛を銑鉄と反応させたためと考えなければ説明できないだろうという推測のもとに唱えられた（佐々木 1985）。しかしながら本論文の実験結果により，これらの鉱物は，ここで取り上げた大鍛冶のような，銑鉄を空気酸化によって脱炭する工程で生成し得ることが実証された。また金属鉄中のチタン化合物などの存在についても，砂鉄を銑鉄中に混合したためではないかという説明がなされていた（赤沼 1992）が，これらは砂鉄製錬の工程で生成することが実験や理論的考察によってすでに報告されている（高塚・田口 1989；田口・尾崎 1994；高塚 1996）。以上の諸点からみると，現在のところ，この「砂鉄脱炭精練法」のような方法が銑鉄の脱炭法として実際に存在していたことについて十分な根拠があるとは言い難いため，本論文では特に比較考察の対象とはしなかった。

今回の予備的実験により，記録にある大鍛冶の方法によって，銑鉄を脱炭して低炭素の鉄を作ることが可能であるということがわかった。次の段階として，炉内各部の温度分布を詳細に測定できる装置を使い，炉内温度変化の条件を変えて実験を行い，また銑鉄内部における反応の進行状況を調査することによって，大鍛冶炉の中で実際にどのような反応が行われているのかということの詳細を調べ，また効率的な大鍛冶の操業法について考察を深めていきたい。

7．まとめ

技術の伝承がすでに途絶え，記録もわずかしか残されていない「大鍛冶」の再現に向けた最初の段階として，文献にある「下げ場」（大鍛冶の第一段階）に倣った簡易な構造の炉を構築して予備的実験を行った。炭素濃度およそ3％の銑鉄を原料として，約1時間の操業によって脱炭を行い，さらにそれに続く約30分の折り返し鍛錬の工程を行うことによって炭素濃度0.1～0.2％というほぼ軟鉄に近い低炭素鋼を作ることができた。今回の実験では，送風条件をきちんと揃えることができず，また温度は目視による推測のみであったため，詳細を定量的に解明するには至らなかった。しかし，前近代の大鍛冶炉内の反応として，まず銑鉄の表面から脱炭が進行することによって，低炭素で融点が高く，高温下でも熔融しない軟鉄の皮膜が表層に形成され，そののちに温度を上げると，軟鉄皮膜の内側の銑鉄が熔解して，皮膜にブロックされながら徐々に外部に出て行って羽口の前を滴下す

ることによって，コントロールされた状態での酸化および脱炭反応が起こっていたのではないかという推定を行うことができた。

謝　辞

本実験は，宮城県志田郡松山町在住の刀匠・九代目法華三郎信房氏工房において，同氏とご子息の法華三郎栄喜氏の全面的なご協力のもとに実施した。作業場所の提供・材料の準備・操業などは，両氏のご尽力と有意義なご助言なしには行うことができなかった。ここに記して感謝の意を表する。

本研究は国立歴史民俗博物館基盤研究「歴史資料の材質・製作技法と生産地に関する調査研究」（平成16〜18年度，研究代表者：宇田川武久）の一環として実施された。

文　献

赤沼英男 1990「古代から中世における北の鉄の変遷」『岩手県立博物館開館10周年記念特別企画展「北の鉄文化」解説図録』pp.74-81 岩手県立博物館

赤沼英男 1992「北沢遺跡出土“鉄滓”の金属学的考察」豊浦町文化財調査報告書（五）北沢遺跡群附編 pp.1-11 豊浦町教育委員会

赤沼英男・福田豊彦 1997「鉄の生産と流通からみた北方世界」国立歴史民俗博物館研究報告 72 pp.1-40

新井　宏 2000「古代日本に間接製鋼法があったか」ふぇらむ 5 pp.742-748

国立歴史民俗博物館編 1994「日本・韓国の鉄生産技術〈調査編1・2〉」国立歴史民俗博物館研究報告 58・59

佐々木稔・村田朋美・伊藤　叡 1983「古代における炒鋼法とその製品」『日本製鉄史論集』（たたら研究会編）pp.615-639 たたら研究会

佐々木稔 1985「ふたたび古代の炒鋼法について」たたら研究 27 pp.210-220

鈴木卓夫 1990『たたら製鉄と日本刀の科学』雄山閣

高塚秀治 1996「熱分析法による前近代製鉄炉内反応の研究」文化財保存修復学会誌 40 pp.48-62

高塚秀治・田口　勇 1989「金属組織観察による古代鉄器の研究」国立歴史民俗博物館研究報告 21 pp.239-251

田口　勇・尾崎保博編 1994『みちのくの鉄 －仙台藩炯屋製鉄の歴史と科学－』アグネ技術センター

俵　國一 1933「錬鐵（庖丁鐵）製造法」『古来の砂鐵製錬法』pp.107-123 丸善

福田豊彦 1993「鉄滓による鉄関連遺跡の性格判定の見直し ――一点の出土スラグの成分分析値では、遺跡の性格を断定できない－」たたら研究 34 pp.23-32

山田賀一 1918「中國に於ける砂鐵精錬」鐵と鋼 4 pp.348-390

（2006年2月16日受付，2006年3月9日受理）

The First Trial to Reconstruct *Ookaji*, a Pre-modern Process of Pig Iron Decarbonizing

Tsutomu SAITO[1], **Akihisa HATTORI**[2] **and Hideharu TAKATSUKA**[1]

[1] National Museum of Japanese History, 117 Jonai-cho, Sakura City, Chiba, 285-8502, Japan

[2] International Christian University, 3-10-2 Oosawa, Mitaka City, Tokyo, 181-8585, Japan

We carried out a preliminary experiment of iron refining, as the first trial to reconstruct *Okaji*, a pre-modern decarbonizing process of pig iron to make wrought iron, which have disappeared and is barely recorded. Pig iron containing 3 % carbon was decarbonized for 1 hour in a furnace constructed in the similitude of *Sageba*, the first stage of *Ookaji*, followed by repeated forging for 30 min., and finally changed to iron with 0.1 to 0.2% carbon that was near to wrought iron.

In this study, we didn't control the blast volume finely and measured the temperature in furnace just by visual observation method depending on the experience of an ironsmith.

We estimated the reaction of decarbonizing process in *Ookaji* furnace as follows;

1. The surface of pig iron is decarbonized at low furnace temperature, and makes a layer of solid to semi-molten low carbon iron.
2. With rising of furnace temperature, pig iron with high carbon content inside gradually melt, however it come out coordinatively just bit by bit because of the gate of law carbon layer.
3. Drops of molten pig iron are oxidized and decarbonized in air blast.