## 大鍛冶の炉内反応に関する実験的検証

齋藤 努,坂本 稔,伊達 元成,高塚 秀治

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

1. はじめに

「禿鍛冶」とは、わが国の近世から明治初期における 製鉄の工程の中で、原料の砂鉄を還元して粗金属を得る 製錬(smelting)に続いて行われる精錬(refining)の 一つであり、特に銑押法において、生成した銑鉄の中の 炭素を大幅に減少させて庖丁鉄(軟鉄)を作るための技 法である。製錬技術としての「たたら吹き」や、精錬の うちの「卸金」(鍛冶職人が自分の作業目的にあった素 材を得るために鉄中の炭素濃度を調整する技法)が現在 も継承されている(鈴木、1990)のに対し、大鍛冶は、 わずか2篇の文献上の記録(山田、1918;俵、1933)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 その実態がわからなくなっている。

われわれは、大鍛冶における炉内反応などの詳細を明 らかにするために、再現実験を行う計画を進めており、 その予備実験の結果を本誌で報告した(齋藤ほか、2006)。 われわれが参考とした上記2篇の論文はいずれも中国地 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、それが少しずつ滴下し高温の酸 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的な工程である。

そして前報(齋藤ほか,2006)で述べた通り,比較的 短時間の操業によって,銑鉄からきわめて低炭素の鉄を 作ることが可能であることは確認できた。しかし,温度 や送風,炉内で起きている反応を把握し,工程全体を理 解した上で再現に臨むためには,いくつか解決しなけれ ばならない問題が残された。特に下記の3点については, 実験的な検証が必要と考えられた。

- A. 操業の様子を観察した記録では、アーチ形に組ん だ原料銑鉄を加熱する際「漸次熔融し氷柱状をな して滴下」(山田, 1918) するとあり、実際、こ のように徐々に熔融が行わなければ脱炭反応はス ムーズに進まないと考えられる。しかしわれわれ が操業を試みたところでは, 前報 (齋藤ほか, 2006) で述べた通り、操業条件上で「歩留まり」 と「脱炭の進行」とは相反する結果が生じてしまっ ていた。すなわち、強熱をすれば脱炭生成物とし てかなり炭素濃度の低いものができるが、その一 方で原料の銑鉄がいっぺんに熔解して炉底に溜ま る「流銑」が、脱炭生成物とは別に大量に発生し てしまうため歩留まりが悪くなってしまい、また 逆に温度を低めにして操業すると、 流銑の発生は 少なく抑えられるため歩留まりは良くなるものの, 脱炭生成物の中では炭素濃度が十分に低くなって いないという結果が得られた。これを解決し、文 献記録にあるような,歩留まり良くまた生成物中 の炭素濃度が十分に低くなるような操業を行うた めにはどのような温度条件が必要か。
- B. 俵(1933)の記録によると、始めは送風管の風孔 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、さらに 20~30分経過したところから生成物が得られる

とある。操業全体の時間は約2時間であるので、 全操業時間の半分を弱い送風での「予備加熱」に 費やしていることになる。これは何を目的とした 工程であるのか。

C. 銑鉄の脱炭は、炉内のどの箇所で、どのようにし て行われているのか。

これらを明らかにするための手順として、われわれは まず「2.1.」において、マッフル炉内で簡単な加熱実験 を行い、各温度で銑鉄にどのような変化がおこっている かを調べた。次に、その結果に基づいて2つの仮説を立 て、その検証のための開放炉による実験を「2.2.」「2.3.」 で行った。

#### 2. 実験

#### 2.1. マッフル炉内におけるテストピース加熱実験

立方体の銑鉄テストピースに対し、マッフル炉内で、 大気雰囲気下で加熱を行ったのちに断面を観察し、特に 表層に近い部分の金属組織と炭素濃度の変化の状況を調 べた。分析は、試料片をエポキシ樹脂(Strues EPOFIX)に埋め込み、断面をダイヤモンドペーストで 鏡面研磨し、1%ナイタールでエッチングして炭素蒸着 を施したのちに、電子線マイクロアナライザー(EPMA、 日本電子製JXA-8200)による金属組織の観察を行った。 炭素濃度は、この金属組織の観察結果から推定した。な お、本論文中で金属組織は基本的に二次電子像で表示し ているが、一部、組織の分布がわかりやすいように反射 電子像で表示したものがある。またスラグは反射電子像 で表示した。反射電子像の場合のみ図のキャプションで その旨を記してある。

2 cm×2 cm×2 cm 程度に成形した銑鉄(炭素濃度 3~3.5%, 江戸時代の建築物の門に使用されていた肘金) を浅い磁性坩堝の中に置き, 800℃, 900℃, 1000℃, 1100℃, 1150℃, 1200℃の各温度で, それぞれ 30 分お よび 60 分加熱した。この加熱時間は, 俵(1933)で, 第一段階の「下げ場」で送風の弱い予備加熱が1時間, 全操業時間が2時間と記録されていることと, 前回実験 (齋藤ほか, 2006)における送風量一定での操業で, 開 始から終了までの全操業時間が約1時間であったという ことから、そのうちの予備加熱にあてられると想定され る程度の時間範囲内で、どのような変化が銑鉄内部に生 じるのかを大まかにつかむことを目的として設定したも のである。なお、銑鉄の脱炭や熔融などの挙動について は、現代の工業製品としての鉄を対象として詳細が明ら かにされており、データブックとしてもまとめられてい るが、このような近代製鉄法で作られたいわゆる「洋鉄」 と、前近代におけるたたら吹き製鉄法などで作られた 「和鉄」とでは、特に高温下でのふるまいに違いがみら れる場合のあることが刀鍛冶職人などによって経験的に 知られており、ここでは、簡単な実験によって和鉄にお ける挙動を確認することにした。

以下に,加熱後のテストピースの状況について述べる。 原料として使用した銑鉄は白銑であったが,加熱の効 果によっていずれも黒鉛の析出がみられ,ねずみ鋳鉄の 組織が混在していた。加熱後はいずれも外周部に酸化皮 膜が形成されており,また鉄-炭素系平衡状態図から予 測できることであるが,1150℃,1200℃では一部熔融が おきていた。そして後述のように,900℃以上では,炭 素濃度の減少した「脱炭層」が表層付近に生じていた。 これは銑鉄の表面から酸化が起こり,表層に近い部分で 炭素が燃焼して除かれることによって生じたものとみら れる。

金属組織観察結果の詳細は次のとおりである。ここで は、脱炭層とそうでない層の区別は、軟鉄〜亜共析〜過 共析までの鋼の組織を示しているか、片状黒鉛やレーデ ブライトが見られる明らかな銑鉄の組織を示しているか によって行うこととし、表面からその境界までの深さを 「脱炭層の厚さ」とする。

800℃では加熱時間に関わらず,表層部での脱炭はみ られなかった(図 1-1a, b)。

900℃では、30分加熱(図1-2a, b)、60分加熱(図1-2c, d)とも、脱炭層の厚さは200~300µmであり、 そのうち、表層に近い100~150µmが亜共析組織を示 すものの、脱炭層における炭素濃度はいずれも0.4%以 上にとどまっている。

1000℃では、30分加熱(図1-3a, b),60分加熱(図 1-3c, d)ともほぼ同様で、脱炭層の厚さは400~500 μmであり、最も脱炭が進んだ箇所では炭素濃度0.1~ 0.3%にまでなっていた。図 1-3a, c で, 脱炭層の中に 片状黒鉛のような形状をしたものがみえているが, これ らの内部は空洞である。脱炭に伴い, 片状黒鉛が酸化し て消失した跡の穴と考えられる。

1100℃では、30 分加熱で 400~500  $\mu$ m 厚の脱炭層が みられ、また局部的に炭素濃度 0.1%以下となっている ところもわずかながら検出された(図 1-4a, b)。60 分 加熱の脱炭層の厚さは 30 分加熱と大差なかったが、最 外部に、10~50  $\mu$ m 厚の炭素濃度 0.1%以下となってい る層が何箇所かみられ(図 1-4c, d)、時間の経過とと もに脱炭が進んではいるものの、その進行はきわめてゆっ くりであることを示している。

1150°Cでは、30分加熱(図 1-5a, b)、60分加熱(図 1-5c, d)とも、熔融せずに固体のままで残存している 部分では 400~500  $\mu$ m 厚の脱炭層がみられ、最外部に、 局所的に炭素濃度 0.1%以下となっているところも散見 された。熔融して液体となった部分ではこれよりも脱炭 が進み(図 1-5e:30分加熱試料)、全体として平均的に 炭素濃度 0.2~0.4%となっており、0.1%以下となってい る箇所もかなりの割合でみられた。

1200℃でも、固体部分は1150℃とほとんど同様であっ た(図1-6a, b:30分加熱試料,図1-6c,d:60分加熱 試料)。液体部分の脱炭は1150℃よりもさらに進み,全 体として炭素濃度は0.2%以下となっており、また0.1% 以下の箇所が過半を占めていた(図1-6e:30分加熱試 料,)。

以上の実験結果(表1に簡略にまとめた)から,次の ことがわかった。

・800℃では表層部での脱炭は起こらない。

- ・900℃~1100℃になると、固体の状態のまま、銑鉄 の表層部で脱炭が起こる。ただし1000℃以上では、 温度が変わっても固体からの脱炭の程度にはあまり 違いがない。
- 液体の状態になると、固体の状態よりもはるかに急速かつ効果的に脱炭が進行する。

これらの結果から,われわれは「1.はじめに」で述 べた「A」~「C」の3点に関し,次のような2つの仮 説を立て,その是非を検証するような操業実験を計画す ることとした。

【仮説1】予備加熱は,表層に意図的に脱炭層を作るための手順なのではないか。

脱炭され炭素濃度が低くなった部分は、融点が上がり、 銑鉄の熔融が始まる程度の温度まで加熱されても固体の ままでとどまる。表層部を意図的にこのような状態にす ることによって、「壁」となったこの層のところどころ にある薄い部分や亀裂などを通して少しずつ外にしみ出 ていくなどして、いちどきに熔融が起こらず、コントロー ルされた状態でポタポタと滴下が行われるのではないか という想定を行った。脱炭して鉄中の炭素濃度が低くな るほど、それを熔かすためにはより高い温度が必要とな るため、原料の熔解が十分に進まず、熔け残りが生じる 可能性も出てくるが、前報(齋藤ほか、2006)の考察で 述べた通り、内部に残っている高炭素部分から炭素原子 の拡散がおこって、局所的に再び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と いった現象があるとすれば、ごく薄い脱炭層であれば、

,	Table 1 Result	t of heating experiment usin	ig pig-iron blocks	as raw material
	固体部分		液体部分	
加熱温度	脱炭層の	最も脱炭が進んだ箇所	平均的な	最も脱炭が進んだ箇所
(°C)	厚さ(µm)	での炭素濃度(%)	炭素濃度(%)	での炭素濃度(%)
800	(なし)	(脱炭していない)		
900	$200 \sim 300$	> 0.4		
1000	$400 \sim 500$	0.1~0.3		
1100	$400 \sim 500$	< 0.1		
1150	$400 \sim 500$	< 0.1	0.2~0.4	< 0.1
1200	$400 \sim 500$	< 0.1	< 0.2	< 0.1

表 1 テストピースによる加熱実験の結果 sult of heating experiment using pig-iron blocks as raw mater

熔融が順次起こっていくことは十分に起こり得るものと 予測される。これによって「1. はじめに」の「A」と 「B」が説明できるのではないかと考えた。

【仮説2】銑鉄の脱炭は、熔けた銑鉄が滴下していく途 中で、羽口から吹き出す風を受けることで瞬 間的に起きているのではないか。

山田(1919), 俵(1933)の記録とも, 羽口から出た 風が, アーチ形に組んだ原料銑鉄の下を通り抜けるよう に炉が設計されている(齋藤ほか,2006参照)。このこ とと熔融銑鉄がポタポタと落ちていくという実際の大鍛 冶操業を観察した際の記録,および上記実験による液体 状態で脱炭が急速に進行するという結果から,この仮説 を立てた。これは「1. はじめに」の「C」に対応する 事項である。

これらを検証するため、赤外線による熱画像を利用し た非接触温度測定装置と送風量測定装置付の送風機を使 用し、炉内や原料各部の温度をリアルタイムで測温しつ つ、原料として、アーチ形に組んだ銑鉄と板状の銑鉄テ ストピースを使用した実験を、スケールダウンした開放 炉で行った。

#### 2.2. 開放炉におけるアーチ形原料銑鉄の加熱実験

前回実験(齋藤ほか,2006)の結果をふまえ,山田 (1918)の報告にあるものに準じた「開放炉」を使用し て加熱実験を行った。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。次節のテストピース加熱実験とも、 操業は、前回同様に宮城県在住の刀匠・法華三郎信房氏 と法華三郎栄喜氏のご協力により、両氏の工房内で実施 した。

炉の構築や使用した原料は前回実験の開放炉とほぼ同 様である(写真1a)。以下に概略を述べる。

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。地中からの水分を遮断するため,厚さ3.3 mm,90cm角の鉄板を砂の上に置く。この上に,断熱



写真1a 原料を設置した開放炉 Photo1a Open-type furnace of ookaji with raw material on hearth part

材として細かく割った木炭を約3cmの厚さに敷いた。 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,炉床)」 となるタテ 46cm×ヨコ 23cm の長方形の凹みをあけた。 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に約14度の 傾斜をつけて羽口(送風管)を設置した。羽口本体は内 径 5.4cm, 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。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。

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)である。金属組織の観察結果から、 炭素濃度は3~3.5%程度と判断される。これを適当な 大きさに切断し(写真1b)、2片の上部が寄り掛かり あうようにアーチ状に組み合わせ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(写真1c)。原料の 配置は、前回同様、俵(1933)の報告にある図および記 述に従ったものである(図2)。燃料の木炭としては硬



写真1b 実験の原料(肘金を切断したもの) Photo 1b Raw material for ookaji, pieces of the hinge



写真1c 原料の設置状況(前から) Photo1c Fixing of raw material from an anterior view

めの松炭を用意し、はじめにその 3.5kg を原料の上に積 んで点火・送風して操業を行い、木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。

送風について、今回は送風機とマスフローメータを使 用し、炉内への送風量を逐次測定しながら変化させられ るようにした。使用したのはコフロック(株)製作の AIR 供給装置で、昭和電機製ガストブロアU2V-70S (最大流量 1800  $\ell$ /min,最大圧力 16kPa)と、コフロッ ク製マスフローメータ HFM-301 (最大測定レンジ 700  $\ell$ /min)を組み合わせたものである。前回実験(齋藤 ほか、2006)では送風量を正確に測っておらず、使用し たブロアの規格や調整電圧から、毎分 0.1m<sup>3</sup> (100  $\ell$ /min)前後ではないかと大雑把に見積もっていたが、 後述のように、実際にはこれよりもかなり多い送風量が



写真2 操業の様子 Photo2 Appearance of operation

#### 必要であった。

前回操業の炉内状況観察結果から、原料の内壁面に木 炭は接触しておらず,アーチ前面の開口部前にある木炭 やアーチ下部に脇からわずかに入り込んだ木炭に羽口か らの風があたって高温となったことによる輻射熱と、銑 鉄中の炭素の燃焼熱と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た。原料の熔融・滴下の 反応はこの内壁面で起こっているので、この部分の温度 状態をモニターしつつ操業を行うことにした。すなわち, 赤外線による熱画像を利用した非接触温度測定装置(高 温用赤外線サーモグラフィー;独 JENOPTIK 社, Vario THERMO head) を使用し、5秒毎に画像を取 り込んで測定画面内各部の温度を記録・測定した。これ をモニターしながら送風量を加減することによって、アー チ状原料の内壁面の温度を調整し,またその際の送風量 を適宜記録した。これら各装置の配置と操業の状況を写 真2に示す。中央の開放炉の向こう側にあるのが送風装 置,手前にあるカメラが非接触温度測定装置の本体,右 の机の上のパソコンには温度測定画面が表示されている。

以下,実験の経過と結果について述べる。なお,1回 目と2回目は本質的に同じ内容で,仮説検証のための確 認として,わずかに条件を変えてあえて2回繰り返した ものである。なお,昇温に必要な送風量は,原料と木炭 の位置関係や風が炉内でどのような経路をたどるかとい うことや,また熔融が始まったあとでは,その生成物と 羽口との距離や角度などにも依存するため,各回の操業 で,送風量と加熱の効率は単純には比例しない。したがっ て送風量の数値は目安として記録したものであり,以下 の各操業はあくまでも,原料内壁の測定温度に基づいて 進められたものである。

#### 2.2.1. 操業1回目

使用した原料はタテ 19.0cm×ヨコ 8.0cm×厚さ 3.0~3.5cmで重量 3.4kg のものとタテ 19.0cm×ヨコ 8.0 cm×厚さ 3.2~3.5cm で重量 3.6kg のものの 2 片を,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。仮説 2 を想定し,風の 方向は,火窪の炉底部(熔けて下に落ちた銑鉄が溜まる 場所)ではなく,熔融した液体状態の銑鉄が滴下する途 中で最も効果的に風を受けるように,アーチの中央部や や下のあたりが最大風速となるよう羽口の位置を調整し た。操業は,内壁面中央部付近で温度測定しつつ行い, 表層部に意図的に脱炭層を形成させるためにはじめの約 30 分は 1000℃前後に保ち,その後,送風量を増やし, 鉄の熔融が始まるまで温度を上昇させたのち,一定の温 度に保ち,熔融が起こらなくなるまで加熱を続けた。

経過は以下の通りである。送風開始後、内壁温度を速 やかに上昇させるため 300  $\ell$ /min に送風量を設定し、 33 分後に内壁温度が 980°Cに達した。その後、送風量の 調整を行い、内壁温度を 990~1030°Cに保った。「2.1.」 の結果から原料の熔融は 1150°C付近から始まると予測 されたので、62 分後、ふたたび送風量を増やして 300  $\ell$ /min とし、内壁温度を 1140~1170°Cまで上げた(75 分後)が、まだ熔融はみられなかった。さらに送風量を 350  $\ell$ /min まで増やし、77 分後、内壁温度 1180°Cとなっ たところで、熔融が始まった。送風量を 320~350  $\ell$ /min の範囲で微調整しつつ、内壁温度を 1190~1220 °Cとして連続的に熔融が起こるような状態を約 78 分間 保ち、送風開始から 164 分後に熔融・流出がみられなく なったので操業を終了した。

図3は、非接触温度測定装置による炉内温度の測定画 面例である。正面やや左側から観測したもので、図3a の中央部でアーチを造っている緑~黄緑に見える部分が 原料銑鉄の側面、その下の黄色く表示された斜めの平行 四辺形に見えている部分が右側の原料の内壁面である。 これは予備加熱の段階のもので、内壁面は990~1030℃ で全体としてほぼ均一な温度になっていることがわかる。 図3bは強熱して熔融が始まる段階のもので,内壁面は 赤~赤紫色で表示された斜めの平行四辺形に見えている 部分であり,1190~1220℃と,やはり全体としてほぼ均 一な温度となっている。

写真3aは操業終了直後の炉内の状況,また写真3b は残存した原料と炉底に溜まった熔融生成物を,位置関 係を保ったまま取り出したものである(右が羽口のある 方向)。原料銑鉄は内部が熔融して抜けて空洞となり, 外皮が残存した。これは,1000℃の予備加熱によって表 層部の脱炭が起こって融点が上がったためその後の強熱 でも熔けずに残ってしまい,内部にあった銑鉄のみが熔 融して外皮の隙間から外に滴下していったものであろう。 下部が熔けあって一体となっているため,残存原料と生 成物それぞれの重量をわけて測定することはできなかっ た。

写真3cに,残存した原料(正面から向かって左側, 上から 2.5~3.5cm の部分)をスライスした断面を示し た。中の銑鉄が流出して空洞ができているが、銑鉄部分 のすべてが外に流出しきっているわけではない。図4は その金属組織の観察結果である。図4aの右が表層部, 左が内部で、表層付近の 100~300 µm の厚さまでは著 しく脱炭が進み、炭素濃度<0.1~0.3%となっている (図4bの右側)。内部にいくほど炭素濃度は高くなって、 しだいに亜共析から過共析までの鋼組織を示すようにな り(図4bの右側:亜共析組織,図4bの左側:共析組 織, 図4c:過共析組織), そこから深部ではほぼ均一な 炭素濃度の銑鉄(図4dの右側:過共析組織,図4dの 左側:銑鉄の組織,図4e:銑鉄の組織を拡大したもの で白銑組織の一部に片状黒鉛が析出)となっており, 「2.1.」と同様に、過共析組織と銑鉄の組織との境界ま でが表層付近での脱炭層の厚さとみなしてよい。表層 100~300 µm の厚さのところまでは, 片状黒鉛が酸化 して消失した跡と考えられる穴が多数みられる。これは、 原料がまだ固体の状態のうちに表面から脱炭し、低炭素 鉄となったために融点が高くなり、その後の強熱によっ ても熔融せずに、反応の痕跡が組織として残ったもので あろう。深部で、脱炭しているにも関わらずこのような 穴が見られないのは、明らかにいったん熔融したためと 考えられる。温度が十分に高まり、原料内部では熔融が



写真 3 a 操業 1 回目の終了直後の炉内状況 Photo 3a Appearance of hearth part after the 1st operation



写真3b 操業1回目で残存した原料と熔融生成物 Photo3b Product fused with remaining raw material of the 1st operation



写真3c 操業1回目で残存した原料の断面 Photo3c Cross section of remaining raw material of the 1st operation

始まったものの, 表面に低炭素で高融点の壁ができてし まっていたためこれに阻まれて外に出ることができず, 表層部での拡散や、微細な穴などを通じて酸素が導入さ れ、酸化および脱炭が行われていた(表面に近づくほど 脱炭が進み、より低炭素となっていることからそのよう に推測される)のであろう。この操業で、銑鉄の熔融・ 滴下の始まった温度が「2.1.」のテストピース加熱実験 より高い1180℃であった理由は、実際にはもっと低い 温度から内部での熔融が起こっていたものの、それが容 易に外へ出てくることができなかったためであり、より 高温になって体積の増加に伴い、「皮」の弱い箇所を破っ て外部への流出が始まったと考えられる。図4は試料深 部にまだ銑鉄が残存している箇所での金属組織観察結果, 図5は内部にあった熔融銑鉄が外に流出したあと, 脱炭 して融点が高くなったために熔融しない「皮」だけとなっ た箇所での金属組織観察結果である(右が表層部、左が 内部)。いずれの状況であっても, 脱炭層の厚さはほぼ 0.8~1.4mm であった。この試料のほか,正面から向かっ て左側の原料の上から 6.0~7.0cm, 13.0~14.0cm, およ び右側の上から 2.5~3.5cm, 6.5~7.5cm の計 5 箇所に ついて分析を行い、残存する銑鉄の量に若干の違いはみ られたものの、いずれもほぼ同様の結果が得られた。

火窪から回収した生成物を分析した結果が図6である。 液体の状態だったこともあって、生成物上部のごく周縁 部1~2mm程度までの厚さの範囲内では亜共析の組 織を示すほどの低炭素になっている箇所もみられる(図 6a, b:上が表層部)。しかし大部分は図6cのような 組織を示しており、炭素濃度はおおむね3~3.5%と判 断される。原料と比較してわずかに炭素濃度の下がって いる箇所もあるものの、全体としては、折り返し鍛錬を 施すことのできない、銑鉄の範疇に入る高炭素鉄である。 つまり、脱炭はほとんど起こっていないということにな る。

#### 2.2.2. 操業2回目

1回目の操業と同様であるが、その経過をふまえ、各 反応が始まると想定される温度までの到達時間ができる だけ短くなるように送風量の調整を行った。

使用した原料はタテ 17.3cm×ヨコ 7.9cm×厚さ 2.8~3.0cm で重量 2.5kg のものとタテ 16.8cm×ヨコ 8.9 cm×厚さ 2.8~3.3cm で重量 2.7kg のものの 2 片である。 他の設定は 1 回目と同様とした。

経過は以下の通りである。送風開始後,はじめ780 ℓ/min, 次いで 470 ℓ/min で加熱し, 13 分後に内壁温 度が1000℃に到達した。その後30分間,送風を調整し て内壁温度を1000~1060℃に保った。53分後に送風を 400 ℓ/min として温度を上昇させ, 59 分後に内壁温度 1200℃とした。送風を 400 ℓ/min に保ち温度を 1200℃ で維持したところ、63分後から熔融の開始が確認され た。その後, 200~400 ℓ/min の範囲で送風を微調整し つつ,内壁温度1180℃~1230℃とした。熔融と滴下は 72分間続き、送風開始から131分後、熔融がみられな くなったが、1回目の操業と同様に原料の外皮が残存し ているのが確認されていたため, 131 分後~180 分後ま での 49 分間,送風量を 380 ℓ/min とし,この設定で到 達できるほぼ最高温度と考えられる内壁温度1350℃付 近まで上げて、反応が起こるかどうかを観察したが、変 化はみられなかった。送風開始から180分後に操業を終 了した。

操業終了直後の状況を写真4aに示す。1回目と同様, 原料銑鉄は内部が熔融して抜けて空洞となり,外皮が残 存した。火窪に溜まった生成物(写真4b,上が羽口の ある方向)の重量は1.7kg,残存した脚部の重量は 3.2kgである。

残存した原料について,正面から向かって左側の原料 の上から 2.0~3.0cm, 6.0~7.0cm, 9.5~10.5cm, およ び右側の上から 2.5~3.5cm, 5.0~6.0cm, 8.0~9.0cm の 計 6 箇所について分析を行ったが,いずれも「2.2.1.」 と同様の結果で,脱炭層の厚さはほぼ 0.8~1.4mm であっ た。なお,上述の操業経過にある通り,熔融・滴下の開 始温度は「2.2.1.」実験よりさらに高い 1200℃前後と なっており,これも表層部に低炭素の「皮」ができたこ とによる影響であろうと思われる。

生成物の分析結果を図7に示した。操業1回目と同様 であり,図7a,b(上が表層部)のように生成物上部の ごく周縁部で低炭素となっている箇所もあるものの,大 部分は図7cのような組織を示す銑鉄の範疇の高炭素鉄 である。炭素濃度は3~3.5%と判断され,ほとんど脱 炭は進んでいない。



写真4a 操業2回目の終了直後の炉内状況 Photo4a Appearance of hearth part after the 2nd operation



5 7 8 9 10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 20 1 2 3 4 5

写真4b 操業2回目の熔融生成物 Photo4b Product of the 2nd operation

#### 2.2.3. 操業3回目

上述のように、1回目と2回目の操業では、脱炭がほ とんど進行していなかった。これは、脱炭が十分に進行 した前回実験(齋藤ほか、2006)と較べ、「2.1.」で立 てた2つの仮説に従って条件設定を変更したことに起因 すると考えざるを得ない。

操業の1回目と2回目で,加熱後に原料の外皮が残存 したのは,低温での加熱によって表層部の脱炭が進み融 点が上がってしまい,またそのようにして形成された厚 い脱炭層は,当初の予測に反し,その後の強熱によって も熔融させることはできないということを示している。 このことから、仮説1で想定したような、表層部付近で 意図的に脱炭層を形成させる条件で予備加熱を行うこと は、全体の操業の妨げとなる不都合な結果をもたらすこ とがわかった。すなわち、仮説1は誤りであり、予備加 熱を行う意図は他にあるのではないかと考えるのが妥当 である。

また, 滴下途中の熔融銑鉄に羽口からの風があたるように設定してあったが, 実際に火窪内に溜まった生成物 は, ほとんど脱炭が進んでいなかった。この結果は, 仮 説2についても見直しを図る必要があることを示唆する ものである。

ただし、これら2回の実験で脱炭の工程がうまく機能 しなかったことについては、われわれの予期しない他の 要因(各部の材質、炉形状、羽口径、温度測定ができる ようにするための木炭の積み方、などのわずかな違い) が原因となっている可能性も捨てきれない。そこで、そ の検証のため、設定を前回実験と同様のものに戻して操 業を試みた。

使用した原料はタテ 16.2~16.9cm×ヨコ 6.4~6.7cm ×厚さ 2.2~3.0cm で重量 2.0kg のものとタテ 16.3~16.6 cm×ヨコ 6.5~6.6cm×厚さ 2.4~3.0cm で重量 2.1kg の ものの 2 片である。風の方向は,前回実験と同様に火窪 中央部付近,滴下した鉄が集まってくるあたりの場所で 最大風速となるように,羽口の位置を下げた。操業は, 内壁面中央部ができるだけ速く熔融温度(1160~1200°C) に達するように,また熔融が開始した後は一度に多量の 熔融が起こらず適度な間隔で滴下が起こるように,送風 を調整して行った。

経過は以下の通りである。送風開始後,380~450  $\ell/\min$ で加熱し,内壁温度は15分後に1000℃となっ た。23分後に1160℃に到達した時点で熔融が開始した。 その後,熔融銑鉄の滴下状況をみながら送風を 130~280 $\ell/\min$ に調整して温度を適度な範囲に維持 (内壁温度は1150~1180℃)したが,60分後から熔融が しだいに起こりにくくなってきたため,340 $\ell/\min$ から 520 $\ell/\min$ まで徐々に送風量を上げてしだいに強熱を行 うことによって定常的な熔融・滴下を維持した。最終的 には内壁温度1360℃まで加熱した。100分後にはほぼす べての原料が熔融してなくなったことを確認し,操業を 終えた。

操業の結果,原料銑鉄は熱の及ばない脚部をのぞいて, ほぼ完全に熔融した。生成物(写真5a)の重量は3.0kg であった。断面(写真5b)の分析結果は図8の通りで ある。炭素濃度はおおむね0.2%以下で,最も低いとこ ろでは0.1%以下,高いところは0.6%の箇所がわずかに みられる程度で,文献(山田,1918;俵,1933)の「本 場」とほぼ同等の良好な生成物を得ることができた。ま た,この操業では,前回実験(齋藤ほか,2006)でみら れた流銑(銑鉄が熔融し,脱炭しないままで火窪に溜まっ たもの)はまったく認められなかった。火窪に滴下した 鉄のほとんどすべてが脱炭生成物になったものとみなさ れ,生成物全体の炭素濃度から見ても,前回実験よりさ らに操業がうまく進んだと判断される。

なお、図9は生成物中に含まれるスラグの鉱物組織を



2<sup>-3</sup> 4 4 5 7 6 7 8 9 10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 20 1 2 3 4 5

写真 5 a 操業 3 回目の熔融生成物 Photo 5a Product of the 3 rd operation



写真 5 b 操業 3 回目の生成物断面 Photo 5b Cross section of the product

3 4

STE

8

9 10

示したものである。繭状のウスタイトが多数観察され, 製鉄遺跡などから出土する鍛冶滓でよくみられるものと 同様の組織を示している。

もし仮説2が正しく, 銑鉄中の炭素が滴下途中で燃焼 する反応が起こっているとすれば高温下でより速く進行 するはずである。そこで,本操業中のほぼ最高温度であ る内壁1360℃に達した時点で,滴り落ちる液滴の温度 を測定してみたところ,1310~1320℃であった。鉄中の 炭素の燃焼がここで起こっていればそれに伴って温度の 上昇がみられるはずであるが,それは確認できなかった ことになる。

本操業の結果から, 操業1回目および2回目がうまく いかなかったのは, 今回の実験における原料や材料など



#### 2.3. 開放炉におけるテストピース加熱実験

仮説1および仮説2の正否と、原料銑鉄の熔融・滴下 時における反応の状況をより詳細に検討するため、開放 炉において板状のテストピースを用いた2回の加熱実験 を行った。テストピースは、実験「2.2.1.」~「2.2.3.」 の原料を調製した肘金の、他の箇所から採取したもので ある。原料の配置と実験の様子は写真6の通りである。



a 原料設置状況(上から) a Fixing of raw material, overhead view



c 加熱中の炉内 c Inside of furnace during experiment



b 原料設置状況(前から) b Fixing of raw material, from an anterior view



d 温度測定の様子 d Observing and recording thermograph of raw material

写真6 開放炉によるテストピース加熱実験 Photo6 Heating experiment of pig-iron block by using open-type furnace

#### 2.3.1. 加熱実験1回目

「2.2.1.」「2.2.2.」と同様の条件で予備加熱および強 熱を行い、熔融・滴下が定常的に起こるようになったと ころで反応を中断させて取り出し,反応進行中に原料内 ではどんな変化が起こりつつあるのかを調べた。また滴 下直後の熔融した鉄を直ちに回収し,仮説2の想定条件 下で脱炭がどの程度進行するのかについても再度確認を 行うことにした。タテ 3.2cm×ヨコ 9.0cm×厚さ 3.2cm で重量 630g の原料を羽口の前面上部に設置した。ここ では仮説2の想定に従い、熔融した液体状態の銑鉄が下 に落ちていく途中で最も効果的に風を受けるように、羽 口の位置を調整した。実験は、最も高温となるテストピー ス下面中央部で温度測定しつつ行い、表層部に脱炭層を 形成させるためにはじめの約60分は1000℃前後に保ち, その後、送風量を増やし、鉄の熔融の起こる1200℃ま で上げ、熔融が定常的に起こるようになった段階で炉か ら出して反応を中断し、原料銑鉄の断面、熔融し原料銑 鉄から「氷柱状」に垂れた鉄, 滴下直後の鉄小塊の金属 組織を調べることにした。

経過は以下の通りである。送風開始後,280ℓ/minの 風量で 60 分間,テストピース下面温度を 960~1030℃ に保ち,そののち風量を 300~350ℓ/min に上げて,送 風開始から 80 分後に約 1200℃に達した。原料下面の熔 融と滴下は 95 分後から始まり,105 分後まで熔融を行っ た後に加熱を中断して,反応途中の原料を分析に供した。 また羽口前面を通ってテストピースから滴下した直後の 鉄の小塊をすみやかに回収し,同様に分析を行った。

写真7aは,残存した原料(上)と火窪に溜まった生 成物であり(上が羽口のある方向),また写真7bは熔 融・滴下直後すみやかに回収した鉄の小塊である。

残存した原料の中央部付近を縦に切断し,断面の金属 組織を観察して各部の炭素濃度を調べた。図 10a は, 原料下面部の最も高温になる部分(「2.2.」の原料内壁 に対応)について表層付近の金属組織を示したもので, 図の下が表層部,上が内部である。最表面部は炭素濃度 が 0.2~0.3%まで下がっており(図 10b),また表面か ら内部にいくに従って亜共析~共析~過共析としだいに 組織が変化する脱炭層が 0.8~1.4mm の厚さでみられる。 「2.2.1」「2.2.2.」の操業と同様に原料の表層は「皮」



写真 7 a 加熱実験 1 回目の残存原料(上)と生成物 Photo 7a Remaining raw material (upper) and product of the 1 st experiment



Photo 7b Molten iron, picked up from the hearth part immediately after fallen down, produced at 1st experiment

のようになって残存し、内部にあった銑鉄部分が流出し ていた。加熱を中断したことによって滴下する直前の状 態で固化した、原料の外側に垂れ下がっていた熔融物の 金属組織が図10cである。一部に片状黒鉛の析出がみら れる白銑組織であり、原料内部の銑鉄が流出したもので あると考えられる。

ここで、炭素濃度の低くなっている脱炭層は、1000℃ 前後での加熱により、原料の固体状態で表面から脱炭が 進行したものとみなしてよい。またその外側に垂れ下がっ ていた熔融物は、原料内部の銑鉄が外に流出し、まだ滴 下しない状態で固化したものである。この段階でも羽口 からの風は十分にあたっているはずであり、実際、表層 部にはわずかに脱炭層が存在しているが、全体として脱 炭は起こっていない。

図 10d は,火窪に滴下後ただちに回収した熔融鉄の 金属組織である。炉の設定により,滴下中に羽口からの 風を受けているので,仮説2が正しければ脱炭が起きて いるはずであるが,実際には白銑組織を示しており,脱 炭はみられない。

#### 2.3.2. 加熱実験2回目

タテ 4.2cm×ヨコ 8.0cm×厚さ 2.2cm で重量 420g の 原料を「2.3.1.」と同様に設置した。すみやかに温度を 1200℃近くまで上昇させ、熔融が定常的に起こるように なった段階で炉から出して反応を中断し、原料銑鉄の断 面、熔融し原料銑鉄から「氷柱状」に垂れた鉄、滴下直 後の鉄小塊の金属組織を調べた。

経過は以下の通りである。送風開始後、480~540ℓ /minの風量で加熱し、30分後に温度が1170℃に到達 したところで原料下面から熔融および滴下が始まった。 その後原料下面の温度を1210~1250℃として定常的に 熔融・滴下を続け、53分後に加熱を中断して、反応途 中の原料と、羽口前面を通ってテストピースから滴下し た直後すみやかに回収された鉄の小塊を回収して分析に 供した。

写真8aは,残存した原料(上)と火窪に溜まった生 成物であり(上が羽口のある方向),また写真8bは熔



i<sup>T</sup> 6 7 8 9 <u>10</u> 1 2 3 4 5 6 7 8 9

写真8a 加熱実験2回目の残存原料(上)と生成物 Photo8a Remaining raw material (upper) and product of the 2nd experiment



# **10** 1 2 3 4

写真 8 b 加熱実験 2 回目で熔融・滴下後ただちに回収した小鉄塊 Photo 8b Molten iron, picked up from the hearth part immediately after fallen down, produced at 2nd experiment 融・滴下直後すみやかに回収した鉄の小塊である。

残存した原料の中央部付近を縦に切断し, 断面の金属 組織を観察して各部の炭素濃度を調べた。図 11a は、 原料下面部について表層付近の金属組織を示したもので, 図の下が表層部、上が内部である。表面から内部にいく に従って亜共析〜共析〜過共析と組織が変化する脱炭層 がみられる点は「2.3.1.」と同様であるが、同倍率で撮 影した図 10a と比較すればわかる通り、それよりもは るかに薄く, 厚さ 200~600 µm 程度である。この脱炭 層は熔融温度にいたるまでの加熱中に生じたものとみて よいが、固体での脱炭が生じる温度帯をすみやかに通過 しているために、脱炭が最小限で抑えられているのであ ろう。注目すべき点は炭素濃度の変化の状況であり, 「2.3.1.」が, 亜共析組織が表面から脱炭層全体の1/3 ほどの厚さで存在し、過共析組織となるのは銑鉄部分の 手前,厚さにして脱炭層全体の1/4程度であるのに対 し、本実験の結果では、 亜共析組織は脱炭層全体の 1/20~1/10 ほどの厚さでしか存在せず、その内側は すぐに共析組織となり(図 11b), さらに内部には脱炭 層全体の1/2以上もの厚さにわたって炭素濃度の比較 的高い過共析組織を示す部分が残存している。これは、 脱炭層の中でも、大幅な炭素濃度の減少が起こったのは 表面に近いごく薄い層であり、全体としてみると炭素濃 度が高く保持されていることを示している。

図 11a の右端は,原料の表面から1 cm ほど奥までの 部分にわたって熔融・滴下が進行中であった箇所であり, そのため表層部分が途切れたような形状になっている。 左側の方の,熔融がまだ起こっていない箇所と較べ,明 らかに脱炭層の厚さが減少していることがわかる。また 脱炭層のうち,銑鉄部分との境界付近の組織にも相違が みられた。図 11c は,図 11a の視野で左から 100 µ m 程 度の位置を中心に,銑鉄部分との境界付近の組織を観察 したもの,また図 11d は図 11a の右端の位置で同様箇 所の組織を観察したものである。これらを比較してみる と,ともに過共析組織ではあるが,図 11d では太く長 い線状のセメンタイト(炭化鉄)が何本も,境界部から 脱炭層へ向けて生成しているのが見える。これについて は以下のように推測できる。図 11a の銑鉄部分の組織 をみると,右端に近づくほど片状黒鉛の量が増えており, この箇所では加熱が中断された時点で一部熔融が起こっ ていたものとみられる。それに伴って銑鉄中の炭素の脱 炭層の方へ向けた拡散が速やかに起き,その炭素濃度を 再び高くするという現象が生じていて,その途中経過を 示す状況がセメンタイトの増加という金属組織として検 出されたのであろう。この現象に伴って脱炭層であった 部分は融点が下がり,大鍛冶の操業温度下で熔融するよ うになるものと考えられる。

実際の操業では、熔融温度にいたるまでの加熱昇温の 過程で不可避的に起こる脱炭層形成のほか、すべての表 面が同時に熔融温度に達することはなく、それよりも若 干低めの温度で加熱される箇所もあるため、たとえ熔融・ 滴下が連続的に起こっている最中であっても各部で脱炭 層の形成が進行していくものと思われる。この結果、操 業の進行に伴い、熔融・滴下を定常的に続けるための加 熱温度は少しずつ高くなっていくことが予想される。 「2.2.3.」で、送風開始から60分後以降、温度を徐々に 上昇させていく必要があったのはこのためであろう。

図 11e は、滴下する直前の状態で原料の外側に付着し ていた熔融物の金属組織で、図 10c と同様、原料内部の 銑鉄が流出したものであると考えられる。図 11f は、火 窪に滴下後ただちに回収した熔融鉄の金属組織である。 どちらも、図 10c、図 10d と同様、銑鉄の組織を示して おり、脱炭はみられない。

#### 3. 考察

これら一連の実験の結果,以下のことがわかった。 まず仮説1であるが,予備加熱の工程は意図的に脱炭 層を表層部に作るためのものと考えることはできない。 すなわち,仮説1は誤りであった。このような脱炭層を 作ってしまうと,その部分は,木炭を用いた加熱温度と してはかなり高めの数値である1350℃まで加熱しても, 熔融せずに操業終了後まで残ってしまう。仮説1を立て た際の予測では,脱炭層で融点が上がり熔けにくくなる ことは想定されていたが,内側にまだ大量に残っている 高炭素の銑鉄部分から炭素が拡散して脱炭層内の炭素濃 度が上がり,表層部から順次熔融していくのではないか と考えていた。しかし,実際に実験で確認したところで は,生成する脱炭層は0.8~1.4mmとかなり厚く,この ような効果による熔融は起こらなかった。

では、文献記録に見られるこの予備加熱はなんのため に行っているのであろうか。「2.2.3.」の操業で使用し た銑鉄原料は2片あわせてわずかに4.1kgにすぎないが, 相当に強熱しても常温から1200℃近くまで温度を上げ るのに23分もの時間を要した。文献(山田, 1918;俵, 1933)に記録されている原料の重量はこれよりもはるか に大きく, それぞれ白銑 120~400 貫および 0.319 トン である。このことから、予備加熱の意義としては、原料 全体に熱を行き渡らせるために必要な加熱時間である可 能性が考えられる。全体に十分温度が上がっていない状 況で内壁面を加熱しても、その熱は原料の他の部分に伝 導して, 内壁面部分が熔融温度に達するまでに時間がか かってしまい、熔融・滴下はなかなか起こらず、かえっ てその内壁面表層における脱炭を促進するだけという好 ましくない結果を招くことになってしまう。これを防ぐ ため、予備加熱の段階ではむしろ、表面から脱炭がおこ りくい温度にとどめつつ全体を加熱する必要があり、今 回の実験の結果からは内壁面温度として 800℃程度が妥 当ということになるであろう。また「2.3.2.」の結果か らみると、表面の低炭素層は、意図的に作らなくとも、 温度上昇に伴って、あとで炭素の拡散が十分に起こり得 るようなごく薄いものが自然に形成されている。「2.2.3.」 の操業経過をみても分かる通り、定常的な銑鉄の熔融・ 滴下を維持するためには,時間の経過に伴い,少しずつ 温度を上げてやる必要があった。これは、加熱中に表層 部で脱炭の起こっている箇所が相対的に増えることによっ て、内側の熔融銑鉄がとどめられる傾向になっていくた め、炭素の拡散や熔融を引き起こして表層部までの熔融 を引き起こすにはより高温が必要になってくるためと推 測される。

次に仮説2についてであるが、熔融した銑鉄の脱炭は、 滴下の途中で瞬時に起こるわけではないことが実証され た。したがって仮説2も誤りである。「2.2.3.」の結果 からは、滴下後、火窪内の炉底に溜まった熔融銑鉄に、 羽口の風があたり続けることによって、やや時間をかけ て脱炭が起こるものと判断され、それが効率的に行われ るための炉底の形状と羽口の位置や角度、風向などが必 要であり、炉の構造がきわめて重要であることがわかっ た。

なお、大鍛冶において脱炭のおこる機構について、永 田・渡邊(2006)は「溶鉄が鉄塊表面を溶解して流れ落 ちるときに、空気との反応によって脱炭が起こり、その ときの発生熱で表面の温度が上る。その結果、炭素濃度 が下がっても液層が生成し、脱炭がさらに進行する」と の推定を行っている。しかし、実際に行われていた大鍛 冶の操業についての記録では、「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」(山田, 1918) 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 点であり,いずれにしても,原料表面を流れ落ちるとい う表現からはかけ離れた状況である。また、実際の原料 が表面に凹凸の多い不定形で、また組成としても不均一 であったことを考えると、熔融した銑鉄がスムーズに原 料表面を流れ落ちながらこのような反応を整然と起こし ていったとは想定しにくい。鉄中の炭素が燃焼して熱が 発生するとしても、炭素濃度の低下した鉄の熔融を促す ほど大量の熱を短時間で発生させるためには、まず、一 度に大量の銑鉄の熔融が起こる必要があるが、実際にそ のような状況の熔融が起これば、前回のわれわれの実験 (齋藤ほか, 2006)で明らかになった通り, 脱炭反応が ほとんど進まないうちにそのまま流れ落ちて火窪に溜ま り、流銑となってしまう。熔融がごく少量であれば下に 落ちる途中での脱炭も期待できないことはないが、発生 する熱量が少なすぎて、たちまち周囲と同じ温度にまで 下がり, 固化してしまうであろう。その場合,「2.2.1.」 「2.2.2.」の実験で生じた脱炭層のようなものが表面に 形成されることになり、その後の原料熔融とそれが流出 する反応が阻害されてしまうことになる。さらに, 1360 ℃の内壁から落ちる液滴の温度が 1310~1320℃であり, 明らかに炭素の燃焼による温度上昇は起きていないとい う「2.2.3.」の温度測定結果や、火窪への滴下物を直ち に回収して炭素濃度を測定したところ脱炭はほとんど起 きていなかったという「2.3.1.」「2.3.2.」の結果から みて、下に落ちるまでの時間が短ければ途中での脱炭も

起こらないことは実験的に明らかである。これらの諸点 から, 脱炭の起こる機構に関する永田・渡邊(2006)の 推定は受け入れがたい。

以上をまとめると,大鍛冶の操業における加熱条件と そこで起きている現象は以下のようであったと考えられ る。

まず,予備加熱を行い,原料全体の温度を上げる。こ れは,次の加熱工程でできるだけ素早く熔融開始温度に 到達させることを目的としている。この際,表面に脱炭 層を作らないようにする必要があるため,最も温度の高 い内壁部分でも800℃程度にとどめる。

次いで、できるだけ速やかに、内壁部分が熔融温度と なるまで強熱する。加熱によって表層付近では脱炭が起 こるものの、あまりそれが進行しないうちに内部の銑鉄 が熔融することによって炭素が拡散していくため、脱炭 した部分は再び高炭素の鉄となって熔融し、この部分が 「皮」の様な状態で残存することはない。熔融が始まっ たら、適度な速度で滴下が起こるように温度を調整しつ つ操業を進める。時間の経過とともに、熔融しながらも 表層部で脱炭層は形成されるので、定常的な熔融・滴下 を維持するのに必要な加熱温度は徐々に高くなっていく ことになると考えられる。

鉄鉄の脱炭反応の主要部分は、火窪の炉底部に溜まっ た熔融銑鉄に羽口からの風が直接あたることによって引 き起こされる。従って、それが最も効果的に行われるよ うにし、なおかつ原料の上を覆っている木炭を効率的に 燃やして輻射熱がうまく原料内壁に伝わり、原料の熔融・ 滴下が適切な速度で行われるように風の通路を設定して やる必要がある。そのためには、火窪の形状、原料の積 み上げ方,羽口の相対位置や角度など,文字記録として 完全に表現することの困難な部分を含む,現場の準備作 業による適切な配置や微妙な調整がきわめて重要な役割 を担うことになる。

記録にある大鍛冶については、例えば、ほとんど同様 の工程の繰り返しにみえる「下げ場 [左下場]」「本場」 の2段階で行われることの意味や、実際にはかなり炭素 濃度の不均一な原料がどのような過程を経て熔融・滴下・ 脱炭にいたるのか、など、未解明の問題もいくつか残さ れている。しかし、前報と本報の実験結果と考察をもっ て、原理的にみた時の大鍛冶の概要はほぼ明らかになっ たと考えてよい。これらの結果を踏まえて、次は、江戸 時代の銑鉄製品のほか、日本美術刀剣保存協会がいわゆ る「日刀保たたら」で製造し販売している銑鉄塊を原料 として使用し、炉内温度と送風過程を記録およびモニター しつつ、スケールダウンしたものながら前近代大鍛冶の 再現を行う計画である。

#### 謝辞

本実験は、宮城県大崎市在住の刀匠・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。

本研究は科学研究費補助金・萌芽研究「鍛冶職人の伝 統技術を数値的に把握する方法の創設へむけた基礎研究」 (平成19~21 年度,研究代表者:齋藤努,課題番号: 19650256)の一貫として実施された。



図 I-1a 800℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-1a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 800℃ for 30 min.



図 1-1b 800℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-1b Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 800℃ for 60 min.



- 図 1-2b 900℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-2b Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 900°C for 30 min.



図 1-2c 900°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-2c Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 900°C for 60 min.



図 1-2a 900℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-2a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 900℃ for 30 min.



- 図 1-2d 900℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-2d Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 900  $^\circ\!C$  for 60 min.



図 1-3a 1000℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-3a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1000℃ for 30 min.



- 図 1-3d 1000℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-3d Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1000°C for 60 min.



- 図 1-3b 1000℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-3b Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1000°C for 30 min.



図 1-3c 1000℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-3c Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1000℃ for 60 min.



図 1-4a 1100℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-4a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1100℃ for 30 min.



- 図 1-4b 1100℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-4b Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1100°C for 30 min.



図 1-4c 1100°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-4c Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1100°C for 60 min.



- 図 1-5b 1150℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-5b Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1150°C for 30 min.



- 図 1-4d 1100℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-4d Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1100°C for 60 min.



図 1-5c 1150℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-5c Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1150℃ for 60 min.



図 1-5a 1150°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-5a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1150°C for 30 min.



- 図 1-5d 1150°C で 60 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-5d Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1150°C for 60 min.



図 1-5e 1150℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(熔融し て液体になった部分)

Fig. 1-5e Metallurgical structure of the pig-iron block heated at  $1150^{\circ}$ C for 30 min., the melted part.



図 1-6c 1200°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-6c Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1200°C for 60 min.



図 1-6a 1200°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織 Fig. 1-6a Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1200°C for 30 min.



- 図 1-6d 1200℃で 60 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-6d Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1200°C for 60 min.



- 図 1-6b 1200℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(表層部 付近を拡大)
- Fig. 1-6b Metallurgical structure near the surface of the pigiron block heated at 1200°C for 30 min.



- 図 1-6e 1200℃で 30 分加熱したテストピースの金属組織(熔融し て液体になった部分)
- Fig. 1-6e Metallurgical structure of the pig-iron block heated at 1200°C for 30 min., the melted part.



図2 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. 2 An assortment way of raw material, pig iron, in front of tuyere (Tawara, 1933)



図3a 非接触温度測定装置による炉内温度測定画面(内壁面は 990~1030℃を示す)

Fig. 3a Infra-red thermograph of inside of furnace during operation, showing 990-1030°C at inside wall



図3b 非接触温度測定装置による炉内温度測定画面(内壁面は 1190~1220℃を示す)

Fig. 3b Infra-red thermograph of inside of furnace during operation, showing 1190-1220°C at inside wall



a 全体の様子 a Overview



b 表層付近, C: <0.1~0.3% (右側), C: 0.6~0.8%</li>
b Near the surface, C: <0.1-0.3% on the right side, C: 0.6-0.8% on the left side



d 深部, C∶1.4~3% d Deep inside, C: 1.4-3%



e 深部, 銑鉄の組織(C:3~3.5%) e Deep inside, C:3-3.5%, showing structure of pig-iron



c 内部, C:1.2~1.4% c Inside, C: 1.2-1.4%

> 図4 操業後に残存した原料の金属組織(右が表層部) Fig. 4 Metallurgical structure of the remaining raw material, surface to the right



図5 操業後に残存した原料の金属組織(内部の銑鉄が流出した 箇所。右が表層部。反射電子像)

Fig. 5 Metallurgical structure of the remaining raw material, pig-iron outflowed from within, surface to the right



図 6 c 生成物の金属組織、C: 3 ~3.5%程度 Fig. 6c Metallurgical structure of the product, C: approx. 3-3.5%, surface to the downward



図 6 a 生成物の金属組織(表層部が脱炭している箇所) Fig. 6a Metallurgical structure of the product, showing the decarbonized surface, surface to the upward



図7a 生成物の金属組織(表層部が脱炭している箇所) Fig.7a Metallurgical structure of the product, showing the decarbonized surface, surface to the upward



図 6 b 生成物の金属組織(表層部付近の脱炭箇所を拡大) Fig. 6b Metallurgical structure near the surface of the product



図7b 生成物の金属組織(表層部付近の脱炭箇所を拡大) Fig.7b Metallurgical structure near the surface of the product



図7c 生成物の金属組織、C: 3~3.5%程度 Fig.7c Metallurgical structure of the product, C: approx. 3-3.5%, surface to the upward



図 8 操業 3 回目における生成物の断面図(数字はその箇所の炭素濃度(%)) Fig. 8 Cross section of the product at the 3rd operation with the numbers showing the carbon content



図 9 操業 3回目における生成物中に含まれているスラグの鉱物 組織(反射電子像)

Fig.9 Minerals of slag in the product at the 3rd operation



図 10a 加熱実験で残存した原料の金属組織(表層部が脱炭している) Fig. 10a Metallurgical structure of the remaining raw material, showing the decarbonized surface to the downward



図 10b 加熱実験で残存した原料の金属組織(表層部付近を拡大) Fig. 10a Metallurgical structure near the surface of the remaining raw material, surface to the downward



図 10c 残存した原料の外側に付着していた熔融鉄の金属組織 Fig. 10c Merallurgical structure of the molten iron attached at the outside of the remaining raw material



- 図 11a 加熱実験で残存した原料の金属組織(表層部が脱炭して いる。反射電子像)
- Fig. 11a Metallurgical structure of the remaining raw material, showing the decarbonized surface to the downward



図 11b 加熱実験で残存した原料の金属組織(表層部付近の拡大) Fig. 11b Metallurgical structure near the surface of the remaining raw material



図 10d 滴下後ただちに回収した熔融鉄の金属組織 Fig. 10d Metallurgical structure of the molten iron, picked up from the hearth part immediately after fallen down



図 11c 脱炭層と銑鉄部分の境界付近の金属組織(図 11a の左側) Fig. 11c Metallurgical structure around the border between decarbonized part and pig-iron, left-side of Fig. 11a



図 11d 脱炭層と銑鉄部分の境界付近の金属組織(図 11a の右側) Fig. 11d Metallurgical structure around the border between decarbonized part and pig-iron, right-side of Fig. 11a



図 11f 滴下後ただちに回収した熔融鉄の金属組織 Fig. 11f Metallurgical structure of the molten iron, picked up from the hearth part immediately after fallen down



図 11e 残存した原料の外側に付着していた熔融鉄の金属組織 Fig. 11e Merallurgical structure of the molten iron attached at the outside of the remaining raw material

#### 引用文献

- 齋藤 努・服部晃央・高塚秀治 2006「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」『考古 学と自然科学』53 pp.37-55
- 鈴木卓夫 1990『たたら製鉄と日本刀の科学』雄山閣
- 俵 國一 1933 「錬鐡(庖丁鐡)製造法」『古来の砂鐡製錬法』丸善 pp.107-123
- 永田和宏・渡邊 玄 2006「大鍛冶の精錬機構―真鍋刀匠精錬鍛冶場における実験の中間報告―」『「前近 代製鉄実験」研究グループ第7回例会予稿集』pp.28-32 (組日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会「鉄の歴
  - 史ーその技術と文化一」フォーラム編
- 山田賀一 1918「中國に於ける砂鐵精錬」『鐡と鋼』 4 pp.348-390

(2008年8月19日受付, 2009年3月2日受理)

### Experimental Inspection of Reaction in Furnace of Ookaji, a Pre-modern Process of Pig Iron Decarbonizing

Tsutomu SAITO, Minoru SAKAMOTO, Motoshige DATE, Hideharu TAKATSUKA National Museum of Japanese History, 117 Jonai-cho, Sakura City, Chiba, 285-8502, Japan

We examined the detail of reaction in the furnace of *ookaji*, a decarbonizing process of pig iron to make wrought iron from the Edo-period to the early Meiji-era, which have disappeared and is barely recorded.

The followings were proved from the heating experiments in muffle furnace and the experimental operations in scale-down open-type furnace with high-temperature thermography and air volume system;

- The purpose of preliminary heating written in the records are to produce an increase in temperature of whole of raw material in preparation for the following fusional heating. The temperature must be 800°C at a maximum not to make decarbonized layer at the surface.
- 2. Depending on increasing of temperature the raw material is fused and dropped to the hearth part. The temperature has to be controlled to continue the steady fusion and dropping. Decarbonizing reaction is occurred by blowing to molten wrought iron, which is accumulated at the hearth part, not during the dropping from raw material to bottom.