

大鍛冶の炉内反応に関する 検証と実験的再現

Experimental Inspection and Reconstruction of Ookaji,
a Pre-modern Process of Pig Iron Decarburizing

齋藤 努・坂本 稔・高塚秀治

SAITO Tsutomu, SAKAMOTO Minoru and TAKATSUKA Hideharu

はじめに

①大鍛冶の技法に関する調査記録

②第1回の試行

③第2回の試行

④日刀保の銑を使用した再現操業

まとめ

【論文要旨】

大鍛冶は、前近代の砂鉄を原料とする製鉄法において、銑鉄を脱炭して軟鉄を作る精錬方法として、近世から明治時代まで行われていた技術である。考古学的な遺跡の発掘調査は行われているが、現在は技術の伝承が途絶えているため、作業内容の詳細は二編の論文からしか推測できなかった。

われわれは大鍛冶を再現するために、実験炉を構築して様々な条件で操業を行い、技術の詳細と炉内反応の実態について考察を行った。その結果、現代のたたら吹き製鉄によって作られた銑を原料として、小規模ながら大鍛冶を再現することに成功した。

基本的な反応機構は以下の通りであると推測される。

1. はじめに、原料銑鉄の表層部に脱炭層が形成されない800℃程度を目標として予備加熱を行なう。全体の温度が上がったところで、内壁が反応の始まる温度（1150℃前後）になるまで速やかに温度を上げる。

2. 羽口からの風によって、アーチ状に組まれた原料銑鉄の下部にある空間の気圧が低くなると、原料と炉内壁の羽口側の隙間から空気とともに一酸化炭素が吸い込まれる。これらが原料下部空間を通過する際に燃焼し、内壁が加熱される。

3. 熔融した銑鉄が炉底に落ち、そこに羽口からの風があたることによって、ある程度時間をかけて脱炭が進行する。したがって、熔融が一度に行われてしまうと内部まで十分な脱炭が行われず、流銑の状態になってしまう。熔融銑鉄がわずかずつ垂れ落ちて脱炭する、というプロセスが連続的に達成されるような内壁温度を維持するためには、反応状況をみて送風量を微調整することが必要である。

【キーワード】 銑鉄、脱炭、軟鉄、前近代技術、精錬

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と、8 世紀から 10 世紀の近江地方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。近世以降のたたら吹製鉄法においては、真砂系砂鉄から主として鋼を作ることを目的とした「鋤押法」と、赤目系砂鉄から主として銑鉄を作ることを目的とした「銑押法」があったといわれている〔河瀬，1995〕。

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)」、不純物の除去や鉄の性質を左右する炭素濃度の調整を目的とする「精練 (refining)」、そして製品とするための「鍛造 (小鍛冶)」「鑄造」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，1990；田口・尾崎，1994 など〕。また、「精練」や「鍛造 (小鍛冶)」としては、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「卸し金」や不純物の除去と素材の均一化を行う「折り返し鍛錬」、刀身を製作する「作り込み」「素延べ」などの技法が、現在も全国に残る刀匠などによって伝承されている（本特集号「刀匠が継承する伝統技術の自然科学的調査」参照）。

ここで取り上げる「大鍛冶」は精練の一つであり、特に近世以降の銑押法において、生成した銑（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。

館〔2003〕は、本床・小舟様の地下施設と鞆座を備えた広島県東広島市の石神遺跡などの事例からみて、炉熱水準が銑押に十分な高温を達成できていたものと考え、遅くとも室町時代後期には銑押法が成立したと推測している。出土鉄塊の分析結果からも、中世において銑の生産が行われていたことは確認できる〔角田，2010〕が、その脱炭方法については必ずしも明確ではない。中国地方の鉄生産遺跡について総括した角田〔2004，2010〕によれば、精練鍛冶遺跡においてみられる、原料と考えられる白銑鉄の出土、炉底塊・流動滓などの鍛冶滓の状況や、鍛打に伴う粒状滓・鍛造剥片の存在から、銑鉄を「除滓・脱炭を目的に加熱・鍛打し」たことを想定し、これが「大鍛冶に通じるところがある」技術としている。しかし、大鍛冶そのものは、中世段階においては確認されていない。

河瀬〔1995〕は、近世のたたら吹製鉄において高殿が建てられ始めた時期を、送風装置である天秤鞆が使われ始めたのと同様 17 世紀末から 18 世紀前半としている。そして、高殿たたらでは銑鉄を作ることを主な目的とし、その普及に伴って、脱炭処理のための大鍛冶が必要とされたという考察を行っている。

大鍛冶は「下げ場」と「本場」の二つの工程からなる（後述）。河瀬〔1995〕や東山〔2003〕によれば、考古学的な調査結果などから、大鍛冶場の状況は以下のようないくつかの観点に従って分類することができる。まず、大鍛冶場の建物の形状からみると、方形の平面をなすもの（例：保光たたら）や長方形の平面をなすもの（例：犬鳴日原鉄山、郷路橋遺跡）がある。下げ場と本場の 2 基

の鍛冶炉の配置には、主軸を直線的にそろえて配置するもの（例：郷路橋遺跡、犬鳴日原鉄山、獅子谷遺跡Ⅰ期・Ⅲ期古段階、中原遺跡第2・3段階、黒尊遺跡、鳥取県日野郡の都合山大鍛冶屋〔俵，1933〕）と、直交方向に向けて配置するもの（例：保光たたら、門前遺跡、獅子谷遺跡Ⅱ期・Ⅲ期中・新段階、中原遺跡第1段階、戸井谷尻遺跡）の2種類がみられる。また、建物が一棟の場合（一軒丁場）と二軒の場合（二軒丁場）とがあったようである。

角田ほか〔1999〕では、大鍛冶場が、高殿炉に併設されて同じ場所で一貫操業されていたとみられるもの（例：檀原遺跡、大槓鉦跡）と、単独で立地し高殿炉から搬入された原料で操業されていたもの（例：橋路橋遺跡；戸井谷尻遺跡）という分類が示されている。これは、河瀬〔1995〕が、広島県〔1981〕の資料から提示した、18世紀の阿芸国山県郡において、たたらの数に比べて鍛冶屋の数が非常に多いことから、たたらと鍛冶の工程を一貫して経営する鉄山師のほかには大鍛冶のみを独立して経営するものがあらわれたとしている状況を、考古学的に裏付けるものであろう。

上で例としてあげた大鍛冶屋のうち、発掘調査された遺跡の所在地や時期について表1にまとめた。

このほか、文献史料としては、『鉄山必用記事』の鍛冶屋・延鋸鍛冶屋（第5図）に大鍛冶場の図がみられる。また、大鍛冶場の職制は、土井〔1983〕によって表2のようにまとめられている。

これらによって、大鍛冶場の概要についてはおおむね把握されているといつてよい。

しかし、現在、大鍛冶はその技術伝承がすでに途絶えており、また具体的な作業工程を記したも

表1 発掘調査された大鍛冶遺跡の例

遺跡名	場 所	時 期	文 献
保光たたら	広島県比婆郡東城町栗田	18世紀前半～中ごろ	潮見(1985)
犬鳴日原鉄山	福岡県鞍手郡若宮町犬鳴	19世紀中ごろ	黒田(1991)
郷路橋遺跡	島根県邑智郡瑞穂町市木	18世紀末～19世紀中ごろ	角田ほか(1991)
獅子谷遺跡	島根県飯石郡頓原町角井	17世紀後半～19世紀中葉以降	東山(2003)
中原遺跡	島根県飯石郡頓原町八神	19世紀中ごろ	角田ほか(1999)
黒尊遺跡	広島県山県郡大朝町筏津	19世紀前半	大朝町教育委員会(1995)
門前遺跡	広島県山県郡大朝町大塚	江戸後期	松井(1991)
戸井谷尻遺跡	島根県飯石郡頓原町角井	18世紀末～19世紀前半	目次ほか(2001)
檀原遺跡	島根県簸川郡佐田町上橋波	18世紀後半～19世紀中ごろ	角田・宮本(1997)
大槓鉦跡	島根県飯石郡頓原町志津見	18世紀～19世紀前半	勝部(1997)

表2 大鍛冶の職制内容(土井, 1983; 第15表)

	職 名	人数	役 目	内 容
割鉄鍛冶屋	手代	1	鍛冶屋総支配	職人・山子の頭廻し、地鉄・長割、銑・炭等諸品の支配 扶持米・諸賃金等の請払い、その他諸用引受 1か月に細工上手20日、未熟10日 地鉄の吹分け、荒こなし、長割鍛鉄が大工補佐、火加減手伝い 大工に従い2人ずつ左右に立ち、槌で長割鍛錬する 長割鍛冶では大工に、地鉄荒こなしでは左下につき手伝い 山所を見廻り、立木荒しの取締まり 炭焼百姓の不足の場合に雇い、炭拵え運搬する
	下走	1	鍛冶屋補佐	
	大工	2	職人棟梁	
			左下場作業	
	手子	6	鍛鉄作業	
	吹差・左下吹	2		
	山子頭	1	総山子の小頭	
	山子	不定	小炭焼	

(『学己集』巻2による)

のとしては、2篇の文献上の調査報告〔山田、1918；俵、1933〕と天田〔2004〕による大鍛冶屋大工（職長）からの取材記録があるのみで、技術的詳細について実態のよくわからない点が多く残されている。

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ことと、小規模なレベルにおいて、その再現を行うことを目的として、これまで調査を進めてきた。上述した考古学的な発掘調査で大鍛冶炉の遺構・遺物調査や原料となった銑鉄・鉄滓等の分析は行われているが、再現を行うために必要となる具体的な作業工程に関する情報はほとんど得ることができない。そこで、われわれは上述した山田〔1918〕と俵〔1933〕の2篇の論文を主に参考として検討を行うこととした。

ここでは、これまでの予備実験の結果〔齋藤ほか、2006；齋藤ほか、2009〕をまとめるとともに、それに基づいて、鳥根県出雲市で日本美術刀剣保存協会が操業する日刀保たたらで作られた銑を原料として実施した再現操業について報告する。

なお、大鍛冶の再現操業はすべて、宮城県大崎市在住の九代目法華三郎信房氏とご子息の法華栄喜氏のご協力のもと、両氏の工房内に実験炉を構築して進められた。

①……………大鍛冶の技法に関する調査記録

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。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（鋳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日に庖丁鉄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。

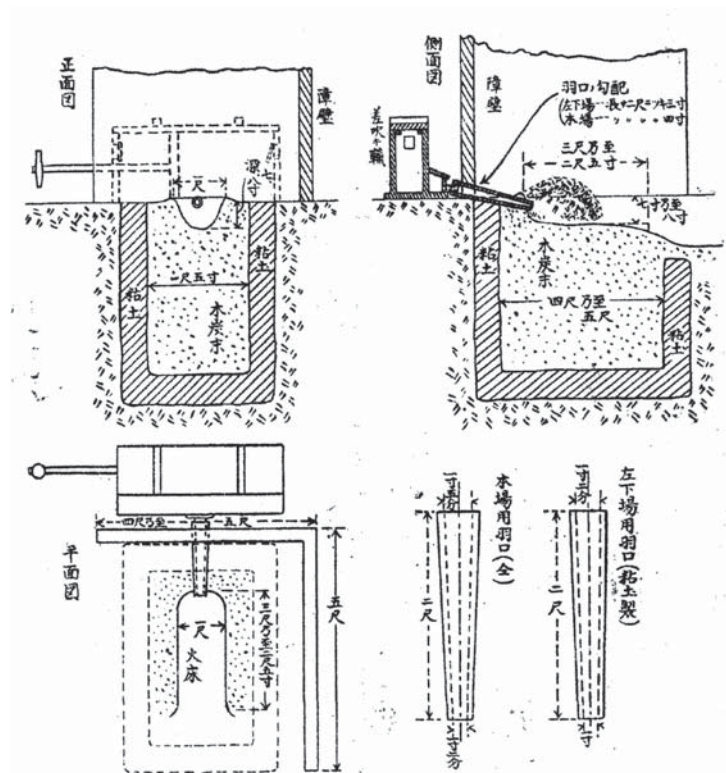


図 1 鳥取で調査された大鍛冶炉の概略図 (山田, 1918)

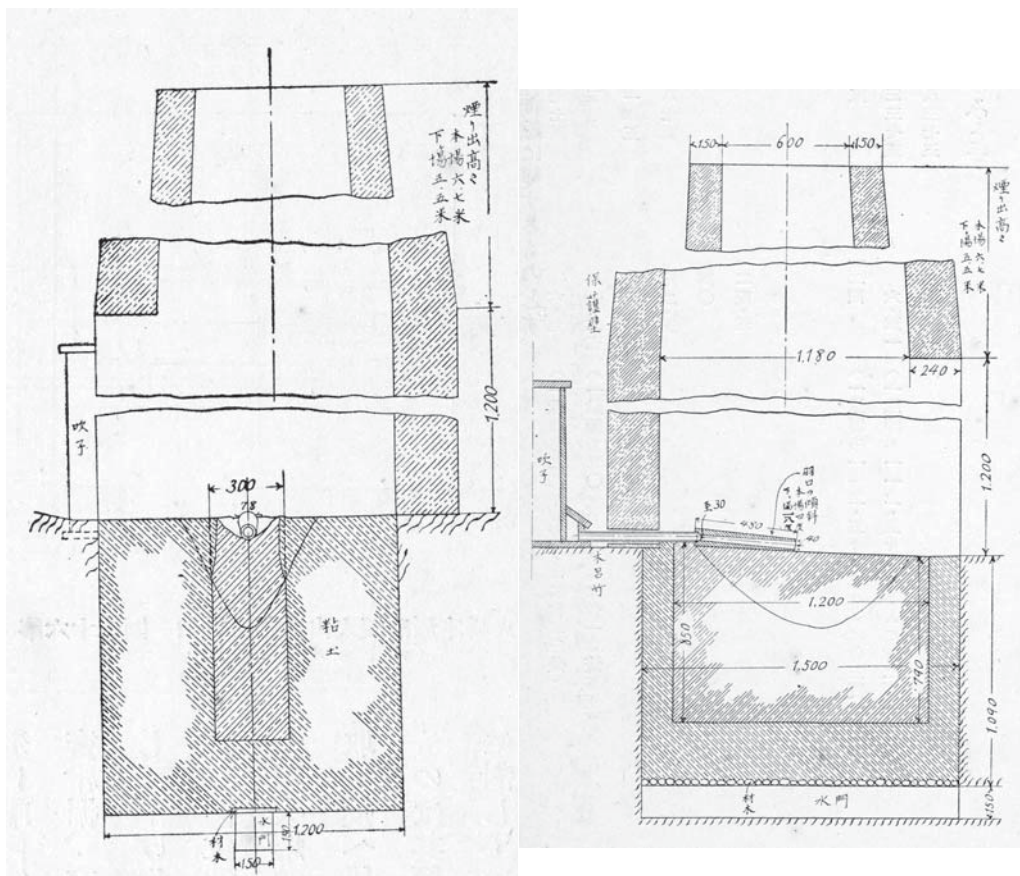


図 2 鳥取で調査された大鍛冶炉の概略図 (依, 1933)

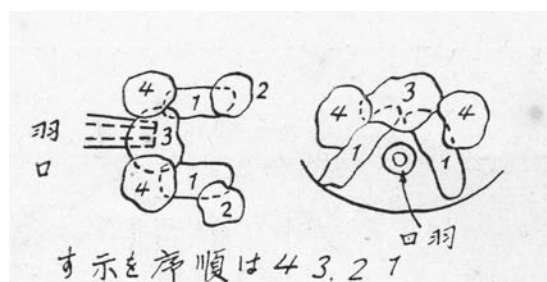


図3 大鍛冶における羽口前の原料銑鉄塊の組み合わせ方(俵, 1933)

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。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(鋸を、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窟にたまったと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。

このほか、天田 [2004] は、昭和 30～40 年代に、すでに引退していた高齢の大鍛冶屋大工を取材し、大鍛冶の方法の聞き取りと、左下法(下げ場で行う作業の方法)を伝授してもらった時の経緯を記録している。しかし、この取材の目的は大鍛冶による庖丁鉄の製造法そのものを知ることよりも、刀剣の素材となるような鋼を大鍛冶の技術を応用して作りたいという意図で行われたものである。文中には作業状況に関する貴重な記述も含まれてはいるものの、大鍛冶の再現に役立つような具体的な詳細情報は記されておらず、参考にすることはできなかった。

②……………第1回の試行

最初の試行は、とにかく大鍛冶に関する手がかりを得るために、作業の際には特に計測器などを使用せず、山田 [1918]、俵 [1933] の図と記述をなぞる形で行った [齋藤ほか, 2006]。

2.1. 炉の構築

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、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] にある方法では周囲の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 5.5 m、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。この試行では山田 [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種類の炉で作業を行い、下げ場を想定した1回のみ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作業であるため、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、反応に直接関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、これはたたらの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ることができる。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、実際の作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、いずれも作業時の加熱によって、少なくとも表面は灰もしく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、この試行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。

2.2. 開放炉による作業

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作業を行った。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・送風して作業を行い、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 2.3m³ のハンドブローアを使用した。そのままでは風が強すぎたため、変圧器で電圧を 10% に下げ、さらに弁で風孔を半分程度に絞って適当な風量におさえた。ただし、送風量の具体的な数値は不明である。また、作業中に炉内状況に応じて多少の微調整を加えた。作業の様子を写真 2e に示す。作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、作業終了。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が、法華氏は経験的に、目視によって炉内のおおよその温度を見積もることができ、1300℃ 程度との推定が行われた。この温度推定の正確さについては、

第二回の試行の際に検証され、 $\pm 10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で一致していることが確認された。

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。これを見てわかる通り、原料の内壁面に木炭が接触していないに関わらず、内壁は高温になっている。このメカニズムについては後述（「3. 5.」で考察）する。

2.3. 煙突炉による操業

煙突炉では、「2. 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、ブロー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、送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、ここではそこに焦点をあてて解析を進めることにした。

2.4. 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 つは火窯の傾斜の比較的下の方に位置しており、銑鉄が高温で溶融し、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窯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。

2.4.1. 開放炉の生成物

生成物の炉内状況を写真 4a に示した（鉄棒で指し示しているのが脱炭生成物、その下が流銑）。流銑の重量は 1710g、脱炭生成物の重量は 2710g であった。写真 4b で上部の塊が脱炭生成物（タテ 12cm × ヨコ 23cm × 厚さ 3 ～ 6 cm 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て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溶解せずに原形をとどめており、その内部は溶解して失われた状態であった（写真 4c）。

写真 4b の脱炭生成物はスライスして（写真 4d）、断面を後述（2. 6.）の分析に供した。

2.4.2. 煙突炉の生成物

生成物を炉外に引き出した状況を写真 5a 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 310 g、脱炭生成物の重量は 4730g であった。写真 5b 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。

写真 5b の脱炭生成物はスライスして（写真 5c）、断面を後述（2. 6）の分析に供した。

2.5. 折り返し鍛錬の実施

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。

折り返し鍛錬の方法については、本特集号の齋藤ほか「刀匠が継承する伝統技術の自然科学的調査」に詳述しているので省略する。ここでは 5 回の折り返し鍛錬を行って生成物とした。操業時間は各 30 分程度であった。

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。肉眼で見える限りでは、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た。

2.6. 金属組織に基づく各部の炭素濃度測定

2.6.1. 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磨した。これを1%ナイト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。

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。

2.6.2. 原料の分析結果

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、おおむね均一な白鉄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。

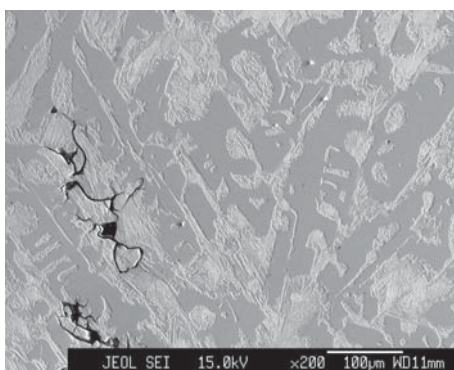


図4 本研究で用いた原料銑鉄（肘金）の金属組織（C：3～3.5%程度）

2.6.3. 開放炉の脱炭生成物の分析結果

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4d, 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5中の数値は、金属組織から推定される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 6 に示した。樹状のファイヤライト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。

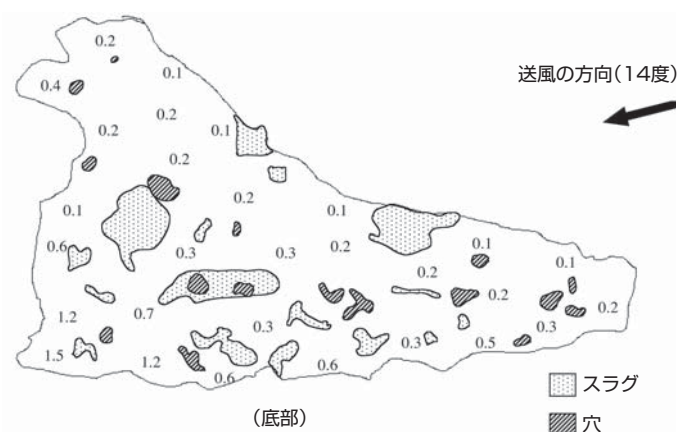


図 5 開放炉における脱炭生成物の断面図
(数字は その箇所の炭素濃度 (%), 写真 4d に対応)

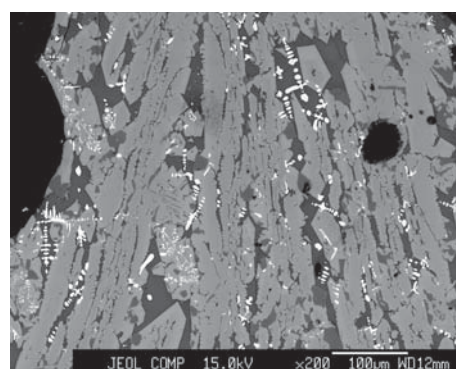


図 6 開放炉における脱炭生成物内の
スラグの鉱物組成 (反射電子像)

2.6.4. 煙突炉の脱炭生成物の分析結果

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 5c、図 7）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 7 中の数値は、金属組織から推定される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%）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。

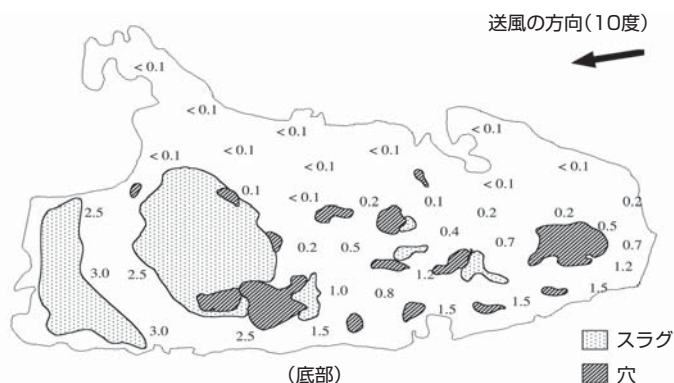


図 7 煙突炉における脱炭生成物の断面図
(数字はその箇所の炭素濃度 (%), 写真 5c に対応)

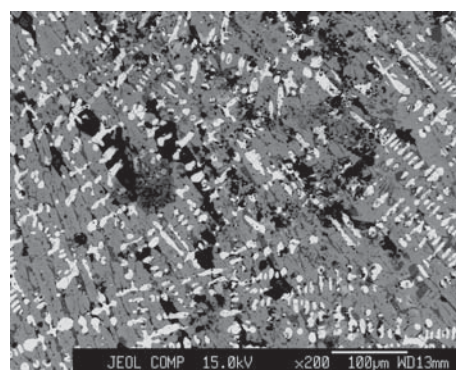


図 8 煙突炉における脱炭生成物内の
スラグの鉱物組成 (反射電子像)

スラグの鉍物組織観察結果を図8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ファイヤライトと繭状のウスタイトが観察された。なお、2つの炉で鉍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違い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、炉内の状況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。

2.6.5. 折り返し鍛錬生成物の分析結果

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。

開放炉の脱炭生成物に対する折り返し鍛錬の生成物は、ほとんど炭素を含まない ($C: < 0.1\%$) 部分もところどころ見られるが、大部分では炭素濃度が 0.1% 程度と判断された。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の生成物は、開放炉のそれよりも若干高く、 0.2% 程度と判断された。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「2.6.3.」、「2.6.4.」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。

2.7. 第1回の試行に関する考察

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 $0.1 \sim 0.2\%$ という軟鉄に近い低炭素鋼にすることができた。

試行の結果、より実態に近い再現を行うために解決すべき課題として、以下のような諸点が浮かび上がってきた。

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 $< 0.1\% \sim 0.2\%$ 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、温度の視点から、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、原料の銑鉄が溶融して下に落ちていき、いずれかの時点で（落下の途中か、下に落ちてからか、その両者か）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溶解がおき、体積が大きすぎたために、酸化作用が十分に液体の内部にまで及ばないままに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を解決するため、次の試行実験に向けて、以下のようなモデルを考えてみた。

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、溶けた鉄がポタポタとし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溶解がおこり、「滴下」や「ポタポタとしたり落ち」の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、「2. 4. 1.」、「2. 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のではないかと考えた。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溶解せずに原形をとどめており、その内部は溶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。これは、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、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溶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いう仮説を立ててみることにした。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のではないだろうか。

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」「鉄中の炭素少々減して底に溜まれるものを底突にてつ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当たる始めの1時間余りは、熔融がわずかに起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、第一回の試行から、大鍛冶における反応の実態を次のように推定した。

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る。

第一回の試行により、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。次の段階としては、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の調査を行うことにする。

③……………第2回の試行

あらためてまとめ直すと、特に実験的な検証を必要とするのは下記の3点である。

- 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。しかし第一回の試行では、「2. 7.」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溶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う、また逆に温度を低めにして操作すると、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作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、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「3. 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「4. 2.」「4. 3.」で行った [齋藤ほか, 2009]。

3. 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、E PMA (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、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。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。

2cm × 2cm × 2cm 程度に成形した銑鉄 (炭素濃度約 3 ～ 3.5%, 「2.」で使用したのと同じ肘金) 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、銑鉄の脱炭や溶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匠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、ねずみ鑄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℃では一部溶融がおきていた。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。図9は、いずれも上部が表層部である。

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9-1a, b）。

900℃では、30分加熱（図9-2a, b）、60分加熱（図9-2c, d）とも、脱炭層の厚さは200～300 μm であり、そのうち、表層に近い100～150 μm 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9-3a, b）、60分加熱（図9-3c, 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9-3a, 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 μm 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9-4a, 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 μm 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9-4c, 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℃では、30分加熱（図9-5a, b）、60分加熱（図9-5c, d）とも、溶融せずに固体のままに残存している部分では400～500 μm 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。溶融して液体となった部分ではこれよりも脱炭が進み（図9-5e：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9-6a, b：30分加熱試料、図9-6c, 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9-6e：30分加熱試料、）。)

以上の実験結果（表3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。

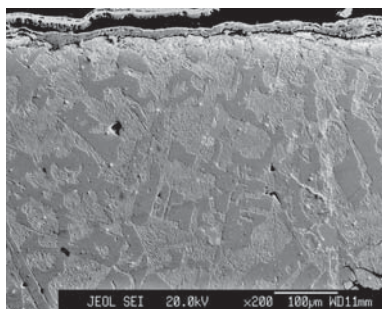


図9-1a 800°Cで30分加熱したテストピースの金属組織

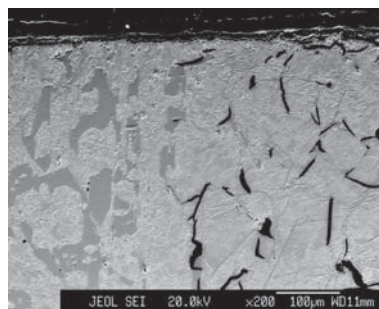


図9-1b 800°Cで60分加熱したテストピースの金属組織

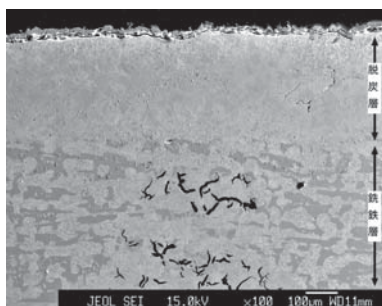


図9-2a 900°Cで30分加熱したテストピースの金属組織

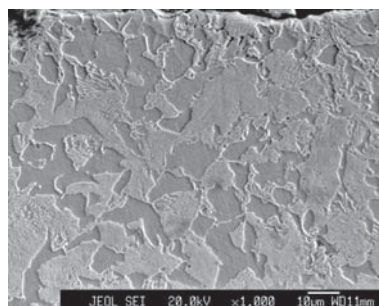


図9-2b 900°Cで30分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)

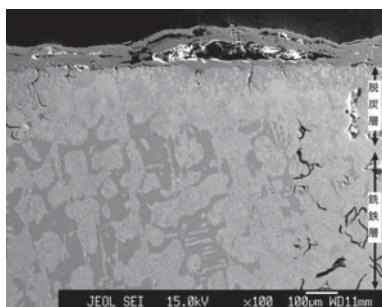


図9-2c 900°Cで60分加熱したテストピースの金属組織

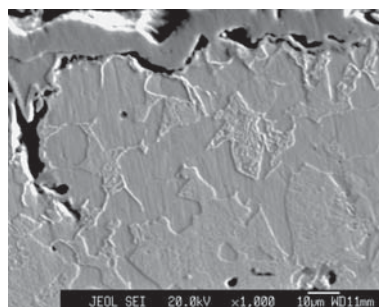


図9-2d 900°Cで60分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)



図9-3a 1000°Cで30分加熱したテストピースの金属組織

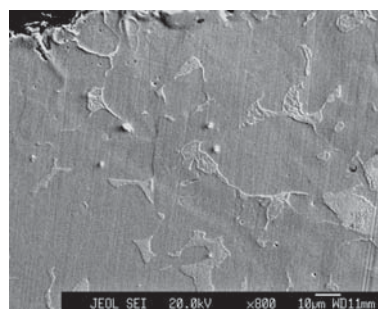


図9-3b 1000°Cで30分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)

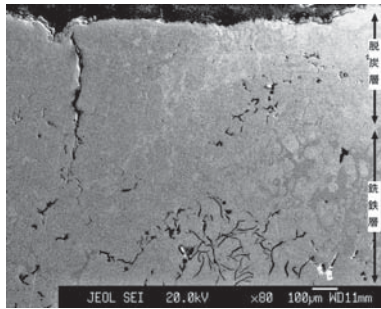


図9-3c 1000°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織

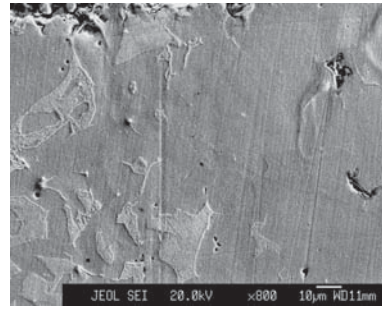


図9-3d 1000°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織 (表層部付近を拡大)

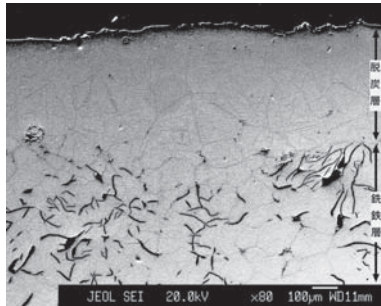


図9-4a 1100°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織

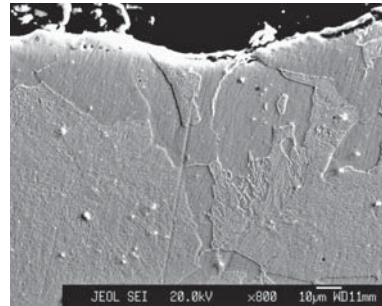


図9-4b 1100°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織 (表層部付近を拡大)

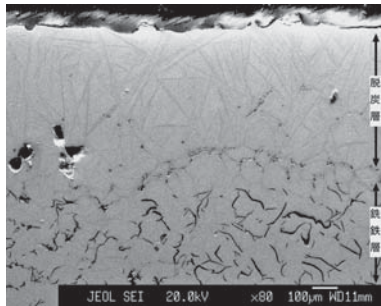


図9-4c 1100°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織

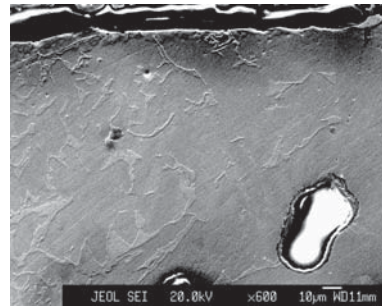


図9-4d 1100°Cで 60 分加熱したテストピースの金属組織 (表層部付近を拡大)

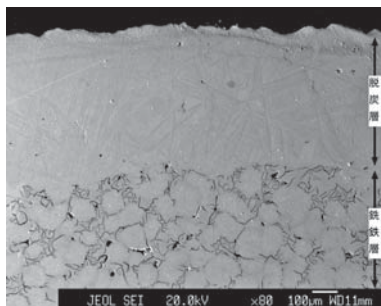


図9-5a 1150°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織

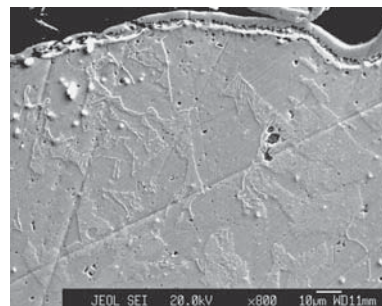


図9-5b 1150°Cで 30 分加熱したテストピースの金属組織 (表層部付近を拡大)

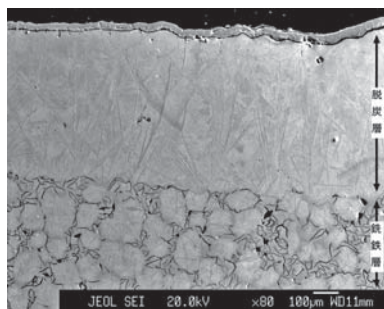


図9-5c 1150℃で60分加熱したテストピースの金属組織

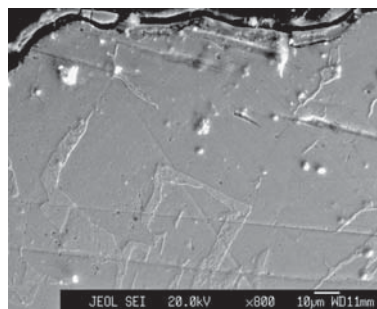


図9-5d 1150℃で60分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)

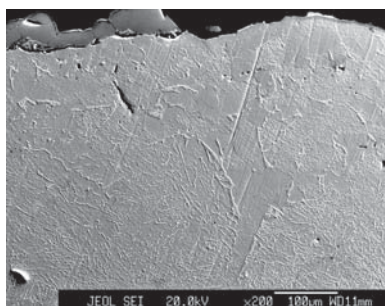


図9-5e 1150℃で30分加熱したテストピースの金属組織(溶融して液体になった部分)

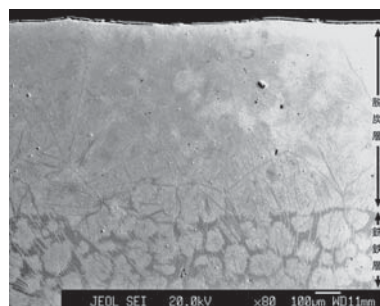


図9-6a 1200℃で30分加熱したテストピースの金属組織

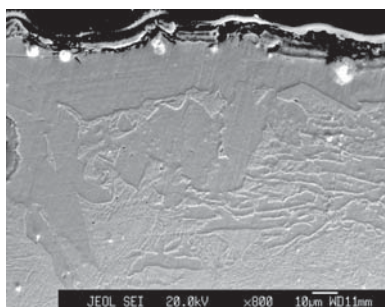


図9-6b 1200℃で30分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)

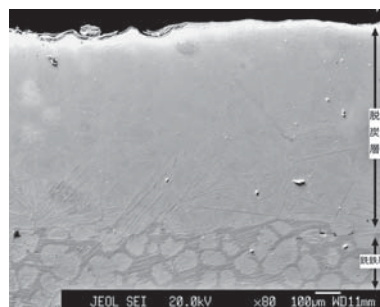


図9-6c 1200℃で60分加熱したテストピースの金属組織

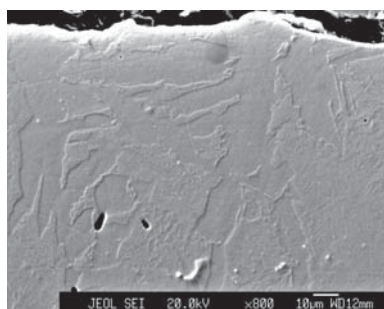


図9-6d 1200℃で60分加熱したテストピースの金属組織(表層部付近を拡大)

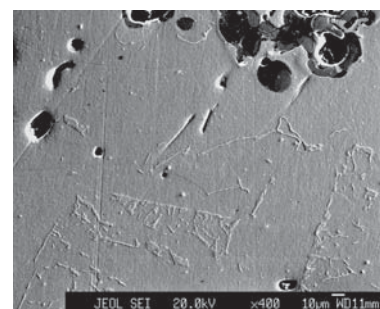


図9-6e 1200℃で30分加熱したテストピースの金属組織(溶融して液体になった部分)

表3 テストピースによる加熱実験の結果

加熱温度(℃)	固体部分		液体部分	
	脱炭層の厚さ(μm)	最も脱炭が進んだ箇所での炭素濃度(%)	平均的な炭素濃度(%)	最も脱炭が進んだ箇所での炭素濃度(%)
800	(なし)	(脱炭していない)		
900	200~300	> 0.4		
1000	400~500	0.1~0.3		
1100	400~500	< 0.1		
1150	400~500	< 0.1	0.2~0.4	< 0.1
1200	400~500	< 0.1	< 0.2	< 0.1

3.2. 仮説の提示

「2. 7.」の考察と「3. 1.」の結果とから、われわれは上述の課題 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、融点上がり、銑鉄の溶融が始まる程度の温度まで加熱されても固体のままにとどまる。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、いちどきに溶融が起こらず、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、それを溶かすためにはより高い温度が必要となるため、原料の溶解が十分に進まず、溶け残りが生じる可能性も出てくるが、「3. 7.」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、溶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。これによって課題の 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、溶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]。このことと溶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。これは課題の 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。

3.3. 開放炉におけるアーチ形原料銑鉄の加熱実験

第一回の試行の結果をふまえ、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。炉の構築や使用した原料は第一回の試行における開放炉とほぼ同様である（写真6a）。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3.3mm、90cm角の鉄板を砂の上に置く。この上に、断熱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窟となるタテ46cm×ヨコ23cmの長方形の凹みをあけた。火窟に耐火モルタルを敷いて底部の大まかな形状を定め、この火窟内に向けて、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。火窟にはさらに、底面の形状や傾斜を整えながら木炭を1～3.5cm程度の厚さにしきつめた。炉を構築後、火窟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、第一回の試行で使用したのと同様の肘金（ヒンジ）であり、炭素濃度は約3～3.5%である。これを適当な大きさに切断し（写真6b）、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6c）。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3）。燃料の木炭としては硬めの松炭を用意し、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ーU2V-70S（最大流量1800ℓ/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700ℓ/min）を組み合わせたものである（写真7a）。

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当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た。原料の溶融・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（写真7b）。これで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（この場合は向かって右側にある原料の内壁温度が測定される）を調整し、またその際の送風量を適宜記録した。操業の様子を写真7cに示す。中央の開放炉の向こう側にあるのが送風装置である。

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、また溶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。

3.3.1. 操業1回目

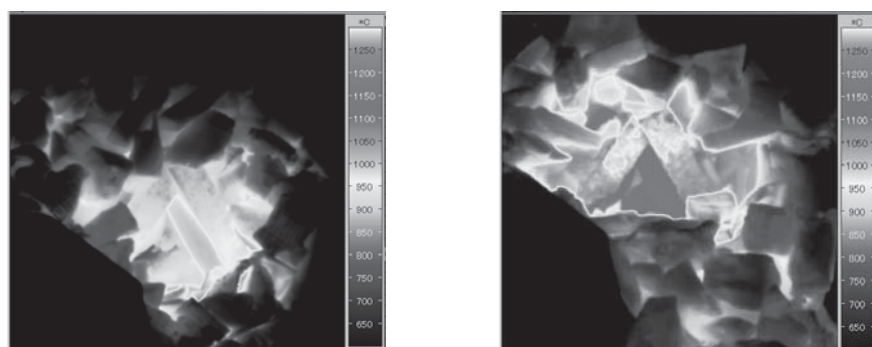
使用した原料はタテ 19.0cm × ヨコ 8.0cm × 厚さ 3.0 ~ 3.5cm で重量 3.4kg のものとタテ 19.0cm × ヨコ 8.0cm × 厚さ 3.2 ~ 3.5cm で重量 3.6kg のものの2片を、上部が寄り掛かりあうようにして羽口の前面に置き、風がその下を通り抜けるようにした。仮説2を想定し、風の方角は、火窯の炉底部（溶けて下に落ちた銑鉄が溜まる場所）ではなく、溶融した液体状態の銑鉄が滴下する途中で最も効果的に風を受けるように、アーチの中央部やや下のあたりが最大風速となるよう羽口の位置を調整した。操業は、内壁面中央部付近で温度測定しつつ行い、表層部に意図的に脱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、鉄の溶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、溶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 ℓ/min に送風量を設定し、33分後に内壁温度が980℃に達した。その後、送風量の調整を行い、内壁温度を990 ~ 1030℃に保った。「3. 1.」の結果から原料の溶融は1150℃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 ℓ/min とし、内壁温度を1140 ~ 1170℃まで上げた（75分後）が、まだ溶融はみられなかった。さらに送風量を350 ℓ/min まで増やし、77分後、内壁温度1180℃となったところで、溶融が始まった。送風量を320 ~ 350 ℓ/min の範囲で微調整しつつ、内壁温度を1190 ~ 1220℃として連続的に溶融が起こるような状態を約78分間保ち、送風開始から164分後に溶融・流出がみられなくなったので操業を終了した。

図10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10a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10bは強熱して溶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8aは操業終了直後の炉内の状況、また写真8bは残存した原料と炉底に溜まった溶融生成物を、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）。原料銑鉄は内部が溶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溶けずに残ってしまい、内部にあった銑鉄のみが溶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。下部が溶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8c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

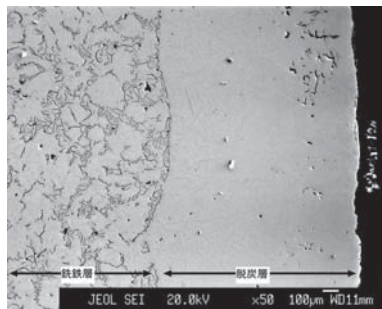


a. 予備加熱の段階（内壁面温度は990～1030℃）

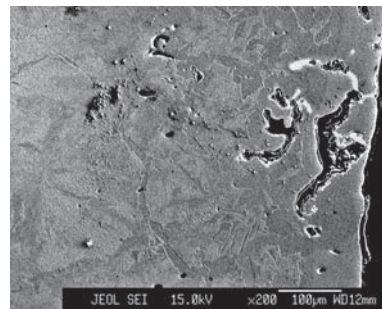
b. 強熱して溶融が始まる段階
（内壁面温度は1190～1220℃）

図10 非接触温度測定装置による炉内温度の測定画面例
（論文末カラー図参照）

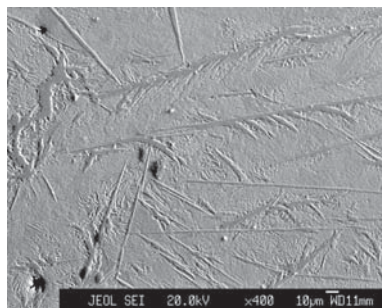
た断面を示した。中の銑鉄が流出して空洞ができているが、銑鉄部分のすべてが外に流出しきっているわけではない。図11はその金属組織の観察結果である。図11aの右が表層部、左が内部で、表層付近の100～300 μ mの厚さまでは著しく脱炭が進み、炭素濃度<0.1～0.3%となっている（図11bの右側）。内部にいくほど炭素濃度は高くなって、しだいに亜共析から過共析までの鋼組織を示すようになり（図11bの右側：亜共析組織、図11bの左側：共析組織、図11c：過共析組織），そこから深部ではほぼ均一な炭素濃度の銑鉄（図11dの右側：過共析組織、図11dの左側：銑鉄の組織、図11e：銑鉄の組織を拡大したもので白銑組織の一部に片状黒鉛が析出）となっており、「3. 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 μ m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溶融せずに、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、明らかにいったん溶融したためと考えられる。温度が十分に高まり、原料内部では溶融が始まったものの、表面に低炭素で高融点の壁ができってしまっ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、銑鉄の溶融・滴下の始まった温度が「3. 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溶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11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12は内部にあった溶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溶融しない「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6～7cm、13～14cm、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。



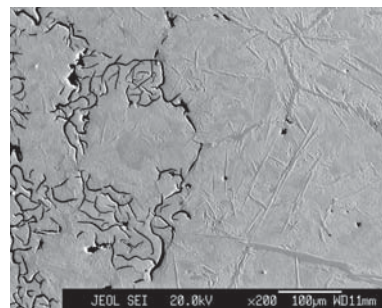
a. 全体の様子



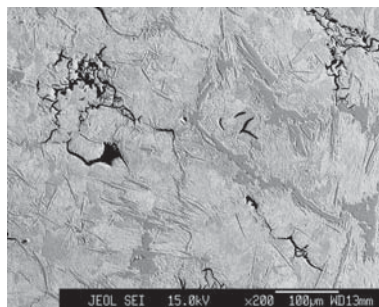
b. 表層付近, C: < 0.1~0.3% (右側の表層付近),
C: 0.6~0.8% (内部)



c. 内部, C: 1.2 ~ 1.4%



d. 深部, C: 1.4 ~ 3%



e. 深部, 銑鉄の組織 (C: 3 ~ 3.5%)

図11 第2回の試行・操業1回目の後に残存した原料の金属組織 (右が表層部)

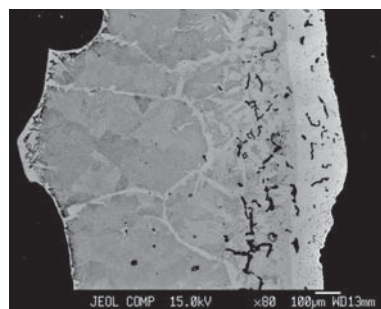
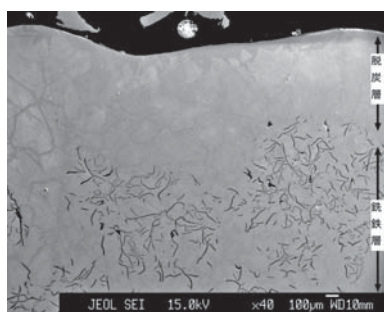
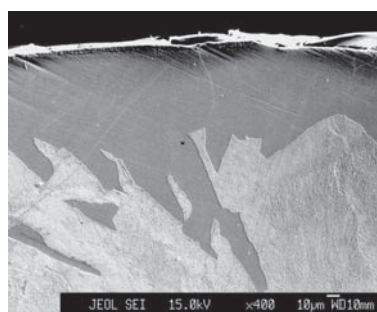


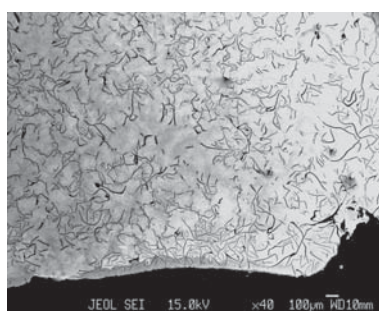
図12 操業後に残存した原料の金属組織 (内部の銑鉄が流出した箇所。右が表層部。反射電子像)



a. 表層部が脱炭している箇所



b. 表層部付近の脱炭箇所を拡大



c. 代表的な金属組織 (C:3～3.5%程度)

図13 第2回の試行・操業1回目の生成物の金属組織(上が表層部)

火窠から回収した生成物を分析した結果が図13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13a, b: 上が表層部)。しかし大部分は図13cのような組織で、原料と比較して大きな変化はない。したがって炭素濃度はおおむね3～3.5%程度と判断してよいであろう。原料より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。

3.3.2. 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8.9cm×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。

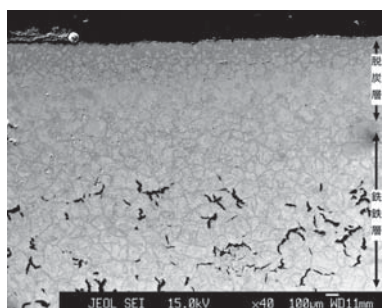
経過は以下の通りである。送風開始後、はじめ780ℓ/min、次いで470ℓ/minで加熱し、13分後に内壁温度が1000℃に到達した。その後30分間、送風を調整して内壁温度を1000～1060℃に保った。53分後に送風を400ℓ/minとして温度を上昇させ、59分後に内壁温度1200℃とした。送風を400ℓ/minに保ち温度を1200℃で維持したところ、63分後から溶融の開始が確認された。その後、200～400ℓ/minの範囲で送風を微調整しつつ、内壁温度1180℃～1230℃とした。溶融

と滴下は72分間続き、送風開始から131分後、溶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。

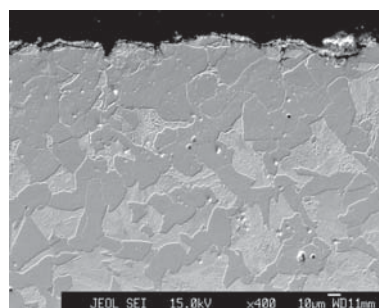
操業終了直後の状況を写真9aに示す。1回目と同様、原料銑鉄は内部が溶融して抜けて空洞となり、外皮が残存した。火窟に溜まった生成物（写真9b、上が羽口のある方向）の重量は1.7kg、残存した脚部の重量は3.2kgである。

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「3. 3. 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、溶融・滴下の開始温度は「3. 3. 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。

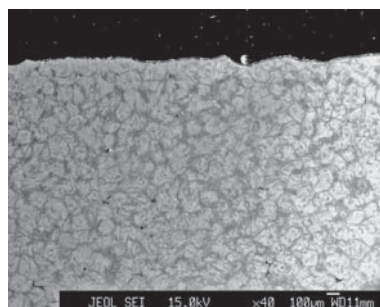
生成物の分析結果を図14に示した。操業1回目と同様であり、図14a、b（上が表層部）のように生成物上部のごく周縁部で低炭素となっている箇所もあるものの、大部分は図14cのような組織を示す銑鉄の範疇の高炭素鉄である。ほとんど脱炭は進んでおらず、炭素濃度は3～3.5%程度と判断される。



a. 表層部が脱炭している箇所



b. 表層部付近の脱炭箇所を拡大



c. 代表的な金属組織 (C:3～3.5%程度)

図14 第2回の試行・操業2回目の生成物の金属組織 (上が表層部)

3.3.3. 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、「3. 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溶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、滴下途中の溶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、実際に火埚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16.3～16.6cm×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埚中央部付近、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溶融温度（1160～1200℃）に達するように、また溶融が開始した後は一度に多量の溶融が起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 ℓ/minで加熱し、内壁温度は15分後に1000℃となった。23分後に1160℃に到達した時点で溶融が開始した。その後、溶融銑鉄の滴下状況をみながら送風を130～280 ℓ/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分後から溶融がしだいに起こりにくくなってきたため、340 ℓ/minから520 ℓ/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溶融・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溶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、ほぼ完全に溶融した。生成物（写真10a）の重量は3.0kgであった。断面（写真10b）の分析結果は図15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（銑鉄が溶融し、脱炭しないまま火埚に溜まったもの）はまったく認められなかった。火埚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

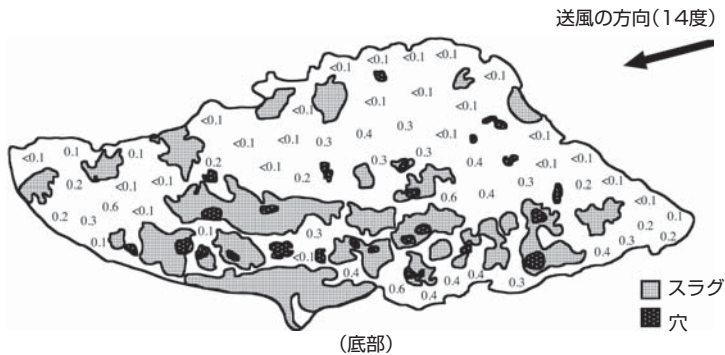


図 15 第 2 回の試行・操業 3 回目における生成物断面の炭素濃度分布 (数字はその箇所の炭素濃度 (%); 写真 10b に対応)

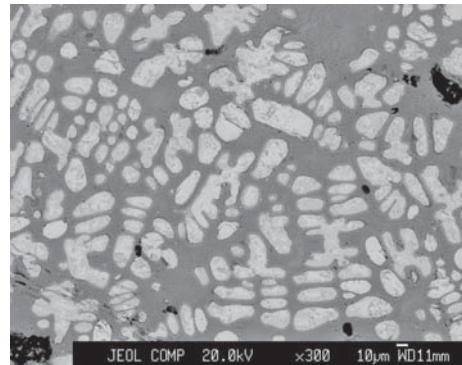


図 16 第 2 回の試行・操業 3 回目における生成物中に含まれているスラグの鉱物組織 (反射電子像)

うまく進んだと判断される。

なお、図 16 は生成物中に含まれるスラグの鉱物組織を示したものである。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き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。熔融銑鉄中の炭素が燃焼すると、炭素→二酸化炭素の燃焼熱を約 394kJ/mol、熔融銑鉄の比熱を約 0.05kJ/(mol・℃) として計算すると、炭素濃度が 3% から 2% ままで下がるだけでも、銑鉄を約 365℃ も温度上昇させるのに相当する熱が発生することになる。したがって、もし熔融銑鉄の燃焼が、滴下中のきわめて短い時間で起きているとすれば、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の組み合わせに起因する問題ではなく、仮説 1 が明らかに誤りであることと、また仮説 2 も誤りである可能性が高いということによるものではないかと考えられることがわかった。

3.4. 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、原料銑鉄の溶融・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「3. 3. 1.」～「3. 3. 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 11 の通りである。

3.4.1. 加熱実験 1 回目

「3. 3. 1.」「3. 3. 2.」と同様の条件で予備加熱および強熱を行い、溶融・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。また滴下直後の溶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（写真 11a）。ここでは仮説 2 の想定に従い、溶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（写真 11b）。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（写真 11c, d）、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、鉄の溶融の起こる 1200℃ まで上げ、溶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、溶融し原料銑鉄から「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。

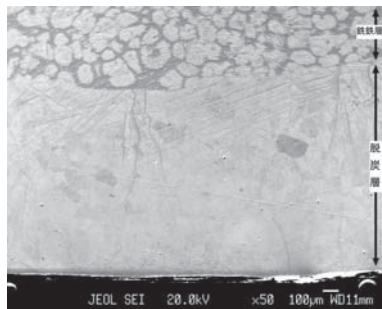
経過は以下の通りである。送風開始後、280 ℓ /min の風量で 60 分間、テストピース下面温度を 960 ～ 1030℃ に保ち、そののち風量を 300 ～ 350 ℓ /min に上げて、送風開始から 80 分後に約 1200℃ に達した。原料下面の溶融と滴下は 95 分後から始まり、いったん部分的に溶融し原料下面で再度固化して「氷柱状」に形成された鉄の先端から、溶融した鉄が「滴下」あるいは「ポタポタとしたたり落ち」ていく状態がみられるようになった。105 分後まで溶融を行った後に加熱を中断して、反応途中の原料を分析に供した。また羽口前面を通してテストピースから滴下した直後の鉄の小塊をすみやかに回収し、同様に分析を行った。

写真 12a 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 12b は溶融・滴下直後すみやかに回収した鉄の小塊である。

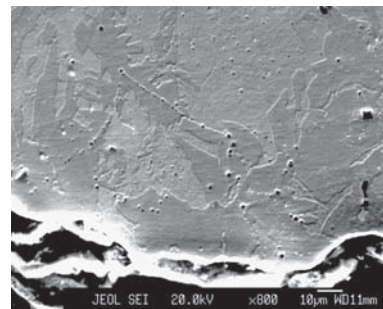
残存した原料の中央部付近を縦に切断し、断面の金属組織を観察して各部の炭素濃度を調べた。図 17a は、原料下面部の最も高温になる部分（「3. 3. 」の原料内壁に対応）について表層付近の金属組織を示したもので、図の下が表層部、上が内部である。最表面部は炭素濃度が 0.2 ～ 0.3% まで下がっており（図 17b）、また表面から内部にいくに従って亜共析～共析～過共析としたいに組織が変化する脱炭層が 0.8 ～ 1.4mm の厚さでみられる。「3. 3. 1」「3. 3. 2. 」の操業と同様に原料の表層は「皮」のようになって残存し、内部にあった銑鉄部分が流出していた。加熱を中断したことによって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溶融物の金属組織が図 17c 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溶融物は、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。

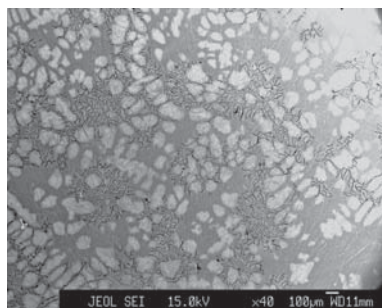
図 17d は、火窪に滴下後ただちに回収した溶融鉄の金属組織である。炉の設定により、滴下中に羽口からの風を受けているので、仮説 2 が正しければ脱炭が起きているはずであるが、実際には白銑組織を示しており、脱炭はみられない。



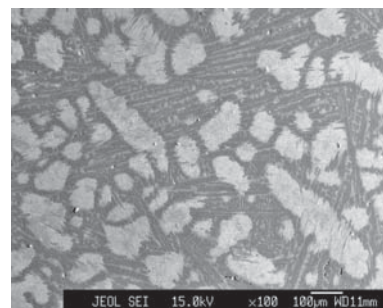
a. 表層部が脱炭している



b. 表層部付近を拡大



c. 残存した原料の外側に付着していた溶融鉄



d. 滴下後ただちに回収した溶融鉄の金属組織

図17 第2回の試行・加熱実験1回目で残存した原料などの金属組織

3.4.2. 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「3. 4. 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、「3. 4. 1.」と同様の溶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、溶融し原料銑鉄から「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。

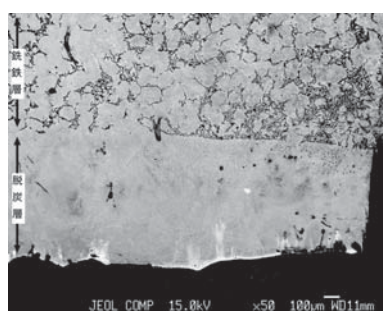
経過は以下の通りである。送風開始後、480～540 ℓ/minの風量で加熱し、30分後に温度が1170℃に到達したところで原料下面から溶融および滴下が始まった。その後原料下面の温度を1210～1250℃として定常的に溶融・滴下を続け、53分後に加熱を中断して、反応途中の原料と、羽口前面を通してテストピースから滴下した直後すみやかに回収された鉄の小塊を回収して分析に供した。

写真13aは、残存した原料（上）と火室に溜まった生成物であり（上が羽口のある方向）、また写真13bは溶融・滴下直後すみやかに回収した鉄の小塊である。

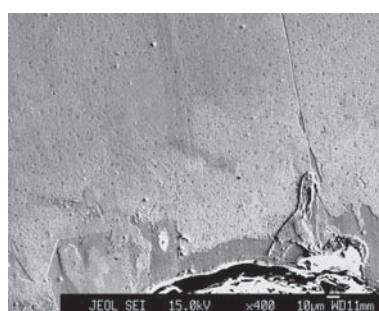
残存した原料の中央部付近を縦に切断し、断面の金属組織を観察して各部の炭素濃度を調べた。図18aは、原料下面部について表層付近の金属組織を示したもので、図の下が表層部、上が内部である。表面から内部にいくに従って亜共析～共析～過共析と組織が変化する脱炭層がみられる点は「3. 4. 1.」と同様であるが、同倍率で撮影した図17aと比較すればわかる通り、それよりもはるかに薄く、厚さ200～600 μm程度である。この脱炭層は溶融温度にいたるまでの加熱中に生じたものとみてよいが、固体での脱炭が生じる温度帯をすみやかに通過しているために、脱炭が最

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、「3. 4. 1.」の図17a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18b）、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。

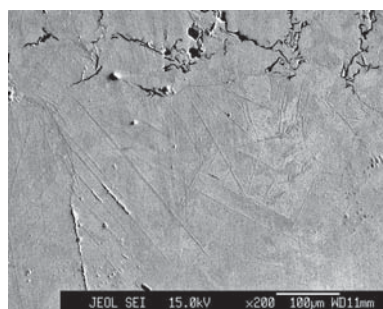
図18aの右端は、原料の表面から1cmほど奥までの部分にわたって溶融・滴下が進行中であっ



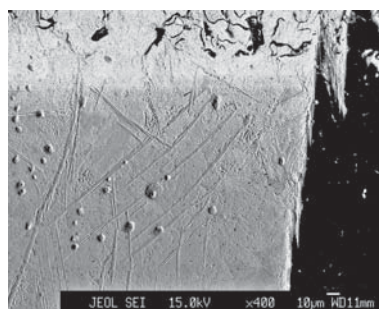
a. 表層部が脱炭している(反射電子像)



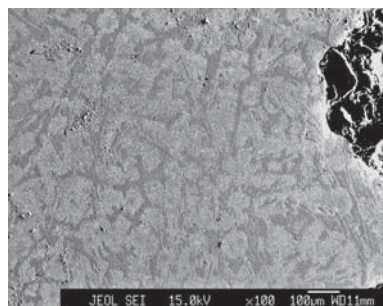
b. 残存した原料の金属組織(表層部付近の拡大)



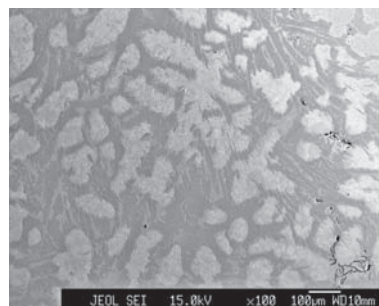
c. 脱炭層と銑鉄部分の境界付近の金属組織(図18aの左側)



d. 脱炭層と銑鉄部分の境界付近の金属組織(図18aの右側)



e. 残存した原料の外側に付着していた溶融鉄の金属組織



f. 滴下後ただちに回収した溶融鉄の金属組織

図18 第2回の試行・加熱実験2回目で残存した原料などの金属組織

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、溶融がまだ起こっていない箇所と比べ、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 18c は、図 18a の視野で左から 100 μm 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 18d は図 18a 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 18d 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 18a 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溶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、大鍛冶の作業温度下で溶融するようになるものと考えられる。

実際の作業では、溶融温度にいたるまでの加熱昇温の過程で不可避免的に起こる脱炭層形成のほか、すべての表面が同時に溶融温度に達することではなく、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、たとえ溶融・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、作業の進行に伴い、溶融・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。「1. 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 18e は、滴下する直前の状態で原料の外側に付着していた溶融物の金属組織で、図 17c 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 18f は、火室に滴下後ただちに回収した溶融鉄の金属組織である。どちらも、図 17c、図 18d と同様、銑鉄の組織を示しており、脱炭はみられない。

3.5. 第2回の試行に関する考察

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、溶融せずに作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溶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、表層部から順次溶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溶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だろうか。「3. 3. 3.」の作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、内壁面部分が溶融温度に達するまでに時間がかかってしまい、溶融・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る、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「3. 4. 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、あとあとでの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。「3. 3. 3.」の操業経過をみても分かる通り、定常的な銑鉄の溶融・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、内側の溶融銑鉄がよってとどめられる傾向になっていくため、炭素の拡散や溶融を引き起こして表層部までの溶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、溶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。「3. 3. 3.」の結果からは、滴下後、火竈内の炉底に溜まった溶融銑鉄に、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、もしここで、火竈に滴下した溶融鉄の温度測定が行なわれ、そこに鉄中の炭素の燃焼による温度上昇がみられれば、推定されたこのプロセスの有力な証拠の一つとなっていたはずである。しかし、火竈内の溶融鉄は、周辺の木炭や生成した灰などによってサーモメーターの測定画面視野から遮られる位置に落下するため、温度測定をすることができなかった。

原料の内壁面がなぜ加熱されるかという問題について、「2. 1.」の冒頭では「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当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」の二つの可能性を述べた。これについて、まず後者は実験によって否定された。銑鉄表層で炭素の燃焼が起きれば脱炭層ができて以後の反応に支障をきたすことになるし、滴下直後の溶融銑鉄において脱炭が起きていないことも確認された。前者について、サーモメーターの内壁面測定画像をみると図 19 のようになっている。中央付近で赤～赤紫を呈しているのが、原料銑鉄の内壁面である。これによると内壁は全体にほぼ均一な温度になっていることがわかるが、詳細にみると、奥の方の、羽口に近い側で 1146～1161℃、手前の側で 1137～1155℃という温度分布になっており、羽口側の方がわずかに温度が高い。もし手前にある木炭からの輻射熱によって加熱されているとすれば、手前壁面部あたりが高温になり、奥の羽口側になるほど温度が低くなるはずであるが、そうはなっていない。また、操業中に炉内の原料の状況を観察したところ、アーチ部分の羽口側上部の縁が、目視でもわかるほどのきわめて高温となっていることがわかった。これらのことから、羽口からの送風に伴ってアーチ内の圧力が低下し、アーチ上部羽口側にある隙間から、空気とともに燃焼ガスである一酸化炭素が強くアーチ内に引き込まれ、それが内壁に沿って流れながら燃焼している可能性が高いと考えられる。

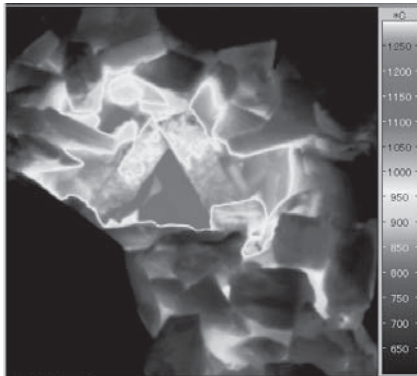


図19 非接触温度測定装置による強熱・溶融時の原料内壁面の測定画像
(図10bと同じもの)
(論文末カラー図参照)

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がる。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、溶けた鉄

がポタポタとし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釜に溜まり、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、「3. 3. 1.」「3. 3. 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「4. 3. 3.」の温度測定結果や、火釜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「3. 4. 1.」「3. 4. 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。溶融が始まったら、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、溶融しながらも表層部で脱炭層は形成されるので、定常的な溶融・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思われる。

銑鉄の脱炭反応の主要部分は、火窟の炉底部に溜まった溶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、原料の溶融・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、火窟の形状、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。

④……………日刀保の銑を使用した再現操業

「2.」「3.」の検討結果に基づき、日本美術刀剣保存協会が操業したたたら吹き製鉄によってできた銑を原料として使用して、大鍛冶の再現操業を行った。

4.1. 大鍛冶の実施

山田〔1918〕の報告にあるものに準じた「開放炉」を使用して操業を行った。炉の構築は第一回・第二回の試行における開放炉とほぼ同様である。記録としてとどめるため、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3.3mm、90cm角の鉄板を砂の上に置く。この上に、断熱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窟となるタテ46cm×ヨコ23cmの長方形の凹みをあけた。火窟に耐火モルタルを敷いて底部の大まかな形状を定め、この火窟内に向けて、水平からやや下向きに約18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8cm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。羽口の角度や高さ、炉底の形状は、第二回の試行とはわずかに変更を加えている。以前には炉底がすり鉢状を呈しており、そこに溶融して落下した銑鉄が溜まっていく状態になっていて、風がその上面をかすめるようにして流れていたのを、炉底部をフラットに近くし、溶融銑鉄が落下した時点から、より大きな角度から底部の銑鉄に効率よく風があたるようにしたものである。火窟にはさらに、底面の形状や傾斜を整えながら木炭を1～3.5cm程度の厚さにしきつめた。炉を構築後、火窟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、日本美術刀剣保存協会が、刀匠に原料の玉鋼などを提供するために操業しているたたら吹き製鉄で作られたものを、法華氏を経由して購入したものである。金属組織の観察結果から、炭素濃度は3～4%程度と判断される。それぞれの塊がやや小さめであったので、2個ず

つを集めて溶接し、2.55kg と 3.05kg のもの 2 片を作成して原料とした（写真 14a）。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、作業途中で崩れないよう、上部の一部を溶接して留めた。これを羽口の前面に置き、風がその下を通り抜けるようにした（写真 14b, c）。燃料の木炭としては硬めの松炭を用意し、はじめにその 2.5kg を原料の上に積んで点火・送風して作業を行い、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。

送風装置および原料の内壁面の温度測定に用いた非接触温度測定装置は、「3. 3.」と同じものを使用した。非接触温度測定装置は、炉の前方や斜め方向に設置し、向かって右の原料の内壁で温度測定を行った。15 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。また、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。各装置の配置などは第 2 回の試行（写真 7）とほぼ同様である。作業の温度条件については第 2 回の試行結果を受けて、下記のような方針で行うこととした。

- ・予備加熱で原料全体の温度を上げる（最高温度 800℃ 程度までにとどめる）
- ・次いで、できるだけ速やかに、内壁が熔融温度になるまで温度を上げる（表層部に脱炭層を作らないように）
- ・熔融が始まったら適切な速さで熔融銑鉄の滴下が起こるように温度を調整する。

図 20 が、これに従って調整された作業時の送風量と内壁面温度の記録である。経過は以下の通りである。

はじめの 10 分間で予備加熱の温度まで内壁温度を上げ、作業開始後 10 分から 22 分にかけて、700～800℃ を維持した。その後、送風量を上げ、25 分に温度測定位置で 1100℃ を超えたところで溶融が開始された。実験で求められた熔融温度よりは低いが、炉内の温度は不均一であるので、測定している箇所よりも温度が高く、すでに熔融温度に達していた箇所があったのだろうと推定される。ここでも、テストピースによる実験の時と同様に、いったん部分的に溶融し原料下面で再度固化して「氷柱状」に形成された鉄の先端から、溶融した鉄が「滴下」あるいは「ポタポタとしたた

り落ち」ていく状態がみられた。

その後は、炉内で定常的な熔融銑鉄の滴下が起こるよう、観察しながら送風量を調整した。図 20 をみるとわかるように、そのためには内壁温度をしだいに高くしていく必要があった。これは第二回の試行と同様の傾向であり、おそらく原料の一部の表層から固体のままで脱炭が起こり、溶けにくい箇所ができていたためであろう。最終的には

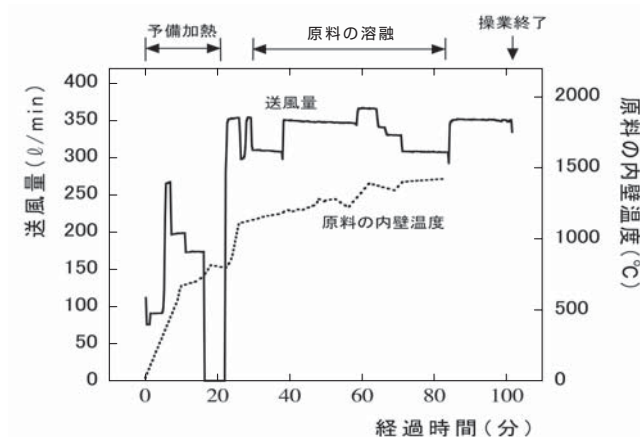


図20 日刀保の銑を使った作業における送風量と内壁温度の変化

82 分を経過したところで原料の上部が溶けて崩れ、内壁温度の測定ができなくなった。最後の測定値は 1420℃である。94 分には、炉内で溶け残っていた原料のすべてが溶解したので、97 分経過後に送風を停止し、生成物を炉内から取り出した。

操作の結果、原料の銑はすべて熔融した（写真 14d, e）。生成物の重量は 5.4kg であった（写真 15a, b）。

4.2. 生成物の金属組織分析

分析方法は前述と同様であり、採取した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%ナイトールでエッチングして炭素蒸着を施したのちに、E PMA（日本電子製 JXA-8200）による金属組織の観察を行った。この金属組織の観察結果から炭素濃度を推定した。

大鍛冶の生成物の断面の分析は、送風の方向に沿った縦方向（写真 16a, 図 21a）と、これと垂直な横方向（写真 16b, 図 21b, 手前が羽口側で風は手前から奥の方向）について行った。縦方向の断面について、炭素濃度はおおむね 0.3%以下で、最も低いところでは 0.1%以下、1%以上となっているところもみられるがそれはごくわずかな箇所であった。横方向の断面では、羽口側からみて

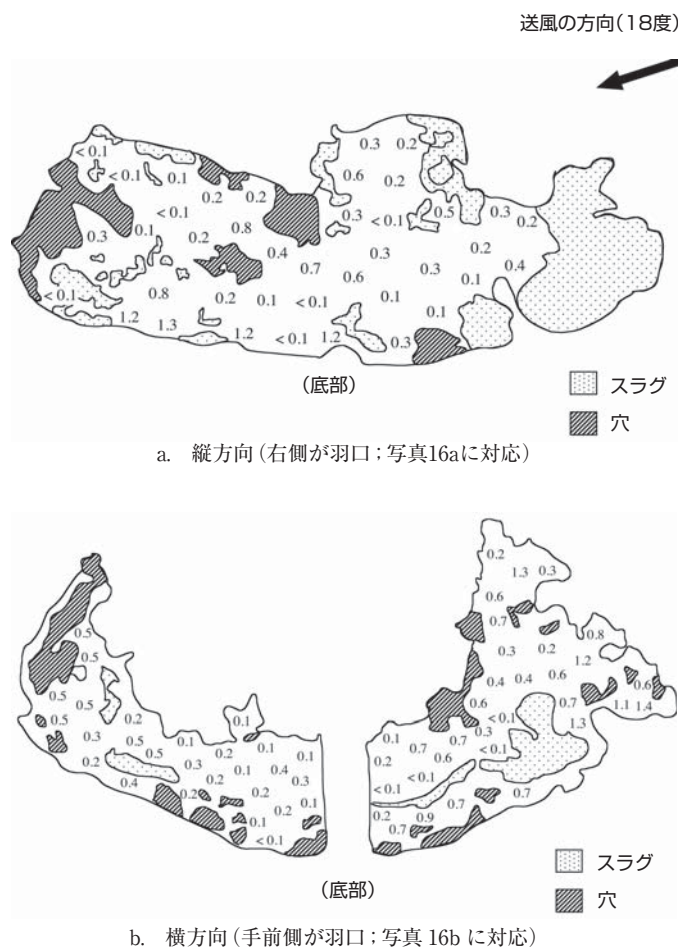


図21 日刀保の銑を使用した再現操作の生成物断面の炭素濃度分布

左側部分の試料では全体として炭素濃度 0.5% 以下であるが、右側部分ではこれよりもやや濃度が高めであり、1% 以上になっているところもある。羽口からの風のあたり方に、左右でやや偏りができていたのではないかと考えられる。

4.3. 折り返し鍛錬

断面観察用試料を採取したあとの、生成物の残部に対して、5 回の折り返し鍛錬を実施した。写真 17 がその生成物である（分析用に中央部から試料採取を行ったもの）。その金属組織を同様に観察したところ、炭素濃度 $< 0.1\% \sim 0.2\%$ のほぼ均一な組成をもつ軟鉄が得られていることがわかった。

まとめ

2 回の試行実験で得られた知見に基づいて、たたら吹き製鉄で得られた銑を原料として大鍛冶の再現実験を行い、脱炭されたきわめて低炭素の生成物を得ることができた。ここでまとめた一連の報告をもって、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であろう。

大鍛冶の基本的な反応機構は以下の通りであると推測される。

1. 予備加熱は、原料銑鉄の表層部に脱炭層が形成されない 800°C 程度を目標として行なう。全体の温度が上がったところで、内壁が反応の始まる温度（ 1150°C 前後）になるまで速やかに温度を上げる。
2. 羽口からの風によって、アーチ状に組まれた原料銑鉄の下部にある空間の気圧が低くなると、原料と炉内壁の羽口側の隙間から空気とともに一酸化炭素が吸い込まれる。これらが原料下部空間を通過する際に燃焼し、内壁が加熱される。
3. 溶融した銑鉄が炉底に落ち、そこに羽口からの風があたることによって、ある程度時間をかけて脱炭が進行する。したがって、溶融が一度に行われてしまうと内部まで十分な脱炭が行われず、流銑の状態になってしまう。溶融銑鉄がわずかずつ垂れ落ちて脱炭する、というプロセスが連続的に達成されるような内壁温度を維持するためには、反応状況をみて送風量を微調整することが必要である。

ただし、記録にある大鍛冶と比較した時、まだいくつかの解明すべき課題が残されている。

まず、ほとんど同様の工程の繰り返しに見える「下げ場 [左下場]」「本場」の 2 段階が行われる理由である。原料の量や送風量などの関係から、一度では完全に脱炭が進行せず、生成物の炭素濃度も不均一であることや、多くのスラグが残留しているなどといった、原理的というよりは現場作業上の問題によるものと推測されているが、これも実際に実施してみれば、それぞれで起きている反応や操業条件の違いなど、新たな知見が得られる可能性が高い。

もう一つは原料をめぐる問題である。本研究で使用した原料は、形状などには差異があるものの、いずれも炭素濃度のきわめて高い銑鉄のみであった。しかし、山田 [1918]、俵 [1933] には、実際に使用されていた原料では、銑鉄の他に鉬を混ぜる場合があるとの記述がある。これについては、

「鋸」が文字通り鋼を主体とする鉄を意味するのか、鋸の中の高炭素鉄の部分を取り出して混ぜたという意味なのかという問題もあるだろう。しかし、上述の下げ場と本場との関係においても、下げ場でいったんある程度の脱炭が進み、銑鉄ではなくになっているものに対しても同様の方法で脱炭を行っていることになるわけである。このような炭素濃度の不均一な原料を使用した場合に、どのような過程を経て溶融・滴下・脱炭にいたるのかという点は興味のあるところである。

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、溶かした銑鉄に砂鉄や鉄鉱石粉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, 1993 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〕の論文に「炒鋼法における鉄鉱石粉と同様に、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 製鍊「鉄」の項）には鉄鉱石粉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・ファイヤライトの存在について、鉄鉱石粉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、これらは砂鉄製鍊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; 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。

本研究を実施するにあたって、九代目法華三郎信房氏・法華栄喜氏、尾崎保博氏（平野神社）、服部晃央氏（国際基督教大学）、伊達元成氏（総合研究大学院大学）にご協力をいただいた。記して感謝の意を表する。

本研究の一部は、科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「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」（研究代表者：齋藤努, 2007～2009年度, 課題番号：19650256）としても実施された。

引用文献

- 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, 岩手県立博物館, pp.74-81
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, 豊浦町教育委員会, pp.1-11
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

- 天田昭次 2004 『鉄と日本刀』慶友社。
- 新井宏 2000 「古代日本に間接製鋼法があったか」『ふえらむ』5, pp.742-748
- 大朝町教育委員会 1995 『黒尊遺跡』大朝町教育委員会
- 角田徳幸 2004 「中国地方における古代末から中世の精錬鍛冶遺跡」『考古論集—河瀬正利先生退官記念論文集—』河瀬正利先生退官記念事業会, pp.873-894
- 角田徳幸 2010 「中国山地における中世鉄生産と近世たたら吹製鉄」『日本考古学』29, pp.39-59
- 角田徳幸, 永瀬伸二, 林健亮, 小笹基, 松本岩雄, 足立克己 1991 『郷路橋遺跡・滝ノ屋谷城跡・桜尾城跡・森迫城跡・内ヶ原城跡・後河内古墓群』島根県教育委員会
- 角田徳幸, 井上貴央, 今田昭二, 時枝克安, 成亨美, 大澤正己 1999 『中原遺跡（本編）』島根県教育委員会
- 角田徳幸, 宮本正保 1997 『檀原遺跡・殿淵山毛宅前跡・谷川遺跡』島根県教育委員会
- 勝部智明 1997 「大槓跡」『島根県教育庁文化財課埋蔵文化財調査センター年報』V, p.31, 島根県教育委員会
- 河瀬正利 1995 『たたら吹き製鉄の技術と構造の考古学的研究』溪水社
- 黒田弘稔 1991 『犬鳴：福岡県鞍手郡若宮町犬鳴区の調査』II, 福岡県教育委員会
- 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
- 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
- 齋藤努, 坂本稔, 伊達元成, 高塚秀治 2009 「大鍛冶の炉内反応に関する実験的検証」『考古学と自然科学』59, pp.29-55
- 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
- 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
- 潮見浩編 1985 『保光たたら—広島県比婆町東城町所在—』保光たたら発掘調査団
- 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—仙台藩桐屋製鉄の歴史と科学—』アグネ技術センター
- 館充 2003 「中国地方における発展」『近世たたら製鉄の歴史』丸善プラネット, pp.112-135
- 俵國一 1933 「錬鐵（庖丁鐵）製造法」『古来の砂鐵製錬法』丸善, pp.107-123
- 土井作治 1983 「近世たたら製鉄の技術」『講座・日本技術の社会史 第5巻 採金と冶金』日本評論社, pp.69-103
- 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, (社)日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会「鉄の歴史—その技術と文化—」フォーラム編
- 東山信治 2003 『殿淵山遺跡・獅子谷遺跡（2）—分析・総括編—』島根県教育委員会
- 広島県 1981 『広島県史』近世Ⅰ, 通史Ⅲ
- 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
- 松井和幸 1991 「門前製鉄遺跡・門前古墓」『中国横断自動車道建設に伴う埋蔵文化財調査報告（Ⅰ）』, pp.17-36, (財)広島県埋蔵文化財調査センター
- 目次謙一, 倉橋浩, 時枝克安, 大澤正己, 鈴木瑞穂 2001 『戸井谷尻遺跡・長老畑遺跡』島根県教育委員会
- 山田賀一 1918 「中國に於ける砂鐵精錬」『鐵と鋼』4, pp.348-390

齋藤 努（国立歴史民俗博物館研究部）

坂本 稔（国立歴史民俗博物館研究部）

高塚秀治（国立歴史民俗博物館共同研究員）

（2011年7月14日受付, 2011年11月11日審査終了）

Experimental Inspection and Reconstruction of Ookaji, a Pre-modern Process of Pig Iron Decarburizing

SAITO Tsutomu, SAKAMOTO Minoru and TAKATSUKA Hideharu

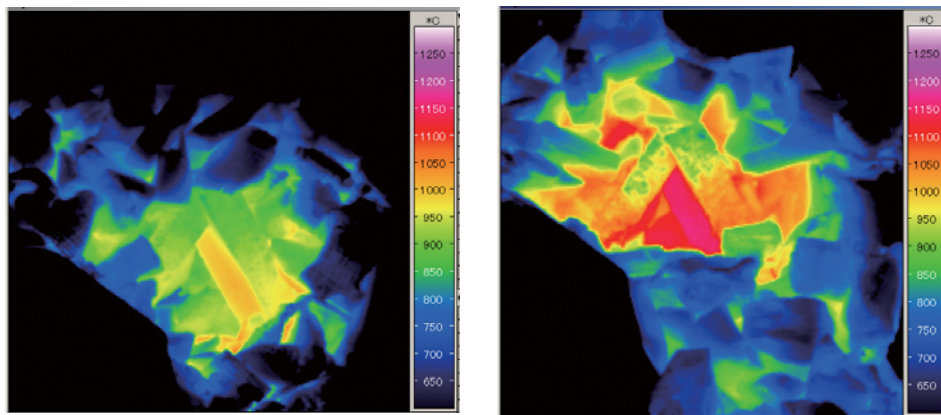
O-kaji was a process of refining to decarburize pig iron to low-carbon iron during Yedo to Meiji periods in Japanese traditional iron manufacturing by using iron sand as raw material. Though archaeological excavations were conducted on O-kaji sites, the accession of the process had end and the technical detail was recorded in only two research papers.

We constructed experimental furnaces of o-kaji and operated them under various conditions to prospect the details of the technology and situation of the reaction in the furnace. As the result, we succeeded at reappearance of O-kaji, even in a smaller-scale, by using pig iron made with the modern tatara-smelting process operated by The Society for Preservation of Japanese Art Swords.

We supposed the basic reaction mechanism of o-kaji as follows;

1. The temperature of preheating was about 800°C , at which decarburized layer was not produced at the surface. After the whole material pig iron was heated enough, the temperature was rapidly risen to around 1150°C , at which the inside-wall of pig iron started to melt.
2. With the wind from tuyere, the air pressure under the arch-like pig iron reduced. Then carbon monoxide was drawn into there with air from gap between the pig-iron and the furnace wall. They burned under the empty space under the pig-iron and heated the inside-wall.
3. Decarburizing was processed with taking a certain amount of time at the bottom of furnace with being blown by the wind from furnace after melted pig iron dripped. So the melting should proceed in small steps otherwise decarburizing did not make progress inside of the massive melted pig iron. Fine control should be needed to keep the adequate temperature of inside-wall for successive process of little by little melting, drip and decarburizing.

key words:pig-iron, decarburizing, wrought iron, pre-modern technology, refining



a. 予備加熱の段階(内壁面温度は990～1030℃)

b. 強熱して溶融が始まる段階
(内壁面温度は1190～1220℃)

図10 非接触温度測定装置による炉内温度の測定画面例

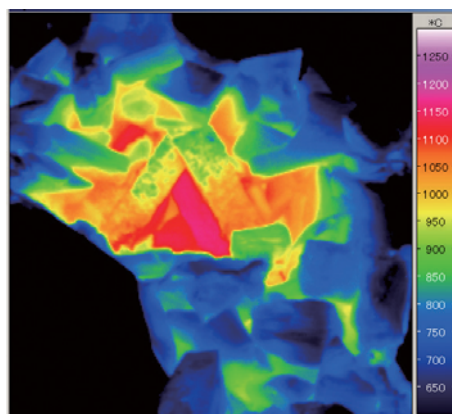


図19 非接触温度測定装置による強熱・溶融時の
原料内壁面の測定画像(図10bと同じもの)



a. 炉底部



b. 羽口の取り付けと火窪の成形

写真1 第1回の試行における炉底の構築



a. 銑鉄の肘金



b. 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. 作業の様子



f. 作業中の大鍛冶炉内

写真 2 第1回の試行における開放炉の作業



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. 作業の様子

写真 3 第1回の試行における煙突炉の作業



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, 下が流鉄)



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)

写真 4 開放炉の生成物



a. 作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, 下が流鉄)



c. 脱炭生成物の断面 (図7に対応)

写真 5 煙突炉の生成物



a. 原料を設置した開放炉

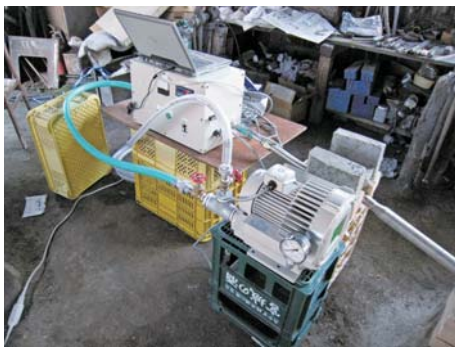


b. 原料(肘金を切断したもの)



c. 羽口の取り付けと火槽の成形

写真6 原料の設置状況(前から)



a. 送風機とマスフローメータ



b. 非接触温度測定装置



c. 操作の様子

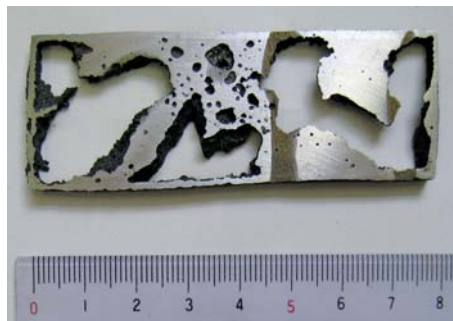
写真7 測定器の設置状況



a. 炉内状況

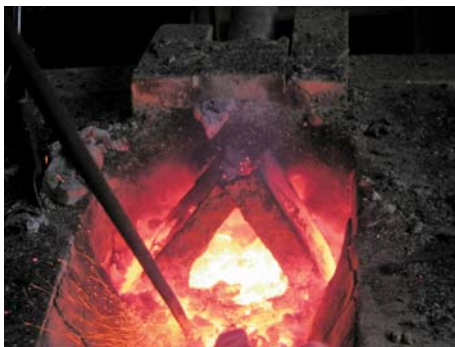


b. 残存した原料と溶融生成物



c. 残存した原料の断面

写真8 第2回の試行・操業1回目の生成物



a. 炉内状況



b. 溶融生成物

写真9 第2回の試行・操業2回目の生成物



a. 溶融生成物



b. 生成物断面 (図15に対応)

写真10 第2回の試行・操業3回目の生成物



a. 原料設置状況（上から）



b. 原料設置状況（前から）



c. 加熱中の炉内



d. 温度測定の様子

写真11 開放炉によるテストピース加熱実験



a. 残存原料（上）と溶融生成物



b. 溶融・滴下後ただちに回収した小鉄塊

写真12 第2回の試行・加熱実験1回目の生成物



a. 残存原料(上)と溶融生成物



b. 溶融・滴下後ただちに回収した小鉄塊

写真13 第2回の試行・加熱実験2回目の生成物



a. 原料



b. 原料の設置状況(上から)



c. 原料の設置状況(前から)



d. 炉内にできた生成物



e. 炉外へ取り出された生成物

写真14 日刀保の銚を使用した再現操作



a. 上から（上側が羽口）



b. 横から（奥側が羽口）

写真15 日刀保の銚を使用した再現操業の生成物



a. 縦方向（右側が羽口；図21aに対応）



b. 横方向（手前側が羽口；図21bに対応）

写真16 日刀保の銚を使用した再現操業の生成物断面



写真17 日刀保の銚を使用した再現操業の生成物を折り返し鍛錬したもの

