

# 刀匠が継承する伝統技術の 自然科学的調査

Scientific Studies on Traditional Techniques Inherited by Swordsmiths

齋藤 努・坂本 稔・高塚秀治

SAITO Tsutomu, SAKAMOTO Minoru and TAKATSUKA Hideharu

はじめに

①卸し鉄

②折り返し鍛錬

③焼き入れ

まとめ

## 【論文要旨】

宮城県に在住する刀匠・九代法華三郎信房氏とご子息の栄喜氏のご協力により、代々継承している作刀技術のうち、「卸し鉄」「折り返し鍛錬」「焼き入れ」の3つについて、自然科学的な観点から調査を行い、下記の諸点が明らかになった。

卸し鉄では、同じ炉を使い、ほとんど同じような動作をしているのに、軟鉄への浸炭と銑鉄からの脱炭という正反対の反応を起こすことができる。両者において、炉内ではまったく異なるメカニズムが働いていると推測される。すなわち、軟鉄の浸炭では、炉の上部で固体の鉄に炭素が吸収され、融点が下がって半溶融状態となり、炉底に垂れ落ちていく。炉底ではできるだけ風があたらないようにして、脱炭が起こらないようにする。一方、銑鉄の脱炭では、炉の上部で鉄が溶解して液体状態になり、炉底に少しずつ流れ落ちていく。炉底では羽口からの風があたるようにして、鉄中の炭素を燃焼させ、炭素濃度を下げる。

折り返し鍛錬において、折り返し回数が増えるにつれて、炭素濃度の均一化されていく様子が観察された。参考文献などにある「折り返し鍛錬によって介在物が減少していく」という現象は確認されず、鍛接面に生じるものもスラグに由来するものも、折り返し回数が増えるほど小さくなり均一に分散されていくことがわかった。鍛造開始時の加熱温度については、仮着けでも泥沸かしでも、鉄の炭素濃度に応じて異なる傾向がみられた。また仮着けと泥沸かしの工程では、加熱温度、作業を行う温度、作業継続時間に相違がみられた。これはそれぞれの工程での目的と刀匠の意識が反映されているものと考えられた。

焼き入れにおいて、沸と匂を作りわける場合の加熱温度の違いを実験的に確認できた。これは刀匠の感覚とも整合的であった。また焼刃土の下の方の鉄の温度の測定により、焼刃土が地部の徐冷に役立っていることが確認された。

【キーワード】 日本刀、刀匠、精錬、脱炭、浸炭、鍛錬

## はじめに

日本刀は平安時代末期に完成された刀剣であり、それ以前の直刀や蔵手刀などとの相違は、鍛錬、焼き入れ技術、複合素材の組み合わせ、<sup>きりはづくり</sup>切刃造から<sup>しのぎづくり</sup>鑄造への移行、反りのある形状などの条件にあるととらえることができる〔鈴木、1994〕。

日本刀は、刀身製作後に研ぎにかけられ、<sup>はばき</sup>鉦を取り付けられたのち、白鞘では鞘と柄、拵では柄・鞘・鐔などの刀装具をつけて完成する。ここで扱うのはそのうち、刀匠が継承している刀身の製作工程であるが、それだけでもかなり複雑であり、さまざまな鉄素材の炭素濃度を調整する「<sup>おろ</sup>卸し鉄」、原料となる玉鋼や卸し鉄の生成物などを熱して薄い板状に打ち延ばす「<sup>みずへ</sup>水減し」、それを細かく荒割りする「<sup>こ</sup>小割り」、小割りした鋼を積み重ねて加熱し、叩いて鍛着させる「<sup>ひづ</sup>積み沸かし」、鉄板を叩いて延ばし、折り返して鍛着させる作業を繰り返す「折り返し鍛錬」、異なる材質の鉄を組み合わせさせて鍛接する「造り込み」、それを打ち延ばしていく「<sup>すの</sup>素延べ」、先端を斜めに切り落としたのちに切先を成形する「<sup>きつきき</sup>切先の打ち出し」、日本刀としての姿を打ち出す「<sup>ひづ</sup>火造り」、焼刃土を置いたのちに所定の温度まで加熱し、水の中で急冷することによって、刃部を硬くし全体に反りを入れる「焼き入れ」、刀匠が研磨することによって刀の形状を整える「<sup>なかこ</sup>鍛冶研ぎ」、茎にヤスリをかける「茎立て」、刀匠が茎に銘を入れる「銘切り」などの作業からなる。

日本刀の刀身は異なる炭素濃度の鋼を組み合わせて作られる。そのやり方には「甲伏せ」「まくり」「<sup>ほんさんまい</sup>本三枚」「<sup>しほうづめ</sup>四方詰」などがあるが、共通しているのは、炭素濃度が比較的低く（0.1～0.3%程度）軟らかめの鋼を、炭素濃度が比較的高く（0.5～0.7%程度）硬めの鋼で包む「造り込み」という技術が使用されている点である（ただし、炭素濃度が比較的高い鋼のみを延ばして作る「<sup>まるぎたえ</sup>丸鍛」もある）。前者を心鉄（<sup>しんがね</sup>心金）、後者を皮鉄（<sup>かわがね</sup>皮金）とよぶ。また、刃先の部分には焼きを入れることによって特別に硬くしている。これにより、日本刀の特徴である「折れず曲がらずよく切れる」が達成されると説明されている。

このような構造がいつから取られるようになったのかということについて、最も古い時期の資料に対する実証的な研究事例としては、倭國一によるものがある。14世紀初め頃と推定される「了戒」銘の資料から顕微鏡観察用試料と化学分析用試料を採取し、前者の断面をエッチングして金属組織を観察したところ、多少組織の入り交じったところはあるものの、おおむね外部に比べて内部の炭素濃度が低くなっていた〔倭、1918；1953〕。これより以前にどこまでさかのぼるのかはわからないが、遅くとも鎌倉時代後期にはすでにこの方法が取られていたとみてよい。

本研究では刀匠が代々継承している作刀技術のうち、「卸し鉄」「折り返し鍛錬」「焼き入れ」の3つについて、自然科学的な観点から調査を行った。

ご協力いただいた刀匠は、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である。法華家については、平安時代に平泉を中心に栄えた奥州藤原氏に仕えていた舞草鍛冶の一つで、寛政4年（1792）に発行された『古刀銘尽大全』にみえる「法華経太郎」を号する刀工集団の系譜であるという言い伝えがある。確実に家系をたどることができるのは法華家の初代法華三郎清房からで、宝暦3年（1753）生まれと推測され、仙台藩において九代山城大掾国包と六代余目清右

衛門安倫に、また江戸において水心子正秀に師事したと伝えられる。八代目信房の時に、長く途絶えていた大和伝保昌派の鍛法の復元に成功し、九代目信房氏とご子息の栄喜氏は日本でそれを唯一父子で継承している〔法華・井上, 2010〕。したがって、法華氏は備前伝や相州伝などの作刀も行いが、その製作技法は基本的に大和伝を製作するために適した方法が基本になっていると考えられるため、本研究で報告する結果や技術的条件が必ずしも一般的なものであるとは限らない。実際、各工房や映像でみることで他の刀匠の作刀技法には、細部において少しずつ違いがあり、それぞれの作る製品に適したやり方を工夫している様子がみとれる。ここで報告する結果は、その中の一例にすぎない。ただし、大筋としては共通しているので、もちろん一般化できる点は多く含まれていると考えてよい。

法華氏によると、日本刀の刀身製作の全工程のうち、6～7割程度の時間は皮鉄の素材を作ることに費やされるという。ここで取り上げた技術のうち、卸し鉄は、高炭素濃度の鉄（炭素3～4%の銑鉄、<sup>ずく</sup>「銑」とよばれる）や低炭素濃度の鉄（炭素0.1%以下の軟鉄、庖丁鉄とよばれる）を、皮鉄の素材に適した炭素濃度に調整するものである。本研究では、特に炉内構造と送風量に着目して調査を行い、反応機構を推定した。

「折り返し鍛錬」には2種類がある。卸し鉄に続いて行われ、不均質で空孔やスラグ（鉄滓、金くそ）が多数含まれている原料を叩き延ばして折り曲げることを繰り返し（法華氏の場合は6回以上）、精製を行うとともに組織と炭素濃度の均一化をはかる「<sup>した</sup>下鍛え」と、下鍛えで得られた鉄板を2枚組み合わせ、何度か折り返す（法華氏の場合は7回まで）ことによって、刀身の鍛え肌を作るための「<sup>あげ</sup>上鍛え」である。本研究では、下鍛えの際の温度測定を行い、鍛錬を繰り返すことによって起こる金属組織や介在物の変化を走査型電子顕微鏡で観察した。

なお、法華氏が製作する大和伝保昌派の刀の特徴の一つは、鍛え肌が<sup>まさめ</sup>柃目肌となっていることである。現在一般に製作されている刀の大部分は<sup>いため</sup>板目肌や<sup>もくめ</sup>杳目肌であり、これは上げ鍛えの際、最後まで鉄板を鍛着させる方向に上から叩いていくことによって、研磨時に表面にあらわれる。これに対し、柃目肌を作るためには、平行に重なった鍛接面が表面に見えるように、上げ鍛えの最後の鍛錬において、鍛接面に対して垂直の方向（板目肌・杳目肌の場合とは90度異なる方向）から叩いて板状に成形する。このため、それまでの折り返し鍛錬で鍛着の不十分な箇所があるとそこが剥がれてしまうことになる。そうならないように、しっかりと鍛着させるための条件を設定したり、また工夫をこらしたりしている点が、法華氏の日本刀製作時の技術的特徴となっている。

「焼き入れ」は、刀身製作において、熱を用いる一連の工程の最終段階にあたる。刃先の部分には薄く、地の部分には厚く<sup>やきばつち</sup>焼刃土を塗り、加熱後に水の中で急冷することによって刃文が形成され、また「反り」もこの段階で入る。刀匠が最も神経を使う工程であり、またさまざまなノウハウが含まれているため、通常、部外者が立ち会うことは好まれないが、特別に許可をいただいて調査を行うことができた。これについては、刃文を作り分ける際の温度の相違を調べ、また焼刃土の効果について考察した。

## ①……………卸し鉄

皮鉄の素材を作る方法として、大きく分けて、1) たたら吹き製鉄など、製錬によってできた<sup>けら</sup>鋳から適した部分（玉鋼など）を取り出し鍛錬する、2) 製品や半製品となっている高炭素濃度の鉄や低炭素濃度の鉄を皮鉄の素材に適した炭素濃度に調整する、の2つがある。後者が卸し鉄であり、現代の刀匠において広く継承されている。「日本刀はすべからず鎌倉・南北朝の古に復すべし」とする復古新刀論を唱えた水心子正秀が、古刀は専ら卸し鉄によってできた鉄を原料としていたと考えていたことから、これに師事したと伝えられる法華家においても卸し鉄は重視されている。法華氏の場合、0.5～0.6%程度の炭素濃度にすることを目標としているとのことである。ただし、炭素濃度の調整はわずかな条件の違いにも左右されるため、生成物の不均一性が大きく、全体としてこの濃度範囲にまとめることは容易ではない。

卸し鉄について解明すべき課題の一つは、同じ火床を使用し、一見同じような作業を行っているのに、なぜ、高炭素鉄の炭素濃度を低くする「脱炭」と、低炭素鉄の炭素濃度を高くする「浸炭」というまったく逆の反応を達成することができるのかという点である。本章では、そこに焦点をあてて調査結果の報告と考察を行う。

なお、俵[1919a, 1920, 1953]には、ここで述べた銑（高炭素濃度の鉄）や<sup>ほうちよう</sup>庖丁鉄（低炭素濃度の鉄）を処理する「銑卸し法」、「鉄卸し法」のほかに、和鋼（製錬によってできた鋳から取り出された鋼）を処理する「鋼卸し法」が紹介されている。ただし、その調査結果を見ると、生成物は炭素をほとんど含まない軟鉄であり、何を意図して行われる作業であるのかが明確ではない。俵は「地金を加熱し鍛錬して其局部に於ける不等整を医するを本とし、含有せる炭素量の増減作用は強て主要なる目的にあらざるべし」としており、論文中においても、鋼卸し法の項は簡単に調査結果が提示されているだけで「単に前に記述せるものを得たりとの一実例を示し得るに過ぎざるものとす」として、特に踏み込んだ考察は行われていない。これについては、原料として大きさ五分（約1.5cm）以下の「<sup>じやみ</sup>砂味鋼」と呼ばれるものが処理されていることから、おそらくこのような細かい粒状の鉄を塊としてまとめるための方法の一つなのではないかと推測される。したがって、本章で扱う鉄中の炭素濃度の調整という意味での卸し鉄の技術とは異なるものと考えられるため、ここでは調査対象としない。

このほかに本間・佐藤[1997, p.346～347]には、原料として「玉鋼、鍋、古釘、鋳、甲冑の破損品など種々の物を用い、多くは一種類の原料ではなく、銑・鋼・鉄の三種を混合させる」との記述があり、「多くの秘事口伝が存在している」としている。原料の使い方や作業の実際については、刀匠によって差異があるものとみられる。本研究で取り上げているのはあくまでも、混合をせず、それぞれ一種類の原料（軟鉄または銑鉄）のみを使用する法華氏の技法である。

## 1.1. 卸し鉄の手順

卸し鉄の具体的な手順は、写真1の通りである。ここでは、前近代の鉄素材として法華氏が大量に所有し、卸し鉄の材料としてもよく使用している鑄鉄銭（寛永通寶の四文銭：写真1a）を使用した場合を例として撮影している。

写真1bは火床の中を作業者である刀匠の側からみたものである。左側に羽口の先端が突き出しているのがみえる。木灰を敷いてかため、原料に応じた炉底の深さ・形状に整える。



火床に木炭を積み、吹差吹子<sup>ふきさしふいご</sup>（箱吹子）で送風して火を起こす（写真 1c）。木炭を入れ、原料の一部をその上に置いて加熱する。燃焼して木炭が減ってきたら、再度木炭を入れ、原料を置くという作業を繰り返す（写真 1d、原料の鑄鉄銭が木炭上にみえる）。

すべての原料の反応が終わったら、送風をとめ、炉底の生成物を取り出す（写真 1e）。生成物は塊状となっている（写真 1f）。

## 1.2. 軟鉄および銑鉄の卸し鉄作業

法華氏が、ふだん使用している写真 1 の炉を使って軟鉄と銑鉄の卸し鉄を行った際の作業調査結果を以下に述べる。

使用されている吹差吹子の内寸は、長さ 96.8cm × 深さ 47.5cm で、幅は端部で 19.2cm、中央部で 18.3cm である。ピストン部の可動範囲は 67cm であるが、作業において実際に使用しているのは 20 ～ 50cm 程度である。1 回のストローク（ここでは、往復で 2 ストロークとする）では 18 ～ 45 ℓ 程度の風が羽口から出ていくことになる。後述するように軟鉄の卸し鉄と銑鉄のそれとでは 1 分間あたりのストローク数が異なっているが、これは送風量の違いを意味する。羽口は吹子の下部から約 20 度の下向きに延び、火床の中へは 3.5cm 突き出している。

### 【軟鉄の卸し鉄】

軟鉄については、慶長 8 年（1603）に仙台藩祖伊達政宗の入府に伴って造営された愛宕神社の、創建当時の建築物を最近修繕した際に取り外した釘を二つに折って、原料として使用した。作業は、火床に木炭を積み、吹子で送風しながら約 3 分おきに、燃焼して減った分の木炭とともに素材を少しずつ装入する。原料の装入は 5 回にわけて行った。作業時間は、炭入れから操業終了までは 32 分、最初の原料装入からは 24 分であり、1.1kg の原料から 845g の生成物を得た。

吹子を動かす速さは原料や木炭の加熱状態などで変わるため、必ずしも常に一定であるとは限らず、また小刻みな往復を行うこともある。しかし、定常的な作業中では、平均として 1 分間あたり 63.9 ストロークであった。

燃焼法と金属組織観察から求めた炭素濃度は、原料では < 0.1 ～ 0.3% であり、生成物は部分的に 3% 以上のところもあるものの、全体としては 1.5 ～ 2.5% 程度のところが大部分を占めた。

### 【銑鉄の卸し鉄】

銑鉄については、江戸時代に製作された寛永通寶の鑄鉄製四文銭（一文銭も混在する）を原料として使用した。鉄銭にはさまざまな生産地や年代のものがあるが、寛永通寶四文銭の鉄銭は 1860 年以降から作られているので、時期はおおまかに 19 世紀後半と考えてよい。作業は、まず火床に水をおよそ 10 ℓ しみこませ、その後火床に木炭を積み、吹子で送風しながら約 3 分おきに、燃焼して減った分の木炭とともに素材を少しずつ装入する。装入は 8 回に分けて行われ、生成物は火床から取り出して、水に入れて冷却した。作業時間は、炭入れから操業終了までは 40 分、最初の原料装入からは 30 分であり、1.2kg の素材から、1.0kg の生成物を得た。

定常的な作業中の吹子を動かす速さは、平均として 1 分間あたり 40.7 ストロークであった。軟

---

鉄の卸し鉄の場合よりも送風量が少ないことになる。

炭素濃度については、原料では約 4% であり、生成物は羽口から遠い部分に 3% 以上と炭素濃度の高いところがあるものの、全体としては 1.0 ～ 1.5% 程度であった。これについては、生成物に対して 3 回の折り返し鍛錬を施したところ、組成が均一化され、炭素濃度は 1.1 ～ 1.2% となった。

これら 2 回の操業ではいずれも、法華氏の本来の目標からすれば、高めの炭素濃度になってしまったことになる。しかし、低炭素鉄への浸炭と高炭素鉄の脱炭という 2 つの異なる工程が同一の火床を使用して達成されていることは確認することができた。

### 1.3. 調査方法

以下、脱炭と浸炭ではどのような違いがあるのかということについて調査を行う。

脱炭と浸炭を行うそれぞれの場合で、法華氏が意識している操業条件の違いは下記の通りとのことである。

#### a. 炉底の位置

羽口と炉底との高さの関係である。炉底は生成物の溜まる場所であるので、これはつまり、羽口と生成物との高さの関係を意味する。羽口は固定されているので、操業前に木灰を火床に入れてかためる段階で、炉内形状とともにこれを調整する。

脱炭を行う際には炉底を高く（浅く）、浸炭を行う際には炉底を低く（深く）設定する。

#### b. 吹き子を動かす速さ

これは送風量を意味する。脱炭を行う際には弱く（吹き子をゆっくり動かす）、浸炭を行う際には強く（吹き子を速く動かす）吹く。これについては「1. 2.」の観察結果にもあらわれている。

#### c. 炉上の炎の状態など

反応の進行状況は、炉上の炎の色や火花の様子、吹き子を動かしている時の手ごたえなどで判断する（鉄の温度が上がってくると手ごたえが重くなる）。

そこで、これらに対して計測を行うことを計画したが、測定装置を設置するためには火床に手を加える必要があり（特に b の計測において）、法華氏が使用している火床を加工してしまうと、もとの状態に戻せなくなってしまう恐れがあった。そのため、この火床と同様の炉内形状をもつ実験用の炉を組み、そこに計測器などを取り付けることにした。実験炉の構築においては、主要部の寸法などは実際に使用している火床を計測したが、羽口から出る風のあたる位置や風の廻り方、炉内の微妙な形状などは、法華氏の感覚にしたがって設定した。上記 a についても同様で、脱炭・浸炭それぞれにおいて、法華氏が目安としているおおよその数値はあるが、最終的には羽口からの風の流れに基づいて、法華氏の感覚によって炉底の高さを微調整した。

操業は主として、c のうち炉上の炎・火花などから判断して、b に該当する送風量を調整しながら行ってもらったこととした。具体的な調査方法は以下のとおりである。

a については、脱炭・浸炭それぞれを行う際の状態に炉内形状、炉底を整えてもらい、炉底と羽

口の位置関係を計測する。

bについては、通常使用されている吹差吹きではなく、送風量測定装置付の送風機を使って作業を行い、送風量の変化を逐次記録する。

cについては、高温用赤外線サーモグラフィーによって炎の温度をモニターする。また、耐熱ステンレスパイプを炉内にさしこみ、炉内で起きている反応の様子を観察するとともに、ここに放射温度計をあてることによって炉内の温度を計測する。なお、外部に突き出した側の端はガラス板でふさいでおき、炉内の燃焼ガス等が外に出るのを防ぐ。

#### 1.4. 調査に使用した炉と機器

法華氏が実際に使用している火床は、長径 46cm、短径が 10 ～ 13cm、羽口は先端部の 3.5cm が炉内に突き出した形状をしている（写真 1b 参照）。

実験炉は、耐火レンガおよび耐火モルタルで大まかな外形を作り、炉内壁は粘土で成形し、さらに水で練った木灰を塗って形状を整えて、法華氏の火床と同様のものにした。写真 2a がその様子である。羽口は内径 5.0cm × 1m 長のステンレスパイプを使用し、耐火モルタルを外部および内部に塗って形状と開口部径を整えた。開口部は 3.5cm φ である。

送風量については、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 ℓ /min、最大圧力 16 kPa）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 ℓ /min）を組み合わせたものである。送風量は 5 秒毎に記録した。

炎の温度モニターは、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、2 秒毎に画像を取り込んで温度分布を記録した。

炉内観察と温度測定用の耐熱ステンレスパイプは内径 21.7mm φ × 1m 長であり、高さを変えて 2 本設置した。上部パイプは下向きに 6 度の角度をつけ、羽口の 1cm 下の位置に、下部パイプは浸炭時には下向きに 6 度、脱炭時には下向きに 4 度の角度をつけ、羽口の 7cm 下の位置に取り付けた。パイプの端部には、赤外線を透過する CaF<sub>2</sub> ガラス（3.0cm φ × 5mm 厚）を、耐火モルタルを使って密着させ、燃焼ガスがパイプを通して外部に漏れないようにした。炉内温度の測定を、チノー製ファイバ式放射温度計 IR-FAQSSL（850 ～ 1600℃ 対応）を使用し CaF<sub>2</sub> ガラスを通して行った。これらの測定値のうち、上部のパイプから観察・測定できる、羽口からの風が最もあたる高温部での測定値を「上部温度」、またその 6cm 下の箇所での測定値を「下部温度」とよぶことにする。

これら各装置の配置と作業の状況を写真 2b、2c に示す。写真 2b で、中央に構築した炉の右側にあるのが送風装置、炉から右手前側に炉内観察と温度測定用の 2 本の耐熱ステンレスパイプがみえる。写真 2c で、手前の三脚に載っているカメラが非接触温度測定装置の本体、その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。

写真 2d は送風装置である。左側がブロアで送風量は手前側にあるバルブで調整する。右の白い箱がマスフローメータである（数値表示板は反対側にある）。上部に載せられたパソコンで記録さ

れる。

写真 2e は、炉内に差し込んだ耐熱ステンレスパイプにつけた  $\text{CaF}_2$  ガラスに放射温度計をあてて、炉内の温度を測定している様子である。机の上にある計器に温度が表示される。

各機材の使用テストを兼ねて、炉に木炭を装入しながら加熱を行い、炉内を乾燥させるとともに、温度上昇に伴って生じたひび割れの補修などを行い、そののちに以下の実験操作を実施した。

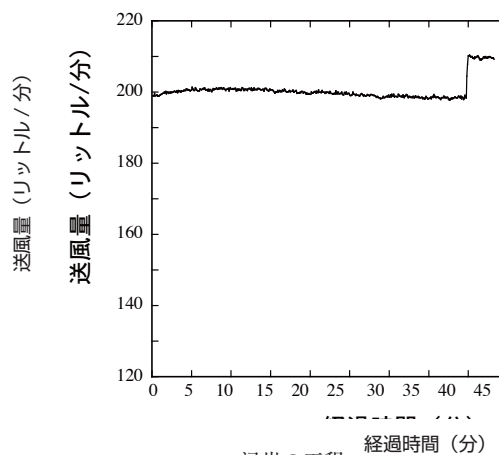
## 1.5. 浸炭

浸炭を行う際には、法華氏によって、炉底を羽口中央から 12cm 下になるように設定が行われた。この場合、できるだけ炉底まで風が廻らないようにすることを意識しているとのことである。

原料には、江戸時代後期（18 世紀頃）に作られた蔵で門扉に使用されていた軟鉄製の肘金（ヒンジ：10cm 幅×3cm 厚×66cm 長：写真 3a）を叩いて薄く延ばし、3cm 幅×2mm 厚にした板を、たがねを用いて 5cm 程度の長さに切ったものを使用した（写真 3b）。全体の量はこの鉄の板 1.6kg であり、これを 4 回にわけて炉内に装入した。

操作の経過は下記の通りである。

経過時間（分）	作業	上部温度（℃）	下部温度（℃）
0	送風開始		
3	炭入れ（0.2kg）		
8	原料装入（0.4kg）	1220	1020
9	炭入れ（0.6kg）	1210	950
16	炭入れ（0.2kg）	1220	1050
18	原料装入（0.4kg）	1250	960
19	炭入れ（0.7kg）	1250	930
27	原料装入（0.4kg）	1340	960
28	炭入れ（0.3kg）	1250	910
36	原料装入（0.4kg）	1220	1000
37	炭入れ（0.8kg）	1230	1010
52	操作終了		



a. 浸炭の工程

図 1a 卸し鉄における送風量の変化（浸炭）



また、最初の原料装入からの送風量の変化グラフを図 1a に示す。

羽口からの風が最もあたる上部温度はおおむね 1200 ～ 1300℃であった。内部観察用のパイプからみると、反応が進むにつれて、溶解した鉄が木炭に沿って少しずつ垂れ落ちていく様子が観察された。流動性が低く、水飴あるいはゼリー状の挙動を示していることから完全に液化しているのではなく半溶融状態なのであろうとみられる。

送風開始から操業終了までの経過時間は 52 分、最初の原料装入からは 44 分であった。生成物は 1.3kg である（写真 3c）。

原料および生成物はエポキシ樹脂（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、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。

原料の炭素濃度は＜0.1～0.2%程度である。生成物は不均一性が大きく、炭素濃度が3%以上のところもあるが、おおむね1%以下であり、0.3%に達していない箇所もあるものの、大部分は0.5～0.8%程度の濃度範囲内にあった。

## 1.6. 脱炭

脱炭を行う際には、炉底を羽口中央から 9cm 下になるように設定された。この場合は、できるだけ多くの風が炉底にあたるようにすることを意識しているとのことである。法華氏が脱炭の卸し鉄を行う場合、通常は操業に先立って約 10 l の水を炉内に入れるが、ここでは条件を揃えるために水は使用しなかった。なお、炉内に水を入れるのは法華氏が先代から伝えられたやり方であり、俵 [1933] の「奥州に於ける鍊鐵製造法」に記述のある、奥州において明治期に行われていた銑鉄から鍊鉄（軟鉄）を製造する方法の影響も推測されている技法である。必ずしも刀匠において一般的に行われている方法ではない。

原料には江戸時代に製造された寛永通寶の鉄製四文銭を使用した（写真 3d）。全体の量は 1.6kg で、これを 4 回にわけて炉内に装入した。

操業の経過は以下の通りである。

経過時間（分） （℃）	作業	上部温度（℃）	下部温度
0	送風開始		
10	炭入れ（0.7kg）		
15	原料装入（0.4kg）	1200	1000
15	炭入れ（0.3kg）	1130	980
23	原料装入（0.4kg）	1170	960
24	炭入れ（0.3kg）	1200	-
32	原料装入（0.4kg）	1140	-
32	炭入れ（0.3kg）	1140	-
41	原料装入（0.4kg）	1150	-
41	炭入れ（0.6kg）	1150	-
57	操業終了		

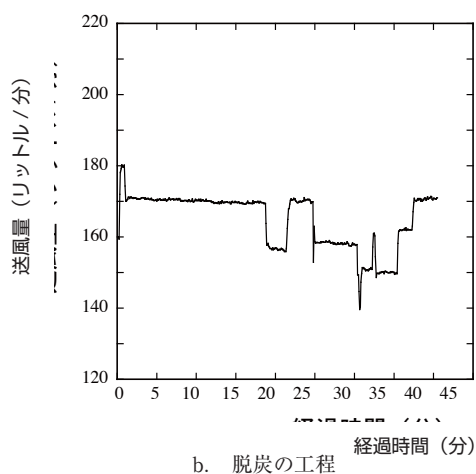


図 1b 卸し鉄における送風量の変化(脱炭)

また、最初の原料装入からの送風量の変化グラフを図 1b に示す。

上部温度はおおむね 1100℃～1200℃であった。内部観察用のパイプからみると、反応が進むにつれ、溶解した鉄がポタポタと少しずつ流れ落ちていく様子が観察された。下部観察パイプは、反応生成物が炉底に溜まってくると木炭がそれに乗ってしまっていて移動しにくくなるため、先端が塞がれてしまい、途中から温度を測定することができなくなった。

送風開始から操業終了までの経過時間は 57 分、最初の原料装入からは 42 分であった。生成物は 1.2kg である(写真 3e)。

原料の炭素濃度は 3～4% である。生成物は不均一性が大きく、下部には炭素濃度 3% 以上となっているところもあるが、おおむね 1% 以下であり、大部分は 0.5～0.8% 程度の濃度範囲内にあった。

## 1.7. 反応機構の推定

図 1～3 に、実験操業における送風量の変化(図 1)、浸炭と脱炭における羽口から炉底までの距離(図 2)、炎のサーモグラフィー測定結果(動画の一画面を取り出したもの、図 3)を比較したもの掲げた。

送風量については、俵[1919a, 1920a, 1953]の記録や、法華氏が実際に卸し鉄を操業する際の状況と同様に、浸炭では大きく、脱炭では小さくなっている。また浸炭では変化がほとんど見られないのに対し、脱炭の場合は微調整を行っていることがわかる。これに対応し、炎の温度も浸炭では 1300℃を超えているところが見られるのに対し、脱炭では 1200℃程度である。炉内温度も同様で、「2. 6.」で述べたように浸炭が 1200～1300℃であるのに対し、脱炭は 1100℃～1200℃である。

炉内反応の状況について、浸炭の場合、溶解した鉄が木炭表面を垂れ落ちていくのが観察されていた。流動性が低く、水飴あるいはゼリー状の挙動を示していることから半熔融状態にあるものとみられる。軟鉄のままであればこの程度の温度では溶解に至らないので、これは、原料の軟鉄が炉の上層部で木炭と混合され、還元雰囲気下で加熱されることにより、固体における炭素の侵入が表層から起こって融点が下がり、半熔融状態となって垂れていったと推測される。操業の終わりまで

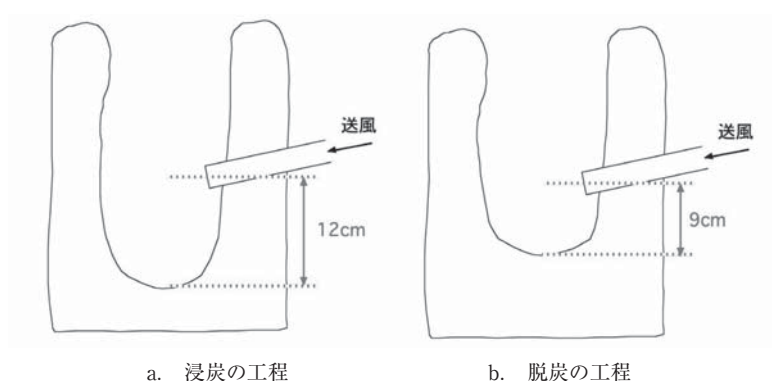


図2 卸し鉄における炉底の深さ

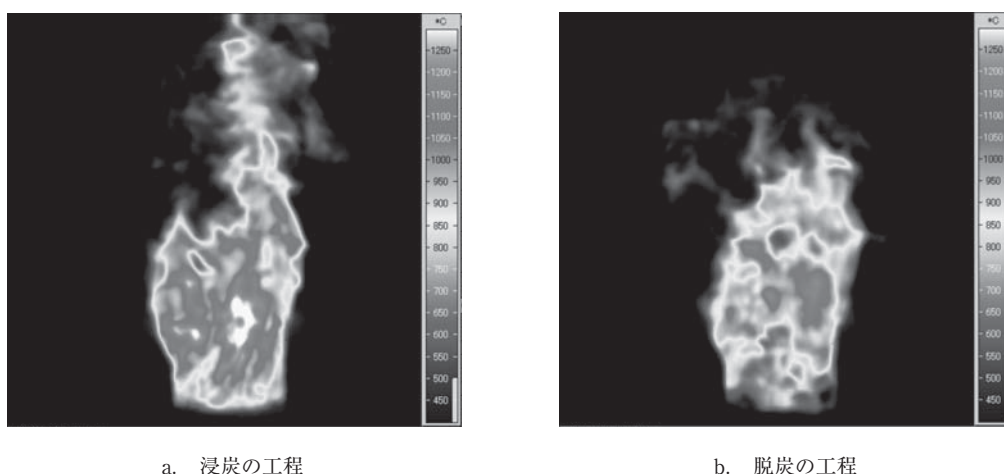


図3 炎のサーモグラフィー測定画像  
(論文末カラー図参照)

下部温度が測定できたことから、生成物はこの箇所には留まらず、さらに下層部へと速やかに移動したものとみられる。実際、操業後に確認したところ、生成物は羽口からの風が十分には届かない炉底部にできていた。また、操業が失敗した場合に起こる現象として、全体として温度が低めで、原料片の一部が未反応で原型をとどめたまま炉底に集まっているという状態がみられる。

一方、脱炭では、液状化し流動性の高い鉄が少しずつポタポタと流れ落ちていくのが観察された。これについては、浸炭の際の炉内熔融物と比較して流動性の高い様子がみてとれた。銑鉄の融点は比較的低いので、原料が少しずつ溶けて液体状態になっていったのであろうと考えられる。操業の途中からステンレスパイプの先がふさがって下部温度が測定できなくなってしまったことから、生成物は浅めに設定された炉底部に溜まっていったことがわかる。操業後の確認でも、生成物は炉底の、羽口の風を受ける箇所にできていた。操業が失敗した場合に起こる現象は、全体として温度が高めになってしまった結果、原料が急速に溶けて大量の流銑が炉底部にいっぺんに溜まり、内部まで脱炭が進行しないということである。

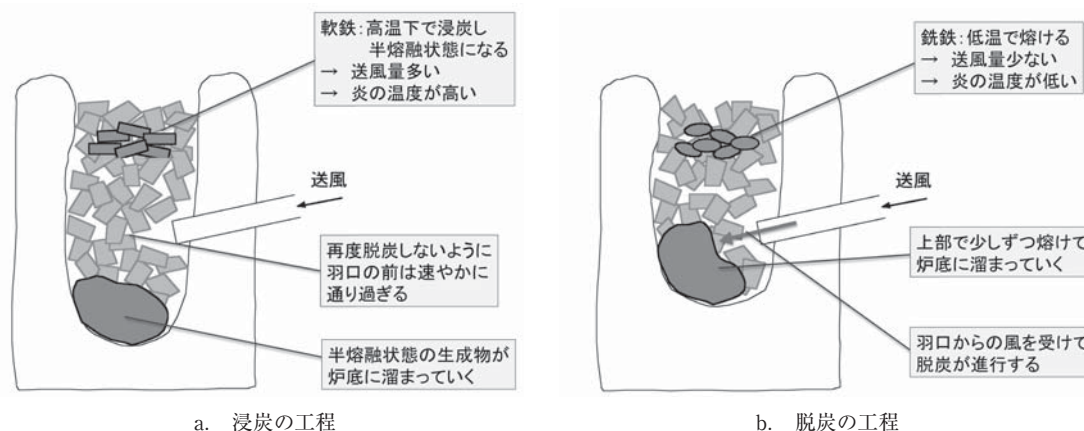


図 4 鉋し鉄における炉内反応の模式図

これらから推測されるそれぞれの炉内反応の模式図を図 4 に掲げた。詳細は下記の通りである。

まず、浸炭の場合（図 4a）、原料の軟鉄は炉の上層部において、高温下で表面から浸炭し、半熔融状態となって下に落ちていく。これを達成するため、送風量は多く、炉内および炎の温度も高くなる。この反応ではそれほど細かい温度調整を要しないので、これが定常的に起こる条件が定まれば、送風量はほとんど一定のままで差し支えない（図 1a）。浸炭した鉄に羽口からの風があたると再度脱炭が起こってしまうので、羽口の前はできるだけ速やかに通り過ぎ、炉底に到達することが必要である。浸炭された生成物は風のほとんどあたらない炉底に溜まっていき、所定の炭素濃度が維持される。

一方、脱炭の場合（図 4b）、原料の鉄鉄は比較的低温で溶けるので、送風量は少なく、炉内および炎の温度も低めになるようにする。上層部で溶けたものが少しずつ炉底に溜まり、羽口からの風を受けて脱炭が進行する。ここで注意すべき点は、鉄鉄が急速に溶解し、一度の大量の溶融鉄鉄が炉底に溜まらないように、反応を微調整することであり、その状況が図 1b の送風量の変化にあらわれていると考えてよい。齋藤ほか〔2009〕は大鍛冶の炉内反応を検討した際、鉄鉄の脱炭の進行について再現炉などによって検証した。その結果によると、溶融した鉄鉄は風を受けることによって表層部から脱炭が起こるが、その進行はそれほど急速ではなく、ある程度の時間をかけて進行すること、また十分に脱炭が進むためには粒状のものに風があたるようにする必要がある、大きな塊状になってしまうと内部まで脱炭が進まず、流鉄になってしまうことがわかった。鉋し鉄による脱炭においてもそれは同様であり、溶けた鉄鉄が羽口の前に少しずつ落ちて風を受け脱炭が進行するという状況が連続的に起こることが重要であると考えられる。ただし、大鍛冶の場合、溶融鉄鉄に風が当たるのがアーチ状に組まれた原料塊の下空間であるのに対し、鉋し鉄の脱炭ではまわりを木炭に囲まれた炉内であるので、大鍛冶の場合（再現実験では大部分の箇所炭素濃度 0.2% 以下）ほどには脱炭反応が進行しないのであろう。なお、鉋し鉄における脱炭の反応機構がここで述べたようなものであるとすれば、法華氏が通常、作業の前に火床の中に入れる 10ℓ の水については、水の気化熱によって温度の急激な上昇が起きないようにし、鉄鉄が急速に溶解してしまうことを防ぐのに役立っているのではないかと推測される。

以上の推定にしたがえば、軟鉄と銑鉄の卸し鉄においては、各部の条件がわずかず異なる作業を同一の炉を使用して行っているが、炉内で起きている反応はまったく異なっているということなる。すなわち、軟鉄の浸炭では、炉の上部で固体の鉄に炭素が吸収され、融点が下がって半溶融状態となり、炉底に垂れ落ちていく。炉底ではできるだけ風があたらないようにして、脱炭が起こらないようにする。一方、銑鉄の脱炭では、炉の上部で鉄が溶解して液体状態になり、炉底に少しずつ流れ落ちていく。炉底では羽口からの風があたるようにして、鉄中の炭素を燃焼させ、炭素濃度を下げる。

卸し鉄に関するこれまでの研究事例としては、前述した俵 [1919a, 1920a, 1953] をまず挙げることができる。その中では、反応の主要部分として、まず浸炭においては高温下で軟鉄が固体の状態に炭素を吸収することや、底部において送風による再脱炭あるいは木炭との接触による更なる浸炭がおこる可能性があることなどを指摘している。脱炭については、大鍛冶との類似性などを挙げつつ、送風によって鉄中の炭素が燃焼することによって反応が進行するとしている。また、操業条件の違いとして、送風方法と炉床については明示されており、脱炭においては炉床を高く、または羽口をより急な下向きの角度にすることで送風による酸化作用が十分に働くようにし、浸炭においては炉床を下げ、酸化作用を避けるようにする、としている。これらの諸点は本研究で得られた結果と合致する。

しかし、送風量の違いとそれがもたらす影響については特に意識されていない。これについては二つの理由が考えられる。

まず一つは、操業を行った刀匠が、その目的に応じて送風量よりもむしろ羽口の傾斜角度を変えることによって対応しているためと考えられる。脱炭においては、炉床を高くするとともに羽口の傾斜角度を大きくすることで炉底の生成物に風がよくあたるようにし、また浸炭においては、炉床を下げ羽口の傾斜角度をゆるやかにすることで、炉底の生成物に風があたりにくくし、再脱炭するのを防ぐことができるようになっているのであろう。

もう一つは、脱炭を行う銑卸し法において、原料として銑鉄のみではなく軟鉄を同時に装入する方法が取られているためと思われる。その割合は銑鉄4：軟鉄6であり、全体としてみれば脱炭は起きているものの、反応の主要部分の中には中国の灌鋼法と同様に、混合による炭素濃度の低下も意図されているものと解すべきである。法華氏のように銑鉄のみを用いて脱炭を行う場合には、温度が少しでも高くなり過ぎると、原料銑鉄は一度に大量に溶け落ち、吹きからの風を受けても内部まで脱炭反応が進まなくなってしまう。そのため送風量とそれによってもたらされる温度の微妙な調整がきわめて重要となる。しかし、俵が調査した方法であれば、毎回炉内に装入する銑鉄の量が少量ずつになるように調整すればよく、むしろ溶けた銑鉄に十分な風をあてて内部にある炭素の燃焼を少しでも促すことが重要になる。脱炭の卸し鉄について俵が「元来銑卸し作業に於いては著しく強く吹子を差すこと必要にして又一つの特徴と認むべき点とす」と述べているのはこのためであらう。実際、浸炭の卸し鉄では原料1貫283匁を処理するのに、1分毎に10回にわけて9分半ですべての装入を済ませているのに対し、脱炭の卸し鉄では、1回目の操業において銑鉄484匁（軟鉄726匁）の処理のために、軟鉄の装入からはじまり12分40秒かけて13回にわけて装入し、ま



た 2 回目でも銑鉄 480 匁（軟鉄 730 匁）を 15 分 40 秒かけて 13 回にわけて装入している。全体の送風時間も、浸炭が 14 分間であるのに対し、脱炭では 1 回目が 21 分 50 秒、2 回目が 34 分 10 秒と後者がはるかに長く、また明らかに炉底に溜まった反応生成物に長時間にわたって強い風をあてることを意識している。

以上みてきたように、俵が示している卸し鉄の事例のうち、脱炭については、法華氏が行っている方法とは本質的な部分で内容に違いがあり、そのまま比較することはできない。このような技術は刀匠ごとに独自の工夫が行われ、それぞれの間であまり情報交換なども行われていないとのことであるが、これはその例の一つといってよいであろう。

送風量の違いは炉内の温度に変化をもたらし、原料の初期の反応にも影響を与えるはずである。その点に関し俵は、送風量が少ない時は原料が徐々に降下するため十分な反応時間が得られて生成物が均一化し、送風量が多いと原料が急速に降下するため反応が不十分となる、と述べるにとどまっている。ここでいう送風量と原料の降下との関係とは、木炭が燃焼して消費されることによって全体の体積が減り、それに伴って原料が下の方に下がっていくことになるため、燃焼の進み具合によって全体の降下速度が変わるという意味である。送風量の違いに応じて当然もたらされるはずの温度の違いの影響については、「複雑せる関係を有し、斯く単一なる現象を呈さざる場合あるべきことなり」としか言及していない。法華氏の事例と比較が可能な浸炭の場合、俵は、原料がいったん銑鉄になるまで炭素を吸収し、炉底で風を受けることによる再脱炭の程度によって炭素濃度が決定されると考えているように読み取れる。しかし、そのような複雑な過程を経たのでは炭素濃度の調整がいっそう困難になってしまうし、また羽口からの風がほとんど廻ってこないほど炉底を深くする必要もないはずである。実際には「1. 5.」の実験で観察された通り、炭素濃度が銑鉄にまで至らなくとも、半熔融状態の鉄が垂れ落ちていくことは可能である。刀匠は、送風量とそれにしたがって変化する温度を調整することによって、炉の上層において軟鉄が炭素を吸収する段階からその程度を適正化しているとみなすべきであろう。

なお、最近の研究例としては、加藤・平井〔2008〕が刀匠に依頼して、瓦用鉄釘の浸炭を行い、炭素濃度と金属組織の分析を行ったものがある。文中では「鍛冶」という表現をとっているが、内容からみて卸し鉄を行ったとみてよい。炭素濃度の変化について、原料の鉄釘中で約 0.1% 以下～0.3% 程度であったものが、卸し鉄によって約 2.6% に、その後の折り返し鍛錬で約 0.6% に下がったとしている。全体としては「1. 2.」と同様の結果が得られているが、「1. 2.」の折り返し鍛錬前後の炭素濃度変化や、後述の「2. 4.」の結果、また折り返し鍛錬に伴う炭素濃度の変化を系統的に調べた佐々木・桃野〔2007〕の報告からみて、折り返し鍛錬では表層部からのわずかな脱炭はあるものの、これほど極端な炭素濃度の変化は起こらない。上述の俵〔1919a, 1920a, 1953〕や本研究の結果からわかるように卸し鉄の生成物は不均一であり、また炭素濃度の異なる部位が境界のはっきりしない層のような形で分布している。具体的なサンプリング部位に関しては特に記載がないためこれは推測であるが、たまたま炭素濃度の高い層に沿って分析試料を採取してしまった可能性があると考えられる。なお、卸し鉄において炉内で起こっている反応については「還元雰囲気からの炭素が鉄中に吸炭したことによる C 濃度の上昇」と述べられているが、特に詳細な考察は行われていない。

## ②……………折り返し鍛錬

長方形に成形した鋼の板を打ち延ばし、中央付近で横にタガネを入れて二つ折りにし、重なった面を鍛接して一枚の板にする工程を折り返し鍛錬という。これには、上述の卸し鉄などでできた不均質な素材を折り返して、炭素濃度の均一化をはかり、中にある空孔をなくし、残留しているスラグの除去や分散をさせることによって、素材の精製・成形を行う「下（した）鍛え」と、このようにしてできた鋼板を二枚あわせ、折り返し鍛錬して層状にすることで皮鉄の鍛え肌を作る「上（あげ）鍛え」がある。法華氏の場合、前者は6回を標準とし必要に応じてそれ以上の回数を、また後者は7回（柁目肌の場合）行うとのことである。加熱する原料鋼塊の保持には、鉄棒の先に原料を継ぎ足す梃子鍛えの方法がとられている。

なお、鈴木 [1993, 1994] が記述している一般的な作刀工程では、折り返し鍛錬の回数を15回程度としている。また、日本美術刀剣保存協会（日刀保）が、砂鉄製錬を行っている日刀保たたらでできた生成物のうち、作刀の材料としてはやや質の劣る二級品玉鋼を現代の刀匠たちに使用してもらって、22口の試作刀を製作した際の調査によれば、折り返し鍛錬の回数は、下鍛えと上鍛えを合計して12～14回であった [鈴木, 1993]。これらについて、折り返し鍛錬の回数と炭素濃度や焼き入れ後の硬さとの関係を佐々木ほか [2000] が調べた結果によると、炭素濃度は折り返し鍛錬27回までゆるやかに減少していくのに対し、高い焼き入れ硬さが維持されるのは折り返し鍛錬13回程度までで、それ以上の回数になると焼き入れ硬さは著しく減少していくことがわかり、伝統技術が経験的に最適条件を選んでいたことになる結論づけている。法華氏の技法でも通常の折り返し回数は13回となり、これらの報告と合致する。

ここでは、下鍛えを想定して折り返し鍛錬を実施し、温度条件の測定と、中間・最終生成物の金属組織の観察を行った。

### 2.1. 折り返し鍛錬の手順

折り返し鍛錬では、図5のような一連の作業が繰り返される。他の刀匠の折り返し鍛錬の手順が鈴木 [1994, pp.3-25～3-27] によって示されており、比較すると、細部に違いはあるものの基本的なやり方は同じとみてよい。

折り返し鍛錬は、大きく分けて、二層の鉄を容易に離れない程度にまず鍛着する「仮着け」と、藁灰と粘土汁をまぶして加熱して叩いてしっかりと鍛着させ、さらに叩き延ばしていく「泥沸かし」の二工程からなる。仮着けの中で、鍛接面にホウ砂と酸化鉄粉末を混ぜたものをはさんでいるが、これは鉄の鍛着を良好にするためのフラックスである。鋼は高温下のオーステナイト状態で変形しやすくなり、圧延や鍛造・鍛接などが容易となる性質をもつ。そのため原理的にはそのままでも鍛着は起こるので、このようなフラックスを使用しない刀匠も多い。これを含め、ここで調査対象としている折り返し鍛錬は、法華氏が柁目肌の大和伝保昌派の作刀を行うために、特にしっかりと鍛着を実現することを目的として採っている方法である。したがって作業温度範囲なども、他の刀匠では、機器による測定を行うまでもなく、目視によっても明らかにここで述べている状況とは

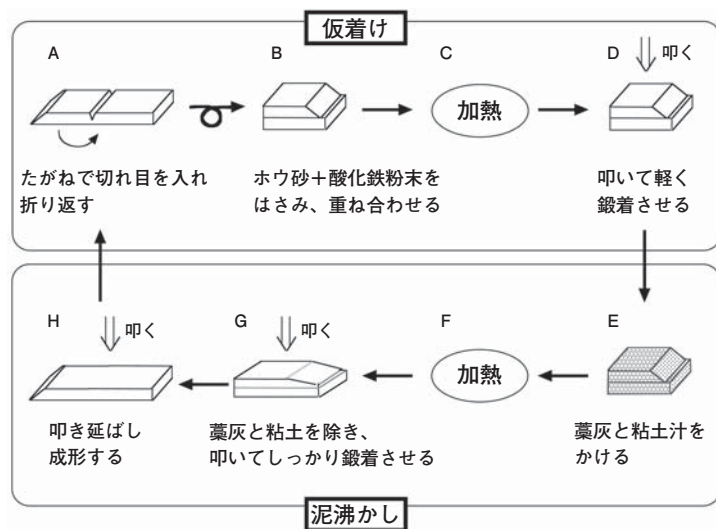


図 5 折り返し鍛錬で行われる作業内容

異なっていると認められる場合があることを、あらかじめ明示しておく。

写真 4 に、設備と作業状況を示した。各写真の下図は、図 5 中の対応する工程をあらわす。

使用している炉は卸し鉄用とは異なるもので、火床がより大きくなっている（写真 4a）。構造は類似しており、作業者からみると左側に羽口がある（写真 4b）。送風は電動の送風機で行い、また鍛接・鍛造は電動ハンマー（写真 4c）を使用する。

工程は一連の作業が繰り返されるが、まず、素材の鉄を一つにまとめるところから始まるので、それにそって流れを示していく。

仮着けにおいて、鉄の板を梃子金につけて重ね、火床で加熱し（写真 4d；図 5 の C に該当）、叩いて、その後の作業で容易に離れない程度に鍛着させる（写真 4e；図 5 の D）。

泥沸かしの段階に入り、藁灰と泥（粘土を水でといたもの）をかけて加熱する（写真 4f、4g；図 5 の E、F）。藁灰と泥を除き、叩いてしっかり鍛着させる（写真 4h；図 5 の G）。叩き延ばし、成形する（写真 4i；図 5 の H）。なお、G～H の段階で、表面に水をかけることによる水蒸気爆発を利用して酸化被膜を取り除く（写真 4j）。

仮着けを行うための作業として、たがねで中央に切れ目を入れて折り返し（写真 4k；図 5 の A）、内側の面の酸化被膜を取り除き、重ね合わせる（写真 4l；図 5 の B）。法華氏の場合は、ここで間にホウ砂と酸化鉄粉末（鉄の酸化被膜（スケール）を細かい粉末にしたもの）の混合物をフラックスとして間にはさむ。このあとは写真 4d（図 5 の C）にもどり、以下繰り返しとなる。

## 2.2. 調査方法

ここでは、炭素濃度の異なる 2 種類の原料として軟鉄と鋳を使用し、各 6 回の折り返し鍛錬を実施した。軟鉄としては、前述の卸し鉄の浸炭工程で使用したのと同じ、江戸時代後期（18 世紀頃）に作られた蔵で門扉に使用されていた肘金（写真 3 a）から 1.58kg 分を切り出して使用した。炭素濃度は < 0.1 ～ 0.2% 程度である。また鋳としては、江戸後期～明治初期頃の砂鉄製錬で得られ

たもの 2.10kg（写真 5）を使用した。炭素濃度は 0.7 ～ 0.9% である。

肘金については、切り出した 2 枚の切片を加熱・整形したのちに、加熱・鍛接、加熱・鍛造を施したものを原料とした。

また鋸については、空孔が数多く含まれており、またスラグなども残留しているので、加熱と鍛造を 4 回繰り返し、叩き延ばして 1 回折り返して鍛接・整形したものを原料とした。

これらの原料に対し、仮着けの鍛着工程（図 5 の D）と泥沸かしの鍛接から叩き延ばすまでの工程（図 5 の G → H）のそれぞれについて、鍛造の作業を行っている温度範囲を、非接触温度測定装置（高温用赤外線サーモグラフィ；独 JENOPTIK 社, Vario THERMO head）によって 50 コマ／秒で記録し、あとで時間経過に沿って各コマの画像から解析した。

また、それぞれ 2 回、4 回、6 回折り返し後に生成物を切断して試料を採取し、鍛接面が見える方向でエポキシ樹脂（Strues EPOFIX）に埋め込み、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 P M A（日本電子製 JXA-8200）を用いて、二次電子像によって資料断面の金属組織観察を行った。また介在物等の観察は反射電子像によって行い、各部の化学組成はエネルギー分散型 X 線検出器（EDS）によって分析した。

軟鉄では、原料より 7.59g、2 回・4 回・6 回折り返し後にそれぞれ 91.27g・81.91g・67.31g+56.00g の試料採取を行い、残った生成物の重量は 565g であった。また鋸では、原料より 7.39g、2 回・4 回・6 回折り返し後にそれぞれ 96.20g・73.16g・72.19g+52.66g の試料採取を行い、残った生成物の重量は 800g であった。このほかに試料採取時のロス（各 15g 程度）もあるが、いずれの場合も、6 回の折り返し鍛錬によって当初重量の半分近くにまで目減りしており、これまでの研究例（佐藤 [1934] の報告からの算出では折り返し 6 回で 300 匁の原料から 110 匁の損失）と比べてロスが大きい。これは、分析用試料採取のために高温の鋼をいったん常温まで冷やし、試料採取後に再度作業温度まで加熱するというやり方を繰り返したため、全体としての加熱時間が長くなってしまい、酸化による鉄の損失が大きくなってしまったためと考えられる。なお、折り返し鍛錬の生成物において、端部は折り返しによって組織が乱れているので、試料採取は中央付近を横断する形で行った。

## 2.3. 温度測定結果

鍛造作業中のサーモグラフィ測定画像の例を図 6 に示す。これは、肘金を原料とし、5 回目の仮着けと泥沸かしを行った際のものである。

仮着けの鍛造開始時において、重なっている 2 枚の鉄はまだ鍛着していない。羽口は原料の下に位置しているため、原料は下から加熱されており、図 6a のように下側の層の温度が高くなる。表面に藁灰や泥を塗っておらず、火床の中では動かさないで加熱するので、酸化被膜が外側に付着しており、温度の不均一が大きい。測定画面上の手前側面は羽口側であるため温度が特に高くなっている。また、梃金との接合面付近は細くなっているため温度が高くなりやすい。図 6b は仮着けの鍛造終了時の画像である。2 層の鉄が鍛着して温度の不均一が小さくなり、酸化被膜がかなり取り除かれている。

図 6c は泥沸かしの鍛造開始時の画像である。場所による多少の違いはあるものの、仮着けの場

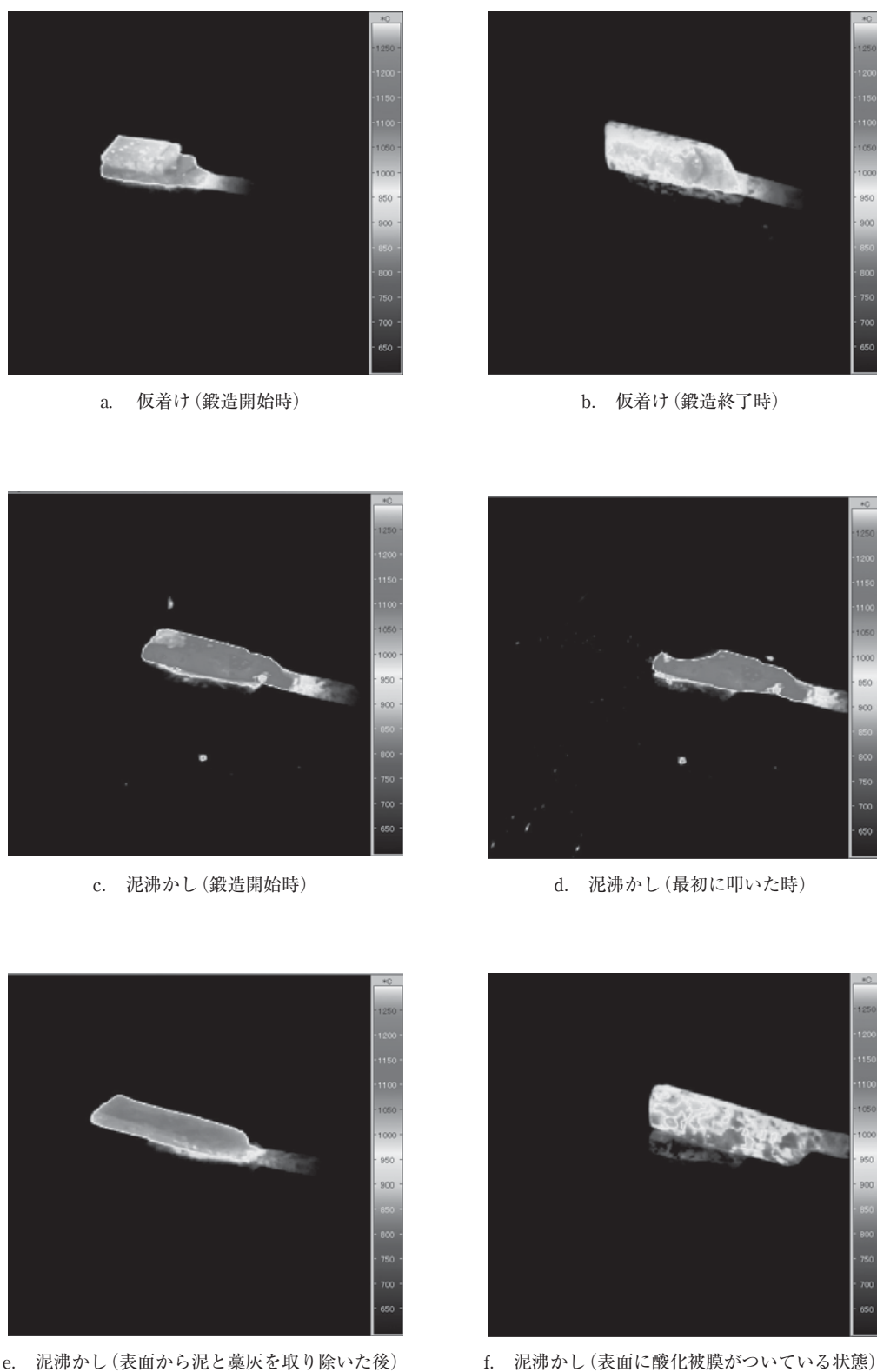
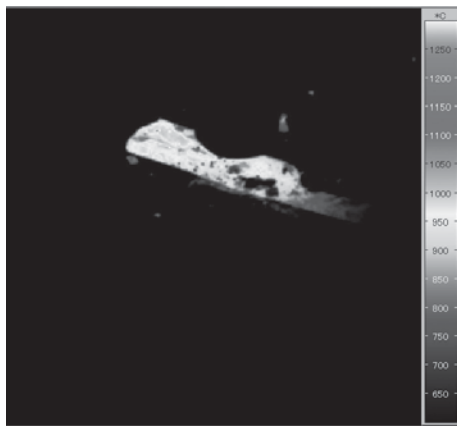
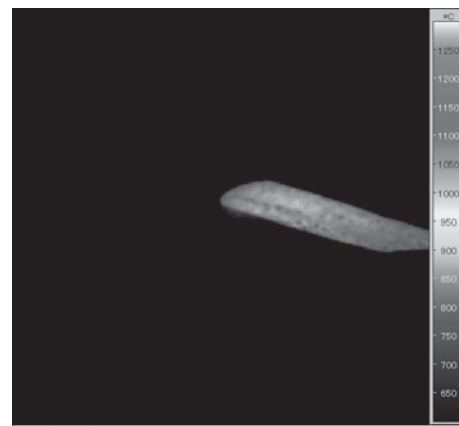


図 6 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像 (原料は肘金)  
(論文末カラー図参照)

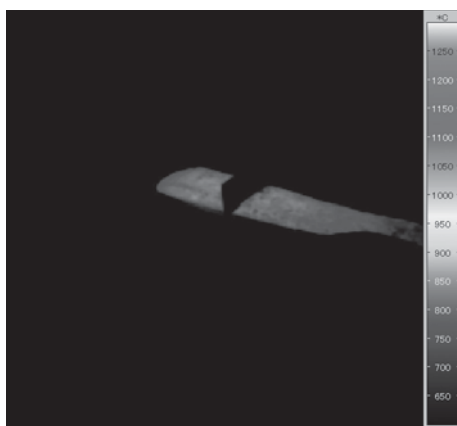




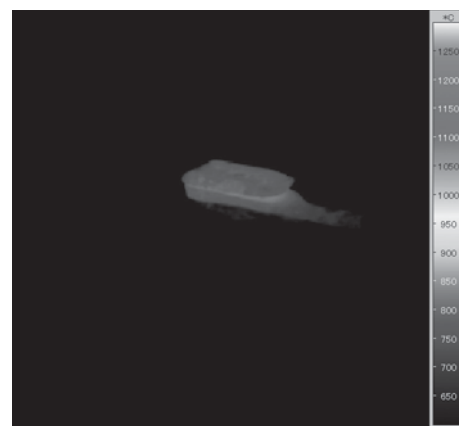
g. 泥沸かし（水をかけて叩き酸化被膜を除く）



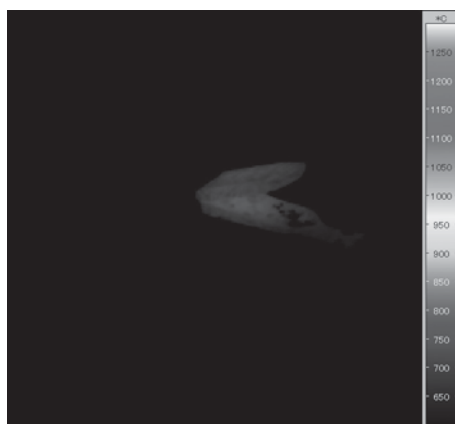
h. 泥沸かし（鍛造終了時）



i. 仮着け（タガネを入れる）



j. 仮着け（タガネを入れた後で折り返す）



k. 仮着け（間にフラックスを入れて再び折り返す）

図 6（続） 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像（原料は肘金）  
（論文末カラー図参照）

合と比べると温度の均一性が高いことがわかる。泥沸かしの場合は、できるだけ加熱の偏りができないように、火床の中で位置をずらしたり回したりするためである。これをハンマーで叩くと、最初は表面の藁灰と泥（が焼けたもの）が飛び散る（図6d）。何度か叩いた後に、表面に付着している藁灰と泥をスクレーパーやブラシを使って取り除くと図6eのような状態になる。仮着けの画像と比較すればわかるように、図6eでは鉄全体が均一に加熱されていることがわかる。以前より、藁灰と泥で覆うことの目的として、表面からの酸化を防ぐことと、全体をできるだけ均一に加熱することの2つの意味があると推定されていたが、後者が確認されたことになる。この後、鍛造を繰り返して叩き延ばしていく。

泥沸かしにおいては、次の仮着けに向けて表層に生じる酸化被膜をできるだけ除去する必要がある。サーモグラフィー画面では、表面に酸化被膜が付着していると、その箇所で温度がわずかに低下し、ムラのある画像となる（図6f）。水をかけて表面で水蒸気爆発を起こさせながら鍛造を行う（図6g）ことで、酸化被膜を取り除き整形していく（図6h）。

中央にタガネを入れ（図6i）、折り返して叩く（図6j）。法華氏の場合は、層の間にホウ砂と酸化鉄粉末の混合物を入れて、再び折り重ねる（図6k）。この後、火床の中に入れて仮着けが行われ、一連の工程が繰り返される。

なお、図7は、原料として鋳を使用した場合の、仮着けと泥沸かしの鍛造開始時におけるサーモグラフィー画面である。図7aと図6a、図7bと図6cを比較するとわかる通り、加熱温度に違いがある。これについては後述する。

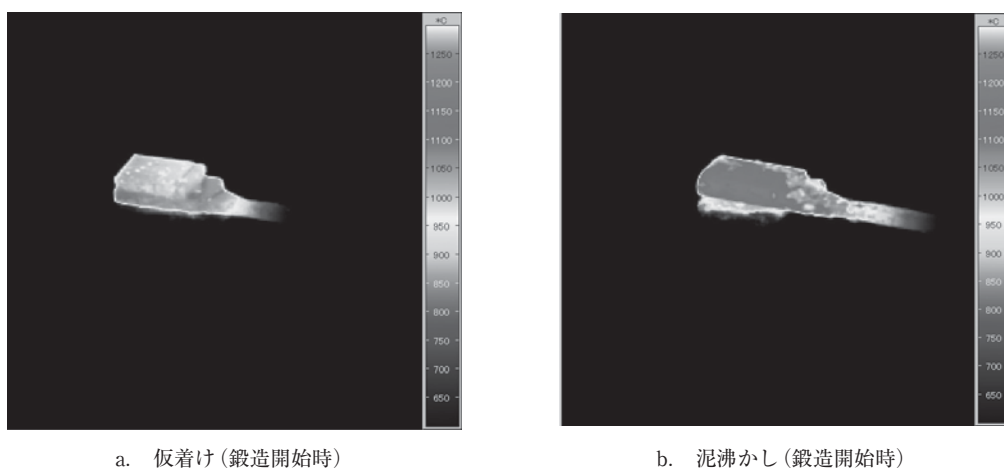


図7 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像（原料は鋳）  
（論文末カラー図参照）

ここで温度測定を行った工程は、サーモグラフィーの画像でいうと、図6aから図6bまでと、図6cから図6hまでに相当する。なお、表面の泥や酸化被膜が取り除かれて金属鉄の部分がみえていた時は、部分的に生成して付着している酸化被膜の箇所を避けて、金属鉄部分の温度を調べた。図8は肘金、図9は鋳を原料とした場合の、それぞれ6回の仮着け、泥沸かしの温度範囲と鍛造時の変化である。グラフ中の「S」と「E」は、鍛造開始時（スタート）と終了時（エンド）を示している。

また図 10 は、図 8、9 から、仮着けと泥沸かしの鍛造開始時の温度範囲のみを抜き出し、折り返し回数ごとにまとめ直したものである。丸と実線で示したのが肘金を原料とする場合、三角と点線で示したのが鉾を原料とする場合である。いずれも、白ぬき記号は測定範囲内の最高温度、黒色記号は同じく最低温度を示す。つまり、この上下の線の間がそれぞれの温度範囲ということになる。

図 8 と図 9 において、どちらの原料を使った時にも共通しているのは、

1. 仮着けはきわめて短時間で作業が終わっていること。ただし、折り返し回数が進むと時間が長くなる傾向があること。
2. 仮着けよりも泥沸かしの方が高い温度から作業を開始し、時間をかけて、より低い温度まで鍛造を行っていること。

ということである。

法華氏からの聞き取りをふまえてこれらについて考察する。まず「1」について、仮着けでは、重なった鉄が鍛着していない段階で、あまり高い温度で叩くと上下の層がすべってずれ動いてしまう。また「仮」着けという用語を用いているが、実際にはこの段階で、2 層の鉄はほぼ鍛着していると考えられる。作業にあたっては、細い鉄棒の先端にカギヅメをつけた「火床突き」という工具で火床の中の鉄を引っ搔いてみて、表面が粘ってきたところで鍛造に取りかかるようにしており、その時の温度が、原料の鉄の鍛着温度であるとみなすことができる。したがって、鉄が鍛着する適切な温度範囲内で作業を終わらせるために、作業時間は限定されていると考えられる。さらに、仮着けの段階では、重なった 2 層の鉄がずれないように、木灰や泥などを表面に塗らずに加熱を行っていることから、できるだけ鉄の酸化による消耗をふせぐという意味もあると思われる。

仮着けにおける折り返し回数と鍛造時間の変化について明確な理由は不明であるが、法華氏は、折り返し回数が増えてきた後半になると、折り返し鍛錬の仕上げに向けて、鍛着面に空気などが入らないように、より慎重にできるだけしっかりと鍛着させることを意識するようになるとのことであるので、それが鍛造時間の変化に反映されているのであろう。ただし、この工程では、ある温度以下になると鍛着が起こらなくなって作業の意味がなくなってしまうし、また必要以上に冷却が進んでしまうと次の泥沸かしにかかるための加熱時間が長くなってしまうので、鍛造時間が一定限度以上に長くなることはないと考えてよい。

「2」について、泥沸かしの工程は、すでに鍛着している鉄を、よりしっかりと密着させ鍛接を完全なものにするというのが法華氏のイメージだとのことである。加熱温度は、鉄の鍛着に必要な温度よりも明らかに高い。ここでは鉄を延ばす段階までの温度測定結果を示しているが、実際には、叩いて鉄を延ばし、タガネを入れて折り返すまでが一連の工程となっており、作業時間が長いので、そのぶん高い温度まで加熱しておかなければならないという意味もあると考えられる。なお、タガネを入れる段階での温度は 950 ～ 850℃ 程度、また折り返して閉じ、整形を済ませるところまでの温度範囲は 750 ～ 650℃ 程度であった。タガネを入れて折り曲げる時に温度が低過ぎると、曲がらずに折れてしまうこともあるそうである。

なお、鉾の泥沸かし（図 9）では 2 回目～6 回目の鍛造後に、鉄の内部に残った空気が加熱によって膨張したものが表層からみえる、いわゆる「ふくれ」が発生していたため、その処置を施しており、タガネを使って空気を取り除いたあと、もう一度加熱して鍛造をやり直している。鉾にはも

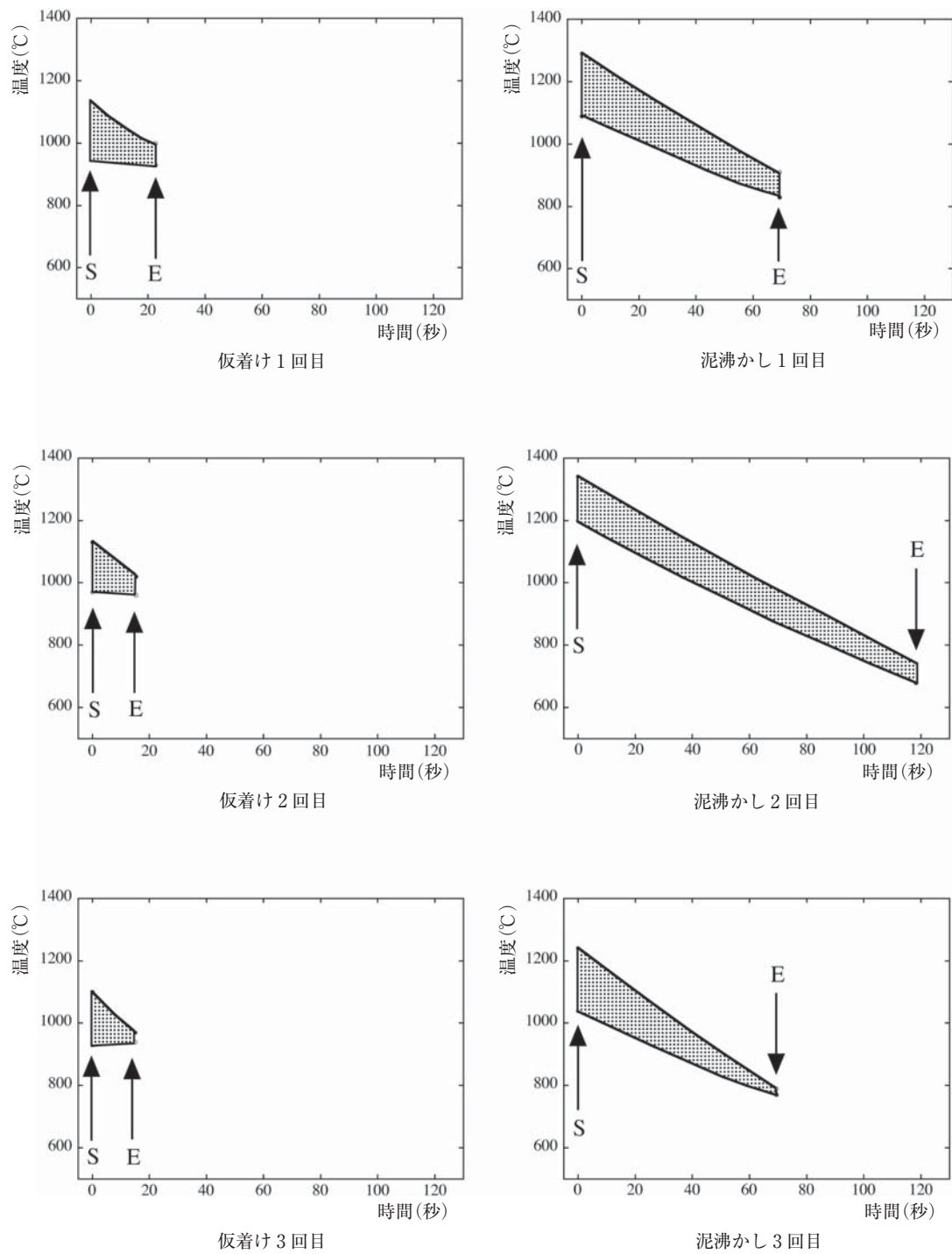


図 8 肘金の折り返し鍛錬における温度測定結果

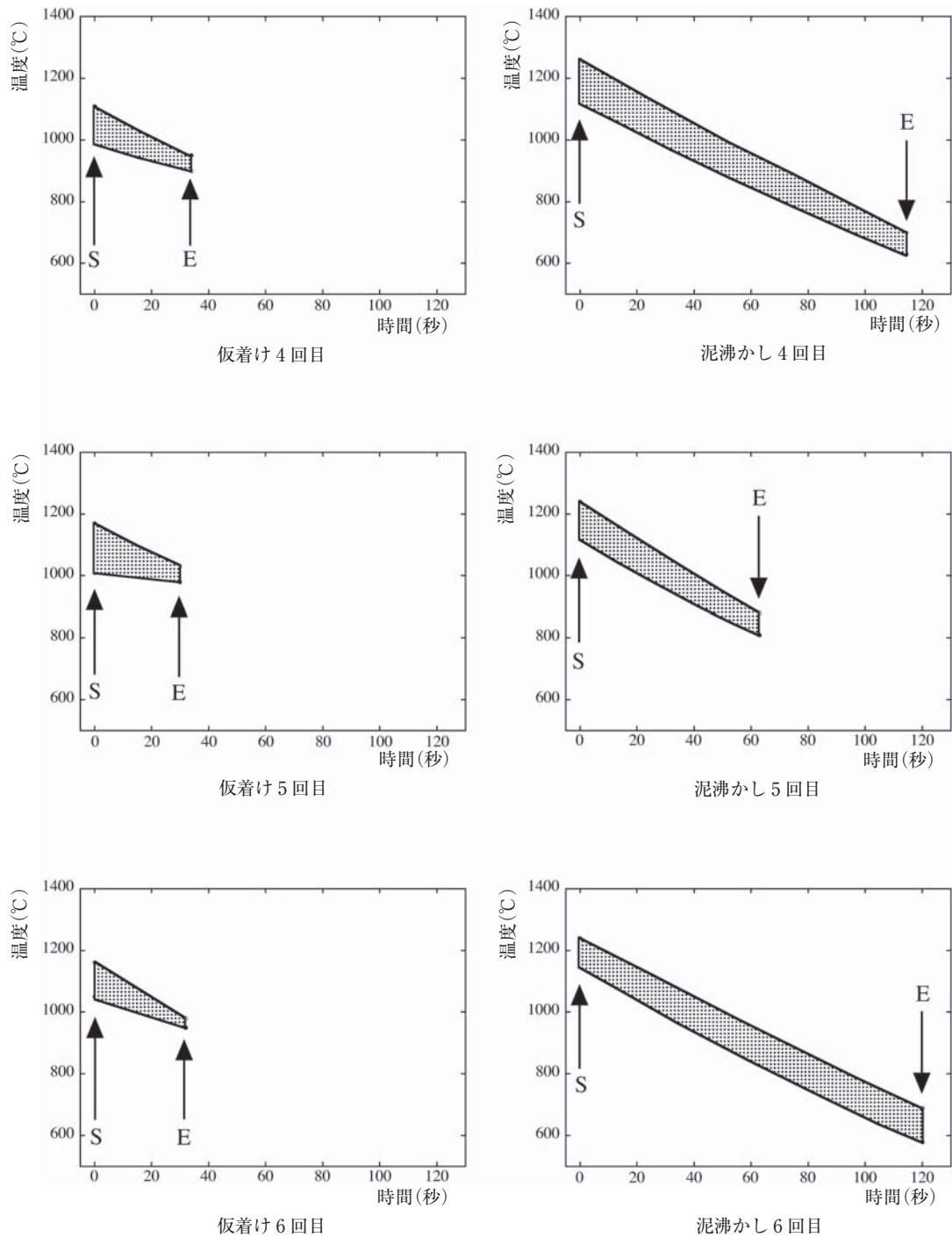


図 8 (続) 肘金の折り返し鍛錬における温度測定結果



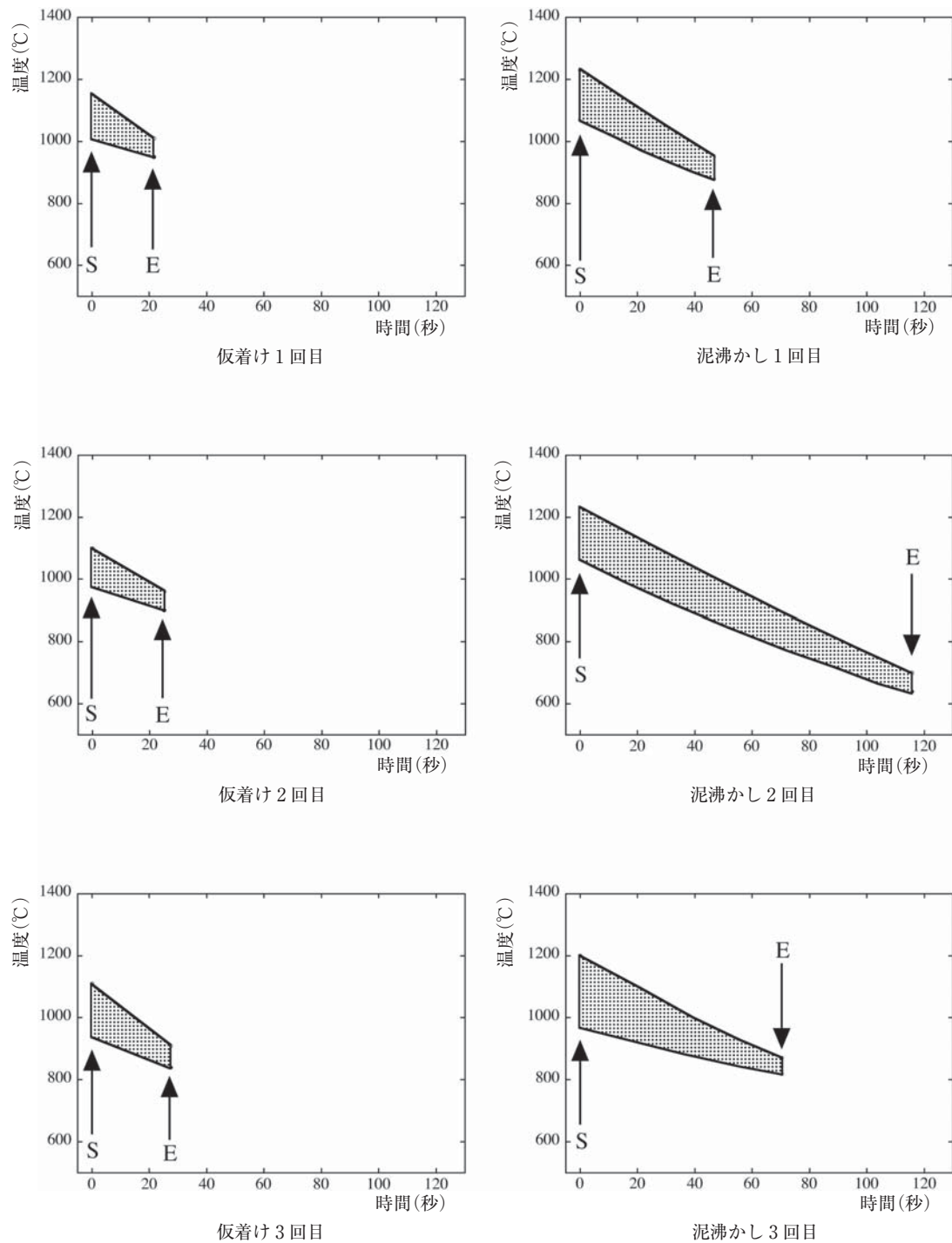


図 9 鉤の折り返し鍛錬における温度測定結果

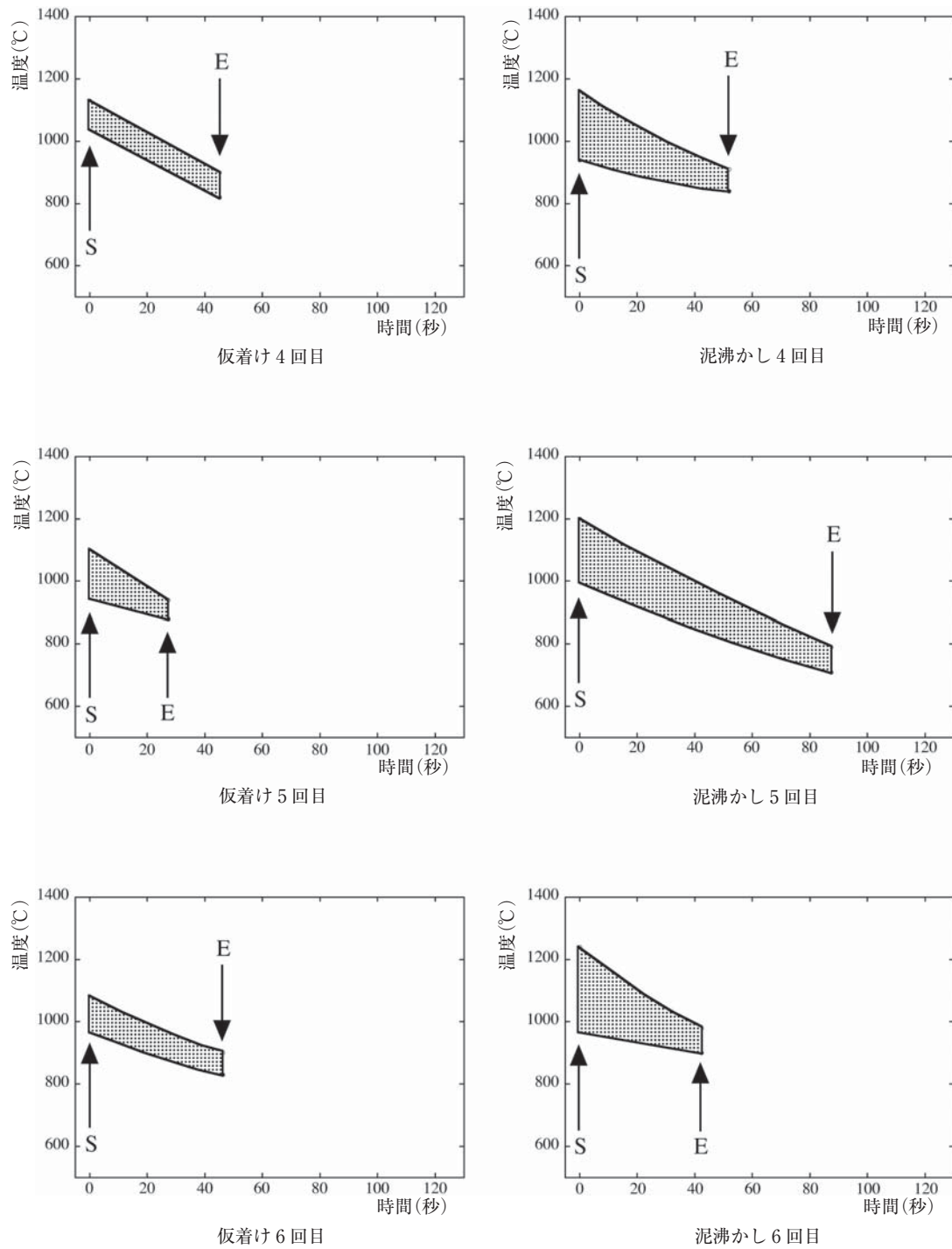


図 9 (続) 鉤の折り返し鍛錬における温度測定結果

ともと多くの穴が含まれているので、それが完全に除き切れずに残留していたとみられる。肘金の泥沸かしの時間よりも全体として短くなっているのはその影響もあると考えられる。

図10から、原料と作業温度の違いについてみると、仮着けでは折り返し回数が多くなると顕著になってこないが、泥沸かしでは、明らかに全体として鉾よりも肘金の方が高い温度から作業を開始していることがわかる。法華氏は、温度調整について「材料に聞く」という表現をしており、鉄が沸き（作業に適した温度に達し）、鍛接が可能になる温度を感覚的に知って加熱温度を定めている。この点からいうと、炭素濃度の低い肘金の方が、高炭素の鉾よりも、鍛接作業上は高い温度を必要とすることから、刀匠の感覚とこの温度測定結果との間には整合性があるといつてよいであろう。

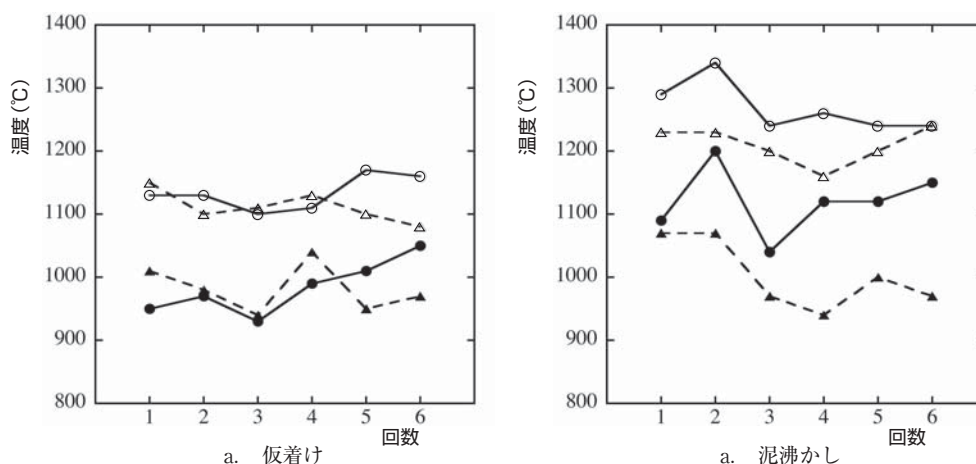


図10 原料による鍛造開始時の温度範囲の違い

## 2.4. 生成物の金属組織観察

それぞれ2回、4回、6回折り返し後に生成物を切断して試料を採取し、EPMAを用いて断面の金属組織観察を行った。写真6に試料例を示した。写真6aは鉾の折り返し2回、写真6cは折り返し4回の生成物から採取した試料である。写真6b、6dはそれぞれを研磨し、エッチングを行ったもので、肉眼でも鍛接面を確認することができる。

図11は、1回目の折り返し時にできた鍛接面が、折り返しを繰り返していくにつれてどのように変化していくのかということについて、鉾を原料として1回（折り返し直後）、2回および4回折り返しした場合を示した例である。折り返し直後の鍛接面（図11a）には、最大数10 $\mu$ mの厚さの介在物が点状に連なってあらわれている。介在物中の比較的明るく見えている粒子は酸化鉄であり、フラックスの中に入っている酸化鉄粉末や残留した酸化被膜に由来するものであろう。暗く見えている部分はガラス化したマトリックスで、原料中にもともと入っていたスラグなどの不純物や、泥沸かしに使用した藁灰、粘土汁などに由来する成分が含まれているものと考えられる。図11bの中央部と図11cの中央部にはそれぞれ、2回および4回折り返し鍛錬を行ったあとに、最初の折り返し鍛接面がどのような状態になったかが示されている（なお、図11cの上部にみえている

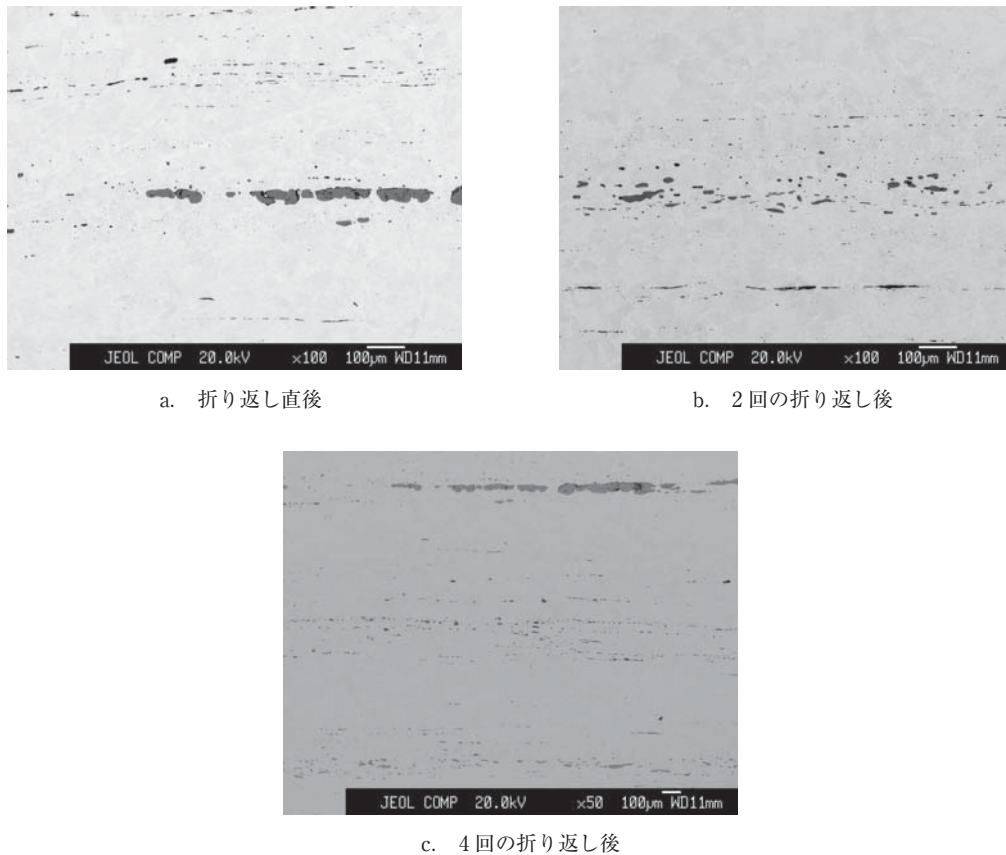
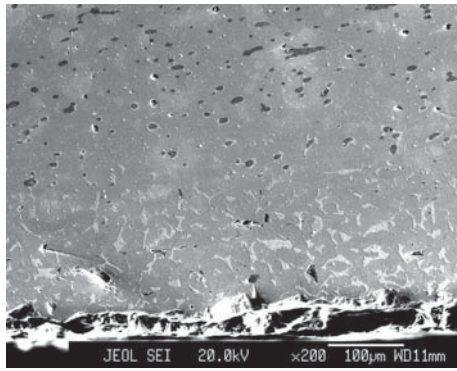


図11 折り返し1回目で形成された鍛接面の変化（介在物）

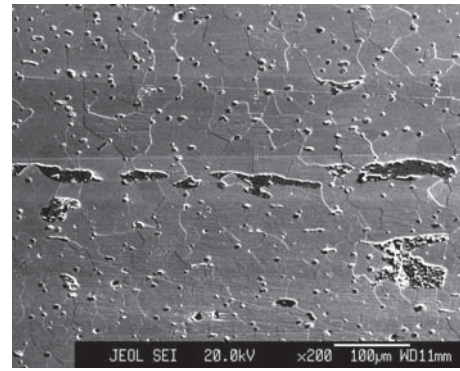
のは4回目の折り返しでできた直後の鍛接面、また下部にみえているのは2回目の折り返しでできた鍛接面である）。これらをみてわかる通り、介在物は折り返し回数が増えていくにつれて薄くなり、また細かく分散して鍛接面が見分けられなくなる程度まで層の均一化が進んでいくことがわかる。酸化鉄が減少し、ガラス化したマトリックスの占める割合が多くなっていることから、これには、鉄中の炭素による酸化鉄の還元も寄与しているものと考えられる。なお、鉄中の介在物について、鉾からはこの他に鉄チタン酸化物（ウルボスピネル、 $\text{Fe}_2\text{TiO}_2$ ）が検出された。また、いずれの資料にもファイヤライト（ $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ）は含まれていなかった。

表層や鍛接面境界部における炭素濃度の変化については以下のとおりである。まず、肘金（軟鉄）の場合、全体として大きな変化はみられないが、ごく一部ながら、表層付近で浸炭（C：0.2%）している箇所が認められた（図12a、下側が表層部）。しかし、鍛接面では特に炭素濃度の変化はみられない（図12b、介在物の周囲は均一な金属組織を示している）。鉾の場合には、表層付近（図12c）で数10～100  $\mu\text{m}$  程度、折り返し直後の鍛接面（図12d）で数100  $\mu\text{m}$  程度の脱炭層がみられるが、これも折り返し回数が増えていくにつれて均一化し、鍛接面周辺とそれ以外の部分での相違がなくなっていく。図12eは2回折り返し後、図12fは4回折り返し後に、1回目の折り返しでできた鍛接面周辺の金属組織の変化を調べたものであるが、しだいに均一化していく様子がわかる。加熱によって炭素の移動が起こり均質になっていったと考えられる。また、鉾を原料に6回折り返

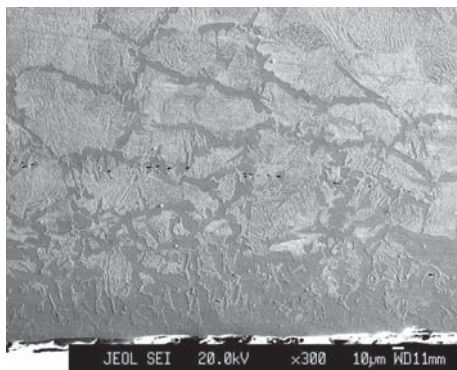




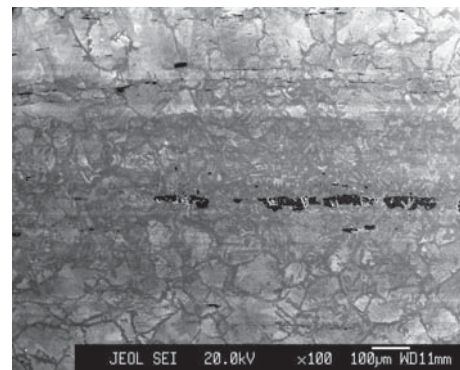
a. 肘金の折り返し鍛錬において表層に生じた浸炭



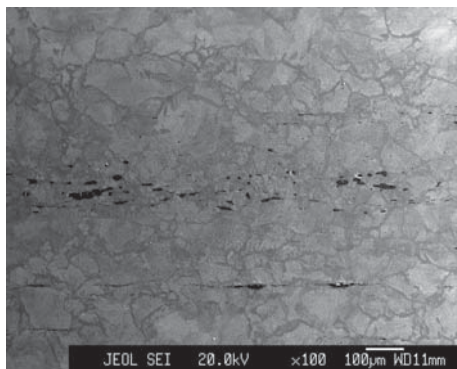
b. 肘金の折り返し鍛錬における鍛接面の周辺金属組織



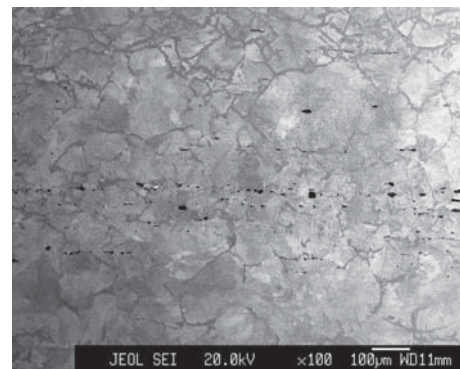
c. 鋇の折り返し鍛錬において表層に生じた脱炭



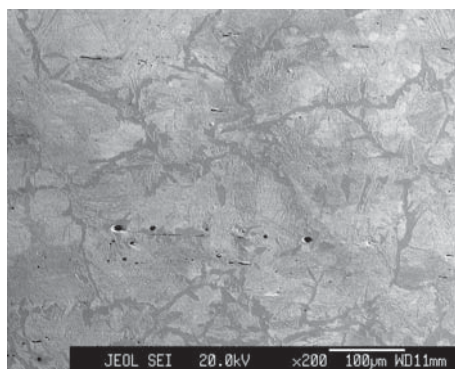
d. 鋇の折り返し1回目で生じた鍛接面の周辺金属組織



e. 鋇の2回折り返し後における折り返し1回目で生じた鍛接面の周辺金属組織



f. 鋇の4回折り返し後における折り返し1回目で生じた鍛接面の周辺金属組織



g. 鋇の6回折り返し後の生成物における金属組織

図12 折り返し鍛錬に伴う表層および鍛接面境界部における炭素濃度の変化



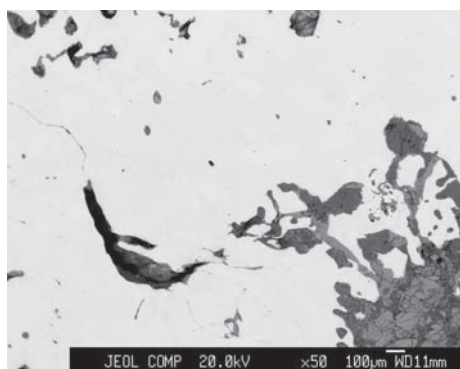
し鍛錬を行った後の生成物における炭素濃度は0.6%程度(図12g)と推定され、金属組織でみる限り、全体としてはほとんど脱炭が進んでいない。これらにより、従来からの指摘どおり折り返し鍛錬によって炭素濃度や金属組織の均一化が起きていること、また泥沸かしの際に藁灰と泥で覆うことによって完全ではないものの酸化を防ぐような雰囲気、またさらに局部的には還元的な箇所も出てくるような雰囲気が作られていることがわかる。

佐々木・桃野[2007]は、炭素濃度0.0%, 0.3%, 0.6%, 0.8%, 1.0%の5種類の炭素鋼に折り返し鍛錬を施し、折り返し回数による鋼全体としての炭素濃度の変化を調べている。その結果によると、全体としては折り返しごとに炭素濃度の減少がみられ、高炭素濃度のものほどその変化が大きい。本研究で使用了素材に近い炭素濃度0.6%の鋼では、6回の折り返しで0.59%から0.56%へとわずかに減少しているが、この程度の折り返し回数ではそれほど大きな変化はみられないことがわかる。これは本研究の結果とも整合的である。同論文[佐々木・桃野, 2007]ではまた、炭素濃度0.9%の鋼を使用して、折り返し鍛錬後の表面部と鍛接面を調べており、いずれも局所的に炭素濃度が0.5%に低下した脱炭層がみられ、その脱炭層深さを0.7mm (700  $\mu$ m)と読み取っている。炭素濃度が異なるためそのまま比較はできないが、これもまた本研究とほぼ同様の結果である。

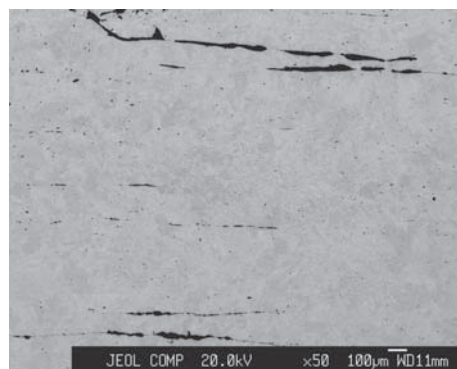
なお、折り返し鍛錬によって「日本刀の能く鍛えた地金即ち刃金などになりますと極めて鉄滓を含むことの少ない純粋なるものであります」「我日本刀の鍛へに於きましては、夫(注：鉄滓)を機械的に絞り出す」[俵, 1920b, 1953], 「地金中に含まれていた鉍滓が搾り出される」「地鉄は純粋化される」[長谷川, 1977, p.209], 「珪酸鉄の主とした鉄滓 slag は」「折り返すごとに酸化鉄とともに、叩き出され減量する。したがって介在する鉄滓の多少によって、逆に鍛錬回数の多少も推知できる」(福永, 1993, 「日本刀の科学」の項。なお、この説明箇所については参考文献として佐藤[1934]があげられているが、原文にこのような記述はなく、「有害なる瓦斯、異種鉍物、塩類及び夾雑物を去り、漸次鍛接面上の鉄滓を還元せしめたる純鉄線を折り込む作業」と説明している)など、折り返し鍛錬の回数が増えるほど、原料の鋼から介在物が取り除かれ減少していくという説明が行われている場合がある。

これについて、法華氏からの聞き取りや作業状況の観察結果によると、折り返し前に原料を成形する段階や折り返し鍛錬の初期段階では、肉眼で認められる程度の大きさで夾雑スラグなどの介在物がある場合、鉄の鍛着が阻害され、内部にある介在物から鉄の表面に向けてひび割れが走る。そして、鍛打を行うことによって、そのひび割れの隙間から介在物が排出されていく様子をみとることができる。しかし折り返し回数が進み、良好な鍛着が維持されていくようになると、そのような現象は、少なくとも肉眼では顕著にみられなくなる。

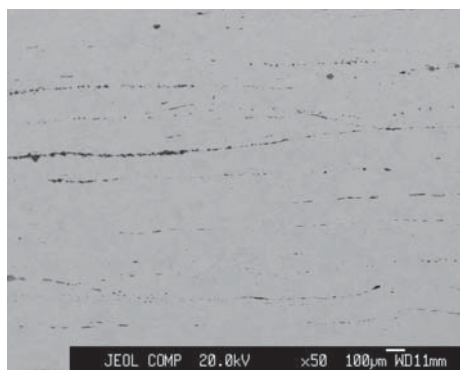
本研究で実施した折り返し鍛錬の資料について、夾雑するスラグ粒や空孔の特に顕著な鋸を原料とした場合の、原料と各折り返し回数での介在物の状況を比較してみた(図13)。図13aは原料の鋸の中にある介在物である。図13b, 13c, 13dはそれぞれ2回, 4回, 6回の折り返し鍛錬後の資料にみられる、中に鉄チタン酸化物の鉍物が含まれていることから原料にもともと存在していたと考えられる介在物(鉄製錬時のスラグに由来する)である。これらによると、確かに折り返し鍛錬の当初には、原料に夾雑していた大きめのスラグ塊の除去や空孔の減少が起きているとみてよいが、その効果は2回までの折り返しまでにほぼ達成されており、あとは特に全体としてスラグ等



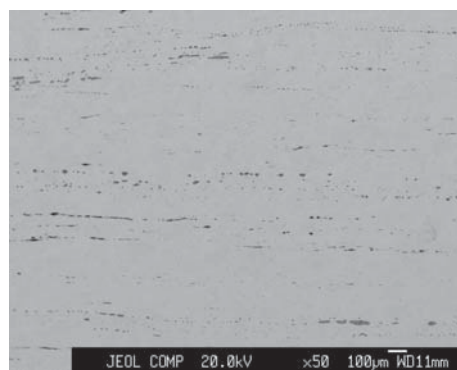
a. 原料



b. 2回折り返し後



c. 4回折り返し後



d. 6回折り返し後

図13 原料の鋳および各折り返し回数におけるスラグ由来介在物の変化

する非金属介在物の量は減少しておらず、そのような効果が顕著に認められるとはいえない。ただし、原料で様々な大きさのスラグが含まれていたものが、折り返し回数が増えるにつれて小さく均一に分散していく様子は観察された。折り返し鍛錬が行われている鋼の中では、加熱時に炭素原子の移動は起こるため、全体としての炭素濃度の変化はそれほど困難ではなく生じる。しかし、鋼組織の内部に存在している微細な非金属介在物（スラグ粒子など）は、たとえ折り返しのために鋼を叩き延ばしたとしても、鋼中で自由に移動できるわけではないので、容易に表面まで出てくることはできず、この方法で除去することはきわめて困難であると推測される。実際に刀剣の金属組織を分析してみると、それほど精巧な作りをしていない他の鉄製品に比べて、それぞれの非金属介在物がきわめて小さく、ただし多数が分散して存在していることがわかる。これについては、上述の俵の論文に掲載されている顕微鏡写真〔俵, 1920b, 1953, 第16図, 第17図〕でも明らかに見てとれる。また、折り返し鍛錬の回数と化学組成の変化を調べた佐々木・桃野〔2007〕によれば、介在物の量の指標となるケイ素とチタンの濃度は、折り返し鍛錬の開始時から15回の折り返しに至るまでほとんど変化がみられない。

これらのことから、スラグなどに由来する非金属介在物に対する折り返し鍛錬の効果は、その初期段階では肉眼で見える程度の大きな介在物の除去が行われる場合があるものの、残留した介在物が鉄の鍛接を阻害しない程度に小さくなった段階に至ってからは、それらを搾り出すことで除去するのではなく、むしろ微細化と均一な分散化を行っているのだと推測される。

### ③……………焼き入れ

刃部に焼きを入れて硬くすること、焼きの入っている部分と入っていない部分との境界で刃文を作ること、刀身に反りを入れること、を主な目的として行う工程である。

成形した刀身に、刃部は薄く、地部は厚めに焼刃土を塗る。この塗り方と置き土の仕方によって、刃文の形を決めることができる。また焼きが入った刃部は急冷組織であるマルテンサイトが形成されるため、徐冷された他の部分よりも体積が大きくなり、全体として刃側と反対の方向に反りが形成される。

刃文、すなわち焼きの入った刃部と入っていない地部との境界は、光にすかしてみると白く浮き立って見える。その全体としての形は直線的なもの(直刃)や曲線的な様々の模様を描くもの(乱刃)があるが、微小部分に注目すると、微粒子が光って見えるもの(「塗物に銀の砂子を振り掛けたる如し」と表現される)と、筆で描いたような滑らかな線がぼんやりと曇って見えるもの(「春霞が棚引く如く又白く烟の如し」と表現される)とに大別することができる。前者を沸、後者を匂という。一般に、高温に加熱し急冷すると沸に、その反対は匂になるとされている[本間・佐藤, 1997, p.277 ~ 290]。

ここでは、刃文にあらわれる沸と匂について、それぞれを作り分けるための条件のうち、焼き入れ温度に着目して測定を行うことによって、刀匠の感覚と実測値との比較を行った。また、水中での冷却時間を変えて取り出し、焼刃土をはがして下層にある鋼(刀身)の温度を測定することによって、焼刃土の役割と効果について実験的に検証した。

#### 3.1. 焼き入れの手順

焼き入れは、加熱温度を微妙に調整する必要があるため、日が暮れたあとに作業場の照明を落とした状態で行う。手順は以下の通りである。

刀身を成形後、ヤスリをかけて表面の傷を消し、灰汁をぬってこすり、表面の油分を取り除く。水で灰汁を洗い流し、風乾する。

砥石・粘土・炭を混合して調製した焼刃土を塗る(写真 7a)。はじめは気泡が入らないように薄く塗り、のちに所定の厚さにする。ここでは、大和伝の製作技法を意識して直刃を作るための塗り方を行った(写真 7b)が、これは測定や分析上の観点からみても単純化された都合のよい状態となっている。なお、沸を作る時には焼刃土の水分を少なめに、匂を作る時には水分を多めにするとのことである。これを炭火の上にかざし、焼刃土を乾燥させる。乾燥後は、水分の量の違いを反映し、沸を作る条件の場合には乾燥による土の厚みの減少が少なく、土は厚くつき、匂を作る条件の場合には乾燥すると土が比較的薄くなる。ひび割れを補修し、全体として土の厚みを整える。

刃部が下側になるように金鉋で保持し、焼き入れ用の火床(写真 8a)にて、刀身全体の温度ができるだけ均一になるように加熱する(写真 8b)。

所定の温度まで加熱したら、刃部を下にしたまま、水の中に入れて冷却する。通常は工房の床面に備え付けられた水槽を用いるが、今回は冷却の様子を観察・記録するためにアクリルの水槽を作

って使用した（写真 8c）。刃部が急冷されて急冷組織のマルテンサイトが形成され、また地部はそれほど冷却速度が速くないためにトルースタイト、ソルバイト、パーライトより成る組織となる。当初は冷却の進行により刃部が先行する形でわずかに体積減少がみられるが、マルテンサイトの形成に伴って刃部では体積が増加するため、水中で焼刃土が剥がれ刀身に反りがついていく。

### 3.2. 調査方法

ここでは、切先から棟区までの長さ約 25cm、茎の長さ約 10cm、元幅約 2.5cm、先幅約 2.2cm、棟側の厚さ（重ね）6.0～6.7mm、刃側の厚さ 1.2～1.6mm の短刀を成形し、実験用資料とした。焼き入れ前の刀身の形状は、切先に向けてやや逆反り気味にしてある（写真 9a）。

なお、ここで使用した短刀の場合、沸を作る条件で焼き入れ作業を行ったところ、水中に刀身を入れて 4～6 秒後から反りがつき始め、焼刃土が剥がれていった。最終的についた反りは約 3mm である（写真 9b）。また、この時に水中へ剥がれ落ちた地部の焼刃土の厚さを、棟側と刃側でそれぞれ 10 箇所ずつ測定したところ、棟側で  $1.3 \pm 0.1\text{mm}$ 、刃側で  $1.03 \pm 0.05\text{mm}$  であり、刃側の厚さの方が均一性が高かった。

#### 【焼き入れの温度測定】

短刀に対し、法華氏の感覚によって沸と匂を作る温度まで加熱してもらい、水につける直前の温度を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）によって 25 コマ／秒で記録し、あとで刀身が画面上に入っているコマの画像から各部の温度を解析した。

砂鉄を原料として前近代に製錬された和鉄で成形した短刀は、材料が貴重であり、また原料から成形するまで時間がかかる。そのため、あとで金属組織の観察を行うものは和鉄原料の資料を使うが、温度測定のものについては現代の工業製品である炭素鋼のうち、和鉄の短刀とほぼ同様の炭素濃度のもの（JIS：S50C）で代用した。

なお、この炭素鋼（S50C）では、和鉄と同様の条件で焼き入れを行っても、和鉄のような刃文とならず、厚く塗った地部の焼刃土の下までマルテンサイトが形成され、全体として想定したよりも広い幅に焼きが入ってしまった。また、油分をとるために灰汁を塗ってから水洗いし、風乾させると、表面がやや黒色となる和鉄の場合とは異なって、全体に赤錆がうっすらと浮き出ている。法華氏を含めさまざまな刀匠から従来指摘されてきたところであるが、この例をみても、和鉄と現代製鉄で作られた鉄とは性質に違いのあることがわかる。以上のことから、現代の炭素鋼で作られた資料は、金属組織の観察対象とすることができないため、本研究では温度条件の再現性などをみる目的のみに使用した。なお、和鉄と現代製鉄の鉄でこのような違いが生じる理由としては、含まれている成分元素や介在物の相違、製造法の相違などが考えられるが、現在のところ不明である。

焼き入れ処理後の和鋼については、切断してダイヤモンドペーストで研磨し、1% ナイタールでエッチング後、EPMA（JEOL JXA-8200）で刃文を中心に金属組織を観察した。

#### 【焼刃土の効果の検証】



沸を作る条件で加熱し、水中で冷却する。その際、冷却時間を変えて水から取りだし、表層の焼刃土を素早く剥ぎ取って、焼刃土の下鉄部分の温度を測定する。測定は、上記と同様に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）によって 25 コマ／秒で記録し、あとで目的とするコマの画像から各部の温度を解析した。測定器は、冷却用水の水面のすぐ上に向けて設置してあるので、水に入った瞬間と水から出した瞬間は、記録された映像によって確認することができる。そのため、水中で冷却されていた時間は、測定画像のコマ数から算出した。

水から出してから焼刃土を剥ぎ取るまでには 4 秒ほどかかるため、その間に若干の温度低下は生じているはずである。しかし、測定画面から見る限りでは、焼刃土を剥ぎ取って鉄部が露出した後であっても、4 秒間での温度低下は 10 ～ 15℃ 程度にすぎず、焼刃土がかかっている間はこれよりもさらに温度低下は小さいと見なすことができるので、考察の大筋には影響しないと考えてよい。

### 3.3. 温度測定結果

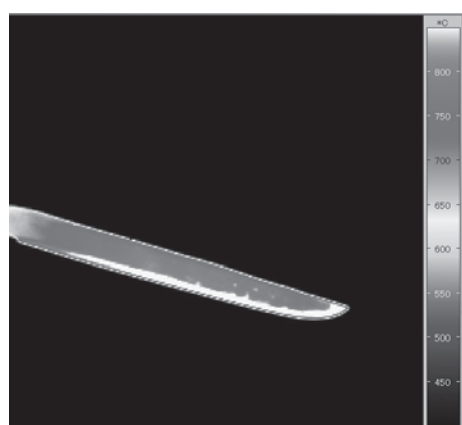
沸と匂の測定画像を図 14 に示した。図 14a ～ 14c が沸の、図 14d と 14e が匂の測定画像である。刀匠自身が感覚的に経験していることでもあるが、切先付近や刃部では、他の部位よりも高温になっている。これは、鋼の厚みが薄くなっている上に、比熱の大きな焼刃土がわずかしきかかっていることから、熱を受けた時の温度上昇が大きくなるためであり、避けられない現象である。また作業上、どうしても元の方（茎の近く）の温度は低くなりがちである。

これらの画面から、法華氏が適正温度をみきわめている箇所（刃先から 1/3 付近の、温度がある程度広い範囲にわたって平準化している箇所）において、温度測定を行った。結果は表 1 の通りである。

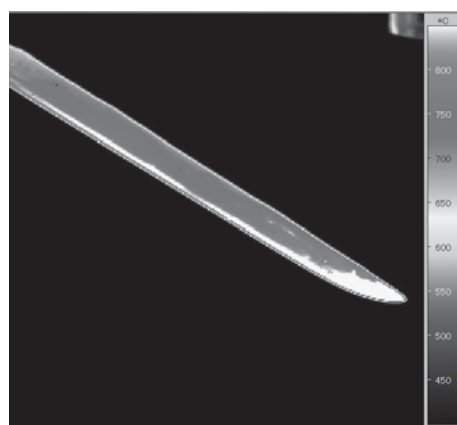
これをみると、沸と匂のそれぞれを作る場合で、加熱温度に差があり、温度条件の再現性が高いこと、すなわち、刀匠はその数 10 度の違いを感覚的に識別できることを示している。また、法華氏の場合には目標とする温度を数値的に把握しており、沸の場合には 800℃ 前後、匂の場合には 730℃ 前後とのことであったが、測定値はこれとよく合致している。なぜこのそれぞれの温度範囲が目標となるのかについて、法華氏によれば経験的に得られた温度であるとのことであった。俵 [1919b, 1953] によれば、刃文を形成するためには鉄を加熱し、オーステナイトへの変態温度（皮鉄の炭素濃度では 760 ～ 770℃）を超えたのちに水中で急冷することが必要とされ、また沸と匂の違いが生じる要因として加熱温度と冷却速度の 2 つがあることが指摘されている。加熱温度については、高温で沸が、低温で匂が生成するとしている。法華氏が、「沸」と「匂」を作るわけのための条件の一つとして加熱温度を重視している点は、俵の考察と整合的である。なお、表 1 でみる通り、匂を作る際の加熱温度が、目標位置で 720 ～ 740℃ と変態温度より低くなっているが、「3. 4.」で述べる通り、下層にある鉄の部分の温度は焼刃土の上での温度よりも高くなっていると推測されるため、矛盾はない。

和鉄原料でできた資料に焼き入れを施したものについて、形成された沸と匂の金属組織を EPM A で観察した結果が図 15 である（いずれも右が刃側、左が地側）。白くみえている粒子がマルテンサイトの結晶、灰色の部分がトルースタイトである。俵 [1919b, 1953] にあるのと整合的であり、

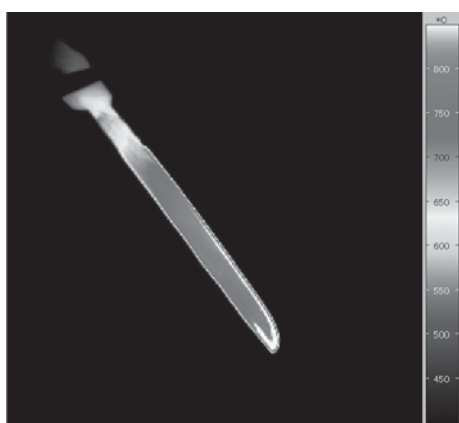




a. 沸-1



b. 沸-2



c. 沸-3



d. 匂-1

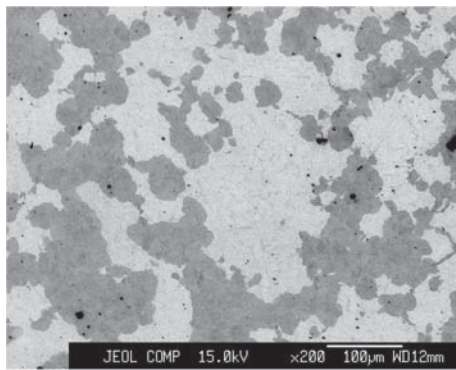


e. 匂-2

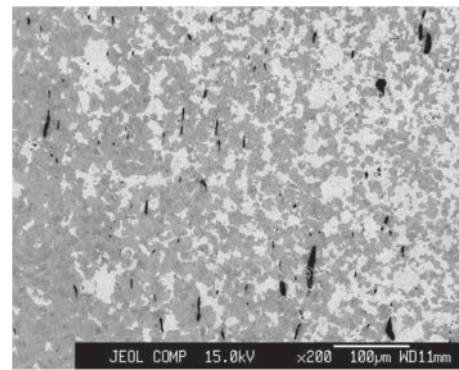
図14 沸と匂を作る焼き入れ温度測定におけるサーモグラフィー画像  
(論文末カラー図参照)

表 1 非接触温度測定装置による短刀の焼き入れ温度測定結果

測定番号 (沸)	図番号	測定値	測定番号 (匂)	図番号	測定値
沸-1	図 14a	780 ～ 800℃	匂-1	図 14d	720 ～ 730℃
沸-2	図 14b	780 ～ 790℃	匂-2	図 14e	720 ～ 740℃
沸-3	図 14c	780 ～ 800℃			



a. 沸



b. 匂

図15 刃文の反射電子像

沸の場合にはマルテンサイトの結晶が大きい（図 15a）。これが肉眼でも粒子状に光って見えるのであろう。一方、匂はマルテンサイトの結晶が小さく（図 15b）、肉眼では粒子を確認できないのだと考えられる。

なお、佐藤 [1934] は沸と匂の作り分けについて、加熱温度の他に、鋼の中の炭素濃度も関係していることに言及している。ここでは炭素濃度がほぼ同一な資料に対して作業を行っているので、この点に関する知見は得られていない。

### 3.4. 焼刃土の効果

焼刃土を剥ぎ取っている作業の様子を写真 10 に、その赤外線サーモグラフィー画像を図 16 に示した。

このような画像から得られた測定結果を図 17 に示す。

加熱後、水中で冷却せずにそのまま焼刃土を剥がした場合には、地の部分の焼刃土の上からの温度が 780 ～ 800℃であるのに対し、下の鉄部では 870 ～ 880℃を示した。切先の温度が 960 ～ 970℃、刃部の温度が 870 ～ 900℃であったので、これらからの熱伝導で焼刃土の上よりも下層の鉄の部分の方が温度が高くなっているのであろう。

焼刃土の下層にある鉄の温度は、水中に入れた直後には冷却速度がやや大きいものの、変態温度に達する前に冷却速度が遅くなっているために、マルテンサイトなど焼き入れ組織の生じない条件が得られているのだと考えられる。冷却が進み、刀身に反りが入り始めるのに伴って焼刃土ははが

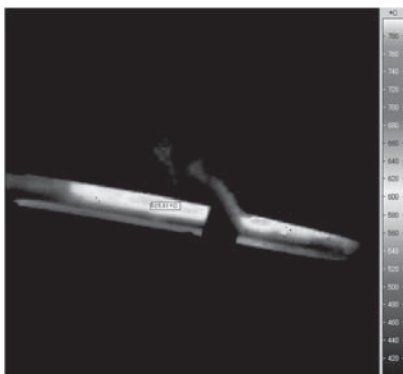


図16 焼刃土を剥がす作業における  
サーモグラフィー画像  
(論文末カラー図参照)

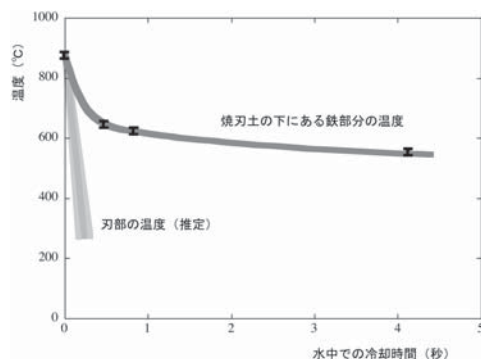


図17 焼き入れにおける水中での冷却に伴う  
焼刃土の下層にある鉄部の温度変化

れていくが、その時点までに、地部ではトルースタイトやソルバイトへの変態が進行し、鉄部分が水に直接ふれて急冷されても組織変化が起こらない程度まで達しているのであろう。焼刃土の下鉄部分でこのように温度降下が小さい理由としては、加熱後、水に入れた時点では焼刃土の表面は高温となっているため、水は表面で激しく気化して内部への浸透が起こらず、またこれによって表面で気化熱が奪われても土の断熱性によりその効果が鉄部分まで及びにくくなっているためと推定される。

焼刃土がほとんどかかっていない刃部については、本実験の最短冷却時間 0.48 秒で、すでに測定限界の 340℃ 以下まで温度が下がってしまったため、冷却速度を算出できなかった。しかし、冷却後の金属組織としてはほぼ完全にマルテンサイトとなっていることから、1000℃/秒以上と考えられる。

焼刃土の厚さと冷却速度との関係については、上原・井上 [1995] で冷却実験の結果が示され、井上 [1995, 1996] がそれに基づく焼き入れにおけるコンピューターシミュレーションを行っている。それらによると、焼刃土をまったく塗らなかった場合よりも、薄く塗った場合の方がはるかに速く冷却が行われると考察されている。その要因については、焼刃土によって、膜沸騰（高温金属が水と接した時に、表面付近の水が激しく沸騰することによって、蒸気が薄い膜となり、表面を覆い温度低下を妨げる）が起こらず、ただちに核沸騰（蒸気膜が切れ、金属と水が直接接するようになる）の段階になるためであると説明している。

## まとめ

刀匠が伝承している技術のうち、卸し鉄、折り返し鍛錬、焼き入れについて、自然科学的な手法を用いて調査を行い、それぞれの技術における特徴や、刀匠の感覚との整合性などについて考察を行った。本研究で明らかになったのは以下の諸点である。

1. 軟鉄と銑鉄の卸し鉄においては、各部の条件がわずかつ異なる作業を同一の炉を使用して

行っているが、炉内で起きているメカニズムはまったく異なっていると推測される。すなわち、軟鉄の浸炭では、炉の上部で固体の鉄に炭素が吸収され、融点が下がって半熔融状態となり、炉底に垂れ落ちていく。炉底ではできるだけ風があたらないようにして、脱炭が起こらないようにする。一方、銑鉄の脱炭では、炉の上部で鉄が溶解して液体状態になり、炉底に少しずつ流れ落ちていく。炉底では羽口からの風があたるようにして、鉄中の炭素を燃焼させ、炭素濃度を下げる。

2. 折り返し鍛錬において、折り返し回数が増えるにつれて、炭素濃度の均一化されていく様子が観察された。参考文献などにある「折り返し鍛錬によって介在物が減少していく」という現象は折り返し2回まではみられるが、その後は顕著にはみられなくなり、むしろ、鍛接面に生じるものもスラグに由来するものも、折り返し回数が増えるほど小さくなり均一に分散されていくようになることがわかった。鍛造開始時の加熱温度については、仮着けでも泥沸かしでも、鉄の炭素濃度に応じて異なる傾向がみられた。また仮着けと泥沸かしの工程では、加熱温度、作業を行う温度、作業継続時間に相違がみられた。これはそれぞれの工程での目的と刀匠の意識が反映されているものと考えられた。
3. 焼き入れにおいて、沸と匂を作りわけるときの加熱温度の違いを実験的に確認できた。これは刀匠の感覚とも整合的であった。また焼刃土の下鉄の温度の測定により、焼刃土が地部の徐冷に役立っていることが確認された。

本研究は、技術に関わる条件の測定を行うほかに、「感覚に従って作業をしている刀匠（職人）の技術を数値化し、将来へ向けての継承に役立てる」ということを目的としていた。その一端を示すことはできたものとする。ただし、実際に現場で刀匠の作業をみていると、例えば炎の色や鉄の燃える音、吹子を動かす手の重さや風の音の変化、羽口から出る風の廻り具合（風の巻き方）など、数値化できないものを感覚で捉えながら作業していることがわかる。数値化できるのはごく一部にすぎない。また、数値で記録したからといって、使用する原料や火床の条件など、状況の異なる条件下で、それをそのまま当てはめることはできない。継承すべき技術の最も要となる部分は、やはり感覚で捉えるしかない。しかし、理論がわかれば、その補助的な役割を果たせることにはなるだろう。その一助となれば幸いである。

なお、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）、野田稔氏（東邦大学）、堀哲郎氏・宮原佑治氏・萩野谷主税氏（専修大学）、齋藤郁乃氏（東京家政大学）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

---

- 井上達雄 1994 「たたらと日本刀—伝承技能における先進科学と技術—」『機械学会誌』, 97, pp.132-135
- 井上達雄 1995 「日本刀にみる科学と技術—焼入れのコンピューターシミュレーションを通して」『バウンダリー』  
11-11, pp.36-41  
(1995), pp.36-41
- 上原拓也, 井上達雄 1-995 「日本刀の焼入れにおける焼刃土の効果」『材料』44, pp.309-315
- 加藤将彦, 平井昭司 2008 「鍛冶による瓦用鉄釘の加炭および脱炭」『鉄と鋼』94 (8), pp.8-13
- 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
- 佐々木直彦, 堀井胤匡, 藤原幹男, 斎藤英之, 三澤俊平 2000 「日本刀の強度—靱性バランスと刃金用玉鋼の折返し鍛錬による炭素量, 焼き入れ硬さの変化」『鉄と鋼』86 (1), pp.45-50
- 佐々木直彦, 桃野正 2007 「伝統的鍛錬工程における日本刀材料の炭素量変化」『鉄と鋼』93 (12), pp.792-798
- 佐藤富太郎 1934 『日本刀の秘奥』(日本刀講座 別巻 1) 雄山閣
- 鈴木卓夫 1993 『たたら製鉄と日本刀の科学』雄山閣
- 鈴木卓夫 1994 『作刀の伝統技法』理工学社
- 俵國一 1918 「日本刀の研究」『機械學會誌』22 (54), pp.1-39
- 俵國一 1919a 「日本刀の原料として庖丁鐵卸し鐵」『鐵と鋼』5 (10), pp.1125-1143
- 俵國一 1919b 「日本刀中の沸及び匂に就き」『鐵と鋼』5 (5), pp.531-544
- 俵國一 1920a 「鋼卸し鐵法及銑卸し鐵法に就て」『鐵と鋼』6 (6), pp.566-579
- 俵國一 1920b 「日本刀の研究」『鐵と鋼』6 (4), pp.337-368
- 俵國一 1933 『古来の砂鐵製鍊法』丸善
- 俵國一 1953 『日本刀の科学的研究』丸善
- 長谷川熊彦 1977 『わが国古代製鉄と日本刀』技術書院
- 福永酔剣 1993 『日本刀大百科事典』雄山閣出版
- 法華三郎信房(語り), 井上英子(聴き書き) 2010 『鐵と炎と魂と』笹氣出版
- 本間薫山, 佐藤寒山監修 1997 「日本刀製法に関する用語」『新版日本刀講座〈第一巻〉概説篇』雄山閣出版

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)



---

## Scientific Studies on Traditional Techniques Inherited by Swordsmiths

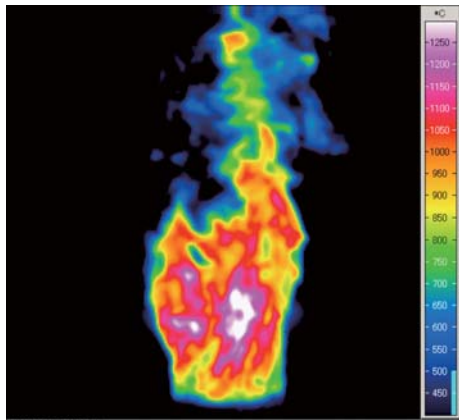
SAITO Tsutomu, SAKAMOTO Minoru and TAKATSUKA Hideharu

We carried out scientific research on three traditional techniques, oroshi-gane, orikaeshi-tanren and yaki-ire, inherited by the swordsmiths, HOKKE-Saburo Nobufusa 9th and his son, HOKKE-Eiki, in Miyagi prefecture. The results are as follows;

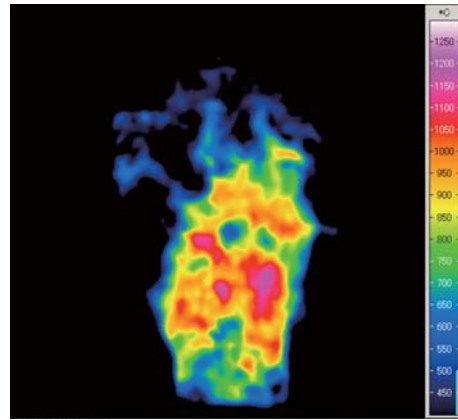
1. With oroshi-gane technique, adjustment of carbon contents in steel, they can both carburize iron and decarburize cast iron in a same furnace. In each process the different mechanisms are assumed to work in the furnace. In the case of carburizing of iron, solid iron absorb carbon at the upper part of the furnace and it stickily drop down in semi-melted. The wind through tuyere hardly blow in the product at the bottom of the furnace, On the contrary, in the case of decarburizing of cast iron, cast iron melt at the upper and the molten material drip down. It is decarburized at the bottom of the furnace by the wind through tuyere.
2. With orikaeshi-tanren technique, duplicated folding and hammer welding, the carbon content is homogenized in increasing of times of folding. Each inclusion is made smaller and is dispersed uniformly in increasing of times of folding. The temperature of forging is different according to the concentration of carbon in raw material.
3. In yaki-ire technique, quenching, the heating temperature of the nie and nioi, the quenching patterns at the blade, is measured. The temperature of the steel under coating clay is also measured at some intermediate period in quenching process, and it is confirmed that the coating clay have an effect on relatively slow cooling of the ground part.

key words: Japanese sword, swordsmith, refining, decarburizing, carburizing, forging, quenching



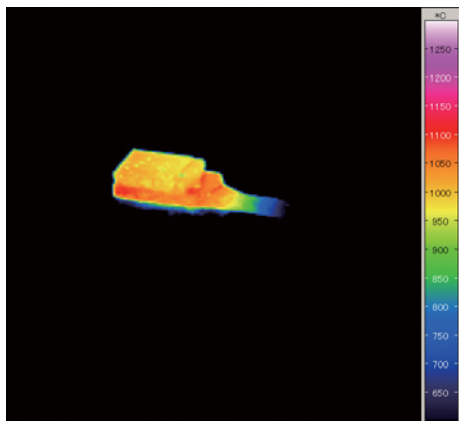


a. 浸炭の工程

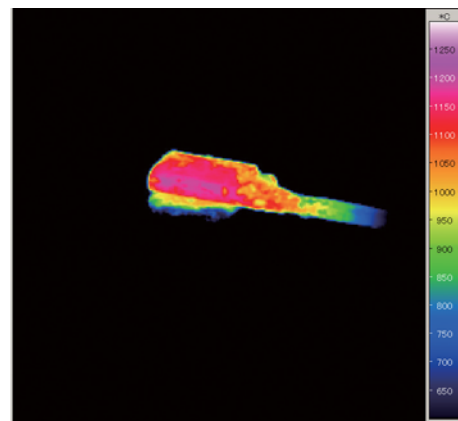


b. 脱炭の工程

図 3 炎のサーモグラフィー測定画像



a. 仮着け(鍛造開始時)



b. 泥沸かし(鍛造開始時)

図 7 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像(原料は鋳)

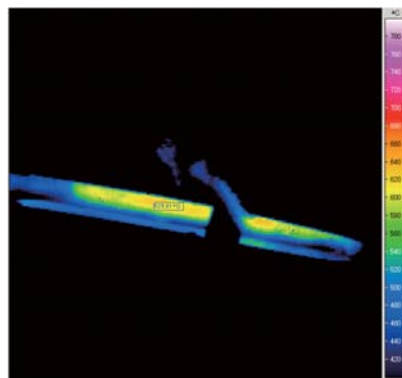
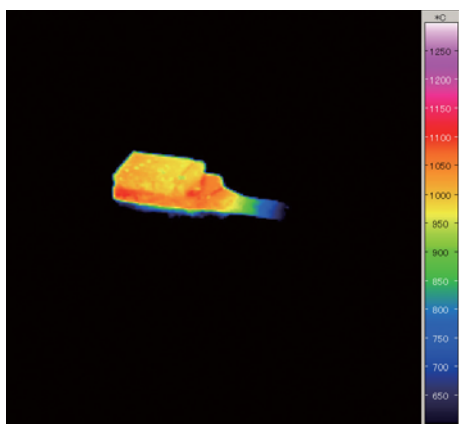
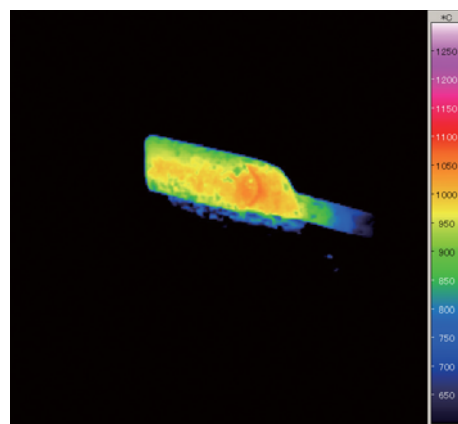


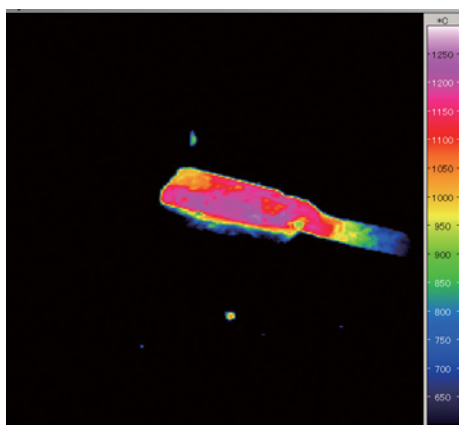
図 16 焼刃土を剥がす作業におけるサーモグラフィー画像



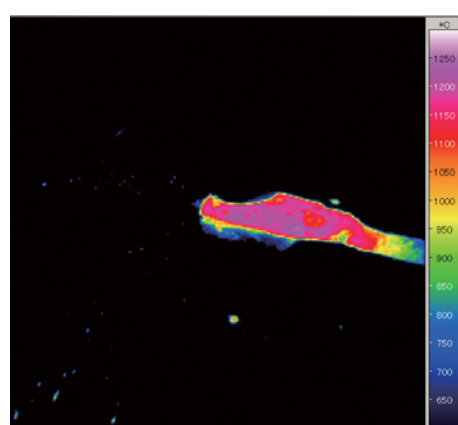
a. 仮着け (鍛造開始時)



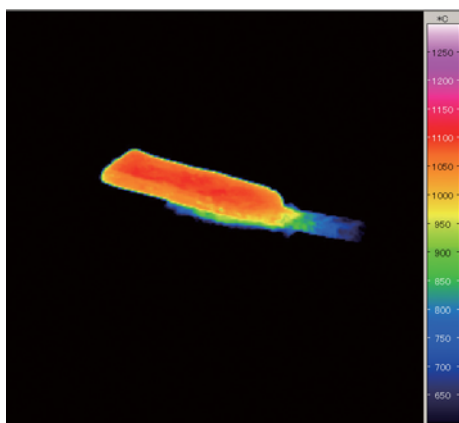
b. 仮着け (鍛造終了時)



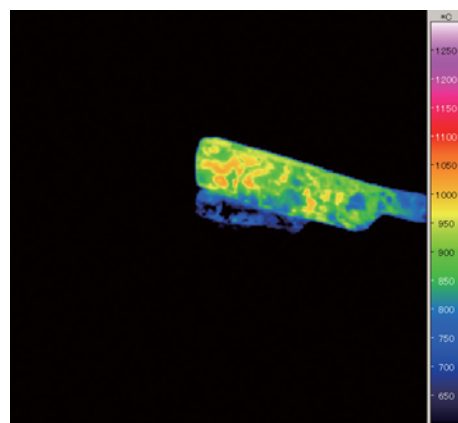
c. 泥沸かし (鍛造開始時)



d. 泥沸かし (最初に叩いた時)

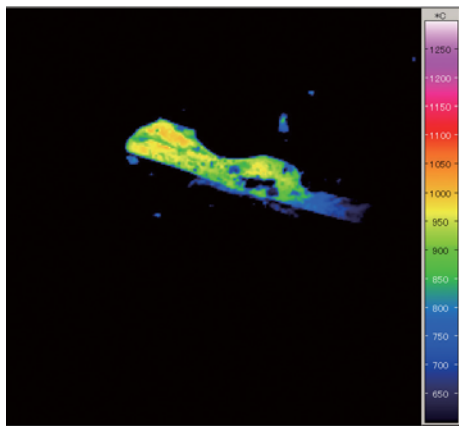


e. 泥沸かし (表面から泥と薬灰を取り除いた後)

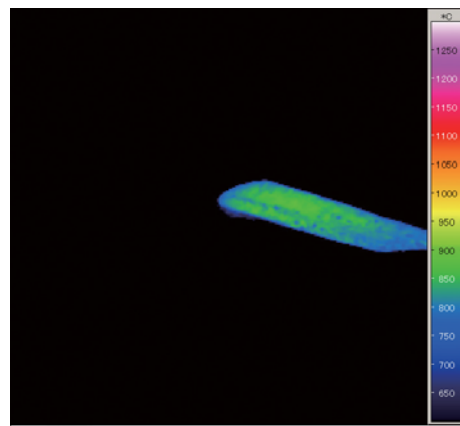


f. 泥沸かし (表面に酸化被膜がついている状態)

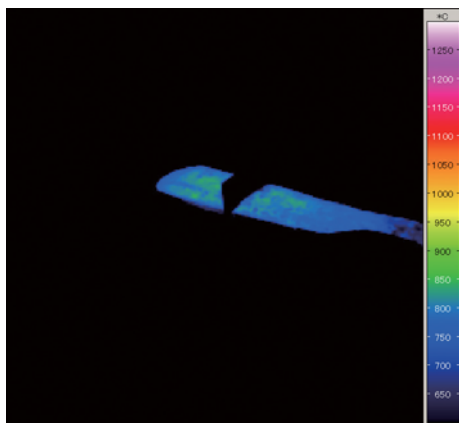
図6 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像 (原料は肘金)



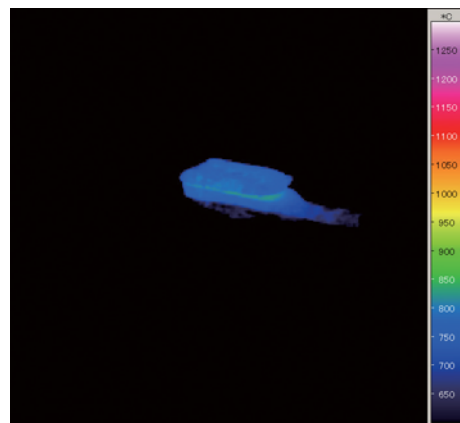
g. 泥沸かし（水をかけて叩き酸化被膜を除く）



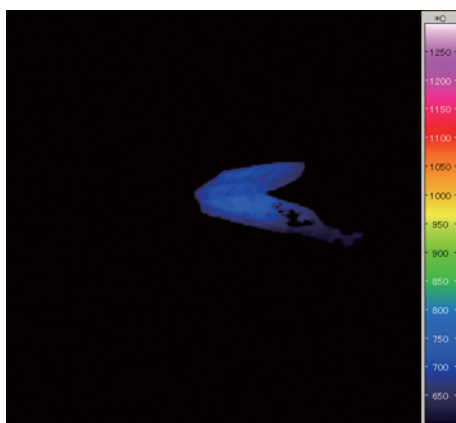
h. 泥沸かし（鍛造終了時）



i. 仮着け（タガネを入れる）



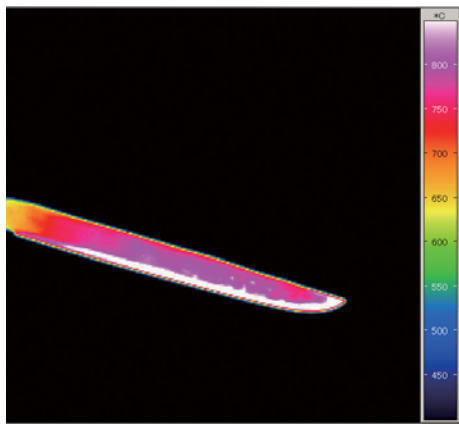
j. 仮着け（タガネを入れた後で折り返す）



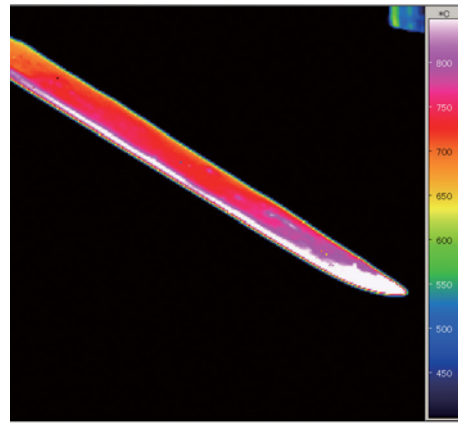
k. 仮着け（間にフラックスを入れて再び折り返す）

図 6（続） 折り返し鍛錬における鍛造作業中のサーモグラフィー画像（原料は肘金）

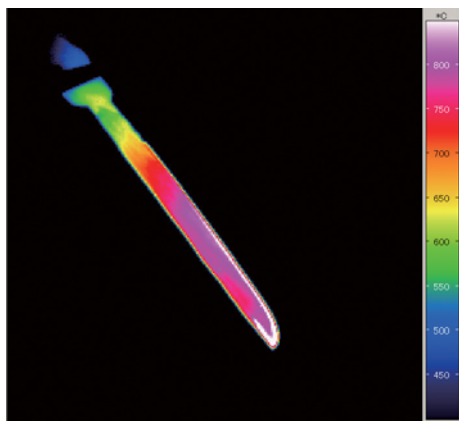




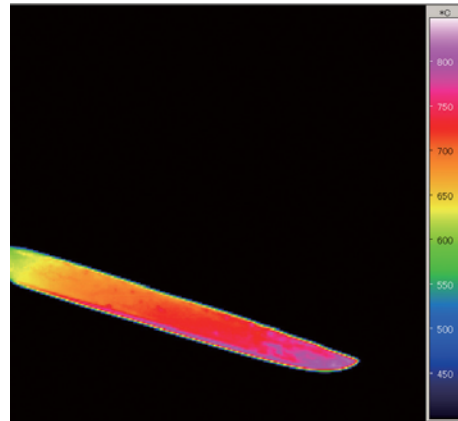
a. 沸-1



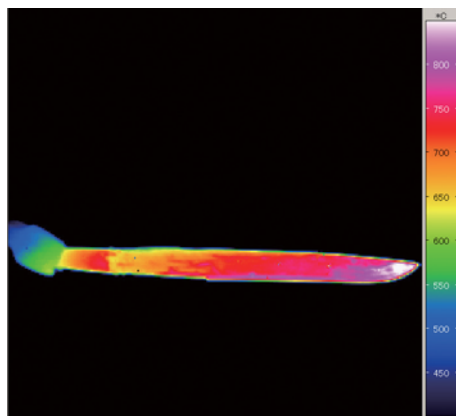
b. 沸-2



c. 沸-3



d. 匂-1



e. 匂-2

図14 沸と匂を作る焼き入れ温度測定におけるサーモグラフィー画像



a. 原料 (寛永通寶の鉄銭)



b. 作業の様子



c. 作業の様子



d. 火床の中にある木炭と原料



e. 生成物の取り出し



f. 生成物

写真 1 卸し鉄の手順



a. 本体



b. 炉と計測機材の配置



c. 実験の様子



d. 送風装置



e. 炉内温度の計測

写真2 実験炉による卸し鉄の実施





a. 肘金(軟鉄)



b. 肘金を切断し、叩いて成形した原料



c. 肘金を使った卸し鉄の生成物



d. 寛永通寶の鉄銭(銑鉄)



e. 鉄銭を使った卸し鉄の生成物

写真3 卸し鉄の実験に使用した原料と生成物



a. 炉の全景



b. 火床



c. 電動ハンマー



C



(加熱)

d. 仮着け(火床で加熱)



D



e. 仮着け(叩いて鍛着させる)



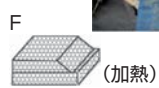
E



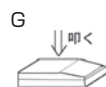
f. 泥沸かし(薬灰と泥をつける)

#### 写真4 折り返し鍛錬の手順





g. 泥沸かし(火床で加熱)



h. 泥沸かし(叩いてしっかり鍛着させる)



i. 泥沸かし(叩いて延ばす)



j. 泥沸かし(水をかけて叩き酸化被膜を除去)



k. 仮着け(タガネを入れて折り返す)



l. 仮着け(重ね合わせる)

写真 4 折り返し鍛錬の手順



写真5 折り返し鍛錬の原料(錫)



a. 錫を原料にし，折り返し2回を施したもの



b. aの試料を鏡面研磨し，エッチングしたもの

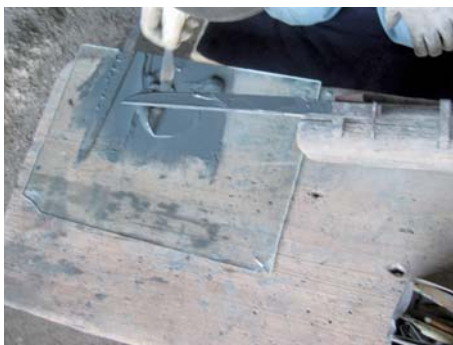


c. 錫を原料にし，折り返し4回を施したもの



d. cの試料を鏡面研磨し，エッチングしたもの

写真6 折り返し鍛錬の生成物から採取した分析試料の例



a. 焼刃土を塗る作業の様子



b. 焼刃土を塗った実験資料

写真7 焼刃土



a. 焼き入れ用の炉



b. 炉内で加熱



c. 水の中で冷却

写真8 焼き入れの手順



a. 焼き入れ前



b. 焼き入れ後

写真9 焼き入れに使用した資料(短刀, 上側が刃部)



写真10 焼刃土を剥がしている様子