

論 文

たたら製鉄と鍛錬による小刀の製作

小松芳成*・後藤正治*・麻生節夫*・三浦敏秋*・田中春美*

A Small Knife Making Based on Combined Use of the Tatara-buki Ironmaking Process and the Hot Forging Process

Yoshinari Komatsu*, Shoji Goto*, Setsuo Aso*, Toshiaki Miura* and Harumi Tanaka*

Abstract

Iron sand mined from Mukaihama beach in the city of Akita was applied to make "Tamahagane" based on combined use of the "Tatara-buki" and "Oroshigane" process. The Tamahagane was applied to make a small knife based on hot forging process. Initially, the iron sand was washed in water and dressed magnetically to rise iron content of the sand. After that, the iron sand was smelted by means of the "Tatara-buki" process to produce Tamahagane with lower phosphorous and sulfur contents. The Tamahagane was obtained in a 10.4 % yield which was lower than that of 26 % in usual process. The reason was considered to be due to high concentration of SiO_2 in the dressed iron sand. The Tamahagane showed a mixed structure of ferrite and pearlite. Finally, the Tamahagane was forged at about 1100 K to make a small knife which was about 3 mm in thickness and 80 mm in length. It was available to use as a fruit knife, though the microstructure was macroscopically non uniform.

1. はじめに

たたら製鉄は、江戸時代末期まで日本の鉄生産のすべてを賄っていた。しかし、明治期に入って釜石製鉄所や官営の八幡製鉄所が高炉による製鉄を稼働されると、生産性に劣るたたら製鉄は衰退の一途をたどり、第二次世界大戦後には消滅した。その後昭和40年代に入ると、日本古来唯一の製鉄法であるたたら製鉄の技術を保存し、後世に伝えようという気運が高まり、現在では(財)日本美術刀剣保存協会が「日刀保たたら」の名称でその技術を伝承し全国の刀匠への玉鋼を製造している⁽¹⁾。

鍛錬は一名火造りともいわれ、一般に金属に粘性変形を与えて成形させる方法である。常温でも行われぬことはないが、粘性変形を容易にするために高温で形を整えるのが普通である。鍛錬には成形のほかに、材料の組織粒子を微細にするとともに組織を均一にし強靱化して、機械的性質を改善する目的を有している⁽²⁾。

本実験では、秋田市で容易に採取できる向浜砂鉄を原材料にして、前報⁽³⁾で実験に供した小型たたら製鉄炉と同一のものを新たに作製し、これまでの実

験で再現性が確認されている手順にしたがってたたら製鉄操作を行った。さらに、たたら製鉄によって得られた鉄(ケラ)を原材料にしてそれに卸鉄法を適用することによりC量の調整を施し、玉鋼(C:0.5~1.5%)の製造を行った。その後、鍛錬を容易にするために得られた玉鋼を高周波誘導加熱炉で再溶解し、砂型に鑄込んでブロック状の鉄塊を得た。この鉄塊に鍛錬を施して板状に成形し機械加工を加えて小刀を製作した。

すなわち本研究は、これまでのたたら製鉄実験で得られたノウハウをもとに、向浜海岸で採取した砂鉄を製錬して純度の高い鉄を作り出し、得られた鉄に鍛錬や熱処理などの一連の加工を施して小刀を作り上げることによって、身近にある砂鉄から実用可能な鉄製品を作製することを主な目的とした。また、上述のたたら製鉄と鍛錬による刃物の作製は材料工学科3年次学生に対する創造工房実習の課題⁽⁴⁾として取り上げたものである。砂鉄の採取から小刀の作製まで一連の作業を行うことによって、講義や既存の実験から得られた知識が、実際に「もの」を作る上でどう結びつくかを学生たちに肌で感じさせることも本実験の目的の一つである。

2. 原材料の採取および調整

原材料の砂鉄は、前報⁽³⁾および前々報⁽⁵⁾と同様に

2004年7月26日受理

*秋田大学工学資源学部材料工学科. Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University.

秋田市郊外の海岸へ出かけて採取した向浜砂鉄を使用した。目視によって砂が黒味を帯びている位置をおおよそ特定し、その中でも永久磁石に付着する砂鉄が多い場所の表面部付近から砂を約 40kg 採取した。海岸で採取した砂は塩分や不純物を取り除きさらに砂鉄の含有率を高めるために、十分に水洗いを行いよく乾燥した後、磁力選鉱を施した。この際、過度の磁力選鉱は必要以上に SiO_2 分を減少させ、スラグの形成を阻害することが懸念されるため、磁力選鉱の度合いを従来^{(3),(5)}の約半分程度に抑え、 SiO_2 成分 20% を目標に行った。

たたら製鉄のプロセスでは、砂鉄に含まれる SiO_2 と Ca を結合させノロ (主成分: $\text{CaO}-\text{SiO}_2$) を作り、砂鉄に含まれる SiO_2 を除去するとともに、そのノロに他の不純物を取り込ませることにより砂鉄を製錬している^{(6),(7)}。これには消石灰 (CaO) が必要となるが、本研究では可能なかぎり不純物成分をおさえるために、その代替として砂鉄と同様に向浜海岸で採取した貝殻を細かく砕いて用いた。

木炭は燃料として熱源となるほかに、燃焼の過程で生じる CO ガスが酸化鉄を還元するための還元剤の役割も果たしている^{(6),(7)}。本実験では発熱量に優れる国産の楢を素材にした木炭を使用した。その木炭を 20~30mm 角程度になるようにナタなどで大きさを調整したが、その際に生じる 20mm より細かい木炭片は、たたら製鉄炉や卸鉄炉の底部を築造するための材料などとして無駄なく利用した。

3. 実験

3.1 たたら製鉄炉の製作および設置

Fig. 1 はたたら製鉄炉の構造とその製鉄過程の概念図を示したものである。本実験でも従来⁽³⁾と同様にオイル缶を外枠として用いた。オイル缶底部の中心に直径 210mm の穴をあけ、そこに外径 210mm の塩ビ管をオイル缶と同心円状になるようにセットした。オイル缶の内側と塩ビ缶の外側に挟まれた円筒状の部分に、5% の水ガラスを添加し混練したオリビンサンドを均一に充填した。その後、静かに塩ビ缶をオイル缶から引き抜き、水ガラスを含んだオリビンサンド層に内側から CO_2 ガスを吹き付け固化させた⁽⁸⁾。これによって外径 300mm、内径 210mm、高さ 360mm の円筒状の炉体を 3 個作製した。さらに下段炉となる一つの炉体には羽口となる炉心管を挿入するために底部から 100mm の炉体側面の位置に径 50mm の穴を互いに対面するように 2 個あけた⁽⁹⁾。

下段炉を据え付けるために、まず最下部にコンクリートブロックを配置し、その上に厚さ 6mm の鋼板を載せ、さらに耐火レンガ (SK-32) を敷詰めた。さらに耐火レンガで内枠が 300mm×300mm の囲いを作り、木炭割りの際に生じた木炭の小片を 20~30mm 厚さに敷いた。その上に厚さ 3mm の鋼板を置き下段炉体を据え付けた。下段炉体の底部は木炭の小片を 20~30mm 厚さに敷詰め、5% の水ガラスを含んだオリビンサンドを用いて凹面状に成形した後、 CO_2 ガスを吹き付けて固化し湯溜まりを形作った⁽⁸⁾。

Fig. 1 からわかるように炉体底部から高さ 100mm の位置に、挿入角度 25° で炉心管を差し込み

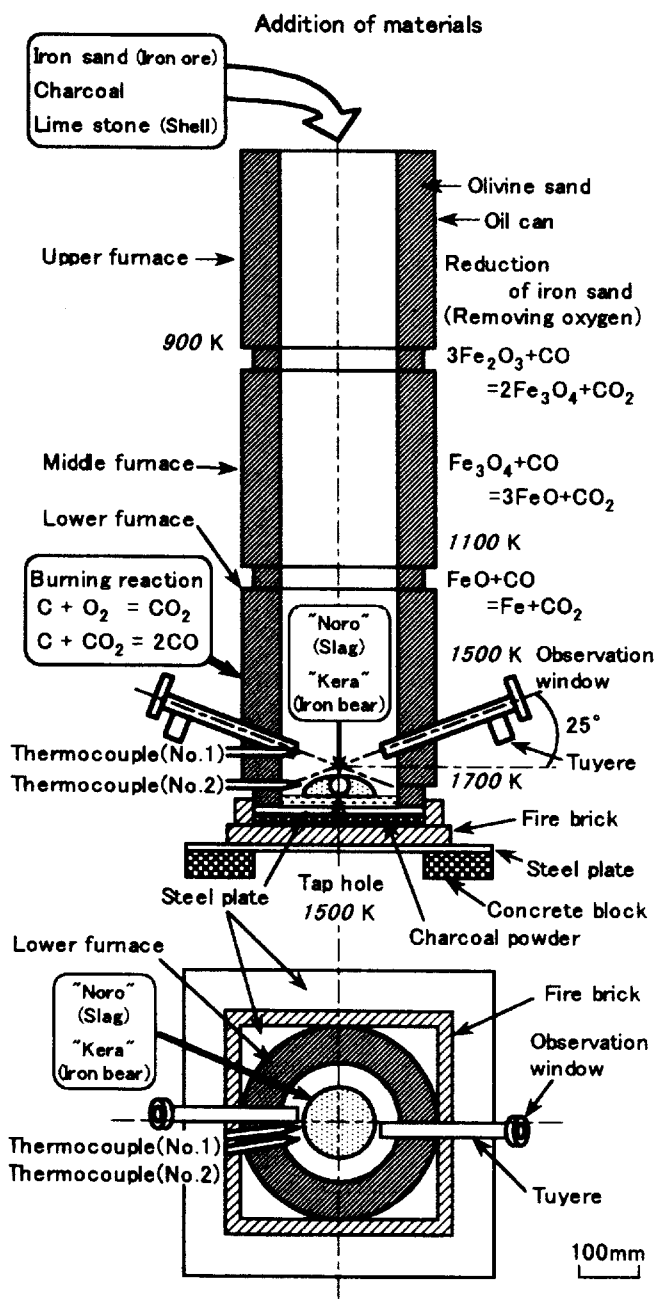


Fig. 1 Schematic illustration of the small-sized "Tatara-buki" furnace⁽³⁾.

2 箇所の羽口を設けた。前報⁽³⁾において述べているように、2つの羽口からの送風が炉内の中心部で均等に衝突させることは、操業中に刻々変化する炉体内の木炭分布の状況にも左右されることから非常に難しいと考えられる。そこで本実験では対面する2箇所の羽口を一直線状に配置することをやめ、Fig. 1 下図に示すように羽口の径の分だけお互いにずらして配置することにした。2箇所の羽口からの送風が正面で衝突することを避けて、各々の羽口が炉内燃焼のおおよそ半分ずつ担うようにさせた。これにより中心部においては2箇所の羽口から送風が相乗的に作用して、より安定した炉内温度の確保が期待できる。

3.2 卸鉄炉の作製

卸鉄（おろしがね）は和鉄のスクラップである古釘、古い鉄瓶、折れ刀などを火床（ほど）で溶かし、炭素量を調整して用途にあった地鉄を作り出すリサイクル技術である。本実験ではたたら製鉄によって得られた鉄（ケラ）に対し、卸鉄法を適用して炭素量の調整を行った。

卸鉄炉は、従来のたたら製鉄実験で使用された下段炉の中で比較的損傷の少ないものを選び、炉壁を補修して再利用した。Fig. 2 に卸鉄炉体の構造図を示す。炉体を設置する基礎部分の構造はたたら製鉄の場合と全く同じようにした。その上に炉体をセットし、炉底部から60~70mmの高さまでV字型に木炭粉を敷詰め硬く叩き締めた。羽口はすり鉢状の炉底部に送風が直接吹き付けられないように、炉体底部から100mmの位置に挿入角15°で取り付けた^{(3),(10)}。

3.3 鑄塊の作製

古来、たたら製鉄や卸金で得られた玉鋼から鍛錬に適した塊状に成形する方法はコテ棒と呼ばれる道具を用いて「積み増し」と言われる方法で行われていた。これは、コテ棒の先に付いている台に粉碎した玉鋼をのせ、和紙、ワラ灰、粘土汁で覆って火床で約1570Kに熱し、不純物を溶かして流れ出させ残った良質の玉鋼どうしを融着させて一つの塊を作り出す方法である。本実験では、この「積み増し」と言われる方法の代わりに玉鋼を高周波溶解炉を用いて再溶解して、炉体を作製するときと同様のCO₂プロセスによる砂型に鑄込んで塊状の鉄を得た。砂型は金型に比べ溶湯がゆっくり冷却されるので、比重の小さい物が上部で凝固して、鉄と不純物がある程度分離されることが期待できる。さらに、砂型の使用には溶湯が徐冷で凝固することによって、鍛錬にとって不都合なパーライトの析出を抑制する目的も

含まれている。

3.4 鍛錬による刃物の製作

鍛錬（鍛造）は一名火造りともいわれるように、一般には金属を高温で熱し粘性変形が容易な状態で、外力を与えて成形する加工法のことである。鍛造には平鋸と金敷で成形をする普通の鍛造法と、所要鍛造物の形を刻んだ鋼製の上型と下型を用い鍛圧する型鍛造との2種類がある。また、鍛錬は金属を成形することのほかに材料の組織を微細にかつ均一にし、機械的性質を改善する目的を有している。一般には金属に粘性変形を与えて成形させる方法である。常温でも行われなことはないが、粘性変形を容易にするために高温で形を整えるのが普通である。鍛錬には成形のほかに、材料の組織粒子を微細にするとともに組織を均一にし、機械的性質を改善する目的を有している。

4. 実験結果および考察

4.1 たたら製鉄

4.1.1 立ち上げ

炉体基礎の上に設置した下段炉に火を起こした種火となる木炭を少量挿入した。その後弱い送風を始め徐々に木炭を積みましていった。木炭が下段炉上面に達したら、シールとなる粘土を下段炉の炉体上面にリング状に敷き、中段炉を重ね上げた。木炭の装入を繰り返しつつ中段炉の上面に達したら、先ほどと同様にシール材の粘土を中段炉上面に敷き、上

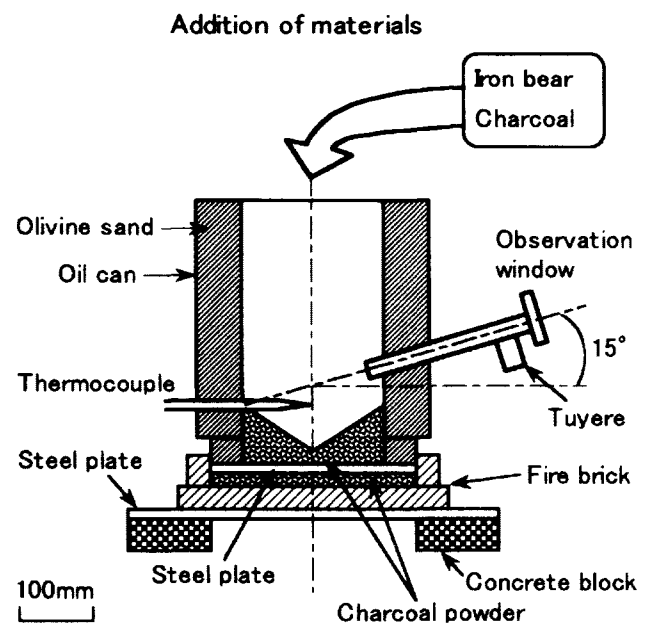


Fig. 2 Schematic illustration of the small-sized “Oroshigane” furnace⁽³⁾.



Fig. 3 Operation of the Tatara-buki ironmaking process.

段炉を重ね上げた。さらに木炭の装入を繰り返し上段炉上面まで木炭を積み上げた。その後、安定した木炭の燃焼が得られるまで定期的に木炭の装入を繰り返し行い、ストックライン（炉頂部における木炭の表面位置）が 300s 間で炉口から 100~150mm 程度燃焼降下するように風量を調整した。この際重要なことは、炉体が十分に予熱されることと、炉体内において安定した木炭の燃焼が維持されていることである。これが十分でなければ、砂鉄の装入開始後に炉体内において急激な温度の低下を招き、羽口からの送風量の調整などによって再び炉内温度を回復させることは非常に困難である。したがって、立ち上げは安定した製鉄操作を行う上で重要なことの一つである。

4.1.2 たたら製鉄操作

火入れ開始から約 10.8ks 後に、炉体内の羽口レベルの温度が 1600K 前後に達し、安定したストックラインの降下が保持されたので、砂鉄と貝殻粉および木炭の装入を始め、製鉄操作を行った。その様子を Fig. 3 に示した。1 回当たりの装入量は、砂鉄 200g、貝殻粉 20g である、また、木炭はストックライン降下分を補充する量とした。この一連の作業を約 360s 間隔で 40 回繰り返し行った。途中、15 および 30 回目の砂鉄等の装入作業をおえた後、Fig. 4 に示すように炉体底部からノロを取り出した。その後、砂鉄と貝殻粉および木炭の装入を中止し、ストックラインが中段炉体の上面まで降下したのちに送風を中止した。十分に炉体が冷却するのを待って中段炉を取り外し下段炉の底部にあるケラを取り出した。そのケラの全体像を Fig. 5 に示した。砂鉄 8kg、貝殻粉 800g を装入して、832g のケラが得られ、その収率は

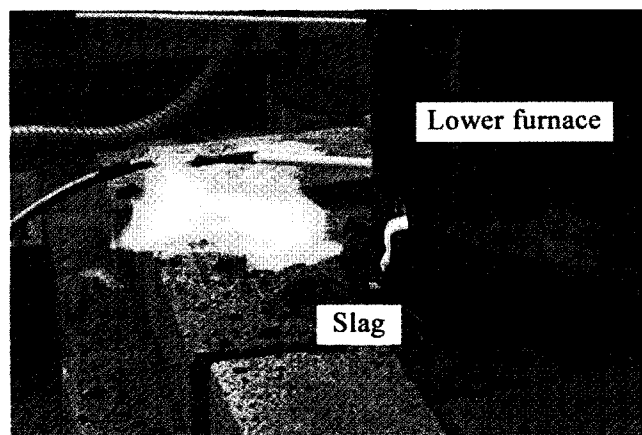


Fig. 4 Flushing of molten slag.

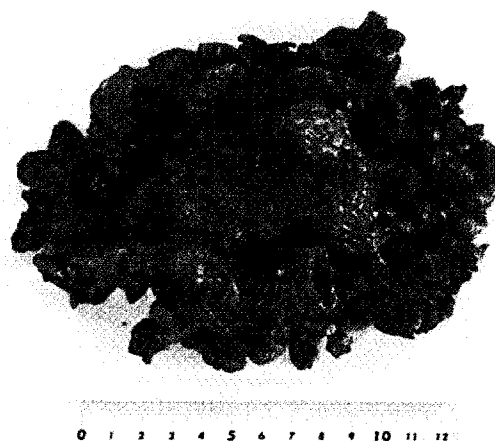


Fig. 5 Overview of a Kera obtained in this experiment.

10.4%であった。

過去 4 回の操作では、20~27%の収率が得られたのに対し、本実験ではその約 1/2 程度の結果となった。これは、スラグ（ノロ）の形成を容易にするために過度の磁力選鉱を避け、装入砂鉄中の SiO_2 含有量を多くしたこと、また、従来よりも平均して高温での操作であったことから、炉体底部に溜まった還元された Fe が再酸化してしまったことなどが主な原因と考えられる。

4.2 卸鉄の操作

卸鉄の立ち上げは、たたら製鉄の場合と同じ手順で行い、種火の木炭を炉の底部に装入して送風を開始した。その後、送風量を調節し木炭の燃焼の度合いを確認しながら、木炭を順次積み増して炉体上面まで装入した。卸鉄においては、たたら製鉄用として木炭を 20~30mm に割った際に発生した、20mm よりも小さい木炭を使用した。

火入れから約 4.2ks 後、炉体中央部の温度が 1450K に達したので、あらかじめ 15mm 程度に切断して大き



Fig. 6 Charging of the Kera in Oroshigane process.

さを調整しておいたケラを約 0.8kg 装入した。Fig. 6 にはケラの装入作業の様子を示した。その後、木炭が燃焼することによってストックラインが降下して行くので、適宜木炭を積み増して作業を続けた。このままの状態です約 3.6ks 間送風を行い、ストックラインが炉体高さの約半分程度になった時点で送風を停止して作業を終了した。炉体を十分に冷却したのち炉体底部にある鉄を取り出した。

4.3 鑄造による鉄鑄塊の作製

卸鉄で得られた玉鋼を鍛錬に適した鉄鑄塊にするために、たたら製鉄炉の炉壁を形作る時に用いた CO₂ プロセスで砂型を作製した。2 番黒鉛るつぼに玉鋼約 800g を装入して高周波誘導加熱炉で 1700K まで加熱保持した後、砂型に鑄込んだ。Fig. 7 は玉鋼を再溶解して 80×140×15mm の板状に成形した鉄鑄塊を示したものである。前述したように、砂型は金型に比べ溶湯がゆっくり冷却されたため、比重の小さいスラグが鉄鑄塊の上部で多くみられた。したがって、完全ではないものの、玉鋼を再溶解して砂型に鑄込む方法でも鉄と不純物がある程度まで分離が可能であるといえる。こうして得られた鉄鑄塊を鍛錬に供した。

4.4 鍛錬による小刀の製作

4.4.1 手ハンマーによる鍛錬

鑄造によって作製した鉄鑄塊から機械式鋸を用いて 30×85×15mm の鉄片を切り出した。それと同時に組織観察用の試験片も作製し研磨を行ない、3%硝酸アルコール液で腐食した。光学顕微鏡で観察した結果、基底がフェライトでその粒界にパーライトが網目状に析出した組織を呈していた⁽⁴⁾。そこで、パーライトを分解して鍛造性を向上させるために、マッフル炉を用いて 1220K の温度で 3.6ks 間加熱保持し、その後徐冷した。そして、この熱処理を行った

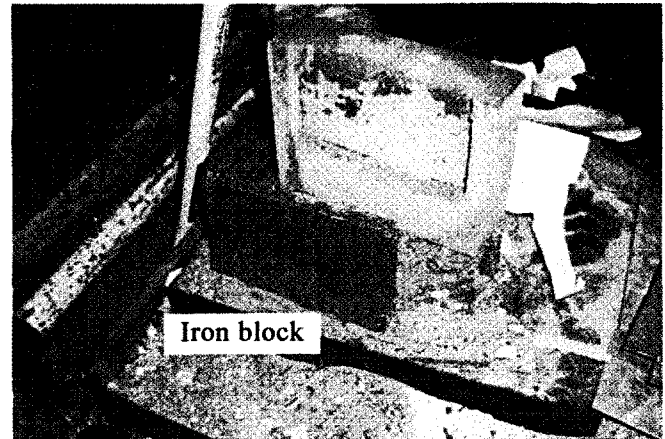


Fig. 7 Overview of an iron block obtained after high frequency induction melting.

鉄片を鍛造用試料とした。

Fig. 8 は鍛造用の試料に対して金敷と手ハンマーで鍛錬を施している様子を示したものである。マッフル炉にて 1220~1225K で 180s 間加熱後、炉外に取り出し、鉄片の赤熱状態を確認しながら手ハンマーで数回たたいた。この作業を 10~12 回ほど繰り返した。この原因として、(1) 初期の焼きなまし時間 3.6ks が不足していてパーライトが十分に分解されてなかった、(2) 鍛造作業時の加熱時間 180s では足りなく、十分な高温が得られなかった、(3) 鑄塊を作る段階で完全にスラグが除去されていなかったため、鉄片の中に介在物が存在していたことなどが考えられる。

4.4.2 エアハンマーによる鍛錬

手ハンマーによる鍛錬では、赤熱状態で鉄片に与えることのできる外力が小さく、そのため 1 工程当たりの加工率はどうしても小さなものになってしまう。



Fig. 8 Hot forging process after heating in muffle furnace.

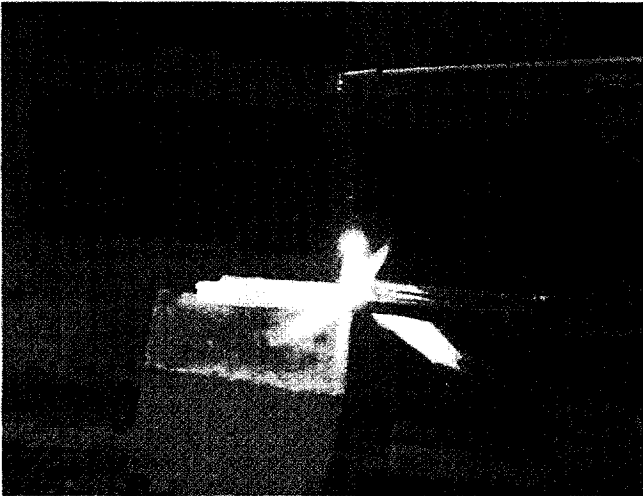


Fig. 9 Heating process by gas burner.



Fig. 10 Hot forging process by air hammer.

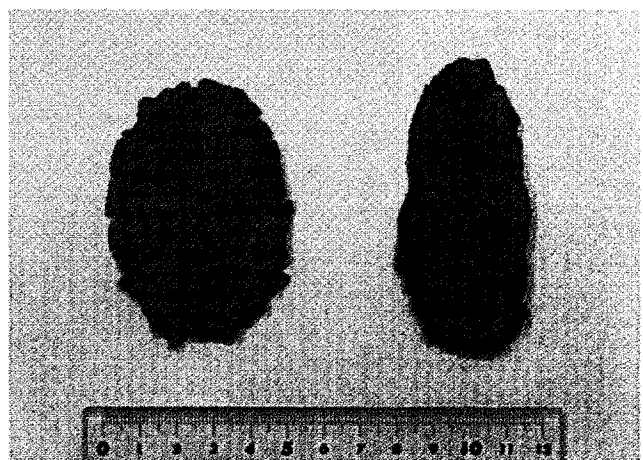


Fig. 11 Work pieces obtained after hot forging by air hammer.

そこで、手ハンマーよりもはるかに加工率に優れるエアハンマーにて鍛錬を行うこととした。また鍛造試料の加熱には、マッフル炉より速く加熱できるガ

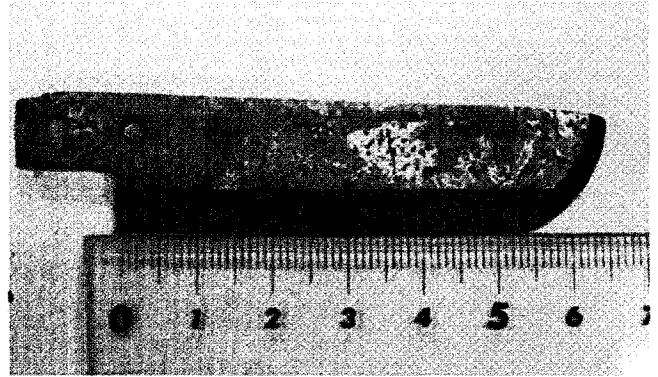


Fig. 12 Body of a small knife after water quenching.

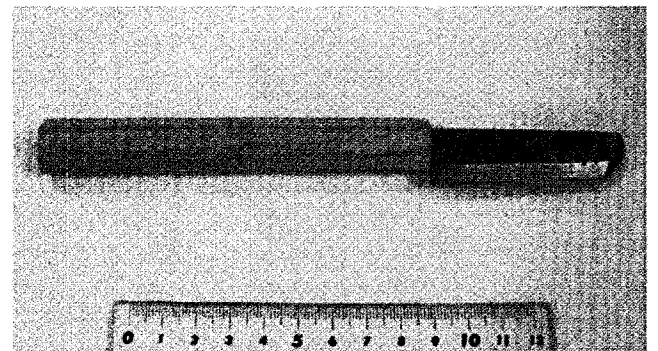


Fig. 13 Overview of the small knife made in this experiment.

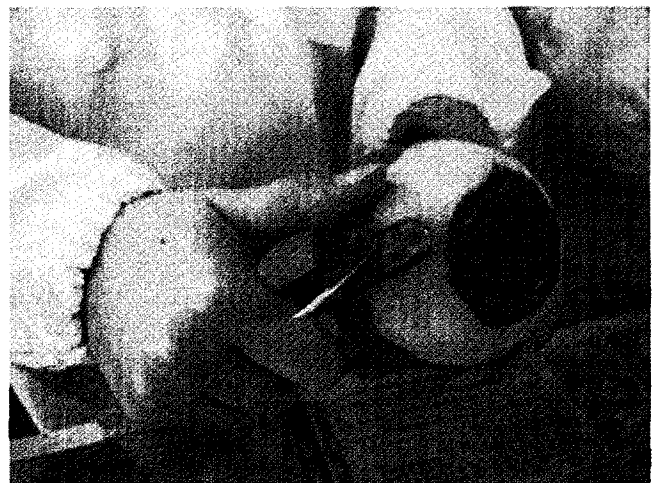


Fig. 14 Paring an apple by the small knife.

スパーナーを使用した。

Fig. 9 に示すように加熱の度合いを目視で確認しながら、ガスバーナーで鍛造試料を十分に加熱後エアハンマーの台座に載せて鍛錬を行った。Fig. 10 はその状況を示したものである。この鍛錬は手ハンマーによって鍛錬を行う途中でクラックが生じ2つに分割された鉄片に対して行った。Fig. 11 はエアハンマーによる鍛錬によって小判状に成形された鉄片

である。一回当たりの圧下量が大きかったために、外周部付近ではクラックが生じ多少乱れてはいるものの、この鍛錬によって鉄片の厚さを 15mm から 3mm にすることができた。

4.4.3 向浜砂鉄から作製された小刀の完成

Fig. 11 に示した鉄片の内、長さのある右側鉄片を切断および研削によって小刀の形状に加工成形した。さらに、これを 1073K に保持したマッフル炉で 600 s 間保持した後、氷水に焼き入れし 473K で 1.5ks 間焼き戻した。Fig. 12 に熱処理後の小刀を示した。小刀の組織は鍛錬が不十分であったためマクロ的にも不均一であったが、熱処理を施すことによってビッカース硬度の平均値を 170Hv から 730Hv まで約 4 倍ほど向上させることができた。さらに刃先を湿式の砥石で研磨し、木製の柄を取り付けて Fig. 13 ような小刀が完成した。そして切れ味を試験するために Fig. 14 のようにりんごの皮をむいてみた。その結果、向浜砂鉄を原料にして作製したこの小刀は、くだものナイフとして十分使用に耐えることがわかった。

5. まとめ

秋田市の向浜砂鉄からたたら製鉄と鍛錬によって小刀を製作し実際に使用した結果、以下のことが明らかとなった。

1. たたら製鉄操業では装入砂鉄 8kg, 貝殻粉 800g に対し 832g のケラが得られ、その収率は 10.4% で従来の 1/2 程度であった。
2. 収率低下の原因は、スラグの形成を促進するために磁力選鉱の度合いを従来より抑え、装入砂鉄中の SiO₂ 含有量が多くしたためである。
3. 作製した小刀の組織は鍛錬が不十分であったためマクロ的にも不均一であったが、刃先を研磨してりんごの皮むきを行った結果、十分使用に耐えることが確認できた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり元材料工学科、伊藤信雄技官ならびに事務部工作室、清水金光技官には炉体

の羽口作製において材料の提供および加工をお願いした。また、本研究は材料工学科平成 15 年度 3 年次学生、近藤岳幸君、大淵裕司君、藤村由佳君、保坂幸大君、保坂芳春君と共同で遂行されたものである。以上の方々に心より感謝申し上げる次第である。

文 献

- (1) 永田和宏(2000): 現代によみがえるたたら製鉄, ふえらむ, 5 巻, 4 号, 231-6 頁.
- (2) 大和久重雄編(1985): 金属術語辞典, アグネ, 186-8 頁.
- (3) 小松芳成, 後藤正治, 麻生節夫(2003): たたら製鉄と卸鉄法による玉鋼の製造—創造工房実習より得られた二三の知見—, 秋田大学工学資源学部研究報告, 第 24 号, 19-25 頁.
- (4) 近藤岳幸, 大淵裕司, 藤村由佳, 保坂幸大, 保坂芳春(2004): たたら製鉄, 平成 15 年度材料工学科創造工房実習報告書, 3-20 頁.
- (5) 小松芳成, 後藤正治, 麻生節夫(2002): たたら製鉄法に基づく向浜砂鉄の製錬と鑄造—創造工房実習より得られた二三の知見—, 秋田大学工学資源学部研究報告, 第 23 号, 23-32 頁.
- (6) 小松芳成, 後藤正治, 麻生節夫(2001): たたら製鉄に関する実験的検討—創造工房実習より得られた二三の知見—, 秋田大学工学資源学部研究報告, 第 22 号, 53-60 頁.
- (7) 小松芳成(2001): 創造工房実習「たたら製鉄炉の製作と操業」, 秋田大学工学資源学部技術発表会報告集, 第 9 号, 17-20 頁.
- (8) 桃野 正(2000): たたら製鉄の原理とロマン, 平成 12 年度室蘭工業大学公開講座「たたら製鉄と日本刀」, 第 5 話, 50-62 頁.
- (9) 小松芳成(2002): 改良型たたら製鉄炉による向浜砂鉄の製錬と鑄造, 秋田大学工学資源学部技術発表会報告集, 第 10 号, 9-12 頁.
- (10) 小松芳成(2003): たたら製鉄と卸鉄法によるケラの精錬, 秋田大学工学資源学部技術部報告集, 第 11 号, 57-60 頁.