

論文

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 —

小松芳成*・後藤正治*・麻生節夫*

An Experimental Study on Tamahagane-making Based on Combined Use of the Tatara-buki Ironmaking Process and the Oroshigane Process
- A Few Findings Obtained from Creative Techno-Craft -

Yoshinari Komatsu*, Shoji Goto* and Setsuo Aso*

Abstract

Small-sized “Tatara-buki” furnace and “Oroshigane” furnace were made for laboratory working. Iron sand mined from Mukaiyama beach in the city of Akita was applied to “Tamahagane” making based on combined use of the Tatara-buki process and the Oroshigane process. After washing in water and magnetic dressing, the iron sand was smelted by means of the “Tatara-buki” process and Kera (iron bear) with lower phosphorous and sulfur contents was made in reproducibility of 20 % yield. The carbon content of the Kera was 2.43~3.04 mass% which was significantly lower than that in blast furnace process. Next, the Kera was refined by the Oroshigane process to make Tamahagane which was a high quality iron containing 0.63mass%C, 0.04mass%Si, 0.048mass%S and 0.075mass%P. The microstructure of the Kera and the Tamahagane was well understood from the carbon contents. A series of the experiments mentioned above was conducted as an appropriate practice on an education program “Creative Techno-Craft” for the undergraduate course in the Department of Materials Science and Engineering, Akita University.

1. はじめに

砂鉄と木炭を原料とするたたら製鉄は、日本古来の唯一の製鉄法である。たたら製鉄法は高炉製鉄法に比べ操業温度が約 200K ほど低い低温製鉄法であるため、それによって造られる鋼や銑鉄は Si や P などの不純物濃度が低いといわれている⁽¹⁾。

一方、卸鉄は使い古された和鉄を火床（ほど）の中で溶かし、目的にあった炭素量の地鉄を作り出す日本で古くから行われている鉄のリサイクル技術である。C 量の少ない鉄素材を卸す場合は、火床の雰囲気還元雰囲気によって吸炭を促進するようにし、C 量が多い銑鉄などを卸す場合は脱炭を促進するために、火床の中を酸化雰囲気保持して C 量を調整する方法である。したがって、たたら製鉄と卸鉄法を併用すれば高純度の玉鋼が製造できるものと期待される。

本実験では、初めに身近で手に入る向浜砂鉄（秋田市）を原材料にして、前報⁽²⁾で実験に供した小型たたら製鉄炉に一部改良を加えた実験炉を新たに作製したたたら製鉄操業を実施した。操業は同一の手順で 2 度行い、本実験方法によるたたら製鉄の再現性を確認することとした。

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。卸鉄には、先に用いたたたら製鉄炉の炉体を再利用することにより卸鉄炉を作製して用いた。以上のことをもとに卸鉄法の有効性について検討した。

本研究では上述のたたら製鉄と卸鉄法を創造工房実習の課題として取り上げ、学生たちの創意工夫と研究スタッフらの知識と経験の融合を図りながら、向浜砂鉄から純度の高い鉄（玉鋼）を作り出す作業を共同で行った⁽³⁾。学生たち自身の手によって日本古来からのたたら製鉄や卸鉄を再現することにより、既存の講義や実験だけでは得ることが難しい冶金学の知識を、体験的かつ実践的に学習させることも本

2003 年 7 月 22 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.

Table 1 Chemical composition of the Mukaihama Iron-sand.

	Chemical composition (mass%)									
	T. Fe	FeO	SiO ₂	Ca	Al	P	S	Cu	Ti	Mg
Before magnetical dressing	33.7	5.9	33.0	1.8	1.6	<0.1	<0.1	<0.1	6.0	4.5
After magnetical dressing	53.7	22.4	6.2	0.4	1.2	<0.1	<0.1	<0.1	7.3	1.3

実験の主な目的の一つである。

2. 原材料

2.1 砂鉄

たたら製鉄に用いた砂鉄は、前報⁽²⁾と同様に秋田市の向浜海岸から採取したものを使用した。その分析値を Table 1 に示した。砂浜の表面およびそこからごく浅い部分の範囲にかけて、目視や磁石によって砂鉄が多く存在する位置を特定し採取したものの分析値が Table 1 の上段の値である。その砂鉄に水洗いと磁力選鉱を施した後の結果が下段の分析値である。前報⁽²⁾においても報告しているが、一連の水洗いや磁力選鉱を行うことで SiO₂ 分を約 80% 減少させるとともに、Fe の含有量を約 60% 増加させることができた。これをたたら製鉄用の砂鉄原料として用いた。

2.2 貝殻および木炭

不純物の少ない良質のケラを得るためには、低融点のノロを如何に上手に形成させるかが重要なポイントのひとつになる。たたら製鉄のプロセスでは砂鉄に含まれる SiO₂ と Ca を結合させ、ノロ（主成分：CaO-SiO₂）を作り、砂鉄に含まれる SiO₂ を除去している^{(4),(5)}。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^{(4),(5)}。本実験ではレジャー用として市販されている、外国産の比較的安価な木炭を選定し供した。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。以上のように、身近なところで比較的簡単に準備できる材料を、無駄なく使用することで操業コストを削減することも実験の一つの目的とした。

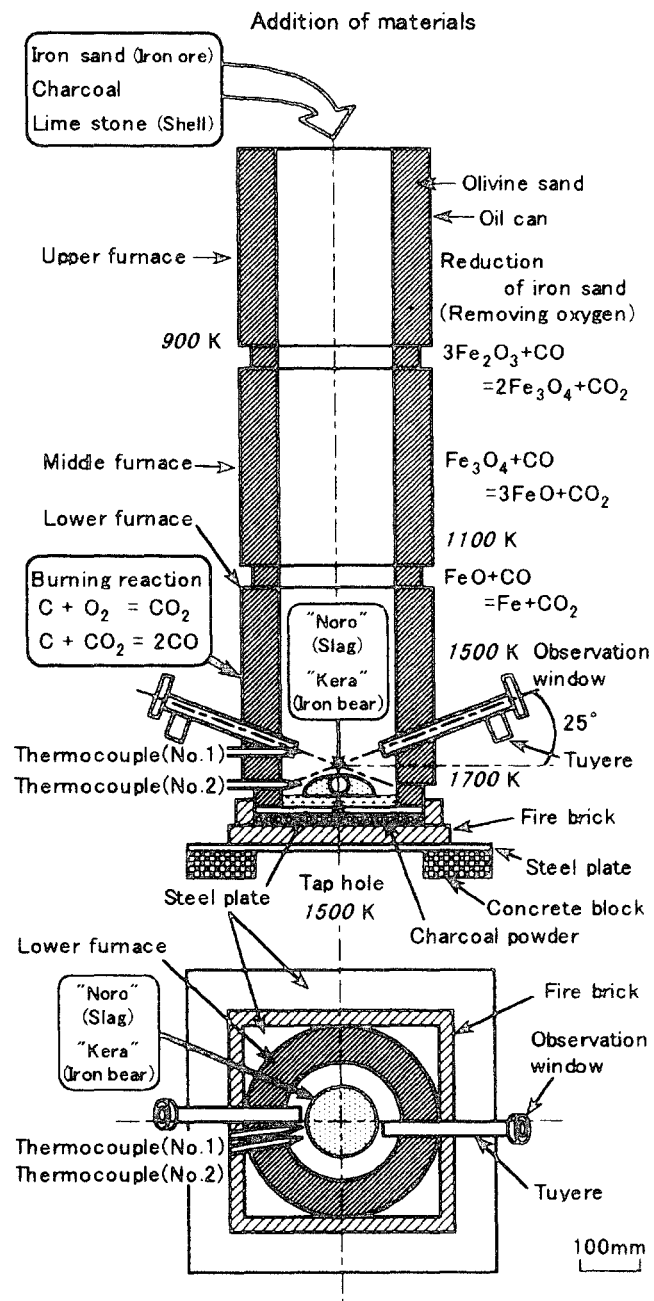


Fig. 1 Schematic illustration of the small-sized "Tatara-buki" furnace.

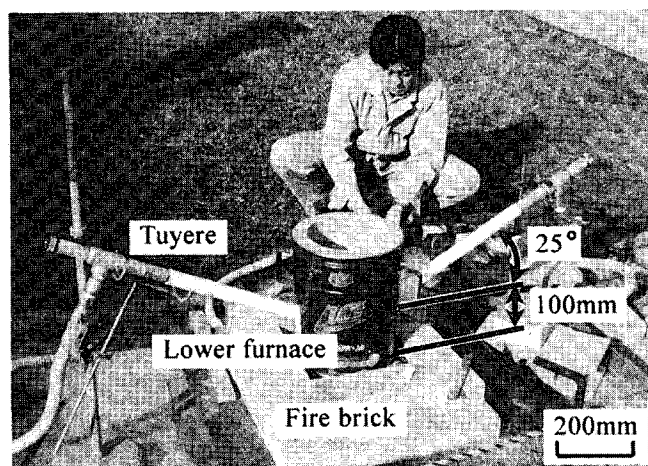


Fig. 2 Setting of the lower furnace in Tatarabuki.

3. 実験

3.1 たたら製鉄炉の作製

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。本実験においても前報⁽²⁾の場合と同様に炉体の外枠には外径 300mm, 高さ 360mm のオイル缶 (20L) を転用した。オイル缶の底部の中心部に直径 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間隙に, 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, 内側から水ガラスを含んだオリビンサンドに CO₂ ガスを吹き付け固化させた⁽⁶⁾。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 の位置に径 50mm の穴を 2 個あけた⁽⁷⁾。

3.2 炉体の設置

Fig. 2 には下段炉を設置し終えた後の状態を示した。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。その上に下段炉体を収めるための囲いを作る目的で, 内枠が 300mm×300mm になるように耐火レンガを配置した。その内枠の中に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 CO₂ ガスを吹き付けて固化した⁽⁶⁾。ここが湯溜まりになる部分である。

羽口は 2 箇所にて設け, お互いに対面になるように

配置した。Fig. 1 からわかるように炉体底部から高さ 100mm の位置において, 挿入角度 25° で炉心管を差し込んだ。前報⁽²⁾では羽口を 1 箇所から 2 箇所に増設したことによって, 操業開始当初は比較的高い炉内温度を得ることができたものの, 高い炉内温度を操業終了時まで安定的に維持することは困難であった。その解決策として羽口を設置する際, 送風が炉内の中心部で衝突するように, 挿入角度とともにその向きについても十分に注意を払わなければならないと述べている。しかし, 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。そこで本実験では発想を転換して, 前報のような対面する 2 箇所の羽口を一直線状に配置することをやめ, Fig. 1 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。なお羽口の挿入角度については従来どおり 25° とした。

3.3 卸鉄

卸鉄 (おろしがね) は古釘, 古い鉄瓶, 折れ刀などの様々な和鉄を火床 (ほど) で溶かし, 炭素量を

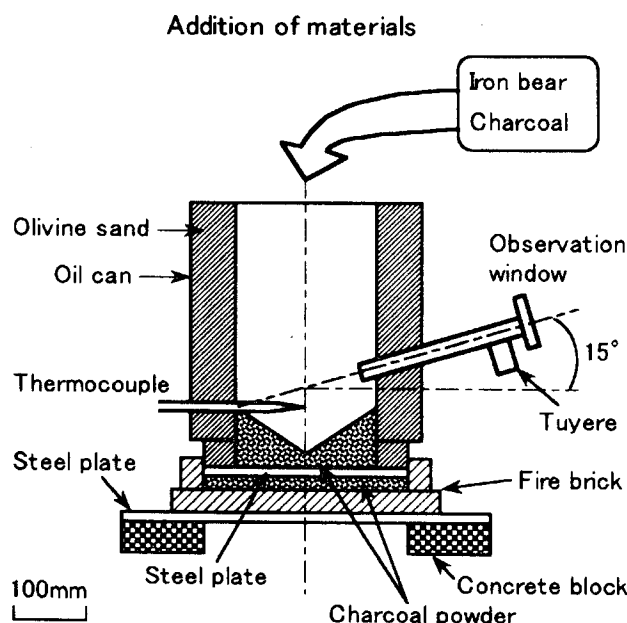


Fig. 3 Schematic illustration of the small-sized "Oroshigane" furnace.

調整して用途にあった地鉄を作り出す技術である。古くから、刀鍛冶が卸鉄を行う場合、鍛錬に使用する火床の中の羽口の前後に粉炭を積み上げ、卸鉄に使う木炭の入る部分が筒状になるようにして使用してきた。現在では多くの場合、専用の卸鉄用の炉を作って使用されていることが多い。本実験ではたたら製鉄によって得られた鉄（ケラ）に、この卸鉄法を適用して炭素量の調整を行うこととした。

3.4 卸鉄炉の作製

卸鉄炉は、本実験でたたら製鉄に用いてきた下段炉の中で比較的損傷の少ないものを選び再利用することにした。Fig. 3 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6~7cm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⁽³⁾。Fig. 4 は羽口の取り付け作業を示したものである。

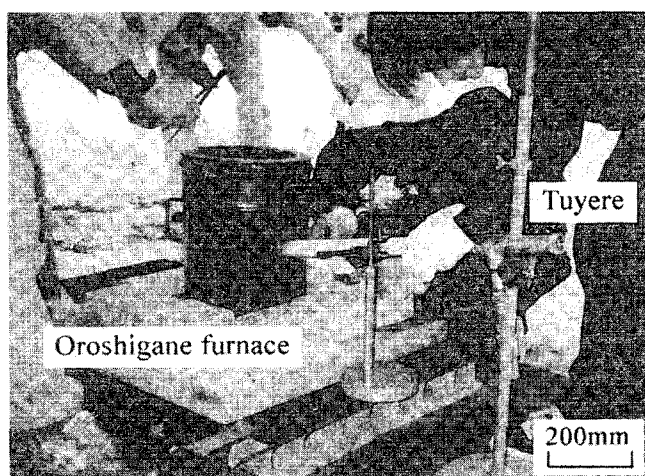


Fig. 4 Setting of the Tuyere in Tatarabuki furnace.

4. 実験結果および考察

4.1 たたら製鉄操業の立ち上げ

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規則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業を行う上で重要なことの一つである。

4.2 たたら製鉄操業

立ち上げ開始から10.8ks後に、炉体内の羽口レベルの温度が1406Kに達し、安定したストックラインの定常的な降下が維持されたので、砂鉄と貝殻粉および木炭の装入を始め、製鉄操業を行った。1回当たりの装入量は、砂鉄200g、貝殻粉20g、木炭は1kgである。この一連の作業を約360s間隔で30回繰り返した。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6kg、貝殻粉600g、木炭29.9kgを装入して、1217.6gのケラが得られ、その収率は20.3%であった。

Kera (Iron bear)

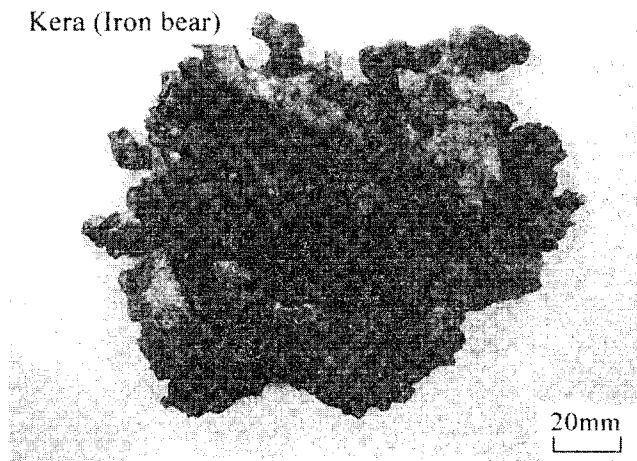


Fig. 5 Overview of a Kera obtained in this experiment.

さらに損傷の激しい下段炉を新しく作り直して2回目の製鉄操業を行った。操業手順は1回目と同様である。砂鉄の総装入量6kgに対して、1208.4gのケラが得られ収率は20.1%であった。この結果は1回目の操業結果とほぼ同じであり、本実験により再

Table 2 Chemical composition of the obtained Kera (iron bear).

	Chemical composition (mass%)											
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Sn	Cr	Ti	Fe
First	3.04	0.05	0.01	0.108	0.085	0.000	0.006	0.021	0.000	0.051	0.001	Bal.
Second	2.43	0.03	0.01	0.141	0.094	0.000	0.008	0.022	0.000	0.027	0.001	Bal.
Average	2.74	0.04	0.01	0.125	0.090	0.000	0.007	0.022	0.000	0.039	0.001	Bal.

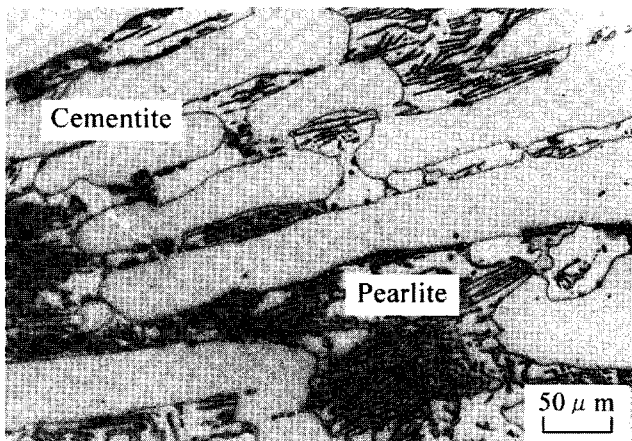


Fig. 6 Optical photomicrograph showing microstructure of the Kera obtained.

現性のある操業方法を確立できたといえる。

4.3 ケラの分析および組織観察

Table 2 は 2 回実施した、たたら製鉄操業によって得られたケラの分析値をまとめて表わしたものである。C 量を見ると 1 回目の操業で得られたケラの場合 3.04% で、2 回目では 2.43% となっている。その他の主要元素である Si, P, S 量を比較すると、1 回目 2 回目とも極めて小さい値で、いずれの場合も高炉製鉄法では得ることのできない P や S が少ない良質の鉄が得られたことになる。またそれ以外の元素について見てみると、1 回目のケラと 2 回目のケラとでは大きな差異が見受けられず、かつ値も極めて小さいことがわかる。このことは C 量をさらに少ないものにできれば、本実験の方法によるたたら製鉄法によって、不純物が少ない非常に純度の高い鉄が安定的に得られることを示唆している。

Fig. 6 は 2 回の製鉄操業によって得られたケラの光学顕微鏡による組織観察結果の一例である。ケラを組織観察できる大きさに数箇所切断し研磨を行い、4% ピクリン酸アルコール液を用いて腐食した。図中で腐食されずに白色になっている部分がセメン

ト相 (Fe_3C) である。縞状、あるいは層状を呈している組織はフェライト相 (αFe) とセメンタイト相 (Fe_3C) が同時に現れたパーライト相 ($\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$) となっている⁽⁸⁾。一般にある一定の冷却速度のもとにおいて、C 量が 1.7~4.3% の範囲以内でかつ Si 量が 2.0% 以下の場合、その凝固組織が白鉄になることが Maurer の組織図⁽⁹⁾から知られている。上述の分析結果から 1 回目と 2 回目、両方のケラの分析値は、C 量、Si 量いずれもこの範囲以内にある。すなわち、組織観察の結果は分析結果とよく対応しているといえることができる。

4.4 卸鉄の操業

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 3.6ks 後、炉体中央部の温度が 1430K に達したので、あらかじめ 15mm 程度に切断して大きさを調整しておいたケラを約 1.2kg 装入した。Fig. 7

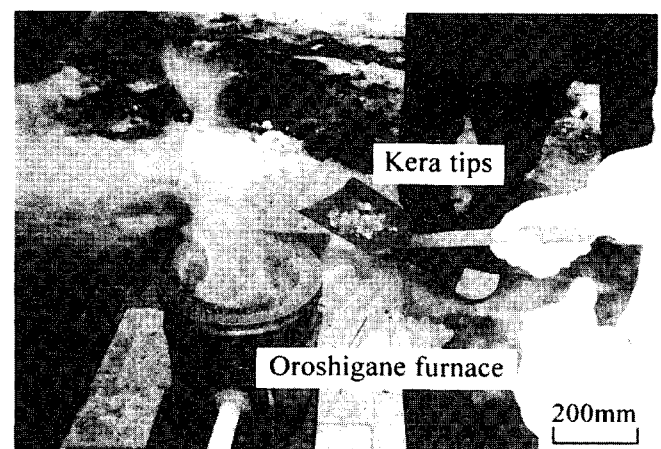


Fig. 7 Charging of the Kera in Oroshigane process.

Table 3 Chemical composition of the obtained Tamahagane.

Chemical composition (mass%)											
C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Sn	Cr	Ti	Fe
0.63	0.04	0.00	0.075	0.048	0.000	0.009	0.033	0.001	0.027	0.002	Bal.

Tamahagane

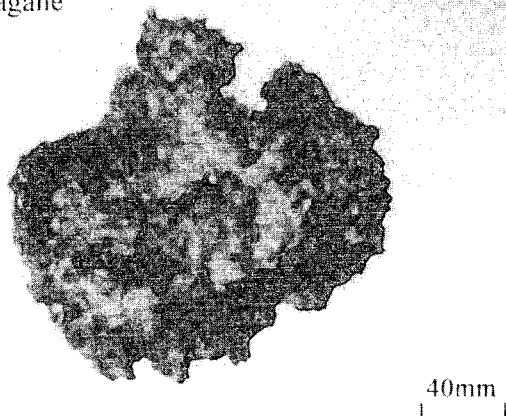


Fig. 8 Overview of a Tamahagane obtained in the Oroshigane process.

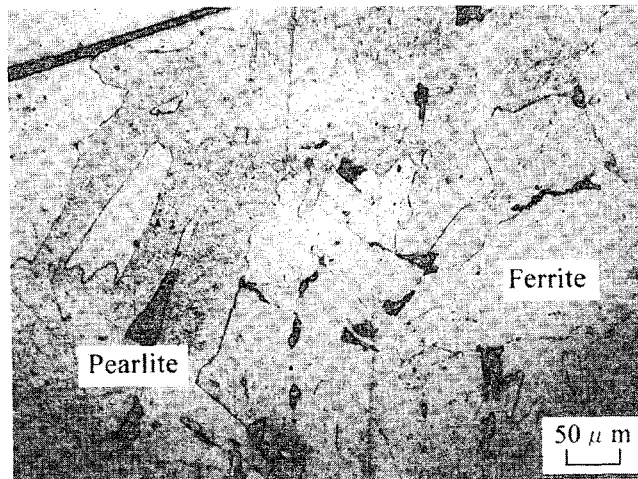


Fig. 9 Optical photomicrograph showing microstructure of the Tamahagane obtained.

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操業を続けた。最初のケラの装入から約 1.8ks 後残りのケラ約 1.0kg を装入して、さらに木炭を炉体上面まで積み増した。このままの状態約 4.2ks 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操業を終了した。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。

Fig. 8 は炉体底部より取り出した鉄（玉鋼）の全体像である。その総重量は 2001.2g であった。卸鉄作業で装入したケラの総重量は 2 度のたたら製鉄によって得られたケラの総重量から組織観察および分析に使用した 200g を差し引いた 2246.0g である。したがって卸鉄によって約 250g の損失が発生したことになるが、これはケラの大部分を占める Fe の酸化が主な原因と推察される。

4.5 玉鋼の分析および組織観察

卸鉄によって得られた鉄の分析結果を Table 3 に表わした。一般に玉鋼の C 量は 0.5~1.5% といわれており、本実験で得られた鉄の C 量は 0.63% であることから、卸鉄によってケラが脱炭されて玉鋼が作られたことになる。また C 以外の元素についても、

Table 2 の下段に示した卸鉄前の分析値と卸鉄後の分析値を比べると、ほとんど変化がなくまた極めて小さな値で良好な結果が得られた。すなわち本実験において、卸鉄の炉内（火床）が還元雰囲気ではなく酸化雰囲気に維持され、脱炭が促進されたことを示すものである。このことは、上述した卸鉄によるケラの重量損失の主な原因が、Fe の酸化であるということを示している。

玉鋼の光学顕微鏡組織写真を Fig. 9 に示した。腐食にはケラの場合と同様に 4% ピクリン酸アルコール液を使用した。結晶粒界が若干腐食されているもの、ほとんど腐食されずに白色になっている部分がフェライト相 (αFe) である。フェライト相 (αFe) の結晶粒界の所々に腐食され黒く観察される組織がフェライト相 (αFe) とセメントタイト相 (Fe_3C) の混合組織であるパーライト相 ($\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$) になっている。Fig. 6 に示したようにたたら製鉄によって得られたケラの組織は、セメントタイト相 (Fe_3C) が組織の大半を占めていたのに対し、卸鉄を施して得られた玉鋼の場合は C 量が極めて少ないフェライト相 (αFe) が大部分の組織に変化していることを示している。したがって組織観察の結果からも、本実験の卸鉄によって C 量が少ない良質の玉鋼を得るこ

とができたことがわかる。

5. まとめ

身近に手に入る砂鉄（向浜砂鉄）と木炭を原料にたたら製鉄実験を2度実施した。さらに、たたら製鉄炉を再利用した炉を用いて、得られた鉄（ケラ）について卸鉄法による2次精錬を行った。以上のことから次のことが明らかとなった。

1. たたら製鉄では対面する2箇所の羽口を、お互いに羽口の径に相当する分だけずらして配置することによって、より安定した製鉄操業が可能となった。
2. たたら製鉄操業を同一の操業手順で2度行い、1回目の操業では装入砂鉄6kgに対し1217.6gのケラが得られ、同じく2回目では砂鉄6kgに対してケラが1208.4g得られた。その収率はそれぞれ1回目が20.3%、2回目が20.1%で、再現性のある製鉄操業方法を確立できたといえる。
3. ケラのC量は、1回目が3.04%、2回目が2.43%であった。またそれ以外の主要元素であるSi, P, S量は高炉製鉄法では得ることが困難な小さい値となり、極めて良質の鉄が得られた。さらにケラの分析値は組織観察の結果と非常によく対応した。
4. たたら製鉄炉体を再利用した卸鉄用の炉を作製し、ケラに卸鉄法を適用した。その結果、Feが一部酸化されたことでケラに約250gの損失が生じたものの、C量を0.63%まで低下させることができた。そして、C以外の主要元素Si, P, Sなどの値をほとんど変動させることなく良質の玉鋼を製造することができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり材料工学科、伊藤信雄技官、三浦敏秋技官、田中春美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14年度3年次学生、片岡孝史君、住谷未央君、鎌田 健君、児島伸浩君、小堀裕太君、鈴木勇佑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) 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.
- (3) 片岡孝史, 住谷未央, 鎌田 健, 児島伸浩, 小堀裕太, 鈴木勇佑(2003):たたら製鉄と卸鉄による玉鋼の製造, 平成14年度材料工学科創造工房実習報告書, 4-48頁.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 日本鑄物工業会編(1982):鑄鉄の材質, コロナ社, 8-10頁.
- (9) 須藤 一, 田村今男, 西澤泰二(1972):金属組織学, 丸善, 203-4頁.