

論文

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 —

小松芳成*・後藤正治*・麻生節夫*

An Experimental Study on Ironmaking of the Mukaihama Iron Sand Based on the Tatarabuiki Ironmaking Process and on Casting of the Obtained Iron Bear
- A Few Findings Obtained from Creative Techno-Craft -

Yoshinari Komatsu*, Shoji Goto* and Setsuo Aso*

Abstract

A small-sized "Tatarabuiki" furnace was made for laboratory working. Iron sand was mined from Mukaihama beach in the city of Akita and applied to ironmaking based on the "Tatarabuiki" 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 "Tatarabuiki" process and iron bear (Kera) with lower phosphorous and sulfur contents was produced. The iron bear was obtained in a 26% yield. Next, the iron bear was remelted and cast into a mold made by the investment method to make some artifacts. Finally, the optimum conditions for the ironmaking and the cast processes were discussed in detail. A series of experiments mentioned above was conducted as an appropriate practice on the education program "Creative Techno-Craft" for undergraduate students in the Department of Materials Science and Engineering, Akita University.

1. はじめに

「たたら製鉄」は、日本において古来から行われてきた製鉄技術で、江戸時代に技術的に完成した日本独特の製鉄法である。「たたら製鉄」で得られた鉄製品は、炭素含有量が2mass%以下のものを「ケラ」、それ以上の高炭素のものを「ズク」と呼び、ケラの中で特に品質の良いものは玉鋼（たまはがね）と呼ばれた。この玉鋼を原料として鍛造された日本刀は切れ味が非常に素晴らしく、そのうえ錆びにくい特長があるために古くは中国へ多数輸出され、近世以降に西洋の冶金技術者から驚嘆された。これは「たたら製鉄」の技術によってリンやイオウ含有量の少ない良質な鉄を得ることができたためであると考えられる。江戸時代末まで日本の鉄需要の全てを賄ってきた「たたら製鉄」も、明治時代に入って西洋式の釜石製鉄所や官営八幡製鉄所が稼働されると、その生産性が低い故に衰退の一途をたどり、第2次世界大戦後には遂にその姿を無くした⁽¹⁾。しかし、リンやイオウ含有率の少ない良質な鉄素材は、耐食

性に優れるなどの特性を有することが知られているので、ハイテク産業の発達した今日においてもそれらの特性を必要とする分野において一段とその需要が増すものと考えられる。

著者らは、前報においてたたら製鉄法に関する実験的検討を行い、本製鉄法の特徴について明らかにした^{(2),(3)}。さらに鉄収率の高い製鉄プロセスについても検討した。それをふまえ、本実験はこの製鉄プロセスを天然鉱石に適用すると共に、材料工学科3年次学生を対象とした創造工房実習の一環としてとりあげたものである⁽⁴⁾。従来のたたら製鉄研究の多くは、その原材料として市販の砂鉄や石灰石を用いて行っているが、本研究ではたたら製鉄が日本国内のいずれの地域でも可能であったことを明らかにするために、原材料として身近で入手できるものを用いて行った。原材料である砂鉄は、秋田県内において過去に産出された地域を調査し、実際に自分たちの手で採取することから始めた。すなわち、前報の結果を踏まえ均質な炉内温度の確保や炉体の持つ熔融能力の向上をはかるため、羽口を2箇所に取り付けるなどの改良を加えた新たな小型たたら製鉄実験炉を創造作製すると共に、実際に秋田県内(秋田市向浜)において採取した砂鉄を還元することに

2002年7月18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.

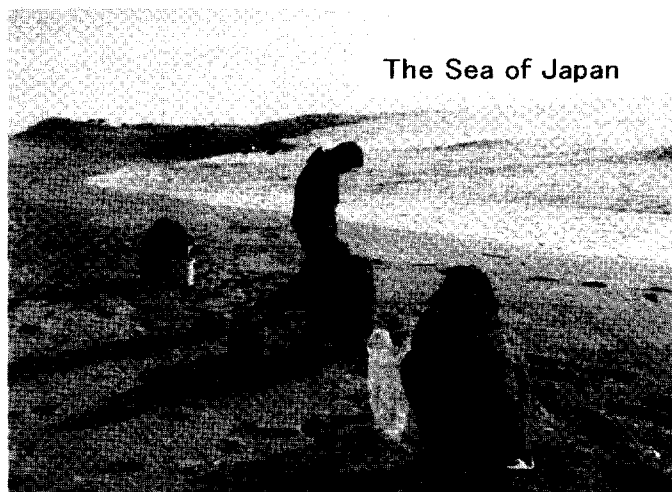


Fig. 1 Mining points of iron sand in Mukaihama beach.

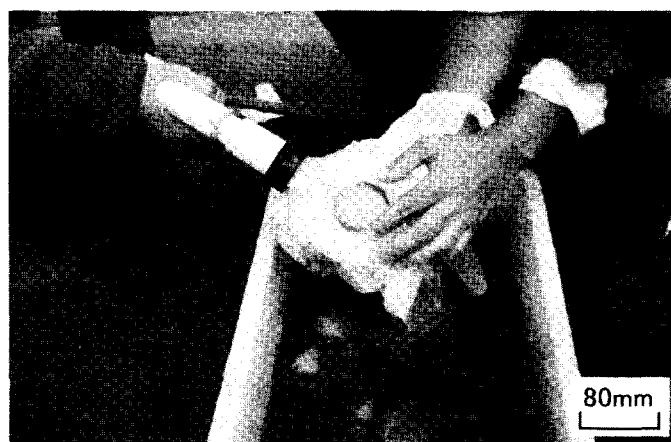


Fig. 3 Washing of the Mukaihama iron sand with water.

よってより良質の鉄を作り出すことにした。さらに本実験では、得られた鉄を高周波炉で再溶解しインベストメント法を用いて手作りの鑄鉄製品を作ることにも試みた。原材料の採取から製品の完成まで一連のプロセスを実体験させることによって学生の“もの作り”に対する興味を高めるとともに、創造することの喜びや難しさを体験させることで材料工学の重要性の理解をさらに深めさせることも本実験の目的である。

2. 原材料の採取および調製

2.1 砂鉄、貝殻および粘土の採取

秋田県内において過去に砂鉄が産出された地域を秋田大学附属図書館および附属鉱業博物館などの資料をもとに調査するとともに、たたら製鉄に用いる原材料である砂鉄を自分たちの手で採取することにした。調査の結果、以前より砂鉄の存在が知られて

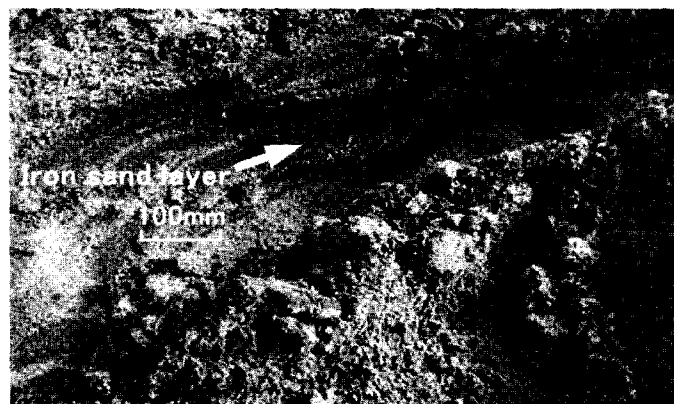


Fig. 2 A bed of the Mukaihama iron sand.

いた秋田市の向浜地区を候補地として選定し実際に現地に出かけて砂鉄の採取を行った。

秋田市の向浜では、海岸線を保護するため沖合いに設けられた消波ブロックの内側に広がる砂浜を中心に、海岸線を歩きながら目視で帯状あるいは層状に黒色の砂が確認できる地点を手分けして探した。黒味を帯びた砂が存在する位置においては磁石を使用して探査 (Fig. 1 参照) を行い、磁石に付着する砂が多く存在する場所を特定し砂鉄の採取位置を決定した。Fig. 2 には表層部に薄い黒色の砂鉄層が存在する地点において、さらにそこを掘削した時の地層の一例を示した。写真では判別しがたいが極薄い砂鉄の層が幾重にも重なりあっていた。このように砂鉄の含有量が多いと考えられる数箇所から合わせて約 72.3kg の砂を採取した。

また、砂鉄の採取と同時に向浜海岸において貝殻を約 2kg 採取した。これは製鉄作業時に酸化鉄中のけい酸などと結合して低融点の鉱滓 (ノロ) を形成させるために用いられる石灰石の代替に使用するものである。

さらに、たたら製鉄炉の作製の際に炉体や羽口の接合部に必要な耐火性の高い良質の粘土として、秋田大学構内の工事現場に発生した土砂の中から粘土質の部分を実約 15kg 採取して準備した。

2.2 砂鉄の選鉱

まず最初に、採取した砂鉄を Fig. 3 に示すように丹念に水洗いを施し粘土分や塩分を取り除いた。その後一旦自然乾燥した後、400K に保持した乾燥器を用いて十分に乾燥した。その後プラスチック製の容器 (直径 60mm, 深さ 70mm) に磁石を挿入したものをを用いて磁力を利用した選鉱を行い砂鉄品位を高めた。Fig. 4 にその様子を示した。容器の底部に磁力線に沿うように砂鉄が付着していることがわかる。プラスチック容器に磁石を挿入して使用したのは、

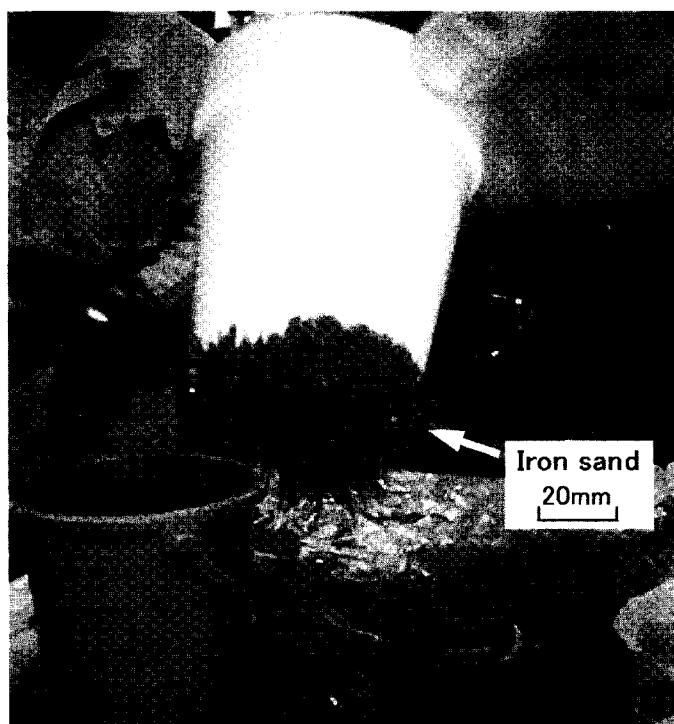


Fig. 4 Magnetic separation of the Mukaihama iron sand.

容器から磁石を取り出すことで、簡便に容器の底部に付着した砂鉄を取り除くことが可能であるからである。このような水洗いと磁力選鉱を施すことにより、向浜において採取した砂 72.3kg から品位の高い砂鉄 12.0kg が得られた。その採取率は 16.6%であった。Table 1 に磁力選鉱前と後の向浜砂鉄の化学分析結果を示す。すなわち、上述の方法で水洗いと磁力選鉱を行うことにより、 SiO_2 を激減させるとともに Fe の含有量を 33.7% から 53.7% まで向上させることができた。

2.3 原材料の調製

水洗いと磁力選鉱によって得られた純度の高い砂鉄は、さらに十分乾燥したのち粉砕処理して 6~48 メッシュ (4.2~0.5mm) 程度に整粒して製鉄操業に供した。一方、石灰石 (CaCO_3) の代替として向浜

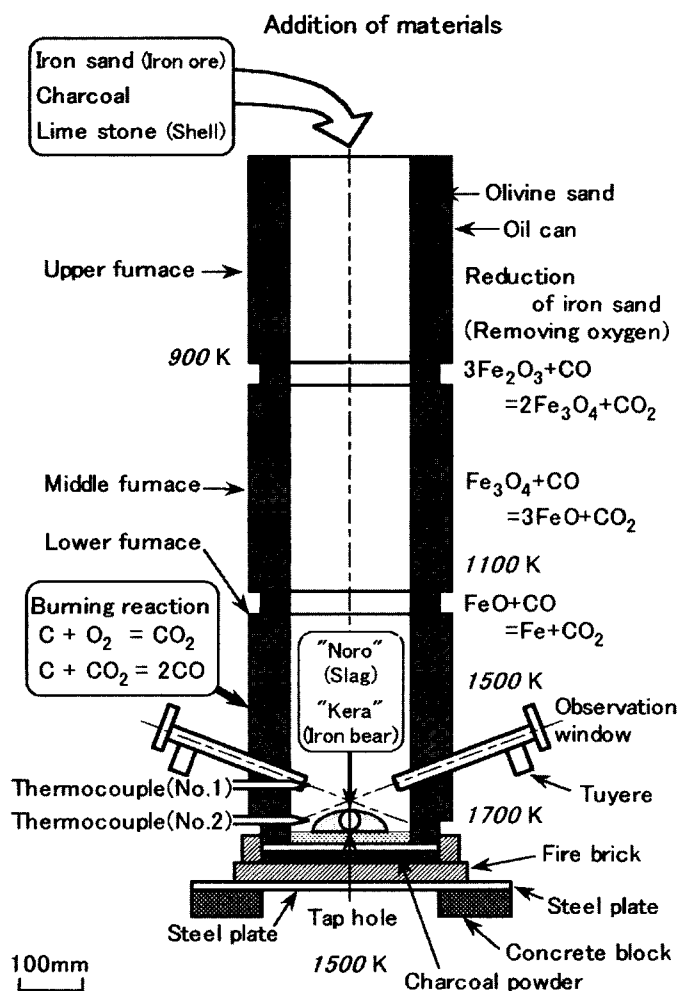


Fig. 5 Schematic illustration of the small-sized "Tatara-buki" furnace.

海岸で採取した貝殻は、よく洗浄乾燥のち大型の乳鉢で細かく粉砕したものを 10 メッシュ (2.5mm) 以下にふるい分けして用いた。また、燃料としての木炭は、岩手県工業技術センターから提供された良質の木炭をナタを用いて 20~30mm 角になるよう折って使用した。その際、約 1/3 程度は粉状になってしまいがそれは製鉄炉を設置する時に湿気を防止するために炉体底部の構築に効率よく利用できた。

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 Magnetic separation	33.7	5.9	33.0	1.8	1.6	<0.1	<0.1	<0.1	6.0	4.5
After Magnetic separation	53.7	22.4	6.2	0.4	1.2	<0.1	<0.1	<0.1	7.3	1.3

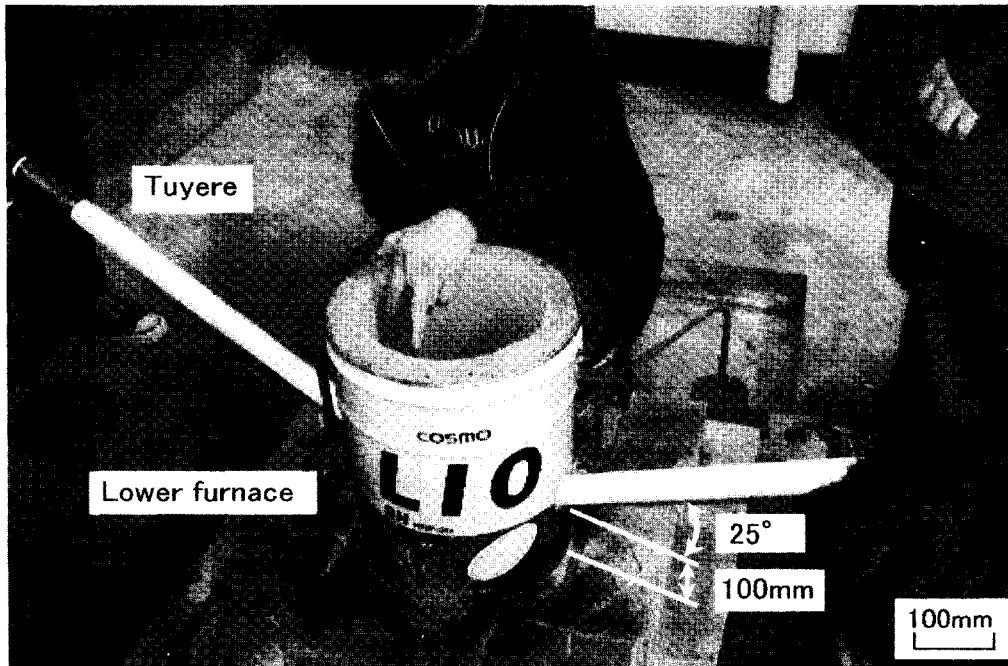


Fig. 6 Setting of the lower furnace.

3. 実験

3.1 たたら製鉄実験炉の作製

3.1.1 実験炉の作製

本実験で使用した炉の構造と製鉄プロセスの概念図を Fig. 5 に示す。炉体の基本的構造は前報で使用した小型製鉄炉と同様であり、上から順に上，中，下段炉の3段式分離型となっている^{(2)~(5)}。炉の内壁は、耐火レンガまたは粘土で裏張りする方法が一般的であるが、本実験では築炉後の乾燥がほとんど必要なく、耐熱性、断熱性に富むCO₂プロセスにより作製した。CO₂プロセスとは、砂と水ガラス（けい酸ソーダ）の混練物に炭酸ガスを通すことによって、けい酸ゲルを生じさせこれによって砂粒子を結合させるものである。

本実験で作製した炉では、それぞれの炉体の外壁用に20Lのオイル缶（外径300mm，高さ360mm）を転用した。オイル缶のふたを取り除き底部にはφ210mmの穴をあけ、それと同心になるように外径210mmの塩ビ管を缶の内側にセットした。そののち塩ビ管とオイル缶の間にオリビン砂と水ガラスの混練物を十分に充填し、塩ビ管を静かに引き抜きとって炉体を形作った。さらに炉体内面から炭酸ガスを均等に吹き付けて炉壁を硬化させて円筒状（外径300mm，内径210mm，高さ360mm）の各炉を完成させた。この方法により、耐火レンガに匹敵する強固な裏張りを有する炉体が得られた。

3.1.2 実験炉の設置

Fig. 6 に炉体基礎部分を構築し下段炉を設置した後には羽口を取り付けた状態を示した。炉体基礎の部分は厳密に地面からの水分を遮断されることが十分な断熱を行うことが求められる。そのためにコンクリートブロックの上に鋼板（厚さ6mm）を載せて、その上に耐火レンガ（SK-32）を敷詰め、さらに木炭粉を20~30mm厚さに敷いた。下段炉の安定性を保つためにさらに厚さ3mmの鋼板を置いた。以上のように、基礎部分を4層構造とすることにより地面からの水分の遮へいを図り十分な断熱を行うとともに炉体の安定性を確保した。

下段炉底部には、さらに木炭片を20~30mm厚さに敷詰め、その上に5%の水ガラスを含むオリビン砂を10mm程度、中心部が凹状になるように成形して固化した。この部分がノロ・ケラの生成箇所であり、凹底部がノロ出し口と高さが一致するように作製した。

次に羽口の構造について説明する。前報で述べたように安定した製鉄操作を行うためには安定した均質な炉内温度を確保するとともに、炉体の持つ溶融能力を向上させることが必要である^{(2),(3)}。そこで本実験で作製した小型たたら製鉄炉ではこのことを考慮して改良を加え、羽口を2箇所を設置することとした⁽⁴⁾。Fig. 6 に示すように、羽口は炉底から約100mm高さの位置で、送風方向を炉直径の対角線上の炉底が確認できる角度（25°）となるようにアクリル製の専用分度器を作製しそれをうい固定した。

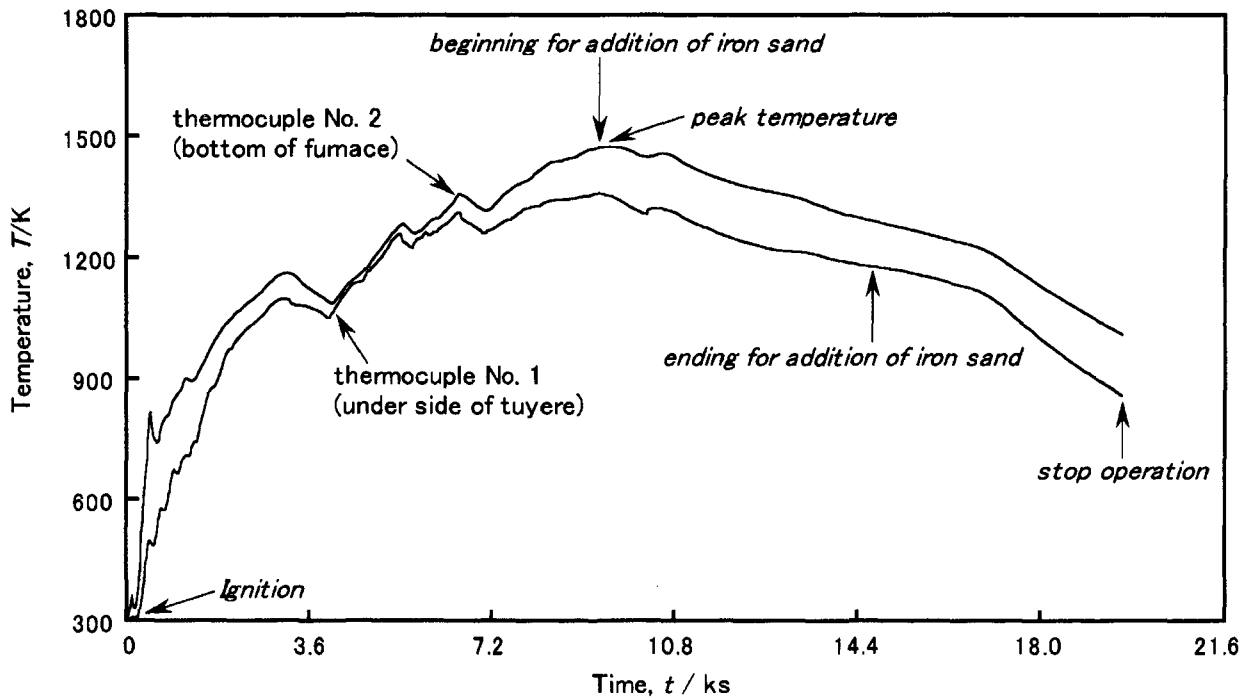


Fig. 7 Change in temperature in the furnace during the Tataru-buki operation.

これよりも急な勾配ではノロやケラに直接送風されることとなり、ケラの再酸化が危惧された。また逆に低い角度では炉底部の温度低下や、羽口先端の溶損などが起こりやすくなる。羽口への送風には工作用のブローアを用い、排水用のホースなどを使用して2箇所の羽口へ分配した。さらに左右の羽口に設けたボールバルブの調整と変圧器（スライダック）で回転数を調整することで送風量の制御を行い、炉体内部において十分に木炭を燃焼させることで均質な炉内温度の維持と熔融能力の向上を図った。

3.2 実作業

3.2.1 立ち上げ

立ち上げ（吹き入れ）における火入れの作業は次の順序で行った。炉体基礎の上にセットされた下段炉体に少量の木炭を装入し点火したのち、弱い送風を開始し次第に木炭を積み増していく。木炭が下段炉上面に達したら、下段炉周辺の炉壁上部に粘土を一樣に敷き中段炉体を載せる。その後また上述と同様の方法を繰り返して木炭を積み増し、上段炉体上面（炉口）まで木炭を装入する。その結果上段炉の炉口から火炎が立ち昇り、その火炎が青みを帯びることで木炭の燃焼が定常状態に達したことを目視確認した。さらに炉体底部と羽口レベルの位置に取り付けた熱電対によって炉内部の温度をレコーダーでモニタリングして温度測定を行った。

3.2.2 製鉄作業

製鉄作業終了後、装入物層の表面位置（ストックライン）が炉口から300s間で10~15cm程度降下するような燃焼速度になるように送風量を調整してから砂鉄と貝殻粉の混合物を十能を用いて木炭上面中央部に一樣に振りまいて装入し、ついで木炭も装入した。このときの砂鉄と貝殻粉の割合は10:1で1回当たりの総重量は220g、木炭は400gであった。そして、この一連の作業を30~40回繰り返して行った。また、10回の砂鉄装入毎にできるかぎりスラグだけを炉から放出するように注意を払いながら、炉体底部からノロ出しの作業を行った。取り出したノロを十分に冷却しその質量を測定した。

3.2.3 吹きおろし

製鉄作業終了後、砂鉄および木炭の装入を中止し最後のノロ出しを行い、ストックラインが中段炉体の上面まで降下したのち送風を中止した。その後、上段炉体を安全な場所へ移動し中段炉体に蓋をした。炉体が冷却したのち、中段炉体と下段炉体との間に鉄板を挿入し、木炭の落下を防止しつつ中段炉体を砂床に移した。十分冷却したのち、残りの木炭を回収し、下段炉体から「ケラ」と「ノロ」を取り出して、水で冷却後それぞれの質量を測定した。

3.3 インベストメント法による鑄造品の製作

インベストメント法とは、ロストワックス法あるいはろう型法とも呼ばれ、ろうで作られた模型の周囲に耐火物スラリーを流し込み、加水分解させて骨

材の耐火物を凝結させた後に模型のろう(ワックス)を加熱溶出させ、続いて高温で加熱し焼成して鑄型を得る方法である。耐火物スラリーには石膏を粘結材剤とし、耐火補助剤としてシリカを配合したインベストメントを用いた。これにより模型と同形状の空隙を鑄型の内部に作る事ができ、一般的な割り型などでは不可能な複雑な形状の鑄造品を製造するのに適している。本実験では実際に採取した砂鉄を小型たたら製鉄実験炉によって還元し、得られたケラを高周波誘導加熱炉により再溶解して溶鉄とし、これを上述のインベストメント法で作製した鑄型に鑄造した。

4. 実験結果および考察

4.1 製鉄操業

製鉄操業における経過時間と炉内温度の関係を Fig. 7 に示した。火入れを開始して木炭を徐々に装入しながら下段炉から上段炉まで炉体を組み上げ約 5.3ks 後に立ち上げを完了した。その後、木炭のストックラインが上段炉口から 300s 間で 10~15cm 程度降下する燃焼速度が得られるように、2 箇所羽口に設けられたボールバルブにより送風量の調整を行いながら、約 4.0ks 間木炭の装入を繰り返した。火入れ開始から約 9.3ks 後に炉口から青みを帯びた火炎が立ち昇り、木炭の燃焼が定常状態に達したことが目視で確認できた。ちなみに、溶融鉄を得るためには、Fe-C 系平衡状態図で示される共晶点(1420K)付近まで炉内温度を上昇させることが必要であるが、この時点においては Fig. 7 からわかるように炉内下部において炉内温度(No.2)が 1470K に達しており、砂鉄を溶融するには十分な炉内温度を確保できたといえる。そこで Fig. 8 に示すように砂鉄と貝殻粉の混合物を装入し製鉄操業を開始した。操業開始から 1.2ks 後炉内温度は若干低下したものの、観察窓からは砂鉄が半溶融状態で雫となって木炭片をつたって炉底部に滴下していることが確認できた。しかし、それから 600s 後には炉内底部の温度(No.2)が 1420K まで降下し、羽口レベルの炉内温度(No.1)もそれと連動するように降下が始まった。送風量の調整などによって温度の回復を試みたが、2 箇所ある羽口のうち一方の一部にスラグが付着し十分に送風されない状況となったためノロ出しが可能であるか確認した。スラグが付着していない羽口の観察窓から光高温温度計を用いて間接的に炉内温度を同定した結果 1450K 以上の温度が確保されており、熱電対による炉内温度のモニタリングからは温度が降下

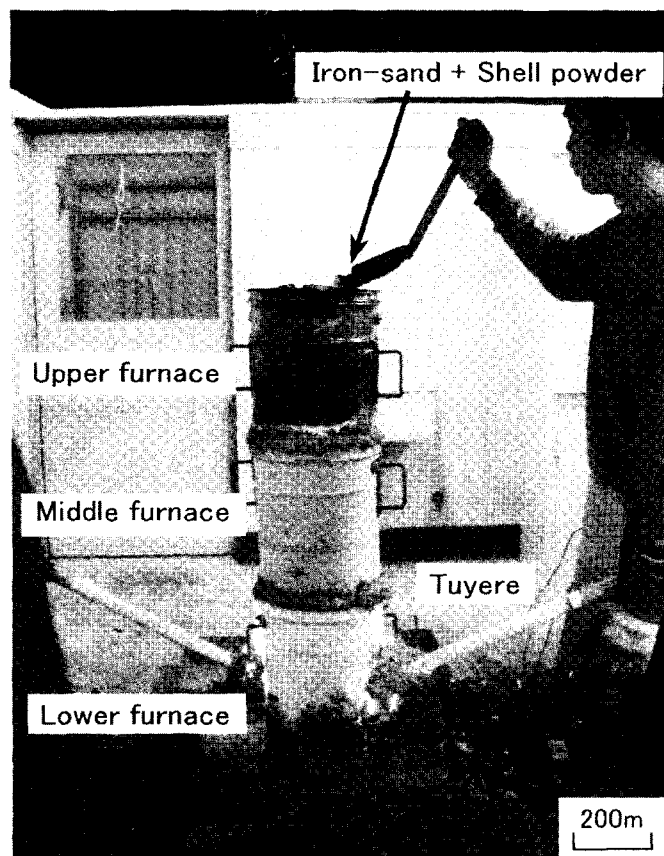


Fig. 8 Operation of the Tataru-buki ironmaking process.

しているものの、少なくとも炉内の片側半分程度以上においては依然として砂鉄を溶融できる温度が十分維持されていることが判明した。これは羽口の一部の一部にスラグが付着したために、炉体内において送風量のアンバランスが生じ、その結果木炭の均質な燃焼が確保されなくなり、炉体内壁の片側にスラグが蓄積されたことが原因であると考えられた。すなわち、熱電対から得られた炉内温度の低下は、炉内全体の温度低下を示すものではなく、熱電対を設置した側の炉体内壁にスラグが徐々に蓄積されて行ったことに起因することが判った。したがって光高温計による観察窓からの測温をもとに 1420K 以上の炉内温度が維持されている間は操業を継続することとし、さらに 3.6ks 間製鉄操業を続けて停止した。装入総量は砂鉄 2.8kg、貝殻粉 280g、木炭 5.6kg で 14 回にわたって装入作業を行った結果、ケラの総量は 730g で収率は 26%であった。得られたケラの全体像を Fig. 9 に示した。本実験で得られた鉄収率 26%は、前報において市販の砂鉄を用いて行った場合に得られた収率 27%にきわめて近く、非常に良好なものと思われる。従来のたたら製鉄研究において報告されている鉄収率も大略同程度であることから

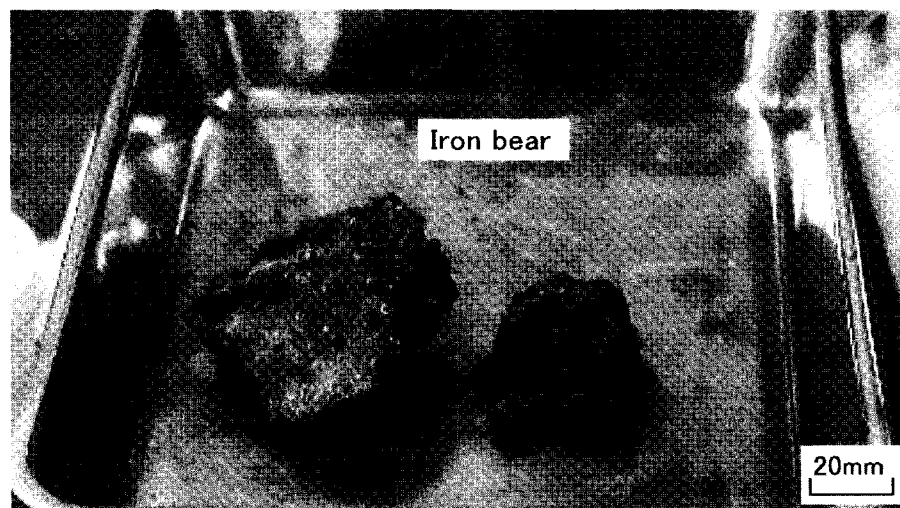


Fig. 9 Overview of two lumps of the iron bear (Kera) obtained in this experiment.

すれば、向浜砂鉄という低品位の原料でも比較的高い収率が得られたものと思われる。すなわちたたら製鉄法では、原料の品位に対してそれほど厳密な制約がなくとも同程度の鉄収率を得ることが可能であったものと推察される。

本実験で用いた炉体は前報の結果を踏まえ^{(2), (3)}、安定した均質な炉内温度を確保するとともに、炉体の持つ熔融能力を向上させ安定した製鉄操作を行うために改良を加えて、羽口を2箇所を設置したものである⁽⁴⁾。それによって送風量が増加して十分な木炭の燃焼が確保され、操業開始当初は高い炉内温度を実現できた。しかしながら、上述したように操業の途中で一方の羽口の一部にスラグの付着が生じ、それにより均質な炉内温度が維持できなくなった。そのことが原因となって炉内の片側においてスラグの蓄積が徐々に進行し、最終的には羽口が十分機能しなくなり操業停止という事態を招いてしまった。その問題点を挙げると、羽口位置やその挿入角度の調整にわずかなずれがあったために、送風バルブの調整だけでは炉内全体に均質に空気を送り込むことが出来なくなった。その結果、一方の羽口付近にスラグを付着させる原因を生じさせてしまったことが考えられる。したがって、さらに改良するためには

正確な羽口角度の調整とともに、羽口位置のセットにおいても2方向からの送風量が炉内の中心部で均等に衝突するように十分に注意を払わなければならないといえる。

4.2 ケラの分析および顕微鏡組織観察

Table 2 には得られたケラの発光分光分析による分析結果を示した。C量は4.12%で鉄-炭素系平衡状態図からみると、共晶点のC量4.3%よりも低い値を示しており亜共晶組成であることがわかる。一般に銑鉄を論じる場合C量のほかにSiやPを考慮しなければならないが、Siは0.01%で極めて小さく、Pも0.134%と小さな値となっており、現代の高炉法で得られる銑鉄のSi濃度が0.2~0.4%であることと非常に異なっている。これはたたら製鉄法では高炉法と比べるとより低い温度でかつより高い酸素分圧で製錬を行っているため、このことはP濃度が低くなる原因にもなっている⁽⁶⁾。また硫黄濃度が低いのは、高炉法では燃料にSを含んだコークスを使用しているのに対し、たたら製鉄法では木炭を使用していることがその理由と考えられる。このようにたたら製鉄法の特徴は、現代の高炉製鉄法ではなし得ない不純物の少ない良質の鋳や銑を作る日本古来の製鉄技術で、冶金学的にも非常優れた技術であるとい

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

Chemical composition (mass%)											
C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Sn	Cr	Ti	Fe
4.12	0.01	0.00	0.134	0.017	0.00	0.013	0.050	0.00	0.036	0.006	Bal.

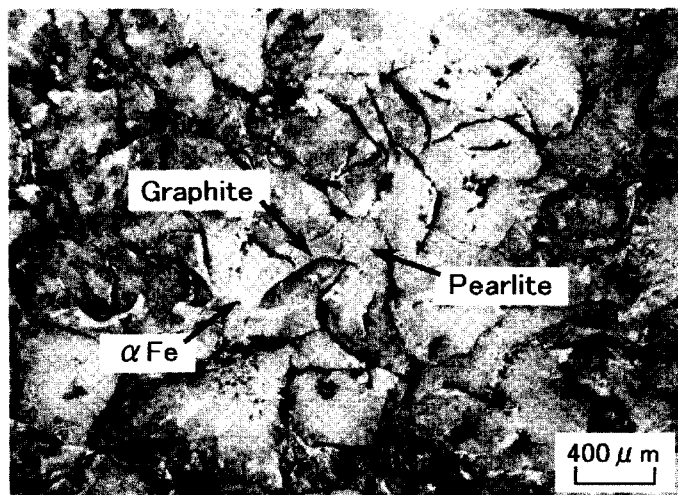


Fig. 10 Optical photomicrograph showing the micro-structure of gray cast iron observed the obtained iron bear (Kera).

うことを本実験で得られた結果からも再確認される。

次に、得られたケラを任意に数箇所切断して研磨を行い、光学顕微鏡を用いて組織観察を行った。その結果の一例を Fig. 10 に示した。腐食は4%ピクリン酸アルコールを用いて行った。これは一般にねずみ鉄と呼ばれる組織である。図中において黒く分布しているものが片状黒鉛である。この黒鉛の周辺を中心に腐食されずに白く分布しているものが炭素濃度の低いフェライト相 (α Fe) である。それ以外の部分、すなわち基底は縞状あるいは層状の組織を呈しており、これはフェライト相 (α Fe) とセメンタイト相 (Fe_3C) が層状に同時に現れたパーライト組織 (α Fe + Fe_3C) である。パーライトは立体的には板状のフェライト相とセメンタイト相が交互に重なりあって構成されているものであるから、顕微鏡

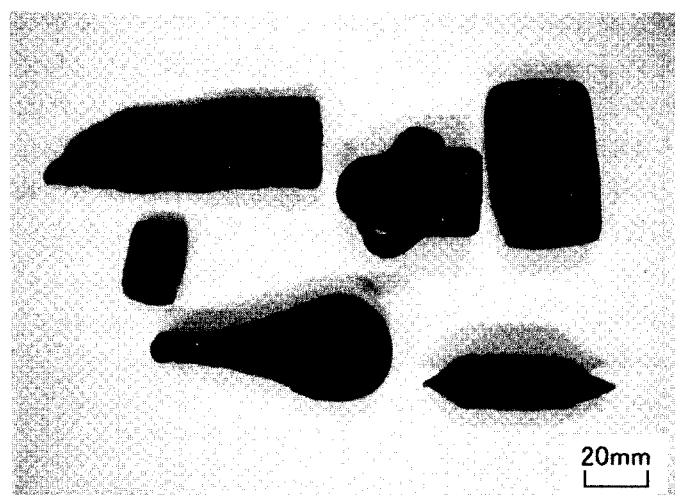


Fig. 11 Wax patterns for casting.

で観察した場合にはその切断面によって、縞状あるいは層状となって観察される⁽⁷⁾。ところで、一般に鉄は強度特性を有効に利用した構造材料として使用される場合が多いが、本実験で得られたような硬いセメンタイトと軟らかいフェライトの混合相であるパーライトを基底に持ち、方向性のない片状の黒鉛が均一に分布している鉄は、他の黒鉛形態の鉄に比べ強度的に優れており、また黒鉛の存在によって機械加工性や耐摩耗性、減衰能などにおいても優れた特性を有しているものと推察される。

4.3 鋳造品の製作

インベストメント法(ロストワックス法)は、4000年以前にエジプトでこれに似た方法が行われていたともいわれ、日本でも奈良時代にこの技術によって仏像や美術鋳物がつくられていた⁽⁸⁾。この鋳造法の大きな特徴のひとつに、前述したように一般的な割り型の鋳型を用いる方法では作製不可能な複雑な形状の品物を一回で鋳造できることが挙げられる。近代工業においてはその利点を生かしてジェットエンジンに代表されるような複雑な部品を高精度で生産する技術が確立されて、この分野のみならず一般機械部品の製造においても欠くことのできない鋳造法となっている。本実験では美術鋳物に代表されるような複雑形状の鋳物を、たたら製鉄で得られた銑鉄を再溶解して古代から行われてきたインベストメント法で鋳造し、砂鉄の還元から鋳物の製造までを行うことで古人(いにしえびと)のロマンを実体験するとともにその技術の奥深さを知ることが目的とした。

その作製過程を説明する。Fig. 11には目的とする鋳造品と同じ形状の模型を製造過程での膨張収縮を見込んでワックスで作製したものを示した。次に Fig. 12 に示すように、後に湯口となる粘土を支えにし湯道を取り付けてその先端に上述したワックスで作製した模型を取り付け、微粒子の高級耐火物と粘結材を混ぜた泥状のものを塗布した。そして、これに鋳枠となる鋼製のパイプをセットし、インベストメントに水を加え泡立てないように注意しながら混合したスラリーを静かに流し込み模型を埋没して、その後乾燥した。その際、鋳枠にハンマーを用いて軽い振動を与え気泡を取り除くようにした。乾燥後マッフル炉を用いて373~393Kで3.6ks間加熱してワックスを熔融流出させて脱ろうを行った。さらに、900Kまで昇温したのち、10.8ks間加熱焼成して鋳型を得た。

一方、たたら製鉄によって得られた銑鉄は、高周

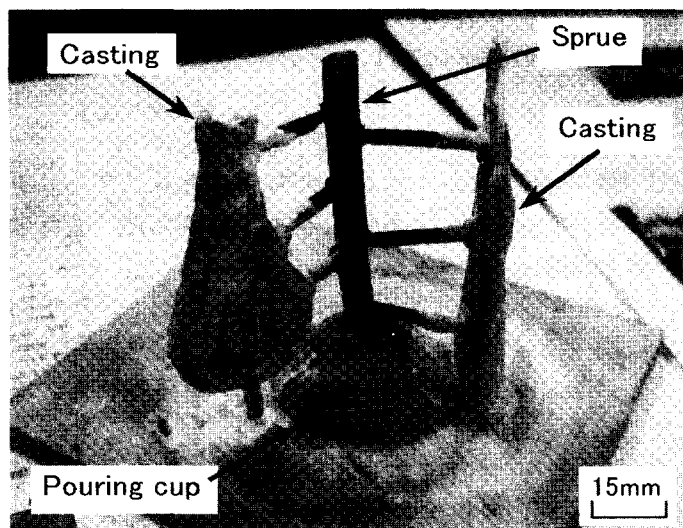


Fig. 12 Casting system for investment casting.

波誘導炉を用いて2番黒鉛るつぼで再溶解して溶湯を得た。溶解温度はC量が4.12%であることから鉄-炭素系平衡状態図より1550Kとした。すばやくマッフル炉から加熱焼成した鑄型を取り出し、鑄込み温度1550Kで高温の鑄型に溶湯を鑄込んだ。

Fig. 13は、鑄型を室温まで冷却したのち型ばらしを行って得られた鑄造品の一部を示したものである。Fig. 11に示した、ワックスで作製された模型をおおよそトレースしていることがわかる。しかしながら、正確に模型を再現した鑄造品を作るところまでには至らなかった。鑄肌を観察すると、ワックス模型で作った細かな紋様が現われておらず、また全体の形状も十分トレースされていないことがわかる。湯口下部付近ではその下にある湯道が細くなっていることも観察できる。これは鑄造品が凝固収縮する過程において湯口の下部が鑄造品よりも早く凝固してしまったために、十分な押し湯の効果が得られずこの部分が引ける形で細くなったからである。結果的に湯廻り不良を起こし、きちんとした形状を得ることができなかったことになる。この解決策は非常に基本的なことではあるが、目的の鑄造品に対して鑄造方案をよく検討して、湯口、湯道などの大きさ、位置を決定するとともに鑄型の加熱温度や鑄込み温度を調整することなどが挙げられる。上述のように、技術の発達した現在のインベストメント法を行っても、著者らが満足できる鑄造品を作ることはできなかった。これに対し、技術の発達していなかった古人においてさえも種々の美術鑄造品が製造されている。このことは、古人の経験的な技術の奥深さをあらためて認識させられるものである。

4.4 創造工房実習としての検討



Fig. 13 Castings made by investment casting process.

本実験では、学生の“もの作り”に対する興味を高めるとともに、実験プロセスを創造し体験させることで材料工学の重要性を理解させることを目的の一つとした。オイル缶を利用した小型炉の作製や向浜で採取した砂鉄と貝殻を原料とした、たたら製鉄実験および得られた鉄を用いた鑄鉄製品の試作などは、いろいろな作業工程において学生の創造意欲を高めるのに十分なものであった。身近で得られる素材を用いても容易に製鉄や鑄造などができることを学生たちは実感した。さらに、材料工学における“もの作り”の工程の一部を理解することができた。したがって、得られた実験成果は材料工学の重要性を理解する上で十分教育価値のあるものと判断された。すなわち、たたら製鉄法は創造工房実習の課題として適当なものと考えられる。

5. まとめ

たたら製鉄に使用する原料を調査研究し、実際に必要な砂鉄などを採取した。その砂鉄を磁力選鉱により精選して純度を高め、改良を加え新たに作製した小型たたら製鉄炉を用いて製鉄操業実験を行った。さらに、得られた鑄鉄を再溶解してインベストメント法による鑄造実験を行った。以上のことから次のことが明らかとなった。

1. 向浜から採取した砂鉄を水洗いして磁力選鉱をすることにより、Feの含有量を33.7%から53.7%まで向上させることができた。
2. 改良を加えて羽口を2箇所にした小型たたら実験製鉄炉を製作したことで、操業開始当初はより高い炉内温度を確保できた。しかし、炉内温度を均質に保持するためには正確な羽口角度の調整とともに、羽口位置のセットにおいても2方

向からの送風が炉内の中心部で均等に衝突するように注意することが重要である。

3. 装入砂鉄 2.8kg からケラ 730g が得られ、収率は 26%であった。本実験で得られたケラは、高炉法によるものと比較して Si や P などの不純物が少ない極めて良質なものであった。
4. ケラの組織の大部分はパーライト基地に片状の黒鉛が方向性なく均一に分布し、機械的性質に優れる片状黒鉛鑄鉄であると推察された。
5. 得られたケラを再溶解してインベストメント法により鑄造品を作製したが、その作製には鑄造方案がきわめて重要であることを再確認するとともに、古人の経験的な技術の奥深さをあらためて認識させられた。
6. 本研究で行ったたたら製鉄法は創造工房実習の課題として適当なものである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり室蘭工業大学の桃野 正教授には貴重な参考資料やビデオテープを提供して頂くとともに、様々なご教授を頂いた。また、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して頂いた。さらに、岩手県工業技術センターからは木炭を、秋木製鋼㈱からはオリビンサンドを提供して頂いた。なお、本研究は材料工学科平成 13 年度 3 年次学生、天野博紀君、宇野 努君、黒木泰洋君、高山裕矢君、

齋藤 聡君、田森博幸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ます。

文 献

- (1) 片山 博(2000): 日本古来の製鉄法「たたら」を巡って、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 1 話、1-12 頁。
- (2) 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。
- (3) 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、9 号、17-20 頁。
- (4) 天野博紀、宇野 努、黒木泰洋、高山裕矢、齋藤 聡、田森 博幸 (2002): たたら製鉄と鑄物作り、平成 13 年度材料工学科創造工房実習報告書、3-40 頁。
- (5) 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。
- (6) 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、231-236 頁。
- (7) 日本鑄物工業会編(1982): 鑄鉄の材質、コロナ社、8-38 頁。
- (8) 大平五郎、井川克也(1986): 金属工学シリーズ 2 「鑄造工学」、日本金属学会、228-232 頁。