

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—

小松芳成*・後藤正治*・麻生節夫*

An Experimental Study on the Tatara-buki Ironmaking Process

—A Few Findings Obtained from Creative Techno-Craft—

Yoshinari Komatsu*, Shoji Goto* and Setsuo Aso*

Abstract

The arts of ironmaking “Tatara-buki process” were well known and practiced in ancient Japan. The process in the ironmaking is unique among metallurgical processes, in which pig iron or steel with lower phosphorus and sulfur contents is produced directly from iron sand as the raw material and charcoal as the fuel. On the other hand, in the Department of Materials Science and Engineering the education program of “Creative Techno-Craft” is prepared as an appropriate practice for well understanding on “materials production process”. The principle of the Tatara-buki ironmaking process was investigated for the technical education through metallographic examination for undergraduate students. And also an optimum condition for making molten iron was discussed in detail. In this experiment, iron bear (Kera) was obtained by this process in a 27 % yield. It was found that the homogeneous temperature in furnace plays important role in the iron making process and it should be kept continuously high enough to do reduction of the iron sand for obtaining the iron bear in high yield.

1. はじめに

たたら製鉄は日本古来から行われてきた製鉄技術である。この製鉄法によれば、粘土で築いた炉高 1.2 m の箱型の低炉を用い、原料に砂鉄を約 10 t, 燃料として木炭を約 10 t 用いることによって、約 2.5 t の銑鉄と鋼を直接製造することができるとされている。その作業工程では、送風動力にふいごを使用して 3 昼夜、砂鉄と木炭を 1.8 ks ごとに炉に装入し続け、炉壁が侵食されて使用できなくなるまで続けられ、これを 1 代（ひとよ）と呼んでいた。したがって 1 代ごとに炉を造りなおさねばならなかった。炉の地下には湿気の防止と保温のために木炭の層や空

洞、排水溝などの大がかりな構造が造られていた⁽¹⁾~⁽³⁾。しかし、この方法により日本では古来よりリンやイオウ含有量の少ない良質な鉄を製造することができた^{(4)~(7)}。

本実験ではこの製鉄技術を材料工学科 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。たたら製鉄の原理を調査、研究するとともに、実際に小型たたら炉を創造作製し、砂鉄を還元することによって、銑鉄あるいは鋼を作り出す過程について検討して、それを再現することを目的とした。さらに、本研究はこのプロセスによって得られた銑鉄およびその金属組織観察を行うことによって、工業技術の基礎となる“もの作り”の立場⁽⁸⁾から理解を深め、さらに金属組織学的考察を行うことによって学生の材料工学に対する一層の理解を深めさせることを目的とした。

2001 年 7 月 23 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.

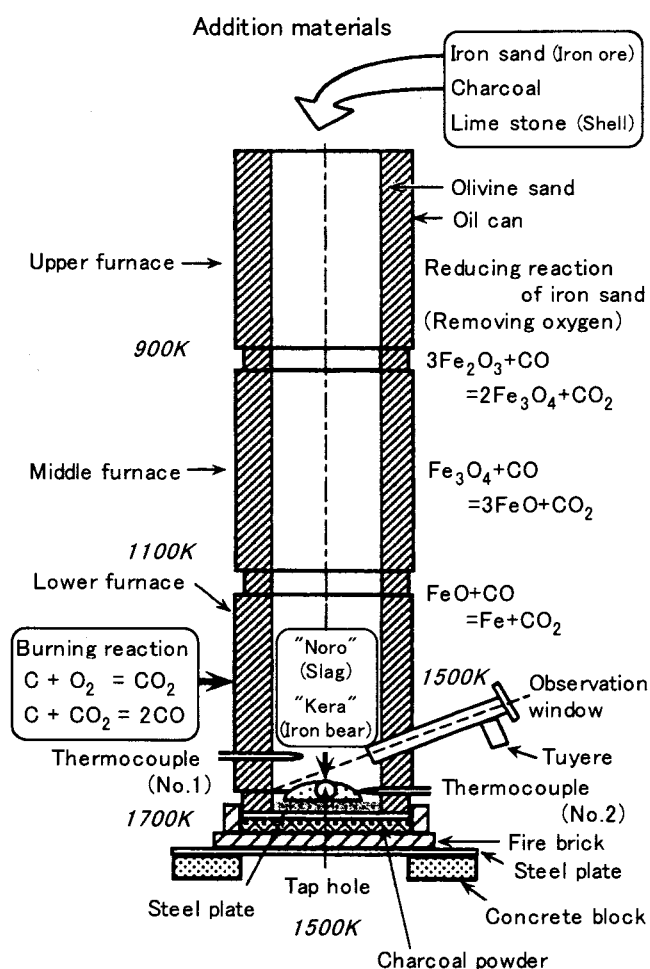
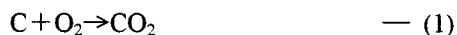


Fig. 1 Schematic view of a small type "Tatara-buki furnace".

2. たたら製鉄の原理

木炭を燃焼させるための空気が羽口から炉内に吹き込まれると、空気中の酸素は木炭と反応し CO_2 を経て CO となる。すなわち、



の2つの反応が相次いで起こり、生成した CO ガスが炉内における酸化鉄還元反応の主役をなす。ここで、 C による直接還元も考えられるが、炉内においては木炭片と酸化鉄粒子は常時接触しているわけではなく、炉内降下とともに離合集散を行っているので、直接還元は CO ガスによる還元にくらべて圧倒的に少ないものと推察される。

装入物である酸化鉄の炉内降下中の化学変化としては、まず装入物は炉頂の装入線近くで付着水や化合水を失い、下降するにつれて酸化鉄が CO によって還元されて次第に低級酸化物となり、さらに金属鉄となる。すなわち、次の反応がおこる。

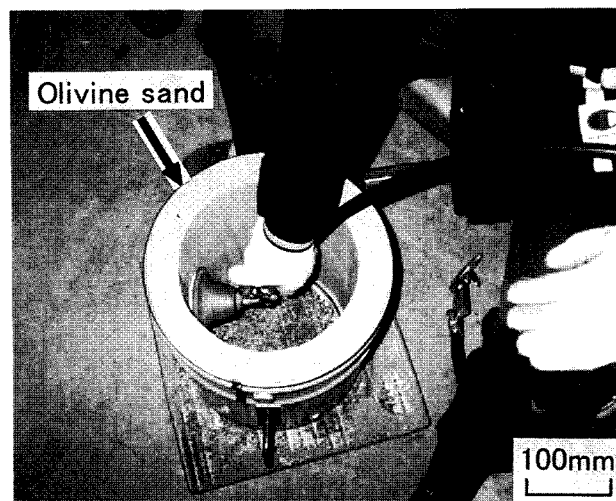
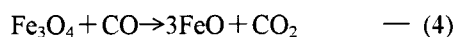
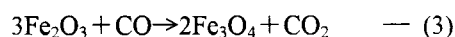
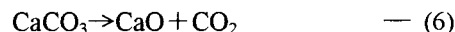


Fig. 2 CO_2 gas spraying process for furnace wall.



これらの反応の中で (3) と (4) の CO による還元反応は 470K 付近から始まり、炉体下部の約 1450K の温度付近ではほぼ完了し、溶鉄(ケラ)が作られる。

一方、装入物として一緒に装入した石灰石は約 570K 付近から分解する。すなわち、



のように分解を始め、1070K において最も盛んに分解し約 1270K で完了する。できた生石灰 (CaO) は酸化鉄中のけい酸などと結合して $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ を主成分とする低融点の鉱滓(ノロ)を形成する。

3. 実験

3.1 たたら製鉄実験炉の作製

Fig. 1 は本実験で使用した炉の構造と製鉄プロセスの概念図である。炉は3段の分離型となっており、上、中、下段炉と名づけた。本実験で製作した炉では、それぞれ20ℓのオイル缶を転用したが、その外径は300mm、内径210mm、高さ360mmである。缶のふたを取り除き、底部にはφ210mmの穴をあけた。缶の底部は若干絞られているので、缶を積み重ねる場合には好都合であった。

炉の内壁は、一般的には耐火レンガまたは粘土で裏張りしているが本実験ではオリビン砂7号を用い、 CO_2 プロセスにより作製した。この方法の特徴は(1)築炉後の乾燥がほとんど必要ないので短時間で本格操業に移行できること、(2)耐熱性、断熱性に富むことから炉体の繰り返し使用が可能であることなどが挙げられる。 CO_2 プロセスとは、水ガラス(けい

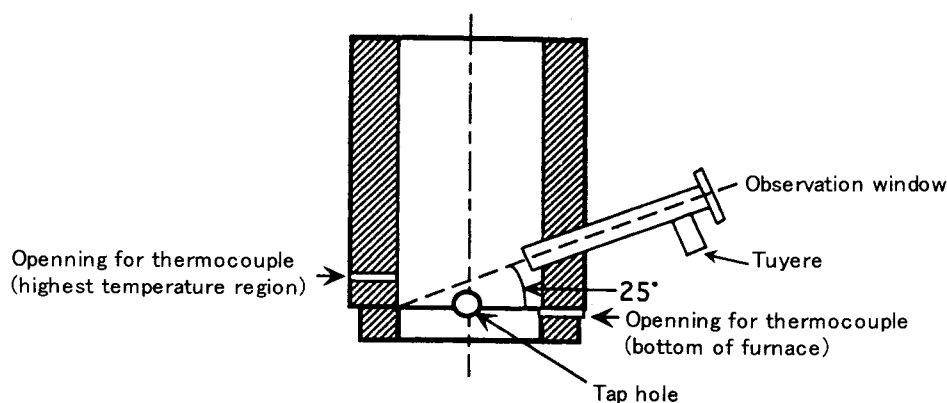


Fig. 3 Schematic view of lower furnace.

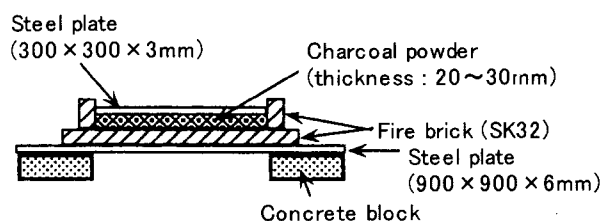
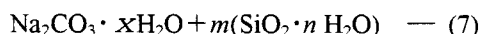
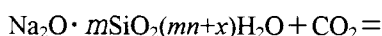


Fig. 4 Schematic view of ground part of furnace.

酸ソーダ $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ の組成で、モル比 $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ が 1.5 以上のものを水ガラスという)に炭酸ガスを通すことによって、



の反応を行わせ、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。

なお、炉体を製作する場合、塩ビ管(外径 210mm)を型として用いた。すなわち、塩ビ管をオイル缶の内側にセットしたのち、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た後、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各炉を完成させた。Fig. 2 にはその作業の一部を示した。この方法により、耐火レンガほどの強固な裏張りが得られた。

次に、最も重要な羽口と炉底の構造について説明する。Fig. 3 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とした。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。

次に炉体基礎の部分は、Fig. 4 に示すように、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。この木炭粉の上に直接下段炉を置くことも可能であるが、粉体であるため安定性に欠ける。そこで厚さ 3mm の鋼板を置いて安定性を保つことにした。以上のように、基礎部分は 4 層構造にしたが、これは厳密に地面からの水分を遮断するためと十分な断熱を行うためのものである。

下段炉底部には、さらに木炭片を 20~30mm 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・ケラの生成個所であり、凹底部がノロ出し口と高さが一致するように作製した。

その他、送風機には工作用のブロアーを用い、変圧器(スライダック)で回転数を調整することで送風量を制御した⁽⁹⁾。

3.2 操業準備

燃料として用いた木炭はナタを使用して約 20~30mm 角になるように粉碎して大きさを調整した。また石灰石(CaCO_3)のかわりに貝殻粉を用いた。貝殻粉はホッキ貝やホタテ貝の貝殻をよく洗浄乾燥のち、大型の乳鉢で細かく粉碎したものを 10 メッシュ(2.5mm)以下にふるい分けして用いた。砂鉄(主成分: FeO)は中央可鍛工業(株)から提供されたものを粉碎処理して 6~48 メッシュ(4.2~0.5mm)程度に整粒したものをを用いた⁽¹⁰⁾。

3.3 実操業

3.3.1 立ち上げ(吹き入れ)

立ち上げ(吹き入れ)における火入れの作業は次

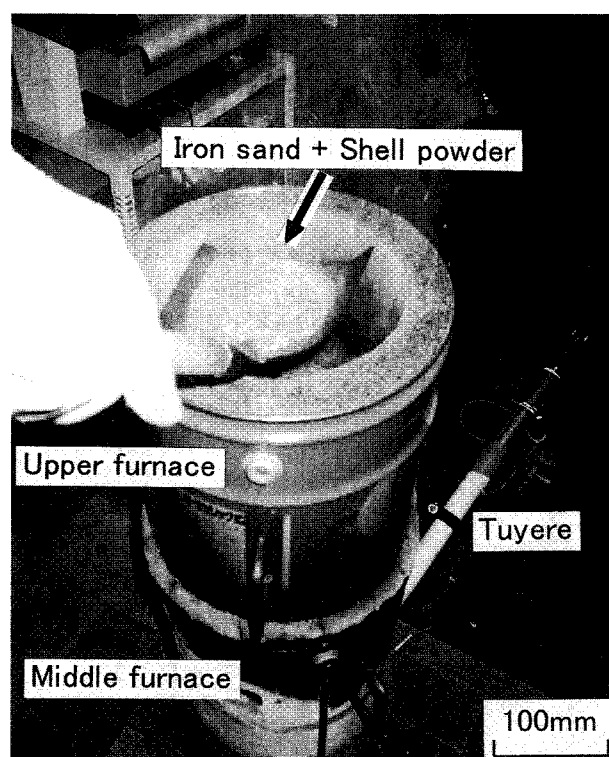


Fig. 5 Charging of iron sand and shell powder.

の順序で行った。すなわち、最初に炉体基礎の上に下段炉のみをセットする。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様に敷き中段炉体載せる。その後また上述と同様の方法により木炭を積み増して、同様のことを繰り返して上段炉体上

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、木炭の燃焼が定常状態に達したことが確認できた。これを目視で判定するとともに炉体底部と羽口対面に設置し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。

3.3.2 製鉄操作

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 Fig. 5 のように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様に振りまいて装入し、ついで木炭も装入した。ちなみに、熔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。このときの砂鉄と貝殻粉の割合は 10 : 1 で総重量は 220~330g、木炭は 400~500g 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分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。

3.3.3 吹きおろし

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。

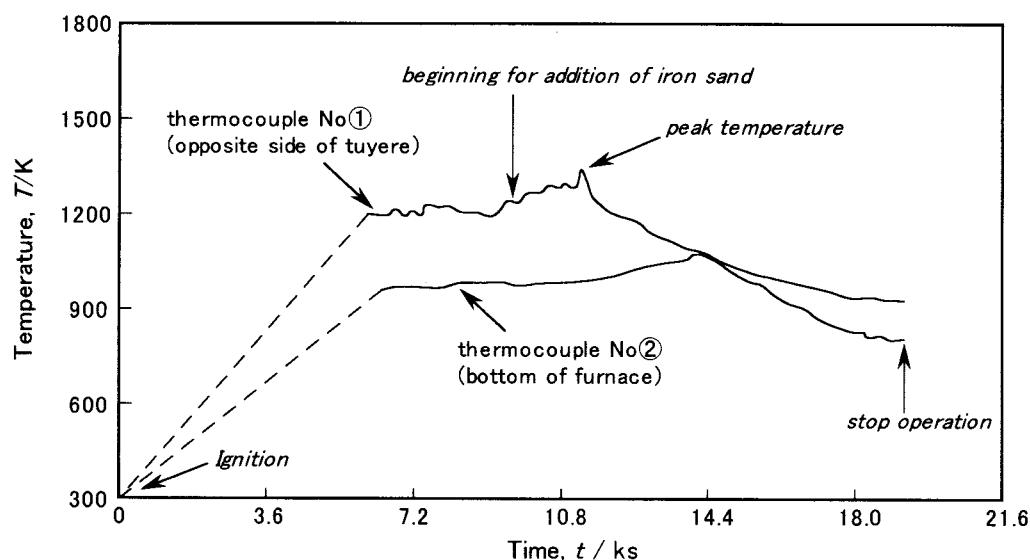


Fig. 6 Temperature profile of furnace in the first operation of Tatara-buki.

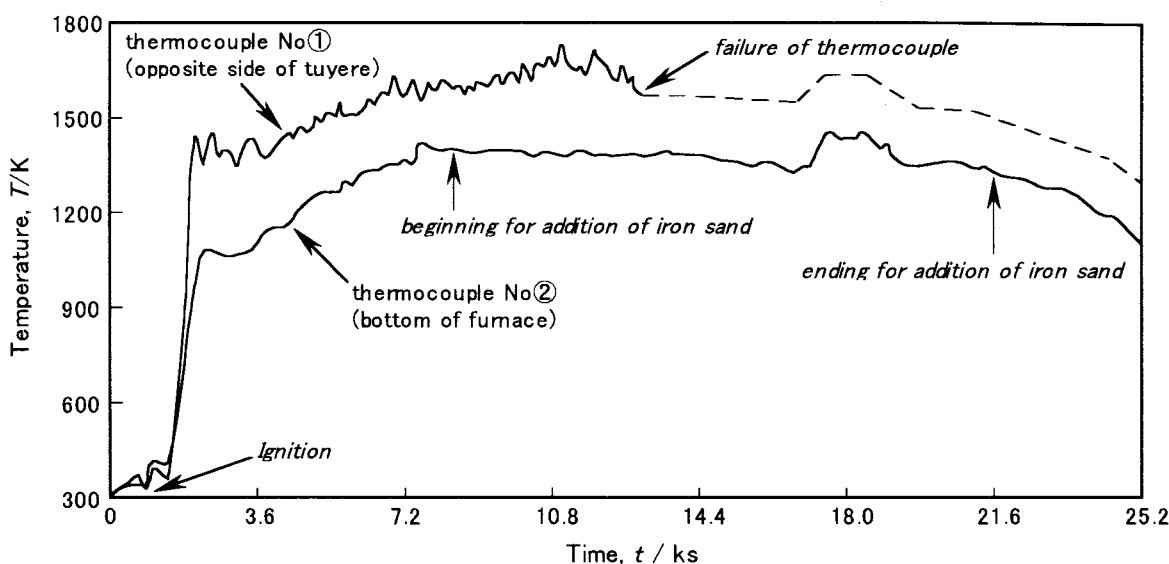


Fig. 7 Temperature profile of furnace in the second operation of Tataru-buki.

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⁽¹¹⁾。

4. 実験結果および考察

4.1 第一回製鉄操業

第1回目の操業における経過時間と炉内温度の関係を Fig. 6 に示した。火入れから約 9.6ks 後に炉口から火炎が立ち昇り、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。そこで図からもわかるように羽口対面における炉内温度 (No.1) が 1223K と若干低かったものの砂鉄を装入し製鉄操業を開始した。操業開始から 1.8ks 後炉内温度は 1338K に達し、観察窓からは砂鉄が半溶融状態で雪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 300s 後には羽口対面部の温度降下が始まったため、送風量の調整などによって温度の回復を試みるとともに、ノロ出しが可能であるか確認した。操業開始から約 4.8ks 後には炉底部の温度降下が始まり、さらに 1.8ks 後には羽口付近のスラグが付着し十分な送風ができない状況となった。さらに 3.0ks 間製鉄操業を続けて停止した。装入総量は砂鉄 6kg、貝殻粉 600g、木炭 30kg であるが、これより得られたケラはわずか 100g 程度で収率は 1.7% であった。第1回目操業の問題点を列記すると (1) 羽口角度が適切でなかったために炉内温度を均質に維持できなかった。(2) 火入れ後の予熱が不足しているとともに、木炭燃焼の定常状態目視確認と熱電対による炉内温度モニタリングが不適切であっ

た。(3) 一回当りの砂鉄と貝殻粉の装入量が炉体を持つ溶融能力を超えていたために十分に砂鉄が還元されなかったなどが挙げられる。これらの原因は相互に関係することではあるが、基本的には安定した炉内温度を維持し、炉体を持つ溶融能力を超えない範囲で砂鉄を装入することが大切であると結論された。木炭を熱源および還元剤として用い、砂鉄 (酸化鉄: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$) を還元して鉄を得るという理論的には簡単なたたら製鉄であるが、実際に炉を作製して製鉄操業を行ってみるといにしえ人が築き上げた技術の深さとその不思議さを感じざるを得なかった。

4.2 第二回製鉄操業

一回目の操業結果を踏まえ、第二回目の操業では以下の点を改善して実験に望んだ。(1) 羽口角度を炉体の水平方向に対して正確に 25° になるように再調整し、下部炉体においてはできるだけ温度が均質になるようにした。(2) 火入れ、炉体組み立て後十分な予熱をし、目視による木炭燃焼定常状態判定においても高温を意味する青白い炎を確認することを心掛けた。(3) 一回当りの砂鉄と貝殻粉の装入量を少なくして 220g とし完全に溶融するようにした。Fig. 7 は第2回目の操業における経過時間と炉内温度の関係を示したものである。火入れから約 7.2ks を経過したところから、炉底部の温度が約 1400K で安定していることを確認できたため、それから 1.2ks 間木炭の燃焼状況を注意深く観察して、砂鉄と貝殻粉を装入し製鉄操業を開始した。図から明らかなように 13.2ks 間の製鉄操業において、炉底部の温度は



Fig. 8 Over view of the iron bear (kera) lump obtained in this experiment.

安定した状態を維持していることがわかる。また、羽口対面部の温度（途中、熱電対が破損したが炉底部温度と連動するため推察可能）も 1600K 以上を維持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ことができる。

装入総量は砂鉄 8kg、貝殻粉 400g、木炭 40kg で 40 回にわたって装入作業を行った結果、ケラの総量は 2.16kg、スラグの総量は 1.36kg で収率は 27%であった。得られたケラの全体像を Fig. 8 に示した⁽¹²⁾。

4.3 ケラの顕微鏡組織観察

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. 9～11 に示した。腐食にはすべて 4%ピクリン酸アルコールを用いた。Fig. 9 は比較的肉薄のケラや肉厚なケラでもその外側にみられた代表的組織であり、一般にねずみ鑄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、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 (αFe) 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 (αFe) 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 ($\alpha\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C}$) 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。Fig. 10 は、比較的肉厚のケラの内部にみられた組織である。これは一般に白鑄鉄と呼ばれる組織である。図中の白い部分がセメンタイト相 (Fe_3C) である。このセメンタイト相中に斑点状にパーライト相が現れている共晶状の組織をレデブライトというが、白鑄鉄組織は、主としてこのレデブライト相とパーライト相（斑点状以外の部分）の混合組織からなっている。大量のセメンタイトが主体となった組織であるため、きわめて硬く脆い性質を有することが知られている。

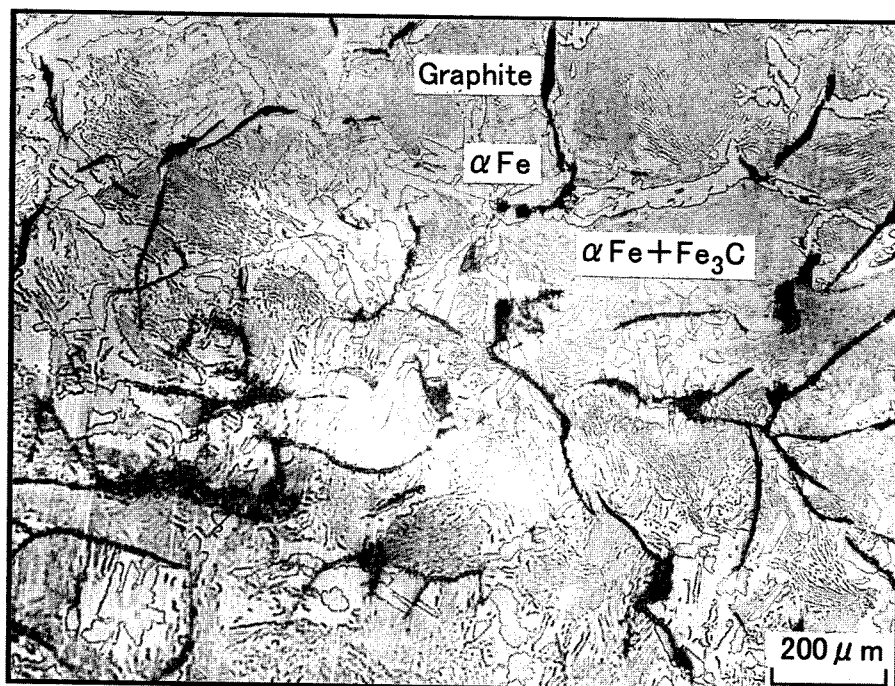


Fig. 9 Optical photomicrograph showing structure of gray cast iron in surface region of the iron bear (kera) obtained.

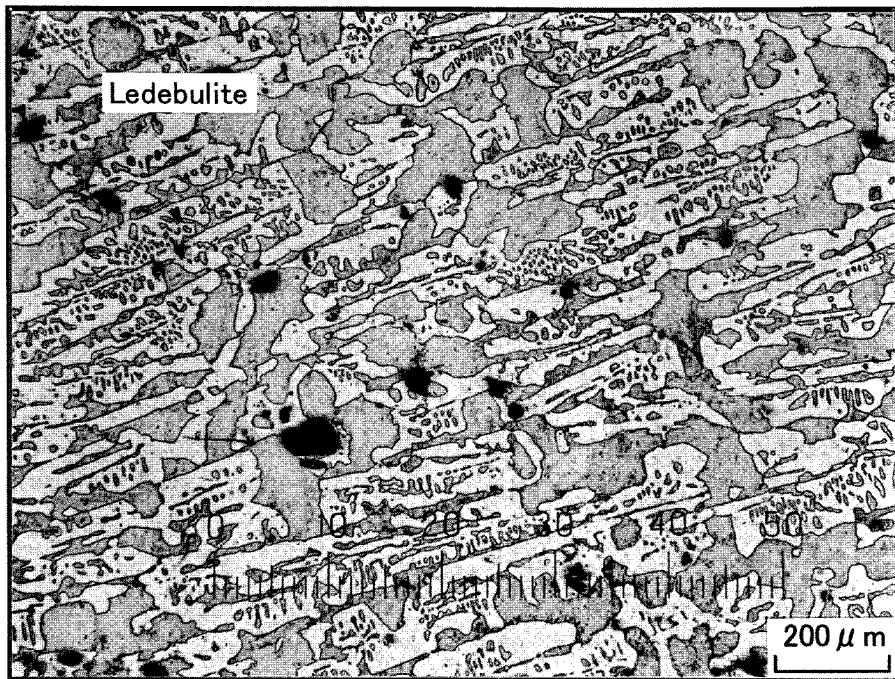


Fig.10 Optical photomicrograph showing structure of white cast iron in central region of the iron bear (kera) obtained.

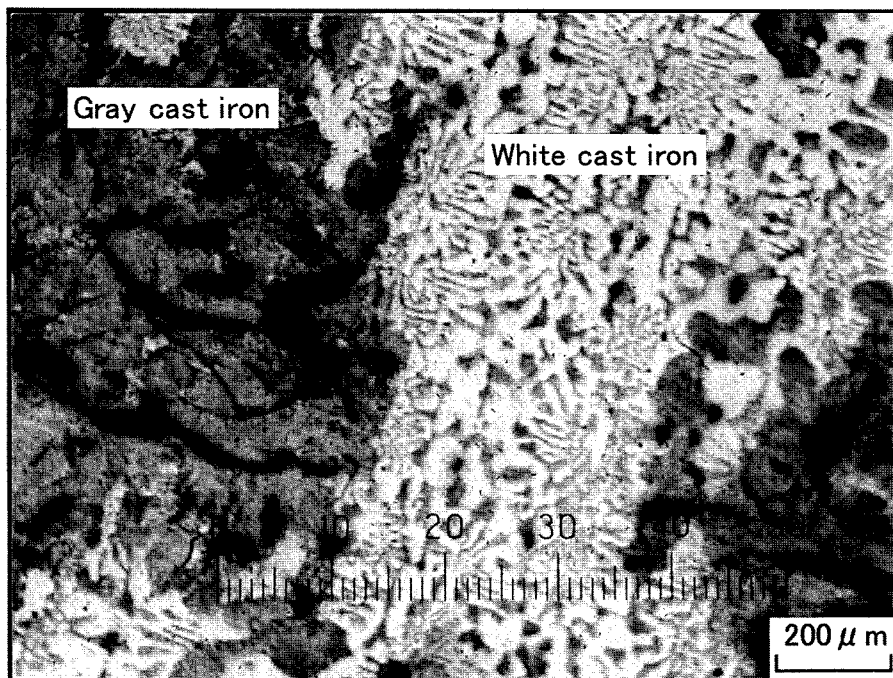


Fig.11 Optical photomicrograph showing structure of mottled cast iron in the iron bear (kera) obtained.

また、肉厚のケラにおいては上述したねずみ鑄鉄と白鑄鉄が混在する組織が観察できた。その結果を Fig. 11 に示す。これは斑鑄鉄と呼ばれるものである。鑄鉄を大きく分類するとねずみ鑄鉄、白鑄鉄、斑鑄鉄となるが、このような組織の相違は主に炭素、け

い素、冷却速度の変化によって起こることが知られている。一般に炭素とけい素の濃度が一定の場合は、冷却速度が遅いほどねずみ鑄鉄として凝固し、冷却速度が速くなれば白鑄鉄として凝固する。したがって、普通の凝固（完全溶湯からの凝固）の過程を経

てケラが生成されたとすれば、冷却速度の遅いと考えられる肉厚のケラの内部にねずみ鑄鉄が生成され、反対に冷却速度が速い肉薄のケラや肉厚のケラでも外側においては白鑄鉄が生成されると考えられる。しかし、本実験では反対の結果が得られた。これは、前述したようにたたら製鉄は基本的には低温で行われる半熔融状態での精錬過程で行われるため、少しずつ炉底部にケラが生成されるためであると考えられる。すなわち最初に凝固するものは冷却速度が速く、次第にケラの体積が増加するに従って、ケラの内部が保温材的役割を果たして外側ほど冷却速度が遅くなり斑鑄鉄からねずみ鑄鉄と変化しながら凝固したものと考えられる。

5. ま と め

たたら製鉄の原理を調査研究し、実際に小型たたら製鉄炉を作製して二回の製鉄操業実験を行った。一回目の操業実験の結果を検討し、二回目の実験では 2.16kg (収率 27%) のケラを得ることができた。以上のことから次のことが明らかとなった。

1. 炉内の温度を均質に保つためには羽口の角度の調整が極めて重要である。
2. 製鉄操業開始前には炉体の十分な予熱を行い、目視による木炭燃焼定常状態の判定においては、高温を意味する青白い炎を確認することが大切である。
3. 一回当りの砂鉄の装入量を調整して炉体のもつ熔融能力を超えないように十分に配慮することが重要である。
4. 本実験で得られたケラの組織は中央部から表面部にゆくにつれてねずみ鑄鉄、斑鑄鉄、白鑄鉄と変化した。これは、ケラの形成過程に冷却速度が強く影響しているためであると推察された。すなわち、安定した製鉄操業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、炉体の持つ熔融能力を十分に考慮して行うことが重要であると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に協力された材料工学科平成 12 年度 3 年次学生 (現: 4 年次学生) 高橋勇誠君、畑山政幸君、松橋 巖君、三浦浩之君、堀江展洋君に対し深く感謝します。また、炉体の羽口作製において材料の提供および加工に御協力頂いた材料工学科、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、清水金光技官に対し深く感謝致します。

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 頁。
- (2) 車 伝仁(2000):中国の古代鑄造と日本のたたら炉の誕生, ふえらむ, 5 巻, 3 号, 163 頁。
- (3) 永田和宏(1997):たたら大好き人間大集合, BOUNDARY, 13 巻, 6 号, 2 頁。
- (4) 名雪東彦(1997):日本鑄造工学会北海道支部会報, 110 号, 16 頁。
- (5) 島津邦弘(1996):山陽・山陰「鉄学の旅」, 中国新聞社刊, 28 頁。
- (6) 高橋一郎(1997):錬鉄が主要製品であった, BOUNDARY, 13 巻, 6 号, 32 頁。
- (7) 島根県文化財愛護協会編(1990):菅谷鑪, 42 頁。
- (8) 高橋礼次郎(1997):鉄が人間を造る, BOUNDARY, 13 巻, 6 号, 21 頁。
- (9) 永田和宏(1998):小型たたら炉による鋼製錬機構, 鉄と鋼, 84 巻, 10 号, 715 頁。
- (10) 横井時秀(1997):身近にあった製鉄原料, BOUNDARY, 13 巻, 6 号, 25 頁。
- (11) 宮本剛汎(1997):日本鑄造工学会北海道支部会報, 112 号, 13 頁。
- (12) 高橋勇誠, 畑山政幸, 松橋 巖, 三浦浩之, 堀江展洋(2001), たたら製鉄, 平成 12 年度材料工学科創造工房実習報告書, 7 頁。