

小型たたら炉による鋳（ケラ）と銑（ズク）の生成機構

永田 和宏*

Production Mechanisms of Bloom and Pig Iron by a Small "Tatara" Furnace

Kazuhiro NAGATA

Synopsis : The mechanisms of pig iron "Zuku" making and steel "Kera" making from iron sand and charcoal using small Tatara furnaces have been cleared. The "Zuku" making furnace has larger zone at high temperature than the "Kera" making furnace. For the "Zuku" making, iron sand falls down, stays longer in the high temperature zone and is reduced and carbonized in higher carbon steel than for the "Kera" making. The higher carbon steel becomes molten pig iron and the less carbon steel becomes bloom with 1.0 to 1.5 mass% C. From the results of small Tatara furnaces, the difference of reaction mechanisms of Tatara furnaces for "Kera" making and "Zuku" making in the Meiji period has been discussed.

Key words: Tatara furnace; pig iron; bloom; reaction mechanisms; carborization.

1. 緒言

我が国古来の製鉄法であるたたら製鉄は、6世紀後半に朝鮮半島から伝えられた。当初は箱形の炉であった。8世紀に入り、朝鮮半島から再び製鉄法が伝えられ、筒形の炉で銑鉄を製造する方法が伝わった。その後、たたら製鉄法は我が国独自の発展を遂げ、江戸中期には「永代たたら」あるいは「企業たたら」として技術的に完成の域に達した。その主生産物は銑と呼ばれる銑鉄であり、鍋や釜、刃物、蝶番や釘などの建材や民生品等が製造された¹⁾。明治期になってもたたら製鉄は島根県出雲地方を中心に我が国の鉄鋼生産を主要に担い、鋳と銑を半々に製造してきたが、西洋の近代製鉄法による輸入鋼に押されて、ついに大正12年に商業生産を中止した。その後、日本刀の材料としての玉鋼の需要に応ずるために一部で続けられ、さらに国策で「靖国鑪」（やすくにたたら）が操業されて第2次大戦終了まで続けられた。昭和52年に（財）日本美術刀剣保存協会が再び刀鍛冶の玉鋼に対する需要に応ずるため、「靖国鑪」の遺構を利用して「日刀保たたら」を再構築し現在に至っている。操業は、毎年冬季3、4回実施されている。「日刀保たたら」では「玉鋼」を造る目的から、その主な生産物は炭素濃度約1.5%の鋳塊である。この技術的解析は鈴木と永田²⁻⁴⁾が行っている。

たたら炉は湿気を防止する大規模な地下構造の上に造られており、長さ約3m、幅約1m、高さ約1.2mの箱型で、粘土で構築され、1操業ごとに壊される。長手方向の両炉壁下部にそれぞれ約20本の羽口（ほど穴）が並んでおり、空気が脈動的に吹込まれる。木炭を装入し炉の温度が上

がってから砂鉄と木炭を30分ごとに装荷する。68時間続けられ、最終的には砂鉄約10トンと木炭約10トンから約2.5トンの銑や鋳を生成する。

前報⁵⁾で著者は小型たたら炉による鋳の生成機構について次のように結論した。羽口上部で一酸化炭素ガスにより砂鉄が還元され、羽口前の約1350°Cの高温領域で木炭と接触して炭素を吸収・溶解し、固液共存状態で互いに溶着し粒になる。溶銑粒は羽口下に生成した熔融スラグ（ノロ）の溜まりに落下し懸濁する。粒は互いに溶着して沈降し、温度低下とともにオーステナイトを晶出して鋳塊を成長させる。溶銑粒の炭素濃度は生成する場所や反応時間により異なるので、鋳の炭素濃度は不均質になる。ノロは羽口上部で生成するが、還元生成した鉄粒とは別に炉下部に流れ落ちる。

俵⁶⁾は、半ば還元した砂鉄が羽口上部に堆積して「粟ぼうそう」と呼ぶ層を形成し、炭素を吸収し銑鉄の小粒となって滴下すると述べている。一方、山本⁷⁾は、砂鉄は降下しながらそのまま熔融し木炭と直接反応して鉄に還元され、急速に炭素を吸収し低融点の銑になるとしている。一酸化炭素ガスによる間接還元も一部ある。金属鉄は砂鉄還元過程で分離したノロ中に懸濁したまま降下し、鋳核に接した鉄粒は付着し、接触しない鉄粒はそのまま炭素を吸収しつつ降下し、溶銑となって炉外にノロとともに放出されるとしている。

このように、羽口上部で砂鉄が還元し羽口前あるいはその上部で木炭と反応して溶銑になる機構と、砂鉄の熔融還元により銑鉄が生成する機構が提案されている。また、スラグの生成についても溶銑粒と別の経路で生成される機構

と、溶銑粒ができる過程で分離生成する機構が提案されている。

俵⁶⁾はたたら炉を鋳と銑の専用製造炉としてそれぞれ「鋳押し」と「銑押し」に分類し、それらの特徴を調査した。また、山本⁷⁾は銑押し炉の特徴を、一般に炉体は狭く、羽口間隔は短く、羽口の口径を小さくして衝風が炉内にまで浸透するようにし、炉芯部が常に高温に保たれる構造になっていると指摘している。

本研究の目的は、わずか1.2mの高さの低炉で、木炭を燃料とし砂鉄を原料とするたたら炉が鋳塊と銑を造り分けていた事実に着目し、それらの生産にあたって製造技術をどのような区別していたかを明らかにすることである。このために、本研究では小型たたら炉を用いた鋳と銑の製造実験から炉の特徴およびそれらの生成機構を比較検討し、その違いを明らかにするとともに、明治期以降のたたら製鉄における「鋳押し法」と「銑押し法」の技術的な違いを考察する。

2. 実験

2.1 小型たたら炉の構築

Fig. 1(a)に銑製造用の小型たたら炉の外観を、(b)に構造図を示す。ロウ石レンガ(230×115×65mm)を積んだ箱型の炉である。レンガの接着は耐火モルタルを水で薄く溶いたものを用いた。平坦な地面に湿気防止のために鉄板を敷き、その上に建築用のブロックを敷き詰め、さらにその上にレンガで横2枚、縦3枚、高さ4枚の箱を作った。内法で横1

枚、縦2枚、高さ3枚になる。この部分を灰床とした。この箱の上に入口の広さをレンガ1枚分として“コ”の字型にレンガを積んだ。この位置を炉底とし、入口の右側炉壁にレンガ半分の大きさのノロ(スラグ)出口を作った。ここは通常耐火モルタルで塞いでおいた。入口1段目にレンガを置き、2段目には中央に鉄パイプ(通称1インチ管)を水平に、炉内に5cm程度入るように置いた。これを下羽口とした。この下羽口は後に取り外すので、耐火モルタルで固定した。左側の炉壁4段目には羽口(上羽口)として2本の鉄パイプ(通称1インチ管)を14cmの間隔で平行に斜め下に向けて設置した。この角度はレンガの断面(115×65mm)で決まる大きさで、水平面に対し0°と約15°で変化させた。レンガは“コ”の字型に炉底から8段積み、その上に箱型に6段積んだ。入口のレンガ8段分は作業後取り外すので耐火モルタルで固定しなかった。炉底から14段積んだレンガの上には建材用ブロックを箱型にさらに2段積み上げ、炉底から約1.2mの高さにした。送風は吹出口付きの家庭用電気掃除機を利用し、電圧を制御して送風量を調整した。塩ビのT型管で風を分割し、両方の羽口に送風した。羽口には覗き窓を設置し、内部を観察した。

酸素センサーと熱電対は炉壁右側の4段目と8段目の中央に壁から約5cm内部に先端が位置するように設置した。酸素センサーはZrO₂・15mol%MgOの一端閉管型固体電解質で、MgO管の中に入れて保護し、0.5mmφのPt電極を巻いた先端が炉内雰囲気に出るようにした。参照極にはシリカ管で空気を少量流した。R型熱電対をそのシリカ管

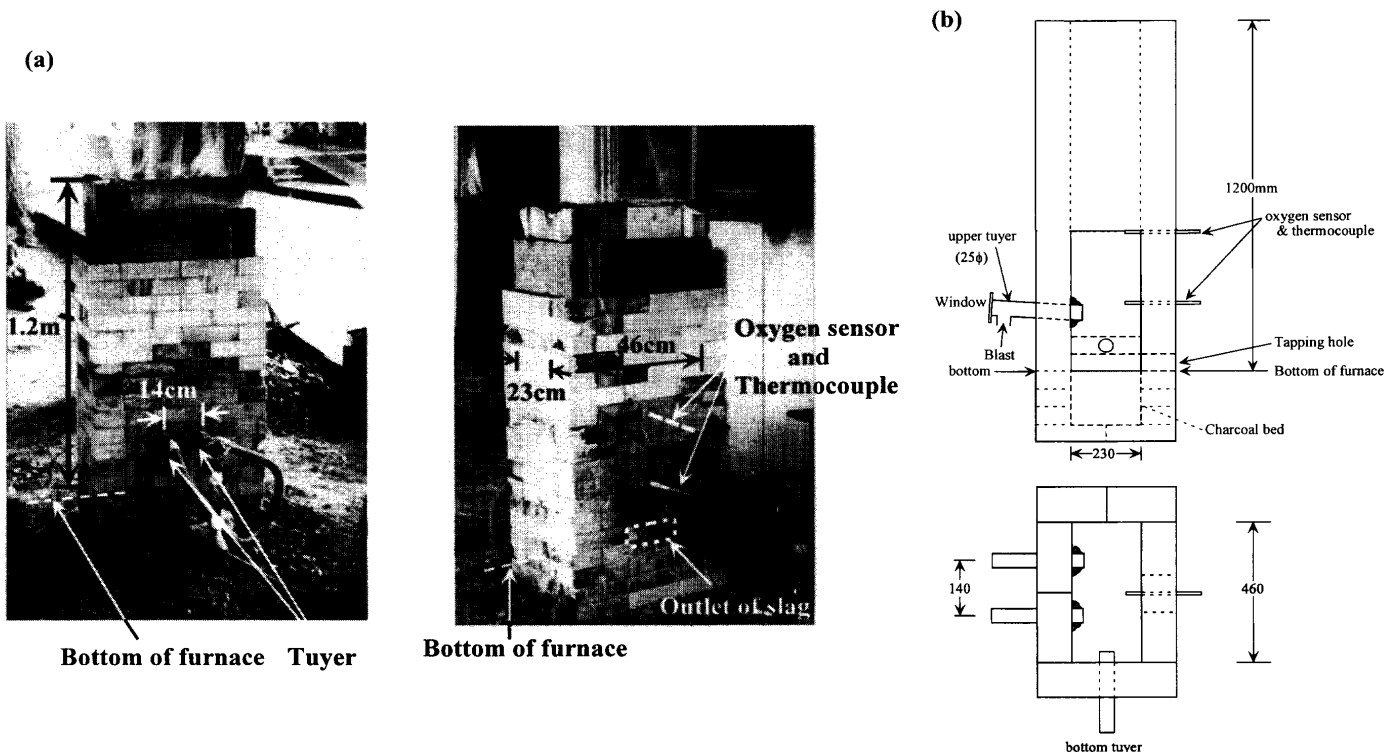


Fig. 1. (a) Picture of small Tataro furnace for pig iron production. (b) Construction of small Tataro furnace.

でバネを用いて電解質管奥底に押し付けて電極とし、そのPt側をリード線とした。さらに炉底にR型熱電対を設置した。したがって、温度は3箇所、酸素分圧は2箇所測定した。

鋳製造用の小型たたら炉は基本的に前報⁵⁾と同じで炉の内法断面積は奥行きレンガ1.5枚分であり、上羽口は1本である。また、炉底から8段目までがレンガで、その上には角型の鉄板のシャフトを置いた。ただし、灰床を設けたこと、ノロ出口を炉床位置の右炉壁中央に設置したこと、また、上羽口の角度を約15°および29°にしたことが異なっている。

鋳製造用炉では、羽口からレンガ3段上に砂鉄を採取する装置を設置した。これは内径約15mmのシャモット管を斜めに切った物で、長さ5cm程度の受け皿になっている。これを操業中に5分間炉内に差込み落ちてくる砂鉄を採取した。

2.2 操業方法

レンガで炉を構築した後、灰床を作るために木炭および木炭粉末を送風機で風を吹きつけながら燃焼させ、棒で燃焼している木炭を碎きながら突き固めた。灰床を堅く突き固めることにより生成した鋳や銑が沈むのを抑制できる。この作業は1時間程度で、同時に炉の乾燥を行った。灰床ができた炉底に細かく砕いた木炭を入れて御椀状に少し中央を窪ませた。

炉底に拳小の大きさに切り出した木炭を装荷し点火した。下羽口から送風して木炭を燃焼させ、さらに木炭を炉全体に装荷した。この時、上羽口はモルタルで栓をし、熱風によって加熱するのを防止した。灰床の温度が上がっているため、炉底温度は30分程度で約1200°C程度になった。送風量はいずれの炉の場合も木炭の燃焼速度が10分間に約10cm降下する程度に設定した。

本研究で用いた砂鉄はニュージーランドのタハロアの浜砂鉄であり磁力選鉱してある。この砂鉄はFe₃O₄の他、3.82%のSiO₂、7.65%のTiO₂をイルメナイト(FeTiO₃)として含むので、このままでは融点が高く溶けたノロが出口で固まってしまい排滓し難い。そこで砂鉄に珪砂(SiO₂)を2mass%混合した。

炉底温度が1200°Cを越したら、最初砂鉄1kgと木炭(銑製造の場合約2.5kg、鋳製造の場合約1.5kg)を10分間隔で2回装荷した。その後、羽口を上羽口に切替え、送風を継続するとともに、10分間隔で砂鉄1.5kgと木炭を装荷した。操業途中で時々ノロ出口を開けノロを流出させる。ノロが出ないときはそのままモルタルで蓋をしておく。砂鉄をすべて装荷し終えたら、そのまま送風を続け、羽口が見える程度まで木炭を燃焼させた。その間、木炭の燃焼に従い、入口のレンガを順次外した。

前報⁵⁾で述べたように、鋳製造の場合は、この後木炭を除去し、炉底にできている鋳塊を取出し、水中に投入し

Table 1. Operation conditions of a modified small Tataru and its products.

| Run No. | Iron sand (kg) | Silica sand (kg) | Char-coal (kg) | Product Weight (kg) | Temperature(°C) | | | O ₂ press.(atm) | | |
|-----------------|----------------|-------------------|----------------|---------------------|------------------|--------|-------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | | | Bottom | Tuyser | Shaft | Tuyser | Shaft | |
| 1 | 30 | 0.0 | 74.2 | Kera | 5.0 | 1091 | 1349 | 1159 | 3.5x10 ⁻¹¹ | 3.6x10 ⁻¹⁴ |
| 2 | 29.7 | 0.90 | 63.6 | Kera | 7.7 | 1074 | 1330 | 1123 | 7.6 x10 ⁻¹² | 1.5x10 ⁻¹⁴ |
| 3 | 30 | 0.90 ⁺ | 80.8 | Kera | 7.8 ⁺ | 1153 | 1316 | 1126 | 2.4 x10 ⁻¹² | 1.1 x10 ⁻¹⁴ |
| 4 | 30 | 0.45 | 51.6 | Kera | 6.9 | 1176 | 1385 | 1156 | 1.8 x10 ⁻¹¹ | 1.5 x10 ⁻¹³ |
| 5 | 30 | 0.45 | 67.4 | Kera | 6.0 | 1189 | 1416 | 1247 | — | — |
| 6 | 30 | 0.45 | 65.0 | Kera | 9.5 | 1247 | 1371 | 1148 | 2.4 x10 ⁻¹¹ | 1.0 x10 ⁻¹³ |
| 7 | 30 | 0.45 | 51.9 | Kera | 5.4 | 1211 | 1370 | 1140 | 7.3 x10 ⁻¹¹ | 1.6 x10 ⁻¹³ |
| 8 | 20 | 0.45 | 41.6 | Kera | 2.0* | — | — | — | — | — |
| 9 | 20 | 0.45 | 37.1 | Kera | 1.3* | — | — | — | — | — |
| 10 | 20 | 0.40 | 42.4 | Kera | 3.7 | 1288 | 1353 | 1064 | — | — |
| 11 | 20 | 0.60 | 37.4 | Kera | 4.2 | 1180 | 1345 | 1125 | — | — |
| 12 [‡] | 30 | 0.90 | 68.3 | Zuku | 5.7 | 1134 | 1381 | 1062 | 9.4x10 ⁻¹⁰ | — |
| 13 [‡] | 30 | 0.60 | 72.8 | Zuku | 8.6 | 1212 | 1319 | 1089 | 4.0 x10 ⁻¹¹ | 1.3 x10 ⁻¹³ |
| 14 [‡] | 30 | 0.60 | 70.9 | Zuku | 10.1 | 1048 | 1359 | 1056 | 1.3 x10 ⁻¹⁰ | 1.1 x10 ⁻¹⁴ |
| 15 [‡] | 20 | 0.50 | 46.8 | Kera | 5.5 | — | — | — | — | — |
| 16 [‡] | 30 | 0.60 | 65.6 | Kera | 8.0 | — | 1368 | 1082 | — | — |

Note: +:Silica sand was mixed with iron sand of 3kg in first 3 charges. #:Small Kera (1.5kg) was produced under large one (6.3kg). *:These Kera were separated in several pieces. ‡:The furnaces for Zuku production have 2 parallel tuyers and the other furnaces for Kera production have 1 tuyser. %:The angle of tuyser for furnace No.15 and 16 was about 29°, that for No.12 is horizontal and those for the other furnaces were 15°.

て冷却した。銑製造の場合は、操業途中にノロ出口から溶融銑鉄が一部流れ出し、残りは操業後、炉底に溜り固まったものと、ノロの中に分散した直径数mmの粒鉄が得られた。鋳塊は得られなかった。

採取した試料の組成分析は、ニュージーランド産砂鉄と羽口上部で採取した砂鉄およびスラグについて、T.FeとFeOは容量法、それ以外は蛍光X線法によった。また、銑鉄のCとSは燃焼法、他はプラズマ発光分光分析法(ICP)である。鋳の断面の組成分布測定はEPMAで行った。また、原料の砂鉄と羽口上部で採取した砂鉄は組成分析の他、XRDで化合物の同定を行った。

3. 結果

3.1 操業結果

Table 1に操業条件と生成物を示した。No. 1から11および15, 16は鋳製造実験、No. 12から14は銑製造実験である。No. 6と14の実験では砂鉄装荷終了後、窒素ガスを吹込んで反応を止めた。

3.2 温度と酸素分圧分布

炉シャフト部の温度分布は目測ではあるが、鋳生成炉では鋼製筒の下部で、急激に温度が低下し、レンガ上部5cmで赤熱状態でなくなり600°C程度にまで下がっていることが分かった。羽口上部450mmの位置での温度は約1150°Cなので、10cmの間に550°C温度低下していることが分かる。一方、銑生成炉の場合は羽口上部450mmの位置での温度は約1080°Cで鋳生成炉より低い。この炉では上部までレンガ構築なので、急激な温度低下は無い。これ以外の炉内条件は鋳生産の場合でも銑生産の場合でもほとんど同じであった。羽口前面の壁近傍で温度は約1350°C、酸素分圧は約1×10⁻¹¹atm、羽口上部450mmの位置では鋳生成炉で1×10⁻¹³~1×10⁻¹⁴atm、銑生成炉で

Table 2. Chemical composition of iron sand in Tajaroa of Newsealand and reduced iron sand sampled near 20cm over tuyer for “Kera” production.

| Sample | T.Fe | FeO | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | S | Reduction rate (%) |
|-----------|-------|-------|------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|--------------------|
| Iron sand | 56.90 | 28.16 | 1.44 | 3.82 | 3.56 | 3.39 | 7.65 | 0.003 | 0.0 |
| No.2-1 | 58.70 | 70.30 | 2.07 | 7.82 | 3.87 | 3.02 | 6.46 | 0.009 | 19.2 |
| No.3-1 | 58.37 | 62.54 | 2.01 | 5.26 | 3.58 | 3.22 | 6.79 | 0.005 | 29.3 |
| No.3-2 | 60.58 | 71.07 | 2.09 | 4.19 | 3.59 | 3.37 | 6.98 | 0.007 | 18.7 |
| No.4-1 | 57.40 | 51.32 | 2.34 | 5.49 | 3.51 | 3.26 | 6.27 | 0.006 | 35.1 |
| No.4-2 | 58.51 | 71.45 | 2.24 | 6.68 | 3.68 | 3.33 | 6.78 | 0.008 | 34.3 |
| No.5-1 | 58.79 | 67.06 | 2.10 | 5.17 | 4.10 | 3.33 | 7.00 | 0.012 | 34.2 |

Note: 2 mass% of silica sand was mixed with the original iron sand. The compositions of P₂O₅ and MnO in the original iron sand are 0.375 and 0.63 mass%, respectively. Reduction rate is defined as % of oxygen removed from iron sand. T.Fe is composed of Fe₂O₃ and FeO for original iron sand and of metallic iron and FeO for reduced iron sand. TiO₂ combines with FeO as ilmenite FeTiO₃.

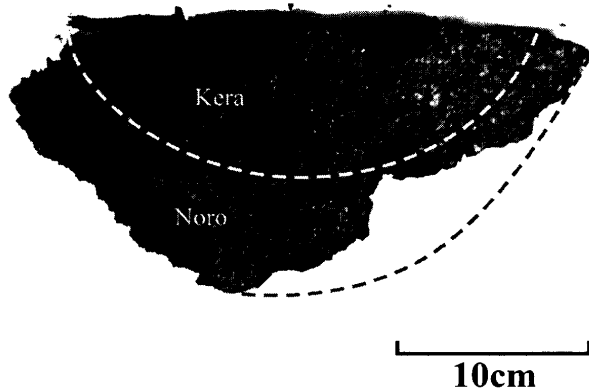


Fig. 2. Shape of bloom “Kera” produced on slag “Noro” for Run No. 6.

$1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-15}$ atm となっており十分還元が進行する条件にある。この羽口上部の酸素分圧について前報⁵⁾では 1×10^{-5} atm 程度と報告したがこれは鋼製筒とレンガの隙間から空気が入っていたためと考えられる。

3.3 羽口上部における砂鉄の還元率

鋳生成の場合について、羽口上部 200 mm の位置で採取した砂鉄の組成を Table 2 に示した。採取した砂鉄は FeO と金属鉄にまで還元されており、その還元率を砂鉄から除去された酸素原子の割合で示した。イルメナイトを差し引いて還元率を計算すると、この位置で約 30~35% 程度が還元されていることが分かる。木炭の燃焼速度が 10 cm / 10 分なので、30 cm を 30 分で降下する間にこの程度還元する。羽口近辺での試料採取は、アルミナ製サンプラーがスラグと反応して溶けてしまい失敗した。羽口に設置した窓からは、還元された砂鉄が木炭表面に落下し、炭素を吸収して粒状の溶銑になるのが観察された。

銑生成の場合は砂鉄の採取は行っていないが、羽口からの観察では鋳生成の場合と同様な現象を観察した。羽口上部 450 mm の位置では約 1080°C で少し低いが、シャフト部の温度分布は鋳生成炉より高い位置まで高温に保たれているので、還元帯は広がっていると考えられる。

3.4 鋳と銑の生成

No. 6 の炉の急速冷却実験で取出した鋳の形を Fig. 2 に、また No. 2, 5, 10 の鋳断面を Fig. 3 に示した。これらから分かるように、鋳塊は羽口直下に平面を上にした凸レン

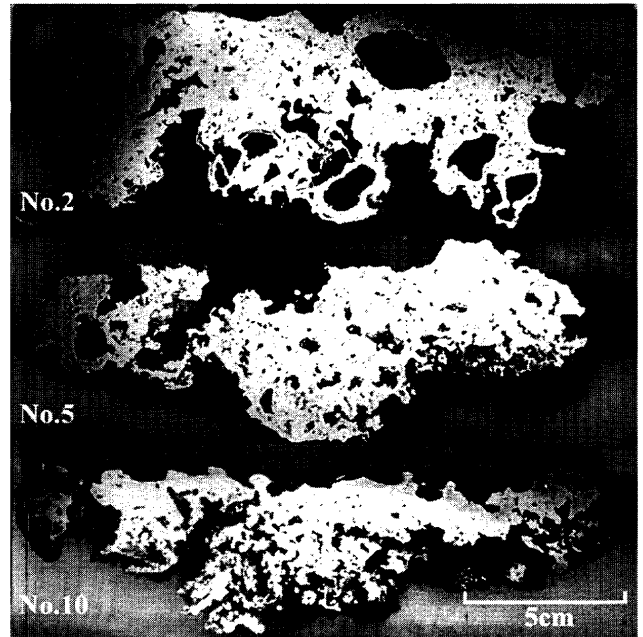


Fig. 3. Cross sections of “Kera” for Run No. 2, 5 and 10.

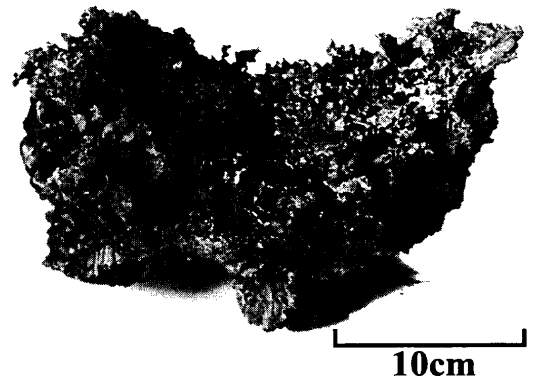


Fig. 4. Shape of slag “Noro” for pig iron “Zuku” production, Run No. 14.

ズ状に生成していて、その下に緻密なスラグが固っていた。本実験で用いた砂鉄は TiO₂ が多く SiO₂ が少ないので、融点を下げるために珪砂を加えた。No. 3 の実験では、最初に融点の低いノロを作る目的で最初の 3 kg の砂鉄にだけ珪砂 0.90 kg を混合した。結果は最初に入れた砂鉄からできた鋳塊と珪砂を入れない砂鉄を用いた鋳塊が上下に分離してしまった。これは後に生成した融点の少し高いノロが最初にできた鋳塊の下に流れ込まず、その上で凝固して新たに鋳塊を作ったためである。

以上から、羽口直下に鋳塊が蓋をするように生成するため、熱が炉下部にゆかず、その下に流れ込んだノロが緻密に固まって、成長する鋳塊を少しずつ押し上げたことが分かる。

一方、No. 13 と 14 の銑生成の場合は溶銑とともにノロが出口から流出した。炉の急速冷却実験で得られたノロは羽口下にできており、Fig. 4 に示すように気泡を多く含んで崩れ易く、大小様々な大きさの粒鉄が懸濁していた。ま

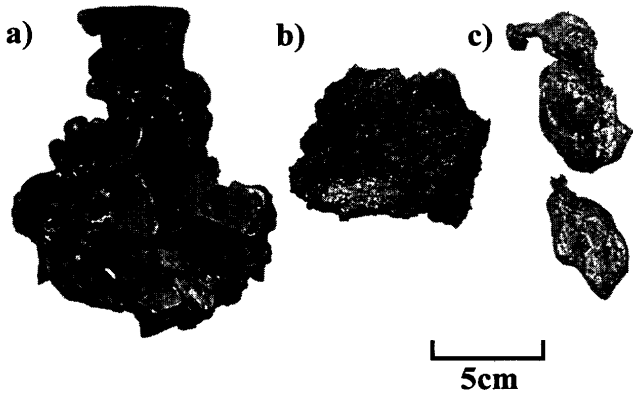


Fig. 5. Pig iron “Zuku” a) and b) produced in the bottom of furnace and c) flowed out from the furnace of Run No. 14.

Table 3. Chemical composition of “Kera”.

| No. | Position | C | Si | Mn | Ti | S | P |
|-----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | 1 | 1.773 | 0.005 | 0.000 | 0.006 | 0.000 | 0.036 |
| | 2 | 0.936 | 0.009 | 0.000 | 0.014 | 0.003 | 0.033 |
| | 3 | 1.436 | 0.019 | 0.000 | 0.051 | 0.079 | 1.324 |
| | 4 | 0.905 | 0.009 | 0.000 | 0.018 | 0.004 | 0.022 |
| | 5 | 1.059 | 0.027 | 0.000 | 0.045 | 0.007 | 0.279 |
| | Mean | 1.222 | 0.014 | 0.000 | 0.027 | 0.019 | 0.339 |
| 5 | 1 | 0.142 | 0.000 | 0.000 | 0.088 | 0.035 | 0.549 |
| | 2 | 0.879 | 0.012 | 0.000 | 0.009 | 0.006 | 0.032 |
| | 3 | 0.554 | 0.030 | 0.000 | 0.020 | 0.016 | 0.082 |
| | 4 | 0.177 | 0.000 | 0.000 | 0.063 | 0.133 | 0.828 |
| | 5 | 0.241 | 0.020 | 0.000 | 0.008 | 0.000 | 0.311 |
| | Mean | 0.399 | 0.012 | 0.000 | 0.038 | 0.038 | 0.360 |
| 10 | 1 | 0.239 | 0.021 | 0.000 | 0.031 | 0.064 | 1.363 |
| | 2 | 0.244 | 0.030 | 0.000 | 0.007 | 0.031 | 0.335 |
| | 3 | 0.393 | 0.009 | 0.000 | 0.012 | 0.003 | 0.021 |
| | 4 | 0.073 | 0.011 | 0.000 | 0.013 | 0.000 | 0.051 |
| | 5 | 0.164 | 0.022 | 0.000 | 0.014 | 0.101 | 0.249 |
| | Mean | 0.223 | 0.019 | 0.000 | 0.015 | 0.040 | 0.404 |

Position: 1:one edge, 2:surface center, 3:center, 4:bottom, 5:the other edge.

Table 4. Chemical composition of “Zuku”.

| No. | Time | C | Si | P | S | Ti |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 14-1 | 13:55 | 3.66 | 0.077 | 0.210 | 0.018 | 0.22 |
| 14-2 | 14:10 | 3.79 | 0.078 | 0.194 | 0.019 | 0.13 |
| 14-4 | 15:20 | 2.73 | 0.029 | 0.187 | 0.017 | 0.044 |

た、炉底に銑が溜まっていた。すなわち、スラグは炉底まで溶融していたことが分かる。これらの銑を Fig. 5 に示した。

3.5 鋳と銑の成分組成

Table 3 には鋳の上部表面近傍(2)、中央部(3)、下部(4)および端2箇所(1,5)の組成を示した。分析はEPMAで行った。場所によって組成が大きくばらついているが、中央部から上部表面にかけて炭素濃度が高くなる傾向があることが分かる。これは操業中に炉の温度が次第に高くなるため、高温の還元・浸炭領域が広がるためである。

Table 4 には流出した銑の組成を示した。炭素濃度は操業の初期は3.66~3.79%であるが、1時間25分後では2.73%と減少している。この現象も操業中に炉の温度が次第に高くなることから、温度が高くなると鉄-炭素合金の垂共晶液相線の炭素濃度が低くなることによるものである。1360°Cで液相線炭素濃度は2.3%であり、銑の炭素濃度は0.4%程度高くなっていることが分かる。

Table 5. Chemical composition of slag, so called “Noro” for making pig iron

| No. | Time | T.Fe | M.Fe | FeO | TiO ₂ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | S |
|------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|-------|
| 6-1 | 14:15 | 38.83 | 0.73 | 44.37 | 11.93 | 16.65 | 7.82 | 5.81 | 4.94 | 0.057 |
| 6-2 | 15:22 | 41.90 | 0.56 | 46.48 | 10.64 | 15.10 | 7.13 | 5.12 | 4.38 | 0.049 |
| 6-3 | 16:10 | 21.71 | 2.54 | 22.83 | 16.69 | 25.14 | 11.26 | 8.40 | 8.07 | 0.032 |
| 6-4 | 16:50 | 39.02 | 6.16 | 38.38 | 6.52 | 23.67 | 7.25 | 4.24 | 5.25 | 0.059 |
| 14-1 | 13:55 | 34.54 | 8.25 | 28.69 | 15.92 | 18.56 | 11.19 | 6.63 | 3.82 | 0.018 |
| 14-2 | 14:10 | 37.64 | 12.57 | 28.81 | 15.82 | 16.99 | 10.31 | 6.58 | 3.68 | 0.018 |
| 14-3 | 14:45 | 29.80 | 7.58 | 25.73 | 16.44 | 21.49 | 12.47 | 7.16 | 4.14 | 0.016 |
| 14-4 | 15:20 | 34.26 | 14.38 | 22.08 | 15.95 | 19.01 | 11.28 | 6.73 | 3.83 | 0.019 |
| 14-5 | 15:48 | 30.44 | 5.93 | 29.60 | 16.77 | 21.05 | 11.91 | 6.98 | 3.99 | 0.017 |
| 14-6 | 16:05 | 37.80 | 13.58 | 26.72 | 14.46 | 18.99 | 10.64 | 6.03 | 3.37 | 0.019 |

Note: For run No.6, the start of charging iron sand was 12:32 and the end was 16:50. For run No.14, the start of charging iron sand was 12:30 and the end was 15:55. TiO₂ exists as ilmenite.

鋳の場合はSiとSの濃度はそれぞれ0.012~0.019 mass%、0.019~0.040 mass%と高炉に比べて非常に低いが、銑の場合はSiが0.029~0.078 mass%と少し大きくなっている。Pは鋳の場合で0.339~0.404 mass%、銑の場合で0.187~0.210 mass%である。前報⁵⁾と比べるとSとPの濃度は今回の方が一桁大きい。

3.6 ノロの成分組成と時間変化

Table 5に吹き止めを行った鋳生成(No. 6)と銑生成(No. 14)におけるスラグの組成を時間変化とともに示した。両者を比べると、銑生成の場合はノロ中に粒鉄が多く懸濁していることが分かる。また、FeO濃度が低い。これはTable 3と4を比較すると分かるように粒鉄中の炭素濃度が高いためである。時間に対する変化はほとんど無い。

一方、鋳生成の場合は、粒鉄が次第に増加し、逆にFeO濃度は低下しSiO₂濃度が増加する傾向にある。これは、銑生成の場合はノロが炉底まで溶融しているのに対し、鋳生成では鋳塊の下にノロが流れ込み凝固して鋳塊を押し上げるため次第に羽口に近いノロが流出するようになる。また、鋳塊の上部ほど炭素濃度が高いことから次第に増加する溶銑粒との反応でFeO濃度が低下した。

3.7 羽口角度の影響

銑生成でNo. 12は羽口の角度を0°すなわち水平に置いた場合である。ノロは流出せず、炉底温度は次第に低下し操業半ばで1100°C以下になった。融点を下げるために珪砂を加えたが効果はなかった。銑は生成していたが流出は無く、収率も悪い。No. 13と14は羽口の傾斜を15°にした。No. 13の炉底温度は操業の間1200°C以上であり、No. 14は熱電対が炉底の灰床の中に埋まっていたので低い温度が記録された。ノロは両者共砂鉄10kgを装荷した時点から盛んに流出し、銑も流出した。このように、風が羽口より下方に流れるようにする事が重要である。

一方、鋳生成では、No. 16は羽口の角度が29°で、他の場合は15°である。Table 1で明らかなように顕著な差は無い。

4. 考察

4.1 鋸と銑の生成機構

鋸と銑の生成機構は明らかに異なっている。鋸塊は羽口下、ノロの上部に生成し、銑はノロの下部、炉底に生成する。炉急冷後の鋸塊下のノロは緻密で非常に硬く、銑の上にあるノロは銑鉄粒と気泡を多く含み崩れ易い。

羽口から吹込まれた空気は羽口前の木炭を燃焼して漏斗状に上昇する。木炭はこの燃焼領域で消費されるため、羽口前に向かって降下する。砂鉄も木炭とともに降下するので、還元した砂鉄は羽口前で炭素を吸収して溶融銑鉄粒となり、羽口下の溶融したノロに落ち懸濁する。

鋸生成の場合、ノロ中に懸濁した溶融鉄粒の炭素濃度はばらついているが、平均濃度は最大1.5%程度である。これらが互いに溶着し温度の低下に伴って固相を晶出し鋸塊が次第に成長する。ノロは鋸塊全体を被い酸化を防止し保温している。溶融鉄粒は鋸塊上部に溶着しこれを成長させ、ノロは鋸塊の下に流れ込んで固まるので鋸は下に凸状の御椀型に成長しながらノロによって押し上げられる。

銑は溶融したノロ中に粒状で懸濁し、操業初期の平均炭素濃度は約3.7%ある。したがって温度が低下しても約1200°Cまで溶融状態にある。炉の温度が上昇すると炭素濃度は2.73%と低くなるが1300°C以上であれば液体状態にあり、さらに温度が低下して固液共存状態にあっても溶融状態で流出する。

溶銑粒は互いに溶着し成長して溶融ノロ中を降下する。一方、溶銑中の炭素とノロ中の酸化鉄の反応により発生するCOガスの上昇によってノロは攪拌され、熱はノロ全体に伝えられる。したがって、ノロは溶融状態に保たれる。そして溶融した銑は炉底に溜まり一部が流出する。このように、溶融銑鉄粒は熱をノロ全体に伝達して溶融状態に保つ。

本研究で用いた鋸生成炉と銑生成炉の違いは、羽口の本数が前者で1本、後方で2本である。また、炉上部が前者では鉄板で、後方ではレンガで作られている。この違いが羽口前で形成される銑鉄粒中の炭素濃度にどのように影響するかを考察する。

銑生成炉の断面積は鋸生成炉の1.5倍であり羽口を並列に2本設置したが、両方の炉とも木炭の燃焼速度を同じにしたので炉内の単位体積あたりの平均発熱量は同じである。また、銑生成炉の羽口1本辺りの送風量は鋸生成炉の0.75倍になる。この事は吹出す風の速度が0.75倍になり炉内への吹込みが浅くなるが、2本の羽口間には高温領域が広がる。しかし、羽口前面の壁近傍で温度は約1350°C、酸素分圧は約 1×10^{-11} atmでありこれはどちらの炉でもほとんど同じであった。この条件でのCO:CO₂は約9:1である。この条件は砂鉄が還元する状態にあるが、ガスと平衡

Table 6. Dimensions of Ataidani Furnace for pig iron (Zuku) production and Tonami Furnace for bloom (Kera) production in Meiji period.

| Name of Tataru | Furnace | | | | Tuyer | | | | |
|----------------|---------|---------------|----------------|--------|----------------|-------|--------------------|------------------|------------------|
| | Length | Width (upper) | Width (middle) | Height | Height (outer) | Angle | Number (both side) | Interval (outer) | Diameter (inner) |
| Ataidani | 2485 | 635 | 697 | 1150 | 127 | 9-10° | 16x2 | 145 | 6x3 |
| Tonami | 2967 | 860 | 800 | 1120 | 218 | 26° | 19x2 | 136 | 24x9 |

する鋼中の平衡炭素の活量は0.01程度であり、銑鉄ができる状態にはない。炉内温度1350°Cで液相が生成し固液共存状態になる酸素分圧は 1×10^{-16} atmであり、1400°Cで 2×10^{-15} atmである。小型たたら炉ではこの状態を作ることにはできない。日刀保たたら炉や過去のたたら炉でもこの状態はできないであろう。したがって、たたら炉の羽口前では固体炭素との接触によってのみ浸炭が進行し、羽口前で炭素を吸収し銑鉄になる。

羽口上部450 mm位置の温度は前述したように砂鉄が還元する状態にある。銑生成炉はシャフト部をレンガで構成し鋸生成炉より保温されているにもかかわらず約70°C低い。また、酸素分圧も1桁低い。これは砂鉄の炭素還元により吸熱反応が起きているためである。すなわち、 $\text{FeO(s)} + \text{CO(g)} = \text{Fe(s)} + \text{CO}_2\text{(g)}$ とソリュション反応 $\text{CO}_2\text{(g)} + \text{C(s)} = 2\text{CO(g)}$ である。この状態で平衡する炭素の活量は銑生成炉で約0.3であり、鋸生成炉で約0.2である。これらの値はそれぞれ1330°Cと1380°Cでの固液共存状態における活量に等しい。したがって、羽口前に到達するまでに砂鉄の還元と浸炭が進行するが、銑生成炉では羽口上200 mmで採取した砂鉄の還元は30%程度であり、ほとんど浸炭していなかった。これは炉体上部の鉄板シャフト部で急速に温度が低下しているため、砂鉄の還元領域が狭く羽口前に到達した鉄粒はほとんど浸炭しない。一方、銑生成炉はすべてレンガで構築されており、高温領域が上部まで広がっているため砂鉄の還元領域も炉体上部に広がっている。したがって、羽口前に到達するまでに浸炭が十分進行する。浸炭が進行し、鉄-炭素系状態図から分かるように、鉄粒中の炭素濃度が高いほど低い温度で液相が生成する。すなわち、羽口前に到達した鉄粒中の炭素濃度が高いとより低い温度で溶解し炭素濃度の高い溶融銑鉄粒になる。

4.2 明治期における鋸押炉と銑押炉の形態

俵⁶⁾は鋸押炉として伯耆国日野郡阿毘縁村砥波鑪を、銑押炉として石見国那賀郡下松山村價谷鑪を調査した。これらのたたら炉ではどのように鋸と銑を造り分けたのであろうか。炉内の還元・吸炭領域の大きさと砂鉄の炉内滞留時間から考察する。

まず、たたら炉の形状を比較する。Table 6に示すように、炉の特徴は銑押炉では炉壁上部が少し狭まっており、鋸押炉では逆に上部に少し広がっている。羽口の位置は前者が後方より低く、傾斜は緩やかになっており、その径は前

Table 7. Results of operation for Ataidani Furnace and Tonami Furnace.

| Name of Tataru | iron sand (ton) | | Charcoal (ton) | | Operation time (hrs) | pig iron (ton) | Bloom (ton) | Steel* (ton) |
|----------------|-----------------|-------|----------------|--------|----------------------|----------------|-------------|--------------|
| | Mountain | Coast | Pine | Others | | | | |
| Ataidani | 2.775 | 15.3 | 1.125 | 16.785 | 85.58 | 4.5 | 0.3375 | — |
| Tonami | 12.825 | — | — | 13.5 | 66.45 | 1.575 | 1.0125 | 1.125 |

* : Good quality steel in bloom (Kera)

Table 8. Compositions of pig iron and bloom produced by Tataru furnaces in Meiji period.

| Compositions(wt%) | C | Si | Mn | P | S | Ti |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pig Iron (Ataidani) | 3.63 | Trace | Trace | 0.10 | 0.003 | Trace |
| Bloom * (Tonami) | 1.32 | 0.04 | Trace | 0.014 | 0.006 | Trace |

* : Best quality in the bloom.

者の方がより細くなっている。送風量は送風装置の容量が不明なので直接比較できないが、鋳押炉では天秤輪の踏み数は毎分27~40回であり、銑押炉では毎分32~49回と多くなっている。しかし、送風圧は大気圧との差で水柱高さ30mmと同じである。これらの炉の構造と送風方法を比較すると、銑押炉では炉の幅を狭くし送風が炉の中にまで吹込まれるようにして熱が溜まるようにしている。また、これは高温の還元領域を炉の上部にまで広げることになる。

4.3 「鋳押し」と「銑押し」の操業方法の相違

還元・吸炭領域の制御に関し、鋳押しと銑押しの操業方法の違いを依⁶⁾の研究から検討する。Table 7に操業結果を、Table 8に銑と鋳の組成を示す。

砂鉄と木炭の装荷方法について次のように述べている。鋳押炉では長辺の炉壁から150mm辺りを両側の壁に沿って2列に種鋤（木製のスコップ）で砂鉄を装荷し、すぐに箕で木炭をその上加える。一方、銑押炉では同様に2列で装荷するが、まず炉に大塊の木炭を装荷し、さらにその間隙を小塊または粉炭で充填し、ツクロイ鋤（木製のスコップ）で木炭の上面をたたいてこれを平らにならす。そして、その上に砂鉄を装荷する。このように、鋳押炉では木炭の間隙を通して砂鉄が比較的早く降下するが、銑押炉では木炭を密に充填することによって砂鉄は木炭の燃焼速度に従って降下し、炉内の滞留時間を長くしている。また同時に熱が炉内に籠るようにもしている。

木炭について、鋳押法では雑木から製造したものを用いるが、銑押炉では火入れ開始から3時間まで松炭を使用する。これは質が柔軟で燃え易く通風を良くするので炉熱を容易に上げることができる。この後は雑木炭を用いる。このため鋳押法では4時間40分後に初ノロが出ているが、銑押炉では3時間15分で初ノロが出ている。これは銑押炉の方が早く温度が上がっているためである。

砂鉄は前報³⁾で述べたように、鋳押法では最初、赤小鉄（あこめ）と称する Fe_2O_3/FeO 比（酸化度）の大きい小粒の砂鉄を用い、次に籠り小鉄（こもりこがね）、真砂小鉄（まさこがね）と順次酸化度の低い砂鉄を用いる。赤小鉄

は還元し易い砂鉄であると言われている。一方、銑押法では最初の2回砂鉄を精洗したときの洗い滓を装荷する。これは、酸化鉄が少なく珪酸分が多いため適度なノロを造ることができる。その後、浜小鉄に山小鉄や洗い滓を調合したものを装荷する。この砂鉄は砂鉄焙焼炉で前もって乾燥した。

銑押炉では、熔融した銑をノロとともに炉下部の湯地と呼ぶ穴から流し出し、生成する鋳塊を引出して成長しないようにする。一方、鋳押炉では前報⁴⁾で指摘したように鋳塊の形状から推定して、鋳塊と炉壁の間を熔融した銑とノロが流れ落ちる。すなわち、銑は鋳塊に固着してそれを大きくし、ノロは炉壁を溶解して鋳塊の成長を助け厚く幅広にするとともに炉底に熱を伝える。したがって、鋳押炉では炉壁の侵食は銑押炉より早く、銑押しは1昼夜操業が長い。

5. 結言

小型たたら炉による鋳塊と熔融した銑の生成機構の違いを次のように結論した。砂鉄の還元および鉄粒の浸炭領域を前者で狭く後者で広くすることにより、鉄粒中の炭素濃度が前者で低く後者で高くなる。鉄粒は羽口前の高温域で木炭と反応して吸炭し熔融銑鉄粒になり、羽口下の熔融ノロ中に落ちて懸濁する。その際、羽口上部で生成した炭素濃度の低い鉄粒は、羽口前で炭素濃度の比較的低い熔融銑鉄粒になり、炉下部で鋳塊に接触して固相を晶出し鋳塊を成長させる。ノロは鋳塊の下に流れ込み凝固して鋳塊を押し上げる。一方、羽口上部で生成した炭素濃度の高い鉄粒は、羽口前で炭素濃度が高く凝固温度の低い熔融銑鉄粒になる。熔融銑鉄粒は炉下部でノロと反応してCOガスを発生して攪拌し、熱を全体に伝えてノロの凝固を防止する。熔融銑鉄は炉底に溜り炉外に流出する。

以上の小型たたら炉の結果を基に鋳押炉と銑押炉の反応機構を考察した。銑押炉では送風量を多めにし、さらに炉内部にまで風を吹き込むことにより炉中心部に広い高温の還元・浸炭領域を設け、かつ木炭を密に充填することによって砂鉄の炉内滞留時間を長くし浸炭を十分行わせる。その結果、羽口近傍に到達した炭素濃度の高い鉄粒は木炭との接触により吸炭し、炭素濃度が高い熔融銑鉄粒になり炉底に溜まると同時にノロに熱を伝える。一方、鋳押炉では、羽口の直径を大きくして送風速度を低めに押さえ、羽口上部に比較的狭い還元・浸炭領域を設け、かつ木炭を粗に装荷して砂鉄の滞留時間を短かめにしている。その結果、羽口前で木炭と反応し生成した熔融銑鉄の炭素濃度は低くなり、鋳塊と炉壁の間に流れ込んだ熔融銑鉄粒が鋳塊と接触して固相を晶出し成長させる。

なお、本研究の組成分析は新日本製鐵(株)の協力を得て行われた。ここに深く感謝する。また、本研究は平成9年

度～平成10年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）により行われた。

文 献

- 1) I.Takahashi: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **1** (1996), 854.
- 2) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 905.
- 3) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 911.
- 4) K.Nagata and T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 64.
- 5) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 715.
- 6) 俵 国一：明治に於ける古来の砂鉄製錬法，丸善，東京，(1993).
- 7) S.Yamamoto: *Tatara-Kenkyu*, No.2, (1959), 1.