

たたら製鉄炉地下構造における小舟の役割

永田 和宏*・羽二生 篤*・鈴木 卓夫*²

Role of “Kobune” in Underground Construction of Tataru Furnace

Kazuhiro NAGATA, Atsushi HANIU and Takuo SUZUKI

Synopsis : The Tataru is the traditional iron- and steelmaking process in Japan. The box type furnace is about 1m width, 3 m length and 1.2 m height. The process produces steel bloom and pig iron from iron sand and charcoal. The furnace is built on the charcoal bed in a big underground construction which is separated into upper and lower parts by a thick clay layer, “Kobune Kawara”. The lower part is a drainage. The upper part has a charcoal bed, “Hondoko”, with twin caves, “Kobune”, on the both sides. The “Kobune” keeps its temperature lower than 41°C and humidity higher than 89%, that is, $4.8 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ in terms of water vapor concentration, during “Tataru” operations. The heat flow and temperature distribution around the furnace during operation was numerically simulated. The water vapor in “Hondoko”, hearth and “Doi” flows to “Kobune” according to heat flow and disperses to the surroundings. Further the historical development of underground construction is discussed.

Key words: Tataru; Kobune; temperature; humidity; heat flow.

1. 緒言

たたら製鉄は炉高約1.2mの粘土で造られた箱型の炉である。砂鉄と木炭を原料とし、炉壁両面の下部にそれぞれ設置した合計40本の羽口から空気を吹込み、銚（ずく）と鉾（けら）を製造する。炉は3昼夜の操業後取り壊され、次の操業のために再び築炉される。Fig. 1に「日刀保たたら」製鉄炉の構造を示す。この炉は第二次大戦終結まで操業していた「靖国鑪（たたら）」の地下構造を補修してその上に昭和52年に復元された。地下構造は深さ273 cm（9尺）、幅485 cm（16尺）（前報¹⁾の970 cm（32尺）は間違い、奥行き364 cm（12尺）の長方形の穴である。その底に深さ61 cm（2尺）、幅61 cm（2尺）の排水溝があり、下から荒砂、坊主石、砂利、木炭、粘土層（小舟かわら）が重なっており、「床釣り」と呼ばれる。その上部構造は「本床釣り」と呼ばれ、中心に本床、その両脇に小舟と呼ばれる空洞が造られている。括弧内の単位尺は「靖国鑪」の設計図に記されている値である。地下構造は湿気の防止と保温を目的としているとされているが詳細不明で、とくに小舟という空間の機能と役割は重要と思われる。

永田と鈴木²⁾は、現在、冬季に3~4回の操業を行っている、島根県仁多郡横田町にある日本美術刀剣保存協会の「日刀保たたら」の炉内反応機構と操業技術を報告した。このなかで、1997年から1999年の操業実績で、銚と玉鋼の1、2級品の生産量が年々少なくなり、3級品や卸鉄が増加していることを明らかにした。その原因として、炉内温

度が低下していること、地下構造が築後20年以上経過しており湿気の遮断効果が低下してきていることを指摘した。その結果、本床を50 cm程掘り下げ、新たな木炭灰を敷詰める工事が行われた。またこのとき、表マエ側の小舟の端が掘り上げられたので、内部を調査するとともに湿度・温度計を設置した。そこで本報告では、たたら操業中の小舟中の温度と水蒸気濃度を測定し、さらに地下構造の熱流および温度分布の計算機シミュレーションを行い、小舟の機能と役割を明らかにする。

2. 実験

2.1 本床の試料採取と分析

本床は長さ364 cm（12尺）、深さは152 cm（5尺）、幅は上部が127 cm（4.2尺）、下部が97 cm（3.2尺）あり、粘土層の上に構築されたレンガ壁で囲まれている。Fig. 1では本床と小舟は石積みとなっているので昭和52年の復元の際、共にレンガ積みに変更されたものと思われる。本床は下部に木炭を敷き詰め、その上に木を燃焼し炭化させた炭（灰と呼ぶ）を叩き潰して、硬く突き固めてある。本床には幅約12 cmの筋金（鉄板の枠）を置き、この枠内にたたら炉が構築される。筋金の配置はFig. 2に示すようであるが、操業ごとに多少変化する。試料採取は1999年12月8、9両日で行われた。試料採取時、本床は約5 cm程窪んでいた。築炉の前にここで木炭を燃焼させ、「シナエ」と呼ぶ長い木の棒で叩き潰しながら固め、「灰床」を造る。この作業を「下灰作り」という。Fig. 2に試料採取した場所を

平成13年5月18日受付 平成13年6月20日受理 (Received on May 18, 2001; Accepted on June 20, 2001)

* 東京工業大学大学院理工学研究科 (Faculty of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama Meguro-ku Tokyo 152-8552)

* 2 日本美術刀剣保存協会 (Japan Institute of Art Japanese Sword)

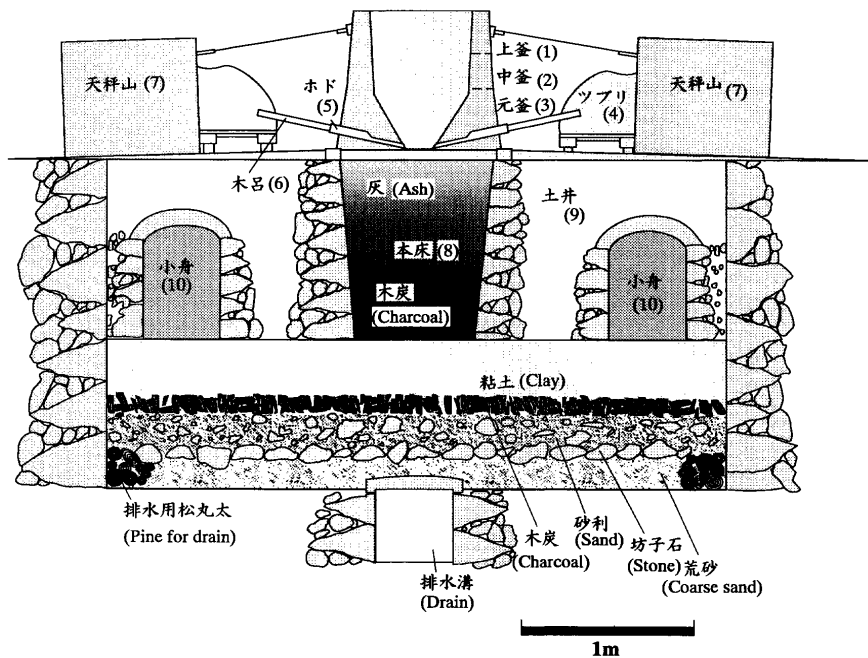


Fig. 1. Construction of the underground and furnace of the Nittoho Tatara (1) Uwagama, (2) Nakagama, (3) Motogama, (4) Tsuburi, (5) Hodo (Tuyer), (6) Kiro (Bamboo pipe), (7) Tenbin-yama, (8) Hondoko, (9) Doi (clay), (10) Kobune (tunnel).

示した。試料採取は8ヶ所(No. 1~8)から行い、内径107mm、長さ500mmの硬質塩化ビニール(塩ビ)製パイプを打込み、これを掘り出して内部の試料を分析に供した。また、マエ側の本床と小舟の間の土居で、深さ60cmの土壌、および小舟中に落ちていた土壌および木炭を採取した。この木炭は小舟底面に散在しており、小舟を築く際に薪を敷き詰め、天井を造って自然乾燥させた後、薪に点火して強制乾燥させたときに燃え残ったものである。

計算機シミュレーションを行うにあたり必要な物性値を以下の方法で測定した。試料採取と同時に採取場所No. 9と10の深さ約50cmまでの灰、土居の深さ60cmの土壌、および小舟底面において、室温における熱伝導度を細線加熱法で測定した。この測定装置は、長さ20cm、幅10cm、厚さ5cmのレンガの片面に直径0.15mmの白金細線を貼付けシリカスラリーで薄く被覆したものである。この細線を試料面に押付け、一定電流を流すとジュール熱が発生し細線の温度が上昇する。この温度上昇をフーリエの熱伝導方程式の非定常解を用いて解析し、熱伝導度を求めた²⁾。

塩ビ管で採取した試料の灰を5cm間隔で切断した。土居の土壌試料を含め、これらの試料は、かさ密度と乾燥による重量減少の測定から水分濃度を決定した。また、No. 9の深さ20cmにおける試料および土居の試料の定圧比熱を、DTAを用いて100°Cにおける値を測定した。乾燥は、恒温槽を用い200°Cで重量変化しないことを確認した上で、1日行った。XRDによる成分同定はNo. 9の深さ5cmごとの試料と土居の試料について行った。

2.2 小舟の湿度・温度測定

小舟の大きさは幅61cm(2尺)、高さ91cm(3尺)、長さ364cm(12尺)で、天井はアーチ型になっており、本床と平行に設置されている。本床の中心から小舟の中心までの距離は182cm(6尺)である。小舟の表マエ側を掘り

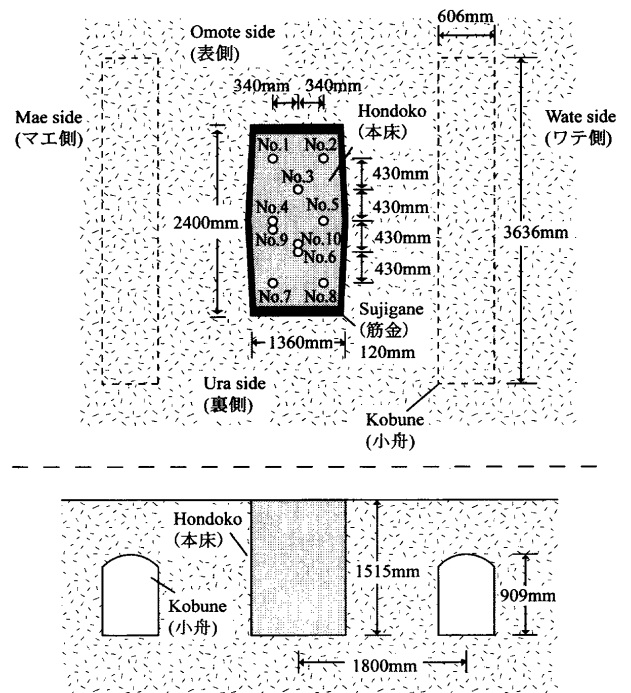


Fig. 2. Dimension of the charcoal bed of "Hondoko".

起こし、その一端を塞いでいるレンガを一部外して穴を開け、内部を観察すると同時に、入口から約50cmの位置にレンガを置き、その上に湿度・温度センサーを設置した。センサーからのリード線は穴から出して上方に導き、天秤山の上に設置した計測器に接続した。小舟は穴をレンガで塞ぎ、埋戻された後、本床の改修と余熱、3回の築炉と操業、および操業後にわたって湿度と温度を記録した。

2.3 地下構造における熱流と温度分布解析

地下構造と炉体を箱型にモデル化し、有限要素法により熱伝導方程式を定常状態で解いた。物性値は実測値を用いた。このモデルでは炉下部で発熱して1350°Cの温度が発

生しており、炉と天秤山間の土居の地表面は 35°C で一定、地下構造の側壁は 10°C で一定、天秤山と土居の表面はその間の温度、炉壁および地下構造の粘土層（小舟かわら）は断熱壁という境界条件を用いた。炉壁は空気にさらされているので断熱とした。また、粘土層の下には木炭層があり、これはやはり断熱である。粘土層の物性値が測定できなかったので粘土層を断熱壁とした。小舟の中の空気は土居と比べ熱伝導度は小さいので、伝熱の効果をみるために静止とした。

3. 結果

3.1 本床の灰のかさ密度、水分濃度、定圧比熱および熱伝導度

Fig. 3に本床のかさ密度を示した。筋金から20 cmあたりまでかさ密度はほぼ一定で、 $500\sim 1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲にあるが、さらに深くなると次第に小さくなる傾向にある。また、中央より両端のかさ密度が大きく、表側より裏側が大きい。これは「下灰作り」で作業員が表と裏に並び、「しなえ」で本床を締める際に互いに相手側の床面を打つ傾向にあるためである。土居のかさ密度は $1200\sim 1600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度である。

本床の水分濃度をFig. 4に示した。本床表面の水分濃度は大きく、 $10\sim 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ あるが、深くなるにしたがって急激に低下し、筋金から25 cmのあたりで最小の $2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ となる。さらに深くなると少し増える傾向にある。これは湿気が本床表面から入ることを示している。土居の深さ60 cmでの水分濃度は $20\sim 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、本床表面の水分濃度とほとんど同じ程度である。

熱伝導度はかさ密度と関係しており、Fig. 5に示すように、かさ密度の高い深さ10 cmあたりまでは約 $0.40\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、20 cmで約 $0.35\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、さらに深くなると約 $0.25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ になる。土居の土壌の熱伝導度は $0.25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、小舟の底面のそれは $0.20\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ である。

定圧比熱は、本床では約 $1.56\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、土居の土壌では約 $1.10\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ であった。

本床（採取位置No. 9）の成分は木炭粉の他、XRD分析ではどの深さの試料からもGehlenite ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$)、Magnetite (Fe_3O_4)が検出された。XRDでは結晶質炭素のピークは検出されなかったため木炭特有の非晶質炭素である。本床の深さ30 cm近傍の試料にはノロ（スラグ）の粒が混入していた。これは「下灰作り」の際振動で落ちたものであろう。また、土居の主成分はシリカで、Albite ($\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2$)も検出された。

3.2 操業中の小舟の温度、湿度および水蒸気濃度

小舟の温度、湿度および水蒸気濃度をFig. 6に示した。12月21日から始まった本床の改修と加熱乾燥により、小舟内の温度は2日間で 18°C から 28°C まで上昇し、一方、湿度は90%から80%に低下する。水蒸気濃度はしだいに上昇し、改修後の12月30日には温度 30°C 、湿度92%、水蒸気濃度 $2.7\times 10^{-2}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ に上昇した。その後、温度と水蒸気濃度は漸減した。1月15日に再び本床を加熱する際には温度 25°C 、湿度98%、水蒸気濃度 $2.0\times 10^{-2}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、加熱の間中、温度、湿度、水蒸気濃度ともに大きな変化はなかった。1月26日から3昼夜の第1回操業、2月2日からの第2回操業、2月9日からの第3回操業において温度と水蒸気濃度は次第に上昇し、湿度は低下した。操業終了後も変化し続け、温度は 41°C 、湿度は89%、水蒸気濃度は $4.8\times 10^{-2}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ に達した。その後、小舟は次第に冷却され、最初の状態に戻る。

3.3 地下構造における熱流と温度分布

Fig. 7(a)と(b)にはそれぞれ小舟がある場合とない場合の熱流束分布の計算結果を示した。炉で発生した熱の一部は炉近傍の地表に流れる。他は土居を流れ、天秤山やその後ろの地表に流れる。小舟がある場合は土居から小舟近傍に流れ、小舟の壁に沿って迂回して天秤山の後ろの地表に抜ける。Fig. 8(a)と(b)にはそれぞれ小舟がある場合とない場合の温度分布の計算結果を示した。小舟がない場合は

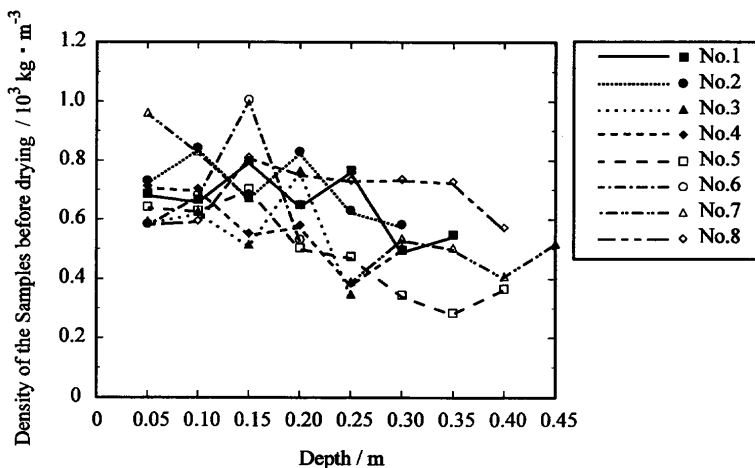


Fig. 3. Packing density of charcoal sampled from "Hondoko".

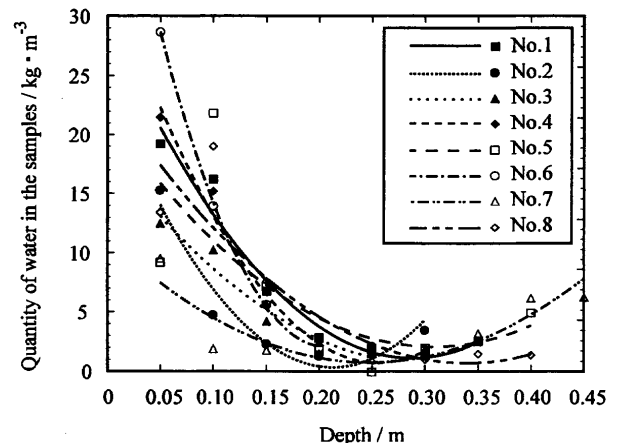


Fig. 4. Water content of charcoal sampled from "Hondoko".

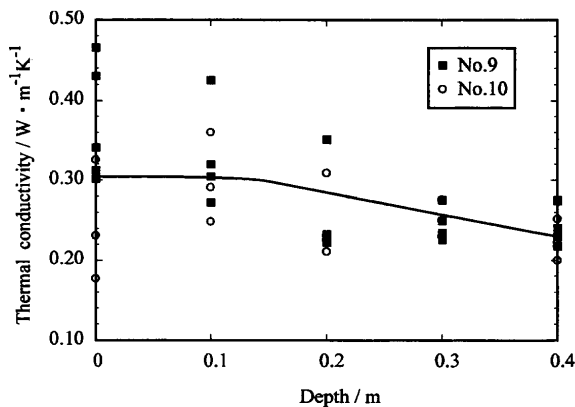


Fig. 5. Thermal conductivity of charcoal sampled from "Hondoko".

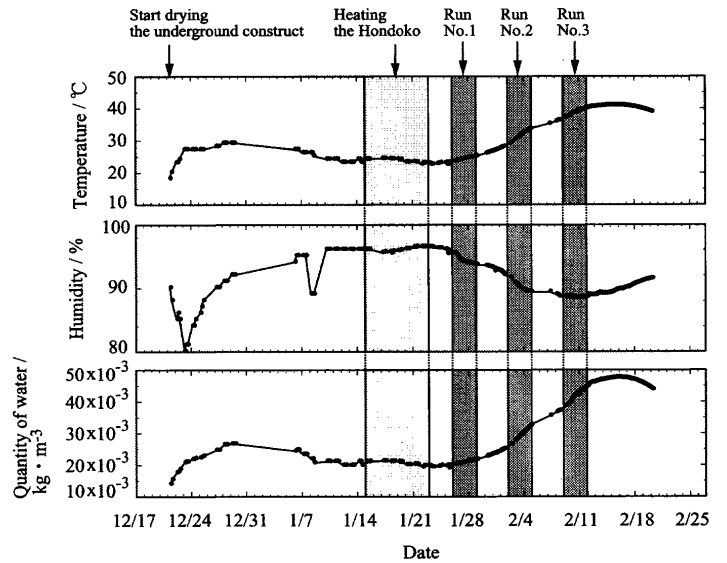


Fig. 6. Temperature, humidity and water content of air in "Kobune" during operation of Tatara in 2000.

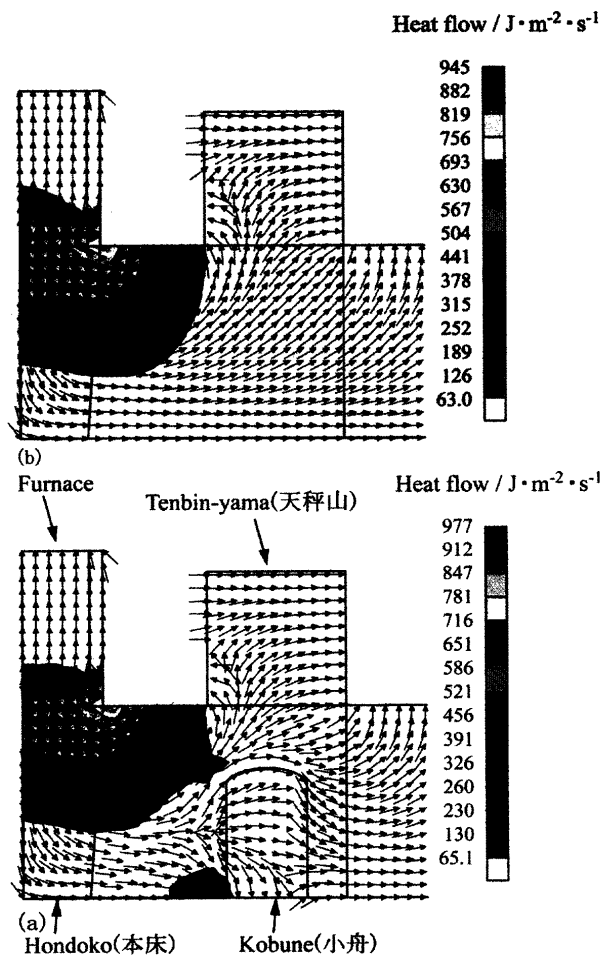


Fig. 7. Calculation of heat flow from Tatara furnace (a) with and (b) without "Kobune" during operation.

100°C以上の領域が天秤山の下にまで伸びている。小舟がある場合には炉側の壁の一部は300°C近くになり、小舟の中で温度が急激に低下する。したがって、小舟が断熱の役割をしており炉床の保温になっていることがわかる。

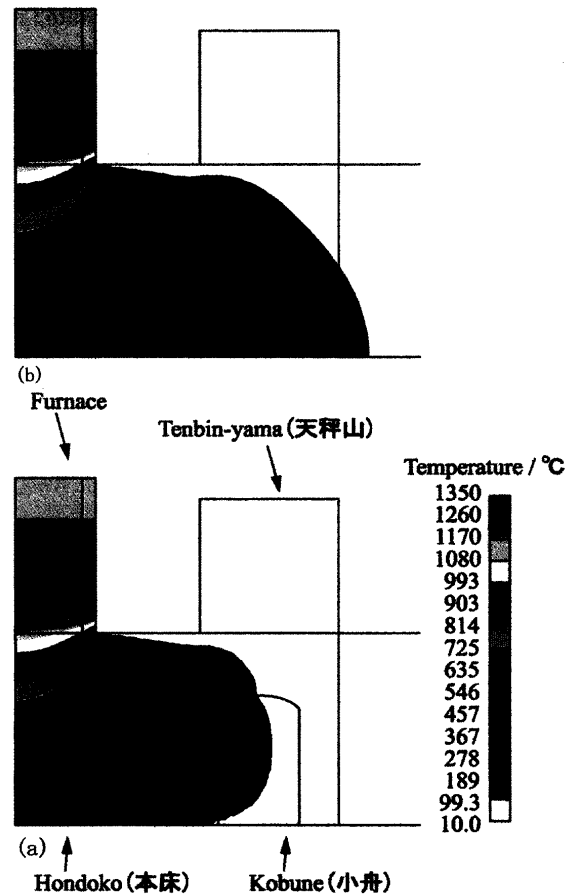


Fig. 8. Calculation of temperature distribution in the underground construction of "Tatara" furnace (a) with and (b) without "Kobune" during operation.

4. 考察

4.1 「日刀保たたら」における地下構造と小舟の役割

本床の表面に含まれる水分は作業休止中に吸収されたものであり、本床の灰の水分濃度は土居と比べると約1/10で

あることがわかる。熱伝導度と定圧比熱は土居と同程度なので、保温より水分含有量の低さに特徴がある。

炉で発生した熱は小舟に向かって流れ、一部は小舟を迂回するように流れる。温度は小舟の壁で低下し、熱を遮断している。本床および土居に含まれている水分は炉体の加熱にともない水蒸気となるが、100°C以上で1 atmになる。徐々に水蒸気が発生する場合、圧力差は発生しないので強制対流による水蒸気の流れは起きない。水分は水蒸気ポテンシャル($G=G^{\circ}+RT \ln p_{H_2O}$)勾配にしたがって拡散する。ここで標準状態 G° は温度のみの関数で、温度が高いほど大きい。したがって、水分は熱流に沿って拡散する。小舟の温度は23°Cから40°Cに上昇し、水蒸気濃度が上昇するが、分圧にして0.13 atm程度なので、小舟で水蒸気ポテンシャルが大きく低下することがわかる。すなわち、水蒸気は小舟に向かって拡散する。実際、小舟の水蒸気濃度が操業中次第に増加することからも、操業中、本床および土居の水分は小舟に向かって移動していることがわかる。

日刀保たたらにおいて、Fig. 4に示す本床の水分は、表面から深さ20~30 cmのものは「下灰作り」の予熱段階で放散し、一方、築炉の際にかなりの水分が粘土から本床に吸収される。水分は100°C以上では水蒸気になるとして、本床に保持される水分量を計算してみる。水蒸気圧 p を1 atmとすると、気相中に含まれる水蒸気濃度は、 $\rho = nM/V = Mp/RT$ で、500°Cでは $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、100°Cで $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ である。ここで、 n と M はそれぞれ水のモル数と分子量、 V は体積、 T は絶対温度、 R はガス定数である。操業中はこの程度の水分が少なくとも本床に吸収されているとみることができる。本床の水分濃度を平均 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ とすると、その大部分は操業中に水蒸気となり熱流に沿って土居表面や小舟に拡散する。さらに、土居の水分濃度は20~30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ で、同様に土居表面や小舟へ流れる。小舟では温度が低く水蒸気ポテンシャルが小さく保たれるので、ここに水分が流れ込む。しかし、小舟全体の体積は約 3.6 m^3 で、保持しうる水分量はせいぜい0.2 kgである。したがって、小舟は一時的に水分を保持するが、さらに周囲に放散する必要がある。

工藤³⁾は「靖国鑪」の設計について次のように述べている。「昔は鑪を築く場所は排水の都合の良い処を選び基礎を大きく掘って捨石を沢山入れて湿気を抜く事と熱を保つ事に非常に骨を折って居ります。尤もそれは「セメント」やコンクリート及鉄板等のない時代のことでありますが、今日は之れ等を利用して防湿及断熱に適宜の方法を採れば工事は簡単に済みます。昨昭和八年に日本刀鍛錬会の靖国鑪築造に際しコンクリートや鉄板断熱砂等を使用して基礎を簡単に致しましたが何等故障は起こりませんでした。」その結果は、小塚⁴⁾によると、操業に失敗し、すぐに昔のように作り直さねばならなくなった。Table 1に昭和8年から19年までの靖国鑪の玉鋼の生産量を示した。1操業あたり昭和

11年までは240 kg程度であったが、その年の11月に地下構造はFig. 1のように改築工事が行われ、以後生産量は倍増した。工藤の設計図ではコンクリートの箱の中に本床と小舟が造られている。工藤の設計が失敗した理由は、本床と小舟を遮蔽板で囲うと水分は逃げ場を失い、そのまま炉本体に上昇するので炉の温度が上らなかったものと考えられる。このことは小舟を含め地下構造を遮蔽すると水分が放散しなくなることを示している。小舟が水分の貯蔵庫であれば遮蔽による操業への影響はない。影響が顕著に出たことは水分が小舟から放散されていることを示している。

たたら操業では、羽口前で1350°C程度の温度になっており、炉上部で還元した砂鉄は羽口近傍で燃焼している木炭と接触し、吸炭溶融して溶融ノロ中に落下する。ノロと溶銑粒は炉壁と鋤の間を流れ落ちる際に、ノロは炉壁を溶かし、溶銑粒は鋤と接触して温度低下にともないオーステナイトの固相を晶出させて鋤を成長させ、残りは溶銑(ズク)として炉底に溜まる¹⁾。一方、ノロは湯地穴から自然に流れ出す。操業初期では炉底はV字型になっている。ノロが生成し、鋤塊が成長し始めると底には空気が来なくなるので、木炭の燃焼発熱はなく、溶融したノロとズクが炉底に熱を運ぶ⁵⁾。炉底の温度が十分上がらない主な原因は本床から上ってくる水分で、とくに本床の乾燥や地下構造の水分の放散が不十分な場合、水分は炉底で蒸発し、その蒸発熱により炉底は冷却され、ノロやズクは凝固して熱の供給を妨げる。その結果、ノロが炉内で固まってしまう、鋤は分散してまとまりがなくなる。ノロが炉内に溜まると羽口前に木炭が供給されなくなり発熱しないので羽口前が冷却され、固まったノロが詰まって操業が継続できなくなる。したがって、たたら炉の地下構造は水分を放散するための精緻な構造になっているばかりでなく、築炉の前には「下灰作業」と呼ぶ炉床の乾燥と叩き締めが行われる。

Fig. 1に示すように、地下構造の掘り下げられた長方形

Table 1. Production of Tamahagane by "Yasukuni Tataru" furnace.

Year	Total production per year (kg)	Number of operations	Mean production per operation (kg)
1933	1,500	7	214
1934	1,687	7	241
1935	1,650	7	236
1936	1,913	7	273
1937	3,563	9	396
1938	5,399	11	491
1939	8,061	15	537
1940	5,500	12	458
1941	5,500	12	458
1942	5,812	12	484
1943	4,500	9	500
1944	5,625	10	563
Total	50,710	118	

Note: In November, 1936, the underground of Tataru furnace was reconstructed.

の穴の周囲は石組みされている。その底の中央には深さ幅共に61cmの排水溝が掘ってある。この排水溝も周囲が石組みされており、石の蓋がされている。底から荒砂層、10~40cm程度の坊主石の層、砂利層、木炭層、粘土層(小舟かわら)の順に積み上げられている。そしてその上に本床とその両脇に小舟および土居が造られている。排水性からみると荒砂は良好で、砂利はそれより劣る。粘土は実際上不透水層である⁶⁾。地下からの湧水は砂利に吸収され、荒砂を通して排水溝に流れる。水分は粘土層で遮断されるが、一部は毛管現象で粘土層を通して上部に上る。そこでこの湿気をさらに遮断するために粘土層の下に木炭層が設置されている。

このように地下構造の設計概念は、「小舟かわら」と呼ばれる粘土層で下からの湧水と湿気を遮断して排水溝へ流し、上部の本床および土居の湿気は小舟に逃がし散逸させることにより、炉の温度への湿気の影響を極力小さくしている。

4.2 地下構造の変遷

たたら製鉄技術が朝鮮半島からわが国に伝えられたのは6世紀後半と言われている。8世紀前半にはシャフト炉を用いた銑鉄製造技術がやはり朝鮮半島から伝えられた。この当時の炉は斜面を利用した炉体が半分地下に埋まった構造で、とくに地下構造と思われるものはないが、6世紀後半から7世紀前半のカナクロ谷製鉄遺跡(広島県山県郡)では、深さ40~55cmの炉底のくぼみに木炭を充填し、その上に鉄滓細片や焼土、木炭などを混ぜた土を充填している⁷⁾。木炭は効果的な水分遮断材である。11世紀の大矢製鉄遺跡では、舟底形の炉底をよく焼き固めた粘土で5~15cm覆い、木炭粉を充填して、その上に焼土を敷き詰め炉底にしている。この炉を囲むように幅60cm、深さ40cmの溝が2本長楕円形に設置されて、木炭が充填されていた。これは小舟に対応するものと考えられている⁸⁾。空洞の小舟が現れ始めるのは17世紀に入ってからである。「楨原たたら跡」は真砂土の山地に造られており、その地下構造は幅2.8m、深さ1.2mの箱型の穴である。底面を焼き、焼土や石礫などを厚く入れて基礎とし、その上に箱状の本床を造り、その谷側に小さな小舟が設けられている⁹⁾。この頃までは野外で操業が行われており、「野だたら」と呼ばれている。

小舟が本床の両脇に造られ、「床釣り」構造ができるのは17世紀後半である。「隠地(おんじ)第1炉床」は黒ボク土山地に造られており、考古・古地磁気測定により1670±20年、¹⁴C測定で1680±90年頃のものとして推定されている。この炉床には4本の柱が埋められた跡があり、同時に発掘された遺構から1650年頃「高殿」と呼ばれる建て屋の中で操業が行われ始めたことを示している。地下構造は大型になり、幅4.0m、長さ12m、深さ1.2mの大きさで、クロボク土を敷き詰め平らにした床釣り部の上に本床と左

右に1対の小舟を設置している。高殿たたら初源のなものとされている⁹⁾。

地下からの湿気を遮断するための「小舟かわら」が造られるようになったのは17世紀末期である。「志谷たたら跡」の地下構造はクロボク質の地層に、幅4.5m、長さ9m、深さ1.5mの穴の底に木炭と厚く焼土を敷詰め床釣り部としている。その上に全面を覆って真砂粘土を叩き締めた「小舟かわら」がある。その上に両小舟を築き、さらに「小舟かわら」を重ねて本床を設置している。1690年から1710年頃操業していたと記録されている。ただし、この地下構造には「伏桶」という排水溝はない。1710±20年と言われる「大峠たたら跡」には「伏桶」はあるが「小舟かわら」はない。以上、17世紀末から18世紀初頭に地下構造の基本構造、「床釣り」と「本床」、「小舟」および「小舟かわら」からなる「本床釣り」が成立したと考えられる。

ズク生産(銑押し)用と言われるたたら炉ではさらに複雑な地下構造が造られている。1670±30年と年代付けられている「朝日たたら跡」では、「小舟かわら」の下が3層になっている。地下構造の底に「伏桶」を周行および横断させて地上へ気抜きし、その上の第1層は柱状立石に支えられた空洞層である。第2層は支えの柱状立石列の間はクロボク土で埋め、中央に大きい下小舟が造られている。これらの層の上に本床と一対の小舟が設置され、小舟の間は「火渡し」と呼ばれる通路で結ばれている。このような「火渡し」や「小舟かわら」の下に空洞を持つ構造は、1998年に発掘調査が行われた島根県飯石郡頓原町「弓谷たたら」にも見られる。この地下構造をFig. 9に示す^{10,11)}。この遺跡は田部家古文書によると1800年から始まり、3期に分かれるが1889年(明治22年)以降も操業が行われていた。この地下構造は小礫混じりの粘土層からなる「小舟かわら」があり、その下に坊主石で支えられた空洞が存在している。この空洞は「火渡し」と「火落とし」と呼ばれる縦穴で結ばれている。この空洞の床には「中かわら」と呼ばれる小礫と木炭混じりの粘土層がある。「中かわら」の下は炭化木片層があり、その下は「捨てかわら」と呼ぶ赤土粘土層が水抜き溝を覆っている。本研究から明らかにように、操業時に断熱と同時に本床の水分を逃す大きな

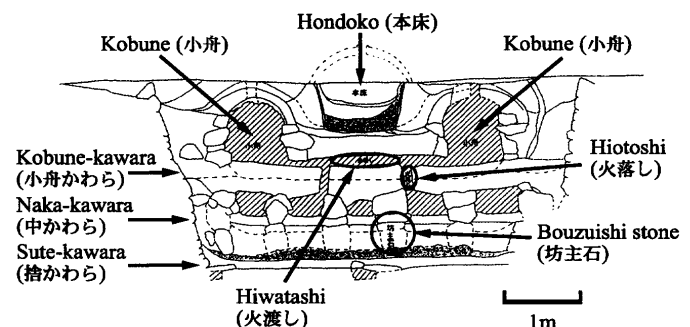


Fig. 9. Underground construction of "Yundani Tatara" which produced pig iron in 19 century.

バッファーとなる。

「天秤吹子」が発明されたのが1691年（元禄4年）であり、この頃、床釣り型の地下構造の基本が完成したことは、炉の温度上昇に大きく寄与し、結果として生産性が飛躍的に向上したと考えられる。操業時期も秋のみの操業から冬季も行われ、1707年頃からは通年操業が行われるようになった。床釣りの地下構造の成立した時期が、1770年から1800年にかけての地球の小氷期に入り長雨と大雨に見舞われた時期と対応するという指摘もある¹²⁾。

4.3 地下構造の補修周期

地下構造、とくに本床や小舟の整備はどのように行われてきたであろうか。高橋一郎¹³⁾は島根県におけるたたら製鉄業の古文書から Table 2 の表を作成した。1734年から記録がある「古屋谷（きやんたに）鉦」では1735年8月、36年6~8月、37年1~2月に毎年「床照らし」を行い、38年に閉鎖している。

1738年から操業を開始した「大原鉦」では39年に「床照らし」を行い、翌40年8月には「鉄湧かず」として「床照らし」を行い、1743年に6年間の操業の後、閉鎖している。この炉は30年後に再開するが、1782年10月に「床照らし」を行い、翌年2月には「炉熱衰え」により「床照らし」を行った。そして、17年間の操業の後、1789年に閉

鎖した。

この時期、年操業月数は5~10ヶ月である。「床照らし」は1~2ヶ月を要しており、本床と小舟を修復した場合には作業月数が長くなっているが、修復の詳細は判明していない。このように炉の修復が頻繁に行われたことは、地下構造の防湿機能がまだ十分でなかったからであろう。宝暦年間（1751~1763年）には年操業月数が10ヶ月になり、1772年（安永元年）からは年12ヶ月操業が行われた。

1743年に操業を開始した「雨川鉦」では、2年後の7~11月に「床照らし」を行っているが、5年後の1747年に閉鎖、その後再開と閉鎖を経て、1779年に再開し1923年まで合計145年間操業を行った。この間、火事による焼失や大破があり、そのときに「床照らし」を行った可能性はあるが、記録は発見されていない。このように地下構造の修復は「永代鉦」になると記録がなく、また明治以降は記録がない。

表は、明治期におけるたたら製鉄を調査した報告¹⁴⁾のなかで、「床焼き」と呼ぶ炉底乾燥作業について「此作業は製錬作業中最も大切なるもの一にして、七、八年毎に一回之を反覆し爐底を乾燥し其充填材料を新にす。」と述べている。本床の上に甲と呼ぶアーチ状の覆いを設け、またその脇の土居上に「上小舟」と「袖小舟」を一對ずつ設け、

Table 2. Operations and repairs of the foundation of Tataru furnaces since 18 century.

Year AD	年	月 Mon.	Name of Tataru furnace							
			古屋谷 Kiyantani	大原 Ohara	雨川 Amekawa	小峠 Kotouge	杭木 Kuigi	叶谷 Kanaitani	野土 Nozuti	
1734	享保 19		Start record							
1735	20	8	床照らし+							
1736	元文元	6-8	床照らし+							
1737	2	1-2	床照らし+							
1738	3		Close (5)	Start						
1739	4	12-1		床照らし+						
1740	5	8		床照らし+ (鉄湧かず)*						
1743	寛宝 3		Close (6)	Start						
1745	延亨 2	7-11		床照らし+						
1747	寛延元		Close (5)	Start						
1754	宝暦 4	4*			Close (9)	Start				
1756	6					Close (3)				
1757	7						Start			
1767	明和 4	12			Start					
1768	5							Close (12)		
1773	安永 2	7		Start						
1775	4				Close (6)					
1779	8	1*			Start				Start	
1782	天明 2	10		床照らし+						
1786	6	2		床照らし+ (炉熱衰え)*						
1788	8									Close(20)
1789	寛政元	10		Close (17)						
1794	4									Start
1796	6									Close (3)
1799	11				鉄穴鉦&					
1819	文政 2	4			A fire* no work					
1855	安政 2				No work 2 months					
		7			Broken* Construct					
1856	3	3			A fire*					
		3-4			Construct					
1923	大正 12				Close (94)					

+床照らし: "Tokoterashi" means the repair of foundation of Tataru furnace.
 \$鉄湧かず: "Tetsu wakazu" means the failure of production of molten pig iron.
 %炉熱衰え: "Ronetsu otoroe" means the failure of heating furnace at high temperature.
 &鉄穴鉦: "Kan'na Tataru" is the new name of Amekawa Tataru furnace.
 #: At these accidents, the foundation of Tataru would be repaired.
 ()the total years of continuous operation for Tataru furnaces

煙突を設置する。これらは薪材を積み重ね粘土で被って造る。これらと本床および小舟（「下小舟」）は「瓢箪」と呼ぶ通路で繋がっており、下小舟に点火すると火炎は順次、上小舟、袖小舟、本床に達する。20日間乾燥後、35~40日かけて粘土を焼いて乾燥させる（「ヌタ作業」）。この後、本床を炭焼窯と同様に用いて木炭を焼き、本床内に木炭を埋め込む（「オキタメ」）。最後に焼いて乾燥した粘土および本床の甲および上小舟と袖小舟を壊した粘土を、「跡坪」と呼ぶ炉の表裏に埋める（「灰すらし」）。乾燥作業は約60日に及ぶ。

4.4 2000年および2001年の冬季操業実績と本床修復効果

「日刀保たたら」では2000年1月26日から2月12日にかけて3回、および2001年1月14日から2月3日にかけて3回の操業が行われた。2000年の操業に先立ち本床上部の灰が50cmほど入れ替えられた。これにより、本床上部に含まれていた水分は少なくなり、その結果、68時間にわたり安定した砂鉄装荷が行われた。一連の操業が終了した後、本床は「ナメクジ」と呼ばれるアーチ形の蓋で覆い、薪を燃して加熱、乾燥した後、メ張りして次のシーズンまで保存する。この間に本床の表面からは水分が吸収される可能性がある。

Fig.10には2000年の第3代の操業における砂鉄と木炭の装荷量とスラッグの発生量を示した。これを昭和53年度に安部由蔵村下が行った7代の操業記録¹⁵⁾と比較すると、木炭の装荷量は30分ごとに合計6杯（約90kg）、砂鉄は合計初期に6杯（約24kg）、中期から8杯（約32kg）で全く同じである。一方、スラッグの総排出量を比較すると、昭和52年の安部村下操業のときは5000kgから6000kgであり、今回のスラッグ量4950kgと同じ程度である。このことは操業が順調に行われたことを示している。生産された鋳の品質の内訳をTable 3に示した。鋳の生成量はやや少な目であるが、玉鋼の1級品の量は1998年レベル¹⁾に戻っていることがわかる。

5. 結言

「日刀保たたら」の地下構造は「靖国鑪」の遺構を補修して使用している。その地下構造は水分をほとんど通さない粘土層で上部と下部に分かれており、下部の水分はこの粘土層で遮断されている。上部中央には木を燃焼させて造った炭を叩き締めた本床があり、その両脇に小舟と呼ばれる空洞が設置されている。この小舟の役割は操業中本床に含まれる湿気を一時的にここに逃すバッファーとなっているほか、炉下部からの熱流を遮断して本床の保温を行っていることがわかった。

本床のサンプリングおよび小舟内への湿度・温度計の設置に対し、日刀保たたら村下・木原明氏のご協力に感

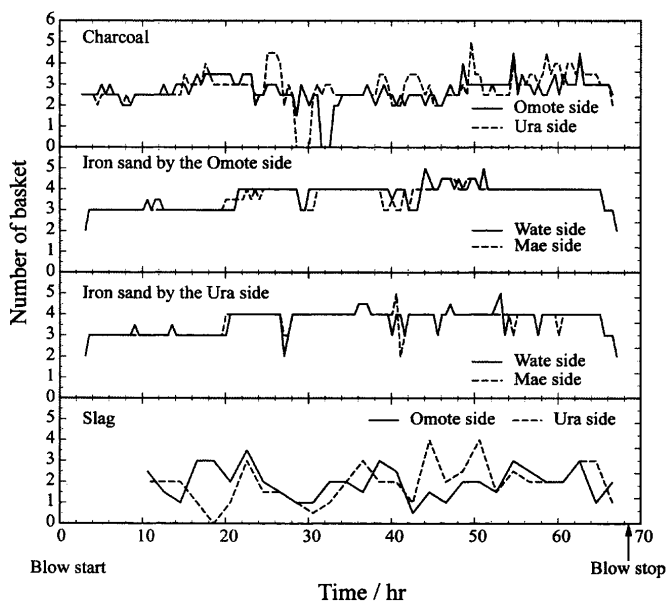


Fig. 10. Amount of charges of iron sand, charcoal and slag (Noro) produced every 30 minutes for the 3rd run of "Nittoho Tataru" operation in 2000. One basket of iron sand, charcoal and slag weigh about 4 kg, 15 kg and 50 kg, respectively.

Table 3. Mean weight (kg) of products for one run of Tataru operations from 1997 to 2001.

Grade	year	2001	2000	1999	1998	1997
Tama-	1 st (1級)	355	360	292	497	811
Hagane	2 nd (2級)	399	510	354	570	504
(玉鋼)	3 rd (3級)	771	700	815	601	228
Mejiro (目白)		51	84	116	136	254
Dousita (銅下)		339	456	308	317	275
Orosigane (卸鉄)		337	294	407	179	52
Pig iron (銑)		58	57	34	49	133
Total		2,310	2,461	2,326	2,349	2,257
Iron sand (砂鉄)		9,867	9,433	10,233	10,325	10,375
Charcoal (木炭)		10,072	10,053*	10,545	10,725	10,413

Note: The grades refers to Table 2 in the reference (1).

謝する。

文 献

- 1) K.Nagata and T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 64.
- 2) E.Takegoshi, S.Imura, Y.Hirasawa and T.Takenaka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (B)*, **47** (1981), 1307.
- 3) 工藤治人: 日本刀講座第4巻, 科学編2, 雄山閣, (1934), 7.
- 4) J.Kozuka: *Tetsu-to-Hagané*, **52** (1966), 1763.
- 5) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 633.
- 6) 山肩邦男: 建築基礎工学, 朝倉書店, 東京, (1981), 47.
- 7) 藤野次史, 土佐雅彦: 中国地方製鉄遺跡の研究, 広島大学文学部考古学研究室編, 溪水社, 広島, (1993), 40.
- 8) 古瀬清秀: 中国地方製鉄遺跡の研究, 広島大学文学部考古学研究室編, 溪水社, 広島, (1993), 23.
- 9) S.Sugihara: *TATARA KENKYU*, **27** (1985), 14.
- 10) 弓谷たたら, 志津見ダム関連埋蔵物文化財発掘調査報告書, 島根県飯石郡頓原町教育委員会, (2000).
- 11) M.Tanaka: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 33.
- 12) E.Murakami: *TATARA KENKYU*, **38** (1997), 46.
- 13) 高橋一郎: 私信, (1999年12月20日).
- 14) 俵 國一: 明治時代に於ける古来の砂鉄製錬法 (たたら吹製鐵法), 丸善, 東京, (1933), 42.
- 15) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 905.