

小型たたら炉の炉サイズに関する考察

山末 英嗣*・林 宏樹*²・石原 慶一*³

Effect of the Size for Small Tataru Steelmaking Furnace

Eiji YAMASUE, Hiroki HAYASHI and Keichi N. ISHIHARA

Synopsis : The steelmaking operations using a small "Tataru" furnace have been performed to investigate the effects of furnace size on the characteristics of "Kera" (steel bloom). The height and the cross-sectional area of the furnace are varied. The weight of Kera increases with increasing the furnace height due to the increased average temperature at upper tuyere, and the carbon concentration of Kera shows a linear relationship with the temperature. It is important for Tataru steelmaking operation to arrange the furnace size with which iron sand is reduced and carburized at temperatures around 1350°C without being blown out. From this viewpoint, the appropriate furnace size is discussed.

Key words: Tataru, steelmaking, iron sand, Kera, Noro, furnace size

1. 緒言

日本にはたたら製鉄法と呼ばれる古くから伝わる製鉄法があった。現在の高炉法では鉄鉱石を鉄源、コークスを還元剤および熱源として熔融銑鉄をつくり、転炉により脱炭し鋼を生産する。一方、たたら製鉄法では鉄鉱石の代わりに砂鉄を鉄源、コークスの代わりに木炭を還元剤および熱源とし、高炉法より低い温度での還元反応を利用して、直接鋼を作る。たたら製鉄法により得られた鋼の塊を「鋸(ケラ)」といい、生成するスラグを「ノロ」という。鋸の緻密な部分は玉鋼としてそのまま利用される。たたら製鉄法において生成する鋸は、不純物が非常に少ないことが大きな特徴で、鍛接しやすい、錆びにくいなどの優れた性質を示す。

たたら製鉄に関してはいくつかの研究がなされており¹⁻⁹⁾、炉の中の反応機構、特に鋸の生成機構について多く報告されている。例えば、永田は実際に小型のたたら炉を作り、酸素分圧や温度などを測定することで、鋸の生成機構について「上から投入された砂鉄は炉内でCOにより還元され、羽口前で吸炭し半熔融状になる。その後、熔融状態のノロ中に滴下し互いにまとまり鋸となる」と結論づけている⁶⁻⁷⁾。永田以外の研究では、砂鉄がCにより還元される反応が主であるとする説や還元された鉄が焼結して鋸を生成するという説⁸⁾も提案されている。また、田辺は親和力を用いて鋸の吸炭・脱炭について検討している⁹⁾。

このように、たたら製鉄は鋸の生成機構に関して比較

的多くの報告が存在するが、一方で炉の構造やサイズといった観点から定量的に評価した研究は少ない。そこで本研究では、たたら製鉄において炉のサイズが鋸の生成量や炭素量に与える影響を評価し、それを用いて鋸の生成に必要な炉の条件を求めることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料

原料である砂鉄は島根県斐伊川産のものを用いた。使用した砂鉄の成分組成をTable 1に、粒度分布をFig. 1に示す。燃料および還元剤である炭は、東京燃料林産(株)の岩手産松炭を用いた。これを約40~50 mm角に割り、一回の実験ごとに約50 kg使用した。

2.2 小型たたら炉

2.2.1 炉の構造

Fig. 2に本研究で作製した小型たたら炉の概略図を示す。本研究で用いた小型たたら炉は永田⁶⁾が使用した炉を原型とした。レンガは230 mm×115 mm×65 mmのムライト製で、荷重軟化点1480°Cのものを用いた。一番下の地面と接する面には鉄板を敷き、湿気が上がってくるのを防いだ。その上に230 mm×115 mmの面を底面として12枚のレンガを用いて1段を構成し、さらにそれを4段重ねた。その上にレンガ7枚を1段とし中が中空の口の字形で、8段積んだ。炉の内部の空洞は底面がレンガ3枚分、高さがレンガ8枚分すなわち345×230×520 mmの大きさとなる。その上に高さ790 mmの煙突を設けた。下から5段目すなわち空

平成16年4月28日受付 平成16年11月2日受理 (Received on Apr 28, 2004, Accepted on Nov 2, 2004)

* 京都大学エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Yoshida-Honmachi Kyoto 606-8501)

* 2 東京大学新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo)

* 3 京都大学エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

Table 1 Chemical composition of the iron sand used in this study

Component	Total Fe	FeO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	S
mass %	64.0	24.0	2.1	4.8	1.24	0.34	0.6	0.02

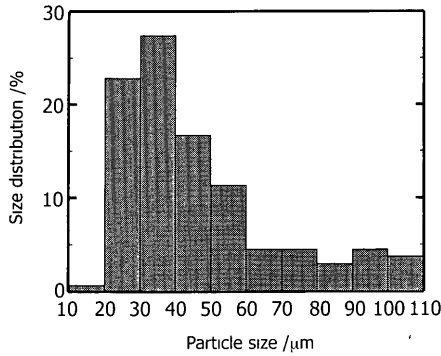


Fig. 1 Size distribution of iron sand.

洞の一番下に、粉状の炭をレンガ一段分敷いて炉底とした。粉炭を敷いた段の上には底羽口をつけ、その二段上側面には上羽口をつけた。羽口には内径1インチ(25.4mm)の鉄管を取り付け、耐火モルタルで固定した。底羽口は水平に、上羽口は下向きに約20°の勾配をつけて取り付けた。上羽口にはプラスチック製のT字管を取り付け、一方に遮光板を取り付けることで内部の様子を送風しながら観察できるようにした。また、上羽口の一段上の炉壁に熱電対保護管を約10mm露出させ、R型熱電対により温度測定した。本研究ではこれを炉中温度と呼ぶ。送風機は変圧器により風量を調整した。送風能力は電圧100Vで1.61 m³/minであった。炉高はレンガの段数を変えることと煙突の着脱により調整した。レンガ部分の高さは、炉底のレンガから数えて5段、8段、10段、12段と変えた。いずれの場合も羽口は同じ位置に取り付けた。

2.2.2 操業手順

操業はまず40~50mm角に割った木炭を少量入れ点火した後、底羽口から送風を開始し、炉頂部まで木炭をつぎ足した。送風量は木炭が10分で10cm降下する程度に随時調節した。炭をレンガの一番上まで入れた後、鉄製の煙突を取り付け、内部にさらに木炭を補充した。点火後、炉のレンガから水分の蒸発による温度の低下を防ぐため、約1時間炉の乾燥を行った。炉の周囲から水蒸気の発生が見られなくなった後、砂鉄の投入を開始した。まず、砂鉄を2.0kg投入し、10分後さらに2.0kg投入した。木炭は砂鉄の投入時に減少した分を補給した。その後、底羽口を抜き取り上羽口からの送風に変えた。操業初期に炉底から送風をしたのは、炉底温度を高くしておきノロを生成させるためである。その後は10分ごとに1.5kgの砂鉄を投入するとともに木炭を補給した。全投入量が20.5kgに達したところで、底羽口が取り付けられてあった場所からノロを出した。

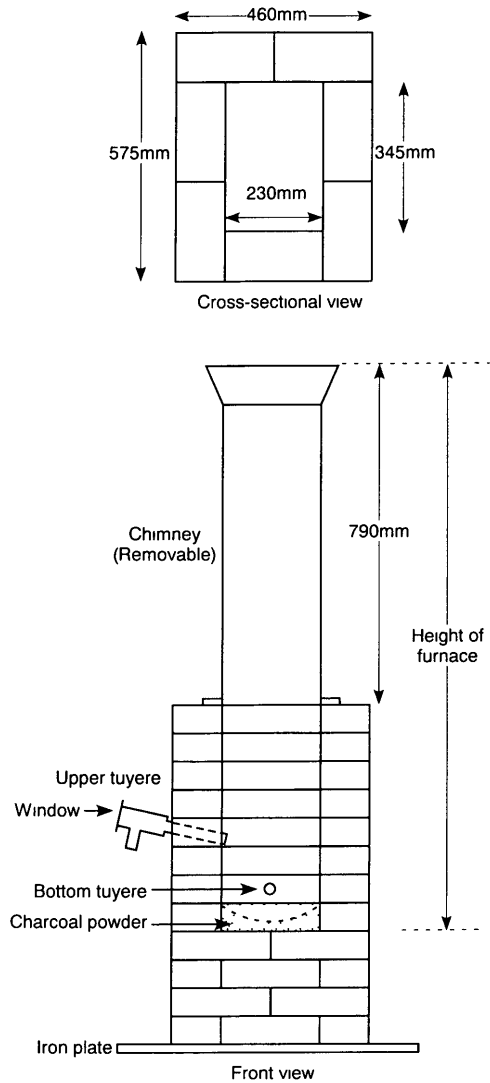


Fig. 2 Schematic diagram of small Tataru steelmaking furnace (The case of No. 8 in Table 2)

砂鉄を計31kg投入した後も操業を続け、木炭が煙突の下部まで下がってから煙突をはずし、さらに木炭が上羽口のレンガの一段上の高さまで下がったとき送風を停止し鉞を取り出した。取り出した鉞は水で急冷し、周囲についているノロを機械的に取り除いた。

2.2.3 操業条件

Table 2に本研究の操業条件を示す。以後は表中のNoを用いて説明する。No 4~6の炉サイズ、送風量はほぼ同じである。ただし、No 5は一回の砂鉄の投入量を半分にし、5分ごとに砂鉄を投入して全体の操業時間は同じ時間をかけて行った。詳細は実験結果で説明するが、煙突無しの場合、炉高が低くなるに従い、炉内温度が低下した。そこで、炉高による影響と炉内温度の影響を分離調査するため、炉高を低くし送風量を大きくすることで炉内温度を高く保つNo. 3の実験を行った。この場合、木炭の降下速度は10分毎に15~18cmであり、通常の送風の場合と比べて1.5倍程度であった。No 7は雨天での操業であった。

Table 2. Experimental conditions and results for small Tatara operation

No	Furnace height /mm	Airflow rate / $\ell \cdot s^{-1}$	Weight of Kera /Kg	Average furnace temperature / $^{\circ}C$	Note
1	325	12.7	Not produced	664	
2	520	14.2	0.5	1042	
3	520	21.2	4.1	1189	Hard blowing
4	1310	13.2	3.7	---	
5	1310	13.7	5.4	1238	*
6	1310	13.0	6	1263	
7	1440	12.4	3.8	1132	Rainy
8	1440	14.1	6.4	1221	
9	780	13.3	1.9	1093	
10	1570	5.37	4.8	1322	

* Iron sand was charged by 0.75kg every 5minutes

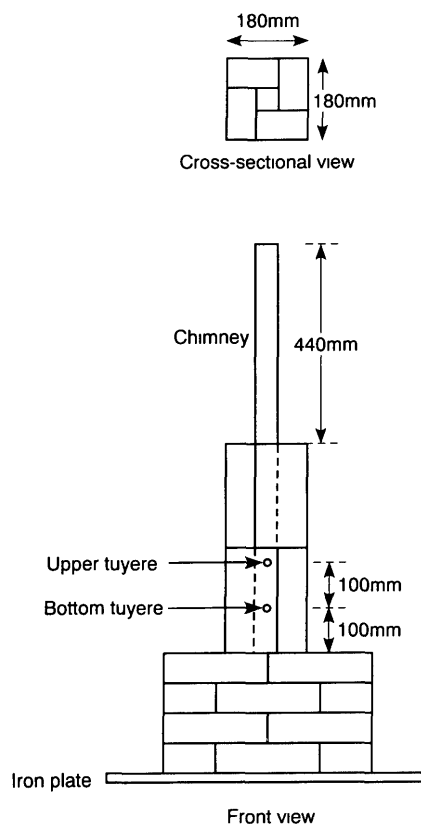


Fig. 3 Schematic diagram of super small Tatara steelmaking furnace.

2.3 超小型たたら炉

2.3.1 炉の構造

小型たたら炉の高さの変化による影響の他に、底面積の変化による影響を調べるため、高さに対する底面積比を大きく減少させた炉を作製した。Fig. 3にその概略図を示す。以下、この底面積を減少させた炉を超小型たたら炉と呼ぶ。底面積は小型炉が230×346 mmであったのに対し超小型炉は50×50 mmである。羽口には内径16 mmの鉄管を用い、位置は小型炉の場合とほぼ同じになるように底羽口は炉底から100 mm、上羽口は炉底から200 mmの位置に取り付けた。羽口反対側の炉壁には、小型炉の場合と同様にR型熱

電対を炉内に1~2 mm出すようにして差し込み、炉中温度と炉底温度を測定した。

2.3.2 操作手順

炉の水平方向の長さ比が $\{(50 \times 50) / (230 \times 345)\}^{1/2} = 0.177$ であることを考慮し、木炭の大きさは6.1~16.0 mm角とした。原料の砂鉄は、小型炉と同じものを使用した。

基本的な操作手順は小型炉と同様である。送風量は炉中温度が1300 $^{\circ}C$ 程度まで上がるように調節した。このときの送風量は小型炉の1/3程度で炭の降下速度は10分毎に55~80 cmであった。木炭は5 cmほど下がるごとに随時補給した。水蒸気が出なくなり十分に乾燥した後、砂鉄投入を開始した。まず、砂鉄30 gを投入し、その5分後に再び30 gを投入した。その後、羽口を上羽口に移し、5分ごとに砂鉄を20 gずつ投入した。砂鉄の全投入量が450 gに達したところでノロ出しを試みたが、ノロの流出は確認できなかった。砂鉄投入量が540 gに達したところで砂鉄投入を止め、木炭が羽口付近まで下がってから炉を解体した。

3. 操作結果

3.1 鋤の観察

操作の結果、各操作条件で大きさの違う鋤が生成したが、まずその特徴を述べる。Fig. 4はNo. 8で鋤を上羽口方向から撮影したものである。ただし、ノロや木炭などは取り除かれていない。全体の大きさは長径350 mm、短径200 mm、高さ200 mm程度である。鋤はノロと直径10 mm程度の木炭の混合物の上部に生成していた。またその形状はソファー状であり、背もたれにあたる部分の内側は緻密な還元鉄であった。この部分は上羽口の向かい側に生成していた。No. 3, No. 6において観察したのものも同様の形状を有していた。ただし、炉高が最も低いNo. 1では鋤の生成は見られなかった。

得られた鋤は可能な限り機械的に分割した。その中で最大の質量を持つ鋤の写真をFig. 5に示す。その大きさは直径220 mm、厚さ50 mm程度である。表面は凹凸が激し

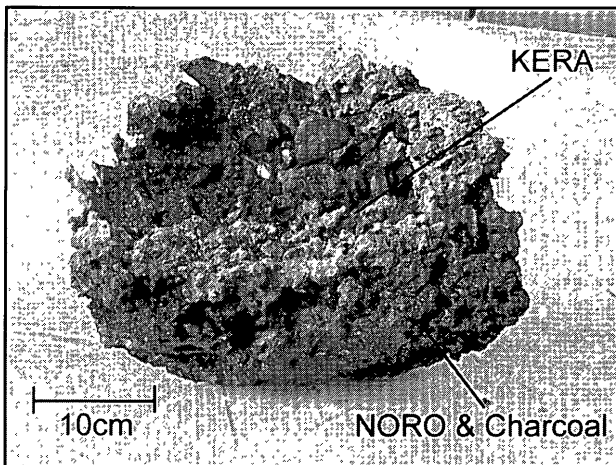


Fig. 4. Outlook of Kera produced in the operation of No 8 in Table 2.

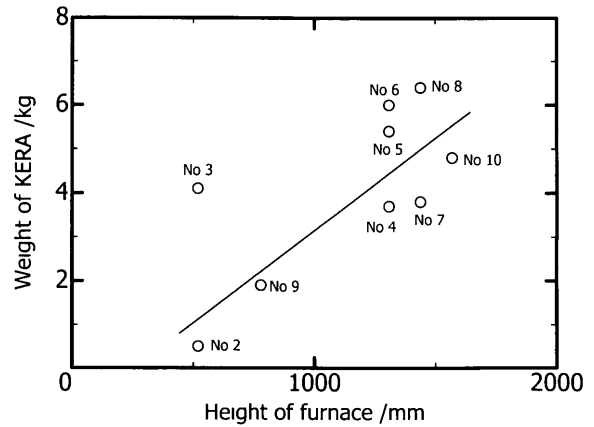
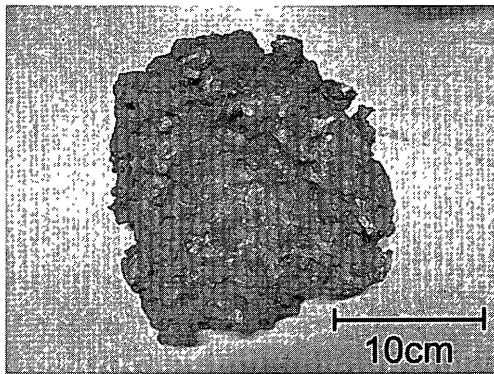
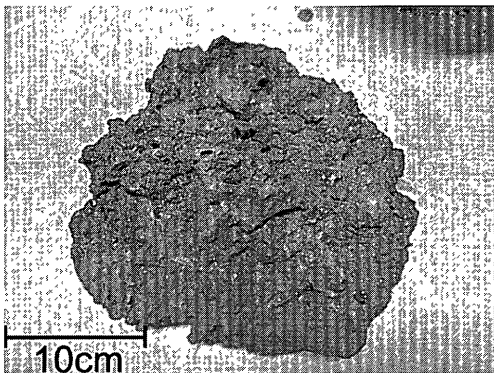


Fig. 6. Relation between the weight of KERA and height of furnace



upper side



bottom side

Fig. 5. The largest block of Kera after mechanically separating Noro and charcoal

く、所々にノロや木炭が入り込んでいた。鉞上部は緻密な鉄塊になっている部分が多い一方、炉底側はノロや炭が多くなっていった。この結果は、永田の「鉞は羽口下、ノロの上部に生成される」という報告⁷⁾とよく一致する。ノロや木炭を取り除いた後の鉞は、一般にお椀型の形状を呈していた。お椀の凹部が鉞塊の上部にあたる。

超小型たたら炉の操業では、平均炉中温度は1300°C前後に保たれ、小型たたら炉とほとんど同じであった。しか

し、炉底に鉞の生成は見られず、数gのノロが確認できるのみであった。また、上羽口下部に直径数mmの鉞とノロの混合物20gが確認できた。540gの砂鉄を投入したにもかかわらず、内部からごく微量のノロと鉞しか得られなかったのは、温度を上げるために送風量を大きくする必要があり、砂鉄が吹き飛ばされたことが原因と考えられる。このことは、実験終了後に炉の周囲に多くの砂鉄が降り積もっていたことから分かる。

3.2 炉高および温度と鉞重量の関係

炉高に対して鉞重量をプロットしたものをFig 6に示す。ここで鉞重量とは、炉から取り出した鉞からできる限りノロや木炭を取り除いた鉄塊の重量のことである。また、平均炉中温度とは砂鉄投入開始から砂鉄投入停止までの炉中温度の平均値を意味する。Fig. 6より、鉞重量と炉高にはNo. 3を除き、右肩上がりの傾向が見られる。No. 3が傾向からはずれたのは、2.2.3節で述べたように、No 3のみ送風量が大きく他の操業と実験条件が異なることが原因と考えられる。

炉高が平均炉中温度とどのような関係にあるのかを調べるため、Fig 7に炉高と平均炉中温度をプロットしたものを示す。図から分かるように、炉高と平均炉中温度は正の相関関係があるといつてよい。また、No. 3とNo. 2を比べると、送風量が大きかったNo. 3の方が温度が高くなっていることが分かる。また、No 6が10分毎に1.5kgずつ砂鉄を投入しているのに対し、No 5は5分毎に0.75kgずつ砂鉄を投入しているが、砂鉄の投入間隔は温度にほとんど影響を与えないことが分かる。さらに、No. 8は晴天、No 7は雨天での操業であるが、No 7の平均炉中温度の方が低くなっている。これは、雨天時の空気に水蒸気が含まれているため、比熱が十数%大きくなったこと¹⁰⁾が原因と考えられる。

以上をまとめると、鉞重量は炉高が高いほど大きくなるが、これは炉高が高くなるほど平均炉中温度が高くなるということが原因であるといえる。

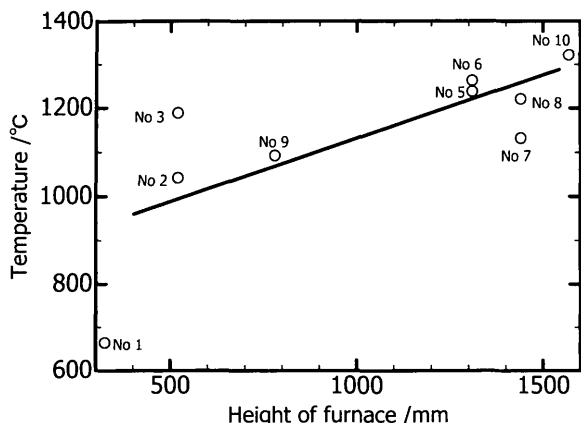


Fig. 7. Relation between the average temperature at upper tuyere and height of furnace

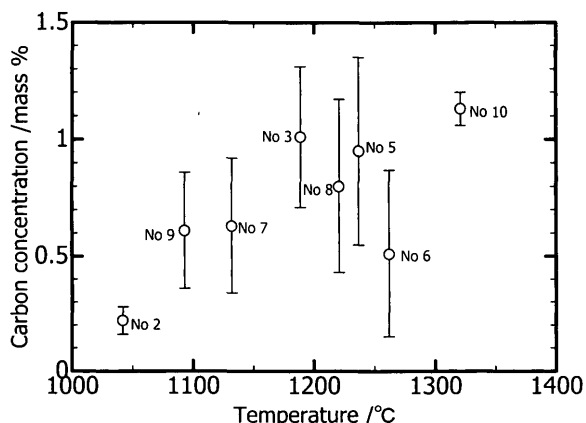


Fig. 8. Relation between carbon concentration of KERA and average temperature at upper tuyere.

3.3 平均炉中温度と錳の炭素量の関係

錳の炭素濃度を平均炉中温度に対してプロットしたものを Fig. 8 に示す。ここで炭素濃度は LECO 社製 CS-444 炭素硫黄同時分析装置により測定し、錳の上部と下部を含めて最低4点以上の測定を行っている。錳の上部と下部では、上部の方が炭素濃度は高い傾向にあった。Fig. 8 から分かるように、平均炭素濃度は平均炉中温度と高い正の相関関係があると考えられる。

4. 考察

4.1 錳の生成機構

永田は本研究における No. 4, No. 5, No. 6 と同様の炉高において実験を行っている⁷⁾が、その中で羽口の向かい側の炉壁内部 50 mm では酸素分圧が 1×10^{-11} atm, 羽口上部 450 mm, 炉壁内部 50 mm の位置で $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-13}$ atm であることを報告している。No. 4~6 の操業で測定した平均炉中温度は 1250°C 程度であり、炉壁より中心部の温度が高いことを考慮すると、Fig. 9 から上羽口付近において砂鉄は Fe に還元されていると推測できる。またこれより上部では温度が低く、FeO か Fe₃O₄ の状態であると推測でき

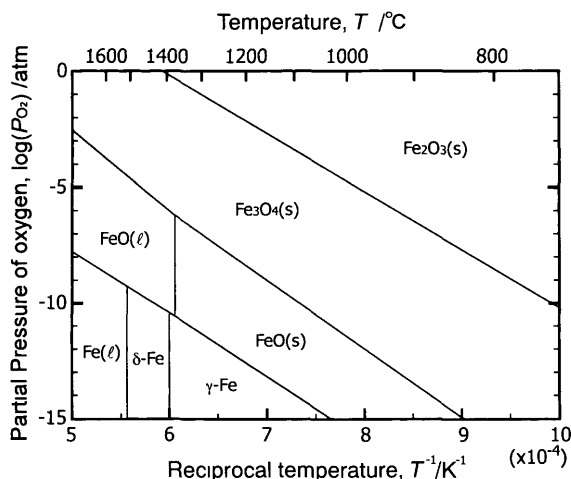


Fig. 9. Phase diagram of iron oxide

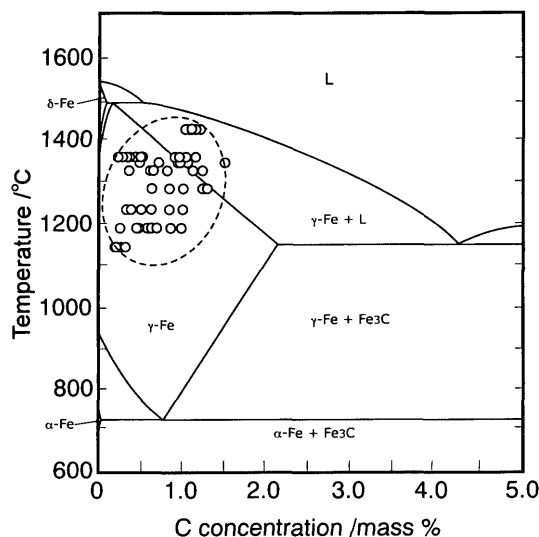


Fig. 10. The phase diagram of Fe-C system. Circles are showing the carbon concentrations of KERAs obtained through these experiments and the estimated furnace temperatures

る。

上羽口の観察窓から内部を観察したところ、還元したと考えられる鉄の一部は赤熱した木炭の上に落下し、おそらく吸炭反応による発光とともに液化して炉底部に落下した。以上から、少なくとも本研究で使用した小型たたら炉では、「砂鉄はあまり還元されない状態のまま予熱されながら沈降する。その後、上羽口上部で Fe に還元され、上羽口前で吸炭した後、炉底部のノロのプール内で成長する」という機構で錳が生成していると考えられる。この結果は基本的に永田の報告^{6,7)}と一致している。

4.2 炉の大きさによる錳の変化

Fig. 10 に Fe-C 状態図と本研究の結果を示す。図において、温度は本研究で測定した平均炉中温度より 100°C 高い温度を用いている。これは、本研究で測定した温度は炉壁から 10 mm 程度内側であるが、実際に砂鉄の還元反応や吸炭反応が起きているのは炉のより中心部であるためであ

る。炉中心部の温度は直接測定していないが、本研究とほぼ同じ炉を用いている永田⁷⁾が炉壁から50mm内部で100°C高い温度を報告しているため、上記のような温度の換算を行った。図から分かるように、羽口前で還元・吸炭した鉄の一部は固液共存状態となっており、観察窓を通した観察結果とよく一致する。平均炉中温度が高いほど液相の量が増し緻密化しやすかったため、鋳重量が大きくなったと考えられる。鋳の下部は緻密性が低く鋳の上部は緻密性が高いのは、操業時間の経過につれ炉内部の温度が上昇し、固液共存状態となっている鉄の割合が増加するためである。また、平均炉中温度が高いほど炭素濃度が高いのは、温度が高いほど吸炭速度が速いことが原因と考えられる。また、鋳の上部の炭素濃度が下部のそれより高い傾向にあったのも、操業時間の経過につれ炉内部の温度が上昇したことが原因と考えられる。以上より、小型たたら炉の操業では、砂鉄が1350°C程度の温度で還元・吸炭できるような条件を整えることが、まとまりがよく炭素量の高い鋳を作る上で重要である。

4.3 炉サイズか操業に与える影響

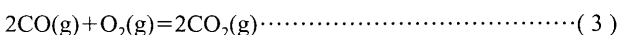
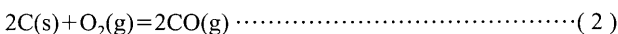
前節までの考察により、炉高の低下は炉内温度の低下につながるが、送風量を増加させることによって温度を上昇させれば鋳重量を増やせることが分かった。しかしながら、超小型たたら炉の結果から、送風を増加させ過ぎると砂鉄が飛散し歩留まりが非常に悪くなることも分かった。すなわち、砂鉄が飛散しない強さの送風量によって炉内を1350°C程度まで昇温しなければならない。そこで以下では砂鉄が飛散せず、かつ十分に昇温するために満たすべき炉の大きさと送風量を検討する。

4.3.1 小型たたら炉の熱収支

炉の周囲から逃げる熱に注目し、炉内温度を一定の条件の下、炉内の熱収支を求めた。羽口から炉内に吹き込んだ空気中の酸素が全て反応し、COとCO₂になるとした。また炉内のCO₂/CO比は1/9⁷⁾であると、その他の化学反応は無視した。

$$\frac{1}{5} M \left(\frac{10}{11} \Delta H_{CO} + \frac{1}{11} \Delta H_{CO_2} \right) - U l h (T_i - T_0) = \int_{T_0}^{T_i} M \left\{ \frac{1}{5} \frac{20}{11} \left(\frac{9}{10} C_{p,CO} + \frac{1}{10} C_{p,CO_2} \right) + \frac{4}{5} C_{p,N_2} \right\} dT \dots (1)$$

ここで、Mは単位時間あたりの空気送風量(mol/s)、Uは熱伝達係数(W/m²K)、ΔH_{CO}(=2.22×10⁵J/mol¹¹⁾、ΔH_{CO₂}(=7.90×10⁵J/mol¹¹⁾はそれぞれ



の標準エンタルピー変化、lは炉外壁周囲の長さ(m)、hは炉高(m)、T_iは実測炉中温度、T₀は外気温度(=298K)、C_{p,X}

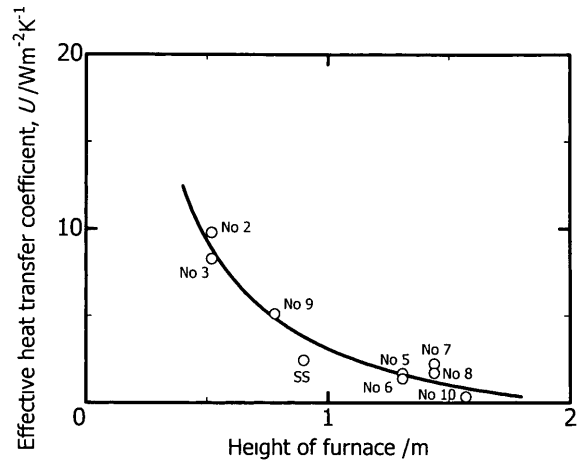


Fig. 11. The effective heat transfer coefficient U as a function of height of furnace

は物質Xの定圧モル比熱(J/mol K)¹¹⁾である。(1)式において、左辺第1項は反応による発熱量、第2項は炉からの放熱量、右辺は気体の温度をT_i(K)まで昇温させるために必要な熱量である。第2項では、代表面積としてh×lを用いている。

このようにして得られたUを炉高hに対してプロットしたものをFig 11に示す。図中SSは超小型たたら炉を意味する。図から、炉高が高くなるとUは下がり、炉高が保温に重要な役割を果たしていることが分かる。Uとhの関係は以下の式で表すことができる。

$$U = -3.13 + 6.23/h \dots (4)$$

4.3.2 砂鉄が飛散しないための条件

砂鉄の直径をd(m)とし、木炭は送風の影響を受けないという仮定の下、この大きさの砂鉄が飛散しない条件を見積もる。砂鉄の形状は球形であると仮定すると、砂鉄の終末速度(定常沈降速度)v_t(m/s)は次式で決定できる¹²⁾。

$$v_t = \left\{ \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{gd}{C_D} \right\}^{1/2} \dots (5)$$

ここで、ρ_sは砂鉄の密度(=5.2×10³kg/m³)¹⁰⁾、ρ_fはCO、CO₂、N₂の混合気体の密度(=0.21×10³kg/m³、理想気体1623Kとして計算)、gは重力加速度(m/s²)、C_Dは抵抗係数である。本研究では、砂鉄の粒度分布からd=10μm、100μmの場合について計算した。前者の場合C_D=0.44、後者の場合C_D=0.2となる¹²⁾。

一方、炉内の上昇気流速度v(m/s)は、羽口から吹き込まれる送風量M(mol/s)を用いて次式で表される。

$$v = \frac{64}{55} \times M \times 22.4 \times 10^{-3} \times \frac{T_i}{273} \times \frac{1}{\varepsilon S} \dots (6)$$

ここで、係数の64/55は空気中の酸素が全て反応しCO₂/CO=1/9のCO₂とCOになったとしたときの体積膨張を表している。また、Sは炉底面積(m²)、εは炉内空間率

(炉内に木炭が全くない場合を1とする)である。砂鉄は飛散せず炉内を降下するための条件は

$$v < v_f \dots \dots \dots (7)$$

であるので、これを $T_f=1623\text{K}$, $\epsilon=0.539$ (超小型たたら炉において実測), $S=l^2/16$ (炉が正方形であると仮定) という条件の下、計算すると

$$M/l^2 < 0.70 \quad (d=10\ \mu\text{m}) \dots \dots \dots (8)$$

$$M/l^2 < 3.34 \quad (d=100\ \mu\text{m}) \dots \dots \dots (9)$$

となる。

4.3.3 小型たたら炉における最適操業条件

(1)式において $T_f=1623\text{K}$ として、 M, U, l の関係を導くと

$$3.52M - 1.33Ulh = 0 \dots \dots \dots (10)$$

となる。これに、(4)式を代入して整理すると

$$M = (-1.18h + 2.36)l \dots \dots \dots (11)$$

となり、これは1623Kに保ったまま操業を行うために必要な M, h, l の関係を示している。この式を(8), (9)式に代入し、 M を消去すると

$$l > 3.37 - 1.68h \quad (d=10\ \mu\text{m}) \dots \dots \dots (12)$$

$$l > 0.71 - 0.35h \quad (d=100\ \mu\text{m}) \dots \dots \dots (13)$$

となる。小型たたら炉において(12), (13)式を満たすとき、まとまりがよく炭素量が高い鋳が得られることになる。Fig.12に本研究で行った操業の l と h の条件を、(12), (13)式の結果とともに示す。図から分かるように、1350°Cの温度を保つための送風を行うとNo. 4~8, No. 10は10 μm の砂鉄も吹き飛ばされない条件で操業できるが、No. 1~3, No. 9および超小型たたら炉の炉サイズでは10 μm の砂鉄は吹き飛ばされることが分かる。本研究で行った超小型たたら炉の温度は1400°C近くまで温度を上げるための強送風を行っており、この条件では100 μm の砂鉄すら吹き飛ばされ非常に低い歩留まりになったと予想できる。

以上の結果から、炉高が低くなれば炉の外周すなわち炉底面積を大きくしなければならない。しかし、この場合、本実験No. 1のように送風が全体に行き渡らず内部に温度の高いところと低いところが出てしまう可能性がある。これを回避するためには、羽口を一本だけではなく、複数本用いるといった工夫をしなければならない。島根県出雲市で毎年行われている日刀保たたら(大たたら)の炉の構造は、高さが両端1.2m中央1.1m、幅は両端0.76m中央0.87m、長さは2.7mと底面積が大きく⁸⁾、概算ではあるが本研究における l (炉周囲の長さ) に換算すると $l=6.9\text{m}$ となり操業に適した条件であることが分かる。また、炉高は

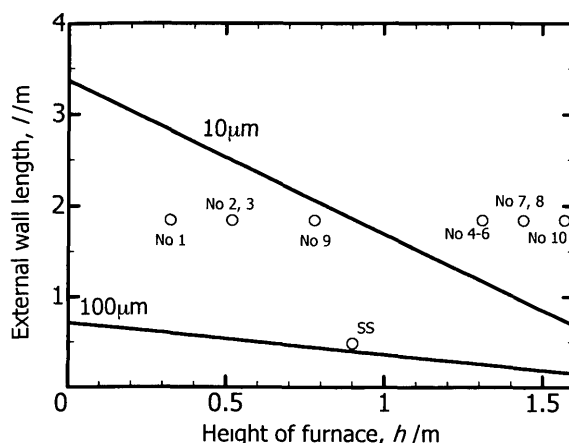


Fig 12. The condition of the size of furnace for the keeping appropriate temperature without blowing out sand iron of 10 and 100 μm in diameter.

それほど高くないが、羽口を両端に20本ずつ、計40本使用しており、炉内の温度が一定になるようにしている。以上のことから、たたら製鉄の職人たちが長年かけて完成させた炉の構造が、実は理にかなったものであることを説明できたと考えられる。

5. 結言

本研究では、たたら製鉄において炉のサイズが鋳の生成量や炭素量にあたる影響や、鋳の生成に必要な最適条件を定量的に評価することを目的として、小型たたら炉を用いて研究を進めた。その結果、以下のことが明らかになった。小型たたら炉において、

- 鋳重量は炉高が高いほど大きくなる。これは炉高が高くなるほど平均炉中温度が高くなるのが原因である。
- 鋳中の炭素濃度は平均炉中温度と正の相関関係がある。
- まとまった鋳を作るためには砂鉄が飛散しない程度の送風量で操業を行うことが重要であり、そのため周囲の長さとおきに条件があることが分かった。

文 献

- 1) 黒岩俊郎：たたら 日本古来の製鉄技術、玉川大学出版部、東京、(1976)
- 2) 永田和宏、羽二生篤、鈴木卓夫：Tetsu-to-Hagané, **87** (2001), 39
- 3) 俵 国一：古来の砂鉄精錬法、丸善、東京、(1933)
- 4) 片岡三郎、井ノ山直哉、畑 明郎：Met Technol Jpn, **45** (1975), 51
- 5) 清水欣吾：Materia Jpn, **33** (1984), 1453
- 6) 永田和宏：Tetsu-to-Hagané, **84** (1998), 715
- 7) 永田和宏：Tetsu-to-Hagané, **86** (2000), 633
- 8) 永田和宏、鈴木卓夫：Tetsu-to-Hagané, **86** (2000), 64
- 9) 田辺 潤、岸 将、佐藤茂夫、永田和宏：Tetsu-to-Hagané, **87** (2001), 515
- 10) 国立天文台(編)：理科年表、丸善株式会社、東京、(1994)
- 11) O Kubaschewski and C B Alcock Metallurgical Thermochemistry, Pergamon Press, Oxford, (1979)
- 12) R B Bird, W E Stewart and E N Lightfoot Transport Phenomena, 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc, New York, (2002)