

小型レンガ炉を用いた「たたら製鉄」の教材化の試み

増田史朗*, 水野 斎**, 船木修平**, 北村 心**, 宮本光貴**,
塚田真也***, 山田容士**, 水野 薫*** †

Shirou MASUDA*, Hitoshi MIZUNO**, Syuhei FUNAKI**, Kokoro KITAMURA**,
Mitsutaka MIYAMOTO**, Shinya TSUKADA***, Yasuji YAMADA** and Kaoru MIZUNO*** †
Making “Tatara” Steel as a Teaching Material Using with a Small Brick Furnace

ABSTRACT

“Tatara” was a Japanese traditional process to produce solid steel, so called “Kera” and/or iron pig, so called “Zuku”, from iron sand and charcoal using box type furnace with blowing cold air. Characteristics of Tatara steelmaking process are low-temperature reaction and short reduction time. Therefore, Tatara furnace is suitable to teaching material of metal smelting. In order to operate safely and get iron securely, outer wall of the Tatara furnace doubled and we used iron sand with a very small particle size. We operated the improved Tatara furnace and get spherical solid steels showing metallic luster. Carbon concentration in the steel was analyzed by infrared absorption method during oxidation to be 0.57 mass%.

【キーワード：小型たたら炉, 製鉄, 玉鋼（たまはがね）, 砂鉄, 還元】

1. はじめに

鉄は人類が入手できるようになってから3000年以上が経過している身近で現代社会に欠くことのできない金属である。そのため、鉄の磁性や電気伝導などの物理的性質はよく知られている。また日本では製鉄業が主要な産業の一翼を担っていることや古代の製鉄方法である「たたら」が地域の歴史や文化に大きな影響を与えていることなどから社会科の教材としてもなじみが深い。しかし、金属学の観点から見た場合、精錬（酸化物の還元）を教材として十分に生かしているとは言えない状況にある。高校の学習指導要領の基礎化学には酸化と還元単元があるが、金属の例としては酸化鉄とアルミニウム粉のテルミット反応が紹介されているに過ぎない。確かに近代高炉による製鉄は連続操業などにより、全体像が見えにくい。日本で古代から発達してきたたたら製鉄は小規模で離散的な操業であるため、直感的な理解が可能であるなど教材として大きな可能性を秘めている。

山陰地方では豊富な森林資源を生かした木炭の製造が盛んなことに加え、真砂砂鉄が産出されるためにそれらを用いたたたら製鉄が古墳時代から行われており、数多くの遺跡が発見されている¹⁾。山陰地方のたたら製鉄による鉄の産出量は江戸時代後期には国内生産量の8割を占めるまでになっていた²⁾。しかし明治になり効率の良い高炉による製鉄技術が導入され、たたら製鉄の衰退がはじまり、大正年間に商業的な生産は事実上中止さ

れた。ただ、たたら製鉄で得た和鋼（玉鋼）でないと上質の日本刀は作製できないため、軍刀の作刀のために昭和初期に新設された靖国たたらが終戦まで稼働した。その後、日本刀の原材料である玉鋼の不足のため、靖国たたらの地下構造物を利用して（財）日本美術刀剣保存協会が復元したたたら炉（日刀保たたら）では現在でも毎年冬季に操業を行っている³⁾。

たたら製鉄や玉鋼の学術的な研究は古くから行われており、倭による研究を嚆矢として、近年では館による歴史的な報告および永田らや清水による金属学的な観点から多くの報告がある³⁻⁷⁾。現在も大庭らによる研究が進められてはいるが、事実上発展を停止した技術であることも影響して、たたら製鉄のメカニズムが科学的に完全に解明されているとは言い難い状況である⁸⁾。

たたら製鉄は直径約0.5mm以下の砂鉄（粉鉱石）を使うため、体積に比べ表面積が大きく還元反応が早くなる。そのため、高炉と比較すると小さな炉で低い温度で短時間に鉄を得ることのできる特徴がある。そのため、教材化に適した金属の製錬方法といえる⁹⁾。

学校教育において、たたら製鉄の教材化は多くの教諭が取り組み、多数の実践が報告されている。古くは久津見らにより小学校で鉄づくりが可能であることが報告されている¹⁰⁾。その後、中川による中学校での実践報告をはじめとして、数多くの実践が報告されている¹¹⁾。特に1998年以降になると、総合的な学習の時間が創設され、こ

* 島根県雲南市立大東中学校

** 島根大学学術研究院理工学系

*** 島根大学学術研究院教育学系

† Corresponding author

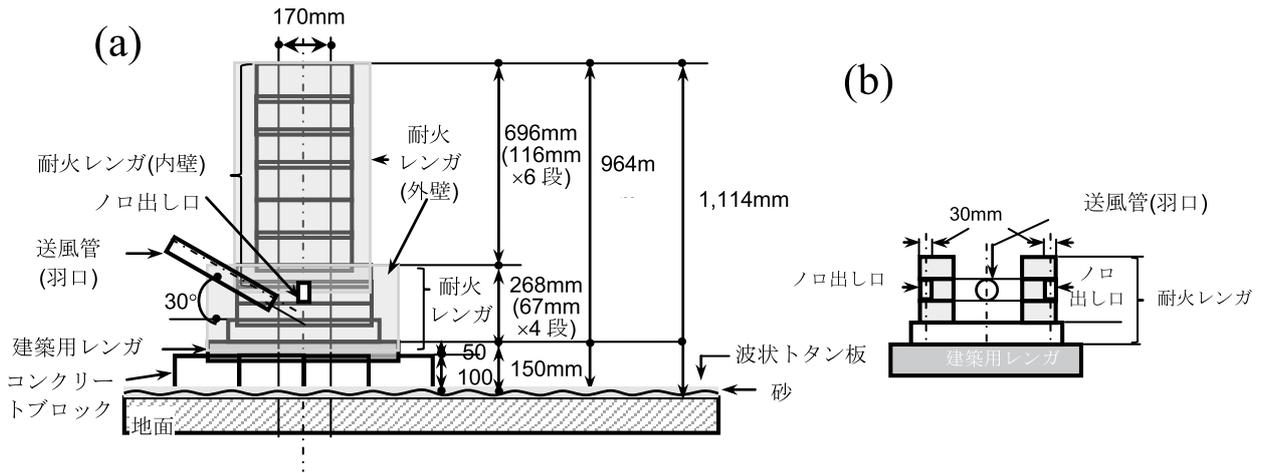


図 1. 耐火レンガ製たたら炉の構造. (a) 全体の構造図. (b) ノロ出し口と羽口部の構造. (a) を 90° 回転してある.

の学習時間において地域に根差した産業を学ぶ機会が増加した。この中で近代に栄えた産業としてたたら製鉄を体験する試みが鳥取県や島根県の小学校でみられた。しかし、実践を行った学校はその後閉校や統合により、これらの実践が途切れてしまったようである。現在は島根県奥出雲町の教育員会を中心として、日刀保たたらの指導のもとで実践に取り組まれている例がある¹²⁾。ただ、この取り組みは粘土による築炉など本来のたたら製鉄の本格的な技法を基にしているため、学校での教材化やその普及は難しいと考えられる。

教材として開発された小型たたら炉の構造は大別すると上部を切り取った石油缶の内側に粘土を張る形式¹³⁾とレンガによる炉の二つの流れがある。レンガを用いる方法に関しては、境により体系的な研究・実践が行われており、教育的にも技術的にも教材化の域に達していると思われる¹⁴⁾。しかし、実験中に炉壁の隙間を埋めた粘土が剥離して隙間から炎が噴き出したり、上方の炉壁の表面で 3 ~ 400℃ とやけどの危険がある温度になっているなどの安全面での問題がまだ残っている。また、原料の砂鉄は強磁性を有するため、たたら炉で生成された熔融凝固物が鉬(ケラ, 高炭素鋼)や銑(ズク, 銑鉄)にまで還元されていなくても磁石に吸引される。とくに銀色の鉄の粒子が確認できない場合は色からして、鉄が生成されたかの確認が非常に難しい。そこで、筆者らは確実に鉄

が生成されたことが分かるよう直径数mmから 1 cm 程度の球状の銀色に光る鉄の精製を目指し、原料の大きさを工夫した。また炉の構造も工夫して、炎の噴き出しを防ぐだけでなく、炉壁を実験中に触ってもやけどをしない温度に保つたたら炉を製作して、教材化を念頭に安全にたたら炉の操作を行った。ただ残念ながら条件を少しずつ変えて、系統的に最適条件を見出すまでにはいたらなかったが、予備実験を通して追試を行えば成功するであろう条件は明らかにしたので、その概要について報告する。

2. 実験方法

2.1. 炉の建設

今回建設した小型たたら炉の構造は境の報告を基にしている¹⁴⁾。すなわち図 1 に示すように建築用コンクリートブロックを横にして置き、その上にレンガを組み合わせることで炉の本体を構築した。レンガは耐火耐熱レンガ(日本ガスエンジニアリング社製SK-32)の使用を基本としたが、熱的に問題のない部分は費用を節約するため、建築用レンガを用いた。ただ、今回の実験は図 2 の写真に示すように自動車庫庫の前のコンクリートで舗装してある部分で実施したため、排水のため地面に緩やかな傾斜がついていた。そこで鉄製トタン板を敷き、その上に水平にするため砂を撒き、その上に炉を構築した。この構造は地面から



図 2. 耐火レンガ製たたら炉の下部構造. 波状トタン板の上に砂をまき、その上に炉を構築

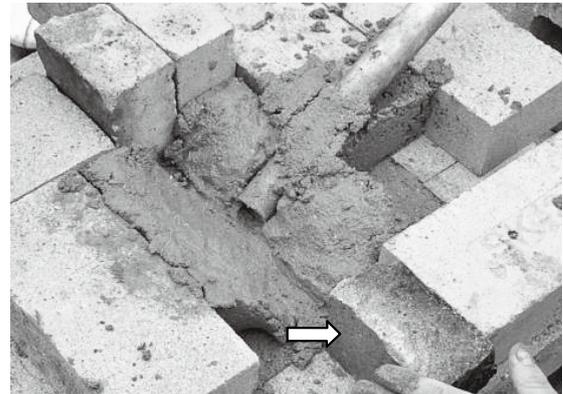


図 3. たたら炉のノロ排出口(矢印)と切羽

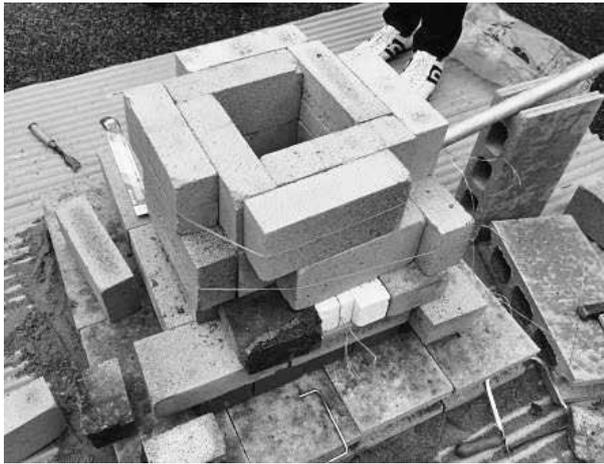


図 4. たたら炉表面の断熱と火炎の噴出を防ぐレンガの二重構造.

の水分を遮断するのにも適していると思われる。図3に建設中の底部の写真を示す。底部はノロ(鋤滓)を流したため、ノロの排出口に向けて粘土で中央部が高い鞍部のある形状にしてある。この粘土は、鳥根県雲南市大東町で採取した粘土と真砂土を4:6の割合で混合して使用した。さらに粘土の乾燥は砂鉄を投入する前の木炭の充填中の燃焼で行い、時間の短縮を目指した。ノロの排出口は図3の矢印に示すように幅5cmほどに切り出した耐火レンガの後部に穴をあけ、針金を通して引き出せるようにした。これは再利用を考慮したためである。送風管は1カ所で外径34mm、内径25mmの鉄製水道管を用い、送風機の取り付け部はT字型のチーズを用い、プラグで片方にふたをして、炉の内部を必要に応じて光温度計で観察できるようにした。この上部に耐火レンガ8段積み上げて炉とした。図4に示すように、この部分のレンガは2重に積み上げ、レンガの境目を内側と外側のレンガでずらしている。これは境目から炎が噴き出すのを防ぐためである。加えてレンガ表面を手でさわられる程度の温度に断熱するためでもある。さらに2重になった8個のレンガを外側から針金で縛り形が変わらないようにした。このため、炉



図 5. 完成したたたら炉. 耐火レンガの継ぎ目を覆う形に外側のレンガを配置してある. レンガ自体は針金で外周を巻いて固定した.



図 6. 地面を掘り下げて背を低くした試作たたら炉. 耐火レンガの外壁も一重.

を解体する時には針金を切れれば容易に解体でき、隙間に詰めた粘土の廃棄物も非常に少なくできる。完成したたたら炉の写真を図5に示す。なお、作業中の温度を測定するため、炉の底部と最上部にR型熱電対をごくわずか先端をさらす形で設置した。また、今回は大人だけで実験を行ったため、地上に直接、炉を建設した。そのため、炉の投入口の高さは約110cmとなり、背の低い児童・生徒では砂鉄等の投入が難しいと思われる。しかし、図6に示す予備実験時の炉のように地面から2~30cmほど掘り下げて設置すれば、児童・生徒による砂鉄、木炭の投入も可能になるだろう。なお、この写真の炉は予備実験時のものなので、外壁は耐火レンガが一重で隙間は粘土で塞いである。

2.2. 操業

まず炉底部の粘土やレンガを乾かすために、送風を行わずに木炭だけを新聞紙で着火して燃焼させた。木炭はホームセンターで購入したマレーシア製のマングローブを原料にしたバーベキュー用のものを用いた。木炭の長さを10cm程度に切りだしただけでなく1cm程度に薄く割った形状にした。木炭の定常的な燃焼を確認したのちに、木炭を適量ずつ投入しながら、送風を開始した。送風用プロアーに掛ける電圧はスライダックで40V程度に落として、送風量を調節した。火勢を見ながら木炭を順次投入して、最終的には木炭を炉の頂部まで装荷した。しばらく燃焼させ木炭が頂部から10cm程度下がった状況に達



図 7. 1 回分用に小分けした砂鉄と石灰の混合物



図 8. 1 回の投入量に小分けした木炭.

してから砂鉄の投入を開始した。

予備実験では、江戸時代にたたら製鉄用の真砂砂鉄を採取した日野川の河口(鳥取県米子市)で採取した砂鉄(直径0.5mm程度)を用いたが、操業後の熔融凝固物に銀色ではっきりと鉄(鋳)と認識できる物体がほとんど観察されなかった。そのため、より鋳のでき易いと考えられる粒径の小さな真砂砂鉄(直径0.1mm程度、鍛冶大鐵工製)を用いた。1回に200gの砂鉄と20gの石灰(炭酸カルシウム)粉末との混合物を投入した。これらは事前に混合して、1回分を紙コップに小分けして準備しておいた。図7は紙コップに小分けした砂鉄と石灰の混合物の写真である。砂鉄を投入したのち、続けて薄く小さく砕いた木炭約300gをスコップの大きさの関係で2回に分けて炉に投入した。これも図8に示すように1回分ずつ小分けしておいた。数分経過して木炭が燃焼して、木炭の上端が10cmほど下がれば、再度砂鉄を投入した。この動作を50回繰り返し、合計10kgの砂鉄を炉に投入した。この間の光温度計で測定した炉内の温度は1200℃前後を保持し、炉頂の温度は600～700℃を示した。しかし、炉の上部の外壁はレンガを2重にしているため側面では20～40℃を示し、手で触ることが可能であった。図9に操業中のたたら炉の様子を示す。砂鉄の投入完了後から40分ほどで木炭が燃えて炉の底部まで下がっていったので、ノロの排出口のレンガを取り外し、ノロを排出した。この時レンガを外しただけではノロが流れ出なかったため、深さを調べる直径10mmの鉄棒で排出口の障害物(粘土)を壊して排出した。図10にノロの排出時の状況を示す。ノロの排出が終了したのちに、送風を停止した。時間的な余裕があれば翌日までかけてゆっくりとたたら炉を冷却したかったが、



図 9. 操業中のたたら炉。炎が上部から出ており、レンガには吹き出した砂鉄が蓄積している。



図 10. ノロを排出している状況。レンガ上面の黒色は吹き出した砂鉄の堆積による。

当日中に炉の撤去まで行わなければならなかつたため、冷却中にレンガを固定している針金を切断して、炉の解体を始めた。炉頂部の二重のレンガの外側の部分は素手でも撤去できた。内側のレンガと下部のレンガは大型スコップと鉄棒を使い、二人がかりで撤去した。撤去したレンガはペール缶に貯めた水で冷却しようとしたが、温度が高いことに加え、レンガの熱容量が大きいので冷却に時間がかかった。なお、今回の実験中には小雨が降っていたため、送風機のスライダック等が濡れないように傘を掛けたが他は特に問題になるようなことは起きなかった。

炉の組み立てに大人が5名で試行錯誤しながら行ったため、1時間30分ほど要した。木炭への着火から砂鉄の投入開始まで約1時間30分、そしてすべての砂鉄の投入までに約3時間を要した。その後、ノロの排出から炉の解体撤去までは冷却が完了する時間を除くと約2時間、合計8時間程度要した。

砂鉄の使用合計が10kgであったのに対して、炭は操業中だけで17kg、炉の乾燥に用いたものも含めれば20kg以上使用した。

3. 実験結果

たたら炉を解体して取り出した熔融凝固物の写真を図11に示す。これ自体も一部は磁石と反応が見られた。次にこの凝固物をハンマーで砕いて内部に含まれている鉄を取り出した。一番大きかった鋳の写真を図12に示す。銀色に鈍く光っていた。直径は13mmほどであり、他の多くの鋳も球状で直径は3～10mmであった。そのため、鉄が生成されたことは磁石で確かめなくても明白



図 11. 得られた熔融凝固物。

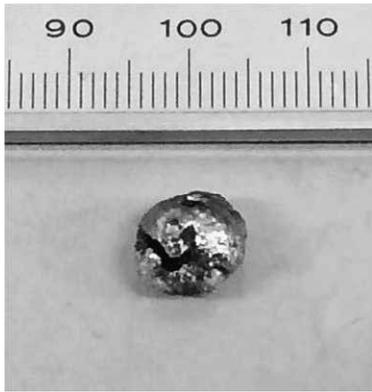


図 12. 一番大きな球状の鋸. この鋸の炭素量を分析した

であった。鋸と銑の質量の合計は789.4gであった。投入した砂鉄は10kgだったので、収率は7.9%程度といえる。ただ、投入した砂鉄の無視できない分量が送風により炉外に吹き出されていたので、事実上の効率ももっと高い数値であると考えられる。図10に吹き出されてレンガに堆積した砂鉄の様子を示す。また、図12に示した球状の鉄の一部を切り出し、燃焼-赤外線吸収法(堀場製作所製EMIA-110)で炭素濃度を測定したところ、0.57mass%の値が得られた。この結果から玉鋼(日刀保たたら)の炭素濃度の基準では玉鋼2級か3級が作製された可能性が高いと考えられる¹⁵⁾。

炭素濃度が0.57mass%の場合、鉄・炭素平衡状態図では融点が1445℃程度となる。木炭の火力ではこの温度の到達が不可能だと考えられる。したがって、固相のまま還元された砂鉄が酸化する過程での発熱により、溶解して凝集して球状になり、それが冷却され玉鋼になったと考えられる¹⁶⁾。

4. 考察

本たたら炉製作のひとつの目的は炉の外部、特に炉頂部の最外部の温度が危険なほど高くないことと組み合わせ耐火レンガの境目から炎が吹き出さない構造にすることで安全性を高めることであった。本研究では炉の外部に設置するレンガを二重にすることにより、断熱効果を大きくして、炉頂部の外側のレンガ側面の温度を25～40℃にすることに成功した。そのため、操業中に炉の上部のレンガを素手で触ってもやけどの心配がなくなった。またレンガの境目を粘土で埋めていないので、操業中の粘土の剥離の心配はなく、外部のレンガは内部のレンガの境界を塞ぐように配置したため、炎の吹き出しは終始起こらなかった。

今回のたたら操業により、予備実験では見られなかった球状に近い形の銀色に輝く鉄(鋸)が得られた。とくに表面が海綿状ではないため、一目で鉄と認識できる状況であった。レンガを二重にしたため、断熱性能が向上してより高い温度に到達した可能性もあろう。

鉄の生成効率は10%程度と他の実践例に比べると低かった。しかし、送風により大量の砂鉄が炉外に吹き出され、レンガの平坦な面に堆積してレンガの地色が分か

らなくなった箇所も見られた。本実験では電動送風機を用いた連続送風状態で実施したが、間欠風を用いると飛散した砂鉄の割合は2%程度まで下げることが可能との報告がある¹⁶⁾。間欠風の使用も含めて送風の方向や送風量を検討すれば、吹き出される砂鉄量が減少でき、生成効率は向上すると考えられる。

本実験の結果は微量な砂鉄を原料にすることで比較的容易に鉄(ケラ)を作ることができた。今後は、簡便性や安全性をさらに高めてたたら製鉄の教材化へのハードルを下げると共に、地元産の木炭や砂鉄を使用し地域に根差した産業を学ぶ観点からも、改良を加えていきたい。

謝辞

本研究は武田科学財団の補助を受けて実施した。同財団に感謝する。

参考文献

- 1) 窪田蔵郎:製鉄遺跡,(ニューサイエンス社 1983).
- 2) 永田和宏:鉄と鋼(日本鉄鋼協会), 90(4), p.38 (2004).
- 3) 鈴木卓夫,永田和宏:鉄と鋼(日本鉄鋼協会), 85(12), p.43 (1999).
- 4) 俵 国一:古来の砂鉄精錬法,(丸善, 1933).
- 5) 館 充:鉄と鋼(日本鉄鋼協会), 91(1), p.2(2005).
- 6) 永田和宏,鈴木卓夫:鉄と鋼(日本鉄鋼協会),86(1), p.64(2000).
- 7) 清永欣吾:まてりあ(日本金属学会), 33(12), p.1453 (1994).
- 8) 大庭卓也:歴史研究(全国歴史研究会), 649(12), p.12 (2017).
- 9) 永田和宏:化学と教育(日本化学会), 55(8), p.382 (2007).
- 10) 久津見宣子:ひと(太郎次郎社), No.73, pp.58-78 (1979).
- 11) 中川 淳:技術教育の方法と実践,pp.122-125(技術教育研究会, 1983).
- 12) 奥出雲町文化体験実行委員会:世界で一つの「炎」を守り,つなげる「たたら体験学習」,仁多郡小中学校長会研究紀要,pp.1-30(2014).
- 13) 松田伸也:磁鉄鉱を原料とするオイル缶たたら炉の操業-容易で安全・確実なケラ(鋼塊)の作り方をめざして-,琉球大学教育学部教育実践総合センター紀要,No.10 (2003) 57.
- 14) 境 智洋:レンガ式たたら製鉄炉による鉄づくり,北海道教育大学へき地教育研究センター研究紀要,60, p.1 (2005).
- 15) 永田和宏:金属(アグネ), 76(5), p.589(2006).
- 16) 永田和宏:金属(アグネ), 77(7), p.804(2007).