

古代製鉄法の再現 ～郷土史から消えた鎌倉たたら製鉄～

1. 研究の背景

たたら製鉄は日本古来の製鉄法であり、材料に砂鉄と木炭を用いて、鉄の融点約 1530℃より低い、約 1200℃の低温で砂鉄を還元して鋼を得る製鉄技術である。化学的には岩石成分である二酸化ケイ素を含む砂鉄をたたら炉内の一酸化炭素雰囲気内で還元し、さらに、木炭との直接接触によって吸炭させて、不純物と純度の高い鉄を分離する反応である。

弥生時代に大陸から伝搬した製鉄技術は、遺跡調査などから古墳時代には全国に広まり、それぞれの地域で独自に発展したと考えられている。時代が下り、中世の武家社会になると鉄器の需要はますます増加し、盛んにたたら製鉄は行われるようになった。特に、出雲地方を中心とした地域では、たたら炉の大型化とともに集約的な操業が行われるようになり、安定した生産が可能になった。一方で、それ以外の地域では室町時代後半になると衰退が始まるのである。本校の位置する鎌倉は幕府の置かれた場所であり、砂鉄の産地として有名な稲村ガ崎海岸もあり、製鉄遺構も発見されていることから、盛んに製鉄が行われていたと考えられている。鎌倉時代から南北朝時代にかけて、刀工正宗は鎌倉の地で相州伝を確立し、後世に残る名刀をつくっているが、その作風は長く伝えられることはなく、やがて途絶えてしまった。そして、鎌倉たたら製鉄も他の地域と同様に江戸時代には衰退するのである。こうして、出雲地方以外の地域のたたら製鉄は衰退の一途をたどり、記録[1]によると明治 12 年では国内製鉄量の約 85%、明治 16 年には約 97%が中国地方で生産されるようになっていたのである。

大陸から伝搬した製鉄技術は全国に広まり、日本独自のたたら製鉄として発展したにもかかわらず、このように衰退した経緯については諸説あり[2]、はっきりしたことはわかっていない[3]。そこで、私たち科学研究会は、砂鉄自体にもたたら製鉄衰退の要因があるのではないかという仮説を立て、古代製鉄法を再現した操業を行うとともに、砂鉄および生成物の元素分析を通して科学的に衰退の謎を探ることにした。

2. 要旨、概要

出雲地方の砂鉄（島根砂鉄）と本校に近い稲村ガ崎海岸の砂鉄（鎌倉砂鉄）を使用して、同一条件でたたら製鉄を行ったところ、島根砂鉄からは約 5.5kg のケラ（鋳、鉄の塊）が得られたが、鎌倉砂鉄からはまったくケラを得ることはできなかった。この違いは同一条件での操業のため、砂鉄によるものと考え、2種類の砂鉄およびそれぞれの炉内生成物について分析したところ、島根砂鉄と鎌倉砂鉄の密度はそれぞれ 4.44g/cm³ と 3.70g/cm³ であり、共通して含まれる元素は鉄、ケイ素、カルシウム、チタン、バナジウムおよび酸素であった。その他の元素は非常に微量で、検出されない場合もあったので、酸素を除く 5種類の元素がケラの生成に関わっていると仮定し、詳細に調べることにした【図 1-1 ～1-5】。

エネルギー分散型 X 線分光器 EDX で観察すると、島根砂鉄のケラの成分元素はほとんどが鉄であったのに対して、鎌倉砂鉄からできた炉内生成物は二酸化ケイ素の量が非常に多く、その中に鉄が点在している状態であった【図 2】。すなわち、過剰な二酸化ケイ素が砂鉄の還元を妨げていたためにケラができなかったのである。そこで、鎌倉砂鉄の磁力選鉱を工夫するとともに、繰り返しの選鉱によって、島根砂鉄を超える密度まで鎌倉砂鉄を選別し、再び操業を行った。得られたケラはひとつの塊にならず、ゴルフボール程度の大きさに砕け、断面を調べると、筋状に鉄が分布し、カルシウムが多く含まれていた。鎌倉砂鉄は浜砂鉄のため、カルシウム分を多く含み、それが鉄をひと塊になるのを妨げる作用があると考え、丁寧な塩抜き作業によって十分に減少させた。さらに、ケラの生成にかかわると考えたチタンとバナジウムは砂鉄の結晶に含まれている元素であり、砂鉄の母岩に由来するため、選鉱作業では取り除くことができない。そこで、炉内温度制御および炉内構造の工夫によって取り除くことにした。このように選鉱した鎌倉砂鉄を使用した 2014 年の操業では数 kg であるが 99%を超える高純度のケラを得ることができた。そして、2015 年の操業では、砂鉄選鉱に熱湯洗浄を取り入れ、さらにカルシウムを減じた砂鉄を使用した結果、純度が 99.9%以上になったひと塊のケラを得ることに成功した。

3. 問題提起、研究目的

すでに述べたように、大陸から伝搬したたたら製鉄は日本全国に広まり、それぞれの地域で独自の発展を遂げた。やがて、武家社会になると武具や刀剣など武器の生産が盛んになり、各地で生産された鉄を使って現代まで残るような名刀などもつくられるようになった。その後も鉄の需要は高まり続け、大勢の鍛冶職人が活躍していた状況において、製鉄自体が廃れてしまったということは不自然に感じられた。つまり、鉄の需要があり、鍛冶職人がいて、なぜ廃れてしまったのだろうか、ということである。繰り返しになるが、たたら製鉄衰退の原因は諸説あるが、はっきりしたことはわかっていない。そこで、私たちは科学的な視点から古代製鉄を眺め、たたら製鉄衰退の謎を調べることにした。

具体的な研究内容は島根砂鉄および鎌倉砂鉄から良質のケラをつくる工程を再現し、得られたケラおよびノロなどの炉内生成物の分析を行ったうえで、鎌倉砂鉄自体に潜むたたら製鉄の衰退について検討することを研究目的とした。

鎌倉砂鉄を使った最初の操業では、まったくケラが得られなかったが、EDX による元素分析および走査式電子顕微鏡 SEM によると、過剰な二酸化ケイ素が砂鉄に含まれていることが観察された。砂鉄に含まれる二酸化ケイ素と鉄は相反関係にあるので、鉄の含有量が少ないということはそれだけ二酸化ケイ素の量が多いということになる。そこで、砂鉄に含まれる鉄の含有量と酸化鉄の還元の関連を調べるためにテルミット反応を行い、生成する鉄について調べることにした。たたら製鉄操業は大掛かりな準備が必要であるが、テルミット反応はアルミニウム粉末を使い酸化鉄を短時間で還元する反応であり、試料の量も

少なく実験室で簡単に行えるためである。ただし、酸化鉄の還元力には違いがあると考えられるので、あくまでも大雑把な目安として判断することにした。

4. 研究方法

4.1 大気下における砂鉄熔融

たたら製鉄ではたたら炉内をCOの還元雰囲気状態に保ち、砂鉄を熔融したのちに還元している。ケラができないということは、還元がうまくできていないということなので、還元されずに熔融した状態を確認するために、島根砂鉄および2種類の鎌倉砂鉄(3.7 g/cm³、4.00g/cm³)を用意して熔融実験を行った。

4.2 テルミット反応

- ① アルミニウム粉末 4.0g と鎌倉砂鉄 10g を計り取り、乳鉢ですり潰すように十分に混合する。
- ② 5 ～10 分ほど混合したら、ろ紙に混合物を移しマッフルにのせる。
- ③ 混合物の上にマグネシウムリボンを立てて、その根元に塩素酸カリウムをのせる。
- ④ マグネシウムリボンに着火する。
- ⑤ マッフルの下に置いたビーカーに反応鉄が落ちて冷却するのを待つ。
- ⑥ 十分冷却したら、生成物を軽く金槌で叩き、内部に含まれる鉄を磁石で確認する。

4.3 鎌倉砂鉄の選鉱

島根砂鉄については採集ができないため、操業実績のある島根砂鉄を京都大学に依頼して準備していただいた。鎌倉砂鉄については本校前の海岸から稲村ガ崎海岸までの間で採集を始めたが、砂鉄密度のサンプリング調査結果から、稲村ガ崎海岸に近い砂鉄は本校前の海岸よりも密度が大きいことが分かり、2013 年から稲村ガ崎海岸で採集することにした。

採集方法は 20～30cm 程度砂浜を掘り、フェライト磁石を入れたペットボトルの外側に砂鉄を吸着させ、ポリバケツの上でペットボトル内の磁石を動かすことで砂鉄を簡単に集めることができる【図 3】。ネオジム磁石を使用すると、磁力の弱い砂鉄、つまり、鉄の含有量が少なく二酸化ケイ素の多い砂鉄や後述するがチタン鉄鉱を含む砂鉄も吸着されてしまうので、弱い磁石を使用した方が密度の大きい砂鉄を集めることができる。このようにして大雑把に選鉱した砂鉄の密度は 4.00g/cm³ 程度である。このあと、塩分を除去するために水洗いを行い、しばらく水につけたままにしておき、天日干しをして乾燥させる【図 4】。完全に乾燥したら、2 回目の選鉱作業を行う。2 回目の選鉱作業はペットボトルに吸着させた後、軽くゆすることで吸着力の弱い砂鉄を振るい落とす。この作業で砂鉄密度は 4.4 ～ 4.5g/cm³ 程度になり、採集した砂鉄の 70 ～80%の量になる。3 回目の選鉱も同様で、3 回目の選鉱が終わると砂鉄密度は 4.7 g/cm³ 程度になる。最後に、熱湯洗浄を行った。2kg 程度に小分けにした砂鉄を熱湯内で 30 分間軽く攪拌しながら浸けておく。この作業によって

砂鉄密度はさらに $0.02 \sim 0.03\text{g/cm}^3$ 程度高めることができ、最終的に 4.73g/cm^3 程度の砂鉄が得られた【図 5】。この熱湯洗浄は水洗いだけでは除去できなかった不純物を取り除けるのではないだろうかと考えて始めたものであるが、その効果の手ごたえを感じている。こうして選鉱が終了した砂鉄に砂鉄重量の 3%にあたる量の粘土砂を混ぜる。この粘土砂は熔融した砂鉄と反応し、ノロを生成させるためのものである。古代製鉄ではたたら炉は粘土でつくられており、3～4日かけて炉壁を侵食しながらケラが成長する。しかし、私たちの操業では材料や日程の都合でたたら炉を煉瓦で作製しているため、ノロをつくるための粘土砂を混ぜ込むのである。

4.4 たたら炉の組み立て

たたら炉は約 180 個の耐熱煉瓦を使って組み立てる。土台になる部分は 7 個の煉瓦を継ぎ目が揃わないように交互に組み合わせて 4 段積み上げ、そこから上は 1 段につき 7 個の煉瓦を使って外周を 22 段まで積み上げた。また、4 段目の炉底部にノロ出し口、5 段目と 6 段目に羽口（送風口）を 2 ヶ所設けるとともに、炉底部と最も高温になる炉の中央部に炉内温度を測定する熱電対を差し込めるようにして、煉瓦の隙間をモルタルで埋めた。このようにしてできあがった炉は、土台の煉瓦の高さもあるので、150cm 程度の高さの炉となる【図 6-1～6-6】。

4.5 たたら操業

たたら操業は炉内を十分乾燥させてから行うことが重要である。そのため、火入れを行い、木炭の燃焼を開始してから 2 時間程度は砂鉄の投入を行わず木炭だけを燃やし続けた。特に、降雨により煉瓦などが水分を含んでしまった時にはさらに時間が必要になると思われる。中世以降、奥出雲地方のたたら製鉄操業において、炉の乾燥を保つために地下構造の改良やたたら場全体を家屋の内部に取り込んだ高殿などが発達したのは、湿気が高くなると品質の良い鉄ができないためである。

十分に炉内が乾燥したらいよいよ砂鉄の投入を開始する。砂鉄と木炭は 10 分おきに投入するが、一度に投入する砂鉄は 1.5kg である。砂鉄の投入後、木炭を炉の上部まで補充する。この作業を 18～20 回程度行う。

予定していた砂鉄の投入が終わったら、しばらく木炭の燃焼が進むのを待ち、ある程度木炭の量が下がったところで、レンガを取り除きながら、炉内のケラを取り出す。

5. 結果

5.1 大気下における砂鉄熔融について

砂鉄に含まれる二酸化ケイ素の影響について調べるために、島根砂鉄 (4.44g/cm^3)、鎌倉砂鉄 (3.70g/cm^3)、鎌倉の砂 (3.17g/cm^3) を大気下の電気炉内で 1200°C に加熱熔融した。砂鉄 (Fe_3O_4 強磁性) を酸化すると酸化鉄(III) (Fe_2O_3 常磁性) となるため磁性が失わ

れる。島根砂鉄は真砂砂鉄のため、融点（1420℃）に達していなかったため熔融しなかったが、大気中の酸素と反応したため酸化反応が起こり完全に磁性が消失した。しかし、鎌倉砂鉄と鎌倉の砂は熔融したため、わずかに磁性が残った。このことから、溶けて粘性の高くなった二酸化ケイ素がガラス質となって周囲を包み、内部に残った砂鉄の酸化を妨げたと考えられる【図 7】。過剰の二酸化ケイ素は砂鉄の還元だけではなく、酸化も妨げていることが確認できた。なお、鎌倉砂鉄の融点は赤目砂鉄の融点として 1290℃と予測していたが、1200℃で熔融した状態が観察できたのは、砂鉄選鉱が十分ではないことを示唆している。

5.2 テルミット反応について

テルミット反応はアルミニウム粉末によって砂鉄を還元する。アルミニウムによる還元作用はたたら製鉄の木炭による還元作用よりも短い時間で反応が進むので、砂鉄密度によってどのような生成鉄になるのか大雑把に状況を捉えることができた。具体的には、砂鉄密度が大きくなると、得られる鉄は質量だけではなく形状も大きく球形に近い形になる。さらに、鎌倉砂鉄からまとまった鉄が還元されてできるのはその密度が約 4.2 ~ 4.3g/cm³ である。【図 8-1,8-2】そして、砂鉄密度がさらに大きくなると還元して得られる鉄はしっかりとした球形の塊になることもわかった。

5.3 砂鉄の選鉱について[4]

選鉱した砂鉄の密度と砂鉄に含まれる元素の割合を示したものが図 1-1 から図 1-5 であり、次の項目について見て取ることができる。ただし、図の中には島根砂鉄のデータも含めてあるが、島根砂鉄は既述のように私たちが採集することができなかつたため、操業実績のある調整された砂鉄を使って分析を行っている。したがって、ノロを生じさせる粘土砂が含まれているので、ケイ素分が高めになっていると考えられる。

- ① 砂鉄密度の増加とともに鉄の含有量は高くなり、ケイ素の含有量は低くなる。
- ② チタンについては、ケイ素、カルシウムおよびバナジウムと同様、密度の増加とともに含有量は減少した。しかし、これらの元素は互いに関連性があるのではなく、チタンの量が減少したのは磁力選鉱を工夫したことで、弱い磁力では吸い付かない砂鉄を取り除くことができたことによる。つまり、チタン含有量の多いチタン鉄鉱は磁力が非常に小さく、磁力の弱い磁石では吸着しにくいのである。そして、鎌倉砂鉄には見ただ目では区別できないが多くが含まれている。
- ③ 海岸で採集する浜砂鉄は海水の影響を受けるためにカルシウムが含まれることが多い。このカルシウムは砂鉄自体に含まれている可能性もあるが、顕微鏡で観察すると、小さな貝殻などが砂鉄に付着しているものも多々見られる。このような場合、丁寧な水洗いや熱湯洗浄、そして、比重分離が有効である。
- ④ バナジウムは島根砂鉄では 0.1%程度、鎌倉砂鉄には 0.6%程度共通して検出されたが、

パラメーターとして量をコントロールできなかったため、ケラ生成についてその影響について調べることができなかった。

5.4 たたら製鉄操業の結果

鎌倉砂鉄 28kg から得られたケラの重量は約 5.0kg で、収率は 20%に届かなかったが、得られたケラの純度は高く、サンプリング結果は鉄の純度は 99.9%を超えた。また、得られたケラと使用した砂鉄の元素分析と比較すると、2015 年の鎌倉砂鉄は還元されてノロとともに不純物が取り除かれたことが分かる【図 9-1~9-3】。この結果は、2014 年の操業と比較すると、砂鉄選鉱による効果だけではなく、炉内温度制御および炉内構造の改良によるものと考えられる。

6. 考察

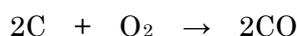
砂鉄に含まれている元素は単体で存在しているのではなく、酸化物として存在している。そのため、砂鉄にケイ素が過剰に含まれると、二酸化ケイ素が融解してガラス質となって酸化鉄の還元および酸化を妨げてしまうことが実験によって示された。また、ケイ素と鉄の含有量は相反関係にあるため、砂鉄に鉄がある程度以上含まれていなければ、還元されることはなくケラを得ることはできないのである。

テルミット反応の結果からは、砂鉄に含まれる鉄の含有量が少なければ還元反応は進行しないということが考えられる。つまり、化学反応である以上、反応物質の適度な割合があり、量的な不均衡があると予測される反応は進行しないことが分かる。特に、 4.5 g/cm^3 を超える砂鉄では得られる鉄の形状も球形のひと塊のものになる。

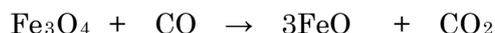
たたら操業について、たたら炉内での化学反応式はまとめると次式であらわされる。

$\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{砂鉄}) + 2\text{SiO}_2(\text{砂}) + \text{C}(\text{木炭}) \rightarrow \text{Fe}(\text{ケラ、鉄}) + \text{CO}_2 + 2\text{FeSiO}_3(\text{ノロ・スラグ})$
段階的な反応は次のとおりである。

① 木炭が不完全燃焼することにより一酸化炭素が生じる。



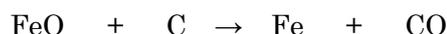
② このとき生じた一酸化炭素が酸化鉄を還元させる。砂鉄は四酸化三鉄 Fe_3O_4 という状態になっており、 $300\sim 800^\circ\text{C}$ の温度で次の反応が進行する。



③ さらに高温になると、2 価の酸化鉄が単体に還元される。



④ 950°C 以上の高温では、炭素は直接酸化鉄を還元する。



この化学反応式で示されるように、砂鉄（酸化鉄）の還元には二酸化ケイ素が必要である。つまり、熔融した二酸化ケイ素がノロとなり、砂鉄に含まれるチタンやバナジウムな

どの不純物も分離すると考えられる。炉内を羽口から覗くと、半熔融状態の鉄が木炭の上に落ち、吸炭によって完全に熔融し炉底に落下する様子が観察できる【図 10】。このようにして砂鉄から鉄が分離されるのである。炉底では完全に溶けたノロと半熔融状態の炭素を含んだ鉄は比重差によって炉底で分離している。この状態のときにノロ出し口からの炉を取り出すことによって炉内に鉄が残るのである。

7. 結論

砂鉄には母岩の違いによって、チタンを多く含む赤目砂鉄とチタンの少ない真砂砂鉄に分類される。元素分析の結果、鎌倉砂鉄は赤目砂鉄であり、真砂砂鉄（1320℃）に比べて融点が低く（1290℃）ノロの融点に近い。これは、大気中における砂鉄の熔融実験によっても示すことができた。赤目砂鉄の融点はノロの融点に近いので、炉内温度の制御だけでは鉄とノロを分離することが難しい。2013年の操業ではノロ出しの際、ノロにケラが混ざってしまい、ノロとケラが一緒に出てしまっていることが分かる。【図 11】。しかし、十分な選鉱に加えて、炉内構造や炉内温度制御することで、2015年の操業ではノロとケラの成分に明らかな違いがみられる。すなわち、ケラの分離に成功したと判断できる。

これまで、出雲地方を中心とする地域以外のたたら製鉄において、古代製鉄法では赤目砂鉄を使用して高純度の鉄をつくることは困難とされていたが、今回の私たちの操業結果によって赤目砂鉄からも高純度の鉄をつくることは可能であることが示された。しかし、私たちの操業は熱電対を使用した炉内温度管理などを徹底した結果であり、勘と経験に頼っていた時代の製鉄作業は困難であったと考えられる。このような要因が鎌倉たたら製鉄衰退の原因のひとつであると結論に至った。

8. 脚注、参考文献など

- [1] たたら製鉄の近代史 渡辺ともみ 吉川弘文館
- [2] 例えば隅谷正峰氏
- [3] 日立金属【たたらの話 <http://www.hitachi-metals.co.jp/tatara/index.htm>】
- [4] 2013年以降の元素分析は蛍光 X 線分析 XRF によって行った。

9. 謝辞

本研究は5年間継続して行って来ました。2011年に始めてから今年の夏まで、京都大学の山末英嗣先生とともに、TAとしてご指導して下さった芝大輔さん、林洋平さん、安達謙さん、梶原崇志さん、遠藤晋さん、栗原雄太さん、諸富恵一郎さん、山下正峻さん、大澤貴弘さん、坂本大記さんに感謝申し上げます。5年目にしてようやく純度の高い鉄を作ることに成功しました。かつての失敗体験から、今年こそは成功できるようにと取り組んできましたが、良い結果が得られたのは京都大学の皆様の賜物です。研究には終わりはありません。これからも気持ちを新たに続けていきたいと思えます。

10. 図表

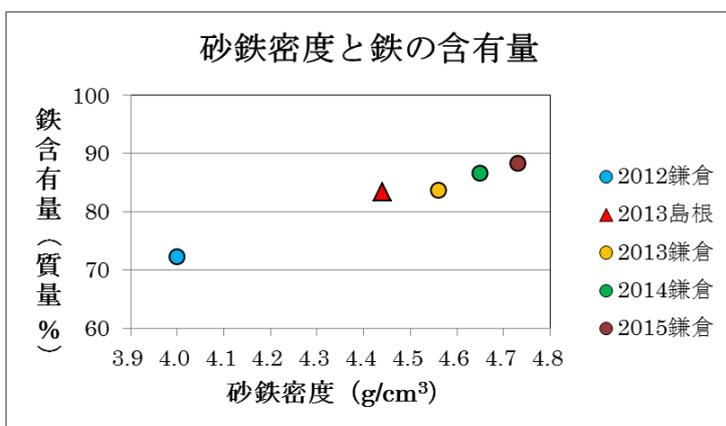


図 1-1. 使用した砂鉄に含まれる鉄 Fe の割合

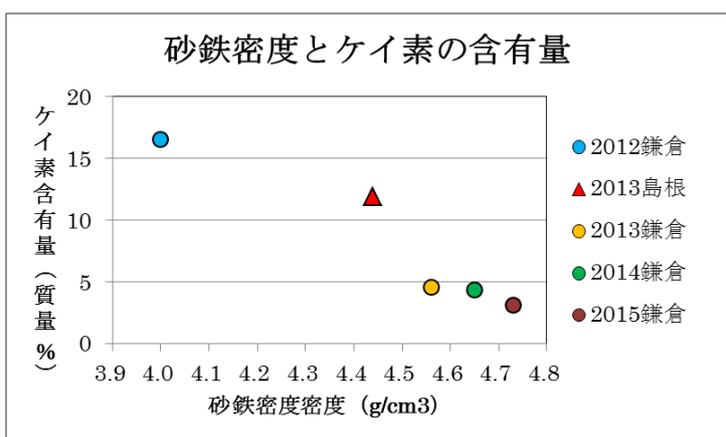


図 1-2. 使用した砂鉄に含まれるケイ素 Si の割合

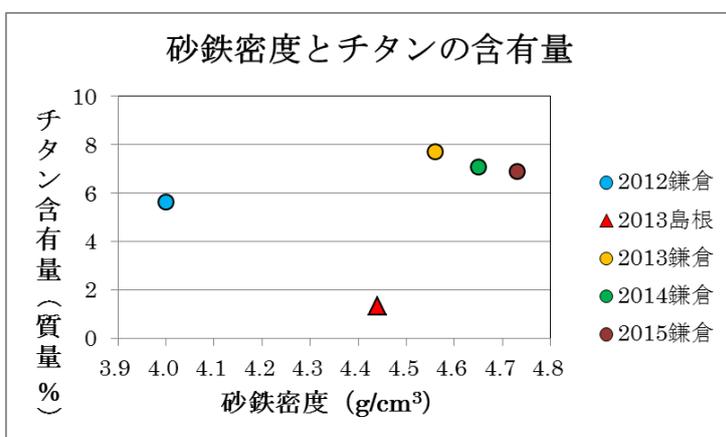


図 1-3. 使用した砂鉄に含まれるチタン Ti の割合

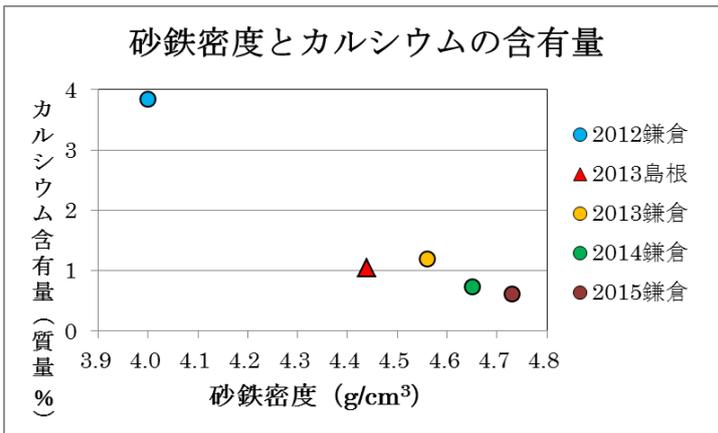


図 1-4. 使用した砂鉄に含まれるカルシウム Ca の割合

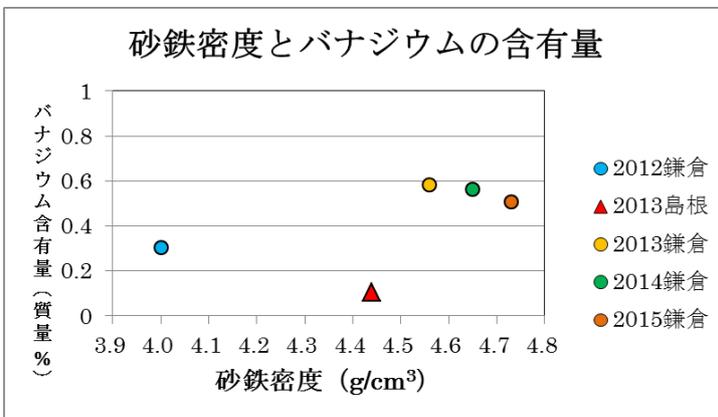


図 1-5. 使用した砂鉄に含まれるバナジウム V の割合



図 2. 過剰の二酸化ケイ素の中に鉄が存在しているのが観察できる。



図 3. ペットボトルの中にフェライト磁石を入れて砂鉄を採集する。ペットボトル内の磁石を動かすことで、砂鉄が下のバケツに落ちる。



図 4. 砂鉄を小分けにして水槽にいれ、天日干しする。

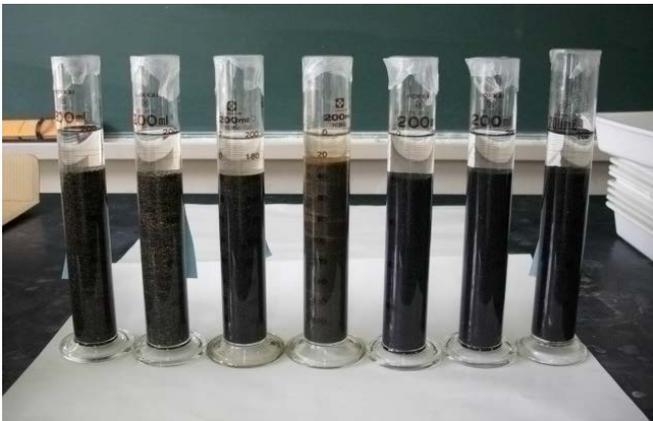


図 5. 砂鉄の密度はメスシリンダーを使用して測定する。



図 6-1. たたら炉の土台づくり。1段につき 10 個の煉瓦を並べてつくる。



図 6-2. 羽口の取り付け。隣り合う煉瓦に隙間ができないように、モルタルを塗り込ながら積み上げていく。



図 6-3. 出来上がったケラを取り出しやすいように、前面が開けられるように煉瓦を積む。



図 6-4. 最も高温になる炉の中央部と炉底に熱電対を設置し、常に炉内温度を監視できるようにする。



図 6-5. 完成したたたら炉に木炭を入れ、2 時間程度このままの状態を燃焼させ、炉全体を乾燥させる。



図 6-6. 横羽口に取り付けた内部監察用の穴に緑色のフィルターを取り付けた。ここから炉内に空気を送り込むので塩化ビニルのパイプでも溶けない。

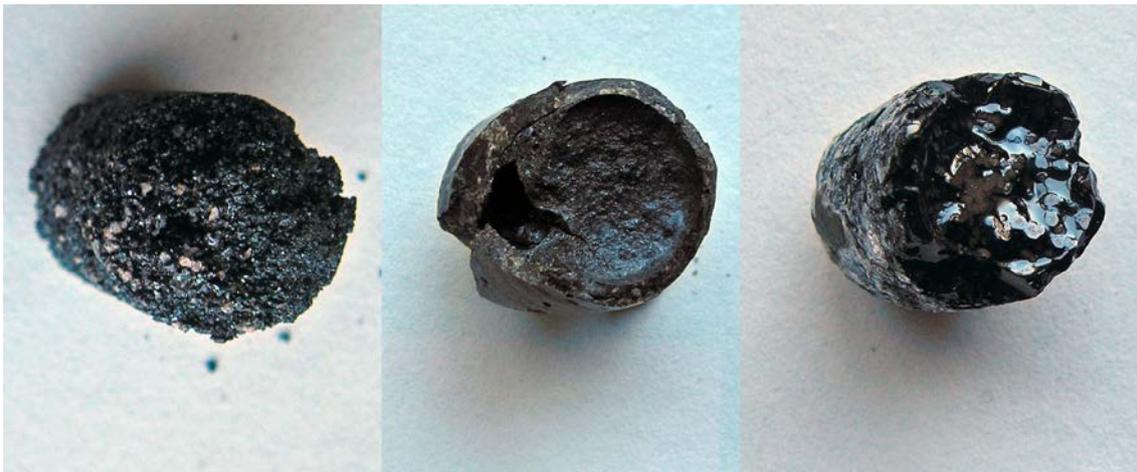


図 7. 電気炉内で砂鉄および砂を 1200℃で加熱溶解した。二酸化ケイ素が多いと粘性の高いガラス質に固化される。大気中の融解のため、砂鉄は酸化され磁性は消失するが、二酸化ケイ素の量が多く含まれる場合はわずかに磁性が残る。左から島根砂鉄(4.44g/cm³)、鎌倉砂鉄(3.70g/cm³)、鎌倉海岸の砂(3.17g/cm³)。



図 8-1. テルミット反応によって砂鉄がアルミニウム粉末によって還元されている様子。砂鉄から酸素を奪って反応するため、水中でも炎が消えない。



図 8-2. テルミット反応によってできた鉄。砂鉄密度が 4.53 g/cm³を超えると、大きな塊の鉄になる。

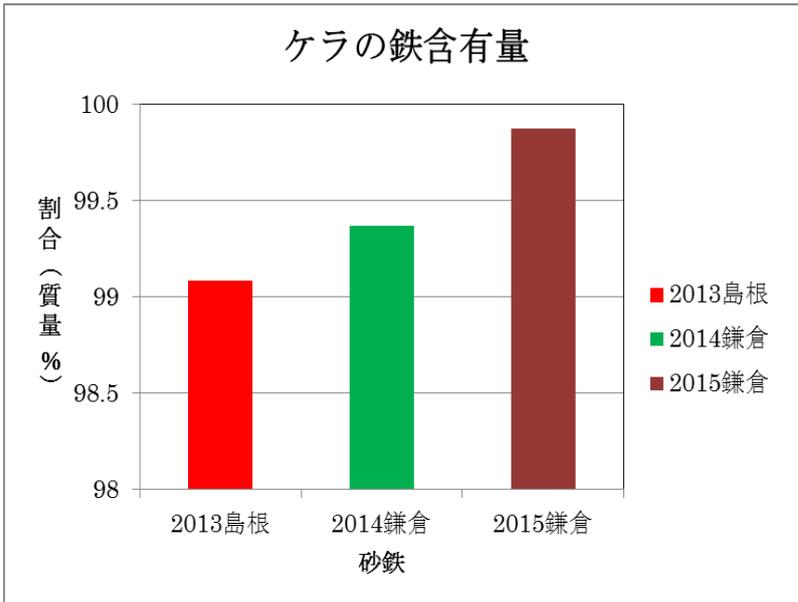


図 9-1.ケラに含まれる鉄のサンプリング結果。鎌倉砂鉄は選鉱技術の向上によって高純度の鉄が得られるようになった。

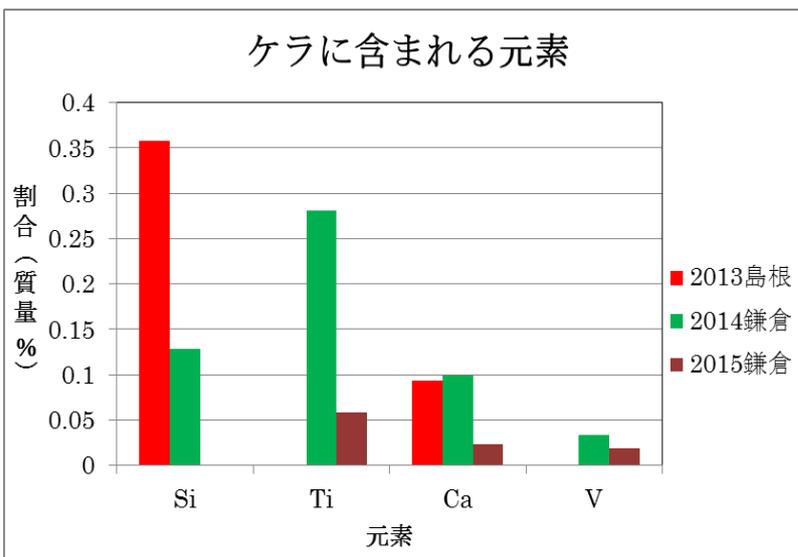


図 9-2. ケラに含まれる鉄以外の元素のサンプリング結果。島根砂鉄はケイ素が他に比べ多く残った。2014 鎌倉砂鉄はチタンが取り除けていないのが分かる。一方、2015 鎌倉砂鉄ではほとんどの元素を取り除くことに成功した。



図 9-3. ノロ出し。砂鉄に含まれる不純物をノロとして炉底に開けた穴から流し出す作業。ノロ出し穴を塞いでいた煉瓦をどけると、炉底に溜まっていたノロが流れ出してくる。

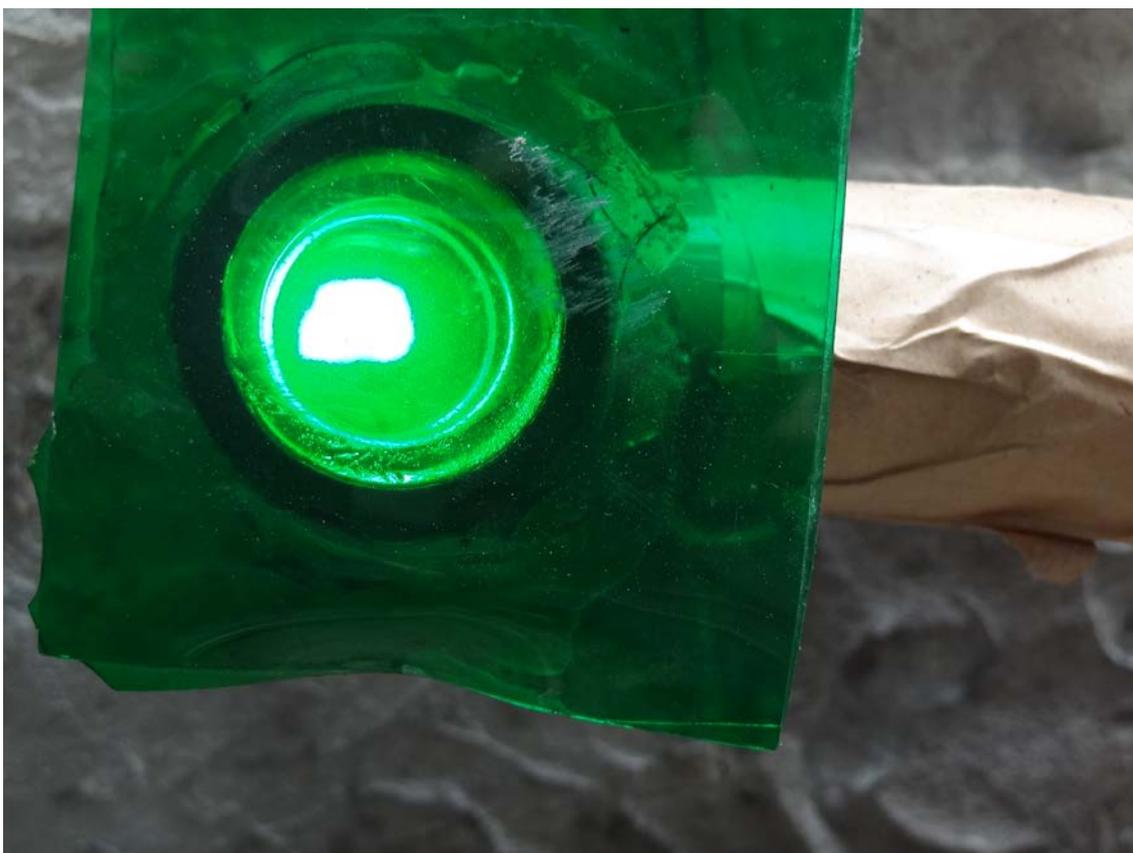


図 10. 炉内の様子。熔融した砂鉄が木炭の上に落ち、吸炭して完全に溶け、炉底の落ちる様子が観察できる。

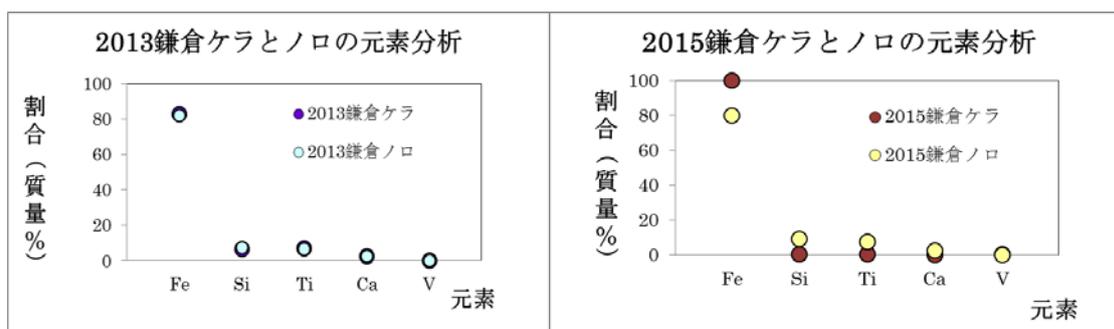


図 11. 2013 年と 2015 年の操業で使用した鎌倉砂鉄のノロとケラの元素分析結果。2013 年の結果ではノロとケラの成分の差がなく、ノロ出しの際、ケラも同時に炉外に出されていることが分かる。一方、2015 年の元素分析結果ではノロとケラの成分は異なり、不純物はノロとなって出されていることが分かる。