

Reproduction of Tataru Steelmaking from Akome iron-sand and Identification of the Origin of Raw Iron

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-02-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 木浪, 信之 メールアドレス: 所属:
URL	https://otsuma.repo.nii.ac.jp/records/6777

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



赤目砂鉄を原料とするたたら製鉄の再現と原料砂鉄の産地特定について

木浪 信之*

要 約

我が国の古代製鉄は、原料を鉄鉱石から各地で採取した砂鉄に転換した結果、その砂鉄に適応した製鉄が確立され、地域特有の地鉄がつくられた。中世になると、奥出雲を中心とする地域の製鉄が発展する一方で他の地域の製鉄は衰退したため、各地の製鉄方法について詳しいことは明らかになっていない。

本研究では、奥出雲砂鉄に加え、鎌倉、東浪見、種子島の砂鉄鉱床から採取した4種類の砂鉄を原料として、古代製鉄を再現した。また、砂鉄とケラ（生成鉄）に含まれる元素を調べると、製鉄工程で分離される元素の割合に差異があることがわかった。この結果を応用すれば、ケラに残留する元素の割合から原料となった砂鉄の産地が特定できる可能性がある。古代鉄の原料となった砂鉄産地が特定されることにより、衰退した各地の製鉄方法だけではなく、古代人の交易や遺跡調査に関して新たな知見が得られることが期待できる。さらに、砂鉄は地質調査のパラメーターとなり得るか考察した。

1. はじめに

日本の製鉄は縄文時代末期に大陸から鉄器が持ち込まれたことに始まった。弥生時代になると、鍛冶技術に続いて製鉄技術が伝播し、各地に広まった。時代が下り、古墳時代になると全国で製鉄が行われていたことが遺跡調査から明らかになっている。製鉄の黎明期には、原料は大陸から運ばれた鉄鉱石が使用されていたが、供給不足により砂鉄が製鉄原料に換えられたと推測される。この原料転換が日本独自の製鉄工程を生み、たたら製鉄に発展した。古代から中世までのたたら製鉄では、炉の形状や送風装置が地域ごとに異なり、

各地域で産出する砂鉄に適応した製鉄方法や製鉄工程が確立された結果、地域特有の地鉄がつくられた。その後、近世になると、奥出雲を中心とする中国地方の製鉄が発展し、品質の良い鉄を安定して供給できるようになったが、それ以外の地域の製鉄は衰退した。そのため、各地で確立された製鉄方法について詳しいことはわかっていない。

たたら製鉄は、化学的には原料の砂鉄を鉄の融点（1538℃）より低い1200～1300℃の低温で溶融還元して鉄（銑鉄または鋼）を得る化学反応である。鉄酸化物にとって炭素は強力な還元剤になるため、砂鉄がたたら炉内で溶融して合金液滴になると、炉内で発生した一酸化炭素によって還元

*神奈川県立横須賀高等学校

反応が進行する。炉内が高温になると、合金液滴は接触する木炭からも還元されるようになり、木炭の炭素が合金液滴に取り込まれる吸炭が起こる。その結果、融点が降下し、より低い温度で鉄と炭素の合金液滴が形成される。この反応は発熱反応として進行するとともに、不純物を分離した合金液滴となり炉底に滴下し、純度の高い鉄となる。このとき生じた不純物をノロ（鉄滓、スラグ）、純度の高まった鉄がケラである。両者は比重と融点が異なるため、完全に溶融したノロの中に半溶融状態のケラが沈んだ状態で分離していると考えられる。このとき、炉底に設けた穴（ノロ出し口）を開放すれば、完全に溶けたノロだけが炉外に流れ出て、ノロとケラを分離することができる。これが図1に示すノロ出しである。



図1. ノロ出し（2016年）

炉底に設けたノロ出し口を塞いでいた煉瓦をどけて、炉底に溜まったノロを外に流し出す。ノロ出しによって、炉内に生じたノロとケラを分離する。

ノロ出しによって炉内にはケラが残るので、ケラを十分に成長させたあとに炉を解体すればケラを得ることができる。ケラの中でも特に良質の部分を玉鋼（たまはがね）といい、日本刀の材料になるのはこの玉鋼だけである。

鎌倉にある稲村ヶ崎海岸は古くから砂鉄の産地として知られており、周辺には鎌ヶ谷（たたらがやつ）遺跡や深田製鉄遺跡がある。後者は飛鳥時代から平安時代前期頃までの遺跡と考えられてお

り、出土品の分析から鎌倉の砂鉄を使っていたことが報告された¹⁾。また、鎌倉は、鎌倉時代末期から南北朝時代にかけて優れた刀工が活躍し、その作風は後世の刀工に影響を与えたことは有名である。このように、鎌倉では製鉄や鍛造が古代から行われており、豊富な砂鉄を産出する稲村ヶ崎海岸が目の前にあるにもかかわらず、南北朝時代を過ぎると急速に衰退したのである。

2. たたら製鉄の再現

2011年と2012年に、京都大学のたたら炉を使用して奥出雲砂鉄と鎌倉砂鉄を原料にして同じ工程で製鉄操業を実施したところ、30 kgの奥出雲砂鉄からは純度の高いケラが約5.5 kg得られたが、同量の鎌倉砂鉄からはまったくケラができなかった。このとき使用した奥出雲砂鉄は山から採取した山砂鉄、鎌倉砂鉄は鎌倉の海岸から採取した浜砂鉄である。密度と元素分析の結果、鎌倉砂鉄は選鉱が不十分のため岩石成分 SiO_2 が多く、鉄の含有量が奥出雲砂鉄に比べて少なかったことがわかった。また、砂鉄はチタンの含有量によって分類されており、奥出雲砂鉄はチタンの含有量が1%以下の真砂砂鉄、鎌倉砂鉄はチタン含有量が7%を超える赤目砂鉄であることもわかった。真砂砂鉄は赤目砂鉄に比べて融点が高く、鉄を分離しやすい特徴があるが、赤目砂鉄は融点が低いにも関わらず還元速度が遅い（特に浜砂鉄は還元率が悪い報告がある²⁾）ので、ケラとノロを分離するためには適正な炉内温度の制御が必要となる。赤目砂鉄から良質のケラができ難い要因は、炉内温度制御が難しいことによることがわかった。

砂鉄分析の結果を踏まえ、2013年の操業では鎌倉砂鉄の密度を奥出雲砂鉄を超えるように選鉱したが、この年の操業でもほとんどケラを得ることはできなかった。ケラの断面を観察すると、ノロの中に鉄が点在または筋状に分布している様子が見られた。これは、ケラとノロが炉内で分離していないことを示している。また、合金液滴の生成状況を調べるために実験室の電気炉を用いて各砂鉄サンプルを1200℃に加熱し、大気雰囲気下で

の溶融状態を調べた。その結果を図2に示す。



図2. 砂鉄の溶融状態

(a) 奥出雲砂鉄、(b) 鎌倉砂鉄（2013年）、(c) 鎌倉砂鉄（2012年）

奥出雲砂鉄 (a) は砂鉄に含まれるガラス成分が溶融したため、砂鉄全体がひとまとまりになったが、砂鉄の粒はほとんど溶融していない。砂鉄は酸化したため、磁力は完全に消失している。2013年の操業で使用した鎌倉砂鉄 (b) も完全に溶融していないが、砂鉄に含まれていた岩石成分が溶融して全体を包んだ結果、弱い磁力が残った。2012年の操業で使用した鎌倉砂鉄 (c) は、全体が溶融した岩石成分で覆われ、砂鉄がガラスに包まれた状況となり、強い磁力が残った。つまり、大気中での加熱によって砂鉄に含まれるガラス成分が溶け出して全体を覆ったため、内部の砂鉄が酸化されていない。

磁力を持つ砂鉄は Fe_3O_4 と示される構造であり、酸化されると式 (1) のように、磁力のない Fe_2O_3 になる。



電気炉内での溶融実験の結果、岩石成分を多く含む砂鉄は、溶けた岩石成分が砂鉄を覆ってしまうために酸化も還元も進行しないことがわかった。すなわち、不十分な砂鉄選鉱では、砂鉄は還元されないのである。

そこで、2014年の操業では、これまで以上に密度を高くした砂鉄を準備したが、ケラの鉄含有量は多少増えたものの、顕著に良いケラができたわけではなかった。この年の結果から、製鉄のパラメーターは砂鉄に含まれる鉄の含有量だけではなく、別の要因があるのではないかと考えた。

造岩鉱物に多く含まれる17種類の元素につい

て、奥出雲砂鉄と鎌倉砂鉄の成分分析を行い比較したところ、明らかな差が見られたのはチタン、カルシウム、バナジウム、アルミニウム、マグネシウムの5元素であった。

砂鉄はマグマが固化してできた火成岩が母岩であり、火成岩は造岩鉱物が集まってできている。すなわち、砂鉄の母岩が異なるということは造岩鉱物が異なり、含まれる元素にも差異が生じている。真砂砂鉄に分類される奥出雲砂鉄は主に花崗岩を母岩としているが、赤目砂鉄に分類される鎌倉砂鉄は閃緑岩や安山岩が母岩となっている。これが2種類の砂鉄の含有元素の差となっていると考えたが、カルシウムについては造岩鉱物による差だけではなく、風化の過程による海水による影響ではないかと考えた。それは、鎌倉砂鉄の採取場所は海岸であることと、同一サンプルによる含有量の差が大きかったことによる。チタンなどのように造岩鉱物であれば砂鉄選鉱によって除去することはできないが、海水の影響によるものならばある程度は除去することは可能であると考え、洗浄と選鉱を繰り返した。その結果、カルシウムの割合を4 wt%程度から0.3 wt%まで減少させることができた。特に、選鉱方法のひとつとして取り入れた30分以上の熱湯洗浄は海水の影響の除去と砂鉄密度の増加に効果があったと思われる。

2015年の操業では炉内温度制御に失敗し、炉内でノロを固化させてしまい、ノロ出しができなかった。そのため、ケラにはノロが食い込み、鬆も混ざってしまい、空洞の多い状態になったが、非常に純度の高い鉄ができていることがわかった。この結果から、同様の砂鉄選鉱を行い、炉内温度を確実に制御すれば良質のケラができることを確信した。そして、2016年の操業では図3に示すような良質のケラを得ることができた。

その後の操業では、鎌倉砂鉄だけではなく種子島砂鉄（鹿児島県）、東浪見砂鉄（千葉県九十九里浜南端）など、採取地域の異なる赤目砂鉄からも純度が高く、鬆のない良質のケラを安定してつくることできるようになった。既述のように、赤目砂鉄から良質のケラをつくることは難しいと考えられていたが、我々は砂鉄の選鉱方法やた

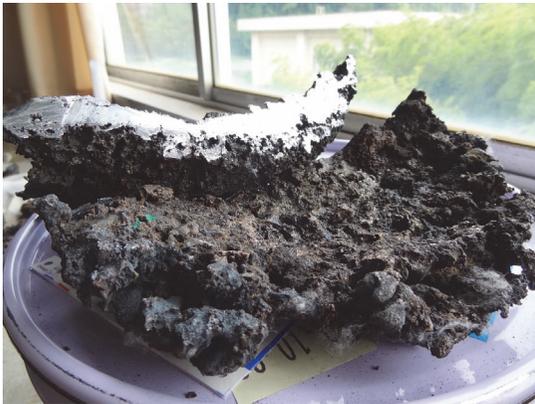


図3. 生成したケラ (2016年)

厚み 50 ~ 60mm、直径 300 ~ 350mm、重量約 4.5kg。鬆がなく、ノロの食い込みも少ない。大杯のような形状で、上部表面には合金液滴の雫が滴下してできた跡が見られる。

ら炉内の温度制御を適切に行うことで、赤目砂鉄からケラをつくる操業工程の確立に成功した。製鉄のパラメーターには、砂鉄選鉱および炉内温度制御に加えて、送風量、送風方向、炉の形状、炉高、装荷比(砂鉄/木炭)、木炭の質、加える粘土の量などがあり、赤目砂鉄は真砂砂鉄に比べてそれぞれの自由度がかなり小さいことがわかった。つまり、少しでもパラメーターが変化すると還元反応が進行せず、良質のケラが得られないのである。

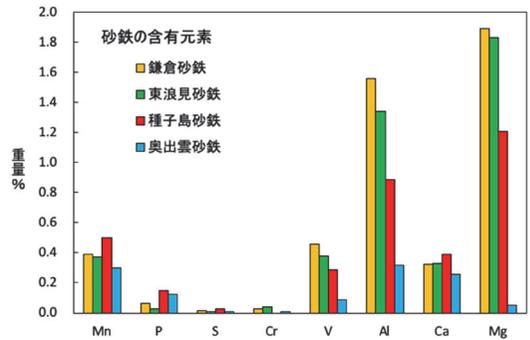
3. 原料砂鉄の特定

同じ赤目砂鉄に分類される鎌倉砂鉄および東浪見砂鉄と種子島砂鉄を詳しく分析すると微量に含まれる元素の割合には差異があった。砂鉄は火成岩の風化作用によって、鉄を含む磁鉄鉱やチタン磁鉄鉱が分離してできた粉体である。地下深くのカンラン岩を主成分とするマグマは周囲の岩石を溶融して混合しながら上昇するため、様々な鉱物を溶かし込む。また、マグマは結晶分化作用によって成分を変化するため、砂鉄は産出する地域によって微量元素の含有量が異なることがある。表1は鎌倉砂鉄、東浪見砂鉄、種子島砂鉄、奥出雲砂鉄の微量元素の分析結果である。

マンガンとカルシウムについては4種類の砂鉄の差異は明確ではないが、バナジウム、アルミニウム、マグネシウムについては、種子島砂鉄と奥出雲砂鉄は鎌倉砂鉄および東浪見砂鉄と割合が異なっていることが明確である。

表1. 砂鉄の元素分析結果

鎌倉砂鉄、東浪見砂鉄、種子島砂鉄、奥出雲砂鉄に含まれる特徴的な元素の含有量を示す。



次に、鎌倉砂鉄から得られたケラについて鍛造の可否について調べた。刀匠にケラの作刀を依頼したところ、図4に示す短刀を制作することができた。鎌倉砂鉄を原料とした鍛造刀の制作記録を確認したところ、鎌倉たたら製鉄が衰退した室町時代以降は記録がないことがわかった³⁾。

鎌倉砂鉄に含まれる元素の中で、製鉄および鍛造によって量的な変化に特徴のある元素を詳細に調べた。多くの元素は合金液滴の生成により不純物として分離されるが、リンと硫黄、そして銅とニッケルは他の元素と変化の割合が異なる。その結果を表2に示す。

リンと硫黄は砂鉄からケラになるときに多くが分離されるが、鍛造の前後では含まれる割合はほとんど変化しない。また、銅とニッケルについては砂鉄に含まれる割合もケラおよび鍛造後に含まれる割合もほとんど変化していないことがわかる。このような残留元素の割合を調べて、遺跡や寺社仏閣から得られた出土鉄や古釘の原料となった砂鉄の産地を特定できると考えている。

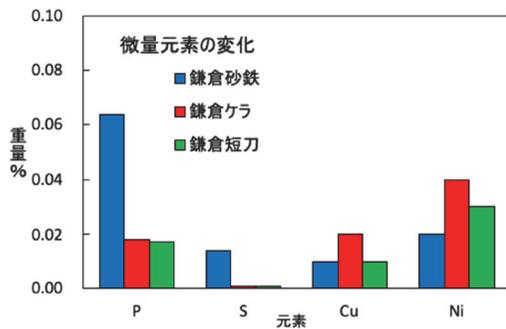


図4. 鍛造した短刀

2016、2017年にできたケラを鍛造してつくった短刀。

表2. 砂鉄、ケラ、短刀に含まれる微量元素

鎌倉砂鉄がケラ、短刀と変化するときの特徴的な元素の含有量変化を示す。



4. 今後の課題

鎌倉砂鉄と一部の東浪見砂鉄からは微量な銅とニッケルが検出されたが、種子島砂鉄と奥出雲砂鉄からは両元素とも検出されなかった。銅は鉄と合金をつくらないが、鉄に溶け込むと分離することが難しく、融点の違いにより結晶粒界が生じて

熱間加工を困難にする元素である。つまり、銅が溶け込んだ鉄は鍛造できない。これが鎌倉砂鉄を原料にした作刀を衰退させた要因となったと考えるに至った。今回、本研究において短刀を鍛造できたのは、砂鉄選鉱の工程で銅を多く含む砂鉄を分離できたのではないかと考えている。この選鉱過程について詳細に調べる予定である。さらに、分析結果では原料となった砂鉄に含まれる銅の割合は0.01～0.02 wt%であるが、この割合は鍛造が可能な含有量か否か、あわせて調べることとしている。

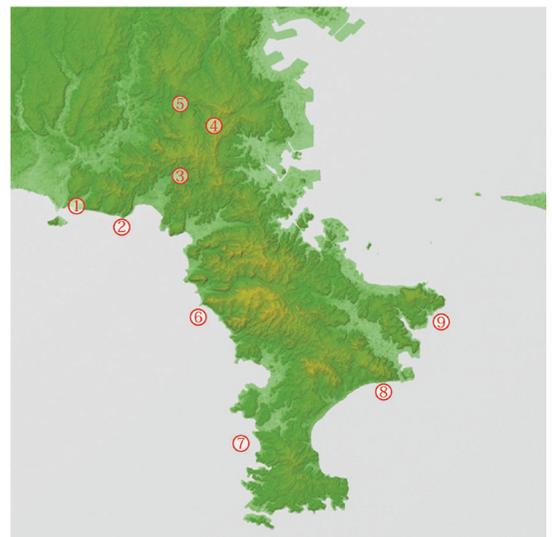


図5. 三浦半島の地図 (SRTM-1 Ver.3 Miura Peninsula)

- 1 鎌倉高校 (鎌倉市)
- 2 稲村ヶ崎 (鎌倉市)
- 3 鎌ヶ谷 (たたらがやつ) 遺跡 (鎌倉市)
- 4 深田製鉄遺跡 (横浜市)
- 5 鍛冶ヶ谷 (横浜市)
- 6 長者ヶ崎 (葉山町)
- 7 三戸浜 (三浦市)
- 8 野比 (横須賀市)
- 9 たたら浜 (横須賀市)

通常の地質調査では、地層や化石などが調査対象であるが、砂鉄が調べられることはない。三浦半島の砂鉄採取場所である砂鉄鉱床を探したところ、図5の②稲村ヶ崎に加え、⑥長者ヶ崎、⑦三

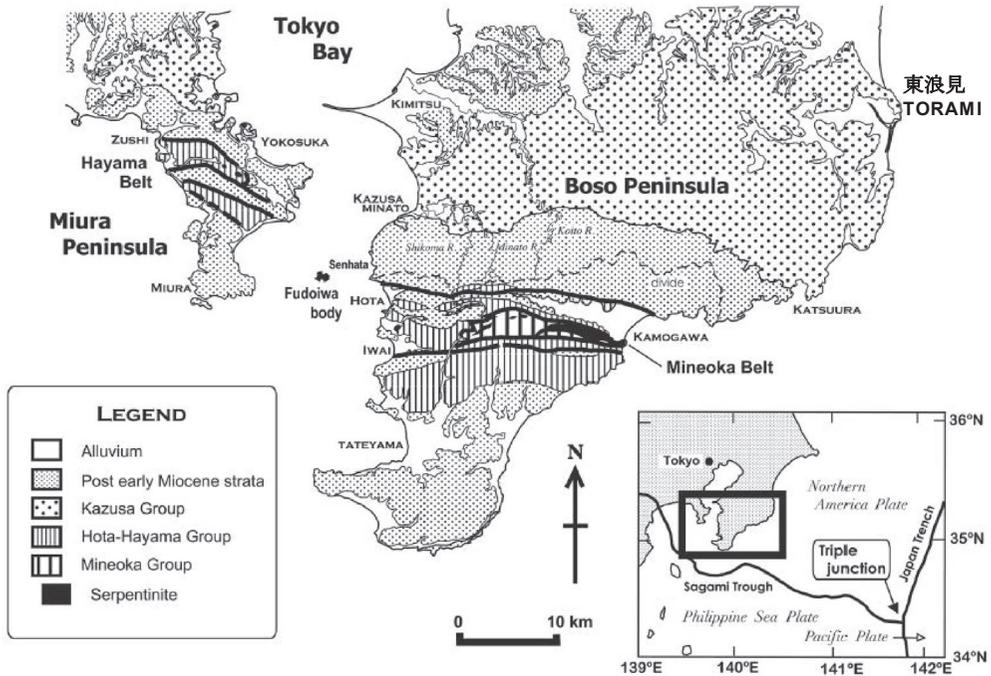


図 6. 三浦半島および房総半島南部の地質区分；葉山－嶺岡帯（高橋直樹、柴田健一郎、平田大二、新井田秀一 (2016) 葉山 - 嶺岡帯トラバース、地質学雑誌、122, 8, 375-395)

戸浜、⑧野比、⑨たたら浜に漂砂鉄床を発見した。

XRF 分析によると、これらの砂鉄の含有元素はほぼ同一の割合であることがわかった。距離的に近いこともあり、同じ起源のマグマからできたと判断できる。同様に、東浪見砂鉄の元素分析結果も鎌倉および三浦半島の砂鉄とよく一致しており、一部のサンプルでは銅も検出された。図 6 に示すように、三浦半島および房総半島は、フィリピン海プレートが北米プレートの下に沈み込む境界（相模トラフ）の北側にあり、北米プレートの地質が押しつぶされてきたと考えられる。その結果、両半島に渡って特徴的な地質構造の葉山嶺岡帯がつながっている。このことから、九十九里浜南端の漂砂鉄床から採取された東浪見砂鉄も、三浦半島の砂鉄と同じ起源をもつマグマからでき

ている可能性は十分考えられ、今後の研究課題としたい。

謝辞

本研究は科学研究補助金（課題番号 16H00294, 17H00287）、下中科学財団（H30 年度）の助成を受けて実施した。

注釈

- 1) 横浜市歴史博物館
- 2) 日立金属たたらの話
- 3) 鎌倉歴史文化交流館

Reproduction of Tataru Steelmaking from Akome iron-sand and Identification of the Origin of Raw Iron

NOBUYUKI KINAMI

Kanagawa Prefectural Yokosuka High School

Abstract

The raw material of ancient steelmaking in Japan was converted from iron ore to iron-sand collected at various locations, so that the steelmaking process adapted to the iron-sand was established, and the local iron was created. In the Middle Ages, steelmaking around Okuizumo developed, while steelmaking in other areas declined, so we do not know much about the steelmaking methods in each area.

In this study, in addition to Okuizumo iron-sand, ancient steelmaking was reproduced using four types of iron-sand from Kamakura, Torami, and Tanegashima iron-sand deposits. Moreover, when the elements contained in iron-sand and kera were examined, it was found that there was a difference in the ratio of elements separated in the steelmaking process. This result indicates the possibility that the ratio of elements remaining in the kera can identify the production area of raw iron-sand. By identifying the iron-sand production area that became the raw material of ancient iron, it is expected that new knowledge will be obtained not only about the reproduction of steel production methods in various areas that have declined, but also with regard to ancient trade and ruins surveys. Furthermore, we considered whether iron-sand could be a parameter for geological surveys.

Key Words (キーワード)

Ancient steelmaking (古代製鉄), Tataru steelmaking (たたら製鉄), Kamakura iron-sand (鎌倉砂鉄), Akome iron-sand (赤目砂鉄), Iron sand beneficiation (砂鉄選鉱), Miura Peninsula (三浦半島), Hayama Mineoka Belt (葉山嶺岡帯)