

## リモナイトによる製錬実験(1)

野島 永・平尾英希

### 1. はじめに

広島大学文学研究科考古学研究室では、2006年10月、2007年3月および2010年11月に、円筒形小型炉による砂鉄・鉄鉱石を原料とした鉄製錬実験(古瀬・グザビエ他2014)、2008年1月に鋳物鉄の熔解と鋳造実験を行ってきた(野島編 2008)。今回これら製錬実験の継続の一環として、阿蘇リモナイトを鉄原料とし、鉄素材を得る簡易な製錬作業を行うこととした<sup>(1)</sup>。阿蘇リモナイトは褐鉄鉱や湖沼鉄とも呼ばれる黄土色の土で、阿蘇カルデラの湖水に土壤微生物の鉄バクテリアが繁殖し、沈殿堆積した物質である。加熱・水簸するとベンガラ(朱土・岱赫)を生産することができ、古くから彩色などに使用されてきた。

弥生時代の鉄素材は日本列島で独自に生産されたものではなく、その多くが舶載されたものとする想定がほぼ定説化している。弥生時代中期には中国大陸東北部の鋳造農具破片、後期には韓半島南部の鉄鉱石起源の塊錬鉄素材が流入してきたものとされる<sup>(2)</sup>。しかし、その一方で熊本県阿蘇山周辺の地域において、弥生時代後期の集落遺跡から多量の鉄器が出土し、鉄滓が頻繁にみられることから、阿蘇リモナイトが鉄原料であったとも想定されており、今後検証されるべき論点ともなりうる<sup>(3)</sup>。

以上のような経緯から昨年2014年9月20日、この種の褐鉄鉱原料を還元させる製錬実験を行なった。以下に備忘録として今回の実験作業の経過と観察についての事実記載をしておきたい。また、今後学生諸氏とともにこのような製錬作業を数回くり返して原料鉄を得、素材鉄として精錬し、弥生時代における鉄器製作を想定した鍛冶実験を行なう予定にしている。

### 2. 設備と原料

#### (1) 設備

まず、耐火煉瓦50個を用いて製錬炉となる七輪の下に土台を作った。2個一組にして正方形に敷き並べ、その上に周囲を囲うようにコ字状に煉瓦2個一組、13対並べて設置し、その内部に耐火粘土を充填し、炉が動かないように固定した(写真2)。また、耐火性の高い珪藻土の練り物で作られた七輪(大嶺日の丸燃料株式会社製)を上下に2つ口縁を合わせて炉として使用することとし、下釜の七輪内部には造滓剤となる耐火粘土を貼った(写真1)。送風管(羽口)からの風が吹きこむ送風口付近にリモナイト原料が収斂していくように、七輪の下部側に粘土をやや厚く貼りこみ、炭を燃焼させて強制的に乾燥させた(写真3)。また、天地逆にして上釜となる七輪底部にリモナイトと炭を投下するための円孔を鑿で穿ておいた。そして、炉内温度を保持するためにブロー送風機(昭和電気株式会社製SB-201-R3A3)を使用し、下釜となる七輪の送風口に向けて送風することとした。送風距離と送風量を調節し、炉内温度が一定になるように設置した(写真4)。炉内温度の計測には、デジ

タル温度計 (CUSTOM 社製 CT-1310D) に、熱電対温度計用センサー (CUSTOM 社製 LK-1200i) を接続して使用した。

## (2) 鉄原料

(株)日本リモナイトから阿蘇リモナイトの原料を提供いただいた。粉体状のリモナイトは水分を含ませて捏ね、炉内に投入しやすいように直径 2～3mm から 1cm 前後の粒状に成形し、行平鍋で加熱し、攪拌して乾燥させておいた。

## 3. 作業分担と実験経過

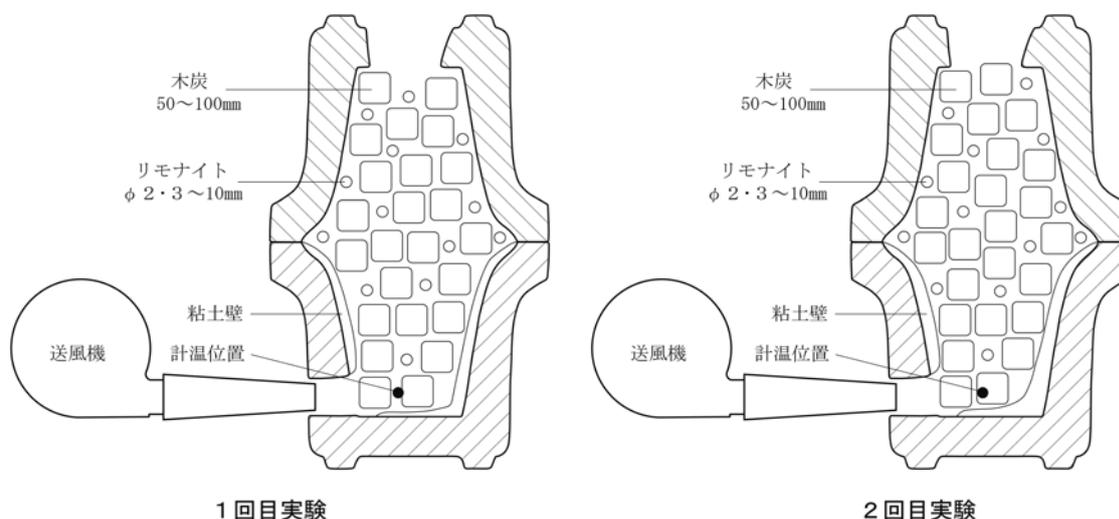
### (1) 作業分担

炉内の温度計測には 4 年生の古久保と 3 年生の池西が担当した。カメラ係として 3 年生の香坂・福地、ビデオ係として同じく 3 年生の平本・貝原、温度計係として 2 年生の佐々木らがそれぞれ分担した<sup>(4)</sup>。なお、実験の解説と作業の指示は大学院生の平尾が行い、藤井・市川が補佐した。

### (2) 炉の構造 (第 1 図)

**1 回目実験** 上述したように、ほぼ同形同大の七輪 2 台を使用し、それぞれの口縁をあわせて重ねた。上釜とした七輪は外径 25cm、内径 22.5cm、下釜とした七輪は外径 26.5cm、内径 21.5cm である。上釜の底にはリモナイトと木炭を投入するための孔を直径 7.5cm の円形に開けた。下釜の内面には送風孔を除いた部分に上端 3mm、下端 12mm になるように、耐火粘土を貼りこみ炉壁とした。送風管の羽口付近に還元された鉄が集まってくるように、下釜七輪の下部に耐火粘土を貼りこんだ。

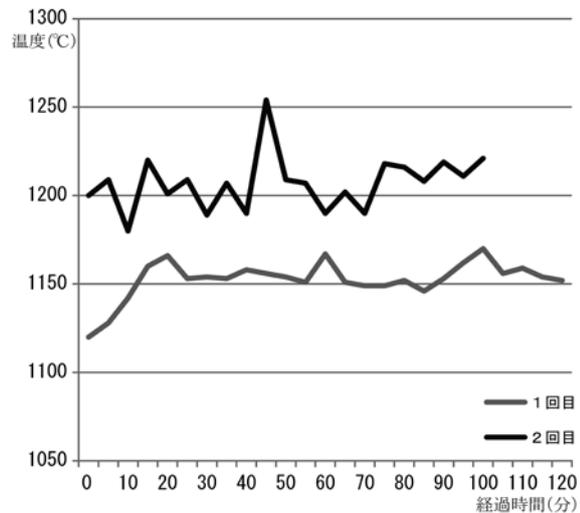
**2 回目実験** 炉の構造は 1 回目の実験と同様であるが、より送風管上部付近にリモナイトを収斂させる形状にするために、下釜の七輪内面に貼り込む耐火粘土を上端 6mm、下端 22mm とし、前回よりもさらに厚くした。



第 1 図 実験炉概略図

### (3) 実験経過

**1 回目実験** 10時30分に火入れを行い、11時00分から13時00分までの2時間実験を行った。炉内の温度を1,150°C前後に保ちつつ、リモナイトと木炭を交互に投入した(第2図)。リモナイトは先述したように、直径約2~3mmから1cm程度の粒状に成形したものを投入した(写真5)。11時00分と11時10分に40g、これ以降は5分ごとに20g投入していき、計500gのリモナイトを使用した。木炭は5~10cmに小割りしたものを適宜投入した。



第2図 炉内温度の変化

操業終了後、下部の七輪から炉壁を壊しつつ生成物を取り出し、磁石を使用して生成物を選別した(写真7・8)。その結果、500gのリモナイトから約66.2gの含鉄物質を生成することができた(写真13)。

**2 回目実験** 2回目の実験は15時00分に火入れを行い、15時40分から17時40分までの2時間実験を行った。炉内の温度は、1回目実験の1,150°Cから1,200°C前後に上昇させた(第2図)。ただし、17時25分以降の炉内の温度については温度計の故障により計測できなかった。リモナイトは1回目の実験と同様に粒状に成形したものを操業開始から5分ごとに40g投入し、計960gのリモナイトを使用した。木炭も5~10cmに小割りしたものを適宜投入していった。

操業終了後、1回目の実験と同様に炉壁を壊しつつ生成物を取り出し、磁石を使用して生成物を選別した(写真9・10)。その結果、960gのリモナイトから約84.9gの含鉄物質を生成することができた(写真14)。

### (4) 炉壁の熔損状況

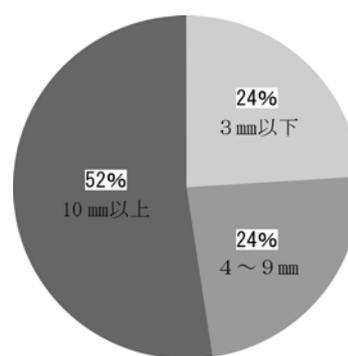
1回目実験の炉壁の熔損状況をみると、炉底付近の壁面には5mm前後の珪酸系ガラス層を確認でき、炉底から離れるほどガラス層は薄くなる。また、炉底には少量の鉄滓が溜まっていた(写真15)。2回目実験では、炉底に大量の鉄滓が溜まっており、炉底付近の炉壁にも鉄滓が厚く付着しているが、1回目実験よりも珪酸質を多量に含むガラス層は薄くなっていた(写真16)。2回目実験では下釜となる七輪の底部に粘土を貼り付けたが、乾燥時間をほとんど設けなかったことも関係する可能性があるだろう。ただし、炉底から離れたところでもガラス層の付着を確認することができた。

## 4. 生成物の観察結果

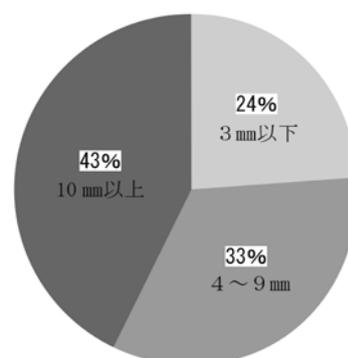
1回目実験は500gのリモナイトから約66.2g、2回目実験は960gのリモナイトから約84.9gの含鉄物質を生成することができた。それぞれ10gあたり約1.32gと約0.88gの含鉄物質を生

成したことになる。両実験で生成した含鉄物質の大きさをみると、1回目は3mm以下のものが約15.9g、4～9mmのものが約15.6g、10mm以上のものが約34.7g、2回目は3mm以下のものが約20.3g、4～9mmのものが約28.3g、10mm以上のものが約36.3gであった(写真12～14)。ちなみに、それぞれの実験で生成できた最大のものは1回目が約28mm、2回目が約35mmとなっている。生成含鉄物質を比較すると後者の方がより大粒の含鉄物質が生成されたといえるが、規模別でみた含鉄物質の重量比率はさほど変わらない(第3図)。

また、両実験において生成した含鉄物質の磁着反応をみると、2回目実験で生成できた含鉄物質の方がより強い磁着反応を示した。いずれも軟らかいもので、2mmほどの薄い部分であれば指で変形できることから、含有される炭素量は少ないものとみられる。ただし、火山起源の鉄資源のため、マグネシウムやマンガンなども含まれている。硫黄など鍛造に不向きな物質をどこまで除去できるのかは、今後の実験による生成物とともに比較分析を行っていく予定である。



実験1回目



実験2回目

第3図 含鉄生成物の重量比率

## 5. おわりに

阿蘇リモナイトを還元して製錬する簡易な製鉄実験を行なった。送風管(羽口)先端付近を1,150℃と1,200℃に設定して生成物の変化を観察する実験であったが、肉眼では生成物に際立った差異はみられなかった。今後は炉内最高温度を変えつつ、数回の実験をくり返し、鉄を含有する生成金属の理化学的分析を行うとともに、製錬作業の効率を高めていきたい。

なお、今回のリモナイトを使った製鉄実験は、科学研究費補助金(基盤研究(C))「弥生時代鍛造鉄器の生産と流通に関する考古学的研究」(研究課題番号:26370895)によるものである。

## 註

(1) ㈱日本リモナイトからリモナイト(阿蘇黄土)20kgをいただいた。学術目的であることから無償で提供を受けた。記して感謝したい。なお、㈱日本リモナイトが公表した明神山鉱床のリモナイト成分(含有重量%)は以下のとおりである(<http://www.limonic.co.jp/html.html>)。

Fe	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	S	MgO	K	P	Mn	Na
69.08	13.7	2.76	1.49	0.58	0.51	0.2	0.09	0.029	0.015

(2) 弥生時代における鉄生産・鉄素材の獲得に関する学説については野島(2014)文献において概観した。

(3) 熊本県阿蘇市下扇原遺跡SB46竪穴住居跡からは半熔融状態の鉄片が鍛冶滓と熔着して出土した(KON-1熔着遺物)。1180～1310℃の高温が発生した可能性が指摘されており(大澤2010)、製錬を行うための高

温を発生させる技術があった可能性がある。また、ベンガラスラグとされる滓との成分比較等も行わねばならないだろう。

(4) 今回の実験参加者は以下のとおりである。

大学院生：藤井翔平（M2）・市川伯博（M2）・平尾英希（M1）、学部4年生：北之園直哉・古久保茜、学部3年生：池西美咲・貝原賢哉・香坂亮・平本直幹・福地祥平・福元隆希・向井涼平・渡邊直宝、学部2年生：近藤直毅・佐々木尚也・永野智朗・名村威彦・真木大空

#### 引用・参考文献

- 大澤正己 2004 「金属組織学からみた日本列島と朝鮮半島の鉄」『国立歴史民俗博物館研究報告』第110集、89～122頁。
- 大澤正己 2010 「下扇原遺跡出土鍛冶関連遺物の金属学的調査」『小野原遺跡群』熊本県文化財調査報告第257集、熊本県教育委員会、231～239頁。
- 国立歴史民俗博物館 1994 『日本・韓国の鉄生産技術〈調査編1〉』国立歴史民俗博物館研究報告第58集。
- 国立歴史民俗博物館 1994 『日本・韓国の鉄生産技術〈調査編2〉』国立歴史民俗博物館研究報告第59集。
- 野島 永編 2008 『弥生時代における初期鉄器の舶載時期とその流通構造の解明』平成17～19年度科学研究費補助金基盤研究（C）研究成果報告書（課題番号17520520）。[http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/ja/list/HU\\_creator/639b33265e1d9651520e17560c007669/item/25169](http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/ja/list/HU_creator/639b33265e1d9651520e17560c007669/item/25169)
- 野島 永 2014 「研究史からみた弥生時代の鉄器文化－鉄が果たした役割の実像－」『農耕社会の成立と展開－弥生時代像の再構築－』国立歴史民俗博物館研究報告第185集、183～212頁。
- 藤尾慎一郎 2004 「弥生時代の鉄」『国立歴史民俗博物館研究報告』第110集、3～29頁。
- 古瀬清秀・グザビエール・ミシェル・横山瑛一・津田真琴他 2013 『製鉄実験の記録』広島大学文学研究科考古学研究室。

## Experimental Iron Production using Limonite Ore

**Hisashi NOJIMA, Hideki HIRAO**

Since 2006, experiments in iron manufacture were continuously carried out at Archaeology Laboratory of the Hiroshima University's Graduate School of Letters. This was part of a broader research project on ancient iron production. In September 2014, we used two earthen charcoal braziers to fashion simple smelting furnaces. A ventilator maintained airflow, and we layered limonite (brown hematite) and charcoal into the furnaces, for purposes of smelting. We performed two experiments each lasting two hours. In the first experiment, we maintained a temperature of around 1150°C at the base of the furnace, and used a total of 500g of limonite ore. In the second, we maintained a temperature of around 1200°C, and used a total of 960g of limonite ore. In both experiments, we observed changes in the products. The experiments yielded approximately 66.2g of a ferruginous substance in the first operation, and 84.9g in the second. We conducted a comparative analysis of the two smelting operations, and noted differences in the size and magnetic responses between them.



写真1 炉壁乾燥状況



写真2 炉および送風管設置状況



写真3 火入れ作業



写真4 炉内温度調整作業



写真5 リモナイト投入状況



写真6 操業終了 (1回目実験)



写真7 取り出し状況 (1回目実験)



写真8 含鉄生成物磁選状況 (1回目実験)



写真9 取り出し状況（2回目実験）



写真10 含鉄生成物磁選状況（2回目実験）



写真11 炉内温度記録作業



写真12 含鉄生成物形状計測作業

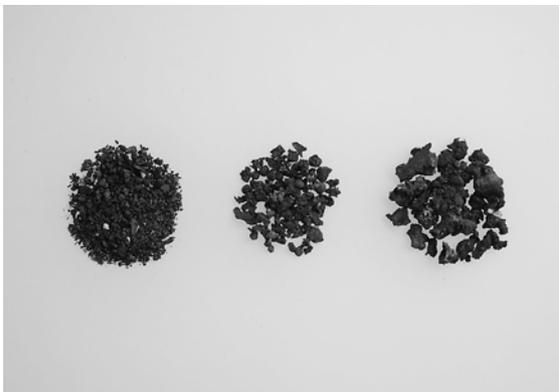


写真13 含鉄生成物（1回目実験）

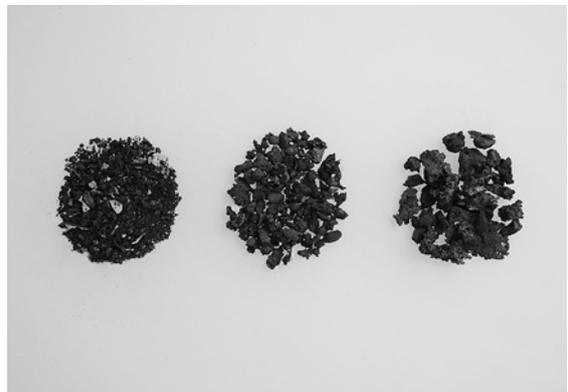


写真14 含鉄生成物（2回目実験）

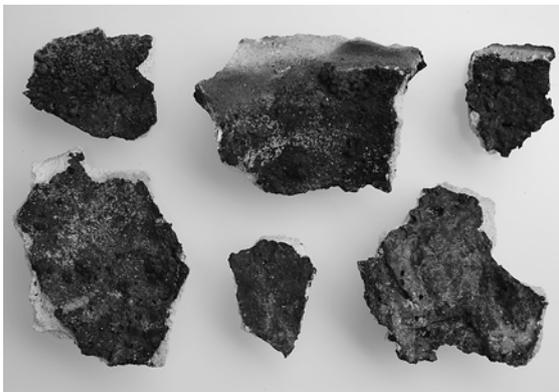


写真15 炉壁内面熔損状況（1回目実験）



写真16 炉壁内面熔損状況（2回目実験）