

『森浩一先生に学ぶ―森浩一先生追悼論集―』

(同志社大学考古学シリーズⅪ) 別刷

二〇一五年一月三十日発行

羽口が装着された箱形炉の炉壁について

——福島県横大道遺跡の出土遺物を中心に——

門
脇
秀
典

羽口が装着された箱形炉の炉壁について

——福島県横大道遺跡の出土遺物を中心に——

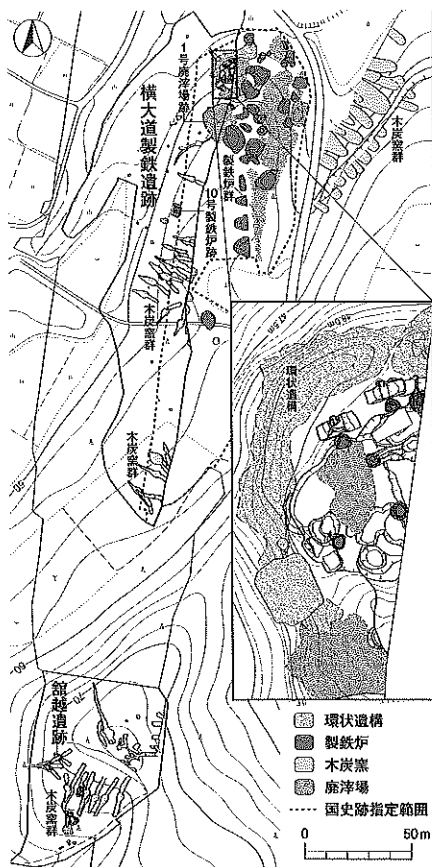
門 脇 秀 典

はじめに

福島県域の太平洋沿岸地域には、古代の製鉄遺跡が多い。本地域の製鉄遺跡は七世紀後半頃に出現するようだが、八〜九世紀頃の時期の遺跡が最も多い。製鉄遺跡は製鉄炉や廃滓場（鉄滓や炉壁の廃棄場所）、木炭窯などの遺構群からなり、それらが丘陵上の広範囲に展開する。

ここで取り上げる横大道遺跡（福島県文化振興事業団編 二〇一〇）は、福島県南相馬市小高区飯崎にあり、太平洋岸から七段内陸に入った標高四〇〜五〇メートルの丘陵上に立地する。八世紀後半から九世紀中頃に、製鉄・製炭をおこなった大規模な生産遺跡である。平成一九〜二二年度に、常磐自動車道建設に伴う発掘調査、範囲確認調査を経て、平成二三年二月七日に重要な遺構が発見された約九三〇〇平方メートルの区域が国の史跡に指定され、保護が図られることとなった遺跡である（図一）。

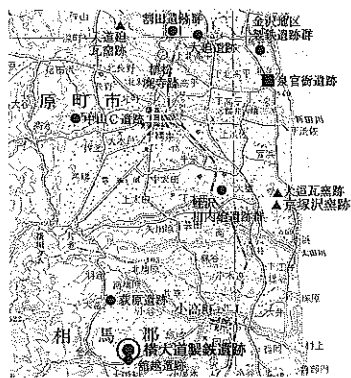
製鉄遺跡は福島県浜通り地方に数多くみられるが、その最大の要因は原料である砂鉄であろう。本地域の海岸は砂鉄が豊富で、今でもよく採れるのだが、分析してみるとかなりの割合でチタン分が含まれる。



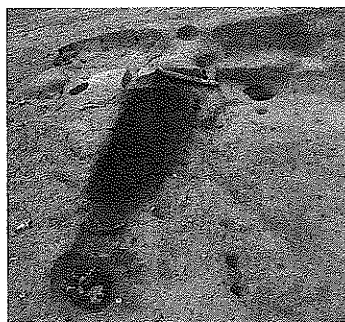
4 横大道遺跡遺構配置図

製鉄炉7基のうち6基が竪形炉で、これらは直径20m程の環状に造成された敷地に集中して配置されていた。これに対し箱形炉は炉背部に踏ふいごが付帯し、炉周辺は平坦に造成された作業場をもつ。

図1 横大道・箱越遺跡の位置 (右)と遺構配置図 (左)



1 横大道遺跡の位置



2 箱形炉 (10号製鉄炉跡)



3 竪形炉 (5号製鉄炉跡)

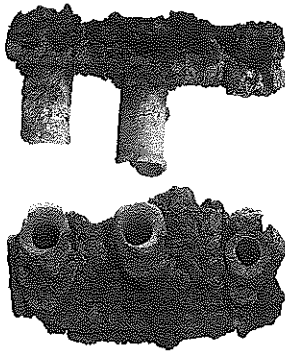


図2 羽口付炉壁 (横大道遺跡)

一般にチタン分が高いとされる中国地方の赤目砂鉄²ですら五割程度であるのに対し、本地域の砂鉄には三〇割も含まれる。砂鉄中には酸化チタンとして含有される訳だが、この金属は現代の高度な製錬技術をもってようやく還元できる物質³であり、古代においては利用のできない不純物そのものであった。この高チタン砂鉄から鉄とチタンを分離する技術こそが本地域の鉄作りの命題であつただろう。

一 羽口付きの炉壁

福島県で製鉄遺跡を発掘すると何十トも鉄滓が出土することはまれではない。これらに混じつて箱形炉の炉壁も出土するのだが、送風孔の部分に小型の羽口を装着していることが多い。この羽口付炉壁は福島・宮城県域の製鉄遺跡に集中し、他地域の分布はごくまれである。つまり全国的にみれば箱形炉の炉壁は、送風孔のみの場合が主流である。

なぜ羽口が炉壁に必要であつたのか。以前、筆者(二〇〇七)は羽口の耐火度が高く、溶けにくいことから、操業終盤まで炉内に送風を可能にすることが目的であつたと述べた。ただ耐火性の問題だけでは羽口付炉壁が本地域に集中して出土するのかを説明できなかった。

鉄山秘書(館沢 二〇〇一)に「一に粉鉄(砂鉄)、二に木山(木炭)、三に元釜土」とあるように、炉壁の粘土の重要度は高い。例えば横大道遺跡では、わざわざ地表面から一畝ほど下の粘土を採掘して、製鉄炉の炉壁としていたとの分析結果が得られている⁴。

表1 横大道遺跡出土羽口・炉壁の耐火度

資料 No	遺構	種別	耐火度		平均 (℃)	
			SK No	(℃)		
35	1号廃滓場跡	羽口	8-	1,240	1,367	
36	1号廃滓場跡	羽口	8	1,250		
37	1号廃滓場跡	羽口	18	1,500		
38	3号廃滓場跡	羽口	12-	1,335		
39	3号廃滓場跡	羽口	12	1,350		
125	10号製鉄炉跡	羽口	18	1,500		
109	4号製鉄炉跡	通風管	10	1,300		
110	5号製鉄炉跡	通風管	16+	1,460		
31	1号廃滓場跡	炉壁	7	1,215		1,232
32	1号廃滓場跡	炉壁	6 a	1,200		
33	1号廃滓場跡	炉壁	6 a	1,200		
34	3号廃滓場跡	炉壁	6 a+	1,215		
93	4号製鉄炉跡	炉壁	5 a+	1,190		
95	4号製鉄炉跡	炉壁	7	1,230		
97	5号製鉄炉跡	炉壁	7	1,230		
98	5号製鉄炉跡	炉壁	6 a	1,200		
100	6号製鉄炉跡	炉壁	6 a	1,200		
102	7号製鉄炉跡	炉壁	6 a	1,200		
104	8号製鉄炉跡	炉壁	10	1,300		
18	1号廃滓場跡	炉底粘土	4 a	1,160		
19	3号廃滓場跡	炉底粘土	17	1,470		
105	10号製鉄炉跡	炉壁	6 a-	1,190	1,283	
123	10号製鉄炉跡	炉壁	13	1,380		
124	10号製鉄炉跡	炉底粘土	9	1,280		
40	基本土層 LIV	粘土	8	1,250	1,275	
126	基本土層 LIV	粘土	10	1,300		
41	基本土層 LV	粘土	6 a	1,200	1,173	
42	基本土層 LV	粘土	2 a	1,120		
43	基本土層 LV	粘土	2 a	1,120		
127	基本土層 LV	粘土	8	1,250		

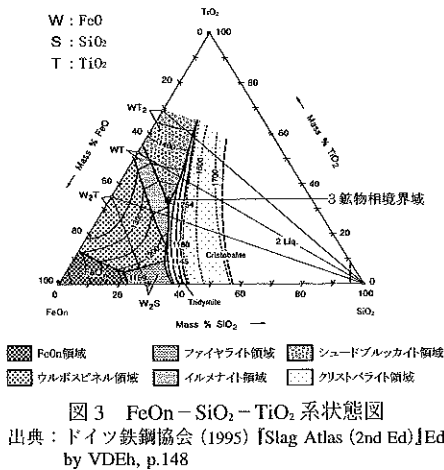
*SK Noはゼーゲルコーン溶倒温度比較表による

(板谷 二〇一〇)。さらに驚くべきは、この粘土の耐火度が二二〇〇度とかなり低かったことである。地表面下五〇センチのローム粘土の耐火度が一三〇〇度であったことからすると、採掘がより困難な粘土をわざわざ選んでいたと推察できる。

鉄を生成するための炉内温度は、炉底付近で二三〇〇度以上といわれている。これは製鉄遺跡から出土した鉄滓の分析や顕微鏡組織観察の結果からも、一二五〇〜一三五〇度の領域で鉄滓が生成していたと推定できる(門脇 二〇一〇)。つまり、一二〇〇度の耐火度の炉壁はかなり溶けてしまうのである。

これに対し羽口の耐火度は、横大道遺跡では一三五〇度から一五〇〇度と明らかに高く、他の製鉄遺跡

羽口が装着された箱形炉の炉壁について



でも同様の結果が得られている(板谷 二〇〇七)。本地域では溶けやすい炉壁と溶けにくい羽口を組み合わせて製鉄炉の炉壁を造っていたと推察できるのだが、問題はなぜ溶けやすい粘土で炉壁を築いたのかである。

炉壁の粘土の主成分はシリカとアルミナで、これが溶け出し、砂鉄の不純物とともに製鉄炉の外に鉄滓として排出される。横大道遺跡に隣接する館越遺跡(福島県文化振興事業団編 二〇一一)の鉄滓の分析結果から、一号製鉄炉跡(箱形炉)では炉壁の溶解量が二〇〜三〇割と推察されている(板谷 二〇一一)。これは使用をしていない羽口の長さが約二〇〜二三センチであるのに対し、箱形炉で使用されたものでは平均

で一四割程度と三〜四割程度、溶けて短くなっていることから推察できる(福島県文化振興事業団編 二〇一〇)。炉壁はある一定量溶けて、鉄滓となって製鉄炉の外に流れ出していたと考えられる。

二 鉄滓から読み解く操業条件

横大道遺跡からは、鉄滓が約六三ト、炉壁が約一ト出土した。このうち、鉄滓については五五点の成分分析や顕微鏡観察をおこなった。出土した鉄滓の主要成分は、酸化鉄(FeO+Fe₂O₃)・シリカ(SiO₂)・酸化チタン(TiO₂)の三つである。三成分の合計が一〇〇割になるように換算し、

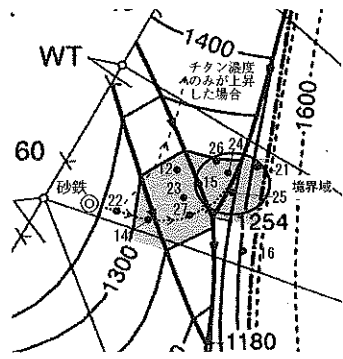
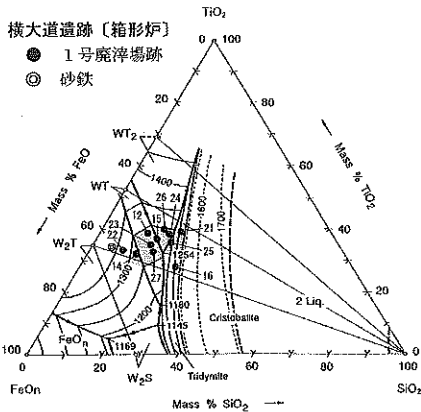


図4 FeO_n-SiO₂-TiO₂系状態図 (横大道遺跡 箱形炉関連資料)

その比率をプロットしたものをFeO_n-SiO₂-TiO₂系状態図(ドイツ鉄鋼協会編 一九九五(図3))という。この図は鉄滓の融点と溶解状態から各鉱物相が初晶として晶出する領域を示しており、顕微鏡観察と見比べることで、鉄滓の生成環境を考えることができる。

横大道遺跡から出土した鉄滓は、高チタン砂鉄を原料に生成したものであるため、そのほとんどが鉱物相のウルボスピネル・イルメナイト・シユードブルツカイト領域にプロットされる。これを遺構別に検討すると、箱形炉由来の鉄滓(一号廃滓場跡)は三つの領域の中でも、融点が一二五〇〜一二〇〇度の帯域に分布している(図4)。この中でイルメナイト・シユードブルツカイト・クリストバライトの境界付近には、五点(資料No.一五・二一・二四・二六)がプロットされる。これらは顕微鏡組織ではイルメナイト・シユードブルツカイトが主体的である。外観的にも流動単位の大きな流出滓資料が多く、箱形炉の操作が最も安定した段階に排出された鉄滓であると推察される。

FeO_n-SiO₂-TiO₂成分系ではイルメナイト・シユード

羽口が装着された箱形炉の炉壁について

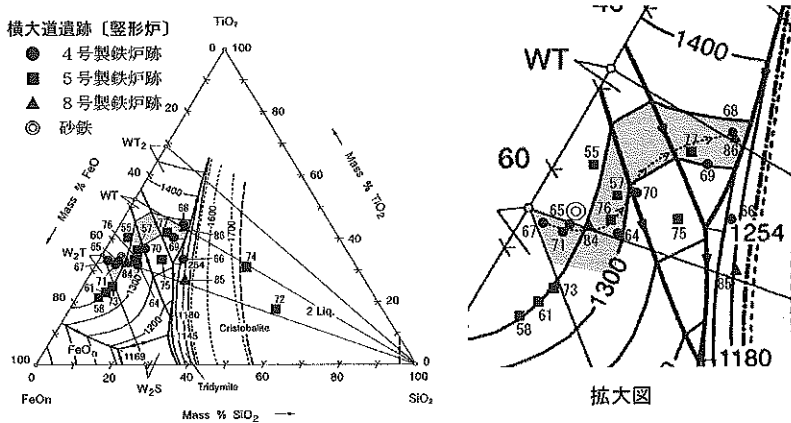


図5 FeO-SiO₂-TiO₂系状態図 (横大道遺跡 整形炉関連資料)

ブルツカイト・クリストバライトの境界付近が、一二五四度と最も鉄滓の融点が低くなるといわれている。この領域に安定期の鉄滓がプロットされていることは、一号廃滓場跡の箱形炉の操業が良好に推移したことを示している。また、安定期に排出された鉄滓の中には、炭素濃度が三割程度の金属鉄を内包する資料(資料No.二二)がある。このことは操業安定期では銑鉄が炉外に流れ出たことを明確に示している。一方、顕微鏡組織観察で砂鉄粒子が残る資料(資料No.一四)や還元が不十分な金属鉄を含む資料(資料No.二二)は、砂鉄のプロットに近い側にある。これらはウルボスピネルの領域にあり、顕微鏡観察結果とも一致する。

以上のことから一号廃滓場跡の鉄滓の分析値を読み解くと、砂鉄のプロットを始点に、まず右下がりに移動して、ウルボスピネル領域の一二五〇度から一三〇〇度帯域に入り、そのなかでイルメナイトからシュードブルツカイト・クリストバライトの境界付近に向かってデータが推移している。仮にウルボスピネル領域で還元プロセスが進行し鉄

成分が減少して、相対的に鉄滓のチタン濃度のみが上昇した場合は、資料No.二二付近からデータは右上がりを続けるはずである。この場合、例えば酸化鉄四〇％、シリカー一〇％、酸化チタン五〇％であればシユードブルツカイト領域で融点が一四〇〇度付近の帯域となり、このような高温を維持することは困難である。

この鉄滓の融点制御に大きく寄与するのがシリカ(粘土)の融解である。シリカの濃度が二〇〜三〇％に高まることにより、イルメナイト・シユードブルツカイト領域で一二五〇〜一三〇〇度帯域での環境条件を維持できる。本地域特有の高チタン砂鉄を還元するプロセスにおいては、造滓剤としてシリカが働くことにより、鉄滓中のチタン濃度の上昇を抑え、さらには融点上昇を抑制する効果があつたと推察できる。

一方、豎形炉から出土した鉄滓は、箱形炉のものとは若干異なる領域でデータが推移する。図5に豎形炉(四・五・八号製鉄炉跡)の鉄滓データを示す。砂鉄データに近い位置に、砂鉄焼結塊(資料No.六四・六五・六七・八四)が集中して分布し、これらは主にウルボスピネル領域の一三〇〇〜一三五〇度の帯域にある。顕微鏡でもこれらの資料にはウルボスピネルが観察され、状態図とおおよそ一致する。

一方、操業が停止する段階に炉内に残留していた鉄滓の資料(資料No.六八・六九・七七・八六)は、シユードブルツカイト領域の一三〇〇〜一三五〇度の帯域にある。これらの鉄滓が、シユードブルツカイト・クリストバライトの境界付近に分布していることは、操業条件を考える上で重要である。おそらく、この領域を目標とした操業をおこなつたと推察できるからである。また、豎形炉と箱形炉の鉄滓データを比較した場合、明らかに豎形炉の方が融点の高い側でデータが推移している。このことは箱形炉よりも豎形炉

の方が高い製錬温度であった可能性を示唆する。

ま と め

福島県内で当たり前に見られるものが、他の地方にはまったくない。「羽口付炉壁」とはまさにその代表で、これまで炉壁や羽口だけを検討しても、なぜ羽口が必要なのかは解明できなかった。一方、福島県や宮城県の太平洋沿岸で採取できる浜砂鉄はきわめてチタン濃度が高く、これを克服することが本地域の製鉄の歴史そのものといえる。

本地域には七世紀後半頃に製鉄技術が導入されるが、その頃の炉壁には羽口が装着されていない。羽口が装着されるようになるのは八世紀前半頃からで、以後十世紀にいたるまで、鍛冶用の小型羽口を箱形炉の炉壁の下段部に数十本並べて送風をおこなう技術が発達する。本論は、本地域において独自の進化を辿った背景について、炉壁の耐火度と鉄滓のチタン濃度の観点から考えてみた。

今回、明らかになったのは高チタン砂鉄への技術適応として、炉壁をより多く溶かし造滓量を増やす必要があったことである。これにより箱形炉では炉壁の下部を厚く築く必要があるが、これに伴い送風孔の長さも増したことであろう。操業に入れば炉壁は激しく溶けるので、送風孔の維持は容易ではない。そこで耐火度の優れた羽口を装着し、送風を維持したと推定できる。

炉壁を多く溶かすことは単純に耐火度の低い粘土を求めればよいという訳ではなく、砂鉄との相性が重視されたであろう。今回は造滓成分としてシリカをあげたが、この他に粘土には耐火性を高めるアルミナや滓の軟化を促すライムなどが含まれる。これらの成分のバランスが、良い鉄滓を生みだし、良い鉄を沸

かしたことであろう。今後は実験などの研究を重ねて、古代の製鉄技術の解明に努めたい。

追記

かつて森浩一先生に「人の耳カスばかり集めて、これは誰だ、これはおまえだという研究ばかりやりよる」と笑いながら言葉をいただいたことがあった。それは石器のチップの研究を発表した直後であったが、二〇年前のその日のことは心に刻まれている。それ以降、私にとつて発掘現場で滓（廃棄されたもの）を見つけることが生きがいとなった。

森先生は、「自分が担当した遺跡の中でこそと思うものがあれば遺跡の保存を考えなさい。それが達成できて一人前だ」とおっしゃったことがある。この言葉が横大道遺跡の保存を考えた時、心の大きな支えとなった。現在、横大道遺跡のある南相馬市小高区は避難指示解除準備区域に指定され、住民の方々は避難を余儀なくされている。今後も森先生にいただいた言葉を胸に刻み、一日も早い復興に少しでも尽力したいと考えている。

註

- (1) 横大道遺跡では製鉄炉七基、廃滓場四方所の製鉄関連遺構のほかに、木炭窯が二六基見つかっている。
- (2) 赤目砂鉄は、安山岩や閃緑岩などを母岩としてチタン鉄鉱が混合したもので、チタンなどの不純物が多い特徴がある。一方、真砂砂鉄よりも融点が低く、還元されやすい特徴があるため、銑鉄（炭素濃度が約二割以上の鉄）が生成しやすいといわれている。
- (3) 酸化チタン (TiO_2) の融点は一八四二度とさわめて高い。一方、鉄は還元が進んで炭素が四割以上溶け込むと二二〇〇度以上に融点が下がる。
- (4) すべて酸化鉄 ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$) と酸化チタン (TiO_2) を組み合わせた化合物（ウルボスビネル ($2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$)・イルメナイト ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) シュードブルツカイト ($\text{FeO} \cdot 2\text{TiO}_2$) である。この化合物はチタン分が多い砂鉄を原料とした製錬滓に特徴的にあらわれる。一方、チタン分が少ない真砂砂鉄由来の製錬滓の顕微鏡組織は、酸化鉄とシリカ (SiO_2) の化合物であるファイヤライト (Fe_2SiO_4) が主体である。

引用文献

- 板谷 宏 二〇〇七 「割田遺跡群出土の製鉄関連遺物の評価」『原町火力発電所関連遺跡調査報告』X 福島県教育委員会。
- 板谷 宏 二〇一〇 「横大道遺跡出土の製鉄関連遺物の評価」『常磐自動車道遺跡調査報告』六〇 福島県教育委員会。
- 板谷 宏 二〇一〇 「製鉄関連遺物の化学分析」『常磐自動車道遺跡調査報告』六二 福島県教育委員会。
- 門脇秀典 二〇〇七 「製鉄関連遺構と遺物の評価」『原町火力発電所関連遺跡調査報告』X 福島県教育委員会。
- 門脇秀典 二〇一〇 「考察」『常磐自動車道遺跡調査報告』六〇 福島県教育委員会。
- 館 充訳 二〇〇一 『現代語訳 鉄山必用記事』丸善株式会社。
- ドイツ鉄鋼協会編 一九九五 『Sag Atlas』(2ndEd.) ドイツ鉄鋼協会 (VDEh)。
- 福島県文化振興事業団編 二〇一〇 『常磐自動車道遺跡調査報告』六〇 福島県教育委員会。
- 福島県文化振興事業団編 二〇一〇 『常磐自動車道遺跡調査報告』六二 福島県教育委員会。