

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	鉄滓分析によるわが国前近代製鉄技術の研究
Title(English)	
著者(和文)	高塚秀治
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3308号, 授与年月日:1999年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3308号, Conferred date:1999/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

鉄滓分析によるわが国前近代製鉄技術の研究

東京工業大学大学院社会工学研究科経営工学専攻

高塚秀治

目次

	頁
第1章. 研究の背景と問題設定	1
1. 研究の背景と先行研究	1
1. 1 文献学的手法による研究	1
1. 2 考古学的手法による研究	4
1. 3 自然科学的手法による研究	5
2. 問題設定	7
3. 研究方法	7
3. 1 還元反応プロセスによる前近代製鉄の解明	7
3. 2 遺跡試料の分析による前近代製鉄の解明	8
3. 3 製鉄史の整理	9
文献と註	9
第2章. 前近代製鉄における還元・酸化反応の解析	12
1. 熱分析法による還元反応の研究	12
1. 1 実験方法	12
1. 2 実験結果	13
1. 2. 1 岩鉄の場合	13
1. 2. 2 砂鉄の場合	19
1. 3 還元温度と生成/晶出結晶鉱物の整理	26
1. 3. 1 岩鉄の還元温度とフェヤライト	26
1. 3. 2 砂鉄の還元温度とFeO-TiO ₂ 鉱物	27
2. 前近代における製錬(還元)プロセス	29
2. 1 炉内における木炭の燃焼プロセス	29
2. 2 前近代炉の製錬プロセス	29
2. 2. 1 酸化鉄の還元	30
2. 2. 2 脈石の分離除去	31
2. 2. 3 砂鉄製錬の場合-その特殊性	32
3. 前近代における精錬(酸化)プロセス	33
3. 1 左下場におけるプロセス	33
3. 2 本場におけるプロセス	34
文献と註	36
第3章. 遺跡試料の解析	37
1. 化学組成分析	37
1. 1 岩鉄製錬遺跡	37
1. 1. 1 滋賀県湖南地域の製錬遺跡	38
1. 1. 2 滋賀県湖西地域の製錬遺跡	38
1. 1. 3 滋賀県湖北地域の製錬遺跡	38
1. 1. 4 滋賀県下遺跡試料の分析結果	42
1. 1. 5 広島県下の製錬遺跡(カナクロ谷遺跡)	47
1. 2 砂鉄製錬遺跡	47
1. 2. 1 尾崎前山遺跡	48
1. 2. 2 ゴマンクボ遺跡	51
1. 2. 3 月山遺跡	54
1. 2. 4 粟田かなくそ山遺跡	55
1. 2. 5 安行猿貝北遺跡	57
1. 2. 6 保光たたら遺跡	58
1. 2. 7 小半弓遺跡	60
1. 2. 8 堪忍沢遺跡	61
1. 2. 9 高保木遺跡	62
1. 3 鍛冶・精錬遺跡	63
1. 3. 1 鳩山窯址群遺跡	63
1. 3. 2 奈良地区遺跡群(I)受け地だいやま遺跡	64

1. 3. 3 内場山城跡遺跡	64
2. 鉱物組成分析	65
2. 1 滋賀県下岩鉄と製錬滓の鉱物組成	65
2. 1. 1 岩鉄の鉱物組成	65
2. 1. 2 鉄滓の鉱物組成	65
2. 1. 3 鉄滓の熔融温度分析	66
2. 2 カナクロ谷遺跡の岩鉄と鉄滓の鉱物組成	71
2. 2. 1 岩鉄類の鉱物組成	71
2. 2. 2 鉄滓類の鉱物組成	72
2. 3 砂鉄の鉱物組成	72
2. 4 砂鉄製錬滓の鉱物組成	75
2. 4. 1 尾崎前山遺跡	75
2. 4. 2 ゴマンクボ遺跡	77
2. 4. 3 月山遺跡	78
2. 4. 4 栗田かなくそ山遺跡	79
2. 4. 5 安行猿貝北遺跡	80
2. 4. 6 保光たたら遺跡	80
2. 4. 7 小半弓遺跡	81
2. 4. 8 堪忍沢遺跡	81
2. 4. 9 高保木遺跡	82
2. 4. 10 富士見台遺跡	82
2. 5 鍛冶(精練)遺跡	84
2. 5. 1 鳩山窯址群遺跡	84
2. 5. 2 下本谷遺跡	87
2. 5. 3 平遺跡	89
2. 5. 4 内場山城跡遺跡	90
3. 製鉄プロセス論と遺跡試料分析結果の関連	91
3. 1 製鉄プロセスから見た鉄滓の検討	91
3. 1. 1 製錬プロセス	92
3. 1. 2 精練プロセス	92
3. 2 還元指数の提起	92
3. 3 製錬プロセスと製錬温度	93
3. 3. 1 岩鉄製錬の温度	93
3. 3. 2 砂鉄製錬の温度	94
3. 4 製錬プロセス論の検討	95
文献と註	97
第4章. 製鉄プロセス論からみた前近代製鉄技術史	106
1. 鉱物組成から見た製錬技術	107
2. 還元指数から見た製錬技術	109
3. 製錬温度と製錬技術	111
4. 鍛冶(精練)の技術	113
文献と註	113
第5章. 結 論	114
補 論	
「炒鋼法による鋼精練法」論の検討	116
1. わが国前近代の精練と「炒鋼法」	116
2. 炒鋼法による鋼精練法論の検討	118
2. 1 鉄器中の高チタン鉱物	118
2. 2 鉄滓・金属鉄中におけるPの挙動	119
2. 3 精練プロセスと熱量	120
文献と註	120

鉄滓分析によるわが国前近代製鉄技術の研究

第1章. 研究の背景と問題設定

1. 研究の背景と先行研究

日本列島における鉄器の初現は、縄文時代晩期とされ¹⁾、金属器としては弥生時代前期の青銅器に先行して使用されたと見られる。以後、青銅器は専ら祭祀用として使用されるようになるが、鉄器は青銅器とは異なり、利器としての優れた属性を有することから、わが国古代においても、農具、工具、あるいは武器といったように、多面的な利用がなされてきた。しかし、鉄の生産については、いつ、どこで、いかなる形態で始められたかについては未だ確言できない。ただ、今までに発見された製錬炉の遺構とそれに随伴する遺物、あるいは古墳から出土した鉄滓や鉄器などの試料の分析によって、わが国の製鉄の起源は今のところ、6世紀代までに遡られている。今後、こうした考古試料の新たな発見と、これに対する自然科学的解析を通じ、わが国における製鉄の起源は6世紀代よりさらに遡る可能性は大きい。

また、今日的な考古学上の知見によれば、古来より、列島においてもっとも多用された鉄は錬鉄であるとされる。そして、錬鉄の生産は、まず、鉄鉱石を還元プロセス (smelting) において鉄素材を生産し、それを高温下で脱炭し、同時に介在物を除去するという酸化プロセス (refining) によって行われていたと見られる。こうした製鉄法は、古代から近世に至る千数百年間にわたり、わが国独自の技術的發展を遂げ、それは江戸期に行われていたいわゆる“永代たたら”と“大鍛冶”の技術に連なると見られる。しかし、前近代製鉄法的發展を通史的に把握するためには、解明すべき課題は今なお多く残されている。

一般に、鉄の製造技術の發展を明らかにしようとするれば、一方には、いかなる社会制度的な枠組みで鉄の製造が展開してきたか、あるいは鉄製造技術の發達が文化的・経済的あるいは政治的問題とどのような関係にあったかなど、社会との関わりで鉄の歴史を明らかにする課題があり、他方では、製鉄技術そのものの發展過程を解明する課題がある。これらの研究は従来人文的手法、あるいは考古学的手法、そして自然科学的手法によって取り組まれてきた。以下、各研究手法による前近代製鉄史研究の今日的な到達点、および、残された課題についてみておきたい。

なお、本論で使用した用語について一言しておく。まず、「前近代」という用語は、本来は近代直近の特定の時代 (pre modern) をさす用語であるが、広義の意味で、近世以前全般を前近代とした。次に、「鉄鉱石」については、従来よりいくつかの呼称が用いられてきた。本来、鉄鉱石には岩状を呈する磁鉄鉱、赤鉄鉱、さらに褐鉄鉱などがあり、砂状を呈する砂鉄が存在し、したがって、形態上の区別から鉄鉱石は岩鉄と砂鉄と呼称した。さらに、「鉄滓」は、近現代製鉄のスラグに対応する用語であるが、近現代と前近代の製鉄では、その方法において異なる点が多い。したがって、前近代製鉄で生成した残滓は、従来より前近代製鉄史研究で用いられている鉄滓という用語を使用した。なお、鉄滓が熔融状態を示す場合は「ノロ」という用語を用いた。

1. 1 文献学的手法による研究

わが国の鉄に関するもっとも古い記述は、3世紀代の中国の史書『魏書』によるものであり、その東夷伝弁辰の条に「国、鉄を出し韓濊倭皆従て之を取る。」と記されている。倭とは中国・朝鮮で用いられた日本の古称であるので、その時代の日本列島では、朝鮮半島から鉄を入手していたことが窺える。同じく『魏書』倭人の条「兵には矛・盾・木弓を用う。木弓は下を短く上を長くし竹箭は或は鉄鏃、或は骨鏃なり。」『隋書』倭国伝には「弓・矢・刀・稍（ほこ）・弩（いしゆみ）・獵（もちのはほこ）・斧有り、皮を漆て甲と為し、骨を矢鏃と為す。」など鉄器についての記述がみられる。

一方、わが国の文献では8世紀後以降日本書紀、続日本紀、平安遺文、平城宮木簡、延喜式、風土記などの文献にしばしば鉄に関する記述が登場し、その生産や流通についてもそれを間接的に示す文献資料は少なからず存在する。日本書紀では、代表的なものとして大宝3年（703年）の条に「鉄穴を志紀親王に賜う」（近江国）があり、天智紀9年（690年）の条に「是歳、水碓を造りて鉄冶かす」という記事がある。この「水碓」解釈については水車を利用した送風、あるいは、鉱石の破碎に水車を用いたという2説が存在するが、この点については今のところ不明である。また、同じく8世紀代の『法隆寺資材帳』、『大安寺資材帳』には鉄釜、鉄鏡の記述が散見でき、平安時代には『延喜式主計上』などから一般庶民にも鉄鑄物製品が行きわたるようになるといわれる²⁾。このことから、わが国において鉄鑄物製品が作られるようになるのは奈良時代以降からとみられ、この時代の鉄製錬において何らかの技術的革新が行なわれた可能性を読みとることができる。

さらに、古代の鉄生産についてみると、8世紀以降は文献試料も少しずつ増加してくるので、製鉄の状況についてさまざまな事情が判明してくる。たとえば、日本霊異記下巻第十三の説話は、明らかに鉱山から岩鉄を機（わかづり）³⁾を用いて採掘していることが記されており、9世紀前期に岩鉄製錬が行われていたことが示されており、『続日本紀』の天平14年の条に記されている近江国の「鉄穴」は岩鉄鉱山を意味している。このような文献上の記述から、少なくとも6世紀～9世紀の製鉄原料は、砂鉄だけでなく岩鉄も盛んに用いられたことが窺える。また、古くからの鉄の生産地である畿内の近江国、播磨国など畿内周辺の諸国は『延喜式』において調庸としての鉄、鉄の納入国となっていないが、この理由について原島礼二は「特に畿内周辺の鉄は交易の対象として重要な地位を占めたのであろう」と述べ、8世紀の鉄の受給関係が「調庸ルートと交易ルートによって満たしていく体制」と捉えている⁴⁾。9世紀代以降の製鉄はこのルートの他に、領主や豪族らによる自給的な製鉄が、関東、北陸、東北地方などの東国と、九州地方の各地において行われたと見られる。

ところが、中世においては製鉄に関する文献はほとんど見あたらない。強いていえば、中世から近世にかけて諸国の鑄物師を統括した真継家に伝わる、いわゆる『真継文書』がすべてといってよい。よって、今のところこの時代の文献試料から得られる手がかりは少ない。

近世になると中国地域のたたら吹きに関しては下原重仲によって『鉄山必要記事』が著されている。この書は全八巻からなり、特に第三では、砂鉄の選鉱とその品位、釜土の選定法などについての記述が詳細に述べられている。そこに書かれた「元釜土の見様」の項を見ると、炉材に使用する土や粘土について次のような記述が見られ、当時の技術を明らかにする重要な資料となっている。

「一此の土は類い粉鐵に鐵穴え共に出る事もあるもの也。砂中に砂の少く、ねはり氣有之土の握り見れば、石を握る如く、手の裏に立か如く、其色青、白、黄、赤の内白色尤よし青を下とす。石氣なきを撰み、砂は如何程大粒にてもくるしからず、砂石を能見分つへし、石の粉は少し有ても大に妨になるもの也。試に能々たゞきこなし、ねり握りかため、焼て打碎き見る也。容易にくたけかねて、粉に成かたき程に、強からねは用に不立。水晶砂の交る土なおよし、何方にてもこもり粉鐵出る山に、必ず元釜土も有物也。」と石氣がない土を選ぶことと、砂氣が少ない土にはこれに真砂土を加えて用い、さらに、元釜に用いる土は、こもり粉鐵の産するところに必ずあると記述されている。真砂土には、約70%の珪酸分を含んでおり、製鍊反応プロセスにおけるSiO₂ (α-石英)の役割が考えられていたことと思われる。また、水土(粘土)についての記述では、

「濕り氣強き土の性、重きに能土もあり、濕氣少き輕き土に悪きもあり。凡土の濕氣といふは、ぬれたると干たるとの事にはあらず、根元の性を云ふなり。水中より出るに、濕氣のなきも有、山より掘取に、さらさらとはらつきたる土濕氣あり。見様の秘事は、土を握り堅めもみ碎き、また握り堅め、もみくたく内に、濕氣有無を知る也。(中略)。手裏のぬくもり土にうつりて、次第和らかき水出る物、濕有土とす。又水晶砂交り、金稍の砂多くきらきらしく交りたるは大方よし。大砂は交りても苦にならず、細かにても石は踏鞴に涌す鐵の妨と成なり大きにても砂は流れて、湯になり安き故に、釜中鐵に障りなし。」とし、水晶砂と金稍砂は製鉄の反応にはよいが、石は製鉄の妨げになると説明している。粘土中に含まれる鉱物は主としてアルミノシリケートであり、これも先の土と同様に造滓成分として作用すると見られる。このように、製鍊プロセスではノロの生成が重要であったことが認識されていたことは特筆すべき事柄である。また、第四には、たたら場の建設とその操業法について記述されている。その中で特に送風装置では差鞴、天秤鞴などが図示され、当時の送風技術がある程度把握できる。

東北地方の旧仙台藩では、中世中国地方から技術導入されたとされる製鍊法が存在し、これは炯屋(どうや)と呼ばれていた。そして、この地域には中国地方から製鍊技術の移転が行われたことを示す伝承がある。このことについて向井は「この地方で、この中国流をもっとも早く導入したのは仙台藩北部の地域であるが、ここではその導入の功勞者について諸説が存在する。その中では特に(1)永禄年間、備中から千末大八郎、小八郎兩人を招き、これから技法を受けたという千葉土佐(登米郡狼河原村、後に、東磐井郡大籠村に定住)、或は彼を含む炯屋八人衆だとするもの。(2)出雲において製鉄法を学んだ後、慶長11年吹き始めた佐藤十郎左衛門(本吉郡馬籠村)だとするもの。この二つの説が有力であり、近世を通じては特に、千葉と佐藤両系の子孫の技法が、それぞれこの地域の製鉄法の中心をなし、且又対立した。」と述べている⁹⁾。この両家の一つである佐藤家には「鑪板定法」なる文書が伝わっている。その中の絵図によれば踏鞴と差鞴が示されており、記された寸法から鞴の大きさがわかる。また、もう一つの千葉家には「製鉄秘書」が存在し、そこに示された図により「出雲流に於いてはすでに永禄頃から吹差鞴二基を使ったことが」示されている。このように、近世になると文献資料によって中国地方、および仙台藩を中心とする東北各地の製鉄法の概要が判明してくる。

なお、19世紀前半以前の製鉄史関係書の主なものとしては別記のようなものがある⁹⁾。これら歴史上の諸文献は断片的ではあるが、上記のようにそれぞれの地域、歴史的な製鉄事

情が示されており、本論にも深く関わるので註として掲載しておく。

1. 2 考古学的手法による研究

考古学的手法による研究は、一方にわが国製鉄の起源を示すこと、他方では前近代製鉄の技術的系譜の流れ、そしてその発展形態を明らかにすることが期待されている。

わが国製鉄の起源については、これまでの考古学的な研究によって鉄器の加工段階を弥生時代中期に求めることはほぼ疑問のないところであるが、製錬法の起源には弥生時代開始、古墳時代開始の二つの有力な説が存在する。

弥生時代開始説は、近年広島県戸の丸山、小丸遺跡の発掘調査が行われ、出土した土器形式による編年により、両遺跡の操業年代は3世紀代に比定された。戸の丸山遺跡については、¹⁴C法、熱残留磁気法などの物理的年代決定法も行われている。¹⁴C年代は1500±60, 1440±55y. B.Pであり、熱残留磁気測定年代ではAD740±40, AD1100±40年という結果であった⁷⁾。川越も認めるように「戸の丸山の場合は平安時代の竪型炉に平面形、遺構配置など類似する点があり、なお検討の余地がある」としながらも同時に「小丸は現時点では弥生時代の製錬炉とする事を妨げるものはない」と述べている⁷⁾。戸の丸山遺跡の遺跡推定年代は、熱残留磁気法では奈良時代、平安時代と年代巾が広いが、¹⁴C法による結果は古墳時代の後期(6-7世紀)に収斂する。この遺跡については、引き続き¹⁴C法によって検討し、年代の分布を確認するの必要を感じず。小丸遺跡の場合は、地山(ぢやま)中に存在した土器片1点のみを根拠とするには危険が伴う。やはり、¹⁴C年代決定法の結果を合わせた検討が必要となろう。

古墳時代後期(6世紀)開始説は、発掘された製錬遺跡が今のところ6世紀が上限であることを根拠とする。⁸⁾たしかに、製錬炉を有する遺跡の存在は、本格的な鉄生産の可能性を示すものであり、このような意味から、古墳時代後期をわが国における鉄生産の起源とすることは一定の妥当性があるろう。ただし、今後、6世紀を遡る製鉄炉の発見があればこの説は変更されることになる。この点に関しては、今後の発掘調査の進捗を待つ以外ない。

つぎに鉄の製錬技術について見てみる。6世紀以降の鉄製錬については、大きく見て二つ製錬技術の系譜が存在したと見られる。一つは、8世紀代の関東・北陸地方などの東国において発生・展開する竪型炉の系譜、二つには、6世紀以降中国地方など西国に発展する箱型炉の系譜である。

竪型炉は半地下式のものと自立するものがある。半地下式竪型炉とは、緩傾斜の山間地をテラス状に開削・整地し、その先端部を掘込んで半地下とし、そこに炉を構築する。そして、炉の背面から送風を行い、前庭部(炉前面)に排滓する。また、自立炉と呼ばれるものは、平地に直接竪型炉を築いたもので、炉の構造そのものは半地下式のものと同じである。両者とも一方向送風一方向排滓を基本型としている。竪型炉による製錬は、9世紀代になると次第に東北地方にも普及し、そして、九州地方にもその技術移転が認められるようになる。さらに、8世紀代の竪型炉には踏鞴が使用されたことが明らかとなり、これにより、炉内温度もより高温にすることが可能となったと見られる。これは先の、文献上に現れる8世紀代の鋳物鉄製品の登場と整合する。また、10世紀頃の律令衰退期に入ると竪型炉による製錬は、関東、北陸、東北地方では、次第に衰退していくが、古代末から中世にかけて九州地方各地の竪型炉の遺跡数は、むしろ増加するという傾向を示す。

箱型炉は7世紀末～9世紀代は関東、北陸、東北などの諸地域にも普及するが、それ以降では、もっぱら中国地方などの西国諸地域において技術的な発展をとげる。6世紀代の箱型炉を有する製錬遺跡は大蔵池南遺跡、緑山製鉄遺跡、（以上岡山県）、カナクロ谷遺跡（広島県、岩鉄製錬）、古橋製鉄遺跡（滋賀県、岩鉄製錬）が代表的な遺跡であるが、この中でも、大蔵池、緑山遺跡の製錬炉には簡単な防湿用の地下施設が施されている。そして、地下構造を持つ製錬遺跡は古代前半に石生天皇遺跡（岡山県、8～9世紀）へと変化する。さらに、古代末～中世中期にかけ大矢製鉄遺跡（広島県、11世紀）と矢栗製鉄遺跡（広島県、14～15世紀）が出現する。大矢製鉄遺跡は、長さ3.5m幅1.2mを有するもので、石生天皇製鉄遺跡（長さ80cm、幅50cm）に比べ、かなり大規模な鉄製錬が行われていたとみられる。そして、これらの炉の周囲には、防湿のための地下構造が形成されていることから、両製錬炉は近世永代たたらの祖形と考えられている。さらに改良された製錬遺跡として石神製鉄遺跡（広島県、15世紀）があげられる。この製錬遺跡は銑（ずく）生産遺跡と見られ、近世たたらに近似した炉構造を有するようになる。

また、わが国中世中国地方で発展した箱型炉による製錬技術は、東北地方旧仙台藩北部地域に移転したと見られ、具体的な事例としてあげられたのがドウメキ沢遺跡である⁹⁾。本遺跡は、先述の矢栗製鉄遺跡と、本床状遺構、小舟遺構などの地下構造に共通点が多いことから、中世末から近世にかけ中国地方の製錬技術が、大籠地域にもたらされたと見られている。この遺跡発掘調査の結果は、先の技術移転を示す伝承、佐藤千葉両家に伝わる製鉄技術書とよく整合している。

考古学的手法による研究成果を整理要約すると、まず第1に、わが国古代の鉄生産は古墳時代後期（6世紀代）に始まり、鉱石は岩鉄と砂鉄が用いられていたこと。第2に、8～13世紀代にかけて、竪型炉と箱型炉の技術的系譜が見られること。第3に、13～14世紀の竪型炉の衰退期に、中国地方を中心とする西国の箱型炉が一気に大型化することなどがわかる。こうした鉄生産の形態変化は、古代律令経済体制から荘園経済体制、そして、より流通経済体制の深化の過程を辿る中で、鉄経済も大きく転換していくという構図が見える。

以上のように、考古学的手法による研究では、箱型炉による製錬技術の発展形態と、わが国中世末から近世初頭にかけて、中国地方から東北地域へと技術的移転がなされていたことについては、一定程度整理されたと見てよい¹⁰⁾。ただし、製鉄関連遺跡の発掘調査は、ここ数年来数多く行われていることから、今後、さらに新しい知見による製鉄関連遺跡の再整理が行なわれる可能性は高い。

1. 3 自然科学的手法による研究

従来の自然科学的手法による研究を概括すると、1つには、遺跡資料の分析学的な研究、2つには、復元実験など、還元プロセスを明らかにするための実証的な研究という、2つの流れがある。

遺跡試料の分析学的研究についてみると、1970年代に入り、金属鉄と共に製錬反応生成物である鉄滓が注目されるようになり、その解析が本格的に行われるようになった。鉄滓について先駆的な研究を行ったのは湊秀雄・佐々木稔である。湊らは、「鉄滓の分析学的検討を通じて、製錬が行われた基本条件を知ることが可能である」とし、さらに「鉄滓に含まれる鉱物相は、製錬反応が不均一に行われていたとしても、製錬技術の基本的特徴を

多かれ少なかれ現すものである」から、これらの研究を通じ、たたら技術をかなり明らかにすることが可能であると指摘した¹¹⁾。また、研究的手法においても、湿式化学分析法、蛍光X線分析法、X線回折分析法などを用い総合的な研究が行われた。湊らによる鉄滓の研究は、その基礎を築いたという点で画期的なものであった。湊らの研究的手法は、部分的に改良されながらも、基本的には今日に至るまで継承されている。その後、鉄滓の研究は大澤、桂によって発展させられている。大澤は、全国的な規模で製鉄関連遺物の分析・解析を行い、また、桂は、専門とする地球化学・分析学の立場から、砂鉄製錬の基本構造、すなわち、砂鉄に含まれるFeO-TiO₂鉱物が還元作用を受け、相転移をしながらTiO₂(ルチル)あるいはTi₂O₃に至ることを予測した。さらに、製鉄技術の発展史の具体的な内容として、精練プロセスを解明する「炒鋼法」の仮説が提示されている。この炒鋼法の仮説とは、中国漢代末に発明されたとされる炒鋼法によってつくられた鉄地金が、まず古墳時代の日本列島にもたらされ鉄器に加工され、次いで、その方法が列島内に普及していく過程で、銑と金属酸化物を高温で攪拌反応させ、錬鉄を製造する精練技術に発展したとする、全く新しい「鋼精練法」論である¹²⁾。(以下、炒鋼法による鋼精練法論)。しかし、この「炒鋼法による鋼精練法論」では単に生成物質を解釈したにすぎず、前近代精練の操業方法に至るまでの説明が十分できるに至っていない。

前近代製錬のプロセスを明らかにするための実証的な研究としては、復元実験がある。その一例として、1969年、島根県に飯石郡菅谷村において近世たたら復元実験があげられる。この実験研究の目的は、一つには鋸押し法の探求であり、二つには、たたら製鉄を自然科学的手法で解析し、記録として残すという文化的遺産の保存にあった。この研究では、こもり、のぼり、くだりなど、製錬プロセスの各段階毎に炉内生成物を採取し、それに金属組織学的・分析学的検討が加えられた。この実験研究の結果については『たたら製鉄の復元とその鋸について』¹³⁾に詳述されている。また、この復元実験研究の意義は、江戸時代後期に行われるようになった鋸押し法という鉄生産技術を当時の生産規模で行なったものであり、製鉄技術史上の観点からも画期的なものとして評価されよう。

さらに、規模の小さい箱型炉や竪型炉を用いた製錬実験も行われている。これら小規模の鉄製錬実験は、房総風土記の丘、あるいは根白石中学校で行なわれた具体的なモデルをもとに行われた復元的なもの、あくまでも、製錬炉内の製錬条件を解明するための実験研究が行われている¹⁴⁾。古代竪型炉の復元を目指した風土記の丘の実験は房総6号炉をモデルとし、送風には踏鞴を使用し、本格的な復元実験を目指したものであった。そして、この実験結果から次の諸点を仮説として提起した。第一は、鉄滓中に存在するCaOは砂鉄と共存する土壌から混入したと見られ、前近代製錬ではCaOの意識的投入の可能性が否定されること。第二には、初期の製鉄法では鉄滓を小割にし、中に残留した小鉄粒を取り出して塊状とする、いわゆる「小鉄塊法」¹⁵⁾が存在したこと。などである。また、根白石中学校の場合は、柏木遺跡(宮城県多賀城市)の三号炉(8世紀)、武井遺跡群(福島県相馬郡新地町)の竪型炉をモデルとし、実験経過については、炉内温度(5ヶ所)、生成ガス、送風量、生成物質(鉄滓や金属鉄)の組成など、そのすべてが記録されている。

一方、東京工業大学金属工学科の研究室が中心となって行った竪型炉の実験は、たたら製鉄で生産される鋸(鋼)の性質に注目した。この実験では、製造した鋸塊の金属組織学

的な解析を行い、たたらで製造される鋼の材質としての特徴を明らかにした¹⁶⁾。

主要な鉄製錬の還元、炉内反応実験は上記の通りであるが、このほかに、実験室的なものとして、山本真之介による砂鉄還元実験があげられる。山本は、山陰地方に産する山砂鉄、川砂鉄、海砂鉄3種の砂鉄を用いて砂鉄とCOガスによる還元反応実験(900℃下)を試み、山砂鉄、川砂鉄、海砂鉄の順に還元性が低くなることを明らかにした¹⁷⁾。

上記のように、製鉄史研究に関わる諸手法による研究の成果をみたが、とくに、自然科学的な手法における今後の課題となる点をあげてみると、第1の分析学的な手法では、従来より蓄積された豊富なデータが活用するために、データの整理法を早急に確立する必要があること、また、第2の製鉄プロセスを解明するための実証的な研究では、還元実験と鉱石の酸化・還元に関する基礎的な研究を進め、両手法を相互に結合された検討が行なわれる必要があること。これらの手法によって相補的な研究が行われれば、わが国前近代製鉄の諸技術を、歴史的に整理することが可能であると考えられる。

2. 問題設定

本論は、自然科学的な手法において問題解明を試みるものであるが、前述のように従来の自然科学的手法による遺跡試料の分析データは、遺跡試料の発掘そのものからして必ずしも体系的に行われているわけではなく、分散的個別的であり、したがって、製鉄技術の発展に対しても部分的な説明にとどまっている。すなわち、部分史的にみれば多くの成果があげられてはいるにもかかわらず、これまでの遺跡分析データは全体として、前近代製鉄史上いかなる問題を明らかにしたのかが必ずしも判然としていない。したがって、通史的にみれば未整理の状態にあって、統一的な歴史像を与えるに至っていない。それには、これらのデータをまとめる基本的視点が必要となろう。この視点を確立するためにはいくつかの方法があると思われるが、前近代製鉄のプロセス論を構築し、つぎに、プロセス論に基づく遺跡データの整理も重要な方法の一つである。

したがって、本研究は、自然科学的な方法によって製鉄プロセスを解明し、製鉄関連遺物の分析データを整理し、わが国前近代製鉄技術を解明することを課題にする。

3. 研究方法

前記課題を解明するための作業の全体的なフレームとしては、前近代製鉄プロセス理論を作るために、還元反応の状態を明らかにする。そして、近現代において確立された還元プロセス理論を補足するために、熱分析法を用い1000~1300℃までの岩鉄と砂鉄による直接還元反応の進行状態を明らかにする。そしてこれらの研究結果を遺跡試料の分析に適用する。

3. 1 還元反応プロセスによる前近代製鉄の解明

前近代製錬プロセスの解明は従来、岩鉄(磁鉄鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱など)を原料にして発展してきた近現代の製錬理論によって進められてきている。しかし、この製錬プロセス理論だけでは砂鉄製錬を十分説明できるわけではない。原料である砂鉄の性状を共通に取り扱うことができないからである。そこで、新たに実験的研究によって求めて行く必要が

生じている。本研究では熱分析装置¹⁹⁾を用い、高温下における岩鉄、砂鉄、炭素粉、粘土による物質相互の反応状態と、反応生成物の挙動に注目して分析を行い、そして、実験によって得られたデータから、前近代製鉄のプロセス論を構築する。

3. 2 遺跡試料の分析による前近代製鉄の解明

前近代製鉄技術の位置付けを行うためには、時代が確定されている製鉄遺跡から出土した製鉄関連遺物の生成条件を、各時代ごとに求める必要がある。このために、試料についてまず化学組成と鉱物組成を求め、先の製精錬プロセスとの整合性を求めなくてはならない。

製鉄遺跡から出土する遺物は大きく分けて岩鉄、砂鉄、鉄滓、製鉄炉材、金属鉄、鉄器、木炭などがあげられるが、これら遺物には以下のような成分が含まれることが予測される。

1. 岩鉄：FeO, Fe₂O₃. (CaO, P₂O₅, MnOなどを含む場合がある)
2. 砂鉄：FeO, Fe₂O₃, TiO₂. (少量のV₂O₅)
3. 鉄滓：FeO, Fe₂O₃, TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, MgO,
4. 炉材：SiO₂, Al₂O₃, MgO, (少量のCaO) .
5. 金属鉄：Fe, 金属鉄中の介在物.
6. 木炭(灰分)：SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, K₂O

以上の予測に基づいて、試料の化学組成分析はつぎの方法を採用することにする。すなわち、主要化学成分には化学分析法と蛍光X線分析法を、微量成分分析には原子吸光分析法を適用する。鉄滓の分析では、桂がはじめて蛍光X線分析法によって定量分析が行われている²⁰⁾。この分析法の利点は、試料調整が簡便であり、さらに、分析結果を迅速に求めることができることにある。本論では、蛍光X線分析法により、マグネシウム(Mg)、アルミニウム(Al)、ケイ素(Si)、リン(P)、硫黄(S)、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、チタン(Ti)、バナジウム(V)、マンガン(Mn)、鉄(Fe)、などの分析を行い、原子吸光分析法によってナトリウム、(Na)銅(Cu)などの分析を行った。

また、これらの試料には種々の結晶鉱物が含まれるので、鉱物組成分析も併せて行う必要があると考えた。そして、これらの遺物には以下のような鉱物成分が含まれることが予測される。

1. 岩鉄：マグネタイト (Fe₃O₄) , ヘマタイト (Fe₂O₃) .
2. 砂鉄：チタン磁鉄鉱 (Fe₃O₄-Fe₂TiO₄固溶体) , チタン鉄鉱 (Fe₂O₃-FeTiO₃固溶体) .
3. 鉄滓：ウルボスピネル (Fe₂TiO₄) , イルメナイト (FeTiO₃) , フェロシュードブルカイト (FeTi₂O₅) , ルチル (TiO₂) .

鉱物組成分析についてはX線回折分析法および、X線マイクロアナライザ付走査型電子顕微鏡法を併用した。X線回折分析法は、固体化合物の同定にはもっともよく使用される方法の1つである。考古試料の場合、粉末にして鉱物など無機化合物の同定を行う方法が一般的である。粉末試料を1cm角、0.5mmぐらいの厚さをガラス板に塗布し、X線束を当てて回折の角度と強度を調べる。得られたデータは化合物に特有のパターンを示すので、これとJCPDS (ASTMカードなど) と対照させ化合物の同定を行う。また、X線マイクロアナライザ付走査型電子顕微鏡は、結晶鉱物の大きさや形状を観察し、微少部分の化学組成分析を行うことができる。

本研究では、上記の方法を用いて遺跡試料の分析を行い、そのデータから鉱石などに含まれる諸成分が、反応プロセスにおいてどのような挙動を示し金属鉄や鉄滓に至るのかを明らかにし、また、その物質の挙動の意味するところについての検討を行う。また、還元プロセスの研究結果を基にして、遺跡出土の製鉄関連試料分析を行う。分析成分についてはSiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、MgO、CaO、K₂O、P₂O₅の主要成分値を求め、製錬プロセスにおける成分移動を把握し、次いで、前近代製鉄に適応した新たな製鉄プロセス論を構築することにする。

3. 3 前近代製鉄史のプロセス論からの解明

上記のプロセス論にもとづいて、分散状態にある各地の既存の製鉄遺跡データや、新たに本研究に関連して発掘された製鉄遺跡の解析データを整理しつつ、製鉄プロセスの視点から時代的には古代と近世の製鉄技術について、また、地域的には製鉄原料の質についての比較検討を行ない、製鉄技術の歴史的発展を解明する。

文献と註

- (1) 「石崎曲り田遺跡－II－」 福岡県教育委員会編 1984年。
- (2) 佐藤昭夫 中村由信「鉄と鑄物の歴史」『日本の鉄仏』小学館 PP72～73 1980年。
- (3) 滑車のこととされる
- (4) 原島礼二「文献に現れた鉄」『鉄』森浩一編 社会思想社 P187 1974年。
- (5) 向井義郎「近世東北地方における製鉄法－仙台藩を中心に－」たたら研究第11号 P43 1964年。
- (6) わが国古代の鉄に関する記述についてみると、最も古くは日本書紀で、670年（天智9年）、「是歳、水碓を造りて鉄冶かす」（近江国）がまず目につく。次いで、続日本紀があげられ、

703年（大宝3年）	「鉄穴を志紀親王に賜う」	（近江国）
722年（養老6年）	「韓鍛冶百嶋」	（近江国）
722年（養老6年）	「韓鍛冶首法麻呂」	（丹波国）
722年（養老6年）	「韓鍛冶百依」	（播磨国）
722年（養老6年）	「韓鍛冶抗田 鎧作名床」	（紀伊国）
728年（神亀5年）	「所輸の庸米を錦・鉄に換える」	（美作国）
743年（天平15年）	「鉄穴を有勢者が独占するを禁ず」	（近江国）
762年（天平宝字6年）	「浅井、高嶋二郡の鉄穴を恵美押勝に賜う」	（近江国）
768年（神護景雲2年）	「寒川郡人韓鉄師・登毛人ら125人造筑前怡土城に功あり、賜姓坂本臣」	（讃岐国）
789年（延暦8年）	「美甕郡大領韓鍛冶首広富（稻6万束を献じて外従五位下を授けられる）」	（播磨国）
790年（延暦9年）	「鉄冑2900余枚を造るらしむ」（太宰府）、三代実録などからは、	
796年（延暦15年）	「申請に依りて鍛鉄を出すを停む」	（備前国）
805年（延暦24年）	「神石以下山間の8郡調糸を鍛鉄に換う」	（備後国）

『風土記』

- 7世紀（中葉） 「讃容（佐用）郡 鹿庭山十二谷に鉄を生ず」，穴禾（穴栗）郡
敷鹿村の山と金内川に鉄を生ず。 （播磨国）
- 704年（慶雲元年） 「国司綏女朝臣・鍛冶佐備大麻呂を率い，浜の沙鉄をとり剣を造
る」 （常陸国）

『平城宮木簡』

- 745年（天平17年） 「備前国赤坂郡周・郷調鉄十口 天平十七年十月廿日」 （備前
国）
- 746年（天平18年） 「備後国三上郡調鉄壹十口」 （備後国）
- 年代不詳 「大井鉄十口 美作国真島郡に大井郷あり」 （美作国）
- 8世紀 「上道 □ 浮浪人調鉄一連」 （備前国）
- 年代不詳 「大井鉄十口 備中国賀夜郡に大井郷あり」 （備中国）

『日本靈異記』

- 8世紀 「英多郡の官の鉄山（国司，役夫十人を穴に入れて鉄を掘り取ら
しむ）」 （美作国）

『延喜式』

- 9世紀 「調一鉄」 （美作国）
- 9世紀 「調一鉄・鉄，庸一鉄」 （備中国）
- 9世紀 「調一鉄・鉄，庸一鉄・鉄」 （備後国）

『平安遺文』

- 1040年（長久元年） 「東大寺封物 鉄339廷・鉄225口」 （美作国）
- 1046年（永承元年） 「東大寺封物 鉄780廷代米156石」 （讃岐国）
- 1060年（康平3年） 「東大寺封米結解 鉄160廷，直16石」 （若狭国）
- 1073年（延久3年） 「東大寺封物 鉄1140廷 代米228石」 （伯耆国）
- 1087年（寛治元年） 「東大寺封物 鉄2200廷 代米220石」 （伯耆国）
- 1093年（寛治7年） 「東大寺封物 鉄1000廷 代米100石」 （伯耆国）
- 1118年（元永元年） 「東大寺封物 調鉄・鉄」 （美作国）

『宇治拾遺物語』

- 12世紀以前 「鉄をとり国司に納める60人の集団の長」 （能登国）

近世になると，製鉄関連の文書はずっと豊富になるが，地域別にみても中国地方
がもっとも多く，次いで東北地方旧仙台藩である。代表的な文献をあげると

寺島良安『倭漢三才圖會』巻 図説百科辞典 1712年（正徳2年），

平瀬徹斎，長谷川光信『日本山海名物圖會』 1754年（宝暦4年），

下原重仲『鉄山必要記事』 1784年（天明4年），

佐藤深淵『山相秘録』 1827年（文政10年）などがあげられる。

近世東北の地域では，旧仙台藩による製鉄が行われていたが，千葉家に伝わる『製鉄
秘書』，佐藤家に伝わる『鑪板定法』などが代表的なものとなる。

(7) 川越哲志「日本の鉄製連の開始時期をめぐって－弥生製鉄存否論各説－」『中国地方
製鉄遺跡の研究』広島大学文学部考古学研究室編 PP303 1993年。

(8) 佐々木稔 座談会「日本古代の鉄生産をめぐって」『日本古代の鉄生産』たたら研究会

編 PP221～222 1991年.

- (9) ドウメキ沢遺跡は岩手県東磐井郡藤沢町大籠字大籠に所在し、1978～1980年にかけて、藤沢帳教育委員会によって発掘調査がなされた。
- (10) 古瀬清秀「近世たたら吹きへの道」『季刊考古学』第57号 雄山閣 PP73～77 1996年.
- (11) 湊秀雄 佐々木稔「タタラ製鉄鉱滓の鉱物組成と製錬条件について」『たたら研究』第14号 P88 1968年.
- (12) 佐々木稔「ふたたび古代の炒鋼法について」たたら研究第27号 PP45～49 1985年.
- (13) 社団法人日本鉄鋼協会編『たたら製鉄の復元とその 鋸について』1971年.
- (14) 松尾孝「鋼の起源」『μミュー』明星大学 No. 13 PP1～6 1993年.
- (15) 館 充「たたら製鉄法技術史的・冶金学的考察」『ふえらむ』日本鉄鋼協会 Vol.1 No. 12 P42 1996年.
- (16) 永田和宏「小型たたら炉による鋼製錬機構」『もののけ姫に見る製鉄の謎』PP1～719 98年.
- (17) 山本真之介「たたら製鉄の技術的考察」『たたら研究』第2号 たたら研究会編 PP1～9 1958年.
- (18) 熱分析法は、試料の物理的状態（例えば融点）や、化学的状態（酸化還元反応）の熱的データの解析に用いるものである。代表的なものは熱重量分析（TGA:Thermogravimetric Analysis 以下TGA）と示差熱分析（DTA:Differential Thermal Analysis 以下DTA）である。TGAは、加熱中におこる重量の変化から結晶水や脱水量など熱分解反応の過程や反応が起こる温度がわかる。DTAでは、温度の昇降に伴って生じる試料の発熱・吸熱の挙動から、融解、結晶転移、酸化還元などの反応と温度が分かる。使用した熱分析装置は重量分析と示差熱分析からなる。
- (19) 高塚秀治「熱分析法による前近代製鉄炉内反応の研究」『文化財科学』文化財保存修復学会誌40 PP48～62 1996年.
- (20) 桂 敬「定性分析としての機器分析」『無機定量分析化学』森北出版株式会社 PP200～209 1981年.

第2章. 前近代製鉄における還元・酸化反応の解析

製錬の原理を一言でいえば、酸化鉄を還元して金属鉄生成させるとともに、脈石を熔融鉄滓として分離させることである。また、精練の原理は高温の酸火焰（酸性ガス）により、鉄の脱炭と鋳中の介在物の除去が行われる。

本章では、前近代の製鉄炉内で展開される製・精練反応プロセスについて解明するために、前近代製錬で用いられたと考えられる岩鉄や砂鉄を試料として、還元反応を起こし、これを熱分析法によって測定し、還元プロセスを解析する。そして、得られたデータに基づいて製錬プロセス、および精練プロセスを推論する。

1. 熱分析法による還元反応の研究

本研究では、まず第一に高温下の炉内で起こる還元反応の状態、あるいはそれによって生じる結晶鉱物などの生成物を明らかにするため、岩鉄と砂鉄、組成の異なる異種の砂鉄について、新しい試みとして熱分析法による還元反応実験を行った。

1. 1 実験方法

この熱分析実験では、以下のような試料を用いた。なお、かっこ内の数値は、一回の実験で使用した試料量である。

- ① 鉱石原料として砂鉄、または磁鉄鉱 (25mg)
- ② 活性炭 (15mg)
- ③ 粘土 (5mg)

実験に用いた鉱石試料のうち、岩鉄は長野県佐久町で採取した円礫状磁鉄鉱（いわゆる餅鉄）であり、砂鉄は、群馬県平沢川と、同じく群馬県荒砥川で採取したものをを用いた。鉱石試料の化学組成を表2.1.1.1に、粘土試料の化学組成の分析結果は表2.1.1.2のようであった。

表 2.1.1.1 鉄鉱石と砂鉄の化学組成

試料	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T.Fe	MnO	MgO	K ₂ O	P
長野県鉄鉱石	8.22	0.04	0.53	62.84	0.54	0.19	0.08	0.02
平沢川砂鉄	8.45	6.07	2.89	55.69	0.25	0.20	0.04	0.01
荒砥川砂鉄	7.67	9.29	2.78	54.10	0.40	3.71	0.06	0.07

表 2.1.1.2 陶器粘土の化学組成

試料	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
陶器粘土	72.60	1.77	19.27	3.44	0.00	0.00	4.24	0.00

それぞれの鉱石試料は乳鉢で微粉末とし、あらかじめ $53\mu\text{m}$ ～ $100\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ ～ $150\mu\text{m}$ の粒径にふるい分けておいた。鉱石相互の比較実験には $53\mu\text{m}$ ～ $100\mu\text{m}$ のものを用い、岩鉄で行った粒度別の実験では粒径が $53\mu\text{m}$ ～ $100\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ ～ $150\mu\text{m}$ の2種類の試料を用いた。

各試料を十分に混和させた後アルミナ製容器（セル）に入れ、 130°C で脱気し、アルゴン気流中で反応させた。熱分析結果を示す図は、TGAが試料の熱重量分析結果、DrTGAがTGAの微分値、DTAが示差熱分析結果、Tempが温度を表している。

実験は室温から開始し、毎分 20°C の割合で加熱した。最終温度は 1000°C から 100°C 毎に 1300°C まで、鉱石別に計4回、さらに、岩鉄は粒径が異なる試料、砂鉄は化学組成が異なる試料を各一点ずつ、計10点の分析を行った。試料は最終温度に到達後20分間最終温度を保持した。実験終了後試料室の自然冷却を室温まで行った。試料容器に残留した反応生成物は樹脂に埋包し、表面を鏡面研磨し電子顕微鏡用の試料とした。

なお、使用した分析機器は島津製作所製熱分析装置（DTG. 50H）、日本電子社製走査型電子顕微鏡（JSM. 820）および、Philips社製X線分析装置（PV. 9550）である。これらの実験結果は、次のようなものであった。

1. 2 実験結果

1. 2. 1 岩鉄の場合

この実験にはまず $53\sim 100\mu\text{m}$ の岩鉄試料を用い、以下のような実験を行った。

室温から徐々に温度を上昇させ $\sim 1300^\circ\text{C}$ に至るまでの熱分析を行った結果を図2.1.2.1に、また、各最終温度下の生成物については写真2.1.1.1～2.1.1.6のような結果が得られた。

なお、各最終温度から20分間反応を継続させた。

< 1000°C > まで昇温した場合

写真2.1.2.1でいちばん輝度の高い部分は酸化鉄が還元されてできた還元鉄部分であり、鉱石の外周部に層状で現れていた。また、この温度帯では他の生成物はほとんど認められなかった。

< 1100°C > まで昇温した場合

金属鉄が遊離し始め、同時に写真2.1.1.2に微細で針状の結晶鉱物が生成していた。図2.1.2.2はこの部分のX線スペクトル図で、この結晶鉱物をファヤライト（理論的には Fe_2SiO_4 ）と推定した。また、この温度領域で析出した金属鉄は、ほとんど炭素を吸収していなかった。

< 1200°C > まで昇温した場合

ファヤライトと金属鉄の共存はいつそう進行し、非晶質物質がそれらの間隙を埋め、お互いに融着しながら成長していた。（写真2.1.1.3）また、写真2.1.1.4は写真2.1.1.3の右下（矢印A）拡大したもので、吸炭した微細な金属鉄である。

< 1300°C > まで昇温した場合

吸炭した金属鉄は液体となって凝集しながら大きくなっていた。（写真2.1.1.5）また、金属鉄中の黒鉛は比較的外周部に集中し、中心部までは及んでいなかった。そして、この温度帯でファヤライトは晶出していなかった。（写真2.1.1.6）

次に、粒径を異にする試料（ $100\mu\text{m}$ ～ $150\mu\text{m}$ ）の試料の熱分析を行い、先の実験結果と比較してみた。その結果は図2.1.1.3のようであった。

TG曲線を微分したDTG曲線で、ピークの両端までの点A B間における重量変化を求めると、図2.1.1.3で10.5mg, 図2.1.2.4で9.6mgが減少したことになる。また、反応の開始は約900℃で1300℃付近でほぼ反応は終了し、反応量は図2.1.1.3は1050℃, 図2.1.1.4が1047℃で最大値を示す。

さらに、DTA, DrTGA曲線双方で1050℃付近にピークが現れるが、これは吸炭した金属鉄の一部が液体になるためと思われる。

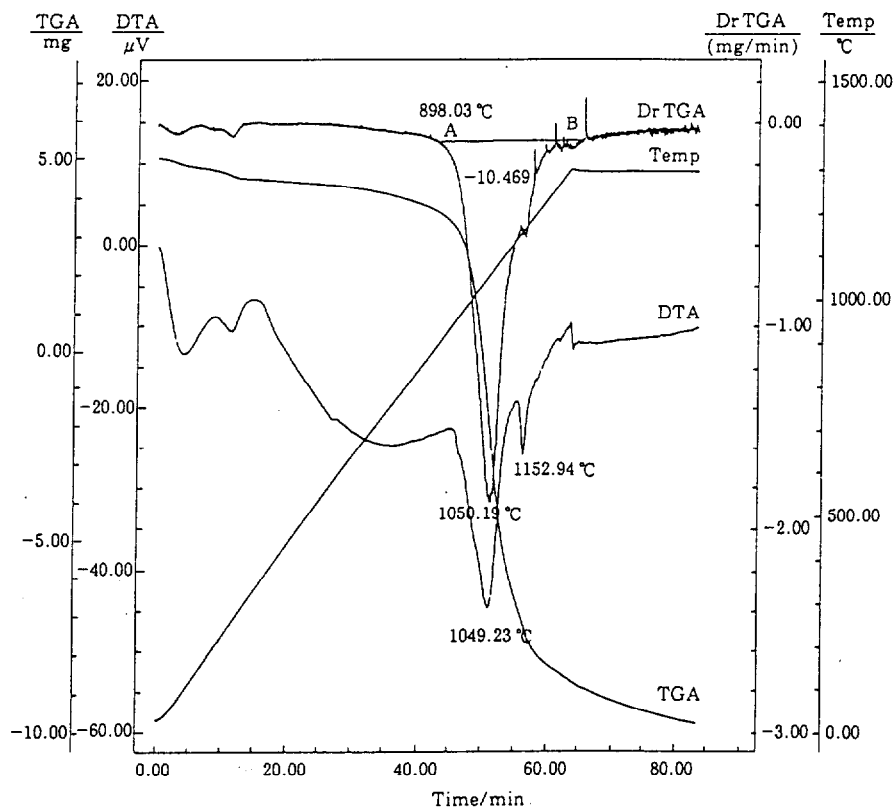


図 2.1.1.1 岩鉄(53 ~ 100 μm)の活性炭による熱分析結果
 図中の 898.03 °Cは還元反応 $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ の
 開始温度 1049.23 °Cは吸熱ピークの温度を示し、
 -10.469 は試料中の(CとO₂)の減量値

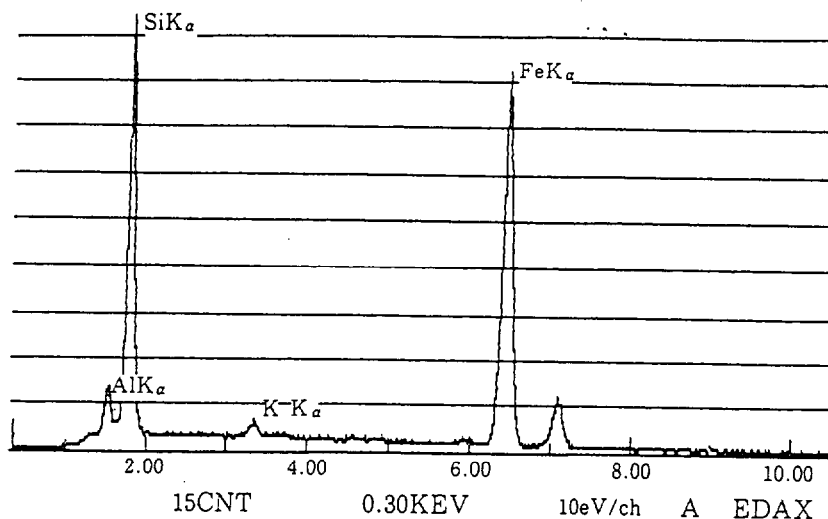


図 2.1.1.2 ファヤライトのX線スペクトル

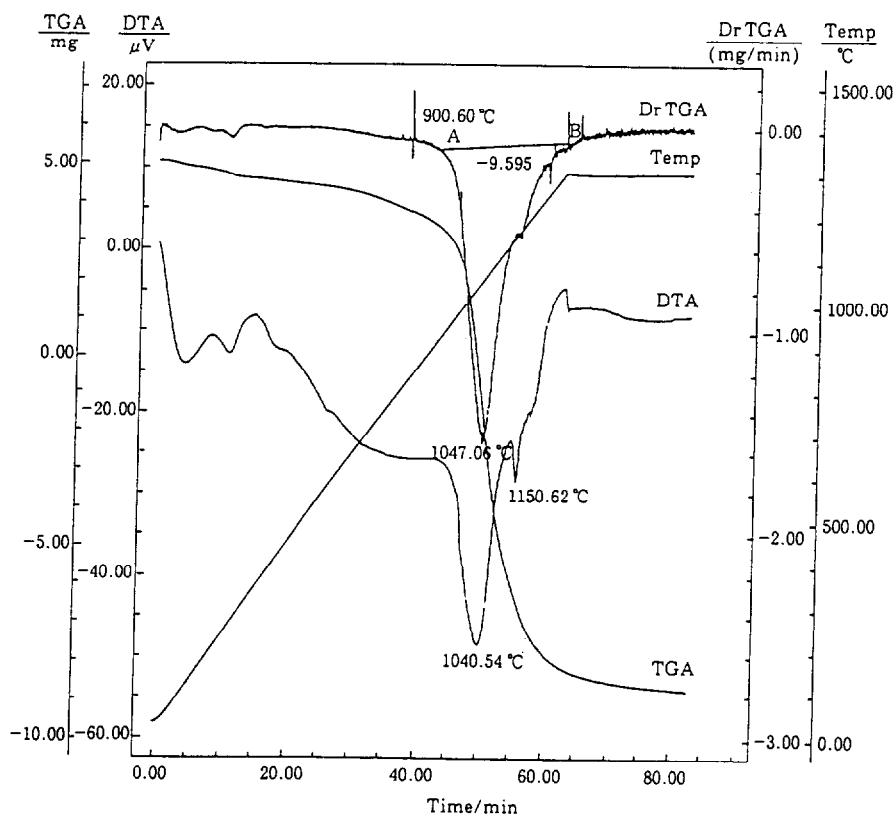


図 2.1.1.3 岩鉄 (100 ~ 150 μm) の活性炭による熱分析結果
 図中の 900.60 °C は還元反応 $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ の
 開始温度 1040.54 °C は吸熱ピークの温度を示し、
 -9.595 は試料中の (C と O₂) の減量値

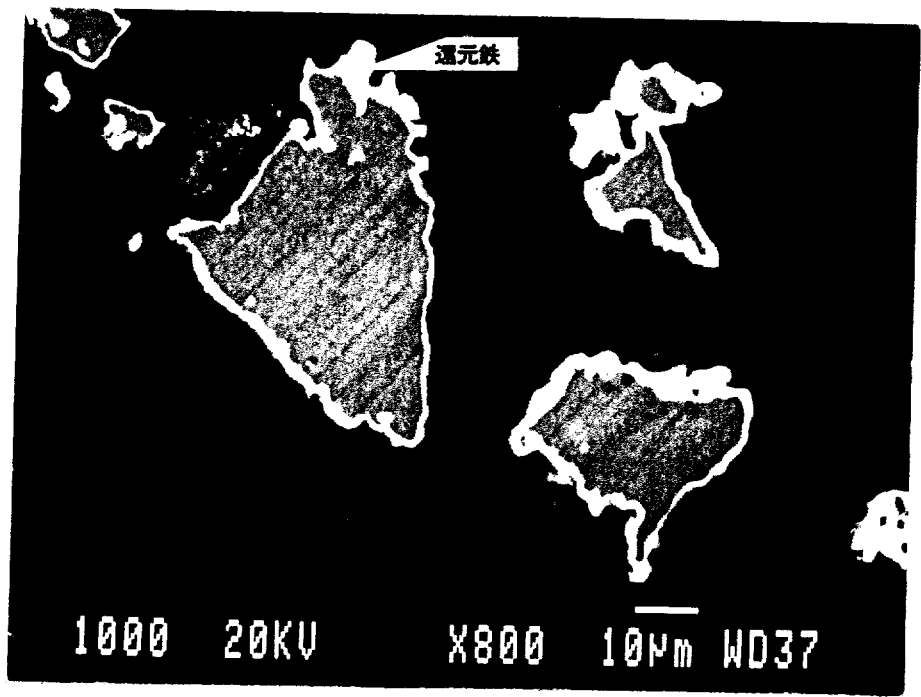


写真 2.1.1.1 岩鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係 (1000 °C付近)

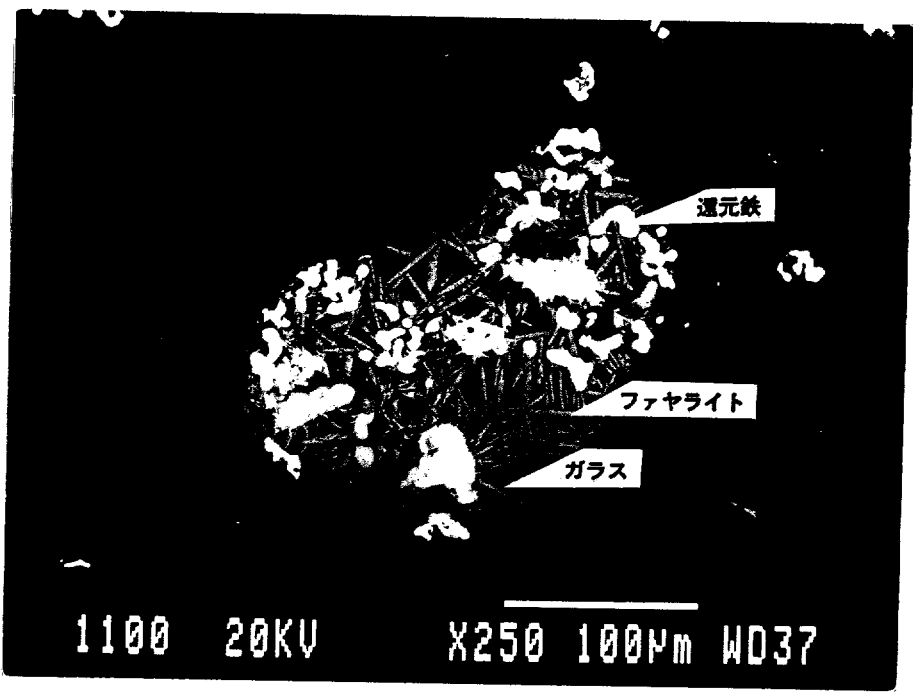


写真 2.1.1.2 岩鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係 (1100 °C付近)

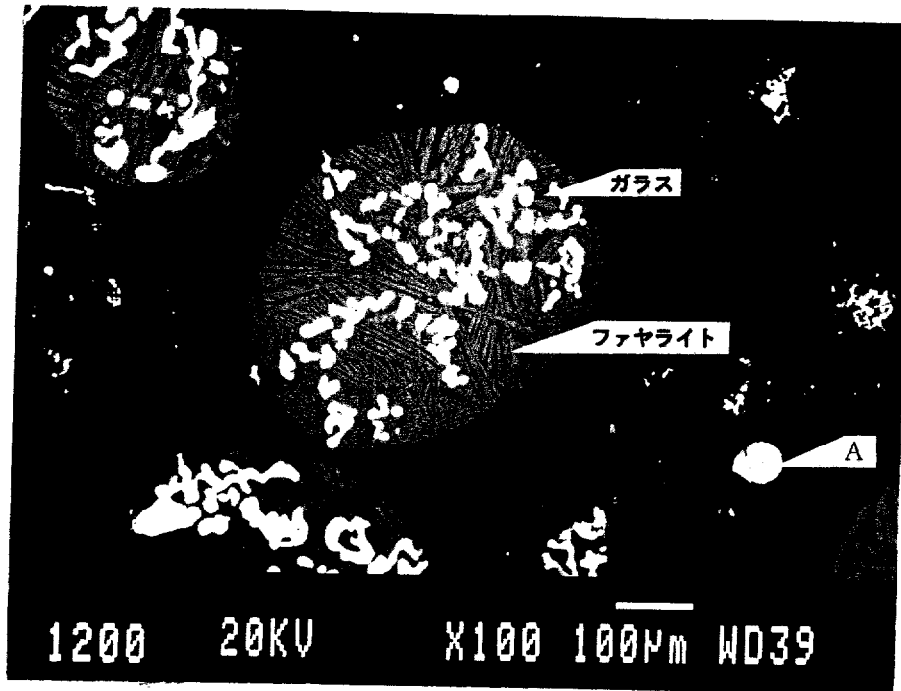


写真 2.1.1.3 岩鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係(1200 °C付近)

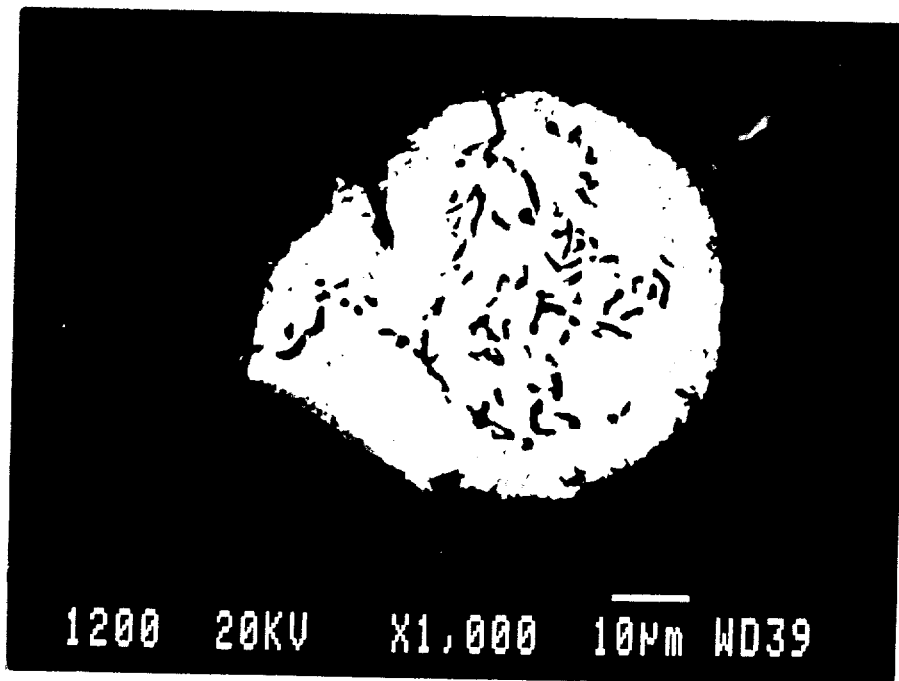


写真 2.1.1.4 岩鉄の活性炭による還元で
浸炭した金属鉄
(1200 °C付近 写真 2.1.2.3 矢印Aの部分)

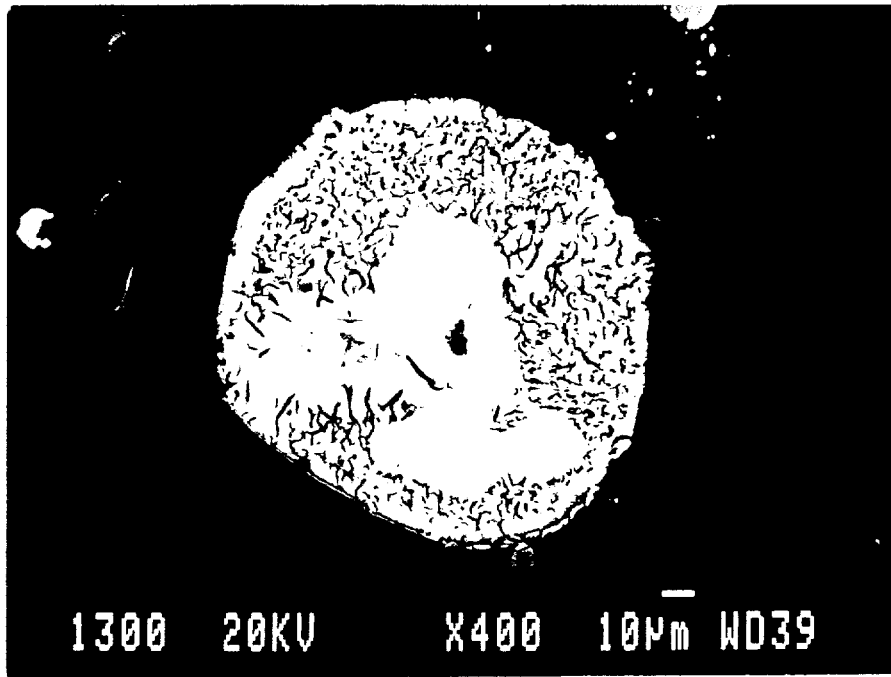


写真 2.1.1.5 岩鉄の活性炭による還元によって
浸炭した金属鉄 (1300 °C付近)

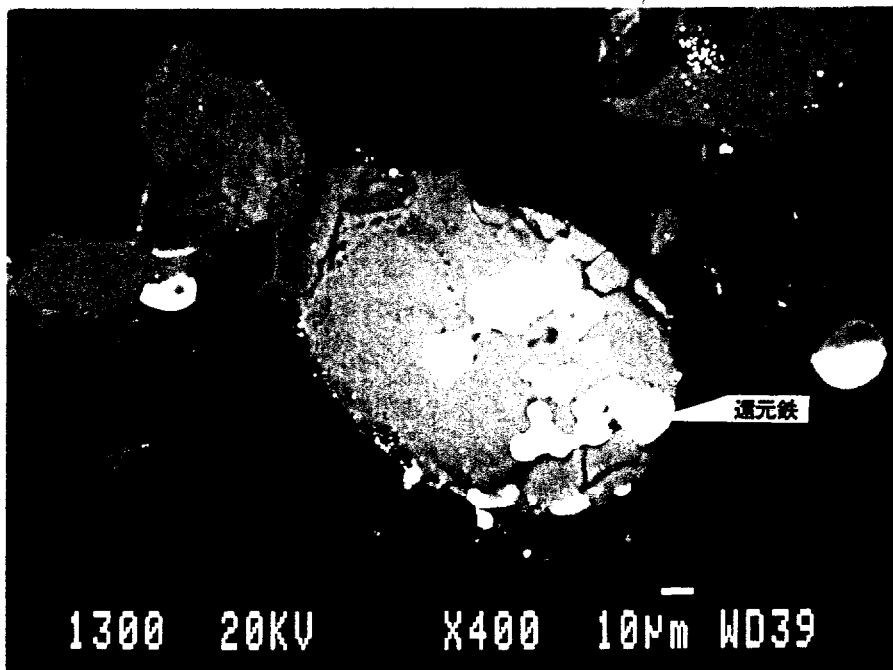


写真 2.1.1.6 岩鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係 (1300 °C付近)

1. 2. 2 砂鉄の場合

砂鉄についても岩鉄と同様の実験を行った。

この実験では53~100 μm 平沢川採取の砂鉄試料を用い、設定温度範囲は、岩鉄の場合と同じく室温~1300 $^{\circ}\text{C}$ とした。

熱分析の結果は図2.1.2.4のとおりとなった。また、各温度帯で生成した物質については写真2.1.2.7~2.1.2.13のようになった。

<1000 $^{\circ}\text{C}$ >まで昇温した場合

写真2.1.2.7はこの温度まで昇温した試料の電子顕微鏡写真であり、砂鉄粒子に網目模様が現れ、砂鉄中の旧イルメナイト界面に沿って還元が進行した様子が認められる。網目模様の比較的白色の部分は酸化鉄が還元された部分である。

<1100 $^{\circ}\text{C}$ >付近まで昇温した場合

写真2.1.2.8は、金属鉄の他に2種類の結晶鉱物が生成している様子を示している。これら結晶鉱物の一つは、写真の矢印部分のX線スペクトル図（図2.1.2.5）からアルミニウム（Al）、マンガン（Mn）、などを少量含むウルボスピネル近似の結晶鉱物であり、針状の結晶鉱物はファヤライトである。

<1200 $^{\circ}\text{C}$ >まで昇温した場合

岩鉄の場合と同様に、吸炭して球状を呈する金属鉄が存在し（写真2.1.2.9）、また同時に、ファヤライト、ウルボスピネル（写真2.1.2.10）のほかに、写真2.1.2.10の矢印部分のX線スペクトル図（図2.1.2.6）からイルメナイト近似の結晶鉱物が生成していることが確認できる。

<1300 $^{\circ}\text{C}$ >まで昇温した場合

岩鉄の場合と同様に、凝集した金属鉄がみえる（写真2.1.2.12）。また写真2.1.2.13では、非晶質（ガラス）中に結晶鉱物が確認できた。この鉱物は、矢印部分のX線スペクトル図からルチルと判定できる。X線スペクトル図のピークはTiが主であり、挟雑物であるFeのピークがわずかにみえるだけなので、TiO₂の存在を示している。そして、この温度領域で、ファヤライトは晶出していない。

また、平沢川の砂鉄と比較するために、荒砥川で採取した砂鉄の熱分析を行った。その結果は、図2.1.2.8のとおりであった。これは砂鉄中に含まれるTiO₂の成分の量の違いによって差があるかどうかを見るためである。まず、還元開始温度は約950 $^{\circ}\text{C}$ であり、平沢川の場合とほぼ同じ温度であったが、反応量の最大値を示す温度は1164 $^{\circ}\text{C}$ であり、平沢川の砂鉄（1134 $^{\circ}\text{C}$ ）より、30 $^{\circ}\text{C}$ ほど高かった。なお、試料重量の総減少量は、両者とも約8.5mgであった。

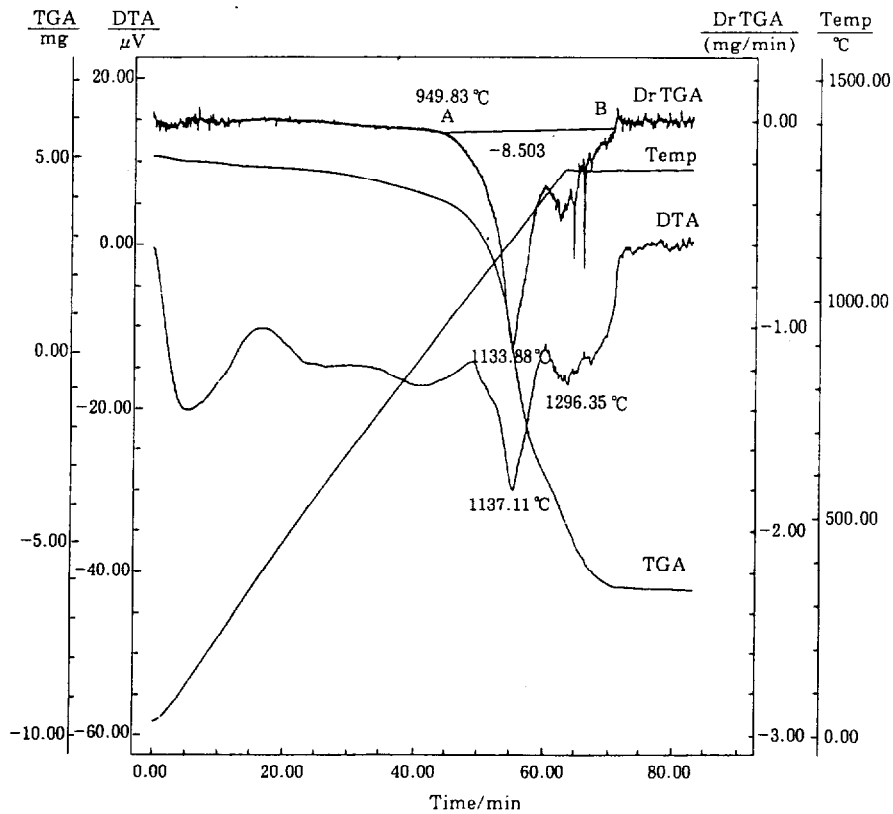


図 2.1.1.4 平沢川採取の砂鉄 (53 ~ 100 μm) の活性炭による熱分析結果. 図中の 949.83 $^{\circ}\text{C}$ は還元反応 $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}$ の開始温度 1137.11 $^{\circ}\text{C}$ は吸熱ピークの温度を示し, -8.053 は試料中の (C と O_2) の減量値

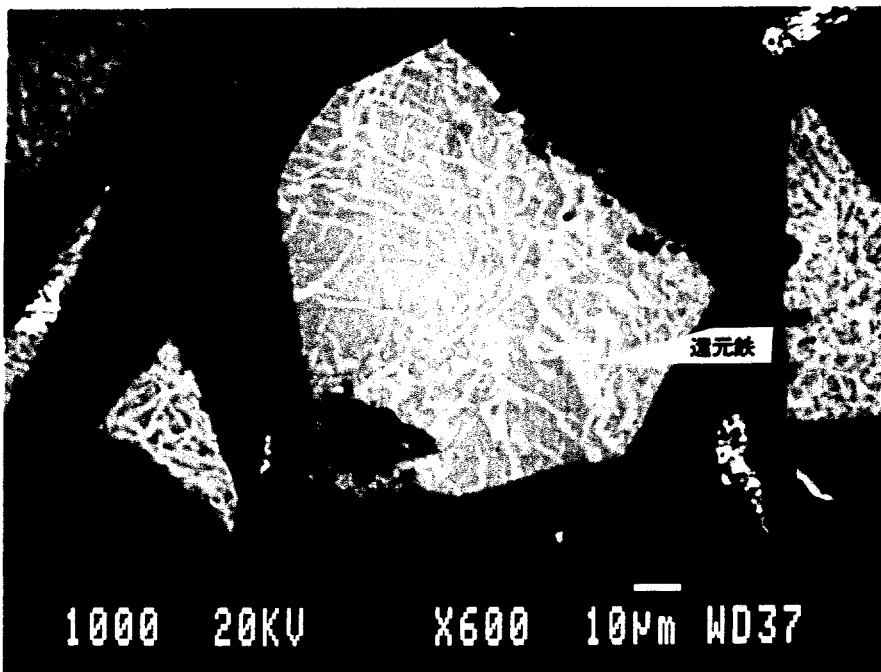


写真 2.1.1.7 砂鉄の活性炭による還元温度と結晶鉱物相の関係 (1000 $^{\circ}\text{C}$ 付近) 旧イルメナイト界面が還元され, ウスタイトが生成する

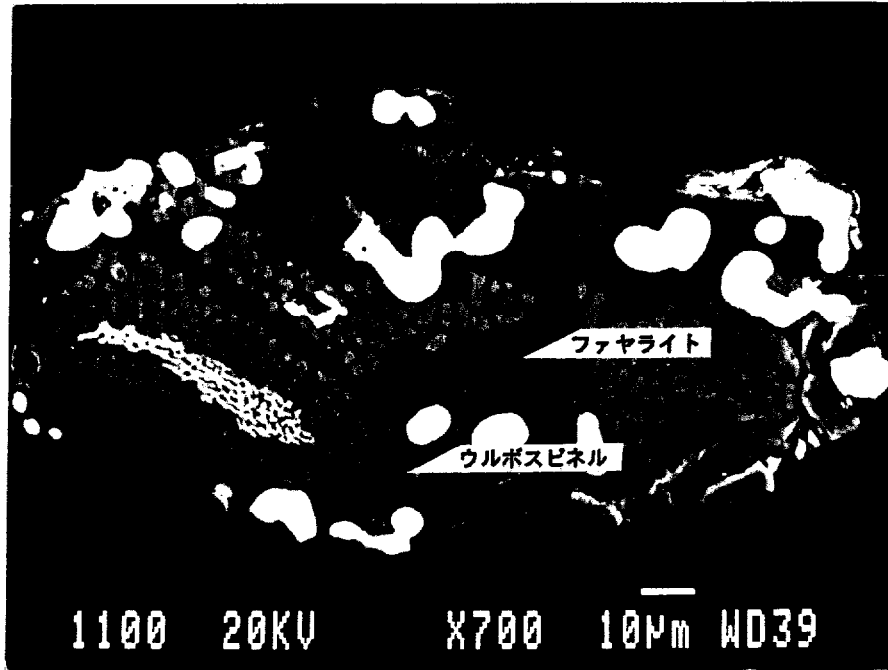


写真 2.1.1.8 岩鉄の活性炭による還元温度と結晶鉱物相の関係 (1100 °C付近) ウルボスピネルの生成とファヤライトの晶出が認められる

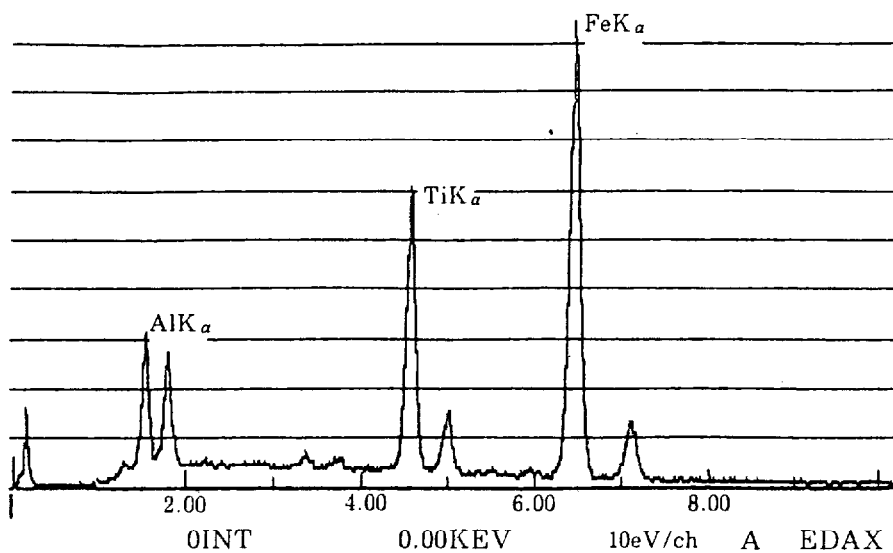


図 2.1.1.5 ウルボスピネルのX線スペクトル

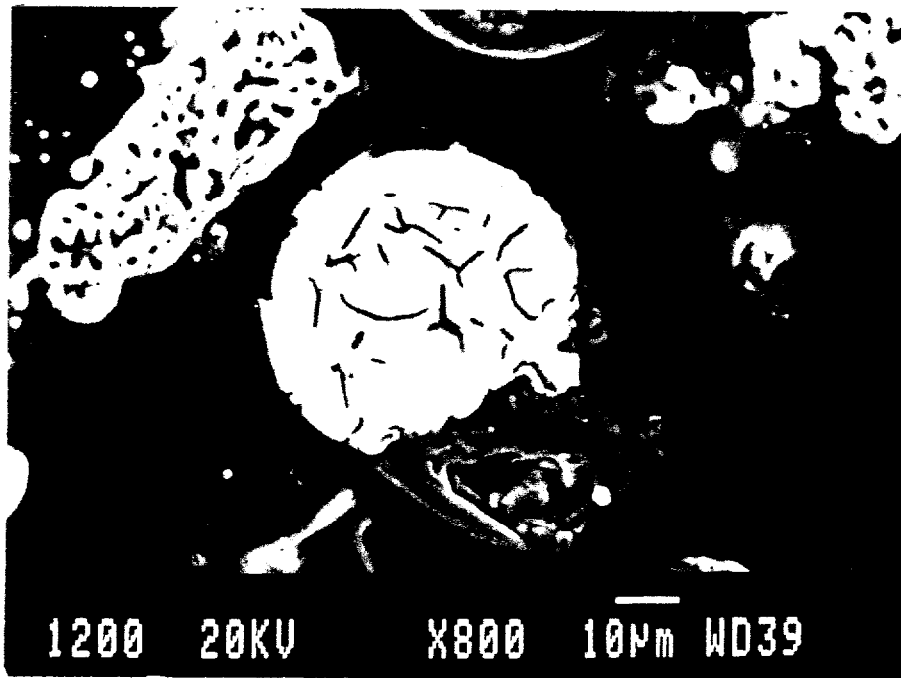


写真 2.1.1.9 砂鉄の活性炭による還元で
浸炭した金属鉄

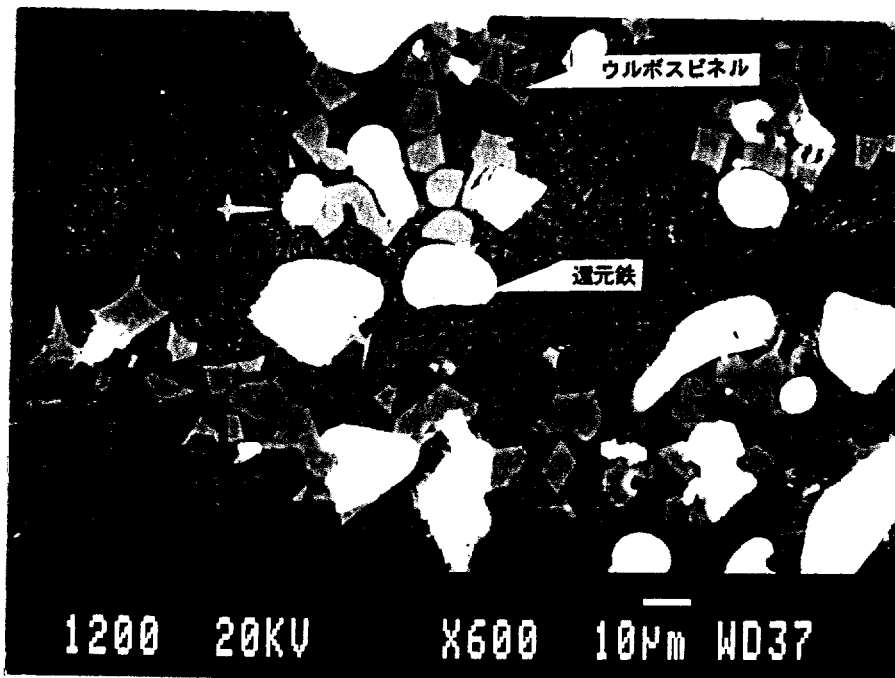


写真 2.1.1.10 砂鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係属鉄(1200 °C付近)
灰色角状の結晶鉱物はウルボスピネル

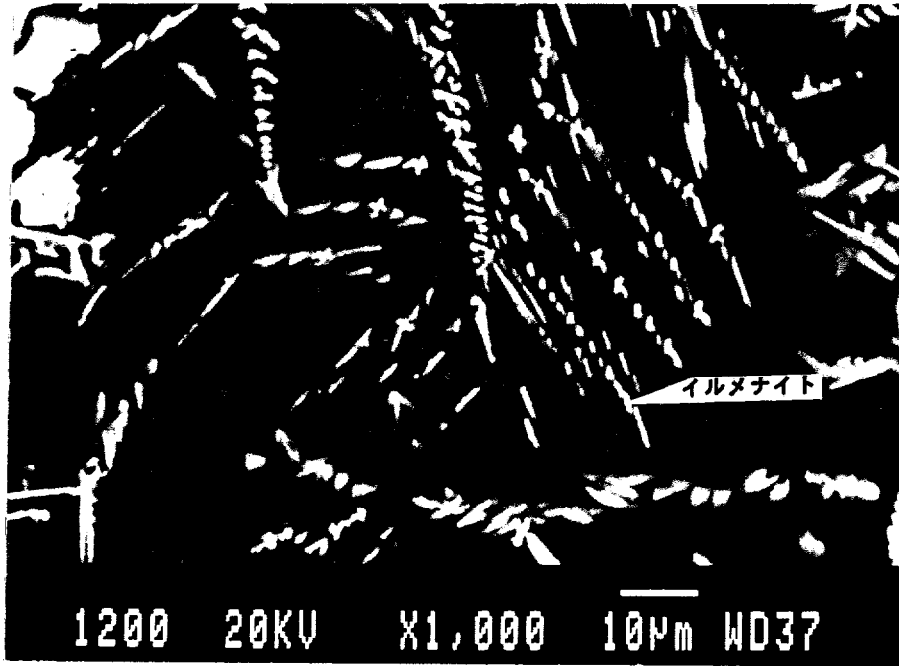


写真 2.1.1.11 砂鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係 (1200 °C付近)
イルメナイトの生成が認められる

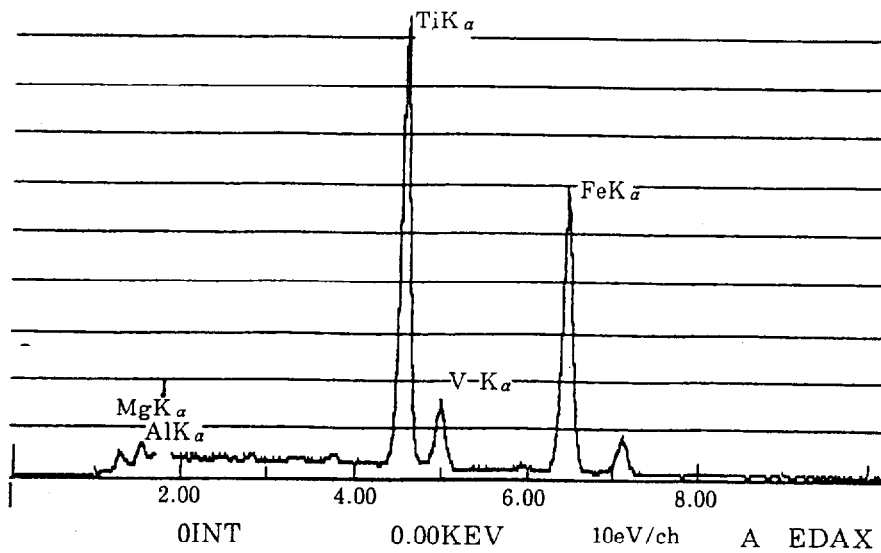


図 2.1.1.6 イルメナイトのX線スペクトル

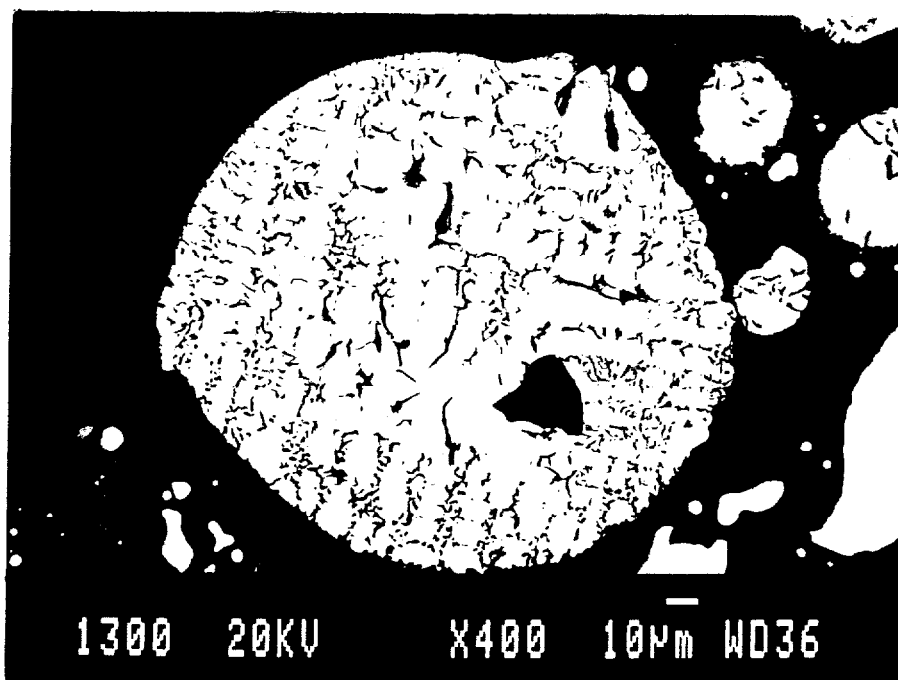


写真 2.1.1.12 砂鉄の活性炭による還元で
浸炭した金属鉄

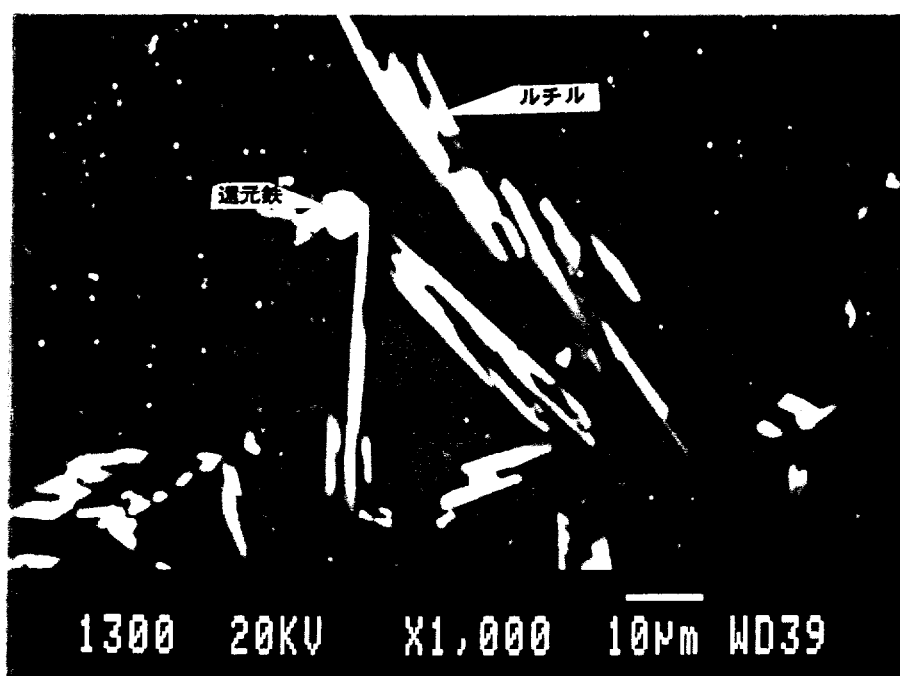


写真 2.1.1.13 砂鉄の活性炭による還元温度と
結晶鉱物相の関係(1300℃付近)
ルチルの生成が認められる

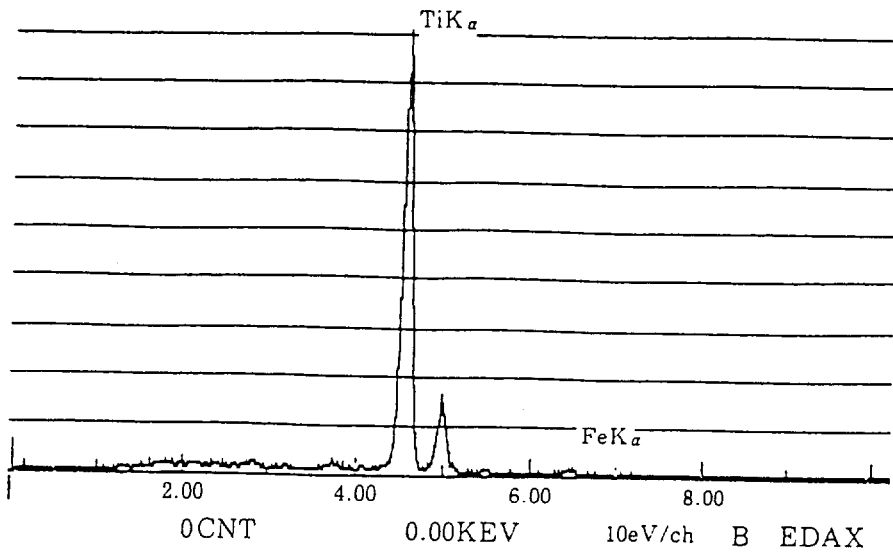


図 2.1.1.7 ルチルのX線スペクトル

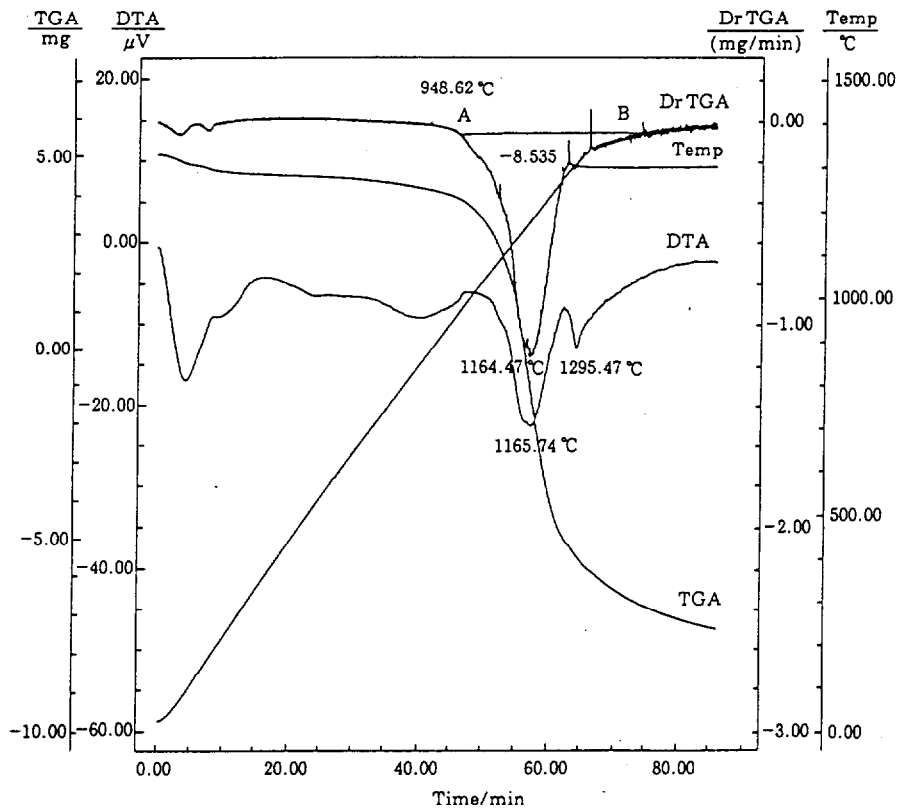


図 2.1.1.8 荒砥川採取の砂鉄 (53 ~ 100 μm) の活性炭による熱分析結果. 図中の 948.83 $^{\circ}\text{C}$ は還元反応 $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ の開始温度 1137.11 $^{\circ}\text{C}$ は吸熱ピークの温度を示し, -8.535 は試料中の (C と O_2) の減量値

1. 3 還元温度と生成（晶出）結晶鉱物の整理

上記の熱分析結果をもとに、各温度帯に現れた結晶鉱物についての整理を行った結果次のような諸点が明らかとなった。

1. 3. 1 岩鉄の還元温度とファヤライト

図2.1.2.3（粒径53~100 μm の岩鉄）では、800 $^{\circ}\text{C}$ 付近でゆるやかにTGAの下降（重量減少）、DTAの上昇（発熱反応）が認められる。TGAの下降は、活性炭とこれに吸着していた酸素とによる反応によるCOの生成、これを引き金としてガス還元反応が起こり、FeOが生成することによって起こる。次いで900 $^{\circ}\text{C}$ 付近から急速にDTAとTGAが下降する。この温度以上から、ブドアル反応によるCOの再生という機構、すなわちみかけ（あるいは真）の直接還元として進むと思われる。したがって、大きな吸熱ピークはブドアル反応の大きな吸熱（3180cal/g-carbon）によるものと考えられる。なお、ブドアル反応の開始温度は炭材の反応性に依存することが知られている。活性炭は反応性の大きい炭材であるが、その場合でも $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ の反応が十分早く進むのには900 $^{\circ}\text{C}$ 程度の高温が必要である。以下、還元温度と、冷却過程で晶出する結晶鉱物の関係は、次のような結果となった。

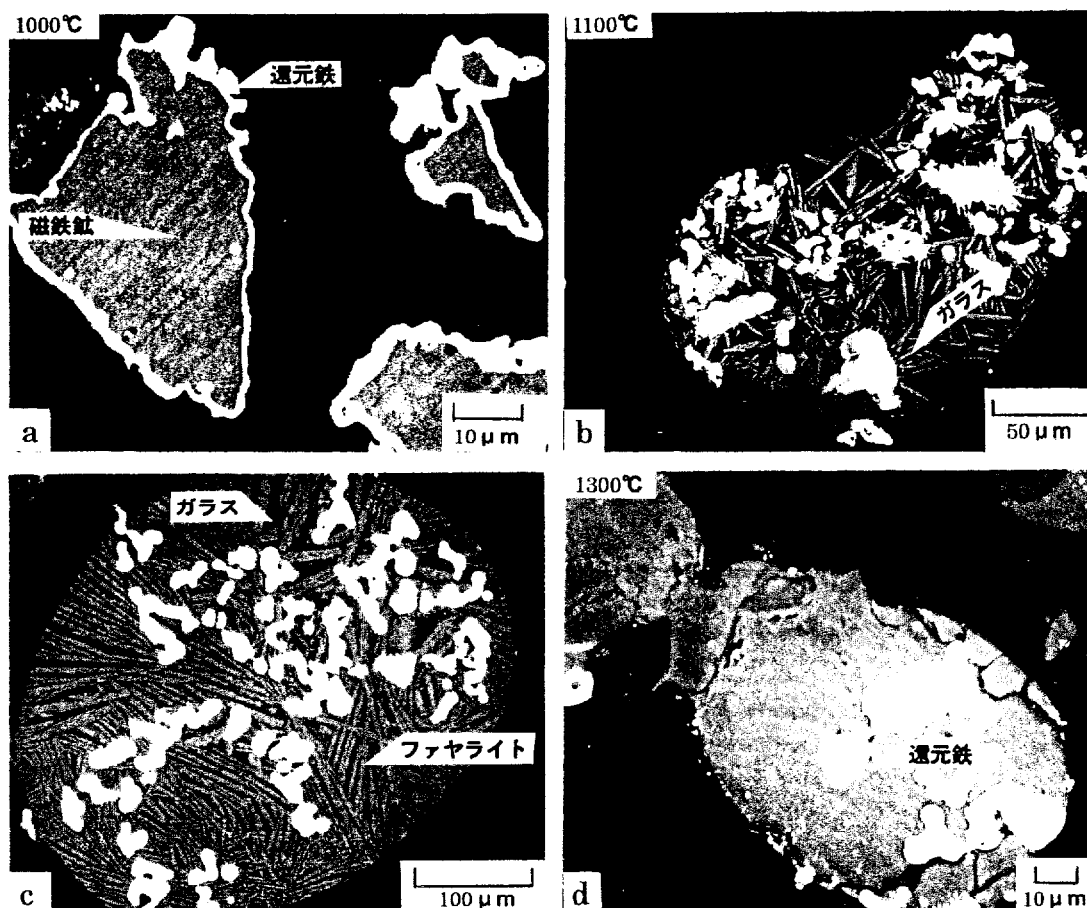


写真 2.1.1.14 岩鉄の活性炭による反応で生成／晶出する結晶鉱物相（1000 ~ 1300 $^{\circ}\text{C}$ ）

写真 a : < 1000℃ > 付近の状態

900℃付近から、急激に還元反応が進行し、金属鉄が生成し始める。この反応は吸熱反応であり、1050℃付近の吸熱ピークはそれを示している。また、還元が外周からおこるのは、この岩鉄が単一鉱物（マグネタイト）であるためである。

写真 b : < 1100℃ > 付近の状態

1100℃付近まで昇温した場合、金属鉄の生成はさらに進行するが、この温度付近に達したときファヤライトの晶出が初めて認められた。これは、非晶質中にあるFeOは近傍にSiO₂が存在すれば、冷却過程でファヤライトが晶出するということを意味している。

写真 c : < 1200℃ > 付近の状態

1200℃付近では晶出するファヤライトの体積率は増加し、そのわずかの間隙にガラスが存在する。これは、900℃付近から始まる還元反応によって2価の酸化鉄（FeO）1200℃付近まで生成していることを意味する。また、DTA曲線の最大吸熱ピークと対応して、ほぼ同じ温度でDrTGA曲線の重量減少率も最大となる。

写真 d : < 1300℃ > 付近の状態

さらに昇温を続けると、1200～1300℃にかけてDrTGA曲線の変化率が小さくなり、1300℃でこの反応はほぼ終了する。すなわち、1300℃直下でFeOは消失し、ファヤライト晶出の条件がなくなる。

1. 3. 2 砂鉄の還元温度とFeO-TiO₂鉱物

図2.1.2.4から、850℃付近からゆるやかにTGA曲線の下降、DTAの上昇が認められるが、これは岩鉄の場合と同様の理由による。つぎに、DrTGA、DTA曲線で950℃付近から急激な重量減少と吸熱反応が進行し、その反応量は1130～1140℃付近の温度帯で最大となる。砂鉄の還元進行は、岩鉄の場合とほぼ同様であるが、岩鉄に比べて急激な反応の開始温度で約50℃、反応最大量で約90℃高い。これは、後者には約6wt%のTiO₂が含有していることに起因する。また、ファヤライトは岩鉄の場合とほぼ同じ温度域で晶出するが、異なる点は、DrTGA曲線の変化率が小さくなる温度帯が岩鉄で1200～1300℃、砂鉄では1300℃以上である。このことは、砂鉄が岩鉄に比べて還元性が低いことを示している。

写真 e : < 1000℃ > 付近の状

1000℃付近で砂鉄は還元され、網目状の模様が見える。それは、この砂鉄がウルボスピネル-マグネタイト、イルメナイト-ヘマタイト両固溶体による離溶構造を持つため、砂鉄の周囲だけでなく内部の旧イルメナイト界面にCOガスが浸透し、還元が進行するためである。

写真 f : < 1100℃ > 付近の状態

1100℃付近でファヤライトに加えウルボスピネルが現れる。ほぼ純粋のウルボスピネルが認められたのは、砂鉄のマグネタイト-ウルボスピネル固溶体の分離が生じたためである。

写真 g : < 1200℃ > 付近の状態

1200℃付近ではウルボスピネルの結晶成長が認められるが、一部のウルボスピネルは還元されイルメナイトに相転移するものと見られる。

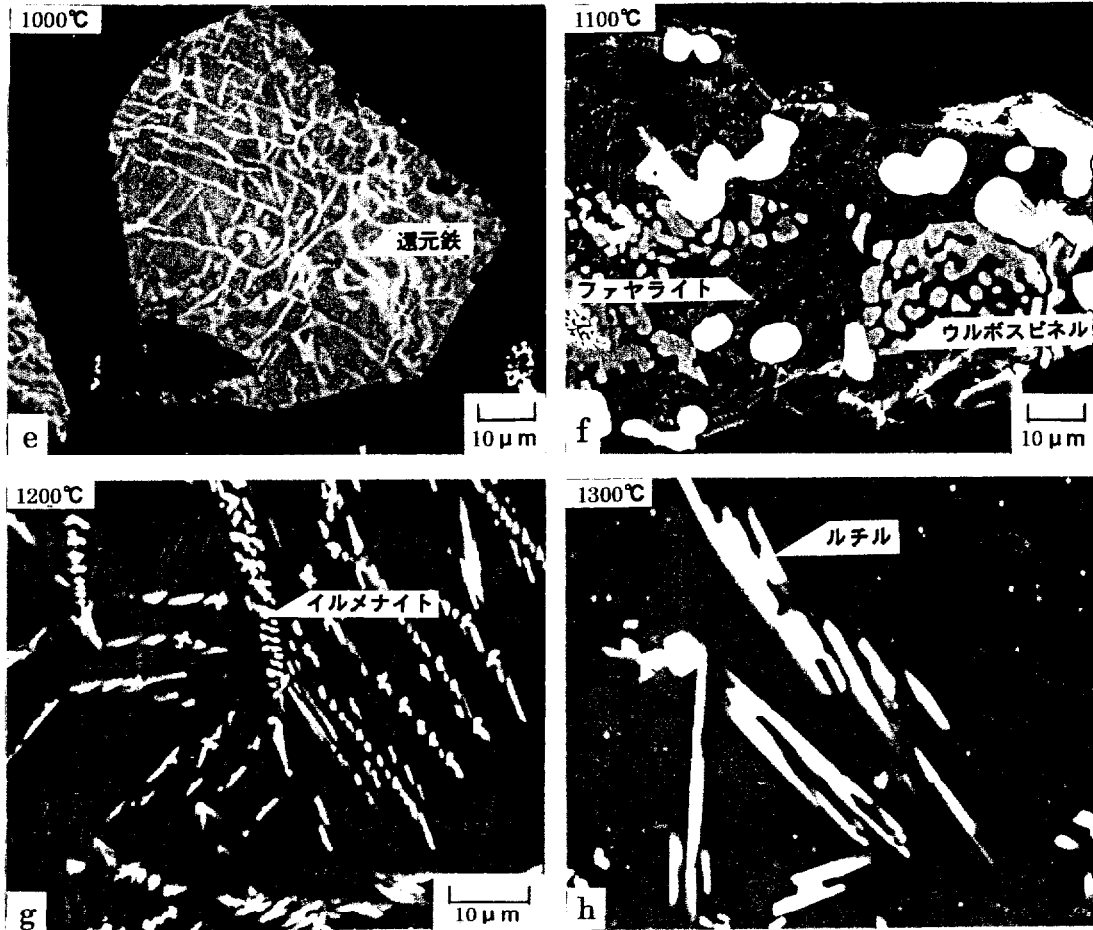


写真 2.1.1.15 砂鉄の活性炭による反応で生成／晶出する結晶鉱物相(1000～1300℃)

写真 h : <1300℃> 付近の状態

1300℃付近ではルチル (TiO_2) が生成する。ただし、写真中には存在しないが、ルチル前段階生成物フェロシュードブルカイト (理論的には FeTi_2O_5) は1200～1300℃の温度域で生成するものと思われる。

以上のように、還元の進行状態や生成物質は、還元温度によって左右されることが判明したが、これらの諸点をまとめると

1. 金属鉄の生成温度は岩鉄の場合は900℃付近、砂鉄は950℃付近で始まる。
2. 岩鉄の還元プロセスでは、ファヤライトの晶出が1100℃付近にあり、1300℃付近では全く晶出しない。
3. 砂鉄の還元プロセスでは、 $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物が、1100～1300の温度帯で金属鉄を析出しながらウルボスピネル→イルメナイト→フェロシュードブルカイトの順に相転移し、ルチルに至ると見られる。また、 $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物の融点はいずれも1400℃以上であるから、これら鉱物は固体のまま相転移すると見られ、先のファヤライトの晶出とは意味が異なる。

以上から、わが国前近代の製錬温度を鉄滓から類推するためには、ファヤライト、あるいは $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物が重要な指標鉱物となる。また、砂鉄の還元プロセスでは、砂鉄中の T

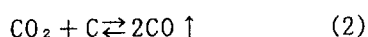
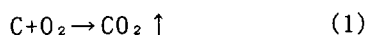
iO₂はほぼ全量が鉄滓に移行するので、TiO₂の挙動から前近代製鉄炉の還元度を知るための成分であることがわかる。

2. 前近代における製鉄（還元）プロセス

次に、実験結果の解析に基づき、前近代における製鉄プロセスを推定する。熱分析実験の結果から、岩鉄や砂鉄が低温域（900℃以下）ではCOガス、高温域（900～950℃）ではCOを媒介とする見かけの直接反応によって還元が進行すること、また、ファヤライトの晶出とFeO-TiO₂鉱物の相転移が起こる温度条件について明らかにしたが、これらの実験結果に従えば、前近代炉内での木炭燃焼プロセスと製鉄プロセスは、以下のように推論できる。

2. 1 炉内における木炭の燃焼プロセス

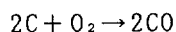
製鉄炉内での送風による木炭の燃焼はつぎの反応式で表せる。



すなわち羽口から入った送風のO₂はまず反応(1)によって木炭の炭素を酸化してCO₂を生じるが、CO₂はさらに木炭がCと反応して（反応(2)）COに還元される。反応(2)は大きな吸熱を伴うが、羽口近傍の高温域で完全に右向きに進行するので、最終的にはN₂とCOだけからなる強還元性のガスを生じることになる。ただし反応はガスの流れる方向に(1)、(2)の順に進むので、ガス（COとCO₂）の組成は流れの方向に不均一となる。

式中のO₂、CO、CO₂などは酸素、炭酸ガス、一酸化炭素などの分子数（モル）を表すもので、これら分子種の相対量は送風の量とは無関係である。例えば反応(1)は1分子のO₂が1原子のCと反応して、1分子のCO₂を生じることを表す。ところが気体分子の体積は分子種にかかわらず22.4 l/molと一定であるから、反応(1)は反応によってなくなるO₂と生成するCO₂の体積が同じであること、したがって空気中のN₂の体積も、反応前後のガス量も一定であることを示している。これに対して反応(2)は反応によってなくなるCO₂の2倍のCOが生成すること、したがって反応によってガスの体積が増加することを示している。

一例として乾燥空気1 m³を送風する場合を考えてみる。空気のO₂の分圧は0.21at. (21 vol. %)であるから、その量は0.21 m³である。すると反応(1)では、O₂+CO₂=0.21 m³（N₂は不変で0.79 m³）、生成ガス量は1 m³一定となる。また反応(2)が完了すると、総括反応は(1)+(2)で



であるから0.21 m³のO₂が0.42 m³のCOに変わることになり、生成ガスの総量はこれに一定不変のN₂を加えて0.42+0.79=1.21 m³であり、組成は次のように計算される。

$$CO = 0.41/1.21 = 0.3471 \quad (34.7\%)$$

$$N_2 = 0.79/1.21 = 0.6529 \quad (65.3\%)$$

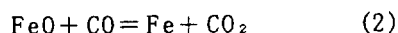
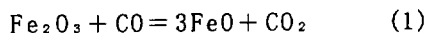
次に送風量を2倍の2 m³にすると、生成ガス量はいずれも2倍に増えるが、ガスの組成は上の計算結果と同じである。すなわち生成ガスの組成は送風の組成だけに依存し、量には無関係である。

2. 2 前近代炉の製鉄プロセス

岩鉄，砂鉄を問わず鉱石から金属鉄を取り出すためには酸化鉄を還元するだけでなく，多くの場合SiO₂やAl₂O₃を主成分とする脈石を分離・除去しなければならない．したがって，前近代製錬における技術上の主要な問題は以下に示すように，その酸化鉄の還元と脈石分離除去の2つがある．

2. 2. 1 酸化鉄の還元

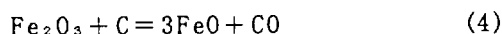
還元は低温域では上昇ガス中のCOによって次のように行われる．



反応(1)，(2)は，いずれも可逆反応で，反応を右向きに進行させるためにはCO分圧を平衡値より大きく保たねばならないが，ガス量に比べて鉱石量が非常に小さい前近代炉では，この条件は，少なくとも平均的には容易に満たされると思われる．一方，これらの反応が高温域（例えば900～950℃以上）で進む場合は，次の可逆反応が同時に進行する．



したがって，総括反応は，(1)+(3)，(2)+(3)から



となる．すなわち還元は木炭の炭素を消費する形でも進行するという事である．これは還元がCOではなく，Cによって行われることで直接還元とも呼ばれる．ただし，機構としてはCOを媒介としているという点で，「見かけの直接還元」ということになる．反応(4)，(5)は反応(3)が大吸熱反応であるため，熱的には不利で，必要な熱を熱風の形で供給できる現代の高炉ならともかく，送風によって生成する多量のCOを十分利用しない放散しがちな前近代炉では，「見かけの直接還元」反応の進行は好ましくないといえる．

なお，反応(3)（ブードアール反応）の平衡は気相が炭素飽和の状態にあることを意味する．図2.2.2.1は，鉄と酸化鉄のCO-CO₂混合ガスにおける状態を示したものである．「2CO=C+CO₂（ブードアール曲線）より高いCO分圧の範囲では炭素は析出する．FeO+CO=Fe+CO₂曲線より高いCO分圧の範囲では鉄に浸炭することを示している．すなわち，右向き反応は炭素のガス化が進むことであり，気相が炭素未飽和の状態であることを，左向き反応は炭素が析出することであり，炭素過飽和状態ということである．したがってもし還元によって生成した金属鉄がブードアール平衡組成のガスと平衡していれば，その鉄もまた炭素飽和の状態となる可能性がある．すなわち，Fe-C系平衡状態図のその温度における飽和炭素濃度まで浸炭する可能性がある．」⁹⁾

製鉄炉に投入された鉱石（岩鉄あるいは砂鉄）は燃焼木炭中を沈降して行き，COガスによって還元される．この時の還元条件は炉内温度が1200℃であれば，図2.2.2.1からCOガスは75%以上が必要となる．この温度でCO，CO₂が平衡するブードアール反応ではCOガスの比率はほぼ100%であるため，容易に還元し金属鉄が生成する．この状態の酸素分圧は10⁻¹²atm程度である．熱分析の結果から，鉱石の急速な還元進行には岩鉄（主成分はマグネタイト）で900℃，砂鉄（主成分はチタノマグネタイト）で950℃が必要となる．そして，反応量の最大値は岩鉄が1050℃付近，砂鉄が1150℃付近にあるので，この温度以上が維持されれば金属鉄は十分に生成する．

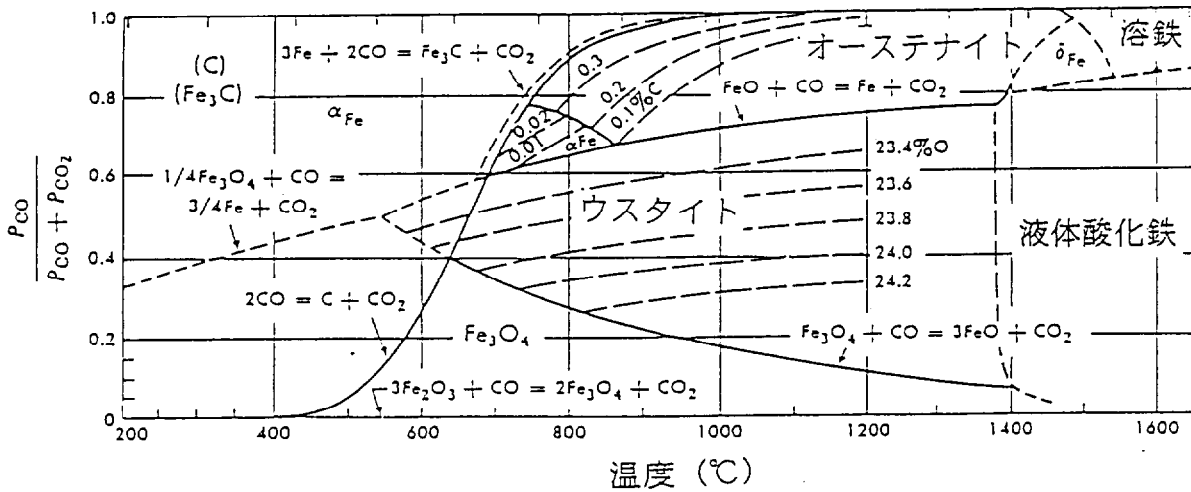


図 2.2.2.1 鉄と酸化鉄の CO - CO₂ 混合ガスにおける状態

また、1200℃下で製錬が行われたとする。図2.2.2.1から、COガス濃度が100%に近い場合、金属鉄は熱力学的に吸炭することが理解できる。熱分析実験の結果では、1000～1100℃付近での金属鉄への浸炭は認められなかったが、1200℃付近に達すると、浸炭は進行する。それでも、この温度帯で十分に浸炭するためには、さらに時間が必要となる。

2. 2. 2 脈石の分離除去

前近代の製錬プロセスにおいてはより清浄な金属鉄を得るため、鉱石と共生する脈石を除去する必要があった。そのため、脈石の分離除去にはノロが大きな役割を演じた。このノロの作用は、次のようなものであり、前近代の製錬プロセスでは、必須の物質であったと考えられる。

第1には、鉱石中の脈石（不純物）の除去・還元鉄の凝集促進。

第2には、ガスが金属鉄に及ぼす作用の緩和

第3には、伝熱の媒体。

製錬過程で生成する鉄滓はファヤライトと、熔融温度の低い非晶質物質（ガラス）からなる。砂鉄製錬の場合はそれにFeO-TiO₂鉱物が加わる。

前近代の製錬炉では、ノロを造るために炉壁が利用された。旧仙台藩大竈地域にみられる製錬炉には、反応剤（炉の補強材でもある）としてザンギと呼ばれる珪石を混ぜて使用している例もある。

また、古代中国では還元を1000℃以下で行い、脈石を含有したまま還元鉄を得る塊煉鉄法が行われていたとされる⁹⁾。その場合には次の鍛冶工程で脈石を除去することになり、脈石含有量が少ない場合、すなわち高品位鉱石にだけ有利に適用できる方法であることは明らかである。洋の東西を問わず一般に採用されたのは、製錬工程で脈石をノロとして分離・除去する方法であった。ところで、多くの場合、脈石の主成分はSiO₂でありその融点が高いので、融剤すなわち塩基性の酸化物と結合させて低融点の化合物（鉱物）を生成させなければならない。石灰（CaO）は最も不変的な融剤であるが、それが常用されるようにな

るのは高炉の出現後のことであり、前近代炉で使用された可能性は低い。その理由として考えられることは、 SiO_2-CaO の2元系は一般に融点が高く、 $\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系の高 SiO_2 側には低融点域があるが、粘度が高いため低温では十分な流動性をもたない。すなわち石灰を溶剤として使用するためには、それ相応の高温が必要であったということである。こうして前近代炉では FeO を溶剤として、ファヤライト ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) を主成分とするノロを作る方法が目的意識的にではなく、自然発生的に取られたとみてよい。

ファヤライトの生成には SiO_2 1%あたり $2 \times 72 \div 60 = 2.4\%$ の FeO を必要とするので、 SiO_2 含有量が高いほど鉄滓として失われる鉄分が多くなるという不都合が生じるが、これは不可避免的なものである。

ファヤライトの融点は 1205°C で $\text{Fe}-\text{C}$ 系状態図の共晶点温度(約 1150°C)を上回る。するとファヤライトを主成分とする鉄滓が炉床で流動状態に保たれるような温度条件の下では、溶銜が生成する可能性があるということになる。ただし、鉄滓中の FeO は酸化剤として働くので、浸炭を阻害し、さらには脱炭作用を起こす可能性もある。したがって、鉄滓のこの作用の影響を強く受けるような状態では浸炭は抑制され、

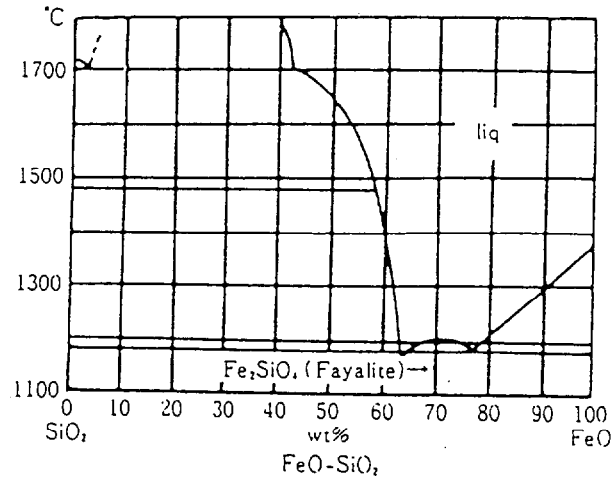


図 2.2.2.2 $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ 系平衡状態図

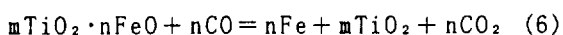
メタルの融点は低下しないため固体の状態に保たれることになる。すなわち還元鉄の浸炭の程度はガスの促進作用と鉄滓の阻害作用との競合の結果として定まるといことになる。

近世のたたら製錬では、操業初期には籠り小鉄(こがね)と称する砂を多く含む砂鉄を用い、鉄の生成以上にノロを生成させる。このノロの生成が、籠の中で鉄が沸く(製錬が成功する)一つの目安となっていたようである。こうした炉材の選定がノロの生成を念頭においていることはあきらかである。古代の製錬にでもノロは重要な物質であったとみられ、製錬遺跡からは膨大な量の鉄滓が出土する。したがって、古代の製錬でも近世と同様な方法で、脈石の分離除去が行なわれたと考えられる。

2. 2. 3 砂鉄製錬の場合—その特殊性

以上は、一般的な場合であったが、原料が砂鉄の場合は、なお検討が必要である。なぜならば、一口に砂鉄といっても、その含有する結晶鉱物や TiO_2 含有量はさまざまであるからである。真砂砂鉄のような低 TiO_2 砂鉄の場合は純マグネタイトのような振る舞いをするであろうから、還元にせよ脈石分離にせよ、上述の鉱石一般の取扱いと大きな相違はないと考えられる。問題は高 TiO_2 砂鉄であるが、この場合の主要な問題は還元ではなく脈石分離にあると思われる。 $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物の還元が低酸素分圧の還元剤を必要とすることは事実であるが、それは然るべき温度の下で次のように進めることができるであろう。

もし還元が $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物と炭素とによって直接還元が進行すれば、





(6) + (7)により



$(m\text{TiO}_2 \cdot n\text{FeO}) + n\text{C} = n\text{Fe} + m\text{TiO}_2 + n\text{CO}$ (9)というような反応進行になるであろう。

いずれにしても問題は、この際生成した TiO_2 をノロとして分離できるか、具体的にいえば砂鉄中の SiO_2 と未還元FeOから生成するファヤライトを主成分とするノロの中にこの TiO_2 を、流動悪化させることなしに溶解できるかということにある。この問題の回答を得るためには SiO_2 - TiO_2 -FeO系の状態図と粘度に関するデータが必要であるが、いずれも欠如している。推察するに、おそらくファヤライトを主要鉱物とする鉄滓は、多少の TiO_2 を溶解するであろうが、現実には TiO_2 の大部分はFeO- TiO_2 鉱物という形で鉄滓中に残留するのではないかと思われる。それは前近代炉では上記の総括反応(8)または(9)が進むのに必要な温度条件が満たされないためではないかと判断される。そこでもし鉄滓の温度がこれら鉱物の熔融温度以下であれば、鉱物は固体として鉄滓中に懸濁し、流動性を悪化させることになる。なお、高 TiO_2 砂鉄の SiO_2 含有量が低く、生成するファヤライト鉄滓が含 TiO_2 鉱物を受け入れるのに少なすぎれば、砂などを加えて鉄滓量を増やすことが必要となる。また、反応(9)が進むような条件の下では、鉄滓中の TiO_2 がさらに還元されて炭化チタン(TiC)や窒化チタン(TiN)が生成されることもあるといわれている⁵⁾。

3. 前近代における精練(酸化)プロセス

前近代製鉄作業工程では還元と酸化の両プロセスが存在したが、還元プロセスについては先のように検討したので、次いで酸化プロセスについて述べる。初期製鉄の時代(古墳時代後期)から中世にかけて、どのような精練法が存在したかは明らかではない。したがって、製錬プロセス解析の手がかりとしてはわが国近世の17世紀に成立したと見られる大鍛冶場で行われた精練法について検討することから始めなくてはならない。この大鍛冶場には左下法および本場と呼ばれる作業工程があり、たたら場で生産された金属鉄は両工程を経て、主として包丁鉄と呼ばれる鍊鉄を生産した。以下、これらは酸化プロセスであり、おおよその作業内容についてはほぼ明らかにされているので、これをもとにして、大鍛冶(精練)のプロセスについての解析を行う。

3. 1 左下場におけるプロセス

左下とは、銑中に含まれる炭素を酸化精練において炭素量を下げる(脱炭)ことである。左下場では白銑の脱炭が行われたが、その業工程で用いられた炉は、山田によれば図2.2.3.1のようなものであるとされる⁶⁾。この図を山田は『…、長さ二尺五寸乃至三尺、幅約一尺乃至一尺五寸深さ七、八寸を有する火床を備へ炉底以下は木炭末にて敲き上げ其下部には溝を設けて湿氣を防ぎ、両側は粘土にて堅め羽口は圖に示せるか如き粘土管にして床の長さに沿ひて置かる、…。』と説明している。さらに、作業工程は『左下床の底に木炭を積み其上に白銑百二十貫⁷⁾乃至四百貫⁷⁾を羽口の前にアーチ形に積み重ねさらに其上を小炭にて覆ひ底部の木炭に点火し強く送風して白銑を熔融せしむ、此場合銑鐵はアーチ形の内面より漸次熔融し氷柱状をなして滴下す、此滴下せる銑鐵が高温の酸化性火焰に觸れ

てその中の炭素は漸次酸化し最初三%以上の炭素を含有せるものか遂に0.7%以下に減す、之を左下鐵と云ふ。此の時銑鐵をアーチ形に積み重ねたるは下部の木炭が燃焼し盡せる後も積まれた銑鐵が崩されざる為にして今一つはよく保熱して温度を高くする役目もなすなり。かくして漸次滴下して底に溜まれる左下鐵が約八貫目内外の塊となり少し固まるを待ちて引き出し冷却せる後錠にて碎きて

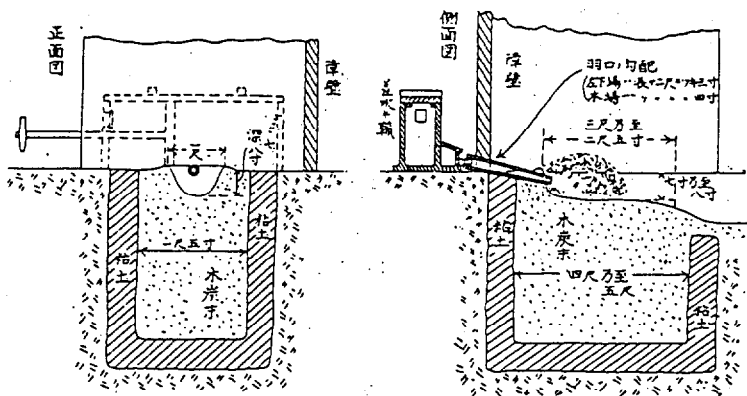
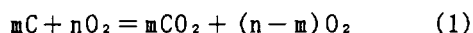
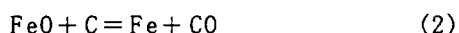


図 2.2.3.1 大鍛冶炉の断面図

次の本場に於ける原料となす。』と述べている。この記述に従えば、左下法とは酸化プロセス精練であり、強熱された「酸化焰」により銑は酸化脱炭される。ただし、炉内下部の木炭は点火用であり、銑上に積まれた小炭は保熱用と考えられる。したがって、銑が酸化・脱炭する反応は以下のようなものである。



酸化焰とは燃焼木炭と酸素との反応において発生した二酸化炭素と自由酸素からなり、この自由酸素により滴下する銑が酸化され脱炭する。



この反応式は一部の金属鉄は酸化焰によって酸化され銑中のCと反応するが、これも酸化反応である。ただし量的には少量であるとみられる。



この反応式は木炭燃焼中に発生する二酸化炭素と銑中の炭素との反応も酸化反応である。

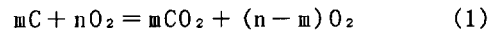
以上の反応で銑の脱炭は、主として①の反応によって起こるとみられる。また、この工程では炭素量約0.7%の「左下鐵」が得られるが、「左下鐵」の原料白銑に対する歩留まりは約95%であるとされる⁸⁾。

3. 2本場におけるプロセス

大鍛冶場では、左下場以外に本場という工程があった。この本場では、たたら場で生産された鋳（とくに質の良くない歩鋳）の介在物を除去し、銑と合わせて脱炭が行われ、錬鉄が生産される。本場に用いられる炉は左下場と同様のものが用いられ、先の左下鉄と歩鋳を合わせて品質の調整を計る。本場の作業工程について山田は『左下鐵と共に總重量七貫乃至貳十貫を挿入す、挿入法も亦左下場に於けると同様に羽口の前にアーチ形に積み更に其上を小炭にて覆い底部より点火し強風を送りて加熱す此際原料は酸化焰に觸れて次第に炭素減し従てその熔融点上昇するか故に全く熔融せずして半熔融體となり互に粘着して一塊となる、此時は不絶注意して鐵棒を用ひ鐵塊の各部を酸化焰の働きに曝す為鐵塊の位置を換え或は回轉せしむ。かくして十分除炭作用進行すれば鐵塊を挟み出し金敷の上のせ鍛夫四人にて交々之を鍛へ熔滓を絞り出し更に加熱して鍛錬を繰返せば遂に炭素0.2%以下の錬鐵を得へし、之を先づ長方形に鍛へ四等分して折り重ね之を鍛錬すこの鍛錬回

数により二延へ、三延へ或は四延へと稱し回数多きものを良品とす、かくして遂に巾三寸、厚二分、長さ二尺内外の帯形として販賣す。』と述べている⁸⁾。

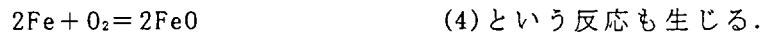
本場の工程は左下鉄と鋸を合わせ、酸化焰中で脱炭すると共に鋸中の滓を排出し鍊鉄を生産する。この工程における主要な反応は、左下工程と同様に



であると考えられる。また、左下工程で述べたように、



の反応も僅かに起こるとみられる。また、この工程では造滓材を加え鋸中の滓を排出したとみられる。したがって、本場の工程が主として介在物の除去にあるとすれば、



大鍛冶工程、すなわち鉄中の炭素量の調整と、鉄中介在物の除去という精練技術がどの時代まで上るか確言はできないが、製鍊プロセスで得られた金属鉄をそのまま使用されることはまずなく、こうした精練プロセスを経て鍊鉄を造ったことは想像に難くない。したがって、少なくとも製鍊が行われるようになった古墳時代後期以降には、日本列島に精練プロセスは存在していたとみてよい。また、このような技術は大鍛冶屋以前はいわゆる鍛冶屋の職分中にあつたもので、工房を伴う住居址に遺棄されている椀型状滓は、大鍛冶滓に対応するものと見られる。第3章以下に述べる鳩山遺跡の例では、椀型滓に含まれる結晶鉱物はファヤライト、ウスタイト、そしてFeO-TiO₂鉱物が含まれていた。鉄滓中のFeO-TiO₂鉱物は、製鍊された素鉄と共存する介在物中に存在していたものである。

以上、還元・酸化プロセスについてまとめると次のようになる。

1. 還元プロセスでは元来前近代炉内の温度およびガス組成は不均質なものであり、それぞれの部位において反応条件が異なり、それにしたがって反応生成物も異なる。炉内で生成した物質のほとんどは炉底部に滞留することになるので、最終的に生成物質のかなりの部分は炉底、あるいはその近傍の温度やガス組成に規定されることになる。
2. 製鍊プロセスを鉱石別でみると、岩鉄の場合は、約850℃以上で主要な還元が進行し、漸次金属鉄が生成し始める。そして、約1000℃付近から液体の鉄滓が生成し始める。そして、この液体の鉄滓（ノロ）が冷却過程で、FeOはSiO₂との反応によってファヤライトを晶出し、FeOの一定部分が不可避免的に消費されることになる。
3. 砂鉄製鍊では、主要な還元温度は約900℃以上であり金属鉄が生成し始める。液体の鉄滓の生成については岩鉄（磁鉄鉱）の場合と同様であるが、異なる点は、砂鉄は岩鉄に比べ、TiO₂が含まれるということにある。本邦に産する砂鉄は一様な組成ではないが、基本的にはFeO-Fe₂O₃-TiO₂成分系に属する鉱物である。したがって、砂鉄の還元反応の進行は、炉内の温度と酸素分圧、また、砂鉄を構成する結晶鉱物の成分とTiO₂の多寡に規定される。

また、精練プロセスでは、鋼の炭素量の低減（脱炭）と介在物の除去が行われる。脱炭を行うためには、鉄の熔融温度これが熔融するための温度、介在物は主として鉄滓であるから、これらが熔融する温度が求められる。これらはいずれも1150～1200℃の温度を必要とするが、炉内は酸化雰囲気には保たれなくてはならない。このようなプロセスで生成した鉄滓はウスタイトとファヤライトを主成分とし、砂鉄起源のものであればこの他にFeO-T

iO₂鉱物（主としてウルボスピネル）を含有する場合が多い。

文献と註

- (1) 高塚秀治「熱分析法による前近代製鉄炉内反応の研究」『文化財科学』文化財保存修復学会誌 40 1996年。
- (2) 館 充「たたら製鉄法の技術史的・冶金学的考察」『ふえらむ』日本鉄鋼協会Vol. 1No. 12 P42 1996年。
- (3) 下原重仲「鐵山必要記事」『日本庶民生活史料集成』第10巻 三一書房 1973年。
- (4) 赤沼英男「遺物の解析結果からみた半地下式竪型炉の性格」『季刊考古学』第57号 P43 1996年。
- (5) 山田賀一「中國に於ける砂鐵精練」『鐵と鋼』第4号 PP378~379 1918年。
- (6) ここに示された銑の重量はあまりにも重すぎるので吟味を要する。白銑一，四貫乃至四，〇〇貫の誤りではなかろうか。
- (7) 山田賀一「中國に於ける砂鐵精練」『鐵と鋼』第4号 P379 1918年。
- (8) 第4章を参照

第3章．製鉄遺跡試料の解析

第2章では、還元と酸化についてのプロセスの構築を試みたが、そのプロセス論の有効性を検証するために、本章では、製鉄関連遺跡の発掘調査と、その試料の分析をし、そして、そのデータの解析を行い、前近代製鉄の酸化・還元反応の検討を行う。また、同じ目的で岩鉄、および砂鉄製鉄遺跡の試料について化学・鉱物組成分析を行う。

1. 化学組成分析

プロセス論の検証を行うためには、資料の化学組成分析は必須の要件となる。このため、まず、始めに岩鉄と砂鉄の製鉄滓、および精錬鍛冶滓の化学組成分析を実施した。

1. 1 岩鉄製鉄遺跡

1985年、滋賀県伊香郡木之本町において古橋遺跡の発掘調査が行われた^{1,2)}。発掘の主体者は滋賀県教育委員会、木之本町教育委員会であり、筆者もこの発掘調査に立ち会った。調査された遺跡は製鉄遺跡であり、発掘により出土した土器（平瓶、7世紀初頭）の遺存状況から、古橋遺跡の操業は6世紀末～7世紀初頭に比定され、わが国最古に属する製鉄遺跡であることが判明した。こうした経緯から、古橋遺跡はわが国初期製鉄の形態を知る上でも貴重な製鉄遺跡であり、全国的にも注目された。

古代の近江は有数の鉄生産地帯であり、『史書』などの文献には製鉄に関する記述が散見できる。たとえば、『日本書紀』には「是歳、水碓を造りて鉄治す」とあり、また、『続日本記』に「鉄穴を志紀王に賜う」、「鉄穴を有勢者が独占するを禁ず」、「浅井高嶋二郡の鉄穴を恵美押勝に賜う」など鉄鉱山に関連した記述もみられる。

また、製鉄遺跡、鉄滓散布地は湖北の伊吹山系、金糞岳山麓を始め、湖西から湖南にかけて広く分布しており、現在までに総計50ヶ所近くが確認されている。中でも代表的な製鉄遺跡として古橋（6世紀末～7世紀初頭）¹⁾、南郷桜峠（7世紀前半）³⁾、源内峠（7世紀後半）⁴⁾、野路小野山（8世紀）⁵⁾、北マキノ（8世紀）製鉄遺跡⁶⁾などがよく知られる。滋賀県下では砂鉄を産する地域ほとんどないことから、砂鉄製鉄が行われた例はなく、岩鉄製鉄のみが行われていた。これは、古代近江における鉄生産の大きな特色となっている。また、古代近江の鉄生産は、古橋遺跡が6世紀に比定され、この地域の製鉄については、日本書紀などの文献にも記述されており、鉄鉱山を占有する有勢者、あるいは渡来系の豪族らによって行われていたとされる⁷⁾。このように、古代近江の鉄生産は、わが国の製鉄史上重要な地位を占めていたと見られる。

次に、滋賀県下製鉄遺跡の立地についてみる。

現在の滋賀県は、今から約7,000～9,900万年前の白亜期後半、古生代地層に花崗岩が貫入し、比良、比叡、田上、鈴鹿などに花崗岩帯が出現した。この花崗岩帯は琵琶湖の南地域を円状に取り囲み、かつては巨大なカルデラ湖の外輪であったとされる⁸⁾。古生代の地層とマグマの接触地帯に変成作用、あるいは交代作用がおこり、そこに鉄鉱床（磁鉄鉱床）が形成されたと考えられている。したがって、古代近江の製鉄遺跡は、これらの花崗岩帯に沿った地域に存在している。

一方、岩鉄製鉄遺跡については、滋賀県以外では岡山県、広島県などで確認されている。このうち広島県は、全国的に見ても有数の製鉄地帯であるが、岩鉄を用いた製鉄遺跡は今

のところカナクロ谷遺跡のみである。この遺跡は6世紀に比定されており、わが国初期製鉄の特徴を有する貴重な遺跡となっている。

したがって、本研究では滋賀県、および広島県下の岩鉄製錬遺跡の資料分析を行うことにした。研究対象とした製錬遺跡は滋賀県（旧近江国）では古橋、北マキノ、北山、鶺川、大堂川、地蔵谷、仏性野、オクビ山、賤山北川、弁天神社、南郷桜峠、芋谷、源内峠遺跡、野路小野山、木瓜原遺跡の15遺跡、広島県（旧備後国）ではカナクロ谷遺跡^{9,10)}で、総計16の遺跡である。これらの遺跡から採取し、分析対象とした資料の総計は鉄滓100点、岩鉄9点および炉壁6点である。滋賀県下で採取した製鉄関連資料の分析結果は、湖南、湖西、湖北それぞれの地域的特徴を示したので、以下のように地域別にまとめた。

1. 1. 1 滋賀県湖南地域の製錬遺跡

滋賀県湖南地域とは、大津市南部、草津市、栗田郡、野州郡、甲賀郡であり、この地域で発掘あるいは調査された製錬遺跡は南郷桜峠、源内峠遺跡、野路小野山、木瓜原遺跡などであり、近年ではこれに加えて芋谷遺跡が発掘されている。

これら地域で採取した岩鉄、鉄滓および製鉄関連異物の化学組成分析の結果は表3.1.1.1と表3.1.1.2のようになった。

1. 1. 2 滋賀県湖西地域の製錬遺跡

滋賀県湖西地域とは、高島郡、志賀郡であり、この地域で調査された製錬遺跡は北山、鶺川、大堂川、地蔵谷、仏性野、北川、弁天神社、二口遺跡などである。

これら地域で採取した鉄滓および製鉄関連遺物の化学組成分析を行った結果は表3.1.1.3のようになった。

1. 1. 3 滋賀県湖北地域の製錬遺跡

滋賀県湖北地域とは、牧野郡、伊香郡であり、この地域で調査された製錬遺跡は北マキノ、古橋遺跡などである。

これら地域で採取した鉄滓の化学組成分析を行った結果は表3.1.1.4のようになった。

表 3.1.1.1 滋賀県湖南地方出土鉄鉱石の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T. Fe	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
南郷桜峠遺跡 (大津市)									
NGS01 (鉄鉱石)	31.18	0.24	10.50	24.38	0.13	6.07	13.44	0.69	2.92
NGS02 (鉄鉱石)	1.60	0.01	0.40	66.00	0.05	0.25	2.20	0.01	1.18
芋谷製鉄遺跡 (大津市)									
IMD-01 (鉄鉱石)	3.61	0.09	1.25	50.82	0.13	0.42	0.26	0.04	0.01
IMD-02 (鉄鉱石)	2.48	0.04	0.93	49.77	0.13	0.36	0.51	0.12	0.14
IMD-03 (鉄鉱石)	3.44	0.06	0.73	60.55	0.08	0.91	0.08	<0.01	0.21
源内峠遺跡 (草津市)									
GM-(1) (鉄鉱石)	14.30	0.00	4.38	5.13	0.11	2.44	40.35	0.22	29.98
GM-(2) (鉄鉱石)	17.88	0.00	5.43	6.59	0.14	3.29	37.08	0.32	25.58
GM-(3) (鉄鉱石)	3.89	0.20	1.02	65.36	0.13	0.56	0.60	0.00	0.23
G-1 (鉄鉱石)	3.10	0.15	1.10	66.75	0.12	0.29	0.58	0.03	0.27

表 3.1.1.2 滋賀県湖南地方出土鉄滓・炉壁の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
南郷桜峠遺跡									
NGS03 (鉄滓)	11.84	0.32	3.95	76.51	0.81	0.94	3.89	0.89	1.48
NGS04 (鉄滓)	4.38	0.15	0.94	91.70	0.08	0.36	1.64	--	0.75
NGS05 (鉄滓)	26.92	0.55	7.52	49.15	0.22	1.94	10.22	1.34	2.14
NGS06 (鉄滓)	26.25	0.24	4.83	55.29	0.19	1.25	7.81	1.96	2.18
NGS07 (鉄滓)	8.68	0.21	2.02	84.52	0.10	0.58	2.64	0.21	1.04
NGS08 (鉄滓)	5.55	--	1.57	91.87	0.02	0.01	0.52	0.19	0.27
NGS09 (鉄滓)	5.40	0.10	1.57	90.27	0.02	0.73	1.15	0.08	0.68
NGS10 (鉄滓)	26.35	0.31	6.61	55.97	0.09	1.09	6.51	1.33	1.74
NGS11 (鉄滓)	24.24	0.21	4.92	60.21	0.12	0.97	5.41	1.70	2.22
NGS12 (鉄滓)	28.54	0.23	6.09	53.13	0.14	1.14	6.55	1.91	2.27
NGS13 (鉄滓)	25.47	0.21	4.99	59.43	0.17	0.97	5.48	1.61	1.67
NGS14 (鉄滓)	24.40	0.21	4.43	60.45	0.19	0.98	5.43	1.71	2.20
NGS15 (鉄滓)	17.02	0.28	5.18	66.19	0.22	1.62	6.41	0.79	2.29
NGS16 (鉄滓)	26.37	0.24	5.96	56.57	0.23	1.03	6.39	1.38	1.83
NGS17 (鉄滓)	25.37	0.21	4.95	58.91	0.20	1.10	5.54	1.51	2.21
NGS18 (炉壁)	70.18	0.51	21.53	3.79	0.02	0.52	0.21	3.21	0.03
NGS19 (炉壁)	73.13	0.51	19.14	3.44	0.02	0.51	0.21	3.04	0.03
芋谷遺跡									
IMD-1 (鉄滓)	32.39	0.35	7.75	43.38	0.67	0.88	11.51	1.49	1.43
IMD-2 (鉄滓)	29.59	0.34	10.26	46.30	0.45	1.45	10.26	1.39	2.29
IMD-3 (鉄滓)	34.05	0.38	7.08	45.82	0.38	1.83	7.70	1.36	1.32
IMD-4 (鉄滓)	34.86	0.25	8.10	46.37	0.25	0.87	6.09	1.99	1.18
IMD-5 (鉄滓)	29.32	0.32	6.96	51.59	0.38	0.82	7.36	1.42	1.61
IMD-6 (鉄滓)	30.77	0.34	8.58	46.27	0.30	1.03	9.19	1.67	1.77
源内峠遺跡									
G-2 (鉄滓)	34.62	0.15	4.22	54.02	0.19	0.65	3.95	1.27	0.93
G-3 (鉄滓)	29.42	0.16	4.39	58.19	0.17	0.79	4.24	0.93	1.72
G-4 (鉄滓)	30.67	0.15	3.25	62.84	0.23	0.36	1.48	0.86	0.16
G-5 (鉄滓)	30.41	0.21	5.15	53.51	0.23	0.84	6.02	0.83	2.80
木瓜原遺跡 (草津市)									
BKW01 (鉄滓)	29.60	0.53	7.26	53.89	0.33	0.54	5.12	1.18	1.55
BKW02 (鉄滓)	35.34	0.45	6.05	50.86	2.79	0.24	2.67	1.41	0.20
BKW03 (鉄滓)	33.98	0.64	6.92	51.18	0.85	0.52	4.37	1.33	0.22
BKW04 (鉄滓)	35.02	0.26	5.13	50.96	2.13	0.19	4.25	1.27	0.80
BKW05 (鉄滓)	29.59	0.59	7.39	55.01	0.33	0.52	4.18	1.03	1.35
野路小野山遺跡 (草津市)									
NO-01 (鉄滓)	16.21	0.45	4.25	75.42	0.40	1.43	0.93	0.83	0.09
NO-02 (鉄滓)	18.47	0.40	5.22	71.93	0.36	1.48	1.32	0.71	0.11
NO-03 (鉄滓)	16.63	0.65	5.47	73.19	0.47	1.43	1.30	0.76	0.10
NO-04 (鉄滓)	19.41	0.46	6.05	68.90	0.47	1.43	2.12	1.04	0.13
NO-05 (鉄滓)	21.34	0.39	5.69	65.82	0.51	1.93	2.75	1.41	0.16
NO-06 (鉄滓)	16.41	0.52	4.55	74.18	0.51	1.39	1.57	0.79	0.09
NO-07 (鉄滓)	18.08	0.67	6.18	70.61	0.47	1.44	1.51	0.87	0.17
NO-08 (鉄滓)	26.47	0.82	8.92	57.46	0.67	1.73	2.47	1.30	0.16
NO-09 (鉄滓)	9.79	0.39	2.46	83.75	0.46	1.53	1.08	0.47	0.07

表 3.1.1.3 滋賀県湖西地方（志賀町・高島町製鉄遺跡）出土鉄滓・炉壁の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
オクピ山遺跡									
OKY01 (炉壁)	61.12	0.33	17.06	15.17	0.13	0.41	1.10	4.63	0.05
OKY02 (炉壁)	56.54	0.36	15.70	20.27	0.13	0.08	1.34	5.01	0.59
OKY03 (鉄滓)	29.93	0.28	8.03	50.49	0.47	2.15	6.16	1.90	0.59
OKY05 (鉄滓)	30.73	0.59	9.35	51.82	0.43	1.48	2.88	2.30	0.44
鶯川遺跡									
UKW01 (鉄滓)	30.24	0.38	7.76	50.32	0.32	1.86	6.59	1.23	1.32
UKW02 (鉄滓)	29.54	0.26	8.54	53.14	0.40	0.78	3.92	1.84	1.57
UKW03 (鉄滓)	27.23	0.14	5.33	52.74	0.50	0.77	9.45	1.28	2.55
谷の口遺跡									
TNK01 (鉄滓)	29.12	0.12	7.71	51.25	0.41	0.66	6.30	1.82	2.59
TNK02 (鉄滓)	30.16	0.16	7.61	49.54	0.45	0.54	6.95	1.93	2.66
TNK03 (鉄滓)	30.47	0.28	5.48	49.96	0.51	2.42	8.91	1.49	0.47
TNK04 (鉄滓)	30.04	0.38	4.92	50.67	0.63	2.87	8.80	1.26	0.44
山田地蔵谷遺跡									
YDJ01 (鉄滓)	37.60	0.14	7.51	37.25	0.43	1.33	10.90	1.76	3.01
YDJ02 (鉄滓)	31.75	0.36	5.64	51.10	1.66	1.59	6.27	1.36	0.29
YDJ03 (鉄滓)	31.21	0.16	7.09	54.12	2.17	0.12	1.92	2.63	0.57
YDJ04 (鉄滓)	32.11	0.54	11.24	46.79	0.56	0.34	5.22	2.80	0.39
後山畦倉遺跡									
UYA01 (鉄滓)	27.19	0.45	9.86	55.78	0.41	1.36	2.84	1.71	0.41
UYA02 (鉄滓)	29.85	0.27	4.57	50.41	0.67	1.95	11.07	0.83	0.37
賤山北川遺跡									
SYK01 (鉄滓)	25.67	0.77	9.98	57.27	0.58	1.99	1.94	1.54	0.25
SYK02 (鉄滓)	26.52	0.22	6.47	57.21	3.67	1.47	2.52	1.61	0.32
念仏山弁天神社遺跡									
NBY01 (鉄滓)	32.30	0.33	9.14	51.21	0.33	0.41	3.79	1.96	0.52
NBY02 (炉壁)	62.62	1.11	16.99	14.61	0.25	0.52	1.14	2.32	0.43
二口遺跡									
FTK01 (鉄滓)	35.03	0.47	11.63	39.46	0.30	0.64	7.63	1.46	3.98
FTK02 (鉄滓)	30.96	0.39	9.32	45.03	0.29	0.80	7.63	1.46	3.86

表 3.1.1.4 滋賀県湖北地方出土鉄滓と炉壁の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
古橋遺跡 (木之本町)									
FRH01 (鉄滓)	16.21	0.45	4.25	75.42	0.40	1.43	0.93	0.83	0.09
FRH02 (鉄滓)	18.47	0.40	5.22	71.93	0.36	1.48	1.32	0.71	0.11
FRH03 (鉄滓)	16.63	0.65	5.47	73.19	0.47	1.43	1.30	0.76	0.10
FRH04 (鉄滓)	19.41	0.46	6.05	68.90	0.47	1.43	2.12	1.04	0.13
FRH05 (鉄滓)	21.34	0.39	5.69	65.82	0.51	1.93	2.75	1.41	0.16
FRH06 (鉄滓)	16.41	0.52	4.55	74.18	0.51	1.39	1.57	0.79	0.09
FRH07 (鉄滓)	18.08	0.67	6.18	70.61	0.47	1.44	1.51	0.87	0.17
FRH08 (鉄滓)	26.47	0.82	8.92	57.46	0.67	1.73	2.47	1.30	0.16
HRH09 (鉄滓)	9.79	0.39	2.46	83.75	0.46	1.53	1.08	0.47	0.07
FRH10 (炉壁)	50.59	0.77	13.91	27.90	0.23	1.78	1.53	3.06	0.23
北マキノ遺跡 (マキノ町)									
KMK01 (鉄滓)	29.09	0.54	8.10	55.88	0.30	0.71	3.35	1.62	0.41
KMK02 (鉄滓)	29.92	0.59	8.18	53.39	0.34	0.69	4.59	1.79	0.52
KMK03 (鉄滓)	28.37	0.45	8.44	52.63	0.29	1.00	5.97	2.24	0.60
KMK04 (鉄滓)	31.06	0.55	8.76	52.77	0.37	0.52	3.79	1.84	0.35
KMK05 (鉄滓)	27.27	0.47	7.72	52.37	0.28	2.98	6.96	1.47	0.47

1. 1. 4 滋賀県下遺跡試料の分析結果

滋賀県下の鉄滓分析については、分析値からP₂O₅、およびCaO 2種の元素成分濃度に着目し、それらの組成をプロットすると図3.1.1.1のようであった。図から琵琶湖南部地域の南郷桜峠、源内峠、二口、および鶴川遺跡のものにはP-Ca間に正の相関が認められた。図3.1.1.2は湖北の古橋、北マキノ、オクビ山、後山畦倉、賤山北川、念仏山弁天神社、野路小野山遺跡のものでPのCaへの依存性はみられなかった。

以下、上記のP-Ca図中において湖南的特徴を持つグループをA群、湖北的特徴を持つグループをB群とし、図3.1.1.3はA群、B群双方の特徴を有する谷ノ口、山田地蔵谷、木爪原遺跡の鉄滓であり、これらはC群と呼称する。そして、これらのグループの特徴の概要は以下のものであった。

- A 群 -

リン(P)とカルシウム(CaO)の相関について、このグループにリンやカルシウムが多いのは、A群に属する南郷桜峠、源内峠遺跡で出土した岩鉄に、角閃石やリン酸カルシウムなどの脈石を含む磁鉄鉱を使用していたことに起因する。他の二口、鶴川遺跡など、A群に属する遺跡でも、同種の岩鉄を用いた可能性が高い。

- B 群 -

これに対しB群に属する試料はほとんどP₂O₅を含まない。この違いはA群と異なる鉱床から岩鉄を求めたことが考えられ、古代近江の鉄鉱山は複数存在していたと判断できる。しかし、B群を詳細にみても、CaO濃度が2%近傍を境にして古橋遺跡(6世紀末~7世紀初頭)と北マキノ遺跡(8世紀)試料とはっきり分かれる。ここで、B群のグループ

は、高カルシウム群と低カルシウム群に分け、前者をマキノタイプ、後者は古橋タイプと呼称する。マキノタイプに属するのは、後山畦倉遺跡であり、古橋タイプは賤山北川、野路小野山遺跡、両者の特徴を有するのはオクビ山、念仏山弁天神社遺跡である。

— C 群 —

また、谷ノ口、山田地蔵谷、木瓜原1つの遺跡からは、A・B両群に属する鉄滓が検出されたが、これの遺跡では複数の鉱山の岩鉄を使用したか、同一鉱山で質の異なる鉱石が存在したかのいずれかであり、これらをC群に区分した。

以上が古代近江の製錬遺跡試料の概要であるが、ここで、特に湖南地方の資料に集中していたP（リン）について触れておく。A群に属する遺跡で使用された岩鉄には、P（とCa）が多く含まれていたが、今日的にはこのような鉄鉱石は使用されない。なぜならば、金属鉄中でリンの濃度が高くなれば、鉄の低温脆性を招くことになり有害とされているからである。にもかかわらず、古代近江でこのようなを含む岩鉄が使用されていたのは、初期の製鉄の一般特徴である低温・高酸素分圧（高FeO鉄滓）の操業により、Pなどの有害物質が金属鉄に余り混入しなかったと考えられる。南郷桜峠遺跡から出土した金属鉄塊の場合、写真2.1.1.1~2と図2.1.1.4~5で明らかのように、Pは金属鉄からは検出されず、ガラス（非晶質）部に濃集していた。この金属鉄の炭素量は0.2以下であることから、比較的低温度で製錬が行われたと考えられ、低温製錬の場合には、Pは金属鉄中に入らないことが判明した。

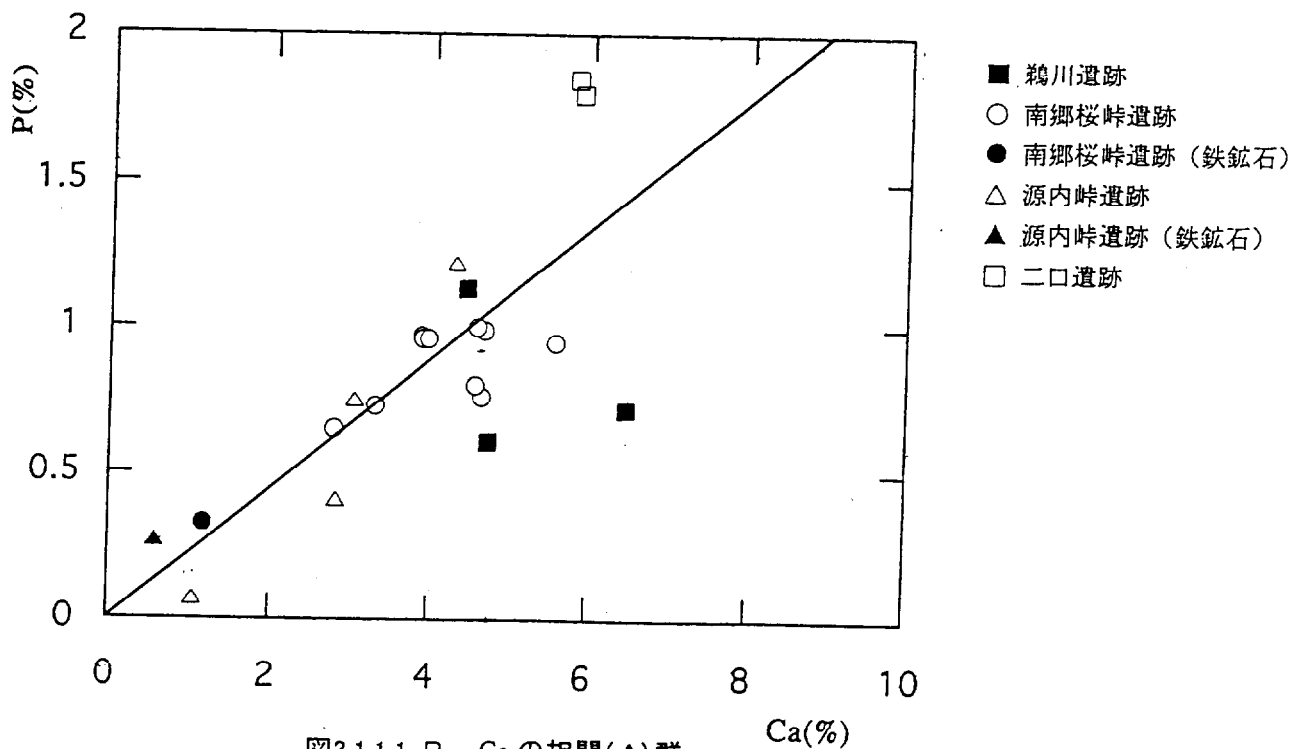


図3.1.1.1 P-Caの相関(A)群.

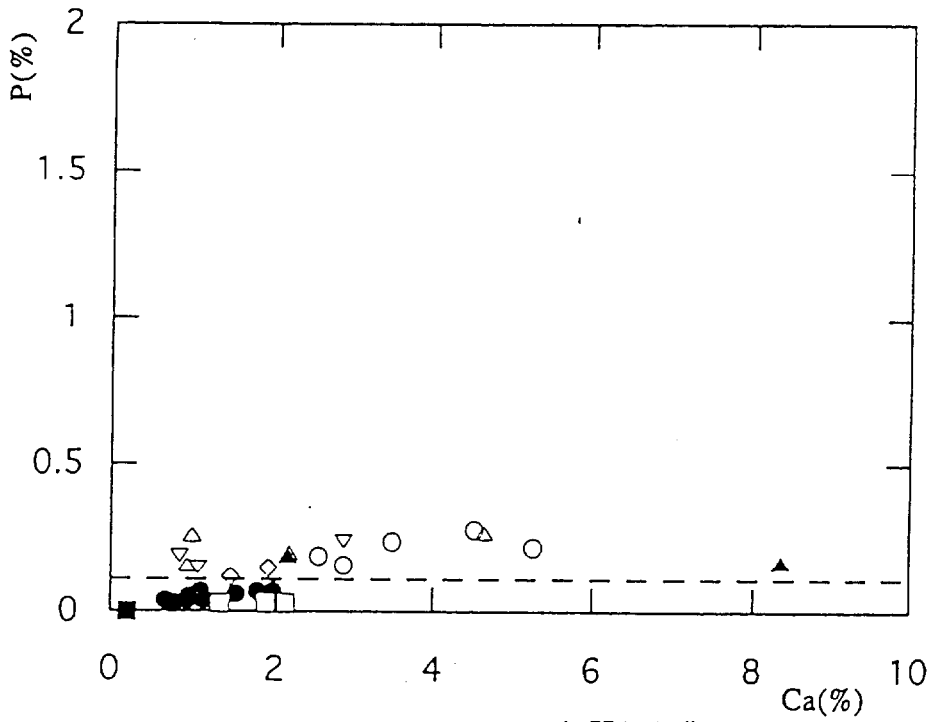


図3.1.1.2 P-Caの相関(B)群

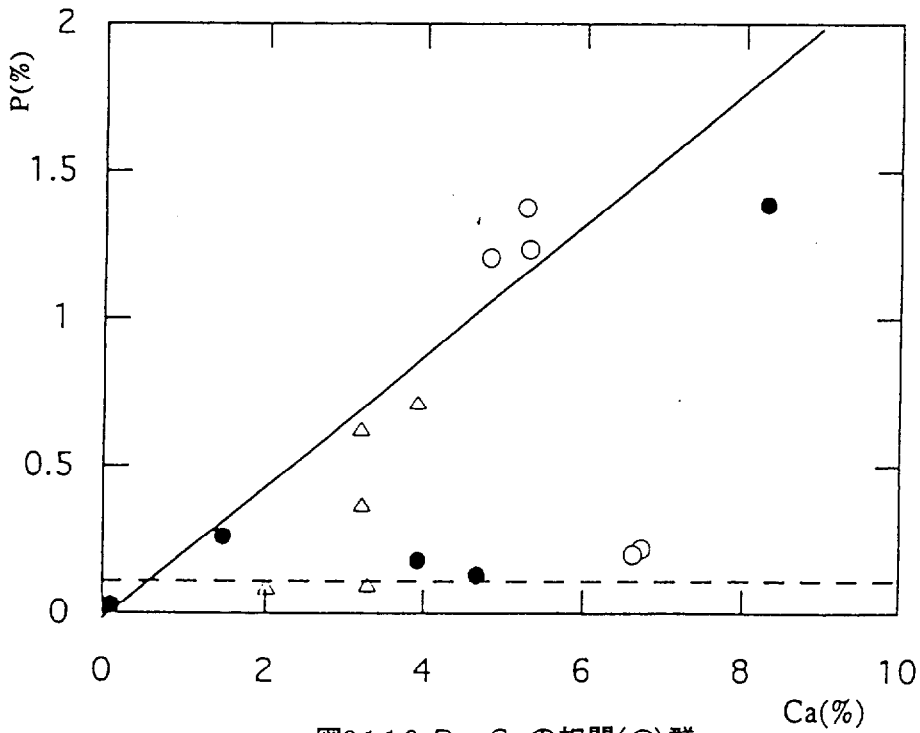


図3.1.1.3 P-Caの相関(C)群

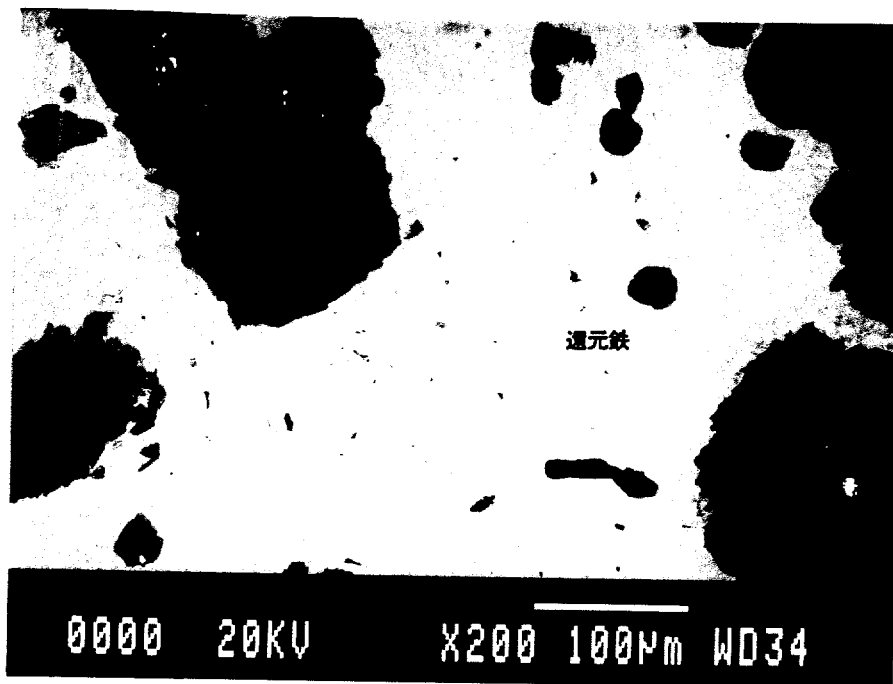


写真3.1.1.1 南郷桜峠遺跡出土鉄塊中の金属鉄部分

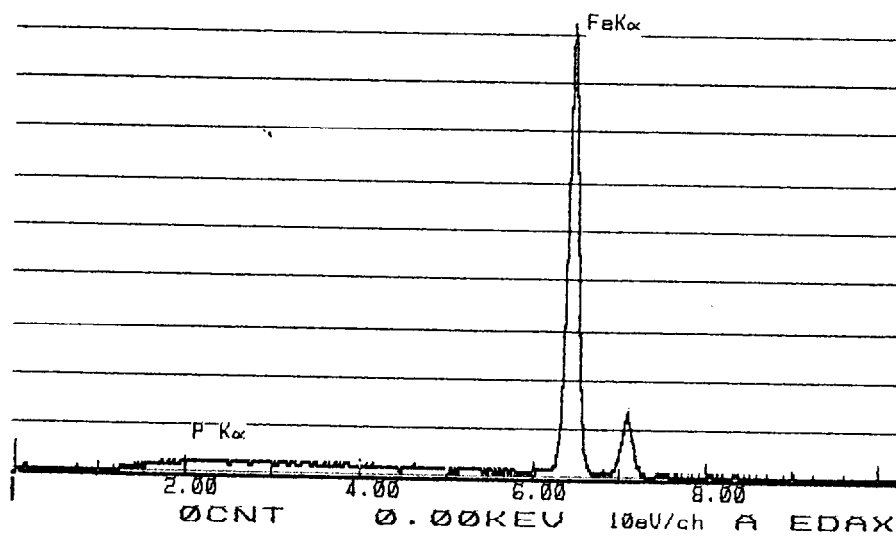


図 3.1.1.4 写真3.1.1.1(矢印)のX線スペクトル図

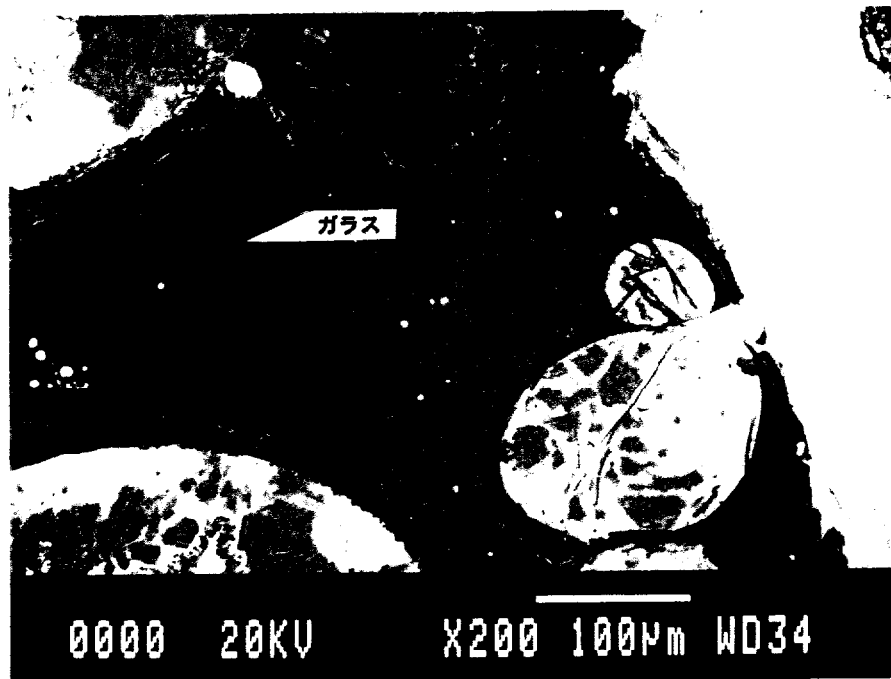


写真3.1.1.2 南郷桜峠遺跡出土鉄塊中の非晶質部分

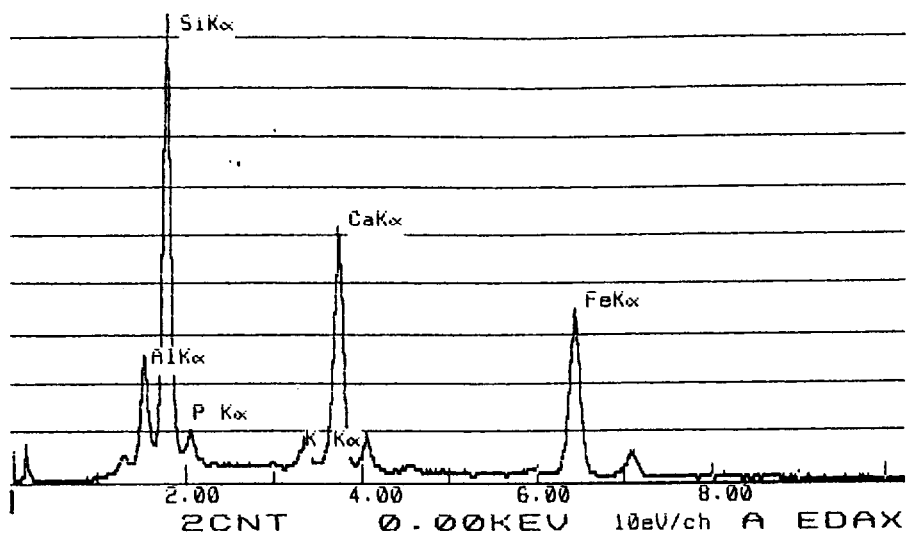


図 3.1.1.5 写真3.1.1.2(矢印)のX線スペクトル図

1. 1. 5 広島県カナクロ谷遺跡出土試料の分析結果

広島県世羅郡世羅町黒淵カナクロ谷製鉄遺跡については、炉跡が2基が検出され、1号炉の付近からは握り拳大の岩鉄が出土した。ここでは岩鉄製錬が行われていたとみられ、遺構に随伴して出土した土器形式から遺跡の成立年代は6世紀後半～7世紀前半と考えられている¹⁰⁾。この遺跡の鉄滓4点の化学組成分析を行ったが、鉄滓は多量のMnOを含み、また、岩鉄と推定されていた物質は、岩鉄ではなく純粋な軟マンガン鉱 (MnO₂) であることが判明した。化学組成分析の結果は表 3.1.1.5のようになった。

表 3.1.1.5カナクロ谷製鉄遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
HKK-05	26.11	0.21	5.91	50.53	10.60	1.08	4.25	0.68	0.63
HKK-06	30.86	0.43	9.65	34.91	15.62	0.87	5.68	1.07	0.91
HKK-07	32.30	0.32	9.52	40.74	7.95	1.19	6.09	1.14	0.75
HKK-08	27.70	0.53	8.44	45.39	10.83	0.87	4.71	0.93	0.61
HKK-09	30.21	0.30	9.73	42.36	9.80	0.95	5.01	1.11	0.63
HKK-10	29.20	0.21	7.54	46.42	9.80	0.76	4.64	0.93	0.63
HKK-12	27.20	0.20	6.17	42.66	19.33	0.46	2.22	0.85	0.91
HKK-13	31.89	0.21	9.73	32.84	17.25	0.62	5.29	1.13	1.05
HKK-14	29.19	0.22	7.70	23.95	30.58	0.77	5.36	1.42	0.81
HKK-15	29.90	0.31	10.07	39.90	13.00	0.91	4.25	0.94	0.68
HKK-16	29.29	0.21	7.74	24.28	31.30	0.74	4.14	1.56	0.74
HKK-17	29.99	0.21	9.55	26.08	26.80	0.94	4.23	1.51	0.68
HKK-18	37.48	2.55	11.69	21.12	7.95	1.68	14.62	2.24	0.68
HKK-19	32.12	0.66	6.01	43.95	10.02	0.35	4.86	0.92	0.92
HKK-20	10.03	2.02	4.30	70.17	2.38	0.88	9.57	0.53	0.13
HKK-21	11.39	3.86	4.87	42.29	32.10	1.01	3.53	0.55	0.40
HKK-22	15.45	2.38	7.45	62.61	3.00	0.92	6.83	1.19	0.17
HKK-11	25.26	16.16	6.28	38.53	3.90	2.60	5.57	1.20	0.50

製鉄現場に30%以上にも及ぶMnOを含む鉄滓、また、軟マンガン鉱が存在していた理由を明らかにするため、多数の鉄滓や鉱石類を採取し、顕微鏡下での観察し、あわせて蛍光X線分析法による化学組成分析を行ったが、いずれの鉄滓試料にも多量のMnOが含まれていた。

上記の化学組成分析によれば、岩鉄製錬は滋賀県の3地域で、また、滋賀県と広島県とで組成上の相違が認められる。

1. 2 砂鉄製錬遺跡

砂鉄製錬は6世紀代には岩鉄製錬と併行して操業されていたが、9～10世紀以降には岩鉄製錬は徐々に姿を消していった。したがって、9～10世紀以降のわが国前近代製錬は、砂鉄製錬と同義といってもよい。

わが国において砂鉄製錬が主流となった背景は、本邦の全域で砂鉄を産出すること、また、比較的早い段階(6世紀代)で砂鉄製鉄法が確立されたこと、などがあげられる。とくに、中国地方では、豊富な木炭資源と良質な砂鉄を産出し、わが国古代から近世にかけ

て製鉄の主要な拠点となった。一方、岩鉄製錬は、本邦の岩鉄鉱床は滋賀県、岡山県、岩手県などの地域に限定され、かつ、貧鉱であることから、鉱石資源が十分に得られず9~10世紀代に衰退していったと見られる。

東京工業大学製鉄史研究会は1977年に発足し筆者もこれに参画した。研究会は製鉄史研究を進めるにあたり、製鉄遺跡の発掘調査、遺跡から出土した確実な遺物の検討が不可欠であると考え、まず、尾崎前山、ゴマクボ、月山遺跡の発掘調査を行い、採取した試料の分析と検討を行ってきた。尾崎前山遺跡は、製錬炉3基とそれに付属するとみられる住居址、工房址、木炭置き場、炉材粘土置き場などがセットで検出され、当時の鉄生産のシステムを明らかにした。発掘調査を行った製鉄遺跡はいずれも砂鉄製錬遺跡であり、中でもゴマクボ遺跡出土鉄滓から、アーマルコライト ($2(\text{MgO}, \text{FeO})\text{Ti}_2\text{O}_{10}$) とルチル (TiO_2) を発見した。また、1984年には群馬県月山遺跡の発掘調査を行った。これら遺跡の発掘調査と試料分析により得られた知見をもとに、他の砂鉄製錬遺跡試料の分析に着手した。研究対象とした遺跡は茨城県栗田かなくそ山、埼玉県安行猿貝北、千葉県富士見台、広島県保光、福島県小半弓、秋田県堪忍沢、兵庫県高保木の総計7遺跡である。

以下、これら砂鉄製錬遺跡出土資料の分析結果の概要について述べる。

1. 2. 1 尾崎前山遺跡^{11, 12, 13, 14)}

本遺跡は茨城県結城郡八千代町に所在し、1978~1980年にかけて東京工業大学製鉄史研究会、茨城県結城郡八千代町教育委員会、茨城県歴史館を主体として発掘調査が行われた¹⁵⁾。遺跡の成立年代は出土した土器形式により9~10世紀と推定された。ただし、炉形式、および炉形状は不明である。遺跡の磁気異常図と発掘調査結果は図 3.1.2.1と 3.1.2.2のようになった。また、遺跡試料の化学組成分析結果は表 3.1.2.1のようになった。本遺跡の研究では、調査過程で採取した木炭の樹種¹⁶⁾、および炉材粘土¹⁷⁾の組成分析による解析も行った。

表 3.1.2.1 尾崎前山遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
OZS-01	15.7	12.8	6.5	56.2	0.4	4.6	2.4	0.27	0.6	0.2
OZS-03	27.8	7.6	8.4	43.6	0.4	5.6	4.1	0.36	1.1	0.3
OZS-04	15.5	8.3	4.6	63.4	0.4	5.9	1.0	0.10	0.1	0.1
OZS-05	26.3	7.6	8.0	46.8	0.4	4.9	5.1	0.45	1.2	0.3
OZS-06	15.4	8.5	4.2	65.2	0.4	3.5	2.3	0.10	0.5	0.2
OZS-07	22.7	9.9	5.7	51.3	0.5	4.2	3.9	0.4	1.0	0.3
OZS-08	13.3	11.2	4.8	64.4	0.4	4.1	1.5	0.30	0.4	0.2
OZS-09	27.02	8.40	8.82	49.29	0.44	5.90	2.65	0.34	0.94	0.31
OZS-10	26.18	7.92	8.42	51.20	0.44	5.48	3.54	0.31	0.97	0.33
OZS-11	19.3	9.1	6.3	62.79	0.4	2.2	2.9	0.3	1.0	0.2
OZS-12	27.0	10.6	7.7	46.1	0.5	4.7	0.7	0.4	1.8	---

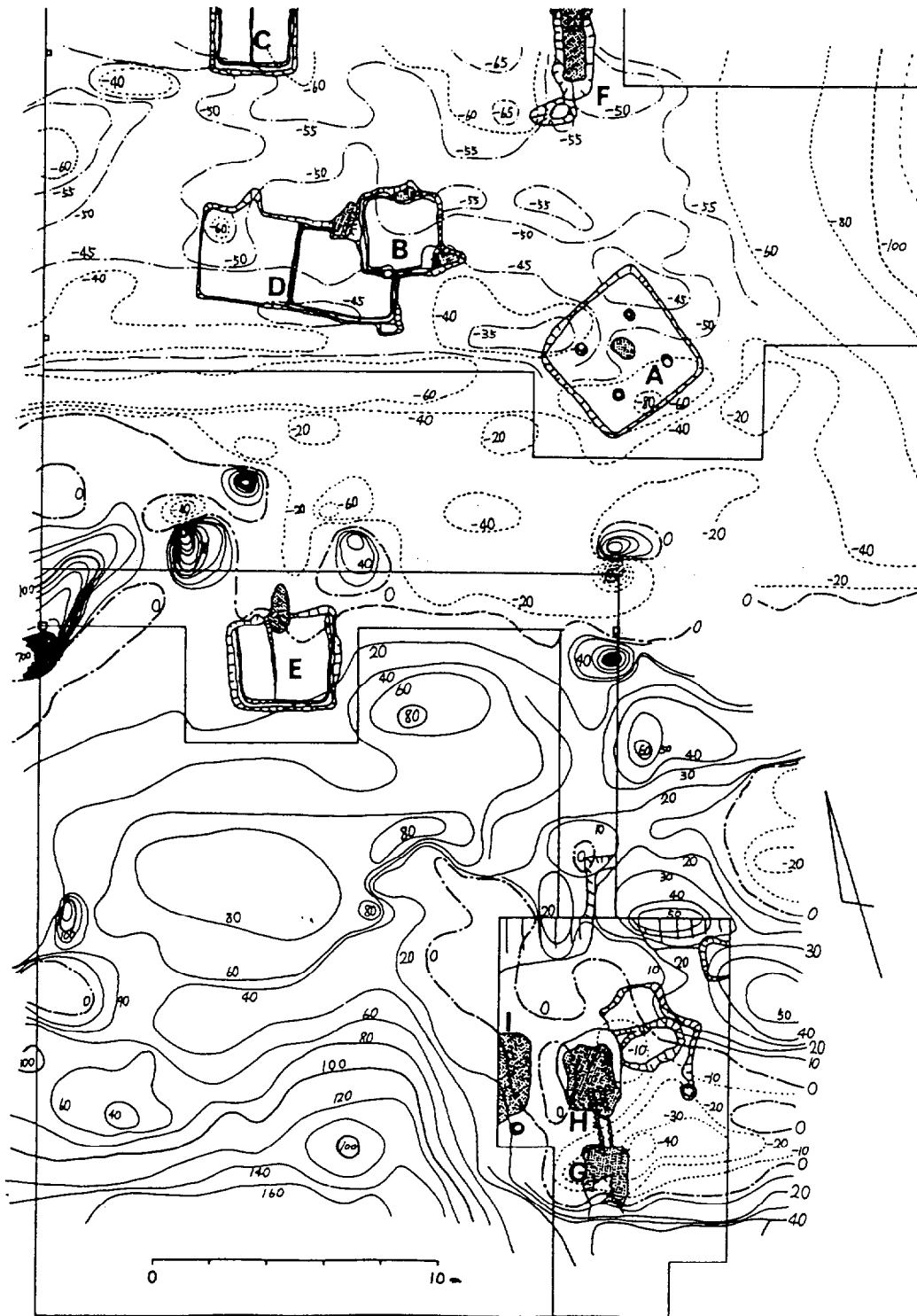


図3. 1. 2. 1尾崎前山遺跡および遺跡周辺の磁気異常図

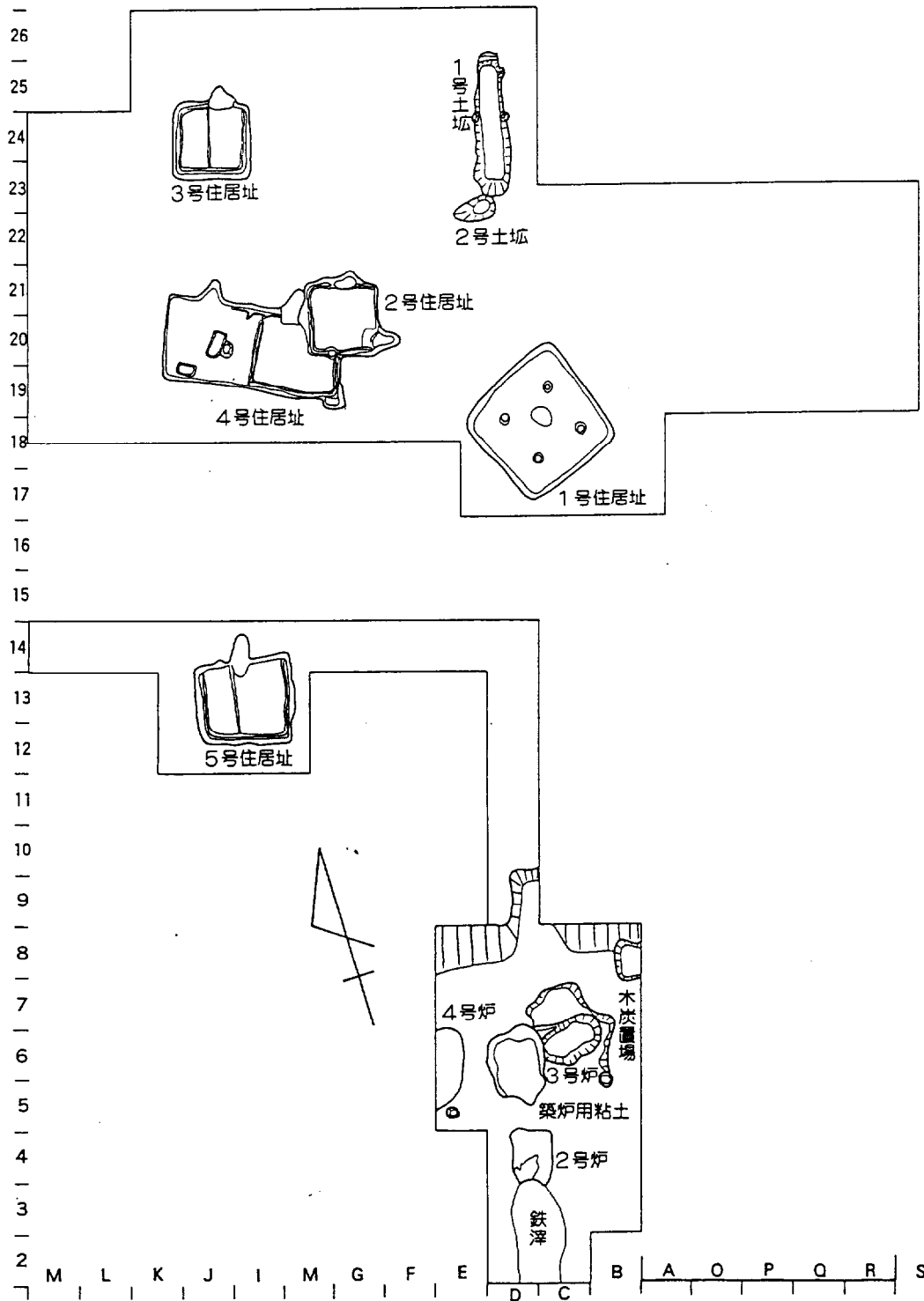


図3.1.2.2尾崎前山遺跡の遺構図

1. 2. 2 ゴマンクボ遺跡^{18, 19, 20, 21, 22)}

本遺跡は茨城県東茨城郡美野里町に所在し、1982～1983年にかけて東京工業大学製鉄史研究会、茨城県東茨城郡美野里町教育委員会、茨城県歴史館を主体として発掘調査が行われた。遺跡の成立年代は熱残留磁気年代決定法により11世紀～15世紀にかけて存在したものと判断され、炉形式は円形竪型炉である。

遺跡の磁気異常図と発掘調査結果は図 3.1.2.3と 3.1.2.4のようになった。また、遺跡試料の化学組成分析結果は表3.1.2.2～3.1.2.4のようになった。鉄滓の化学組成分析は、 Na_2O を除く全成分を蛍光X線分析法（波長分散型）によって行った。なお、 Na_2O は原子吸光法によって行った。表3.1.2.2～3.1.2.4のIM. seriesは桂による分析値で SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 の10成分の相対量を求めたため、その総和を100%に換算し直している。また、表3.1.2.2と3.1.2.4のMHG. seriesは高塚による分析値であり、各試料に含まれる成分の絶対値を求める方法によった。さらに、試料中にはZr（ジルコニウム）が無視できない量を含有するものもあったので、それらについては ZrO_2 の半定量値を求めた。なお、本遺跡から出土した鉄滓試料は TiO_2 , CaO などの成分には、他の遺跡試料には見られない特徴があるので特に註に記した²⁹⁾。また、同遺跡出土の鉄塊と高チタン鉱物については Photo.1, 2, 3 Fig.2として註に記した。

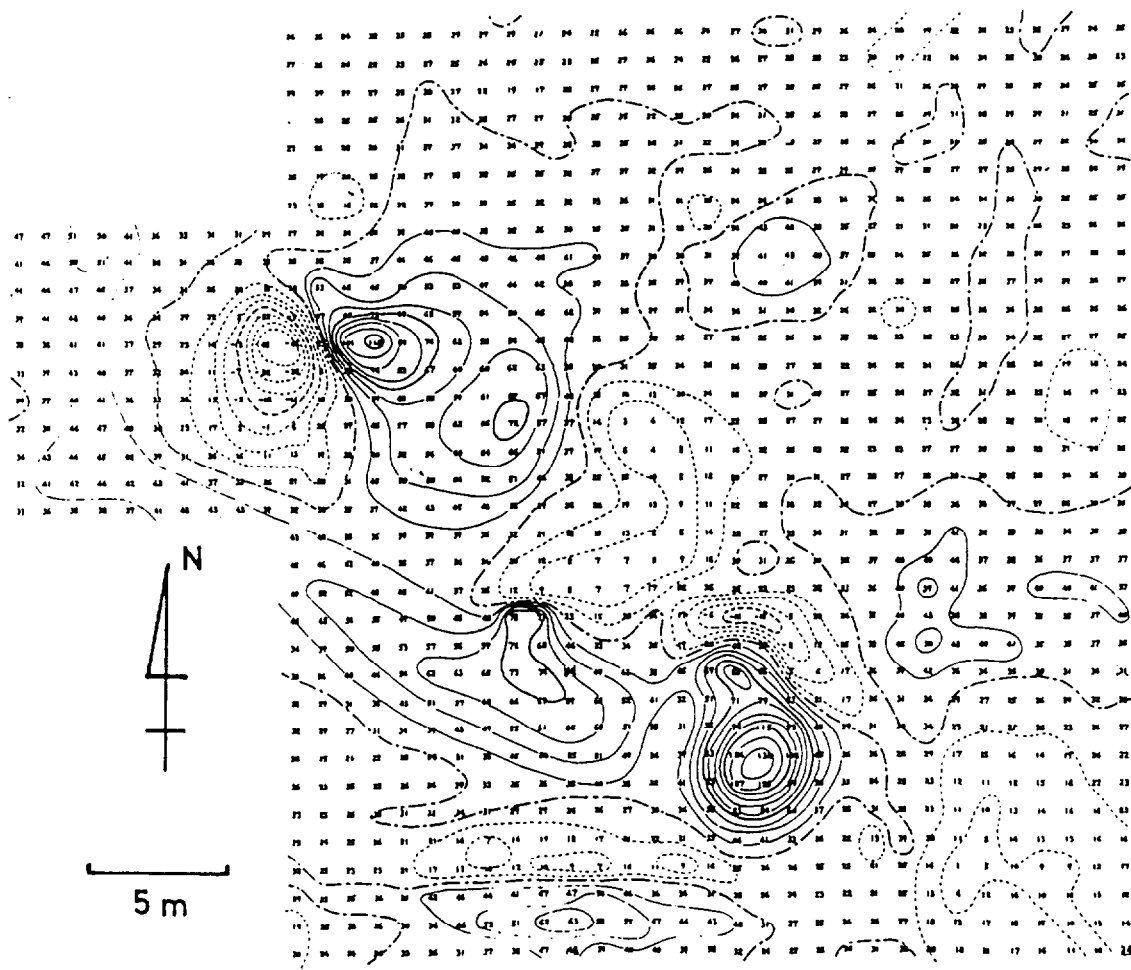


図3.1.2.3 ゴマンクボ遺跡および遺跡周辺の磁気異常図

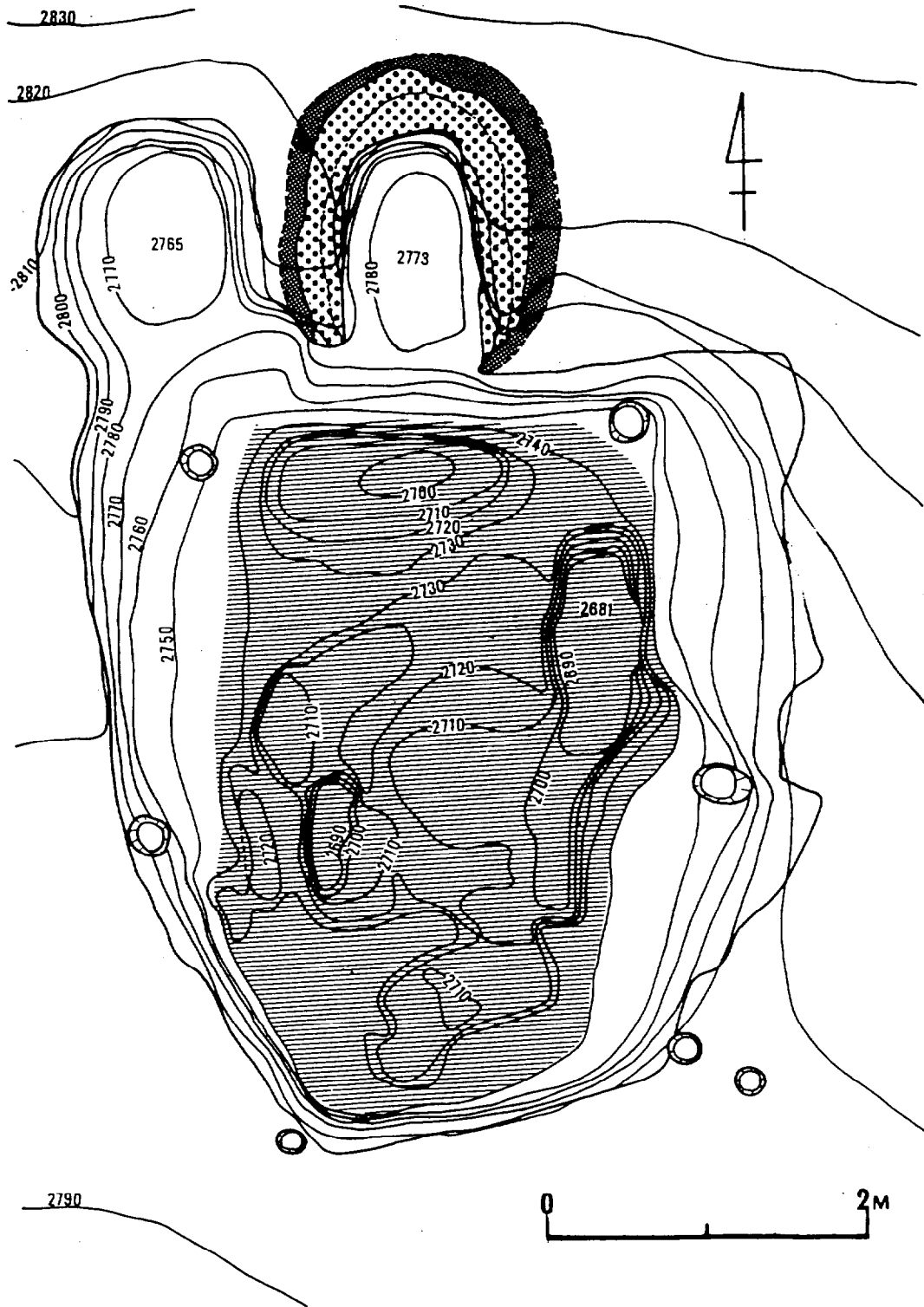


図3. 1. 2. 4ゴマンクボ遺跡遺構平面図

表 3.1.2.2 ゴマクボ遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
MHG-1	7.3	56.2	2.2	8.7	9.4		7.7	7.1		0.3	
IM-62	9.27	53.38		4.93	18.47	1.47	7.24	4.39		0.85	0.00
MHG-2	8.1	47.2	0.3	6.6	27.1		6.6	3.2			
IM-69	13.56	45.15		7.83	12.33	1.02	8.62	11.17		0.31	0.00
MHG-3	12.7	41.9	2.0	9.4	20.0		6.3	2.7		1.5	
IM-9	21.11	41.23		8.59	4.31	0.94	7.24	15.21	0.10	1.25	0.02
IM-61	20.24	37.54		7.62	15.51	1.40	5.61	9.51		2.58	0.00
IM-76	22.57	36.35		6.78	19.28	0.81	4.81	3.74		5.66	0.01
IM-2	20.88	36.02		5.29	20.05	1.13	8.28	8.28	0.09	0.77	0.00
IM-75	17.80	35.89		6.27	22.69	1.36	5.55	5.55		2.22	0.01
MHG-4	25.7	35.2		8.7	15.2		5.3	6.4		2.0	
IM-6	20.71	31.47		6.37	29.16	0.80	4.61	5.64	0.08	1.08	0.07
MHG-9	15.5	29.9	0.2	8.5	23.6		4.6	9.9		4.4	
IM-3	20.67	28.57		5.45	30.06	1.10	6.84	6.42	0.14	0.75	
IM-1	15.69	27.89		4.18	39.15	0.92	6.35	5.08	0.10	0.58	0.06
IM-74	25.50	25.81		7.92	27.26	0.95	4.12	7.50		0.93	0.02
MHG-12	18.8	23.6	0.3	7.3	38.8		3.2	1.7		3.3	
IM-72	30.53	23.23		8.49	25.49	0.89	4.06	5.54		1.64	0.13
MHG-18	10.3	23.1	0.1	5.2	47.8		2.9	3.5		1.2	
IM-21	4.70	21.26		2.75	66.34	0.71	2.62	0.81	0.02	0.71	
IM-63	18.21	20.76		5.67	43.36	0.81	3.39	6.47		1.22	0.12
IM-71	22.43	20.14		7.98	41.40	0.89	2.96	3.22		0.97	0.02
MHG-15	16.1	19.0		6.1	50.4		2.5	1.6		2.6	
IM-65	22.21	18.87		5.21	44.46	0.51	2.02	1.31		5.82	
IM-78	12.74	18.77		5.52	57.30	0.71	2.60	1.79		0.56	
IM-10	3.78	18.55		2.67	68.88	0.68	2.95	2.29	0.05	0.19	0.01
IM-77	45.01	16.73		12.30	11.94	0.52	2.94	7.79		2.75	0.02
IM-66	19.44	14.60		5.50	51.99	0.52	1.92	1.71		4.31	0.01
IM-67	30.06	14.28		7.09	38.64	0.52	1.78	1.88		5.71	0.03
IM-17	20.54	6.06		7.77	58.85	0.21	1.61	3.39	0.19	1.12	0.25
IM-19	22.19	5.69		8.04	57.86	0.19	1.46	3.07	0.17	1.11	0.23
IM-18	21.50	5.32		7.35	56.76	0.28	1.65	5.14	0.16	1.54	0.28
IM-12	22.09	4.90		7.50	56.17	0.26	1.99	5.04	0.20	1.55	0.29

表 3.1.2.3 ゴマクボ遺跡 1号炉炉壁の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
IM-50	50.67	1.65	28.73	13.45	0.23	1.96	1.38	0.97	0.80	0.15
IM-51	81.73	0.81	10.48	2.90	0.06	0.56	0.80	0.43	2.18	0.04
IM-52	60.88	1.58	25.21	7.85	0.12	1.19	1.30	0.73	1.07	0.08
IM-53	51.49	1.77	27.82	13.91	0.29	1.58	1.20	0.75	1.06	0.12
IM-54	50.00	1.80	29.56	13.44	0.17	1.69	1.17	0.85	1.20	0.12

表 3.1.2.4ゴマノクボ遺跡出土の炉壁片および粒状白色砂礫類の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
IM-11	72.76	8.16	8.40	4.95	0.24	1.50	1.87	0.17	1.95	0.00
IM-13	74.40	2.31	10.33	7.07	0.09	0.56	1.87	0.35	3.01	0.00
IM-14	75.82	1.14	13.78	5.21	0.06	0.56	0.31	0.49	2.62	0.00
IM-64	76.82	0.31	16.07	1.71	0.03	0.87	0.20	--	3.96	0.04
MHG-4(1)	69.9	4.5	14.2	3.4		1.7	1.2		4.2	
MHG-17	68.0	2.1	17.9	7.6		1.3	0.8		2.3	
MHG-19	68.5	3.0	13.6	7.5		1.4	1.6		3.8	
MHG-5	76.1	1.0	12.9	4.9		1.0	1.0		2.5	
MHG-6(3)	76.1	0.5	14.8	2.2		1.0	0.4		4.1	
MHG-6(4)	69.4	0.8	17.9	4.4		1.7	0.4		4.6	
MHG-33	69.2	0.5	19.4	3.5		1.0	0.2		5.8	
MHG-34	98.3	tr	1.2	0.2		tr	tr		tr	
MHG-35	98.3	tr	0.8	0.2		tr	tr		tr	

1. 2. 3月山遺跡^{24, 25, 26)}

本遺跡は群馬県前橋市小坂子町に所在し、1984年に東京工業大学製鉄史研究会によって発掘調査が行われた。遺跡の成立年代は出土土器により9~10世紀と推定された。なお、炉型式および炉形状は不明である。

遺跡試料の化学組成を分析した結果は表 3.1.2.5のようであった。

表 3.1.2.5月山遺跡出土鉄滓，粘土の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
GKT01 (鉄滓)	49.60	1.46	27.00	17.40	0.30	3.62	0.43	0.11	0.08
GKT02 (鉄滓)	29.65	4.85	13.70	41.04	0.60	4.42	4.30	1.11	0.33
GKT03 (鉄滓)	46.16	1.56	24.87	18.35	0.34	4.03	3.80	0.73	0.13
GKT04 (鉄滓)	17.35	7.41	6.14	56.94	0.77	4.48	5.54	0.51	0.49
GKT05 (鉄滓)	29.48	4.72	14.17	41.90	0.55	3.82	4.22	0.80	0.34
GKT06 (鉄滓)	13.50	8.72	5.96	61.98	0.68	3.98	4.35	0.41	0.43
GKT07 (鉄滓)	48.51	1.32	26.60	16.35	0.33	3.71	2.49	0.57	0.33
GKT08 (鉄滓)	39.70	9.24	16.45	11.69	0.97	8.67	12.18	0.99	0.12
GKT09 (鉄滓)	38.74	7.73	19.66	18.75	0.77	5.45	7.67	1.43	0.16
GKT10 (鉄滓)	46.28	1.92	23.03	21.78	0.34	3.81	2.22	0.51	0.11
GKT11 (鉄滓)	17.15	9.17	8.33	57.52	0.55	3.75	2.91	0.33	0.29
GKT12 (鉄滓)	40.52	2.13	22.06	28.22	0.37	3.32	2.79	0.46	0.13
GKT13 (粘土)	64.47	1.11	21.19	5.65	0.01	0.66	5.87	1.00	0.03

1. 2. 4 粟田かなくそ山遺跡²⁷⁾

本遺跡は茨城県新治郡千代田村に所在し、1988～1989年にかけて千代田村教育委員会によって発掘調査が行われた。遺跡の成立年代は出土土器から7世紀末～8世紀初頭に推定され、炉形式および炉形状は長方形箱形である。

遺跡の炉遺構について図 3.1.2.5、遺跡試料の化学組成の分析結果は表3.1.2.6のようになる。

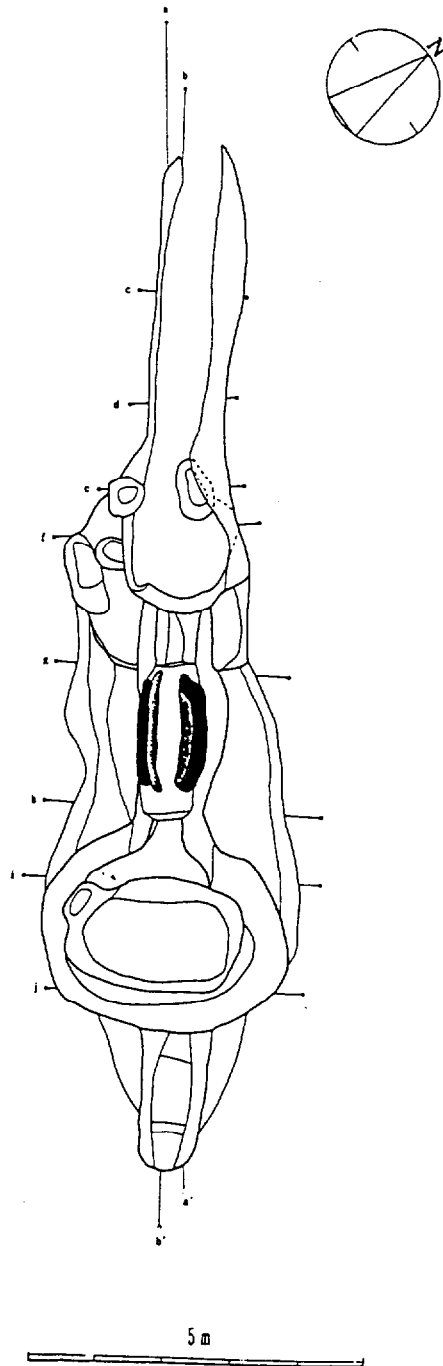


図 3.1.2.5 粟田かなくそ山遺跡炉遺構平面図

表 3.1.2.6 栗田かなくそ山遺跡遺跡出土鉄滓・炉壁の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
AK02	25.76	13.90	5.20	44.11	0.72	2.41	5.85	1.33	0.71
AK04	24.15	12.76	5.14	50.01	0.77	2.65	2.94	0.90	0.67
AK05	32.81	14.71	8.06	33.83	0.72	3.02	4.69	1.33	0.83
AK06	77.54	0.39	15.37	2.74	0.01	0.56	1.06	1.73	0.59
AK07	27.04	19.47	6.18	35.36	0.95	3.38	5.83	1.16	0.62
AK08	77.19	3.82	11.72	4.39	0.15	0.29	0.94	1.26	0.23
AK09	26.45	13.10	5.82	45.20	0.58	2.05	5.09	1.01	0.69
AK10	42.69	11.98	10.68	17.59	0.40	7.87	5.67	1.52	1.59
AK11	32.51	10.14	5.84	38.59	0.76	3.71	6.22	1.33	0.91
AK12	27.19	12.99	5.73	44.41	0.48	1.91	5.57	1.23	0.49
AK13	60.07	4.05	11.09	21.80	0.01	0.30	0.53	0.01	2.13
AK14	24.89	17.96	5.47	41.01	0.99	3.55	4.35	1.12	0.66
AK15	26.00	13.80	5.92	44.75	0.75	2.16	4.95	1.21	0.47
AK16	26.75	13.51	5.82	43.97	0.53	1.90	5.65	1.36	0.51
AK17	14.57	23.39	8.20	45.06	1.12	4.49	2.17	0.23	0.78
AK18	27.88	17.60	6.44	33.54	0.91	6.09	5.88	1.34	0.32
AK19	11.31	25.40	3.47	52.58	0.77	3.45	2.26	0.47	0.28
AK20	35.28	12.80	8.40	34.23	0.45	2.27	4.83	1.05	0.69
AK21	34.88	11.98	7.47	34.86	0.61	3.97	4.94	1.12	0.17
AK22	14.99	22.33	4.75	47.08	0.74	4.24	4.68	0.67	0.52
AK23	59.35	2.66	13.96	12.75	0.31	0.75	6.95	2.71	0.55
AK24	33.98	12.33	7.23	34.45	0.68	2.79	6.21	1.68	0.64
AK25	31.97	12.84	9.42	29.78	1.07	3.02	10.40	0.78	0.73
AK27	21.46	14.93	5.21	50.12	0.62	2.50	3.68	0.83	0.66
AK28	24.41	13.97	5.43	49.19	0.55	2.95	2.33	0.69	0.50
AK29	56.15	5.14	12.26	21.27	0.29	0.87	2.03	1.50	0.48
AK31	16.59	17.16	2.41	54.88	0.64	4.68	2.69	0.52	0.42
AK32	9.52	20.88	3.52	58.18	0.50	4.17	2.50	0.23	0.49

1. 2. 5 安行猿貝北遺跡²⁹⁾

本遺跡は川口市安行に所在し、1982年埼玉県埋蔵文化財調査事業団によって発掘調査された。なお、炉型式および炉形状は不明である。遺跡の成立年代は9～10世紀代であるが、発掘調査の際に、鉄滓を含む46.5kgの鉄塊が発見された。事故によって途中で操業を中止したものか、製鉄操業終了後に何らかの事情で放棄されたものかは判断できないが、鉄塊の形状は炉形状を保存するものと考えられる。

本遺跡で出土採取した砂鉄、鉄滓の化学組成分析の結果は表 3.1.2.7のようになる。また、同遺跡から出土した鉄塊の平面形状は図 3.1.2.6のようであった。

表 3.1.2.7 安行猿貝北遺跡出土砂鉄と鉄滓の化学組成

試料	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T. Fe	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
SK-S	0.61	10.79	2.85	58.17	0.45	2.00	0.21	0.00	0.00
試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
SK-01	29.94	9.36	10.68	40.78	0.45	3.27	2.97	1.90	0.12
SK-02	12.21	8.90	5.64	70.08	0.25	1.69	0.83	0.24	0.08
SK-03	3.46	17.97	5.71	69.04	0.40	2.94	0.46	0.01	0.01
SK-04	29.14	7.54	10.55	45.75	0.34	2.62	1.89	1.47	0.08
SK-05	19.16	9.33	6.40	57.13	0.44	5.09	1.74	0.49	0.07
SK-06	16.39	5.25	5.40	67.55	0.25	2.47	2.10	0.39	0.11

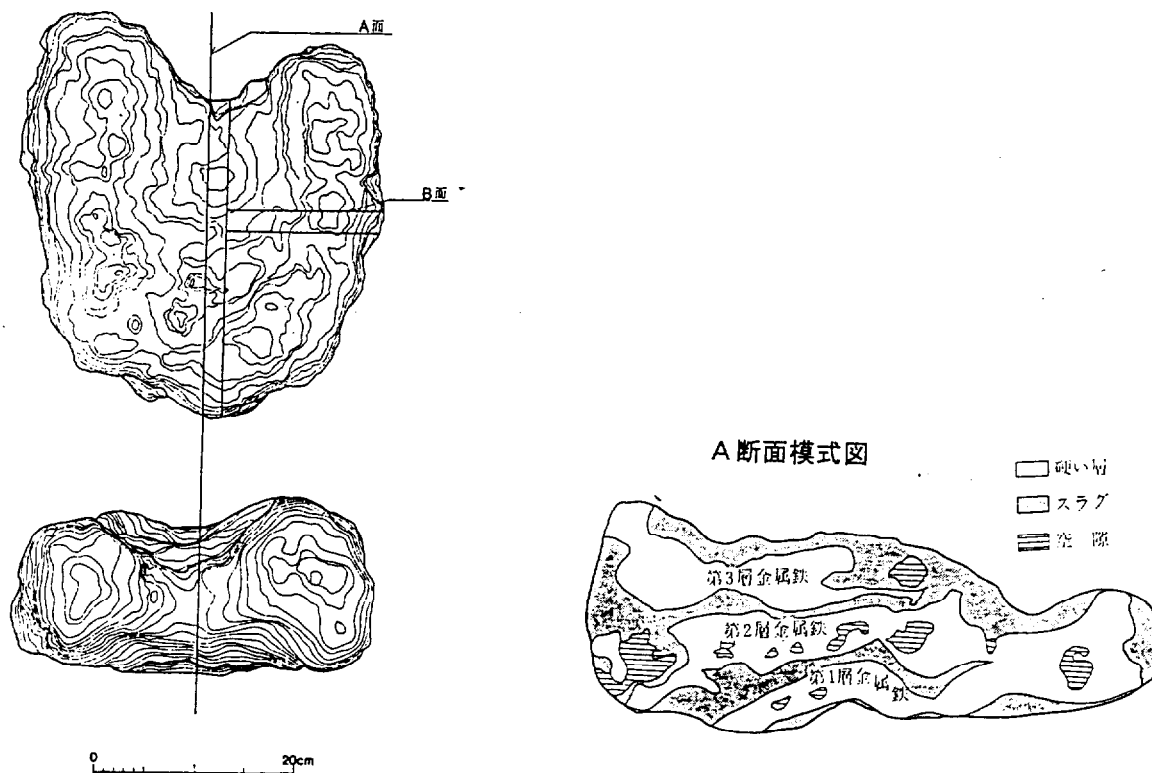


図 3.1.2.6 安行猿貝北遺跡出土鉄塊

1. 2. 6 保光たたら遺跡²⁹⁾

本遺跡は広島県比婆郡東城町（旧備後国）大字粟田字保光に所在し、1984年、保光たたら発掘調査団（広島大学考古学研究室、世羅郡東城町教育委員会）によって発掘調査が行われた。遺跡の成立年代は出土磁器類から18世紀中葉前後と推定され、炉形式および炉形状はは長方形箱形のものである。本調査で製錬炉跡の他に大鍛冶場跡、炭窯跡などが検出された。製錬炉の床釣り上部平面図を図 3.1.2.7に、横断面は写真 3.1.2.1のようであった。図から炉の地下構造は長さ13m、幅7m、深さ3.5mの掘方の中に築かれていた。小舟の北側には石組みがあり、炉の両側に竈（天秤竈）が置かれていたと考えられている。

また、炉本体のあった高殿から西側に大鍛冶場が配置されて、そこからは2基の炉跡が検出された。

保光たたらの高殿周辺から採取した砂鉄・鉄滓の化学組成の分析結果は表 3.1.2.8～3.1.2.10のようになる³⁰⁾。

表 3.1.2.8 保光たたら出土砂鉄の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T.Fe	MnO	MgO	CaO	K ₂ O
HTY-IS	3.35	4.37	2.01	62.04	0.85	0.49	0.23	0.07

表 3.1.2.9 保光たたら高殿内出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O
HTY-1	27.35	11.11	5.82	50.42	1.45	1.01	1.72	1.12
HTY-2	31.89	10.74	7.40	44.24	1.32	1.50	1.75	1.16
HTY-4	26.28	7.44	5.53	56.60	0.95	1.12	1.17	0.91
HTY-5	30.76	8.57	7.55	48.07	1.01	1.00	1.69	1.33
HTY-6	32.08	8.37	6.85	47.77	0.90	1.01	1.70	1.32
HTY-7	24.91	7.38	6.13	56.30	0.89	1.36	2.07	0.96
HTY-8	23.53	5.90	5.45	60.96	1.39	0.74	1.17	0.86
HTY-9	25.09	11.69	6.20	52.00	1.54	1.00	1.44	1.05
HTY-10	39.94	11.16	8.39	34.55	1.46	1.12	2.18	1.20
HTY-12	24.33	11.84	7.18	51.00	1.48	1.23	1.82	1.12

表 3.1.2.10 保光たたら、大鍛冶場、A2区出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O
HTY-3	27.89	0.60	8.08	61.39	0.05	0.53	0.53	0.92
HTY-11	24.42	0.28	7.54	66.18	0.03	0.20	0.50	0.75
HTY-13	19.12	1.86	6.89	69.05	0.20	0.63	1.21	1.03
HTY-14	23.34	0.80	7.91	65.56	0.08	0.41	1.47	0.45
HTY-15	18.58	0.34	6.09	73.24	0.03	0.32	0.56	0.84
HTY-16	19.82	0.55	6.31	70.81	0.07	0.72	0.80	0.92
HTY-17	9.30	0.13	2.18	87.80	0.01	0.17	0.13	0.27
HTY-18	1.46	0.05	0.49	97.57	0.01	0.30	0.09	0.03

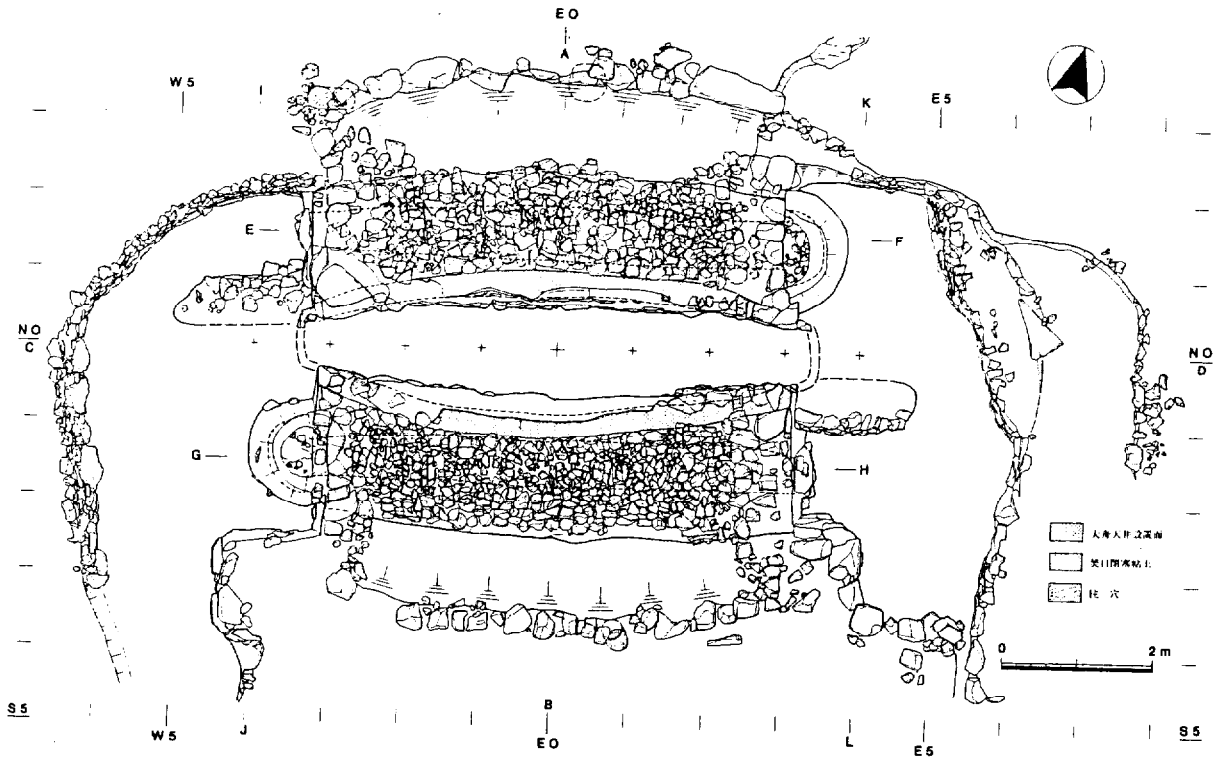


図 3.1.2.7 保光たたら遺跡遺構平面図

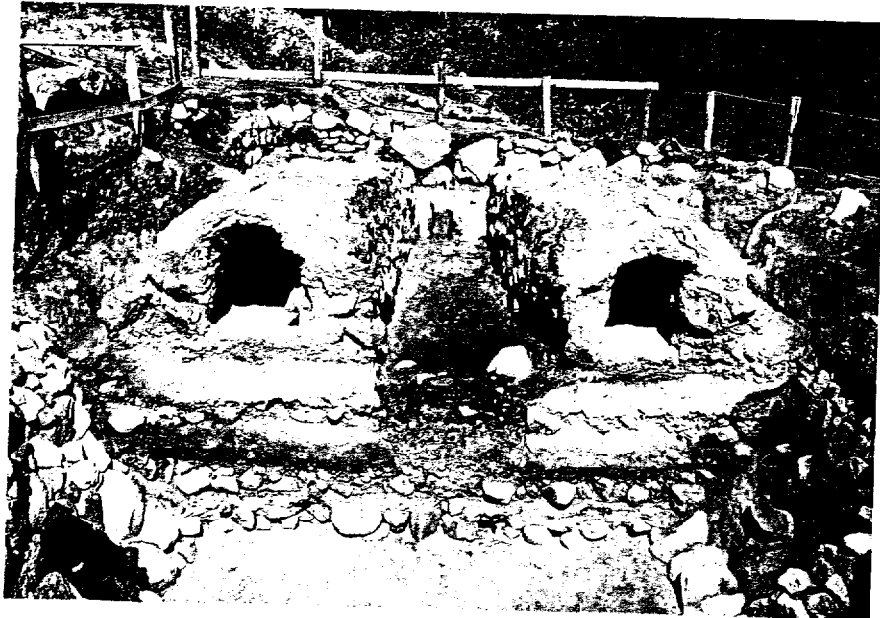


写真 3.1.2.1 保光たたら遺跡床釣り横断面

1. 2. 7 小半弓遺跡³¹⁾

本遺跡は福島県石川郡玉川町に所在し、1984年、石川郡玉川町教育委員会によって発掘調査された。遺跡の成立年代は、出土陶器と磁器から寛政年間と考えられており、炉型式および炉形状は、永代たたら形式を持つ長方形箱型炉である。この形式を持つ製鉄遺跡は東日本では唯一の遺跡とあってよく、全国的にも注目された遺跡である。江戸時代中期、中国地方で展開された、たたら製鉄が東日本の白川藩に導入された政治的、経済的背景、その技術的位置づけなど、今後検討されるべき課題は多い。

本遺跡および周辺地域の砂鉄、遺跡出土の鉄滓などの化学組成の分析結果は表 3.1.2.1 1~3.1.2.13 のようであった³²⁾。

表 3.1.2.11 小半弓遺跡出土砂鉄の化学組成

資料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T.Fe	MgO	CaO	K ₂ O
FKK-S1	3.7	12.2	2.0	56.3	1.2	0.3	0.2
FKK-S2	3.4	11.8	1.8	56.8	1.3	0.4	0.2
FKK-S3	2.6	10.0	1.1	59.5	0.8	0.4	0.2

表 3.1.2.12 小半弓遺跡出土鉄滓の化学組成

資料名	資料採取地点	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O
FKK07	本床周辺	22.3	21.9	6.8	42.5	2.5	2.4	1.6
FKK08	本床周辺	22.7	21.7	7.5	41.9	2.3	2.3	1.6
FKK09	本床周辺	20.7	23.7	5.9	43.8	2.9	1.7	1.2
FKK10	本床周辺	22.9	28.7	6.9	35.1	2.8	2.1	1.5
FKK11	本床周辺	20.7	23.3	6.1	43.8	3.2	1.8	1.2
FKK12	本床周辺	23.8	29.2	7.3	33.4	2.9	2.0	1.5
FKK13	湯だまり	18.9	20.1	4.8	49.3	3.2	2.6	1.1
FKK14	湯だまり	20.5	26.9	5.8	39.8	3.4	2.3	1.3
FKK15	湯道	18.4	26.0	5.3	43.3	3.6	2.3	1.1
FKK19	鉄滓捨て場	28.5	16.6	7.1	42.3	2.5	1.5	1.6
FKK20	鉄滓捨て場	28.9	17.0	6.6	42.8	2.7	1.5	1.6
FKK21	鉄滓捨て場	24.6	27.0	8.1	32.8	3.4	2.7	1.5
FKK22	鉄滓捨て場	18.3	31.1	5.3	38.6	3.3	2.1	1.3

表 3.1.2.13 小半弓遺跡出土鍛冶遺構周辺鉄滓の化学組成

資料名	資料採取地点	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O
FKK01	遺構西掘方	18.0	15.2	5.1	57.9	1.5	1.5	0.8
FKK02	遺構西掘方	17.6	15.9	4.3	58.4	1.6	1.5	0.7
FKK03	1号鍛冶炉	13.1	19.8	3.6	58.1	2.6	2.3	0.6
FKK04	1号鍛冶炉	13.6	16.3	3.8	62.2	2.1	1.3	0.7
FKK05	1号鍛冶炉	9.0	16.3	3.9	67.1	2.3	1.0	0.5
FKK06	1号鍛冶炉	25.8	17.5	9.0	41.9	2.3	2.0	1.5
FKK16	2号鍛冶炉	8.4	16.8	2.9	68.1	2.3	1.1	0.4
FKK17	2号鍛冶炉	20.3	23.1	4.2	47.3	3.1	1.2	0.8
FKK18	2号鍛冶炉	16.7	21.5	4.8	50.7	3.4	1.8	1.0

1. 2. 8 堪忍沢遺跡³³⁾

本遺跡は、秋田県鹿角市に所在し、1986年、秋田県教育委員会によって発掘調査された。遺跡の成立年代は、出土土器から11世紀代に推定され、炉形式および炉形状は長円形竪形である。遺跡は製鉄炉本体とそれに付属する砂鉄置き場、作業場、排滓場からなっている。発掘調査によって明らかになった製鉄炉は総計13基で、そのすべてが長円形竪型炉である。

製鉄炉(SN02)に隣接する遺構(SK01)は砂鉄置き場と考えられ、多量の砂鉄が堆積しており、分析用砂鉄資料はここから採取した。

本遺跡出土の砂鉄と鉄滓の分析結果は、表3.1.2.14と3.1.2.15のとおりであり、その他の試料については表3.1.2.16と3.1.2.17のとおりである³⁴⁾。

表 3.1.2.14 秋田県堪忍沢出土砂鉄の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T. Fe	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
KNZ22	2.97	13.63	0.58	55.73	0.49	2.13	0.42	0.04	0.12
KNZ23	6.08	12.28	1.50	52.79	0.46	2.81	1.22	0.17	0.55
KNZ24	4.94	11.75	1.71	54.29	0.44	2.10	1.01	0.13	0.36
KNZ25	2.85	12.72	0.84	56.43	0.52	2.13	0.26	0	0.06

表 3.1.2.15 秋田県堪忍沢出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
KNZ01	15.63	13.30	4.48	57.84	0.62	3.90	2.61	0.40	0.87
KNZ02	17.77	14.04	4.18	54.07	0.67	4.49	3.27	0.63	0.88
KNZ03	19.28	13.05	6.41	51.82	0.65	4.24	2.89	0.59	1.05
KNZ04	23.84	12.74	5.64	46.09	0.67	5.96	3.58	0.56	0.92
KNZ05	26.99	15.84	8.65	38.54	0.71	4.69	3.04	0.80	0.74
KNZ06	20.27	13.36	7.44	50.97	0.64	3.66	2.21	0.68	0.76
KNZ07	16.94	12.99	6.28	57.04	0.53	3.04	1.94	0.48	0.76
KNZ08	20.31	9.98	6.48	56.86	0.49	2.77	1.99	0.53	0.59
KNZ09	18.29	14.44	4.44	53.27	0.70	5.01	2.61	0.40	0.83
KNZ10	26.46	7.47	6.72	49.98	0.65	3.92	3.14	0.68	0.98
KNZ11	32.89	5.14	7.76	45.90	0.30	2.35	3.28	1.81	0.56
KNZ12	31.36	7.53	9.23	43.24	0.43	4.25	2.54	0.80	0.62
KNZ13	21.51	13.64	5.54	47.52	0.70	5.03	4.39	0.82	0.86
KNZ14	24.30	12.77	6.90	46.38	0.58	4.32	3.03	0.97	0.75
KNZ15	24.94	10.69	8.26	47.94	0.49	3.36	3.00	0.66	0.65
KNZ16	26.81	12.42	8.16	42.65	0.63	5.33	2.70	0.68	0.62
KNZ17	24.97	12.28	6.54	47.71	0.58	4.05	2.65	0.65	0.57
KNZ18	15.10	14.13	5.58	56.35	0.64	4.22	2.63	0.47	0.88
KNZ19	22.76	13.33	6.62	50.38	0.55	2.95	2.08	0.67	0.65
KNZ20	24.84	15.14	6.78	42.02	0.76	5.16	3.72	0.7	0.88
KNZ21	13.27	4.57	5.62	70.30	0.17	1.08	0.93	0.74	0.30

表 3.1.2.16 秋田県壺忍沢出土炉壁の化学組成

資料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
KNZ26	66.33	0.84	23.92	7.74	0.04	0.41	0.18	0.48	0.05
KNZ27	59.01	0.98	28.18	10.92	0.09	0.31	0.18	0.84	0.07
KNZ28	66.26	0.84	23.87	7.62	0.09	0.60	0.10	0.51	0.09

表 3.1.2.17 秋田県壺忍沢出土粘土の化学組成

資料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
KNZ29	52.77	1.6	34.82	10.37	0.13	0.21	0.02	0.07	0
KNZ30	62.9	0.8	25.52	8.84	0.08	1.14	0.29	0.35	0.08

1. 2. 9 高保木遺跡³⁵⁾

本遺跡は兵庫県穴栗郡千種町に所在し、1967～1968年にかけて千種町教育委員会によって発掘調査された。遺跡の成立年代はいまのところ古代から中世にかかると推定されており、炉形式と炉形状は長方形箱形である。

本遺跡試料の化学組成を分析した結果は表 3.1.2.18の通りである。

表 3.1.2.18 兵庫県高保木遺跡出土砂鉄、鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T. Fe	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
HT-S (砂鉄)	5.83	4.70	4.99	57.72	0.47	0.56	0.15	0.01	0.85
試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
HT-01 (鉄滓)	32.49	3.97	9.78	48.42	0.65	0.11	2.19	1.81	0.57
HT-02 (鉄滓)	29.84	3.45	7.96	53.97	0.62	0.31	1.83	1.55	0.47
HT-03 (鉄滓)	24.03	6.07	8.30	57.29	0.77	0.03	2.03	1.31	0.17
HT-04 (鉄滓)	31.03	3.37	10.90	49.49	0.58	0.06	1.99	1.87	0.71
HT-05 (鉄滓)	26.28	7.66	9.47	51.34	0.81	0.32	2.09	1.34	0.70
HT-06 (鉄滓)	32.14	4.20	9.78	46.77	0.90	0.54	2.92	1.93	0.82
HT-07 (鉄滓)	20.55	3.81	5.81	65.98	0.63	0.11	1.41	1.13	0.57
HT-08 (鉄滓)	22.57	2.77	7.45	64.43	0.02	0.04	1.73	0.90	0.05

1. 3 鍛冶・精練遺跡

近世期の鍛冶工程は、大鍛冶（精練鍛冶）と小鍛冶に分けられる。大鍛冶屋が専業として定着するのは享保年間であり、それ以前は鍛冶屋の職分とされていた。近世以前の鍛冶（精練）は大鍛冶に対応していると考えられるので、本節では、古代から近世までの鍛冶（精練）遺跡出土遺物について検討を行う。

1. 3. 1 鳩山窯址群遺跡⁴²⁾

本遺跡は8世紀～12世紀代にかけて存在した窯址、炭窯址、一般住居址、工房址などを含む生産遺跡である。工房址から採取し分析を行った鉄滓試料は24点であり、その内部に金属鉄を含む試料は8点であった。

これら試料の化学組成を分析した結果は表 3.1.3.1のとおりとなった。この分析結果には、鉄鉄滓に1点だけあきらかに製錬滓と見られるものがある。この鉄滓は製錬場で生産された金属塊に付着したまま持ち込まれ、本遺跡に残留したものであると考えられる。また、鉄滓中に含まれる結晶鉱物について化学組成分析を行った。その結果は表3.1.3.2の通りであった。

表 3.1.3.1 鳩山遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅
SH-1	15.46	1.41	6.27	73.90	0.19	1.16	1.14	0.05	0.33	0.08
SH-2	10.55	4.40	3.54	78.49	0.51	1.17	0.54	0.16	0.35	0.28
SH-3	21.58	1.63	3.54	65.07	0.19	0.89	3.68	1.36	0.02	0.10
SH-4	17.74	0.24	4.12	72.57	0.14	0.68	3.00	0.97	0.17	0.04
SH-5	27.70	0.01	8.08	55.73	--	0.78	5.98	1.71	0.01	--
SH-6	13.67	0.11	3.89	80.61	0.02	0.29	0.64	0.43	0.02	--
SH-8	21.12	1.02	6.14	66.90	0.24	1.01	2.43	1.13	--	--
SH-9	12.93	0.25	3.52	81.31	0.14	0.38	0.69	0.68	0.02	0.09
SH-10	30.11	0.83	7.91	55.24	0.36	0.95	2.27	1.65	0.02	0.21
SH-11	20.70	2.12	5.89	63.47	0.50	1.55	4.30	1.11	--	0.36
SH-12	35.65	0.37	6.10	64.21	0.24	0.61	1.55	1.04	0.01	0.21
SH-13	43.87	0.84	10.31	39.73	--	0.86	2.07	2.23	--	0.08
SH-14	22.10	0.02	4.93	71.05	0.03	0.02	0.90	0.91	0.04	--
SH-15	22.30	1.05	6.69	64.24	0.06	0.80	3.31	1.52	0.03	--
SH-17	21.35	0.46	5.60	68.87	0.15	0.45	2.01	0.98	0.02	0.11
SH-18	12.56	0.16	3.19	82.02	0.01	0.42	0.67	0.78	0.19	--
SH-19	22.71	0.18	5.82	66.57	0.12	0.48	2.50	1.48	0.12	0.02
SH-20	23.07	0.61	5.38	61.71	0.29	0.99	5.73	2.05	0.02	0.15
SH-22	24.42	0.71	6.77	61.57	0.02	0.89	4.35	1.21	0.02	0.04
SH-23	11.74	1.10	3.53	80.33	0.24	0.68	1.73	0.58	--	0.07
SH-24	18.70	0.58	4.88	71.55	0.18	1.03	2.35	0.76	--	0.03
SH-25	18.54	14.03	6.20	46.19	0.87	4.17	8.55	1.42	0.02	--
SH-26	20.72	0.23	4.97	70.65	0.01	0.04	2.09	1.14	0.15	--
SH-32	19.66	1.05	5.85	68.01	0.16	0.73	3.27	1.18	0.08	--

表 3.1.3.2 鳩山遺跡出土鉄滓に含まれる結晶鉱物の化学組成

試料番号	結晶鉱物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅
SH-2	ウルボスピネル	9.7	6.4	48.0	1.5	7.6	0.1	--	--	6.7
SH-11	ウルボスピネル	9.9	6.1	68.1	0.3	1.0	--	--	--	4.2
SH-23	ウルボスピネル	8.3	9.4	80.3	0.3	--	0.2	0.1	--	0.6
SH-25	ウルボスピネル	2.6	4.3	56.7	1.1	5.1	0.1	--	--	--

1. 3. 2 奈良地区遺跡群 (I) 受け地だいやま遺跡³⁸⁾

遺跡試料の化学組成分析を行った結果は表 3.1.3.3の通りである。

試料No. KYN. 1, 2, 3, 7の形状はいずれも椀型, あるいは椀型の破片状を示し, いわゆる鍛冶滓と呼ばれるものである。また, 試料No. KYN. 4, 5は不定型のもので化学組成からみれば炉壁と思われる。さらに, 試料No. KYN. 8も不定形状であるが, 同じく化学組成からみれば, 先の鍛冶滓とは異なり, 製錬滓に近いものである。

表 3.1.3.3 奈良地区遺跡群 (I) 受け地だいやま遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O
KYN-1	17.70	1.07	5.29	72.15	0.11	1.73	1.25	0.70
KYN-2	8.57	0.14	1.07	88.22	0.00	1.07	0.37	0.56
KYN-3	17.04	0.22	3.65	74.92	0.06	1.14	1.96	1.01
KYN-4	44.52	2.36	10.21	34.98	0.33	2.31	2.43	2.86
KYN-5	75.66	0.48	13.23	6.36	0.10	1.17	1.24	1.76
KYN-6	15.76	5.79	4.17	66.75	0.70	3.10	3.18	0.55
KYN-7	14.55	0.45	6.48	74.86	0.10	1.98	0.56	1.02
KYN-8	3.49	11.42	1.50	78.11	0.41	4.10	0.92	0.05

1. 3. 3 内場山城跡遺跡³⁹⁾

本遺跡は戦国時代の山城であり, 兵庫県多紀郡西紀町に所在する。遺跡の成立年代は15世紀末~16世紀代とみられている³⁹⁾。化学組成分析を行った試料は総計7点であり, すべて椀型の形状を示していた。化学組成分析の結果は表 3.1.3.4の通りである。

表 3.1.3.4 内場山城跡遺跡出土鉄滓の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
HN-3	47.20	0.68	15.60	29.49	0.25	0.91	1.68	3.48	0.54
HN-4	18.17	0.42	7.75	71.65	0.28	0.41	0.40	0.71	0.15
HN-5	23.77	0.17	7.64	63.57	0.01	0.82	1.01	2.92	0.11
HN-6	26.75	1.78	8.45	55.48	0.35	0.70	3.17	2.79	0.19
HN-7	22.40	0.61	6.27	67.21	0.23	0.37	0.91	1.89	0.00
HN-8	24.09	2.60	6.97	59.77	0.14	0.59	2.69	2.84	0.01

2. 鉱物組成分析

研究用とした資料は化学・鉱物組成分析を実施した。鉱物組成分析は基本的にはX線回折分析法によったが、走査型電子顕微鏡と、これに併設されたエネルギー分散型X線分析装置を併用し、結晶鉱物の同定を行った。

2. 1 滋賀県下岩鉄と製錬滓の鉱物組成

滋賀県下の鉄滓は、化学組成分析結果のデータを3種に大別し、地域的偏差があることを明らかにした。しかし鉱物組成的には、地域的な特徴は認められなかった。

2. 1. 1 岩鉄の鉱物組成

滋賀県下に存在する製鉄遺跡は、そのすべてが岩鉄製錬によるものであるが、ここでは湖南的特徴を有する源内峠遺跡（7世紀末～8世紀初頭）の事例を取り上げる。この遺跡で採取した岩鉄は、大(2.3kg)小(40g)2種である。これらの鉱石の鉱物組成を表3.2.1.1に示す。まず、大きい鉱石の一部を切り出し、破面を色調別破碎分離し3種の試料を作成した。試料GM-(1)は含水リン酸カルシウム(Ca₃(PO₄)₂·nH₂O)と角閃石からなり、試料GM-(2)の鉱物組成は試料GM-(1)と同じで化学組成も近似していた。試料GM-(3)は磁鉄鉱と赤鉄鉱の混合物である。つぎに試料G-(1)は小さい方の岩鉄の分析結果であるが、この鉱石はほぼ純粋な磁鉄鉱であった。

2. 1. 2 鉄滓の鉱物組成

鉄滓試料は、はじめにX線回折分析を行い、次いで走査型電子顕微鏡で観察し、さらに、試料中の結晶鉱物についてはX線マイクロアナライザで化学組成分析を行った。試料分析の結果から鉄滓は、以下の3種に分類することができた。

1. 結晶鉱物としてはファヤライトのみで、残部はわずかな非晶質部からなる鉄滓試料。代表例として試料BKW04(木瓜原遺跡, 写真3.2.1.1)があげられる。
2. 結晶鉱物はファヤライト, 鉄酸化物鉱物(ウスタイトまたはマグネタイト)で、残部は非晶質部分である鉄滓試料。代表例として試料UYA01(後山畦倉遺跡, 写真3.2.1.2)があげられる。
3. 結晶鉱物はファヤライトと僅かに鉄酸化物鉱物(ウスタイトまたはマグネタイト)を含むもので、残部は非晶質部分である鉄滓試料。代表例として試料SYK01(賤山

北川遺跡，写真3.2.1.3) があげられる。

上記3試料のX線回折分析結果は図 3.2.1.1~3.2.1.3のようであった。走査型電子顕微鏡写真とX線回折ピークから，いずれの試料もファヤライトを主体としていることが明らかとなった。

2. 1. 3 鉄滓の熔融温度分析

先に述べたように，前近代製錬におけるノロ（液体の鉄滓）は，鉱石中の脈石を分離除去したり，ガスの金属鉄に及ぼす作用を緩和させたり，伝熱媒体として機能するので，きわめて重要な役割をしている。したがって，鉄滓の分析は，製錬プロセスの解明に重要な意味を持っている。そこで，これらの鉄滓と熔融温度にどのような関係があるかを検討することにし，鉄滓の熔融実験を行った。この実験解析に使用した試料は，先のX線回折分析を行った試料の，試料BKW01（木瓜原遺跡），試料UYA01（後山畦倉遺跡）の2試料と，化学組成分析を行った試料のうちPとCaの総和がもっとも高い値を示した試料YDJ01（山田地蔵谷遺跡）の1試料を選んだ。実験は，示差熱分析法（DTA:Differential Thermal Analysis）によるもので，試料はあらかじめ微粉末として40mgを分取し，アルゴン気流中で室温から1200℃まで，毎分 20℃ずつ加熱して測定を行った。結果は図 3.2.1.4~3.2.1.6の通りであった。これらの図から，

1. BKW01は，992に始めの熱吸収ピークが現れ，1133℃で最大の熱吸収ピークが認められた。
2. UYA01は，1002℃に始めの熱吸収ピークが現れ，1102℃で最大の熱吸収ピークが認められた。
3. YDJ01は，1043℃で最大の熱吸収ピークが認められ，つづいて1112℃にも熱吸収ピークが認められた。

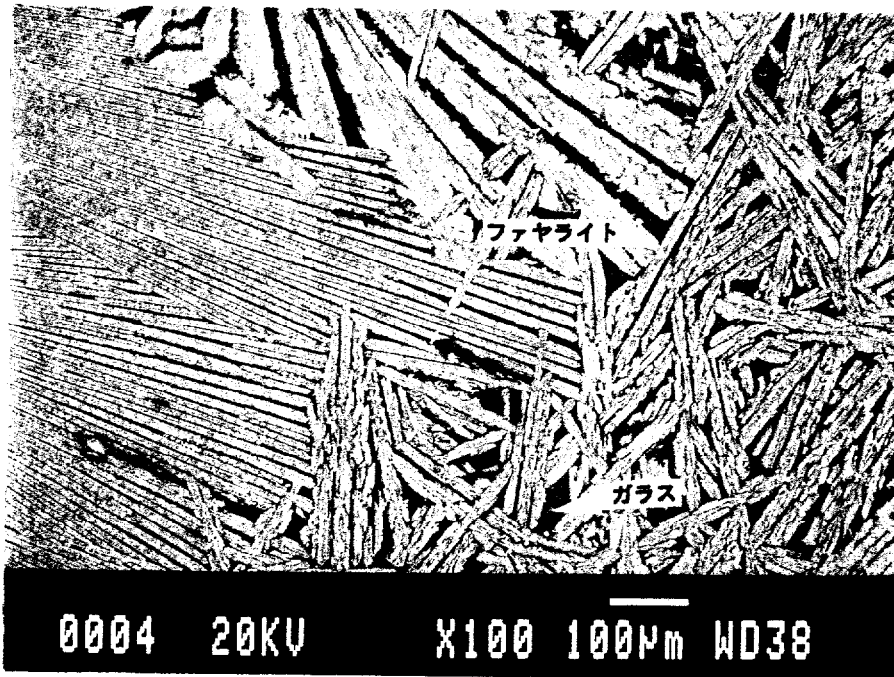


写真 3.2.1.1 ファヤライト，ガラスからなる鉄滓

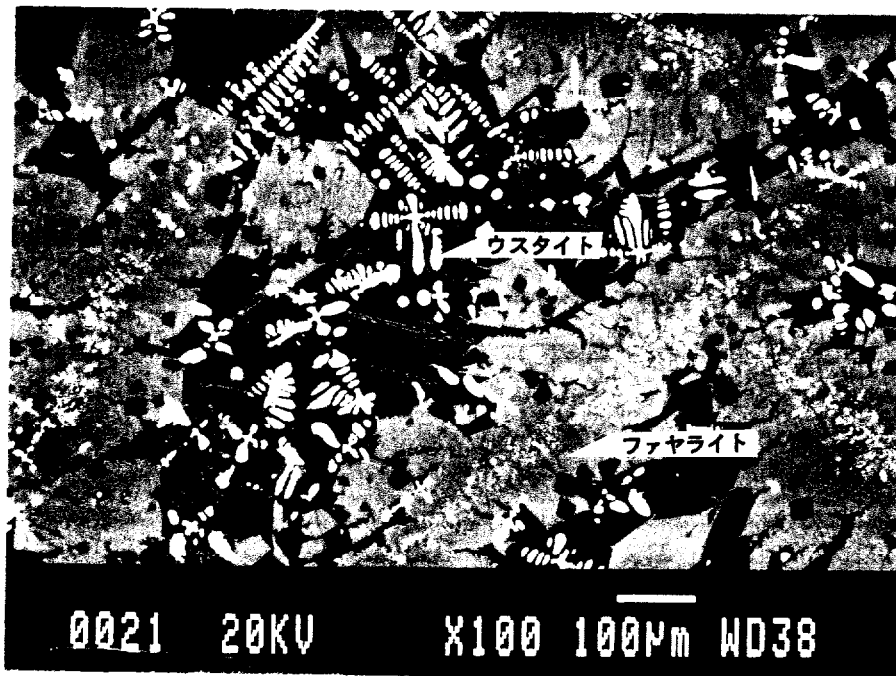


写真 3.2.1.2 ファヤライト，ウスタイト，ガラスからなる鉄滓

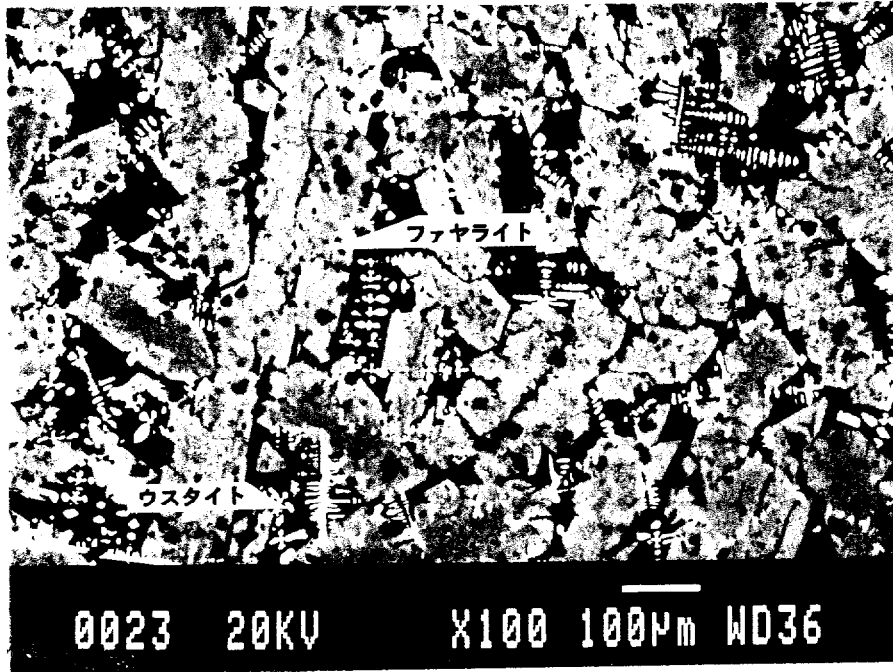


写真 3.2.1.3 ファヤライト, 少量のウスタイト, ガラスからなる鉄滓

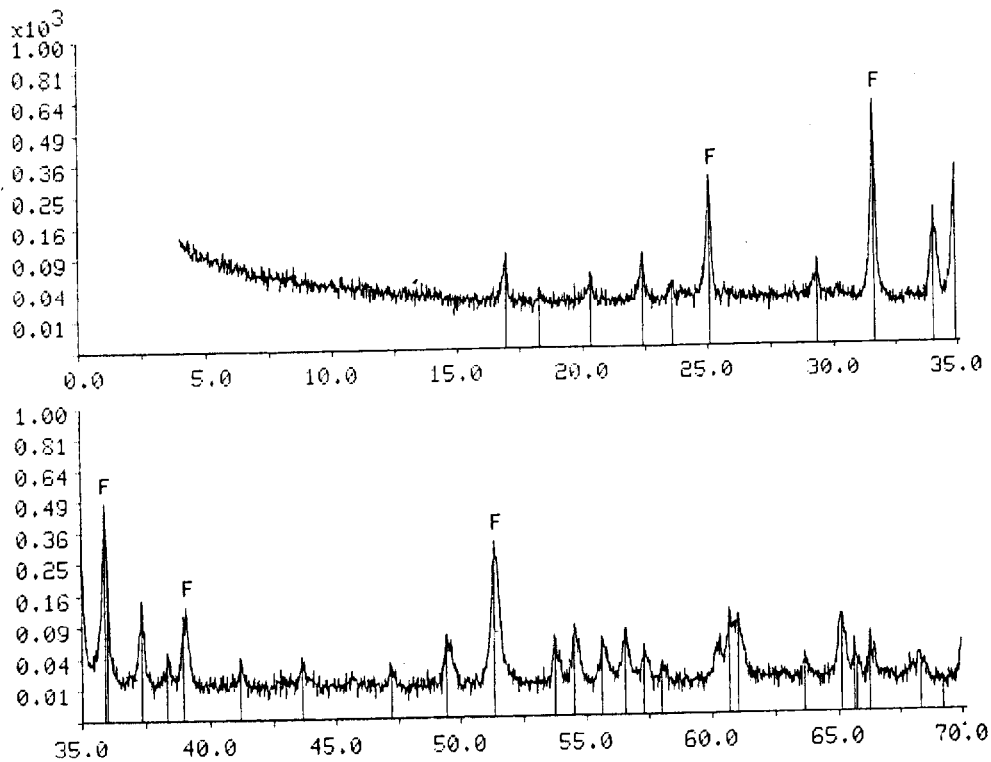


図 3.2.1.1 X線回折分析結果 (試料No. BKW04, ターゲット Cu)
 図中 Fはファヤライト, Wはウスタイト

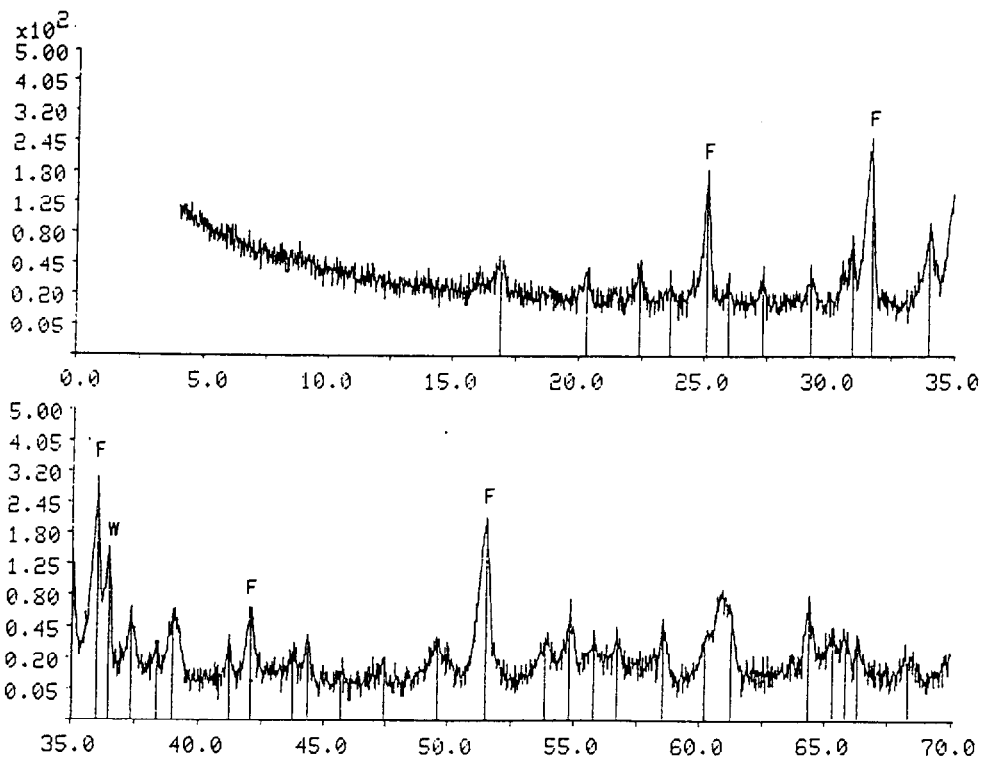


図 3.2.1.2 X線回折分析結果 (試料No. UYA01, ターゲット Cu)
 図中 Fはファヤライト, Wはウスタイト

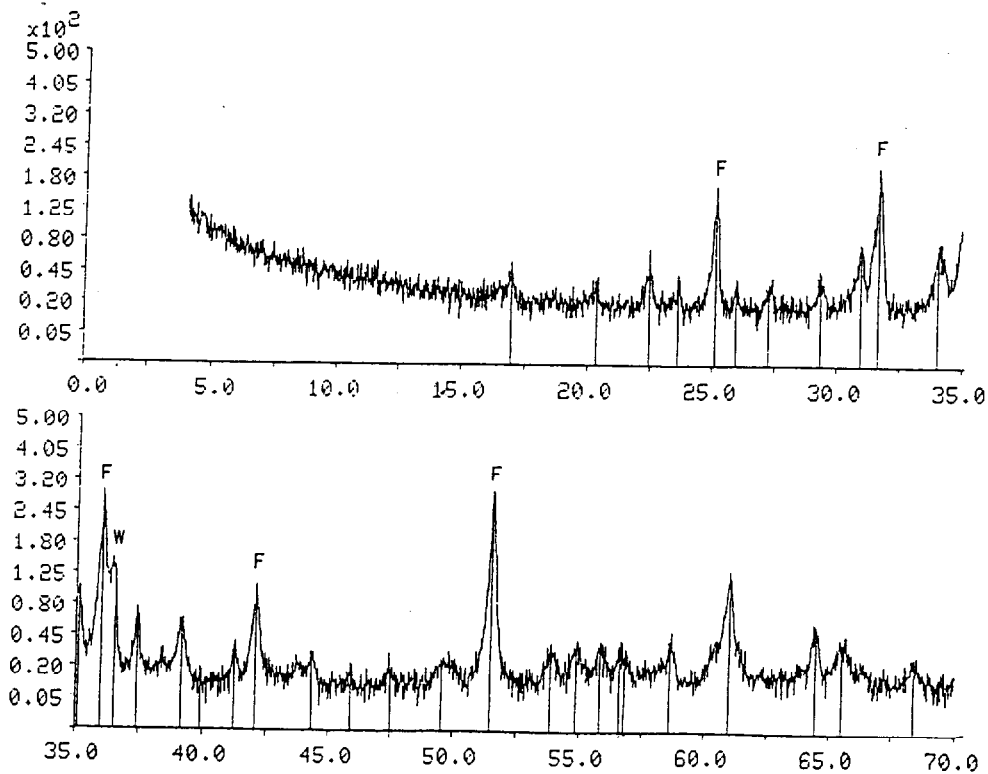


図 3.2.1.3 X線回折分析結果 (試料No. SYK01, ターゲット Cu)
 図中 Fはファヤライト, Wはウスタイト

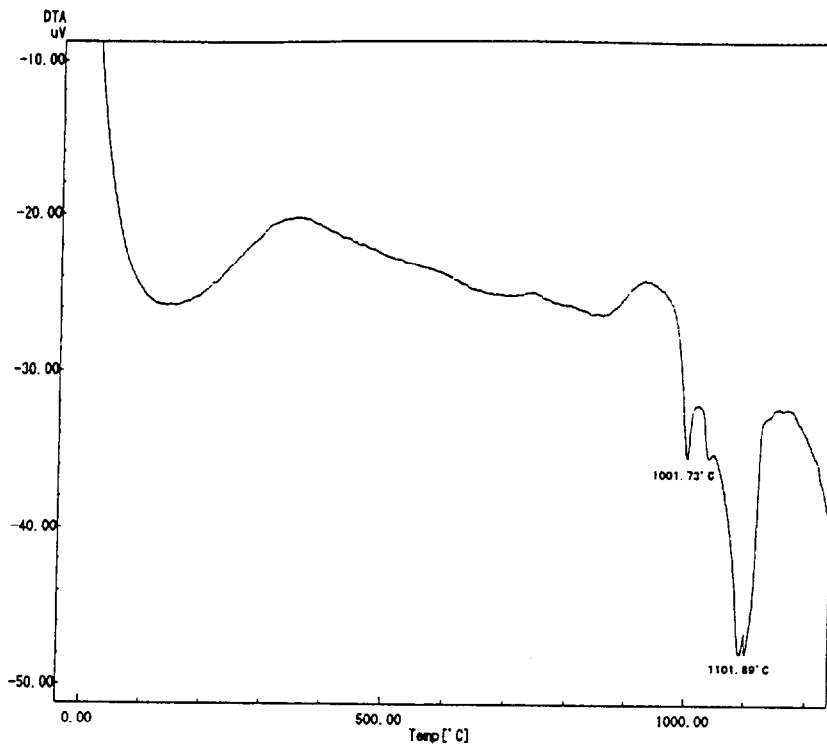


図 3.2.1.4 岩鉄滓の比差熱分析結果 (写真 3.2.1.1)
 分析は室温～1200 °Cで、この試料は
 1102 °Cで完全熔融した。

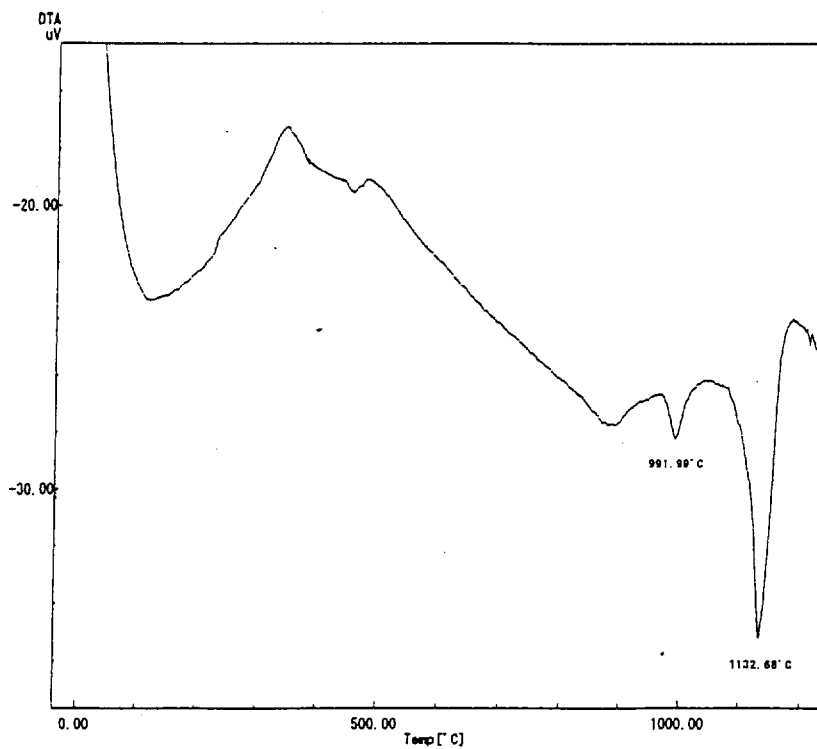


図 3.2.1.5 岩鉄滓の比差熱分析結果 (写真 3.2.1.2)
 分析は室温～1200 °Cで、この試料は
 1133 °Cで完全熔融した。

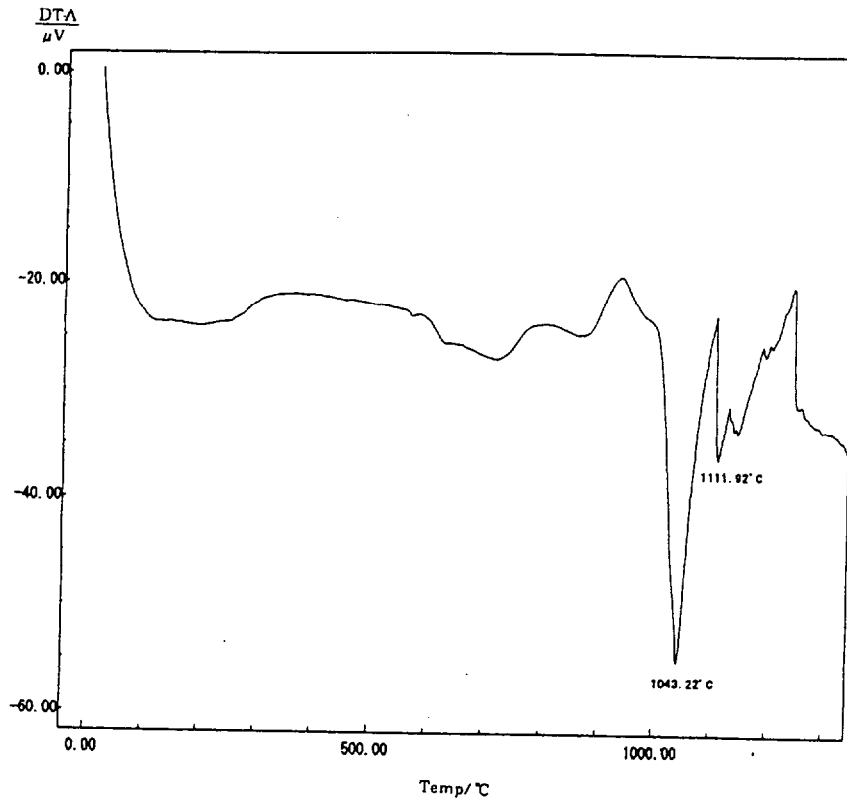


図 3.2.1.6 岩鉄滓の比差熱分析結果
分析は室温～1200℃で、この試料は
1112℃でほぼ熔融した。

2. 2 カナクロ谷遺跡の岩鉄と鉄滓の鉱物組成

2. 2. 1 岩鉄類の鉱物組成

カナクロ谷遺跡出土鉱石類の鉱物組成分析結果は、表 3.2.2.1の通りであった。このうち、試料HKK-0は広島大学考古学教室から提供を受けたものあり、製鉄原料の岩鉄と考えられていたものである。試料HKK-1～4は筆者らが採取し分析を行ったものである。

試料HKK-0は軟マンガン鉱 (pyrolusite, MnO_2 , ASTM card 24.735, β - MnO_2) である。化学組成は MnO_2 として94.4%となりほとんど純粋な軟マンガン鉱とみてよい。

試料HKK-1は多量の赤鉄鉱 (Fe_2O_3) 少量の鉄-マンガン-ざくろ石 (Fe-Mn-Garnet, ASTM card 10.367, Ref. Min. Mag., 29, 946 (1952)) と少量の角閃石 (Hornblende, ASTM card 21.149 天然物) から成っている。MnOの少ないことからざくろ石は少量で、むしろ角閃石が50%程度を占める鉱石類と思われる。

試料HKK-2はX線回折分析の結果から、鉱物組成は鉄-マンガン-ざくろ石とわずかな角閃石を含むものである。

試料HKK-3はHKK-2にほぼ等しい鉱物組成であるが、磁鉄鉱を含むものである。

試料HKK-4は磁鉄鉱 (Fe_3O_4) を主体とし、それにわずかな鉄-マンガン-ざくろ石と角閃石を含むものである。 Fe_2O_3 は60wt%以上を占めている。

ここにあげた鉱石類はすべてスカルン鉱物と考えるのが至当である。その主体となる鉱物は、磁鉄鉱と脈石である鉄-マンガン-ざくろ石 (試料HKK-2) で、これを製鉄原料として使用したのであろう。そして、この鉄-マンガン-ざくろ石の二次的な風化生成物として軟マンガン鉱が存在したと考えることが、鉱床学的にみてもっとも妥当である。

試料HKK-0の軟マンガン鉱にみられた $d=9.50$ と 4.75 \AA の線はASTM cardには無い。AS

TM.cardに記載のpyrolusiteは人工的に合成された結晶であり、 β .MnO₂と呼ばれている。

一方、ASTM.cardの鉄-マンガン-ざくろ石は天然産のものであり、spessartine (Mn₃Al₂Si₃O₁₂) と almandine (Fe₃Al₂Si₃O₁₂) 以外に、かなりの量のgrossular (Ca₃Al₂Si₃O₁₂) あるいはandradite (Ca₃(Fe³⁺, Ti)₂Si₃O₁₂) を含んでおり、Al₂O₃ が4.27%と少ない。しかし、HKK-2とASTM.cardの鉄-マンガン-ざくろ石とは面間隔でよく一致し、X線強度比もよく一致していた。

2. 2. 2 鉄滓類の鉱物組成

本遺跡の鉄滓17点のX線回折分析を17行なったが、その結果は表3.2.2.1の通りである。試料はすべて風化・変質を受けていないものだけを選別し、分析用試料とした。これらの鉄滓には金属鉄を含むものは皆無であり、通常鉄滓と外観上異なるところはない。ただし、TiO₂を16%を含む鉄滓が1点(HKK-11)あった。この鉄滓試料は砂鉄起源のものと考えられ、本遺跡では岩鉄、砂鉄を混用した製鉄が行われていた可能性は高い。

表3.2.2.1カナクロ谷遺跡鉄滓の鉱物組成

試料番号	鉱物組成
HKK-05	ファイアライト
HKK-06	ファイアライト
HKK-07	ファイアライト
HKK-08	ファイアライト
HKK-09	ファイアライト
HKK-10	ファイアライト
HKK-12	ファイアライト
HKK-13	ファイアライト
HKK-14	ファイアライト
HKK-15	ファイアライト
HKK-16	ファイアライト
HKK-17	ファイアライト
HKK-18	ファイアライト
HKK-19	ファイアライト
HKK-20	ウスタイト
HKK-21	ウスタイト, マグネタイト, ファイアライト
HKK-22	ウスタイト, マグネタイト

2. 3 砂鉄の鉱物組成

砂鉄とは一般に火成岩中の酸化物鉱物の一種であるチタン磁鉄鉱、あるいはフェロチタン鉄鉱を主成分とし、母岩に由来する多少の脈石(成分)を含有するものである。チタン磁鉄鉱はスピネル構造、フェロチタン鉄鉱は六方晶系菱面体構造であるが、いずれも強磁性である。前者はマグネタイト(Fe₃O₄)とウルボスピネル(Fe₂TiO₄)の固溶体であり、後者はヘマタイト(Fe₂O₃)とイルメナイト(FeTiO₃)の固溶体である。したがってこれら

鉱物の組成は $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ の3成分系として表すことができる。すなわち、チタン磁鉄鉱およびフェロチタン鉄鉱の組成はそれぞれ $\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 線上の点および $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{FeTiO}_3$ 線上の点で表されることになる。

図3.2.3.1に様々な砂鉄の組成をプロットした。図中B, A+B, D+Rなどのグループはそれぞれ玄武岩, 玄武岩+安山岩, 石英安山岩+花崗岩を母岩とするものである。これから実際の砂鉄の大半はチタン磁鉄鉱型か, チタン磁鉄鉱+チタン鉄鉱の離溶共生型(高温では1相をなしていた固溶体が低温で不安定になり2相の固溶体に分離したもの)に属し, フェロチタン鉄鉱が単独で存在している例は少ないことがわかる。また, 図3.2.2.1は $B \rightarrow A+B \rightarrow D+R$ と母岩が塩基性から酸性側に推移するにつれて TiO_2 含有量が低下する傾向を示している。 TiO_2 含有量は, 一般的にわが国に産する砂鉄は, 2~10%の TiO_2 を含むものが多い。また, 砂鉄は TiO_2 の他に少量の V_2O_5 , MnO を含む場合がある。

本邦に産する砂鉄は, おおよそ次の3つのタイプに分類できる。すなわち, 固溶体構造を持つものとしてマグネタイト-ウルボスピネル固溶体(チタン磁鉄鉱), イルメナイト-ヘマタイト固溶体(チタン鉄鉱), その両者が共生する離溶構造を持つ砂鉄である。これら砂鉄の代表的なものとして, 宮城県本吉町で採取したチタン磁鉄鉱系の砂鉄(写真3.2.3.1), 滋賀県大津市袴腰山麓の風化した花崗岩から採取した, フェロチタン鉄鉱系の砂鉄(写真3.2.3.2), 兵庫県高保木遺跡⁴⁾で採取した離溶共生型(写真3.2.3.3)があげられる。

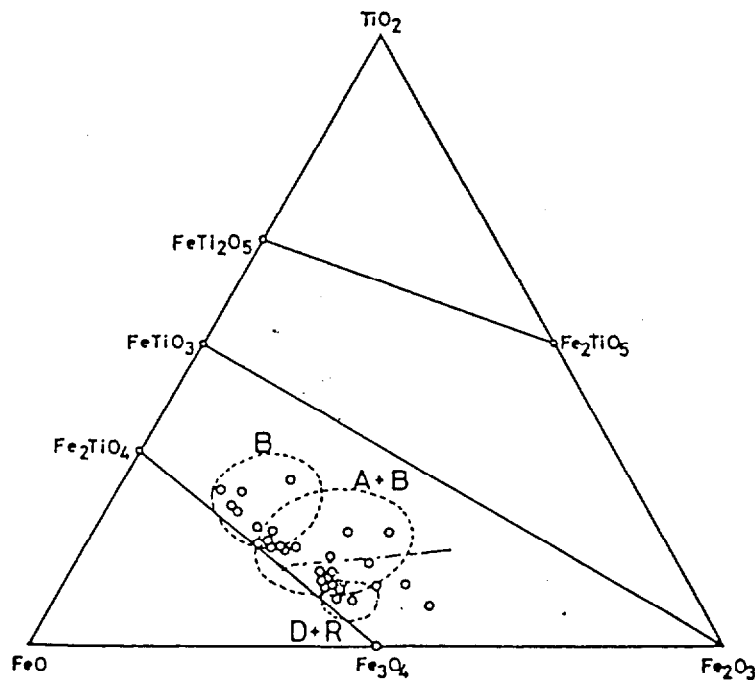


図 3.2.3.1 火成岩中の $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系の酸化物鉱物の分布

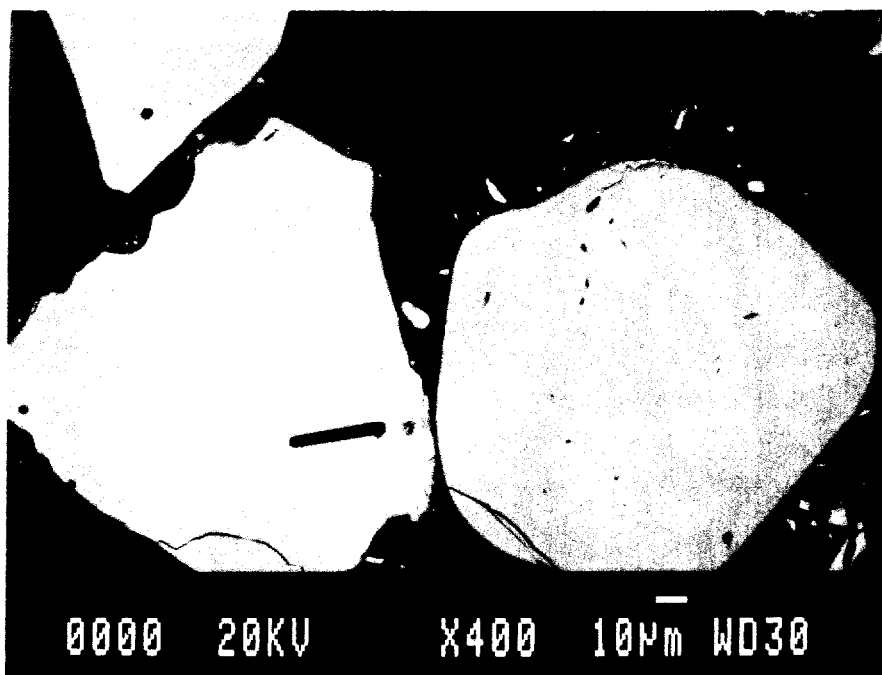
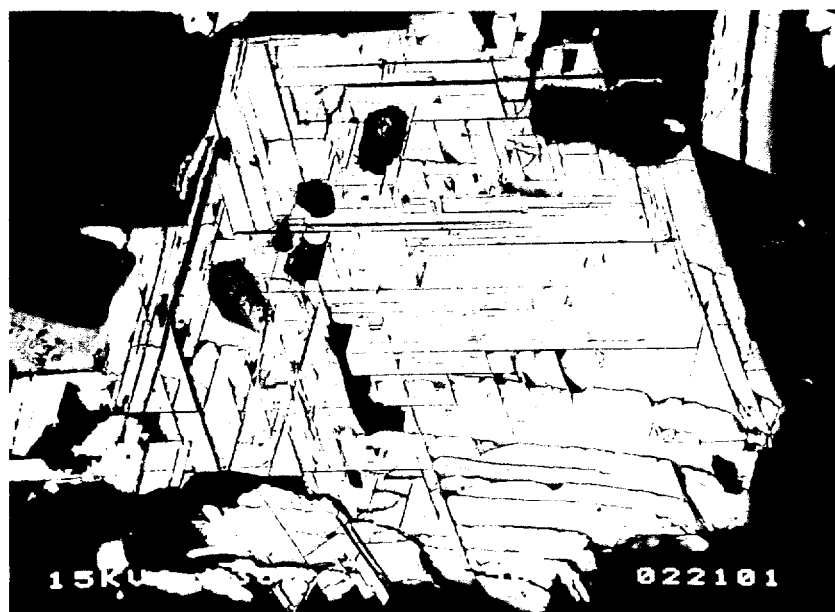


写真3. 2. 3. 1チタン磁鉄鉱系の砂鉄（宮城県本吉町で採取）



50 µm

写真3. 2. 3. 2離溶共生型の砂鉄（兵庫県千種川で採取）

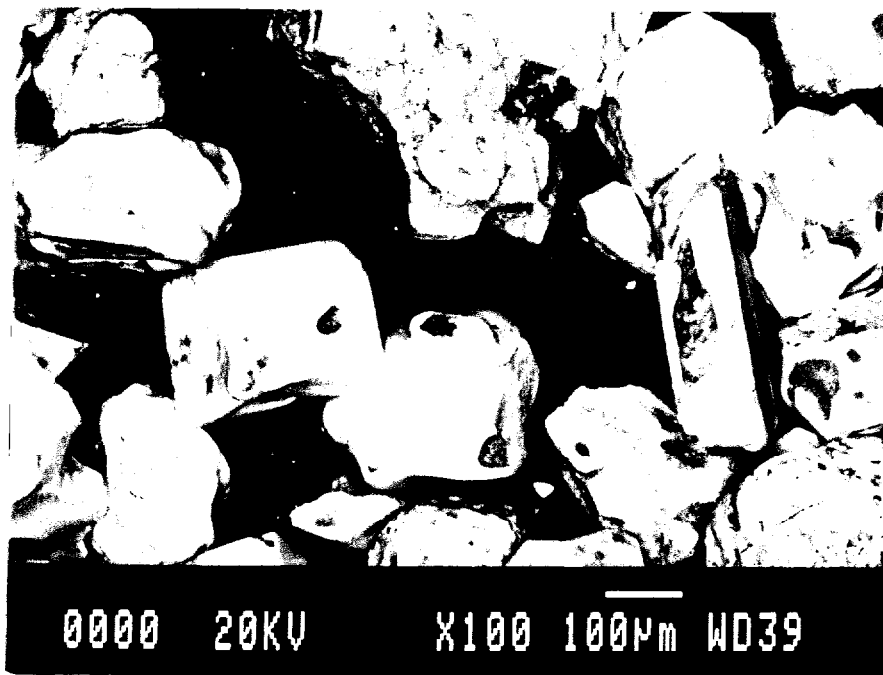


写真 3.2.3.3 チタン鉄鉱系の砂鉄（滋賀県南郷町で採取）

なお、近世においては、砂鉄の品質上の分類として、酸性母岩に伴う砂鉄を真砂（まさ）、塩基性母岩に伴う砂鉄を赤目（あこめ）と呼称した。真砂砂鉄は中国山脈の北側鳥取県日野郡、島根県仁多郡などに産し、チタンやリンなどの不純物が少なく、良質の鋼を得る原料として古来より重用されてきたが、産出量はあまり多くない。これに対して赤目砂鉄は、広島県、岡山県など中国地方南部に多く産することで有名であり、わが国に産出する砂鉄の多くは赤目系の塩基性砂鉄である。真砂砂鉄と赤目砂鉄を結晶鉱物学的にみると、前者ではチタン磁鉄鉱を主体とし、後者はチタン磁鉄鉱とフェロチタン鉄鉱を含む。色調は真砂が黒色、赤目はやや赤味をおびている。乳鉢で微粉末にすると赤目砂鉄はヘマタイト特有の赤紫色を呈する。さらに、砂鉄は山砂鉄、川砂鉄、浜砂鉄の3種に分類される場合があり、この順にしたがって砂鉄に含まれる TiO_2 の量が増加する傾向がある。これは、砂鉄が河川で水簸され、上流では比重の大きい砂鉄（チタン磁鉄鉱を主成分とする）が、下流には比重の小さい砂鉄（フェロチタン鉄鉱を含む）がより多く堆積することによる。

2. 4 砂鉄製錬滓の鉱物組成

2. 4. 1 尾崎前山遺跡

尾崎前山遺跡の製鉄炉付近で採取された鉄滓の分析結果の一例は表3.2.4.1と3.2.4.2のとおりであった。表中OM-1シリーズは製錬鉄滓のX線回折分析結果である。ファヤライト（F）とウルボスピネル（U）および少量のウスタイト（W, FeO）などの鉱物成分を含んでいる。また、OM-2シリーズの試料は工房址で採取された鉄滓で、鍛冶滓と考えられるもののX線回折分析結果である。製錬鉄滓に比べファヤライト、ウルボスピネルは少なく、マ

グネタイト (Fe_3O_4) および錆であるゲーサイト ($\text{FeO}(\text{OH})$) などの鉱物成分を含んでおり、明らかに製錬滓とは異なった鉱物成分からなっている。なお、工房址周辺部で採取した黒褐色の鉄滓は、製錬滓と同様の X 線回折分析結果を示した。さらに OM-3 シリーズは木炭置き場周辺で採取した赤錆色の鉄滓の X 線回折分析結果である。

表 3.2.4.1 尾崎前山遺跡出土鉄滓の化学組成

試料採取地	試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O
製錬炉周辺 採取の鉄滓	OM1-1	21.5	8.8	5.6	54.0	4.7	3.1	0.5
	OM1-2	23.0	9.4	6.2	48.6	4.7	4.8	0.8
	OM1-3	16.5	12.4	5.5	56.9	3.4	2.7	0.5
	OM1-4	18.2	9.0	5.4	57.4	3.4	3.9	0.6
	OM1-5	22.7	8.3	5.0	51.4	6.8	3.9	0.5
	OM1-6	20.2	11.0	5.8	51.5	5.4	3.2	0.5
工房址周辺 採取の鉄滓	OM2-1	10.7	4.6	4.2	75.2	2.2	1.6	0.2
	OM2-2	10.9	4.2	4.0	76.6	1.7	1.6	0.2
	OM2-3	16.1	8.4	5.3	61.4	4.3	1.6	0.4
	OM2-4	5.7	1.3	2.1	88.7	0.9	1.1	0.2
	OM2-5	6.3	0.9	2.9	88.8	0.5	0.4	0.1
	OM2-6	9.2	2.4	3.7	81.7	1.1	1.3	0.2
	OM2-7	23.3	11.0	6.4	46.8	6.1	3.9	0.8
木炭置き場 周辺採取の 赤錆鉄滓	OM3-1	15.4	4.9	5.0	70.7	1.4	0.9	0.2
	OM3-2	17.2	4.8	4.9	65.7	3.0	2.1	0.3
	OM3-3	18.4	2.9	5.3	71.1	1.0	0.5	0.3

表3.2.4.2尾崎前山遺跡出土鉄滓の鉱物組成

試料番号	鉱物組成
OM1-1	ウスタイト, ウルボスピネル, ファヤライト
OM1-2	ウルボスピネル, ファヤライト
OM1-3	ウルボスピネル, ファヤライト
OM2-1	ウスタイト, ウルボスピネル, ファヤライト, マグネタイト
OM2-2	ウスタイト, ウルボスピネル, ファヤライト, マグネタイト
OM2-3	ウスタイト, マグネタイト, ゲーサイト, レピドクロサイト
OM2-4	ウスタイト, マグネタイト, ゲーサイト, レピドクロサイト
OM3-1	マグネタイト, ゲーサイト, ウルボスピネル,
OM3-2	ウスタイト, マグネタイト, ゲーサイト, ウルボスピネル
OM3-3	マグネタイト, ゲーサイト, ウルボスピネル

2. 4. 2 ゴマンクボ遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.3, 炉材試料については表3.2.4.4の通りであった.

表3.2.4.3 ゴマンクボ遺跡出土鉄滓の鉱物組成

試料番号	鉱物組成
IM-62	フェロシュードブルカイト
IM-69	フェロシュードブルカイト
IM-09	フェロシュードブルカイト, ペロブスカイト
IM-61	フェロシュードブルカイト
IM-76	フェロシュードブルカイト, イルミナイト
IM-02	フェロシュードブルカイト
IM-75	フェロシュードブルカイト, イルミナイト
IM-06	フェロシュードブルカイト, イルミナイト, グラファイト
IM-03	フェロシュードブルカイト
IM-01	フェロシュードブルカイト, イルミナイト
IM-74	フェロシュードブルカイト, α -石英
IM-21	ウルボスピネル
IM-63	ウルボスピネル
IM-71	イルミナイト, ウルボスピネル
IM-65	ウルボスピネル
IM-78	ウルボスピネル
IM-10	ウルボスピネル
IM-77	ウルボスピネル, イルミナイト
IM-66	ウルボスピネル
IM-67	ウルボスピネル, イルミナイト
IM-17	マグネタイト, ファヤライト
IM-19	マグネタイト, ファヤライト
IM-18	マグネタイト, ファヤライト
IM-12	マグネタイト, ファヤライト
MHG-01	フェロシュードブルカイト, ペロブスカイト
MHG-03	フェロシュードブルカイト, マグネタイト
MHG-04	フェロシュードブルカイト, ペロブスカイト, α -石英
MHG-09	フェロシュードブルカイト, ペロブスカイト
MHG-12	フェロシュードブルカイト, マグネタイト
MHG-18	マグネタイト, ファヤライト
MHG-15	ウルボスピネル, イルミナイト

表3.2.4.4ゴマंकボ遺跡出土炉材の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
IM-11	α -石英, その他
IM-13	金属鉄, 灰白色粒
IM-14	不明
IM-64	α -石英
MHG-04	α -石英, その他
MHG-17	α -石英
MHG-19	α -石英
MHG-05	α -石英
MHG-06(3)	α -石英, その他
MHG-06(4)	α -石英, その他
MHG-33	α -石英, その他
MHG-34	α -石英
MHG-35	α -石英

2. 4. 3 月山遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.5の通りであった。

以上発掘調査を行った3遺跡の分析結果から次のことが明かとなった。

上記3遺跡はいずれも砂鉄製錬が行われており、出発物質である砂鉄に含まれるTi-Fe鉱物が、製錬（還元）プロセスにおいて、その還元条件（温度と酸素分圧）により、それぞれに異なった結晶鉱物として鉄滓中に残留する。これは、砂鉄製錬滓の大きな特徴である。

表3.2.4.5月山遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
GKT02	ウルボスピネル, ファヤライト
GKT04	ウルボスピネル, ファヤライト
GKT05	ウルボスピネル, ファヤライト
GKT06	ウルボスピネル, ファヤライト
GKT08	ウルボスピネル, ファヤライト, イルメナイト
GKT09	ウルボスピネル, ファヤライト, イルメナイト
GKT11	ウルボスピネル, ファヤライト

2. 4. 4 栗田かなくそ山遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.6の通りであった。

表 3.2.4.6 栗田かなくそ山遺跡出土遺物の鉱物組成

資料番号	資料名	出土地点	結 晶 鉱 物
1	鋼	炉 d 区	パーライト, セメントライト
2	鉄滓	炉 d 区	ウルボスピネル, ファヤライト
3	鋼	炉 II 区	パーライト
4	鉄滓	炉 II 区	ウルボスピネル, ファヤライト
5	鉄滓	排滓溝	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
6	炉壁	排滓溝	イルミナイト
7	鉄滓	排滓溝	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
8	鉄滓	排滓溝	フェロシュードブルカイト
9	鉄滓	炉内	ウルボスピネル, ファヤライト
10	鉄滓	炉内	ウルボスピネル, イルミナイト
11	鉄滓	炉内	ウルボスピネル, ファヤライト
13	鉄滓	東端突出部	結晶物質なし
14	鉄滓	東端突出部	ウルボスピネル, 僅かなイルミナイト, ファヤライト
15	鉄滓	東端突出部	ウルボスピネル, ファヤライト
16	鉄滓	東端突出部	ウルボスピネル, ファヤライト
17	鉄滓	炉内	イルミナイト
18	鉄滓	6号竪穴	イルミナイト
19	鉄滓	6号竪穴	ウルボスピネル, ファヤライト
20	鉄滓	6号竪穴	ウルボスピネル, ファヤライト
21	鉄滓	6号竪穴床No.4	イルミナイト
22	鉄滓	6号竪穴床No.6	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
23	炉壁	6号竪穴床No.2	結晶物質無し
24	鉄滓	6号竪穴床No.2	ウルボスピネル, ファヤライト
25	鉄滓	6号竪穴床No.2	ウルボスピネル, ファヤライト
26	鉄滓	6号竪穴床No.4	イルミナイト
27	鉄滓	5号住居 d 区	ウルボスピネル, ファヤライト
28	鉄滓	5号住居 d 区	ウルボスピネル, ファヤライト
29	炉壁	5号住居 d 区	イルミナイト
31	鉄滓	5号住居 a 区	ウルボスピネル, 僅かなイルミナイト, ファヤライト
32	鉄滓	5号住居床	ウルボスピネル, 僅かなイルミナイト, ファヤライト

2. 4. 5 安行猿貝北遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.7の通りであった。

表 3.2.4.7 安行猿貝北遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
SK01	ウルボスピネル, ファヤライト
SK02	ウルボスピネル, FeCO ₃ (炭酸鉄)
SK03	ウルボスピネル, ヘマタイト, FeO-OH (水酸化鉄)
SK04	ウルボスピネル, ファヤライト
SK05	ウルボスピネル, ファヤライト
SK06	ウルボスピネル, FeCO ₃ (炭酸鉄), FeO-OH (水酸化鉄)

2. 4. 6 保光たたら遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.8の通りであった。

表 3.2.4.8 保光たたら, 砂鉄と出土鉄滓の鉱物組成

試料	資料番号	結晶鉱物	
砂鉄	HTY-IS	マグネタイト, ヘマタイト	
製錬滓	HTY-1	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-2	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-4	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-5	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-6	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-7	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-8	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-9	ウルボスピネル, ファヤライト	
	HTY-10	ウルボスピネル, ファヤライト, イルミナイト	
	HTY-12	ウルボスピネル, ファヤライト	
	鍛冶滓	HTY-3	α-石英, マグネタイト
		HTY-11	α-石英, マグネタイト
HTY-13		ファヤライト, ウスタイト, マグネタイト	
HTY-14		ファヤライト, α-石英, マグネタイト	
HTY-15		ファヤライト, α-石英, マグネタイト	
HTY-16		ファヤライト, ウスタイト	
HTY-17		マグネタイト, ゲーサイト, レピドクロサイト	
HTY-18		マグネタイト	

2. 4. 7 小半弓遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.9の通りであった。

表 3.2.4.9 小半弓遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	資料採取地点	結 晶 鉱 物
FKK07	本床周辺	ウルボスピネル, イルミナイト
FKK08	本床周辺	ウルボスピネル, イルミナイト
FKK09	本床周辺	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK10	本床周辺	イルミナイト, フェロシュードブルカイト, ファヤライト
FKK11	本床周辺	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK12	本床周辺	イルミナイト, フェロシュードブルカイト, ファヤライト
FKK13	湯だまり	ウルボスピネル, ファヤライト
FKK14	湯だまり	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK15	湯 道	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK19	鉄滓捨て場	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK20	鉄滓捨て場	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト
FKK21	鉄滓捨て場	イルミナイト, フェロシュードブルカイト, ファヤライト
FKK22	鉄滓捨て場	ウルボスピネル, イルミナイト, ファヤライト

2. 4. 8 堪忍沢遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.10の通りであった。

表 3.2.4.10 堪忍沢遺跡遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
KNZ01	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ04	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ05	ウルボスピネル, ファヤライト, イルミナイト
KNZ06	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ09	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ10	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ11	ウスタイト, ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ13	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ14	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ16	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ19	ウルボスピネル, ファヤライト
KNZ20	ウルボスピネル, ファヤライト, イルミナイト

2. 4. 9 高保木遺跡

本遺跡出土鉄滓の鉱物組成は表3.2.4.11の通りであった。

表 3.2.4.11 兵庫県高保木遺跡出土鉄滓中の鉱物組成

試料番号	鉱物組成
HY-01	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-02	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-03	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-04	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-05	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-06	ファヤライト, ウルボスピネル
HY-07	ウスタイト, ファヤライト, ウルボスピネル
HY-08	ウスタイト, ファヤライト, ウルボスピネル

2. 4. 10 富士見台遺跡⁴⁰⁾

本遺跡からは砂鉄, 鉄滓, あるいは鉄器などの製鉄関連遺物が出土したが, ここでは焼結砂鉄分析例をあげる。写真3.2.4.1は製鉄炉内に残留していた焼結砂鉄の一部である。これらの粒子はおおよそ100 μ m粒径のものが多く, 砂鉄粒子間の境界もはっきりしている。この写真から, 砂鉄が固体の状態のまま反応進行した様子が観察できる。この砂鉄は製鉄炉内のある温度とガス組成(CO/CO₂)のもとで還元されたが, 金属鉄が出来る一歩手前の段階で反応が停止し, その後炉内で冷却し, 残留したものとみられる。写真3.2.4.2は写真3.2.4.1の部分を拡大したものである。各々の粒子の中心部に集まった灰色の斑点状の物質(B点)は, 19%程度のTiO₂を含むFeO-TiO₂鉱物である。そしてB点とほぼ同じ組成を示した個所はC点であり, ウルボスピネル近似の組成である。また, 斑点状の物質と共存するやや白色の部分は点Aと同様の値を示した。X線回折分析結果から, これらはウスタイトと考えられる。さらに, D点などのいちばん暗い灰色の不定型物質は, ファヤライト(Fe₂SiO₄)近似の物質である。

この試料は, 上記結晶鉱物の生成/晶出状況から, 1000℃付近まで達したのち, 炉内に残留したものと推定できる。

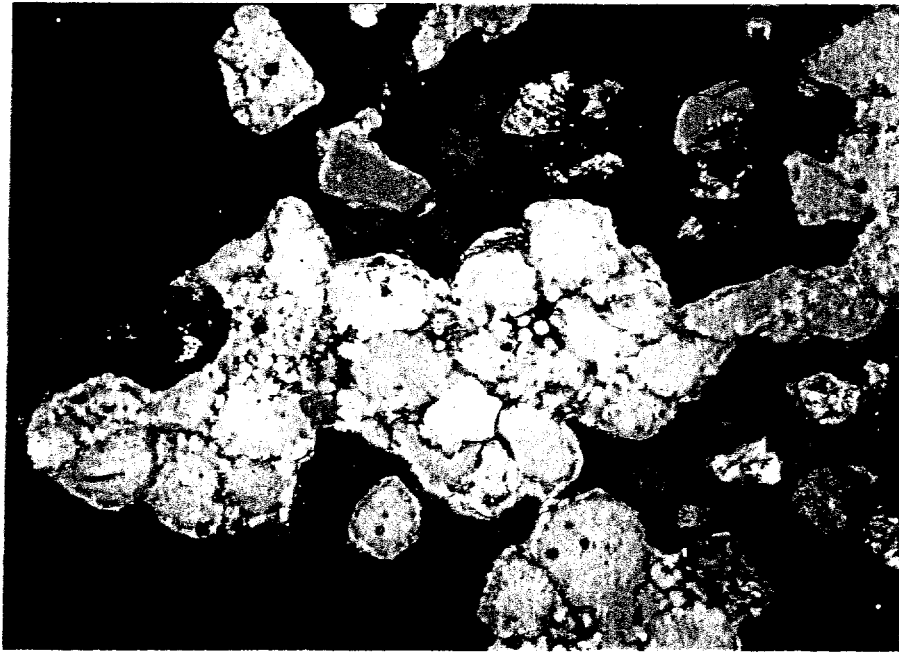


写真 3.1.4.1 富士見台遺跡出土の焼結砂鉄 200 μ m

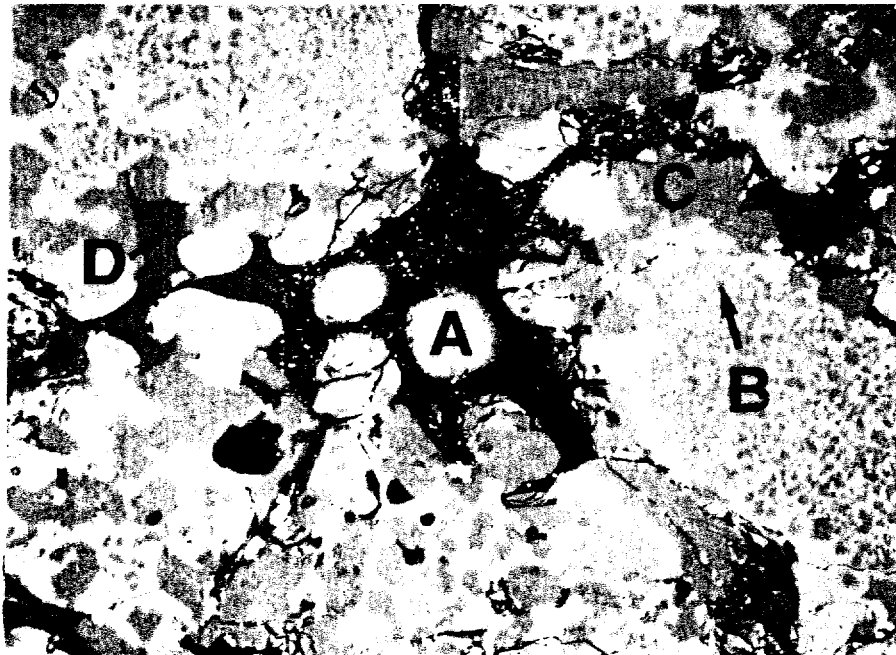


写真 3.1.4.2 富士見台遺跡出土の焼結砂鉄
写真 3.1.4.1 の部分を拡大したもの

2. 5 鍛冶（精練）遺跡

2. 5. 1 鳩山窯址群遺跡

鉄滓の鉱物組成分析の結果は、表3.2.5.1のようであり、以下に示したように4種に分類できる。

1. ファヤライト+ウスタイトタイプ

No.1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 22, 24, 26 で、24試料中 16試料がここに属す。

2. ファヤライト+FeO-TiO₂鉱物を含むウスタイトタイプ

No.15, 18, 23, 32 がここに属し、鉄滓中のウスタイトには写真3.2.5.1のようなウルボスピネルが認められる。

3. ファヤライト+ウスタイト+ウルボスピネルタイプ

試料 No.2, 3, 11 がここに属する。

4. ファヤライト+ウルボスピネルタイプ

試料 No.25がここに属する。

椀型滓に存在した結晶鉱物のウルボスピネルのTiO₂/V₂O₅値は、試料によってかなり相違が認められる。この点に関しては、鉄地金の搬入経路が複数であった可能性もある。

鉄鉄滓鉱物組成・化学組成分析を通じて次の諸点を明らかにすることができた。

1. 写真3.2.5.1と3.2.5.2は第3グループに属する試料の電頭組織で、角状の結晶鉱物はウルボスピネルであり、砂鉄の主要鉱物であるチタン磁鉄鉱に由来すると考えられる。この組織は写真3.2.5.4のように第4グループの試料でもみられる。この他に第2グループでは前述のように、ウスタイト中にFeO-TiO₂鉱物が未分離状態で存在しており、この鉄滓も同様に砂鉄起源とみなせる。試料 No.25の鉄滓は鍛冶（精練）工程の生成物とは考えにくい。この試料は、おそらく、近傍の製錬場で作られた鉄（鋼）塊に付着していたものであり、柳原（B-17号住居 8C.1/4）に持ち込まれたのち鉄塊からはずされ、出土地点に残留したものと思われる。
2. 今回の分析試料中には金属鉄を含む鉄滓は8点存在していた。写真3.2.5.3は試料SH-4（柳原 A-26号住居 8C.3/4）中に現れた金属鉄であるが、細長い亀裂が数条認められる。この亀裂は金属鉄を鍛造する際にできる痕と思われ、柳原 A-26号住居は小鍛冶の作業場の一つであって、この集落に必要な鉄器を製作し、供給していたものと考えられる。

表 3.2.5.1 鳩山窯址群IV遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
SH-1	ファヤライト, ウスタイト
SH-2	ファヤライト, ウスタイト, ウルボスピネル
SH-3	ファヤライト, ウスタイト, ウルボスピネル
SH-4	ファヤライト, ウスタイト
SH-5	ファヤライト, ウスタイト
SH-6	ファヤライト, ウスタイト
SH-8	ファヤライト, ウスタイト
SH-9	ファヤライト, ウスタイト
SH-10	ファヤライト, ウスタイト
SH-11	ファヤライト, ウスタイト, ウルボスピネル
SH-12	ファヤライト, ウスタイト
SH-13	ファヤライト, ウスタイト
SH-14	ファヤライト, ウスタイト
SH-15	ファヤライト, ウスタイト
SH-17	ファヤライト, ウスタイト
SH-18	ファヤライト, ウスタイト
SH-19	ファヤライト, ウスタイト
SH-20	ファヤライト, ウスタイト
SH-22	ファヤライト, ウスタイト
SH-23	ファヤライト, ウスタイト
SH-24	ファヤライト, ウスタイト
SH-25	ファヤライト, ウルボスピネル
SH-26	ファヤライト, ウスタイト
SH-32	ファヤライト, ウスタイト

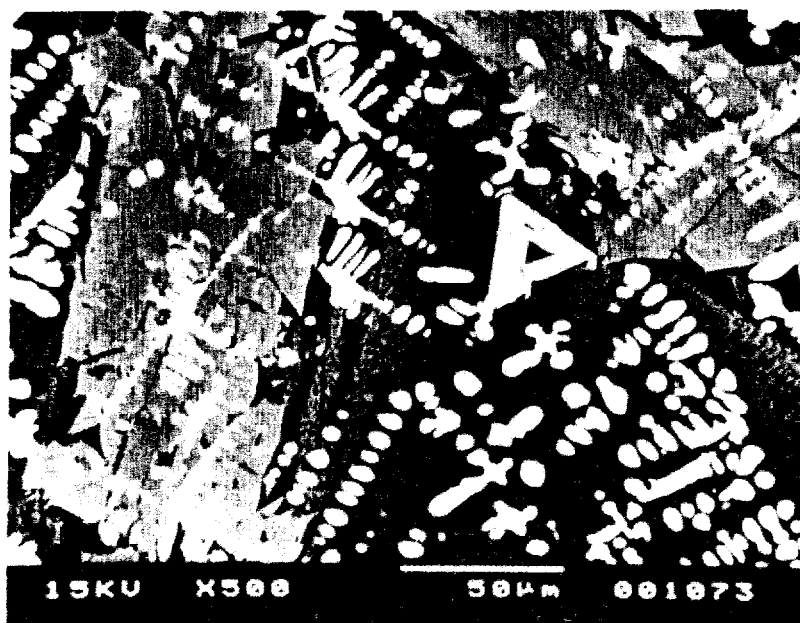


写真 3.2.5.1 鳩山遺跡出土鉄滓 (第3グループ)



写真 3.2.5.2 鳩山遺跡出土鉄滓（第3グループ）

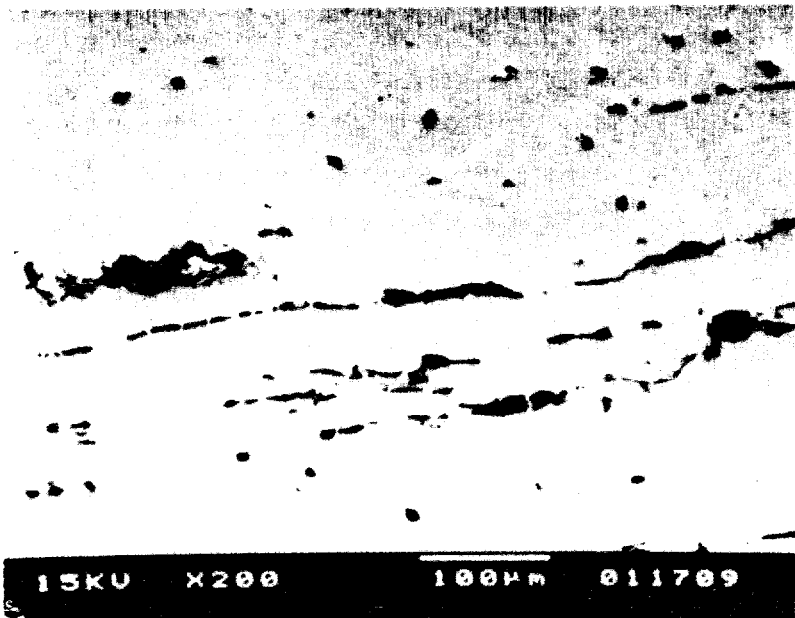


写真 3.2.5.3 鳩山遺跡出土鉄塊



写真 3.2.5.4 鳩山遺跡出土鉄滓

2. 5. 2 下本谷遺跡⁴¹⁾

本遺跡については鉄器（和釘）と鉄滓についての分析を行った。

写真3.2.5.5は和釘中に存在した介在物であり，形状は細長く長径はおよそ $250\mu\text{m}$ 程度である。結晶性物質のうち，AとBについて分析を行い，その結果は表3.2.5.2のようであった。分析結果から，AおよびBは $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物であり，AおよびBより輝度の高い球状の結晶物質はウスタイトである。つぎに，同遺跡から出土した鍛冶滓に含まれていた結晶鉱物は写真3.2.5.6のようであった。写真から，ファヤライト，ウスタイトとともに角状の結晶物質C，Dが認められた。この角状の結晶性物質は，鉄器中に認められた介在物A，Bに近い値を示していた。特にチタン，バナジウムの値は近似していた。以上から，下本谷遺跡出土の鉄器は，同遺跡内で製作されたと考えられる。

表 3.2.5.2 下本谷遺跡出土鉄器，鉄滓中鉱物の化学組成

		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	K_2O	V_2O_5	P_2O_5
鉄器	A	0.0	20.7	3.8	63.6	1.4	0.6	0.3	0.02	9.7	0.0
	B	0.2	21.4	3.8	63.6	0.9	4.2	0.0	0.0	2.3	0.0
鉄滓	C	0.6	18.3	8.2	65.1	0.4	4.6	0.0	0.0	3.0	0.0
	D	0.6	17.4	9.4	63.3	0.5	4.8	0.0	0.0	4.0	0.0

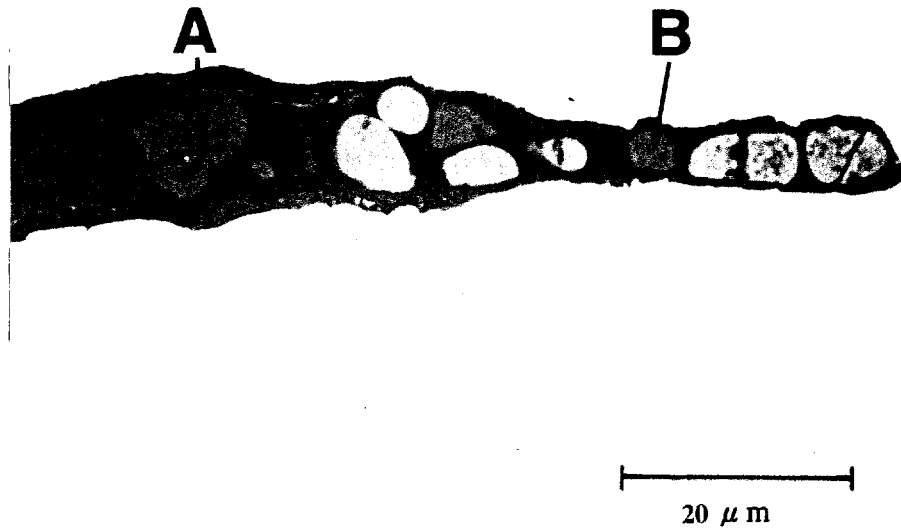


写真 3.2.5.5 下本谷遺跡遺跡出土鉄器中の介在物

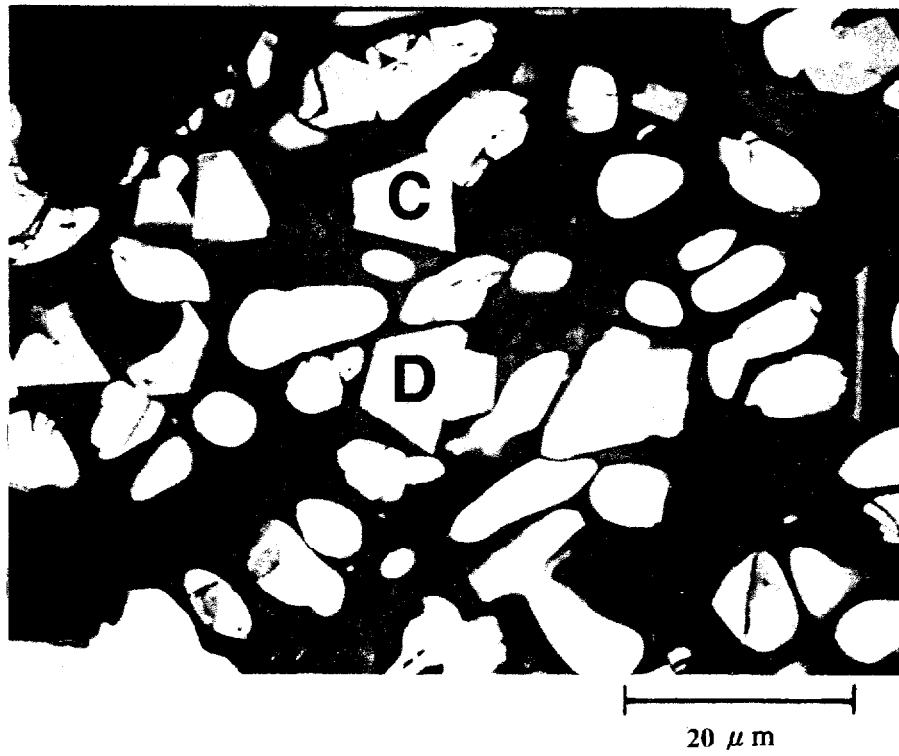


写真 3.2.5.6 下本谷遺跡遺跡出土鉄滓中の結晶鉱物

2. 5. 3 平遺跡⁴²⁾

本遺跡については鉄器と鉄滓についての分析を行った。

鉄器中に介在していた結晶物質は写真3.2.5.7のようであった。先の下本谷遺跡出土鉄器の例とは異なり、介在物は鍛造によって扁平な形状を呈している。分析結果より、A部分からは硫黄 (S) , マンガン (Mn) のほかに少量の鉄 (Fe) が検出され、これは硫化マンガン (MnS) と思われる。つぎに、同遺跡から採取した鍛冶滓の化学組成分析によれば、酸化チタン (TiO_2) が約2%含まれており、砂鉄製錬由来である。写真3.2.5.8から、鍛冶滓に含まれる結晶鉱物はファヤライトとウスタイトであるが、わずかに角状をしたウルボスピネル (B) が認められた。また、平遺跡出土の鍛冶滓からは、硫黄やマンガンを含む物質は検出されなかった。

したがって、平遺跡出土の鉄器は、外部から持ち込まれたものとの判断した。

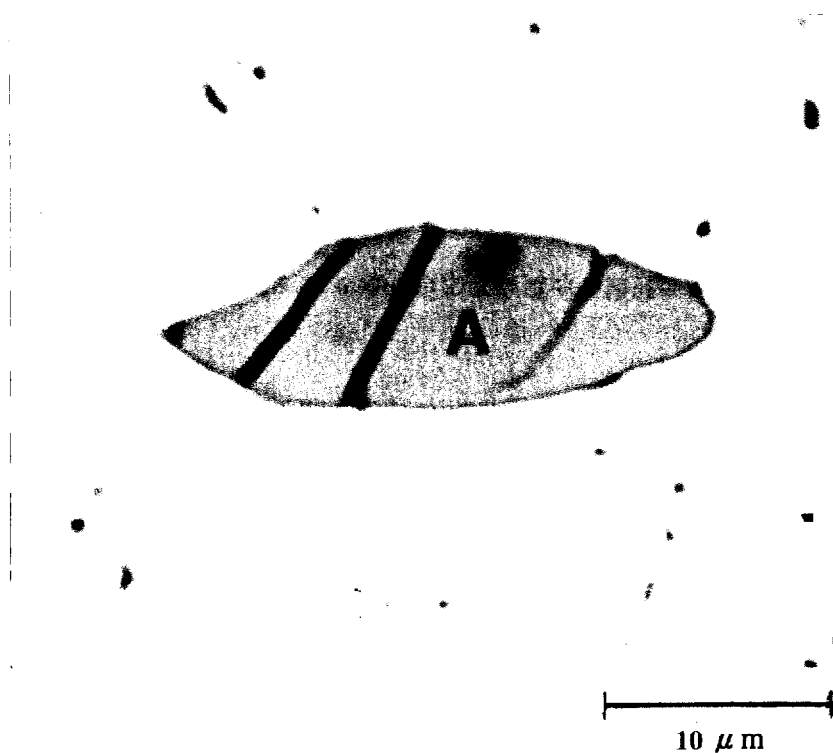


写真 3.2.5.5 平遺跡遺跡出土鉄器中の介在物

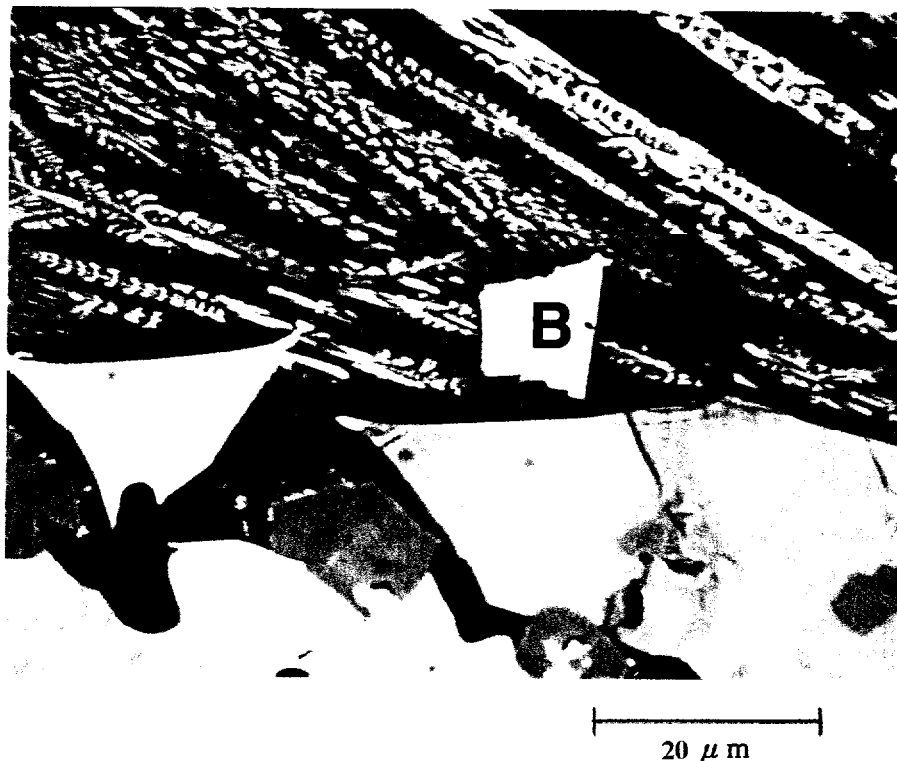


写真 3.2.5.6 平遺跡出土鉄滓中の結晶鉱物

2. 5. 4 内場山城跡遺跡⁽³⁾

分析の結果から鉄滓試料は、おおよそつぎの3種に分類される。

第1群：Fe₂O₃が比較的高く、結晶鉱物としてはファヤライトのほかにウスタイトなどの鉄酸化物鉱物を含むもので、試料No. HN. 2, 4, 5がこれに属する。

第2群：結晶鉱物がファヤライトのみからなる試料で、試料No. HN. 3, 7がこれに属する。

第3群：TiO₂を1.78～2.60%含むもので、HN-6, 8がこれに属する。

分析を行った試料は、いずれも精練（鍛冶）プロセスによって生成した鉄滓とみられるが、第1群の鉄滓からは元となる鉱石が岩鉄、あるいは砂鉄であるかの区別はつかない。第2群に属するHN-7は、化学組成、鉱物組成のいずれも、岩鉄による製錬滓と同じような特徴を有している。これに対して、3群の鉄滓試料からは、ウルボスピネルが検出され、この試料は砂鉄製錬由来のものと見られる。

内場山城跡遺跡の場合は、1群と2群の鉄滓試料の由来を岩鉄とみることもできる。もし、岩鉄由来のものであるならば、14世紀代の日本では岩鉄製錬を行った可能性のある遺跡は皆無であるので、輸入された鉄地金を加工した、ということも考えておかななくてはならない。

遺跡試料の分析結果は表3.2.5.3の通りである。

表3.2.5.3内場山城跡遺跡出土鉄滓の鉱物組成

資料番号	鉱物組成
HN-02	ウスタイト, マグネタイト
HN-03	ファイアライト, 金属鉄
HN-04	ファイアライト, ウスタイト, ゲーサイト
HN-05	ファイアライト, ウスタイト
HN-06	ファイアライト, ウスタイト
HN-07	ファイアライト
HN-08	ファイアライト, ウスタイト, ウルボスピネル

上記鍛冶遺跡のすべてに椀型滓が出土し、鉄滓中からFeO-TiO₂鉱物が検出された。これらの遺跡では、砂鉄起源の素鉄（鋼あるいは銑）から、錬鉄や鋼を作る精練遺跡であったと見られる。

また、下本谷、平両遺跡出土鉄器の介在物は、下本谷遺跡の場合は鉄器と鉄滓にはTiO₂とV₂O₅に共通性が認められ、この鉄器が本遺跡で製作された可能性は高い。これに対して平遺跡の鉄器と鉄滓には全く共通するものがなく、おそらく、他の場所から本遺跡に持ち込まれたものとみてよい。

3. 製鉄プロセス論と遺跡試料分析結果の関連

本章では、上記の遺跡試料の分析結果を第2章で提示した製鉄プロセス論との関連を検討する。

3. 1 製鉄プロセスから見た鉄滓の検討

第2章で述べた製鉄プロセスとは、鉱石の製錬（鉱石の還元と脈石の分離除去）、そして製錬で得られた金属鉄を、所用の目的に応じた鉄素材に加工する精練（銑の脱炭と鋸中の介在物除去）の2つのプロセスから成り立つ。したがって、製鉄の各プロセスで生成した鉄滓には、いずれも鉱石中の脈石、炉材、そして酸化鉄などの成分が含まれることになる。以下、製鉄プロセスと遺跡試料分析結果との関連について検討する。

3. 1. 1 製錬プロセス

岩鉄製錬遺跡試料の化学組成分析結果から、使用された岩鉄（磁鉄鉱）に共生する脈石の各成分から、滋賀県下の湖南、湖西、湖北各地域のP₂O₅とCaOの依存性、あるいは広島県カナクロ谷遺跡のMnOについて、顕著な地域的偏差が存在することが明らかとなった。

また、砂鉄製錬遺跡鉄滓には、TiO₂が含有するという特徴を持つ。砂鉄中のTiO₂は前近代炉ではそのほぼ全量が鉄鉄滓移行するとみられるので、砂鉄から金属鉄が生成するためには、常に

$$\text{Ti/Fe(SG)} > \text{Ti/Fe(IS)} \quad (1)$$

という条件が必要である。砂鉄と鉄滓の化学組成分析から安行猿貝北、高保木、堪忍沢

(以上, 古代製錬遺跡), 保光たたら, 小半弓(以上, 近世製錬遺跡)の5遺跡について行ったが, いずれの遺跡試料も平均値としては $Ti/Fe(SG) > Ti/Fe(IS)$ が成り立つことから, この5遺跡はいずれも製錬遺跡である。しかし, 古代の砂鉄製錬滓の中の一部に, $Ti/Fe(SG) < Ti/Fe(IS)$ という試料もある。これは, 金属鉄が再酸化され, 鉄滓中に取り込まれた結果とみられる。砂鉄中の TiO_2 が鉄滓中に濃縮するという事は, 同時に金属鉄が生成することと同義であり, その濃縮の量が大きいほど金属鉄の生成量は大きい。

3. 1. 2 精練プロセス

本章では, 鍛冶(精練)遺跡として鳩山, 奈良地区遺跡群(I)受け地だいやま遺跡, 下本谷, 平遺, 内場山城跡, 保光たたらの6遺跡について鉄滓の分析を行った。これらの遺跡で出土したいずれの鉄滓にも $FeO-TiO_2$ 鉱物が含まれており, これらの鉄滓は砂鉄製錬起源のものとみられる。精練プロセスでは, 製錬プロセスで得られた銑の脱炭, 鋼や銑の介在物の除去が行われる。介在物の主要成分は $FeO, SiO_2, Al_2O_3, TiO_2$ の4成分である。また, このプロセスでは, 上記の介在物の他に, 金属鉄の一部が酸化されて FeO となり, 鉄滓中に残留する。次に, 介在物除去のプロセスについて考えてみる。鍛冶滓の成分のうち FeO を除き, $TiO_2 / (SiO_2 + Al_2O_3)$ 値 = a (以下 a) とする。このプロセスにおいて, $SiO_2-Al_2O_3$ 系鉱物を含む造滓剤が加わった場合, 製錬滓(a_0)と鍛冶滓(a_1)の関係は,

$$a_0 > a_1$$

(2)となる。保光たたら遺跡で製錬滓

と精練滓の分析値から相互の a を比較すると, 製錬滓の a 値は最大=5.6, 最小=3.1(平均 $a_0=4.4$), 精練滓のそれは最大 $a_1=114.1$, 最小 $a_1=39.1$ (平均 $a_1=62.7$)であり, 精練滓の a 値が高い値を示した。このことから, 介在物の除去には $SiO_2-Al_2O_3$ 系鉱物を含むなんらかの造滓剤が用いられたと判断される。また, 鳩山窯址群遺跡の場合は, 製錬滓の $a_0=1.8$, 鍛冶滓の平均 $a_1=33.1$ であり, 保光たたら遺跡の場合とほぼ同様の傾向を示している。そして製錬プロセスで使用された砂鉄の組成がわかれば, 砂鉄と鍛冶滓の Ti/Fe は

$$Ti/Fe(SG) < Ti/Fe(IS)$$

(3)という製錬プロセスのときは逆

の関係が成立たつ。例えば, 保光たたら遺跡のそれぞれの平均 Ti/Fe 値で見ると, 製錬滓(0.167) > 砂鉄(0.042) > 精練滓(0.008)という関係にある。

また, 鍛冶滓を顕微鏡で観察すると, 針状のファヤライトと繭玉状のウスタイトが認められる。ウスタイトは銑の一部が酸化したものであり, ファヤライトは, 鋼に付着していた介在物に含まれていたものと, 鋼や銑の一部が酸化されてウスタイトとなり, これが造滓剤の SiO_2 と反応して晶出したものである。また, この酸性ガス中で $FeO-TiO_2$ 鉱物の近傍に酸化鉄(FeO)が存在すれば, この $FeO-TiO_2$ 鉱物は先の還元プロセスとは逆の相転移が起こることがある。

3. 2 還元指数の提起

鉄の生産量の増大は, 一方では鉱石からより効率よく金属鉄を生成することであり, 他方では一操業サイクルで, より多くの金属鉄が生産されることによって実現できる。

ここで, 前者の鉱石からどれだけ金属鉄を生成する技術があったかを, 遺跡試料の分析をもとに, 検討を行う。岩鉄製錬については, 指標となる成分は今のところ見いだせていないが, 砂鉄製錬では TiO_2 が有効な指標成分となる。

砂鉄製錬の場合は、遺跡で採取した砂鉄と鉄滓の分析値から、砂鉄の全鉄量 (Total Fe wt%) を求め、この値を t とし、さらに砂鉄と鉄滓両者の組成から (Ti/Fe) が与えられれば、このときの金属鉄の生成量 (r) は

$$r = t \times \{ 1 - (Ti/Fe(IS) / Ti/Fe(SG)) \} \quad (4)$$

という式で求めることができる。ただし、鉄滓の分析値は試料を必ずしも十分に代表するものではないが、砂鉄と鉄滓の関係を見るとき、その一般的な傾向を求めることは可能である。すなわち、 r とは、鉄生産における経済的な概念である「歩留まり」とは異なるものであり、砂鉄製錬遺跡の技術的な水準を示す尺度となる。したがって、 r は砂鉄製錬を解析するために有効であり、 r を「還元指数」として把握することをここに提起する。

3. 3 製錬プロセスと製錬温度

本章で分析を行った鉄滓試料中の含まれる鉱物の組成は、次のようであった。岩鉄製錬滓の鉱物組成は、ファヤライトのみか、あるいは、ファヤライトに酸化鉄が含んでいる試料、砂鉄製錬滓は、岩鉄製錬滓の鉱物組成に加えて $FeO-TiO_2$ 鉱物を含むものとなる。

ここで、第2章に示した熱分析の結果と、遺跡試料の関係から遺跡の製錬温度の推定を行う。

3. 3. 1 岩鉄製錬の温度

まず、岩鉄による熱分析実験で確認した各温度帯に現れる結晶鉱物と、製錬遺跡試料の電子顕微鏡写真とを比較し、遺跡で実現した製錬温度の推定を行う。比較を行った試料は、木瓜原と後山畦倉遺跡のものである。

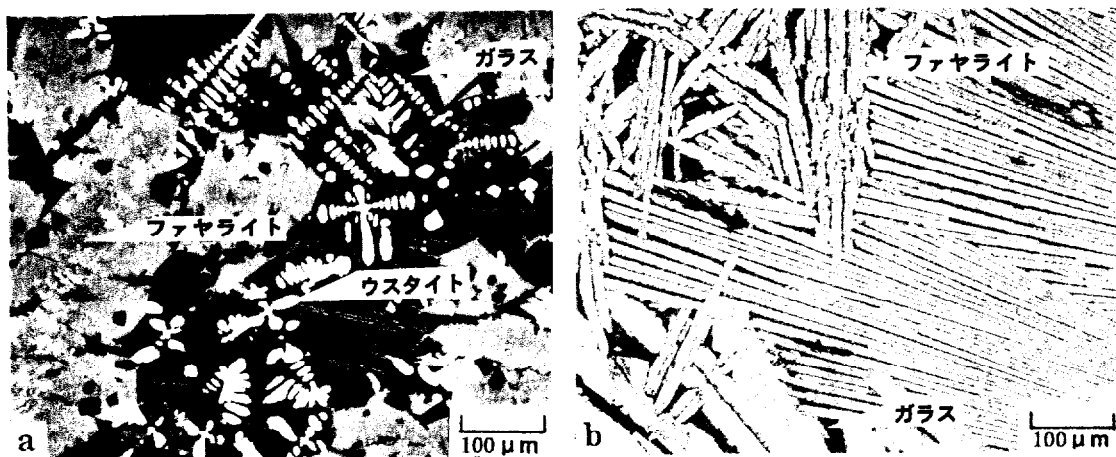


写真 3.3.1.1 岩鉄製錬の鉄滓に含まれる結晶鉱物

写真 a : 後山畦倉遺跡試料 (試料UYA01)

この試料は、ウスタイト、およびファヤライト、そしてガラスからなっている。ウスタイトの生成と、ファヤライトの晶出の程度から、この遺跡で操業された製錬温度はおよそ $1000^{\circ}C$ 以上 $1100^{\circ}C$ 付近であったと推定される

写真 b : 木瓜原遺跡試料 (試料BKW01)

この試料はファヤライトとガラスからなっている。晶出したファヤライトの体積率から、この遺跡で操業された製錬温度は1200℃付近に達したものと推定される。

賤山北川遺跡の、試料SYK01は、ファヤライトとわずかに酸化鉄を含んでいる。この試料も試料UAK01の場合と同様に、結晶鉱物相が生成／晶出する温度に大きな差はないと見てよい。また、滋賀県と広島県で資料採取を行い分析した鉄滓の鉱物組成は、そのすべてがファヤライトのみ、あるいはファヤライトとウスタイトからなるものであった。

したがって、岩鉄製錬遺跡は以下のように総括できる。

1. 酸化鉄（ウスタイト）は900℃～1200℃の温度範囲で生成する。
2. 流動状の鉄滓は、炉底温度が1000～1100℃付近で生成する。
3. 酸化鉄を含まず、ファヤライトの体積率の高い鉄滓は、1200℃付近で生成する。

以上から、滋賀県、および広島県で行われていた岩鉄製錬の温度範囲は900～1200℃の範囲にあったと考えられる。

3. 3. 2 砂鉄製錬の温度

つぎに、砂鉄製錬についても、鉄鉱石製錬の場合と同様な比較を行い、遺跡で実現した製錬温度の推定を行う。比較を行った行った試料は、富士見台、栗田かなくそ山、ゴマंकボの3遺跡の試料である。

砂鉄の還元プロセスでは、岩鉄製錬の場合と同様に、ファヤライトの晶出は製錬温度によって状態変化が起こるが、砂鉄には多かれ少なかれFeO-TiO₂鉱物が含まれており、この鉱物が製錬プロセスで相転移をしていく。したがって、この鉱物を同定することにより、遺跡の製錬温度の推定が可能となる。

写真c：富士見台遺跡試料（試料No. 欠落）

砂鉄の粒子に含まれるFeO-TiO₂鉱物（ウルボスピネル近似の鉱物）とウスタイトが分離しており、ファイアライトも晶出している。これは、熱分析結果の950℃より高い温度と推定される。しかし、ウスタイトの存在から、1100℃付近の温度で生成したものと見られる。

写真d：栗田かなくそ山遺跡試料（試料AK-19）

ウスタイトが金属鉄となり、FeO-TiO₂鉱物（ウルボスピネル）はバラバラの状態で存在し、ファヤライトも晶出していた。これは、熱分析結果の1100～1200℃の範囲のものと推定できる。

写真e：栗田かなくそ山遺跡試料（試料AK-04）

砂鉄粒子が還元され、イルメナイトと金属鉄が観察される。これは、写真dより高温で生成したものと見られ、また、熱分析結果のおよそ1200℃付近と対応するものと見られる。

写真f：ゴマंकボ遺跡試料（試料MHG-2）

フェロシュードブルカイトと金属鉄、そしてガラスが観察でき、この試料からファヤライトは検出されなかった。熱分析実験で、フェロシュードブルカイトは現れなかったが、推定温度は1200℃以上に達していたものと見られる。

写真g：ゴマंकボ遺跡試料（試料No. 欠落）

ガラス中にルチルが観察される。熱分析結果の1300℃付近のものと対応するものと見られる。

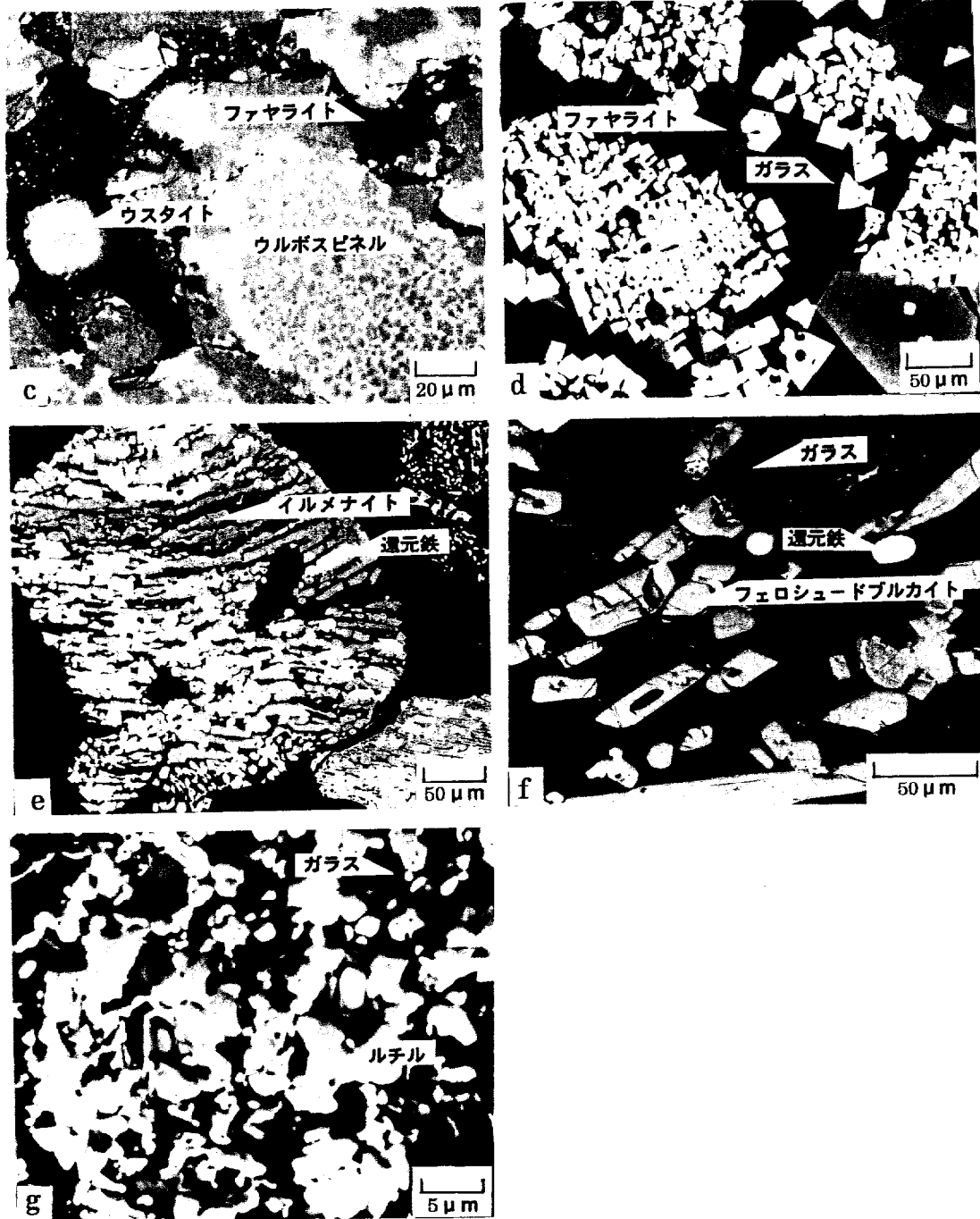


写真 3.3.1.2 砂鉄製錬の鉄滓に含まれる結晶鉱物

以上が熱分析の結果と遺跡試料の比較によって得られた遺跡の温度推定である。従来までに分析を行ってきた遺跡試料は、上記、写真の a ~ g でそのほとんどが網羅されるといってよい。したがって、この方法によって遺跡出土鉄滓の分析を行えば、おおよその遺跡の製錬温度が推定できると考える。

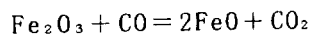
3. 4 製錬プロセス論の検討

前節では、第 2 章の熱分析実験の結果と遺跡試料との比較から、遺跡における製錬温度

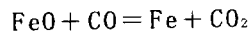
の推定を行い、上記の方法が一定程度の有効性があることを確認した。

本節では、第2章で述べた、製鉄プロセスを論が有効であるかどうか、遺跡試料の分析結果をもとに検証を行う。

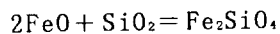
岩鉄による製錬遺跡の鉄滓では、ウスタイトやファヤライトが検出されている。ウスタイトは、酸化鉄鉱物が還元されることによって生成するのであるから、以下の反応式によっていたとみられる。すなわち、



(1)であり、さらに還元が進行すれば、

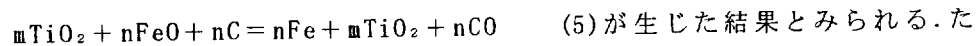
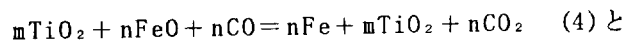


(2)となって金属鉄が生成する。また、鉄滓中に見られるファヤライトは、ノロの中に存在するFeOとSiO₂と反応し、冷却過程でファヤライトとなって晶出すると見られる。したがってこの反応式は、



(3)と考えられる。

また、砂鉄製錬遺跡の鉄滓では、ウスタイトとファヤライトについては上述の岩鉄による製錬滓の場合と同様であるが、相違点は鉄滓中にFeO-TiO₂鉱物が含まれていることである。したがって、砂鉄製錬における反応式は、上記の式(1)、(2)、(3)に加え、



が生じた結果とみられる。ただし、反応式(5)は、砂鉄と木炭が接触していても、その間にはごくわずかであっても気相が存在するので、見かけの直接反応ということになる。そして、この状態から温度がさらに上昇すれば、砂鉄中のFeO-TiO₂鉱物は、ウルボスピネル→イルメナイト→フェロシュードブルカイトの順に相転移し、最終的にはルチルが生成すると考えられる。こうして、還元作用を受けたFeO-TiO₂鉱物はFe(金属鉄)と分離し、鉄滓中に移行すると見られる。

さらに、鍛冶(精練)遺跡の鉄滓では、そのほとんどがウスタイトとファヤライトからなっており、その点だけで見ると岩鉄製錬滓の鉱物組成と近似している。しかし、両者に含有するウスタイトの量は、鍛冶(精練)滓の方が圧倒的に多い。例えば、内場山城跡遺跡の精練(鍛冶)鉄滓の場合は写真3.3.1.3のようであった。

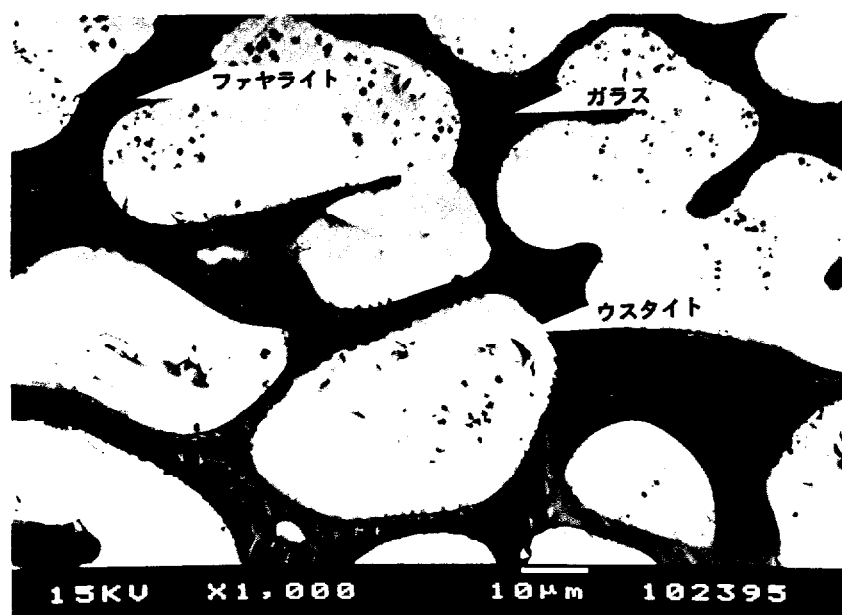


写真 3.3.1.3 精練(鍛冶)鉄滓に含まれる結晶鉱物

この場合のウスタイトは、金属鉄から介在物を除去する際に酸化焔によって金属鉄が酸化 ($\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$) されて生じたものと考えられる。また、ファヤライトは、介在物中のファヤライトと、新たに、このプロセスで生じたFeOと造滓剤との反応によって晶出したものと考えられる。

以上、遺跡出土鉄滓の鉱物・化学組成は、第2章で示したプロセス論によって、化学・鉱物両組成から、製錬遺跡、精練（鍛冶）遺跡で出土する鉄滓の生成を説明できる。したがって、本論で述べたプロセス論が一定程度有効であることが確認できた。

文献と註

- (1) 丸山竜平「滋賀県伊香郡木之本町古橋製鉄所跡概要」『日本前近代製鉄の東西比較研究』研究発表要旨 P54 1986年。
- (2) 高塚秀治「古橋遺跡出土鉄滓の分析結果」『日本前近代製鉄の東西比較研究』研究発表要旨 P55 1986年。
- (3) 高塚秀治「南郷遺跡出土鉄滓等の分析結果について」『南郷遺跡発掘調査報告書』滋賀県教育委員会・財団法人滋賀県文化財保護協会 PP18～21 1988年。
- (4) 桂敬 高塚秀治 福田豊彦「広島県と滋賀県における岩鉄製鉄—初期製鉄における資源の質をめぐって—」『日本歴史』第448号 PP1～25 吉川弘文館 1985年。
- (5) 大橋信弥「滋賀県草津市野路小野山遺跡の調査」『たたら研究』第25号 PP17～25 1983年。
- (6) 森浩一「滋賀県北牧野製鉄遺跡調査報告」『若狭・近江・讃岐・阿波における古代生産遺跡の調査（同志社大学文学部考古学調査報告第4冊）』同志社大学文学部文化学科 PP91～120 1971年。
- (7) 丸山竜平「近江の鉄」『古代近江の朝鮮』新人物往来者 P44 1984年。
- (8) 大道和人「岩鉄の採掘地と製鉄遺跡の関係について—滋賀県の事例を中心に—」『紀要』第9号抜粋 滋賀県文化財保護協会 PP164～184 1996年。
- (9) 桂敬 福田豊彦 高塚秀治「広島県カナクロ谷製鉄遺跡もマンガンを多量に含む鉄滓について」『たたら研究』第26号 PP34～40 1984年。
- (10) 潮見浩ら「カナクロ谷製鉄遺跡」広島大学文学部考古学研究室編『中国地方製鉄遺跡の研究』溪水社 PP40～56 1993年。
- (11) 高塚秀治ら「茨城県八千代町尾崎前山製鉄遺跡の発掘と研究」—日本製鉄史上の一研究—『人文論叢』No.4 PP147～164 1978年。
- (12) 高塚秀治ら「茨城県八千代町尾崎前山製鉄遺跡の発掘と研究」—第2報—『人文論叢』No.5 PP193～211 1979年。
- (13) 高塚秀治ら「茨城県八千代町尾崎前山製鉄遺跡の発掘と研究」—第3報—『人文論叢』No.6 PP269～286 1980年。
- (14) 桂敬 北山憲三 宗秀彦「茨城県結城郡八千代町尾崎前山遺跡より発掘された製鉄関連遺物の化学的研究」『尾崎前山』八千代町教育委員会 PP39～56 1981年。
- (15) 尾崎前山遺跡は東京工業大学製鉄史研究会、結城郡八千代町教育委員会、茨城県立歴史博物館による学術調査として、1978年～1980年にかけて発掘した製鉄遺跡である。

本遺跡の成立年代は、出土した土器の推定年代から9～10世紀に比定され、遺跡内から製鉄炉の他に住居趾、鍛冶工房址（2号住居）、木炭置き場、築炉用材とみられる粘土堆積場が検出され、製鉄から鍛冶工程を含む総合的な製鉄遺跡であった。遺跡が存する茨城県結城郡八千代町尾崎前山は、崎房新田と栗山新田飛び地に挟まれた台地である。この付近は、八千代町調整の1万分の1の地図によると、東を南流する鬼怒川が、古来流路を変えたため、西岸には沼沢湿地が入りこんでいた。享保7年（1722年）に江戸幕府は、財政立て直しの策として、新田開発を打ち出した。この期に尾崎村名主左平田、および在郷の名主たちは、飯沼の開発を幕府に進言し、享保9年、幕府はこの開発を援助し、第1期を享保13年に完成している。その後用水路の確保、河川の開鑿、湿地の開発などが継続して行われ、明治初期に完成した。この旧飯沼地方には左平田新田、五郎兵衛新田、孫兵衛新田など開発に努力した人たちの名前を冠した村名と、崎房新田、栗山新田など、地名を冠した村名が多くみられる。

- (16) 製鉄に用いた木炭の樹種は、地域の植生に規制されながら、一定の樹種選定を行った遺跡と、樹種選定を行った形跡がない遺跡が存在する。尾崎前山遺跡は前者の例であり、鑑定の結果いずれも櫟（くぬぎ）である。櫟は他の樹種に比べ硬くかつ重い。そして、火力が強くて火持ちもよいので製鉄用木炭として使われたと考えられる。他の遺跡では群馬県金井遺跡では樺（なら）と櫟、福岡県八熊遺跡では樫（かし）材が用いられており、比較的堅い材が選ばれていたように思える。これに対して後者の例として岡山県キナザコ遺跡では、ミズナラ、樺（けやき）、ミツマタ、ナラガシワ、ウリハラカエデ、ハリギリなどがあげられている。また、富山県東山Ⅱ遺跡においては硬度や発熱量の高いコナラ類、クヌギ類などのほか、炭質の劣るクマシデ属、サクラ属などを含む19の樹種が検出されている。島根県教育委員会が刊行した「菅谷鑪」によれば、「鉦時代の炭竈は大きなもので、幅一丈一尺に奥行き一丈五、六尺くらい、周囲は石垣で造り、底は少し掘って笹を敷き、その上に木材を敷き、底へ初めは松や雑木五尺四、五寸くらいに伐ったものを立て並べ、上え土をおいて天井を造り、五、六日焚くというやり方であった。だからできた製品もいまの家庭用炭に比べれば粗末なもので、形も整わず半焼けもあるというものだった。」とあり、製鉄用炭は松材を主とするものであった。

- (17) 本研究では遺跡の発掘で得られた試料から、炉材についての分析検討を行った。

尾崎前山、鹿子C、ゴマンクボ、大蔵池南遺跡から出土した炉壁の分析値をTable. 1に示すが、参考として羽口、布目瓦の化学組成も併せて表記する。またいずれの遺物も $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ の3成分系とみなせることから、その組成を関東ロームのそれとともにFig. 1に示した。製鉄炉材の構成は、砂と粘土の混合物である。砂は一般的に長石（曹長石： $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、灰長石： $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 、正長石： KAlSi_3O_8 を端成分とする固溶体鉱物）と石英（ SiO_2 ）から成る場合が多いが、ときには磁鉄鉱、錫石など種々の砂鉱を含んである。これに対して粘土は一般的にアルミノシリケートを主成分とし、これに鉄やマグネシウムが加わる。

- (18) 桂敬 高塚秀治「茨城県美野里町製鉄遺跡出土鉄滓の化学的研究」『人文論叢』No. 9
1983年。

- (19) 桂敬 高塚秀治「茨城県美野里町製鉄遺跡出土鉄滓の化学的研究」『五万窪遺跡調査報

告』美野里町教育委員会 PP21～31 1984年。

(20)阿久津久 田中秀文「茨城県花館ゴマンクボ製鉄遺跡発掘調査報告」『五万窪遺跡調査報告』美野里町教育委員会 1984年。

(21)高塚秀治 桂敬「鉄滓の成分分析からみたわが国古代の製鉄技術」『考古学と自然科学』第20号日本文化財科学会誌 PP65～80 1988年。

(22)東京工業大学製鉄史研究会は、第二回目製鉄遺跡の学術調査として、1982年12月4日～20日にかけてゴマンクボ遺跡の第一次発掘調査を行い、翌1983年に第二次発掘調査を行った。筆者も二次にわたるこの発掘調査に参画し、遺跡の調査と試料分析等を行った。本遺跡は茨城県東茨城郡美野里町花館ゴマンクボに所在し、美野里町を流れる巴川と園部川に挟まれた標高25m～30mの台地上に位置している。本遺跡のあった地区は戦後まで山林であったが、その後整地され、現在の畑地となっている。第1次調査では、発掘調査の事前調査として、本遺跡全域の磁気探査を試みた。その結果、南北方向に磁気異常値を示した個所と、東西方向に磁気異常値をもつ個所を検出した。磁気探査の結果にしたがって、はじめに南北方向に異常値をもつ個所の発掘調査を行い、製鉄炉1基、土坑1基、そのほか鉄滓堆積場1個所を検出した。第2次調査では、東西方向に磁気異常値をもつ個所を中心に発掘調査を進めたが、製鉄に関連する遺構などの検出はできなかった。

(23)ゴマンクボ遺跡出土鉄滓の化学組成の特徴について以下に記す。

(SiO₂)

7～8割の試料が15～25%SiO₂の範囲にある。非常に少ない試料はMHG-1, IM-62およびMHG-2であり、これらは例外なくTiO₂値が異常に高い。また、SiO₂の特に多い試料はIM-77の45%であり、この試料には炉材が混入したものと考えられる。また、SiO₂と他の成分の間には、一般的に正の相関あるいは負の相関は認められないが、強いていえばAl₂O₃との間にわずかに正の相関がある。

(TiO₂)

ゴマンクボ遺跡出土鉄滓の特徴は、高チタン鉱物を非常に多く含むことにある。試料分析を行なう中で金属鉄がみいだされたが(Photo. 1)、その近傍にルチルが生成していた(Photo. 2, Fig. 2)。また、他の試料からはフェロシュードブルカイト近似のアーマルコライトが検出された。

(アルカリ金属(Na₂OとK₂O))

Na₂Oについては、すべての鉄滓試料について分析を行ったわけではないが、Na₂Oは一般的にもあまり含まれない。分析を行った試料もそのほとんどが0.2%以下である。またK₂Oについては0.3～5.8%と、かなりの幅で分布している。4%を越える試料も4点あった。しかし、他のどの元素成分の間にも相関性は認められない。また、鉄滓中のK₂Oは主として炉壁材物質から供給されたものであり、わずかに木炭灰からも流入したと考えられる。

(P₂O₅)

P₂O₅はすべての試料において0.3%以下であり、他の製鉄遺跡出土鉄滓鉄滓に比べ含有量が少ない。P₂O₅は砂鉄中の脈石として含まれる場合が多いが、ゴマンクボ遺跡では鉄滓中のリンの混入経路は不明である。

- (24)井上唯雄「月山遺跡の調査」『日本前近代製鉄の東西比較』研究発表要旨 PP16～18
1986年.
- (25)高塚秀治「月山遺跡出土鉄滓について」『日本前近代製鉄の東西比較』研究発表要旨
P19 1986年.
- (26)現地は開田のため台地端部を切断しているため、詳細は不明であるが、ほぼ20°ほどの勾配を原地形は有していたものとみられる。その傾斜裾部を径1.5m深さ1m規模で掘り下げて、炉を設定するための掘り方を作っている。その底部から鉄滓、礫、木炭混じりの褐色土層を50cmほど積み上げて炉床を作っている。除湿装置であろう。この層は5～10cmほどの厚さで互層に積み上げている。この炉底構造の上に炉が築かれたとみられるが、既に破壊されていて炉の構造は全く不明である。ただ周辺には50cmから20cmほどの河原石がかなり強く焼けて4個ほど検出されたことからすると、炉の芯を石組とした構造であった可能性が強い。また、炉底構造のすぐ東側に白色粘土が100×60cmほどの長円形で厚さ15cmほど堆積していた。これは焼けていないところからみると、築炉用に持ち込まれた可能性が強い。炉の上段部分は砂質粘土が径4cm程の半円形にひろがっており、この部分が、炉への木炭や砂鉄を投入するための作業場であったとみられる。遺物はすべて鉄滓・炉壁の崩れたもののみであったが、上段のテラス状の部分に散見されたほか、炉底構造に食い込むように多量に検出された。これらのことから、製鉄炉はこの部分に設置されていたことはほぼ疑いを容れない。
- (27)高塚秀治「栗田かなくそ山遺跡出土鉄滓の化学的調査結果」『栗田かなくそ山製鉄遺跡調査報告』茨城県新治郡千代田村教育委員会高倉・栗田地区埋蔵文化財発掘調査会 PP33～71 1990年.
- (28)高塚秀治ら「埼玉県出土の鉄滓と鉄塊」『研究紀要』財団法人埼玉県埋蔵文化財調査事業団 PP101～112 1983年.
- (29)後藤忠俊 高塚秀治「保光たたら砂鉄・鉄滓の分析結果について」『保光たたら』保光たたら発掘調査団 PP69～74 1985年.
- (30)砂鉄は高殿内の溝から土と共に採取されたもので、土壌成分と混在する砂鉄粒子には赤褐色焼土が強く付着していた。したがって分析試料は、ピーカ中において水に強く懸濁させ、よく水洗し乾燥した後、数回磁選を数回繰り返し、砂鉄(HTY. IS)と土壌を分離した。当時の製鉄操業においてはどの程度精製された砂鉄を使用したかはわからないが、これに近いものが使用されていたであろう。鉱物組成をみると主としてマグネタイト(Fe_3O_4)と少量のヘマタイト(Fe_2O_3)が認められた。ヘマタイトが含まれる砂鉄は、県下では東広島市石神製鉄遺跡の事例にもみられ、広島県一帯(あるいは中国山脈の南側)に産する砂鉄の多くに共通する特徴とも思われる。また、含有するMnOの多いことも、関東・東北地方の砂鉄とは異なる特徴である。
- (31)後藤忠俊高塚秀治「小半弓遺跡出土鉄滓の分析結果について」『小半弓遺跡』福島県玉川村教育委員会 PP32～36 1984年.
- (32)小半弓遺跡出土の砂鉄と鉄滓については以下のような状況であった。
本遺跡では砂鉄の集積場は発見されなかったが、次の3種の砂鉄を採取し分析を行った。一つは本遺跡近くを流れる東川に堆積していた砂鉄で、試料 No. FKK. S1, FKK.

S2としたものである。FKK.S1は東川の砂鉄を比重選鉱により精製したものであり、FKK.S2はこれをさらに磁選し精製したものである。FKK.S3は、小舟上面の焼土に混在していた砂鉄を磁石を用いて採取したものである。この砂鉄は、焼土が堅く付着していたため、水中で軽くおしつぶしは磁選するという操作をくりかえし、精製して分析試料とした。いずれの砂鉄試料も結晶成分はマグネタイト (Fe_3O_4 、少量のウルボスピネルを含む)、ヘマタイト (Fe_2O_3 、イルメナイトを含む) からなる。これら試料の分析結果から、東川から採取した砂鉄と、小舟焼土面に存在した砂鉄はほぼ同質のものである。小半弓たたらが操業していた当時の砂鉄採取法は、もっぱら比重選鉱によったと考えられるので、使用された原料砂鉄の組成はFKK.S1に近いものであったと思われる。

また、 TiO_2 含有量はいずれの砂鉄試料も10%以上であり、中国地方産出の砂鉄に比べ品位は劣る。鉄滓については炉遺構(大舟・小舟)周辺、湯溜まりから出土した鉄滓、および鉄滓捨て場にあった鉄滓の多くは小さな粒状の金属鉄を含むものであった。

(33)高塚秀治 西村亮治「堪忍沢遺跡出土遺物の分析結果について」『西山地区農免農道整備事業に係わる埋蔵文化財発掘調査報告書Ⅰ-堪忍沢遺跡-』秋田県教育委員会 PP53~55 1987年。

(34)堪忍沢遺跡出土の砂鉄はいずれも製鉄炉遺構から出土していることから、製鉄に使用された砂鉄と考えられ、 Ti/Fe 値=0.130~0.147と比較的高い値を示した。また、いずれの砂鉄にも MgO が2%程含まれていた。また、鉄滓については21試料の分析を行った。各試料の分析値から求められる Ti/Fe 値は砂鉄製鉄の製錬度を示す指標となりうるので、この数値と鉄滓中に含まれる結晶鉱物を基本にして、鉄滓を3つのグループに分類した。

第1群： Ti/Fe 値=0.053~0.128 試料No.10, 11, 21, このグループに属する鉄滓は、 Ti/Fe 値が砂鉄の Ti/Fe 値(0.130~0.147)より小さいものである。これら試料のうちNo.21は6住居趾から出土したもので、製錬鉄滓ではなく鍛冶段階の生成物と考えられる。鉄滓中に含まれる結晶鉱物はウルボスピネル、ファヤライトの他に、ウスタイトが含まれていた。No.10は Ti/Fe 値=0.128で砂鉄試料とほぼ同じ値を示した。

第2群： Ti/Fe 値=0.149~0.250 試料No.1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 この群に属する鉄滓中の結晶鉱物は、ウルボスピネルとファヤライトからなる。

第3群： Ti/Fe 値=0.309~0.352 試料No.5, 20この群に属する鉄滓中の結晶鉱物は、ウルボスピネル、ファヤライト、イルメナイトからなる。

さらに、炉材および粘土の分析結果は、炉材には α -石英が含まれる。粘土にはカオリン鉱物が認められたが、炉材からは検出されなかった。しかし、化学組成からみれば、29, 30のような粘土に砂を混ぜて炉材としたとみられる。

(35)高塚秀治「高保木製鉄遺跡出土の砂鉄と鉄滓の化学分析について」『高保木製鉄遺跡』千種町教育委員会 PP35~38 1989年。

(36)高塚秀治「鳩山窯址群出土鉄滓の分析結果について」『鳩山窯址群』(IV)鳩山窯址群遺跡調査会鳩山町教育委員会 PP351~353 1992年。

(37)鳩山遺跡全体としては、精錬・製鋼鍛冶と小鍛冶の作業場が併設されていたものと思

われる。さらに、表3.1.3.2でV₂O₅の量が2種に分かれた。V₂O₅の比較的多い試料群はSH-2（柳原A-1号住居8C.2/4）とSH-11（柳原A-26号住居8C.3/4）であり、同じくV₂O₅の少ない試料群はSH-23, SH-25（柳原B-17号住居8C.1/4）である。そもそもV₂O₅はチタン磁鉄鉱（スピネル鉱物）中の狭雑物として存在するものであり、スピネル鉱物中のV₂O₅が、古代の製鉄レベルで還元されることはまず無い。したがってSH-2, -11とSH-23, -25にみられるV₂O₅量の違いは、それぞれ地域的に異なる砂鉄を使用したことも考えられる。

- (38)高塚秀治後藤忠俊「鍛冶関係鉄滓の成分分析」『奈良地区遺跡群I』奈良地区遺跡調査団 PP69~71 1986年.
- (39)高塚秀治「内場山城跡出土鉄滓と錆片の分析」『内場山城跡』兵庫県教育委員会 PP77~79 1993年.
- (40)高塚秀治 田口勇「金属組織観察による古代鉄器の研究」『国立歴史民俗博物館研究報告』PP242~243 1991年.
- (41)高塚秀治 田口勇「金属組織観察による古代鉄器の研究」『国立歴史民俗博物館研究報告』P248 1991年.
- (42)高塚秀治 田口勇「金属組織観察による古代鉄器の研究」『国立歴史民俗博物館研究報告』P249 1991年.
- (43)高塚秀治「内場山城跡出土鉄滓と錆片の分析」『内場山城跡』兵庫県教育委員会 PP77~79 1993年.
- (44)川崎製鉄株式会社技術研究所「石生天皇遺跡出土試料に関する調査報告」『石生天皇遺跡』和気町 P21 1980年.

Table.1遺跡出土炉材・布目瓦の化学組成

試料番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
IKC08	76.3	0.7	15.6	4.2	--	--	0.1	0.93	2.5	--
IKC09	83.2	0.4	10.2	2.8	--	--	--	0.90	3.2	--
IKC10	83.2	0.4	9.7	2.1	--	0.1	--	0.79	3.2	--
IKC11	79.8	0.4	12.8	2.3	--	0.1	0.1	1.17	3.2	--
IM 14	75.82	1.14	13.78	5.21	0.06	0.56	0.31	0.49	2.62	--
OK 08	67.42	0.61	21.91	4.68	0.10	0.57	0.22	--	4.48	0.01
OK 09	70.76	0.72	19.02	4.69	0.05	0.27	0.12	--	4.36	0.01
OK 10	65.82	0.81	22.62	6.12	0.08	0.17	0.11	--	4.20	0.01
OK 11	70.78	0.73	18.70	4.67	0.16	0.67	0.83	--	3.44	0.01
OZC04	66.1	0.9	21.0	8.7	0.12	0.3	0.4	1.1	2.0	0.1
OZC05	66.7	0.9	19.5	8.0	0.13	0.4	0.7	1.1	2.1	0.1
布目瓦	62.6	1.2	23.1	8.7	0.10	0.3	1.2	0.88	1.8	0.4

IKC08 鹿ノ子C遺跡 31号住 1号炉 粘土, IM 14 茨城県ゴマノクボ遺跡
 IKC09 鹿ノ子C遺跡 33号住 1号炉 粘土, OK 08 岡山県久米町大蔵池南 1層出土 炉壁,
 IKC10 鹿ノ子C遺跡 33号住 5号炉 粘土, OK 09 岡山県久米町大蔵池南 3層出土 炉壁,
 IKC11 鹿ノ子C遺跡 39号住 1号炉 炉壁, OK 10 岡山県久米町大蔵池南 6層出土 炉壁,
 OK 11 岡山県久米町大蔵池南 鍛冶炉の炉壁,
 OZC04 尾崎前山遺跡 OZC05 尾崎前山遺跡 布目瓦 尾崎前山遺跡

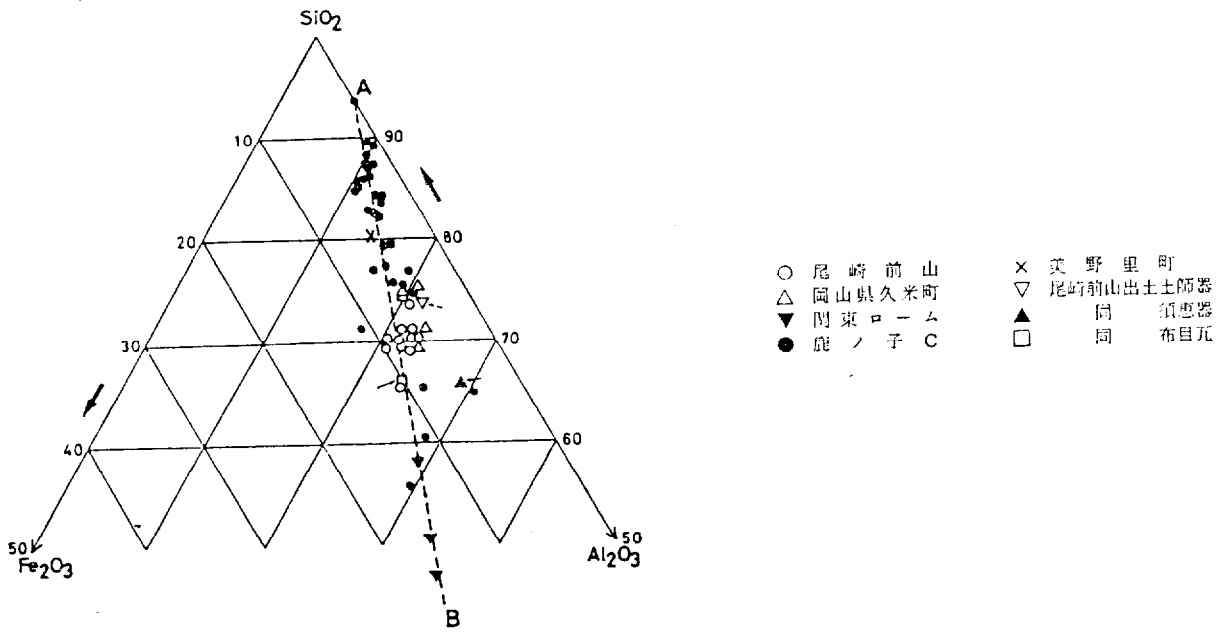


Fig. 1 SiO₂-Fe₂O₃-Al₂O₃系組成分布図



Photo. 1ゴマクボ遺跡出土鉄滓中の金属鉄

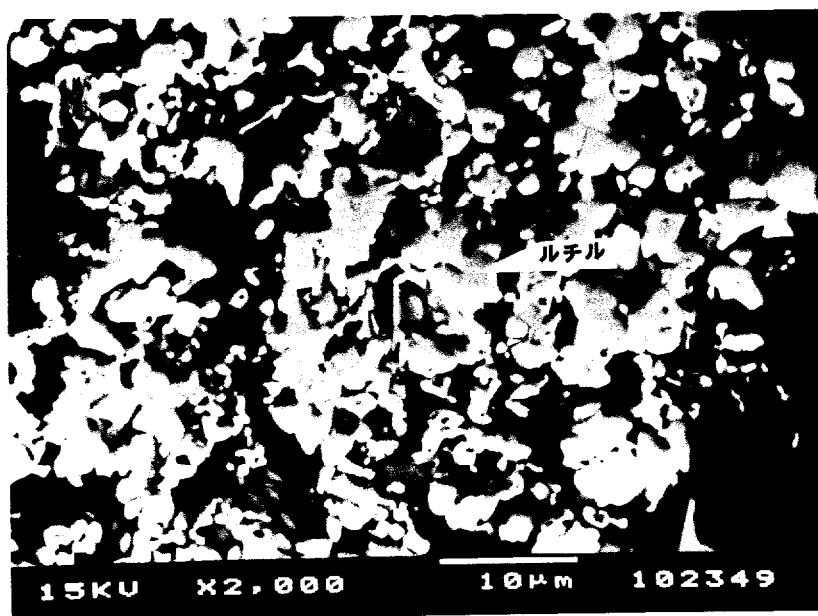


Photo. 2ゴマクボ遺跡出土鉄滓中のルチル

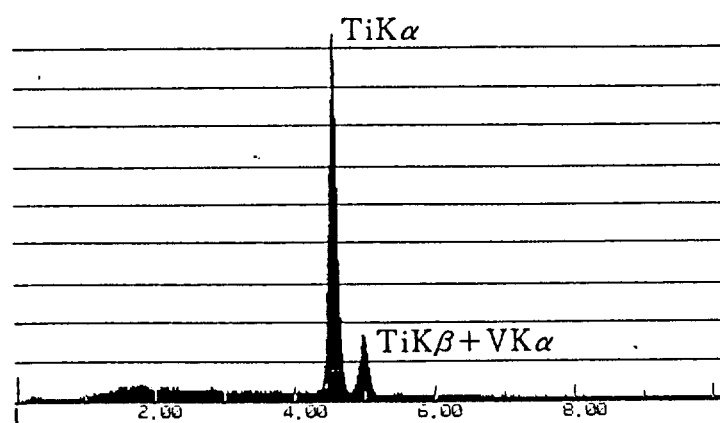


Fig. 2Photo. 2中のルチルのX線スペクトル図



Photo.3 ゴマクボ遺跡出土鉄滓中のフェロシュードブルカイト

第4章．製鉄プロセス論からみた前近代製鉄技術史

前近代製鉄を支える技術的要素は、大きく見れば第一には送風技術、第二には炉の構造、第三には炉内にノロを生成させること、さらには第四に、不純物（主としてTiO₂）の少ない良質の砂鉄を求めたことである。そして、これら諸要素の相乗によって前近代製鉄技術は発展することができた。

前近代の送風技術の発達については必ずしも明瞭ではないが、古代では、『日本書紀』の天岩戸（あめのいわと）の条に鹿の皮で天羽鞆（あめのはぶき）を作ったことが見えるが、これは、送風用具を示す言葉であろう。和名類聚鈔（10世紀）、巻十五の鍛冶具の項に、鞆は「布岐加波＝ふきかわ」と、踏鞆「太太良＝たたら」があり、両者は区別されている。吹皮（ふきかわ）とは動物の皮を用いた差鞆の類であったとみられる。そして、踏鞆は、たたら板を交互に踏んで送風する比較的大型の鞆であり、古くは8世紀代の福島県相馬郡武井製鉄遺跡においてその使用が確認されている。さらに、平安時代の関東以北に認められる竪型炉にも、その多くが踏鞆を使用したと見られる。また、建保2年（1214年）に成立する『東北院職人歌合』には吹差鞆が図示されており、中世初期以降は踏鞆と吹差鞆が併用されていたとみられる。さらに、『和漢三才圖會』（正徳2年＝1712年）によれば、和名類聚鈔鈔と同様に鞆「布岐加波」、踏鞆「太太良」について説明されている。鞆は「鍛冶屋皆用之吹皮也以＝狸皮-為之上」、踏鞆は「常鑄＝鍋釜或鐘等ノ物ヲ用-」とある。この説明から、鞆（吹差鞆が図示されている）は鍛冶、踏鞆はより火力を必要とする製鉄、鑄造用に用いられたことが読みとれる。また、17世紀末（貞享・元禄年間）に天秤鞆が発明され、送風量もさらに強力なものとなり、鉄生産量は飛躍的に高まったといわれる¹⁾。

一方、炉の構造についてみると、第1章で述べたように、竪型炉は、一般的には半地下式で築炉され、炉の大きさは比較的小型である。そして、その製鉄法は、炉の背面一方向からの送風と、炉の前面から排滓するという方式をとる。また、箱型炉は、その成立段階（6世紀代）の製鉄炉以降、2方向送風、2方向排滓によって操業され、炉の平面形状も時代を経るにしたがい、方形から長方形へと拡大変化する。そして、炉の大型化に伴い送風法の改良と、炉の地下部分に湿気の除去と放熱を防護する堅牢な地下構造を築き、炉内の温度を均質にするような工夫が認められる。

本研究は、わが国前近代製鉄技術の発展を、実験的な手法と分析的手法とによって解明し、それを技術史的に整理することを主眼とするもので、その進行を整理要約すると以下のようなことになる。すなわち、

第2章では、製鉄プロセスの検討によって、岩鉄による還元プロセスではファヤライトが晶出する温度が1100℃付近にあること、また、ファヤライトは1300℃付近では全く晶出しないこと、砂鉄の製鉄プロセスでは、岩鉄の場合と同様にファヤライトの晶出する温度範囲はほぼ同じ温度域であったが、1100～1200℃以上で、FeO-TiO₂鉱物がウルボスピネル→イルメナイト→フェロシュードブルカイトといった相転移をしながら、1300℃付近でルチルに至ることを明らかにした。

第3章では、製鉄プロセス論の有効性を検討するために、製鉄関連30遺跡から出土した

資料について化学・鉱物両相成分分析を実施し、砂鉄製錬滓については、その化学組成分析の結果から、本論に述べるプロセス論が一定の有効性をもつことを確認した。そして、前近代製鉄プロセスの温度を求める方法を示し、さらに、砂鉄と鉄滓に含有する「還元指数」概念を提起した。

本章では、前近代製鉄遺跡を技術史的に把握するため、遺物の鉱物組成からは製錬温度を求め、砂鉄製錬遺跡では還元指数によって金属鉄の生成量を求めた。そして、わが国前近代の製鉄技術を時代別に整理する⁹⁾。

1. 鉱物組成からみた製錬技術

先述したように、第3章で分析を行った製錬遺跡出土鉄滓に含まれる主要な結晶鉱物は、次のようなものであった。岩鉄製錬では木瓜原、後山畦倉遺跡の鉄滓にはウスタイト、ファヤライト、砂鉄製錬鉄滓の富士見台、栗田かなくそ山、ゴマクボ遺跡の鉄滓にはウスタイト、ファヤライト、ウルボスピネル、イルメナイト、フェロシュードブルカイト、ルチルなどが含まれていた。そして、これらの鉱物は、従来、分析を行った試料の全てを網羅している。そして、これら製錬鉄滓の結晶鉱物の同定ができれば、鉄滓の生成温度が推定できる。さらに、個々の鉄滓の製錬温度が推定すれば、遺跡そのものの製錬温度が把握できる。このことに従って、鉄滓の鉱物組成と製錬温度の関係を整理すると、表4.1.1.1のようであった。なお、表に記載した遺跡は、時代の判明している製錬遺跡である。

表4.1.1.1を見ると、岩鉄製錬鉄滓では、いずれの遺跡出土滓にもファヤライトのみか、ファヤライトとウスタイトを含む鉄滓が存在しており、これは岩鉄製錬の一つの典型となっている。このことから、古代(6~8世紀代)の岩鉄製錬法には大きな違いはなかったと見られる。

一方、砂鉄製錬鉄滓の鉱物組成を時代別に見ると、古代では栗田かなくそ山、月山遺跡を除いてウスタイトが存在しており、時代が下るにしたがってFeO-TiO₂鉱物は、よりチタン濃度の高い結晶鉱物相が現れる傾向にある。

鉄滓中にウスタイトが存在するという事は、鉱石が未還元状態にあるか、または金属鉄の再酸化が原因と考えられる。すなわち、ウスタイトの生成が生じるのは、炉内に低温部分があるということであり、この低温部分は主として炉底部にあったと考えてよい。これは、地下からの水分の蒸散によって、炉底部分に大きな吸熱効果が生じるためであり、多湿な日本においては不可避的なものである。

表 4.1.1.1 製錬遺跡出土鉄滓中の結晶鉱物と製錬温度域との関係

	結晶鉱物	ウスタイト	ファヤライト	ウルボスピネル	イルメナイト	フェロシュードブルカイト	ルチル
	晶出／生成する温度域(°C)	900～1000付近	1100～1200付近	1100～1200付近	1200付近	1200<	1300付近
岩 鉄 製 錬 遺 跡	古橋 6末～7初頭	●	●	—	—	—	—
	カナク口谷 6末～7初頭	●	●	—	—	—	—
	南郷桜峠 7世紀	●	●	—	—	—	—
	源内峠 7世紀	●	●	—	—	—	—
	木瓜原 8世紀	●	●	—	—	—	—
	野路小野山 8世紀	●	●	—	—	—	—
北マキノ 8世紀	●	●	—	—	—	—	
砂 鉄 製 錬 遺 跡	栗田かなくそ山 7末～8世紀	—	●	●	●	—	—
	尾崎前山 9世紀	●	●	●	—	—	—
	月山 9～10世紀	—	●	●	●	—	—
	安行猿貝北 10世紀	●	●	●	—	—	—
	堪忍沢 11世紀	●	●	●	●	—	—
	高保木 古代～中世	●	●	●	—	—	—
	ゴマンクボ 11～14世紀	—	●	●	●	●	●
	小半弓 18世紀	—	●	●	●	●	—
保光たたら 18世紀	—	●	●	●	—	—	

※ ●は検出される —は検出されない

2. 還元指数から見た製錬技術

第3章で製鉄技術の水準を示す一つの指標として、「還元指数」(r)概念の提起を行った。本節でr値を求めた遺跡は、古代の製錬遺跡では安行猿貝北、高保木、堪忍沢の3遺跡、そして近世の製錬遺跡では小半弓、保光たたら2遺跡、また、他の研究者が行った砂鉄製錬遺跡(古代製錬遺跡からは福島県相馬郡の向田²⁾、埼玉県大山遺跡³⁾、近世の遺跡の島根県飯石郡頓原町泉原遺跡⁴⁾)の3遺跡で、総計8遺跡である。そして、それらの遺跡試料のr値は図4.2.1.1のようであった。そして、その平均値は、古代に属する向田遺跡(13)、安行猿貝北遺跡(6)、大山遺跡(23)、堪忍沢遺跡(17)、高保木遺跡(12)であり、近世に属する保光たたら遺跡(44)、小半弓遺跡(43)、泉原遺跡(49)であった。また、古代製錬試料では、指数がマイナス(-)の値をとるものがあるが、これらの試料は、主として炉底部のスラグに、再酸化した鉄分(ウスタイト、あるいはマグネタイト)が加わることによって生じたものとみられる。したがって、この図から、次のような説明が可能である。

前近代砂鉄製錬では、古代から近世にかけて金属鉄の生成量が増加している。これは、還元反応部分の温度をより高温にすることが可能になったことが示されている。また、r値は、古代の遺跡試料より、近世の遺跡試料の方がばらつきが小さい。これは、炉内の低温部分(特に炉底部)を出来るだけ小さくし、炉内温度をより均質にしていたことを意味している。

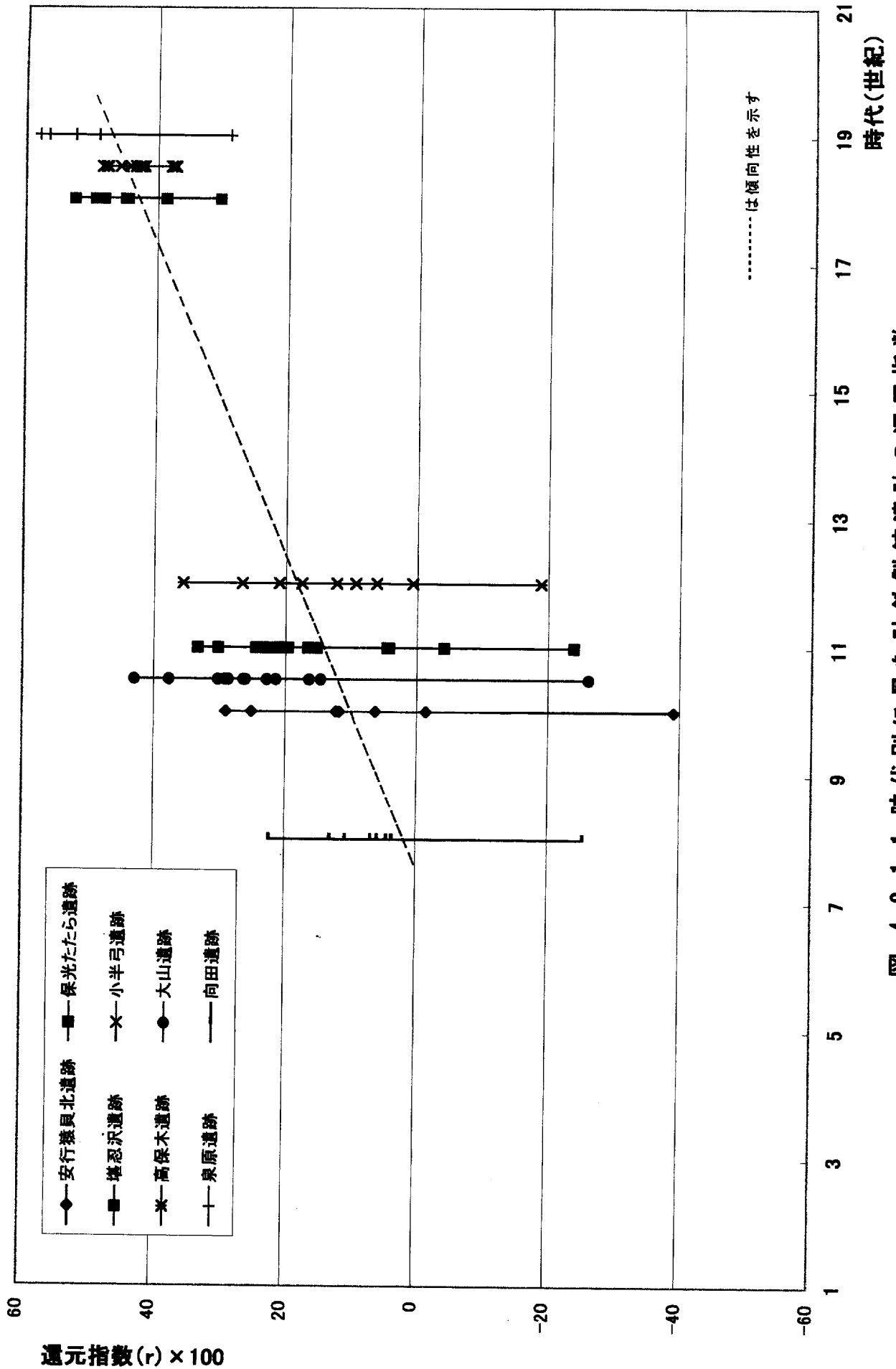


図 4.2.1.1 時代別にみた砂鉄製錬遺跡の遺元指数

3. 製錬温度と製錬技術

本章第2節と第3節では、鉄滓の鉱物組成から製錬温度を、還元指数から金属鉄の生成量を求めた。本節では、各製錬遺跡で実現した製錬温度について検討を行うが、特に砂鉄製錬では、還元指数と製錬温度の関係について検討する。

岩鉄製錬における鉄滓の鉱物組成を見ると、ファヤライトと酸化鉄からなる試料がもっとも多い。第2章で述べた熱分析実験の結果から、岩鉄による製錬プロセスにおいてウスタイト、約900℃から生成し、また、ファヤライトは1100℃付近で晶出し始める。そして、1200℃付近では晶出面積（体積）率をもっとも大きくなり1300℃付近ではまったく晶出しない。したがって、岩鉄による製錬はおよそ900～1200℃付近の温度範囲で操業されたものと思われる。

また、砂鉄製錬については、先に求めた還元指数と製錬温度の関係を求めたが、その結果は、おおよそ図4.3.1.1のようであった。すなわち、古代に属する安行猿貝北、高保木の場合はファヤライト、ウスタイト、ウルボスピネルなどの結晶鉱物が含まれ、堪忍沢では、これらの他にイルメナイトを含む試料があった。砂鉄の還元プロセスでは、ウスタイトの生成は950℃付近から顕著に起こり、ファヤライトは岩鉄の場合と同様に1100℃付近で晶出する。そして、ウルボスピネルは1100～1200℃付近、イルメナイトは1200℃あるいはそれ以上の温度域で生成する。したがって、古代の砂鉄製錬では、およそ950～1200℃付近の温度範囲で操業されたものと思われる。また、近世に属する保光たたら遺跡の場合はファヤライト、ウルボスピネル、イルメナイトなどの結晶鉱物が含まれ、小半弓遺跡では、これらの他にフェロシュードブルカイトも含まれていた。したがって、近世の砂鉄製錬では、およそ1100～1200℃以上の温度範囲で操業されたものと思われる。なお、例外的な事例として、ゴマンクボ遺跡があげられる。この遺跡から出土した鉄滓にはフェロシュードブルカイト、ルチルなどが検出されている⁷⁾。したがって、この遺跡における製錬温度は1300℃付近まで達していたものと推測できる。

以上の結果から、わが国前近代の製錬は次のように結論づけられる。すなわち、岩鉄であれ砂鉄であれ、古代の製錬炉内には、いずれもウスタイトが存在する低温領域が存在し、温度範囲も950～1200℃となっている。これに対して近世の砂鉄製錬では、こうした低温領域が克服され、ウスタイトを含む試料はまったく検出されず、温度範囲も1100～1200℃付近であったことが推測される。

以上のように、製錬遺跡の試料の鉱物組成から製錬温度の推定が可能であり、また、砂鉄製錬では、さらに還元指数を用いて金属鉄の生成量を求めることができた。このように、遺跡試料の化学・鉱物組成分析結果から、製錬温度や還元指数を導くことにより、わが国前近代における鉄製錬の技術史的な整理が可能となる。

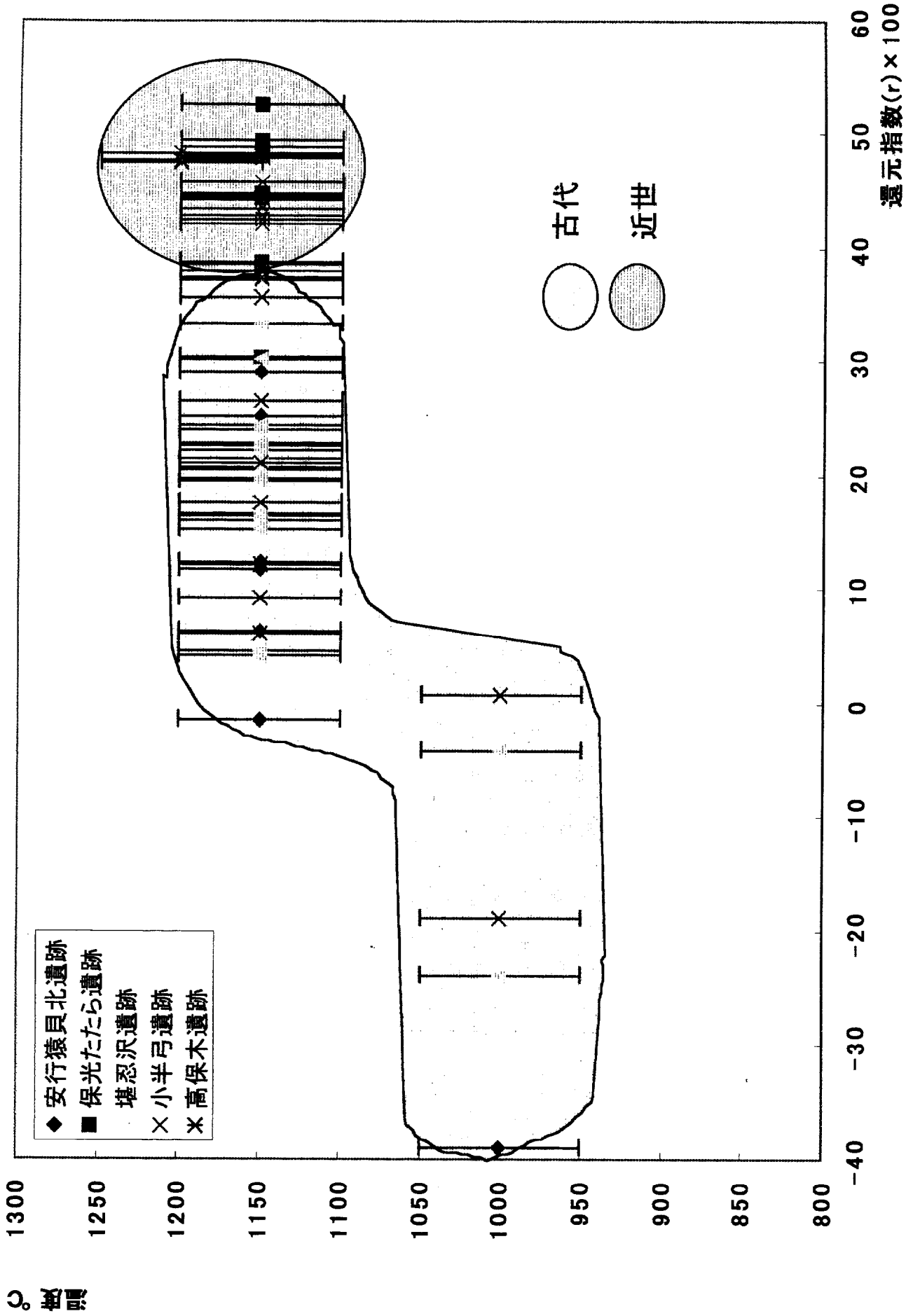


図4.3.1.1 還元指数と製錬温度との関係

4. 鍛冶（精練）の技術

鍛冶（精練）遺跡出土の鉄滓の形状は梔型の形状をなし、そのほとんどの鉄滓からファヤライト、ウスタイト、そして FeO-TiO_2 鉱物が検出された。鍛冶遺跡から鍛造箔片のみが出土する場合は、鍛造加工による鉄器製作が考えられるが、しかし、梔型の鉄滓が出土する遺跡は、製錬後の鉄素材の精練を目的としたと考えられる。

一般的に精練（鍛冶）遺跡から出土する遺物は、鍛造箔片、梔型形状滓、および羽口とみてよい。鍛冶遺跡出土の鉄滓は以下のように分類することができる。

1. 鍛造箔片は、鉄器を鍛打する際に生ずるもので、これに含まれる結晶鉱物はマグネタイト、あるいはマグネタイト+ヘマタイトという鉄酸化物鉱物である。

2. 梔型形状の鉄滓は、製錬で得られた鉄（銑、あるいは錒）から錬鉄を得るために銑の脱炭、および錒中の介在物除去の際に生ずる。この熔融鉄滓が木炭中を沈降し炉の底部に溜まり、梔型の形状となる。梔型滓中に認められる結晶鉱物相は鱗玉状のウスタイト、針状のファヤライトからなる場合が多いが、砂鉄製錬由来のものであればウルボスピネルなどの FeO-TiO_2 鉱物を少量含む場合が多い。

以上が、鍛冶（精練）プロセスの概要であり、錒中の介在物の除去については1150℃以上の温度帯で行われると考えられるが、銑の酸化脱炭法については、今のところ実験的に検証がなされていないため不明な点が多く、このプロセスの解明は今後の課題となる。

文献と註

- (1) 本研究では中世の試料が欠落しているために、古代と近世の試料によって検討を行った
- (2) 川崎製鉄株式会社技術研究所「石生天皇遺跡出土試料に関する調査報告」『石生天皇遺跡』和気町 P21 1980年。
- (3) (財) 福島県文化庁センター「鉄滓分析」『相馬関連遺跡調査報告』P400 1991年。
- (4) 大澤正己「製錬滓・鍛冶滓の化学分析結果」『埼玉県立ガンセンター埋蔵文化財調査発掘調査報告 大山』P327 1983年。
- (5) 日立金属株式会社安楽工場・和鋼記念館「化学組成」『朝原町泉原たたら遺跡出土の鉄片及び鉄滓の調査』P4 1983年。
- (6) 赤沼英男「遺物の解析結果からみた半地下式型型炉の性格」季刊『考古学』第57号—いま見えてきた中世の鉄—雄山閣出版株式会社 PP41~45 1996年。
- (7) ゴマクボ遺跡で出した鉄滓は、全国的にみて、 TiO_2 の含有量が突出しており、ペロブスカイト (CaTiO_3) が検出された鉄滓も存在した。

第5章. 結 論

第1章では

わが国前近代製鉄法の発展に関する従来の研究では、人文学的手法、考古学的手法、そして、自然科学的手法についてその到達点と課題を指摘した。とくに、自然科学的手法による研究においては、製鉄原料の特定や、鉄器の産地を同定するという点では一定程度判明したが、製鉄プロセスを解明するための実証的な研究事例が少ないことを指摘した。そして、この手法においては、通史的に見れば未だ未整理の状態にあって、一貫した技術発達史像を与えるに至っていない。

したがって、本研究は、製鉄史の通史的把握には、製鉄プロセス論の構築が必要となるという視点から、その構築と、それに依拠して製鉄遺跡の発掘と試料分析を行い、前近代製鉄史の技術的展開の基本的傾向を解明することを課題とした。

第2章では

前近代炉内で展開される製錬（還元）プロセスを明らかにするため、各種鉱石の還元プロセスを熱分析法を用いて実験的に解析し、製鉄原料の製錬プロセスでは結晶鉱物相の生成と晶出が製錬温度に依拠することを明らかにした。

岩鉄と砂鉄の還元進行では、岩鉄製錬ではファヤライト、砂鉄製錬では FeO-TiO_2 鉱物の相転移が温度に関係しており、さらには TiO_2 の挙動が重要な役割を演じていることを明らかにした。鉱石の還元が CO ガスと C による反応によって進行していくことを論じた。そして、ファヤライトを主成分とする鉄滓の生成によって脈石の分離除去が行われることを明らかにし、また、砂鉄製錬の特殊性については、 FeO-TiO_2 鉱物がウルボスピネル→イルメナイト→フェロシュードブルカイトと順次相転移レルチルに至ることを明らかにした。

さらに、精練（酸化）プロセスでは、銑鉄の脱炭と介在物の除去が高温酸性ガス中で行われることを予測した。そして、この前提によって精練プロセスによって、金属鉄が再酸化されることにより、ウスタイトの生成と、ファヤライトの晶出が起こるということを推定した。

第3章では

第2章のプロセス論の有効性について検証するため、岩鉄製錬遺跡15、砂鉄製錬遺跡10、鍛冶（精練）遺跡5の総計30の製鉄関連遺跡の発掘調査と出土資料の分析を行いデータの解析を行った。

分析の結果、岩鉄製錬による鉄滓には酸化鉄（ウスタイト、マグネタイト）、ファヤライトのいずれかを、また、砂鉄製錬による鉄滓には、そのいずれも FeO-TiO_2 鉱物を含有するが、レルチルが生成する条件下ではファヤライトは晶出しないことを明らかにした。

そして、鉄滓に含まれる結晶鉱物相から、遺跡で実現した製錬温度が類推できること、また、砂鉄製錬では、砂鉄からの金属鉄生成率（ r ）を求めることができることを明らかにした。また、 r は砂鉄製錬遺跡を解析するために有効であることを論じ「還元指数」として把握することを提起した。

さらに、鍛冶（精練）鉄滓は、ファヤライトとウスタイトという結晶鉱物が含まれる場

合がもっとも多いが、砂鉄製錬由来の鉄滓は $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物が含まれるという特徴があることを明らかにした。

4章では

3章で行った遺跡試料の分析結果から、岩鉄製錬鉄滓の鉱物組成は、ファヤライト+酸化鉄、あるいはファヤライトのみがもっとも多いことや晶出ファヤライトの体積率が異なるものがあること、また、砂鉄製錬鉄滓の鉱物組成は酸化鉄+ファヤライト+ $\text{Fe}-\text{TiO}_2$ 鉱物+酸化鉄、あるいはファヤライト+ $\text{FeO}-\text{TiO}_2$ 鉱物という組み合わせがもっとも多いが、ファヤライトはフェロシュードブルカイトやルチルとは共存しないことを明らかにし、これら鉱物の組み合わせから、遺跡で実現した製錬温度の推定を行った。そして、砂鉄製錬では「還元指数」を用いて古代と近世の還元状態の比較検討を行い、その指数は古代で0.2付近、近世では0.4付近に収束することを明らかにした。

以上の事実から、わが国前近代製鉄関連遺跡の整理を行い、前近代製鉄においては、特に製錬技術が古代から近世へと、より高い温度を炉内に均質に分配することにあつたことを指摘した。また、この傾向は、炉型の発展の傾向と照応すると考えられることを明らかにした。

第5章では

各章をまとめ、最終的に本研究は、前近代製鉄プロセスを解明し、さらに、遺跡出土の鉄滓の分析結果から製錬温度の推定と還元指数の提起を行い、わが国前近代製鉄の発展の道筋を以下のように明らかにした。

岩鉄製錬では、鉄滓に含有する結晶鉱物がファヤライトとウスタイト、あるいはファヤライトのみであることから、製錬炉内の温度範囲が推定でき、いずれの製錬炉にも、ウスタイトが生じる低温領域が存在していた。しかし、次に述べる砂鉄製錬のように、還元指数を求めるための指標元素成分は今のところ示せない状況にあり、この点については今後の課題となる。

また、砂鉄製錬では、古代から近世に向かって還元指数が増大していくことを示した。これは、古代から近世にかけ、製錬炉内の温度の上昇と低温領域が徐々に解消され、より均質な高温領域が得られるようになったためである。これに至るには、製錬技術の発展に照応して吹皮（差鞆）、踏鞆、天秤鞆などの送風装置が発明され、また、主として炉底部に生じる低温領域の解消に、初期製錬にみられる簡略な地下構造から、近世永代たたらのような、複雑な地下構造へと発展させていったと見られる。このように、炉内温度の上昇とその均質化は、わが国前近代製錬が開始されて以来、一貫して追求された技術的課題であつたといえよう。

補 論

「炒鋼法による鋼精練法」論の検討

第1章で述べたように、佐々木らは「炒鋼法が日本列島の鋼生産に及ぼした影響」の中で、銑に金属酸化物を混合攪拌し、脱炭を行ったと述べている。この論文は、製鉄史の解明を製鉄プロセスの側面から行うという面もあるので、その製鉄論が妥当であるかどうかを、先行研究の一つとして、反応生成物、熱収支についての視点から、検討しておく必要がある。

1. わが国前近代の鋼精練と「炒鋼法」

わが国前近代における製鉄法については直接法と間接法が存在したが、これらの方法のいつ、いかなる形で出現するかについては不明な点が多い。中国大陸では、すでに紀元前1世紀には「炒鋼法」という方法による間接法が確立していたと考えられている。そして、この「炒鋼法」は日本列島にも大きな影響を与え、銑鉄に金属酸化物を加えて攪拌し脱炭するという、独特な間接法が存在したという説が、佐々木らが作業仮説として提示している。この説は単なる仮説にとどまらず、赤沼、福田らによって補強され、従来製鉄遺跡と判断された遺跡についても、製鋼遺跡として修正が行われている¹⁾。今日この間接法を巡り鋭く論争が行われており、製鉄史研究上この学説を看過することができないものとなった。ここで、佐々木らの説と、その説に対置する説とを以下に列記する。

1. 1 佐々木らの説

佐々木らは、中国後漢末に発明されたとされる「炒鋼法」について次のように説明している。「これは鉄鉱石を堅型炉で還元して熔融状態の銑鉄を作り、鉄滓から分離して炉外に取りだしたあと、そのまま（あるいはふたたび加熱して）熔融状態を保ちながら大気中で攪拌を行い、銑鉄中の炭素を燃焼させて鋼とするものである。前半の工程は、現在の金属工学では還元製錬プロセス、後者は酸化精錬プロセスと呼ばれる。このように二段階で熔融状態の鋼を製造する方法、すなわち間接製鋼法は現代の製鉄法と原理的には同じであり、これまでには十八世紀にヨーロッパで開始したと考えられてきたのである」と述べている²⁾。「炒鋼法」についての説明が初めてなされたのは、明代、宋応星が著した「天工開物」という技術書である。佐々木らはこの天工開物で説明された「潮泥灰」なるものに着目した。「潮泥灰」とは、海浜の泥寧を乾燥させて焼いたものでり、主として貝殻、砂、粘土からなり、したがって $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ となって溶けた銑鉄を攪拌し、銑鉄が O_2 と反応し、脱炭されて鋼になる、したがって、「炒鋼製品中に $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 系あるいは $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系などの非金属介在物が鋼中に残留することになる」と説明した。

また、古墳時代に出土する鉄器中には、先の潮泥灰のものと思われる非金属介在物のガラス質珪酸塩の他に、銅分が比較的多く含まれることから、鉄素材の製法が「炒鋼法」によっていること、併せて鉱石原料（佐々木は含銅磁鉄鉱と呼称している）の産地を山東半島もしくは揚子江沿岸部に求め、それらの地域で造られた炒鋼製品が日本列島に舶載され、古墳時代の鉄器の主流になったと推論した³⁾。「炒鋼法」によったとみられる鉄器では、埼玉県行田市稲荷山古墳出土鉄剣（辛亥銘文鉄剣）があげている。佐々木はさらに続けて、「炒鋼法は日本列島における鋼の生産にも大きな影響を与えている」と述べている⁴⁾。その

根拠の一つとしてあげたのが、金属鉄中に介在物として存在する FeO-TiO_2 鉱物、あるいは磁鉄鉱などの金属酸化物の存在である。鋼中に FeO-TiO_2 鉱物があるのは、砂鉄をは脱炭剤として使用した結果生じたものとする。すなわち砂鉄を鉄浴（溶鉄）中の炭素と反応させて脱炭し、可鍛性をもつ鋼とする。同時に砂鉄は還元され、一部は金属鉄となり、残りの一部は FeO-TiO_2 鉱物として鋼中に残留したものと考えられている。このように、わが国における製鉄法は、製錬された高炭素の鉄を、上記のような間接法により、錬鉄に加工したという立場をとっている。また、この立場を支持する赤沼は、砂鉄や鉄滓にみられるリン(P)の挙動、鉄滓中のチタン窒化物の存在などを論拠とし、佐々木説を補強した⁷⁾。さらに、福田は「炒鋼法」論を前提とし、従来製鉄遺跡と認定された遺跡でも、その中のいくつかは製鋼遺跡の可能性があると指摘し、再検討が必要であると主張している¹⁾。

この論は、実際の製鉄関連遺物について以下のように適用されている。

1. 古代の鉄器中介在物、あるいは鉄滓中に、しばしば「高チタンの鉄酸化物」が存在する。この FeO-TiO_2 鉱物系の介在物は、鉄中の炭素と金属酸化物である砂鉄と反応した結果生ずるものとし、したがって、ウルボスピネルの他にイルメナイト、フェロシュードブルカイトなどが介在物として鉄器中に残留すると考える。また、鉄の脱炭材として、岩鉄粉も使われる例もあるとしている。また、杵沢遺跡出土の鉄滓中からチタン窒化物が検出された。チタン窒化物は超高温・高還元雰囲気中にて生成するものであり、同遺跡が通常の製鉄遺跡ではなく、製鋼遺跡ではなかったかと考える。
2. 稲荷山銘文鉄剣に代表される古墳時代の鉄器の特徴は、銅含有量の高いものが多いといわれている。この銅成分は、鉄器の原料である岩鉄が「含銅磁鉄鉱」由来のものであり、また、このような性質をもつ磁鉄鉱は本邦においては釜石鉱山以外にはないこと。また、釜石地域が古墳時代に製鉄を行っていたとは考えられない。したがって、中国の揚子江下流域に産する磁鉄鉱が使用された可能性がある。こうして、中国大陸で「炒鋼法」によって精練された鉄地金が日本列島に持ち込まれ、鉄製品に加工されたものであると考えられている。
3. 製鋼遺跡としてもっとも代表的な例は北沢⁵⁾、杵沢遺跡⁶⁾である。杵沢遺跡の鉄滓中にはリン(P_2O_5)が最大で0.3%含まれているが、 P_2O_5 は酸化鉄より還元しやすく、 P_2O_5 は還元過程で金属鉄に移行するため、鉄滓中に残留することはない。したがって、杵沢遺跡の鉄滓中の P_2O_5 は、鉄を脱炭する際に鉄滓に移行したものであるという解釈を行う。また、北沢遺跡についても P_2O_5 の挙動については同様の解釈がなされている。

1. 2 村上英之助の説

これに対して村上は、「それまでの古代中国の間接法は、間接法は間接法でも<半>間接法というべき段階にあったと考えられる。つまり或チャージは大半が鉄であったが、別なチャージは錒のみ、あるいは鉄と錒のミクスチャーというような複雑な、あるいは不安定な操業内容であったに違いない。こうしたプロダクツの構成は、時代を遡れば遡るほど、鉄の割合の減少となって現れるだろう。そしてそうなってくると、鉄を直接脱炭して鋼に変える「炒鋼法」的誘因は働かなくなるはずだ。錒がたくさんあるからである。むしろ低炭素の錬鉄の上に鉄をのせ、これを溶化して錬鉄に灌入する、いわゆる「灌鋼法」の方が望ましいくらいである。このように考えると、「炒鋼法」は鉄の産出がよほ

ど増大し、銑と鋳の比率が逆転するような段階になってはじめて出現したものと思われる。その場合でも脱炭の方法が、佐々木説のような溶銑の酸化処理であったかどうか、にわかには決めがたい」と述べ、一種のパドル法であった可能性を指摘した。また、その理由として中国の「炒鋼法」、「灌鋼法」の組み合わせは、日本の「銑卸し」、「湯金作り」に対応しているからであるとも述べ、村上はプロダクツの構成という生産概念と、専門とする工学的立場から、分析化学的な手法を主軸とする佐々木「炒鋼法」説に異を唱えた⁷⁾。

近年の製鉄史研究上の特徴を指摘するならば、「炒鋼法による鋼精練法」論をめぐる、研究界が二分されている状況があげられる。しかも、この論争はここ10年以上も続けられ、十分な成果が得られないまま、今日に至っている。また、この論争は主として理工学を専門とする研究者の間で行われ、必然的に考古学の研究者は従的な立場に置かれ、少なからぬ混乱が生じている。

この「炒鋼法」論とは、製鉄関連遺物中に認められる結晶鉄物相が、どのような条件下で生成するかを、分析学的に意味付けしようとしたものであり、その理論的な構築と展開は主として佐々木、福田、赤沼らが行い、その論考については『たたら研究』誌などに提示されている。

2. 炒鋼法による鋼製錬法論の検討

中国語で「炒」とは熱してかき混ぜるの意であり、したがって「炒鋼法」とは、高温下で半熔融の鉄をかき混ぜることを指し、一種のパドル法とみられる。「炒鋼法」は、1世紀頃の中国において行われていた製鋼法であり、「炒鋼法」によって作られた鋼材が古墳時代の日本列島にもたらされ、鉄器に加工されたといわれる。それは以下の理由による。

古墳時代の鉄器の化学成分的特徴として銅の含有量が高い値を示す試料が多いこと、また、介在物の特徴として、珪酸塩ガラスが多いことがあげられている。この鉄器の地金は銑鉄を脱炭して鋼にしたものであり、その結果珪酸塩ガラスの介在物が鋼中に残留する。この代表的事例が、埼玉古墳郡出土の稲荷山鉄剣であるとする。

佐々木らの説によれば稲荷山鉄剣はまず、「含銅」磁鉄鉱によって銑鉄がつくられ、その銑鉄を「炒鋼法」によって精練して得られた鋼によって作刀し、さらに、列島内に持ち込まれた後、彫金・金象眼された鉄剣と考えている。この稲荷山鉄剣に刻印された辛亥の年は5世紀代に比定されており、このころの日本列島でこうした鉄地金が作られたとは考えにくく、中国大陸（中国大陸→朝鮮半島経由）からもたらされた可能性がないわけではない。しかし、その「炒鋼法」の技術が日本列島に移転されたとする説は、以下の理由によって首肯し難い。

2. 1 鉄器中の高チタン鉄物

この論の根拠とされているのは、鉄器中に介在物として存在する高チタン酸化物と、鉄滓中に含まれるチタン窒化物などである。砂鉄中の FeO-TiO_2 鉄物が銑鉄浴中で起こる反応で還元され、砂鉄中の結晶鉄物相であるマグネタイト-ウルボスピネル固溶体、ヘマタイト-イルメナイト固溶体から、ウルボスピネル、イルメナイト、フェロシュードブルカイトが生成するという想定は正しい。筆者も、ねずみ銑と砂鉄を 1300°C で反応させた実験で

フェロシュードブルカイトが生成することを確認している。また、ゴマンクボ遺跡出土の鉄滓からはルチルが検出されている。

ここで、このような高チタンの結晶鉱物相が生成する条件について考察してみる。高チタン鉱物が介在物となることについては砂鉄（それに由来するノロ）の酸化鉄と溶銑の炭素との反応は、 $(\text{FeO}) + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ で表される。なお、 (FeO) は熔融 FeO 、 C は溶銑中の炭素である。

これにより、砂鉄中の $\text{TiO}_2 - \text{FeO}$ 化合物が、 TiO_2/FeO 比の大きい方向に進む（ $\text{TiO}_2 \cdot 2\text{FeO} \rightarrow \text{TiO}_2 \cdot \text{FeO} \cdots \rightarrow \text{TiO}_2$ ）可能性があることはいうまでもないが、とくに TiO_2 、 Ti_2O_3 、 TiC 、 TiN などを生じるためには強い還元状態が要求される。それは上の反応により消費された C がたえず補給されることを意味する。それは、 $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ による浸炭であっても、多量に存在する固体炭素（木炭）のとけ込みであれ、いずれにせよ結果的に溶銑がたえず再生（熔融還元）され、脱炭は進まないということになる。すなわち、 TiO_2 や TiC 、 TiN が生じるような条件は熔融還元であるにせよ、固相還元（ $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ ）であるにせよ還元であって酸化ではない。もし銑と金属酸化物によって脱炭を行うとすれば、木炭以外（例えば高温ガスなど）の熱源が必要となり、このような方法が古代で実現されたとは考えられない。

ただし、羽口付近ではブードール平衡組成を生じ、そこで TiC 、 TiN などが生成される可能性もあるが、一方、多量の FeO を含む酸化性鉄滓が生じるという炉内の不均一性が考慮されなくてはならない。

2. 2 鉄滓・金属鉄中におけるPの挙動

具体的な遺跡としては、遺物の分析結果に現れたリン（P）の挙動から北沢、空沢遺跡をあげている。穴沢らの報告ではPについては特に触れていないのでここでは赤沼説を取り上げる。赤沼は北沢遺跡について、遺跡に残留していた銑鉄塊と遺跡出土の砂鉄化学組成のうちPに着目し、銑鉄塊（ $P=0.176\%$ ）は（ $P=0.017\%$ 、ただし、穴沢らの報告では $P=0.031\%$ ）砂鉄に比べてはるかに大きい値を取るため、銑鉄塊と砂鉄の因果関係はないとし、遺跡外部から搬入されたものとしている。また、空沢遺跡については、遺跡出土の砂鉄と鉄滓中の P_2O_5 を比較しつぎのように考えている。「 P_2O_5 は酸化鉄より還元しやすいため、砂鉄中の P_2O_5 は金属鉄中に移行し鉄滓中に含まれることはない。したがって、鉄滓中に P_2O_5 は存在しないはずである。」

溶銑が生成するような条件では、原燃料中のPはすべてその銑鉄中に入るとするのが近代製鉄法の認識である。しかし、近代高炉では鉄滓中の FeO は0.5%未満であり、溶銑とともに固体鉄塊が生成することはない。逆にいつて高濃度の FeO を含有する鉄滓を生じ、溶銑とともに鉬を生じるような近世たたら、さらにはそれ以前の段階でも、炉内のPの挙動が現代高炉の場合と同じ挙動を示すと断定する理由はない。現に明治期におけるたたらの改良の試みの一つとして、低リン鉄の製造をめざす溜め吹きが行われている。

前近代製鉄遺跡におけるPの挙動を論じるためには、まず、原料と生成物との間のPの正確なバランスデータが必要となる。例えば、製鉄原料の一つである木炭中のPの量は無視できない、ということをつ記しておく^{*)}。

2. 3 精練プロセスと熱量

さらに、同論中では、反応に関わる温度については全く触れられていないが、銑を錬鉄まで脱炭させるとするならば、当然熱量の問題が論じられなくてはならないはずである。

すなわち、銑に砂鉄を加えて脱炭し、可鍛性をもつ錬鉄にしようすれば、銑のC濃度に対応する融点の上昇に見合っただけで昇温し、その温度は作業中に途切れることなく維持されなくてはならない。なぜなら、銑中の炭素と砂鉄の反応 ($\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$) は吸熱反応であり、反応時の温度降下は避けられず、したがって、脱炭された銑鉄（すなわち鋼）は熔融状態を保つことができず、反応に関わる砂鉄は銑（鋼）中に補足され脱出できずブロック状に残留してしまうのである。こうした高温をどのようにして維持したのかは不明である。したがって、この熱の保証がない限り、この論は成立しないことになる。

さらに付言すれば、もしこのような技法が存在したとするなら、明治期まで継続された前近代製精練の技法にその痕跡が存在するはずであるが、その形跡は今のところない。

以上の諸点から筆者は、わが国前近代における精練法とは、第2章で述べた精練プロセスを基本とするものであり、高温下で銑と金属酸化物を攪拌し、銑の脱炭を行ったとする精練法は、わが国前近代に存在した可能性はきわめて低いと考える。

文献と註

- (1) 例えば堪忍沢遺跡は製錬遺跡ではなく、鋼精練遺跡と考えられている。
- (2) 「古代における炒鋼法とその製品」『日本製鉄史論集』たたら研究会編 P615～616 1983年。
- (3) 佐々木稔「ふたたび古代の炒鋼法について」たたら研究第27号 PP45～49 1985年。
- (4) 佐々木稔「再び古代の炒鋼法について」『たたら研究』第27号 PP40～49 1985年。
- (5) 赤沼英男「遺物の解析結果からみた半地下式竪型炉の性格」季刊『考古学』第57号—いま見えてきた中世の鉄—雄山閣出版株式会社 PP41～45 1996年。
- (6) 赤沼英男「北沢遺跡出土“鉄滓”の金属学的解析」『北沢遺跡群』新潟県豊浦町教育委員会 PP1～5 1992年。
- (7) 赤沼英男「遺物の解析結果からみた半地下式竪型炉の性格」季刊『考古学』第57号—いま見えてきた中世の鉄—雄山閣出版株式会社 PP44 1996年。
- (8) 村上英之助「佐々木氏の「炒鋼」を疑う」『たたら研究』第32, 33合併号 PP85～86 1992年。
- (9) 桂敬「茨城県結城郡尾崎前山遺跡より発掘された製鉄関連物質の化学的研究」『尾崎前山』P50 1981年。
- (10) 佐々木稔ら「古代における炒鋼法とその製品」『日本製鉄史論集』たたら研究会編P