

報 告

UDC 669.1 "311"

自然通風炉による古代製鉄法復元実験について*

長谷川熊彦**・芹沢正雄***・天田誠一****

An Experimental Investigation into the Ancient Iron Making
Furnace by Natural Draught

Kumahiko HASEGAWA, Masao SERIZAWA, and Seiichi AMADA

1. 緒 言

近年、全国各地にわたって、古代の製鉄遺跡が次々に発見されている。しかし、形態の確認できるような炉遺構はほとんどなく、出土した炉体の一部と思われる土塊や地下の焼土、凹所の形状から推測して、火床炉、穴窯炉、舟底形炉、竪形炉などの呼称が人それぞれによつてつけられ、稼働年代の比定が行われる場合が多い。送風法としては、竈送風説と自然通風説が論議される。自然通風説は谷間に面した丘陵や海岸に近い台地に発見された遺構に対して、その地方特有の風向きに関連させてとりあげられやすく、鉄は低温で鉄鉱石から還元してできるとの説明が付随しがちである。

古代製鉄に関する研究調査には、考古学と製鉄技術の相互の領域から理解と興味を持ち合いつつ、総合かつ体系的に究明すべき問題が多い。自然通風法に製鉄炉操業の原点を求めるとするならば、その原始的様相と発達過程の探求は重要な課題であり、実験考古学としても、金属学的立場からの復元実験が唱導されるゆえんでもある。

古代製鉄炉の復元操業実験はドイツ、イギリス、ソ連など¹⁾で行われており、本邦では、近世たたら炉の実験²⁾や、小形炉による鋳づくりの試験³⁾⁴⁾の結果を見ることができ、いづれも竈や電気送風機による人工送風である。自然通風炉については、J. W. GILLES⁵⁾⁶⁾によるジーゲルランド地方に発見されたラテーヌ時代（紀元前約500年間）の炉の復元実験が注目される。

筆者らは昭和49年6月に2回、50年6月に1回、51年5月に1回、4次にわたって、一種の竪炉を築炉し、復元的設定諸条件を模索しつつ、自然通風操業実験を行なった。第1～3次実験は資金的人力的制約のため、操

業時間が短く、付帯的試験を含めて、傾向の観察的調査に終始したが、第4次実験は本実験と称し、長時間操業を行なうべく努力し、諸試料の収集をはかり、もつて、自然通風炉としての炉況の特性を把握し、炉内生成物によつて低温還元製錬の反応機構について考察を加えた。本文はその経過の概要を述べるものである。

2. 実験の諸条件

2.1 炉体構造

自然通風を利用する製錬炉の形としては、断面に比して高さの大きい竪形炉が適当となる。竪形炉と想定される製鉄遺構には、群馬県太田市菅ノ沢遺跡⁷⁾、埼玉県上尾市大山遺跡⁸⁾、新潟県豊浦町真木山遺跡⁹⁾などが該当するであろう。これらは丘陵地の斜面を掘り、三方を地山で囲んだ円形、あるいは隅丸角形に準じた断面を持ち、斜面下方側に通風孔などを設けた高さ1 m以上の形態が想像され、自然通風炉であつたか否かは別に論ずるとしても、実験に際して、古代炉の1形式として参考となり多くの示唆に富むものである。

実験炉の内形の設定は上述の遺構や近世たたら炉の寸法（表1）に準拠した。炉高は煙突効果を期待して1 m以上とし、さらに、炉口部の上に装入時移動可能の鉄板円筒をとりつけ、炉腹、炉床部は菅ノ沢遺構炉や GILLES の復元実験炉の下膨れ形が操業後の溶損崩壊した残存形態であるとの観点¹⁰⁾から、むしろ、炉床部径の縮小形を採用し、炉外形は操業上、築炉上の便宜から截頭円錐体状となる。通風孔は径60 mm、円筒羽口を使用せず直接炉壁に開孔し、常用として1個を北側に、予備用をその反対の南側におく。熔融物の抽出孔は通風孔の下方、炉底面の高さに設ける。炉底地下に、防湿のため、木炭小塊層（下部）と木炭灰、焼粘土の混合層（上部）

* 昭和52年3月7日受付 (Received Mar. 7)

日本鉄鋼協会は、長年古代製鉄法を研究しておられる会員、長谷川熊彦、芹沢正雄両氏が、昭和51年に企画された古代製鉄炉としての自然通風炉実験につき、研究委員会で説明を受け、その主旨に賛同し、同年5月実施した実験結果を収載したものである。

** 工博 相模原市上鶴間 2348 原一貞方

*** 東京都世田谷区羽根木 2-34-11

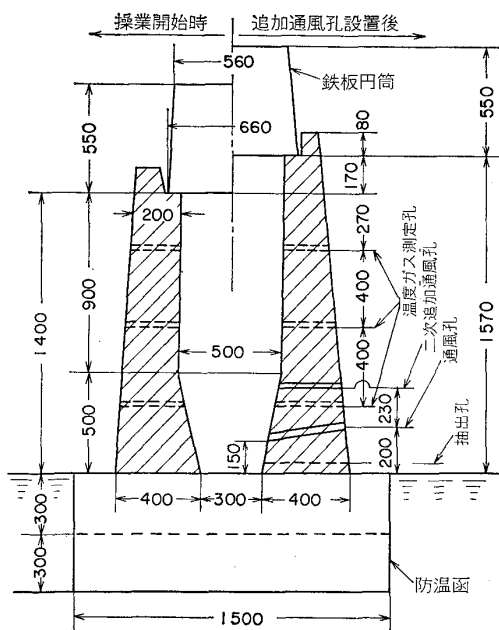
**** 刃匠 新潟県北蒲原郡豊浦村月岡

表 1 製鉄遺構、復元実験炉の内形概略寸法 (cm)

炉名 炉内形	菅ノ沢遺構		大山遺構	真木山遺構	ジークル ランド 復元炉	たたら復 元炉 側面	実 験 炉	
	1 号	3 号	B-1	B			1-2 次	3 次
炉口	35×40	44×50	55×?	55×?	φ44	93	φ40	φ40
炉床	75×65	72×70	75×?	55×?	φ90	15	φ40	φ30
炉腹高	120	130	70	80	172	110	φ60 120	φ50 135

表 2 砂鉄 (磁選別) 化学分析成分

産地	着磁率 (%)	区 別	化 学 成 分 (%)								
			T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO
島 根	67	磁 着 不磁着	64.80	18.24	72.30	4.32	2.39	0.80	0.75	0.43	0.51
			24.80			14.48	34.86	3.53	1.67	1.10	2.06
千 種	99	磁 着 不磁着	60.89	18.95	65.93	2.72	6.87	1.77	0.64	0.41	0.91
			25.68			1.73	43.25	7.91	1.60	1.93	0.27

図 1 自然通風実験 (第 4 次) 炉体図
(寸法 mm)

をつめた鉄箱を埋設す。炉形各部の寸法ならびに各孔の位置を図 1 に示す。炉の設置場所は遺構の発見されたような地勢を求めることがむずかしいので、低い谷地に面して造成された台地広場 (真木山遺構の発見地と同町内の天田宅地) とし、鉄骨上屋内に築炉する。自然風の吹きこみの影響はうけにくい。

2.2 原燃料

古来本邦における製鉄原料鉱石としては、岩鉄鉱が使用された形跡もあるが、ほとんどの製鉄遺跡の付近には砂鉄の産地があり、砂鉄採用されていたと考えられる。実験に使用した砂鉄は第 1～3 次が久留里 (千葉県) 産

鎌倉 (神奈川県) 産、本実験において、島根県産真砂と千種 (兵庫県) 産をえらんだ。とくに、島根産はガスバーナーによる下部加熱の鉄板上で攪拌しつつ焙焼処理を行なう。砂鉄の成分は採取時の選鉱度によつてちがいが、また、随伴鉱物の種類と量が造滓上に大きく影響するので、使用砂鉄について磁着分と非磁着分とをそれぞれ分析した。その結果を表 2 に見ると、島根産は砂の混在が多く、千種産はよく選鉱されたものである。これらの性状が実験結果の上に及ぼした影響については、推測の範囲を出でず確言するにはいたらない。

木炭は原始的には野焼によつてつくられたであろう。平安時代中期以前の製鉄遺跡付近には、横穴式あるいは登窯式の窯が発見される。実験用には土窯による特製の檜炭を使用し、本実験の砂鉄添加装入操業時には松炭とし、なお、その初期に松の半焼炭を追加混用した。松炭は古来極上品といわれており、自然通風炉操業にとつて適性であるとの配慮による。装入炭は長さ 100～150 mm に切断す。

2.3 築炉用材

築炉材料には耐火性ととも、造滓剤としての品質が要求される。山陰地方のたたら炉の釜土といわれる炉材は真砂粘土と赤粘土の混合物であるのも上述の意味を持つものと思われる。実験炉では、付近に産出する山砂と粘土を 3:7 の割合とし、切り藁と水を加えて混練した約 200 mm 大の塊をつみ上げて築炉を行なつた。鉱物組成をしらべると、山砂はソーダ長石 20%、灰長石約 14%、α石英約 66%、石英を含有する長石系の 0.2～0.5 mm の細粒であり、耐火度 1360°C。生粘土は α 石英を主体とし、7～10% の亜灰長石と若干のアルカリ長石、白雲母などを含み、長石と石英粒が混在し、耐火度 1485°C。両者の混合物からなる炉壁材 (操業中止後炉内影

表 3 炉材の化学分析成分 (%)

炉 材	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Ig. loss
山 砂	75.45	10.7	2.84	1.05	2.85	0.22	3.03	2.45	1.11
粘 土	67.26	16.7	2.06	0.84	1.00	0.56	2.01	1.52	7.88
炉壁材	73.16	15.6	3.49	1.00	1.52	0.46	2.53	1.89	0.26

表 4 砂鉄添加装入期操業表

時 刻 日. 時. 分	天 候 気 温 °C	装 入 回 数	木炭装入量 (kg)		砂鉄装入量 (kg)	炉 況 A 孔 : 二次通風孔 N 孔 : 北側 S 孔 : 南側
			半 焼	特 焼		
25. 9. 40	無風細雨 15°	1	12	8	千種 1.5	A 孔全開, N 孔半開
10. 15		2	4	1.5	〃	
10. 34		3	4.9	〃	〃	炎高さ 50cm
11. 02	小 雨 15.5°	4	2.6	3	2.0	
11. 28		5	1.0	5	〃	A 孔溶滓付着, 掻掃
11. 55		6	〃	〃	〃	
12. 35	16°	7	〃	〃	〃	
13. 18		8	〃	〃	2.5	N 孔全開
13. 48		9	〃	〃	島根 2.5	A 孔掻掃
14. 23	17.5°	10	〃	〃	〃	
14. 52		11	〃	〃	〃	
15. 25		12	〃	〃	3.0	
16. 00	無 雨	13	〃	〃	〃	{ S 孔一時開孔
16. 28		14	〃	〃	〃	{ N 孔滓流入
16. 58		15	〃	〃	〃	{ 炎高さ 1m
17. 27	17°	16	〃	〃	〃	
17. 55		17	〃	〃	〃	{ N 孔閉塞しやすし
18. 24		18	〃	〃	〃	{ 金棒突くと炎 1.5m
18. 57	16°	19	〃	〃	〃	
19. 24		20	〃	〃	〃	炎 70cm
19. 51		21	〃	〃	〃	{ 金棒で突くも炎少なくなる.
20. 27	21. 04	22	〃	〃	〃	
21. 04		23	〃	〃	〃	A 孔滓流入
21. 25		24	〃	〃	〃	装入中止
21. 40						炎 40cm
22. 00						炉壁取崩し開始
操業時間 12 h		総装入量		木炭 145.5 kg		
				砂鉄 61.5 kg		

響の少い個所から採取)の耐火度は 1368°C を示した。それぞれの化学成分を表 3 に見ると、耐火性は低いが、SiO₂ が多い。したがって、炉壁の造滓剤としての効用が大きくなる。

3. 操 業 状 況

3.1 木炭単味装入操業

第 1 ~ 3 次の各操業においては、前日夕方、薪焚きに着手し、夜半、木炭を充填密封して保熱した炉に、当日朝から砂鉄添加木炭装入操業を開始し、その夕方にいたって実験を中止した。砂鉄装入時間はそれぞれ 10 h 30 min, 10 h, 7 h (事前木炭単味装入 5 h) にすぎず、したがって、炉熱は十分つくにいたらず、生成物は第 4 次の本実験時の写真 2 の B, E に類似の形状の程度であった。

本実験においては、木炭単味装入期間を設けて炉熱の上昇をはかり、砂鉄操業の長期継続を企画した。昭和 51 年 5 月 22 日、実験装入操業に先き立ち、炉壁予熱のため

夕方から薪焚きと夜半の木炭充填密封のくりかえしによる加熱をつづけ、24 日にいたって、炉内物掻き出し清掃と諸計器取付を行なう。炉壁温度 (図示北側下段) は 24 日 8 時の 350°C が 16 時に 220°C となつた。

24 日 16 時 30 分、木炭装入点火し、木炭単味装入操業を開始す。ときに、北西の微風、曇天、気温 23°C。木炭 1 回装入量は 4 ~ 5 kg、装入は炉口上辺を上部レベルとして約 30 min ごとに行われて進む。23 時頃になると、通風孔先に溶融物が付着する。その度ごとに、金棒で掻き落しをするも、この現象は発生の度を増し、25 日 3 時 30 分頃には、炉頂ガス炎の高さが 600 mm ぐらいから 300 mm にまで減じてきた。小雨模様となり、気温 16°C。通風を助長するために、予備通風孔、抽出孔を開け、炉内の金棒突きを行なうも、炉況は好転することもなく、しだいに不燃木炭や半溶融滓などの堆積による炉底隆起現象の様相が現われる。その対策として、5 時から通風孔の上部に二次通風孔を追加開設し、装入炭を槽から松に切りかえ、通風孔の位置の上昇分だけ、炉高を

表 5 各 次 実 験 時 の 木 炭 消 費 比 較

実験次数	通風孔 使用状況 径×個数	調 査 期 間		期間中装入量 (kg)			木 炭 砂 鉄	木炭消費量 (kg/min)
		時・分	間時	檜 炭	松 炭	砂 鉄		
1	3 cm×4	9.20—16.15	7		47	45	1.04	0.11
2	6 cm×1, 以下同	8.10—16.05	8	68		32	2.1	0.14
3	炉腹に横穴あり	12.10—17.10	5	42		18	2.3	0.14
4	孔閉塞瀕発	22.00—5.00	7	56		0		0.13
4	二次孔開設	11.28—21.25	10		108	55	1.96	0.18
4	同上	16.00—21.00	5		55	33	1.66	0.18

つぎ足す。

この処置以後、二次通風孔先の景況は悪化する傾向もなく、炉壁温度も急騰するにいたつたので、8時30分装入を一時中断す。操業開始後 16 h, 木炭総装入量 205 kg, 装入回数 29 回。

3.2 砂鉄添加装入操業

25日 9時40分、砂鉄添加操業に移行する。装入は表4に示す経過をたどり、炉壁温度は上限に近づき、11時過ぎる頃から二次通風孔先に溶融物が付着しはじめ、これを掻きとると、炎は1 mの高さに達するときがあり、装入物の下降速度もやや速くなる傾向が現われる。15時に閉塞していた1次通風孔を金棒で突くと、鉍滓が孔内に流入し、通風孔付近の炉壁の浸食が進んできている状況を示し、16時頃以降、通風孔先に溶融物の付着が頻発し19時頃には金棒突きの効果も少く、抽出孔からの溶滓の流出誘導を試みてもその気配が見えず、通風はしだいに継続困難の様相を呈してきた。ここにおいて、自然通風による炉況の特性についておおよそ知ることができたとの観点から、長時間操業の敢行を予定変更して、実験の終止を決断する。時に 21 時 25 分、木炭装入開始から約 29 時間、砂鉄装入期間約 12 時間である。

4. 操業記録の検討

4.1 炉内通気

炉内への送風は自然風の吹きこみをもとめず、炉自体の吸気現象にもとづく流入空気によつて行われた。通気圧を通風孔にとりつけた鉄管(径 80 mm, 長さ 500 mm)内においてピトー管によつて測定すると、トルエン液(s.g. 0.87)の示す差圧が 0.3~0.4 mm. この数値から概算した流速は 2.1 m/s, 風量はほぼ 0.6 m³/min, この空気による木炭燃焼量は 0.8~0.16 kg/min 程度となる。各次実験時の木炭消費量を表5によつて比較すると、本実験の砂鉄装入操業時がもつとも多いことになる。自然風利用による炉内への送風量は、ビュフォートの風力階級表¹¹⁾によれば、山谷風の風力が 0.3~3 mm 水柱であるので、本実験の場合は通風量はきわめて少い。それにしても、自然通風炉では、竈による送風量に較ぶべくもない。また、山谷風は連日連夜にわたつて、同方向、同風力がつづくわけではないので、炉内温度の

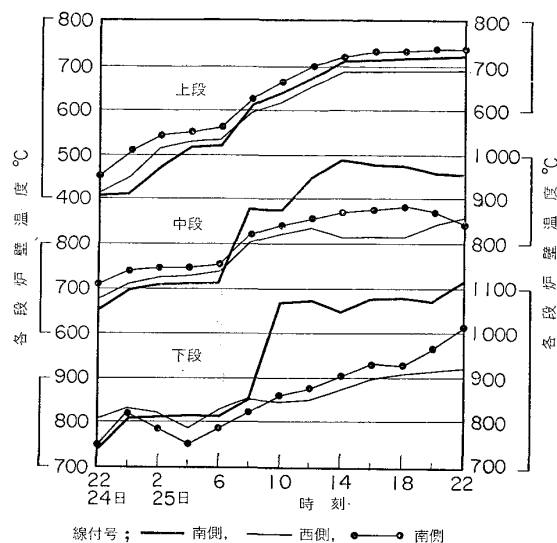


図 2 時間経過と炉壁温度変化

不安定を生じやすい。自然通風操業が行なわれたとすれば、古代人たちは現代では思い及ばぬ経験から案出した方法が行なわれていたかも知れない。

4.2 炉内温度

炉内温度察知の手段として、炉形図に示す北南西各壁の上中下3段に、先端 20 mm を閉塞した孔にサーモカップル管を挿入して、炉壁内温度を測定す。図2の温度線を見ると木炭単味装入期間中は上昇過程にあり、砂鉄装入期の進むにつれて上限に近づいている。通風孔側の急騰は測定位置が2次通風孔開設の影響をうけ、かつ、炉壁が浸食されてきたためであろう。

表6は通風孔側からサーモカップル管を炉内に挿入して测温した数値で、炉壁と炉心との中間から炉心寄りに最高部があり、通風孔レベルでは1300°Cを越えた温度に達しているが、風量が少いので、その範囲は狭く、小さいことになる。

4.3 炉内ガス

分析用ガスは温度測定孔の傍に設けた南北、上中段の測定孔に鋼管(径 6 mm)を挿入し、ポンプで吸引採取してオルザット装置によつて測定す。各個所のガス成分は表7によると、ばらつきが大きく、相関性ははつきりしない。強いて求めれば、通風孔側に CO₂ が多く、CO

表 6 時間経過にともなう炉内温度分布

経過 時間	測定 位置	炉 内 温 度 (°C)				
		南側	中間	炉 心	中間	北側
1	下			1 260		
6	下中			1 220 1 140	1 300 1 200	1 200 1 160
12	下中上	1 000 890 780	950 820	1 320 1 100 850	1 250 1 060 790	1 140 980 720

北側：通風孔側

表 7 炉壁内側ガス成分

測定 位置		時 刻 時・分	ガ ス 成 分 (%)			
			CO ₂	O ₂	CO	
北 側	上 段	11.10	2.2	0	30.6	
		14.40	6.6	0.4	21.5	
		16.35	5.3	0.4	22.6	
		20.50	12.8	0.7	15.0	
	中 段	14.20	16.3	0.6	14.1	
		16.50	7.7	0.3	17.7	
		21.05	8.1	0.4	16.8	
		南 側	上 段	12.20	3.0	0
13.30	2.7			0.1	29.2	
16.10	11.3			0.7	14.1	
20.05	7.1			0.4	20.5	
中 段	13.45		10.2	0.3	16.9	
	16.20		3.9	0.2	25.0	
	21.15		5.2	0.4	24.9	

+CO₂ が少い、そして上段の CO が中段よりも増加の傾向がある。炉内のガスが偏流し、木炭が上部で消費されているためであろう。O₂ の含有はガス採取の際の空気流入によるものと思われる。

4.3 操業中止後の炉壁溶損状態

炉壁の溶損状態は、製鉄遺構の炉原形を想定するための示唆を秘めているはずである。

第1～3次実験炉では、炉温が高くならなかつたので通風孔付近の壁に、半溶解鉍滓状物が付着し、炉底部において半溶解生成物塊が溶着している程度であつた。

本実験炉の炉内壁は通風孔側において、中段以下がガラス状に変色し、通風孔上部から浸食が大きくなり、炉底に向つて、半溶解生成物塊が食い入る。写真1は向つて右が通風孔側、炉壁にさしこんだ上下の鉄管は通風孔の位置 t_2 , t_1 を示し、付近の炉壁厚さは約 200 mm、炉床下部と炉底部には生成塊を離脱した跡が見られる。この状態の観察によつて、操業中の通風孔閉塞や炉底隆起などの現象発生の素因や炉床部拡大進行の状況が察知される。



写真 1 通風孔側炉壁下部溶損状態

5. 炉内生成物

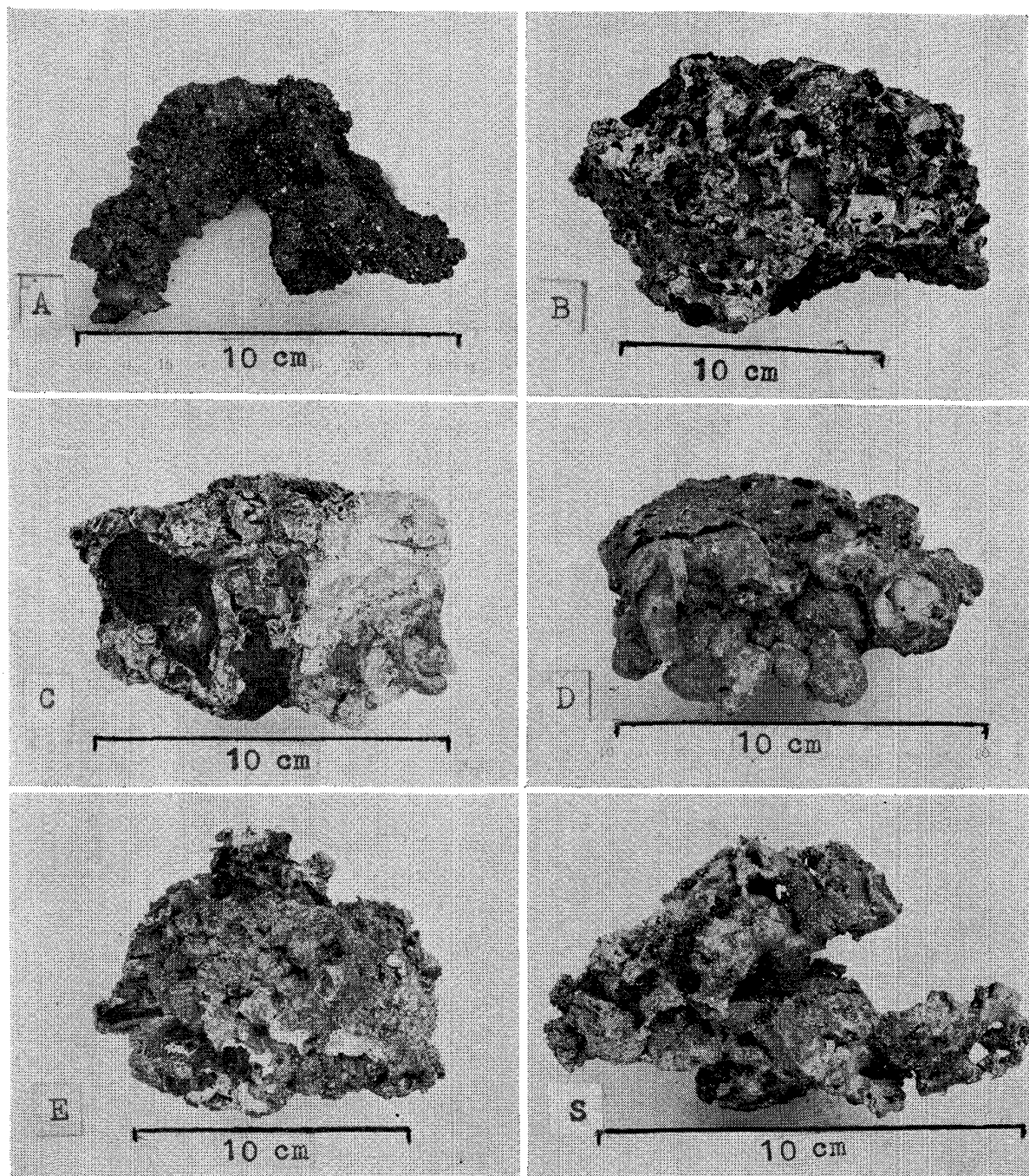
5.1 操業中止後の炉内残留物

操業終止にともなう装入停止の1 h 後、装入レベルが約 400 mm 下降した時、東側炉壁を上部から取り崩しつつ、炉内残留物を順次に取り出し、翌日になつて炉床、炉底に固着した塊を掘り取る。

下降した最上層約 100 mm には木炭のみで、それ以下になると砂鉄が木炭間に残っており、さらに 300 mm 下がった炉口から 800 mm 付近では、砂鉄粒が相互付着し合い、下降するにしたがい、焼結状(写真2.A)を形成し、その量を増す。木炭は 30 mm 以下に小形化する。通風孔レベルあたりから、木炭をまきこみ、鱗片状還元鉄を混有して、表面のガサガサした半溶解塊(写真2.B)が現われ、硬い岩磐状塊(写真2.E)とともに、炉底残存物を形成している。表面が平滑な流動状を表わした鉄滓はきわめて少く、通風孔先の下部と思われるところから、瘤状に垂れさがつた形(写真2.D)また、溜つてうづくまつた形をしたものが発見された。そして、その付近の半溶解塊にまじつて、磐状にまで形成するにいたっていないスケルトン状の鉄の集塊(写真2.Sはその1折断面)約 2.5 kg が採取された。そのほかに、鉄片、鉄粒が写真2のB, C, D状の塊を粉砕することによつて収集できたが、その量は少い。

5.2 生成物に対する考察

表8, 9は写真2が示す炉内生成物の化学成分を列記



A : 砂鉄焼結状物
C : 造滓過程物
E : 含末還元砂鉄半溶解物

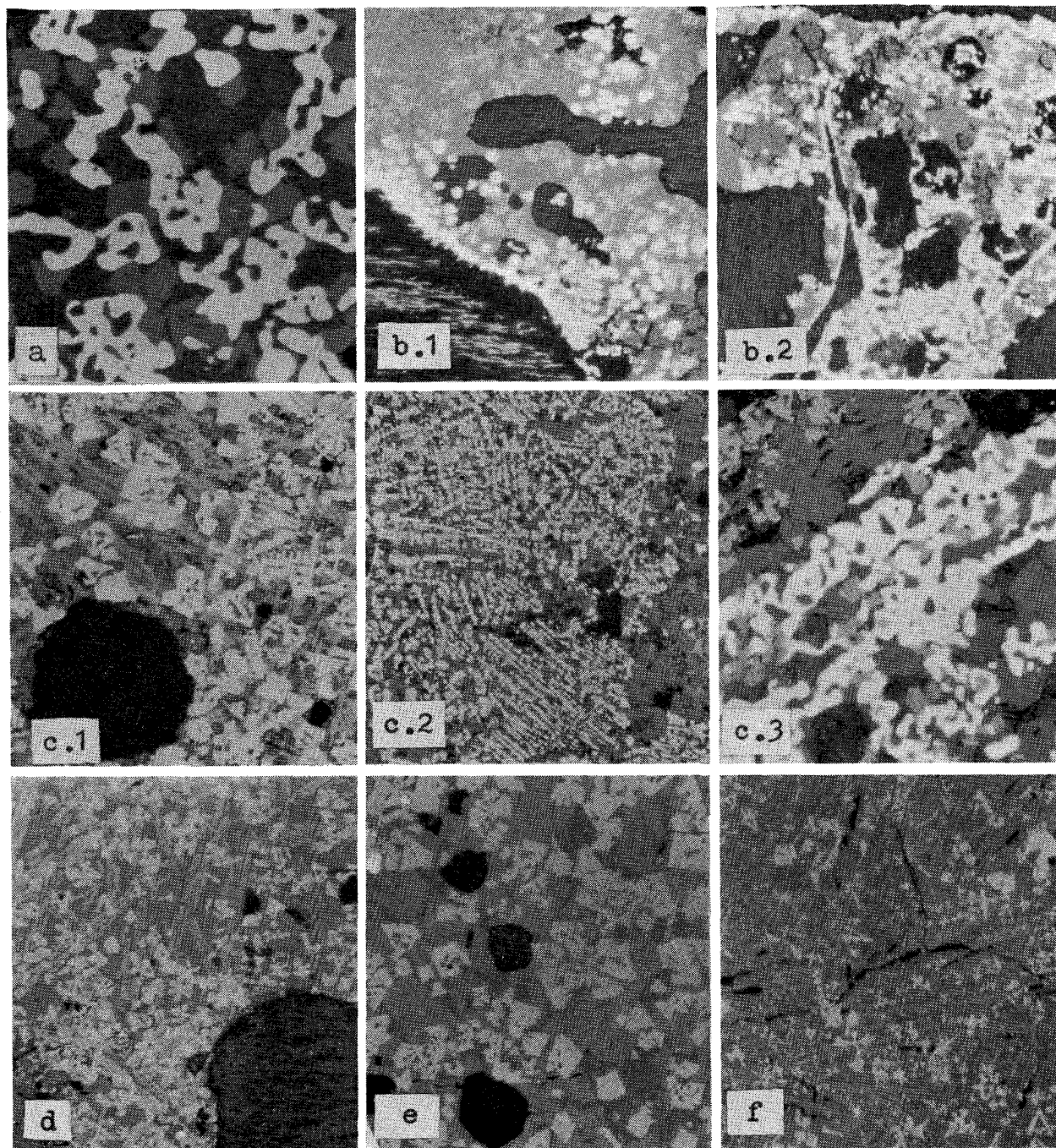
B : 含鉄片半溶解物
D : 流動化生成滓
S : 生成鉄塊

写真 2 炉 内 生 成 物 外 観

し、写真 3 はそれらの一部分の顕微鏡組織写真である。これらを見くらべると、低温炉内における製鉄反応機構が察知され、自然通風炉の生成物の特質が指摘できる。

A 塊は砂鉄粒がガス還元され、未還元粒とともに、滓化の進まぬ状態で相互に溶着して混在する。B 塊になると、写真 3. b が示すように、木炭との接触部に鱗片状鉄が生じ、また、粒状鉄も凝集してきている。やがて、造滓夾雑物は温度の上昇とともに増加する FeO によって、熔融温度の低いファイアライ ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) の晶

出したガラス状地をつくり、浸食された炉壁材が溶剤作用して、鉍滓化を助長する。C 塊は写真の向って右側が下方である。同塊内には高含鉄部と低含鉄部があり、顕微鏡写真 3 の c.1 および c.2 において見られるように、マグネタイト (Fe_3O_4) とウースタイト (FeO) との晶出がことなるような熔融状態にあつた部分から形成されており、c.3 は金属鉄の凝集しつつある部に相当する。C 塊はその形状から見ても、含鉄半溶解体が熔融滓となつて流動し、鉄を分離する過程についてきわめて示唆的で



a : (写真A)塊, b.1, b.2 : (写真B)塊
 c.1, c.2, c.3 : (写真C)塊, d : (写真D)塊
 e : (写真E)塊, f : 通風孔流入滓

写真 3 炉内生成物 (写真 2) の顕微鏡組織 (倍率50)

ある。写真3のd, fはいずれもマグネタイトを晶出して、流動化にまで溶けていたことを明らかにする。E塊は写真3.eを見ると、半還元マグネタイトが存在し、分析値によると、金属鉄が少く、FeOが多く、低温過程また、生鉄降りによる生成物であることがわかる。

生成鉄塊の含有する炭素の分析値は1.0~1.5%である。EPMAによると、鉄塊中にまきこまれた滓の部分にCの存在が認められたので、炭素含有量については、木炭混入の影響を考慮する必要があるかも知れない。塊の折の断片を試料とした顕微鏡観察では、大部分が写

真4(S.1)の鋼組織を示し、過共析鋼としての初析セメントライトがはつきりしない。写真4(S.2)はフェライトのある部分が割然しており、鉄塊が炭素含有量のちがつたものの溶着形成体であることを明らかに示す。半溶解体の塊を破碎して採取した鉄片には、炭素含有量が少く、小数点以下2桁代にとどまっている。

鋼の生成機構に関しては多くの発表^{12)~14)}があり、また、高炉内融着帯の溶鉄溶滓の調査¹⁶⁾や、鉱石の還元と吸炭についての研究¹⁷⁾などが報告されているが、それらは鉄鉄の生成がともなう場合の見解である。ここでは、

表 8 炉 内 生 成 物 の 化 学 分 析 成 分

試 料		化 学 成 分 (%)									
		T.Fe	M.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	MgO	MnO
A	塊	59.64	43.15	9.25	15.56	2.49	1.84	6.16	0.21		
B	塊	36.39	27.78	2.22	28.86	4.99	4.39	3.94	0.31		
C	高 鉄 部	63.07	40.44	21.77	13.50	2.56	1.59	4.99	0.26		
塊	低 鉄 部	38.78	3.59	33.51	25.89	4.91	4.05	4.16	0.17		
D	塊	33.29	1.84	32.30	30.89	5.85	5.08	4.33	0.12	1.47	0.88
E	塊	45.00	1.16	46.10	21.58	3.81	1.84	6.40	0.35	1.03	0.98
通風孔流入滓		35.83	1.56	30.45	31.13	5.04	1.76	6.38	0.20	0.99	0.90

表 9 鉄 塊 鉄 片 の 化 学 分 析 成 分

試 料		化 学 成 分 (%)										*太平洋金属(株)測定
		C	G.C	全Si	全Mn	P	S	全Ti	全V	Ni	Cu	
鉄塊部	1 ×	1.32	0.076	0.18	0.01	0.062	0.004	0.04	0.01			
	2 ×	1.22	0.002	0.09	0.01	0.034	0.003	0.01	0.01			
	3	1.53		0.07	0.01	0.023	0.006	0.04	~	0.03	0.02	
	4	1.03		0.04	0.02	0.029	0.006	0.01	0.01	0.02	0.02	
片 状 鉄		0.04	0.002	2.73	0.28	0.053	0.011	1.66	0.11			

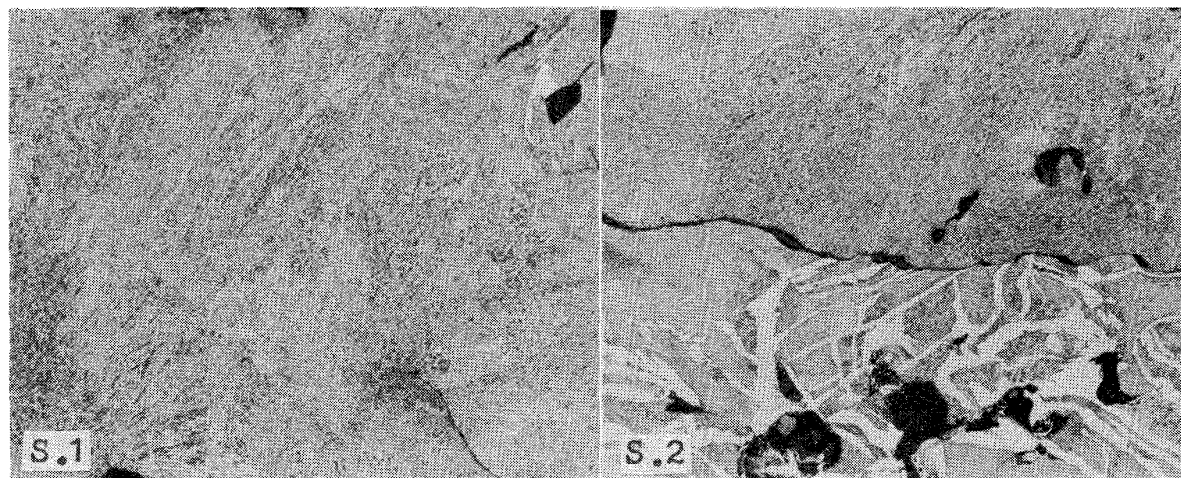


写真 4 鉄塊折断面顕微鏡組織 (倍率50) 腐蝕液 2%ナイタール

上述の炉内生成物の性状から考察してみよう。

ガス還元された砂鉄粒は相互にゆ着し、しだいに連結状を拡げ、夾雑鉱石を溶出離脱して、片状や粒状の金属鉄となり、熔融温度の低い含鉄滓が生成されるようになると、炉温の上昇とともに吸炭し、鉄—炭素状態図の固相線以上に達し粘性を増し、鉱滓の流動化にともない凝集して、スケルトン状鉄塊片を形成するようになり、さらに、高温域が拡がれば、鉄塊は肥大して磐状化する。温度の上昇は吸炭をすすめ、銑鉄が生成されることになろうが、自然通風炉の場合には、磐状肥大に限度がある。

GILLES の実験結果を見ると、通風困難となるまでの

操業時間が 30 h、生成鉄は 17 kg を収集、その平均炭素含有量 0.09%、Si が SiO₂ として検出されている。炉壁の溶損度も少く、本実験より炉温が低い状態にあつたと思われるのだが、その原因は鉱石の装入比、炉床の広狭のちがいにあるのであろう。

本実験生成のスケルトン状鉄塊は残材 300 g について鍛冶炉で加熱鍛打した結果、炭素含有量 0.5% の鉄片を得た。

6. 結 言

古代において操業されたといわれる自然通風炉について、自然風の吹きこみによることなく、炉自体の通気機

能にもとづく通風炉を設定して、製鉄法の復元実験を行ない、その性能を究明した。実験は長谷川が主唱し、資金調達にあたり、芹沢の計画と実施への参与、天田の諸材料、実験場の提供と作業施行によつて共同的に進められ、4回にわたつて行なわれた、4次本実験は規模も小さく、調査対象も限定されており、今後の実験調査にまつところが多いが、次の諸見解が得られた。通風孔先において炉温は1300°Cに達するも、風量が過少のため、その範囲は狭い。炉の熱容量が小さいので、炉底隆起、通風孔閉塞などの現象を生じ、炉況は変動しやすい。生成鉄塊は還元鉄が溶融流動化鉍滓の造成にともない凝集離脱して形成される。炉床残留滓はほとんど半溶解塊であり、鉄の生産性はきわめて小さい。精選された鉄塊片は再加熱し鍛打によつて加工が可能と認められる。要するに、自然通風炉稼行に対する解釈は、その時代の技術水準と鉄の需要度を想定勘案し、炉の原始性をどの程度認容するかによつて、多様化するであろう。製鉄炉遺構の考察にあたつては、鑪が古くから使用されていたことを認識し、単にその地勢にとらわれずに、炉内壁の浸蝕状態、出土鉄滓の性状などを加味して検討すべきであることは論をまたない。

本実験は駒沢大学考古学研究室倉田芳郎教授、穴沢義功氏と学生諸君の作業応援、太平洋金属(株)新発田工場研究室的諸計器設置測定への援助、天田日本刀鍛錬所天田貞夫氏の操業推進を得て敢行するにいたつた。その尽力によるところが多い。原材料、生成物の諸検定調査は日

本鉄鋼協会の賛同を得て、新日本製鉄(株)に依頼して、同社の基礎研究所、製品技術研究所、広畑製鉄所において行われた。なお、多くの方々の励ましをうけた。ここに関係諸氏に対し、深甚の謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 長谷川熊彦: 鉄と鋼, 54(1968), p. 1177
- 2) 日本鉄鋼協会: たたら製鉄の復元とその鉍について, (1971)
- 3) 隅谷正峯: 刀剣美術, 2, 4, 5, 6 (1972)
- 4) 横川清志: たたら研究, 19・20 (1976), p. 1
- 5) J. W. GILLES: Stahl u. Eisen, 78 (1958), p. 1690
- 6) 長谷川熊彦: たたら研究, 12 (1968), p. 1
- 7) 飯島武次, 穴沢義功: 考古学雑誌, 55 (1969) p. 44
- 8) 高橋一夫: 考古ジャーナル, 112 (1975), p. 16
- 9) 新潟県教育委員会: 調査報告未発表, 私信 (1973)
- 10) 芹沢正雄: 産業考古学会, 2 (1977)
- 11) 小学館: 大日本百科辞典, 4巻 (1968), p. 383
- 12) 山本真之助: たたら研究, 2 (1959), p. 1
- 13) 小塚寿吉: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1763
- 14) 大蔵明光: 金属, 40 (1970) 8, p. 33
- 15) 片岡三郎, 井ノ上直哉, 畑 明郎: 金属, 45 (1975) 3, p. 51
- 16) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 559
- 17) 江本房利: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 340