

古代仙台平野における鉄生産活動について

—宮城県柏木遺跡検出竪形炉の再検討を通して—

関博充¹, 女鹿潤哉², 赤沼英男³

Analysis of Iron Production Activities in the Ancient Sendai Plains

— Based on Reexamination of the Shaft Styled Furnaces Excavated from the Kashiwagi Site,
Miyagi Prefecture, Japan —

Hiromitsu SEKI¹, Jyun'ya MEGA² and Hideo AKANUMA³

-
1. 岩手県立博物館研究協力員 / 東北大学大学院, 980-8576 宮城県仙台市青葉区川内41. Tohoku University,
Aoba-ku, Miyagi 980-8576, Japan.
2. 岩手県立盛岡第一高等学校. 3. 岩手県立博物館.
-

Abstract

In order to interpret the transition to and popularization of iron and iron artifacts around the Sendai plains in the Japanese Ritsuryo era, it is necessary to consider the following three factors: production of iron from start to finish in Sendai plains, supply of raw iron materials and iron objects from other regions, and iron recycling. To analyze the circumstances of producing iron from start to finish, we investigated the function of four shaft-styled furnaces found at the Kashiwagi site in Miyagi prefecture, Japan. This was done by archaeometallurgical analysis of tuyeres, furnace walls and iron lumps excavated along with the furnaces.

As a result, iron sulfide compounds were found in the iron lumps and a residue of copper compounds was also found in the brown-black material attached to the tuyere surface. There was no correlation of the three element ratios of Ni, Co, and Cu between the iron lumps excavated from the site and the iron sand sampled around the Kashiwagi site. It is difficult to conclude that smelting with iron sand around the Kashiwagi site as the starting material was accomplished using the four shaft styled furnaces, considering that tuyeres of a different type were found and an opening area was installed in the front of one of the shaft styled furnaces.

It would be best to further clarify the function of the shaft styled furnaces by a detailed survey of the archaeological objects related to the iron excavated along with the furnace. Furthermore, comparative discussion of the archaeometallurgical results of shaft styled furnaces excavated from other archaeological sites should be undertaken.

1 はじめに

仙台平野およびその周辺地域における鉄・鉄器普及とその変遷解明には、仙台平野内における一貫生産、他地域からの原料鉄および鉄器供給、前代に使用された鉄器の再利用という3つの要素を考慮に入れる必要がある。宮城県仙台市郡山遺跡、同大崎市名生館官衙遺跡、同東松島市赤井遺跡の、7世紀後半～8世紀前半に比定されている官衙跡または城柵跡から出土

した鉄器の金属考古学的調査を行った結果、3つの遺跡ではいずれも組成の異なる地金を素材とした鉄器が使用されていたことが確認された(関ほか2006; 2007; 2009)。複数の地域で製作された鉄器が、官衙あるいは城柵において使用されていた可能性が高い。

仙台平野およびその周辺地域では、律令期に比定される製鉄遺跡が検出されている。1987年の考古学の発掘調査によって、宮城県多賀城市柏木遺跡からは4基

の竪形炉跡が出土した（多賀城市埋蔵文化財調査センター 1989, 以下, 多賀城市埋文とする）（図1）。1984年から1987年まで、福島県相馬市武井地区では火力発電所建設および関連開発事業に伴う発掘調査が実施され、竪形炉跡4基、箱形炉跡18基が確認された（福島県教育委員会 1997, 以下, 福島県教委とする）。南相馬市金沢地区においても、1988年から1994年まで火力発電所建設および関連開発事業に伴う発掘調査がなされ、竪形炉跡10基、箱形炉跡96基が検出された（福島県教委 1995b, 飯村 2005）（図1）。報告書によると、上記3地域で見つかった竪形炉および箱形炉のいずれもが、砂鉄を製鉄原料とする製鉄炉と判定されている（多賀城市埋文前掲, 福島県教委 1995b; 1997）。仙台平野における鉄・鉄器普及に、これら3地域で製造された鉄が重要な役割を果たしたものと推定される（註1）。3地域における生産状況および生産された鉄の仙台平野における供給状況の解明は、律令期の仙台平野における鉄器普及ならびに日常生活に鉄器が果たした役割を知る上で、きわめて重要である。

本稿ではその第一歩として、柏木遺跡検出竪形炉の形態と機能について再検討した。その結果、柏木遺跡出土竪形炉の構造、羽口の製作方法とその装着角度が、武井・金沢両地区製鉄遺跡群で見つかった竪形炉とは異なることが判明した。これらの結果は、柏木遺跡および武井・金沢両地区製鉄遺跡群において検出された竪形炉を、直ちに同一機能とみなすことが危険であること、操業に従事した技術集団の系譜に違いがあった可能性のあることを示している。3地域において確認された竪形炉の詳細な機能を解明し、主生産物の組成と仙台平野から出土した鉄器地金の組成を対比することによって、律令期の仙台平野における鉄器普及に、3地域が果たした役割を検討する上での重要な情報を得ることができる。以下に調査結果を述べる。

2 柏木遺跡出土鉄生産関連遺構と遺物

1987年、多賀城市埋蔵文化財調査センターが行った緊急発掘調査によって、柏木遺跡（図1）では、4基（1～4号）の炉跡が検出された（多賀城市埋文前掲）。4基の炉は北から南に緩やかに傾斜する丘陵上に構築されている。遺構の切り合い関係から、3号炉が最も新しく、次が1号炉、2号炉と続く。最も古い炉が4号炉である（図2）。なお、4号炉は1・3号炉に削平されたため、炉の構造および付随設備の存在は不明である。

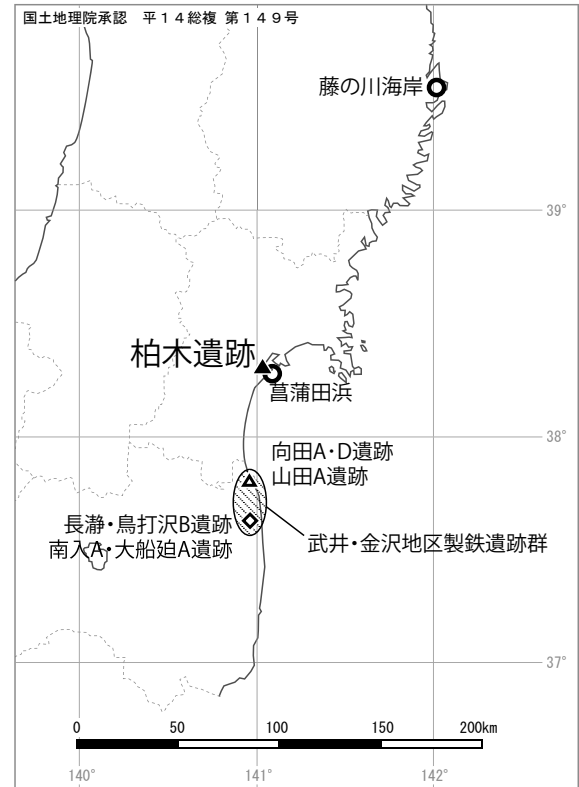


図1 本稿で扱った遺跡の所在と砂鉄の採取場所
国土地理院承認平14総複第149号(2002)を基に作成。

報告書によると、1～3号炉はいずれも凝灰岩質の地山を隅丸方形に浅く削り、その掘り込みの中心付近をさらに円筒柱状に掘り込んでいる。隅丸方形掘り込みの中に黄橙色のシルトを敷設し、円筒柱状掘り込み内をスサ入粘土で覆った後、さらにスサ入粘土を使って炉の上部が築炉されている（図2）。

4号炉を除き、炉跡の斜面上部には、長軸200～250cm、短軸90～180cm、深さ20～50cmを計る長方形の竪穴が、斜面下部には長軸250～450cm、短軸200～250cm、深さ20～100cmの竪穴が確認された（図2, 表1）。斜面下部およびさらにその斜面下には、鉄塊、炉壁、羽口（註2）、流状滓、塊状滓が大量に堆積していた。

3基の中でも、最も残存状況が良好な炉は3号炉である。炉底部平面は長軸約60cm、短軸約50cmの楕円を呈し、残存する炉壁の高さは約80cmを計る（図2）。炉壁は炉の最頂部に向かいやや窄まる。炉壁最頂部の炉内側には、スサ入粘土が3層重ねて貼られていた（多賀城市埋文前掲）。

炉前方部には、約50cmの細長い礫で上部と両側部を囲んだ、高さ約50cm、幅約70cm程度の方形を呈する開口部が見られる（図2c₁）。発掘を担当した多賀城

表1 本稿で扱った竪形炉の概要

遺跡名(所在地)		柏木(宮城県多賀城市)				武井地区(福島県相馬市)					
検出された竪形炉の数		4				向田A		向田D	山田A		
竪形炉跡の番号		1号	2号	3号	4号	4		1号	3号		
竪形炉の立地		立地場所	南向斜面			南向斜面		東向斜面	南向斜面		
		傾斜角(度)	15~20			12~17		18	6		
炉跡に付随する設備	斜面上部	平面形	長軸(cm)	200	220~250	220	削平により不明	長方形竪穴	長方形竪穴	長方形竪穴	長方形竪穴
			短軸(cm)	90	120~140	180		230~240	207	270	230
			深さ(cm)	20~50	50	5~40		160~200	142	100	84
	斜面下部	平面形	長軸(cm)	300	250	450		長方形竪穴	楕円形竪穴	三角形竪穴	長方形竪穴
			短軸(cm)	250	200	250		310	270~300	430	540
			深さ(cm)	60~100	20~80	80		300	200~270	330	370
炉跡	炉形状	平面形	長軸(cm)	円形	楕円形	楕円形	円形	楕円形	円形	台形	円形
			短軸(cm)	70	55	50	40	50	55	65	46
		横断面形		長方形	長方形	長方形	長方形	台形		台形	長方形
		縦断面形		不明	不明	長方形	不明	不明	不明	不明	不明
	炉壁	残存高(cm)	不明	不明	100	不明	85	不明	不明	50	
		厚さ(cm)	不明	不明	4~8	不明	不明	不明	8	不明	
		材料	スサ入粘土			不明	スサ入粘土				
	炉内状況	炉床部の色	不明	不明	褐色	赤褐色	青灰色	不明	不明	青灰色	
	壁前方の開口部	礫の有無	不明	不明	有	不明	不明	不明	不明	不明	
	羽口	直線型	内径(cm)	12~14	12	7.2~13	12	11~12.5	10	7.2~12.3	未検出
外径(cm)			15~17	15	13~18	16	16.4	17.6	12.8~16.8	12	
装着角度(度)			不明	不明	60	不明	72	45	67~75	不明	
製作法/調整痕			紐積上・布目圧痕/ナデ				紐積上/ナデ				
ラッパ型		内径(cm)	未検出	3	未検出	未検出	未検出	未検出	2.4	未検出	未検出
		外径(cm)		6.8					4.2~5.6		
		装着角度(度)		90					不明		
		製作法/調整痕		不明/ナデ					貼付/ナデ		
推定年代(共伴する土器の編年)		8世紀前半				8世紀後半~9世紀	不明(2号炉より古い)	不明	9世紀前半		
引用報告書名		多賀城市埋文1989				福島県教委1989		新地町教委1987	福島県教委1997		

遺跡名(所在地)		金沢地区(福島県南相馬市)											
検出された竪形炉の数		長瀬		鳥打沢B	南入A	大船迫A							
竪形炉跡の番号		2号	3号	10号	18号	22号	1号	1号	42号	58号	59号		
竪形炉の立地		立地場所	西向斜面		南向斜面	西向斜面	南向斜面	南向斜面	南東向斜面	南向斜面			
		傾斜角(度)	20	25	25	10~12	25	13	18	12	12		
炉跡に付随する設備	斜面上部	平面形	長方形竪穴			削平により不明	長方形竪穴		長方形竪穴				
			長軸(cm)	270	240		260	242~244	削平により不明	248	240	210~230	削平により不明
			短軸(cm)	80	70		120	106~110		86	90	48~90	
	深さ(cm)	15~35	12~42	12~36	56		20~42	41		6~13			
	斜面下部	平面形	不整長方形竪穴		長方形竪穴		三角形竪穴	三角形竪穴	隅丸長方形竪穴	長方形竪穴	三角形竪穴	不整方形	
			長軸(cm)	600	280		510	384	550	340	900	290	
短軸(cm)			350	180	310	320	350	200	500	258			
炉跡	炉形状	平面形	長軸(cm)	隅丸長方形	隅丸長方形	楕円形	隅丸長方形	円形	楕円形	隅丸長方形	隅丸長方形	楕円形	円形
			短軸(cm)	140	40~50	90	88	45	100	64~120	100	70	64
		横断面形		長方形	長方形	長方形	不明	台形	不明	台形	長方形	長方形	長方形
		縦断面形		不明	長方形	長方形	不明	不明	不明	不明	長方形	不明	不明
	炉壁	残存高(cm)	不明	60	15	不明	120	不明	不明	60	60	48	
		厚さ(cm)	不明	9~12	6~12	不明	4~16	不明	不明	6~30	6~15	6~12	
		材料	スサ入粘土										
	炉内状況	炉床部の色	青灰色	青灰色	青灰色	青灰色	不明	青灰色	青灰色	不明	不明	不明	
	壁前方の開口部	礫の有無	不明	未確認	開口部無	不明	未確認	不明	不明	未確認	未確認	未確認	
	羽口	直線型	内径(cm)	8.8~9.7	8.5~12	破片により不明	8~9	6~8	7~10	8~13	7.5~8	9~11	6.5~7.2
外径(cm)			14~16	11~19	12~15		12~14	12~14	13~18	10~13	15.8~16	11~14	12
装着角度(度)			不明	44	50~60		65~70	35~45	不明	40~45	45	40~45	60
製作法/調整痕			紐積上/ケズリナデ		紐積上/ケズリナデ				紐積上/ケズリ		紐積上/ケズリナデ		
ラッパ型		内径(cm)	未検出	2.7~3.3	2.4~4	未検出	2.8~3.2	2.2~2.8	未検出	未検出	未検出	未検出	
		外径(cm)		5.2~9.2	4.8~7.2		5.2~7.6	4~6.4					
	装着角度(度)	60		70	45~90		70						
	製作法/調整痕	貼付/ヘラケズリ・指ナデ		貼付/ナデ	ケズリナデ		不明						
推定年代(共伴する土器の編年)		9世紀前半	8世紀末~9世紀前半	8世紀後半	9世紀前半	8世紀後半	8世紀後半~9世紀初頭	9世紀前半	8世紀中葉~後葉	8世紀第2四半期~第3四半期			
引用報告書名		福島県教委1991			福島県教委1992	福島県教委1991		福島県教委1995a	福島県教委1995b				

* 各報告書の記載および掲載実測図を基に作成。

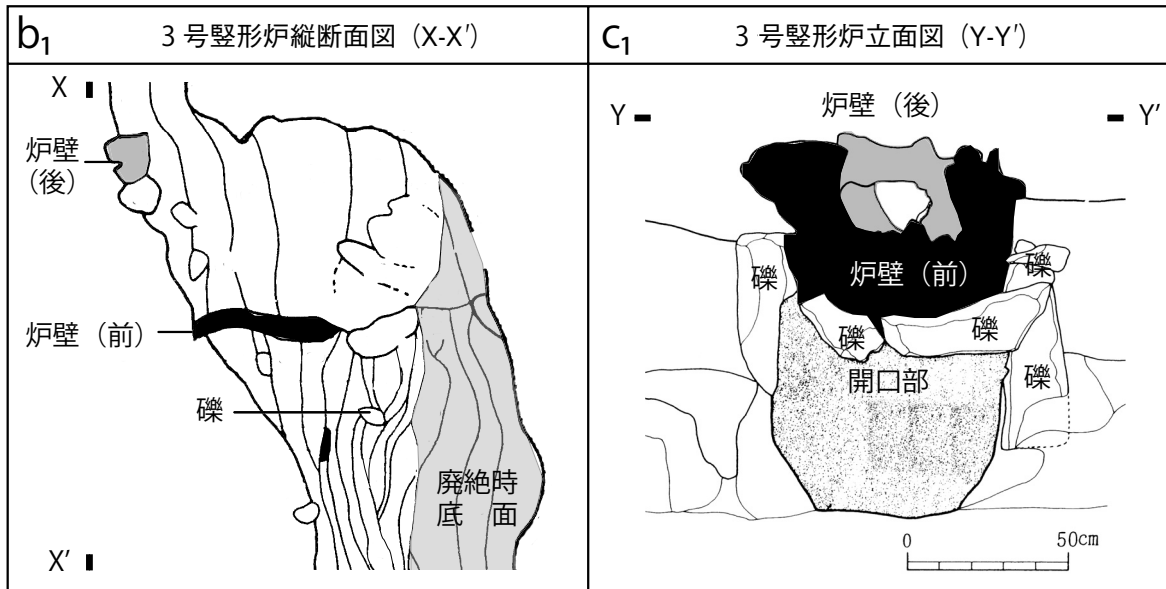
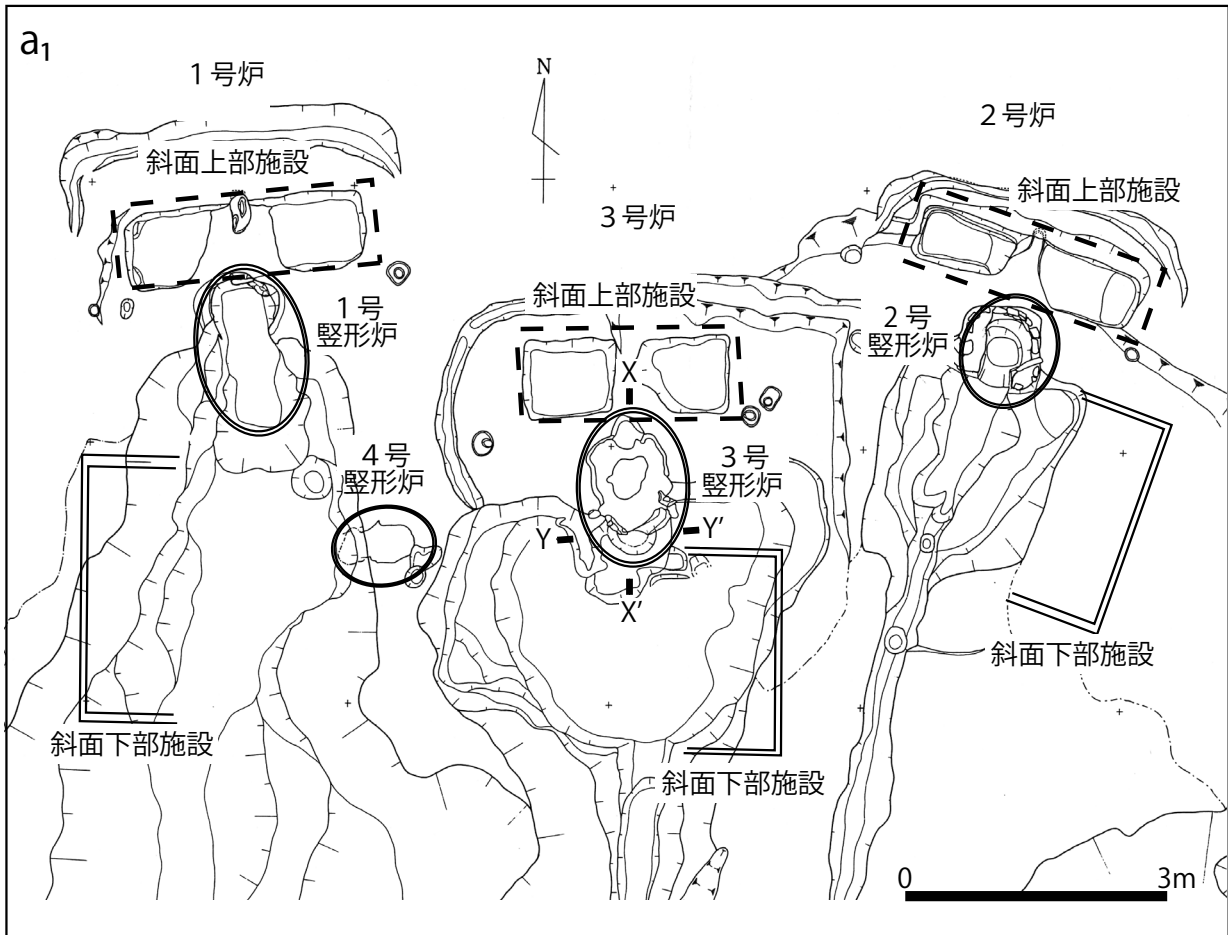


図2 柏木遺跡出土豎形炉の実測図

発掘調査報告書（多賀城市埋文 前掲）を基に作成。

a₁：全体平面図，b₁：3号豎形炉縦断面図，c₁：3号豎形炉立面図。

a₁の実線内に豎形炉，波線部に斜面上部施設，二重線に斜面下部施設が設置。

b₁・c₁：それぞれa₁のX-X'断面図とY-Y'の立面図。縮尺は同じ。

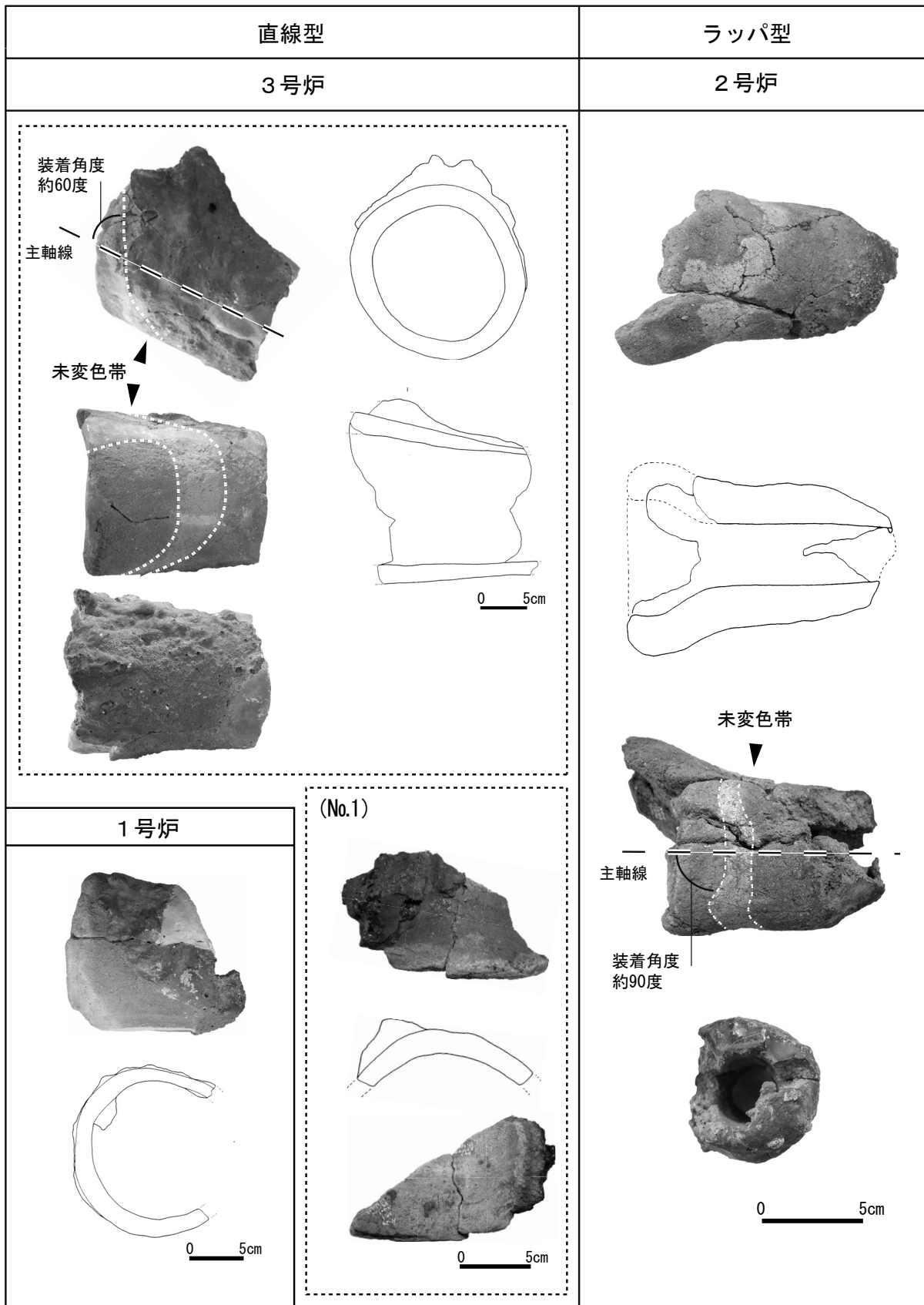


図3 柏木遺跡出土羽口の外観と実測図
 実測図は発掘調査報告書（多賀城市埋文 前掲）を基に作成。

市埋蔵文化財調査センター相沢清利氏によると、操業時にこの部分が開放していたのか、何らかの方法で閉じられていたのかは不明という。炉後方部には、長軸約20cm、短軸約18cmを計る楕円形の穿孔が見られた(図2)。

3号炉内からは羽口が出土した(図3)。残存長約19cmで、先端部および基部は欠損している。残存する先端部外径は約13cm、内径は約11cm、基部外径は約18cm、内径は約14cmを計る。先端に向けてやや窄まった羽口である。羽口表面には、巾約4cmの未変色帯が認められた。操業時、厚さ約4cmの炉壁内に装着されていた部位と推定される。羽口気道の主軸線と未変色帯の面とが成す角度(以下、羽口の装着角度と呼ぶ。)(註3)は約60度であった。羽口の基部から先端にかけての羽口表面の約半分は、黒褐色を呈している。前述した炉の残存状況を加味すると、上記羽口が炉後方部の穴に差し込まれ、炉内に突き出た部分の上面が黒褐色を呈したものと推測される(図3)。

ほぼ同形状の羽口片は、1・2・4号炉跡廃滓場からも出土している(多賀城市埋文前掲)(図3)。残存する部分から気道内径を推測すると、いずれも10～14cmの範囲に収まる。これらの羽口には、気道内面に布目圧痕が確認できるものとナデ調整のものがあり、前者がそのほとんどを占める。当該時期の丸瓦にも布目圧痕が認められることから、瓦の製作方法と共通点があったことが指摘されている(多賀城市埋文前掲)。

2号炉廃滓場からは、基部がラッパ状に拡がる形状(註4)の羽口が1点出土している(図3)。3号炉内検出羽口に比べ小型である。残存する先端部の気道内径は2～24cmと3号炉内検出羽口の1/5未満である。羽口胴体部分には、巾約2cmの未変色帯が認められた。装着角度は約90度と推定される。炉壁または何らかの道具に装着して、使用されていた可能性がある。基部の形状、気道内径、装着角度および装着された壁体(または道具類)の厚さに差異がある2種類の羽口が検出されているという事実から、複数の設備を使って操作がなされていた可能性を考えることができる(註5)。柏木遺跡における豎形炉跡の検出状況を要約すると、表1の通りとなる。

3 調査試料の摘出と調査方法

3-1 調査資料の概要

調査資料は、多賀城市埋蔵文化財調査センターに保管されている出土資料の内、肉眼観察が可能で、分析用試料採取を許可された資料の中から、以下の7点を選別した。3号炉廃滓場出土羽口(No.1)、1号炉廃滓場出土炉壁片(No.2・3)、および1号炉廃滓場ならびに3号住居跡(註6)出土鉄塊系資料(No.4～7)である(表2)。

No.1羽口は基部のみを残す羽口片で(図3)、気道内径約16cmと推定される。羽口内面(気道表面)には布目圧痕が、外面にはわずかな変色帯と黒褐色を呈する流状物質が付着している。装着状況の推定は困難であった。流状物質の一部をペンチで切り取り、分析用試料とした。No.2・3炉壁はスサ入粘土状物質からなる資料である。No.3の炉壁内面には厚さ3～6mmの、黒褐色を呈するガラス化した層(以下、黒褐色層と呼ぶ)が観察される(図5a)。黒褐色層に木炭の付着や噛み込

表2 分析した柏木遺跡関連資料

No.	資料名	出土状況	
		遺構名	層位
1	羽口	3号炉廃滓場	12層
2	炉壁	1号炉廃滓場	—
3			
4	鉄塊系資料	1号炉廃滓場	w層
5			
6			
7		3号住居跡	l1層
8	砂鉄	菖蒲田浜採取	
9			
10			

* No.は分析番号。出土状況は報告書(多賀城市埋文前掲)を基に作成。

表3 分析した宮古市製鉄実験資料

No.	資料名	採取場所
11	砂鉄	藤の川海岸
12		
13		
14	鉄塊系資料	1号炉
15		2号炉
16		3号炉
17	鉄器	3号炉
18	炉壁	1号炉
19		2号炉

* No.は分析番号。

** 3号炉は耐火煉瓦を主体に構築され、炉床のみ1・2号炉と同じ粘土が貼られた。分析用炉壁試料が採取できなかったため未分析。

みは見られない。1号炉廃滓場から出土していることから、1号炉で使用された炉壁の可能性が高いが、No.1同様装着状況を推定することはできなかった。分析用資料は、黒褐色層とその外側の炉体が共存する部分に切り込みを入れ、摘出した。

現在、柏木遺跡から西に約2kmの海岸（菖蒲田浜）では浜砂鉄を採取することができる。猪木（1992）によると、柏木遺跡は中新世大塚層の凝灰岩地帯に立地している。菖蒲田浜の砂鉄の起源は、この凝灰岩である可能性が高い。菖蒲田浜砂鉄が、操業当時製鉄原料として使用された可能性を考慮に入れ、菖蒲田浜で採取した砂鉄（No.8～10）についても調査した。

3-2 試料調整と調整方法

No.1羽口、No.2・3炉壁から摘出した試料をさらに二分し、組織観察と化学成分分析に供した。No.2・3炉壁は、黒褐色層のある炉壁内面部分（Sa₁）と炉壁外面部分（Sa₂）から試料を摘出し、それぞれを化学成分分析した。No.4～7鉄塊系資料についてはX線透過観察し、資料の内部構造を調査した。調査結果から、残存状況が良好な部位を選別し、ダイヤモンドカッターを装着したハンドドリルを使って約0.1gの試料を摘出した。摘

出した試料をさらに二分し、一方を組織観察に、もう一方を化学成分分析に供した。No.8～10砂鉄は、浜で採取したままのもの（nmc）と、磁選したもの（mc）それぞれを化学成分分析試料とした。

化学成分分析は、全鉄（TFe）、銅（Cu）、ニッケル（Ni）、コバルト（Co）、マンガン（Mn）、りん（P）、チタン（Ti）、ケイ素（Si）、カルシウム（Ca）、アルミニウム（Al）、マグネシウム（Mg）、バナジウム（V）、クロム（Cr）、亜鉛（Zn）、ジルコニウム（Zr）、および硫黄（S）の16成分を、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法（ICP-AES法）で分析した。

No.2・3炉壁の組織観察用試料は、炉壁内面と炉壁外面からなる試料を、No.1羽口およびNo.4～7鉄塊系資料は二分したうちの大きい方の試料をエポキシ樹脂に埋包し、エメリー紙、ダイヤモンドペーストで研磨した。検鏡面を金属顕微鏡で観察し、鉄塊中に析出した化合物および鉄塊中に混在する鉄滓部分を、エレクトロン・プローブ・マイクロアナライザー（EPMA）で分析した。鉄塊系資料4点についてはEPMA分析の前に、ナイトールによるエッチングを施し、炭素量を推定した。分析試料の調整方法および分析方法はAkanuma（2001）を準用した。

表4 No.1～7に混在する化合物のEPMAによる定量分析結果

No.	図	測定領域	化学組成 (mass%)													合計
			Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	V ₂ O ₅	FeO	ZrO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	
1	5d ₁	Qtz(1)-1	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.03	<0.01	98.1	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	98.15
		Qtz(1)-2	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	97.7	0.07	<0.01	0.02	0.03	<0.01	<0.01	97.86
2	6c ₂	Tmag(1)	0.03	0.01	2.62	<0.01	3.22	17.3	0.11	1.27	70.8	<0.01	1.10	<0.01	<0.01	96.51
		Iℓ(1)	0.00	0.01	3.75	<0.01	0.36	45.1	<0.01	0.64	46.1	0.18	1.09	<0.01	<0.01	97.18
		Fa(1)	<0.01	<0.01	22.7	0.45	0.05	0.92	35.6	0.11	38.9	<0.01	1.64	<0.01	0.11	100.41
	6d ₂	Gℓ(1)	0.15	3.67	1.74	6.93	12.3	1.14	62.7	<0.01	8.16	0.19	0.35	<0.01	1.16	97.33
		Tmag(1)	0.04	0.05	1.34	<0.01	1.51	24.3	0.06	1.67	65.7	0.03	0.30	0.05	<0.01	95.05
		Gℓ(1)	1.29	5.25	0.44	2.30	16.0	2.25	66.8	0.06	3.34	0.02	0.09	0.03	1.30	97.85
3	—	XT2(1)	0.02	0.01	3.69	0.04	0.75	40.0	<0.01	2.76	47.6	0.03	0.52	0.01	<0.01	95.45
		XT2(2)	<0.01	0.01	3.95	0.11	0.64	41.6	<0.01	2.98	45.1	0.25	0.59	<0.01	0.01	95.18
		Gℓ(1)	0.08	<0.01	9.20	22.7	5.57	4.42	37.6	0.12	17.3	0.02	0.67	0.02	0.49	97.63
5	8	Iℓ(1)	0.02	0.01	2.95	0.24	0.09	52.7	0.07	0.79	42.0	0.05	1.23	<0.01	<0.01	100.14
		Iℓ(2)	<0.01	0.03	2.94	0.34	0.01	53.4	0.03	0.89	41.7	0.05	1.25	<0.01	<0.01	100.67
		Gℓ(1)	0.55	0.96	3.50	11.2	6.06	6.65	41.5	0.11	26.1	0.26	1.08	<0.01	0.97	97.90
		Gℓ(2)	0.43	1.00	3.38	11.2	6.34	5.59	42.2	0.32	26.1	0.09	1.07	<0.01	1.03	97.62
		Uℓ(1)	<0.01	<0.01	4.82	<0.01	1.95	35.6	0.11	3.32	53.7	0.02	0.98	0.17	<0.01	100.71
		Fa(1)	0.01	<0.01	28.7	0.29	0.07	0.35	37.33	0.11	30.9	<0.01	1.09	0.01	<0.01	98.92
6	8	Uℓ(1)	0.02	<0.01	1.34	<0.01	5.40	30.8	0.16	1.99	58.1	0.03	0.60	0.14	<0.01	98.60
		Uℓ(2)	0.02	<0.01	1.29	<0.01	4.30	30.4	0.07	1.77	59.2	0.04	0.51	0.07	<0.01	97.65
		Fa(2)	0.01	0.02	11.3	0.06	0.10	0.33	32.3	<0.01	53.7	0.04	0.90	<0.01	<0.01	98.78
		Mag(1)	<0.01	<0.01	1.46	<0.01	0.23	2.24	0.33	0.08	95.2	<0.01	0.19	0.01	<0.01	99.79
		Gℓ(1)	1.61	1.48	0.97	3.93	16.9	1.36	56.2	0.03	13.1	0.09	0.38	<0.01	0.28	96.01
		Gℓ(2)	1.48	2.15	0.83	3.23	15.8	1.22	60.1	0.04	12.0	0.03	0.27	<0.01	<0.01	97.11
7	8	Iℓ(1)	0.01	0.01	4.86	0.29	0.14	51.4	0.13	1.12	37.1	0.07	1.40	0.04	<0.01	96.53
		Iℓ(2)	<0.01	0.01	4.61	0.31	0.11	53.1	0.17	1.18	37.4	0.01	1.57	0.04	<0.01	98.53
		Gℓ(1)	0.55	1.20	5.34	13.5	8.57	3.79	46.6	0.02	17.9	0.31	1.08	<0.01	1.22	100.02

* No.は表2に、測定領域は各図に示す反射電子組成像（BEI）に対応。

** Qtz=石英, Mag=マグネタイト, XT=鉄チタン酸化物 (Tmag=チタノマグネタイト, Iℓ=イルメナイト, Uℓ=ウルボスピネル), Fa=鉄かんらん石, Gℓ=ガラス質ケイ酸塩。

4 調査結果

4-1 設備材の調査結果

No.1 羽口のマクロ組織 (図 4b₁) はそのほとんどがガラス化していて、内部には微細な灰色針状結晶 (XT) や灰色粒子 (Qtz) が析出した領域が観察された (図 4c_{1,2}, d₁)。EPMA による分析によって、XT は Fe-Al-Ti-Si-O 系化合物 (以下、鉄チタン酸化物)、Gl は Fe-Si-Al-Mg-K-Na-O 系のガラス質ケイ酸塩、Qtz は石英であることがわかった (表 4)。また、局所的であるが、微細な Fe-O 系化合物粒子 (IO: 以下、酸化鉄粒子) と Cu-Ni 系化合物も確認された (図 4e_{1,2})。No.1 羽口の T.Fe は 21.91mass%, Ti は 7.87mass%, Si は 17.9mass% であった (表 5)。

No.2 炉壁外面は熔融または部分熔融し、発泡していた (図 5a₁)。内面は黒褐色を呈しガラス化していた (図 5a₃)。摘出した試料のマクロ組織 (図 5b₁) 明灰色部分が、炉壁内面の黒褐色層に相当する。明灰色部分は、イルメナイト (Il), チタノマグネタイト (Tmag), 鉄かんらん石 (Fa), 石英 (Qtz), および Na₂O-K₂O-MgO-CaO-Al₂O₃-TiO₂-FeO-SiO₂ 系のガラス質ケイ酸塩によって構成されていた (図 5c_{1,2}・d₁, 表 4)。黒褐色層上面は熔融または部分熔融し、発泡した粘土状物質からなる層で覆われていた (図 5b₁)。No.3 炉壁内面にもチタノマグネタイト (Tmag) と鉄チタン酸化物 (XT_{1,2}) からなる粒子が濃密に析出した、厚さ 4 ~ 5mm の層が確認された (図 5e₁Sa₁ 層, 表 4・5)。いずれのマクロ組織中にも木炭の混在は見られなかった。

No.2・3 炉壁の化学組成を表 4 に示す。内面から摘出した No.2Sa₁ および No.3Sa₁ の T.Fe, Co, Mn, P, Ti, Ca, Mg, V, Zn, Zr の含有量は、外面から摘出した No.2Sa₂ および No.3Sa₂ の含有量に比べ増加している。

4-2 鉄塊系資料の調査結果

No.4 鉄塊系資料のマクロエッチング組織には空隙が見られ、メタル、錆、および鉄滓が混在していた (図 6b₁)。メタル部分はほぼ一様に黒く腐食され、柱状の組織 (PCm) が観察された (図 6b₁・c₁)。EPMA による元素濃度分布によると、PCm は鉄と炭素からなり、初析セメンタイトと判定された。メタル部分は 0.8mass% C 以上の鋼と評価される (佐藤 1968) (図 6c₁・d_{1,2})。局所的にはあるがレーデブライト組織が観察され (図 6c₂)、Fe-S 系化合物 (図 6d_{1,2}) および Fe-P 系化合物も確認された (表 6)。鉄滓部分には Fe-Ti-Mg-O 系の

鉄チタン酸化物 (XT), Fe-Mg-Si-O 系化合物 (XF: 鉄かんらん石と推定される), および Fe-Ca-Al-Si-O 系のガラス化した領域 (Gl) からなる組織が観察された (図 6e₁)。

No.5・6 鉄塊系資料のマクロ組織にも初析セメンタイトが析出したメタルが確認された (図 7)。0.8mass% C 以上の鋼と判定される。No.6 には局所的に Fe-S 系化合物が見出された (図 7, 表 6)。

No.7 には片状黒鉛 (G) が観察された。除冷された銑鉄である (図 7)。No.5 ~ 7 鉄塊系資料に混在する鉄滓部分は、鉄かんらん石 (Fa), ウルボスピネル (Ul), イルメナイト (Il), マグネタイト (Mag), ガラス質ケイ酸塩 (Gl) からなる組織によって構成されていた (図 7, 表 4・6)。

No.4 ~ 7 の化学成分分析結果を表 6 に示す。4 試料の T.Fe は 71.82 ~ 84.74mass% であった。Si, Ca, Al, Mg の化学成分が 0.8mass% 以下であることを踏まえると、メタルと錆を主体とする試料である。上記 4 鉄塊からは 0.005 ~ 0.009mass% の Ni, 0.020 ~ 0.048mass% の Co が、No.4・6 からは 0.06 ~ 0.17mass% の S が検出された。分析された S は主として、地金中に混在する Fe-S 系化合物に起因すると考えられる。

4-3 菖蒲田浜砂鉄の調査結果

No.8 ~ 10mc の T.Fe は 52 ~ 59mass%, Cu は 0.001 ~ 0.002mass%, Ni は 0.003mass% もしくは検出限界以下, Co は 0.021 ~ 0.022mass% であった (表 7)。No.8 ~ 10nmc の T.Fe は 5 ~ 12mass% と低レベルである。Si, Al, Ca, Mg の含有量が多く、相当量の土砂が混入しているとみなされる。

5 考察

5-1 鉄塊の素材となった地金の組成

摘出した試料の組織観察によって、No.4 は過共析鋼と銑鉄, No.5・6 は過共析鋼, No.7 は銑鉄を主体とし、いずれにも少量の鉄滓が混在することがわかった。No.4・6 の試料には Fe-S 系化合物が混在していた。鉄塊の製造に硫黄鉱物を随伴する製鉄原料が使用された可能性がある。

No.4 ~ 7 いずれの鉄滓領域からも鉄チタン酸化物が観察された。それらを製造する過程で、チタン化合物を含む物質が関与していたことを示している。

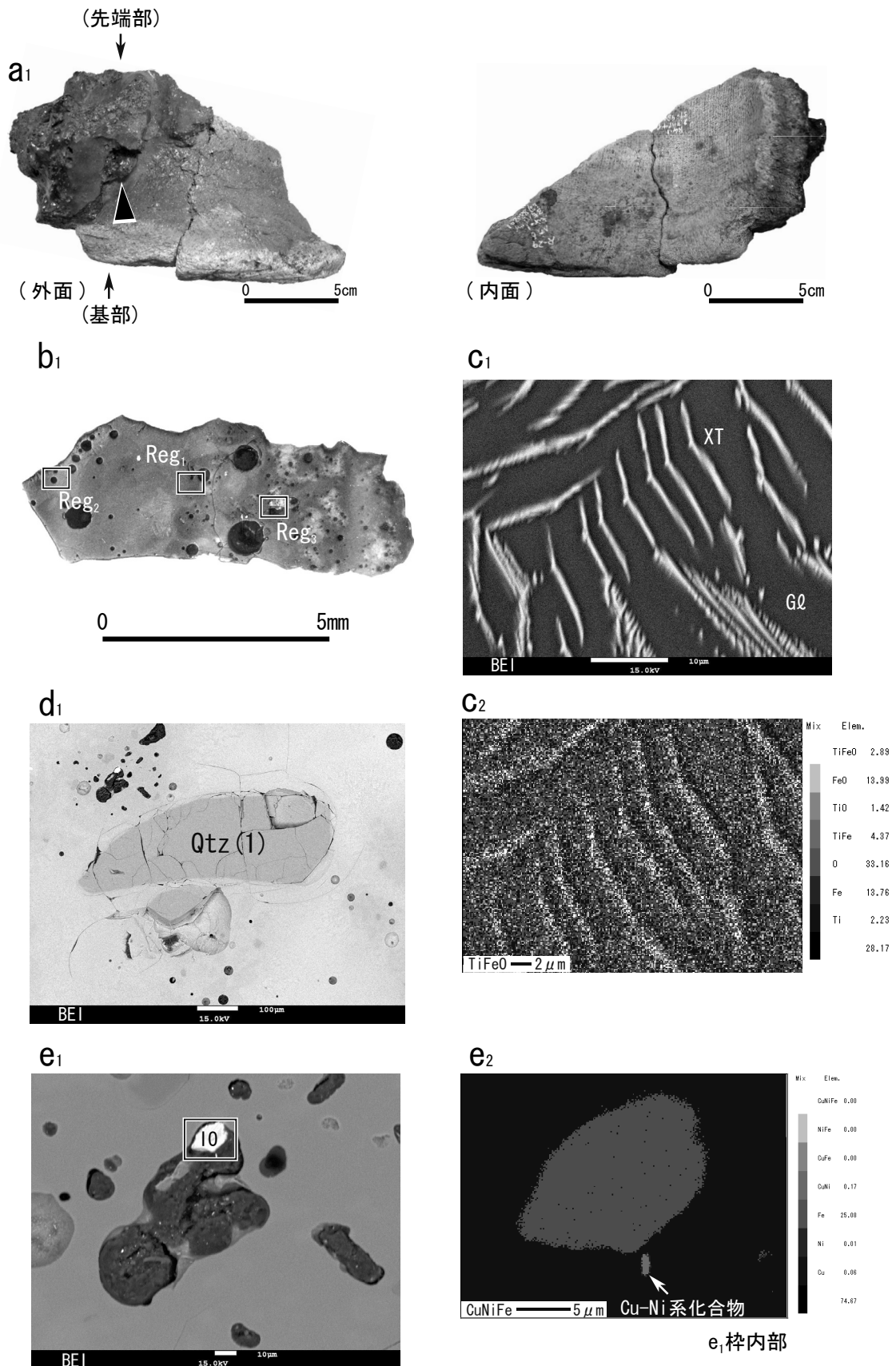


図4 No.1の組織観察結果

a₁: 外観の矢印は試料摘出位置. b₁: マクロ組織. c₁・d₁・e₁: それぞれマクロ組織領域 (Reg₁₋₃) 内部のEPMAによる反射電子像 (BEI). c₂・e₂: それぞれc₁・e₁に含有される元素濃度分布のEPMAによるカラーマップ (グレー表示). IO = 酸化鉄粒子, XT = 鉄チタン酸化物, Gl = ガラス質ケイ酸塩, Qtz = 石英.

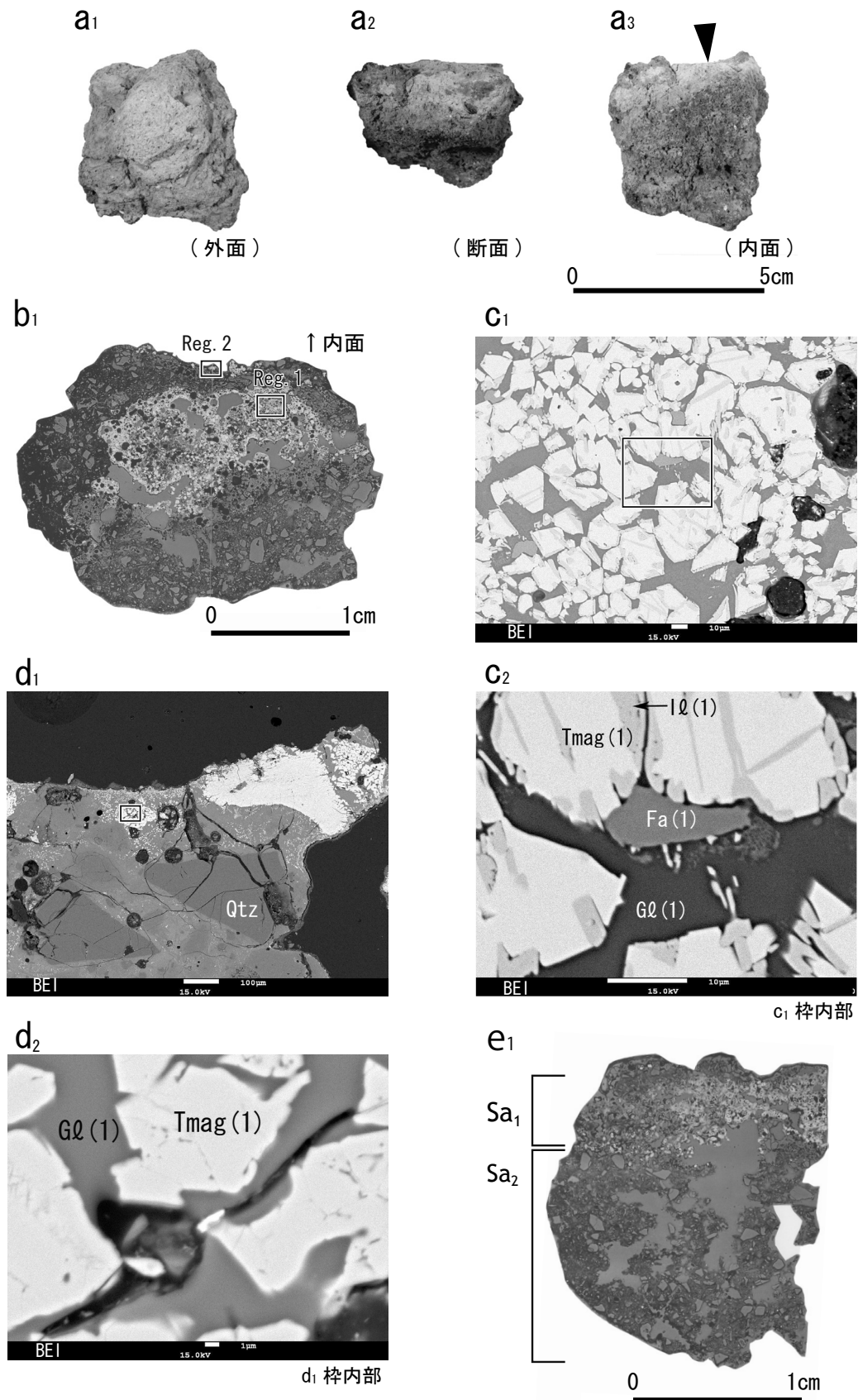


図5 No.2・3の組織観察結果

a_{1,3} : それぞれ No.2 の外面, 断面, 内面の外観。矢印は試料摘出位置。b₁ : No.2 のマクロ組織。
 c₁・d₁ : それぞれ b₁ 内部 (領域 Reg._{1,2}) の EPMA による反射電子像 (BEI)。
 c₂・e₂ : それぞれ c₁ および d₁ の杵内部, e₁ : No.3 のマクロ組織。Sa₁ は内面の黒褐色層, Sa₂ は外面の粘土状物質。Tmag = チタン磁鉄鉱, lℓ = イルメナイト, Fa = 鉄かんらん石, Gl = ガラス質ケイ酸塩, Qtz = 石英。

表5 No.1～3の分析結果

No.	資料名	Sa	化学組成 (mass%)														マイクロ組織		
			T.Fe	Cu	Ni	Co	Mn	P	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	Cr	Zn		Zr	S
1	羽口	-	21.91	0.001	0.001	0.015	0.355	0.20	7.87	17.9	2.25	6.22	1.46	0.023	0.002	0.017	0.037	<0.01	IO, Cu-Ni系化合物, XT, Qtz, Gl
2	炉壁	1	29.94	<0.001	<0.001	0.016	0.369	0.19	7.08	13.4	1.51	4.52	1.17	0.048	<0.001	0.010	0.050	<0.01	Il, Tmag, Fa, Qtz, Gl
		2	1.56	<0.001	<0.001	0.001	0.051	0.03	0.431	25.5	1.31	8.06	0.220	<0.001	<0.001	0.006	0.005	<0.01	
3		1	37.47	0.001	<0.001	0.021	0.480	0.09	8.53	8.28	1.77	3.08	1.62	0.044	0.003	0.101	0.065	<0.01	Mag, XT, Tmag, Fa, Qtz, Gl
		2	2.29	<0.001	<0.001	0.001	0.046	0.02	0.262	25.0	1.02	8.43	0.323	<0.001	<0.001	0.014	0.006	<0.01	

* No.は表2に対応。化学組成はICP-AES法。
 ** Saはサンプル抽出位置。1は炉壁内面の黒褐色部分、2は炉壁外面の赤褐色部分を選別
 *** IO=Fe-O系化合物, Mag=マグネサイト, XT=鉄チタン酸化物 (Tmag=チタン磁鉄鉱), Fa=鉄かんらん石, Gl = ガラス質ケイ酸塩, Qtz=石英。

表6 No.4～7の分析結果

No.	化学組成 (mass%)														Cu/Co	Ni/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu/Co	マイクロ組織	n.m.i.					
	T.Fe	Cu	Ni	Co	Mn	P	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	Cr	Zn								Zr	S			
4	84.74	<0.001	0.008	0.038	<0.001	0.23	0.002	0.44	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.06	4.75	<0.01	0.21	<0.01	<0.01	4.75	<0.01	L, PCm	XT, XF, Gl, IS, IP
5	84.68	<0.001	0.007	0.033	0.001	0.14	0.016	0.21	<0.001	0.012	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.07	4.71	<0.01	0.21	<0.01	<0.01	4.71	<0.01	PCm	Ul, Il, Fa, Gl
6	71.82	<0.001	0.005	0.020	0.006	0.48	0.129	0.71	0.028	0.101	0.030	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.17	4.00	<0.01	0.25	<0.01	<0.01	4.00	<0.01	PCm	Ul, Fa, Mag, Gl, IS
7	80.27	<0.001	0.009	0.048	0.002	0.13	0.100	0.29	0.007	0.022	0.015	0.002	<0.001	<0.001	0.003	0.03	5.33	<0.01	0.19	<0.01	<0.01	<0.01	5.33	<0.01	G, PCm	Il, Gl

* No.は表2に対応。化学組成はICP-AES法。
 ** ミクロ組織はナイタールによるエッチング組織。Lはレーデアブライト, Gは片状黒鉛, PCmは初析セメントタイト。
 *** n.m.i.は非金属存在物組成, Mag=マグネサイト, XT=鉄チタン酸化物 (Il = イルメナイト, Ul = ウルボスピネル), Fa=鉄かんらん石 (XF=Fe-Mg-Si-O系化合物), IS=Fe-S系化合物, IP=Fe-P系化合物, Gl = ガラス質ケイ酸塩。

表7 No.8～10の分析結果

No.	化学組成 (mass%)														Ni/Co	Cu/Co			
	T.Fe	Cu	Ni	Co	Mn	P	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	Cr	Zn			Zr	S	
8	mc	58.93	0.002	0.003	0.022	0.449	0.15	7.10	0.88	1.41	1.67	1.08	0.210	0.020	0.089	0.008	0.01	0.14	0.09
	nmc	5.48	0.001	0.002	0.002	0.202	0.05	0.426	10.2	5.14	5.92	2.57	<0.001	<0.001	0.012	0.002	<0.01	-	-
9	mc	55.13	0.001	<0.001	0.021	0.448	0.14	7.18	1.24	0.358	0.357	0.477	0.237	0.017	0.089	0.008	<0.01	<0.01	0.05
	nmc	8.05	0.001	0.002	0.003	0.259	0.06	0.954	8.93	3.99	4.92	3.34	<0.001	0.002	0.015	0.002	<0.01	-	-
10	mc	52.52	0.001	<0.001	0.021	0.441	0.12	6.68	0.30	0.305	0.351	0.296	0.245	0.026	0.087	0.008	<0.01	<0.01	0.05
	nmc	11.13	0.001	<0.001	0.005	0.286	0.06	1.58	13.8	3.65	1.33	0.606	0.014	0.001	0.019	0.003	<0.01	-	-

* No.は表2に対応。mc=磁選, nmc=磁選せず。化学組成はICP-AES法。

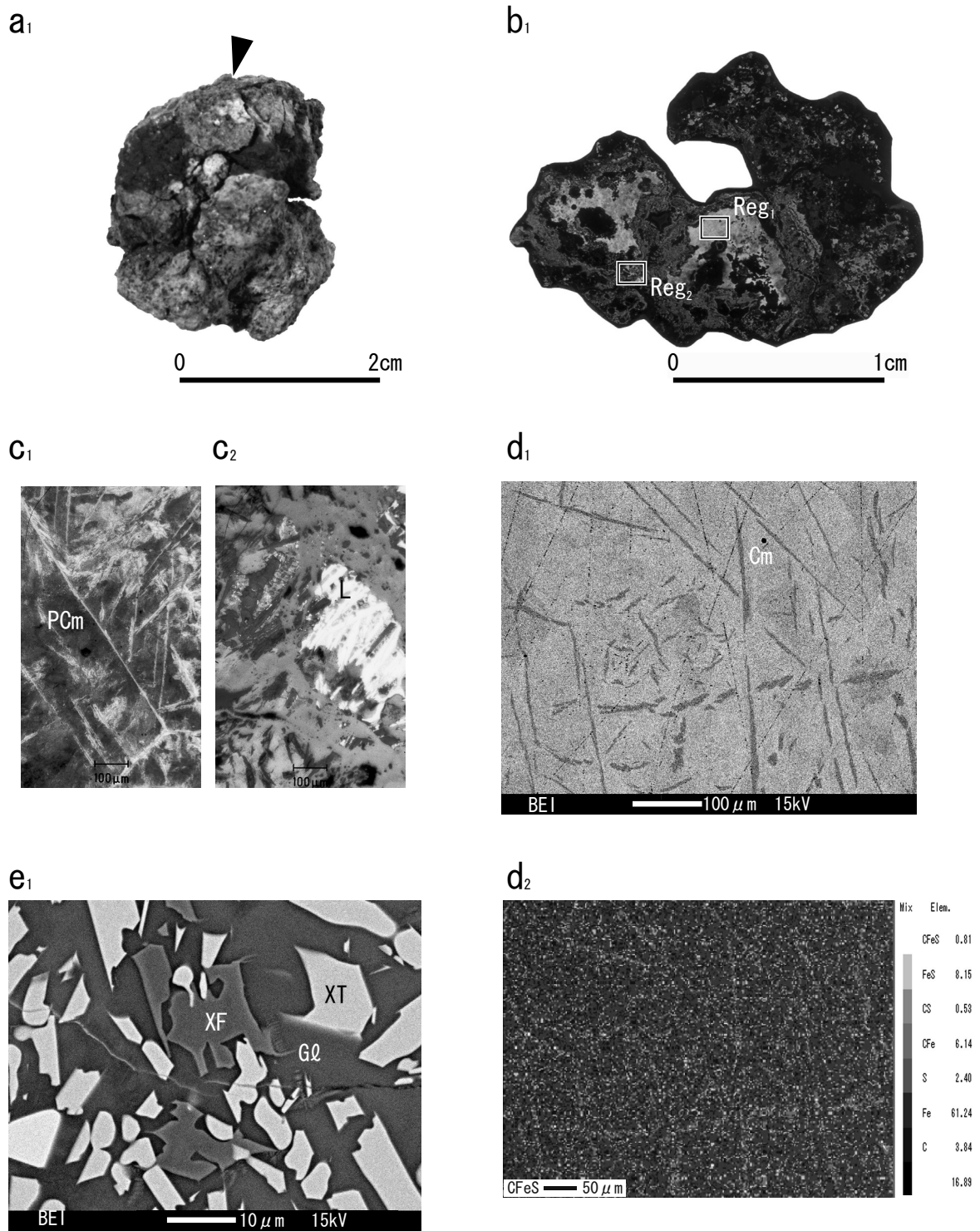


図6 No.4の組織観察結果

a₁: 外観の矢印は試料摘出位置. b₁: マクロエッチング組織. c₁₋₂: マクロエッチング組織領域 (Reg₁₋₂) 内部のミクロエッチング組織. d₁・e₁: それぞれのEPMAによる反射電子像 (BEI). d₂: d₁ 枠内部に含まれる元素濃度分布のEPMAによるカラーマップ (グレー表示). L=レーデブライト, PCm=初析セメントタイト, Cm=セメントタイト, XT=Fe-Mg-Si-O系化合物, Gl=ガラス質ケイ酸塩.

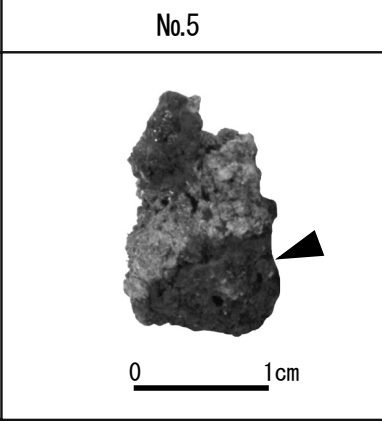
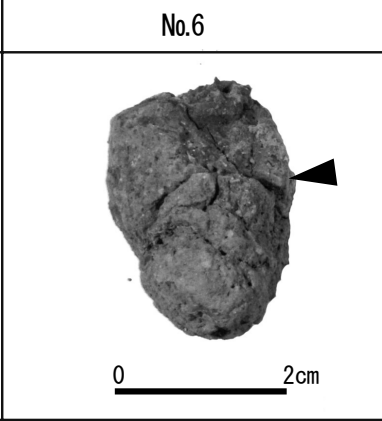
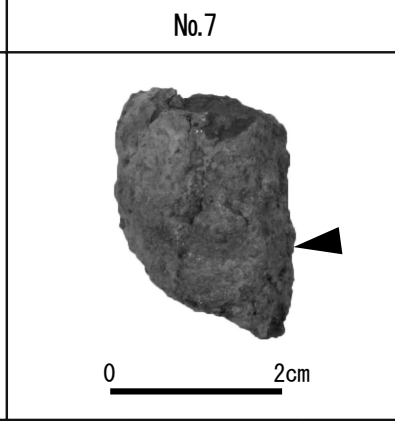
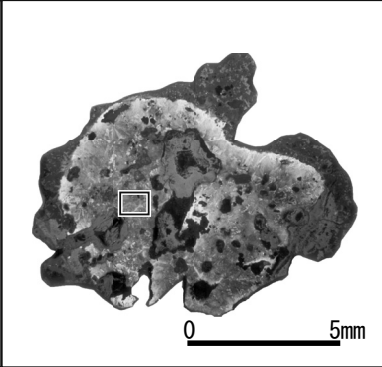
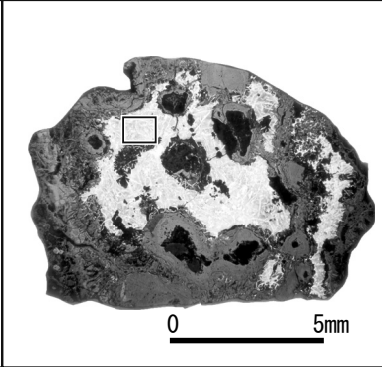
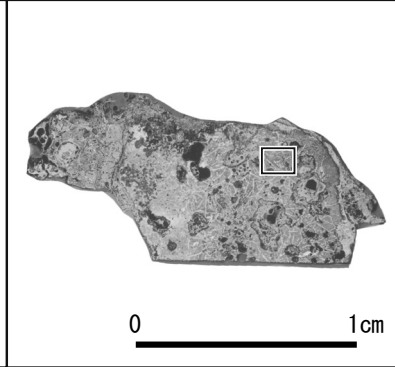
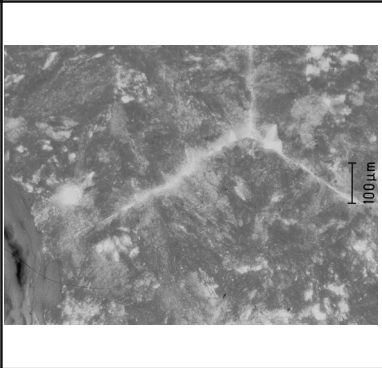
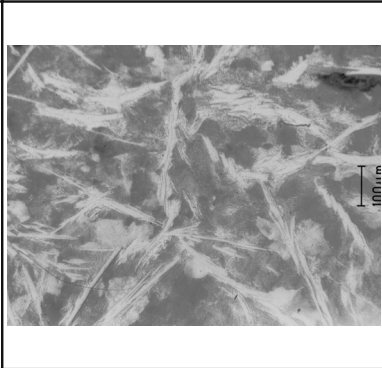
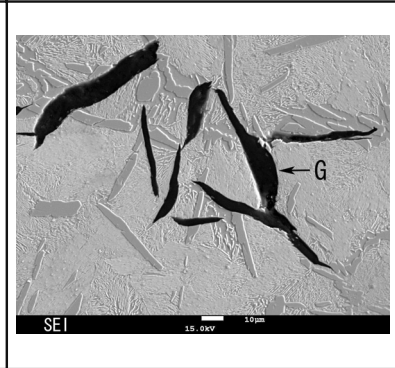
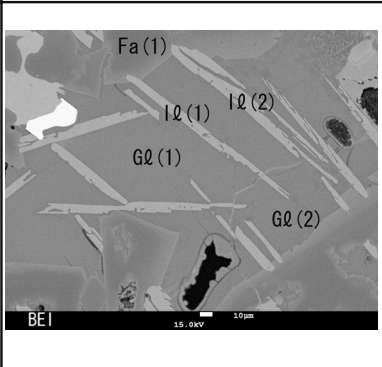
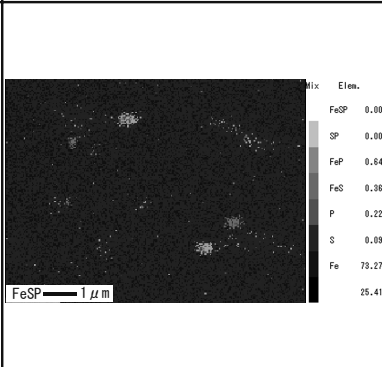
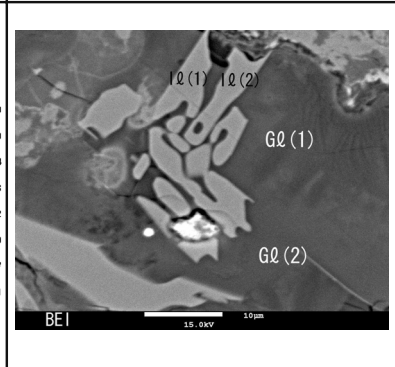
	1号炉廃滓場出土	3号住居跡出土																			
	No.5	No.6	No.7																		
外観																					
マクロエッチング組織																					
マイクロエッチング組織																					
混在する化合物		 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: top; margin-left: 10px;"> <thead> <tr> <th>Mix</th> <th>Elem.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FeSP</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>SP</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>FeP</td> <td>0.64</td> </tr> <tr> <td>FeS</td> <td>0.38</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0.09</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>78.27</td> </tr> <tr> <td></td> <td>26.41</td> </tr> </tbody> </table>	Mix	Elem.	FeSP	0.00	SP	0.00	FeP	0.64	FeS	0.38	P	0.22	S	0.09	Fe	78.27		26.41	
Mix	Elem.																				
FeSP	0.00																				
SP	0.00																				
FeP	0.64																				
FeS	0.38																				
P	0.22																				
S	0.09																				
Fe	78.27																				
	26.41																				

図7 No.5～7の外観と組織観察結果

外観の矢印は試料摘出位置。マイクロエッチング組織はマクロエッチング組織の枠内部。エッチングはナイタルによる。混在する化合物はEPMAにより分析。No.6はFeSPの含有元素濃度分布のカラーマップ(グレー表示)。G=片状黒鉛, Il=イルメナイト, Fa=鉄かんらん石, Gl=ガラス質ケイ酸塩。

5-2 鉄関連資料の三成分比に基づく分類の有効性確認

Cu, Ni および Co の三成分は、鋼製造過程で合金添加が行われていなかったとすると、その組成比は鋼製造法の如何に関わらず製鉄原料の組成比に近似すると推定される(赤沼 2004)。本稿では、まず製鉄実験に用いた砂鉄、製鉄・鍛冶実験によって得られた鉄塊、鉄器それぞれの三成分比を求め、上記三成分比に基づく分類方法の有効性を確かめた。

2010年6月～10月の5ヶ月にわたり、岩手県宮古市教育委員会によって「平成22年度古代の鉄づくり体験講座」が開催された。第1回は砂鉄採取体験、第2回は木炭作り体験、第3回は古代製鉄遺物見学、第4回は製鉄炉作り体験、第5回は鉄づくり体験、第6回は鍛冶体験である。鉄づくり体験は講師に中川淳氏(岩手たたら研究会)を、鍛冶体験は講師に辻和宏氏(刀匠)を招いて行われた。

筆者のうち一人関は、第4回から第6回の講座に参加した。製鉄実験には、宮古市藤の川海岸から採取した砂鉄が用いられた。現代の瓦作成に用いる粘土と、閉伊川の川砂、藁スサを混ぜた粘土を使って、講座参加者が、2基の製鉄炉(炉床平面が直径40cmの円形で、高さ70cmの1号炉、炉床平面が直径20cmの円形で、高さ60cmの2号炉)を構築した(図8a₁)。構築した炉を40日間自然乾燥させた後、講師中川氏の指導の下、講座参加者が以下の手順で製鉄実験を行った(図8a₂)。

まず、炉内に木炭を投入し、ブローアで送風を続け、約1時間木炭を燃焼した。その後、砂鉄約1kgと木炭約1kgを順に投入した。ほぼ同量の砂鉄と木炭の投入を7～8分おきに10回繰り返し、製鉄実験を終了した。炉を壊し、炉内の生成物を取り出し、水冷した。金槌で生成物を叩き、叩き壊れない部分を選別して、鉄塊を得た。この製鉄実験の後、宮古市教育委員会によって別途構築された3号炉(母体を耐火煉瓦で構築し、1・2号炉の炉体と同じ粘土を炉床に貼り付けた)において、同じ砂鉄を用いて製鉄実験が行われ、鍛冶体験用鉄塊が製造された。

鍛冶実験では、講師辻氏によって、3号炉で得られた小鉄塊が鍛冶用の炉で加熱され、1つの鉄塊にまとめられた。その鉄塊を、関を含む講座参加者が加熱・鍛打して、約1cm角の棒状鉄器に整形・加工した(図8a₃)。

上記、製鉄実験に使用した砂鉄(No.11～13)、1～

3号炉で製造した鉄塊(No.14～16)、3号炉鉄塊を素材として製作した鉄器(No.17)、および1・2号炉の炉

表8 No.11～17の分析結果

No.	資料名	化学組成 (mass%)														Cu/Ni			
		T.Fe	Cu	Ni	Co	Mn	P	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	Cr	Zn		Zr	S	
11	砂鉄	48.08	<0.001	0.021	0.007	0.202	0.31	0.851	9.18	1.35	2.09	1.15	0.136	0.423	0.031	0.001	<0.01	0.33	<0.01
12		57.72	0.001	0.012	0.007	0.252	0.32	0.930	5.94	1.49	1.92	1.16	0.167	0.207	0.031	0.002	<0.01	0.58	0.08
13		-	61.78	0.001	0.011	0.008	0.248	0.34	0.819	5.62	1.21	1.43	0.903	0.180	0.209	0.035	0.002	<0.01	0.73
14	鉄塊	94.74	<0.001	0.022	0.012	0.001	0.27	0.004	0.39	0.041	0.30	0.005	0.002	0.011	<0.001	<0.001	<0.01	0.55	<0.01
15		97.25	<0.001	0.029	0.020	<0.001	0.61	0.003	0.28	0.004	0.18	0.004	0.001	0.009	<0.001	<0.001	0.01	0.69	<0.01
16	鉄塊	95.77	<0.001	0.051	0.022	0.015	0.14	0.077	1.04	0.197	0.137	0.048	0.008	0.021	<0.001	0.003	<0.01	0.43	<0.01
		97.15	<0.001	0.014	0.012	0.003	0.15	0.007	0.14	0.008	0.031	0.005	0.009	0.019	<0.001	<0.001	<0.01	0.86	<0.01
17	鉄器	94.55	<0.001	0.018	0.012	0.032	0.15	0.005	0.31	0.012	0.002	0.004	0.095	0.062	<0.001	<0.001	0.01	0.67	<0.01
		97.18	<0.001	0.015	0.012	0.052	0.14	0.100	0.51	0.297	0.083	0.073	0.041	0.029	<0.001	0.002	0.01	0.80	<0.01
17	鉄器	95.82	<0.001	0.020	0.014	0.002	0.04	0.007	0.15	0.010	0.035	0.006	0.005	0.014	<0.001	<0.001	<0.01	0.70	<0.01
		87.39	<0.001	0.016	0.011	0.001	0.06	0.009	0.18	0.007	0.074	0.009	0.009	0.025	<0.001	<0.001	<0.01	0.69	<0.01

* No.は表3に対応。Saはサンプリング採取位置。化学組成はICP-AES法。

表9 No.18・19の分析結果

No.	資料名	化学組成 (mass%)															
		T.Fe	Cu	Ni	Co	Mn	P	Ti	Si	Ca	Al	Mg	V	Cr	Zn	Zr	S
18	炉壁	3.05	0.001	0.003	0.001	0.064	0.04	0.368	25.7	0.566	7.90	0.869	<0.001	0.003	0.009	0.005	<0.01
19		2.91	0.001	0.003	0.001	0.065	0.03	0.395	25.2	0.486	8.63	0.554	<0.001	0.003	0.009	0.006	<0.01

* No.は表3に対応。化学組成はICP-AES法。

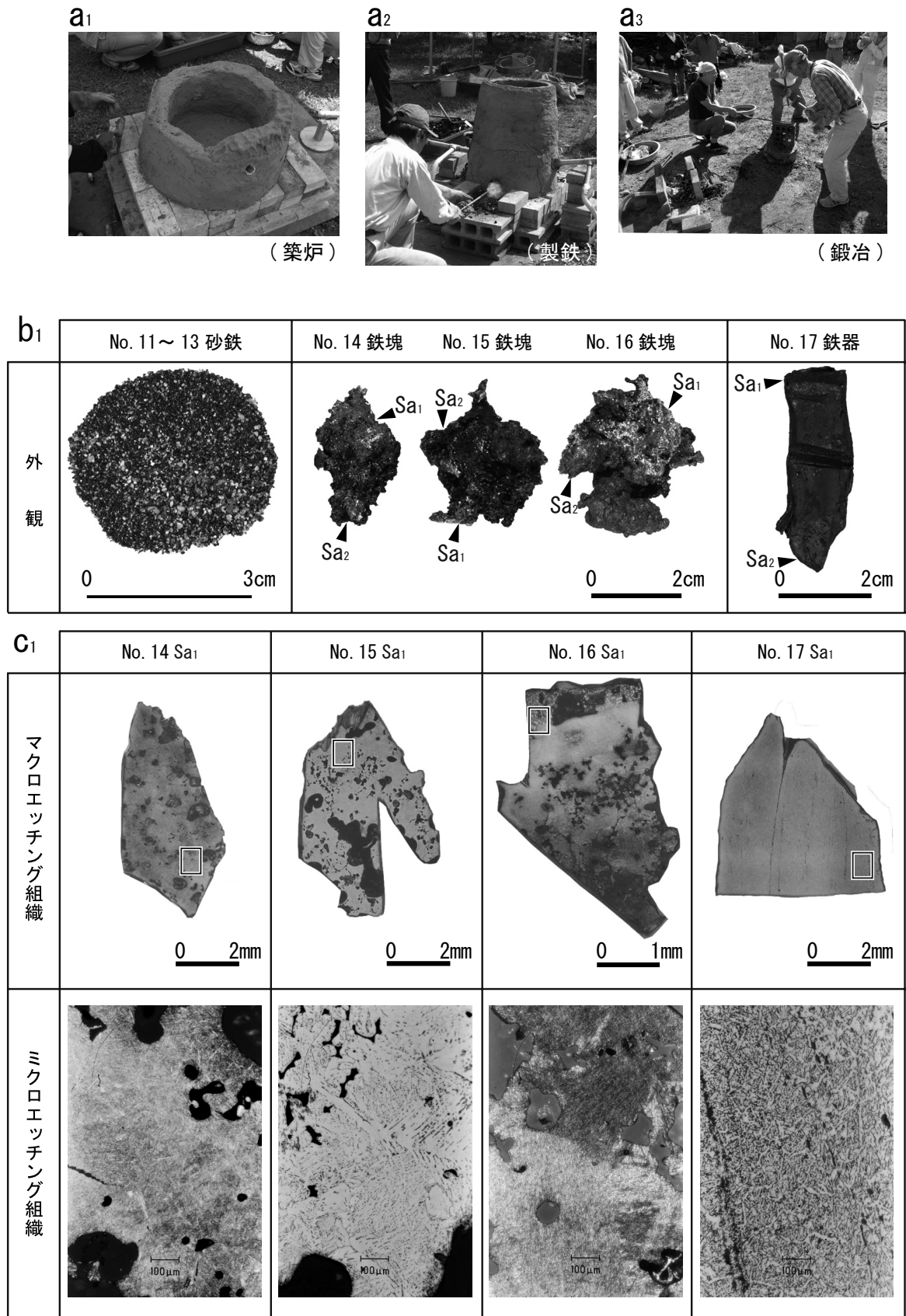


図8 製鉄実験風景と調査資料の組織観察結果

a₁₋₃: 実験風景. b₁: 調査資料の外観. 矢印は試料抽出位置. c₁: 組織観察結果. ミクロエッチング組織はマクロエッチング組織の枠内部. エッチングはナイタールによる.

壁 (No.18・19) それぞれから分析用試料を抽出し、3-2で述べた方法に従って調査した。鉄塊および鉄器については2つ (Sa_{1,2}) の小片を抽出し、それぞれを化学成分分析、組織観察に供した。

分析結果を表8・9に示す。砂鉄 (No.11~13) のT.Feは48~62mass%, Tiは0.2~0.94mass%, Siは5.6~9.2mass%, Caは1.2~1.5mass%, Alは1.4~2.1mass%, Mgは0.9~2.1mass%であった。相当量の土砂成分が混在した、チタン含有量の少ない砂鉄である。Niは0.011~0.021mass%, Coは0.007~0.008mass%, Cuは0.001~0.002mass%含有されていた。

No.14~16鉄塊、およびNo.17鉄器のT.Feは87.4~98.6mass%, Si, Ca, Al, Mgはいずれも1.1mass%未満であった。ほぼメタル、あるいはメタルに若干の錆が混在した試料が分析されている。Ni含有量は0.014~0.051mass%, Co含有量は0.011~0.022mass%であり、Cuは検出限界以下であった。No.14~16鉄塊、およびNo.17鉄器のCuは砂鉄同様いずれも検出限界以下であったが、NiとCo含有量は、砂鉄に比べ増量していた。Mn, V, Cr, およびZnは、鉄塊、鉄器のいずれにおいても、砂鉄の含有量よりも低レベルであった。これ

らの4元素は鉄滓中に移動したことを示している。上記4元素は地金の分類指標として使用することはできない。

表8に示した各試料の化学成分分析結果から、(mass% Co) / (mass% Ni) と (mass% Cu) / (mass% Ni) を求め、それらの値をプロットしたものが図9(1)である。銅が検出限界以下の試料はCuを0.0001mass%としてプロットした。11試料が図の左下にまとまり、ほぼ同じ位置に分布する。図9(2)は、鉄器、鉄塊、および砂鉄中に含有されるNiをX軸に、CoをY軸にとりそれぞれの分析値をプロットしたものである。11試料の相関係数は0.913で、強い正の相関が見られる。図9(1)・(2)の結果は、製鉄、鍛冶操作を通じ、製鉄原料、鉄塊および製品鉄器中のCu, NiおよびCo三成分比がほぼ一定に保たれることを示している。表9に示すとおり、No.18・19からも0.001mass%のCu, 0.003mass%のNi, 0.001mass%のCoが検出されてはいるが、三成分比に炉壁が与える影響は乏しい。上記一連の調査を通し、Cu, NiおよびCo三成分比に基づく資料分類の有効性が確かめられた。

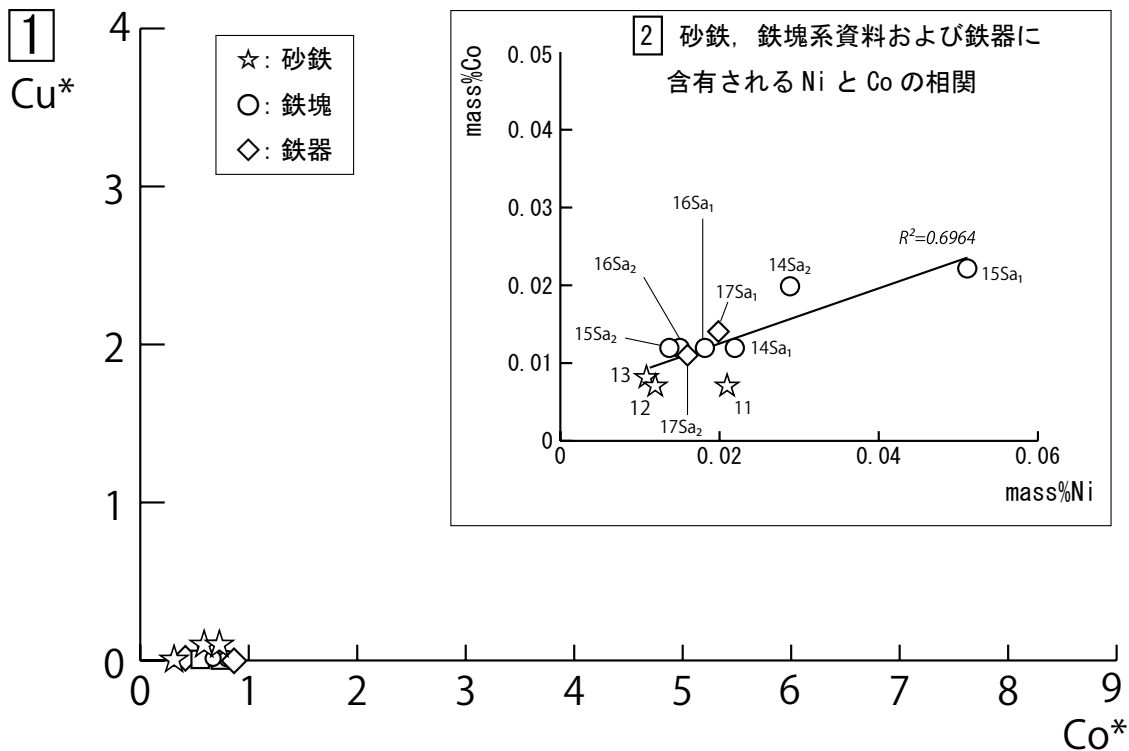


図9 製鉄実験資料に含有されるCu, Ni, Co三成分比の関係

番号 (No.) は表3に対応。

$Cu^* = (mass\%Cu) / (mass\%Ni)$.

No.12・13を除く9試料は、いずれもCuが検出限界以下であったため、

Cuを0.0001としてCu/Niを求め、プロットした。

5-3 柏木遺跡出土鉄塊の分類

表6に示す各試料の化学成分分析結果から、 $(\text{mass\% Co})/(\text{mass\% Ni})$ と $(\text{mass\% Cu})/(\text{mass\% Ni})$ 、 $(\text{mass\% Ni})/(\text{mass\% Co})$ と $(\text{mass\% Cu})/(\text{mass\% Co})$ を求め、それらの値を丸印でプロットしたものが図10a・bである。

図10aでは中央下部に、図10bでは左下部にNo.4過共析鋼(わずかに銑鉄が混在)、No.5・6過共析鋼、およびNo.7銑鉄塊がほぼまとまって分布する。4試料に含有されるNiおよびCoから求めた相関係数は0.993と極めて高い値をとる(図10c)。分析した4試料は、ほぼ同じ組成の製鉄原料から製造された、とみることができる。

図10bには柏木遺跡に近接する菖蒲田浜で採取した砂鉄を磁選した資料(No.8~10mc)の分析値(表7)をプロットした。既述の通り、菖蒲田浜採取砂鉄は柏木遺跡が立地する凝灰岩帯に含まれる砂鉄が集積した可能性の高い砂鉄で、柏木遺跡の有力な製鉄原料である。分析した砂鉄は、No.4~7とは異なる位置にプロットされ、鉄塊中に含有されるNiとCoとの相関も見られない(図10c)。既述の通り、No.4・6にはFe-S系化合物が見出されている。硫黄鉱物を随伴する製鉄原料を用いて製造された可能性がある。No.8~10mcのS含有量は0.01mass%もしくは検出限界以下ときわめて低い(表7)。菖蒲田浜で採取したままの資料(No.8~10mc)のTFeは5~11mass%と低レベルであり、土砂の混入が著しい。現在の砂鉄堆積状況が当時と同じであった場合、製鉄原料として使用するためには、土砂を除去する選鉱作業が必要であるが、遺跡内でそのような操作が実施されていたことを示す遺構は未確認である。当該砂鉄が製鉄原料として使用された可能性はきわめて乏しいことを示している。

5-4 設備材の調査結果から推定される柏木遺跡豎形炉の機能

柏木遺跡3号炉前方には、礫で構築された開口部が確認されている(多賀城市埋文前掲)。3号炉において製鉄が実施されていたとすると製鉄時、上記開口部は何らかの部材を使ってふさがれていたことになる。発掘報告書には、炉内後方は青灰色を呈していたと報告されているが、炉内のほぼ全体が高還元雰囲気であったことを示す資料は未確認である。

炉頂付近には、スサ入粘土が3層重ねられた状況が

確認されている。操業過程で傷んだ炉を修復しながら、数回にわたり使用されていた可能性がある。組織観察の結果、No.2炉壁では、チタノマグネタイトとイルメナイトからなる粒子が濃密に析出した層の上に、溶融もしくは部分溶融した粘土状物質が覆っていることが確認された(図5b₁)。

No.3炉壁では、チタノマグネタイトとイルメナイトからなる粒子が濃密に析出した層の厚さは4~5mmでほぼ均一であった(図5e₁)。4-1で述べた通り、炉壁内面(No.2Sa₁・No.3Sa₁)は炉壁外面(No.2Sa₂・No.3Sa₂)に比べFe、Co、Mn、P、Ti、Ca、Mg、V、Zn、およびZrの含有量が増加していた(表4)。左記10成分のほとんどは、鉄チタン酸化物に起因していると推定される。検出された鉄チタン酸化物については、炉頂から投入された砂鉄の一部が溶融もしくは部分溶融した炉壁に固着し、炉壁粘土と反応したとみることができる。その場合、砂鉄と共に木炭片も混入する可能性があるが、肉眼観察した炉壁片およびNo.2・3炉壁のマクロ組織には、木炭片の混在は認められなかった。

これらの調査結果をふまえると、炉壁の耐火度を向上させるため、砂鉄を混ぜた粘土を意図的に炉壁内面に貼り付けていた可能性を考えることができる。

No.1羽口は基部の一部である。表面には局所的に黒褐色物質が付着している。黒褐色物質には、ガラス化した領域内に針状の鉄チタン酸化物が析出した組織と、石英、微小酸化鉄粒子、および直径1 μm 未満の微細なCu-Ni系化合物が析出した組織が観察された(図4)。

豎形炉に伴って出土した鉄塊に鉄の硫黄化合物が検出されていること、鉄塊中のCu、Ni、およびCo三成分比と遺跡周辺に分布する砂鉄のCu、Ni、およびCo三成分比との間に明瞭な差異が見られることをふまえると、調査した豎形炉で、遺跡周辺から採取される砂鉄を原料鉱石とする製鉄が行われていたことを断定することは難しい。

豎形炉前方部に開口部を有すること、少量の鉄滓が混在する過共析鋼塊や銑鉄塊が出土したこと、炉に隣接する竅穴住居跡から剥片状資料が出土していること、および鑄型が未検出であることをふまえると、製鉄に加え他地域から供給された原料鉄を素材とする鋼の製造が行われていた可能性について検討する必要があると考える。

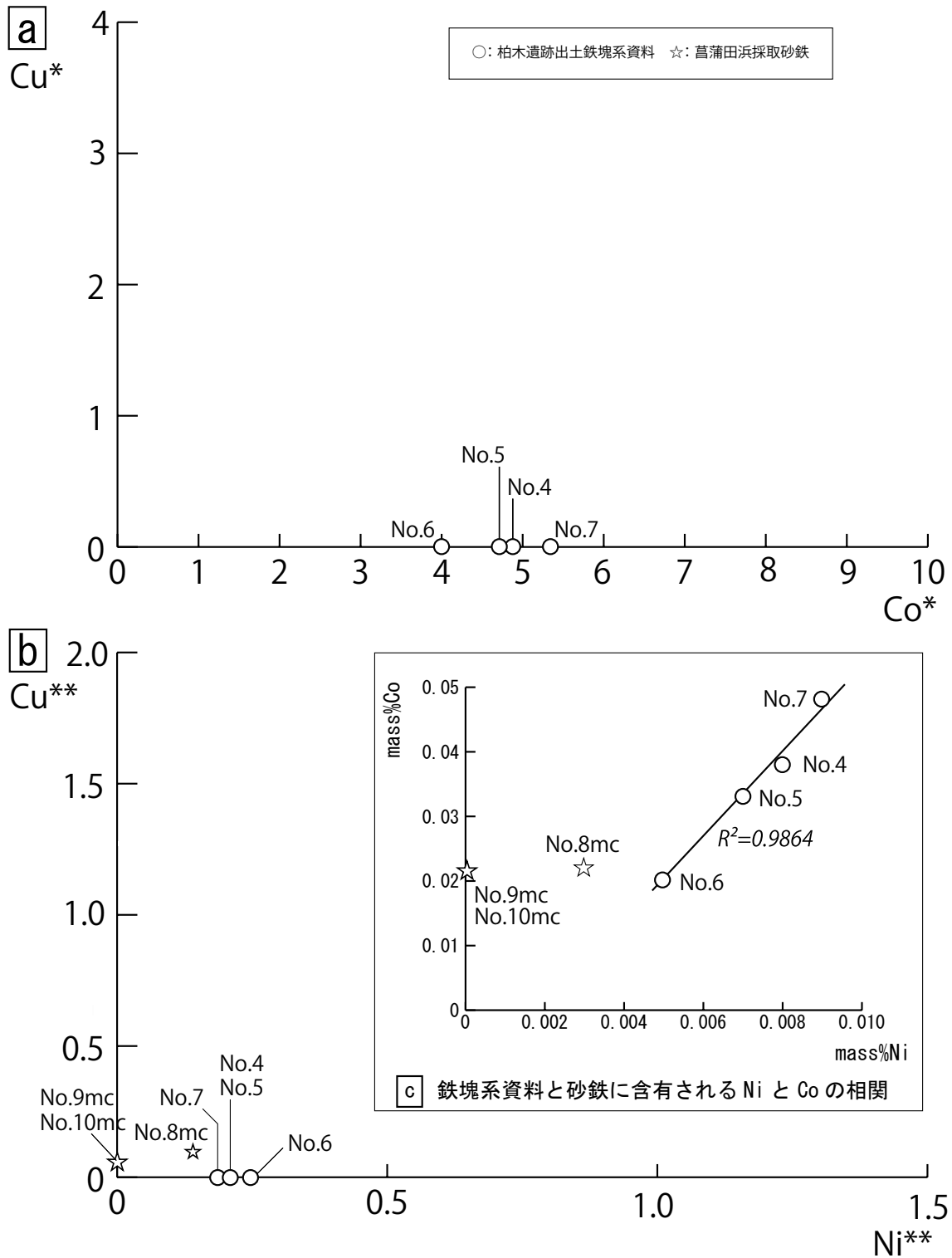


図 10 No.4～10 に含有される Cu, Ni, Co, 三成分比の関係

番号 (No.) は表 2 に対応。

$Co^* = (\text{mass\%Co}) / (\text{mass\%Ni})$. $Cu^* = (\text{mass\%Cu}) / (\text{mass\%Ni})$.

$Ni^{**} = (\text{mass\%Ni}) / (\text{mass\%Co})$. $Cu^{**} = (\text{mass\%Cu}) / (\text{mass\%Co})$.

No.8mc を除く 6 試料は、いずれも Cu が検出限界以下であったため、

Cu を 0.0001 として Cu/Ni を求め、プロットした。

5-5 武井・金沢両製鉄遺跡群検出豎形炉跡との比較

仙台平野周辺において柏木遺跡とほぼ同時代に稼働したとされる豎形炉は、福島県相馬市武井地区製鉄遺跡群において4基、南相馬市金沢地区製鉄遺跡群では10基検出されている(福島県教委1989; 1991; 1992; 1995a・b; 1997)(図1・11, 表1)。それらの検出状況は表1右欄および下段に示す通りであり、柏木遺跡出土豎形炉との共通点は以下の4点である。

- ①傾斜地に立地する。
- ②炉の斜面上部に長方形堅穴と、斜面下部に長方形あるいは三角形の堅穴を設けている。
- ③地山を掘り込み、その表面にスサ入粘土を貼って炉を構築している。
- ④直線型で気道内径の広い羽口とラップ型で気道内径の細い羽口の両方が出土する。

この結果をみる限り、武井・金沢両地区製鉄遺跡群出土豎形炉も一応、柏木遺跡出土豎形炉とほぼ同じ機能を有していたとみなすことができる。しかし、柏木遺跡で確認された、礫で囲まれた炉前方部の開口部(註7)、気道内面に布目圧痕のある直線型で気道内径の広い羽口は未確認である。また、武井・金沢両地区製鉄遺跡群では、柏木遺跡よりも規模が大きい豎形炉が見つまっている。気道内径の大きい羽口の装着角度(註8)が35～45度と65～75度の2種類ある点でも柏木遺跡とは状況が異なる(表1)。これらの結果は、機能の異なる豎形炉の混在(註9)、あるいは柏木遺跡と武井・金沢両地区製鉄遺跡群それぞれの操業に従事した技術集団の系譜上の違いについて検討する必要があることを示している。

武井・金沢両地区製鉄遺跡群では豎形炉出現以前の7世紀後半から箱形炉が出土し、10世紀まで存続する。その出土数も合計114基と豎形炉をはるかに上回る(福島県教委1997, 飯村前掲)。豎形炉に加え、箱形炉の機能および、豎形炉と箱形炉の関係(註10)についても検討する必要があるが、この点についても今後の課題としたい。

6 まとめ

律令期の仙台平野とその周辺地域における鉄・鉄器に関する生産の状況について検討するため、宮城県多賀城市柏木遺跡検出豎形炉の炉形、および豎形炉に伴って出土した羽口、炉壁、鉄塊系資料の再調査を実施した。その結果、以下の4点が明らかとなった。

- ①仙台平野およびその周辺地域では、柏木遺跡でのみ、豎形炉前方に礫を敷設した開口部が確認されている。
- ②鉄硫化物が混在する鉄塊系資料が確認された。
- ③羽口表面に付着する黒褐色物質には微細なCu-Ni鉱物の析出が認められた。
- ④実験によって有効性が確かめられたCu, NiおよびCo三成分比による分類法によると、鉄塊系資料と遺跡周辺で採取した砂鉄の三成分比には明確な差異がある。

これらの結果は、柏木遺跡出土豎形炉で砂鉄を始発原料とする製鉄が実施されたことを直ちに断定することが危険であることを示している。福島県相馬市武井地区・南相馬市金沢地区で見つかった8世紀後半～9世紀前半に比定される豎形炉も、炉の立地、豎形炉に付随する設備内容、築炉材、基部の形状と気道内径に差異のある2種類の羽口の検出という点で柏木遺跡出土豎形炉と共通点があるが、炉の規模と構造、羽口の製作方法とその装着角度に差異が認められた。豎形炉の機能、または技術系譜に差異があった可能性がある。

今後、豎形炉に伴って出土した鉄関連資料をより詳細に調査し、柏木遺跡とほぼ同時代に比定される遺跡から出土した豎形炉の調査結果と比較検討することによって、仙台平野およびその周辺地域で検出された豎形炉の機能をより明確にできると思われる。

謝辞

本稿を作成するにあたり、多賀城市埋蔵文化財調査センターには、所蔵資料の自然科学的調査、宮古市教育委員会には、体験講座への参加と実験資料の自然科学的調査にご協力いただいた。相沢清利氏からは、発掘調査状況、調査資料の検出状況に関してご指導を賜った。衷心よりお礼申し上げる。

註

- 1) 当該地域で生産された鉄は、当時の陸奥国府である多賀城造営とその維持に重要な意味を果たしたという見解が提示されている(多賀城市埋文前掲, 高倉1992, 飯村前掲)。
- 2) 豎形炉内に送風するための送風口先端部分を「通風管」, 「送风管」と呼び、箱形炉や鍛冶炉で使用する羽口と使い分けている発掘調査報告書があるが、本稿では、送風のために炉内に挿入された道具とみなされる遺物を全て羽口、炉内側の先端を先端部、送風装置側の先端を基部と呼ぶ。

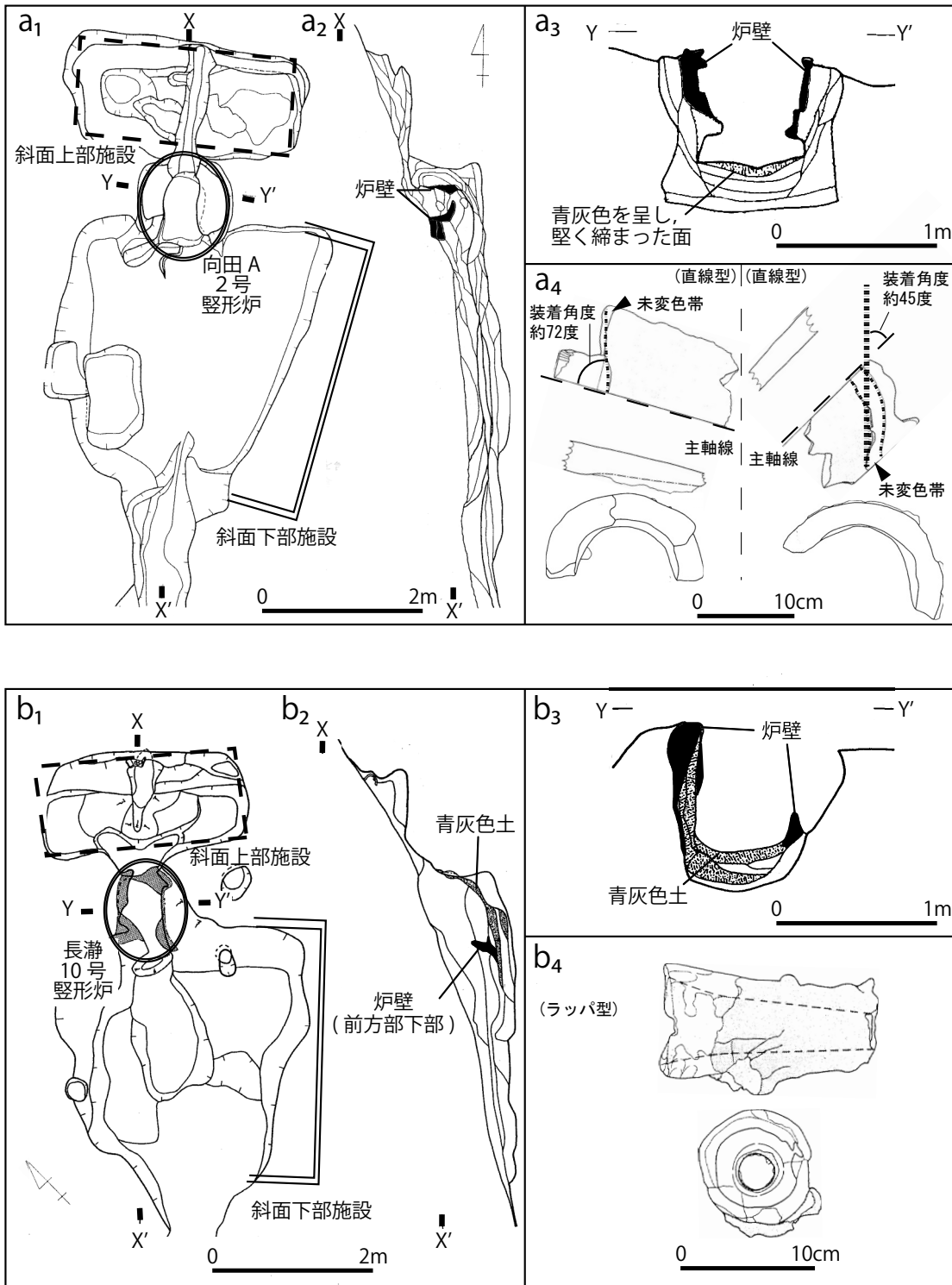


図 11 武井・金沢両製鉄遺跡群出土豎形炉と出土羽口の実測図
各遺跡の発掘調査報告書（福島県教委 1989・1991）を基に作成。

a：武井地区向田A遺跡2号炉，b：金沢地区長瀬遺跡10号炉

a₁・b₁：平面図。実線内に豎形炉，波線部に斜面上部施設，二重線に斜面上部施設が設置。

a₂・b₂：それぞれ a₁, b₁ の X-X' の断面図。 a₃・b₃：それぞれ a₁, b₁ の Y-Y' の断面図。

a₄・b₄：それぞれ炉跡に共伴する羽口の実測図。

- 3) 本稿における羽口の装着角度は、羽口気道の主軸に対する未変色体平面の角度とした。
- 4) 柏木遺跡出土羽口には、縦断面形が長方形もしくは台形を呈するタイプと、縦断面形が長方形もしくは台形を呈し、基部に至り急激にラッパのように開くものの2種類が認められた(図3)。本稿では、前者を直線型、後者をラッパ型と呼ぶ。後者の気道内径は前者の1/5～1/4程度と細い。
- 5) 炉跡4基の南側平坦地からは、還元面と酸化面を有する炉跡を備えた2号堅穴住居跡が1基発見され、遺構内から羽口片2点、多量の剥片状資料と粒状資料、1点の椀形滓が出土している(多賀城市埋文前掲)。羽口片は2点とも先端部分のみを残すにすぎない。その形状から気道内径は25～3cmと推定される。これらの羽口を用いて、少なくとも堅穴遺構内では固体鉄の加熱・鍛打が実施されていた可能性が高い。
- 6) 2号堅穴住居跡に近接して、カマドを備えた堅穴住居跡が3基(1号、3号、4号)検出された。遺構内からは鉄塊系資料、剥片状資料、炉壁片、流状滓、塊状滓が出土している。
- 7) 金沢地区長瀨遺跡3・10・22号炉、大船迫A遺跡42・58・59号炉では炉前方の壁体が残存していた(表1)。長瀨10号炉では、前方部下方の壁体が炉底から約15cmの高さで残存したという(図11b₂)(福島県教委1991)。開口部が無い可能性がある。一方、長瀨22号炉、大船迫A42号では前方部上方の壁体が廃絶時のまま残存し、その下方部はそれぞれ約30cm、約20cmの高さで開口していたと報告されている(福島県教委1992・1995a)。長瀨3号炉、大船迫A58・59号炉では、炉前方部上方にあった壁体が炉底部に落ちた状態で出土したと推測されている(福島県教委1991; 1995a・b)。長瀨10号炉を除いた5基では、開口部における礫の敷設は未確認である。斜面下部施設およびその下部に堆積する遺物から礫の有無を確認する必要がある。金沢地区堅形炉では開口部の有無という点でも堅形炉の構造に差異がある。なお、武井地区については前方部の壁体が残存しておらず、開口部の有無は不明である。
- 8) 本稿における羽口の装着角度の算出方法は、武井・金沢両製鉄遺跡群の発掘調査報告書における算出方法と異なる。報告書の記載と本稿の装着角度は異なるので、注意願いたい。
- 9) 武井地区では、獣脚、器物、梵鐘(龍頭)などの鋳型片が集中して出土する遺構が確認されている(福島県教委1989)。鋳造が行われていたことを示すものであり、堅形炉が鋳鉄製造あるいは溶解炉として機能していた可能性につ

いても検討する必要がある。

- 10) 福島県教委(1989)によると、武井地区向田A遺跡出土の堅形炉と鋳型出土遺構のいずれもが8世紀後半と推定されることから、堅形炉で生産された鋳鉄を原料として鋳造作業が実施されていた可能性を指摘している。しかし、同じく堅形炉と箱形炉が共存する武井地区向田D・山田Aの2遺跡、金沢地区長瀨・鳥沢B・大船迫Aの3遺跡では鋳型が未確認であり、全ての堅形炉の機能を鋳鉄生産に限定することは危険である。

引用文献

- Akanuma Hideo (2001) Iron Objects from Stratum II at Kaman-Kalehöyük Correlation between Composition and Archaeological Levels. *Anatolian Archaeological Studies X* : 181-190.
- 赤沼英男(2004) 出土遺物の組成からみたオホーツク文化における鉄器使用の変遷。アイヌ文化の成立, pp 203-230. 北海道出版企画センター, 札幌。
- 福島県教育委員会(1989) 相馬開発関連遺跡調査報告Ⅰ。
- 福島県教育委員会(1991) 原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅱ。
- 福島県教育委員会(1992) 原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅲ。
- 福島県教育委員会(1995a) 原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅴ。
- 福島県教育委員会(1995b) 原町火力発電所関連遺跡調査報告Ⅵ。
- 福島県教育委員会(1997) 相馬開発関連遺跡調査報告Ⅶ。
- 飯村均(2005) 律令国家の対蝦夷政策—相馬の製鉄遺跡群—。新泉社, 東京
- 猪木幸男監修(1992) 日本地質図体系東北地方。朝倉書店, 東京。
- 佐藤知雄編(1968) 鉄鋼の顕微鏡写真と解説。丸善株式会社, 東京。
- 新地町教育委員会(1987) 向田C・D遺跡 向田経塚。
- 関博充・女鹿潤哉・赤沼英男・佐々木整(2006) 律令期の陸奥国官営施設における鉄器獲得方法について—城柵・官衙出土鉄器の形態と組成を通して—。岩手県立博物館研究報告 23: 21-34。
- 関博充・女鹿潤哉・赤沼英男・佐々木整(2009) 律令期の陸奥国官営施設における鉄器獲得方法について(3)—城柵・官衙出土鉄器の解析を通して—。岩手県立博物館研究報告 26: 11-22。

関博充・女鹿潤哉・高橋誠明・赤沼英男・佐々木整
(2007) 律令期の陸奥国官営施設における鉄器獲得方法について (2) - 城柵・官衙出土鉄器の形態と組成を通して - . 岩手県立博物館研究報告 24: 43-54.

高倉敏明(1992) 柏木遺跡. 多賀城市史第4巻考古資料, 多賀城市.

多賀城市埋蔵文化財調査センター (1989) 柏木遺跡 I・II. 多賀城市教育委員会.

要 旨

律令期の仙台平野における鉄・鉄器普及とその変遷解明には、仙台平野内における一貫生産、他地域からの原料鉄・鉄器供給、鉄器の再利用という3つの要因を考慮する必要がある。一貫生産の状況を検討するため、宮城県柏木遺跡竪形炉跡の検出状況と、共伴する羽口、炉壁、および鉄塊系資料を金属考古学的に調査した。

その結果、鉄塊系資料に鉄硫化物の混在、羽口表面付着黒褐色物質に銅鉍物の残存が確認された。実験によって有効性を確かめた Cu, Ni, Co 三成分比に基づく分類結果によると、鉄塊系資料と遺跡周辺で採取した砂鉄の間に相関は見られない。形状の異なる羽口の検出、竪形炉に開口部の設置という事実を加味すると、直ちにその竪形炉で砂鉄を始発原料とする製鉄が実施されたと断定することは難しい。

炉に伴って出土した鉄関連資料をより詳細に調査し、他遺跡出土竪形炉の調査結果と比較検討することで、竪形炉の機能をより明確にできると思われる。

キーワード：律令期，仙台平野，竪形炉，金属考古学的調査