土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査()

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年1月

日立エンジニアリング株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49 核燃料サイクル開発機構 技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

◎ 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2004

土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査()

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

本田 卓 ,山口新吾

要旨

宮崎県内の 4 ヶ所の遺跡(4 ~ 7 世紀)及び青森県内の 3 ヶ所の遺跡(9 ~ 10 世紀)から出土した鉄器 8 点の腐食状況と埋蔵環境について調査し,長期の土壌腐食について環境と材質の両面から評価した。地下式横穴墓(宮崎県)から出土した鉄器は X 線 CT を用いて評価した。いずれも主に弱酸化雰囲気に曝されていたと考えられ,1,500 年間の腐食量は 2 mm以下で,表面は主にマグネタイトに覆われていた。青森県内で出土した鉄器は破壊評価に供し,材質の影響についても評価した。これらの資料はいずれも酸化雰囲気に曝され,ゲーサイトとマグネタイトの 2 層皮膜に覆われており,1,000 ~ 1,200 年間の腐食量は最大で 3 mmであった。本調査では,これまでの 40 点に及ぶ鉄器の調査結果をもとに,長期間の土壌腐食モデルについて言及し,弱酸化雰囲気における腐食は酸化雰囲気に比べて抑制されることを明らかにした。

本報告書は,日立エンジニアリング株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室:東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

日立エンジニアリング株式会社

Inspection about the corrosion of metallic

archaeological artifacts in ground ()

(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Takashi Honda, and Shingo Yamaguchi

Abstract

In general, it is difficult to evaluate non-destructively the corroded states of iron-based archaeological remains, as they are fully covered by thick rust formed under ground during a long period over a hundred years. The purpose of this study is to estimate the corrosion amounts of such remains with using X-ray CT and summarize the longevity of iron in soil. Eight remains dug out at seven relics were analyzed. The burial periods in soil were estimated to be from 1000 to 1700 years. Metallic iron remained in six remains, and the corrosion amounts were figured out to be from 1 to 3 mm in these periods. In addition, the soil environments of relics were analyzed, and the relation between corrosion behaviors and environmental factors was discussed. The rust was composed of outer goethite and inner magnetite layers in normally oxidizing conditions. On the other hand, a few samples were buried in slightly oxidizing environments, and these were covered by magnetite single layers. The corrosion amount of remains in such an environment was small compared to the others.

This work was performed by Hitachi Engineering Co.,Ltd under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

Hitachi Engineering Co.,Ltd

目 次

1. 緒言
2. 調査方法
2.1 調査対象鉄器
2.2 X 線 CT による非破壊評価 ····································
2.3 破壊評価
2.4 埋蔵環境の調査方法
3. 調査結果
3.1 新田場地下式横穴墓群
3.2 六野原地下式横穴墓群
3.3 築池地下式横穴墓群
3.4 西都原古墳群
3.5 岩ノ沢平遺跡
3.6 砂子遺跡
3.7 野木遺跡
3.8 鉄器の腐食量
3.9 孔食電位
4. 考察
4.1 腐食の環境依存性 ····································
4.2 腐食に及ぼす材質の影響
4.3 腐食モデル
5. 結言
謝辞14
参老文献····································

JNC TJ8400 2003-059

付 録

(1) X 線 C T 装置	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一
(2) X線CT撮像状況	

図目次

図 2.3-1	鉄器の破壊評価方法	··16
図 3.1-1	地下式横穴墓の例	$\cdot 17$
図 3.1-2	資料 1 [鉄鏃 (新田場地下式横穴墓)] の外観と X 線 CT 像	18
図 3.1-3	資料 1 , A-A'断面(図 3.1-2)の物質密度分布 ····································	··19
図 3.2-1	資料 2 [短甲片 (六野原地下式横穴墓)] の外観と X 線 CT 像	·20
図 3.2-2	資料 2 , A-A'断面(図 3.2·1)の物質密度分布 ····································	·21
図 3.3-1	資料 3 [鉄鏃 (築池地下式横穴墓)] の外観と X 線 CT 像 ··································	·24
図 3.3-2	資料 3 , A-A'(図 3.3-1)及び B-B'断面(図 3.3-1)の物質密度分布 ·········	25
図 3.4-1	資料4[左:小札(西都原古墳)]と資料5[右:刀子(同)]の外観と	
	X 線 CT 像 ·····	·26
図 3.5-1	岩ノ沢平遺跡の周辺地形	·27
図 3.5-2	青森県内遺跡の出土鉄器の外観	.28
図 3.5-3	鉄器の断面マクロ観察結果	·29
図 3.5-4	資料 6-メタル部分のミクロ組織·······	.30
図 3.6-1	資料 7-メタル部分のミクロ組織·······	.32
図 3.7-1	資料 8-メタル部分のミクロ組織	.34
図 3.9-1	炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)のミクロ組織 ·······	.38
図 4.1-1	酸化雰囲気における土壌腐食反応機構 (三澤 ½) に基づく)	··40
図 4.3-1	腐食量と埋蔵期間との関係	.45

表目次

表 2.1-1	調査鉄器の概要
表 3.2-1	鉄器付着層の形態と化学組成22
表 3.3-1	築池地下式横穴墓土壌の成分23
表 3.5-1	鉄器付着層の形態と Fe 含有率
表 3.7-1	野木遺跡内湧水の水質分析結果33
表 3.7-2	資料 8-メタル部分の化学組成35
表 3.8-1	鉄器の腐食量
表 3.9-1	炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)の化学組成と熱処理条件37
表 3.9-2	孔食電位 (Vc) ····································
表 4.1-1	酸化雰囲気における腐食量評価結果41
表 4.1-2	酸化雰囲気土壌の環境因子42
表 4.1-3	弱酸化雰囲気土壌の環境因子42
表 4.2-1	砂子遺跡出土鉄器の化学組成43
表 4.3-1	土壌腐食モデル式の研究事例44

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物の地層処分において,オーバーパックには数百年以上にわたる健全性が期待されている。炭素鋼はその候補材料の一つであり,これまでに室内試験を通して腐食速度と腐食形態に関する種々の評価が行われてきた。現在,その結果をもとに,埋設環境における1,000年間の最大腐食深さは32 mm (軟岩系岩盤/竪置きの場合)と推定されている。しかし,評価に用いられている試験は長くても数年間程度であり,長期の腐食量をより高い精度で予測するためには,他の方法で補完する必要があると思われる。

1,000年間に及ぶ長期の腐食量を直接的に求めることは不可能であるため,補完する方法としてナチュラルアナログが提案されている。これは言わば自然界による長期試験である。たとえば,炭山等 1)は圧縮ベントナイトに類似した土壌に長期に埋設されていた鋳鉄製水道管の腐食調査を行い,約 70年間の最大腐食深さは 2 mm程度であることを明らかにしている。また,調査データを基に極値統計解析を行い,1,000年後のオーバーパックの最大腐食深さは 11 mm程度と推定している。また,Johnson 等 2)は種々の環境に置かれていた考古遺物を調査し,たとえば,通気されていない水中における鉄の腐食速度は相当に小さく,腐食量は 1,000年間で 1 mm程度と評価している。これらの結果は上述した室内試験の結果から推定される値を超えるものではなく,評価の妥当性を示唆している。しかし,妥当性を保証するには,なお多くのデータの蓄積が必要と思われる。

1999 年度に実施した「土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査」³⁾により,X線CTを用いれば,鉄器に残存するメタル,生成した錆及び表面に付着した土層等を非破壊で定量的に分離することができ,錆層の厚さを基に腐食量が推定できることを明らかにした。また,上新保遺跡(富山県富山市)で出土した鉄器を対象に評価を行い,腐食量は1,200 年間で約2 mmであることを示した。しかし,腐食量は埋蔵環境,期間,鋼種の影響を受けると思われ,これらの観点からデータの蓄積を図ることが,評価の信頼性を高めることに繋がると考えられた。

2001 年度には「土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査 ()」 4)を実施し、イヨマイ7遺跡(北海道千歳市)と出雲大社境内遺跡(島根県大社町)で出土した鉄器を対象に調査を行った。その結果、酸化雰囲気における腐食量は $400 \sim 500$ 年間で $2 \sim 5$ mm , 約 700 年間で $3 \sim 5$ mmであることが判明した。

2002 年度には「土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査()」5)を実施し、青森県内の6ヶ所の遺跡(9~16世紀)から出土した各種鉄器,出雲大社境内遺跡から出土した新と釘,及び横浜市で出土した約130年前の埋設ガス管を対象に,腐食に及ぼす材質と埋蔵環境の影響を調べた。その結果,酸化雰囲気での腐食状況はこれまでの調査結果と変わらないが,弱酸化雰囲気では腐食量が著しく少ない例を認めた。しかし,塩化物イオン濃度が高い場合には,130年間で約7mmの黒鉛化腐食を呈した例もあり,

埋蔵環境の影響をさらに検討する必要があると判断された。

本年度の研究では,宮崎県の 4 ヶ所の遺跡(4 ~ 7 世紀)及び青森県の 3 ヶ所の遺跡(9 ~ 10 世紀)から出土した鉄器を対象に調査を実施した。調査における目的の一つは,弱酸化雰囲気での腐食状況をより明確にすることである。宮崎県の地下式横穴墓群から出土した鉄器は,この目的に適合するものと思われる。第 2 の目的は,腐食に及ぼす材質の影響を明らかにすることである。この目的のために,青森県で出土した資料を対象に破壊評価を実施した。また,1,000 年間の腐食を評価するためには,埋蔵期間がそれ以上の資料の評価が欠かせないが,宮崎県の資料はこれにも適合している。

2. 調査方法

2.1 調査対象鉄器

調査した鉄器は8点で,表2.1-1に出土場所,埋蔵年代等をまとめた。宮崎県では,3ヶ所の地下式横穴墓(5世紀)から出土した鉄鏃と短甲片の3点を,4~7世紀の古墳群から出土した小札,刀子の2点を調査対象とした。また,青森県では平安時代(9~10世紀)の3ヶ所の住居跡から出土した鉄器3点を調べた。

2.2 X線 CT による非破壊評価

宮崎県の4ヶ所の遺跡から出土した鉄器5点は、いずれもX線CTによる非破壊評価に供した。資料は出土後に表面に付着する土のみが除去され、15~30年間、保管庫に保存されていた。本調査に用いたX線CT装置(日立製HiXCT-1M)の構成を付録-1に示す。X線エネルギーの最大値は1MeV で、鉄換算厚さで100 mm程度の撮像が可能である。空間分解能は0.5 mm,スライス厚さは0.4 mmである。

また,一部の資料では表面付着層の極微量を剥離し,形態を粉末X線回折により調べ, 化学組成のFe, V, Cu, Ti については溶解後にICP-AES(高周波誘導結合プラズマ発 光分光分析法)により,Pについては吸光光度法により求めた。

2.3 破壊評価

青森県の3ヶ所の遺跡から出土した鉄器3点は破壊評価に供した。評価方法を図2.3-1に示す。組織観察用の試料は,鉄器を樹脂に埋め込んだ後,中央部をダイヤモンドカッターで切断し,表面をエメリ紙で研磨,水洗,乾燥したのち,ナイタール(10%硝酸エチルアルコール溶液)でエッチング処理した。また,孔食電位測定にはエッチング処理を施さない試料を用いた。測定装置の構成は JIS G 0577 に準拠した。液は 25 の0.01N-NaCl+0.05N-H $_3BO_3$ +KOH(pH 8.5),電位走引速度は20mV/min で,電流密度が 100 μ A/cm 2 における電位を孔食電位(Vc)とした。測定には比較材としてオーバーパック候補材である圧力容器用炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)を用いた。

錆の形態と Fe 含有率及び残存メタルの化学組成については , 図 2.3-1 に示す処理手順にしたがって求めた。なお , 化学組成の C , S は高周波燃焼法 (JIS~G~1211~,1215~) , Si は重量法 (JIS~G~1212~) , P は吸光光度法 (JIS~G~1214~) , Mn , Cu , V は原子吸光光度法 (JIS~G~1257~) , Ti は ICP-AES により求めた。

2.4 埋蔵環境の調査方法

土壌環境の腐食性を評価するため,前報 4 の結果に基づいて築池地下式横穴墓(宮崎県国富町)の土壌を分析した。評価因子は,pH,水分含有量及び塩化物イオン(Cl),硫酸イオン(SO_4^2),硫化物イオン(S^2),チタン(Ti),鉄(Fe) の各濃度である。濃度測定には土壌の温水抽出液を用い, S^2 は JIS K 0101,<math>Cl7, SO_4^2 はイオンクロマ

トグラフィー, Ti は ICP-AES, Fe は原子吸光光度法 (JIS G 1257) により求めた。なお,環境の腐食性は DVGW が提唱する方法 6 に基づいて評価した。

また,他の出土場所の環境は,各遺跡の調査報告書 ^{7)~11)}に基づいて評価した。

3. 調査結果

3.1 新田場地下式横穴墓群

宮崎県小林市大字真方字新田場に位置する6号地下式横穴墓(5世紀)から出土した鉄鏃(資料1,報告書 7)登録番号 16)を評価した。この場所は二原台地の南端東縁部にあたる。資料は1986年の調査 7時に出土したもので,表面に付着する土が除去された状態で約17年間保管されていた。地下式横穴墓は図3.1-1に示すように,深さ約1.5mの竪坑から水平方向に掘られた羨道と玄室から構成されている。調査時点では玄室の天井は崩落しており,資料は崩落土の中から出土したが,元は玄室側壁の棚部に置かれていたと考えられている。したがって,資料の片側は土に接していたが,反対側は長期間,気相に曝されていたと思われる。また,竪坑と羨道の間は河原石で閉塞され,竪坑は土で埋められていた。埋土は横穴墓構築時の廃土であるアカホヤ(火山灰),黒褐色土,黒色土である。したがって,初期の埋蔵環境は大気雰囲気だが,その後は長く低酸素・高湿度雰囲気であったと考えられる。玄室天井の崩落時期は不明だが,崩落後において資料4は酸化雰囲気に曝されていたと思われる。

3.2 六野原地下式横穴墓群

宮崎県東諸県郡国富町の六野原台地に位置する地下式横穴墓(5世紀)から出土した短甲片(資料2,宮崎県教育庁文化課文書108-1211(平成15年10月7日発行)記載の「短甲片」)を調査した。土壌はアカホヤ(火山灰),黒褐色土,黒色土で,埋蔵環境は新田場地下式横穴墓とほぼ同じである。

図 3.2-1 は外観と X 線 CT 撮像結果である。資料は最大横幅 $130 \text{ mm} \times$ 最大縦幅 50 mm で厚さは約 2 mmである。表面は黒褐色で縁近くに貫通孔が数個あるが,いずれも鋲留孔で腐食によって生じたものではない。撮像結果を見ると,厚さ 2 mmの板状メタルが良く残っている。錆の厚さはほぼ均一で 0.5 mm以下と薄いが,ところどころに孔食(最大深さ:2 mm)によると思われるピットが形成されており,その部分では若干厚く成長している。図 3.2-2 は A-A</sub>的面の物質密度分布である。錆は密度が約 $4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の 1 Pm

で構成されている。

次に,資料表面に付着する層の極微量を採取し,形態と化学組成を調べた。結果を表 3.2-1 に示す。付着層は X 線回折強度が弱く,結晶性の悪い非晶質成分を多く含んでいる。結晶相としては,マグネタイト(Fe_3O_4)が主であり,高次の鉄酸化物であるゲーサイト(FeOOH)とレピドクロサイト(FeOOH)は少量ないしは痕跡程度であった。また,土壌成分である SiO_2 と Na ,Al 等の複合酸化物は検出されず,付着層が腐食生成物のみで構成されていることが分かる。この結果は化学組成を調べた結果とも良く符合している。Fe 濃度は 60%で,マグネタイトの Fe 含有率(72%)に近い。この結果は本資料が長期にわたり弱酸化雰囲気に埋蔵されていたことを示唆している。ところで,錆の Ti/Fe 比は 0.01%以下で,鉄器の原材料は砂鉄ではなく鉄鉱石である。

3.3 築池地下式横穴墓群

宮崎県都城市水流町には古墳と地下式横穴墓が点在する。この地域は霧島山系の東端裾野に位置し、周囲を川に囲まれている。地下式横穴墓は水田地帯がせまる台地(標高約 150m)に位置している。鉄鏃(資料 3 , 宮崎県教育庁文化課文書 108-1211(平成15 年 10 月 7 日発行)記載の「鉄鏃」)は 1970 年代の調査 8時に出土したもので , 約30 年間保管されていた。出土環境は新田場地下式横穴墓の場合と同じで , 調査時には玄室の天井は崩落しており , 資料は崩落土の中から出土した。竪坑は土で埋められており , 埋土は黒褐色砂質土である。表 3.3-1 は土壌の分析結果である。塩化物イオン(Cl-) , 硫酸イオン (SO₄²⁻) が共に中程度の濃度であり , チタン磁鉄鋼やフェロチタン鉄鋼が風化した砂鉄成分を含んでいる。環境の腐食性は弱いと考えられる。

図 3.3-1 は資料の外観と X 線 CT 撮像結果である。全長 $170\,\mathrm{mm}$ で,長さ約 $120\,\mathrm{mm}$ の鏃 身部は黒褐色,茎部は褐色を呈している。鏃身部先端のメタルは消失しているが,中央 には矩形のメタルが残っている。メタル周りの錆厚さは $1\sim2\,\mathrm{mm}$ であり,最大孔食深さは $1\,\mathrm{mm}$ である。

図 3.3-2 は A-A'(茎部)及び B-B'(鏃身部)断面の物質密度分布である。茎部ではメタルが消失し,円柱状の錆が形成されていることが分かる。錆の周りを厚さ約1mmの低密度層が覆う。この層は木質などの有機物であろうと推定される。鏃身部には鉄質が認められ,その周りに錆が形成されている。

3.4 西都原古墳群

宮崎県西都市大字三宅西都原の西都原台地には310 余基の古墳が分布しており,築造年代は4~7世紀と考えられている。調査した資料は,甲冑の一部分である小札(資料4,宮崎県教育庁文化課文書108-1211(平成15年10月7日発行)記載の「小札」)と刀子(資料5,同「刀子」)の2点である。

図 3.4-1 は外観と X 線 CT 撮像結果である。小札は最大長さ約 60 mm x 最大幅約 40 mm

である。表面は黒褐色で図の左部分はやや厚い。撮像結果を見ると,メタルは腐食で完全に消失している。錆は密度の異なる 2 層で構成されており,高密度の内層厚さは $1\sim2$ mmで,低密度の外層厚さは約 1 mmである。メタルが消失した後は厚さ約 2 mmの空洞となっている。厚くなっている左部分は 2 枚の板が重なっていたように見え,それぞれの錆厚さは同程度である。なお,撮像結果 の右側に見られる複数の孔は,資料に元々開けられていた紐通し用の孔と思われる。

刀子は最大長さ約 $50 \, \mathrm{mm} \times \mathrm{a}$ 大幅約 $20 \, \mathrm{mm}$ である。腐食状態は小札と同様で,メタルは完全に消失している。撮像結果 には空洞が観察される。錆構造は資料 $4 \, \mathrm{c}$ と同じで,内層の厚さはほぼ均一で $1 \, \mathrm{c} \, \mathrm{2} \, \mathrm{mm}$ で,低密度の外層厚さは約 $1 \, \mathrm{mm}$ である。資料表面の付着層を分析した結果(表 $3.2 \, \mathrm{c} \, \mathrm{1}$),この層は $X \, \mathrm{k}$ 回折強度が弱く非晶質成分を多く含んでいる。錆成分としては,マグネタイト($\mathrm{Fe}_3\mathrm{O}_4$),ゲーサイト($\mathrm{Fe}_3\mathrm{O}_4$),ゲーサイト($\mathrm{Fe}_3\mathrm{O}_4$),が同定された。また,土壌成分の Na , Al 等の複合酸化物も存在する。化学組成を見ると, P/Fe 濃度比が0.3%と高い。磁鉄鋼はりん鉱石を伴うことが多いことから,地金の原料が磁鉄鉱であることを伺わせる。なお, Ti 濃度も高いが,これは付着する土壌成分に由来するものと思われる。

3.5 岩ノ沢平遺跡

岩ノ沢平遺跡は青森県八戸市の中心部から西に約 6.5 kmの地点にあり,図 3.5-19に示すように,南側を馬淵川,北側を浅水川に挟まれ,東西方向に延びる丘陵の東側に位置する。本地域は国内有数の段丘発達地域で,十和田カルデラを噴出源とする火山灰層に覆われている。鉄器は平安時代(9~10世紀)の住居跡から多数出土しており,この地域で鉄器が製作されていた可能性が高いと考えられている。鉄器が出土した場所は深さ約 1mの住居跡床面で,土壌は浮石混じりの黒褐色土を主体とする。なお,表層には白頭山火山灰が堆積する。

調査に供した鉄器は,図 3.5-2 に示したものの内,メタルが残っているものを選定した。資料は「98 岩ノ沢平 B 地区 SI-69 白頭山火山灰下層(青森県教育委員会記録)」である。図 3.5-3 にマクロ観察結果を示す。資料 6 の内部には多くの亀裂が認められる。メタル周りの錆は 2 層構造で,内層厚さは最大で 2 mm,外層厚さは 1 mmである。メタル部分のエッチング組織を図 3.5-4 に示す。結晶粒径が $10 \sim 20$ μ mに細粒化している部分と 50 μ m以上の部分が層状に分布しているが,いずれもフェライトとパーライトの組織である。炭素(C)量は 0.06%と低く亜共析鋼である。また,Ti は 0.01%と低く,原材料は鉄鉱石であろうと推定される。

この資料表面に付着する層の内側と外側から極微量を採取し,それぞれの形態と Fe 含有率を調べた。結果を表 3.5-1 に示す。外層は非晶質成分が主であるが,錆成分であるゲーサイト(-FeOOH)とレピドクロサイト(-FeOOH)が少量~痕跡程度認められ,土壌成分はほとんどない。また,内層にはマグネタイト(Fe_3O_4)が検出され,

錆が 2 層構造であることを示唆している。内層の Fe 濃度は 60%で,マグネタイトの Fe 含有率 (72%)に近い。以上の結果はこの資料の埋蔵環境が酸化雰囲気であったことを示している。

3.6 砂子遺跡

砂子遺跡は青森県三戸郡南郷村の沖積地に広がる平安時代の住居跡である。地層は砂礫,砂などの水成堆積物が主体で,水成堆積物を覆う黒色土層中に,浮石層,火山灰層が認められ,十和田火山灰に由来する軽石粒が混じっている。遺跡内で鉄の生産活動が行なわれていたと考えられており,その調査100も実施されている。

本調査に供した鉄器は,図 3.5-2 に示したものの内,メタルが残っているものを選定した。資料は「97 砂子鉄製品 AB-17 畑面上 97-8-27(青森県教育委員会記録)」である。図 3.5-3 のマクロ観察結果に見られるように,黒灰色の錆層が最大で 2 mm厚で,その周りを赤褐色の層(最大厚さ約 3 mm)が覆っている。メタル部分のエッチング組織を図 3.6-1 に示す。結晶粒径が $10\sim20\,\mu$ m程度に細粒化している部分と $50\,\mu$ m以上の部分が層状に分布している。細粒化している部分の方がパーライトの比率がやや高いが,いずれも初晶フェライトとパーライトの組織である。C 量はいずれも 0.1%以下で亜共析鋼である。また,Ti は 0.01%以下と低いことから,原材料は鉄鉱石であろうと推定される。

この資料表面の付着層の形態と Fe 含有率を調べた。結果は表 3.5-2 に示すように,外層は土壌成分が非常に多く,錆成分であるゲーサイト(FeOOH)が少量認められた。また,内層はマグネタイト(Fe3O4)が主体である。この結果は,錆がゲーサイトとマグネタイトの 2 層構造であることを示しており,埋蔵環境は酸化雰囲気であったと思われる。

3.7 野木遺跡

野木遺跡は青森市大字合子沢字松森に所在し,標高約 80mの丘陵部分の尾根に位置する。本遺跡は 1995~98 年にかけて調査 ¹¹⁾され,平安時代(9世紀中葉~10世紀中葉) の集落跡であると見られている。なお,放射性炭素年代測定の結果は 780~975 年であることを示している。この場所では 350 点もの鉄器が出土しており,鉄の鍛冶に加え,素材の製造まで行なわれていた可能性が指摘されている。

鉄器が出土した地層は白頭山火山灰が被覆した層である。同遺跡内の湧水から採取した地下水の分析結果を表 3.7-1 に示す。 p H は 6.3 で中性であり,塩化物イオンなどの腐食性イオンの濃度は低い。また,硬度は 24 で軟水である。地下水質から推定すると,環境の腐食性は弱い。

調査に供した鉄器は,図 3.5-2 に示したものの内,メタルが残っているものを選定した。資料は「97 野木 B7 333H Fe-1 床面 (青森県教育委員会記録)」である。図 3.5-3

にマクロ観察結果を示した。錆は黒灰色の内層(黒鉛化腐食層 , 厚さ 3 mm) と赤褐色の 外層 (厚さ 5 mm) の 2 層である。メタル部分のエッチング組織を図 3.7-1 に示す。バラ 状黒鉛が析出しており , 素地はフェライトとパーライトからなる鋳鉄組織である。化学 組成 (表 3.7-2) は , 4.61% C , 0.03% Si である。なお , Ti が 0.01% 以下と低く , P が 0.16% と高い。このことは原材料が砂鉄ではなく , 鉄鉱石であることを示している。

この資料表面に付着する層の形態と Fe 含有率を調べた。結果を表 3.5-1 に示す。外層は非晶質成分が多く,錆成分であるアカガネアイト(-FeOOH)とゲーサイト(-FeOOH)が認められた。また,内層はマグネタイト(Fe_3O_4)が多いが,アカガネアイトとゲーサイトも検出された。この結果は,錆が 2 層構造で,埋蔵環境が酸化雰囲気であったことを示唆する。

3.8 鉄器の腐食量

表 3.8-1 に調査した資料の埋蔵環境と腐食状態をまとめた。7 遺跡から出土した 8 点の内 6 点にメタルの残存が確認された。地下式横穴墓から出土した 3 点は,1,500 年間の相当期間,大気と遮断された高湿度の弱酸化雰囲気に置かれていたものと推定される。いずれも鍛鋼品で孔食を生じていたが,腐食深さは $1\sim2$ mmである。なお,錆厚さから推定される平均腐食量は 1 mm以下である。一方,西都原古墳群から出土した 2 点も鍛鋼品で,ほぼ同じ期間,埋蔵されていたと思われるが,いずれも完全に錆化していた。これは,錆がマグネタイトとゲーサイト(レピドクロサイト)の 2 層構造であることから,酸化雰囲気に長く曝されていたことに起因していると思われる。なお,錆厚さから推定される腐食量は,2 点とも最大で 2 mm程度である。

青森県の住居跡から出土した 3 点の内 ,2 点は鍛鋼品 ,1 点は鋳鉄品である。いずれも酸化雰囲気に $1,000 \sim 1,200$ 年間埋蔵されていたと考えられるが , 前者の腐食量は $2 \sim 3$ mm , 後者の腐食量は約 2 mmである。

3.9 孔食電位

オーバーパック候補材である圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 (SFVC1)を比較材として,青森県で出土した鉄器 3 点の孔食電位を求めた。なお,比較材の化学組成,熱処理条件を表 3.9-1 に,組織を図 3.9-1 に示した。この材料は 0.19% で,初析フェライトとパーライトからなる亜共析鋼である。

表 3.9-2 は 25 の 0.01N-NaCl+0.05N-H $_3$ BO $_3$ +KOH(pH 8.5)溶液中における各材料の孔食電位 (Vc) である。なお,岩ノ沢平遺跡から出土した鍛鋼品は明瞭なアノード分極曲線が得られず,孔食電位を求めることができなかった。これは資料が多孔質であったことによると思われる。SVFC1 は 0.11V (SHE) であるのに比べ,砂子遺跡の鍛鋼品は 100mV 程貴であり,耐孔食性に勝ると考えられる。また,野木遺跡の鋳鉄品は 0.04V と卑である。

4. 考察

4.1 腐食の環境依存性

土壌中の腐食は酸素が主なカソード反応物質であることから,環境は酸化雰囲気と弱酸化(還元)雰囲気に大きく分けることができる。酸化雰囲気における腐食反応機構は図 $4.1\cdot1$ のように推定される。初期錆はレピドクロサイト(- FeOOH)であり,還元と再酸化,熟成を経て,長期間後には内層にマグネタイト(Fe_3O_4),外層にはゲーサイト(-FeOOH)が形成されると考えられる。この反応機構はこれまでの調査結果と良く符号している。なお,野木遺跡で出土した資料 8 には,他の資料には検出されていないアカガネアイト(-FeOOH)が含まれていた。この錆成分は塩化物イオン濃度の高い環境で形成されると考えられるが,同資料の錆に含まれていた理由は不明である。これまでの調査結果からは,酸化環境に埋蔵されていた鉄器の腐食量は,表 $4.1\cdot1$ に示すように,約 1,000 年間で 10 mmを超えていない。今回の調査の内,青森県の 3 点と西都原古墳群の 2 点はこの雰囲気に曝されていたと考えられるが,最大腐食量は 3 mmでこれまでの結果から外れてはいない。これまでの調査の内,酸化雰囲気と考えられる遺跡の環境測定値を表 $4.1\cdot2$ にまとめた。調査した遺跡の腐食性は,DVGW の判定基準 6 による 4 段階の「3: 弱い」か「4: ほとんどなし」である。この様な環境であれば,酸化雰囲気で腐食量が 10 mmを超えないと言えよう。

地層処分の場合,初期は酸化雰囲気であるが,腐食の進行に伴い酸素が消費され,主に弱酸化雰囲気に置かれるものと思われる。これは今回の地下式横穴墓の環境変化と似ている。したがって,初期にはレピドクトサイトが形成されるが,還元過程を経て,最終的にはマグネタイトとして安定すると考えられる。弱酸化雰囲気では腐食性イオンの濃度が数 100 mg/kg以下であれば,孔食の度合も小さいものと思われる。

4.2 腐食に及ぼす材質の影響

オーバーパックの候補材としては,圧力容器用炭素鋼鍛鋼品(SFVC など)が考えられている。この鋼は初析フェライトとパーライトから成る亜共析鋼である。砂子遺跡で出土した鍛鋼品(資料 7)は,SFVC と比べるとパーライト組織がやや少なく 0.1%C 程度である。同じ遺跡内で出土した鉄器(文献 10^{10} p.303 , 表 2 (No.35))の代表的な化学組成を表 4.2-1 に示す。SFVC1 と比べて Si が低く P が高いが,他の不純物濃度は同レベルである。孔食電位は資料 7 の方が 100mV 貴で,耐孔食性が高いことを示唆しているが,その理由が低 C,低 Si にあるかは明確ではない。古代鉄器の材質に関して検討された結果によると,鍛鋼品は $0.1 \sim 0.5\%$ の亜共析鋼で,P と Ti にバラツキがあるものの,他の元素は概ね現代の鍛鋼品の組成と同じレベルである。P は磁鉄鋼原料で,また,Ti は砂鉄原料で高くなる場合があるとされる。この 2 元素が腐食挙動にどこまで影響するかは,現状では明らかでなく,今後の検討を必要とする。

一方,鋳鉄品は調査した 43 点中,4 点に過ぎないが,腐食形態が黒鉛化腐食である点を除けば,腐食量としては鍛鋼品と有意な差は見られない。なお,野木遺跡の資料 8 は鋳鉄品で,資料 7 (鍛鋼品)と比べて孔食電位が低いが,平均腐食量には優位な差がない。

4.3 腐食モデル

土壌腐食速度を腐食に強く影響を与える環境因子を把握することによって推定しようとの試みは古くから検討されてきた。しかし,土壌中の腐食は複数の腐食支配因子の相乗作用によって進行しているため,定量的に把握することは非常に難しい。たとえば,各環境因子の腐食への影響度を定量的に捉えようとしている $DVGW^{6}$ は,環境因子ごとの影響度を単純に加算するという評価方法を用いており,最終評価は土壌環境の腐食性を 4 段階に分類するに留まっている。これまでの代表的な研究事例(表 4.3-1)を検討した結果,土壌抵抗率が重要な因子であるものの,これ一つで腐食を評価することは難しく,また,他の特定因子を抽出することもできない。そこで,片野 19 が提示した評価式の水準を高めることが,本研究の目的にかなっていると思われる。すなわち,腐食量(m/mm)は埋設期間(t/h)を用いて次のように表わすことができる。

 $m = a t^n$

ここに,係数 a は環境に依存する係数である。 n は片野 19)によれば 0.4,炭山ら 1)によれば 0.5 であり,時間の経過とともに腐食速度が小さくなることを示唆している。 土壌中での腐食が酸素の拡散律則であると考えると,腐食速度は形成される酸化皮膜の厚さに反比例し,腐食量の増大は放物線則に従う。

これまでの調査で得られた腐食量と埋蔵期間との関係を図 4.3-1 に示した。環境を

酸化雰囲気と弱酸化雰囲気に分けると,酸化雰囲気では 式に従い,弱酸化雰囲気では 式に従う。なお,腐食量変化が放物線則に従うとして,nは0.5を用いた。

酸化雰囲気m = 0.12 t 0.5...弱酸化雰囲気:m = 0.039 t 0.5...

なお,弱酸化雰囲気において特異な腐食挙動を示した鋳鉄管の値は評価から除外した。 結果は,弱酸化雰囲気における腐食量は,酸化雰囲気に比べて約 1/3 に抑えられること を示している。

5. 結言

宮崎県の4ヶ所の遺跡(4~7世紀)と青森県の3ヶ所の遺跡(9~10世紀)から出土した鉄器8点の腐食状況と埋蔵環境について調査し,長期の土壌腐食について環境と材質の両面から評価した結果,以下のことが明らかになった。

- (1)宮崎県の地下式横穴墓から出土した鉄器3点は,長期にわたり弱酸化雰囲気に埋蔵されていたと考えられる。塩化物イオン等の腐食性イオン濃度は中程度で,環境の腐食性は弱い。表面はマグネタイトを主とする錆に覆われ,孔食が生じていた。1,500年間の腐食量は,最大孔食深さで2mmであった。
- (2)青森県の住居跡から出土した鉄器 3 点は酸化雰囲気に埋蔵されており,2 層皮膜に覆われていた。環境の腐食性は弱い。鍛鋼品 2 点にはマグネタイトとゲーサイト(一部,レピドクロサイトも検出)が,また,鋳鉄品 1 点にはこれらの他にアカガネアイトの存在も認めた。 $1,000 \sim 1,200$ 年間の腐食量は最大で 3 mmであった。
- (3) 西都原古墳群(宮崎県)から出土した鉄器 2 点は酸化雰囲気に曝されていたと考えられ,2 層皮膜が形成されていた。1,500 年間の腐食量は 2 mmであった。
- (4)古代の鍛鋼品は,現代の炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)と組織,組成で大きな差がない。野木遺跡で出土した鍛鋼品は,SVFC1と比べると耐孔食性にやや優れる。
- (5)土壌の腐食性イオン濃度が中程度(約200 mg/kg以下)であれば,弱酸化雰囲気における腐食は酸化雰囲気に比べて約1/3に抑制され,また,いずれの雰囲気でも腐食速度は時間の経過とともに減少する放物線則に従うと考えられ,1,000年間の腐食量が10 mmを超える例は認められなかった。

謝辞

本調査にあたり,試料の借用並びに現地における環境測定にご協力頂きました宮城県 教育委員会並びに青森県埋蔵文化財調査センターに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 炭山守男,他:"ベントナイト中の炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関するナチュラルアナログ研究",材料と環境 '99 講演集,p.224 (1999)
- 2) A.B.Johnson, Jr. and B.Francis: PNL-3198/JC-70, Battelle (1980)
- 3) 本田 卓,他:"土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査", JNC TJ8400 2000-007 (2000)
- 4) 本田 卓,他:"土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査()",JNC TJ8400 2001-045 (2002)
- 5) 本田 卓,他:"土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査()",JNC TJ8400 2003-012 (2002)
- 6) 西独ガス水道協会: DVGW GW9, DIN-50 929-Teil 3 (1985)
- 7) 宮崎県教育委員会:宮崎県文化財調査報告書,第34集(1991)
- 8) 宮崎県都城市教育委員会:都城市文化財調査報告書,第16集(1992)
- 9) 青森県教育委員会:青森県埋蔵文化財調査報告書,第287集(2000)
- 10) 青森県教育委員会:青森県埋蔵文化財調査報告書,第 280 集 (2000)
- 11) 青森県教育委員会:青森県埋蔵文化財調査報告書,第 281 集 (2000)
- 12) 三澤俊平: "鉄鋼腐食科学の温故知新", 材料と環境, Vol.50,p.538 (2001)
- 13) K.Araki, et al. : ASME'89, p.601 (1989)
- 14) NACE: Corrosion Data Survey (1974)
- 15) 山本一雄,他: "鋳鉄管の黒鉛化腐食と強度劣化の関係",防食技術, Vol.32,p.157 (1983)
- 16) 田中 裕:"土壌中の鋼管杭の長期腐食試験", 防錆管理, No.2,p.47 (1990)
- 17) 佐古光聡:日本瓦斯協会誌, Vol.33, p.73 (1986)
- 18) 笠原晃明, 他:"土壌埋設配管の腐食診断法", 防錆管理,No.9,p. 272 (1986)
- 19) 片野幸雄 ,他:"埋設管の腐食環境の解析と腐食予測",防食技術, Vol.37,p. 205 (1988)
- 20) 日本ガス協会:本支管維持管理ガイドライン(1984)
- 21) 日本簡易ガス協会: 簡易ガス導管管理技術調査報告書(1989)
- 22) T.Honda, et al.:13th APCCC, Paper#100(2003)

表2.1-1 調査鉄器の概要

No.	資料名	出土場所	埋蔵年代
1	鉄鏃	新田場地下式横穴墓(宮崎県小林市)	5 世紀
2	短甲片	六野原地下式横穴墓 (宮崎県国富町)	5 世紀
3	鉄鏃	築池地下式横穴墓(宮崎県都城市)	5 世紀
4	小札	西都原古墳群 (宮崎県西都市)	4 ~ 7 世紀
5	刀子	西都原古墳群(宮崎県西都市)	4~7世紀
6	塊状鉄器	岩ノ沢平遺跡(青森県八戸市)	9~10世紀
7	棒状鉄器	砂子遺跡(青森県三戸郡)	9~10世紀
8	塊状鉄器	野木遺跡(青森県青森市)	9~10世紀

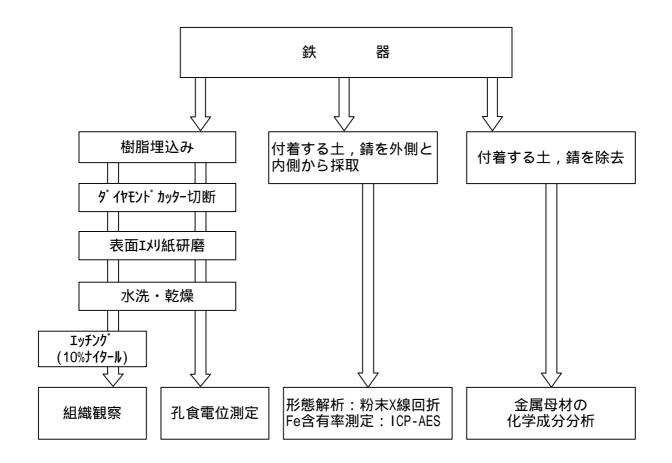


図2.3-1 鉄器の破壊評価方法

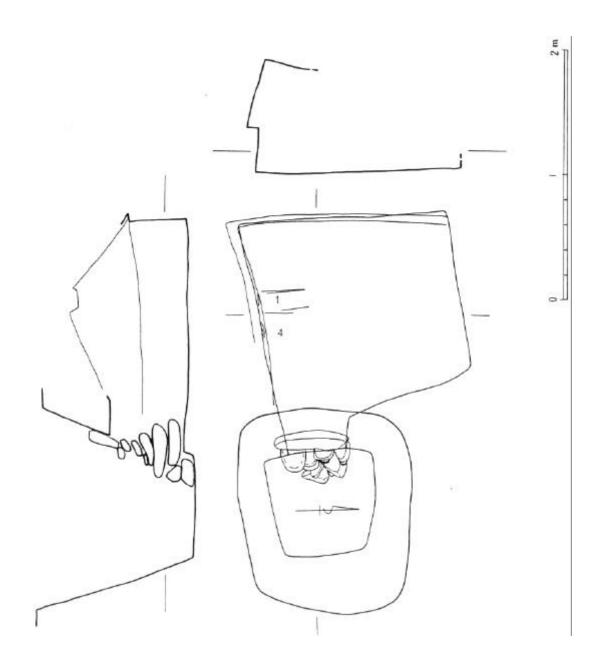


図3.1-1 地下式横穴墓の例⁷⁾

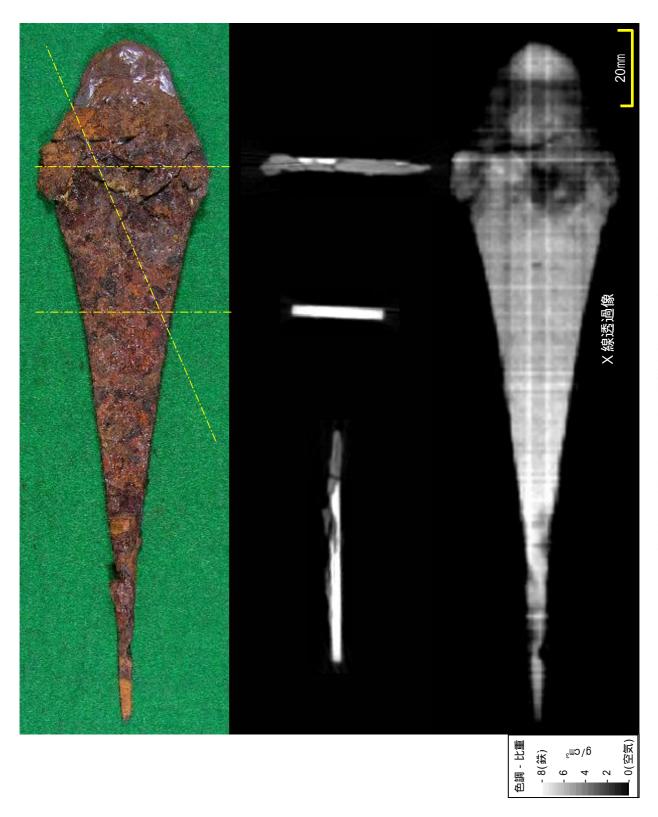
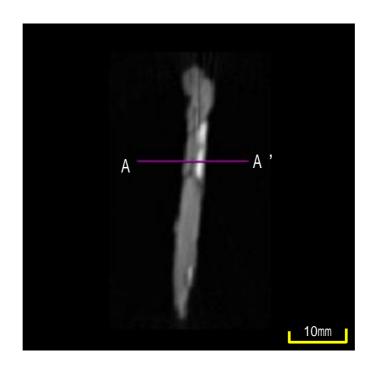


図3.1-2 資料[鉄鏃(新田場地下式横穴墓)]の外観とX線CT像



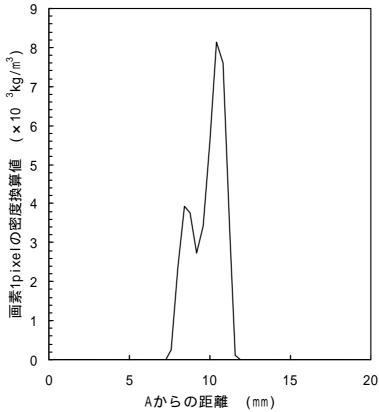


図3.1-3 資料1, A-A'断面(図3.1-2)の物質密度分布

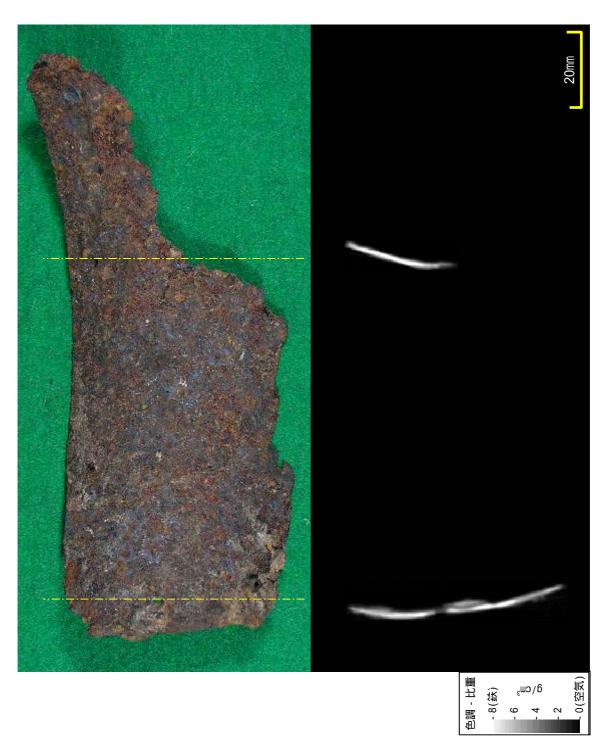
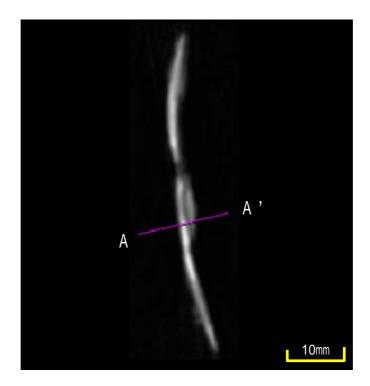


図3.2-1 資料2 [短甲片(六野原地下式横穴墓)]の外観とX線CT像



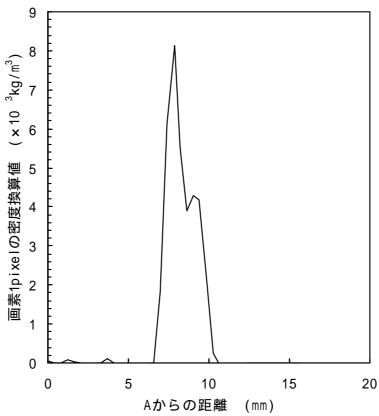


図3.2-2 資料2, A-A'断面(図3.2-1)の物質密度分布

表3.2-1 鉄器付着層の形態と化学組成

		2	
(%	Ţ	< 0.05	<0.01 0.22
	nე	< 0.05 0.02	<0.01
七学組成 (wt%)	٨	<0.05	0.01
化学	Ь	0.03	0.12
	Ьe	60.13	39.34
	-Fe00H -Fe00H SiO ₂ NaAI複合	ı	‡
(SiO_2	1	ı
態 (注	- Fe00H	Tr	+
出	- Fеоон	+	‡
	Fe ₃ 0 ₄	‡	+
出土場所		六野原地下式 横穴墓群	西都原古墳群
資料No.		2	4

(注) ++++:非常に多い,+++:多い,++:中程度,+:少量,Tr:痕跡程度,-:不検出

表3.3-1 築池地下式横穴墓土壌の成分

(mg/kg)

CI ⁻	SO ₄ ²⁻	S ²⁻	Ti	Fe
21	240	< 10	3000	14000

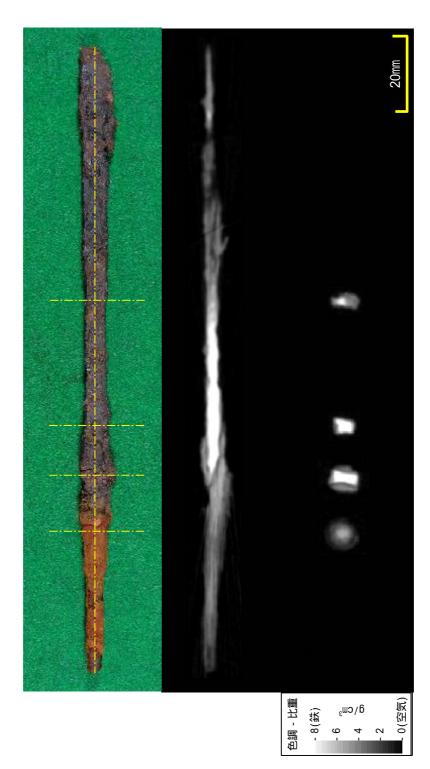


図3.3-1 資料3 (鉄鏃(築池地下式横穴墓)]の外観とX線CT像

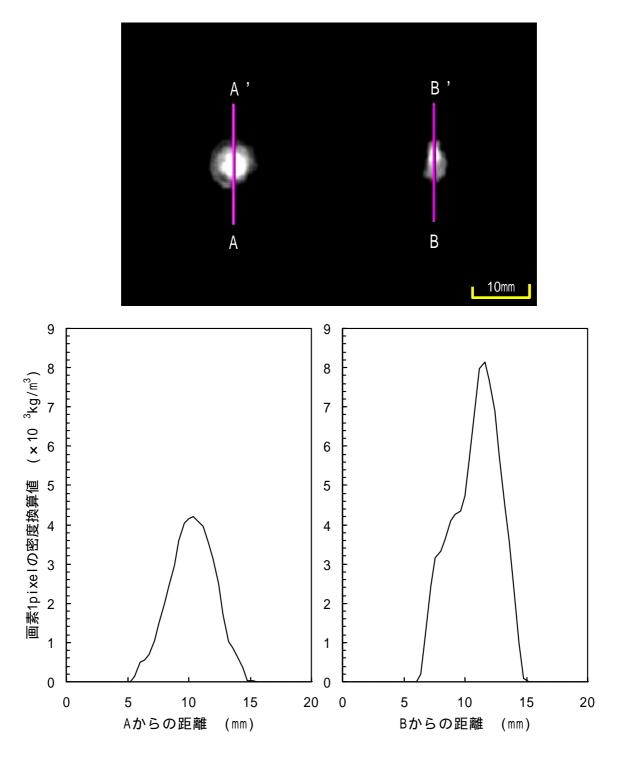


図3.3-2 資料3, A-A'(図3.3-1)及びB-B'断面(図3.3-1)の物質密度分布

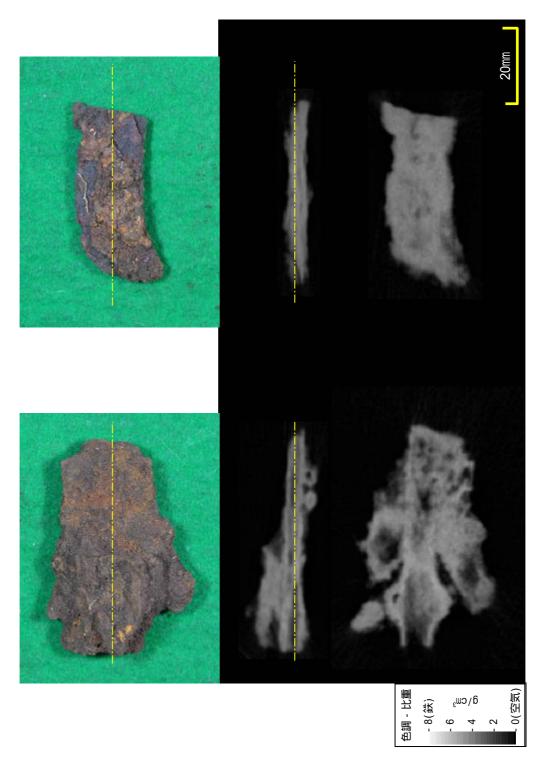


図3.4-1 資料4 [左:小札(西都原古墳)]と資料5 [右:刀子(同)]の外観とX線CT像

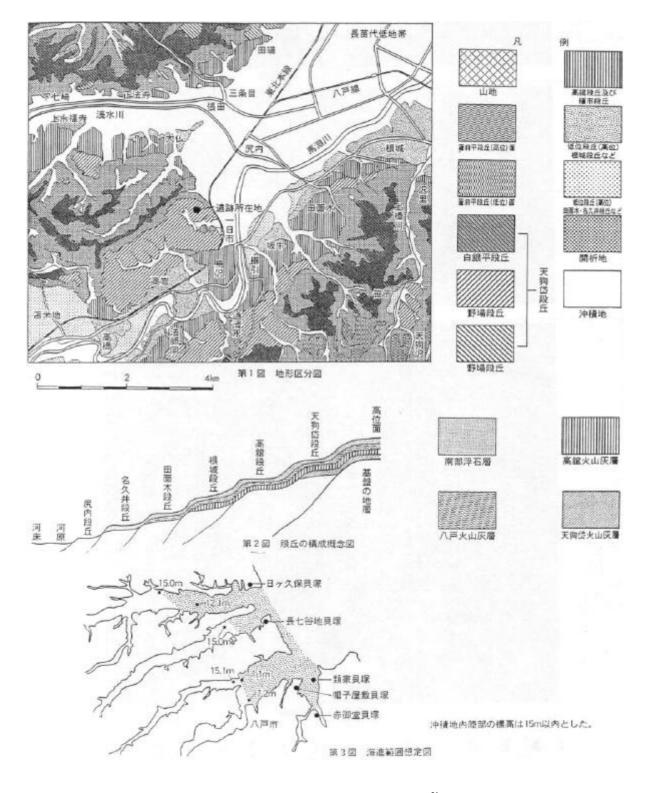


図3.5-1 岩ノ沢平遺跡の周辺地形9)

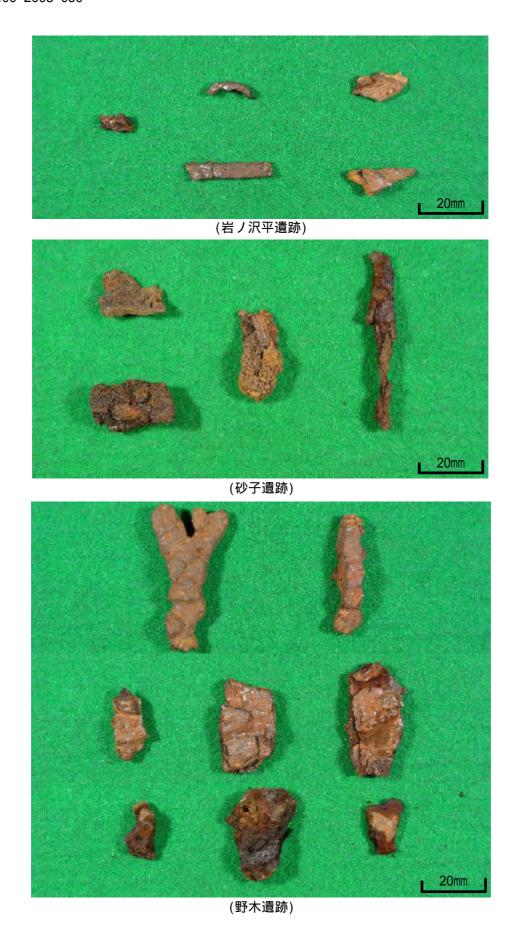


図3.5-2 青森県内遺跡の出土鉄器の外観



5mm

資料6(岩ノ沢平遺跡)



5mm

資料7(砂子遺跡)



5mm

資料8(野木遺跡)

図3.5-3 鉄器の断面マクロ観察結果

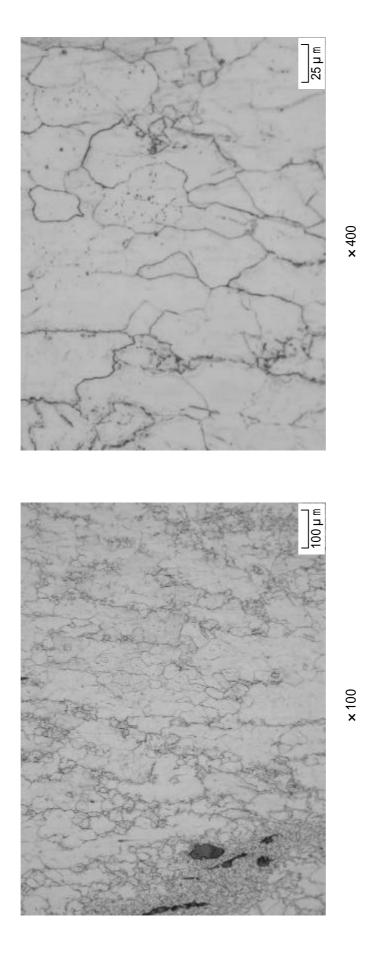


図3.5-4 資料6-メタル部分の三クロ組織

表3.5-1 鉄器付着層の形態とFe含有率

医蛇体 医蛇体			וגעע	וגעע	(注)			◇MINON	Fe含有率
出工場所	Fe ₃ 0 ₄ -Fe00H -Fe00H	- Fe00Н				-FeOOH SiO ₂	SiO_2	Nakl 複凹 酸化物	(%)
- + - 4 場影に見る	+	+	+	1		Ë		Ļ	44.08
- + + +	+ +	+		-		Tr	ı	-	57.63
- + - 4	+			-		ı	+ + +	++	26.49
7. 1 是啊	+ +++	+		-		ı	1	Tr	40.05
A Tr + ++ ++	Tr +	+	+	‡		-	1	Tr	47.42
++ ++ 中 中	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+		‡		ı	ı	ı	59.69

(注) ++++:非常に多い,+++:多い,++:中程度,+:少量,Tr:痕跡程度,-:不検出

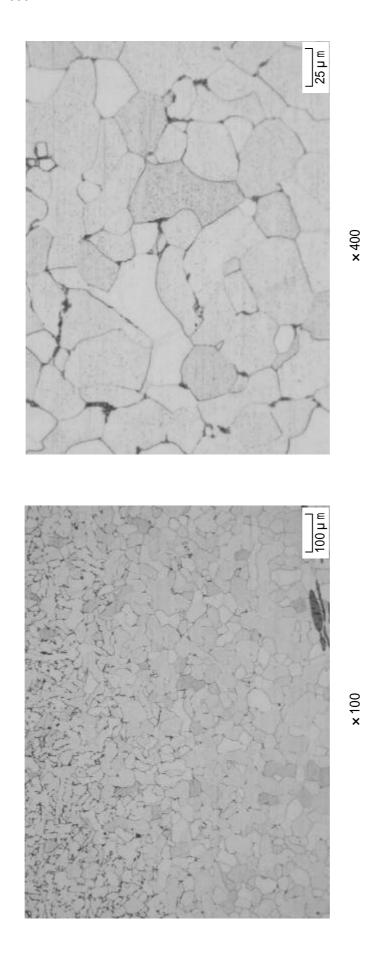


図3.6-1 資料7-メタル部分の三クロ組織

表3.7-1 野木遺跡内湧水の水質分析結果¹¹⁾

項目	測 定 値
рН	6.3
Cl (mg/kg)	22.8
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	0
HCO ₃ (mg/kg)	3.6
Ca ²⁺ (mg/kg)	2.9
Mg ²⁺ (mg/kg)	2.0
全硬度	23.9
電気伝導度 (µS/cm)	112.3

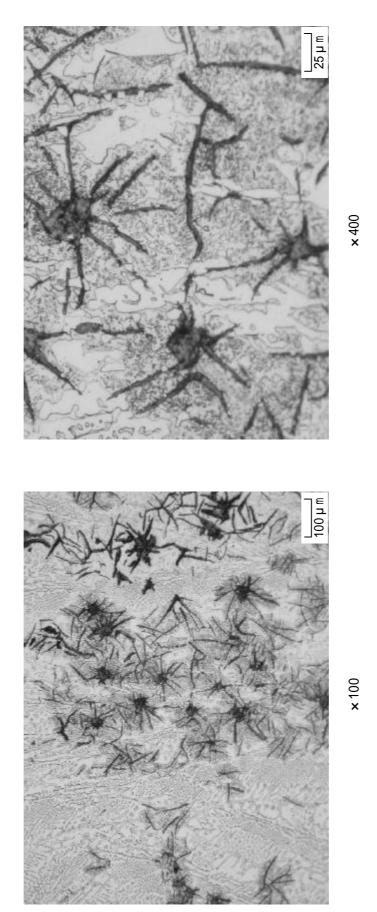


図3.7-1 資料8-メタル部分の三クロ組織

表3.7-2 資料8-メタル部分の化学組成

(%)

С	Si	Mn	Р	S	Cu	V	Ti
4.61	0.03	0.01	0.16	0.016	<0.01	0.01	<0.01

No.	資料名	出土場所	埋蔵環境	埋蔵期間 (年)	鋳鍛造	最大錆厚 さ	爾食量 (mm)	状態
_	鉄鏃	新田場地下式横穴墓	~	1500	ш	2	2(P)	M
2	短甲片	六野原地下式横穴墓	œ	1500	ட	0.5	2(P)	M
3	鉄鏃	築池地下式横穴墓	~	1500	ட	2	1(P)	M
4	小札	西都原古墳	0	1300 ~ 1700	ட	က	2(6)	O
5	刀子	西都原古墳	0	1300 ~ 1700	Ŧ	3	2(6)	C
9	塊状鉄器	岩ノ沢平遺跡	0	1000 ~ 1200	ш	3	2(6)	M
7	棒状鉄器	砂子遺跡	0	1000 ~ 1200	ш	5	3(6)	M
8	棒状鉄器	野木遺跡	0	1000 ~ 1200	C	3	2(6)	M

【埋蔵環境】| 【鋳鍛造】 | 【腐食量】 | 【状態】 |

R: 弱酸化雰囲気,0:酸化雰囲気 F: 鍛鋼品,C: 鋳鉄品 P: 孔食最大深さ,G:全面腐食量 M:メタル残存,C:完全錆化

表3.9-1 炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)の化学組成と熱処理条件

(%)

С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.19	0.18	0.91	0.024	0.007	0.08	0.03	0.11	0.02

〔熱処理条件〕900 ×2.5h,空冷

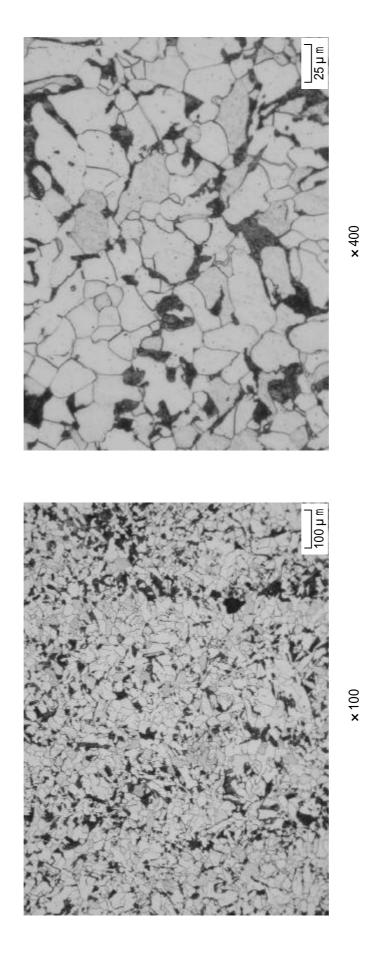


図3.9-1 炭素鋼鍛鋼品(SFVC1)の三クロ組織

表3.9-2 孔食電位 (Vc)

資料	Vc (V SHE)
SFVC1	+0.11
資料7(砂子遺跡)	+0.21
資料8(野木遺跡)	+0.04

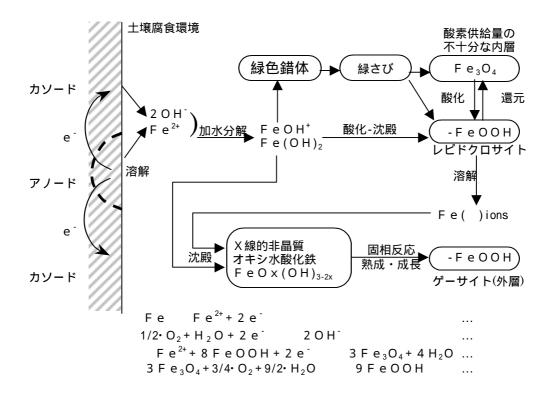


図4.1-1 酸化雰囲気における土壌腐食反応機構(三澤12)に基づく)

表4.1-1 酸化雰囲気における腐食量評価結果²²⁾

relics	sample	burial period	condition	rust thick	ness (mm)	corrosion amount
		(years)		inner	outer	(mm)
Kamishinpo	spear head	1100-1300	M	2	10	2
	spike	1100-1300	C	2	10	2
	fire metal	1100-1300	M	1	10	2
	pot	500-800	С	1	54	7
Iyomai-7	sword	400-500	M	7	22	6
	sword	400-500	M	6	13	5
Izumo-Oyashiro	band	~700	C	2	50	7
-Keidai	spike	~700	M	10	15	6
Takayashikidate	knife	900-1200	C	2	7	2
Hayashinomae	sickle	900-1200	M	2	12	3
Mukaida	knife	900-1200	M	4	5	3
Miyatadate	axe head	900-1200	M	9	17	6
	spindle wheel	900-1200	С	4	16	4

M: Metal remained, C: Completely corroded

表4.1-2 酸化雰囲気土壌の環境因子

項目	測定値
酸化還元電位 (mV SHE)	470 ~ 480
土壌抵抗率(k ·cm)	8.3~36
水分含有率(%)	29 ~ 53
рН	5.8~7.0
Cl (mg/kg)	4 ~ 230
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	<10 ~ 260
S ²⁻ (mg/kg)	<30

表4.1-3 弱酸化雰囲気土壌の環境因子

項目	出雲大社境内遺跡	横浜市
酸化還元電位 (mV SHE)	-	120
土壌抵抗率(k ・cm)	-	2.8
水分含有率(%)	25	41
рΗ	5.3	7.2
Cl (mg/kg)	130	5700
SO ₄ ² (mg/kg)	310	81
S ²⁻ (mg/kg)	< 30	< 45

表4.2-1 砂子遺跡出土鉄器の化学組成¹⁰⁾

(%)

С	Si	Mn	Р	S	Cu	V	Ti
0.11	<0.001	0.004	0.258	0.009	0.004	0.015	0.007

表4.3-1 土壌腐食モデル式の研究事例

報告者	文献	対象	埋設期間	評価結果
佐古	17	ガス配管 (11本)	25年	最大孔食深さは,環境因子,管対地電位,電流などの特定因子と相関性なし
笠原	18	ガス配管 (275本)	-	・ミクロセル腐食速度(d _m)
片野	19	水道管	-	Y ₀ = 0.4·Yc·t ^{0.4} ここに,Y ₀ :環境指数の予測値 Y _c :環境の腐食性評価値 [環境因子] ANSI,土壌抵抗率,H ₂ O ₂ -pH,含水率
日本ガス 協会	20	ガス配管 (18本)	16~38年	・平均腐食深さ(H _R) H _R = f (,P/S, t)
日本簡易 ガス協会	21	ガス配管 (171本)	-	・最大腐食深さ(HM) HM/ t = f (,P/S,Eh)

: 土壌抵抗率, Ecorr: 腐食電位, P/S: 管対地電位Eh: 酸化還元電位, t: 埋設期間(年)

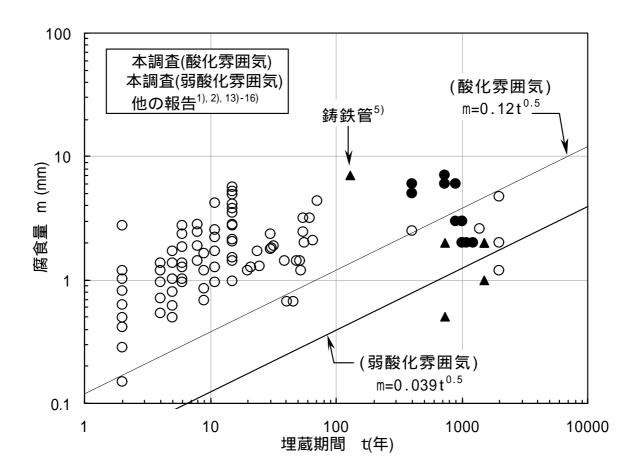
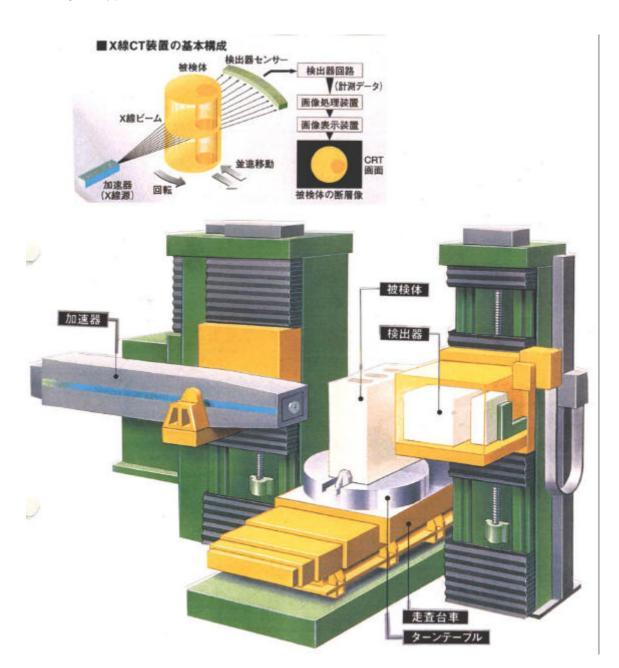


図4.3-1 腐食量と埋蔵期間との関係

付 録

(1) X 線 C T 装置



日立製X線CT装置

型式:HiXCT-1M X線エネルギー:1MeV

透過性能:100mm(鉄換算厚さ)

(2) X線CT撮像状況

