

鉄遺物のX線CT測定

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2005

鉄遺物のX線CT測定

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

本田 卓 , 郡司英一

要 旨

大和六号墳(奈良市)より出土した鉄鋌20枚(大形3枚,小形17枚)の腐食状況を調査した。X線CTによる内部構造解析,錆のX線回折及び化学組成分析などの結果から,大形鉄鋌と一部の小形鉄鋌は弱酸化性雰囲気にて約1,500年間埋蔵されていたと推定され,腐食深さは最大で1.6mmであった。一部の小形鉄鋌は酸化性雰囲気に曝されていたと推定され,地金が消失して空洞を伴った厚さ約1mmの錆層が形成されており,腐食量に換算すると約0.3mmであった。また,これらのデータから極値統計手法を用いてオーバーパックの最大腐食深さを推定したところ2.5~2.7mmであった。

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契約により実施した業務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

X-ray CT analysis on archaeological iron based artifacts

(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Takashi Honda , and Eiichi Gunji

Abstract

Corrosion analysis was carried out on twenty iron-plates, which had been dug out at the 6th Yamato ancient tomb (Nara-shi). It was evaluated through the inner-structural analysis by X-ray CT and the XRD and chemical analysis of the rusts that the most iron-plates had been buried in a slightly oxidizing environment and the maximum corrosion depth was 1.6 mm for about 1500 years. The analysis result of the extreme-value data indicates that the maximum depth of an overpack is estimated to be 2.5-2.7 mm. A part of small iron-plates were supposed to have been buried in an oxidizing environment, and about 1 mm-thick rust layers with cavities existed and the corrosion amount was figured out to be about 0.3 mm.

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	1
2. 調査方法	3
2.1 供試材	3
2.2 腐食評価方法	3
2.3 埋蔵環境	3
3. 調査結果	4
3.1 目視観察とX線CT	4
3.2 錆層の形態と化学組成	4
3.3 孔食深さ	5
4. 考察	6
5. 結言	8
6. 参考文献	9
付 録	
(1) X線CT装置	付(1)

目 次

図 3-1	大形鉄鋌 (No.001) の外観と X 線 C T 像	12
図 3-2	大形鉄鋌 (No.001) の断面物質密度分布	13
図 3-3	大形鉄鋌 (No.232) の外観と X 線 C T 像	14
図 3-4	小形鉄鋌 (No.250) の外観と X 線 C T 像	15
図 3-5	小形鉄鋌 (No.251) の外観と X 線 C T 像	15
図 3-6	小形鉄鋌 (No.253) の外観と X 線 C T 像	16
図 3-7	小形鉄鋌 (No.256) の外観と X 線 C T 像	16
図 3-8	小形鉄鋌 (No.257) の外観と X 線 C T 像	17
図 3-9	小形鉄鋌 (No.258) の外観と X 線 C T 像	17
図 3-10	小形鉄鋌 (No.267) の外観と X 線 C T 像	18
図 3-11	小形鉄鋌 (No.268) の外観と X 線 C T 像	18
図 3-12	小形鉄鋌 (No.271) の外観と X 線 C T 像	19
図 3-13	小形鉄鋌 (No.272) の外観と X 線 C T 像	19
図 3-14	小形鉄鋌 (No.273) の外観と X 線 C T 像	20
図 3-15	小形鉄鋌 (No.274) の外観と X 線 C T 像	20
図 3-16	小形鉄鋌 (No.275) の外観と X 線 C T 像	21
図 3-17	小形鉄鋌 (No.277) の外観と X 線 C T 像	21
図 3-18	小形鉄鋌 (No.278) の外観と X 線 C T 像	22
図 3-19	小形鉄鋌 (No.279) の外観と X 線 C T 像	22
図 3-20	小形鉄鋌 (No.280) の外観と X 線 C T 像	23
図 3-21	大形鉄鋌 (No.232) 表面錆層の外観	26
図 3-22	小形鉄鋌表面錆層の外観	26
図 3-23	大形鉄鋌に基づくオーバーパック最大孔食深さの極値統計解析	27
図 3-24	小形鉄鋌に基づくオーバーパック最大孔食深さの極値統計解析	28
図 4-1	鉄鋌の出土状況	29
図 4-2	腐食量と埋蔵期間との関係	29

表 目 次

表 2-1	鉄錠の大きさと重量	10
表 3-1	鉄錠の目視観察結果	11
表 3-2	小形鉄錠の X 線 C T による内部構造解析結果	24
表 3-3	鉄錠表面錆層の分析結果	25
表 4-1	地金の化学組成	30

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間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/縦置きの場合）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。炭山ら¹⁾は圧縮ベントナイトに類似した土壤に長期に埋設されていた鑄鉄製水道管の腐食調査を行ない、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た。また、調査データを基に極値統計解析を行ない、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ら²⁾は種々の環境に置かれていた考古遺物を調査し、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、健全性を保証するには、より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「土壤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地金、生成した錆及び表面に付着した土層など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）で出土した鉄器を評価し、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、埋蔵期間及び材質などの影響を受けるため、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「土壤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）で出土した鉄器を評価した。その結果、酸化性雰囲気における腐食量は 400～500 年間で 2～5 mm、約 700 年間で 3～5 mmであると推定された。

2002 年度には「土壤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 6ヶ所の遺跡（9～16 世紀）と出雲大社境内遺跡から出土した鉄器、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、酸化性雰囲気での腐食状況はこれまでの調査結果と変わらなかったが、弱酸化性雰囲気では錆構造が異なり腐食量が著しく少ない例

を認めた。しかし、腐食量は土壌環境に大きく依存することも明らかになり、環境影響についてさらに検討する必要があると判断された。

2003 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（ ）」⁶⁾を実施し、宮崎県内 4 ヶ所の遺跡（4～7 世紀）と青森県内 3 ヶ所の遺跡（9～10 世紀）から出土した鉄器を調査した。その結果、土壌中の腐食性イオン濃度が中程度以下の弱酸化性雰囲気では、腐食量は酸化性雰囲気の場合に比べて約 1/3 に抑制されると評価された。また、地金の金属学的分析を行ない、組織、組成、腐食性等の観点を現代鋼と比較した。

以上に述べたように、これまでに国内 17 遺跡から出土した約 50 点の鉄製品の腐食状況を調査し、腐食量は 1,000 年間で 10 mm を超えないことを明らかにした。しかし、埋蔵環境は大半が酸化性雰囲気、地層処分で想定される弱酸化性ないしは還元性雰囲気に埋蔵されていたと推定されたものは数点にすぎず、この雰囲気におけるデータの蓄積が必要と考えられた。そこで、本年度は宮内庁書陵部が所蔵する鉄鋌を調査した。この鉄鋌は 1945 年に宇和奈辺古墳群（奈良市）の一つである大和六号墳（5 世紀中葉）から出土したものの一部で、地金の残存状態が良く弱酸化性雰囲気に埋蔵されていたと推定されたことから調査を実施した。

2. 調査方法

2.1 供試材

調査に供したのは鉄錠 20 枚（大形 3 枚，小形 17 枚）である。大形鉄錠 1 枚のみは出土時に近い状態で保存されていたが，他は浮き錆が除去され保存処理（脱塩，樹脂含浸）が施されていた。なお，埋蔵期間は 1,500～1,600 年間と推定される。

2.2 腐食評価方法

鉄錠は写真撮影，目視観察，秤量，寸法計測を行なったのち，孔食深さ測定及び X 線 CT による内部構造解析に供した。表 2-1 に各鉄錠の大きさと重量をまとめた。大形鉄錠 1 枚（No.231）は長さ 375 mm，中央幅 78 mm，端部幅 130 mm，厚さ 2.3～3.3 mm，重量 310 g で，もう 1 枚（No.232）は長さ 417 mm，中央幅 56 mm，端部幅 105 mm，厚さ 2.3～3.3 mm，重量 381 g である。小形鉄錠は長さ 120～152 mm，中央幅 9～21 mm，端部幅 19～38 mm，厚さ 1～3 mm で，重量は 14～28 g である。孔食深さは次の手順で測定・評価した。大形鉄錠は No.231 と No.232 を対象として 60 mm × 100 mm の区画を任意に 12 ヶ所選び，また小形鉄錠は試料それぞれについて最大深さを求めた。なお，小形鉄錠の表面積は 40～70 cm² と幅があるが 1 枚ごとに値を記録した。次いで，求めた値を元に極値統計手法によりオーバーパックの最大孔食深さ推定を試みた。X 線 CT には日立製 HiXCT-6M（付-1）を用いた。X 線エネルギーの最大値は 6MeV，スライス厚さは 0.4 mm，画素サイズは 0.2 mm である。

また，大形鉄錠（No.232）及び小形鉄錠（No.250～258）の表面から剥離した錆層の形態を粉末 X 線回折により調べた。なお，保存されていた小形鉄錠の錆量が個々には少なかったため混合して測定に供した。また，大形鉄錠の錆層については化学組成も調べた。Fe，Cu，Ti については 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 埋蔵環境

鉄錠が出土した場所はすでに整地されて原形を留めていないため，埋蔵環境は調査記録⁷⁾に基づいて推定した。

3. 調査結果

3.1 目視観察とX線CT

表 3-1 に目視観察結果をまとめた。出土時に近い状態で保存されていた大形鉄錠 (No.001) は中央部で切断されており、黄褐色の層に覆われている。他の大形鉄錠は保存処理が施されており、部分的に赤褐色の錆が残っているものの全体に黒色を帯びている。また、食孔が多数認められ貫通孔も観察される。一方、全数が保存処理されている小形鉄錠は光沢を帯びた灰黒色を呈しており、割れや剥離が見られる。

次に、X線CTによる内部構造解析の結果について述べる。図 3-1 は試料No.001の外観写真とX線CT像である。短辺方向 2 位置における断層像を見ると、厚さ 2~4 mmの地金の廻りを厚さ 0.5 mm程度の錆層(土が混ざっていると思われる)が覆っている。また、深さ 1 mm程度の食孔が存在し、その部分では錆が孔を埋めやや厚く成長している。食孔は水平断層像にも多数観察される。図 3-2 は厚み方向の物質密度分布である。A-A'断面から、孔食部では最大密度が約 $3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の錆が厚さ約 1.5 mm成長していることがわかる。また、A-A'断面、B-B'断面のいずれにも地金の中心付近で密度低下がみられる。この状況は図 3-1 の短辺方向の断層像でも確認される。よく観察すると、中心部分に低密度域(灰色部分)が線状に存在することがわかる。

図 3-3 は試料 No.232 の結果である。保存処理が施されているため、試料 No.001 に比べると錆層の厚さは薄い。食孔の深さは 1 mm程度である。また、端部(約 4 mm幅)は完全に錆化しており地金は残っていない。なお、試料 No.001 に存在した地金の低密度部分が一部の断層像で観察される。

図 3-4 ~ 3-20 は小形鉄錠(No.250 ~ 280)の外観写真と長辺方向の断層像である。表 3-2 に内部の腐食状況をまとめた。地金は概ねよく残っている。食孔が観察され、一部には貫通孔もある。この状況は大形鉄錠と似ているが、一部の試料では空洞を伴った錆層が生成しているものがある。このような試料の錆層厚さは約 1 mmで、その部分では地金は残っていない。なお、目視観察で割れや剥離が見られたのはこのような部分である。

3.2 錆層の形態と化学組成

大形鉄錠 (No.232) と小形鉄錠 (No.250 ~ 258) の表面から採取した錆層の形態と化学組成を調べた。結果を表 3-3 に示した。錆層は図 3-21 及び図 3-22 に示すように共に黒味を帯びた褐色を呈している。いずれの試料もX線回折強度は弱く、非晶質成分を多く含んでいる。結晶相としてはゲーサイト ($\gamma\text{-FeOOH}$) とマグネタイト (Fe_3O_4) が多く、レピドクロサイト ($\beta\text{-FeOOH}$) とアカガネアイト ($\alpha\text{-FeOOH}$) が少量存在する。また、小形鉄錠試料には土壌成分であるNa/Ca/Al/Siの複合酸化物

が極少量検出された。大形鉄錠試料の化学組成を見ると、Fe濃度は60%とFeOOHのFe含有率(63%)とほぼ同じで、本試料が鉄錆単体から構成されていることを示している。また、Cuが0.9%(Cu/Fe比:0.15%)とやや高く、PとTiは検出限界以下であった。

3.3 孔食深さ

大形鉄錠の測定区画(60 mm×100 mm)12ヶ所の最大深さは0.7~1.5 mm、小形鉄錠11枚(面積:40~70 cm²)の最大深さは0.1~1.6 mmであった。なお、大形鉄錠2枚で計6個、小形鉄錠では試料No.275のみに1個の貫通孔が観察されたが、場所が厚さ1 mm以下の端部であり、両面からの食孔が繋がったものと考えられることから最大深さの値としては採用しなかった。次に、測定結果を元に極値統計手法によりオーバーパックの最大腐食深さ推定を試みた。なお、オーバーパックの全表面積は8.07 m²とした。大形鉄錠の結果を用いた場合(図3-23)、オーバーパックの最大深さは2.5 mm(標準偏差:0.4 mm)である。また、小形鉄錠の結果を用いた場合(図3-24)は2.7 mm(標準偏差:0.6 mm)である。なお、小形鉄錠の測定面積は一定ではないが、推定計算には平均値(56 cm²)を用いた。

4. 考察

鉄鋌が出土した場所は、円墳のほぼ中央で表土下約 0.5m の位置である。図 4-1⁸⁾ は遺物の出土状態である。約 1m × 3m のエリアに鉄鋌 872 枚の他、鉄斧などの鉄遺物 708 点が土に直に接する形で置かれていた。初めから土中に直接埋蔵されたものか、あるいは木箱などに収納されていたかについては不明とされている⁸⁾。このように多数の鉄遺物が 1ヶ所に集まった状態で埋蔵されている場合は、置かれた位置によって雰囲気酸素分圧が相当異なる。例えば、大形鉄鋌は 20～30 枚単位で束状に積み重なっていたが、酸素分圧は表土に近い位置では比較的高く、束の中央付近では低くなっていたと考えられる。したがって、位置によって腐食状況に違いが出てもおかしくない。大形鉄鋌 3 枚の腐食状況を比較すると、いずれも孔食主体の腐食で大きな違いはない。しかし、小形鉄鋌には腐食状況に違いが見られ、地金の残りがよく孔食を生じているものがある一方、錆化が顕著で空洞を伴った層状の錆が生じているものがある。これまでの調査結果^{3)～6)} から、前者の形態は弱酸化性雰囲気が多く現れ、また後者は酸化性雰囲気で見られる腐食現象である。本調査では各試料が置かれていた位置関係が明確ではないことから、埋蔵雰囲気を事前に特定することは難しい状況であった。したがって、各試料の埋蔵雰囲気は X 線 CT による腐食解析の結果を基に推定した。

大形鉄鋌と一部の小形鉄鋌に観察された地金の残りがよく孔食を生じた状態は、弱酸化性雰囲気によく埋蔵されていたと推定される宮崎県の地下式横穴墓で出土した鉄遺物⁶⁾ と似ている。また、約 1,500 年間の埋蔵期間中に生じた孔食深さも最大で約 2mm とほぼ同じである。ところで、弱酸化性雰囲気形成される錆はマグネタイト単層と考えられるが、大形鉄鋌の錆にはマグネタイトとともにゲーサイト等の高次酸化物が検出された。これはこの試料が酸化性雰囲気に曝されたことを意味する。しかし、酸化性雰囲気の時期は古墳が破壊されて遺物が大気に曝された 1945 年 12 月以降の僅かな期間とも考えられ、主な埋蔵環境が弱酸化性雰囲気であることを否定するものではない。なお、錆の厚さが薄いことが酸化性雰囲気に置かれていた期間が短いことを示唆している。たとえば、錆が除去されていない試料 No.001 の孔食部以外の錆厚さは 0.5 mm 程度であり、腐食量に換算すると約 0.1 mm である。この値は酸化性雰囲気数 100 年間以上埋蔵されていた試料の腐食量 (2～7 mm)⁶⁾ に比べると一桁以上小さい。一方、一部の小形鉄鋌には空洞を伴った層状の錆が生じていたが、これは青森県の竪穴住居跡などで出土した鉄器⁵⁾ と同様に酸化性雰囲気腐食した結果であろうと推定される。

腐食量と埋蔵期間との関係について、これまでの調査結果をまとめて図 4-2 に示した。今回調査した試料のうち弱酸化性雰囲気に埋蔵されていたと見なされる試料 (No.231, 232, 250, 251, 256, 258, 267, 271, 272, 273, 275, 277, 278)

の最大腐食深さを全てプロットした。また、一部の試料(No.253 , 257 , 268 , 274 , 279 , 280) は酸化性雰囲気下での腐食形態を示したが、錆厚さから推定される腐食量が 0.3 mm を超えておらず、また地金が消失していることから本図には載せなかった。これまでの調査結果を含めて評価すると、弱酸化性雰囲気における腐食量は酸化性雰囲気に比べて約 1/4 に抑えられると考えられる。

最後に地金について考察する。表 4-1 はこれまでに大和六号墳出土鉄鋌の化学組成について分析された結果をまとめたものである。参考として本調査結果である錆の化学組成 (Fe比) を載せた。C は 0.054 ~ 0.71 % と幅があるが、いずれも初晶フェライトとパーライトからなる亜共析鋼である。Cu が高く Ti が低いことは原料が砂鉄ではなく鉄鉱石であることを示唆している。また、顕微鏡観察により本試料が低温還元によって生産された鉄を鍛造して板状に成形したものであると推定されている⁸⁾。なお、組成に関してはオーバーパック候補材である炭素鋼鍛造品 (SFVC1)⁶⁾ と有意な差はない。ところで、X線CTによる断面密度分布解析等の結果、大形鉄鋌の地金には中心部分に低密度領域が存在することが分かった。複数の断層像に観察されることから、この領域は面状に広がっていると推定される。これは2枚の薄板を鍛接した面とも考えられるが、詳細な解析は破壊検査によるしかないと思われる。

5. 結言

大和六号墳から出土した鉄鋌 20 枚（大形 3 枚，小形 17 枚）の腐食状況を調査した結果，以下のことが明らかになった。

- （ 1 ） 大形鉄鋌と一部の小形鉄鋌は弱酸化性雰囲気にて約 1500 年間埋蔵されていたと推定され，腐食形態は孔食主体で最大腐食深さは 1.6 mm であった。また，出土時に近い状態の試料から推定すると，孔食部以外の錆厚さは約 0.5 mm で，腐食量に換算すると約 0.2 mm であった。
- （ 2 ） 小形鉄鋌の一部は酸化性雰囲気に埋蔵されていたと推定され，地金が消失して空洞を伴った厚さ約 1 mm の錆層が形成されており，腐食量に換算すると約 0.3 mm であった。
- （ 3 ） 錆の外層は非晶質成分を多く含んでおり，結晶成分としてはゲーサイト（ γ -FeOOH）とマグネタイト（ Fe_3O_4 ）が多く，レピドクロサイト（ α -FeOOH）とアカガネアイト（ β -FeOOH）が少量存在した。また，Fe 濃度が 60% で，微量成分としては Cu が 0.9% と高く，P と Ti は検出限界以下であった。このことは鉄鋌の原料が鉄鉱石であろうことを示している。
- （ 4 ） 極値統計手法を用いてオーバーパックの最大腐食深さを解析したところ，鉄鋌と同じ弱酸化性雰囲気にて 1500 年間埋蔵された場合は 2.5 ~ 2.7 mm と推定される。
- （ 5 ） 弱酸化性雰囲気における腐食量は酸化性雰囲気に比べて約 1/4 に抑えられる。
- （ 6 ） 大形鉄鋌の地金には中心部分に面状に広がった低密度領域が存在する。これは 2 枚の薄板の鍛接面とも考えられるが詳細は不明である。

本調査にあたり，鉄鋌並びに関連情報のご提供にご協力頂きました宮内庁書陵部の方々に深謝申し上げます。

6. 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ス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 : “ Durability of metals from archaeological objects, metal meteorites, and native metals ”, PNL-3198/JC-70, Battelle (1980)
- 3) 本田 卓, 他 : JNC TJ8400 2000-007, “ 土壤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(2000)
- 4) 本田 卓, 他 : JNC TJ8400 2001-045, “ 土壤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(2002)
- 5) 本田 卓, 他 : JNC TJ8400 2003-012, “ 土壤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(2003)
- 6) 本田 卓, 他 : JNC TJ8400 2003-059, “ 土壤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(2004)
- 7) 奈良県 : “ 宇和奈辺陵墓参考地陪塚高塚 大和六号墳 ”, 奈良県史跡名勝天然記念物調査抄報第四輯 1949)
- 8) 窪田蔵郎 : “ 宇和奈辺陵墓参考地陪塚高塚 (大和六号墳) 出土鉄鋌の金属学的調査 ”, p.175 (1974)
- 9) K.Araki, et al. : “ Natural analogue study on engineered barriers for underground disposal of radioactive wastes ”, ASME'89, p.601 (1989)
- 10) NACE : Corrosion Data Survey (1974)
- 11) 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)
- 12) 田中 裕 : “ 土壤中の鋼管杭の長期腐食試験 ”, 防錆管理, No.2,p.47 (1990)
- 13) 佐々木稔, 他 : “ 古墳出土鉄器の材質と地金の製法 ”, 季刊考古学, No.8,p.27 (1984)

表 2-1 鉄錠の大きさと重量

No.	種類	長さ(mm)	中央幅(mm)	端部幅(mm)	厚さ(mm)	重量(g)
001	大形鉄錠	中央部で切断された残材のため測定せず				
231	同上	375	78	130	2.3~3.3	310
232	同上	417	56	105	2.3~3.3	381
250	小形鉄錠	121	17	23	1.5~1.6	18
251	同上	131	21	32	1.5~1.7	23
253	同上	122	14	26	1.8~2.5	23
256	同上	120	18	31	1.3~1.9	20
257	同上	120	19	29	1.5~2.0	20
258	同上	128	12	20	1.6~1.8	16
267	同上	152	11	29	1.5~2.0	23
268	同上	132	14	29	1.7~2.0	24
271	同上	135	13	33	1.6~2.5	20
272	同上	134	15	24	1.4~1.8	19
273	同上	142	10	29	1.7~2.0	22
274	同上	152	14	29	1.3~3.3	28
275	同上	140	9	33	1.4~1.5	16
277	同上	130	14	28	1.0~1.1	15
278	同上	134	15	19	1.0~1.1	14
279	同上	149	15	38	1.3~2.0	28
280	同上	132	10	22	1.3~1.6	15

表 3-1 鉄錠の目視観察結果

No.	種類	表面状態
001	大形鉄錠	保存処理は施されておらず全体に黄褐色を帯びている。中央で切断されており端部に金属面が露出している。表面の錆はもろく剥離し易い。
231	同上	浮き錆は除去され保存処理されている。全体に黒色を帯びているがまだらに赤褐色の錆が見られ、径5mm程度の食孔が多数(6×10^4 個/m ²)ある。また、端部に貫通孔が1個認められる。
232	同上	浮き錆は除去され保存処理されている。全体に黒色を帯びているがまだらに赤褐色の錆が見られ、径5mm程度の食孔が多数(6×10^4 個/m ²)ある。また、端部に貫通孔が5個認められる。
250	小形鉄錠	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れが認められる。
251	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れがあり、食孔が多数認められる。
253	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部は薄板2枚に剥離しているように見られる。食孔が全面に多数認められる。
256	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れがあり、また一部は薄板2枚に剥離しているように見られる。
257	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。全体が薄板2枚に剥離しているように見られる。
258	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。割れや剥離は見られない。
267	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れがあり、また一部は薄板2枚に剥離しているように見られる。
268	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れがあり、また一部は薄板2枚に剥離しているように見られる。
271	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に薄板の剥離が見られ、錆こぶも付着している。
272	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に薄板の剥離が見られ、錆こぶも付着している。
273	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に薄板の剥離が見られる。
274	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に割れがあり、中央部は薄板2枚に剥離しているように見られる。
275	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に薄板の剥離が見られ、貫通孔と錆こぶもある。
277	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。割れや剥離は見られない。
278	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。割れや剥離は見られない。
279	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。中央に長片方向の割れがあり、また一部は薄板2枚に剥離しているように見られる。
280	同上	保存処理されている。全体に光沢を帯びた黒色である。一部に薄板の剥離が見られる。

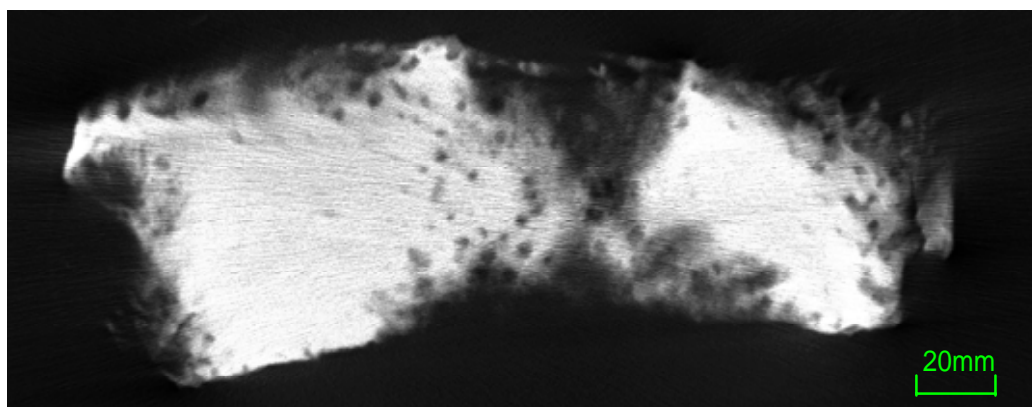
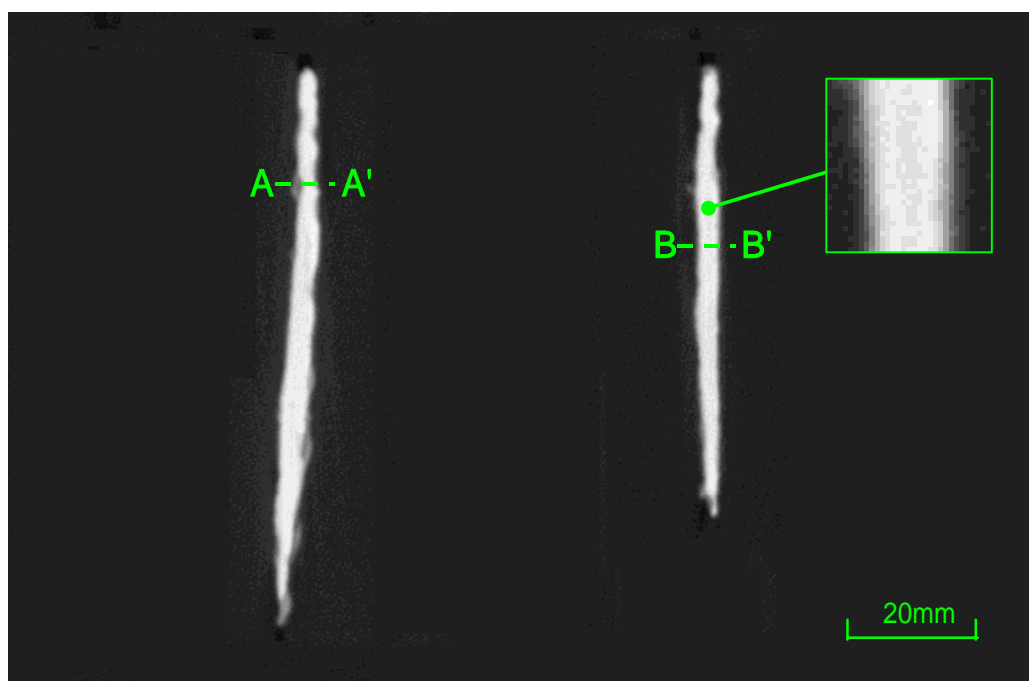


図 3-1 大形鉄鋌 (No.001) の外観と X 線 C T 像

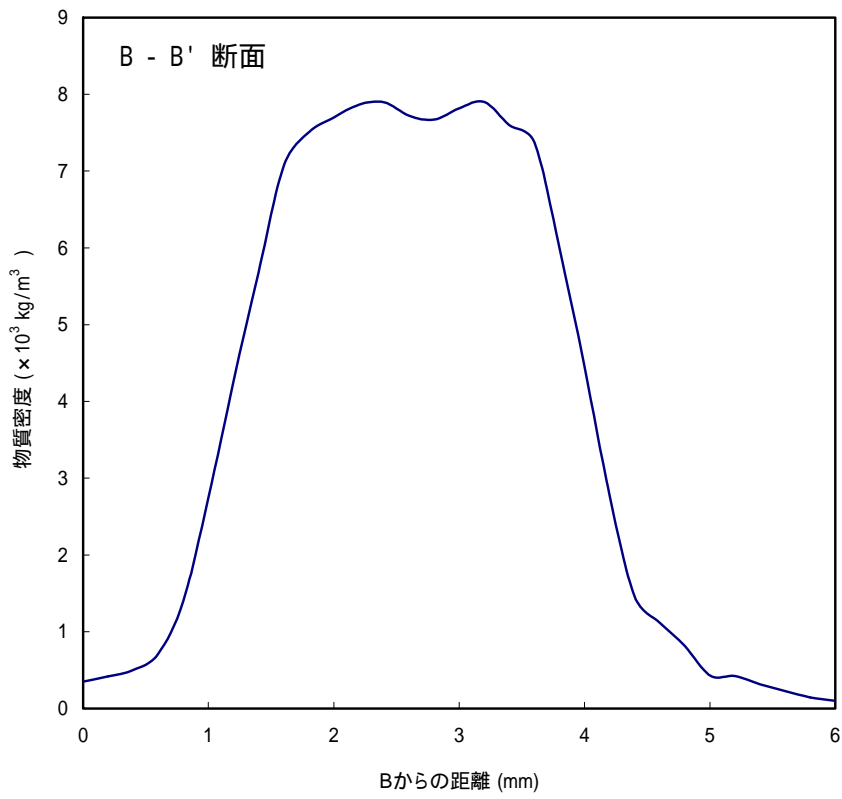
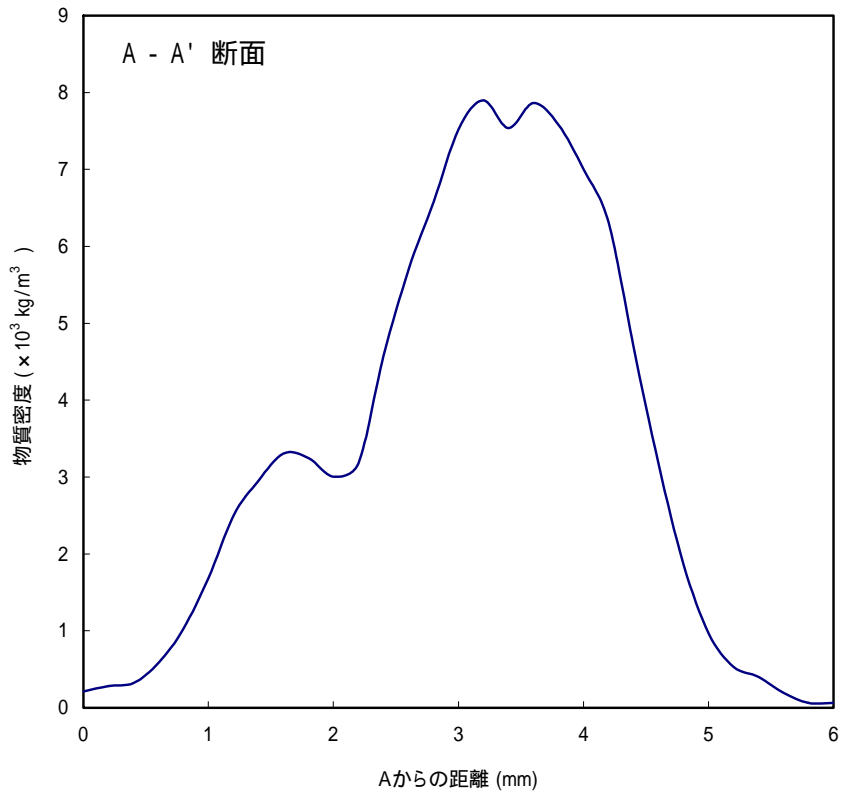


図 3-2 大形鉄錠 (No.001) の断面物質密度分布

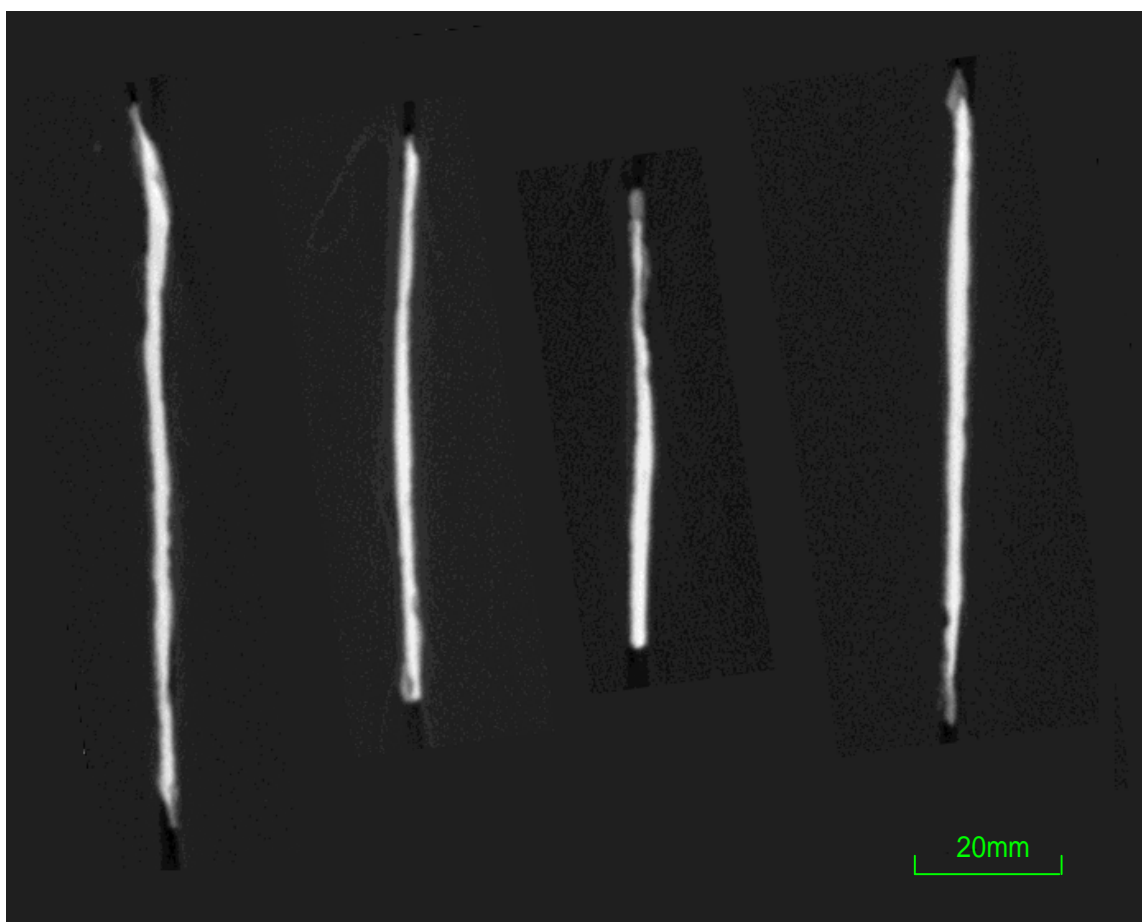
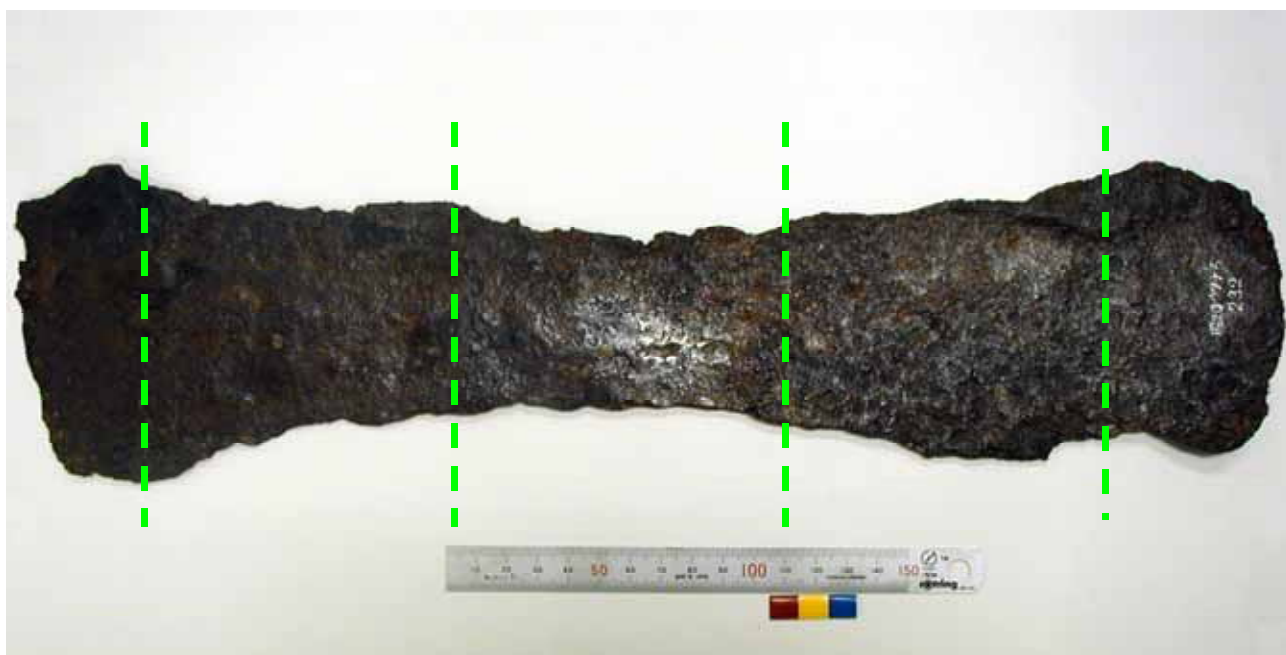


図 3-3 大形鉄鋌 (No.232) の外観とX線CT像



図 3-5 小形鉄鋌 (No.251) の外観とX線CT像



図 3-4 小形鉄鋌 (No.250) の外観とX線CT像



図 3-7 小形鉄錠 (No.256) の外観とX線CT像



図 3-6 小形鉄錠 (No.253) の外観とX線CT像



図 3-9 小形鉄錠 (No.258) の外観とX線CT像



図 3-8 小形鉄錠 (No.257) の外観とX線CT像



図 3-11 小形鉄鋌 (No.268) の外観とX線CT像



図 3-10 小形鉄鋌 (No.267) の外観とX線CT像



図 3-13 小形鉄鋌 (No.272) の外観とX線CT像

図 3-12 小形鉄鋌 (No.271) の外観とX線CT像



図 3-15 小形鉄鋌 (No.274) の外観とX線CT像

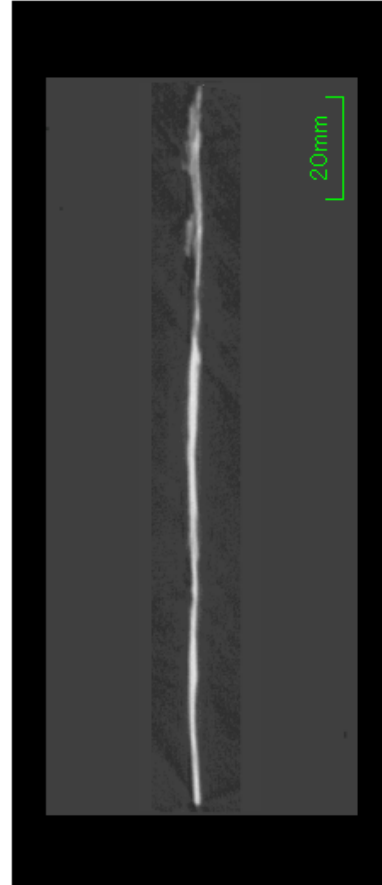


図 3-14 小形鉄鋌 (No.273) の外観とX線CT像

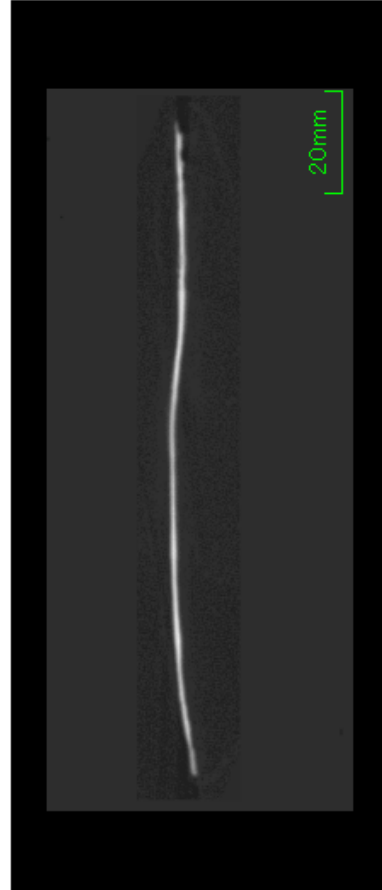


図 3-17 小形鉄鋌 (No.277) の外観とX線CT像



図 3-16 小形鉄鋌 (No.275) の外観とX線CT像



図 3-19 小形鉄鋌 (No.279) の外観とX線CT像

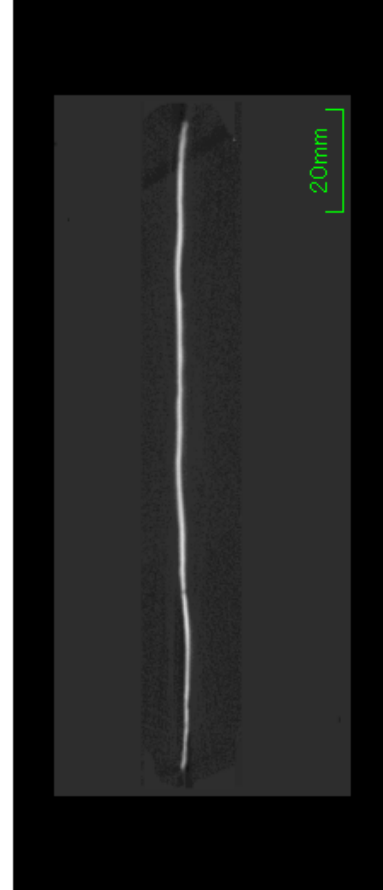


図 3-18 小形鉄鋌 (No.278) の外観とX線CT像



図 3-20 小形鉄鋳 (No.280) の外観とX線CT像

表 3-2 小形鉄錠のX線CTによる内部構造解析結果

No.	内部状況
250	全体に約2mm厚の地金が残っているが、端部は錆化している。また、食孔が散見される。
251	全体に約2mm厚の地金が残っているが、端部は錆化している。また、深さ約1mmの食孔が多数見られる。
253	最大厚さ約3mmの地金が部分的に残っている。端部には膨れた錆層が見られる。
256	1～2mm厚の地金が部分的に残っているが、中央部はほとんど錆化している。
257	全体に錆化している。錆層は空洞を挟んで2層に分かれている。
258	1～2mm厚の地金が残っており、食孔が観察される。端部は錆化している。
267	約2mm厚の地金が全体に残っているが、端部は錆化しており、空洞を伴った錆層が形成している。
268	ごく一部に約2mm厚の地金が残っているが、錆化が進んでおり一部は層状になっている。
271	1～2mm厚の地金が残っており、食孔が多数観察される。
272	約1mm厚の地金が半分程度残り、食孔も観察される。他の半分は錆化している。
273	全体に約2mm厚の地金が残っているが、端部は錆化している。
274	地金の残存はごく一部であり、空洞をともなった層状の錆が形成されている。
275	ごく一部に地金が残っている。孔食によると思われる貫通孔がある。
277	全体に約1mm厚の地金が残っている。
278	全体に約1mm厚の地金が残っているが、貫通孔も存在する。
279	約2mm厚の地金が残っているが、中央部に貫通孔があり、端部には空洞を挟んで2層の錆が見られる。
280	地金の残存は一部のみであり、他は錆化している。

表 3-3 鉄銹表面錆層の分析結果

No.	種類	形態(注)						化学組成(wt%)			
		Fe ₃ O ₄	α-FeOOH	γ-FeOOH	β-FeOOH	NaCaAlSi 複合酸化物	Fe	P	Cu	Π	
232	大形鉄銹	++	++	+	+	-	60.1	<0.01	0.09	<0.01	
250~258	小形鉄銹	++	++	+	+	Tr	-	-	-	-	

(注) ++: 中程度, +: 少量, Tr: 痕跡程度, -: 不検出



図 3-21 大形鉄釘（No.232）表面錆層の外観



図 3-22 小形鉄釘表面錆層の外観

測定箇所 i	試料No.	累積確率 F(i)	孔食最大深さ x(mm)	標準化 変数y	係数 Ai(N,n)	係数 Bi(N,n)	係数 Ci(N,n)
1	231	0.923077	1.5	2.525195	0.023894	0.062906	2.493753
2	232	0.846154	1.4	1.789438	0.032984	0.067671	2.034495
3	232	0.769231	1.2	1.338021	0.041628	0.068357	1.115979
4	232	0.692308	1.2	1.000421	0.050303	0.066122	1.115979
5	231	0.615385	1.1	0.72256	0.059266	0.061113	0.656721
6	231	0.538462	1.1	0.479587	0.068747	0.053053	0.656721
7	232	0.461538	1.1	0.257231	0.079018	0.041278	0.656721
8	231	0.384615	1	0.045509	0.090455	0.024548	0.197463
9	232	0.307692	0.9	-0.16437	0.103673	0.000534	-0.2618
10	232	0.230769	0.9	-0.38277	0.119838	-0.03566	-0.2618
11	231	0.153846	0.8	-0.6269	0.141833	-0.09709	-0.72105
12	231	0.076923	0.7	-0.94194	0.188361	-0.31284	-1.18031

最大値分布
N= 12, n= 12

尺度パラメータ(α)	0.21774248
位置パラメータ(λ)	0.95700393
再帰関数(T)	1345
標準化変数(ymax)	7.20377743
最大孔食深さ(Xmax)	2.52557231
標準偏差(σ)	0.40053328

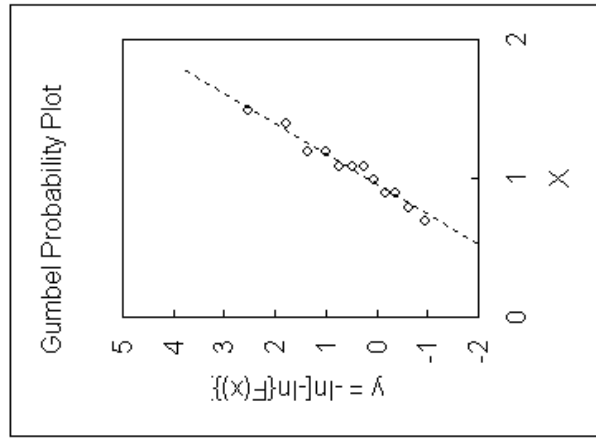


図 3-23 大形鉄錠に基づくオーバーパック最大孔食深さの極値統計解析

測定箇所 i	試料No.	累積確率 F(i)	孔食最大深さ x(mm)	基準化 変数y	係数 AI(N,n)	係数 BI(N,n)	係数 CI(N,n)
1	267	0.916667	1.6	2.441716	0.02618	0.069644	3.834272
2	251	0.833333	1	1.701983	0.036886	0.07483	1.973113
3	273	0.75	0.7	1.245899	0.047159	0.074977	1.042533
4	275	0.666667	0.7	0.90272	0.057578	0.071381	1.042533
5	271	0.583333	0.6	0.618046	0.068485	0.064071	0.73234
6	272	0.5	0.5	0.366513	0.080222	0.052464	0.422147
7	258	0.416667	0.4	0.132996	0.093234	0.035284	0.111954
8	250	0.333333	0.3	-0.09405	0.108226	0.010032	-0.19824
9	278	0.25	0.2	-0.32663	0.126522	-0.0286	-0.50843
10	256	0.166667	0.1	-0.5832	0.151385	-0.09487	-0.81863
11	277	0.083333	0.1	-0.91024	0.204123	-0.32921	-0.81863

最大値分布
N= 11, n= 11

尺度パラメータ(α)	0.32238
位置パラメータ(λ)	0.363908
再帰関数(T)	1441.071
基準化変数(y_{max})	7.272795
最大孔食深さ(X_{max})	2.70851
標準偏差(σ)	0.627818

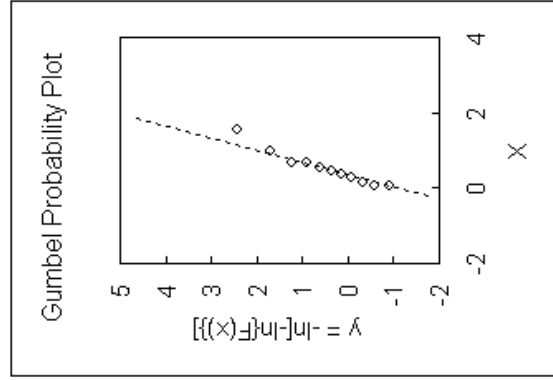


図 3-24 小形鉄錠に基づくオーバーク最大孔食深さの極値統計解析

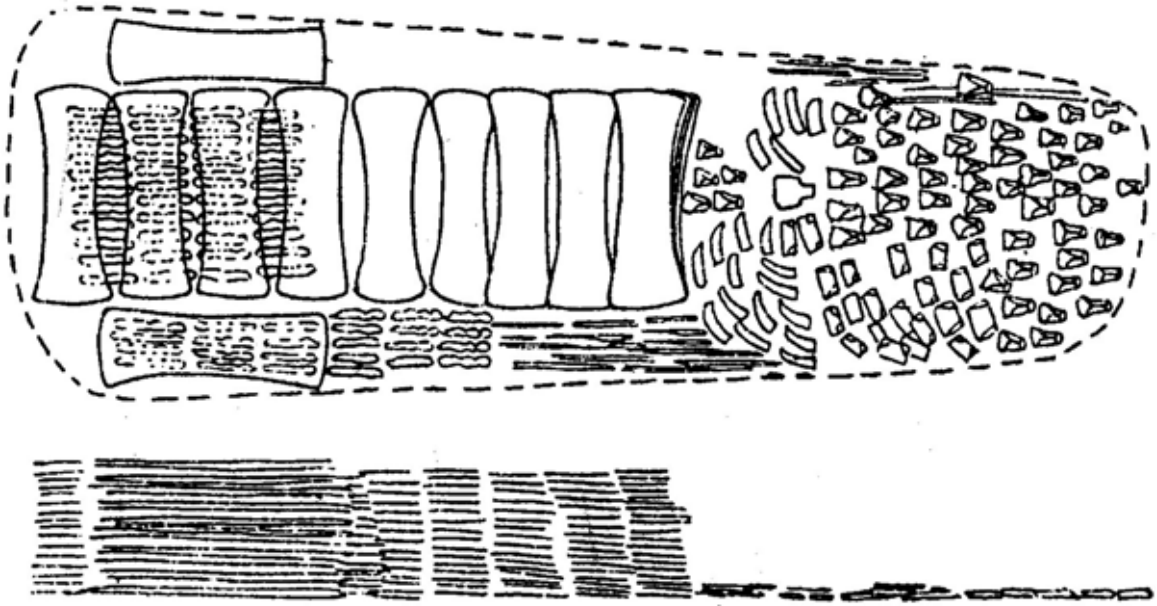


図 4-1 鉄釘の出土状況 ⁵⁾

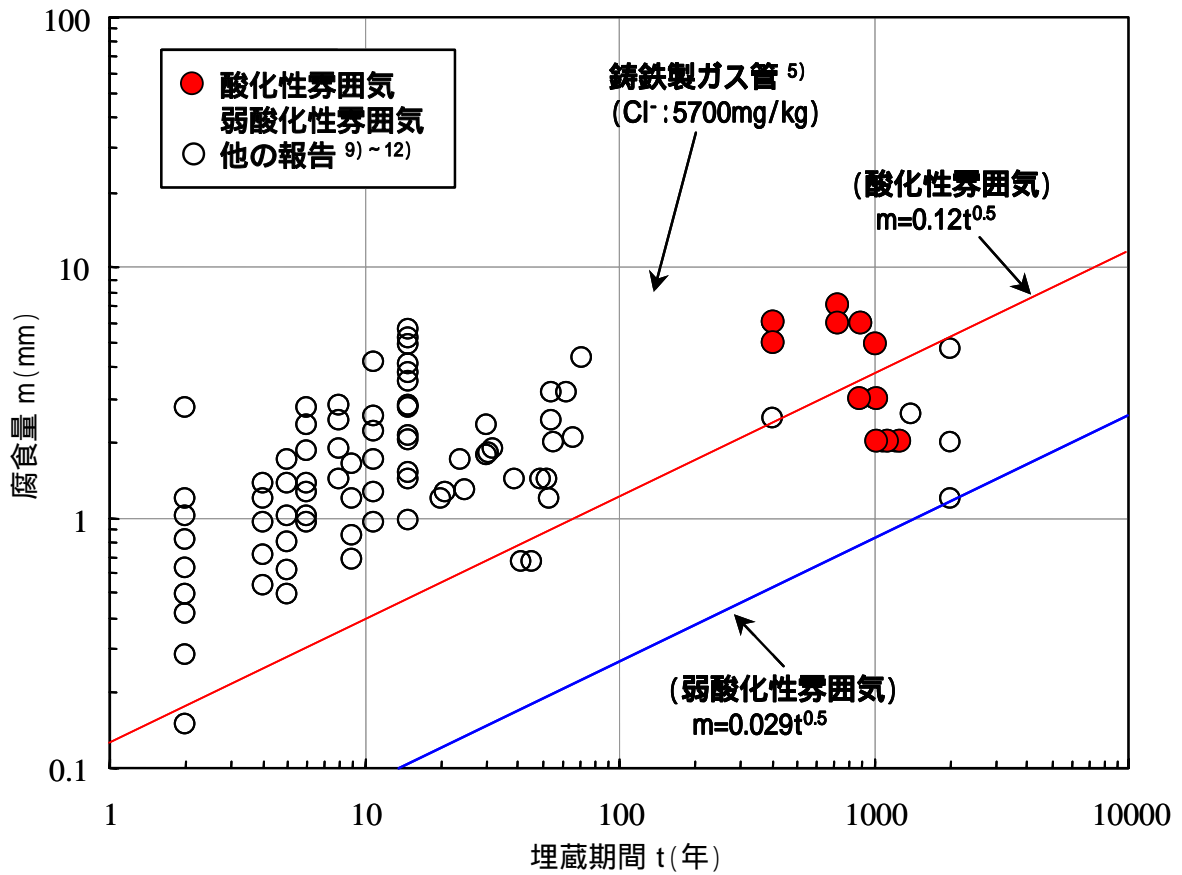


図 4-2 腐食量と埋蔵期間との関係

表 4-1 地金の化学組成

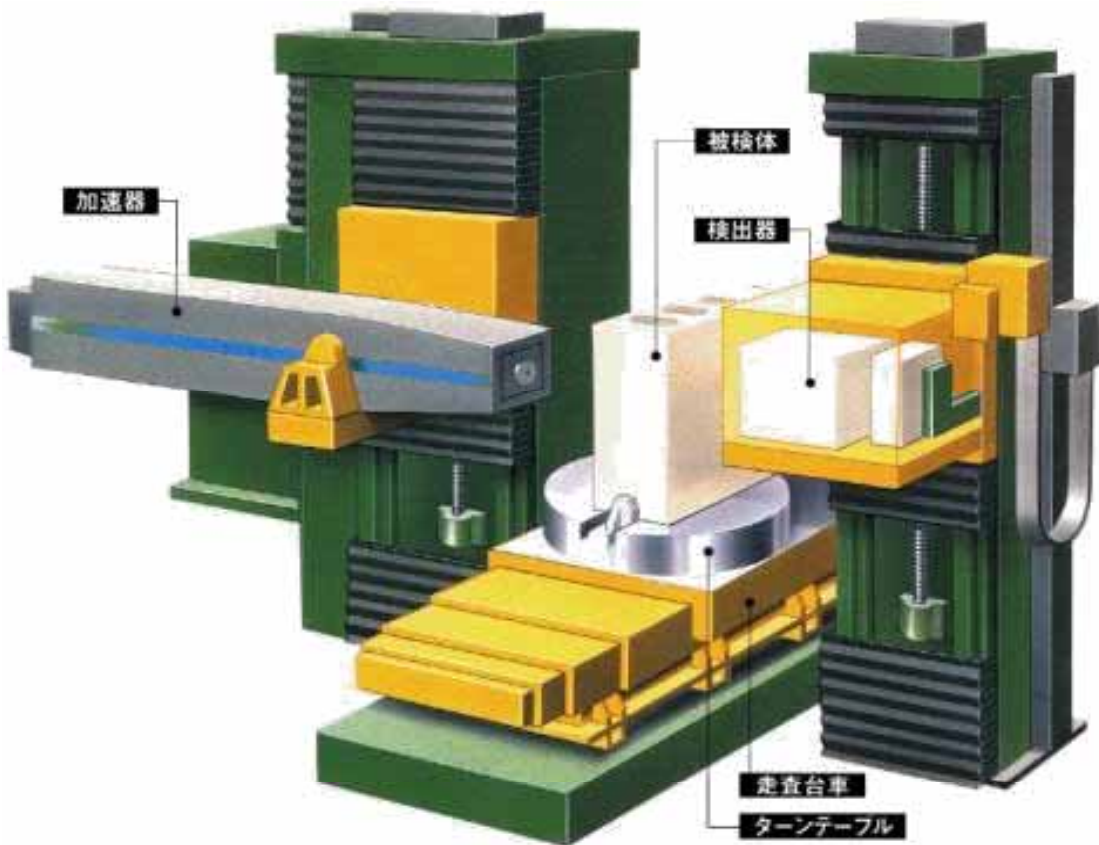
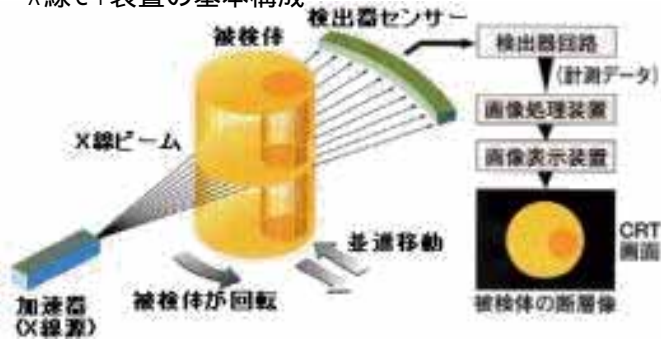
出典	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti	V
6)	0.1	0.057	<0.01	0.006	0.009	0.21	<0.001	<0.002
6)	0.47	-	-	0.017	0.04	-	-	-
13)	0.054	0.15	0.011	0.019	-	-	-	-
13)	0.71	0.25	0.002	0.027	0.003	-	-	-
本調査 (鋳組成をFe比で表示)	-	-	-	<0.01	-	0.15	<0.01	-

(wt%)

付録

(1) X線CT装置

X線CT装置の基本構成



日立製X線CT装置
型式：HiXCT-6M
X線エネルギー：6MeV
透過性能：300mm (鉄換算厚さ)