

宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳  
出土鉄ていの腐食調査  
(研究報告)

2005 年 7 月

核燃料サイクル開発機構

宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳  
出土鉄ていの腐食調査  
(研究報告)

吉川英樹<sup>\*1</sup>，本田卓<sup>\*2</sup>，郡司英一<sup>\*2</sup>

要 旨

高レベル放射性廃棄物のナチュラルアナログ研究の一環として，宮内庁書陵部が所蔵する鉄ていに関して腐食調査を実施した。本鉄ていは 1945 年に大和六号墳（奈良市宇和奈辺参考地陪塚，5 世紀中葉）より出土したものの一部で，埋蔵環境が弱酸化雰囲気であろうと推定される。本鉄ていは母材の鉄が原型に近い形を保っており，これら鉄遺物を材料という観点から見た場合，埋設期間約 1500 年間に渡る鉄の地中での長期腐食挙動に関して貴重な情報を提示している。調査の結果，腐食深さは最大で 1.6mm であった。なお，本報告書は標題の調査の概要を記しており，試料提供の宮内庁に報告・提出するものである。

---

\*1：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

\*2：日立エンジニアリング株式会社

Corrosion Investigation for Iron Artifacts  
Dug Out at the 6<sup>th</sup> Yamato Ancient Tomb  
(Research Document)

Hideki Yoshikawa<sup>\*1</sup>, Takashi Honda<sup>\*2</sup>, and Eiichi Gunji<sup>\*2</sup>

**Abstract**

We analyzed corrosion depth for some iron artifacts dug out at the 6<sup>th</sup> Yamato ancient tomb in Nara prefecture using X-ray CT for the purpose of estimation for long stability of iron material in the ground as a part of the natural analog study related to the research of the high-level nuclear waste disposal. These samples are three big and 17 small iron artifacts which are called “Tetsutei” like as horseshoe iron plate. It is considered that the most of them had been buried in a slightly oxidizing or reducing environment. The analysis result shows the maximum corrosion depth is 1.6 mm for about 1500 years. This paper presents an outline of this study.

---

<sup>\*1</sup>: Barrier Performance Research Gr., Waste Isolation Research Div., Tokai works

<sup>\*2</sup>: Hitachi Engineering Co. Ltd.

青色の項目をクリックすると当該ページへジャンプします

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 調査方法と結果 .....	2
2.1 外観調査 .....	2
2.2 X線 CT による錆評価 .....	2
2.3 錆の分析 .....	3
3. 考察 .....	4
4. 結言 .....	6
謝辞 .....	6
参考文献 .....	7

青色の項目をクリックすると当該ページへジャンプします

## 図 目 次

図 1	宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳出土鉄てい .....	8
図 2	佐紀古墳群の一部と鉄ていの出土した大和 6 号墳の推定所在地 .....	9
図 3	大形鉄てい(No.001)の外観図(上)と X 線 CT 図(下) .....	10
図 4	小形鉄てい(No.250)の外観図(上)と X 線 CT 図(下) .....	11
図 5	小形鉄てい(No.274)の外観図(上)と X 線 CT 図(下) .....	12
図 6	年代測定校正曲線 .....	13
図 7	大和六号墳出土鉄ていの腐食量 .....	14

## 表 目 次

表 1	鉄ていの大きさと重量 .....	15
表 2	鉄ていの推定腐食量 .....	16

## 1. 緒言

鉄遺物の出土事例は全国的に見受けられ、数百年間地中に埋まっていた試料のなかには、多少の錆を伴うものの、母材の鉄がほぼ原型に近い形を保っている事例が報告されている。これら鉄遺物を材料という観点から見た場合、鉄の地中での長期腐食挙動に関して貴重な情報を提示している。

高レベル放射性廃棄物は、その処分方策として地層処分が考えられており、廃棄物は炭素鋼等を材料とする容器（オーバーパック）に入れられ、300m以深の地中に処分される。オーバーパックは地中において、地下水との接触はするものの約千年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るが、地層処分研究開発分野では、これまでに室内での試験を通して、腐食速度と腐食形態に関する種々の評価を行ってきた。しかし、室内試験では長くても試験期間が数年間程度であり、約千年に渡る長期の腐食量予測は外挿となり、より高い精度で腐食量を予測するためには他の方法でデータを補完する必要がある。

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。これは自然界おける類似した現象を基に検討する試験方法である。このナチュラルアナログの試料としての遺跡から出土する鉄遺物を調査することにより、鉄腐食の長期試験として代用し、鉄腐食の長期挙動について貴重な知見を得ることができる。

本調査は宮内庁書陵部が所蔵する鉄ていを対象とした(図1)。この鉄ていは1945年に大和六号墳(奈良市宇和奈辺参考地陪塚、5世紀中葉)(図2)より出土したものの一部で、埋蔵環境が弱酸化雰囲気であろうと推定されたことから調査を実施した。なお、本報告書は試料提供元の宮内庁に報告・提出するものである。解析の詳細及び地層処分研究上の評価は別途報告書「鉄遺物のX線CT測定」(JNC TJ8400 2004-030)<sup>1)</sup>を参照。

## 2. 調査方法と結果

### 2.1 外観調査

調査に用いた鉄ていを表 1 に示した。大形鉄てい 3 枚と小形鉄てい 17 枚の計 20 枚である。大形鉄ていは長さ 375～417 mm ,中央幅 56～78 mm ,端部幅 105～130 mm ,厚さ 2～3 mmの平板で ,重量は 310～381 g である。小形鉄ていは長さ 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。そのうち No.001 の大形鉄ていは ,過去における調査のために二分されているものの保存処理はされていない。他は保存処理(脱塩 ,樹脂含浸)が施され ,部分的に赤褐色の錆が残っているが全体に黒色を帯びていた。なお ,埋蔵期間は推定 1500～1600 年間である。

孔食深さは次の手順で測定・評価した。大形鉄てい (No.231 , No.232) は ,孔食深さを測定する範囲として 60 mm×100 mmの区画を任意に 12 ケ所設定した。小形鉄ていは表面積が 40～70 c m<sup>2</sup>と幅があるが 1 枚毎に値を記録した。測定範囲内にある代表的な孔食について 3～5 点選定し深さを測定するとともに ,各領域の孔食数を調べた。大形鉄ていの測定区画(60 mm×100 mm)12 ケ所の最大深さは 0.7～1.5 mm ,小形鉄てい 17 枚 (面積 : 40～70 c m<sup>2</sup>) の最大深さは 0.1～1.6 mmであった。詳細は別途報告書「鉄遺物の X 線 CT 測定」(JNC TJ8400 2004-030) を参照。

### 2.2 X 線 CT による錆評価

X 線 CT には日立製 HiXCT-6M を用いた。

保存処理がされていない大形鉄ていの試料 No.001 について ,図 3 に外観写真(上図)と X 線 CT 像(下図)で示した。上図の , の 2 位置で ,下図の X 線 CT 画像を見ると ,厚さ 2～4 mmの鉄地金(白色部分)の残存部分の廻りを厚さ 0.5 mm程度の錆層(やや白色の灰色部分)が覆っているのが分かる。濃淡の違いは測定対象の密度変化を表しており ,地金と錆の密度の違いが明確に映し出されている。この錆の部分には少し土が混ざっていると思われる。また ,外観では直径 5～6mmの錆の山が所々見えるが ,この部分は深さ 1 mm程度の孔食であり ,錆が孔を埋めやや厚く成長していることが分かる。A-A'断面では ,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。保存処理のされている他の 2 つの試料でも ,食孔の深さは 1 mm程度であった。

小形鉄てい (No.250) の外観写真と長辺方向の X 線 CT 断層像を例として図 4 に示した。この小形鉄ていは ,約 2mm の厚さの地金が残っていたが ,どの小形鉄ていも地金は概ねよく残っている。また ,孔食が観察され ,他の小形鉄ていの中には貫通孔が観察された鉄ていもあった。小形鉄てい (No.274) の外観写真と長辺方向の X 線 CT 断層像を同様に図 5 に示した。この試料では空洞を伴った錆層が生成している。このような試料の錆層厚さは 1～3 mmで ,その部分では地金は残っていない。各鉄ていの画像

は別途報告書「鉄遺物の X 線 CT 測定」( JNC TJ8400 2004-030 ) を参照。

## 2.3 錆の分析

大形鉄てい( No.232 )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。また、小形鉄てい( No.250 ~ 259 )については、各鉄ていの錆量が少なかったため混合して測定に用いた。錆層は小形鉄ていの外観、図 4 及び図 5 に示すように共に黒味を帯びた褐色を呈している。大形鉄てい( No.232 )も同様であった。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。結晶相としては鉄の酸化物、水酸化物であるマグネタイト(  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  )とゲーサイト(  $\text{-FeOOH}$  )が主成分であった。

鉄ていの錆の化学組成については、大形鉄ていの錆について分析を行った。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。Fe 濃度は 60%と  $\text{FeOOH}$  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。6 世紀のたたら製鉄では、鉄鉱石あるいは砂鉄を原料として用いていたことが考えられるが、砂鉄はチタン磁鉄鉱、あるいはフェロチタン鉄鉱の風化したものであるので製品への Ti 含有量が多くなる。ここでは、Ti は検出限界以下であったことから、鉄鉱石が原料である可能性が高い。また、Cu については、原料の鉄鉱石の不純物として混入したものか、他の材料や製造工程上混入したものであるかは不明である。しかし、これら Ti や Cu の分析結果は錆の分析結果なので、原材料を間接的に示しているに過ぎず今後の検討が望まれる。



### 3. 考察

鉄てい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、埋蔵環境は文献や、鉄ていの地金の残りがたに基づいて推定した。発掘調査を行った森の著書（文献2）によると、直径25m、高さ3mの円墳の頂上でブルドーザーが一度表面を削ったら出土したとある。鉄ていが出土した場所は、円墳のほぼ中央で表土下約0.5m位の位置である。大形鉄ていが20数枚づつ束ねられた「連」が11列で合計282枚。小形鉄ていはその上にばらまくようにして590枚出土したとある。わずかに、約1m×4.50cmのエリアに鉄てい872枚があったことになる。その外側にさらに、鉄斧などの鉄遺物708点が土に直接に接する形で置かれていて、出土場所は約1m×3mのエリアであったという。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、表土に近い位置では酸素分圧が比較的高い。表土近くに散らばっていた小形鉄ていには、腐食状況に違いが見られる。地金の残りは良いが孔食を生じているものがあり、錆化が顕著で空洞を伴った層状の錆が生じているものもある。これは、酸化雰囲気で見られる現象である。一方、束状に積み重なっていた大形鉄ていは、束の中央付近では酸素分圧が低くなっていたと考えられる。大形鉄てい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く、地金の残りも多い。これら3枚は弱酸化雰囲気になっていたことが推定される。しかし、大形鉄てい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。これは試料が酸化雰囲気に曝されたことを意味するが、酸化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雰囲気であることを否定するものではない。X線CTの測定結果から、錆の厚さが薄いことが酸化雰囲気に置かれていた期間が短いことを示唆している。大形鉄ていと一部の地金の残りがよい小形鉄ていとに観察された孔食を生じた状態は、約1500年間の埋蔵期間中に生じた孔食深さが最大で約2mmとほぼ同じである。

埋蔵期間については、鉄ていの出土した陪塚がウワナベ古墳の付属のものであることから、ウワナベ古墳が文献値から5世紀中葉の古墳と報告されている値を用い、約1500年間と判断した。本陪塚からは鉄遺物が多数出土したものの、年代測定に資する試料は乏しい。近年、加速器の進歩により、少量の有機物を用いての年代測定が可能となってきた。ここで、報告値を科学的に裏付けられるか検討した。図6に加速器質量分析を用いるときの年代校正曲線を示した。放射性炭素による年代測定は、宇宙線生成物である放射線炭素を用いた原理なので、時代による宇宙線変動が測定精度に大きく影響する。江戸時代前期で数十年の誤差で測定できても、江戸末期では100年近い誤差をとまうこともある。この校正曲線は、横軸に計算される年代を縦軸に実測される年代を示している。斜めの実線が宇宙線影響を考慮した校正曲線で水平では誤差が大きく、傾きが大きければ誤差が小さく測定可能であることを示す。図では1300年近辺の計算結果を示したが、1500年位前の試料でも測定精度は約0.3%、年代換算で±25年くらいの

測定が可能であることが分かる。今後の分析に期待したい。

腐食量と埋蔵期間との関係について、調査結果を図 7 に、推定腐食量を表 2 に示した。今回調査した資料のうち弱酸化雰囲気中に埋蔵されていたと見なされる試料の最大腐食深さをプロットした。また、一部の試料は酸化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。図の中の は地層処分環境での炭素鋼の 1000 年後の腐食量として考えられている値である。直線は、埋設後、還元性の地下水により処分場が飽和されるまでの 50 年間は不飽和期間として酸化性の腐食を、その後、還元性の腐食挙動を取ると想定した場合の腐食量推移を示している。本鉄ていの事例を約 1500 年間の腐食事例としてみると、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究で想定している処分環境での 1000 年間の腐食量より 1 桁から 2 桁腐食量が小さいことが分かる。このことから、地層処分で想定している腐食量は保守的（危険側での評価）であることが分かった。

高レベル放射性廃棄物地層処分のナチュラルアナログ研究として、これまでに青森県、宮崎県など国内 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 を超えないことが明らかにしている。しかし、埋蔵環境は大半が酸化雰囲気、地層処分で想定される弱酸化ないしは還元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は貴重であり更なるデータの蓄積が必要と考えられる。

#### 4. 結言

大和六号墳から出土した鉄てい 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）大形鉄ていと一部の小形鉄ていは弱酸化雰囲気にて約 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，孔食部以外の錆厚さは，保存処理未処理の試料から推定すると約 0.5 mm であった。
- （２）小形鉄ていの一部は酸化雰囲気にて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 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（ $\gamma$ -FeOOH）とマグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）が多く，レピドクロサイト（ $\beta$ -FeOOH）とアカガネアイト（ $\alpha$ -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。このことは鉄ていの原料が鉄鉱石であろうことを示している。
- （４）本鉄ていの事例を約 1500 年間の腐食事例としてみると，高レベル放射性廃棄物の地層処分研究で想定している処分環境での 1000 年間の腐食量より 1 桁から 2 桁腐食量が小さいことが分かる。このことから，地層処分で想定している腐食量は保守的（危険側での評価）であることが分かった。

#### 謝辞

本調査にあたり，鉄てい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。また，年代測定の可能性については一部パレオ・ラボ㈱に解析でご協力頂きました。

参考文献

- 1) 本田 卓，他：“鉄遺物の X 線 CT 測定”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ8400 2004-030 (2005)
- 2) 森 浩一：僕は考古学に鍛えられた，筑摩書房， p74-82 (1998)
- 3) 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,腐食防食協会(1999)
- 4) A.B.Johnson,Jr. and B.Francis : PNL-3198/JC-70, Battelle (1980)
- 5) K.Araki, et al. : ASME'89, p.601 (1989)
- 6) NACE : Corrosion Data Survey (1974)
- 7) 山本一雄，他：“鑄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)
- 8) 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)
- 9) 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)



図 1 宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳出土鉄てい  
(左側が大形鉄てい，右側が小形鉄てい)

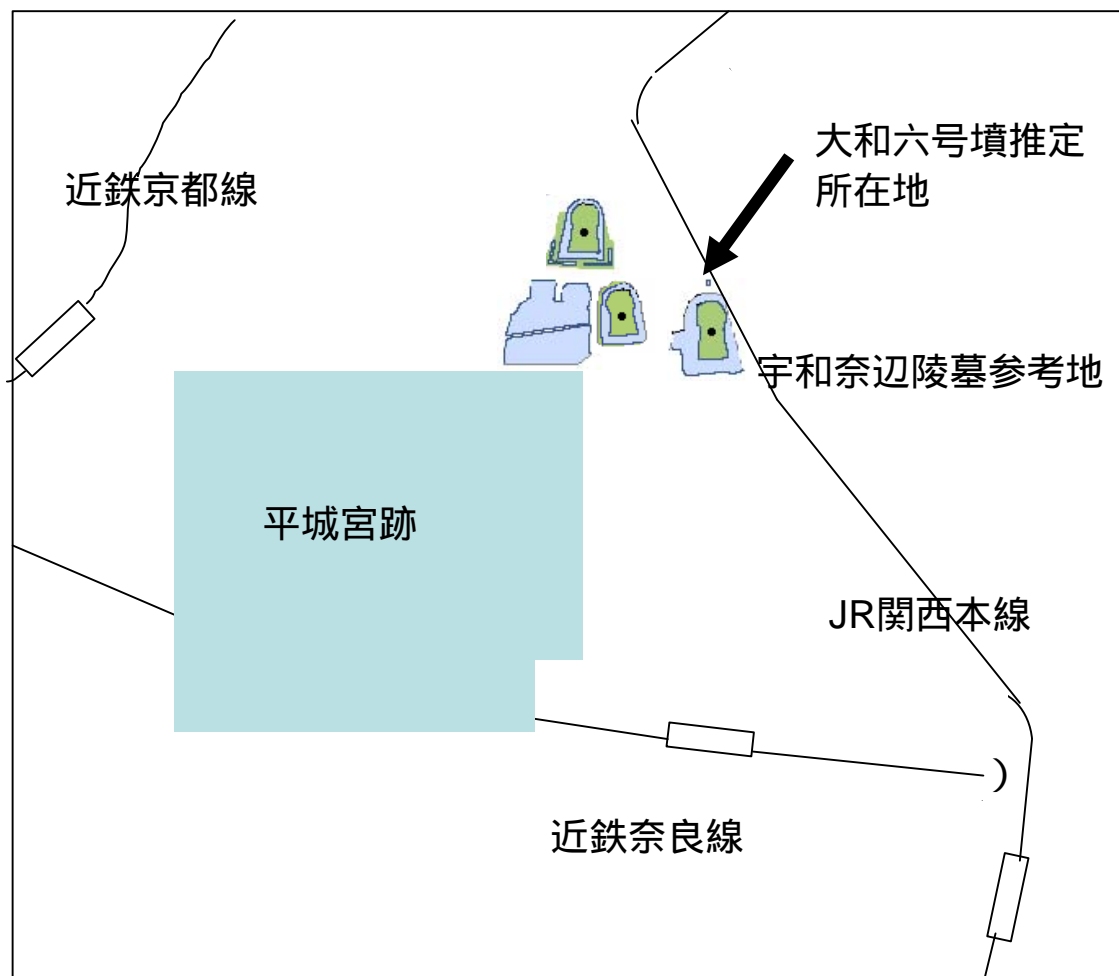


図 2 佐紀古墳群の一部と鉄ていの出土した大和 6 号墳の推定所在地

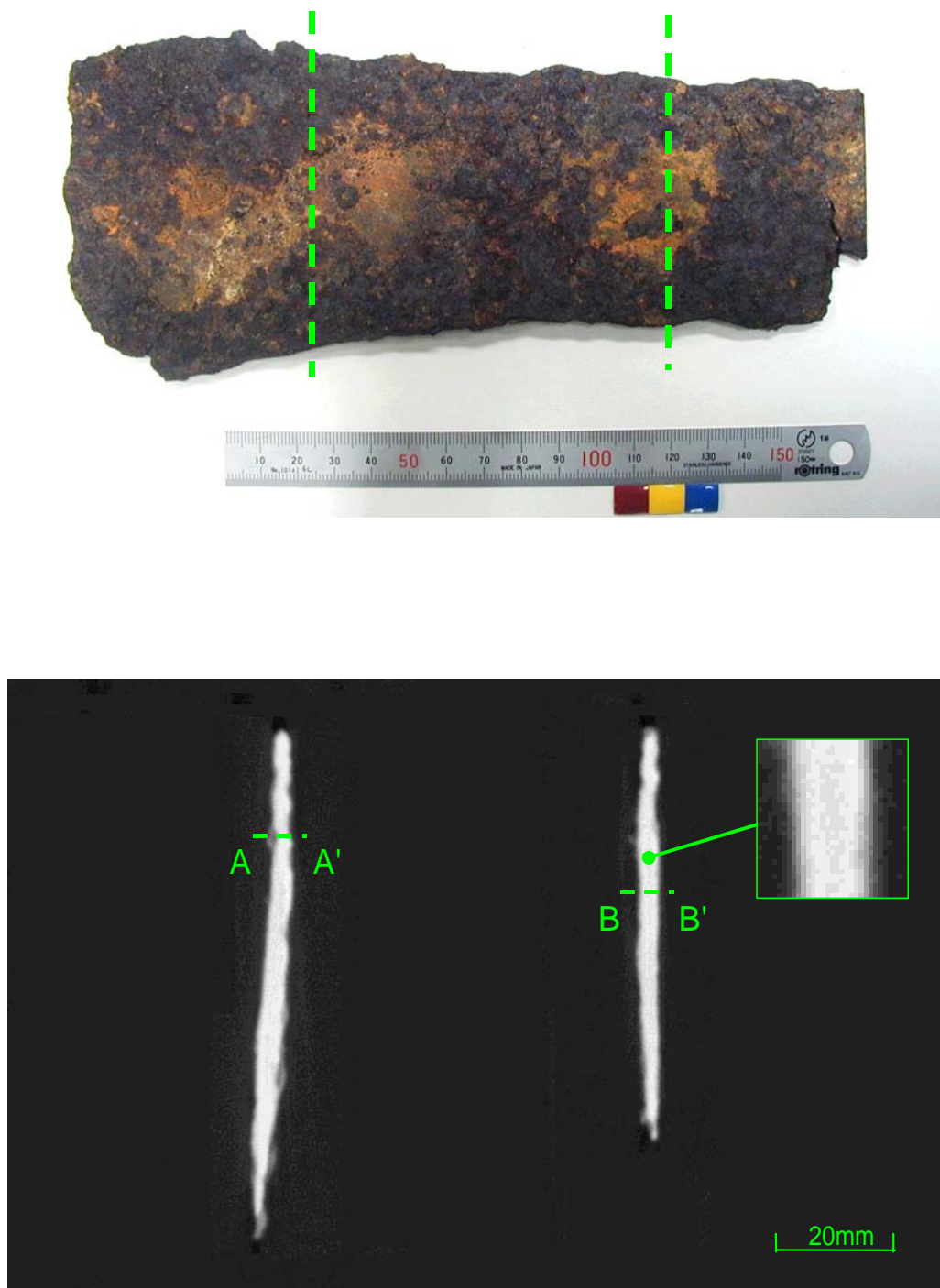


図3 大形鉄てい(No.001)の外観図(上)とX線CT図(下)  
外観図の , の断面がX線CT図に該当する。

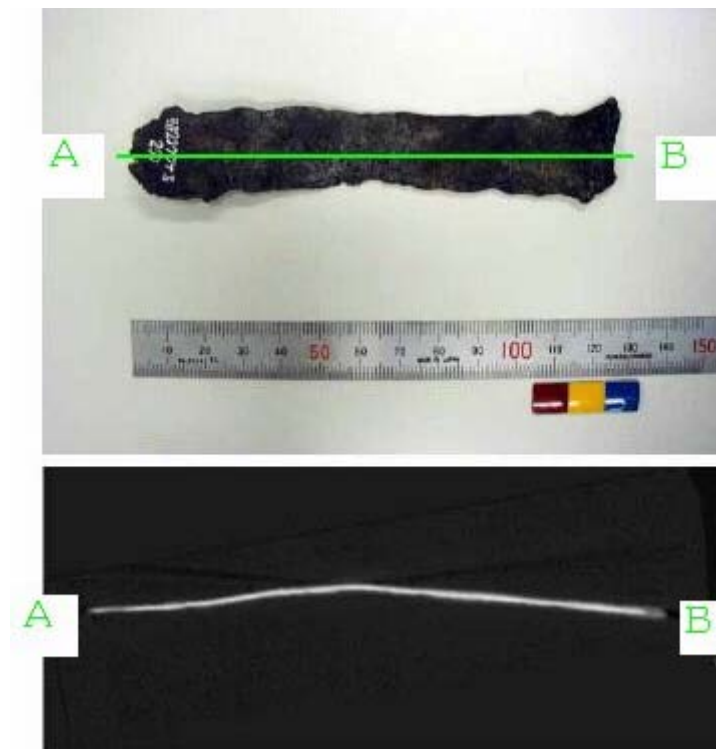


図4 小形鉄てい(No.250)の外観図(上)とX線CT図(下)  
全体に約2mm厚さの地金が残っているが、端の部分は  
錆化している。また、食孔が散見される。X線CT像は  
外観図のA-Bの長軸方法の断面に相当する。



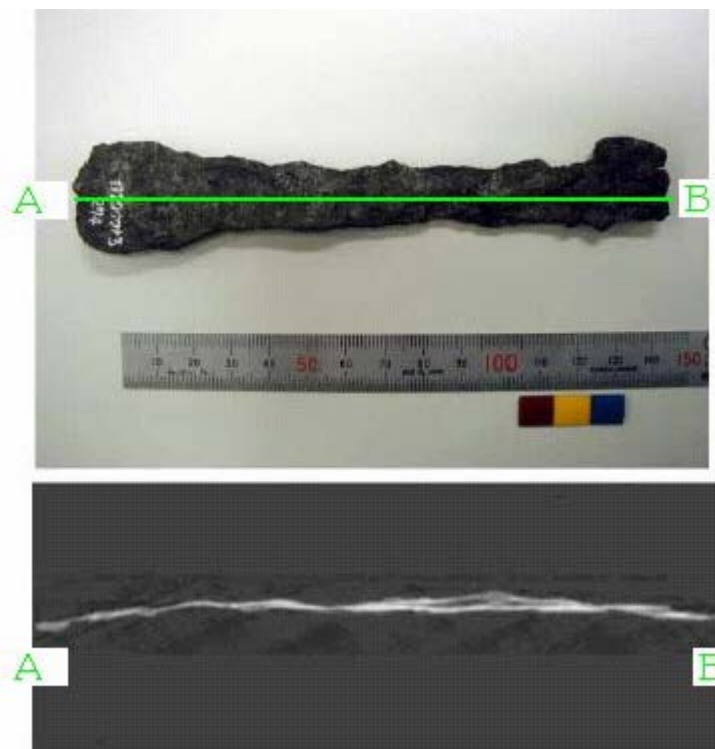


図5 小形鉄てい(No.274)の外観図(上)とX線CT図(下)  
地金の残存はごく一部であり、空洞を伴った層状の  
錆が形成されている。

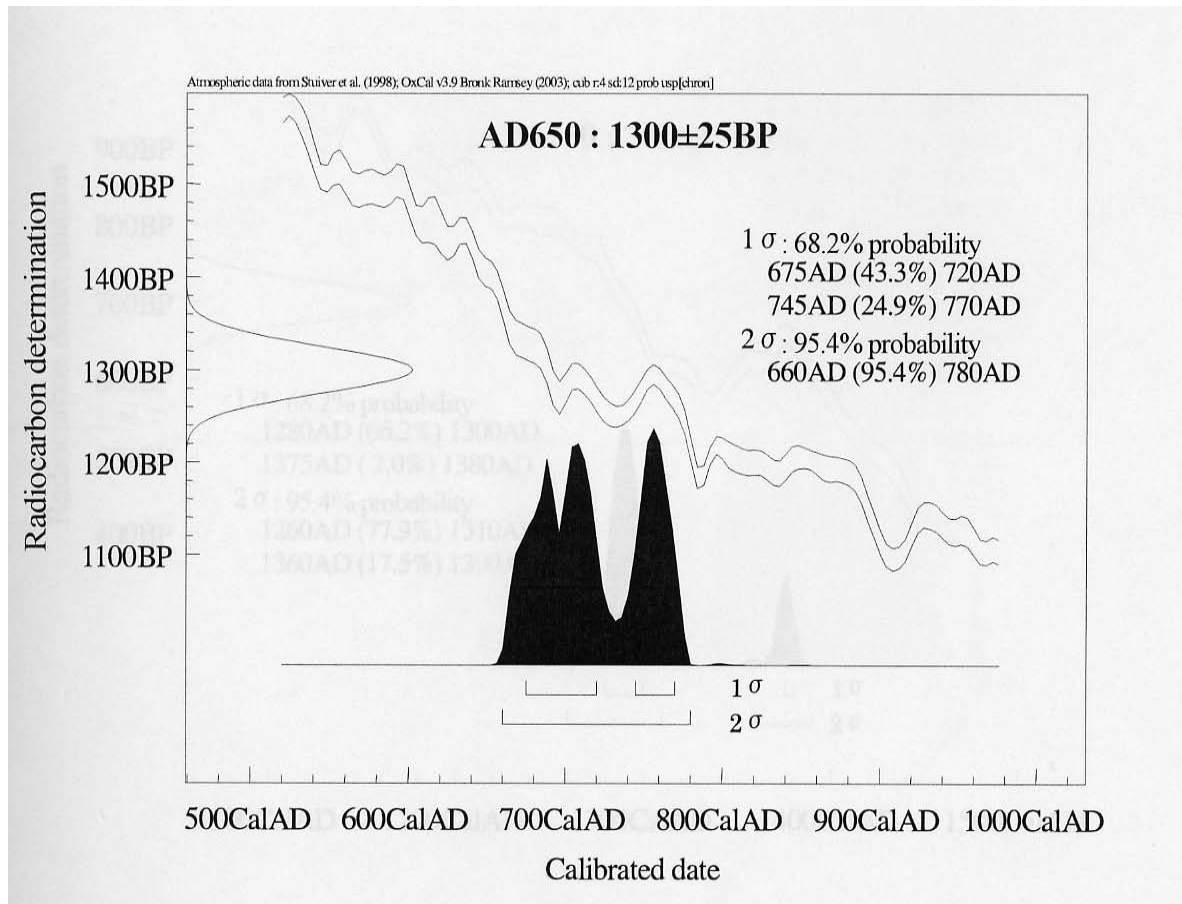


図6 年代測定校正曲線

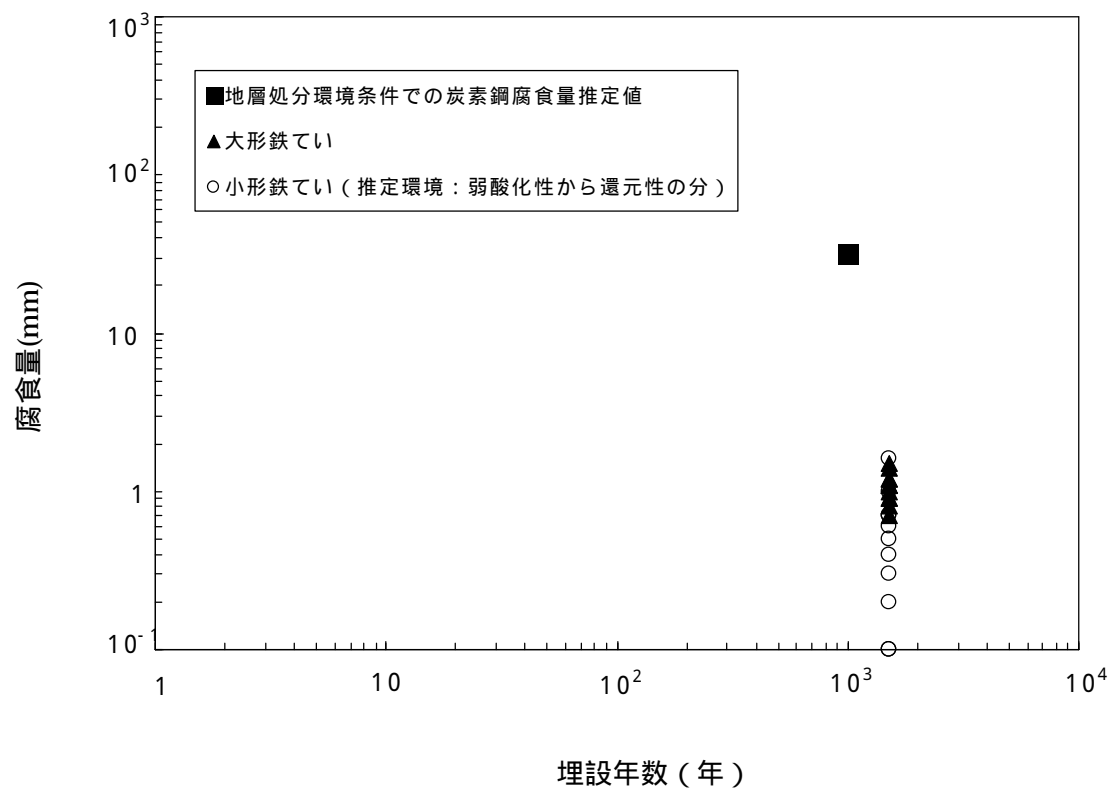


図7 大和六号墳出土鉄ていの腐食量  
鉄ていの腐食量は孔食腐食の深さの値を用いた。

表1 鉄ていの大きさと重量

No.	種類	長さ ( mm )	中央幅 ( mm )	端部幅 ( mm )	厚さ ( mm )	重量( g )
001	大形鉄てい	*	*	*	*	*
231	同上	375	78	130	2.3 ~ 3.3	310
232	同上	417	56	105	2.3 ~ 3.3	381
250	小形鉄てい	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

\* : 中央部で切断された残材のため測定せず

表2 鉄ていの推定腐食量

測定 No.	試料No. 大形鉄てい	最大孔食深さ ( mm )		測定 No.	試料No. 小形鉄てい	最大孔食深 さ ( mm )
1	試料 No.231	1.5		1	試料 No.267	1.6
5	試料 No.231	1.1		2	試料 No.251	1.0
6	試料 No.231	1.1		3	試料 No.273	0.7
8	試料 No.231	1.0		4	試料 No.275	0.7
11	試料 No.231	0.8		5	試料 No.271	0.6
12	試料 No.231	0.7		6	試料 No.272	0.5
2	試料 No.232	1.4		7	試料 No.258	0.4
3	試料 No.232	1.2		8	試料 No.250	0.3
4	試料 No.232	1.2		9	試料 No.278	0.2
7	試料 No.232	1.1		10	試料 No.256	0.1
9	試料 No.232	0.9		11	試料 No.277	0.1
10	試料 No.232	0.9				