

土壤埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年2月

日本鋼管工事株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究

池田 新太郎* 炭山 守男**

要 旨

本研究は、オーバーパックの候補材である炭素鋼の土壌中での長期腐食挙動を評価し、腐食モデルの開発に資することを目的に実施したものである。現在までの研究から、地層処分環境であるベンナイト中と類似の自然環境は、淡水成粘土である。そこで、淡水成粘土中に長期間埋設された水道管を1件掘り上げ、その埋設土壌の環境と管体の腐食量を調査した。

粘土中における鋼材の最大孔食深さを実測により求めると共に、極値統計手法により最大孔食深さを推定した。つぎに、過去の研究結果を加えて、そのデータの腐食速度と埋設環境因子との関係を多変量解析し、腐食データの層別を行った。その結果を腐食モデルの式 $H = a Y^n$ に適用して、極値統計手法による値で $n \approx 0.6$ の妥当な値を得た。

更に、長期腐食の予測を試みた。

しかしながら現状では、より精度の高い推定をする上でデータ数が不足しており、今後、データを増加していく必要がある。

本報告書は、日本鋼管工事株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号 : 040D0152

事業団担当部課室および担当者 : 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室 (本田明)

* : 技術開発センター 研究開発部

** : 同上

Study on Long-term Corrosion of Carbon Steels
in the Soil Environment

Sintaro Ikeda *
Morio Sumiyama **

A b s t r a c t

The Objectives of this study are to investigate the long term corrosion behavior of carbon steel in the soil environment and to develop the corrosion model of carbon steel on the basis of obtained data. These models will be used for the long-term prediction of carbon steel overpack.

It is considered through our study that one of the soil environment which similar to bentonite is clay zone contact with fresh water.

Two water service pipes buried under clay condition for a long time were excavated and the environmental condition was investigated. The penetration depth of each pipe was measured and the extreme value statistical analysis was adopted to estimate the maximum penetration depth for this water service pipe.

The regression analysis of the extreme values accumulated up to this year gave the constant of the pit growth law ($H = aY^n$). The constant "n" was estimated about 0.6. In addition, long-term corrosion depth was predicted by using this equation.

However, it is necessary to acquire more data for the more precise prediction.

* Work performed by Nippon Kokan Koji K.K. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation Contract No.:040D0152
PNC Liaison: Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works

* : RESEARCH AND DEVELOPMENT DEPT

** : RESEARCH AND DEVELOPMENT DEPT

目 次

	頁
まえがき	1
1. 粘土中埋設鉄管の腐食量及び環境条件の測定	3
1.1 埋設鉄管の履歴及び調査内容	3
1.1.1 履歴及び掘り出し場所	3
1.1.2 調査内容及び測定方法	6
1.2 調査結果	18
1.2.1 地表面計測結果	18
1.2.2 掘削後計測結果	18
1.2.3 管体腐食調査結果	21
2. 考察	51
2.1 本年度調査結果のまとめ	51
2.2 全調査結果のまとめ	59
2.3 解析	64
2.3.1 粘土全データ (6地点)	64
2.3.2 層別解析 (粘土中4地点データ)	78
3. まとめ	85
あとがき	87

Index of Table, Figure, Photo

	Page
Table 1	Hysteresis of Buried Cast Iron Pipe 3
Table 2	Measuring Methods of Soil Environment Factors 8
Table 3	Methods of Soil Analyses 14
Table 4	Results of Surface Soil Measurements at Sasanodai-1 18
Table 5	Results of Measurement at Sasanodai after Excavation 20
Table 6	Results of Measurement of Pit Depths (Sasanodai 1-1) 27
Table 7	Results of Measurement of Pit Depths (Sasanodai 1-2) 28
Table 8	Summary of Measured Depths of Pit (Sasanodai 1-1) 30
Table 9	Summary of Measured Depths of Pit (Sasanodai 1-2) 31
Table 10	Chemical Composition of Pipe (Sasanodai) 34
Table 11	X-ray Diffraction Analyses of Rust (Sasanodai) 35
Table 12	EPMA Analyses of Rust (Sasanodai) 35
Table 13	Results of Quantitative Analyses of Rust (Sasanodai) 35
Table 14	Results of Compositional Analyses of Soil (Sasanodai) 36
Table 15	Results of X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai) 37
Table 16	Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Sasanodai, underside of Pipe) 37
Table 17	Results of SRB Tests 37
Table 18	Summary of Soil Environmental Factors 52
Table 19	Summary of Corrosion of Pipe 54
Table 20	Examination Results on the amount of Corrosion of Pipe Buried in the Clay Soil-1992 55
Table 21	Examination Results on the amount of Corrosion of over all the Buried Pipe Surface (Including Macrocells) 55
Table 22	Table of Calculated Parameters Using MVLUE 57
Table 23	Summary of Environmental Factors of Clay Measured at Sites 60

	Page
Table 24	Summary of Corrosion of Pipe 62
Table 25	Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay 63
Table 26	Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay Obtained by the Extreme Value statistical Method 63
Table 27	Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor 66
Table 28	Correlation Coefficients between Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor 66
Table 29	Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor 67
Table 30	Correlation Coefficients between Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor 67
Table 31	Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Mean Corrosion Rate 71
Table 32	Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Maximum Corrosion Rate 72
Table 33	Results of Multiple Regression Analysis of Measured Mean Corrosion Rate by Variable Selection 73
Table 34	Results of Multiple Regression Analysis of Measured Maximum Corrosion Rate by Variable Selection 74
Table 35	Correlation Coefficients between Corrosion Rate and Environmental Soil Factor 79

Figure 1	Investigated Positions in Topographical Map	4
Figure 2	Investigation Position of Sasanodai	5
Figure 3	Investigation Flow	6
Figure 4	Schematic Illustration of Measurement at Ground Surface	7
Figure 5	Schematic Illustration of Measuring Method after Excavation	9
Figure 6	Method of Measuring from Investigated Pipe	10
Figure 7	Measuring Method of Pit Depth	10
Figure 8	Definition of Corrosion Products to be Measured	11
Figure 9	Sketch of Adhering Soil (Sasanodai)	22
Figure 10	Sketch after Removal of Adhering Soil (Sasanodai)	24
Figure 11	Sketch of a Corroded surface of Pipe after Blasting (Sasanodai)	29
Figure 12	Results of Measurement of Original Wall Thickness (Sasanodai)	32
Figure 13	Cutting Position of Test piece (Sasanodai)	38
Figure 14	Positions of Metallography(Sasanodai)	38
Figure 15	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust(Sasanodai)	43
Figure 16	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust(Sasanodai)	43
Figure 17	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust(Sasanodai)	44
Figure 18	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust(Sasanodai)	44
Figure 19	X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Sasanodai-9H)	45
Figure 20	X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Sasanodai-9H)	46
Figure 21	EPMA Analyses of surface Rust(Sasanodai)	47
Figure 22	EPMA Analyses of Rust in Pit(Sasanodai)	47
Figure 23	Grain-size of Soil(Sasanodai)	48
Figure 24	Grain-size Distribution of Soil (Sasanodai)	48
Figure 25	X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai)	49
Figure 26	X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai)	50
Figure 27	Maximum Pit Depth-Histogram (Sasanodai)	57

	Page
Figure 28	Estimation of Maximum Pit Depth-Gumbel Probability Paper Plot(Sasanodai) 58
Figure 29	Relation to Environmental Soil Factor Correlated with Corrosion Rate (Scatter Diagram I) 68
Figure 30	Relation to Environmental Soil Factor Correlated with Corrosion Rate (Scatter Diagram II) 69
Figure 31	Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Data of Steel Pipes buried in Freshwater Clay 75
Figure 32	Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method 77
Figure 33	Factors Correlating Strongly with Corrosion Rate (Scatter Diagram I) 80
Figure 34	Factors Correlating Strongly with Corrosion Rate (Scatter Diagram I) 81
Figure 35	Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Date of Steel Pipes buried in Freshwater Clay 82
Figure 36	Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method 84

	Page
Photo 1	Condition of Soil Around Pipe (Sasanodai) 19
Photo 2	Outview of Pipe (Sasanodai) 21
Photo 3	After Removal of Adhering Soil (Sasanodai)..... 23
Photo 4	Corroded Surface of Pipe after Blasting (Sasanodai)..... 26
Photo 5	Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-1)--- 39
Photo 6	Micro and Macro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-1) 40
Photo 7	Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-2)--- 41
Photo 8	Micro and Macro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-2) 42

まえがき

本研究は、オーバパックの候補材である炭素鋼の土壌中での長期腐食挙動を評価し、腐食モデルの解明に資することを目的とし、昭和63年度から実施している。昨年度までに文献調査・埋設管の掘り上げ調査により、土壌埋設鋼材の腐食モデル（経験式）を作成した。

今後の課題は、モデルの精度向上のためには、データ数の蓄積が必要で、特に長期間埋設されたものが必要であった。

本年度は「土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究」のテーマで委託研究を実施した。研究は、横浜市内に長期間埋設された水道管を掘り上げ、埋設されていた土壌環境とその環境下での鋼材の腐食状況を調査し、評価した。さらに、そのデータに統計的処理をおこなって推定腐食量をもとめた。これらのデータを昨年度までのデータに追加して、腐食速度と埋設環境因子との関係を多変量解析し、腐食データの層別を行った。層別したデータにより、天然環境下の淡水成粘土中の鋼材の腐食モデルを作成した。この結果において、数十年経過した埋設水道管の腐食量及び腐食モデルは、昨年度までに構築したものより精度が向上した結果が得られた。

1) 実施責任者

研究開発センター 研究開発部

池田 新太郎

2) 実施担当者

研究開発センター 研究開発部

炭山 守男

1. 粘土中埋設鑄鉄管の腐食量及び環境条件の測定

粘土中鋼材の経年腐食量を推定するに際して精度向上のため、粘土中に31年間埋設されていた埋設水道管を選定した。その管体掘上げ時に、埋設管近傍の詳細な土壌環境の調査を行い、掘り上げ後に管体の腐食状況調査と土質分析を行った。土壌環境調査として地表面計測と、管体近傍まで掘削した時点で行う掘削後計測を実施した。

1.1. 埋設鑄鉄管の履歴及び調査内容

1.1.1 履歴及び掘り出し場所

(1) 履歴

調査対象の埋設管は、水道管でこの調査のためだけに掘削をおこなったものである。調査条件として、土質が粘土であること及び経過年数が20年以上経過しているものとし、その結果、31年間埋設の笹野台の水道管を選定した。この調査対象物件の水道局殿の情報による埋設管の履歴を埋設経過年、埋設年、埋設場所、使用目的、材料、管径、土質について、Table-1に示す。

Table-1 Hysteresis of Buried Cast Iron Pipe

項目 \ 名称	笹野台
経過年	31年
埋設年	昭和36年
埋設場所	横浜市旭区笹野台
使用目的	上水
管種	鑄鉄管
呼び径	150φ
土質*	粘性土

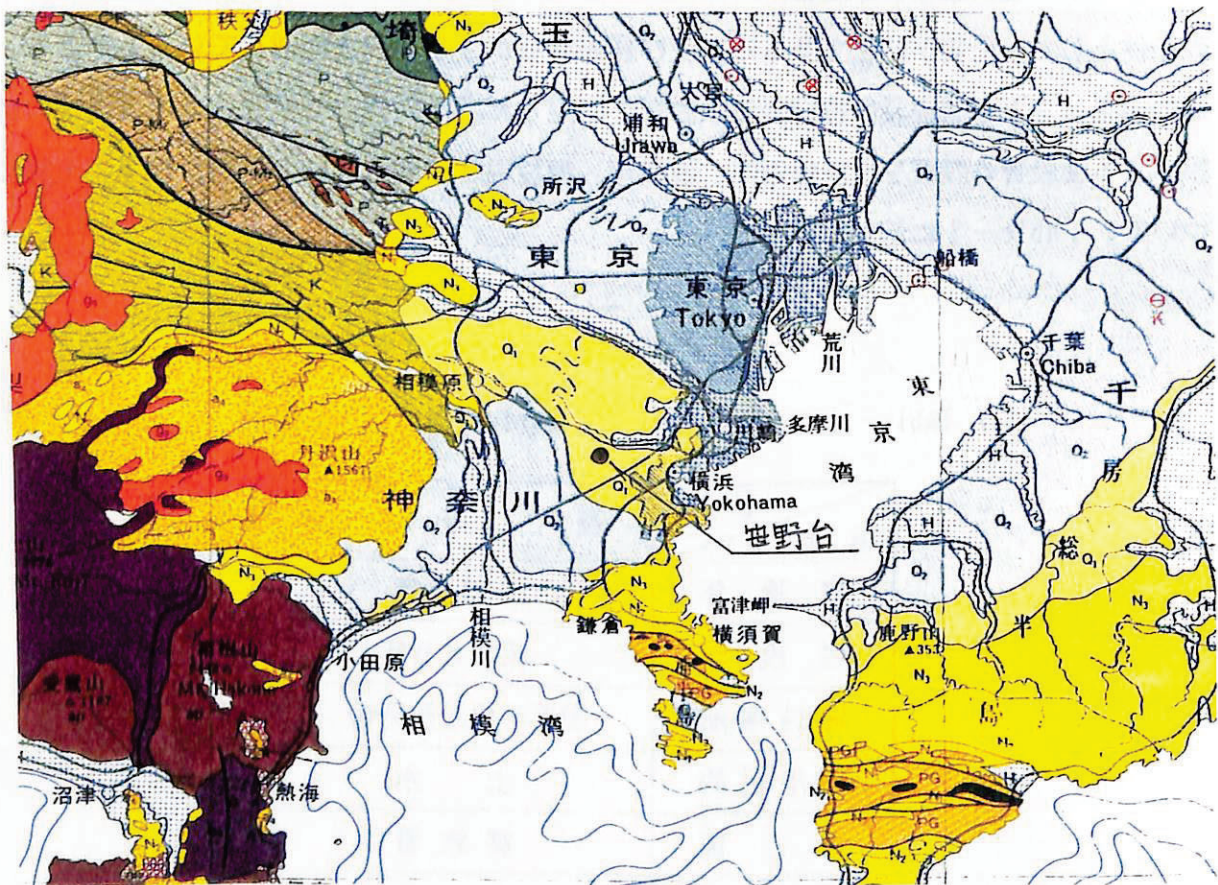
* 水道局からの情報による。

(2) 埋設鑄鉄管の掘り出し場所

調査場所は、横浜市で、笹野台は横浜市西部にある。この地域は、沖積層の地域にあたる。地形図中にプロットしてFigure - 1 に示す。

次に、電食を生じる迷走電流源の電鉄との関係では、1. 3 Kmほど離れて、相模鉄道があるが、腐食に対する影響はない。

また、調査ヶ所の笹野台は、丘陵地の住宅地内の道路に埋設されたもので、丘陵地の凹地部分である。この位置図をFigure - 2に示す。



凡例	
H	新生代・第四紀・完新生 砂・泥および礫
Q ₂	新生代・第四紀・更新世後期 礫岩・砂岩・泥岩および凝灰岩
Q ₁	新生代・第四紀・更新世前期 礫岩・砂岩・泥岩および凝灰岩
N ₂	新生代・新第三紀・鮮新生 砂岩・泥岩・礫岩および凝灰岩
N ₁	新生代・新第三紀・中新世後期 —鮮新世前期 泥岩・砂岩・礫岩および火砕岩
N ₁	新生代・新第三紀・中新世後期 —鮮新世前期

Figure-1 Investigated Positions in Topographical Map

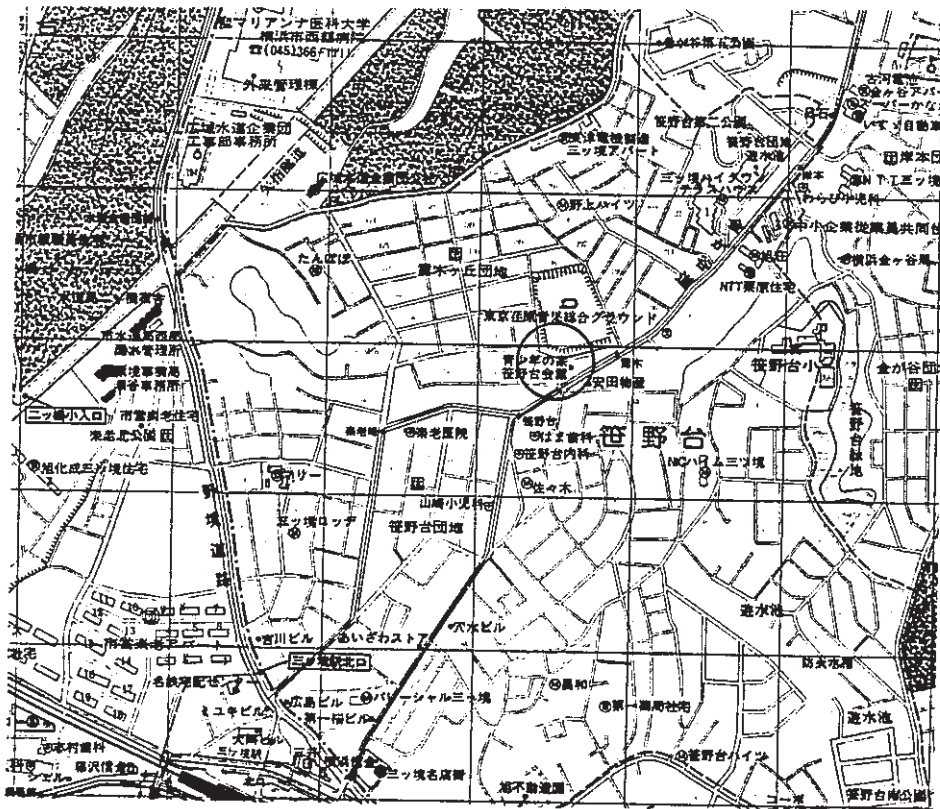


Figure -2 Investigation Position of Sasanodai

○ : Position

1.1.2 調査内容及び計測方法

(1) 調査内容

調査は、撤去延長のうちの1 m長について行った。舗装除去後に地表面計測（参考）を行った後、管体付近まで掘削し、管周近傍の土壌環境の測定と管体状況の調査を行う掘削後計測を実施した。掘り上げた管体については、詳細な管体腐食状況及び土壌の分析、腐食生成物の分析、管材の分析を行った。以下に工事現場における調査フローを示す。

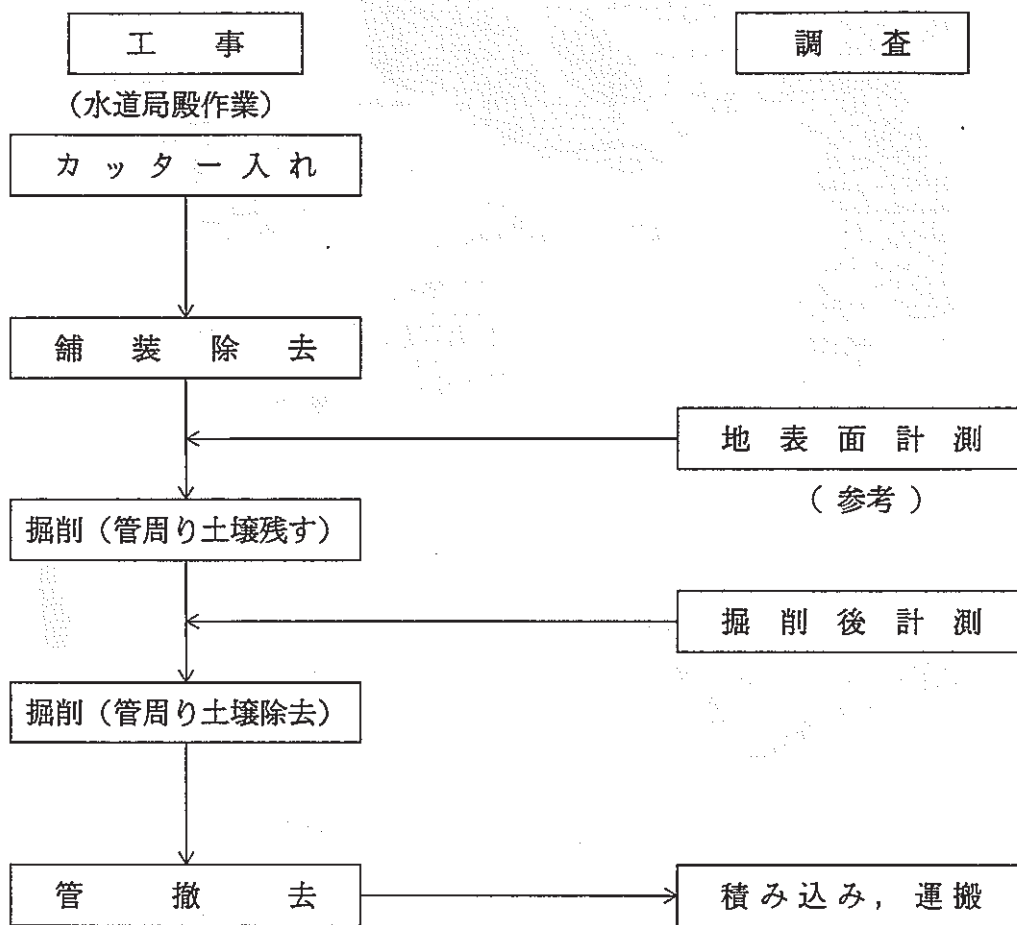


Figure-3 Investigation Flow

(2) 地表面計測 (参考)

舗装除去後、碎石層も除いた調査対象管の東側、中央、西側で、7項目（土壌比抵抗、プローブ腐食速度、プローブ分極抵抗、プローブ自然電位、管対地電位、酸化還元電位、pH）について測定した。現地の測定方法をFigure-4 に示し、測定項目及び方法をTable -2 に示す。

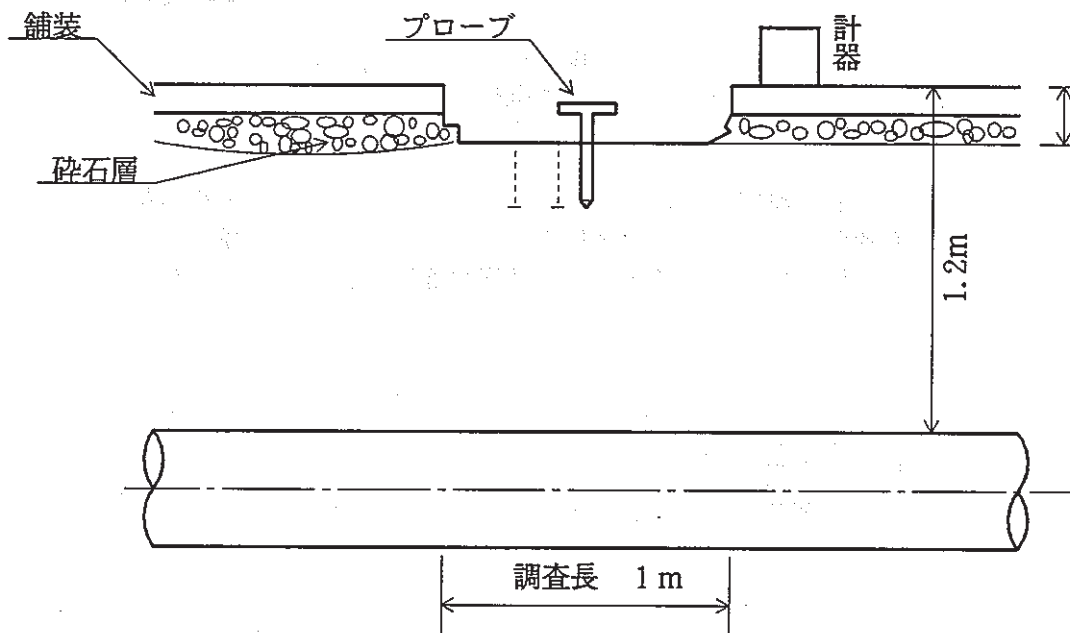
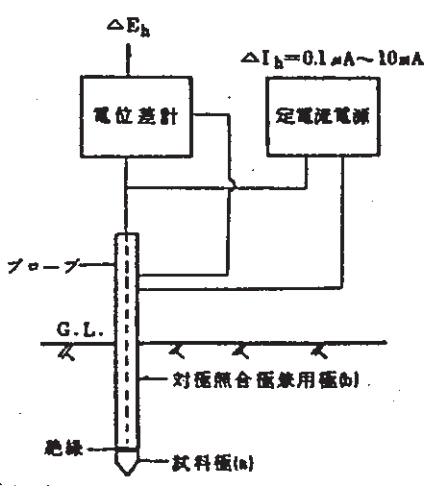
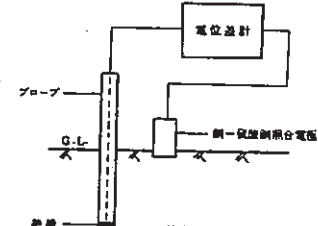


Figure-4 Schematic Illustration of Measurement at Ground Surface

Table - 2 Measuring Methods of Soil Environment Factors

項 目	調 査 内 容
<p>① 土 壤 比 抵 抗</p>	<p>測定土壤にプローブを打ち込みプローブの試料極 (a) と対極 (b) との間で定電流パルス ΔI_h を印加した時の (a) 極 - (b) 極間の応答電圧 ΔE_h を測定し、下式により土壤抵抗 R_s、土壤比抵抗 ρ に換算した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> $R_s (PR) = \frac{\Delta E_h}{\Delta I_h}$ $\rho = \frac{R_s(PR)}{K_1}$ <p> R_s : 土壤抵抗 ρ : 土壤比抵抗 K_1 : プローブ係数 </p> </div> <div style="flex: 1;">  </div> </div>
<p>② プローブ腐食速度 ③ プローブ分極抵抗</p>	<p>上記、測定系においてコロジョモニターにより分極抵抗及び自然腐食速度を計測した。分極抵抗とはプローブをある土壤中に打ち込んだ場合の腐食反応抵抗である。自然腐食速度とはプローブ係数を分極抵抗で除したものであり、自然腐食における速度の大きさを示すものである。</p>
<p>④ プローブ自然電位</p>	<p>測定土壤にプローブを打ち込み近傍に照合電極を接地して、プローブ先端の鋼製試料極 (a) と照合電極との間の電圧として腐食電位を測定した。</p> <div style="text-align: right;">  </div>
<p>⑤ 管対地電位測定</p>	<p>測定器 (高抵抗電圧計) の ⊕ 側を配水管の露出部に、⊖ 側を硫酸銅電極に接続し、電極を測定箇所 (導管の直上) に接地して計測する。(測定器はプローブ測定器にて行う)</p>
<p>⑥ 酸化還元電位測定</p>	<p>酸化還元電位計の電極を掘削箇所の土壤に 1 ~ 2 cm 挿し込んで土壤の酸化還元電位を酸化還元電位差計 (レドックスメーター) で測定し記録する。電極の挿し込み位置を変えて 3 回 / 箇所の測定を行う。 この読み値を水素電極基準に換算する。</p>
<p>⑦ p H 測 定</p>	<p>露出した土壤を採取し、2.5 倍の蒸留水を加えて攪拌し、上澄み液の pH をガラス電極 pH 計 (レドックスメーター) で測定し記録する。土壤の採取位置を変えて 3 回 / 箇所の測定を行う。</p>

(3) 掘削後計測

掘削を管近傍まで行った時点で、Figure-4 に示すごとく管断面に対して管天と管下側の2箇所、管軸方向について、管先端部（東側）、管の中央部、管末端部（西側）の3ヶ所の土壌環境の測定を行った。測定項目及び方法はTable-2 に示す。計測後、管周りの土壌を掘り起こしながら、土質状況（土質、特殊土の有無、不均一土、地下水の状況等）を調査した。計測後管周り土（管天・管下）において、分析用土壌を採取した。採取位置をFigure-5 に併せて示す。

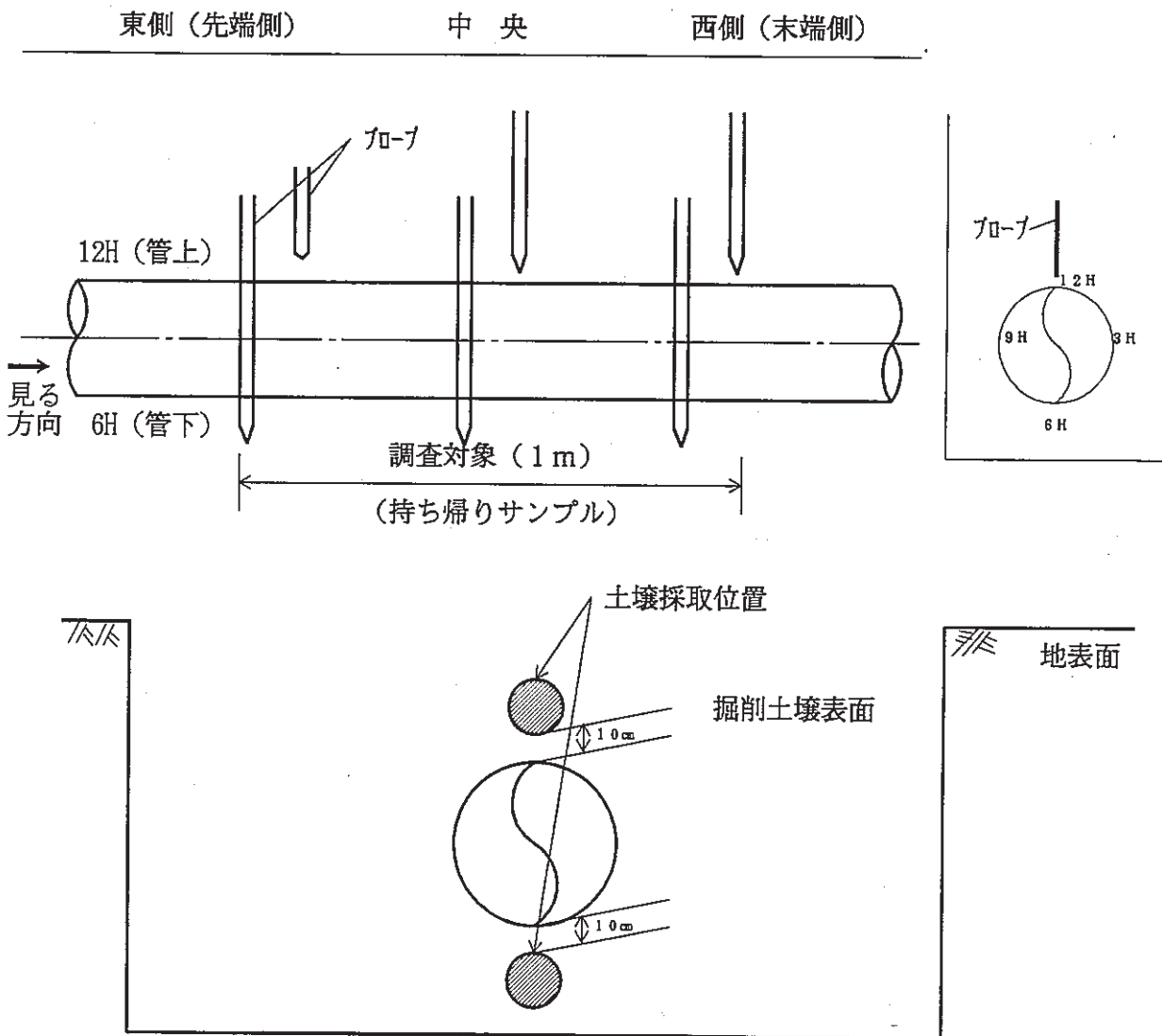


Figure-5 Schematic Illustration of Measuring Method after Excavation

(4) 管体腐食調査

Figure-5 に示す調査対象部 1 m を現地で切断し持ち帰り、付着土状況、付着土除去後の状況、ブラスト後の管体腐食状況、孔食位置のスケッチ、孔食深さを測定した。本管は、中央部に接合部があった。

(i) 付着土状況

掘り上げ管の付着土状況をスケッチした。

(ii) 付着土除去後の管体表面状況

管体の付着土を水洗いにて除去後、管体表面の土壌、その他の固着物の状況をスケッチに示した。

(iii) 孔食深さ測定

測定方法は、Figure-6 に示すように管体を管軸方向に 10 cm ごとに区分して、かつ管周方向 4 分割して、Figure-7 に示す如く、そのメッシュ内で孔食の深いものを 5ヶ所デプスゲージにて測定し記録した。また、孔食の深いものについては、寸法を測定し記録した。ただし、デプスゲージは現存する表面に極力水平に当てて、その面内に含まれる局部腐食を計測するので、表面が水平でない場合、表面が荒れている場合や表面が平均腐食により減肉している場合には正確ではなくなる。

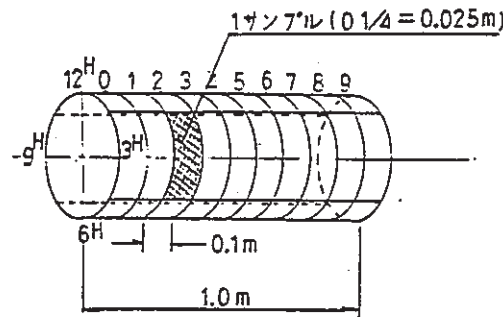


Figure-6 Method of Measuring from Investigated Pipe

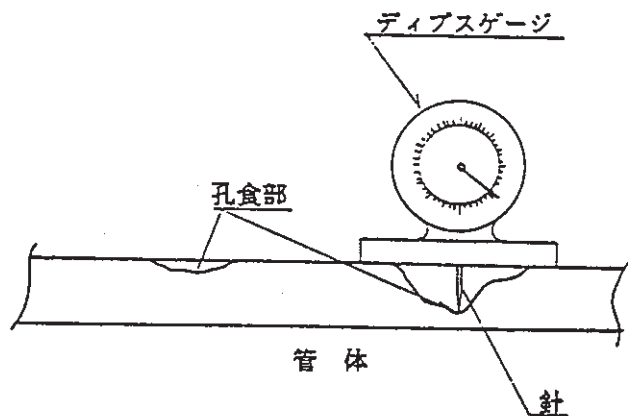


Figure-7 Measuring Method of Pit Depth

(5) 分 析

掘り上げた管について付着土を除去し、表面に固着している腐食生成物を採取してX線回折及びEPMA（電子線マイクロアナリシス）分析、錆量が多いものについて定量分析を行った。採取した腐食生成物は表面錆及び孔食内錆であるが、Figure - 8に示すごとく表面錆とは、表面にある厚い錆コブ層である。孔食内錆は、深い孔食の内部をえぐり取ったものである。また、管体から試験片を切り出して成分分析及び顕微鏡組織を調べた。さらに現地で採集した土壌について土壌の化学分析及び土壌中の鉍物分析を行った。Table - 3に土壌の分析内容を記す。

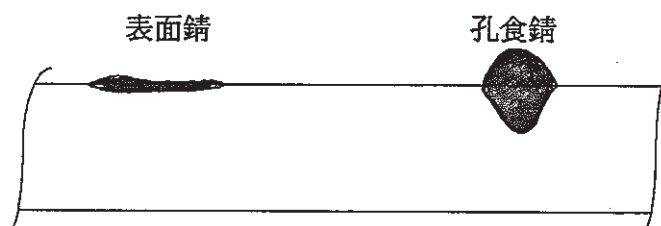


Figure- 8 Definition of Corrosion Products to be Measured.

i) 鋳鉄管の成分分析

管端から切り粉を取り、酸で溶解し、Cは赤外線吸収法、Siは二酸化珪素吸収法、Mnは原子吸光光度法、Pはモリブデン青吸光光度法、Sは赤外線吸収法、Alは原子吸光光度法によって分析した。これらの分析方法は、JIS G1201「鉄及び鋼の分析方法通則」及びJIS G1211～1215、1257によった。

ii) 顕微鏡組織

掘り上げ管の一部を切り取り、断面マクロ、ミクロ組織観察を行った。

iii) 腐食生成物のX線回折

表面錆と孔食内錆において行った。

錆をボールミキサーで粉碎し、ガラス試料板に充填し、X線回折装置で $2\theta : 0^\circ \sim 90^\circ$ を測定した。測定の終了したチャートをJCPDSのデータ集で検索した。

iv) 腐食生成物の E PMA 分析

電子ビームを固体表面に照射するとき、電子ビームの加速電圧が励起電圧を超えると、固体表面層を形成している元素特有の X 線が放出される（通常、10～30kV の加速電圧が用いられる）。電子ビームは電氣的にコントロールできる収束レンズおよび対物レンズによって細く絞ることにより、固体表面上の微小部分を分析した。

v) 腐食生成物の定量分析

腐食生成物を化学分析により定量分析を実施した。分析項目は E PMA で検出された成分について定量分析を実施した。各成分の分析方法を下記に示す。

- 1) CO_2 …… 試料に HCl を加えて発生する CO_2 ガスをシュレッターアルカリメトリー法で (S を除外して) KOH に吸収させ、吸収前後の重量差から CO_2 を求める
- 2) FeSO_4 …… イオンクロマトグラフで SO_4^{2-} を求めこれを FeSO_4 に換算する。
- 3) FeS …… $(\text{T}-\text{S})-(\text{S}_{\text{FeSO}_4})$ より FeS の S を求め、これを FeS に換算する。
なお、 $\text{T}-\text{S}$ は試料に過塩素酸カリウムを加え、硫化物を硫酸塩にして重量法で求める。
- 4) $\text{T}-\text{C}$ …… C , S 分析装置で求める。
- 5) Cl^- …… 試料を粉砕して純水で抽出し、抽出水中の Cl^- をイオンクロマトグラフ法で求める。
- 6) SiO_2 …… 重量法ただし試料が少ない場合は、モリブデン青吸光光度法
- 7) $\text{T}-\text{Fe}$ …… 滴定法

ただし、 CO_2 については錆量が少ないので分析できなかった。

vi) 土壌分析

土壌分析は D V G W の項目である pH、含水率、酸化還元電位、硫化物イオン、粘土分、塩化物、硫酸塩、交換性陽イオン、置換酸度を測定し、この他にイオン分、重炭酸イオン、M アルカリ度、SRB を Table-3 に示す土壌分析法により分析した。また、土の粒度試験、土の粒度分布を J I S A 1 2 0 1 ~ A 1 2 0 4 により行った。

vii) 土壌中の鉍物分析

試料を蒸留水により水ひして、粘土鉍物を分離採取し、X線回折による鉍物の同定を行った。

viii) 土壌中の鉍物の成分分析

試料を硝酸と硫酸にて溶解し、 FeO_3 、 MnO_2 、 Mg_2O 、 CaO を原子吸光法により、また、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 をフレイム光度法により、 SiO_2 は重量法によって土壌成分を分析した。固型分とは、全試料から含水量を引いた残分。強熱減量とは、固型分を 700°C から 800°C で強熱した場合の減少質量で、強熱減量は、土の物理的・力学的性質との関係が深い。

ix) 土壌中の硫酸塩還元バクテリアの試験

土壌中の試験菌を培養する方法（SRB試験）で行った。

Table-3 Methods of Soil Analyses

p H	<p>生土（または風乾土）に蒸留水を加え（普通、土壌30gに50ml）かきまぜるか振とうして30分以上放置する。測定前軽くかきまぜてけん濁状態とした液にガラス電極の薄膜球部を全部液中に浸し、約30秒経過後にpH指示値を読む。</p> <p>（土質試験法 JSF T7T）</p>
含水率	<p>土壌中に含まれる水分量をいい、次式で求める。</p> $\text{含水率 (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100$ <p>A：試料土 重量 (g) B：110℃で24時間乾燥した後の試料重量 (g)</p> <p>（土質試験法 JSF T7T）</p>
酸化還元電位	<p>前処理は、土壌を砕きふるい別けし、1mm以下の部分を用いる。土壌7gに蒸留水4mlを加え十分に混合し、電極を挿入して、30分放置する。遠心分離器にかけ、直ちに電位差を測定する。</p> <p>（土壌養分分析法の畑土壌の場合のBrown(1934)の方法）</p>
硫化物イオン	<p>前処理はJSF T-10の「土の水溶性成分試験のための試料調整法」により、採取土壌に蒸留水を加え振とうし、ろ液を浸出させる。この浸出液についてJIS K 0101の「工業用水試験方法」により硫化物イオンの項の滴定法で分析する。</p>
粘土	<p>メスシリンダーの内容物を標準網フルイ74μの上で水洗いし、フルイに残った部分を炉乾燥し、標準網フルイ840μ, 420μ, 250μ, 105μ及び74μによってふるい分け、各フルイの残留分の重量をはかり、74μより小さな粒度は比重浮ひょうによる粒度測定方法によった。</p> <p>（JIS A1204）</p>

塩化物	<p>塩化物含有量 = $(a - b) \times f \times 0.00071 \times 1 / C x \times 100 (\%)$</p> <p>a : 試料の滴定に要したN/50硝酸銀のml数 b : 空試験の滴定に要したN/50硝酸銀のml数 f : N/50硝酸銀の力価 0.00071 : N/50硝酸銀1mlに相当する塩素イオン (g) C : 試料採取量 (ml) x : 試験液1mlに対応する土の乾燥質量 (g) 塩化物含有量の値をmmol/kgに換算する。 (土質試験法 JSF T-10とT-12)</p>
硫酸塩	<p>土の乾燥質量当たりの硫酸塩含有量は次式により、SO₃含有量 (%) で表示する。</p> $SO_3 = \frac{z}{f \times 50} \times 0.833 \times 100 (\%)$ <p>ここに、 z : 試料液50ml中の硫酸イオン量 (g) f : 試験液1mlに対応する土の乾燥質量</p> $f = \frac{\text{乾燥土の質量 (g)}}{500 (ml) + \text{試料土の含有水量 (ml)}}$ <p>硫酸塩含有量の値をmmol/kgに換算する。 (土質試験法 JSF T-10とT-14)</p>
交換性陽イオン	<p>土壤実験法の陽イオン交換容量測定のための酢酸アンモニウム浸出液を用いて、交換性陽イオン測定に基づき、前処理し、各種の陽イオンの定量は、原子吸光度法でカルシウム、マグネシウム、を測定し、炎光光度法でカリウム、ナトリウムを測定する。</p> <p>(土壤実験法 交換性陽イオンの項)</p>
置換酸度	<p>風乾細土20gを内容100mlの三角フラスコにとり、1NKCl液50mlを加え、1時間振とう器で振とうする。乾燥ろ紙でろ過し、最初のろ液数mlは捨て、ろ液10mlを50mlの三角フラスコにとり、煮沸かして液中の炭酸ガスを追出した後、フェノールフタレインを指示薬として0.1ないし0.02NNaOH溶液で滴定し、その値から抽出液の1/2量を中和するに要するNaOH量を0.1NNaOHのml数に換算して(風乾土100gを供試した場合に換算し)置換酸度とする。</p> <p>(土壤実験法 置換酸度の項)</p>

<p>イオウ分</p>	<p><硫酸バリウム重量法> 試料を塩素酸カリウム及び塩酸と硝酸の混酸で分解し蒸発乾固する。塩酸で塩類を溶解し、不溶解残さをろ過する。ろ液は大部分の鉄をMIBKで抽出して除去し、主液として保存する。不溶解残さはふっ化水素酸処理をした後、炭酸ナトリウムで融解後主液に合わせる。わずかに共存する鉄(Ⅲ)を亜鉛で鉄(Ⅱ)まで還元した後、塩化バリウムで硫酸バリウムとして沈澱させ、これをこし分けて乾燥し、強熱してその質量をはかる。</p> $\text{硫黄 (\%)} = \frac{[(w_1 - w_2) - (w_3 - w_4)] \times 0.1874}{W} \times 100$ <p>ここに、 w_1 : 硫酸バリウムを含む白金るつぼの質量 (g) w_2 : 白金るつぼの質量 (g) w_3 : 空試験操作時の硫酸バリウムを含む白金るつぼの質量 (g) w_4 : 空試験操作時の白金るつぼの質量 (g) W : 試料はかり取り量 (g)</p> <p>(JIS M 8217)</p>																											
<p>重炭酸イオン</p>	<p>炭酸水素アルカリ度は水中の炭酸水素塩によるアルカリ度、炭酸アルカリ度は炭酸塩、水酸基アルカリ度は水酸化物によるアルカリ度である。これらのアルカリ度は下表によって求められる。</p> <p>炭酸水素アルカリ度・炭酸アルカリ度・水酸基アルカリ度算定表</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">滴定の結果</th> <th colspan="3">CaCO₃ (mg/ℓ)</th> </tr> <tr> <th>炭酸水素アルカリ度</th> <th>炭酸アルカリ度</th> <th>水酸基アルカリ度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P = 0</td> <td>T</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>P < 1/2T</td> <td>T - 2P</td> <td>2P</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>P = 1/2T</td> <td>0</td> <td>2P</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>P > 1/2T</td> <td>0</td> <td>2(T - P)</td> <td>2P - T</td> </tr> <tr> <td>P = T</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>T</td> </tr> </tbody> </table> <p>T : 総アルカリ度 P : フェノールフタレインアルカリ度</p> <p><フェノールフタレインアルカリ度 (Pアルカリ)> (原理) 本法は、フェノールフタレイン指示薬 (変色点 pH 約 8.3) を用いて、0.02N 硫酸で中和滴定する方法であり、水中の水酸化物並びに炭酸塩の 1/2 量が測定される。</p> $2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ $2\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{HCO}_3^-$ <p>(日本水道協会：上水試験方法、1985年版)</p>	滴定の結果	CaCO ₃ (mg/ℓ)			炭酸水素アルカリ度	炭酸アルカリ度	水酸基アルカリ度	P = 0	T	0	0	P < 1/2T	T - 2P	2P	0	P = 1/2T	0	2P	0	P > 1/2T	0	2(T - P)	2P - T	P = T	0	0	T
滴定の結果	CaCO ₃ (mg/ℓ)																											
	炭酸水素アルカリ度	炭酸アルカリ度	水酸基アルカリ度																									
P = 0	T	0	0																									
P < 1/2T	T - 2P	2P	0																									
P = 1/2T	0	2P	0																									
P > 1/2T	0	2(T - P)	2P - T																									
P = T	0	0	T																									

<p>Mアルカリ度</p>	<p>本法は、MR指示薬（変色点pH約4.8）を用いて、0.02N硫酸で中和滴定する方法であり、水中のアルカリ分全部が中和される。</p> $\text{OH}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow \text{HCO}_3^-$ $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ <p>検水の水相が赤紫色になるまで、0.02N硫酸で滴定し、ここに要した硫酸のmL数(a)から、次式によって試料1ℓ中の総アルカリ度（Mアルカリ度）のmg量を算出する。</p> $\text{Mアルカリ度 (CaCO}_3 \text{ mg / ℓ)} = a \times \frac{1,000}{\text{検水 mL}} \times 1$ <p>（日本水道協会：上水試験方法、1985年版）</p>																																													
<p>S R B 試験</p>	<p><試験方法> アプリケーターを蒸留水で湿らせて、試験土中にさし込み、そのアプリケーターを寒天の入った試験管に差し込み、上に油を添加し、CO₂ 錠剤を入れ栓をする。 この試験管を定期的に観測し、下に示すチャートに照合して比較評価する。</p> <table border="1" data-bbox="438 913 1348 1299"> <thead> <tr> <th rowspan="2">イソキュベーション日数</th> <th colspan="5">mL 当たりの還元菌のカウント*</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>試験管の外観</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>完全な黒色</td> <td>10⁵個 <</td> <td>10⁶個 <</td> <td>10⁶個 <</td> <td>10⁶個 <</td> <td>10⁶個 <</td> </tr> <tr> <td>アプリケーター回りに狭い黒色領域</td> <td>10⁵個 ≤</td> <td>10⁴個 ≤</td> <td>10³個 ≤</td> <td>10²個 ≤</td> <td>10¹個 <</td> </tr> <tr> <td>無反応</td> <td>10⁵個 ></td> <td>10⁴個 ></td> <td>10³個 ></td> <td>10²個 ></td> <td>10¹個 ></td> </tr> </tbody> </table> <p>* この数字は、Biosan Labs. において、嫌気性プレート上のカウントとして調べた。なお、培養した試験菌は <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> [ATCC #7757 による]</p> <p><定量結果の解釈></p> <table border="1" data-bbox="438 1563 1348 1877"> <thead> <tr> <th>硫酸塩還元菌個数/ mL</th> <th>解釈・判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10⁵ 個 (=100,000個)/ mL 以上</td> <td>重度の汚染</td> </tr> <tr> <td>10³~10⁴ 個 (=1,000個)/ mL 以上</td> <td>中程度の汚染</td> </tr> <tr> <td>10²~10³ 個 (=100個)/ mL 以上</td> <td>軽度の汚染</td> </tr> <tr> <td>10¹ 個 (= 10個)/ mL 以下</td> <td>一般には無汚染と見られる</td> </tr> </tbody> </table>	イソキュベーション日数	mL 当たりの還元菌のカウント*					1	2	3	4	5	試験管の外観						完全な黒色	10 ⁵ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <	アプリケーター回りに狭い黒色領域	10 ⁵ 個 ≤	10 ⁴ 個 ≤	10 ³ 個 ≤	10 ² 個 ≤	10 ¹ 個 <	無反応	10 ⁵ 個 >	10 ⁴ 個 >	10 ³ 個 >	10 ² 個 >	10 ¹ 個 >	硫酸塩還元菌個数/ mL	解釈・判定	10 ⁵ 個 (=100,000個)/ mL 以上	重度の汚染	10 ³ ~10 ⁴ 個 (=1,000個)/ mL 以上	中程度の汚染	10 ² ~10 ³ 個 (=100個)/ mL 以上	軽度の汚染	10 ¹ 個 (= 10個)/ mL 以下	一般には無汚染と見られる
イソキュベーション日数	mL 当たりの還元菌のカウント*																																													
	1	2	3	4	5																																									
試験管の外観																																														
完全な黒色	10 ⁵ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <	10 ⁶ 個 <																																									
アプリケーター回りに狭い黒色領域	10 ⁵ 個 ≤	10 ⁴ 個 ≤	10 ³ 個 ≤	10 ² 個 ≤	10 ¹ 個 <																																									
無反応	10 ⁵ 個 >	10 ⁴ 個 >	10 ³ 個 >	10 ² 個 >	10 ¹ 個 >																																									
硫酸塩還元菌個数/ mL	解釈・判定																																													
10 ⁵ 個 (=100,000個)/ mL 以上	重度の汚染																																													
10 ³ ~10 ⁴ 個 (=1,000個)/ mL 以上	中程度の汚染																																													
10 ² ~10 ³ 個 (=100個)/ mL 以上	軽度の汚染																																													
10 ¹ 個 (= 10個)/ mL 以下	一般には無汚染と見られる																																													

1.2. 調査結果

1.2.1 地表面計測結果（参考測定）

(1) 笹野台

舗装剥離後のプローブによる測定結果をTable-4 に示す。

土壌は柔らかく地表面下1m位までプローブを挿入した。

Table - 4 Results of Surface Soil Measurements at Sasanodai - 1

項目	土壌比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	プローブ腐食 速度 (mm/y)	プローブ分極 抵抗 (Ω)	プローブ自然 電位 (mV)	管対地 電位 (mV)	酸化還元電位 (Eh 換算値) (mV)	pH
東側	6,170	—	210	- 735	—	+390 (220)	6.5
中央	3,130	0.089	320	- 833	—	+390 (220)	6.5
西側	3,080	0.116	245	- 807	—	+460 (290)	6.5

() は計器の読み値

1.2.2 掘削後計測結果

(1) 笹野台

調査は、管の上に土壌を残して調査した。

Photo-1 に、12H方向からの管周囲の土壌の状況を示す。管の周囲は黒色の粘土で覆われていた。3H方向に30cm位離れてガス管が埋設されていたため、9H方向（右側）は山砂に入替えられていた。ただし、管壁左側（9H方向）は、黒い粘土が10cm位あってその向う側が山砂となっていた。粘土は黒色の粘土であった。

掘り上げ部中央に継手があった。測定結果をTable-5に示す。この結果をみると、上流側の12Hのデータのうち、比抵抗の測定結果値が他の値より飛び抜けて低い。これはプローブが管に近接し過ぎて低くなったものと考えられ、この12Hの値は参考値として使用しない。

- ① 管周方向については、土壌比抵抗はほぼ均一で 2,340～3,700 $\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、平均で 2,914 $\Omega \cdot \text{cm}$ と一般粘土の値である。
- ② pHは平均で 6.6 とほぼ中性である。
- ③ プローブ分極抵抗は平均では 400 Ω と粘土としてはやや高い。
- ④ プローブ腐食速度は 0.082 mm/y と、粘土としては低い値である。

- ⑤ プローブ自然電位は平均で \ominus 812mVと一般土壌より卑な電位となっている。管対地電位も平均は \ominus 573mVと铸铁管としては卑な電位である。
- ⑥ 酸化還元電位は平均値で+ 54 mVを示し、比較的均一な強い還元性環境である。
- ⑦ 湧水は掘削時はほとんどなかったが、除々に湧き出し調査完了時には10 cm程度の深さの量となっていた。

以上の結果をまとめてみると、土壌の比抵抗は粘土の値であるがやや高く、管対地電位とプローブ自然電位の値が卑な値であることから、酸素の少ない還元性の環境であることを示している。酸化還元電位も還元性環境であることを示している。

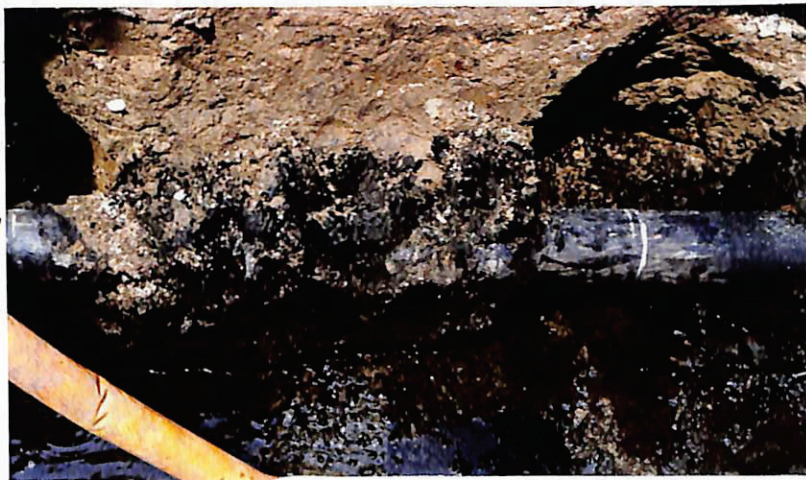


Photo-1 Condition of Soil Around Pipe (Sasanodai)

Table-5 Results of Measurement at Sasanodai after Excavation

	測定位置	土壌比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	腐食速度 (mm/y)	70-7分極抵抗 (Ω)	70-7自然電位 (mV)	管対地電位 (mV)	酸化還元電位 (Eh 換算値) (mV)	pH
上流側	1 2 H	610 *	1.114 *	—	-586 *	-580	+ 24(-160)**	6.6
	6H	3,000	0.070	460	-828	-580	- 16(-180)**	6.4
	平均値	3,000	0.070	460	-826	-580	+ 4(-170)**	6.5
中央部	1 2 H	2,450	0.054	600	-810	-571	- 10(-180)**	6.5
	6H	3,080	0.075	400	-814	-572	+100(-100)**	7.0
	平均値	2,765	0.065	500	-812	-572	+ 45(-140)**	6.8
下流側	1 2 H	2,340	0.085	340	-811	-567	+ 50(-120)**	6.5
	6H	3,700	0.128	200	-797	-566	+180(+ 10)**	6.5
	平均値	3,020	0.107	270	-804	-567	+115(- 55)**	6.5
総 平 均		2,914	0.082	400	-812	-573	+ 54(-122)**	6.6
標 準 偏 差		489	0.025	132	10	6	+ 68(- 66)**	0.2
湧水の有無 : 最初にじむ程度 (暫くして10cm程度) * : 異常値と考えられ参考値とする (平均値には加えない) 埋設深さ : 1 m 0 0 cm ** : () は生データの直接読み値 呼び径 : 1 5 0 ϕ メカニカル継手 土の温度 : 2 4 $^{\circ}\text{C}$ (天候 晴れ) , 気温 3 4 $^{\circ}\text{C}$								

1.2.3 管体腐食調査結果

(1) 笹野台

(i) 付着土状況

管付着土が管周囲に付着した状態で調査した。

笹野台-1の付着土状況をPhoto -2 に示す。この写真に示す如く、ほぼ全周にわたって黒い粘土が付着していた。ただし、3Hの中央長手方向にみぞ状に付着土の無い部分がみられた。12Hは全面に黒い粘土質の土が付着していた。

なお、笹野台-1の付着土状況のスケッチをFigure -9 に示す。



a (Sasanodai 12H)



b (Sasanodai 6H)

Photo -2 Outview of Pipe (Sasanodai)

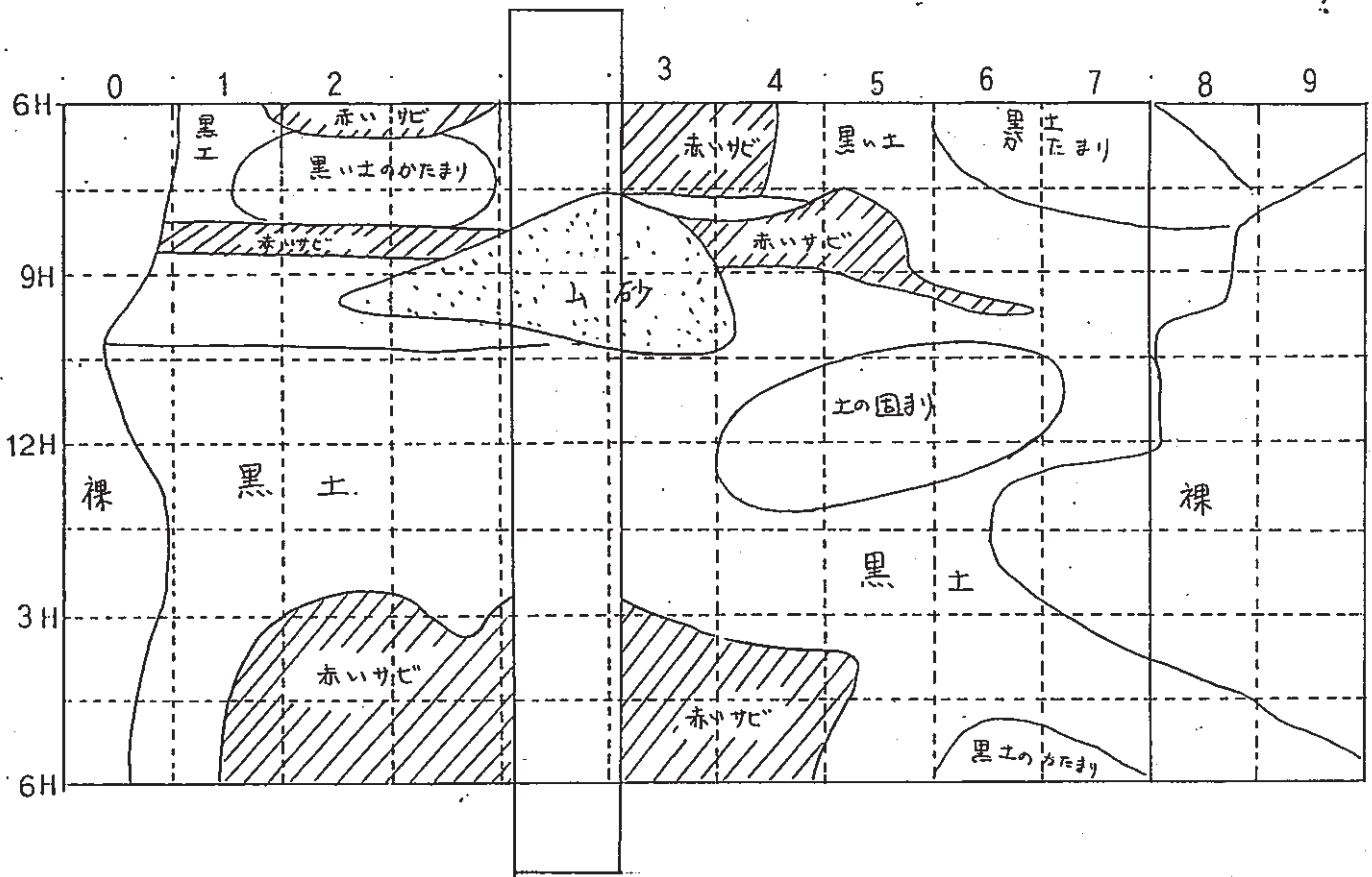


Figure -9 Sketch of Adhering Soile (Sasanodai)

(ii) 付着土除去後の管体状況

笹野台の付着土除去後の管体状況の写真をPhoto -3に示し、スケッチをFigure -10に示す。笹野台-1は管天側(3H~12H ~9H)に付着土や錆コブが無く、滑らかなつやのある管体表面が露出した。9Hの長手方向は赤いサビコブの付着が見られた。また、3Hから6Hのフランジ前後部にも赤い錆コブがみられた。6Hの長手方向は黒い錆コブがみられた。この黒い錆コブは赤い錆コブ周囲にも見られた。



1 2 H



1 2 H



6 H



9 H



6 H

Photo -3 After Removal of Adhering Soil(Sasanodai)

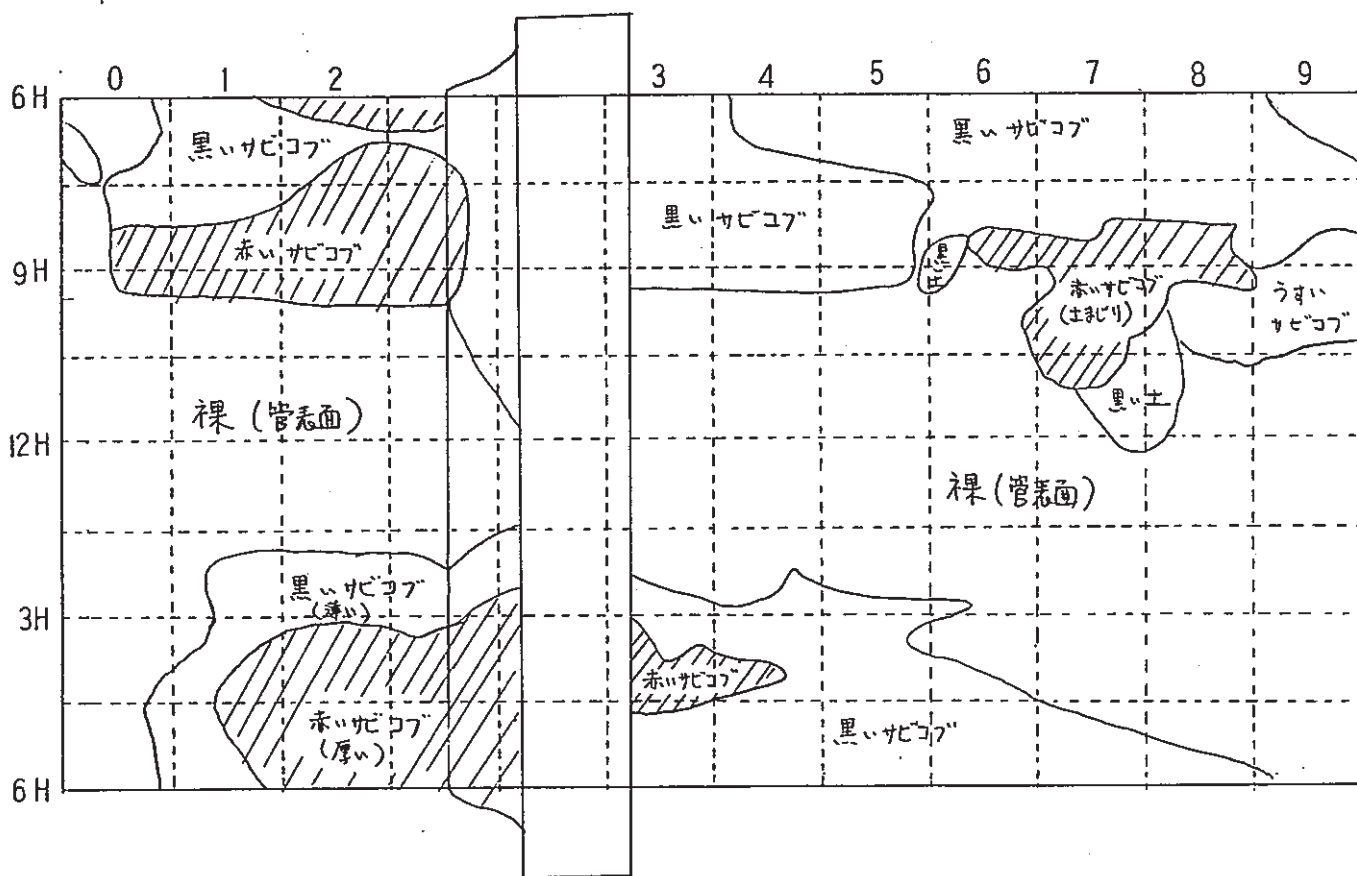


Figure -10 Skech after Removal of Adhering Soil (Sasanodai)

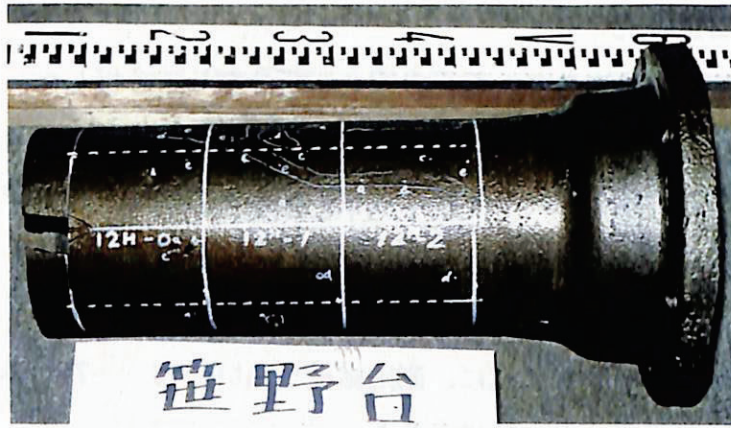
(iii) 孔食深さ測定及び腐食状況

管体はフランジ部が中央にあり、前後の管を切断分割して分析した。上流側を笹野台-1（長さ=0.6m）、下流側のフランジ付き管を笹野台-2として調査した。フランジの押輪には61年の鋳型字があったので、1961年（昭和36年）である。管体表面をブラスト後各メッシュ内（10cm長×1/4周）毎に最大孔食深さ5点（a～e）を測定した。

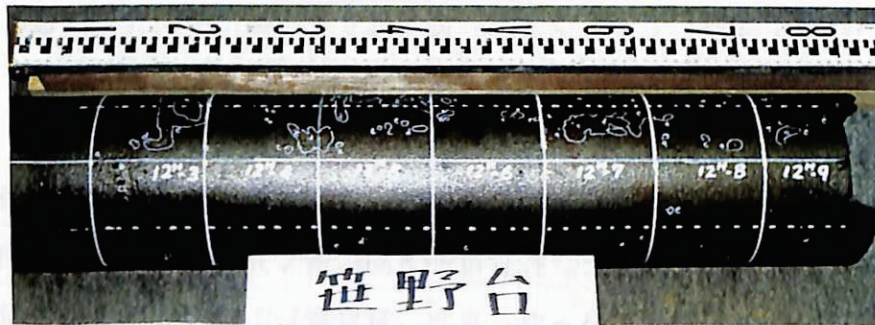
ブラスト後の管体状況をPhoto-4に、測定結果をTable-6、-7に示した。また、孔食の測定位置をFigure-11に示した。

以上の結果を整理してメッシュ毎、またはリング毎に平均孔食深さ、最大孔食深さ、最大値をまとめてTable-8とTable-9に示した。

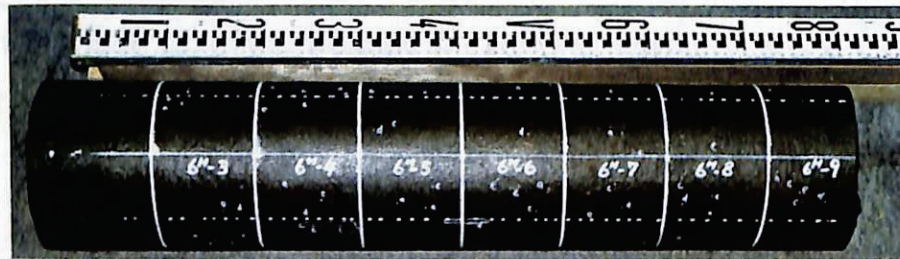
これによると、笹野台1-1の最大孔食深さは、メッシュNo. 12H-0の1.6mmであった。次はメッシュNo. 9H-1の1.3mmであった。各メッシュの最大孔食深さの平均は、0.91mmであった。孔食は9H方向に多く見られた。他の方向は少なく、孔食深さは、1.0mm程度であった。また、笹野台1-2の最大孔食深さは、メッシュNo. 9H-3の1.9mmであった。次は、メッシュNo. 12H-3の1.8mmであった。各メッシュの最大孔食深さの平均は、0.93mmと小さかった。孔食は管上側から管左側（11H方向管～9H方向）にかけて長手方向にみられた。一方3Hと6Hの長手方向にはほとんど腐食はみられなかった。



a (Sasanodai 1-1 12H)



b (Sasanodai 1-2
12H)



c (Sasanodai 1-2 6 H)



d (Sasanodai 1-2 12H)

Photo- 4 Corroded Surface of Pipe after Blasting (Sasanodai)

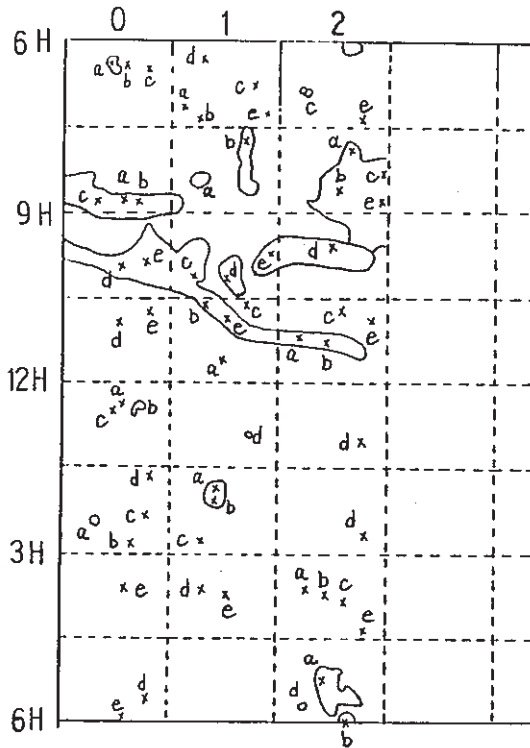
Table -6 Results of Measurement of Pit Depths (Sasanodai 1-1)
(Unit : mm)

メッシュ	a	b	c	d	e
12H-0	1.0	1.6	0.7	0.4	0.5
12H-1	0.3	0.7	0.6	0.8	0.5
12H-2	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4
3H-0	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2
3H-1	1.1	0.7	0.4	0.3	0.3
3H-2	0.6	0.8	0.6	0.6	0.4
6H-0	0.6	0.4	0.2	0.3	0.3
6H-1	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5
6H-2	0.7	0.6	1.0	0.9	0.9
9H-0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
9H-1	1.3	0.8	1.0	0.7	0.8
9H-2	0.8	0.8	1.1	1.0	0.4

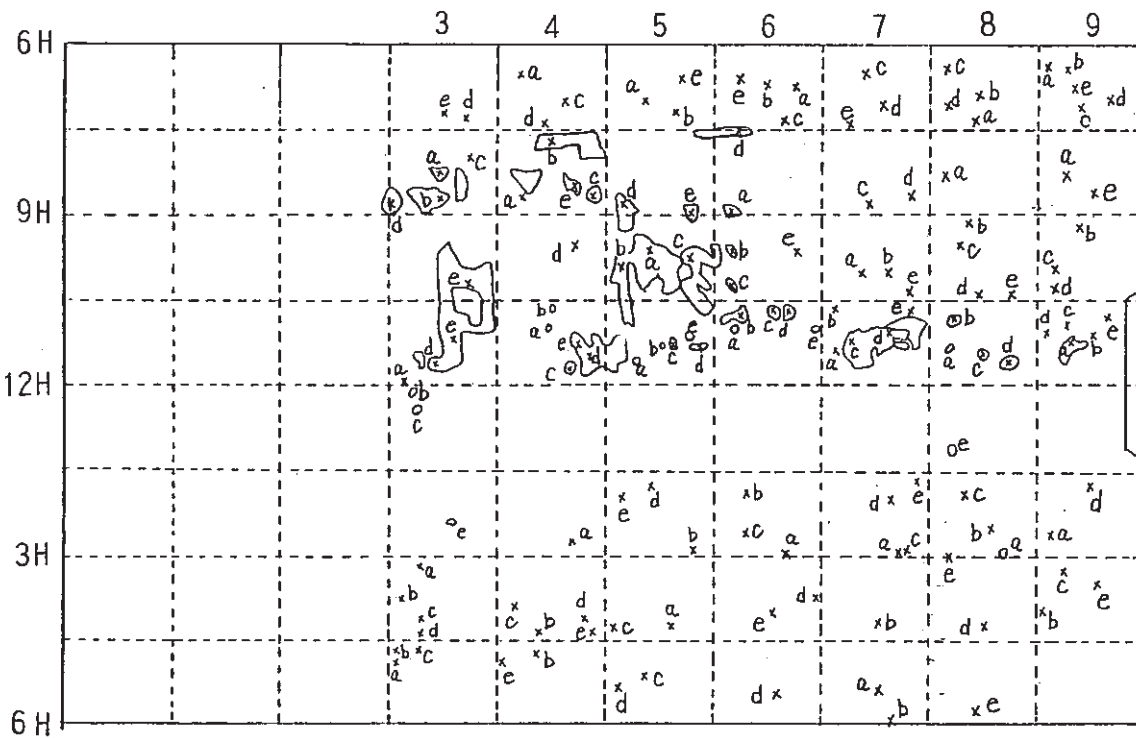
Table -7 Results of Measurement of Pit Depths (Sasanodai 1-2)

(Unit : mm)

メッシュ	a	b	c	d	e
12H-3	1.2	1.8	1.8	0.8	0.6
12H-4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.4
12H-5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4
12H-6	0.3	0.3	0.5	0.3	0.4
12H-7	1.4	0.7	1.0	0.9	1.1
12H-8	1.1	0.6	1.0	0.5	0.6
12H-9	0.8	0.3	0.4	0.3	0.5
3H-3	0.8	0.9	0.7	0.8	0.3
3H-4	0.8	0.3	0.2	0.2	0.3
3H-5	0.3	0.7	0.3	0.2	0.2
3H-6	1.4	0.3	0.5	0.4	0.5
3H-7	1.6	0.3	0.4	0.2	0.4
3H-8	0.6	0.3	0.4	0.2	0.4
3H-9	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3
6H-3	1.0	1.0	0.6	0.3	0.4
6H-4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2
6H-5	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4
6H-6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4
6H-7	0.6	0.6	0.3	0.5	0.5
6H-8	0.3	0.6	0.3	0.3	0.5
6H-9	0.7	0.5	0.4	0.5	0.3
9H-3	1.9	0.8	0.9	1.2	0.4
9H-4	0.6	0.6	1.2	1.1	0.8
9H-5	0.4	0.5	0.7	1.4	1.2
9H-6	1.4	0.7	0.7	1.1	0.5
9H-7	1.2	1.0	0.6	0.5	0.3
9H-8	0.4	0.7	0.3	0.6	0.9
9H-9	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3



a (Sasanodai 1-1)



b (Sasanodai 1-2)

Figure -11 Sketch of a Corroded surpave of Pipe after Brasting (Sasanodai)

Table - 8 Summary of Measured Depths of Pit (Sasanodai 1-1)

最大 孔食 深さ	長手方向 メッシュNo.		0	1	2	長手方向 全メッシュNo. の平均値	長手方向 全メッシュNo. の最大値
	周メ 方ッ 向シ ュ 区 分	1 2 H	1.6	0.8	0.5	0.97	1.6
		3 H	0.5	1.1	0.8	0.80	1.1
		6 H	0.6	0.7	1.0	0.77	1.0
		9 H	0.9	1.3	1.1	1.10	1.3
周方向平均値		0.90	0.98	0.85	—	—	
平均最大孔食深さ						0.91	
最大孔食深さの最大値						1.6	

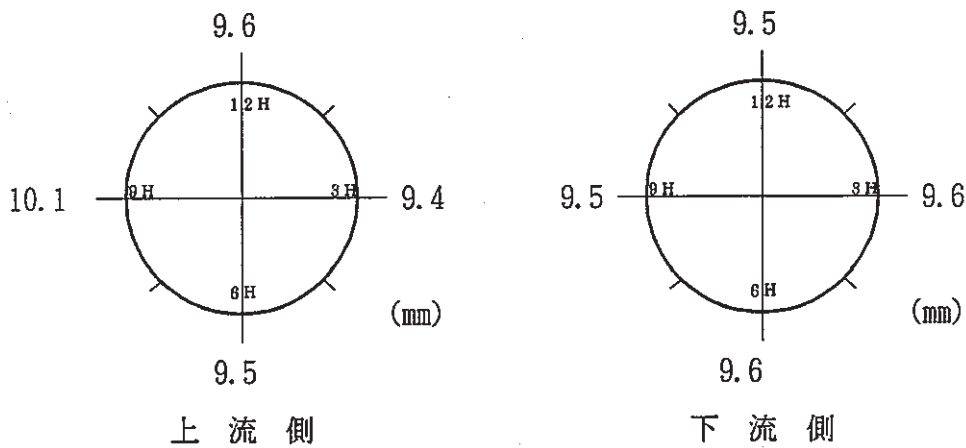
Table - 9 Summary of Measured Depths of Pit (Sasanodai 1 - 2)

最大 孔食 深さ	長手方向 メッシュNo.		3	4	5	6	7	8	9	長手方向 全メッシュNo. の平均値	長手方向 全メッシュNo. の最大値
	周メ 方ッ 向シ ュ 区 分	1 2 H	1.8	0.6	0.5	0.5	1.4	1.1	0.8	0.96	1.8
		3 H	0.9	0.8	0.7	1.4	1.6	0.6	0.4	0.91	1.6
		6 H	1.0	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.61	1.0
		9 H	1.9	1.2	1.4	1.4	1.2	0.9	0.6	1.23	1.9
周方向平均値		1.4	0.78	0.75	0.95	1.20	0.80	0.63	—	—	
										平均最大孔食深さ	0.93
										最大孔食深さの最大値	1.9

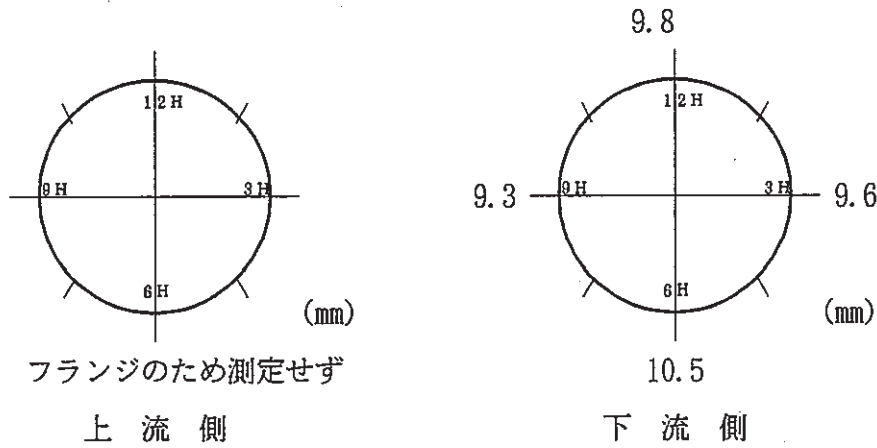
(iv) 元肉厚測定結果

笹野台 1-1 は両端部で測定し、笹野台 1-2 は上流側端部において測定した。このとき、測定箇所は腐食がないところとした。測定器はノギスを使用した。この結果をFigure -12に示す。管厚は笹野台 1-1 で 9.4mm~10.1mm、笹野台 1-2 で9.3mm ~10.5mmの範囲にあり、これらの平均値としては、笹野台1-1 では上流側で9.65mm、下流側で9.55mm、笹野台1-2 の下流側で 10.3mmであった。

元肉厚としては最大値を採用し、10.5mmとする。



(Sasanodail-1)



(Sasanodail-2)

Figure -12 Results of Measurement of Original Wall Thickness (Sasanodai)

(v) 分析

① 成分分析

掘上げ管の成分を化学分析した結果を Table -10 に示す。この分析によると、炭素含有量が3.78%と3.75% であることから、材質は黒鉛鑄鉄である。

② 顕微鏡組織

掘上げ管の管端部からFigure -13に示す位置で1-1と1-2のテストピースを切り取り、断面 マクロ、ミクロ組織観察を行った。1-1,1-2 の観察位置をFigure -14に示し、1-1 の組織の写真をPhoto-5, Photo-6 に示し、1-2 の組織の写真をPhoto-7, Photo-8 に示す。

管の材質は 共晶タイプの黒鉛鑄鉄である。これは製造時の急冷により生じたと考えられる。片状黒鉛鑄鉄と同様のものである。

管表面の泥を除去したサンプルであるが、表面にうすく均一な黒鉛層がみられ、腐食部の一部で組織内部への黒鉛化がみられる。

③ 生成錆の分析

掘上げ管外面の表面錆と孔食内錆について、X線回折を行った結果をTable -11 , EPMAを行った結果をTable -12 に示し、表面錆(6H)のX線回折チャートをFigure - 15~Figure-18 に示し、孔食内錆(9H)のX線回折チャートをFigure - 19 とFigure-20 に示す。EPMA分析のチャートをFigure-21 , 22 に示す。EPMAで検出された元素をTable -12 に示す。また、錆の成分について定量分析した結果をTable -13 に示す。表面錆の腐食生成物のX線回折では、 α -FeO(OH), Fe_3O_4 , γ - Fe_2O_3 が検出された。また、土壌成分である SiO_2 , $CaSO_4$, Sが検出され、土壌の混在した錆であることがわかる。また、孔食内錆のX線回折分析は、 $FeCO_3$, FeS , Fe_3O_4 が錆として検出された。表面錆は一般的な錆の結晶であるが、孔食内錆は $FeCO_3$, FeS のSRBに関する結晶が検出されており、SRBによる腐食が考えられる。土壌成分である SiO_2 は孔食内で痕跡程度で検出された。つぎに定量分析では、表面錆のT-Sは全体の量の25%であったが、 FeS はT-Feの80%を占めた。つぎにT-Cが20%であることから、黒鉛化腐食を示している(Fe分が流失

して成分に比べ少ない)。孔食内錆は、T-Feが全体の40% を占め、試料の半分が錆であった。FeSはT-Feの1/3であった。

④ 土壌分析

埋設管周囲土において、管体から10cm離れたところの管の上側と下側の土壌について分析した結果をTable -14 に示す。特に粘土分については、Figure -23 に土の粒度試験、Figure -24 に土の粒度分布の三角座標を示す。

この結果に示す如く、採取土壌においては、管上(44%)、管下(45%)とも粘土分が多く、粘土であることを示している。また、硫化物イオンが32mg/Kg(管上)、57 mg/Kg(管下)と非常に多い。塩化物は一般土壌と同じ位であるが、硫酸塩はかなり多い。交換性陽イオンも多い。硫化物イオン、 SO_4^{2-} イオンが多いことから、腐植土と考えられる。

⑤ 土壌中の鉱物分析(動燃殿からの御提供)

X線回折により土壌中の鉱物分析を行った測定チャートをFigure -25 と Figure -26 に示し、X線回折の土壌中の鉱物分析結果をTable -15 に示す。

水比が不完全のためと考えられる石英や長石が検出されている。粘土鉱物と同定されたものはカオリン鉱物(加水ハロイサイト、ハロイサイト、スメクタイト)である。

⑥ 土壌中の鉱物の成分含有量の分析

管天場の土壌において、成分含有量を調べた結果をTable 1-16に示す。

一般土壌の成分に比べ強熱減量が多く、有機物が多いことを示している。成分間の比率は一般土壌と同一である。

⑦ 硫酸塩還元バクテリアの試験

試験結果をTable -17 に示す。土の分析結果からみるとかなりSRBが繁殖しやすい環境であるが、 10^5 個以下と非常に多い値とはならなかった。

Table -10 Chemical Composition of Pipe (Sasanodai)

資料No.	成分	C	Si	Mn	P	S
1-1	測定値(%)	3.78	1.64	0.41	0.11	0.12
1-2	測定値(%)	3.75	1.60	0.43	0.12	0.13

Table -11 X-ray Diffraction Analyses of Rust (Sasanodai)

錆の成分	FeCO ₃	α-FeO(OH)	Fe ₃ O ₄	γ-Fe ₂ O ₃	FeSO ₃	FeS	その他
表面錆	—	◎	◎	◎	—	—	◎(CaSO ₄)
孔食内錆	◎	—	◎	—	—	◎	○(SiO ₂)

判定 ◎ 検出
○ こん跡
— なし

<分析条件> 装置 : PHILIPS製 APD1700

管球ターゲット: Cu(Kα 線)

管電圧(KV) : 40

管電流(mA) : 50

測角範囲(deg) : 10 ~ 90

モノクロメーター使用

検出器走査速度(deg/min): 3

サンプリング間隔(deg) : 0.05

発散スリット(deg) : 1

受光スリット(mm) : 0.3

Table -12 EPMA Analyses of Rust (Sasanodai)

	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ag	Ti	Cu	Mg	Cr
表面錆 (6H)	○	◎	○	○	◎	◎	○	◎	—	○	○	◎	—	○	—	—	—
孔食内錆	○	◎	—	○	◎	◎	○	◎	—	△	○	◎	—	○	○	○	○

◎: ピーク強度 大

○: ピーク強度 小

△: 他元素の高次線と重なる

<分析条件>

加速電圧: 15KV

試料電流: 2×10^{-7} A

取り込み時間: 0.5 Sec

ビーム径: 100 μmφ

使用した結晶: TAP, PET, LIF, LDI 1

Table -13 Results of Quantitative Analyses of Rust (Sasanodai)

(Unit:%)

錆の成分	FeS	FeSO ₄	CO ₂	T-Fe	T-C	Cl ⁻	Ca
表面錆 (6H)	18.44	3.24	*	24.85	20.32	<0.01	7.41
孔食内錆 (12H)	13.25	0.88	*	47.80	7.61	<0.01	5.02

表面錆コブ 74.26 %

孔食内錆 74.56 %

*は試料が少ないため分析不可

Table -14 Results of Compositional Analyses of Soil (Sasanodai)

項目	単位	管の上側	管の下側
pH	—	6.1	6.1
含水率	%	50	52
酸化還元電位	mV	305	303
硫化物イオン	mg/kg	32	57
粘土分	%	44	45
塩化物	mmol/kg	0.48	0.51
硫酸塩	mmol/kg	4.1	5.5
交換性陽イオン	mmol/kg	330	380
置換酸度	mmol/kg	0.6	0.2
イオウ分	%	0.01 以下	0.01 以下
重炭酸イオン	mmol/kg	0.66	0.59
Mアルカリ度	mmol/kg	0.54	0.49

Table 15 Results of X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai)

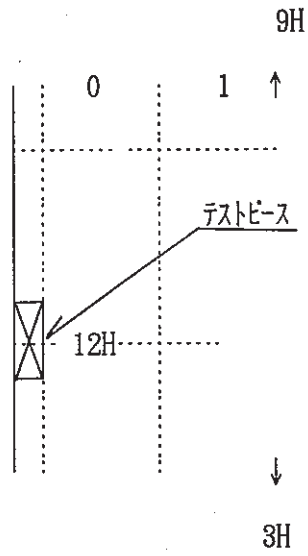
試料名	XRD定性分析同定結果
	カオリン鉱物(加水ハロイサイト) カオリン鉱物(ハロイサイト, スメクタイト) 膨潤性緑泥石 雲母類, 長石類, 石英

Table -16 Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Sasanodai, underside of Pipe)

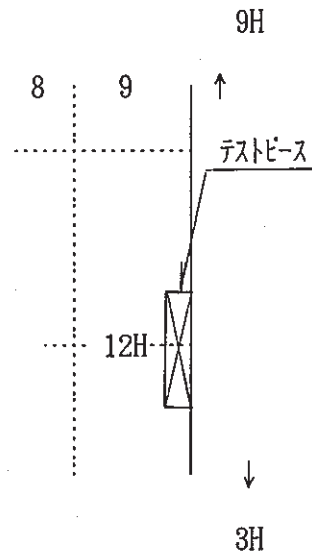
項目	単位	管上の土	管下の土
		分析値	分析値
Fe ₂ O ₃	%	12	11
MnO ₂	%	0.16	0.19
CaO	%	1.2	1.1
MgO	%	1.1	1.0
K ₂ O	%	0.28	0.29
Na ₂ O	%	0.50	0.51
SiO ₂	%	39	40
Al ₂ O ₃	%	17	18
TiO ₂	%	1.1	1.1
固型分	%	50	48
強熱減量	%	20	20

Table -17 Results of SRB Tests

項目	単位	管の上	管の下
SRBの数	個/ml	10 ⁴ 以下	10 ⁵ 以下

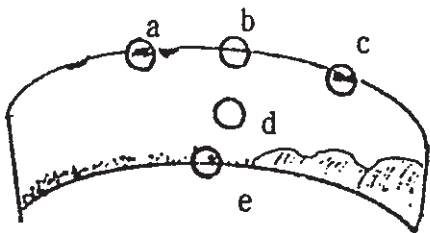


(Sasanodai 1-1)

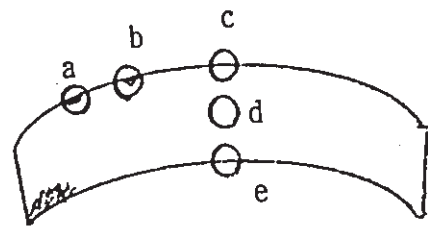


(Sasanodai 1-2)

Figure -13 Cutting Position of Test piece (Sasanodai)



(Sasanodai 1-1)

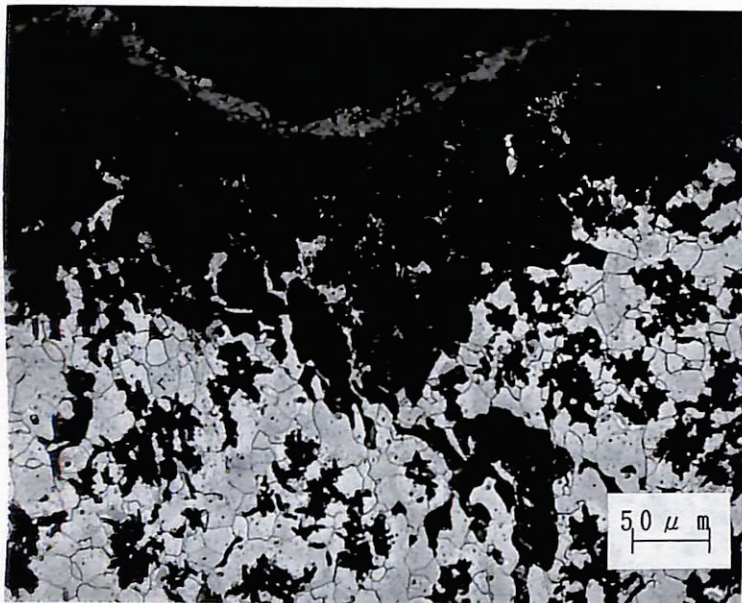


(Sasanodai 1-2)

Figure -14 Position of Metallography (Sasanodai)

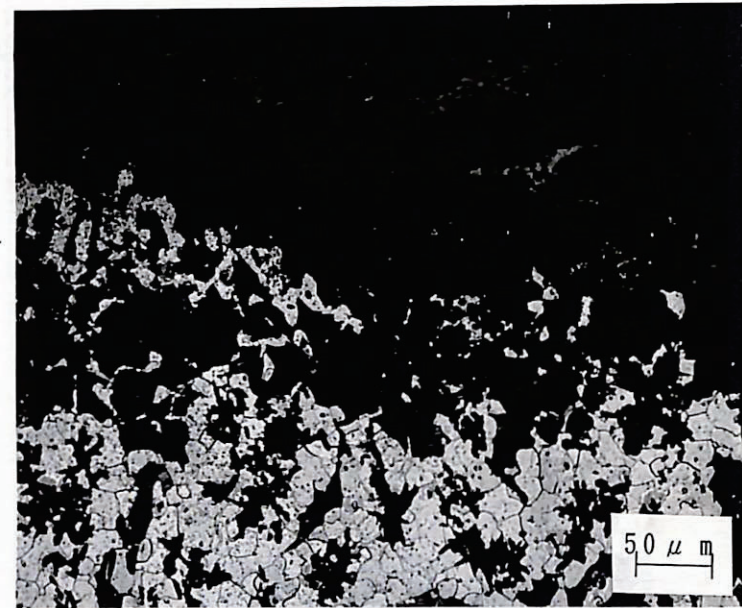
a

× 200



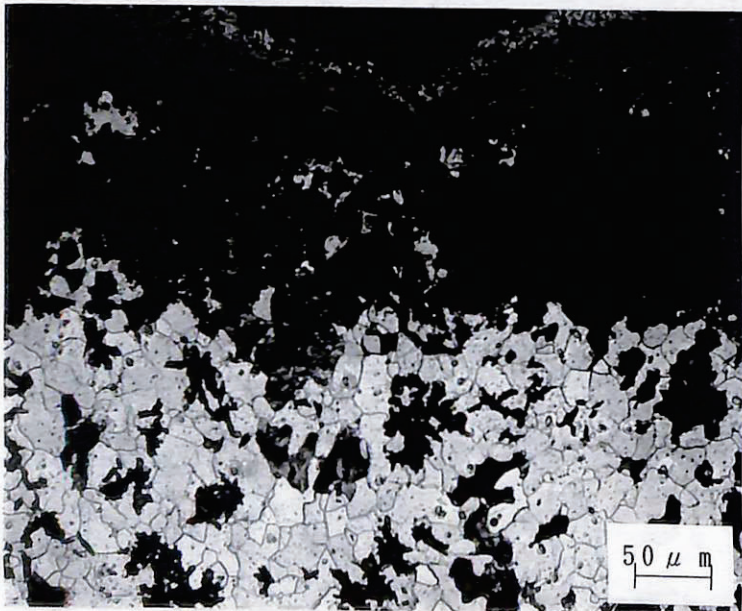
b

× 200



c

× 200



d

× 200

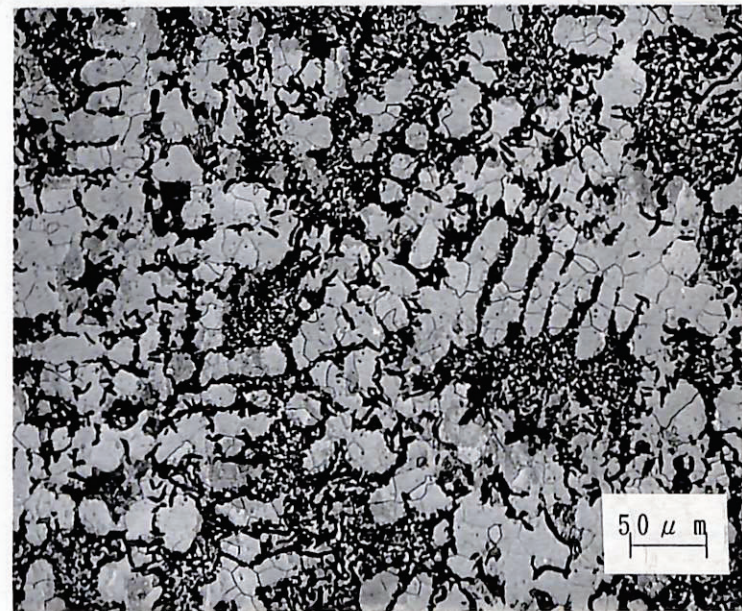


Photo -5 Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-1)

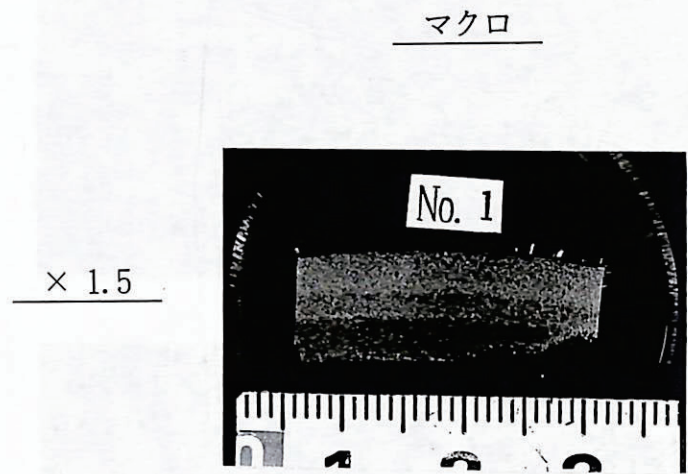
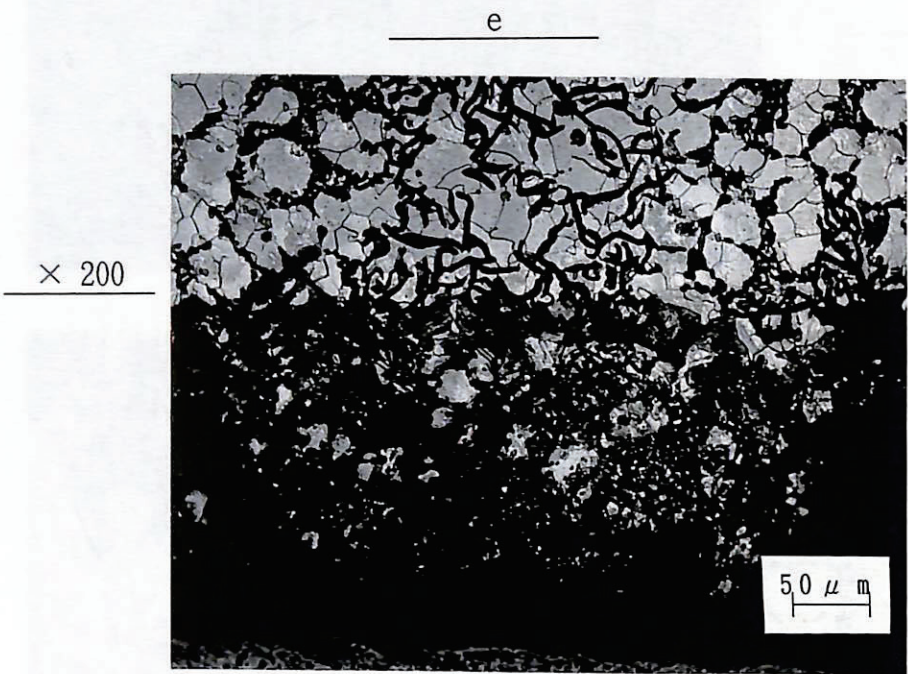
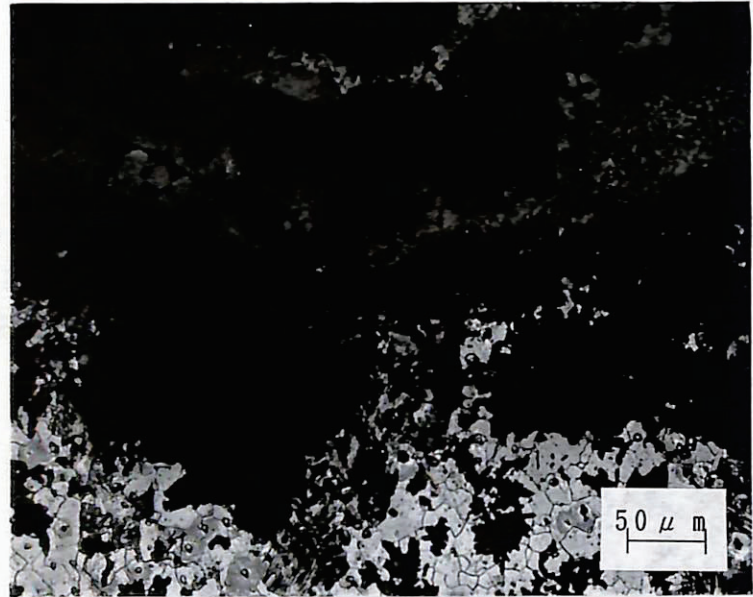


Photo -6 Micro and Macro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-1)

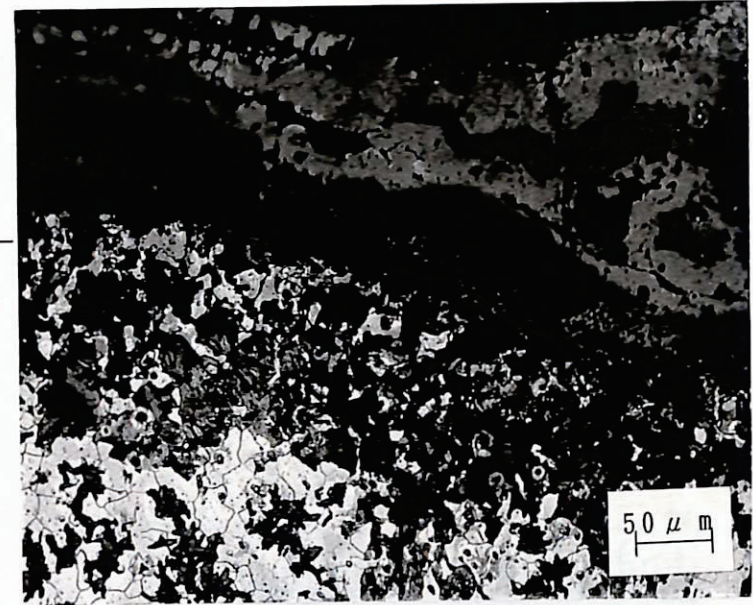
a

× 200



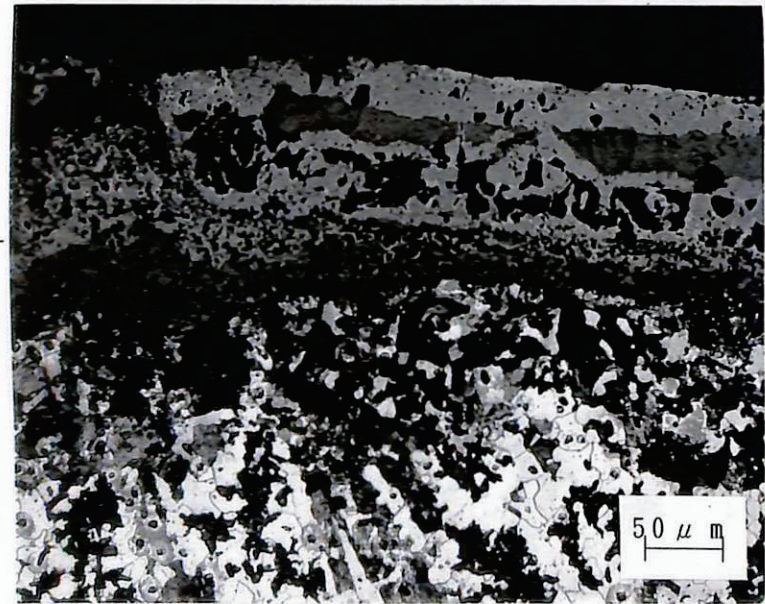
b

× 200



c

× 200



d

× 200

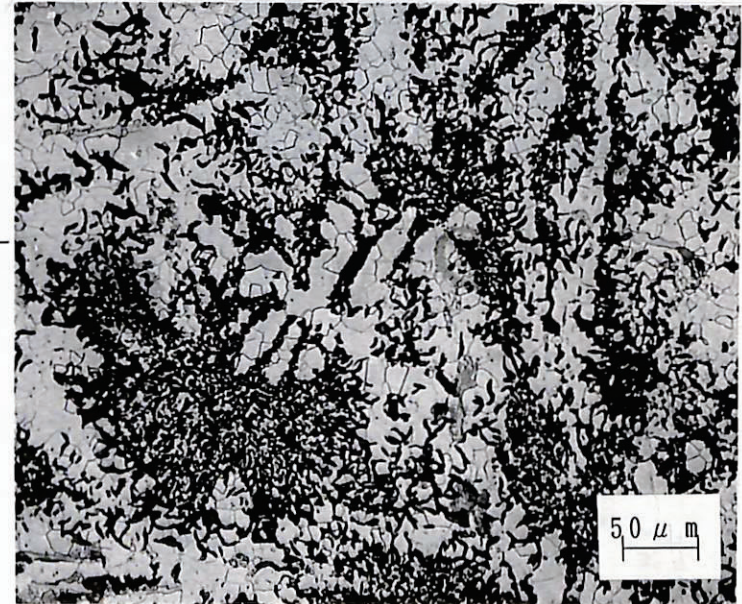


Photo -7 Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-2)

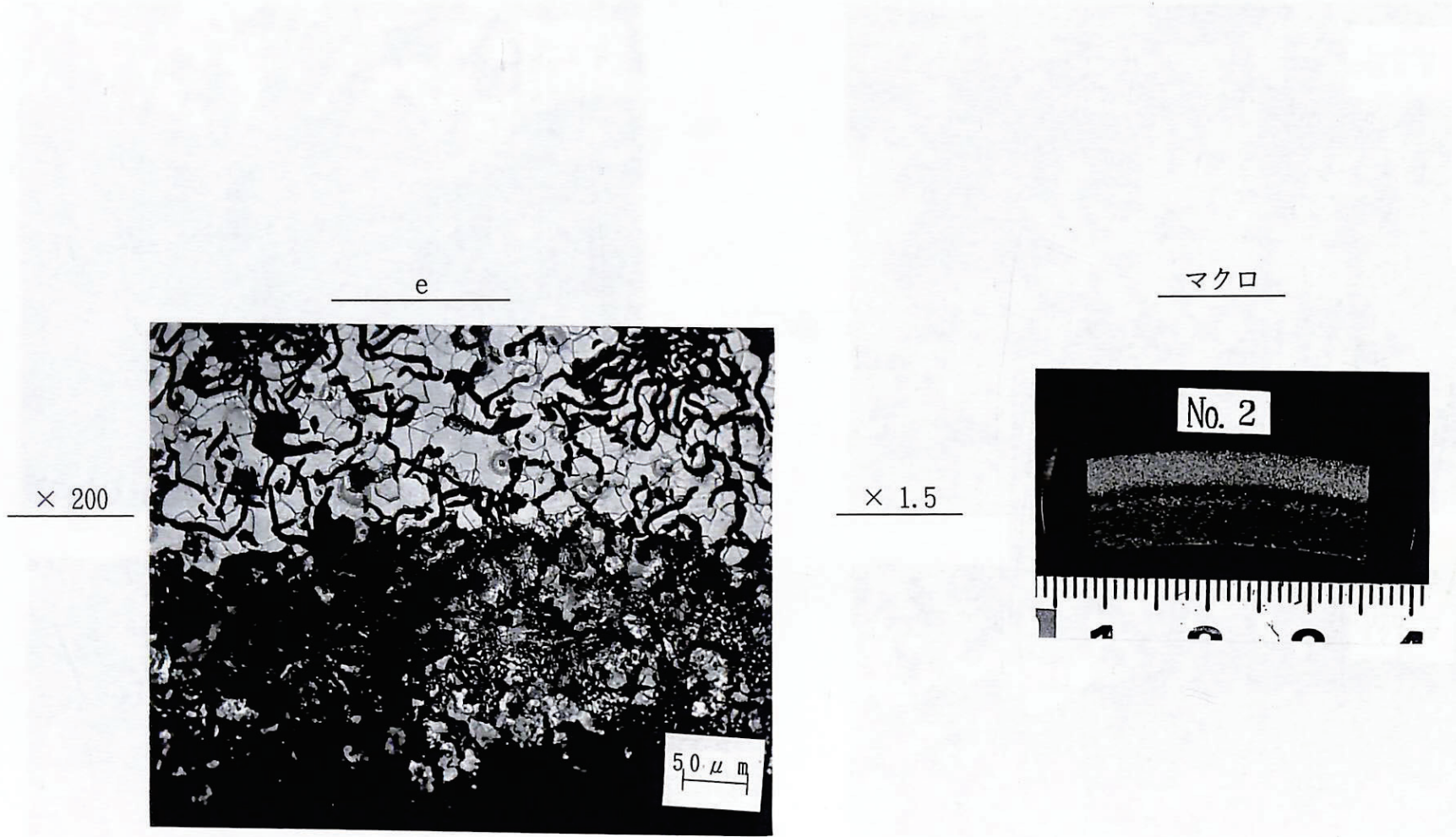


Photo -8 Micro and Macro Structures of Cross Section of Test Piece (Sasanodai 1-2)

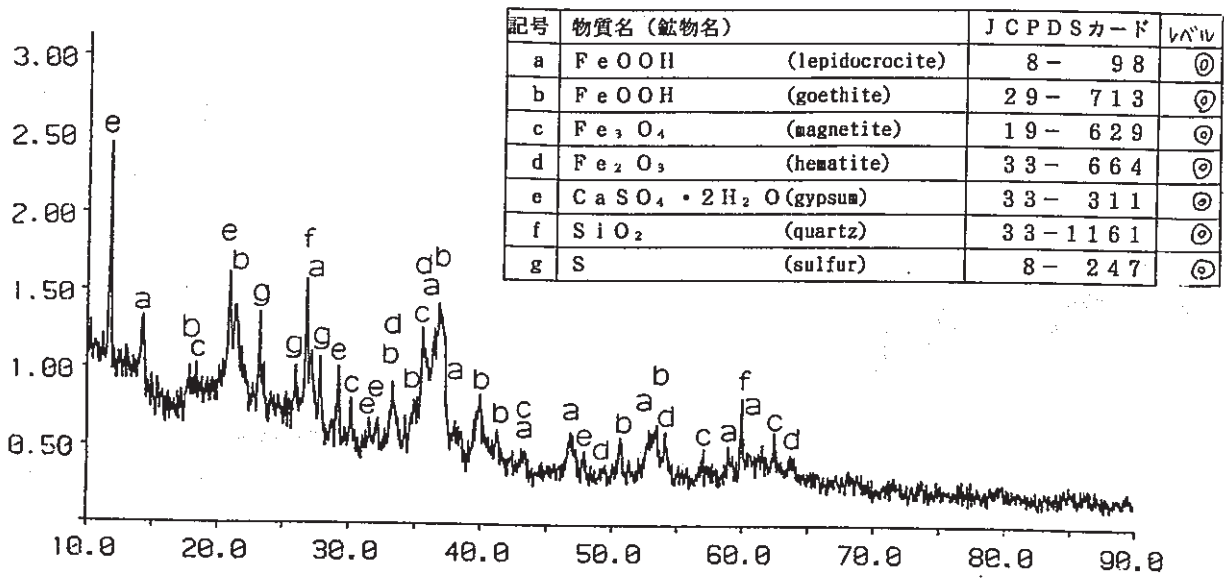


Figure -15 X-Ray Diffraction Analyses of Sureface Rust

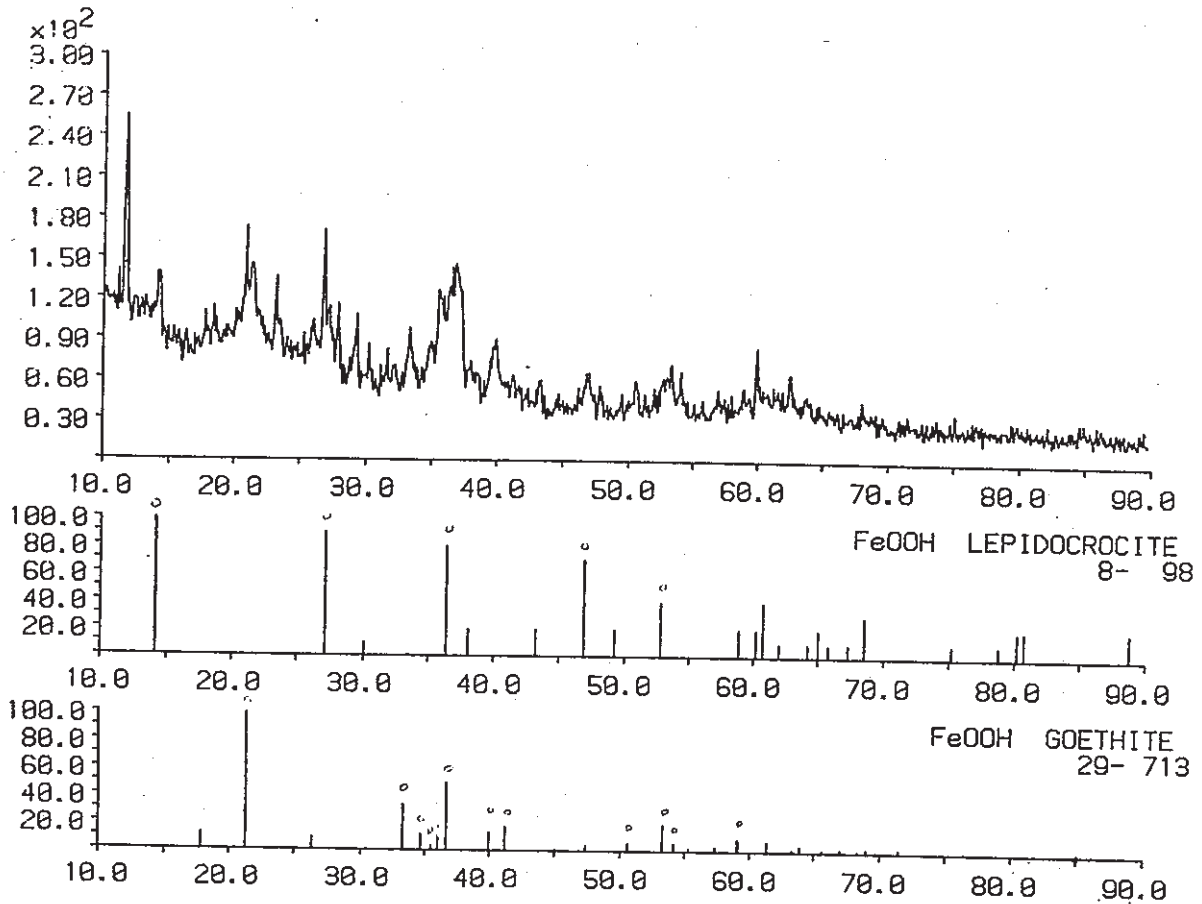


Figure -16 X-Ray Diffraction Analyses of Sureface Rust

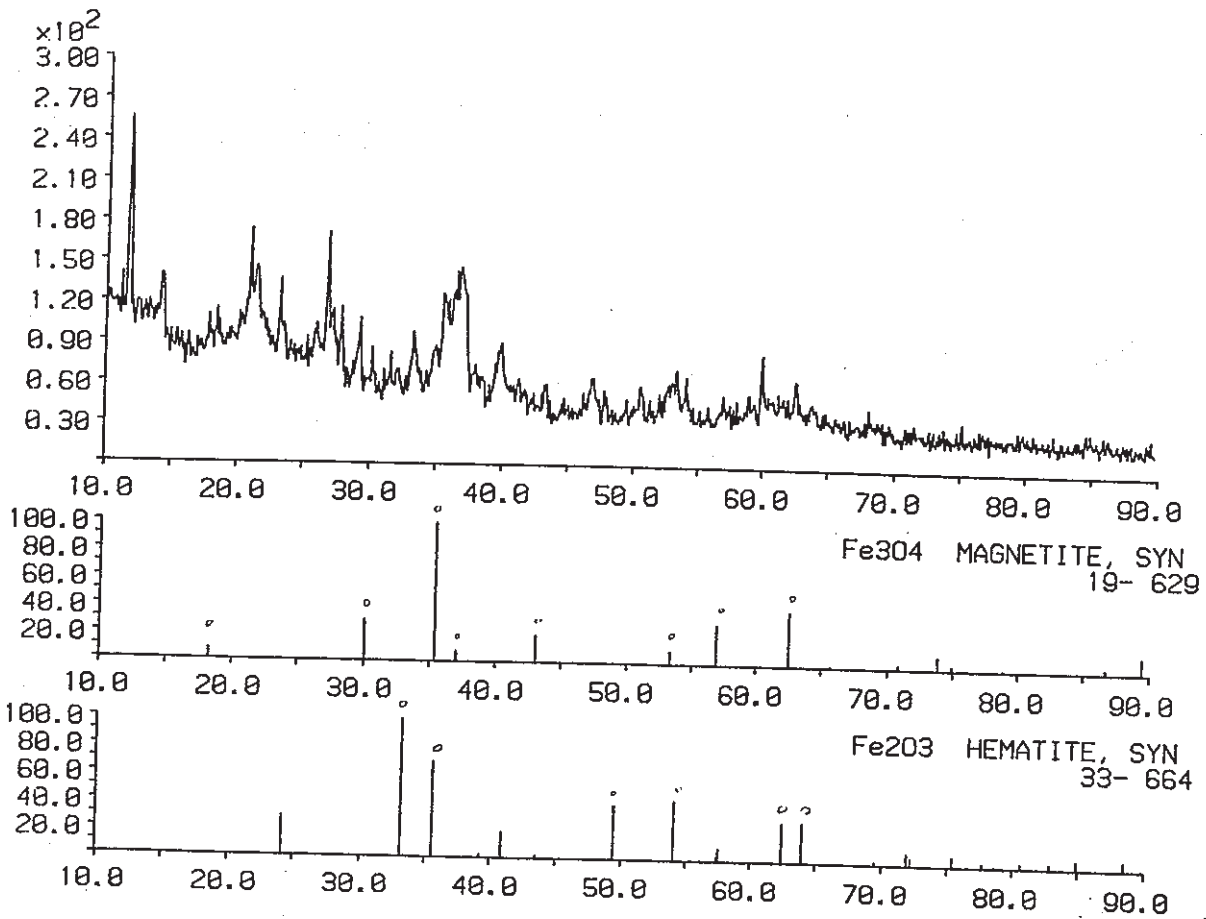


Figure -17 X-Ray Diffraction Analyses of Sureface Rust

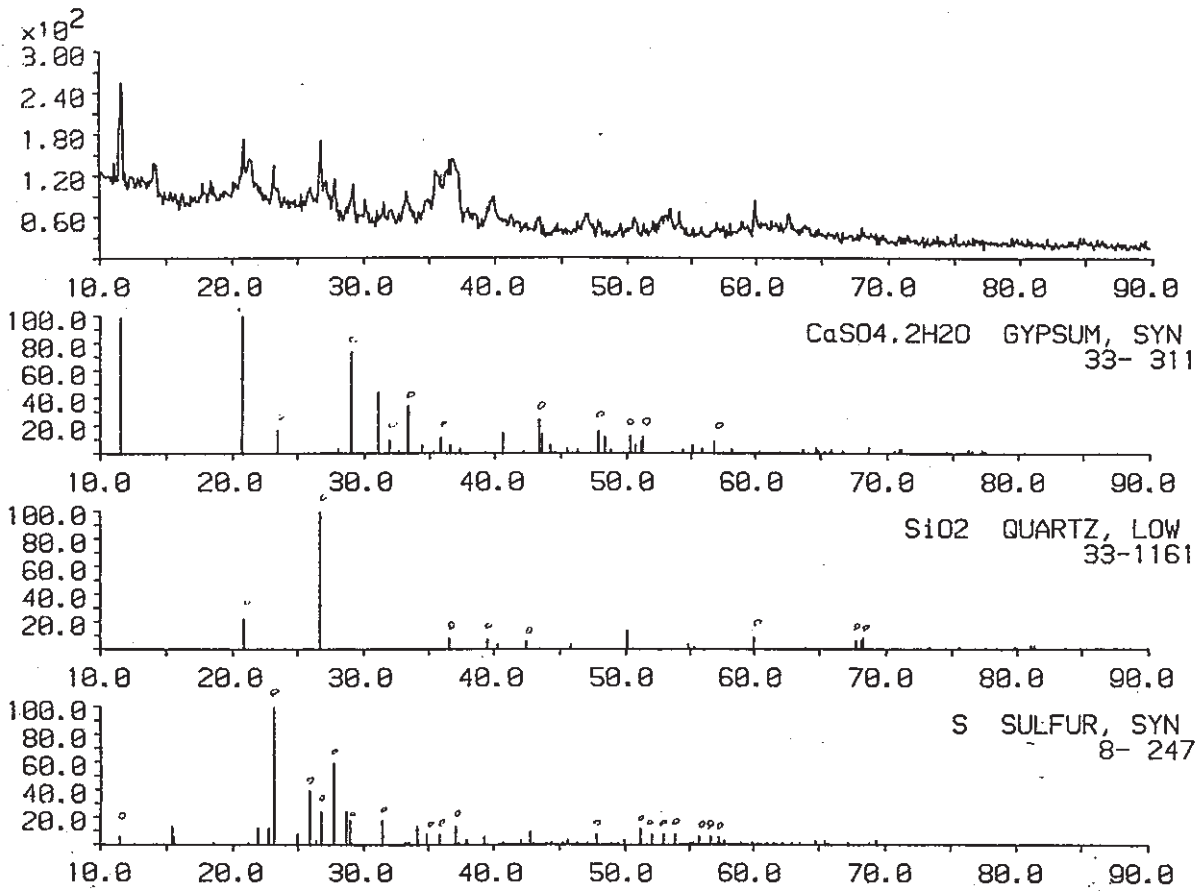


Figure -18 X-Ray Diffraction Analyses of Sureface Rust

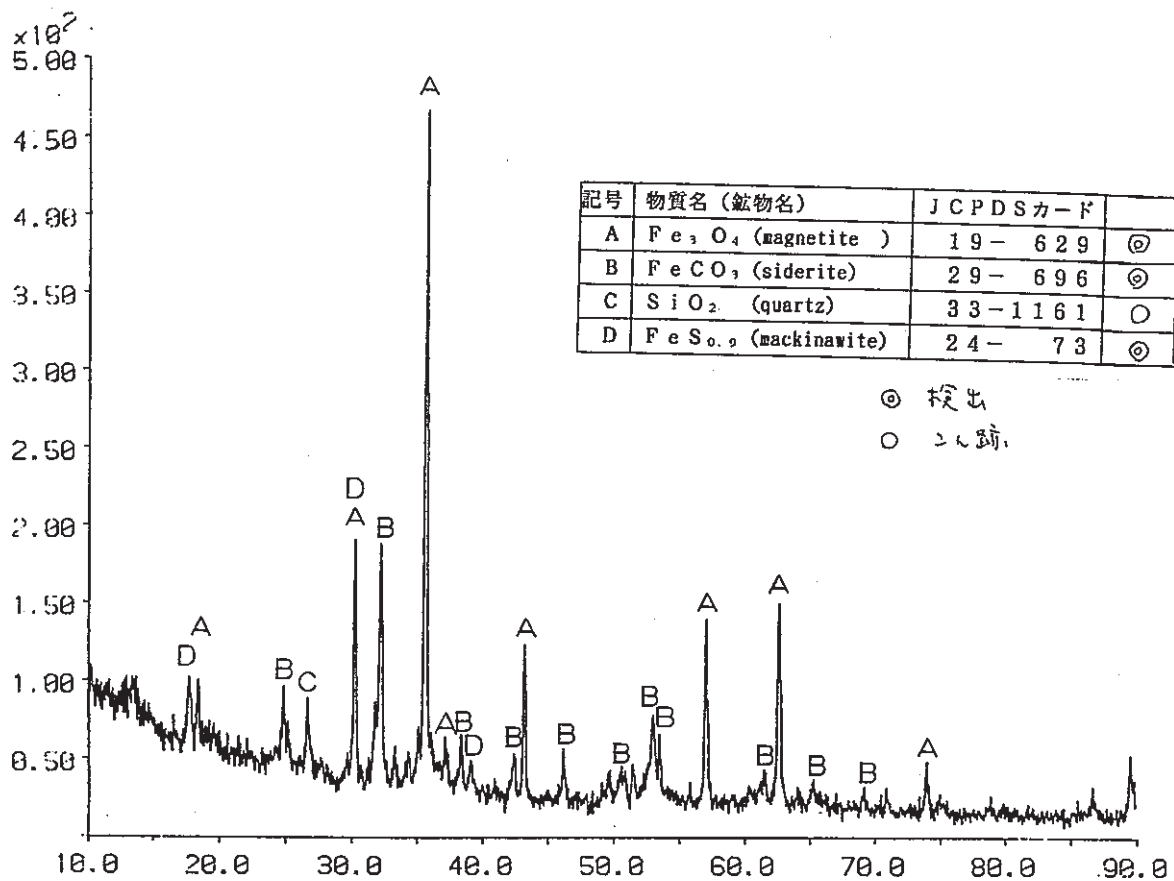


Figure -19 X-Ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Sasanodai-9H)

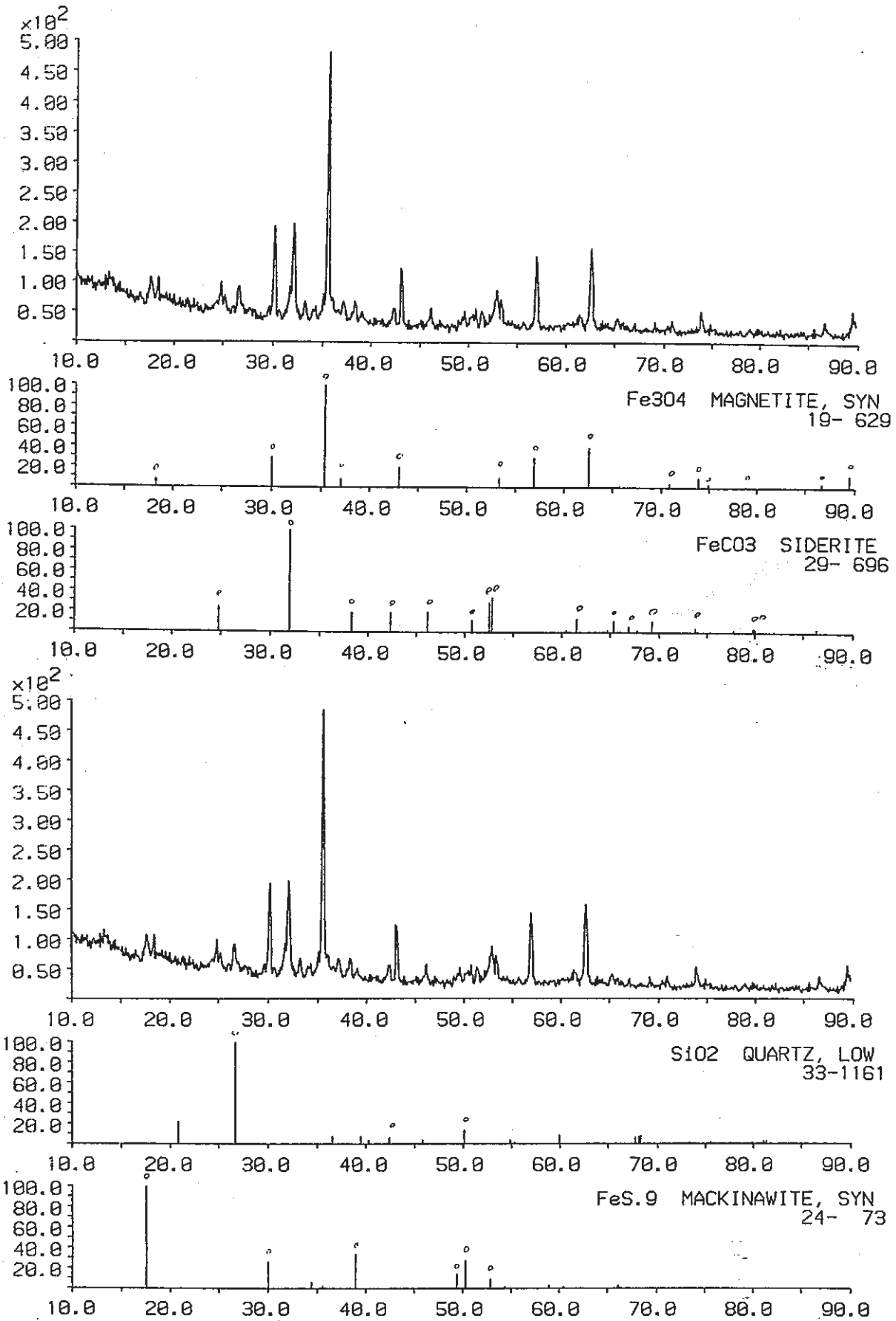


Figure -20 X-Ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Sasanodai-9H)

INTENSITY
(Counts)
4433. 5992.
3273. 17200.

PNC TJ1451 93-001

Acc.vol. 15.0 kV Length 184.800 mm Smoothing No

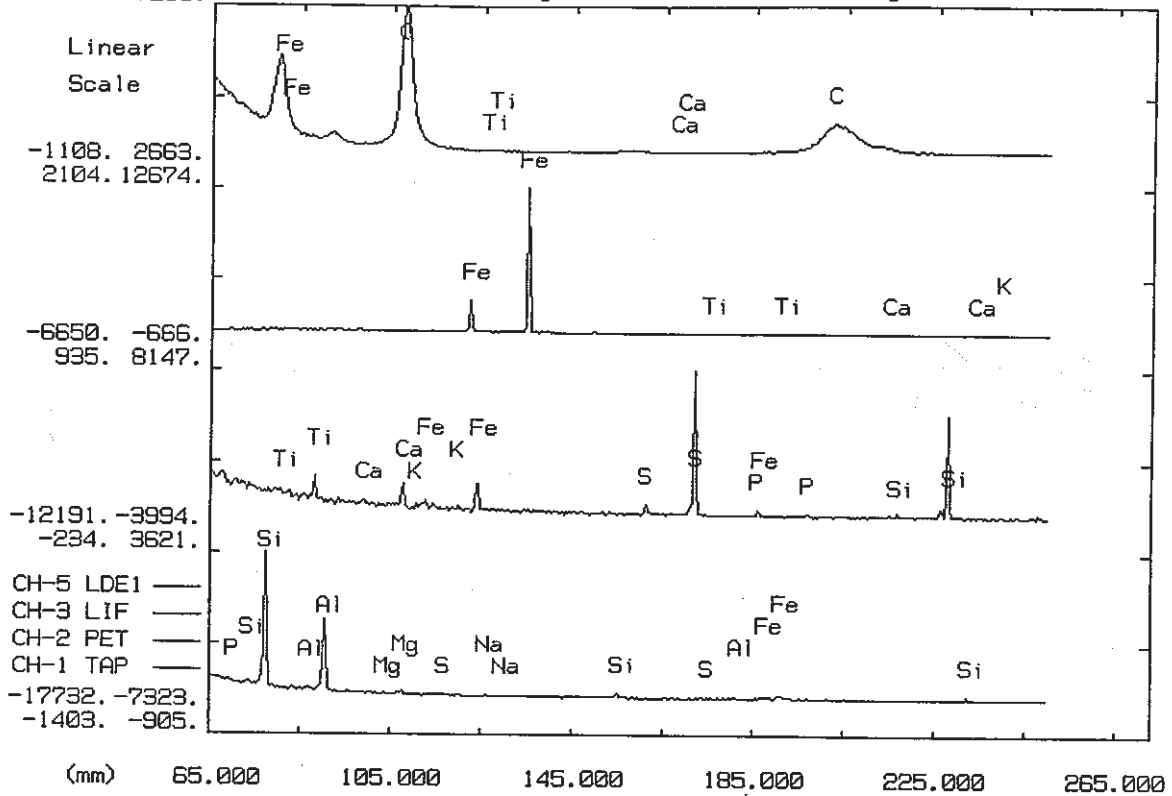


Figure -21 EPMA Analyses of Sureface Rust (Sasanodai)

INTENSITY
(Counts)
6316. 14551.
5036. 22173.

Acc.vol. 15.0 kV Length 184.800 mm Smoothing No

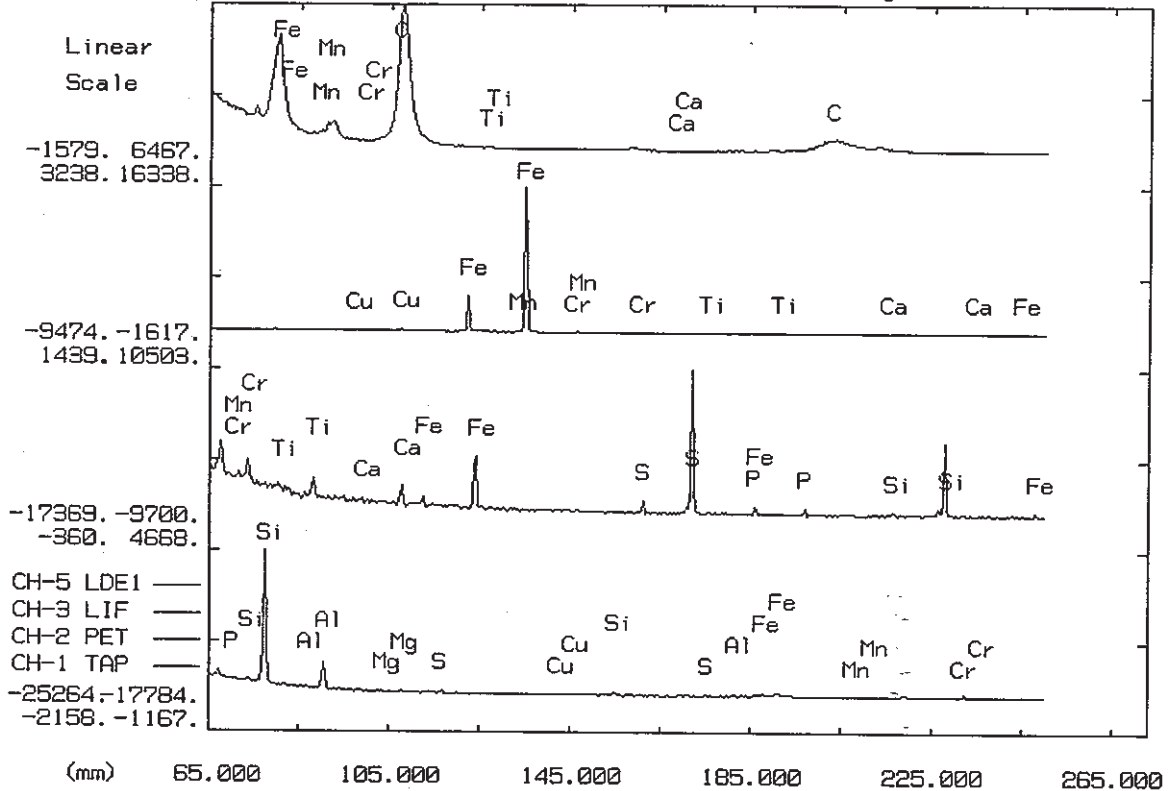


Figure -22 EPMA Analyses of Rust in Pit (Sasanodai)

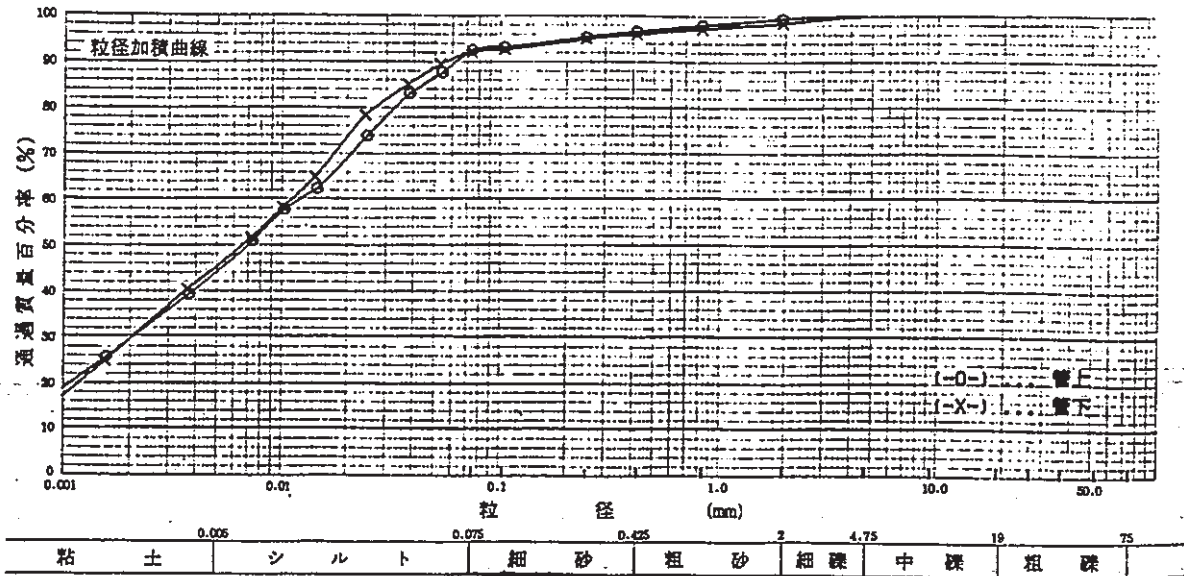


Figure -23 Grain-size of Soil (Sasanodai)

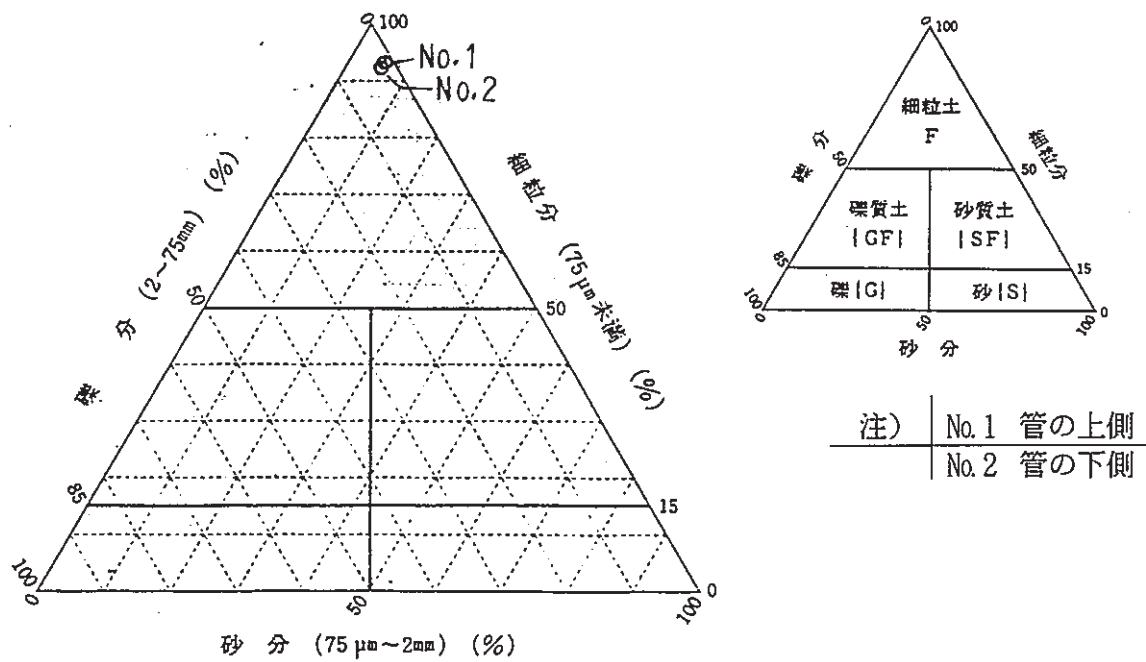


Figure -24 Grain-size Distribution of Soil (Sasanodai)

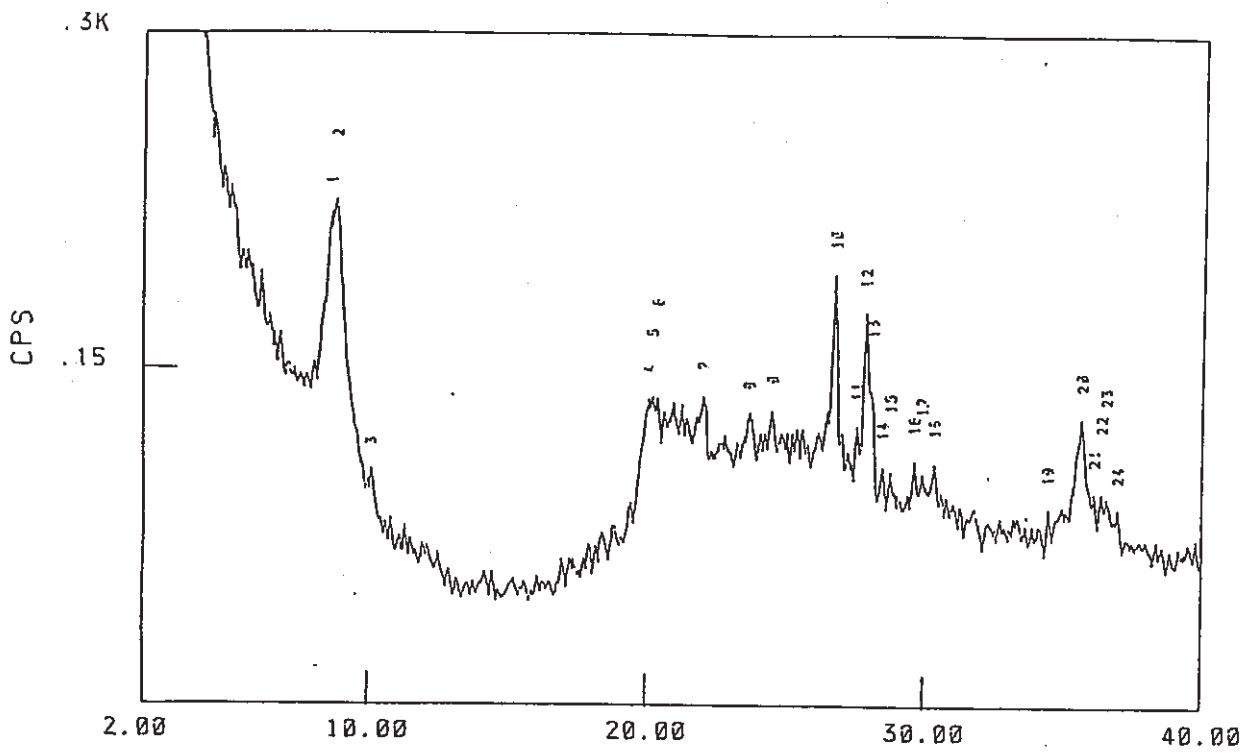
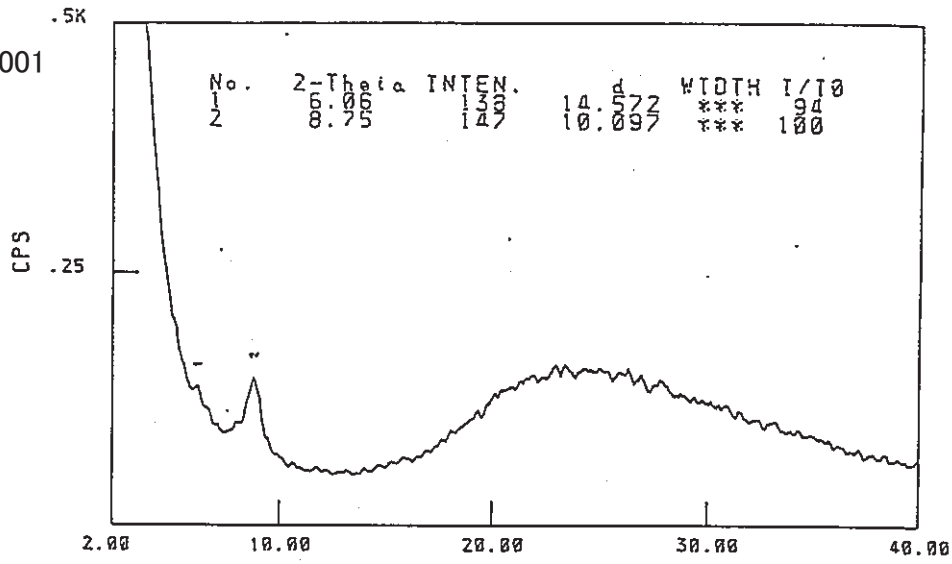
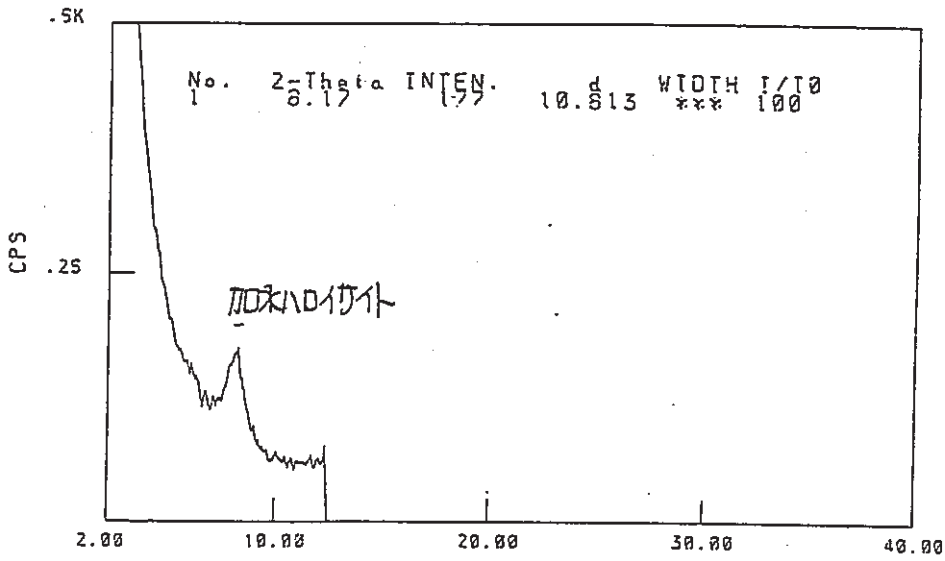


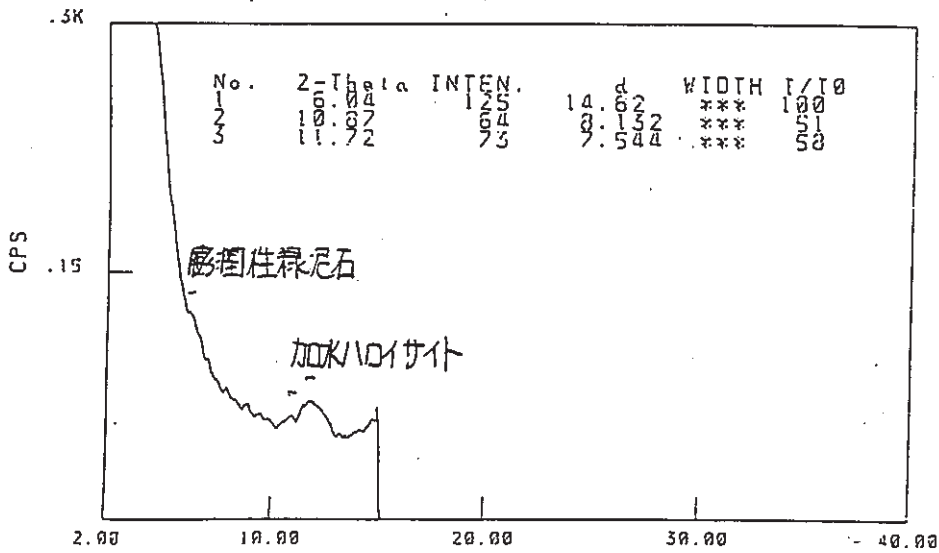
Figure -25 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai)



未処理



エチレングリコール処理



100℃乾燥処理

Figure -26 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Sasanodai)

2. 考 察

2.1 本年度調査結果のまとめ

(1) 土壌環境調査

粘土中埋設鉄管（笹野台）の掘り上げ調査結果のうち、土壌環境の現地計測データと分析結果をまとめ Table -18に示す。

- ① 管周り土の目視観察では、埋設管の周囲は黒色の粘土（表土）であり、管上に10cm程度土を残して調査し、掘り上げ時に管周り土を観察したところ、調査部分の全長全周粘土であった。中央部に継手があった。
- ② 掘削後計測では、土壌比抵抗が平均で $2,914 \Omega \cdot \text{cm}$ と粘土としては少し高い値である。pHは6.6で中性である。
管対地電位（平均）は -573mV で、プローブ自然電位（平均）は -812mV で一般土壌より卑な値であった。
プローブ分極抵抗（平均）は 400Ω と一般土壌より少し低い値で、プローブ腐食速度（平均）は 0.082mm/y と粘土としては少し小さい値を示した。酸化還元電位（平均）は $+54\text{mV}$ と強い還元性環境を示した。
- ③ 土の分析については、pH、塩化物、は、一般土壌と似た値である。粘土分、硫化物イオンは多く腐食性の環境であった。
また、交換性陽イオンは粘土なみの多さであった。
- ④ SRBについては、 10^4 個/ml 以上 10^5 個/ml 以下であった。
- ⑤ 笹野台の地形は、丘陵地の中の凹地にあたり付近の水が集まるような場所である。現地調査の掘削においても、掘削開始時には湧水がほとんどなかったが、2～3時間後は20cm位の深さとなった。
- ⑥ 上記結果から、笹野台の土壌は硫化物イオンや酸化還元電位、硫酸塩、強熱減量、SRBが多いことから腐植土と考えられる。

Table -18 Summary of Soil Environmental Factors

項目	内 容	笹野台
掘削後計測 (平均値)	土壌比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2,914
	プローブ腐食速度 (mm/y)	0.082
	プローブ分極抵抗 (Ω)	400
	プローブ自然電位 (mV)	-812
	管対地電位 (mV)	-573
	酸化還元電位 (mV)	+ 54
	pH (現地)	6.6
土の分析 (平均値)	pH (試験室)	6.1
	含水率 (%)	51
	酸化還元電位 (mV)	304
	硫化物イオン (mg/kg)	45
	粘土分 (%)	45
	塩化物 (mmol/kg)	0.50
	硫酸塩 (mmol/kg)	4.8
	交換性陽イオン (mmol/kg)	355
	置換酸度 (mmol/kg)	0.4
	イオン分 (%)	0.01以下
	重炭酸イオン (mmol/kg)	0.63
	Mアルカリ度 (mmol/kg)	0.52

(2) 管体腐食状況

笹野台の管体腐食状況についてのまとめをTable 19に示す。

管の材質は片状黒鉛鑄鉄であることを示している。

付着土除去後の管体状況は管天側は、滑らかな表面であり、厚いさびこぶは見られなかった。しかし、顕微鏡写真によれば管表面下に黒鉛化腐食を示す黒鉛のサビ層の付着が見られた。9 Hの長手方向には帯状の赤い錆こぶが見られた。

管体の腐食状況は、管天側から9 H（左側）方向に腐食が見られた。他の部分の腐食は少なかった。9 H方向にはガス管があり、砂埋めとなっていた。その9 H（管より10cm位は粘土でその外側が砂）方向の赤い錆こぶ部分に大きな腐食がみられた。この部分は管の下側でもあり空けきが出来、土壌ではなく地下水にひたっていた部分と推定される。その他の部分は均一な黒い粘土に覆われており、1 2 H側の1.8mm が最大腐食深さであり、全般に腐食が少なかった。

粘土中の腐食量は、笹野台では9 H方向を除く1 2 H, 3 H, と6 H方向で、このなかの最大孔食深さは1.8mmで、最大孔食腐食速度は0.058mm/yであった。平均孔食深さは、0.83mmで、平均孔食腐食速度は0.027mm/yであった。

なお、参考として、全調査の腐食量（マクロセル腐食を含む）は最大孔食深さは1.9mm であり、平均孔食深さが0.93mm であった。これらを腐食速度で見ると、最大孔食腐食速度は0.061 mm/yで、平均孔食腐食速度0.030mm/yであった。

以上の如く、粘土中の腐食量は小さい。

Table -19 Summary of Corrosion of Pipe

項目	内 容	笹野台
管 の 成 分	C (%)	3.75
	Si (%)	1.60
	Mn (%)	0.43
	P (%)	0.12
	S (%)	0.13
錆 の X 線 回 析	表 面 錆	α -FeO(OH) ◎ Fe ₃ O ₄ ◎ γ -Fe ₂ O ₃ ◎
	孔 食 内 錆	FeCO ₃ ◎ Fe ₃ O ₄ ◎ FeS ◎
腐 食 粘 土 深 さ 計 測	最大孔食深さ平均値(mm) (12H, 3H, 6H)	0.83
	最大孔食深さ最大値(mm) (12H, 3H, 6H)	1.8
	最大孔食腐食速度(mm/y) (12H, 3H, 6H)	0.058
	マクロセルの種類	土質差(水と土) による腐食

◎ 検出 ○ こん跡

(3) 粘土中の鋼材の腐食

笹野台は、埋設土壌の目視では全周粘土に思われたが、分析結果によれば、比較的均質であるが、錆コブの状況や付着土の状況や孔食の分布から、マクロセルがわずかに見られ、ほぼ粘土中に当たる部分は12H、3Hと6Hになると考えられる。また、SRBの簡易計測でSRB菌は多くかつ、土質分析結果からも、SRBによる腐食が考えられる。ただし、SRBのデータは少なく腐食への関与の程度が明瞭でないことから今後のデータの積み上げが必要である。

これらの部分による腐食量と腐食速度を Table - 20 に示す。

この結果から、笹野台は最大孔食深さが経過年31年で 1.8 (mm) で、平均孔食深さが 0.83 (mm) であった。

そして、腐食速度は、最大孔食深さが 0.058mm/yで、平均孔食速度が 0.027 m/y であった。

Table1 -20 Examination Results on the amount of Corrosion of Pipes Buried in the Soil-1992

調査場所	項目 経過年	孔食深さ (mm)		孔食腐食速度 (mm/y)	
		平均値	最大値	平均値	最大値
笹野台	31	0.83	1.8	0.027	0.058

笹野台は 12 H 3Hと 6 H が粘土

Table -21 Examination Results on the amount of Corrosion of over all the Buried Pipe Surface (Including Macrocells)

調査場所	項目 経過年	孔食深さ (mm)		孔食腐食速度 (mm/y)	
		平均値	最大値	平均値	最大値
笹野台	31	0.93	1.9	0.03	0.061

(4) 埋設鋼材の極値統計手法による腐食量の評価

現地調査の調査長さは1 m（笹野台は0.7 m）と短く、そこで、極値統計手法を用いて、長い実路線の最大孔食深さを推定した。ただし、この手法は、同一環境で適用すべきことから、鑄鉄管1本の長さ5 m（再帰期間200）で、最大孔食深さの推定を行った。

極値統計を実施するに当たって使用するサンプルは粘土中に特定すると、笹野台では12H、3H、6Hの長手方向全サンプルとした。なお、粘土中のサンプルの最小単位は、1リング（10cm長）を4分割した大きさに解析した。

笹野台については、9Hは、赤いサビコブであり、9H方向は付着土もなかったことから、マクロセル腐食部分と考えられ、9H方向を除いた12H、3H、6Hの長手方向部（サンプル数21個）で解析した。

① 使用期間ごとのデータ情報

・使用期間：	.....	31年
・試料数N：	.....	21
うちデータが得られた試料数n：	.....	21
1試料で得られたデータ数の最大値m：	.....	0.7
・対象物の大きさ：	.....	5 m
・1試料の大きさ：	.....	0.025m
再帰期間：	.....	200

② 度数分布

測定データの分布は、Figure -27 に示す如く、グンベル分布となっている。最頻値は0.7mmである。

③ 解 析

データをグンベル確率紙に平均ランク法にてプロットし、Figure -28に示し、最大孔食深さ推定直線は、MVALUE法によって求めた。この結果、5 m長の管の最大孔食深さの最大値である累積確率0.99では3.3mmである。

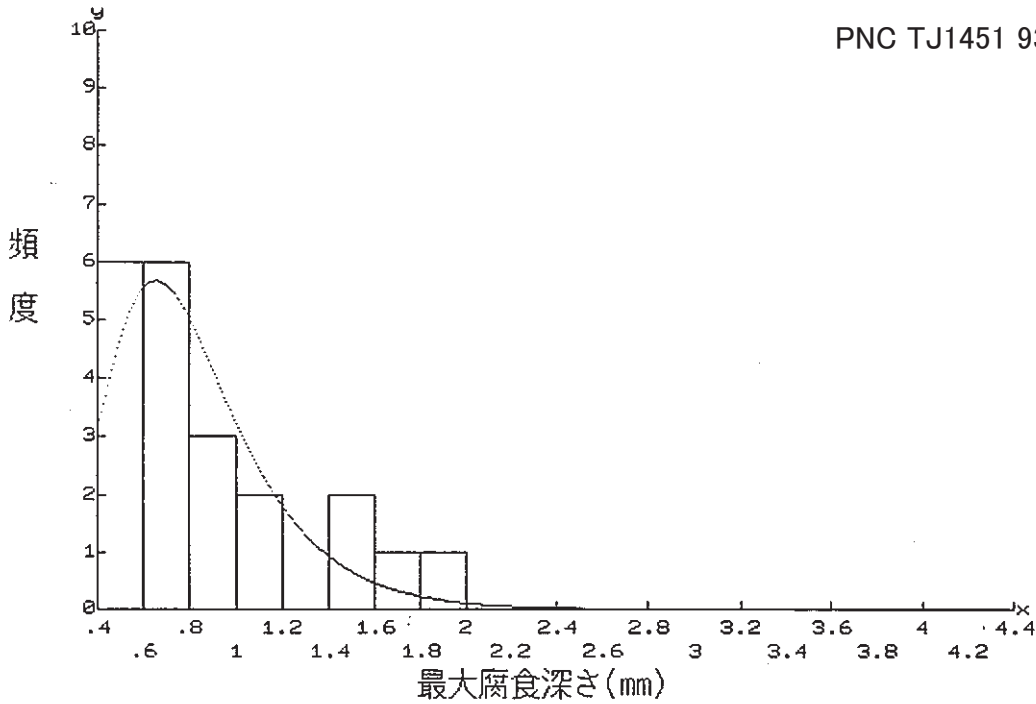


Figure -27 Maximum Pit Depth-Histogram (Sasanodai)

Table -22 Table of Calculated Parameters Using MVLUE

試料 i	Max値 X_i (mm)	MVLUE係数 $a_i(N,n)$	MVLUE係数 $b_i(N,n)$	$a_i X_i$ (mm)	$b_i X_i$ (mm)	累積確率 $F(y)$
1	1.8	.0132641	.0333258	.0238754	.0599864	.95455
2	1.6	.0164762	.0356676	.0263619	.0570682	.90909
3	1.4	.019424	.0368693	.0271936	.051617	.86364
4	1.4	.0222664	.0373672	.031173	.0523141	.81818
5	1.1	.0250677	.0373053	.0275745	.0410358	.77273
6	1	.0278664	.0367417	.0278664	.0367417	.72727
7	.9	.0306909	.0356941	.0276218	.0321247	.68182
8	.8	.0335658	.0341546	.0268526	.0273237	.63636
9	.8	.0365147	.032094	.0292118	.0256752	.59091
10	.7	.0395625	.0294624	.0276937	.0206237	.54545
11	.7	.0427368	.0261856	.0299158	.01833	.5
12	.6	.0460707	.0221589	.0276424	.0132953	.45455
13	.6	.0496054	.0172345	.0297633	.0103407	.40909
14	.6	.0533945	.0112017	.0320367	6.72104E-03	.36364
15	.6	.0575113	3.75159E-03	.0345068	2.25095E-03	.31818
16	.5	.0620617	-5.58994E-03	.0310308	-2.79497E-03	.27273
17	.5	.067209	-.0175966	.0336045	-8.79828E-03	.22727
18	.5	.0732292	-.0336516	.0366146	-.0168258	.18182
19	.5	.0806582	-.0566027	.0403291	-.0283014	.13636
20	.4	.0908317	-.0940109	.0363327	-.0376044	.09091
21	.4	.111993	-.221763	.0447971	-.088705	.04545

$N = 21 \leq 45$ $n = 21$
 $\lambda = \sum a_i X_i = .652$ (位置パラメータ)
 $\alpha = \sum b_i X_i = .27242$ (尺度パラメータ)
 $y = (x - \lambda) / \alpha$ $F(y) = e(-e(-y))$

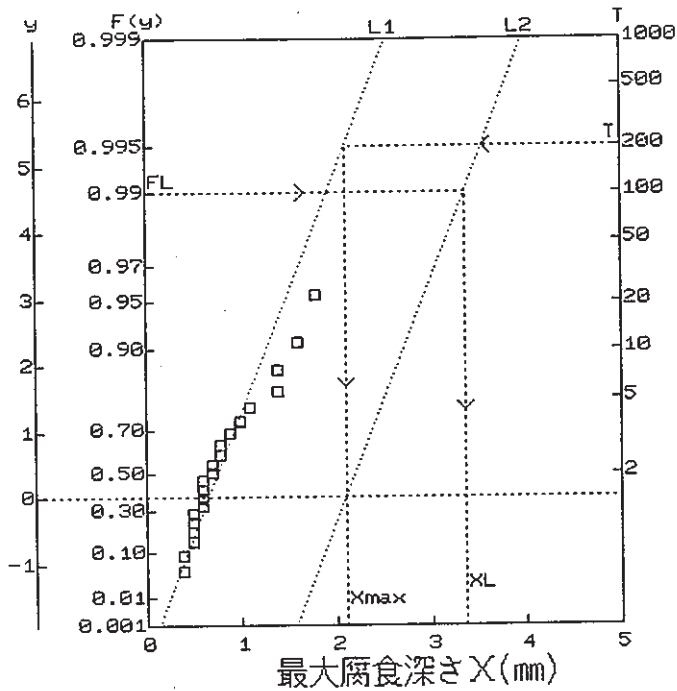


Figure -28 Estimation of Maximum Pit Depth-Gumbel Probability Paper Plot (Sasanodai)

L1 : 1 試料中の最大浸食量の推定分布直線

$$y = (X - \lambda) / \alpha$$

$$\lambda = 0.652$$

$$\alpha = 0.27242$$

L2 : 実機全体の最大侵食量の推定分布直線

$$y = (X - X_{max}) / \alpha$$

再帰期間 T	200
実機推定最大浸食量最頻値 Xmax	2.09 mm
指定信頼率 FL	0.99
実機推定最大浸食量指定信頼率点値 XL	3.35 mm

2. 2 全調査結果のまとめ

(1) 現地の粘土の環境調査

梅田, 蓮根, 豊島-1, 豊島-2, 京町-1, 笹野台の粘土の環境因子とそれらを各因子毎に平均値を求め、Table -23 に示す。

一般に知られている土壌抵抗, 管対地電位, 酸化還元電位, pHについて

i) 現地調査の計測値について

- ① 土壌比抵抗は、平均 $3,293 \Omega \cdot \text{cm}$ が示す如く、一般土壌より低い値であるが、粘土としては高い値である。とくに、豊島-1, 豊島-2の抵抗が高い。
- ② 管対地電位は、一般土壌に比べて平均 -510 mV はやや卑な値と思われる。
- ③ 酸化還元電位は、値のバラツキがあり、平均 $+203 \text{ mV}$ の値は一般的土壌より還元性であるが、計測方法にも問題があり、検討項目から外すべきであろう。笹野台は他の地点と異なり、還元性土壌であった。
- ④ pHについては 6.6 から 8.6 の中性範囲にあって一般的土壌と同じであると言える。

ii) 分析について

- ① 含水率は、平均で 35% で一般土壌よりやや多い値である。
- ② 塩化物, 硫酸塩はバラツキが多いが、豊島-1, 豊島-2の硫酸塩が少ない。
- ③ 交換性陽イオンは、ベントナイトに比べると小さいが、一般土壌に比べると大きい値である。しかし、豊島-1, 豊島-2の値が小さく、粘土分が少ないことと関係しているようである。
- ④ 置換酸度については、ほとんど検出されなかった。

iii) まとめ

全体については、淡水性粘土であるが、豊島-1, 豊島-2については、土壌比抵抗が高く、粘土分, 硫酸塩, 交換性陽イオンが少ない。また、笹野台は、腐植土で有機物が多い土壌である。今後の解析においては、層別を検討する必要がある。

Table -23 Summary of Environmental Factors of Clay Measured at Sites

項目	内 容	梅田 6H03点	蓮根 全周	豊島-1 12H3点	豊島-2 6H03点	京町 1-1	笹野台	平均値
掘 削 後 計 測 (平 均 値)	土 壤 抵 抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2,437	2,818	5,293	3,593	2,700	2,914	3,293
	ﾌｻﾞ腐食速度 (mm/y)	0.118	0.057	0.046	0.051	0.092	0.082	0.074
	ﾌｻﾞ分極抵抗 (Ω)	262	505	557	453	332	400	418
	ﾌｻﾞ自然電位 (mV)	-672	-720	-794	-766	-812	-812	-763
	管対地電位 (mV)	-493	-350	-550	-518	-577	-573	-510
	酸化還元電位 (mV)	+262	+291	+179	+216	+218	+54	+203
	pH	7.7	7.2	6.9	8.6	8.2	6.6	7.5
土 の 分 析 (平 均 値)	pH	8.0	7.9	7.7	8.6	8.0	6.1	7.7
	含 水 率 (%)	38	32	32	27	29	51	35
	酸化還元電位 (mV)	+243	+316	+341	+395	+242	+304	+307
	硫 化 物 (mg/kg)	1以下	1以下	1以下	1以下	1以下	45	1以下 *
	粘 土 分 (%)	28	40	29.5	22	49	45	36
	塩 化 物 (mmol/kg)	0.57	3.2	0.23	1.4	0.69	0.50	1.10
	硫 酸 塩 (mmol/kg)	2.7	2.2	0.16	0.49	0.77	4.8	1.85
	交換性陽イオン (mmol/kg)	120	170	95	90	220	355	175
置 換 酸 度 (mmol/kg)	0	0.3	0.2	0.1 以下	0.1 以下	0.4	0.15	

* 最頻値

(2) 管体腐食状況

埋設調査管の材質の結果及び錆のX線回折結果もあわせてTable -24に示す。管の材質は、粘土中埋設の5件が片状黒鉛鑄鉄であった。錆のX線回折分析結果は、表面錆と孔食内錆はほぼ同じものが検出された。孔食内錆で6件中4件に $FeCO_3$ が痕跡～検出オーダーで分析された。定性分析結果によれば、Fe, Si, Mg, Al, Ca が多く検出され、土混じりの錆となっていることを示している。管体のブラスト後の腐食状況は、蓮根を除いて大きさに差はあるが土質差のマクロセルを受けている。とくに、豊島-1, 豊島-2は粘土が少ないこと、小石がみられたことから、マクロセルの混入の可能性があり、層別した解析も必要である。これは、埋設管の施工方法や埋設深さから地表土は他からの埋め立て土であり、埋設する場合、管廻りに空げきが出来たり、種々の土が混在してしまうためと考えられる。

従って、管廻りが全周全長にわたって均質な粘土に埋設されている物件は少ない。また、調査の選定方法、調査方法から現地の作業においては調査時間に制約があり、土質観察や調査に限界がある。

次に、埋設管の粘土中の実測値の腐食量を Table -25 に示す。これによれば、経過年が20, 27, 30, 31, 56, 66年のものが得られた。腐食量の最大値は、豊島-1の3.8(mm)であった。最大経過年の(66年)の京町-1の孔食深さは2.1(mm)と小さかった。

従って、腐食速度は平均で0.012～0.065mm/y, 最大で0.03～0.14 mm/yであった。

埋設管の粘土中の極値統計手法による推定腐食量を Table -26 に示す。この極値統計による腐食深さの結果によれば、最大孔食深さの最頻値は、1.2 mm～4.7 mmの範囲にあり、累積確率 0.99 では、2.0～7.4 mmの値となった。最大孔食腐食速度は、最頻値で0.05～0.157 mm/yを示し、累積確率 0.99 で 0.061～0.247 mm/yを示した。

Table -24 Summary of Corrosion of Pipe

項目	内 容	梅田	蓮根	豊島-1	豊島-2	京町 1-1	笹野台 1-2	
管 の 成 分 分 析	C (%)	2.95	4.14	3.44	3.22	3.59	3.75	
	Si (%)	2.00	2.16	1.68	1.91	1.27	1.60	
	Mn (%)	0.50	0.33	0.45	0.56	0.71	0.43	
	P (%)	0.17	0.57	0.061	0.14	0.26	0.12	
	S (%)	0.056	0.065	0.113	0.09	0.080	0.13	
	Al (%)	0.0020	<0.001	<0.001	0.0048	<0.0010	<0.0010	
錆 の X 線 回 析	表面錆	FeCO ₃	—	○	—	○	—	—
		α-FeO(OH)	—	○	—	—	—	◎
		Fe ₃ O ₄	—	—	○	—	—	◎
		γ-Fe ₂ O ₃	—	—	○	—	—	◎
		Fe ₂ O ₃	—	—	—	○	—	—
		FeSO ₄	—	—	—	—	—	—
	孔食内錆	FeCO ₃	—	○	○	◎	—	◎
		α-FeO(OH)	—	—	—	—	—	—
		Fe ₃ O ₄	—	—	○	—	—	◎
		γ-Fe ₂ O ₃	○	—	○	—	—	—
		Fe ₂ O ₃	—	—	—	○	—	—
		FeS	—	—	—	—	—	◎

Table -25 Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay

調査場所	項目 経過年	孔食深さ (mm)		孔食腐食速度 (mm/y)	
		平均値	最大値	平均値	最大値
梅田 (6H, 9H)	56	1.03	2.0	0.018	0.036
蓮根 (全周)	20	0.24	1.2	0.012	0.06
豊島-1(12H, 9H)	27	1.76	3.8	0.065	0.14
豊島-2 (6H, 9H)	30	1.94	3.2	0.065	0.11
京町1-1(12H, 6H)	66	1.01	2.1	0.015	0.03
笹野台(12H, 3H, 6H)	31	0.83	1.8	0.027	0.058

* 梅田については、全周測定値ではなく、6H, 9H の値
全周では、平均 1.38 mm, 最大 5.2 mm であった。

Table -26 Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay
Obtained by the Extreme Value statistical Method

調査場所	項目 経過年	最大孔食深さ (mm)		最大孔食腐食速度 (mm/y)	
		最頻値	累積確率 0.99	平均値	累積確率 0.99
梅田 (6H, 9H)	56	2.8	4.2	0.05	0.075
蓮根 (全周)	20	1.2	2.0	0.06	0.100
豊島-1(12H, 9H)	27	3.2	4.6	0.119	0.170
豊島-2 (6H, 9H)	30	4.7	7.4	0.157	0.247
京町1-1(12H, 6H)	66	2.5	4.0	0.038	0.061
笹野台(12H, 3H, 6H)	31	2.1	3.3	0.068	0.106

2.3 解析

2.3.1 粘土全データ(6地点)

(1) 埋設鋼材の腐食速度と土壤環境因子との関係

調査して得られた粘土中全データとマクロセルの混入の可能性のあるデータを層別して解析する。

試料は、類似の粘土環境にあったが、環境因子は同一では無く、かつ腐食速度も同一ではない。そこで、腐食速度と環境因子との関係を分析する。

また、調査埋設鋼材は粘土中環境下のものだが、因子個々は少しずつ異なっているので、それらを総合して腐食速度との関係を求める方法として多変量解析がある。そこで、この多変量解析のうちの単相関分析と重回帰分析を用いて解析した。

1) 単相関分析

腐食速度と土壤環境因子の関係を相関係数で示すとTable -28, Table -30 の如くとなる。この中で腐食速度と相関の強い因子の散布図をFigure -29, Figure 30に示す。この分析結果によれば、

- ① 実測平均腐食速度と相関の強い因子を相関の強い順に示すと、土壤比抵抗 (0.84) 試験室酸化還元電位 E_h (0.80), 粘土分(-0.68), 分極抵抗(0.57), SO_4 イオン(-0.53), であった。
- ② ただし、土壤比抵抗、酸化還元電位 E_h 、分極抵抗、とも一般に言われている腐食との関係は逆となっている。例えば、土壤比抵抗の場合は腐食速度は比抵抗が高いほど大きい関係にあり、酸化還元電位が高いほど腐食速度が大きい関係にある。
- ③ 因子相互の関係で、相関の強いのは、 SO_4 イオンと含水率 (0.93), SO_4 イオンと含水率 (0.93), 含水率と試験室pH(0.88), 試験室pHと陽イオン (0.86), 置換酸度と現地pH(0.88), P/SとClイオン (0.91), 粘土分と陽イオン(0.80), 酸化還元電位と現地pH(0.83), 現地pHと試験室pH (0.80) である。
- ④ 実測最大腐食速度と相関の強い因子は、強い順に比抵抗 (0.93), 酸化還元電位 E_h (0.82), 分極抵抗(0.80), 粘土分(-0.62), SO_4 イオン(-0.57), 陽イオン(-0.56) である。

- ⑤ 最大腐食速度と因子との関係でも、平均腐食速度と同様に一般に言われている関係と逆の関係となっている。とくに、最も相関の強い土壌比抵抗は、抵抗が高い程腐食大となっている。本試料は、マクロセルを含んでいない部分の腐食であることから、酸素の透過量、保護皮膜の生成の量の影響が強いと考えられる。
- ⑥ 実測の平均腐食速度と因子間の相関は、最大腐食速度の方が平均腐食速度よりやや強い傾向がある。
- ⑦ 因子相互で関係は、平均腐食速度の場合と同一である。

Table 27 Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor

	テ-ク名	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
		mm/y	比抵抗	分極抵抗	自然電位	P/S	Redox	現地 pH	含水率	Eh	粘土分	Clイイ	SO4イイ	陽 イイ	試験室pH	置換酸度
1	梅田	0.018	2437	262	-672	-493	262	7.7	38	243	28	0.57	2.7	120	8	0
2	蓮根	0.012	2818	505	-720	-350	291	7.2	32	316	40	3.2	2.2	170	7.9	0.3
3	豊島-1	0.065	5293	557	-794	-550	179	6.9	32	341	30	0.23	0.16	95	7.7	0.2
4	豊島-2	0.065	3593	453	-766	-518	216	8.6	27	395	22	1.4	0.49	90	8.6	0
5	京町	0.015	2700	332	-812	-577	218	8.2	29	242	49	0.69	0.77	220	8	0
6	笹野台	0.027	2914	400	-812	-573	54	6.6	51	30 ⁴	45	0.5	4.8	355	6.1	0.4

Table 28 Correlation Coefficients between Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor

		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
		mm/y	比抵抗	分極抵抗	自然電位	P/S	Redox	現地 pH	含水率	Eh	粘土分	Clイイ	SO4イイ	陽 イイ	試験室pH	置換酸度
x1	mm/y	1	0.83814	0.56908	-0.3801	-0.3391	-0.2395	0.12480	-0.2963	0.80416	-0.6783	-0.3179	-0.5329	-0.4980	0.23083	-0.1329
x2	比抵抗	0.83814	1	0.75929	-0.4703	-0.2447	-0.2034	-0.2387	-0.2615	0.59587	-0.4010	-0.2971	-0.5580	-0.4339	0.07774	0.11472
x3	分極抵抗	0.56908	0.75929	1	-0.3691	0.26475	-0.0667	-0.3445	-0.2495	0.75036	-0.1733	0.33272	-0.3580	-0.2355	0.01093	0.48201
x4	自然電位	-0.3801	-0.4703	-0.3691	1	0.62350	0.50150	-0.0256	0.17056	-0.2321	-0.3837	0.33340	0.37286	-0.2553	0.16185	-0.0813
x5	P/S	-0.3391	-0.2447	0.26475	0.62350	1	0.69106	-0.0595	-0.2292	0.11342	-0.1295	0.90860	0.04756	-0.2846	0.30772	0.20010
x6	Redox	-0.2395	-0.2034	-0.0667	0.50150	0.69106	1	0.49438	-0.7144	-0.1304	-0.2966	0.57263	-0.4832	-0.6920	0.82509	-0.5245
x7	現地 pH	0.12480	-0.2387	-0.3445	-0.0256	-0.0595	0.49438	1	-0.7109	0.07966	-0.3301	0.08667	-0.5635	-0.4743	0.80450	-0.8808
x8	含水率	-0.2963	-0.2615	-0.2495	0.17056	-0.2292	-0.7144	-0.7109	1	-0.2653	0.34442	-0.3075	0.92583	0.76419	-0.9249	0.65557
x9	Eh	0.80416	0.59587	0.75036	-0.2321	0.11342	-0.1304	0.07966	-0.2653	1	-0.5647	0.24097	-0.3233	-0.3426	0.18904	0.16312
x10	粘土分	-0.6783	-0.4010	-0.1733	-0.3837	-0.1295	-0.2966	-0.3301	0.34442	-0.5647	1	0.05015	0.39014	0.80194	-0.5496	0.41810
x11	Clイイ	-0.3179	-0.2971	0.33272	0.33340	0.90860	0.57263	0.08667	-0.3075	0.24097	0.05015	1	0.00203	-0.1144	0.29325	0.22430
x12	SO4イイ	-0.5329	-0.5580	-0.3580	0.37286	0.04756	-0.4832	-0.5635	0.92583	-0.3233	0.39014	0.00203	1	0.77135	-0.7990	0.61061
x13	陽 イイ	-0.4980	-0.4339	-0.2355	-0.2553	-0.2846	-0.6920	-0.4743	0.76419	-0.3426	0.80194	-0.1144	0.77135	1	-0.8605	0.61237
x14	試験室pH	0.23083	0.07774	0.01093	0.16185	0.30772	0.82509	0.80450	-0.9249	0.18904	-0.5496	0.29325	-0.7990	-0.8605	1	-0.7978
x15	置換酸度	-0.1329	0.11472	0.48201	-0.0813	0.20010	-0.5245	-0.8808	0.65557	0.16312	0.41810	0.22430	0.61061	0.61237	-0.7978	1

Table 29 Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor

	テ-夕名	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
		mm/y	比抵抗	分極抵抗	Ecorr	P/S	Redox	現地 pH	含水比	Eh	粘土分	Clイオン	SO4イオン	陽イオン	試験室pH	置換酸度
1	梅田	0.036	2437	262	-672	-493	262	7.7	38	243	28	0.57	2.7	120	8	0
2	蓮根	0.06	2818	505	-720	-350	291	7.2	32	316	40	3.2	2.2	170	7.9	0.3
3	豊島-1	0.14	5293	557	-794	-550	179	6.9	32	341	30	0.23	0.16	95	7.7	0.2
4	豊島-2	0.11	3593	453	-766	-518	216	8.6	27	395	22	1.4	0.49	90	8.6	0
5	京町	0.03	2700	332	-812	-577	218	8.2	29	242	49	0.69	0.77	220	8	0
6	笹野台	0.05	2914	400	-812	-573	54	6.6	51	304	45	0.5	4.8	355	6.1	0.4

Table 30 Correlation Coefficients between Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	
	mm/y	比抵抗	分極抵抗	Ecorr	P/S	Redox	現地 pH	含水比	Eh	粘土分	Clイオン	SO4イオン	陽イオン	試験室pH	置換酸度	
x1	mm/y	1	0.93468	0.80518	-0.3393	-0.1007	-0.1586	-0.1156	-0.2897	0.82990	-0.5948	-0.1179	-0.5165	-0.5019	0.16692	0.10702
x2	比抵抗	0.93468	1	0.75929	-0.4703	-0.2447	-0.2034	-0.2387	-0.2615	0.59587	-0.4010	-0.2971	-0.5580	-0.4339	0.07774	0.11472
x3	分極抵抗	0.80518	0.75929	1	-0.3691	0.26475	-0.0667	-0.3445	-0.2495	0.75036	-0.1733	0.33272	-0.3580	-0.2355	0.01093	0.48201
x4	Ecorr	-0.3393	-0.4703	-0.3691	1	0.62350	0.50150	-0.0256	0.17056	-0.2321	-0.3837	0.33340	0.37286	-0.2553	0.16185	-0.0813
x5	P/S	-0.1007	-0.2447	0.26475	0.62350	1	0.69106	-0.0595	-0.2292	0.11342	-0.1295	0.90860	0.04756	-0.2846	0.30772	0.20010
x6	Redox	-0.1586	-0.2034	-0.0667	0.50150	0.69106	1	0.49438	-0.7144	-0.1304	-0.2966	0.57263	-0.4832	-0.6920	0.82509	-0.5245
x7	現地 pH	-0.1156	-0.2387	-0.3445	-0.0256	-0.0595	0.49438	1	-0.7109	0.07966	-0.3301	0.08667	-0.5635	-0.4743	0.80450	-0.8808
x8	含水比	-0.2897	-0.2615	-0.2495	0.17056	-0.2292	-0.7144	-0.7109	1	-0.2653	0.34442	-0.3075	0.92583	0.76419	-0.9249	0.65557
x9	Eh	0.82990	0.59587	0.75036	-0.2321	0.11342	-0.1304	0.07966	-0.2653	1	-0.5647	0.24097	-0.3233	-0.3426	0.18904	0.16312
x10	粘土分	-0.5948	-0.4010	-0.1733	-0.3837	-0.1295	-0.2966	-0.3301	0.34442	-0.5647	1	0.05015	0.39014	0.80194	-0.5496	0.41810
x11	Clイオン	-0.1179	-0.2971	0.33272	0.33340	0.90860	0.57263	0.08667	-0.3075	0.24097	0.05015	1	0.00203	-0.1144	0.29325	0.22430
x12	SO4イオン	-0.5165	-0.5580	-0.3580	0.37286	0.04756	-0.4832	-0.5635	0.92583	-0.3233	0.39014	0.00203	1	0.77135	-0.7990	0.61061
x13	陽イオン	-0.5019	-0.4339	-0.2355	-0.2553	-0.2846	-0.6920	-0.4743	0.76419	-0.3426	0.80194	-0.1144	0.77135	1	-0.8605	0.61237
x14	試験室pH	0.16692	0.07774	0.01093	0.16185	0.30772	0.82509	0.80450	-0.9249	0.18904	-0.5496	0.29325	-0.7990	-0.8605	1	-0.7978
x15	置換酸度	0.10702	0.11472	0.48201	-0.0813	0.20010	-0.5245	-0.8808	0.65557	0.16312	0.41810	0.22430	0.61061	0.61237	-0.7978	1

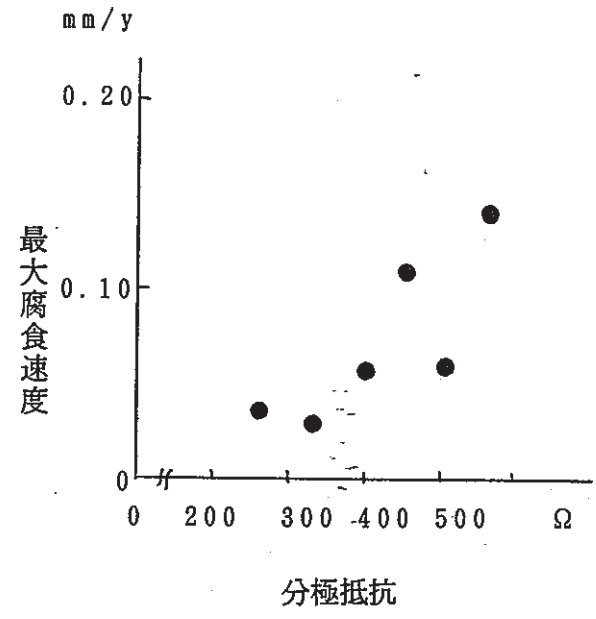
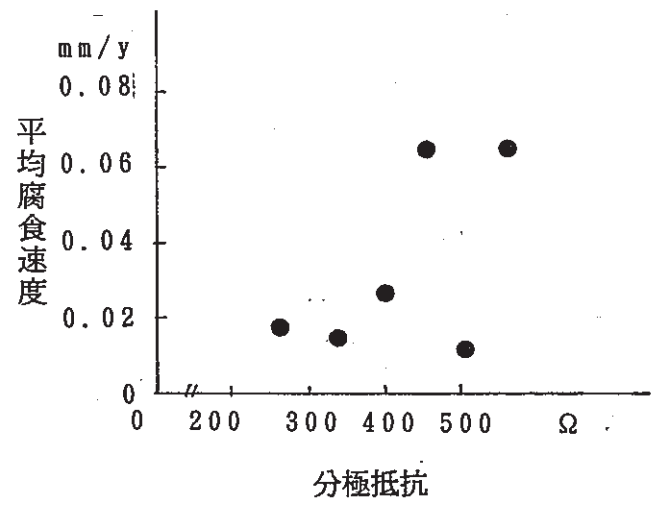
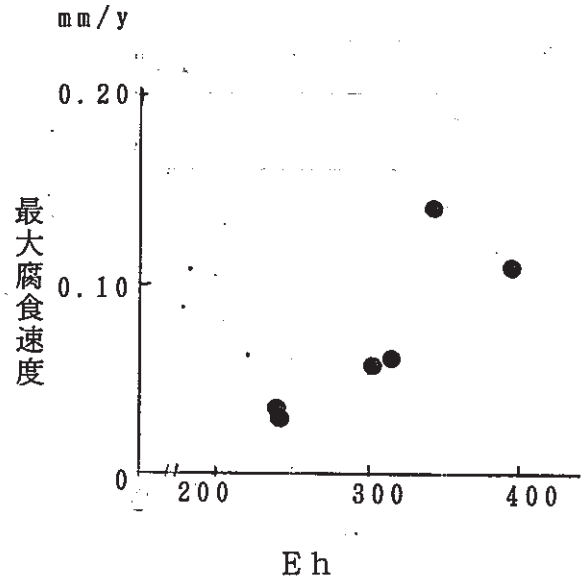
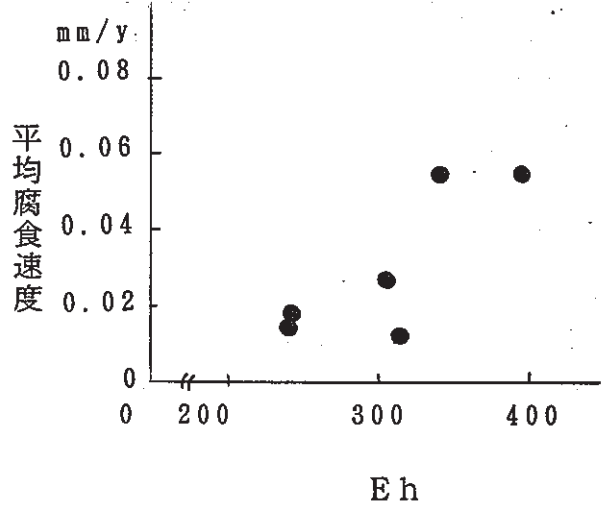
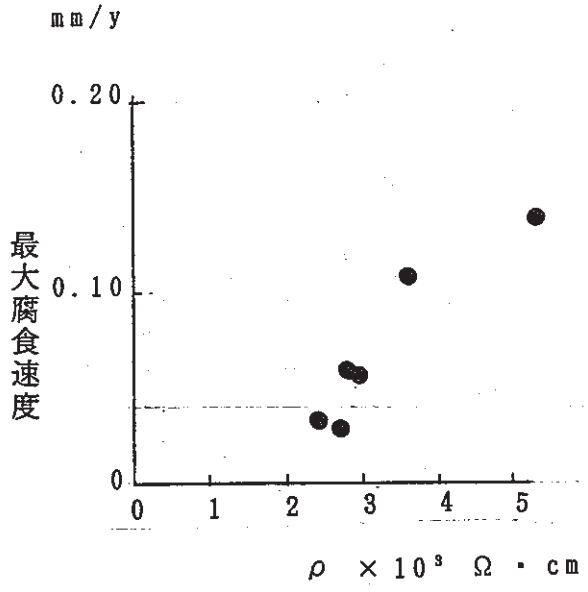
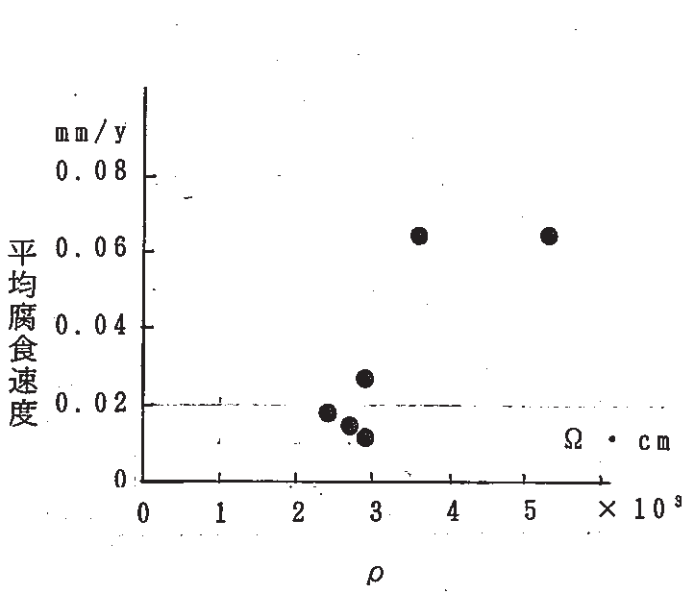


Figure 29 Relation to Environmental Soil Factor Correlated with Corrosion Rate (Scatter Diagram I)

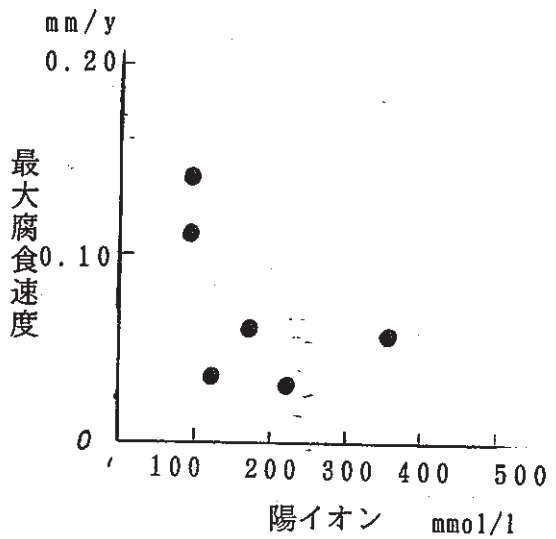
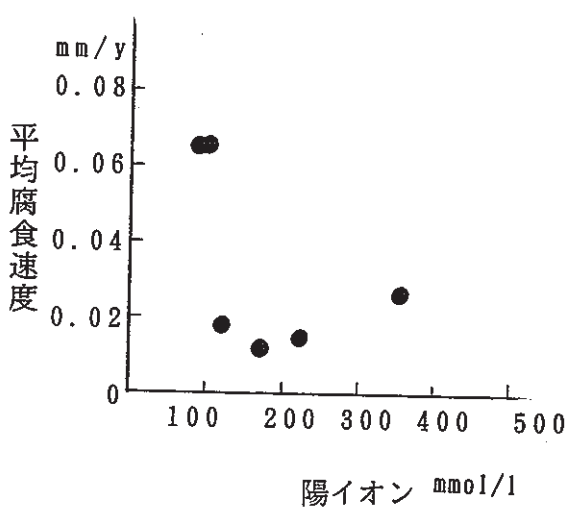
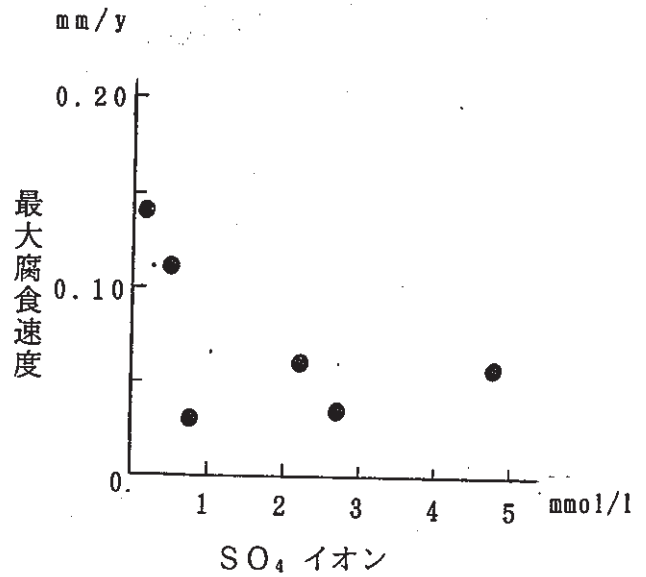
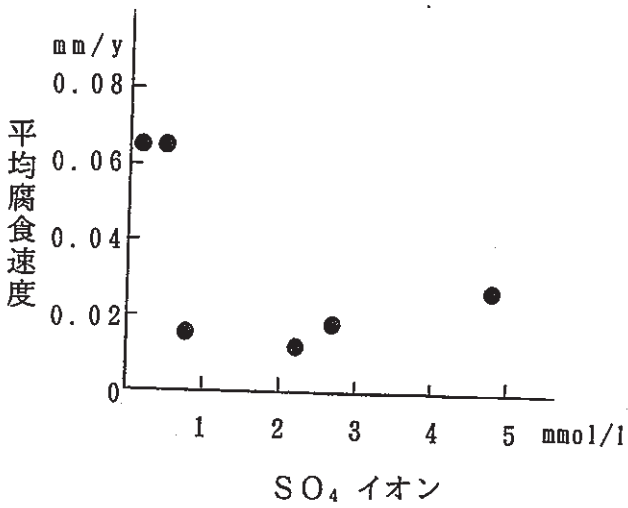
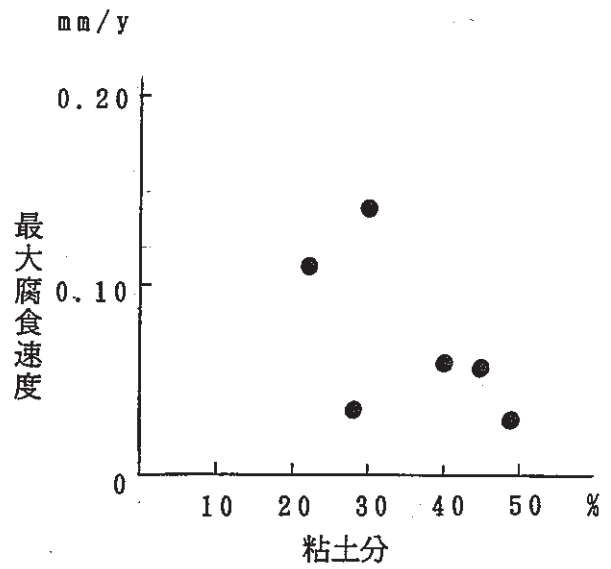
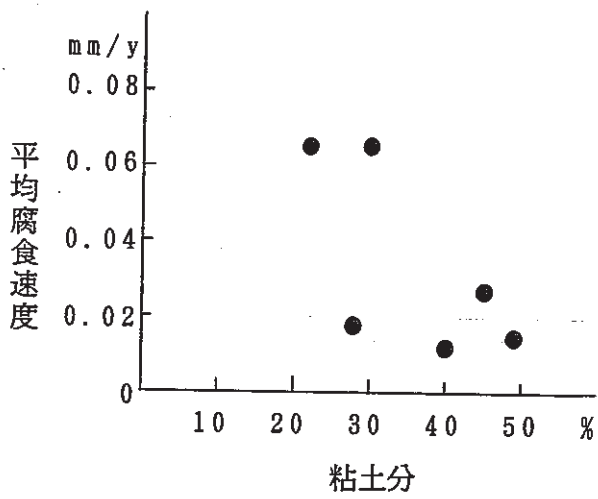


Figure 30 Relation to Environmental Soil Factor Correlated with Corrosion Rate (Scatter Diagram II)

2) 重回帰分析による腐食速度と土壤環境因子との関係

腐食速度を目的変数とし、各因子による重回帰分析を行った。

①変数増減法（ステップワイズ法）

変数増減法（ステップワイズ法）の結果をTable -31, Table -32 に示す。

この結果によれば採用された因子は、

平均腐食速度では 1 番目に土壤比抵抗, 2 番目に試験室酸化還元電位 (Eh)
 , 3 番目に分極抵抗, 4 番目に自然電位であった。

最大腐食速度では 1 番目に土壤比抵抗, 2 番目に試験室酸化還元電位 (Eh)
 , 3 番目に粘土分, 4 番目に現地酸化還元電位であった。

②指定変数法

変数を指定して、重回帰式を求め、この結果をTable -33, Table -34 に示す。現
 在のデータ数から考えて実用的な使用因子数は、2 因子、または3 因子である。

2 因子の重回帰式は

$$\text{平均腐食速度 } H_{\max} \text{ (mm/y)} = 0.00019 \times Eh + 0.00001 \times \rho - 0.075 \quad (R=0.92)$$

$$\text{最大腐食速度 } H_{\max} \text{ (mm/y)} = 0.00003 \times \rho + 0.00002 \times Eh - 0.1183 \quad (R=0.99)$$

3 因子の重回帰式は

$$\text{平均腐食速度 } H_{\max} \text{ (mm/y)} = 0.00001 \times \rho + 0.00013 \times Eh - 0.0006 \times \text{粘土分} - 0.0268 \quad (R=0.95)$$

$$\text{最大腐食速度 } H_{\max} \text{ (mm/y)} = 0.00002 \times \rho + 0.00024 \times Eh - 0.0006 \times \text{粘土分} - 0.0725 \quad (R=0.99)$$

Table -31 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Mean Corrosion Rate

ステップ表

条件	F in 値 :	2
	F out 値 :	2

ステップ	選 択	偏回帰係	決定係数	誤差分散	F 値	結果
1	x1 比抵抗	0.00001			9.44447	○
	定数項	-0.0312	0.70248	0.00022		
2	x1 比抵抗	0.00001			3.90411	○
	x8 Eh	0.00019			2.81384	○
	定数項	-0.0705	0.84647	0.00015		
3	x1 比抵抗	0.00002			339.445	
	x8 Eh	0.00034			277.319	○
	x2 Rp	-0.0001			147.507	○
	定数項	-0.0725	0.99794	0.00000		
4	x1 比抵抗	0.00002			504.543	
	x8 Eh	0.00034			482.177	
	x2 Rp	-0.0001			257.631	○
	x3 Ecorr	-0.0000			2.46196	○
	定数項	-0.0870	0.99940	0.00000		

Table -32 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Maximum Corrosion Rate

【ステップ表】

条件 Fin 値 :	2
Fout 値 :	2

ステップ	選 択	偏回帰係数	決定係数	誤差分散	F 値	結果
1	x2 比抵抗	0.00002			83.0831	
	x9 Eh	0.00031			31.9497	○
	定数項	-0.1165	0.98915	0.00003		
2	x2 比抵抗	0.00002			678.172	
	x9 Eh	0.00026			160.309	○
	x10 粘土分	-0.0005			23.6297	○
	定数項	-0.0831	0.99915	0.00000		
3	x2 比抵抗	0.00002			37821.8	
	x9 Eh	0.00027			11546.6	
	x10 粘土分	-0.0005			1787.20	○
	x7 現地 pH	-0.0019			141.340	○
	定数項	-0.0648	0.99999	0.00000		

【分析結果】

決定係数	0.71213
自由度調整済み決定係数	0.52021
重相関係数	0.84387
誤差分散の推定値	0.00090
誤差項標準偏差の推定値	0.03014

【偏回帰係数】

	値	標準誤差	t 値	検定	95%信頼区間
β_0 定数項	-0.0650	0.12536	-0.5192		-0.4640 ~ 0.33381
β_9 Eh	0.00053	0.00027	1.93225		-0.0003 ~ 0.00141
β_{10} 粘土分	-0.0007	0.00154	-0.4936		-0.0056 ~ 0.00414

Table 33 Results of Multiple Regression Analysis of Measured Mean Corrosion Rate by Variable Selection

指定因子数	加 ₁ 土壌比抵抗 ρ	加 ₂ 分極抵抗 Rp	加 ₃ 自然電位 Ec	管対地電位 P/S	現地酸化還元電位 Re	現地 pH	試験室 pH	含水率	試験室酸化還元電位 Eh	粘土分	塩化物	硫酸塩	陽イオン	重相関係数 √R ²	自由度調整済 重相関係数 √R ²	重回帰式			
																定数項 β ₀	説明変数 β ₁	説明変数 β ₂	説明変数 β ₃
4 因子	○	○	○						○					0.9997	0.997				
	○				○				○	○				0.969	0.694				
3 因子	○	○							○					0.9990	0.995	-0.0725	0.00034*Eh	0.00002*ρ	-0.0001*Rp
	○								○	○				0.948	0.748	-0.0268	0.00001*ρ	0.00013*Eh	-0.0006*粘土分
	○								○			○		0.924	0.633	-0.0636	0.00001*ρ	0.00019*Eh	-0.0014*SO ₄
2 因子	○								○					0.920	0.744	-0.0705	0.00019*Eh	0.00001*ρ	
	○									○				0.918	0.737	0.0154	0.00001*ρ	-0.0009*粘土分	
	○	○							○	○				0.844	0.523	Rp の係数が小さすぎて計算不可			
	○													0.838	0.628	-0.0312	0.00001*ρ		
										○				0.678	0.325	0.09025	-0.0015*粘土分		
									○					0.804	0.558	-0.0702	0.00033*Eh		

PNC T J1451 93-001

Table 34 Results of Multiple Regression Analysis of Measured Maximum Corrosion Rate by Variable Selection

指定因子数	加 ₁ 土壌比抵抗 ρ	加 ₂ 分極抵抗 Rp	加 ₃ 自然電位 Ec	管対地電位 P/S	現地酸化還元電位 Re	現地 pH	試験室 pH	含水率	試験室酸化還元電位 Eh	粘土分	塩化物	硫酸塩	陽イオン	重相関係数 √R ²	自由度調整重相関係数 √R ²	重回帰式			
																定数項 β ₀	説明変数 β ₁	説明変数 β ₂	説明変数 β ₃
4 因子	○	○	○						○					0.997	0.973				
	○				○				○	○				0.99998	0.99988				
3 因子	○	○							○					0.992	0.958	-0.1188	0.00003*ρ	-0.0000*Rp	0.00034*Eh
	○								○	○				0.9992	0.9979	-0.0831	0.00002*ρ	0.00026*Eh	-0.0005*粘土分
	○								○			○		0.992	0.959	-0.1090	0.00002*ρ	0.00030*Eh	-0.0019*SO ₄
2 因子	○								○					0.9891	0.982	-0.1165	0.00002*ρ	0.00031*Eh	
	○									○				0.971	0.905	0.00122	0.00003*ρ	-0.0012*粘土分	
									○	○				0.841	0.512	-0.0541	0.00051*Eh	-0.0009*粘土分	
	○	○												0.944	0.819	-0.0714	0.00003*ρ	0.00008*Rp	
	○													0.874	0.842	-0.0548	0.00003*ρ		
									○										
										○									

(2) 実測最大孔食深さと経過年の関係

Table -25に示す実測の最大孔食深さの6点の $H = a Y^n$ の近似関数を求めると、

$$H = 1.6 Y^{0.086} \quad (\sqrt{R^2} = 0.34) \quad (\sqrt{R^2} \text{ は重相関係数})$$

となり、この関係を Figure -31に示す。

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると

$$H_{1000} = 2.8 \text{ (mm)}$$

なお、参考に平均最大孔食深さから、近似 $H = a Y^n$ の a , n を求めた。

$$H = 0.12 Y^{0.57} \quad (\sqrt{R^2} = 0.35)$$

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると、

$$H_{1000} = 6.2 \text{ (mm)}$$

と小さい値となった。

前年度までのデータに1データ追加されたが、 $N=4$ のときの $n \approx 0.5$ であったものが $N=6$ 件となって $n \approx 0.1$ に変わったのはデータ数が少ないためと考えられる。

なお、実測データは、限られた面積により求められたものであり、極値統計手法による推定値を採用すべきと考えられる。

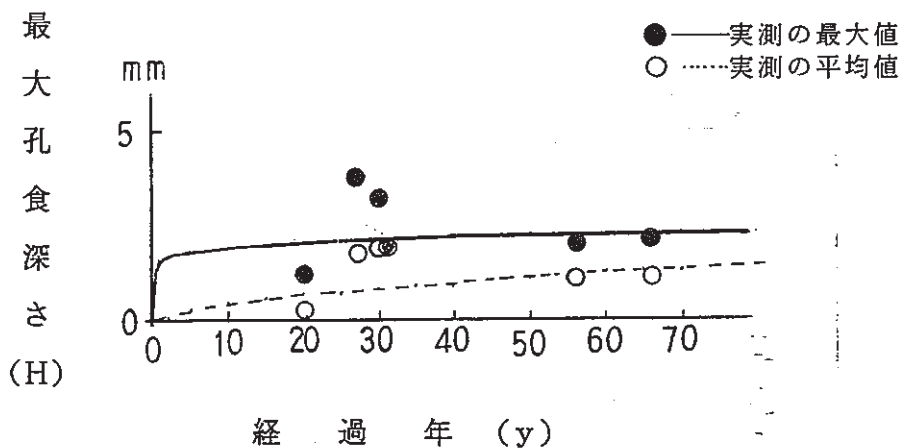


Figure -31 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Date of Steel Pipes buried in Freshwater Clay

(3) 極値統計手法による最大孔食深さと経過年の関係

Table -26に示す全年度6件の最大孔食深さのデータを用い、この5点の近似関係式 $H = a Y^n$ の定数 a , n を求めると、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_y = 0.84 Y^{0.310} \quad (\sqrt{R^2} = 0.31)$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_y = 1.4 Y^{0.291} \quad (\sqrt{R^2} = 0.31)$$

となり、この関係を Figure -32に示す。

上式を用いて、1,000年後の最大孔食深さ (H_{1000}) を求めると、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_{1000} = 7.1 \text{ mmとなる。}$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_{1000} = 10.5 \text{ mmとなる。}$$

上記解析において、 n として約0.3の値が求まっており、従来の文献から比較すると少し低い値である。これは、経過年の長い京町-1の腐食量が小さいのと、梅田の腐食量が小さいためである。ただし、最頻値と累積確率0.99とも $n = 0.3$ となった。

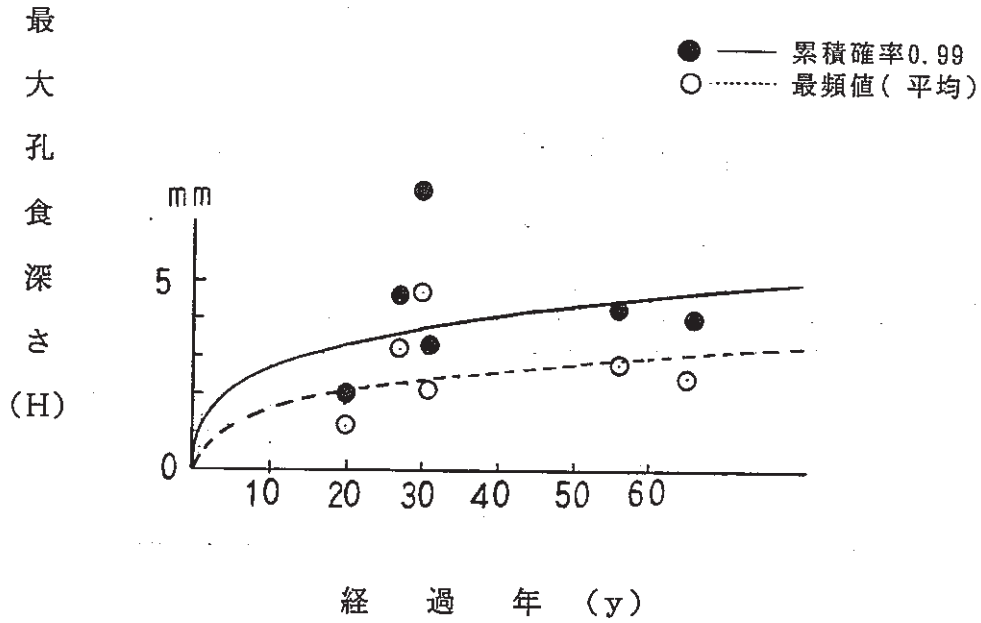


Figure -32 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method

2.3.2 層別解析（粘土中4地点データ）

粘土として選択していた6件のデータは蓮根を除いて、大きさに差はあるが土質差のマクロセルをうけている。とくに、豊島-1, 豊島-2は土壌比抵抗が高いこと、粘土がやや少ないこと、小石もみられることや腐食状況からマクロセルの混入の可能性があることから、この2データを除いた解析のほうがより正確である。従って、マクロセルの混入の可能性のあるデータとを層別して解析する。

(1) 埋設鋼材の腐食速度と土壤環境因子との関係（粘土中4地点データ）

i) 単相関分析

腐食速度と土壤環境因子の関係を相関係数で示すとTable -35 の如くとなる。この中で腐食速度と相関の強い因子の散布図をFigure -33, Figure -34に示す。

この分析結果によれば、

- ① 実測平均腐食速度と相関の強い因子を相関の強い順に示すと、含水比 (0.95) 現地酸化還元電位 Re (-0.93), 試験室 pH (-0.91), SO_4 イオン(0.85), 陽イオン(0.77)であった。
- ② ただし、含水比、現地酸化還元電位 Re は一般に言われている腐食との関係は正しい関係である。比抵抗は腐食との相関が0.3と低い。
- ③ 因子相互の関係で、相関の強いのは、 SO_4 イオンと含水比 (0.97), 含水比と試験室 pH (-0.92), 試験室 pH と陽イオン (-0.91), 置換酸度と現地 pH (0.93), P/S と Cl イオン (0.93), 粘土分と E_{corr} (-0.97), 酸化還元電位と試験室 pH (0.95), P/S と Cl イオン (0.93) である。
- ④ 実測最大腐食速度と相関の強い因子は、強い順に酸化還元電位 Bh (0.97), 分極抵抗(0.88), 置換酸度(0.85), Cl イオン(0.75), 現地 pH (-0.77), 比抵抗(0.63)である。
- ⑤ 実測の平均腐食速度と因子間の相関は、最大腐食速度の方が平均腐食速度よりやや強い傾向がある。

Table 35 Correlation Coefficients between Corrosion Rate and Environmental Soil Factor

相關係數表

		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10
		平均mm/y	最大mm/y	比抵抗	分極抵抗	Ecorr	P/S	Redox	現地 pH	含水比	Eh
x1	平均mm/y	1	1E-15	0.30364	-0.2116	-0.1761	-0.6425	-0.9301	-0.6307	0.94987	0.14927
x2	最大mm/y	1E-15	1	0.62840	0.88694	0.23240	0.69088	-0.0390	-0.7749	0.27229	0.96843
x3	比抵抗	0.30364	0.62840	1	0.78708	-0.5924	0.00176	-0.5684	-0.6496	0.34950	0.79687
x4	分極抵抗	-0.2116	0.88694	0.78708	1	-0.1492	0.61279	0.01236	-0.5372	-0.0226	0.90929
x5	Ecorr	-0.1761	0.23240	-0.5924	-0.1492	1	0.59064	0.50410	-0.1075	0.04293	0.00781
x6	P/S	-0.6425	0.69088	0.00176	0.61279	0.59064	1	0.69172	-0.1433	-0.3713	0.50701
x7	Redox	-0.9301	-0.0390	-0.5684	0.01236	0.50410	0.69172	1	0.60219	-0.8379	-0.2495
x8	現地 pH	-0.6307	-0.7749	-0.6496	-0.5372	-0.1075	-0.1433	0.60219	1	-0.8163	-0.8365
x9	含水比	0.94987	0.27229	0.34950	-0.0226	0.04293	-0.3713	-0.8379	-0.8163	1	0.37481
x10	Eh	0.14927	0.96843	0.79687	0.90929	0.00781	0.50701	-0.2495	-0.8365	0.37481	1
x11	粘土分	0.10162	9E-16	0.74332	0.38687	-0.9694	-0.3948	-0.4578	-0.0240	-0.0563	0.21377
x12	Cl ⁻ 材	-0.6589	0.75052	0.30748	0.82575	0.24248	0.92532	0.56527	-0.1639	-0.4292	0.63848
x13	SO ₄ 材	0.85328	0.46553	0.38340	0.13584	0.18260	-0.1488	-0.7260	-0.9084	0.97336	0.53131
x14	陽 材	0.77068	0.19686	0.79175	0.26025	-0.6696	-0.5600	-0.9458	-0.6142	0.69255	0.42668
x15	試驗室pH	-0.9081	-0.3418	-0.6637	-0.2102	0.31174	0.42747	0.94628	0.82798	-0.9185	-0.5148
x16	置換酸度	0.44908	0.85823	0.85364	0.76815	-0.1173	0.22203	-0.5419	-0.9383	0.62209	0.94779

		x11	x12	x13	x14	x15	x16
		粘土分	Cl ⁻ 材	SO ₄ 材	陽 材	試驗室pH	置換酸度
x1	平均mm/y	0.10162	-0.6589	0.85328	0.77068	-0.9081	0.44908
x2	最大mm/y	9E-16	0.75052	0.46553	0.19686	-0.3418	0.85823
x3	比抵抗	0.74332	0.30748	0.38340	0.79175	-0.6637	0.85364
x4	分極抵抗	0.38687	0.82575	0.13584	0.26025	-0.2102	0.76815
x5	Ecorr	-0.9694	0.24248	0.18260	-0.6696	0.31174	-0.1173
x6	P/S	-0.3948	0.92532	-0.1488	-0.5600	0.42747	0.22203
x7	Redox	-0.4578	0.56527	-0.7260	-0.9458	0.94628	-0.5419
x8	現地 pH	-0.0240	-0.1639	-0.9084	-0.6142	0.82798	-0.9383
x9	含水比	-0.0563	-0.4292	0.97336	0.69255	-0.9185	0.62209
x10	Eh	0.21377	0.63848	0.53131	0.42668	-0.5148	0.94779
x11	粘土分	1	-0.0170	-0.1469	0.68121	-0.3327	0.29283
x12	Cl ⁻ 材	-0.0170	1	-0.2246	-0.3296	0.32970	0.36067
x13	SO ₄ 材	-0.1469	-0.2246	1	0.60690	-0.8772	0.72436
x14	陽 材	0.68121	-0.3296	0.60690	1	-0.9136	0.66565
x15	試驗室pH	-0.3327	0.32970	-0.8772	-0.9136	1	-0.7612
x16	置換酸度	0.29283	0.36067	0.72436	0.66565	-0.7612	1

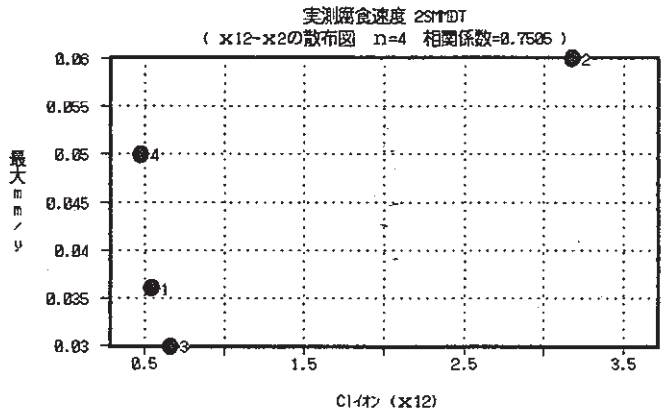
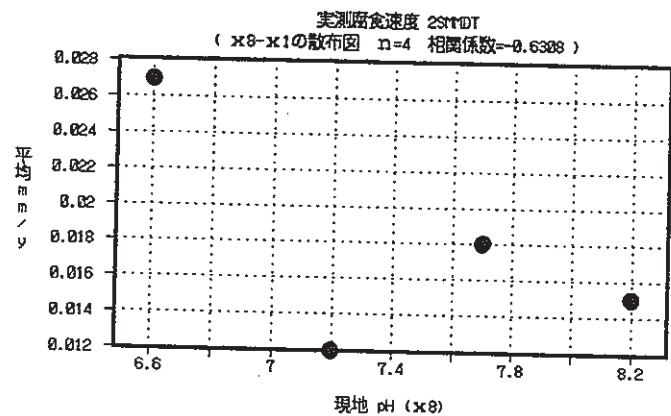
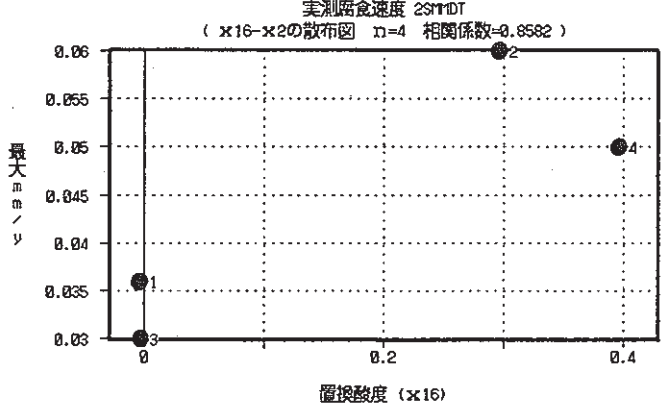
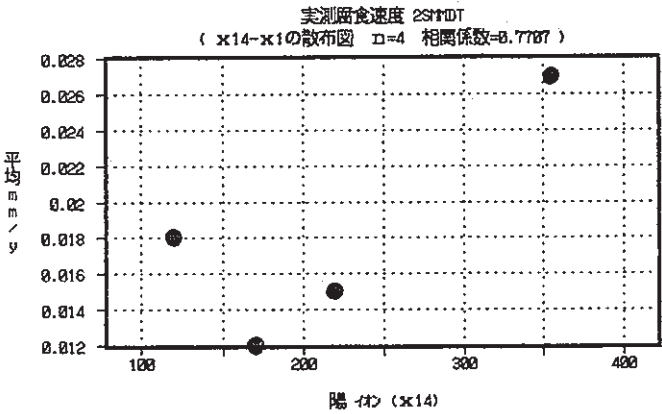
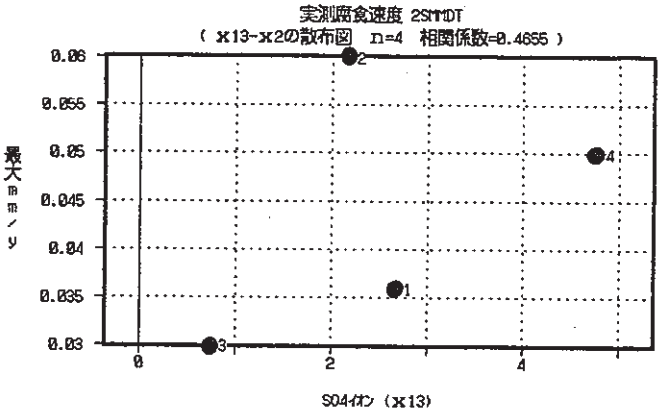
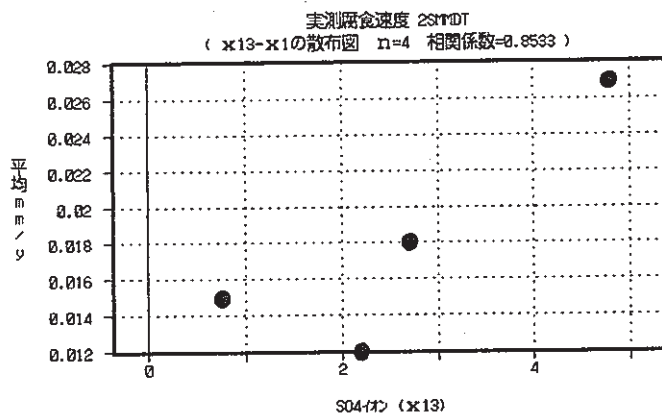
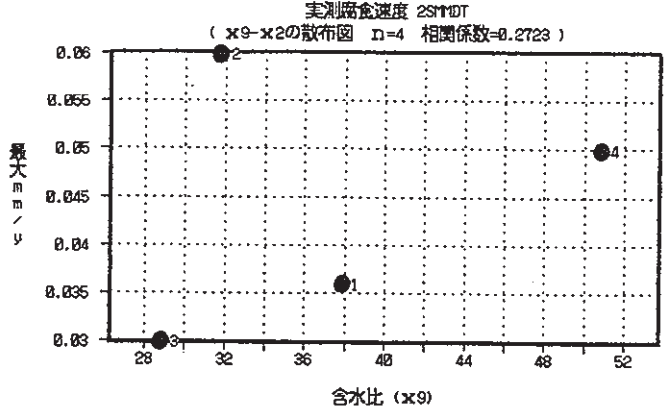
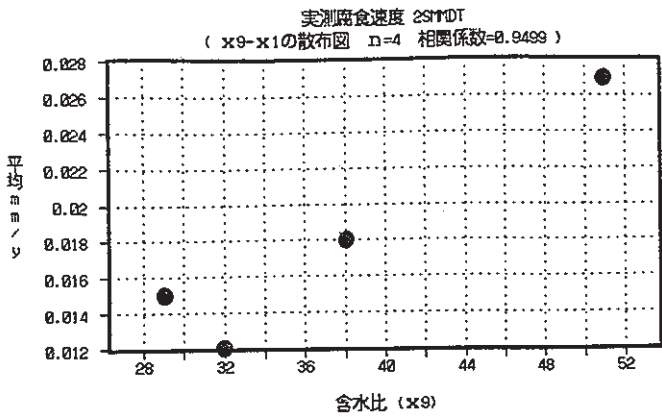


Figure 33 Factors Correlating Strongly with Corrosion Rate (Scatter Diagram I)

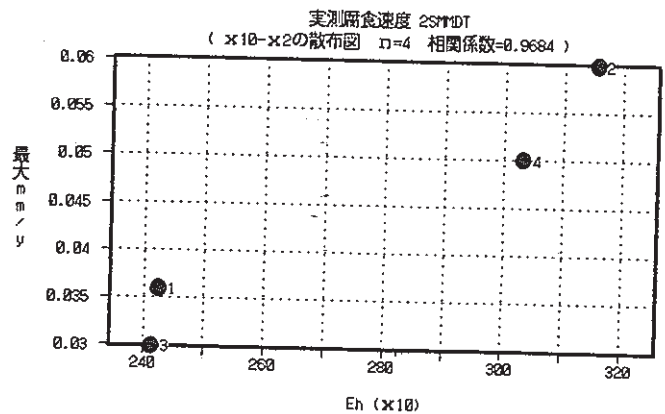
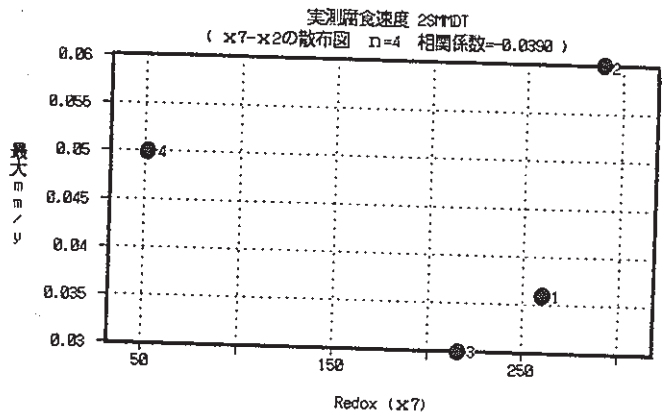
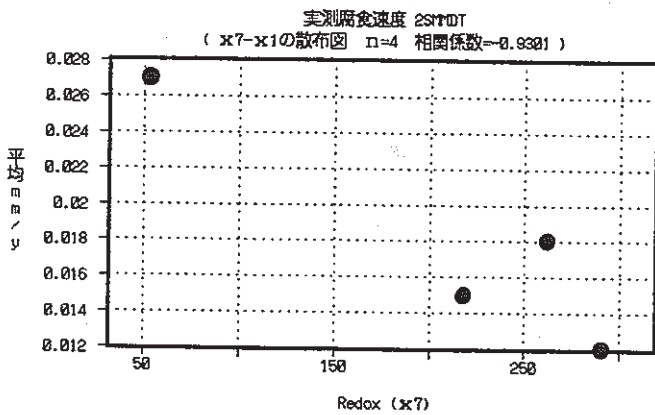
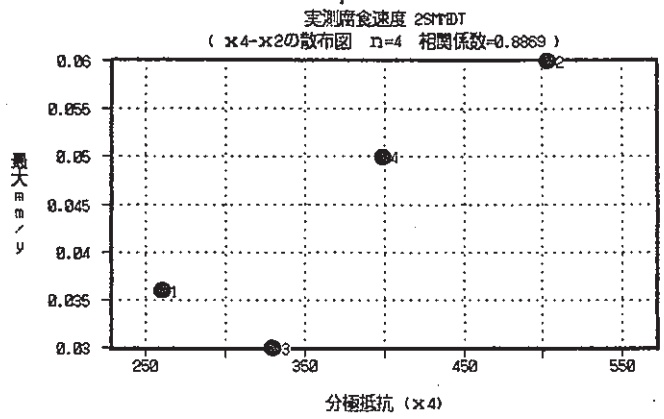
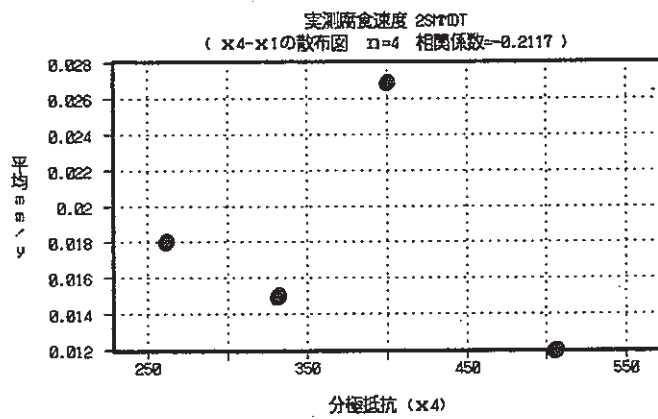
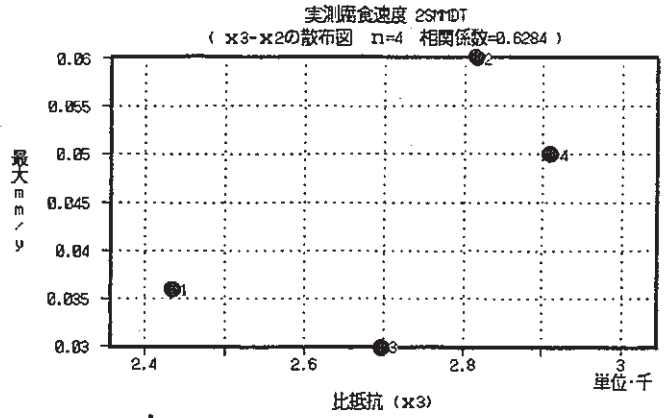
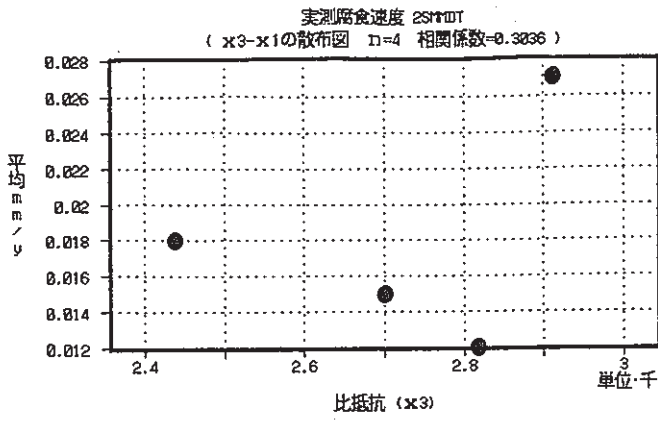


Figure 34 Factors Correlating Strongly with Corrosion Rate (Scatter Diagram II)

(2) 実測最大腐食深さと経過年の関係

Table -25に示す実測の最大腐食深さの6点から豊島-1と豊島-2のデータを除いた4地点の $H = a Y^n$ の近似関数を求めると、

$$H = 0.350 Y^{0.430} \quad (R = 0.92) \quad (R \text{ は 相関係数})$$

となり、この関係を Figure -35に示す。

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると

$$H_{1000} = 6.8 \text{ (mm)}$$

なお、参考に平均最大孔食深さから、近似 $H = a Y^n$ の a , n を求めた。

$$H = 0.0115 Y^{1.11} \quad (R^2 = 0.88)$$

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると、

$$H_{1000} = 24.6 \text{ (mm)}$$

と大きい値となった。

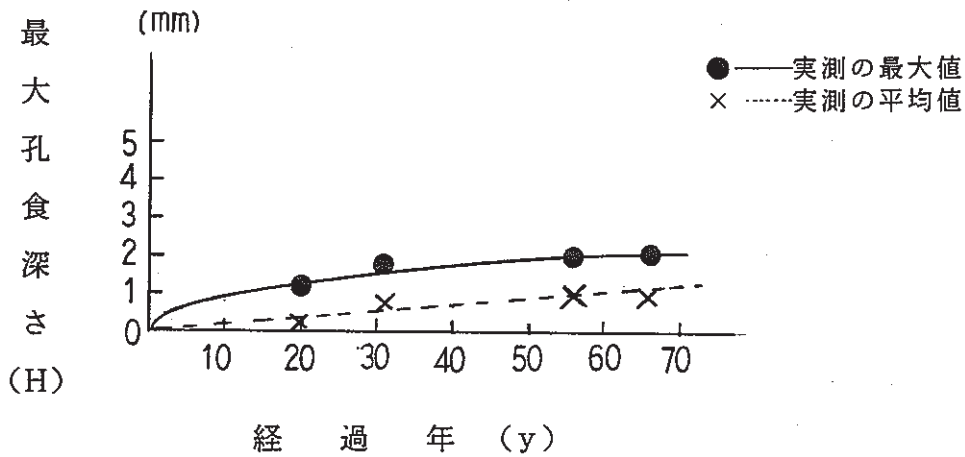


Figure -35 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Date of Steel Pipes buried in Freshwater Clay

(3) 極値統計手法による最大孔食深さと経過年の関係

Table -25に示す全年度6件の最大孔食深さのデータから、豊島1, 豊島-2を除く4地点のデータを用い、この4点の近似関係式 $H = a Y^n$ の定数 a , n を求めると、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_y = 0.206 Y^{0.628} \quad (R = 0.93)$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_y = 0.393 Y^{0.576} \quad (R = 0.92)$$

となり、この関係を Figure -36 に示す。

上式を用いて、1,000年後の最大孔食深さ (H_{1000}) を求めると、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_{1000} = 16.0 \text{ mmとなる。}$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_{1000} = 21.0 \text{ mmとなる。}$$

上記解析において、 n として約0.6の値が求まっており、従来の文献から比較すると少し高い値であるが、ほぼ文献等と同様な値となった。

さらに確度を上げるためにはデータ数の増加及び100年以上のデータがのぞまれる。

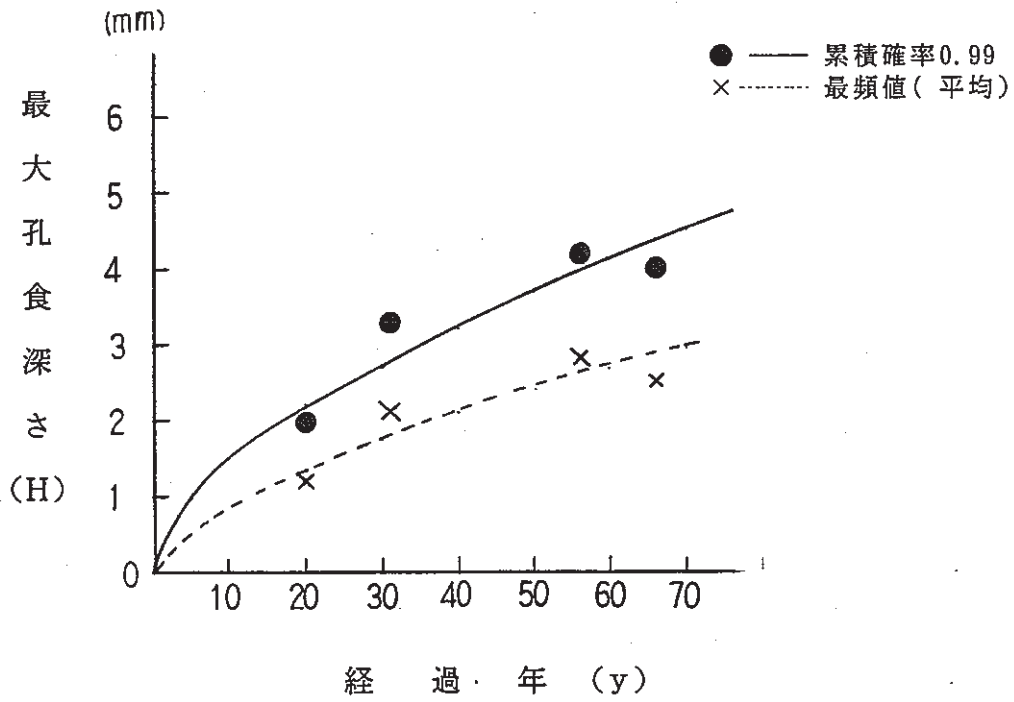


Figure -36 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method

3. ま と め

放射性廃棄物の地層処分使用する、金属オーバーパックスの長期腐食挙動を評価するアプローチの一つとして、ナチュラルアナログ研究がある。ナチュラルアナログの観点からは、緩衝材の候補材である精製ベントナイトに類似していること、及び環境条件の履歴が比較的単純かつ把握できることが重要である。

こうした観点から、まず天然環境下における金属の腐食事例、メカニズム、腐食診断・推定方法について調査を行った。その評価結果から土質差マクロセル腐食、ガルバニック腐食、迷走電流腐食を除いた淡水成粘土中における数十年経過した埋設水道管の腐食調査を行い、構築した腐食モデルに基づいて、長期埋設後の腐食量の推定を行った。

この本年度の調査結果の主要な点について以下に集約記述するとともに、今後の検討課題について提言した。

(1) 粘土中の鋼材の腐食評価量

全調査結果をみると、経過年の長いものの腐食量が小さく、経過年の短いものの腐食量が大きい傾向がみられる。

このことから、経過年の長いもので腐食の大きいものは入れ替えられて、腐食環境が弱いところが残っていることも考えられる。

(2) 腐食回帰式と長期腐食の推定

均一中性の淡水成粘土中における鋼材の腐食メカニズムの検討結果に基づいて、設定した孔食深さの腐食モデルを検証した結果、以下の式が得られた。

4 地点データ（除くマクロセル）

$$\text{実 測 (平 均)} \quad H=0.0115Y^{1.11}$$

$$\text{実 測 (最 大)} \quad H=0.35Y^{0.430}$$

$$\text{極値統計 (最 頻 値)} \quad H=0.026 Y^{0.628}$$

$$\text{極値統計 (累積確率0.99)} \quad H=0.393 Y^{0.576}$$

$$\text{重回帰式 (平 均)} \quad H(\text{mm/y}) = 0.00001 \cdot \rho + 0.00013 \cdot Eh - 0.0006$$

$$\text{重回帰式 (最 大)} \quad H(\text{mm/y}) = 0.00002 \cdot \rho + 0.00026 \cdot Eh - 0.0005$$

$$\cdot \text{粘土分} - 0.0831$$

（重回帰式のデータは6件のデータ）

なお、実測平均値による推定式は、追加データにより極端に変化した。そのため前年の推定式は直線回帰に近くなったために、1,000年後の推定値が大きくなったが、反対に今年度の推定式による1000年後の推定値は小さくなった。上記解析において、極値統計による推定式では n の値として約0.6がもとまっております、従来の文献から比較すると、ほぼ妥当な値と考えられる。ただし、値のバラツキがあり、さらに確度を上げるためにはデータの増加、出来れば百年以上のデータの増加と、それらに基づく極値統計による検討が望まれる。

以上の結果から、中性、低酸素下の酸素還元反応律速で経年効果を考慮した孔食深さ（とくに最大）に関する腐食モデルは、ほぼ妥当であると判断されるが、今後、埋設履歴の明確なサンプルの選定と、異土質土壌の混入によるマクロセル腐食の見極め（除外）、データ数の増加による精度の向上、及びできれば百年以上経過した埋設鋼材の調査等が課題となり、さらに腐食環境因子による腐食推定式の策定、検討も必要となろう。

あ と が き

本報告は、動燃事業団殿より受託した日本鋼管工事㈱が土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究を行った成果のうち、平成4年度分をまとめたものである。

ベントナイト類似の淡水成粘土中に埋設されている鋼材を掘り上げ、その時、腐食と環境を調査した。文献により構築した腐食モデルを実物調査により検証した成果は、腐食モデルがほぼ妥当であることが明らかになった。

ただし、条件制約から掘り出し物件も少なく、又、20～60年の埋設鋼材のデータによる検証となっているため、今後は百年以上経過した埋設鋼材の調査をすることにより、精度の向上を図ることが必要である。

本研究の遂行に当たり、埋設管の提供に対し横浜市水道局殿の多大なる御協力に感謝する。

本研究の一連の成果が動燃殿のオーバーパックスの研究に役立って頂ければ幸いである。