

土壤埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究（VI）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1994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、オーバーパックス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2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、腐食因子と腐食量の関係を求めた。更に過去の研究結果を加えた最大孔食深さのデータを腐食モデルの式 $H = a Y^n$ に適用して、極値統計手法による値で $n = 0.4$ の妥当な値を得た。

更に、この求めた腐食モデルの式より、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まだ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 : 050D0185

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 0.4. 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.:050D0185
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. 粘土中埋設鑄鉄管の腐食量及び環境条件の測定	3
1.1 埋設鑄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	17
1.2.1 掘削後計測結果	17
1.2.2 管体腐食調査結果	23
2. 考察	71
2.1 本年度調査結果のまとめ	71
2.2 全調査結果のまとめ	81
2.3 解析	86
2.3.1 粘土全データ（5地点）	86
3. まとめ	101
あとながき	103

Index of Table, Figure, Photo

	Page
Table -1 Hysteresis of Buried Cast Iron Pipe	3
Table -2 Measuring Methods of Soil Environment Factors	7
Table -3 Methods of Soil Analyses	13
Table -5 Results of Measurement at Hazawa after Excavation	19
Table -6 Results of Measurement at Hanasaki after Excavation	22
Table -7 Results of Measurement of Pit Depths (Hazawa)	30
Table -8 Summary of Measured Depth of Pit	31
Table -9 Chemical Composition of Pipe (Hazawa)	34
Table -10 X-ray Diffraction Analyses of Rust (Hazawa)	35
Table -11 SEM-EDX Analyses of Rust (Hazawa)	35
Table -12 Results of Quantitative Analyses of Rust (Hazawa)	35
Table -13 Results of Compositional Analyses of Soil (Hazawa)	36
Table -14 Results of Analyses of Springwater	36
Table -15 Results of X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hazawa)	37
Table -16 Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Hazawa) 3	37
Table -17 Results of SRT Tests (Hazawa)	37
Table -18 Results of Measurement of Pit Depths (Hanasaki)	55
Table -19 Summary of Measured Depths of Pit (Hanasaki)	56
Table -20 Chemical Composition of Pipe (Hanasaki)	59
Table -21 X-ray Diffraction Analyses of Rust (Hanasaki)	60
Table -22 EPMA Analyses of Rust (Hanasaki)	60
Table -23 Results of Quantitative Analyses of Rust (Hanasaki)	60
Table -24 Results of Compositional Analyses (Hanasaki)	61
Table -25 Results of X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical	

	Page
Composition of Soil (Hanasaki)	62
Table -26 Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Hanasaki, underside of Pipe)	62
Table -27 Results of SRT Tests (Hanasaki)	
Table -28 Summary of Soil Environmental Factors	73
Table -29 Summary of Corrosion of Pipe	76
Table -30 腐食深さと腐食速度のまとめ表	76
Table -31 Examination Results on the amount of Corrosion of Pipes Buried in the Soil-1994	77
Table -32 MV L U Eによるパラメーター算出表	79
Table -33 Summary of Environmental Factors of Clay Measured at Sites	82
Table -34 Summary of Corrosion of Pipe	84
Table -35 Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay	85
Table -36 Pit Depth and its rate of Pipes Buried in Freshwater Clay Obtained by the Extreme Value statistical Method	85
Table -37 Correlation Coefficients between Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor	87
Table -38 Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor	88
Table -39 Correlation Coefficients between Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor	88
Table -40 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Mean Corrosion Rate	89
Table -41 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Maximum Corrosion Rate	96
Table -42 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Extremal mode Correlation Rate	96
Table -43 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of the Extreme Value statistical Method	97

	Page
Figure- 1	Investigated Positions in Topographical Map 4
Figure- 2	Investigation Position of Hazawa 5
Figure- 3	Investigation Position of Hanasaki 5
Figure- 4	Invitation Flow 6
Figure- 5	Schematic Illustration of Measuring Method after Excavation --- 8
Figure- 6	Method of Measuring from Investigated Pipe 9
Figure- 7	Measuring Method of Pit Depth 9
Figure- 8	Definition of Corrosion Products to be Measured 10
Figure- 9	Sketch of Adhering Soil (Hazawa) 24
Figure- 10	Sketch after Removal of Adhering Soil (Hazawa) 26
Figure- 11	Mesured Points of Pit (Hazawa) 29
Figure- 12	Results of Measurement of Original Wall Thickness (Hazawa) 32
Figure- 13	Cutting Position of Test pieces (Hazawa) 38
Figure- 14	Positions of Metallography (Hazawa) 38
Figure- 15	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hazawa) 40
Figure- 16	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hazawa) 40
Figure- 17	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hazawa) 41
Figure- 18	X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hazawa) 42
Figure- 19	X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Hazawa) 42
Figure- 20	X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Hazawa) 43
Figure- 21	EPMA Analyses of surface Rust (Hazawa) 43
Figure- 22	EDX Analyses of surface Rust (Hazawa) 44
Figure- 23	EDX Analyses of surface Rust in Pit (Hazawa) 45
Figure- 24	Grain-size Distribution of Soil (Hazaw) 46
Figure- 25	X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hazawa) 47
Figure- 26	X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hazawa) 47

	Page
Figure- 27 Sketch of Adhering Soil (Hanasaki)	49
Figure- 28 Sketch after Removal of Adhering Soil (Hanasaki)	51
Figure- 29 Sketch of a Corroded surpave of Pipe after Blasting (Hanasaki)	54
Figure- 30 Mesured Points of Pit (Hanasaki) ---	54
Figure- 31 Cutting Position of Test piece (Hanasaki)	63
Figure- 32 Positions of Metallography (Hanasaki)	63
Figure- 33 X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hanasaki)	66
Figure- 34 X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (Hanasaki)	66
Figure- 35 X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Hanasaki)	67
Figure- 36 X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Hanasaki)	67
Figure- 37 EPMA Analyses of surface Rust (Hanasaki)	68
Figure- 38 EPMA Analyses of Rust in Pit (Hanasaki)	68
Figure- 39 Grain-size of Soil (Hanasaki)	69
Figure- 40 Grain-size Distribution of Soil (Hanasaki)	69
Figure- 41 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hanasaki)	70
Figure- 42 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hanasaki)	70
Figure- 43 Maximum Pit Depth-Histogram (Hazawa)	79
Figure- 44 Estimation of Maximum Pit Depth-Gumbel Probability Paper Plot(Hazawa).....	80
Figure- 45 Relation to Environmental Soil Factor with Pit Depth	89
Figure- 46 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Data of Steel Pipes buried in Freshwater Clay	98
Figure- 47 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method	99

	Page
Photo -1 Condition of Soil Around Pipe (Hazawa)	18
Photo -2 Condition of Soil Around Pipe (Hanasaki)	21
Photo -3 Condition of Soil Around Pipe (Hazawa)	23
Photo -4 Scketch after Removal of Adhering Soil (Hazawa)	25
Photo -5 Outview of Pipe (Hazawa)	28
Photo -6 Micro and Macro Structures of Cross Section of	
- Test Piece (Hazawa)	39
Photo -7 Condition of Soil Around Pipe (Hanasaki)	48
Photo -8 Condition after Removal of Adhering Soil (Hanasaki).....	50
Photo -9 Corroded Surface of Pipe after Blasting (Hanasaki).....	53
Photo -10 Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Hanasaki)	64
Photo -11 Micro and Macro Structures of Cross Section of	
Test Piece (Hanasaki)	65

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（VI）」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2ヶ所掘り上げ、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、天然環境下の淡水成粘土中の鋼材の腐食モデルを作成するとともに、腐食速度と埋設環境因子との関係を多変量解析し、腐食因子と腐食量の関係を求めた。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30年間と68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、30年間埋設の羽沢町と、68年間埋設の花咲町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	羽 沢 町	花 咲 町
経 過 年	30年	68年
埋 設 年	昭和38年	大正14年
埋 設 場 所	横浜市神奈川区羽沢	横浜市西区花咲町
使用目的	上 水	上 水
管 種	鑄 鉄 管	鑄 鉄 管
呼 び 径	150φ	100φ
土 質 *	粘 性 土	粘 性 土

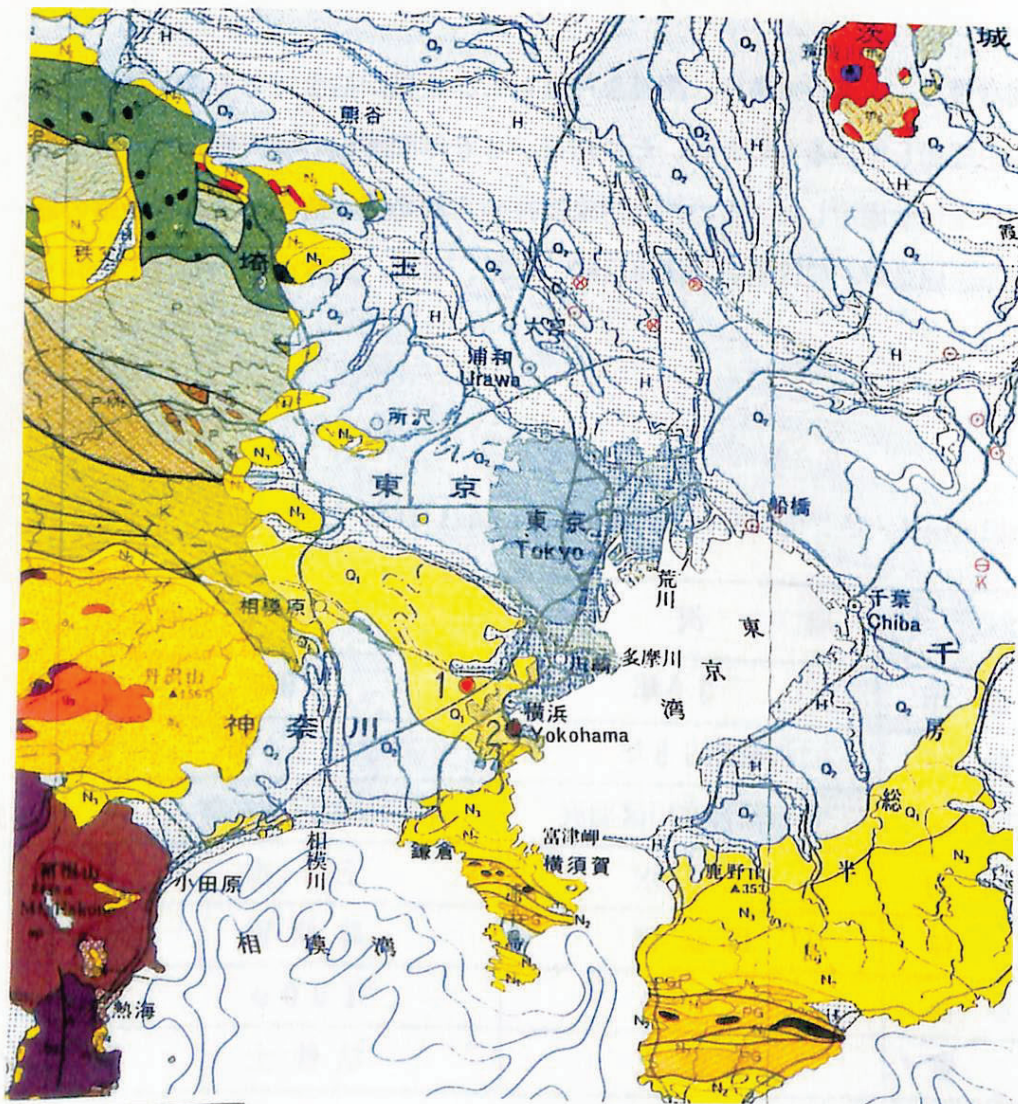
* 水道局からの情報による。

(2) 埋設鉄管の掘り出し場所

調査場所は、横浜市の羽沢町と花咲町で、羽沢は横浜市中心部にあり、花咲町は横浜市海岸部に位置している。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、羽沢は0.6 Kmほど離れて、JR貨物線があるが、腐食に対する影響はない。また、花咲町は京浜東北線より200mしか離れていないので、電食の影響も考えられる。

また、調査ヶ所の羽沢（図中番号8）は、丘陵地の住宅地内の道路に埋設されたもので、丘陵地の傾斜部分である。花咲は、商業地域内である。この位置図をFigure - 2に示す。



凡例	
H	新生代・第四紀・完新世 砂・泥および礫
Q ₁	新生代・第四紀・更新世後期 礫岩・砂岩・泥岩および凝灰岩
Q ₂	新生代・第四紀・更新世前期 礫岩・砂岩・泥岩および凝灰岩
N ₁	新生代・新第三紀・鮮新世 砂岩・泥岩・礫岩および凝灰岩
N ₂	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 ₃	新生代・新第三紀・中新世後期 —鮮新世前期

Figure-1 Investigated Positions In Topographical Map
(調査箇所 1. Hazawa 2. Hanasaki)

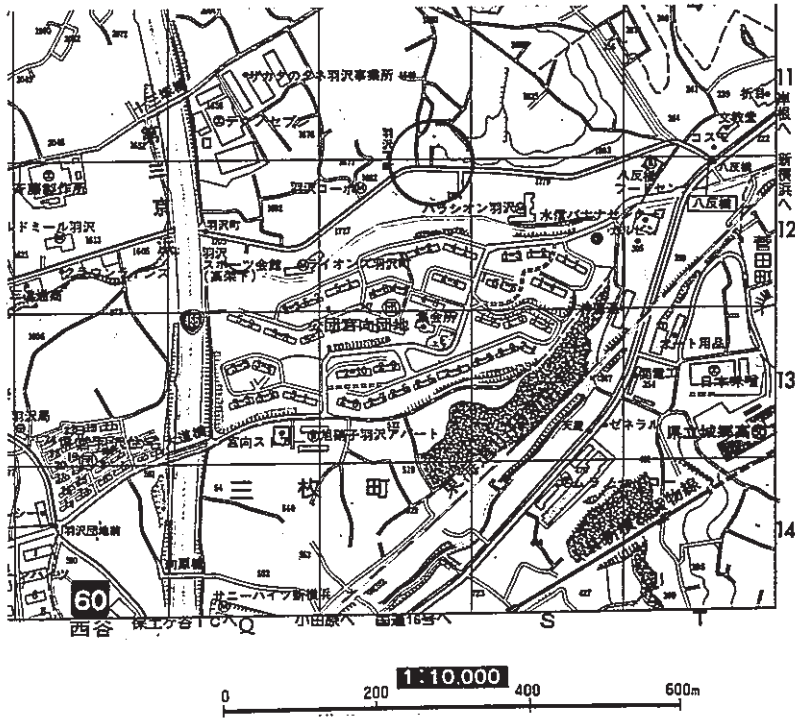


Figure-2 Investigation Position of Hazawa

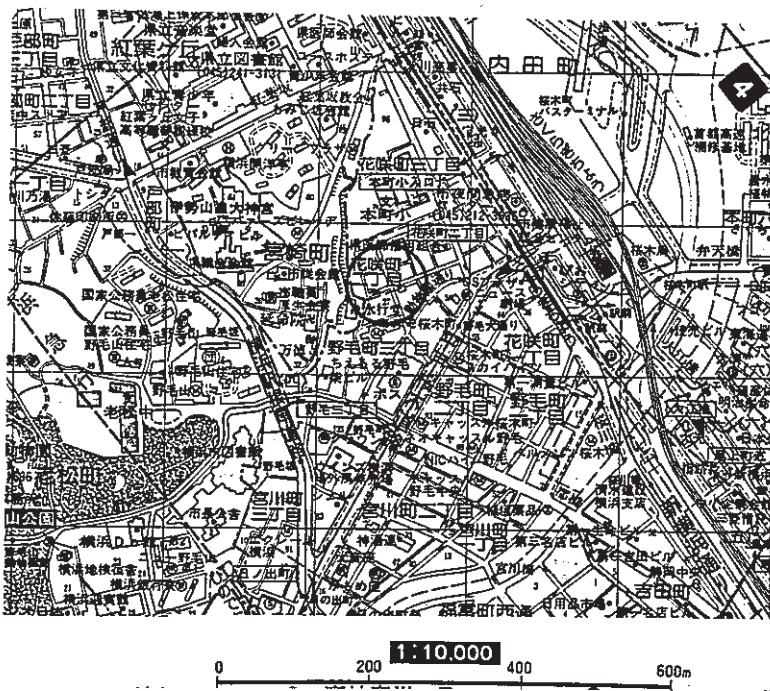


Figure-3 Investigation Position of Hanasaki

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1m長について行った。舗装除去後に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。

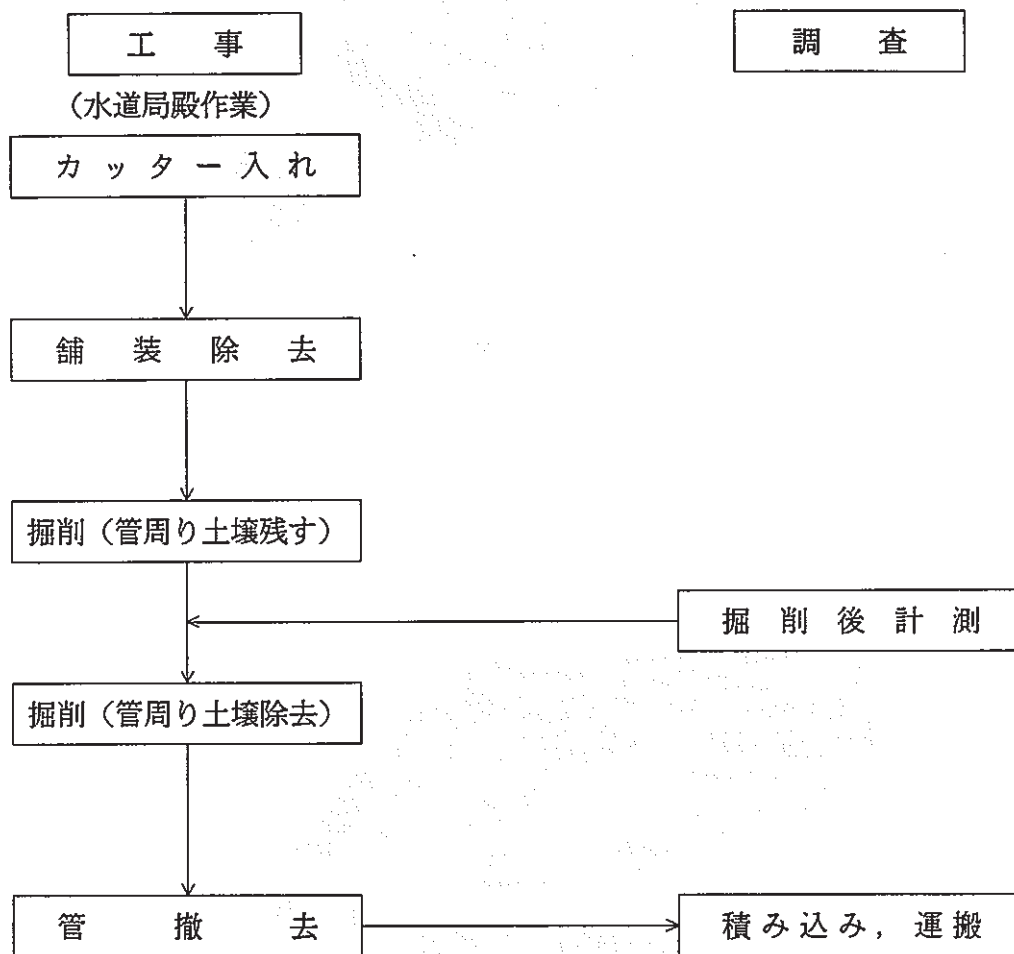
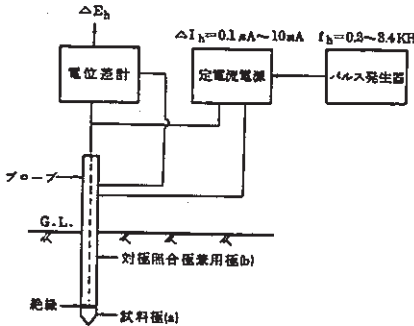
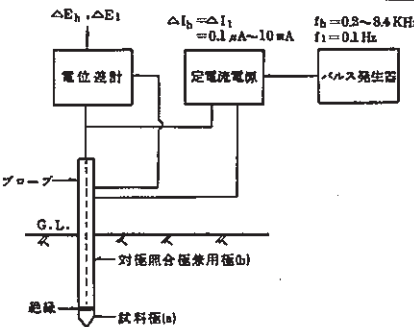
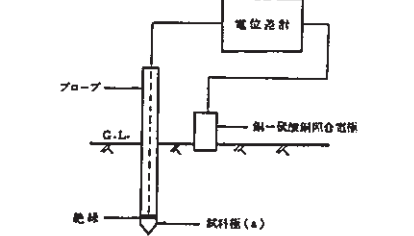
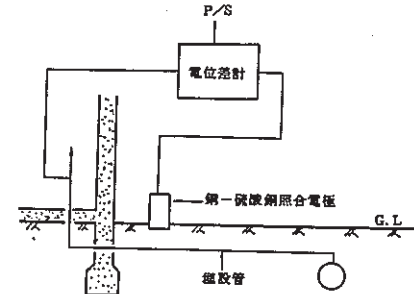


Figure-4 Investigation Flow

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) との間に定電流パルス 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> $R_s (PR) = \frac{\Delta E_h}{\Delta I_h}$ $\rho = \frac{R_s(PR)}{K_1}$ <p> R_s : 土壤抵抗 ρ : 土壤比抵抗 K_1 : プローブ係数 </p>  <p>図8 土壤比抵抗 ρ、土壤抵抗 $R_s (PR)$ の測定原理</p>
<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ー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> 
<p>⑤ 管対地電位測定</p>	<p>図に示すように、銅-硫酸銅照合電極を測定点に接地すれば、埋設管と照合電極との間の電圧として管対地電位が測定されます。</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。この読み値を水素電極基準に換算する。</p>
<p>⑦ pH 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。</p>

(2) 掘削後計測

掘削を管近傍まで行った時点で、下図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（上流）、管の中央部、管末端部（下流）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。

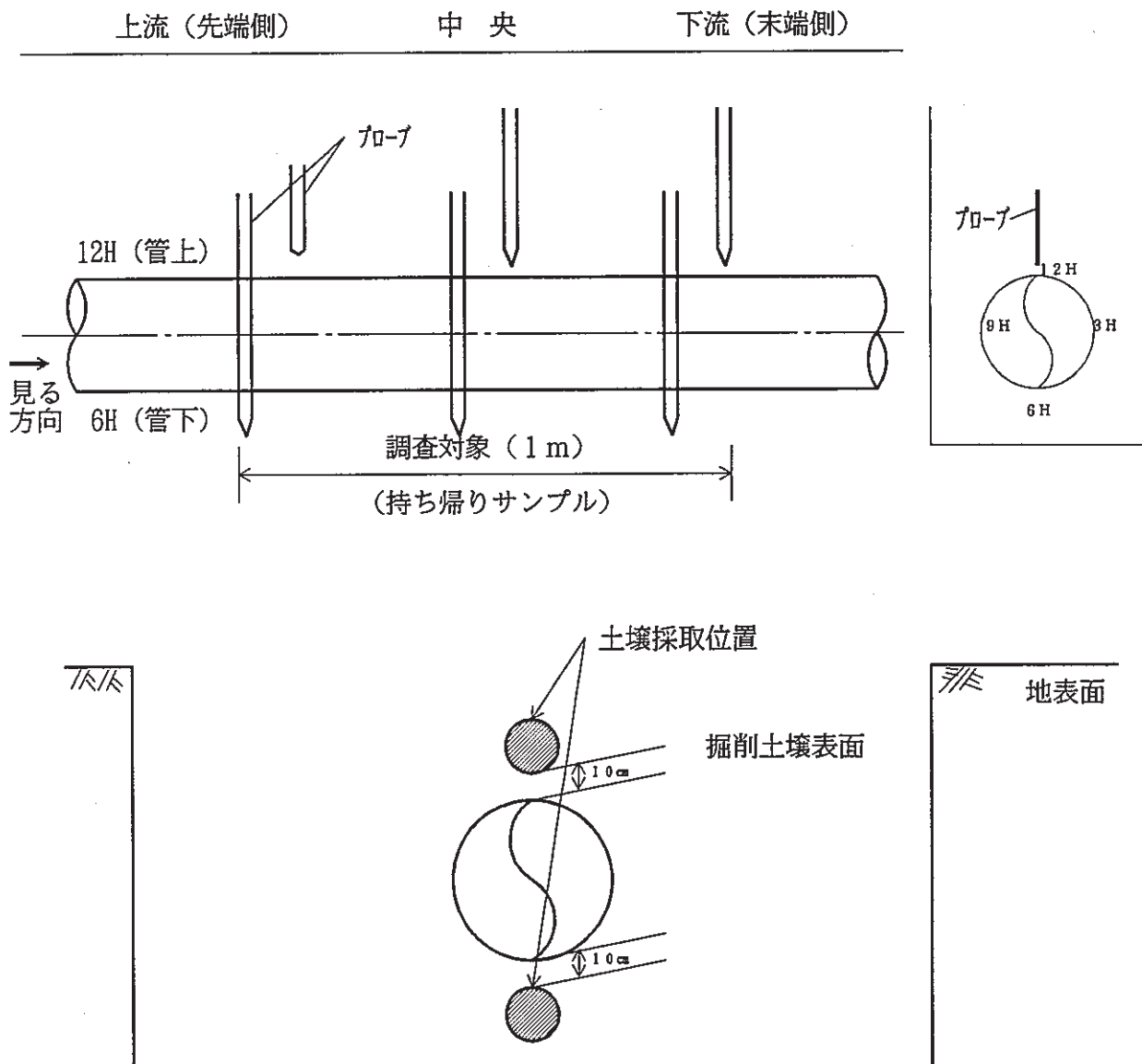


Figure-5 Schematic Illustration of Measuring Method after Excavation

(3) 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。

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ヶ所ディ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、ディ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。

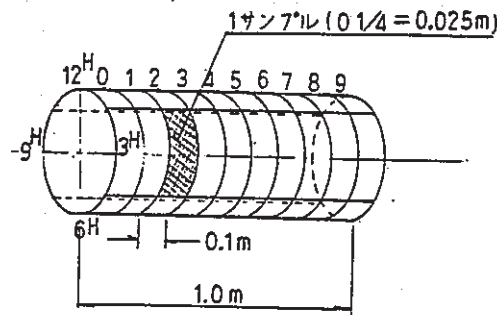


Figure - 6 Method of Measuring from Investigated Pipe

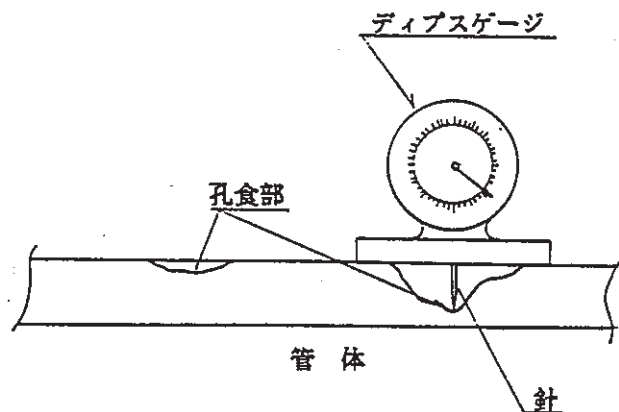


Figure - 7 Measuring Method of Pit Depth

(4) 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。

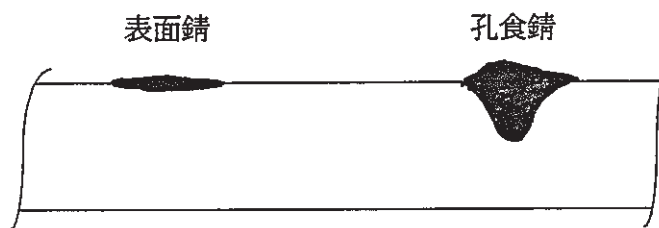


Figure-8 Definition of Corrosion Products to be Measured

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、マイ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) 腐食生成物の元素分析

1) EPMA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。

2) EDX分析

エネルギー分散型X線分光法(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)は、電子線照射により発生する特性X線をSi(Li)半導体検出器により波高分析した。

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EPMA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 ガスをシュレッダーアルカリメトリ-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 …… $(T-S) - (S_{\text{FeSO}_4})$ より FeS のSを求め、これを FeS に換算する。
なお、T-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) T-C …… C, S 分析装置で求める。
- 5) Cl^- …… 試料を粉碎して純水で抽出し、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) T-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DVGW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JIS A 1201～A1204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>

<p>塩化物</p>	<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>
<p>硫酸塩</p>	<p>土の乾燥質量当たりの硫酸塩含有量は次式により、SO₄含有量(%)で表示する。</p> $SO_4 = \frac{z}{f \times 50} \times 0.833 \times 100 (\%)$ <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>
<p>交換性陽イオン</p>	<p>土壤実験法の陽イオン交換容量測定のための土壌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>
<p>置換酸度</p>	<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) (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" data-bbox="438 1131 1340 1467"> <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> $\text{OH}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^-$ $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ <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="438 907 1340 1288"> <thead> <tr> <th rowspan="2">イン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>10⁶個</td> <td>< 10⁵個</td> <td>< 10⁴個</td> <td>< 10³個</td> <td>< 10²個</td> </tr> <tr> <td>アプリケータ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 1556 1340 1859"> <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>	イン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 ⁶ 個	< 10 ⁵ 個	< 10 ⁴ 個	< 10 ³ 個	< 10 ² 個	アプリケータ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
イン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 ⁶ 個	< 10 ⁵ 個	< 10 ⁴ 個	< 10 ³ 個	< 10 ² 個																																									
アプリケータ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 掘削後計測結果

(1) 羽沢

調査は、管の上に一部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。管の周囲はこげ茶色のロームで覆われていた。掘削溝上流側部分は山砂埋め戻しとなっていた。管周囲は均一な砂混じり粘土に思われた。写真は石が混じっている様に見えるが、これは舗装を割った時の舗装下の碎石が多く混じっている。測定結果を Tab1 - 5 に示す。

- ① 管周方向については、土壌比抵抗は 4,340～6,310 Ω cmの範囲にあり、平均で 5,247 Ω cmと一般土壌の値で粘土よりは高い値である。
- ② pHは平均で 7.1 と中性である。
- ③ プロープ分極抵抗は平均では 144 Ω と一般土壌より低く、粘土的な値である。
- ④ プロープ腐食速度は 0.157mm/yと、一般土壌としては低い値である。
- ⑤ プロープ自然電位は平均で-730mVと一般土壌的な電位となっている。管対地電位も平均は-544mV と铸铁管の一般的な電位である。
- ⑥ 酸化還元電位は平均値で+289mVを示し、管上は 420mVと一般的であったが、管下は 100～200mV 位でやや還元性環境である。
- ⑦ 湧水は掘削時はほとんどなかったが、土の採取跡のくぼみにたまる程度の湧水が見られた。

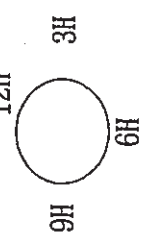
以上の結果をまとめてみると、土壌の比抵抗は粘土より高い値であり、管対地電位とプロープ自然電位の値は一般的な値である。酸化還元電位は管上土壌と管下土壌で異なり、管下は還元性環境であることを示している。



photo 1 Condition of Soil Around Pipe (Hazawa)

Table-5 Results of Measurement at Hazawa 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 (Bh換算値) (mV)	pH
上流側	1 2 H	6,310	0.205	108	-665 *	420(204)	7.0
	6H	4,780	0.213	130	-754	208(-20)	7.2
	平均値	5,545	0.209	119	-710	314(92)	7.1
中央部	1 2 H	6,360	0.164	169	-727	429(201)	7.2
	6H	4,420	0.196	145	-739	143(-79)	7.1
	平均値	5,390	0.180	157	-733	286(61)	7.2
下流側	1 2 H	4,340	0.185	144	-748	422(200)	7.1
	6H	5,270	0.169	166	-746	112(-104)	7.0
	平均値	4,805	0.177	155	-747	267(48)	7.1
総平均	5,247	0.157	144	-730	-544	289(67)	7.1
標準偏差	826	0.062	21	30	18	138(137)	0.08
0 湧水の有無 : にじむ程度 (調査完了時数cm程度) * : () は生データ 埋設深さ : 1 m15cm 呼び径 : 150 ϕ メカニカル継手 土の温度 : 8.3 $^{\circ}\text{C}$ (天候 晴れ)							



(2) 花咲町

調査は、管の上に土壌を残して調査した。

Photo 2 に管天付近の土壌の写真を示す。管の周囲は、茶色の礫まじり土である。

また、管周りには、壁のしっくいらしいものも混ざっていた。このように、ガレキ混じりのローム土壌のようである。管体表面の土が黒くなっているのも見られる。この埋設土の下層はかたい土丹層であった。

測定結果をTable-6 に示す。この測定の中で、プローブ分極抵抗の上流側 6 H の値は異常に高い値である。他の ρ の値は問題ないことから、異常値としか考えられないので今後の値から除く。

測定結果から

- ① 土壌比抵抗は、平均で $4,447 \Omega \cdot \text{cm}$ と一般土壌の平均と同じ位であるが、中央部と下流側の管下 (6 H) 土壌の抵抗は、 $2000 \Omega \cdot \text{cm}$ 位で粘土の値である。このように、土壌比抵抗の差が大きい環境である。管下測定値は管下土層である土丹層の影響と考えられる。
- ② 腐食速度は、平均で 0.08 mm/y と一般的な値である。ただし、下流側 6 H の値は、分極抵抗からみて異常に小さい。石か何かに当たっていたと考えられる。
- ③ プローブ分極抵抗は、平均で 346Ω と一般的である。土壌比抵抗と同様に、中央と下流側の管下の値が管上の $2/3$ 位の値となっていて、低い値である。
- ④ プローブ自然電圧は、平均で -727 mV と一般的な値である。ただし、中央部は -640 mV と貴な値となっている。
- ⑤ 管対地電位は、平均で -533 mV と一般的な値である。管上と管下、上流と下流の間で電位の差は少ない。
- ⑥ 酸化還元電位は、上流側 1 2 H を除いて 400 mV 以上であり、酸化性の土壌を示している。全体にバラツキが小さい。
- ⑧ PH は、平均で 7.3 であり中性を示し、範囲も 7.0~7.5 であり差は小さい。



photo 2 Condition of Soil Around Pipe (Hanasaki)

Table-6 Results of Measurement at Hanasaki 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 (Bh換算値) (mV)	pH
上流側							
12H	5,060	0.080	400	-766	-553	+366(-150)	7.1
6H	5,290	0.085	3,210	-724	-544	+580(+340)	7.5
平均値	5,175	0.0825	400	-745	-548.5	+473(+95)	7.3
中央部							
12H	6,080	0.068	360	-641	-530	+462(+240)	7.2
6H	1,820	0.186	190	-642	-522	+414(+180)	7.4
平均値	3,950	0.127	275	-641.5	-526	+438(+210)	7.3
下流側							
12H	5,620	0.058	480	-791	-517	+490(+280)	7.0
6H	2,810	0.002	300	-799	-529	+560(+320)	7.5
平均値	4,215	0.03	390	-795	-523	+525(+300)	7.25
総平均	4,447	0.080	346	-727	-533	+479(+202)	7.28
標準偏差	1,566	0.055	97	65	12.4	+75(+166)	0.20
湧水の有無 : なし 埋設深さ : 55cm 呼び径 : 100 ϕ 土の温度 : 14°C(天候 晴れ)							
() は生データの直接読み値							

1.2.2 管体腐食調査結果

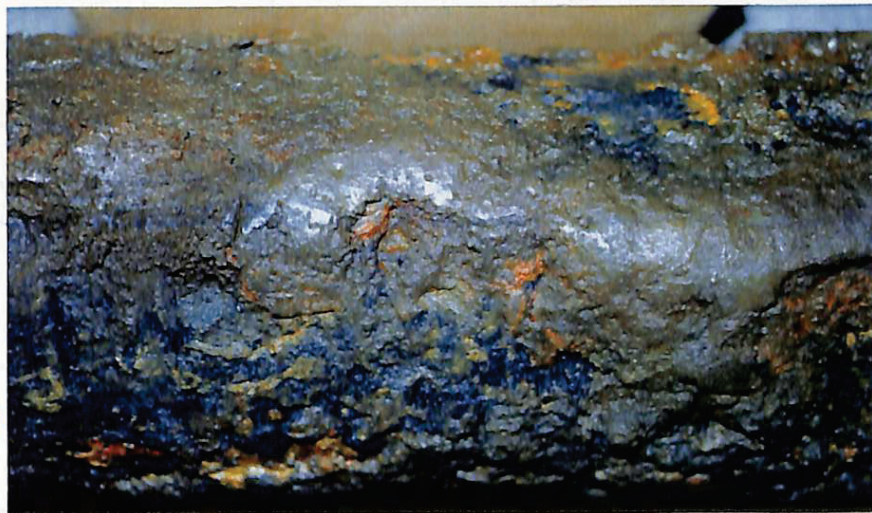
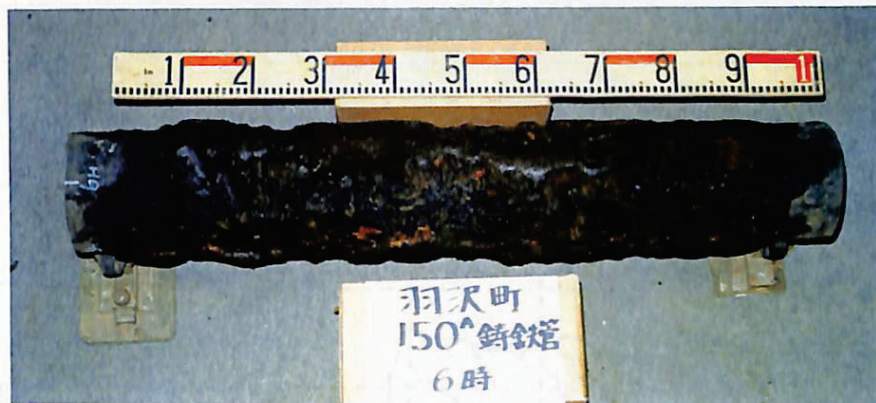
(1) 羽沢

(i) 付着土状況

掘り上げ管は、管周り土が付着した状態で調査した。

羽沢の付着土状況をPhoto -3 に示す。この写真に示す如く、ほぼ全周にわたってこげ茶のローム（砂まじり粘土）が付着していた。管上には掘削時に混じった物と異なる小石が混っていた。

なお、羽沢の付着土状況のスケッチをFigure -9 に示す。



b (Hazawa 6H)

Photo -3 Condition of Soil Around Pipe (Hazawa)

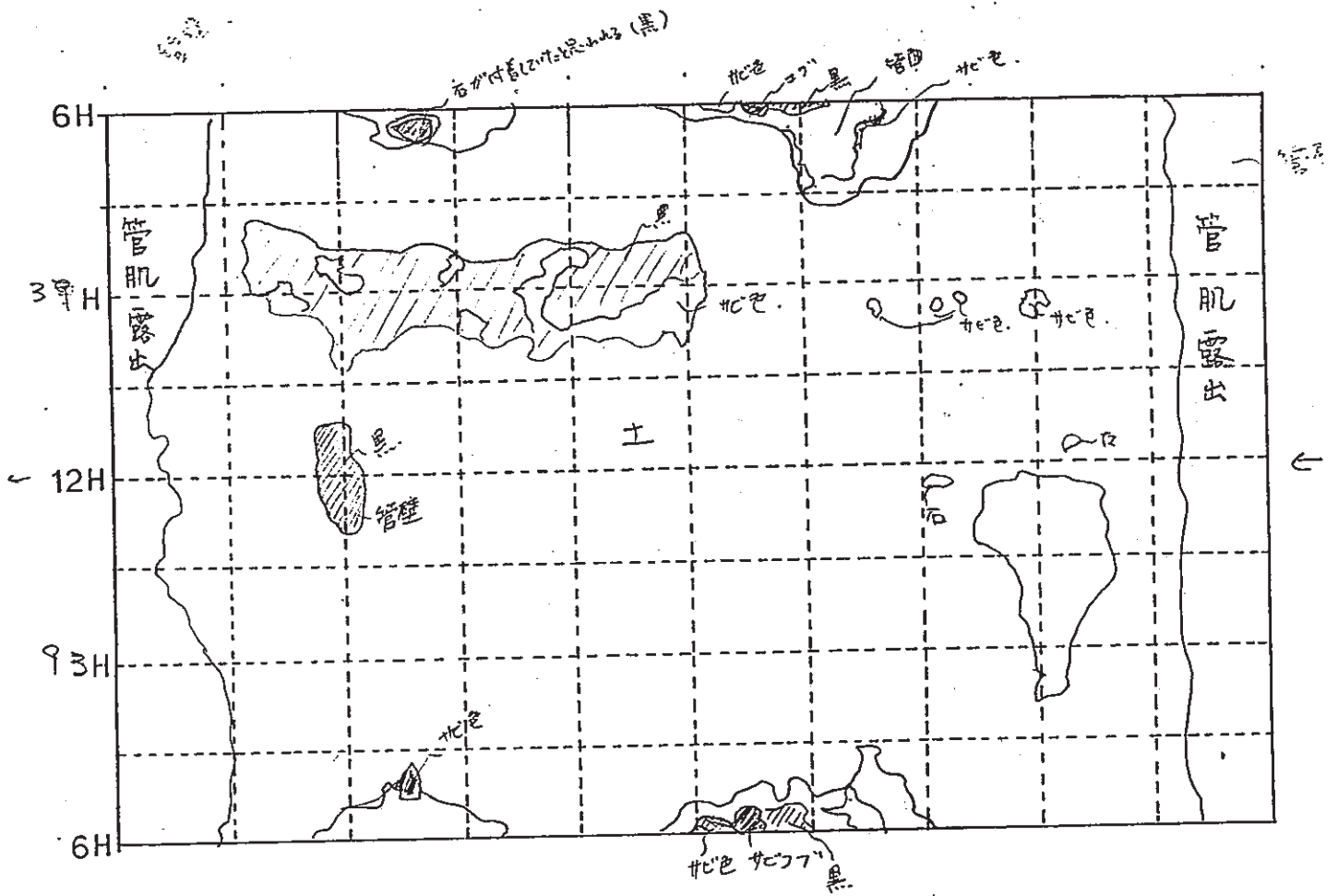


Figure -9 Sketch of Adhering Soil (Hazawa)

(ii) 付着土除去後の管体状況

羽沢の付着土除去後の管体状況の写真をPhoto -4に示し、スケッチをFigure-10に示す。羽沢は管天側（3H～12H ～9H）に付着土混じりの錆コブや小石や赤い錆コブが多く、とくに3Hは、赤い錆コブが多く見られ、6Hの長手方向は均一な黒い錆コブの付着が見られ、その中の一部に赤い錆コブの付着がみられた。9Hの長手方向も6Hと同様な黒い錆コブの中の一部に赤い錆コブがまじっていた。

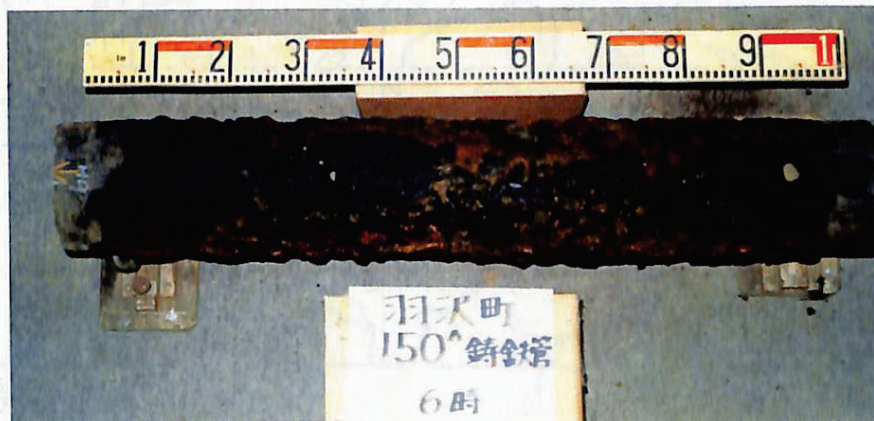
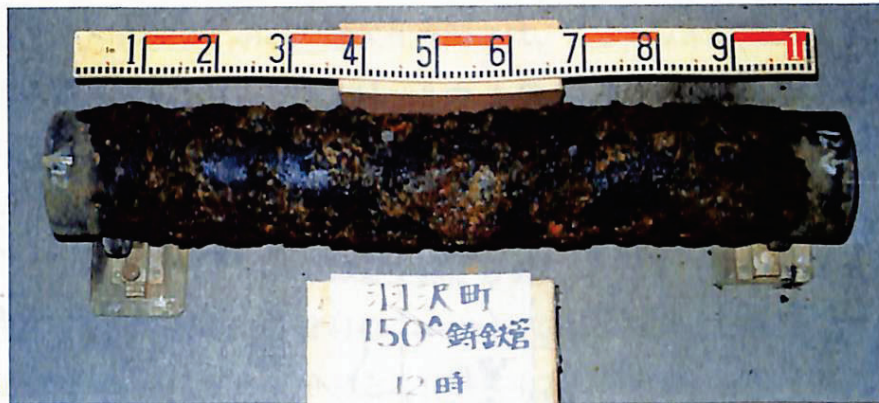


Photo -4 Sketch After Removal of Adhering Soil (Hazawa)

(iii) 孔食深さ測定及び腐食状況

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 -5に、測定結果をTable -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 に示した。

これによると、羽沢の最大孔食深さは、メッシュNo. 12H-1の5.0mmであった。次はメッシュNo. 3H-3の4.0mmであった。各メッシュの最大孔食深さの平均は、2.10mmであった。孔食は12H、3H方向に多く見られた粘土と思われる。6H、9Hの方向は孔食が少なく、最大孔食深さはメッシュNo. 6H-4の2.3mmであった。孔食は管上側から管右側(12H方向管~3H方向)にかけて長手方向にみられ、12Hは平均で2.36mm、3Hは平均で2.73mmとやや大きな腐食であった。一方9Hと6Hの長手方向の腐食は平均で1.6mmと1.7mm程度であった。

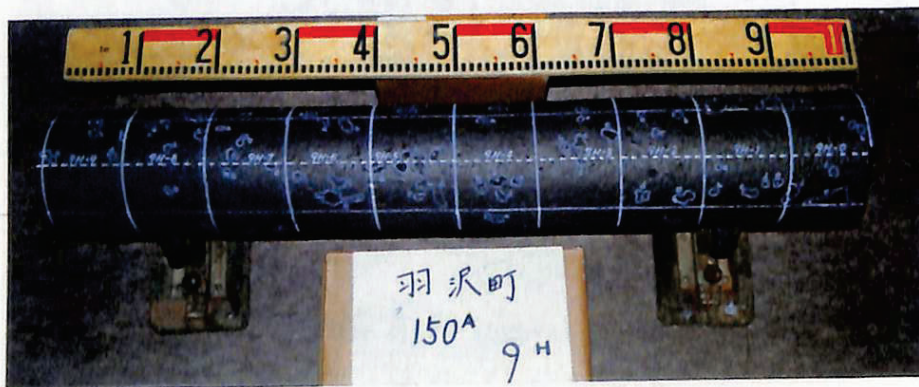
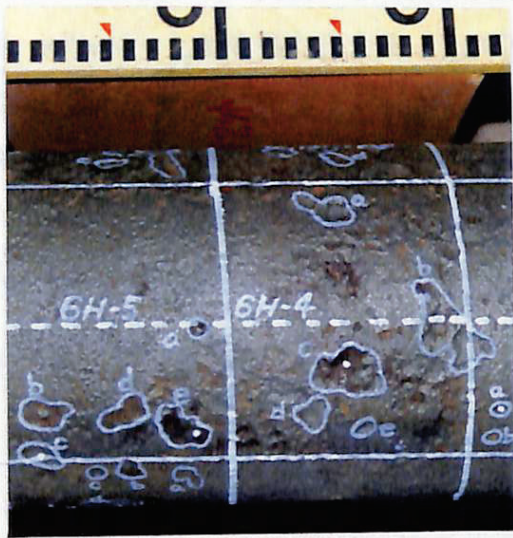


Photo- 5 Outview of Pipe (Hazawa)

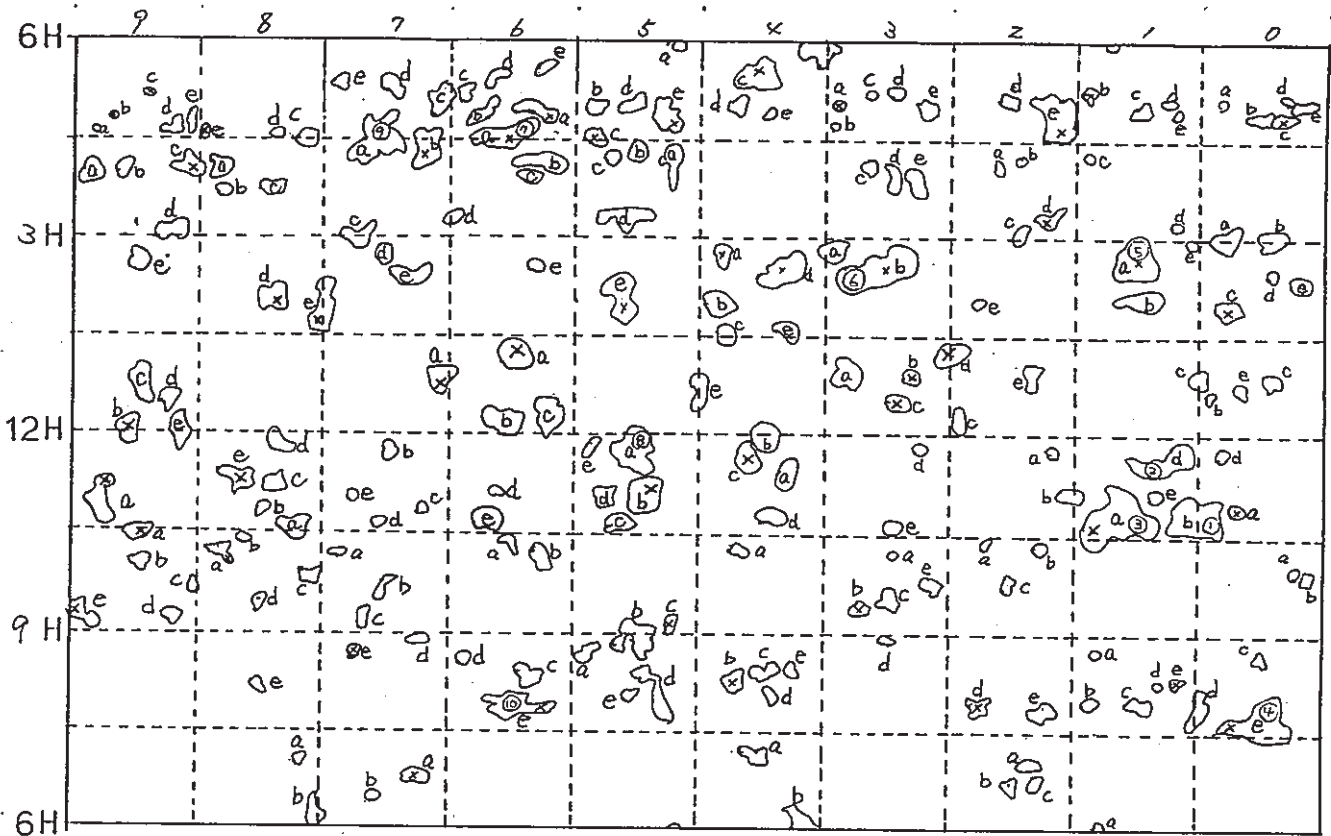


Figure - 1 1 Mesured Points of Pit (Hazawa)

Table-7 Results of Measurement of Pit Depths

(Unit : mm)

メッシュ	a	b	c	d	e
12H-0	1.8	1.0	1.2	1.3	1.2
12H-1	5.0	3.0	1.5	1.7	1.1
12H-2	2.0	1.5	1.6	2.2	1.3
12H-3	1.4	1.8	1.8	1.0	1.3
12H-4	1.9	2.4	3.4	1.6	1.7
12H-5	1.8	2.1	1.6	1.3	1.6
12H-6	2.7	2.0	1.8	1.5	1.6
12H-7	1.5	1.1	1.0	1.1	0.8
12H-8	1.0	1.2	1.2	1.4	1.8
12H-9	1.5	1.5	1.2	1.0	1.1
3H-0	2.3	2.3	2.4	1.2	1.3
3H-1	3.8	2.8	1.2	1.1	1.6
3H-2	1.2	1.2	1.1	2.0	1.2
3H-3	3.3	4.0	1.3	1.9	1.8
3H-4	2.8	2.5	2.1	2.8	1.9
3H-5	1.5	1.6	2.0	1.3	3.3
3H-6	2.2	1.2	1.3	1.3	2.1
3H-7	2.4	2.9	2.1	2.1	2.0
3H-8	1.8	1.5	1.9	2.3	2.3
3H-9	1.5	1.2	1.6	1.2	1.4
6H-0	1.2	1.0	1.6	1.0	1.5
6H-1	0.9	1.4	1.1	1.2	0.9
6H-2	1.4	1.0	1.3	1.6	2.2
6H-3	1.6	1.4	1.1	1.5	1.5
6H-4	1.6	2.0	2.3	2.1	1.8
6H-5	1.4	1.3	1.9	1.3	1.9
6H-6	1.5	1.3	0.7	1.0	0.9
6H-7	1.2	0.8	0.6	0.8	0.7
6H-8	1.0	0.9	1.0	0.8	1.3
6H-9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7
9H-0	1.0	1.5	1.4	1.4	1.7
9H-1	0.9	1.5	1.4	1.6	1.7
9H-2	1.3	1.9	1.3	2.1	1.5
9H-3	1.3	2.0	1.5	1.3	1.7
9H-4	1.6	1.8	1.7	1.2	1.3
9H-5	1.4	1.6	2.0	1.8	1.9
9H-6	0.5	1.1	1.3	1.2	1.8
9H-7	0.8	1.1	1.1	0.8	1.5
9H-8	1.3	0.5	0.8	0.9	1.0
9H-9	1.4	1.1	0.8	1.0	1.4

Table - 8 Summary of Measured Depths of Pit (Unit :mm)

長手方向 メッシュNo.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	長手方向 全メッシュNo. の平均値	長手方 全メッシュNo. の最大
	周メ 方ッ 向シ ユ 区 分	1.8	5.0	2.0	1.8	3.4	2.1	2.7	1.5	1.8	1.5	2.36
	2.4	3.8	2.0	4.0	2.8	3.3	2.2	2.9	2.3	1.6	2.73	4.0
	1.6	1.4	2.2	1.6	2.3	1.9	1.5	1.2	1.3	0.8	1.58	2.3
	1.7	1.7	2.1	2.0	1.8	2.0	1.8	1.5	1.3	1.4	1.73	2.1
周方向平均値	1.88	2.98	2.08	2.35	2.7	2.33	2.05	1.78	1.68	1.33	—	—
周方向最大値	2.4	5.0	2.2	4.0	3.4	3.3	2.7	2.9	2.3	1.6	—	—
平均最大孔食深さ											2.10	
最大孔食深さの最大値											5.0	

(iv) 元肉厚測定結果

羽沢は両端部で測定した。このとき、測定箇所は腐食がない部分とした。測定器はノギスを使用した。この結果をFigure-12に示す。管厚は羽沢で 7.9mm~8.6mm の範囲にあり、これらの平均値としては、上流側で8.23mm、下流側で8.20mmであった。

元肉厚としては最大値を採用し、 8.6mmとする。

なお、本管は内面モルタルライニングしており、管端部しかライニングを剥離できず奥部は不明だが内面腐食は剥離できた管端部において生じていなかった。

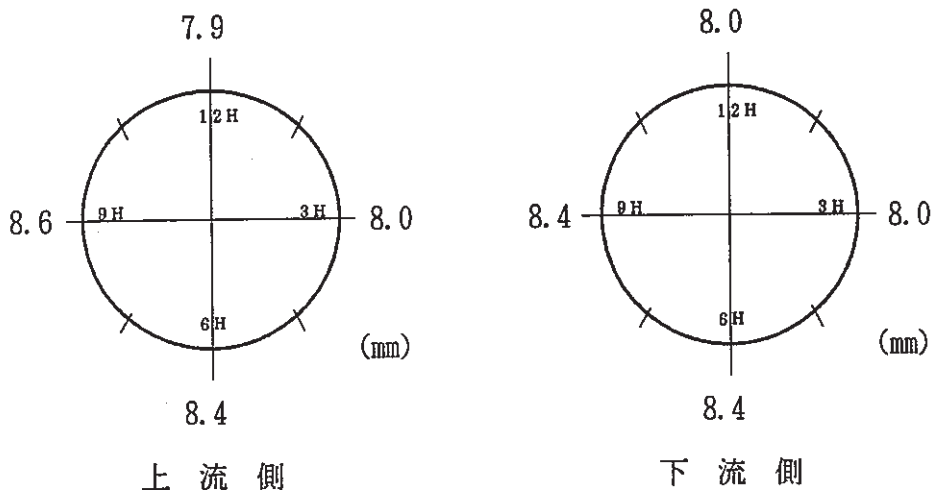


Figure-12 Results of measurement of Original Wall Thickness (Hazawa)

(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- 9 に示す。この分析によると、炭素含有量が3.08%であることから、材質は黒鉛鑄鉄である。

② 顕微鏡組織

掘上げ管の管端部の内面のモルタルライニングを除去してから、Figure -13に示す位置で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。テストピースの観察位置をFigure -14に示し、組織の写真を Photo-6に示す。

管の材質は、片状黒鉛鑄鉄である。

管表面の泥を除去したサンプルであるが、一般に見られる表面の黒鉛層がみられない。腐食部のごく一部で組織内部への黒鉛化がみられるが、全体に少ない。

また、管内面側の e 位置では、写真下方にモルタルの付着跡が見られる。

③ 生成錆の分析

掘上げ管外面の管上と管下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 -10、管上表面錆と孔食内錆について行った結果を Table -12 に示し、表面錆(12H)のX線回折チャートを Figure-15~Figure-18 に示し、表面錆(6H)のX線回折チャートを Figure-18、19に示し、孔食内錆(6H)のX線回折チャートを Figure-20とFigure-21 に示す。SEM-EDX 分析のチャートを Figure-22、23に示す。SEM-EDX で検出された元素を Table -11に示す。また、錆の成分について定量分析した結果をTable-12に示す。表面錆の腐食生成物のX線回折では、管天側(12H)は FeOOH と Fe_3O_4 が検出され、管下側は Fe_3O_4 が検出された。また、土壌成分である SiO_2 、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 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 が錆として検出された。つぎに定量分析では、表面錆のT-Feは全体の量の23.3と14.0%であったが、FeS はほとんど見られないと考えられる。 FeSO_4 が表面錆には多いと考えられる。また孔食内錆はT-Feが4.3%あり、次にT-Cが多く、黒鉛化腐食を示している。また、Clが検出される。

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-13 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（27%）、管下（29%）とも粘土分が多くないが、シルト分が37%と32%で、シルト+粘土では、60%を占め、細粒分は多い土壌である。土質は、有機質火山灰土(OV)であることを示している。硫化物イオンは検出限界以下である。また、含水率は管上、管下とも多い。塩化物硫酸塩は一般土壌と同じ位である。

⑤ 湧水の分析

掘削後、管下測定作業中に測定穴内に湧き出た湧水を採取して参考に分析した分析結果を Table-14 に示す。特に、変わった成分は無く、一般的な値である。

⑥ 土壌中の鉍物分析（動燃殿からの御提供）

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

粘土鉍物と同定されたものはカオリン鉍物である。

⑦ 土壌中の鉍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 SiO_2 が48%と44%と少ない。

⑧ 硫酸塩還元バクテリアの試験

試験結果を Table-17 に示す。レドックス計測結果は還元環境で、 SO_4 は多くない環境であったが、SRBは 10^2 個以下と非常に小さい値であった。ただし、錆コブに希塩酸を加えると、硫化水素臭は生じた。

Table -9 Chemical Composition of Pipe (Hazawa)

成分	C	Si	Mn	P	S
測定値 (%)	3.08	1.61	0.42	0.11	0.13

Table -10 X-ray Diffraction Analyses of Rust (Hazawa)

錆の成分	FeCO ₃	FeOOH	Fe ₃ O ₄	γ-Fe ₂ O ₃	FeSO ₃	FeS	その他
表面錆(6H)	—		◎	—	—	—	SiO ₂ ◎ CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ◎
表面錆(12H)							
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) 検出器走査速度 (deg/min) : 3
 管電圧(KV) : 40 サンプリング間隔 (deg) : 0.05
 管電流(mA) : 50 発散スリット (deg) : 1
 測角範囲(deg) : 10~90 受光スリット (mm) : 0.3
 モノクロメーター使用

Table -11 SEM-EDX Analyses of Rust (Hazawa)

	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ag	Ti	Cu	Mg	Cr
表面錆	○	◎	—	—	◎	◎	—	◎	—	—	○	◎	—	○	—	—	—
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 : 3 × 10⁻¹⁰A
 ワーキングディスタンス : 3.7mm

Table -12 Results of Quantitative Analyses of Rust (Hazawa)

(Unit:%)

錆の成分	FeS	FeSO ₄	CO ₂	T-Fe	T-C	Cl	Ca	Mg	Al
表面錆 (12H)	<0.1	14.6	1.44	23.3	2.83	0.001	3.04	1.31	6.17
表面錆 (6H)	<0.1	17.6	0.72	14.0	3.00	<0.001	2.81	1.98	7.62
孔食内錆	*	*	*	43.1	11.0	0.073	1.18	<0.1	0.83

表面錆コブ(12H) 52.7%
 表面錆コブ(6H) 47.8%
 孔食内錆 56.2%

*は試料が少ないため分析不可

Table -13 Results of Compositional Analyses of soil (Hazawa)

項目	単位	管の上側	管の下側
pH	—	7.5	7.4
含水率	%	67	81
酸化還元電位	mV	280	254
硫化物イオン	mg/kg	0.2以下	0.2以下
粘土分	%	27	29
塩化物	mmol/kg	0.51(18)	0.66(23.4)
硫酸塩	mmol/kg	0.67(32)	1.9(91.2)
交換性陽イオン	mmol/kg	160	140
置換酸度	mmol/kg	0.2	0.2
イオウ分	%	0.07	0.07
重炭酸イオン	mmol/kg	1.8(110)	3.6(220)
Mアルカリ度	mmol/kg	1.5(75)	3.0(150)

()内はmg/kgに換算した値

Table -14 Results of Analyses of Springwater

項目	単位	湧水	測定方法
pH	mg/l	7.1	JIS K 0102
溶解性マンガン	mg/l	2.9	JIS M 0202 "
シアン化合物	mg/l	0.05以下	JIS K 0102
塩化物イオン	mg/l	27	JIS K 0102
イオン状シリカ	mg/l	16	JIS K 0101
アンモニウムイオン	mg/l	1.6	JIS K 0102
硫化物イオン	mg/l	0.2以下	"
硫酸イオン	mg/l	53	"
重炭酸イオン	CaCO ₃ mg/l	200	上水試験法
全硬度	CaCO ₃ mg/l	260	JIS K 0101
電気伝導率	ms/m	46	JIS K 0102

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

試料名	XRD定性分析同定結果
	カオリン鉱物

Table -16 Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Hazawa)

項目	単位	管上の土	管下の土
		分析値	分析値
Fe ₂ O ₃	%	9.6	11.0
MnO ₂	%	0.13	0.15
CaO	%	2.8	4.1
MgO	%	2.0	2.5
K ₂ O	%	1.0	0.7
Na ₂ O	%	1.3	1.5
SiO ₂	%	48	44
Al ₂ O ₃	%	20	15
TiO ₂	%	1.0	0.74
固型分	%	60	56
強熱減量	%	12	13

Table -17 Results of SRT Tests (Hazawa)

項目	単位	管の上	管の下
SRBの数	個/ml		10 ¹ 以上
		10 ¹ 以下	10 ² 以下

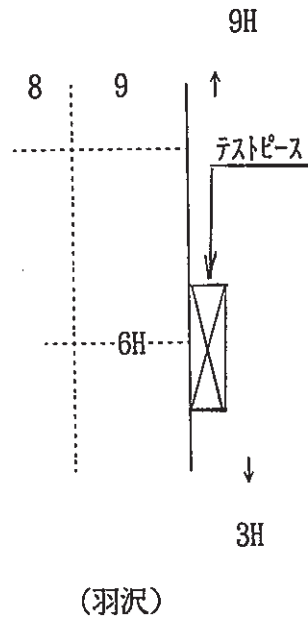


Figure -13 Cutting Position of Test Pieces (Hazawa)

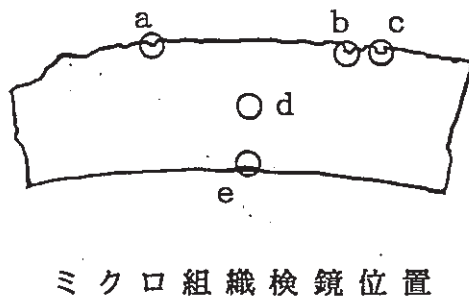
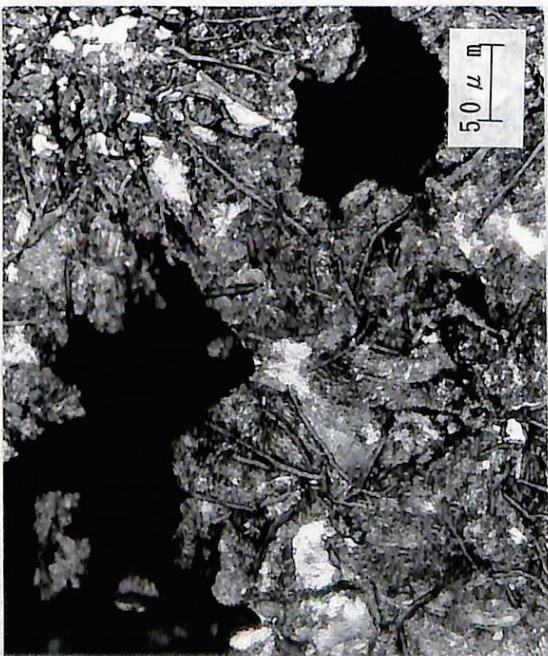


Figure -14 Positions of Metallography (Hazawa)



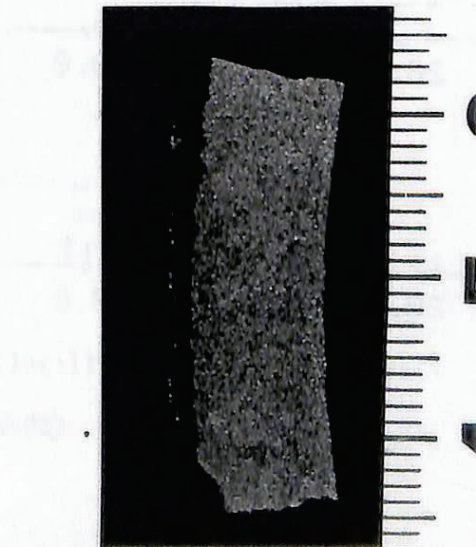
a X 200



b X 200



c X 200



d X 200



e X 200

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

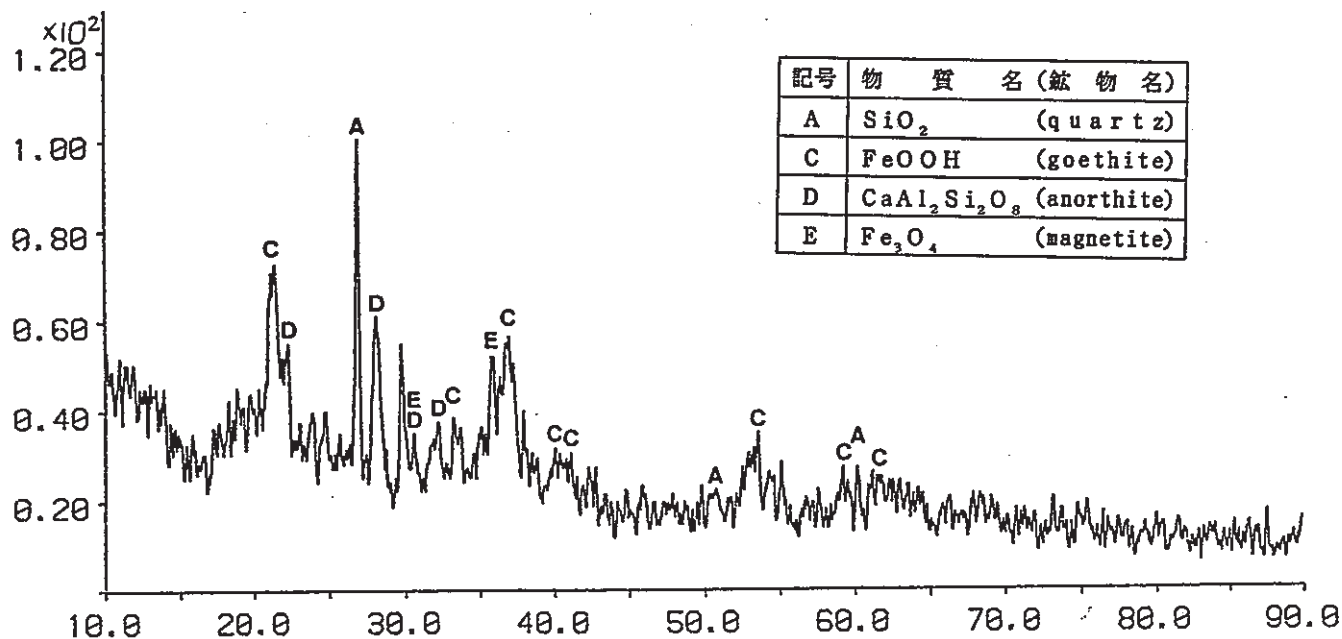


Figure -15 X-ray Diffraction Analyses of Surface Rust (12H)

(同定された全結晶)

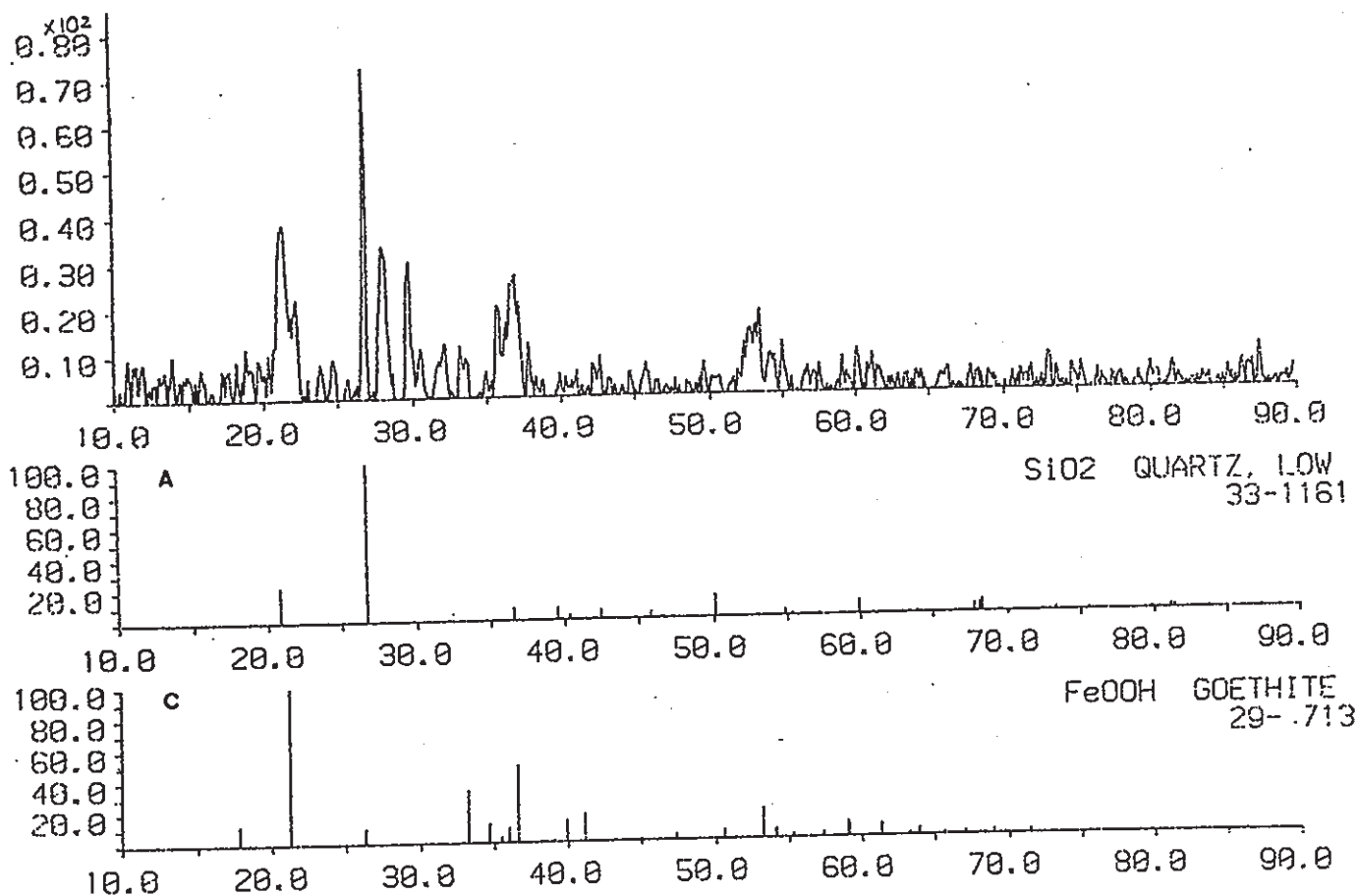


Figure -16 X-ray Diffraction Analyses of Surface Rust (12H)

(錆の結晶の同定その1)

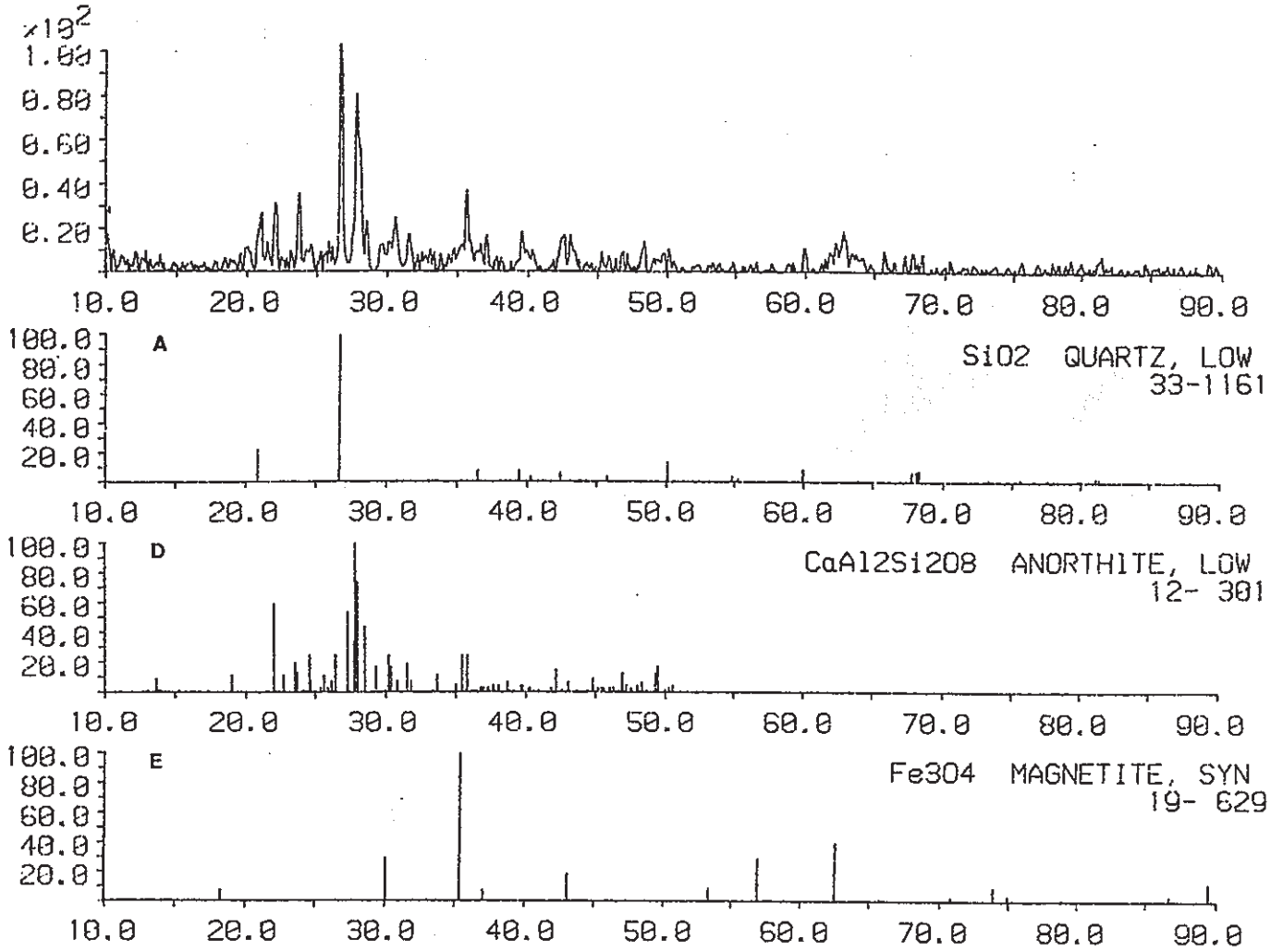


Figure -17 X-Ray Diffraction Analyses of Surface Rust (12H)

(錆の結晶の同定その2)

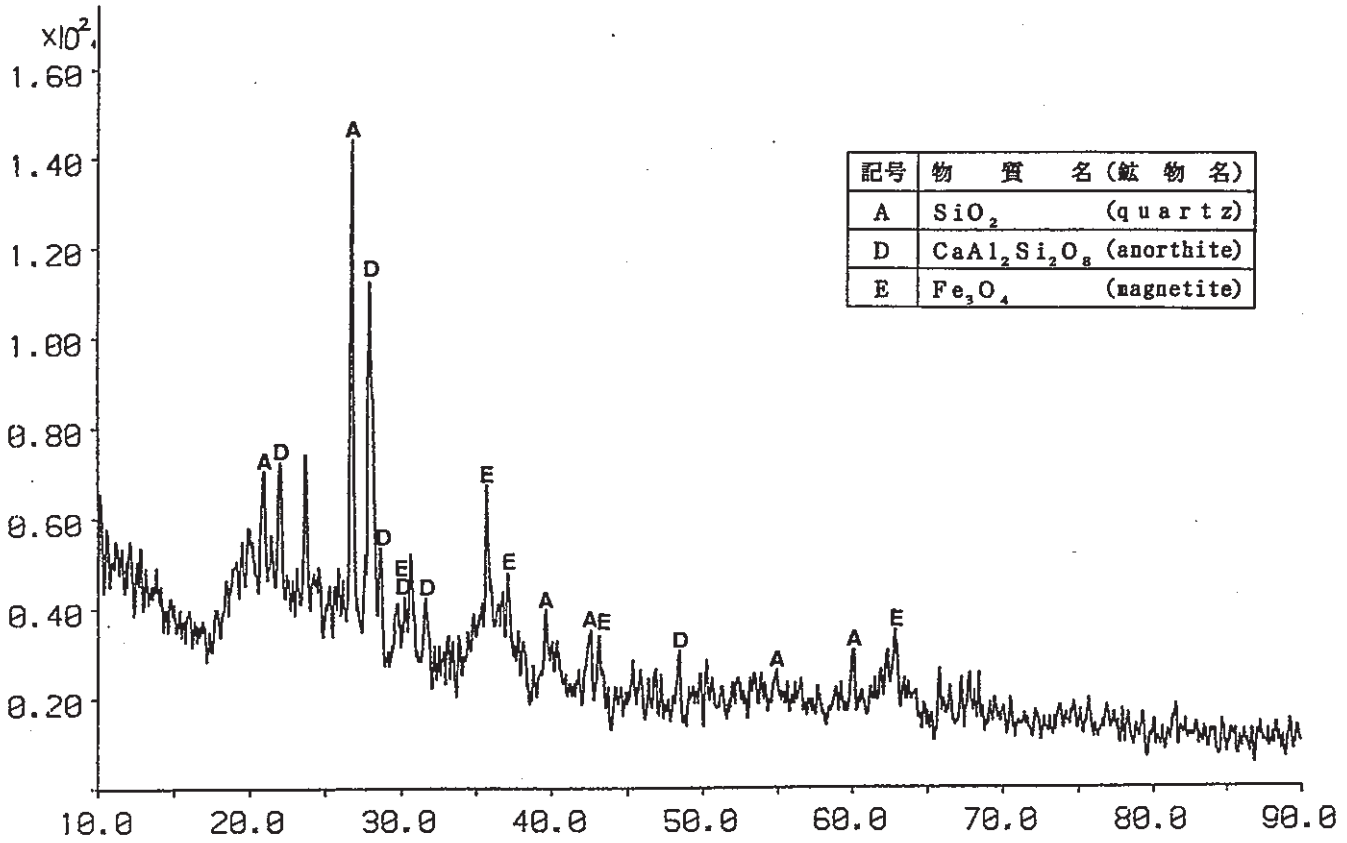


Figure -18 X-Ray Diffraction Analyses of Surface Rust (6H)

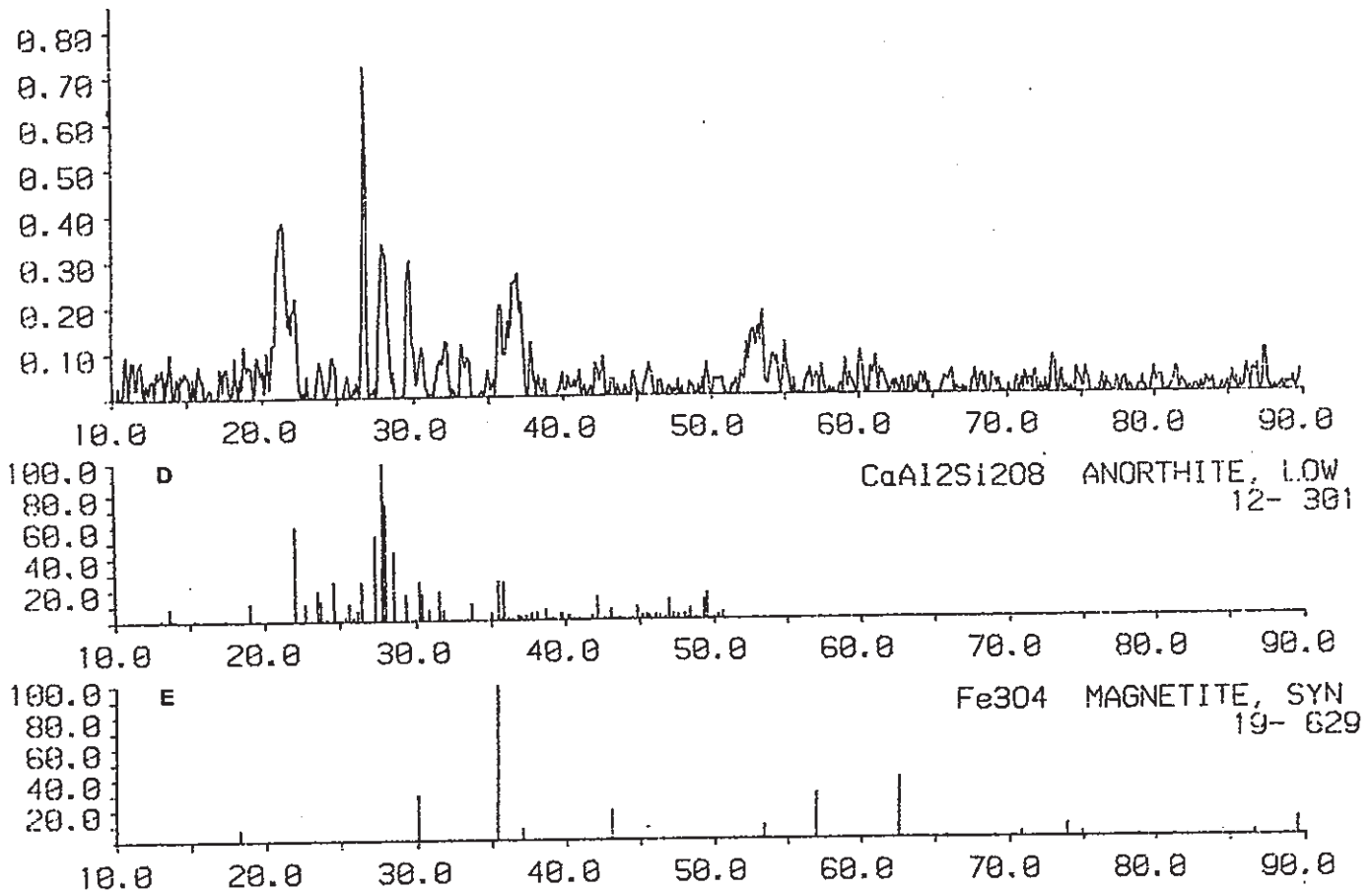


Figure -19 X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (6H) (Hazawa)

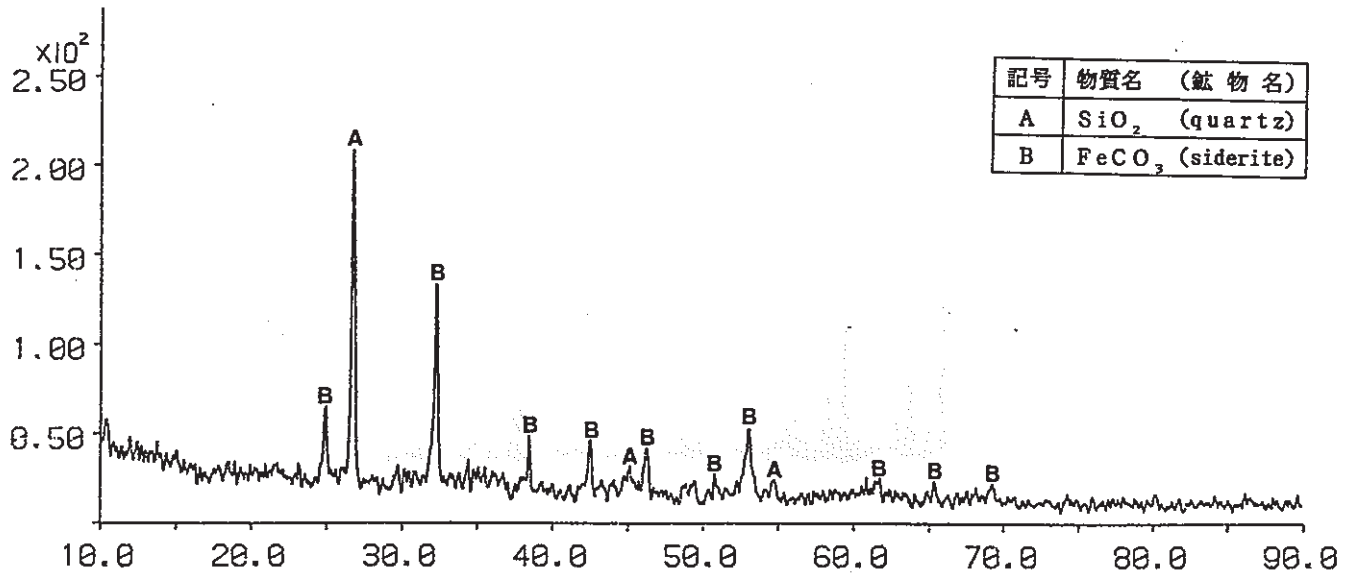


Figure -20 X-Ray Diffraction Analyses of Surface Rust (Hazawa) (Pit)

(錆の同定)

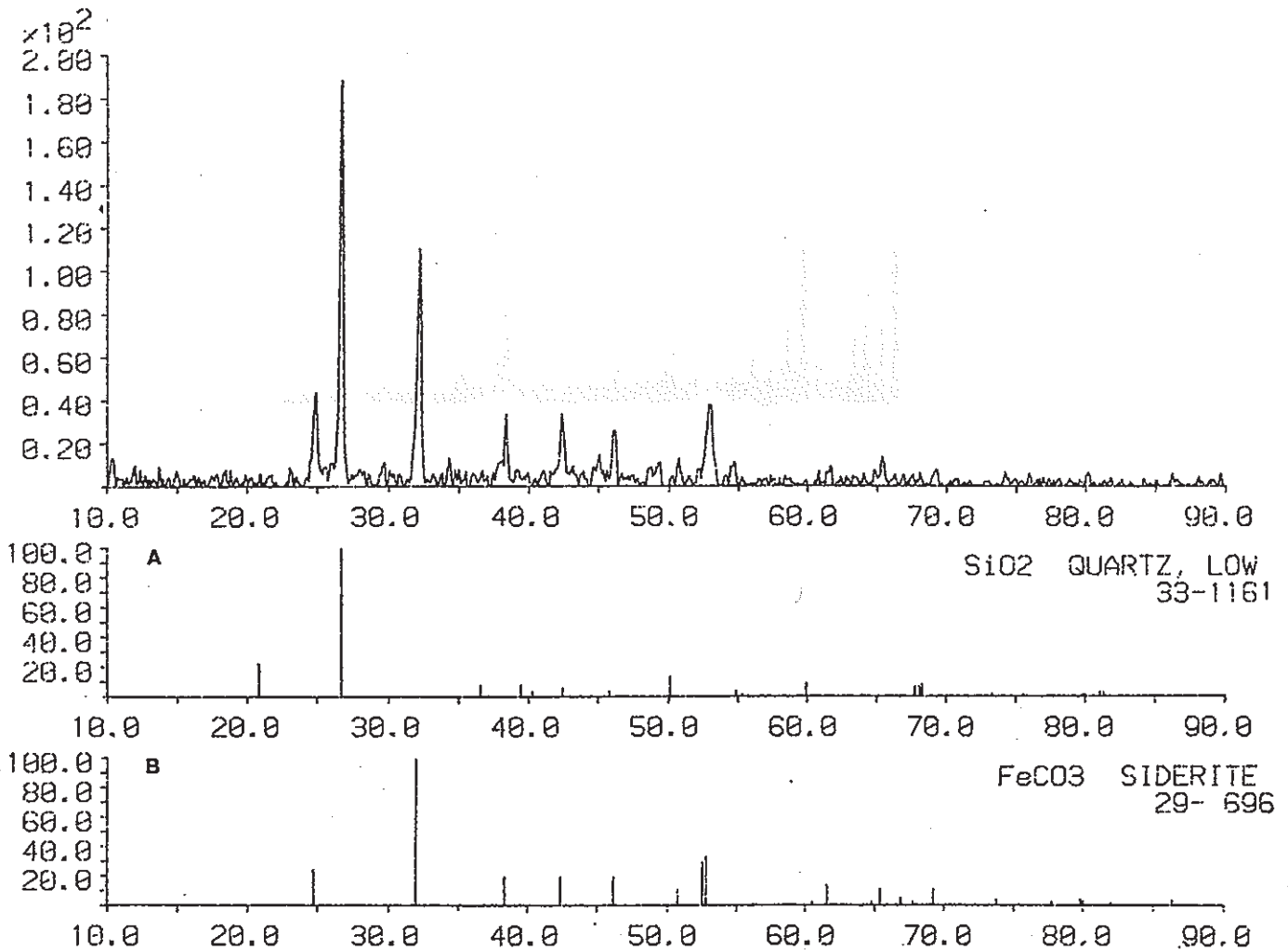
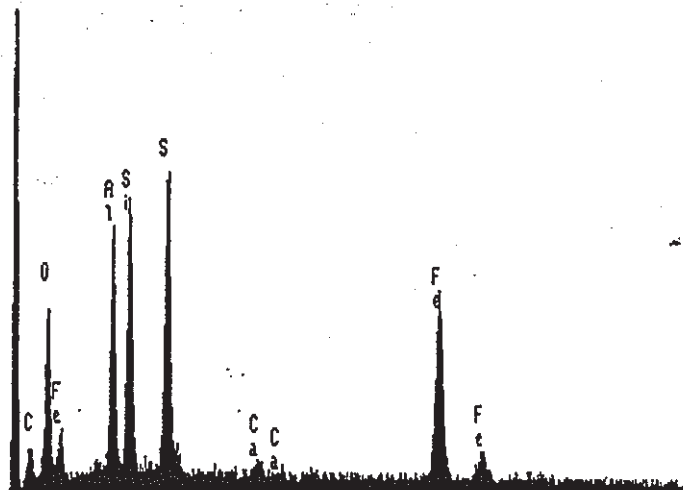


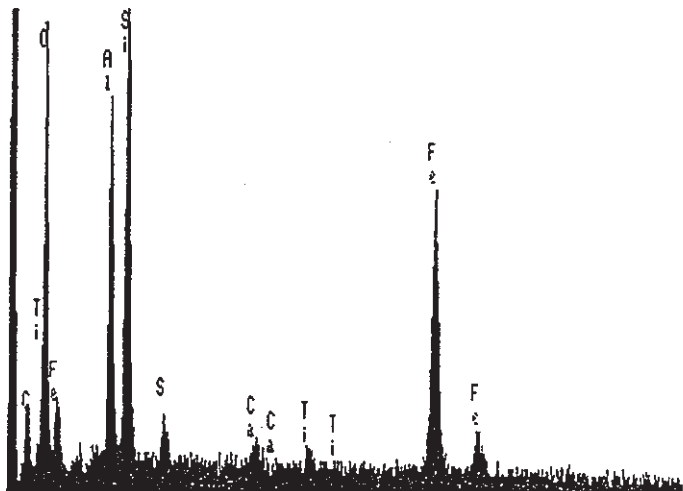
Figure -21 EPMA Analyses Surface Rust (Hazawa) (Pit)

X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 64s 22% Dead



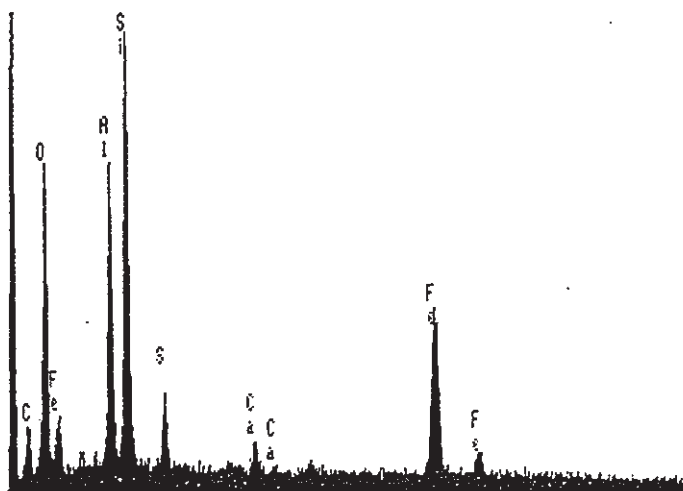
< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS= 1K ch 512= 37 cts
MEM1:2

X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 62s 19% Dead



< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS=511 ch 512= 25 cts
MEM1:2

X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 66s 24% Dead

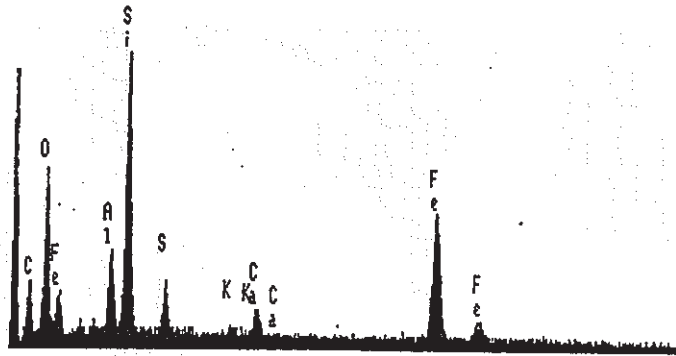


< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS= 1K ch 512= 51 cts
MEM1:2

Figure -22 EDX Analyses of Surface Rust (Hazawa)

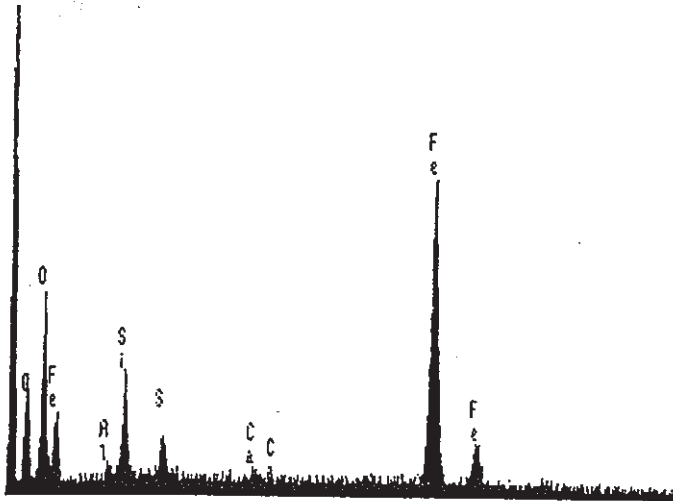
X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 70s 29% Dead

PNC TJ1451 94-002



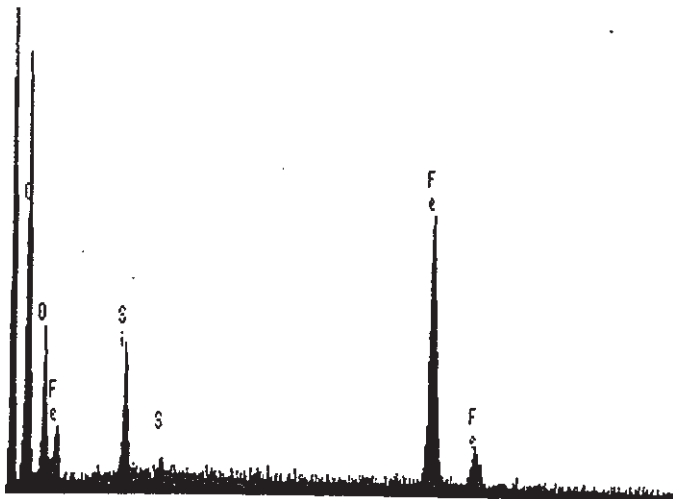
< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS= 2K ch 512= 64 cts
MEM1:1

X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 63s 21% Dead



< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS= 1K ch 512= 34 cts
MEM1:1

X-RAY: 0 - 10 keV
Live: 50s Preset: 50s Remaining: 0s
Real: 63s 21% Dead



< -0.1 5.020 keV 10.1 >
FS= 1K ch 512= 41 cts
MEM1:1

Figure -23 EDX Analyses of Rust in pit

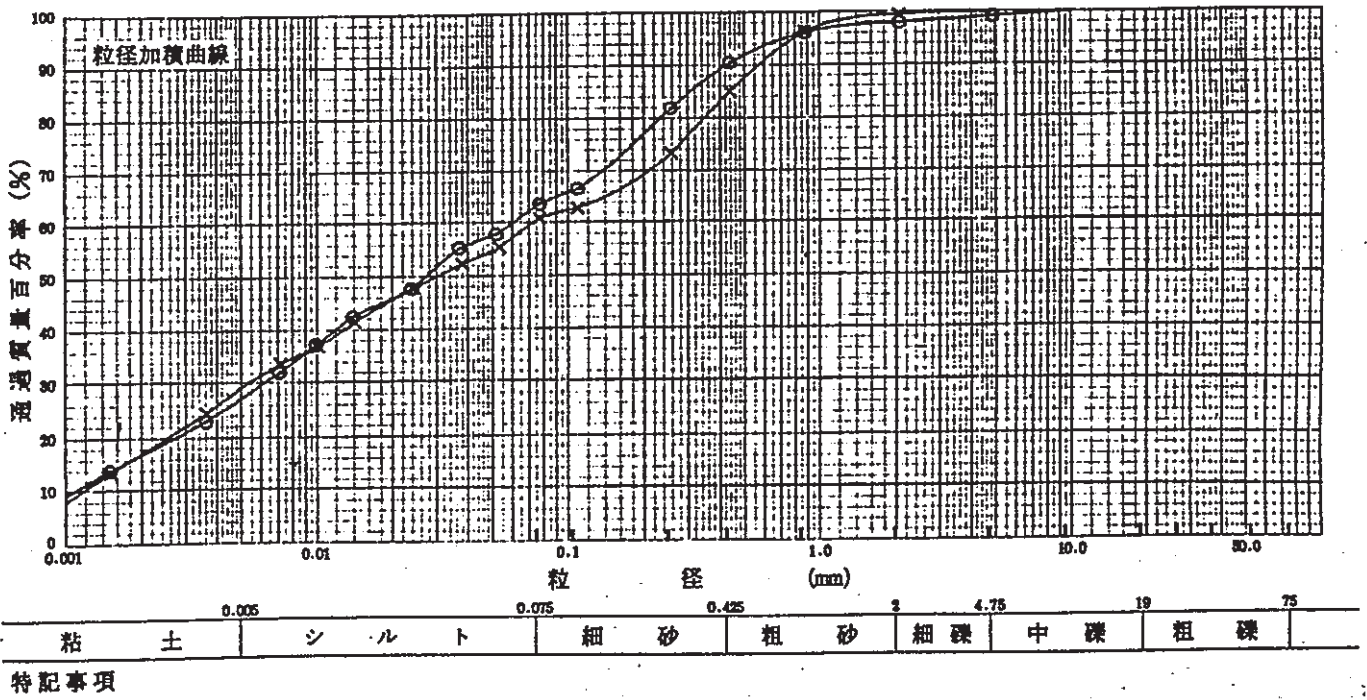


Figure -23 Grain-size of Soil (Hazawa)

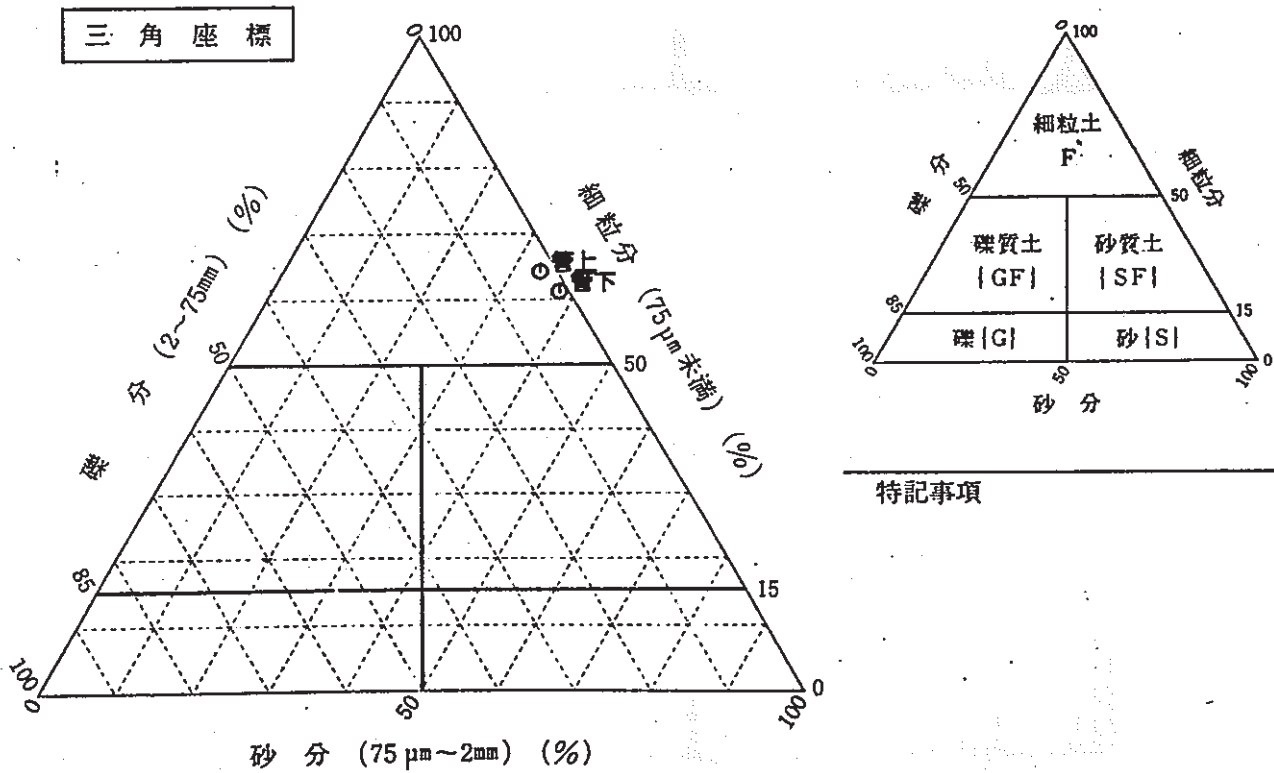


Figure -24 Grain-size Distribution of Soil (Hazawa)

未処理

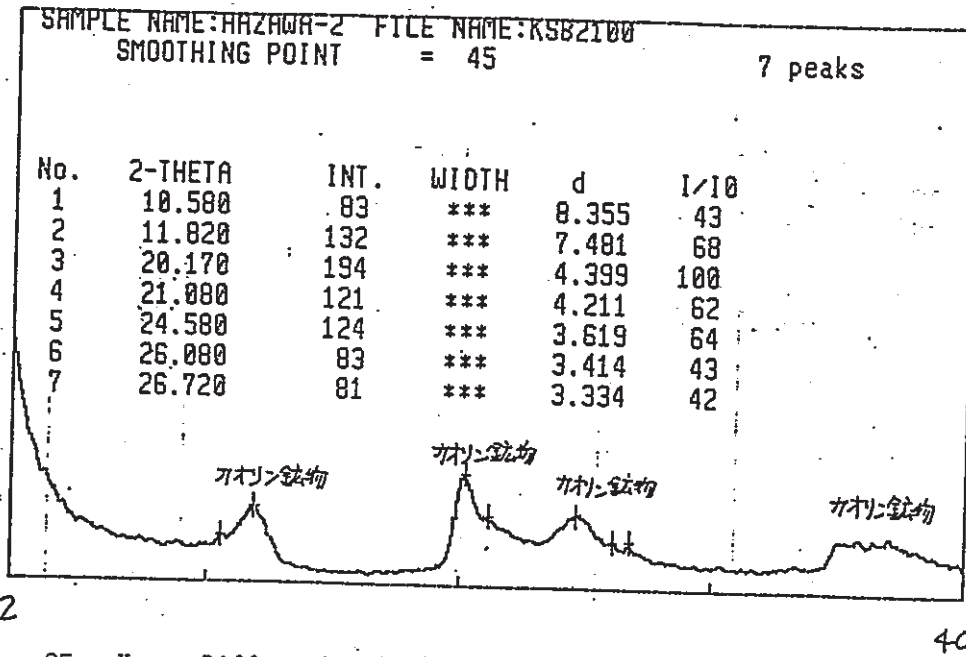


Figure -25 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil
(EG 処理前) (Hazawa)

エチレングリコール処理

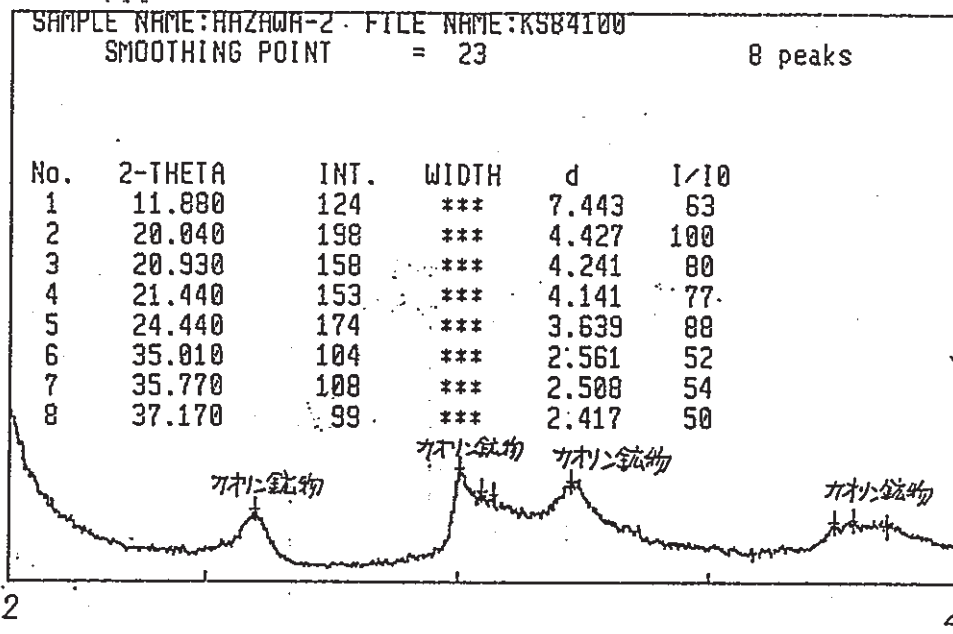


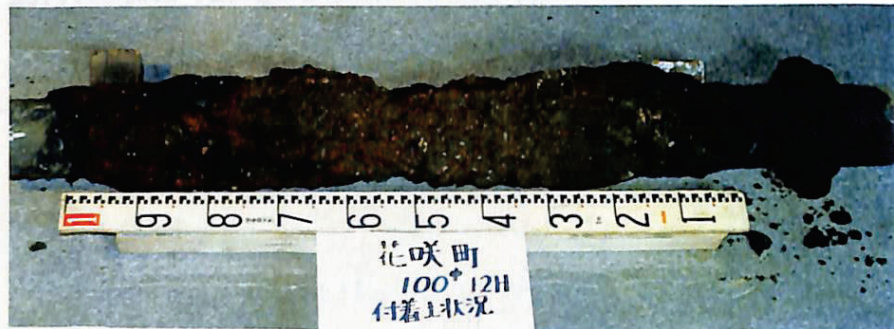
Figure -26 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil
(EG 処理後) (Hazawa)

(2) 花咲町

(i) 付着土状況

全周にわたって、茶色のロームが付着していた。この土の中に、小石、レンガの破片、壁土が混ざっていた。管体近傍は、土が黒色となっていた。管下の半分程度は粘土が付着していた。赤い錆も出ていた。12H、3H、9Hは、ローム、砂、小石や赤錆の混ざった土壌である。Photo -7に示す。

上流側12Hに給水取出し、下流側にサドルが付いていた。



a (Hanasaki 12H)



b (Hanasaki 9H)

Photo -7 Condition of Soil Around Pipe (Hanasaki)

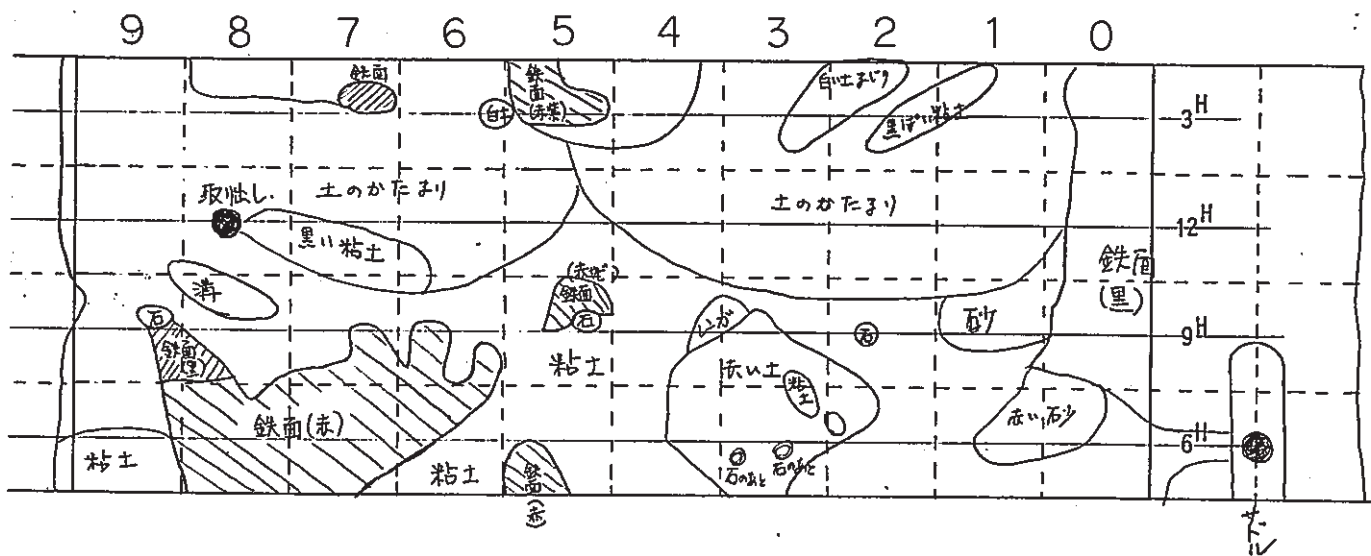


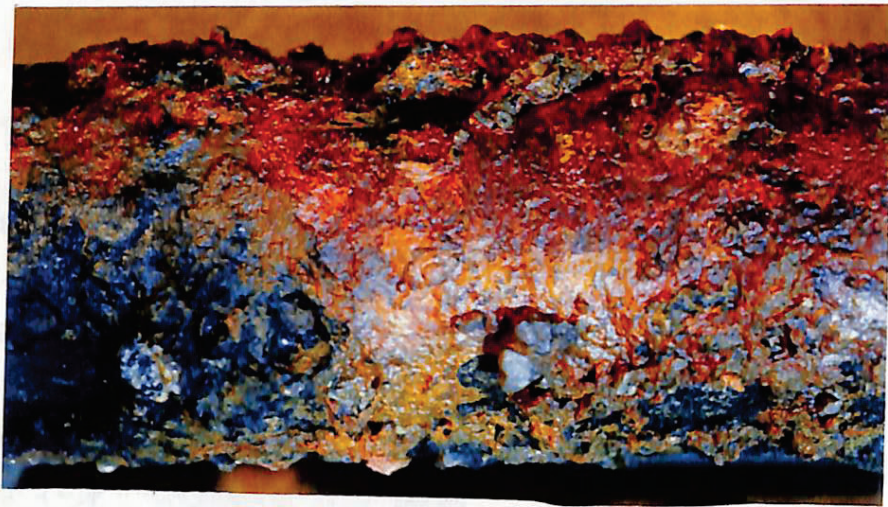
Figure -27 Sketch of Adhering Soil (Hanasaki)

(ii) 付着土除去後の管体状況

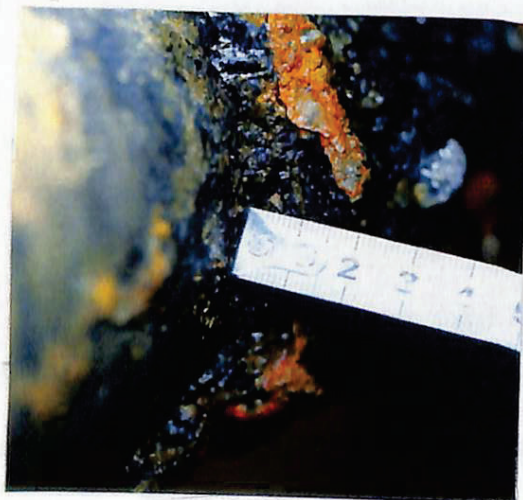
付着土除去後の管体状況は、全体に厚さ1cm位の土まじりの錆が付着している。色は、管天(12H)側が黒で、他が赤い色である。いたる所に小石が付着している。錆は厚く、でこぼこで均一ではない。赤錆の下は、黒色の錆層である。



1 2 H



6 H



9 H

Photo -8 Condition after Removal of Adhering Soil (Hanasaki)

(iii) 孔食深さ測定及び腐食状況

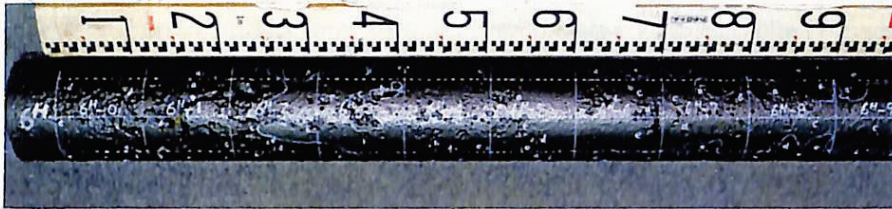
管体をブラスト後、各メッシュ内(10cm長×1/4周)毎に最大孔食深さ5点(a～e)を測定した。

ブラスト後の管体状況をPhoto-9に、測定結果をTable-18に示す。また、孔食の測定位置をFigure-29に示す。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-19に示す。

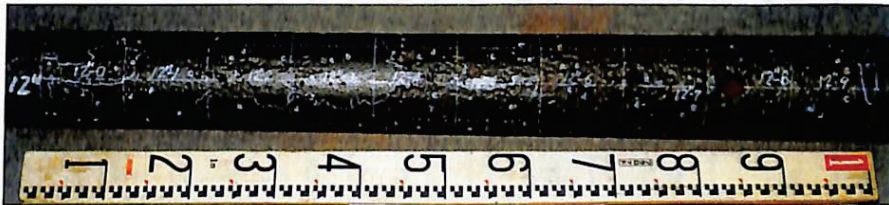
これによると、花咲町の最大孔食深さは、メッシュNo. 12H-7の5.0mm、12H-8の5.0mmであった。ただし、メッシュNo. 12H-7の5.0mmは貫通しているため板厚から考えると腐食深さは7.0mmであるが、孔食形状からブラストによる貫通とみられ、実際の腐食深さは5.0mmである。

管周方向別にみると12Hの長手方向が、平均で3.47mmと最も大きい。3H、6H、9H方向は2mm台の孔食である。各メッシュの最大孔食深さは、最小でも1.9mmで、全平均は2.84mmである。

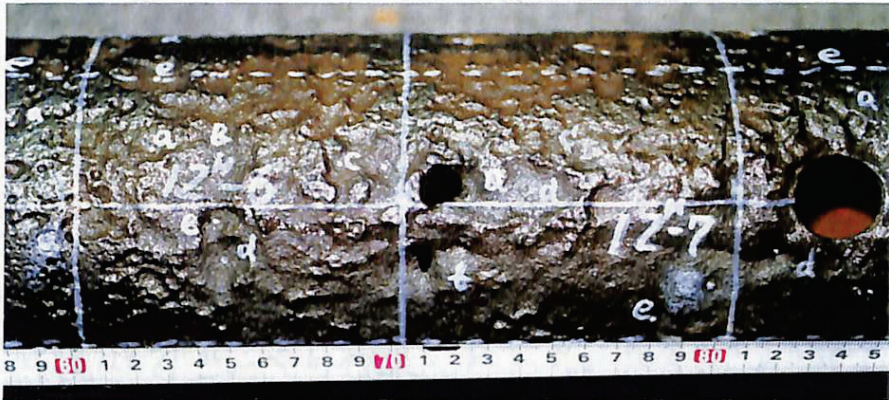
管体のブラスト後の腐食状況は、ほぼ全面に腐食しており、土質差マクロセルの影響と考えられる。ただし、12Hの上流側、6Hの中央部に腐食の少ない均一な管体面もみられた。



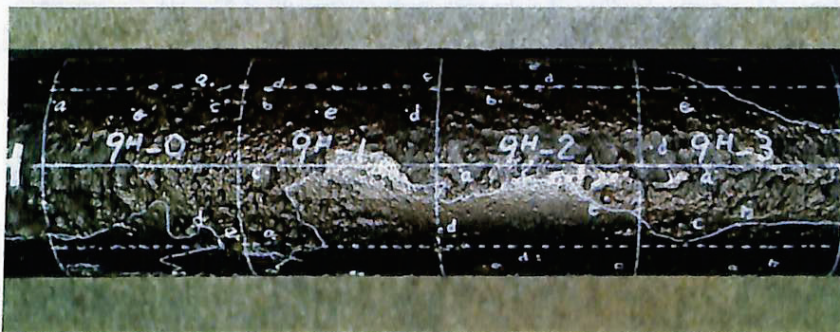
a (Hanasaki 6H)



b (Hanasaki 12H)



c (Hanasaki 12H-7)



d (Hanasaki 9H-0 ~9H-2)

Photo-9 Corroded Surface of Pipe after Blasting (Hanasaki)

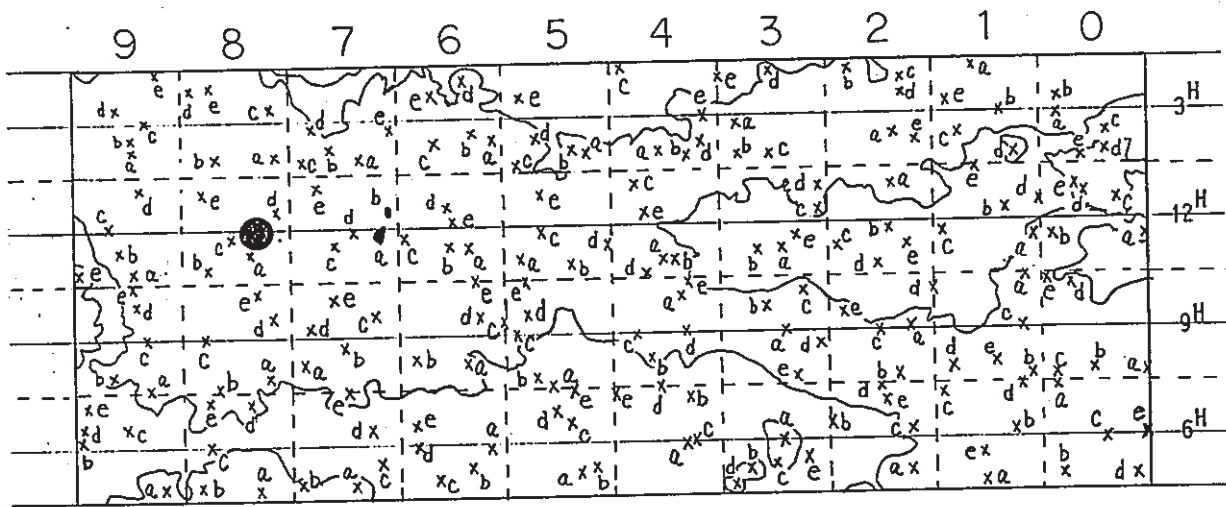


Figure -29 Measured Points of Pit (Hanasaki)

Table -18 Results of Measurement of Pit Depths (Hanasaki)
(Unit : mm)

メッシュ	a	b	c	d	e
12H-0	2.3	1.8	1.8	1.9	1.7
12H-1	2.7	2.1	2.1	2.1	1.7
12H-2	3.4	2.9	2.1	2.0	2.3
12H-3	2.3	2.1	1.9	1.8	1.9
12H-4	3.9	3.8	3.0	3.0	2.4
12H-5	2.3	2.4	2.0	2.1	1.8
12H-6	2.0	3.0	3.6	4.8	4.6
12H-7	5.0	5.0	2.1	3.5	2.0
12H-8	2.6	2.1	3.2	5.0	2.8
12H-9	2.9	2.5	2.7	1.5	2.6
3H-0	3.0	3.2	1.8	1.6	1.4
3H-1	3.8	2.3	3.2	1.9	2.2
3H-2	3.5	3.1	2.7	2.1	2.9
3H-3	2.1	2.8	2.4	2.2	3.0
3H-4	2.8	1.7	2.0	1.6	1.3
3H-5	2.3	1.7	3.2	1.6	0.9
3H-6	1.5	1.2	1.9	1.7	2.3
3H-7	1.6	1.6	1.4	1.9	1.8
3H-8	2.0	1.7	1.4	1.6	1.4
3H-9	1.5	1.7	1.5	2.4	2.4
6H-0	3.0	2.7	2.0	1.9	1.7
6H-1	3.1	3.0	2.3	2.8	2.5
6H-2	4.4	2.1	2.4	2.5	2.6
6H-3	2.1	2.3	2.1	1.7	1.9
6H-4	1.7	1.9	1.8	2.0	1.5
6H-5	1.6	1.5	2.8	1.9	2.2
6H-6	1.6	2.0	2.0	1.9	1.7
6H-7	1.9	1.4	1.8	1.8	1.7
6H-8	1.8	1.6	1.6	2.5	1.3
6H-9	2.4	2.6	2.7	1.7	2.0
9H-0	3.0	2.5	2.5	2.5	3.5
9H-1	3.1	3.0	2.0	1.6	1.6
9H-2	2.5	2.0	2.1	2.0	2.0
9H-3	2.5	2.3	2.2	1.8	1.8
9H-4	3.0	2.0	2.8	1.5	1.4
9H-5	1.7	1.9	2.7	2.0	2.5
9H-6	2.4	2.5	2.5	2.3	3.0
9H-7	1.8	1.5	3.1	1.6	2.1
9H-8	1.9	2.6	2.2	2.1	2.2
9H-9	2.4	1.7	1.4	1.6	2.4

(Unit : mm)

Table-19 Summary of Measured Depths of Pit (Hanasaki)

長手方向 メッシュNo.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	長手方向 全メッシュNo. の平均値	長手方 全メッシュNo. の最大
	1 2 H	2.3	2.7	3.4	2.3	3.9	2.4	4.8	*5.0 (7.0)	5.0	2.9	3.47
3 H	3.2	3.8	3.5	3.0	2.8	3.2	2.3	1.9	2.0	2.4	2.81	3.8
6 H	3.0	3.1	4.4	2.3	2.0	2.8	2.0	1.9	2.5	2.7	2.67	4.4
9 H	3.5	3.1	2.5	2.5	3.0	2.5	3.0	3.1	2.6	2.4	2.4	3.5
周方向平均値	3.0	3.2	2.5	2.5	2.9	2.7	3.0	3.0	3.0	2.6	—	—
*—貫通だがプラスチックによる貫通で 腐食そのものは5 mm ()内は板厚(7.0)											平均最大孔食深さ	2.84
最大孔食深さ											最大孔食深さの最大値	5.0

(IV) 元肉厚測定結果

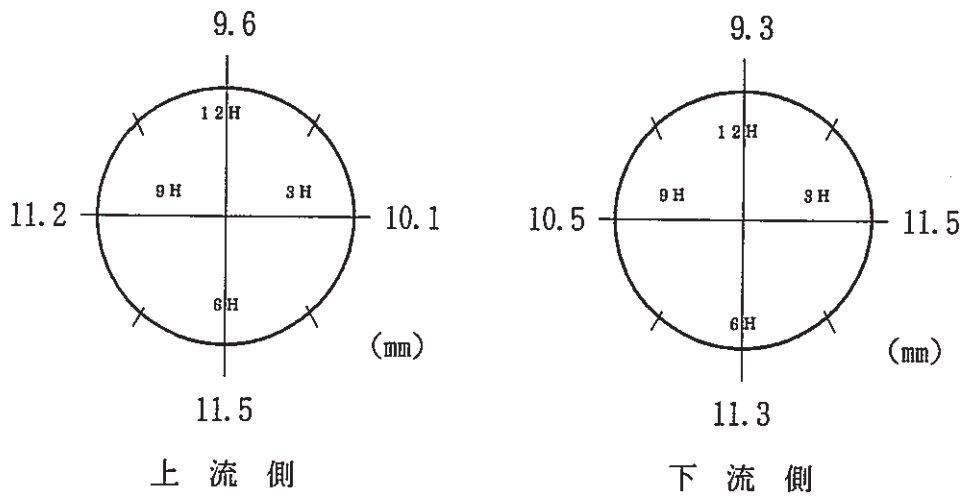


Figure-30 Results of measurement of Original Wall Thickness (Hanasaki)

(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-20 に示す。この分析によると、炭素含有量が3.11%であり、マイクロ写真から材質は片状黒鉛鑄鉄である。ただし、Si が 7.35%と非常に多い。

② 顕微鏡組織

掘上げ管の管端部から Figure -31 に示す位置でテストピースを切り取り、断面、クロ、マイクロ組織観察を行った。観察位置を Figure -32 に示し、組織の写真を Photo-10、Photo-11に示した。

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 -21、E PMAを行った結果をTable -22 に示し、表面錆のX線回折チャートを Figure-33と Figure-34に、孔食内錆のX線回折チャートを Figure-35、36に示す。EMP Aのチャートを Figure-37、38に示す。また、錆の成分について定量分析した結果を Table -23に示す。表面錆の腐食生成物のX線回折では、 FeCO_3 のみ同定され、他に土壌成分である Ca 、 CaCO_3 、 SiO_2 が同定されている。

孔食内錆では、 FeCO_3 が同定され、他にはCである。

E PMAでは、表面錆で Ca が検出され、孔食内ではCが検出されている。

定量分析では、表面錆にSの関係の成分が多く検出されている。

④ 土壌分析

埋設管周囲土において、管体から10m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-24 に示す。特に粘土分については、Figure-39 に土の粒土試験、Figure-40 に土の粒土分布の三角座標を示す。この結果から、管上と管下とは少し値が異なる。全体に硫化物イオンが非常に多い。交換性陽イオンも粘土の量からみると非常に多い。粘土分は管上10、管下15%と少ない。

⑤ 土壌中の鉍物分析(動燃殿からの御提供)

X線回折により土壌の鉍物分析を行った結果を Figure-41、42に示す。

粘土鉍物と同定されたものは、カリオン鉍物である。

⑥ 土壌中の鉍物の成分含有量の分析

管天場の土壌において、成分含有量の結果を Table-26 に示す。

⑦ 硫酸塩還元バクテリアの試験

試験結果を Table-27 に示す。土の分析結果からみるとかなりSRBが繁殖し易い環境であるが、埋設が浅いためか、 $10^3 \sim 10^4$ 個/mlと非常に多い値ではない。

Table -20 Chemical Composition of Pipe (Hanasaki)

成 分	C	Si	Mn	P	S
測定値 (%)	3.11	7.35	0.55	0.084	0.14

Table -21 X-ray Diffraction Analyses of Rust (Hanasaki)

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	◎	—	—	—	—	—	Ca, CaCO ₃ SiO ₂
孔食内錆	◎	—	—	—	—	—	C

判定 ◎ 検出
○ こん跡
— なし

<分析条件> 装置 : PHLIPS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 -22 EPMA Analyses of Rust (Hanasaki)

	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ag	Ti	Cu	Mg	Cr
表面錆 (12H)	○	◎	○	○	◎	◎	○	◎	—	○	○	◎	—	○	—	—	—
孔食内錆 (6H)	○	◎	—	○	◎	◎	○	◎	—	△	○	◎	—	○	○	○	○

◎: 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 × 10⁻⁷A

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 -23 Results of Quantitative Analyses of Rust (Hanasaki)

(Unit:%)

錆の成分	FeS	FeSO ₄	CO ₂	T-Fe	T-C	Cl ⁻	T-S	SiO ₂
表面錆 (12H)	8.88	0.38	6.87	23.83	10.43	0.01	3.32	29.40
孔食内錆 (6H)	1.88	0.49	*	48.18	11.92	0.05	0.79	13.20

表面錆コブ 83.12 %

孔食内錆 76.51 %

*は試料が少ないため分析不可

Table -24 Results of Compositional Analyses (Hanasaki)

項目	単位	管の上側	管の下側
pH	—	8.1(22.0°C)	7.4(22.0°C)
含水率	%	1.6	2.0
酸化還元電位	mV	370	247
硫化物イオン	mg/kg	2.0	4.0
粘土分	%	1.0	1.5
塩化物	mmol/kg	0.21	0.68
硫酸塩	mmol/kg	1.7	2.7
交換性陽イオン	mmol/kg	460	330
置換酸度	mmol/kg	0.1以下	0.1以下
イオウ分	%	0.05	0.09
重炭酸イオン	mmol/kg	4.6	7.9
Mアルカリ度	mmol/kg	2.3	3.9

Table-25 Results of X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil (Hanasaki)

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) カルサイト, 石英

Table -26 Results of Analyses of Composition of Mineral in Clay (Hanasaki 管下の土)

項目	単位	管下の土
		分析値
Fe ₂ O ₃	%	11
MnO ₂	%	0.32
CaO	%	0.63
MgO	%	0.72
K ₂ O	%	1.20
Na ₂ O	%	0.18
SiO ₂	%	58
Al ₂ O ₃	%	16
TiO ₂	%	0.71
固型分	%	80
強熱減量	%	7.0

Table -27 Results of SRT Tests

項目	単位	管の上	管の下
SRBの数	個/ml	10 ³ 個~	10 ³ 個~
		10 ⁴ 個以下	10 ⁴ 個以下

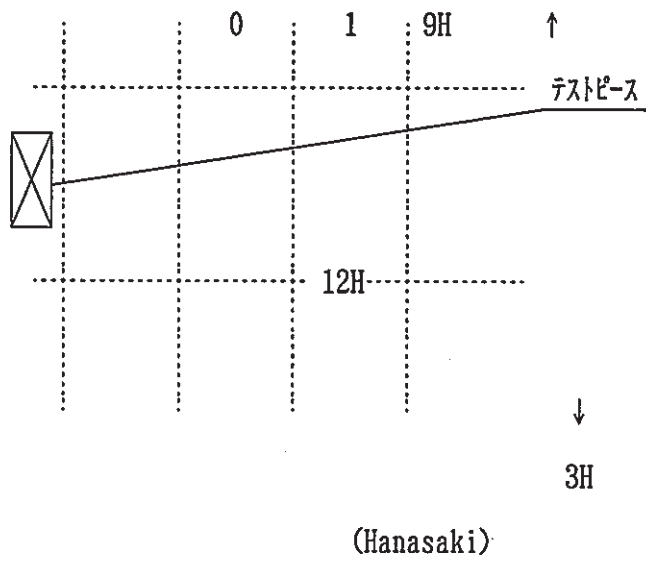
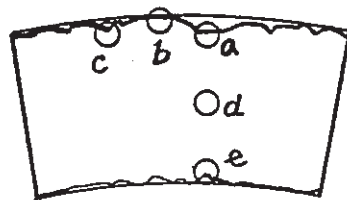


Figure -31 Cutting Position of Test Pieces (Hanasaki)



(Hanasaki)

Figure -32 Positions of Metallography (Hanasaki)

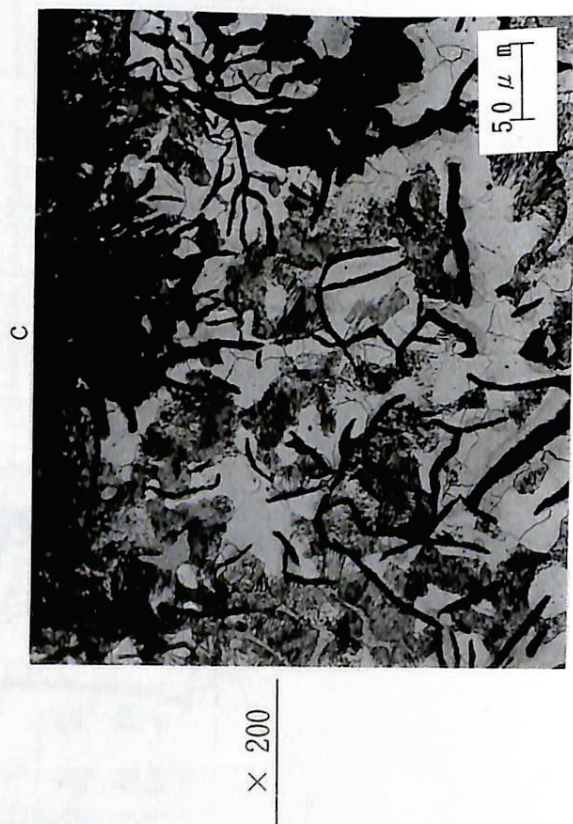
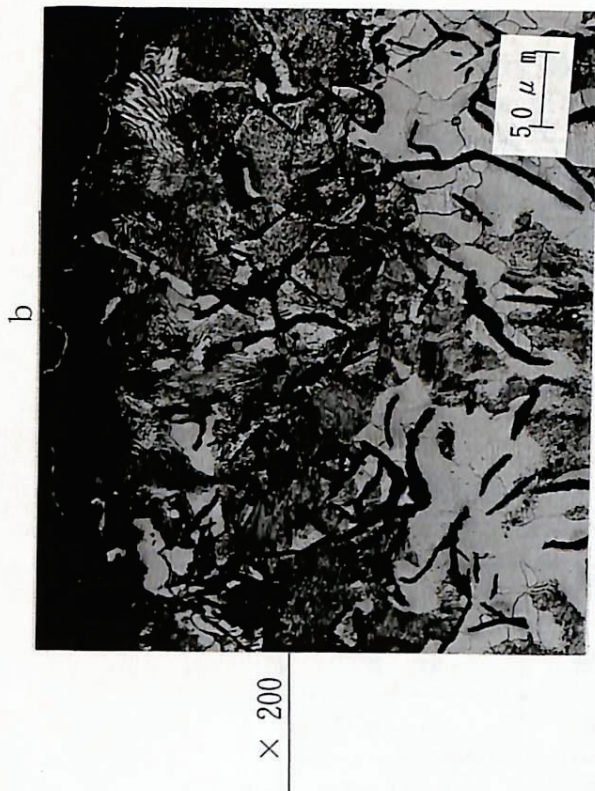
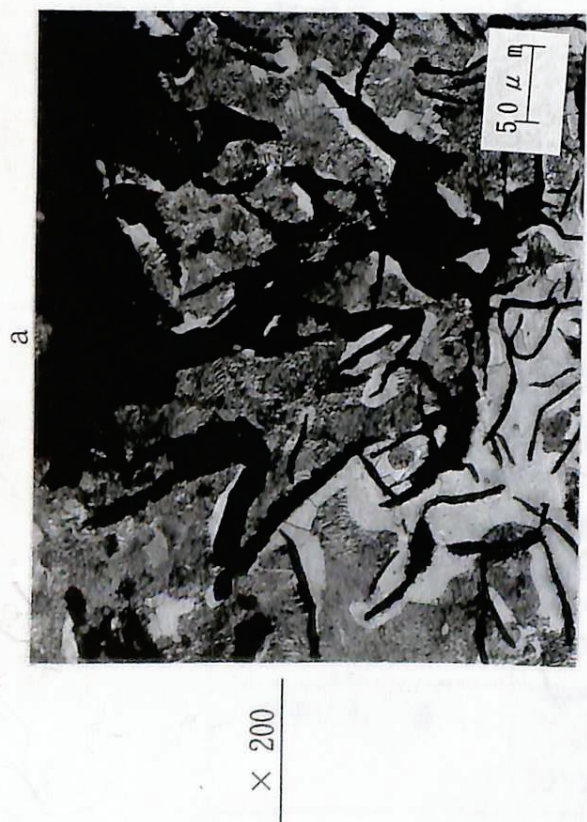
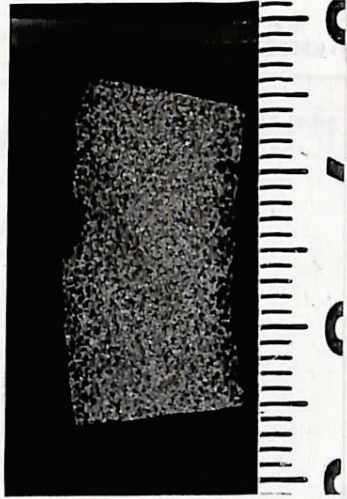


Photo -10 Micro Structures of Cross Section of Test Piece (Hanasaki)

マクロ



× 2

e



× 200

Photo -11 Micro and Macro Structures of Cross Section of Test Piece (Hanasaki)

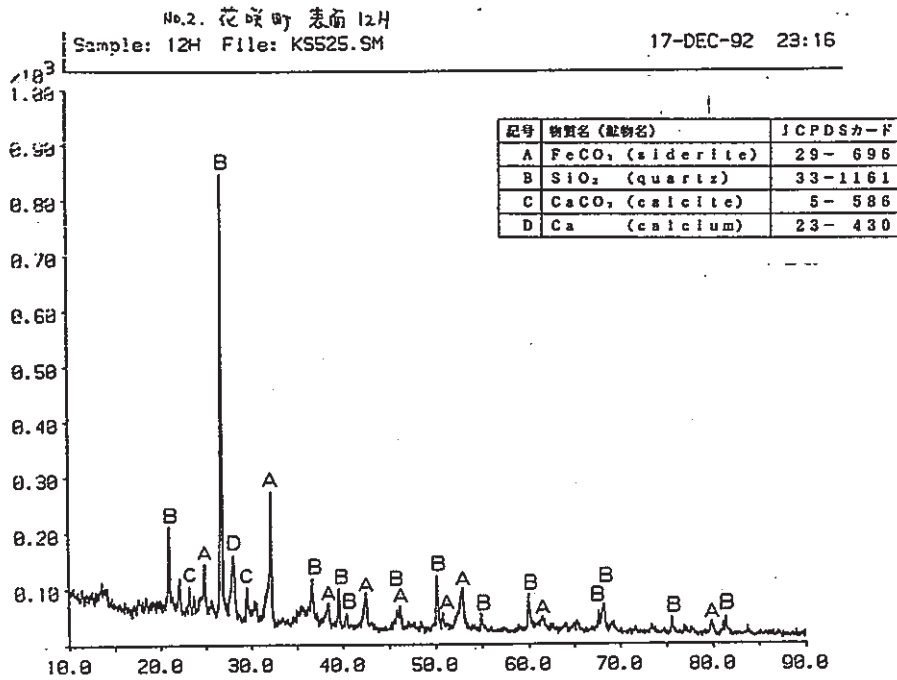


Figure -33 X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (固定された全結晶)

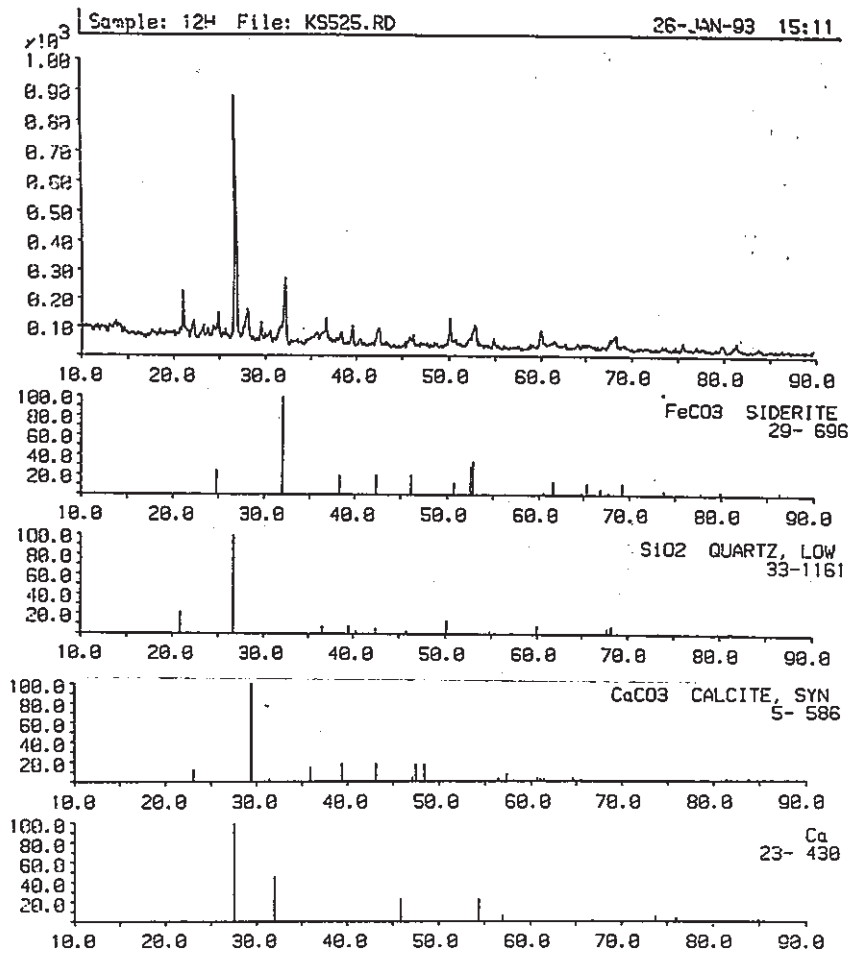


Figure -34 X-ray Diffraction Analyses of surface Rust (錆の結晶の同定)

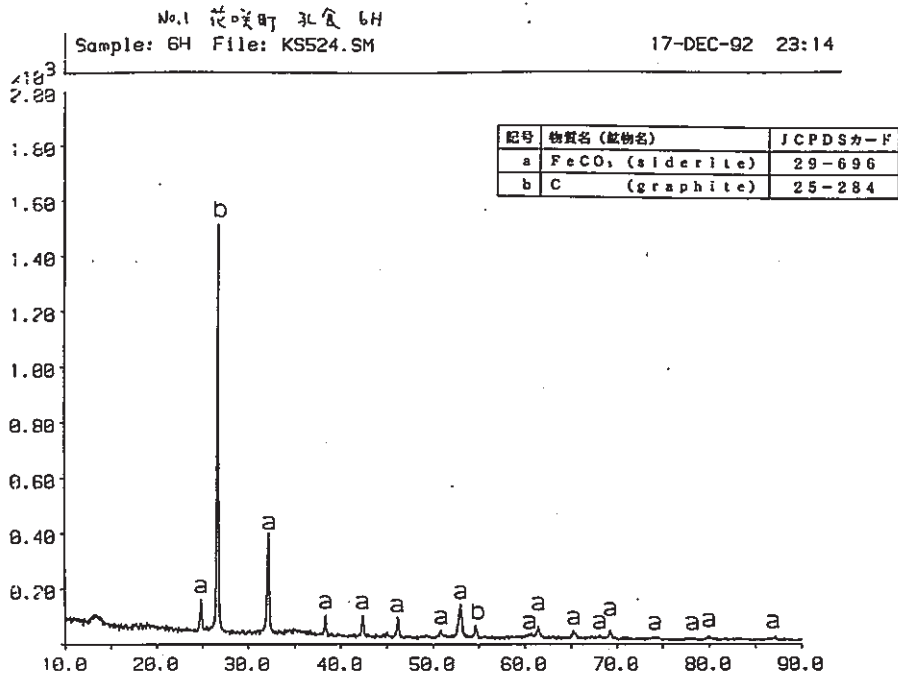


Figure -35 X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit (Hanasaki)
 (同定された全結晶)

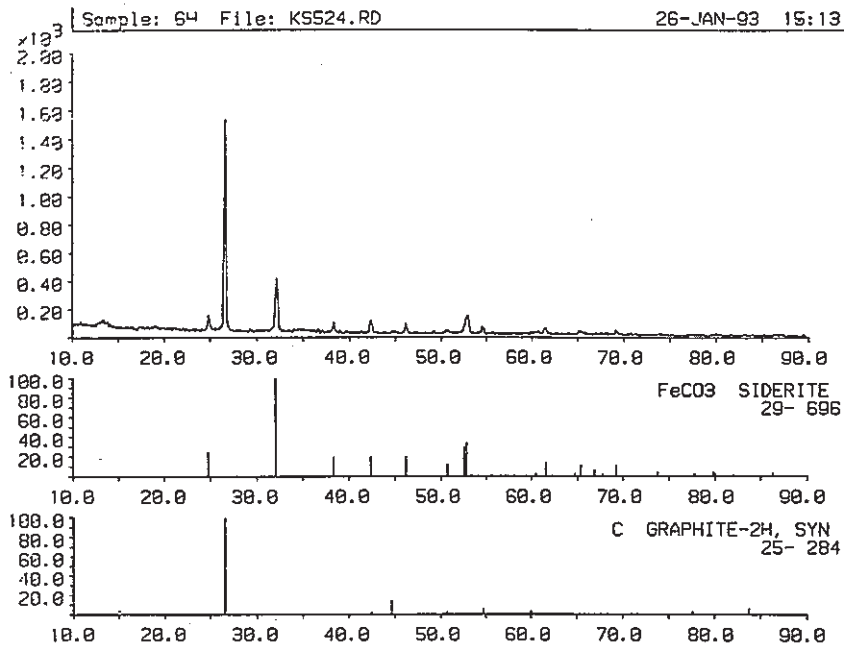


Figure -36 X-ray Diffraction Analyses of Rust in Pit(Hanasaki)
 (土壌結晶の同定)

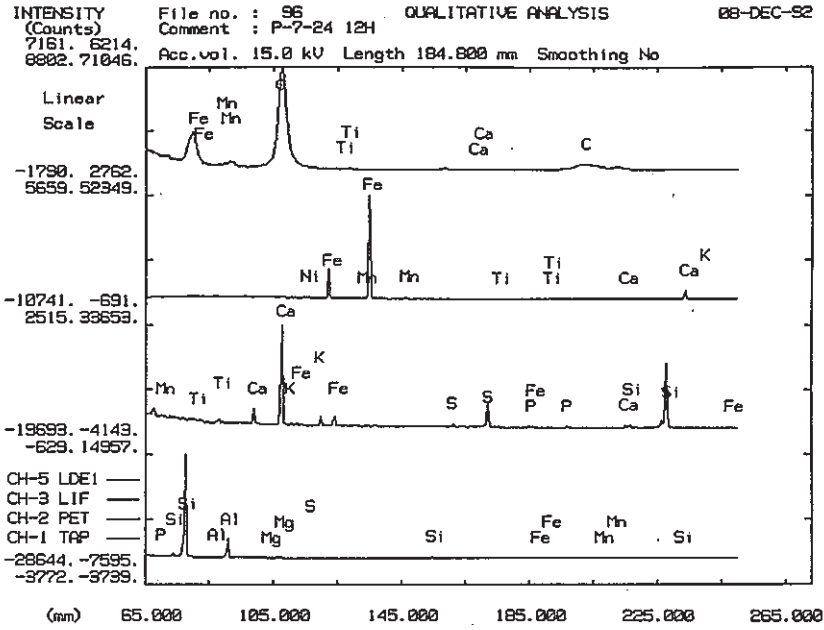


Figure -37 EPMA Analyses of surface Rust (Hanasaki)

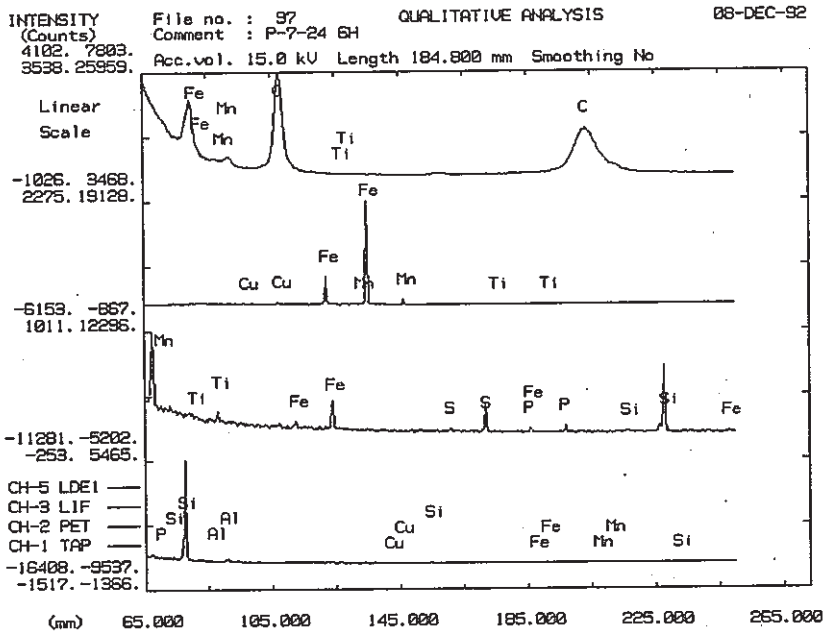


Figure -38 EPMA Analyses of Rust in Pit (Hanasaki)

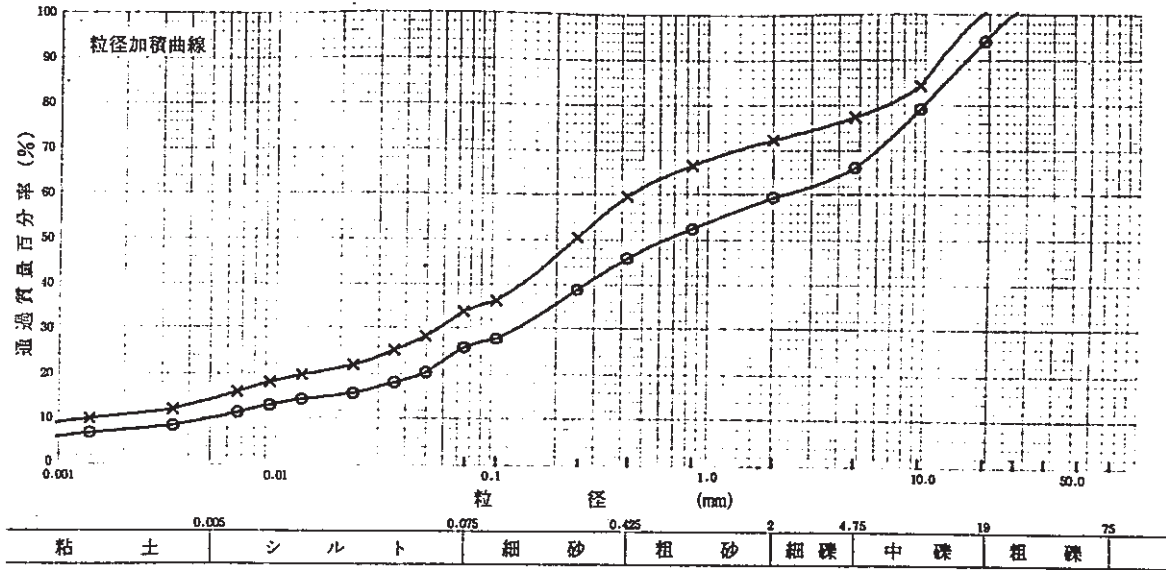


Figure -39 Grain-size of Soil (Hanasaki)

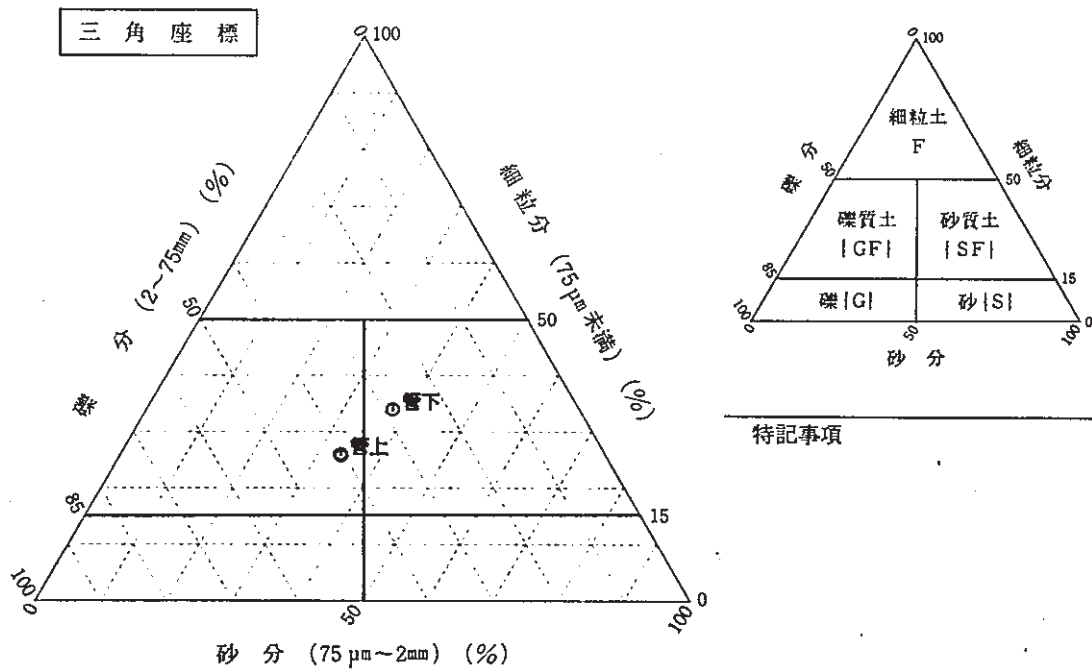


Figure -40 Grain-size Distribution of Soil (Hanasaki)

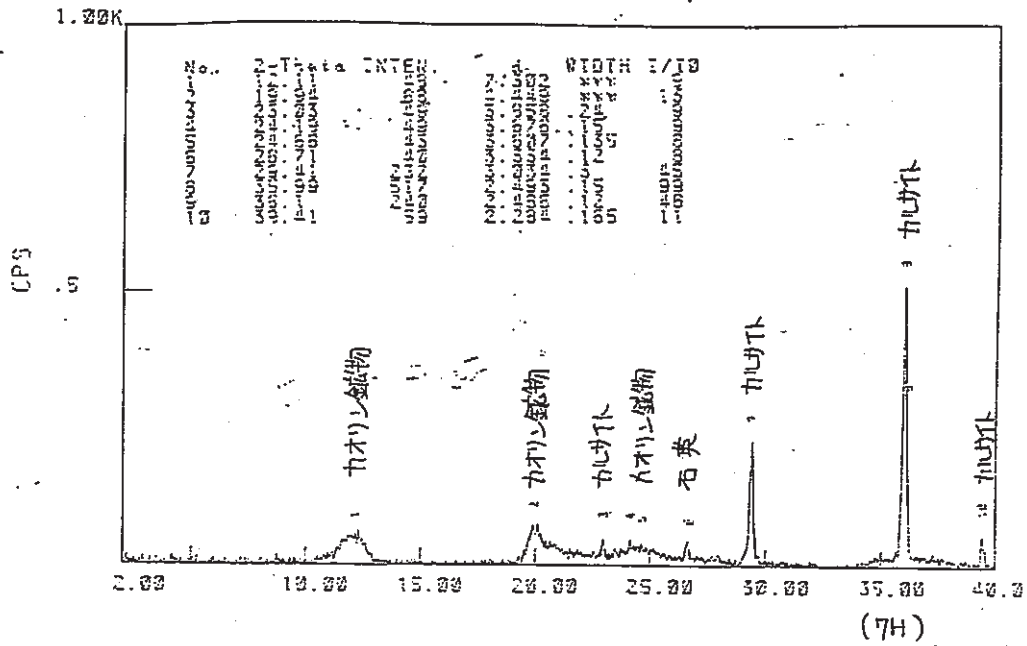


Figure -41 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil
(BG処理前) (Hanasaki)

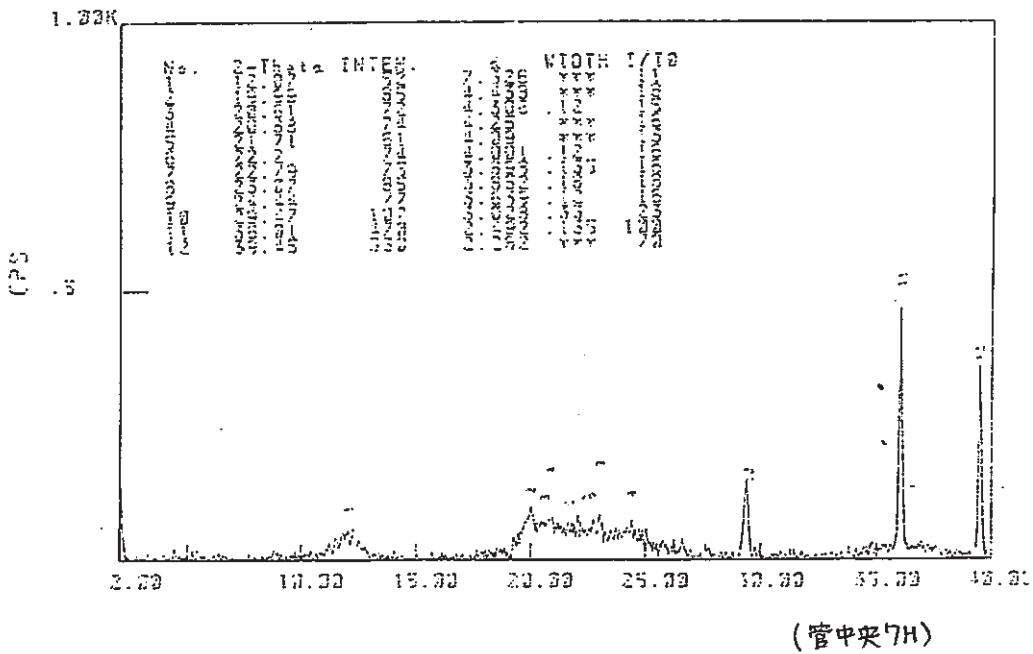


Figure -42 X-ray Diffraction Analyses of Mineralogical Composition of Soil
(BG処理後) (Hanasaki)

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 -28に示す。

(i) 羽沢

- ① 管周り土の目視観察では、埋設管の周囲はこげ茶のローム（表土）であり、管上に 2～3 cm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ロームであった。
- ② 掘削後計測では、土壌比抵抗が平均で $5,247 \Omega \cdot \text{cm}$ と粘土としては高い値でロームとしては低い値である。pHは7.1で中性である。
管対地電位（平均）は -544mV で、一般的な値であり、プローブ自然電位（平均）は -730mV で一般土壌的な値であった。
プローブ分極抵抗（平均）は 144Ω と一般土壌よりかなり低い値で、プローブ腐食速度（平均）は 0.157mm/y と粘土より大きな値を示した。酸化還元電位（平均）は $+289\text{mV}$ とやや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、 10^3 個/ml 以上 10^4 個/ml 以下であった。
- ⑤ 羽沢の地形は、丘陵地の途中の傾斜にあたる。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、土の採取跡のくぼみにたまる程度の湧水がみられた。

(ii) 花咲

- ① 土壌の目視観察では、埋設管の周囲は浅いため茶色の礫混じりの粘土で、白い壁の崩れたものが混ざっていた。管の表面が見えたところで測定を行った。
- ② 土壌比抵抗は、平均で $4.447 \Omega \cdot \text{cm}$ と一般土壌の平均と同じ位であるが、中央部と下流側の管下（6 H）土壌の抵抗は、 $2000 \Omega \cdot \text{cm}$ 位で粘土の値である。このように、土壌比抵抗の差が大きい環境である。管下は土丹層であると考えられる。
- ③ 腐食速度は、平均で 0.08 mm/y と一般的な値である。ただし、下流側 6 H の値は、分極抵抗からみて異常に小さい。
- ④ プローブ分極抵抗は、平均で 346Ω と一般的である。土壌比抵抗と同様に、中央と下流側の管下の値が管上の $2/3$ 位の値となっていて、低い値である。
- ⑤ プローブ自然電圧は、平均で -727 mV と一般的な値である。ただし、中央部は -640 mV と貴な値となっている。
- ⑥ 管体地電位は、平均で -533 mV と一般的な値である。管上と管下、上流と下流の間で差は少ない。
- ⑦ 酸化還元電位は、上流側 1 2 H を除いて 400 mV 以上であり、酸化性の土壌を示している。全体に差が小さい。
- ⑧ PH は、平均で 7.3 であり中性を示し、範囲も 7.0~7.5 であり差は小さい。
- ⑨ 硫化物イオンは、一般に不溶性のため容易に検出されないのに、花咲町では検出されている。塩化物、硫酸塩は、普通である。
- ⑩ 硫酸塩還元細菌は $10^3 \sim 10^4$ 個/ml と環境のわりに少なかった。

Table -28 Summary of Soil Environmental Factors

項目	内 容	羽 沢	花 咲
掘削後計測 (平均値)	土壌比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	5,247	4,447
	プローブ腐食速度 (mm/y)	0.157	0.080
	プローブ分極抵抗 (Ω)	144	346
	プローブ自然電位 (mV)	-730	-727
	管対地電位 (mV)	-544	-533
	酸化還元電位 (mV)	+289	+479
	pH (現地)	7.1	7.3
土の分析 (平均値)	pH (試験室)	7.5	7.8
	含水率 (%)	74	18
	酸化還元電位 (mV)	267	309
	硫化物イオン (mg/kg)	0.2 以下	30
	粘土分 (%)	28	12.5
	塩化物 (mmol/kg)	0.59	0.45
	硫酸塩 (mmol/kg)	1.3	2.2
	交換性陽イオン (mmol/kg)		395
	置換酸度 (mmol/kg)		0.1 以下
	イオウ分 (%)	以下	0.07
	重炭酸イオン (mmol/kg)	2.7	6.3
	Mアルカリ度 (mmol/kg)	2.3	3.1

(2) 管体腐食状況

管体腐食状況についてのまとめをTable-29に示す。

また、腐食深さと腐食速度測定結果まとめ表をTable-30に示す。

(i) 羽沢

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では、管天側は赤く凹凸の激しい錆コビが多い表面となっており、小石の付着もみられた。管下6 H方向は、黒い均一な錆におおわれた部分が多く見られ、中央部の赤サビ下に腐食が見られた。プラスト後の管体の腐食状況は、管天側から3H（左側）方向に腐食が見られた。3 H方向の赤いサビコブ部分に大きな腐食がみられた。管下部分は均一なこげ茶のロームに覆われており、6 H側の2.3mm が最大腐食深さであった。埋設経過年30年としては全般に腐食は大きかった。

腐食量（マクロセル腐食を含む）は最大孔食深さは5.0mm であり、平均孔食深さが2.10mm 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0.167 mm/yで、平均孔食腐食速度 0.070mm/yであった。

粘土と見られる6 Hと9 H方向の最大孔食深さは、2.3mmであった。

(2) 花咲

管の材質は片状黒鉛鑄鉄であるが、Siが非常に多い。

付着土除去後の管体状況は、全体に厚さ1 cm位の小石混じりの厚いサビコブが付着していた。サビコブの色は、管天側が黒色で、管下側が赤色であった。腐食状況は、ほぼ全面に腐食が生じているが、12 Hの上流側、6 Hの中央部に腐食の少ない均一なカソードと思われる管体面があった。このことは、土質差等によるマクロセルがあったことを示しているが、腐食速度からみると、腐食速度が小さい。これは、土壌比抵抗が管中央の管下を除いてやや高いことと、サビコブが非常に厚く付着し、この腐食生成物（サビコブ）が保護被膜となって、腐食が徐々に遅くなった結果と考えられる。

また、最大腐食部は管体がもろいため、プラストにより貫通を生じ、実際の腐食深さは形状から5.0 mmとした。

最大腐食深さは5.0 mmであり、平均腐食深さは2.84mmであった。これを腐食速度でみると、最大腐食速度は0.074mm/yであり、平均腐食速度は0.042mm/yであった。

Table -29 Summary of Corrosion of Pipe

項目	内 容	羽 沢	花 咲
管 の 成 分	C (%)	3.08	3.11
	Si (%)	1.61	7.35
	Mn (%)	0.42	0.55
	P (%)	0.11	0.084
	S (%)	0.13	0.14
錆 の X 線 回 析	表 面 錆	FeOOH ◎ (管上) Fe ₃ O ₄ ◎ (管下) SiO ₂ ◎ CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ◎	FeCO ₃ ◎ Ca ₁ CaCO ₃ SiO ₂
	孔 食 内 錆	FeCO ₃ ◎ SiO ₂ ◎	FeCO ₃ ◎ C.
腐 食 深 さ 計 測	最大孔食深さ平均値 (mm)	2.10	2.84
	最大孔食深さ最大値 (mm)	5.0	5.0
	最大孔食腐食速度 (mm/y)	0.167	0.074
マクロセルの種類		一部に土質差 による腐食	土質差 による腐食

◎ 検出 ○ こん跡

Table1 -30 腐食深さと腐食速度まとめ表

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
羽 沢	30	2.10	5.0	0.071	0.167
花 咲	68	2.84	5.0	0.042	0.074

(3) 粘土中の鋼材の腐食

羽沢は、埋設土壌の目視では全周ロームに思われたが、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、マクロセルが見られ、ほぼ粘土中に当たる部分は6H, 9Hになると考えられる。

粘土中の部分による腐食量と腐食速度を Table - 31 に示す。

この結果から、羽沢の粘土中の腐食は最大孔食深さが経過年30年で 2.3 (mm) で、平均孔食 深さが 1.66 (mm) であった。

そして、腐食速度は、最大孔食深さが 0.077mm/yで、平均孔食速度が 0.055 m m/y であった。

Tablel -31 Examination Results on the amount of Corrosion of Pipes Buried in the Soil-1994

項目		孔食深さ (mm)		孔食腐食速度 (mm/y)	
		調査場所	経過年	平均値	最大値
羽 沢	30	1.66	2.3	0.055	0.077

羽沢は 6H 9Hが粘土

(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1mと短く、そこで、極値統計手法を用いて、長い実路線の(5m)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5m(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、羽沢では6H、9H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分割した大きさで解析した。

羽沢については、12H、3Hは、赤いサビコブであり、マクロセル腐食部分と考えられ、12H、3H方向を除いた6H、9Hの長手方向部(サンプル数20個)で解析した。

解析はパソコンによる極値統計手法を用いた装置材料の寿命予測システムであるEVANというソフトウェアを使用して行った。(EVANは、腐食防食協会編装置材料の寿命予測入門 丸善 1984年に対応するソフトウェアである。)

① 使用期間ごとのデータ情報

- ・使用期間： 30年
- ・試料数N： 20
- うちデータが得られた試料数n： 20
- 1試料で得られたデータ数の最大値m： 1.0
- ・対象物の大きさ： 5m
- ・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 -43 に示す如く、正規分布に近いグンベル分布となっている。最頻値は1.7mm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5.22mmである。

(最大侵食量推定 - 最大値によるヒストグラム)

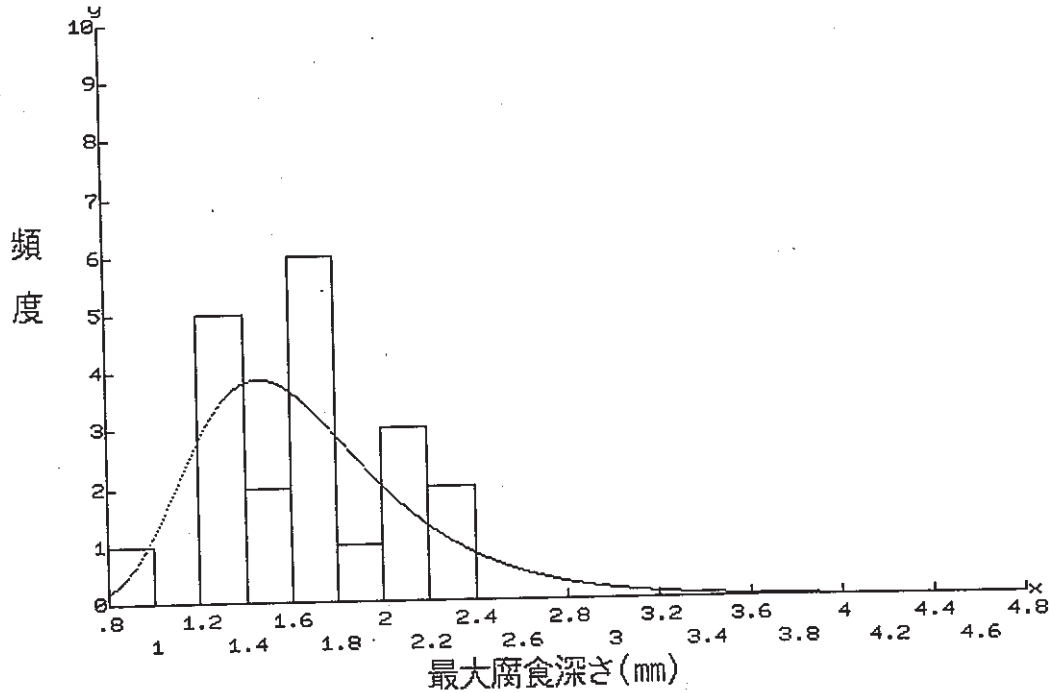


Figure -43 Maximum Pit Depth-Histogram (Hazawa)

Table -32 Table of Calculated Parameters Using MVLUE

試料 i	Max値 x_i (mm)	MVLUE係数 $a_i(N,n)$	MVLUE係数 $b_i(N,n)$	$n_i x_i$ (mm)	$b_i x_i$ (mm)	累積確率 $F(y)$
1	2.3	.0139613	.0351833	.0321109	.0809216	.85238
2	2.2	.0174766	.0376929	.0384485	.0829245	.90476
3	2.1	.0207089	.0389341	.0434888	.0817617	.85714
4	2	.0238328	.0393857	.0476651	.0787713	.80952
5	2	.0269187	.0392023	.0538373	.0784047	.76191
6	1.9	.0300107	.0384435	.0570204	.0730426	.71429
7	1.8	.0331417	.0371221	.0596551	.0668199	.66867
8	1.8	.0363409	.0352206	.0654136	.0633971	.61905
9	1.7	.0396372	.0326948	.0673833	.0555811	.57143
10	1.7	.0430622	.0294727	.0732057	.0501035	.52381
11	1.6	.0466521	.0254483	.0746434	.0407174	.47619
12	1.6	.050452	.0204701	.0807232	.0327521	.42857
13	1.5	.0545196	.0143194	.0817795	.0214792	.38095
14	1.5	.0589339	6.67421E-03	.0884008	.0100113	.33333
15	1.4	.0638081	-2.96101E-03	.0893314	-4.14541E-03	.28571
16	1.4	.0693171	-.0153961	.0970439	-.0215546	.2381
17	1.3	.0757558	-.0320804	.0984825	-.0417046	.19048
18	1.3	.0836968	-.0559988	.108806	-.0727985	.14286
19	1.2	.0945659	-.095077	.113479	-.114092	.09524
20	.8	.117208	-.228751	.0937666	-.183001	.04762

$N = 20 \leq 45$ $n = 20$
 $\lambda = \sum a_i x_i = 1.4647$ (位置パラメータ)
 $\alpha = \sum b_i x_i = .37939$ (尺度パラメータ)
 $y = (x - \lambda) / \alpha$ $F(y) = e^{-e^{-y}}$

〈最大侵食量推定 - Gumbel確率紙プロット〉

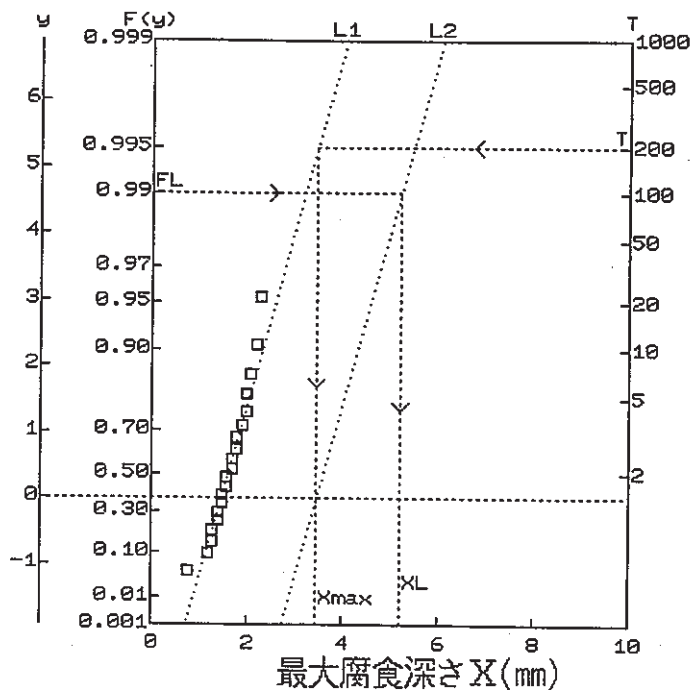


Figure -44 Estimation of Maximum Pit Depth-Gumbel Probability Paper Plot

L1 : 1 試料中の最大侵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

実機推定最大侵食量最頻値 Xmax 3.47 mm

指定信頼率 FL 0.99

実機推定最大侵食量指定信頼率点値 XL 5.22 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、京町-1、笹野台、羽沢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 -33 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についてみると、

i) 現地調査の計測値について

- ① 土壌0 抵抗は、平均 $3,223 \Omega \cdot \text{cm}$ 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。羽沢はずば抜けて高い値である。
- ② 管対地電位は、一般土壌に比べて平均 -507 mV はやや卑な値と思われるが蓮根は非常に貴な電位を示している。
- ③ 酸化還元電位は、値のバラツキがあり、平均 $+289 \text{ mV}$ 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る。笹野台は他の地点より、より以上に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 45% で一般土壌よりやや多い値である。とくに羽沢が高い。
- ② 塩化物、硫酸塩はバラツキが多いが、一般土壌にみられる値で、海成粘土の値より低い値である。
- 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。
- ④ 置換酸度については、平均で $0.2(\text{mmol/kg})$ となった。

iii) まとめ

全体調査ヶ所とも淡水性粘土である。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 -33 Summary of Environmental Factors of Clay Measured at Sites

項目	内 容	梅田 6H03点	蓮根 全周	京町 1-1	笹野台	羽沢	平均值
掘 削 後 計 測 (平 均 値)	土 壤 抵 抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2,437	2,818	2,700	2,914	5,247	3,223
	加-フ腐食速度 (mm/y)	0.118	0.057	0.092	0.082	0.157	0.101
	加-フ分極抵抗 (Ω)	262	505	332	400	144	329
	加-フ自然電位 (mV)	-672	-720	-812	-812	-730	-749
	管対地電位 (mV)	-493	-350	-577	-573	-544	-507
	酸化還元電位 (mV)	+262	+291	+218	+ 54	+289	+223
	pH	7.7	7.2	8.2	8.6	7.1	7.8
土 の 分 析 (平 均 値)	pH	8.0	7.9	8.0	6.1	7.5	7.5
	含 水 率 (%)	38	32	29	51	74	45
	酸化還元電位 (mV)	+243	+316	+242	+304	+267	+274
	硫 化 物 (mg/kg)	1 以下	1 以下	1 以下	45	0.2 以下	1 以下 *
	粘 土 分 (%)	28	40	49	45	28	38
	塩 化 物 (mmol/kg)	0.57	3.2	0.69	0.50	0.59	1.11
	硫 酸 塩 (mmol/kg)	2.7	2.2	0.77	4.8	1.3	2.35
	交換性陽イオン (mmol/kg)	120	170	220	355	150	203
	置 換 酸 度 (mmol/kg)	0	0.3	0.1 以下	0.4	0.2	0.2

* 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 -34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5件中3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、羽沢は管天に、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る、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、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 -35 に示す。これによれば、経過年が20, 30, 31, 56, 66年のものが得られた。腐食量の最大値は、羽沢の2.3(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0.012～0.055mm/y, 最大で0.03～0.07 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 -36 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 ～3.5 mmの範囲にあり、累積確率 0.99 では、2.0 ～5.2 mmの値となった。最大孔食腐食速度は、最頻値で0.038 ～0.117 mm/yを示し、累積確率 0.99 で0.061～0.173 mm/yを示した。

Table -34 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	羽沢	
管の成分分析	C (%)	2.95	4.14	3.44	3.22	3.59	3.75	3.08	
	Si (%)	2.00	2.16	1.68	1.91	1.27	1.60	1.61	
	Mn (%)	0.50	0.33	0.45	0.56	0.71	0.43	0.42	
	P (%)	0.17	0.57	0.061	0.14	0.26	0.12	0.11	
	S (%)	0.056	0.065	0.113	0.09	0.080	0.13	0.13	
錆のX線分析	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 -35 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
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
羽沢 (6H, 9H)	30	1.66	2.3	0.055	0.077

Table -36 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
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
羽沢 (6H, 9H)	30	3.5	5.2	0.117	0.173

2.3 解析

2.3.1 粘土全データ(5地点)

(1) 埋設鋼材の腐食速度と土壤環境因子との関係

調査した試料は、類似の粘土環境にあるが、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、因子個々は少しづつ異なっている。そこで、因子と腐食速度の関係がどうなっているかを多変量解析により、解析してみた。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腐食速度と因子の関係を調べた。

(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 -37, Table -39 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 -40~Figure 45 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 (0.95)、含水率(0.98)、逆相関で分極抵抗(-0.76)であった。
- ② ただし、土壤比抵抗は、一般に言われている腐食との関係は逆となっている。つまり、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る。
- ③ 因子相互の関係で、相関の強いのは、比抵抗と含水率 (0.90)、P/SとClイオン (0.93) がある。
- 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 (0.83)、含水率 (0.77) 現地pH(-0.65)であった。
- 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、最も相関の強い土壤比抵抗は、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 実測の腐食速度と因子間の相関は、平均腐食速度の方が最大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 -37 Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor

表題：長期平均腐食速度と土壌環境因子との相関93TMS5

デ-名	x1 mm/y	x2 比抵抗	x3 Rp	x4 Ecorr	x5 P/S	x6 Redox	x7 現地pH	x8 含水率	x9 Eh	x10 粘土分	x11 塩化物	x12 S04	x13 試験室pH
1	0.018	2437	262	-493	262	7.7	38	243	28	2.7	2.7	2.7	8
2 蓮根	0.012	2818	505	-720	291	7.2	32	316	40	2.2	2.2	2.2	7.9
3 京町	0.015	2700	332	-812	298	8.2	29	242	49	0.77	0.77	0.77	8
4 笹野台	0.027	2914	400	-812	54	8.6	51	304	45	4.8	4.8	4.8	6.1
5 羽沢	0.055	5247	144	-730	289	7.1	74	267	28	1.3	1.3	1.3	7.5

Table -38 Correlation Coefficients between Measured Mean Pit Depth and Environmental Soil Factor

相関係数表

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
	mm/y	比抵抗	Rp	Ecorr	P/S	Redox	現地pH	含水率	Eh	粘土分	塩化物	S04	試験室pH
x1	1	0.95062	-0.7595	0.03692	-0.4072	-0.0407	-0.3299	0.98133	-0.0667	-0.5208	-0.4402	-0.1036	-0.2917
x2	0.95062	1	-0.6651	0.06616	-0.2143	0.18509	-0.5269	0.90243	0.00416	-0.4764	-0.1988	-0.3174	-0.1035
x3	-0.7595	-0.6651	1	-0.2453	0.55629	-0.2561	0.25191	-0.6774	0.68308	0.64346	0.71206	0.36745	-0.1378
x4	0.03692	0.06616	-0.2453	1	0.58375	0.47555	-0.7227	0.05869	-0.1397	-0.8576	0.25768	-0.1360	0.53750
x5	-0.4072	-0.2143	0.55629	0.58375	1	0.37489	-0.6220	-0.3595	0.51750	-0.1888	0.92888	-0.0925	0.41726
x6	-0.0407	0.18509	-0.2561	0.47555	0.37489	1	-0.7202	-0.1881	-0.4422	-0.3155	0.32455	-0.9201	0.95092
x7	-0.3299	-0.5269	0.25191	-0.7227	-0.6220	-0.7202	1	-0.2845	-0.0672	0.67587	-0.4959	0.52803	-0.5816
x8	0.98133	0.90243	-0.6774	0.05869	-0.3595	-0.1881	-0.2845	1	0.06367	-0.5346	-0.4116	0.07873	-0.4219
x9	-0.0667	0.00416	0.68308	-0.1397	0.51750	-0.4422	-0.0672	0.06367	1	0.24294	0.64394	0.53397	-0.5111
x10	-0.5208	-0.4764	0.64346	-0.8576	-0.1888	-0.3155	0.67587	-0.5346	0.24294	1	0.13012	0.10716	-0.2715
x11	-0.4402	-0.1988	0.71206	0.25768	0.92888	0.32455	-0.4959	-0.4116	0.64394	0.13012	1	-0.1077	0.31937
x12	-0.1036	-0.3174	0.36745	-0.1360	-0.0925	-0.9201	0.52803	0.07873	0.53397	0.10716	-0.1077	1	-0.8123
x13	-0.2917	-0.1035	-0.1378	0.53750	0.41726	0.95092	-0.5816	-0.4219	-0.5111	-0.2715	0.31937	-0.8123	1

Table -39 Measured Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor

表題 : 異潤最大菌食速度と土壤環境因子との相関93TMS5

デー名	x1 mm/y	x2 比抵抗	x3 Rp	x4 Ecorr	x5 P/S	x6 Redox	x7 現地pH	x8 含水率	x9 Eh	x10 粘土分	x11 塩化物	x12 S04	x13 試験室pH
1 梅田	0.036	2437	262	-672	-493	262	7.7	38	243	28	0.57	2.7	8
2 蓮根	0.06	2818	505	-720	-350	291	7.2	32	316	40	3.2	2.2	7.9
3 京町	0.03	2700	332	-812	-577	298	8.2	29	242	49	0.69	0.77	8
4 津野台	0.05	2914	400	-812	-573	54	8.6	51	304	45	0.5	4.8	6.1
5 羽沢	0.077	5247	144	-730	-544	289	7.1	74	267	28	0.59	1.3	7.5

Table -40 Correlation Coefficients between Maximum Pit Depth and Environmental Soil Factor

相関係数表

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
mm/y	1	0.83386	-0.2284	0.21282	0.24999	0.04687	-0.6471	0.77286	0.50426	-0.4523	0.25843	-0.0268	-0.2128
比抵抗	0.83386	1	-0.6651	0.06616	-0.2143	0.18509	-0.5269	0.90243	0.00416	-0.4764	-0.1988	-0.3174	-0.1035
Rp	-0.2284	-0.6651	1	-0.2453	0.55629	-0.2561	0.25191	-0.6774	0.68308	0.64346	0.71206	0.36745	-0.1378
Ecorr	0.21282	0.06616	-0.2453	1	0.58375	0.47555	-0.7227	0.05869	-0.1397	-0.8576	0.25768	-0.1360	0.53750
P/S	0.24999	-0.2143	0.55629	0.58375	1	0.37489	-0.6220	-0.3595	0.51750	-0.1888	0.92888	-0.0525	0.41726
Redox	0.04687	0.18509	-0.2561	0.47555	0.37489	1	-0.7202	-0.1881	-0.4422	-0.3155	0.32455	-0.9201	0.95092
現地pH	-0.6471	-0.5269	0.25191	-0.7227	-0.6220	-0.7202	1	-0.2845	-0.0672	0.67587	-0.4959	0.52803	-0.5816
含水率	0.77286	0.90243	-0.6774	0.05869	-0.3595	0.1881	-0.2845	1	0.06367	-0.5346	-0.4116	0.07873	-0.4219
Eh	0.50426	0.00416	0.68308	-0.1397	0.51750	-0.4422	0.0672	0.06367	1	0.24294	0.64394	0.53397	-0.5111
粘土分	-0.4523	-0.4764	0.64346	0.8576	-0.1888	0.3155	0.67587	-0.5346	0.24294	1	0.13012	0.10716	-0.2715
塩化物	0.25843	-0.1988	0.71206	0.25768	0.92888	0.32455	-0.4959	-0.4116	0.64394	0.13012	1	-0.1077	0.31937
S04	-0.0268	-0.3174	0.36745	-0.1360	-0.0525	-0.9201	0.52803	0.07873	0.53397	0.10716	-0.1077	1	-0.8123
試験室pH	-0.2128	-0.1035	-0.1378	0.53750	0.41726	0.95092	-0.5816	-0.4219	-0.5111	-0.2715	0.31937	-0.8123	1

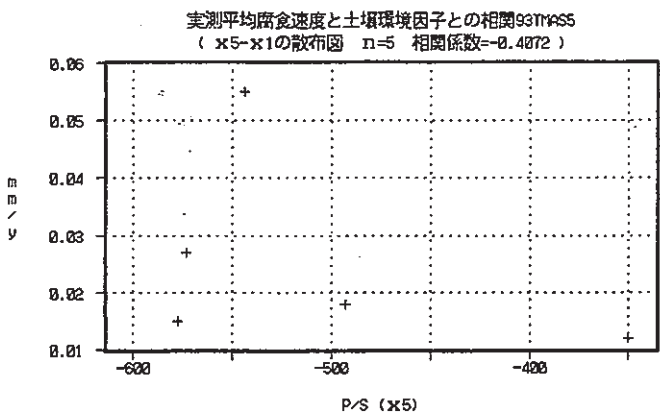
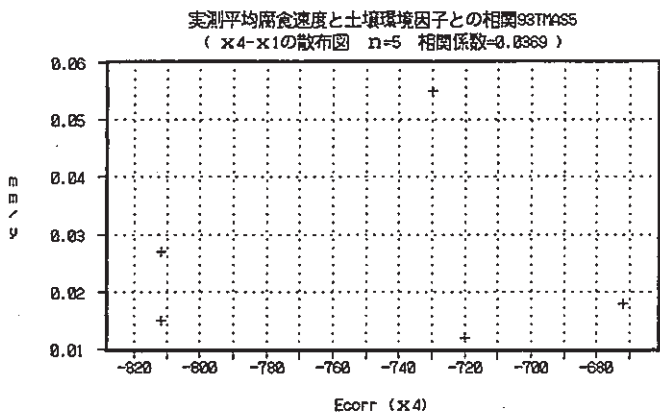
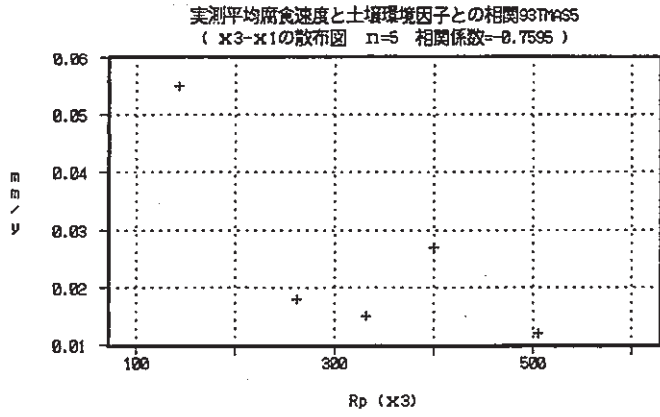
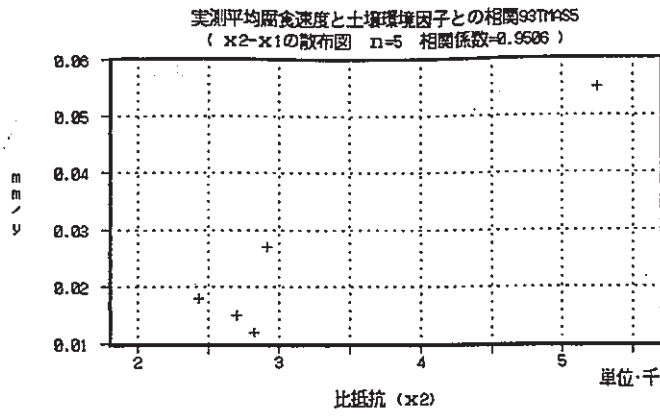


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scaffer Diagram I]

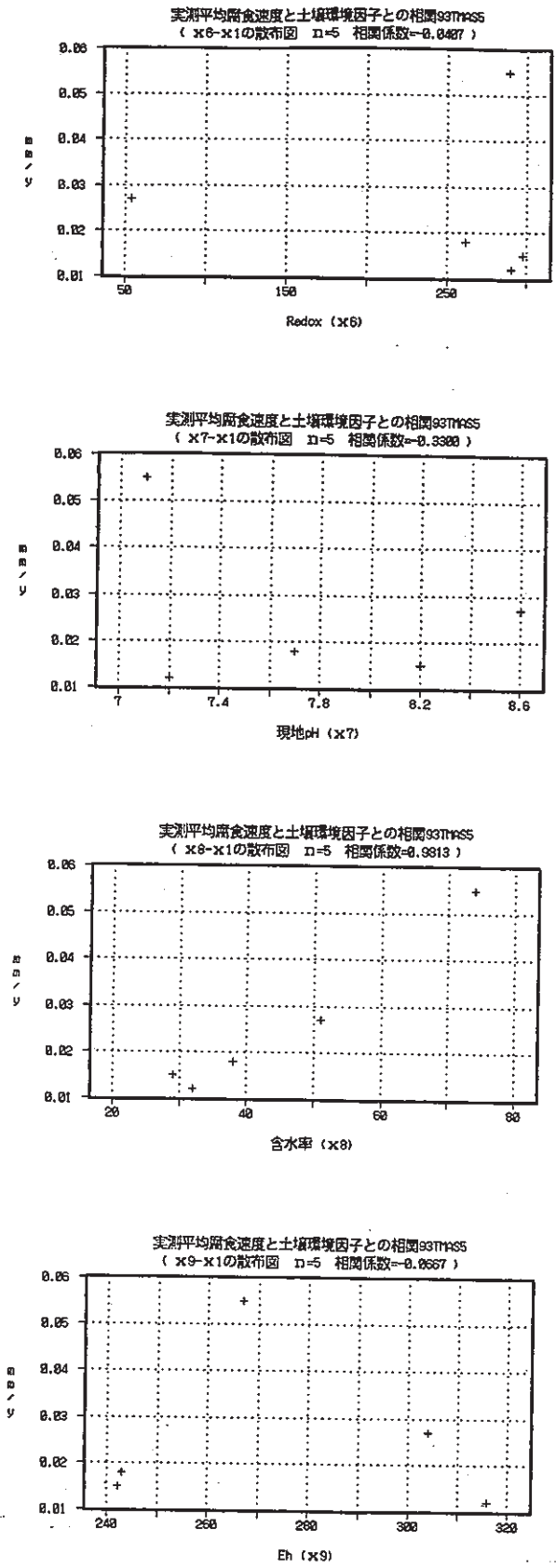


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scatter Diagram II]

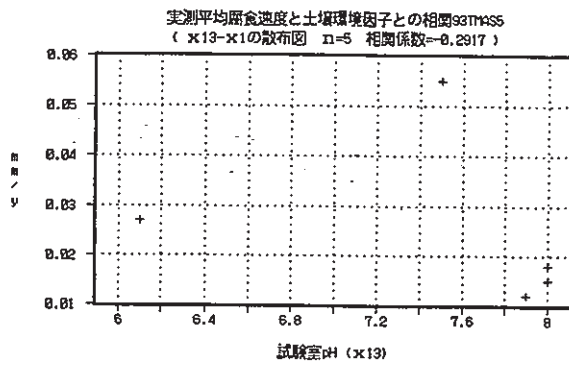
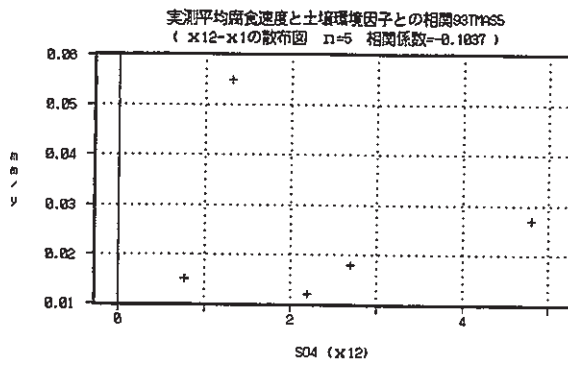
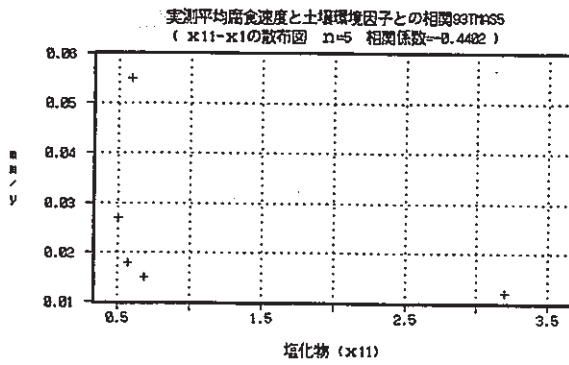
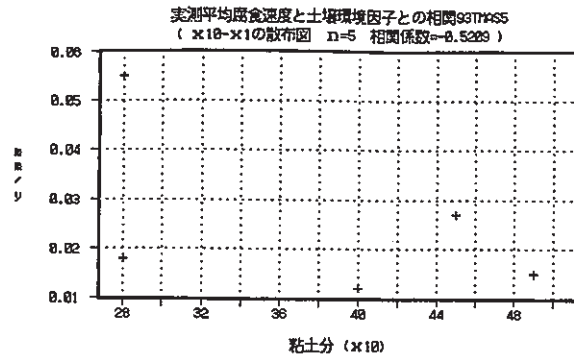


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scaffer Diagram III]

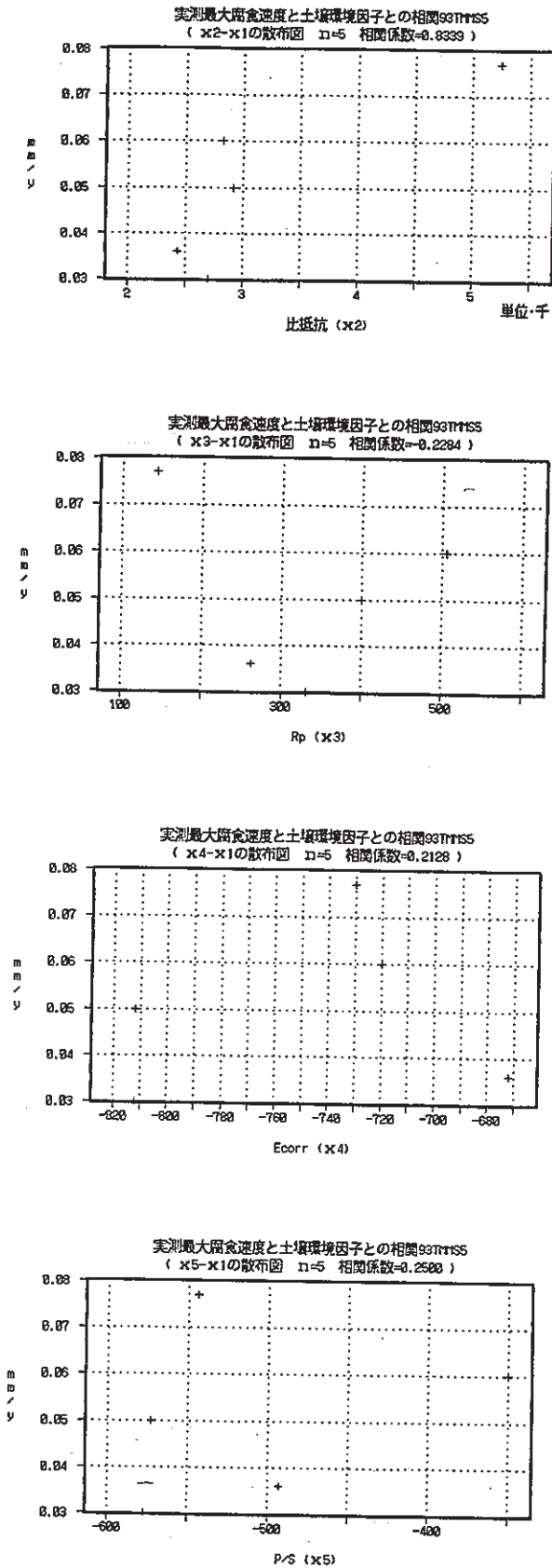


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scaffer Diagram IV]

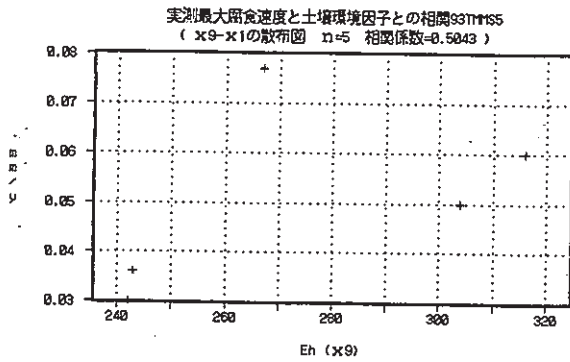
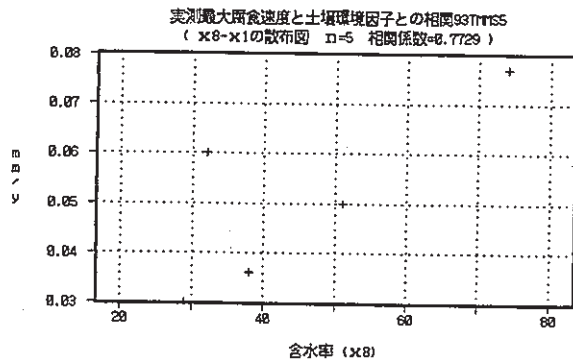
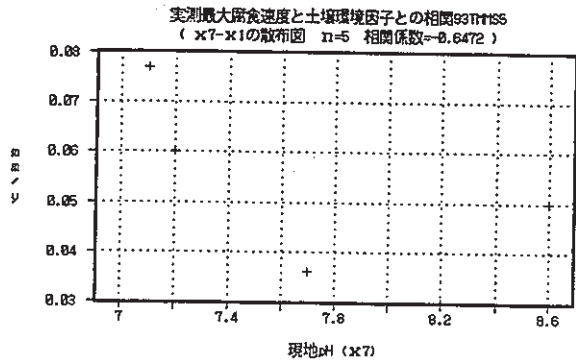
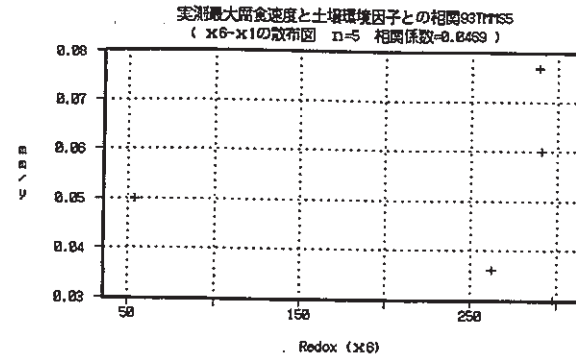


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scatter Diagram V]

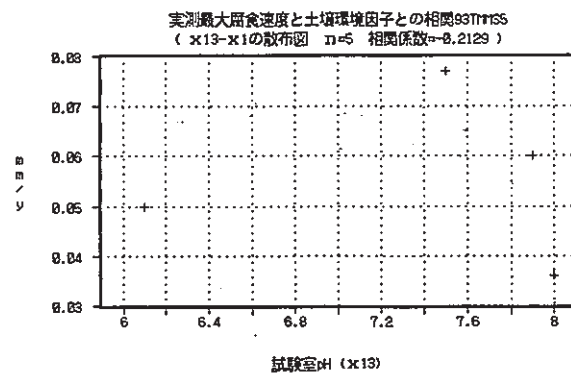
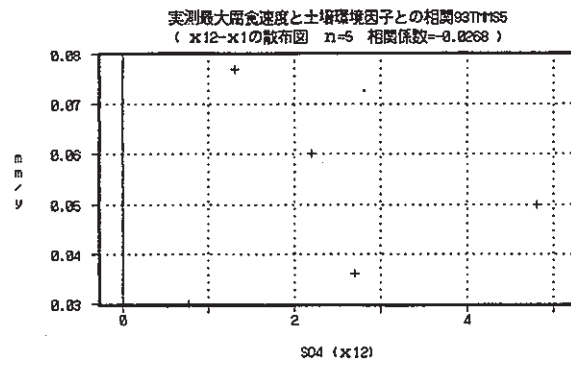
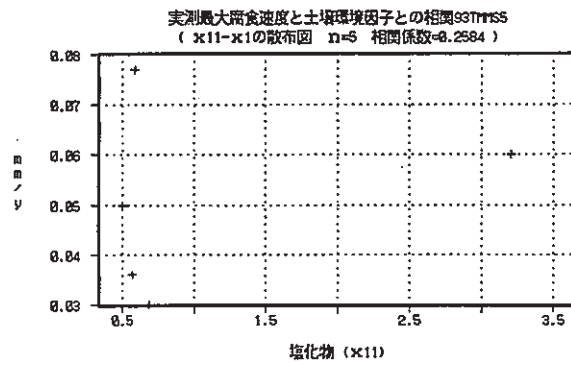
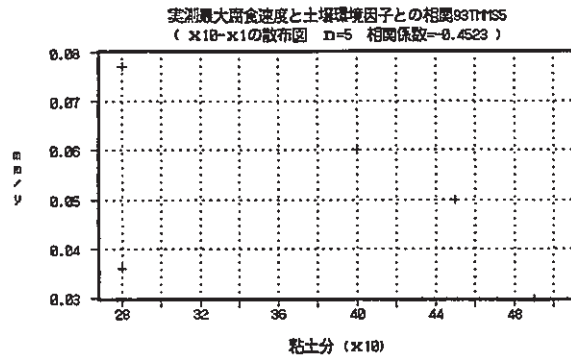


Figure -45 Relation to Environmental Soil Factor with pit Depth

[Scatter Diagram VI]

(ii) 重回帰分析による腐食速度と土壌環境因子との関係

腐食速度を目的変数とし、各因子の変数増減法（ステップワイズ法）による重回帰分析を行った。

①実測値による腐食速度と各因子

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番目に含水率、2番目に SO_4 、3番目に現地pHであった。

最大腐食速度では1番目に含水率、2番目に塩化物、3番目に現地pHであった。

②極値統計による腐食速度と各因子

変数増減法の結果をTable - 、Table - に示す。

この結果によれば採用された因子は、

最頻値腐食速度では、1番目に含水率、2番目に塩化物、3番目に SO_4 であった。

累積確率0.99では、他と異なり、1番目に比抵抗が採用され、次に置換酸度で、3番目に粘土分であった。

ただし、比抵抗は一般に言われていることと逆の関係である。

Table -41 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Mean Corrosion Rate

【ステップ表】

条件 Fin 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	x7 含水率	0.00093			78.1426	○
	定数項	-0.0164	0.96302	0.00001		
2	x7 含水率	0.00094			488.065	○
	x11 SO4	-0.0020			16.3154	○
	定数項	-0.0122	0.99596	0.00000		
3	x7 含水率	0.00097			16049.1	
	x11 SO4	-0.0025			619.235	○
	x6 現地pH	0.00218			72.2827	○
	定数項	-0.0291	0.99994	0.00000		

Table -42 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of Maximum Corrosion Rate

【ステップ表】

条件 Fin 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	x7 含水率	0.00083			5.22653	○
	定数項	0.01501	0.63532	0.00017		
2	x7 含水率	0.00110			65.1932	○
	x10 塩化物	0.01040			23.5273	○
	定数項	-0.0087	0.97142	0.00002		
3	x7 含水率	0.00125			4E+08	
	x10 塩化物	0.01338			1E+08	○
	x6 現地pH	0.00736			1E+07	○
	定数項	-0.0760	0.99999	3E-12		

Table -43 Results of Analysis by Stepwise Method
for Variables of Extremal mode 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	x7 含水率	0.001576547			31.3011	○
	定数項	-0.00402931	0.91253	0.00010		
2	x7 含水率	0.001783625			188.681	○
	x10 塩化物	0.007899495			15.0106	○
	定数項	-0.02207485	0.98971	0.00001		
3	x7 含水率	0.001790575			14689.1	
	x10 塩化物	0.007660309			1084.45	○
	x11 SO4	-0.00197678			153.719	○
	定数項	-0.01746739	0.99993	0.00000		

Table -44 Results of Analysis by Stepwise Method for Variables of the
Extreme Value statistical Method

【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	x1 比抵抗	0.000035435			22.5352	○
	定数項	-0.01121417	0.88251	0.00029		
2	x1 比抵抗	0.000033300			41.4801	○
	x14 置換酸度	0.070218111			4.49887	○
	定数項	-0.01697314	0.96384	0.00013		
3	x1 比抵抗	0.000028646			48915.1	
	x14 置換酸度	0.087264284			13737.1	○
	x9 粘土分	-0.00102822			4477.37	○
	定数項	0.034031664	0.99999	0.00000		

重回帰分析のソフトウェア：LOTUS 1-2-3 多変量解析
オードマン(株)製

(2) 実測最大孔食深さと経過年の関係

Table -35に示す実測の最大孔食深さの5地点の $H = a Y^n$ の近似関数を求めると、

$$H = 0.529 Y^{0.345} \quad (R^2 = 0.67) \quad (R^2 \text{ は重相関係数})$$

となり、この関係を Figure -46に示す。

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると

$$H_{1000} = 5.7 \text{ (mm)}$$

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。

$$H = 0.037 Y^{0.855} \quad (R^2 = 0.58)$$

上記式から $Y = 1,000$ 年を推定すると、

$$H_{1000} = 13.6 \text{ (mm)}$$

と小さい値となった。

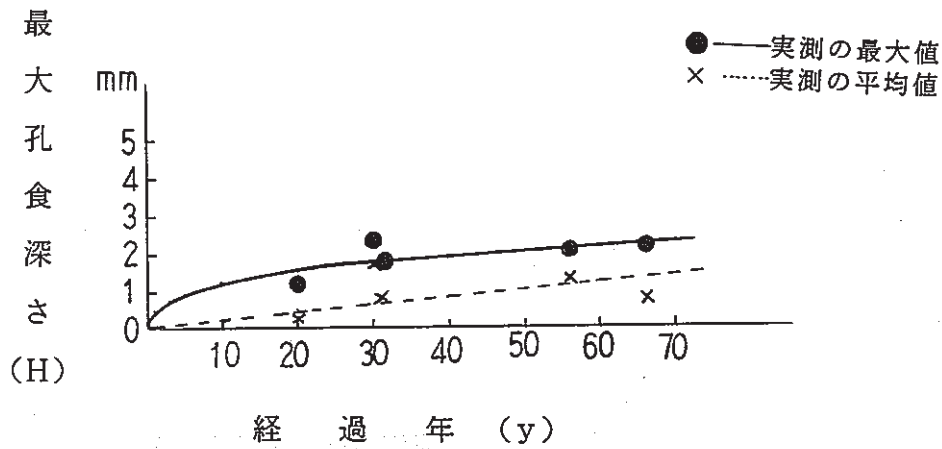


Figure -46 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration in Accordance with the Examination Date of Steel Pipes buried in Freshwater Clay

(3) 極値統計手法による最大孔食深さと経過年の関係

Table -36に示す全年度5件の最大孔食深さのデータから、近似関係式 $H = a Y^n$ の定数 a , n を求めると、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_y = 0.408 Y^{0.477} \quad (R^2 = 0.58)$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_y = 0.723 Y^{0.442} \quad (R^2 = 0.60)$$

となり、この関係を Figure -47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、

$$\text{最頻値点の値からは、} H_{1000} = 11.0 \text{ mm となる。}$$

$$\text{累積確率 } 0.99 \text{ では、} H_{1000} = 15.3 \text{ mm となる。}$$

上記解析において、 n として約0.4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年以上のデータが求められる。

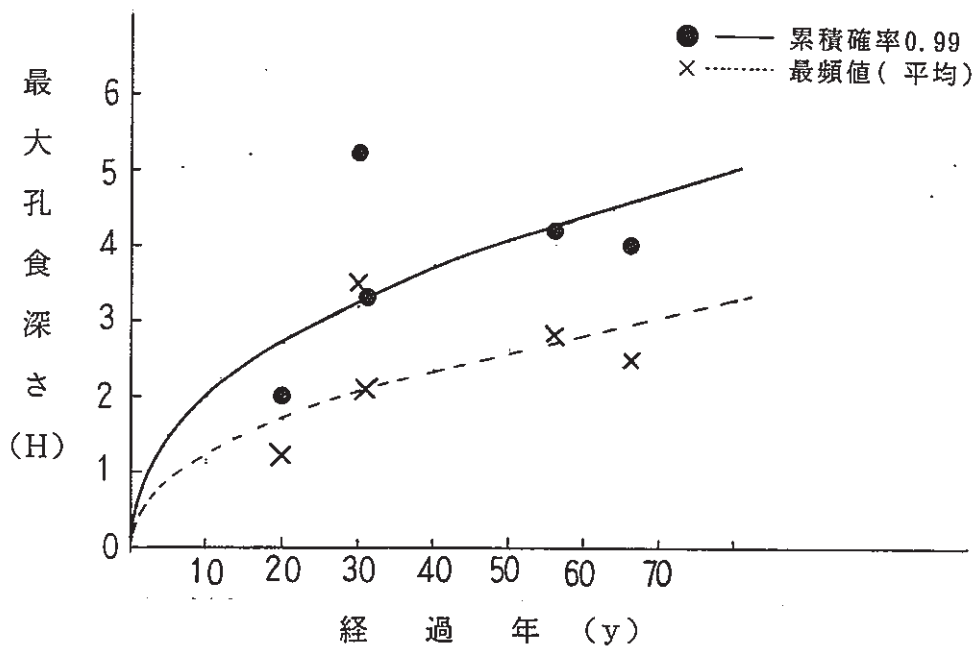


Figure -47 Relation between the Pitting Corrosion Depth and Duration of Steel Pipes buried in Freshwater Clay in Accordance with the Extreme Value statistical Method

3. ま と め

放射性廃棄物の地層処分に使用する、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。

5地点データ（除くマクロセル）

実 測（平均）	$H=0.037 Y^{0.855}$
実 測（最大）	$H=0.529 Y^{0.345}$
極値統計（最頻値）	$H=0.408 Y^{0.477}$
極値統計（累積確率0.99）	$H=0.723 Y^{0.442}$

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0.4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(株)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5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、20～70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。