

粘土中に埋設された鉄の腐食事例の研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内様報告書)

2000年 2月

日本鋼管工事株式会社

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

◎ 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

JNC TJ 8400 2000-009

2000年 2月

粘土中に埋設された鉄の腐食事例の研究

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壤中での長期腐食挙動の評価に資するため、淡水性粘土中に長期間埋設された水道管を堀上げ、その埋設土壤の環境と管体の腐食量を調査し、土壤埋設鋼材についての酸素還元反応律速型の腐食モデル（経験式）を作成してきた。この腐食モデル式の信頼性の向上に資する目的で国内外で実施された土壤埋設鋼材の長期腐食挙動に関する調査の一つとして、(財)日本簡易ガス協会で実施した埋設管の腐食データを使用した。その171試料の中から淡水性粘土に埋設されていた38路線の試料を抽出し、そのデータの腐食速度と土壤環境因子をまとめ、かつ極値統計手法によりオーバーパックの面積を再帰期間とし、最大孔食深さを求めた。それらの腐食量と土壤環境因子の相関解析を行い土壤環境因子と腐食量の関係を求めた。このデータを埋設水道管のデータに加え、極値統計解析の累積確率0.99の最大孔食深さの腐食モデルについて比較した。さらに、既往文献の研究結果を加えて極値統計解析の累積確率0.99最大孔食深さのデータを腐食モデルの式 $H = a Y^b$ と比較した。水道管と簡易ガス管の極値統計解析の累積確率0.99のデータは既往データと較べて妥当な値を示し、中性低溶存酸素環境の腐食モデルとして妥当であることが示された。

本報告書は、日本鋼管工事株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号 : 110D0151

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

* : 日本鋼管工事株式会社 技術開発本部 研究開発部

JNC TJ 8400 2000-009
February 2000

Corrosion of Iron Buried in Clay

Morio Sumiyama *

Abstract

To evaluate corrosion behavior of carbon steel, a candidate materials of overpack, buried in soil for a long time, the water pipes buried in freshwater clay for a long time we digged out and the soil environment and the corrosion weight loss of pipes have been researched. From the results, a corrosion model (an empirical equation), an oxygen reduction reaction rate-determining step type, of carbon steel buried in soil was introduced. The corrosion data of under ground pipe collected by the Japan Community Gas Associations was used to increase reliability of the corrosion model equation. These data are one of researches of corrosion behavior of carbon steel buried in soil for a long time studied by at home and abroad. 38 samples buried freshwater clay were selected in 171 samples. With estimating the corrosion velocities and the soil environment factors of the above data, the maximum depth of pit corrosion was calculated by the statistical method of the extreme values using the area of overpack as the recurrent time. The correlation between the soil environment factors and the corrosion weight loss was obtained by the correlation analysis. The corrosion model of the maximum depth of pit corrosion at 0.99 of cumulative probability was compared between the under ground pipe data and the above data. On the reference data and the above data, the corrosion model equation; $H = aY^n$ was compared with the maximum depth of pit corrosion at 0.99 cumulative probability. The data of water pipes and community gas pipes at 0.99 cumulative probability showed the reasonable values when these data were compared with the reference data. So that the model was proved as a good corrosion model in the neutral low dissolved oxygen environment.

Nippon Koukan koji K.K. made this study under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract No: 110D0151

JNC liaison: Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works.

* : Research and Development Department, Technical Development Center.

目 次

まえがき	1
1. 日本簡易ガス協会腐食調査の調査内容とデータの抽出	3
1. 1 調査内容	3
1. 2 データの抽出	4
2. 極値統計解析	5
3. 粘土中埋設管の孔食深さと土壤環境因子	53
3. 1 孔食深さ	53
3. 2 土壤環境因子	57
3. 3 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の孔食深さと土壤環境の比較	62
4. 孔食深さおよび孔食腐食速度と土壤環境因子に対する多変量解析	69
4. 1 孔食深さおよび孔食腐食速度と土壤環境因子との単相関	69
4. 2 孔食腐食速度と土壤環境因子との多変量解析	101
5. 水道埋設管と簡易ガス管およびペントナイトの土壤環境の比較	105
5. 1 調査内容	105
5. 2 土壤環境因子の比較	105
5. 3 実測ならびに極値統計解析の孔食腐食速度の比較	108
6. 腐食モデル式	113
6. 1 簡易ガス管の孔食データの近似式	113
6. 2 水道管の腐食モデル式 $H = 0.3 Y^{0.4}$ と簡易ガス管腐食データとの関係	117
6. 3 水道管データを含めた腐食モデル式	118
7. 既往データとの比較	123
8. オーバーパックの長期腐食量の推定	125
まとめ	126
あとがき	129

Index of Table, Figure

	Page
Table-1 グンベル分布適合度検定結果	6
Table-2 腐食深さ、腐食速度（実測値）	55
Table-3 腐食深さ、腐食速度（極値統計解析値）	56
Table-4 土壌環境調査結果（その1）	60
Table-5 土壌環境調査結果（その2）	61
Table-6 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壌環境の比較 （その1）	63
Table-7 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壌環境の比較 （その2）	64
Table-8 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壌環境の比較 （その3）	65
Table-9 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壌環境の比較 （その4）	66
Table-10 全データ表	71
Table-11 相関表	72
Table-12 ステップワイズ法による解析結果（V1）	101
Table-13 ステップワイズ法による解析結果（V2）	101
Table-14 ステップワイズ法による解析結果（V3）	102
Table-15 ステップワイズ法による解析結果（V4）	102
Table-16 ステップワイズ法による解析結果（V5）	103
Table-17 ステップワイズ法による解析結果（V6）	103
Table-18 ステップワイズ法による解析結果（V7）	104
Table-19 ステップワイズ法による解析結果（V8）	104
Table-20 埋設水道管と簡易ガス管およびベントナイト中ヒーターの比較表	105
Table-21 土壌環境因子の比較	106
Table-22 腐食深さと腐食速度の比較	109

Figure-1	路線No. 0-6 の極値統計解析結果	7
Figure-2	路線No. 0-106 の極値統計解析結果	8
Figure-3	路線No. 0-107 の極値統計解析結果	9
Figure-4	路線No. 1-5 の極値統計解析結果	10
Figure-5	路線No. 1-112 の極値統計解析結果	11
Figure-6	路線No. 1-110 の極値統計解析結果	12
Figure-7	路線No. 1-109 の極値統計解析結果	13
Figure-8	路線No. 1-108 の極値統計解析結果	14
Figure-9	路線No. 1-103 の極値統計解析結果	15
Figure-10	路線No. 1-106 の極値統計解析結果	16
Figure-11	路線No. 1-111 の極値統計解析結果	17
Figure-12	路線No. 2-9 の極値統計解析結果	18
Figure-13	路線No. 2-12 の極値統計解析結果	19
Figure-14	路線No. 2-22 の極値統計解析結果	20
Figure-15	路線No. 2-24 の極値統計解析結果	21
Figure-16	路線No. 2-103 の極値統計解析結果	22
Figure-17	路線No. 2-101 の極値統計解析結果	23
Figure-18	路線No. 2-112 の極値統計解析結果	24
Figure-19	路線No. 2-114 の極値統計解析結果	25
Figure-20	路線No. 2-107 の極値統計解析結果	26
Figure-21	路線No. 2-108 の極値統計解析結果	27
Figure-22	路線No. 2-117 の極値統計解析結果	28
Figure-23	路線No. 2-119 の極値統計解析結果	29
Figure-24	路線No. 2-120 の極値統計解析結果	30
Figure-25	路線No. 2-121 の極値統計解析結果	31
Figure-26	路線No. 2-123 の極値統計解析結果	32
Figure-27	路線No. 3-105 の極値統計解析結果	33
Figure-28	路線No. 3-106 の極値統計解析結果	34
Figure-29	路線No. 3-110 の極値統計解析結果	35
Figure-30	路線No. 3-115 の極値統計解析結果	36
Figure-31	路線No. 3-117 の極値統計解析結果	37
Figure-32	路線No. 4-102 の極値統計解析結果	38
Figure-33	路線No. 5-105 の極値統計解析結果	39
Figure-34	路線No. 5-106 の極値統計解析結果	40
Figure-35	路線No. 6-2 の極値統計解析結果	41
Figure-36	路線No. 6-5 の極値統計解析結果	42

Figure-37	路線No. 7-106 の極値統計解析結果	43
Figure-38	路線No. 7-104 の極値統計解析結果	44
Figure-39	路線No. 7-1 の極値統計解析結果	45
Figure-40	路線No. 7-103 の極値統計解析結果	46
Figure-41	路線No. 8-7 の極値統計解析結果	47
Figure-42	路線No. 8-117 の極値統計解析結果	48
Figure-43	路線No. 8-109 の極値統計解析結果	49
Figure-44	路線No. 8-110 の極値統計解析結果	50
Figure-45	路線No. 8-107 の極値統計解析結果	51
Figure-46	路線No. 8-122 の極値統計解析結果	52
Figure-53	亜鉛メッキ管と裸鋼管の孔食深さと経過年の散布図	67
Figure-54	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その1)	73
Figure-55	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その2)	74
Figure-56	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その3)	75
Figure-57	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その1)	76
Figure-58	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その2)	77
Figure-59	各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その3)	78
Figure-60	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その1)	79
Figure-61	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その2)	80
Figure-62	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その3)	81
Figure-63	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その4)	82
Figure-64	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その5)	83
Figure-65	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その6)	84
Figure-66	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その1)	85
Figure-67	各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その2)	86
Figure-68	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その1)	87
Figure-69	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その2)	88
Figure-70	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その3)	89
Figure-71	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その1)	90
Figure-72	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その2)	91
Figure-73	各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その3)	92
Figure-74	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/y) (その1)	93
Figure-75	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/y) (その2)	94
Figure-76	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/y) (その3)	95
Figure-77	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その1)	96
Figure-78	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その2)	97

Figure-79	各環境因子に対する累積確率0.99の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その3)	98
Figure-80	測定値間の相関図 (代表例) (その1)	99
Figure-81	測定値間の相関図 (代表例) (その2)	100
Figure-82	土壤環境条件の比較	107
Figure-83	腐食深さの比較 (その1)	110
Figure-84	腐食深さの比較 (その2)	111
Figure-85	腐食速度の比較 (mm/ \sqrt{y})	115
Figure-86	経過年に対する孔食深さ	115
Figure-87	経過年に対する孔食深さ	116
Figure-88	経過年に対する孔食深さ	116
Figure-89	簡易ガス管のデータと関係式	117
Figure-90	水道管を含めたデータ (最大値)	119
Figure-91	水道管を含めたデータ (平均値)	119
Figure-92	水道管を含めたデータ (累積確率0.99値)	121
Figure-93	水道管を含めたデータ (最頻値)	121
Figure-94	既往の短期腐食データとの比較	124
Figure-95	既往の長期腐食データとの比較	124

まえがき

本研究は、オーバーパックの候補材である炭素鋼の土壤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・埋設水道管の掘り上げ調査により、土壤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あった。

本年度は「粘土中に埋設された鉄の腐食事例の研究」のテーマで委託研究を実施した。研究に用いたデータは、通商産業省が（財）日本簡易ガス協会に委託し、昭和60年から昭和63年に実施した簡易ガス導管管理技術調査結果である。この腐食データの使用を許可して頂いた。研究は簡易ガス導管の腐食データ171件のうち、ベントナイト類似の淡水性粘土に埋設された管のデータを抽出した。このデータの腐食量と土壤環境を整理した。さらに、この腐食データからオーバーパックの面積を再帰期間として極値統計解析により最大孔食深さを求めた。これらの腐食速度と環境因子との相関解析を行い腐食速度と環境因子の関係を調べた。

簡易ガスデータを水道埋設鉄管データに追加し、腐食モデル式を求めた。また、その他の既往データもプロットして比較した。

1. 日本簡易ガス協会腐食調査の調査内容とデータの抽出

日本簡易ガス協会腐食調査は通商産業省が（社）日本簡易ガス協会に委託し、昭和60年から昭和63年に簡易ガス導管管理技術調査として実施したものである。この調査の目的は埋設ガス導管の腐食深さの計測とその埋設環境調査からガス導管の腐食防止技術の開発を目的として実施されたものである。

1.1. 調査内容

(1) 調査対象

調査対象の埋設管は、亜鉛メッキ管および裸鋼管のガス導管である。全国にある簡易ガスでガスを供給している団地のうちから下記の条件を満たす団地を選定したものである。

条件は50Aの亜鉛メッキ鋼管（白ガス管）または裸鋼管（黒ガス管）の無塗装管であって、共同住宅単独（コンクリート建物）を除く単独住宅（主に木造）で電鉄迷走電流の影響の無い電気防食を行っていない団地に埋設されたガス導管である。

(2) 調査内容

掘削調査箇所は事前に非掘削調査を団地の10箇所で実施し、その中で土壤比抵抗が最も低い箇所を10m長掘削し、管体を掘上げた。この10mの管路を以降の本文では路線という。

土壤環境調査は土壤環境調査掘削箇所10mの両端の2箇所（1m×2箇所）で行い、1箇所3点のプローブ計測およびpH、レドックスの計測を行い、土壤サンプルを1箇所で採取し、化学分析をおこなっている。

① 土壤環境調査

土壤環境調査は導管の両端1mの所でプローブ計測であるプローブ土壤比抵抗、プローブ孔食腐食速度、プローブ分極抵抗、プローブ自然電位、を行い、この他に管対地電位、土壤杖土壤比抵抗、土壤pH、レドックス電位、湧水の有無、土質、土の色、立地状況、埋設土、造成の有無、管周囲の土壤を計測・調査した。さらに土壤を採取し、硫化物の有無、塩化物含有量、硫酸塩含有量、過マンガン酸カリ消費量、細粒分、含水比、土壤箱比抵抗を分析した。

② 管体調査

管体調査は掘り上げた管から腐食生成物を採取した後、サンドブラストで除錆、管を0.2m長さに切断し、0.1m長さの残存肉厚と元肉厚を計測し、元肉厚から残存肉厚を引いて、最大孔食深さを求めている。

1.2. データの抽出

簡易ガス 171 路線のデータから処分環境のベントナイトと類似である粘土を抽出するため、土壤比抵抗は今まで研究した水道管と同様な $5,500 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下とし、かつ細粒分 ($74 \mu \text{m}$ 以下の含有量) は 30% 以上とし、pH は酸性土を除く 5.0 以上の路線として抽出した。

この結果抽出された路線は 46 路線となった。

2. 極値統計解析

粘土として選定した46路線のデータは0.1m毎の10m長の孔食深さのデータで、
 1.88m²と小さい面積である。そこで、オーバーパックの面積で生じる孔食に対比できる
 ように簡易ガス管データーで極値統計解析を行った。なお、EVAN IIのソフトウェア
 はデータ数に制限があり、適用できるように、このデータから0.5m毎の最大孔食深
 さを求め、1路線のサンプル数を20サンプルとした。解析は、グンベル分布の適合検定
 をを行い、帰無仮説10%以下の路線はマクロセルなどの特異な孔食が混在している可能性
 があるので、粘土データから除外した。この結果、粘土中埋設管は38路線となった。

次に、この38路線のデータをEVAN IIのソフトウェアを用いてオーバーパックの
 表面積(8.0701m²)を再帰期間として最大孔食深さ推定値を求めた。さらにこの値
 から累積確率0.99の最大孔食深さ推定値を求めた。

手順はグンベル分布の適合度検定を行い、再帰期間の最大孔食深さ推定値を求めた。こ
 の時のパラメーターの α と λ についても記載した。

この極値統計解析結果をTable-1に示す。また、路線の度数分布とGEVプロットお
 よびグンベル分布プロットをFigure-1~Figure-52に示す。

この結果から

- ① グンベル分布適合度検定10%以下の路線は46路線中8路線あった。これらの路線
 はマクロセルなどの特異な孔食が含まれている可能性があるので今後の解析から除外す
 る。
- ② 極値統計解析の最大孔食深さ推定値(最頻値)の範囲は0.33mmから2.49m
 mであり、平均は0.93mmであった。
- ③ 極値統計解析の最大孔食深さ推定値(累積確率0.99の最大孔食深さ推定値)の範
 囲は0.61mmから4.35mmであり、平均は1.58mmであった。
- ④ パラメーター α は0.06から0.40で平均0.14であった。また、 λ は0.0
 7から0.87で、平均は0.30であった。

以上のことから、粘土系土壤中埋設管は極値統計が適用できる。オーバーパックの面積
 の孔食深さを求める簡易ガス孔食調査データのうち、粘土系土壤とした路線は38路線
 となった。

Table-1 グンベル分布適合度検定結果

路線 No.	帰無仮説 %	α	λ	Xmax	0.99値 XL	経過年 (年)
0-6	50	0.133063	0.199981	0.790222	1.402332	7
1-5	50	0.110204	0.249575	0.738415	1.245370	7
2-9	50	0.223490	0.332734	1.324088	2.352175	9
2-12	10以下	0.070252	0.332644	0.644266	0.967436	14
2-22	50	0.114987	0.338554	0.848615	1.377572	13
2-24	40	0.404814	0.695236	2.490906	4.353111	9
6-2	50	0.074620	0.470988	0.801984	1.145247	17
6-5	30	0.126099	0.146113	0.705463	1.285537	12
7-1	50	0.161362	0.200247	0.916015	1.658304	22
8-7	10以下	0.119715	0.408816	0.939847	1.490554	19
0-106	40	0.151663	0.268338	0.941085	1.638757	9
0-107	30	0.071030	0.118474	0.433548	0.760297	14
1-103	10	0.169059	0.256190	1.006103	1.783800	11
1-106	40	0.169956	0.447674	1.201561	1.983384	17
1-108	40	0.107163	0.251666	0.727019	1.219985	9
1-109	50	0.108002	0.224250	0.703322	1.200147	14
1-110	50	0.095158	0.243343	0.665447	1.103188	9
1-111	30	0.214232	0.224926	1.175215	2.160714	12
1-112	10以下	0.349787	0.374841	1.926422	3.535494	10
2-101	10	0.064727	0.128996	0.416111	0.713865	10
2-103	50	0.122613	0.352077	0.895964	1.460002	12
2-107	10以下	0.207754	0.311761	1.233317	2.189016	9
2-108	50	0.072260	0.166784	0.487316	0.819723	11
2-112	50	0.060737	0.065369	0.334788	0.614187	21
2-114	10以下	0.084235	0.168250	0.541899	0.929393	18
2-117	10	0.234647	0.375557	1.416401	2.495812	17
2-119	30	0.147893	0.270530	0.926553	1.606883	21
2-120	50	0.153640	0.346581	1.028099	1.734866	17
2-121	50	0.061434	0.149514	0.422021	0.704627	21
2-123	10	0.135794	0.170688	0.773043	1.397716	9
3-105	50	0.104394	0.260549	0.723619	1.203847	16
3-106	50	0.093769	0.286784	0.702724	1.134075	19
3-110	30	0.327756	0.869677	2.323533	3.831260	17
3-115	10以下	0.102748	0.122110	0.577877	1.050533	14
3-117	30	0.074240	0.136074	0.465386	0.806901	10
4-102	10以下	0.221441	0.435124	1.417391	2.436053	17
5-105	50	0.149990	0.320611	0.985933	1.675909	9
5-106	10	0.206270	0.368117	1.283088	2.231961	23
7-103	10以下	0.178688	0.270874	1.063497	1.885488	18
7-104	50	0.149157	0.295768	0.957398	1.643542	17
7-106	20	0.107541	0.402010	0.879039	1.373744	13
8-107	30	0.324268	0.831865	2.270250	3.761931	9
8-109	50	0.102149	0.245477	0.698587	1.168488	7
8-110	50	0.089863	0.165404	0.564016	0.977399	17
8-117	50	0.084753	0.264999	0.640944	1.030820	12
8-122	50	0.062192	0.257394	0.533265	0.819357	16

注: 1. 再帰期間 T は 84.92(8.0701m²)

路線No. 0-6

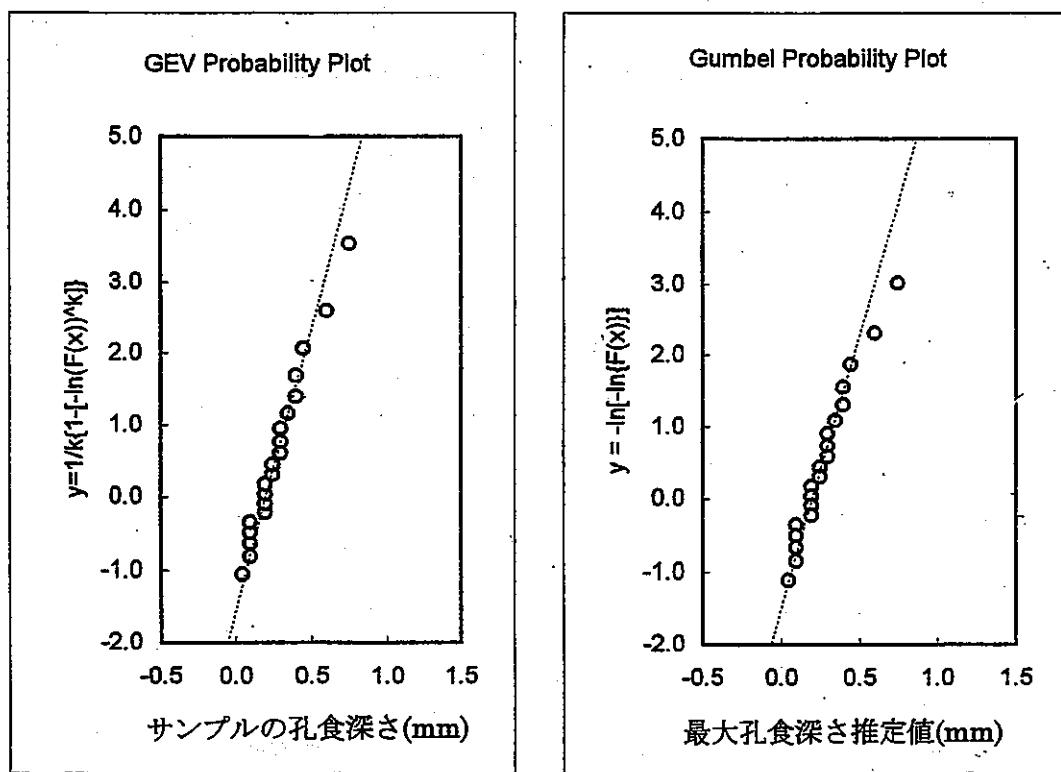
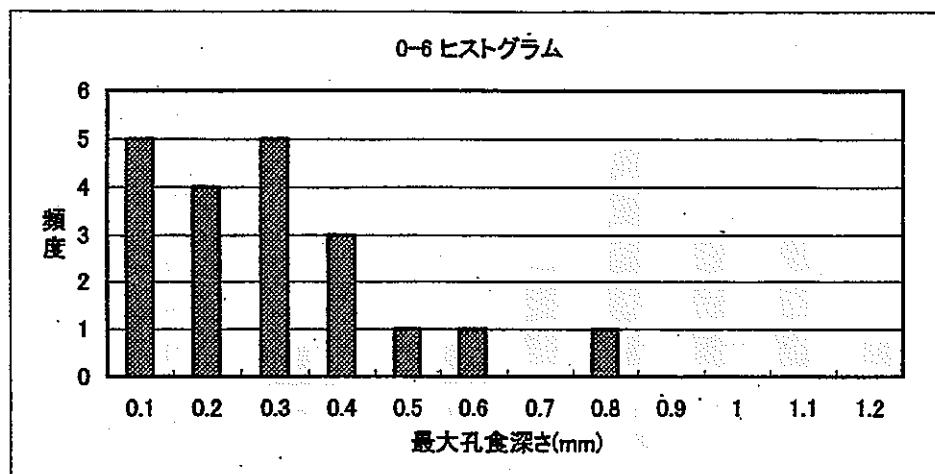


Figure-1 路線 No. 0-6 の極値統計解析結果

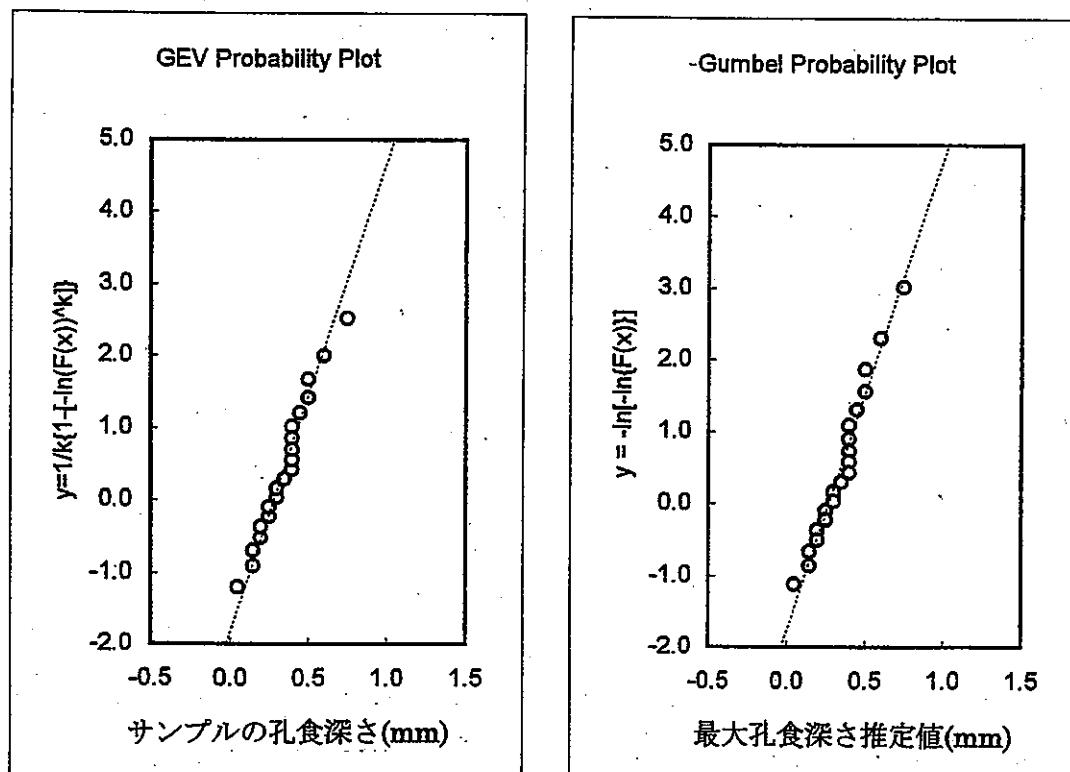
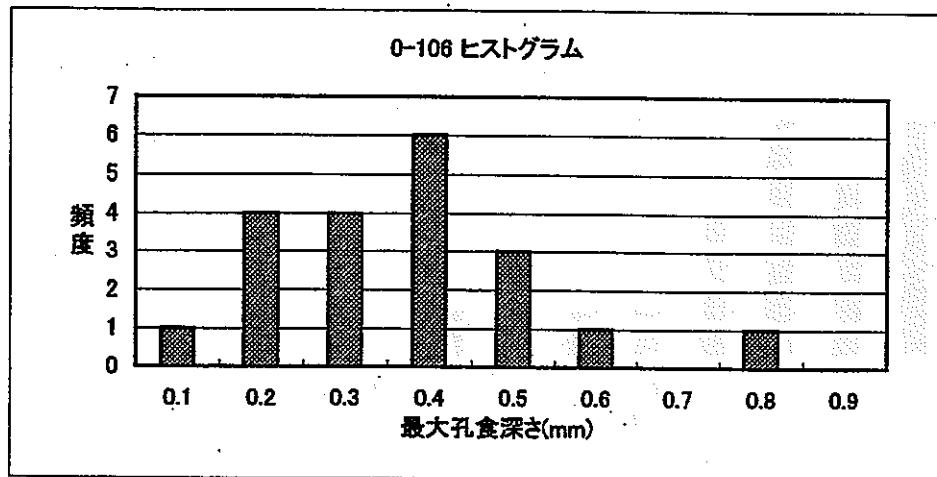
路線No. 0-106

Figure-2 路線 No. 0-106 の極値統計解析結果

路線No. 0-107

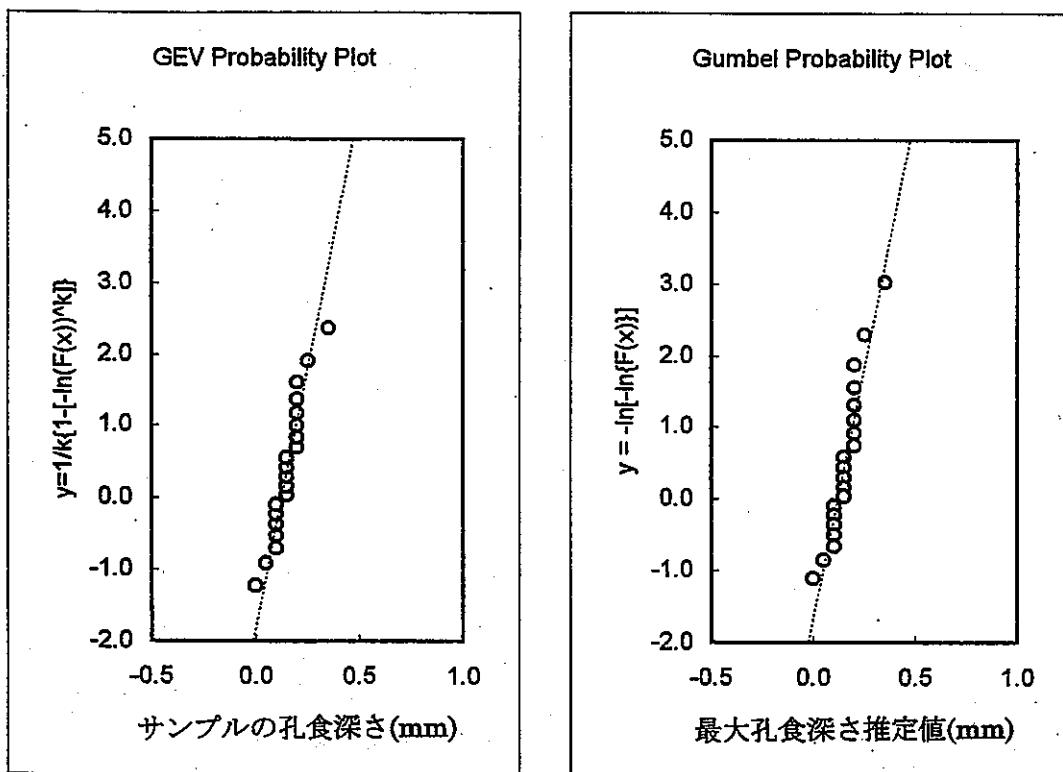
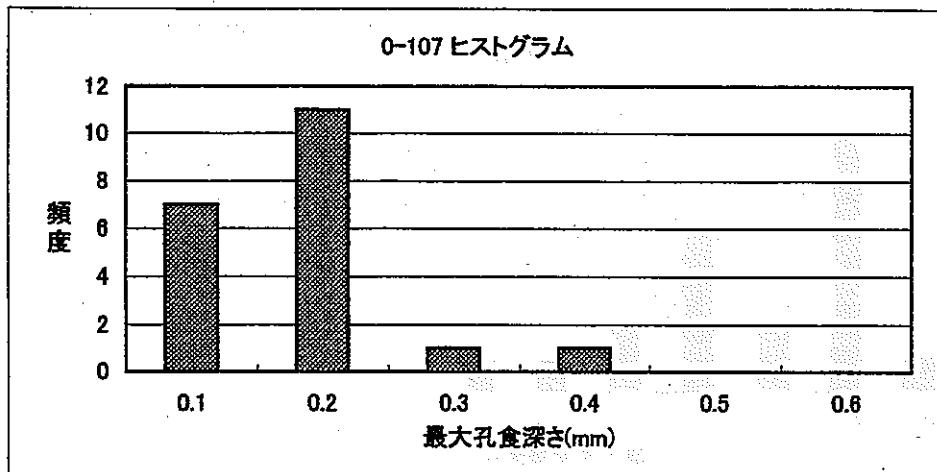


Figure-3 路線 No. 0-107 の極値統計解析結果

路線No. 1-5

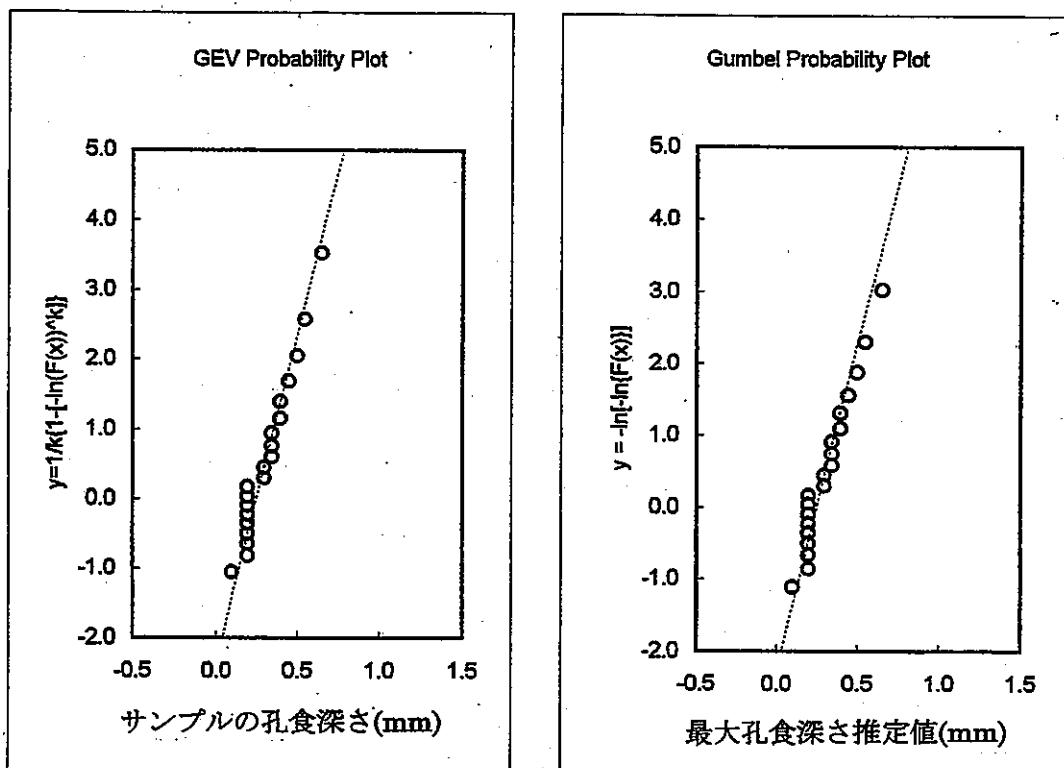
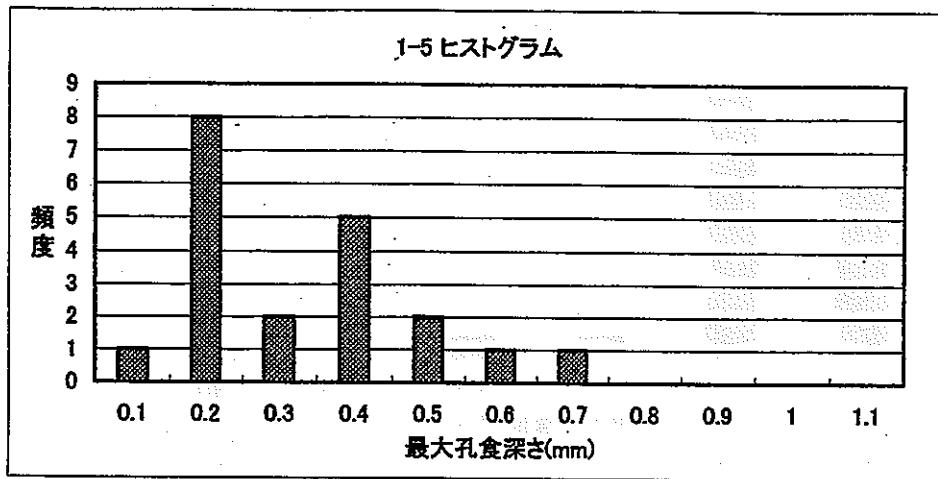


Figure-4 路線 No. 1-5 の極値統計解析結果

路線No. 1-112

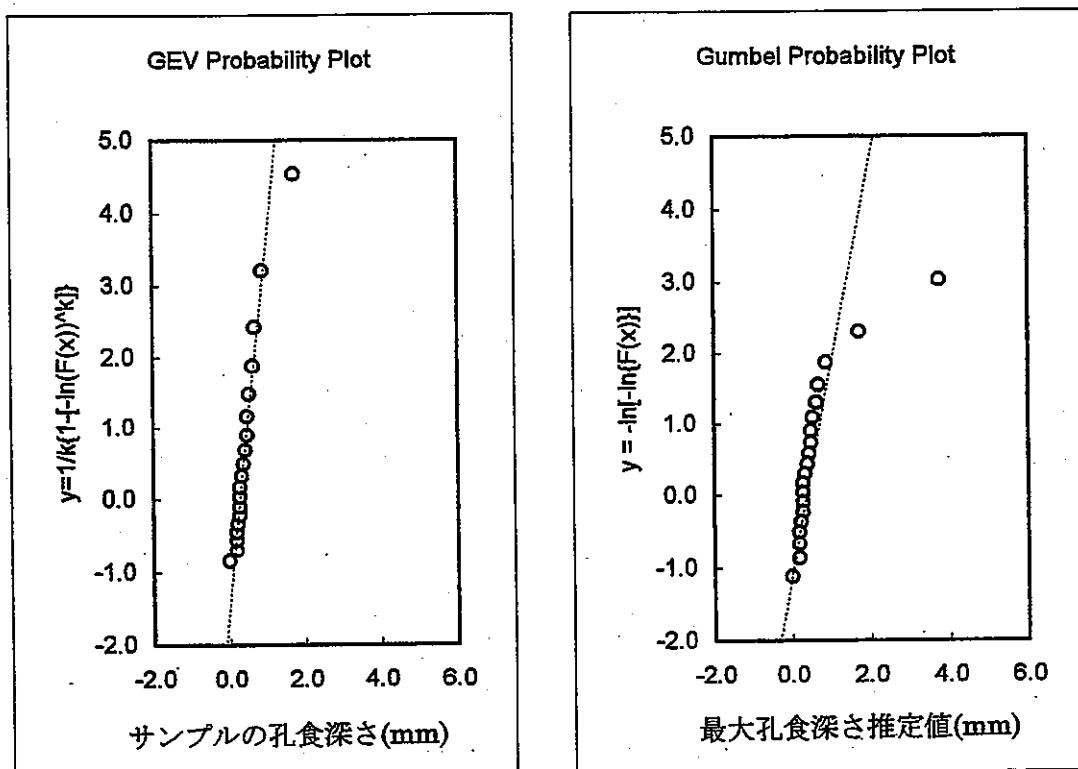
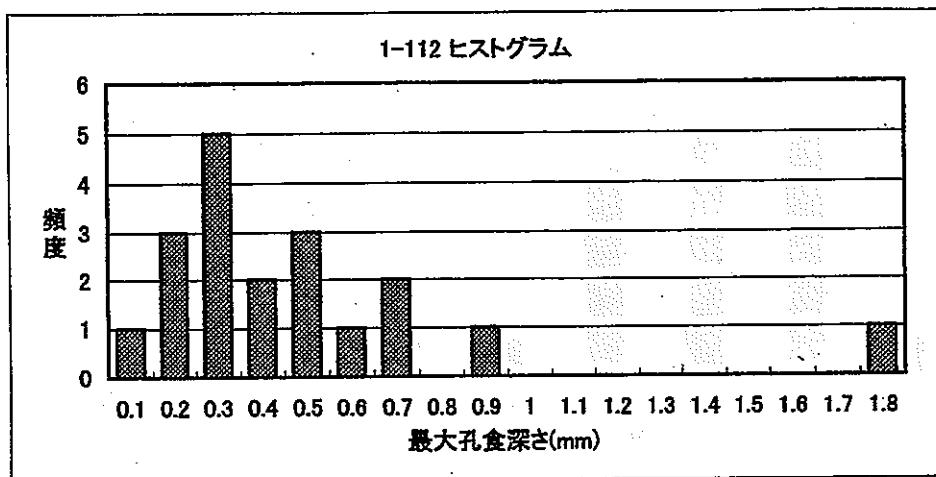


Figure-5 路線 No. 1-112 の極値統計解析結果

路線No. 1-110

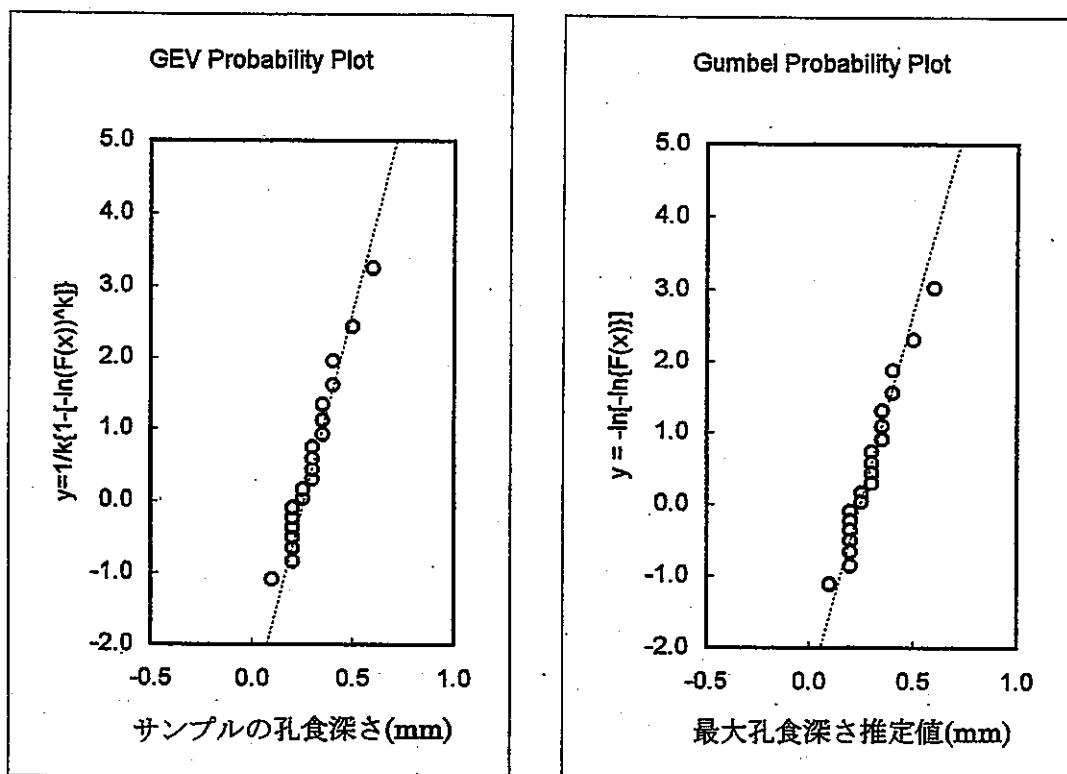
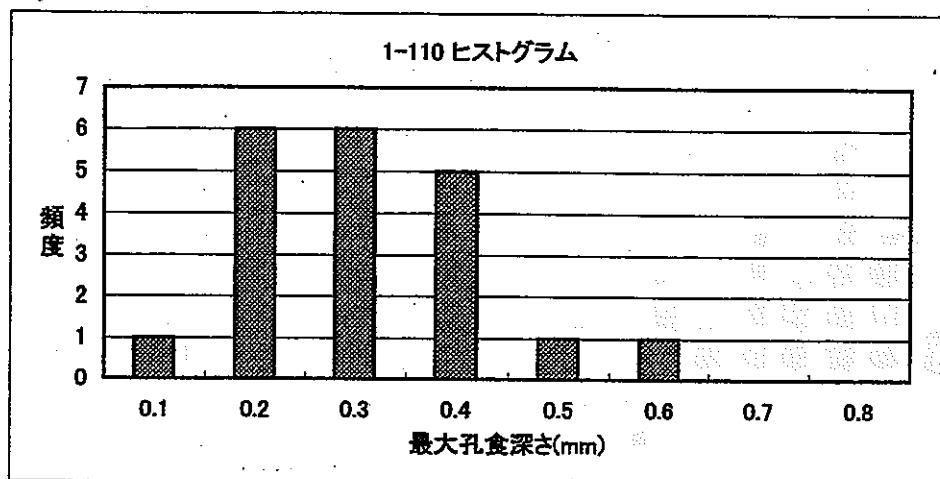


Figure-6 路線 No. 1-110 の極値統計解析結果

路線No. 1-109

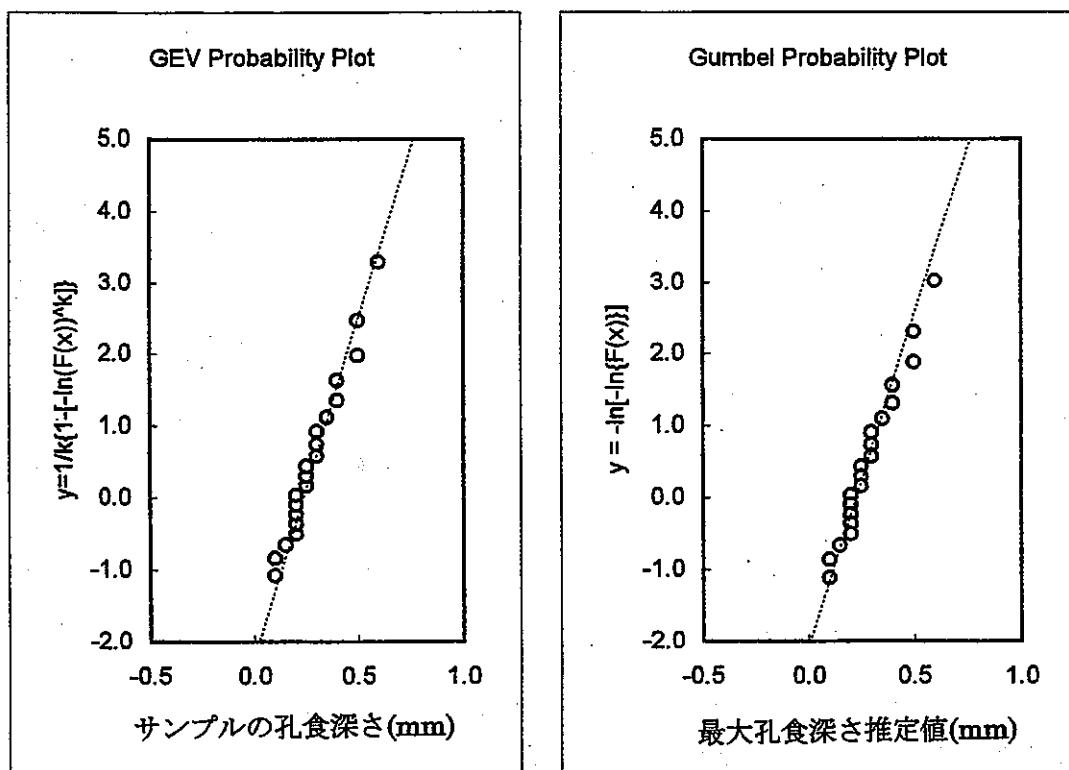
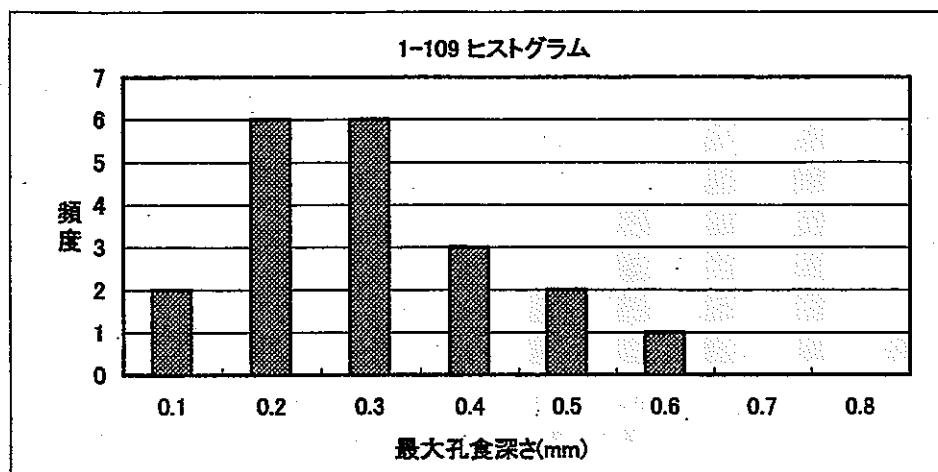


Figure-7 路線 No. 1-109 の極値統計解析結果

路線No. 1-108

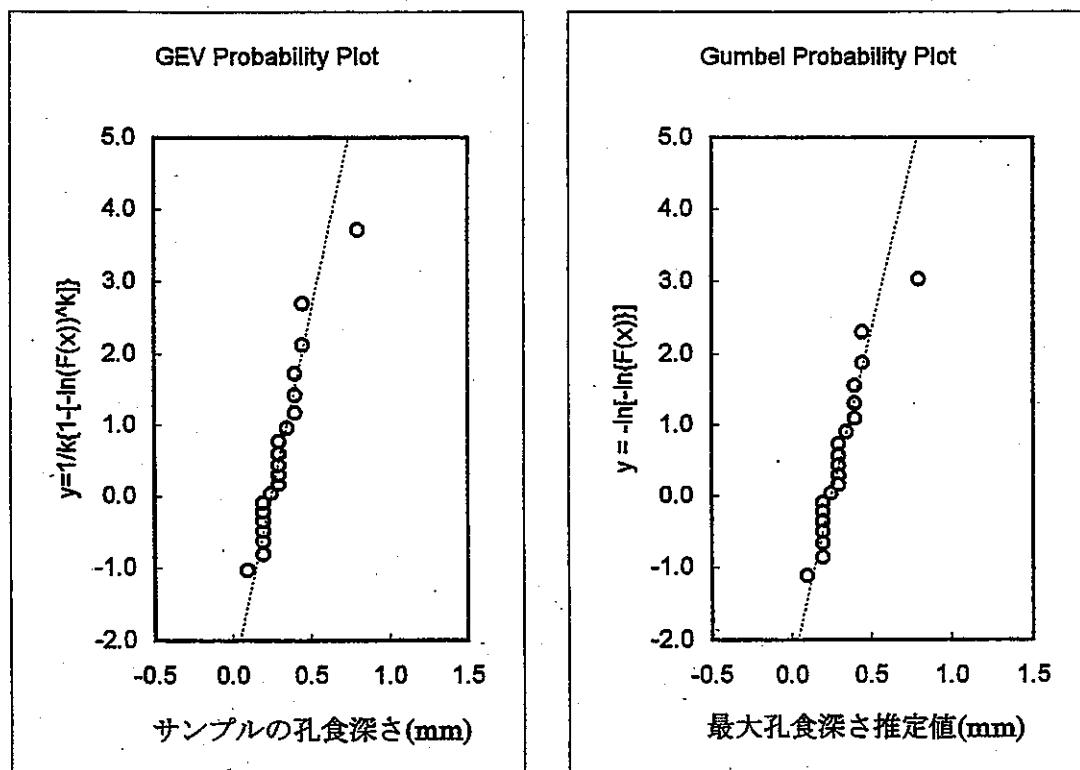
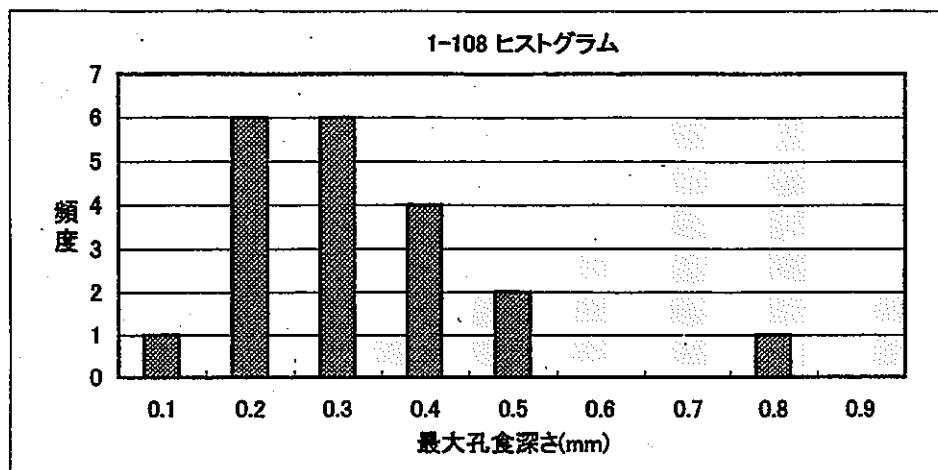


Figure-8 路線 No. 1-108 の極値統計解析結果

路線No. 1-103

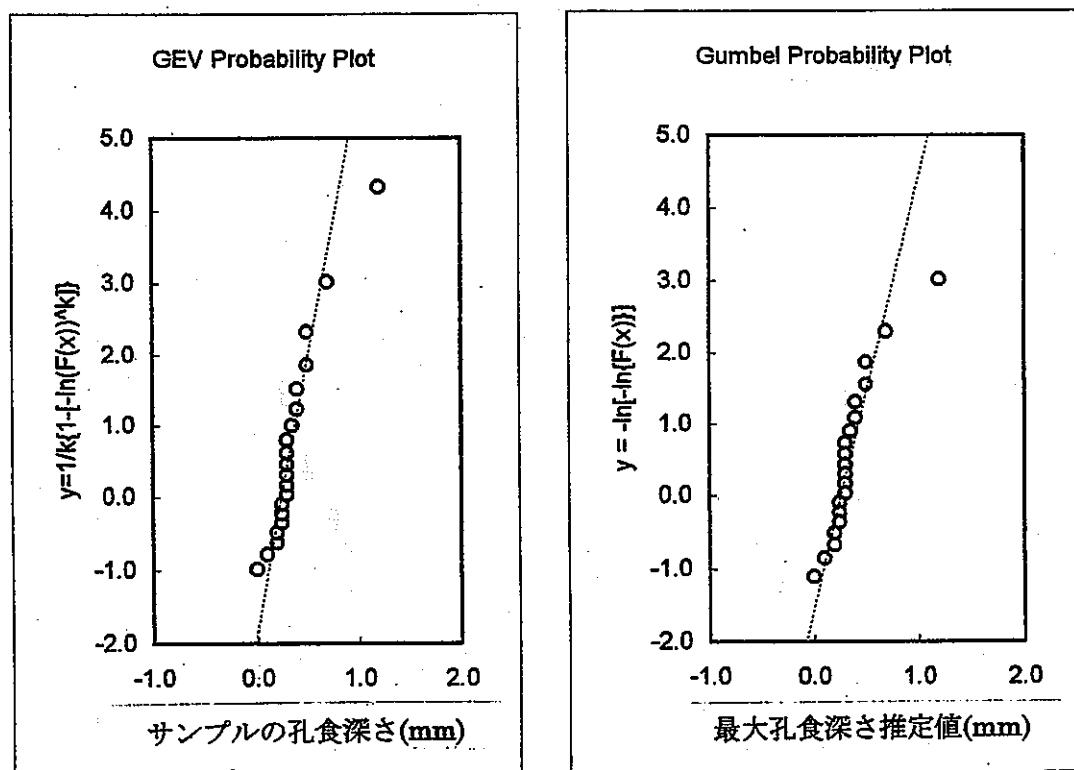
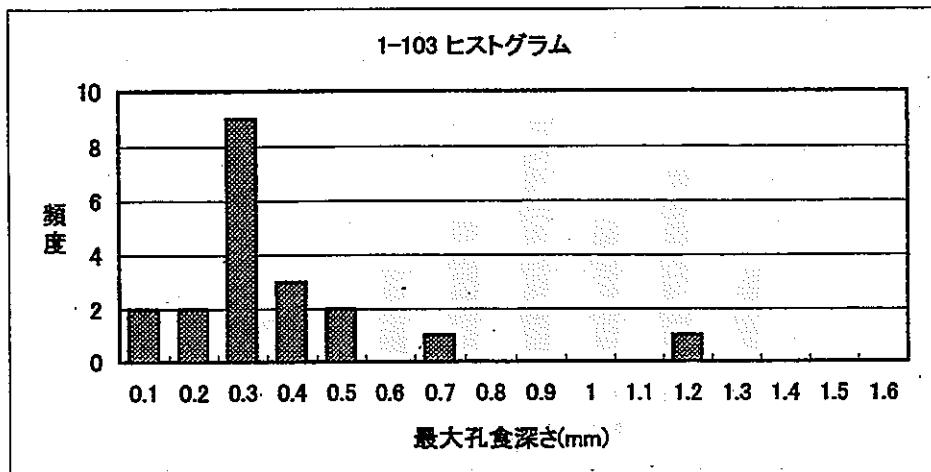


Figure-9 路線 No. 1-103 の極値統計解析結果

路線No. 1-106

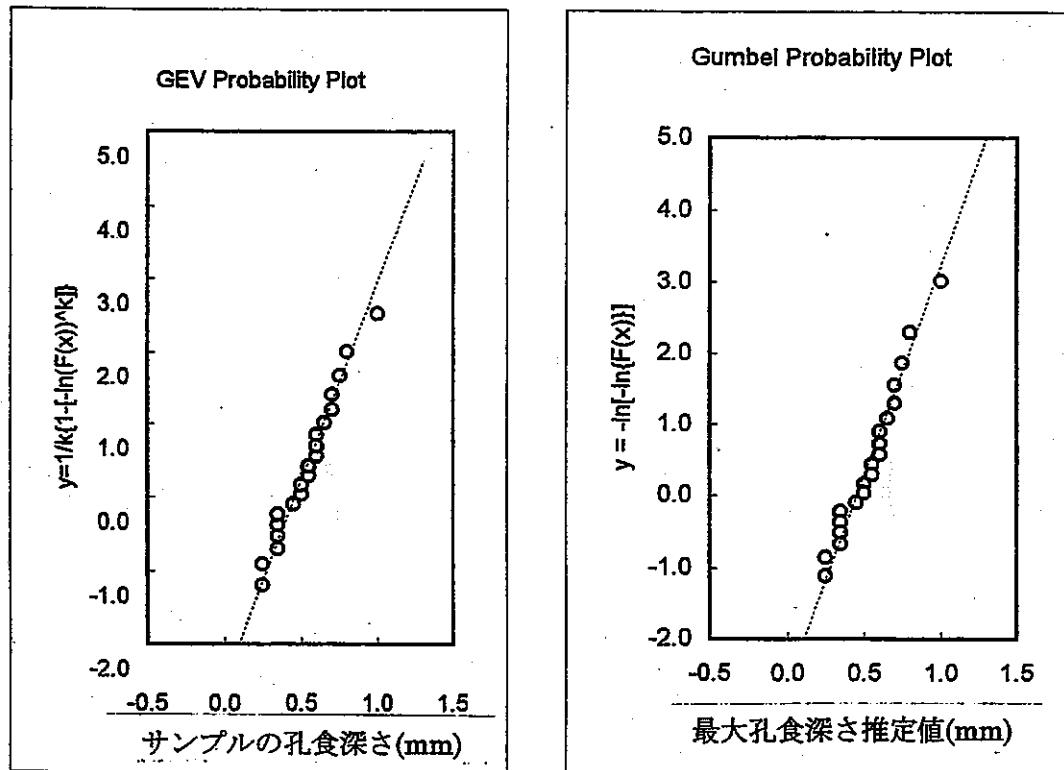
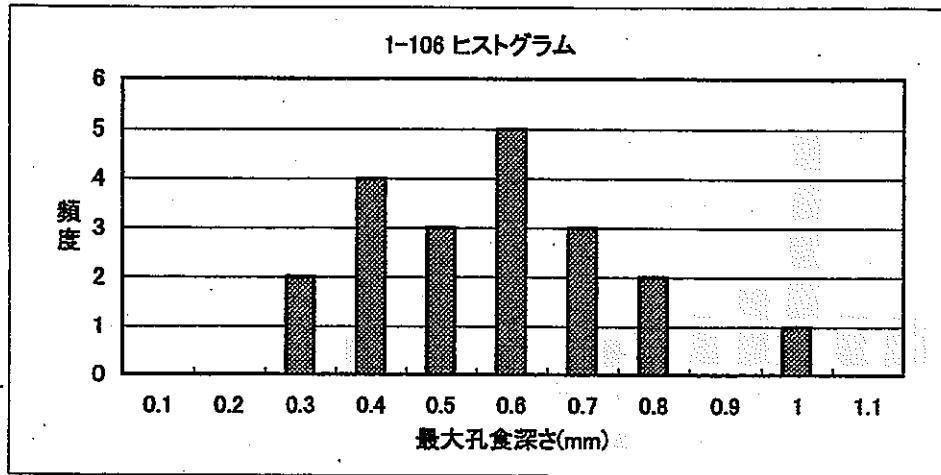


Figure-10 路線 No. 1-106 の極値統計解析結果

路線No. 1-111

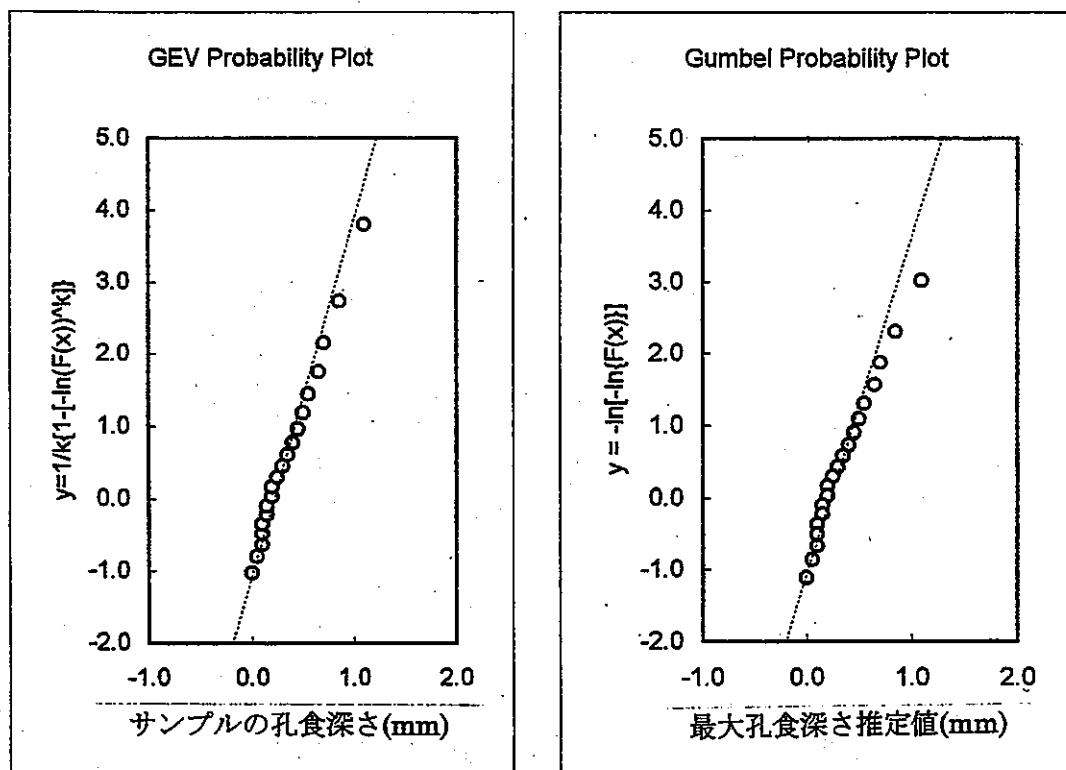
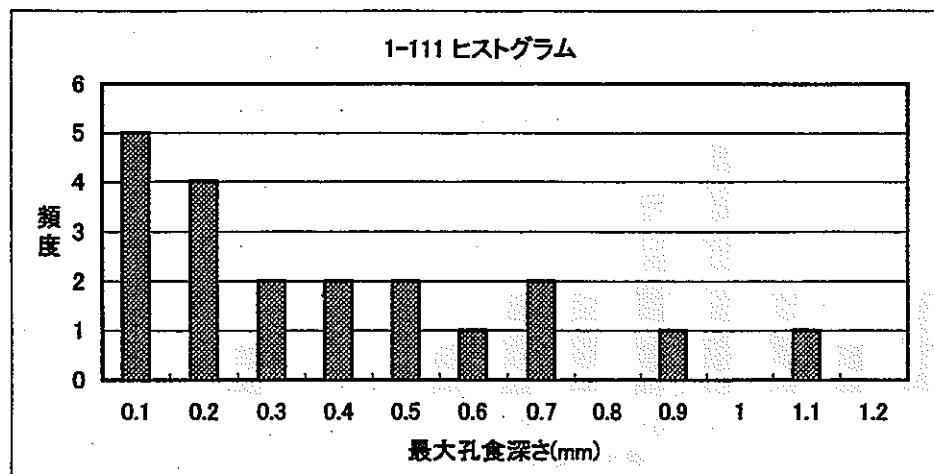


Figure-11 路線 No. 1-111 の極値統計解析結果

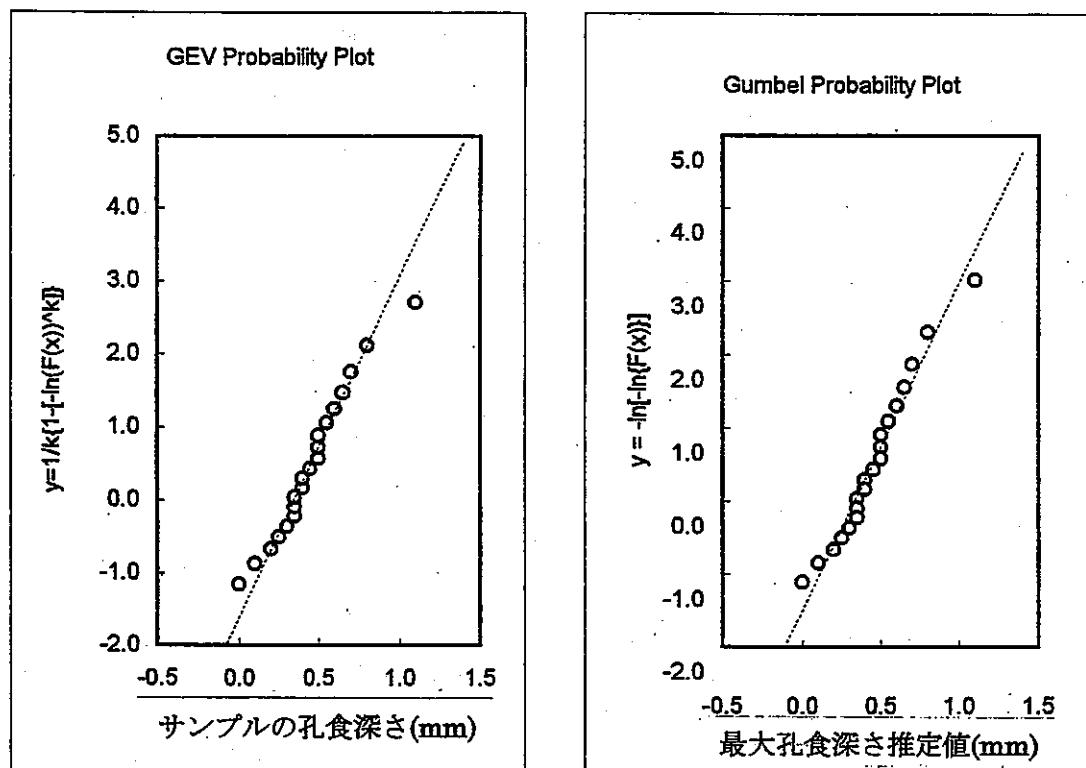
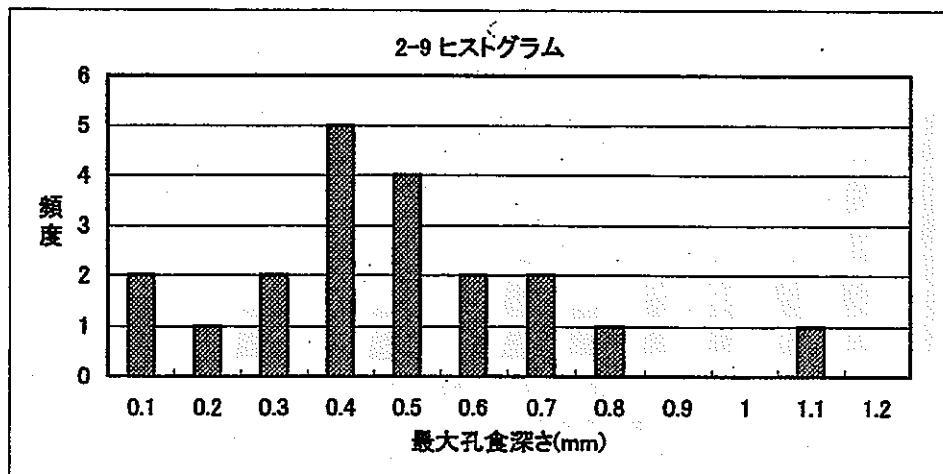
路線No. 2-9

Figure-12 路線 No. 2-9 の極値統計解析結果

路線 No. 2-12

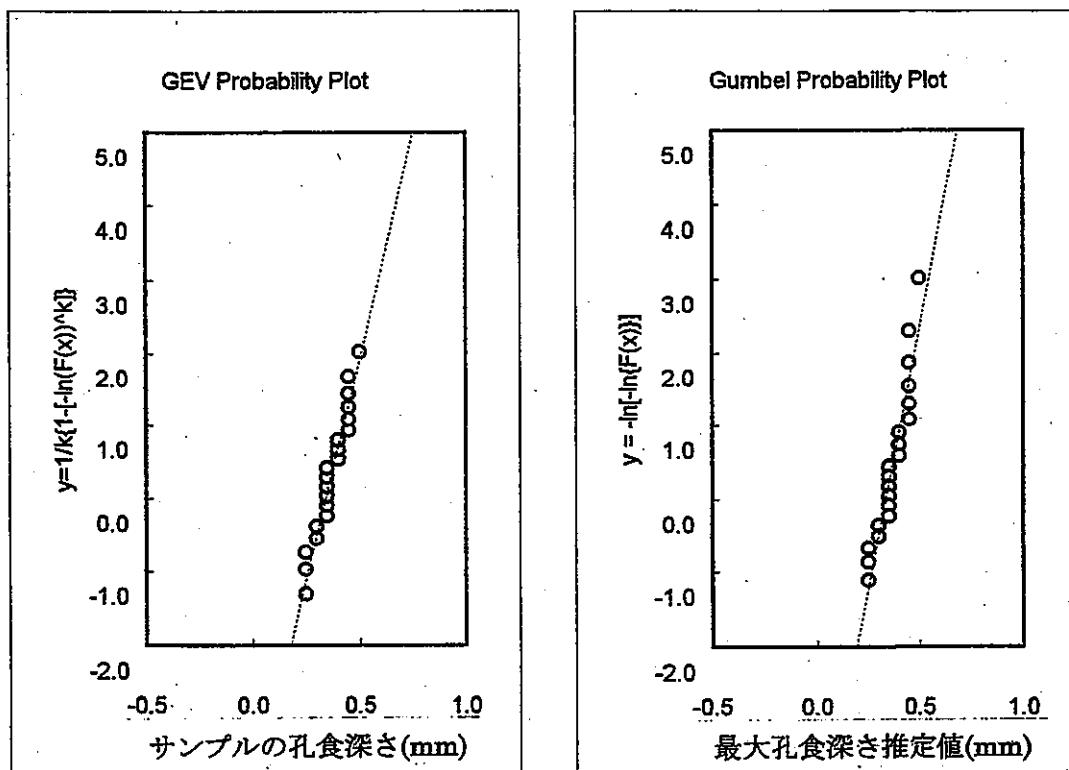
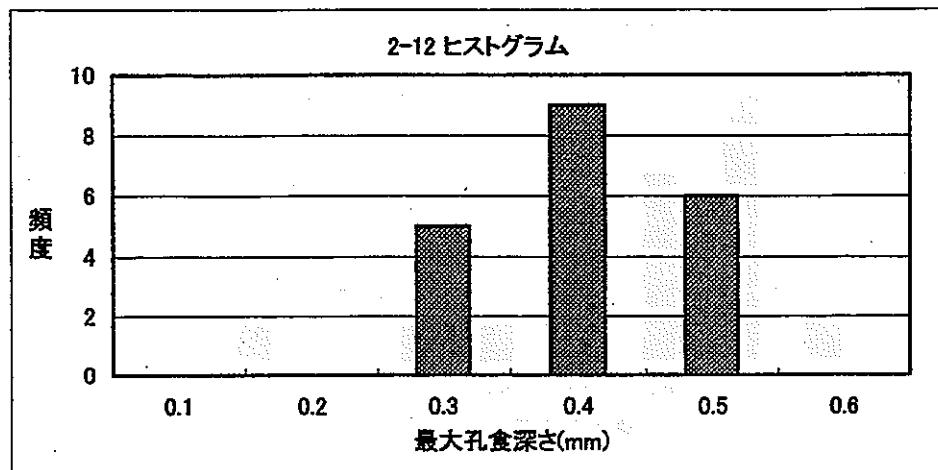


Figure-13 路線 No. 2-12 の極値統計解析結果

路線No. 2-22

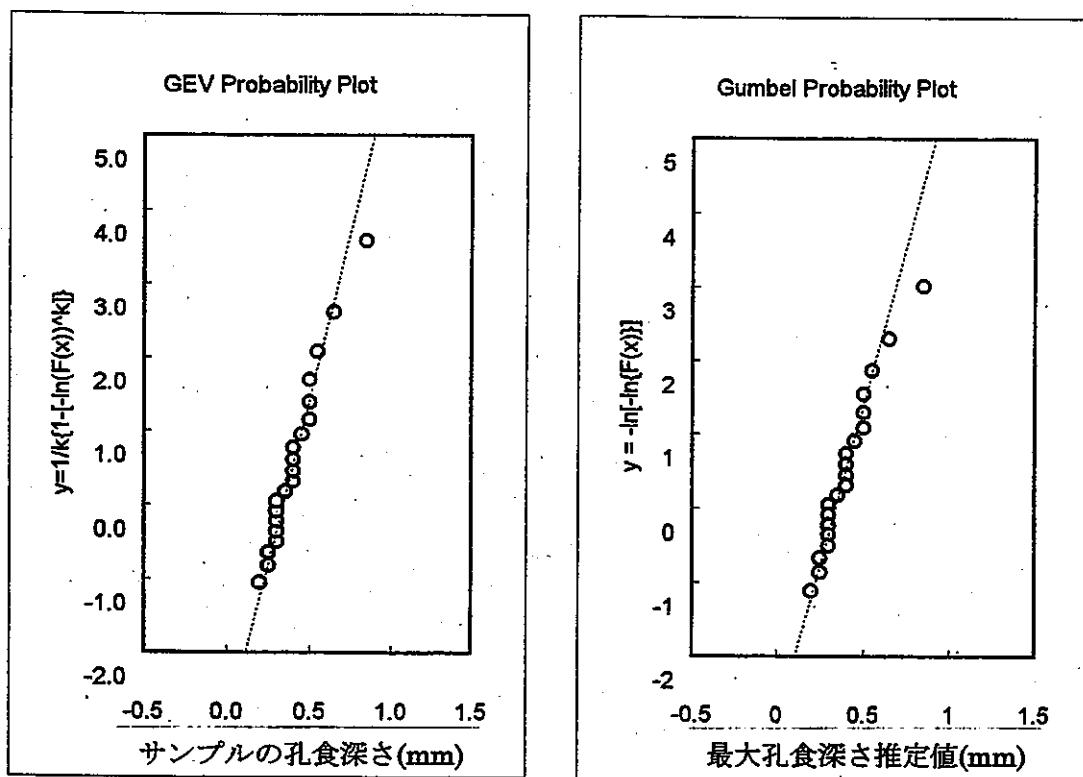
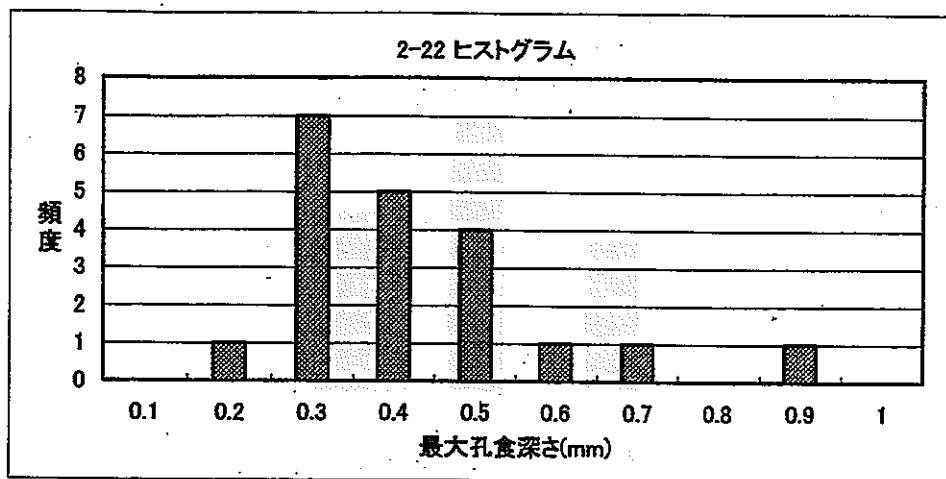


Figure-14 路線 No. 2-22 の極値統計解析結果

路線 No. 2-24

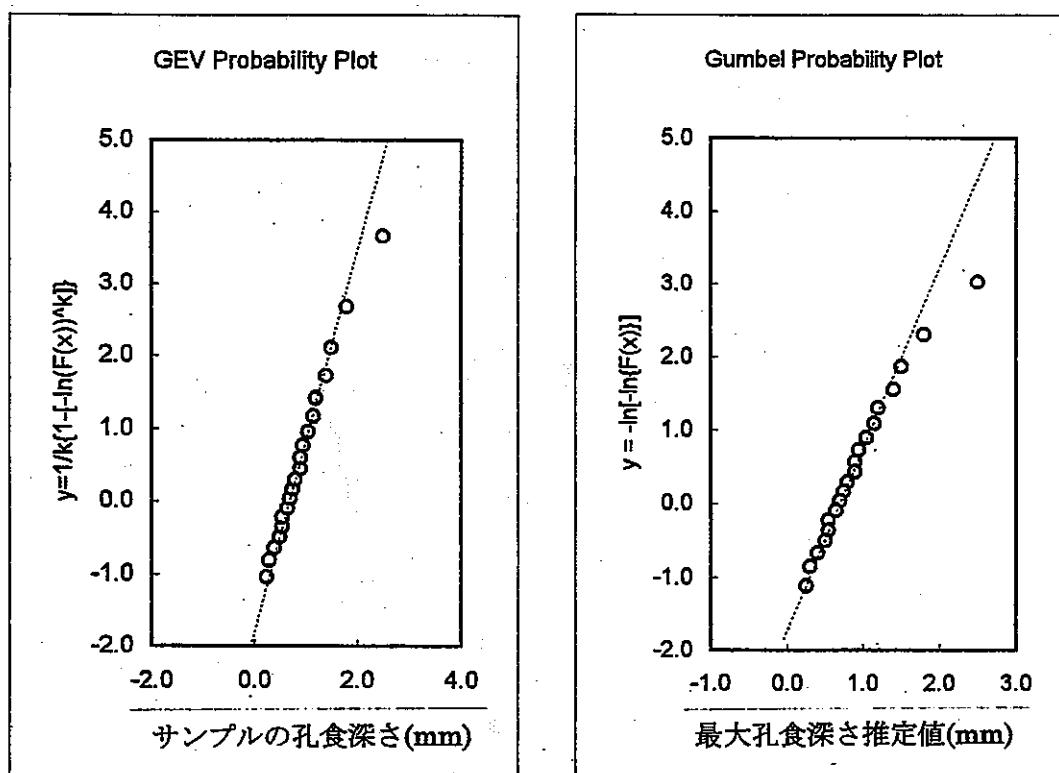
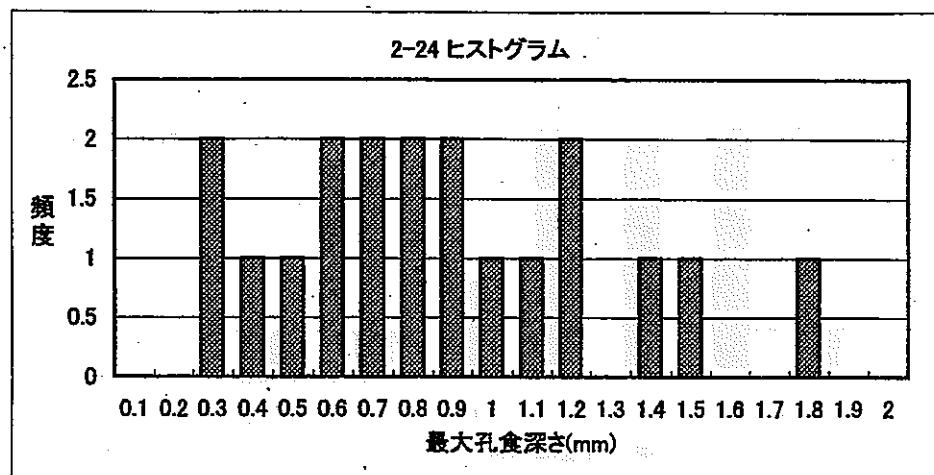


Figure-15 路線 No. 2-24 の極値統計解析結果

路線No. 2-103

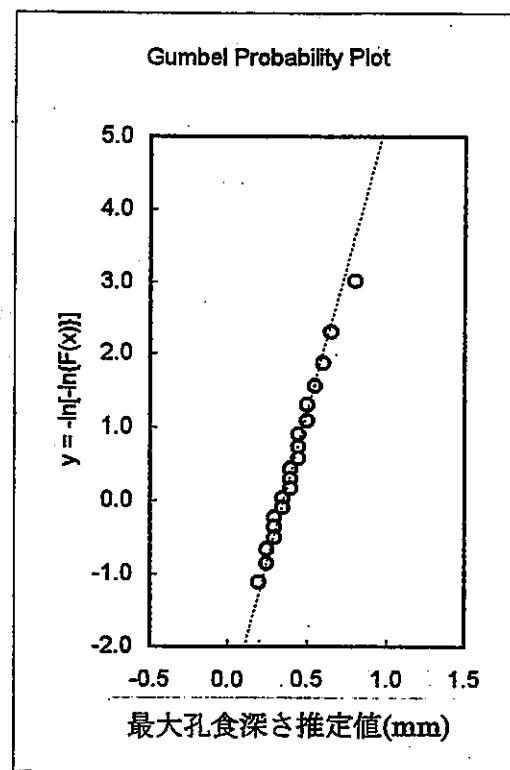
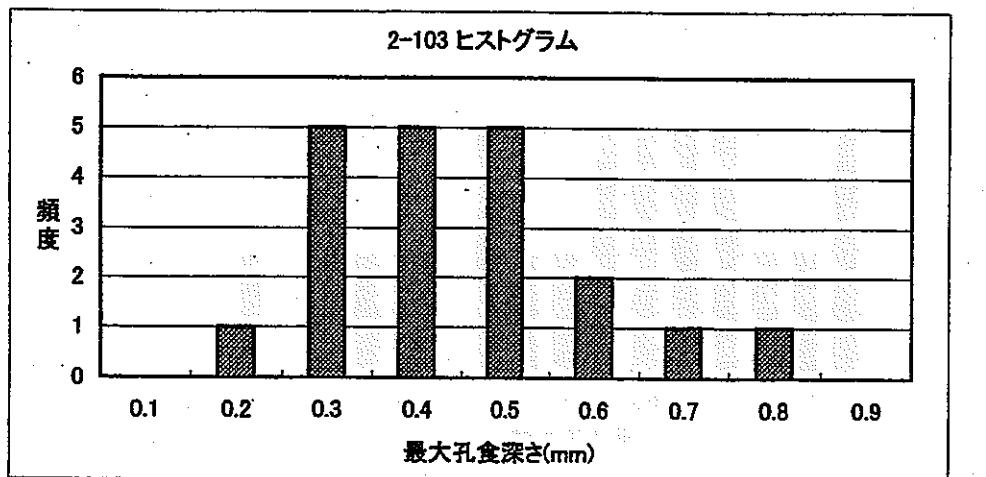


Figure-16 路線 No. 2-103 の極値統計解析結果

路線No. 2-101

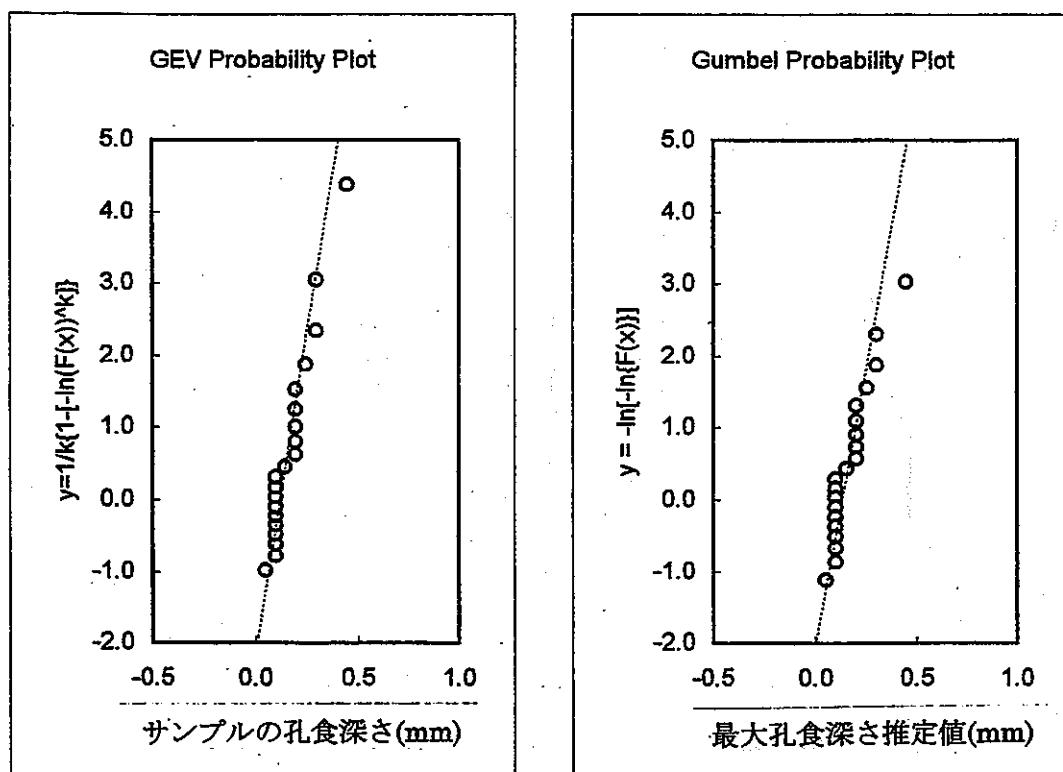
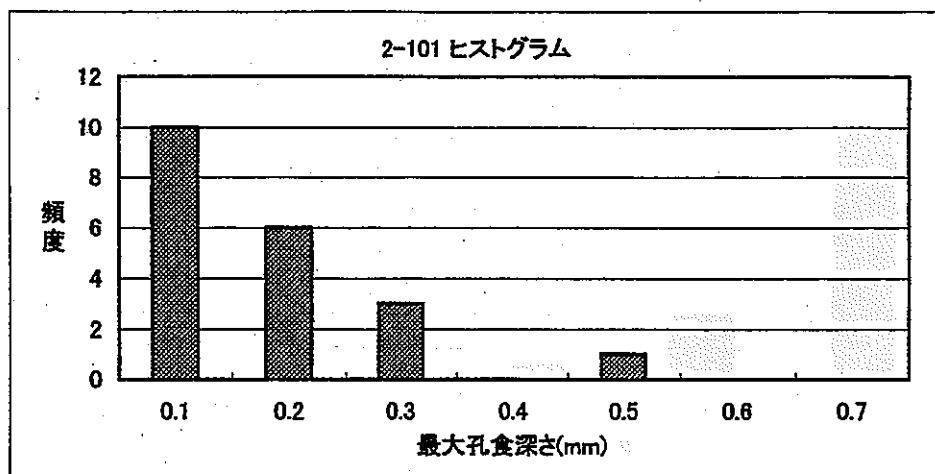


Figure-17 路線 No. 2-101 の極値統計解析結果

路線No. 2-112

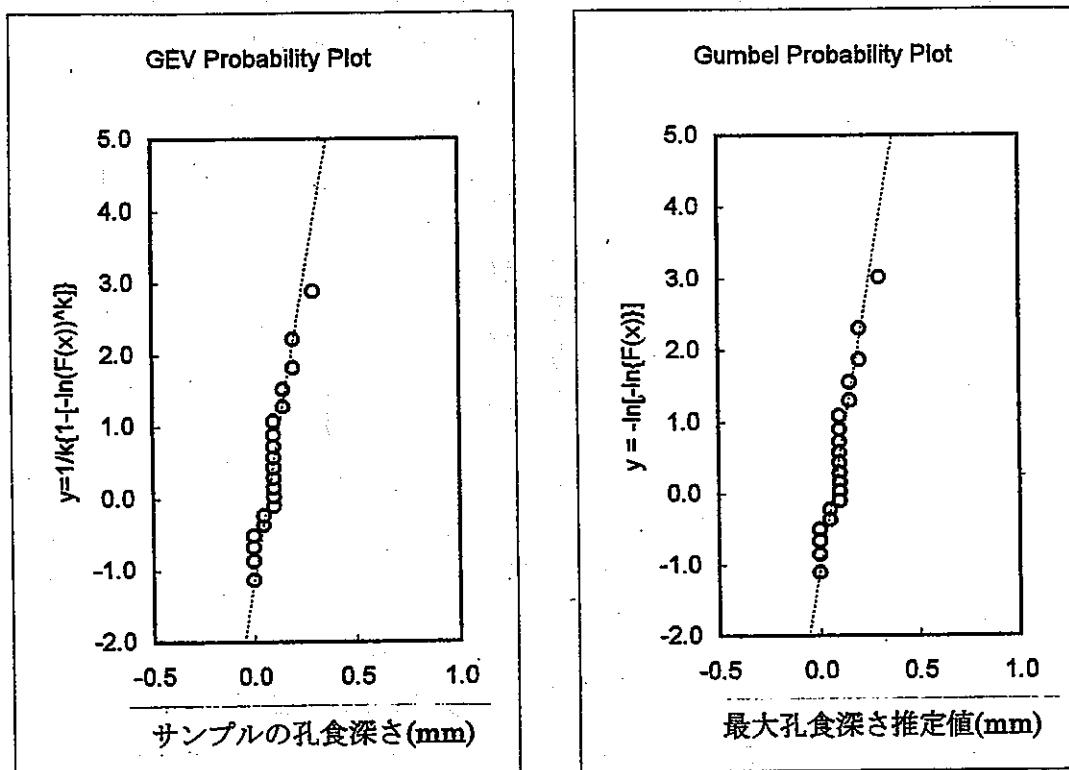
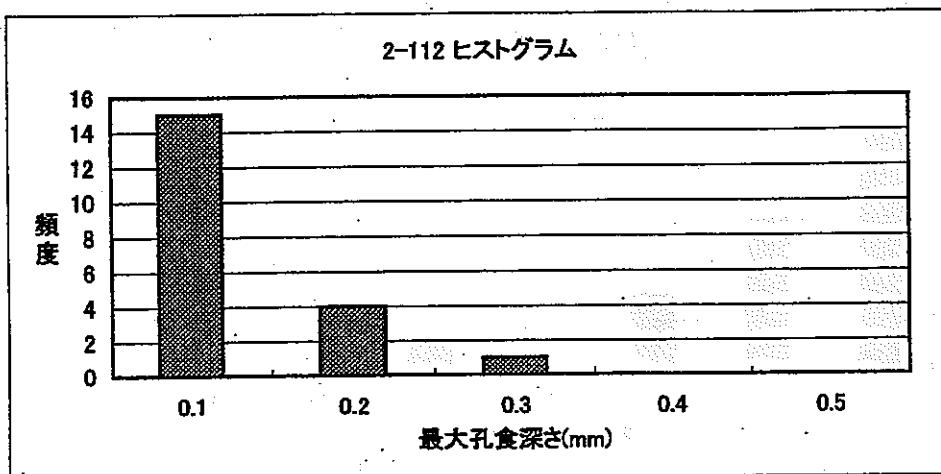


Figure-18 路線 No. 2-112 の極値統計解析結果

路線No. 2-114

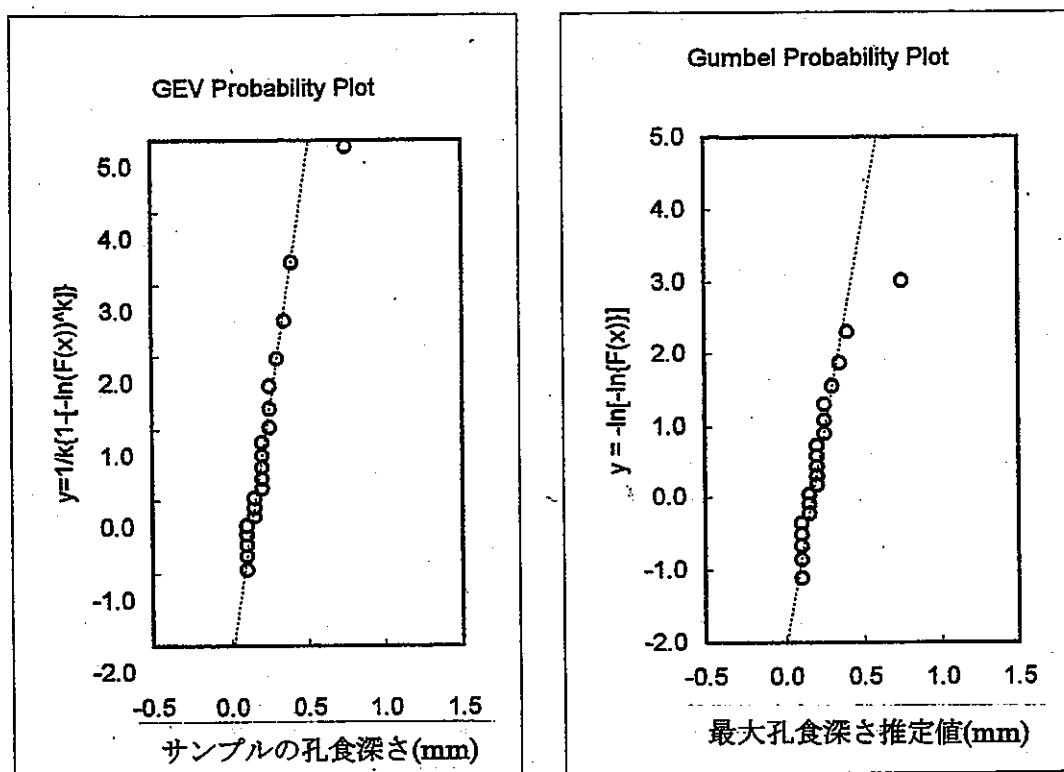
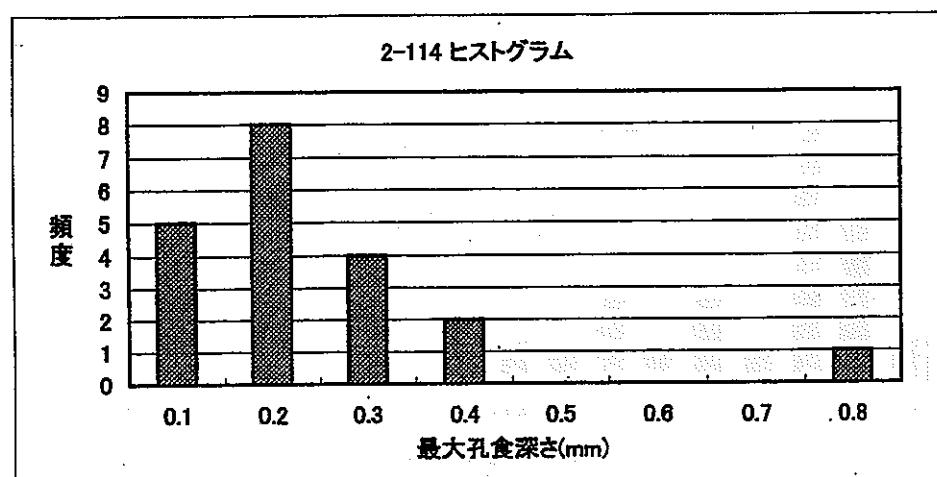


Figure-19 路線 No. 2-114 の極値統計解析結果

路線No. 2-107

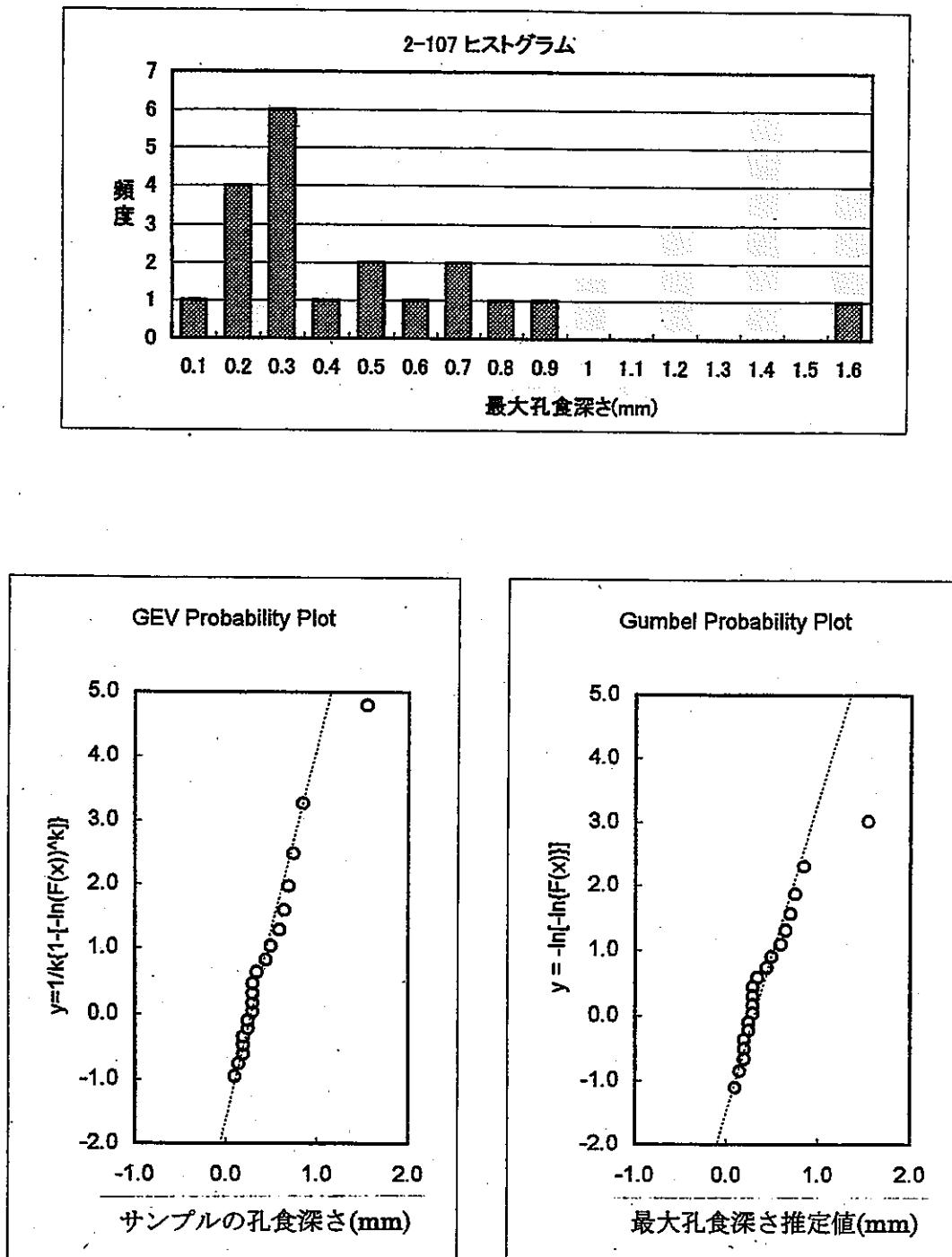


Figure-20 路線 No. 2-107 の極値統計解析結果

路線No. 2-108

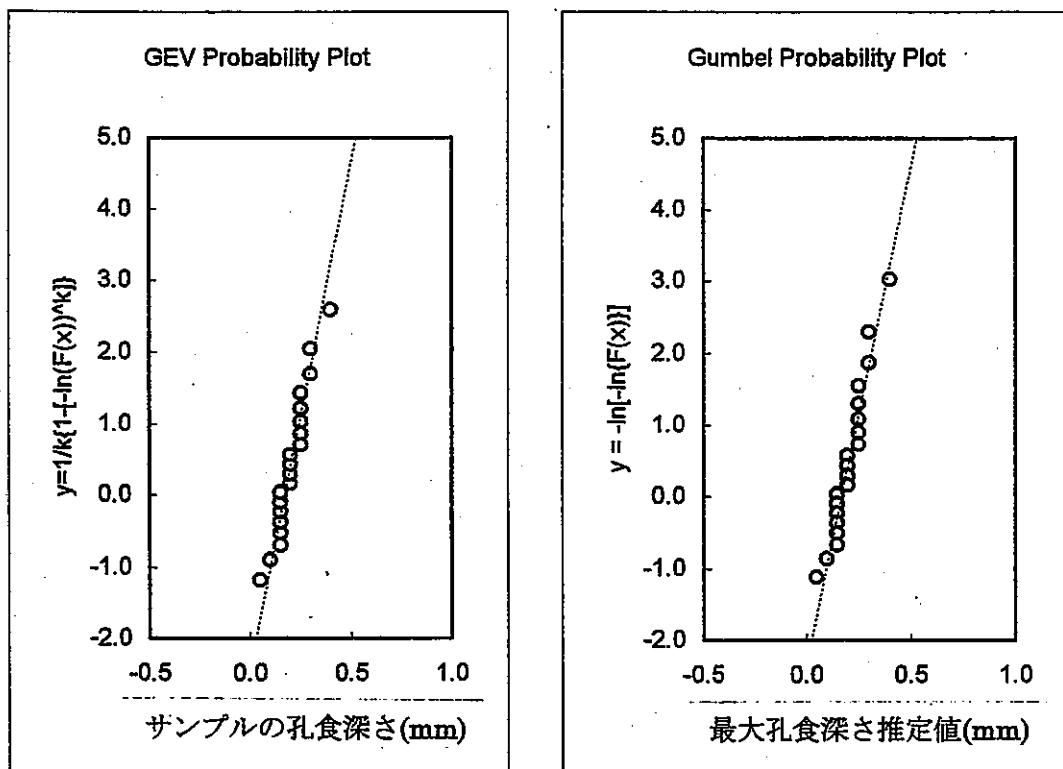
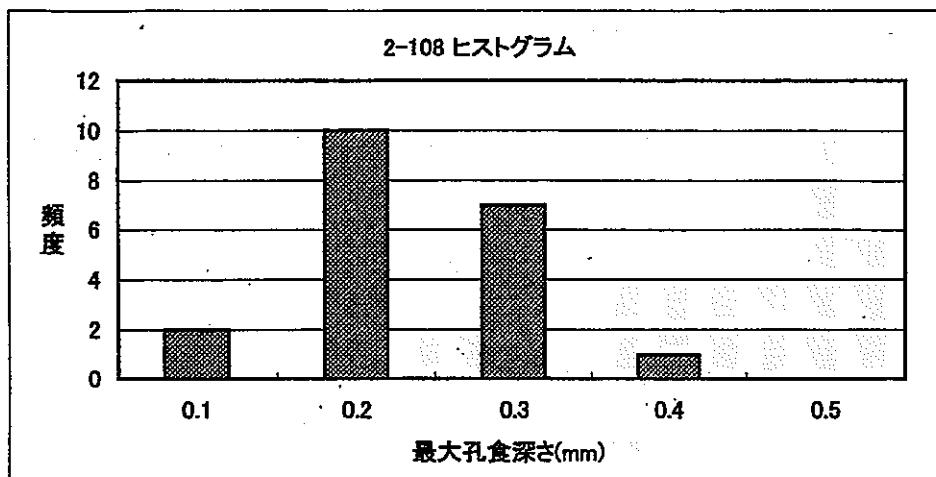


Figure-21 路線 No. 2-108 の極値統計解析結果

路線No. 2-117

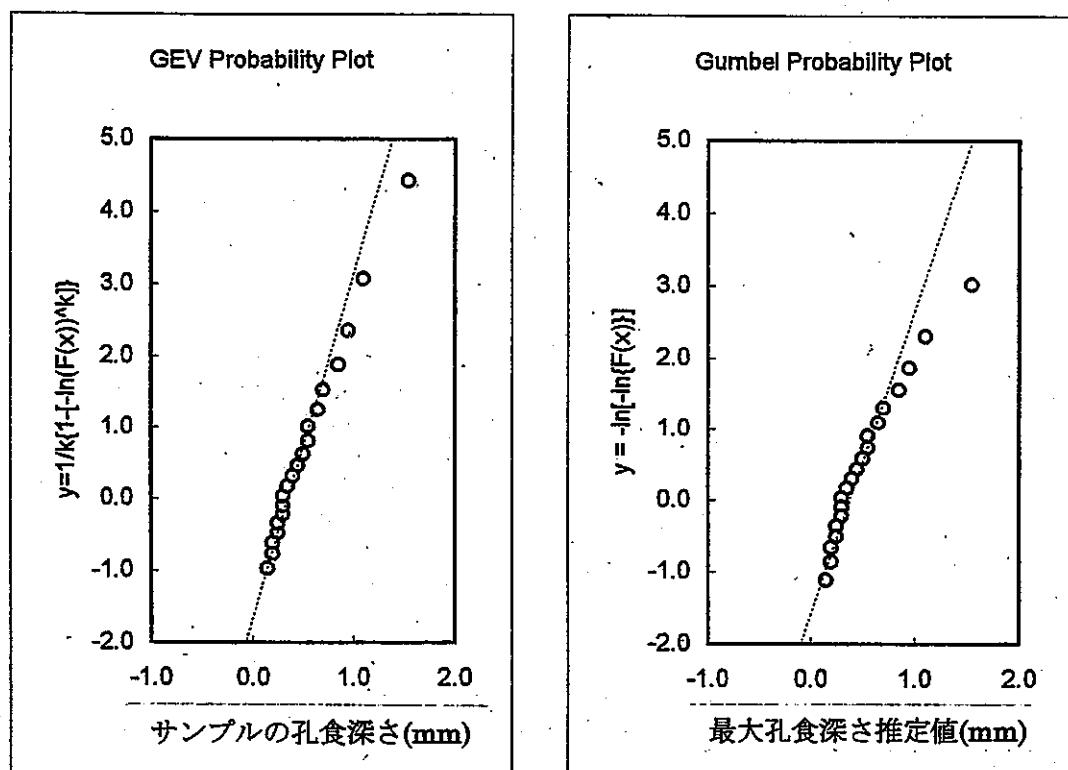
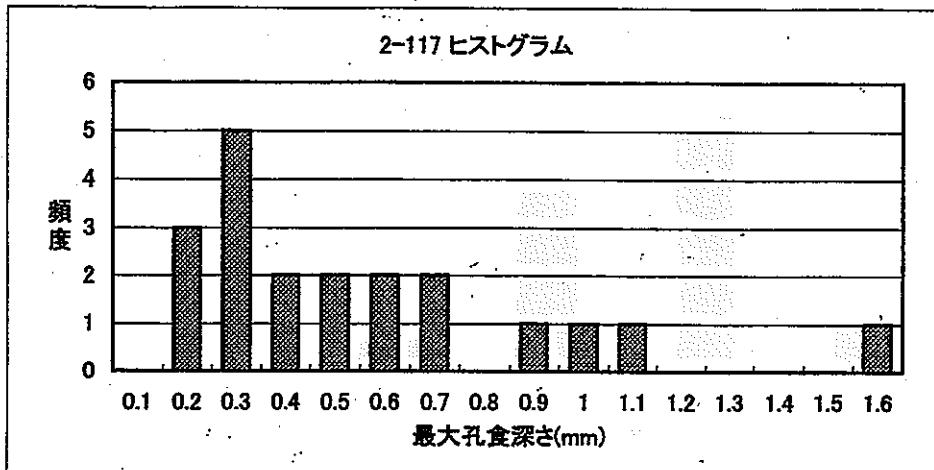


Figure-22 路線 No. 2-117 の極値統計解析結果

路線No. 2-119

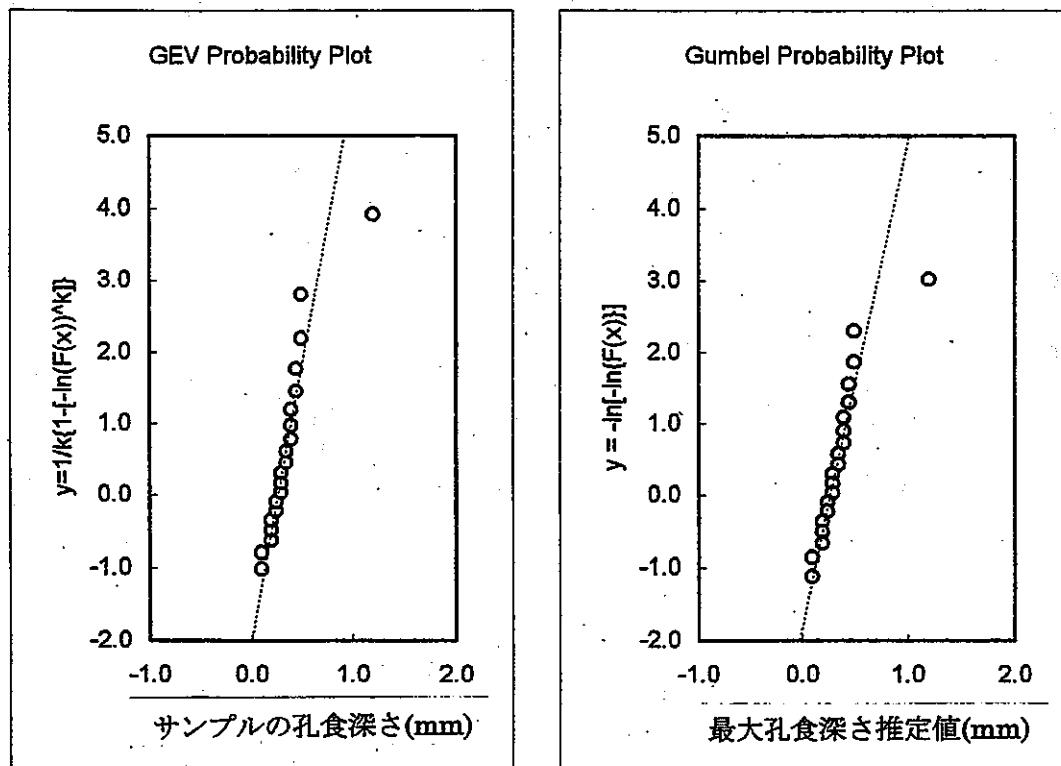
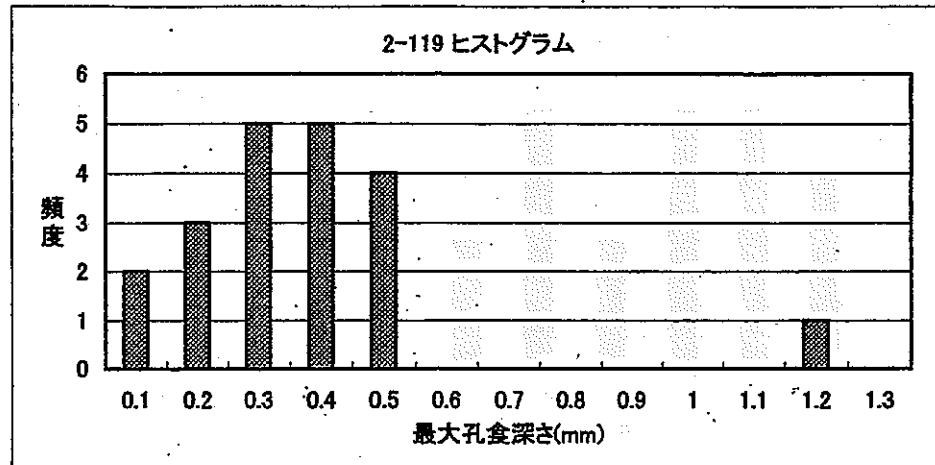


Figure-23 路線 No. 2-119 の極値統計解析結果

路線No. 2-120

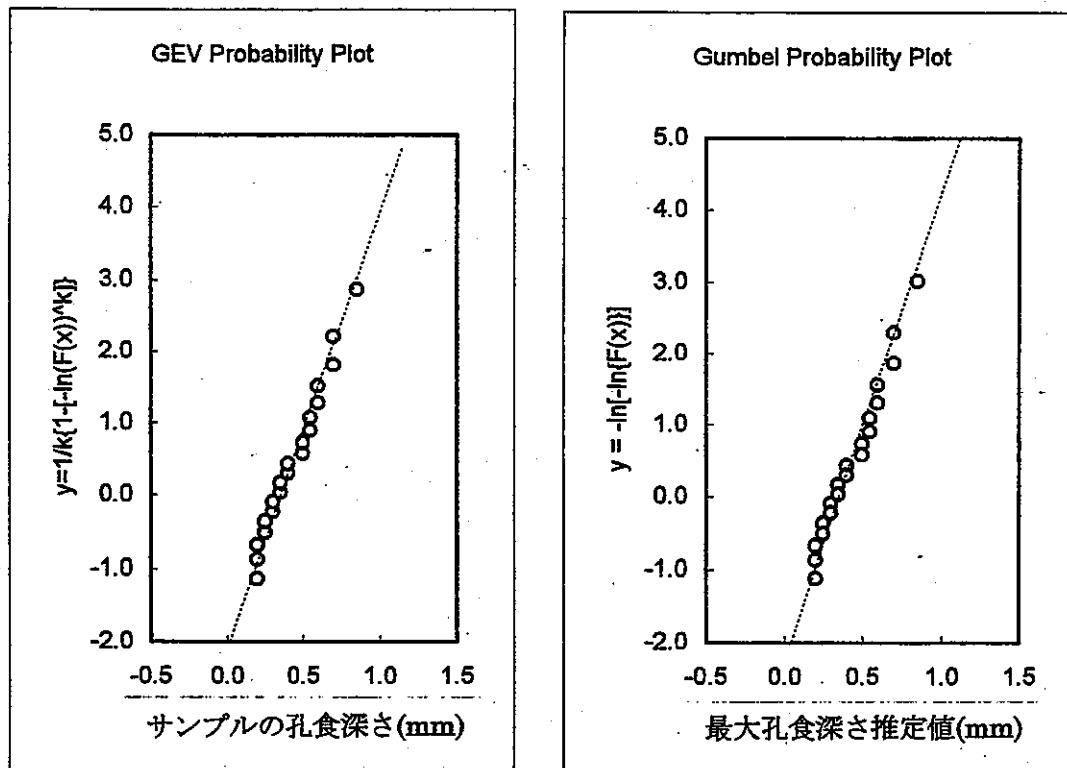
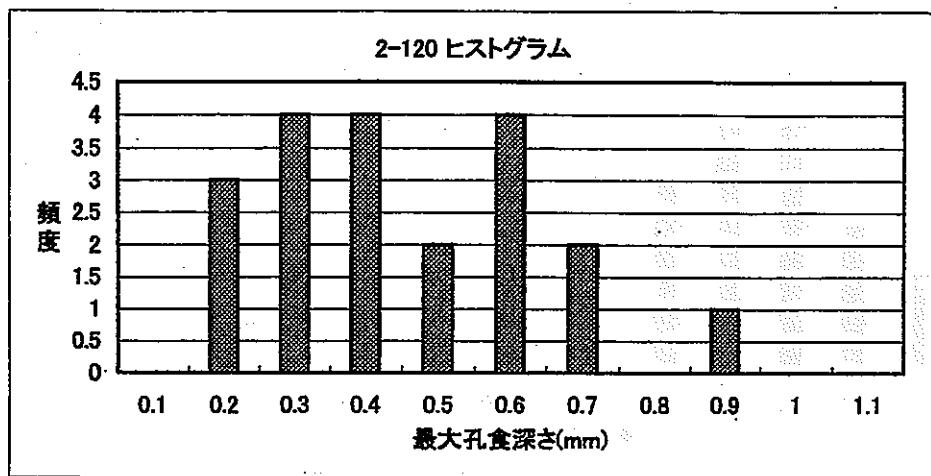


Figure-24 路線 No. 2-120 の極値統計解析結果

路線No. 2-121

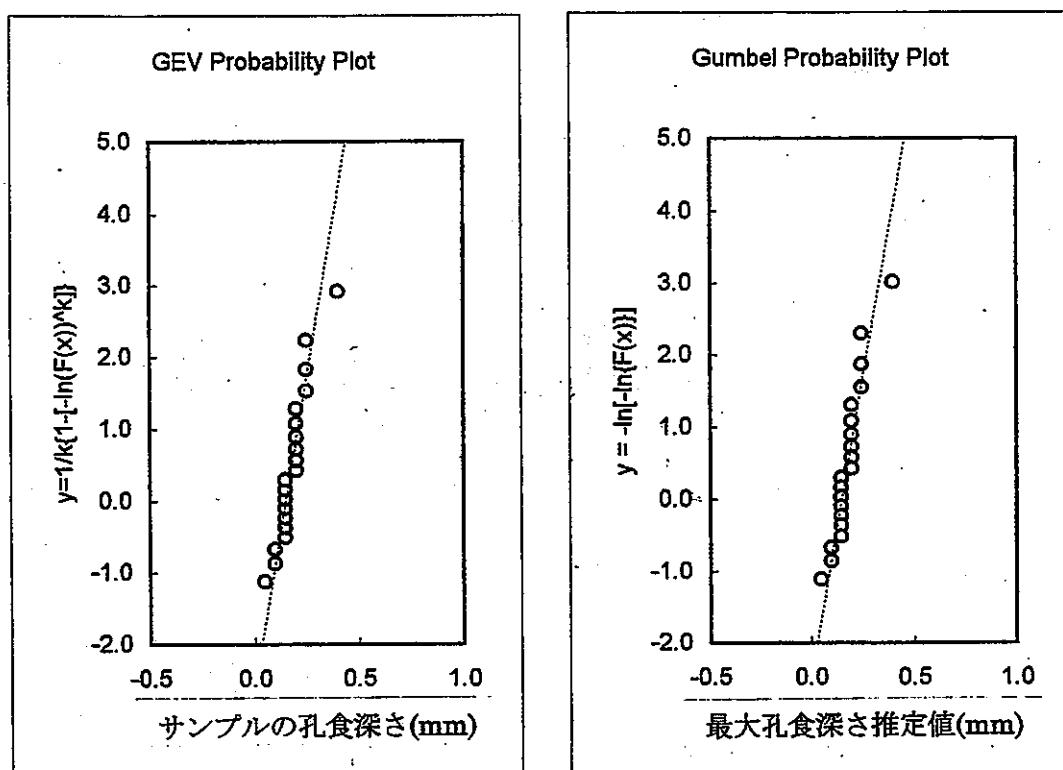
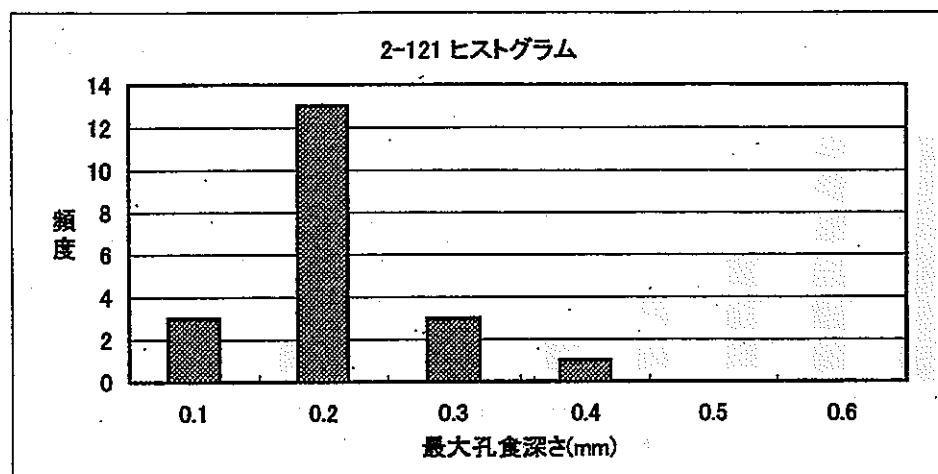


Figure-25 路線 No. 2-121 の極値統計解析結果

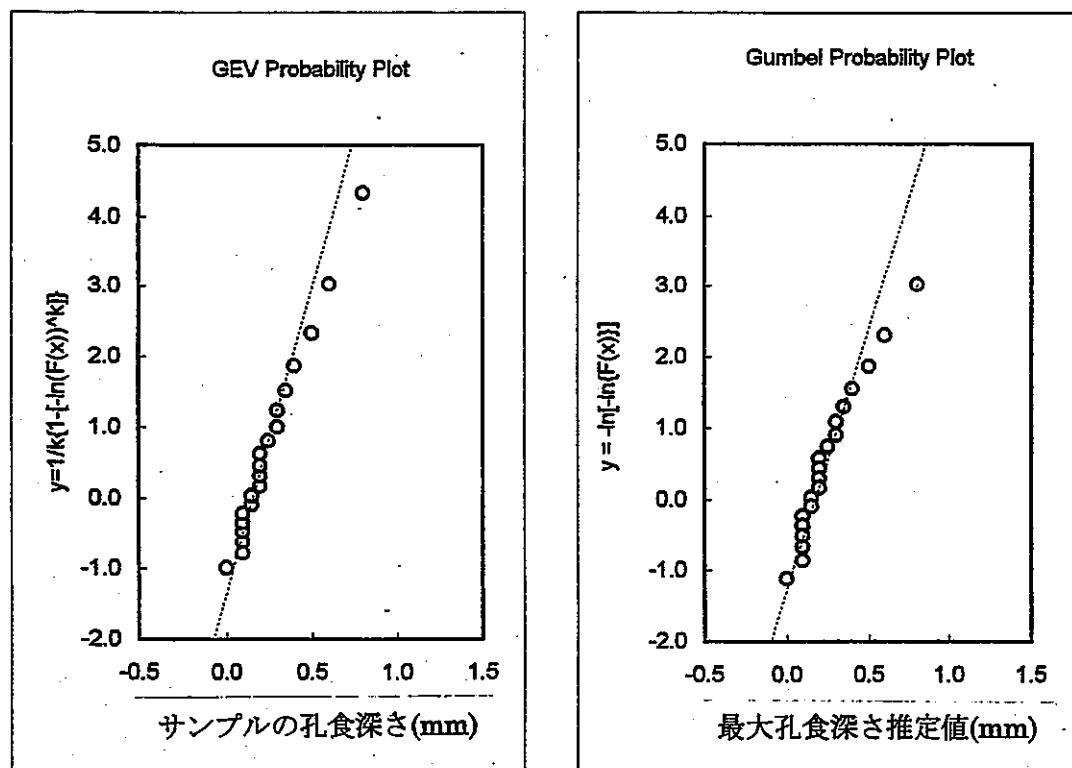
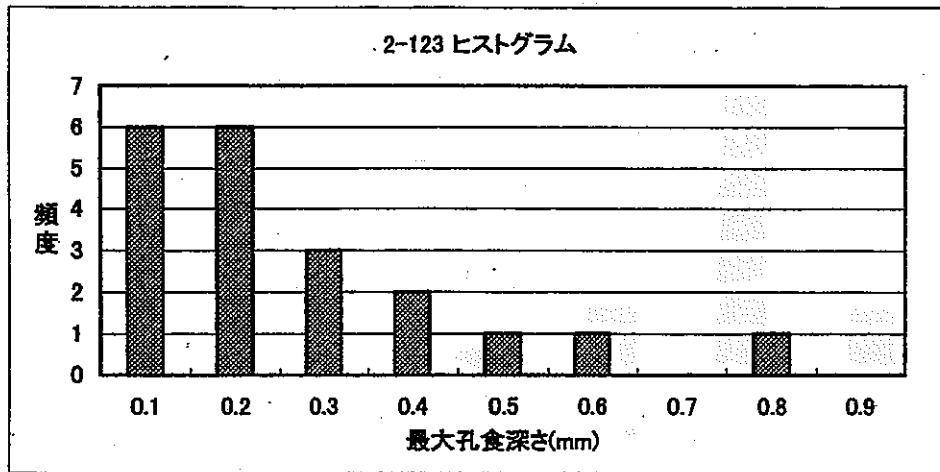
路線No. 2-123

Figure-26 路線 No. 2-123 の極値統計解析結果

路線No. 3-105

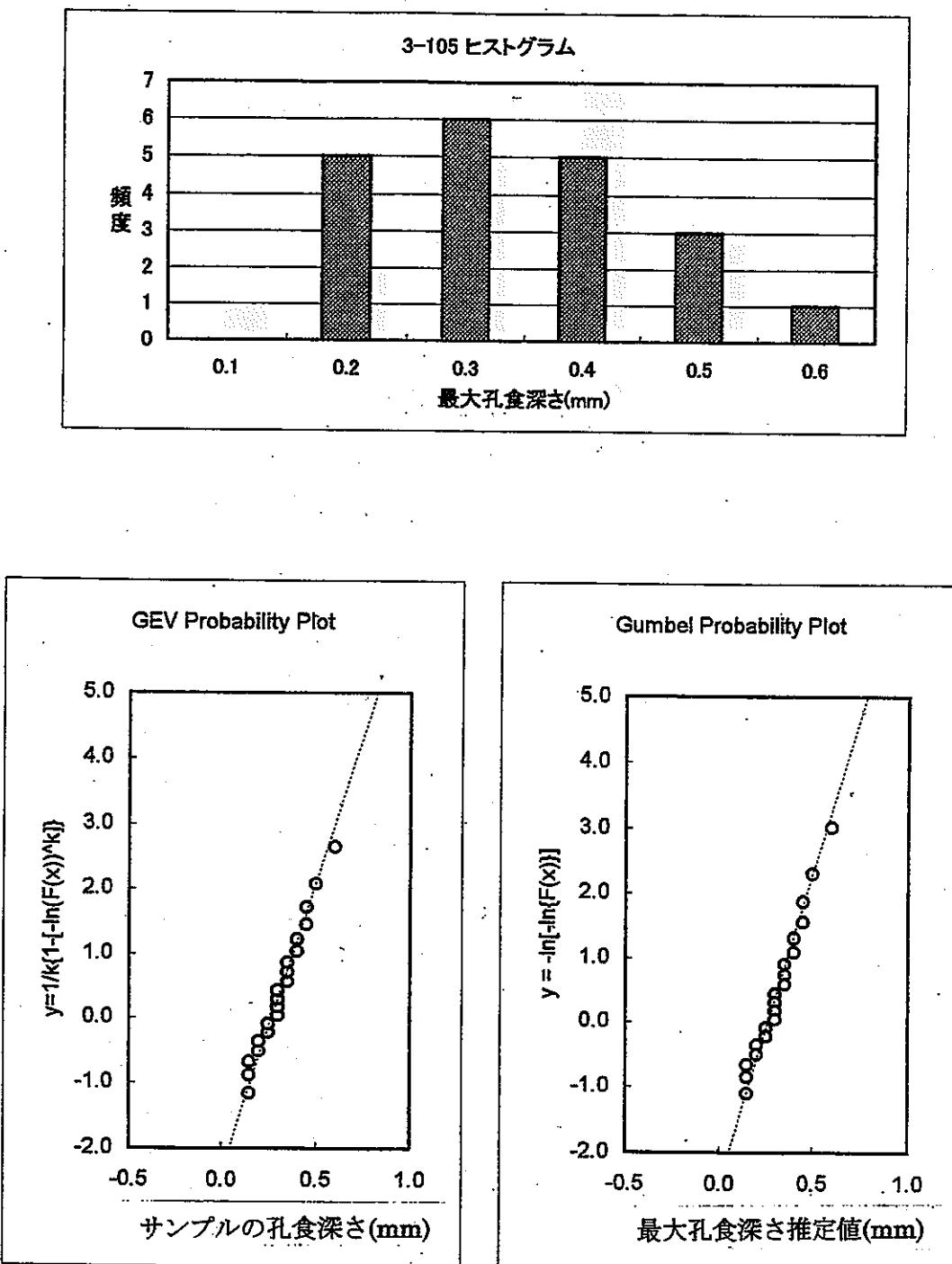


Figure-27 路線 No. 3-105 の極値統計解析結果

路線No. 3-106

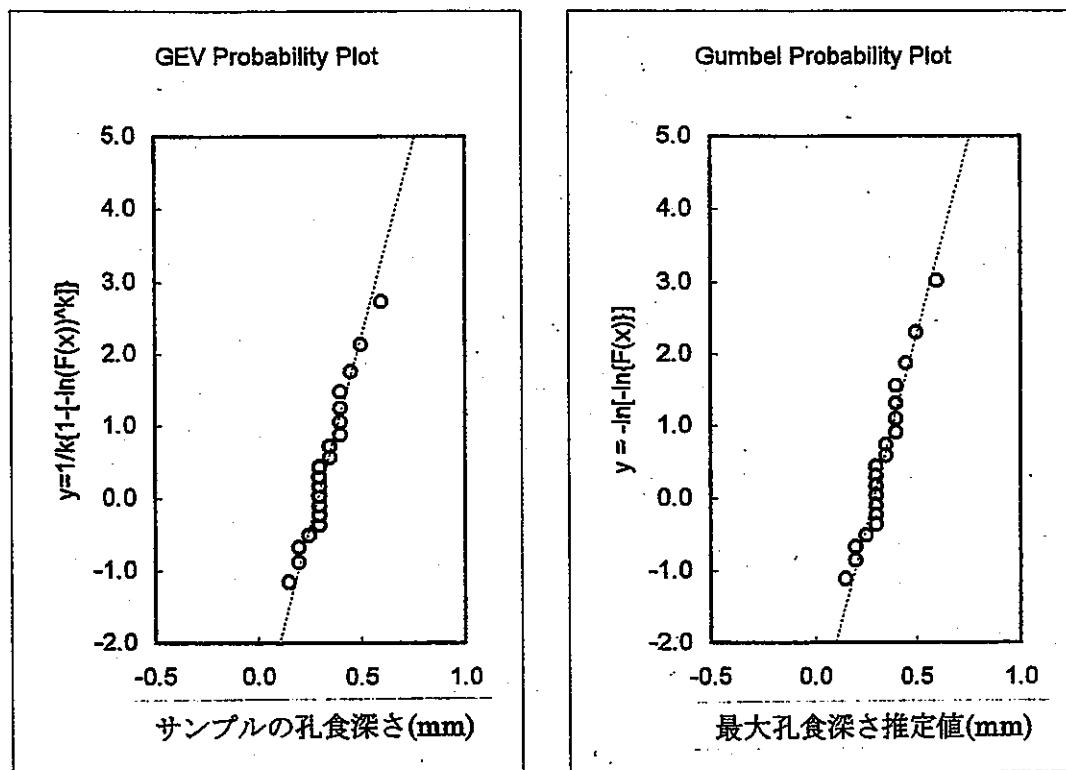
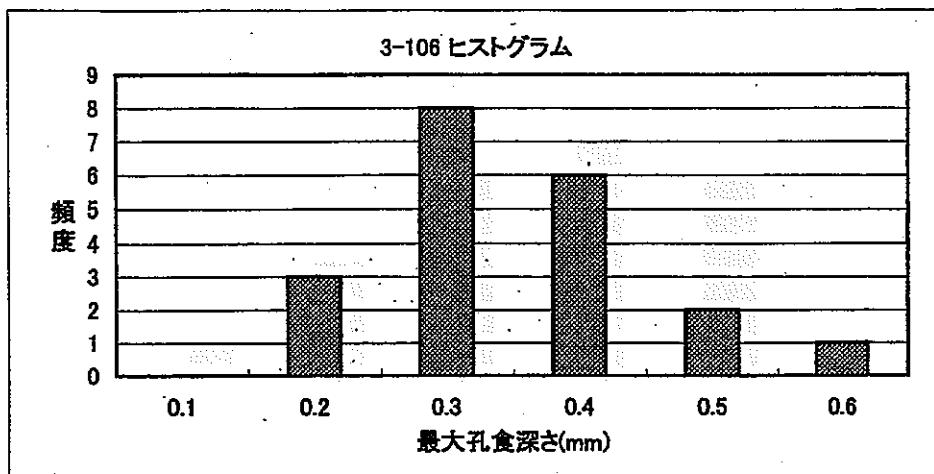


Figure-28 路線 No. 3-106 の極値統計解析結果

路線No. 3-110

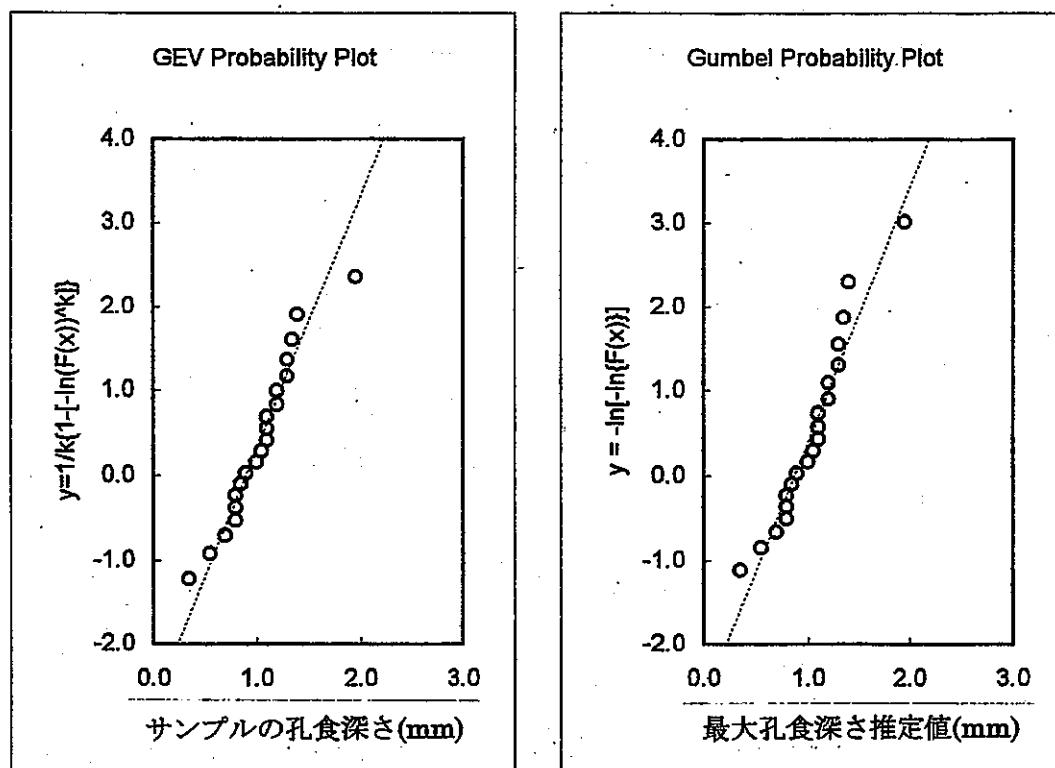
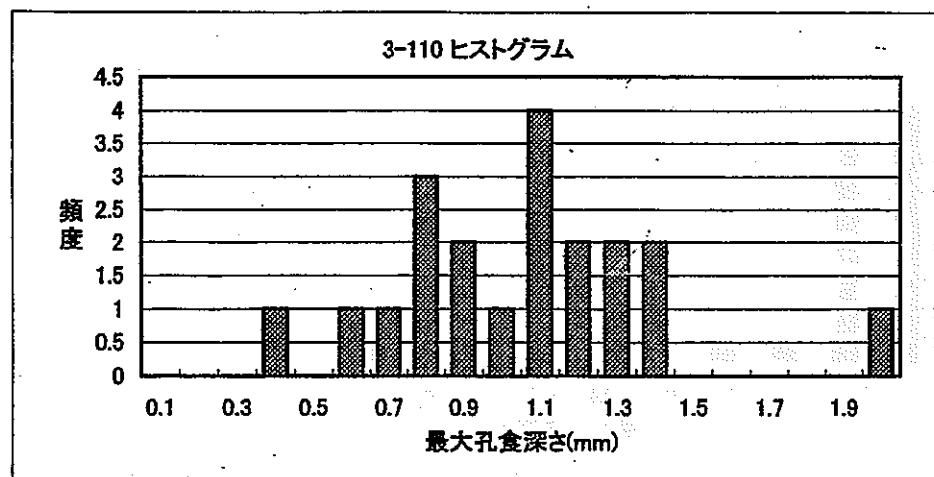


Figure-29 路線 No. 3-110 の極値統計解析結果

路線No. 3-115

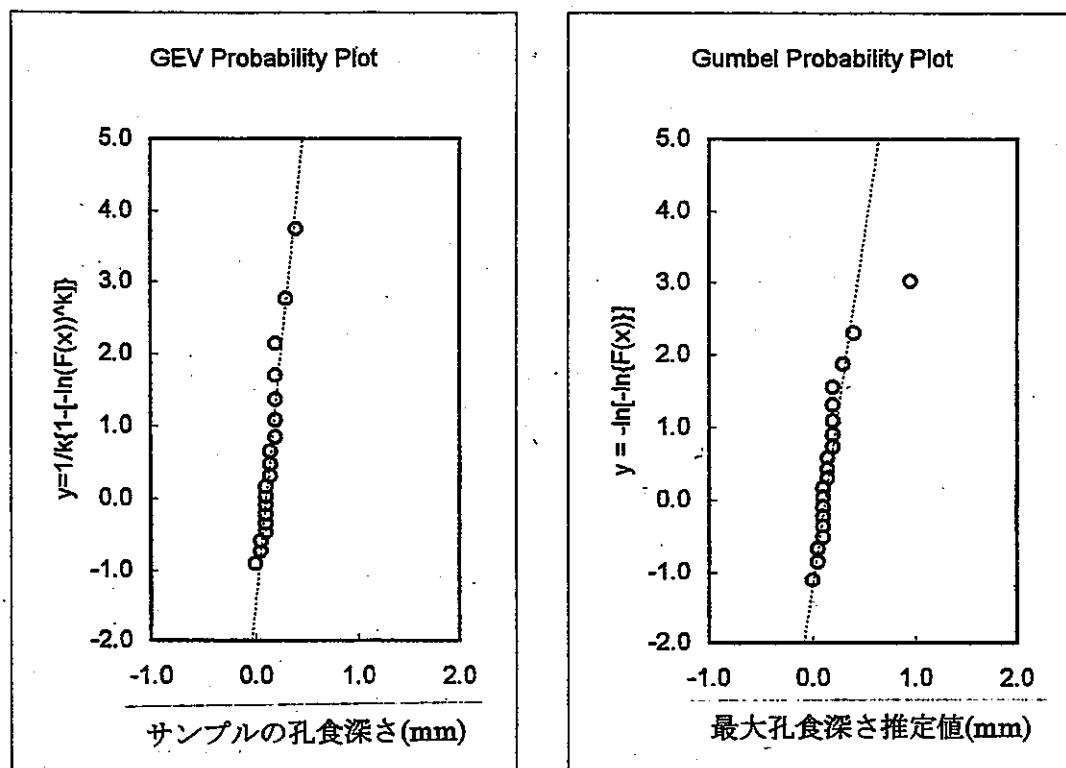
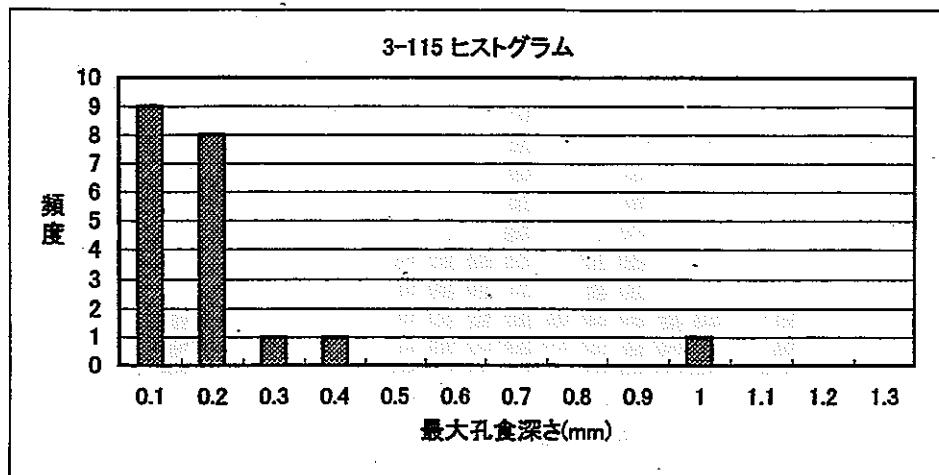


Figure-30 路線 No. 3-115 の極値統計解析結果

路線No. 3-117

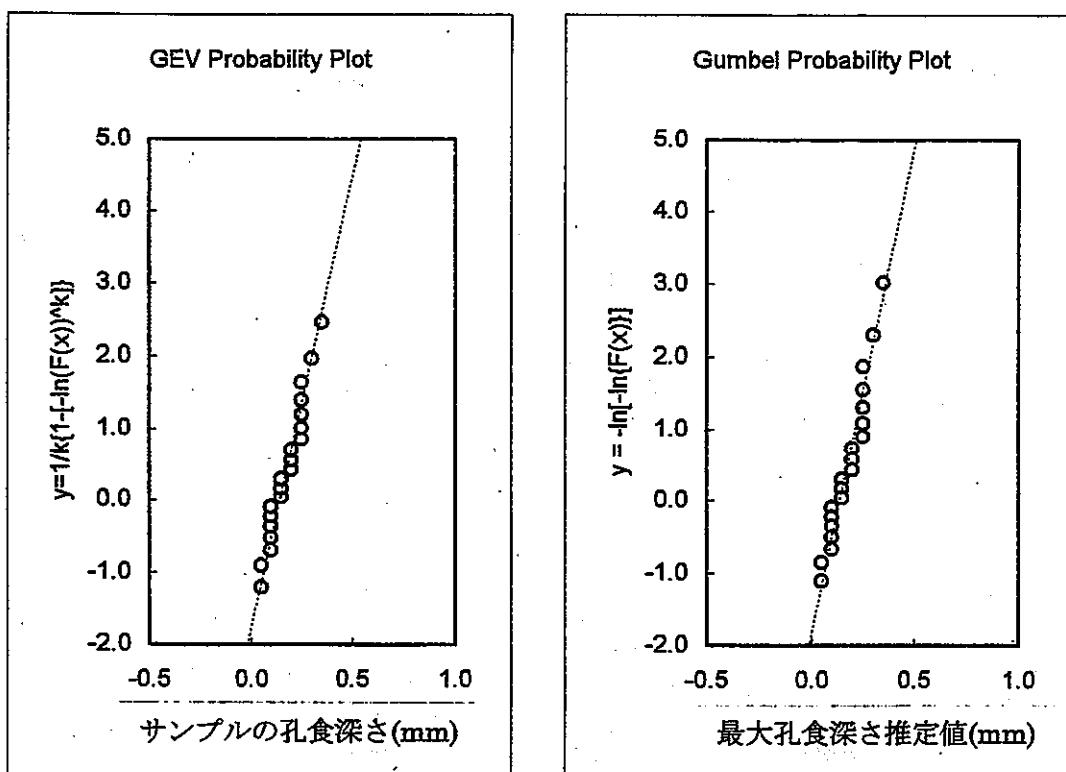
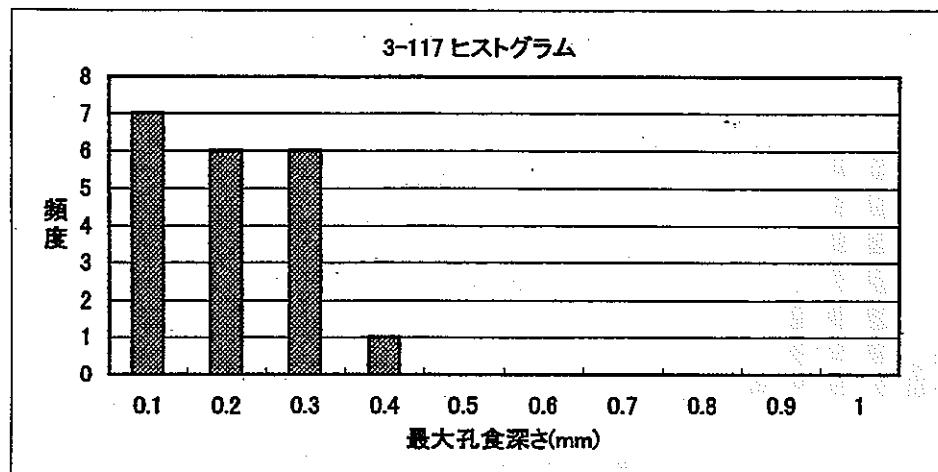


Figure-31 路線 No. 3-117 の極値統計解析結果

路線No. 4-102

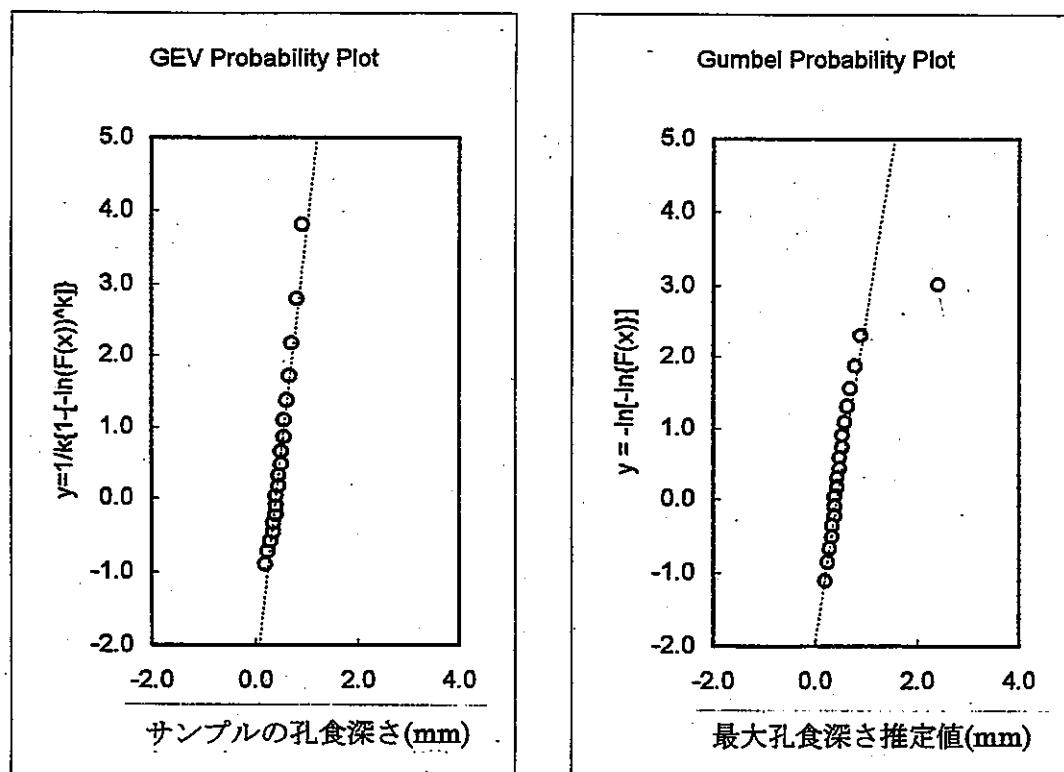
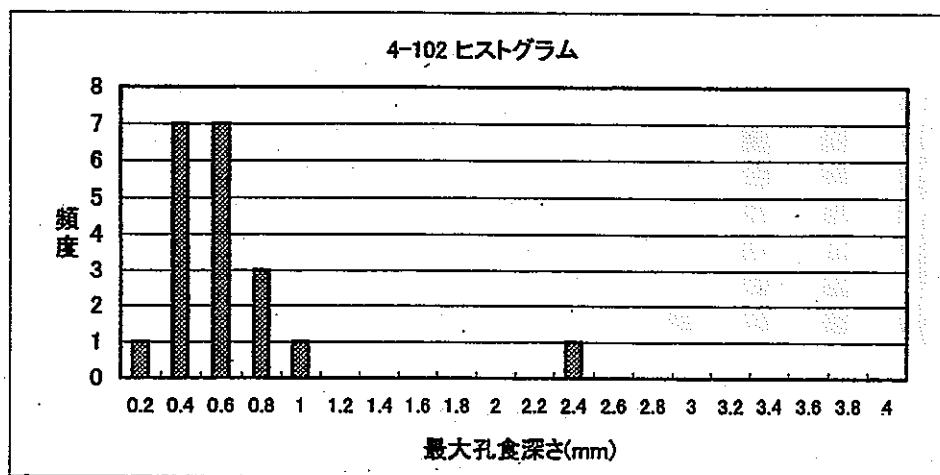


Figure-32 路線 No. 4-102 の極値統計解析結果

路線No. 5-105

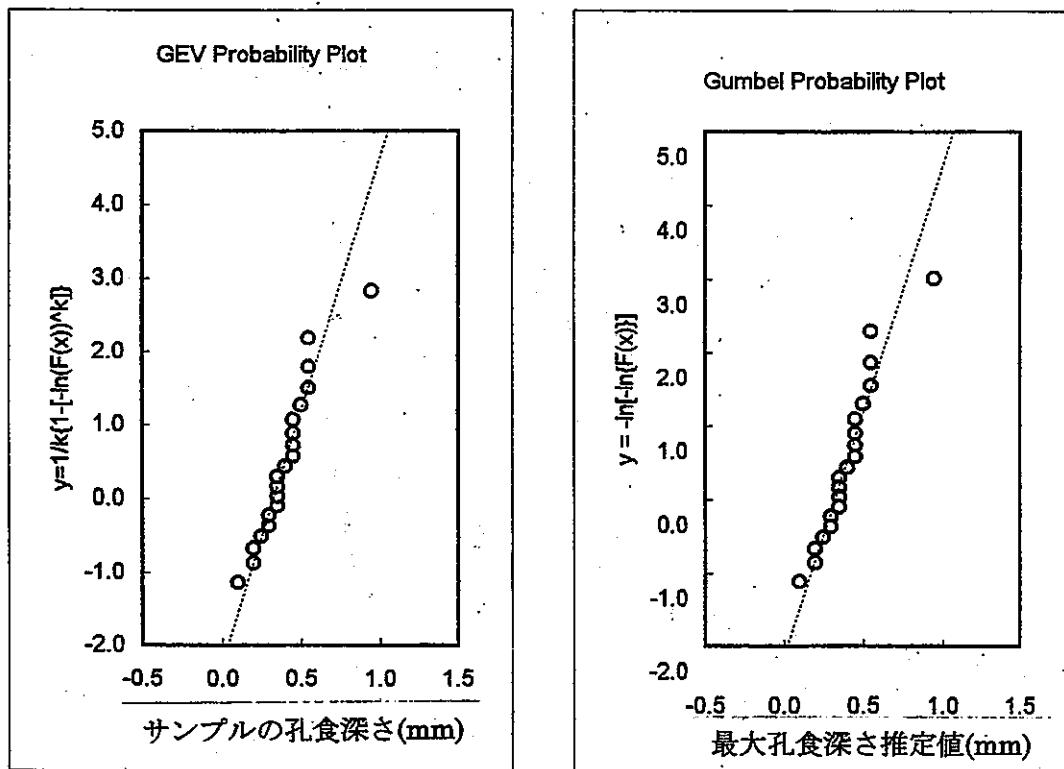
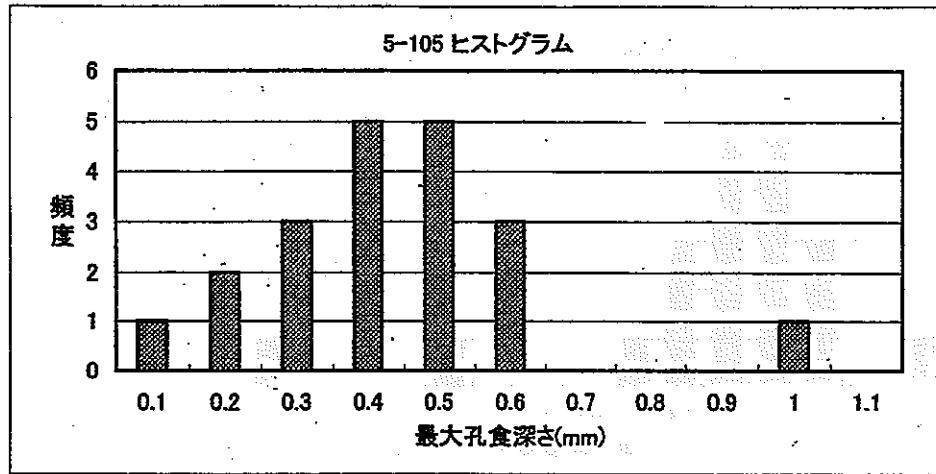


Figure-33 路線 No. 5-105 の極値統計解析結果

路線No. 5-106

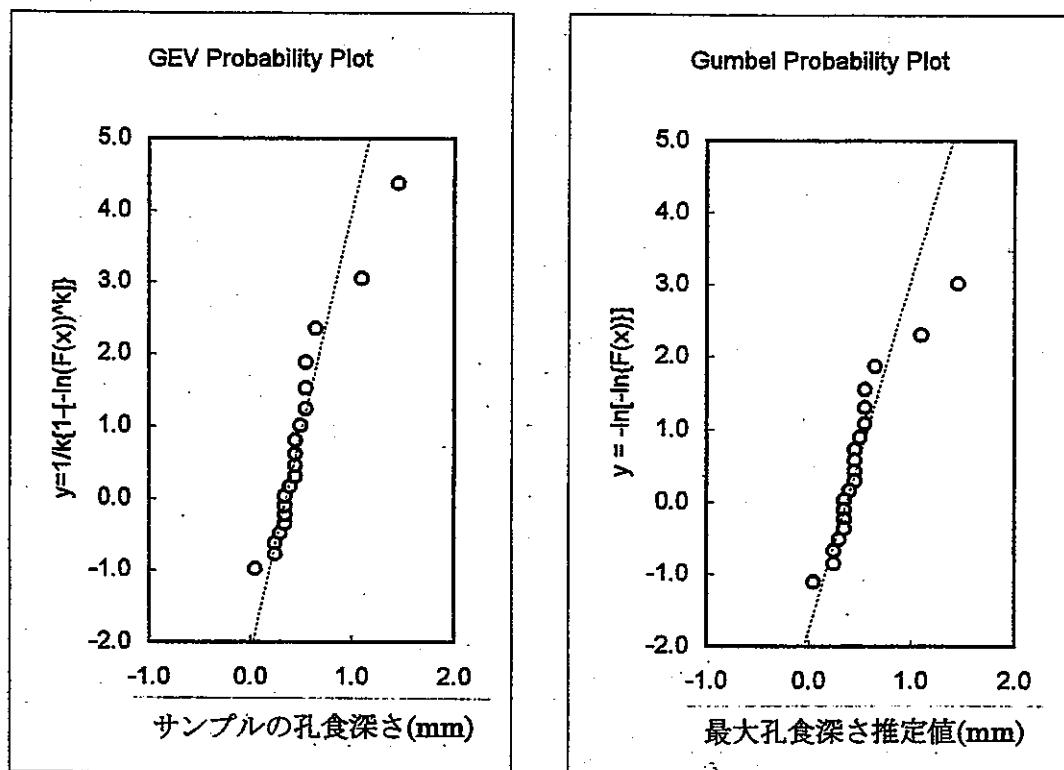
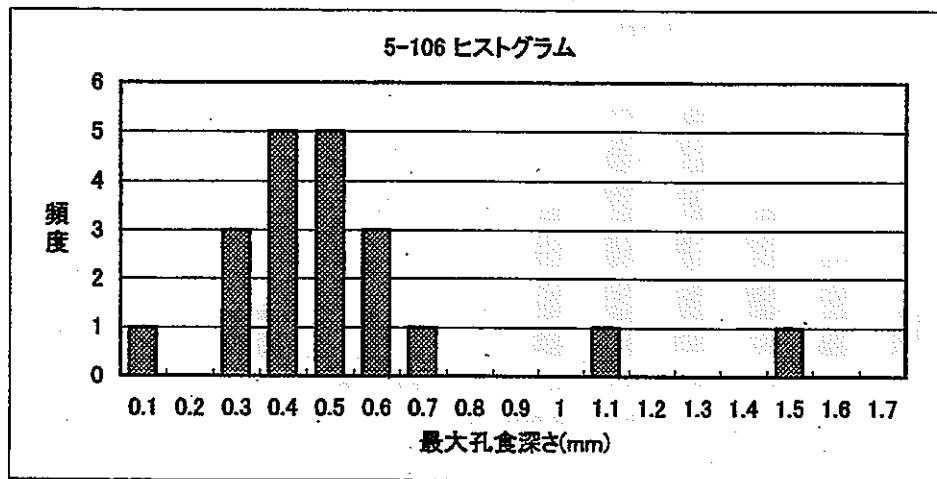


Figure-34 路線 No. 5-106 の極値統計解析結果

路線No. 6-2

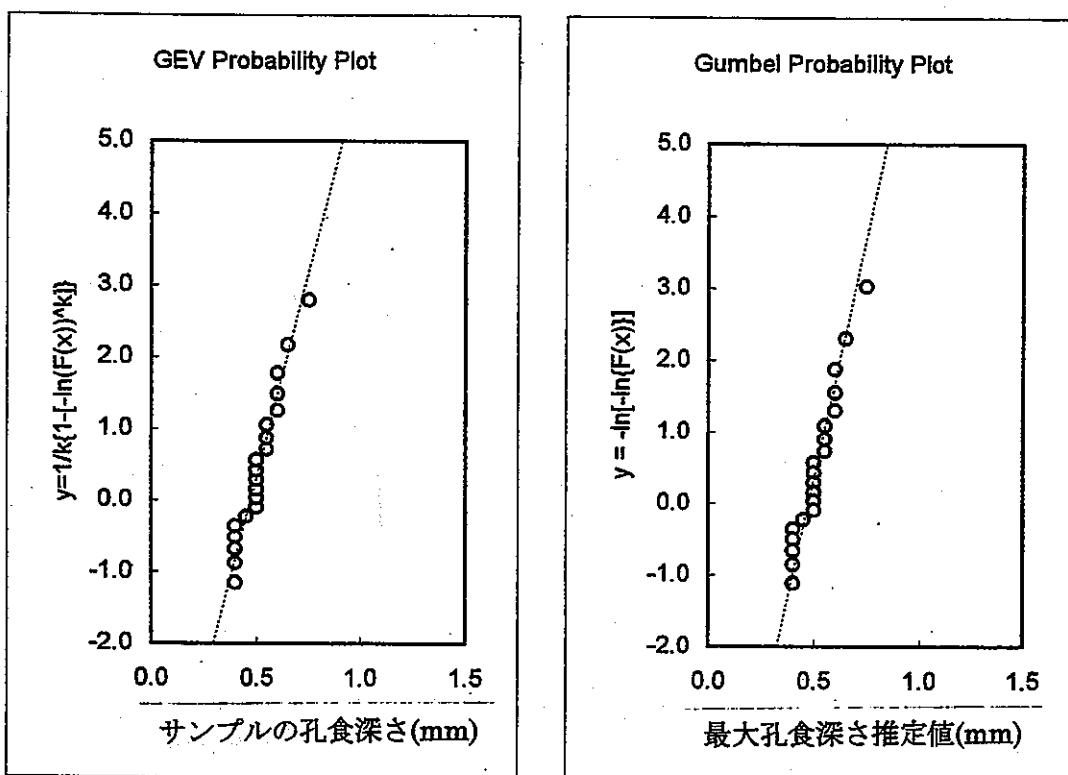
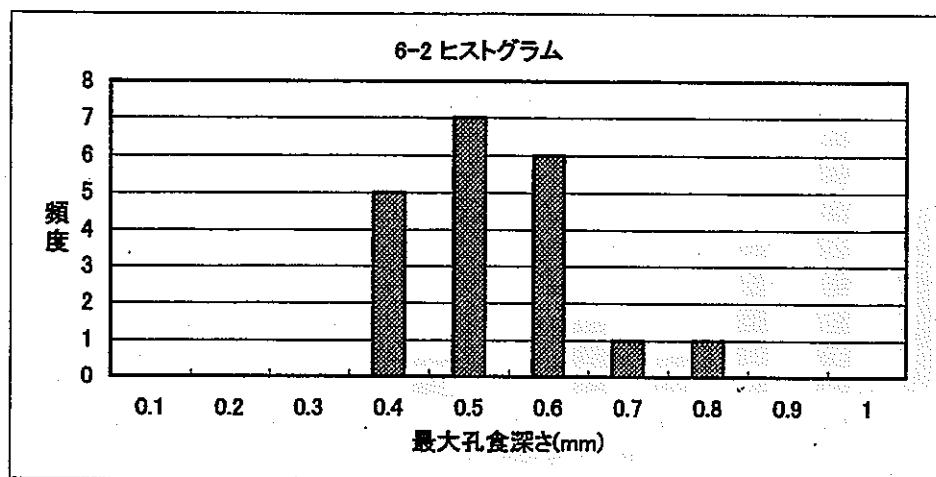


Figure-35 路線 No. 6-2 の極値統計解析結果

路線No. 6-5

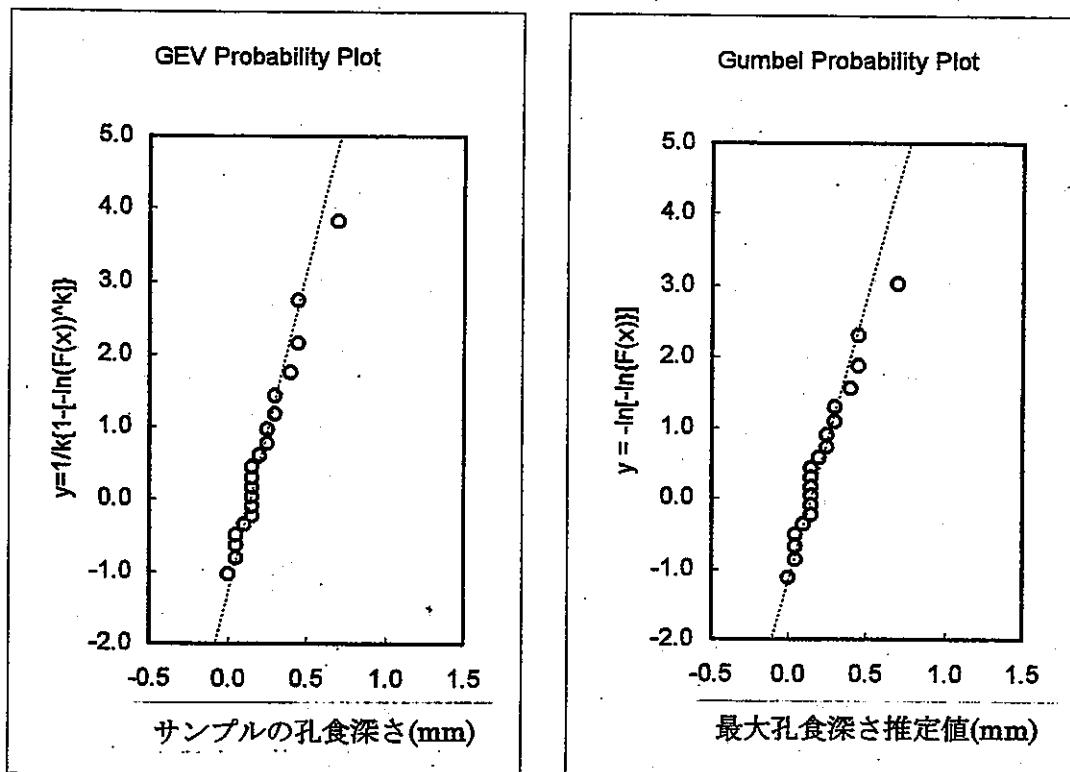
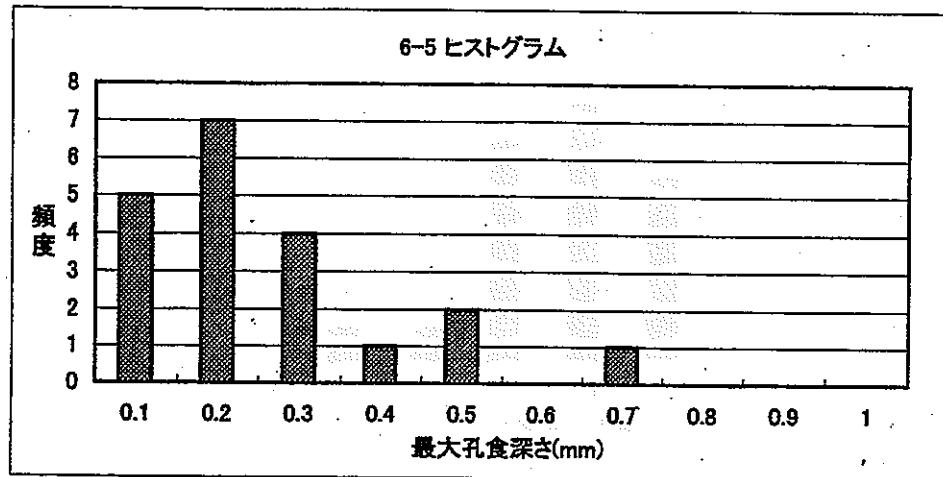


Figure-36 路線 No. 6-5 の極値統計解析結果

路線No. 7-106

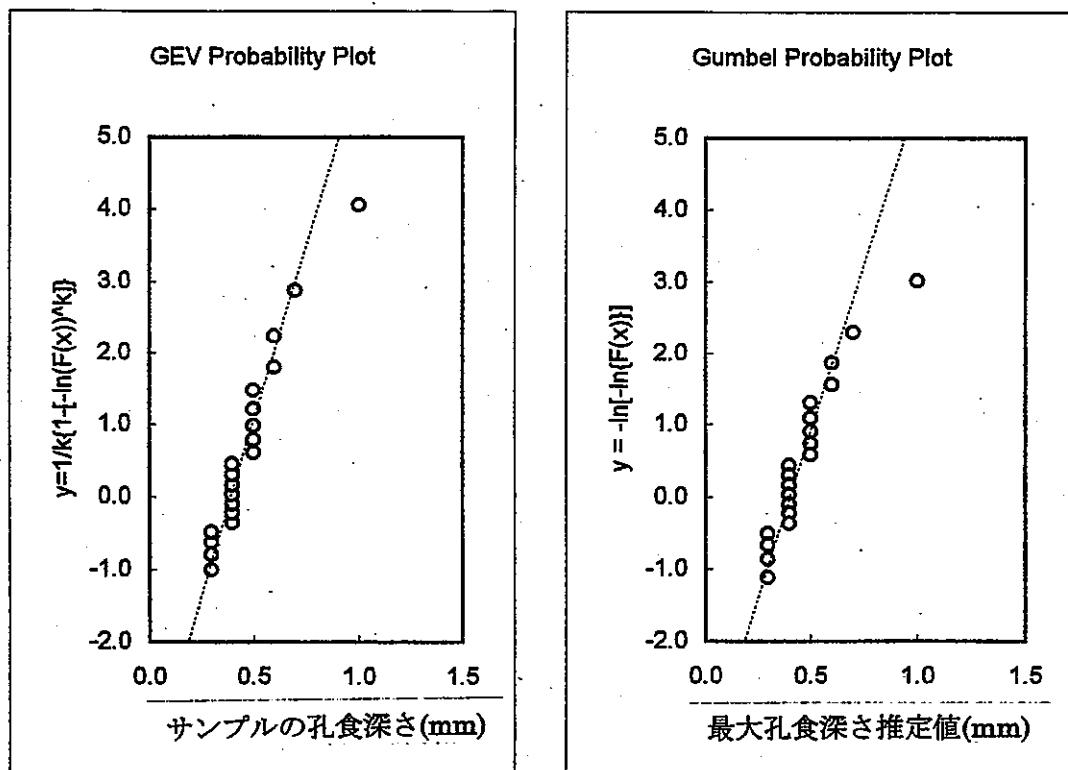
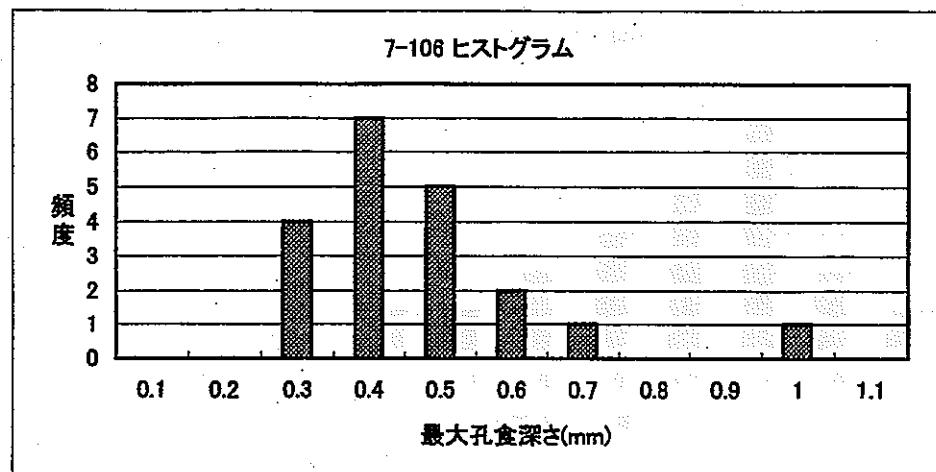


Figure-37 路線 No. 7-106 の極値統計解析結果

路線No. 7-104

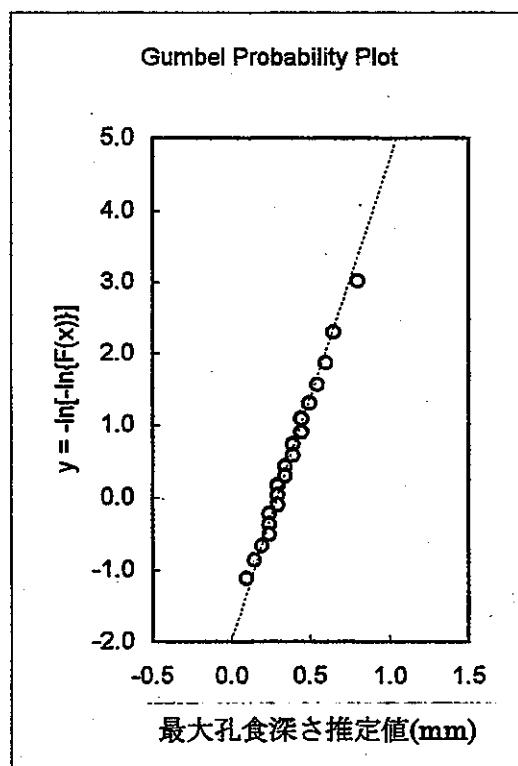
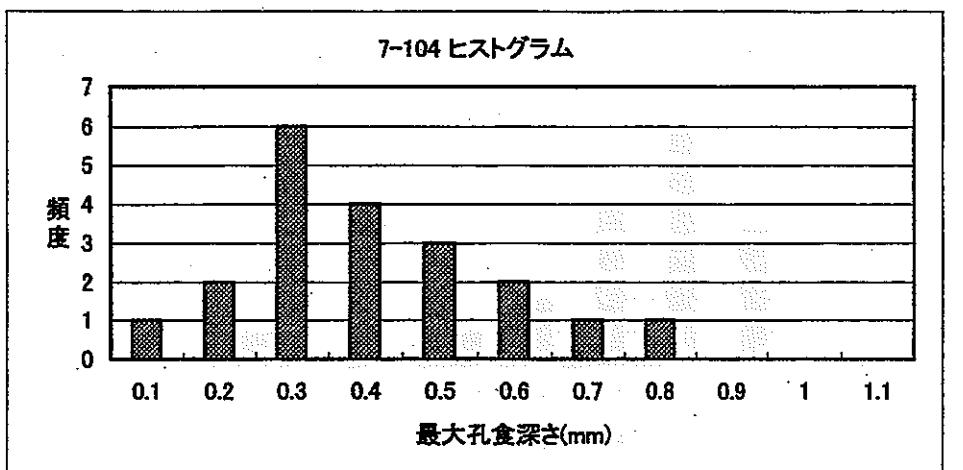


Figure-38 路線 No. 7-104 の極値統計解析結果

路線No. 7-1

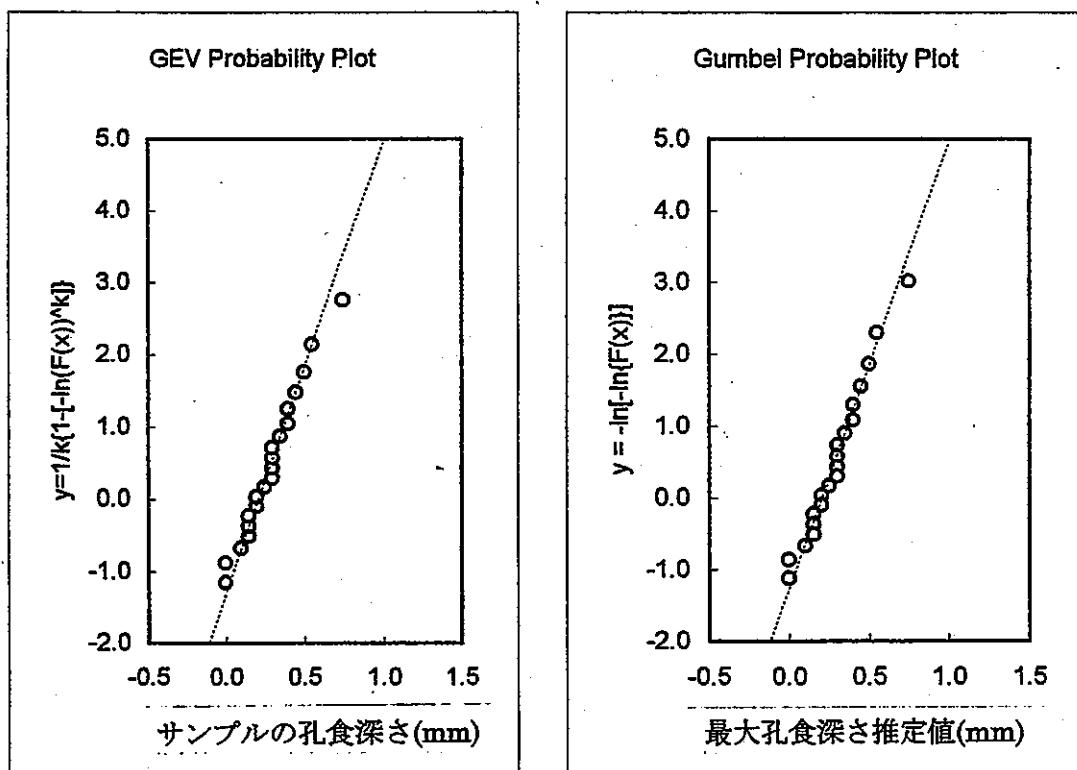
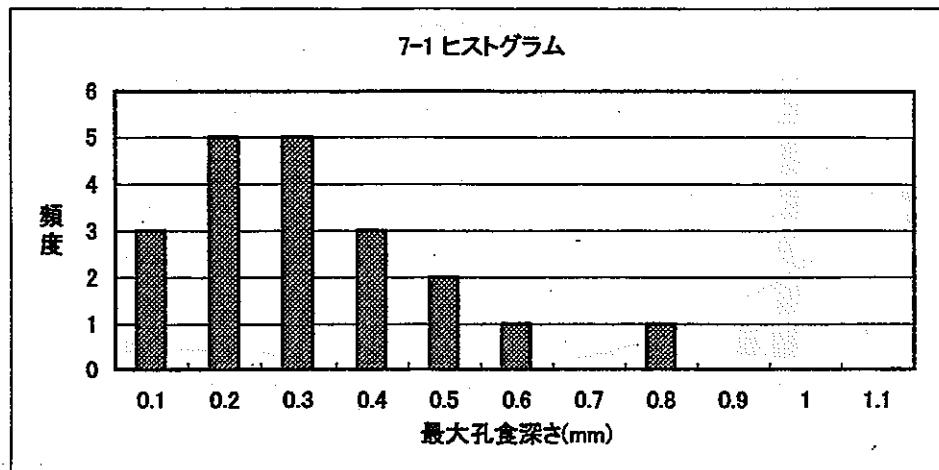


Figure-39 路線 No. 7-1 の極値統計解析結果

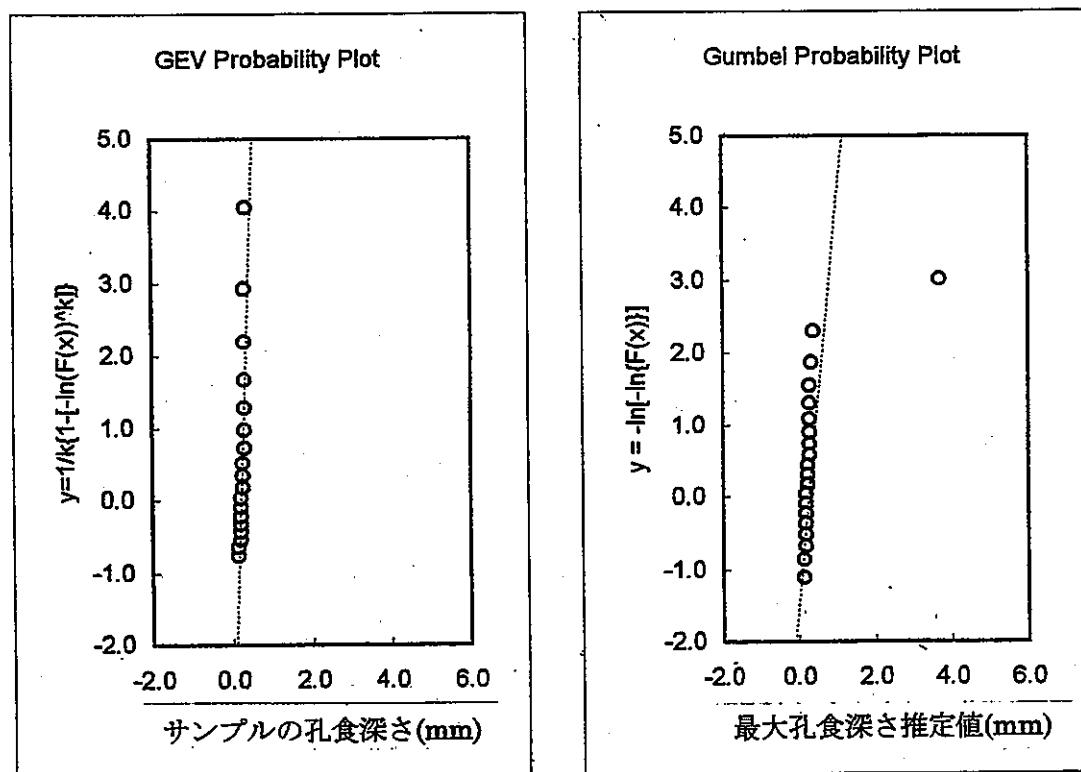
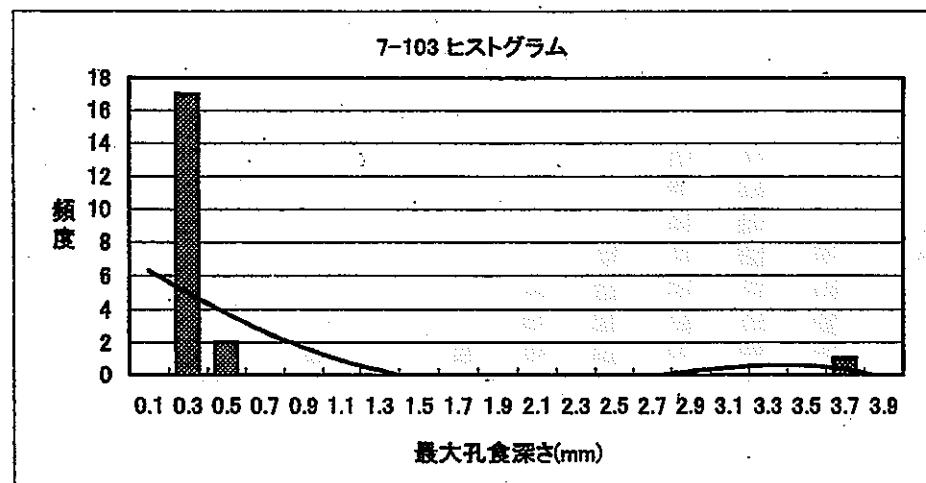
路線No. 7-103

Figure-40 路線 No. 7-103 の極値統計解析結果

路線No. 8-7

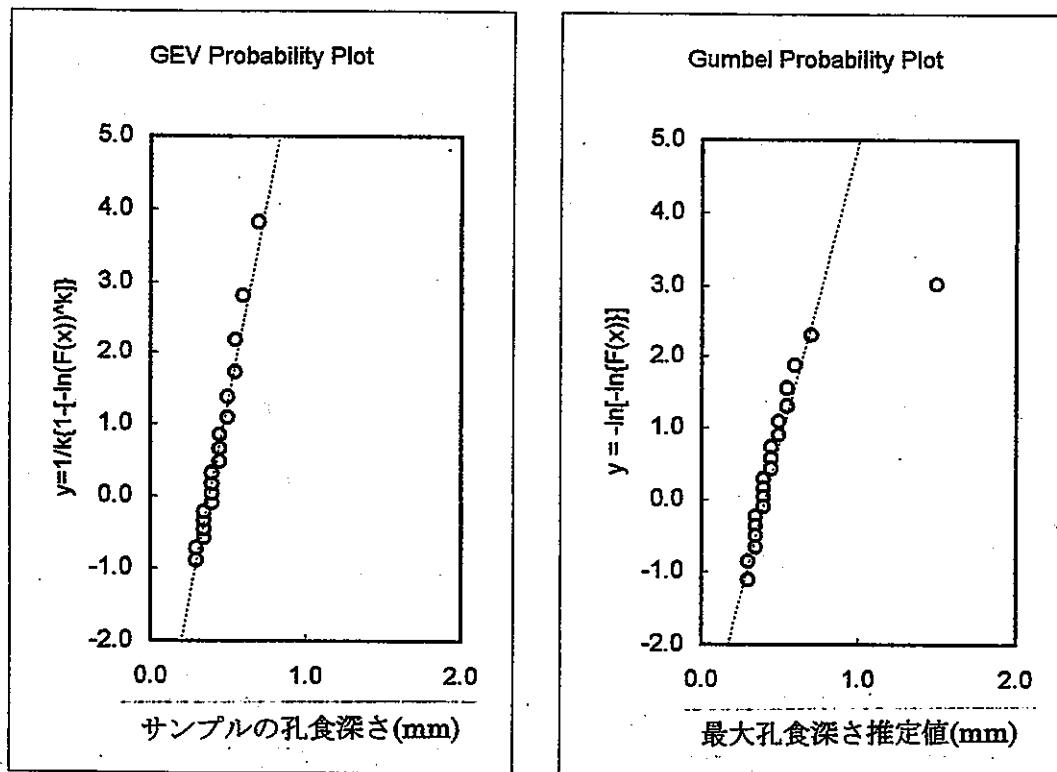
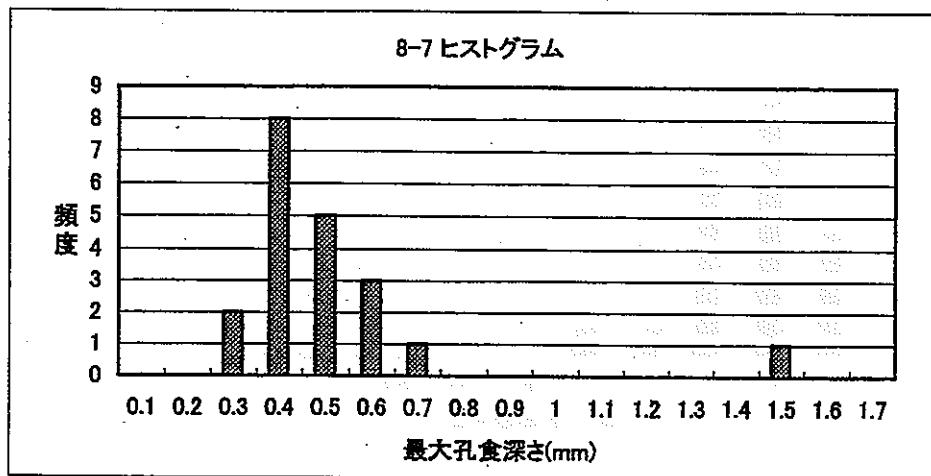


Figure-41 路線 No. 8-7 の極値統計解析結果

路線No. 8-117

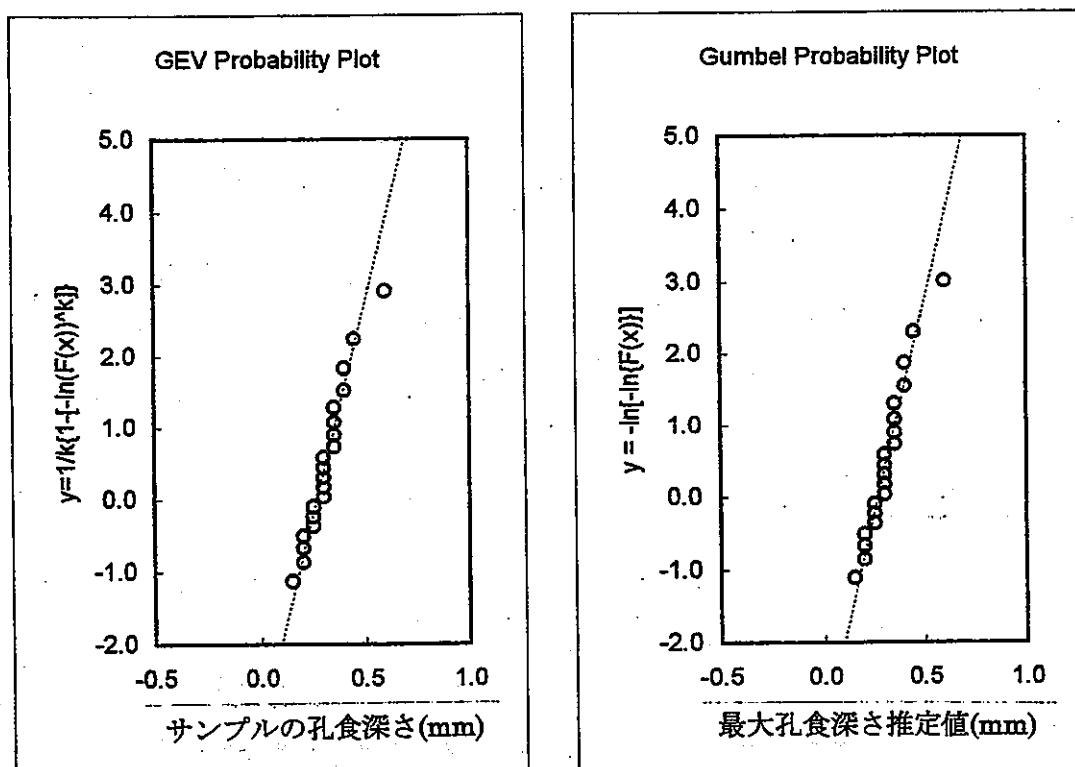
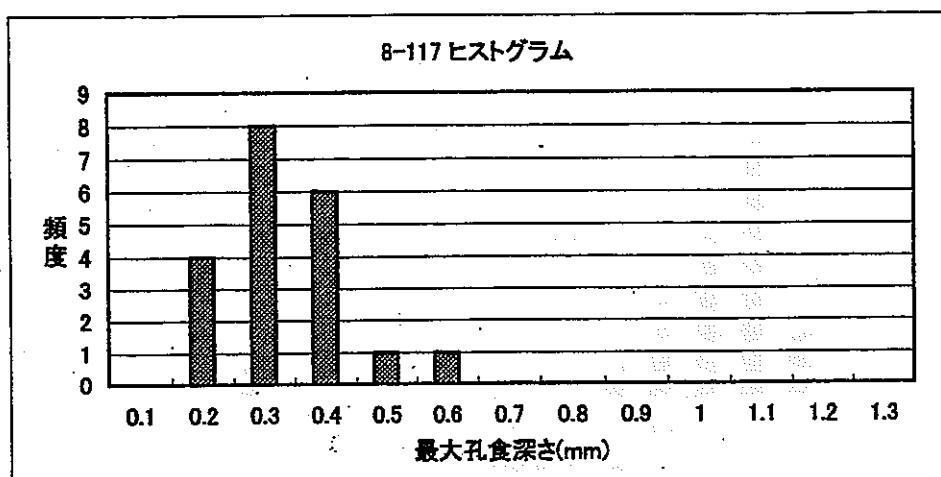


Figure-42 路線 No. 8-117 の極値統計解析結果

路線No. 8-109

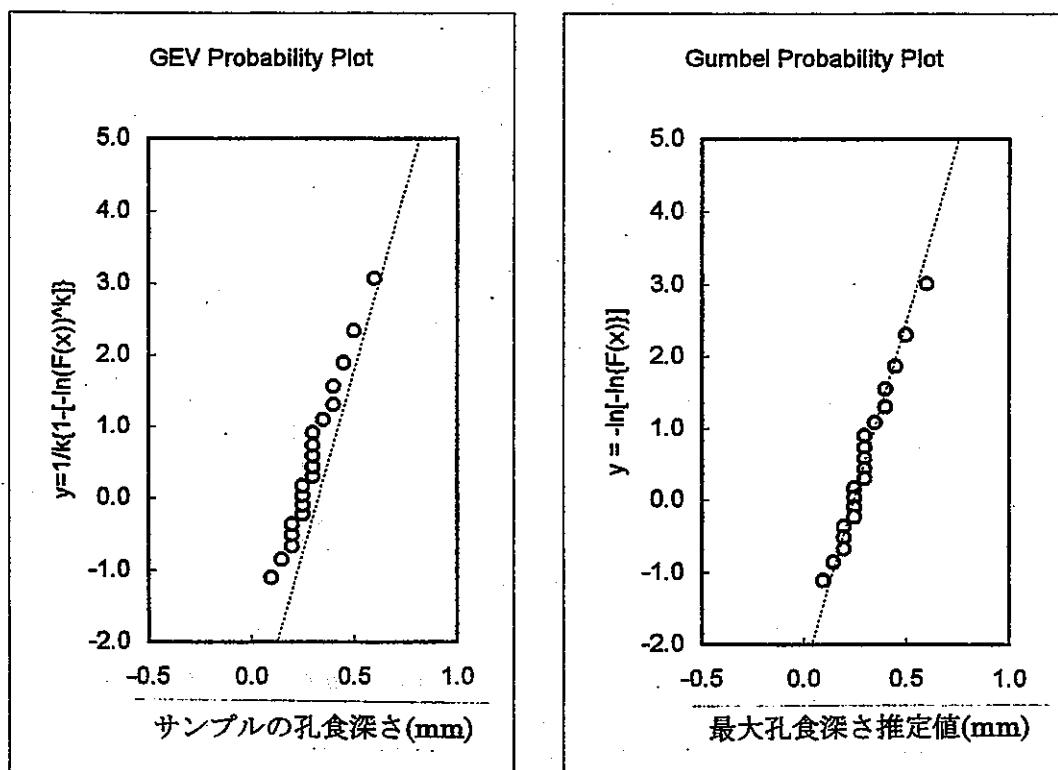
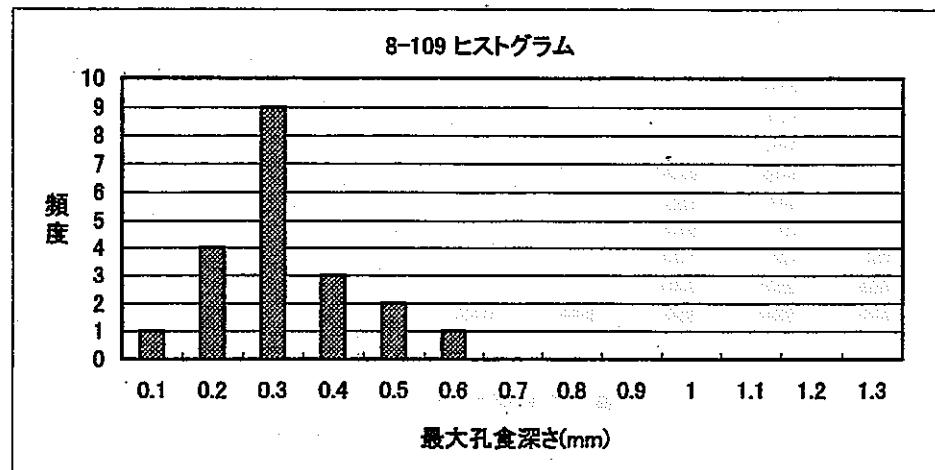


Figure-43 路線 No. 8-109 の極値統計解析結果

路線No. 8-110

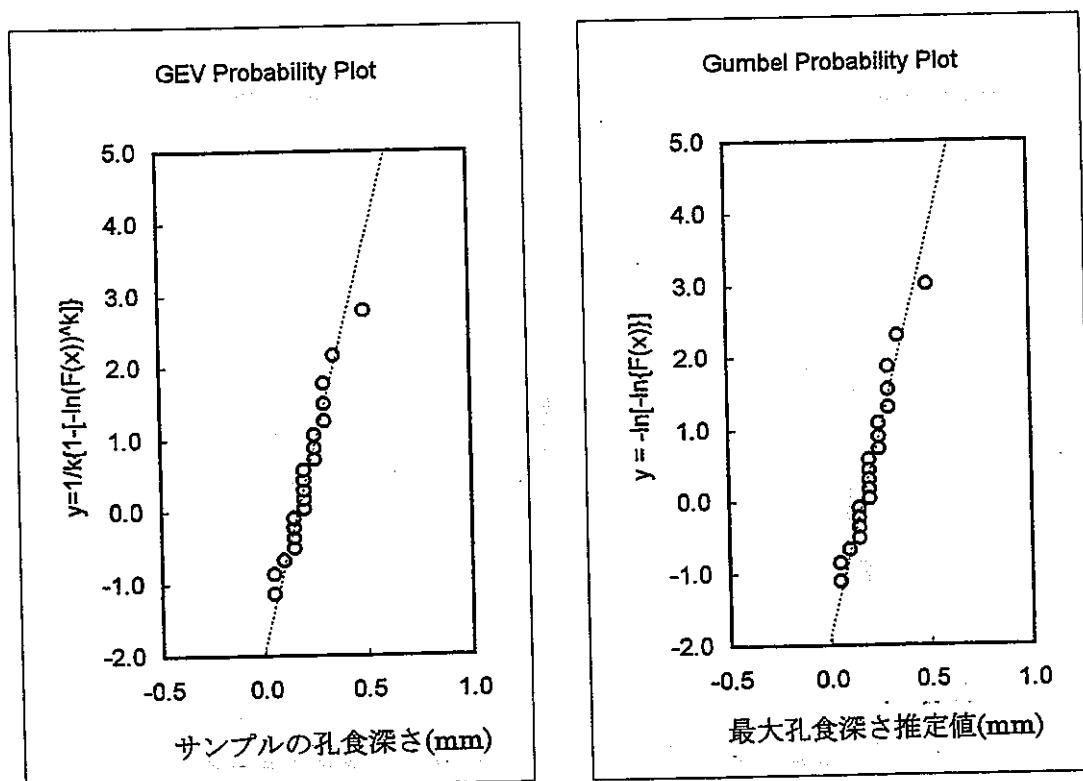
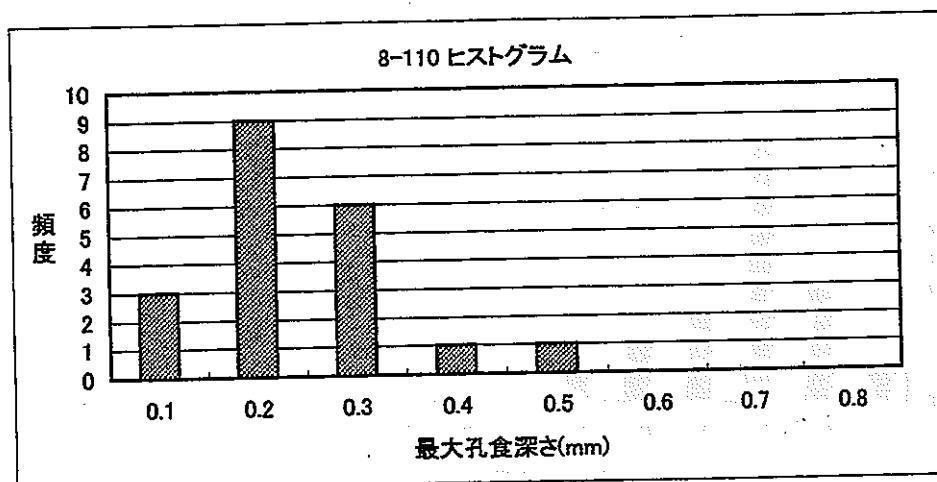


Figure-44 路線 No. 8-110 の極値統計解析結果

路線No. 8-107

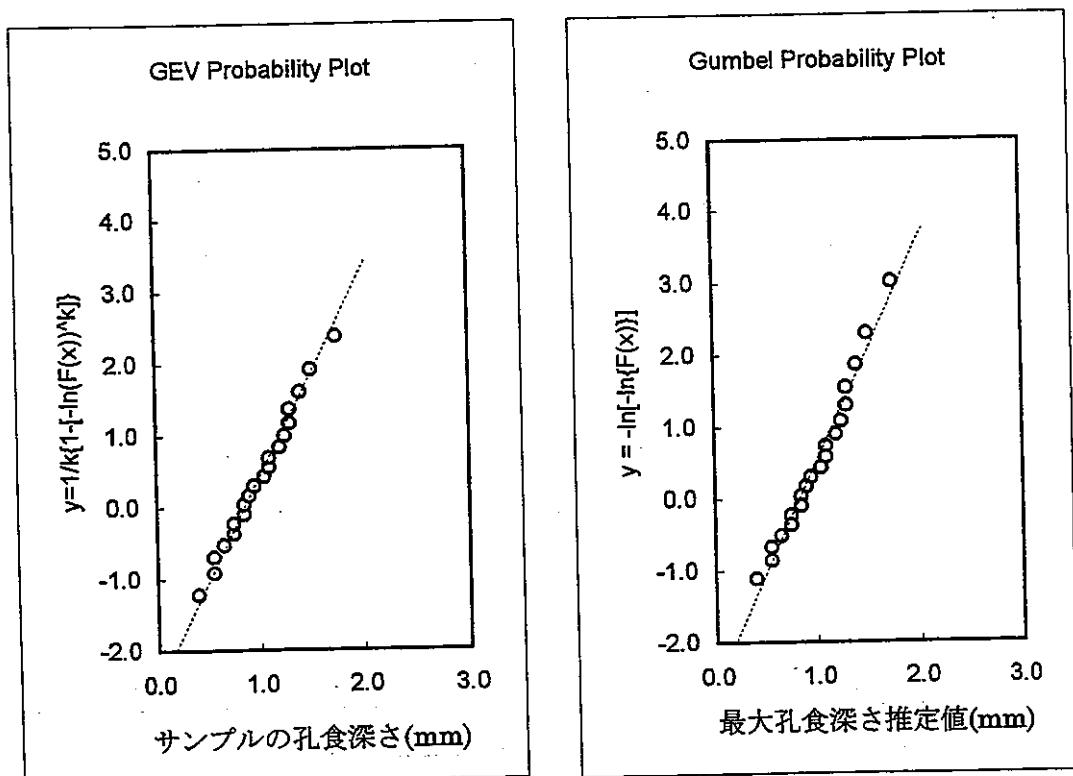
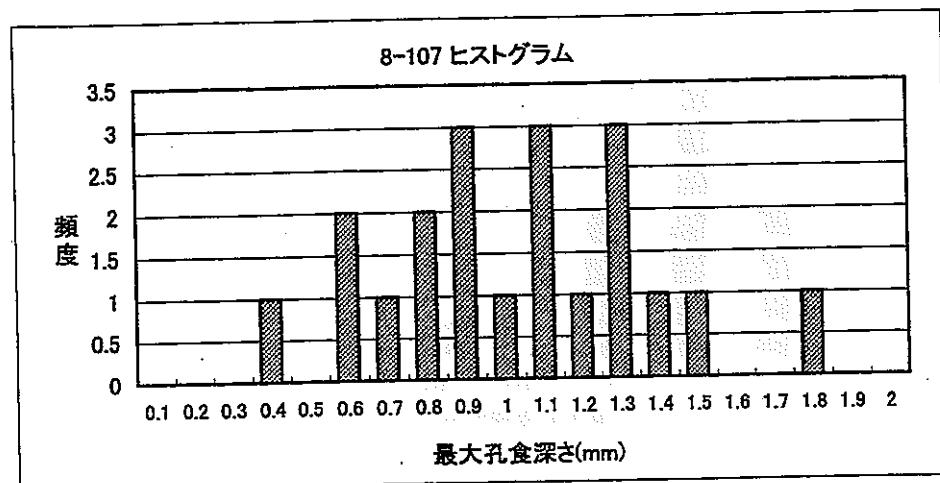


Figure-45 路線 No. 8-107 の極値統計解析結果

路線No. 8-122

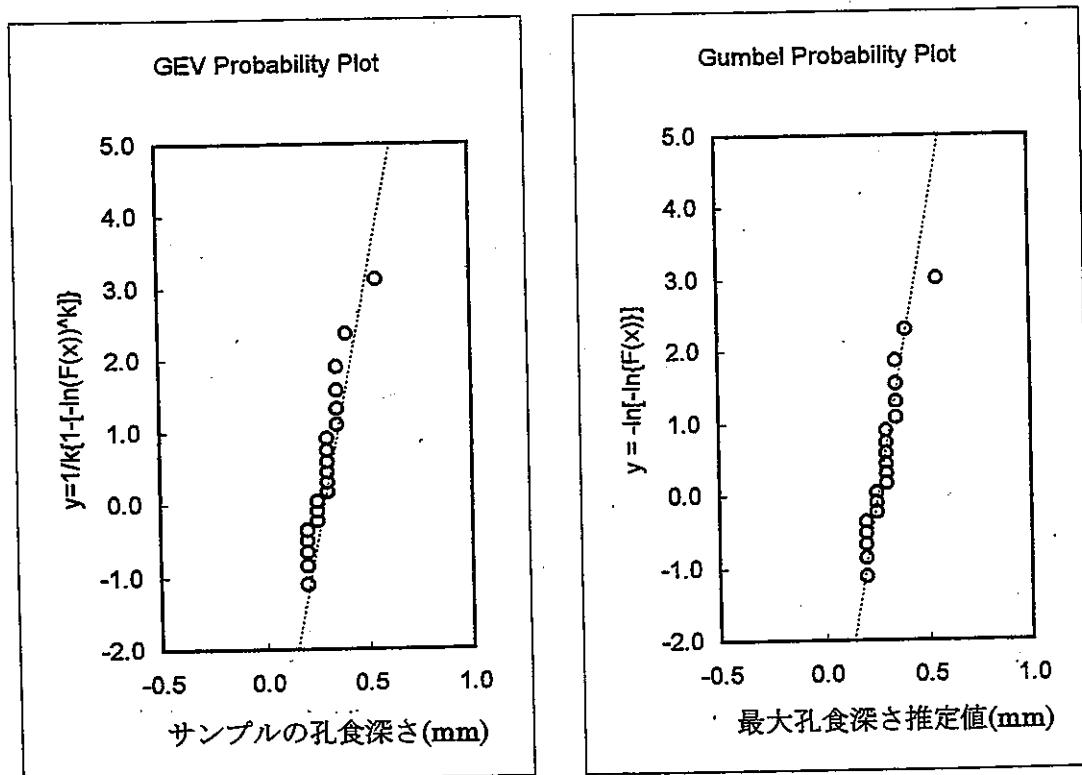
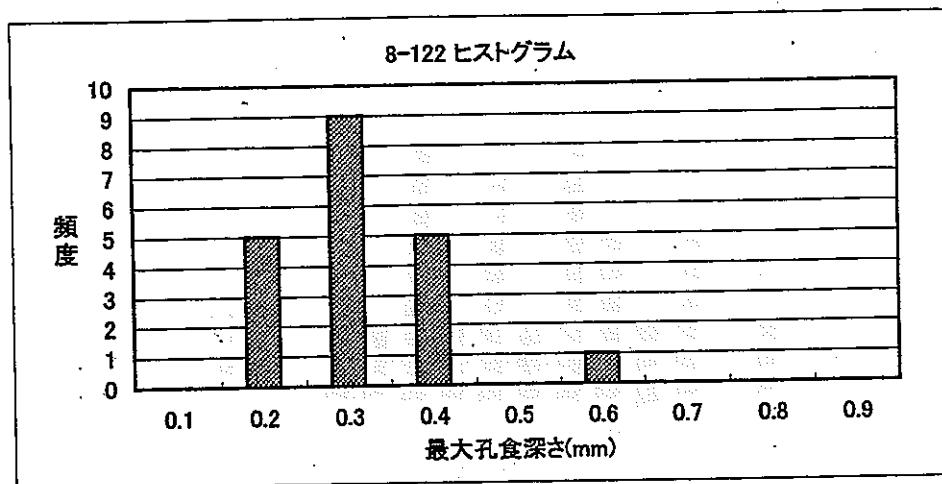


Figure-46 路線 No. 8-122 の極値統計解析結果

3. 粘土中埋設管の孔食深さと土壤環境因子

3.1 孔食深さ

簡易ガス 171 路線のデータから処分環境のベントナイトと類似である粘土を抽出するため、土壤比抵抗は水道管と同様の $5,500 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下とし、かつ粘土系土壤を抽出するため細粒分（ $74 \mu\text{m}$ 以下の含有量）は 30% 以上とし、pH は酸性土を除く 5.0 以上の路線とした。さらに、極値統計解析により、グンベル分布とならない路線も除外した。

この結果、抽出された路線は 38 路線となった。

この 38 路線の孔食深さと孔食腐食速度のデータを Table-2, 3 に示す。

(1) 孔食深さ

38 路線の中で最大孔食深さの最大は 2.50 mm で、その範囲は 0.30 mm～2.5 mm であり、全平均 0.87 mm であった。

38 路線の中で 0.1 m 長の平均孔食深さの最大は 1.04 mm であり、その範囲は 0.10 mm～1.04 mm であり、全平均は 0.38 mm であった。

(2) 孔食腐食速度 mm/y

孔食腐食速度 mm/y に直すと最大孔食孔食腐食速度は $0.01 \text{ mm}/y \sim 0.28 \text{ mm}/y$ で平均 $0.07 \text{ mm}/y$ であった。0.1 m 長の平均孔食孔食腐食速度は $0.00 \text{ mm}/y \sim 0.11 \text{ mm}/y$ で平均 $0.03 \text{ mm}/y$ であった。

(3) 孔食腐食速度 mm/\sqrt{y}

孔食腐食速度 mm/\sqrt{y} に直すと最大孔食孔食腐食速度は $0.07 \text{ mm}/\sqrt{y} \sim 0.83 \text{ mm}/\sqrt{y}$ で、平均 $0.25 \text{ mm}/\sqrt{y}$ であった。0.1 m 長の平均孔食孔食腐食速度は $0.02 \text{ mm}/\sqrt{y} \sim 0.34 \text{ mm}/\sqrt{y}$ で平均 $0.11 \text{ mm}/\sqrt{y}$ であった。

(4) 極値統計解析による最大孔食深さ推定値

38 路線の中で極値統計解析による最大孔食深さ推定値（最頻値）の最大値は 2.49 mm で、その範囲は 0.30 mm～2.49 mm であり、全平均 0.93 mm であった。

極値統計解析による累積確率0.99の最大孔食深さ推定値の最大値は4.35m
mで、その範囲は0.61mm～4.35mmであり、全平均1.58mmであった。

(5) 極値統計解析による最大孔食深さ推定値の孔食腐食速度 (mm/y)

極値統計解析による最大孔食深さ推定値（最頻値）の腐食速度の範囲は0.02mm
/y～0.28mm/yで平均0.08mm/yであった。

極値統計解析による累積確率0.99の最大孔食深さ推定値の腐食速度の範囲は0.
03mm/y～0.48mm/yで平均0.13mm/yであった。

(6) 極値統計解析による最大孔食深さ推定値の腐食速度 (mm·√y)

極値統計解析による最大孔食深さ推定値（最頻値）の腐食速度mm/√yの範囲は0.
07mm/√y～0.83mm/√yで、平均0.26mm/√yであった。

極値統計解析による累積確率0.99の最大孔食深さ推定値の腐食速度 (mm/√y)
の範囲は0.13mm/√y～1.45mm/√yで平均0.45mm/√yであった。

Table-2 腐食深さ、腐食速度（実測値）

路線 No.		最大孔食 深さ(mm)	平均孔食 深さ(mm)	最大/y mm/y	平均/y mm/y	最大/ \sqrt{y} mm/y	平均/ \sqrt{y} mm/y
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	0-6	0.75	0.28	0.11	0.04	0.28	0.11
2	1-5	0.65	0.32	0.09	0.05	0.25	0.12
3	2-9	1.10	0.45	0.12	0.05	0.37	0.15
4	2-22	0.85	0.41	0.07	0.03	0.24	0.11
5	2-24	2.50	0.95	0.28	0.11	0.83	0.32
6	6-2	0.75	0.52	0.04	0.03	0.18	0.13
7	6-5	0.70	0.22	0.06	0.02	0.20	0.06
8	7-1	0.75	0.29	0.03	0.01	0.16	0.06
9	0-106	0.75	0.35	0.08	0.04	0.25	0.12
10	0-107	0.35	0.16	0.03	0.01	0.09	0.04
11	1-103	1.20	0.36	0.11	0.03	0.36	0.11
12	1-106	1.00	0.54	0.06	0.03	0.24	0.13
13	1-108	0.80	0.32	0.09	0.04	0.27	0.11
14	1-109	0.60	0.29	0.04	0.02	0.16	0.08
15	1-110	0.60	0.30	0.07	0.03	0.20	0.10
16	1-111	1.10	0.36	0.09	0.03	0.32	0.10
17	2-101	0.45	0.17	0.05	0.02	0.14	0.05
18	2-103	0.80	0.42	0.07	0.04	0.23	0.12
19	2-108	0.40	0.21	0.04	0.02	0.12	0.06
20	2-112	0.30	0.10	0.01	0.00	0.07	0.02
21	2-117	1.55	0.53	0.09	0.03	0.38	0.13
22	2-119	1.20	0.36	0.06	0.02	0.26	0.08
23	2-120	0.85	0.44	0.05	0.03	0.21	0.11
24	2-121	0.40	0.18	0.02	0.01	0.09	0.04
25	2-123	0.80	0.26	0.09	0.03	0.27	0.09
26	3-105	0.60	0.32	0.04	0.02	0.15	0.08
27	3-106	0.60	0.34	0.03	0.02	0.14	0.08
28	3-110	1.95	1.04	0.11	0.06	0.47	0.25
29	3-117	0.35	0.18	0.04	0.02	0.11	0.06
30	5-105	0.95	0.40	0.11	0.04	0.32	0.13
31	5-106	1.45	0.49	0.06	0.02	0.30	0.10
32	7-104	0.80	0.38	0.05	0.02	0.19	0.09
33	7-106	1.00	0.47	0.08	0.04	0.28	0.13
34	8-107	1.75	1.01	0.19	0.11	0.58	0.34
35	8-109	0.60	0.30	0.09	0.04	0.23	0.11
36	8-110	0.50	0.22	0.03	0.01	0.12	0.05
37	8-117	0.60	0.31	0.05	0.03	0.17	0.09
38	8-122	0.55	0.30	0.03	0.02	0.14	0.08
平均値		0.87	0.38	0.07	0.03	0.25	0.11
最大値		2.50	1.04	0.28	0.11	0.83	0.34
最小値		0.30	0.10	0.01	0.00	0.07	0.02
標準偏差			0.47	0.21	0.05	0.02	0.15
							0.07

Table-3 腐食深さ、腐食速度（極値統計解析値）

No	路線 No.	極 値 統 計							
		パラメーター		最大孔食深さ(mm)		腐食速度(mm/y)		腐食速度(mm/ \sqrt{y})	
		α	λ	最頻値	累積確率0.99	最頻値	累積確率0.99	最頻値	累積確率0.99
1	0-6	0.13	0.20	0.79	1.40	0.11	0.20	0.30	0.53
2	1-5	0.11	0.25	0.74	1.25	0.11	0.18	0.28	0.47
3	2-9	0.22	0.33	1.32	2.35	0.15	0.26	0.44	0.78
4	2-22	0.11	0.34	0.85	1.38	0.07	0.11	0.24	0.38
5	2-24	0.40	0.70	2.49	4.35	0.28	0.48	0.83	1.45
6	6-2	0.07	0.47	0.80	1.15	0.05	0.07	0.19	0.28
7	6-5	0.13	0.15	0.71	1.29	0.06	0.11	0.20	0.37
8	7-1	0.16	0.20	0.92	1.66	0.04	0.08	0.20	0.35
9	0-106	0.15	0.27	0.94	1.64	0.10	0.18	0.31	0.55
10	0-107	0.07	0.12	0.43	0.76	0.03	0.05	0.12	0.20
11	1-103	0.17	0.26	1.01	1.78	0.09	0.16	0.30	0.54
12	1-106	0.17	0.45	1.20	1.98	0.07	0.12	0.29	0.48
13	1-108	0.11	0.25	0.73	1.22	0.08	0.14	0.24	0.41
14	1-109	0.11	0.22	0.70	1.20	0.05	0.09	0.19	0.32
15	1-110	0.10	0.24	0.67	1.10	0.07	0.12	0.22	0.37
16	1-111	0.21	0.22	1.18	2.16	0.10	0.18	0.34	0.62
17	2-101	0.06	0.13	0.42	0.71	0.04	0.07	0.13	0.23
18	2-103	0.12	0.35	0.90	1.46	0.07	0.12	0.26	0.42
19	2-108	0.07	0.17	0.49	0.82	0.04	0.07	0.15	0.25
20	2-112	0.06	0.07	0.33	0.61	0.02	0.03	0.07	0.13
21	2-117	0.23	0.38	1.42	2.50	0.08	0.15	0.34	0.61
22	2-119	0.15	0.27	0.93	1.61	0.04	0.08	0.20	0.35
23	2-120	0.15	0.35	1.03	1.73	0.06	0.10	0.25	0.42
24	2-121	0.06	0.15	0.42	0.70	0.02	0.03	0.09	0.15
25	2-123	0.14	0.17	0.77	1.40	0.09	0.16	0.26	0.47
26	3-105	0.10	0.26	0.72	1.20	0.05	0.08	0.18	0.30
27	3-106	0.09	0.29	0.70	1.13	0.04	0.06	0.16	0.26
28	3-110	0.33	0.87	2.32	3.83	0.14	0.23	0.56	0.93
29	3-117	0.07	0.14	0.47	0.81	0.05	0.08	0.15	0.26
30	5-105	0.15	0.32	0.99	1.68	0.11	0.19	0.33	0.56
31	5-106	0.21	0.37	1.28	2.23	0.06	0.10	0.27	0.47
32	7-104	0.15	0.30	0.96	1.64	0.06	0.10	0.23	0.40
33	7-106	0.11	0.40	0.88	1.37	0.07	0.11	0.24	0.38
34	8-107	0.32	0.83	2.27	3.76	0.25	0.42	0.76	1.25
35	8-109	0.10	0.25	0.70	1.17	0.10	0.17	0.26	0.44
36	8-110	0.09	0.17	0.56	0.98	0.03	0.06	0.14	0.24
37	8-117	0.08	0.26	0.64	1.03	0.05	0.09	0.19	0.30
38	8-122	0.06	0.26	0.53	0.82	0.03	0.05	0.13	0.20
平均値		0.14	0.30	0.93	1.58	0.08	0.13	0.26	0.45
最大値		0.40	0.87	2.49	4.35	0.28	0.48	0.83	1.45
最小値		0.06	0.07	0.33	0.61	0.02	0.03	0.07	0.13
標準偏差		0.08	0.18	0.50	0.86	0.05	0.09	0.16	0.27

3.2 土壌環境因子

抽出された路線の土壌環境因子をTable-4、5に示す。このデータから

(1) 管対地電位

管対地電位（飽和硫酸銅電極基準）の範囲は $-566\text{ mV} \sim -820\text{ mV}$ で、平均 -706 mV であった。最卑電位が -820 mV と卑な電位なのは管表面に亜鉛が残っており、この電位を計測したものと考えられる。

(2) プローブ孔食腐食速度

プローブ孔食腐食速度は $0.060\text{ mm/y} \sim 0.285\text{ mm/y}$ の範囲にあり、平均は 0.126 mm/y であった。

(3) プローブ分極抵抗

プローブ分極抵抗は $100\Omega \sim 747\Omega$ の範囲にあり、平均は 284Ω であり、全体に低く粘土系の分極抵抗である。

(4) プローブ土壤比抵抗

プローブ土壤比抵抗は $908\Omega \cdot \text{cm} \sim 5,322\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、平均は $2,887\Omega \cdot \text{cm}$ であった。全体に低く粘土系の比抵抗である。

(5) 土壌杖土壤比抵抗

土壌杖土壤比抵抗は $827\Omega \cdot \text{cm} \sim 6,735\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、平均は $2,890\Omega \cdot \text{cm}$ であった。プローブ土壤比抵抗とほぼ同様である。

(6) 酸化還元電位 (Redox)

酸化還元電位は $83\text{ mV} \sim 528\text{ mV}$ の範囲であり、平均は 362 mV と弱酸化性（土中の酸素が大気開放状態よりやや少なく酸化性がやや弱い状態）である。

(7) プローブ自然電位

プローブ自然電位は $-729\text{ mV} \sim -826\text{ mV}$ の範囲であり、平均は -773 mV である。

(8) 土壌 pH

土壌 pH は 5.1 ~ 7.7 の範囲であり、平均は 6.6 で、中性環境であった。明らかに海性粘土といえるものは見られない。

(9) 含水比

含水比は 13% ~ 68% の範囲であり、平均は 31% である。

(10) 細粒分

細粒分はふるいによる $74 \mu\text{m}$ 以下の土壌の含有量であるが、30% ~ 79% であり、平均は 46% であった。この 30% の値は土質的には砂質が多い土壌であるがいずれも土壌比抵抗が低い。この抵抗からみるとシルトに近いと考えられる。50% 以上はシルト ~ 粘土と考えられる。

(11) 土壌箱土壤比抵抗 (注水せず)

土壌箱土壤比抵抗 1, 200 $\Omega \cdot \text{cm}$ ~ 32, 500 $\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、平均は 9, 987 $\Omega \cdot \text{cm}$ であった。この測定は締め固めが難しく、バラツキが多い。

(12) 注水土壤箱土壤比抵抗

注水土壤箱土壤比抵抗 1, 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ ~ 13, 300 $\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、平均は 6, 016 $\Omega \cdot \text{cm}$ であった。

(13) 塩化物

塩化物含有量は 20 mg/k g ~ 180 mg/k g の範囲であり、平均 50 mg/k g であった。この中で、5-105 の路線が 180 mg/k g と大きい。この次の値は 88 mg/k g である。なお、本分析は試料を 2.5 倍の蒸留水に抽出したものを分析している。

(14) 硫酸塩

硫酸塩含有量は 5 mg/k g ~ 1,030 mg/k g の範囲にあり、平均は 220 mg/k g であった。なお、本分析は試料を 2.5 倍の蒸留水に抽出したものを分析している。

(15) KMnO₄消費量

KMnO₄消費量は28mg/kg~765mg/kgの範囲であり、平均は158mg/kgであった。

Table-4 土壌環境調査結果（その1）

	路線 No.	管対地 電位(mv)	Pr腐食速 度(mm/y)	Pr分極抵 抗(Ω)	ρ (プローブ) Ω-cm	ρ (土壤杖) Ω-cm	Redox mv	Pr自然電 位(mv)	pH
		X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25
1	0-6	-710	0.082	317	4,303	4,050	401	-787	6.3
2	1-5	-820	0.083	747	2,903	1,591	416	-747	7.1
3	2-9	-655	0.082	346	2,961	6,735	342	-799	6.8
4	2-22	-743	0.112	321	2,201	1,920	345	-768	5.5
5	2-24	-566	0.060	468	3,651	3,651	298	-771	6.6
6	6-2	-690	0.079	393	4,845	4,250	528	-793	6.7
7	6-5	-717	0.063	431	5,198	4,350	377	-771	7.1
8	7-1	-632	0.085	282	4,803	4,725	485	-777	6.8
9	0-106	-729	0.127	215	5,177	5,125	481	-729	6.9
10	0-107	-803	0.079	327	1,948	2,242	365	-762	5.1
11	1-103	-708	0.104	314	3,067	2,900	371	-736	6.1
12	1-106	-633	0.210	136	2,238	2,333	344	-749	6.1
13	1-108	-697	0.086	282	2,567	2,607	446	-759	6.5
14	1-109	-681	0.285	100	3,517	3,383	252	-731	5.8
15	1-110	-748	0.095	347	2,300	1,783	354	-746	6.4
16	1-111	-625	0.241	165	2,137	2,175	433	-759	7.7
17	2-101	-678	0.233	135	1,433	1,230	402	-792	6.7
18	2-103	-702	0.197	149	1,017	1,343	227	-789	6.7
19	2-108	-668	0.078	348	4,637	3,750	128	-775	6.8
20	2-112	-690	0.136	209	2,138	3,240	211	-747	7.6
21	2-117	-808	0.117	248	2,863	2,200	320	-807	6.2
22	2-119	-722	0.172	183	1,238	1,337	520	-783	6.6
23	2-120	-710	0.267	108	1,279	3,248	497	-750	6.6
24	2-121	-655	0.064	435	2,055	2,083	370	-758	6.3
25	2-123	-672	0.179	176	3,963	4,183	437	-777	6.3
26	3-105	-760	0.094	332	1,497	1,500	409	-794	6.9
27	3-106	-755	0.110	247	2,548	2,350	83	-783	6.9
28	3-110	-690	0.121	252	4,088	3,733	507	-754	6.2
29	3-117	-677	0.109	266	5,322	5,433	303	-774	6.7
30	5-105	-727	0.199	147	908	827	435	-801	7.0
31	5-106	-725	0.141	200	3,277	3,117	394	-773	6.9
32	7-104	-669	0.119	247	3,778	3,658	179	-744	7.0
33	7-106	-698	0.062	448	3,477	3,200	179	-764	6.8
34	8-107	-653	0.127	291	1,180	1,080	418	-761	6.1
35	8-109	-705	0.110	284	2,375	2,245	273	-808	7.2
36	8-110	-754	0.074	353	3,442	2,867	393	-826	7.0
37	8-117	-792	0.083	326	2,185	1,950	406	-804	7.3
38	8-122	-761	0.133	211	1188	1417	407	-816	6.5
平均値		-706	0.126	283.8	2,887	2,890	361.5	-772.7	6.6
最大値		-566	0.285	747	5,322	6,735	528	-729	7.7
最小値		-820	0.060	100	908	827	83	-826	5.1
標準偏差		54.0	0.060	123.8	1292.2	1345.3	108.2	24.3	0.5

Table-5 土壌環境調査結果（その2）

	路線 No.	含水比	細粒分	ρ (箱、現)	ρ (箱注水)	塩化物	硫酸塩	KMnO ₄ 消費
		%	%	$\Omega\text{-cm}$	$\Omega\text{-cm}$	mg/kg	mg/kg	mg/kg
	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	
1	0-6	30	42	4,600	4,600	74	65	638
2	1-5	53	66	10,200	7,100	63	740	53
3	2-9	44	41	13,300	6,600	38	300	206
4	2-22	31	74	3,500	3,500	39	40	121
5	2-24	21	55	32,500	13,000	49	140	134
6	6-2	24	34	22,000	8,500	55	158	187
7	6-5	24	42	10,700	7,600	46	28	62
8	7-1	20	36	21,400	8,700	78	100	262
9	0-106	25	31	8,700	5,100	33	56	127
10	0-107	60	63	4,300	3,800	50	260	217
11	1-103	26	43	14,300	5,600	35	225	219
12	1-106	68	34	4,800	4,800	59	208	109
13	1-108	34	36	10,200	5,600	49	80	126
14	1-109	30	41	15,300	12,200	38	55	104
15	1-110	42	32	6,100	5,600	65	55	217
16	1-111	39	79	8,700	5,100	64	65	270
17	2-101	26	32	10,700	6,100	23	350	41
18	2-103	38	41	3,600	3,000	33	223	64
19	2-108	57	32	14,300	13,300	39	8	74
20	2-112	17	56	9,700	6,400	88	50	765
21	2-117	26	40	11,700	4,100	40	630	59
22	2-119	31	53	11,700	8,700	58	5	31
23	2-120	41	37	5,400	2,400	28	1030	65
24	2-121	18	67	3,100	3,000	46	405	117
25	2-123	21	55	19,400	6,100	21	170	41
26	3-105	29	70	1,200	1,000	73	43	28
27	3-106	24	53	10,200	6,100	20	390	217
28	3-110	30	31	4,600	4,000	25	105	55
29	3-117	13	31	12,600	4,500	21	15	53
30	5-105	17	61	5,400	3,800	180	223	36
31	5-106	24	39	4,100	4,100	83	150	86
32	7-104	26	46	5,600	3,600	20	615	229
33	7-106	22	43	15,800	10,200	60	85	248
34	8-107	35	38	5,600	3,300	36	750	35
35	8-109	22	40	3,100	3,000	63	153	70
36	8-110	17	39	9,700	8,200	40	135	140
37	8-117	45	53	6,600	5,900	23	235	402
38	8-122	39	30	14,800	10,400	49	30	89
平均値		31.3	45.7	9,987	6,016	50.1	220.4	157.8
最大値		68	79	32,500	13,300	180	1030	765
最小値		13	30	1,200	1,000	20	5	28
標準偏差		12.8	13.4	6,440	2,944	28.6	240.7	156.6

3.3 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の孔食深さと土壤環境の比較

調査した管には、亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）があり、その孔食深さを比較した。白ガス管には27路線、黒ガス管は11路線である。各路線毎の孔食深さと土壤環境因子をTable-6~9に示す。また、孔食深さと経過年の散布図をFigure-53に示す。

この結果に示す如く、最大孔食深さ、平均孔食深さ、最大孔食腐食速度、平均孔食腐食速度の平均値は差がない。さらに、土壤環境も硫酸塩濃度を除いて差がない。

また、孔食深さと経過年の散布図の亜鉛メッキ管と裸鋼管の分布との間に差がみられない。このことから、亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の経過年の孔食深さに差がない。

Table-6 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壤環境の比較

(その1)

	路線 No.	最大孔食深さ	平均孔食深さ	最大腐食速度	平均腐食速度	最大腐食速度	平均腐食速度
		(mm)	(mm)	(mm/y)	(mm/y)	(mm/ \sqrt{y})	(mm/ \sqrt{y})
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	0-6	0.75	0.28	0.11	0.04	0.28	0.11
2	1-5	0.65	0.32	0.09	0.05	0.25	0.12
3	2-9	1.10	0.45	0.12	0.05	0.37	0.15
4	2-22	0.85	0.41	0.07	0.03	0.24	0.11
5	2-24	2.50	0.95	0.28	0.11	0.83	0.32
6	6-2	0.75	0.52	0.04	0.03	0.18	0.13
7	6-5	0.70	0.22	0.06	0.02	0.20	0.06
8	7-1	0.75	0.29	0.03	0.01	0.16	0.06
9	0-107	0.35	0.16	0.03	0.01	0.09	0.04
10	1-103	1.20	0.36	0.11	0.03	0.36	0.11
11	1-109	0.60	0.29	0.04	0.02	0.16	0.08
12	1-110	0.60	0.30	0.07	0.03	0.20	0.10
13	2-112	0.30	0.10	0.01	0.00	0.07	0.02
14	2-117	1.55	0.53	0.09	0.03	0.38	0.13
15	2-119	1.20	0.36	0.06	0.02	0.26	0.08
16	2-120	0.85	0.44	0.05	0.03	0.21	0.11
17	2-121	0.40	0.18	0.02	0.01	0.09	0.04
18	2-123	0.80	0.26	0.09	0.03	0.27	0.09
19	3-105	0.60	0.32	0.04	0.02	0.15	0.08
20	3-106	0.60	0.34	0.03	0.02	0.14	0.08
21	3-117	0.35	0.18	0.04	0.02	0.11	0.06
22	5-105	0.95	0.40	0.11	0.04	0.32	0.13
23	5-106	1.45	0.49	0.06	0.02	0.30	0.10
24	7-104	0.80	0.38	0.05	0.02	0.19	0.09
25	7-106	1.00	0.47	0.08	0.04	0.28	0.13
26	8-107	1.75	1.01	0.19	0.11	0.58	0.34
27	8-110	0.50	0.22	0.03	0.01	0.12	0.05
平均値		0.89	0.38	0.07	0.03	0.25	0.11
最大値		2.50	1.01	0.28	0.11	0.83	0.34
最小値		0.30	0.10	0.01	0.00	0.07	0.02
標準偏差		0.49	0.21	0.06	0.03	0.16	0.07

黒管データ一覧

1	0-106	0.75	0.35	0.08	0.04	0.25	0.12
2	1-106	1.00	0.54	0.06	0.03	0.24	0.13
3	1-108	0.80	0.32	0.09	0.04	0.27	0.11
4	1-111	1.10	0.36	0.09	0.03	0.32	0.10
5	2-101	0.45	0.17	0.05	0.02	0.14	0.05
6	2-103	0.80	0.42	0.07	0.04	0.23	0.12
7	2-108	0.40	0.21	0.04	0.02	0.12	0.06
8	3-110	1.95	1.04	0.11	0.06	0.47	0.25
9	8-109	0.60	0.30	0.09	0.04	0.23	0.11
10	8-117	0.60	0.31	0.05	0.03	0.17	0.09
11	8-122	0.55	0.30	0.03	0.02	0.14	0.08
平均値		0.82	0.39	0.07	0.03	0.23	0.11
最大値		1.95	1.04	0.11	0.06	0.47	0.25
最小値		0.40	0.17	0.03	0.02	0.12	0.05
標準偏差		0.433	0.236	0.026	0.013	0.100	0.053

Table-7 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壤環境の比較
(その2)

最頻値 (mm)	累積確率.99 (mm)	最頻値速度 (mm/y)	最頻値速度 (mm/ \sqrt{y})	累積確率.99 (mm/y)	累積確率.99 (mm/ \sqrt{y})	位置パラメータ (α)	尺度パラメータ (λ)	経過年 (y)
X7	X8	X9	X10	X11	X12	X14	X15	X16
0.79	1.40	0.11	0.30	0.20	0.53	0.13	0.20	7
0.74	1.25	0.11	0.28	0.18	0.47	0.11	0.25	7
1.32	2.35	0.15	0.44	0.26	0.78	0.22	0.33	9
0.85	1.38	0.07	0.24	0.11	0.38	0.11	0.34	13
2.49	4.35	0.28	0.83	0.48	1.45	0.40	0.70	9
0.80	1.15	0.05	0.19	0.07	0.28	0.07	0.47	17
0.71	1.29	0.06	0.20	0.11	0.37	0.13	0.15	12
0.92	1.66	0.04	0.20	0.08	0.35	0.16	0.20	22
0.43	0.76	0.03	0.12	0.05	0.20	0.07	0.12	14
1.01	1.78	0.09	0.30	0.16	0.54	0.17	0.26	11
0.70	1.20	0.05	0.19	0.09	0.32	0.11	0.22	14
0.67	1.10	0.07	0.22	0.12	0.37	0.10	0.24	9
0.33	0.61	0.02	0.07	0.03	0.13	0.06	0.07	21
1.42	2.50	0.08	0.34	0.15	0.61	0.23	0.38	17
0.93	1.61	0.04	0.20	0.08	0.35	0.15	0.27	21
1.03	1.73	0.06	0.25	0.10	0.42	0.15	0.35	17
0.42	0.70	0.02	0.09	0.03	0.15	0.06	0.15	21
0.77	1.40	0.09	0.26	0.16	0.47	0.14	0.17	9
0.72	1.20	0.05	0.18	0.08	0.30	0.10	0.26	16
0.70	1.13	0.04	0.16	0.06	0.26	0.09	0.29	19
0.47	0.81	0.05	0.15	0.08	0.26	0.07	0.14	10
0.99	1.68	0.11	0.33	0.19	0.56	0.15	0.32	9
1.28	2.23	0.06	0.27	0.10	0.47	0.21	0.37	23
0.96	1.64	0.06	0.23	0.10	0.40	0.15	0.30	17
0.88	1.37	0.07	0.24	0.11	0.38	0.11	0.40	13
2.27	3.76	0.25	0.76	0.42	1.25	0.32	0.83	9
0.56	0.98	0.03	0.14	0.06	0.24	0.09	0.17	17
0.93	1.59	0.08	0.27	0.13	0.46	0.14	0.29	14.19
2.49	4.35	0.28	0.83	0.48	1.45	0.40	0.83	23.00
0.33	0.61	0.02	0.07	0.03	0.13	0.06	0.07	7.00
0.49	0.85	0.06	0.17	0.11	0.30	0.08	0.17	4.98

0.94	1.64	0.10	0.31	0.18	0.55	0.15	0.27	9
1.20	1.98	0.07	0.29	0.12	0.48	0.17	0.45	17
0.73	1.22	0.08	0.24	0.14	0.41	0.11	0.25	9
1.18	2.16	0.10	0.34	0.18	0.62	0.21	0.22	12
0.42	0.71	0.04	0.13	0.07	0.23	0.06	0.13	10
0.90	1.46	0.07	0.26	0.12	0.42	0.12	0.35	12
0.49	0.82	0.04	0.15	0.07	0.25	0.07	0.17	11
2.32	3.83	0.14	0.56	0.23	0.93	0.33	0.87	17
0.70	1.17	0.10	0.26	0.17	0.44	0.10	0.25	7
0.64	1.03	0.05	0.19	0.09	0.30	0.08	0.26	12
0.53	0.82	0.03	0.13	0.05	0.20	0.06	0.26	16
0.91	1.53	0.08	0.26	0.13	0.44	0.13	0.32	12.00
2.32	3.83	0.14	0.56	0.23	0.93	0.33	0.87	17
0.42	0.71	0.03	0.13	0.05	0.20	0.06	0.13	7
0.536	0.898	0.032	0.124	0.055	0.211	0.080	0.202	3.376

Table-8 亜鉛メッキ管(白ガス管)と裸鋼管(黒ガス管)の腐食深さと土壤環境の比較

(その3)

経過年 (√y)	管対地電位 (mv)	Pr腐食速度 (mm/y)	Pr分極抵抗 (Ω)	土壤比抵抗*1 (Ω-cm)	土壤比抵抗*2 (Ω-cm)	酸化還元電位 (mv)	Pr自然電位 (mv)	pH
X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25
2.65	-710	0.082	317	4,303	4,050	401	-787	6.3
2.65	-820	0.083	747	2,903	1,591	416	-747	7.1
3.00	-655	0.082	346	2,961	6,735	342	-799	6.8
3.61	-743	0.112	321	2,201	1,920	345	-768	5.5
3.00	-566	0.060	468	3,651	3,651	298	-771	6.6
4.12	-690	0.079	393	4,845	4,250	528	-793	6.7
3.46	-717	0.063	431	5,198	4,350	377	-771	7.1
4.69	-632	0.085	282	4,803	4,725	485	-777	6.8
3.74	-803	0.079	327	1,948	2,242	365	-762	5.1
3.32	-708	0.104	314	3,067	2,900	371	-736	6.1
3.74	-681	0.285	100	3,517	3,383	252	-731	5.8
3.00	-748	0.095	347	2,300	1,783	354	-746	6.4
4.58	-690	0.136	209	2,138	3,240	211	-747	7.6
4.12	-808	0.117	248	2,863	2,200	320	-807	6.2
4.58	-722	0.172	183	1,238	1,337	520	-783	6.6
4.12	-710	0.267	108	1,279	3,248	497	-750	6.6
4.58	-655	0.064	435	2,055	2,083	370	-758	6.3
3.00	-672	0.179	176	3,963	4,183	437	-777	6.3
4.00	-760	0.094	332	1,497	1,500	409	-794	6.9
4.36	-755	0.110	247	2,548	2,350	83	-783	6.9
3.16	-677	0.109	266	5,322	5,433	303	-774	6.7
3.00	-727	0.199	147	908	827	435	-801	7.0
4.80	-725	0.141	200	3,277	3,117	394	-773	6.9
4.12	-669	0.119	247	3,778	3,658	179	-744	7.0
3.61	-698	0.062	448	3,477	3,200	179	-764	6.8
3.00	-653	0.127	291	1,180	1,080	418	-761	6.1
4.12	-754	0.074	353	3,442	2,867	393	-826	7.0
3.71	-709.185	0.118	306.8	2,987	3,033	358.6	-771.5	6.6
4.80	-566	0.285	747	5,322	6,735	528	-731	7.6
2.65	-820	0.060	100	908	827	83	-826	5.1
0.67	56.2	0.058	133.0	1262.2	1392.8	107.1	23.1	0.5

3.00	-729	0.127	215	5,177	5,125	481	-729	6.9
4.12	-633	0.210	136	2,238	2,333	344	-749	6.1
3.00	-697	0.086	282	2,567	2,607	446	-759	6.5
3.46	-625	0.241	165	2,137	2,175	433	-759	7.7
3.16	-678	0.233	135	1,433	1,230	402	-792	6.7
3.46	-702	0.197	149	1,017	1,343	227	-789	6.7
3.32	-668	0.078	348	4,637	3,750	128	-775	6.8
4.12	-690	0.121	252	4,088	3,733	507	-754	6.2
2.65	-705	0.110	284	2,375	2,245	273	-808	7.2
3.46	-792	0.083	326	2,185	1,950	406	-804	7.3
4.00	-761	0.133	211	1188	1417	407	-816	6.5
3.43	-698.18	0.15	227.55	2640.18	2537.09	368.55	-775.82	6.78
4.12	-625	0.24	348	5177	5125	507	-729	7.70
2.65	-792	0.08	135	1017	1230	128	-816	6.10
0.486	49.749	0.062	76.427	1393.469	1208.106	115.585	27.989	0.477

Table-9 亜鉛メッキ管（白ガス管）と裸鋼管（黒ガス管）の腐食深さと土壤環境の比較
(その4)

含水比 (%)	細粒分 (%)	土壤比抵抗*3 (Ω·cm)	土壤比抵抗*4 (Ω·cm)	塩化物 (mg/kg)	硫酸塩 (mg/kg)	KMnO ₄ 消費量 (mg/kg)
X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32
30	42	4,600	4,600	74	65	638
53	66	10,200	7,100	63	740	53
44	41	13,300	6,600	38	300	206
31	74	3,500	3,500	39	40	121
21	55	32,500	13,000	49	140	134
24	34	22,000	8,500	55	158	187
24	42	10,700	7,600	46	28	62
20	36	21,400	8,700	78	100	262
60	63	4,300	3,800	50	260	217
26	43	14,300	5,600	35	225	219
30	41	15,300	12,200	38	55	104
42	32	6,100	5,600	65	55	217
17	56	9,700	6,400	88	50	765
26	40	11,700	4,100	40	630	59
31	53	11,700	8,700	58	5	31
41	37	5,400	2,400	28	1030	65
18	67	3,100	3,000	46	405	117
21	55	19,400	6,100	21	170	41
29	70	1,200	1,000	73	43	28
24	53	10,200	6,100	20	390	217
13	31	12,600	4,500	21	15	53
17	61	5,400	3,800	180	223	36
24	39	4,100	4,100	83	150	86
26	46	5,600	3,600	20	615	229
22	43	15,800	10,200	60	85	248
35	38	5,600	3,300	36	750	35
17	39	9,700	8,200	40	135	140
28.4	48.0	10,719	6,011	53.5	254.1	169.3
60	74	32,500	13,000	180.0	1030.0	765
13	31	1,200	1,000	20.0	5.0	28
11.3	12.4	7,123	2,927	32.0	272.1	172.7

X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32
25	31	8,700	5,100	33	56	127
68	34	4,800	4,800	59	208	109
34	36	10,200	5,600	49	80	126
39	79	8,700	5,100	64	65	270
26	32	10,700	6,100	23	350	41
38	41	3,600	3,000	33	223	64
57	32	14,300	13,300	39	8	74
30	31	4,600	4,000	25	105	55
22	40	3,100	3,000	63	153	70
45	53	6,600	5,900	23	235	402
39	30	14,800	10,400	49	30	89
38.45	39.91	8190.91	6027.27	41.82	137.55	129.73
68	79	14800	13300	64.00	350.00	402
22	30	3100	3000	23.00	8.00	41
13.995	14.604	4071.475	3128.607	15.791	105.722	109.712

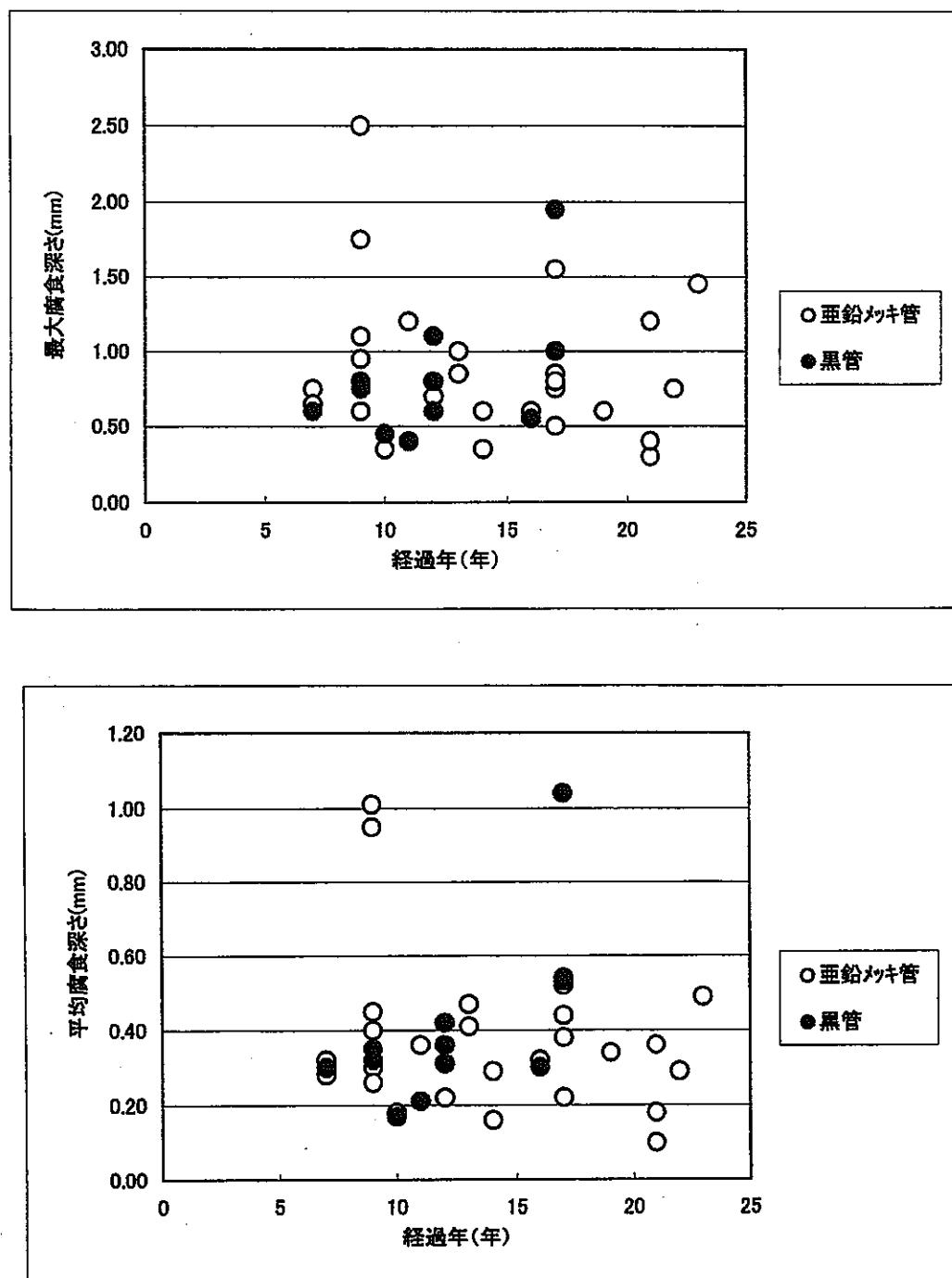


Figure-5-3 亜鉛メッキ管と裸鋼管の孔食深さと経過年の散布図

4. 孔食深さおよび孔食腐食速度と土壤環境因子に対する多変量解析

4.1 孔食深さおよび孔食腐食速度と土壤環境因子との単相関

50 A 亜鉛メッキ管の10 mを実測の孔食深さとその実測値を埋設経過年で除した孔食腐食速度の最大孔食孔食腐食速度と平均孔食孔食腐食速度、この孔食深さデータからオーバーパックの表面積 (8.0701 m^2) を再帰期間として求めた極値統計解析の最頻値と累積確率 0.99 で求めた最大孔食深さとそれらの孔食腐食速度を求めた。これらの各腐食評価量と各土壤環境因子との相関を求める。

孔食腐食速度は $\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$ と $\text{mm}/\sqrt[3]{\text{y}}$ とし、極値統計でもとめたパラメーターである α と λ も因子の一つとして相関解析をおこなった。この結果を Table-10, 11 に示す。

また、孔食腐食速度と因子間の相関図を Figure-54～81 に示す。

この結果から、

(1) 孔食量および孔食腐食速度と土壤環境因子との単相関

実測の最大孔食深さ、最大孔食腐食速度、平均孔食腐食速度と土壤環境因子との間には相関がみられなかった。

(2) 孔食量および孔食腐食速度と土壤環境因子以外 (α , λ , 帰無仮説, 経過年) の因子との単相関

- ① 孔食深さと孔食腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$ 以外) との間に最も高い相関係数を示した因子は管対地電位であり、この相関係数は 0.31 から 0.43 であった。
- ② 孔食深さと孔食腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt[3]{\text{y}}$ 以外) は極値統計のパラメーターである α と λ に相関が見られた。

(3) 土壤環境因子間の単相関

各因子間の単相関係数が 0.4 以上の関係について以下に示す。

- ① 管対地電位は土壤箱土壤比抵抗（無注水）で単相関係数は -0.41 であった。
- ② プローブ腐食速度はプローブ分極抵抗と -0.77 と高く、プローブ土壤比抵抗と -0.40 であった。
- ③ プローブ分極抵抗は逆数であるプローブ腐食速度以外にない。

- ④ プローブ土壤比抵抗は土壤箱土壤比抵抗（無注水）と0.44であった。
- ⑤ 土壤杖土壤比抵抗は土壤箱土壤比抵抗（無注水）と0.42であった。
- ⑥ 土壤箱土壤比抵抗（無注水）は管対地電位（-0.41），プローブ土壤比抵抗（0.44）土壤杖土壤比抵抗（0.42），土壤箱土壤比抵抗（注水）（0.78）であった。
- ⑦ 酸化還元電位，プローブ自然電位，pH，塩化物，硫酸塩， $KMnO_4$ 消費量はどの因子とも0.4以上の相関は見られなかった。

Table-10 全データ表

路線 No.	最大孔食 深さ(mm)		平均孔食 深さ(mm)		最大/y mm/y		平均/y mm/y		最大/y mm/y		平均/y mm/y		最頻値 (mm)		0.99値 (mm)		最頻/y mm/y		最頻/y mm/y		0.99値/y mm/y		無板脱 %		α		λ		経過年 (y)		γ/y		管対地 電位(mV)		Pr腐食速 度(mm/y)		Pr分極抵 抗(Ω)		ρ(プローブ Ω-cm)		ρ(土壤) Ω-cm		Redox mv		Pr自然電 位(mV)		pH		含水比 %		粗粒分 %		ρ(箱、現 Ω-cm)		ρ(箱注水 Ω-cm)		塩化物 mg/kg		硫酸塩 mg/kg		KMnO ₄ 消 耗 mg/kg		硝化物 mg/kg	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33																															
1	0-6	0.75	0.28	0.11	0.04	0.28	0.11	0.79	1.40	0.11	0.30	0.20	0.63	50	0.13	0.20	7	2.85	-710	0.082	317	4.303	4.050	401	-787	6.3	30	42	4,600	4,600	74	65	638	0																														
2	1-5	0.65	0.32	0.09	0.05	0.25	0.12	0.74	1.25	0.11	0.28	0.18	0.47	50	0.11	0.25	7	2.85	-820	0.083	747	2.903	1.591	416	-747	7.1	53	68	10,200	7,100	63	740	53	0																														
3	2-8	1.10	0.45	0.12	0.05	0.37	0.16	1.32	2.35	0.15	0.44	0.26	0.76	50	0.22	0.33	9	3.00	-655	0.082	348	2.961	6.735	342	-799	6.8	44	41	13,300	6,600	38	300	206	0																														
4	2-22	0.85	0.41	0.07	0.03	0.24	0.11	0.85	1.38	0.07	0.24	0.11	0.38	50	0.11	0.34	13	3.61	-743	0.112	321	2.201	1.920	345	-768	5.5	31	74	3,500	3,500	39	40	121	0																														
5	2-24	2.50	0.95	0.28	0.11	0.83	0.32	2.49	4.35	0.28	0.83	0.48	1.45	40	0.40	0.70	9	3.00	-568	0.060	468	3.851	2.98	298	-771	6.6	21	55	32,500	13,000	49	140	134	0																														
6	6-2	0.75	0.52	0.04	0.03	0.18	0.13	0.80	1.15	0.05	0.19	0.07	0.26	50	0.07	0.47	17	4.12	-690	0.079	393	4.845	4.260	528	-783	6.7	24	34	22,000	8,500	55	158	187	0																														
7	6-5	0.70	0.22	0.08	0.02	0.20	0.08	0.71	1.29	0.08	0.20	0.11	0.37	30	0.13	0.15	12	3.46	-717	0.083	431	5.198	4.250	377	-771	7.1	24	42	10,700	7,800	48	28	62	0																														
8	7-1	0.75	0.29	0.03	0.01	0.16	0.08	0.92	1.68	0.04	0.20	0.08	0.35	50	0.18	0.20	22	4.89	-632	0.085	282	4.803	4.725	485	-777	6.8	20	38	21,400	8,700	78	100	262	0																														
9	0-106	0.75	0.35	0.08	0.04	0.25	0.12	0.94	1.64	0.10	0.31	0.18	0.55	40	0.15	0.27	9	3.00	-729	0.127	215	5.177	5.125	461	-729	6.9	25	31	8,700	5,100	33	56	127	0																														
10	0-107	0.35	0.16	0.03	0.01	0.08	0.04	0.43	0.76	0.03	0.12	0.05	0.20	30	0.07	0.12	14	3.74	-803	0.079	327	1.948	2.242	385	-782	5.1	60	63	4,300	3,800	50	260	217	0																														
11	1-103	1.20	0.38	0.11	0.03	0.38	0.11	1.01	1.78	0.08	0.30	0.18	0.54	10	0.17	0.28	11	3.32	-708	0.104	314	3.087	2.900	371	-736	6.1	28	43	14,300	5,600	35	225	219	0																														
12	1-106	1.00	0.54	0.06	0.03	0.24	0.13	1.20	1.98	0.07	0.29	0.12	0.48	40	0.17	0.45	17	4.12	-633	0.210	138	2.238	2.333	344	-749	6.1	68	34	4,800	4,800	59	208	109	0																														
13	1-108	0.80	0.32	0.09	0.04	0.27	0.11	0.73	1.22	0.08	0.24	0.14	0.41	40	0.11	0.25	9	3.00	-697	0.086	282	2.587	2.607	448	-759	6.6	34	38	10,200	5,800	49	90	126	0																														
14	1-109	0.60	0.29	0.04	0.02	0.16	0.08	0.70	1.20	0.05	0.18	0.09	0.32	50	0.11	0.22	14	3.74	-881	0.285	100	3.517	3.383	252	-731	5.8	30	41	15,300	12,200	38	55	104	0																														
15	1-110	0.60	0.30	0.07	0.03	0.20	0.10	0.67	1.10	0.07	0.22	0.12	0.37	50	0.10	0.24	9	3.00	-748	0.095	347	2.300	1.783	354	-740	6.4	42	32	6,100	5,800	65	55	217	0																														
16	1-111	1.10	0.36	0.08	0.03	0.32	0.10	1.18	2.18	0.10	0.34	0.18	0.62	30	0.21	0.22	12	3.46	-625	0.241	165	2.137	2.175	433	-759	7.7	39	79	8,700	5,100	64	65	270	0																														
17	2-101	0.45	0.17	0.05	0.02	0.14	0.05	0.42	0.71	0.04	0.13	0.07	0.23	10	0.08	0.13	10	3.16	-678	0.233	135	1.433	1.230	402	-792	6.7	28	32	10,700	6,100	23	350	41	0																														
18	2-103	0.80	0.42	0.07	0.04	0.23	0.12	0.90	1.48	0.07	0.26	0.12	0.42	50	0.12	0.35	12	3.46	-702	0.197	149	1.017	1.343	227	-789	6.7	38	41	3,600	3,000	33	223	64	0																														
19	2-108	0.40	0.21	0.04	0.02	0.12	0.06	0.68	0.8																																																							

Table-11 相關表

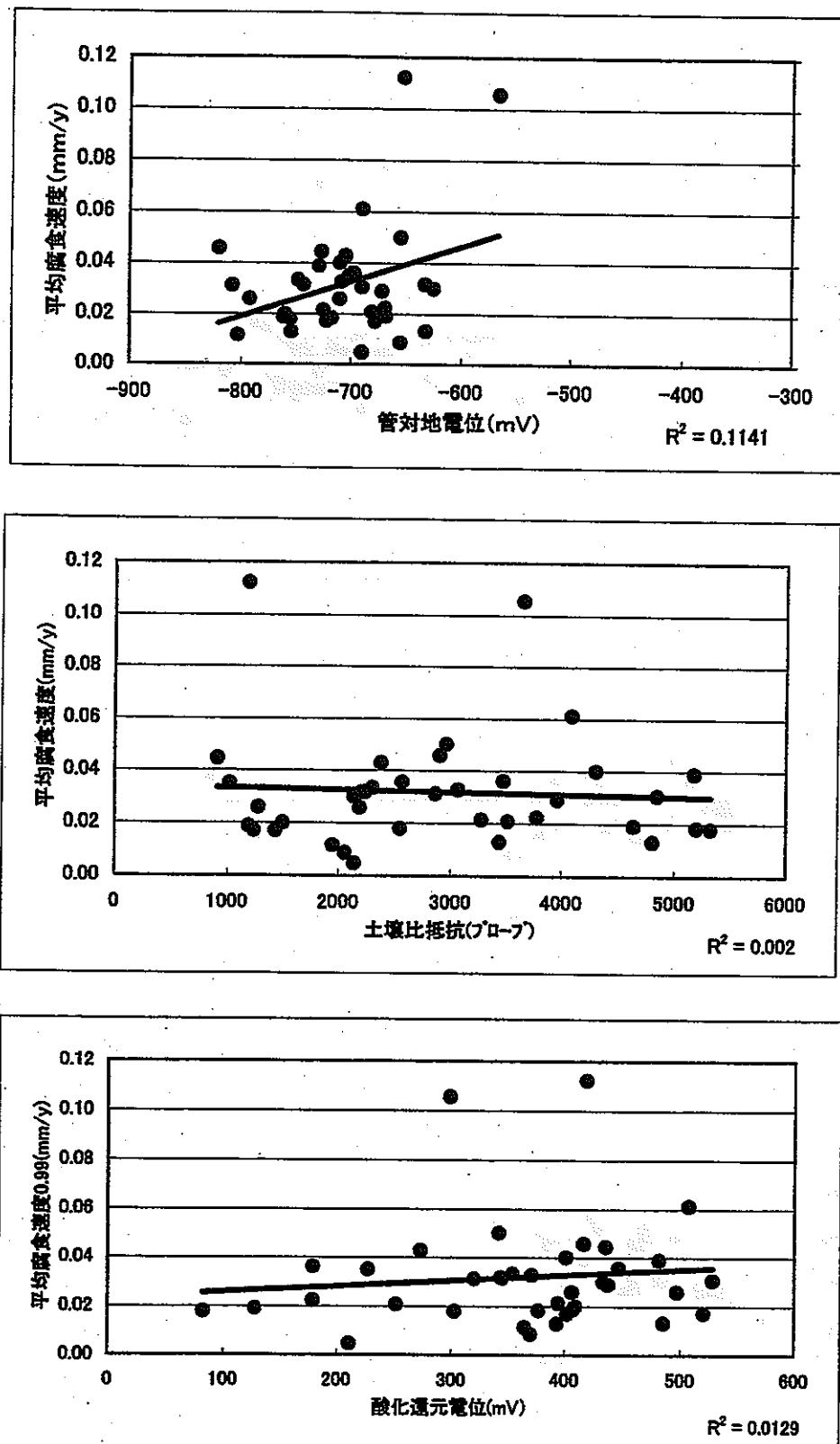


Figure-54 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その 1)

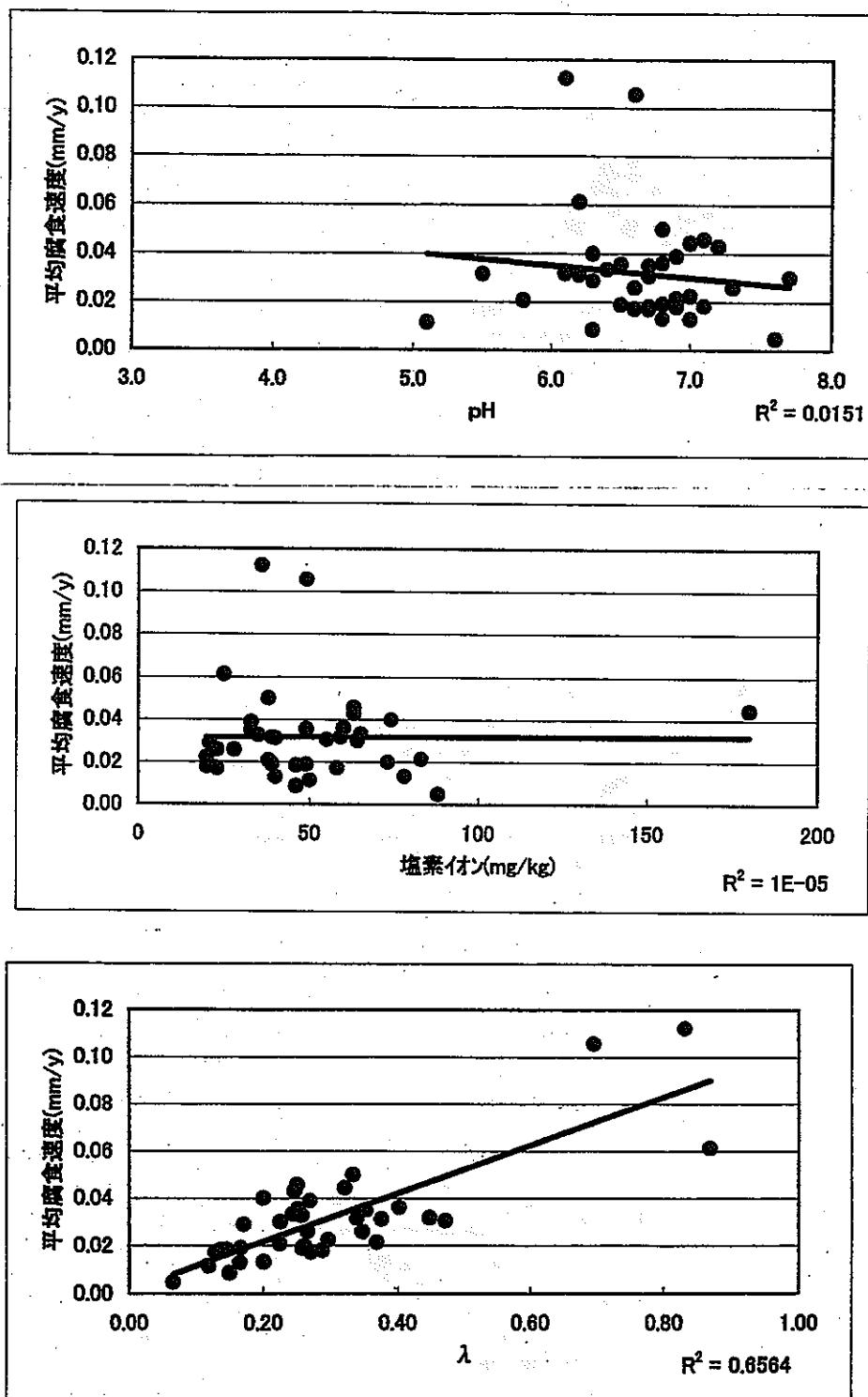


Figure-55 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その 2)

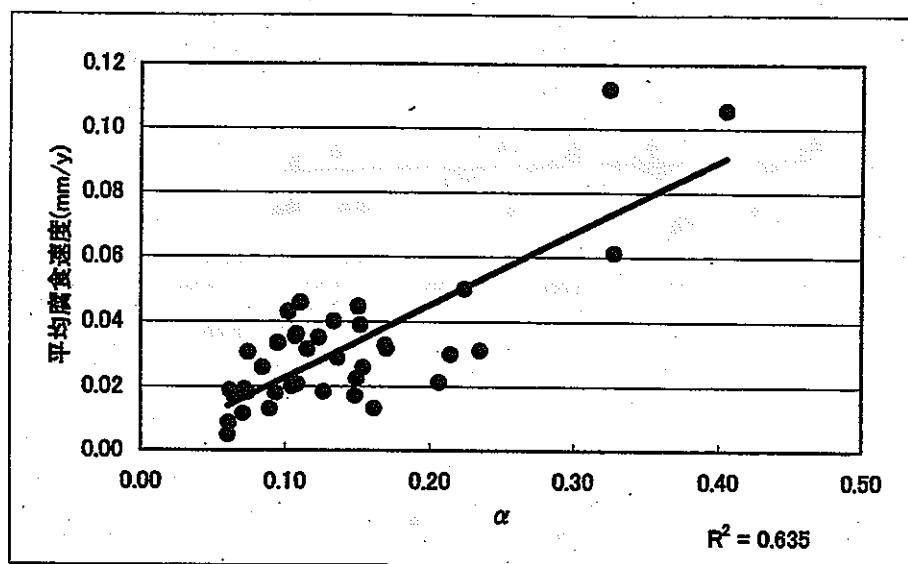
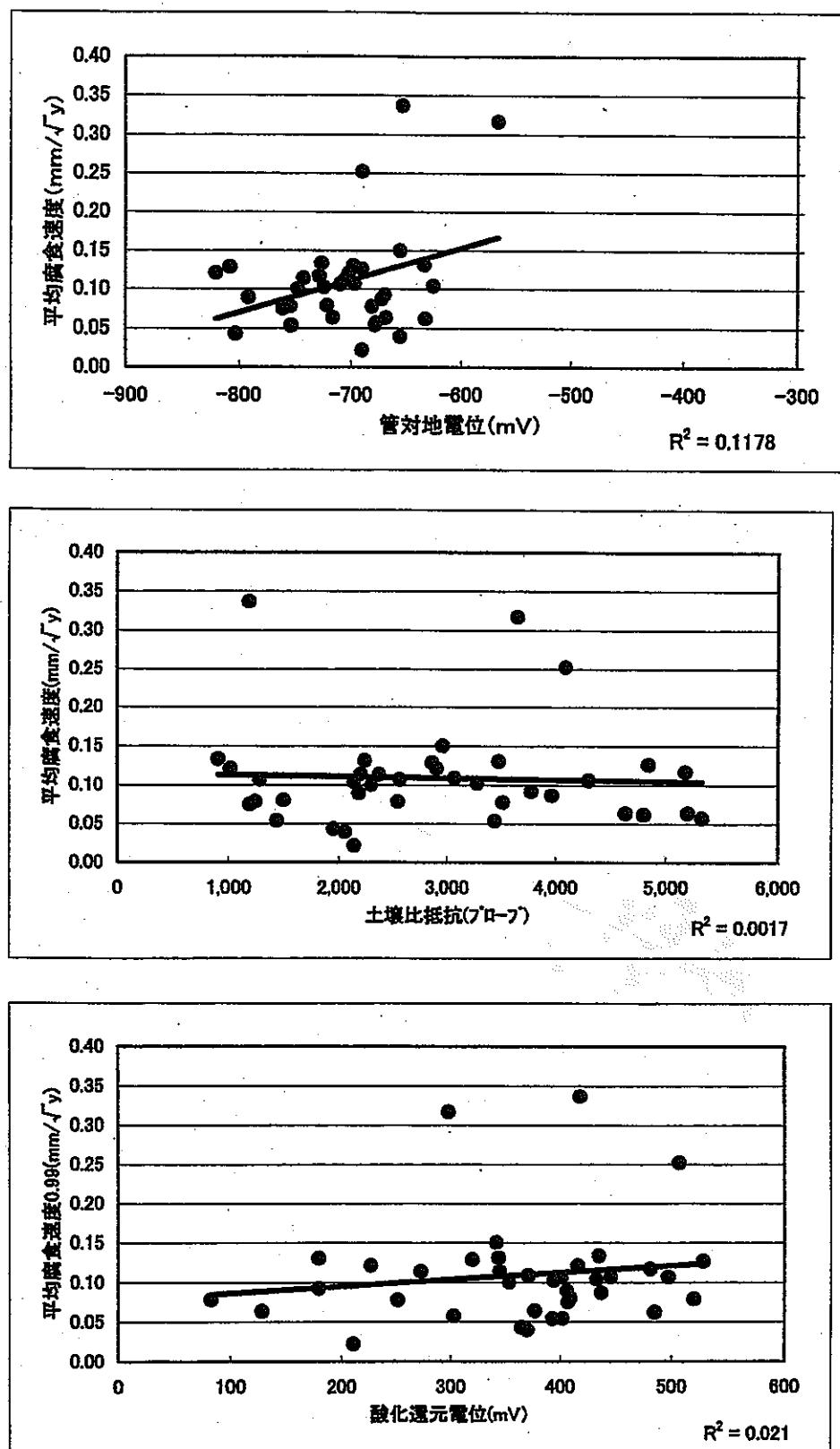
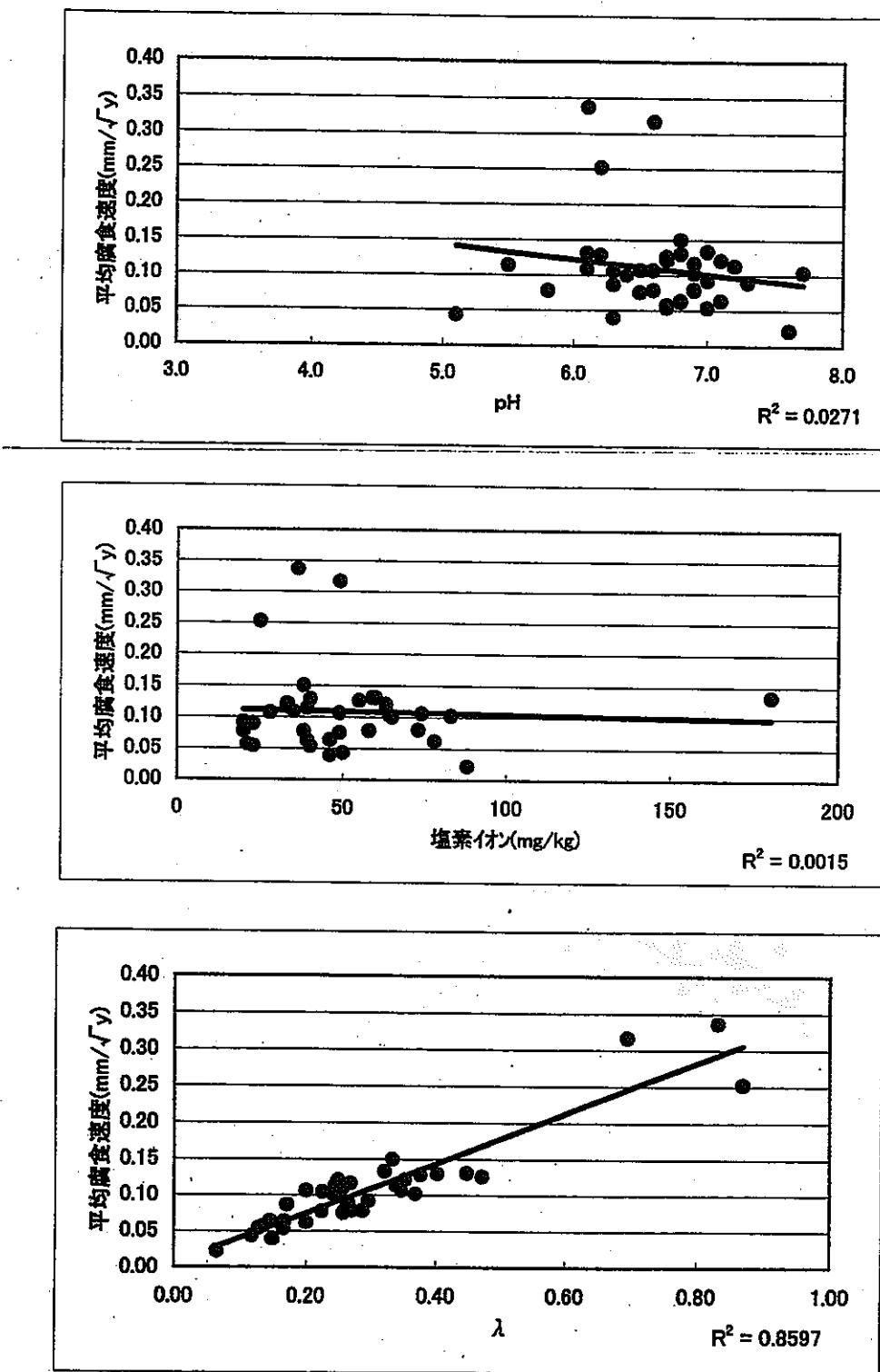


Figure-56 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/y) (その3)

Figure-57 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その 1)

Figure-58 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その2)

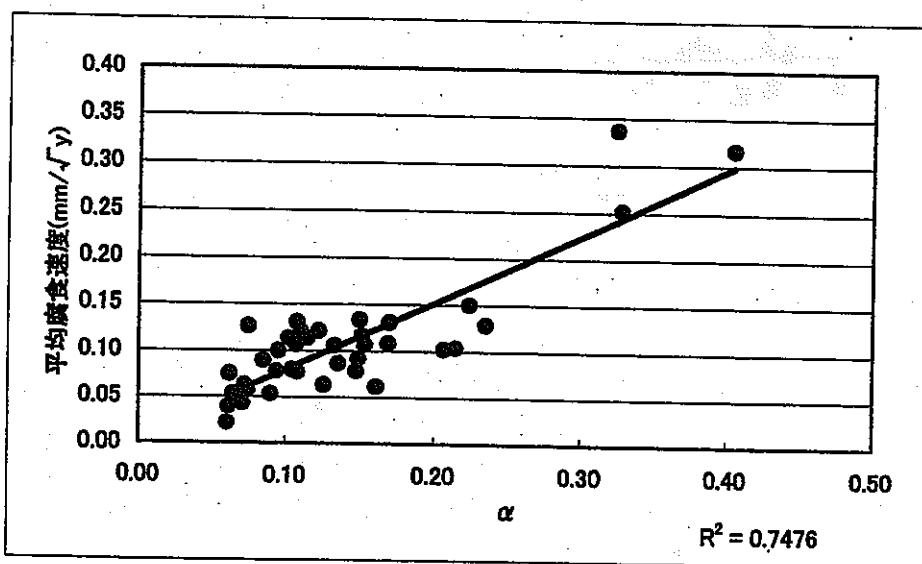


Figure-59 各環境因子に対する平均値腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その 3)

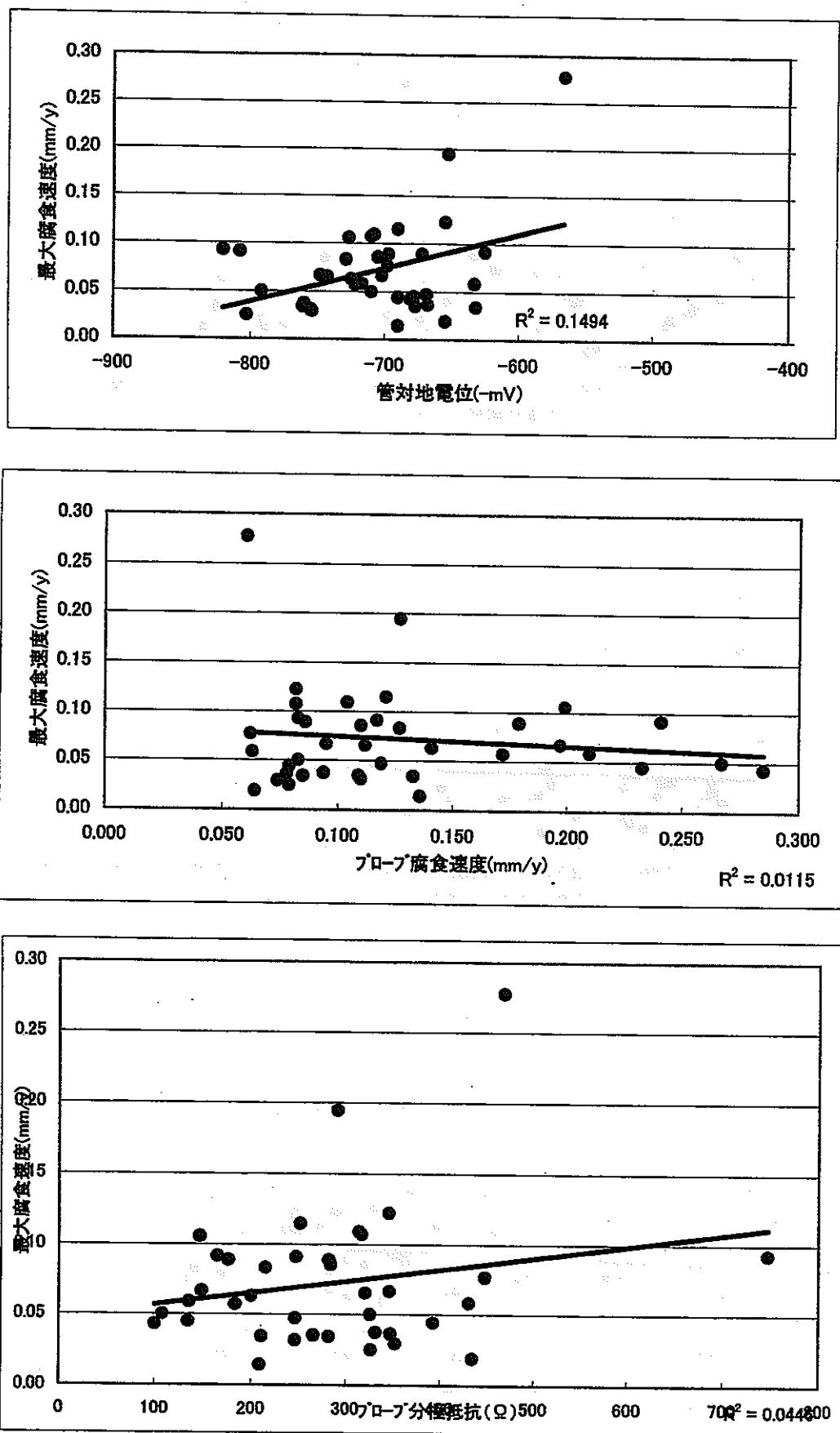


Figure-60 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その1)

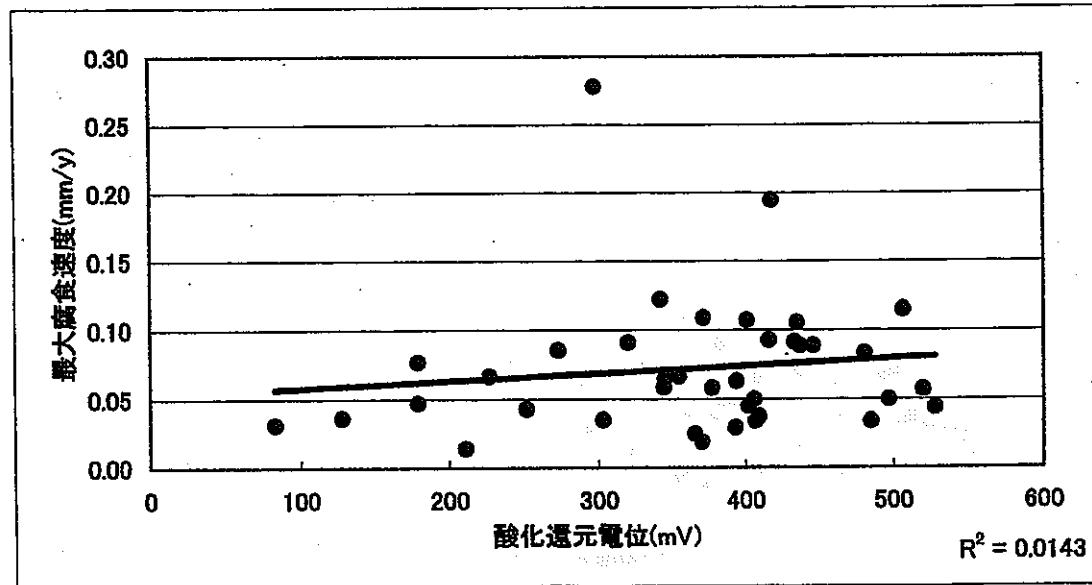
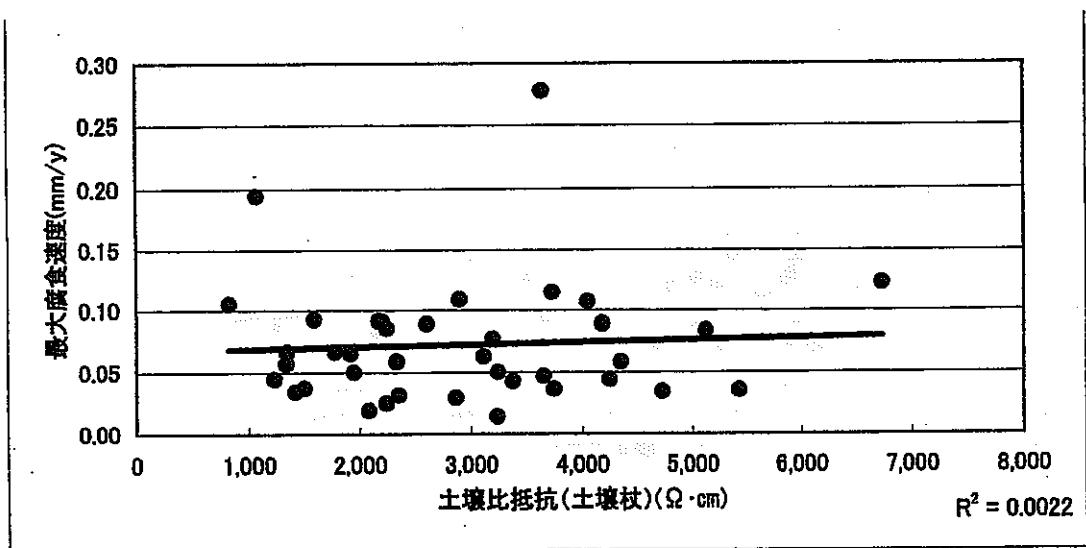
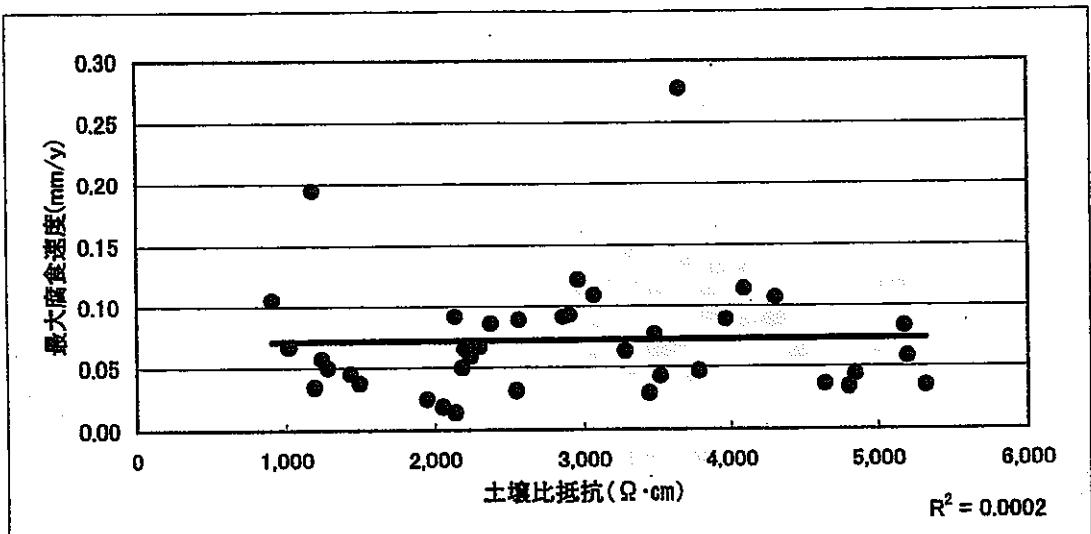


Figure-61 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その2)

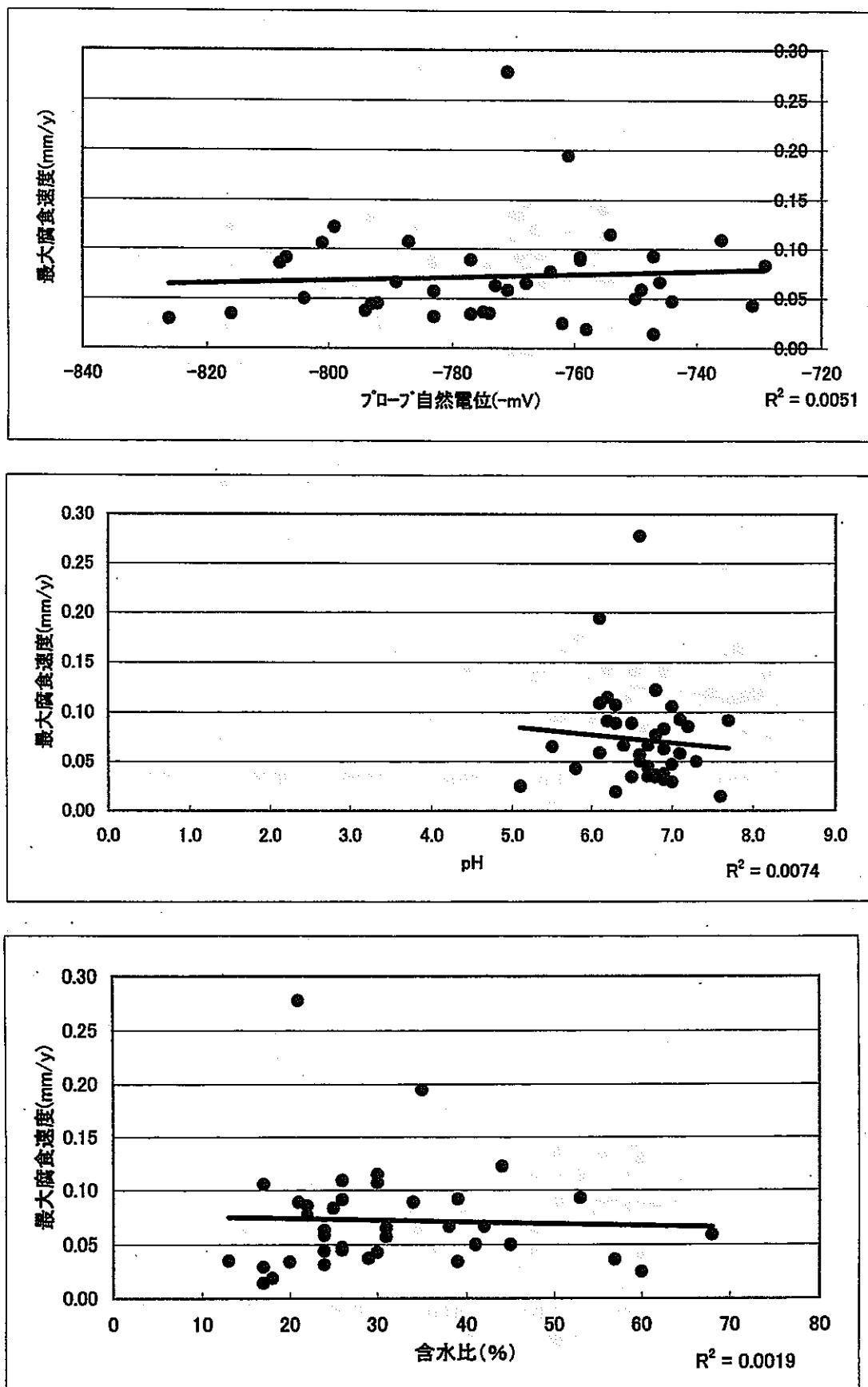


Figure-62 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その 3)

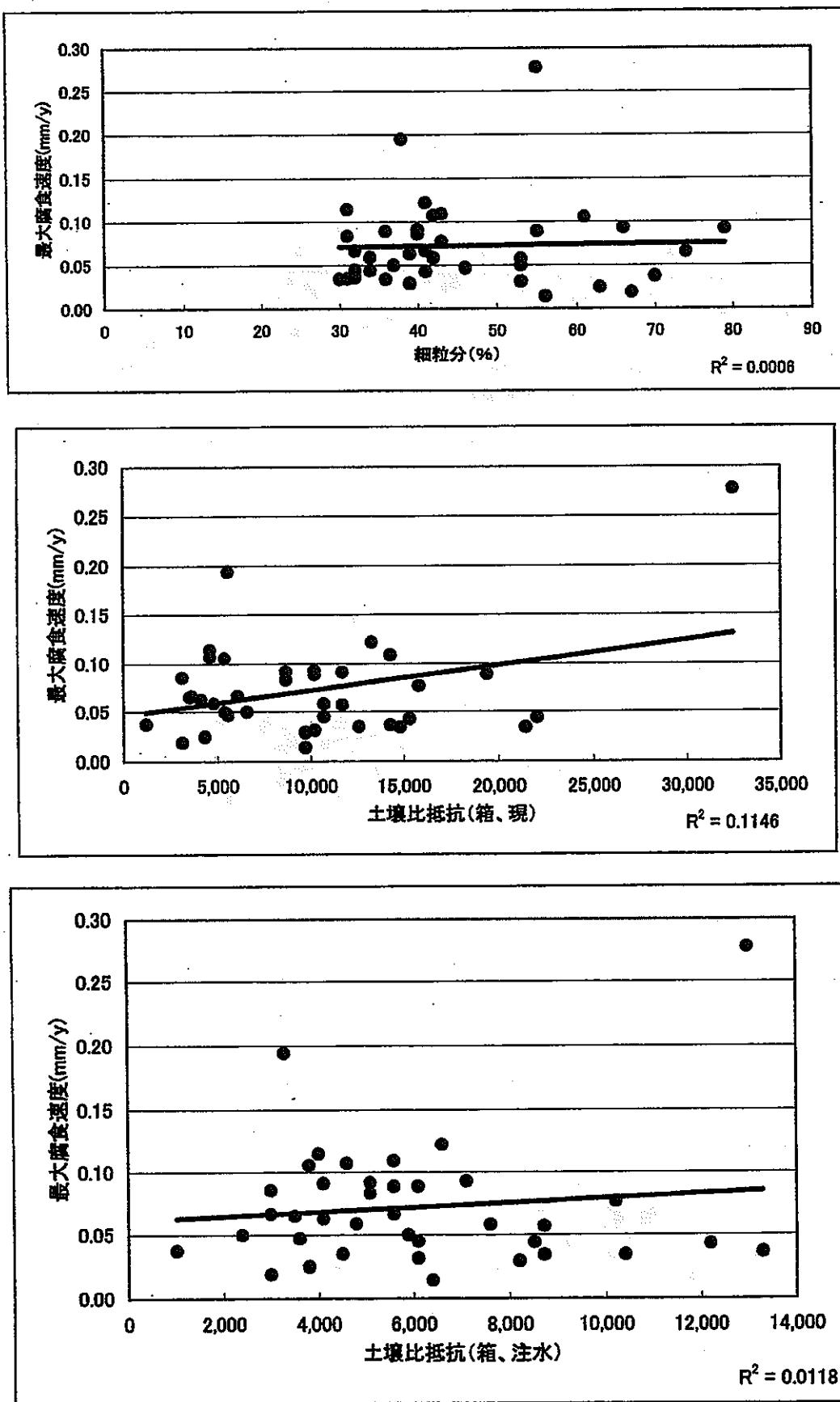


Figure-63 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その 4)

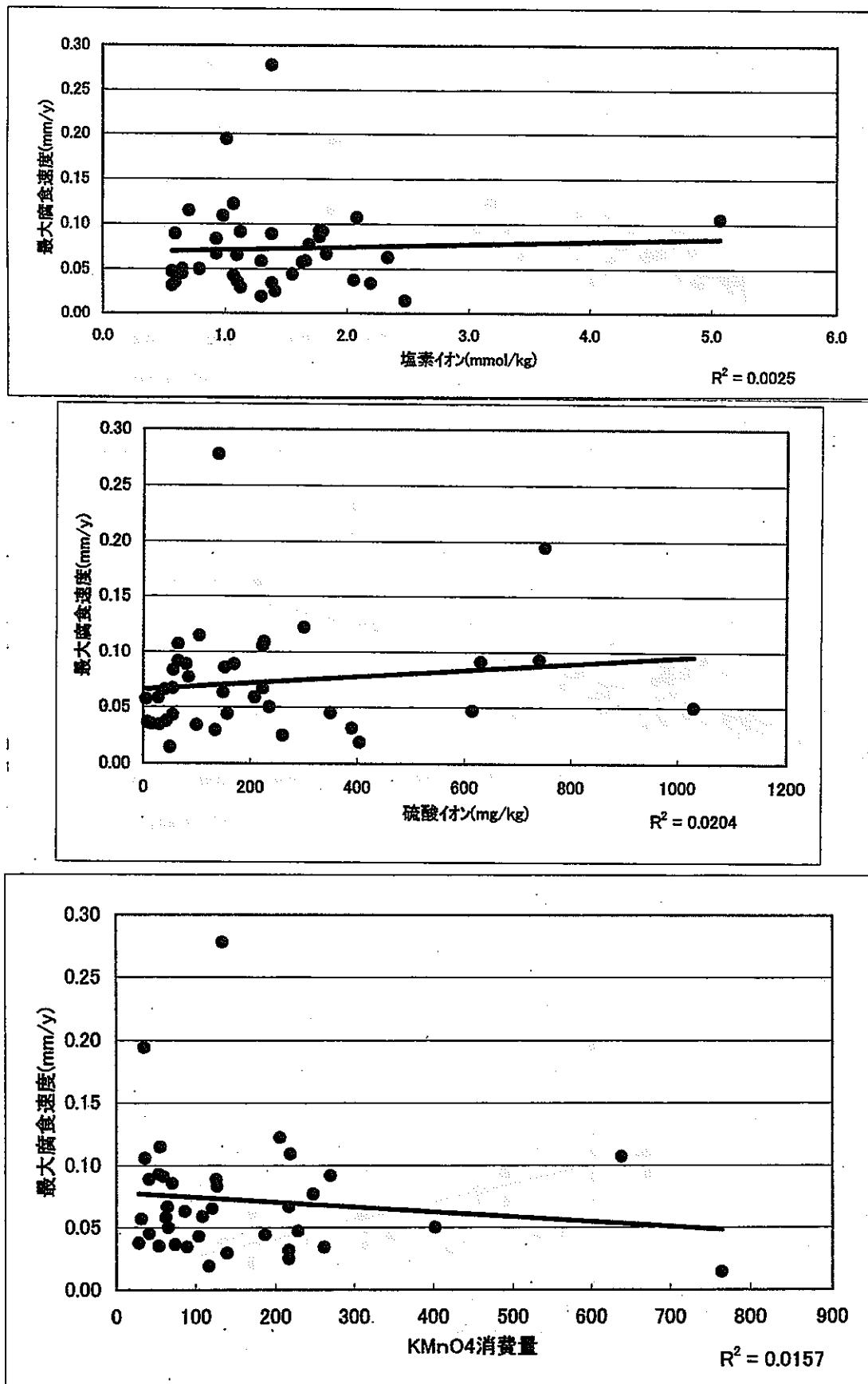


Figure-64 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その 5)

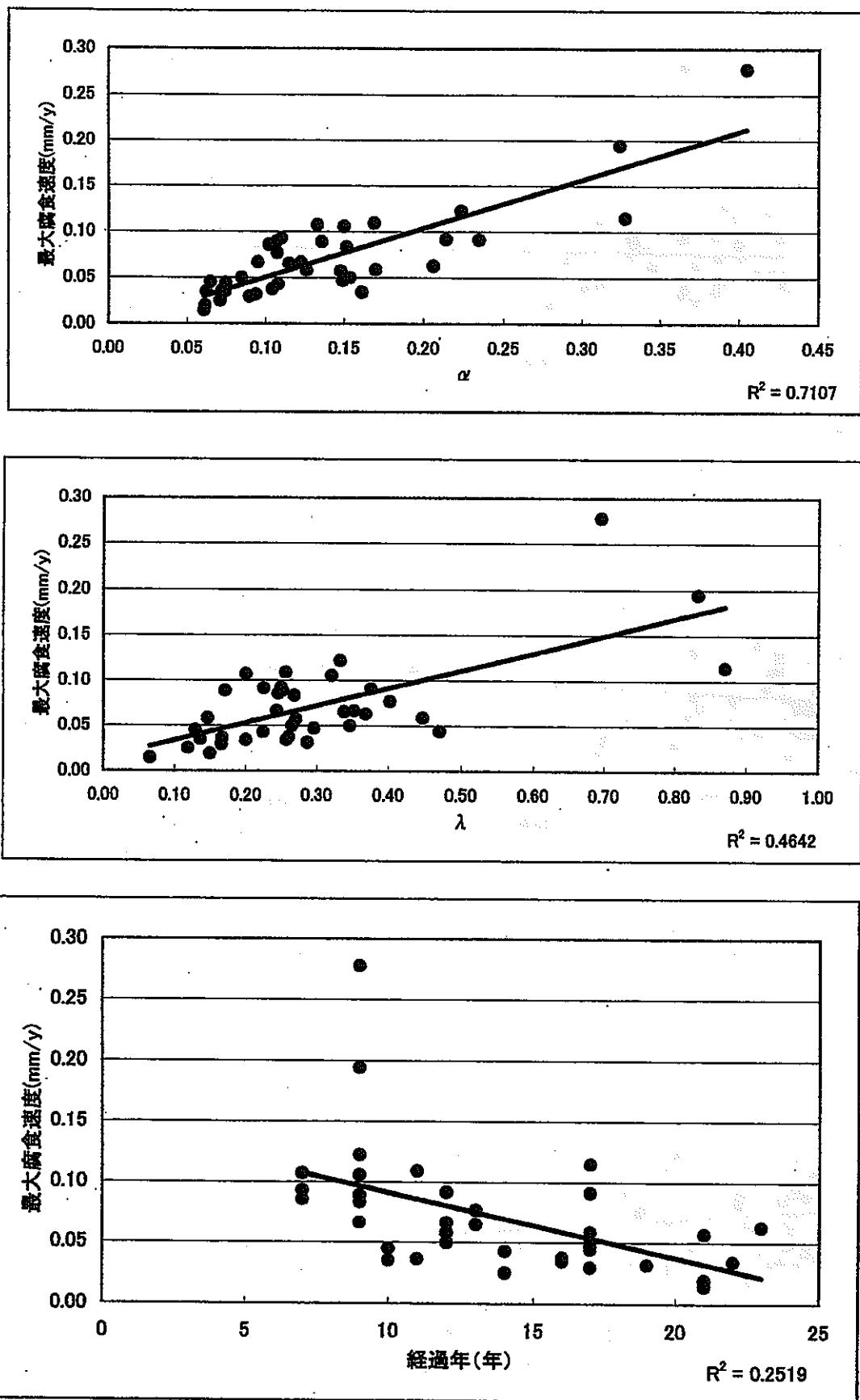
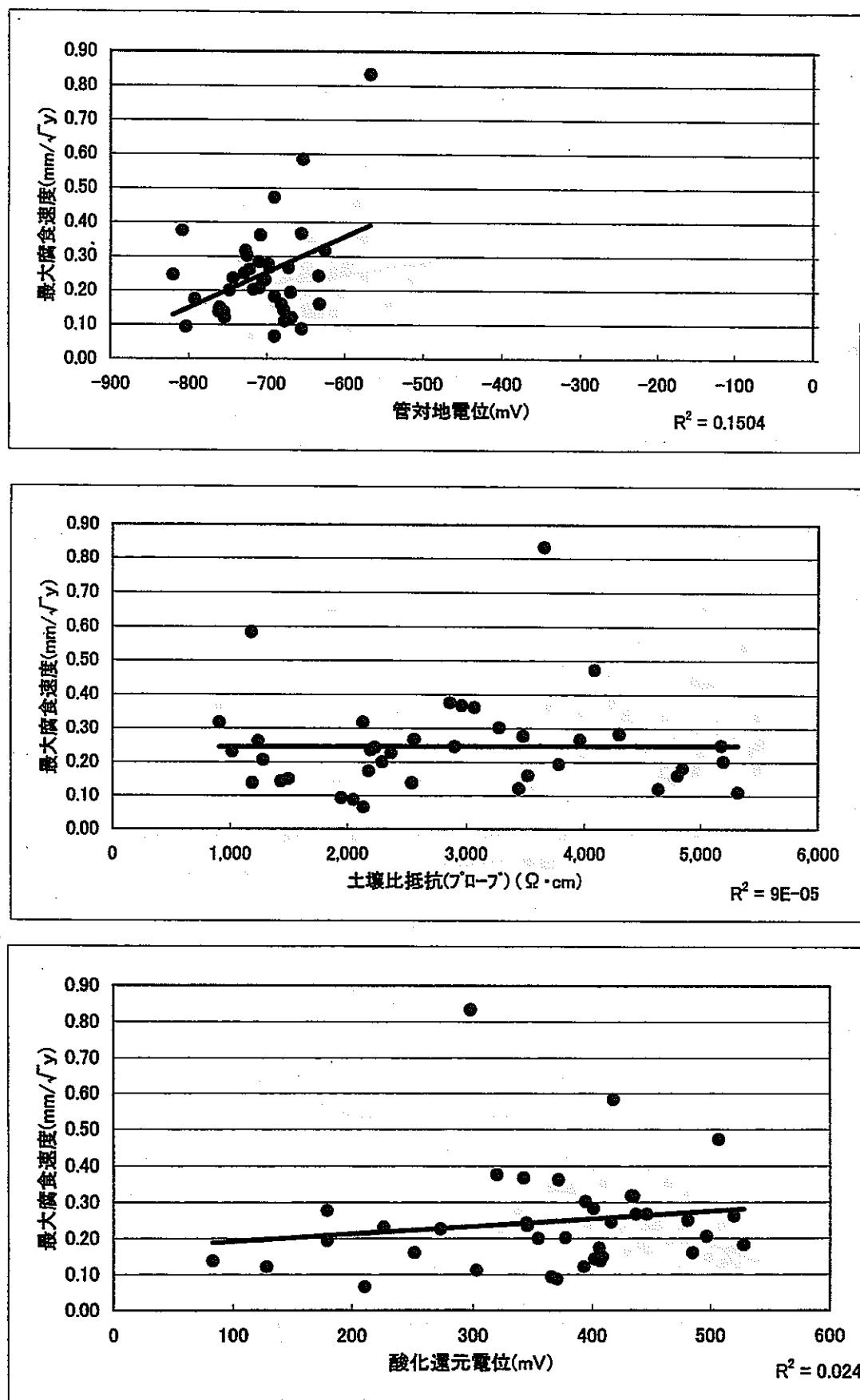
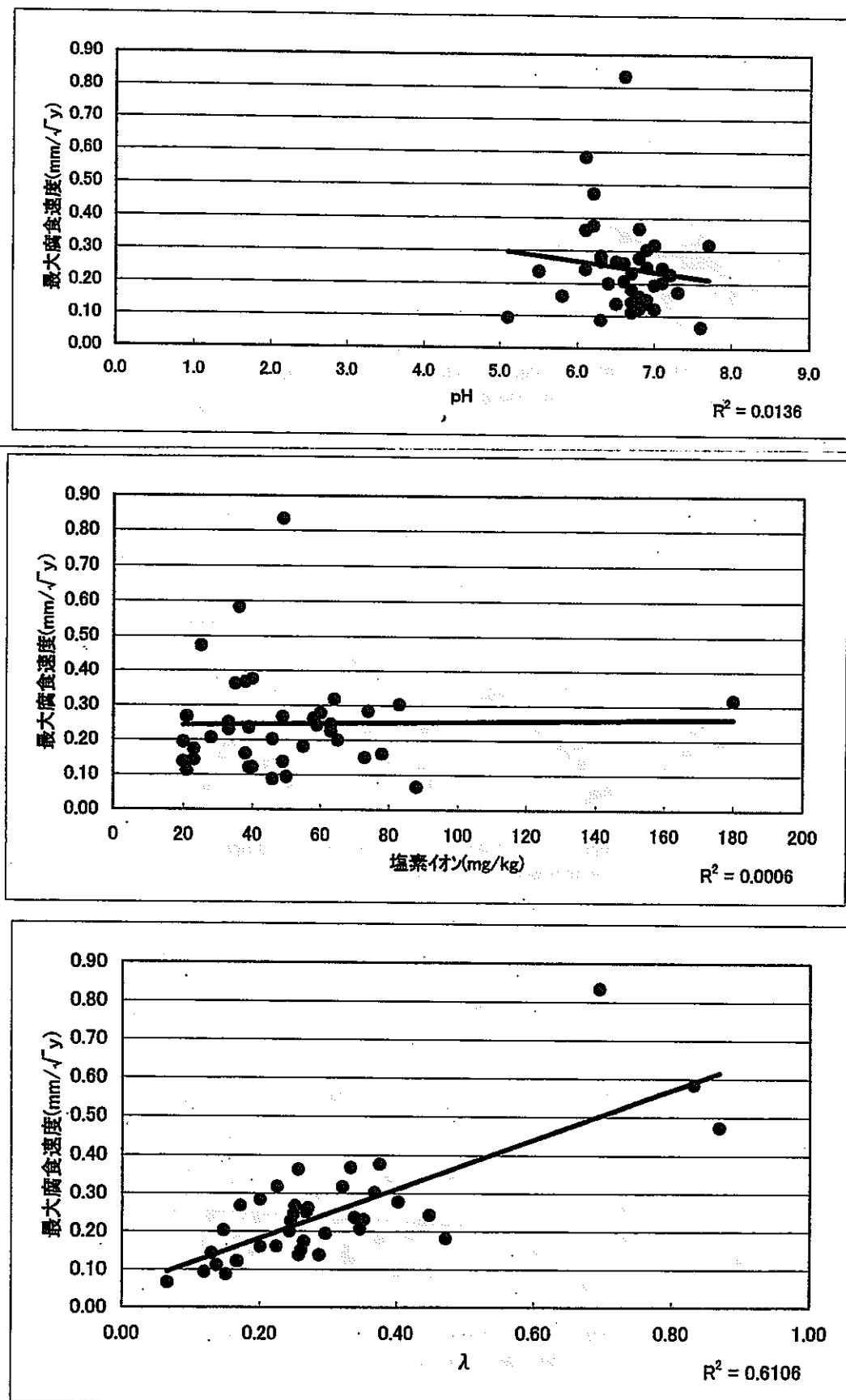


Figure-65 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/y) (その 6)

Figure-66 各環境因子に対する最大腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$) (その 1)

Figure-67 各環境因子に対する最大腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その 2)

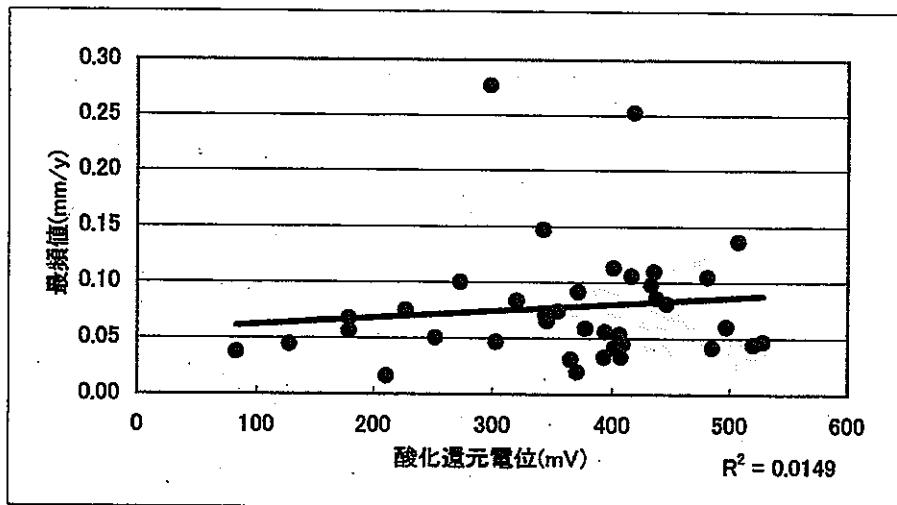
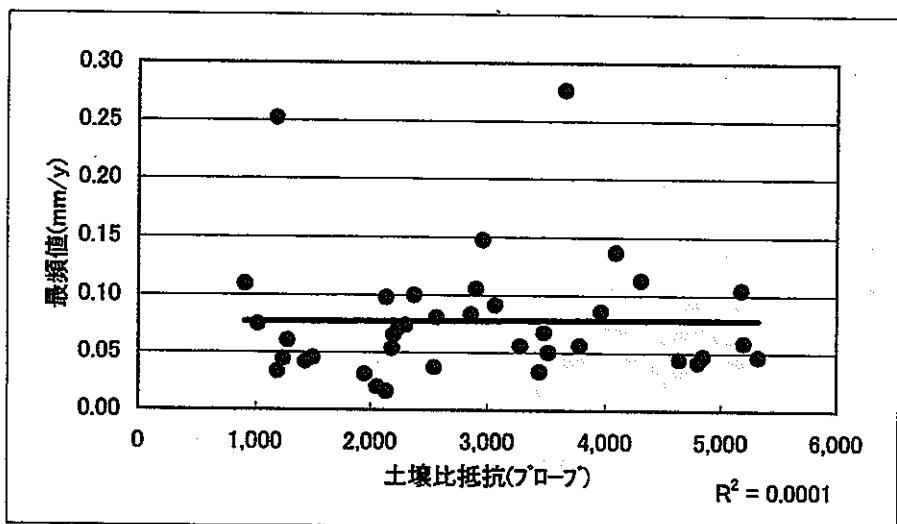
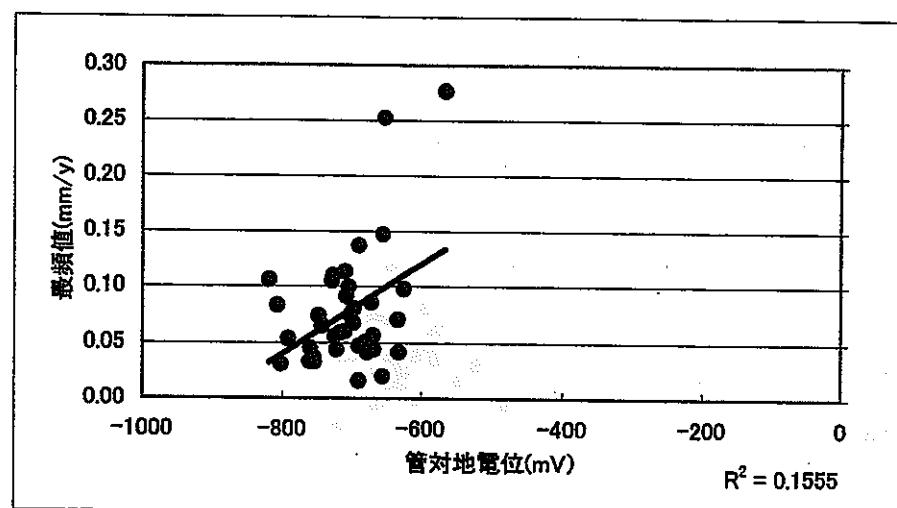


Figure-68 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その 1)

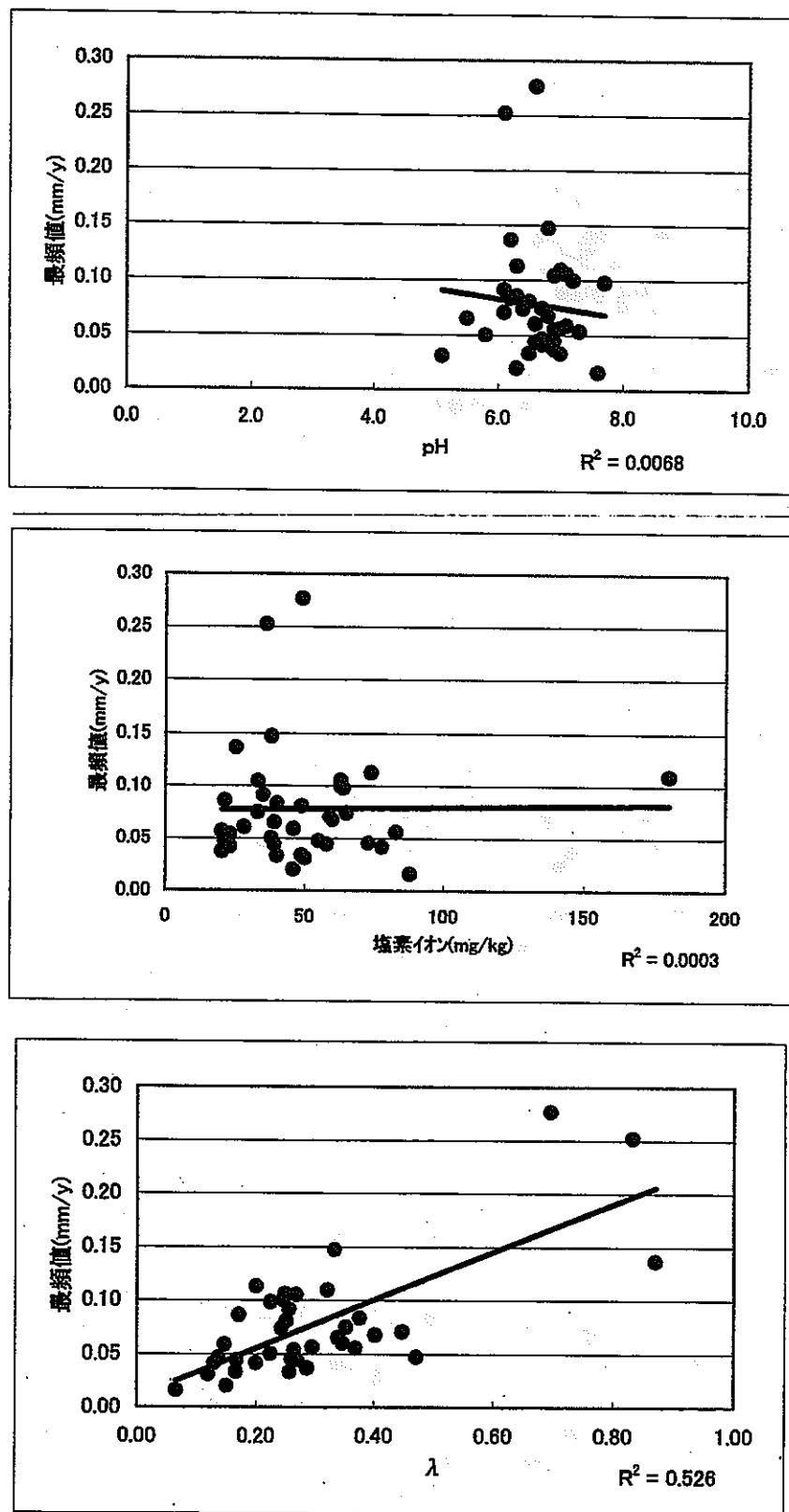


Figure-69 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その 2)

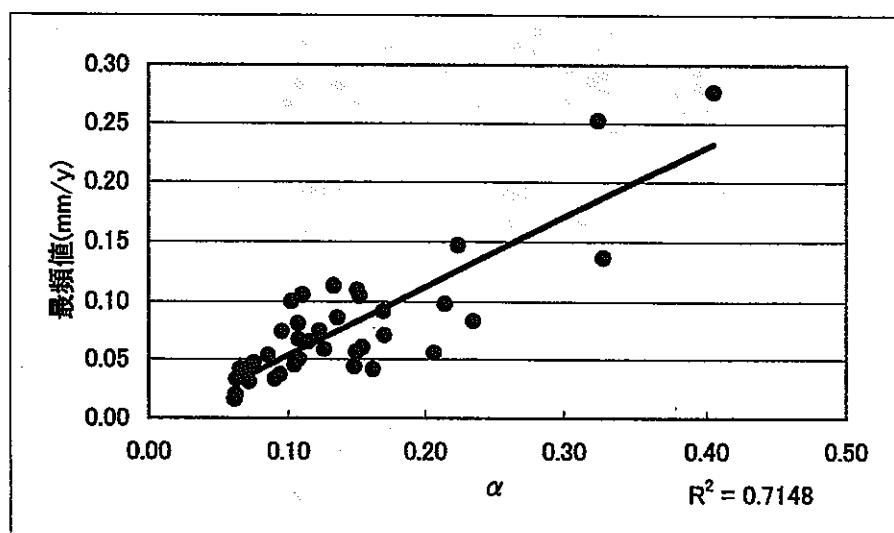
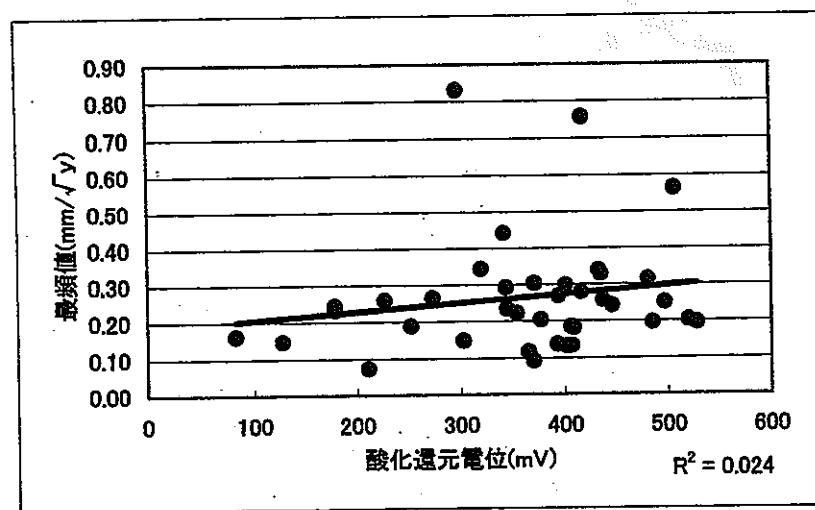
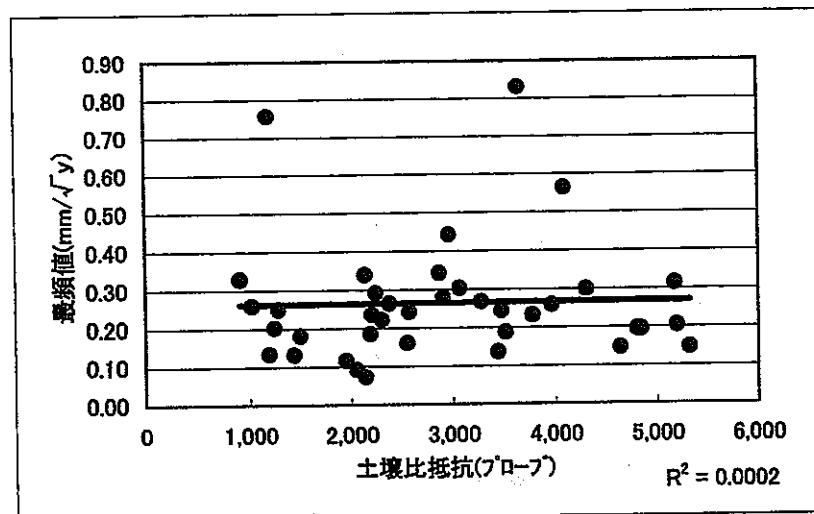
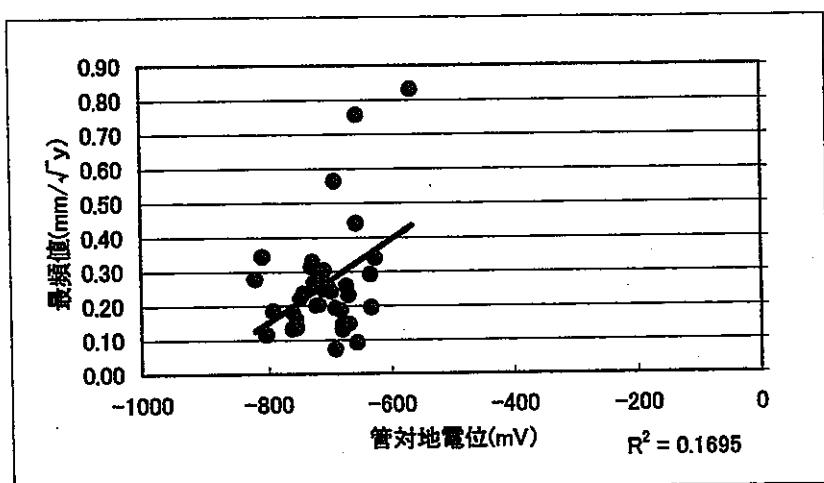
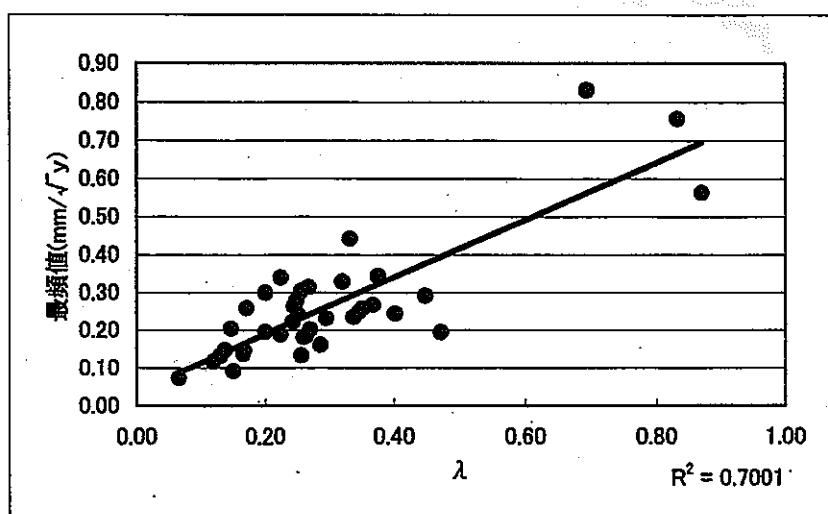
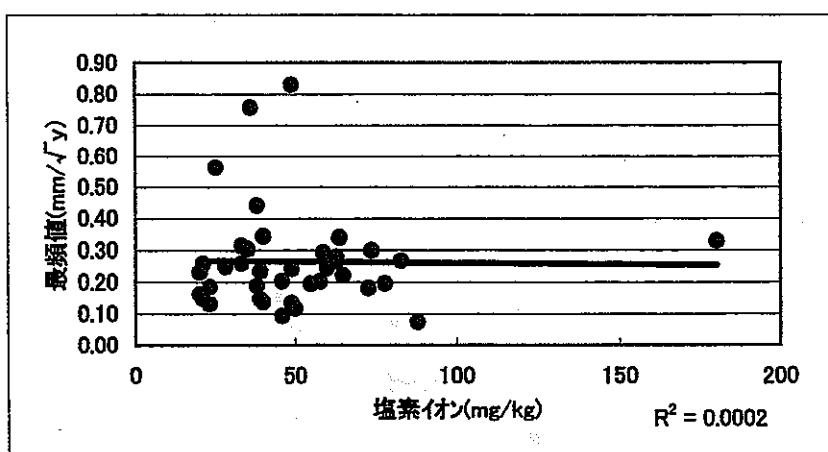
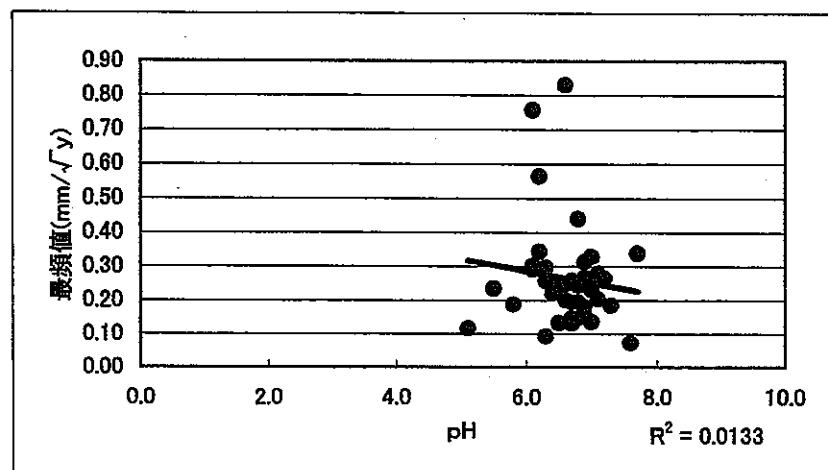


Figure-70 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/y) (その 3)

Figure-71 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) (その1)

Figure-72 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$) (その2)

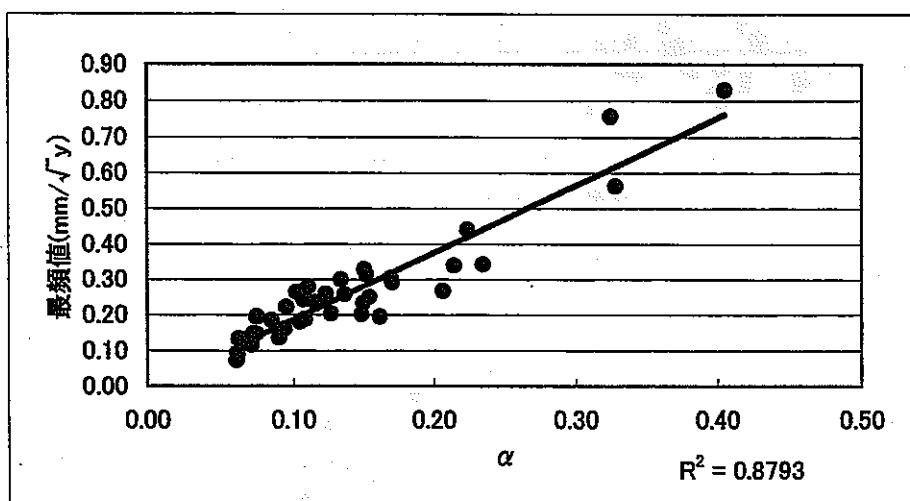


Figure-73 各環境因子に対する最頻値の腐食速度 (mm/\sqrt{y}) (その3)

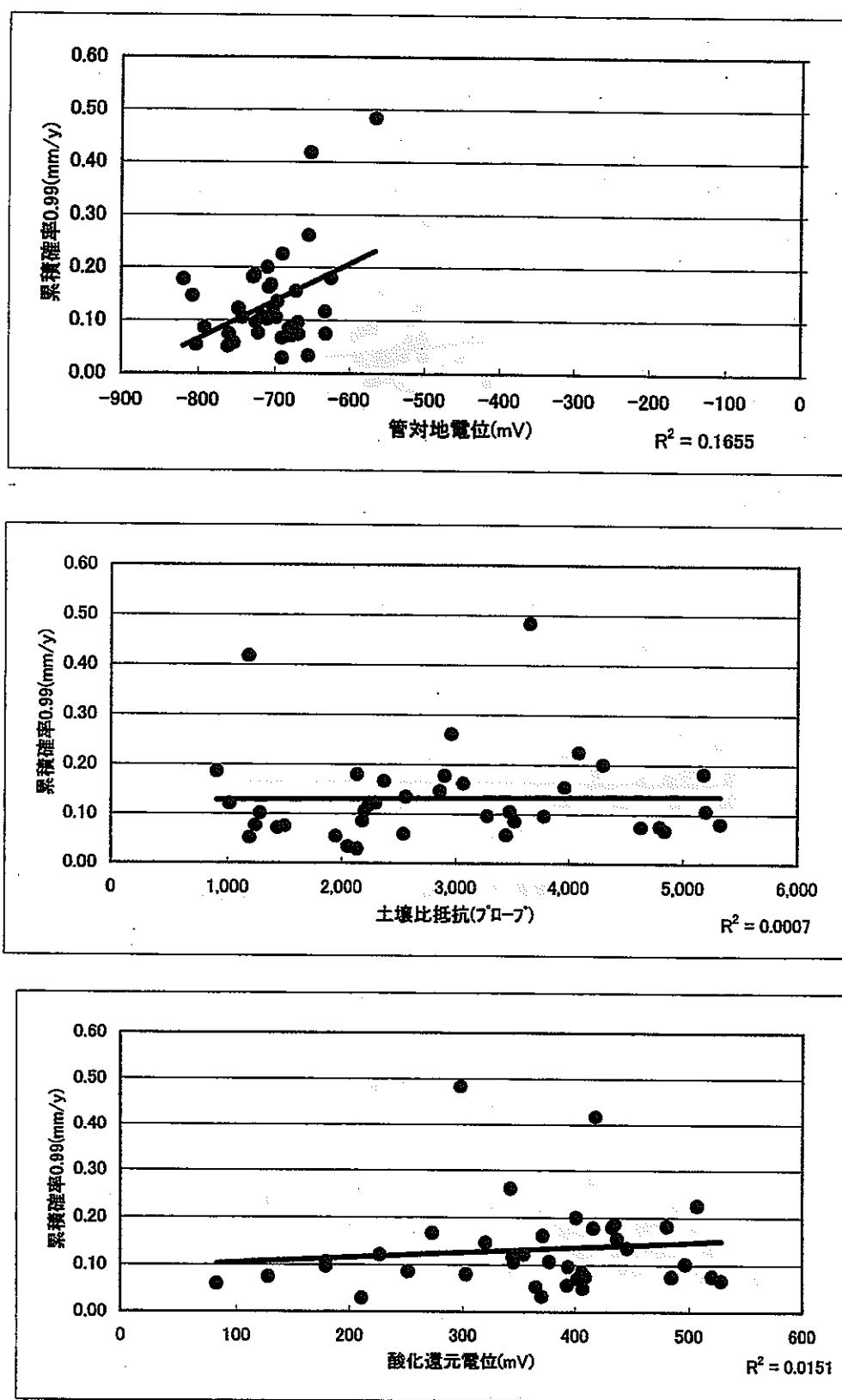


Figure-74 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 (mm/y) (その 1)

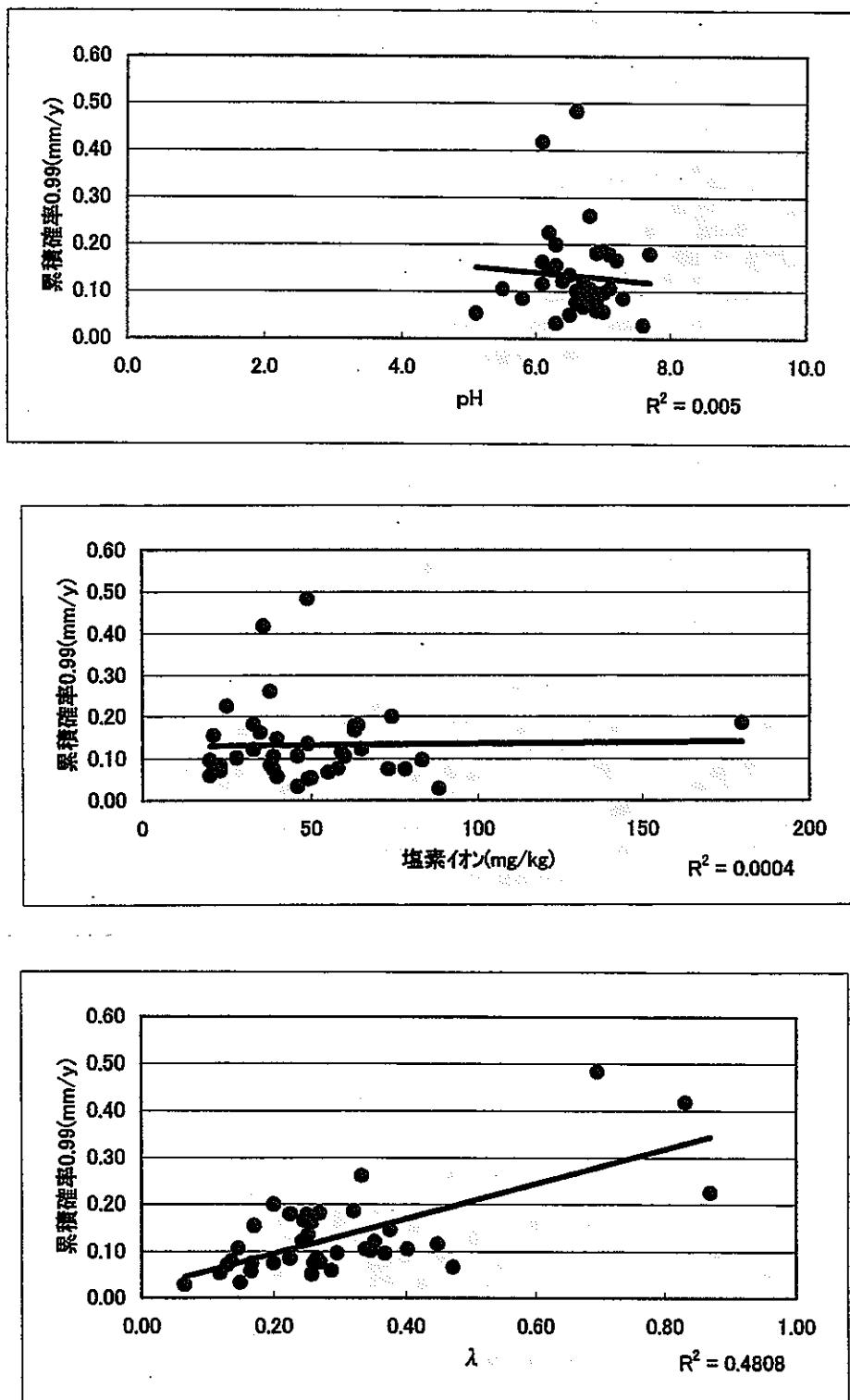


Figure-75 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 (mm/y) (その 2)

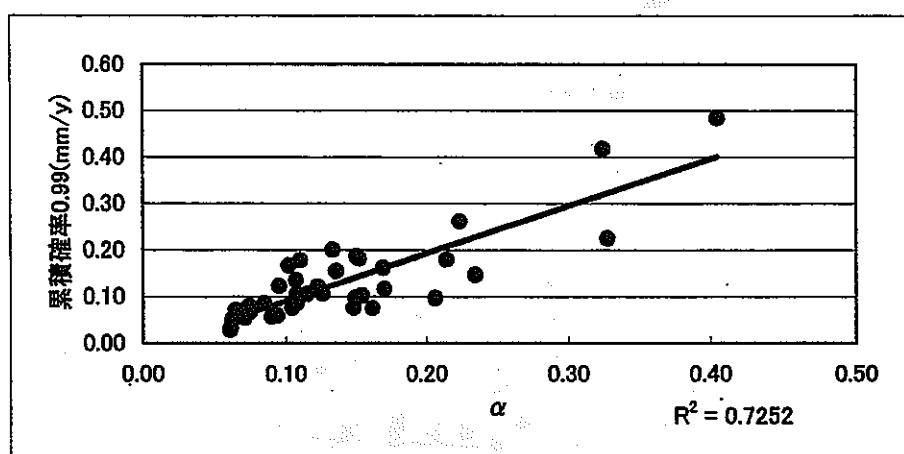
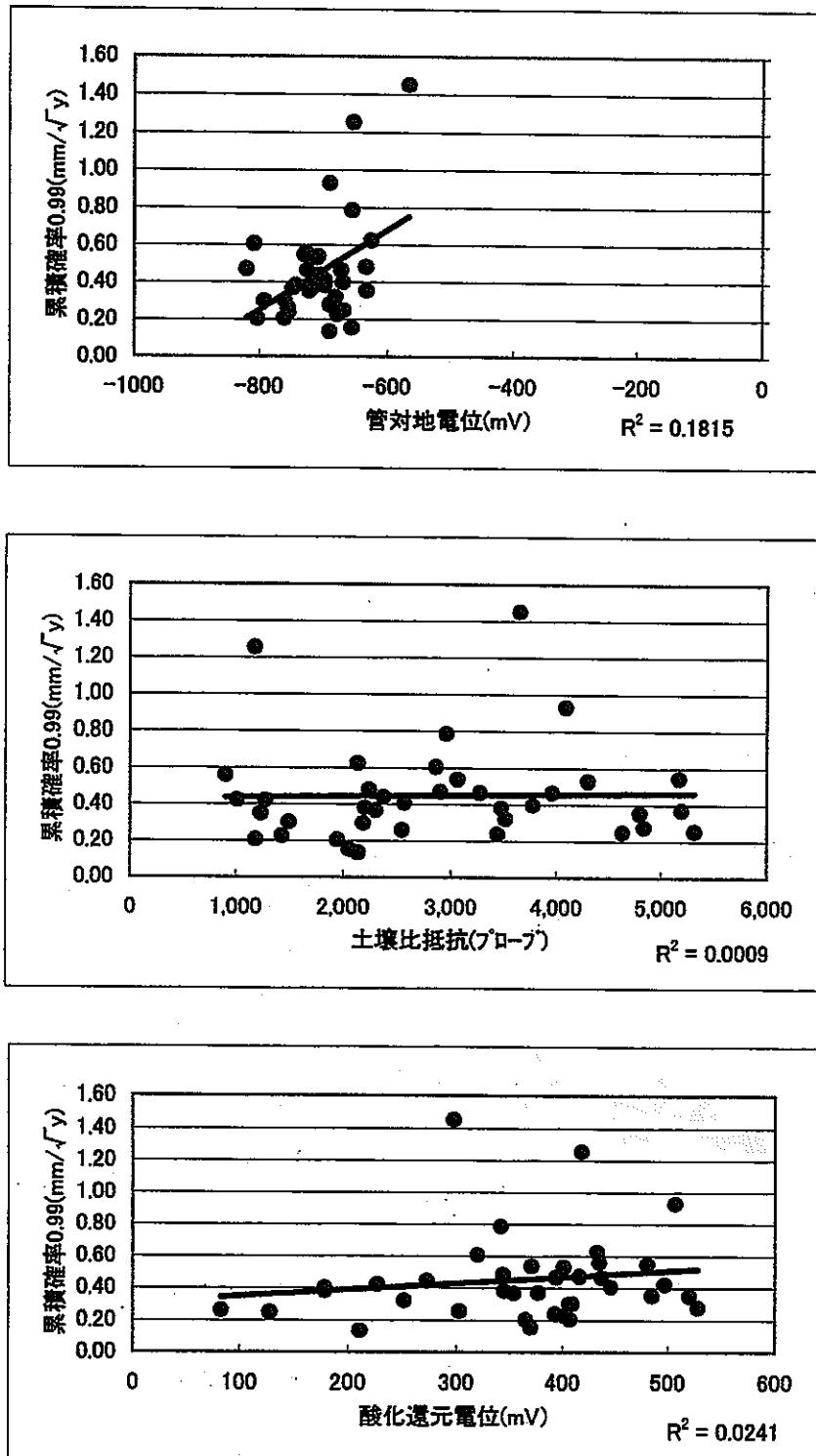


Figure-76. 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 (mm/y) (その 3)

Figure-77 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$) (その 1)

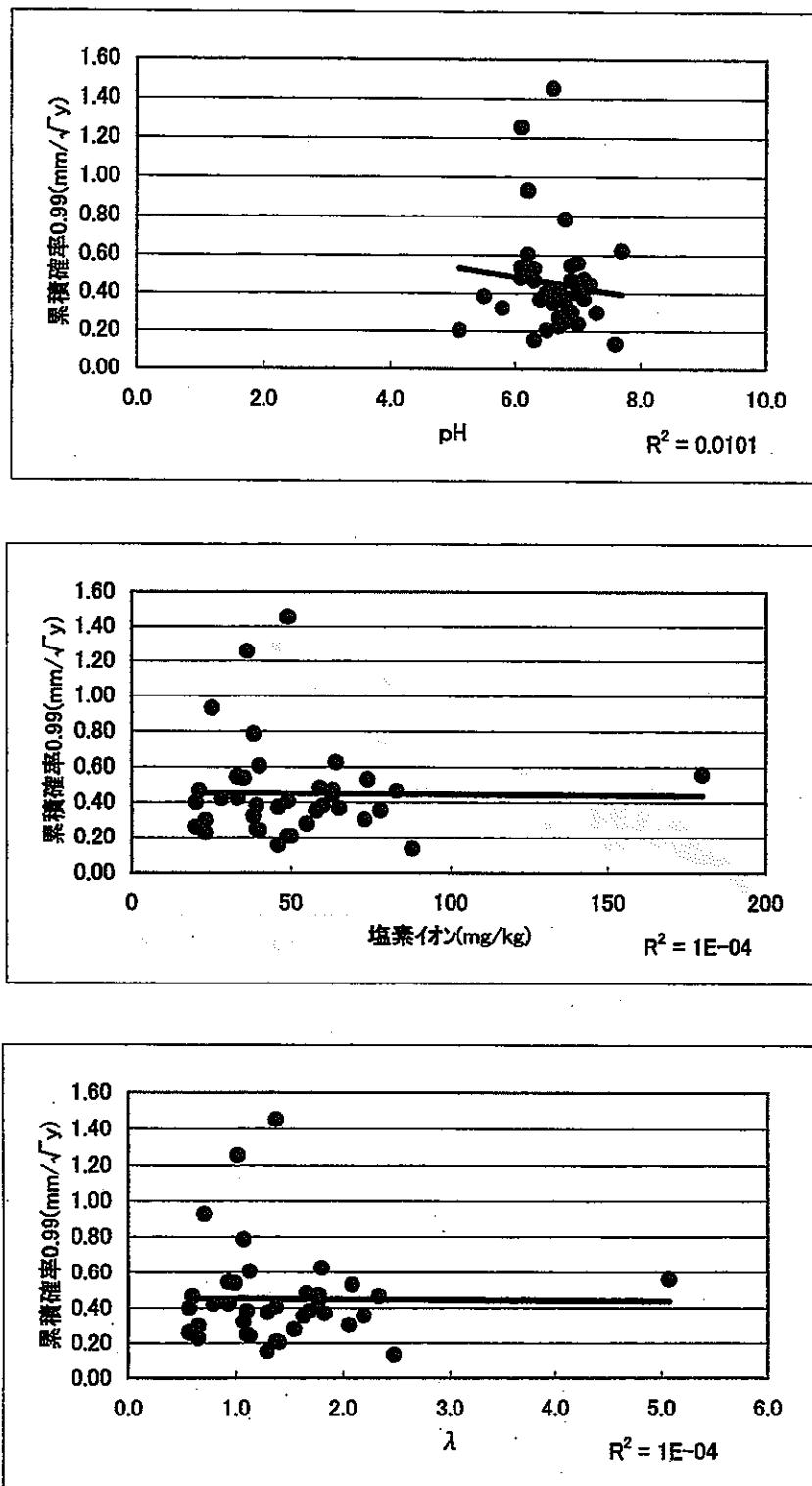
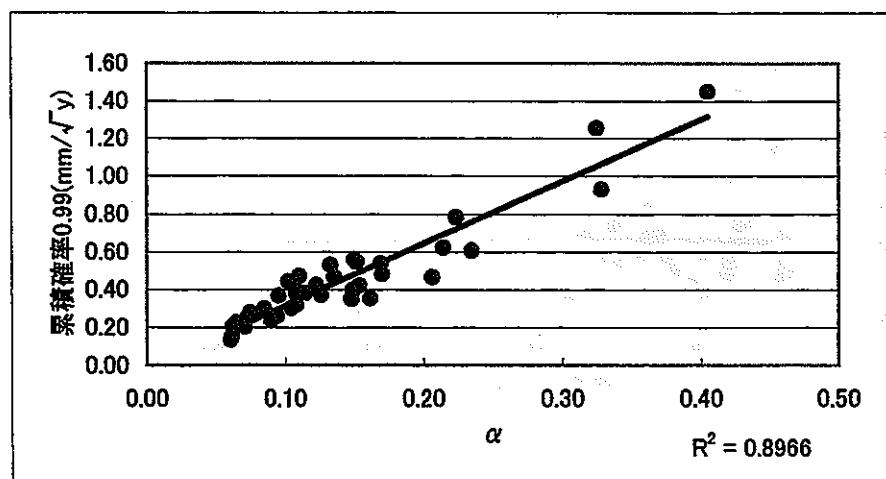


Figure-78 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$) (その 2)

Figure-79 各環境因子に対する累積確率 0.99 の腐食速度 ($\text{mm}/\sqrt{\text{y}}$) (その 3)

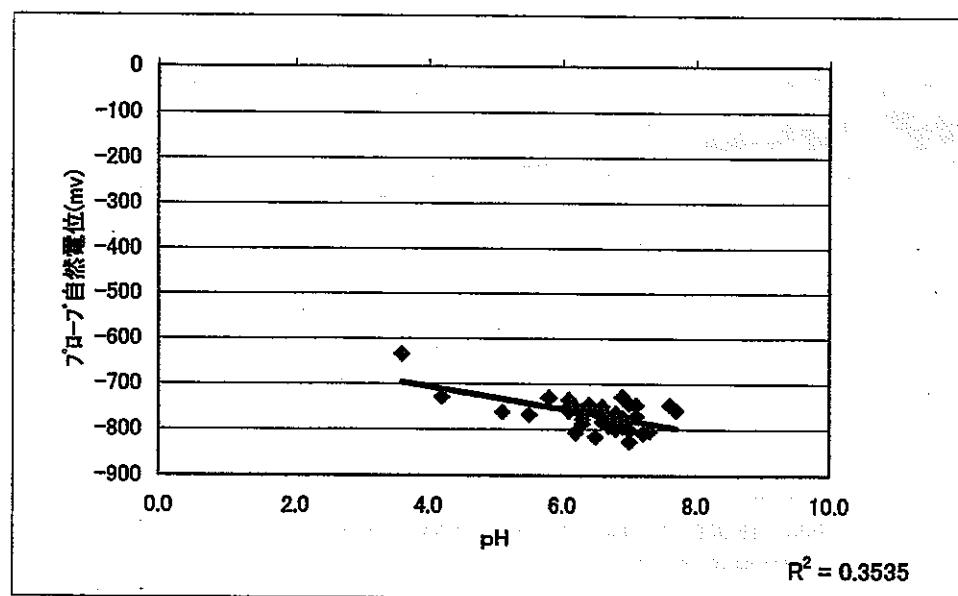
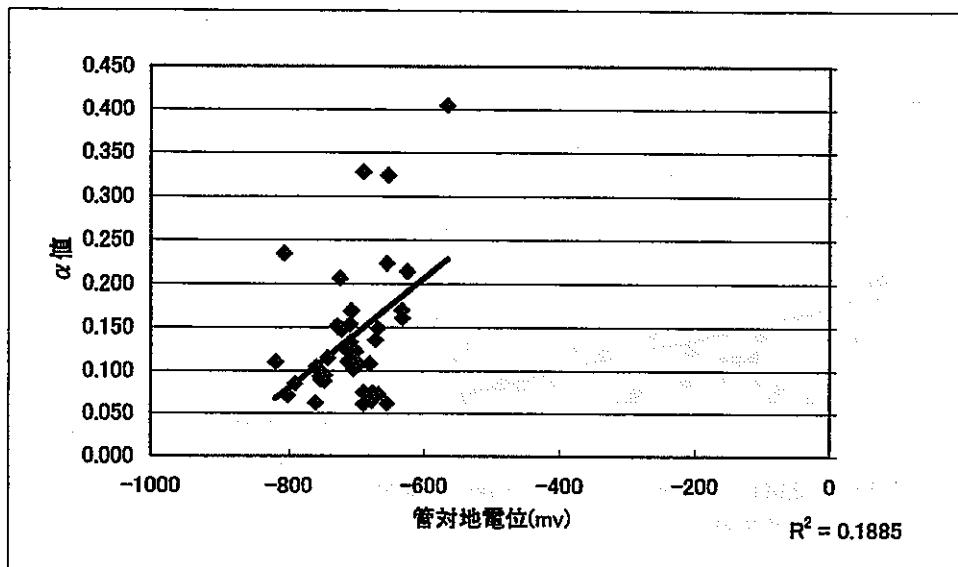


Figure-80 測定値間の相関図（代表例）（その1）

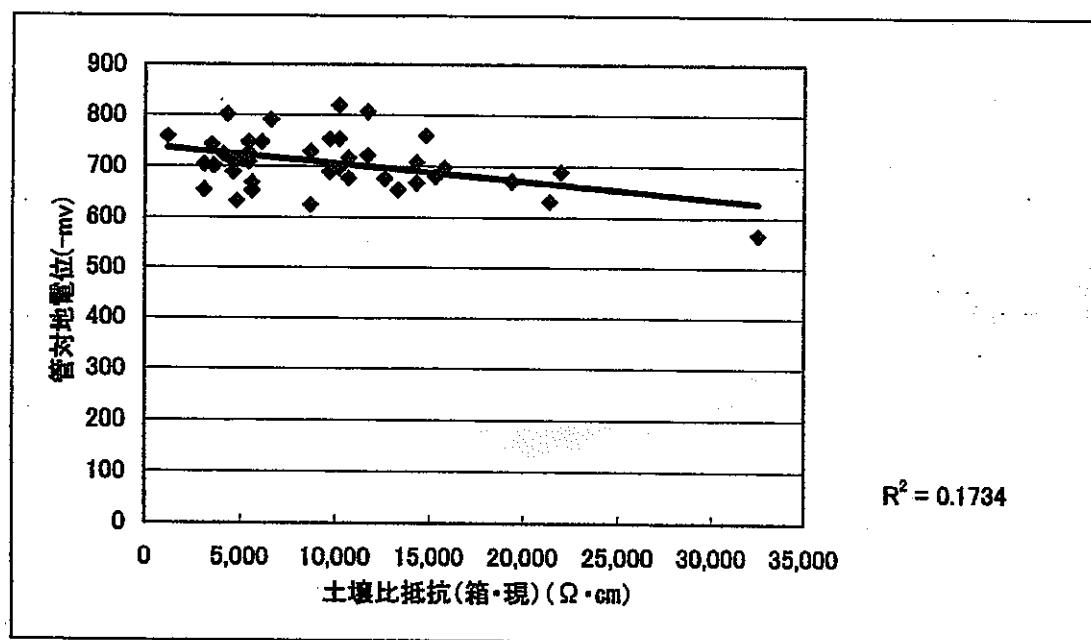
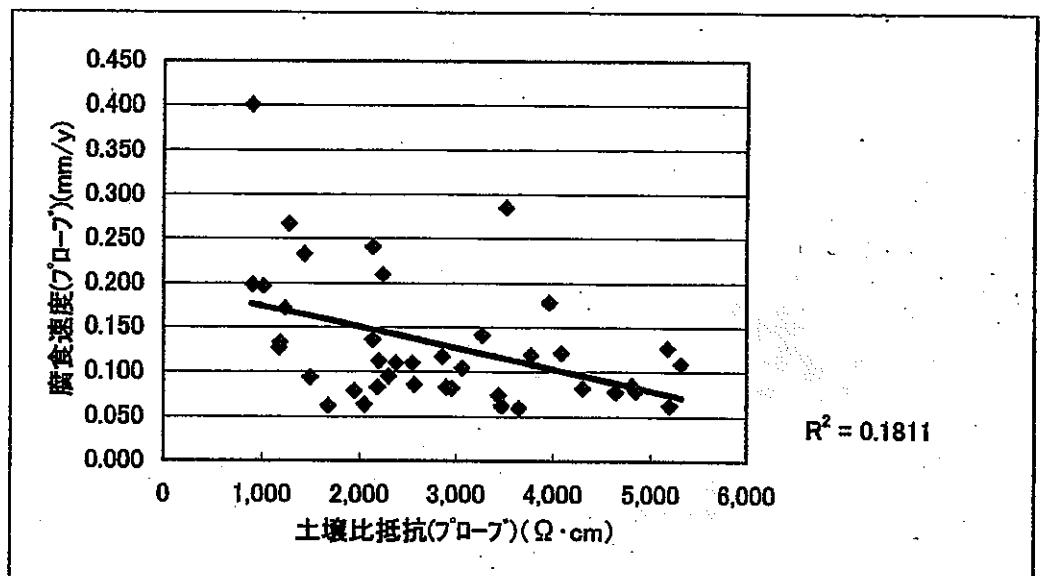


Figure-81 測定値間の相関図（代表例）（その2）

4. 2 孔食腐食速度と土壤環境因子との多変量解析

4.2.1 実測値

(1) 最大孔食腐食速度 (mm/y)

最大孔食腐食速度 (mm/y) を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に Pr(プローブ) 分極抵抗であった。

Table-12 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00041		8.74222
V11 Pr 分極抵抗	0.00012		3.93094
定数項	0.32706	0.2353023	

(2) 平均孔食腐食速度 (mm/y)

平均孔食腐食速度 (mm/y) を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に Pr(プローブ) 分極抵抗、3番目は硫化物であった。

Table-13 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00018		8.45171
V11 Pr 分極抵抗	0.00005		3.64808
V22 硫化物	0.00122		3.52809
定数項	0.13788	0.276727	

(3) 最大孔食腐食速度 (mm/ \sqrt{y})

最大孔食腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) を目的変数として、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なった。その結果によれば、管対地電位のみであった。

Table-14 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00104		6.36387
定数項	0.98169	0.1502193	

(4) 平均孔食腐食速度 (mm/ \sqrt{y})

平均孔食腐食速度 (mm/ \sqrt{y}) を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に硫酸塩であった。

なお、この因子の中で単相関で相関の認められるものは無かった。

Table-15 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00047		6.50992
V22 硫酸塩	0.00397		4.01383
定数項	0.42228	0.2087154	

4.2.2 極値計算値

(1) 極値（最頻値）(mm/y)

極値（最頻値）(mm/y)を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目にPr(プローブ)分極抵抗、3番目は硫酸塩であった。

Table-16 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00049		10.81498
V11 Pr 分極抵抗	0.00012		3.41134
V22 硫酸塩	0.00274		3.00360
定数項	0.37749	0.2971265	

(2) 極値（最頻値）(mm/ \sqrt{y})

極値（最頻値）(mm/ \sqrt{y})を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に硫酸塩であった。

Table-17 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2

Fout 値 : 2

選 抹	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00133		9.38599
V22 硫酸塩	0.00909		3.79879
定数項	1.15949	0.2504544	

(3) 極値(累積確率 0.99) (mm/y)

極値(累積確率 0.99) (mm/y) を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に Pr(プローブ)分極抵抗、3番目は硫酸塩であった。

Table-18 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2
Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00086		11.31740
V11 Pr 分極抵抗	0.00020		3.38289
V22 硫酸塩	0.00459		2.85814
定数項	0.66221	0.3013791	

(4) 極値(最頻値) (mm/ \sqrt{y})

極値(最頻値) (mm/ \sqrt{y}) を目的変数として、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なった。その結果によれば、1番目に管対地電位、2番目に硫酸塩であった。

Table-19 ステップワイズ法による解析結果

条件 ; Fin 値 : 2
Fout 値 : 2

選 択	偏回帰係数	決定係数	F 値
V9 管対地電位	0.00235		10.07521
V22 硫酸塩	0.01521		3.62877
定数項	2.04220	0.2585215	

5. 水道管埋設管と簡易ガスおよびベントナイトの土壤環境の比較

5.1 調査内容

水道管と簡易ガス管の調査条件を比較した表をTable-20に示す。

水道管は埋設期間が20年から60年で材質が鉄管であるが、調査長が1mと短い。これに対し、ガス管は埋設期間が短く、材質が亜鉛メッキ鋼管でネジ継手である。調査管路長が10mと長い。

ベントナイト中のヒーターは埋設期間が非常に短く、調査対象としては大きく、かつ本体の温度が高い環境である。

Table-20 埋設水道管と簡易ガス管およびベントナイト中ヒーターの比較表

	水道管	簡易ガス管	ベントナイト中 ヒーター
管の材質	鉄管	亜鉛メッキ管 裸鋼管	鋼
埋設期間	20年～60年	7年～23年	1.5年
管径（呼径）	100A～350A	50(60.5mm ϕ) A	1.04m ϕ
調査管長	1m	10m	1.95m
継ぎ手構造	ロウ付け型 押輪型	ネジ継手	重ね合わせ
埋設深さ	地面下1～2m	地面下1～2m	地面下2～4m
周囲温度	常温	常温	0.7年間100°C 0.7年間常温

5.2 土壤環境因子の比較

水道管とガス管とベントナイトの土壤環境因子を比較するために比較表ならびに図をTable-21とFigure-82に示す。

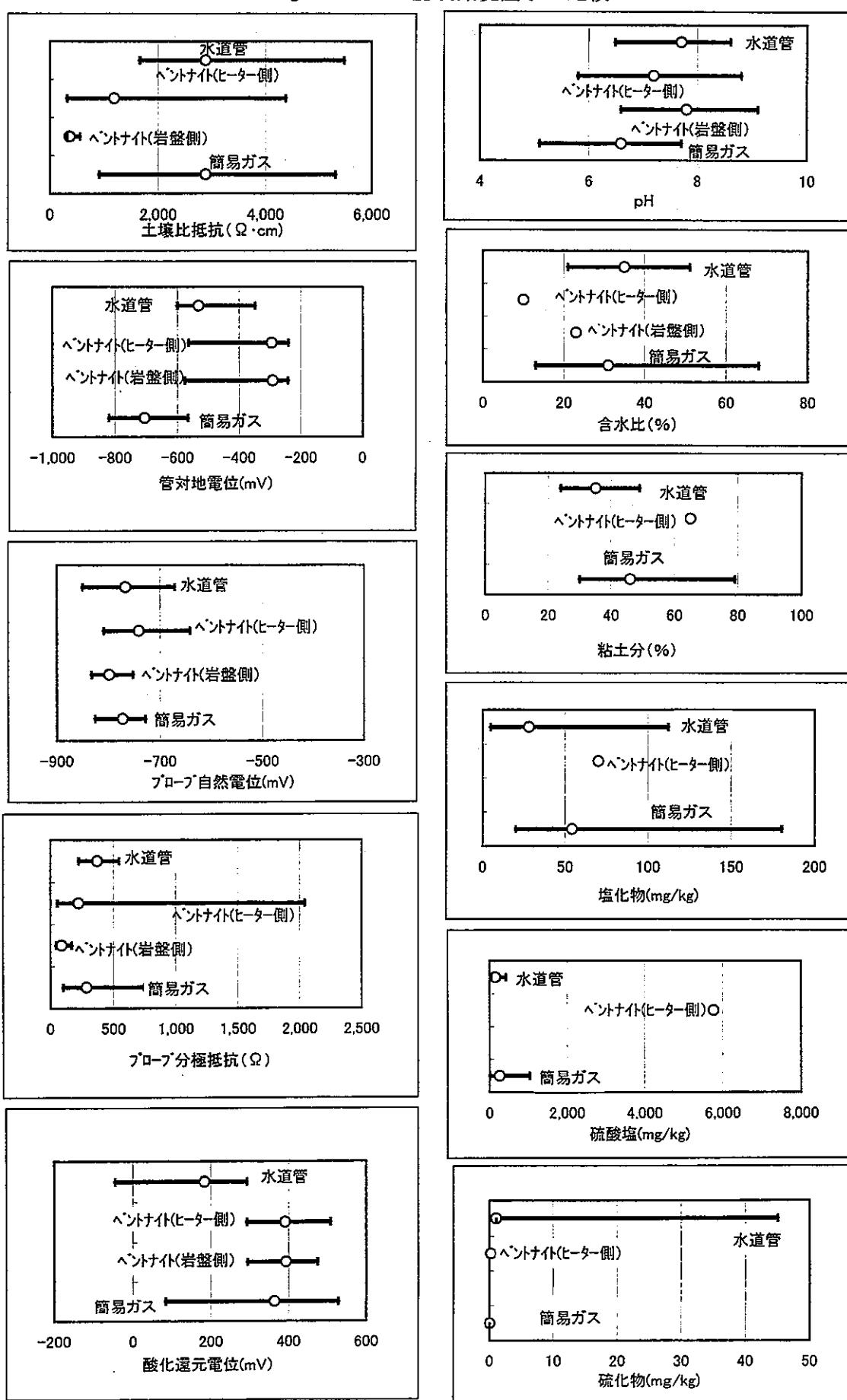
この図から

- ① 土壌比抵抗、プローブ分極抵抗、プローブ自然電位、pH、含水率は水道管と平均値、範囲ともほぼ同じである。
- ② 管対地電位はガス管だけがやや卑である。
- ③ 酸化還元電位は水道管に比し、やや酸化性であり、釜石のベントナイトと同様である。
- ④ 塩化物、硫酸塩は簡易ガスが水道管より、含有量が多い。これは抽出液が簡易ガスは試料の2.5倍、水道管は試料の5倍としていることの差と考えられる。

Table-21 土壌環境因子の比較

	対象	最大値	平均値	最小値
土壤 比抵抗 (Ω·cm)	水道管理設土壌	5,480	2,887	1,653
	ペントナイト(ヒーター側)	4,380	1,182	319
	ペントナイト(岩盤側)	548	358	311
	ガス管理設土壌	5,322	2,887	908
酸化 還元電位 (mv)	水道管理設土壌	291	183	-46
	ペントナイト(ヒーター側)	508	390	291
	ペントナイト(岩盤側)	475	392	293
	ガス管理設土壌	528	362	83
管対地 電位 (mV)	水道管理設土壌	-350	-532	-601
	ペントナイト(ヒーター側)	-242	-297	-564
	ペントナイト(岩盤側)	-243	-294	-576
	ガス管理設土壌	-566	-706	-820
プローブ 自然電位 (mV)	水道管理設土壌	-672	-768	-851
	ペントナイト(ヒーター側)	-642	-742	-810
	ペントナイト(岩盤側)	-753	-799	-833
	ガス管理設土壌	-729	-773	-826
プローブ 分極抵抗 (Ω)	水道管理設土壌	544	369	219
	ペントナイト(ヒーター側)	2,040	220	55
	ペントナイト(岩盤側)	168	87	46
	ガス管理設土壌	747	284	100
pH	水道管理設土壌	9	8	7
	ペントナイト(ヒーター側)	9	7	6
	ペントナイト(岩盤側)	9	8	7
	ガス管理設土壌	8	7	5
含水比(%)	水道管理設土壌	51	35	21
	ペントナイト(ヒーター側)		10	
	ペントナイト(岩盤側)		23	
	ガス管理設土壌	68	31	13
粘土分(%)	水道管理設土壌	49	35	24
	ペントナイト(ヒーター側)		65	
	ペントナイト(岩盤側)			
	ガス管理設土壌	79	46	30
塩化物 (mg/kg)	水道管理設土壌	112	28	5
	ペントナイト(ヒーター側)		70	
	ペントナイト(岩盤側)			
	ガス管理設土壌	180.0	54.0	20.0
硫酸塩 (mg/kg)	水道管理設土壌	413	141	37
	ペントナイト(ヒーター側)		5,760	
	ペントナイト(岩盤側)			
	ガス管理設土壌	1,030.0	254.0	5.0
硫化物 (mg/kg)	水道管理設土壌	45	1	1
	ペントナイト(ヒーター側)		48	
	ペントナイト(岩盤側)			
	ガス管理設土壌	0	0	0

Figure-82 土壤環境因子の比較



5.3 実測ならびに極値統計解析の孔食腐食速度の比較

実測ならびに極値統計解析の孔食腐食速度（mm/y）を比較するために比較表ならびに図をTable-22とFigure-83, 84に示す。

この図から

水道管の孔食腐食速度は小さく、簡易ガス管の範囲の中にはいる。また、ヒーターの実測の腐食速度の範囲と簡易ガス管の極値統計解析の腐食速度は同様の腐食速度である。

Table-22 孔食深さと孔食腐食速度の比較

	実測の平均					
	孔食深さ(mm)			孔食腐食速度(mm/y)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
水道管	1.14	0.835	0.24	0.037	0.023	0.012
ヒーター		0.129			0.086	
簡易ガス管	1.04	0.38	0.1	0.11	0.03	0.01

	実測の最大孔食深さ					
	孔食深さ(mm)			孔食腐食速度(mm/y)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
水道管	2.9	1.863	1.20	0.071	0.052	0.032
ヒーター		0.76			0.507	
簡易ガス管	2.50	0.87	0.30	0.28	0.07	0.01

	極値の最頻値					
	孔食深さ(mm)			孔食腐食速度(mm/y)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
水道管	3.0	2.388	1.4	0.115	0.068	0.041
ヒーター		0.846			0.564	
簡易ガス管	2.49	0.93	0.34	0.28	0.08	0.02

	極値の累積確率0.99の最大孔食					
	孔食深さ(mm)			孔食腐食速度(mm/y)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
水道管	4.5	3.563	2.1	0.177	0.102	0.06
ヒーター	0.76	0.27	0.05	0.51	0.18	0.03
簡易ガス管	4.35	1.58	0.61	0.48	0.13	0.03

但し;平成10年度の「土壤埋設鋼材の長期挙動に関する研究(X-I)」に記載されている $0.248\text{m}^2(3 \times 4\text{メッシュ}, 18\text{サンプル})$ の値である。

※1は、ヒーター1段(全4段)毎の最大最小平均のうちの全最大、最小、平均

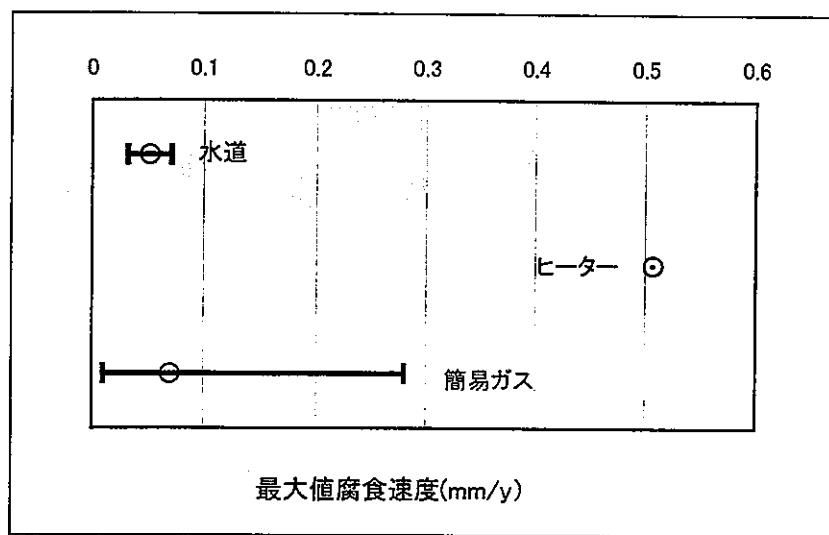
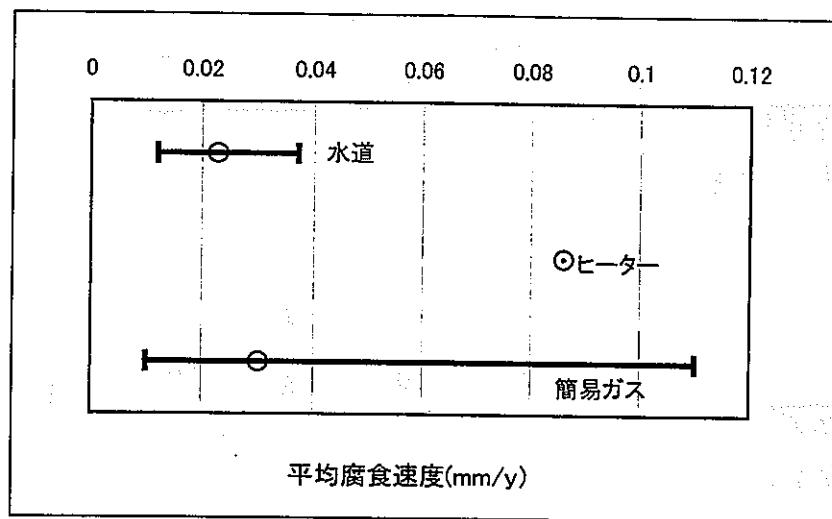


Figure-83 孔食腐食速度の比較(その1)

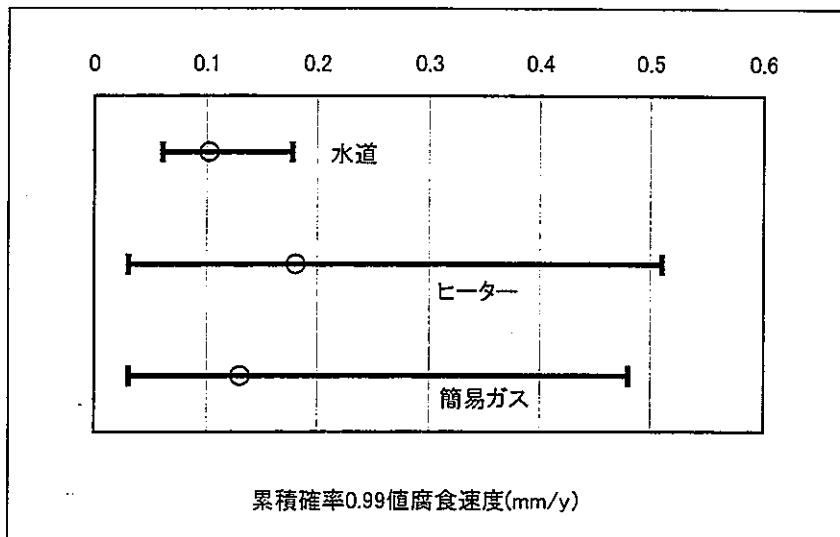
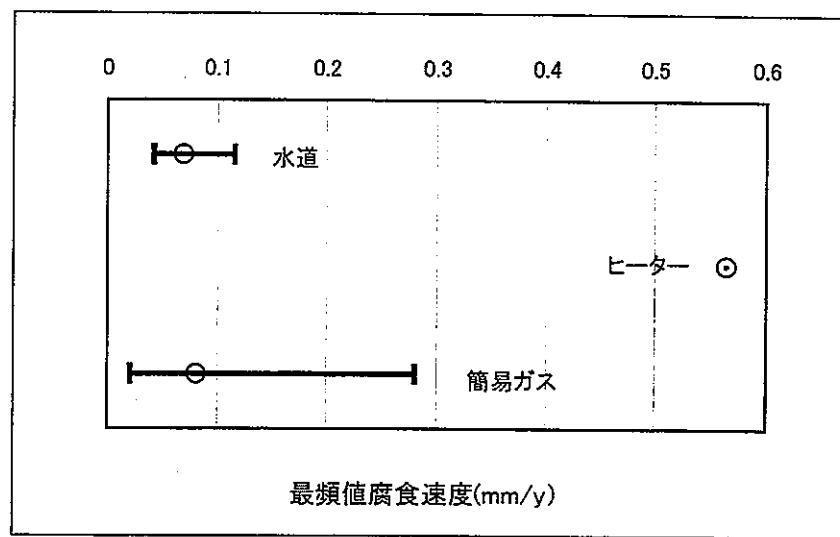


Figure-84 孔食腐食速度の比較（その2）

6. 腐食モデル式

腐食モデル式として、中性、低溶存酸素環境の孔食深さは $H=aY^n$ に当てはめられることがから、簡易ガス管の各孔食データを当てはめて a と n を求めた。

6.1 簡易ガス管の孔食データの近似式

(1) 実測の最大値 (Figure-85)

簡易ガス管の最大孔食深さの実測値に基づく腐食モデル式を $H=aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。この結果、

$$H = 0.91 Y^{-0.07} \text{ となり、}$$

n が 0 に近く、埋設経過年が経っても孔食深さが増加しない関係式となっている。

(2) 実測の平均値 (Figure-86)

簡易ガス管の実測の平均に基づく腐食モデル式を $H=aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。この結果、

$$H = 0.41 Y^{-0.07} \text{ となり、}$$

n が 0 に近く、埋設経過年が経っても孔食深さが増加しない関係式となっている。

(3) 極値統計の累積確率 0.99 の最大孔食深さ (Figure-87)

簡易ガス管の極値統計の累積確率 0.99 の最大孔食深さに基づく腐食モデル式を $H=aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。この結果、

$$H = 1.89 Y^{-0.112} \text{ となり、}$$

n が 0 に近く、埋設経過年が経っても孔食深さが増加しない関係式となっている。

また係数が異常に大きい。

(4) 極値統計解析による最頻値

簡易ガス管の極値統計による最頻値に基づく腐食モデル式を $H=aY^n$ に当てはめ、a と n を求めた。この結果、

$$H = 1.07 Y^{-0.10} \text{ となり、}$$

n が 0 に近く、埋設経過年が経っても孔食深さが増加しない関係式となっている。

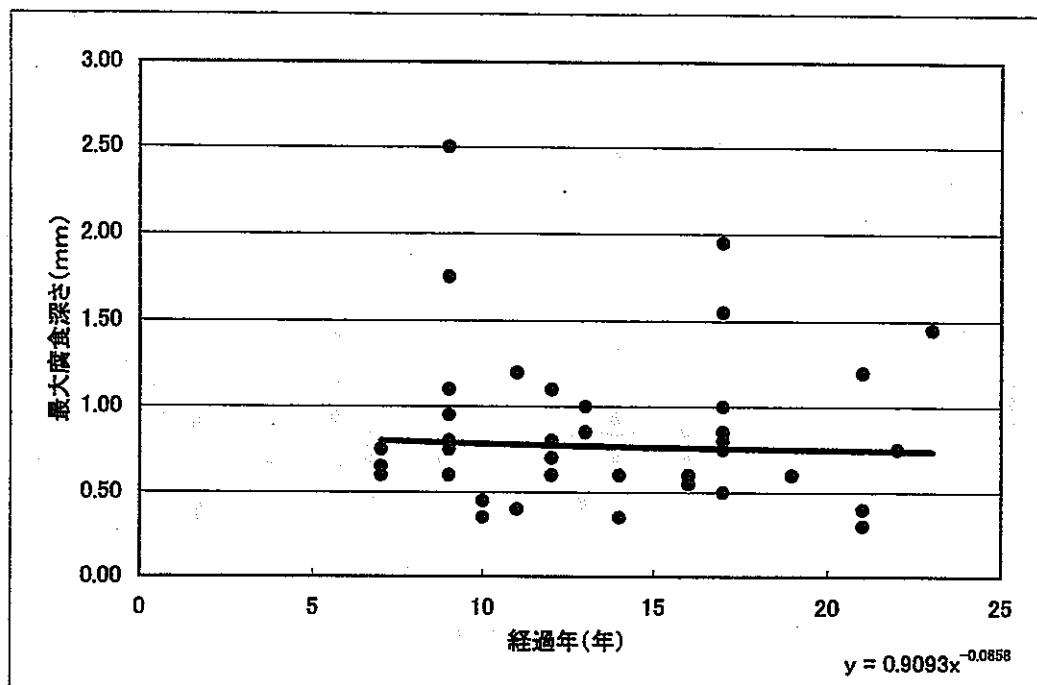


Figure-85 経過年に対する腐食深さ（最大値）

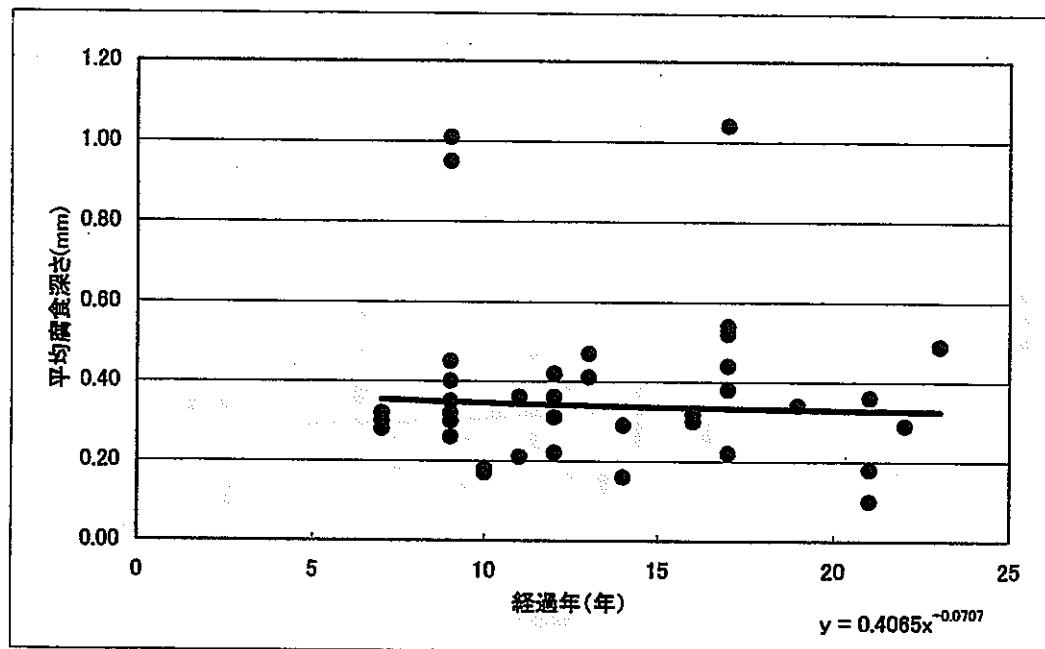


Figure-86 経過年に対する腐食深さ（平均値）

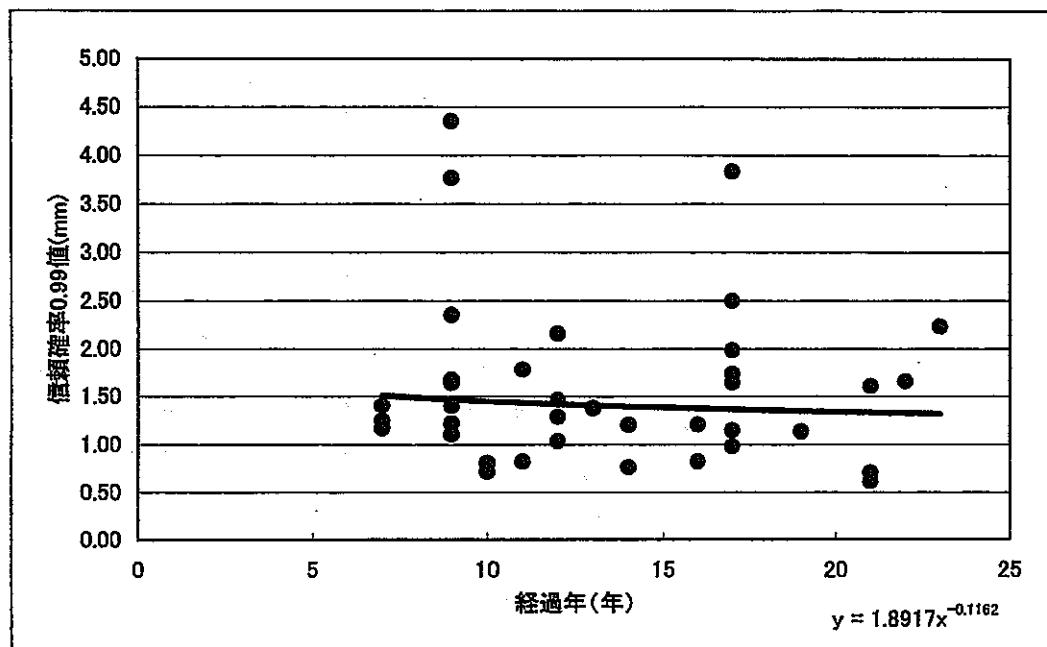


Figure-87 経過年に対する腐食深さ（累積確率 0.99 値）

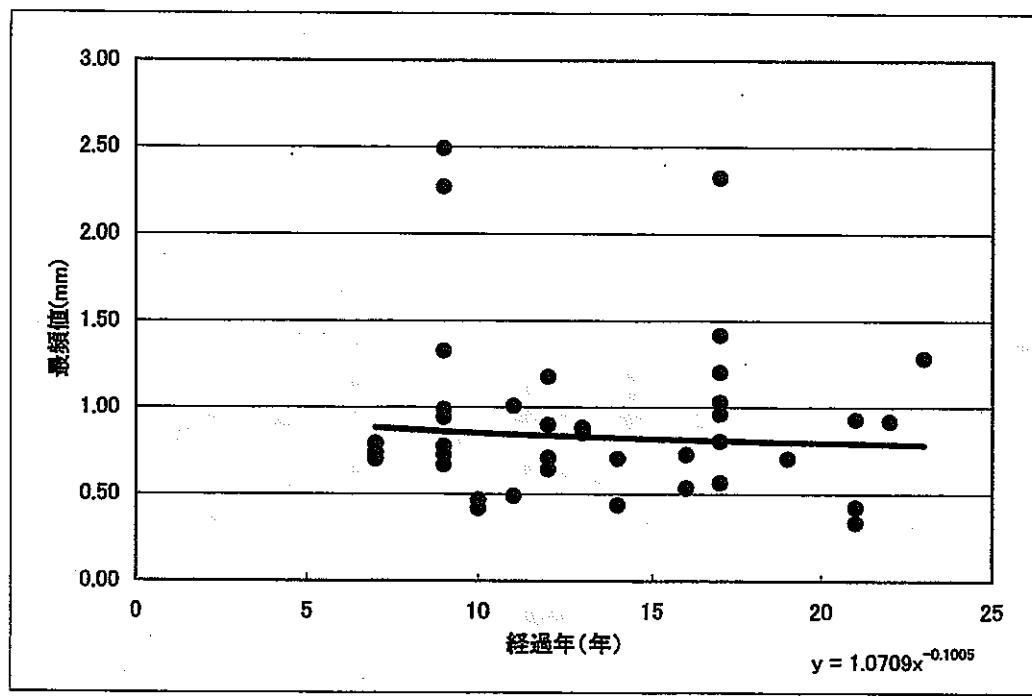
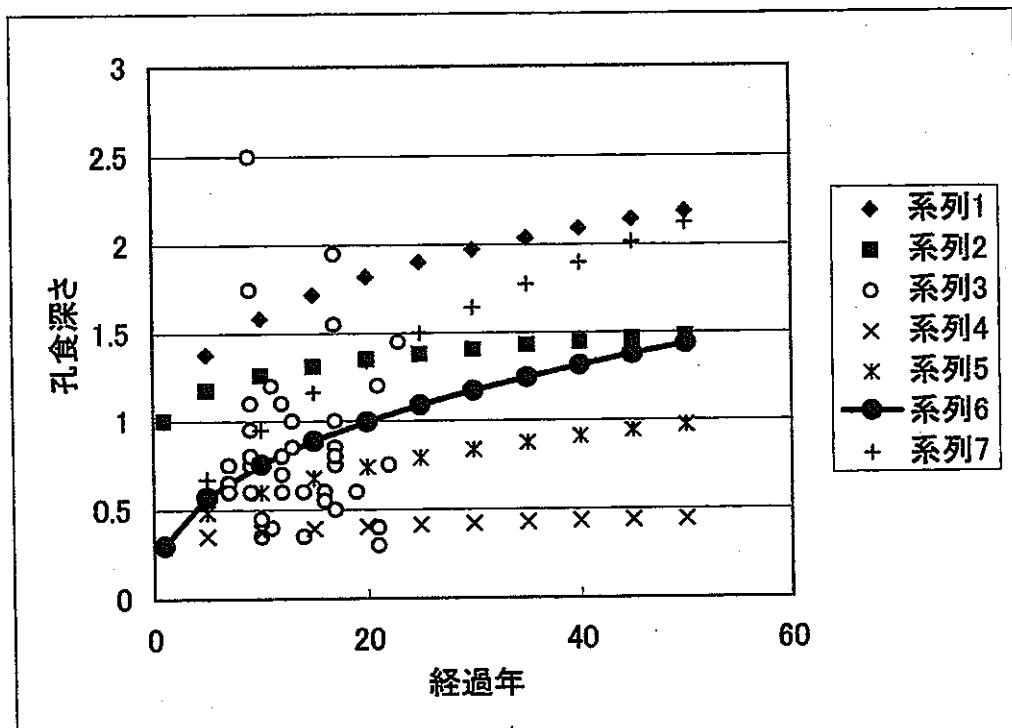


Figure-88 経過年に対する腐食深さ（最頻値）

6.2 水道管の腐食モデル式 $H = 0.3 Y^{0.4}$ と簡易ガス管腐食データとの関係

水道管からの概略腐食モデル式 $H = 0.3 Y^n$ の n を $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ を入れたモデル式の線と比較した。この結果、 $n = 0.4$ が最もプロットの中央を通りいることが分かる。これを Fig-89 に示す。



- 系列1; $H = Y^{0.2}$
- 系列2; $H = Y^{0.1}$
- 系列3; 簡易ガス
- 系列4; 系列2の値に0.3を乗じた($H = 0.3 Y^{0.1}$)
- 系列5; $H = 0.3 \times Y^{0.3}$
- 系列6; $H = 0.3 \times Y^{0.4}$
- 系列7; $H = 0.3 \times Y^{0.5}$

Figure-89 簡易ガスのデータと関係式

6.3 水道管データを含めた腐食モデル式

水道管と簡易ガス管の土壤環境は類似していることから、水道管の腐食データと簡易ガス管の腐食データをあわせて、 $H = aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。これらの散布図をFigure-90～93に示す。

(1) 実測の最大値

簡易ガス管の最大孔食深さの実測値に基づく腐食モデル式を $H = aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。この結果、

$$H = 0.25 Y^{0.47} \text{ となり、}$$

n は0.5に近く、水道管の腐食モデル式の n と同様な値となった。

(2) 実測の平均値

簡易ガス管の実測の平均に基づく腐食モデル式を $H = aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。この結果、

$$H = 0.09 Y^{0.51} \text{ となり、}$$

n は0.5に近く、水道管の腐食モデル式の n と同様な値となった。

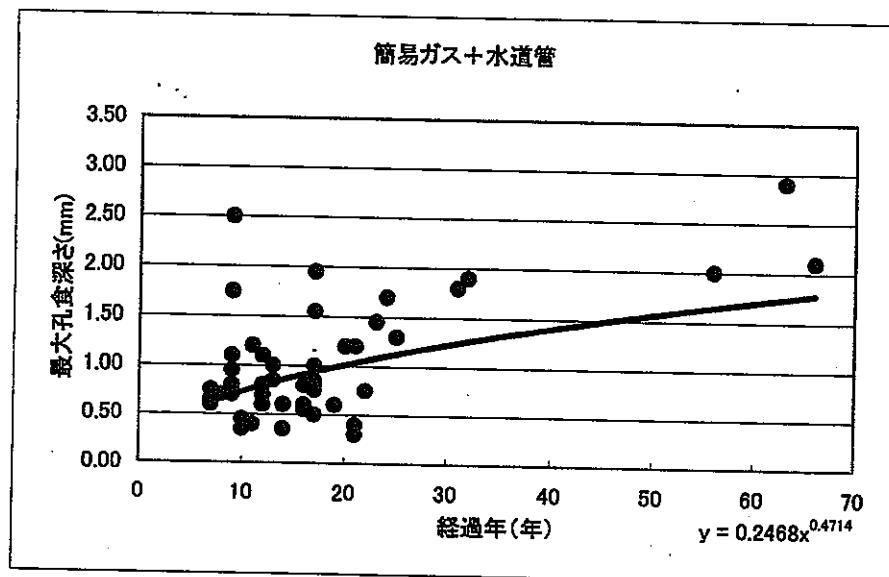


Figure-90 水道管を含めたデータ（最大値）

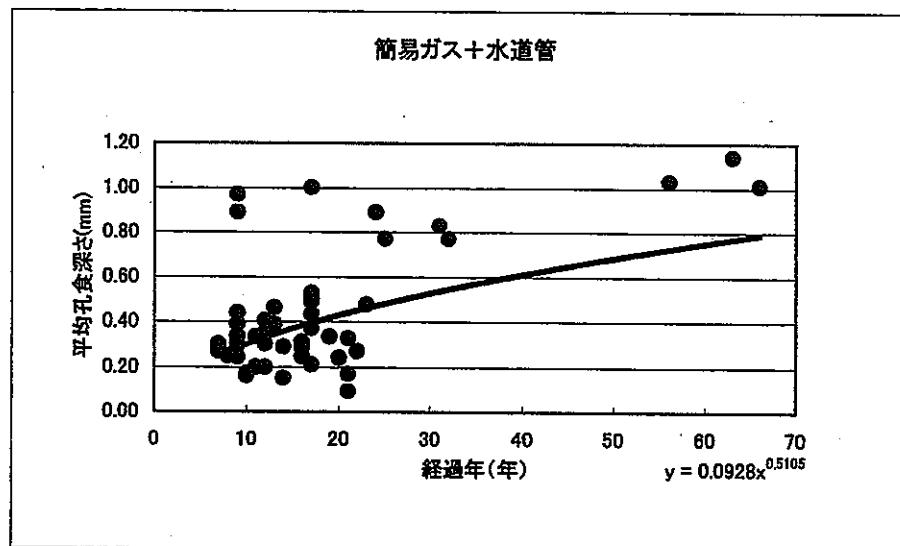


Figure-91 水道管を含めたデータ（平均値）

(3) 極値統計解析の累積確率0.99の最大孔食深さ

今まで、オーバーパックの面積(8.07 m²)の大きさに対応するモデルは、水道管の8件であったが、簡易ガス管のデータを加えることにより46サンプルとなり、データが補強された。

簡易ガス管の極値統計解析の累積確率0.99の最大孔食深さに基づく孔食モデル式を

$H = aY^n$ に当てはめ、aとnを求めた。この結果、

$$H = 0.45 Y^{0.47}$$
となり、

nは0.5に近く、水道管の腐食モデル式と同様な式となった。

(4) 極値統計解析の最大孔食深さの最頻値

簡易ガス管の極値統計解析の最大孔食深さの最頻値に基づく腐食モデル式を $H = aY^n$ に当てはめ、aとnを求めた。この結果、

$$H = 0.22 Y^{0.54}$$
となり、

nは0.5に近く、水道管の腐食モデル式と同様な式となった。

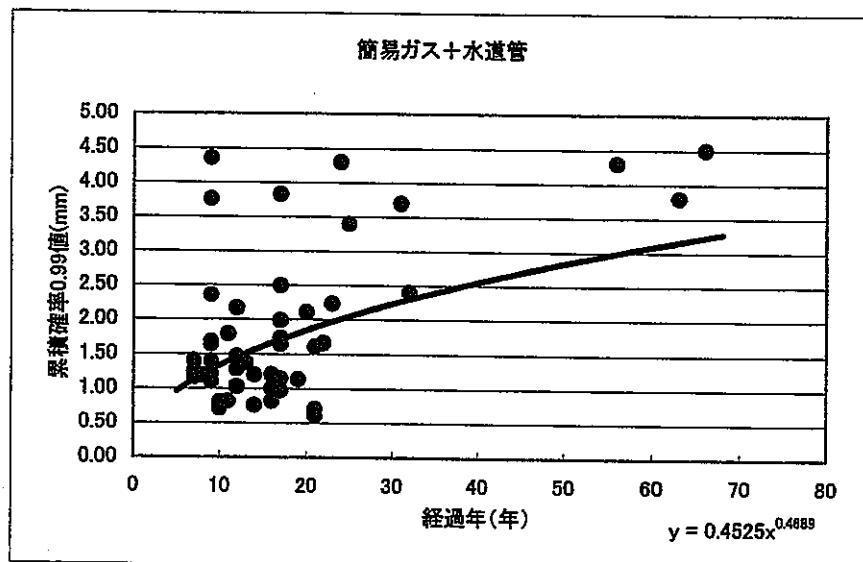


Figure-92 水道管を含めたデータ（累積確率 0.99 値）

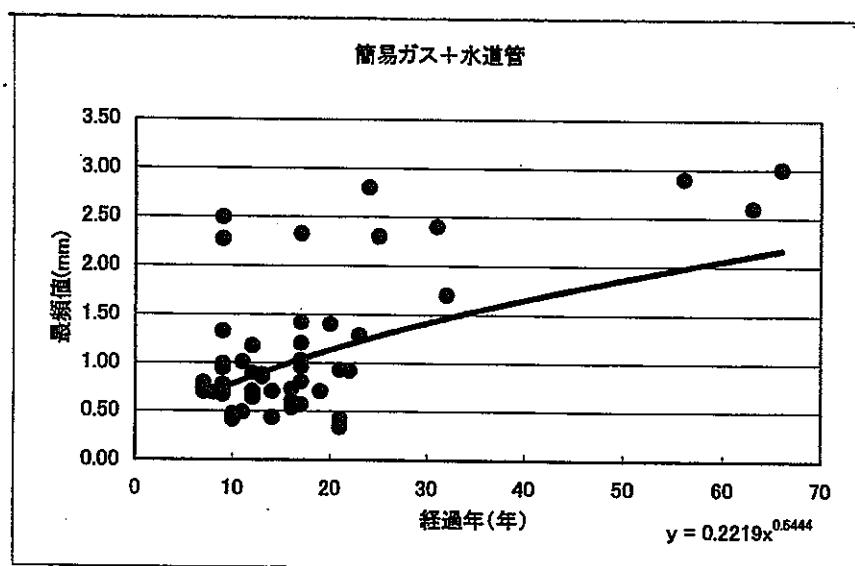


Figure-93 水道管を含めたデータ（最頻値）

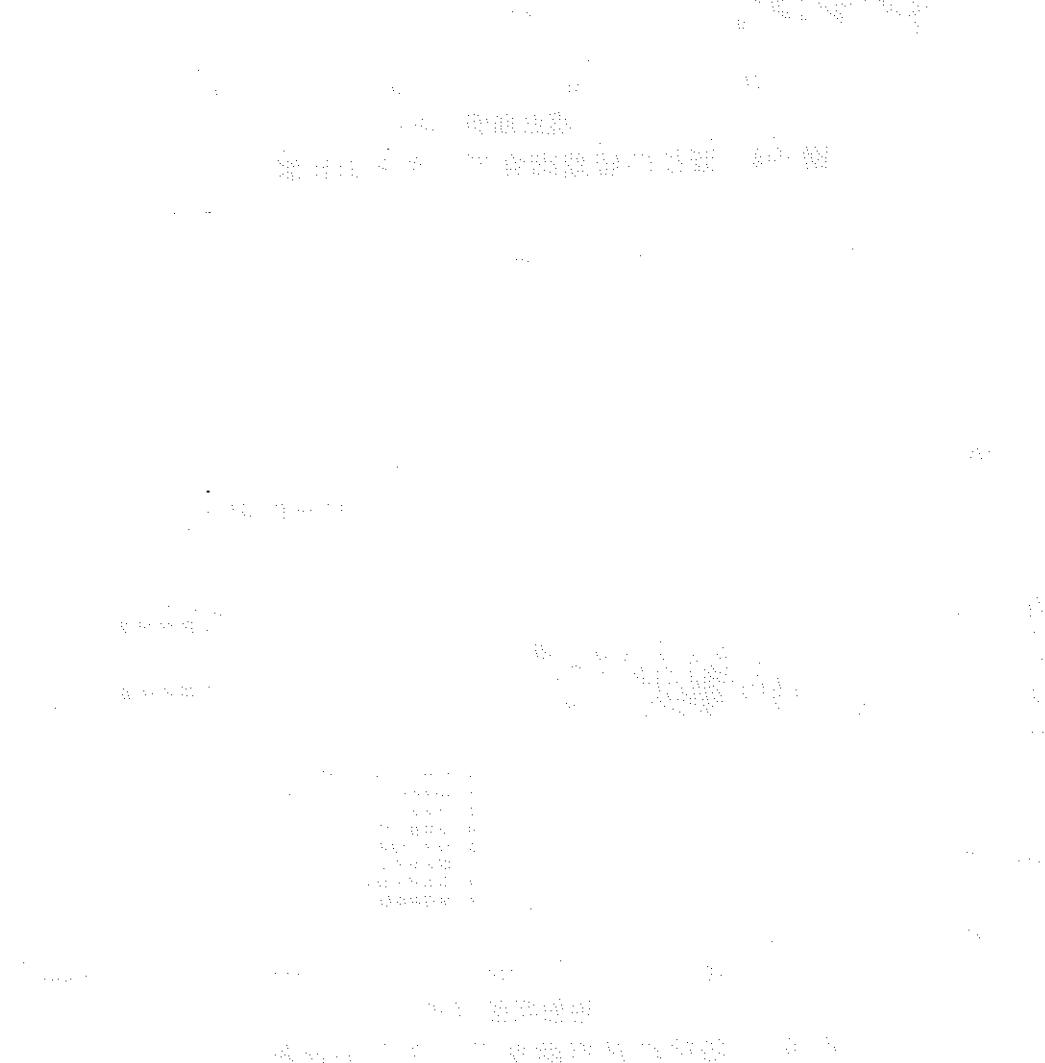
7. 既往データとの比較

今回求めた極値統計解析による累積確率 0.99 の孔食深さに基づく腐食モデル式について、短期および長期の既往孔食データと比較し、その妥当性を検討する。

水道管の腐食モデル式

$$H = 0.45 Y^{0.47}$$

既往データとして、NBS および田中による鋼抗試料の土壤埋設試験データ、山本らの調査による土壤埋設水道管の孔食データを示す。これらに簡易ガス管の実測の最大孔食深さのデータを加えた。Figure—94、95 に示す如く、既往データは孔食モデル式と同様な位置にあり、モデル式が妥当なことを示している。



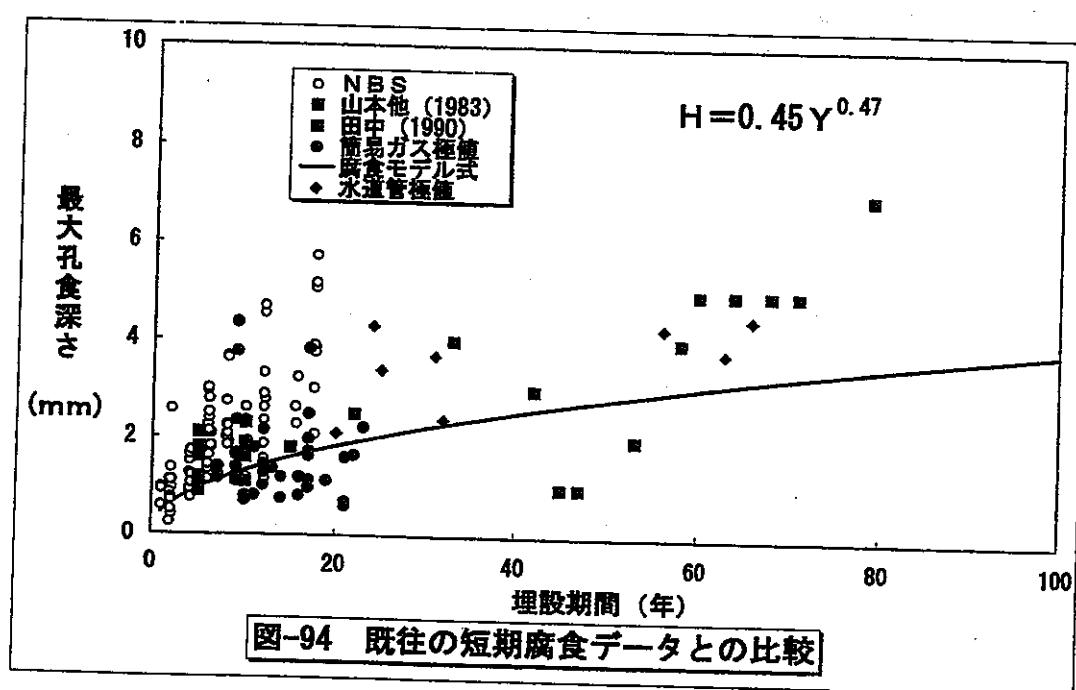


図-94 既往の短期腐食データとの比較

Figure-94 既往の短期孔食データとの比較

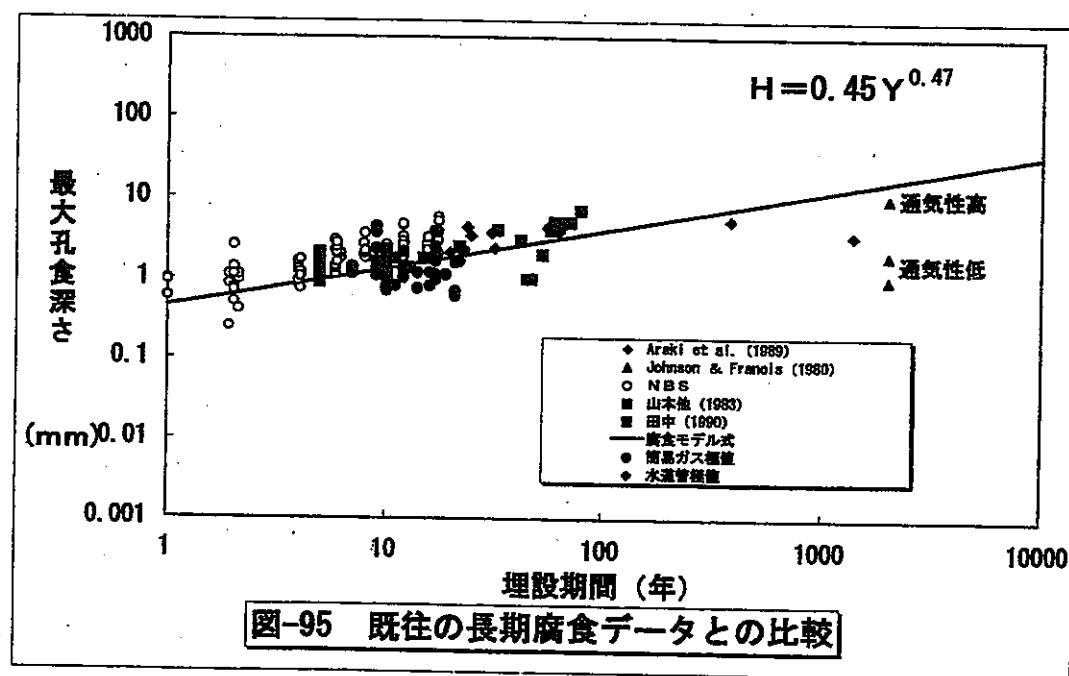


図-95 既往の長期腐食データとの比較

Figure-95 既往の長期孔食データとの比較

8. オーバーパックの長期孔食量の推定

水道管と簡易ガス管の腐食データからオーバーパック 1体の表面積を再帰期間として極値統計解析を行ない累積確率 0. 99 の最大孔食深さを $H = aY^n$ に当てはめ、 a と n を求めた。

極値統計による最大孔食深さと埋設経過年の関係式

$$H = 0.45 Y^{0.47}$$

このモデル式により、水道管や簡易ガス管と同様な中性低溶存酸素環境での 1000 年後のオーバーパックの最大孔食深さを推定すると約 11 mm となる。

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、およ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おこなった。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性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。

ただし、この腐食モデルの信頼性向上のために、日本簡易ガス協会で実施した亜鉛メッキ管の腐食調査 171 路線の中からベントナイト類似環境の路線を抽出し、オーバーパックの面積を再期期間とした極値統計解析を行い、孔食深さを得た。抽出した路線は 38 路線となった。なお、この 38 路線は亜鉛メッキ管が 27 路線、钢管（亜鉛メッキなし）が 11 路線であったが孔食深さに差が無く、亜鉛メッキの影響は小さかったのですべて鉄管として扱った。

本研究の研究結果の主要な点について以下に記述する。

(1) 簡易ガス管の腐食評価量と土壤環境因子および埋設経過年

- ① 孔食深さは 0.3 mm から 2.5 mm で平均 0.87 mm であり、腐食速度は 0.01 から 0.11 mm/y で平均 0.03 mm/y であった。
- ② 極値統計解析による累積確率 0.99 の孔食深さは 0.61 mm から 4.35 mm で平均 1.58 mm であり、腐食速度は 0.03 mm/y から 0.48 mm/y で平均 0.13 mm/y であった。
- ③ 土壤比抵抗の平均は 2,887 Ω · cm、酸化還元電位の平均 362 mV、土壤 pH は平均 6.6、細粒分は平均 46% であり、ほぼ水道管の環境と同様である。塩化物、硫酸塩は簡易ガス土壤が水道管より分析方法の違いによりやや多い。

(2) 簡易ガス管の腐食評価量と土壤環境因子との多変量解析

- ① 腐食速度と土壤環境因子間で相関があったものは管対地電位であった。相関係数は 0.3 から 0.4 であった。その他の因子で相関のあるものは無かった。
- ② 簡易ガス管の腐食速度を目的変数として、各土壤環境因子の変数増減法による重回帰分析を行った結果、F 値が 2 以上の因子は管対地電位、及びプローブ分極

抵抗、硫酸塩であった。

(3) 腐食モデル式

簡易ガス管と水道管の実測孔食深さと極値統計解析により求めた孔食深さと埋設経過年の関係を $H = a Y^n$ にあてはめて求めた腐食モデル式を検証した結果、以下の式が得られた。

$$\text{実測の平均孔食深さ} \quad H = 0.09 Y^{0.54}$$

$$\text{実測の最大孔食深さ} \quad H = 0.25 Y^{0.47}$$

$$\text{極値統計手法による最頻値孔食深さ} \quad H = 0.22 Y^{0.51}$$

$$\text{極値統計手法による累積確率 } 0.99 \text{ の最大孔食深さ} \quad H = 0.45 Y^{0.47}$$

上記解析において、極値統計解析による累積確率 0.99 の最大孔食深さの n の値として約 0.5 が求まった。

(4) 既往文献との比較

今回 48 のサンプルにより求めたオーバーパックの面積を再期期間とした極値統計解析による累積確率 0.99 の孔食深さに基づく腐食モデル式について、短期および長期の既往孔食データと比較し、その妥当性を検討した。この結果、既往データは腐食モデル式の周囲にあり、モデル式が妥当なことを示している。

(5) オーバーパックの長期腐食量の推定

ここで求めた腐食モデル式 $H = 0.45 Y^{0.47}$ を用いて千年後の最大孔食深さをもとめると、腐食深さは 11 mm となった。

以上の結果から、

土壤埋設鉄管の長期腐食挙動に関する研究については地下 1 ~ 2 m の低酸素環境（弱酸化性環境）は初期の埋設モデルとして妥当であり、寿命推定式も妥当である。今後、腐食モデル式の信頼性を上げるために、さらに鋼に関する腐食データの蓄積が必要である。

しかしながら、長期における処分環境は還元性環境を想定しており、鋼杭の深い部分のような還元性環境のデータが必要である。

あとがき

本報告は核燃料サイクル開発機構殿より受託して日本鋼管工事株式会社が「粘土中に埋設された鉄の腐食事例の研究」を実施したものである。

研究に用いたデータは、通商産業省が（財）日本簡易ガス協会に委託し、昭和60年から昭和63年に実施した簡易ガス導管管理技術調査結果である。この腐食データの使用を許可して頂いた。研究は簡易ガス導管の腐食データ171件のうち、ペントナイト類似の粘土系土壤に埋設された管のデータを抽出した。このデータの腐食量と土壤環境を整理した。さらに、この腐食データから極値統計によりオーバーパックの面積を再帰期間として腐食深さを求めた。これらの腐食速度と環境因子との相関解析を行い腐食速度と環境因子の関係を調べた。さらに、簡易ガスデータを水道埋設鉄管データに追加し、腐食モデル式を求めた。また、その他の既往データもプロットして比較した。

土壤埋設鉄管の長期腐食挙動に関する研究については地下1～2mの低酸素環境（弱酸化性環境）は初期の埋設モデルとして妥当であり、寿命推定式も妥当である。今後、腐食モデル式の信頼性を上げるために、さらに鋼に関する腐食データの蓄積が必要である。

しかしながら、長期における処分環境は還元性環境を想定しており、鋼杭の深い部分のような還元性環境のデータが必要である。

本研究の遂行にあたり、日本簡易ガス協会の調査のデータ公開に関して、日本簡易ガス協会の毛馬内殿の多大なるご協力に感謝致します。

本研究の一連の成果が核燃料サイクル開発機構殿のオーバーパックの研究に役立つていただければ幸いです。

以上