

弱アルカリ性およびアルカリ性環境における
炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動
(研 究 報 告)

2003年3月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

弱アルカリ性およびアルカリ性環境における炭素鋼オーバーパットの 局部腐食進展挙動

(研究報告)

谷口直樹, 川崎学*, 川上進, 鈴木治雄**

要 旨

堆積軟岩系岩盤における処分では緩衝材周囲にコンクリート製支保工の施工が考えられており、地下水がセメントとの接触によって高 pH 化する可能性がある。そのような処分環境において、炭素鋼オーバーパットは条件によっては不動態化して局部腐食を受けることが懸念される。そこで弱アルカリ性～アルカリ性 ($7.7 < \text{pH} < 13.4$) の水溶液環境で浸漬試験を行い、炭素鋼の局部腐食進展挙動を検討した。

緩衝材ブロック間の継ぎ目に地下水が選択的に浸潤した場合にも飽和度や緩衝材空隙水組成の不均一性に起因する局部的な腐食を受ける可能性がある。よって、ブロック間の継ぎ目を模擬したスリットの付与された緩衝材中で浸漬試験を実施し、腐食の局在化を検討した。

これらの実験結果を平均腐食深さと孔食係数の関係で整理した。その結果、今回行った試験条件の範囲ではいずれのデータも第 2 次取りまとめにおいて推定された孔食係数の上限を下回っており、炭素鋼オーバーパットの寿命に影響をもたらすような顕著な腐食局在化は認められなかった。また、実験データに基づいて炭素鋼オーバーパットの酸素による最大腐食深さを推定するモデル式を検討した。

東海事業所 環境保全センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

* 検査開発株式会社

** 鋼管計測株式会社

Propagation Behaviour of Localised Corrosion of Carbon Steel in Slightly Alkaline and Alkaline Environment

(Research Document)

Naoki Taniguchi*, Manabu Kawasaki, Susumu Kawakami* and Haruo Suzuki*****

Abstract

In current repository concept of high-level radioactive disposal in soft rock system, concrete support will be emplaced around the buffer material, and groundwater pH will be increased by the contact with cement. In such condition, carbon steel overpack is possible to be passivated and be attacked by localized corrosion due to the breakdown of passive film. In this report, we investigated the propagation behaviour of localized corrosion of carbon steel by immersion tests in slightly alkaline and alkaline aqueous solution in which pH range was from 7.7 to 13.4.

Another possible cause of non-uniform corrosion is heterogeneity of water content or porewater chemistry in buffer material around a gap between the buffer material block. In order to examine such situation, immersion tests of carbon steel were conducted in buffer material with a slit simulating the gap.

Based on these experimental results, relationship between the average corrosion depth and the pitting factor was investigated. The result indicated that any observed pitting factor was not over upper limit value estimated in second progress report by JNC. In conclusion, no severe localized corrosion enough to influence the overpack lifetime was observed in immersion test within the experimental condition in this report. The empirical model to estimate the maximum corrosion depth of carbon steel overpack under oxidizing condition was established based on our experimental data and previously reported data.

* Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

** Inspection Development Corporation

***Kokan Keisoku K.K.

目 次

1	はじめに	1
2	実験方法	3
2-1	弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における浸漬試験方法	3
2-2	不飽和緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法	12
3	実験結果	16
3-1	弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における浸漬試験結果	16
3-2	不飽和緩衝材中における浸漬試験結果	32
4	考察	50
5	おわりに	61
	参考文献	62
	付録 1	付-1(1)
	付録 2	付-2(1)
	付録 3	付-3(1)

目 次

図 2-1(a) 炭素鋼試験片の形状、寸法（円盤型、すきま付き）	7
図 2-1(b) 炭素鋼試験片の形状、寸法（大型平板）	7
図 2-2(a) 水溶液中での浸漬試験方法の模式図（円盤型、すきま付き）	8
図 2-2(b) 水溶液中での浸漬試験方法の模式図（大型平板）	8
図 2-3 Gumbel 分布関数による解析方法の模式図	9
図 2-4 緩衝材中での浸漬試験セルの模式図	14
図 3-1 Gumbel 確率プロットの一例（No. 5～No. 7 高腐食性溶液）	19
図 3-2 普通セメント浸出液中での浸漬後の炭素鋼試験片の外観	20
図 3-3 低アルカリ性セメント浸出液中での浸漬後の炭素鋼試験片の外観	21
図 3-4 浸漬後の大型平板炭素鋼試験片の外観（No. 32～No. 33）	22
図 3-5 浸漬後の大型平板炭素鋼試験片の外観（No. 34～No. 35）	23
図 3-6 高腐食性溶液における炭素鋼の腐食深さの経時変化	24
図 3-7 中腐食性溶液中における炭素鋼 SM400B の腐食深さの経時変化	24
図 3-8 中腐食性溶液中における炭素鋼 SFVC1 の腐食深さの経時変化	24
図 3-9 炭酸塩-塩化物水溶液中における大型平板炭素鋼試験片の 腐食深さの経時変化	25
図 3-10 人工海水中における大型平板炭素鋼試験片の腐食深さの経時変化	25
図 3-11 高腐食性溶液および中腐食性溶液中における炭素鋼の最大腐食深さ、 P_{\max} （オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	26
図 3-12 高腐食性溶液および中腐食性溶液中における炭素鋼の孔食係数、 Pf_{\max} （オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	26
図 3-13 pH11.0 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化	27
図 3-14 pH12.0 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化	27
図 3-15 pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化	27
図 3-16 pH11.0～pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の最大腐食深さ、 P_{\max} （オー バーパック相当の表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	28
図 3-17 pH11.0～pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の孔食係数、 Pf_{\max} （オーバ ーパック相当の表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	28
図 3-18 普通セメント浸出液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化	29
図 3-19 低アルカリ性セメント浸出液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化	29
図 3-20 セメント浸出液中における炭素鋼の最大腐食深さ、 P_{\max} （オーバ ーパック 相当の表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	30
図 3-21 セメント浸出液中における炭素鋼の孔食係数、 Pf_{\max} （オーバ ーパック 相当の表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化	30
図 3-22 平均腐食深さと孔食係数（実測値に対する値）の関係	31
図 3-23 平均腐食深さと孔食係数（実機推定値に対する値）の関係	31
図 3-24 炭素鋼および緩衝材中の温度測定結果の一例（No. 41）	36

図 3-25	緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 37)	37
図 3-26	緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 39)	38
図 3-27	緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化 (No. 41)	39
図 3-28	緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 43)	40
図 3-29	緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化 (No. 45)	41
図 3-30	緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 47)	42
図 3-31	緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 49)	43
図 3-32	緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化 (No. 51)	44
図 3-33	緩衝材中心線からの距離と白金または金電極の電位の関係	45
図 3-34	緩衝材中心線からの距離と白金または金電極の電位の関係	45
図 3-35	緩衝材中における炭素鋼の自然電位の経時変化 (0~3600hr)	46
図 3-36(1)	緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (No. 41, 脱スケール前)	47
図 3-36(2)	緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (No. 41, 脱スケール後)	47
図 3-36(3)	緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (a~d 点拡大図)	48
図 3-37	緩衝材中の炭素鋼の平均腐食深さと孔食係数の関係	49
図 4-1	炭素鋼の孔食係数に関する既往のデータ、推定上限値との比較	57
図 4-2	炭素鋼の孔食係数 (実測値) に関する本研究のデータと 既往のデータの比較	58
図 4-3	平均腐食深さと Gumbel 分布関数における尺度パラメータ、 α の関係	59
図 4-4	平均腐食深さと Gumbel 分布関数における位置パラメータ、 λ の関係	59
図 4-5	平均腐食深さに対する実機最大腐食深さ (表面積 55129cm ²) の上限値の 推定モデル (信頼率 0.99 での推定値に基づき作成)	60

表 目 次

表 2-1	炭酸塩と塩化物を含む水溶液中での試験条件	10
表 2-2	コンクリートと接触させた水溶液中での試験条件	10
表 2-3	大型平板を用いた試験条件	11
表 2-4	人工海水の組成	11
表 2-5	不飽和緩衝材中における試験条件	15
表 3-1	不飽和緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験結果	35
表 4-1	酸素によるオーバーパックの最大腐食深さ推定モデル	56

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分におけるオーバーパックには、ガラス固化体の放射能の比較的高い初期の **1000** 年間にわたって地下水とガラス固化体の接触を防ぐ機能が期待されている。この機能はオーバーパックの腐食によって失われると考えられることから、処分環境条件におけるオーバーパック材料の腐食挙動を評価することが課題となっており、研究が進められている。現時点ではオーバーパックの有力な候補材料として炭素鋼が考えられている。炭素鋼オーバーパックの腐食寿命を評価するうえで腐食の局在化の程度を把握することが不可欠である。第2次取りまとめでは日本における地下水条件に対し、緩衝材である圧縮ベントナイト中で炭素鋼は不動態化しにくく、全面腐食を受ける可能性が高いことを示した（核燃料サイクル開発機構、**1999** 以下、「**JNC, 1999**」と記す）。しかし、軟岩系岩盤における処分では緩衝材周辺にコンクリート製の支保工を施工することが考えられており（**JNC, 1999**）、地下水の高 **pH** 化によって炭素鋼表面が不動態化して局部腐食を受けることも懸念される。これまでの実験的な検討より、緩衝材中で炭素鋼が不動態化しうるのは緩衝材空隙水の **pH** が約 **10.5** 以上の場合であることがわかっている（谷口ほか、**2002**）。緩衝材にはアルカリ性の溶液を中性側に緩衝する **pH** 緩衝作用があるため、空隙水の **pH** が **10.5** を超えるのは約 **13** 以上の水が緩衝材に浸潤した場合である（谷口ほか、**2002**）。普通ポルトランドセメントの使用を想定すると現時点では緩衝材に浸潤する地下水の **pH** として最大約 **13.5** まで考慮する必要があり、オーバーパックに接触する緩衝材空隙水の **pH** として約 **12.5** 程度まで想定する必要がある。一般に局部腐食の進展速度は全面腐食に比較して速く、短期破損原因になる場合がある。一方、処分環境は本来酸素濃度の極めて低い還元性環境であり、局部腐食が生起・進展しうるのは処分場の建設によって地上から持ち込まれた酸素が存在する期間に限定され、トータルの腐食量の最大値は酸素量によって決められる。したがって、たとえ局部腐食が発生しても、それによる腐食の局在化の程度を評価し、過大な腐食深さにならないことが示されれば炭素鋼オーバーパックの長期的な健全性を損なうことはないと考えられる。これまで、処分環境で生起しうる代表的な局部腐食である孔食、すきま腐食についてその生起・進展挙動に及ぼす環境因子（炭酸／炭酸水素イオン、塩化物イオン、**pH** など）の影響を実験的に調査してきた（谷口ほか、**1999a**）。また、極値統計法を用いて実サイズのオーバーパックにおける最大腐食深さを予察的に評価し、局部腐食が進展しても十分な腐食しろによって短期破損には至らないことを示した。さらに平均腐食深さと孔食係数（最大腐食深さと平均腐食深さの比）の関係を天然の土壌中における腐食データ（**Romanoff, 1989**）と比較し、ほぼ同様の傾向を示すこと、炭素鋼の孔食係数の上限は環境条件や時間によらず平均腐食深さから保守的に見積もることが可能であることを示した。しかし、これまでの研究ではセメントの使用を想定しておらず、**pH** 約 **11** を超えるアルカリ性の条件については十分なデータがあるとはいえなかった。また、試験に用いた試験片の表面積、試験片数が十分とはいえず、極値統計法による推定は予察的なものであった。そこで本研究では従来よりも広い **pH** 範囲の弱アルカリ性～アルカリ性（**pH 7.7～13.4**）の水溶液中にて浸漬試験を行った。本試験では従来よりも大きな面積

の試験片を多数個用い、より信頼性の高い腐食深さの評価を行った。

更に、実際のオーバーパックが置かれる緩衝材中での腐食局在化の程度を把握することを目的として緩衝材ブロックの継ぎ目を模擬してスリットを付与したケイ砂混合ベントナイト中で浸漬試験を行った。これらの試験結果から、炭素鋼オーバーパックの腐食局在化の程度を評価した。

2 実験方法

2-1 弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における浸漬試験方法

(1) 試験片

試験片の材質として炭素鋼 SM400B (C:0.13%, Si: 0.15%, Mn: 0.71%, P: 0.011%, S: 0.006%) および、一部の試験では SFVC1 (C:0.22%, Si: 0.26%, Mn: 0.93%, P: 0.013%, S: 0.005%) を用いた。試験片の形状および寸法は図 2-1(a)に示すように、厚さ 2mm、直径 80mm の円盤型として、中心部には直径 8mm の穴をあけ、ポリサルフォン製のすきま形成材 (直径 20mm) を付与した。試験片の表面積は 104.6cm² である。なお、試験片の寸法については炭酸塩濃度 0.1M、塩化物イオン濃度 0.027M、pH10 の水溶液中で試験片面積をパラメータとした実験が行われており、約 60cm² 以上で腐食速度が概ね一定となったことから (谷口ほか、1999a)、これを超える面積となるように設定した。すきま形成材の大きさについても腐食速度が極大となる寸法とした。すきま形成材の締め付けトルクは 20kgfcm とした。試験片表面はエメリー#800 にて湿式研磨、アセトンによる脱脂を行った。1 条件あたりの試験片数は前者の円盤型については 15 個として、各試験片の最大腐食深さを求め、15 個の腐食深さデータにより極値統計解析を行った。

このほか、より大きな表面積の試験片を用いた試験も行った。試験片の材質は炭素鋼 SM400B であり、形状および寸法は図 2-1(b)に示すように、厚さ 10mm、300×300mm の平板として、両面ともに 250×250mm の部分を残して縁を絶縁テープおよびシリコン樹脂で被覆した。試験溶液と接する部分の表面積は片面 625cm² である。1 条件あたり 5 枚の試験片を浸漬させ、各試験片の両面よりそれぞれ最大腐食深さを求め、10 個の最大腐食深さのデータを得た。これを用いて極値統計解析を行った。

(2) 試験溶液

試験溶液として、炭素鋼が不動態化して局部腐食を受ける代表的な水溶液である炭酸塩と塩化物を含む水溶液を主に用い、一部には硫酸イオンも添加した。一般に炭酸塩は炭素鋼の不動態化を促進し、塩化物イオン、硫酸イオンは不動態皮膜に対して攻撃型の化学種であることが知られている (Marsh et al., 1983; 谷口ほか、1999a; 春名ほか、2002)。溶液条件を表 2-1 に示す。炭酸ナトリウム、炭酸水素ナトリウム、塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムを所定の濃度となるように、蒸留水に添加して試験溶液を作成した。表 2-1 の水溶液のうち、これまでの実験データ (谷口ほか、1999a) を参考に No.1～No.4 は比較的腐食性の低い溶液として高炭酸塩、低塩化物、高 pH の条件とした (以下、「低腐食性溶液」と記す)。No.5～No.7 は比較的腐食性の高い溶液として、低炭酸塩、高塩化物、高硫酸塩、低 pH の条件とした (以下、「高腐食性溶液」と記す)。No.8～No.14 は中間的な腐食性の溶液として、炭酸塩、塩化物ともに高腐食性溶液と低腐食性溶液の中間のオーダーの濃度とした (以下、「中腐食性溶液」と記す)。これら弱アルカリ性の水溶液のほか、炭酸ナトリウムと塩化ナトリウムの水溶液に NaOH を添加し、より高 pH 側の条件でも実験を行った (No.15～23)。試験溶液の温度は 80℃とした。これは局部腐食の進展しうる処分後初期の

酸化性期間における代表的な温度条件を模擬している。

実際のコンクリートと接触させた水溶液を用いた実験も行った。普通ポルトランドセメント（以下、「OPC」と記す）および低アルカリ性セメント（以下、「HFSC」と記す）（大和田ほか，2000）を用いてそれぞれコンクリートブロックを作成したのち、1mm以下に粉碎して0.5M NaCl水溶液を10日間以上混合させ、その上澄みを試験溶液とした（OPC: No.24～No.27、HFSC: No.28～No.31）。溶液条件を表2-2に示す。試験溶液の温度は80℃とした。

大型の試験片を用いた試験ではNo.8～No.14の試験と同一組成の試験溶液を用いて局部腐食の進展挙動を観察した（No.32～No.33）。また、比較のため全面腐食を生じる代表的な条件である人工海水を用いた試験も行った（No.34～No.35）。人工海水の組成を表2-4に示す。試験期間は90日および180日とした。試験溶液の温度は室温とした（試験容器も大型であり、加熱や温度制御が困難なため）。

(3) 試験手順

円盤型すきま付き試験片を用いた試験では、まず試験片のすきま形成材を緩く仮締めした状態で試験片を試験溶液に浸し、すきま形成材と試験片の間に溶液がしみ込んだことを確認したのち、所定の締め付けトルク（20kgfcm）にてすきま形成材を締めつけた。次に図2-2(a)に示すように試験片をガラス容器内のテフロン製フォルダに置き、試験溶液約30を容器内に注ぎ込んだ。この試験容器を恒温水槽に入れ、大気を吹き込みながら所定期間浸漬させた。浸漬期間終了後は試験片を取り出してすきま形成材を取り外した。次に5%クエン酸2アンモニウム水溶液中でカソード分極下（約10mA/cm²）にて腐食生成物を除去した。蒸留水で洗浄、乾燥後試験片の重量を測定し、あらかじめ測定しておいた浸漬前の試験片重量との差より平均腐食深さを算出した。次に腐食していない部分（不動態の健全な部分）を基準面としてレーザープローブ式の寸法測定装置により腐食深さを測定し、最大腐食深さを求めた。

大型平板を用いた試験では、試験片同士が触れないようにプラスチック製容器内に置き、試験溶液を約1000注ぎ込んだ。溶液中には試験期間を通して2ヶ所から大気を吹き込んだ。試験終了後は試験片を取り出し、絶縁テープとシリコン樹脂をはがしたのち、試験片に堆積した腐食生成物をナイロンブラシを用いて機械的に除去した。更に5%クエン酸2アンモニウム水溶液中に浸漬させ、試験片に付着した腐食生成物をナイロンブラシを用いて除去した。その後蒸留水で洗浄、乾燥後試験片の重量を測定し、あらかじめ測定しておいた浸漬前の試験片重量との差より平均腐食深さを算出した。次に絶縁テープで覆われていた面を基準面としてレーザープローブ式の形状測定装置により腐食深さを測定し、最大腐食深さを求めた。

最大腐食深さについては試験条件ごとにGumbel分布関数による極値統計解析を行い、実サイズのオーバーパックにおける最大腐食深さを推定した。その方法を次に示す。

(4) 極値統計解析方法

各試験片の最大腐食深さを確率変数 x とすると、Gumbel 分布の累積分布関数 $F(x)$ は以下の式で与えられる。

$$F(x) = \exp[-\exp\{-(x-\lambda)/\alpha\}] \quad (2-1)$$

ここで、 λ は位置パラメータ（最頻値）、 α は尺度パラメータと呼ばれる。基準化変数 y を(2-2)式で定義すると、その累積分布関数は(2-3)式で表される。

$$y=(x-\lambda)/\alpha \quad (2-2)$$

$$F(y) = \exp[-\exp(-y)] \quad (2-3)$$

基準化変数 y とこれに対応する累積確率 $F(y)$ を縦軸に、 x を横軸にとると図 2-3 に示すような Gumbel 確率紙が得られる。確率紙上の直線が Gumbel 分布を表し、 $y=0$ に対応する x 座標が位置パラメータ λ となる。直線の勾配の逆数より尺度パラメータ α が得られる。図 2-3 中の右側の縦軸 T は再帰期間と呼ばれ、対象とする実機の表面積 S と腐食深さ測定におけるサンプリング面積 s の比であり、累積確率 $F(y)$ とは次の関係がある。

$$F(y) = 1-1/T \quad (2-4)$$

$$T=S/s \quad (2-5)$$

例えば第 2 次取りまとめにおけるオーバーパックの表面積は $S=55129\text{cm}^2$ であり、今回用いたすきま付き円盤試験片 ($s=104.6 \text{ cm}^2$) を用いた試験の解析における再帰期間は $T=55129/104.6=527$ となる。

解析手順は次のとおりである。まず各試験片の最大腐食深さ x_{\max} を大きい順に並べ、各順位 i に対応する累積確率 $F(y)$ を以下の式の平均ランク法に決定した(腐食防食協会、1984)。

$$F(y) = 1- i/(N+1) \quad (2-5)$$

これを Gumbel 確率紙にプロットしてこのプロットに MVLUE 法により(腐食防食協会、1984) Gumbel 分布の直線をあてはめ、パラメータ λ および α を求めた。次にこの直線を再帰期間 T まで外挿することによってオーバーパックにおける最大腐食深さの推定値 X_{\max} を求めた。 T が十分に大きいとき、 X_{\max} は以下の式で近似される。

$$X_{\max} = \lambda + \alpha \ln T \quad (2-6)$$

この推定値は最大腐食深さの最頻値であり、実際のオーバーパックにおける累積分布関数は Gumbel 分布の直線を $\alpha \ln T$ だけ右にずらした直線で表現できる。ここで、信頼率 a を指定し、 $F(y)=a$ における x の値を P_{\max} とすると、以下の式で与えられる。

$$P_{\max} = X_{\max} - \alpha \ln(-\ln a) = \lambda + \alpha \ln T - \alpha \ln(-\ln a) \quad (2-7)$$

このとき、オーバーパックにおける最大腐食深さが P_{\max} を超える確率は $1-a$ と見なされる。本研究では信頼率を $a=0.99$ と設定し、 P_{\max} を求めた。すなわち、オーバーパックの最大腐食深さが P_{\max} を超える確率は 1%となる。

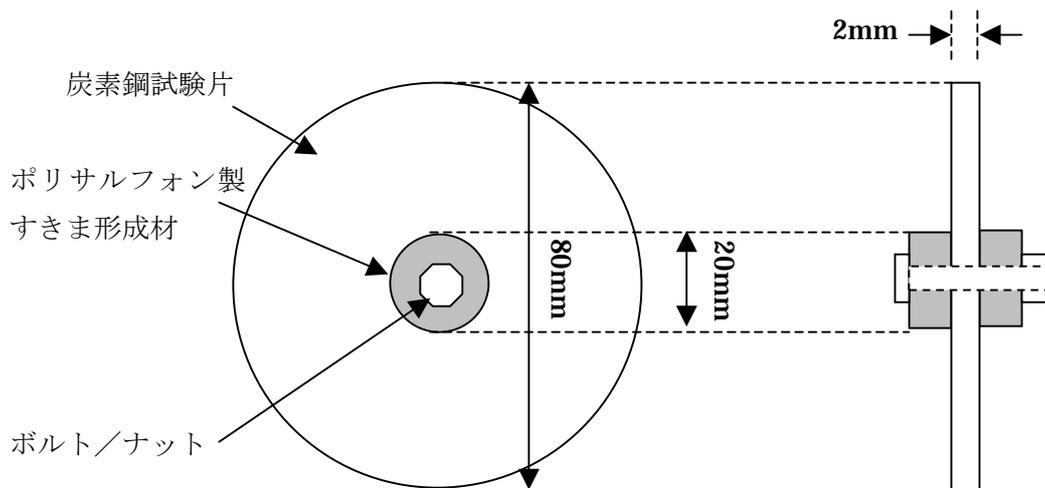


図 2 - 1(a) 炭素鋼試験片の形状、寸法（円盤型、すきま付き）

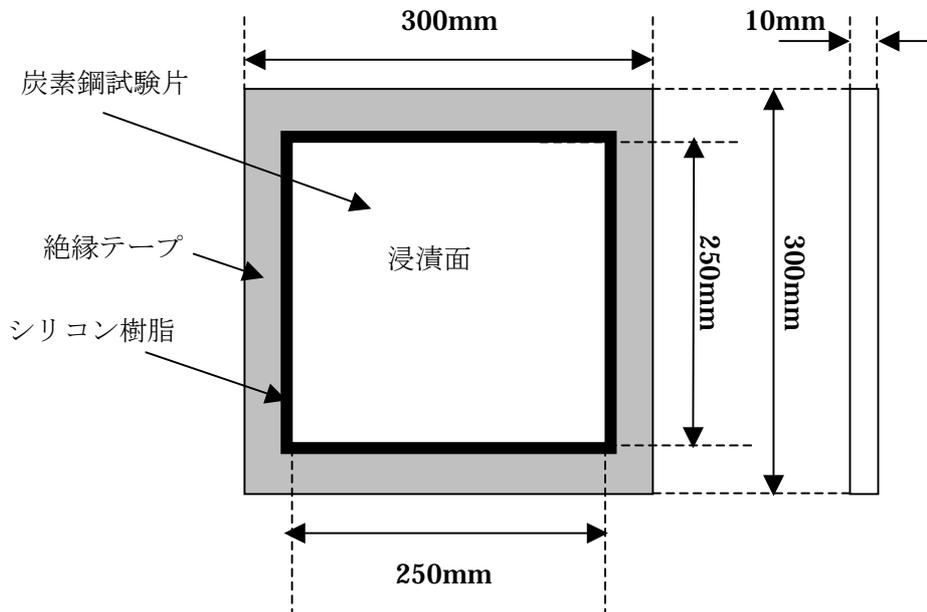


図 2 - 1(b) 炭素鋼試験片の形状、寸法（大型平板）

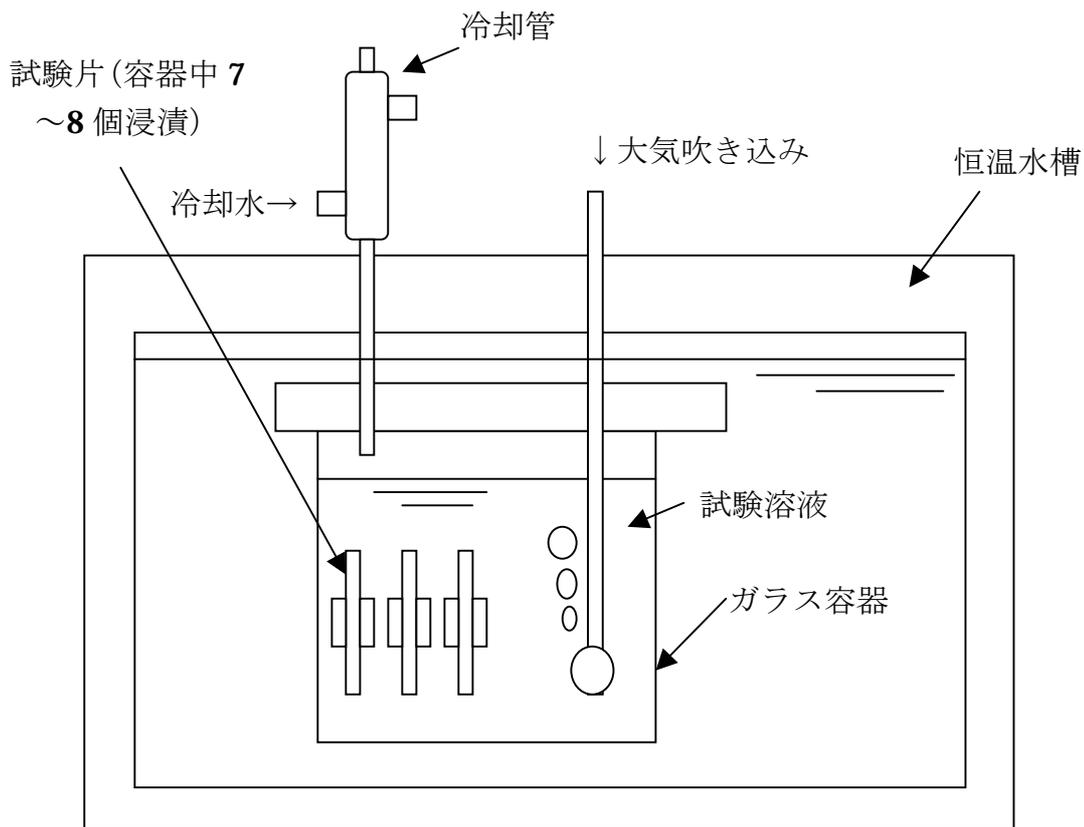


図 2 - 2(a) 水溶液中での浸漬試験方法の模式図 (円盤型、すきま付き)

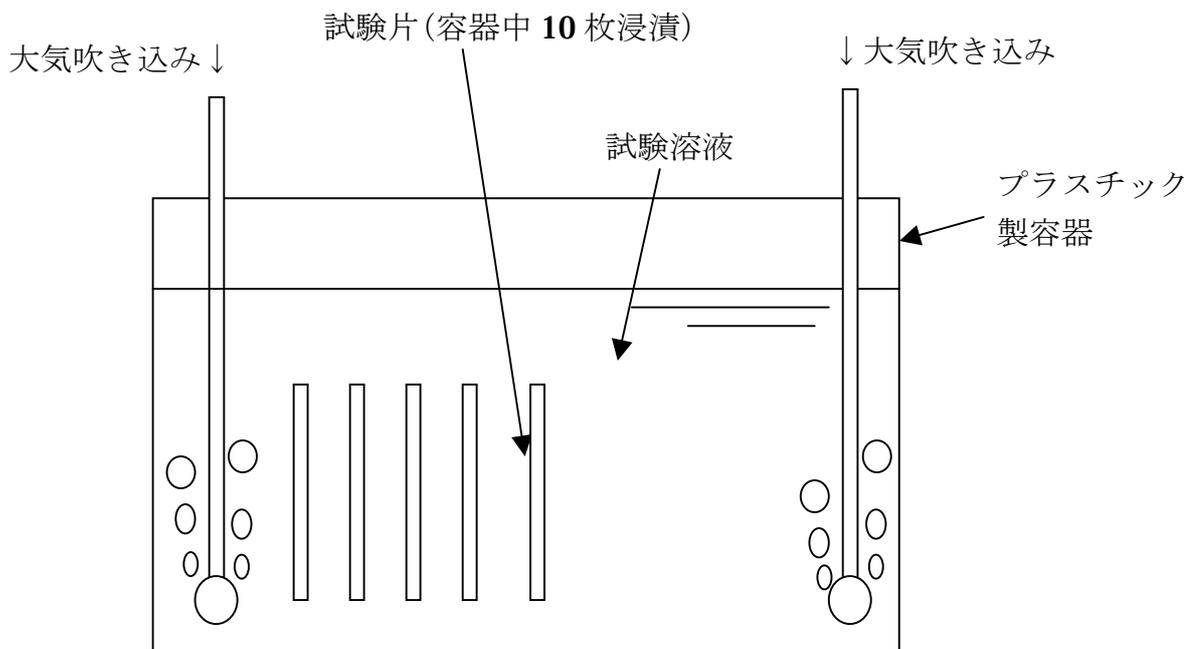


図 2 - 2(b) 水溶液中での浸漬試験方法の模式図 (大型平板)

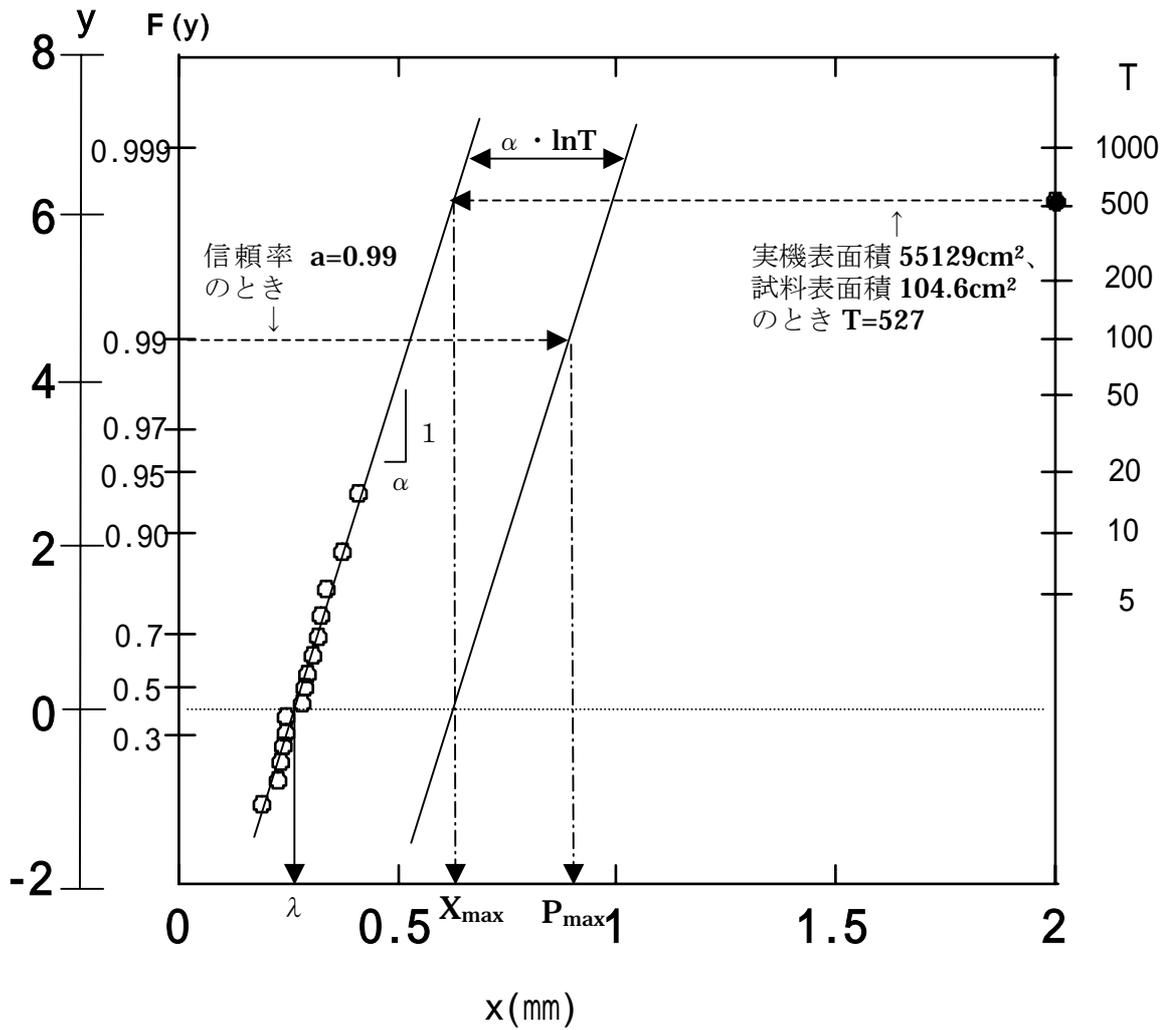


図 2 - 3 Gumbel 分布関数による解析方法の模式図

表 2-1 炭酸塩と塩化物を含む水溶液中での試験条件

No.	[HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻] (M)	[Cl ⁻] (M)	[SO ₄ ²⁻] (M)	温度 (°C)	pH (試験前) 上段：室温 下段：80°C	期間 (days)	試験片	備考
1	0.2	0.0027	0	80	11.3~11.5 10.9~11.2	90	SM400B 円盤 φ 80mm	低腐食 性溶液
2	0.2	0.0027	0	80		180		
3	0.2	0.0027	0	80		365		
4	0.2	0.0027	0	80		720		
5	0.01	0.56	0.052	80	8.4 8.1~8.2	90	SM400B 円盤 φ 80mm	高腐食 性溶液
6	0.01	0.56	0.052	80		180		
7	0.01	0.56	0.052	80		365		
8	0.1	0.027	0	80	10.0~10.1 9.6~10.3	90	SM400B 円盤 φ 80mm	中腐食 性溶液
9	0.1	0.027	0	80		180		
10	0.1	0.027	0	80		365		
11	0.1	0.027	0	80		720		
12	0.1	0.027	0	80		90	SFVC1 円盤 φ 80mm	
13	0.1	0.027	0	80		180		
14	0.1	0.027	0	80		365		
15	0.1	0.56	0	80		11.0 10.5~11.0	30	
16	0.1	0.56	0	80	90			
17	0.1	0.56	0	80	180			
18	0.1	0.56	0	80	12.0 10.9~12.2	30	SM400B 円盤 φ 80mm	NaOH 添加
19	0.1	0.56	0	80		90		
20	0.1	0.56	0	80		180		
21	0.1	0.56	0	80	13.4 11.5~11.9	30	SM400B 円盤 φ 80mm	NaOH 添加
22	0.1	0.56	0	80		90		
23	0.1	0.56	0	80		180		

表 2-2 コンクリートと接触させた水溶液中での試験条件

No.	コンクリート	水溶液	pH (試験前) 上段：室温 下段：80°C	期間 (days)	試験片
24	OPC	0.56M NaCl	13.0~13.1 11.4~11.6	30	SM400B 円盤 φ 80mm
25	OPC	0.56M NaCl		90	
26	OPC	0.56M NaCl		180	
27	OPC	0.56M NaCl		365	
28	HFSC	0.56M NaCl	10.7~11.0 9.8~10.0	30	SM400B 円盤 φ 80mm
29	HFSC	0.56M NaCl		90	
30	HFSC	0.56M NaCl		180	
31	HFSC	0.56M NaCl		365	

表 2-3 大型平板を用いた試験条件

No.	試験溶液	pH (室温)	期間 (days)	試験片
32	$[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] = 0.1\text{M}$ $[\text{Cl}^-] = 0.027\text{M}$	10.2	90	SM400B 大型平板
33	$[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] = 0.1\text{M}$ $[\text{Cl}^-] = 0.027\text{M}$	10.2	180	
34	人工海水	7.7	90	
35	人工海水	7.7	180	

表 2-4 人工海水の組成

成分	濃度 (M)
Mg^{2+}	5.51×10^{-2}
Ca^{2+}	9.21×10^{-3}
Sr^{2+}	2.09×10^{-4}
Na^+	5.31×10^{-1}
K^+	1.16×10^{-2}
B	3.98×10^{-4}
Cl^-	5.44×10^{-1}
F^-	6.32×10^{-5}
Br^-	8.26×10^{-4}
SO_4^{2-}	2.92×10^{-2}
HCO_3^-	1.85×10^{-3}

2-2 不飽和緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法

(1) 試験片および試験セル

炭素鋼試験片材質として **JISG3106 SM400B (C:0.14%, Si: 0.22%, Mn: 1.07%, P: 0.014%, S: 0.007%)** を用いた。これを直径 **226mm**、厚さ **9mm** の寸法で切り出し、表面をエメリー紙**#800**番で仕上げた。緩衝材と接する面は中央の直径 **147mm**、面積 **169.6cm²** の部分である。

(2) 緩衝材

試験に用いた緩衝材は第2次取りまとめにおける仕様に基づいて **70%ベントナイトー30%ケイ砂混合体**とした。これを直径 **146mm**、厚さ **50mm**、乾燥密度 **1.8Mg/m³** に圧縮成型した。緩衝材ブロック間のスリットを模擬する試験ではこの緩衝材を半割した。また、緩衝材中の環境条件を測定する試験では緩衝材に電極、熱電対を挿入する孔あけ加工をそれぞれ施した。

(3) 試験条件

試験溶液として表 **2-4** に示す化学成分の人工海水、**0.1M NaHCO₃** 水溶液を用いた。また、軟岩系岩盤における処分で想定されるコンクリート支保工の共存による影響を把握するため、粉砕したコンクリートブロックと人工海水を混合した溶液も用いた。コンクリートブロック作成におけるセメント材料として、**2-1** の試験でも使用した普通ポルトランドセメント (**OPC**) および低アルカリ性セメント(**HFSC**)を用いた。人工海水中での試験では、緩衝材のスリットの条件をスリットなし、スリット幅 **5mm**、スリット幅 **10mm** と変えて行った。スリット幅 **5mm** の条件については緩衝材の膨潤によってスリットが閉塞しないようガラスフィルタをスリットに挿入させた条件での実験も行った。試験期間は **60** 日 (**1440hr**) とした。人工海水での試験については期間 **150** 日 (**3600hr**) でも行った。温度は炭素鋼試験片表面にて約 **90°C** となるようヒータで加熱した。試験条件を表 **2-5** に示す。

(4) 試験セル

試験セルの模式図を図 **2-4** に示す。セルの底部 (テフロン製) には試験片加熱用のヒータを埋め込み、その上に炭素鋼試験片、緩衝材ブロックを置き、テフロン製の断熱カバーで覆った。上部にはテフロン製の蓋をした。さらに、緩衝材の膨潤圧に対して変形しないよう、上下をステンレス製の抑え板で挟み、ボルト・ナットで締め付けるとともに、側面もステンレス製の円筒で覆った。緩衝材への試験溶液の注水は上蓋中央部の穴にチューブを接続し、セル上部より行った。なお、緩衝材上部には水が均一に浸潤するよう、ろ紙を敷いた。また、注水孔から緩衝材が流出することを防止するため、テフロン製上蓋中央部の内側を円形にくり貫き、セラミックフィルタおよびチタン製の目板をはめ込んだ。セル側面のカバーには熱電対、電極挿入用の孔を空けた。1条件あたりの試験セル数は2とし、そのうち1個は試験期間中の温度、緩衝材中の白金または金の電位、炭素鋼の自然電位をモニタリングした。緩衝材中の温度測定は **1.2mm** 径のシース熱電対を用いて炭素鋼表面よ

り **10mm** 上の部分と **27mm** 上の部分 2ヶ所で行った。白金（金）電極の電位測定は炭素鋼表面からの距離およびスリットからの距離を変えて全部で9ヶ所にて行った。電極は、細径の白金（金）線をテフロンでコーティングし、先端を **3mm** 露出したものを用いた。炭素鋼試験片には自然電位測定のためのリード線を接続した。セル上部には注水孔のほか、1ヶ所孔をあけ、**Ag/AgCl** 参照電極に通じる塩橋を配置した。

(5) 試験手順

セルを組み立てたのち、炭素鋼を加熱し、炭素鋼試験片が **90℃** に達した時点で試験溶液を注水した。温度は熱電対のデータを、データロガー（キーエンス社製 **NR1000**）により **20分**～1時間に1回の間隔で測定した。炭素鋼の自然浸漬電位は電位差計からの出力をデータロガーにより、**20分**～1時間に1回の間隔で測定した。白金（金）電極の電位は、手動により9個の端子にひとつずつ接続して電位差計の表示値を読み取ることにより行った。測定回数は1日に3回とした。所定期間後はセルを解体して炭素鋼試験片を取り出し、平均腐食速度、腐食深さ分布の測定を行った。平均腐食速度は炭素鋼試験片の重量減少量により算出した。腐食深さ分布の測定は表面粗さ計を用いて行った。

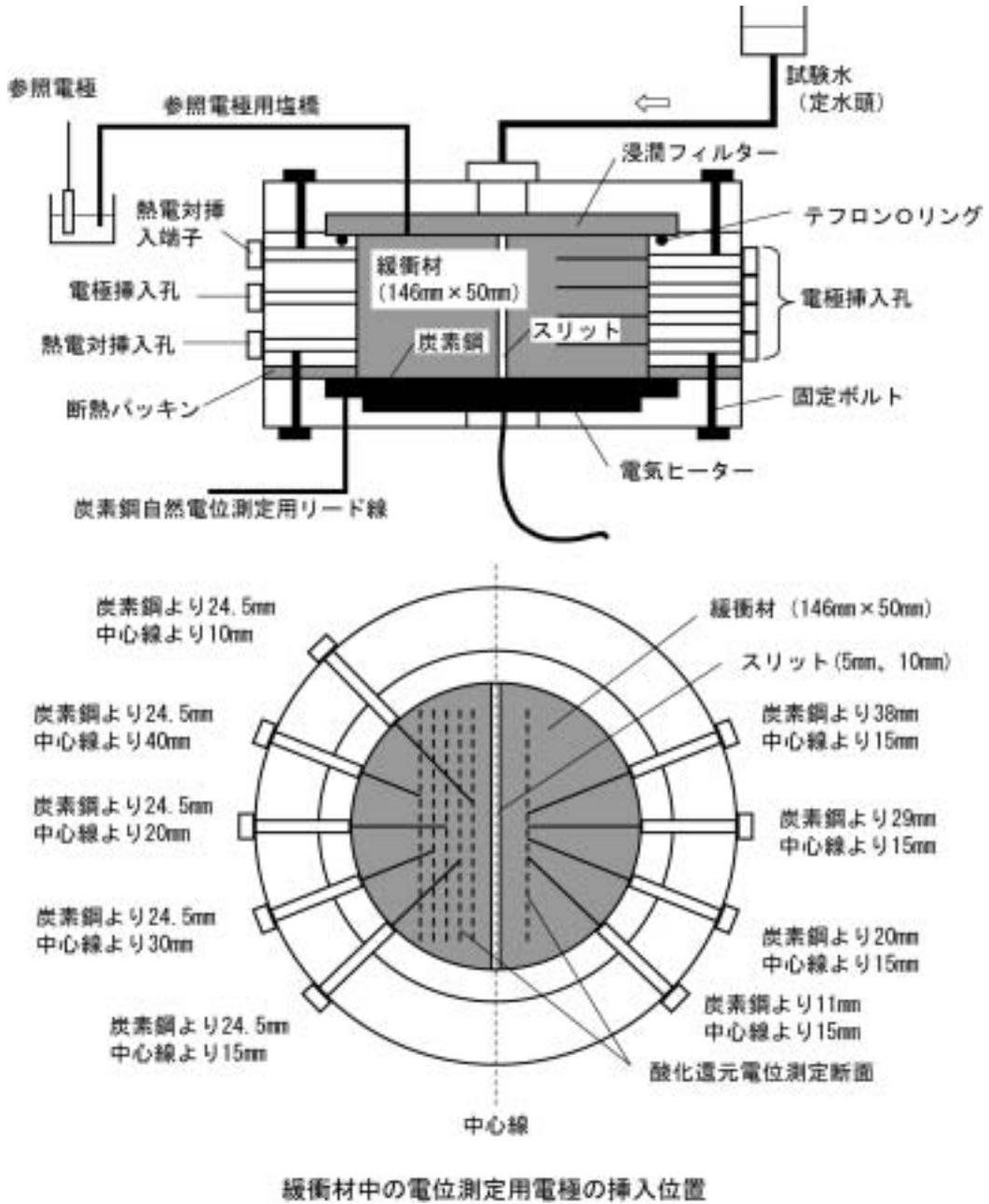


図 2-4 緩衝材中での浸漬試験セルの模式図

表 2-5 不飽和緩衝材中における試験条件

No.	溶液	コンクリート	試験溶液のpH (室温)	スリット	期間 (days)	温度と電位の測定
36	人工海水	なし	8.2	なし	60	なし
37	人工海水	なし	8.2	なし	60	有
38	人工海水	なし	8.2	5mm	60	なし
39	人工海水	なし	8.2	5mm	60	有
40	人工海水	なし	8.2	5mm	150	なし
41	人工海水	なし	8.2	5mm	150	有
42	人工海水	なし	8.2	5mm (フィルタ付)	60	なし
43	人工海水	なし	8.2	5mm (フィルタ付)	60	有
44	人工海水	なし	8.2	10mm	60	なし
45	人工海水	なし	8.2	10mm	60	有
46	人工海水	OPC	13.2	5mm	60	なし
47	人工海水	OPC	13.2	5mm	60	有
48	人工海水	HFSC	10.9	5mm	60	なし
49	人工海水	HFSC	10.9	5mm	60	有
50	0.1M NaHCO ₃	なし	8.4	5mm	60	なし
51	0.1M NaHCO ₃	なし	8.4	5mm	60	有

3 実験結果

3-1 弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における浸漬試験結果

各試験条件における平均腐食速度、平均腐食深さ最大腐食速度、最大腐食深さ、孔食係数（最大腐食深さと平均腐食深さの比）を付録1に添付した。各試験片で得られた最大腐食深さのデータは Gumbel 確率紙による極値統計解析を行った。その一例として高腐食性溶液での解析結果を図 3-1 に示す。この直線の傾きの逆数より尺度パラメータ α を、 $y=0$ における x の値より位置パラメータ λ を求めた。各試験条件での極値統計解析結果を付録 2 に添付した。

なお、No.1～No.4 の低腐食性溶液中での試験については全ての試験片がすきま内外ともに腐食が認められず、全面が金属光沢を保っていたため、腐食速度、腐食深さの評価は行わなかった。

(1) 試験片の外観

円盤型すきま付き試験片の浸漬後の外観の代表例を図 3-2 (No.24, 26) および図 3-3 (No.28, 30) に示す。図 3-2 は普通セメント浸出液中における浸漬 30 日後および 180 日後の外観である。図 3-3 は低アルカリ性セメント浸出液中における浸漬 30 日後および 180 日後の外観である。No.8～No.27 の条件のように、平均腐食速度が概ね $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ mm/y}$ のオーダーの試験では図 3-2 と同様の挙動であり、腐食の進展した部分と不動態の健全な部分が明確であった。しかし、時間の経過とともに試験片全体に腐食が広がる形で進展していた。一方、No.5～7 および No.28～31 の条件のように、平均腐食速度が 10^{-1} mm/y のオーダーの条件では図 3-3 のように初期には試験片全体が変色しており、一部に腐食の進展が早く、錆こぶが堆積していた。これが時間の経過とともに試験片全体に錆こぶが堆積し、試験片全面で凹凸を伴った腐食が進展していた。

大型平板を用いた試験片の浸漬後の外観の代表例を図 3-4 (No.32, No.33) および図 3-5 (No.34, No.35) に示す。図 3-4 は不動態化して局部腐食を受ける溶液中に浸漬されたものであるが、90 日後、180 日後ともにほぼ全面にわたって腐食が生じており、不動態の健全な部分のごく一部にしか残っていなかった。腐食した部分に典型的な井戸型の孔食は観察されなかったが、腐食の凹凸は伴っていた。一方、人工海水中に浸漬させた場合には外観上ほぼ均一な全面腐食が生じており、局部的な腐食は観察されなかった。

(2) 腐食性の異なる溶液での比較 (No.5～No.14 の結果および No.32～No.35 の結果)

高腐食性溶液における平均腐食深さ X_m 、最大腐食深さ実測値 x_{\max} および最大腐食深さの実機推定値（極値統計解析による） P_{\max} の経時変化を図 3-6 に、中腐食性溶液における平均腐食深さ X_m 、最大腐食深さ実測値 x_{\max} および最大腐食深さの実機推定値 P_{\max} の経時変化を図 3-7 (SM400B)、図 3-8 (SFVC1) に示す。高腐食性溶液中では時間とともに明確に腐食深さが増加していくのに対し、中腐食性溶液中では腐食深さの増加量は小さくなっていた。

次に大型平板試験片を用いた試験の平均腐食深さ X_m 、最大腐食深さ実測値 x_{max} および最大腐食深さの実機推定値 P_{max} の経時変化を図 3-9 (No.32、No.33) と図 3-10 (No.34、No.35) に示す。図 3-9 に示すように、No.32、No.33 の条件は中腐食溶液と同一組成の溶液での結果であるが、No.8～No.14 に比較して平均腐食深さ、最大腐食深さともに数十倍大きな値が観察された。この原因として温度の違いによる影響が考えられる。No.8～No.14 は 80°C の温度条件で行われているが、大型平板を用いた試験は室温で行われている。中腐食溶液と同一組成の溶液において室温～90°C の範囲で温度をパラメータとした実験が行われており (谷口ほか、1999)、それによると温度の低い条件のほうが大きな腐食速度が観察されている。室温と 80°C の結果を比較すると、約 1 桁室温のほうが腐食速度は大きく、今回の結果とほぼ一致する。人工海水中での実験では約 0.1mm/y 以下の平均腐食速度が観察されており、海洋環境での鋼材の腐食速度 (腐食防食協会、1995) と同程度の値であった。また、人工海水中では平均腐食深さが時間と共に増加していくのに対して最大腐食深さの進展はほとんど変化なく、深さ方向への進展が抑制されていた。

最大腐食深さの実機推定値について高腐食性溶液と中腐食性溶液の比較および材質の比較を図 3-11 に示す。図中には大型平板試験片を用いた試験結果に基づく推定値も示した。図中の曲線はべき乗則で近似した回帰曲線を表す (図 3-16 と図 3-20 も同様であり、回帰式はまとめて後述する)。なお、大型平板試験片での試験は試験期間が 2 条件のみであり、回帰曲線の推定は行わなかった。高腐食性溶液と中腐食性溶液では腐食の進展速度に数倍程度の差が認められた。材質の違いによる影響についてはあまり明確ではないが、SFVC1 のほうが SM400B よりも大きな腐食深さになる傾向があった。平均腐食速度が同程度の高腐食性溶液と大型平板の試験 (炭酸塩-塩化物溶液中) では最大腐食深さ推定値も同程度の値を示した。次に最大腐食深さの実機推定値 P_{max} を平均腐食深さ X_m で除した値を孔食係数として求めた。その時間依存性を図 3-12 に示す。概ね時間とともに低下する傾向があった。また、孔食係数は最大腐食深さの大きい条件のほうが小さな値となった。

(3) pH の違いによる影響 (No.15～No.23 の結果)

各 pH 条件における平均腐食深さ X_m 、最大腐食深さ実測値 x_{max} および最大腐食深さの実機推定値 P_{max} の経時変化を図 3-13～図 3-15 に示す。いずれの条件でも経時的な腐食の進展は小さい。特に、最大腐食深さの進展が抑制されていることがわかる。また、平均腐食深さは pH11 の条件では 10^{-3} mm のオーダー、pH12 および pH13 では 10^{-4} mm のオーダーであり、pH の高い条件のほうが腐食量は小さな値となった。最大腐食深さ (実測値) についても pH の高い条件のほうが小さな値を示す傾向があった。最大腐食深さの実機推定値について pH の違いによる比較を図 3-16 に示す。90 日の結果を除き、pH の高い条件ほど小さな値となった。次に最大腐食深さの実機推定値を平均腐食深さで除した値を孔食係数として求めた。その時間依存性を図 3-17 に示す。時間に対する傾向は明確ではないが、概ね経時的に小さくなっているように見える。また、孔食係数は比較的腐食量の大きい pH11 の条件のほうが小さな値となった。

(4) コンクリートの違いによる比較 (No.24～No.31 の結果)

各セメントの浸出液中における平均腐食深さ X_m 、最大腐食深さ実測値 x_{max} および最大腐食深さの実機推定値 P_{max} の経時変化を図 3-18～図 3-19 に示す。OPC 浸出液中では経時的な腐食の進展は小さい。特に、最大腐食深さの進展が抑制されていることがわかる。一方、HFSC 浸出液中ではほぼ直線的に腐食量が増加していた。最大腐食深さの実機推定値の pH による比較を図 3-20 に示す。90 日までは OPC 浸出液中のほうが大きな値を示しているが、180 日、365 日後の値は HFSC 浸出液のほうが数倍大きな値となった。180 日後と 365 日後の HFSC 浸出液の pH は 9 以下に低下していた。これによって腐食が促進されたものと考えられる。次に最大腐食深さの実機推定値を平均腐食深さで除した値を孔食係数として求めた。その時間依存性を図 3-21 に示す。孔食係数は概ね OPC 浸出液中のほうが大きな値であったが、HFSC 浸出液では時間による変化が小さく、365 日後は両者とも同程度の値を示した。

(5) 弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における浸漬試験結果のまとめ

以上の試験結果が示すように、概ね腐食の進展は時間とともに抑制された。孔食係数もほぼ時間とともに低下する傾向があった。また、平均腐食深さの大きい条件ほど孔食係数は小さくなる傾向があった。これは従来の pH 約 11 以下での挙動 (谷口ほか、1999a) とほぼ同様である。ここで、今回得られた平均腐食深さと孔食係数の関係を図 3-22 (実測値)、図 3-23 (実機推定値) に示す。実験条件によって腐食速度の違いがあるため、分布の領域は異なるが、局部腐食における孔食係数のデータ (No.5～No.33) はいずれのデータもほぼ同一線上に分布していることがわかった。人工海水中 (全面腐食) における孔食係数のデータ (No.34～No.35) は、局部腐食の起こる条件でのデータに比べて小さい領域に分布していた。

また、実機推定値について、円盤型すきま付き試験片 (表面積 104.6cm^2) を用いた実験データから推定される値と大型平板 (表面積 625.0cm^2) を用いた実験データから推定される値は平均腐食深さが同じであればほぼ同等であることがわかった。

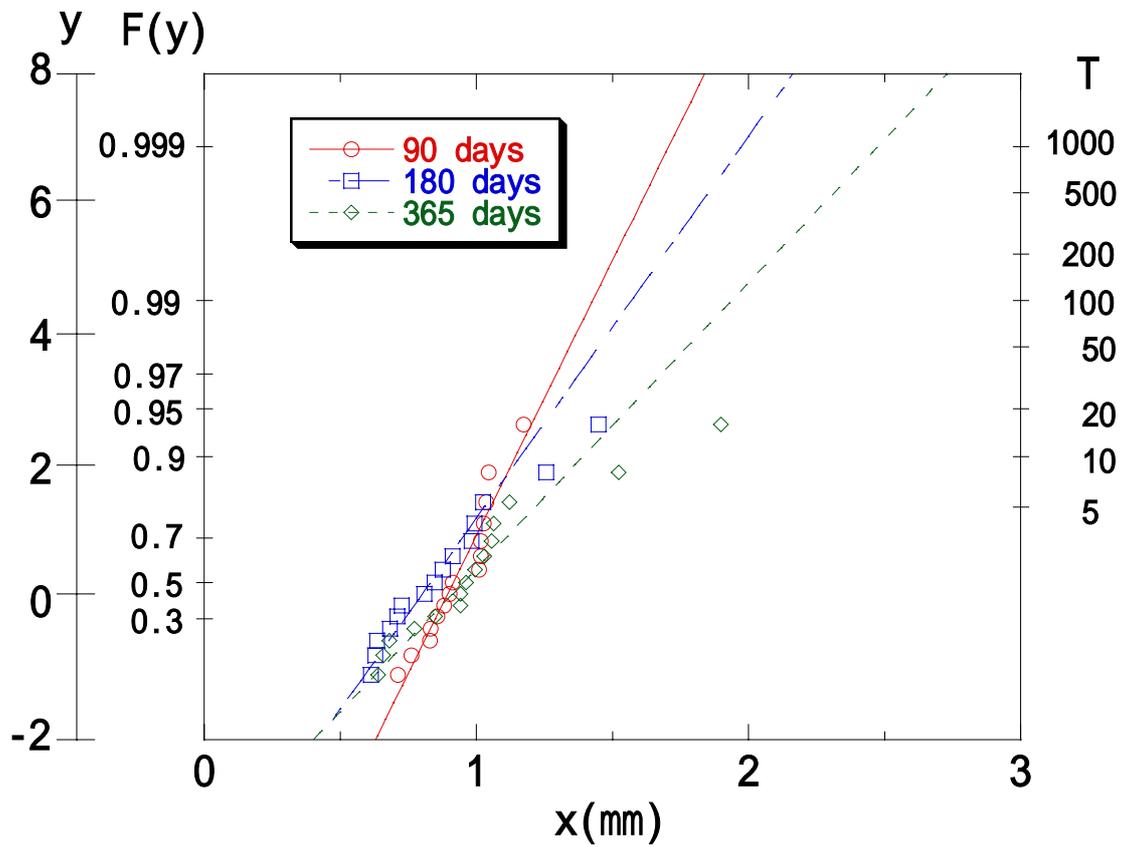


図 3-1 Gumbel 確率プロットの一例 (No.5 ~ No.7 高腐食性溶液)



30 日後 (No.24)
取り出し後



180 日後 (No.26)
取り出し後



30 日後 (No.24)
脱スケール後



180 日後 (No.26)
脱スケール後

図 3-2 普通セメント浸出液中での浸漬後の炭素鋼試験片の外観



30 日後 (No.28)
取り出し後



180 日後 (No.30)
取り出し後



30 日後 (No.28)
脱スケール後



180 日後 (No.30)
脱スケール後

図 3-3 低アルカリ性セメント浸出液中での浸漬後の炭素鋼試験片の外観



90日後 (No.32)
取り出し後



180日後 (No.33)
取り出し後



90日後 (No.32)
脱スケール後



180日後 (No.33)
脱スケール後

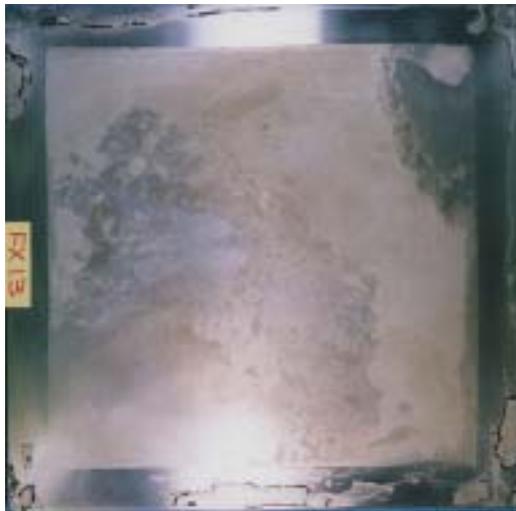
図 3-4 浸漬後の大型平板炭素鋼試験片の外観 (No.32 ~ No.33)



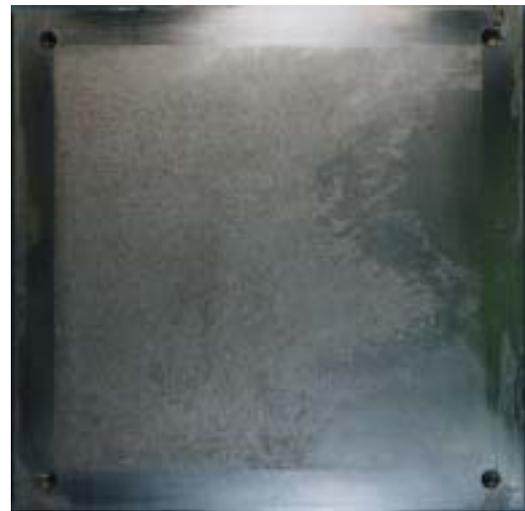
90 日後 (No.34)
取り出し後



180 日後 (No.35)
取り出し後



90 日後 (No.34)
脱スケール後



180 日後 (No.35)
脱スケール後

図 3-5 浸漬後の大型平板炭素鋼試験片の外観 (No.34 ~ No.35)

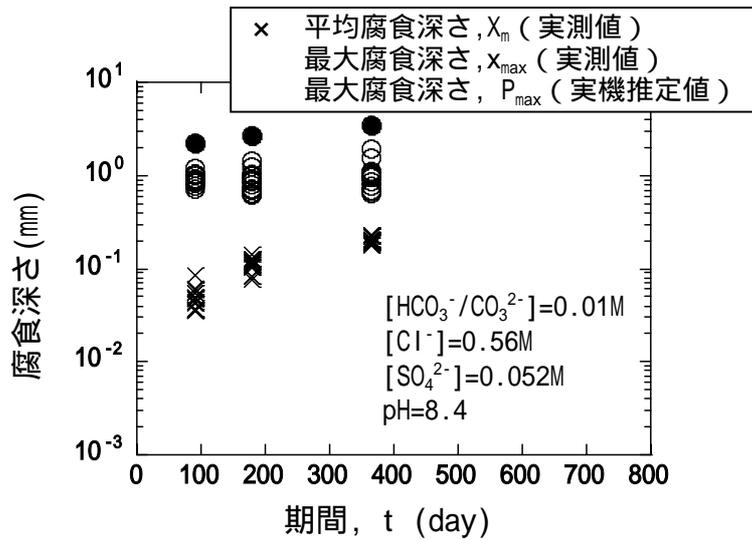


図 3-6 高腐食性溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

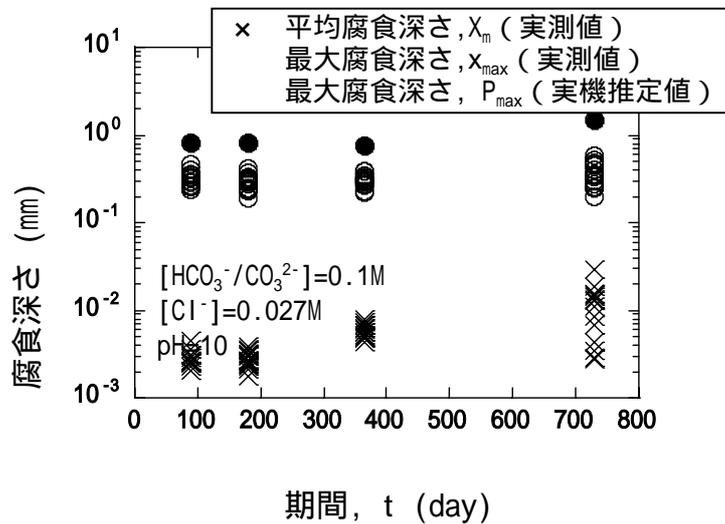


図 3-7 中腐食性溶液中における炭素鋼 SM400B の腐食深さの経時変化

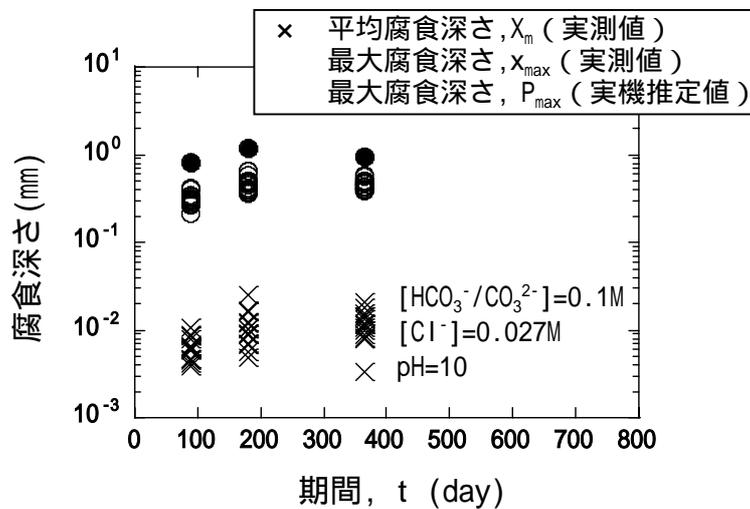


図 3-8 中腐食性溶液中における炭素鋼 SFVC1 の腐食深さの経時変化

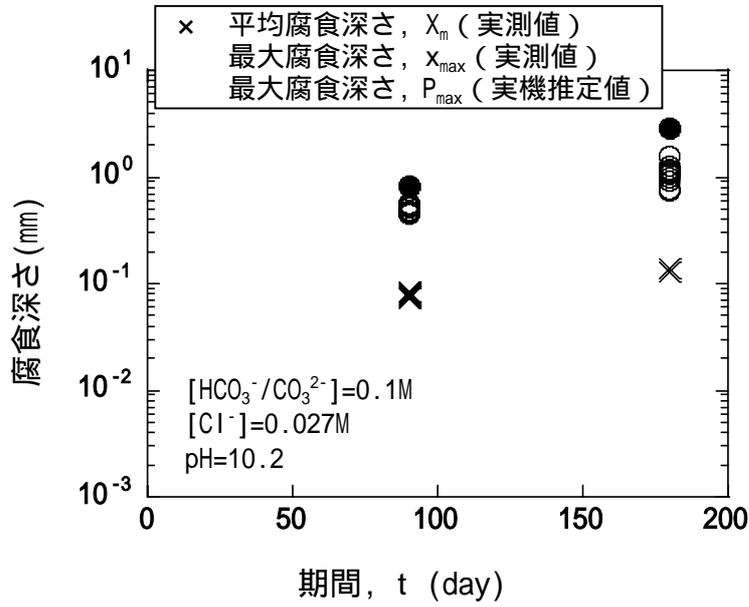


図 3-9 炭酸塩-塩化物水溶液中における大型平板炭素鋼試験片の腐食深さの経時変化

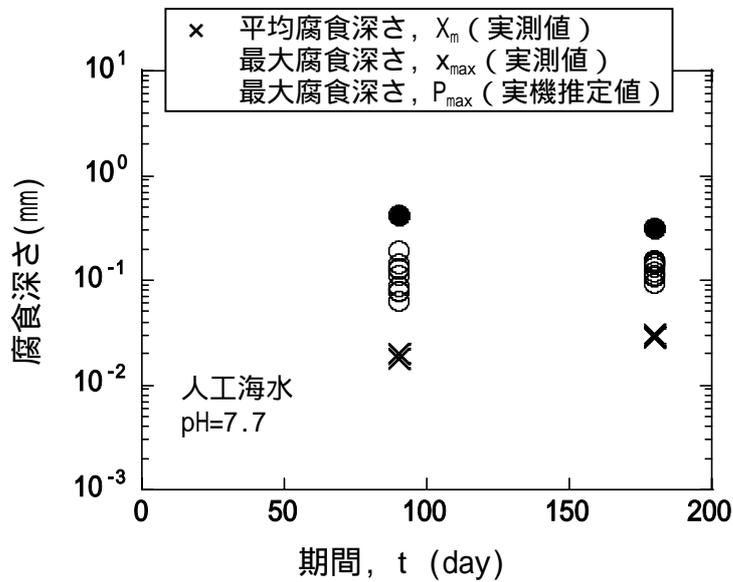


図 3-10 人工海水中における大型平板炭素鋼試験片の腐食深さの経時変化

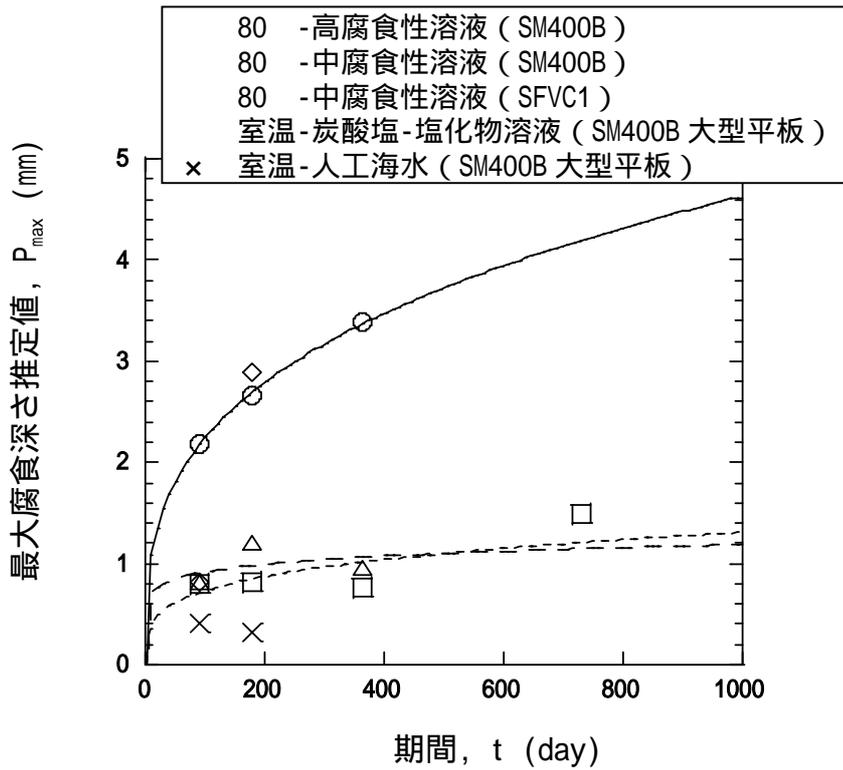


図 3-11 高腐食性溶液および中腐食性溶液中における炭素鋼の最大腐食深さ, P_{max} (オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値) の経時変化

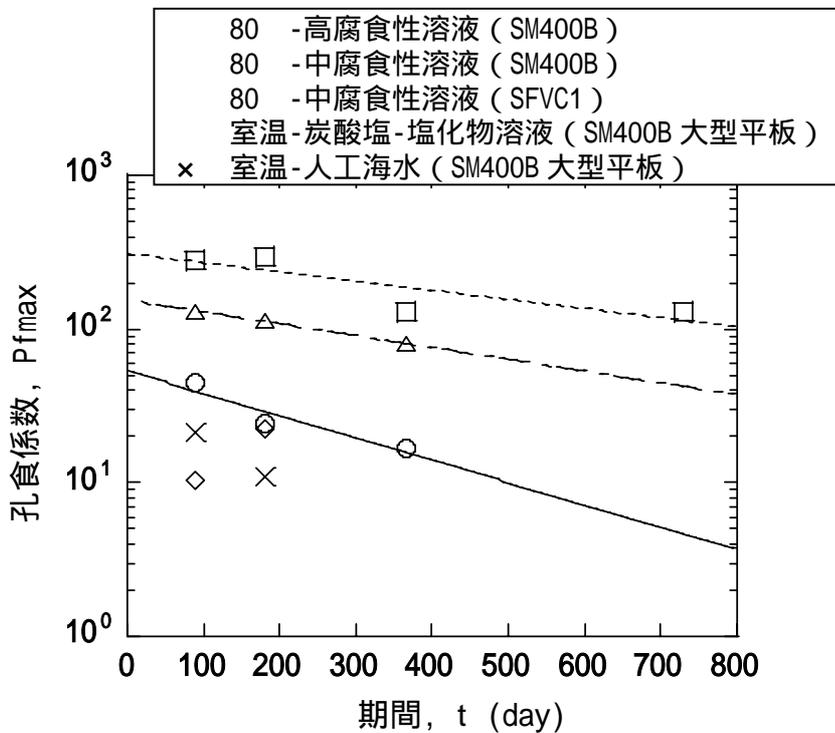


図 3-12 高腐食性溶液および中腐食性溶液中における炭素鋼の孔食係数, P_{fmax} (オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値) の経時変化

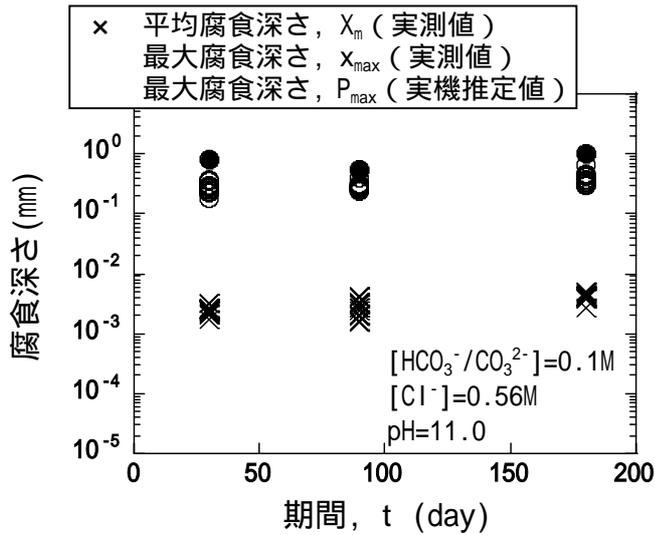


図 3-13 pH11.0 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

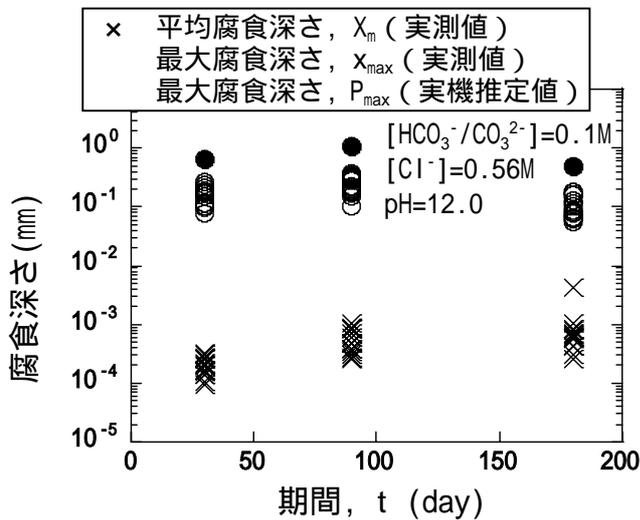


図 3-14 pH12.0 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

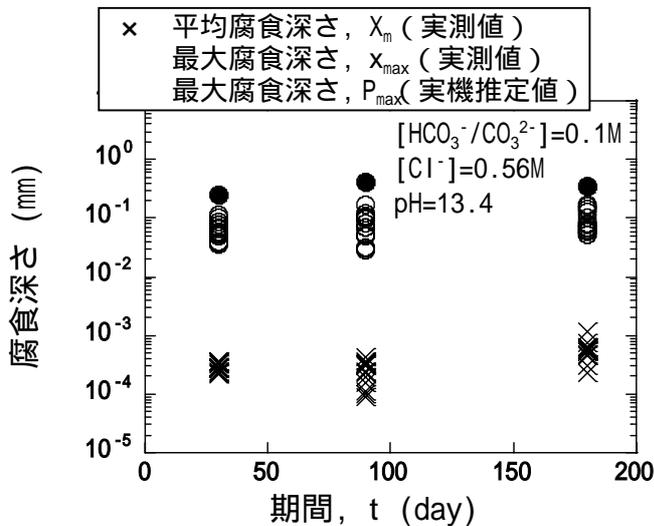


図 3-15 pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

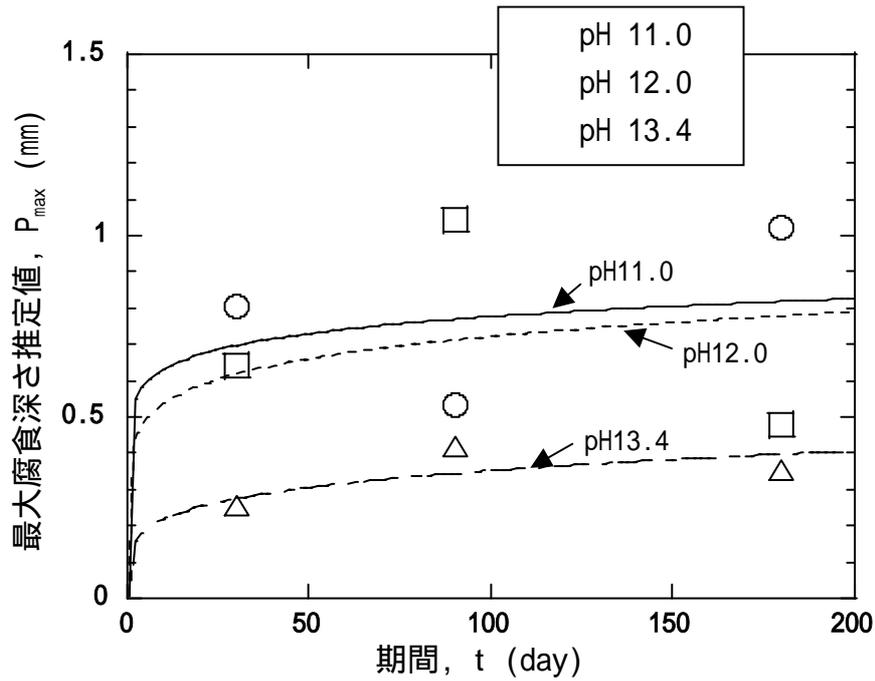


図 3-16 pH11.0～pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の最大腐食深さ， P_{\max} （オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化

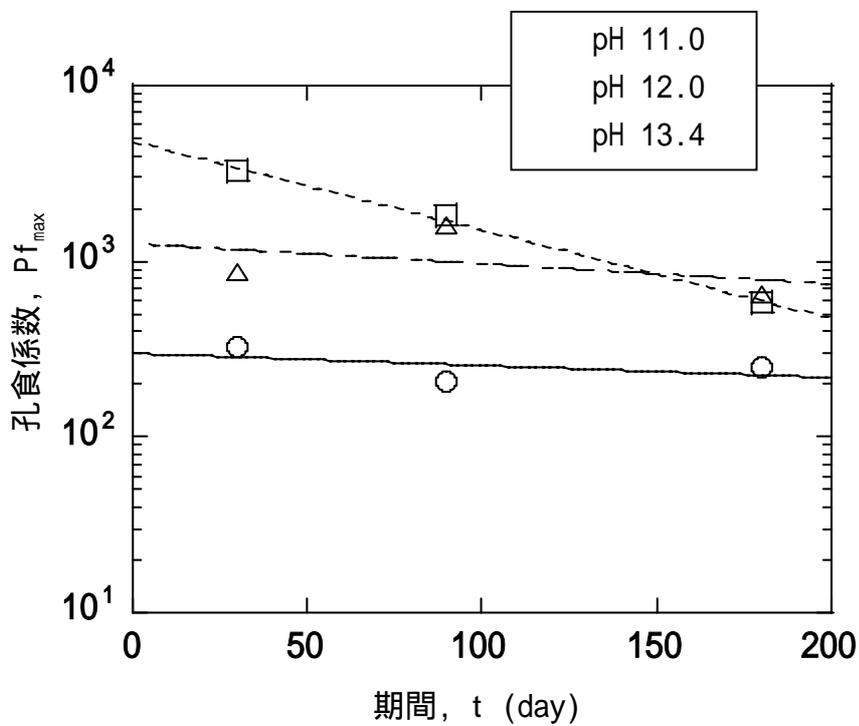


図 3-17 pH11.0～pH13.4 の炭酸塩水溶液中における炭素鋼の孔食係数， $P_{f_{\max}}$ （オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値）の経時変化

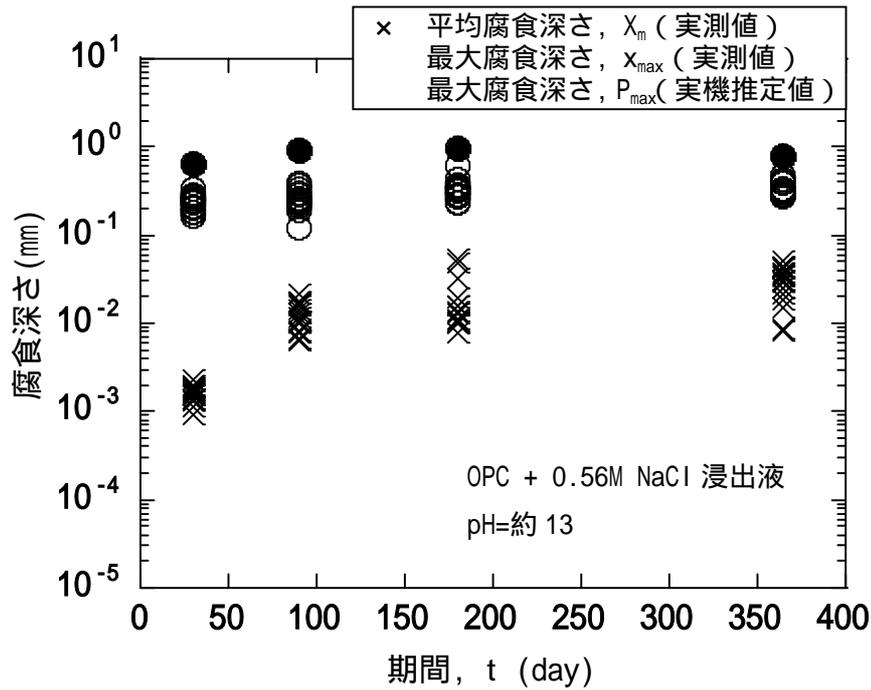


図 3-18 普通セメント浸出液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

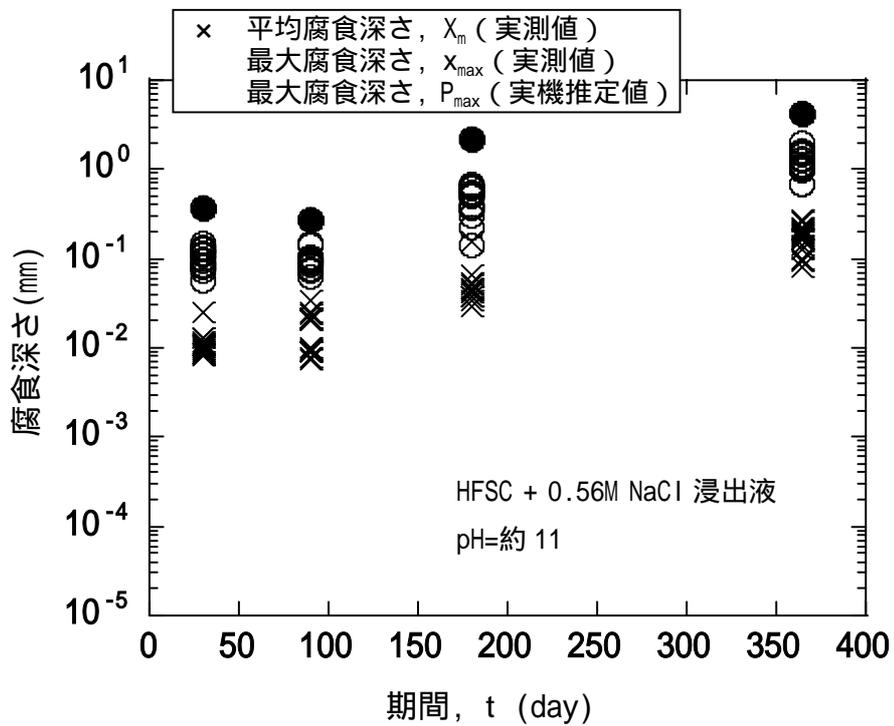


図 3-19 低アルカリ性セメント浸出液中における炭素鋼の腐食深さの経時変化

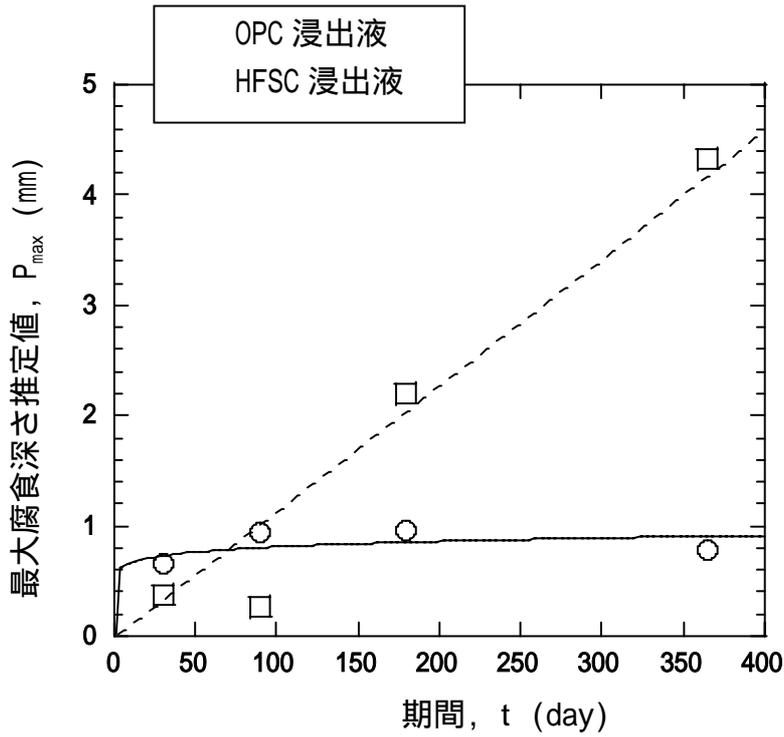


図 3-20 セメント浸出液中における炭素鋼の最大腐食深さ, P_{\max} (オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値) の経時変化

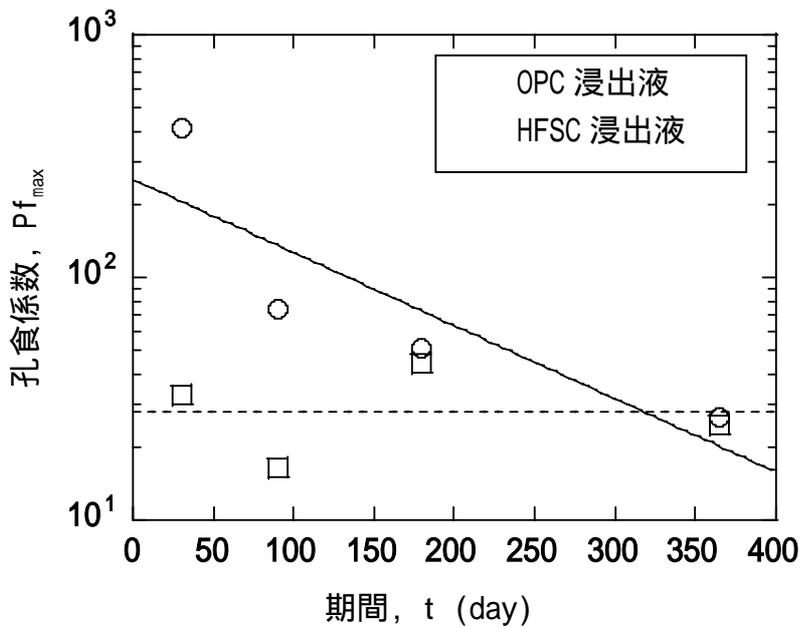


図 3-21 セメント浸出液中における炭素鋼の孔食係数, Pf_{\max} (オーバーパック表面積における信頼率 0.99 での推定値) の経時変化

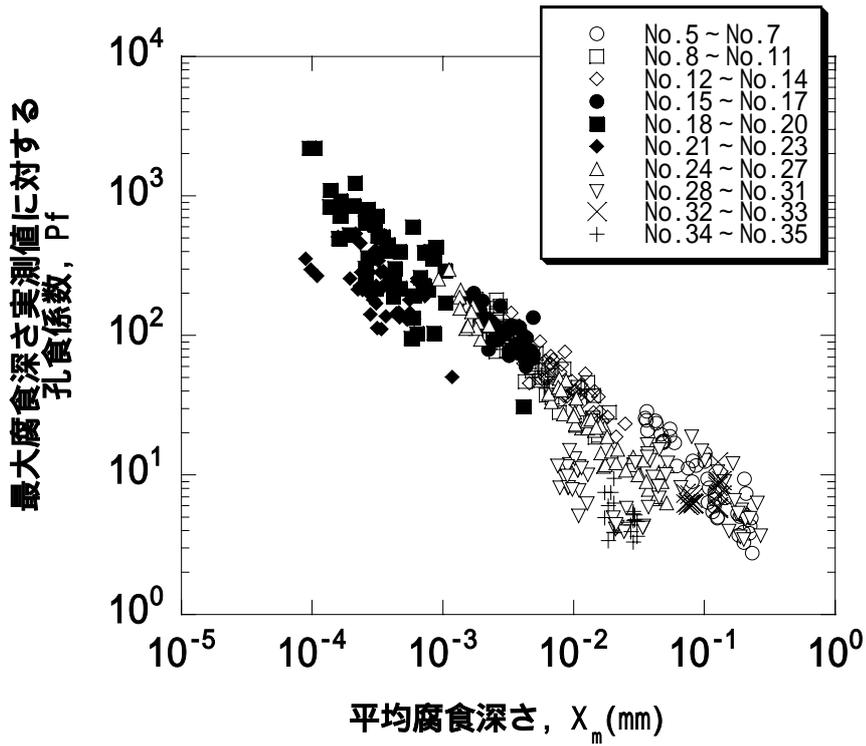


図 3-22 平均腐食深さと孔食係数（実測値に対する値）の関係

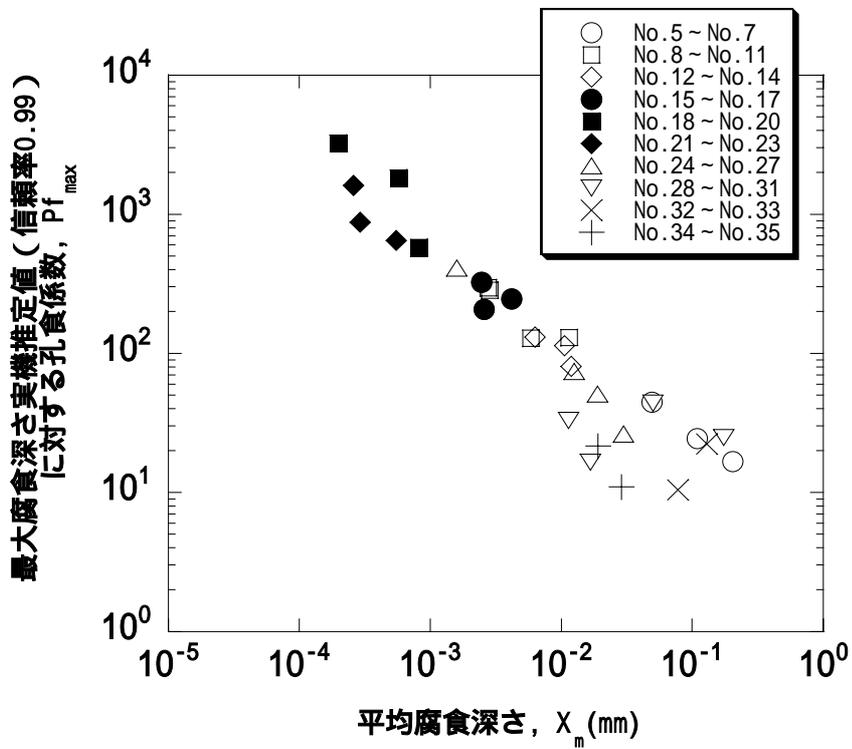


図 3-23 平均腐食深さと孔食係数（実機推定値に対する値）の関係

3-2 不飽和緩衝材中における浸漬試験結果

(1) 温度測定結果

熱電対により炭素鋼および温度のモニタリングを行った結果の一例を図 3-24 に示す。試験期間を通じて炭素鋼は 90℃、炭素鋼より 10mm 上では約 85℃、炭素鋼より 27mm 上では 75℃～80℃であった。したがって、約 0.5℃/mm の温度勾配が緩衝材中に生じていたと考えられる。第 2 次取りまとめにおける人工バリア仕様での温度勾配は最大約 0.04℃/mm であり、今回の実験で与えた温度勾配のほうが十分大きい。緩衝材中の温度勾配が炭素鋼の腐食に与える影響はほとんど検討されていないが、局所的な塩の濃縮など腐食の不均一化の原因となる現象は実際の条件に比較して今回の実験のほうが起こりやすかったものと考えられる。

(2) 電位測定結果

緩衝材中における白金または金電極の電位測定結果を図 3-25～図 3-32 に示す。これらの図の上段は炭素鋼表面から 24.5mm の高さにおいてスリット端からの水平方向距離を 10mm～40mm まで変えて測定した結果であり、下段はスリット端から 15mm の距離において炭素鋼表面からの高さ方向の距離を 11mm～38mm まで変えて測定した結果である。なお、図 3-30 に示す No.47 (人工海水+OPC) および図 3-31 に示す No.49 (人工海水+HFSC) の実験ではいくつかの電極で試験期間を通して測定値が大きく変動しており、プロットから除外した。

いずれの図においても、試験開始初期にはデータのばらつき、変動が大きかったが、概ね数百時間程度までは電位が卑な値に向かい、それ以降は経時的に貴化する傾向が観察され、500～1000hr 以降はほぼ一定の値を示した。No.47 (人工海水+OPC) では試験期間を通して他の条件に比較して電位が卑な値であり、他の条件のように数百時間以降に貴化して安定な値を示すような挙動は観察されなかった。この条件では試験期間終了後の緩衝材を観察すると他の条件に比較して溶液の浸潤量が明らかに小さかった。このことから、他の条件の試験での数百時間までの浸潤過程での挙動が約 1000hr 以上にわたって継続している可能性がある。

ここで、測定値が比較的安定した値を示す 1000hr 以降の電位の平均値を求め、緩衝材中心線 (スリット中心線) からの距離との関係および炭素鋼からの距離との関係を求めた。緩衝材中心線からの距離と電位の関係を図 3-33 に、炭素鋼表面からの高さで安定後の電位 (1500hr 以降の平均値) の関係を図 3-34 に示す。緩衝材中心線からの距離に対する明確な依存性は認められなかった。一方、炭素鋼表面からの距離については、炭素鋼から離れるほど貴な値を示す傾向が観察された。緩衝材中の白金または金電極の電位が酸化還元電位に対応した値であるとする、炭素鋼に近いほど還元性の環境であったことが示唆される。炭素鋼に近い部分は腐食によって酸素が消費されたことが反映されていると考えられる。また、緩衝材中心線からの距離に対しては明確な依存性はないものの、数 100mV 以上の幅があり、緩衝材が水で満たされるまでの不飽和の段階では場所によって酸化還元性が場所によって異なっていることが示唆される。したがって、炭素鋼上に不均一な腐食をもたら

す可能性がある。後述するように、試験後試験片を観察すると、いくつかの条件で深い孔食状の腐食が観察されており、試験片上でアノード反応とカソード反応の分離が生じていたものと考えられる。

次に炭素鋼の自然電位測定結果を図 3-35 に示す。人工海水および人工海水と低アルカリ性セメントの混合物を浸潤させた条件では試験開始直後より電位は卑化し、500hr 以内にほぼ約-700mV 付近で安定した。人工海水中の長期の試験では、約 1000hr 以降にやや電位が貴化し、約 2500hr 以降は-600mV 程度で安定した。これら電位の値は従来から観察されているベントナイト中における炭素鋼の電位(谷口ほか、1999b)とほぼ一致する。長期経過後の電位貴化については皮膜形成によるアノード反応の抑制、ベントナイト中铁鉱物の酸化に伴う pH の低下(小崎ほか、1996)などの原因が考えられる。人工海水に普通セメントを混合した溶液条件では他の条件に比較して卑な電位であり、約 500hr 以降、-1100mV vs. Ag/AgCl 付近で安定した。普通セメントと人工海水の混合物の pH は 13 以上であり、スリットを通して炭素鋼と直接的に接触した場合には同程度の pH 条件が達成されることが考えられる。また、緩衝材による pH 緩衝性が作用しても 12 以上はあったものと推定される(谷口ほか、2002)。このような高 pH 環境では炭素鋼は酸化性環境で不動態化すると予想される(谷口ほか、2002)。しかし、約 500hr 以降の値はコンクリート環境中の鉄筋の電位(腐食防食協会、1995)など酸化性環境で不動態化している場合の値と比較して十分卑である。脱気条件での炭素鋼の電位の pH 依存性(Taniguchi et.al, 1998)によると、pH 約 12 以上で推定される電位は約 500hr 以降の値(-1100mV vs. Ag/AgCl)に近い。和田ほか(2002)も pH 約 12.5 の脱気した海水系溶液中で同程度の値を報告している。よって、今回の試験期間の後半、約 500hr 以降は炭素鋼近傍において高 pH で還元性の環境がほぼ達成されていたものと考えられる。0.1M NaHCO₃ 水溶液を浸潤させた実験では人工海水系での値に比較して貴な-200~-400mV vs. Ag/AgCl の値が得られた。松田ほか(1990)は炭酸塩を含む人工淡水中において酸素濃度をパラメータとして炭素鋼の自然電位を測定しており、酸素濃度の高い環境(20%~100%)で今回得られた値とほぼ同程度の値を報告している。また、0.1M NaHCO₃ 水溶液の場合、緩衝材が存在すると炭素鋼は不動態化しないが、水溶液単独系では大気中で容易に不動態化する(Taniguchi et.al, 1998)。今回の実験ではスリットを通して直接的に炭素鋼に接し、不動態化した可能性もある。試験後試験片の外観は全面的に腐食しており、明確な不動態化の形跡はなかったが、不動態に近い状態がもたらされ、電位が比較的貴な値になった可能性もある。ただし、電位は経時的に卑化する傾向があり、緩衝材への溶液の浸潤に伴って脱不動態化、還元性環境への変化が徐々に進展しているものと考えられる。

(3) 炭素鋼試験片の腐食状況

いずれの試験片も全面が変色または腐食生成物で覆われていた。一部に孔食状の腐食や不均一な腐食は観察されたが、水溶液中で観察されたような金属光沢の保たれた部分(不動態皮膜の健全な部分)と腐食した部分の明確な分離は観察されず、外観は不均一な全面腐食の様相であった。炭素鋼試験片の外観の代表例(No.41)を図 3-36 に示す。スリットの近傍と円周部で黒色または茶色の腐食生成物の堆積が観察され、この付近で腐食の進展が比

較的速かったことがわかる。腐食生成物を除去すると、スリットおよび円周部（図中 a～d 点）で孔食状の腐食の進展が観察された。孔食状の腐食 a, b, d 点はスリット中央部よりわずかにずれた緩衝材と接触していた部分で生じていた。スリットに近い部分は緩衝材の含水比が高く、酸素の供給が抑制されたため、アノード反応が起こったと考えられる。また、スリット中央部やスリットから離れた含水比の低い場所では酸素の供給が容易であったため、カソード反応が生じたものと考えられる。

人工海水を用いた実験ではセメント浸出液での実験を除き、同様の現象が観察された。セメント浸出液を用いた実験や炭酸水素ナトリウムを用いた実験では不均一な部分はあったが、このような深い孔食状の腐食は観察されなかった。

各条件で得られた腐食速度、腐食深さなどのデータを表 3-1 に示す。No.43 を除き、いずれも重量減少量から算出された腐食速度はほぼ 0.1mm/y 以下であったが、人工海水を浸潤させた No.36～No.45 の条件のほうが No.46～No.49 のセメント浸出液を浸潤させた条件、No.50、No.51 の NaHCO₃ 水溶液を浸潤させた条件に比較して大きな値となった。最大腐食深さ、孔食係数についても人工海水を用いた実験では比較的大きな値を示しているように見える。特に、No.40 と No.41 の実験（人工海水、スリット幅 5mm、150 日）で突出した腐食深さと孔食係数が観察された。ここで、緩衝材中における平均腐食深さと孔食係数の関係を図 3-37 に示す。この範囲では平均腐食深さに対する明確な依存性は認められなかった。

表 3-1 不飽和緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験結果

No.	溶液	スリット	期間	平均腐食速度 (mm/y)	平均腐食深さ (mm)	最大腐食深さ (mm)	孔食係数
36	人工海水 pH 8.2	なし	60 days (1440 hr)	0.0685	0.0109	0.1233	11.3
37	人工海水 pH 8.2	なし	60 days (1440 hr)	0.0942	0.0150	0.1313	8.75
38	人工海水 pH 8.2	5mm	60 days (1440 hr)	0.0728	0.0116	0.0546	4.71
39	人工海水 pH 8.2	5mm	60 days (1440 hr)	0.0738	0.0117	0.0951	8.13
40	人工海水 pH 8.2	5mm	150 days (3600 hr)	0.0370	0.0152	0.4105	27.0
41	人工海水 pH 8.2	5mm	150 days (3600 hr)	0.0405	0.0168	0.1985	11.8
42	人工海水 pH 8.2	5mm(フィル タ付)	60 days (1440 hr)	0.0747	0.0119	0.1169	9.82
43	人工海水 pH 8.2	5mm(フィル タ付)	60 days (1440 hr)	0.161	0.0255	0.2312	9.03
44	人工海水 pH 8.2	10mm	60 days (1440 hr)	0.0721	0.0119	0.1197	10.1
45	人工海水 pH 8.2	10mm	60 days (1440 hr)	0.0808	0.0134	0.0616	4.60
46	人工海水+OPC pH13.2	5mm	60 days (1440 hr)	0.0297	0.00491	0.0326	6.64
47	人工海水+OPC pH13.2	5mm	60 days (1440 hr)	0.0397	0.00658	0.0406	6.17
48	人工海水 +HFSC pH11.9	5mm	60 days (1440 hr)	0.0543	0.00900	0.0493	5.48
49	人工海水 +HFSC pH11.9	5mm	60 days (1440 hr)	0.0643	0.0107	0.0503	4.70
50	0.1M NaHCO ₃ pH 8.4	5mm	60 days (1440 hr)	0.0433	0.00718	0.0551	7.67
51	0.1M NaHCO ₃ pH 8.4	5mm	60 days (1440 hr)	0.0484	0.00801	0.0224	2.80

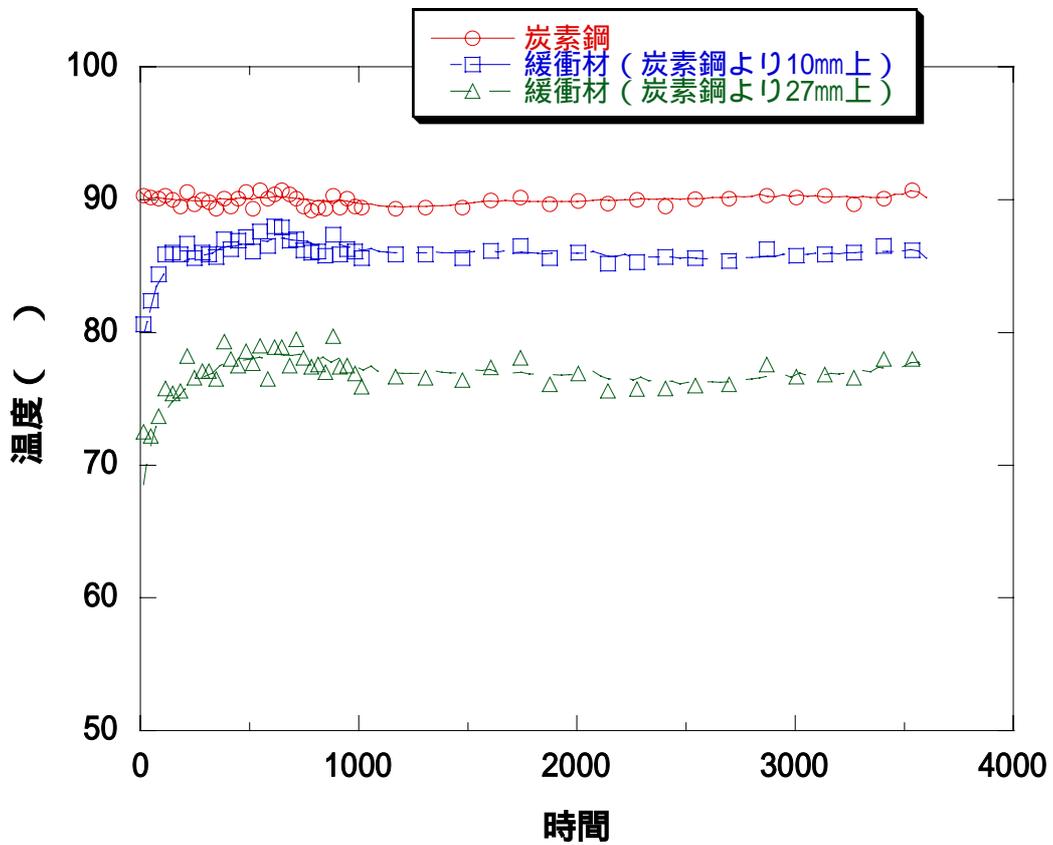


図 3-24 炭素鋼および緩衝材中の温度測定結果の一例 (No.41)

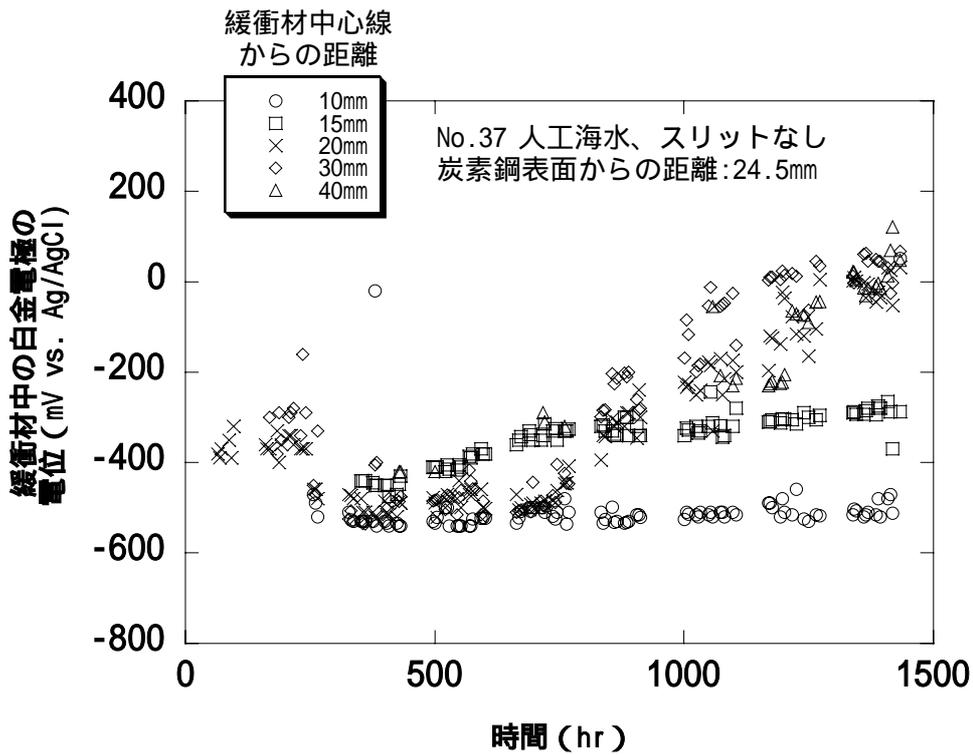


図 3-25(1) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No.37)

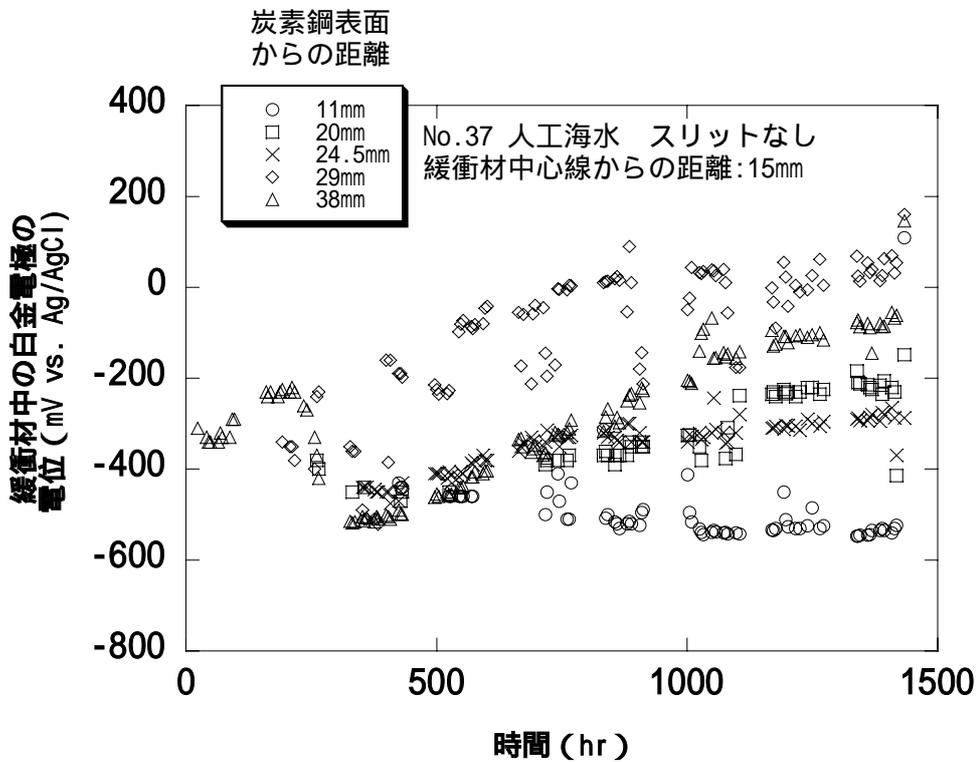


図 3-25(2) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No.37)

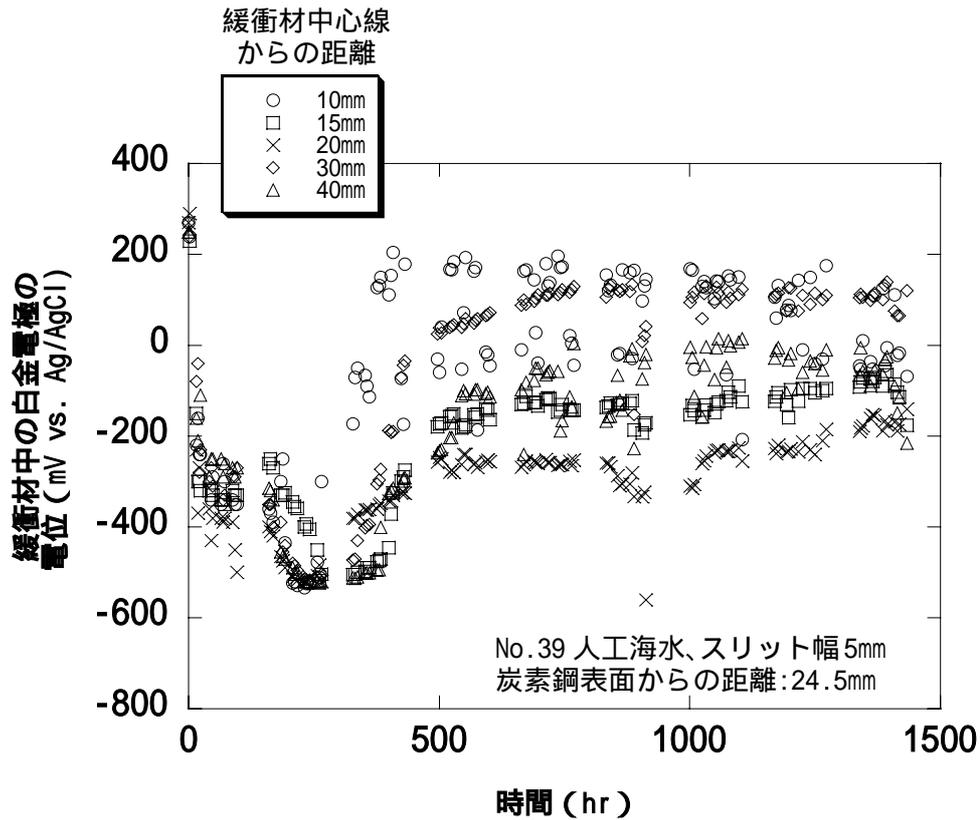


図 3-26(1) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 39)

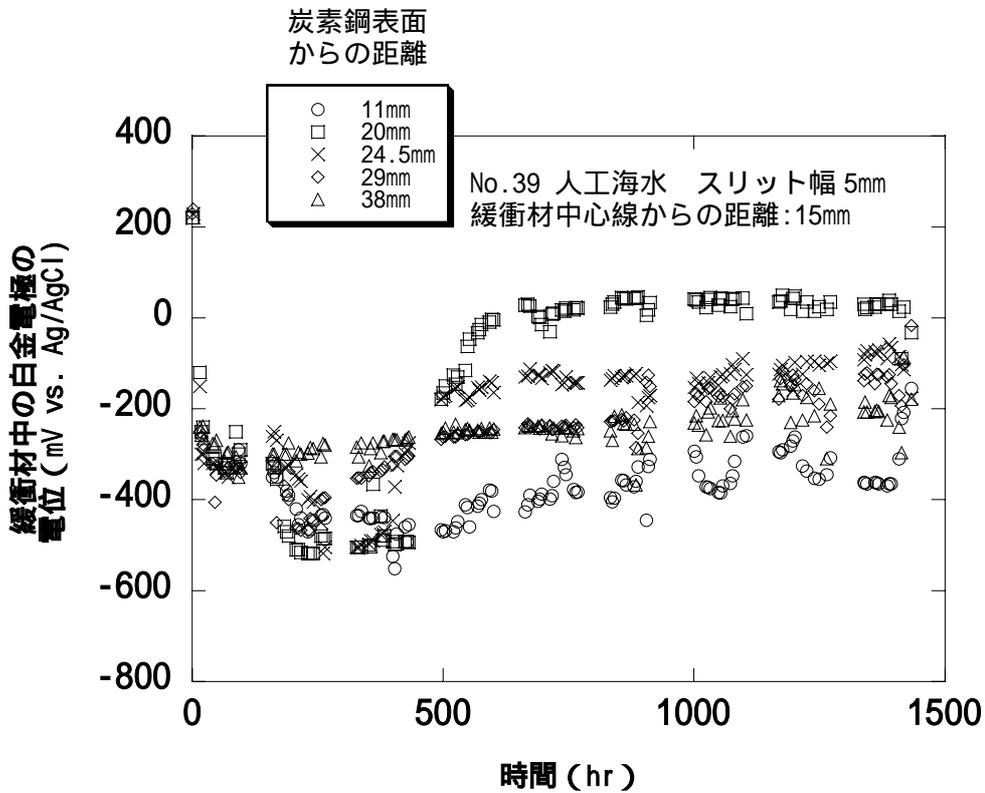


図 3-26(2) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化 (No. 39)

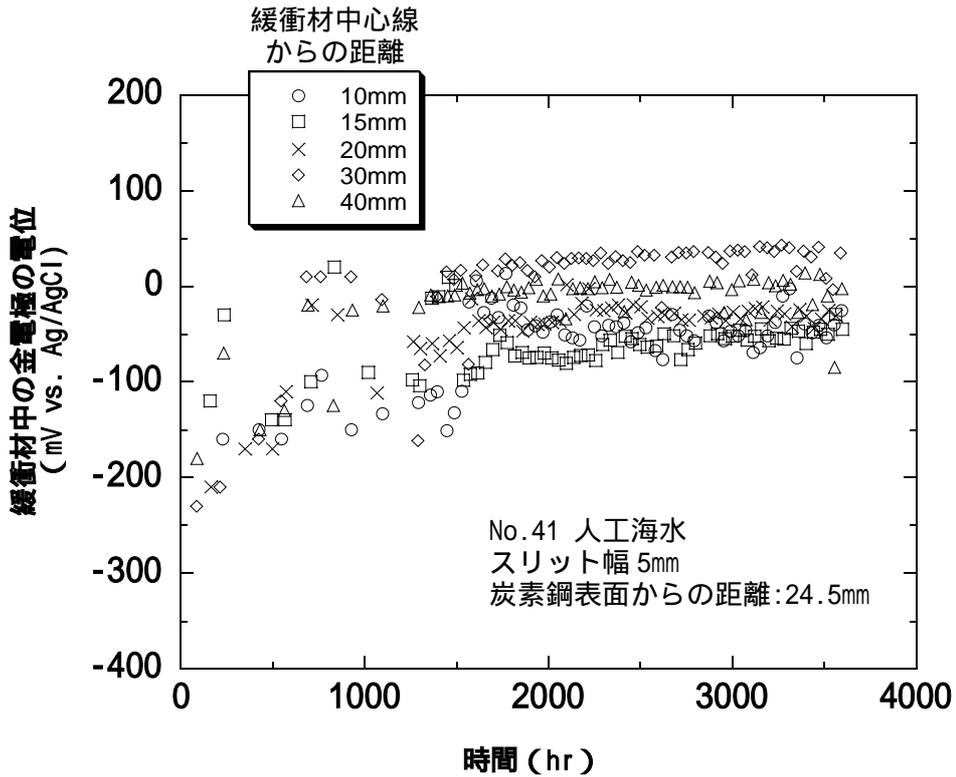


図 3-27(1) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.41)

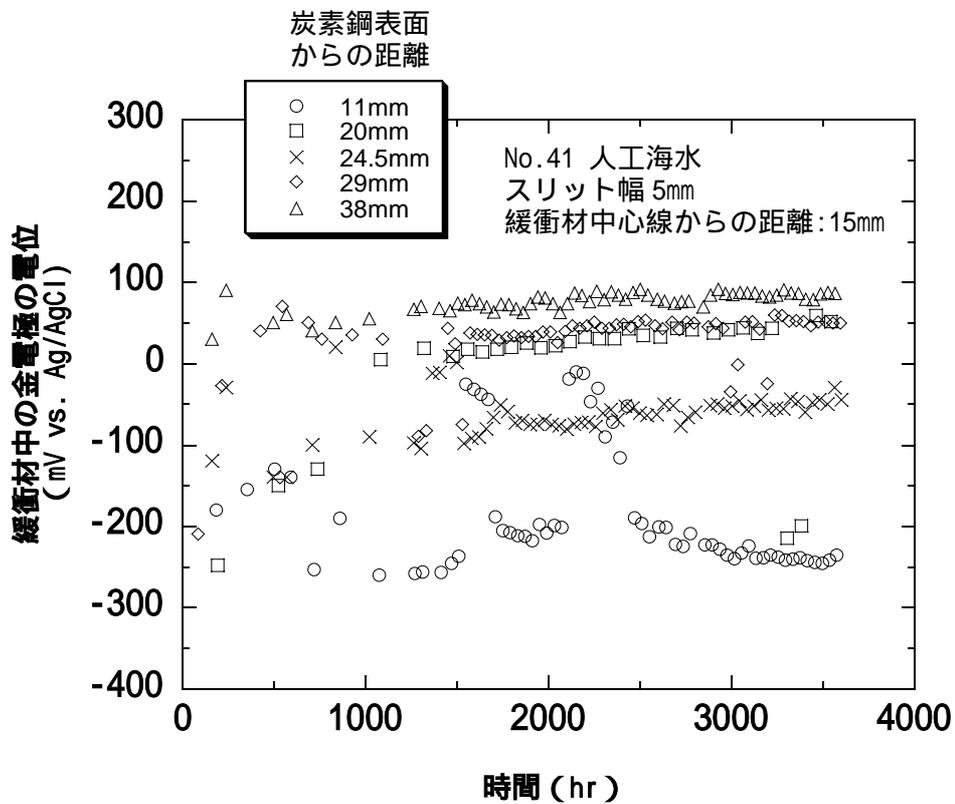


図 3-27(2) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.41)

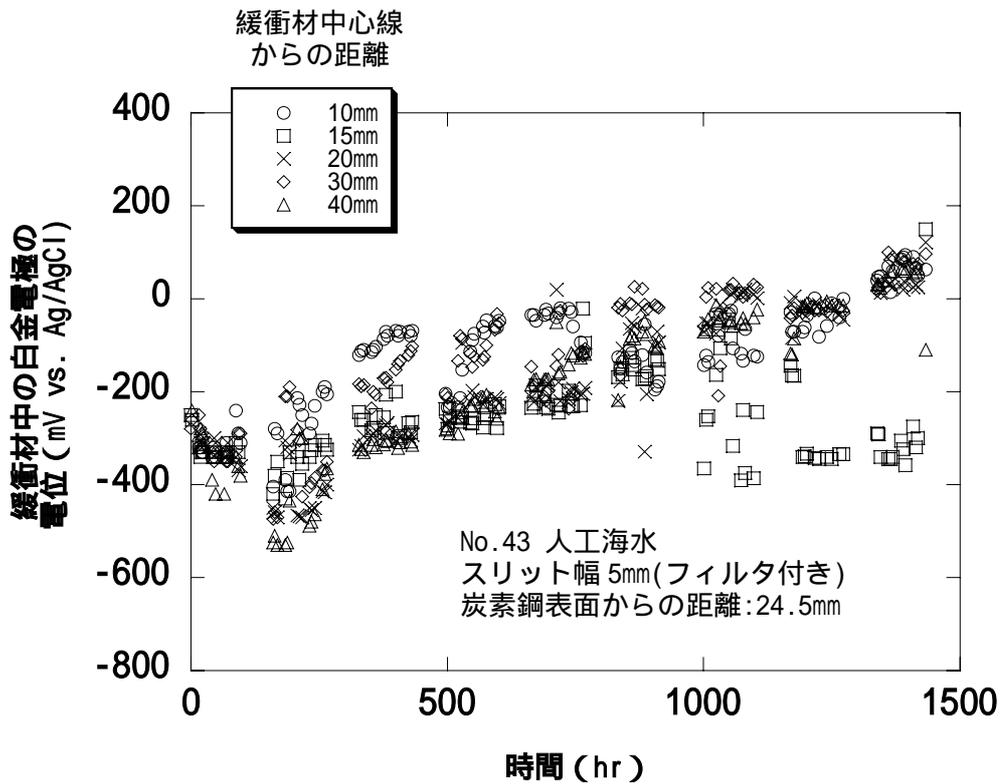


図 3-28(1) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No.43)

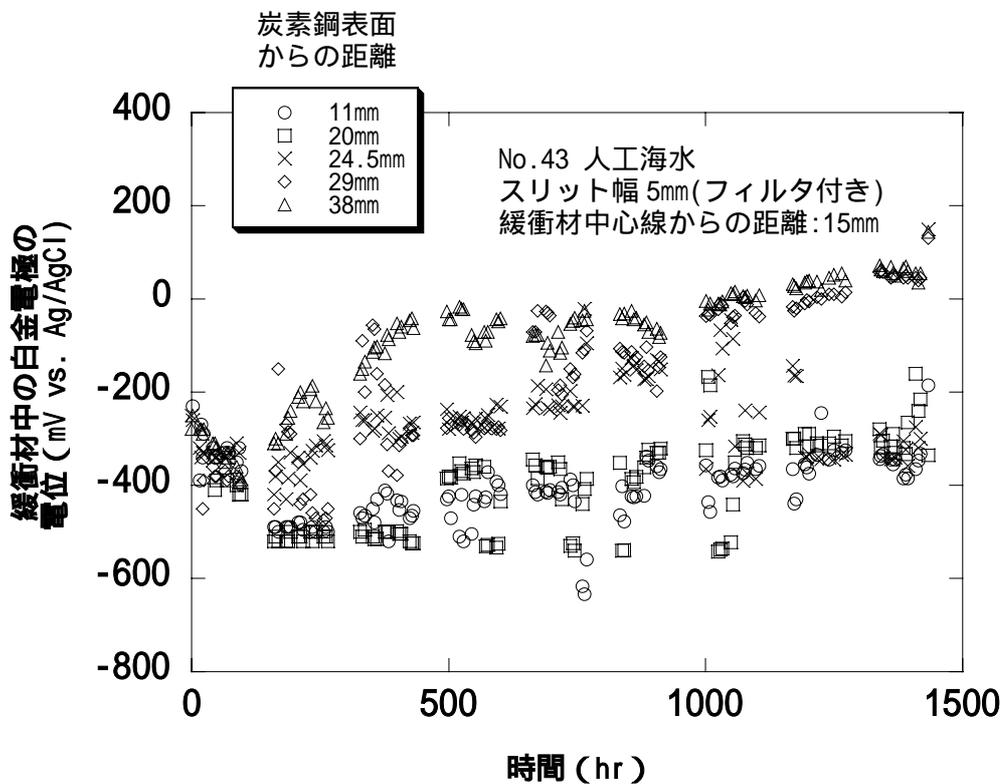


図 3-28(2) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No.43)

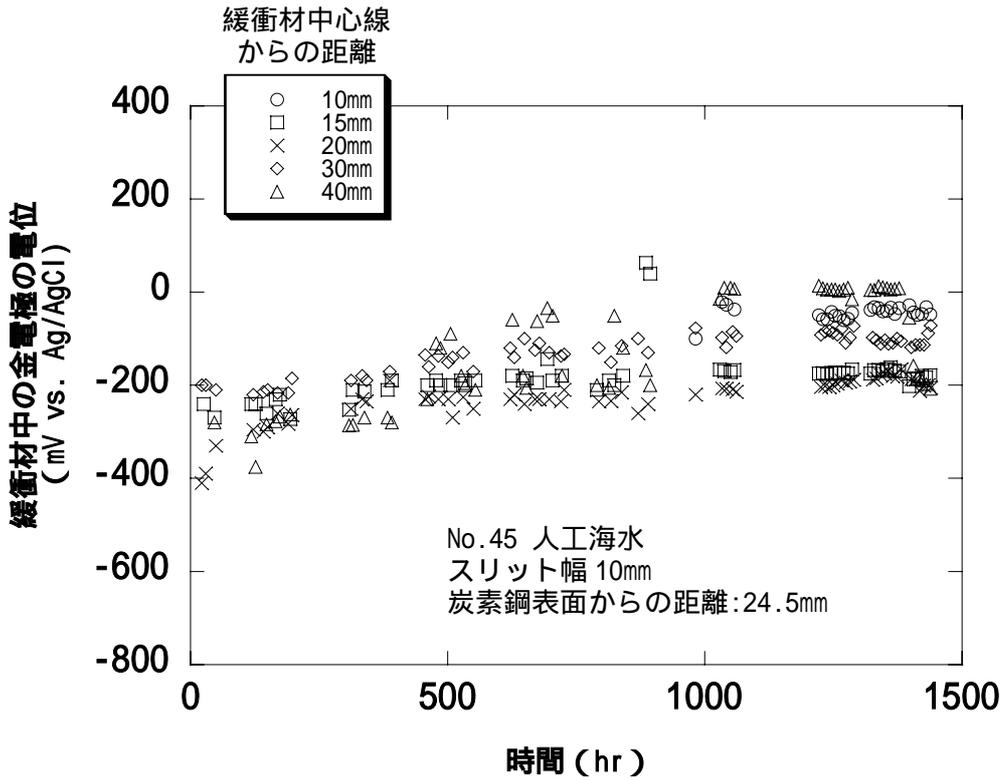


図 3-29(1) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.45)

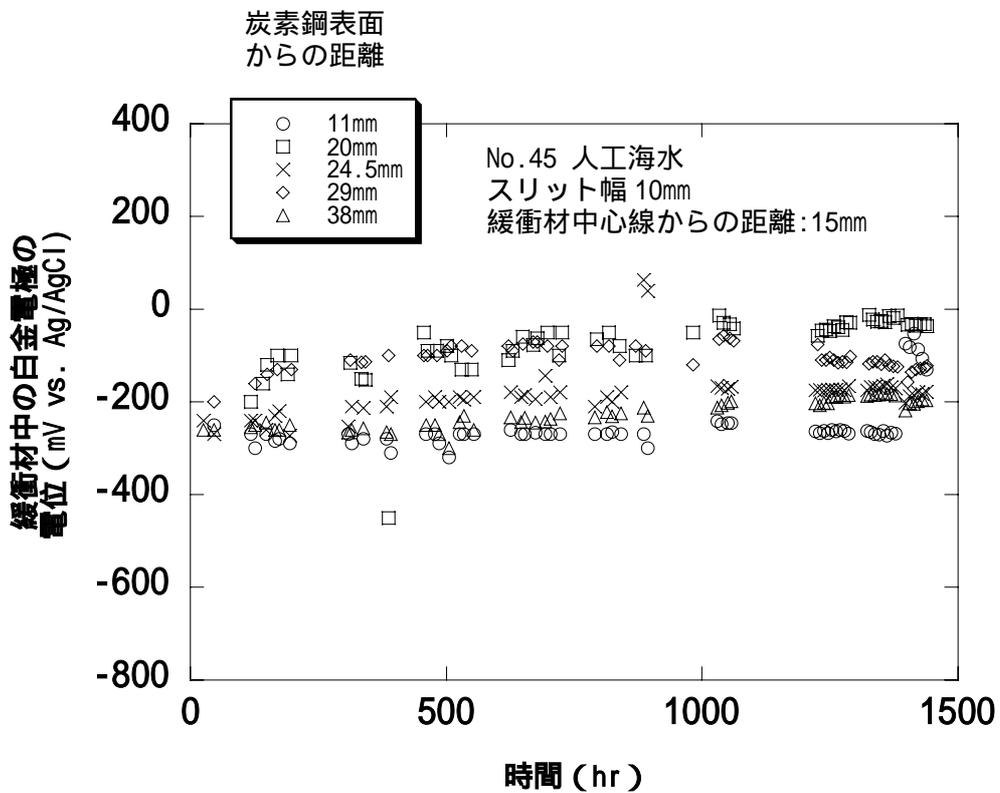


図 3-29(2) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.45)

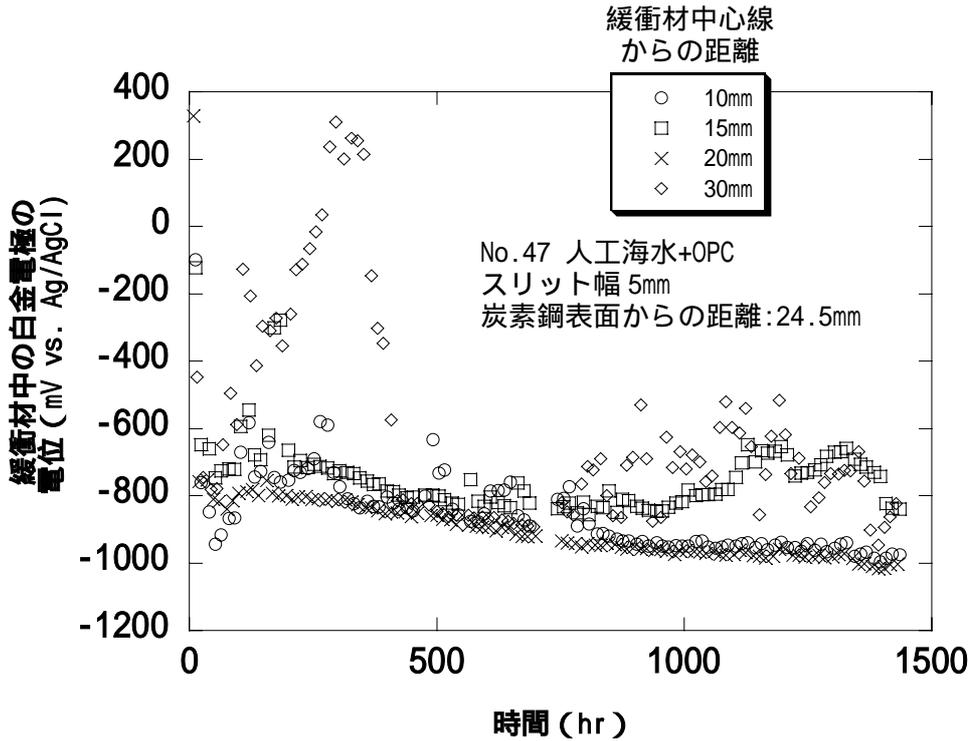


図 3-30(1) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No. 47)

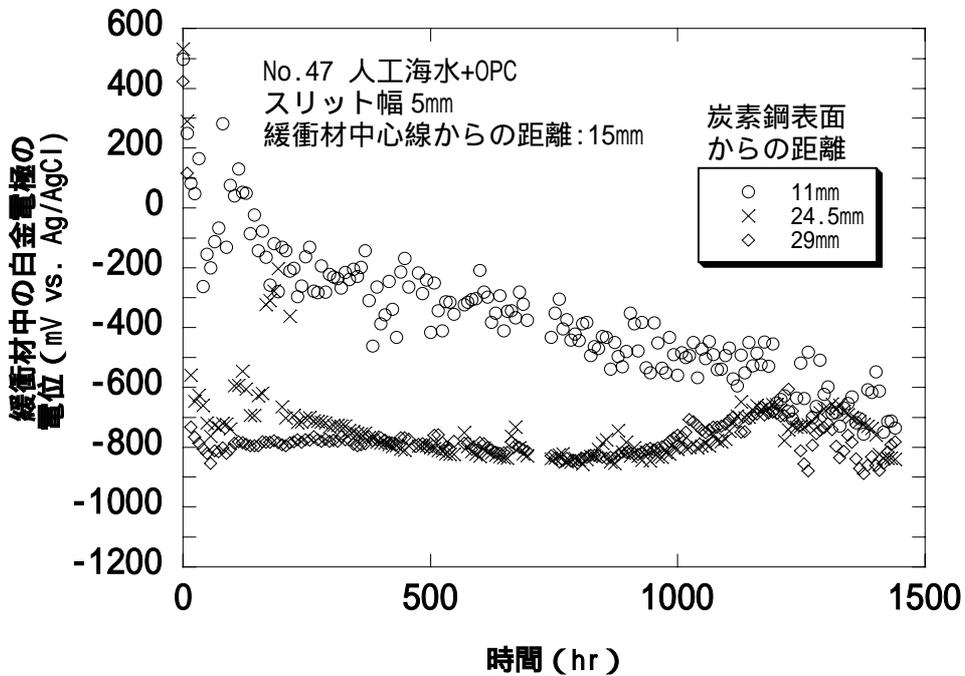


図 3-30(2) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No. 47)

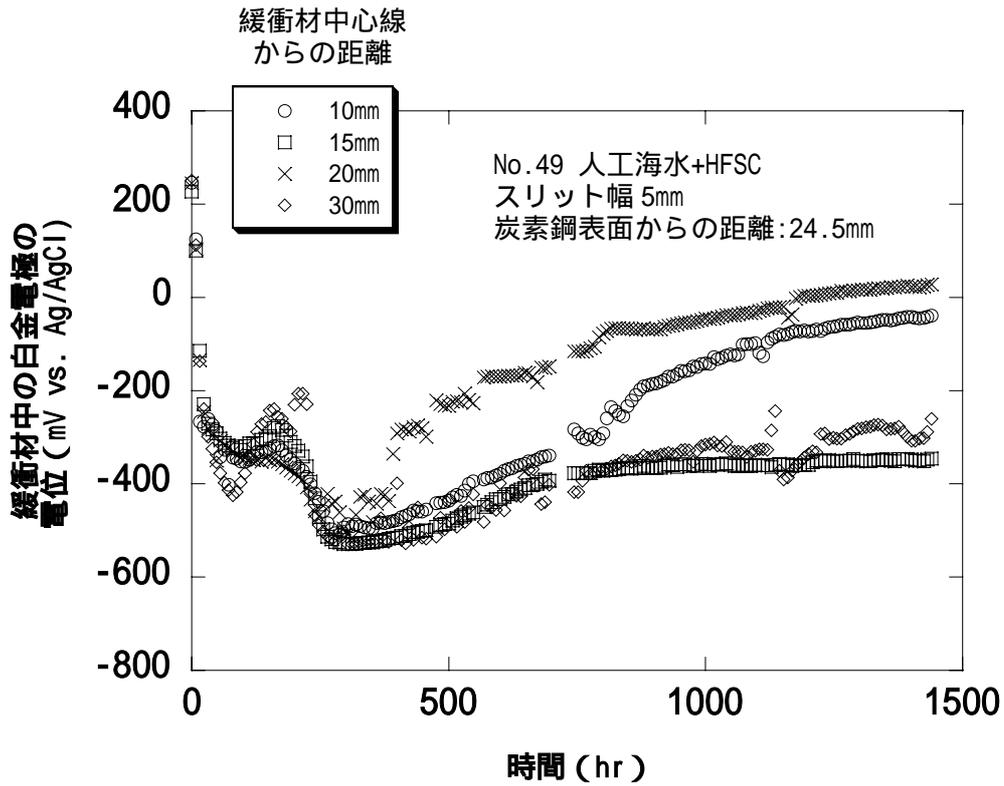


図 3-31(1) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No. 49)

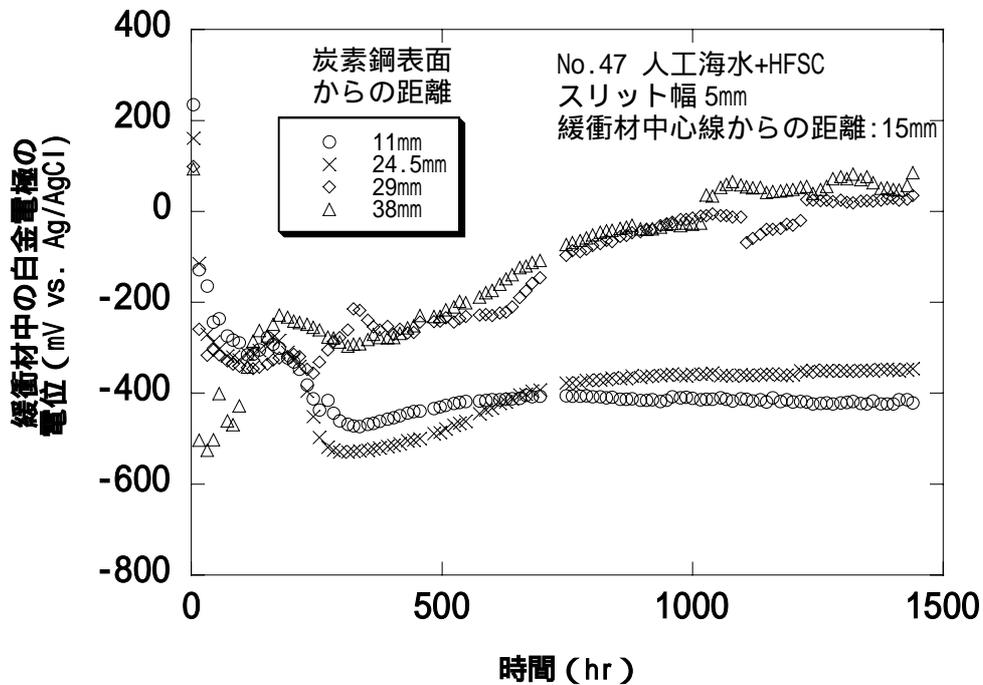


図 3-31(2) 緩衝材中に埋設された白金電極の電位の経時変化(No. 49)

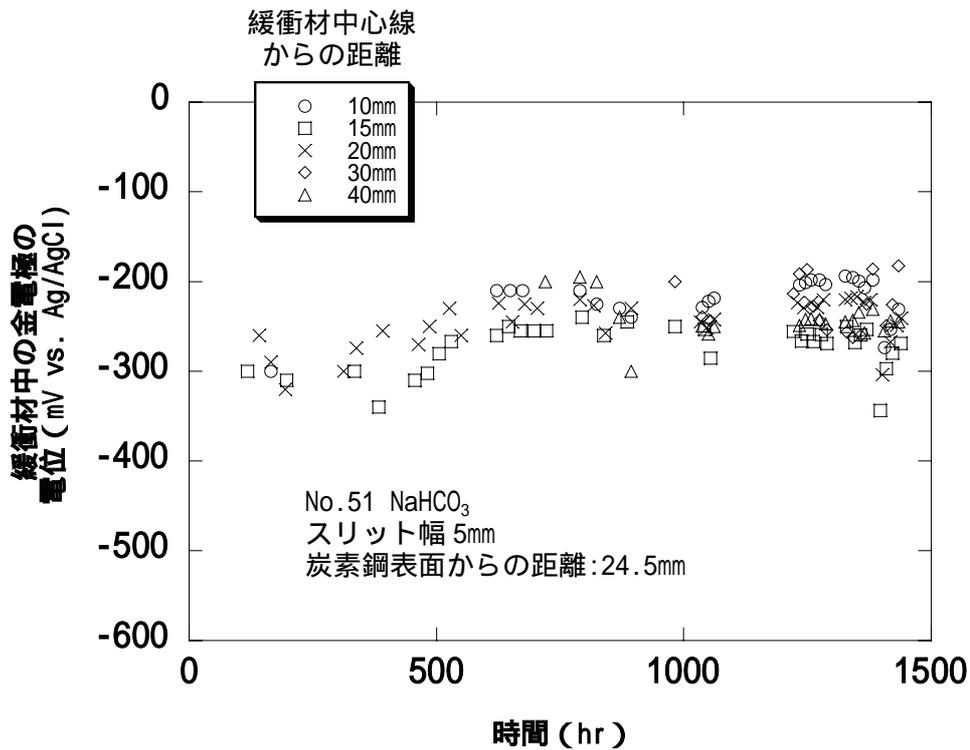


図 3-32(1) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.51)

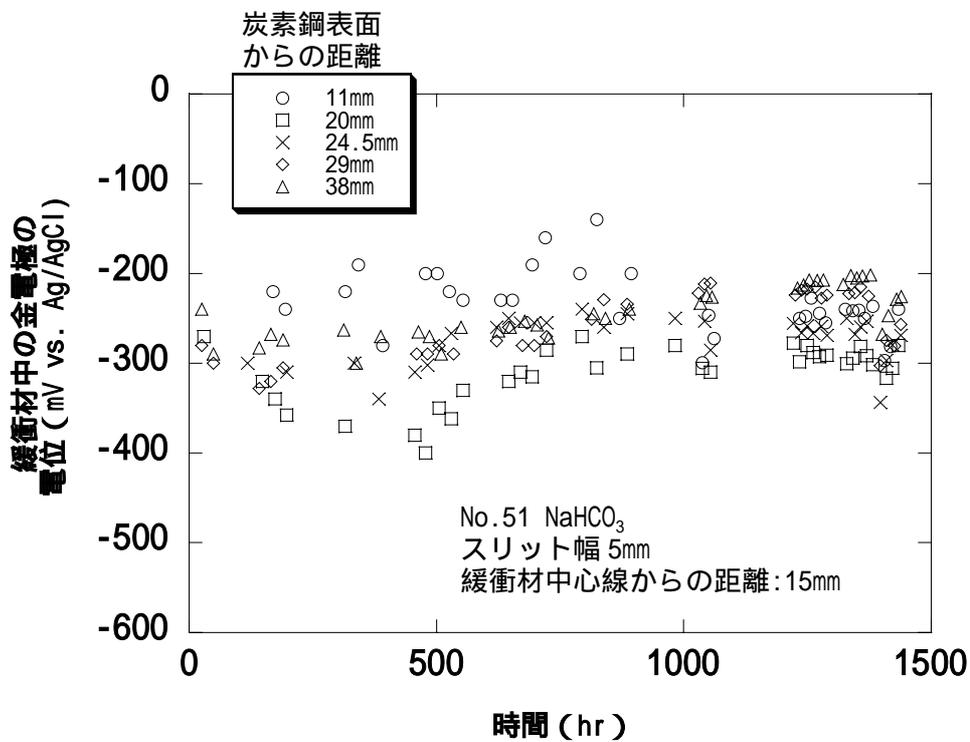


図 3-32(2) 緩衝材中に埋設された金電極の電位の経時変化(No.51)

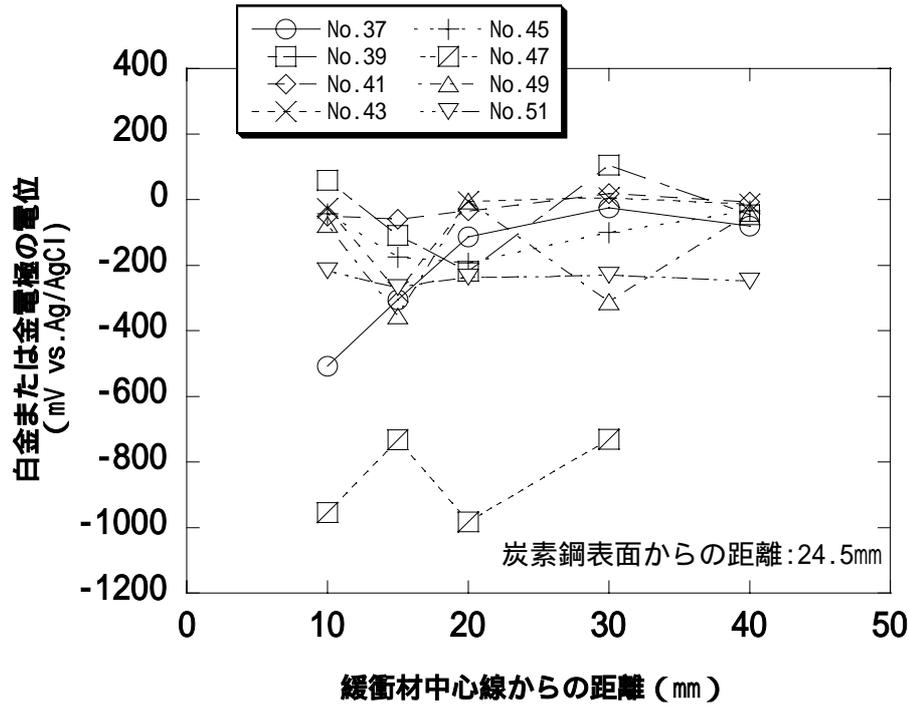


図 3-33 緩衝材中心線からの距離と白金または金電極の電位の関係 (電位は 1000hr 以降の平均値)

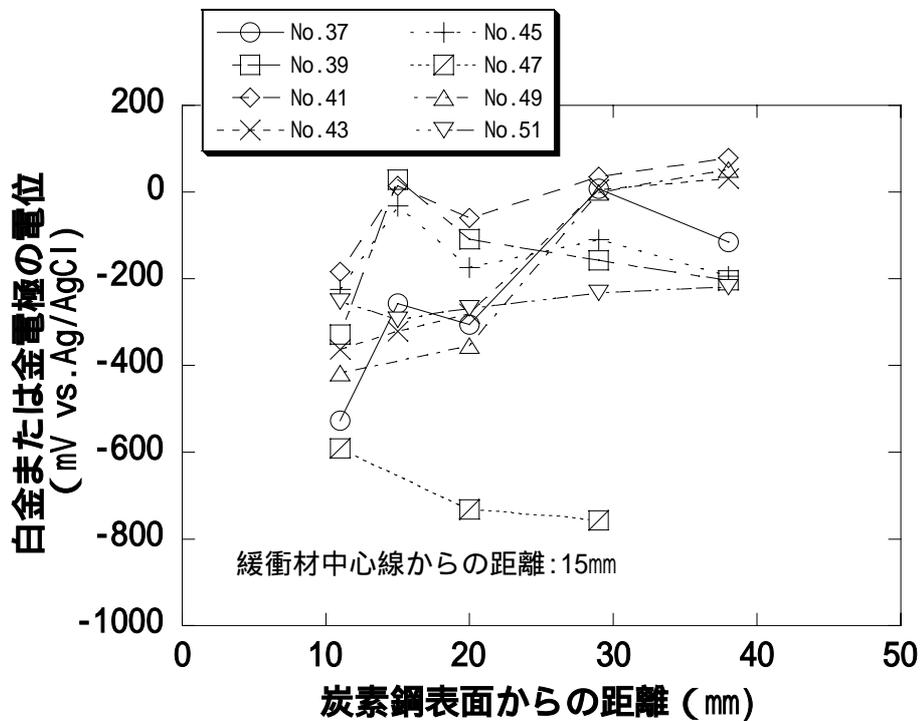


図 3-34 緩衝材中心線からの距離と白金または金電極の電位の関係 (電位は 1000hr 以降の平均値)

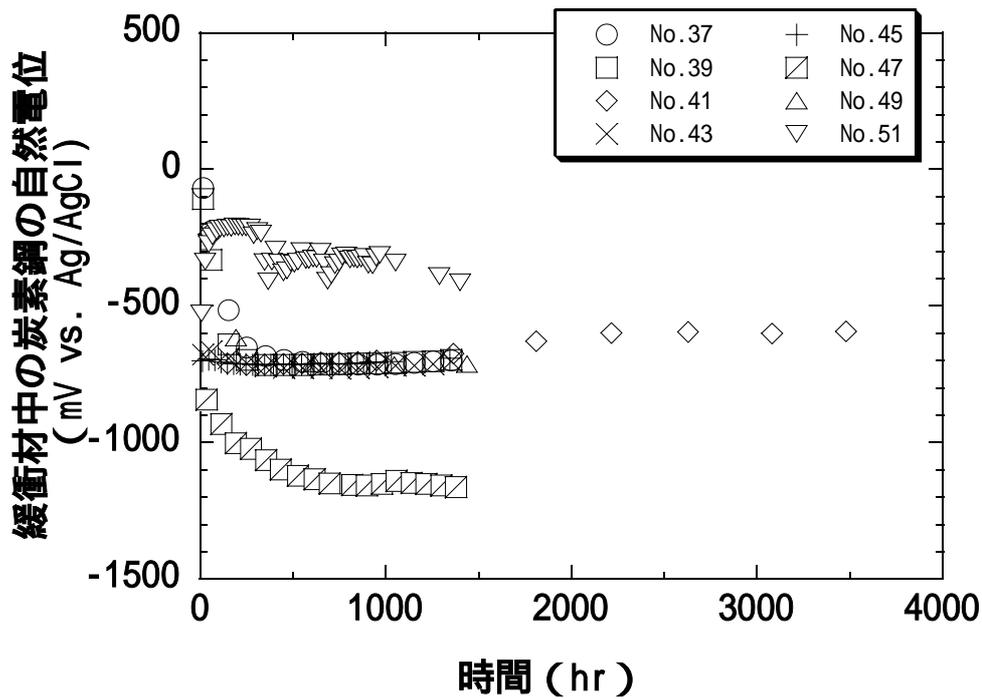


図 3-35(1) 緩衝材中における炭素鋼の自然電位の経時変化 (0 ~ 3600hr)

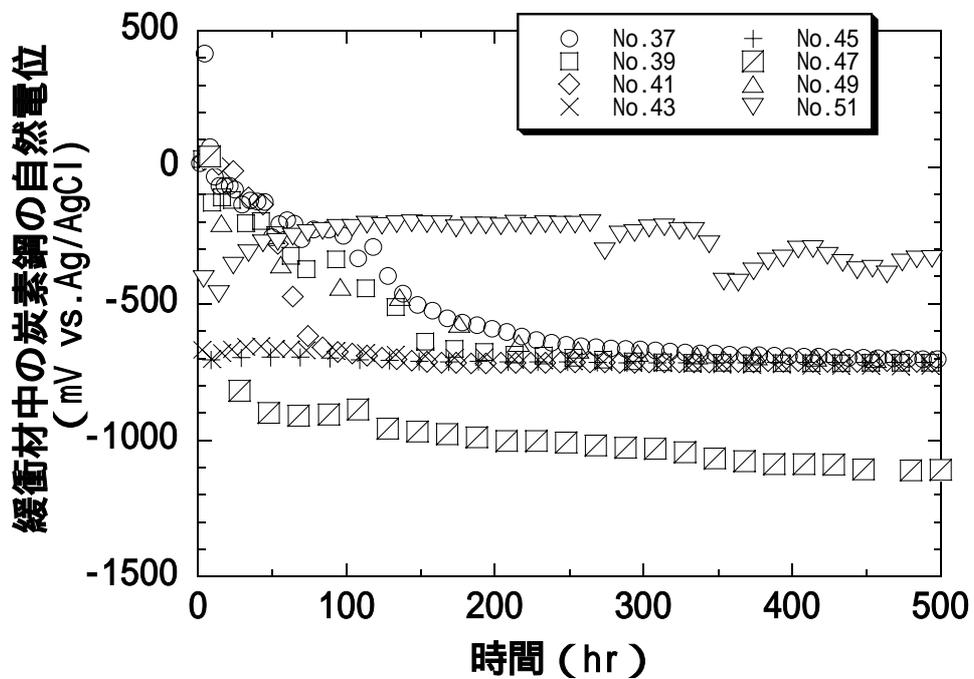


図 3-35(2) 緩衝材中における炭素鋼の自然電位の経時変化 (0 ~ 500hr の拡大)

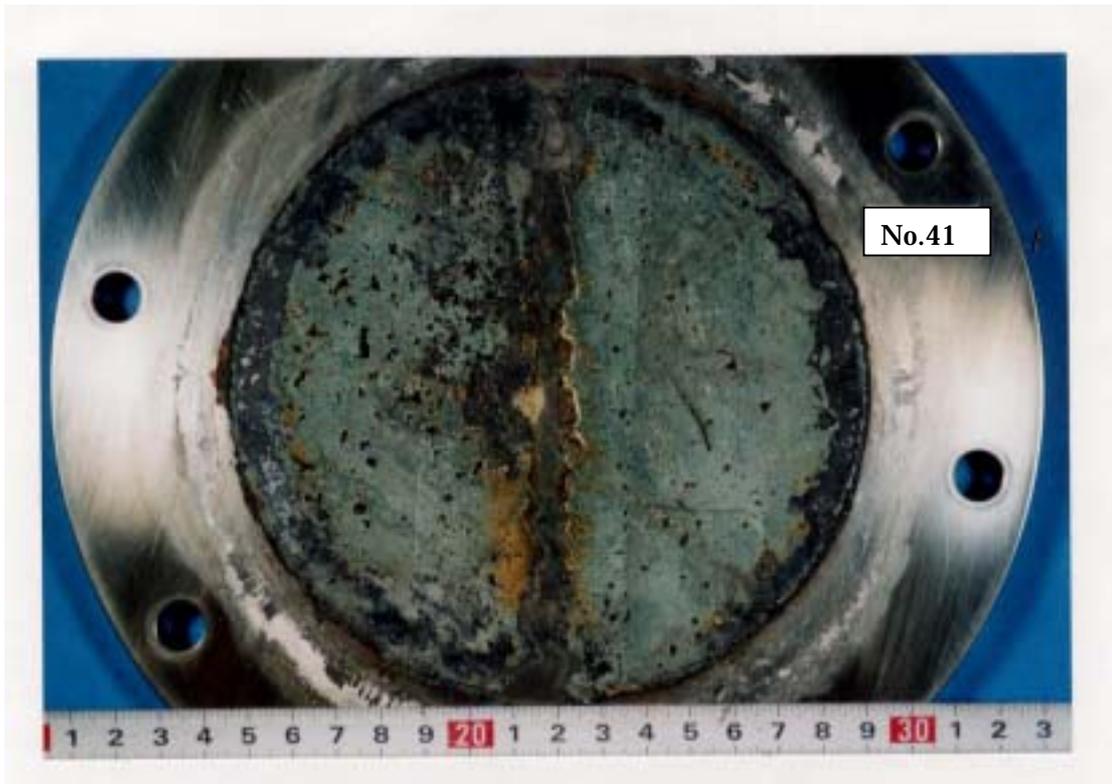


図 3-36(1) 緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (No.41, 脱スケール前)

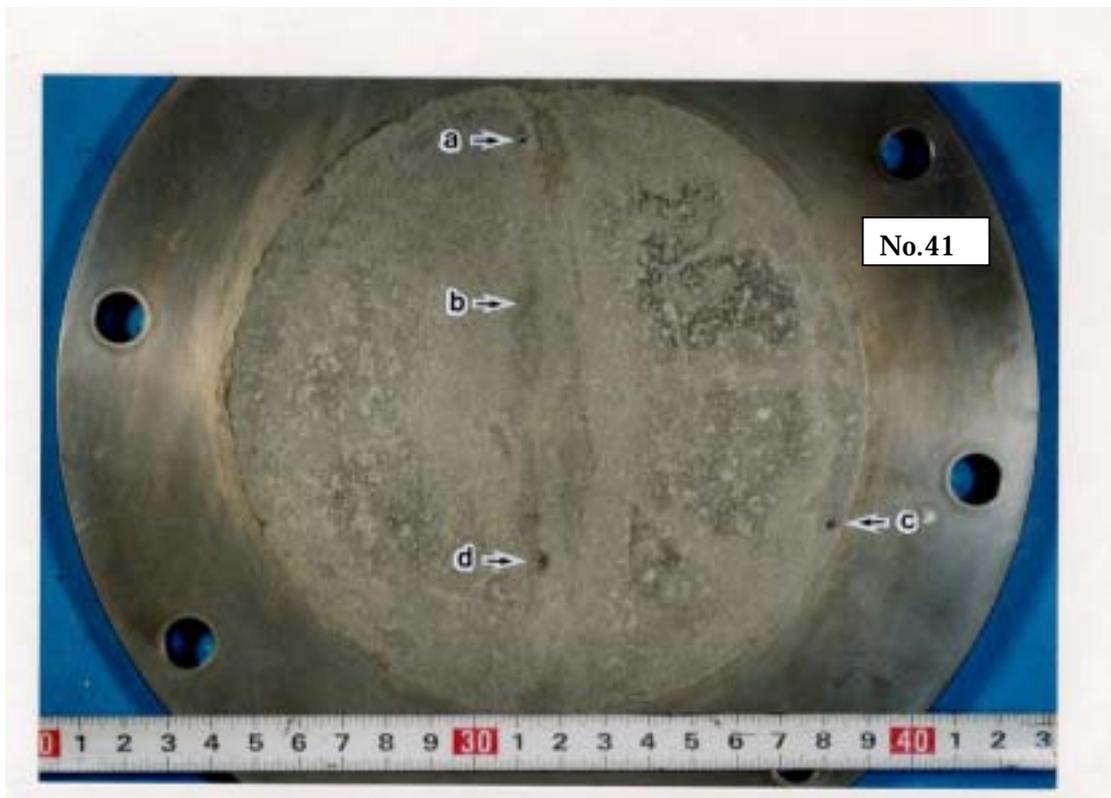


図 3-36(2) 緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (No.41, 脱スケール後)

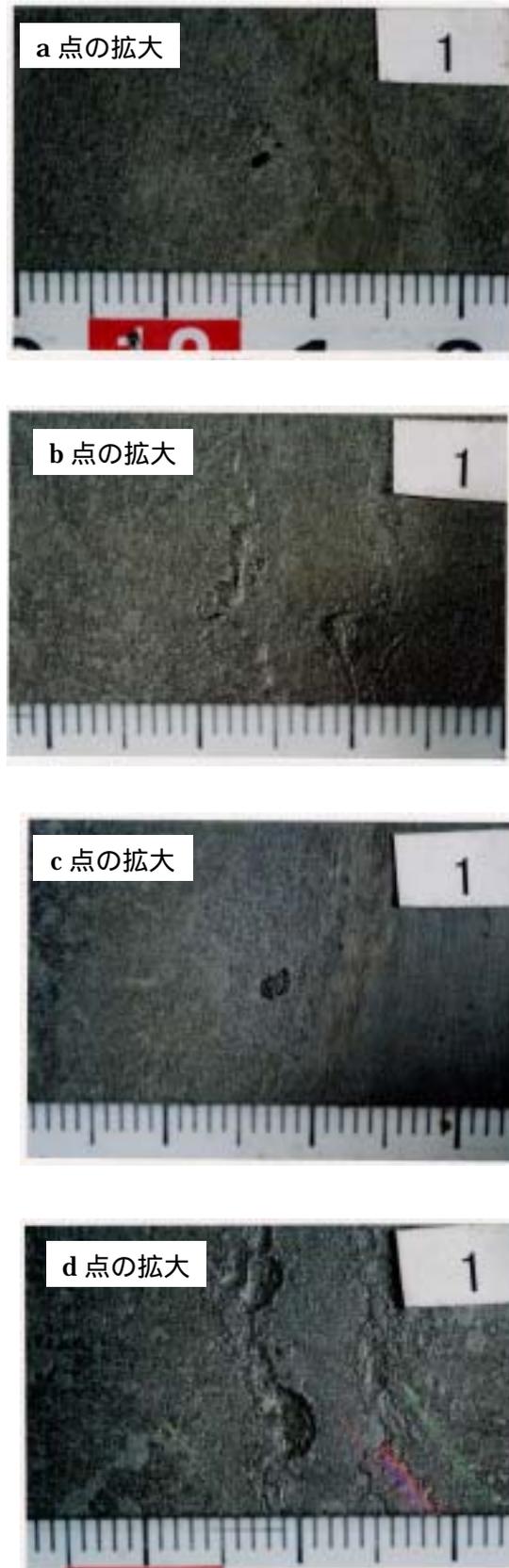


図 3-36(3) 緩衝材中に浸漬終了後の試験片の外観 (a~d 点拡大図)

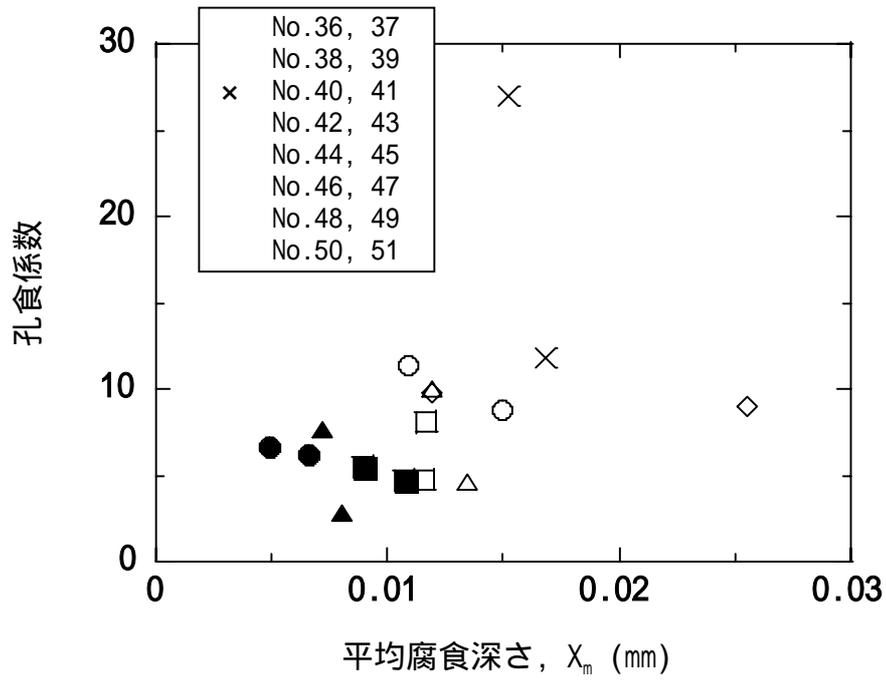


図 3-37 緩衝材中の炭素鋼の平均腐食深さと孔食係数の関係

4 考察

4-1 高 pH 化による炭素鋼の腐食局在化促進の可能性

今回得られた実機推定値（信頼率 0.99）に対する孔食係数を、第 2 次取りまとめにおいて実験データ（ $\text{pH} < \text{約 } 11$ ）に基づいて予察的に推定された孔食係数の上限値と比較した。その結果を図 4-1 に示す。今回得られたデータは $\text{pH} < \text{約 } 11$ の条件と $\text{pH} > \text{約 } 11$ の条件に分けて表示した。図中には不均一な全面腐食条件で得られた孔食係数（石川ほか，1992）もプロットした。この図より、今回得られたいずれのデータも第 2 次取りまとめでの推定上限以下であった。また、 $\text{pH} 11$ 以上のアルカリ性環境であっても孔食係数の平均腐食深さに対する依存性は $\text{pH} 11$ 以下の条件と同様であった。したがって、セメントによって地下水の高 pH がもたらされて炭素鋼が不動態化し、孔食、すきま腐食などの局部腐食が発生しても従来からの予想を超える顕著な腐食の局在化は生じないと考えられる。また、第 2 次取りまとめで想定した平均腐食深さ付近の値（ $0.3 \sim 1.8\text{mm}$ ）では不均一な全面腐食による孔食係数と孔食、すきま腐食など局部腐食による孔食係数は同程度であると考えられる。

4-2 緩衝材中における炭素鋼の腐食局在化

今回行った実験のうち、人工海水を用いた No.36 ~ No.45 の実験は炭素鋼が不動態化しにくい条件であり、顕著な腐食の局在化は起こりにくいと予想されていた。また、セメント浸出液、炭酸水素ナトリウム水溶液は炭素鋼に直接接した場合は不動態化と局部腐食をもたらす、腐食の不均一化を促進しやすいと予想されていた。特に、普通セメントを用いた No.42 と No.43 の条件は緩衝材中での炭素鋼の不動態化条件を満たしているため（谷口ほか，2002）、腐食の不均一化が大きくなることが予想される。しかし、今回の実験結果を見ると逆に人工海水での結果が腐食の不均一化が大きくなった。特に 150 日の長期の試験で孔食状の腐食が観察されている。この原因のひとつとして溶液の化学特性の影響が考えられる。孔食状の腐食が観察されたのはスリット近傍か、外側の円周部分の試験セルとの境界であり、緩衝材の接触状態が不連続となっている部分である。このような部分では溶液組成や酸素の輸送特性が場所によって異なり、アノードとカソードの分離をもたらすと考えられる。アノード反応によって生じた鉄イオンが加水分解されて水素イオンを生じ、局所的に pH 低下が生じると、その部分では活性溶解が促進され、さらにアノード反応が起こりやすくなると考えられる。今回の実験で人工海水を用いた場合にはこのようなアノードとカソードの分離が持続されたものと考えられる。一方、セメントと人工海水を接触させて pH が高くなった溶液を用いた場合にはアノード部分での pH 低下が抑制され、局部的な腐食が起こりにくかったものと考えられる。NaHCO₃ 水溶液を用いた実験でも同様に、炭酸塩による pH 緩衝作用によって局所的な pH 低下が起こりにくかったものと考えられる。

以上のように、不動態化せず全面腐食を生じる条件であっても緩衝材ブロック間の継ぎ目に代表される環境条件の不均一性によっては炭素鋼オーバーパックの腐食局在化の原因となりうることを示唆された。ここで、今回の水溶液中での実験結果と緩衝材中での実験結果から得られた孔食係数を比較した。その結果を図 4-2 に示す。図中には石川ほか（1992）

の全面腐食のデータ、天然の土壌中でのデータ(Romanoff, 1989)もプロットして比較した。なお、これらのデータにおける試験片の面積は以下のとおりであり、ほぼ同程度と見なし、実測値を用いて比較を行った。

石川ほか (1992) : 131.0cm^2

Romanoff (1989) : 182.4cm^2 (直径 1.5inches=3.8cm、長さ 6inches=15.2cm より、外面の面積を算出)

本研究 (水溶液中) : 104.6cm^2

本研究 (緩衝材中) : 169.6cm^2

この図に示すように、緩衝材中での実験データのほとんどは水溶液中での値、天然の土壌中での値に比較して十分小さく、全面腐食での孔食係数に近いことがわかる。また、比較的深い孔食状の腐食が観察されたものについても、水溶液中での結果や天然の土壌中での値の範囲内である。したがって、今回の実験条件で観察された腐食の局在化の程度は最も大きいものでも従来の評価で予想された範囲内であると見なされる。

今後は、緩衝材中での実験データを更に充実させ、これまでの評価の保守性、妥当性をより確実なものにするとともに、将来的には実規模レベルでの原位置試験で実証することが必要である。また、溶接部など材料側の不均一性を考慮した腐食局在化の検討も必要である。

4-3 酸素によるオーバーパック最大腐食深さ評価モデルの検討

今回得られた実験データおよび既往のデータを用いて酸素による炭素鋼オーバーパックの最大腐食深さ評価モデルを検討した。

(1) 腐食深さの時間依存性から評価するモデル

一般に孔食などの局部腐食の経時的な進展はべき乗則を適用した評価が行われており (Marsh and Taylor, 1988; Hock et al., 1995; 腐食防食協会, 1984)、最大腐食深さ P と時間 t の関係は以下の式で表される。

$$P=kt^n \quad (4-1)$$

k : 比例定数

$$n : 0 < n < 1$$

ここで図 3-11、図 3-16、図 3-20 に示されたオーバーパックにおける最大腐食深さ推定値 P_{\max} (信頼率 0.99) の時間 $t(\text{year})$ に対する依存性を上記の(4-1)式で近似すると、以下の通りとなる。

$$\text{No.5} \sim \text{No.7} \quad P_{\max} (\text{mm}) = 3.37 t^{0.32} \quad (4-2-1)$$

$$\text{No.8} \sim \text{No.11} \quad P_{\max} (\text{mm}) = 1.01 t^{0.25} \quad (4-2-2)$$

No.12 ~ No.14	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.06 t^{0.11}$	(4-2-3)
No.15 ~ No.17	$P_{\max} (\text{mm}) = 0.87 t^{0.09}$	(4-2-4)
No.18 ~ No.20	$P_{\max} (\text{mm}) = 0.85 t^{0.13}$	(4-2-5)
No.21 ~ No.23	$P_{\max} (\text{mm}) = 0.46 t^{0.21}$	(4-2-6)
No.24 ~ No.27	$P_{\max} (\text{mm}) = 0.91 t^{0.09}$	(4-2-7)
No.28 ~ No.31	$P_{\max} (\text{mm}) = 4.20 t$	(4-2-8)

ここで、局部腐食の進展可能な期間はオーバーパック周囲の環境が酸化性の期間である。この期間は地質環境条件や地下水特性、人工バリア仕様などに依存すると考えられるが、多くの場合は100年以内とされている(千葉ほか、1999)。そこで $t=100$ として P_{\max} を計算すると以下ようになる。

No.5 ~ No.7	$P_{\max} (\text{mm}) = 14.7$	(4-2-9)
No.8 ~ No.11	$P_{\max} (\text{mm}) = 3.19$	(4-2-10)
No.12 ~ No.14	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.76$	(4-2-11)
No.15 ~ No.17	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.32$	(4-2-12)
No.18 ~ No.20	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.55$	(4-2-13)
No.21 ~ No.23	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.21$	(4-2-14)
No.24 ~ No.27	$P_{\max} (\text{mm}) = 1.38$	(4-2-15)
No.28 ~ No.31	$P_{\max} (\text{mm}) = 420$	(4-2-16)

これらの計算結果は100年間環境条件が変化せず、大気雰囲気維持された場合の推定値であり、(4-2-9)式や(4-2-16)式の計算結果が示すように条件によっては大きな値が算出される。一方、オーバーパック周囲の酸化還元性、緩衝材中空隙水の化学特性、緩衝材中の物質移行特性など環境条件は経時的に変化すると考えられる。特にオーバーパック周囲の酸素濃度は確実に低下し、例え腐食速度の大きな環境条件であっても腐食の進展は抑制されるものと考えられる。また、本実験では最大腐食深さの大きい条件では平均腐食速度も大きくなっており、このような条件では酸素の消費速度も大きいため、局部腐食の進展期間もさらに短いと考えられる。Brossia and Cragnolino(2000)も(4-1)式のパラメータ k 、 n を既往のデータに基づいて設定すると10cm厚さのオーバーパックの寿命は5桁の幅を持つとともに、このモデルを用いた評価では腐食の成長停止は考慮されないとしている。

このようなことから、処分環境のような還元性雰囲気に向かう条件での挙動を大気雰囲気下での実験で得られた経験式を用いて推定することは過度に保守的な評価になる場合があると考えられる。

(2) 平均腐食深さと最大腐食深さ(孔食係数)の関係から評価するモデル

オーバーパック周囲の酸素は地上から持ち込まれた量に限定されるため、酸素量からオーバーパックの平均腐食深さの上限を算出し、平均腐食深さに対する最大腐食深さを実験データに基づいて推定する方法が従来から行われており(石川ほか、1992; Fukuda et.al,

1994)より現実的な評価が可能と考えられる。本研究でも平均腐食深さと最大腐食深さ(または孔食係数)の関係に関するデータが得られており、この方法で酸素による最大腐食深さの評価モデルを検討した。

今回の局部腐食に関する実験結果より、Gumbel分布関数のパラメータ X_m および T は、図4-3に示すように平均腐食深さとともに大きくなる傾向があった。ここで、平均腐食深さ X_m と T の関係は、両対数軸上で概ね直線関係があることから以下の式で近似した。

$$T = k_1 \cdot X_m^m \quad (4-3)$$

k_1, m : 定数

についても同様の式で近似できるように見えるが、 T は試験片の最大腐食深さの最頻値であり、平均腐食深さ以下となることはないため、以下の式を用いることとした。

$$T = X_m + k_2 \cdot X_m^n \quad (4-4)$$

k_2, n : 定数

この(4-3)式、(4-4)式を(2-6)式に代入すると以下に示すようにオーバーパックにおける最大腐食深さの最頻値 X_{max} を推定する式が得られる。

$$\begin{aligned} X_{max} &= X_m + T \cdot \ln T \\ &= X_m + k_2 X_m^n + k_1 X_m^m \ln T \end{aligned} \quad (4-5)$$

さらに、信頼率 a におけるオーバーパック最大腐食深さ P_{max} は(2-7)式と(4-5)式より、以下のようなになる

$$\begin{aligned} P_{max} &= X_m + T \cdot \ln(-\ln a) \\ &= X_m + k_2 X_m^n + k_1 X_m^m \ln T - k_1 X_m^m \ln(-\ln a) \end{aligned} \quad (4-6)$$

ここで、本実験における X_m (mm)、 T (mm)の上限の分布を $k_1 = 0.45$ 、 $k_2 = 1.5$ 、 $m = n = 0.25$ として近似した。したがって、 P_{max} の上限は以下の式のようなになる。

$$X_m(\text{mm}) = 0.45 X_m^{0.25} \quad (4-7)$$

$$T(\text{mm}) = X_m + 1.5 X_m^{0.25} \quad (4-8)$$

また、(4-5)式、(4-6)式は以下のようなになる。

$$X_{max}(\text{mm}) = X_m + 1.5 X_m^{0.25} + 0.45 X_m^{0.25} \ln T \quad (4-9)$$

$$P_{max}(\text{mm}) = X_m + 1.5 X_m^{0.25} + 0.45 X_m^{0.25} \ln T - 0.45 X_m^{0.25} \ln(-\ln a) \quad (4-10)$$

更に、再帰期間 T は実機の表面積 S と試験片の表面積 s の比であり、 s は $s=104.6\text{cm}^2$ であることから、以下のように書くことが出来る。

$$X_{\max}(\text{mm}) = X_m + 1.5X_m^{0.25} + 0.45X_m^{0.25}\ln(S/104.6) \quad (4-11)$$

$$\begin{aligned} P_{\max}(\text{mm}) &= X_m + 1.5X_m^{0.25} + 0.45X_m^{0.25}\ln(S/104.6) - 0.45X_m^{0.25}\ln(-\ln a) \\ &= X_m + \{ 1.5+0.45 \ln(S/104.6) - 0.45\ln(-\ln a) \} X_m^{0.25} \end{aligned} \quad (4-12)$$

また、孔食係数は最大腐食深さを平均腐食深さで除した値であり、 P_{\max} に対する孔食係数 Pf_{\max} は、以下のようになる。

$$Pf_{\max} = 1 + \{ 1.5+0.45 \ln(S/104.6) - 0.45\ln(-\ln a) \} X_m^{-0.75} \quad (4-13)$$

したがって、平均腐食深さ $X_m(\text{mm})$ 、実機の表面積 $S(\text{cm}^2)$ 、信頼率 a を設定することにより、(4-12)式、(4-13)式を用いてオーバーパックの局部腐食による最大腐食深さまたは孔食係数を推定することが出来る。

次に、石川ほか(1992)によって得られた不均一全面腐食における Gumbel 分布関数のパラメータ、(付録3)についても同様の検討を行った。の平均腐食深さに対する依存性は図4-4のようであり、上限の分布を以下の式で近似した。

$$= 0.54X_m^{0.5} \quad (4-14)$$

$$= X_m + 1.8X_m^{0.5} \quad (4-15)$$

試験片の表面積は $s=131.0\text{cm}^2$ であり、同様の手順により X_{\max} 、 P_{\max} 、 Pf_{\max} は以下の式で表される。

$$X_{\max}(\text{mm}) = X_m + 1.8X_m^{0.5} + 0.54X_m^{0.5}\ln(S/131.0) \quad (4-16)$$

$$P_{\max}(\text{mm}) = X_m + \{ 1.8+ 0.54 \ln(S/131.0)-0.54\ln(-\ln a) \} X_m^{0.5} \quad (4-17)$$

$$Pf_{\max} = 1 + \{ 1.8+0.54 \ln(S/131.0) -0.54 \ln(-\ln a) \} X_m^{-0.5} \quad (4-18)$$

これらの式により、不均一全面腐食によるオーバーパックの最大腐食深さ、孔食係数を推定できる。

ここで、第2次取りまとめにおける人工バリア仕様(JNC, 1999)に対してオーバーパックの最大腐食深さを検討する。オーバーパックの表面積は $S=55129\text{cm}^2$ と算出される。信頼率を $a=0.99$ とすると、(4-12)式、(4-17)式はそれぞれ以下のようになる。

$$\text{局部腐食} : P_{\max}(\text{mm}) = X_m + 6.4X_m^{0.25} \quad (4-19)$$

$$\text{不均一全面腐食} : P_{\max}(\text{mm}) = X_m + 7.5X_m^{0.5} \quad (4-20)$$

(4-20)式は第2次取りまとめにおける酸素による全面腐食深さの評価式に相当する。また、孔食係数は(4-13)式と(4-18)式より以下のようになり、(4-21)式は図4-1中に示す第2次取りまとめで推定された孔食係数の上限の線に概ね一致する。

$$\text{局部腐食：Pf}_{\max} = 1 + 6.4X_m^{-0.75} \quad (4-21)$$

$$\text{不均一全面腐食：Pf}_{\max} = 1 + 7.5X_m^{-0.5} \quad (4-22)$$

なお、局部腐食に関する(4-11)～(4-13)式と不均一全面腐食に関する(4-16)～(4-18)式を比較すると、平均腐食深さ X_m が小さいときには局部腐食に関する式を用いたほうがより大きな最大腐食深さまたは孔食係数が算出される。しかし、 X_m が大きくなると不均一全面腐食の場合との差は小さくなり、ある X_m 以上では不均一全面腐食のほうが大きな値が算出される。例えば、 $a=0.99$ 、 $S=55129\text{cm}^2$ の場合、(4-19)式と(4-20)式の交点は、 $X_m=0.53\text{mm}$ と求められる。すなわち、第2次取りまとめでのオーバーパック仕様において信頼率を0.99とすると、約0.5mm以下の平均腐食深さの場合は局部腐食のモデル式(4-17)式を用いたほうが保守的であり、約0.5mm以上の平均腐食深さの場合は不均一全面腐食のモデル式(4-18)式を用いたほうが保守的である。これらの式を用いて平均腐食深さ2mmまでの最大腐食深さを算出した結果を図4-5に示した。

以上の検討結果を表4-1にまとめた。当面、処分環境条件が不明確な段階では表中(2)の式により、酸素によるオーバーパックの最大腐食深さを保守的に推定することが可能であり、第2次取りまとめでのオーバーパック仕様、信頼率0.99の設定に対しては(3)式の適用が可能である。将来的に処分環境条件がある程度明確になった段階では原位置での試験を含めて処分サイトに対応した条件での詳細な試験、検討によって表中の(1)式における k_1 、 k_2 、 m 、 n などの定数を検討し、処分場の環境条件に対応した評価を行うことが必要である。

表 4-1 酸素によるオーバーパックスの最大腐食深さ推定モデル (腐食深さの単位は mm)

	局部腐食	不均一全面腐食	備考
(1)一般形	$P_{\max} = X_m + k_2 X_m^n + k_1 X_m^m \ln T - k_1 X_m^m \ln(-\ln a),$ $T = s/S$		k_1, k_2, n, m : 定数 X_m : 平均腐食深さ s : 試料表面積 S : 実機表面積 a : 信頼率
(2)実験データに基づく評価式	$P_{\max} = X_m + \{ 1.5 + 0.45 \ln(S/104.6) - 0.45 \ln(-\ln a) \} X_m^{0.25}$	$P_{\max} = X_m + \{ 1.8 + 0.54 (\ln S/131.0) - 0.54 \ln(-\ln a) \} X_m^{0.5}$	・ 局部腐食 : $k_1 = 0.45, k_2 = 1.5,$ $n = m = 0.25, s = 104.6 \text{ cm}^2$ ・ 不均一全面腐食 : $k_1 = 0.54, k_2 = 1.8,$ $n = m = 0.5, s = 131.0 \text{ cm}^2$
(3)第2次取りまとめにおけるオーバーパックスに対する評価式	$P_{\max} = X_m + 6.4 X_m^{0.25}$	$P_{\max} = X_m + 7.5 X_m^{0.5}$	$S = 55129 \text{ cm}^2$ $a = 0.99$

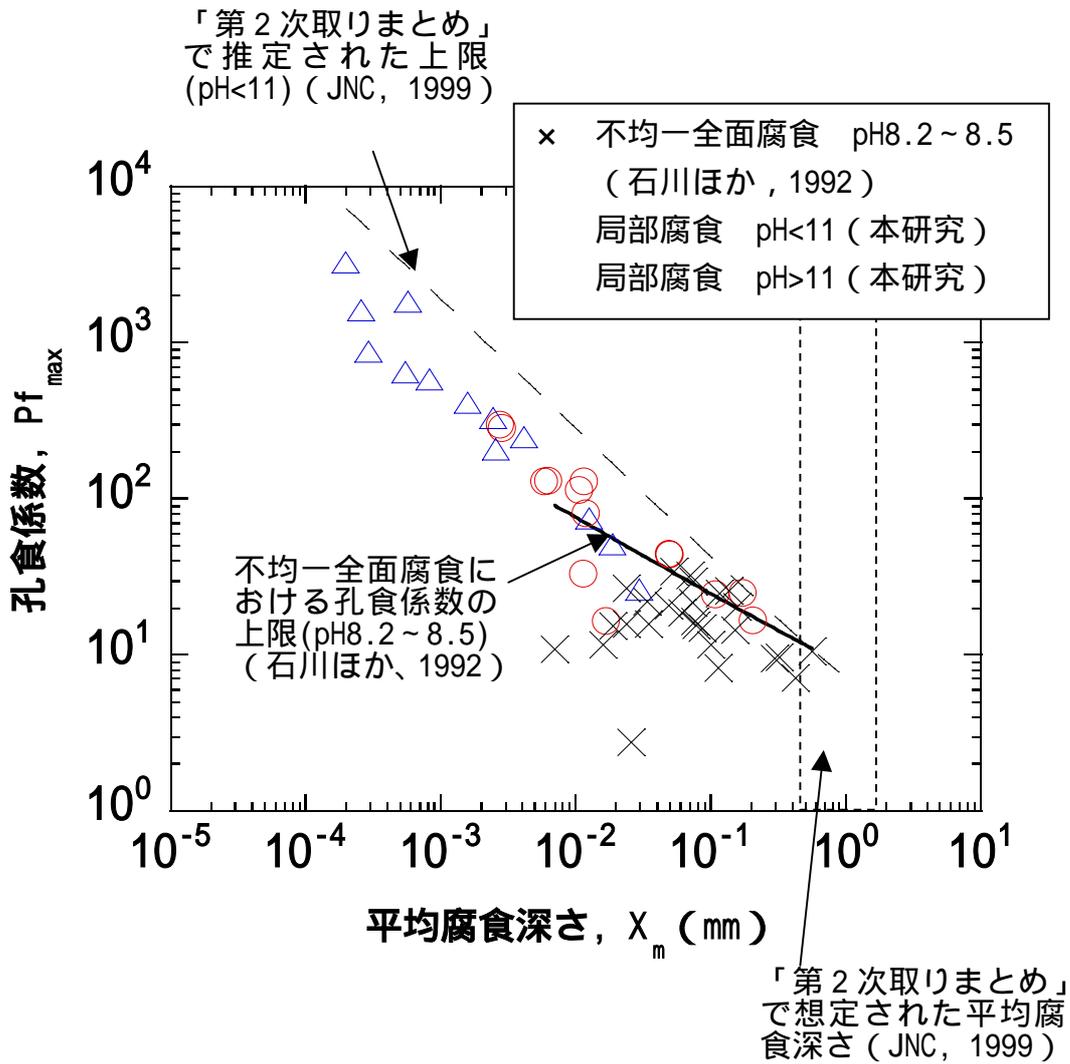


図 4-1 局部腐食における孔食係数（実機推定値に対する値）の pH の違いによる影響、および不均一全面腐食における孔食係数との比較

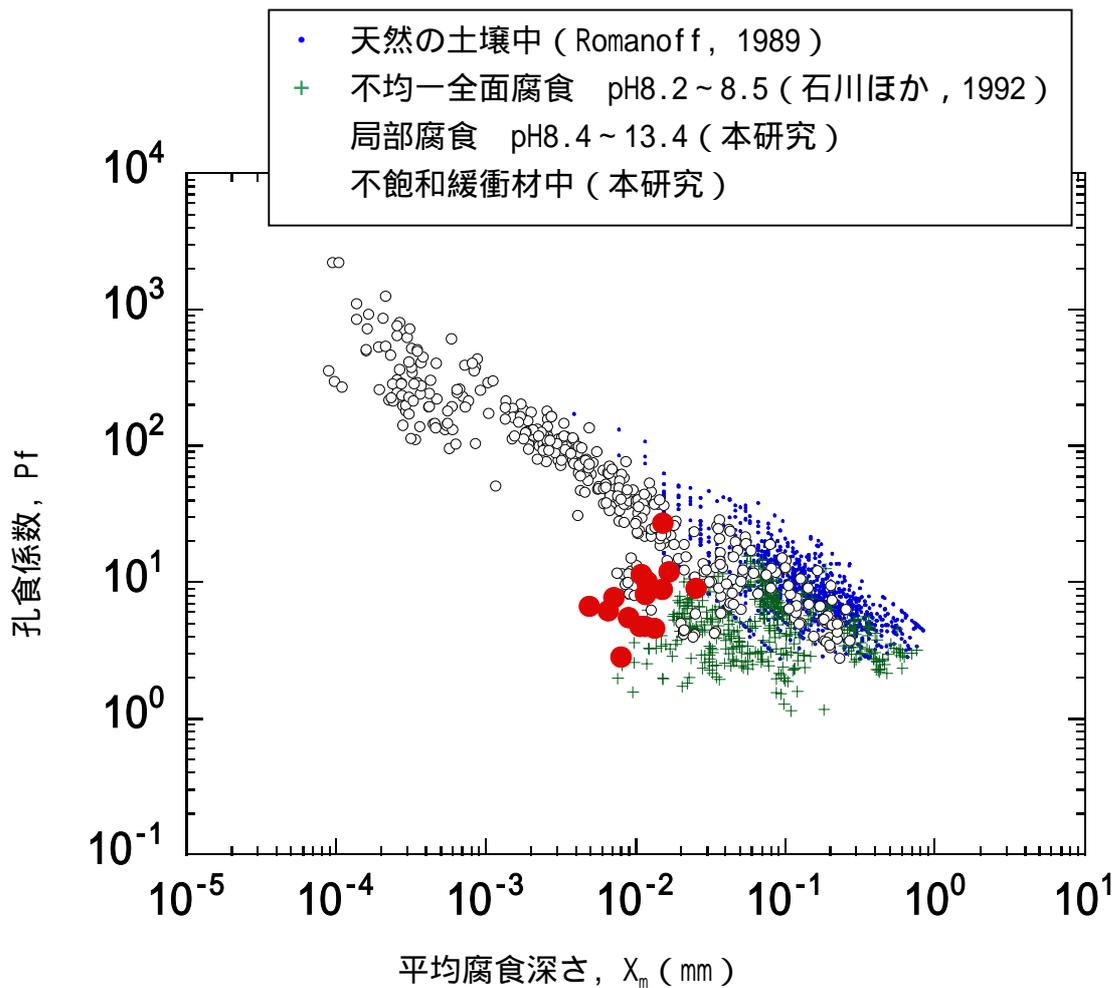


図 4-2 炭素鋼の孔食係数（実測値）に関する本研究のデータと既往のデータの比較

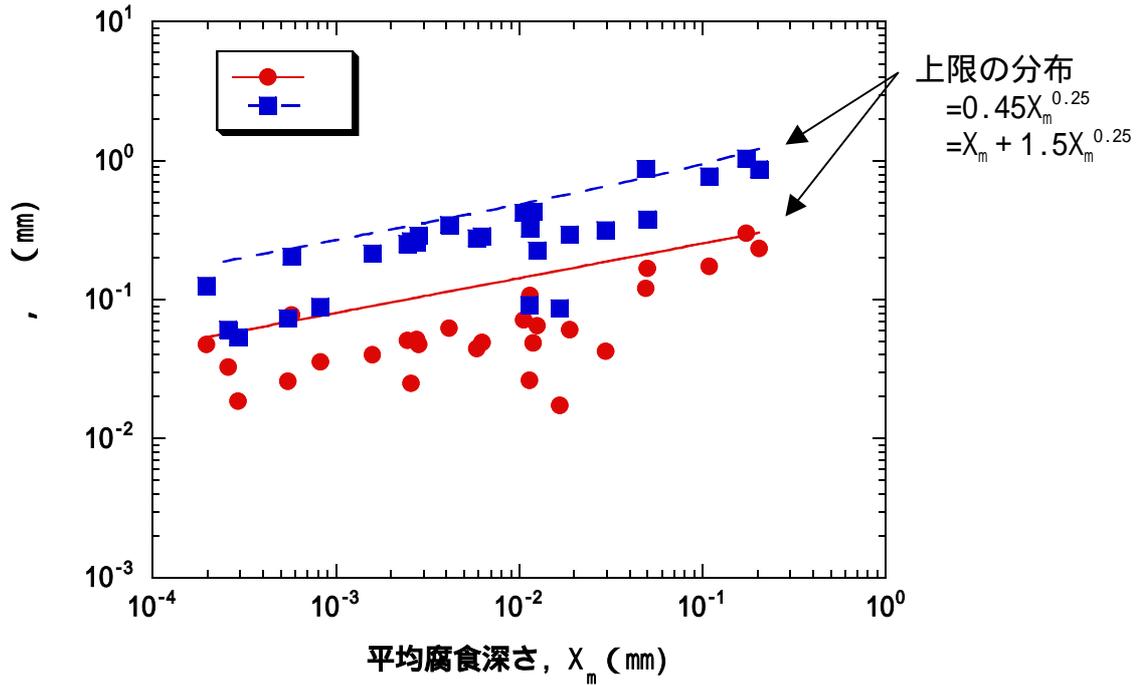


図 4-3 局部腐食における平均腐食深さと r の関係
 (本実験データ)

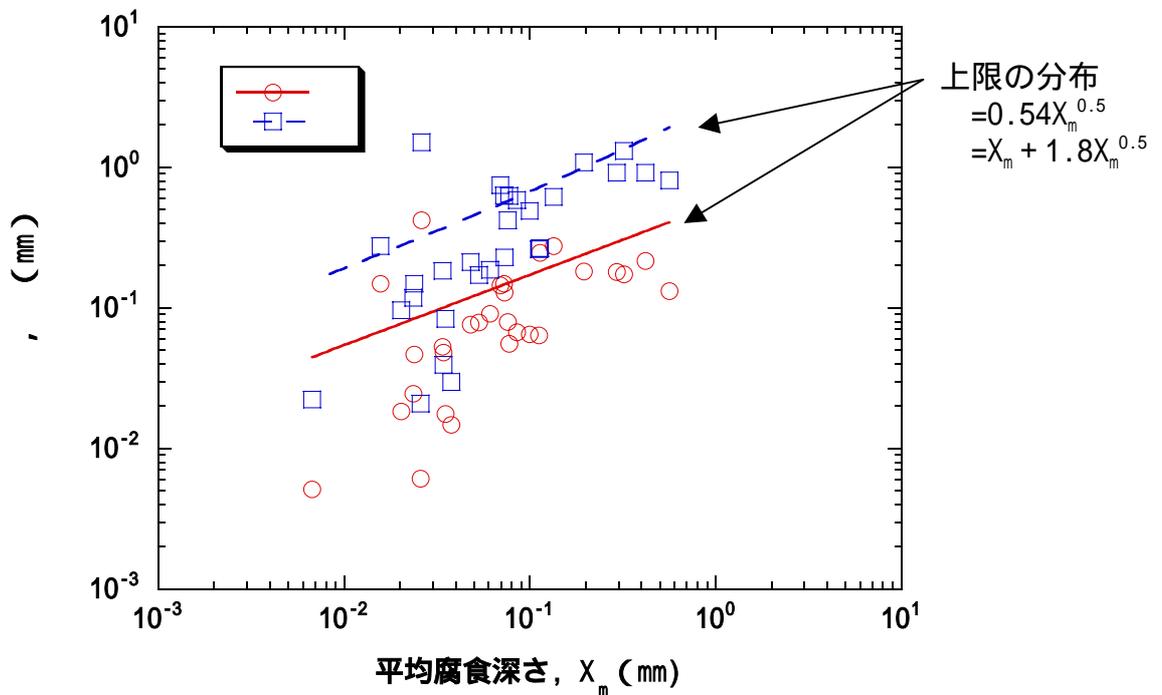


図 4-4 不均一全面腐食における平均腐食深さと r の関係
 (石川ほか, 1992 のデータ)

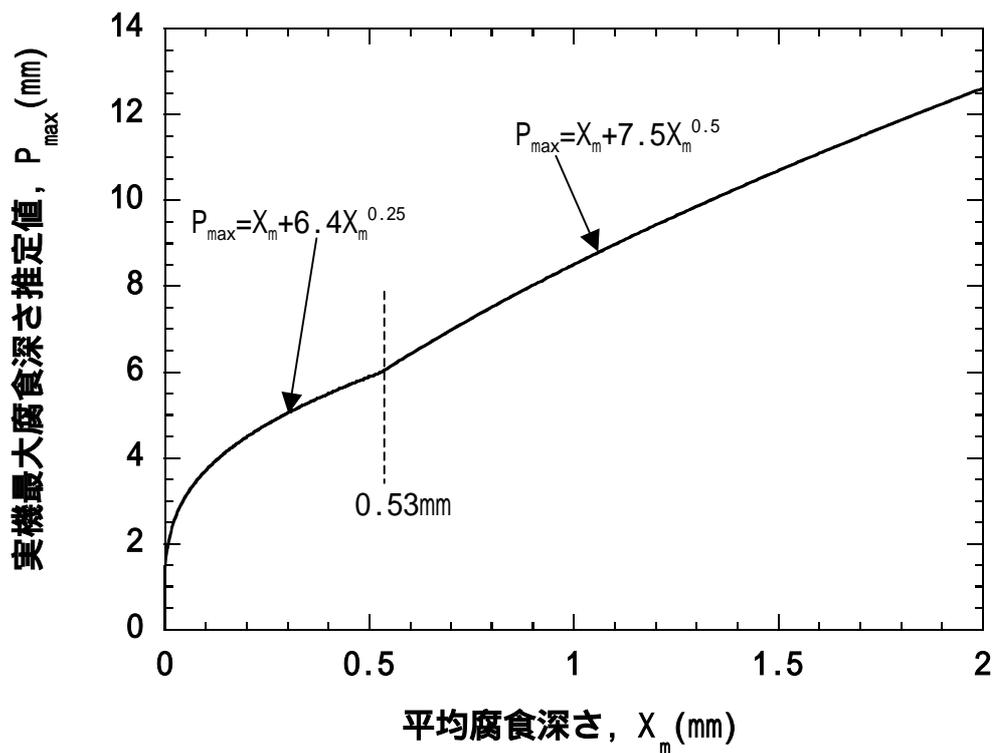


図 4-5 平均腐食深さに対する実機最大腐食深さ（表面積 55129cm²）の上限値の推定モデル(信頼率 0.99 での推定値に基づき作成)

5 おわりに

弱アルカリ性～アルカリ性 (pH 8.4～13.4) の水溶液中および、不飽和緩衝材中において炭素鋼の浸漬試験を実施した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 高 pH 環境 (pH>11) において、孔食、すきま腐食が進展しても、同じ平均腐食深さに対する孔食係数は弱アルカリ性環境での値とほぼ同程度であり、高 pH 化による腐食局在化の促進は認められなかった。
- (2) 弱アルカリ性～アルカリ性 (7.7<pH<13.4) の環境における孔食・すきま腐食の進展は深さ方向よりも試験片全体に広がる方向であり、見かけ上は不均一な全面腐食に近い状態になっていく傾向があった。孔食係数についても、腐食量 (平均腐食深さ) が大きくなるにつれて低下し、不均一な全面腐食での値に近くなることがわかった。
- (3) 不飽和緩衝材中ではブロック間の継ぎ目を模擬したスリットの近傍や緩衝材と試験セルの境界など不均一な部分で炭素鋼の局所的な腐食が観察された。しかし、その孔食係数は弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中や天然の土壌中での値と同程度以下であった。
- (4) 水溶液中、不飽和緩衝材中いずれも今回実験を行った条件では既往のデータの範囲を超えるような顕著な腐食の局在化は観察されなかった。
- (5) 本実験データおよび既往のデータに基づいて炭素鋼オーバーパックの酸素による最大腐食深さ推定モデルを検討した。平均腐食深さ X_m 、オーバーパックの表面積 S および信頼率 a を設定し、以下の式により P_{max} を計算し、いずれか大きな値によって最大腐食深さを保守的に推定できる。

$$P_{max}(mm) = X_m + \{ 1.5 + 0.45 \ln(S/104.6) - 0.45 \ln(-\ln a) \} X_m^{0.25}$$

$$P_{max}(mm) = X_m + \{ 1.8 + 0.54 \ln(S/131.0) - 0.54 \ln(-\ln a) \} X_m^{0.5}$$

参考文献

Brossia, C.S. and Cragolino, G.A.: " Effect of environmental variables on localized corrosion of carbon steel ", Corrosion, Vol.56, No.5, pp.505-514(2000).

千葉保、笹本広、三木崇史、稲垣学、油井三和：“ ニアフィールドにおける酸化還元状態の変遷に関する予察的解析 ”、JNC TN8400 99-027(1999).

Fukuda, T., Akashi, M.: " A Gumbel distribution model for assessing the general corrosion propagation of mild steel used for nuclear waste disposal package, Life Prediction of Corrodible Structures ", NACE, pp.419-428 (1994).

腐食防食協会：装置材料の寿命予測入門、丸善（1984）。

腐食防食協会：腐食防食データブック、丸善（1995）

春名匠、堂本耕司、柴田俊夫：“ 炭酸塩 / 重炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食に及ぼす硫酸イオンの影響 ”、材料と環境, 51, pp.350-355(2002).

Hock, A., Honda, A., Ishikawa, H., Porter, F., Sharland, S. and Taniguchi, N.: " A modeling and experimental study for long term prediction of localized corrosion in carbon steel overpacks for high-level radioactive waste ", Mat.Res.Soc.Symp., 353, pp.703-710(1995).

石川博久, 本田明, 鶴留浩二, 井上邦博, 小畑政道, 佐々木憲明：“ オーバーパックスの候補材料選定と炭素鋼オーバーパックスの寿命評価 ”、PNC TN 8410 92-139 (1992) 。

核燃料サイクル開発機構：“ わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊2 地層処分の工学技術 ”、JNC TN1400 99-022 (1999)。

Marsh, G.P., Blend, I.W., Desport, J.A., Naish, C., Wescott, C. and Taylor, K.J.: " Corrosion assesment of metal overpacks for radioactive waste disposal ", European Appl. Res. Rept.-Nucl. Sci. Technol. 5 [2] 223(1983).

Marsh, G.P. and Taylor, K.J.: " An assesment of carbon steel containers for radioactive waste disposal ", Corrosion Science, Vol.28, No.3, pp.289-320(1983).

小崎完、河辺英樹、玉井秀明、佐藤正知、大橋弘士、高田實彌、森山裕丈：“ベントナイト中の黄鉄鉱の酸化とそのオーバーパック材の腐食に与える影響”、放射性廃棄物研究、Vol.3, No.1 (1996).

松田文夫、和田隆太郎、藤原和雄、泊里治夫：“炭素鋼オーバーパックの腐食に及ぼす溶存酸素の影響に関する研究”、PNC TJ4058 90-005 (1990).

Taniguchi, N., Honda, A. Ishikawa, H.: “Experimental investigation of passivation behavior and corrosion rate of carbon steel in compacted bentonite”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.506, pp.495-501 (1988).

谷口直樹、本田明、川崎学、森田光男、森本昌孝、油井三和：“炭素鋼オーバーパックにおける腐食の局在化の検討”、JNC TN8400 99-067 (1999a).

谷口直樹、本田明、川崎学、水流徹 (1999b): “圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価”、JNC TN8400 99-003.

谷口直樹、川上進、森田光男：“ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件”、JNC TN8400 2001-025 (2002).

大和田仁、三原守弘、入矢桂史郎、松井 淳(2000): “フライアッシュ高含シリカフェームセメントの実用性の検討”、サイクル機構技報 No.6, pp.43-52.

Romanoff : Underground Corrosion, originally issued by NBS in 1957, reprinted by NACE (1989).

付録 1 弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における

浸漬試験結果表

(腐食速度、腐食深さ測定結果)

付録 1-1 No.5～No.14 の結果

付録 1-2 No.15～No.31 の結果

付録 1-3 No.32～No.35 の結果

付録 1-1 腐食速度、腐食深さ測定結果 (No.5 ~ No.14)

No.	[Cl-] (M)	[CO32-+HC03-] (M)	[SO42-] (M)	期間 (day)	試験片 No.	平均腐食深さ (mm)	平均腐食速度 (mm/year)	最大腐食深さ (mm)	最大腐食速度 (mm/year)	孔食係数
5	0.5	0.01	0.052	90	LC091	5.468E-02	2.218E-01	1.175E+00	4.7661E+00	2.15E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC092	4.799E-02	1.946E-01	8.321E-01	3.3747E+00	1.73E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC093	4.889E-02	1.983E-01	8.564E-01	3.4732E+00	1.75E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC094	5.488E-02	2.226E-01	1.044E+00	4.2351E+00	1.90E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC095	6.156E-02	2.496E-01	7.127E-01	2.8906E+00	1.16E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC096	8.641E-02	3.504E-01	1.016E+00	4.1198E+00	1.18E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC097	4.661E-02	1.890E-01	9.121E-01	3.6990E+00	1.96E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC098	3.513E-02	1.425E-01	9.009E-01	3.6537E+00	2.56E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC099	4.850E-02	1.967E-01	8.282E-01	3.3589E+00	1.71E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC100	4.222E-02	1.712E-01	1.027E+00	4.1653E+00	2.43E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC111	3.632E-02	1.473E-01	1.037E+00	4.2064E+00	2.86E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC112	3.578E-02	1.451E-01	8.818E-01	3.5760E+00	2.46E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC113	3.666E-02	1.487E-01	7.624E-01	3.0918E+00	2.08E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC114	5.949E-02	2.413E-01	1.010E+00	4.0942E+00	1.70E+01
5	0.5	0.01	0.052	90	LC115	4.320E-02	1.752E-01	1.016E+00	4.1224E+00	2.35E+01
6	0.5	0.01	0.052	180	LC156	1.160E-01	2.351E-01	6.298E-01	1.2770E+00	5.43E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC157	1.440E-01	2.920E-01	9.818E-01	1.9908E+00	6.82E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC158	1.266E-01	2.568E-01	6.351E-01	1.2878E+00	5.02E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC159	1.204E-01	2.441E-01	9.134E-01	1.8521E+00	7.59E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC160	1.190E-01	2.413E-01	7.085E-01	1.4366E+00	5.95E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC161	1.201E-01	2.436E-01	8.085E-01	1.6395E+00	6.73E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC162	1.251E-01	2.536E-01	6.140E-01	1.2450E+00	4.91E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC163	1.087E-01	2.204E-01	8.775E-01	1.7794E+00	8.07E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC164	8.125E-02	1.648E-01	1.025E+00	2.0785E+00	1.26E+01
6	0.5	0.01	0.052	180	LC165	7.541E-02	1.529E-01	8.476E-01	1.7187E+00	1.12E+01
6	0.5	0.01	0.052	180	LC166	1.005E-01	2.039E-01	1.257E+00	2.5483E+00	1.25E+01
6	0.5	0.01	0.052	180	LC167	1.012E-01	2.053E-01	1.448E+00	2.9354E+00	1.43E+01
6	0.5	0.01	0.052	180	LC168	1.058E-01	2.144E-01	9.949E-01	2.0174E+00	9.41E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC169	1.071E-01	2.172E-01	6.818E-01	1.3825E+00	6.36E+00
6	0.5	0.01	0.052	180	LC170	8.066E-02	1.636E-01	7.253E-01	1.4707E+00	8.99E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC171	2.326E-01	2.326E-01	6.389E-01	6.3894E-01	2.75E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC172	2.043E-01	2.043E-01	1.063E+00	1.0628E+00	5.20E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC173	1.869E-01	1.869E-01	9.412E-01	9.4120E-01	5.04E+00

7	0.5	0.01	0.052	365	LC174	1.790E-01	1.790E-01	9.422E-01	9.4217E-01	5.26E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC175	1.837E-01	1.837E-01	6.803E-01	6.8034E-01	3.70E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC176	1.915E-01	1.915E-01	1.057E+00	1.0565E+00	5.52E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC177	1.986E-01	1.986E-01	7.724E-01	7.7243E-01	3.89E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC178	2.222E-01	2.222E-01	8.492E-01	8.4920E-01	3.82E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC179	2.003E-01	2.003E-01	6.575E-01	6.5750E-01	3.28E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC180	1.927E-01	1.927E-01	9.956E-01	9.9558E-01	5.17E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC181	2.024E-01	2.024E-01	1.900E+00	1.8998E+00	9.39E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC182	2.074E-01	2.074E-01	1.522E+00	1.5221E+00	7.34E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC183	2.068E-01	2.068E-01	1.030E+00	1.0303E+00	4.98E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC184	2.292E-01	2.292E-01	1.122E+00	1.1219E+00	4.90E+00
7	0.5	0.01	0.052	365	LC185	2.239E-01	2.239E-01	9.623E-01	9.6231E-01	4.30E+00
8	0.027	0.1	0	90	LC066	3.066E-03	1.243E-02	3.245E-01	1.3161E+00	1.06E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC067	3.605E-03	1.462E-02	3.232E-01	1.3108E+00	8.97E+01
8	0.027	0.1	0	90	LC068	4.522E-03	1.834E-02	2.945E-01	1.1944E+00	6.51E+01
8	0.027	0.1	0	90	LC069	3.108E-03	1.261E-02	3.191E-01	1.2940E+00	1.03E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC070	2.554E-03	1.036E-02	3.317E-01	1.3451E+00	1.30E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC131	2.562E-03	1.039E-02	4.607E-01	1.8683E+00	1.80E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC132	2.595E-03	1.052E-02	4.069E-01	1.6501E+00	1.57E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC133	2.854E-03	1.158E-02	2.689E-01	1.0906E+00	9.42E+01
8	0.027	0.1	0	90	LC134	2.577E-03	1.045E-02	3.563E-01	1.4450E+00	1.38E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC135	2.266E-03	9.190E-03	2.343E-01	9.5034E-01	1.03E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC136	2.443E-03	9.910E-03	2.567E-01	1.0409E+00	1.05E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC137	3.069E-03	1.245E-02	3.421E-01	1.3875E+00	1.11E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC138	2.679E-03	1.087E-02	2.821E-01	1.1441E+00	1.05E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC139	2.663E-03	1.080E-02	2.848E-01	1.1549E+00	1.07E+02
8	0.027	0.1	0	90	LC140	2.039E-03	8.270E-03	2.599E-01	1.0542E+00	1.27E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC071	3.854E-03	7.815E-03	4.094E-01	8.3017E-01	1.06E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC072	3.527E-03	7.153E-03	3.737E-01	7.5768E-01	1.06E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC073	2.535E-03	5.141E-03	1.929E-01	3.9108E-01	7.61E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC074	3.245E-03	6.580E-03	3.354E-01	6.8016E-01	1.03E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC075	3.064E-03	6.212E-03	2.394E-01	4.8539E-01	7.81E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC201	3.396E-03	6.887E-03	3.165E-01	6.4187E-01	9.32E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC202	2.933E-03	5.947E-03	2.858E-01	5.7948E-01	9.74E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC203	2.603E-03	5.278E-03	2.931E-01	5.9438E-01	1.13E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC204	2.287E-03	4.638E-03	2.274E-01	4.6110E-01	9.94E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC205	1.786E-03	3.622E-03	3.252E-01	6.5937E-01	1.82E+02

9	0.027	0.1	0	180	LC206	2.627E-03	5.326E-03	3.053E-01	6.1904E-01	1.16E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC207	2.088E-03	4.234E-03	2.433E-01	4.9340E-01	1.17E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC208	2.449E-03	4.965E-03	2.342E-01	4.7493E-01	9.57E+01
9	0.027	0.1	0	180	LC209	2.672E-03	5.418E-03	2.786E-01	5.6502E-01	1.04E+02
9	0.027	0.1	0	180	LC210	2.409E-03	4.886E-03	2.466E-01	4.9995E-01	1.02E+02
10	0.027	0.1	0	365	LC076	6.826E-03	6.826E-03	3.844E-01	3.8440E-01	5.63E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC077	5.073E-03	5.073E-03	3.126E-01	3.1261E-01	6.16E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC078	7.339E-03	7.339E-03	3.168E-01	3.1676E-01	4.32E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC079	4.745E-03	4.745E-03	2.804E-01	2.8044E-01	5.91E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC080	6.712E-03	6.712E-03	2.708E-01	2.7077E-01	4.03E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC241	6.154E-03	6.154E-03	2.306E-01	2.3055E-01	3.75E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC242	5.583E-03	5.583E-03	2.672E-01	2.6717E-01	4.79E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC243	4.821E-03	4.821E-03	2.681E-01	2.6808E-01	5.56E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC244	7.807E-03	7.807E-03	2.180E-01	2.1803E-01	2.79E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC245	5.701E-03	5.701E-03	2.859E-01	2.8592E-01	5.02E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC246	6.780E-03	6.780E-03	2.933E-01	2.9325E-01	4.33E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC247	5.196E-03	5.196E-03	3.871E-01	3.8708E-01	7.45E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC248	6.374E-03	6.374E-03	3.294E-01	3.2939E-01	5.17E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC249	4.308E-03	4.308E-03	3.055E-01	3.0547E-01	7.09E+01
10	0.027	0.1	0	365	LC250	4.840E-03	4.840E-03	3.417E-01	3.4172E-01	7.06E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC141	1.403E-02	7.017E-03	3.586E-01	1.7932E-01	2.56E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC142	1.418E-02	7.091E-03	5.260E-01	2.6298E-01	3.71E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC143	1.874E-02	9.368E-03	5.235E-01	2.6177E-01	2.79E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC144	1.277E-02	6.386E-03	5.860E-01	2.9299E-01	4.59E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC145	1.550E-02	7.752E-03	2.984E-01	1.4921E-01	1.92E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC146	2.904E-02	1.452E-02	3.434E-01	1.7172E-01	1.18E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC147	8.443E-03	4.222E-03	4.869E-01	2.4345E-01	5.77E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC148	1.348E-02	6.740E-03	3.305E-01	1.6526E-01	2.45E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC149	4.280E-03	2.140E-03	1.997E-01	9.9835E-02	4.66E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC150	2.751E-03	1.375E-03	4.480E-01	2.2399E-01	1.63E+02
11	0.027	0.1	0	730	LC151	6.815E-03	3.408E-03	2.463E-01	1.2316E-01	3.61E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC152	1.083E-02	5.416E-03	4.630E-01	2.3149E-01	4.27E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC153	2.895E-03	1.447E-03	2.562E-01	1.2809E-01	8.85E+01
11	0.027	0.1	0	730	LC154	3.435E-03	1.718E-03	4.004E-01	2.0020E-01	1.17E+02
11	0.027	0.1	0	730	LC155	1.466E-02	7.332E-03	2.721E-01	1.3606E-01	1.86E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL001	4.406E-03	1.787E-02	3.385E-01	1.3726E+00	7.68E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL002	7.875E-03	3.194E-02	2.639E-01	1.0703E+00	3.35E+01

12	0.027	0.1	0	90	FL003	4.594E-03	1.863E-02	2.928E-01	1.1876E+00	6.37E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL004	6.350E-03	2.575E-02	3.302E-01	1.3391E+00	5.20E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL005	1.043E-02	4.229E-02	3.354E-01	1.3602E+00	3.22E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL006	4.588E-03	1.861E-02	2.085E-01	8.4566E-01	4.55E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL007	5.719E-03	2.320E-02	2.777E-01	1.1263E+00	4.86E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL008	8.822E-03	3.578E-02	3.254E-01	1.3198E+00	3.69E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL009	6.102E-03	2.475E-02	4.039E-01	1.6379E+00	6.62E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL010	3.863E-03	1.567E-02	2.888E-01	1.1714E+00	7.48E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL011	6.542E-03	2.653E-02	4.122E-01	1.6719E+00	6.30E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL012	6.150E-03	2.494E-02	2.978E-01	1.2077E+00	4.84E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL013	6.318E-03	2.562E-02	3.124E-01	1.2668E+00	4.94E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL014	4.168E-03	1.690E-02	2.625E-01	1.0644E+00	6.30E+01
12	0.027	0.1	0	90	FL015	8.444E-03	3.425E-02	3.122E-01	1.2663E+00	3.70E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL016	2.475E-02	5.020E-02	5.787E-01	1.1734E+00	2.34E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL017	9.092E-03	1.844E-02	3.551E-01	7.2010E-01	3.91E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL018	1.239E-02	2.512E-02	6.598E-01	1.3379E+00	5.33E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL019	1.585E-02	3.215E-02	4.484E-01	9.0926E-01	2.83E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL020	1.009E-02	2.047E-02	3.748E-01	7.6001E-01	3.71E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL021	1.669E-02	3.384E-02	4.064E-01	8.2413E-01	2.44E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL022	1.179E-02	2.390E-02	4.958E-01	1.0053E+00	4.21E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL023	8.751E-03	1.775E-02	3.872E-01	7.8518E-01	4.42E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL024	5.519E-03	1.119E-02	4.976E-01	1.0091E+00	9.02E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL025	6.682E-03	1.355E-02	4.165E-01	8.4447E-01	6.23E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL026	6.709E-03	1.360E-02	4.769E-01	9.6699E-01	7.11E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL027	7.008E-03	1.421E-02	4.728E-01	9.5879E-01	6.75E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL028	8.638E-03	1.752E-02	6.617E-01	1.3417E+00	7.66E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL029	1.011E-02	2.049E-02	4.015E-01	8.1409E-01	3.97E+01
13	0.027	0.1	0	180	FL030	4.747E-03	9.626E-03	3.753E-01	7.6094E-01	7.90E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL031	8.106E-03	8.106E-03	5.013E-01	5.0128E-01	6.18E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL032	1.041E-02	1.041E-02	4.152E-01	4.1517E-01	3.99E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL033	9.662E-03	9.662E-03	4.565E-01	4.5649E-01	4.72E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL034	1.547E-02	1.547E-02	5.610E-01	5.6104E-01	3.63E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL035	1.129E-02	1.129E-02	4.260E-01	4.2602E-01	3.77E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL036	1.345E-02	1.345E-02	4.985E-01	4.9846E-01	3.71E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL037	1.142E-02	1.142E-02	5.030E-01	5.0302E-01	4.41E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL038	1.165E-02	1.165E-02	3.900E-01	3.8995E-01	3.35E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL039	7.853E-03	7.853E-03	4.301E-01	4.3006E-01	5.48E+01

14	0.027	0.1	0	365	FL040	8.639E-03	8.639E-03	3.857E-01	3.8565E-01	4.46E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL041	2.115E-02	2.115E-02	3.993E-01	3.9925E-01	1.89E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL042	1.417E-02	1.417E-02	3.964E-01	3.9642E-01	2.80E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL043	1.811E-02	1.811E-02	4.723E-01	4.7230E-01	2.61E+01
14	0.027	0.1	0	365	FL044	3.341E-03	3.341E-03	4.834E-01	4.8337E-01	1.45E+02
14	0.027	0.1	0	365	FL045	1.444E-02	1.444E-02	5.766E-01	5.7664E-01	3.99E+01

付録 1-2 腐食速度、腐食深さ測定結果 (No.15 ~ No.31)

No.	試験溶液	室温 pH	期間 (day)	試験片 No.	平均腐食深さ (mm)	平均腐食速度 (mm/year)	最大腐食深さ (mm)	最大腐食速度 (mm/year)	孔食係数
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR561	2.647E-03	3.220E-02	2.930E-01	3.565E+00	1.11E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR562	2.206E-03	2.684E-02	2.915E-01	3.546E+00	1.32E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR563	2.226E-03	2.709E-02	1.764E-01	2.146E+00	7.92E+01
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR564	2.335E-03	2.841E-02	2.768E-01	3.367E+00	1.19E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR565	2.331E-03	2.836E-02	2.873E-01	3.496E+00	1.23E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR566	2.569E-03	3.126E-02	2.558E-01	3.112E+00	9.96E+01
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR567	3.187E-03	3.878E-02	2.285E-01	2.780E+00	7.17E+01
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR568	2.595E-03	3.158E-02	2.699E-01	3.284E+00	1.04E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR569	2.441E-03	2.970E-02	2.939E-01	3.576E+00	1.20E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR570	3.221E-03	3.918E-02	3.666E-01	4.460E+00	1.14E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR571	2.561E-03	3.116E-02	2.786E-01	3.390E+00	1.09E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR572	2.006E-03	2.441E-02	3.542E-01	4.309E+00	1.77E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR573	2.504E-03	3.047E-02	2.354E-01	2.865E+00	9.40E+01
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR574	1.719E-03	2.092E-02	3.452E-01	4.200E+00	2.01E+02
15	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	30	LR575	2.416E-03	2.940E-02	2.236E-01	2.720E+00	9.25E+01
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR576	2.063E-03	8.366E-03	2.481E-01	1.006E+00	1.20E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR577	2.080E-03	8.435E-03	2.468E-01	1.001E+00	1.19E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR578	1.921E-03	7.791E-03	2.927E-01	1.187E+00	1.52E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR579	1.918E-03	7.779E-03	2.418E-01	9.808E-01	1.26E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR580	2.348E-03	9.521E-03	2.937E-01	1.191E+00	1.25E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR581	2.074E-03	8.411E-03	2.715E-01	1.101E+00	1.31E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR582	1.523E-03	6.175E-03	2.851E-01	1.156E+00	1.87E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR583	1.607E-03	6.517E-03	2.620E-01	1.063E+00	1.63E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR584	2.634E-03	1.068E-02	2.442E-01	9.902E-01	9.27E+01
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR585	4.298E-03	1.743E-02	2.580E-01	1.046E+00	6.00E+01

16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR586	2.998E-03	1.216E-02	3.098E-01	1.256E+00	1.03E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR587	3.210E-03	1.302E-02	2.504E-01	1.015E+00	7.80E+01
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR588	2.679E-03	1.087E-02	2.933E-01	1.189E+00	1.09E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR589	3.336E-03	1.353E-02	3.941E-01	1.598E+00	1.18E+02
16	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	90	LR590	3.970E-03	1.610E-02	2.951E-01	1.197E+00	7.43E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A00	4.133E-03	8.380E-03	3.661E-01	7.424E-01	8.86E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A01	3.876E-03	7.860E-03	4.283E-01	8.685E-01	1.10E+02
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A02	3.810E-03	7.725E-03	2.977E-01	6.036E-01	7.81E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A03	4.182E-03	8.480E-03	3.076E-01	6.238E-01	7.36E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A04	4.184E-03	8.485E-03	4.118E-01	8.350E-01	9.84E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A05	3.908E-03	7.925E-03	2.880E-01	5.840E-01	7.37E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A06	2.757E-03	5.591E-03	4.518E-01	9.162E-01	1.64E+02
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A07	4.914E-03	9.964E-03	6.624E-01	1.343E+00	1.35E+02
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A08	4.885E-03	9.906E-03	3.337E-01	6.766E-01	6.83E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A09	4.202E-03	8.521E-03	2.997E-01	6.077E-01	7.13E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A10	4.661E-03	9.452E-03	3.621E-01	7.342E-01	7.77E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A11	3.836E-03	7.780E-03	4.394E-01	8.910E-01	1.15E+02
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A12	3.712E-03	7.527E-03	3.233E-01	6.557E-01	8.71E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A13	4.919E-03	9.974E-03	3.586E-01	7.272E-01	7.29E+01
17	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl	11	180	A14	4.378E-03	8.879E-03	4.212E-01	8.542E-01	9.62E+01
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR516	3.386E-04	4.120E-03	3.737E-02	4.547E-01	1.10E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR517	2.778E-04	3.380E-03	6.500E-02	7.908E-01	2.34E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR518	2.798E-04	3.404E-03	3.936E-02	4.789E-01	1.41E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR519	2.749E-04	3.344E-03	7.894E-02	9.604E-01	2.87E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR520	2.155E-04	2.622E-03	1.157E-01	1.407E+00	5.37E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR521	2.250E-04	2.738E-03	4.832E-02	5.879E-01	2.15E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR522	3.156E-04	3.840E-03	3.561E-02	4.333E-01	1.13E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR523	2.385E-04	2.902E-03	6.778E-02	8.247E-01	2.84E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR524	3.666E-04	4.460E-03	8.731E-02	1.062E+00	2.38E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR525	2.795E-04	3.401E-03	5.438E-02	6.616E-01	1.95E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR526	2.928E-04	3.562E-03	5.236E-02	6.370E-01	1.79E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR527	2.935E-04	3.571E-03	5.826E-02	7.088E-01	1.99E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR528	3.511E-04	4.272E-03	1.014E-01	1.233E+00	2.89E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR529	2.750E-04	3.346E-03	7.764E-02	9.446E-01	2.82E+02
18	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	30	LR530	3.642E-04	4.431E-03	5.006E-02	6.091E-01	1.37E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR531	9.743E-05	3.951E-04	2.885E-02	1.170E-01	2.96E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR532	3.075E-04	1.247E-03	6.973E-02	2.828E-01	2.27E+02

19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR533	3.226E-04	1.308E-03	1.109E-01	4.498E-01	3.44E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR534	3.194E-04	1.295E-03	1.190E-01	4.826E-01	3.73E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR535	3.695E-04	1.499E-03	1.014E-01	4.112E-01	2.74E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR536	8.903E-05	3.611E-04	3.145E-02	1.275E-01	3.53E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR537	2.330E-04	9.451E-04	1.070E-01	4.341E-01	4.59E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR538	3.476E-04	1.410E-03	1.706E-01	6.918E-01	4.91E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR539	3.328E-04	1.350E-03	9.415E-02	3.818E-01	2.83E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR540	2.423E-04	9.826E-04	5.163E-02	2.094E-01	2.13E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR541	1.093E-04	4.435E-04	2.932E-02	1.189E-01	2.68E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR542	3.305E-04	1.340E-03	7.005E-02	2.841E-01	2.12E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR543	1.950E-04	7.907E-04	5.012E-02	2.033E-01	2.57E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR544	4.194E-04	1.701E-03	8.087E-02	3.280E-01	1.93E+02
19	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	90	LR545	1.587E-04	6.437E-04	8.063E-02	3.270E-01	5.08E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR546	5.563E-04	1.128E-03	9.969E-02	2.021E-01	1.79E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR547	5.365E-04	1.088E-03	6.995E-02	1.418E-01	1.30E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR548	2.333E-04	4.731E-04	5.269E-02	1.068E-01	2.26E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR549	6.429E-04	1.304E-03	1.567E-01	3.178E-01	2.44E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR550	7.322E-04	1.485E-03	1.401E-01	2.840E-01	1.91E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR551	6.425E-04	1.303E-03	1.653E-01	3.352E-01	2.57E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR552	5.441E-04	1.103E-03	7.674E-02	1.556E-01	1.41E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR553	3.080E-04	6.245E-04	5.232E-02	1.061E-01	1.70E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR554	3.061E-04	6.208E-04	1.259E-01	2.554E-01	4.11E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR555	4.441E-04	9.005E-04	6.375E-02	1.293E-01	1.44E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR556	4.588E-04	9.303E-04	6.705E-02	1.360E-01	1.46E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR557	4.640E-04	9.409E-04	6.268E-02	1.271E-01	1.35E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR558	1.173E-03	2.378E-03	5.891E-02	1.195E-01	5.02E+01
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR559	6.044E-04	1.226E-03	7.903E-02	1.603E-01	1.31E+02
20	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	12	180	LR560	5.599E-04	1.135E-03	8.147E-02	1.652E-01	1.46E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC271	2.549E-04	3.102E-03	7.789E-02	9.477E-01	3.06E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC272	1.593E-04	1.939E-03	7.879E-02	9.586E-01	4.94E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC273	1.621E-04	1.973E-03	1.160E-01	1.411E+00	7.15E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC274	9.463E-05	1.151E-03	2.095E-01	2.549E+00	2.21E+03
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC275	1.371E-04	1.668E-03	1.510E-01	1.837E+00	1.10E+03
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC276	1.051E-04	1.279E-03	2.328E-01	2.832E+00	2.21E+03
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC277	1.368E-04	1.665E-03	1.151E-01	1.400E+00	8.41E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC278	2.650E-04	3.225E-03	9.555E-02	1.163E+00	3.61E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC279	2.071E-04	2.520E-03	1.779E-01	2.164E+00	8.59E+02

21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC280	2.565E-04	3.121E-03	1.649E-01	2.006E+00	6.43E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC281	2.991E-04	3.639E-03	1.863E-01	2.266E+00	6.23E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC282	1.939E-04	2.359E-03	1.025E-01	1.247E+00	5.29E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC283	1.652E-04	2.010E-03	1.513E-01	1.841E+00	9.16E+02
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC284	2.138E-04	2.602E-03	2.652E-01	3.226E+00	1.24E+03
21	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	30	LC285	3.189E-04	3.880E-03	1.650E-01	2.007E+00	5.17E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC286	2.675E-04	1.085E-03	2.145E-01	8.698E-01	8.02E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC287	4.660E-04	1.890E-03	1.866E-01	7.567E-01	4.00E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC288	3.711E-04	1.505E-03	1.510E-01	6.122E-01	4.07E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC289	3.115E-04	1.263E-03	2.226E-01	9.026E-01	7.14E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC290	3.487E-04	1.414E-03	1.772E-01	7.184E-01	5.08E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC291	4.717E-04	1.913E-03	1.035E-01	4.197E-01	2.19E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC292	2.565E-04	1.040E-03	1.947E-01	7.895E-01	7.59E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC293	3.809E-04	1.545E-03	1.697E-01	6.882E-01	4.45E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC294	8.845E-04	3.587E-03	3.802E-01	1.542E+00	4.30E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC295	1.039E-03	4.214E-03	3.016E-01	1.223E+00	2.90E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC296	5.869E-04	2.380E-03	3.543E-01	1.437E+00	6.04E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC297	8.531E-04	3.460E-03	3.169E-01	1.285E+00	3.71E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC298	7.218E-04	2.927E-03	2.818E-01	1.143E+00	3.90E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC299	8.332E-04	3.379E-03	2.962E-01	1.201E+00	3.56E+02
22	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	90	LC300	8.136E-04	3.300E-03	3.263E-01	1.323E+00	4.01E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR501	4.279E-04	8.677E-04	1.288E-01	2.612E-01	3.01E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR502	4.117E-03	8.348E-03	1.264E-01	2.563E-01	3.07E+01
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR503	5.958E-04	1.208E-03	1.153E-01	2.338E-01	1.94E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR504	1.048E-03	2.125E-03	1.795E-01	3.639E-01	1.71E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR505	5.757E-04	1.167E-03	5.475E-02	1.110E-01	9.51E+01
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR506	8.539E-04	1.731E-03	8.879E-02	1.800E-01	1.04E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR507	4.217E-04	8.551E-04	1.015E-01	2.057E-01	2.41E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR508	7.051E-04	1.430E-03	1.621E-01	3.287E-01	2.30E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR509	6.729E-04	1.364E-03	1.759E-01	3.566E-01	2.61E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR510	6.325E-04	1.283E-03	6.499E-02	1.318E-01	1.03E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR511	7.659E-04	1.553E-03	1.628E-01	3.301E-01	2.13E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR512	4.154E-04	8.423E-04	7.975E-02	1.617E-01	1.92E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR513	5.816E-04	1.179E-03	7.733E-02	1.568E-01	1.33E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR514	2.554E-04	5.179E-04	6.221E-02	1.261E-01	2.44E+02
23	0.1M Na2CO3 + 0.56M NaCl + NaOH	13.35	180	LR515	3.091E-04	6.267E-04	6.712E-02	1.361E-01	2.17E+02
24	0.56M NaCl + 普通セメント	13.07	30	A15	1.368E-03	1.665E-02	2.897E-01	3.525E+00	2.12E+02

24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A16	1.521E-03	1.850E-02	2.456E-01	2.988E+00	1.62E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A17	1.857E-03	2.260E-02	2.322E-01	2.824E+00	1.25E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A18	1.842E-03	2.241E-02	2.287E-01	2.783E+00	1.24E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A19	2.255E-03	2.744E-02	2.664E-01	3.241E+00	1.18E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A20	1.947E-03	2.369E-02	1.831E-01	2.228E+00	9.40E+01
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A21	1.704E-03	2.073E-02	2.774E-01	3.375E+00	1.63E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.07	30	A22	1.652E-03	2.009E-02	2.450E-01	2.981E+00	1.48E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A23	9.246E-04	1.125E-02	2.353E-01	2.863E+00	2.54E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A24	1.121E-03	1.364E-02	3.337E-01	4.060E+00	2.98E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A25	1.799E-03	2.189E-02	2.009E-01	2.444E+00	1.12E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A26	1.501E-03	1.826E-02	1.674E-01	2.036E+00	1.12E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A27	1.344E-03	1.635E-02	2.539E-01	3.089E+00	1.89E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A28	1.354E-03	1.647E-02	2.118E-01	2.577E+00	1.56E+02
24	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.08	30	A29	1.562E-03	1.901E-02	1.837E-01	2.234E+00	1.18E+02
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A30	8.382E-03	3.399E-02	2.290E-01	9.286E-01	2.73E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A31	1.067E-02	4.327E-02	2.556E-01	1.037E+00	2.40E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A32	1.700E-02	6.894E-02	1.949E-01	7.905E-01	1.15E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A33	1.014E-02	4.111E-02	1.236E-01	5.013E-01	1.22E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A34	1.154E-02	4.681E-02	2.493E-01	1.011E+00	2.16E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A35	7.798E-03	3.163E-02	3.811E-01	1.545E+00	4.89E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A36	1.749E-02	7.092E-02	2.070E-01	8.395E-01	1.18E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A37	1.282E-02	5.199E-02	2.862E-01	1.161E+00	2.23E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A38	2.112E-02	8.567E-02	2.585E-01	1.049E+00	1.22E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A39	1.583E-02	6.420E-02	3.340E-01	1.355E+00	2.11E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A40	6.755E-03	2.739E-02	2.257E-01	9.154E-01	3.34E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A41	6.433E-03	2.609E-02	2.456E-01	9.958E-01	3.82E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A42	1.729E-02	7.012E-02	3.780E-01	1.533E+00	2.19E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A43	1.451E-02	5.884E-02	3.024E-01	1.227E+00	2.08E+01
25	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.05	90	A44	1.044E-02	4.236E-02	2.369E-01	9.609E-01	2.27E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A45	1.601E-02	3.246E-02	3.616E-01	7.332E-01	2.26E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A46	1.280E-02	2.595E-02	2.765E-01	5.607E-01	2.16E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A47	1.275E-02	2.585E-02	3.112E-01	6.311E-01	2.44E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A48	7.623E-03	1.546E-02	3.264E-01	6.618E-01	4.28E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A49	1.361E-02	2.759E-02	3.426E-01	6.948E-01	2.52E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A50	1.103E-02	2.237E-02	3.261E-01	6.613E-01	2.96E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A51	1.020E-02	2.069E-02	2.855E-01	5.789E-01	2.80E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A52	1.032E-02	2.093E-02	2.377E-01	4.820E-01	2.30E+01

26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A53	1.051E-02	2.131E-02	3.716E-01	7.535E-01	3.54E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A54	1.621E-02	3.288E-02	2.321E-01	4.706E-01	1.43E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A55	1.003E-02	2.034E-02	2.673E-01	5.421E-01	2.67E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A56	1.947E-02	3.948E-02	2.885E-01	5.850E-01	1.48E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A57	3.218E-02	6.525E-02	3.218E-01	6.525E-01	1.00E+01
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A58	4.774E-02	9.680E-02	4.278E-01	8.674E-01	8.96E+00
26	0.56M	NaCl + 普通セメント	13.03	180	A59	5.225E-02	1.060E-01	6.083E-01	1.233E+00	1.16E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A60	2.507E-02	2.507E-02	2.712E-01	2.712E-01	1.08E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A61	4.215E-02	4.215E-02	2.833E-01	2.833E-01	6.72E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A62	2.850E-02	2.850E-02	3.851E-01	3.851E-01	1.35E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A63	4.472E-02	4.472E-02	4.685E-01	4.685E-01	1.05E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A64	3.738E-02	3.738E-02	2.936E-01	2.936E-01	7.86E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A65	3.140E-02	3.140E-02	3.132E-01	3.132E-01	9.98E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A66	5.118E-02	5.118E-02	3.222E-01	3.222E-01	6.30E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A67	4.310E-02	4.310E-02	3.015E-01	3.015E-01	6.99E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A68	8.797E-03	8.797E-03	4.174E-01	4.174E-01	4.74E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A69	1.804E-02	1.804E-02	3.381E-01	3.381E-01	1.87E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A70	1.485E-02	1.485E-02	3.253E-01	3.253E-01	2.19E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A71	3.606E-02	3.606E-02	3.239E-01	3.239E-01	8.98E+00
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A72	3.441E-02	3.441E-02	4.393E-01	4.393E-01	1.28E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A73	2.179E-02	2.179E-02	3.310E-01	3.310E-01	1.52E+01
27	0.56M	NaCl + 普通セメント	12.27	365	A74	7.991E-03	7.991E-03	3.235E-01	3.235E-01	4.05E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A75	8.632E-03	1.050E-01	9.627E-02	1.171E+00	1.12E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A76	8.166E-03	9.936E-02	9.405E-02	1.144E+00	1.15E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A77	8.552E-03	1.040E-01	8.168E-02	9.938E-01	9.55E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A78	9.090E-03	1.106E-01	7.379E-02	8.978E-01	8.12E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A79	1.078E-02	1.311E-01	1.159E-01	1.410E+00	1.08E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A80	2.529E-02	3.077E-01	1.469E-01	1.787E+00	5.81E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A81	1.093E-02	1.330E-01	5.548E-02	6.750E-01	5.08E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.98	30	A82	1.109E-02	1.349E-01	1.281E-01	1.558E+00	1.15E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A83	1.282E-02	1.560E-01	1.279E-01	1.556E+00	9.98E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A84	9.310E-03	1.133E-01	1.113E-01	1.354E+00	1.20E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A85	1.074E-02	1.307E-01	1.159E-01	1.410E+00	1.08E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A86	1.020E-02	1.241E-01	1.339E-01	1.629E+00	1.31E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A87	1.148E-02	1.397E-01	1.279E-01	1.556E+00	1.11E+01
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A88	1.112E-02	1.353E-01	8.580E-02	1.044E+00	7.72E+00
28	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.01	30	A89	1.275E-02	1.551E-01	7.929E-02	9.647E-01	6.22E+00

29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A90	2.487E-02	1.009E-01	1.019E-01	4.131E-01	4.09E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A91	2.148E-02	8.710E-02	9.077E-02	3.681E-01	4.23E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A92	2.102E-02	8.525E-02	8.601E-02	3.488E-01	4.09E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A93	2.434E-02	9.872E-02	9.583E-02	3.886E-01	3.94E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A94	2.020E-02	8.194E-02	1.004E-01	4.073E-01	4.97E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A95	3.459E-02	1.403E-01	1.493E-01	6.053E-01	4.31E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A96	2.091E-02	8.482E-02	9.167E-02	3.718E-01	4.38E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A97	2.120E-02	8.599E-02	9.420E-02	3.820E-01	4.44E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A98	9.365E-03	3.798E-02	1.409E-01	5.715E-01	1.50E+01
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	A99	7.826E-03	3.174E-02	6.349E-02	2.575E-01	8.11E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	B00	9.129E-03	3.702E-02	7.433E-02	3.014E-01	8.14E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	B01	9.842E-03	3.992E-02	7.764E-02	3.149E-01	7.89E+00
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	B02	8.950E-03	3.630E-02	1.032E-01	4.186E-01	1.15E+01
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	B03	7.574E-03	3.071E-02	8.810E-02	3.573E-01	1.16E+01
29	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	11.36	90	B04	8.929E-03	3.621E-02	8.807E-02	3.572E-01	9.86E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B05	3.683E-02	7.468E-02	6.072E-01	1.231E+00	1.65E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B06	3.842E-02	7.791E-02	4.898E-01	9.931E-01	1.27E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B07	4.062E-02	8.236E-02	3.939E-01	7.987E-01	9.70E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B08	3.697E-02	7.498E-02	5.257E-01	1.066E+00	1.42E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B09	4.510E-02	9.145E-02	6.889E-01	1.397E+00	1.53E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B10	5.235E-02	1.062E-01	6.400E-01	1.298E+00	1.22E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B11	5.087E-02	1.032E-01	5.163E-01	1.047E+00	1.01E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.74	180	B12	1.550E-01	3.142E-01	6.162E-01	1.250E+00	3.98E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B13	3.728E-02	7.560E-02	2.191E-01	4.442E-01	5.88E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B14	3.681E-02	7.463E-02	4.953E-01	1.004E+00	1.35E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B15	2.985E-02	6.053E-02	3.661E-01	7.423E-01	1.23E+01
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B16	3.378E-02	6.851E-02	1.416E-01	2.871E-01	4.19E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B17	4.509E-02	9.144E-02	3.088E-01	6.262E-01	6.85E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B18	4.445E-02	9.013E-02	3.689E-01	7.480E-01	8.30E+00
30	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.77	180	B19	6.647E-02	1.348E-01	5.442E-01	1.103E+00	8.19E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B20	2.718E-01	2.718E-01	1.001E+00	1.001E+00	3.68E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B21	1.932E-01	1.932E-01	1.090E+00	1.090E+00	5.64E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B22	1.900E-01	1.900E-01	6.834E-01	6.834E-01	3.60E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B23	2.066E-01	2.066E-01	9.972E-01	9.972E-01	4.83E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B24	1.713E-01	1.713E-01	1.131E+00	1.131E+00	6.60E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B25	1.993E-01	1.993E-01	6.846E-01	6.846E-01	3.44E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B26	2.236E-01	2.236E-01	1.100E+00	1.100E+00	4.92E+00

31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B27	1.824E-01	1.824E-01	9.692E-01	9.692E-01	5.31E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B28	1.268E-01	1.268E-01	1.340E+00	1.340E+00	1.06E+01
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B29	1.007E-01	1.007E-01	1.283E+00	1.283E+00	1.27E+01
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B30	9.544E-02	9.544E-02	1.426E+00	1.426E+00	1.49E+01
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B31	1.425E-01	1.425E-01	1.277E+00	1.277E+00	8.97E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B32	2.543E-01	2.543E-01	1.599E+00	1.599E+00	6.29E+00
31	0.56M	NaCl + 低アルカリセメント	10.69	365	B34	7.963E-02	7.963E-02	1.506E+00	1.506E+00	1.89E+01

付録 1-3 腐食速度、腐食深さ測定結果 (No.32 ~ No.35)

No.	試験溶液		室温 pH	期間 (day)	試験片 No.	平均腐食深さ (mm)	平均腐食速度 (mm/year)	最大腐食深さ (mm)	最大腐食速度 (mm/year)	孔食係数	
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX01 表	8.244E-02	3.344E-01	5.106E-01	2.071E+00	6.19E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX01 裏	8.244E-02	3.344E-01	5.158E-01	2.092E+00	6.26E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX02 表	7.735E-02	3.137E-01	5.588E-01	2.266E+00	7.22E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX02 裏	7.735E-02	3.137E-01	4.769E-01	1.934E+00	6.16E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX03 表	8.142E-02	3.302E-01	5.590E-01	2.267E+00	6.86E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX03 裏	8.142E-02	3.302E-01	5.139E-01	2.084E+00	6.31E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX04 表	7.532E-02	3.055E-01	4.571E-01	1.854E+00	6.07E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX04 裏	7.532E-02	3.055E-01	4.787E-01	1.941E+00	6.36E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX05 表	7.226E-02	2.931E-01	4.510E-01	1.829E+00	6.24E+00
32	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	90	FX05 裏	7.226E-02	2.931E-01	5.322E-01	2.158E+00	7.36E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX06 表	1.282E-01	2.601E-01	1.583E+00	3.210E+00	1.23E+01
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX06 裏	1.282E-01	2.601E-01	7.534E-01	1.528E+00	5.87E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX07 表	1.272E-01	2.580E-01	1.109E+00	2.248E+00	8.71E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX07 裏	1.272E-01	2.580E-01	1.057E+00	2.144E+00	8.31E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX08 表	1.282E-01	2.601E-01	7.387E-01	1.498E+00	5.76E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX08 裏	1.282E-01	2.601E-01	9.154E-01	1.856E+00	7.14E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX09 表	1.282E-01	2.601E-01	1.124E+00	2.278E+00	8.76E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX09 裏	1.282E-01	2.601E-01	1.163E+00	2.358E+00	9.07E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX10 表	1.364E-01	2.766E-01	1.246E+00	2.527E+00	9.14E+00
33	0.05M NaHCO ₃	+ 0.05M Na ₂ CO ₃	+ 0.027M NaCl	10.2	180	FX10 裏	1.364E-01	2.766E-01	9.767E-01	1.981E+00	7.16E+00
34	人工海水		7.7	90	FX11 表	1.730E-02	7.017E-02	1.300E-01	5.271E-01	7.51E+00	
34	人工海水		7.7	90	FX11 裏	1.730E-02	7.017E-02	8.573E-02	3.477E-01	4.95E+00	
34	人工海水		7.7	90	FX12 表	1.832E-02	7.430E-02	1.099E-01	4.455E-01	6.00E+00	
34	人工海水		7.7	90	FX12 裏	1.832E-02	7.430E-02	6.189E-02	2.510E-01	3.38E+00	

34	人工海水	7.7	90	FX13 表	2.036E-02	8.256E-02	1.283E-01	5.204E-01	6.30E+00
34	人工海水	7.7	90	FX13 裏	2.036E-02	8.256E-02	7.850E-02	3.184E-01	3.86E+00
34	人工海水	7.7	90	FX14 表	1.934E-02	7.843E-02	1.456E-01	5.906E-01	7.53E+00
34	人工海水	7.7	90	FX14 裏	1.934E-02	7.843E-02	1.457E-01	5.907E-01	7.53E+00
34	人工海水	7.7	90	FX15 表	2.036E-02	8.256E-02	1.925E-01	7.808E-01	9.46E+00
34	人工海水	7.7	90	FX15 裏	2.036E-02	8.256E-02	7.918E-02	3.211E-01	3.89E+00
35	人工海水	7.7	180	FX16 表	3.053E-02	6.192E-02	1.114E-01	2.260E-01	3.65E+00
35	人工海水	7.7	180	FX16 裏	3.053E-02	6.192E-02	1.415E-01	2.868E-01	4.63E+00
35	人工海水	7.7	180	FX17 表	2.850E-02	5.779E-02	1.347E-01	2.732E-01	4.73E+00
35	人工海水	7.7	180	FX17 裏	2.850E-02	5.779E-02	1.496E-01	3.034E-01	5.25E+00
35	人工海水	7.7	180	FX18 表	2.952E-02	5.985E-02	1.529E-01	3.100E-01	5.18E+00
35	人工海水	7.7	180	FX18 裏	2.952E-02	5.985E-02	1.412E-01	2.863E-01	4.78E+00
35	人工海水	7.7	180	FX19 表	2.748E-02	5.573E-02	1.077E-01	2.183E-01	3.92E+00
35	人工海水	7.7	180	FX19 裏	2.748E-02	5.573E-02	1.206E-01	2.445E-01	4.39E+00
35	人工海水	7.7	180	FX20 表	2.850E-02	5.779E-02	9.483E-02	1.923E-01	3.33E+00
35	人工海水	7.7	180	FX20 裏	2.850E-02	5.779E-02	1.560E-01	3.163E-01	5.47E+00

付録2 弱アルカリ性～アルカリ性水溶液中における
浸漬試験データの極値統計解析結果表
(Gumbel 分布パラメータ、実機最大腐食深さ推定結果)

付録2 極値統計解析結果

No.	平均腐食深さ (mm)		/	試験片表面 積 (cm ²)	実機表面 積 (cm ²)	再帰 期間	信頼率	実機最頻値 (mm)	実機最大値 (99%) (mm)	孔食係数 (最頻値)	孔食係数 (最大値)	
5	4.922E-02	8.708E-01	1.210E-01	0.139	104.6	55129	527	0.99	1.629E+00	2.186E+00	3.31E+01	4.44E+01
6	1.088E-01	7.683E-01	1.743E-01	0.227	104.6	55129	527	0.99	1.861E+00	2.663E+00	1.71E+01	2.45E+01
7	2.041E-01	8.668E-01	2.327E-01	0.269	104.6	55129	527	0.99	2.325E+00	3.396E+00	1.14E+01	1.66E+01
8	2.840E-03	2.886E-01	4.748E-02	0.165	104.6	55129	527	0.99	5.861E-01	8.046E-01	2.06E+02	2.83E+02
9	2.765E-03	2.582E-01	5.171E-02	0.200	104.6	55129	527	0.99	5.823E-01	8.202E-01	2.11E+02	2.97E+02
10	5.884E-03	2.754E-01	4.452E-02	0.162	104.6	55129	527	0.99	5.544E-01	7.592E-01	9.42E+01	1.29E+02
11	1.146E-02	3.233E-01	1.070E-01	0.331	104.6	55129	527	0.99	9.938E-01	1.486E+00	8.67E+01	1.30E+02
12	6.291E-03	2.852E-01	4.929E-02	0.173	104.6	55129	527	0.99	5.940E-01	8.207E-01	9.44E+01	1.30E+02
13	1.059E-02	4.228E-01	7.155E-02	0.169	104.6	55129	527	0.99	8.711E-01	1.200E+00	8.23E+01	1.13E+02
14	1.194E-02	4.307E-01	4.881E-02	0.113	104.6	55129	527	0.99	7.365E-01	9.611E-01	6.17E+01	8.05E+01
15	1.980E-04	1.253E-01	4.749E-02	0.379	104.6	55129	527	0.99	4.229E-01	6.413E-01	2.14E+03	3.24E+03
16	5.737E-04	2.034E-01	7.757E-02	0.381	104.6	55129	527	0.99	6.894E-01	1.046E+00	1.20E+03	1.82E+03
17	8.252E-04	8.874E-02	3.564E-02	0.402	104.6	55129	527	0.99	3.121E-01	4.761E-01	3.78E+02	5.77E+02
18	2.926E-04	5.348E-02	1.857E-02	0.347	104.6	55129	527	0.99	1.699E-01	2.553E-01	5.81E+02	8.73E+02
19	2.583E-04	6.088E-02	3.272E-02	0.538	104.6	55129	527	0.99	2.659E-01	4.165E-01	1.03E+03	1.61E+03
20	5.471E-04	7.344E-02	2.579E-02	0.351	104.6	55129	527	0.99	2.350E-01	3.536E-01	4.30E+02	6.46E+02
21	2.464E-03	2.524E-01	5.070E-02	0.201	104.6	55129	527	0.99	5.701E-01	8.033E-01	2.31E+02	3.26E+02
22	2.577E-03	2.631E-01	2.502E-02	0.095	104.6	55129	527	0.99	4.198E-01	5.349E-01	1.63E+02	2.08E+02
23	4.157E-03	3.438E-01	6.252E-02	0.182	104.6	55129	527	0.99	7.356E-01	1.023E+00	1.77E+02	2.46E+02
24	1.583E-03	2.150E-01	4.001E-02	0.186	104.6	55129	527	0.99	4.657E-01	6.497E-01	2.94E+02	4.10E+02
25	1.255E-02	2.267E-01	6.499E-02	0.287	104.6	55129	527	0.99	6.339E-01	9.329E-01	5.05E+01	7.43E+01
26	1.885E-02	2.945E-01	6.104E-02	0.207	104.6	55129	527	0.99	6.770E-01	9.578E-01	3.59E+01	5.08E+01
27	2.969E-02	3.164E-01	4.270E-02	0.135	104.6	55129	527	0.99	5.840E-01	7.805E-01	1.97E+01	2.63E+01
28	1.140E-02	9.141E-02	2.622E-02	0.287	104.6	55129	527	0.99	2.557E-01	3.763E-01	2.24E+01	3.30E+01
29	1.668E-02	8.643E-02	1.741E-02	0.201	104.6	55129	527	0.99	1.955E-01	2.756E-01	1.17E+01	1.65E+01
30	4.999E-02	3.785E-01	1.674E-01	0.442	104.6	55129	527	0.99	1.428E+00	2.198E+00	2.86E+01	4.40E+01
31	1.735E-01	1.038E+00	3.019E-01	0.291	104.6	55129	527	0.99	2.930E+00	4.319E+00	1.69E+01	2.49E+01
32	7.776E-02	4.857E-01	3.574E-02	0.074	625	55129	88.21	0.99	6.456E-01	8.100E-01	8.30E+00	1.04E+01
33	1.297E-01	9.463E-01	2.135E-01	0.226	625	55129	88.21	0.99	1.901E+00	2.883E+00	1.47E+01	2.22E+01
34	1.913E-02	9.591E-02	3.476E-02	0.362	625	55129	88.21	0.99	2.514E-01	4.113E-01	1.31E+01	2.15E+01
35	2.891E-02	1.199E-01	2.183E-02	0.182	625	55129	88.21	0.99	2.175E-01	3.180E-01	7.53E+00	1.10E+01

付録3 不均一全面腐食における Gumbel 分布関数の
パラメータ、（石川ほか、1992 より）

付録3 不均一全面腐食における Gumbel 分布関数のパラメータ(石川ほか、1992)

試験溶液	pH	期間(day)	平均腐食深さ (mm)	(mm)	(mm)	/
人工海水中 7%O ₂ 吹込み	8.2	30	6.736E-03	5.068E-03	2.218E-02	0.229
人工海水中 7%O ₂ 吹込み	8.2	90	2.043E-02	1.822E-02	9.621E-02	0.189
人工海水中 7%O ₂ 吹込み	8.2	180	6.119E-02	9.046E-02	1.866E-01	0.485
人工海水中 大気吹き込み	8.2	30	3.450E-02	4.816E-02	3.932E-02	1.225
人工海水中 大気吹き込み	8.2	60	3.542E-02	1.754E-02	8.330E-02	0.211
人工海水中 大気吹き込み	8.2	90	7.310E-02	1.476E-01	6.280E-01	0.235
人工海水中 大気吹き込み	8.2	180	1.136E-01	2.455E-01	2.655E-01	0.925
人工海水中 67%O ₂ 吹込み	8.2	30	2.594E-02	6.094E-03	2.075E-02	0.294
人工海水中 67%O ₂ 吹込み	8.2	90	7.327E-02	1.282E-01	2.284E-01	0.561
人工海水中 67%O ₂ 吹込み	8.2	180	3.234E-01	1.717E-01	1.299E+00	0.132
人工海水中 100%O ₂ 吹込み	8.2	30	1.125E-01	6.337E-02	2.613E-01	0.243
人工海水中 100%O ₂ 吹込み	8.2	90	1.351E-01	2.743E-01	6.128E-01	0.448
人工海水中 100%O ₂ 吹込み	8.2	180	2.952E-01	1.799E-01	9.150E-01	0.197
人工淡水中 大気吹き込み	8.5	30	2.393E-02	4.643E-02	1.482E-01	0.313
人工淡水中 大気吹き込み	8.5	90	7.795E-02	5.554E-02	6.237E-01	0.089
人工淡水中 大気吹き込み	8.5	180	6.960E-02	1.440E-01	7.448E-01	0.193
人工淡水中 67%O ₂ 吹込み	8.5	30	3.396E-02	5.260E-02	1.830E-01	0.287
人工淡水中 67%O ₂ 吹込み	8.5	90	4.820E-02	7.534E-02	2.107E-01	0.358
人工淡水中 67%O ₂ 吹込み	8.5	180	8.567E-02	6.674E-02	5.833E-01	0.114
人工淡水中 100%O ₂ 吹込み	8.5	30	2.362E-02	2.439E-02	1.171E-01	0.208
人工淡水中 100%O ₂ 吹込み	8.5	90	7.619E-02	7.903E-02	4.176E-01	0.189
人工淡水中 100%O ₂ 吹込み	8.5	180	1.002E-01	6.429E-02	4.894E-01	0.131
緩衝材+人工海水 大気吹き込み	8.2	30	3.792E-02	1.472E-02	2.956E-02	0.498
緩衝材+人工海水 大気吹き込み	8.2	60	5.337E-02	7.824E-02	1.707E-01	0.458
緩衝材+人工海水 大気吹き込み	8.2	90	1.962E-01	1.815E-01	1.084E+00	0.167
緩衝材+人工海水 大気吹き込み	8.2	180	2.620E-02	4.176E-01	1.508E+00	0.277
緩衝材+人工淡水 大気吹き込み	8.5	30	1.578E-02	1.475E-01	2.730E-01	0.540
緩衝材+人工淡水 大気吹き込み	8.5	90	4.199E-01	2.143E-01	9.165E-01	0.234
緩衝材+人工淡水 大気吹き込み	8.5	180	5.650E-01	1.317E-01	8.039E-01	0.164