

鋼板遮水システム最終処分場における鋼板の腐食因子と防食法に関する研究

廃棄物・有害物管理工学研究室 小林直樹
 指導教官 小松俊哉、藤田昌一、姫野修司

1. はじめに

現在、確実な遮水が行える埋立最終処分場が早急に求められている中、遮水材に鋼板を用いたシステムが開発されている。鋼板は水を全く通さない材料であるので信頼性は高いが、腐食が起こりうる。しかし、廃棄物中での腐食速度および防食効果についてはほとんど測定されていないのが現状である。そのため鋼板を遮水工として用いる場合、土中パイプラインや船体外板などで用いられている工法と同様の電気防食、塗装、腐食しるによる防食が必要と考えられる。腐食しるとは予め鋼板の腐食量を想定してその分の板厚を増しておく厚さのことで、これは全面平均腐食速度を参考に決定されるため、廃棄物中の腐食速度を正確に知る必要がある。

本研究では、廃棄物中における鋼板の腐食速度・腐食機構を把握すること、各種防食法の信頼性を確認することを目的とし、廃棄物中での腐食速度の把握、各種防食効果の確認（野外曝露試験）と廃棄物中での鋼板腐食の支配因子の解明実験（室内浸漬試験）を行った。

2. 野外曝露試験（腐食速度、塗装効果）

2.1 試験方法

本試験では、工業用水腐食性試験方法（JIS K 0100）を一部改変した方法を用いて3実験場に試験片の埋設を行った。埋設期間ごとの試験片保持装置に7種の試験片を3枚ずつ取り付け埋設する方法で行った。試験片の材質は遮水鋼板に用いるものと同じ一般構造用の圧延鋼材であるSS400であり、形状は平板と溶接板の2種類を用いた。図1に試験片形状を示す。試験片はブラスト処理により鋼板表面のさびや汚れを除去した後、表1に示す表面処理を施し試験を行った。

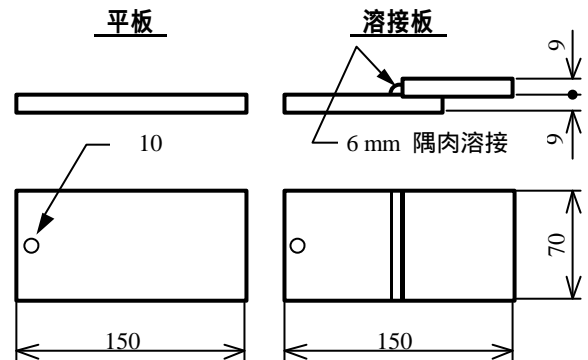


図1 試験片の形状（単位：mm）

表1 野外曝露試験における各種試験片の表面処理

	塗装タイプ	名称	塗装方法	工程	塗装系	膜厚 (μm)
未 塗 装 片	無防食試験片 (ブラスト処理のみ)	平板 B 溶接板 B	なし			
	ジンクリッチプライマー	平板 Z	スプレー塗り	第1層	無機ジンクリッチプライマー	15
塗 装 片	タールエポキシ樹脂 200 μm	平板 E2 溶接板 E2	スプレー塗り	第1層	無機ジンクリッチプライマー	15
				第2層	タールエポキシ樹脂塗料	100
				第3層	タールエポキシ樹脂塗料	100
	タールエポキシ樹脂 300 μm	平板 E3	スプレー塗り	第1層	無機ジンクリッチプライマー	15
				第2層	タールエポキシ樹脂塗料	100
				第3層	タールエポキシ樹脂塗料	100
ガラスフレーク	平板 G	スプレー塗り	第1層	有機ジンクリッチプライマー	15	
			第2層	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料	350	

2.2 試験条件

産業廃棄物の A 実験場と、焼却灰中の B、C 実験場において塗装片、未塗装片を深さ約 1 m の場所に埋設し、最長 37 カ月間の野外曝露試験を行った。また、A 実験場には浸出水調整槽についても試験片を浸漬した。各実験場の概要は表 2 に示す通りである。

表 2 野外曝露試験における各実験場の概要

	A 実験場 (産業廃棄物)		B 実験場	C 実験場
	第1,2,3地点	調整槽		
埋立内容物	燃え殻 (30%) 銹さい (30%) 汚泥 (30%) 煤塵 (5% 未満)	浸出水	焼却灰	焼却灰
降雨条件	自然降雨		定期散水 2 条件	自然降雨 1 条件
評価年数	6,12,24,37 カ月		4,8,32 カ月後	3,6,12,24 カ月後

2.3 評価方法

2.3.1 外観観察

本研究では、塗装片および未塗装片について、試験前と試験後の外観観察写真を比較し、さび、ふくれ、傷の発生を確認した。

2.3.2 塗装片の評価

塗装片は塗膜の劣化を調査するため付着力測定、インピーダンス測定、膜厚測定を行った。

・付着力 (アドヒージョン) 測定

端子 (ドーリー) を塗膜面に接着剤で接着し、垂直引張力のみによる引張試験を行い、塗膜を剥離させることにより、塗膜の付着力を求めた。

・インピーダンス測定

ポータブル形インピーダンスブリッジを用いた測定器により、各周波数 (0.2、0.5、1.0 kHz) における交流抵抗値と電気容量値を測定し、周波数に対する抵抗値や電気容量値の変化もしくは抵抗値の経時変化から塗膜の劣化度を評価した。

・膜厚測定

塗膜厚は塗料の性質や対象物の用途に合わせて設定されているが、塗膜厚の不足や過剰は腐食の原因となる。本実験では、付着力測定、インピーダンス測定による塗膜評価結果の検証のため膜厚測定を行った。

2.3.3 未塗装片の評価

未塗装片の評価は試験片を取り出し外観観察を行った後、腐食量により評価を行った。本研究では重量減測定法により、全面一様な腐食が起こると仮定したときの鋼材の減少厚を求めて腐食量とした。

前処理として酸洗浄法による腐食生成物の除去を行った。酸洗浄法は腐食抑制剤 (ヒビロン A-5S : スギムラ化学工業株式会社) を 0.5% 加えた塩酸溶液 15% に試験片を浸漬し、ナイロンブラシで 10 分間ブラッシングした後、蒸留水で洗浄し、アセトンで脱脂した。その後、電子天秤により試験片重量を 0.1 g まで測定し、埋設前に予め計測しておいた重量から差し引き重量減少を算出した。同時に空試験を行い、除去操作による試験片減量を補正した。なお、平板プラスチック片の空試験 (評価枚数 n=3) において重量減少は 0.0 g であり、ジンクリッチプライマー塗装片では、酸洗浄による塗装分の重量減少量が 1.1 g であった (試験片の重量は約 720 g)。腐食量は次式により計算し単位は mm で表した。腐食速度 (mm/year) は腐食量の経年データから原点を通る直線に近似したときの傾きとした。

$$\text{腐食量 } W (\text{mm}) = \frac{(M_0 - M_1) \times 10}{S \times d}$$

M_0 : 試験片の試験前の質量 (g) S : 試験片の表面積 (cm²)

M_1 : 試験片の試験後の質量 (g) d : 試験片の密度 (g/cm³)

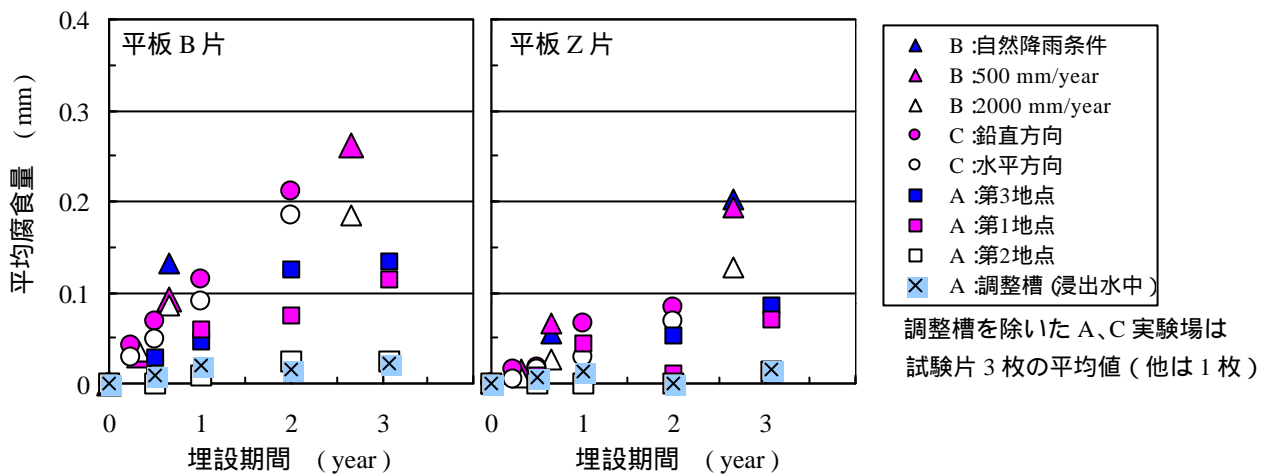


図2 野外曝露試験における平板 B、Z 片の腐食量の経時変化

2.4 結果と考察

最大 37 ヶ月間の野外曝露試験での平板 B、Z 片の経時変化を図 2 に示す。この結果、腐食量は廃棄物中でも特に焼却灰中において埋設方向、降雨条件に関わらず大きくなった。そこで焼却灰中の結果を合わせて全面平均腐食速度を求めたところ約 0.10 mm/year となった。平板 Z 片は亜鉛の防食効果により腐食速度は低くなった。また、溶接部に関しては一般部（平板）と同様の腐食形態であった。

廃棄物中での腐食因子の検討を行った結果、廃棄物水分中の塩化物イオン、pH、溶存酸素（DO）による影響が推測された。焼却灰中で腐食速度が大きくなった原因としては可溶性塩類を多量に含有していること、および地表付近の埋設のため、空隙が多く通気性も比較的良好ことから、鋼板表面付近の水分中の酸素濃度（DO）が高くなることが予想された。

また、塗装の防食性能については付着力測定、インピーダンス測定、膜厚測定の塗膜評価試験を行った結果、物理的損傷を受けた部分以外は試験期間を通して塗膜の劣化は全く認められず健全であった。

3. 電気防食試験

3.1 試験方法

電気防食とは被防食体（鋼材）に電流を流して腐食を防止する方法で、局部腐食に対しても有効である。本研究ではカソード防食法の流電陽極法（マグネシウム合金陽極）を用いた。

図 3 のように鋼板（プラスト処理のみ未塗装片）とマグネシウム合金陽極を電氣的に接続することでマグネシウム合金陽極からケーブルを通過して鋼板に電子が供給され鋼板が防食される。

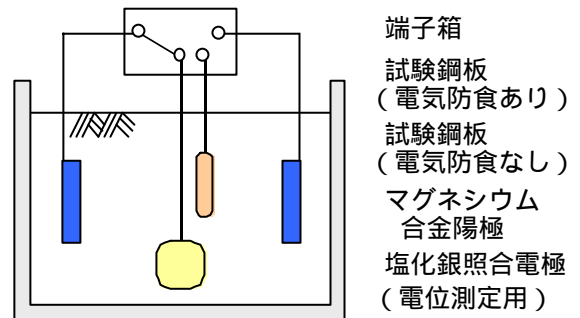


図3 電気防食試験の模式図（焼却灰中）

3.2 試験条件

電気防食試験については、腐食量調査で最も腐食の大きかった焼却灰中で行うこととし、B 実験場の（年間降雨量 1000 mm/year で散水）にて実施した。試験片はプラスト処理のみを行った平板 B 片を用いた。埋設期間は 4 ヶ月と 8 ヶ月の 2 回で、1 回の測定で電気防食あり、電気防食なしの試験片をそれぞれ 4 枚ずつ取り出して評価を行った。

3.3 評価方法

用いた試験片は平板 B 片のみであるので、野外曝露試験と同様の外観観察と腐食量測定を行った。

3.4 結果と考察

電気防食試験を行った結果を図 4、5 に示す。図 4 は試験開始後 8 ヶ月経過後の外観観察写真、図 5 は埋設期間 4、8 ヶ月の腐食量測定結果である。その結果、電気防食を行うことで明らかな防食効果が確認され、平均腐食速度は 0.01 mm/year となり、電気防食を行わない場合の 1/10 となった。このことから、塗装や電気防食は廃棄物中においても問題なく、長期間にわたって防食効果を発揮することが確認された。

4. 室内浸漬試験（腐食因子の把握）

4.1 実験方法

野外曝露試験で推測された DO、焼却灰、塩化物イオン濃度、pH による影響検討のため、処分場内で起こりうる条件を設定した試験水を用い図 6 に示す 2 種類の試験装置を用いた未塗装鋼板（70×50×9 mm）による 1 年間連続の腐食試験を行った。

4.2 実験条件

実験条件は大きく分けて低 DO 系（DO 0~2 mg/l）と高 DO 系（DO 4~5 mg/l）があり、それぞれについて焼却灰、塩化物イオン（Cl⁻）濃度、pH の影響を調べるための試験を行った（図 7）。各影響因子設定の際に基準としたのが焼却灰影響試験で、Cl⁻濃度影響試験の pH と、pH 影響試験の Cl⁻濃度をそれぞれ焼却灰影響試験の試験水中をほぼ同じになるように調整した。なお、焼却灰中の pH は試験期間中、空気中の二酸化炭素による中和が起こり、試験開始直後 pH11 であるものが徐々に低下していくため、Cl⁻濃度影響試験の pH もそれに合わせて調整した。試験水は週 2 回 pH と DO の測定と調整を行い、また、1 ヶ月ごとに試験水および焼却灰の交換を行った。

用いた焼却灰はストーカ炉式のごみ焼却処理施設より排出された一般廃棄物の焼却灰（主灰）である（表 3）。本試験では焼却灰を大量に用いるため同施設から 2 回収集して用いた。このため、試験途中で異なる焼却灰を用いることになったが、Cl⁻濃度、pH はほぼ等しかった。表 4 に焼却灰の性状（環境庁告示 13 号法による溶出試験値）を示す。

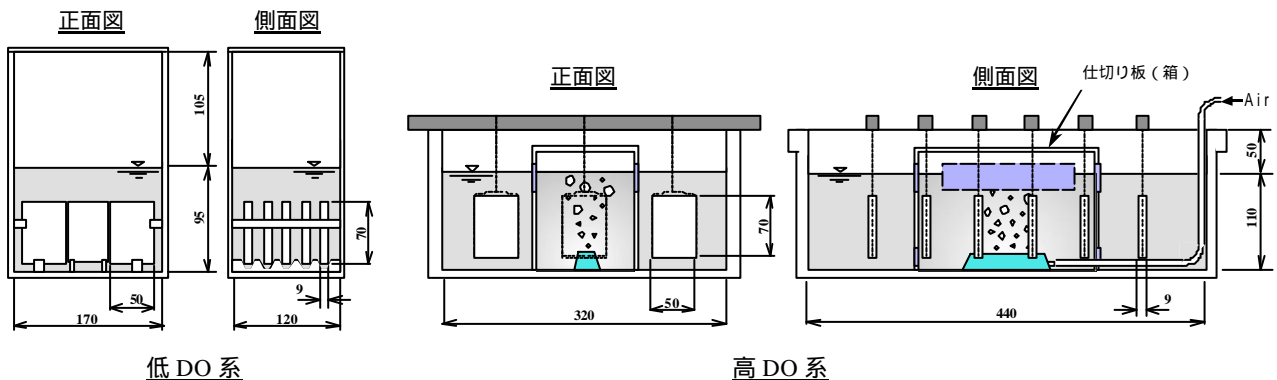


図 6 室内浸漬試験装置の概要（単位：mm）



図 4 電気防食試験における外観写真（平板 B 片、150×70×9 mm）

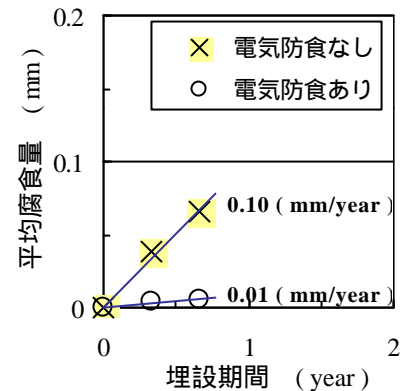


図 5 電気防食試験における平均腐食量結果（各プロットは 4 枚の平均値）

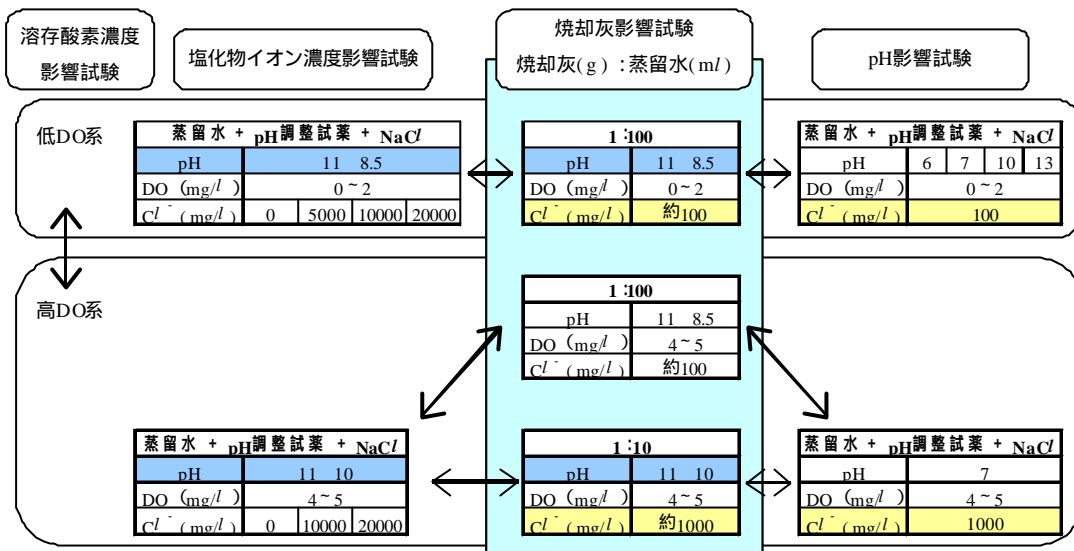


図7 室内浸漬試験の設定条件 (Cl⁻濃度調整はNaCl、pH調整はHNO₃、NaOH)

なお、焼却残渣のうち焼却飛灰は、塩化物イオンや重金属などが高濃度に含まれており、鋼板腐食に大きく影響を与えると予想されるが、焼却飛灰は特別管理一般廃棄物の指定を受けているため、何らかの中間処理をしなければ一般廃棄物処分場に搬入されることはないため用いなかった。

4.3 評価方法

ブラスト処理のみの未塗装片であるので2.3に示した外観観察、腐食量測定を行った。試験片サイズが小さいことから(重量約230g)腐食量測定時の酸洗浄時間を3分に短縮した。

4.4 結果と考察

4.4.1 外観観察結果

各試験条件12ヵ月間浸漬後の外観写真を図8に示す。

4.4.2 腐食量測定結果

低DO系では各条件(塩化物イオン濃度、pH、焼却灰)に関わらず全て0.04mm/year程度の低い腐食速度となった。一方、

高DO系では塩化物イオンを多量に含有する条件において明らかに腐食速度が大きくなった。最も腐食速度が大きかったのは塩化物イオン10000mg/lの条件で0.15mm/yearの腐食速度であった(図9)。

室内浸漬試験の結果から鋼板腐食に最も影響を与える因子は溶存酸素であり、溶存酸素の存在する場合のみ塩化物イオンが腐食に影響を与えることが示唆された(図10)。

また、焼却灰影響試験からは焼却灰によって鋼板腐食が促進されないことがわかった。逆に、焼却灰量が多い条件では鋼板腐食が抑制されていた。これは、鋼板表面に生成した白い付着物が鋼板と試験水との接触を妨げることで腐食を抑制したためと考えられる。この物質を採取し、粉末X線回折分析を行った結果炭酸カルシウムであることがわかった。このことから、焼却灰の条件では塩化物イオンの影響よりも、炭酸カルシウムによる表面保護の腐食抑制があることが明らかになった。

表3 室内試験で用いた焼却灰の焼却施設概要

焼却炉	燃焼形式 焼却能力 炉内温度	ストーカ式燃焼炉 160t/24h 930以上
集塵装置	形式 アルカリ剤	バグフィルター 消石灰
ごみの種類		分別収集した 一般廃棄物可燃分 (汚泥も若干含む)
灰発生量	主灰 飛灰	10% 5%

表4 室内試験で用いた焼却灰の性状(環境庁告示13号法)

	室内試験用焼却灰	
	No.1	No.2
Cl ⁻ (mg/l)	797	845
pH (-)	11.61	11.61

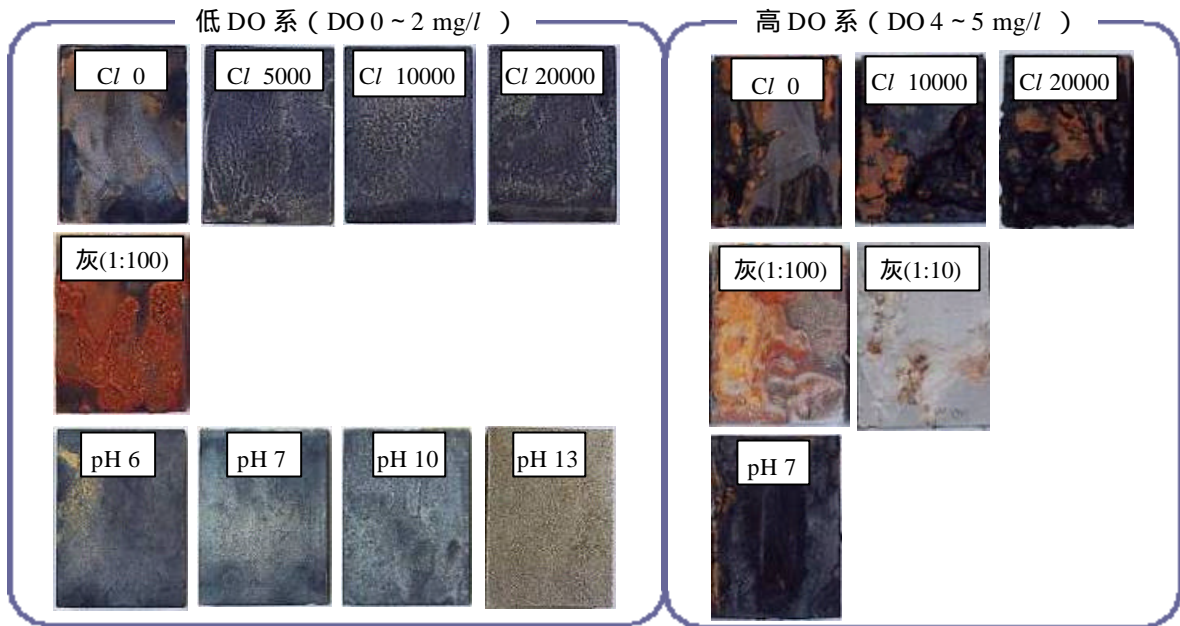


図 8 各条件における 12 ヶ月間浸漬後の外観写真（さび取り前）

材質：SS400。プラスト処理鋼板：70×50×9 mm
週 2 回 pH, DO 調整、毎月試験水を交換、室温で静置

5. 結論

本研究において廃棄物中における鋼板腐食は、焼却灰中において最も進行し、平均腐食速度は 0.10 mm/year であった。また、その最大の腐食因子は鋼板と接する焼却灰中の水分に含まれる溶存酸素であることが示唆された。一方、室内実験から最大の平均腐食速度は 0.15 mm/year 程度であり、その条件は埋立処分場内で起こりうる鋼板腐食にとって最も過酷な条件ではないかと予想される。

これらのことから、平均全面腐食速度として 0.10 mm/year を用いることは十分信頼性があると思われる。さらに、廃棄物中でも塗装や電気防食は極めて有効であることが確認されたことから、それらの併用を行えば、設計耐用年数まで信頼性の高い遮水機能が保たれると考えられる。

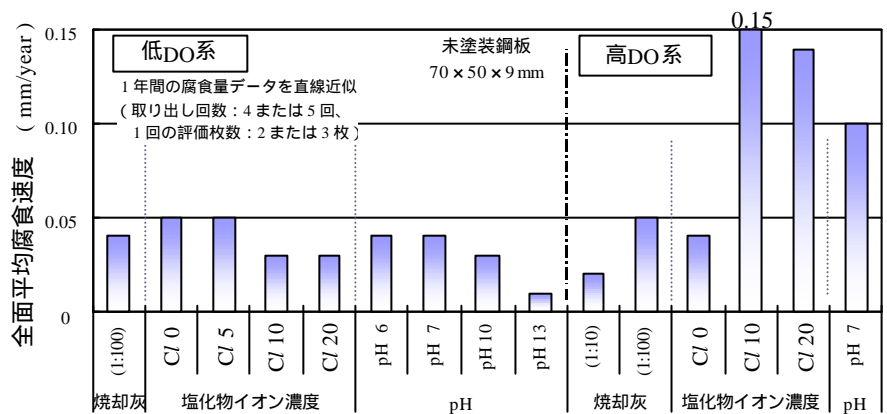


図 9 室内浸漬試験における各条件の年間平均腐食速度

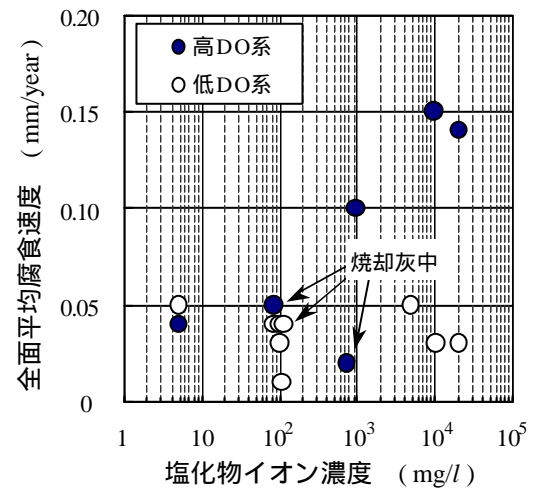


図 10 室内浸漬試験における塩化物イオン濃度と腐食速度との関係