

(46) 廃棄物最終処分場における遮水鋼板の防食法に関する検討

Study on the Corrosion Protection of the Steel Plate Liner in Landfill Sites

小林 直樹\*, 小松 俊哉\*, 姫野 修司\*, 吉村 有希子\*\*, 小高 直\*\*\*

Naoki KOBAYASHI\*, Toshiya KOMATSU\*, Shuji HIMENO\*, Yukiko YOSHIMURA\*\*, Tadashi ODAKA\*\*\*

ABSTRACT: Environmental safety of the landfill sites is now highly requested. In this viewpoint, a new type landfill sites called as 'steel plate liner system' is now developed. Steel plate is used as the liner facility instead of the conventional rubber sheets. However, the corrosion of the steel plate can take place in the system. Especially, the corrosion of the inside steel plate is feared because waste or leachate is touching to the inside. Corrosion margin should be adopted as the protection method. In this method, the corrosion rate of steel plate until reclaimed waste reaches stable is estimated and the board thickness is determined in advance. However, no data has been reported about the corrosion rate of steel plate in landfill sites. In this study, the corrosion rate of a non-painted steel plate was measured and the performance of various types of painting for protection was checked by landfill site exposure tests. The required board thickness was determined by using the maximum value of annual corrosion rate of the non-painted piece in view of safety.

KEYWORDS: landfill site, steel plate liner, corrosion protection, corrosion margin, exposure tests

1. はじめに

廃棄物は、資源化または再利用される場合を除き、最終的には埋立処分されている。しかし、国土が狭く人口密度の高い我が国において、最終処分場の確保は困難になってきている。加えて最終処分場の安全性への不信から、その建設に対して住民の同意が得られないといった問題がある。

そこで、安全性の確保された最終処分場が求められる中で、処分場に屋根等の覆いをかけ、外部との環境から遮断するクローズドシステム処分場が注目されている。このような処分場で、かつ遮水材として従来使用されているゴムシートの代わりに鋼板を用いた新しい管理型最終処分場（鋼板遮水システム）の開発が行われている<sup>1,2)</sup>。その概念図を図1に示す。遮水工に鋼材を用いた場合、強靱で漏洩しない構造を構築できるが、一方で、埋立物や浸出水、または地下水等による遮水鋼板の内外面の腐食による鋼板の貫通が懸念される。そのため、土壌と接している遮水鋼板の外面に

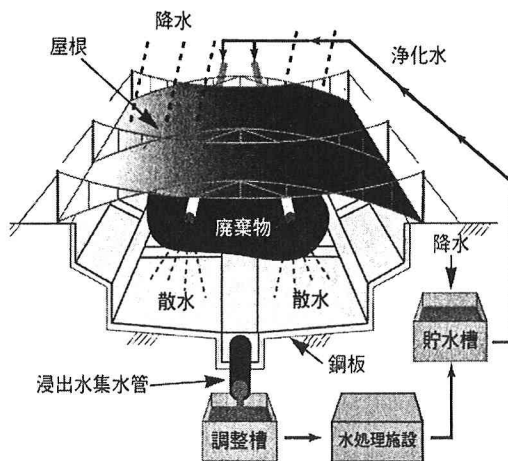


図1 鋼板遮水システムの概念図

\* 長岡技術科学大学 (Nagaoka Univ. of Tech.)  
 \*\* 日進化成(株) (Nisshin-Kasei Corporation)  
 \*\*\* (株)横河ブリッジ (Yokogawa Bridge Corporation)

については、土壌中の腐食代で防食を行い、廃棄物と接する内面については、塗装および腐食代により防食を行うなどの対策が必要である。腐食代とは、使用中の腐食によって失われることを予想してその分だけ増しておく厚さ（JIS Z 0103 防食用語）と定義されている。一般に腐食代は炭素鋼や低合金鋼の全面平均腐食量を参考にして経験的に決められており、土中では年間  $0.02\text{mm}^{3,4)}$  である。しかし、廃棄物中における鋼板の腐食量および塗装の効果についてはこれまで知見がない。

本研究では、複数の実処分場等において最長2年間の遮水鋼板の野外暴露実験を実施し、塗装による防食の有効性を調べることで、鋼板の腐食代設定に必要な腐食量を測定すること、さらに腐食因子について検討することを目的とした。

## 2. 野外曝露実験の方法

### 2.1 試験片

#### (1) 形状および寸法

本研究では、図2に示す2種類の形状の試験片を用いた。1)は一般部を対象とした平板であり、2)は遮水鋼板同士をつなげた重ね溶接継ぎ手部分を想定した溶接板である。平板は後述する5種類の表面仕上げ全てを、溶接片は未塗装片とエポキシ樹脂  $200\mu\text{m}$  塗装片の2種類を用いた。

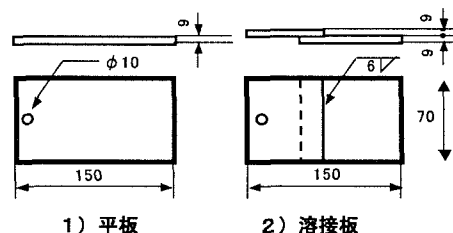


図2 試験片の形状

#### (2) 材質

試験片の材質は、遮水鋼板の指定建築材料である一般構造用圧延鋼材 SS400 (JIS G 3101) とした。なお、本鋼材は、橋、建築、船舶、車両その他の構造物にも広く用いられている。

#### (3) 表面仕上げ方法

本研究では、実験に用いる試験片に予めブラスト処理を施したのち、試験片に対して表1に示すような表面処理を行った。ブラストとは、砂（サンド）、小鋼球（ショット）などの研掃材を圧縮空気や遠心力で鋼材にたたきつけて鋼材のさびを除去し、清浄な鋼材面にする前処理方法の一つである<sup>5)</sup>。この表面状態の試験片の他に、亜鉛粉末を塗布した短期防錆用のショッププライマー塗装片、および3種類の重防食塗料を施した塗装片<sup>6)</sup>を用いた。

#### (4) 初期計測方法

埋設前に、未塗装片（プラスト片）およびショッププライマー塗装片については、試験片表面の汚れを除去した後、記号をつけた。次に試験片の寸法を  $0.1\text{mm}$  まで測定して、全表面積を算出した。その後、試験片を水洗いし、メタノールによる脱水、次いでアセトンによる脱脂を行い、乾燥後、試験片重量を  $0.1\text{mg}$  まで測定した。また、外観の写真を撮影した。

塗装片である、エポキシ樹脂  $200\mu\text{m}$  塗装片、エポキシ樹脂  $300\mu\text{m}$  塗装片、ガラスフレーク樹脂塗装片については、後述する膜厚測定、アドヒージョン試験、インピーダンス試験を行い各塗装片の初期値を求めた。その後、カッターで試験片に素地まで達する傷（クロスカット）を対角線にいれ、この部分からの腐食の状況も確認することとした。

### 2.2 試験片設置場所の状況

表1 試験片の種類

塗装タイプ	仕様番号	工程	塗装系	膜厚 ( $\mu\text{m}$ )
未塗装片 (プラスト片)	B	---	---	---
ショッププライマー	Z	第1層	無機ジंकリッチプライマー	15
タールエポ $200\mu\text{m}$	E2	第1層	無機ジंकリッチプライマー	15
		第2層	タールエポキシ樹脂塗料	200 (100×2)
		第3層	無機ジंकリッチプライマー	15
タールエポ $300\mu\text{m}$	E3	第1層	無機ジंकリッチプライマー	15
		第2層	タールエポキシ樹脂塗料	300 (100×3)
		第3層	無機ジंकリッチプライマー	15
		第4層	無機ジंकリッチプライマー	15
ガラスフレーク	G	第1層	有機ジंक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

鋼板の腐食状況は環境によって変わるため、野外曝露試験も種々の環境下で実施することで実用的なデータを得ることができる。本研究では、産業廃棄物最終処分場（A実験場）と、同一の焼却灰の埋立を行った鋼板遮水システムの実証プラント（B実験場）と最終処分場（C実験場）の計3ヶ所に未塗装片及び各種塗装片を埋設し、最長2年間の野外曝露実験を行った。A実験場では、異なる3ヶ所の地点に埋設した。各実験場での試験片の埋設設定を表2に示す。試験片は、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、試験片保持装置に埋設期間ごとに取り付け、各曝露試験場の地中深さ約1mの場所に埋設した。また、試験片埋設環境を調査するため、試験片を埋設した各地点から埋立内容物を採取した。採取した試料は、環境庁告示13号法の埋立処分に係る試験法に基づき溶出試験を行い、溶出液をICP等により測定した。さらに、B、C実験場については焼却灰の土壌抵抗率を測定した。その結果、抵抗率は200～2000Ω・cmと低かったことから、一般土壌と比較して腐食性が高い<sup>7)</sup>と予想された。

表2 試験片の埋設設定

実験場名	産業廃棄物最終処分場			実証プラント		一般産業廃棄物最終処分場	
	A			B		C	
設置地点	A-a	A-b	A-c	—		—	—
埋設方向	鉛直			鉛直		鉛直	水平
n数	3	3	3	3		3	3
埋立内容物	燃え殻(30%)、鋸ざり(30%) 汚泥(30%)、煤塵(5%未満)			焼却灰		焼却灰	
評価年数	6、12、24ヵ月後			4、8ヵ月後		3、6、12ヵ月後	

に埋設した。各実験場での試験片の埋設設定を表2に示す。試験片は、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、試験片保持装置に埋設期間ごとに取り付け、各曝露試験場の地中深さ約1mの場所に埋設した。また、試験片埋設環境を調査するため、試験片を埋設した各地点から埋立内容物を採取した。採取した試料は、環境庁告示13号法の埋立処分に係る試験法に基づき溶出試験を行い、溶出液をICP等により測定した。さらに、B、C実験場については焼却灰の土壌抵抗率を測定した。その結果、抵抗率は200～2000Ω・cmと低かったことから、一般土壌と比較して腐食性が高い<sup>7)</sup>と予想された。

### 3. 試験片の評価方法

#### 3.1 外観観察

塗膜調査において外観観察は重要視されている<sup>5)</sup>。本研究では、塗装片および未塗装片について、試験前の外観観察写真との比較で、さび、ふくれ、傷の発生を調べた。

#### 3.2 塗装片の評価

##### (1) 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。

##### (2) 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（通常0.2、0.5、1.0 kHz）における並列等価抵抗と並列等価容量を測定し、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。

##### (3) 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。本研究では、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。

#### 3.3 未塗装片およびショッププライマー塗装片の評価

##### (1) 腐食量測定

試験片を試験片保持器から取り外した後、酸洗浄法により腐食生成物を除去し、試験片重量を0.1 mgまで測定した。酸洗浄は、試験片を腐食抑制剤（インヒビター）を0.5%加えた塩酸溶液15%に浸漬しながら、ナイロンたわしで10分間ブラッシングした後、蒸留水で洗浄し、アセトンで脱脂する方法で行った。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、未塗装片の空試験において重量減少はなかった。ショップ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1.1gであった。（試験片の全重量は約720gである。）腐食量は次式によって求められ、mmまたはmm/yearの単位で整理した。

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

$M_0$  : 試験片の試験前の質量 (g)     $M_1$  : 試験片の試験後の質量 (g)  
 $S$  : 試験片の表面積 (cm<sup>2</sup>)         $d$  : 試験片の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

(2) X線回折法による腐食生成物の評価

遮水鋼板の腐食原因調査のため、腐食生成物の構造の同定を、X線回折法（理学電気製 X線分析装置 RAD-2D）を用いて行った。腐食生成物として、ワイヤブラシでかき落とされる浮き錆を対象とした。

4. 結果および考察

4.1 外観観察

5種類の試験片の外観観察を行った。プラスト片（B片）およびシヨッププライマー塗装片（Z片）の場合、図3のB実験場での例に見られるように、埋設8ヶ月後のB片では錆および焼却灰が水分を含んで固まったスケールが付着しており、外観から腐食の状況は埋設4ヶ月後の試験片より激しくなっていることがわかった。また、4ヶ月後、8ヶ月後ともに、孔食を伴う腐食状態であったことも確認された。Z片にも同様の錆が付着していたが、B片に比べるとその付着量は少なく、白っぽいジンクリッチプライマー塗装が確認できた。A実験場では、試験片取り出し直後のB片の表面にはごつごつとした錆が付着していた。この錆はブラシでこすると、はがれる浮き錆がほとんどであった。錆の付着は、A-c地点で最も多く、次いでA-a地点、A-b地点の順番であった。Z片にも同様の錆が付着していたが、B片に比べるとその付着物は少なかった。

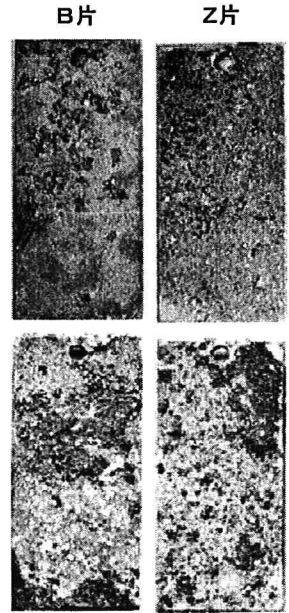


図3 B処分場における外観変化（B片、Z片）

一方、3種類の塗装片（E2, E3, G）であるが、埋設12ヶ月まで外観から塗装の変化は見られなかったが、クロスカット部に錆の発生が確認された。A実験場において、6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月の埋設を行った試験片の外観観察写真を図4に示す。埋設2年後にはクロスカット部付近にふくれが発生しており、埋設時間の経過にしたがって、塗装劣化の進行が確認された。

溶接板に関しては、溶接部分も他と同様な腐食形態であったことが確認された。

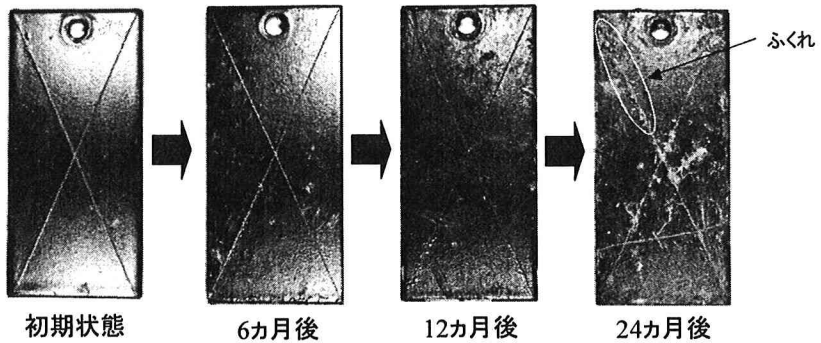


図4 A-c地点における塗装片の外観変化（E2片）

4.2 塗装片の評価

図5にA実験場の各地点におけるE2片の付着力測定結果を示す。この結果より、6、12、24ヶ月後の付着力は、初期の付着力より上昇している。これは、塗膜が十分に硬化する前に初期値の測定を行ったためであると考えられる。充分硬化していないまま埋設を行ったものの、周囲の環境には塗膜の硬化を妨げるものが無く、6ヵ月後の付着力は初期値より上昇したと考えられる。なお、付着力は、いずれも2MPa以上を示し、塗膜に異常は認められなかった。また、他の実験場に埋設したいずれの塗装片についても同様の結果であった。

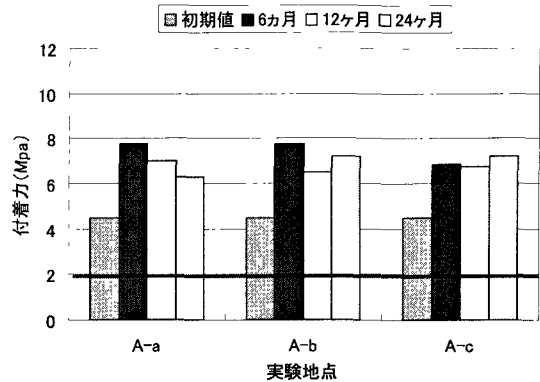


図5 付着力測定結果 (A実験場、E2片)

図6にA-c地点におけるE2片のインピーダンス測定結果を示す。評価方法として、抵抗値は斜線より上、容量値は0.03 nF以下の値であれば、塗膜は防食性能を保っていると考えられていることから、廃棄物中においても塗膜は劣化していないことがわかった。また、他の実験場に埋設したいずれの塗装片についても同様の結果であった。また、膜厚測定を行った結果、すべての試験片において設定膜厚を保っていた。

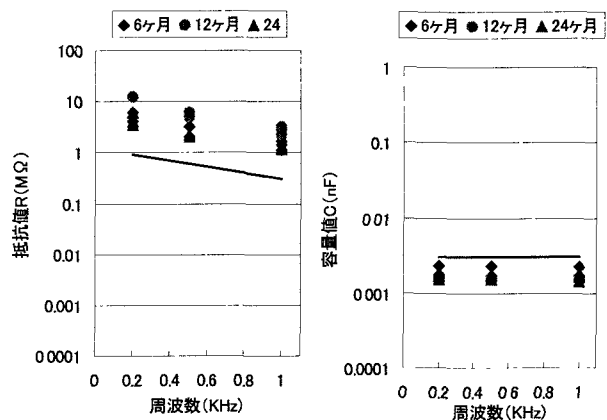


図6 インピーダンス測定結果 (A-c地点、E2片)

以上の結果より、いずれの塗装片についても試験期間を通して塗膜は劣化しておらず防食効果が確認された。しかし、外観観察の結果、塗膜上のクロスカット部、傷の発生地点からは、ふくれおよび腐食が確認された。傷等の物理的要因によって塗装の防食性能が低下した場合は腐食代による防食を行うことから、未塗装片(プラスチック材)およびショッププライマー塗装片の腐食量を調査する必要がある。

#### 4.3 未塗装片およびショッププライマー塗装片の腐食量

図7に各実験場におけるB片およびZ片の腐食量測定を行った結果を示す。なおn数は3で、結果は平均値を示した。B片では、全ての実験場において埋設期間の増加とともに腐食量が増加していることが確かめられた。一方、Z片の場合、B、C実験場では埋設期間とともに増加したが、A実験場では地点によっては見かけ上腐食量が減少していた。埋立廃棄物あるいは埋立環境の僅かな違いが影響していると考えられるが、原因を特定することはできなかった。ただし、A実験場のZ片の結果は全て低い値である。

腐食量のデータから、最小二乗法によって原点を通る回帰直線を得た(図7に示した直線)。その直線の傾きより求めた年間腐食速度を表3に示す。なお、ここでは便宜上、A実験場のZ片のデータについても直線回帰を行った。また、C実験場において、試験片を鉛直、水平の2方向に埋設したが、埋設方向による腐食量に差はなかったため、埋立廃棄物が等しいB実験場の結果も併せて算出した。この結果から、産業廃棄物中(A実験場)に埋設した鋼板よりも焼却灰中に埋設した試験片の腐食速度が高かったことがわかる。A実験場での腐食量は、地点によっては一般土壌中の腐食量よりも低かった。年間腐食速度は最大で0.12 mm

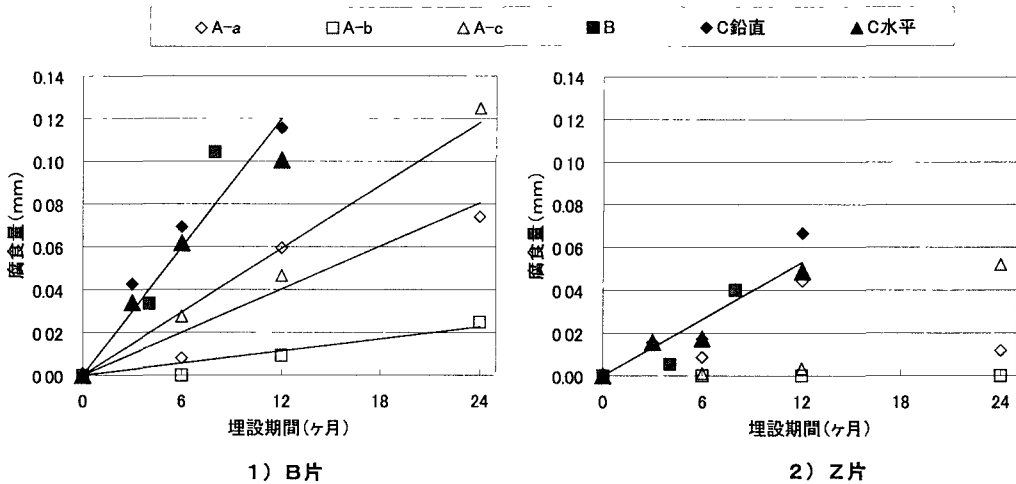


図7 各実験場における腐食量の経時変化

であり (B, C実験場), 海中での年間腐食速度  $0.1 \text{ mm}^{\text{a}}$  に近いものであった。一方, 初期の防食効果 (屋外曝露期間 6 ヶ月程度)<sup>b</sup> がある Z 片の腐食量は, B 片に比べ少なく, ほとんど腐食していないか, 腐食していても, 最大で  $0.05 \text{ mm/year}$  であった。このことから, 遮水鋼板ヘジクリッチプライマーを塗布する程度でも防食効果が十分あることが確認できた。

表3 各実験場における年間腐食速度

	埋設地点 (mm/year)			
	A-a	A-b	A-c	B,C
B 片	0.04	0.01	0.06	0.12
Z 片	0.01	0.00	0.02	0.05

#### 4.4 腐食因子の検討

表4に試験片埋設地点の埋立廃棄物の溶出試験結果を示す。これより, A実験場の異なる地点に埋設した鋼板腐食量は pH が低いほど増加していることがわかった。鋼板の腐食は, pH7 以上のアルカリ水溶液中では鋼表面に耐食性の良い不動態膜が形成されるため, 腐食が抑制される<sup>9)</sup>。この傾向は pH の上昇とともに大きくなる。このことから, A実験場の各地点および, B, C実験場における鋼板の腐食には pH が大きく影響していると考えられる。しかし, B, C実験場における鋼板の腐食量は, A実験場の鋼板の腐食量より大きい。そこで, pH 以外の要因として考えられるのは, 金属の不動態膜に侵入して皮膜を破壊することでさびの発生の重大な原因となる塩化物イオン<sup>10)</sup>と, 腐食反応には不可欠な溶存酸素である。B,

表4 溶出試験の結果

	A実験場			B,C実験場
	A-a地点	A-b地点	A-c地点	焼却灰
Hg	N.D	N.D	N.D	N.D
Cd	N.D	N.D	N.D	N.D
Pb	N.D	N.D	N.D	0.06
Cr	0.005	0.006	0.006	0.011
Se	N.D	N.D	N.D	N.D
As	N.D	N.D	N.D	N.D
Zn	N.D	N.D	N.D	N.D
Cu	0.013	0.029	0.003	0.447
K	11.0	6.2	0.7	278.9
Na	7.9	4.6	3.1	463.3
Al	0.15	0.09	0.13	0.49
Ca	38.9	79.2	19.1	53.5
Mg	6.9	0.4	6.8	15.5
Fe	N.D	N.D	N.D	N.D
Cl <sup>-</sup>	0	0	0	1495
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	108	92	17	510
pH	9.7	11.2	8.1	8.24

N.D 検出限界未満

C実験場では塩化物イオンの値が高い。一方, A実験場は, 汚泥などの有機物を含む埋立廃棄物中に試験片を埋設していることから, 無機系の焼却灰中よりも溶存酸素が消費されている可能性が高い。従って, B, C実験場で腐食量が大きい要因として, 塩化物イオンと溶存酸素も影響していると考えられる。

A実験場の各地点において、6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月埋設を行ったB片、およびZ片について、腐食原因を把握するため、腐食生成物をX線回折により分析した。また、C実験場で12ヶ月の埋設を行った試験片についても同様に測定を行った。A実験場に埋設していた試験片の腐食生成物について、埋設地点ごとに違いはなく、主な結晶質成分は $\text{SiO}_2$ と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ であった。C実験場においては、 $\text{SiO}_2$ と $\text{FeSiO}_2$ が検出された。試験片に付着している成分のうち、灰(土)と、錆成分を分離して分析することは非常に困難であり、検出された $\text{SiO}_2$ は灰又は土成分の結晶であると考えられる。C実験場で検出された $\text{FeSiO}_2$ は灰のSi成分と鉄が結合して、結晶化したものと考えられる。しかし、例えば、硫酸塩還元菌(SRB)による腐食が起こった場合に検出される $\text{FeS}$ のように、腐食原因を明らかにするような特徴的な腐食生成物を確認することはできなかった。

#### 4.5 必要板厚の試算例

以上の結果から、より安全側な鋼板の設計を考え、焼却灰中における未塗装片の年間腐食速度を用いて遮水鋼板の必要板厚を試算してみる(図8)。

$$\text{必要板厚 } T = t_1 + t_2 + t_3 = 2.3 + (0.02 + 0.12) \times X$$

{

$t_1$  (内面): 埋立廃棄物に対する年間腐食速度 (0.12 mm) × 安定化年数 (X)

$t_2$ : 構造上必要な板厚 = 2.3 mm<sup>1)</sup>

$t_3$  (外面): 土壌に対する年間腐食速度 (0.02 mm) × 安定化年数 (X)

ここで重要となるのが最終処分場の安定化年数である。これは、処分場を考える上では、処分場の遮水設備・水処理施設を廃止できるまでの年数を指すとも考えられる。しかし、埋立廃棄物の種類も変化しており、また長年にわたるデータ収集やその分析が困難であり、さらに安定化の目標をどの程度に置くのかによっても大幅に異なるため<sup>1)</sup>、この年数は明確には定まっていない。そこで、仮に $X=25$ とした場合、必要板厚は5.8 mmと算出される。ただし、用いた埋立廃棄物に対する年間腐食速度は、12ヶ月間の短期実験結果に基づいたものであるため、さらに信頼できる値を得るために、より長期間の腐食量の調査を行う必要があると考えられる。

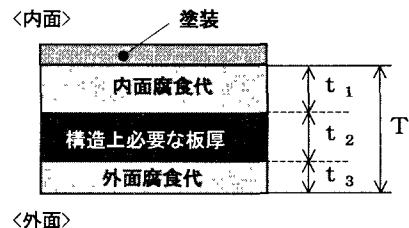


図8 必要板厚の算出方法

#### 5. 結論

複数の実処分場等において最長2年間の遮水鋼板の野外暴露実験を実施し、塗装による防食の有効性、腐食量、および腐食因子について検討した。本研究の主な結論は以下のようになる。

- 1) 廃棄物中においても、塗装による防食性能が十分に保たれることが確認された。
- 2) 物理的要因によって傷等が生じた場合に塗装の防食性能が低下する可能性があるため、遮水鋼板の防食仕様として塗装と腐食代を併用することが望ましいと考えられる。
- 3) 腐食代の設計において有用なデータとなる埋設初期の腐食速度を得ることができた。
- 4) 焼却灰中に埋設した試験片の腐食量が大きかったことから、遮水鋼板の主な腐食因子として溶存酸素や塩化物イオンが考えられる。

今後、遮水鋼板システムの必要板厚をより安全で確実に設計するためには、より長期間の腐食量の調査、および実際の鋼板の埋設環境における腐食因子の調査が必要であると考えられる。さらに、鋼板の腐食は孔食を伴う腐食形態であったことから、それに対するより確実な対策として電気防食も併用することが望ましいと考えられ、廃棄物中における電気防食の効果を検討する必要がある。

## 謝辞

本研究は鋼板遮水システム研究会（花嶋正孝会長）のご協力の元に行うことができました。ここに同研究会の各位に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 鋼板遮水システム研究会：平成 12 年度 鋼板遮水システム技術検討会報告書（2000）
- 2) 秋元耕一郎：鋼構造による廃棄物のストック・埋立施設に関する提案，産業立地，2，48-52（2000）
- 3) 鋼管杭協会：防食ハンドブック（1998）
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針（1988）
- 5) 社団法人 日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック（1996）
- 6) 社団法人 日本塗料工業会：重防食塗料ガイドブック（1995）
- 7) 腐食防食協会：防食技術便覧，日刊工業新聞社（1980）
- 8) 日本防食技術協会：防錆技術学校教科書
- 9) 腐食防食協会：金属防食技術便覧，日刊工業新聞社（1977）
- 10) H.H. Uhlig, R.W. Revie：Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc., New York (1985)
- 11) 田中信寿：環境安全な廃棄物埋立処分技術，廃棄物学会誌，10，118-127（1999）