

溶融亜鉛めっきの耐食性

亜鉛めっき鋼構造物研究会

目 次

	頁
1. 溶融亜鉛めっきの耐食性の特徴・・・・・・・・・・	1
2. 亜鉛めっき皮膜の推定耐用年数の計算方法・・・・・・・・	2
3. 大気中における耐食性・・・・・・・・・・	3
4. 海岸地域での亜鉛めっきの耐食性・・・・・・・・	5
5. 海水中の耐食性・・・・・・・・・・	7
6. 水中の耐食性・・・・・・・・・・	10
7. 農畜産施設における亜鉛めっきの耐食性・・・・・・・・	12
8. 土壌中の亜鉛めっきの耐食性・・・・・・・・	13
9. 原油中における亜鉛めっきの耐食性・・・・・・・・	15
10. 亜鉛めっき鉄筋の耐食性・・・・・・・・	16

溶融亜鉛めっきの耐食性

1. 溶融亜鉛めっきの耐食性の特徴

鉄をさびから守る方法として、溶融亜鉛めっき（以下亜鉛めっきという）は防食性能に優れ、最も経済的であるとして広い分野で採用されるようになりました。しかし、亜鉛めっきの耐食性は環境や使用条件によって大きく変化しますので、この点を十分に知っておくことが大切です。

(1) 保護皮膜作用

亜鉛めっき表面に緻密なさびの薄膜が生成しこの緻密なさびの薄膜が強力な保護皮膜となって、その後の腐食が進行しにくくなります。

これを鉄素地と比較すると図1のようになります。

	亜鉛の場合	鉄の場合
素地	Zn	Fe
さびが生成	さび($ZnO + Zn(OH)_2$) Zn (緻密なさびの薄膜が生成)	さび(Fe_2O_3) Fe (粗なさびが生成)
さびが生成後	さび($ZnO + Zn(OH)_2$) Zn (緻密なさびの薄膜が保護被膜となっている)	さび(Fe_2O_3) Fe (鉄さびは保護能力が少ないのでさびが進行する)

図1. 亜鉛と鋼の防食機構の比較

ところで、一般的に腐食速度は、使用環境、使用期間によって異なりますが、亜鉛は鉄の10~25倍の耐食性を有しています。

たとえば、条件の厳しい海岸地帯での亜鉛と鉄の腐食速度を比較すると図2のようになります。

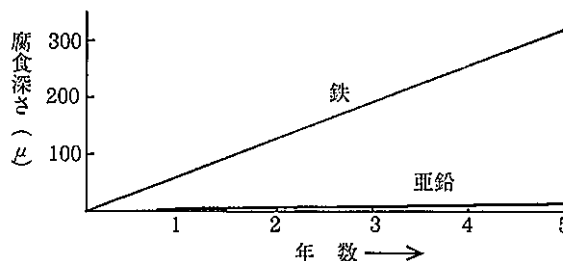


図2. 海岸地帯における亜鉛と鉄の腐食速度

(2) 犠牲防食作用

亜鉛めっき皮膜になんらかの理由で傷が生じた場合、周囲の亜鉛が陽イオンとなって鉄の腐食を抑制し電気化学的に保護する犠牲防食作用を有しています。

この鉄に対する亜鉛の犠牲防食作用は、亜鉛独特の防食作用です。

これを塗装と比較すると図3のようになります。

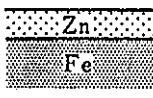

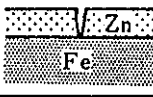



	亜鉛めっき	塗 装
素 地		
傷が生じた		
腐食が起こる	 亜鉛の犠牲防食作用により鉄は腐食されない	 粗い鉄さびにより塗膜が大きく破れ更に腐食が進行する

図3. 傷が生じた場合の亜鉛めっき皮膜と塗装皮膜の防食状態

2. 亜鉛めっき皮膜の推定耐用年数の計算方法

亜鉛めっきの最大の特徴は耐食性が優れていることですが、どのような使用環境でも無条件に耐用年数が長いという訳ではありません。

過去から多くの代表的な環境下での暴露試験結果が報告され、また使用実績からも知られている通り亜鉛めっきの耐用年数は使用環境によって大きく変化します。

そして同じ使用環境ではめっき層の厚さ(=めっき付着量)にほぼ比例します。

亜鉛めっきの耐用年数を予測するためには、現在までに報告されている耐食性(腐食速度)が参考になります。

亜鉛めっきの耐用年数については、使用環境による亜鉛の腐食速度と亜鉛の付着量から、次式のように計算できます。

$$\text{耐用年数} = \frac{\text{亜鉛付着量} [g/m^2]}{\text{腐食速度} [g/m^2/年]} \times 0.9^*$$

0.9は「めっき付着量の90%が腐食された時点めっき層の寿命とする」という判定方法から決められた係数です。

また、めっき付着量は色々な単位で表されています。

それをg/m²の単位に換算するためには次の係数を掛けます。

単 位	× 係数
o z / f t ²	× 305
m g / d m ²	× 0.1
m g / c m ²	× 10
m i l (ミル=1/1,000インチ)	× 182.9
μ m (ミクロン=1/1,000mm)	× 7.2

例 2.0 o z / f t ² = 2.0 × 305 g / m² = 610 g / m²

亜鉛めっきおよび亜鉛の耐食性は色々な単位で報告されています。

それを g / m² / 年の単位に換算するためには次の係数を掛けます。

単 位	× 係数
o z / f t ² / 年	× 305
m d d (=m g / d m ² / d a y)	× 36.5
i p y (=i n c h / y e a r)	× 182,880
μ p y (=m i c r o n / y e a r)	× 7.2

例 1.2 m d d = 1.2 × 36.5 g / m² / 年 = 43.8 g / m² / 年

3 . 大気中における耐食性

一般に、亜鉛めっきの大気中における耐食性は優れています。

しかし、使用する環境での降雨量、風向き、湿度、亜硫酸ガス量、海塩粒子量などによって亜鉛めっきの耐食性は影響を受けます。たとえば、海岸地帯など海からの距離によっても腐食速度は異なるため、その環境での耐食性はその位置で暴露してみなければ正確には判りません。

しかし、大気中の亜鉛めっきの耐食性は(社)日本溶融亜鉛鍍金協会、ASTMその他、多くの機関での暴露試験結果から明らかにされています。

日本における使用環境別の亜鉛腐食速度を表1に示します。

表1 . 使用環境別亜鉛腐食速度

ばく露試験地域	平均腐食速度 (g / m ² / 年)	耐用年数 ※ (年)
都市工業地帯	9.3	53
田園地帯	4.5	110
海岸地帯	11.1	45

※耐用年数は亜鉛付着量550 g / m²の場合で、めっき皮膜の90%が消費するまでの期間として示した。

なお、重工業地帯である横浜市の鶴見工業高校で昭和39年から昭和49年にかけて行ったばく露試験では平均腐食速度は34 g/m²でした。

しかし、平成4年から開始した都市工業地帯のばく露試験では、平均腐食速度は9.3g/m²/年と大幅に減少しています。これは都市工業地帯の硫黄酸化物濃度が年々減少してきているためで、現在では例えば図4の横浜市の例に示すように、臨海工業地域と住工混在地域、商業住宅地域、郊外地域とで硫黄酸化物濃度はほとんど同じ値となっています。

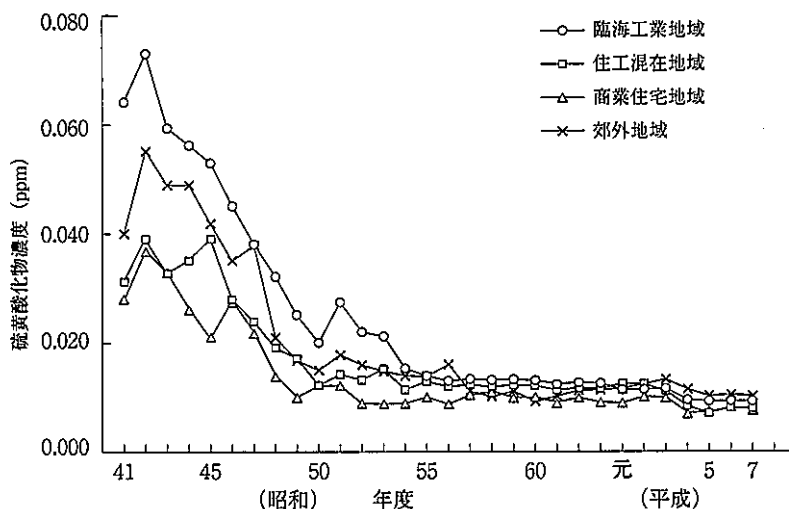


図4. 硫黄酸化物濃度の地域別経年変化

橋梁などの大型構造物は、部材の厚みが9 30mmと非常に厚く、めっき付着量も800 2,000 g/m²程度が見込まれその耐用年数は半永久的なものとなります。

また、屋内では同じ地域の屋外に比べて5倍以上の耐用年数が期待できます。

次に外国における使用環境別の亜鉛腐食速度の例を表2に示します。

表2. 外国の使用環境別の亜鉛腐食速度²⁾

場 所	環 境	暴露期間 (年)	腐食速度 (mil/年)	腐食速度 (g/m ² /年)
Altoona, Pennsylvania	重工業地帯	10	0.21	38.4
New York	重工業地帯	10	0.21	38.4
Newark	工業地帯	2	0.14	25.6
Key West Florida	海岸地帯	20	0.03	5.5
La Jolla California	海岸地帯	10	0.08	14.6
State College Pennsylvania	田園地帯	5	0.04	7.3
Singapore	海洋熱帯地方	5	0.03	5.5
Aro Nigeria	内陸熱帯地方	5	0.02	3.7
Delhi India	乾燥地帯	1	0.006	1.1
Abisko North Sweden	極地付近	5	0.01	1.8

4 . 海岸地帯での亜鉛めっきの耐食性

海岸地帯の場合では、多くの地域で年間腐食減量が $10 \sim 20 \text{ g/m}^2$ ですが稀に 100 g/m^2 以上という激しい腐食を起こす場所があり、このことが亜鉛めっき鋼材の海岸地帯での耐食性についての信頼性を低下させる原因になっています。

このような疑問を解明するため多くの海岸地帯で暴露試験を行ってきました。試験結果を表3に示しましたが、これから暴露地の環境状況と亜鉛めっき鋼材の腐食減量との関係を知ることができます。

試験番号4.5の結果は激しい腐食を起こした場所ですが、いずれも常時海水飛沫を受ける海岸線間際の測定値です。また試験番号7は海岸線からかなり離れていますが冬期は強い季節風により異常に高い濃度の海塩粒子が飛来し、しかも日本海沿岸の特殊な地形での測定で、初年度に高い腐食速度を示しています。

海岸地帯での腐食形態の特徴は白色の腐食生成物が表面に固着することであり、中でも腐食速度の速い所では非常に厚い(1～2mm)皮膜に覆われます。この皮膜はかなりの防食性能があるため、海塩粒子濃度が支配的な地域での腐食速度は経年的に減少します。従って、常時海水飛沫を受けたり、海塩粒子濃度の月間平均値が $1 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ を超えるような特殊海岸地帯でも亜鉛めっき鋼材は5～10年の耐用年数が期待できます。

しかしながら、台風時や特別の高波時にのみ海水飛沫を受けるような場所も含めて、ほとんどの海岸地帯における長期間供用時の年間腐食減量は $10 \sim 20 \text{ g/m}^2$ であると推定できます。このことは通常的大型めっき鋼材(亜鉛付着量 550 g/m^2)では、25～50年の耐用年数があることを示しており、亜鉛めっき方法は一般的な環境下と同様に海岸地帯においても非常に経済的かつ信頼性の高い防食方法といえます。

海岸地帯においては、海岸からの距離によって亜鉛めっきの耐食性は影響されます。

(社)日本溶融亜鉛鍍金協会では、日本海側の強い海風の吹く福井石油備蓄基地の構内で暴露試験を行っています。

表3 海岸地帯での環境別皿鉛めっきの腐食減量

試験番号	暴露地	暴露地の状況	大気暴露開始年月(昭和)	暴露期間(年)別の年間平均腐食減量(g/m ² /年)					
				0～1	1～2	2～3	3～5	5～10	
1	伊良湖岬観測所	伊良湖岬の先端部で、太平洋、伊勢湾より3km、渥美湾より1km程度の地点	39年3月	10	15	13	15	8	
2	九州電力(株)宇多津変電所	瀬戸内海沿岸より300m程度、暴露開始時は周囲は塩田であったが、埋立てられた。	41年6月	12	10	9	14	11	
3	日本鉱業(株)佐賀製錬所	豊子海峡に面し、海岸より30m、高度20m程度の崖上、崖には樹木がある。	56年11月	24	—	(0～2) 8			
4	日本鉱業(株)佐賀製錬所	No.3地点の崖下、海岸線より数mで平均海面より3m程度の護岸上、沖約20mに露出岩礁あり	56年11月	196	172	35			
5	沖繩電力(株)本社浦添市牧港	東シナ海に面し、海岸間際の高さ2m程度の護岸上。高波では海水飛沫を受ける。	58年10月	90	(0～2) 34				
6	東洋コンクリート(株)沖繩県西原村	太平洋側の中城湾奥の海岸線より約200mの地点。砂浜で高さ数m程度の防波堤が途中にある。	58年5月	15	(0～2) 14				
7	北陸自動車道鯨波橋(柏崎近辺)	岩礁の多い日本海海岸線より、約300mの谷奥に架かる自動車道路橋の海岸に面した橋台上	57年9月	45	—	(0～3) 20			
8	広島県宮島沖・中国塗料(株)海洋暴露筏	瀬戸内海の暴露用浮上筏に設けた暴露台 海面上1.0mの高さで暴露	59年8月	19					
9	大井川町沖海洋技術総合研究施設	大井川町の沖、約250mの太平洋の中に設置された海洋暴露台、T.P.13.9mのデッキ上	59年5月	—	(0～2) 21				
10	日本ウエザリソングラストセンサー(銚子市)	犬吠崎より西11km、太平洋より4kmの高度50mの台地上。湿度のやや高い代表的田園地域	50年12月	10	5	5	3	3	

() *は暴露期間を示す。

海岸より70m、140m、210mの地点で5年間暴露試験を行った結果を表4に示します。ただし、やけめっきは3年間の暴露試験。

表4 海岸からの距離による亜鉛めっきの腐食減量

海岸からの距離	腐食減量 (g/m ² /年)	
	標準めっき	やけめっき
70m	29.2	22.2
140m	17.6	19.2
210m	15.1	21.2

試験片表面に付着している塩素イオン量をJIS K0102(1986)の硝酸第二水銀標準液による滴定法を用いて測定した結果を表5に示します。いずれも5年経過時点です。

表5 試験片表面の塩素イオン濃度

海岸からの距離	塩素イオン濃度 (mg/m ²)
70m	28.9
140m	20.4
210m	18.5

試験片表面の塩素イオン濃度はかなりバラツキを生じるものであります。たとえば海岸から70mで1年暴露のものは182.7mg/m²もありました。

これらの暴露試験片は屋外のため塩素分は雨水などで流されるが、海風の影響を大きく受け、雨水のかかりにくい部位、たとえば橋梁の中桁の水平部材などは塩素イオン濃度は相当高い値になることが予想されます。

5. 海水中の耐食性

5-1 海水腐食の特徴

干満部と連なっている海中部の鋼材は、酸素の供給が少ないのでアノードとなり、単独に海水中に浸せきされている鋼材よりも激しい腐食を示します。

海中では腐食もさることながら、生物付着についても大きな問題があります。

付着する藻や貝類は、海中深い所より干満で顔を出すような所の方が酸素の供給が多いため、多量に付着しています。

これらの付着しているような所の鋼材は、局部腐食を生じやすくなります。

この理由としては、フジツボ等が付着した所にスキマ腐食というやはり酸素の濃淡に起因する腐食が起こるからです。

全面均一に腐食する場合にはあまり問題はありますが、現実には、局部的な腐食によって問題は起こっています。

カルシウムやマグネシウムの炭酸塩が全面均一に沈着すると保護皮膜として作用しますが、これもただらに付着すると鋼材の露出部は局部的に腐食が進行します。

このように、海水中では生物付着や塩類の部分付着等によって局部電池を生じやすく、腐食を進行させやすい傾向にあります。

しかし、溶融亜鉛めっき皮膜は海水中においても保護皮膜を生成しますし、電気化学的な犠牲防食作用があります。

したがって、最近では亜鉛めっきされた製品が海洋構造物関係に使用されることが徐々に増えています。

5-2日本における海水中での耐食性

亜鉛めっき皮膜にとって、海水中では同濃度の食塩水中より耐食性は良いといわれています。

これは海水中のカルシウムやマグネシウム塩類が腐食抑制作用を有するからだといわれています。

次に(社)日本溶融亜鉛鍍金協会で行いました亜鉛めっき海水浸せき試験結果を示します。

試験地 大阪府堺市石津西町(海岸)

干潮時 海中 深さ約1mの地点

試験期間 昭和53年4月～58年4月

試験寸法 3.2×100×200mm(SS400)

(1) 試験片の外観変化

亜鉛めっき試験片

試験片の全面は6ヶ月～2年後に灰色ないし暗灰色を呈してきましたが、5年後もめっき層表面には孔食は認められませんでした。

鋼試験片

1ヶ月経過後、孔食腐食のため試験片の表面が凸凹状態となり、2ヶ月経過後、試験片の全面が赤さびで覆われ、その上にフジツボ、青草が著しく付着していました。

1年経過後、孔食腐食のため試験片の肉よせによる破損部が認められました。

(2) 亜鉛めっきの腐食速度

試験片はテスト開始直前に重量測定を行いました。

腐食速度は試験片2個の平均値を示しました。

腐食生成物はブラシにより水道水で洗浄して除去を行いました。

海水中に浸せきした亜鉛めっき鋼は、めっき層表面に亜鉛の緻密な保護皮膜ができるために、亜鉛の腐食速度が経時的に減少します。

海水中での標準的な亜鉛めっき鋼の平均腐食速度は、浸せき初期(1年経過後)では100～150g/m²/年、その後腐食速度は減少し、5年間海水浸せきされた平均腐食速度は54.1g/m²/年

表6. 海水中における亜鉛の腐食速度

期	間	腐食速度 (g/m ² /年)
1	年	108.5
2	年	85.8
3	年	72.3
5	年	54.1

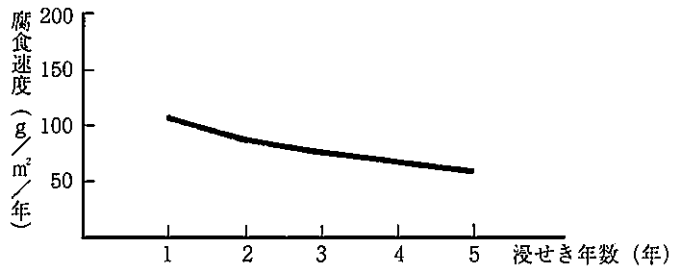


図5. 海水中における亜鉛の腐食速度

です。

これから亜鉛めっき皮膜の推定耐用年数を計算しますと表7のようになります。

表7 海水中での亜鉛めっきの推定耐用年数³⁾⁴⁾

亜鉛付着量 (g/m ²)	推定耐用年数 (年)
600	10.0
800	13.3
1000	16.6

推定耐用年数は亜鉛付着量の90%が5年浸漬の平均腐食速度で腐食された時の寿命として示した。

ただ干満帯やしぶきのかかるスプラッシュゾーンでは、200g/m²/年以上になることがあり、このような場所ではめっき面上にエポキシコーティングなどの処理を施すことが必要です。

5-3外国における海水中の耐食性データ

外国における亜鉛めっきの海水中的耐食性データは数多くあります。しかし、試験場所によって腐食速度はかなり異なってきます。

水温および海流の速さなどにも影響されるものと思われませんが、特に海水浸せきの場合は試験片表面にできる腐食生成物の除去方法が定められていないためその差を生じるものと思われます。

表 8. 外国の海水中での腐食速度⁶⁾

場 所	亜鉛めっき付着量 oz/ft ² (g/m ²)		期 間	腐食速度	
				m d d	g/m ² /年
Kure Beach	3.7	(1130)	0.5	9.5	347
〃	3.8	(1160)	1.0	4.5	164
〃	4.3	(1320)	3.5	3.0	110
〃	5.0	(1525)	5.0	2.0	91
Gasport and Emsworth	2.51	(780)	6.0	1.1	40
	3.04	(930)	6.0	1.1	40

6. 水中の耐食性

水中における亜鉛めっきの耐食性は、PH、含有物質、温度、液の流速によって大きく影響を受けます。

亜鉛は両性金属のため強酸、強アルカリの水溶液には急速に溶解します。

亜鉛めっきが有効な耐食性を示すのはPH6.0～12.0、水温50 以下です。

水温が50 を超えると腐食速度はかなり増大する傾向にあります。大部分の淡水はPH 7 前後のため亜鉛めっきをすれば十分な耐食性があります。

同じPH 7 前後の水であっても、

蒸留水 軟水 硬水

と水中に含まれる物質の量が増加していくに従って亜鉛の耐食性が強くなります。

軟水中(腐食速度=91.3g/m²/年)よりも硬水中(腐食速度=9.1g/m²/年)の方が10倍の耐食性を示したという報告があります。

これは硬水中に含まれているカルシウム塩、マグネシウム塩類が亜鉛の腐食を抑制するからです。

しかし、水に溶けている酸素と炭酸ガスは亜鉛の耐食性を悪化させます。

特に炭酸ガスの量が10ppmを超えると亜鉛の腐食速度は大きくなる傾向を示します。

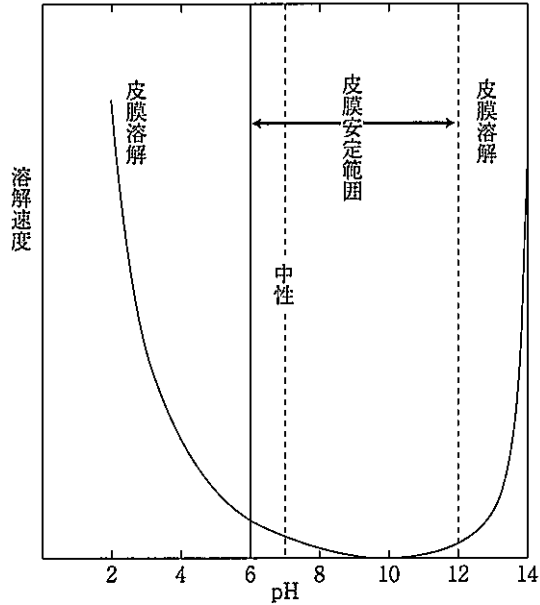


図6. PHによる皮膜の溶解速度

次に炭酸ガスを含む水中での亜鉛の腐食速度の試験結果を示します。

表9. 炭酸ガスを含む水中の亜鉛の腐食速度⁶⁾

水 (a)	水中の各CO ₂ (ppm×10) における腐食速度 (g/m ² /年)			
	0	0.5	1.8	3.7
硬水	51.1	98.5	178.9	262.8
混合水	29.2	98.5	182.5	346.8

注(a) 混合水は硬水と電導度測定用水と等量混合

表10. 各種の水における金属の腐食量 (厚さ)⁷⁾ (単位: mm/年)

材 料	上 水		工業用水		処理下水		海 水	
	静止	流水	静止	流水	静止	流水	静止	流水
亜鉛めっき	0.002	0.033	0.003	0.027	0.004	0.030	0.006	0.052
銅	0.001	0.017	0.003	0.009	0.004	0.006	0.052	0.043
真 鍮	0.004	0.025	0.011	0.024	0.007	0.025	0.014	0.071
鋳 鉄	0.079	0.127	0.083	0.128	0.051	0.037	0.080	0.139
キルド 鋼	0.072	0.118	0.077	0.116	0.067	0.058	0.067	0.134

なお、表10の試験結果はピーカー内で静止水中に浸漬した場合の10ヵ月間の腐食量よりmddの腐食量を算出し、mm/年に換算したものです。

7. 農畜産施設における亜鉛めっきの耐食性

農畜産施設における各種環境下での亜鉛めっきの耐食性を調査するため、施設設置農業団体の協力を得て(社)日本溶融亜鉛鍍金協会が2年間暴露試験を行いました。

設置場所としては佐賀県唐津市、熊本県菊池市及び沖縄県読谷村、大里村の年舎、豚舎、温室堆肥センター6施設の25ヶ所です。

暴露期間は6ヶ月、1年及び2年としました。

試験片はSS400材で寸法100×200×3.2mmを使用し、1回の調査で3個の試験片を取りはずし、3個の平均値を1カ所の腐食減量としました。

農畜産施設における亜鉛めっきの耐用年数は、使用される環境により変わりますが一般的には次のような傾向を示しました。

(1) 温室内部は高温多湿にもかかわらず、年間腐食量は12.3g/m²と比較的小さく良好な耐食性が期待できます。

(2) 牛舎、豚舎建屋部材は、部分的に白さびが発生しますが、年間腐食量は13~14g/m²程度であり長期の耐用が期待できます。

熊本県菊池市農協堆肥センターの場合、屋外での年間亜鉛腐食量は16g/m²程度であり、牛舎建屋内(床上約3m)は13.1g/m²、糞尿が時々かかる牛舎の吸水場周辺では20g/m²、直接生糞に接触させている所では35g/m²です。

しかし、生糞尿ピットの中に浸せきした試験片の年間腐食量は391g/m²と非常に大きな数値を示しました。これはアンモニア分によって腐食量が大きくなったものと思われます。

(3) 堆肥センター内の発酵槽より発生する水蒸気の影響は殆どないように思われます。

すなわち、農畜産施設における亜鉛めっきの耐食性は、常時湿った生糞尿と直接接する箇所以外は非常に良好です。

従って牛舎、豚舎における建屋部材においても、床上30cm程コンクリート巻きにして、全部材亜鉛めっきを行えば長期の耐用が期待できます。

2年間の暴露試験結果の一部より年間当りの亜鉛腐食量および推定耐用年数を次にまとめます。

表11 2年間暴露試験後の腐食量及び推定耐用年数

試験片設置場所	腐食減量 (g/m ² /年)	推定耐用年数 (年)
(1) 屋外フェンス部分	16.0	33.8
(2) 牛舎建屋内部	13.1	41.2
(3) 堆肥発酵槽(床上3m)	14.8	36.5
(4) 牛舎吸水場周辺	20.0	27.0
(5) 生糞置場(直接接触)	35.0	15.4
(6) 屋外フェンス部分	14.8	36.5
(7) 屋内繫留所周辺	9.7	55.7
(8) 豚柵(豚接触部分)(床上30cm)	35.1	15.4
(9) 生尿集合箇所(1m上)	35.9	15.0
(10) 温室内部	12.3	43.9

(1)～(5)は熊本県菊池市、(6)～(7)は沖縄県大里村、(8)～(10)は沖縄県読谷村で、暴露試験を行ったものです。

推定耐用年数は亜鉛めっき付着量を600 g/m²として、めっきの腐食減量から亜鉛皮膜の90%が消耗するまでの期間として示した。

8. 土壌中の亜鉛めっきの耐食性

土壌中における亜鉛めっきの耐食性に影響を与える因子は、水分の量、PH、塩類の種類と量、電気抵抗率、酸化還元電位及び通気性等です。

これらが土質によって異なるため亜鉛めっきの腐食速度に差を生じます。

一般に水分が多く、PHが高低いずれかに傾き、塩分が多く、電気抵抗が低く、酸化還元電位が低いほど腐食速度は大きくなる傾向を示します。

また、迷走電流も悪い影響を示します。

肥料として硫酸アンモニウム、過磷酸石灰などの化学肥料を供給すると一時的に塩類が多くなります。

PHは土質によりPH4～9ぐらいにわたりますが、雨が多くアルカリが流れ易い日本では、一般に弱酸性です。

このような土壌中の腐食挙動は多くの因子に影響されますが、土性による腐食速度の差について、日本及び外国の調査結果を一例として示します。

国際的土性分類法では、土性の区分として下記の様な粒径を用います。

粒径の区分(Particle size)

> 2mm礫(gravel)、2mm～0.2mm粗砂(coarse sand)、0.2mm～0.02mm細砂(fine sand)、0.02mm～0.002mmシルト(silt)、< 0.002mm粘土(clay)

また、標準的な土性の区分を表12に示します。

表12. 土性の区分

土 性	略号	粘土%	シルト%	砂 %	土 性	略号	粘土%	シルト%	砂 %
重 埴 土	HC	45-100	0-55	0-55	シルト質埴壤土	SiCL	15-25	45 - 85	0 - 40
砂 土 埴 土	SC	25-45	0-20	55-75	壤 質 砂 土	LS	0-15	0 - 15	85 - 95
軽 埴 土	LiC	〃	0-45	10-55	砂 壤 土	SL	〃	0 - 35	65 - 85
シルト質埴土	SiC	〃	45-75	0-30	壤 土	L	〃	20 - 45	40 - 65
砂質埴壤土	SCL	15-25	0-20	5-85	シルト質埴土	SiL	〃	45 -100	0 - 55
埴 壤 土	CL	〃	20-45	3-65	砂 土	S	0- 5	0 - 15	85 -100

わが国において(社)日本溶融亜鉛鍍金協会で、5年間、17ヶ所で亜鉛めっき試験片による埋設試験を行いました。

試験片の寸法は100×200×3.2mmであり、水平埋設と垂直埋設の2通りで行いました。その結果のまとめを表13に示します。

表13. 日本における土壌中の腐食速度

土地の区分	腐 食 速 度 (g/m ² /年)		
	水平埋設	垂直埋設	平 均
HC	28.0	25.4	26.7
LiC	16.1	16.5	16.3
SCL	28.9	37.0	33.0
CL	17.3	16.1	16.7
SiCL	21.7	22.2	22.0
LS	24.5	25.3	24.9
L	17.7	26.6	22.2
SL	24.4	25.0	24.7

5年間の調査結果より、今後も等速で腐食していくとし、亜鉛付着量600g/m²でその90%が消耗するまでの期間をめっき皮膜の寿命として耐用年数を計算すれば、最も短い場合で16.4年、長い場合で33年となり、通常24~25年耐用が期待できます。また外国の例として、米国における土質による高純度亜鉛の腐食量を表14に、また土壌の電気抵抗と腐食の関係を表15に示します。

表14. 米国の各種土壌中の高純度亜鉛の腐食
(12.7年埋設試験による腐食速度)

土 壌 の 種 類	g/m ² /年	
無 機 質 酸 化 性 酸 性 土 壤	粘土ローム ローム 粘土	52 29 39
無 機 質 酸 化 性 ア ル カ リ 性 土 壤	沈泥ローム 砂利質ローム	43 130
無機質還元性酸性土壌	粘 土	46
無 機 質 還 元 性 ア ル カ リ 性 土 壤	粘 土 粘 土	46 210
有 機 質 還 元 性 酸 性 土 壤	堆 肥 沼 池 堆 肥	110 96 180

注) 無機質：草木に覆われた場所が50%未満のところ
酸化性：一般に農用地のように排水性がよく明色の土壌
還元性：地表のすぐ下が湿った土地で暗色の土壌

表15. 土壌の抵抗率と腐食程度

抵抗率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	腐食の程度
0～ 900	非 常 に 激 し い
901～ 2,300	激 し い
2,301～ 5,000	中 位
5,001～ 10,000	緩 慢
10,000以上	非 常 に 緩 慢

水分や塩分が多く腐食性土壌に埋設される場合や長期耐用を期待する場合には、亜鉛めっき上にタールエポキシ樹脂等の重防食を行うか、防食テープ被覆する等の方法が用いられています。

9. 原油中における亜鉛めっきの耐食性

工場内配管、石油備蓄タンク関係、タンカー及びガソリンスタンド等の配管にも亜鉛めっき鋼管が使用されています。

一般に重油は脱硫されているため、亜鉛めっきには殆ど反応しないとされています。従って、今回は硫黄分の多い原油での腐食挙動を調べるため3種類の原油を用いて浸せき試験を行いました。

最も背酷な条件として、原油と海水の交互浸せきというタンカーでの使用条件を想定してのテストも行いました。

タンカーの油槽は片道が空になり、船のバランスをとるために海水を入れることがあります。海水は鉄鋼を腐食しますが、原油自体も鉄鋼を僅かではありますが腐食します。このため亜鉛めっきによる防食を調査することになりました。原油は産地によって成分に差がありますので、産地別の差も考慮しました。

試験は原油にヴェネズエラ、スマトラ、及びクエートの3種類を使い、亜鉛めっきした鋼板と黒鋼板とを互いに接触しないように配慮して、各原油中に連続浸せき、1週間間隔で各原油と海水に交互浸せき、および1週間間隔で各原油浸せきと大気暴露を交互に繰り返しの3試験条件で1年間実施しました。

ヴェネズエラ産原油は他の2種類に比較して僅かに腐食性でしたが、亜鉛めっきは3試験条件共に優れた耐食性を示しました。1週間間隔で原油と海水に交互浸せきした試験状態では、他の2条件に比較して10倍以上の腐食速度になりましたが均一腐食であり孔食腐食はありません。

均一腐食の場合にはめっき層の耐用年数を計算により予測できますので、めっき付着量を600g/m²としてめっき層の耐用年数を計算した値を表16に示しています。

また、試験片の1年経過後の外観状態は表17に示します。

表16 原油浸せきによる亜鉛めっき皮膜の推定寿命と亜鉛めっきしない鋼板と亜鉛めっき皮膜との腐食割合

テ ス ト 条 件	原油の種類 (地域)	溶融亜鉛めっき皮膜		亜鉛めっきしない鋼板と亜鉛めっき皮膜との腐食速度の割合 (めっき皮膜の耐食倍率)
		平均腐食速度 (g/m ² /y)	耐用年数 (年)	
各原油中への連続浸せき	ヴェネズエラ	2.98	181	4.4
	スマトラ	2.53	213	4.3
	クエート	1.39	398	10.7
1週間間隔で各原油と海水に交互浸せき	ヴェネズエラ	44.61	12	2.2
	スマトラ	37.71	14	2.7
	クエート	40.31	13	4.4
1週間間隔で各原油浸せきと大気暴露をくりかえしたもの	ヴェネズエラ	6.11	88	4.2
	スマトラ	3.84	141	5.5
	クエート	2.26	237	8.5
備 考 耐用年数は亜鉛めっき付着量600g/m ² の90%までが腐食されてしまったという仮定に基づいて計算した。				

表17 各試験片1年経過後の外観状態

テ ス ト 条 件	溶 融 亜 鉛 め っ き 皮 膜	裸 鋼
各原油中に連続浸せき	各試験片の全面は金属光沢が残っている。	各試験片の全面は赤錆でおおわれ、僅かに孔食がある。
1週間間隔で各原油と海水に交互浸せき	各試験片の全面は灰色に変色し、部分的に白い腐食生成物が表面に付着している。	各試験片の全面は赤錆でおおわれ、孔食が激しい。
1週間間隔で各原油浸せきと大気暴露をくりかえしたもの	各試験片の全面は金属光沢が残っている。しかし僅かに灰色に変色しているものもある。	各試験片の全面は赤錆でおおわれ、僅かに孔食がある。
備 考 3種類の原油の間で試験片の外観状態には著しい差はなかった。		

亜鉛めっき皮膜を原油中と海水中に交互に浸せきする場合でも、初期腐食速度が速い最初の1年間の試験で12年以上の耐用年数が算出されており、比較試験片としての黒鋼板の腐食速度に対し約2倍から4倍になっていますので、タンカー部材の鉄鋼製品の防食にも亜鉛めっきが適していることが判ります。

尚、原油中への連続浸せきでは腐食速度の最も大きいヴェネズエラ産でも180年以上の耐用年数であります。従って硫黄分の少ない重油、軽油、灯油等の寿命については更に長期の耐用が期待できます。

10. 亜鉛めっき鉄筋の耐食性

コンクリート構造物の塩害などによって起こる、早期劣化の防止対策としての亜鉛めっき鉄筋の使用も新分野の一つです。

確かにこの方法は最も簡便で、通常的设计基準、施行方法のままでも良く、その上メンテナンスフリーのコンクリート最大の特徴を損なわない優れた防食対策です。

しかし、塩分を含むコンクリート中での亜鉛めっき鉄筋の挙動に関しては一定した結論になっておらず、なかには亜鉛皮膜の寿命がコンクリートの寿命に比較し効果的とはいえないという意見もあります。

亜鉛めっき鋼材の大部分が使用されている大気中での耐食性については、長期の経験と多数の暴露試験などで耐用年数の推定がかなりの精度で可能になっています。

大気中とは異なり、腐食環境としてのコンクリートは複合材料であり、水分や酸素の浸透拡散が複雑であり、未解明の部分も多くあります。しかし、最近は研究や実的な暴露試験もかなり行われているので、それらの資料を参考にしてコンクリート内での亜鉛めっき鉄筋の腐食の概要について述べます。

コンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の耐食性に最も大きい影響を与える要因は塩分含有量です。

標準的な品質のコンクリート中では、少量の塩分が混入または侵入しても亜鉛皮膜は優れた耐食性を示しますが、塩分量がある限界値を超えると亜鉛皮膜に孔食を生じ、長期の耐食年数を期待できなくなります。

このような現象が亜鉛めっき鉄筋の評価を混乱させている主な原因であります。

発表されている亜鉛めっき鉄筋コンクリートの暴露試験報告書より、亜鉛皮膜が異状腐食を起こす塩分濃度限界値を推定すると、概略的には表18に示す通りになります。

表18 亜鉛めっき鉄筋、通常鉄筋の使用可能な塩分含有量
(塩分含有%はコンクリートに対するNaCl換算重量%)

	不動態領域	使用可能な低腐食領域
溶融亜鉛めっき鉄筋	0.1 %以下	0.3 %以下
通常の鉄筋	0.014%以下	0.034%以下

備考：通常鉄筋での不動態領域の塩分は、細骨材中の塩分許容量0.04%、また低腐食領域は0.1%よりコンクリート中に換算した。

表18より、通常鉄筋の場合はコンクリート中の塩分濃度が0.034%を超えると鉄筋が発錆し、コンクリートがひび割れ、崩壊を起こす可能性が増大するが、亜鉛めっき鉄筋では0.3%程度までは劣化原因を生じる恐れはありません。

この塩分限界値は昭和60年7月日本建築学会関東支部研究報告会での東大岸谷教授、建築研究所樫野氏他による報告「亜鉛メッキした鉄筋コンクリートの自然暴露試験」によっても容認される値であると思います。この報告は13年間普通地区に暴露した塩分を混入したものを含む各種コンクリート試験体の調査結果です。結果より、かぶり20mmの鉄筋全表面についての腐食面積率の平均値を計算し表19に示します。

表19. 鉄筋全表面の腐食面積率測定結果

		標準 調合	貧 調合	富 調合	CaCl ₂ 混入	人工海 水混練
水セメント比 %		58	65	45	58	57
塩分含有量 %		—	—	—	0.27	0.34
腐食 面積 率 %	通常鉄筋	4	29	5	49	49
	亜鉛めっき鉄筋	0	0	0	0	0.4

備考：(1)塩分含有量は試験体の実測値、コンクリートにたいするNaCl換算量%
 (2)通常鉄筋のCaCl₂、海水混入のものは幅1mm程度のひびわれが鉄筋にそって発生していた。
 (3)海水混入で亜鉛めっき鉄筋のものは散在孔食形態の部分があった。

実際のコンクリート構造物の塩分含有量は、海岸近くの構造物で飛散する海水飛沫にさらされる頻度の高い場所では1%を超すものがあります。しかし直接海水飛沫を受けない場所では、特異地形を除き、かぶり40mm程度では長期供用後も0.3%を越さないようであります。このようなデータを参考にし、かなり安全サイドで考えても、海岸線より100m程度離れた場所であれば、通常品質のコンクリート構造物で、かぶり40mmでの亜鉛めっき鉄筋は長期に腐食を生じることはありません。

コンクリート中のアルカリによる亜鉛の溶解については、寿命に影響を及ぼさないというのが実状です。

多数の亜鉛めっき鋼材を基礎材としてコンクリートに埋め込んで使用していますが、これらの皮膜が異状腐食を起こしたという実例を聞きません。また亜鉛めっき鉄筋コンクリートの耐食試験や付着力試験などで多数の試験体が破壊観察されていますが、異状腐食は報告されていません。ただ稀に鉄筋と接するコンクリート表面に1~2mmの小気泡が発生する時があります。これはコンクリートペーストのアルカリと亜鉛の反応による水素によるものですが、この反応もコンクリート硬化後は停止して進行することはありません。このような現象はコンクリート中では亜鉛表面に拡散してくるアルカリしか反応に関与できず、その上反応生成物である亜鉛酸カルシウムが以降の拡散障壁となりアルカリ溶解を抑止するためであろうと考えられます。

参考文献

- 1) 「横浜市大気汚染調査報告書」, 第25報 (S59年度), P. 35
- 2) 「亜鉛とその耐食性」, P 38~P 42, 日本鉛亜鉛需要研究会
- 3) 「防錆管理」, 1974年1月, P 8~P 14, (社)日本防錆技術協会
- 4) 「溶融亜鉛めっき鋼板の海水浸漬試験」, (社)日本溶融亜鉛鍍金協会
- 5) 「亜鉛とその耐食性」, P 137, 日本鉛亜鉛需要研究会
- 6) 「亜鉛とその耐食性」, P 119, 日本鉛亜鉛需要研究会
- 7) 勝山 隆善, 「溶融亜鉛メッキ」, P 208, 理工図書株式会社
- 8) F. O. Waters ; Corrosion, No. 8, 407 (1952)