

大気暴露試験ハンドブック

〔 〕 金属編

平成 19 年 1 月

財団法人 日本ウエザリングテストセンター

大気暴露試験ハンドブック

まえがき

大気暴露試験は、屋外で工業材料及び工業製品を使用した場合に生じる化学的性質、物理的性質の経時変化を調査する目的で行う。

本書は、大気暴露試験を実際に行う場合の具体的内容を、分かりやすくするために、共通編、金属編、塗料編及びプラスチック・ゴム編に分類して解説し、大気暴露試験ハンドブックとしてまとめたものです。

[] 共通編は JIS Z 2381 (大気暴露試験方法通則)、[] 金属編は JIS Z 2381 及び ISO8566 (Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements for field tests)、[] 塗料編は JIS K 5600-7-6 (塗料一般試験方法 第7部：塗膜の長期耐久性 第6節：屋外暴露耐候性)、[] プラスチック・ゴム編は JISK7219 (プラスチック 直接屋外暴露、アンダーグラス屋外暴露、太陽集光促進暴露試験方法) の規格を基に解説した。

また、耐候性結果の一例として、平成3年度から経済産業省より「新発電システムの標準化に関する調査研究」によって得られた成果の一部を記載した。

本書の作成に当たって、関係者の方々の懇切なご指導を受けており、ここに記して謝意を表します。

本書は今後も改善を加えていく所存ですので、ご利用者各位にはお気付きの点やご意見をぜひ当センターにお寄せください。



平成 19 年 1 月

財団法人 日本ウエザリングテストセンター

〒105 0011

東京都港区芝公園 1 丁目 3 番 7 号

TEL 03 - 3434 - 5528

FAX 03 - 3434 - 5529

E - Mail tokyo@jwtc.or.jp

() 金 属 编

〔 〕 金 属 編

目 次

	ページ
1. はじめに	金 - 1
2. 暴露試験について	”
3. 暴露試験計画	”
3.1 暴露試験場の選定	金 - 2
3.2 暴露試験の選定	”
3.2.1 直接暴露試験	”
3.2.2 遮へい暴露試験	金 - 3
3.3 暴露試験期間	”
3.4 試料の数量	金 - 4
4. 試料の前処理	”
4.1 試料の作製	”
4.2 試料の標識	金 - 5
4.3 試料の脱脂	金 - 6
4.4 試料のシール処理	”
4.5 試料の前処理工程	金 - 7
5. 暴露試験	金 - 8
5.1 暴露架台及び試料保持具	”
5.2 試料の取り付け及び取り外し	”
5.2.1 試料の取付け	”
5.2.2 試料の取外し	”
5.3 暴露試験期間中の試料の取扱い	金 - 10
6. 暴露試験場の環境計測	”
6.1 環境因子の計測	”
6.1.1 腐食性因子の計測	”
6.1.2 気象因子の計測	金 - 12
6.2 暴露試験場の腐食性の把握	”
7. 評価試験	金 - 14
8. 記録	金 - 16
9. 付記	金 - 17
9.1 腐食生成物除去、腐食量及び板厚減少量	”
9.2 腐食量の経時変化	金 - 20

[] 金属編

1. はじめに

本ガイドは、金属材料の大気暴露試験を実施する上での試験計画立案、試料作製方法、試験中の注意事項、試験後の評価方法について記述する。金属の大気暴露試験方法は、ISO8565(Metals and alloys Atmospheric corrosion testing - General requirements for field tests)に規定されており、JIS Z 2381(大気暴露試験方法通則)の本文中にもその内容の一部が反映されている。そのため、本ガイドは、JIS Z 2381及びISO8565の内容を解説、又は大気暴露試験(以下、暴露試験という。)を行う上で留意すべき事項を記述したものである。

2. 暴露試験について

暴露試験の計画、前準備から暴露後の評価までの流れを図1に示す。

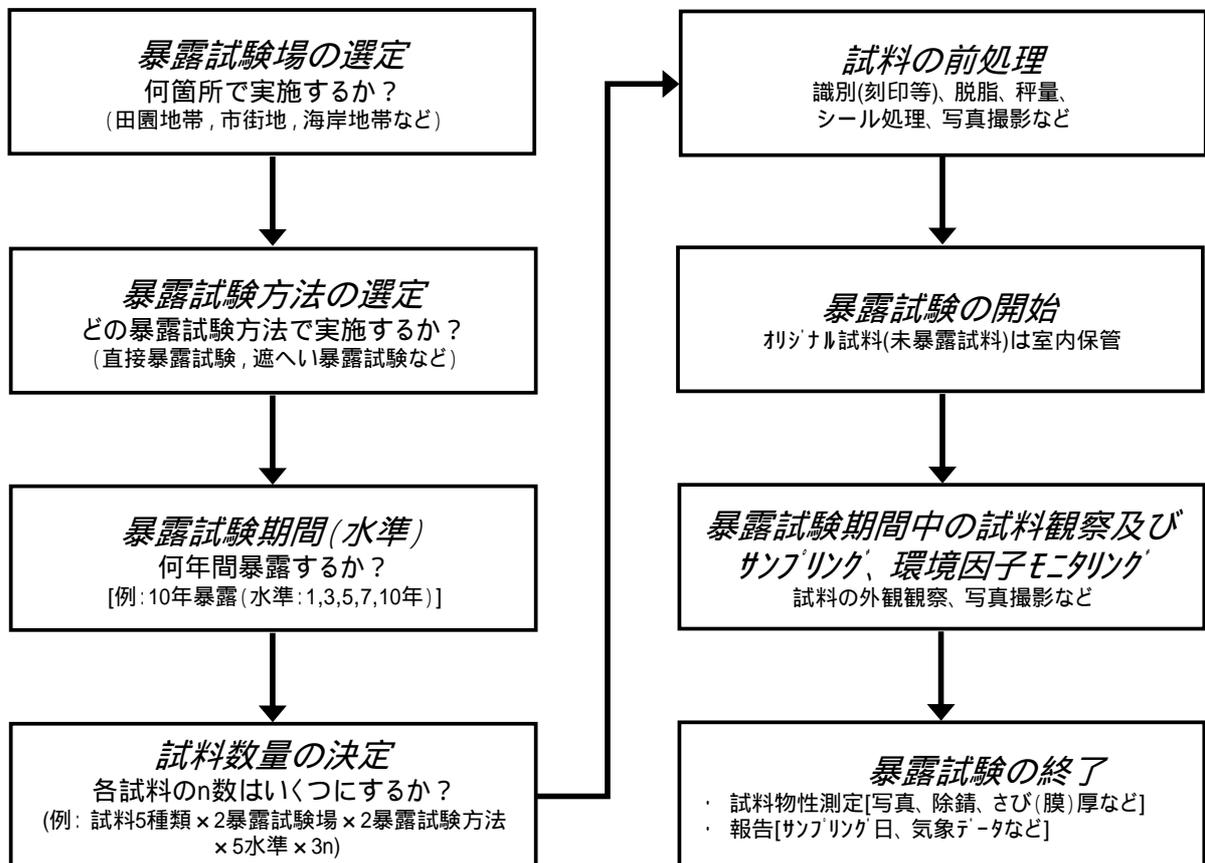


図1 暴露試験の流れ【計画から試験終了まで】

3. 暴露試験計画

金属材料の耐用年数(ライフサイクル)及び防錆処理方法などを導き出すためには、暴露試験後の試料から得られる情報(腐食減量、さびの種類、孔食深さ、インピーダンス等々)が重要である。暴露試験からさまざまな情報を得るためには、試験実施前に綿密に試験計画を立て、検討されることを推奨する。この項では、暴露試験に際し、最低限検討されなくてはならない事項を記述する。

3.1 暴露試験場の選定

金属材料の腐食の主要因とされる3因子¹⁾は、「ぬれ時間」、「海塩粒子」、「硫酸化物」である。我が国においては、四面を海に囲まれているため、腐食の主要因の中では海塩粒子による影響が大きいとされている。暴露試験場の選定は、これら因子の影響を考慮し、決定されることを推奨する。また、暴露試験場では、環境因子（気象因子、大気汚染因子）を計測されることが望ましい。

暴露試験場を数箇所選定した場合、同時期に暴露試験を開始することにより、暴露試験場間の腐食性の違いをえることができる。

表1 場所による区分

区 分
工業地域
都市地域
田園地域
酸性雨地域
火山・温泉地域

表2 海からの距離による区分

区 分	海からの距離
海上	海の上
海浜	0.3km
沿岸	0.3km ~ 2km
準沿岸	2km < ~ 20km
内陸	20km

備考) 表1及び表2の詳細は、本ガイドの[]共通を参照。

3.2 暴露試験の選定

JIS Z 2381は、5種類の暴露試験方法（直接暴露試験、遮へい暴露試験、アンダーガラス暴露試験、ブラックボックス暴露試験、太陽追跡集光暴露試験）を規定しているが、ISO8565ではこの中の2種類の暴露試験方法（直接暴露試験、遮へい暴露試験）を規定している。そのため、直接暴露試験方法及び遮へい暴露試験方法について記述する。

表3 暴露試験方法 [凡例: (効果大), (効果中), (効果小), - (効果極小)]

暴露試験方法	雨雪	風	日照	試料温度	備 考	規 格	
直接暴露試験					自然状態	JIS Z 2381	ISO8565
遮へい暴露試験	-		-		雨水洗浄効果	JIS Z 2381	ISO8565
アンダーガラス暴露試験	-				ガラス透過光	JIS Z 2381	-
ブラックボックス暴露試験					試料温度が高い	JIS Z 2381	-
太陽追跡集光暴露試験					太陽光を集光	JIS Z 2381	-

3.2.1 直接暴露試験

直接暴露試験は、表3に示すように、気象因子（日照、雨、雪、風など）の影響を直接受ける状態で暴露する方法である。JIS Z 2381で規定する5種類の試験方法の中での直接暴露試験は、一般的に最も試験されている方法である。直接暴露試験方法の条件を、表4に示す。

3.2.2 遮へい暴露試験

遮へい暴露試験は、表 3 に示すように、気象因子の日照及び雨・雪の影響を受けない状態で暴露する方法である。遮へい暴露試験では、試料表面に付着した海塩粒子などは、降雨による洗浄効果がないために、試料表面に長期間付着し続ける状態になり、かつ、試料表面の付着物が蓄積される状態になる。そのため、同じ暴露試験場で直接暴露試験と遮へい暴露試験を実施した場合、ほとんどの金属材料は直接暴露試験よりも遮へい暴露試験の方が腐食量は大きくなる。遮へい暴露試験方法の条件を、表 4 に示す。

表 4 暴露試験の条件

暴露試験方法	試料の取り付け		
	角 度	方 位	地面からの高さ
直接暴露試験	水平面に対して 45 度 (許容される場合は 30 度)	南面 (腐食性因子の発生源に向けても良い)	試料の下端面は、地面から 0.5m 以上
遮へい暴露試験	水平面に対して 0、30、45、60 又は 90 度		

3.3 暴露試験期間

暴露試験期間の設定は、暴露する試料より得たい情報の分だけ数量が必要となる。例えば、暴露した試料を一定期間に外観写真のみ観察する場合は、写真撮影後に試料を再暴露すればよいため、数枚の試料を用意すればよいことになる。しかし、暴露した試料から得られる有益な情報は、破壊検査によるものも少なくない。腐食減量測定も破壊検査であるため、腐食生成物除去後の試料を再暴露することはできない。そのため、暴露試験に必要な試料数を計算するためには、次のことを考慮しなくてはならない。

どれぐらいの期間暴露するのか
暴露試験期間中のサンプリング頻度
暴露後試料の物性測定において必要となる数量

表 5 に、単年度繰返し暴露及び中・長期暴露試験の一例を示す。1 年未満の暴露試験を実施することはあまり推奨できない。1 年未満の暴露試験では、暴露開始した季節(四季)の影響を受けるためである。また、単年度暴露試験又は中・長期暴露試験を開始するに当たり、腐食性が大きい季節(例えば夏季)は避け、春または秋より暴露開始することを推奨する。

表 5 暴露試験期間の一例

	暴露試験期間													
	0年	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年	・・・	20年	
単年度暴露	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中・長期暴露	○													
		○												
			○											
				○										
					○									
						○								

3.4 試料の数量

前述の暴露試験場、暴露試験方法、暴露試験期間が決まれば、必要となる試料数量が決定される。暴露試験を開始してしまってから、新たに試料を追加して暴露するケースがあるが、暴露を開始した時期が異なるために、当初から暴露している試料と同列には比較することが不可能となってしまう。(追加した試料から得られた情報は、当初から開始した暴露データの参照データとなってしまう場合が多い)

そのため、試料数量は、計画段階よりも多めに設定することが賢明である。試料の数量についての例を次に示す。

試料の数量【例：平板試料の場合】

暴露試験場： 2か所[銚子、宮古島]

暴露試験方法： 2方法[直接暴露試験、遮へい暴露試験]

暴露試験期間： 20年[8水準(1、2、3、5、7、10、20年及び予備n年)]

試料： 3種類[炭素鋼、銅、ステンレス鋼板(SUS304)]

物性測定： 1水準あたり5枚[腐食量(3n)、X線回折(1n)、断面観察(1n)]

$$\text{必要な試料数} = 2\text{か所} \times 2\text{方法} \times 8\text{水準} \times 5\text{枚} = 160\text{枚}$$

したがって、各種類の必要な試料の数量は、炭素鋼(160枚)、銅(160枚)、ステンレス鋼板(160枚)が必要となる。

この他に、オリジナル試料(保存用試料)を数枚(例えば3枚)用意し、温湿度が調整された室内のデシケータ内に保管することを推奨する。

4. 試料の前処理

試料が製品や、部品など金属材料を用いて組立てられたものである場合は、そのままの状態暴露試験に用いる。平板試料の場合は、試料の前処理が必要となるため、この項では平板試料の暴露試験前の処理方法について記述する。

4.1 試料の作製

試料は、金属材料の原板より切り出して作製される。炭素鋼などの原板は、表面に酸化皮膜(黒皮)があり、原板より試料を切り出す前に表面研磨をして酸化皮膜を除

去する必要がある。また、原板より試料を切り出す際に、原板にロール目（方向性）がある場合がある。その場合は、試料のロール目が同一方向になるように切り出さなければならない。

また、切り出し、または研磨した試料は、暴露試験を開始するまでの期間の腐食を低減させるために、試料表面に防錆処置（例えば、防錆油の塗布）を施すことが望ましい。

試料の大きさとしては、表 6 に示す。

表 6 JIS 及び ISO で推奨される試料の大きさ

規格名称	規格番号	形状 (mm)		備考
			板厚	
めっきの耐食性試験方法	JIS H 8502	70 ^w × 150 ^h 100 ^w × 100 ^h	-	
大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法	JIS Z 2383	100 ^w × 150 ^h	1 ~ 6	最低 50 ^w × 100 ^h mm 以上
金属及び合金の大気腐食試験における一般要求事項	ISO8565	100 ^w × 150 ^h (金属)	1 ~ 3	めっきの場合、 50 × 100mm 以上 (表面積 50cm ² 以上)

4.2 試料の標識

試料は、同種類の試料を識別できるようにしなければならない。その方法としては、試料個別に識別記号（番号）を付与する方法と、試料を取り付ける暴露架台の配置図を作成する方法がある。この両者の方法の何れか、またはすべてを行うことにより、試料は識別される。炭素鋼などは、試料に識別記号（番号）を付与しても暴露することにより発生する腐食生成物のために、識別が判読できなくなる場合が多い。そのため、試料個別に識別記号（番号）を付与し、かつ試料配置図を作成しておくことを推奨する。

試料の識別記号（番号）の取り決めは、試料の種類、暴露試験場、暴露試験方法及び暴露試験期間を、アルファベット、数値などを用いて表示すると管理しやすい。試料の識別記号（番号）の表示例を次に示す。また、試料の識別方法を表 7 に示す。

試料識別記号（番号）【例】

識別：

試料の種類	暴露試験場・暴露試験方法	暴露試験期間
T：炭素鋼	C D：銼子・直接暴露試験	1 年用(1 ~ 3)
D：銅	C S：銼子・遮へい暴露試験	3 年用(4 ~ 6)
S：S U S	M D：宮古島・直接暴露試験	5 年用(7 ~ 9)
	M S：宮古島・遮へい暴露試験	7 年用(10 ~ 12)
		10 年用(13 ~ 15)

炭素鋼、銼子、遮へい暴露試験、3 年用の試料の標記例を次に示す。

「 T - C S - 4、T - C S - 5、T - C S - 6 」

表 7 試料の識別方法

識別方法	位置	内容	留意事項
刻 印	試料裏面 (推奨)	試料に記号(番号)を打刻する。	めっき鋼板への打刻は、避けたほうが良い。打刻により、めっき層が破壊され下地金属が露出するおそれがある。
粘着性ラベル (シールテープ)		記号(番号)が表記された粘着性ラベルを試料に添付する。	暴露試験期間中に判読可能な耐久性のある粘着性ラベルを用いる。
配置図	-	暴露架台上の試料の位置と試料記号(番号)を記録する。	配置図作成者以外の人でも配置図により試料識別ができるように詳細に記録する。
備考) (1) 試料端部への切込み、ドリル孔なども試料識別に用いてもよい。 (2) 試料の識別方法は、化学的・物理的な影響を与えない方法で付ける。 (3) 試料識別による試験結果への影響は小さくしなくてはならない。 (4) 暴露架台、試料保持枠に試料記号(番号)を表示してもよい。			

4.3 試料の脱脂

試料表面に防錆油等が塗布されている場合は、試料を脱脂しなければならない。脱脂の一例を次に示す。

試料脱脂【例】

揮発性油(ナフサ)で洗浄	メタノールで洗浄	水道水で洗浄
沸騰水中に浸せき(数秒)	乾いたタオルで水分拭き取り	終了

ナフサ：工業用ナフサ(成分：キシレン 80～90wt%、トルエン 5～10wt%)

4.4 試料のシール処理

試料の端面、または裏面にシール処理を施し、暴露面以外の部分の腐食を制御する方法で試験をする場合がある。その場合のシール処理材は、耐久性がなくてはならない。シール処理は、高分子素材のシールテープ、塗装などによる幾つかの方法はあるが、何れの方法を用いる場合においても、試料に影響を及ぼすもの(例えば防錆塗料)を使用してはならない。試料の端面・裏面にシール処理を施して長期間暴露試験に供する場合、タールエポキシ樹脂塗装を用いた例がある。

試料のシール処理は、試料の脱脂終了後に行う。また、暴露試験後の物性測定で、腐食量を求める場合は、試料のシール処理前に秤量しておかなければならない。そのため、試料のシール処理前に他の作業が終了しているか再確認することが肝要である。

4.5 試料の前処理工程

試料の前処理工程を、図 2 に示す。

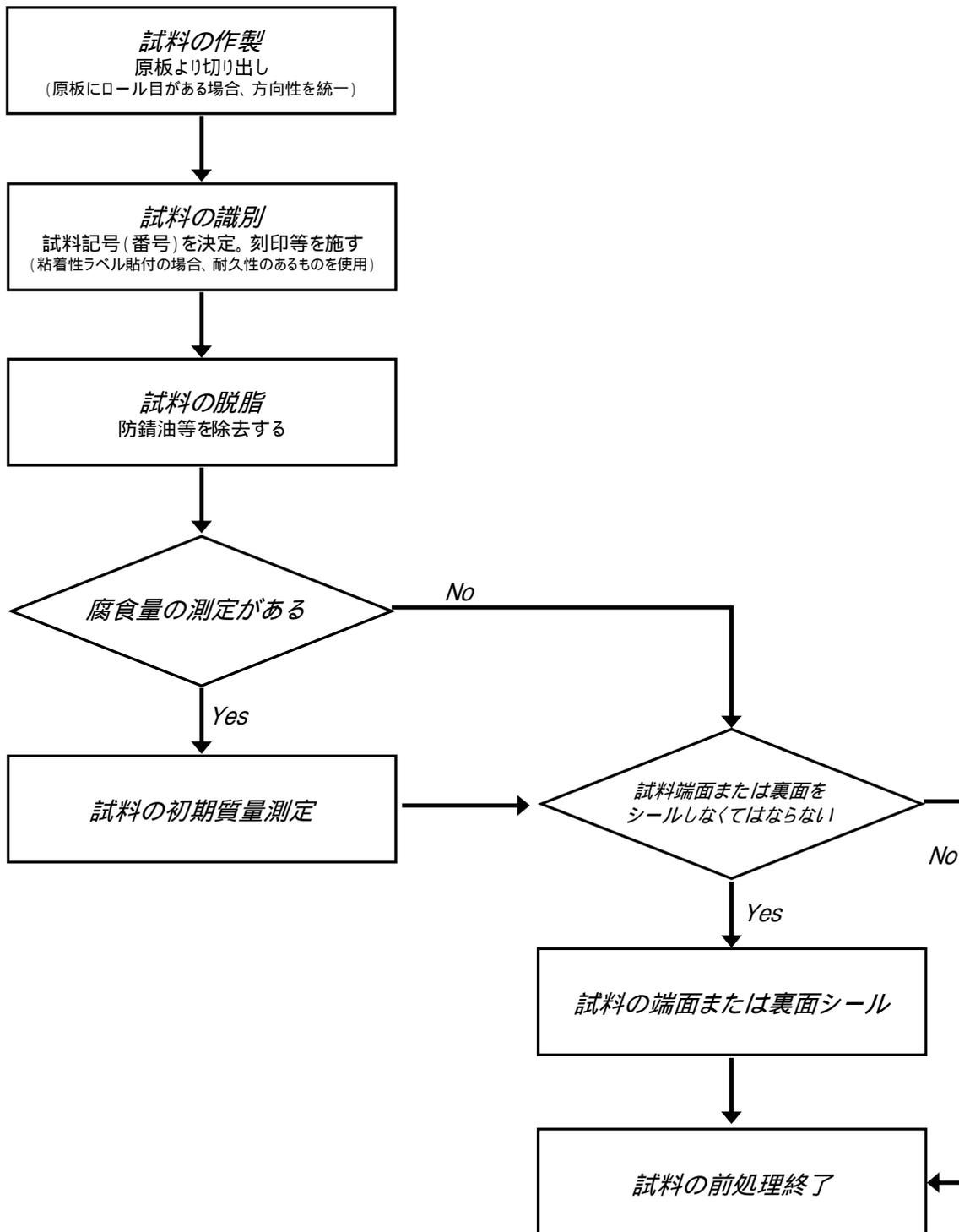


図 2 試料の前処理工程

5. 暴露試験

5.1 暴露架台及び試料保持具

暴露架台は、試料の暴露試験期間中に腐食等により破損するような材質であっては、試験を満足に実施することができない。そのため、暴露架台は相応の耐久性のある材質のものをを用いる必要がある。暴露架台の材質が木材である場合は、防腐処理を施し、場合によっては塗装したほうが良い。暴露架台の材質が金属である場合は、暴露架台から腐食生成物が発生しないよう暴露架台の表面を処理する必要がある。

試料保持具については、試料（金属）と暴露架台との間が、電氣的に絶縁されるようにしなくてはならないため、試料保持具は、磁器製又はプラスチック製のものをを用いたほうが良い。

試料保持具を図 3 に示す。

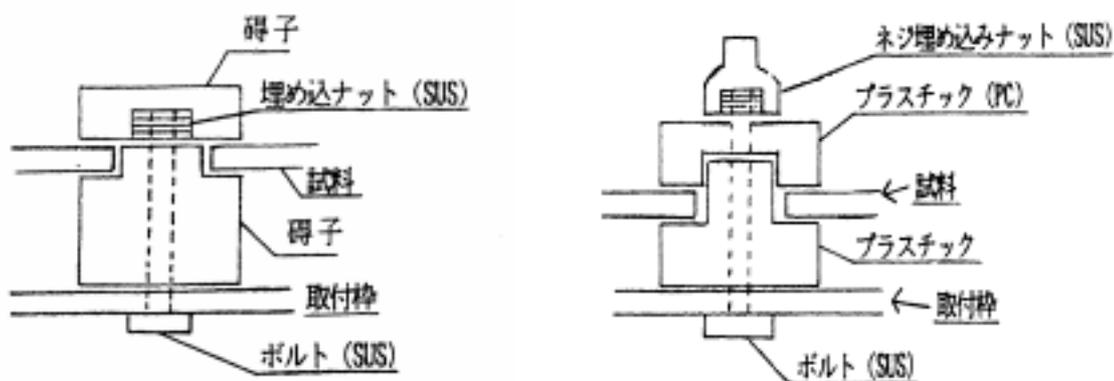


図 3 試料保持具（左：磁器製、右：プラスチック製）

5.2 試料の取り付け及び取り外し

5.2.1 試料の取り付け

- 1) 清浄な手袋をして試料を取り付ける。[素手で試料に触れてはならない]
- 2) 暴露試験の条件をよく確認し、暴露試験の条件に従い試料を取り付ける。また、あらかじめ試料配置図を作成してある場合は、配置図に従い試料を取り付ける。
[暴露試験方法、試料取り付け角度・方位、暴露面、試料配置などの確認]
- 3) 暴露架台に取り付けた試料同士が接触しないように設置する。また、試料から発生した腐食生成物が他の試料に付着しないように設置しなければならない。[図 4 参照]
- 4) 試料と暴露架台の間は、電氣的に絶縁されていなければならない。[図 5 参照]

5.2.2 試料の取り外し

- 1) 清浄な手袋をして試料を取り外す。[素手で試料に触れてはならない]
- 2) 暴露架台と試料配置図を照らし合わせながら試料を取り外す。[試料記号（番号）の確認]
- 3) 試料を取り外す際は、試料に傷等を作らないように細心の注意を払わなければならない。

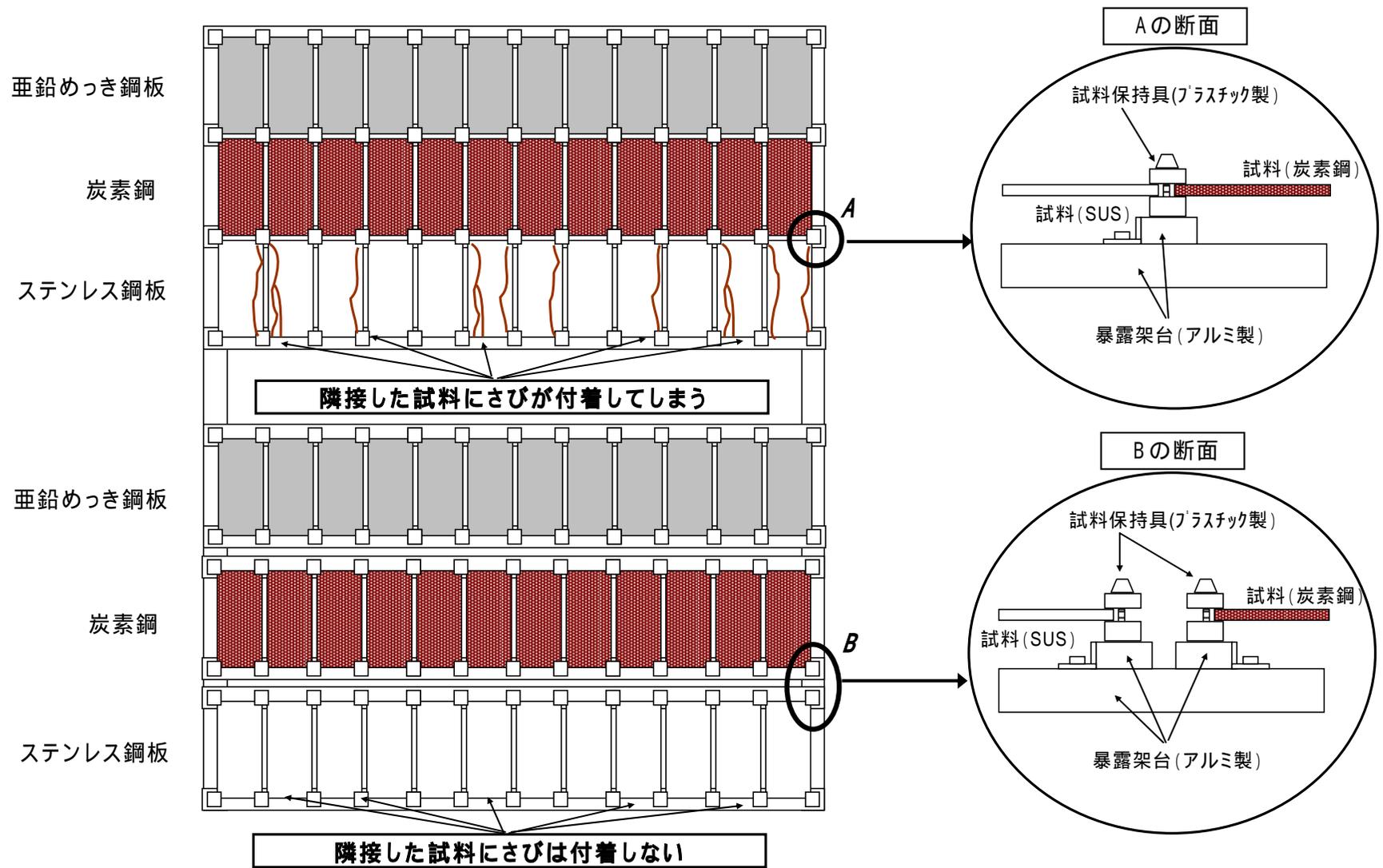


図4 暴露架台への試料の取り付け【試料同士が影響しない取り付け方の一例】

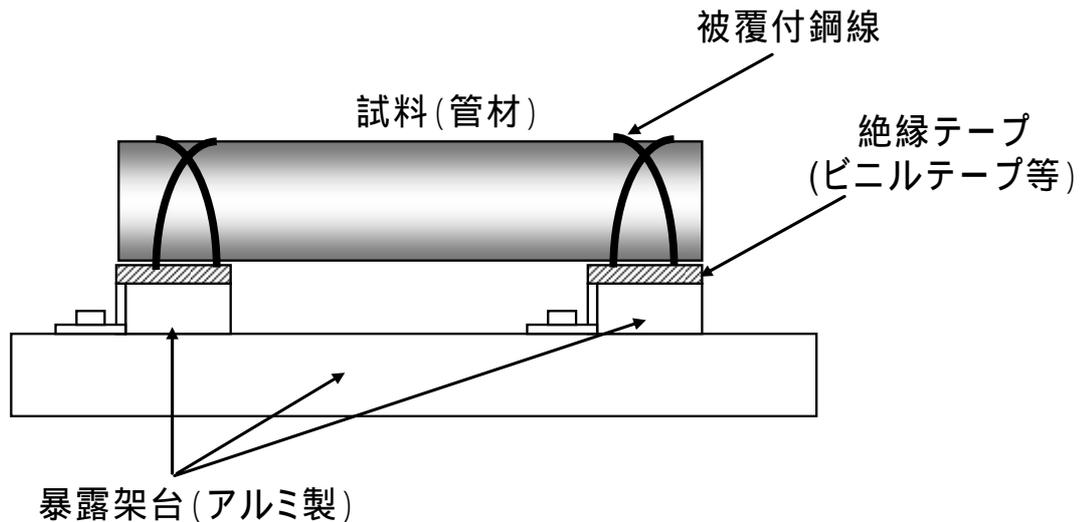


図5 試料と暴露架台の絶縁方法の一例

5.3 暴露試験期間中の試料の取扱い

暴露試験期間中の試料の取扱いは、次による。

- 1) 暴露試料の暴露状態を定期的に目視にて確認する。[試料が初期の設置状態を保っているか確認]
- 2) 試料シール部に不具合（欠損等）が見つかった場合、速やかに補修する。[試料状態の確認]
- 3) 暴露試験期間中の試料の洗浄は実施しない。また、鳥類などの糞が試料に付着している場合の処置は、試験当事者間の協議による。[試料状態の確認]

6. 暴露試験場の環境計測

6.1 環境因子の計測

前述したが、金属材料の腐食の主要因は、「ぬれ時間」、「海塩粒子」、「硫酸化物」の3因子である。そのため、最低限これら因子を計測することが望ましい。これらの3因子の他に、気象因子を併せて計測することは、暴露後試料の腐食状況を解析する上で有用である。

6.1.1 腐食性因子の計測

1) ぬれ時間

ISO9223¹⁾では、ぬれ時間を次のように定義している。

「ぬれ時間：0 よりも高い気温のときに相対湿度が80%以上であるときの時間」

したがって、ぬれ時間は、気温と相対湿度を計測することにより求められる。しかしながら、気温と相対湿度のチャート紙よりデータを読み出すことは非常に労力が掛かるため、表8に示す年平均気温及び年平均相対湿度の関係から計算する方法により、ぬれ時間を計算しても良い。

また、ぬれ時間計測用のセンサーを用い、ぬれ時間を測定しても良い。ただし、ぬれ時間計測用センサーは、気象庁の気象測器検定に該当しないため、その旨留意された上で計測すること。

備考) 気象測器検定は、6要素（気温、相対湿度、降水量、風向、風速、日射量）について検定項目として挙げられている。

ぬれ時間の計算方法²⁾³⁾

$$\text{ぬれ時間 (TOW : Time of Wetness)} = 8766 \times P(\text{RH}) \times P(\text{T})$$

表 8 ぬれ時間計算に使用する確率係数

年平均相対湿度 (%R.H) と確率係数 P (RH)							
%R.H	P(RH)	%R.H	P(RH)	%R.H	P(RH)	%R.H	P(RH)
20	0.002	54	0.146	70	0.396	86	0.767
25	0.005	56	0.169	72	0.438	88	0.814
30	0.012	58	0.194	74	0.482	90	0.859
35	0.023	60	0.222	76	0.527	92	0.900
40	0.042	62	0.252	78	0.574	94	0.937
45	0.069	64	0.285	80	0.622	96	0.968
50	0.107	66	0.320	82	0.670	98	0.990
52	0.125	68	0.357	84	0.719	99	0.997
年平均気温 () と確率係数 P (T)							
	P(T)		P(T)		P(T)		P(T)
-30	0.001	-14	0.080	2	0.580	18	0.965
-28	0.002	-12	0.114	4	0.656	20	0.978
-26	0.005	-10	0.158	6	0.727	22	0.986
-24	0.008	-8	0.211	8	0.789	24	0.992
-22	0.014	-6	0.273	10	0.842	26	0.995
-20	0.022	-4	0.344	12	0.886	28	0.998
-18	0.035	-2	0.420	14	0.920	30	0.999
-16	0.054	0	0.500	16	0.946		

2) 腐食性物質の計測

腐食性物質の中の海塩粒子量、硫黄酸化物量についての計測は、JIS Z 2382 に準拠して計測を行う。計測は、測定器具を1か月ごとに交換し分析する。1年間以上の計測を行うことが望ましい。海塩粒子及び硫黄酸化物の測定方法を表9に示す。

表 9 腐食性物質の計測 (JIS Z 2382)

種類 [単位]	測定方法	内容	規格
海塩粒子量 mgNaCl / (m ² ・d)	ドライ ガーゼ法	捕集部のガーゼ面積が 100cm ² (10×10cm) になるように木 枠等にはめ込んでガーゼ部に風が通り抜ける構造。	JIS Z 2382
	ウェットキャ ンドル法	捕集部のガーゼが円筒部に巻付けた構造であり、ガーゼ面 積が 100cm ² である。また、ガーゼの一部がフラスコ内の グリセリン水溶液中に接しており、ガーゼ部はぬれている 状態になっている。	JIS Z 2382 (IS09225)
硫黄酸化物量 mgSO ₂ / (m ² ・d)	二酸化鉛 円筒法	捕集部は二酸化鉛が塗布されたガーゼを円筒部に巻付け た構造であり、ガーゼ面積が 100cm ² である。	JIS Z 2382
	二酸化鉛 プレート法	捕集部は二酸化鉛が塗布されたろ紙をシャーレに貼付け た構造であり、ガーゼ面積が 28.26cm ² (60mm) ある。シ ャーレの硫黄酸化物捕集部を地面に向けて計測を行う。	JIS Z 2382 (IS09225)
	アルカリろ紙 プレート法	捕集部は炭酸ナトリウムまたは炭酸カリウム溶液に浸漬 し、乾燥させたろ紙であり、面積が 150cm ² で (10×15× 0.3cm) ある。	

6.1.2 気象因子の計測

気象因子については、本ガイドの[]共通の環境因子の測定を参照されたい。

6.2 暴露試験場の腐食性の把握

暴露試験場の腐食性把握は、ISO9223₋₁₉₉₂（大気環境の腐食性分類）¹⁾を用いてその腐食の程度を把握することが可能である。大気環境の腐食性は、標準金属試験片[JIS Z 2383（ISO9226）]を暴露することにより分類される。暴露試験場の腐食性を把握することは、他の暴露試験場の腐食性と相対比較することが可能となるため、環境因子の計測と同じく重要な要素である。

大気環境の腐食性分類を行う上で、ISOは世界の分類であるために区分幅が大きいいため、日本の大気環境の腐食性分類（案）⁴⁾では国内で出現する大気環境による腐食性を基に5段階に分類できるようになっている。以下に、標準金属試験片の種類を表10に、大気環境の腐食性分類でISO9223の大気環境の腐食性分類を表11に、日本の大気環境の腐食性分類（案）を表12に示す。また、日本の大気環境の腐食性分類で国内25か所において標準金属試験片（炭素鋼、亜鉛）を暴露した結果を図6、図7に示す。

表10 標準金属試験片 [JIS Z 2383]

No.	名称	種別（対応規格）	大きさ (mm)	板厚 (mm)	表面処理	備考
1	炭素鋼	SM400B(JIS G 3106)	100 ^W × 150 ^H	6	両面#600 研磨	炭素鋼
2	耐候性鋼	SMA490BW(JIS G 3114)		6	両面#600 研磨	耐候性鋼
3	亜鉛	純度 98.5%以上		2	両面#320 研磨	旧 JIS H 4321 の1種に準拠
4	銅	C1220P(JIS H 3100)		2	-	りん脱酸銅
5	アルミニウム	A1050P(JIS H 4000)		2	-	純アルミニウム
7	ステンレス	SUS304(JIS G 4305)		2	2B 仕上げ	汎用ステンレス鋼

表11 大気環境の腐食性分類 [ISO9223₋₁₉₉₂]

腐食性 カテゴリー	単位	炭素鋼	亜鉛	銅	アルミニウム
C1	g / (m ² · a) μ m / a	r _{corr} 10 r _{corr} 1.3	r _{corr} 0.7 r _{corr} 0.1	r _{corr} 0.9 r _{corr} 0.1	—
C2		10 < r _{corr} 200 1.3 < r _{corr} 25	0.7 < r _{corr} 5 0.1 < r _{corr} 0.7	0.9 < r _{corr} 5 0.1 < r _{corr} 0.6	r _{corr} 0.6 —
C3		200 < r _{corr} 400 25 < r _{corr} 50	5 < r _{corr} 15 0.7 < r _{corr} 2.1	5 < r _{corr} 12 0.6 < r _{corr} 1.3	0.6 < r _{corr} 2 —
C4		400 < r _{corr} 650 50 < r _{corr} 80	15 < r _{corr} 30 2.1 < r _{corr} 4.2	12 < r _{corr} 25 1.3 < r _{corr} 2.8	2 < r _{corr} 5 —
C5		650 < r _{corr} 1500 80 < r _{corr} 200	30 < r _{corr} 60 4.2 < r _{corr} 8.4	25 < r _{corr} 50 2.8 < r _{corr} 5.6	5 < r _{corr} 10 —

備考) 腐食性カテゴリーは、標準金属試験片を1年間暴露することにより得られる。

表 12 日本の大気環境の腐食性分類 (案)

記号	腐食度			
	鉄 鋼		亜 鉛	
	g / (m ² ・a)	μ m / a	g / (m ² ・a)	μ m / a
J C 1	104	14	4.1	0.6
J C 2	104 < ~ 136	14 < ~ 17	4.1 < ~ 5.3	0.6 < ~ 0.7
J C 3	136 < ~ 238	17 < ~ 30	5.3 < ~ 9.2	0.7 < ~ 1.3
J C 4	238 < ~ 312	30 < ~ 40	9.2 < ~ 11.9	1.3 < ~ 1.7
J C 5	312 < ~ 492	40 < ~ 63	11.9 < ~ 18.5	1.7 < ~ 2.6
J C X	492 <	63 <	18.5 <	2.6 <

備考) 腐食性カテゴリーは、標準金属試験片を1年間暴露することにより得られる。

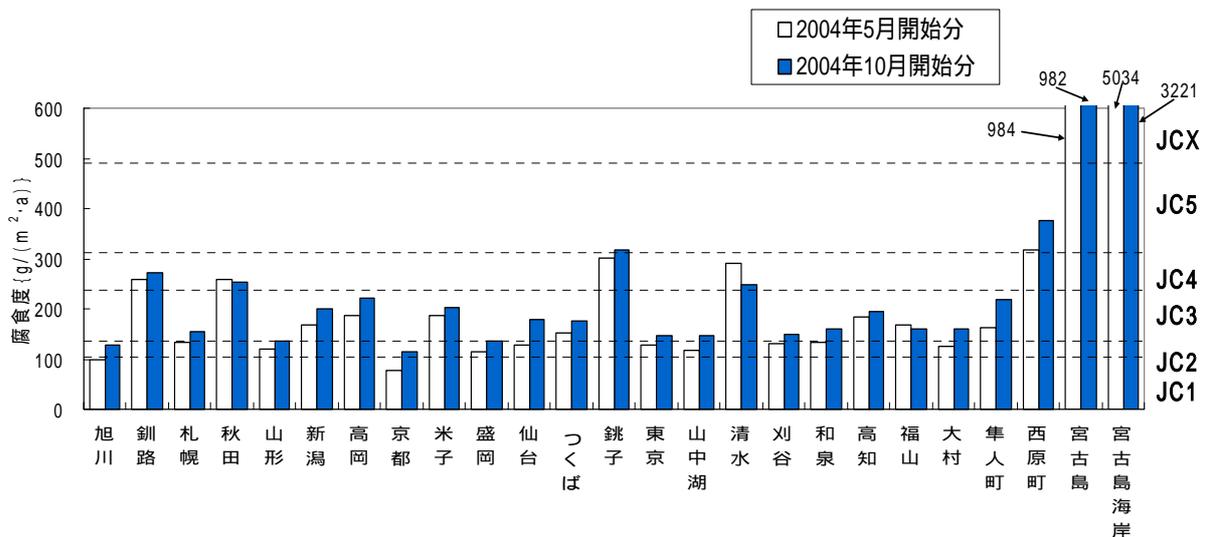


図 6 標準金属試験片(鉄鋼)の腐食度【試験片数3nの平均値】

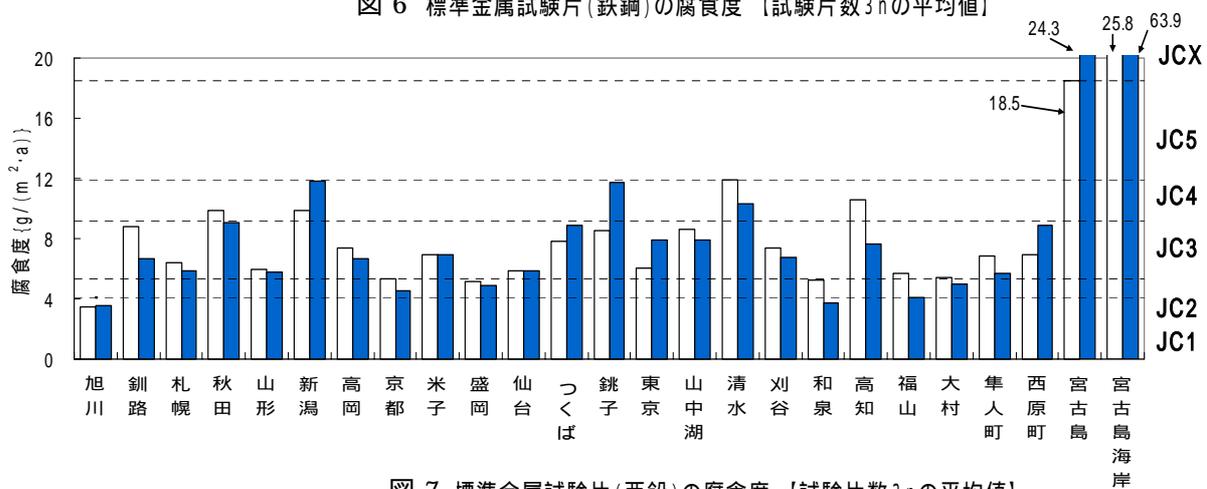


図 7 標準金属試験片(亜鉛)の腐食度【試験片数3nの平均値】

7. 評価試験

暴露試験後の評価試験は、試料の特徴を捉える上で重要である。さまざまな評価項目の中の一部を表 13 に示す。

なお、腐食生成物除去方法を 8 項（付記）に示す。

表 13 評価試験の評価項目〔種々の評価項目から一部を表記〕

評価項目	分析技術等	内 容	関連規格
物理特性	硬さ	ブリネル、ビッカース、ロックウェル、ショア、ヌーブ硬さ	JIS Z 2243、JIS Z 2244、 JIS Z 2245、JIS Z 2246、 JIS Z 2251
	粗さ	表面粗さの測定	JIS B 0601
	引張	引張強度、ひずみ、クリープ、リラクション	JIS Z 2241、JIS Z 2254、 JIS Z 2271、JIS Z 2276、 JIS H 0511
	曲げ	曲げの測定	JIS Z 2248
	衝撃	シャルピー、アイゾット衝撃	JIS Z 2242
	われ	エリクセン	JIS Z 2247
	粒度	結晶粒度の測定	JIS G 0551、JIS G 0552
	アノード分極	アノード分極曲線の測定	JIS G 0579
	疲れ	疲労測定	JIS Z 2273
	膜厚	めっき、溶射の膜厚測定	JIS H 8501、JIS H 8401、 JIS H 8664、JIS H 8680
	密着	めっき、溶射の密着性測定	JIS H 8504、JIS H 8664
	磨耗	めっき、溶射の磨耗性の測定	JIS H 8503、JIS H 8682
構造解析	XRD (X線解析法)	結晶構造の特定	JIS K 0131
	EPMA (電子プローブマイクロアナライザー)	多元素同定	JIS K 0132
表面解析	XPS (X線光電子分光分析法)	表面組成測定	JIS K 0116
	AES (オージェ電子分光分析)	表面極小観察、元素分析	JIS K 0116
	SEM (走査型電子顕微鏡)	表面微小観察	JIS K 0132
	TEM (透過電子顕微鏡)	表面微小観察	JIS K 0132
	STM (走査型トンネル顕微鏡)	表面微小観察	JIS K 0132
	SPM (走査型プローブ顕微鏡)	表面微小観察	JIS K 0132

表 13 暴露試料の評価方法〔種々の評価項目から一部を表記(続き)〕

項目	分析技術等	内容	関連規格
元素分析	ICP (高周波誘導結合 プラズマ分光分析)	元素の同定	JIS K 1200、JIS G 1258 JIS H 1307、 JIS K 0400-52-30
	XRF (蛍光 X 線分析)	元素の同定	JIS K 0119、JIS G 1351、 JIS H 1669
	イオンクロマトグラフィー	陽イオン、陰イオンの測定	JIS K 0127
	ガスクロマトグラフィー	気体中の成分分析	JIS K 0114
その他	腐食減量	腐食性生物を除去し腐食減量を測定	JISZ2371、JISH8502
	さび発生度 (レイトング ナハ)	レイトング ナハ 法による試料表面のさび発生度を目視により測定	JIS Z 2371、JIS H 8502 JIS H 8681-2 JIS G 0595
	孔食深さ	光学顕微鏡により試料表面の孔食深さを計測	JIS H 8679-1、JIS H 8679-2
	外観観察	目視、あるいはルーペにて試料表面を観察	
	写真撮影	アナログあるいはデジタルカメラにて試料を撮影	

8. 記録

表 14 に記録事項を示す。ただし、必要のない項目は省略しても良い。

表 14 記録事項

項目		記録する内容	備考
試料	内容	名称,種類,形状,寸法,試料記号(番号)及び数量	-
	前処理	研磨,脱脂,表面処理,シール有無	シールをした場合,材質等を明記する。
暴露	暴露試験場	所在地(住所),緯度,経度,標高	左記以外に,環境区分を明記することが望ましい。
	暴露試験方法	暴露試験方法の種類	-
	試料の取り付け	方位,角度	-
	試料の配置図	試料記号(番号)と暴露架台への配置場所を明記	-
	暴露試験期間	開始日,サプ ^o リング ^o 日,終了日	-
	暴露試験の中止・中断	期日及び期間,理由,処置方法	中断の場合は,試料の保管方法を明記することが望ましい
環境	環境因子	腐食性因子 (ぬれ時間,海塩粒子量,硫酸化物量) 気象因子 (気温,相対湿度,降水量,風向,風速,日射量など)	暴露試験場近傍の気象官署データを引用する場合は,気象官署の場所,暴露試験場から気象官署までの距離を明記する。 腐食性因子については,その測定方法を明記する。
	大気環境の腐食性	大気環境の腐食性測定結果	暴露試験場の大気環境の腐食性を測定した場合のみ明記する。
特記事項		暴露試験期間中に台風,暴風雨及び記録的な気象条件であった場合,特記として記録することが望ましい。	

9. 付記

9.1 腐食生成物除去、腐食量及び板厚減少量

試料の腐食生成物除去は、暴露試験後の評価として重要であり、試料の特性（耐候性）が腐食量（ g/m^2 ）という数値で得ることができる。そのため、腐食量を経時的に取得することにより、腐食量の経年変化が得られる。その経年変化により数十年後の腐食量を予測する近似式を立てることにより、防錆設計の策定に寄与することが可能であるとされている。

（財）日本ウエザリングテストセンターでは、腐食生成物の除去を JIS Z 2371（塩水噴霧試験方法）の参考表 1（化学的腐食生成物除去方法）及び IS08407 [Corrosion of metals and alloys Removal of corrosion products from corrosion test specimens] に準拠した方法で行なっている。

腐食生成物除去（以下、除錆と称す）の概要は、腐食生成物除去溶液（以降、除錆溶液と称す）に所定の時間、試料を浸漬させ、浸漬後に水洗洗浄する。その後、試料を乾燥させて秤量する。この除錆溶液に浸漬 洗浄 秤量を繰り返すことにより、試料質量が徐々に小さくなってゆく。（付図 1 参照）

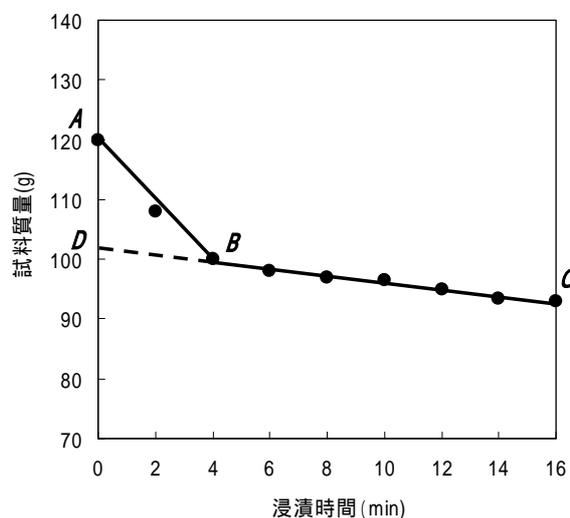
付図 1 の「A」は、除錆前の試料質量（すなわち、暴露試験後の試料質量）、「B」は概ね試料の腐食生成物が除去されたポイントになる。

付図 1 の直線 A-B は、腐食生成物が除去され質量減少の大きい直線である。一方、直線 B-C は試料自身が除錆溶液により溶解するために質量減少が発生するブランク減量直線である。

除錆においては、ほとんどの金属試料において付図 1 のような傾向を示すと言われている。

IS08407 では、ブランク減量直線（B-C 直線）の延長した直線（B-D 直線）の Y 軸との交点「D」が腐食量であるとされている。

今回は、亜鉛板の暴露により発生した腐食生成物の除去を紹介する。



付図 1 除錆溶液への浸漬時間と試料質量の

除錆試料： 標準金属試験片 [亜鉛板、Zn 純度 99.8wt%以上]

除錆溶液： 酸化クロム（ ）水溶液 [CrO_3 (200g) を蒸留水で 1000ml にした溶液]

除錆条件： 除錆溶液を 80 一定にし、試料を 2 分間浸漬させる。

試料を水道水で水洗、洗浄する。（試料よりも柔らかいブラシ等で表面を擦る）

試料を沸騰水中に浸漬後、水分をタオルで拭き取る。（沸騰水中には数十秒程の浸漬）

試料秤量（ただし、試料温度は室温であること）

～ を繰り返し実施する。

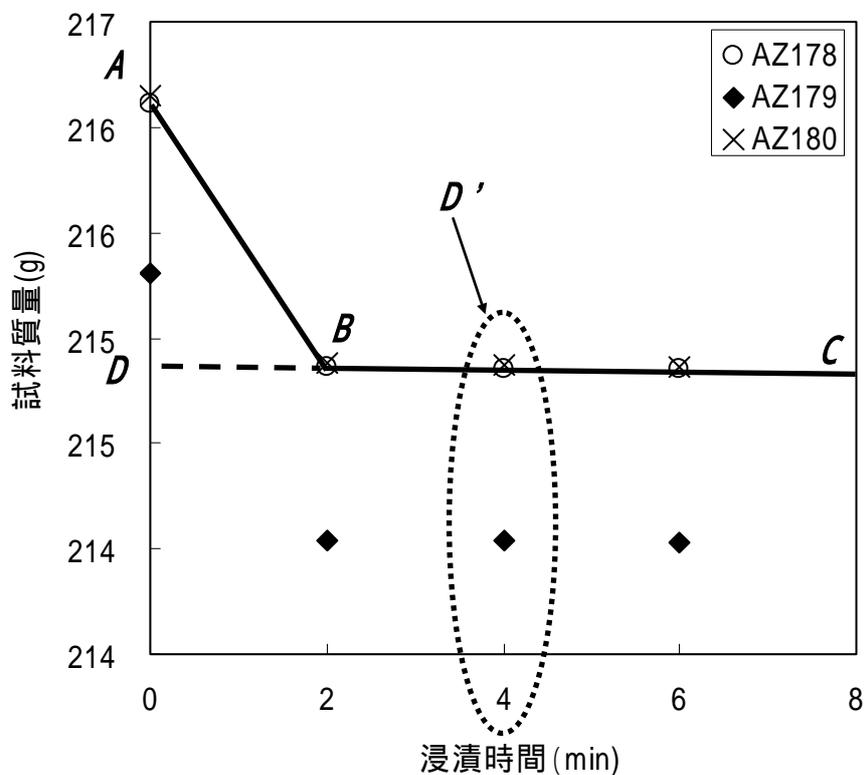
除錆終点： 試料の質量変化（質量減量）が小さくなった時点

以上の除錆作業に則し、実際に亜鉛板に対し除錆作業を行った時⁴⁾の質量変化を、付表 1 及び付図 2 に示す。

付表 1 亜鉛板の除錆作業時の質量変化（単位：g）

試料記号	暴露 試験前	暴露 試験後	除錆溶液に浸漬させた延べ時間(分)		
			2	4	6
AZ178	215.215	216.113	214.861	214.856	214.851
AZ179	214.406	215.310	214.044	214.038	214.031
AZ180	215.239	216.146	214.881	214.874	214.865

備考) 亜鉛板は、銚子にて1年間の直接暴露試験を行ったものである。



付図 2 亜鉛板の除錆作業時の質量変化グラフ

1年間の暴露試験(銚子)による亜鉛板の場合、経験的に除錆溶液への延べ浸漬時間が6分にて除錆ができることがわかっているため、付図 2 の結果は延べ浸漬時間6分で終了した。付図 2 よりわかるように、直線 B-C は傾きが非常に小さいことがわかる。つまり、2分間浸漬で概ね腐食生成物が除去されたことを示している。

したがって、直線 B-C の延長線上で Y 軸との交点である「D」と、付図 2 で示す「D'」はほぼ同じであると考え、延べ浸漬時間 4 分のときの亜鉛板の質量を、除錆後質量とした。

次に、試料の除錆後質量より、試料の腐食量が(1)式より計算される。

$$Z = (W_0 - W) / A \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

Z : 腐食量 (g/m²)、 W₀ : 初期質量(g)、 W : 除錆後質量(g)、
A : 試料試験面積 (m²)

腐食量 (g/m²) が(1)式より求めたことにより、試料の板厚減少量を(2)式より計算することができる。

$$D = Z / \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

D : 板厚減少量 (μm) Z : 腐食量 (g/m²) ρ : 金属密度 (g/cm³)

付表1の除錆結果より求めた腐食量及び板厚減少量の結果を付表2に示す。

付表2 亜鉛板の腐食量及び板厚減少量

試料記号	質量(g)		腐食量 (g/m ²)	板厚減少量 (μm)
	暴露試験前	除錆後		
AZ178	215.215	214.856	11.6	1.62
AZ179	214.406	214.038	11.9	1.66
AZ180	215.239	214.874	11.8	1.65

備考) (1) 亜鉛板は、銚子にて1年間の直接暴露試験を行ったものである。
(2) 試料の面積は、310cm²(試料の大きさ10×15×0.2cm)として計算した。
(3) 試料の密度は、亜鉛の密度7.13(g/cm³)を用いた。

板厚減少量を計算する際には、試料の金属密度が必要となる。参考までに、JIS Z 2383に規定されている標準金属試験片の金属密度を付表3に示す。

付表3 標準金属 (JIS Z 2383) の密度

標準金属	記号	密度 (g/cm ³)
炭素鋼	Fe	7.86
亜鉛	Zn	7.13
銅	Cu	8.96
アルミニウム	Al	2.70
ステンレス鋼 (SUS304)	SUS	7.93

9.2 腐食量の経時変化

前述したが、暴露試験を実施するに当たり、何を知らたいのかで暴露試験計画も異なってくる。ここでは、長期暴露（10年）試験⁵⁾を実施した炭素鋼の暴露試験の結果を紹介する。（付図3、付図4）

この長期暴露試験では、JIS Z 2383に規定された標準金属（炭素鋼、耐候性鋼、亜鉛、銅、アルミニウム、ステンレス鋼）を用い、4暴露試験場〔銚子（千葉県）、西原町（沖縄県）、宮古島（沖縄県）、マイアミ（米国、フロリダ州）〕において実施したものである。

付図3及び付図4より、暴露試験場の違いにより腐食量の経時変化が異なることがわかる。このことは、暴露試験場の大気環境が異なるため、腐食量に違いが生じたと言える。

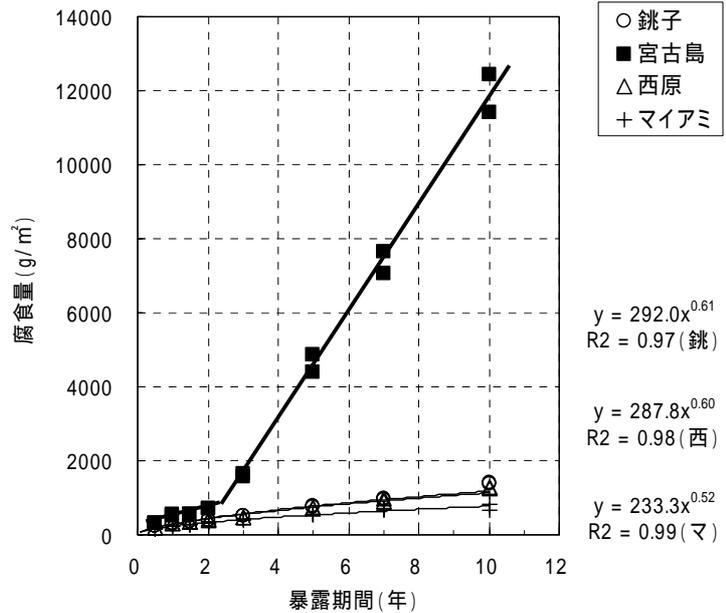
特筆すべきは、宮古島における腐食量が他の暴露試験場を凌駕しているという点に尽きる。

付図4は、宮古島以外の暴露試験場の変化がわかりやすいようにY軸のレンジを小さくしたものである。付図中には、腐食量の経時変化における近似式を示してある。

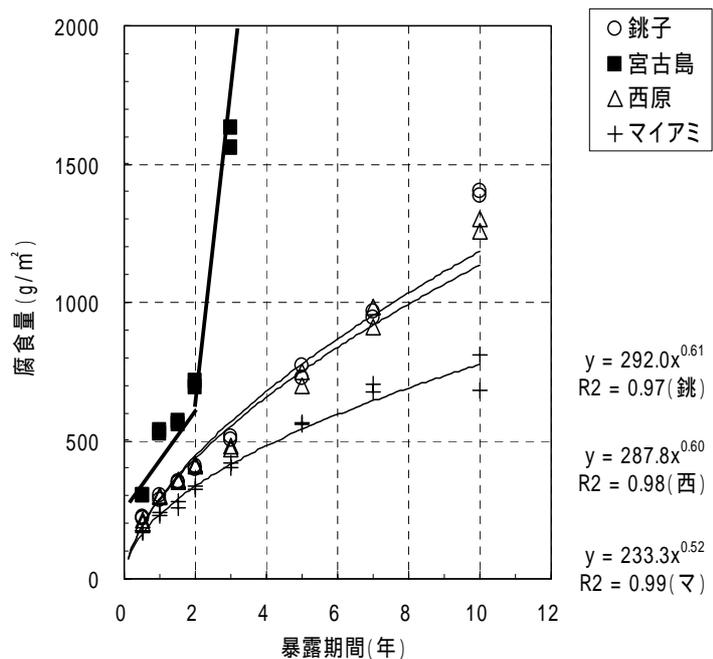
金属の腐食速度は、経時的に小さくなるといわれており、近似式には「 $Y = AX^B$ 」の累乗近似が適している。この近似式のYは腐食量、Xは年である。

この近似式を用いることにより、例えば20年後、あるいは50年後の腐食量を推測することが可能である。

暴露試験の結果からこのように近似式を立て、将来の腐食量のある程度推定することは可能であるが、短い暴露試験期間による暴露試験の結果から導き出された近似式は将来の腐食量の予測に用いる場合、長期間暴露試験の結果から導き出された近似式よりも精度が低くなる。



付図3 炭素鋼の腐食量の経時変化



付図4 炭素鋼の腐食量の経時変化
（付図3のY軸レンジを拡大表示）

また、我が国では四季があるため、暴露試験は最低でも1年以上実施しなくてはならない。

参考文献

- 1) ISO9223-1:1992: Corrosion of metals and alloys -corrosivity of atmospheres-Classification
- 2) ISO/TC156/WG4,N234; Classification of corrosivity of atmosphere.1st Draft of ISO Technical Report.1993
- 3) ISO/TC156/WG4,N314; V.Kucera, J.Tidblmd, A.Mikhailov, :Some new ideas for characterization of atmospheric corrosivity in connection with development of improved standards
- 4) 新発電システムの標準化に関する調査研究（2005）；
財団法人 日本ウエザリングテストセンター
- 4) 新発電システムの標準化に関する調査研究（2003）；
財団法人 日本ウエザリングテストセンター