

標準金属試験片を用いた長期暴露試験結果 [金属系分科会報告]

(財)日本ウェザリングテストセンター 石毛 篤

1. はじめに

大気環境で使用される材料または製品の耐候性・耐久性を把握する方法として、大気暴露試験は必須である。また、大気暴露試験は、短期間で材料・製品の耐候性・耐久性を評価する促進試験で得られたデータに意味（大気暴露試験結果との相関性）を持たせる上で、不可欠である。

しかし、大気暴露試験は、結果を得るまでに長時間を必要とするため、今日では1～3年程度の暴露試験結果から、5～10年またはそれ以上の使用年数の耐候性・耐久性を予測する方法がとられており、長期間（10年以上）の暴露試験はあまり実施されていないのが現状である。

本報告では、経済産業省委託「新発電システムの標準化に関する調査研究（金属系分科会）」（以下、調査研究と称す）で実施した各種金属材料における10か年の長期間暴露試験結果及び暴露試験実施場所の大気環境を紹介し、試験片の選定理由、評価方法、JIS Z 2383（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）が制定されるまでの経緯を解説する。

2. 試験条件

2. 1 試験方法

JIS Z 2381（大気暴露試験方法通則）の直接暴露試験方法に準拠した。

○試験片取付け角度：45度                      ○暴露方位：南 面

2. 2 試験片

試験片は、表1に示す5種類の金属試験片を用いた。

表1 試験片の種類及び形状

No.	名称	種別（対応規格）	形状(mm)	表面処理	備考
1	鉄 鋼	SM400B(JIS G 3106)	150×100×6	両面#600 研磨	炭素鋼
2		SMA490BW(JIS G 3114)	150×100×6	両面#600 研磨	耐候性鋼
3	亜 鉛	純度 98.5%以上	150×100×2	両面#320 研磨	旧 JIS H 4321 の1種に準拠
4	銅	C1220P(JIS H 3100)	150×100×2	—	りん脱酸銅
5	アルミニウム	A1050P(JIS H 4000)	150×100×2	—	純アルミニウム
6		A5052P(JIS H 4000)	150×100×2	—	アルミニウム合金
7	ステンレス	SUS304(JIS G 4305)	150×100×2	2B 仕上げ	オーステナイト系
8		SUS329J4L(JIS G 4305)	150×100×0.8	2B 仕上げ	オーステナイト・フェライト系

2. 3 試験実施場所

試験は、表2に示す6か所で実施した。

表2 試験実施場所の名称等

No.	名称	実施場所	試験実施場所の経緯		海岸までの最短距離(km)
			緯 度	経 度	
1	銚 子	JWTC*銚子暴露試験場	35° 43'	140° 45'	4
2	宮古島	JWTC*宮古島試験場	24° 44'	125° 20'	2
3	西 原	琉球大学工学部 構内	26° 15'	127° 46'	2. 3 5
4	マイアミ	ATLAS* Everglades Test Site	25° 47'	80° 51'	1 6
5	旭 川	JWTC*旭川暴露試験場 (旭川東海大学 構内)	43° 47'	142° 18'	7 6
6	宮古島海岸	JWTC*宮古島海岸試験場	24° 42'	125° 18'	0. 0 0 8

備考) (1)表中の略語は、次のとおり。

JWTC……財団法人 日本ウェザリングテストセンター(Japan Weathering Test Center)

ATLAS……アトラス・ウェザリングサービスグループ(ATLAS Weathering Services Group)

(2)表中の緯度は「北緯」であり、経度は「東経」である。ただしマイアミのみ経度は「西経」である。

2. 4 試験水準

試験片は、水準ごとに n = 3 枚で実施した。試験実施場所と試験対象の試験片を表 3 に示す。

- (1) 長期暴露試験…………… 10 か年暴露 (8 水準 : 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10 か年)
- (2) 短期暴露試験…………… 3 か年暴露 (3 水準 : 1, 2, 3 か年)
- (3) 繰返し暴露試験…………… 1 か年暴露 (8 水準 : 春開始 3 水準, 秋開始 5 水準)

表 3 試験実施場所と試験対象試験片一覧 (「○」は試験実施)

試験名称 (実施期間)	試験実施場所	鉄 鋼		亜 鉛	銅	アルミニウム		ステンレス	
		炭素鋼	耐候性鋼			A1050P	A5052P	SUS304	SUS329J4L
長期暴露試験 (1992 年~2002 年)	4 暴露地 銚子, 宮古島, 西原, マiami	○	○	○	○	○	○	○	○
短期暴露試験 (1996 年~1999 年)	4 暴露地 銚子, 宮古島, 旭川, 宮古島海岸	○	○	○	○	—	—	○*	—
繰返し暴露試験 (1992 年~1995 年)	3 暴露地 銚子, 宮古島, 西原	○	○	○	○	○	○	○	○
繰返し暴露試験 (1996 年~1998 年)	4 暴露地 銚子, 宮古島, 旭川, 宮古島海岸	○	○	○	○	—	—	○	—

備考) 短期暴露試験のステンレス試験片 (SUS304) は、試験実施場所「旭川」においては暴露実施しなかった。

2. 5 試験期間

試験期間を表 4 に示す。

表 4 試験実施表及び試験期間

	1992 年	1993 年	1994 年	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年
長期暴露試験 (暴露 10 か年)	○ 開始	● 0.5 年 1 年	● 1.5 年 2 年	● 3 年		● 5 年		● 7 年			● 10 年
	試験実施場所 : 4 か所(銚子、宮古島、西原、マイアミ*)										
短期暴露試験 (暴露 3 か年)					○ 開始	● 1 年	● 2 年	● 3 年			
	試験実施場所 : 4 か所(銚子、宮古島、旭川、宮古島海岸)										
繰返し暴露試験 (暴露 1 か年)	○	◎	◎	●							
		○	◎	●							
					←秋開始分						
					←春開始分						
						○	◎	●			
						○	◎	●			
									←秋開始分		
									←春開始分		
	試験実施場所 : 4 か所(銚子、宮古島、旭川、宮古島海岸)										

- 凡例) 「○」 …… 試験開始  
 「●」 …… 試験片サブリング  
 「◎」 …… 試験片サブリング及び新規試験片取付け

※注) 長期暴露試験の試験実施場所「マイアミ」において、大型ハリケーン(アンドリュー)の襲来のため約 2 か月間 (1992. 8. 24~1992. 10. 30) 暴露を中断した。

3. 環境因子の計測

計測及び算出した環境因子 6 項目を表 5 に示す。

表 5 環境因子について

No.	項目	単位	備考	No.	項目	単位	備考
1	気温	℃	最高, 最低, 月平均	4	飛来海塩粒子量	mdd	mg・NaCl/d m <sup>2</sup> /day
2	湿度	%R.H	最低, 月平均	5	硫黄酸化物量	mdd	mg・SO <sub>2</sub> /d m <sup>2</sup> /day
3	降水量	mm	月ごとに積算	6	ぬれ時間	hr/年	気温・湿度より算出

備考) 試験実施場所「マイアミ」の飛来海塩粒子量及び硫黄酸化物量の測定は実施しなかった。

※ ぬれ時間の算出方法

ぬれ時間は、年平均気温（℃）と年相対湿度（％）の確率係数を1年間の時間（1年≒8766hr）に乗することで近似できる方法（ISOに提案されている方法<sup>3)</sup>）を用いた。計算式は次のとおり。また、年平均気温と相対湿度の確率係数を表6に示す。

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

表6 ぬれ時間計算方法(ISO提案法)確率係数

年相対湿度 (%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		

4. 評価方法

4. 1 評価項目

調査研究（1992年～2002年）で実施した検討・評価項目は、表7に示すとおりであるが、今回の発表は○印の項目のみ対象とする。

表7 調査研究（1992年～2002年）で実施した検討・評価項目 ※○印が今回発表

検討・評価項目	内容	対象試料
○ 腐食減量 (g/m <sup>2</sup> )	試験前後の質量差	全試料
○ 環境因子と腐食量の相関	環境因子(温度, 湿度, ぬれ時間, 飛来海塩粒子量, 硫酸化物量, 降水量)との単相関	全試料
○ 外観写真	フロッグ写真撮影	全試料
○ 繰返し暴露結果の差の検定	試験開始時期, 試験実施場所を因子とし, 腐食量データの差を検定	全試料
外観観察	目視による	全試料
孔食深さを統計的に類推	単位面積当りの実測した孔食深さ(μm)データより極値統計(Gunbel分布)解析し検定	アルミニウム, ステンレス
色差(ΔEab*)	試験前後の色差	アルミニウム, 銅, ステンレス
光沢(60° GS)	試験前後の光沢	アルミニウム, 銅, ステンレス
腐食面積率(%)	試験後試料の腐食発生面積率	アルミニウム, ステンレス
孔食深さ(μm)	試料表裏面の孔食測定	アルミニウム, ステンレス
RST値測定(kΩ)	さび層安定度センサー(RST)で測定(新日鐵法)	炭素鋼, 耐候性鋼
EPMA分析	腐食生成物元素分析	銅
X線回折	腐食生成物成分分析	炭素鋼, 銅
発錆程度評価	基準写真による評価(ステンレス協会評価方法)	ステンレス

検討・評価項目	内容	対象試料
腐食性分類	環境因子レベルによる大気の腐食性カテゴリ分類 (ISO9223)	炭素鋼, 銅, 亜鉛 アルミニウム
ぬれ時間の検討	ISO9223 による平均気温, 相対湿度からの計算値と電極法による実測値を比較	—
飛来海塩粒子量の捕集方法を検討	ドライゲゼ法 (JIS 法) とウェットキャントル法 (ISO 法) の海塩捕集量を比較	—
飛来海塩粒子量と風向・風速を検討	ドライゲゼ法 (JIS 法) とウェットキャントル法 (ISO 法) の海塩捕集量と風向・風速の関係を検討 <sup>1)</sup>	—
気温の促進率	暴露場所の平均気温の差を促進率 <sup>2)</sup> として捉え補正值を算出し, 腐食量との相関を検討	全試料
エアサンプラーとドライゲゼ法の比較	エアサンプラーとドライゲゼ法で捕集される飛来海塩粒子量を比較	—
XRD 法による分析	さび組成成分を分析	炭素鋼, 耐候性鋼
ドライゲゼ法の海塩捕集期間の違い	ドライゲゼ法の飛来海塩粒子捕集期間 (暴露期間) を変え, 捕集量の差を検討	—
大気の腐食性カテゴリ分類 (試案)	ISO9223 の腐食性カテゴリ分類を, 国内で計測された環境因子累積確率で再分類 (試案) したカテゴリで評価	炭素鋼, 亜鉛

備考) 表中の検討・評価項目は、調査研究(1992年～2002年)において大気暴露試験試料及び環境因子測定に実施したものである。また、調査研究で実施した促進試験の検討・評価項目は含まない。

#### 4. 2 腐食生成物除去

試験片の腐食生成物除去方法は、JIS Z 2371 (塩水噴霧試験方法) の参考表 1 及び ISO8407 (Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens) に準拠した。実施方法を、表 8 に示す。

腐食生成物除去後の試験片は、乾燥後、1/10000g 単位で秤量した。

表 8 試験片の金属種類ごとの腐食生成物除去方法

試験片	腐食生成物除去溶液	溶液温度	浸漬時間	備考
鉄鋼	{塩酸(HCl, 比重 1.19) 500ml + キヤリソル <sup>3)</sup> 3.5g} を蒸留水で 1L にする	25℃	5分	炭素鋼 耐候性鋼に実施, R.N10 になるまで(浸漬後→水道水で洗浄)を繰り返した。
亜鉛	酸化クロム(VI) (CrO <sub>3</sub> ) 200g を蒸留水で 1L にする	80℃	2分	(浸漬後→水道水で洗浄)を3回繰り返した。
銅	硫酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 比重 1.84) 54ml を蒸留水で 1L にする	50℃	30分	浸漬後, 水道水で洗浄した。
アルミニウム	{りん酸(H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 比重 1.69) 50ml + 酸化クロム(VI) (CrO <sub>3</sub> ) 20g} を蒸留水で 1L にする	95℃	3分	(浸漬後→水道水で洗浄)を3回繰り返した。
ステンレス	ケル酸二アモニウム ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>7</sub> ) 100g を蒸留水で 1L にする	沸騰	10分	ケル酸溶液に浸漬後, 水道水で洗浄し硝酸溶液に浸漬させた。R.N10 になるまで(ケル酸浸漬後→水道水で洗浄→硝酸浸漬後→水道水で洗浄)を繰り返した。
	硝酸(HNO <sub>3</sub> , 比重 1.42) 150g を蒸留水で 1L にする	60℃	20分	

#### 4. 3 試験片腐食量から浸食深さを計算する方法

調査研究では、試験片の腐食減量の単位は「g/m<sup>2</sup>」で計算してあるため、試験片の密度「ρ (g/cm<sup>3</sup>)」で除することで、腐食生成物の侵食深さ (μm) を算出することができる。ただし、金属の腐食形態で「全面腐食タイプ」と「孔食タイプ」があり、前記の全面腐食タイプ (今回の試験片では、炭素鋼、耐候性鋼、亜鉛、銅) に有効な方法である。また、全面腐食タイプでも試験面の腐食生成物が一樣に同じさび厚ではないため、参考値として用いられる。

試験片の侵食深さの算出に用いた密度を表 9 に示す。

表 9 試験片の密度

試験片	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	試験片	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
鉄鋼	7.86	アルミニウム	2.70
亜鉛	7.13	ステンレス	7.93
銅	8.96		

## 5. 結果

### 5. 1 暴露試験結果

- ・ 長期暴露試験結果……腐食量経時変化グラフを図1～図8に示す。
- ・ 短期暴露試験結果……腐食量経時変化グラフを図9～図13に示す。
- ・ 繰返し暴露試験結果……炭素鋼(SM400B)及び亜鉛の腐食量グラフを図14～図17に、腐食量平均値を表11～表14に示す。

### 5. 2 試験実施場所の環境

試験実施場所(計6か所)の環境因子測定結果を図18～図39に示す。また、測定期間における環境因子の平均または積算値を表10に、銩子を基準とした場合(銩子を「1」とする)の各暴露場所の倍率を表10'に示す。

表10 試験実施場所の測定期間における環境因子の平均値, 積算値

暴露地	測定期間	気温(°C)	湿度(%R.H)	降水量(mm)	飛来海塩粒子量(mdd)	硫黄酸化物量(mdd)	ぬれ時間 <sup>※</sup> (hr)
銩子	1992.1～2002.12	14.5	77	1580.4	0.250	0.046	4580.3
宮古島		23.4	79	1952.4	0.418	0.027	5218.8
西原		23.2	74	2165.8	0.337	0.031	4261.7
マイアミ		23.8	81	1653.5	—	—	5760.1
旭川	1993.1～2002.12	7.0	76	1016.9	0.027	0.038	3602.2
宮古島海岸	1996.1～2000.12	24.2	88	1952.4 <sup>*</sup>	1.102 <sup>*</sup>	0.122 <sup>*</sup>	7134.8

- 備考) (1)ぬれ時間は、平均気温及び平均相対湿度より算出(計算値)。  
 (2)宮古島海岸の「飛来海塩粒子量」及び「硫黄酸化物量」の値は、1996年1月～2002年12月までの平均値である。  
 (3)宮古島海岸の降水量は、宮古島試験場より約2kmの距離にあることを考慮し、宮古島試験場と同じ数値とした。

表10' 銩子を基準とした場合の各暴露場所の倍率

暴露地	測定期間	気温(°C)	湿度(%R.H)	降水量(mm)	飛来海塩粒子量(mdd)	硫黄酸化物量(mdd)	ぬれ時間(hr)
銩子	1992.1～2002.12	1	1	1	1	1	1
宮古島		1.61	1.03	1.24	1.67	0.59	1.14
西原		1.60	0.96	1.37	1.35	0.67	0.93
マイアミ		1.64	1.05	1.05	—	—	1.26
旭川	1993.1～2002.12	0.48	0.99	0.64	0.11	0.83	0.79
宮古島海岸	1996.1～2000.12	1.67	1.14	1.24	4.41	2.65	1.56

○長期暴露試験における腐食量経時変化グラフ(暴露期間:1992年~2002年)

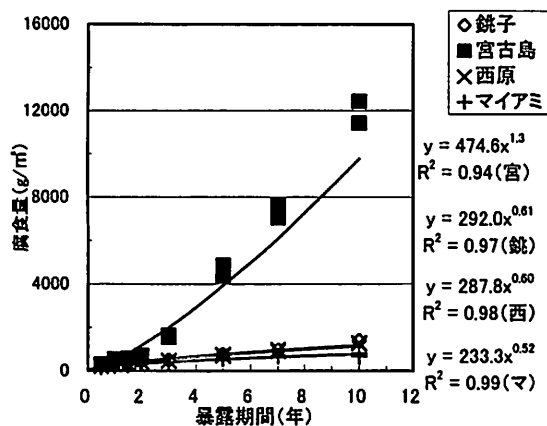


図1 炭素鋼(SM400B)の腐食量経時変化

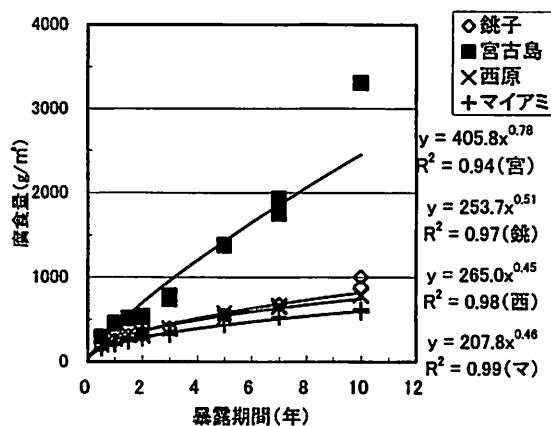


図2 耐候性鋼(SMA490BW)の腐食量経時変化

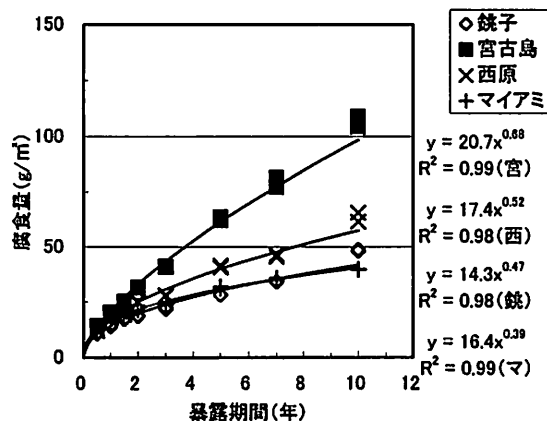


図3 銅(C1220P リン脱酸)の腐食量経時変化

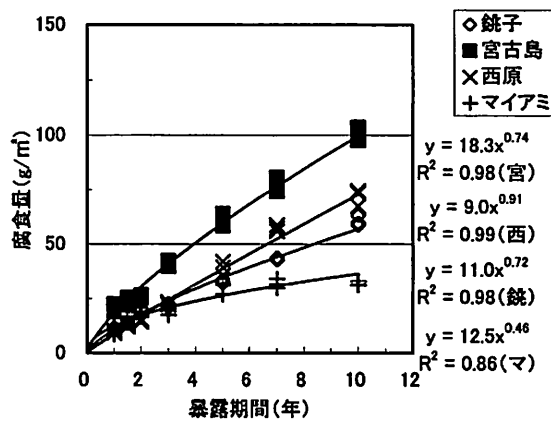


図4 亜鉛(旧JIS H 4321)の腐食量経時変化

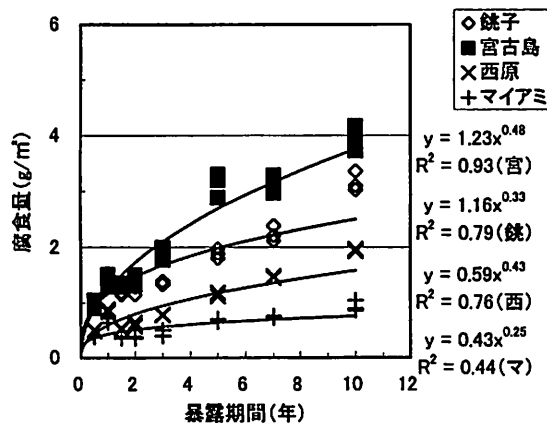


図5 アルミニウム(A1050P)の腐食量経時変化

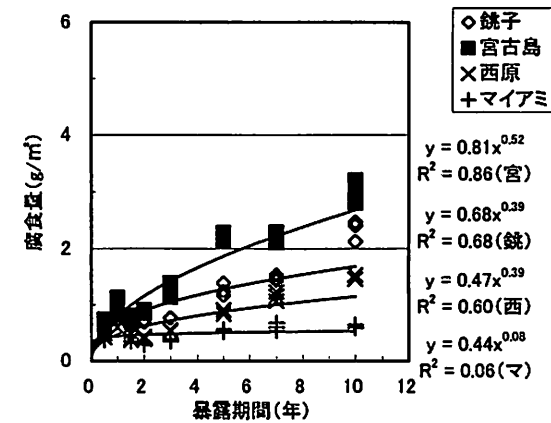


図6 アルミニウム(A5052P)の腐食量経時変化

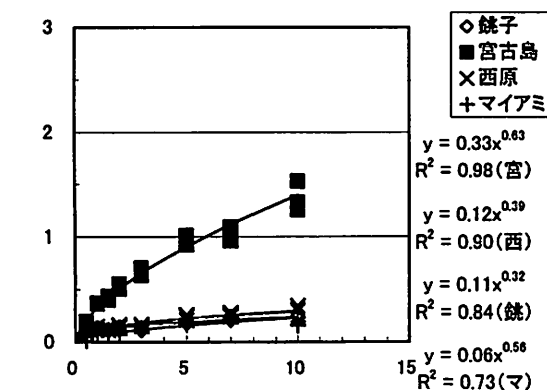


図7 ステンレス(SUS304)の腐食量経時変化

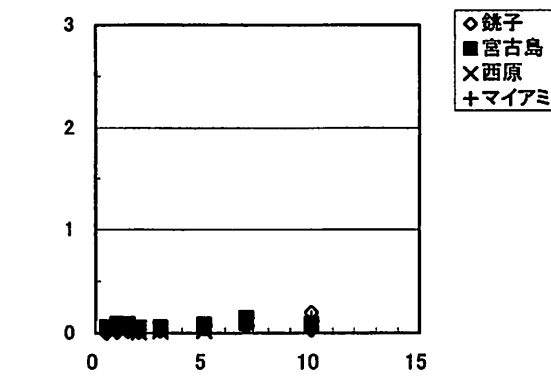


図8 ステンレス(SUS329J4L)の腐食量経時変化

○短期暴露試験における腐食量経時変化グラフ(暴露期間:1996年~1998年)

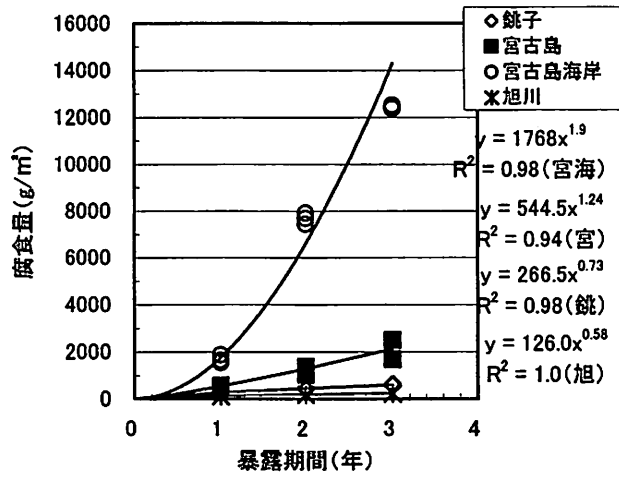


図9 炭素鋼(SM400B)の腐食量経時変化

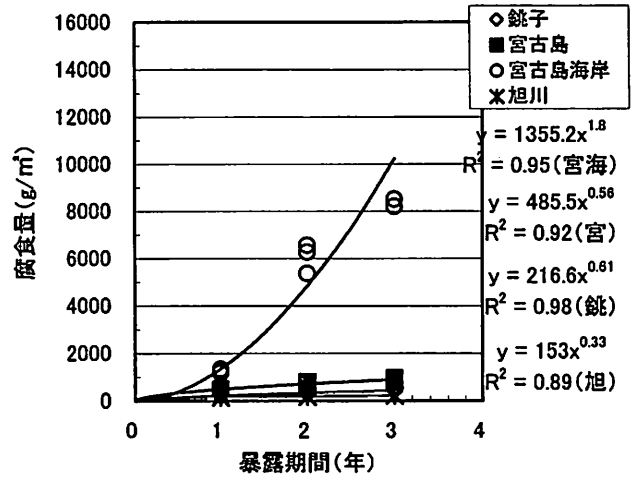


図10 耐候性鋼(SMA490BW)の腐食量経時変化

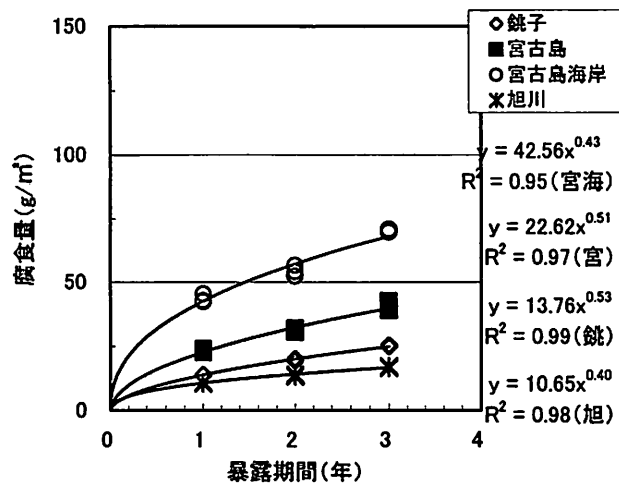


図11 鋼(C1100Pりん脱酸)の腐食量経時変化

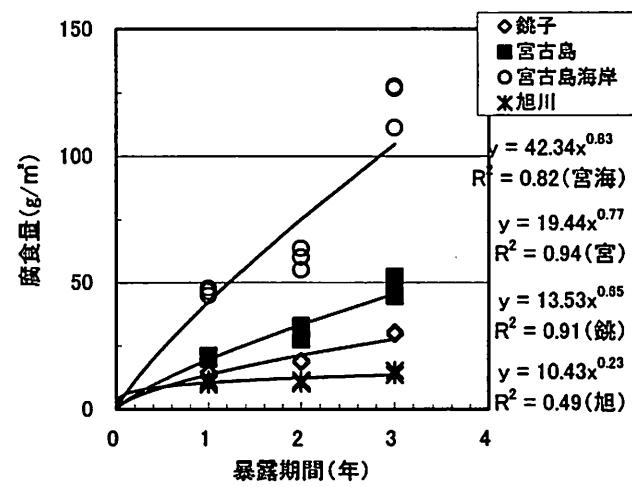


図12 亜鉛(旧JIS H 4321)の腐食量経時変化

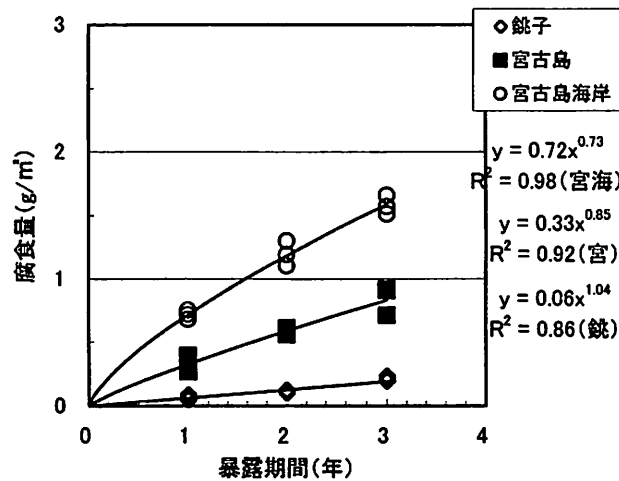


図13 ステンレス(SUS304)の腐食量経時変化

○繰返し暴露試験(1992年～1995年)における腐食量グラフ及び腐食量表

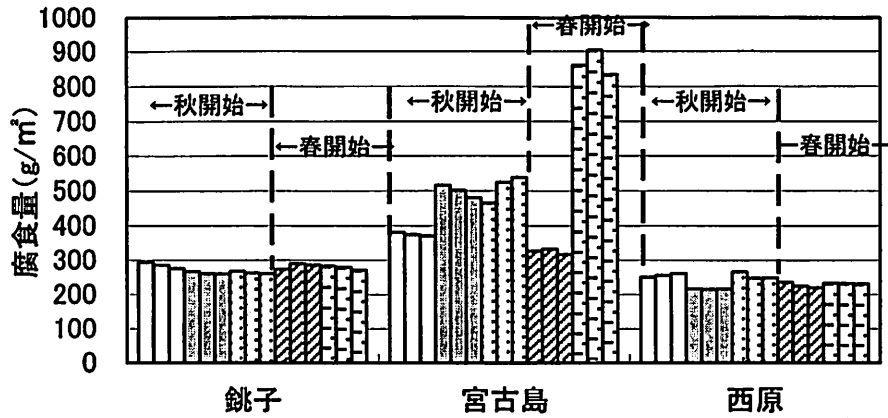
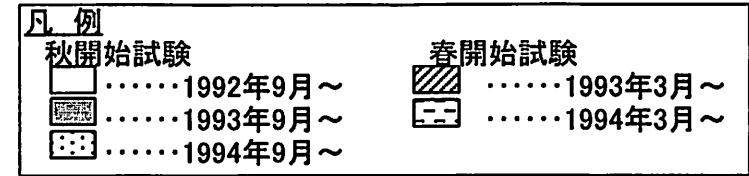


図14 繰返し暴露(1年暴露)の炭素鋼(SM400B)腐食量

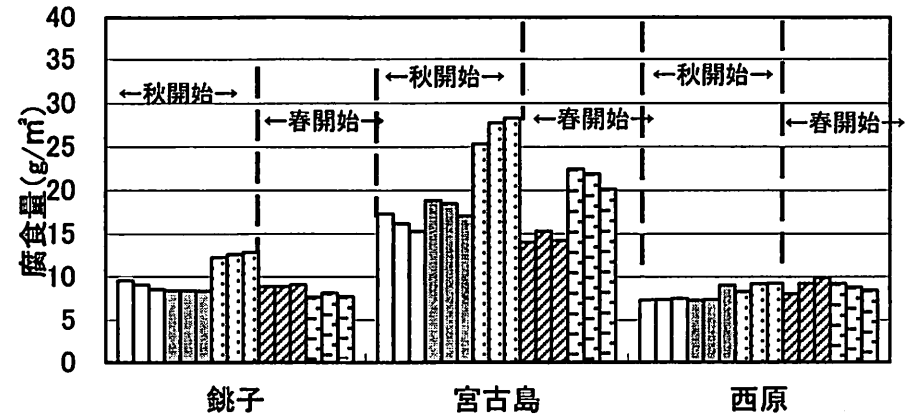


図15 繰返し暴露(1年暴露)の亜鉛(旧JIS H 4321)腐食量

表11 繰返し暴露試験(炭素鋼)の腐食量データ (腐食量  $g/m^2$ )

	秋開始分(3回)		春開始分(2回)		全5回の平均	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
銚子	270.1	12.2	279.8	7.3	274.0	11.3
宮古島	460.8	68.2	595.2	296.7	514.6	196.8
西原	241.7	20.4	228.8	5.9	236.5	17.1

表12 繰返し暴露試験(亜鉛)の腐食量データ (腐食量  $g/m^2$ )

	秋開始分(3回)		春開始分(2回)		全5回の平均	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
銚子	10.00	1.97	8.37	0.63	9.35	1.74
宮古島	20.48	5.15	17.98	3.91	19.48	4.71
西原	8.04	0.87	8.90	0.66	8.38	0.88



○繰返し暴露試験(1996年～1998年)における腐食量グラフ及び腐食量表

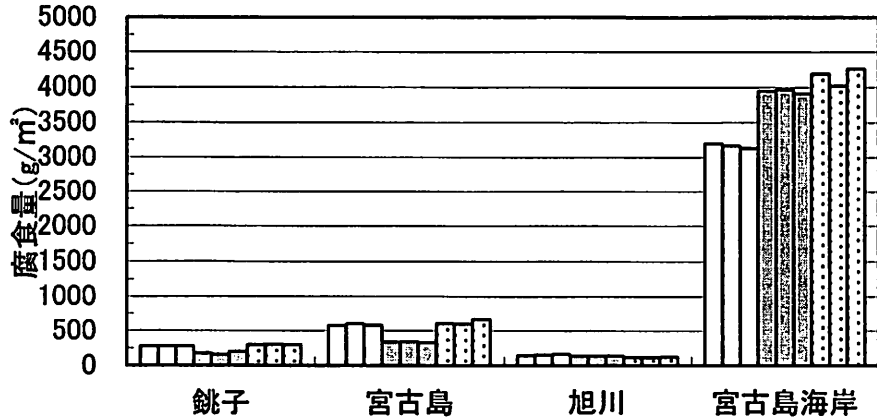
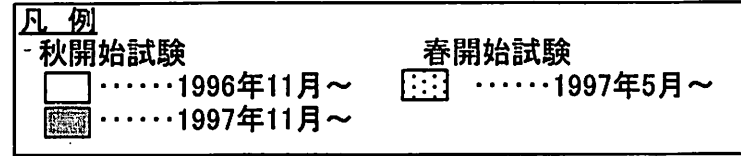


図16 繰返し暴露(1年暴露)の炭素鋼(SM400B)腐食量

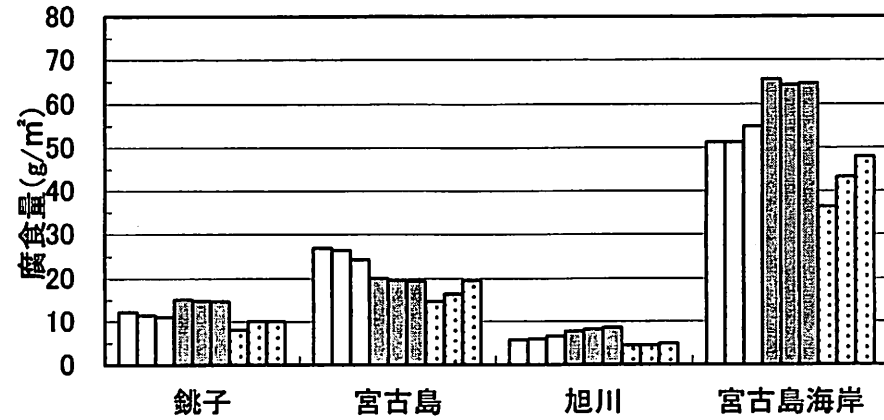


図17 繰返し暴露(1年暴露)の亜鉛(旧JIS H 4321)腐食量

表13 繰返し暴露試験(炭素鋼)の腐食量データ (腐食量 g/m²)

	秋開始分(2回)		春開始分(1回)		全3回の平均	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
銚子	226.6	55.9	297.8	3.6	250.3	56.8
宮古島	457.5	138.0	622.9	38.0	512.6	138.2
旭川	143.5	11.6	118.1	1.8	135.0	15.7
宮古島海岸	3552.7	428.6	4158.5	122.5	3754.6	458.6

表14 繰返し暴露試験(亜鉛)の腐食量データ (腐食量 g/m²)

	秋開始分(2回)		春開始分(1回)		全3回の平均	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
銚子	13.20	1.84	9.38	1.13	11.92	2.46
宮古島	22.77	3.48	16.81	2.44	20.78	4.23
旭川	7.08	1.22	4.55	0.21	6.24	1.59
宮古島海岸	58.63	6.90	42.54	5.88	53.27	10.16

○ 環境因子測定結果-1

※銚子, 宮古島, 西原, マイアミの平均及び積算値

(1) 気温

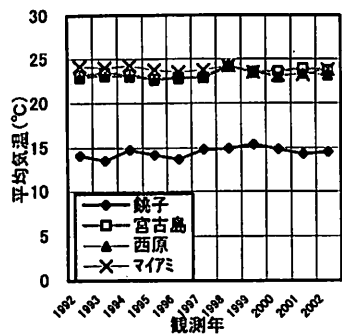


図18 気温の年平均値推移グラフ

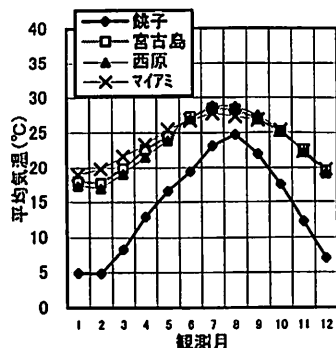


図19 気温の月平均値推移グラフ

(2) 相対湿度

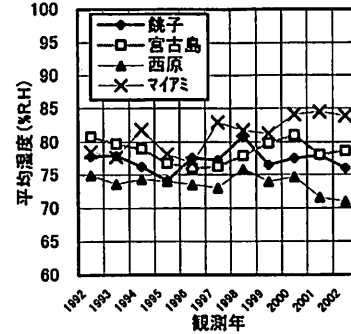


図20 相対湿度の年平均値推移グラフ

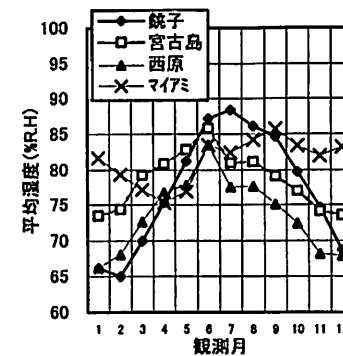


図21 相対湿度の月平均値推移グラフ

(3) 降水量

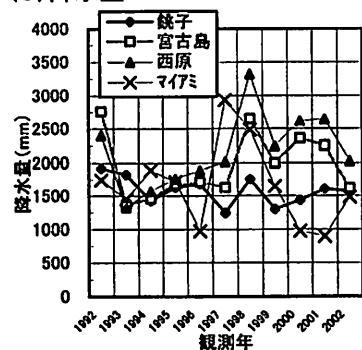


図22 降水量の年積算値推移グラフ

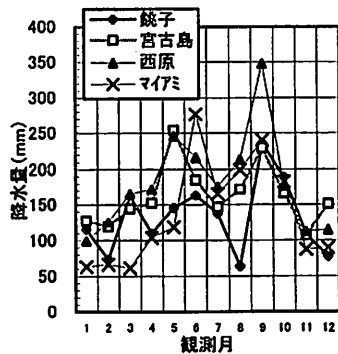


図23 降水量の月積算値推移グラフ

(4) 飛来海塩粒子量

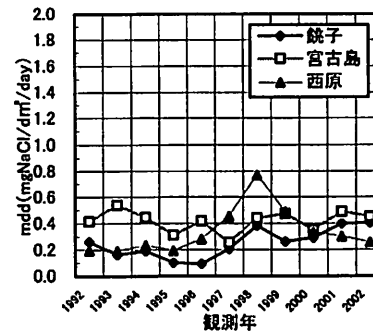


図24 飛来海塩粒子量の年平均値推移グラフ

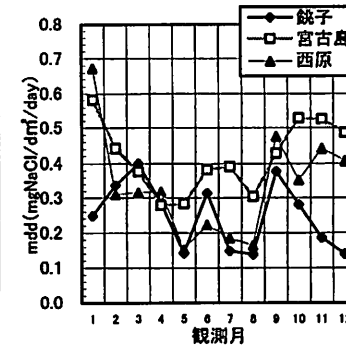


図25 飛来海塩粒子量の月平均値推移グラフ

(5) 硫酸化物量

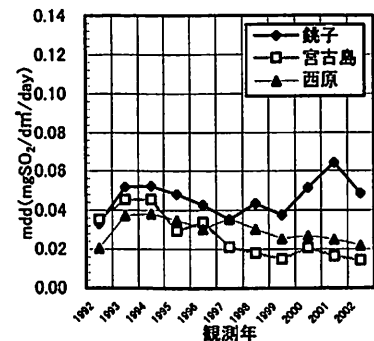


図26 硫酸化物量の年平均値推移グラフ

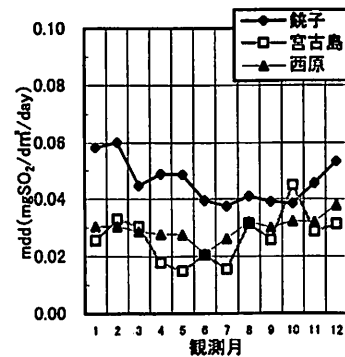


図27 硫酸化物量の月平均値推移グラフ

(6) ぬれ時間(計算値)

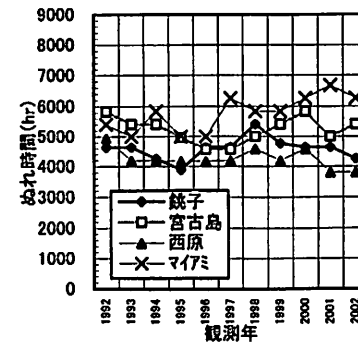


図28 ぬれ時間グラフ

○ 環境因子測定結果-2

※旭川、宮古島海岸の平均及び積算値

(1) 気温

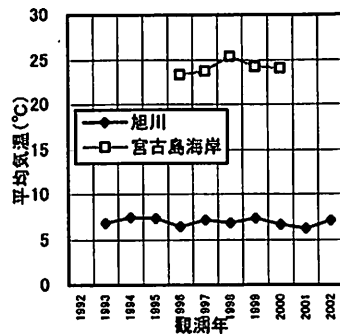


図29 気温の年平均値推移グラフ

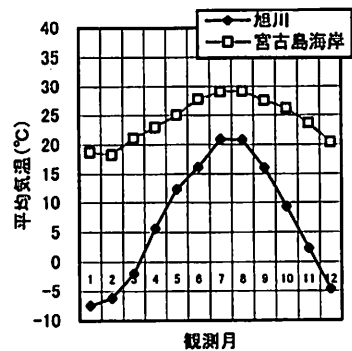


図30 気温の月平均グラフ

(2) 相対湿度

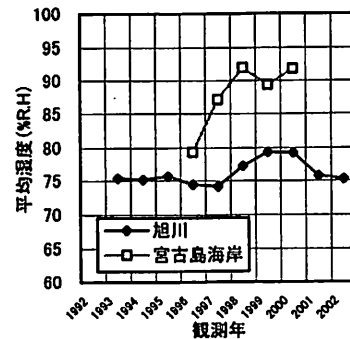


図31 相対湿度の年平均値推移グラフ

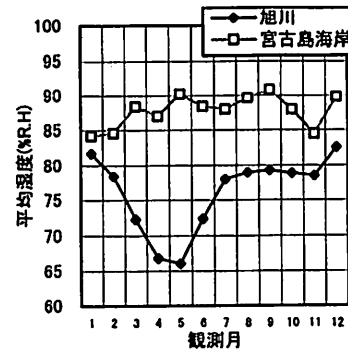


図32 相対湿度の月平均グラフ

(3) 降水量

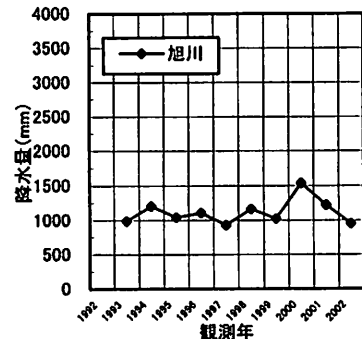


図33 降水量の年積算値推移グラフ

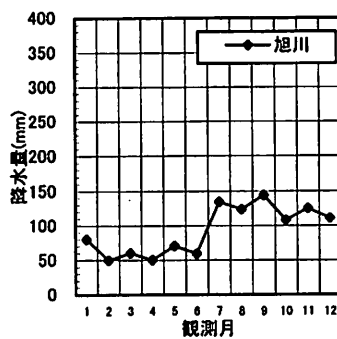


図34 降水量の月積算値推移グラフ

(4) 飛来海塩粒子量

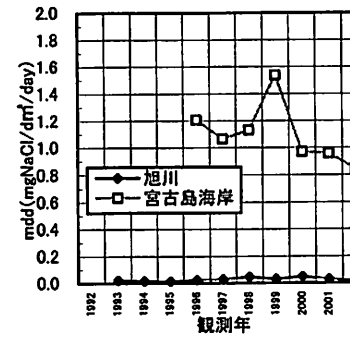


図35 飛来海塩粒子量の年平均値推移グラフ

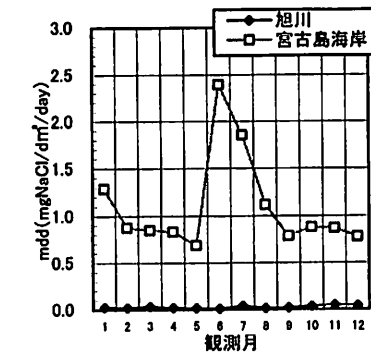


図36 飛来海塩粒子量の月平均グラフ

(5) 硫酸化物量

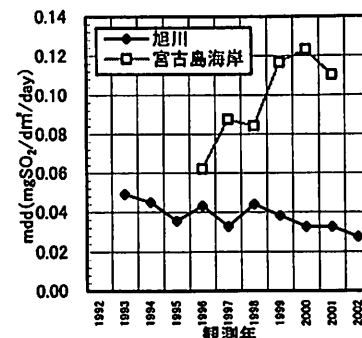


図37 硫酸化物量の年平均値推移グラフ

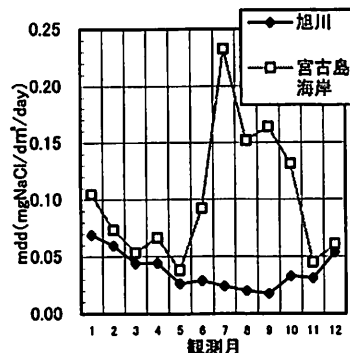


図38 硫酸化物量の月平均グラフ

(6) めれ時間(計算値)

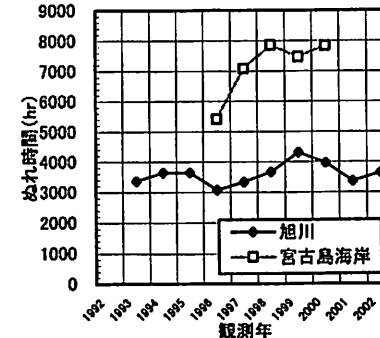


図39 めれ時間グラフ

## 6. 考 察

### 6. 1 暴露試験

#### (1) 長期暴露試験

長期暴露試験の暴露10か年腐食量データを表15に、また、暴露10か年腐食量データの銹子を基準とした場合(銹子を「1」とする)の各暴露場所の倍率を表16に示す。

表15 長期暴露試験の暴露10か年データ

(g/m<sup>2</sup>)

	炭素鋼 (SM400B)	耐候性鋼 (SMA490BW)	亜鉛 (旧 JIS H 4321)	銅 (C1220P)	アルミニウム		ステンレス	
					A1050P	A5052P	SUS304	SUS329J4L*
銹子	1396.0	944.8	60.62	48.52	3.16	2.33	0.254	0.093
宮古島	11929.2	3311.1	101.24	106.55	3.95	3.00	1.368	0.083
西原	1280.1	787.7	71.81	63.55	1.95	1.51	0.314	0.075
マイアミ	744.5	605.4	31.72	39.80	0.93	0.61	0.173	0.125

備考) ステンレス (SUS329J4L) については、腐食量データが非常に小さいため参考値とする。

表16 銹子を基準とした場合の各暴露場所の倍率 (暴露10か年腐食量データによる)

	炭素鋼 (SM400B)	耐候性鋼 (SMA490BW)	亜鉛 (旧 JIS H 4321)	銅 (C1220P)	アルミニウム		ステンレス	
					A1050P	A5052P	SUS304	SUS329J4L*
銹子	1	1	1	1	1	1	1	1
宮古島	8.55	3.50	1.67	2.20	1.25	1.28	5.39	0.89
西原	0.92	0.83	1.18	1.31	0.62	0.65	1.24	0.80
マイアミ	0.53	0.64	0.52	0.82	0.29	0.26	0.68	1.34

備考) ステンレス (SUS329J4L) については、腐食量データが非常に小さいため参考値とする。

暴露10か年目の腐食量データで各暴露場所の腐食量を比較した場合、腐食量の大きい順序は次のとおりであった。(ただし SUS329J4L は除く)

- 炭素鋼、耐候性鋼、アルミニウム (A1050P 及び A5052P)

腐食量 大 宮古島 > 銹子 > 西原 > マイアミ 腐食量 小

- 亜鉛、銅、ステンレス (SUS304)

腐食量 大 宮古島 > 西原 > 銹子 > マイアミ 腐食量 小

宮古島は、どの金属試験片においても腐食量は最も大きかった。

銹子と西原の腐食量は、金属試験片の種類により順序が異なった。このことは、炭素鋼、耐候性鋼、アルミニウムは、銹子のほうが西原よりも「ぬれ時間」が多いためであると推察される。また、亜鉛、銅、ステンレス(SUS304)では、西原のほうが銹子よりも飛来海塩粒子量が多いため、ぬれ時間よりもむしろ飛来海塩粒子量の違い(表11参照)によるものであると推測される。

表16より銹子と宮古島では、炭素鋼8.6倍、耐候性鋼3.5倍、ステンレス(SUS304)5.4倍と腐食量比は大きく、宮古島はかなり厳しい腐食環境であることがわかる。また、銹子と西原の各金属試験片の比率はほぼ同じと考えられるが、アルミニウムにおいては西原のほうが銹子よりも腐食量比が小さいことがわかる。

マイアミと銹子の腐食量は、腐食量比よりマイアミは銹子に比べて腐食性がマイルドな環境であると言える。

(2) 短期暴露試験

短期暴露試験の暴露3か年腐食量データを表17に、また、暴露3か年腐食量データの銩子を基準とした場合(銩子を「1」とする)の各暴露場所の倍率を表18に示す。

表17 短期暴露試験の暴露3か年データ (g/m<sup>2</sup>)

	炭素鋼 (SM400B)	耐候性鋼 (SMA490BW)	亜鉛 (旧 JIS H 4321)	銅 (C1220P)	ステンレス (SUS304)
銩子	619.8	437.3	29.75	25.07	0.211
宮古島	2221.5	895.5	48.33	40.69	0.844
宮古島海岸	12434.7	8343.9	121.77	70.27	1.579
旭川	238.4	230.5	14.65	16.86	—

備考) 旭川は、ステンレス (SUS304) の暴露は実施しなかった。

表18 銩子を基準とした場合の各暴露場所の倍率 (暴露3か年腐食量データによる)

	炭素鋼 (SM400B)	耐候性鋼 (SMA490BW)	亜鉛 (旧 JIS H 4321)	銅 (C1220P)	ステンレス (SUS304)
銩子	1	1	1	1	1
宮古島	3.58	2.05	1.62	1.62	4.01
宮古島海岸	20.06	19.08	4.09	2.80	7.49
旭川	0.38	0.53	0.49	0.67	—

備考) 旭川は、ステンレス (SUS304) の暴露は実施しなかった。

暴露3か年目の腐食量データで各暴露場所の腐食量を比較した場合、腐食量の大きい順序は次のとおりであった。(SUS304について旭川は除く)

- 炭素鋼、耐候性鋼、亜鉛、銅、ステンレス(SUS304)  
腐食量 大 宮古島海岸 > 宮古島 > 銩子 > 旭川 腐食量 小

宮古島海岸は、どの金属試験片においても腐食量は最も大きかった。

前述の長期暴露試験結果において、腐食量が最も大きかった宮古島よりも宮古島海岸は腐食量が大きいことを考慮すると、非常に厳しい腐食環境であることが言える。

宮古島海岸試験場が他の暴露場所と大きく違う点は、試験片が海水の飛沫を直接受ける環境であり、海塩が試験片に豊富に供給される環境であるために、宮古島海岸は試験片の腐食因子として海塩が他の要因より群を抜いて大きいと考えられる。

一方、旭川は飛来海塩粒子量が少ない環境であり、表10より銩子の約1/10、宮古島の約1/15、宮古島海岸の約1/40の量である。

表18より、旭川は銩子での腐食量の約1/2であることがわかる。

短期暴露試験では、暴露場所における「飛来海塩粒子量」、「ぬれ時間」が腐食量に大きく影響していることが伺える。

### (3) 繰返し暴露試験

1992年より開始した繰返し暴露試験(全5回:秋開始3,春開始2)と、1996年より開始した試験(全3回:秋開始2,春開始1)の腐食量データを、春開始分と秋開始分の試験開始時期と、暴露実施場所の2因子を要因として、二元配置分散分析した結果を表19に示す。

#### ① 開始時期による腐食量の違い

開始時期による腐食量に有意差が認められた金属試験片は、耐候性鋼、亜鉛、アルミニウム合金(A5052P)であった。その他の金属では、開始時期の違いで腐食量に多少の差はあるが統計的に有意差はないため、試験開始時期の違いの影響は少ないと考えられる。

有意差が認められた金属試験片の3種類は、耐候性鋼は春開始、亜鉛とアルミニウム合金は秋開始の方が腐食量は大きかった。耐候性鋼については、宮古島海岸の腐食量データに暴露開始時期によりかなりの差があった。表19からも宮古島海岸の標準偏差が大きいことがわかるように、秋開始と春開始の腐食量に倍近い差があり、他の暴露場所よりも格段に腐食量が多いため、統計的に有意差が出たと考えられる。

亜鉛とアルミニウム合金については、各暴露場所においても秋開始試験の腐食量の方が大きく、突飛的なデータも確認できなかった。したがって、亜鉛とアルミニウム合金は、試験開始時期により腐食量に影響がある可能性が考えられる。

#### ② 暴露場所による腐食量の違い

表19より暴露場所の中で最も腐食性が大きいのは「宮古島海岸」、次に「宮古島」であった。宮古島海岸及び宮古島は、ほぼすべての金属試験片において他の暴露場所と統計的に有意差が確認された。(耐候性鋼のみ宮古島と銚子、宮古島と西原の間に有意差がなかった)  
また、腐食量の平均値で判断すると、銅以外の金属試験片では、腐食量平均の大きい順に

腐食量 大                      宮古島海岸>宮古島>銚子>西原>旭川                      腐食量 小  
( 銅のみ 宮古島海岸>宮古島>西原>銚子>旭川 )

であった。

このことは、腐食量の非常に小さいステンレス鋼(SUS329J4L)以外の今回試験実施をした金属試験片では、単年度(1か年)暴露試験でも十分に暴露場所の腐食性を把握できると推察できる。

表 19 繰返し暴露試験結果の二元配置分散分析結果

[因子：暴露場所，開始時期 データ：腐食量 (g/m<sup>2</sup>/year)]

		炭素鋼 (SM400B)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	24	24	15	9	9	51	30	なし	
平均値	265.1	513.8	236.5	135.0	3754.6	687.0	740.5		
標準偏差	35.8	170.2	16.5	14.8	432.4	1061.9	1158.8		
順位 <sup>※</sup>	宮古島海岸>宮古島>銑子<西原<旭川， 秋開始<春開始								
		耐候性鋼 (SMA490BW)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	24	24	15	9	9	51	30	* (5%有意)	
平均値	247.9	398.6	213.0	128.4	3284.1	553.7	706.2		
標準偏差	28.8	88.8	17.3	13.2	953.5	785.9	1284.4		
順位 <sup>※</sup>	宮古島海岸>宮古島<銑子<西原<旭川， 秋開始<春開始								
		亜鉛 (旧 JIS H 4321)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	24	24	15	9	9	51	30	** (1%有意)	
平均値	10.32	19.97	8.38	6.24	53.27	18.76	14.38		
標準偏差	2.31	4.40	0.85	1.50	9.58	15.94	10.65		
順位 <sup>※</sup>	宮古島海岸>宮古島>銑子<西原<旭川， 秋開始>春開始								
		銅 (C1220P)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	24	24	15	9	9	51	30	なし	
平均値	12.57	21.25	14.41	8.79	37.21	17.98	17.50		
標準偏差	1.68	2.61	1.05	1.74	2.73	8.56	7.81		
順位 <sup>※</sup>	宮古島海岸>宮古島>西原>銑子>旭川， 秋開始<春開始								
		アルミニウム (A1050P)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	15	15	15	-	-	27	18	なし	
平均値	0.616	1.255	0.425	-	-	0.788	0.733		
標準偏差	0.061	0.160	0.073	-	-	0.420	0.279		
順位 <sup>※</sup>	宮古島>銑子>西原， 秋開始<春開始								
		アルミニウム (A5052P)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	15	15	15	-	-	27	18	** (1%有意)	
平均値	0.476	0.816	0.351	-	-	0.580	0.499		
標準偏差	0.050	0.115	0.070	-	-	0.222	0.189		
順位 <sup>※</sup>	宮古島>銑子>西原， 秋開始>春開始								
		ステンレス (SUS304)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	24	24	15	9	9	51	30	なし	
平均値	0.090	0.372	0.095	0.031	0.766	0.243	0.243		
標準偏差	0.017	0.061	0.013	0.009	0.114	0.222	0.250		
順位 <sup>※</sup>	宮古島海岸>宮古島>銑子<西原<旭川， 秋開始<春開始								
		ステンレス (SUS329J4L)							開始時期 (春、秋) の有意差
		銑子	宮古島	西原	旭川	宮古島 海岸	秋開始	春開始	
データ件数	15	15	15	-	-	27	18	なし	
平均値	0.041	0.055	0.039	-	-	0.048	0.040		
標準偏差	0.019	0.026	0.018	-	-	0.026	0.015		
順位 <sup>※</sup>	順位なし <sup>※</sup>								

備考) (1)順位は、分散分析結果から有意 (1%または 5%) であった場合に不等号「>」により表記し、統計的に有意差が認められない場合は「≒」で表記し順位をつけた。また、統計的に有意差が認められない暴露場所については平均値の大きい順番で並べた。  
 (2)順位で、1つ前の暴露場所と有意差はないが、2つ前の暴露場所とは有意差がある

- 場合は、不等号「 $\geq$ 」で表記した。[例： $a \approx b \geq c$  (aとb, bとcには有意差なし。aとcに有意差あり)]
- (3) ステンレス (SUS329J4L) については、腐食量データが非常に小さいため順位の対象としなかった。

## 6. 2 環境因子と腐食量

環境因子の測定結果は、前出の表 10 及び表 11 のとおりである。

金属材料腐食の主要因子としては、「ぬれ時間」、「飛来海塩粒子量」及び「硫黄酸化物量」の3つが考えられている。「気温」、「湿度」、「飛来海塩粒子量」、「硫黄酸化物量」の4つとも言われているが、今回報告の「ぬれ時間」は気温・湿度からの計算値であるため、上記3要因とした

その他の要因としては、試験片に付着した飛来海塩粒子を洗浄する効果のある降水量が、今回の直接暴露試験の場合では逆要因（腐食を遅らせる）として考えられるが、飛来海塩粒子の供給が豊富な南西諸島に暴露場所（計3か所）があることを考慮し、降水量は要因にしなかった。

環境因子と腐食量の相関関係（単相関）を表 20 に示す。計算方法として、環境因子は表 10 に示す暴露期間に計測された年平均及び年積算値を使用した。腐食量は、長期暴露試験の経年変化量をデータとした。その際、環境因子を腐食量経年変化と整合させるために、比較する腐食量の暴露年数を環境因子データに乗じて相関関係を計算した。

表 20 環境因子と長期暴露試験腐食量の相関係数（単相関）

	炭素鋼 SM400B	耐候性鋼 SMA490BW	亜鉛 旧 JIS H 4321	銅 C1220P	アルミニウム		ステンレス	
					A1050P	A5052P	SUS304	SUS329J4L
気 温	0.5577	0.6577	0.8073	0.8426	0.5424	0.5852	0.4994	0.6050
湿 度	0.5202	0.6396	0.8046	0.8080	0.6220	0.6508	0.4490	0.6083
飛来海塩粒子量	0.7554	0.8320	0.9801	0.9582	0.8184	0.8578	0.6927	0.5359
硫黄酸化物量	0.3636	0.4878	0.7080	0.6478	0.6986	0.7144	0.2569	0.4500
降水量	0.5485	0.6633	0.8615	0.8543	0.6289	0.6663	0.4903	0.5771
ぬれ時間	0.5348	0.6449	0.7728	0.8001	0.5880	0.6173	0.4627	0.6244

表 20 より亜鉛及び銅は、各環境因子に対し非常に良い相関関係にあることがわかる。また、ステンレス以外の金属試験片は、飛来海塩粒子量と相関性が大きい。

亜鉛及び銅は環境因子の変化が良く腐食量に反映されていると推察され、ステンレス鋼は他の金属試験片と比べ腐食量がかなり少ない（耐食性が良い）ため、各環境因子との相関性があまり良くなかったと考えられる。

硫黄酸化物量については、数値の目安となる参考表を表 21 に示す。表 21 の硫黄酸化物量は  $\text{SO}_3$  量であり、今回の測定値は  $\text{SO}_2$  量である。そのため、表 21 に示した値を「0.8倍」すれば  $\text{SO}_2$  量と同等となる。

表 10 の硫黄酸化物量平均値で最も大きい場所は、宮古島海岸の 0.122 m d d であるが、表 21 の汚染第1度より小さいため、今回実施した暴露場所の硫黄酸化物による試験片への影響は無視できる量であると考えられる。

表 21  $\text{PbO}_2$ 法による  $\text{SO}_2$ 汚染程度の判定標準<sup>4)</sup>

汚 染 度	$\text{mg SO}_3/\text{dm}^2/\text{day}$		評 価
汚 染 第 1 度	0.5 以上	1.0 未満	軽微な汚染
汚 染 第 2 度	1.0 以上	2.0 未満	普通度の汚染
汚 染 第 3 度	2.0 以上	3.0 未満	中等度の汚染
汚 染 第 4 度	3.0 以上	4.0 未満	やや高度の汚染
汚 染 第 5 度	4.0 以上		高度の汚染



### 6. 3 腐食量から侵食深さ推測

暴露試験結果より、試験片の腐食量から侵食深さを考察することができる。

前述の 4.3 項の方法を参照し、長期暴露試験の宮古島試験場における炭素鋼の腐食量近似式より試験片の減厚を算出する。

図 1 の炭素鋼腐食量経時変化より、宮古島の腐食量近似式は「 $Y=474.6x^{1.3}$ 」である。鉄の密度は「 $7.86(\text{g}/\text{cm}^3)$ 」であるため、宮古島の減厚 ( $\mu\text{m}$ ) 近似式は「 $Y=60.4x^{1.3}$ 」となる。

暴露 10 年であるため、前記の式に  $x=10$  を代入すると、

$$Y=60.4 \times 10^{1.3}=1517.18 (\mu\text{m})$$

となる。炭素鋼試験片の初期試験片厚みは 6 mm であるため、宮古島試験場の炭素鋼 10 か年暴露後の健全な（腐食されていない）試験片残部は、 $4.48\text{ mm}$  ( $6 - 1517.18 \times 10^{-3}\text{ mm}$ ) であると推測される。

また、宮古島試験場の炭素鋼が消失する年数は、上記近似式の  $Y (\mu\text{m})$  に試験片厚さ ( $6\text{mm}=6000\mu\text{m}$ ) を代入し  $x$  (年) で解くと、

$$x = (Y/60.4)^{1/1.3} = (6000/60.4)^{1/1.3} = 34.37 (\text{年})$$

となる。

したがって、宮古島試験場における炭素鋼は約 34 年後には消失すると考えられるが、実際の腐食生成物は試験面均一に同じ厚さで発生するとは考えにくいいため、それ以前に消失すると推測される。

一方、繰返し暴露試験結果の表 19 より、宮古島の炭素鋼腐食性は「 $513.8 (\text{g}/\text{m}^2/\text{year})$ 」であった。この値を金属密度で除すと「 $65.37 (\mu\text{m}/\text{year})$ 」となる。今回使用した炭素鋼試験片板厚は 6 mm であるため、前述の腐食速度で除すと、

$$6 (\text{mm}) / 65.37 (\mu\text{m}/\text{year}) = 6000 (\mu\text{m}) / 65.37 (\mu\text{m}/\text{year}) = 91.78 (\text{年})$$

となり、長期暴露試験結果の近似式とは異なる結果となる。

つまり、単年度暴露試験は、その暴露場所の腐食性を表す尺度であり、寿命予測には適さないことがわかる。

この一例は、宮古島試験場など長期暴露試験結果の腐食量近似式「 $Y = a x^b$ 」のべき乗  $b > 1$  であるため、単年度暴露試験結果の腐食性で寿命予測した場合には寿命が延びてしまったが、銚子などの長期暴露試験結果近似式のべき乗  $b < 1$  の場所などでは逆に、単年度暴露結果の腐食性で寿命予測した場合には寿命が短くなる結果になる。

したがって、単年度暴露試験結果は腐食性を把握するための尺度であり、材料等の寿命予測をする場合には危険度が高いことが推測される。

### 7. まとめ

JIS Z 2383 (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) に規定された金属試験片は、今回の暴露試験で実施した試験片の「アルミニウム合金 (A5052P)」と「ステンレス鋼 (SUS329J4L)」以外の金属試験片 6 種類である。

JIS Z 2383 に規定された金属試験片により、その暴露結果で腐食性が確認できることがわかった。ただし、亜鉛試験片においては暴露開始時期が試験結果に誤差を生じさせるおそれがある可能性が示唆された。

また、単年度暴露における腐食性は、その暴露地の尺度を表すものであることが言える。

## 8. あとがき

現在、大気環境で使用される材料・製品などの防錆設計は、海岸から何kmである場合云々と海岸からの距離に依存している。確かに飛来海塩粒子量は、金属材料劣化の主要因子であるが故に四面を海に囲まれた我国では上記手法が非常に有効である。

しかし、海から離れた山間部で使用されている材料等で、融雪塩などの人的に撒布された塩分が要因で腐食が発生したという報告もあり、実際の材料・製品を設置する環境が把握できていなくては十分な防錆設計は不可能である。

当センターでは、経済産業省委託事業として JIS Z 2383 に規定された試験片（炭素鋼、亜鉛）を使用し、各縣市工業試験場・研究機関・大学・企業など全国 22 か所で暴露試験を開始している。その目的は、各暴露実施場所の腐食性を把握することである。

現在は、暴露場所が各地方に 2 か所程度であるために腐食性マップのメッシュが 100～200 km レンジであるが、将来的にはメッシュを 20 km レンジの腐食性マップ作成を目標が完成できるように努力したいと考えております。

## 9. 謝 辞

経済産業省委託「新発電システムの標準化に関する調査研究」（金属系分科会）において、分科会長並びに委員各位様に多大なご尽力をいただきましたことを深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 田中誠, 町田洋人, 江成孝文, 遠藤三郎: 腐食防食協会'96 講演集, D-206(1996)
- 2) 富板崇, 樫野紀元: 日本建築学会構造系論文報告集, 第 405 号(1989.11)
- 3) ISO/TC156/WG4, N314; V. Kucera, J. Tidblom, A. A. Mikhailov: Some new ideas for characterization of atmospheric corrosivity in connection with development of improved standards
- 4) 大気汚染測定法の実際: 寺部本次 著, ㈱技報堂
- 5) 経済産業省委託「新発電システムの標準化に関する調査研究」（金属系分科会）  
平成 4 年度～平成 14 年度成果報告書