

電力設備の防食技術開発に関する研究（第3報）

安里昌樹、羽地龍志、國吉和男

1. はじめに

沖縄県は亜熱帯特有の高温多湿に加え島嶼環境にあるため、鋼構造物や電力設備の腐食が著しく、沖縄県全体ではその損失も莫大であると推定される。本研究は大気腐食に関わる素材や被覆材の評価、研究を行い、金属の防錆防食に効果的な素材や被覆材の効果的な活用を開発し、鋼構造物や電力設備等の防食技術の向上を目指すとともに、金属材料の沖縄型仕様の提案を目的とする。

2. 測定項目

本大気暴露試験は、平成9年度より開始しており、(財)日本ウエザリングテストセンター銚子暴露試験場（以下「銚子」という）、琉球大学（以下「琉大」という）、(財)ウエザリングテストセンター宮古島試験場（以下「宮古」という）の3カ所に総計554枚（保存板も含む）の試験片を暴露した。

平成11年度は各試験片について、20ヵ月時に試験片を回収し、表1に示す項目について測定等を行った。

表1 暴露試験測定項目

	20ヵ月時
ステンレス鋼材	目視観察、重量測定、写真撮影
炭素鋼	目視観察、重量測定、写真撮影
溶射	目視観察、重量測定、写真撮影、画像処理（傷有）
溶射+塗装	目視観察、基盤目試験、写真撮影、色差、光沢度、インピーダンス
溶融亜鉛めっき	目視観察、重量測定、写真撮影
溶融亜鉛めっき+塗装	目視観察、基盤目試験、写真撮影、色差、光沢度、インピーダンス
塗装（工程短縮）	目視観察、基盤目試験、写真撮影、色差、光沢度、インピーダンス
塗装（特殊）	目視観察、ピンホールテスト、衝撃試験、写真撮影
錆抑制剤	目視観察、写真撮影

表2に平成10年度および11年度の試験片回収日、表3に試験片内容を示す。

表2 暴露試験片の設置日および回収日

	暴露試験片設置日	10ヵ月回収日	20ヵ月回収日
銚子	平成10年3月27日	平成11年2月1日	平成11年11月17日
琉大	平成10年3月20日	平成11年1月25日	平成11年11月15日
宮古	平成10年3月17日	平成11年1月20日	平成11年11月5日

表3 試験片内容

試験片名	試験片記号	仕様
ステンレス鋼	A(B,C)-1-1-2-1	SUS304
	A(B,C)-1-2-2-1	SUS316
	A(B,C)-1-3-2-1	SUS444
炭素鋼	A(B,C)-2-1-2-1	SMA490A
	A(B,C)-2-2-2-1	SM490A
	A(B,C)-2-3-2-1	SS400
溶射	A(B,C)-3-1-1-1	溶射亜鉛 (傷有)
	A(B,C)-3-1-2-1	溶射亜鉛 (傷無)
	A(B,C)-3-3-1-1	溶射亜鉛・アルミニウム合金 (傷有)
	A(B,C)-3-3-2-1	溶射亜鉛・アルミニウム合金 (傷無)
	A(B,C)-3-5-1-1	溶射アルミニウム (傷有)
	A(B,C)-3-5-2-1	溶射アルミニウム (傷無)
	A(B,C)-3-7-1-1	溶射亜鉛アルミニウム合金低温アーク (傷有)
	A(B,C)-3-7-2-1	溶射亜鉛アルミニウム合金低温アーク (傷無)
	A(B,C)-3-8-1-1	溶射ポリエチレン系 (傷有)
	A(B,C)-3-8-2-1	溶射ポリエチレン系 (傷無)
溶射+塗装	A(B,C)-3-2-2-1	溶射亜鉛+塗装
	A(B,C)-3-4-2-1	溶射亜鉛・アルミニウム合金+塗装
	A(B,C)-3-6-2-1	溶射アルミニウム+塗装
めっき	A(B,C)-4-1-1-1	亜鉛めっき (傷有)
	A(B,C)-4-1-2-1	亜鉛めっき (傷無)
めっき+塗装	A(B,C)-4-2-2-1	亜鉛めっき+塗装 (沖電仕様)
	A(B,C)-4-3-2-1	亜鉛めっき+塗装 (エポキシプライマ)
塗装 (工程短縮)	A(B,C)-5-1-2-1	塗装1 (沖電仕様)
	A(B,C)-5-2-2-1	塗装2 (短縮1)
	A(B,C)-5-3-2-1	塗装3 (短縮2)
	A(B,C)-5-4-2-1	塗装4 (短縮3)
特殊塗装	A(B,C)-6-1-1-1	セメント系 (傷有)
	A(B,C)-6-1-2-1	セメント系 (傷無)
	A(B,C)-6-2-1-1	有機ゾクリッチ (傷有)
	A(B,C)-6-2-2-1	有機ゾクリッチ (傷無)
錆抑制剤	B-7-1-2-1	MK剤
	B-7-2-2-1	レノーバコンク

3. 結果及び考察

3. 1 暴露試験

(1) 目視観察

全試験片について目視観察、および写真撮影（別添）を行っている。各試験片の概況は以下のとおりである。

①ステンレス鋼

ステンレス鋼の試験片は素材別、地域別によって劣化度に差が認められた。

素材別にみると、表裏とも10ヶ月時と同様 SUS304 > SUS316 > SUS444 の順にさびが発生している。表面と裏面では、裏面の方がさびの発生は大きい。

一方、地域別にみると表面、裏面とも宮古 > 銚子 > 琉大の順になっており、表面に関しては10ヶ月時の結果（宮古 > 琉大 > 銚子）と異なっている。

②炭素鋼

まず地域別にみても、琉大、宮古のさびは粗く、銚子は細かく固着しており、10ヶ月時と同様な結果を示している。さびの色に関しては、銚子では全体的に赤っぽく、琉大、宮古になるにしたがって黒みを帯びてきている。

素材別にみると SS 材は耐候性鋼と比較して赤色を呈しているが、さびのあらさに関しては裏面で SS 材が粗く、はがれも確認された。

③溶射

溶射亜鉛試験片は宮古が銚子、琉大に比べやや黒みがかった灰色を呈しており、点状の白さびが多く発生している。銚子は点状のさびは少なく、琉大は点さびと白雲状のさびが混ざっている。傷有りの試験片については基本的に傷無しの試験片と同傾向を示している。傷部のさびの形状は、宮古のさびの色が銚子、琉大の赤さびよりも黒みがかった。傷部の広がりは見られないが、さび汁の流れが認められる。

溶射亜鉛・アルミニウム合金試験片は各試験片とも灰黒色に変化しており、その上に白さびが点状に発生している。白錆の発生量は琉大 > 宮古 > 銚子の順で、おもて面が発生量が多い。

溶射アルミニウム試験片は宮古の試験片で灰黒色に変化している。

溶射亜鉛アルミニウム合金低温アーク試験片は各試験片とも灰色に変化しており、そのうえに点状の白さびが発生している。宮古の白さびが銚子、琉大と比較して細かくなっている。白さびの量は表面が多くなっている。

溶射ポリエチレン系試験片は、各試験片とも黒ずんでおり、特に銚子で顕著である。さびの発生は見られない。

傷有りの試験片については、アルミニウム、ポリエチレン系を除く試験片では、亜鉛の犠牲陽極作用により、傷部の縁側は赤さびの発生は抑えられている。アルミニウム、ポリエチレン系試験片については傷部全面赤さびが発生し、さび汁の流れはみられるが、傷部の広がりは見られない。

③' 溶射+塗装

各試験片とも塗膜のわれ、ふくれ等、特異常はみられない。さびの発生もみられない。

④めっき

各試験片とも白雲状に白さびが発生している。発生量は宮古>琉大>銚子の順で裏面がより白さびが発生している。

傷有りの試験片については傷部で銚子、琉大の試験片は赤さびが発生していない部分もみられるが、宮古では傷部は全面赤さびの状態である。傷の広がり等はみられない。

④' めっき+塗装試験片

塗膜のわれ、ふくれ等、特に異常はみられない。さびの発生もみられない。

⑤塗装試験片

汚れがみられる以外、塗膜の異常等はみられない。

⑥特殊塗装

セメント系試験片においてピンホールから赤さびが発生しており、特に宮古の試験片においてはピンホール部からさびがしみ出したように周囲に広がっている。各地域とも表面がよりさびが発生している。セメント系は昨年度のピンホール試験で、保存用の試験片においてもピンホールが確認されたことから、塗装を行うことが難しいと推測される。

有機ジンクリッチ試験片はさびの発生はみられない。

(2) 重量変化

重量を測定し、暴露前の重量と比較し、その変化を調べる。

①ステンレス鋼

変化率はいずれも0.1%未満で地域差も特にみられなかった。

②めっき試験片

めっき試験片の暴露前後の重量変化率を図1に示す。目視観察でも触れたように、白さびの発生量は宮古で最も多く、重量変化でも10ヶ月時と同様に宮古で増加傾向を示しており、銚子、琉大ではほとんど変化がみられない。

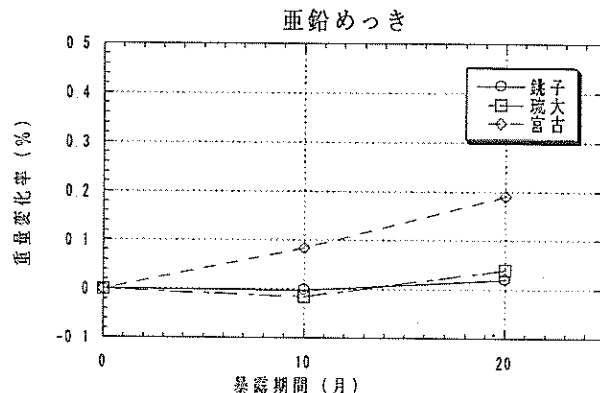


図1 めっき試験片の重量変化

③ 溶射試験片

溶射試験片の暴露前後の重量変化率を図 2 に示す。いずれの試験片においても増加の傾向（右肩あがり）になっている。亜鉛・アルミニウム試験片において特に増加が大きく、同じ亜鉛・アルミニウムでも低温アークの試験片は亜鉛およびアルミニウム試験片と同程度の重量変化率となっている。

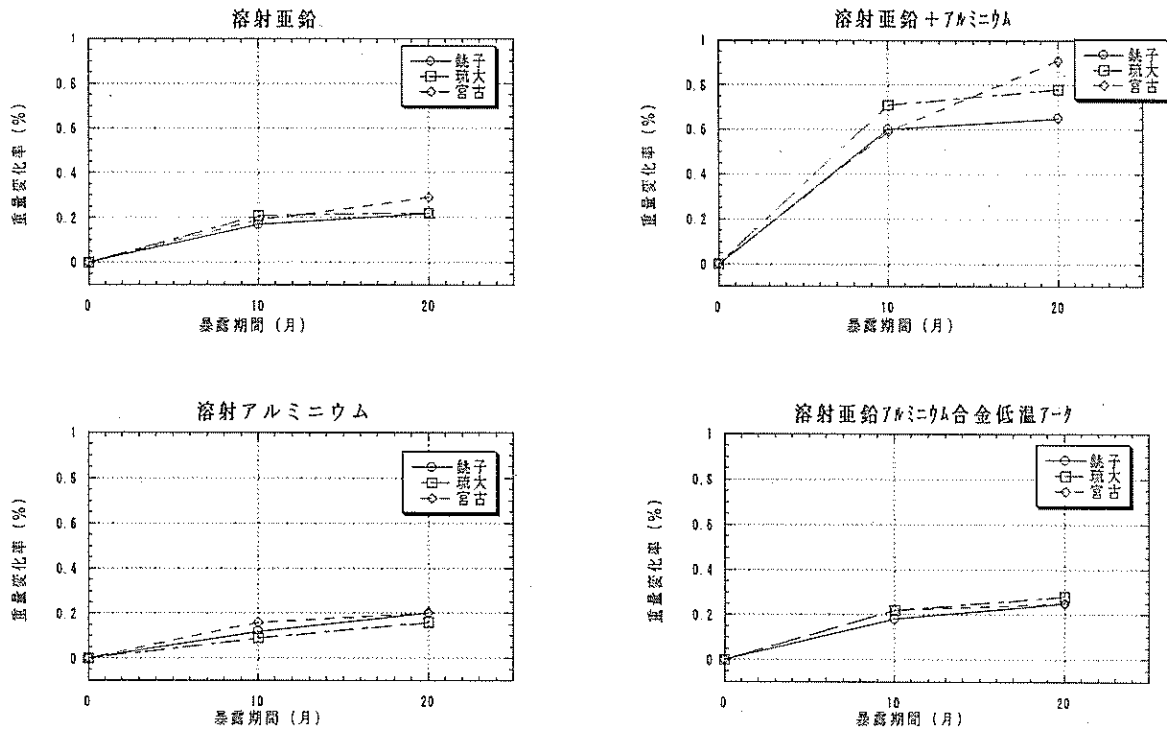


図 2 溶射試験片の重量変化率

(3) 光沢度

光沢度は紫外線等の影響を受けることから、塗装の劣化度を示すパラメーターとして利用できる。本試験は暴露試験片塗膜の 60 度鏡面光沢度を測定し、保存板の値を初期値と見なし各試験片について光沢残存率を求める。

① 溶射+塗装試験片

溶射+塗装試験片の光沢残存率を図 3 に示す。各試験片とも 10 ヶ月時より光沢残存率は低下しており、とくに表面においては 30 % 以下であり、見た目においても光沢がなくなっているのが確認される。これは紫外線等の影響により表面の方が劣化度が大きかったためと考えられる。また地域別では銑子が若干高い値を示す傾向がみられる。

② めっき+塗装試験片

めっき+塗装試験片の光沢残存率を図 4 に示す。この試験片についても溶射+塗装試験片と同様に表面で光沢残存率の低下が大きい。地域別、種類別では特徴的な傾向はみられない。

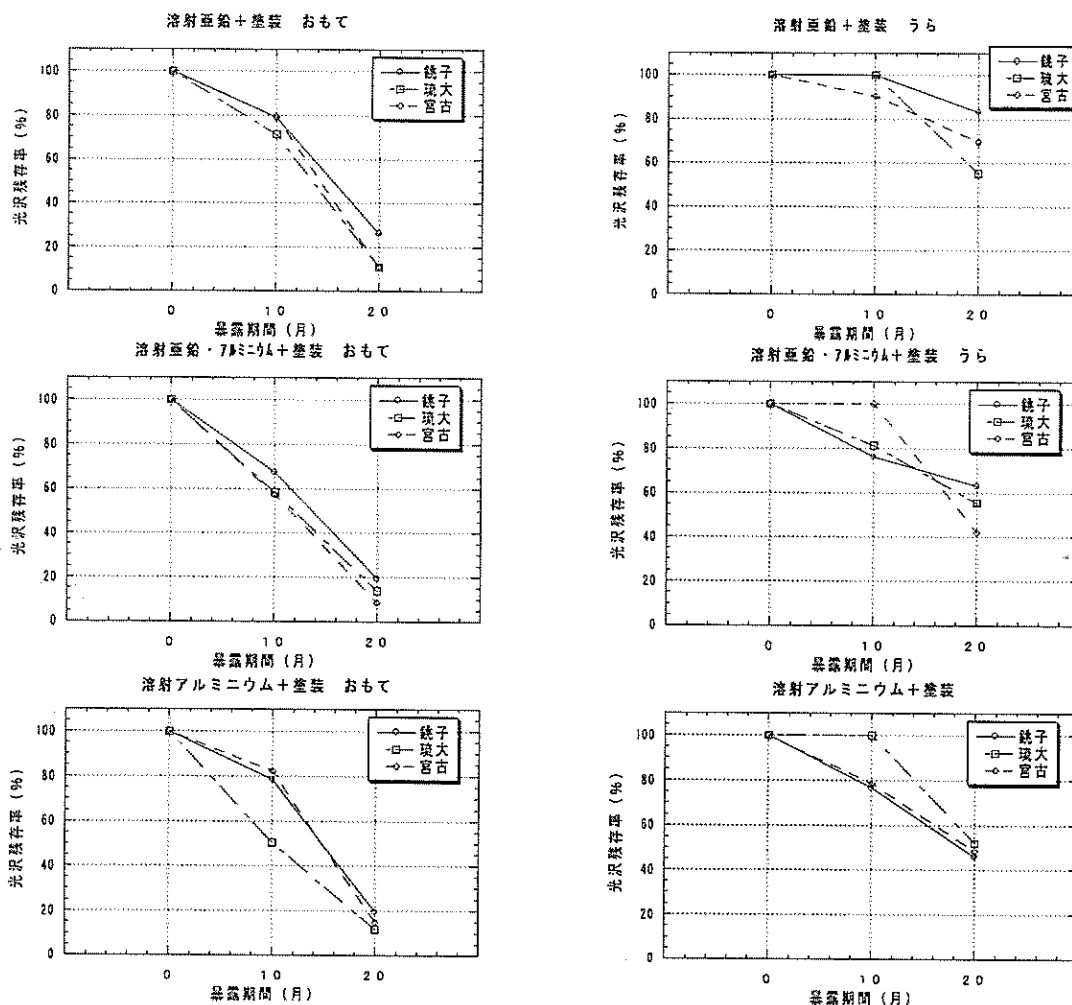


図3 溶射+塗装試験片の光沢残存率

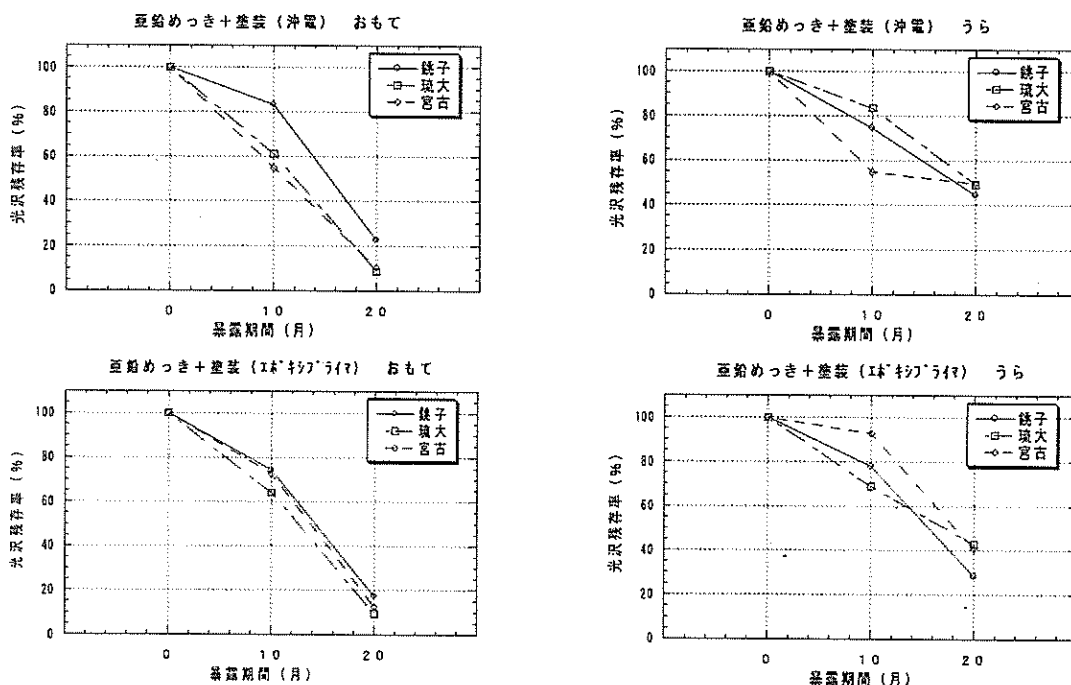


図4 めっき+塗装試験片の光沢残存率

③ 塗装試験片

塗装試験片の光沢残存率を図 5 に示す。各試験片とも表面より裏面が光沢残存率が大きくなっている。地域別の差はあまり明確ではないが、種類別でみると、短縮 3 (シリコン変性アクリル) の光沢残存率が各地域で比較的高い値を示している。

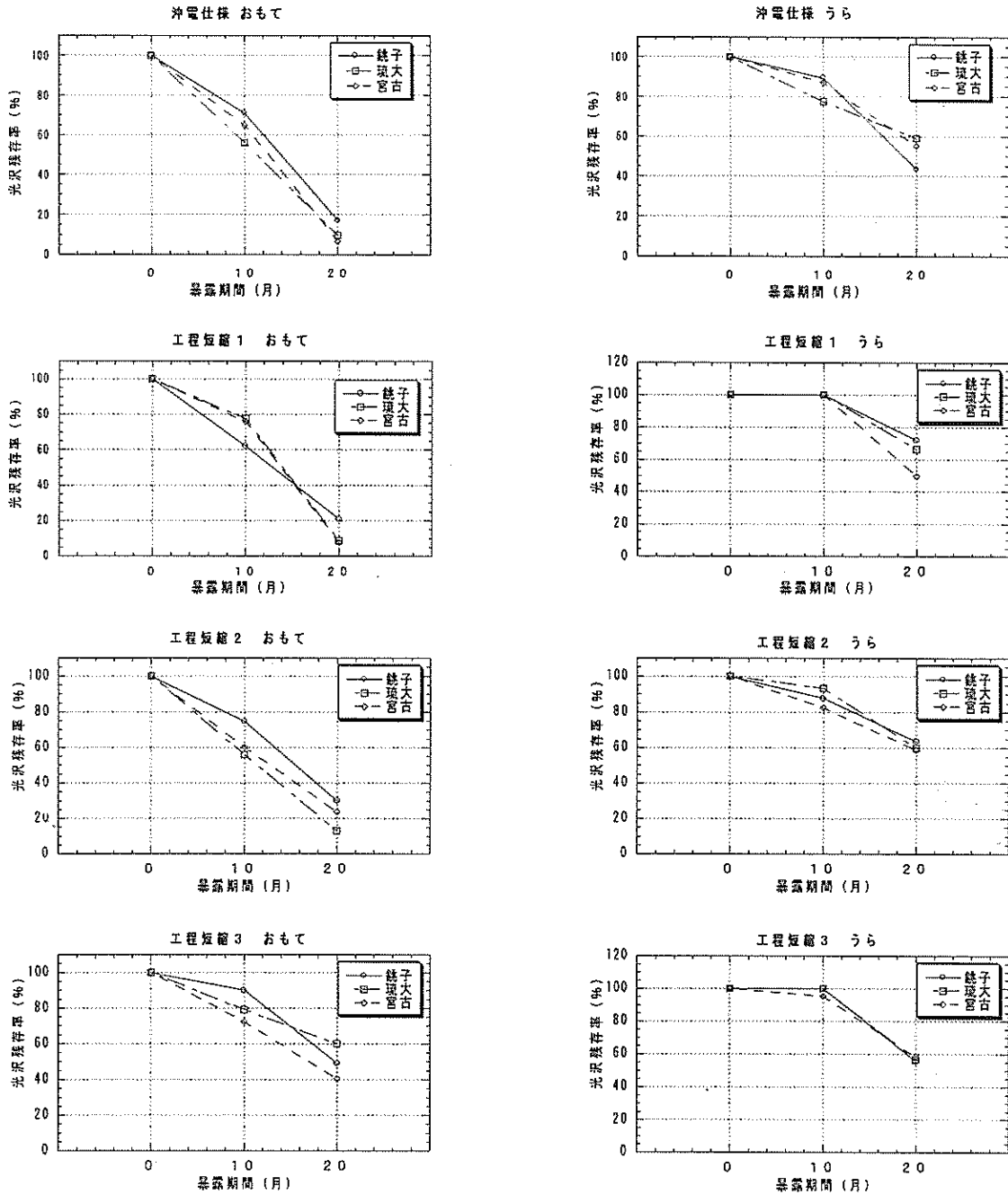


図 5 塗装試験片 (種類別) の光沢残存率

(4) 色差

塗装の色調も光沢度と同様紫外線等の影響により変化を見せる。本試験では保存板と暴露試験片塗膜との色差(L a b)を色差計を用いて測定し(JIS Z 8730 色差表示方法による)、各試験片の評価を行う。

※Δ(L, a, b)

色差基準色のデータを(L_i, a_i, b_i)、測定データを(L*, a*, b*)とすると次式でそれぞれのデータが得られる。

$$\Delta L^* = L^* - L_i$$

$$\Delta a^* = a^* - a_i$$

$$\Delta b^* = b^* - b_i$$

またL*a*b*空間における上の2つのデータ間の色差ΔE*a bは以下の式で得られる。

$$\Delta E^* a b = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}$$

表4 色差の評価基準

色差の程度の評語	Δ E*ab
きわめてわずかに異なる (trace)	0 ~ 0.5
わずかに異なる (slight)	0.5 ~ 1.5
感知し得るほど異なる (noticeable)	1.5 ~ 3.0
著しく異なる (appreciable)	3.0 ~ 6.0
きわめて著しく異なる (much)	6.0 ~ 12.0
別の色系統になる (very much)	12.0 以上

①溶射+塗装試験片

溶射+塗装試験片の色差測定の結果を図6に示す。各試験片とも暴露期間が長くなるにつれて色差が大きくなる傾向にある。表面と裏面を比較すると、表面が大きくなっているが、亜鉛+塗装試験片においては裏面でも大きい値を示している。光沢残存率ではこのような傾向は認められず、後述するインピーダンスでも特に異常な値はみられない。今後の経過に注意する必要がある。地域別では特徴的な傾向は認められない。

②めっき+塗装

めっき+塗装試験片の色差測定結果を図7に示す。地域別では特に大きな差はみられない。また種類別にみると沖電仕様の方が若干大きい傾向がみられる。この試験片も溶射+塗装試験片と同様、裏面は表面より値は小さく、暴露期間が長くなるにつれて、色差が大きくなる傾向がある。

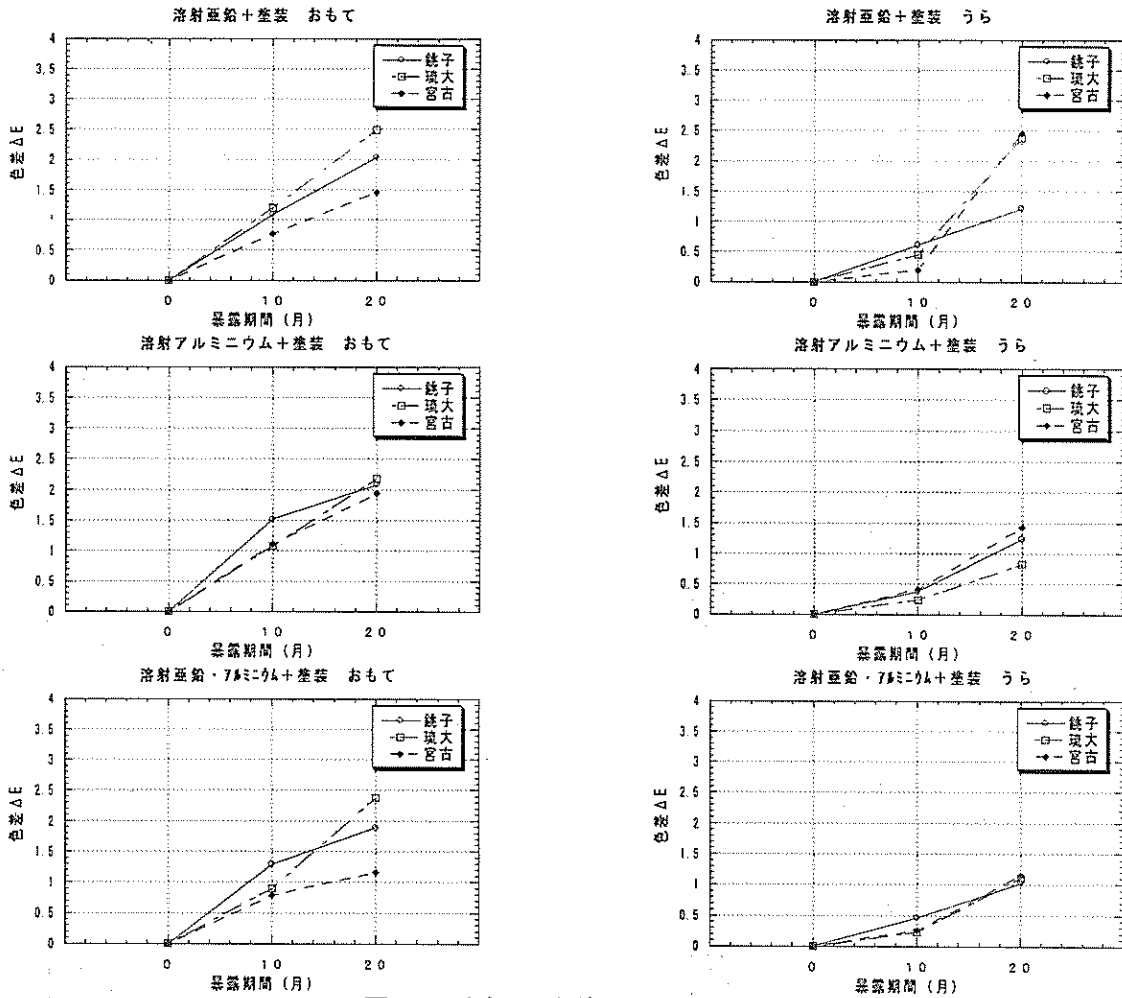


図6 溶射+塗装試験片の色差

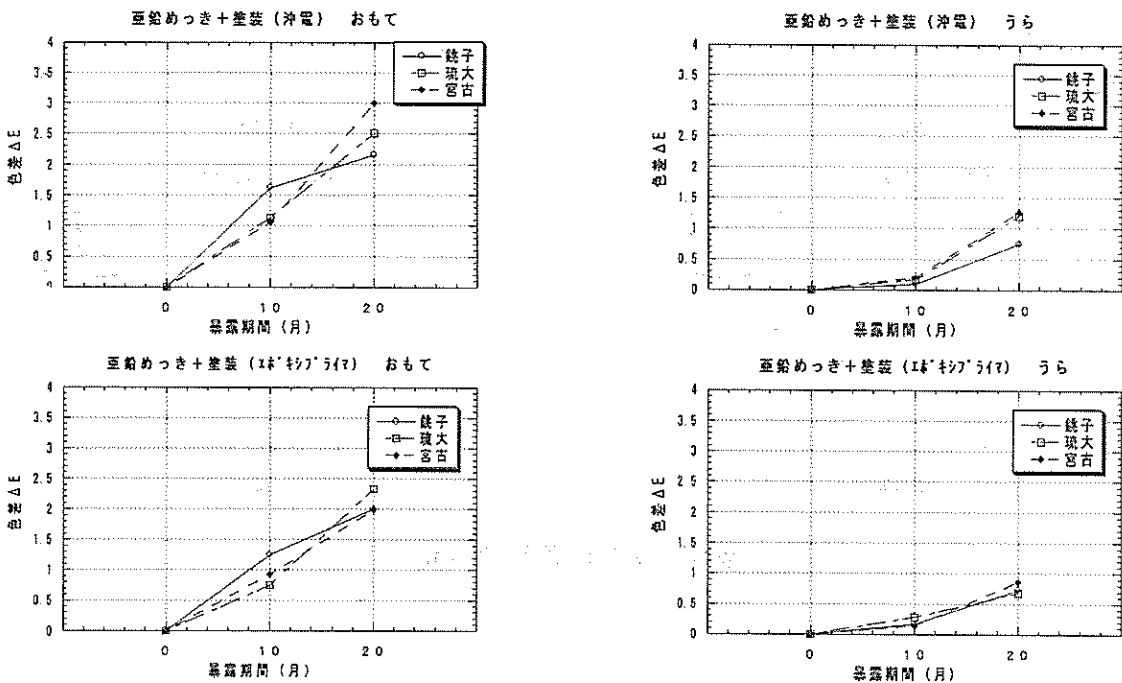


図7 めっき+塗装試験片の色差

③塗装試験片

塗装試験片の色差測定結果を図8に示す。この試験片でも暴露期間が長くなるにつれて色差が大きくなる傾向にあり、表面が色差が大きくなっている。地域差は特に認められないが、種類別にみると工程短縮2（フッ素系）の色差が小さくなっている。

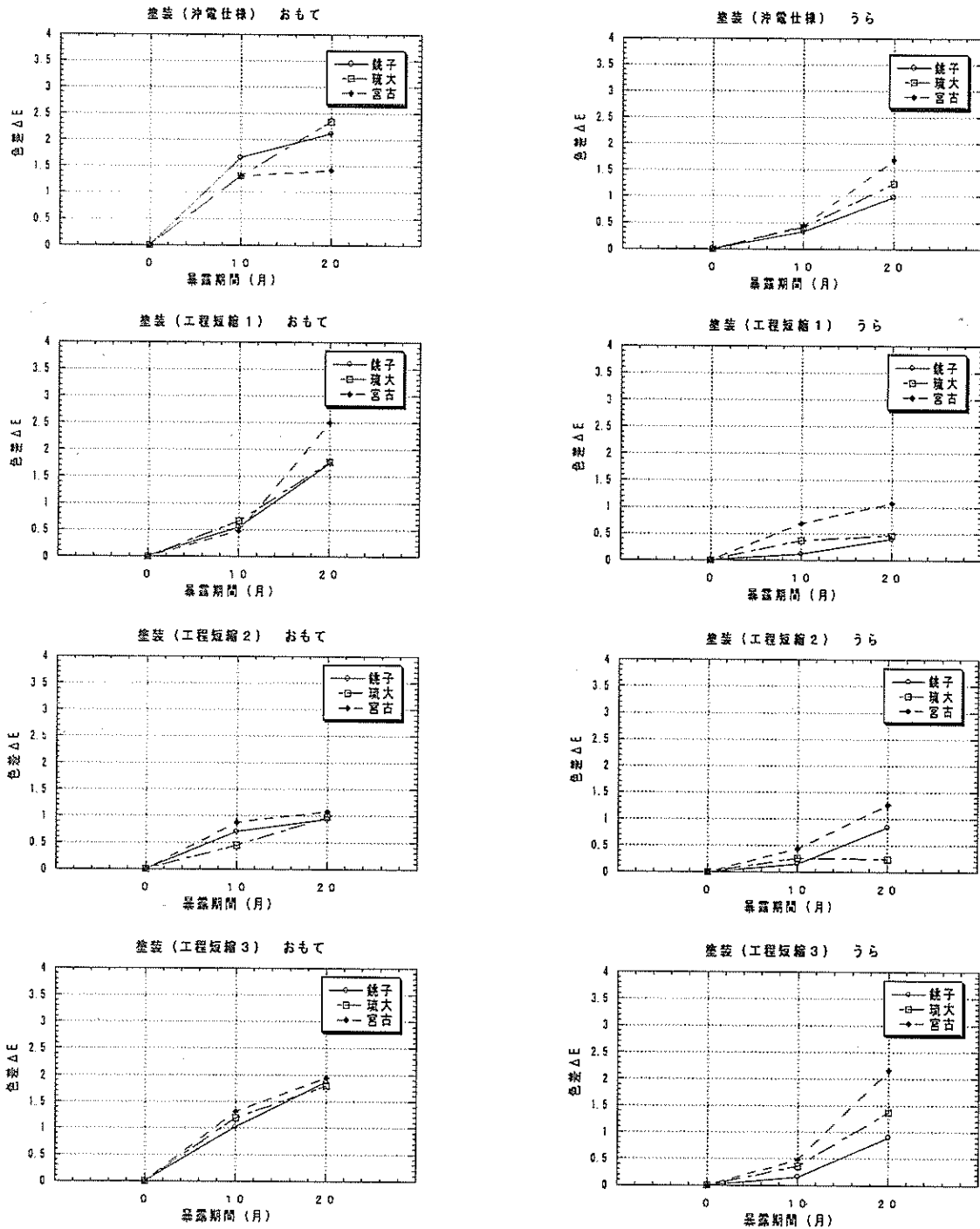


図8 塗装試験片の色差

(5) インピーダンス

交流ブリッジ（塗膜劣化度測定器）を用いて、容量値（C）と抵抗（R）を測定し、塗膜の劣化度を推測する。

① 溶射+塗装

溶射+塗装試験片のインピーダンス測定（電気容量C、抵抗R）の測定結果を図9に示す。各試験片とも保存板と比較して、電気容量は大きく、抵抗は小さくなっているが、値、グラフの形から塗膜の著しい劣化、異常等はみられない。

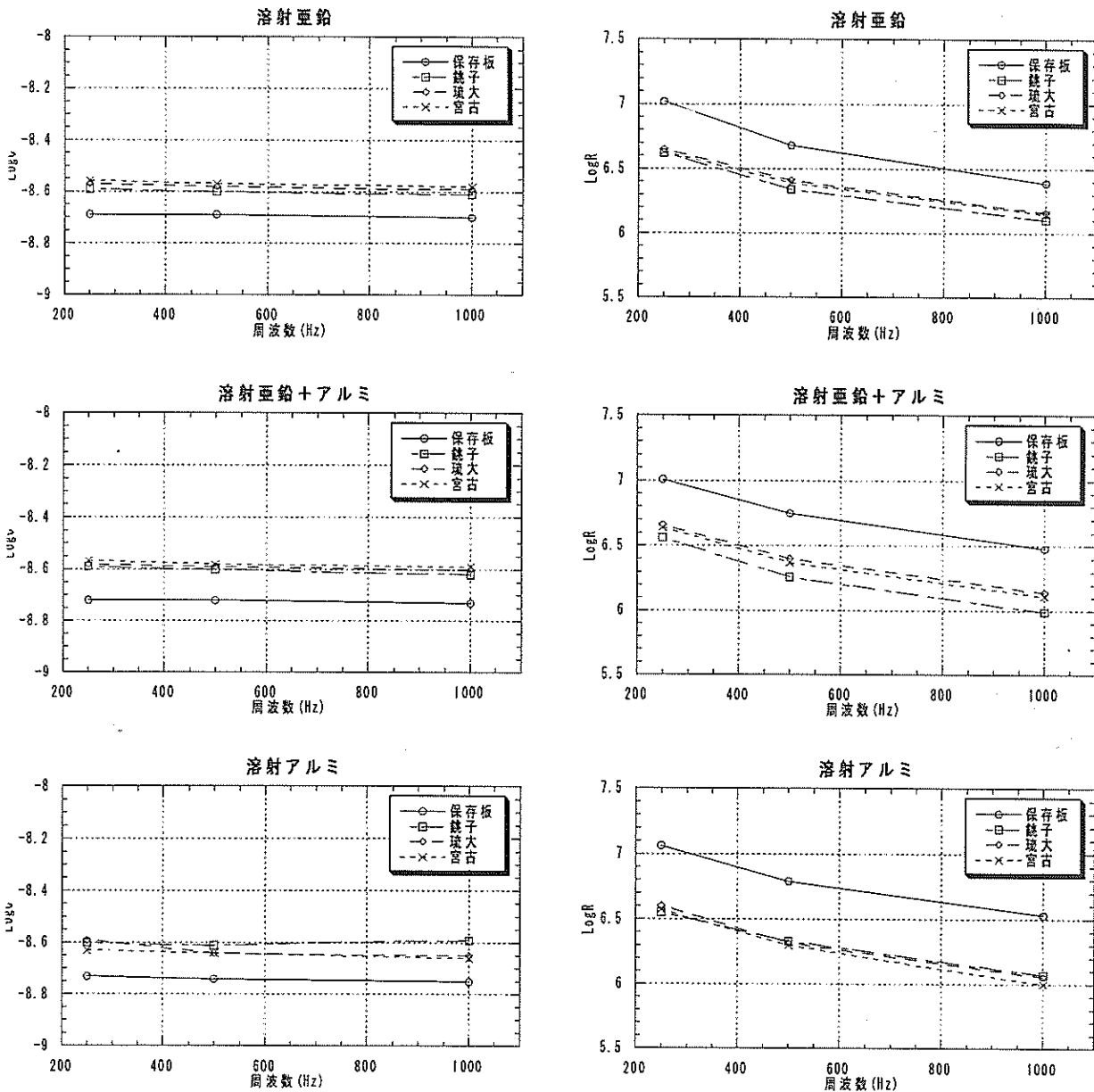


図9 溶射+塗装試験片のインピーダンス

②めっき+塗装

めっき+塗装試験片のインピーダンス測定（電気容量C、抵抗R）の測定結果を図10に示す。各試験片とも保存板と比較して、電気容量は大きく、抵抗は小さくなっているが、値、グラフの形から塗膜の著しい劣化、異常等はみられない。値からは電力仕様が保存板との差は小さい傾向にある。

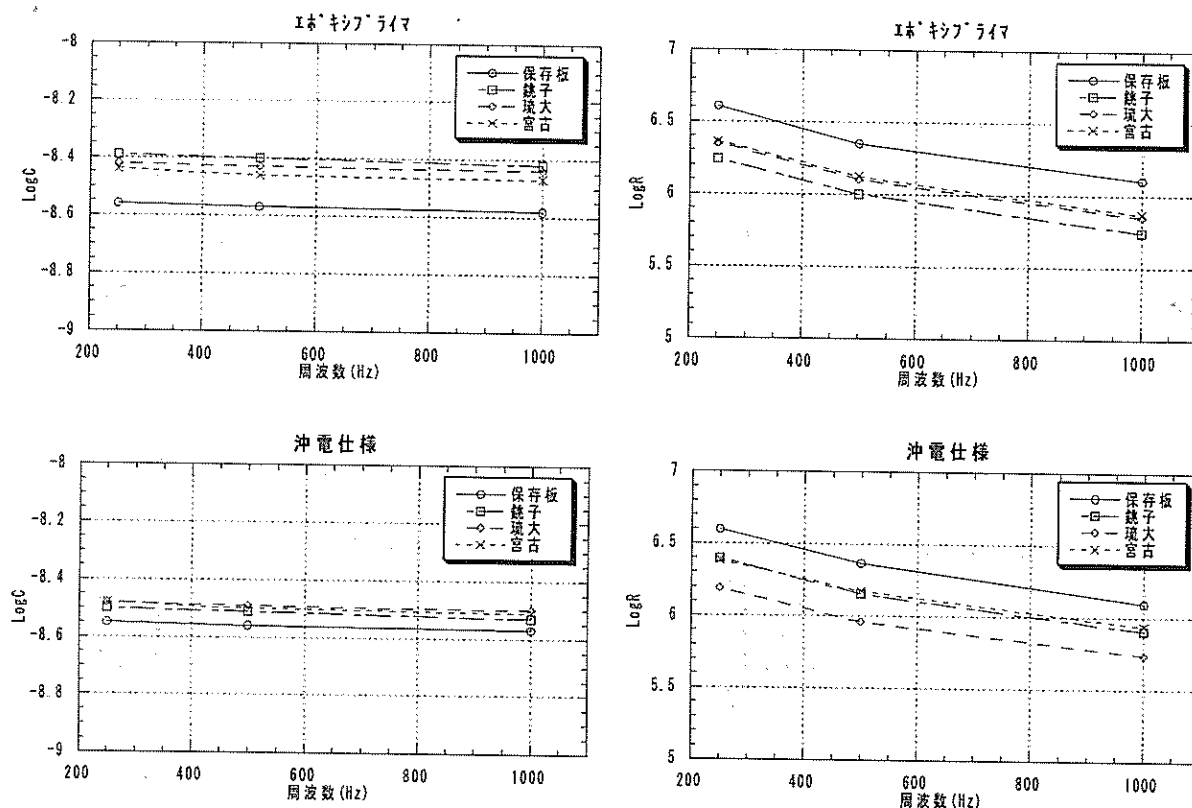


図10 めっき+塗装試験片のインピーダンス

③塗装試験片

塗装試験片のインピーダンス測定（電気容量C、抵抗R）の測定結果を図11に示す。各試験片とも保存板と比較して、電気容量は大きく、抵抗は小さくなっているが、値、グラフの形から塗膜の著しい劣化、異常等はみられない。地域差も特徴的な傾向はみられない。

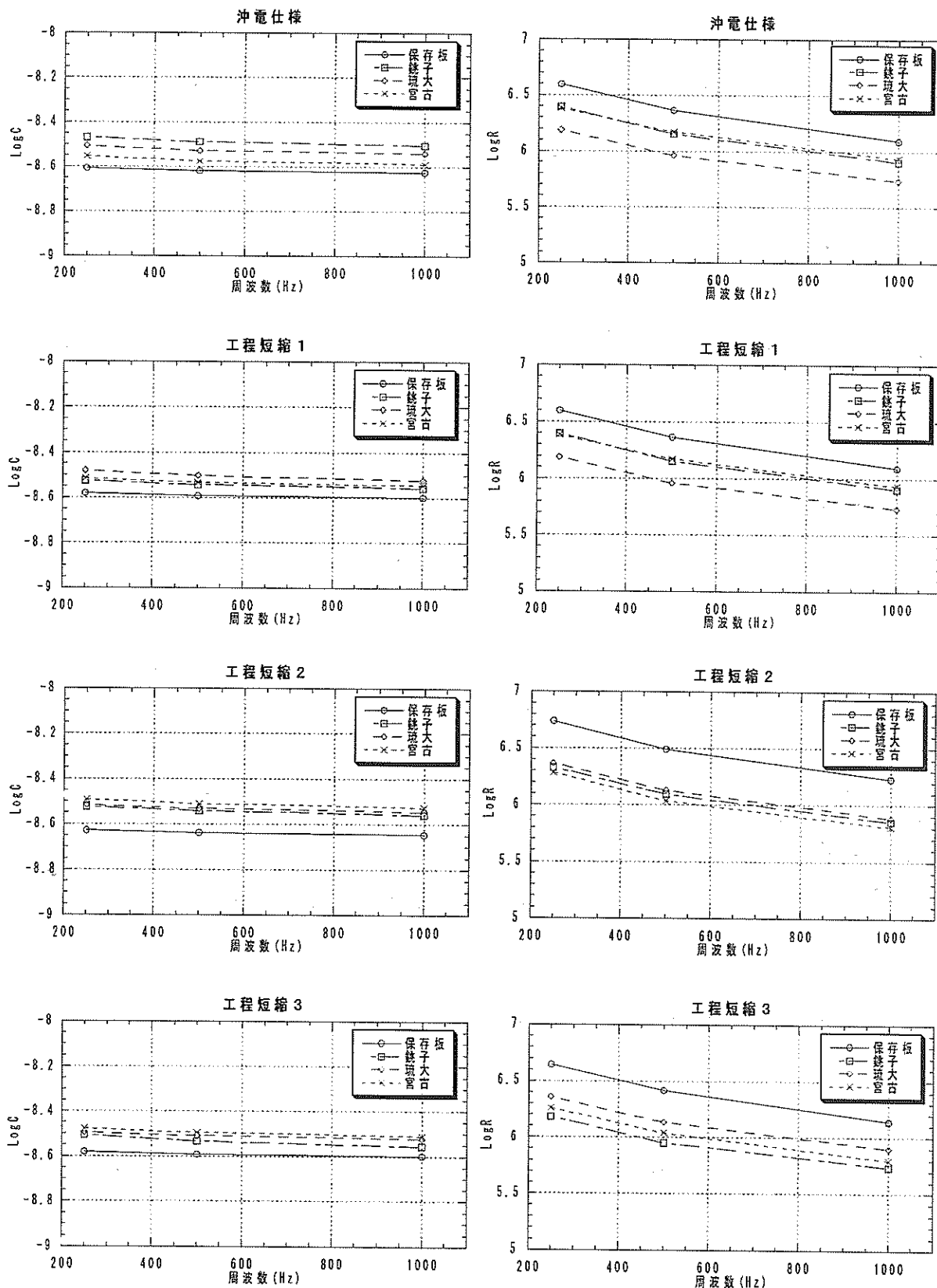


図11 塗装試験片のインピーダンス

(6) ピンホール試験

特殊塗装試験片についてピンホールテストを用いてピンホールの個数を調べた。塗装面にピンホールが存在すると、そこからさびが発生しやすくなる。今回の暴露試験片でセメント系の試験片でピンホールが確認され、そこからさびの発生がみられている。ピンホールの個数は宮古島の試験片(C-6-1-2-2)でおもて面 120 個、うら面 140 個ともっとも多く、ついで銚子(おもて面 90 個、うら面 80 個)、琉大(おもて面 92 個、うら面 57 個)の順だった。

(7) 腐食速度

炭素鋼について腐食速度を測定した。さびの除去は 60℃ に加熱した 10% クエン酸アンモニウム水溶液中に炭素鋼を浸し、さびを完全に除去し、水洗後メタノールに浸した後、乾燥・冷却し秤量する。得られた腐食減量から次式により腐食速度を求めた。

$$\text{腐食速度 (mdd)} = (\text{初期重量} - \text{除錆後重量}) / \text{試験片表面積} / \text{暴露日数}$$

結果を図 12 に示す。これをみると 20 ヶ月時の腐食速度はいずれの試験片も 10 ヶ月時よりも小さな値を示しており、ある時期からさびの発生が抑制されていることが示唆される。地域別にみると耐候性鋼材、SS 材とも宮古 > 銚子 > 琉大の順になっており、特に宮古で大きくなっている。素材別にみると SS 材が大きな値を示しているが、琉大では 20 ヶ月経過時点での腐食速度は素材による差はあまりでない。

(8) クロスカット

塗装試験片、溶射 + 塗装試験片、およびめっき + 塗装試験片について、塗膜にカッターナイフを用いて、素地に達する切り傷で碁盤目(間隔は 5mm)を作り、その面に粘着テープを圧着・剥離させる。これを 2 回繰り返す、そのときの塗膜のはがれ状態から密着度を評価する。

溶射 + 塗装試験片、めっき + 塗装試験片についてはカッターの切り傷による若干のはがれが認められる他は特に異常はみられなかった。

塗装試験片についてははがれ面積を図 13 に示す。10 ヶ月時と同様、沖電仕様以外はかなりのはがれが認められるが、地域、種類による傾向はみられない。はがれの原因について、沖電仕様と比べて工程短縮の試験片では下塗りでの溶剤使用量が多いため、乾燥後の引っ張り応力が大きくなるためと考えられる。

表 6 に今回暴露している塗装試験片の仕様を示す。

(9) 衝撃試験

特殊塗装試験片について、塗膜面に、260 g のおもりを、落下高さ 1000mm より落とし、塗装面の状態を観察(ひび、はがれ等)した。その結果、塗装面でへこみはみられたが、われ、はがれ等は観察されなかった。

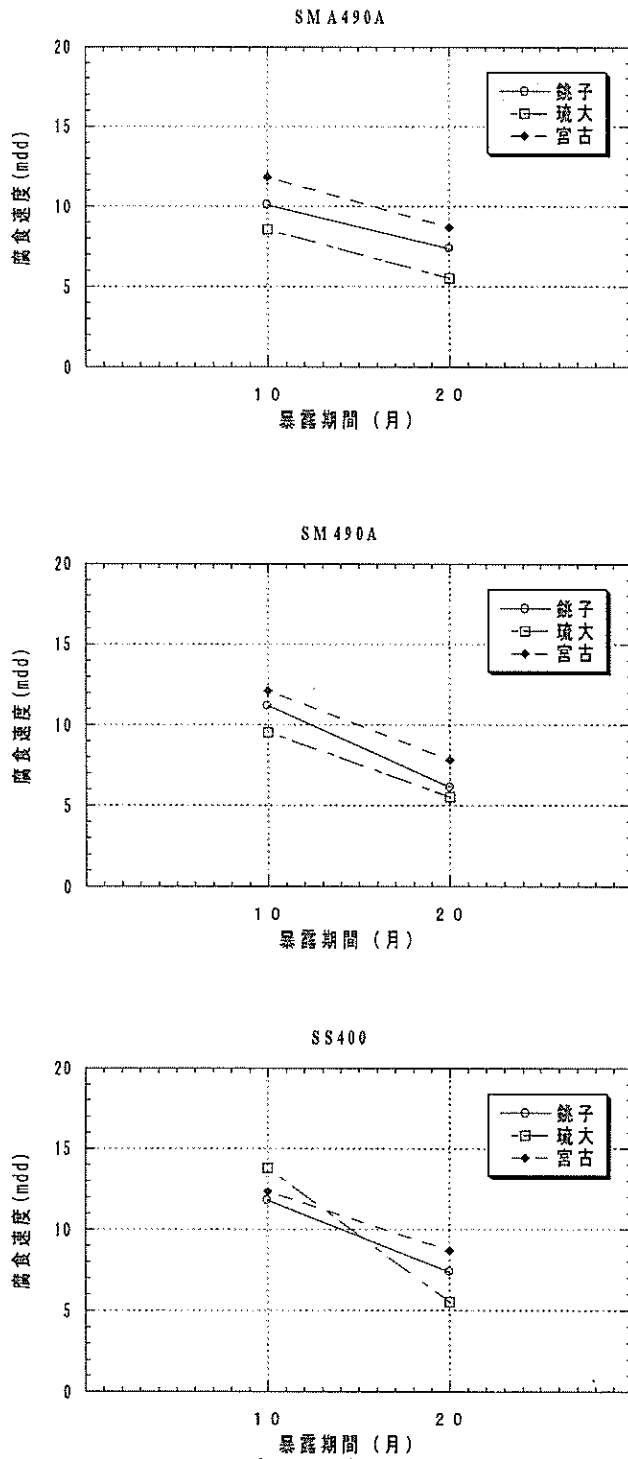


図12 炭素鋼の腐食速度

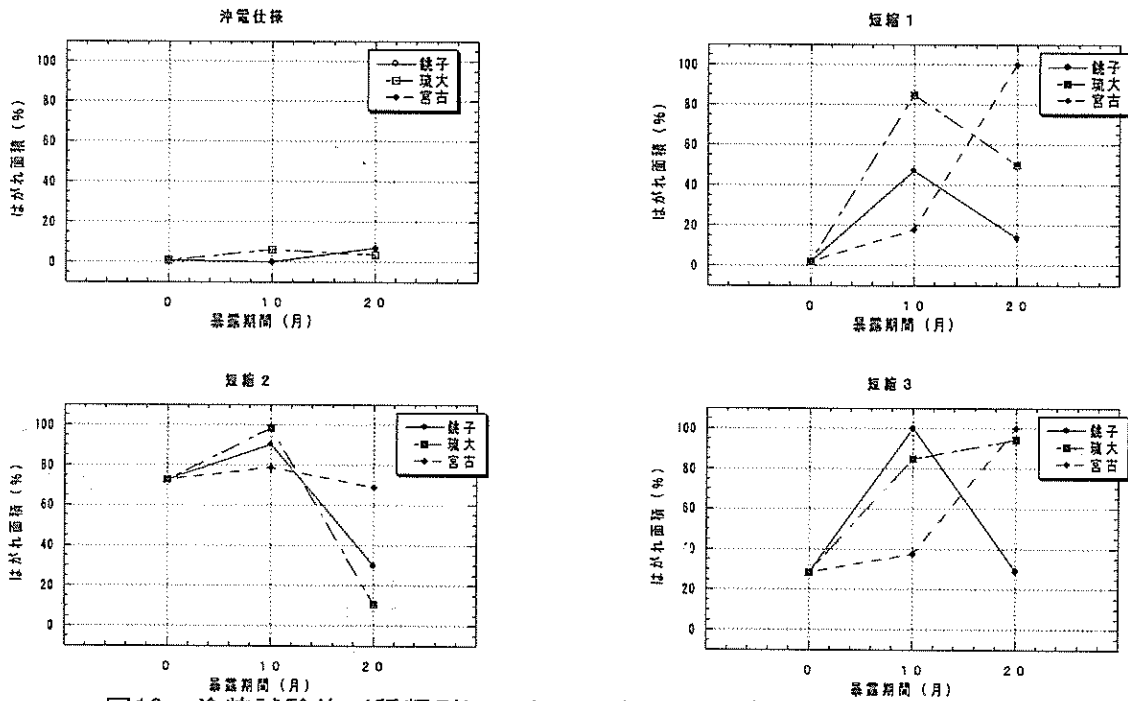


図13 塗装試験片（種類別）のクロスカットはがれ面積

表 5 クロスカット試験の評価点数

評価点数	
10	切り傷1本ごとが、細くて両側が滑らかで、切り傷の交点と正方形の一目一目にはがれがない。
8	切り傷の交点にわずかなはがれがあつて、正方形の一目一目にはがれがなく、欠損部の面積は全正方形面積の5%以内。
6	切り傷の両側と交点とにはがれがあつて、欠損部の面積は全正方形面積の5～15%。
4	切り傷によるはがれの幅が広く、欠損部の面積は全正方形面積の15～35%。
2	切り傷によるはがれの幅は4点よりも広く、欠損部の面積は全正方形面積の35～65%。
0	はがれの面積は、全正方形面積の65%以上。

※ JIS K 5400 (塗料一般試験方法) 8.5 付着性より

表6 塗装（工程短縮形）試験片適用塗装系

種別	試験片記号	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層
沖電仕様	A-5-1-1-0 (B.C) (1~5)	無機 ジソクリッチ 75 μm	ミストコート (エポキシ下 50%希釈)	エポキシ 下 60 μm	エポキシ 60 μm	ポリウレタン 中 30 μm	ポリウレタン 上 25 μm
短縮1	A-5-2-1-0 (B.C) (1~5)	無機 ジソクリッチ 75 μm	ミストコート (エポキシ下 50%希釈)	エポキシ 下 120 μm	ポリウレタン 中 30 μm	ポリウレタン 上 25 μm	—
短縮2	A-5-3-1-0 (B.C) (1~5)	無機 ジソクリッチ 75 μm	ミストコート (エポキシ下 50%希釈)	エポキシ 下 120 μm	フッ素用 中 30 μm	フッ素用 上 25 μm	—
短縮3	A-5-4-1-0 (B.C) (1~5)	無機 ジソクリッチ 75 μm	ミストコート (エポキシ下 50%希釈)	エポキシ 下 120 μm	シリコン変性 アクリル 中 30 μm	シリコン変性 アクリル 上 25 μm	—

3. 2 環境因子と暴露試験結果の相関

暴露試験の結果は環境条件により非常に異なることが多い。暴露試験の結果と環境因子の相関について検討することは、実際の使用環境でどのような挙動を示すかを予測するのに重要となる。そこで環境因子と暴露試験結果の対応関係について検討する。

各暴露地における環境因子測定としては温度、湿度、ガーゼ法による飛来塩分量の測定を実施している。これらの環境因子の結果と、暴露試験 20 ヶ月目の結果は素材に関してはやや差が現れ始めているものの、それ以外の表面被覆材の腐食状況には顕著な違いが現れるまでには至っていないのが現状である。

(1) 温度、湿度からみた腐食性

温度および湿度は金属の腐食とは密接な関係にあり、それらが高い環境では結露しやすく、腐食しやすいと言われている。月毎の平均温度と平均湿度をプロットしたクライモグラフと呼ばれる図において温度も湿度もともに高い月（例えば 20℃以上、70%以上）が1年を通して多い環境ほど腐食環境が厳しいと判断する場合がある。温度と湿度は各暴露地に設置した温湿度センサーで10分ごとの測定を行っている。図14に12月までのクライモグラフを示す。図より温度20℃以上、湿度70%以上の月は宮古および琉大では1月と2月以外はすべてであり、銚子では夏場の6月から9月にかけてである。これは昨年度とほぼ同様であり、クライモグラフから判断すると銚子はマイルドな環境といえる。

図15には10分毎に測定している温度と湿度が20℃以上かつ80%以上であった時間を月毎に

算出し、その割合を表したものである。宮古と琉大においては6月から9月にかけては90%以上が高温高湿条件ということがわかる。

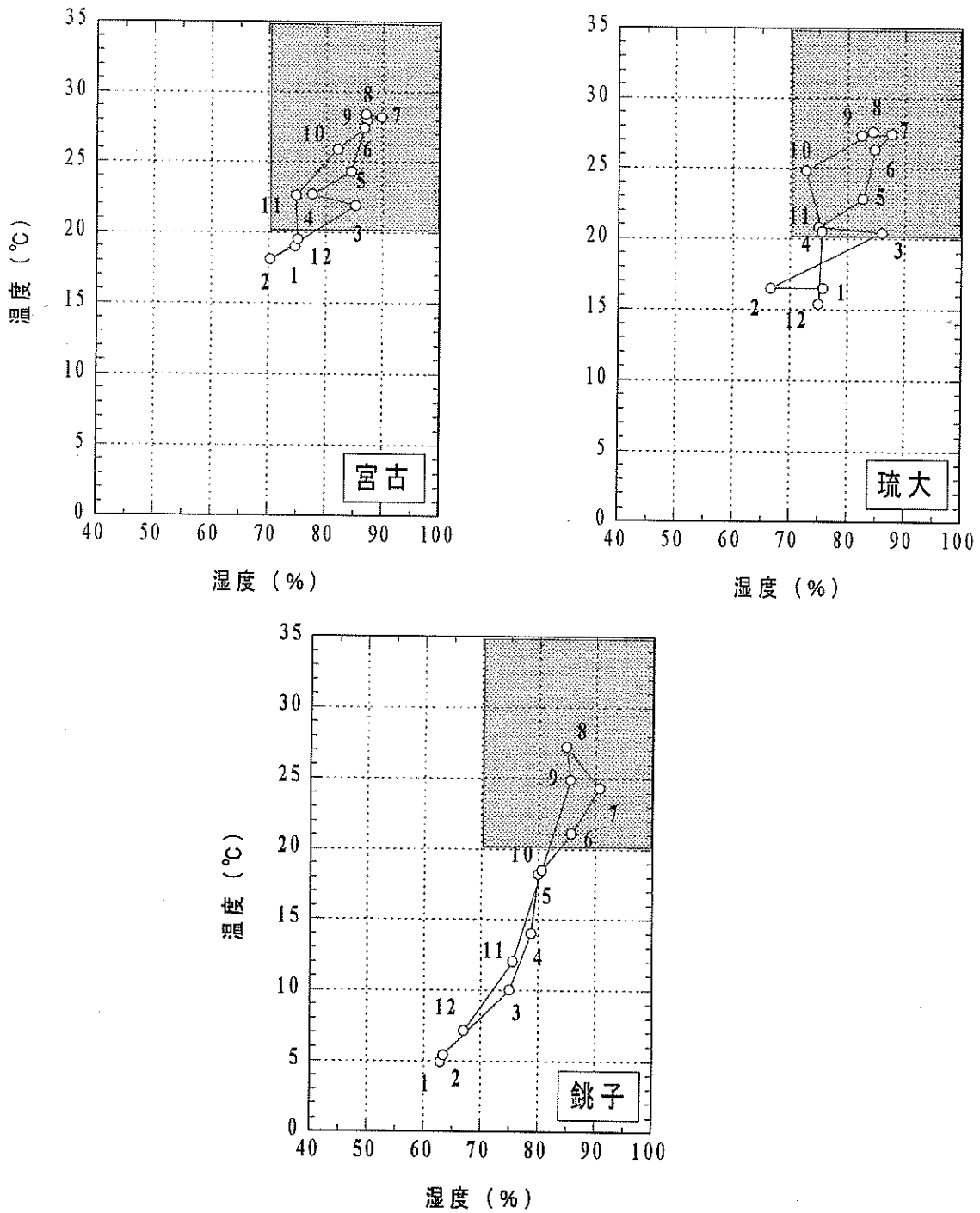


図14 各暴露地のクライモグラフ

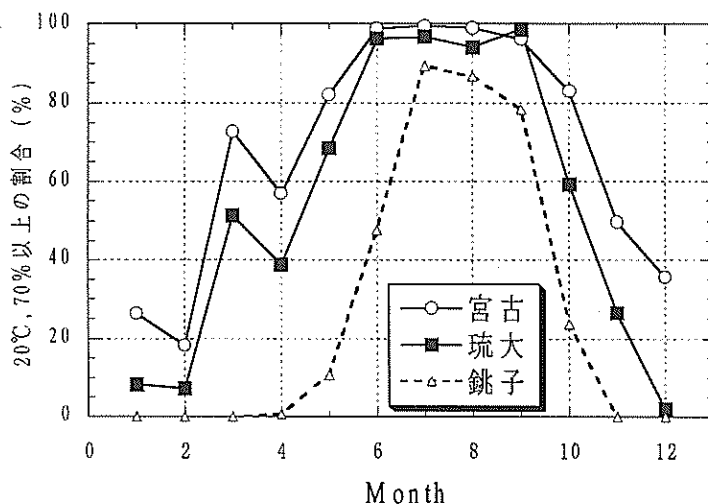


図15 20°C以上かつ70%以上の時間の月別割合

(2) 海塩粒子量から見た腐食性

海塩粒子とは、海岸周辺や海上で海水滴、あるいは海水気泡が破壊する際に生じる非常に細かい海水の粒子のことである。一般的には海岸から離れるにしたがいその量は減少傾向にあるものの、沖縄県のように四方を海に囲まれた狭い地域においては内陸部といえどもその量は少なくはない。ガーゼ法による海塩粒子量の測定は、100 × 100mm のガーゼをある一定期間（通常は1ヶ月）雨の当たらない箇所に暴露し、海塩粒子を捕獲し、その飛来量を測定するものである。図16に各暴露地で測定した海塩粒子量の月毎の変化を示す。ほぼ0.5mdd以下を示している。しかし、宮古の10月および銚子の11月が非常に多い結果となっている。昨年からの全データをプロットした図17を見てみると、飛来塩分量は対数正規分布にしたがうことがわかる。図より銚子は月による変動が大きく、宮古と琉大は変動が小さい。飛来塩分量の平均では宮古（0.39mdd）が最も多く、琉大（0.30mdd）、銚子（0.18mdd）の順となっている。

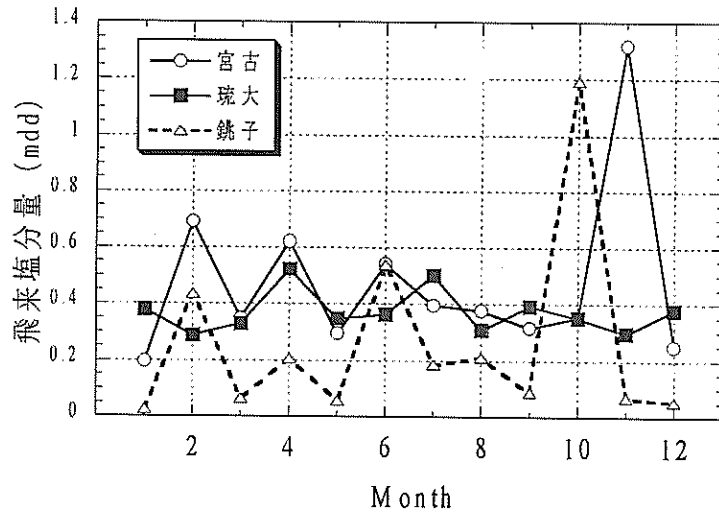


図16 海塩粒子量の月経時化

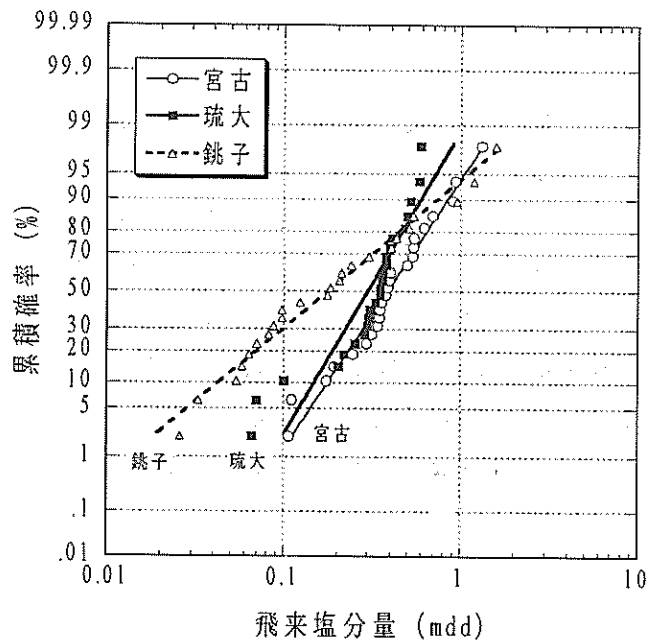


図17 飛来塩分量の累積分布

2. 4 おわりに

宮古、琉大および銚子の3カ所の暴露地において、環境因子測定および大気暴露試験を行い、20ヵ月経過時点での暴露試験の結果をまとめると、以下の通りである。

20ヵ月経過時での暴露試験の結果は、素材試験片ではステンレス鋼のさび発生度、炭素鋼の腐

食減量の結果とも宮古>銚子>琉大になっていた。

溶射、めっき試験片については宮古でさびの発生度が大きくなっている傾向がみられる。

塗装試験片（溶射+塗装、めっき+塗装も含む）は、光沢度、色差の結果とも暴露期間が長くなるにつれ塗膜の劣化がみられたが、地域差に関しては大きな傾向はみられなかった。特殊塗装試験片（セメント系）でもピンホール部からの赤さび発生がみられ、特に宮古ではピンホール部周囲にまで広がりを見せていた。

本研究は(株)沖縄電力研究開発部、(株)トロピカルテクノセンターの絶大なご協力により進められたことにたいし、深く感謝の意を表します。

また、吉田眞一氏には当センターの防錆関係技術アドバイザーとして、終始ご指導いただきました。さらに(社)日本ウエザリングテストセンターには、資料の提供など多大なご協力をいただきました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 石原金盛、長山純朗、國吉和男、比嘉眞嗣、比嘉敏勝：「沖縄県における金属素材及び防錆被覆材の耐食性に関する研究(1)～(7)」、沖工試研究報告 17号～23号
- 2) 國吉和男、比嘉敏勝、羽地龍志、安里昌樹：「電力設備の防食技術開発に関する研究(第1報)」、沖工試研究報告 25号

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。