

## 電力設備の防食技術開発に関する研究（第4報）

開発研究部 安里昌樹、比嘉眞嗣

### 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宮古島試験場（以下「宮古」という）、琉球大学（以下「琉大」という）、（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）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12年度は各試験片について、32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

|            | 32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、クロスカット、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、クロスカット、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、クロスカット、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10ヶ月時、20ヶ月時、32ヶ月時の試験片回収日、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

|    | 試験片設置日   | 10ヶ月回収日  | 20ヶ月回収日   | 32ヶ月回収日   |
|----|----------|----------|-----------|-----------|
| 銚子 | H10.3.27 | H11.2.1  | H11.11.17 | H12.11.27 |
| 琉大 | H10.3.20 | H11.1.25 | H11.11.15 | H12.11.15 |
| 宮古 | H10.3.17 | H11.1.20 | H11.11.5  | H12.11.20 |

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) |
| 溶射+塗装    | 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)         |
|          | 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           |
|          | A(B,C)-4-1-1-1 | 亜鉛めっき(傷有)             |
| めっき      | A(B,C)-4-1-2-1 | 亜鉛めっき(傷無)             |
|          | A(B,C)-4-2-2-1 | 亜鉛めっき+塗装(電力仕様)        |
| めっき+塗装   | A(B,C)-4-3-2-1 | 亜鉛めっき+塗装(エポキシプライマ)    |
|          | A(B,C)-5-1-2-1 | 塗装1(電力仕様)             |
|          | A(B,C)-5-2-2-1 | 塗装2(短縮1)              |
| 塗装(工程短縮) | 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)              |
|          | A(B,C)-6-1-1-1 | セメント系(傷有)             |
| 特殊塗装     | A(B,C)-6-1-2-1 | セメント系(傷無)             |
|          | A(B,C)-6-2-1-1 | 有機ジンクリッチ(傷有)          |
|          | A(B,C)-6-2-2-1 | 有機ジンクリッチ(傷無)          |
| 錆抑制剤     | B-7-1-2-1      | MK剤                   |
|          | B-7-2-2-1      | レノバコンク                |

### 3. 結果及び考察

#### (1) 目視観察

全試験片について目視観察、および写真撮影を行った。各試験片の概況は以下のとおりであった。

#### 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、20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く、特に宮古においてはかなりのさびの発生が認められた。

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、20ヶ月時の結果と同様の傾向を示した。

### 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ヶ月時および20ヶ月時と同様な結果を示した。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た状態を示した。

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かった灰色を呈しており、点状の白さびが多くみられた。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た状態であった。傷有りの試験片については基本的に傷無し試験片と同傾向を示した。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ており、傷部の広がりにはみられないが、さび汁の流れが認められた。

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た。白さびの発生量は琉大>宮古>銚子の順で、おもて面が発生量は多かった。

溶射アルミニウム試験片は、宮古の試験片で灰黒色への変化がみられた。

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た。宮古の白さびが銚子、琉大に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た。

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った。さびの発生はみられなかった。

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た。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たが、傷部の広がりにはみられなかった。

### ③' 溶射+塗装

各試験片とも塗膜のわれ、ふくれ等、特に異常はみら

れず、さびの発生もみられなかった。

### ④めっき

各試験片とも白雲状に白さびが発生しており、発生量は宮古>琉大>銚子の順で、うら面がおもて面より多く発生していた。

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たが、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かった。

### 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かった。さびの発生もみられなかった。

### 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かった。

### ⑥特殊塗装

セメント系試験片では20ヶ月時と同様ピンホールから赤さびが発生し、特に宮古の試験片においてピンホール部から赤さびの周囲への広がりがみられた。各地域ともさびの発生はおもて面がうら面より多かった。セメント系は、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かった。傷有りの試験片は傷部周辺への広がりがみられ、特に宮古において大きな広がりがみられた。

## (2) 重量変化

重量を測定し、暴露前の重量と比較し、その変化率を調べた。

### ①ステンレス鋼

ステンレス鋼の重量変化率を図1に示す。変化率はいずれも0.1%未満で地域差も特にみられない。

### ②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。ほとんどの試験片において20ヶ月時と同等、もしくは若干の増加傾向を見せている。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。

### ③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3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、重量の増加を見せているのも宮古だけである。重量変化率は各地域とも20ヶ月時と同様の変化を示しており、銚子、琉大ではほとんど変化がみられない。

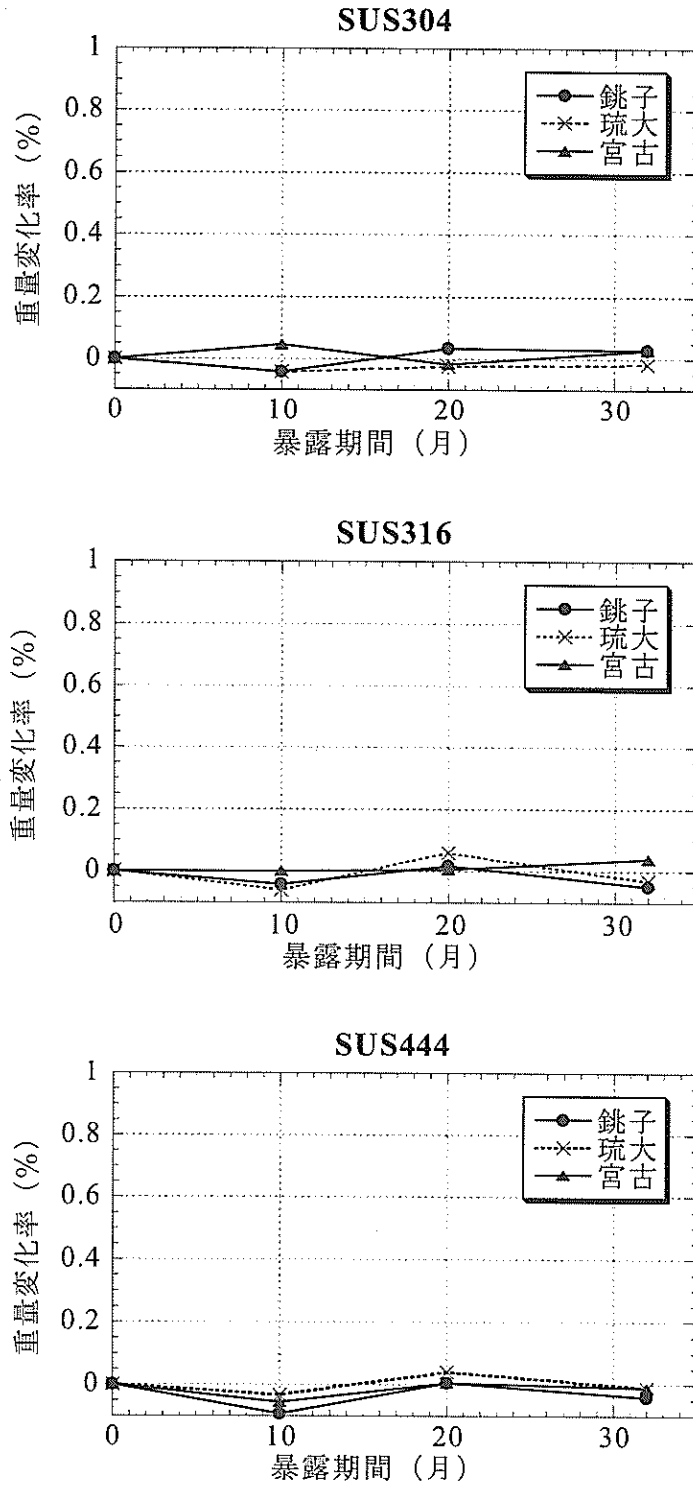


図1 ステンレス鋼の重量変化率

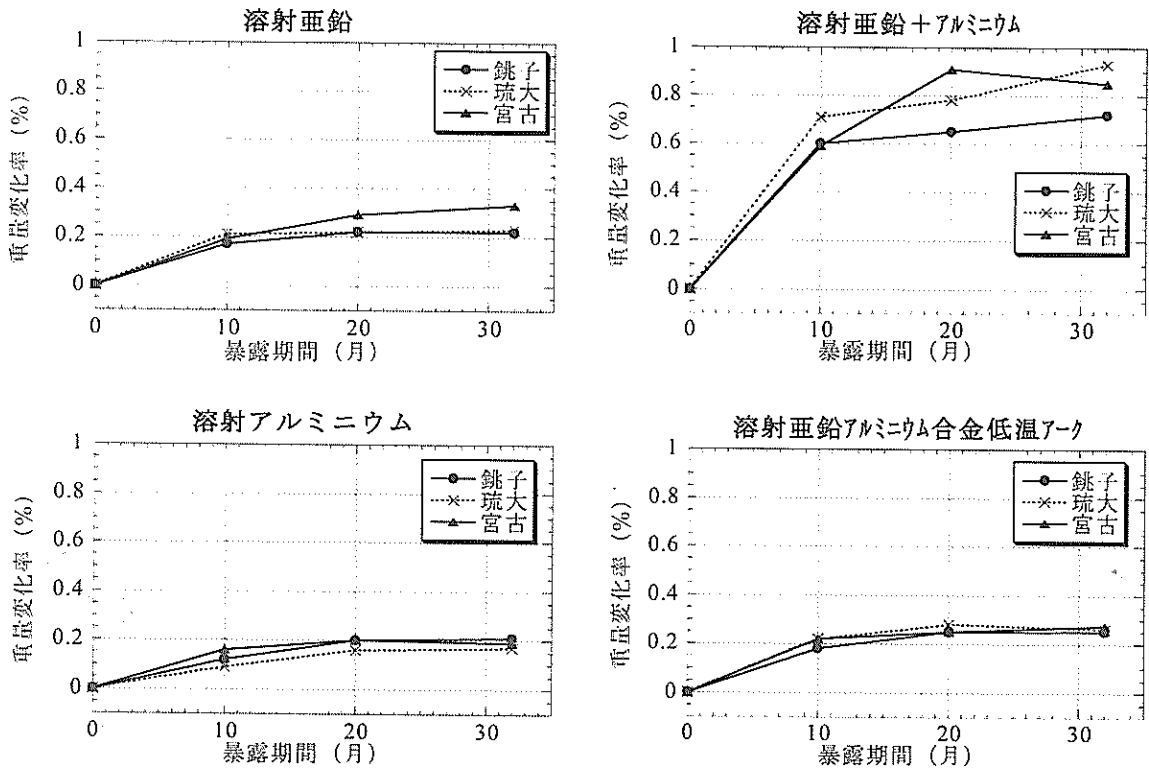


図2 溶射試験片の重量変化率

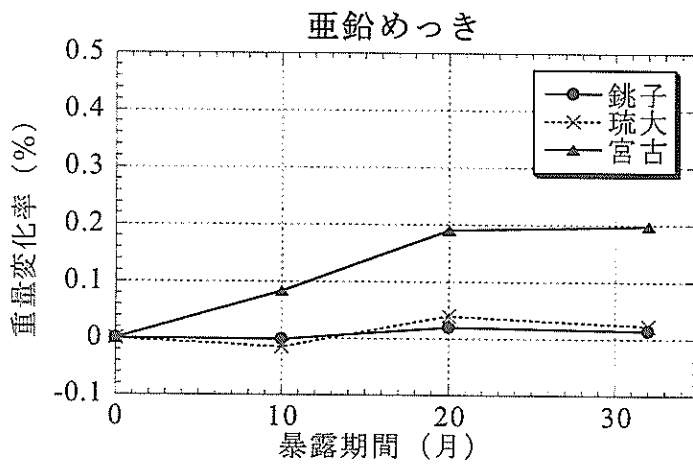


図3 めっき試験片の重量変化

(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た。

①溶射+塗装試験片

溶射+塗装試験片の光沢残存率を図4に示す。各試験片ともおもて面については20ヶ月時より光沢残存率は低下しており、ほとんど0%、もしくはそれに近い値になっており、見た目においても光沢がなくなっているのが確認された。

一方、うら面についてはほとんどの試験片で50%以上の残存率を記録しており、見た目においても光沢は保たれていた。

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5に示す。この試験片についても溶射+塗装試験片と同様におもて面で光沢残存率は0%になっている。地域別、種類別では特徴的な傾向はみられない。

③塗装試験片

塗装試験片の光沢残存率を図6および図7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

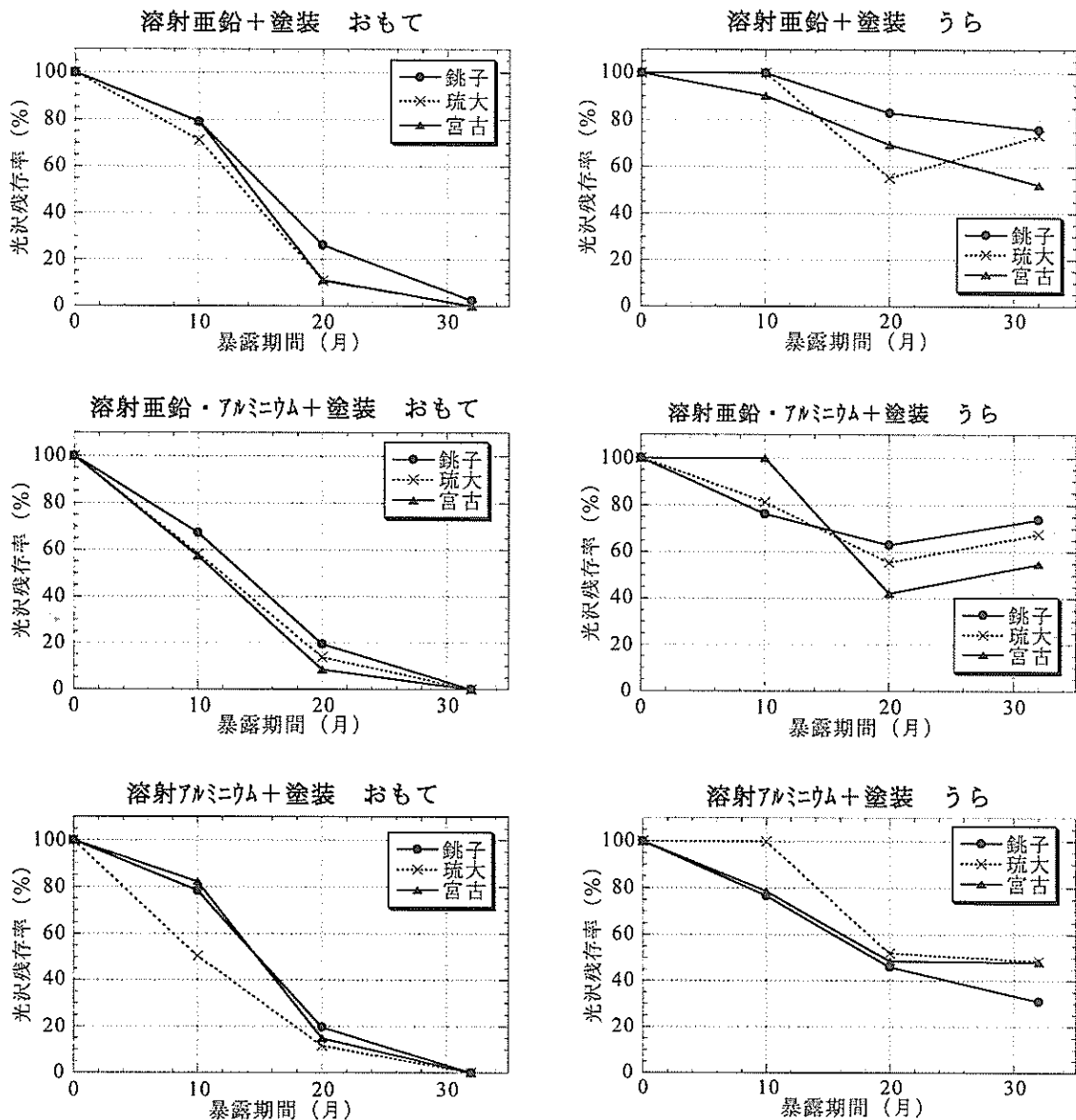


図4 溶射+塗装試験片の光沢残存率

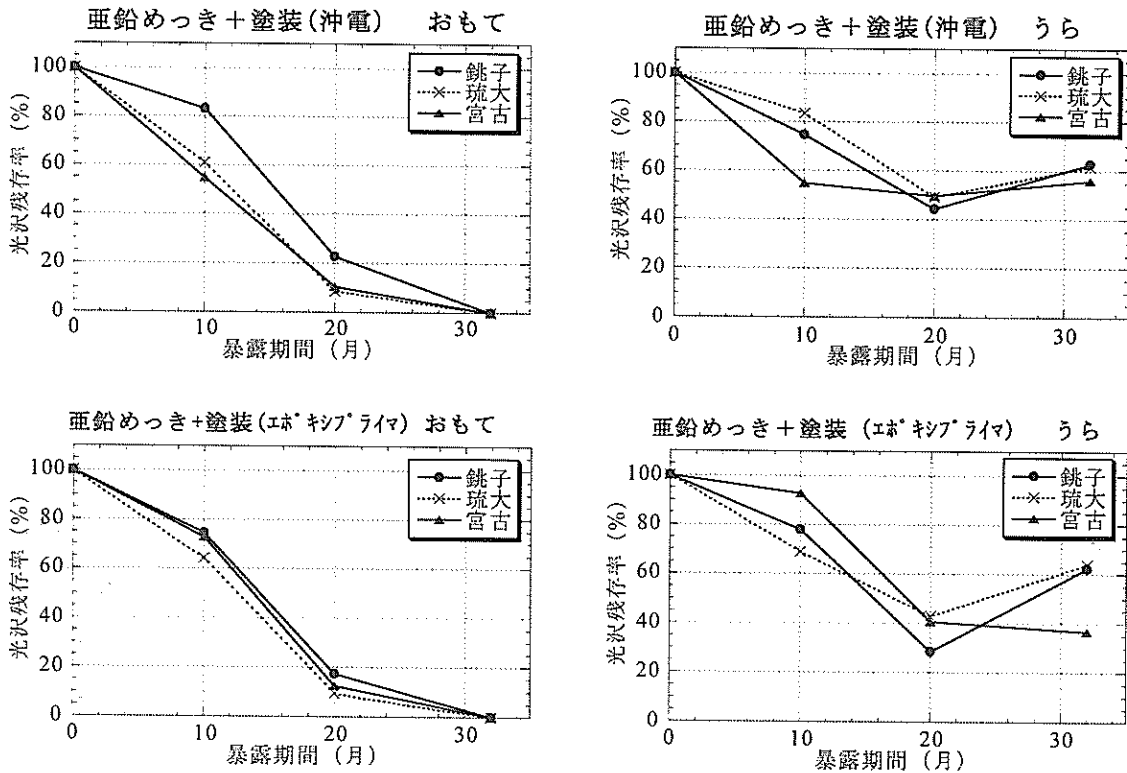


図5 めっき+塗装試験片の光沢残存率

る。地域別の差はあまり明確ではないが、種類別で見ると、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。

(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（Lab）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った。

※Δ（L、a、b）

色差基準色のデータを（L<sub>1</sub>, a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>）、測定データを（L<sup>\*</sup>, a<sup>\*</sup>, b<sup>\*</sup>）とすると次式でそれぞれのデータが得られる。

$$\Delta L^* = L^* - L_1$$

$$\Delta a^* = a^* - a_1$$

$$\Delta b^* = b^* - b_1$$

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

$$\Delta E^* a b = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad 1^{12}$$

表4 色差の評価基準

| 色差の程度の評語                | ΔE <sup>*</sup> 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           |
| 別の色系になる (verymuch)      | 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8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。おもて面とうら面を比較すると、おもて面が大きくなっている。地域別では20ヶ月時までは特徴的な傾向は認められなかったが、32ヶ月時点では琉大、宮古の値が銚子に比べ高くなる傾向が見られる。

②めっき+塗装

めっき+塗装試験片の色差測定結果を図9に示す。地域別では溶射+塗装試験片と同様に琉大、宮古の色差が銚子に比べて高くなってきている。また種類別にみると電力仕様の方が若干大きい傾向がみられる。

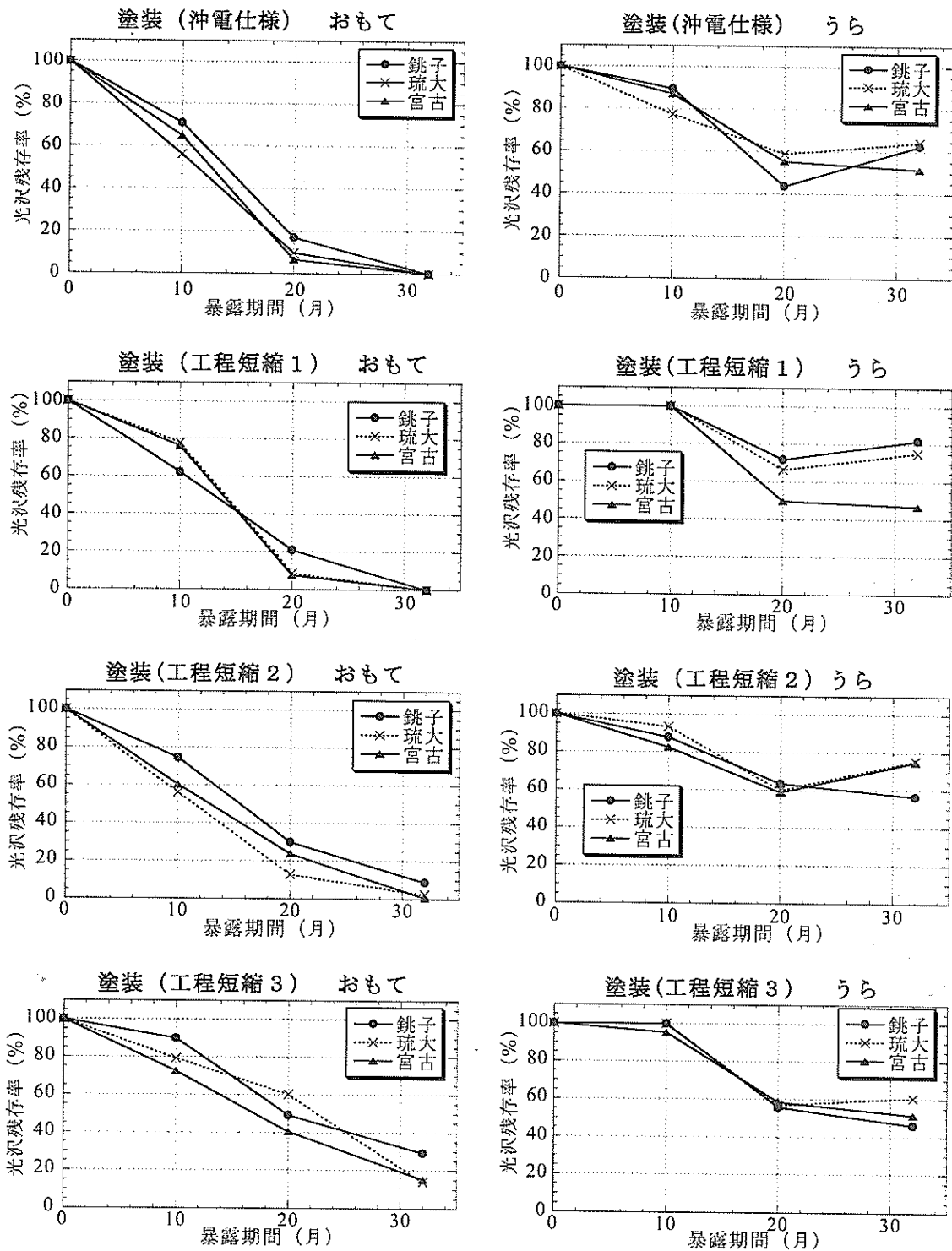


図6 塗装試験片(種類別)の光沢残存率

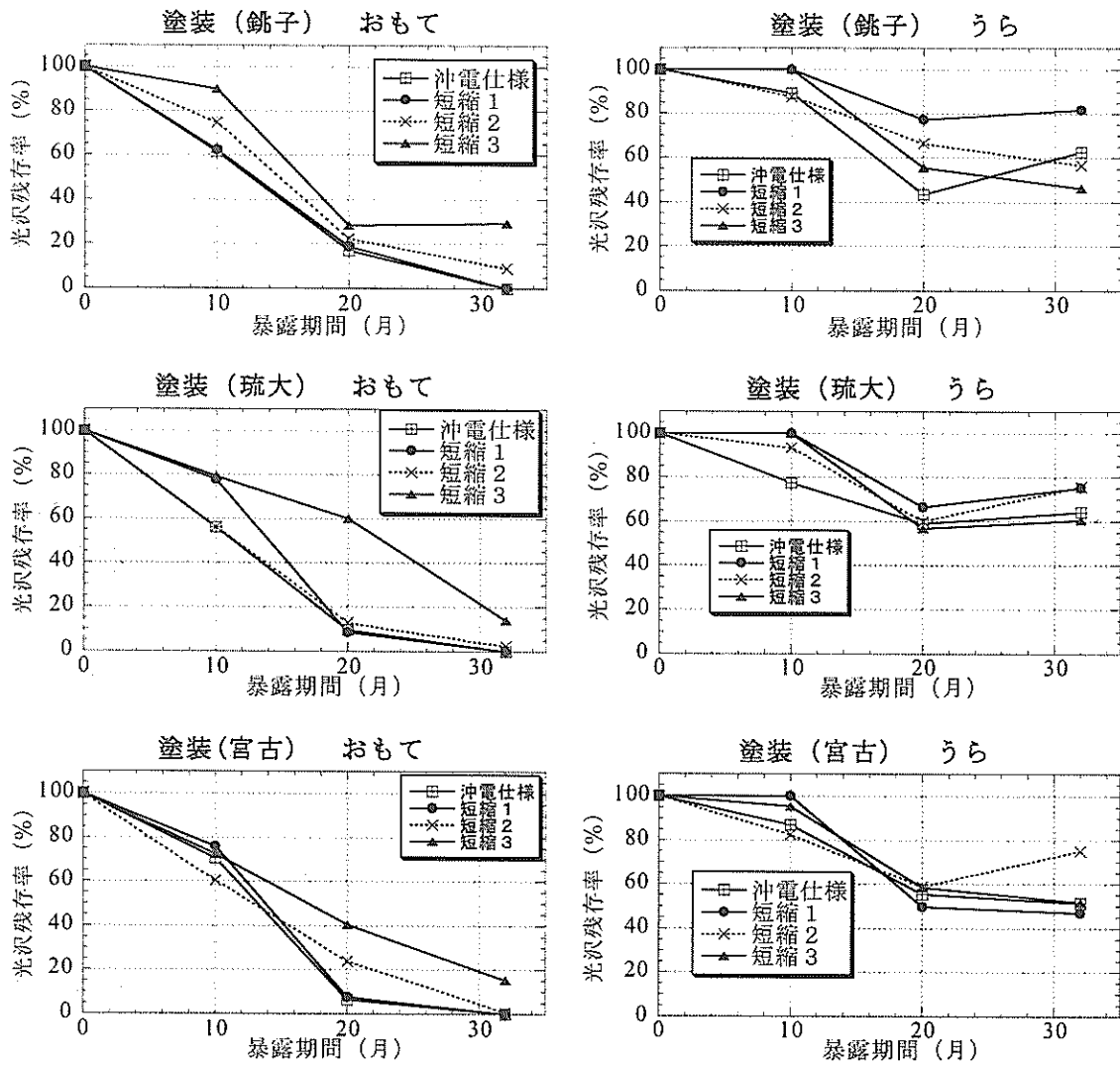


図7 塗装試験片 (地域別) の光沢残存率



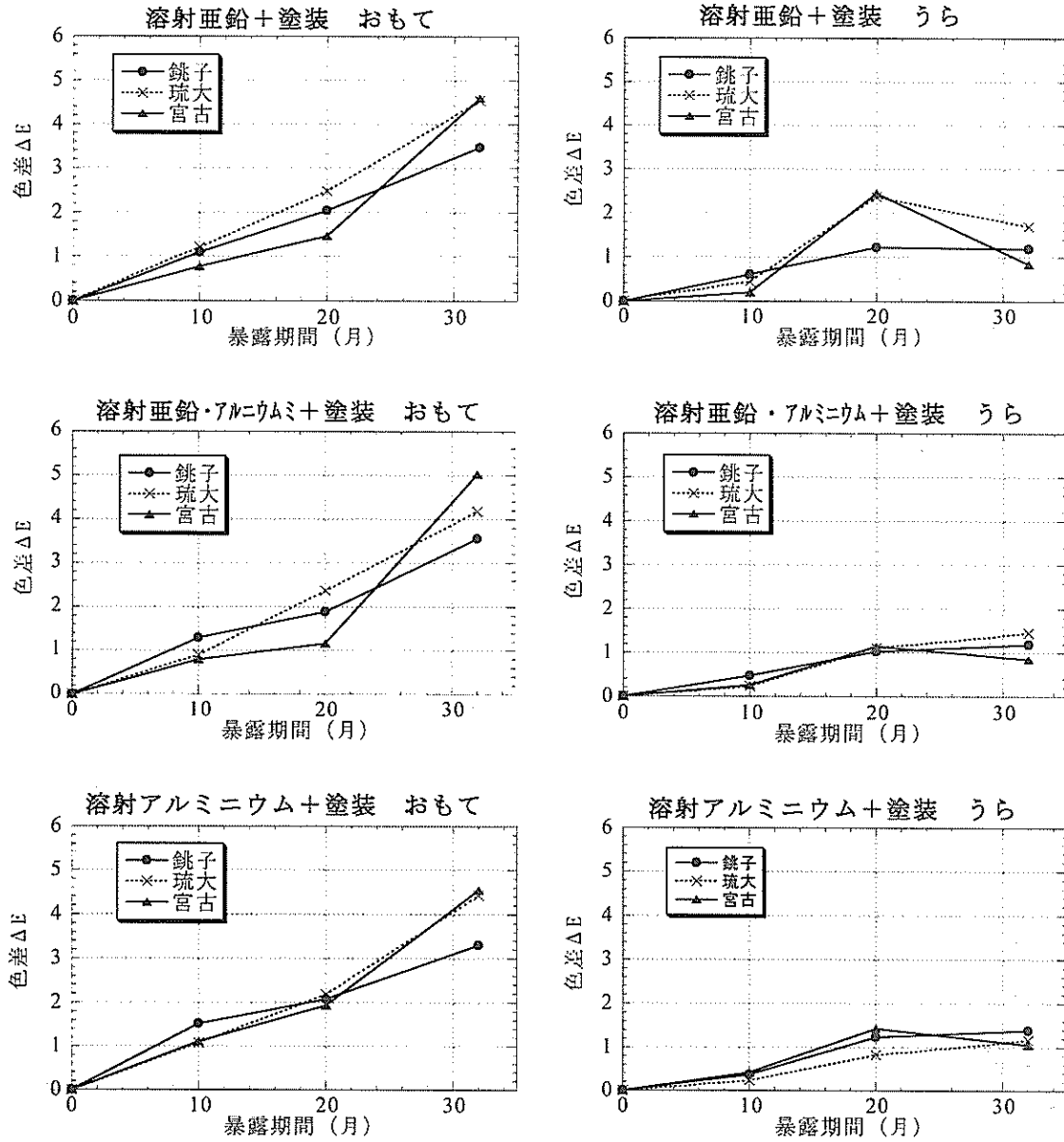


図8 溶射+塗装試験片の色差

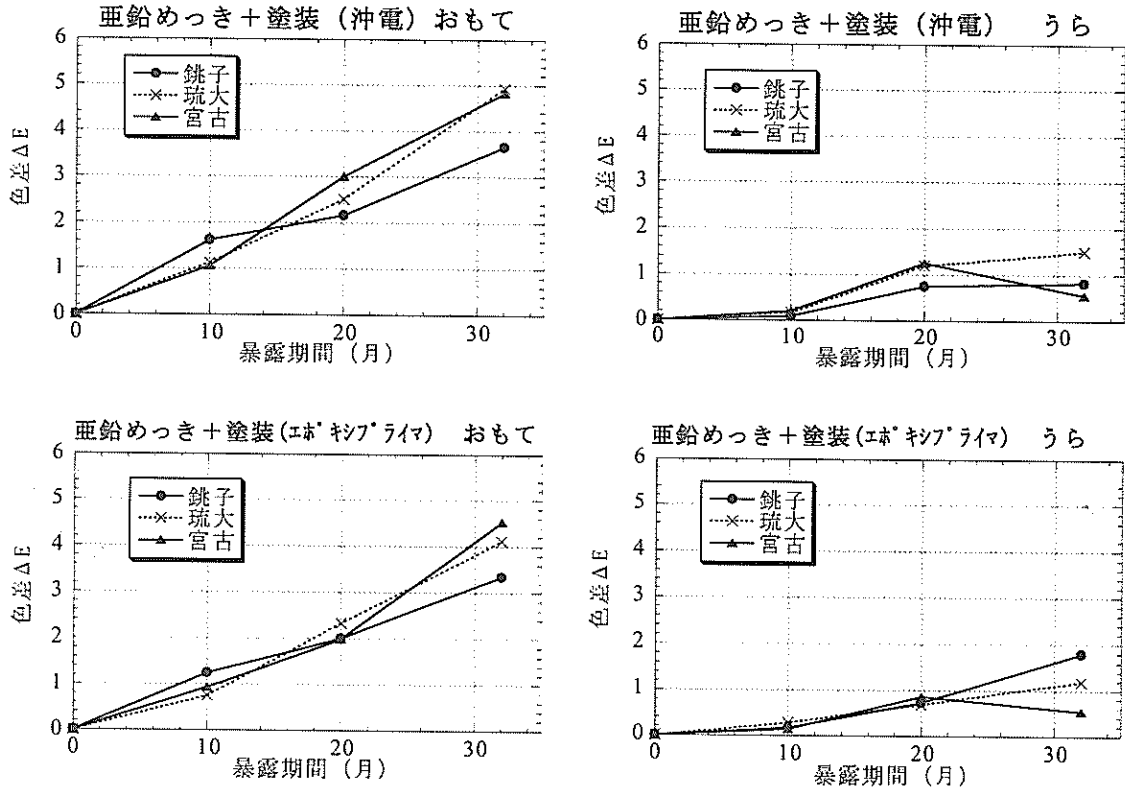


図9 めっき+塗装試験片の色差

### ③塗装試験片

塗装試験片の色差測定結果を図10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、おもて面が色差が大きくなっている。地域差をみると沖電仕様、工程短縮1（共にポリウレタン）、工程短縮3（シリコン変性アクリル）で琉大、宮古の色差が銚子に比べ大きくなっており、工程短縮2（フッ素系）では特に地域差は認められない。種類別にみると沖電仕様、工程短縮1の色差が他の試験片に比べ大きくなっている。

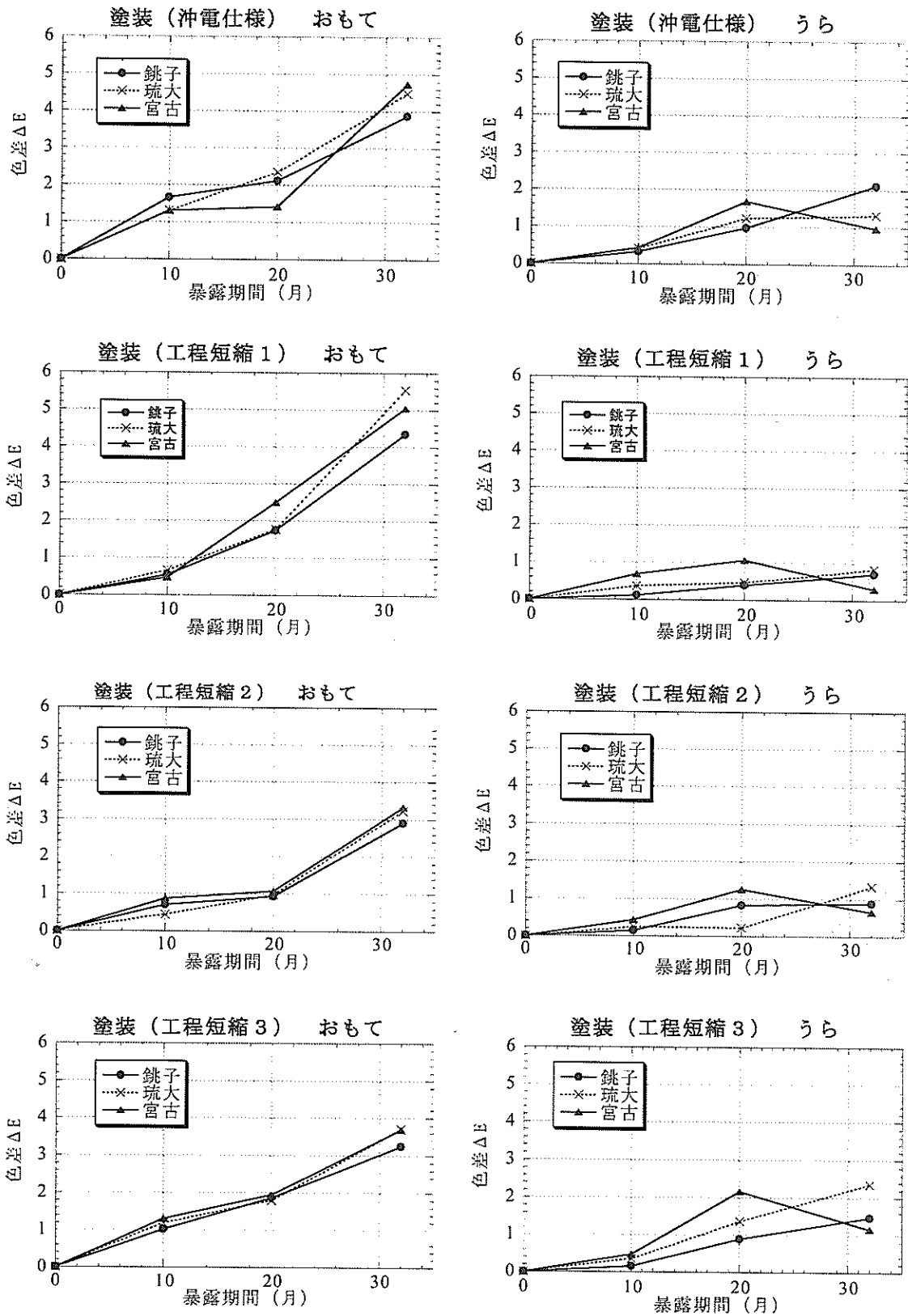


図10 塗装試験片の色差

(5) インピーダンス

交流ブリッジを用いて、容量値 (C) と抵抗 (R) を測定し、塗膜劣化度推測を行った。

溶射+塗装試験片、めっき+塗装および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11~13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、異常等は見られない。

(6) 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。

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

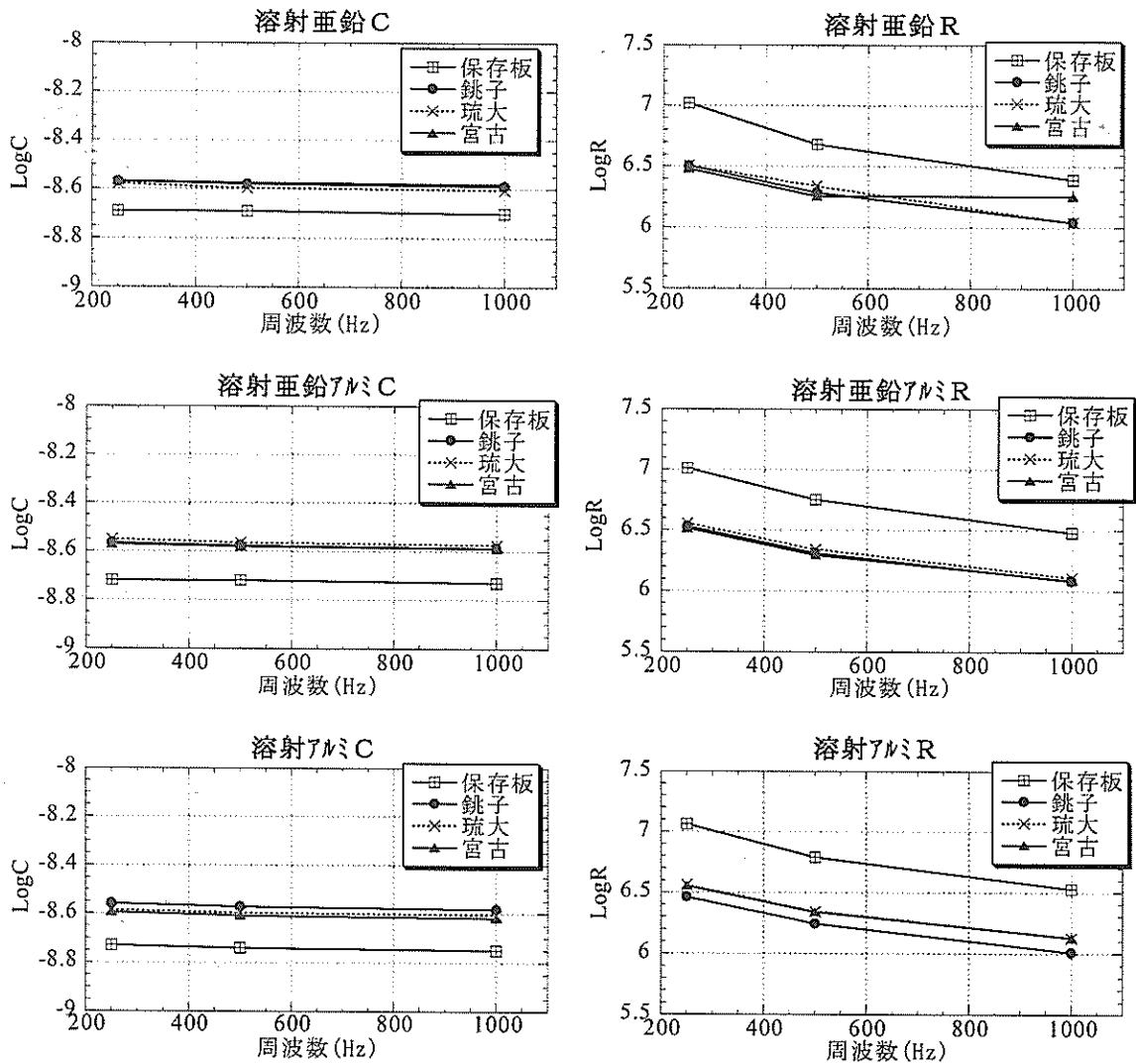


図11 溶射+塗装試験片のインピーダンス

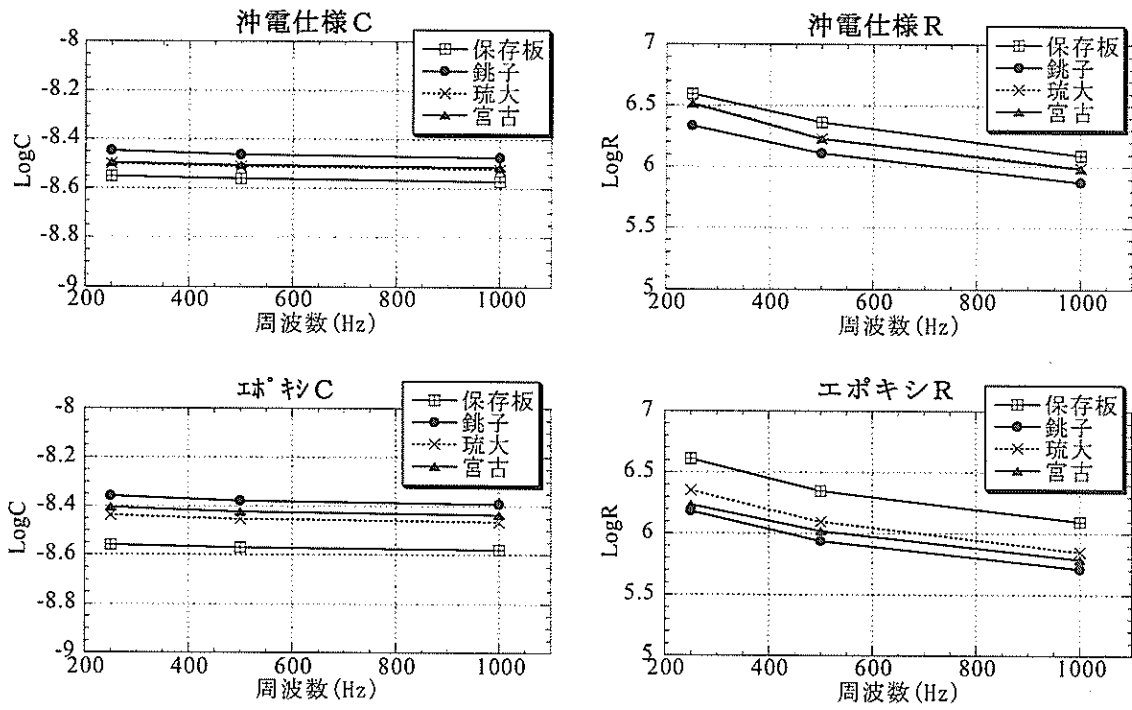


図12 めっき+塗装試験片のインピーダンス

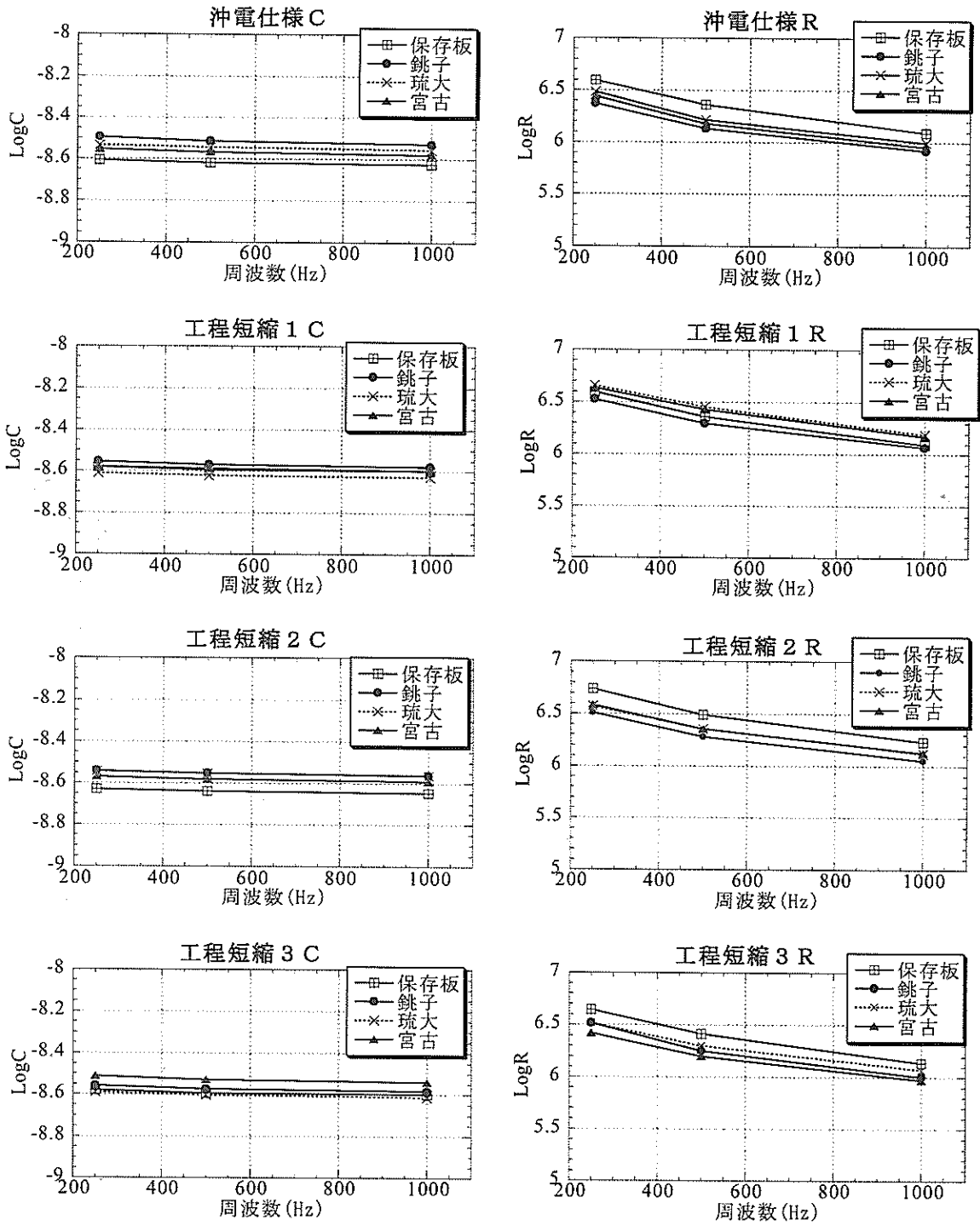


図13 塗装試験片のインピーダンス

結果を図14に示す。これをみると銚子、琉大と宮古で異なった傾向を示している。銚子および琉大においてはいずれの炭素鋼においても20ヶ月時までと同様腐食速度は減少傾向を示しているのに対して、宮古においては腐食速度が増大と他地域と違った傾向を示している。このことは目視観察でも表れており、銚子、琉大の試験片は比較的さびが緻密で、それにより鉄素地を保護するのに対し、宮古の試験片についてはさびが粗く、特に裏面がこぶ状や層状になっており、隙間から水分、塩分が進入しさびを促進させたと思われる。また耐候性鋼においても腐蝕速度は大きく、腐食環境の厳しいところでの使用に対しては注意が必要であると思われる。

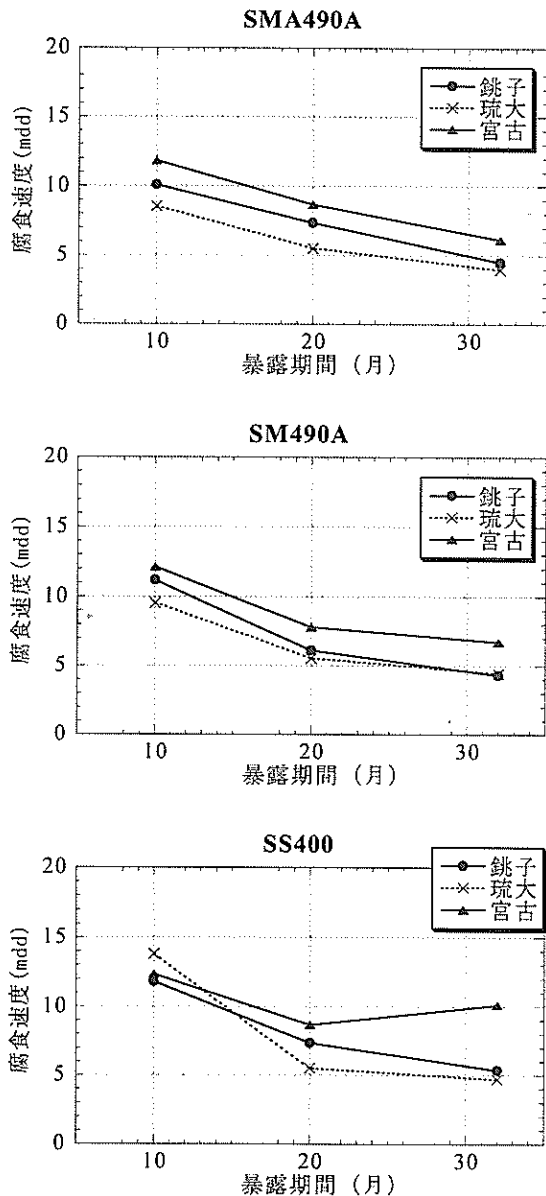


図14 炭素鋼の腐食速度

(7) 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・引きはがす。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を行った。

溶射+塗装試験片、めっき+塗装試験片については10ヶ月、20ヶ月時と同様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種類別、地域別のはがれ面積を図15、16に示す。

これまでの結果と同様、工程短縮型の試験片についてはかなりのはがれ面積がみられ、特に宮古の試験片はすべての試験片ではがれ面積100%となっている。また20ヶ月時と比較してはがれ面積は増加の傾向を示した。

今回の試験では、カッターによる碁盤目作成段階(テープ圧着前)ですではがれをおこす試験片もみられたことから、塗装内部における引っ張り応力はかなり大きいと思われる。

また沖電仕様の試験片でも琉大暴露試験片について30%程度のはがれが確認された。

(8) 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)でも面105個、うら面120個と最も多く、銚子はおもて面62個、うら面82個、琉大はおもて面88個、うら面76個であった。

(9) 衝撃試験

特殊塗装試験片について、塗膜面に、260gのおもりを、落下高さ1000mmより落とし、塗膜面の状態を観察(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。

4 おわりに

暴露試験32ヶ月における試験片の状況は以下の通りであった。

素材試験片であるステンレス試験片、炭素鋼とも腐食は宮古でもっともひどく、耐候性鋼についても腐食度が大きいことから使用については注意を要すると思われる。

溶射およびめっき試験片は素材試験片に比べて腐食の

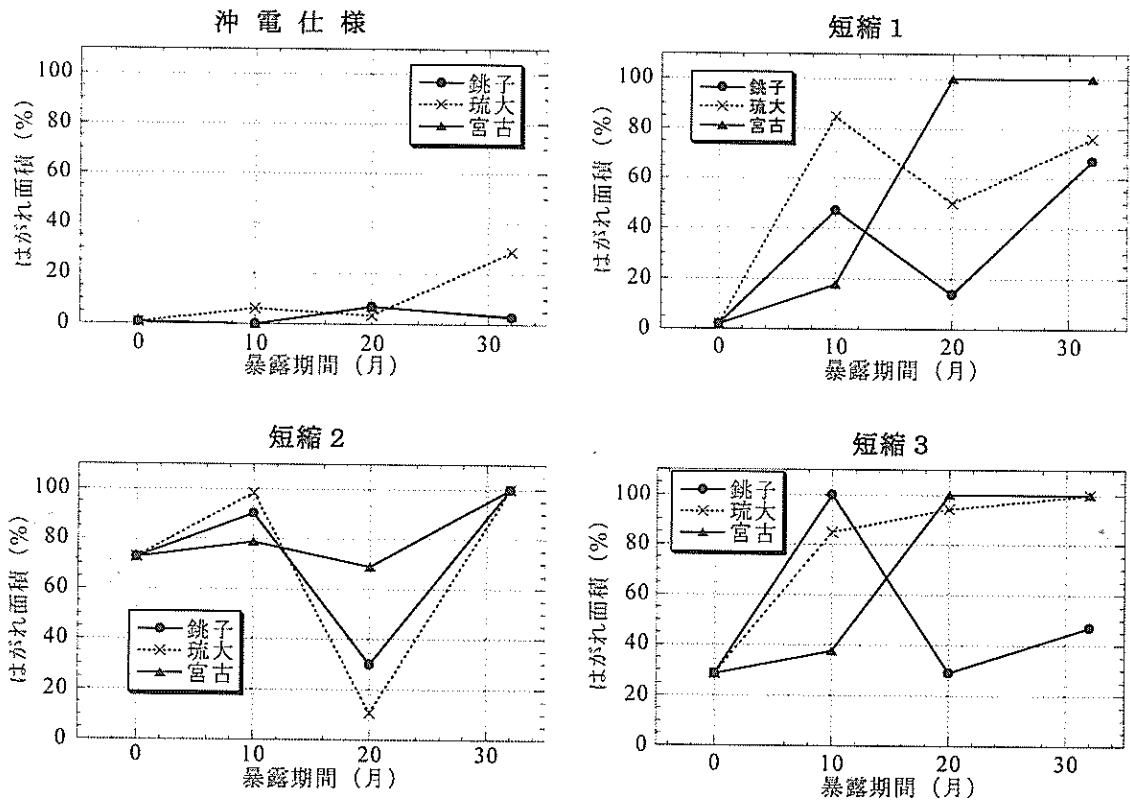


図15 塗装試験片 (種類別) のクロスカットはがれ面積



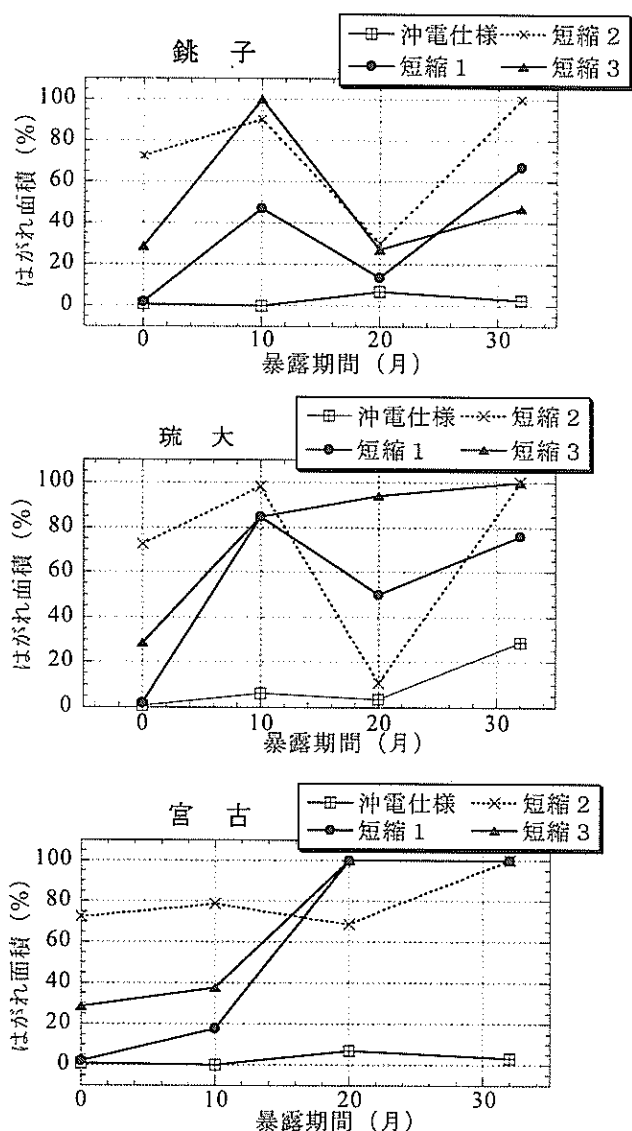


図16 塗装試験片 (地域別) のクロスカットはがれ面積

進行は見られなかったが、表面の被覆材は酸化物が生成されかなりの変色が認められた。また、傷有りの試験片についてもポリエチレン系溶射を除いて傷部からの赤さびの広がりはみられず、犠牲陽極作用が確認された。

溶射+塗装試験片、めっき+塗装試験片および塗装試験片については、特に異常は認められなかったが、工程短縮型の塗装試験片についてはクロスカット試験において大きなはがれ面積が認められた。このことは、暴露期間が10ヶ月および20ヶ月目の試験片についても同様の傾向がみられており、工程短縮型の仕様は衝撃を受けるような場所での使用について注意を要すると思われる。

特殊塗装試験片は、有機ジンクリッチ系については、特に異常は認められなかったが、セメント系の試験片については試験片作成時よりピンホールが存在が確認されており、32ヶ月時点においてはピンホールより赤さびが発生しており、特に宮古の試験片では赤さびの周囲への広がりも認められた。

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対し、深く感謝の意を表します。

また、吉田真一氏には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(財)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
- 3) 國吉和男、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2報、3報)」、沖縄県工業技術センター研究報告1号、2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。