

各種金属材料の屋外暴露試験結果と環境因子との関係
(耐候性に関する調査研究委員会(金属系分科会)中間報告)

日本テストパネル工業(株) 取締役技術開発部長
調査研究委員会 金属系分科会長 外川 靖人
(財)日本ウエザリングテストセンター
銑子暴露試験場 主幹研究員 伊藤 哲司

1. はじめに

金属系分科会では、炭素鋼、耐候性鋼、銅、亜鉛、アルミニウム合金、ステンレス鋼等の金属材料の屋外暴露試験を行って、各種金属材料の腐食挙動と大気環境因子(腐食に関与する因子)との関係を解明し、腐食に大きく関与する主要環境因子レベルからその環境の腐食性(金属を腐食させる性質)を決定する方法に関するデータベースを構築し、金属材料の使用環境における防錆手段の仕様決定に資する。また、屋外暴露試験による金属の腐食の挙動と環境因子データとの解析結果をもとに、金属の腐食に影響する主な腐食性因子の相乗作用を考慮した複合サイクル腐食試験の検討を行い、屋外環境下における金属材料の寿命予測が可能な評価方法の規格化を推進することを目標とした。

具体的な目標は、

- ① 環境因子レベルによる大気腐食性を分類するシステムの確立及び標準化
- ② 大気腐食性を分類するための標準金属材料の決定(平成7年度JIS原案提案済)
- ③ 環境因子測定方法の標準化(平成7年度JIS原案提案済)
- ④ 評価方法の確立のためのデータベースの構築
- ⑤ 促進腐食試験方法の確立及び実環境との相関関係の提示

なお、本調査研究に関して、ウエザリング技術研究成果発表会において平成6年11月に「各種金属材料の腐食と環境因子との関係」のテーマで外川分科会長、平成7年11月に「各種金属材料の複合サイクル試験について」のテーマで黒沢WG主査が報告した。

2. 調査研究方法

2.1 試験片の種類(8種類)

炭素鋼(SM400B)、耐候性鋼(SMA490BW)、アルミニウム合金(A1050P、A5052P)、
銅(C1220P)、亜鉛(旧 JIS H 4321)、ステンレス鋼(SUS304、SUS329J4L)

2.2 試験片の寸法

炭素鋼、耐候性鋼… 150×100×6 mm
アルミニウム合金、銅、亜鉛、… 150×100×2 mm
ステンレス鋼… 150×100×2 mm, 150×100×0.8mm,

2.3 試験実施場所

銑子 : JWTC銑子暴露試験場(銑子市新町1034-1)
北緯35° 43′, 東経 140° 45′

- 宮古島 : JWTC宮古島試験場 (沖縄県宮古郡上野村宮国1342)
北緯24° 44' , 東経 125° 20'
- 西原 (沖縄) : 琉球大学工学部構内 (沖縄県中頭郡西原町千原1)
北緯26° 15' , 東経 127° 46'
- マイアミ : EVTL {Everglades Testing Laboratory(MAIA MI, FRORIDA, USA) }
北緯25° 47' , 西経 80 ° 51'

2.4 暴露角度及び暴露期間

(1) 長期暴露試験

- 暴露角度 : 南面45度
暴露期間 : 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 3 , 5 , 7 及び10か年 (8水準)
暴露開始 : 1992年3月

(2) 繰返し1年暴露試験

- 暴露開始時期を6か月ずらして1年暴露試験を国内3暴露地で5回実施
- 暴露期間 I : 1992年3月~ 1993年2月 (長期暴露試験, 1か年用)
II : 1992年9月~ 1993年8月
III : 1993年3月~ 1994年2月
IV : 1993年9月~ 1994年8月
V : 1994年3月~ 1995年2月
VI : 1994年9月~ 1995年8月

2.5 評価方法

- 炭素鋼, 耐候性鋼 : 外観観察, 腐食度 ($\mu\text{m/a}$, g/m^2) ,
さび (さび層の安定度, X線回折)
- アルミニウム合金 : 外観観察, 腐食度 ($\mu\text{m/a}$, g/m^2) , 色差 (ΔE) ,
孔食 (μm)
- 銅 : 外観観察, 腐食度 ($\mu\text{m/a}$, g/m^2) , 色差 (ΔE) ,
表面のX線回折
- 亜鉛 : 外観観察, 腐食度 ($\mu\text{m/a}$, g/m^2)
- ステンレス鋼 : 外観観察 (標準写真) , 腐食度 ($\mu\text{m/a}$, g/m^2) ,
色差 (ΔE) , 光沢, 孔食 (μm)

2.6 環境因子の計測

国内3暴露地で, 以下の項目について測定

- ・ 気温 (°C)
- ・ 相対湿度 (RH. %)
- ・ ぬれ時間 (hr) (ISO方式, 電極方式)
- ・ 降水量 (mm)
- ・ 海塩粒子量 ($\text{mg} \cdot \text{NaCl} / \text{day} / 100\text{cm}^2$)
ドライガーゼ方式 (JIS法)
ウェットキャンドル方式 (ISO法)
- ・ 硫酸酸化量 ($\text{mg} \cdot \text{SO}_3 / \text{day} / 100\text{cm}^2$)
JIS法

3. 屋外暴露試験結果

3.1 長期暴露試験

5か年間の各種金属材料の腐食度を図1～図8に示す。外観の腐食形態として炭素鋼、耐候性鋼、銅、亜鉛は表面から全面的に腐食するのに対しアルミニウム合金とステンレス鋼は点状に腐食して腐食部分に孔食が発生した。各金属材料ともに宮古島の腐食度が大きい。特に、宮古島で炭素鋼は暴露2年以降から腐食が激しく、5か年暴露では銩子、西原の約6倍の腐食度となった。耐候性鋼は各地域で腐食度に差があるものの5か年まではほぼ直線的に進行した。宮古島における暴露3か年までの炭素鋼、耐候性鋼のさび層の安定度を図9に示す。ステンレス鋼のSUS 304は「標準写真(ステンレス協会作成)」により表面の点状赤さびを評価し、その評価点数を図10に示す。

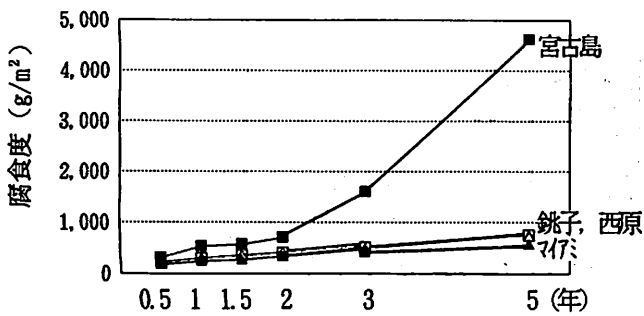


図1 炭素鋼の腐食度 (g/m²)

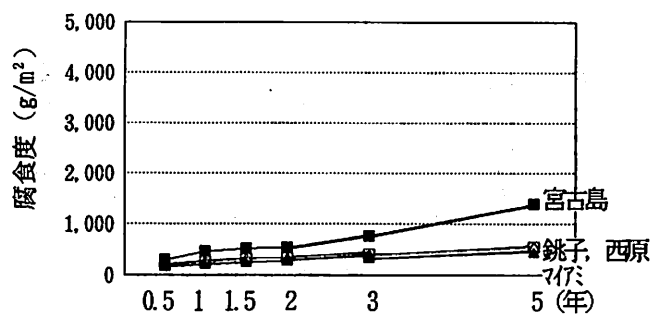


図2 耐候性鋼の腐食度 (g/m²)

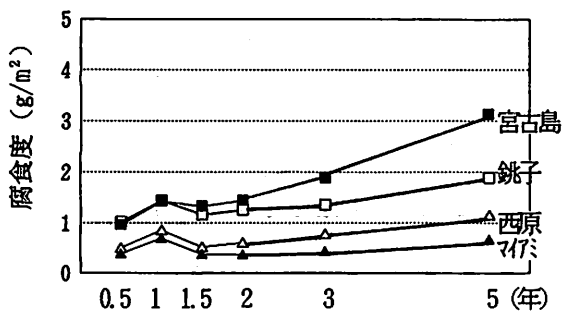


図3 アルミニウム (A1050P) の腐食度 (g/m²)

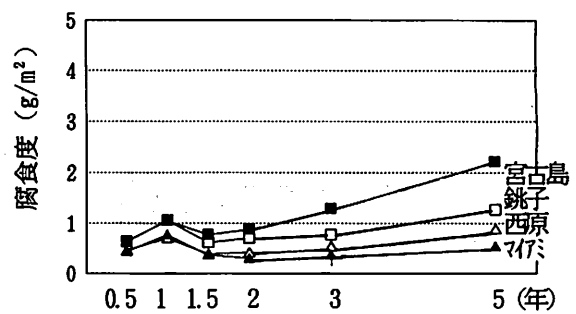


図4 アルミニウム (A5052P) の腐食度 (g/m²)

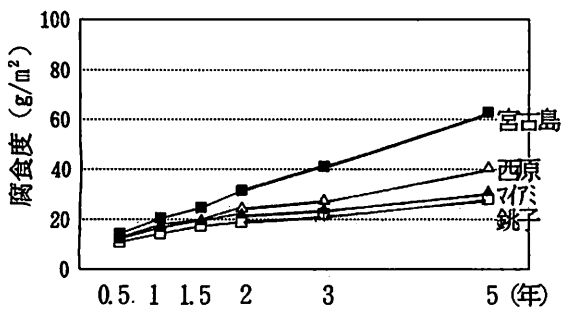


図5 銅の腐食度 (g/m²)

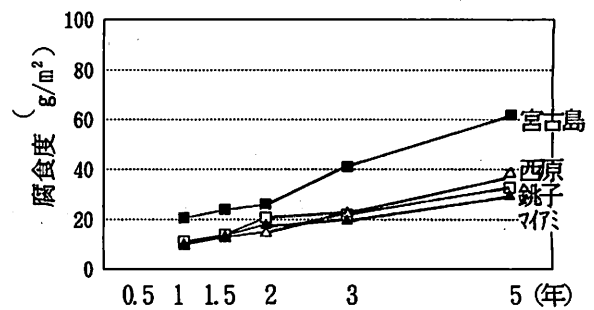


図6 亜鉛の腐食度 (g/m²)

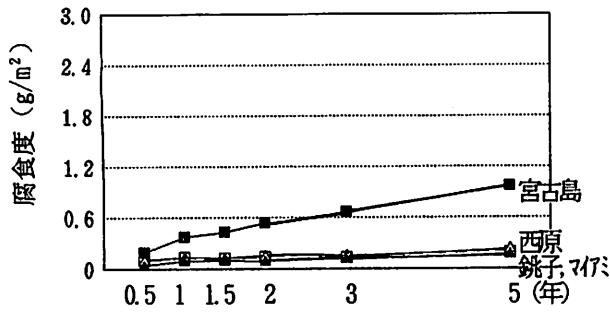


図7 ステンレス鋼(SUS304)の腐食度 (g/m²)

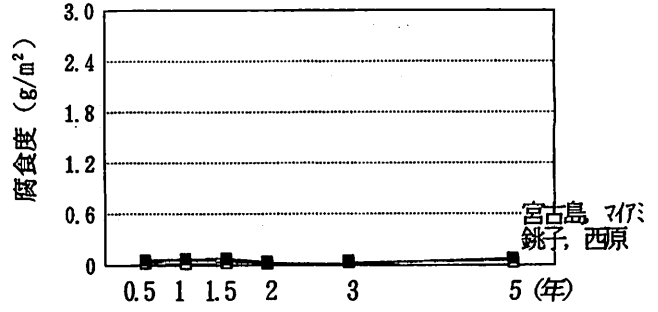
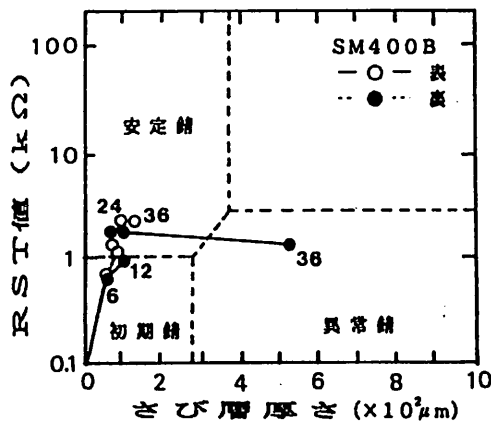
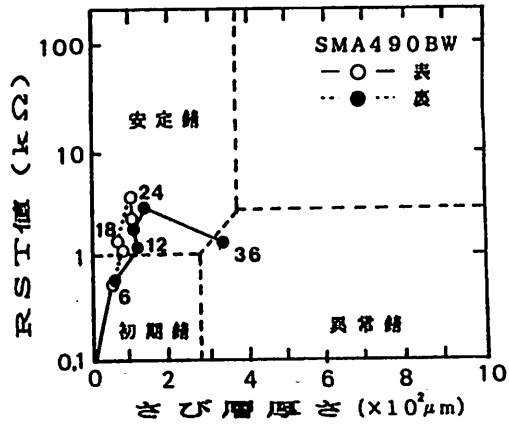


図8 ステンレス鋼(SUS329J4L)の腐食度 (g/m²)



炭素鋼 (SM400B)



耐候性鋼(SMA490BW)

図9 宮古島における RST値-さび層厚さの関係 (図中の数字は暴露月数)

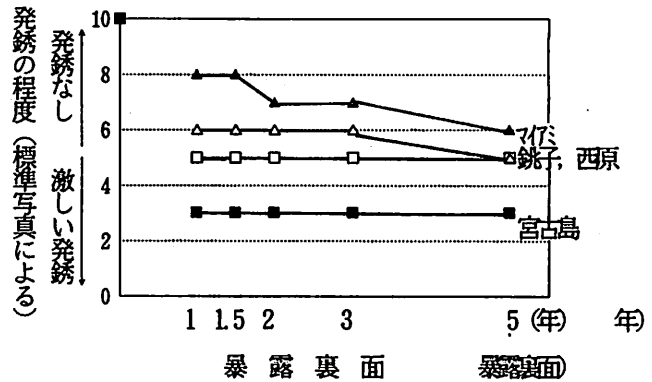
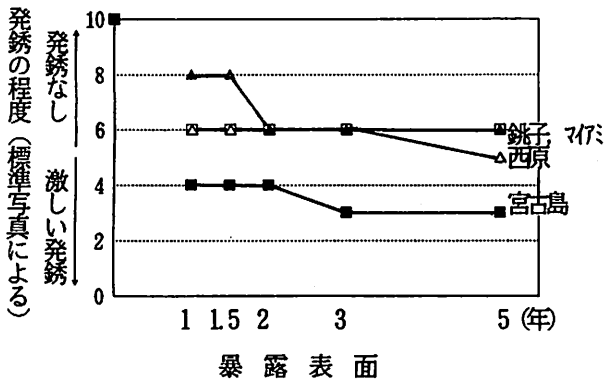


図10 SUS 304鋼の発錆程度

3.2 繰返し1年暴露試験

暴露開始時期を6か月ずらして1年暴露を6回行った各種金属材料の腐食度を図11～図18に示す。ステンレス鋼 (SUS329J4L)を除いたすべての金属材料とも宮古島の腐食度が大きい。炭素鋼、耐候性鋼は宮古島で暴露時期の腐食度に違いを認めた(約2.7倍)が、銚子、西原ではその差がほとんどない。ステンレス鋼のSUS 304鋼及びSUS 329J4L鋼は腐食度が小さい。

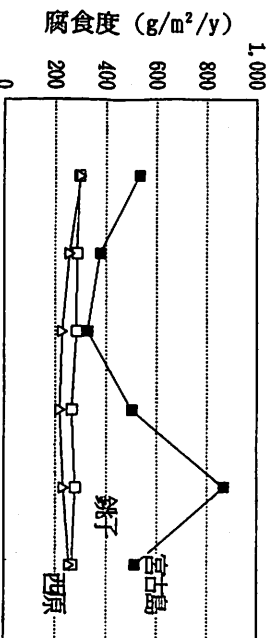


図11 1年暴露の炭素鋼 (SM400B) の腐食度

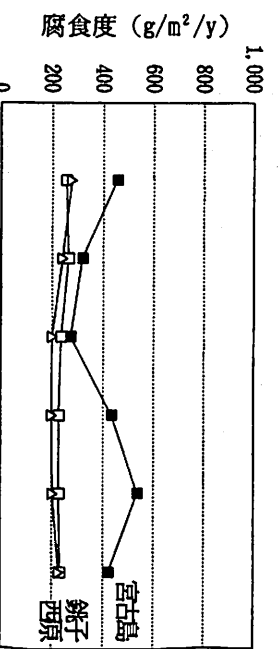


図12 1年暴露の耐焼鈍鋼 (SMA490BP) の腐食度

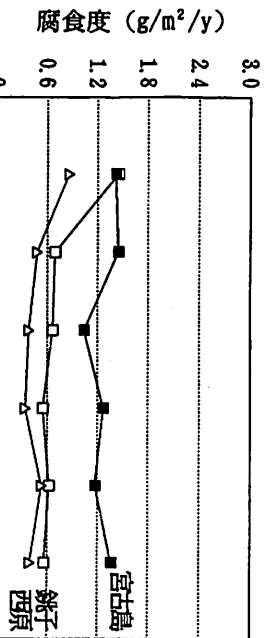


図13 1年暴露のアルミニウム (A1050P) の腐食度

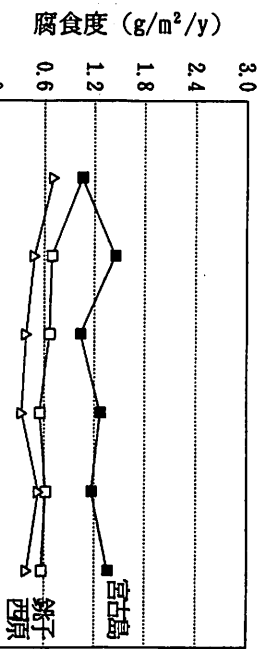


図14 1年暴露のアルミニウム (A5052P) の腐食度

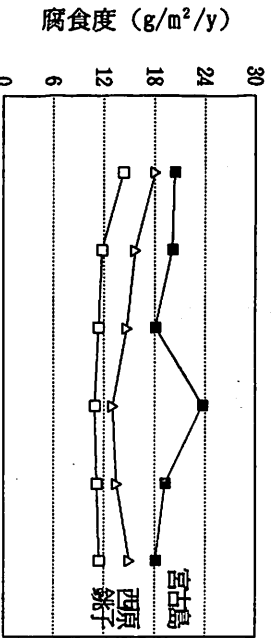


図15 1年暴露の銅 (C1220P) の腐食度

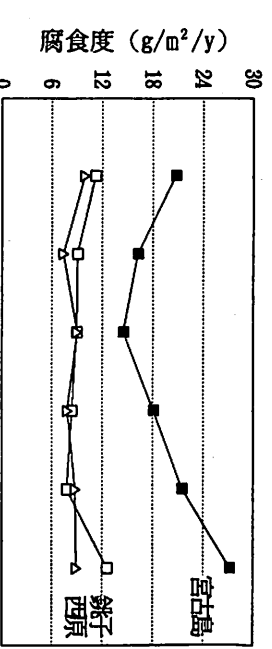


図16 1年暴露の亜鉛 (JIS H 4821) の腐食度

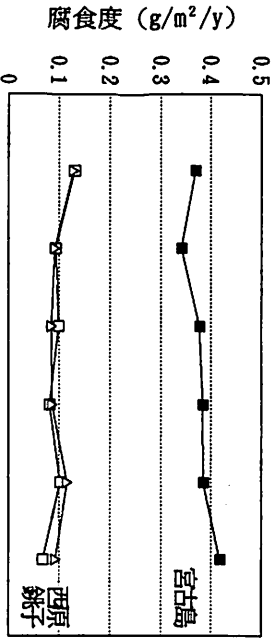


図17 1年暴露のステンレス鋼 (SUS304) の腐食度

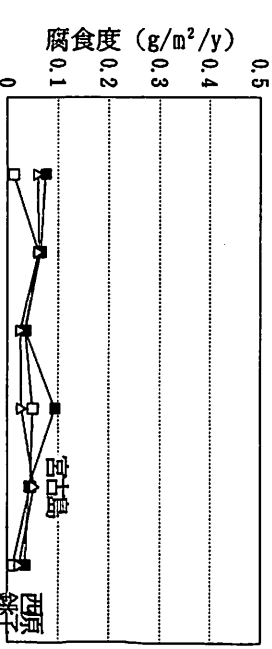


図18 1年暴露のステンレス鋼 (SUS321) の腐食度

3.3 環境因子の測定結果

4 暴露地で得られた5か年間の月平均気温の累計、月平均相対湿度の累計、降水量の累計を図19～図21に、3暴露地で得られた繰返し1年間の測定結果を図22～図27に示す。

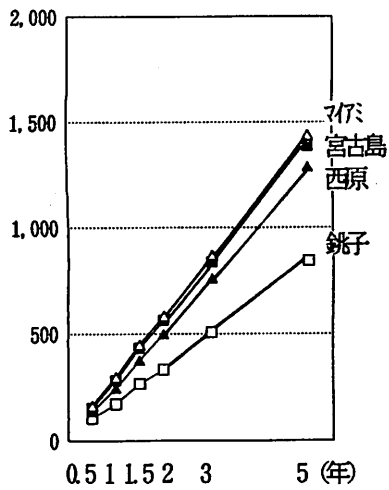


図19 月平均気温の累計 (°C)

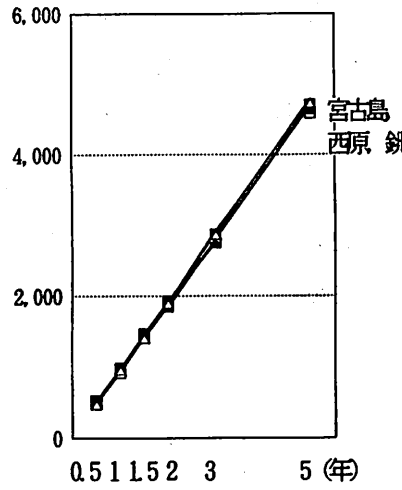


図20 月平均相対湿度の累計 (%)

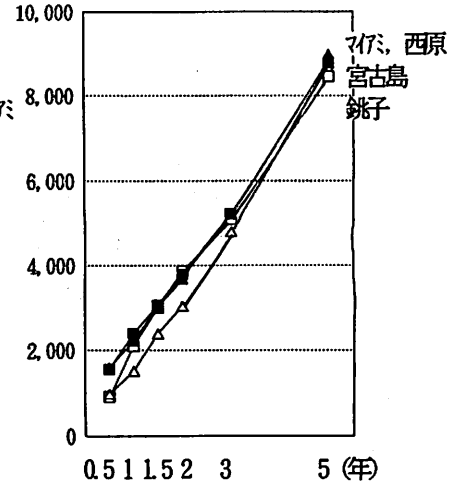


図21 降水量の累計 (mm)

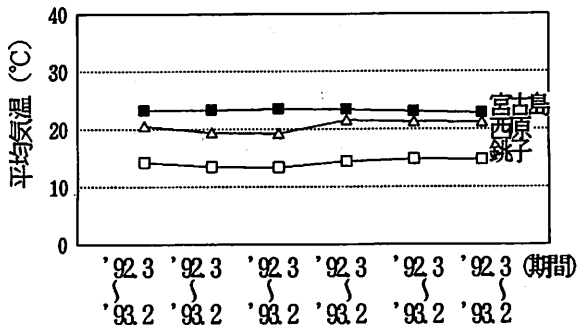


図22 年平均気温

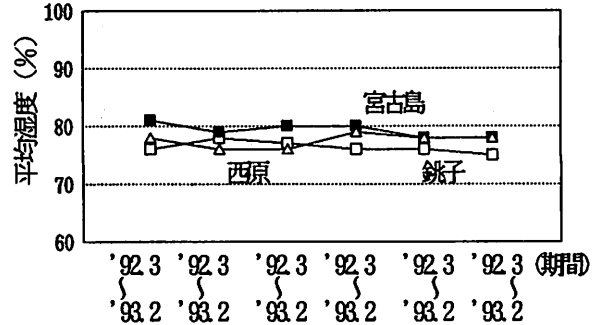


図23 年平均相対湿度 (%)

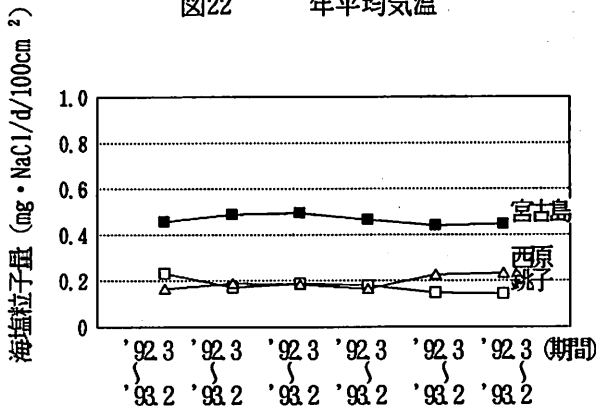


図24 年平均海塩粒子量・F値法 (mg·NaCl/day/100cm²)

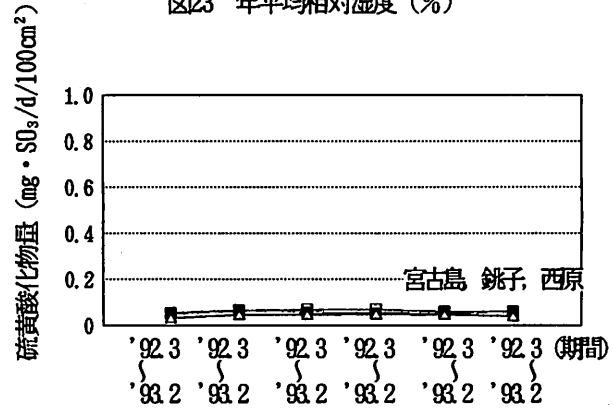


図25 年平均硫酸化物量・JIS法 (mg·SO₂/day/100cm²)

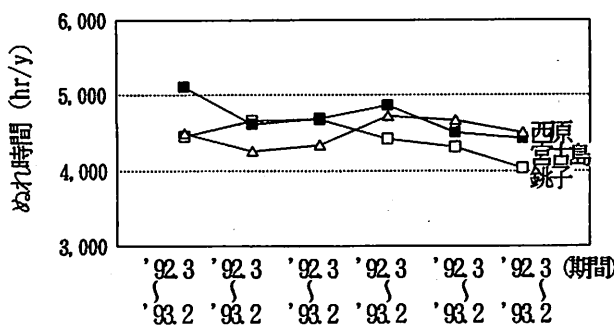


図26 ぬれ時間・ISO方式 (hr)

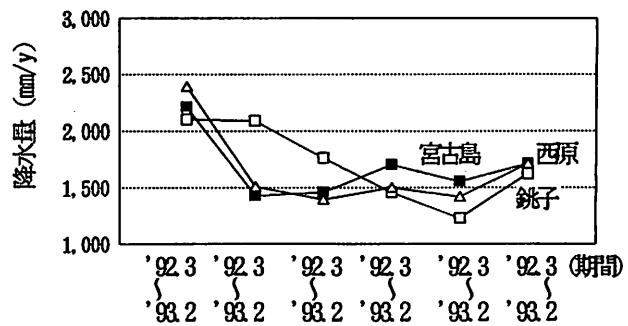


図27 降水量 (mm)

4. 考察

4.1 長期屋外暴露試験

(1) 各金属の腐食傾向

各金属の腐食傾向は、炭素鋼(SM400B)で銦子、西原、マイアミは5か年間まではほぼ直線的に進行した。宮古島は他の3地域と異なり暴露2年以降から腐食が激しく、5か年暴露では銦子、西原の約6倍の腐食度となった。これは暴露2年目以降に台風が宮古島に数多く接近した影響と推察される。耐候性鋼は各地域で腐食度に差があるものの5か年まではほぼ直線的に進行し、宮古島の腐食度は5か年暴露で銦子、西原の約2.5倍程度であった。暴露2年目以降、炭素鋼と耐候性鋼に腐食の差が現れ、5か年暴露で宮古島では炭素鋼が耐候性鋼の約3.3倍程度の腐食度となり、耐候性鋼が炭素鋼に比べて当然のことながら耐候性があることが確認できた。アルミニウム合金は、A1050P、A5052Pともに腐食度は、宮古島>銦子>西原>マイアミの順であるが、腐食度は小さく優れた耐候性を有している。ステンレス鋼のSUS 304は表面に点状赤さびが認められるものの、5年間で腐食度は0.17~0.97g/m²と少ない。SUS 329J4Lはわずかな発錆がある程度で5年間で腐食度は0.027~0.078g/m²とさらに少なく測定誤差の範囲内と思われ、非常に優れた耐候性を示している。5か年の腐食度について銦子を1として金属の種類ごとに倍率を求め、表1に示す。

表1 5か年暴露の腐食度で銦子を1とした金属の種類ごとの腐食倍率

鋼種 \ 暴露場所	銦子	宮古島	西原	マイアミ
炭素鋼	1	6.2	1.0	0.8
耐候性鋼	1	2.5	1.0	0.8
アルミニウム(A1050P)	1	1.7	0.6	0.4
アルミニウム(A5052P)	1	1.8	0.7	0.4
銅	1	2.2	1.5	1.1
亜鉛	1	1.9	1.2	0.9
ステンレス鋼(SUS304)	1	5.1	1.3	0.9
ステンレス鋼(SUS329J4L)	1	1.3	0.5	1.1

上表から、宮古島では、炭素鋼は銦子及び西原の約6倍の腐食度であるが、耐候性鋼は約2.5倍であった。アルミニウム合金は、銦子の約1.7~1.8倍が宮古島で西原は銦子より腐食度が小さい。銅は、銦子の約2倍が宮古島で西原は約1.5倍である。亜鉛は、銦子の約2倍が宮古島で西原は約1.2倍である。このように金属の種類によって暴露地ごとに腐食度が異なることが明らかとなった。マイアミは、銅が銦子と同程度であるがその他の金属は銦子より腐食程度が小さいことが分かった。

(2) 炭素鋼、耐候性鋼のさび層の分析(さび層安定度センサー、X線回折)

3か年間宮古島で暴露した炭素鋼、耐候性鋼をさび層安定度センサー(新日鉄製)で測定した結果を図9に示した。RST値(さび層の抵抗値)は、銦子、西原、マイアミでは炭素鋼、耐候性鋼を問わず徐々に上昇しており、鋼種間の差は顕著でない。RST値-さび層厚さをプロットすると、さび層が初期さび領域から安定さび領域への移行が進んでいることがわかった。宮古島では(図9)暴露2年から暴露3年にかけてRST値の大幅な低下が

みられ、裏面は異常さびの状態となった表面にはさび層が層状に剝離した形跡があったことから、RST値は安定さび領域にあるものの層状剝離が起きていたとすると表面のさび層も異常さびと判断すべきと考えられる。この原因として、2年目から3年目にかけて多量の海塩粒子が飛来したのではないかと推測される。また、暴露3年のさび層のX線回折による組成分析結果によると、宮古島におけるさび層にのみ β -FeOOHが大量に生成されていたことと、裏面にはマグネタイト(Fe_3O_4)が生成していた。この β -FeOOHは不安定な生成物であり、塩素(Cl)が多い場所で生成されると言われ、宮古島の海塩粒子が非常に多いことが影響しているものと考えられる。また、マグネタイトは不安定なさび層に多く見られることなどから、宮古島のさび層が異常さびであることを示唆している。なお、銦子、西原、マイアミのさび層の組成は α -FeOOHと γ -FeOOHであった。 α -FeOOH/ γ -FeOOH比は時間の経過に比例して増加し、それに伴ってさび層の安定度が増し、比が2以上になると安定化するといわれる。さび層の安定化は β -FeOOHが含まれないことが条件である。

4.2 繰返し1年暴露試験

(1) 暴露環境の腐食性並びに暴露開始時期による腐食度の違い

各金属材料ごとに暴露環境の腐食性並びに暴露開始時期による腐食度の違いを二元配置分散分析により解析した結果、すべての金属において暴露場所及び暴露開始時期により99%有意で腐食度に差があった。そこで腐食度の差の検定を行った結果、暴露環境の腐食性の大きさの順位は、炭素鋼、耐候性鋼及びアルミニウムは宮古島>銦子>西原、銅は宮古島>西原>銦子、亜鉛及びステンレス鋼は宮古島>銦子=西原となった。この結果、宮古島の大気環境の腐食性が非常に高く、金属の腐食にとって極めて厳しい環境であると言える。暴露開始時期による腐食度の差は宮古島が顕著で、特に炭素鋼及び耐候性鋼の腐食度に大きな変動が認められた。しかし銦子及び西原は比較的変動が小さい。宮古島の変動が大きい要因として風向・風速及び台風の接近など自然現象の変化により飛来する海塩粒子量に大きな変化があるためではないかと推察される。

(2) 金属の腐食度と環境因子との関係

金属材料ごとに腐食度と環境因子との単相関関係を解析した。その結果、海塩粒子(JIS法)及び相対湿度はすべての金属で危険率1%で比較的高い相関関係が認められたが、気温は銅と亜鉛、ぬれ時間は銅とステンレス鋼(SUS304)で危険率5%で単相関関係が認められたのみであった。硫酸化物は単相関関係が認められなかった。

4.3 暴露地の環境について

(1) ぬれ時間：ISO法と電極法(実測値)による測定値の関係

国内3暴露地でISO法、銦子と宮古島において電極法(スガ試験機(株)製、デュレイン時間記録装置DR-2型)による測定を実施した。その結果、ISO法が電極法に比較して測定値が大きい(銦子で約2.4倍、宮古島で約3.4倍)。銦子における相関関係を図28に示す。相関係数は $r=0.6883$ と比較的高い相関関係(危険率1%で有意)が認められた。

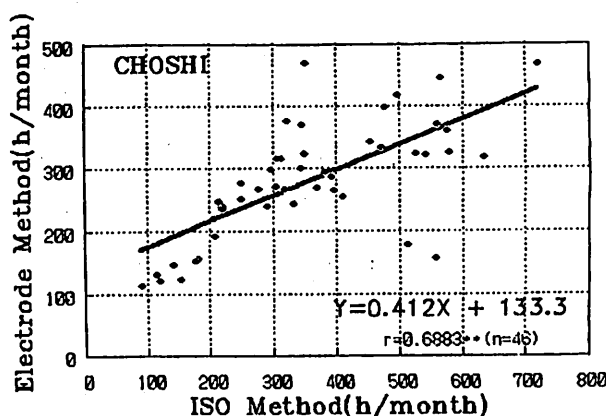


図28 ISO法と電極法で測定したぬれ時間値の相関関係(銦子)

(2) 海塩粒子：ISO法（ウェットキャンドル法）とJIS法（フライグ-ゼ法）との関係

国内3暴露地においてJIS法と銚子と宮古島においてISO法による測定を実施した。その結果、ISO法がJIS法より捕集量が多かった。我が国では、従来からJIS法での測定が行われており、ISO法の測定はISO 9223が1992年に制定されてからで国内での測定データが極めて少ないのが現状である。この2方法間の対応関係を明確にする必要があるため相関分析した。銚子では両方法間に相関関係は認められなかったが、宮古島では相関係数 $r = 0.3267$ と低い危険率5%で相関関係が認められた。これらの結果、2方法間の対応関係は相関式で示すことが出来る可能性が示唆されたが、2暴露地における測定結果のみであり、今後多くの場所で同時に測定して対応関係を明確にする必要がある。

(3) 宮古島における飛来海塩粒子量と風向・風速との関係

海塩粒子は、海岸の波うち際或いは海上で波頭が砕けた際に発生する海水ミストが風で運ばれ飛来するもので、一般的には海岸線からの距離に対して指数関数的に減少し、1km以上離れると飛来海塩粒子量は一定になると言われている。しかし、風が強いとかなり内陸まで多量の海塩粒子が飛来することも知られている。宮古島は周囲が海でかつ海塩粒子の飛来の障害物となる高い山がないことから、全方位から海塩粒子が飛来するものと考えられる。そこで、飛来海塩粒子量と風向・風速の関係について解析した。

田中らは⁵⁾、日平均風速と日最大風速から求めた海風エネルギー比例数（飛来海塩粒子の測定器の配置を考慮した海方向からの風の持つエネルギーに比例する量）から飛来海塩粒子量を概略推測できる可能性があることを報告している。そこで宮古島の観測データを基に、田中らが報告している次式により、風エネルギー比例数を求めた。

$$\text{風エネルギー比例数} = \sum_{n=a}^n [V_n^2 \cdot \sin(\theta_n)]$$

a : 飛来海塩粒子測定開始日
n : 飛来海塩粒子測定終了日
V_n : n日の平均又は最大風速
θ_n : n日の最多風向又は最大風速時の風向と測定面との角度

飛来海塩粒子量測定面を東西南北の4面として、各面に当たる風向の角度を基に、日最大風速-風向及び日平均風速-日最大風向から各測定面毎の風エネルギー指数を計算した。

① 宮古島の16方位風エネルギー比例数とウェットキャンドル法による測定値との関係

ウェットキャンドル法は飛来海塩の捕集面は円筒で垂直に設置されているため、全方向からの捕集が可能であることから、1992年から1995年の4年間の16方位の風エネルギー比例数を求めた。宮古島の風エネルギー比例数は、北面では10月～3月にかけて大きく、東面は8月～12月にかけて大きい。南面は4月～8月にかけて比較的大きい、一方西面は年間を通して小さい。これらの解析結果から、宮古島では北から東よりの風エネルギーの影響が大きい傾向であることが明らかとなった。16方位風エネルギー比例数の総計値とウェットキャンドル法で捕集した飛来海塩粒子量との関係を図29及び図30に示す。図29は日最大風速-風向による風エネルギー比例数との関係であり、相関係数 $r = 0.6977$ とかなり高い相関関係（危険率1%で有意）が認められる。図30は日平均風速-日最大風向による風エネルギー比例数との関係で、相関係数 $r = 0.7750$ とさらに高い相関関係（危険率1%で有意）が認められた。このようにウェットキャンドル法に

よる飛来海塩粒子の捕集量は、風向・風速の観測値から推定できる可能性があることがわかった。

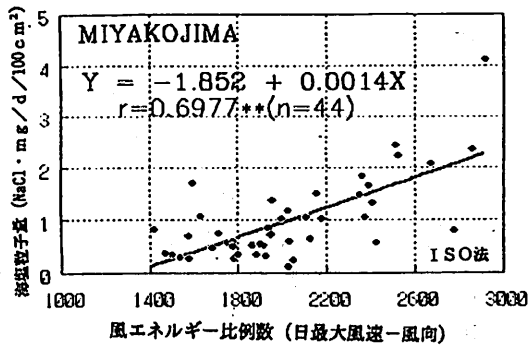


図29 飛来海塩粒子量 (ISO法) と風エネルギー比例数 (日最大風速-風向) との関係

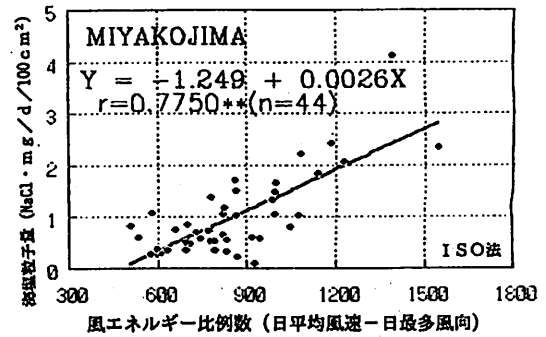


図30 飛来海塩粒子量 (ISO法) と風エネルギー比例数 (日平均風速-日最多風向) との関係

② 宮古島の南北方向の風エネルギー比例数とドライゲゼ法による捕集量との関係

ドライゲゼ法の飛来海塩粒子の捕集面は南北垂直面であるので、南面と北面からの風エネルギーの影響を受ける可能性がある。そこで南面及び北面の風エネルギー比例数を求めた。また、ドライゲゼ法による飛来海塩粒子捕集量との関係を図31及び図32に示す。ドライゲゼ法の場合も相関係数が $r=0.4669$ (日最大風速-風向) 及び $r=0.4505$ (日平均風速-日最多風向) と低い危険率1%で相関関係が認められ、ウェットキヤンドル法の場合と同様な結果が得られた。以上の結果は、宮古島試験場に限ったことであり、他の場所に適用することは出来ない。今後多くの場所での解析と海塩発生源からの距離及び海塩飛来経路の障害物などを考慮した検討を行うことにより、風エネルギー比例数から飛来海塩粒子量を推定することが可能になるものとする。

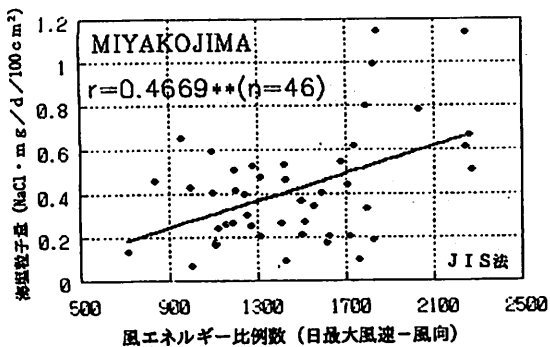


図31 飛来海塩粒子量 (JIS法) と風エネルギー比例数 (日最大風速-風向) との関係

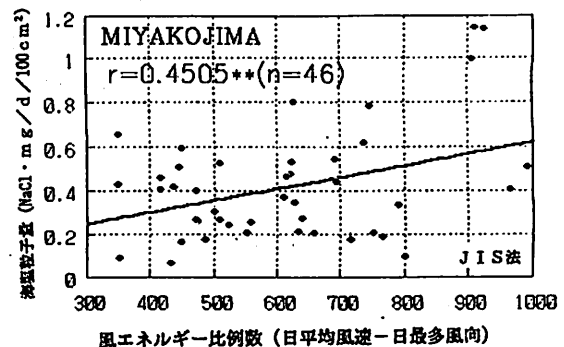


図32 飛来海塩粒子量 (JIS法) と風エネルギー比例数 (日平均風速-日最多風向) との関係

(4) 環境因子 (気温による補正) と腐食度の関係

富板らは⁶⁾、屋外における建築用プラスチックの劣化は化学反応の一種であり、高温時の劣化速度は低温時よりも大きくなるという温度による促進効果があることに注目し、反応速度論を導入して劣化現象の解明に「気温補正結露マップ」を提案している。そこで、金属の腐食反応も化学反応の一種であることから、暴露環境の温度を考慮すべきことは当然であると考え、彼らが用いた補正式を用いて以下のように各種因子について気温補正した。

化学反応速度：kは温度：T（絶対温度K）により次の式で表される。

$$k = C \cdot \exp(-E/RT)$$

ここで、C：材料定数

E：見かけの活性化エネルギー

R：気体定数, 8.31 [J/K/mol]

一般に言われる「温度が10℃上昇すると反応速度は2倍になる」ことを、20℃と30℃の場合に当てはめて計算すると、 $E/R=6160$ [K]、 $E=51.2$ KJ/mol/Kが得られる。そこで気温20℃での反応速度を1としてこれに対する比、すなわち温度T'の時の反応速度の促進率Mは以下の式で計算される。

$$M(T') = \frac{C \cdot \exp[-6160/(T' + 273.16)]}{C \cdot \exp[-6160/(20 + 273.16)]}$$

$$= \exp[-6160/(T' + 273.16)] / (7.486 \times 10^{-10})$$

そこで、各暴露環境において測定した海塩粒子量、硫黄酸化物量及びぬれ時間について測定月の月平均気温を基にその気温での促進率を計算して気温補正を行い、その補正值と1年暴露の各金属の腐食度との単相関関係を解析した。その結果を補正前のものも併せて表2に示す。補正前後の単相関係数を比較すると、海塩粒子についてはJIS法で測定したものは補正後わずかに低下しているが、ISO法の場合はかなり高くなり相関関係が良くなることが認められた。硫黄酸化物（JIS法）については補正前は相関関係が認められなかったが、すべての金属に関し相当相関係数が高くなり、一部の金属で相関関係が認められるようになった。また、ぬれ時間（ISO法）についても相関関係が高くなり相関性が良くなることが分かった。このような結果から、今後腐食に及ぼす環境因子の要因解析に気温による影響を考慮する必要があるとの示唆を得た。相関関係の一例を図33に示す。

表2 環境因子と腐食度との単相関関係

環境因子	海塩粒子 (NaCl・mg/d/m ²)				硫黄酸化物 JIS法 (n=18) (SO ₃ ・mg/m ² /d)		ぬれ時間 ISO法 (n=18) h/y	
	JIS法 (n=18)		ISO法 (n=12)		実測値	補正值	実測値	補正值
材料	実測値	補正值	実測値	補正值	実測値	補正值	実測値	補正值
SM400B	0.6983**	0.6543**	0.3088	0.4694	0.0414	0.4296	0.4286	0.4702*
SMA490BW	0.7751**	0.7309**	0.4646	0.6077*	0.0009	0.4422	0.4484	0.5353*
Cu	0.8407**	0.8514**	0.7849**	0.8806**	-0.3465	0.5535*	0.5182*	0.7599**
Zn	0.8339**	0.8049**	0.4326	0.5862*	0.0187	0.6105**	0.5454*	0.5590*
A1050P	0.7971**	0.7148**	0.7663**	0.7337**	0.0557	0.3101	0.4374	0.3271
SUS 304	0.9703**	0.9570**	0.6669**	0.8123**	-0.0208	0.7316**	0.5865*	0.7560**

*：危険率5%で有意

**：危険率1%で有意

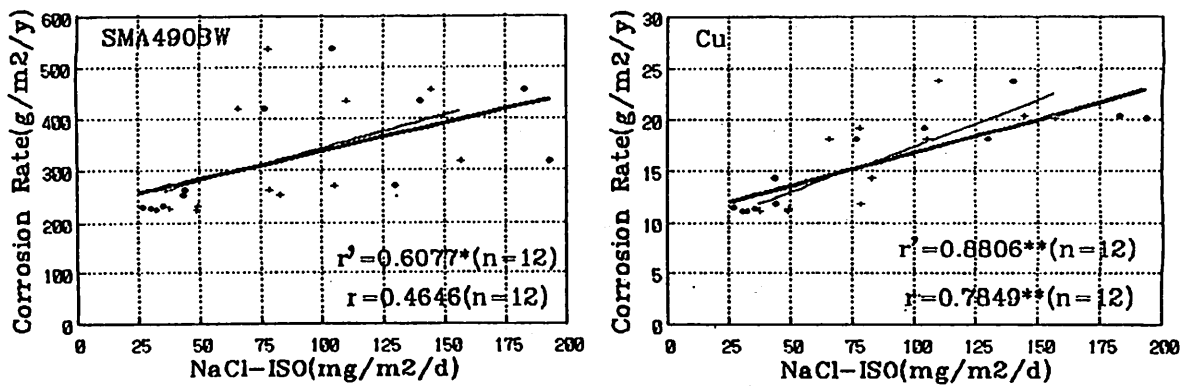


図33 気温補正した環境因子と腐食度との単相関関係の一例

(+印, r 及び細線は補正前, ●印, r' 及び太線は気温補正環境因子)

4.5 繰返し1年暴露とISO規格との関連

各暴露地の繰返し1年暴露とISO規格の大気分類システムの間連について、環境因子レベルは、すべての期間とも銑子では硫酸化物量が P_0 、海塩粒子量が S_1 、ぬれ時間が τ_4 、宮古島では硫酸化物量が P_0 、海塩粒子量が S_1 乃至 S_2 、ぬれ時間が τ_4 、西原では硫酸化物量が P_0 、海塩粒子量が S_1 、ぬれ時間が τ_4 となり、これらの環境因子データと腐食度の実測値を表3に示す。

表3 暴露地の環境因子カテゴリ-と1年暴露の平均腐食度及びその腐食性カテゴリ-

暴露場所 及び 暴露期間	環境因子カテゴリ-			環境因子レベルによる 腐食性カテゴリ- (ISO 9223)			1年暴露の腐食度 (g/m ²) 及び その腐食性カテゴリ-				
	硫黄 酸化物	海塩 粒子	ぬれ 時間(hr)	炭素鋼	銅及び 亜鉛	アルミニウム	炭素鋼	銅	亜鉛	アルミニウム (A1050P)	
銚子	I	P ₀ 5.0	S ₁ 82.6	τ ₄ 4456	C3	C3	C3	294.0 C3	11.34 C4	11.20 C3	1.45 C3
	II	P ₀ 6.2	S ₁ 78.2	τ ₄ 4657	C3	C3	C3	284.9 C3	11.79 C3	9.06 C3	0.69 C3
	III	P ₀ 6.7	S ₁ 49.1	τ ₄ 4677	C3	C3	C3	282.5 C3	11.36 C3	8.93 C3	0.66 C3
	IV	P ₀ 6.7	S ₁ 48.6	τ ₄ 4425	C3	C3	C3	262.2 C3	10.92 C3	8.38 C3	0.45 C2
	V	P ₀ 5.8	S ₁ 37.3	τ ₄ 4317	C3	C3	C3	277.1 C3	11.12 C3	7.82 C3	0.62 C3
	VI	P ₀ 5.9	S ₁ 35.5	τ ₄ 4035	C3	C3	C3	263.3 C3	11.46 C3	12.57 C3	0.56 C2
宮古島	I	P ₀ 5.1	S ₂ 158.5	τ ₄ 5101	C4	C4	C3orC4	329.7 C3	20.38 C4	20.71 C4	1.42 C3
	II	P ₀ 6.5	S ₂ 156.3	τ ₄ 4640	C4	C4	C3orC4	374.8 C4	20.08 C4	16.23 C4	1.45 C3
	III	P ₀ 5.7	S ₂ 104.8	τ ₄ 4714	C4	C4	C3orC4	325.2 C3	18.08 C4	14.50 C3	1.04 C3
	IV	P ₀ 5.2	S ₂ 109.4	τ ₄ 4863	C4	C4	C3orC4	498.7 C4	23.67 C4	18.10 C4	1.27 C3
	V	P ₀ 5.0	S ₁ 77.8	τ ₄ 4505	C3	C3	C3	365.3 C3	19.22 C4	21.46 C4	1.17 C3
	VI	P ₀ 5.8	S ₁ 65.2	τ ₄ 4427	C3	C3	C3	368.8 C4	18.06 C4	27.17 C4	1.36 C3
西原 (沖繩)	I	P ₀ 3.1	S ₁ 16.4	τ ₄ 4654	C3	C3	C3	300.4 C3	13.69 C4	9.95 C3	0.86 C3
	II	P ₀ 4.6	S ₁ 18.8	τ ₄ 4212	C3	C3	C3	255.5 C3	15.73 C4	7.37 C3	0.48 C2
	III	P ₀ 4.5	S ₁ 18.3	τ ₄ 4165	C3	C3	C3	226.4 C3	14.75 C4	9.01 C3	0.88 C2
	IV	P ₀ 4.8	S ₁ 16.4	τ ₄ 4732	C3	C3	C3	215.8 C3	13.07 C4	7.86 C3	0.94 C2
	V	P ₀ 4.6	S ₁ 22.6	τ ₄ 4579	C3	C3	C3	231.1 C3	13.49 C4	8.78 C3	0.53 C2
	VI	P ₀ 4.0	S ₁ 23.1	τ ₄ 4483	C3	C3	C3	253.8 C3	15.01 C4	8.87 C3	0.39 C2

備考)

暴露期間 I : '92.03~'93.02 II : '92.09~'93.08 III : '93.03~'94.02 IV : '93.09~'94.08

V : '94.03~'95.02 VI : '94.09~'95.08

海塩粒子量 (NaClmg/(m²・d)) : 銚子, 宮古島・ウェットパッド方式
西原・ドライゲージ方式

硫黄酸化物量 (SO₂mg/(m²・d)) : 銚子, 宮古島, 西原・JIS方式

5 まとめ

(1) 4 暴露地で5 年暴露の結果、環境の違いによる金属の材料ごとの腐食度が明らかになった。概ね腐食環境は宮古島>>銚子=西原>マイアミであった。

(2) 繰返し1 年暴露試験の結果を ISO 9223 規格に当てはめると銚子のデータは銅の1 回、アルミニウムの2 回を除いて一致した。宮古島は炭素鋼で4 回、銅で2 回、亜鉛の3 回を除いて一致した。西原は銅の6 回、アルミニウムの2 回を除いて一致した。銚子ではほとんどの金属が一致したが、宮古島と西原では一部の金属で合致しない。

(3) 飛来海塩粒子量が腐食に大きく関与していることが確認できたので、飛来塩分量を正確に測定できる方法の開発並びに現行の測定方法に基づき測定値の補正式の検討が必要である。

(4) 環境因子データ解析の結果、以下のことがわかった。

① ぬれ時間の ISO法と電極法（スガ試験機㈱製、デュレイン時間記録装置DR-2型）には相関関係が認められ、電極法による測定値を約3 倍すると ISO法の測定値に相当する。

② 飛来海塩粒子量の捕集方法で ISO法と JIS法には相関係数は低い危険率1 %で相関関係が認められた。しかし、両測定方法間の対応関係を明確にするためには、さらに多くの場所で同時に計測する必要がある。

③ 宮古島における飛来海塩粒子量の捕集量は、ISO法では16方位の風エネルギー比例数と、JIS法では南・北面の風エネルギー比例数と相関関係が認められ、飛来海塩粒子量を風向・風速から推定できる可能性があることがわかった。

④ 金属の腐食に関与する環境因子の影響を解析するにあたり、因子個々の測定値だけでなく化学反応速度論に基づき温度（腐食環境の気温）の影響を考慮すべきであることがわかった。

本調査研究は、平成12年度まで継続の予定であり、さらに長期の屋外暴露試験結果をもとに「大気の腐食性を環境因子レベルから精度よく判定・分類するシステムの構築」、
「促進腐食試験方法の確立」の標準化を図っていきたい。最後に、本調査研究に積極的にご協力戴いた大学、企業関係及び金属系分科会委員並びに関連機関の方々に深謝する。

参考文献)

1. 「新発電システムの標準化に関する調査研究」報告書 平成8年3月
2. 「新発電システムの標準化に関する調査研究」報告書 平成9年3月
3. H. KIHARA, S. ITO, T. MURATA ; Corrosion, Vol. 45, No. 4, 349(1989)
4. 外川靖人; 防錆管理, 37, 55(1993)
5. 田中誠, 町田洋人, 江成孝文, 遠藤三郎; 腐食防食' 96講演集, D-206(1996)
6. 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)