

大気の腐食性の分類システム（試案）

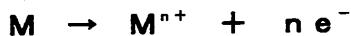
— JWTC 金属系分科会報告 —

JWTC 金属系分科会委員長 外川 靖人

1. はじめに

地球表面の自然のままの空気の状態を大気(atmosphere)と言う。この大気環境に暴露された金属材料は、基本的には大気中の水と酸素の存在のもとに電気化学反応により腐食（大気腐食：Atmospheric corrosion）し、金属材料特有の化学的性質、物理的性質が変化し、その性能も低下する。その電気化学反応は、次のとおりである。

* アノード反応：金属(M)の溶解反応



* カソード反応：溶存酸素の還元反応



清浄な大気の成分は、窒素約 80 %、酸素約 20 %であり、それに微量の炭酸ガスやアルゴンガスが含まれている。しかし、実際の大気中には水分は勿論のこと海洋や地表面における気象現象、微生物の活動、火山活動あるいは工業生産活動、商業活動及び人間の社会生活活動に伴い様々な物質が放出され、大気は汚染されている。金属材料の大気腐食に関する代表的な汚染物質は、硫黄酸化物(SO₂)、窒素酸化物(NO_X)、海水ミストである海塩粒子及びじん埃である。その汚染の程度は、その大気環境の立地条件（自然条件、生活活動の様態）によって大きく左右される。

金属材料の腐食は、曝された大気環境の気象条件（温度、湿度、ぬれ時間など）及び大気汚染物質の汚染レベルなどによるその大気環境特有の腐食性に大きな影響を受ける。

本稿では、大気環境下における金属材料の腐食に及ぼす各種環境因子（大気環境の腐食性に関する環境因子）の挙動を解説し、その大気環境の持つ腐食性を、環境因子のレベルによって分類する ISO 9223（大気の腐食性の分類）に規定される分類システムを紹介する。さらに、このシステムを我が国に適用するに当たっての問題点と、それを補完するため金属系分科会で検討してきた国内の大気環境条件及び鉄鋼、亜鉛の腐食度により我が国に適用可能な分類システムの修正案（試案）について報告する。

2. 大気環境の腐食性に関する環境因子

2. 1 温度（気温、熱）・湿度（水分）・降水

温度の作用は、化学反応の促進である。化学反応速度に関するネルンストの式から「温度が 10 °C 上昇すると化学反応速度は 2 倍になる」と言われる。腐食反応は電気化学的反応であるが、これは化学反応の一種であるので、当然温度（気温）が高い環境ほど腐食反応が促進される。

湿度は、大気中に気体の状態で含まれる水分（水蒸気）の量を表示する用語であり、金属材料の腐食反応に必要不可欠な水の供給源である。単位体積当たりの大気中に含み得る水蒸気量（飽和水蒸気量）は、図1に示すように温度によって変化する。湿度の表示単位には通常使用されている相対湿度（Relative Humidity）と絶対湿度がある。相対湿度は、ある温度の大気の単位体積当たりに含まれる水蒸気量（絶対湿度）を、その温度の飽和水蒸気量に対する百分率（%）で表したもので%RHで表示される。図1から分かるように、相対湿度が同じであっても温度（気温）が高い環境ほど単位体積当たりに含まれる水分が多い。国内92カ所の暴露試験実施場所及び気象観測所の月平均気温と月平均湿度との関係を解析した結果、図2¹⁾に示すように気温と絶対湿度との間に良い相関関係が認められた。この結果から、我が国においては気温が高い地域（環境）及び季節ほど大気中の水分が多いという特徴があることが明確である。

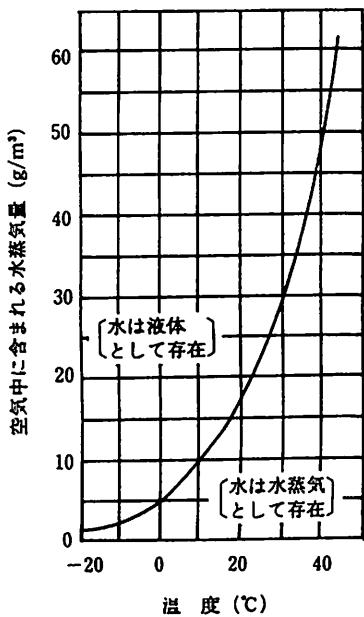


図1 空気中の水蒸気の飽和曲線

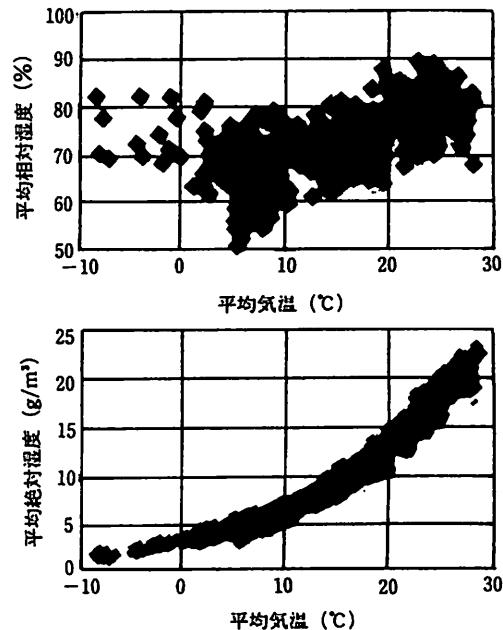


図2 国内92カ所の月平均湿度と月平均湿度との関係¹⁾

大気環境で金属材料の腐食原因である水が金属材料表面に供給される挙動は、相対湿度が100%RH以下で起こる大気中の水分の吸着凝縮である。この吸着凝縮は、図3²⁾に示すように60%～70%RH付近から急激に増大している。すなわち湿度が高くなるに従い材料表面に連続した薄い水膜が形成され、水膜も次第に厚くなる。この水膜の厚さと腐食速度との関係については、鉄鋼の初期大気腐食速度についてN.D.Tomashovが提示した図4³⁾が有名である。図4の領域Iは乾き大気腐食と言われ連続した水膜が存在しないときの大気腐食で、おそらく相対湿度が60%RH以下の腐食と考えてよい。相対湿度が60%RHを越えて上昇すると肉眼では見えない連続した水膜が形成され、湿り大気腐食と言われる領域IIになり、カソード反応に必要な水(H₂O)の供給が多くなりそれに伴い腐食速度が増大する。水膜が厚くなり約1μmで腐食速度は最大となる。これ

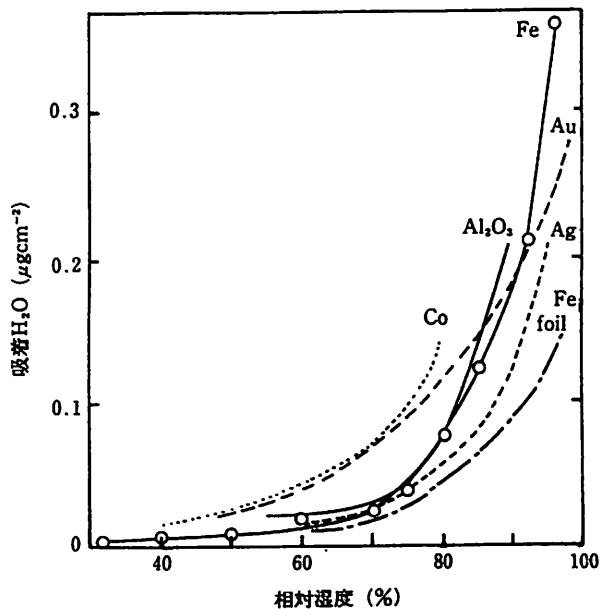


図3 蒸着金属膜表面における水の吸着等温線²⁾

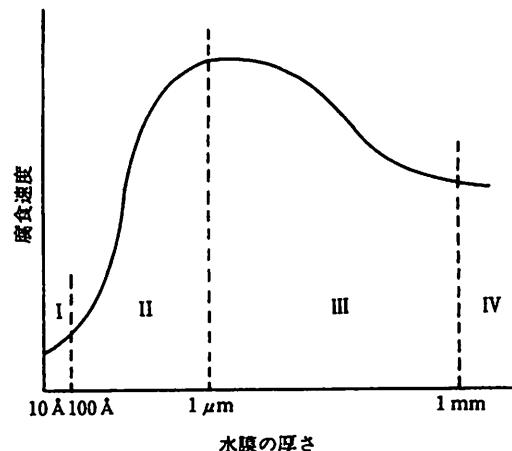


図4 鉄鋼の初期大気腐食速度と水膜の厚さとの関係³⁾

以上に水膜が厚くなるとぬれ大気腐食と言われる領域Ⅲになり、水膜が厚くなるに従い腐食速度は金属材料表面への酸素の供給が遅くなり腐食速度も低下する。この領域Ⅲでの水の供給は結露、降水、霧などである。

吸着凝縮以外に 100%RH 以下で水分の凝縮が起こる現象に毛細管凝縮と化学凝縮がある。毛細管凝縮は金属材料表面に付着したごみ、ばい塵など個体状の物質の細孔及びその下部に形成されたすき間、表面のさび層の細孔や割れ目に起こる水分の凝縮で、この現象は低い相対湿度で起こり、大量の水が供給される。化学凝縮は表面に付着した塩類による吸湿現象である。この現象による吸湿は付着した塩類の吸湿性に依存する。

表1 各種塩類の飽和水溶液の平衡湿度

塩の種類	平衡湿度 (%RH)	塩の種類	平衡湿度 (%RH)
ZnCl ₂	10	Na ₂ SO ₄	81
CaCl ₂	32	KCl	86
MgCl ₂	34	ZnSO ₄	91
NaCl	76	KNO ₃	93
NaNO ₃	77	K ₂ SO ₄	99

表1に代表的な塩類の飽和水溶液の平衡湿度を示す。大気環境の相対湿度が付着した塩の平衡湿度以上であれば塩は飽和水溶液になるまで吸湿し、塩の水溶液（電解質膜）を形成し腐食を増大させる。平衡湿度が低い塩ほど低い相対湿度から吸湿を開始する。これら2つの凝縮現象による凝縮水は、部分的に水膜を形成し局部腐食の原因になる。

大量に水を供給（目に見える水膜の形成）するのは結露と降水である。結露は、大気中の水蒸気量がその温度の飽和水蒸気量より多くなったとき（温度の低下など）、その多い分の水蒸気が液体の水として材料表面に析出する現象（図1の曲線の上側）である。高温で相対湿度の高い大気環境ではわずかな温度低下で結露が生じる。降雨は、表面に

腐食の原因となる水膜を形成する、さらには相対湿度の上昇の原因となる。反面、材料表面に付着したごみ、じん埃及び塩類などを洗い流すクリーニング効果がある。構造物で雨が直接当たらない部位、例えば、軒下及び軒天井の部位の腐食が激しいのは、降雨によるクリーニング作用がないためである。

2. 2 海塩粒子

海塩粒子は、海岸の波打ち際あるいは海上で波頭が碎けた際発生する海水ミストが風に運ばれて飛来したものであり、金属表面に付着すると腐食反応を激しく促進する因子であることはよく知られている。海塩粒子の大きさは約 $0.01 \mu m \sim 20 \mu m$ である。海岸からの距離と飛来量との関係を図5に、また、海塩粒子の付着機構の推定模式図⁴⁾を図6に示す。発生した海水ミストは、風で運ばれる過程で粒子の大きなものから順に落下し、1Km以上離れると極微少な粒子のみが遠くまで運ばれる。しかし、台風など強風が吹き荒れるときは、海岸から10数Km以上の内陸まで大量に飛来し塩害をもたらす。山本によると図6で、凝縮（結晶：NaCl）の周りに形成されているしぶき状の微少粒子は $MgCl_2$ の飽和溶液である。一度付着した海塩粒子は、乾燥して風などのより脱落することが確認されている。

海塩粒子は、もとが海水ミストであるところからその成分は約75%が $NaCl$ 、他に $MgCl_2$ 、 K_2SO_4 、 $CaCl_2$ などを含んでいる。従って、海塩粒子が付着した表面では表1に示した平衡湿度の低い塩が存在する。その結果、低い相対湿度（約33%RH）から吸湿を開始し、 $NaCl$ の平衡湿度（76°C）以上で液滴状になり、厚い電解質水膜を形成するた

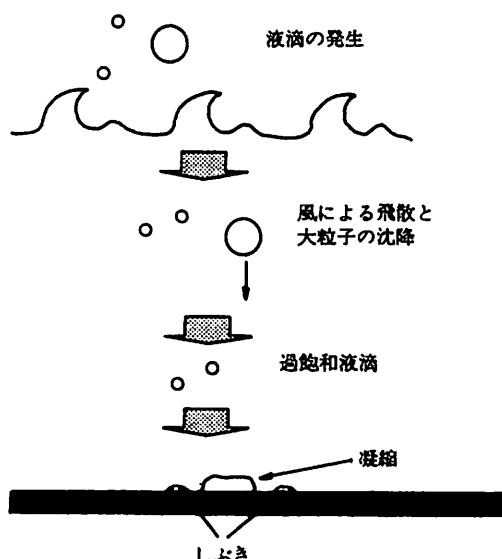
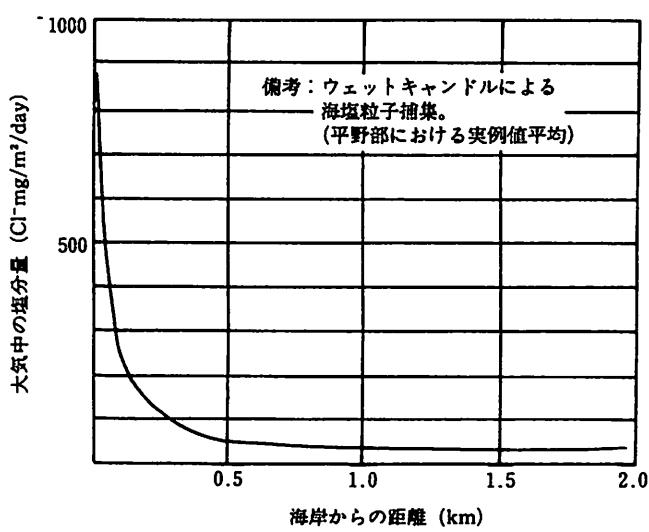


図5 海岸からの距離と海塩粒子飛来量

図6 海塩粒子の付着機構の模式図⁴⁾

め電気化学反応が容易になり、腐食速度が増大する。また、海塩粒子には、大量の塩化物イオン (Cl^-) が含まれておりこの塩化物イオンによる直接的な腐食作用により、その腐食生成物は水可溶性で保護皮膜を形成しない。この塩化物イオンは、ステンレス鋼、アルミニウム合金などの不動態被膜を破壊する作用が強い。

海塩粒子の他に腐食に大きく関与する塩分として、近年自動車の腐食で問題になっている凍結防止氷雪融解剤がある。この凍結防止氷雪溶解剤の主成分は NaCl (岩塩) であるので、金属表面に付着すると海塩粒子と同様な厳しい腐食環境を形成する。

2. 3 大気汚染物質

大気汚染物質には、ガス状のものと個体状のものがある。一般大気中での代表的なガス状汚染物質は、二酸化硫黄ガス (SO_2) と窒素酸化物 NO_x ガス (一酸化窒素 NO と二酸化窒素 NO_2) である。

SO_2 ガスは水溶性が高い (気体の水への溶解度の指標であるヘンリーリー定数が $1.3\text{mol/L/atm}^{(5)}$) ことから、ガス状で水に溶解し各種酸化剤 (金属酸化物、酸素など) によって酸化され硫酸 (H_2SO_4) として作用する。硫酸は、金属やその腐食生成物と反応して水可溶性の硫酸塩 (Fe_2SO_4 , $\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ など) を生成するので腐食作用が激しい。

NO_x ガスは、水に難溶性 (ヘンリーリー定数が NO で 0.009mol/L/atm , NO_2 で $0.012\text{mol/L/atm}^{(5)}$) であるため、大気中で光化学的に酸化され硝酸 (HNO_3) ガスになってから水に取り込まれ、水膜中で硝酸として金属と反応し腐食を促進する。しかし、 NO_x ガスと金属の腐食との関係についてはまだ明確にされていない。

近年、地球規模の環境汚染として問題になっている酸性雨の主な原因物質は、 SO_2 と NO_x である。我が国では、pH が 5.6 (大気中で炭酸ガスが飽和した pH 値) 以下の降雨を酸性雨としている (米国では SO_2 の自然発生量を考慮して pH 5.0 以下)。この酸性雨が金属の腐食にどのように影響しているかについては定量的な解明は行われていない。これは屋外に設置されたブロンズ製のモニュメントなどの腐食以外、酸性雨が原因であることが特定できないためである。

今後、金属材料の腐食に関して注目しなければならないのは、酸性霧の発生である。酸性霧は局地的に発生するもので、その注目すべき点は、①霧は地表面付近に浮いている大気汚染物質を大量に取り込み酸性化する。②材料への影響を考えると、酸性雨の場合は最初に汚染された雨が降っても、その後に清浄な雨が降って洗い流される場合が多いが、霧の場合は材料表面に付いても洗い流されることなく長時間作用する。③しかも、一個の粒子が雨滴に比べると小さく pH 値が低い (観測値には pH 2 台がある) ことである。また、酸性霧の発生は全国的な現象であると言われている^(6,7)。

3. 大気環境の腐食性の分類システム

大気環境の腐食性は、これまで述べてきた気温、湿度 (表面のぬれ状態)、飛来海塩粒子及び各種環境汚染因子のそれぞれのレベルに依存している。大気環境の分類には定性的な分類として、海岸地域、工業地域、都市地域、田園地域など地理的な立地条件又は生産活動、生活行動に伴うものが定着している。しかし、大気環境の腐食性についての定量的な分類方法は ISO 規格 (ISO 9223: Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of

atmospheres – Classification) に規定された方法が最初であり、国内での認知はこれからの状態である。そこで ISO 規格の分類システムを紹介するとともに、JWTC 金属系分科会でこの規格を国内に導入する目的で、国内の大気環境の腐食性について、国内の各地での環境因子の測定値ならびに鉄鋼及び亜鉛の腐食度をもとに検討してきた新たな分類システムの試案について紹介する。

3. 1 ISO 規格の分類システム

この分類システムは、ISO/TC156（金属及び合金の腐食）／WG4（大気の腐食性）で 1992 年に制定され規格である。大気の腐食性を分類する方法は、金属の腐食に関与する様々な環境因子の中で、ぬれ時間、SO₂ 汚染量及び飛来海塩粒子量の 3 つの因子を主要因子とし、各因子のそれぞれのレベルにより大気環境の腐食性を分類する方法である。この分類システムは、以下のとおりである。

3 つの環境因子のレベルをそれぞれ表 2 に示すカテゴリーに分類する。次に標準金属材料（ISO 9226, 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）の炭素鋼、亜鉛、銅及びアルミニウム合金の大気暴露試験による最初の 1 年間の腐食度をもとに、大気の腐食性を表 3 のようにカテゴリー分類する。この表 1 及び表 2 のカテゴリー分類を基に、表 4 に示した各環境因子のカテゴリーの組合せに腐食性のカテゴリーを組み合わせて、その環境の腐食性を分類するシステムである。例えば、JWTC 銚子暴露試験場の環境因子カテゴリーは、ぬれ時間が τ₅、SO₂ 汚染量が P₀、飛来海塩粒子量が S₀ であるので、腐食性は鉄鋼及び亜鉛とも C₄ の環境である。

表 2 主要環境因子のカテゴリー分類 (ISO 9223)

ぬれ時間		SO ₂ 汚染量		海塩粒子量	
記号	h/y	記号	mg/(m ² ·d)	μg/m ³	記号
τ ₁	≤10	P ₀	≤10	≤12	S ₀
τ ₂	> 10~ 250	P ₁	>10~ 35	>12~ 40	S ₁
τ ₃	> 250~2500	P ₂	>35~ 80	>40~ 90	S ₂
τ ₄	> 2500~5500	P ₃	>80~200	>90~250	S ₃
τ ₅	> 5500				

注：() 内の数値は NaCl·mg/(m²·d)。

表 3 大気暴露・最初の 1 年の腐食度 (r_{corr}) (ISO 9223)

腐食性分類記号	金属の腐食速度 (r _{corr})				
	単位	炭素鋼	Zn	Cu	Al
C ₁	g/(m ² ·y)	≤10	≤0.7	≤0.9	Negligible
	μm/y	≤1.3	≤0.1	≤0.1	—
C ₂	g/(m ² ·y)	> 10~ 200	> 0.7~ 5	>0.9~ 5	≤0.6
	μm/y	>1.3~ 25	>0.1~0.7	>0.1~0.6	—
C ₃	g/(m ² ·y)	>200~ 400	> 5~ 15	> 5~ 12	>0.6~ 2
	μm/y	> 25~ 50	>0.7~2.1	>0.6~1.3	—
C ₄	g/(m ² ·y)	>400~ 650	> 15~ 30	> 12~ 25	> 2~ 5
	μm/y	> 50~ 80	>2.1~4.2	>1.3~2.8	—
C ₅	g/(m ² ·y)	>650~1500	> 30~ 60	> 25~ 50	> 5~ 10
	μm/y	> 80~ 200	>4.2~8.4	>2.8~5.6	—

表 4 主要因子レベルの組合せによる大気の腐食性のカテゴリー分類(ISO 9223)

金属	炭素鋼			Zn and Cu			Al		
	P ₀ -P ₁	P ₂	P ₃	P ₀ -P ₁	P ₂	P ₃	P ₀ -P ₁	P ₂	P ₃
τ_1	S ₀ -S ₁	C ₁	C ₁	C ₁ orC ₂	C ₁				
	S ₂	C ₁	C ₁	C ₁ orC ₂	C ₁	C ₁	C ₂	C ₂	C ₂ orC ₃
	S ₃	C ₁ orC ₂	C ₁ orC ₂	C ₂	C ₁	C ₁ orC ₂	C ₂	C ₂	C ₂ orC ₃
τ_2	S ₀ -S ₁	C ₁	C ₁ orC ₂	C ₂	C ₁	C ₁ orC ₂	C ₂	C ₁	C ₁ orC ₂
	S ₂	C ₂	C ₂ orC ₃	C ₃	C ₁ orC ₂	C ₂	C ₂ orC ₃	C ₃ orC ₄	C ₄
	S ₃	C ₃ orC ₄	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₃	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₄	C ₄
τ_3	S ₀ -S ₁	C ₂ orC ₃	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃ orC ₄
	S ₂	C ₃ orC ₄	C ₃ orC ₄	C ₄ orC ₅	C ₃	C ₃ orC ₄	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₄ orC ₅
	S ₃	C ₄	C ₄ orC ₅	C ₅	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₄	C ₄ orC ₅	C ₅
τ_4	S ₀ -S ₁	C ₃	C ₄	C ₅	C ₄	C ₃ orC ₄	C ₄ orC ₅	C ₃	C ₃ orC ₄
	S ₂	C ₄	C ₄	C ₅	C ₄	C ₅	C ₃ orC ₄	C ₄	C ₅
	S ₃	C ₅							
τ_5	S ₀ -S ₁	C ₃ orC ₄	C ₄ orC ₅	C ₅	C ₃ orC ₄	C ₄ orC ₅	C ₅	C ₄ orC ₅	C ₅
	S ₂	C ₅							
	S ₃	C ₅	C ₅	C ₆	C ₅				

この規格に関するデータベースを構築する目的で、1986年から8年間国際共同暴露試験が行われ、我が国でも4カ所の暴露試験場を使って参加している^{8), 9)}。そのデータベースを基に、参加各国で様々な解析が行われ、現規格の修正案が検討されている。その1つが、ぬれ時間の測定方法である。現規格では、ぬれ時間を気温0°C以上、相対湿度80%RH以上の持続時間と規定しているが、ISOの共同暴露試験の計測値及び他のヨーロッパでの暴露試験の環境測定データを基に確率統計計算を行った結果、以下の確率関数式で算出した方がより的確である¹⁰⁾との提案がなされている。この計算式で算出したJWTC銚子暴露試験場のぬれ時間を実測値と対比した結果、比較的正確なぬれ時間が計算できることが分かった。

$$\text{ぬれ時間 (年間)} \quad T_{\text{ow}} = 8766 \times P(\text{RH}) \times P(\text{T})$$

ここで、P(RH)は年平均相対湿度の確率係数、P(T)は年平均気温の確率係数である¹⁰⁾。それぞれの確率係数を、次に示す。

年平均湿度(%RH)と確率係数P(RH)

%RH	P(RH)	%RH	P(RH)	%RH	P(RH)	%RH	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 (°C) と確率係数 P(T)

°C	P(T)	°C	P(T)	°C	P(T)	°C	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		

この規格を我が国に導入するに当たり問題になる点は、ぬれ時間が 1,000h/y 以下、SO₂ 汚染度が P₁ 以上の環境が存在せず、環境因子カテゴリーが限られた狭い範囲の環境に分類される。腐食を促進する主因子である海塩粒子量のカテゴリー分類の幅が大きすぎ、特に S₂ のカテゴリーが実際の腐食との関係から不適切である。また、温度の影響が無視されている。さらに、我が国の大気環境の腐食性のカテゴリーがほぼ 2 つのランクに位置づけされるなど狭く偏ったものになることが計測データから明らかになり、現規格をそのまま導入しても使い勝手が悪い（実用的に意味がない）ことが分かった。そこで、我が国の大気環境条件の計測値を基に、きめ細かな環境分類と鉄鋼及び亜鉛の腐食度の分類を行い、大気環境の腐食性の分類を試みた。その結果を、次項で説明する。

3. 2 大気環境の腐食性に関する分類（試案）

JWTC の「大気の腐食性を決定するための大気暴露試験」委員会は、平成 9 年度の報告書で、我が国における各種環境因子及び鉄鋼と亜鉛の腐食度をもとに、それぞれカテゴリー分類を行った結果を報告している。それは、全国 80 力所の気温、相対湿度及び降水量の気象因子（理科年表による 10 年間の平均値）、全国 44 力所で測定した飛来海塩粒子量及び硫黄酸化物量（JWTC 3 力所、全国の橋梁 41 力所¹¹⁾）、さらに、国内の鉄鋼及び亜鉛の暴露試験による腐食度〔中村：防食技術；12,56(1963), 堀川,他：ibid.,16,154 (1967), 中村, 他：ibid.,16,468(1967), ISO/TC156/WG4, 外川：第 36 回腐食防食討論会講演集,P217(1989), 外川, 伊藤, ISO/TC156/WG4 : 第 38 回腐食防食討論会講演集,p157 (1991)〕を、それぞれ正規確率プロットあるいは対数正規確率プロットした結果、気温と相対湿度は正規分布に、それ以外の因子及び腐食度は対数正規分布に従うことを明らかにし、累積確率により統計的に意味のある標準偏差を基に 5 段階に区分したカテゴリー分類案を提示している。各環境因子の確率分布を図 7～図 11 に、鉄鋼と亜鉛の腐食度の確率分布を図 12 に示す。

このカテゴリー分類案に基づき、各環境因子、鉄鋼及び亜鉛の腐食度のそれぞれの分類基準値を表 5 に示した。また、この基準値をもとにした環境因子のカテゴリー分類（試案）を表 6 に、腐食性のカテゴリー分類（試案）を表 7 に示した。ただし、表 6 のぬれ時間は、国内での測定場所が偏っており測定データも少ないため確率プロットによる解析は行っていないが、ISO に提案されている確率関数式 ($TOW = 8766 \times P(RH) \times P(T)$)

により、表 5 の分類基準の気温と相対湿度から計算した値を用いた。

この表 6 及び表 7 のカテゴリー分類（試案）に基づき、JWTC の金属系分科会及び「大気の腐食性を決定するための大気暴露試験」委員会で、8 地所の暴露試験場で 1 年間の暴露試験を繰り返し行ったデータ（表 8）をカテゴリー分類した。その結果を表 9 に示す。また、全国 41 橋梁の暴露試験データ〔耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（X V）、耐候性鋼材の暴露試験まとめ：第 71 号、1992.3；建設省土木研究所、（社）鋼材俱楽部、（社）日本橋梁建設協会〕を基に、橋梁の所在地に近接する気象官署の気象データを用いて、環境因子及び腐食度のカテゴリー分類を行った。その結果を表 10 に示す。なお、表 8 及び表 10 に示したぬれ時間は、確率関数式を用いて計算した値である。

表 9 及び表 10 に示したように、環境因子及び腐食度のカテゴリー分類（試案による）は、ISO 規格によるものよりきめ細かな分類が可能であることが明かである。しかし、ISO 規格と同様に環境因子のカテゴリー分類の組合せによってその環境の腐食性を推定するには、試案の環境因子のカテゴリー分類の区分をどのように組み合わせて腐食性のカテゴリー分類と対応させるかが問題として残っている。この問題を解決するにはもっと多くの環境での大気暴露試験が必要である。また、環境因子のカテゴリー分類の試案の中で相対湿度及び降水量の項目は不要であると考える。

しかし、41 橋梁の環境データを用い様々な解析を行った結果、次式により大気環境の腐食性パラメータ Z を計算した。

$$Z = 2 \times 10^6 \times \left(\frac{\text{NaCl}}{1 + 60 \times \text{NaCl} \times \text{SO}_2} \right) \times \exp \left(\frac{-50000}{8.31 \times T} \right)$$

ここで、T は絶対温度である。

この腐食性パラメータ Z を用いて、41 橋梁の水平及び垂直暴露の予測腐食度を次式により計算した。その結果を、腐食度カテゴリーの C 1, C 2, ..., C 5 のそれぞれに相当する予測腐食度を Z 1, Z 2, ..., Z 5 として表 10 に併記した。

$$\text{垂直暴露} : CRV = 41.98 \times Z + 6.00$$

$$\text{水平暴露} : CRH = 54.66 \times Z + 9.01$$

表 10 で腐食度のカテゴリー分類 C 1, C 2, ..., C 5 と予測腐食度 Z 1, Z 2, ..., Z 5 との対応をみると、41 橋梁で予測的中カテゴリーは垂直暴露で 27 件、水平暴露で 23 件、残りはすべて予測区分差が ± 1 であり、かなりの確度で大気環境の腐食性の分類（予測）が可能であることが分かった。今後、更にこの腐食性パラメータ Z を使った腐食度予測式を検討し、精度のよい大気環境の腐食性を分類するシステムを検討していく予定である。

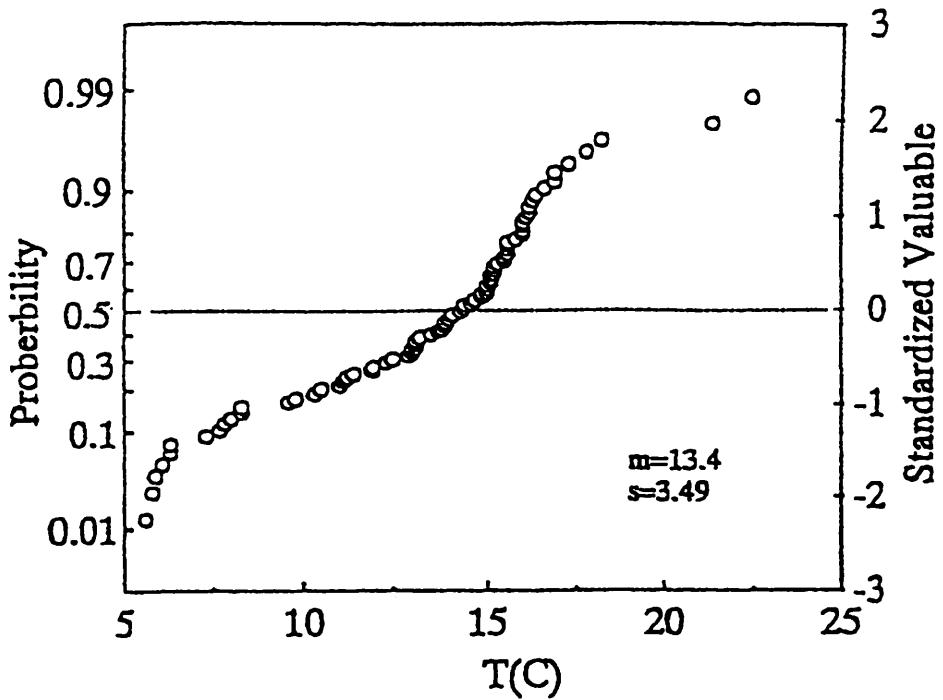


図7 日本全国80か所における平均温度（気温）の正規確率プロット

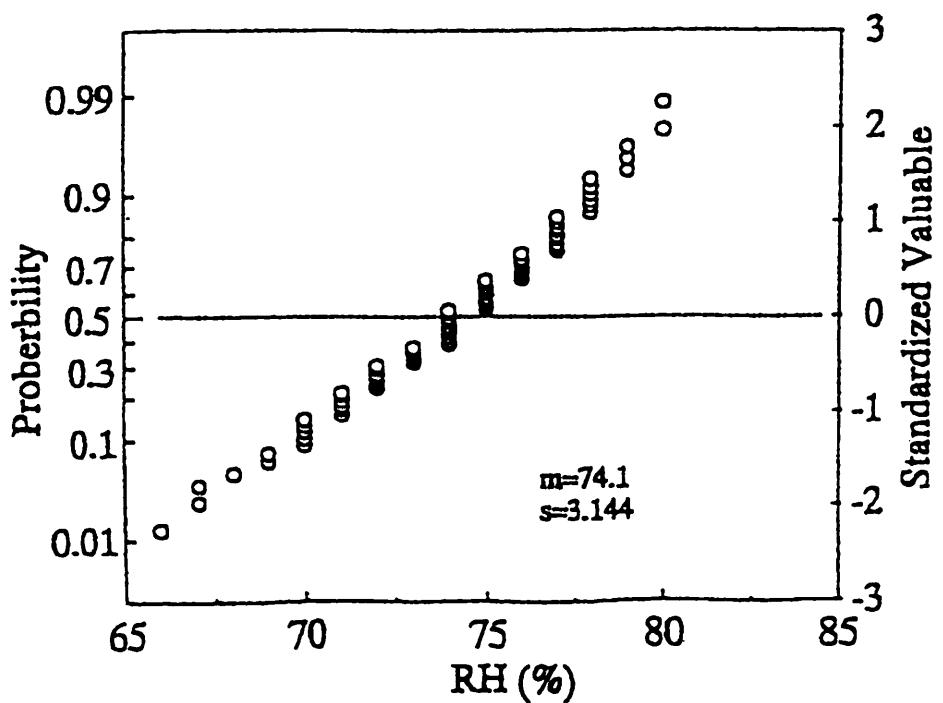


図8 日本全国80か所における平均相対湿度の正規確率プロット

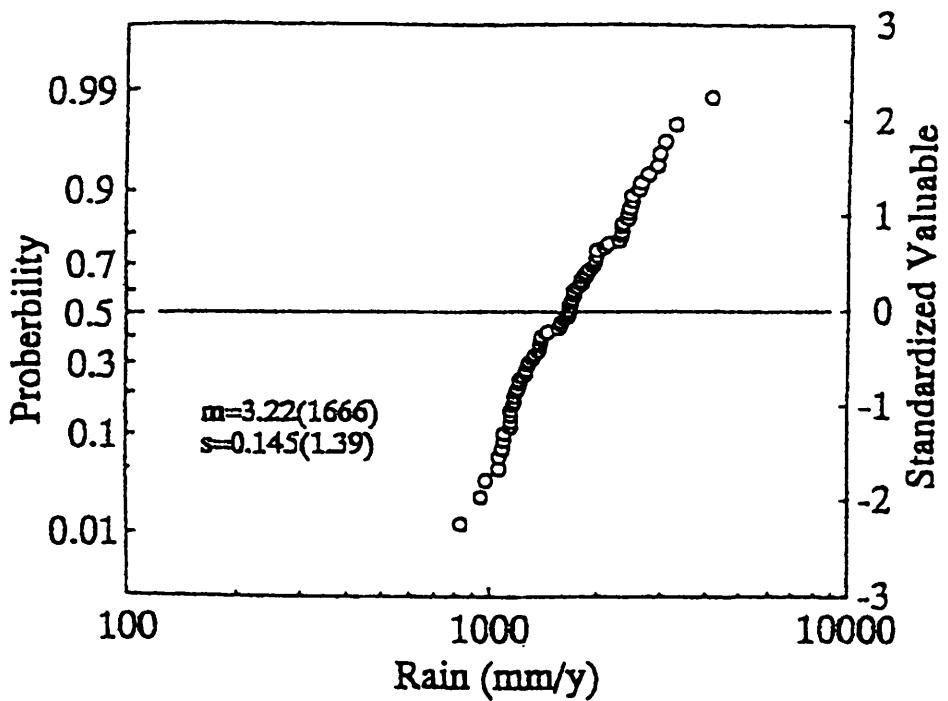


図9 日本全国80か所における平均降水量の対数正規確率プロット

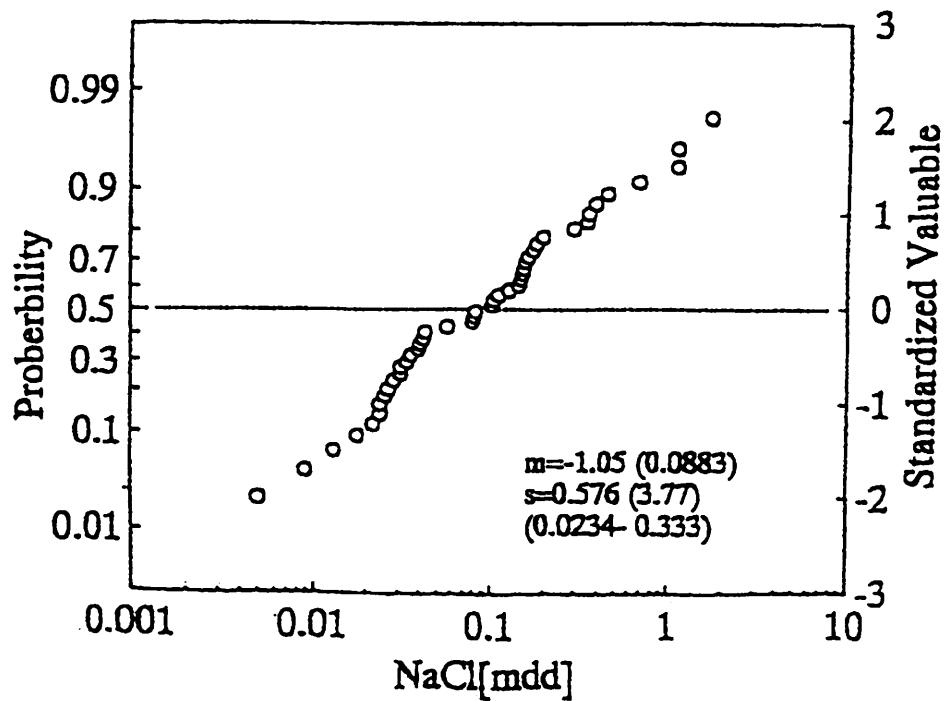


図10 日本全国44か所における飛来海塩粒子量の対数正規確率プロット

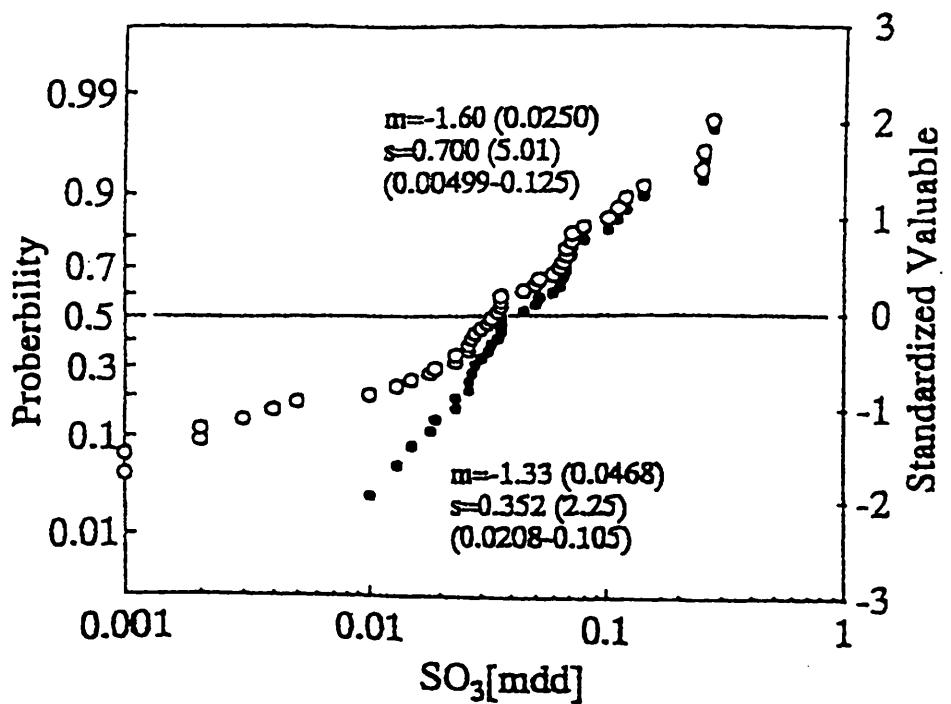


図 11 日本全国44か所における硫黄酸化物量の対数正規確率プロット

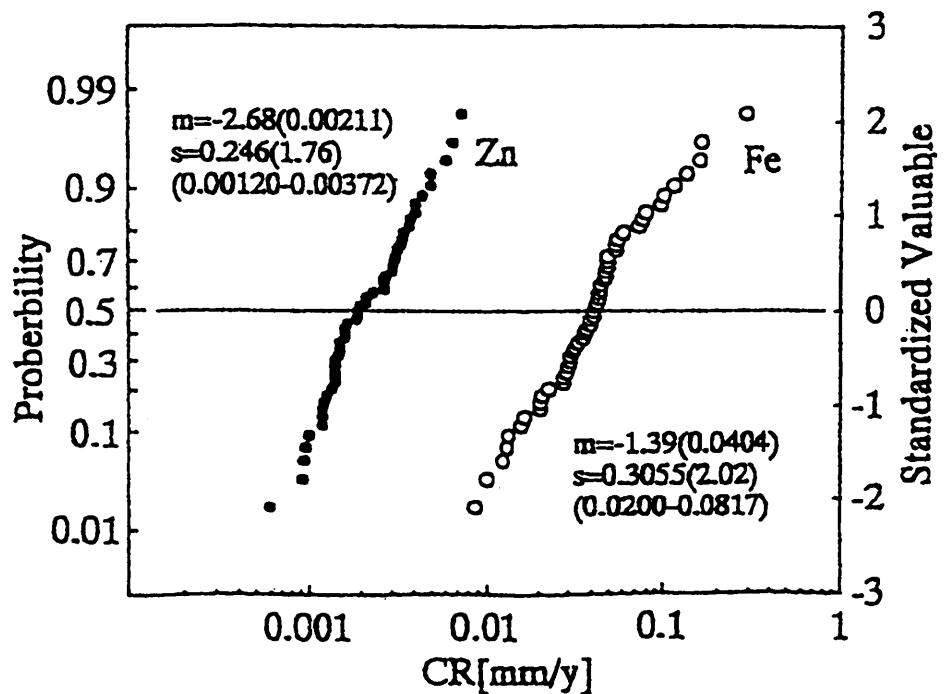


図 12 日本国内で暴露された鉄鋼及び亜鉛の腐食度の対数正規確率プロット

(その7) 沖縄(北谷町・日産自動車砂辺暴露場)

暴 露 期 間	気温 (°C)	湿度 (%)	ぬれ時間 新ISO (h/y)	降水量 (mm/y)	海塩粒子量 (NaCl·mg/dm ² /d)		硫黄酸化物量 (SO ₃ ·mg/dm ² /d)	炭素鋼の 腐食量 (g/m ² /y)	亜鉛の 腐食量 (g/m ² /y)
					ドライ ガーゼ法	ウェット キャンドル法			
86.11～87.10	22.8	76	4566	1214	1.316	—	0.112	927.8	44.9
87.5～88.4	23.6	77	4718	1549	0.945	—	0.091	1083.0	29.4
87.11～88.10	24.0	76	4583	2062	1.251	—	0.109	430.6	26.4
88.5～89.4	23.5	73	4567	1805	1.420	—	0.114	450.0	21.6
88.11～89.10	23.2	73	3990	1533	1.499	—	0.121	352.7	13.7
89.5～90.4	23.4	71	3620	2259	1.571	—	0.125	308.2	11.6

(その8) 大井川沖(駿河湾海洋総合研究施設第1テッキ)

暴 露 期 間	気温 (°C)	湿度 (%)	ぬれ時間 新ISO (h/y)	降水量 (mm/y)	海塩粒子量 (NaCl·mg/dm ² /d)		硫黄酸化物量 (SO ₃ ·mg/dm ² /d)	炭素鋼の 腐食量 (g/m ² /y)	亜鉛の 腐食量 (g/m ² /y)
					ドライ ガーゼ法	ウェット キャンドル法			
86.11～87.10	16.7	69	3144	2001	1.620	—	0.334	337.8	21.9
87.5～88.4	16.7	69	3144	1901	1.673	—	0.355	334.2	19.8
87.11～88.10	16.2	70	3290	2154	1.893	—	0.365	374.8	13.2
88.5～89.4	16.1	70	3287	2355	1.394	—	0.341	440.6	19.6
88.11～89.10	16.1	70	3287	2318	1.101	—	0.341	406.0	21.5
89.5～90.4	16.5	71	3475	2275	1.290	—	0.313	386.4	20.1

表9 各暴露試験場の環境因子のカテゴリーと腐食性（試案による）
(その1)

暴 露 時 期	J W T C 銚子暴露試験場 環境因子カテゴリー						腐 食 度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海 塩	硫 黃	鉄 鋼	亜 鉛
'86. 11 → '87. 10	T3	H5	R3	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'87. 5 → '88. 4	T3	H5	R3	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'87. 11 → '88. 10	T3	H5	R4	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'88. 5 → '89. 4	T3	H5	R4	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'88. 11 → '89. 10	T3	H5	R4	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'89. 5 → '90. 4	T3	H5	R3	τ 4(5)	S4(1)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'92. 3 → '93. 2	T3	H3	R4	τ 3(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'92. 9 → '93. 8	T3	H4	R4	τ 4(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'92. 11 → '93. 10	T3	T4	R3	τ 4(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	—
'93. 3 → '94. 2	T3	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'93. 5 → '94. 4	T3	H4	R3	τ 4(4)	S3(1)	P4(0)	C3(3)	—
'93. 9 → '94. 8	T3	H3	R3	τ 3(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'93. 11 → '94. 10	T3	H3	R3	τ 3(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	—
'94. 3 → '95. 2	T3	H3	R2	τ 3(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'94. 5 → '95. 4	T3	H3	R2	τ 3(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	—
'94. 9 → '95. 8	T3	H3	R3	τ 3(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'96. 1 → '96. 12	T3	H4	R3	τ 4(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	C1(3)*
'96. 7 → '97. 6	T3	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'96. 11 → '97. 10	T3	H4	R2	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'97. 5 → '98. 4	T3	H5	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'97. 11 → '98. 10	T3	H5	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C2(2)	C3(3)

注1) : 1年暴露による腐食度のカテゴリー分類

* : 溶融亜鉛めっきの腐食度

注2) : 表中の()内の数値は、ISO9223による環境因子のカテゴリー分類のレベルと腐食度

(その2)

暴 露 時 期	J W T C 宮古島暴露試験場 環境因子カテゴリー						腐 食 性 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海 塩	硫 黃	鉄 鋼	亜 鉛
'92. 3 → '93. 2	T5	H5	R4	τ 4(5)	S4(1)	P3(0)	C4(4)	C3(4)
'92. 9 → '93. 8	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C3(4)
'92. 11 → '93. 10	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C4(4)	—
'93. 3 → '94. 2	T5	H5	R2	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C3(3)
'93. 5 → '94. 4	T5	H4	R2	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(4)	—
'93. 9 → '94. 8	T5	H5	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C4(4)	C3(4)
'93. 11 → '94. 10	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C5(5)	C2(3)
'94. 3 → '95. 2	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C4(5)	C4(4)
'94. 5 → '95. 4	T3	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C5(5)	—
'94. 9 → '95. 8	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P3(0)	C4(4)	C4(4)
'96. 7 → '97. 6	T5	H5	R3	τ 4(5)	S4(1)	P2(0)	C4(4)	C3(4)
'96. 11 → '97. 10	T5	H3	R3	τ 4(4)	S4(1)	P2(0)	C4(4)	C4(4)
'97. 5 → '98. 4	T5	H4	R3	τ 4(4)	S4(1)	P2(0)	C4(5)	C3(4)
'97. 11 → '98. 10	T5	H4	R4	τ 4(4)	S4(1)	P2(0)	C3(3)	C3(4)

(その3)

暴露時期	環境因子カテゴリー						腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海塩	硫黄	鉄鋼	亜鉛
'92. 3 → '93. 2	T5	H4	R4	τ4(4)	S3(1)	P2(0)	C3(3)	C2(3)
'92. 9 → '93. 8	T5	H3	R3	τ4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'93. 3 → '94. 2	T5	H4	R3	τ4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'93. 9 → '94. 8	T5	H4	R3	τ4(4)	S3(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'94. 3 → '95. 2	T5	H4	R3	τ4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)
'94. 9 → '95. 8	T5	H4	R3	τ4(4)	S4(1)	P3(0)	C3(3)	C2(3)

(その4)

暴露時期	環境因子カテゴリー						腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海塩	硫黄	鉄鋼	亜鉛
'96. 7 → '97. 6	T1	H3	R2	τ2(4)	S2(0)	P3(0)	C2(2)	C2(3)
'96. 11 → '97. 10	T1	H3	R1	τ2(4)	S2(0)	P3(0)	C2(2)	C1(3)
'97. 5 → '98. 4	T1	H3	R1	τ2(4)	S2(0)	P3(0)	C2(2)	C1(2)
'97. 11 → '98. 10	T1	H3	R1	τ2(4)	S2(1)	P3(0)	C2(2)	C1(3)

(その5)

暴露時期	環境因子カテゴリー						腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海塩	硫黄	鉄鋼	亜鉛
'96. 7 → '97. 6	T5	H5	—	τ4(5)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C5(5)
'96. 11 → '97. 10	T5	H5	—	τ5(5)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C5(5)
'97. 5 → '98. 4	T5	H5	—	τ5(5)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C5(5)
'97. 11 → '98. 10	T5	H5	—	τ5(5)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C5(5)

(その6)

暴露時期	環境因子カテゴリー						腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海塩	硫黄	鉄鋼	亜鉛
'86. 11 → '87. 10	T4	H1	R2	τ1(3)	S2(0)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'87. 5 → '88. 4	T4	H1	R2	τ1(3)	S2(0)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'87. 11 → '88. 10	T3	H1	R3	τ1(3)	S2(0)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'88. 5 → '89. 4	T3	H1	R3	τ1(3)	S2(0)	P4(0)	C3(3)	C2(3)
'88. 11 → '89. 10	T3	H1	R3	τ1(3)	S3(1)	P4(1)	C3(4)	C2(3)
'89. 5 → '90. 4	T3	H1	R2	τ1(3)	S3(1)	P4(1)	C3(3)	C2(3)

(その7)

暴 露 時 期	環境因子カテゴリー							腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海 塩	硫 黃	鉄 鋼	亜 鉛	
'86.11 → '87.10	T5	H3	R2	τ4(4)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C5(5)	
'87. 5 → '88. 4	T5	H3	R3	τ4(4)	S5(2)	P4(0)	C5(5)	C4(5)	
'87.11 → '88.10	T5	H3	R4	τ4(4)	S5(2)	P4(0)	C3(4)	C4(4)	
'88. 5 → '89. 4	T5	H2	R3	τ4(4)	S5(2)	P4(0)	C4(4)	C4(4)	
'88.11 → '89.10	T5	H2	R3	τ3(4)	S5(2)	P4(0)	C3(3)	C2(3)	
'89. 5 → '90. 4	T5	H2	R4	τ3(4)	S5(2)	P4(0)	C3(3)	C2(3)	

(その8)

暴 露 時 期	環境因子カテゴリー							腐食度 ¹⁾	
	気温	湿度	降水量	ぬれ時間	海 塩	硫 黃	鉄 鋼	亜 鉛	
'86.11 → '87.10	T4	H1	R4	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(3)	C4(4)	
'87. 5 → '88. 4	T4	H1	R3	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(3)	C3(4)	
'87.11 → '88.10	T4	H2	R4	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(3)	C2(3)	
'88. 5 → '89. 4	T4	H2	R4	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(4)	C3(4)	
'88.11 → '89.10	T4	H2	R4	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(4)	C4(4)	
'89. 5 → '90. 4	T4	H2	R4	τ2(4)	S5(2)	P5(2)	C3(3)	C3(4)	

参考文献

- 1) (社)日本建材産業協会：鉄鋼系社会資本材の耐候性・耐食性試験評価方法に係る調査研究報告書－気象データグラフ集(1998.03),p.2
- 2) 腐食防食協会編：材料環境学入門(1994),p.170
- 3) N.D.Tomashov:Theory of corrosion protection of metals, MacMillan, (1966),p.369
- 4) 山本正弘：防錆管理, 43 [9] ,(1999),p.345
- 5) 前田泰昭, 竹内規訓：材料と環境, 40(1991),p.619
- 6) 野村健太郎：THE HITACHI SCIENTIFIC INSTRUMENT NEWS,34[4],(1994),p.3
- 7) 野村健太郎：防錆管理, 41[5],(1997),p.139
- 8) 外川靖人：防錆管理, 37[2],(1993),p.35
- 9) ISO/TC156/WG4, N243; Classification of corrosivity of atmosphere. 1st Draft of ISO Technical Report.1993
- 10) ISO/TC156/WG4, N314; V.Kucera, J.Tidblmd, A.A.Mikhailov: Some new ideas for characterisation of atmospheric corrosivity in connection with development of improved standards
- 11) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（X）－暴露試験片の第3回及び第4回腐食量調査－：建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会