工業化住宅内各部位の環境腐食性*

元田 慎一**, 鈴木揚之助**, 篠原 正***, 辻川 茂男***

** 東京商船大学

*** 東京大学大学院工学系研究科

Corrosivity of Indoor Atmosphere for a Prefabricated House*

Shin-ichi Motoda**, Yohnosuke Suzuki**, Tadashi Shinohara*** and Shigeo Tsujikawa***

** Tokyo University of Mercantile Marine

*** Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

An atmospheric exposure test has been conducted since Sept. 26, 1994 at a five member family steel framed prefabricated house in Nogi-chou, Shimotoga-gun, Tochigi prefecture. The ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) corrosion sensors and zinc-coated steel coupons are exposed in nine indoor sites—ceilings, floors and wall cavities—and one outdoor site sheltered from rain. Three year of measured results are reported here. The ACM sensor outputs galvanic current, I , between carbon steel and silver, integral of which over a day—daily average electricity, Q —is related to corrosion rates of carbon steel and zinc to be used as a measure of corrosivity for each site. The sensor output, I , is found to depend not only on relative humidity, RH , but also on amount of deposits on the sensor, which, expressed as equivalent amount of deposited sea salt, Ws , is determined by referencing to I vs. RH relationship observed under various predetermined amounts of deposited sea salt in laboratory test. Corrosion rates of carbon steel and zinc at their indoor sites are around one fifth of the outdoor one. Such lower corrosion rates at the indoor sites are attributed mainly to lower Ws values which are around one tenth of the outdoor one. Moreover, amount of sulfur trioxide collected for a year is $0.001 \text{ mg SO}_3/100 \text{ cm}^2/\text{day}$ at an indoors site, one twenty sixth of the outdoor one.

Key words: steel framed prefabricated house, indoor corrosion, corrosion monitor, ACM sensor, corrosion rate, carbon steel, zinc, amount of deposit, relative humidity.

1. はじめに

建設省が「工業化住宅性能認定制度」を1973年（昭和48年）に創設して以来、1997年現在で24年を経過した。この事業を1987年（昭和62年）5月から引き継いだ（財）日本建築センターでは、審査項目のうち、鋼材の防錆については部位・部品を数グループに大別し、それぞれをめっき・塗膜厚などの適切な表面処理・仕上げに照らして評価している¹⁾。このような評価基準をより適正化し、対応する加速試験を開発するために

も、まず各部位ごとの環境腐食性を定量化する必要がある。

以下で述べるように、一般に屋外環境に比べ住宅内での腐食速度は小さい。これは囲まれた空間内にあるため外部から持ち込まれる付着物量が少ないからである。このように穏和な環境の腐食性データを効率的に採取するためには、高感度の腐食センサの適用が有効である。われわれはこれまでに、ACM（Atmospheric Corrosion Monitor）型腐食センサを4か所の暴露地に設置し、主として海洋性大気環境の腐食性評価を試みてきた^{2),3)}。本報では、ACM型腐食センサを実際の工業化住宅内の諸部位に暴露して、その出力を測定した3年間の結果について報告する。

* 第111回腐食防食シンポジウム（大阪、1996年）で一部発表

** 〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6 (2-1-6, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan)

*** 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan)

2. 亜鉛めっき鋼板試料・センサ類の暴露方法

積水ハウス(株)のご好意により、栃木県下都賀郡野木町にある鉄鋼系工業化住宅(1985年4月竣工:家族5人が居住)において、1994年9月26日('94.9.26とかく、以下同様)からACM型腐食センサならびに新日本製鐵株式会社のご好意による溶融または電気亜鉛めっき鋼板試料の暴露を開始した。

暴露位置はFig. 1およびTable 1に示す10か所の部位で、試料およびセンサの表面が通常は地面とほぼ垂直になるように設置した。このうち、浴室壁内(Site 1)、浴室天井裏(Site 4)、床下(厨房: Site 5、南面和室: Site 7)、小屋裏(2階押入天井裏: Site 6)および屋外(測定器格納庫の直接雨が当たらない軒下: Site 10)には、温・湿度センサ(神栄(株)、変換器THT-130、センサTHP-B4T)も併せて設置した。これら6部位では後述のように付着物量も決定できる。

ACMセンサ出力、 I 、の測定範囲は0.1 nA~100 nA(分解能0.1 nA)、10 nA~10 μ A(分解能10 nA)、および1 μ A~1 mA(分解能1 μ A)である。なお、暴露部位によってはセンサ出力のノイズレベルが大きいため、'94.11.30から簡易型のRCローパスフィルター(フィルター1)を、また'95.4.27からは高性能のローパスフィルター(フィルター2)を取り付けた。

Fig.1 Plane view of exposure sites. Sites 1~10 for ACM sensors, sites 1~9 for zinc-coated steel coupons and six sites marked by (*) for thermo-hygrometers.

Table 1 Exposure sites of ACM sensor and thermo-hygrometer.

Site	test area	ACM sensor	Thermo-hygrometer
1	wall cavity of bath room	○	○
2	wall cavity of dining room	○	—
3	wallcavity of kitchen	○	—
4	ceiling for bath room	○	○
5	kitchen floor	○	○
6	attic (ceiling for closet)	○	○
7	floor of Japanese room	○	○
8	wall cavity of Japanese room (1st floor)	○	—
9	wall cavity of western room (2nd floor)	○	—
10	eaves of measurement box , outside the house	○	○

Fig.2 Range of RH and temperature at each site ('94.10-'97.9).

亜鉛めっき鋼板試料におけるめっき亜鉛 (Zn とかく) 部の腐食速度測定は精密化学法⁴⁾ によった。これは Zn の腐食生成物が全量試料表面に残存する場合、その中の Zn(II) を定量することにより腐食速度を決定する方法で、その部材の経過年数がわかれば初期重量の測定を必要としない。

また、大気中の SO₂ 濃度の測定は、JIS Z 2381 に従い PbO₂ ペーストを塗布した円筒を '96.10 ~ '97.9 の 1 年間暴露しておこなった。

3. 測定結果と考察

3.1 温度・湿度

実際工業化住宅内各部位での温・湿度 (相対湿度, RH) の 1 日内の最高・最低値を求め、それらの各月ご

Fig.3 Normal probability plots of relative humidity at each exposure site for three years.

との平均値を算出した。3 年間 ('94.10 ~ '97.9) におけるこれら平均値の最高・最低値を、各部位ごとに取り得る温・湿度の範囲として Fig. 2 に示す。小屋裏 (Site 6) を除いて、屋内の各部位の温度・湿度の範囲は屋外 (Site 10) のそれにほぼ含まれている。ユニットバスの導入によるのか、浴室の天井裏 (Site 4) といっても高湿度になっていない。ただし、床下 (Site 5, 7) では、湿度の変動が小さく、かつ高めである。同じ期間内において 10 分ごとに測定した湿度の累積確率分布を Fig. 3 示す。平均値が約 70% の Site 4・6 と 10 および約 80% の Site 1・5 と 7 がある。

3.2 センサ出力・海塩相当付着量

屋外 (Site 10) では '94.12.1 から、また Site 1, 2, 3, 5, 7 および 9 では '95.4 から有意なセンサ出力が検出された。Site 4 (浴室天井裏) と Site 6 (小屋裏) では当初から '97.9 現在まで出力は 10^{-4} μ A 以下である。'96.8.10 ~ 8.12 における ACM センサ出力ならびに RH の経時変化例を Fig. 4 に示す。床下 (Site 5) の RH は 80% 以上であり、1 日内の変動も屋外 (Site 10) ほども大きくない。そのため Site 5 のセンサ出力も $(3 \sim 10) \times 10^{-4}$ μ A と変動は小さく、 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ μ A と変動の大きい Site 10 とは対照的である。

Fig.4 Example of time variations of ACM sensor output, I , and relative humidity, RH , at Site 5 (kitchen floor) and Site 10 (outside the house).

'96.8.10~8.11における Site 1, 4, 5, 6, 7 および 10 での I vs. RH の関係を Fig. 5 に示す。図中の実線は $10^{-4} \sim 10^0 \text{ g/m}^2$ の海塩を付着させたセンサにおける I vs. RH の関係 (校正曲線とよぶ) である。これらと実データとを照合して決定される Site 1, 5 および 7 における海塩相当付着量 (以下, 「海塩」付着量と記す) は $(3 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ g/m}^2$ であり, Site 10 では約 $3 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2$ である。また, Site 4 ($\square$)・6 ($\blacktriangle$) については $10^{-4} \mu\text{A}$ 超のセンサ出力が検出されず, この場合の付着

量は $1 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2$ 未満である。 $10^{-4} \mu\text{A}$ 超の有意な出力が検出された Site 1, 5, 7, および 10 について, 3 年間 ('94.10~'97.9) における「海塩」付着量の経時変化を求め, 結果を Fig. 6 に示す。屋外 (Site 10) の「海塩」付着量は, 暴露開始後約 200 日で定常的になり, その値 $(4 \sim 6) \times 10^{-3} \text{ g/m}^2$ は静岡県清水市における暴露台のそれ $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^2$ (文献 (2)) の $1/20 \sim 1/2$ である。屋内の部位については, 暴露開始からフィルター 2 を取り付けた '95.4.27 まではセンサ出力が検出できていないが, 屋外 (Site 10) とほぼ同じ時期に定常になったものと考えられる。上述のように Site 1, 5 および 7 における「海塩」付着量は部位間にほとんど差はなく $(3 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ g/m}^2$ で, 屋外の約 $1/10$ である。このような挙動は, センサを垂直に設置したためであろうか。この点の検討のため, '95.10.25 より Site 1 に水平上向きに設置したセンサ (Site 1*) では, 約 120 日後 ('96.2 下旬) から「海塩」付着量が増加し始め, 約 170 日ではほぼ定常的付着量 $6 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2$ となった。この付着量は垂直に設置したセンサの約 2 倍である。垂直/水平上向き—いずれの置き方でも, 数箇月以上の誘導期間を経て定常的付着量が形成されるようである。

Fig. 6 と同じ 3 年間における ACM センサ出力の日平均電気量 (Q) と RH の月別変動 ($\mu \pm \sigma$, μ : 平均, σ : 標準偏差) を Fig. 7 に示す。Fig. 2 および Fig. 3 と同様, 屋内の Site 1, 4, 7 の RH は屋外 (Site 10) に比べて高く, かつ変動が小さい。「海塩」付着量が定常になった '95.5 以降でみると, 屋外 (Site 10) での Q は 6~9 月の夏期で大きく 11~3 月の冬期で小さい。'96, '97 とも, 2 月で最も小さくなっている。これに対し, 屋内 (Site 1, 7) の Q では 2 月に小さいのは屋外と同様であるが, 8 月においても極小値をとることがあり, これらは RH の変化とはむしろ逆である。屋内の Q は屋外のおおよそ $1/100$ (5~9 月)~ $1/10$ (11~3 月) となっている。

3.3 付着物量と湿度条件とが与えられた環境での日平均電気量の推定

ACM センサ出力 I は, W_s と RH との関数 $I = I(W_s, RH)$ として表せる。所定の測定期間 T [s] におけるセンサ出力の全電気量 Q_T [C] は

$$Q_T = \sum_{i=1}^{NT} I(W_s, RH)_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

ここで, Δt は測定間隔, NT は測定期間 T 内での測定回数 ($T/\Delta t$) である。

住宅内環境では部位ごとに Fig. 6 で示したように W_s はほぼ定常になるから, 各部位での出力 I はそれぞれの W_s 一定条件下での I vs. RH 曲線 $I_{W_s}(RH)$ に沿って変化することになる。すなわち:

Fig.5 Relationship between ACM sensor output, I , and RH at Sites 1, 4, 5, 6, 7 and 10 with respect to the calibration curves obtained under various predetermined amount of sea salt, W_s , deposited on the ACM sensor.

Fig.6 Variation with exposure time of equivalent amount of deposited sea salt, W_s , estimated at each site.

$$Q_T = \sum_{i=1}^{NT} I_{ws}(RH_i) \cdot \Delta t$$

$$= \sum_{RH=0}^{100} I_{ws}(RH) \cdot n(RH) \cdot \Delta t \quad (2)$$

ここで、 $n(RH)$ は湿度が RH となる累積回数である。測定期間 T 内で湿度が RH になる確率密度関数を $f(RH)$ とすれば、 $n(RH) \cdot \Delta t = T \cdot f(RH)$ であるから

$$Q_T = \sum_{RH=0}^{100} I_{ws}(RH) \cdot T \cdot f(RH) \quad (3)$$

したがって、1日(=8.64×10⁴ s)あたりの平均電気量(日平均電気量、 Q)は

$$Q = 8.64 \times 10^4 Q_T / T$$

$$= 8.64 \times 10^4 \sum_{RH=0}^{100} I_{ws}(RH) \cdot f(RH) \quad (4)$$

として与えられる。このように、腐食性の目安となる Q は W_s と RH の分布 $f(RH)$ とによって決まる。

これを以下に図示してみる。まず、湿度の確率密度関数 $f(RH)$ をFig. 8(a)に示す。湿度は5%ごとに分割した。図中左縦軸は1日(=8.64×10⁴ s)を1としたときの累積時間8.64×10⁴・ $f(RH)$ [s]である。この部

Fig.7 Monthly variation of daily average electricity, Q , and RH at some sites in 3 year exposure ('94.10-'97.9).

位に、「海塩」を $W_s = 10^{-2} \text{g/m}^2$ (屋外程度) 付着させたセンサを置いたときの、 I vs. RH の関係は図(b)のようになり、各湿度での電気量($Q(RH)$)は図(a), (b)の縦軸の積($Q(RH) = 8.64 \times 10^4 I_{ws}(RH) \cdot f(RH)$)として図(c)のように与えられ、たとえば $RH = 90\%$ (87.5~92.5%) の場合には図中の斜線部となる。このような計算を0~100%のすべての RH について積算して日平均電気量 Q をえる。このようにして、付着量の定常値と RH 条件とが与えられれば、その部位での Q を算出できることになる。

3.4 日平均電気量の「海塩」付着量および RH との関係

実際工業化住宅内において、直近の1年間('96.10~'97.9)における各暴露部位の日平均電気量(Q)と海塩相当付着量(W_s)の実測値をFig. 9に示す。 Q と W_s との関係におけるプロットは、Site 10の屋外とSite 1, 5, 7とSite 4, 6(Q は検出限界以下)の屋内とに大きく分けられるが、基本的には W_s に対応して Q

Fig.8 Accumulated time or probability of RH at Site 7 (a), ACM sensor output, I , vs. RH relationship with $W_s = 10^{-2} \text{g/m}^2$ (b), and calculated daily average electricity, Q (c).

が増加している。このことは、日平均電気量に対応するであろう普通鋼 (Fe とかく) の腐食速度が、まず海塩相当付着量に依存することを示す。これを図中横軸方向に示す「付着物からみた腐食性」とよぶ。センサ出力が検出されない Site 4・6 における Q は $8.64 \times 10^{-6} \text{C/day}$ 未満であり、これに相当する付着量 (W_s) および普通鋼の腐食速度 $CR(\text{Fe})$ の検出限界は、それぞれ $W_s = 10^{-4} \text{g/m}^2$ および $CR(\text{Fe}) = 2.25 \times 10^{-3} \text{mm/y}$ である。

3.3 で述べたように Q は RH にも依存する。そこで Fig. 3 で示した年間平均湿度が最も高い Site 7 (図中 7 y) と最も低い Site 6 (同 6 y), および月間平均湿度が最も高い '97.8 の Site 7 (同 7 m) と最も低い '97.2 の Site 6 (同 6 m) における RH の実測値に基づき種々の「海塩」付着量における日平均電気量 (Q) を算出し、結果を Fig. 9 中に併せて示した。住宅内部位の Q 値は、月単位では 6 m と 7 m, 年単位では 6 y と 7 y との間にあるであろう。同じ「海塩」付着量であっても、たとえば $W_s = 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{g/m}^2$ では RH の月間での差が最も大きい 6 m と 7 m とでは Q 値に 100 倍弱の違いがあ

Fig.9 Corrosivity of indoor and outdoor sites for a residential house in terms of deposits (W_s) and humidity (RH). Daily average electricity (Q) on the left, obtained from ACM sensor, corresponds to corrosion rates of carbon steel (Fe) and zinc (Zn) on the right ordinates. The indoor sites with lower corrosivities (Q) show lower W_s values, while the outdoor site 10 with the higher corrosivity (Q) has higher W_s value. The Q value depends also on RH . Under given values of W_s shown on the abscissa, Q will vary in the ranges bound by the lines 7 m or 7 y, monthly or yearly highest humidity conditions observed at Site 7, and the lines 6 m or 6 y, monthly or yearly lowest humidity conditions observed at Site 6.

Fig.10 Relationship between corrosion rate of carbon steel, $CR(\text{Fe})$, and daily average electricity, Q , obtained from ACM sensor.

る。この縦軸方向の変動は「 RH 条件からみた腐食性」を表すといえる。ただし、年間での変動範囲 (6 y と 7 y の間) はより狭く、 RH 条件が腐食性へ与える影響はより小さくなる。

3.5 日平均電気量と普通鋼およびめっき亜鉛の腐食速度との対応

静岡県清水市および沖縄県西原町 (琉球大学) での雨の直接あたらないシェルター暴露試験、または実験室での恒湿度試験における炭素鋼板の重量減から求めた普通鋼 (Fe) の腐食速度 $CR(\text{Fe})$ と、同時に暴露した ACM センサで測定した Q との関係^{5), 6)} を Fig. 10 に示す。図中の右上がりの直線は次式で表せる:

$$\log CR(\text{Fe}) [\text{mm/y}] = 0.379 \log Q [\text{C/day}] - 0.723 \quad (5)$$

このような Q と $CR(\text{Fe})$ との関係を Fig. 9 および後述の Fig. 13 の左右の縦軸に表示した。

次に、'94.10 ~ '97.9 の 3 年間暴露しためっき亜鉛の腐食速度を精密化学法によって測定した結果を Table 2 に示す。同表の max (3 y) は実測値中の最大値を mm/y で表したもので、腐食量を試料の暴露期間 3 y ではなく W_s が定常になった期間 ('95.5 ~ '97.9 : 2.42 y) で除して求めた。これらの値は次節の耐用年数の試算では $CR(\text{Zn}) - 1$ とよぶ。なお、'94.10 ~ '96.9 の 2 年間暴露したものの同様の値、max (2 y) も併せて示した。

こうして求めた $CR(\text{Zn})$ を文献値と比較してみる。まず、Fig. 11 は同一の屋外環境に同

Table 2 Corrosion rate for zinc at each indoor site.

Site	measured values for coupons				max (3y)	max (2y)
	g/m ² /3y				10 ⁻³ mm/y	10 ⁻³ mm/y
1	0.274	0.328	0.353	0.694	4.02	4.45
2	0.192	0.241	0.447	—	2.59	—
3	0.172	0.258	0.279	0.372	2.16	—
4	0.296	0.323	0.354	0.703	4.07	6.03
5	0.509	0.775	1.212	1.344	7.79	7.81
6	0.364	0.419	0.424	0.540	3.13	—
7	0.878	1.150	2.194	2.275	13.2	14.0
8	0.291	0.337	0.347	0.416	2.41	3.36
9	0.258	0.280	0.295	0.518	3.00	—

Fig.11 Reported corrosion rates of carbon steel and zinc exposed at outdoor sites.

時に暴露された Fe および Zn の腐食速度^{7)~12)}で、Potter¹²⁾らの海洋環境 (Marine, +印) での結果を除けば、両腐食速度の関係は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \log CR(\text{Fe}) [\text{mm/y}] \\ = 1.438 + 1.062 \log CR(\text{Zn}) [\text{mm/y}] \end{aligned} \quad (6)$$

また、(5), (6)の両式より次式をえる：

$$\begin{aligned} \log CR(\text{Zn}) [\text{mm/y}] \\ = 0.357 \log Q [\text{C/day}] - 2.035 \end{aligned} \quad (7)$$

同様の両軸目盛りの Fig.12 には、

(a) 野木の住宅内各部位における、ACM センサ出力からうる Q と(5)式の関係から求めた CR(Fe) および Table 2 に示した CR(Zn) の実測最大値、max (3y)、

および

(b) 山陰地方の 6 戸の軽量鉄骨住宅内のそれぞれ 7 部位および屋外 (⊙) に設置して 3 年経過した普通鋼・亜鉛めっき鋼板試片で求められた CR(Fe)・CR

Fig.12 Corrosion rates of carbon steel (Fe) and zinc (Zn) exposed for three years in prefabricated residential houses with respect to those exposed outdoor as shown in Fig. 11.

(Zn)¹³⁾、

を記入した。また、右上がりの直線は Fig.11 中の回帰線 ((6)式) である。Fig.11 中のデータはいずれも屋外でのそれであるが、値の小さいものほど暴露地の降雨量が少なくなるなど屋内の条件に近づくのであろう。Fig. 9 および後述の Fig.13 の右縦軸に目盛った CR (Zn) は、(7)式を用いて Q から、あるいは(6)式を用いて CR(Fe) から求めた後述の CR(Zn)-2 である。

3.6 耐用年数の試算

住宅内各部位ごとの亜鉛めっき鋼板の耐用年数を試算した結果を Table 3 に示す。鋼材の許容腐食量は文献 14)に従い、文献 15):「低層建築物の構造耐力性能評価に関する技術規定 (鉄鋼系)」に規定される値—構造耐力上主要な部分に用いる鋼材の厚さ 2.3 mm—の 10 % を開断面における暴露面数 2 で除した値 0.23 mm/2 とした。また、Zn については同じく文献 14)で「付着量の 90 %が腐食損失した時をもって耐用限界に達する」と規定されることより、所要めっき付着量の 90 %を許容腐食量とした。ここでの所要めっき付着量または厚さは、日本建築センターの評価¹⁾に定める部位 (d) ごとの値 (e) を採った。同表において

a: Ws が定常になった'95.5~'97.9 の ACM センサ出力の日平均電気量 Q,

b: Q から(5)式を用いて求めた CR(Fe)

であり、上述の腐食許容量 0.23 mm/2 を CR(Fe) で除して鋼材による寿命期待値 f をえる。また CR(Zn)

Table 3 Life expectancy estimated as corrosion allowance —5% of minimum thickness (2.3 mm) required for steel member and 90% of specified coating thickness for zinc —divided by corrosion rate of carbon steel and zinc, respectively.

		a	b	c	c'	d	e		f	g	g'	h	h'
		daily average electricity, Q	CR(Fe)	CR(Zn)*		site-class (d) and corresponding minimum thickness (e) of Zn specified by BCJ ¹⁾	life(Fe)		life(Fe)	life(Zn)		total life	
				-1	-2					-1	-2	-1	-2
		C/day	mm/y	mm/y			gm ⁻²	μm	0.23mm/2b	0.9e/c	0.9e/c'	f+g	f+g'
Site									y	y		y	
1	Wall cavity	4.5E-5	4.3E-3	4.02E-5	2.6E-4	③	75	10.5	27	235	36	262	63
2		3.0E-5	3.7E-3	2.59E-5	2.3E-4	③	75	10.5	31	365	42	396	73
3		2.8E-5	3.6E-3	2.16E-5	2.2E-4	③	75	10.5	32	438	43	470	75
8		3.6E-5	3.9E-3	2.41E-5	2.4E-4	③	75	10.5	29	392	40	421	69
9		4.1E-5	4.1E-3	3.00E-5	2.5E-4	③	75	10.5	28	315	38	343	66
4	Ceiling	<0.86E-5	<2.3E-3	4.07E-5	<1.5E-4	③	75	10.5	50<	232	65<	282<	115<
6		<0.86E-5	<2.3E-3	3.13E-5	<1.5E-4	③	75	10.5	50<	302	65<	352<	115<
5	Floor	5.8E-5	4.7E-3	7.79E-5	2.8E-4	①	110	15.4	24	178	49	202	73
7		9.3E-5	5.6E-3	1.32E-4	3.4E-4	①	110	15.4	21	105	41	126	62
10	Outdoor	5.4E-3	2.6E-2	—	1.4E-3	—	—	—	—	—	—	—	—

* CR(Zn)-1 : maximum value measured for coupons (Table 2) ; CR(Zn)-2 : estimated value based on Q value(a) and the equation [7]

については、

c: Table 2 に示した実測の最大値, CR(Zn)-1

c' : (6)式により (b) の CR(Fe) から算出した推定値, CR(Zn)-2

(以後, CR(Zn) には実測値については “-1” を, 推定値については “-2” を付記する)

これらと上述の e の値とにより, めっき亜鉛による寿命期待値 g, g' をえる。

なお, メンテナンス可能対象として建築センターの規定がない屋外 (Site 10) については, Q から(5)・(7)式を用いて求めた CR(Fe)・CR(Zn)-2 の値のみを Table 3 に記載するととどめた。

Zn の腐食速度として, 実測最大値 CR(Zn)-1 (c) を採った場合の寿命 (g) は, いずれの部位においてもより大きな値になる。より小さい値を与える CR(Zn)-2 (c') を用いた場合の寿命 (g') は, 天井・小屋裏 (Site 4, 6) で 65 年超と比較的大きいほかは, 壁内の 5 か所の部位で 36~43 年, である。以上の部位は建築センターの区分で ③ に当たる。これらより腐食性が厳しいとされる床下 (Site 5, 7) —同上の部位区分 ①—においても所要めっき厚を増すことにより 49・41 年と, 同レベルの寿命が確保されていることがわかる。結局, めっき亜鉛と下地鋼材とからなる亜鉛めっき鋼材としての寿命期待値は, CR(Zn)-2 (c') による評価 (h') で 60 年以上, CR(Zn)-1 (c) による評価で 120 年以上 (h) となっている。

以上の試算は, 同センターの規定する必要限のめっき仕様を仮定した場合の値であって, 実際に本報で調査した野木の工業化住宅のようにこれより上位の仕様が採用されていれば, 寿命期待値はさらに大きくなることはいうまでもない。

3.7 住宅内環境の腐食性

Table 3 のように得られた腐食速度を文献 14) の値と比較し, 結果を Table 4-1 に示す。まず, 屋外 (Site 10) における腐食速度は, Fe および Zn についてそれぞれ 2.6×10^{-2} および 1.4×10^{-3} mm/y である。これらを Table 4-1 中 ② に示した。文献 14) による対応する値は, Table 4-1 中 ②' に示す表面無処理鋼材の年間腐食量 $\alpha_s = 5 \times 10^{-2}$, および標準地域における亜鉛めっきの年間腐食量 $\alpha_{zn} = 11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{y}) = 1.5 \times 10^{-3}$ mm/y である。これらと比較して Site 10 の CR(Fe) は約 1/2 と小さく, CR(Zn)-2 はほぼ同じである。

次に, 屋内における最も高い腐食速度は Site 7 でえられ, Table 4-1 中 ① に示すように, Fe については 5.6×10^{-3} mm/y, Zn については 1.3×10^{-4} (-1) または 3.4×10^{-4} (-2) mm/y である。先に述べたように, 屋外 (Site 10) ② においては実測値 (-1) がえられていないため (6) 式から推定した値 (-2) を用いた。これらの屋内/屋外の比 (同 ①/②) は Fe で約 0.22 および Zn で 0.093 または 0.24 で, 文献 14) での対応する比, 露出度係数 BX 3 (非露出/常時乾燥)/BX 4 (半露出/湿潤・乾燥の繰り返し) = $1/6 \approx 0.17$ (Fe) および $1/8 \approx 0.13$

Table 4-1 Comparison of corrosion rate between outdoor and indoor sites for carbon steel (Fe) and zinc (Zn).

	Corrosion rate (mm/y)			ratio	
	①indoor (Site 7)	②outdoor(Site 10)	②' 14)	①/②	BX3/BX4 ¹⁴⁾
Fe	5.6×10^{-3}	2.6×10^{-2}	5×10^{-2} (α_s)	0.22	1/6=0.17
Zn	1.3×10^{-4} (- 1)	1.4×10^{-3} (- 2)	1.5×10^{-3} (α_{Zn})	0.093	1/8=0.13
	3.4×10^{-4} (- 2)			0.24	

Table 4-2 Comparison of SO₃ absorbed in PbO₂ between outdoor and indoor sites.

mgSO ₃ /100cm ² /day		ratio	
①indoor (Site 1)	②outdoor(Site 10)	①/②	Fukuda et.al. ¹⁷⁾
0.001	0.026	1/26	1/20

(Zn) にそれぞれおおよそ等しい。

長沼ら¹⁶⁾ は、Fe・Zn など各種金属の腐食速度と海塩粒子飛来量との倉庫屋内/屋外の比が、いずれも約 1/10 であることを報告している。Fig. 6 (3.2) に示した屋内/屋外の比, 1/10, はこれにはぼ等しく, 汚染物質の堆積速度を調べた福田ら¹⁷⁾ による固体化合物中 Cl⁻ の屋内/屋外比, 約 1/20, よりやや大きい。なお, 同じ報告¹⁷⁾ において PbO₂ で捕集される SO₃ の堆積速度の屋内/屋外比, 約 1/20, については, Table 4-2 に示す実測値, 約 1/26, と近い値となっている。Zn の腐食を最も促進する亜硫酸ガス濃度は, mgSO₃/100cm²/day で表して工業地帯・都市部で 0.10~0.30, 山間部の最も低い箇所 で 0.000~0.001 と報告¹⁸⁾ されている。Table 4-2 によれば, 屋外の Site 10 での同濃度 0.026 は, 同上の報告による筑波田園部 (0.023) と琵琶湖近くの山間部 (0.027) との中間に位する。これに対し屋内の Site 1 では 0.001 で, 上述の山間部など最も低い箇所と同程度の低い値を示している。

以上のように, 住宅内環境は付着物量が少ないことに対応して腐食速度が低く, 現段階でもかなり穏和な環境にあることがわかる。しかし, Fig. 3 でみたように床下や壁内部の湿度は屋外より高い。もし, 床下・壁内などの構造躯体内部を付着物を持ちこむことなくより低い湿度に制御できれば, 低湿度と極低付着物量との相乗効果によるさらなる長期健全性を達成できよう。

3.3 の手法により, 相対湿度 RH が一定値に保たれると仮定して計算した日平均電気量 Q と海塩相当付着量 Ws との関係を Fig. 13 に示す。先に Fig. 9 に示した Site 10 の (Q, Ws) 値のプロットが Fig. 13 中で占める位置から判断すると, 同 Site の湿度条件が対応する一定湿度 (相当定湿度) はおよそ RH=90 % であり,

同様に屋内部位 (Site 1, 5, 7) のそれも RH=80~90% に対応する。

Fig.13 によると, 屋内の Ws 値をやや高め の 10⁻³ g/m² と仮定する場合でも, RH を 50 % 以下に制御することにより ACM センサの出力は検出限界以下にすることができる。すなわち Table 3 でみて Site 4, 6 (天井裏, 小屋裏) に相当する穏和な環境腐食性一同表でみて 65 年を超え (g')・約 200 年 (g) というめっき亜鉛の寿命一が期待できる。

4. ま と め

ACM 型腐食センサを実際工業化住宅内各部位に暴露し, 3 年間経過時点 で腐食性評価をまとめた。

- 1) 住宅内部位ごとの腐食性の尺度としての ACM センサ出力の日平均電気量 Q は, 相対湿度 RH と海塩相当付着量 Ws—ACM センサ出力の対 RH 特性

Fig.13 Relationship between daily average electricity, Q, and deposited sea salt, Ws, calculated under constant RH condition.

から決定できる一とに依存する。

- 2) Q と炭素鋼の腐食速度 $CR(Fe)$ との間にはよい対応関係があり, Q から $CR(Fe)$ を推定できる。このことは, 精度はやや劣るがめっき亜鉛の腐食速度 $CR(Zn)$ についてもあてはまる。
- 3) 屋内での腐食速度は, 鋼材・めっき亜鉛とも屋外の $1/5$ と低く, これは付着物量 Ws が屋内で少ないことと対応している。亜鉛の腐食速度を大きく促進する硫酸化物量も屋内では $0.001\text{mg}/100\text{cm}^2/\text{day}$ と非常に少なく, 屋外の $1/26$ であった。
- 4) 普通鋼・めっき亜鉛の腐食速度と日本建築センターが規定するめっき厚さなどに基づいて, 鋼材とめっき亜鉛とによる腐食寿命期待値を部位ごとに試算した。
- 5) 屋内各部位において, 付着物量と湿度とをさらに低減することにより, より長い寿命が期待できる。例えば, 海塩相当付着量 Ws が $10^{-3}\text{g}/\text{m}^2$ のとき, 相対湿度 RH を 50% 以下に保てば, ACM センサの検出限界以下の穏和な環境腐食性が達成できる。

謝 辞

本研究は, (財)日本建築センターの平成6年度研究助成に基づき実施した。実地測定において同センター評定部住宅課長金岡宏幸氏, (社)プレハブ建築協会幹事社(当時)の積水ハウス株式会社阿蘇太美夫氏・住田安司氏のご尽力を賜った。記して深謝する。

(Manuscript received April 22, 1998;
in final form July 31, 1998)

文 献

- 1) 日本建築センター: ビルディングレター '96, 3, 37 (1996).
- 2) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原 正, 兒島洋一, 辻川茂男, 押川 渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人: 材料と環境, **43**, 550 (1994).
- 3) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原 正, 辻川茂男, 押川 渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人: 材料と環境, **44**, 218 (1995).
- 4) 松本雅充: 第111回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会, p.26 (1996).
- 5) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原 正, 辻川茂男: 第111回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会, p.1 (1996).
- 6) 押川 渡, 糸村昌祐, 篠原 正, 辻川茂男: 第111回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会, p.7 (1996).
- 7) 中村 素: 防蝕技術, **12**, 55 (1963).
- 8) 堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計: 防蝕技術, **16**, 153 (1967).
- 9) 中村 素, 尾間一彦, 菅野照造, 平井陽一: 防蝕技術, **16**, 467 (1967).
- 10) ISO/TC156/JWG 4, 外川靖人: 第36回腐食防食討論会講演集, p.217 (1989).
- 11) ISO/TC156/JWG 4, 外川靖人, 伊藤哲司: 第38回腐食防食討論会講演集, p.157 (1991).
- 12) F. C. Porter: "Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys", Marcel Decker Inc., New York, p.101 (1994).
- 13) 石本徳三郎, 宮下 優: 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.1183 (1987).
- 14) 建設大臣官房技術調査室監修, (財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編: 「鉄骨造構造物の耐久性向上技術」, 技報堂出版 (1986).
- 15) 日本建築センター: ビルディングレター '97, 9, 220 (1997).
- 16) 長沼 仁, 大黒 紘: 第6回防錆技術発表大会講演予稿集, p.104 (1986).
- 17) 福田芳雄, 福島敏郎, タン・チェン・ミン, 吉原一紘, 藤原 純: 表面技術, **41**, 1059 (1990).
- 18) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (IX), p.5 (1989).