ACM センサによる環境腐食性評価

篠原 正*, 元田 慎一**, 押川 渡***

* 物質・材料研究機構 材料基盤情報ステーション

** 東京海洋大学

*** 琉球大学工学部

Evaluation of Corrosivity of Atmosphere by ACM Type Corrosion Sensor

Tadashi Shinohara*, Shin-ichi Motoda** and Wataru Oshikawa***

* Materials Information Technology Station, National Institute for Materials Science

** Tokyo University of Marine Science and Technology

*** College of Engineering, University of the Ryukyus

An ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) type corrosion sensor, consisting of a Fe-Ag galvanic couple was developed and applied for the evaluation of corrosivity of atmospheric environments. The sensor was designed considering mass-production and good reproducibility of results, making it convenient for long-term corrosion data acquisition. Besides the sensor output, I , temperature, relative humidity, RH , were also recorded by a microcomputer. By analyzing the magnitude and time variation of I , the occurrence and duration of rain, dew and dry periods, T_{rain} , T_{dew} and T_{dry} , respectively, could be distinguished and determined. And by referencing to the empirical I - RH calibrating curve, the amount of deposited sea salt, Ws , could also be estimated. It was also found that the corrosion loss could be estimated in the indoor site by analyzing sensor output. Corrosivities of some kinds of exposure sites were evaluated by using the ACM sensor. It was also demonstrated that this ACM sensor could be applicable to the evaluation of corrosivity of atmosphere for stainless steels.

Key words : atmospheric corrosion, monitoring, ACM sensor, carbon steel, stainless steel

1. はじめに

金属材料の大気腐食は薄い水膜下で進行する。実際には、腐食は降雨時あるいは結露時などのぬれ期間に成長し、乾き期間には停止する。このため、腐食挙動は、金属全体が常に水溶液と接している没水環境中とは異なる。このような非没水環境下での腐食に対しては、通常の電気化学的手法が適用できず、従来からガルバニック対が適用されてきた。これらは、Dew Detector¹⁾, ACM²⁾ (Atmospheric Corrosion Monitor), Time-of-Wetness Meter³⁾ あるいは Moisture Sensor⁴⁾ などと呼ばれてきたが、一般的には ACM と呼ばれる⁵⁾ ので、以下ではこの種のセンサを ACM 型腐食センサと呼ぶ。

著者らはこれまで、Fe-Ag 対からなる ACM 型腐食センサを開発し、これを海洋性大気環境から工業化住宅内環境までの広い範囲の環境に暴露し、付着物を中心に、各々の環境の腐食性評価を試みてきた⁶⁾⁻⁹⁾。腐食防食協会においては、1995 年に『ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ実用化研究会』が発足し、大気腐食評価法研究会 (2003 年度からは大気腐食評価法分科会) に至る 3 期 6 年間にわたって、この ACM 型腐食センサの実用化あるいは同センサによる種々の大気環境の腐食性評価法について検討してきた。この成果によって、

センサについてはすでに当協会腐食センターによって認定され、市販されている。解析ソフトについても同協会の認定版として出版される運びとなった。本稿では、水の役割を中心に大気腐食の特徴を解説するとともに、ACM センサおよびこれによる環境腐食性評価について解説し、大気腐食を理解する上での一助としたい。

2. Fe/Ag-対 ACM センサ

著者らが開発した Ag/Fe-対 ACM センサ (以下ではこれを単に ACM センサとよぶ) の構成を図 1⁶⁾ に示す。これは、腐食情報を長期にわたって採取できる—センサの寿命が数カ月程度であっても、これを更新することで長

図 1 Ag/Fe-対 ACM 型腐食センサの構成

* 〒305-0047 つくば市千現 1-2-1 (1-2-1 Sengen, Tsukuba, 305-0047 Japan)

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

*** 〒903-0213 沖縄県西原町千原 1 (1 Sembaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan)

図2 種々の量の海塩を附着させた場合の ACM センサ出力 (I) と RH との関係

期にわたる腐食情報の採取を可能にする—ことを目的とし、量産性および再現性に留意したものである。

新規に作製したセンサ表面に所定の量 ($10^{-4} \sim 10^0$ g/m²) の海塩を附着させ、恒湿槽中で測定した各海塩附着量におけるセンサ出力 (I) と湿度 (RH) との関係を図2に示す。海塩附着量 (W_s) が 10^{-4} g/m² の場合には、 $RH=90\%$ においても、0.1 nA を越える出力は検出されなかった。以後は、 I および RH の実測値とこの校正曲線を用いて、海塩相当附着量 (以下、「海塩」附着量と記す) を推定した。

3. 屋外での環境腐食性

3.1 めれ時間

ACM 型腐食センサを、『比較的穏やかな海洋性大気環境』である東京海洋大学清水臨海実験実習所 (静岡県静岡市清水：以下、清水)、『火山灰によって腐食が加速される海洋性大気環境』である鹿児島県工業技術センター (鹿児島県隼人町：以下、隼人)、『海塩によって腐食が加速される海洋性大気環境』である琉球大学工学部 (沖縄県西原町：以下、西原) および日本ウエザリングテストセンター宮古島試験場 (沖縄県宮古郡上野村：以下、宮古) および『田園地域』にある物質・材料研究機構 (茨城県つくば市：以下、つくば) の5カ所に暴露した。

図3に示したように、ACM センサ出力の大きさと経時変化は降雨時と結露時とで異なるため、結露・乾燥および降雨の各期間を検出できる。各暴露地における結露時間 (T_{dew})・乾燥時間 (T_{dry}) および降雨時間 (T_{rain}) を求め、結果を図4に示す。1年 (8760 h) について見積もると、各暴露地でのめれ時間 (Time of wetness, $TOW = T_{\text{dew}} + T_{\text{rain}}$) は、清水：6570 h (75.0%)、隼人：5530 h (63.1%)、宮古：7550 h (86.2%)、西原：7200 h (82.2%)、およびつくば：5230 h (59.7%)、である。

ところで、ISO によると、めれ時間 (TOW) は「気温 0°C 以上、湿度 80% 以上の継続時間」と、温度と湿度という気象条件だけで決まるとしている。すなわち：

$$TOW(\text{ISO}) = T_{\text{dew}}(\text{ISO}) + T_{\text{rain}}(\text{ISO})$$

ACM センサで測定した場合のそれを

$$TOW(\text{ACM}) = T_{\text{dew}}(\text{ACM}) + T_{\text{rain}}(\text{ACM})$$

とすると、降雨期間では $RH \geq 80\%$ であって、

図3 ACM センサ主力の経時変化例

図4 各暴露地における結露時間 (T_{dew})・乾燥時間 (T_{dry}) および降雨時間 (T_{rain})

$T_{\text{rain}}(\text{ACM}) = T_{\text{rain}}(\text{ISO})$ としてよく、従って $TOW(\text{ISO})$ と $TOW(\text{ACM})$ との差は $T_{\text{dew}}(\text{ISO}) = T_{\text{dew} + \text{dry}}(RH \geq RH_{\text{th}} = 80\%)$ と $T_{\text{dew}}(\text{ACM})$ との差となる。図5は清水の1年 (1993年) と1カ月 (同年2月) におけるめれ・乾燥期間 ($T_{\text{dew} + \text{dry}}$: ○) での湿度分布と、結露期間 (T_{dew} : ●) での湿度分布を表したものである⁸⁾。図中には、ISO で規定されている $RH_{\text{th}} = 80\%$ を実線で、また、 $T_{\text{dew}}(\text{ACM}) = T_{\text{dew} + \text{dry}}(RH \geq RH_c)$ となる湿度 RH_c を破線で示した。1年間で見ると $RH_c = 78\%$ であって ISO の値 $RH_{\text{th}} = 80\%$ とほぼ等しいが、2月では $RH_c = 63\%$ とかなり低い。また、隼人および宮古における1年間での RH_c はそれぞれ 58% および 60% であった (図6)⁷⁾。このように、ISO 方式を満たす一定の RH_{th} は 80% ではない

図5 清水の1年(1993年, (a))と1カ月(同年2月(b))におけるぬれ・乾燥期間($T_{\text{dew}+\text{dry}}$:○)と結露期間(T_{dew} :●)での湿度分布

図6 隼人(a)および宮古島(b)の1年におけるぬれ・乾燥期間($T_{\text{dew}+\text{dry}}$:○)と結露期間(T_{dew} :●)での湿度分布

し、80%以外にも存在しない。

3.2 付着海塩量

清水および西原において、5日以上降雨がなかった期間を選び出し、そこでの海塩付着量の経時変化例を図

図7 清水および西原における海塩付着量の経時変化例

表1 種々の環境での「海塩」付着量

「海塩」付着量の対数, $\log Ws (\text{g/m}^2)$	
-4	-3
-2	-1
0	1
2	
静岡県静岡市清水	
百葉箱 屋根上	
海面上50cm下向き	
沖縄県西原町	
屋根上	
南面90° (屋根下)	
沖縄本島東海岸	
屋根上	
沖縄本島西海岸	
屋根上	
沖縄県宮古島	
屋根上	
鹿児島県隼人町	
屋根上	
茨城県つくば市	
屋根上	
栃木県野木町	
屋内 屋外(軒下)	
(1998)	
屋内 屋外(軒下)	
(1999~)	
海水散布	
10 ⁻³ 海水 10 ⁻² 海水 海水	
5% NaCl水溶液	

7⁶⁾に示す。清水では3~4日で一定になり、その定常値は $1.3 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2$ である。西原では、清水より早く、1~2日で一定になる。また、その定常値は $1.9 \times 10^{-1} \text{ g/m}^2$ と清水の約10倍である。

このように、海塩はいったん雨で洗い流されても、清水ではおよそ3日で回復する。そこで、各暴露地において3日以上雨が降らなかった期間を検出し、その3日目以降の定常的付着海塩量(Ws)を求めた結果を表1に示す。直接雨がかかる条件下(屋根上)での Ws は、『海塩によって腐食が加速される海洋性大気環境』である沖縄県内で $10^{-1} \sim 3 \times 10^0 \text{ g/m}^2$ 、『比較的に穏やかな海洋性大気環境』である清水で $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^2$ 、『田園地域』にあるつくばで $3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2$ である。清水においても、洗浄作用が生じないように、内海の海面上50cmの高さに下向き(海面向き)におくと、沖縄での屋根下に匹敵する 10^1 g/m^2 以上にもなることがある。

一方、塩水散布では、海水では 10 g/m^2 、5%NaCl水溶液では 1 g/m^2 の「海塩」が付着したとみなせる。同

様にして 100 分の 1、1000 分の 1 に希釈した海水を散布した時の付着海塩量は、それぞれ $10^{-1} \sim 10^0 \text{ g/m}^2$ 、 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ g/m}^2$ である。

4. 直接雨が当たらない環境での腐食性評価

4.1 ACM センサ出力と鉄および亜鉛の腐食速度との関係¹¹⁾

炭素鋼試片と ACM センサとを、清水および西原の雨が直接当たらない所に 1~12 カ月間暴露した（シェルター暴露試験）。また、海水を種々の濃度に希釈したものを炭素鋼試片および ACM センサに噴霧して、所定の量の海塩を付着させた後、これらを恒湿槽中に 1 カ月暴露した（恒湿槽内暴露試験）。また、上述と同様にして所定の量の海塩を付着させた QCM (Quartz Crystal Microbalance) および ACM センサを恒湿槽中に暴露し、QCM によって求められる微小な鉄の腐食速度と ACM センサ出力とを比較した。これらの暴露試験で得られた腐食速度と日平均電気量 (Q) との関係を図 8 に示す。QCM の適用を必要とするような穏和な環境から、西原のような厳しい環境まで、腐食速度と日平均電気量 (Q) との関係はほぼ 1 本の直線に乗る。このことは、海塩付着量や湿度条件などの環境条件によらず、 Q から腐食速度を推定できることを示す。なお、ACM センサの検出限界 $2 \mu\text{m/y}$ は QCM のそれ $0.4 \mu\text{m/y}$ には及ばないものの、かなり高い感度をもっていることが注目される。

ACM センサ表面に種々の量の「海塩」を乗せ、所定の湿度環境に置いたとすると、図 2 の I - RH 関係で求められるセンサ出力が検出されるはずである。これを日平均電気量 (Q) に換算し、海塩相当付着量 (Ws) との関係として図 9 に示す。また、図中右縦軸に目盛ったのは、図 8 から求めた、左縦軸の Q に対応する鉄の腐食速度である。 RH と Ws の大まかな値がわかれば校正曲線よりセンサ出力 (I) あるいは Q が求まり、これと図 9 とから鉄の腐食速度が推定できる。実際の環境では RH が変動するが、長期にわたる腐食量は図 9 から得られる腐食速度の累積であるから、湿度分布の実測データから推定できる。

4.2 住宅内環境の腐食性評価⁹⁾

実際工業化住宅の各部位に ACM センサを設置し、各

図 8 種々の環境での腐食速度と ACM センサ出力の日平均電気量 (Q) との関係

部位ごとの環境腐食性を調べた。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 センサの暴露を開始した。暴露位置は屋内 9 カ所と屋外 1 カ所の 10 カ所の部位で、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・湿度センサも併せて設置した。

屋外 (Site 10) では、暴露開始後およそ 3 カ月後の '94.12 から、また Site 4, 6, および 8 を除き、6 カ月後の '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 まで出力は $10^{-4} \mu\text{A}$ 以下であったが、Site 4 については、暴露開始後 4 年 10 カ月後の '99.7 になってセンサ出力が検出されるようになった。

Site 1 における暴露開始後 3~6 年目にあたる '97.10 から 3 年間にわたる海塩相当付着物量 Ws の経時変化を求め図 10 に示す。暴露開始後 4 年目の '97.6 までは暴露開始後およそ 6 カ月目から 3 年目まででみられた Ws の

図 9 種々の湿度条件下での日平均電気量 (Q) と海塩相当付着量 (Ws) との関係

図 10 暴露開始後 3~6 年における「海塩」付着量

定常値⁹⁾とほぼ同等であったが、その後、漸増しはじめ、5年目の'99.6で2回目の定常的な値となった。屋外(Site 10)も同様の变化であることから、外部の飛来塩分量が増加した結果、屋内のWsも増加したことが考えられる。この地域での飛来塩分量が増加する理由については現在調査中である。しかしながら、工業化住宅でみると、屋内のWsは屋外の1/10程度と極めて少ない。(表1)

ACM センサ出力から求めた日平均電気量Qの経時変化を図11に示す。Wsと同様、暴露開始後3年目までは定常的な値をとりながら7~9月の夏期で大きく10~3月の冬期で小さいという周期的な変化を繰り返す。Qも4年目から漸増しはじめ、その変化は図10のWsに対応する。

以上の結果から、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、その結果を表2に示す。試算の方法については文献9)を参照されたい。表2より、6年間の寿命期待値は暴露開始当初3年間での結果からわずかに小さくなっている。これはWsの増加に伴うセンサ出力の増大によるものである。しかし、亜鉛の腐食速度(CR(Zn))の高いSite 5, 7であっても、日本建築センタ

図11 '97.10~'00.8における日平均電気量Qの経時変化

ーの規定¹⁰⁾により所要めっき厚を増すことで、依然、他の部位と同じレベルの寿命が確保されている。上で述べたように、4年10カ月の暴露により、Site 4ではじめて有意なセンサ出力が検出されるようになる。その寿命期待値(g)は98年と床下Site 5の61年よりも長い。これらの試算は、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るので、これより上位の仕様を採用されている実際の工業化住宅では寿命期待値はさらに大きくなるのは言うまでもない。

5. ステンレス鋼の発錆への適用

5.1 ステンレス鋼の発錆環境条件の検討¹²⁾

本ACM型腐食センサおよび種々のステンレス鋼(410, 430, 304, 22Cr-0.8Mo鋼)試片を国内の2カ所の海洋性大気環境に暴露した。ACMセンサ出力とRHとの関係をもとに各Site・部位および暴露期間について半日ごとの付着海塩量(Ws)を求め、このWsが半日間で変化しないとして、Wsと10分ごとのRHとを、Wsの対数の1桁分を10等分、RHを20~100%で16等分したメッシュ内に割り振った。こうして、暴露期間内で所定の頻度以上出現するメッシュ(Ws, RH)を取り出し、『発錆有り』の場合にはメッシュを“×”, そうでない場合は“○”とする。ここで、

- (1) 『発錆有り』(×)と『発錆なし』(○)の重ね合わせは、すべて『発錆なし』(○)になる。
- (2) 工学的な考察により、一定のRHで高Ws側に『発錆なし』(○)がある場合はそれより低いWs条件での『発錆有り』(×)は『発錆なし』(○)と判定する。

という条件により各解析結果を重ね合わせてWsとRHとによる発錆領域を求めた。

304鋼についての解析結果を図12に示す。発錆条件には臨界値—Ws*: Wsの下限値, RH*: RHの上限値—が存在し、304鋼についてはWs>Ws*=4×10⁻²g/m²およびRH<RH*=43%, である。同様の解析を行って求めた各種ステンレス鋼の発錆条件を図13に示す。鉄の大

表2 6年間の腐食速度から試算した腐食寿命期待値

		a	b	c	d	e		f	g	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 (Zn)	total life
		C/day	mm/y			gm ⁻²	μm	0.23mm/2b y	0.9e/c y	f+g y
Site										
1	Wall cavity	6.2E-5	4.8E-3	2.9E-4	③	75	10.5	24 (27)	33 (36)	57 (63)
4	Ceiling	1.4E-5	2.7E-3	1.7E-4	③	75	10.5	42 (50<)	56 (65)	98 (115<)
5	Floor	9.6E-5	5.7E-3	3.4E-4	①	110	15.4	20 (24)	41 (49)	61 (73)
7		1.0E-4	5.8E-3	3.5E-4	①	10	15.4	20 (21)	40 (41)	60 (62)
10	Outdoor	6.7E-3	2.8E-2	1.5E-3	-	-	-	-	-	-

* CR (Zn)-1: 亜鉛めっき鋼板試料の腐食速度
CR (Zn)-2: Qから算出した腐食速度, ()は3年間での結果

図 12 各種ステンレス鋼の発錆条件

図 13 304 の発錆条件の解析結果

気腐食については、相対湿度 (RH) が高いほど水膜厚さが増し、腐食性が厳しくなるのに対して、ステンレス鋼においては、図 13 に示すように低湿度側で発錆し、附着物だけでなく湿度分布も考慮しなければならない。

5.2 実構造物軒天部の発錆状況調査¹³⁾

幕張メッセ国際展示場 (千葉県千葉市美浜区: 東京湾岸から約 500 m) の軒天パネルに ACM 型腐食センサおよびステンレス鋼試片を設置し、2 年間 (1994 年 11 月～1996 年 10 月) にわたって附着海塩量の実時間測定および発錆状況の調査を行った。Ws の実測例を図 14 に示す。図中破線は ACM センサを交換した日である。海側 (南西: SW) の部位 (Site1) では、'95.4.18～6.22 の暴露期間での Ws が多く、中でも '95.4.23 および 4.24 のそれはそれぞれ 2.1 および 2.4 g/m² に達した。1996 年版 気象年鑑¹⁴⁾ によると、'95.4.23 には「千葉で最大瞬間風速 37.5 m/s (SW) の突風が吹き、隣接する千葉マリンスタジアムで予定されていたプロ野球が中止になった」という。この強風により多量の高塩が飛来し、Ws が 1 g/m² 以上になったものと考えられる。2 年間で Ws が 22Cr-0.8Mo 鋼の臨界 Ws (0.5 g/m², 図 13) を越え、22Cr-0.8Mo 鋼試片が発錆したのは、上記暴露期間の海側の部位だけであった。また、連続暴露試片においても、

図 14 実構造物軒天部での海塩付着量 (W_s) の実測例

この発錆は拡大せず、また新たな発錆が生じることもなかった。

このように、Ws の経時間変化を調べることによって、海塩が多く付着し、ステンレス鋼が発錆する可能性が高い日を特定できる。

6. 鉄以外の金属を基板とした ACM センサ¹⁵⁾

本 ACM センサの特徴は、絶縁層およびカソード (Ag ペースト) を後から印刷・付与させるので、基板であるアノードを種々選択できることである。ここではセンサ基板に亜鉛めっき鋼板を用いた Zn/Ag- 対センサ (センサ基板: クロメート処理なしの亜鉛めっき鋼板 (Z27, $t=0.8$ mm)) およびアルミニウム板を用いた Al/Ag- 対センサ (1085 材, $t=1.0$ mm) について述べる。これらに所定の量の海塩を付着させ、恒湿度槽中で I - RH 関係を求めた結果を図 15 に示す。図 (a) は Zn/Ag センサにおける結果である。破線で示した Fe/Ag センサの出力特性と比較すると、附着海塩量 Ws が $Ws \geq 0.1$ g/m² では Zn/Ag センサの出力が高いものの、 $Ws=0.01$ g/m² で両者の差はほとんどなくなり、0.001 g/m² ではセンサ出力は Fe/Ag センサのそれよりも低くなる。図 (b) は Al/Ag センサの場合である。Fe/Ag センサと比較すると、Ws が 0.1 g/m² 以上では Al/Ag センサの出力が高い。さらに、

図 15 ACM センサ出力 I と相対湿度 RH との関係
(a) Zn/Ag センサ, (b) Al/Ag センサ

図 16 結露による I の経時変化 図 17 図 16 の期間における I - RH の関係

$W_s = 0.01 \text{ g/m}^2$ および 0.001 g/m^2 では出力にばらつきがあり 1 本の曲線では表示できなかった。そのため 8 回測定した最大値と最小値の範囲を図のような幅広線で示している。 $W_s = 0.01$ および 0.001 g/m^2 で比較すると、Fe/Ag センサの出力よりも低くなる場合があり、このような W_s による差異は龍岡らの実環境での測定結果¹⁶⁾と一致する。

Zn/Ag-対 ACM センサの特性を、比較的厳しい海洋性大気環境として東京海洋大学清水臨海実験実習所の試験海面に浮かべた筏上で測定した。センサ出力の経時変化例を図 16 に示す。測定期間中に降雨はなかったためセンサ出力は結露による出力である。Fe/Ag と Zn/Ag センサの出力を比較すると、最大出力にはほとんど差異がみられないのに対し、最低出力は Fe/Ag センサの方が低く、日中の RH の低下により出力が検出限界である 0.1 nA を下回って乾燥期間と判定される時間がある。この期間で I - RH の関係としてプロットし、その結果を図 17 に示す。低 RH 域で Zn/Ag センサ出力が高いものの、両センサとも RH に依存して出力が変化している。Zn/Ag センサの出力は Fe/Ag センサのそれよりも変動幅が小さく、この Zn センサの出力が安定していることは同センサの特性を調べた川口らの結果¹⁷⁾と一致する。

図 18 は屋外のシェルターで雨がかりのない部位で測定した両センサ出力の経時変化である。ここでは海上筏

図 18 シェルター暴露試験でのセンサ出力の経時変化例

図 19 Fe/Ag センサと Zn/Ag センサとで測定した W_s の比較

とは逆に Zn/Ag センサの出力が Fe/Ag センサのそれを下回るが、この結果は図 15 に示した実験室試験での低 W_s における挙動と対応している。

Zn/Ag センサおよび Fe/Ag センサでの W_s を測定した例を図 19 に示す。 W_s は暴露開始後 2 日間で $10^{-1} \sim 10^0 \text{ g/m}^2$ となり、両センサとも同様の値を示している。10 日～12 日は降雨により測定できないが、その後 Fe/Ag センサの W_s が大きくなっており、この理由としては図 15 で示したように高 W_s 域で Zn/Ag センサの出力が相対的に高くなるため、 W_s が小さく見積もられたことが考えられる。

従来の Fe/Ag-対の寿命は、雨がかりのある屋外においては、おおよそ 2 カ月となることがわかっている¹⁾。川口ら¹⁷⁾ は Zn/Ag-対センサにおいては上述した I - RH の関係が 1 年暴露後でも成り立つこと報告しており、本協会大気腐食評価法分科会でも Zn/Ag-対センサを長寿命型 ACM センサとして実用化させる検討をはじめた。

7. ま と め

大気腐食を理解する上での一助として、水の役割を中心に大気腐食の特徴を解説するとともに、Ag/Fe-対 ACM 型腐食センサによる、付着物を中心とした環境腐食性評価法について解説した。

1) 雨が直接かかる屋外においては、センサ出力の大きさと経時変化とから、結露・乾燥・降雨の各期間を検

出でき、それらの時間を測定できる。こうして求めたぬれ時間（結露時間＋降雨時間）は湿度だけでなく付着海塩量にも依存し、「温度 0℃以上で湿度 80%以上」と気象条件だけで決まるとする ISO 方式では求めることができない。

2) 雨が直接かからない環境では鉄の腐食速度と ACM センサ出力の日平均電気量 (Q) とにはよい対応関係があり、海塩付着量や湿度条件などの環境条件によらず、 Q から鉄の腐食速度を推定できる。

今後は、こうしたセンサ出力と腐食速度に関する解析を屋外環境にまで広げていくことを考えている。

3) 鉄の大気腐食については、海塩付着量 (Ws) が多いほど、また相対湿度 (RH) が高いほど水膜厚さが増し、腐食性が厳しくなる。これに対して、ステンレス鋼においては発錆臨界条件— Ws^* : Ws の下限値, RH^* : RH の上限値—が存在し、付着物だけでなく湿度分布も考慮しなければならない。

海塩が多く付着し、ステンレス鋼が発錆する可能性が大きい日を選定する上で、ACM センサは有用なモニタリング手法であるといえる。

参 考 文 献

- 1) P. J. Sereda, *ASTM Bulletin*, No. 228, 53 (1958); *ibid.*, No. 238, 61 (1958), *ibid.*, No. 246, 47 (1960).
- 2) F. Mansfeld and J. V. Kenkel, *Corrosion Science*, **16**, 111 (1976).
- 3) P. R. Grossman, "Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Engineering Metals", Ed. by S.K. Conburn, p.5, ASTM STP 66 (1978).
- 4) P. J. Sereda, S. G. Croll and H. F. Slade, "Atmospheric Corrosion of Metals", Ed. by S. W. Dean, Jr. and E. C. Rhea, p.267, ASTM STP, 767 (1982).
- 5) I. Suzuki, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **30**, 639 (1981).
- 6) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara, Y. Kojima, S. Tsujikawa, W. Oshikawa, S. Itomura, T. Fukushima and S. Izumo, *Zairyo-to-Kankyo*, **43**, 550 (1994).
- 7) T. Shinohara, S. Tsujikawa, S. Motoda, Y. Suzuki, W. Oshikawa, S. Itomura, T. Fukushima and S. Izumo, Proc. 41st Jpn Conf. Materials and Environments, p.345, JSCE (1994).
- 8) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara, S. Tsujikawa, W. Oshikawa, S. Itomura, T. Fukushima and S. Izumo, *Zairyo-to-Kankyo*, **44**, 218 (1995).
- 9) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **47**, 651 (1998).
- 10) 日本建築センター, ビルディングレター '97.9, 220 (1997).
- 11) W. Oshikawa, S. Itomura, T. Shinohara and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **51**, 398 (2002).
- 12) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **50**, 162 (2001).
- 13) T. Shinohara, S. Motoda, K. Nabeshima, Y. Suzuki and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **48**, 796 (1999).
- 14) 気象庁監修, 「1996 年版 気象年鑑」, p.29 (1996).
- 15) S. Motoda, Proc. 144th Symposium, p.19, JSCE (2004).
- 16) T. Tatsuoka, Y. Takagi, S. Motoda and S. Tsujikawa, Proc. 49th Jpn Conf. Materials and Environments, p.67, JSCE (2002).
- 17) H. Kawaguchi and T. Tsujimura, Proc. 48th Jpn Conf. Materials and Environments, p.89, JSCE (2001).

(2005 年 9 月 15 日受理)

要 旨

Fe/Ag-対からなる ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサが開発され、大気環境の腐食性評価に適用された。本センサは、大量生産と再現性を考慮し、長期のデータ収集に便利なように設計されている。センサ出力 I のほかに温度と相対湿度 RH もマイクロコンピュータによって記録された。 I の大きさと経時変化を解析することによって、降雨、結露および乾燥期間（それぞれ T_{rain} , T_{dew} , T_{dry} ）を分類し、その経過時間を決定できた。また、予め求めておいた I - RH 校正曲線を用いて、海塩付着量 Ws を見積もることができた。センサ出力を解析することにより、屋内環境での腐食量を見積もることができるともわかった。ACM センサを用いていくつかのサイトにおける環境の腐食性を評価した。また、本センサが炭素鋼についてだけでなく、ステンレス鋼に対しての環境腐食性評価に適用できることも示した。

キーワード 大気腐食, モニタリング, ACM センサ, 炭素鋼, ステンレス鋼