

|||||
論 文
|||||

住宅環境における溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めっき鋼板の耐食性

吉崎 布貴男* 清水 剛**

Indoor Atmospheric Corrosion Resistance of Hot-dip Zn-6%Al-3%Mg Alloy Coated Steel Sheet at Prefabricated House

Fukio Yoshizaki, Takeshi Shimizu

Synopsis

In order to investigate the corrosion resistance of a hot-dip Zn-6%Al-3%Mg alloy coated steel sheet (ZAM) in an indoor environment, we conducted a 4.5-year exposure test, during which we monitored the environmental conditions using ACM sensors placed under the floor and under the eaves of the test house locating near the coast. The corrosion resistance results were compared with a galvanized steel sheet (GI). We examined the corrosion behavior of ZAM by analyzing corrosion products and measuring the surface potential distribution using contact-free methods.

- (1) If a relatively high humidity is maintained and sea salt is allowed to accumulate, the metal surfaces will remain wet for prolonged periods of time even in indoor environments, and the corrosion will tend to advance. In this investigation, the specimens placed horizontally under the floor are placed in such conditions.
- (2) The corrosion loss of ZAM placed horizontally under the floor and eaves was only about 1/4 to 1/3 of that of GI, indicating that ZAM has favorable corrosion resistance.
- (3) The presumed reasons why ZAM exhibits more favorable corrosion resistance than GI include that fine basic zinc corrosion products containing Al and Mg are formed, which cover the surfaces uniformly at the macroscopic level.

1. 緒言

溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めっき鋼板（以下、ZAMと記す）が営業生産化されて12年が経過し、住宅、建材、自動車など幅広い分野で使用されるようになった。なかでもプレハブ住宅の構造材はZAMの大きな用途の一つとなっている。ZAMはこれまで屋外での大気暴露試験により耐食性や防食機構が調べられてきた¹⁾。それに対し、プレハブ住宅の構造材が曝される腐食環境は住宅環境といわれ屋外暴露環境とは異なる点がある。降雨に曝される屋外環境ではめっき面に付着した海塩粒子などの飛来物は降雨により洗い流されるが、住宅環境では外部より侵入した付着物が洗い流されることなくめっき面に堆積し、それが温湿度変化により吸湿することで水膜が形成され腐食が進行することになる²⁾。また、降雨により流失しやすいとされ大気暴露試験では明確に検出されないSを含有する亜鉛系腐食生成物³⁾の生成と耐食性への影響が考えられる。

一般に住宅環境での腐食は屋外環境に比べ軽度であるとされ、Znめっきの腐食速度で $1\text{g}/(\text{m}^2\text{y})$ 以下の報告がある^{4,5)}。一方、海岸近くの住宅で海塩粒子の侵入が多い部位になると屋外環境並みの約 $8\text{g}/(\text{m}^2\text{y})$ のZnめっきの腐食速度が報告されている⁶⁾。これらの報告ではZnめっきの腐食減量が示されているだけで生成する腐食生成物や腐食形態といった調査は行われていない。

本報では、住宅環境でのZAMの耐食性および腐食挙動に着目し、ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ（以下、ACMセンサと記す）⁷⁾により腐食環境をモニタリングしながら実施した海岸近接地域の実住宅での暴露試験についてZnめっき鋼板と比較調査した結果を述べる。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には低炭素冷延鋼板を基材として連続式溶融

* 技術研究所 表面処理研究部 表面処理第一研究チーム 主任研究員

** 技術研究所 表面処理研究部 表面処理第一研究チーム チームリーダー

めっきラインで製造した溶融 Zn めっき鋼板（以下、GI と記載）と ZAM を用いた。片面あたりのめっき付着量として GI は $158\text{g}/\text{m}^2$ （めっき厚み換算で約 $22\ \mu\text{m}$ ）、ZAM は $55\text{g}/\text{m}^2$ （めっき厚み換算で約 $9\ \mu\text{m}$ ）に調整したもので、めっき後の化成処理は施していない。供試材は $75 \times 150\text{mm}$ に切り出し、切断端面および裏面をポリエステルテープでシールして暴露試験に供した。

2.2 住宅内暴露試験

住宅内暴露試験は太平洋海岸線から約 500m の塩害環境に位置する茨城県ひたちなか市の 2 階建て鉄鋼系工業化住宅（1989 年竣工）にて 1999 年 10 月より 4.5 年間実施した。暴露試験片の設置部位は Fig.1 に示す床下および 2 階の軒天裏とした。住宅内の環境において、特に塩分などの外部から飛来・付着する腐食促進因子については、換気口からの距離・方向および材料の向きなどによってその量に変化する。また、実際の住宅で暴露試験を行う場合、試験片の設置場所なども限定されるため、本来の鉄骨部材が曝される環境と全く同じ位置で試験を実施することが困難な場合が多い。本試験では、それらの条件を鑑み試験片の設置場所を決定した。床下の場合は換気口からごく近い位置で水平上向きと垂直（床下の梁の垂直面はりつけ）の 2 方向で試験片を設置した。軒天裏では水平上向きになるように試験片を設置した。床下、軒天裏とも水平上向きの設置場所は実部材が曝される環

境とは一致しないが、外部からの付着塩分が最も多く腐食環境が厳しくなる部位として選定した。

2.3 環境測定

暴露試験片と同じ向きで塗装鋼板を 1 年間暴露し、その表面上に付着した付着物をイオン交換水をしみ込ませたガーゼで拭き取り、この操作をガーゼを替えて 3 回繰り返した⁸⁾。これをイオン交換水で抽出し、陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) は ICP 発光分光分析（島津製作所製 ICPS-8100）により、陰イオン (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) はイオンクロマトグラフィー（島津製作所製イオンクロマトグラフシステム）により定量分析した。

暴露試験片とともに温湿度センサおよび ACM センサを設置した。ACM センサは住宅環境などの腐食環境をモニタリングする目的で開発されたもので、異種金属対 (Fe/Ag 対など) に流れるガルバニック電流（センサ出力）から環境腐食性を評価するものである⁷⁾。今回は、ACM センサとして多数の報告例がある Fe/Ag 対型^{4,9-11)} に代わり、耐久性に優れることから実用化が進められているものの報告例の少ない Zn/Ag 型^{12,13)} を設置した。ACM センサの向きは暴露試験片と揃え、温度・湿度とともにセンサ出力（電流値）を測定し、時間で積分して日平均電気量（単位：C/d）を算出した。

2.4 腐食状態の調査

暴露試験片の外観を目視観察するとともに、断面組織を走査型電子顕微鏡（SEM）（JEOL 製 JSM-840, 15kV）で観察して腐食状況を調査した。めっき層の腐食減量は、腐食生成物が流出せず表面に残存していると考えられることから、精密化学法¹⁴⁾により求めた。腐食生成物を $200\text{g}/\text{L}$ のクロム酸水溶液（ 80°C ）で溶解し、GI についてはその溶液中の Zn を定量することで、ZAM については Zn, Al, Mg を定量してその和を求めることで、それぞれ腐食減量を算出した。Mg の分析値には付着海塩粒子に由来する Mg が含まれることになるが、後述する付着イオン量の分析結果からこれは無視できるレベルとみられた。腐食生成物についてはその表面を SEM で観察するとともに、X 線回折（リガク製 RINT2500V, Cu 管球, 40kV , 50mA , $\theta/2\theta$ 法）、電子線マイクロアナライザ（EPMA）（島津製作所製 EPM-810, 20kV ）を用いて分析した。

2.5 表面電位の測定

薄い水膜下で進行する住宅環境の腐食現象を調査するには、水膜の状態を乱すことなく非接触で表面電位を計測できるケルビンプローブを用いた測定が有効である^{15,16)}。そこで今回は、表面反応測定装置（ヒロコン製 RM201）^{17,18)}を用いて非接触で表面電位を計測した。測

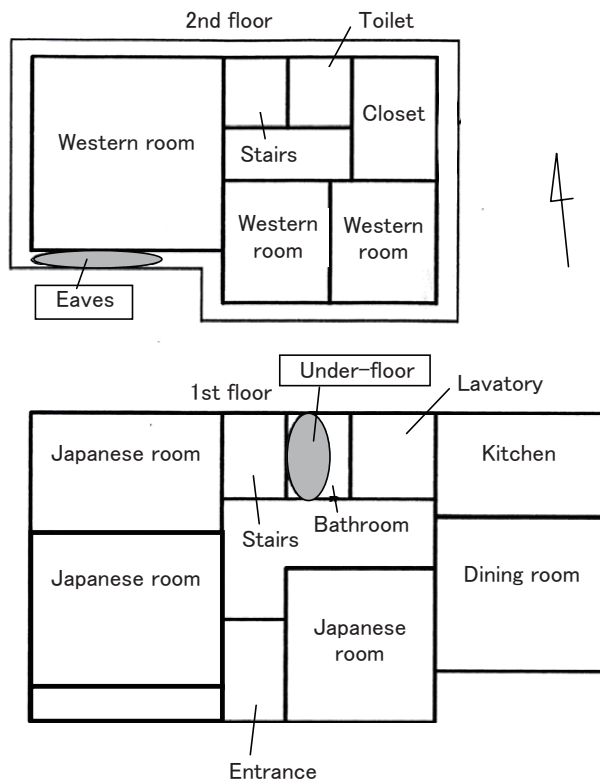


Fig.1 Plane view of exposure sites.

定原理はケルビンプローブとほぼ同様で微小な金属板を振動させ静電容量の変化から電位を計測するものである。本装置はプローブ先端と試料表面との距離が1mm程度変動しても安定した測定値が得られ、凹凸のある試料表面でも精度良く測定可能である。暴露試験片と測定プローブを恒温恒湿槽に配置し、床下での実際の温湿度変化をもとにそれを模擬すべく、20℃で相対湿度を60%および75%と制御した環境下で測定を行った。相対湿度60%および75%では暴露試験片に付着している海塩粒子が吸湿し水膜が生成することになる¹¹⁾。電位測定は暴露試験面の20mm×10mmの範囲を0.5mm間隔で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 暴露試験結果

3.1.1 暴露試験環境

Fig.2に2001年の住宅内各部位の温度・湿度の推移を示す。ここでは気温と相対湿度の1日の平均、最高および最低を月平均した値を示している。軒天裏の温度は外気温の影響を受けて変動しやすく、それに応じて相対湿度も変化する。夜間温度が下がると相対湿度は上がるが、晴れた昼間では相対湿度は下がり乾燥する。これに対し、床下の温度変化は軒天裏に比べると小さく、そのため湿度変化も小さい。軒天裏に比べて床下の相対湿度は地盤

の湿気の影響を受け全般に高い値を示し、特に夏場では平均値が80%を超える。

暴露開始後1年間の付着イオン量の分析結果をFig.3に示す。トータルの付着量としては軒天裏に水平置きした場合が最も多く、次いで床下・水平置きで、最も少ないのが床下・垂直置きの場合である。同じ床下でも設置状態により付着イオン量として4倍程度の違いが生じる。付着イオン種としては海塩粒子由来のCl⁻、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺が主体で、その他、SO₄²⁻の付着が認められる。床下・水平置きと軒天裏・水平置きのCl⁻付着量は220～270mg/m²であり、住宅床下におけるCl⁻付着量のこれまでの報告結果⁶⁾と比べると日本海沿岸(福井県敦賀市:960mg/m²)ほどではないものの、内陸(東京都杉並区、愛知県春日井市:10～30mg/m²)の付着量に比べると多く、太平洋沿岸部立地のやや厳しい腐食環境といえる。

Fig.4にACMセンサの出力を積算した日平均電気量の月ごとの推移(2001年)を示す。これはセンサ設置後1年以上経過して出力が安定した状態の測定結果である。海塩付着量が最も多い軒天裏・水平置きより床下・水平置きの方が日平均電気量が高いのは、Fig.1で示した様に気温の変動が少なく、比較的高い相対湿度が維持されることで付着海塩が潮解している時間が長くなり、結果として金属表面で濡れた状態が長く続いたためである。床下・垂直では付着物量が少ないため相対湿度が高くても金属表面は乾いた状態が続く。以上のことから、日平均電気量が全体的に高い値で推移する床下・水平置

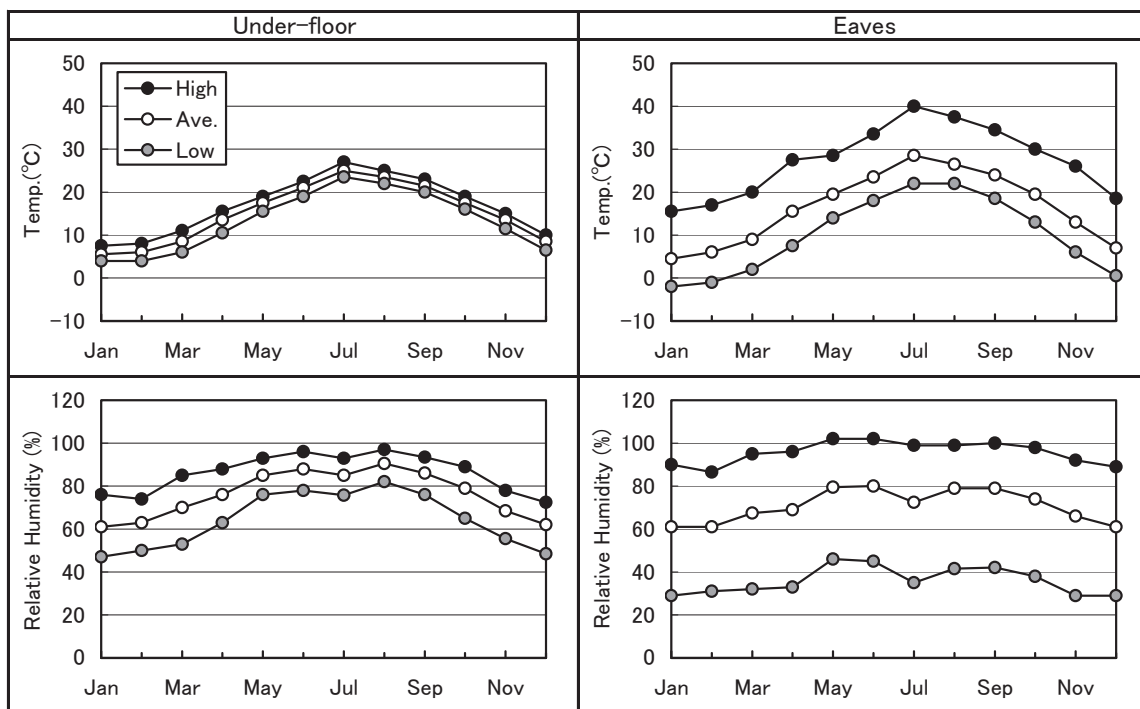


Fig.2 Monthly variation of temperature and relative humidity at exposure sites in 2001.

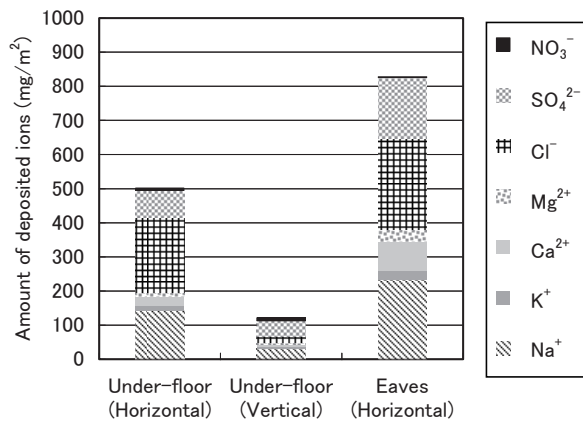


Fig.3 Amount of deposited ions at exposure sites.

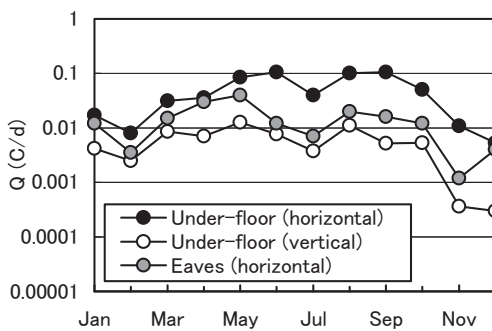


Fig.4 Monthly variation of daily average electricity obtained from ACM sensors in 2001.

きの試験片が腐食の進行が最も速いと推測される。

3.1.2 ZAMの耐食性

住宅内暴露試験4.5年後の表面外観を Fig.5 に示す。床下・水平置きでは GI, ZAM ともに試験面全体が茶褐色に変色し腐食していた。床下・垂直置きの場合、いずれも初期の金属光沢は失われているものの、GI でマダラ状の黒変がみられた程度で GI, ZAM とも目立った腐食の発生は認められなかった。軒天裏・水平置きでは、GI で部分的に茶褐色の変色をとまなう腐食の発生がみられたが、ZAM では外観に目立った腐食は認められなかった。

Fig.6 に暴露4.5年後の平均的な腐食状態のめっき層断面組織を試験前とあわせて示す。床下・水平置きでの GI では、腐食によりめっき層が鋼素地まで消失した箇所と初期のめっき厚みに近い状態で残存している箇所が混在し、非常に不均一に腐食が進行している。そして、それらの表面を起伏の大きい腐食生成物が覆っているのがわかる。ZAM も部分的に鋼素地まで腐食が進行している箇所がみられるが、GI ほど不均一な腐食の進み方にはなっておらず、腐食生成物も GI に比べると平滑といえる。初期のめっき厚みを考慮すると、GI に比べて ZAM のめっきの腐食量が著しく少ないのがわかる。床

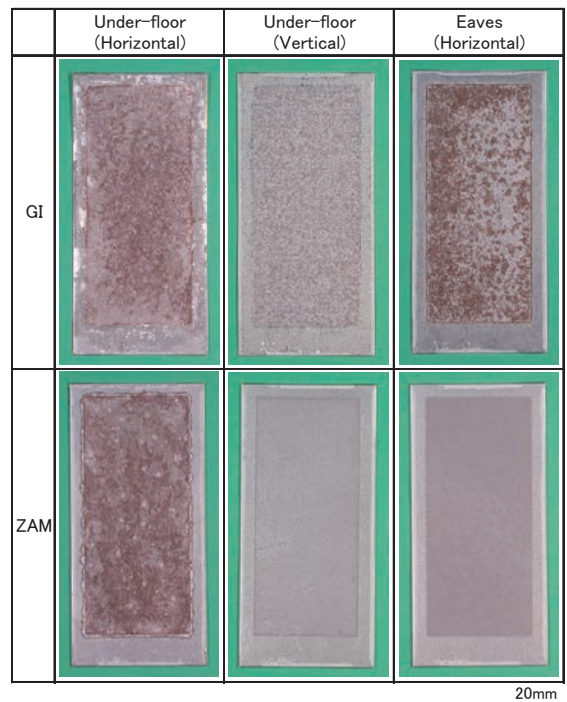


Fig.5 Surface appearance of specimens after 4.5 years of exposure.

下・垂直置きは断面組織からもわかるようにいずれのめっき鋼板ともほとんど腐食していない。軒天裏・水平置きの場合、床下・水平置きに比べると程度は軽いものの、部分的に鋼素地に達する腐食が GI で観察される。ZAM の腐食はごくわずかに抑えられている。これら断面からの腐食状態の観察結果と Fig.4 で示した日平均電気量の大小との間に良い相関があるのがわかる。

Fig.7 はめっき層の腐食減量の経時変化を示す。断面観察で明確に腐食の発生がみられた暴露4.5年での床下・水平置きと軒天裏・水平置きでの GI の腐食量はそれぞれ 47g/m^2 , 21g/m^2 である。一方、ZAM のそれは 16g/m^2 , 5g/m^2 で GI の $1/3 \sim 1/4$ に抑えられている。GI の腐食量は暴露期間とともにほぼ直線的に増加するのに対し、ZAM では腐食速度(グラフの傾き)が暴露期間の経過とともに低下する傾向があるため、暴露期間が今後長くなるとともに、差がさらに拡大するものと予測される。

Fe/Ag 型 ACM センサを用いた結果によると、計測された日平均電気量と Zn めっきの腐食速度は良く対応することが知られている^{4,5,19)}。そこでそれに倣い、今回 Zn/Ag 型で得られた日平均電気量と GI, ZAM それぞれの腐食速度との関係を Fig.8 のように整理した。横軸は2001年の日平均電気量 (Fig.4) の年間平均値、縦軸は Fig.7 の暴露4.5年での腐食量から平均値として求めた年間の腐食速度である。GI, ZAM ともに日平均電気量と腐食速度との間には相関が認められ、GI に比

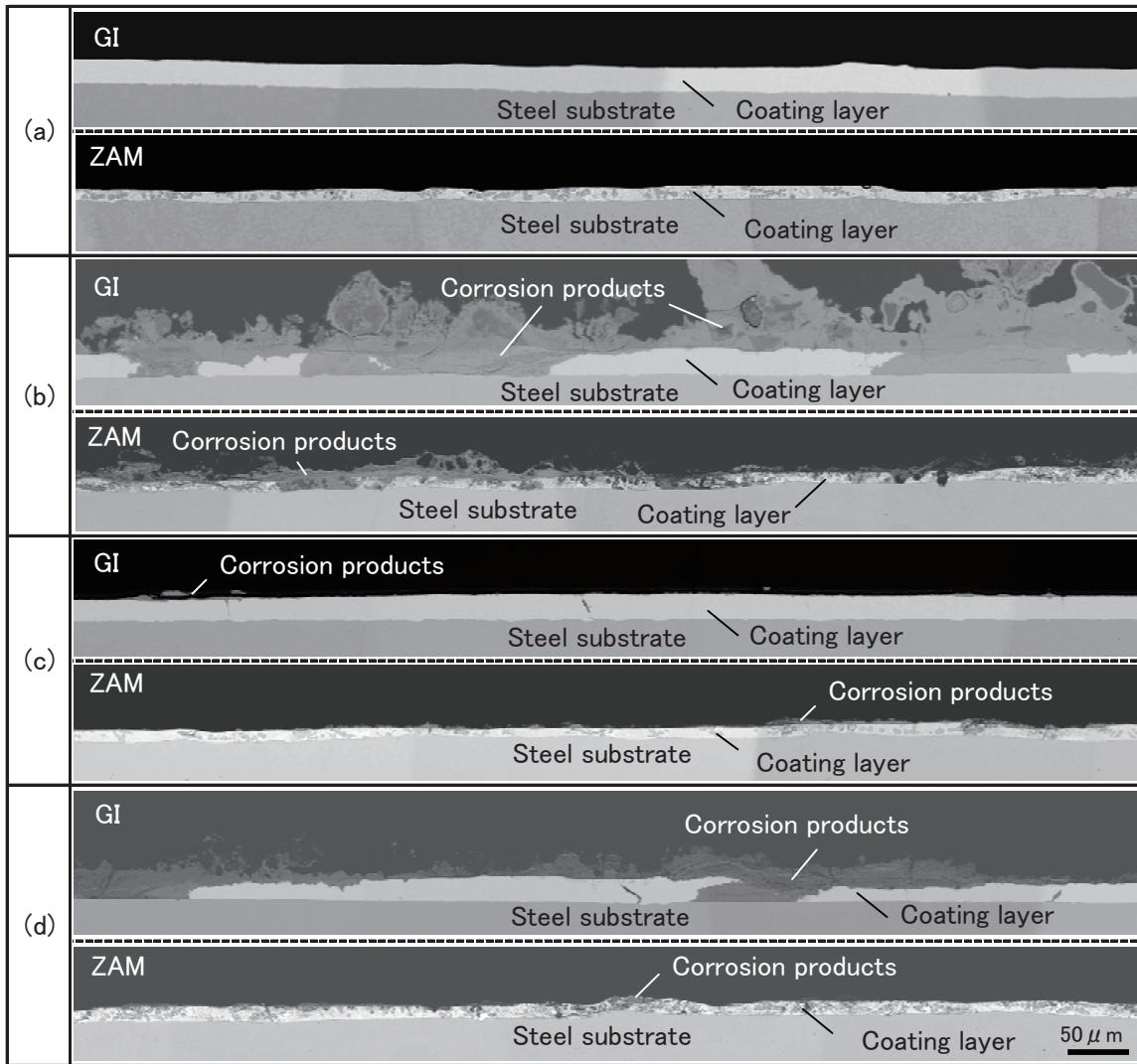


Fig.6 Cross-sectional BSE (backscattered electron) images of specimens before exposure and after 4.5 years of exposure. (a)Before exposure, (b)under-floor (horizontal), (c)under-floor (vertical), (d)eaves (horizontal).

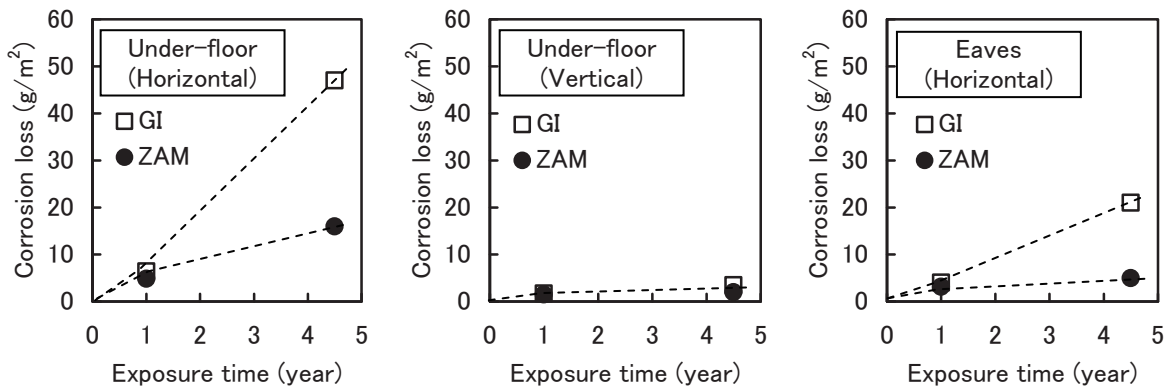


Fig.7 Change in corrosion loss of coating layer of specimens after the indoor exposure test.

と ZAM は日平均電気量に対する腐食速度が全体的に小さい。さらにグラフの傾きも ZAM の方が小さく、これは日平均電気量が多い環境、すなわち厳しい腐食環境ほど腐食速度における GI との開きが大きくなることを

示唆している。藤田ら²⁰⁾、Thierry ら²¹⁾ は促進腐食試験で塩濃度が濃くなるほど、濡れ時間が長くなるほど Mg 含有 Zn 系めっきと Zn めっきとの耐食性の差が広がることを示している。今回、促進腐食試験とは異なる

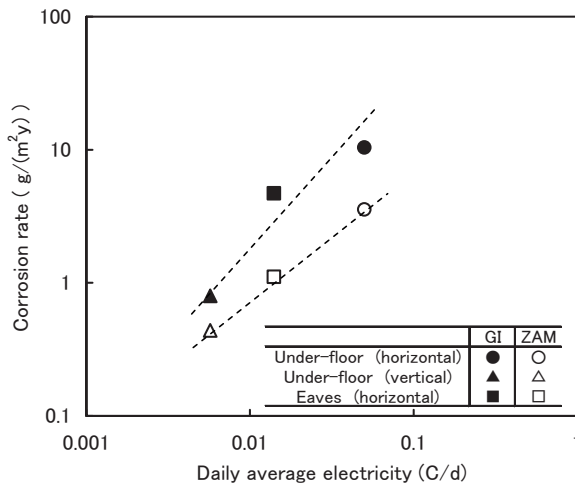


Fig.8 Relationship between corrosion rates of coating layer of specimens and daily average electricity obtained from ACM sensors.

住宅環境においても同様の傾向を確認した。

住宅環境ではGIでも十分な耐食性が得られる部位からGIでは耐食性不足が懸念される部位まで様々な腐食環境が存在する (Fig.7)。GIで耐食性不足が懸念されるような部位になるほどZAMの高耐食性が活かされることを Fig.8 は表している。

3.2 防食機構

腐食減量の測定結果と断面組織観察から、直接雨に曝されることのない住宅環境においても海塩粒子が堆積し比較的高い湿度が保たれる条件が重なると、GIにおいて10g/(m²y)以上の腐食速度が示されることがわかった。これは屋外一般環境とほぼ同等の腐食速度²²⁾である。一方、ZAMは同様の環境で3.6g/(m²y)の腐食速度に抑制されていた。これらの耐食性の差が生じた原因を調査するため、床下・水平置き4.5年暴露材の腐食生成物の分析と表面電位分布測定を実施した。

3.2.1 腐食生成物

Fig.9はGIとZAM上に生成していた腐食生成物のX線回折図形である。いずれの供試材からもZn₅(OH)₈Cl₂·H₂O (●: 塩基性塩化亜鉛), Zn₄Cl₂(OH)₄SO₄·5H₂O (▼)²³⁾, およびNaZn₄Cl(OH)₆SO₄·6H₂O (▲)²³⁾を主体とする亜鉛系腐食生成物の生成が確認され、腐食生成物の種類として両めっき間で顕著な違いはない。屋外暴露環境では検出されないSを含んだ塩基性塩の腐食生成物の生成が認められる。一方、屋外暴露環境で通常検出されるZn₆Al₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O (塩基性炭酸亜鉛アルミニウム)やZn₄CO₃(OH)₆·H₂O (塩基性炭酸亜鉛), ZnO (酸化亜鉛)といった腐食生成物の生成¹²⁴⁾は今回の調査では確認できなかった。Leygrafらは亜鉛腐食生成物の時間的な変

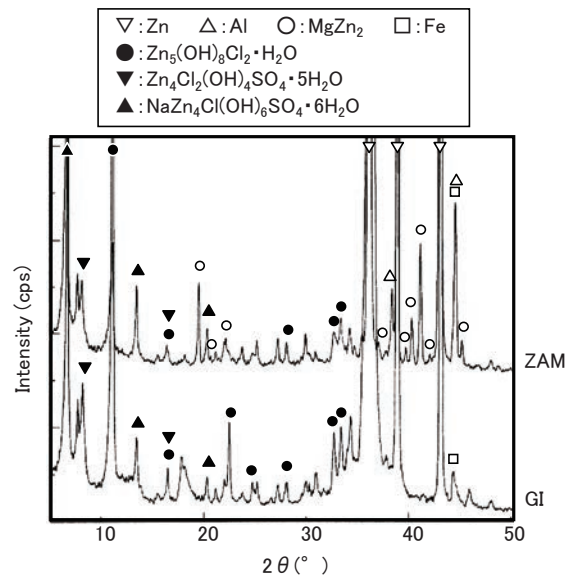


Fig.9 X-ray diffraction patterns of corrosion products formed on specimens after 4.5 years of exposure under floor.

化を報告しており、直接雨のあたらない空間におかれた場合の最終的な腐食生成物として、Zn₄Cl₂(OH)₄SO₄·5H₂OやNaZn₄Cl(OH)₆SO₄·6H₂Oの存在を示しており²⁵⁾、今回の結果はその結果と対応している。

Fig.10, 11はGIとZAM上に生成した腐食生成物を断面からEPMAでそれぞれ分析した結果を示す。GIの腐食生成物はZn, Cl, Oを主体としてSを含むものであり、表層の腐食生成物中に比べると、鋼素地まで腐食が進行した部分にClが濃化している。また、海塩由来するとみられるMgやCaがわずかに含まれるのがわかる。一方、ZAMの腐食生成物はZn, Al, Mg, Cl, Oを主体としてSとCaから構成されるが、Alおよび明らかにGIよりも高濃度のMgが含まれる点でGIと異なる。なお、腐食生成物中に塊状にAl, Siがみられる箇所があるが、これは砂塵の付着によるものである。また、Naの分析はその特性X線(Na-K α)がZnの特性X線(Zn-L β)と重なり分離できないため困難であった。

Fig.12に腐食生成物の表面形態を示す。GIに比べてZAMの表面には微細で平滑性を有する腐食生成物の生成が確認できる。これまでに筆者らは、促進腐食試験や大気暴露試験でZAM上にはGIに比べて微細で緻密な塩基性亜鉛腐食生成物が長期間、安定に存在することを確認しており、腐食生成物に取り込まれたAlやMgがその効果を出現させていると推察している¹²⁶⁾。今回の住宅環境の暴露試験においても、ZAM上にはAlやMgを含む塩基性亜鉛腐食生成物の生成が確認でき、同様の効果によりZAM上にはGIに比べて微細で平滑性を有する腐食生成物が生成したと考える。そして、そのこと

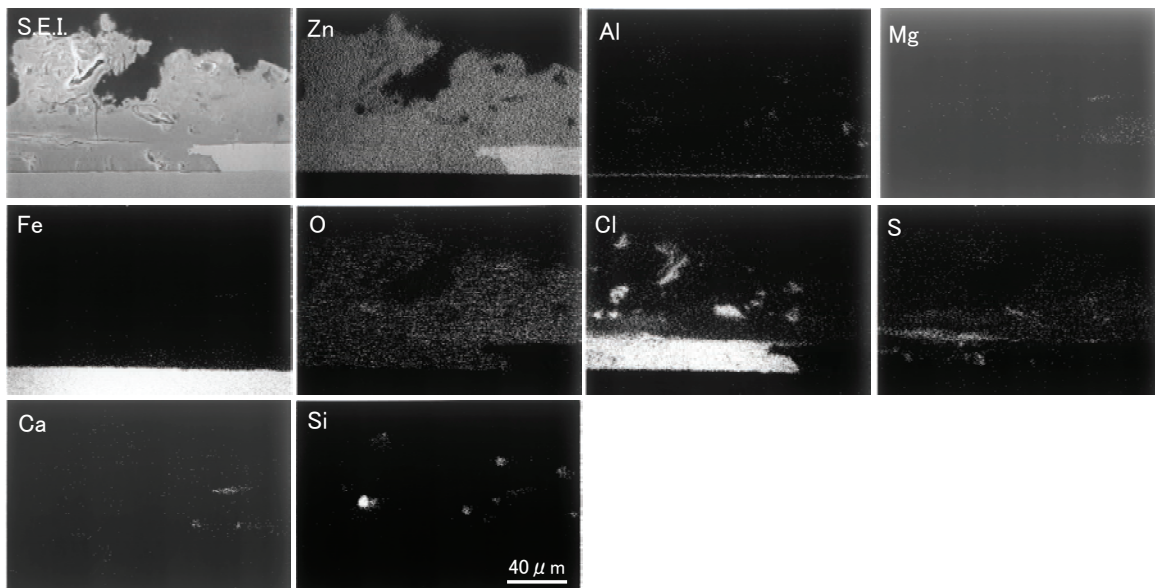


Fig.10 EPMA analysis of corrosion products formed on GI after 4.5 years of exposure under floor.

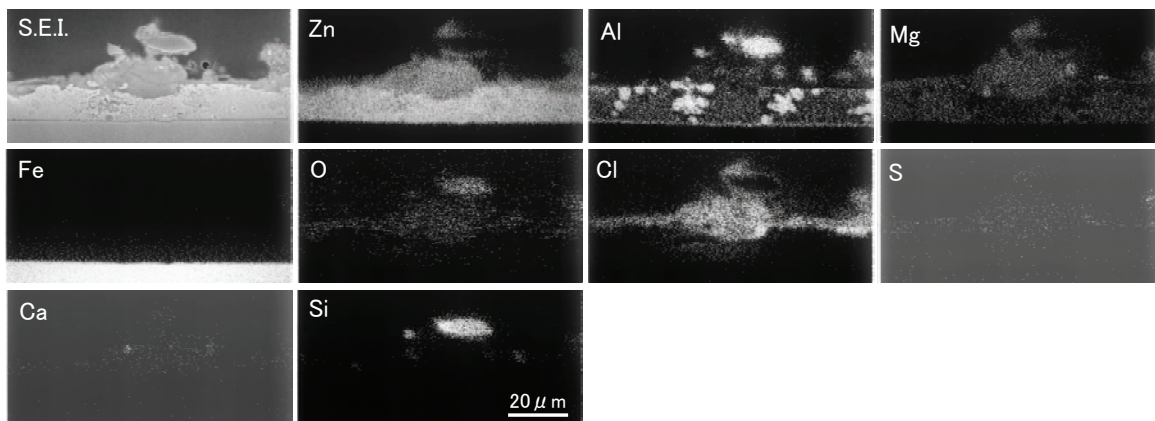


Fig.11 EPMA analysis of corrosion products formed on ZAM after 4.5 years of exposure under floor.

がZAMの耐食性を向上させる一要因になっていると考える。なお、Sを含む亜鉛系腐食生成物は降雨などにより流出しやすいことが知られており³⁾、耐食性への影響を示す報告はこれまでに見当たらない。しかし、塩基性塩の一種であることを考えると、今回のような雨がかりのない腐食環境ではZAMの耐食性を向上させる腐食生成物として働く可能性も考えられる。

3.2.2 表面電位分布測定

Fig.13は温度20℃においてGIとZAMの表面電位分布を相対湿度60%と75%で測定した結果である。グラフの縦軸は、測定領域(10×20mm)内で試験片毎に得られた電位の最小値を基準(0V)としたときの電位差を示す。Zn合金表面に塩水を付着させて表面電位を測定したProsekら²⁷⁾の結果からみて、相対的に電位の低い箇所がアノード部、電位の高い箇所がカソード部に相当し、電位差が大きくなるほど腐食反応が起こりやす

いことを示している。暴露後のGIの表面には相対湿度60%において380mVの電位差が存在し、相対湿度が75%になると電位差は450mVに拡大する。表面に塩付着の無い暴露前のGIの相対湿度60%のときの電位差は30mV、相対湿度75%で170mVを示し、暴露後の電位差は暴露により生じた腐食による影響と判断できる。一方、暴露後のZAMでは、相対湿度60%で電位差は100mV、相対湿度が75%の場合でも260mVとGIと比較して小さく、かつ、測定領域内での電位差分布が小さいのがわかる。これは、暴露後のGI表面がマクロ的スケールでアノード部とカソード部が明確に分離した不均一な表面状態となっているのに比べて、ZAMのそれは均一な表面状態となっていることを示している。このため相対湿度が高くなり表面に水膜が形成された場合、ZAMはGIに比べて電位差による腐食が起こりにくいと考えられる。このような状態が形成される原因としては、先に述べた微細で緻密な腐食生成物が生成する以外

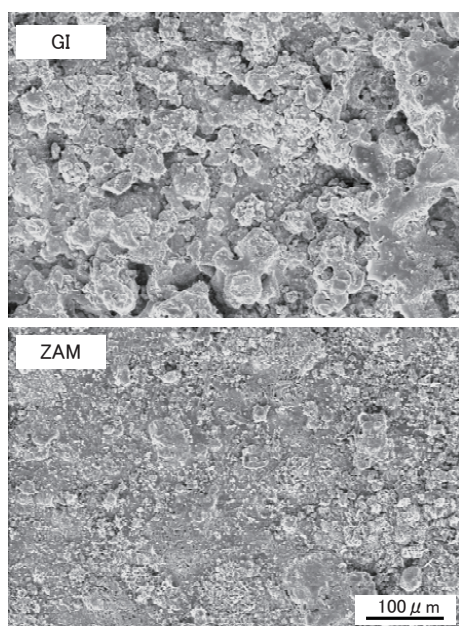


Fig.12 Surface morphologies of corrosion products formed on specimens after 4.5 years of exposure under floor.

に、Zn、Al および $MgZn_2$ の複相微細組織で構成されるめっき組織²⁸⁾ がマクロ的に均一な腐食を促すことも考えられる。原因は今後の研究で明らかにしていきたい。

以上のことから、住宅環境において ZAM が GI に比べて良好な耐食性を示すのは、ミクロ的にみると Al、Mg を含む微細な塩基性亜鉛腐食生成物が生成すること、およびその腐食生成物がマクロ的にも均一にめっき面を覆うため、と考えられる。

4. 結 言

ZAM の住宅環境における耐食性と防食機構を調査するために、海岸近接地域の実住宅の床下と軒天裏において ACM センサによる環境測定と 4.5 年の暴露試験を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 海塩が堆積し、比較的高い相対湿度が保たれる条件が重なると住宅内といえども金属表面は濡れた状態が長く続くことになり、厳しい腐食環境になる。今回の調査では床下・水平置きで GI で屋外環境並みの約 $10g/(m^2y)$ の腐食速度が確認された。
- (2) 床下と軒天裏の水平置きにおいて、ZAM の腐食量は GI の $1/3 \sim 1/4$ に抑えられ良好な耐食性を示した。
- (3) 住宅環境において ZAM が GI に比べて良好な耐食性を示すのは、ミクロ的にみると Al、Mg を含む微細な塩基性亜鉛腐食生成物が生成すること、およびその腐食生成物がマクロ的にも均一にめっき面を覆

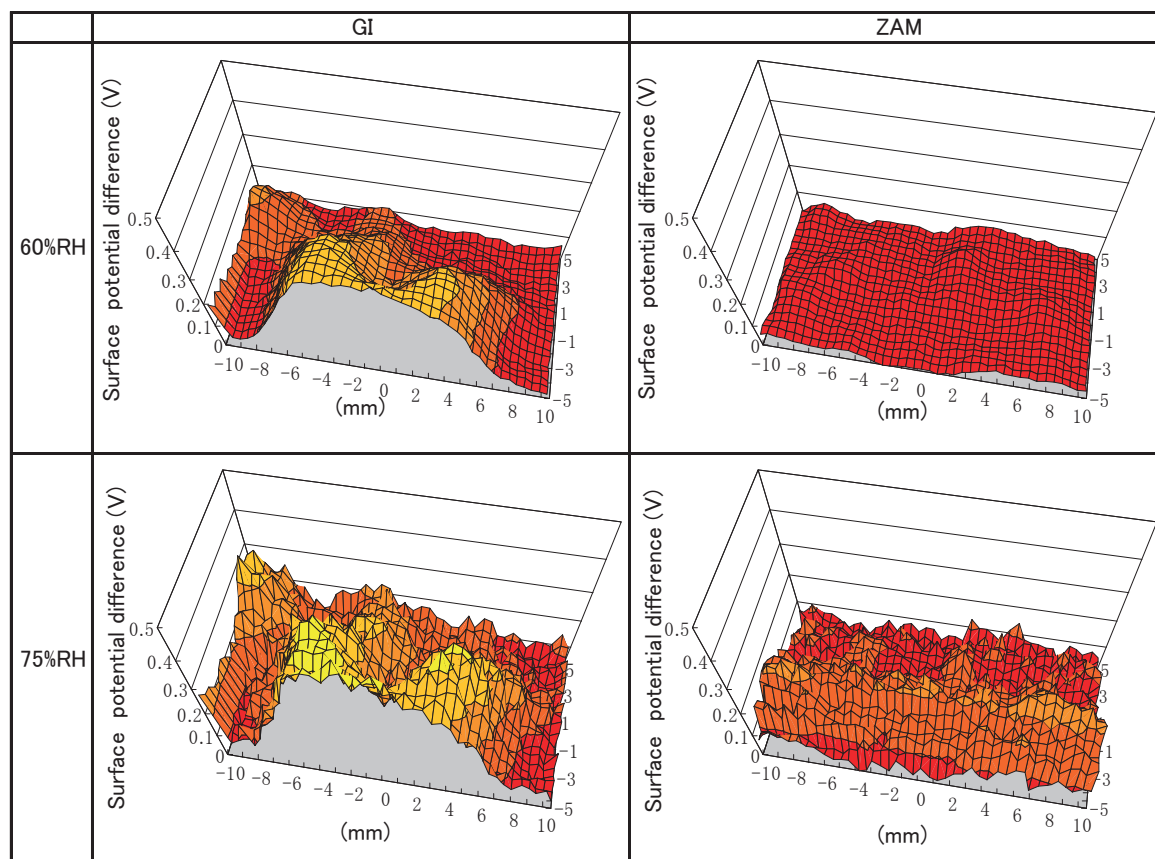


Fig.13 Surface potential difference maps of specimens after 4.5 years of exposure under floor.

うため、と考えられる。

参考文献

- 1) 清水剛, 吉崎布貴男, 三吉泰史, 安藤敦司: 日新製鋼技報, 85 (2004), 11.
- 2) 住宅の腐食分科会総覧-住宅環境における腐食試験法-, 腐食防食協会住宅の腐食分科会編, (2009), 1.
- 3) 浜田秀樹, 出口武典: 防錆管理, 38 (1994), 453.
- 4) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原正, 辻川茂男: Zairyo-to-Kankyo, 47 (1998), 651.
- 5) I. Kage and S. Fujita: Proc. of 4th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH' 98), ISIJ, Chiba, (1998), 394.
- 6) 池田法民: 第 161 腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会編, (2008), 27.
- 7) 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, 福原敏郎, 出雲茂人: Zairyo-to-Kankyo, 43 (1994), 550.
- 8) 住宅の腐食・防食, 腐食防食協会編, 丸善, 東京, (2004), 144.
- 9) 押川渡, 糸村昌祐, 篠原正, 辻川茂男: Zairyo-to-Kankyo, 51 (2002), 398.
- 10) 篠原正, 元田慎一, 押川渡: Zairyo-to-Kankyo, 54 (2005), 375.
- 11) 篠原正: ふえらむ, 11 (2006), 215.
- 12) 川口洋充, 辻村太佳夫: 第 48 回材料と環境討論会, (2001), 89.
- 13) 押川渡, 長山雅, 篠原正: 第 165 回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会編, (2008), 32.
- 14) 松本雅充: 第 111 回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会編, (1996), 26.
- 15) 田原晃, 小玉俊明: Zairyo-to-Kankyo, 46 (1997), 717.
- 16) 武藤泉: 防錆管理, 54 (2010), 59.
- 17) 升田博之: 表面技術, 54 (2003), 957.
- 18) 片山英樹, 野田和彦, 升田博之: 表面技術, 54 (2003), 1022.
- 19) H. Nomura, M. Matsumoto, H. Tozaki, M. Yamamoto and S. Tsujikawa: Proc. of 4th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH' 98), ISIJ, Chiba, (1998), 399.
- 20) 藤田栄, 梶山浩志, 鹿毛勇, 加藤千昭: 第 25 回防錆防食技術発表大会講演予稿集, (2005), 57.
- 21) D. Thierry, T. Prosek, N. Le Bozec and E. Diller: Proc. of 8th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH2011), AIM, Genova, (2011).
- 22) 鉄骨造建築物の耐久性向上技術, (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, 技報堂出版, 東京, (1986), 75.
- 23) I. Odnevall and M. Westdahl: Corros. Sci., 34 (1993), 1231.
- 24) T. Shimizu, F. Yoshizaki, Y. Miyoshi and A. Andoh: Tetsu-to-Hagané, 89 (2003), 166.
- 25) 大塚俊明: 表面処理鋼板の防錆機構解明および寿命設計研究会報告書, 日本鉄鋼協会編, (2005), 15.
- 26) A. Komatsu, H. Izutani, T. Tsujimura, A. Andoh and T. Kittaka: Tetsu-to-Hagané, 86 (2000), 534.
- 27) T. Prosek, A. Nazarov, U. Bexell, D. Thierry and J. Serak: Corros. Sci., 50 (2008), 2216.
- 28) T. Tsujimura, A. Komatsu and A. Andoh: Proc. of 5th Int. conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH'01), Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, (2001), 145.