

建材用めっき鋼板の端面防錆機構

Rust Prevention Mechanism on Cut Edge of Coated Steel Sheets for Buildings

遠藤玲央那 ENDO Reona JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 主任研究員

吉田 昌浩 YOSHIDA Masahiro JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 グループリーダー

要旨

亜鉛系めっき鋼板は、建築構造物の意匠性維持や耐久性向上に重要な役割を担っている。本研究では、溶融 Zn-5% Al 系めっき鋼板の端面腐食挙動に及ぼす付着塩分量の影響を、ISO 16539B 法 (ACTE[®]) および大気暴露試験により評価した。ACTE では、塩分量が少ない場合に赤錆が優先的に発生し、多い場合には白錆が形成され赤錆の発生が抑制された。大気暴露試験では、塩分量の少ない千葉県および北海道では赤錆が優先的に発生し、塩分量の多い沖縄県では白錆によって端面が保護された。ACTE と大気暴露試験の付着塩分量に対する腐食挙動は類似しており、ACTE を用いることで飛来塩分量が異なる実環境における端面腐食挙動を予測評価できると考えられる。さらに、腐食挙動の違いは、付着塩分量に応じて形成される電解質液膜の厚さに起因する犠牲防食能の差によるものと推定した。

Abstract:

Zinc coated steel sheets play an important role in maintaining appearance and improving the service life of building structures. The effect of the amount of deposited salt on the cut edge corrosion behavior of hot-dip Zn-5%Al coated steel sheets was evaluated using ISO 16539B method (ACTETM) and atmospheric exposure test in this study. In the ACTE test, red rust formed in a short period under low salt deposition conditions, whereas white rust formed and red rust was suppressed under high salt deposition. In the exposure tests, red rust preferentially formed in Chiba and Hokkaido where the amount of salt is small, while the cut edge was entirely covered by white rust in Okinawa where the amount of salt is large. The dependence of the amount of salt deposition on the corrosion behavior was similar between ACTE and exposure tests, and it is suggested that the cut edge corrosion behavior under actual environmental conditions can be predicted by ACTE. Furthermore, the differences in corrosion behavior are attributed to variations in sacrificial protection effectiveness, which are influenced by the thickness of the electrolyte film formed depending on the amount of deposited salt.

1. はじめに

Zn や Zn 系合金を鋼板表面に被覆した亜鉛系めっき鋼板は、優れた耐食性を有する^{1,2)} ことから、電機、建材および自動車などの用途で広く用いられている。特に建材用途では、屋外環境に長期間曝されることから、腐食や劣化を防ぐための長期耐久性が求められる。一般的に亜鉛系めっき鋼板は、建築部材への製品化の過程でせん断して使用されるため、端面には地鉄が露出して赤錆が発生することや、端面近傍の表面では鋼をカソードとするガルバニック腐食が生じ、めっき層の腐食速度が増大することが知られている³⁾。このため、従来から端面腐食に関する多くの検討^{3,4)} がなされてきたが、端面腐食挙動に対する付着塩分量の影響について詳細に調べられた例はほとんどない。

一方、腐食の評価にはさまざまな方法が用いられている。大気下での耐食性を信頼性高く評価する方法として大気暴露試験があるが、環境条件のばらつきや試験期間の長さが課題である。近年では、実環境を模擬した条件で、短期間に実環境における腐食挙動を再現可能な腐食促進試験として ACTE[®]が開発され^{5,6)}、ISO 16539B 法として国際規格化⁷⁾ されている。

そこで、本研究では ACTE を用いて、溶融 Zn-5% Al 系めっき鋼板の端面腐食挙動に及ぼす付着塩分量の影響を調査した。さらに、実環境下での腐食挙動と比較するため、飛来塩分量の異なる複数地域での大気暴露試験を行い、ACTE の実環境に対する適用性についても検討した。

2025 年 9 月 25 日受付

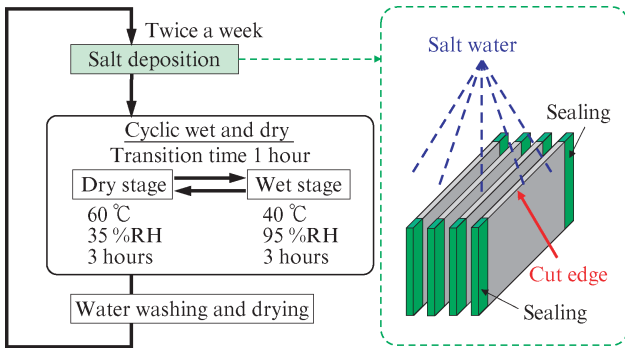


図1 ACTE[®]の試験条件

Fig. 1 Test condition of ACTETM

2. 実験方法

2.1 ACTE 試験

2.1.1 供試材

供試材には、板厚 1.6 mm、片面めっき付着量 90 g/m² の溶融 Zn-5% Al 系めっき鋼板を用いた。表面にはクロメートフリー化成処理皮膜が付与されている。供試材を 70 mm×30 mm サイズにせん断し、短辺を端面も含めてテープでシールした試験片を腐食試験に供した。評価面は 70 mm 長辺の端面とし、端面のせん断面と破断面の比率はおよそ 1:1 であった。

2.1.2 試験条件および評価方法

腐食試験に用いた ACTE の試験条件を図 1 に示す。塩分を付着させる工程と乾燥・湿潤のサイクルを繰り返す工程で構成される。スプレー装置で塩水を噴霧することにより、試験片に塩分を付着させる。塩水には人工海水（八洲薬品（株）製アクアマリン[®]）を用いた。本実験では、付着塩分量を変化させ、溶融 Zn-5% Al 系めっき鋼板の端面における腐食の経時変化を調査した。試験片は上向きに設置し、塩水の希釈度と塩水の付着量により付着塩分量を 10 mg/m² から 3 000 mg/m² に調整し、腐食試験に供した。

端面腐食の経時変化は、端面の外観観察および赤錆発生面積率（切断端面全体の面積に対する赤錆発生部分の面積）によって評価した。赤錆発生面積率は、切断端面のデジタル写真を撮影し、彩度基準の閾値を用いて赤錆部とそれ以外の部分の二値化を行うことで算出した。

2.2 大気暴露試験

2.2.1 供試材

供試材には、板厚 1.6 mm、片面めっき付着量 200 g/m² の溶融 Zn-5% Al 系めっき鋼板を用いた。表面にはクロメートフリー化成処理皮膜が付与されている。腐食試験には、70 mm×150 mm サイズにせん断した供試材の短辺を端面も含めてテープでシールして、長辺のうち約 100 mm の端面を露出した試験片を供した。腐食評価は、70 mm×100 mm の

	①Ginowan, Okinawa	②Tateyama, Chiba	③Tomari, Hokkaido
Exposure test sites			
Annual mean temperature	23 °C	16 °C	9 °C
Annual mean relative humidity	76 %	75 %	75 %
Equivalent salt deposit density (ESDD)	1 200 mg/m ²	200-400 mg/m ²	50-150 mg/m ²

図2 大気腐食試験場所の環境条件

Fig. 2 Environmental conditions for atmospheric corrosion test sites

表面およびシールを貼っていない約 100 mm 端面で行った。なお、端面のせん断面と破断面の比率はおよそ 1:1 であった。

2.2.2 試験条件および評価方法

大気暴露試験は、日本国内の 3 地点（沖縄県宜野湾市、千葉県館山市、北海道泊村）の沿岸付近で実施した。各地点の平均的な環境条件⁸⁾を図 2 に示す。沖縄県は北海道や千葉県よりも付着塩分量（等価塩分付着密度: ESDD）が多く、温度も高い環境である。3 地点の相対湿度の平均値は、ほぼ同じ値である。供試材は、各地の電柱に設置した試験架台に取り付け、2020 年 11 月から 2023 年 11 月までの 3 年間にわたり暴露した。腐食評価は、1 年ごとに試験片を回収し、端面の外観を観察することで行った。試験片は、観察後に再び試験架台に設置して、3 年間継続して観察した。

3. 結果および考察

3.1 ACTE 試験結果

切断端面の外観に及ぼす付着塩分量と腐食期間の影響を図 3 に示す。付着塩分量が 10, 50, 100 および 500 mg/m² の場合、7 日目に破断面で地鉄の溶解に伴う赤錆が発生し、28 日目にかけて赤錆が破断面全体に広がった後、56 日目には赤錆の一部がめっきの腐食生成物と考えられる白錆に覆われた。以降、赤錆の状態に大きな変化は認められなかった。一方、付着塩分量が 1 000 および 3 000 mg/m² の場合では、28 日目までは赤錆の発生はほとんど認められず、端面全体が白錆に覆われていたが、56 日目には破断面で赤錆が確認され、以降赤錆が徐々に増加した。

各付着塩分量条件における赤錆発生面積率の経時変化を図 4 に示す。図 3 に示したように、付着塩分量が 10, 50, 100 および 500 mg/m² の場合では、試験の初期から 28 日目

Amount of deposited salt (mg/m ²)	Test period		
	7 days	28 days	56 days
10			
50			
100			
500			
1 000			
3 000			

Shearing surface:
 Breaking surface: 1 mm

図3 ACTE試験におけるめっき鋼板の切断端面外観

Fig. 3 Cut edge appearance of coated steel sheets in ACTE

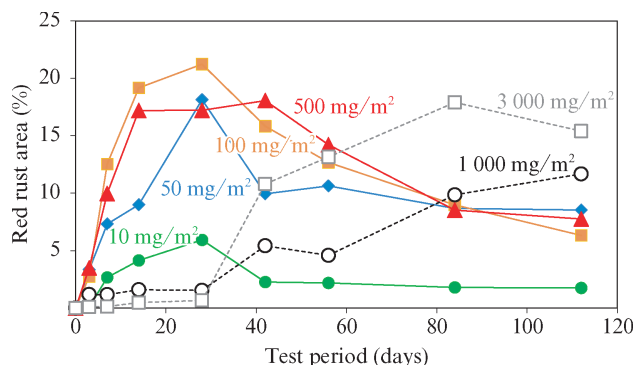


図4 ACTE試験における端面の赤錆発生面積率経時変化

Fig. 4 Time dependence of the red rust area ratio on the edge in ACTE

まで赤錆発生面積率は時間とともに増加し、その後徐々に減少した。付着塩分量の増加とともに、初期の腐食速度は増大する傾向であるが、100 mg/m²以上の塩分量では、あまり差が見られない。一方、付着塩分量が1 000および3 000 mg/m²の場合では、28日目まで赤錆発生が抑制され、それ以降に赤錆発生面積率の増加が見られた。その後、時間の経過とともに赤錆は増加して、112日目には、付着塩分量が少ない場合よりも赤錆発生面積率が高くなった。

付着塩分量が少ない場合、高湿度でも塩分の吸湿による水膜量が少ないため、めっきから離れた鋼部分まで亜鉛とのガルバニック対の形成による十分な犠牲防食効果が得られず、まためっきの腐食速度が小さく保護性のある亜鉛の腐食生成物である白錆の形成が少ないと考えられる。これらの結果、端面の特にせん断によるめっきの巻き込みが少ない破断面で、試験の初期から赤錆が発生したと推測している。一方、付着塩分量が多い場合、塩分の吸湿で端面の広範囲が電解質液膜で覆われ、めっきから離れた鋼部分でも亜鉛の犠牲防食により赤錆の発生が抑制されやすい。加えて、高濃度の塩分が白錆の形成を促進し、腐食初期においては端面が白錆に保護されると考えられる。

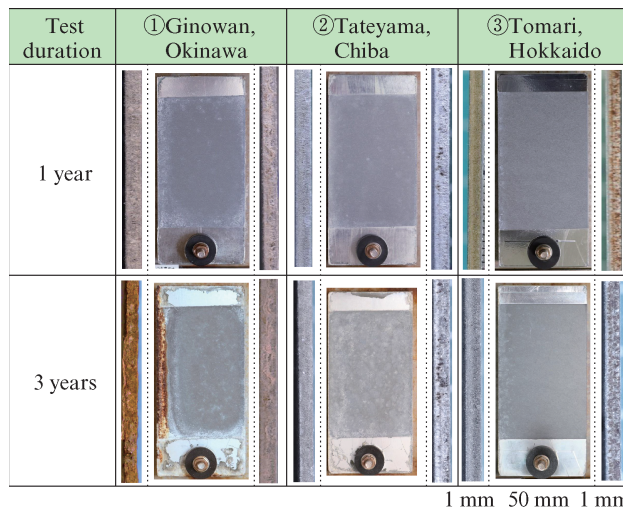


図5 暴露試験片の表面および切断端面の外観

Fig. 5 Appearance of surface and cut edge in exposure tests

3.2 大気暴露試験結果

沖縄県、千葉県および北海道における試験片の外観を図5に示す。写真は1年および3年経過時の試験片表面側および両側切断端面を示しているが、切断端面の腐食性には風向きなどの影響により偏りがあるため、特に赤錆の発生が確認された側の端面に着目して腐食挙動を述べる。

沖縄では、1年目は切断端面全体がめっきの腐食生成物と考えられる白錆に覆われ、赤錆の発生は確認されなかった。2年目では切断端面において赤錆の発生が認められ、3年目では赤錆が端面全体に広がるとともに表面にも赤錆が進展してきていることが分かる。千葉では、1年目の右側切断端面で、白錆の中に局所的な点状の赤錆の発生が確認され、3年目にかけて点状の赤錆がやや広がったが、端面全体で見ると白錆の方が多く、赤錆の広範囲への拡大は認められなかった。北海道では、右側切断端面に着目すると、1年目の時点で赤錆が多く見られ、2年目以降も切断端面全体に広がったが、3年目にはむしろ白錆が増えて赤錆の増加した様子は見られなかった。千葉、北海道の試験片表面には3年経過後も赤錆の発生はない。一方、端面に赤錆が観察された側とは反対側の端面から、表面に白錆が徐々に広がっている様子が見られた。

これらの結果から、沖縄のような付着塩分量が多い環境下では腐食初期に白錆が優先的に形成され、赤錆の発生が抑制されることが示された。これは、ACTE試験においても付着塩分量が多い条件(1 000 mg/m²以上)で、白錆が端面を被覆し、赤錆の発生が遅延するという傾向とよく一致している。一方で、千葉と北海道のような付着塩分量が少ない環境下では、早期に赤錆が局所的に発生し、後から白錆が端面を覆うように形成することで、初期に発生した赤錆の進展が抑制される傾向があることが示された。この傾向は、ACTE試験において付着塩分量が少ない条件(500 mg/m²

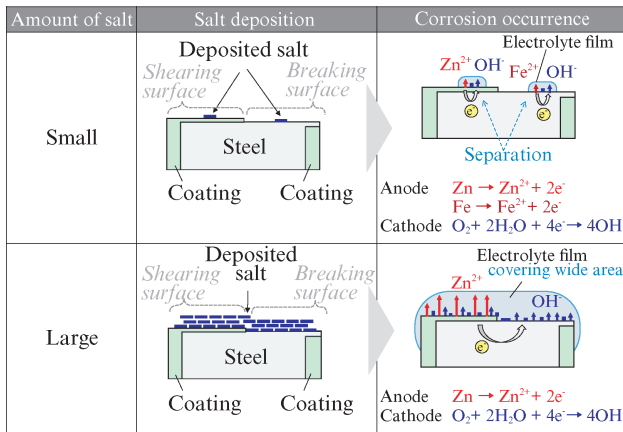


図6 切断端面における腐食メカニズムの推定

Fig. 6 Estimated mechanism of the cut edge corrosion of coated steel

以下)で、試験の比較的初期に赤錆が発生し、それ以降はあまり赤錆面積が増えない傾向と一致している。

3.3 端面の腐食挙動に及ぼす水膜の影響

ACTE 試験および大気暴露試験の結果から、熔融 Zn-5% Al 系めっき鋼板の端面腐食挙動は付着塩分量に依存することが明らかとなった。さらに、大気暴露試験においては、切断端面の腐食が表面の腐食と影響を及ぼし合っていることが示唆された。つまり、付着した塩分により形成される電解質液膜が表面と端面とを短絡させて電気化学反応を生じ、全体としての腐食挙動を決めているものと考えられる。これらの結果を踏まえ、付着塩分量の違いにより推定される腐食メカニズムを図6に模式的に示す。なお、本研究における供試材は熔融 Zn-5% Al 系めっきであり、実際には Zn や Fe 以外に Al も溶解や腐食生成物形成に関与すると考えられるが、ここでは金属元素が Fe と Zn のみの単純なモデルとして説明する。

付着塩分量が少ない場合、高湿度下の腐食が生じる場合でも、形成される電解質液膜が薄く、端面全体を十分に覆うことができないと考えられる。このような状況下では、亜鉛とのガルバニック対形成による犠牲防食効果が限定的となり、端面鋼部の腐食が進行しやすく、赤錆が優先的に発生すると考えられる。一方、付着塩分量が多い場合には、端面に比較的厚い電解質液膜が形成されるため、端面全体にわたりガルバニック対形成による亜鉛の犠牲防食効果が発揮される。その結果、試験の開始初期から亜鉛の腐食生成物である白錆が形成され、鋼の腐食および赤錆発生が抑制されると考えられる。

このような腐食挙動の違いは、付着塩分量に応じて形成される電解質液膜の厚さに起因する電気化学的条件の変化によるものであると推定される。特に、金属表面に海塩が付着した場合、NaCl や MgCl₂ など複数の塩類を含むため、こ

れらの塩類の吸湿作用により、周囲の相対湿度に応じて空気中の水分を吸収し、電解質液膜が形成される。NaCl 単体では飽和蒸気圧以下の湿度での吸湿は困難だが、MgCl₂ などを含む海塩ではより低湿度でも吸湿が進みやすく、塩分量が多いほど液膜が厚くなる傾向がある⁹⁾。形成された電解質液膜は腐食反応において、電気化学反応のアノード(例えば Zn や Fe などの溶解反応が生じるサイト)とカソード(例えば金属上の酸素還元反応や水素発生反応などが生じるサイト)間の電流の流れを媒介する。この電解質液膜中の電流の流れやすさは溶液抵抗 R_{sol} によって決まり、以下の式で表される。

$$R_{sol} = L / (\kappa \cdot S) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、L は水膜の長さ、S は水膜の断面積、κ は電導度である。付着塩分量が少ないため液膜が薄く形成される、あるいは液膜の連続性が乏しい場合には、断面積 S が小さくなることで溶液抵抗 R_{sol} が大きくなり、IR ドロップが増加する。その結果、Zn から離れた Fe への電流供給が制限され、犠牲防食に寄与する有効アノード面積が減少する。これにより、Fe 部の電位が Zn によって卑化することなく、Fe そのものの腐食電位で腐食し、赤錆が発生する。一方で、付着塩分量が多く液膜が厚く形成する場合には、断面積 S が大きくなることで溶液抵抗 R_{sol} が低下し、IR ドロップが減少する。そのため、表面や端面のせん断面に付着した Zn と Fe が電解質液を介して短絡し、広範囲にわたって電流供給が可能となり、犠牲防食に寄与する有効アノード面積が拡大する。結果として、カップリング電流が増加し、Fe の電位も Zn とのカップリング電位に近づく方向へと卑化し、Fe の腐食が抑制されると考えられる。以上のことから、端面腐食挙動の違いは、付着塩分量に応じた電解質液膜の形成と、それに伴う犠牲防食能の差に起因すると考えられる。

4. おわりに

熔融 Zn-5% Al 系めっき鋼板の端面腐食挙動に及ぼす付着塩分量の影響について ACTE および大気暴露試験を用いて調査した結果、以下のことが分かった。

- 1) 付着塩分量が少ない 500 mg/m² 以下では、腐食初期に端面に赤錆が発生し、その後は亜鉛の白錆形成により赤錆の進展が抑制される。一方、付着塩分量が多い 1 000 mg/m² 以上では、腐食初期に白錆が端面を被覆し赤錆発生を抑制する。時間の経過とともに赤錆が発生し、端面で赤錆が広がると、端部から表面に赤錆が進展していく。
- 2) ACTE の結果は、大気暴露試験の腐食挙動と比較的よく一致していることから、飛来塩分量が異なる実環境

におけるめっき鋼板の端面腐食挙動を、ACTE で予測評価できると考えられる。

- 3) 付着塩分量の差による端面の腐食挙動の違いは、水膜の厚さに起因する IR ドロップの差によって有効アノード面積が変化するためであると推定される。

本研究における知見は、建材用めっき鋼板の端面の腐食挙動に及ぼす付着塩分量の影響に関する基礎的な知見であり、腐食促進試験により実際の大気環境における腐食を再現できることを示唆している。今後、さらに端面における腐食挙動の理解を深めることで、建材用めっき鋼板の使用環境における精度の高い腐食予測技術や耐食性に優れた表面処理鋼板の開発に繋がることが期待される。

参考文献

- 1) Pelerin, J.; Bramaud, B.; Coutsouradis, D.; Radtke, S. 新 Zn-Al 合金めっき-Zn-5% Al-ミッシュメタルめっき鋼板一. 金属表面技術. 1982, vol. 33, no. 10, p. 474-488.
- 2) Blrickwedge, D. J. 55% Al-Zn-Alloy-Coated Sheet Steel. 鉄と鋼. 1980, vol. 66, no. 7, p.821-834.
- 3) 松本雅充, 木本雅也, 迫田章人, 工藤起夫. 塩水噴霧試験における 55% Al-Zn 合金めっき鋼板の切断端面近傍の腐食挙動. 鉄と鋼. 2005, vol. 91, no. 9, p. 700-705.
- 4) 関根健司, 端山菊雄. 亜鉛めっき鋼板における端面の耐食性. 防錆管理. 1986, vol. 30, p. 101-108.
- 5) 梶山浩志, 藤田栄, 藤井和美, 酒井政則. 現状腐食試験法の課題と新腐食試験法の開発—家電製品を模擬した腐食試験法の開発 (2)—. 材料と環境. 2006, vol. 55, no. 8, p. 356-363.
- 6) 梶山浩志, 藤田栄, 鷺山勝. 家電用表面処理鋼板の新耐食性試験法「ACTE」. JFE 技報. 2006, no. 12, p. 36-41.
- 7) ISO 16539: 2013. Corrosion of metals and alloys — Accelerated cyclic corrosion tests with exposure to synthetic ocean water salt-deposition process — “Dry” and “wet” conditions at constant absolute humidity.
- 8) 配電機材に対する劣化環境の定量評価専門委員会. 配電機材に対する劣化環境の定量評価. 電気協同研究. 2013, vol. 69, no. 3, p. 56-137.
- 9) 押川渡, 篠原正, 元田慎一. 強電解質が吸水してできる水膜組成と水膜厚さの推定. 材料と環境. 2003, vol. 52, no. 6, p. 293-298.