

# 新高耐食めっき鋼板“ZEXEED®”

## New Corrosion Resistant Coated Steel “ZEXEED™”

徳田 公平\*  
Kohei TOKUDA

齊藤 完  
Mamoru SAITO

後藤 靖人  
Yasuto GOTO

中村 文彰  
Fumiaki NAKAMURA

石田 欽也  
Yoshinari ISHIDA

松村 賢一郎  
Kenichiro MATSUMURA

### 抄 録

Zn-Al-Mg系合金めっき鋼板として約20年ぶりとなる新高耐食めっき鋼板“ZEXEED®”を開発・実用化した。“ZEXEED”の開発においては溶融めっき鋼板が本来有する耐食性の確認の他、使用環境と形態を考慮した耐食性確認を実施した。“ZEXEED”の耐食性は、めっき層に多量に含有されるMgの防食効果により、従来のJIS G 3323(溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板)と比較して約2倍、JIS G 3302(溶融亜鉛めっき鋼板)の約10倍の耐食性を示すことをJASO試験によって確認しており、ライフサイクルコストが重要視される社会資本や、過酷な腐食環境で用いられる製品の長寿命化が期待される。

### Abstract

Nippon Steel Corporation developed and launched new corrosion resistant Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets “ZEXEED™” for the first time in 20 years. During the development time, we focused on not only the corrosion resistance inherent in the coating, but also that under an actual use environment. ZEXEED has approximately double the corrosion resistance of that of JIS G 3323 (conventional Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets), or 10 times that of JIS G 3302 (commodity type Zn coated steel sheets) under the cyclic corrosion test (JASO mode) environment. It is expected to be widely used in social facilities in severe corrosion environments, and thus extend their life span.

## 1. 緒 言

建材・土木市場では、鋼材を経済的に防食する手段として溶融めっき法が広く採用されている。部材の長寿命化に直結するめっき層の高耐食化には、めっき層中にZnの他に、Al, Mg等の合金元素を添加した溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板(JIS G 3323)が使用されている。日本製鉄(株)は2000年から、“ZAM®”<sup>1)</sup>、“SuperDyma®”(以下、SDと称す)<sup>2)</sup>が販売されており、両製品の国内外累計販売量は約1500万トンを超えている。2021年10月からは、約20年ぶりとなる新溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板“ZEXEED®”の販売を開始した。

2013年の国土交通省の“今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について”の答申において、国内の社会資本(道路橋、トンネル、河川、下水道、港湾等)の多くは高度成長期以降に整備されており、今後20年で建設後50年を

経過する施設の割合が加速度的に増加することが示されている。また施設の老朽化については建設年度で一律に決まるものではなく立地環境や維持管理状況等により異なるが、ここでは便宜的に“建設後50年”で整理されていることが報告されている。さらに翌年2014年には“国土交通省インフラ長寿命化計画(行動計画)”が決定し、以降、中長期的な維持管理・更新等のコスト(LCC)を意識した技術に注目が集まっている。この分野では従来、JIS H 8641(後めっき、またはどぶ漬けZnめっき)に代表される溶融亜鉛めっきが多く使用されているが、耐食性不足の課題があり、特に社会基盤の根幹を構成する社会資本が多いことから高耐食化のニーズが高い。このような社会的背景を踏まえて開発された“ZEXEED”は優れた耐食性を活かし、LCC削減や社会インフラ老朽化対策に加え、労働人口の減少に対応する省工程・省力化にも貢献できる材料である。

製品・施設の正確な寿命判断には、めっき層の耐食性を

\* 鉄鋼研究所 表面処理研究部 めっき研究室 研究第一課長 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

正確に見積もる必要がある。これには、実使用環境での暴露試験が最も重要な役割を果たすが、寿命確認のための数十年に及ぶ長期間の暴露試験の実施は非現実的である。また溶融めっき鋼板の寿命は、メンテナンス状況を含む使用状態・使用環境の他、製品構造（プレめっき鋼板においては製品への加工形態）にも依存するため、現実的には、短期的な腐食促進試験で、様々な想定をもとに寿命予測することが好ましい。今回、“ZEXEED”の開発においては、製品・施設の社会の様々なニーズに応えるため、寿命予測についても見直しが図られている。正確な寿命予測には、下記、3点が特に重要である。(1) 暴露腐食環境と腐食促進試験における関連性の評価。(2) めっき層自体が有する正確な耐食性の評価。(3) 加工部における耐食性劣化の見極め。

暴露腐食環境別の耐食性把握は、近年、高耐食めっきの採用において広く知られるようになった。いわゆる使用地域における海塩粒子濃度・気温等の腐食因子と耐食性の関係の調査である。例えば、国際標準化機構（ISO）では炭素鋼・亜鉛等の腐食量に応じた大気腐食の腐食性レベルとして、C1（非常に低い腐食性）～CX（極端に高い腐食性）の6段階（表1）に識別<sup>3)</sup>されており、寿命予測には、これらの環境での耐食性把握が必要である。国内では、海岸までの距離に応じた飛来塩分量が見込まれるため海岸地域程、腐食環境が厳しくなり、緯度が低い方が気温は高くなる傾向にあるため腐食環境が厳しくなる。また、腐食促進試験においては、従来、塩水噴霧試験（SST）が広く使用されていたが、より実使用環境での腐食状態に近い複合サイクル試験（CCT）によって評価されることが好ましい。

次に暴露試験での将来の腐食状況を予測するために、めっき層の腐食促進試験における耐食性を評価する必要がある。これには腐食減量評価に基づくめっき層の減肉速度、及び腐食生成物による防食期間の見極めの2点が必要である。めっき鋼板の主な防食期間は、これら2点で確定するため前者については適切な腐食生成物除去（酸洗）方法、後者においてめっき鋼板上の腐食生成物の保持期間を見極める必要がある。

最後にZAM, SD, “ZEXEED”等のめっき鋼板の分類は連続溶融めっきラインでのめっき後に加工に供されるプレめっき鋼板に属し、鋼板の加工後にめっきする後めっきとは区別して取り扱う必要がある。加工とは、切断、曲げ、

ボルト・溶接などの接合等であり、これらの部位では必然的にめっき層に加工による耐食性劣化が起こる。ただし、その程度は、めっき層の成分組成や相構成に大きく依存するため、適切な加工を施せばプレめっき鋼板の高耐食性を十分に維持することは可能である。

ここでは“ZEXEED”に備わる、従来のJIS G 3323（溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板）と比較して約2倍、JIS G 3302（溶融亜鉛めっき鋼板）の約10倍の耐食性の考え方を紹介すると共に、今後の製品・施設の寿命予測に必要な溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきの耐食性評価方法、及び、その加工部位における対策手段等を紹介する。

## 2. 本 論

### 2.1 国内の腐食環境と腐食促進試験

四方を海に囲まれた日本国内の主な地点の環境は、一般財団法人日本ウエザリングテストセンターの大気暴露試験ハンドブック<sup>4)</sup>によれば2004年時点でC3環境に属する環境が多く、沖縄地方がC4で海岸距離によりC5, CXになることが推測できる。

腐食促進試験には古くからISO9227に定められるSSTが用いられてきた。SSTは品質管理方法としては適した試験方法であるが、大気暴露環境での腐食との相関性に欠けるため、近年、実環境での寿命予測にはCCTが用いられるようになってきている<sup>5)</sup>。最も一般的なCCTは日本自動車規格（JASO）に規定されるJASOサイクル試験（M609）<sup>6)</sup>であり、再現性がよく、広く耐食性を確認するのに適した腐食促進試験である。暴露試験との相関性を確認する際、JASOサイクル試験は長時間ではSSTよりも厳しい腐食試験<sup>7)</sup>であり、例えば裸鋼板の腐食外観については、JASO45サイクルが沖縄での屋外暴露約1年に近いことが報告されている。また、JASO試験におけるZnの腐食速度から換算した場合、JASO30サイクルが沖縄約3年に相当するとされている報告もある<sup>8)</sup>。今回“ZEXEED”の耐食性評価はZnを主体とするめっき層の腐食減量にて耐食性を評価しているため、JASO30サイクルを暴露予測基準としている。

### 2.2 めっき層の耐食性評価

図1に日本製鉄で測定された各種Znめっき層の腐食減量推移を示す。この腐食減量値は、腐食生成物除去方法としていずれも常温（23℃）の30%クロム酸（VI）水溶液に15分間浸漬して測定した。通常、亜鉛及び亜鉛合金の腐食生成物の化学的除去方法としてJIS Z 2371<sup>9)</sup>、及びISO 8407<sup>10)</sup>に除去方法が提案されているが、煮沸された酸化クロム（VI）水溶液の浸漬はブランクロスがZnめっきで存在することが示されている。日本製鉄知見においてもJIS G 3323や“ZEXEED”でブランクロスが確認されること、さらには腐食減量の増大に伴い誤差が大きくなり長期の腐食試

表1 大気腐食の腐食性レベル  
Classification of Environments

Category	Corrosivity
C1	Very low
C2	Low
C3	Medium
C4	High
C5	Very high
CX	Extreme

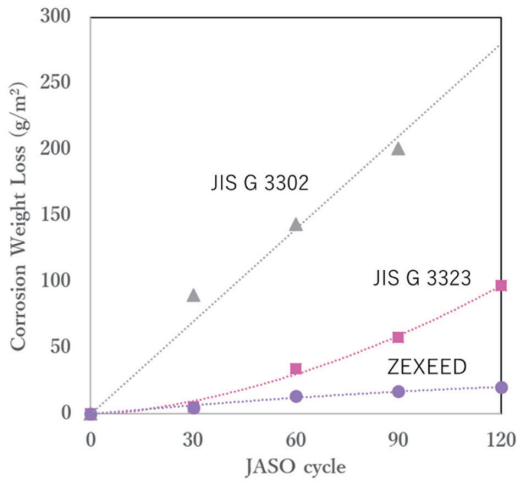


図1 各種 Zn めっき層の腐食減量推移  
Changes in corrosion weight loss of Zn coatings

験で正確性に欠けること等から、近年開発された Mg を含有する溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきに適していないと判断している。また、その他の規定される酸種では、Al, Mg を含有する塩化物、大気腐食環境で生成する硫酸系腐食生成物が完全に除去できないなどの課題があり、常温 (23℃) の 30% クロム酸 (VI) 水溶液浸漬が、めっき損傷の最小化 (ブランクロスの低減)、化学反応速度、腐食生成物除去性が優れる手段であった。なお、図1の腐食減量の推移からは、JASO50 サイクルで“ZEXEED”の腐食減量は 10g/m<sup>2</sup> に到達し、JIS G 3323 の約 1/2、JIS G 3302 の約 1/10 となり、その後、差はさらに拡大する。前記の JASO 試験における沖縄暴露年数換算想定からは、JIS G 3323 と明瞭な耐食性差は JASO50 サイクル、すなわち、約 5 年の沖縄暴露で確認されると推測される。また、腐食減量の推移から寿命予測する場合、亜鉛めっき被膜の推定耐用年数の計算方法が知られており<sup>1)</sup>、

$$\text{〔耐用年数〕} = \text{亜鉛付着量 (g/m}^2\text{)} / \text{腐食速度 (g/m}^2\text{/年)} \times 0.9$$

を指標とすると“ZEXEED”付着量記号 T20 (≒片面 100g/m<sup>2</sup> 以上) で約 450 サイクル前後 (沖縄約 45 年相当) が耐用年数となる。実際には腐食減量がめっき付着量に到達した場合でも腐食生成物による地鉄の保護期間が存在するため、直ちに鋼材から赤錆が発生することはない。図2は JASO 試験における“ZEXEED”の腐食外観であり、JASO 1000 サイクルにおいてもめっき表面で赤錆発生に至っていない。これは JIS G 3323 や“ZEXEED”に備わる Mg を含有することによる腐食生成物の安定化効果<sup>1,2)</sup>であり、Mg 量が多い“ZEXEED”は JIS G 3323 よりも、長期に渡って塩基性塩化亜鉛が安定し、体積膨張を伴い保護被膜効果に劣る酸化亜鉛への変態が抑制されているためである。

### 2.3 加工部の耐食性

製品の性質上、JIS G 3323 及び“ZEXEED”はプレめっき鋼板であり溶融めっき後に加工されるため、加工形態に

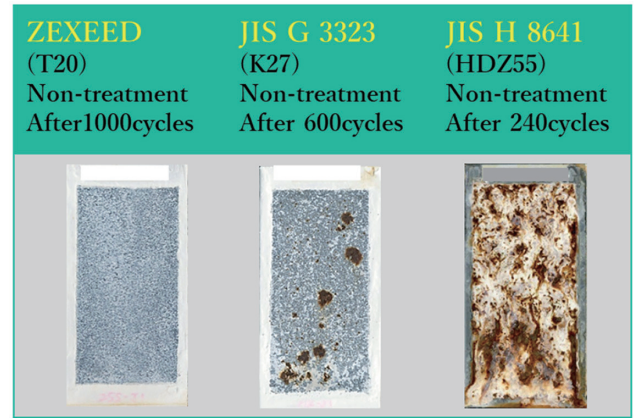


図2 JASO 試験での各めっき層の腐食外観  
Appearance of coated steel sheets in CCT (JASO)

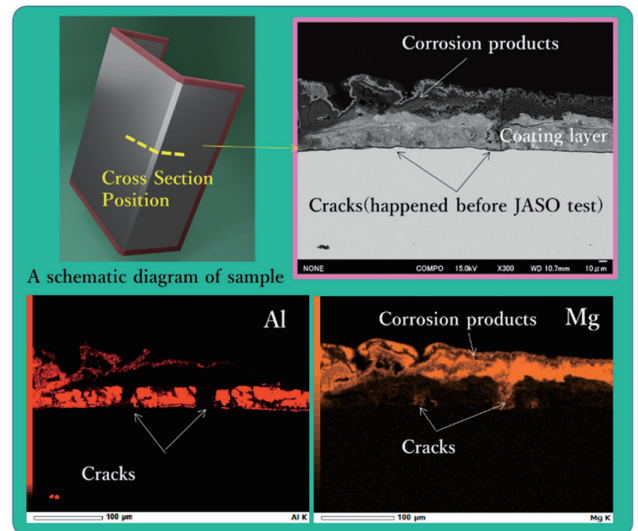


図3 ZEXEED の 90° 曲げ加工部の SEM-EDS 観察 (JASO 600 サイクル後)  
SEM-EDS images of 90-degree-bending part in ZEXEED (After JASO 600 cycles)

よって亀裂や溶接熱などによるめっき層の損傷がある。主な損傷の形態としては、曲げ・絞り加工等によるめっき層亀裂の発生、切断・パンチング加工による切断端面部の露出、ボルト接合による異種金属接触腐食、溶接によるめっき層の減肉と変性等が存在する。プレめっき鋼板の加工時の性能を把握し、対策することでプレめっき層が本来有する耐食性に近づけることが可能である。

曲げ加工部における溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき層は、密着する鋼と比較すると塑性変形能が異なるため、加工時に鋼の変形量に追従できず、めっき層に亀裂が生じる。図3はロールフォーミング加工後の“ZEXEED”について JASO600 サイクル後の曲げ加工部を断面観察 (元素分析) した結果である。90° 曲げ加工部の亀裂間の地鉄露出部は、めっき層の犠牲防食作用により防食され、腐食生成物で覆われる。腐食生成物で被覆されると腐食の進行が抑制されるが、この作用に Mg が重要な役割を果たしていることが確認できる。



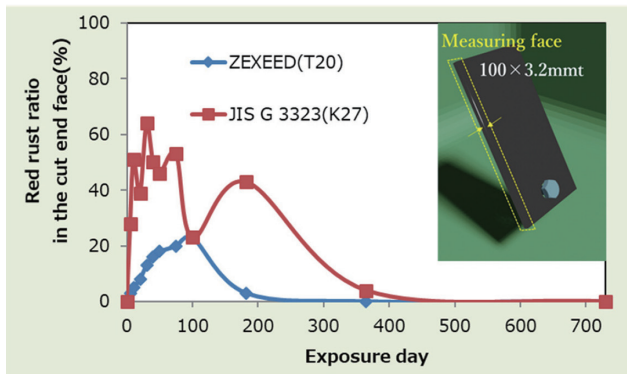


図4 ZEXEEDの切断端面部の赤錆面積率推移 (3.2mmt) (暴露地：富津屋外2年間)

The transition graph indicating red rust of 3.2 mm-ZEXEED cut end face in Futtsu, Japan

また加工部の亀裂と比較して地鉄露出面積の大きい切断端面部はプレめっき鋼板の犠牲防食性とその周囲での腐食速度を小さくする平面部耐食性の両立が求められる箇所である。図4に示すように、“ZEXEED”はJIS G 3323より切断端面部で赤錆が目立ちにくい状況にあり、これは地鉄露出部がMgを含有する腐食生成物によって早期に被覆されるためである。

ボルトを介して機械的にめっき鋼板を接合する場合、高耐食めっき鋼板であるプレめっきの性質を発揮するためには同じく高い耐食性を有するボルトを採用することが望ましいが、ステンレス (SUS) を使用した場合、めっき鋼板との接触部で異種金属接触腐食が起こる。“ZEXEED”においても金属原子から構成される合金めっきであるため、この現象は避けられないが図5に示すように、JIS G 3323よりもボルト接合部周囲でも赤錆抑制効果は優位であることが確認されている。

接合方法としてアーク溶接を使用した場合、めっき層の損傷は溶接ビード部以外に、熱影響部 (HAZ) にも及ぶ。溶接部の耐食性対策として、ステンレス系シームレスフラックス入りワイヤNSSW SF-309SD (スーパーダイマ<sup>®</sup>及びZAM<sup>®</sup>溶接用フラックス入りワイヤ<sup>12)</sup>)を“ZEXEED”にも適用することで溶接部周囲まで優れた耐食性を維持することが可能である (図6)。その他の溶接部の補修として、各種ジンクリッチペイントの補修等を用いることも可能であり、溶接が含まれる大型構造物に対してもプレめっき鋼板を採用することで高耐食化が期待できるようになっている。

### 3. 結 論

カーボンニュートラルを目指す新しい再生可能エネルギーへの期待、新型コロナウイルスの拡大による社会構造の変化などにより、省エネルギー、LCC低減、メンテナンスフリー等の要望が高まった中、これらを実現するためには社会資本を支える構造材料の長寿命化が必要であり、それを支える溶融めっき鋼板には高い耐食性が必要となって

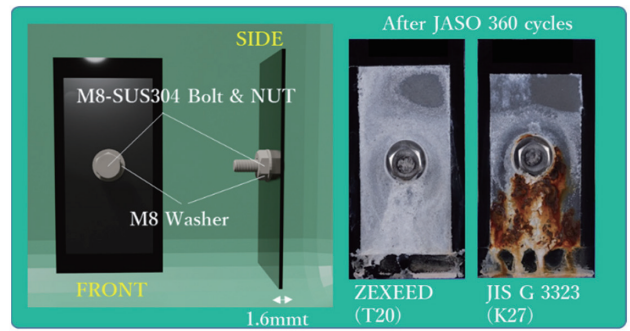


図5 ステンレスボルト接合体の腐食外観 (JASO360 サイクル後)  
Appearances of SUS joined body (After JASO 360 cycles)

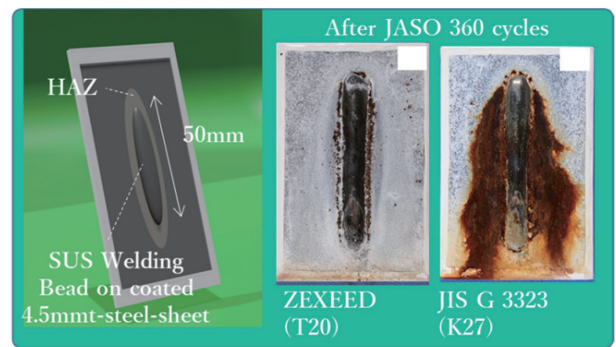


図6 SUSビード (NSSW SF-309SD) 部周囲の腐食外観 (JASO360 サイクル後)  
Appearances of SUS bead (NSSW SF-309SD) surroundings (After JASO 360 cycles)

いる。近年、社会資本施設・製品・設備の設計においては、使用環境や形態を意識した開発がなされている。“ZEXEED”の開発においては、まず暴露環境に近い促進試験やその腐食状況を把握することを最重要項目として位置づけ、既存の溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきよりも優れた耐食性を実現した。また、単純にめっき層の有する耐食性レベルの確認に限らず、プレめっき鋼板の課題となる使用形態での耐食性についても高い耐食性レベルを維持することも同時に重要項目として含め、製品として想定される様々な加工に対しても高い耐食性が維持できることを確認した。社会の様々なニーズに応える製品開発を第一に取り組んだ“ZEXEED”の提供を通じて、従来実現できなかった多種多様な製品の創出や、腐食環境の厳しい地域での社会資本構築と維持に貢献することを切願する。

#### 参照文献

- 1) 清水剛 ほか：鉄と鋼. 89 (1), 166-173 (2003)
- 2) 森本康秀 ほか：鉄と鋼. 89 (1), 161-165 (2003)
- 3) ISO 9223 (1992) Corrosion of metals and alloys —Corrosivity of atmospheres— Classification, determination and estimation
- 4) 一般財団法人日本ウエザリングテストセンター：大気暴露試験ハンドブック. 2007
- 5) 須賀茂雄：表面技術. 62 (1), 30 (2011)

- 6) JASO M 609(1991) 自動車用材料腐食試験方法
- 7) 一般財団法人日本ウエザリングテストセンター：促進試験ハンドブック. 2009
- 8) 中村清徳 ほか：日本建築学会大会学術講演便覧集(近畿). 5 (1996/09)
- 9) JIS Z 2371 (2015) 塩水噴霧試験方法
- 10) ISO 8407(2021) Corrosion of metals and alloys —Removal of corrosion products from corrosion test specimens
- 11) 一般財団法人日本溶融亜鉛鍍金協会：溶融亜鉛めっきの耐食性 (2004)
- 12) 水本学：日鉄溶接工業(株) 技術情報トピックス (2020/07)



徳田公平 Kohei TOKUDA  
鉄鋼研究所 表面処理研究部  
めっき研究室 研究第一課長  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



中村文彰 Fumiaki NAKAMURA  
薄板事業部 薄板営業部 薄板商品技術室  
部長代理



齊藤 完 Mamoru SAITO  
瀬戸内技術研究部 高機能鋼板研究室  
表面処理研究課 主幹研究員



石田欽也 Yoshinari ISHIDA  
鉄鋼研究所 接合研究部  
接合プロセス研究室 研究第二課長



後藤靖人 Yasuto GOTO  
瀬戸内技術研究部 高機能鋼板研究室  
表面処理研究課長 博士(工学)



松村賢一郎 Kenichiro MATSUMURA  
鉄鋼研究所 表面処理研究部長  
(現 日鉄鋼板(株) 取締役執行役員)