

## 解説

受賞技術 - 44

# 塗装欠陥部の腐食を抑制する Sn添加鋼の開発

Development of Sn Bearing Steel Reducing Corrosion Progress at  
Paint Defect

日本製鉄(株)  
技術開発本部 鉄鋼研究所  
材料信頼性研究部 耐食材料研究室  
課長

菅江清信  
Kiyonobu Sugae

日本製鉄(株)  
厚板・建材事業部厚板技術部  
厚板商品技術室  
主幹

長澤 慎  
Makoto Nagasawa

日鉄総研(株) 参与  
サステナビリティソリューション事業部  
副事業部長

上村隆之  
Takayuki Kamimura

## 1 緒言

橋梁は人の移動と物流を円滑にする経済活動において不可欠な社会インフラストラクチャーの一つである。我が国の橋梁の多くは、高度経済成長期に建設され、建設後約50年経過し、老朽化が進展している<sup>1)</sup>。近年、少子高齢化が進み、労働人口の減少に伴い老朽化した橋梁の維持管理は、国や地方公共団体の財政への負担となっていることから、橋梁の長寿命化とライフサイクルコストの低減が求められている。

橋梁の老朽化の主要因は疲労損傷と腐食である。腐食を防止するため橋梁をはじめとする鋼構造物の多くは塗装防食が施されている。近年は、防食下地に無機ジンクリッチペイントとエポキシ樹脂塗料、耐紫外線劣化に優れるフッ素樹脂塗料を組み合わせた塗装仕様であるC-5塗装仕様が橋梁用一般外面塗装仕様として適用されている。しかしながら、部材角部や架設時の盤木接触部で腐食が発生している<sup>2)</sup>。また、主桁の下フランジ下面や橋梁の桁端部においては、結露や雨濡れの雫が留まり濡れ状態が長くなりやすく、腐食劣化の進展が進むことが報告されている<sup>2,3)</sup>。大気環境における塗装欠陥部の腐食は、重防食塗装のみでは抑制することは十分ではない。塗装欠陥部の腐食を抑制するためには、鋼材の耐食性を高めることが解決手段の一つであると考えられるが、塗装欠陥部や塗膜下で進展する地鉄の腐食反応メカニズムは十分に理解されていない。

本報告では、大気環境における塗装欠陥部の腐食メカニズムについて解説するとともに、塗装鋼構造物の弱点である塗装欠陥部の腐食を抑制するSnを添加した新たな耐食材料について紹介し、開発鋼材の適用による鋼橋のライフサイクルコスト(LCC)の縮減期待効果について述べる。

## 2 大気環境における塗装欠陥部の腐食メカニズム

### 2.1 乾燥と湿潤の繰り返し環境における塗装欠陥部の腐食と溶液pH変化

大気環境における鋼の腐食は、降雨や結露による濡れと乾燥を繰り返す雰囲気中で鋼表面に形成した極めて薄い水膜の中で、海水中の没水環境と同様に鉄のアノード溶解反応式(1)に対して酸素還元反応のカソード反応式(2)が進展する。



これらの反応は薄膜水で進展するため、従来の腐食研究で広く用いられてきた電気化学測定等の計測技術を容易に適用して検討することは困難であった。Kelvin Probeを用いることで、非接触で鋼材の腐食電位を計測することができる。さらに微差圧計測による酸素消費量の計測結果から、腐食速度を求める差

圧法を併用することで、腐食電位変化と腐食速度を同時計測することができる<sup>47)</sup>。著者らは、Kelvin Probe/差圧法を用いて乾湿繰り返し条件の乾燥過程における鋼の腐食挙動を解析した。乾湿繰り返し環境における薄膜水中の腐食電位の変化と腐食速度の変化を図1に示す<sup>7)</sup>。乾燥により液膜厚が小さくなると腐食速度が急激に増加し、腐食電位は貴化する<sup>47)</sup>。液膜を透過する酸素量が増加することで、酸素還元反応であるカソード反応が増加し、鉄のアノード溶解反応が進行すると考えられている。

## 2.2 薄膜水中のアノード部のpH変化

上述したように大気環境の腐食は、薄膜水中でアノード部とカソード部に分離して進行する。著者らは、薄膜水中のアノード部に形成するさび層がアニオン選択性を有すること<sup>8)</sup>に着目し、図2に示すアニオン選択透過膜を設置した微小アノードセルを作製した<sup>9)</sup>。その結果、微小アノードセル内は濃

厚な塩化物イオンの低pH環境となることを確認した(図3)。pHの低下要因は、アノード溶解した $Fe^{2+}$ の空気酸化物である $Fe^{3+}$ の加水分解反応によりpHが低下したと考えられる<sup>9)</sup>。

## 2.3 塗装欠陥部の腐食メカニズム

塗装欠陥部を中心とする塗膜下腐食は、無塗装の鉄の腐食と同様にアノードとカソードに分離して進行する<sup>9)</sup>。図4(a)に示すように塗装欠陥部で鉄の溶解するアノード反応が、その周囲の塗装下で酸素還元反応のカソード反応が進行する<sup>11)</sup>。そのため、大気環境における塗装欠陥部の腐食は、上述した乾湿繰り返し環境の薄膜水中の腐食と同様であると考えられる。鉄の溶解するアノード部においては、電気的な中性条件を満たすために、塩化物イオンが電気泳動し濃化する<sup>9)</sup>。液膜厚の減少と電気的な中性条件による泳動濃化により、乾燥過程の薄膜水中のアノード部は濃厚な塩化物イオン

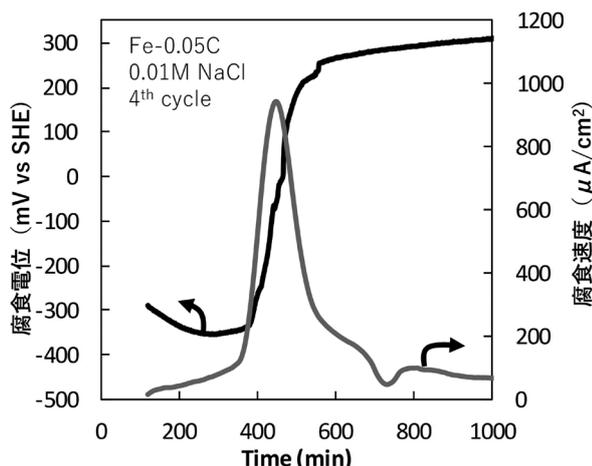


図1 乾湿繰り返し環境の鉄の腐食速度と腐食電位の変化<sup>7)</sup>

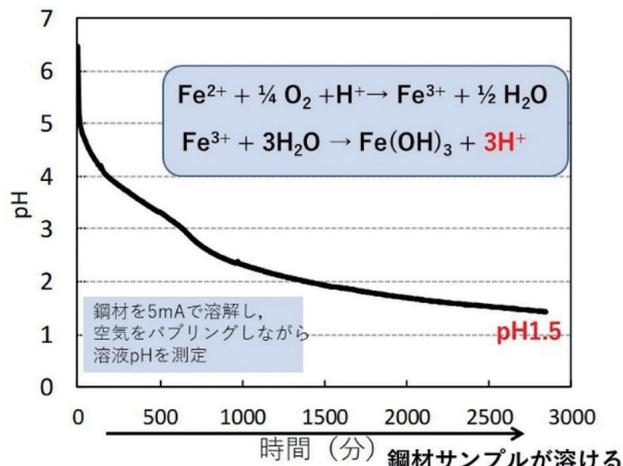


図3 模擬微小アノードセルのpH変化<sup>9)</sup> (Online version in color.)

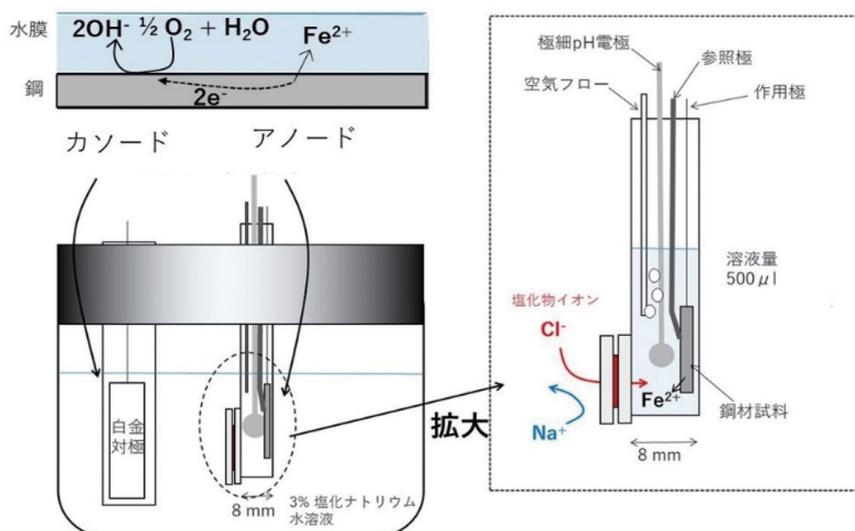


図2 薄膜水中の局所アノード部を模擬した微小アノードセルの模式図<sup>9)</sup> (Online version in color.)

環境になると考えられる<sup>9)</sup>。

### 3 Sn添加による塗装欠陥部の耐食性

#### 3.1 Snの耐食性メカニズム

大気環境における塗装欠陥部は局所的なアノード部となり、濃厚な塩化物イオンの低pH環境となることから、従来の耐候性鋼のようなさび層の保護性に期待することは難しい。そこで、濃厚な塩化物イオンの低pH環境で鉄の溶解反応を抑制する元素を探索した。酸性水溶液中において鉄のアノード溶解反応を電気化学分極測定により各種合金元素を検討したところ、Snは酸性水溶液中の鉄のアノード溶解反応抑制することを確認した<sup>9,10)</sup>。図4 (b) に鋼中のSnによる塗装欠陥部の耐食性メカニズムを示す。大気環境における塗装欠陥部は局所的なアノード部となり、濃厚な塩化物イオンの低pH環境となる。鋼材に添加したSnは地鉄とともに電解水溶液中へ溶出するが、地鉄とSn原子の仕事関数の違いによりSn<sup>2+</sup>は鉄が活性溶解する表面に原子1層分程度の析出層を形成するアンダーポテンシャル析出という現象により鉄のアノード溶解反応を抑制すると考えられる<sup>11)</sup>。

#### 3.2 腐食促進試験と大気暴露試験での耐食性

図5と6に腐食促進試験結果を示す。腐食促進試験は、大気環境における無塗装の腐食形態を類似している点<sup>12)</sup>や米国において凍結防止剤散布環境の自動車や橋梁の腐食の評価に用いられている点より<sup>13)</sup>SAEJ2334試験を用いた。Sn添加鋼

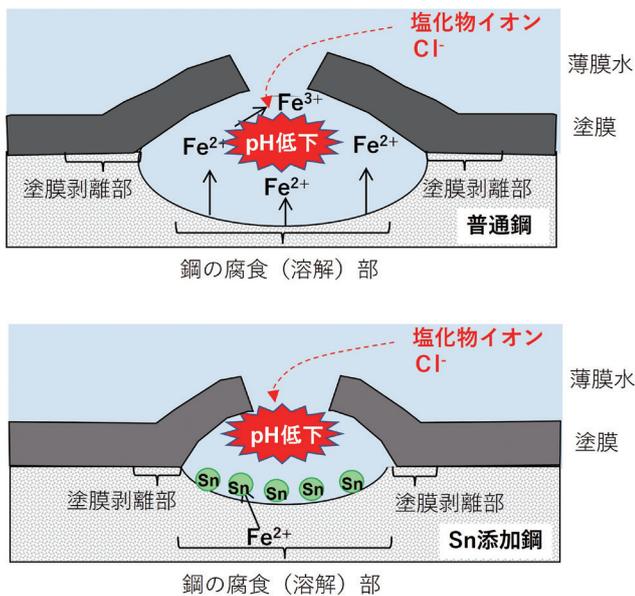


図4 塗装欠陥部の腐食機構模式図 (a) 普通鋼の腐食促進機構、(b) Sn添加鋼の腐食抑制機構 (Online version in color.)

は、普通鋼 (SM490鋼) に比べて塗装剥離も腐食深さも抑制できることを確認した。

図7に沖縄海岸における5年間の暴露試験結果を示す。橋梁用一般外面塗装仕様のC-5塗装仕様でも沖縄の厳しい腐食環境では普通鋼は激しく腐食が進展するのに対し、Sn添加鋼は塗装欠陥部の腐食を抑制した。

以上の腐食試験結果よりSn添加鋼は、優れた耐食性を有する上に、JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材、JIS G 3140 橋梁

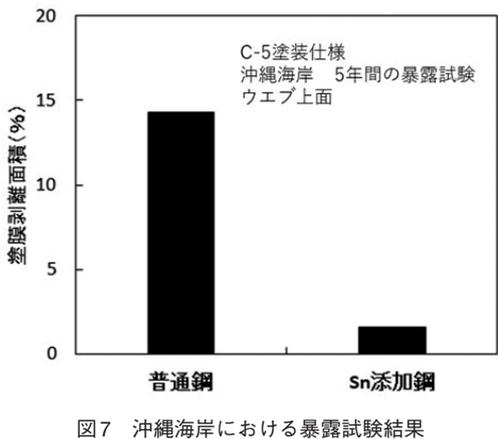
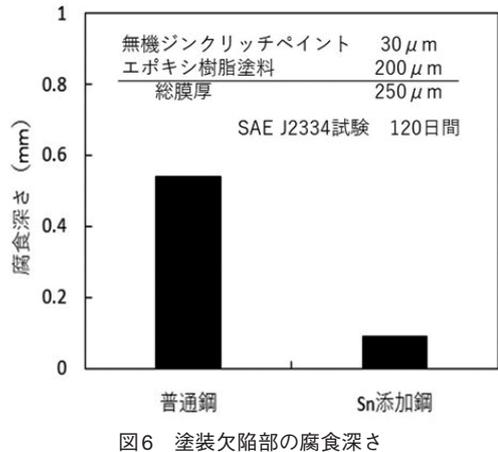
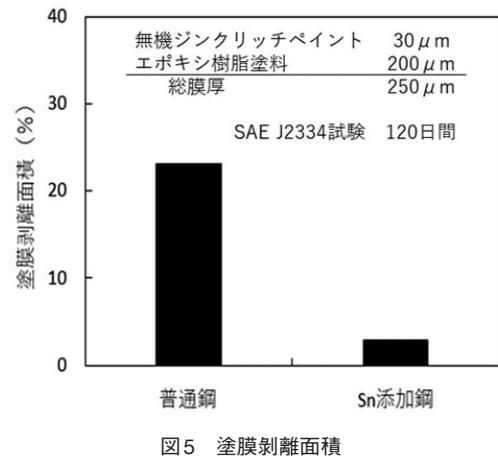


表1 ライフサイクルコスト算出の為のモデル橋梁の詳細

橋長	121.0 m (37.0 + 46.0 + 37.0 m)
全幅員	11.5 m
総鋼重	187.3 ton
塗装面積	3,541 m <sup>2</sup>

用降伏点鋼板、JIS G 3101一般構造用圧延鋼材が要求する機械特性ならびに溶接継手特性を満足し、さらに道路橋示方書に記す機械特性と溶接継手特性満足することを確認した。Sn添加鋼は、塗装周期延長鋼として上市している。また、専用溶接材料等の開発を完了している。

## 4 鋼橋のライフサイクルコストの縮減と適用事例

近年、橋梁をはじめとする社会インフラを社会的資本として捉え、将来の維持管理を含めて費用対効果を考慮して新設設計や補修計画を立案するアセットマネジメントの導入が進められている。開発したSn添加鋼は、塗装の弱点である塗装欠陥部の腐食を抑制することができ、普通鋼に比べて塗装塗り替えに至る期間を約2倍にできる<sup>14)</sup>。LCCの試算として国内の橋梁に多く用いられている鋼3径間連続少数桁橋(表1)で、初期塗装を橋梁一般外面塗装仕様のC-5仕様とし、補修塗り替え塗装をRc-Iで施工するものとした。橋梁が架設される環境を海岸などの腐食の厳しい環境とした。同環境においては、普通鋼の重防食塗装の耐用年数が30年とされ、Sn添加鋼は普通鋼の約2倍の耐食性を示すことから耐用年数は60年となる。そのため、100年間の供用期間中における塗装塗り替えは、普通鋼は3回、Sn添加鋼は1回となり、Sn添加鋼のLCCの縮減効果は最大で75%となる<sup>15)</sup>。またさらに、Sn添加鋼の適用による塗り替え工事の回数削減により塗料から発生する環境負荷の高い有機揮発物質(VOC)や工事により発生する温室効果ガス排出を抑制することができ、社会資本に対する経済性と地球環境の負荷軽減に寄与できると考える。沖縄県など塩害の厳しい環境だけでなく、融雪剤散布を行う東北・北陸などの積雪地帯、さらには将来的な塗装塗り替え足場の設置困難となるような道路・鉄道跨線橋などを中心に、これまで51橋(2022年3月末)に採用され、また港湾クレーン等にも展開されている。

## 5 結言

大気環境における塗装欠陥部の腐食メカニズムと溶液変化に関する基礎研究より、Snを鋼材中に微量添加すること

で塗装欠陥部の腐食を著しく抑制できることを見出した。Sn添加鋼は、橋梁をはじめとする鋼構造物の塗装塗り替え周期を延長することが期待でき、経済性と地球環境の負荷に貢献できる塗装鋼構造物向けの新たな耐食鋼材である。

以上、述べた開発成果に対して、第9回ものづくり日本大賞優秀賞、第55回市村産業賞貢献賞を受賞できた。推薦を頂いた日本鉄鋼協会をはじめとする関係者の皆様に深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本の老朽化対策情報のポータルサイト、[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02\\_01.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html)
- 2) 原田孝：平成25年度四国整備局管内技術・業務研究発表会論文、<https://www.skr.mlit.go.jp/kikaku/kenkyu/h25/index.html>
- 3) 細井章浩、伊藤義人、金子恵介、杉浦友樹：構造工学論文集, 57A (2011), 669.
- 4) M. Stratmann and H. Streckel : Corros. Sci., 30 (1990), 681.
- 5) M. Stratmann and H. Streckel : Corros. Sci., 30 (1990), 697.
- 6) T. Kamimura and M. Stratmann : Corros. Sci., 43 (2001), 429.
- 7) K. Sugae, T. Kamimura, H. Miyuki and T. Kudo : Mater. Trans., 59 (2018), 779.
- 8) 幸英昭, 山下正人, 藤原幹夫, 三澤俊平 : Zairyo-to-Kankyo, 47 (1998), 186.
- 9) T. Kamimura, K. Kashima, K. Sugae, H. Miyuki and T. Kudo : Corros. Sci., 62 (2012), 34.
- 10) 上村隆之, 西尾大, 前田隆雄, 吉田直嗣, 鹿島和幸, 菅江清信, 幸英昭, 工藤赳夫 : 材料と環境, 62 (2013), 187.
- 11) Y. Takabatake, K. Sugae, M. Ito, K. Kashima, H. Miyuki and T. Kamimura : Electrochem. Soc., 166 (2019), C217.
- 12) 長野博夫, 内田仁, 山下正人 : 環境材料学—地球環境保全に関わる腐食・防食工学, 共立出版, (2004), 74.
- 13) N. Damgaard, S. Walbridge, C. Hansson and J. Yeung : J. Construct. Steel Res., 66 (2010), 1174.
- 14) 青木康素, 高田佳彦, 菅江清信, 上村隆之, 那須和夫, 壺岐浩 : 橋梁と基礎, 53 (2019) 10, 29.
- 15) 菅江清信, 原田直樹, 長澤慎, 壺岐浩, 谷口祥基, 西村美紀 : 令和5年度土木学会全国大会年次学術講演会予稿集, (2023), V-263.

(2024年1月23日受付)