

(論文)

高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼板 エコビュー プラス™

松林拓人*1・高橋佑輔*1(博士(工学))・湯瀬文雄*2(博士(工学))・松下政弘*3・田畑晃人*4・山口徹雄*5

Corrosion Resisting Steel Eco-view Plus™, a Repaint Term Extension under High Humid Environment

Takuto MATSUBAYASHI・Dr. Yusuke TAKAHASHI・Dr. Fumio YUSE・Masahiro MATSUSHITA・Akito TABATA・Tetsuo YAMAGUCHI

要旨

橋梁など交通インフラは建設から架け替えまでにかかるライフサイクルコストの縮減が求められるなか、鋼橋においては桁端部のような厳しい腐食環境にさらされる箇所における塗膜下腐食対策が課題である。塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」は鋼材中に含まれる Ta, Mg, REM (希土類元素) がそれぞれ、介在物の耐食性向上による鋼材の高耐久化、ジンクリッチペイントの Zn さび形成促進による腐食環境の遮断、ならびに塗膜-鋼材界面の保護機能をそれぞれ付与し、一般鋼材と比較して塗膜膨れの成長に要する期間を2倍程度延長する効果を有することから、橋梁端部に適用することで鋼橋のライフサイクルコスト縮減が期待できる。

Abstract

In transportation infrastructure such as bridges, there is demand for reduction of life-cycle costs from construction through to rebuilding. For steel bridges, a key challenge is addressing corrosion under paint coatings, particularly in areas exposed to harsh environments, such as girder ends and edges. "Eco-view Plus" is a corrosion-resisting steel that contains Ta, Mg, and rare earth metals (REM) which improve the steel's corrosion resistance under painting by enhancing the corrosion resistance of inclusions, and promoting the formation of zinc rust by zinc-rich paint which shields steel surface and the coating-steel interface from corrosive environments. Eco-view Plus can extend the time for the growth of coating blisters to approximately twice than that of conventional steel materials. Its application to girder ends and edges is therefore expected to significantly reduce the life-cycle cost of steel bridges.

検索用キーワード

橋梁, ライフサイクルコスト, 塗膜下耐食鋼 エコビュー, エコビュー プラス

まえがき = 持続可能な社会の実現に向け、橋梁などの道路インフラにおいては建設・維持管理・補修・架け替えまでにかかる人的負荷、財政面を考慮したライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, 以下LCC) が重要視されている。鋼橋においては鋼材の腐食が代表的な損傷原因であることから、LCC縮減対策として鋼材の高耐食化や塗装による防食処理が不可欠である^{1), 2)}。とくに図1に示すような桁端部では路面からの雨水や土砂が流入し、加えて風通しの悪い閉塞的な構造により水分や塩分など

の腐食因子が長時間滞留するためほかの箇所よりも厳しい腐食環境となり、鋼板と塗装の界面で塗膜下腐食が発生しやすい³⁾。その結果塗装による防食機能が低下するため一定の周期で塗替えを行う必要があり、維持管理コストがかさむ要因となっていることから、各種対策が検討されている^{4)~6)}。このような厳しい腐食環境にさらされる箇所に塗膜下腐食に対する耐久性に優れた鋼材 (以下、塗膜下耐食鋼) を用いることで、塗装塗替えまでにかかる期間を延長できればLCC縮減が期待できる⁷⁾。

これまで当社は塗装塗替え周期延長を指向した塗膜下耐食鋼の開発にいち早く取り組み、鋼材に塗膜下腐食抑制の機能を付与した「エコビュー」の商品化により橋梁のLCC縮減に貢献してきた^{8), 9)}。さらに今般、橋梁のなかでも塗装が薄くなる板端部や腐食環境の厳しい桁端部におけるさらなる耐食性向上を目指し、鋼材自身の耐食性能と塗装のもつ防食機能それぞれを強化する効果を併せ持つ塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス^{注)}」を開発した。本製品は橋梁機能の維持に必要な塗装塗替え周期延長効果に優れ、とくに飛来塩分量の多い沿岸部や凍結防止剤を多用する豪雪地帯などの腐食環境の厳しい地域

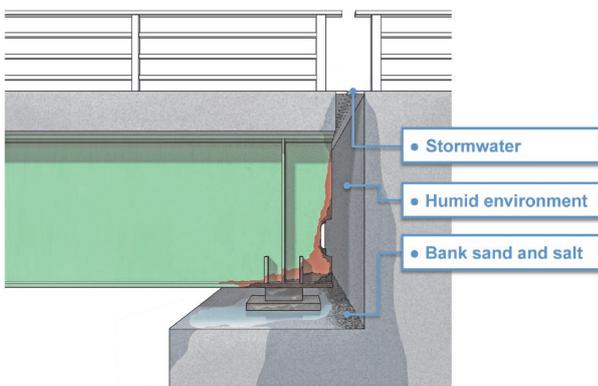


図1 橋梁端部における腐食環境イメージ

Fig.1 Image of corrosion environment at bridge abutment

脚注) 登録商標第6769816号

*1 技術開発本部 材料研究所 *2 (株)コベルコ科研 材料ソリューション事業部 腐食防食評価部 *3 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部
*4 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部 *5 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

における橋梁のLCC縮減効果が期待できる¹⁰⁾。また溶接施工性や溶接継手における引張特性、耐衝撃性も良好であり、橋梁向け溶接構造用圧延鋼材のJIS SMおよびSBHSの母材規格も満たしていることから、従来鋼と同様に扱うことができる¹¹⁾。本稿では、エコビュープラスの特徴である塗膜下耐食機能発現のメカニズム、および塗装塗替え周期延長効果について紹介する。

1. エコビュープラスの特徴

エコビュープラスはエコビューの成分系であるCu-Ni-Ti系を継承しつつ、さらにTa, Mg, REM (Rare Earth Metal; Ce, La) を適量添加することで、鋼材の表面を腐食環境から保護し、耐食性を高めているのが特徴である。一般的な鋼材の塗膜下腐食発生メカニズム、およびエコビュープラスにおける塗膜下腐食抑制メカニズムを図2に示す。なお、塗装系は近年主流とされている重防食塗装を想定している¹²⁾。塗装鋼材は角部や端部で塗膜むらや欠陥部が存在し、これらを起点として水分などの腐食促進因子が鋼材表面に侵入して腐食が発生する。通常の鋼材は腐食に伴い塗膜下でFeを主成分とするさびが成長することで塗膜に膨れや割れが生じ腐食が進行する。いっぽうエコビュープラスは添加成分の働きによりFeさびの発生を抑えつつ、ジンクリッチペイントの持つZnさび生成と鋼材表面の保護機能を促進することで塗装の持つ防食機能を高め、塗膜下腐食を抑制することが特徴である。

本章ではTaおよびMgの添加による鋼材の塗膜下耐食性向上コンセプトの検証およびメカニズムについて紹介する。

1.1 腐食発生起点の無害化による鋼材の高耐食化

一般的に鋼材中には母材に含まれる微量成分から成る介在物が存在し、これらが鋼材自身よりも溶解しやすいと腐食の発生起点となることが知られている¹³⁾。このような介在物を起点とする腐食の抑制対策として、鋼材中の添加元素により介在物を改質し、電気化学的に安定化させることが有効であると報告されている^{14)~16)}。そこでJIS G3106溶接構造用圧延鋼材 (SM) を基準鋼として腐食起点となる介在物を不溶化する元素の探索を行った。

表1に示すとおり基準鋼の表面にはSやC, Mnなどから成る介在物が見られた。いっぽう基準鋼にTiを添加したTi添加鋼では介在物表面にTiを主成分とする化合物が析出した。またTiとTaを複合添加したTi-Ta添加鋼でもTi添加鋼と同様に、TiやTaを主成分とする化合物が介在物表面に析出している様子が確認された。この結果から、介在物の被覆にはTiやTaの添加が有効であることが示唆された。

続いてTiやTaの添加による介在物の耐食性向上効果を確認するため、分極試験にて各鋼材の腐食発生電位の測定を行った。試験はステンレス鋼の孔食発生電位測定法JIS G0577を参考に0.15M H₃BO₃-0.0375M Na₂B₄O₇-0.010M NaCl水溶液中25℃にて行い、アノード分極中の電流密度が10⁻⁵ A/cm²を超えた時点の電位を鋼材の腐食発生電位 (Vc) とした。図3に示すとおり、基準鋼のVcは-0.024 Vであるのに対し、Ti添加鋼では0.056 Vとなり腐食発生電位の上昇がみられた。またTi-Ta添加鋼のVcは0.55 Vとなり鋼材の耐食性が大幅に向上していることが示唆された。これらの結果からTiやTaの添加は介在物表面の被覆による電気化学的安定化に有効であり、とくに両者の複合添加によりその効果が大きいことがわかった。

図4に鋼材へのTa添加量に対するVcを5回測定した

表1 各鋼材中の介在物のSEM像および元素組成
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Table 1 SEM image and elemental composition of inclusions on (a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

SEM image		Elemental composition (at%)								
Point		C	N	Al	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Ta
a	(a) SM	30	-	-	21	2	-	21	25	-
b	(b) Ti-SM	18	20	2	1	1	50	-	8	-
c	(c) Ti-Ta-SM	35	6	-	-	-	20	-	24	15

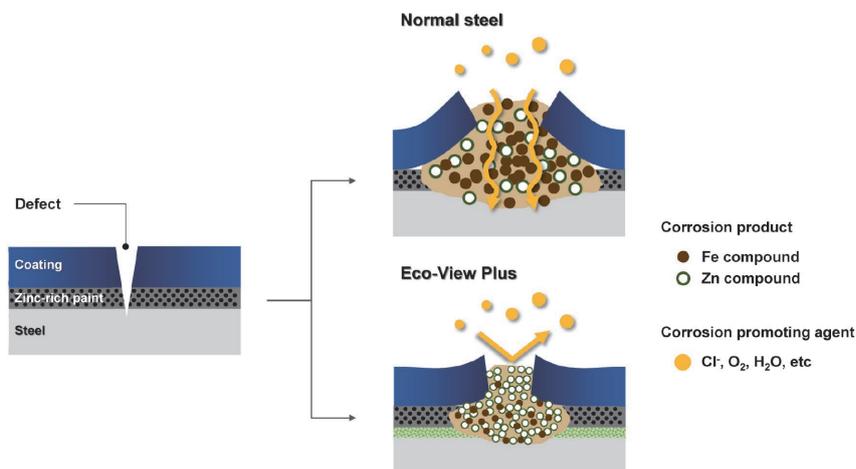


図2 エコビュープラスの塗膜下腐食抑制メカニズム
Fig.2 Inhibition mechanism of under-film corrosion of Eco-View Plus

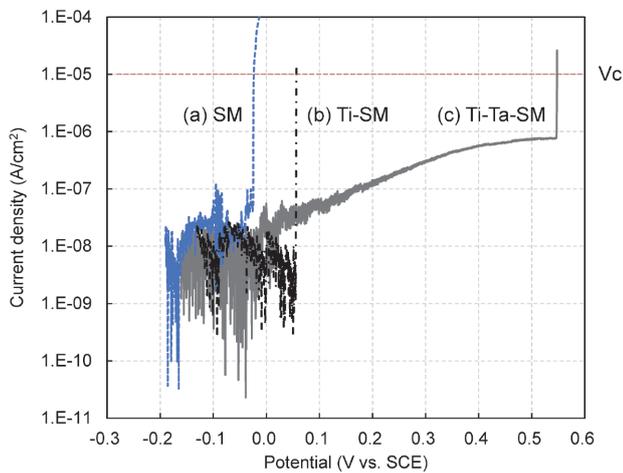


図3 各鋼材のアノード分極測定結果
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Fig.3 Anodic polarization curves of (a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

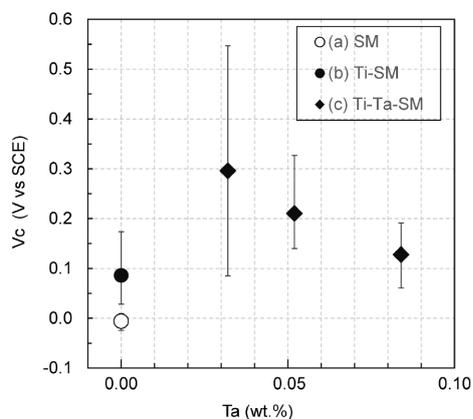


図4 Ta添加量に対する鋼材のVc
(a) 基準鋼, (b) Ti添加鋼, (c) Ti-Ta添加鋼

Fig.4 Plot of Vc with Ta content of steels
(a) SM, (b) Ti-SM, (c) Ti-Ta-SM

平均値を示す。Taの添加量が0.03%のTi-Ta添加鋼ではVcが基準鋼やTi添加鋼と比較して増加しており、耐食性が向上した。いっぽう添加量をそれ以上増加させても耐食性の向上は見られなかった。図5はTa添加量の異なるTi-Ta添加鋼の介在物観察結果を示しており、Ta添加量の増加に伴いTa系化合物の析出量も増加していることがわかった。これらの結果からTa添加による介在物被覆の効果には一定の上限があり、過剰に添加しても介在物被覆に関与しないTa化合物が析出するため、耐食性に与える影響が飽和すると考えられる¹⁴⁾。

以上の結果からTiおよびTaを適量添加することにより腐食起点となる介在物を被覆し、鋼材の耐食性を改善できることがわかった。

1.2 塗装成分とのマッチングによる腐食環境の遮断

近年橋梁の下地塗装として主流になりつつあるジンクリッチペイントは塗膜中に含まれる金属亜鉛粒子が腐食環境中で鋼材に対して犠牲防食能を示す。また溶出した亜鉛は腐食生成物(Znさび)を形成して鋼材表面を覆い腐食環境から遮断する保護効果を有している。とくにMgなどの塩基性化合物共存化で生成する塩基性Znさびは結晶が緻密で化学的に安定なため、保護効果に優れ

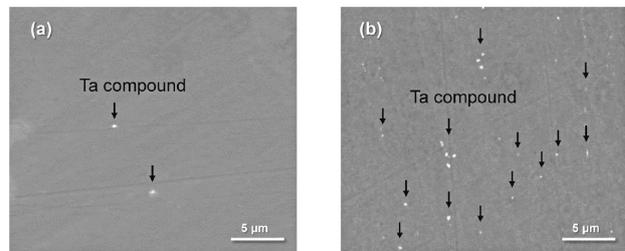


図5 Ta量の異なるTi-Ta添加鋼の介在物SEM像
(a) Ta 0.03wt%, (b) Ta 0.08wt%

Fig.5 SEM image of inclusions in Ti-Ta-SM with different Ta content
(a) Ta 0.03wt%, (b) Ta 0.08wt%

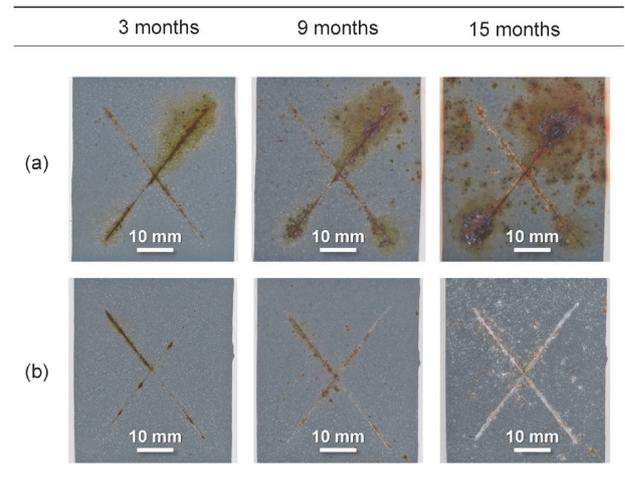


図6 (a) 基準鋼と (b) Mg添加鋼の塗装後、宮古島暴露試験における外観変化

Fig.6 Appearance of painted steels of (a)SM and (b)Mg-SM during exposure test at Miyakojima

ることが報告されている¹⁷⁾。そこでジンクリッチペイント塗膜下で生成するZnさびの環境遮断効果におよぼす鋼板へのMg添加の影響を調査した¹⁸⁾。

基準鋼、およびMg添加鋼(Mg-SM)にジンクリッチペイントを下塗り(塗膜厚 $35\mu\text{m}$)したあとポリウレタン塗装を上塗りし(塗膜厚 $25\mu\text{m}$)、塗装時の傷や薄膜部を模擬するため塗膜にカッターナイフでクロスカットを入れ、沖縄県宮古島の一般財団法人日本ウエザリングテストセンターにて1.5年間の屋外暴露試験に供した。なお塗膜下で生じる腐食生成物の外観観察のため上塗りにはクリア塗装とした。

図6に基準鋼とMg添加鋼の暴露試験中における外観変化を示す。基準鋼では暴露開始3箇月後にはクロスカット部周囲に赤褐色のFeさびが発生した。いっぽうMg添加鋼ではFeさびの発生は基準鋼と比べて抑制されていた。9箇月後、基準鋼ではクロスカット以外の塗装健全部からもFeさびが発生していたのに対し、Mg添加鋼ではクロスカット部に白色のZnさびの生成が確認された。15箇月後では基準鋼のほぼ全面にFeさびが広がっており塗装の膨れや剥離が多数みられた。Mg添加鋼でも塗装健全部からさびが成長しているものの、そのほとんどがZnさびであり、腐食生成物に顕著な違いが見られた。

暴露試験終了後の試験片の傷部周辺の断面観察、および成分分析結果を図7に示す。基準鋼ではZnさびと母

材の間にFeさびが厚く成長しており、ClがFeさびの内部まで侵入している様子が確認された。いっぽうMg添加鋼ではZnさびが鋼材表面を覆うように成長し、Feさびの生成が抑制されていた。またClのほとんどはZnさびの表面に濃化しており、さびの内部には侵入していないことがわかった。

試験片表面に生成した腐食生成物の結晶相、および結晶子サイズをX線回折法にて同定した結果を表2に示す。Mg添加鋼では基準鋼と異なりFeさびの主成分であるFeOOH系化合物が検出されず、代わりにSimonkolleiteやGordaititeなどの塩基性亜鉛化合物の構成比率が高く、Gordaititeについては結晶子が基準鋼と比べて微細化していることがわかった。以上の結果から、鋼材にMgを追加することで腐食環境中における塩基性Znさびの生成が促進され、高い防食機能が得られることがわかった。

1.3 塗膜－鋼材界面の保護

REMは水と反応して緻密な水和酸化物の沈殿を形成し、鋼材の表面に保護性の被膜を形成して耐食性を向上させることが知られている¹⁹⁾。従って鋼材にREMを追加することで、塗膜－鋼材界面に侵入した水分と鋼材中のREMが反応し、鋼材表面に緻密な被膜を形成するこ

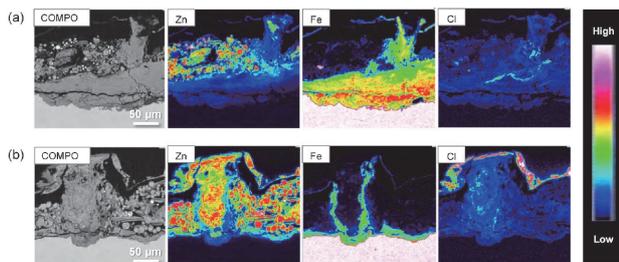


図7 暴露試験後の(a)基準鋼および(b)Mg添加鋼のクロスカット近傍における腐食生成物の断面分析結果

Fig.7 Cross-sectional images of corrosion product of (a)SM and (b) Mg-SM after exposure test

表2 暴露試験後の腐食生成物の組成および結晶子径

Table 2 Composition and crystallite diameter of corrosion product of steels after exposure test

Corrosion products	SM		Mg-SM	
	Fraction (%)	Crystallite diameter (nm)	Fraction (%)	Crystallite diameter (nm)
Fe based compound	α -FeOOH (Akaganeite)	31.6	20.7	-
	β -FeOOH (Goethite)	19.3	27.6	-
Zn based compound	$Zn_2(OH)_2Cl_2 \cdot H_2O$ (Simonkolleite)	-	-	20.6
	$NaZn_2(SO_4)Cl(OH)_6 \cdot (H_2O)_6$ (Gordaitite)	8.9	95.4	26.1
	ZnO (Zincite)	35	36.7	45.2
	Metal Zn	5.2	-	8.0

とで鋼材と塗膜界面の保護性を向上させることが期待できる。なお、REMの効果については本稿でこれ以上詳しく触れないがREM水溶液中の分極試験において鋼材の腐食電位上昇効果を確認しており、別の機会に紹介したい。

2. エコビュー プラスの開発

1章で紹介したとおり、TaやMgはそれぞれ異なるメカニズムにより鋼材の耐食性改善、および腐食環境遮断効果があることが確認された。そこで当社塗膜下耐食鋼であるエコビューにこれら元素およびREMを複合添加することで、橋梁桁端部など厳しい腐食環境下においても高耐久化が期待できる。これらの考え方をもとに高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」を開発した。本章ではエコビュー プラスの塗膜下耐食性評価結果、および本製品の適用によって期待される塗装塗替え周期延長効果について紹介する。

2.1 複合サイクル試験による塗膜下耐食性の評価

表3に示す組成の基準鋼、およびエコビュー プラスの塗膜下耐食性を複合サイクル試験 (Cyclic Corrosion Testing, 以下CCT) にて評価した。塗装仕様は現在橋梁で主流であるC5塗装系を想定し、防食下地をジンクリッチペイント、中塗りをエポキシ系塗装、上塗りをフッ素系塗装とした三層構造とし、試験期間短縮のため塗膜厚を通常よりも薄めの仕様とした²⁰⁾。各鋼材を塩水噴霧-湿潤-乾燥の環境に繰り返し暴露させ、2週間ごとにクロスカット部周囲で生じる塗膜膨れ幅、および面積を評価した。なおCCT試験条件は橋梁桁端部の環境を模擬するため、JIS K 5600-7-9 Cycle Dの条件をベースに、実際の橋梁端部での環境モニタリング結果に基づき表4のとおりに設定した。²¹⁾

図8に複合環境サイクル試験16週目のクロスカット部の外観を示す。基準鋼のクロスカット部近傍では茶褐色を呈するFeさびが発生し、さらに塗膜下腐食に伴い生成したさびの体積膨張により塗膜膨れが生じた。いっぽうエコビュー プラスでは1.2節で紹介した暴露試験と同様、クロスカット部近傍は白色を呈しており、Znさびの生成とFeさびの成長抑制効果が確認された。また、塗膜の膨れ幅、膨れ面積ともに基準鋼よりも小さくなった。

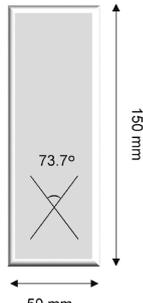
2.2 塗装塗替え周期延長効果

図9に各鋼の傷部における膨れ幅、および膨れ面積の経時変化を示す。エコビュー プラスは基準鋼に比べ膨れ幅、膨れ面積ともに増加が抑えられる傾向にあり、例えば一定の膨れ幅 (5.0 mm) に達するまでに要する

表3 基準鋼およびエコビュー プラスの組成
Table 3 Chemical compositions of SM and Eco-View Plus

Steel	Elemental composition (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	Others
SM (JIS G3106)	0.17	0.36	1.38	0.015	0.003	0.01	0.04	0.01	0.001	-
Eco-View plus	0.05	0.30	1.24	0.010	0.001	0.70	<0.01	0.48	0.05	Ta, REM, Mg

表4 複合サイクル試験条件
Table 4 Cyclic corrosion test (CCT) conditions

Sample image	Surface preparation	CCT process	Environment	Time
	Sand blast • ISO Sa2 1/2 <hr/> Coating • Inorganic zinc 35 μm • Epoxide (Clear) 20 μm • Fluoride (Clear) 20 μm	Salt spray	30°C ± 2°C 5% NaCl	0.5 h
		Condensation humidity	30°C ± 2°C 95 ± 3%RH	2.5 h
		Air drying 1	50°C ± 2°C 20 ± 3%RH	1.5 h
		Air drying 2	30°C ± 2°C 20 ± 3%RH	1.5 h

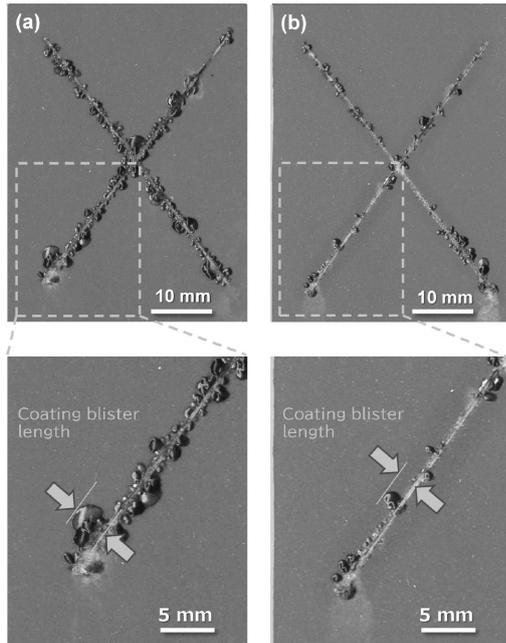


図8 複合サイクル試験16週目の塗装試験片外観
(a) 基準鋼, (b) エコビュー プラス
Fig.8 Appearance of painted steels of
(a) SM and (b) Eco-View Plus after 16 weeks of CCT

時間は、基準鋼、エコビュー プラスでそれぞれ10.3週、15.5週となり約1.5倍の時間を要する結果となった(図9(a))。

鋼板の塗装寿命については、塗膜膨れ面積の経時変化を塗膜劣化曲線で回帰し、一定の劣化面積に達するまでの期間を予測する方法が種々提唱されている²²⁾。今回のような初期段階の塗膜劣化結果から長期間の劣化挙動を推定する場合にはGompertz曲線を用いた方法²³⁾が適用できることから、(1)式に示すGompertz曲線により塗装塗替えまでに要する期間の見積もりを行った。

$$y(t) = K \cdot a^{bt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y(t)$: 塗膜の膨れ面積 (mm²)
 K : 評価部の面積 (mm²)
 t : 試験時間 (week)
 a, b : 定数 ($0 < a, b < 1$)

なお、 $y(t)$ は鋼材の劣化面積を意味することからFeさび面積と定義し、 K の値は表4に示すクロスカット部が全て含まれるよう2,000 mm² (縦50 mm × 幅40 mm)

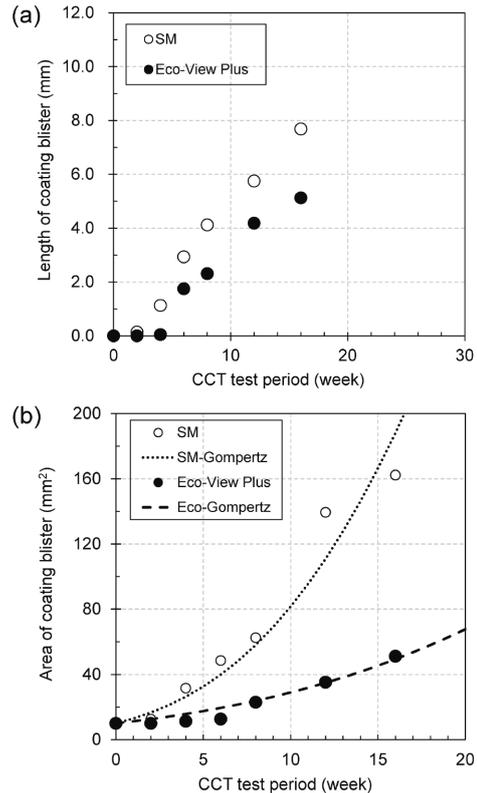


図9 各種鋼材のCCT試験中における塗膜膨れの
(a) 最大幅, および (b) 面積の経時変化
Fig.9 Changes in (a) maximum length and (b) total area of coating blister on steels during CCT

表5 Gompertz曲線回帰による鋼板の塗装塗替え周期予測結果
Table 5 Prediction results of repainting cycles on steels with Gompertz curve

Steel	K (mm ²)	a	b	Correlation coefficient	t _{6.6} (week)
SM	2,000	0.005	0.9982	0.94	14
Eco-View Plus	2,000	0.005	0.9992	0.89	29

とした。また初期劣化面積率 ($t=0$ における a)を0.5%とした。図9(b)および表5に膨れ面積の経時変化をGompertz曲線で回帰した結果を示す。塗装塗替え周期の目安は、膨れ面積が塗装面全体の6.6~36.8%に達するまでの期間と考えられており²³⁾、最短の6.6%、すなわち $y = 132 \text{ mm}^2$ に達するまでに各鋼が要する時間 ($t_{6.6}$)

を算出すると、基準鋼、エコビュー プラスでそれぞれ14週、29週となった。このことから、エコビュー プラスは基準鋼と比べ、橋梁桁端部を模擬した環境において約2倍の塗装塗替え周期延長効果を有するものと考えられる。

むすび = 橋梁端部における厳しい腐食環境でも高い耐食性を発揮する高湿潤環境対応型塗膜下耐食鋼「エコビュー プラス」を開発した。エコビュー プラスは Ta, Mg, REMの複合添加により①Taによる鋼材の高耐食化、②Mgと塗装成分との機能マッチングによる腐食環境の遮断、ならびに③REMによる塗装-鋼材界面の保護機能を付与し、高湿潤・高塩分環境における鋼板の塗膜下腐食を抑制する。本製品を橋梁の中でも塗装寿命の短い端部に適用することで塗装塗替え周期を延長し、橋梁機能の維持に必要な管理・メンテナンスコストを抑え、LCC縮減に貢献できると考えている。

謝辞：本研究および製品開発にあたり宮城県大河原土木事務所、山形県県土整備部道路整備課の皆様には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 玉越隆史. 国土技術政策総合研究所資料. 2008, No.482, p.47-68.
- 2) 日本橋梁建設協会技術短信. 2009, No.10.
- 3) 玉越隆史ほか. 国土技術政策総合研究所資料. 2006, No.294, p.1-56.
- 4) 日本橋梁建設協会技術短信. 2011, No.11.
- 5) 玉越隆史ほか. 国土技術政策総合研究所資料. 2012, No.684, p.1-94.
- 6) 細井章浩ほか. 構造工学論文集. 2011, Vol.57A, p.669-680.
- 7) 松本剛司ほか. DNTコーティング技報. 2005, No.5, p.17-22.
- 8) 古川直宏ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.1, p.47-52.
- 9) 湯瀬文雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.1, p.6-10.
- 10) 湯瀬文雄ほか. 土木学会全国大会第78回年次学術講演会. 2023, V-261.
- 11) 田畑晃人ほか. 土木学会東北支部技術研究発表会. 2023, I-21.
- 12) 重防食塗装ガイドブック第4版, 社団法人日本塗料工業会, 2020, p.84-96.
- 13) I. Muto et al. J. Electrochem. Soc. 2009, Vol.156, C395.
- 14) 河盛 誠ほか. 材料と環境. 2015, Vol.64, No.7, p.320-323.
- 15) M. Kawamori et al. Mater. Trans. 2021, Vol.62, No.9, p.1359-1367.
- 16) 西澤夏来ほか. 材料と環境. 2015, Vol.64, No.7, p.324-327.
- 17) 小松厚志ほか. 鉄と鋼. 2000, Vol.86, No.8, p.534-541.
- 18) 湯瀬文雄ほか. 関西土木工学交流発表会. 2023, I-30.
- 19) 荒牧國次. 材料と環境. 2007, Vol.56, No.7, p.292-300.
- 20) 日本道路協会. 鋼道路橋防食便覧. 2014.
- 21) 湯瀬文雄ほか. 土木学会東北支部技術研究発表会. 2022, I-31.
- 22) 藤原 博ほか. 土木学会論文集. 2002, No.696/I-58, p.111-123.
- 23) 伊藤義人ほか. 土木学会論文集. 2004, No.766/I-68, p.291-307.