

# 塗装寿命延長鋼 (EXPAL<sup>®</sup>) の開発

## Development of Corrosion Resistant Steel for Extended Painted Life “EXPAL<sup>TM</sup>”

中村 直人 NAKAMURA Naoto JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部  
三浦 進一 MIURA Shinichi JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (副課長)  
羽鳥 聡 HATORI Satoshi JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 商品技術部 厚板室 主任部員 (課長)

### 要旨

鋼構造物の塗装寿命を延長することでライフサイクルコストを低減する、塗装寿命延長鋼 (EXPAL<sup>®</sup>) を開発した。本開発鋼は、鋼材中に複合添加した耐食元素の作用により塗膜下で保護性のさび層を形成し、さび層が地鉄の腐食を抑えることで塗膜膨れを抑制する。実験室腐食促進試験から推定される塗装塗替え期間は普通鋼の 2.4 倍であり、塗替え回数の低減が可能である。また、開発鋼は、JIS G 3106 の化学成分、機械的特性の規格を満足し、従来鋼と同等の溶接施工性、溶接継手特性を有する。

### Abstract:

EXPAL<sup>TM</sup> has been developed as corrosion resistant steel that reduces life cycle costs by extending the paint life of painted steel structures. The developed steel forms a protective rust layer under paint film by the effect of corrosion resistant elements. Protective rust layer suppresses the corrosion of steel and paint blistering. Repainting interval estimated from the accelerated corrosion test is more than twice that of the conventional steel, and hence the number of repainting can be reduced. In addition, the developed steel meets the chemical composition and mechanical properties standards of JIS G 3106 and has the same weldability and weld joint properties as those of the conventional steel.

## 1. はじめに

近年、橋梁や港湾構造物などの社会資本の維持管理費、劣化更新費の増加が見込まれており<sup>1)</sup>、30年後には現在の1.3倍に達すると試算されている<sup>2)</sup>。そのため、社会資本の長寿命化およびライフサイクルコスト (以降、LCC と記す) の低減化のニーズは、今後さらに増大すると考えられる。鋼構造物の劣化要因の一つは腐食であり、一般に、海上や海岸付近などの飛来塩分が多い地域では腐食が激しい。そこで、特に、橋梁の防食のため重防食塗装 (C-5 塗装系) が施されているが、C-5 塗装系の期待耐用年数は 30 年であることから<sup>3)</sup>、鋼橋の供用期間を 100 年とすると 3 回の再塗装が必要である。LCC の低減には再塗装回数を減少させることが必要であり、そのためには、塗装寿命を延長する必要がある。塗装された鋼構造物の腐食は、ピンホール等の塗膜欠陥や、膜厚が薄くなりやすい部材角部や狭隙部などを起点に多く発生するが、これらを完全に排除することは困難である。厳しい腐食環境における塗装寿命は、塗膜欠陥を起点とした地鉄の腐食とそれに伴う塗膜膨れ、剥がれなどの要因で決まる。したがって、鋼材の耐食性を向上させることで塗膜膨

れや剥がれを抑制でき、塗装寿命の延長が可能になると考えられる。

以上の背景から、JFE スチールでは、鋼材の耐食性を向上させることで塗膜欠陥から生じる腐食、塗膜膨れを抑制し、塗装寿命を延長する耐食鋼である塗装寿命延長鋼 (EXPAL<sup>®</sup>) を開発した<sup>4)</sup>。本報では開発した耐食鋼の塗装耐食性、母材および溶接継手の機械的特性、実構造物への適用期待効果などを述べる。

## 2. 開発鋼の耐食設計

図 1 に開発鋼の耐食設計を示す。開発鋼は、塗膜欠陥部からの地鉄の腐食反応を抑えることで塗膜膨れを抑制する。腐食反応は、さび層による地鉄保護性の向上で抑制することとした。さび層による地鉄保護性を向上させる方法として、さび粒子を微細化することで腐食因子の透過を物理的に抑制する作用<sup>5)</sup>を用いる方法、カチオン選択透過性を付与することで塩化物イオンの透過を電氣的に抑制する作用<sup>6)</sup>を用いる方法が知られている。これらの作用を発揮させること、および C-5 塗装系に用いられるジンクリッチペイントにより亜鉛 (Zn) との相乗効果を発揮させることも考慮し、開発鋼の耐食設計を行った。なお、さび粒子の微細化とカチオ

2020 年 3 月 9 日受付

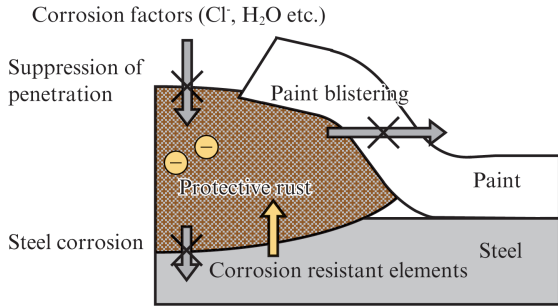


図1 開発鋼の耐食設計

Fig. 1 Concept of development of corrosion resistant steel

ン選択透過性は4.2節で詳細に述べる。

以上の耐食設計と種々の腐食試験および電気化学的検討から、最適耐食成分としてCu-Ni-Sn-W添加鋼を見出した。

### 3. 実験方法

#### 3.1 腐食試験

開発鋼の塗装耐食性を評価するため、実験室腐食促進試験と屋外暴露試験を実施した。

供試鋼として、開発鋼と従来鋼である溶接構造用熱間圧延鋼板 (JIS G 3106, 以降、普通鋼と記す) を用いた。これらの供試鋼から実験室腐食試験用として5 mm<sup>1</sup>×70 mm×50 mm, 屋外暴露試験用として5 mm<sup>1</sup>×150 mm×70 mmの試験片を採取し、プラスト処理後、表1に示すC-5塗装系を施した。なお、C-5塗装系は、新設鋼橋への適用が推奨されているものである<sup>3,7)</sup>。塗装後の試験片は、プラスチック

表1 新設鋼橋の塗装仕様

Table 1 Paint system

Paint system	Paint name	Target film thickness (μm)
Protective coat	Inorganic zinc rich paint	75
Mist coat	Epoxy resin paint	—
Base coat	Epoxy resin paint	120
Middle coat	Epoxy resin paint	30
Top coat	Fluoro resin paint	25
Total film thickness (μm)		250

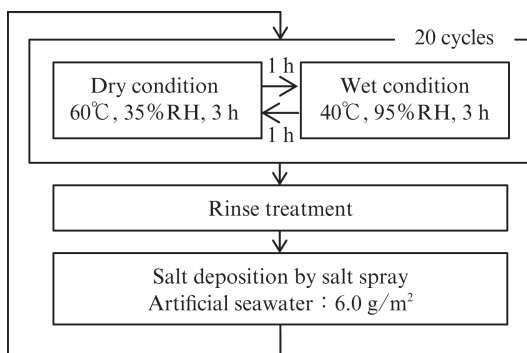


図2 実験室腐食促進試験条件

Fig. 2 Condition of accelerated corrosion test

カッター (エヌティー(株)製BM-2P) を用いて、地鉄に至る幅0.7 mm, 長さ40 mm (実験室腐食試験片), 80 mm (屋外暴露試験片) の直線塗膜欠陥を付与した後、それぞれ腐食試験に供した。

実験室腐食試験の条件を図2に示す。塗装鋼板の膨れ形態が実環境と相関が高いことが報告<sup>8)</sup>されている腐食試験法 (ISO16539:2013) をベースとし、塩分付与工程を週1回、付着塩分量を人工海水で6.0 g/m<sup>2</sup>とした。

屋外暴露試験は、飛来塩分量が多く厳しい腐食環境である沖縄で4.2年間実施した。暴露環境と試験片姿勢は、実構造物で厳しい腐食環境となる、雨による洗い流しの無い環境を模擬し、軒下・水平姿勢とした。

それぞれの腐食試験終了後、塗膜欠陥周囲に生じた塗膜膨れの面積を外観写真の画像解析により測定し、塗膜膨れ面積から片側平均膨れ幅 (以降、塗膜膨れ幅と記す) を算出した。

#### 3.2 さび層の解析

耐食元素によるさび粒子の微細化、および、さび層のカチオン選択透過性を検証するため、以下の解析を行った。

さび粒子の微細化は、腐食試験後の試験片に生成したさび層を走査透過電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope) で観察することで評価した。なお、試料は集束イオンビームを用いてさび層から薄膜を切り出して作製した。

カチオン選択透過性は、さび層の膜電位により評価した。供試鋼には、普通鋼と、開発鋼と同様にWを添加したモデル鋼 (以降、W添加鋼と記す) を用いた。なお、モデル鋼には、W添加によるイオン選択透過性の傾向を評価するため、Wを0.3 mass %添加した。本供試鋼より0.05 mm<sup>1</sup>×10 mm×10 mmの試験片を採取し、図2に示す条件で3週間腐食促進試験に供することで腐食により鋼材を消失させ、さび層のみの状態の試験片を作製した。この試験片の両側が種々の濃度のKCl溶液に接するように2個のセルの間に挟み込み、片側のセル(a1)に0.1 mol/L, もう片側のセル(a2)に0.1もしくは0.001 mol/LのKCl水溶液を導入した。なお、各KCl溶液はHClでpH4に調整した。その後、2個のセルそれぞれの参照電極 (Ag/AgCl/飽和KCl) 間の電位差を測定し、膜電位として、測定開始から約8時間後の電位差を用いた。また、市販のアニオンもしくはカチオン選択透過性膜 (AGCエンジニアリング(株)製セレミオンAMV-N, CMV-N) の膜電位を測定し、得られたデータの妥当性を検証した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 塗装耐食性評価

64週間の実験室腐食促進試験後の塗膜膨れの外観および

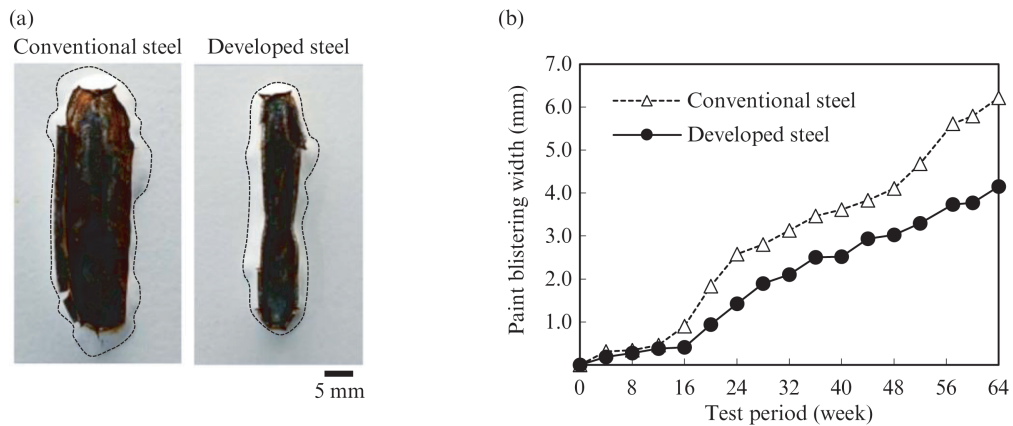


図3 実験室腐食促進試験結果 (a) 塗膜膨れ部の外観, (b) 塗膜膨れ幅の経時変化

Fig. 3 Results of laboratory accelerated corrosion test : (a) appearance of paint blistering area, (b) change in paint blistering width

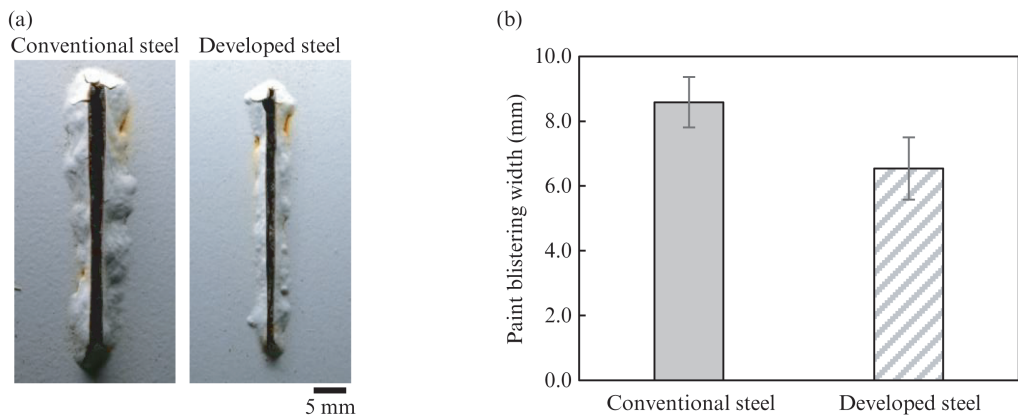


図4 沖縄地域における4.2年間の屋外暴露試験結果 (a) 塗膜膨れ部の外観, (b) 塗膜膨れ幅

Fig. 4 Results of exposure test for 4.2 years in Okinawa : (a) appearance of paint blistering area, (b) paint blistering width

塗膜膨れ幅の経時変化を図3に示す。普通鋼、開発鋼とも、塗膜欠陥部に腐食が生じ塗膜膨れが発生したが、開発鋼の塗膜膨れは普通鋼に比べ小さかった。また、図3(b)に示す塗膜膨れ幅の経時変化から、普通鋼、開発鋼とも腐食初期に塗膜膨れの進行が遅い潜伏期が確認された。これは、C-5塗装系の無機ジンクリッチペイント層中のZnによる効果と考えられる<sup>9)</sup>。普通鋼では12週、開発鋼では16週以降において塗膜膨れ幅の増加が見られたが、12週以降の全期間において開発鋼の塗膜膨れ幅は普通鋼に対し小さい値を示し、64週時点で、開発鋼は普通鋼に対し塗膜膨れ幅が33%小さかった。

次に、沖縄地域で4.2年間の屋外暴露試験後の試験片外観および塗膜膨れ幅測定結果を図4に示す。開発鋼は塗膜膨れ幅が小さかったことから、実験室腐食促進試験と同様に、実環境においても開発鋼の塗膜膨れ抑制効果が確認できた。

実験室腐食促進試験および屋外暴露試験の結果を用いて、開発鋼の塗装寿命延長効果を算出した結果を図5に示す。図5の横軸は、屋外暴露試験に対する実験室腐食試験の促進倍率が2.0倍であったことから、実験室腐食試験の時間を

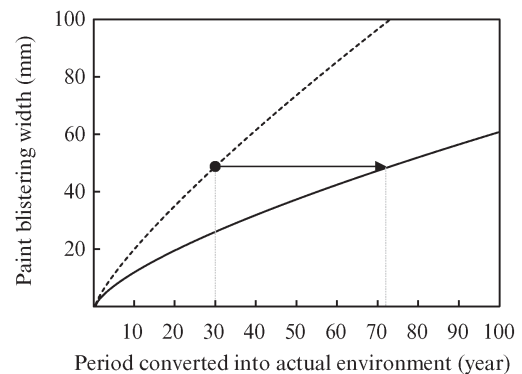


図5 塗装塗替え期間の延長効果

Fig. 5 Effect of extending repainting interval

2.0倍にした実環境相当時間に変換している。ここで、屋外暴露試験に対する実験室腐食試験の促進倍率は、次のように求めた。すなわち、①：実験室腐食試験64週における普通鋼、開発鋼の塗膜膨れ幅は、それぞれ6.2 mm、4.2 mmであり、屋外暴露試験で普通鋼、開発鋼が6.2 mm、4.2 mmに至る期間を算出した。②：①より、両試験における期間の比から求める促進倍率を算出し（普通鋼:2.1倍、開発鋼:2.0

倍)、普通鋼、開発鋼の促進倍率を平均化した(2.0倍)。なお、三浦ら<sup>4)</sup>の報告では2.6倍と試算されたが、より長期の暴露試験結果が得られたので再試算した。促進倍率の変更により、後述する開発鋼の再塗装間隔は70年から73年となるものの、塗替え回数やLCC試算に変化は生じない。

次に、開発鋼の塗装寿命延長効果の算出方法を説明する。本試験における塗膜膨れの主因は、地鉄の腐食やそれに伴うさびの生成、成長であり、耐候性鋼材の腐食減耗機構と共通する。そこで、開発鋼の塗装寿命延長効果は、耐候性鋼材の腐食減耗予測で一般に用いられる累乗回帰曲線<sup>10)</sup>で近似して算出した。計算には、腐食初期の潜伏期を除いた期間、すなわち、普通鋼では12週以降、開発鋼では16週以降の塗膜膨れ幅を用いた。腐食が橋梁の寿命を左右する厳しい腐食環境における普通鋼の塗替え期間は30年である<sup>3)</sup>。累乗回帰近似曲線から普通鋼における30年後の膨れ幅は49mmであることから、開発鋼が同じ膨れ幅になるまでの期間は73年と算出される。したがって、再塗装までの間隔は、普通鋼の30年に対し、開発鋼では73年に延長することが推定される。このことから、開発鋼を適用することで、再塗装の間隔は普通鋼に対し2.4倍延長できると考えられる。

4.2 さび層の解析結果

図6にさび層のSTEM観察結果を示す。HAADF-STEM像中の破線は一つのさび粒子を表す。開発鋼では普通鋼に比べ微細なさび粒子が観察された。また、電子回折図形は、普通鋼ではスポット状、開発鋼ではリング状であった。これは、開発鋼では電子ビームの照射範囲200nm内に、数多くなさび粒子が存在していることを意味する。また、電子回折図形の解析から、開発鋼のさび層はFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>主体であることがわかった。以上から、開発鋼では微細なさび粒子が生成し、これによりさび層中の腐食因子の地鉄表面への透過が抑制されていると考えられる。なお、このさび微細化による腐食抑制効果について、Samusawaら<sup>5)</sup>は、古典分子動力学法を用いて、微細なFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子では、粗大な粒子に比べてさび粒子間を移動する水分子の運動性が低下することを明らかにしている。

次に、図7にカチオン選択透過性を評価した結果を示す。比較のため、図中に市販のアニオンおよびカチオン選択透

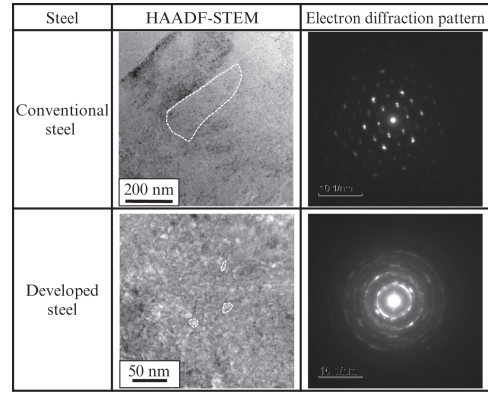


図6 実験室腐食促進試験で生じたさび層のSTEM観察  
Fig. 6 STEM observation of rust layer formed in accelerated corrosion test

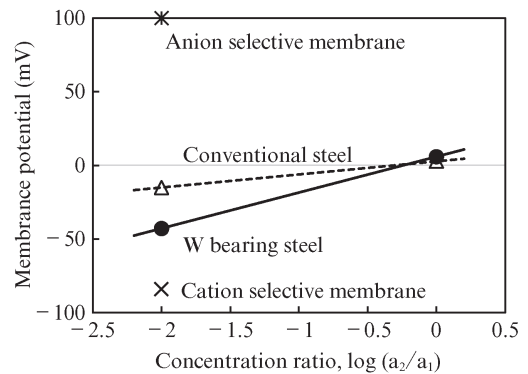


図7 膜電位測定結果

Fig. 7 Measurement of membrane potential

過膜の膜電位の測定結果を付す。膜電位の傾きが負であればアニオン選択透過性、正であればカチオン選択透過性である。W添加鋼の傾きは正であり、かつ普通鋼に対してその傾きは大きく、強いカチオン選択透過性を示した。これは、普通鋼と比較し、W添加鋼はさび層中の塩化物イオンの透過が抑制されることを意味する。これに関して、Itagakiら<sup>11)</sup>は、人工的に合成したさび膜の膜電位測定を行った結果、WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>を吸着させたさび膜は、カチオン選択透過性を示すことを実験的に明らかにしている。また、寒沢ら<sup>6)</sup>は、ESM-RISM法を用いてWO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が吸着したさび層表面において塩素イオンが排斥されていることを、計算科学的に示した。

表2 開発鋼の化学成分

Table 2 Chemical composition of developed steel

Grade	Chemical composition (mass%)									C <sub>eq</sub> <sup>*1</sup>	P <sub>CM</sub> <sup>*2</sup>
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Sn	W		
490 MPa	0.12	0.34	1.31	0.008	0.001	Add	Add	Add	Add	0.36	0.20
570 MPa	0.09	0.34	1.54	0.007	0.002	Add	Add	Add	Add	0.40	0.19

\*1) C<sub>eq</sub> = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

\*2) P<sub>CM</sub> = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

表 3 開発鋼の母材機械的特性  
Table 3 Mechanical properties of developed steel

Steel	Grade	Thickness (mm)	Tensile test *3				Charpy impact test *4			Z-direction tensile test *5	
			Specimen	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El (%)	Position	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)	RA (%)	
										Each	Ave.
Developed steel	490 MPa	25	JIS 1A	427	542	25.7	1/4t	0	347	83, 82, 83	83
		50	JIS 1A	458	558	34.7	1/4t	0	315	72, 76, 77	75
	570 MPa	25	JIS 5	523	651	39.4	1/4t	-5	258	80, 80, 79	80
		50	JIS 5	607	698	39.2	1/4t	-5	280	76, 76, 73	75
JIS G 3106 Spec.	SM490YB -Z35	16<t≤40	JIS 1A	≥355	490	≥19	1/4t	0	≥27	≥25	≥35
		40<t≤75	JIS 1A	≥335	~610	≥21					
	SM570 -Z35	16<t≤40	JIS 5	≥450	570	≥26	1/4t	-5	≥47	≥25	≥35
		40<t≤75	JIS 5	≥430	~720	≥20					

\*3) C direction \*4) L direction \*5) JIS G 3199, Z35

## 5. 開発鋼の機械的特性

### 5.1 化学成分および母材機械的特性

表 2 に実機製造した開発鋼の化学成分を示す。耐食元素として、Cu, Ni, Sn, W を添加している。表 3 に開発鋼の母材引張特性およびシャルピー衝撃特性、Z 方向への引張特性を示す。開発鋼は JIS G 3106 の化学成分、引張特性、シャルピー衝撃特性を満足し、また、Z 方向への引張特性は JIS G 3199, Z35 の規格値を満足し、良好な耐ラメラテア性を示している。

### 5.2 溶接施工性および溶接継手機械的特性

表 4 に開発鋼の y 形溶接割れ試験結果を示す。被覆アーク溶接では予熱 0°C、ガスシールドメタルアーク溶接では予熱 25°C で、ルート割れの発生は認められなかった。表 5 に溶接継手の機械的特性を示す。溶接材料は、塗装耐食性の観点から、(株)神戸製鋼所製のニッケル系高耐候性鋼用溶接材料を用いた。開発鋼を用いた溶接継手の機械的特性は JIS G 3106 の規格を満足し、普通鋼を用いた溶接継手と同等の特性を示した。

表 5 開発鋼の溶接継手機械的特性

Table 5 Mechanical properties of welded joint of developed steel

Steel	Grade	Thickness (mm)	Welding process *8	Welding consumable *9	Heat input (kJ/mm)	Tensile test	Charpy impact test		
						TS (N/mm <sup>2</sup> )	Test temp. (°C)	Notch position	Absorbed energy (J)
Developed steel	490 MPa	25	GMAW	DW-50WCL	2.0	553	0	Weld metal HAZ 1 *10	116 166
	570 MPa	50	SAW	US-W62CL × MF-38	4.1	604	-5	Weld metal HAZ 1 *10	86 202
JIS G 3106 Spec.	SM490YB	—	—	—	—	≥490	0	—	≥27
	SM570	—	—	—	—	≥570	-5	—	≥47

\*8) GMAW: Gas-shielded Metal Arc Welding, SAW: Submerged Arc Welding

\*9) DW-50WCL (1.2 mmφ), USW-62CL (4.0 mmφ) × MF-38: KOBE STEEL, Ltd.

\*10) Position of 1 mm from fusion line

表 4 開発鋼の y 形溶接割れ試験結果

Table 4 Results of y-type weld crack test of developed steel

Grade	Welding process *6	Welding consumable *7	Thickness (mm)	Preheating temperature to prevent root cracking (°C)
SM490YB	SMAW	LB-W52CL	50	0
	GMAW	DW-50WCL	50	25
SM570	SMAW	LB-W62CL	50	0
	GMAW	DW-60WCL	50	25

\*6) SMAW: Shielded Metal Arc Welding, GMAW: Gas-shielded Metal Arc Welding

\*7) LB-W52CL (4.0 mm), DW-50WCL (1.2 mmφ), LB-W62CL (4.0 mm), DW-60WCL (1.2 mmφ),: KOBE STEEL, Ltd.

## 6. ライフサイクルコスト低減効果

開発鋼を適用した場合の橋梁の LCC の試算を行った。試算の前提は以下とした。

- ・海岸などの塩分が多く厳しい環境で供用する
- ・維持管理、補修は塗装の塗替えのみとする

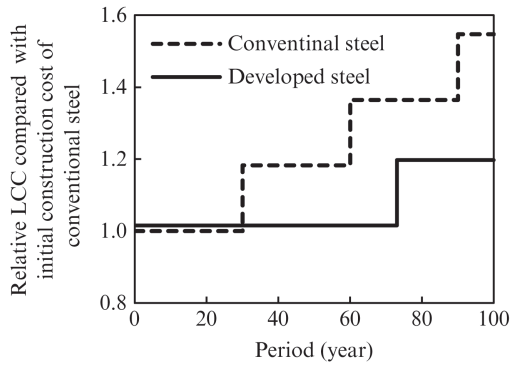


図8 ライフサイクルコスト試算結果

Fig. 8 Calculation examples of life cycle cost

- ・橋長 114 m, 鋼重 211 t の鋼 3 径間連続非合成少数鉸桁橋とし、建設物価等を参考に材料、施工費等を試算する
- ・開発鋼を適用することで、塗替え期間が普通鋼の 30 年から 73 年に延長される

図8にLCCの試算結果を示す。普通鋼を適用した際の初期コストを1とし、それに対する相対値で表記した。本試算では、開発鋼は普通鋼に比べ初期コストが若干高いものの、再塗装回数が3回から1回に減少するため、100年間の塗替えコストは大きく減少する。本試算結果から、開発鋼を適用することで、鋼材価格の増分を考慮しても、塗替えコストは普通鋼と比較して64%低減すると考えられる。

## 7. 実構造物への適用

開発鋼は、橋梁、沿岸域に設置される建産機、タンクなどの塗装寿命延長効果が期待できる。すでに、貯蔵タンク(図9)やクレーンなどの沿岸構造物へ適用され、橋梁にも適用予定である。

## 8. おわりに

本報では、当社で開発した塗装寿命延長鋼 (EXPAL<sup>®</sup>) について、その塗装耐食性と母材および溶接継手の機械的特性、実構造物への適用期待効果などを述べた。その要約を以下に記す。

- (1) 開発鋼は、鋼材中に複合添加した耐食元素がさび粒子を微細化し、また、さび層へカチオン選択透過性を付与することで保護性のさび層を形成する。この保護性さび層が、腐食因子の透過を抑制して地鉄の腐食を抑制することで、塗膜膨れを抑制する。
- (2) 開発鋼は、64週間の実験室腐食促進試験において、塗膜膨れ幅を普通鋼に対し33%低下させた。また、沖縄地域での4.2年間の屋外暴露試験においても、実験室腐食促進試験と同様、塗膜膨れを抑制した。
- (3) 実験室腐食促進試験から推定される開発鋼の塗装塗替



図9 開発鋼が適用されたタンクの外観

Fig. 9 Appearance of tank applied with developed steel

え期間は、普通鋼の30年に対して73年であり、再塗装間隔は2.4倍に延長する。

- (4) 開発鋼は、JIS G 3106の各強度グレードの規格値を満足する。また、JIS G 3199, Z35の規格値を満足し、良好な耐ラメラテア性を示す。溶接施工性、溶接継手特性についても、従来鋼と同等の特性を有する。
- (5) 開発鋼を適用した橋梁の塗替えに着目したライフサイクルコストを試算した。開発鋼の100年間の塗替えコストは、鋼材価格の増分を考慮しても、普通鋼と比較して64%低減すると考えられる。

### 参考文献

- 1) 国交省. 平成23年度国土交通白書. 99, 2012.
- 2) 国交省. 国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計. 2018.
- 3) 日本鋼構造協会. JSSCテクニカルレポートNo.55 鋼橋塗装のLCC低減のために. 東京, 2002, 53p.
- 4) 三浦進一, 中村直人, 塩谷和彦, 鹿毛勇, 加藤真志. 塗装寿命を延長する橋梁用新耐食鋼の開発. 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集. 2018, V-365, p. 729-730.
- 5) Samusawa, I.; Shiotani, K. Influence of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particle size on corrosion of carbon steel under wet/dry cyclic conditions. Materials and corrosion. 2019, vol. 70, no. 1, p. 57-69.
- 6) 寒沢至, 塩谷和彦. ESM-RISM法を用いた塩水環境における耐食元素Wの防食作用機構の検証. 材料と環境2019講演集. 2019, B-307.
- 7) 日本道路協会. 鋼道路橋防食便覧. 丸善, 東京, 2014, 550p.
- 8) 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.
- 9) Yan, M.; Gelling, V. J.; Hinderliter, B. R.; Battocchi, D.; Tallman, D. E.; Bierwagen, G. P. SVET method for characterizing anti-corrosion performance of metal-rich coatings. 2010, vol. 52, p. 2636-2642.
- 10) 日本鋼構造協会. JSSCテクニカルレポートNo.73 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術. 東京, 2007, 217p.
- 11) Itagaki, M. et al. Electrochemical Impedance of Rust Film Fabricated by Deposition from Fe (III) in Solution. Electrochemistry. 2007, vol. 75, no. 12, p. 945-949.



中村 直人



三浦 進一



羽鳥 聡