

海浜環境等高塩分環境向け新高耐候性鋼 (LALAC[®]-HS) の開発

Development of New Weathering Steel for High Salinity Environment for Coastal Use

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)
鹿毛 勇 KAGE Isamu JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (副部長)・博士 (工学)

要旨

海浜や凍結防止剤散布地域などの高塩分環境で適用可能な、ニッケル系高耐候性鋼より Ni 添加量を低く抑えた新しい高耐候性鋼 (LALAC[®]-HS) を開発し、本開発鋼がニッケル系高耐候性鋼 (JFE-ACL-Type1, 1.5Ni-0.3Mo 添加鋼) とほぼ同等の耐食性を示すことを確認した。本開発鋼は、合金元素の添加量を抑えた新合金設計としたことで経済性に優れ、また母材の機械的特性は従来の耐候性鋼 (JIS G 3114, JIS SMA) の規格を満足し、JIS SMA と同等の溶接性、溶接継手特性を有する。

Abstract:

The new high performance weathering steel was developed with less nickel content than conventional Ni added weathering steel to be applicable in the region of large amount of airborne salt. It was verified that the developed steel had almost same corrosion resistance as conventional Ni added weathering steel (JFE-ACL-Type1, 1.5Ni-0.3Mo bearing steel). The mechanical properties of a base material were satisfied the specification of conventional weathering steel (JIS G 3114, JIS SMA) and the weldability and properties of welded joint were equivalent to JIS SMA. Developed steel has an advantage in economical efficiency by applying the new alloy design reducing the amount of expensive alloying elements.

1. はじめに

社会インフラの維持管理費、老朽更新費は今後増加が見込まれ、国土交通省の推計¹⁾に基づく試算では、2050 年頃には現在のおよそ 1.2 倍に増加すると推定される。したがって、長期間にわたり供用される鋼構造物に対するライフサイクルコスト低減ニーズは、今後とも増大すると見込まれる。橋梁の分野では、ライフサイクルコスト低減可能な耐候性鋼が、現在鋼橋のおよそ 2 割に適用されている²⁾。耐候性鋼は、無塗装で使用できるため、塗装の塗替えなどのメンテナンスコストを低減することで、ライフサイクルコストの低減に大きく寄与する³⁾。

従来の耐候性鋼 (JIS G 3114, 以降 JIS SMA と表記する) は、飛来塩分量が $0.05 \text{ mg} \cdot \text{NaCl} / \text{dm}^2 / \text{day}$ (以降 mdd と表記する) 以下の地域において無塗装で使用可能である⁴⁾。一方、より海岸に近い地域や、冬季に凍結防止剤が散布される地域などの高塩分となる環境 (以降、高塩分環境と表記する) では JIS SMA は適用できず、より耐食性の高いニッケル系高

耐候性鋼が適用される。ニッケル系高耐候性鋼は、高塩分環境での耐食性を高めるため 1.0~3.0 mass% 程度の Ni を含有している⁵⁻⁸⁾。JFE スチールでは、架設地の環境の厳しさに応じた 2 つのタイプのニッケル系高耐候性鋼 JFE-ACL-Type1 (1.5 mass% Ni-0.3 mass% Mo), Type2 (0.3 mass% Cu-2.5 mass% Ni) を開発し、商品化しており、これらのニッケル系高耐候性鋼は既に多数の架橋実績がある。

しかし、ニッケル系高耐候性鋼は原料価格の高い Ni の含有量が多いことからコスト高の要因となっていた。また、JIS SMA の適用範囲を超える領域でニッケル系高耐候性鋼が適用されるが、JFE-ACL-Type1, Type2 とも腐食環境に対し過度な耐食性を持つことでコスト増につながる場合があった。そのため、腐食環境に応じた適切な耐食性を有する、経済性に優れた鋼材が求められていた。

当社は、Ni の含有量を低く抑え、かつ高塩分環境において無塗装で使用可能な、新しい高耐候性鋼 (LALAC[®]-HS) を開発⁹⁾ した。

本報では、Ni の含有量を低く抑えつつ高耐食性を確保するための耐食コンセプトと、それに基づいて設計した鋼材の、耐食性および構造物用鋼として具備すべき機械的特性につい

て検証した結果を報告する。

2. 耐食設計

高塩分環境で適用可能なニッケル系高耐候性鋼は、多量に添加した Ni がさび層に広く分散し緻密なさび層を形成することで、Cl の地鉄表面への透過を抑え、腐食を抑制する⁵⁻⁶⁾が、Ni の多量添加が必要という課題がある。また、JIS SMA は、Cu, Ni, Cr が緻密な保護性の高いさび層を形成し腐食を抑制する¹⁰⁻¹⁴⁾ 一方、これらの元素の中で Cr は高塩分環境で腐食に対し悪影響を及ぼす場合がある。

そこで本開発では、Ni の多量添加に頼らずに緻密な保護性の高いさび層を形成するため、微量でも高塩分環境で高い耐食性を示す元素として Sn, Nb を見出し添加した。これらの元素は、さび層の下層へ局所的に濃化して緻密なさび層を形成し、塩化物イオンが地鉄表面へ透過することを抑制する。さらに、Cu および Ni を JIS SMA と同程度添加することでさびの保護性を向上させ、かつ Cr を無添加とすることで高塩分環境での耐食性の劣化を回避した。以上の耐食設計により、Ni 添加量を低く抑え、かつ高塩分環境における良好な耐食性を確保をすることができた。

図 1 に耐食機構の模式図を示す。Cu や Ni が内層さびに分散し、Sn, Nb が濃化することにより、緻密なさび層を形成する。形成した緻密なさび層により、腐食因子である塩化物イオンが地鉄表面へ透過することを抑え、腐食反応を抑制する。

3. 実験方法

3.1 暴露試験

実際の気象環境での耐食性を評価するため、暴露試験を行った。暴露試験方法として、雨水による付着塩分の洗い流しの無い厳しい実環境を想定し、雨がかりの無い軒下暴露試験方法を採用した。供試材として開発鋼 (0.3 mass % Cu-0.3 mass % Ni-Sn-Nb 添加鋼), JIS SMA (0.3 mass % Cu-

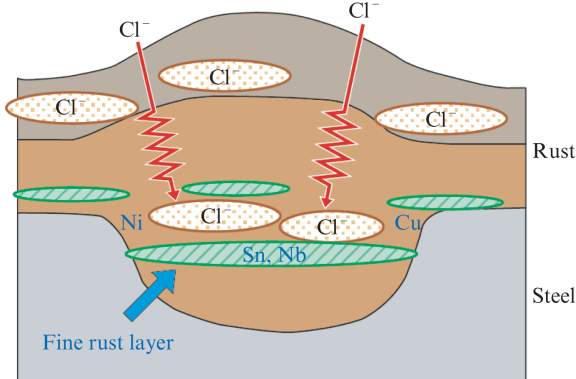


図 1 開発鋼の耐食機構

Fig. 1 Corrosion resistant mechanism of developed steel

0.5 mass % Cr-0.2 mass % Ni 添加鋼), JFE-ACL-Type1 (1.5 mass % Ni-0.3 mass % Mo 添加鋼) を用いた。試験片を回収後さびを除去して重量を測定し、初期の重量との差と試験片表面積から片面の平均板厚減少量を算出することで腐食量を評価した。

3.2 さび層の解析

開発鋼のさび層のキャラクタリゼーションを以下の手順で行った。

- 1) 偏光顕微鏡によるさび層断面の観察
暴露試験後の試験片を切断後、エポキシ樹脂に埋込み、乾式でエタノール研磨を行い、ダイヤモンドスプレー仕上げをして観察した。
- 2) XRD によるさび組成の定量評価
試験片上に生成したさび層を、浮きさびである上層、地鉄に密着している下層に区別してスクレーパを用いてかき落とし、回収した。回収したさびの中で、下層さびを粉碎して粉末試料として試験した。測定は、CuK α 線, 40 kV, 40 mA, ステップ角: 0.02° の条件で行った。
- 3) EPMA によるさび層中の元素分布評価
試材として、偏光顕微鏡によるさび層断面の観察に用いた試料を使用した。EPMA 観察条件は、加速電圧 15.0 kV, 照射電流 5.0×10^{-7} A, ビーム径 $1 \mu\text{m}$, 照射時間 25 ms とした。
- 4) STEM の制限視野電子回折によるさび層の微細性評価
供試材は収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。STEM による制限視野電子回折条件は 200 kV, 絞り 200 nm とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 暴露試験による耐食性評価

図 2 に開発鋼, JFE-ACL-Type1, JIS SMA を沖縄の海浜

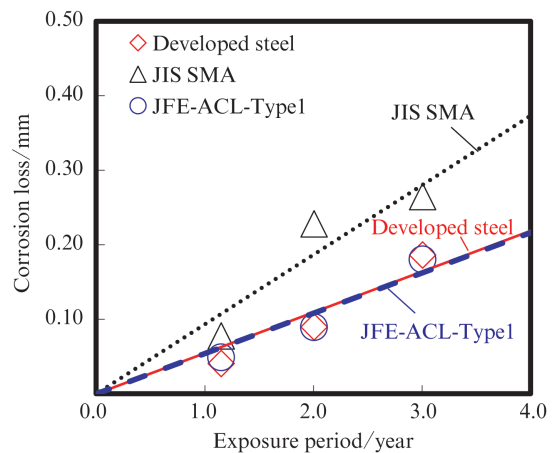


図 2 腐食量の経時変化

Fig. 2 Time-dependent changes of corrosion loss

環境で3年間暴露した際の腐食量の経年変化を示す。暴露試験地の飛来塩分量は0.77 mddであった。ここでは、開発鋼とその他の鋼材の耐塩分耐食性を比較するため、高塩分環境で暴露した。図2より、開発鋼の腐食量はJIS SMAより大幅に少なく、JFE-ACL-Type1とほぼ同等の値であることが分かる。この結果から、開発鋼は高塩分環境においてJIS SMAよりも耐食性が良好であり、JFE-ACL-Type1とほぼ同等の耐食性を有することを確認した。

次に、飛来塩分量に対する開発鋼の適用限界を明らかにするため、飛来塩分量の異なる種々の地域において暴露試験を実施した。図3に飛来塩分量と開発鋼の一年間の暴露試験後の腐食量の関係を示す。開発鋼の腐食量は飛来塩分量と正の相関を有する。本暴露試験結果をもとに開発鋼の耐塩性能を評価した。日本鋼構造協会のテクニカルレポート¹⁵⁾によれば、短期間で耐候性鋼の適用性を評価する際、1年間の暴露試験における腐食量が0.03 mm以下であれば適用可能と判断される。この基準を本暴露試験結果へ適用した結果、開発鋼の適用可能飛来塩分量は0.27 mddと見積もられた。

日本海側(金沢)での適用可能離岸距離を開発鋼、JFE-ACL-Type1の腐食予測式から見積もった結果、開発鋼は4.4 km以遠、JFE-ACL-Type1は1.6 km以遠であった。なお、同環境でのJIS SMAの適用可能離岸距離は20 km以遠である³⁾。このことから、開発鋼は同環境においてJFE-ACL-Type1の海浜地域適用可能範囲の85%:(20 km-4.4 km) ×

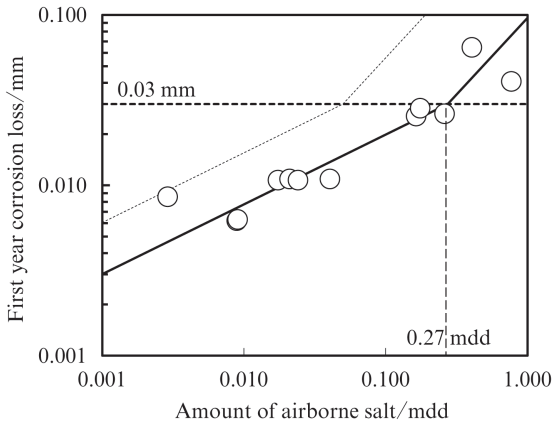


図3 開発鋼の腐食量と飛来塩分量の関係

Fig. 3 Relationship between corrosion loss of developed steel and amount of airborne salt

100/(20 km-1.6 km) で置き換えることが分かった。

4.2 さび層の構造解析

開発鋼の耐食機構を検討するため、暴露試験片に形成されたさび層の解析を行った。

図4に千葉(飛来塩分量0.26 mdd)で2年間暴露した試験材のさび層断面の偏光顕微鏡像を示す。消光層は緻密なさび層で防食に効果があり、非消光層(偏光層)はクラックが多く防食性が低いことが報告されている¹⁶⁾。JIS SMAのさび層は偏光層がさび層の地鉄近傍にも存在し、消光層がさび下層に連続的に生成していない。一方、開発鋼のさび層は消光層がさび下層に連続的に生成している。また、JFE-ACL-Type1のさび層も同様に消光層がさび下層に連続的に形成している。以上から、開発鋼は、JFE-ACL-Type1

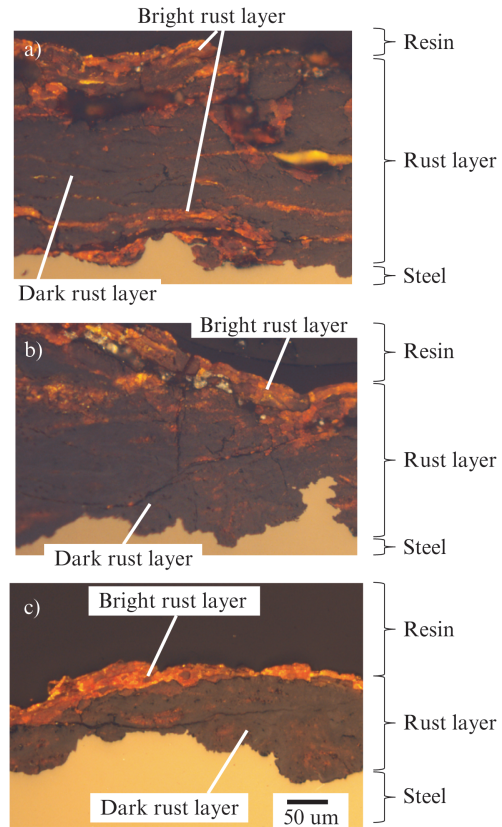


図4 さび層断面の偏光顕微鏡像
a) JIS SMA b) 開発鋼 c) JFE-ACL-Type1

Fig. 4 Polarization microscope image of cross section of rust
a) JIS SMA b) developed steel c) JFE-ACL-Type1

表1 各鋼材のさびの組成

Table 1 Rust composition of various steels

	α -FeOOH	β -FeOOH	γ -FeOOH	Fe ₃ O ₄	X-ray amorphous rust
JIS SM	18.4	10.1	12.3	0.0	59.2
JIS SMA	15.9	13.6	7.1	0.0	63.4
Developed steel	16.6	11.5	5.7	0.0	66.3
JFE-ACL-Type1	14.7	14.9	3.5	0.0	67.0

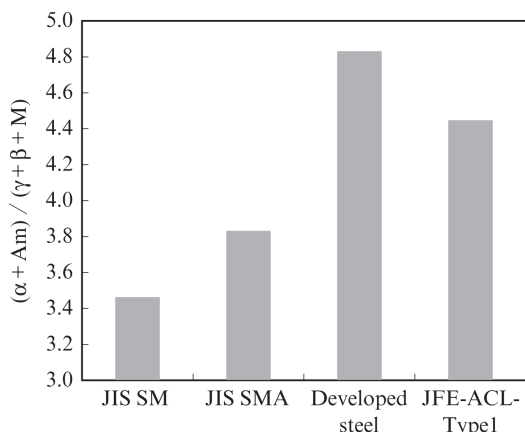


図5 各鋼材のさびの保護性の指標

Fig. 5 Rust protection index of various steels

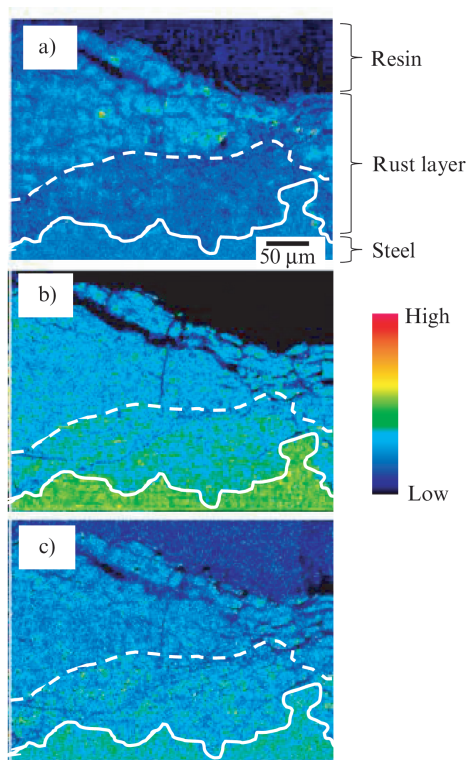


図6 さび層断面のEPMA マッピング
a) Cl, b) Sn, c) Nb

Fig. 6 EPMA mapping of cross section of rust layer
a) Cl b) Sn c) Nb

と同様に、JIS SMA のさび層に比べ緻密なさび層を生成する機能があると推定される。

次に、千葉で2年間暴露した試験材からさびを採取し、XRD による定量分析を実施した。供試材は開発鋼、JFE-ACL-Type1, JIS SMA, JIS SM とした。結果を表1に示す。定量分析結果からさび層の保護性を評価するため、さびの評価指標である $(\alpha + am) / \gamma^{*17}$ を用いて各鋼種の比較を行った。ここで、 α : α -FeOOH, am : X線の非晶質さび, γ^* : γ -FeOOH+ β -FeOOH+ Fe_3O_4 である。図5に千葉で2年間

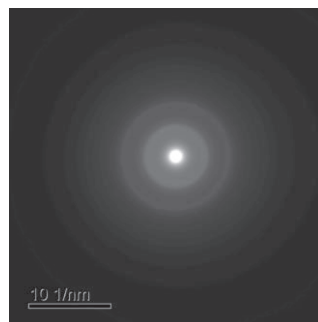


図7 Sn, Nb 濃化部におけるさび層の電子回折像

Fig. 7 Electron diffraction image of rust layer at Sn and Nb concentrated area

暴露した各鋼種のさびの評価指標を示す。この値が大きいほどさびの保護性は良好である。各鋼種のさびの評価指標は、JIS SM < JIS SMA < JFE-ACL-Type1 < 開発鋼であり、開発鋼は最も良好なさびの保護性を示した。このことから、開発鋼は JFE-ACL-Type1 と同様に、JIS SMA よりも保護性の高いさび層を形成すると推測される。

図6に開発鋼のさび層断面のEPMAによる元素マッピングを示す。ここでは主な腐食因子であるClと、耐食元素であるSn, Nbについて測定した。測定範囲は図4に示す偏光顕微鏡観察と同じ位置とした。図中の白線はさび層と地鉄の界面を示す。Clは主にさび上層側、すなわち、図中の白の破線よりも上側に分布し、さび層と地鉄の界面近傍ではCl分布量が顕著に少なかった。一方、Sn, Nbはさび層の下層すなわち白の破線よりも下側に濃化していた。また、Sn, Nbが濃化している位置は図4に示す偏光顕微鏡像で消光層として観察された領域と一致した。以上のことから、開発鋼は、耐食元素がさび下層へ濃化することで、Clのさび層地鉄界面への透過を抑制していると推定できる。

図7にSn, Nb濃化部のさび層の電子回折像を示す。さび層の非晶質構造から得られるハローパターンを呈しており、微細な非晶質のさび層を形成していると推察される。

これらの解析結果から、開発鋼は耐食元素の効果により緻密なさび層を形成し、腐食促進因子であるClがさび層を透過することを抑制することで、良好な耐食性が発現すると考えられる。

5. 開発鋼の機械的特性

以下に、構造用鋼材として具備すべき機械的特性について実機鋼板を評価した結果を示す。

表2に開発鋼の化学成分の例を示す。耐食成分としてCu, Ni, Sn, Nbを含有させた。表3に各強度グレードにおける開発鋼の引張特性およびシャルピー衝撃特性の例を示す。開発鋼は、JIS SMA400CW, 490CW, 570Wの機械的特性の規格値を満足した。表4に引張強度490MPa級および

表 2 開発鋼の化学成分

Table 2 Chemical composition of developed steel

Grade	Chemical composition (mass%)								Ceq	P _{CM}	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Corrosion resistant elements			
Developed steel	400 MPa	0.08	0.20	0.96	0.009	0.002	0.30	0.30	Total content of Nb, Sn shall be less than 0.15	0.26	0.15
	490 MPa	0.08	0.53	1.62	0.008	0.003	0.32	0.32		0.38	0.20
	570 MPa	0.08	0.48	1.57	0.008	0.003	0.31	0.31		0.36	0.19

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表 3 開発鋼の母材機械的特性

Table 3 Mechanical properties of developed steel

Grade	Thickness (mm)	Tensile test				Charpy impact test		
		YS (N/mm ²) 16 < t ≤ 40	TS (N/mm ²)	Specimen	El (%)	Test temp. (°C)	vE (J)	
Developed steel	400 MPa	25	354	456	JIS 1A	29	0	268
	490 MPa	25	471	549	JIS 1A	31	0	312
	570 MPa	25	523	642	JIS 5	39	-5	218
JIS G 3114 Specification	SMA400CW	16 < t ≤ 50	235 ≤	400 ~ 540	JIS 1A	21 ≤	0	47 ≤
	SMA490CW	16 < t ≤ 50	355 ≤	490 ~ 610	JIS 1A	19 ≤	0	47 ≤
	SMA570W	16 < t	450 ≤	570 ~ 720	JIS 5	26 ≤	-5	47 ≤

YS: yield strength, TS: tensile strength, El: elongation, vE: absorbed energy, Position of charpy impact test: 1/4t

表 4 開発鋼の溶接性

Table 4 Weldability of developed steel

Grade	Welding process	Welding consumables	Thickness (mm)	Preheating
				temperature to prevent root cracking (°C)
Developed steel	SMAW	LB-W52CL	25	0
			50	0
	GMAW	MX-50WCL	25	0
			50	0
SMAW	LB-W62CL	25	0	
		50	25	
570 MPa	GMAW	DW-60WCL	25	0
			50	0

SMAW: Self Metal Arc Welding, GMAW: Gas Metal Arc Welding, Welding consumable: KOBE STEEL, Ltd.

び 570 MPa 級の開発鋼を用い、JIS Z 3158 に準拠して y 形溶接割れ試験を実施した結果を示す。ルート割れ防止予熱温度は 0°C および 25°C であり、溶接性は良好である。

表 5 に引張強度 490 MPa 級、570 MPa 級の開発鋼の溶接継手の機械的特性の例を示す。溶接継手はそれぞれニッケル系高耐候性鋼 (JFE-ACL-Type1) 用の溶接材料を用いて製作した。開発鋼を用いた溶接継手は、JIS SMA の引張強度 490 MPa 級および 570 MPa 級鋼板の強度の規格値を超え、曲げ特性も良好であった。このことから、実橋梁への適用において、従来鋼種と同様な溶接施工が可能であるといえる。

6. 実構造物への適用

開発鋼は日本国内で橋梁に適用済である。橋梁への適用事例を図 8 に示す。当該橋梁は自動車専用道路における長さ 194 m の橋梁である。開発鋼は、橋梁のほか、沿岸に近い地域に設置される鉄塔などの鋼構造物へ適用可能である。

7. おわりに

海岸の近傍や凍結防止剤を散布する環境など、高塩分環境に無塗装で適用可能な新高耐候性鋼 (LALAC[®]-HS) を開発した。以下に本開発鋼の特長と機械的特性を示す。

- 耐食性向上に有効な元素として Sn, Nb, Cu, Ni を添加することで、多量のニッケルを添加せずに高塩分環境での耐食性を向上できることを見出し、高塩分環境で JIS/JFE-ACL-Type1 とほぼ同等の耐食性を有する新しい高耐候性鋼を開発した。
- 本開発鋼は引張強度 400, 490, 570 MPa 級の各強度グレードにおいて、JIS SMA と同等の機械的特性、溶接性、溶接継手特性を有する。また、本開発鋼は JIS SMA400AW, 400BW, 400CW, 490AW, 490BW, 490CW, 570W に相当するラインナップを持つ。

本開発鋼は、高塩分環境において無塗装で鋼構造物に適用できるため、塗替えなどの維持管理費の削減により、鋼構造物のライフサイクルコストの低減に大きく寄与する。

表 5 開発鋼の継手機械的特性
Table 5 Mechanical properties of developed steel

Grade	Grade	Welding process	Thickness (mm)	Welding consumable	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test	
						TS (N/mm ²)	Test temp. (°C)	Notch position	vE ₀ (J)
Developed steel	490 MPa	GMAW	25	DW-50WCL	2.0	556	0	Weld Metal	121
								HAZ1	257
JIS G 3114 Specification	SMA490CW	-	-	-	-	≥ 490	0	-	≥ 47
	SMA570W	-	-	-	-	≥ 570	-5	-	≥ 47

GMAW: Gas Metal Arc Welding, SAW: Submerged arc welding, TS: tensile strength, vE: absorbed energy, Welding consumable: KOBE STEEL, Ltd., HAZ1: Position of 1 mm from fusion line



図 8 開発鋼が適用された橋梁の外観

Fig. 8 Appearance of the bridge in which developed steel is applied

参考文献

- 国土交通省. 国土交通省所管部やにおける社会異本の将来の維持管理・更新費の推計. 2018.
- 日本橋梁建設協会. <https://www.jasbc.or.jp/technique/works/>. 2020.
- 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会. 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX). 整理番号第 88 号, 平成 5 年 3 月, 1993.
- 三木千壽, 市川篤司. 現代の橋梁工学. 数理工学社, 2004.
- 塩谷和彦, 谷本亘, 前田千寿子, 川端文丸, 天野虔一. 臨海工業地帯で 27 年間暴露された実橋裸使用耐候性鋼さび層の構造解析. Zairyo-to-Kankyo. 2000, vol. 49, p. 67-71.
- Suzuki, I.; Hisamatsu, Y.; Masuko, N. Nature of Atmospheric Rust on Iron. J. Electrochem. Soc. 1980, vol. 127, no. 10, p. 2210.
- Yamashita, M.; Konishi, H.; Kozakura, T.; Mizuki J.; Uchida, H. Atmospheric Rust Formation Process on Fe-Cr and Fe-Ni Alloys under

Wet/Dry Cycles Observed by Synchrotron Radiation X-ray Diffraction. Materials Transaction. 2005, vol.46, no. 5. p. 1004-1009.

- 大塚俊明. さびの微細化と鋼材の防食性への添加元素の効果. ふえらむ. 2007, vol. 12, no. 12, p. 795.
- 紀平寛. 耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断. Zairyo-to-Kankyo. 1999, vol. 48, p. 697-700.
- Takemura, M.; Tanaka, K.; Shinichi, S.; Morita, K.; Fujita S. Development of Weathering Steel for Coastal Use. Materia Japan. 2001, vol. 40, no. 3, p. 289-291.
- 塩谷和彦, 川端文丸, 天野虔一. 溶接性に優れた極低炭素ペイナイト型新耐候性鋼. 川崎製鉄技報, 2001, vol.33, no. 2, p. 97-101.
- 宇佐美明, 紀平寛, 楠隆. 耐塩害性を高めた 3% Ni 耐候性鋼. 新日鐵技報. 2002, vol. 377, p. 19-21.
- 中山武典, 湯瀬文雄, 川野晴称, 大江憲一, 安部研吾, 堺雅彦. 海浜・海岸耐候性鋼板および長曝型塗装用鋼板の開発. 神戸製鋼技報. 2001, vol. 51, no. 1, p. 29-33.
- 三浦進一, 塩谷和彦, 加藤真志, 藤原良憲. 海岸近傍における高耐候性鋼材 (LALAC®-HS) の適用性評価. 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集. 2019, V-316.
- 日本鋼構造協会, テクニカルレポート no. 73. 2006.
- 岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光. 耐候性鋼のさび層の構造. 鉄と鋼. 1969, vol. 55, no. 5, p. 355-365.
- 塩谷和彦, 中山武典, 紀平寛, 幸英昭, 竹村誠洋, 川端文丸, 安部研吾, 楠隆, 渡辺祐一, 松井和幸. 定量 XRD 指標の検証と利用指針. 第 132 回腐食防食シンポジウム資料. 2001, p. 73-82.



三浦 進一



羽鳥 聡



鹿毛 勇