

(解説)

海浜・海岸耐候性鋼板と溶接材料

川野晴弥*・岡野重雄*・堺 雅彦**・中山武典(工博)***・湯瀬文雄***・長谷 薫****

*鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター **鉄鋼部門・厚板商品技術部 ***技術開発本部・材料研究所 ****溶接カンパニー・技術開発部

Atmospheric Corrosion Resistant Steel Plates and Welding Consumables for Coastal Use

Haruya Kawano・Shigeo Okano・Masahiko Sakai・Dr. Takenori Nakayama・Fumio Yuse・Kaoru Nagatani

The reduction of life cycle cost for steel bridges is in strong demand. Therefore, we have researched and developed a new steel for unpaint use which has excellent atmospheric corrosion resistance properties in chloride environments. This was achieved by Cr removal and Ti addition. The new steel showed higher chloride corrosion resistance than JIS SMA-W in accelerated exposure tests. Furthermore, future thickness loss in a chloride environment was predicted to be low, based on exposure test data.

まえがき = 近年、社会資本整備においては事業の効率化やコスト縮減が厳しく求められ、橋梁分野においても初期建設コストや維持管理コストを含めたライフサイクルコスト(LCC)軽減の要望が強まっている¹⁾。このような情勢の中、鋼橋においては建設時の塗装及び供用中の塗替えが省略できる無塗装仕様耐候性鋼材の使用が年々増加している。図1に耐候性鋼材の適用実績の推移を示すが、1998年には鋼橋への鋼材使用量約90万トンのうち10%を超える割合で耐候性鋼材が使用されている²⁾。

耐候性鋼は大気腐食に伴って鋼材表面に保護性のさび層が形成され、それ以上の腐食を抑制する性質を持つものであり、適度な環境下では腐食速度はステンレス鋼並に低くなる³⁾。しかし、日本での耐候性鋼の適用比率は米国にくらべると未だに大きく下回っており、これは日本が四方を海に囲まれた島国であることが一因となっている。すなわち、耐候性鋼のさび層形成には塩化物イオン(Cl⁻)が大きく影響を及ぼし、建設省土木研究所(現独立行政法人土木研究所)・(社)鋼材倶楽部(現(社)日本鉄鋼連盟市場センター)・(社)日本橋梁建設協会の三者共同研究として実施された長期暴露試験結果に基づき、JIS耐候性鋼材(JIS SMA-W)は、飛来塩分量が0.05mdd(mg NaCl/dm²/day)以下である地域での適用が推奨されている⁴⁾。ま

た、1991年にスパイクタイヤが禁止されて以降、高速道路を中心に凍結防止剤の散布量が増加しており、山間部の橋梁においても保護性さび層の形成が阻害されることが報告されている⁵⁾。

当社では、このような課題を解決しさらなるLCC低減を目指して、高塩化物環境下でも無塗装使用が可能な海浜・海岸耐候性鋼を開発してきた。これまでに開発の考え方及び耐食性向上メカニズムについて紹介しているが⁶⁾、本報ではそれに加えて、さらに長期の暴露試験結果及びそれに基づいた将来の腐食予測についての検討結果を紹介する。

1. 開発の考え方

開発鋼の目標として、400～570MPa級の強度クラスを対象に、塩化物環境下での耐食性を高めた上で、機械的特性は従来のJIS耐候性鋼の規格を満足するものとした。また、施工効率を向上できるように溶接予熱軽減、大入熱溶接にも対応できることとした。

従来のJIS耐候性鋼板はCu-Ni-Crを基本成分としているが、Crは塩化物環境下では腐食先端のpHを低下させ腐食性を高める作用があるため⁶⁾、開発鋼においてはCrを無添加とした。さらに塩化物環境下において特徴的に

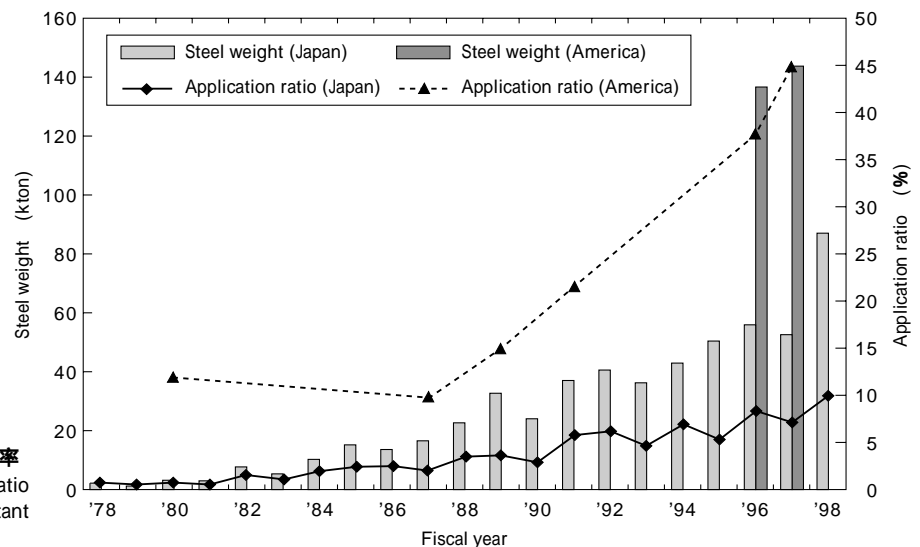


図1 耐候性橋梁の鋼材重量及び適用比率
Fig. 1 Steel weight and the application ratio of atmospheric corrosion resistant bridge

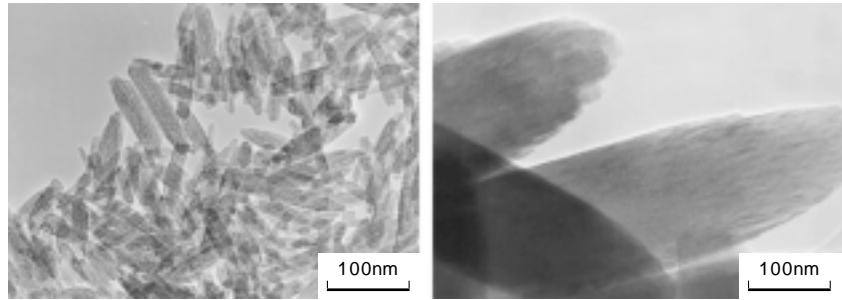


写真1 人工さびのTEM観察結果
Photo 1 TEM observation of artificial rust (FeOOH)

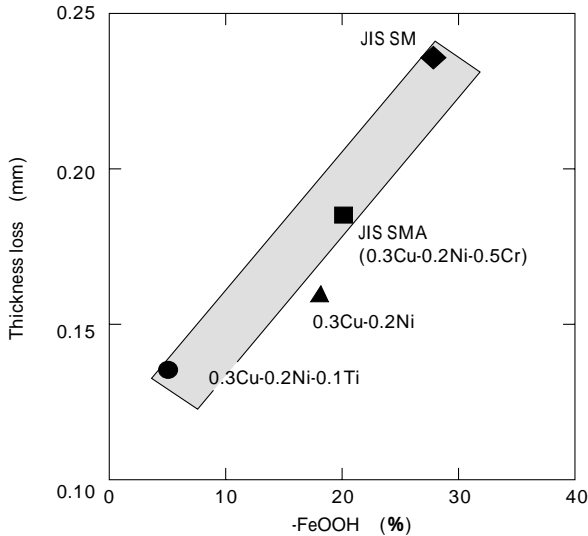


図2 2年間暴露した鋼板のさび分率と板厚減少量の関係(週1回5%NaCl散布)
Fig. 2 Relationship between rust content and thickness loss of steels exposed for 2 years (added 5%NaCl spray once a week)

生成し、安定性・緻密性に劣るといわれているFeOOHさびの生成がTiを添加することにより抑制・微細化されるとの知見(写真1)を活用した⁷⁾。すなわち、開発鋼はCu,Niを添加し、Crを無添加とすると同時に、Tiを添加することにより塩化物耐食性を向上させている(図2⁸⁾)。

その他の元素については溶接性や溶接継手特性を考慮して P_{CM} (溶接割れ感受性組成), C_{eq} (炭素当量)を低減するため、極力低C化した上で強度クラス、板厚に応じて主にMn添加量で強度調整を行うこととした。

また、溶接材料についても鋼板と同様のコンセプトで基本成分系を設計しており、さらに異種金属間で生じるガルバニック腐食を考慮して、鋼板と同程度の腐食電位

となるようCu, Ni添加量で調整を行うこととした。

2. 開発鋼の特性

2.1 母材特性

各強度クラスに対応する化学成分を表1, 機械的性質の一例を表2に示す。いずれの強度クラスにおいても、耐食性向上のためJIS規格(JIS G 3114)に対して成分の一部が外れるが、機械的的特性は規格値を十分満足している。

2.2 溶接材料

490MPa級鋼用に開発された溶接材料の溶着金属化学成分及び機械的性質の一例を表3に示す。化学成分は鋼板の成分と同様Cr無添加-Cu-Ni-Ti添加としており、異種金属間の電位差によって生じるカップリング電流を測定し各元素の添加量を決定した。機械的的特性はいずれの溶接材料も関連するJIS規格(JIS Z 3214, JIS Z 3320, JIS Z 3183)を満足している。

2.3 溶接性・溶接継手特性

490MPa級、板厚100mm材について、入熱0.5kJ/mmの炭酸ガスアーク溶接によるy型溶接割れ試験を実施した結果、予熱温度が25℃の場合でも溶接割れは発生しないことを確認した。

種々の溶接方法での溶接継手特性を表4に示す。開発鋼は、いずれの溶接方法においてもJIS耐候性鋼の母材

表2 開発鋼板の機械的性質の一例

Table 2 Examples of mechanical properties of developed steel plates

Strength	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	vE_0 (J)
400MPa class	25	435	497	301
	25	513	545	352
490MPa class	100	438	529	322
	50	571	637	vE_{-5} : 393

表1 開発鋼板の化学成分の一例

Table 1 Examples of chemical compositions of developed steel plates

Strength	Thickness (mm)	Chemical compositions (wt%)								
		C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Ti	$C_{eq}^{1)}$	$P_{CM}^{2)}$
400MPa class	25	0.05	0.32	0.49	0.99	0.02	1.02	0.043	0.25	0.15
	25	0.06	0.25	1.09	1.00	0.04	1.02	0.047	0.36	0.19
490MPa class	100	0.05	0.29	1.43	0.96	0.02	0.99	0.048	0.40	0.20
	50	0.05	0.32	1.44	0.96	0.06	0.95	0.047	0.40	0.20

1) $C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + (Cu/13)$ (Cu:applied when Cu 0.50%)

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

表3 開発溶接材料の溶着金属化学成分及び機械的性質の一例

Table 3 Examples of chemical compositions and mechanical properties of weld metal by developed welding material

Welding method	Strength	Chemical compositions (wt%)							Mechanical properties			
		C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Ti	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE_0 (J)
FCAW SAW SMAW	490MPa class	0.04	0.54	1.10	0.47	2.05	0.03	0.04	490	586	30	117
		0.05	0.37	1.50	0.64	2.75	0.03	0.02	556	667	26	153
		0.06	0.46	0.83	0.36	2.29	0.03	0.02	496	611	30	177

表4 開発鋼の溶接継手特性の一例

Table 4 Examples of mechanical properties of weld joints by developed steel plates and welding material

Strength	Thickness (mm)	Welding method	Heat input (kJ/mm)	TS (MPa)	$\sqrt{E_0}$ ¹⁾ (J)
490MPa class	25	SAW	6.0	579	218
	25	EGW	11.4	549	105
	100	FCAW	1.8	545	186
570MPa class	50	FCAW	1.8	635	$\sqrt{E_{-5}}$:242

1) Notch location : HAZ + 1mm

規格値を満足し、エレクトロガスアーク溶接(EGW, 入熱 11.4kJ/mm)のような大入熱溶接も適用可能である。

2.4 塩化物耐食性

普通鋼(SM490), JIS 耐候性鋼(SMA490W, 0.3%Cu-0.2%Ni-0.5%Cr), 開発鋼(Cr 無添加-1.0%Cu-1.0%Ni-0.05%Ti)を用いて、高塩分環境下での耐食性評価を行った。腐食試験は、兵庫県内の臨海工業地区(加古川)にて、週1回3%食塩水を散布する促進暴露試験(散布塩分量からは1.4mdd, 普通鋼の板厚減少量からは0.3~0.8mddの環境に相当)を3年間実施し、板厚減少量及びさび性状の調査を行った。

促進暴露試験における板厚減少量の経年変化を図3に示す。普通鋼やJIS 耐候性鋼では層状剥離さびが生成し、暴露期間が長くなるにつれ板厚減少量が増大した。一方、開発鋼は層状剥離さびが生成せず、板厚減少量はJIS 耐候性鋼の半分程度に低減しており、優れた裸耐食性を示した。

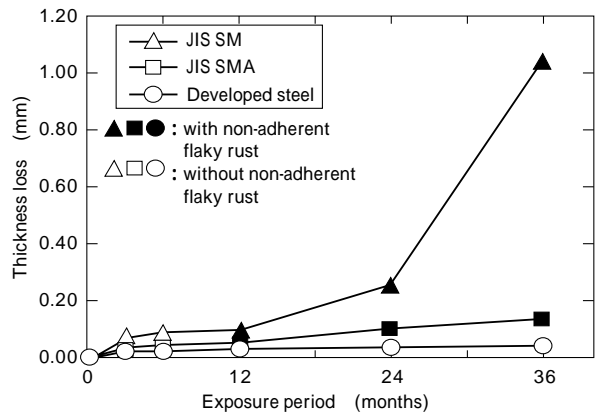


図3 開発鋼の促進暴露試験結果(週1回 3%NaCl 散布)

Fig. 3 Results of accelerated exposure test of developed steel (added 3%NaCl spray once a week)

促進暴露試験3年後のさび層断面をEPMA分析した結果を写真2に示す。普通鋼やJIS 耐候性鋼ではCl⁻が地鉄界面にまで侵入しているのに対し、開発鋼ではさび層の外面に止まっており、腐食因子であるCl⁻の侵入抑制効果があることが示唆される。

3. 塩化物環境中での腐食量予測

これまでの長期暴露腐食実験の結果から、鋼材の板厚減少量は $y = a \cdot x^b$ 式 (y : 板厚減少量, x : 暴露期間, a, b : 定数) に沿って推移することが知られており⁸⁾, この予測式の妥当性はJIS 耐候性鋼の17年間の暴露試験結果により確認されている(図4)⁹⁾。いずれの橋梁においても、9年目までの暴露試験結果から得た板厚減少量

写真2 3年間促進暴露後のさび層断面 EPMA 観察結果

Photo 2 EPMA cross-section observation of rust layer of steels exposed for 3 years

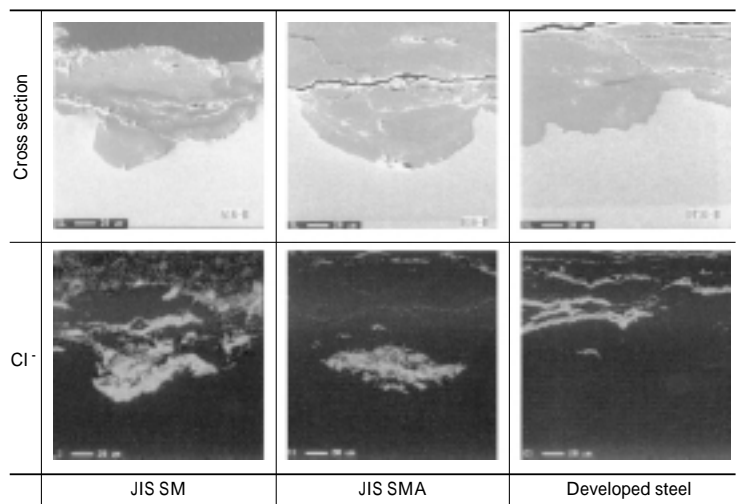
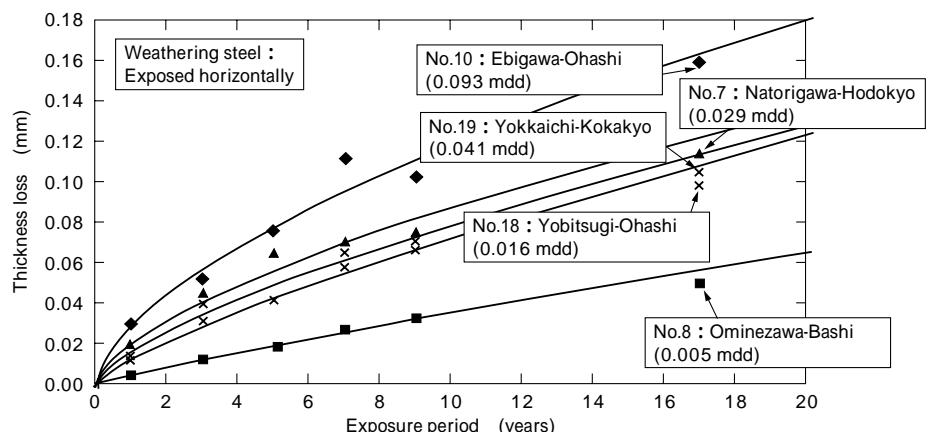


図4 17年目までの暴露試験結果と9年目までのデータに基づいて決定した推定式

Fig. 4 Exposure test results for 17 years and prediction based on the data for 9 years



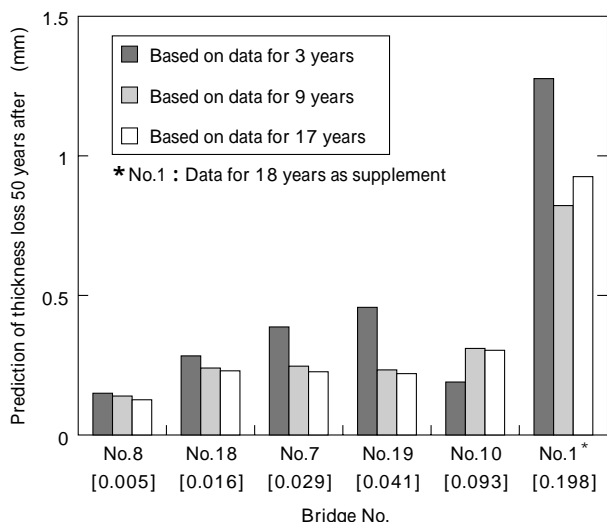


図5 3, 9, 17年目までの暴露試験データから得た50年後の板厚減少量予測 ([]内は飛来塩分量 /mdd)

Fig. 5 Prediction of thickness loss 50 years after based on the exposure test data for 3, 9, and 17 years (air-borne salt is given in []/mdd)

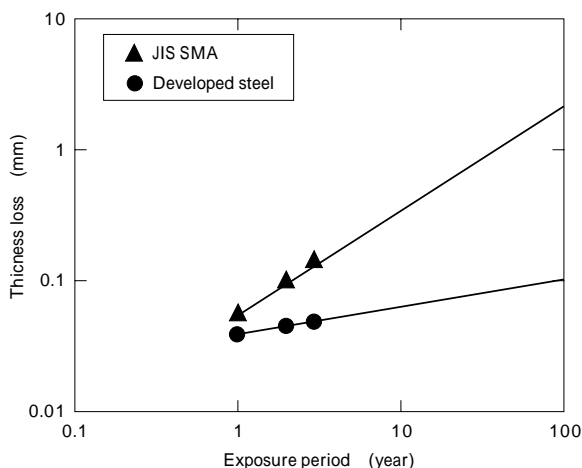


図6 開発鋼の板厚減少量予測

Fig. 6 Prediction of thickness loss of developed steel

予測曲線と同程度の値となっている。さらに3, 9, 17年間の暴露試験結果から得た50年後の板厚減少量予測の比較を図5に示す。この結果から、各種塩分環境下において3年間の暴露試験から得られた板厚減少量予測値は、さらに長期間の暴露試験から得られるそれと同等または多めであり、安全側の評価となっている。

当社で実施した3年間の促進暴露試験結果から、50年後の鋼材の板厚減少量を $y = a \cdot x^b$ 式を用いて推定した結果を図6に示す。この環境での50年後の板厚減少量は、JIS 耐候性鋼が1mm以上であるのに対し、開発鋼は無塗装使用可否の目安の一つである0.3mm以下であると推定される。

4. 橋梁への適用実績

これまでに当社の海浜・海岸耐候性鋼は、8橋、2,000



写真3 海浜・海岸耐候性鋼を適用した橋梁の一例(架設後2年経過)

Photo 3 Example of the bridge applied developed steel (in 2 years from the construction)

トンあまりの適用実績がある。この中には架設後2年経過したものもあり、生成さびは良好に推移しており、板厚減少量は非常に少ないと推測される(写真3)。今後もさび性状の経過観察を継続し、本開発鋼の耐食性向上効果を確認していく。

むすび = 海浜・海岸耐候性鋼の塩化物耐食性を促進暴露試験により評価した結果、本鋼材は普通鋼やJIS 耐候性鋼に比べて優れた裸耐食性を示した。実験結果をもとに腐食量を予測すると、高塩分環境下においても板厚減少量は十分に低位に推移すると推定された。本開発鋼は、生成さびを緻密化することにより、優れた塩化物耐食性を発揮すると考えられた。以上より、本開発鋼は無塗装仕様橋梁の適用範囲を拡大し、ライフサイクルコストの低減効果が期待される。

参考文献

- 1) 西川和廣：橋梁と基礎，Vol.97, No.8 (1997) p.64.
- 2) (社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼の橋梁への適用【解説書】(2001)
- 3) 三澤俊平：ふえらむ，Vol.6, No.5 (2001) p.6.
- 4) 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)-無塗装耐候性鋼の設計・施工要領(改訂版)-，(1993)
- 5) 日本道路公団試験研究所，(社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会：無塗装耐候性鋼使用橋梁現地調査結果，(1998)
- 6) 中山武典ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51, No.1 (2001) p.29.
- 7) 湯瀬文雄ほか：土木学会第55回年次学術講演会，(2000) - 150.
- 8) 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()-全国暴露試験のまとめ(概要編)-，(1993)
- 9) (社)腐食防食協会，(社)鋼材倶楽部：第132回腐食防食シンポジウム資料(2001) p.73.