

耐候性鋼の腐食予測技術

Prediction for Corrosion Loss of Weathering Steels

鹿毛 勇 KAGE Isamu JFE スチール スチール研究所 耐食・防食研究部 主任研究員(課長)
京野 一章 KYONO Kazuaki JFE スチール スチール研究所 耐食・防食研究部長
松田 穰 MATSUDA Yutaka JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(副部長)

要旨

ライフサイクルコスト特性に優れた耐候性鋼は、高飛来塩分環境で適用可能なニッケル系高耐候性鋼が共用されて以降、橋梁分野ではその重要性が増している。本研究では、橋梁への各種耐候性鋼の適用を環境への適合性を一次判定することを目的として、架設地の環境因子から腐食量を予測する技術を構築した。さらに、腐食量を計算する際に用いる環境因子の設定を標準化することで、広く簡便に使えるソフトウェアを作成した。

Abstract:

Weathering steels have had the advantage in life cycle cost. After nickel added weathering steels which can be applicable in the location of higher air-borne salt are developed, they gain in importance for bridge construction. In this study, technology to predict for corrosion loss of weathering steels has been developed using environmental factors of its location to judge preliminary adaptability. Further, software has been developed to be able to use widely and easily by standardizing environmental parameters to predict the corrosion loss.

1. はじめに

国内の橋梁分野では、1990 年代中頃にミニマムメンテナンス橋梁の考え方¹⁾が示されて以降、鋼橋に関するライフサイクルコストの解析²⁾が進み、無塗装耐候性鋼の経済性が示されてきた。これに対応して鋼橋における耐候性鋼の使用比率は年々増加し、現在では鋼重で 20% を超えるようになってきている³⁾。さらに、これまで従来の耐候性鋼が適用できなかった高飛来塩分環境に対する鋼材としてニッケル系高耐候性鋼が 1998 年に実用化^{4,5)}され、耐候性鋼は適用地域の面でも拡大が図られてきた。一方で、耐候性鋼材の選択の幅が広がったことにより、経済性を考慮して最適な耐候性鋼材を選定する要求が新たに生じてきた。以上の要求にこたえるために、国内では東京工業大学創造プロジェクト SIG1 などで各種耐候性鋼の腐食挙動を予測する技術開発が進められてきた^{6,17)}。

JFE スチールでは、国内各地で独自に実施してきた耐候性鋼の暴露試験結果を元に、耐候性鋼の腐食量を予測し、環境への適合性を簡易に判定する技術の開発を進めてきた^{7,8)}。本稿では、この腐食量予測技術と活用方法について述べる。なお、本技術は 2006 年に(社)日本鋼構造協会に

て発行されたテクニカルレポート⁹⁾の中に標準化された方法として取り入れられているものである。

2. 耐候性鋼の腐食量予測式

2.1 大気中における耐候性鋼の腐食予測の基本式

耐候性鋼は、錆が成長するにつれて腐食を抑制する効果をもつ。このような腐食量の変化を経年の関数としては、堀川らの式¹⁰⁾を変形した

$$Y = AX^B \quad (B \leq 1) \dots\dots\dots (1)$$

Y : 片側平均板厚減少量 (mm), X : 時間 (年),
 A, B : 係数

がよく一致することが知られている。ここで、(1) 式の係数 A, B は、各環境において生じる錆の保護性によって決まる。従来、係数 A, B は、暴露試験データに基づく回帰によって決定し、その場の腐食量予測に用いてきたが、これには経年の暴露試験データが必要となる。暴露試験データのない新たな架設計画地において、直ちに腐食量を予測することは、あらかじめ係数 A, B を架設計画地の環境因子から与えおくことに他ならない。

1993 年に独立行政法人土木研究所は、(社)日本橋梁建設

協会、(社)日本鉄鋼協会の三者で、全国の41ヶ所の橋梁にて行った耐候性鋼の共同暴露試験(以下、三者共研)および飛来塩分量の測定結果を詳細に解析¹¹⁾し、係数Aを飛来塩分量の関数として、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= kC^\gamma \text{ (ただし, } C \leq 0.1 \text{ の時, } \gamma = 0.487) \\ B_1 &= 0.73 \text{ (一定)} \end{aligned} \right\} (2)$$

C: 飛来塩分量 (mdd)

と表した。本式は、錆の保護効果を考慮した経年の腐食量を、環境因子から予測する、初めての式であったが、(2)式は、飛来塩分量以外の環境因子の考慮がなされていないことや、 B_1 が環境に依存しない定数となっていることなどの点が、予測精度上の課題として指摘される。本研究では、(2)式を基本としてこれらの点の改良を行っている。

2.2 係数A, Bの環境因子からの算出方法

1986年に発行された(財)国土開発技術研究センター編「鉄骨造建築物の耐久性向上技術」¹²⁾では、鋼材に対する劣化外力は濡れ時間に比例するとして(3)式の関係を示している。

$$\begin{aligned} \text{劣化外力} &= \\ &(\text{温度係数}) \times (\text{濡れ時間}) \times (\text{促進係数}) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

一方、係数Aは、(1)式において $X=1$ とした時のYの値であり初年度の腐食量に相当する。すなわち、係数Aは、錆による腐食抑制効果がほとんど生じていない状態における一定期間の腐食量であり、環境の腐食性指標と考えることができる。ここでは(3)式と同様に、温度係数、濡れ時間、促進係数の3項目を腐食に対する環境因子の構成要素とし、(2)式とから、

$$A_2 = k(\alpha \cdot T + \beta) \cdot \text{TOW} \cdot C^\gamma \dots\dots\dots (4)$$

k: 定数, T: 気温, TOW: 年間の濡れ時間,
C: 飛来塩分量

とおいた。ここで、 α, β, γ は、鋼種に依存する係数である。温度係数の項は、年間平均気温の一次の近似式($\alpha \cdot T + \beta$)を用いて係数を設定した。これは、腐食は化学反応であり、温度が高いほど反応は促進されるが、日中、高温となるときは乾燥し必ずしも腐食しないこと、実際の対象となる温度範囲が比較的狭いことによる。

濡れ時間の項は、年間の濡れ時間(TOW)をそのまま乗じた。これは、腐食反応が濡れている時間しか生じず、腐食量と直接比例関係があると考えたためである。

促進係数の項は、飛来塩分量を(2)式と同様の形式で取り込んでいる。なお、その他耐候性鋼の腐食に影響をおよぼす腐食促進因子として亜硫酸ガスがあげられるが、現在、国内の工業地帯では著しく亜硫酸ガスが減じているとされることから、国内を対象とした本予測技術では取り込んでいない。

(4)式における係数k, α, β, γ は、三者共研の結果、あるいは、温度、湿度を変化させた実験室における試験結果を用いて重回帰により決定した。係数決定の詳細は文献8)を参照されたい。

係数Bの値は、錆の持つ保護効果に依存する。B=1に近い場合には、錆の保護性が低くBが小さくなるほど錆の保護性が高いといえる。(2)式では、Bは一律平均で0.73と設定されているが、三者共研の各暴露データのBは、図1に示すとおり、Aが小さいとき、あるいは大きいときにBは大きく1に近い値をとり、Aが0.02~0.04程度のときBは小さい値をとる。これは錆の保護性が有効に働くには、適当な錆の厚さが必要なためと考えられる。この挙動を3次式で回帰し、AとBの関係式(5)を得た。

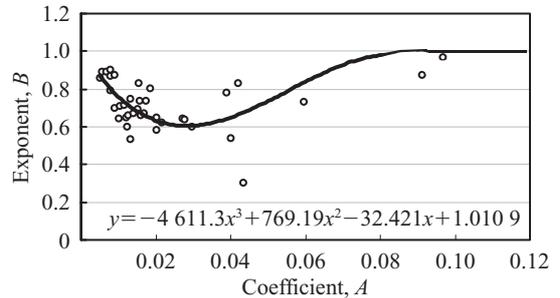


図1 耐候性鋼における $Y = AX^B$ の係数AとBの関係
Fig.1 Relationship between A and B on Eq. (1) of JIS-SMA

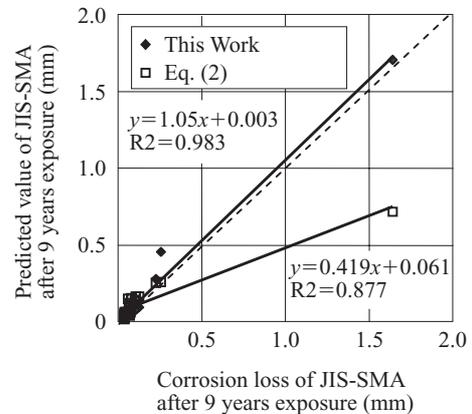


図2 耐候性鋼における腐食量の実測値と予測値の相関
Fig.2 Correlation between Corrosion loss and Predicted corrosion loss of JIS-SMA

$A_2 < 0.083$ の時,

$$B_2 = -4611.3A_2^3 + 769.19A_2^2 - 32.421A_2 + 1.0109$$

$0.083 \leq A_2$ の時,

$$B_2 = 1 \dots\dots\dots (5)$$

以上、本手法を用いて三者共研9年目腐食量の予測結果の比較を行ったのが図2である。合わせて示している(2)式による予測結果と比較して、広範囲で一致していることが分かる。

3. 腐食量予測式の活用方法

3.1 計算に用いる環境因子

2章で述べたように、構築した式を用いて、任意の地域の腐食量を算出するためには、全国各地が網羅され、かつ同一方法で計測された環境因子のデータが必要である。ここでは、計算に用いる各環境因子について述べる。

温度は、相対湿度とともに揃っている気象庁の気象官署のデータより、年間変動や季節の影響を除くために平年値(1971年~2000年)¹³⁾を用いた。気象官署は全国に約160ヶ所あり、基本的には架設地に最も近い気象官署のデータを選定して計算に使用する。図3に国内気象官署の気温、相対湿度の分布を示す。なお、温度には、気象庁の計測手法に準拠し1年あるいはそれ以上の期間、架設地において実測した値があればこれを用いてもよい。

濡れ時間は、年間平均気温、年間平均相対湿度を用いて算出する方法がKuceraらによって提案されている¹⁴⁾。本方法は、全世界の数千点におよぶデータを統計解析したものであり、ISO/TC 156にて国際的に標準化されている方法である。本方法に基づき、気象官署の気温、相対湿度から濡れ時間が推定できる。

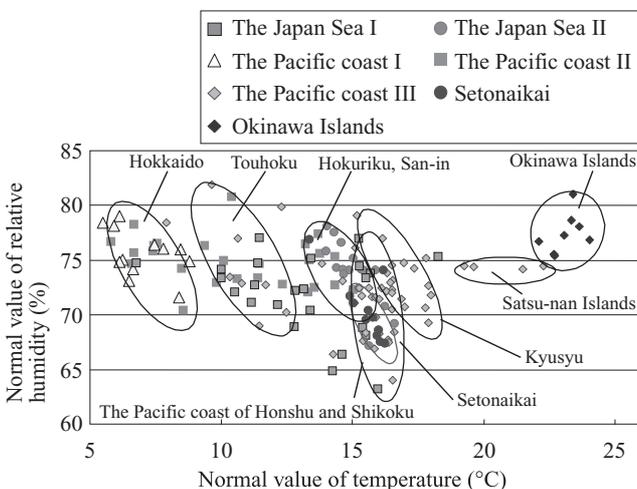


図3 国内気象官署の気温、相対湿度の分布

Fig.3 Distribution of temperature and relative humidity on Domestic Meteorological Observatories

$$TOW = \int \delta T \times \delta RH dt$$

$$= 8766 \times P(T > 0^\circ\text{C}) \times P(RH > 80\%)$$

$$= 8766 \times N(T:0;9.96) \times \beta(RH/100;4.67;1.78) \dots\dots\dots (6)$$

ここで,

$$\delta T = 1 (T > 0^\circ\text{C}) \text{ または } 0$$

$$\delta RH = 1 (RH > 80\%) \text{ または } 0$$

飛来塩分の測定方法には、ドライガーゼ法 (JIS Z 2382)、土研法、ウェットキャンドル法などがある。現在、国内の土木分野では、主として前2種の測定法が、よく用いられており、データベースとしては、

(1) 土木研究所資料飛来塩分量全国調査 (IV)¹⁵⁾ (土研法) …266ヶ所

(2) 三者共研¹⁶⁾ (ドライガーゼ法) …44ヶ所

が測定箇所も多く、よく引用される。ただし、両者の方法は、塩分捕集時の指向性や、いったん捕集した塩分の脱離などの特性が異なるため、必ずしも一致するものではない。耐候性鋼の腐食状況と飛来塩分量の関係は、三者共研のドライガーゼ法による測定に基づいているため、本予測方法ではドライガーゼ法による測定値を標準として用いることとしている。

なお、土研法では、地域ごとに離岸距離との関係が解析され、離岸距離による塩分減衰が距離の-0.6乗に比例する(7)式が提案されている¹⁵⁾。

$$C = C_1 X^{-0.6} \dots\dots\dots (7)$$

C: 推定される飛来塩分量,

C₁: 離岸距離1kmの地点の飛来塩分量,

X: 離岸距離

各地域区分における耐候性鋼の塩分測定を省略してよい離岸距離のときの飛来塩分量を0.05 mddとおいて(7)式より逆算したC₁の値を表1に示す。表1の係数を用いた(7)式による直線と合わせて三者共研における飛来塩分量と離岸距離の関係を、図4に示す。三者共研の飛来塩分量と離岸距離の関係は、回帰直線とよく一致し、ドライガーゼ法においても傾き-0.6乗で表されることが分かる。したがって、架設地の飛来塩分量が不明な場合には、本式に基づいて推定することが可能となる。ただし、本推定値は、海塩の影響を広範囲な地域区分の平均値として算出したものであり、架設地近傍の地形の影響、海岸の向きなどは考慮していない。これらの影響や、架設後に生じる凍結防止剤の影響は、別途考慮する必要がある。

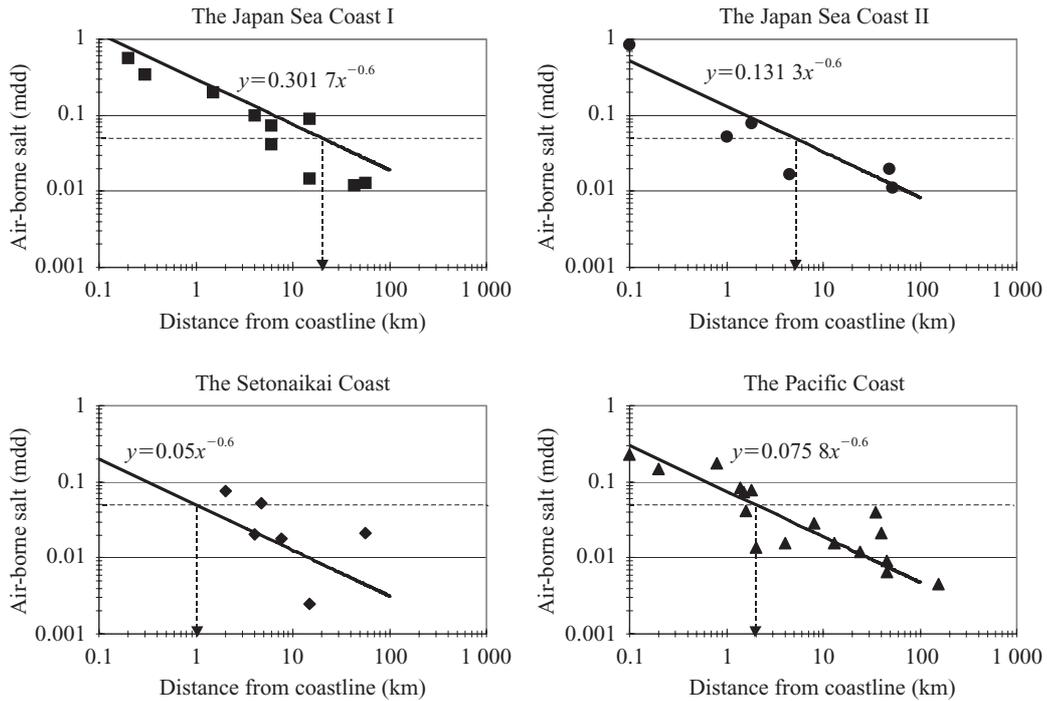


図4 三者共研における飛来塩分量と離岸距離の関係

Fig.4 Relationships between air-borne salt and distance from coastline

表1 耐候性鋼の塩分測定を省略してよい離岸距離の時の飛来塩分量を0.05 mddとして逆算したC₁の値

Table 1 C₁-value calculated from regulated distance from coastline on Eq. (7)

District	C ₁ (mdd)	Regulated distance from coastline (km)
Japan Sea coast I	0.302	20
Japan Sea coast II	0.131	5
Pacific coast	0.076	2
Setonaikai coast	0.050	1
Okinawa Islands	—	—

3.2 ニッケル系高耐候性鋼の予測方法

従来、ニッケル系高耐候性鋼の腐食量予測については、JFE スチールが開発した2種のニッケル系高耐候性鋼 (JFE-ACL-Type1, JFE-ACL-Type2) について、直接独自の暴露試験データ、ラボ試験データに基づいた係数を設定し計算

を可能としてきた⁸⁾。一方、日本鋼構造協会において、(8)式に示すV値を用いて任意成分のニッケル系高耐候性鋼のA値を算出する方法が提案されている。算出方法の詳細は、文献9)を参照されたい。両者は、同等の計算結果が得られることが検証され、2006年に業界で標準化されている。

$$V = 1 / \{ (1.0 - 0.16[C]) \cdot (1.05 - 0.05[Si]) \cdot (1.04 - 0.016[Mn]) \cdot (1.0 - 0.5[P]) \cdot (1.0 + 1.9[S]) \cdot (1.0 - 0.10[Cu]) \cdot (1.0 - 0.12[Ni]) \cdot (1.0 - 0.3[Mo]) \cdot (1.0 - 1.7[Ti]) \}$$

ただし、 $0.9 \leq V \leq 2.5$ …………… (8)

3.3 耐候性鋼の腐食量予測ソフトウェア

構築した予測式を用いて簡便に計算するために、各環境データを備え、地名から、各種耐候性鋼の腐食量を予測するソフトウェア化を図った。ソフトウェアの構成は図5に

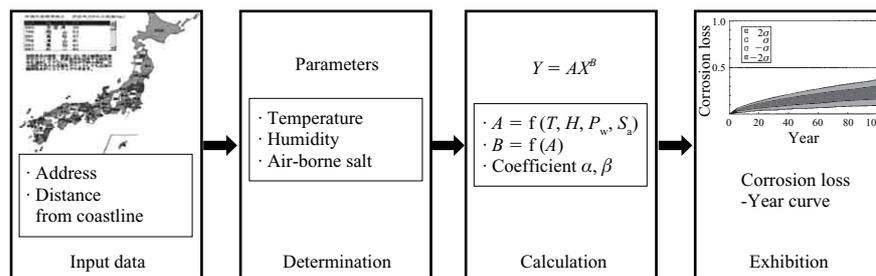
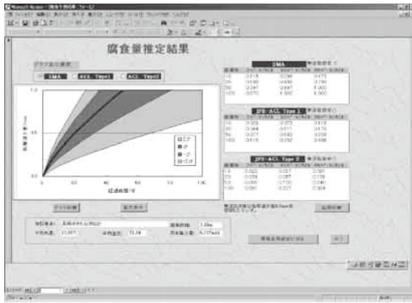


図5 予測フロー

Fig.5 The flow chart to predict corrosion loss and select suitable steel from weathering steels



The screen of the environmental Parameter



The screen of calculated result

図 6 初期画面と JIS-SMA の計算の表示例
Fig. 6 Example of the Prediction

示すとおりである。

はじめに橋梁を架設する場所を設定する。架設地は、住所を入力し緯度経度を呼び出すようになっている。架設地の温度、湿度は、全国約 160 ケ所の気象官署の平年値を用い、緯度、経度により各官署との距離を算出し、最も近い官署から順に一覧表を表示し、その中から架設地点の環境に最も近い気象データを選択できるようにしている。

飛来塩分量 (C) は、実際に架設地で計測した値を直接入力することが可能である一方、飛来塩分の測定値がない場合、前出した (7) 式を用いて、架設地の離岸距離を入力することにより飛来塩分を算出することが可能である。以上のように架設地の情報入力のみで、各耐候性鋼の腐食量予測値を算出することができるようシステム化されている。図 6 に初期画面と一般の耐候性鋼 (JIS で規定される SMA) の計算の表示例を示す。

4. おわりに

以上述べてきたように、耐候性鋼の従来の知見や暴露データを活用し、腐食量予測技術を構築した。また本技術をソフトウェア化することにより、任意の架設地における

長期の腐食量を簡便に予測し、ライフサイクルコストを低減する最適な鋼材を迅速に提案することを可能とした。本技術は、開発以降、多くの実物件において適用判定として活用されている。今後は、データの拡充、予測精度の向上に努めていき、耐候性鋼材、ひいては土木建築構造物の信頼性向上の一助としたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所. ミニマムメンテナンス橋〈鋼桁橋編〉.
- 2) ミニマムメンテナンス橋梁に関する検討. 土木研究所資料. 1997, no. 3506.
- 3) 山口栄輝. 耐候性鋼橋梁防食性能照査法提言. 第 160 回腐食防食シンポジウム. 腐食防食協会. 2007.
- 4) 竹村誠洋, 藤田栄, 鈴木伸一, 松井和幸. 海岸耐候性鋼. NKK 技報. 2000, no. 171, p. 913.
- 5) 塩谷和彦, 川端文丸, 天野虔一. 溶接性に優れた極低炭素ベイナイト型新耐候性鋼. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 2, p. 39-43.
- 6) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛. 土木学会論文集. 2003, no. 738, I-64, p. 271.
- 7) 鹿毛勇, 松井和幸, 川端文丸. 橋梁用のミニマムメンテナンス実現のための耐候性鋼板とその利用技術. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 31-37.
- 8) 鹿毛勇, 塩谷和彦, 竹村誠洋, 小森務, 古田彰彦, 京野一章. 実暴露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測. 材料と環境. 腐食防食協会. 2006, vol. 55, p. 152-158.
- 9) 日本鋼構造協会. 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術. テクニカルレポート. 2006, no. 73.
- 10) 堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計. 防食技術. 1967, vol. 16, no. 4, p. 153.
- 11) 西川和廣, 村越潤, 田中良樹. 無塗装鋼材の大気腐食性状—耐候性鋼材の全国暴露試験結果—. 土木技術資料. 1994, vol. 36, no. 8, p. 60-67.
- 12) 国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会. 鉄骨構造物の耐久性向上技術. 1986, p. 75.
- 13) 気象庁. 平年値統計期間 1971~2000 年. 2001.
- 14) Kucera, V. Tidblad, J. Mikhailov, A. ISO/TC 156/WG 4 N 314, Annex A, 1999.
- 15) 飛来塩分量全国調査 (IV)—飛来塩分量の分布特性と風の関係—. 土木研究所資料. no. 3175. 1993.
- 16) 建設省土木研究所ほか. 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書 (XX). 1993.
- 17) 紀平寛, 田辺康見, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸. 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究. 土木学会論文集. 2005, no. 780, I-70, p. 71.



鹿毛 勇



京野 一章



松田 穰