

島根県における既設耐候性鋼橋梁の腐食実態

Investigation of corrosion condition for weathering steel bridges in Shimane

松崎靖彦*・大屋 誠**・安食正太***・武邊勝道****・麻生稔彦*****

Yasuhiko MATSUZAKI, Makoto OHYA, Shota AJIKI,
Masamichi TAKEBE and Toshihiko ASO

*株式会社ウエスコ島根支社 技術部 (〒690-0047 島根県松江市嫁島町16-1)

**博 (工), 松江工業高等専門学校助教授, 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

***松江工業高等専門学校 生産・建設システム工学専攻 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

****博 (理), 松江工業高等専門学校助手, 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

*****博 (工), 山口大学大学院助教授, 理工学研究科システム設計工学系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

In recent years, the structure made of weathering steel has been paid attention concerning the life cycle cost. The Japan guideline describes the rules of the construction for the weathering steel bridge that the weathering steel is applicable in the region which is more than 5km from the coast of the Japan Sea. Many weathering steel bridges have been constructed in Shimane. However, the performance of the weathering steel in those bridges is not well traced.

The authors conducted the field study of performance on the weathering steels in Shimane. This paper is reported the results of our investigation into the corrosion condition from the point of view rust development.

Key Words: weathering steel bridge, rust condition, field study, Shimane

キーワード: 耐候性鋼橋梁, 腐食実態, 実橋調査, 島根

1. はじめに

耐候性鋼材は、鋼板表面に保護性さびを形成させることにより防食機能を持たせるユニークな材料である。鋼橋へ使用すれば、塗装などの防食費用が不要であることから、建設コストが若干増えてもその後のメンテナンス費を軽減できる。総合的なコスト（ライフサイクルコスト）は縮減できることからミニマムメンテナンス橋¹⁾として期待され、多数の橋梁が建設されている。

鋼板表面に保護性さびを生成させるためには、腐食環境が良好であることが必要である。一般に、鋼にとって良好な腐食環境とは、温湿度が低い、鋼材のぬれ時間が短い、有害な飛来物が無いといった条件であり、その下ではさびの成長そのものが遅くなる。耐候性鋼にとってもこのような腐食環境であれば、さびの成長が遅く、初期の流れさびが長い期間残留したり、赤茶けた外観が長らく続くことになる。さらに適度な乾湿の繰り返しが生ずることにより、初期さびが風化した後に、緻密な保護性さびが生成され防食機能を発揮す

る。腐食環境は保護性さび生成に影響を与える。このため、飛来塩分量が0.05mdd (mg/100cm²/day)を超えない地域の目安として、離岸距離から規定される適用地域が示され²⁾、設計計画の際に用いられている。

一方、構造物の形状として、橋梁構造部材としてだけでなく、水切れの良い水仕舞いや風通しを良くするなどの、構造物のさび安定化に適した構造条件をつくることも必要である。設計施工の際には、水はけへの配慮より部材の継手部は部材間へ隙間を設けること、湿潤な雰囲気になる桁端部への塗装や切り欠きを設け通風性を確保することなどが適用されている³⁾。また、桁下の水面から主桁までの高さや、山のせまった架橋地点での対応も検討され始めている^{4), 5)}。同一橋梁内でも構造部位によって腐食速度が異なり、特に、外側桁の内側や内側桁における下フランジなどの水平部材は速度が高い。反対に、雨水のあたる外桁ウェブの外側面では、腐食を促進する塩化物イオンなどの付着物が洗い流されることから、速度は低くなる。腐食環境と構造物の形態から決定される構造物要因は、相互に関わりあうことに留意が必要である。これらの要因分析

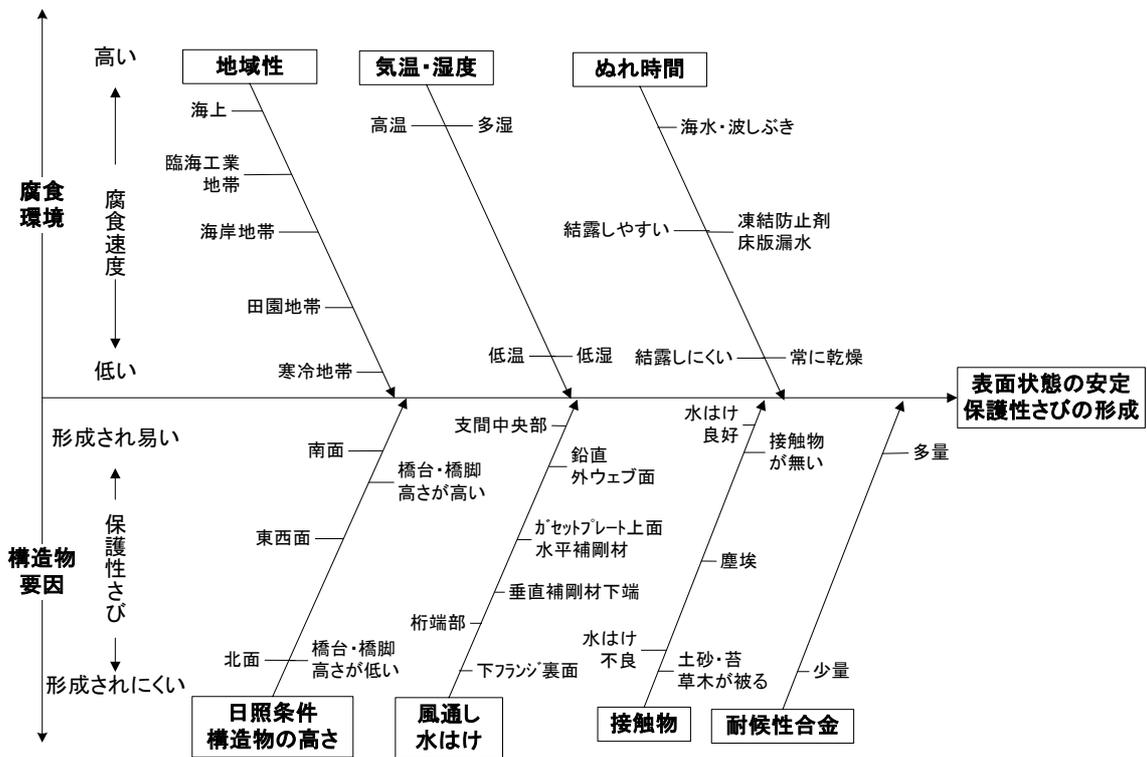


図-1 保護性さび形成の要因分析図⁶⁾

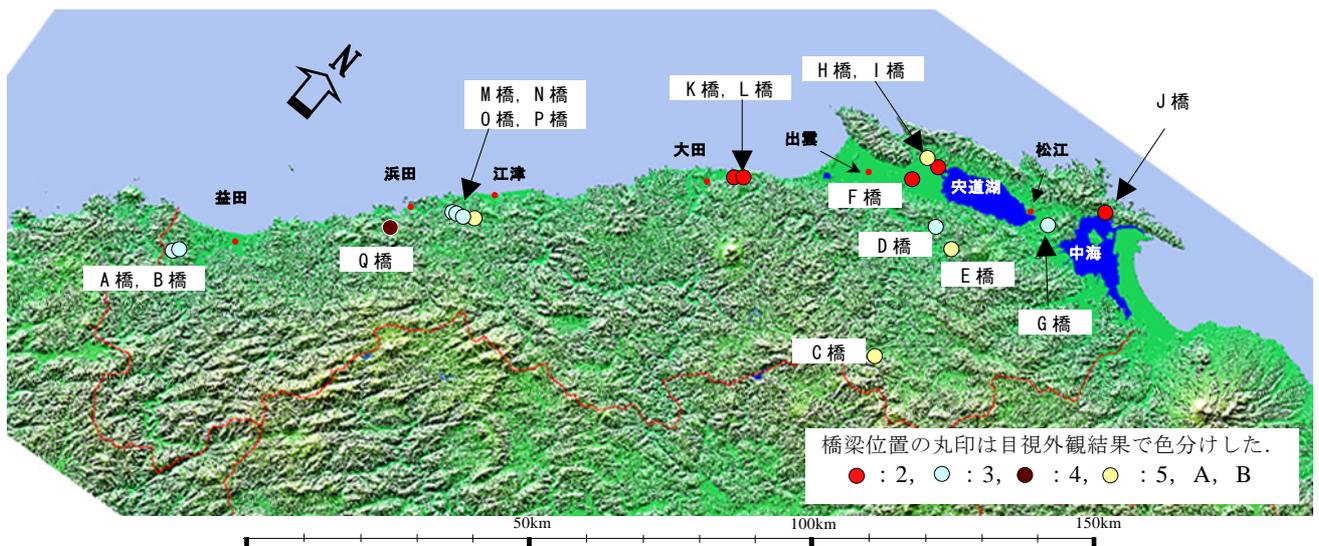


図-2 調査位置図

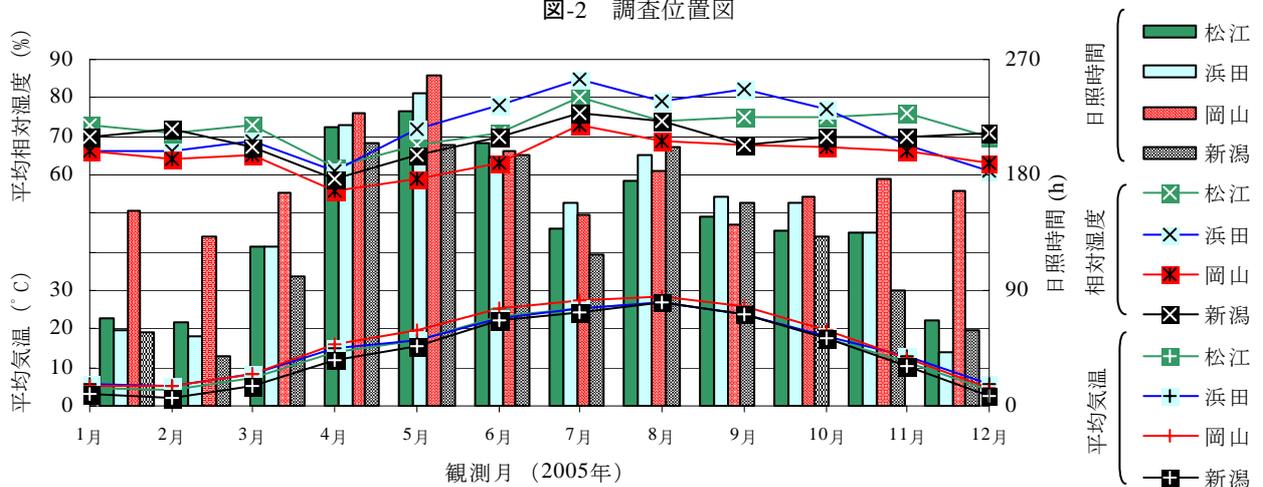


図-3 松江, 浜田, 岡山, 新潟の気象

を図-1 に示す。

島根県内では 100 橋余りの耐候性鋼橋梁が建設されており、そのうち半数の 50 橋程度は竣工後 10 年以上が経過している。海塩粒子の影響についての目安である離岸距離 5km 以内（日本海沿岸部 II）に位置する橋梁は 20 橋程度あり、そのうち 10 数橋は竣工後 10 年以上経過し、鋼板表面からさび生成状況を直接観察、外観評価することが可能である。

著者らは、これらのうち海岸近傍の橋梁と、飛来塩の影響の高いと思われる島根県東部の出雲、松江地区の橋梁を中心に表面状態の目視観察、さび厚計測、表面付着物の回収とイオンクロマトグラフィによる分析を行ってきた。これらの調査結果と島根県土木部の行った飛来塩分量調査結果および地形の特徴から、橋梁全体に影響する架橋地点の腐食環境の厳しさや、桁端部や内桁下フランジのような局所での環境条件の厳しさなどを検討する。検討結果や調査記録は、維持管理のために有用であるのみならず、地域の環境条件として整理することによって、今後の橋梁建設に際し、腐食環境を評価する重要なデータになるものと思われる。

2. 島根県の地形と気象

島根県は東西に長く、その海岸線延長は約 563km におよぶ。出雲市、江津市から浜田市、益田市に砂浜海岸が点在するが、大半は海岸背後まで山が迫る切り立った海岸線や丘陵が侵食され、ゆるやかに下る海岸線が交互に続く。図-2 に島根県の地形概要と調査橋梁の位置を示す。

島根県東部では宍道湖、中海を中心に平野がひらけ出雲市と松江市の市街地を形成する。特に松江市では、島根半島と宍道湖南岸の山地に挟まれ、吹き抜ける風は整流、収れんされる。島根県中、西部の沿岸部では、一部砂浜海岸に続く平野部で市街地を形成するが、ほとんどは山地、丘陵が続く。標高 200~300m の定高性の丘陵が風化、浸食され、谷あいでは町並みを形成する。島根県では、東部の宍道湖・中海周辺を除き、海岸線から数 km も内陸側へ続く平野は非常に限定的である。

アメダスデータをもとに、島根県の松江市、浜田市、山陽側の岡山市、東北日本海側の新潟市について 2005 年の温湿度、日照時間の比較を図-3 に示す。島根県の 2 都市と新潟市の冬場の日照時間は、岡山市に比べ半分程度しかない。日本海側に位置することを反映して、島根県と新潟県は類似した傾向を示している。島根の気象を特徴づけるのは通年の相対湿度の高さである。岡山市と新潟市は概ね 60~70% の間を推移するのに対し、浜田市では夏場を中心に 80% を超え、松江市でも 80% 近くの多湿の状態が続き、また冬場でも 70% 台を維持している。夏場の高温、多湿度や飛来塩の多い冬場の多湿度の状態は鋼材の腐食環境として不利な条件

にあたると思われる。

3. 腐食実態と環境調査結果

腐食実態の外観評価は、それぞれ目視外観評価基準とさび厚計測法（表-1）、錆安定化表面処理材の目視外観評価基準（案）（表-2）によった。実態調査の対象橋梁の位置と結果を図-2、表-3、4 に、さび厚さと付着物調査を行った主桁計測ポイントを図-4 に、調査橋梁の外観を写真-1~10 に示す。

計測主桁の内桁は、多主桁橋の場合は図-4 に示すように第二主桁の外桁側、2 主桁橋の場合は両主桁の内側とした。付着塩分量調査は、表面を拭き取ったガーゼをイオン交換水に溶かし、溶存イオンをイオンクロマトグラフィによって分析した。

さび安定化補助処理された橋梁の外観評価基準には、処理被膜の残留状態を示す A、B 評価が加わり、またさびの面積率を評価（x~z）するものとしている。本文での評価では評点付けのみに着目し、さびの面積率 x~z の指標は用いなかった。

図-2 に表示した目視外観結果は、今後の維持管理に用いられることを想定し、一橋梁中の最も悪い部位での評価を示した。ただし、RC 床版の水だれや漏水などによる異常腐食は評価外としている。本文中に、内桁側のさび厚と塩化物イオン（Cl⁻）計測値の最大値と最小値を記した。NaCl は溶解度が高いことから、鋼板表面の塩化物イオンの量は雨や露の影響を受け、計測時期や天候によって変動する⁷⁾ことや、拭き取り法では捕集しきれず厳密な計測が難しい⁸⁾ことが知られている。一方で、拭き取り法で得られる付着塩分組成にも、地域特性が観察されることが報告されている⁹⁾。本調査でも、得られた塩化物イオン量を参考に、飛来塩や凍結防止剤の橋梁全体への影響および、主桁部位ごとの影響について検討した。

表-1 目視外観観察法とさび厚測定法による評点づけとその解釈法（案）¹⁰⁾

状態	評点	目視外観（例）	さび厚
正常	5	腐食が進まず、さびも薄い	200 μ m 程度未満
	4	平均外観粒径 1mm 程度以下で均一なさび	400 μ m 程度未満
	3	平均外観粒径 1~5mm 程度のさび	
要観察	2	外観粒径 5~25mm 程度のうろこ状剥離があるさび	400 μ m 程度以上 800 μ m 程度未満
異常	1	層状剥離が起きているさび	800 μ m 程度以上

表-2 鍍安定化表面処理材の目視外観評価基準 (案)¹¹⁾

鍍・被膜の外観 (例)			処理皮膜部の鍍状況 (% : 1m ² 程度範囲の鍍面積率) ^{*4}			膜・鍍厚 ^{*2, *} 3 (μm)	
			被膜に鍍が見られない. または, 被膜の下や中に僅かな鍍が見られる.	x	y		z
被膜の外観	正常	A	明らかな変・退色なし	A			
		B	明らかな変・退色あり	B			
鍍部の外観	正常	5	腐食が進まず, 薄い鍍	5-x	5-y	5-z	< 400
		4	微細で外観平均粒径1mm程度の均一な鍍	4-x	4-y	4-z	< 600
		3	微細で外観平均粒径5mm程度の鍍	3-x	3-y	3-z	< 1000
	要観察	2	外観粒径5~25mm程度のうろこ状鍍	2-x	2-y	2-z	< 1000
			外観直径25mm程度以下の小さなこぶ状鍍 ^{*1}	2-x (b)	2-y (b)	2-z (b)	
	異常	1	層状鍍	1-x	1-y	1-z	> 1000
外観直径25mm程度を超える大きなこぶ状鍍 ^{*2}			1-x (b)	1-y (b)	1-z (b)		

注) *1 : (b)はこぶ状鍍 (bumpy rust) であることを示す.
 *2 : 膜・鍍厚は目安としての参考値である.
 *3 : 被膜の残留も考慮して, 裸使用の目安に200μmを加算した.
 *4 : 正常の判定は, 鍍発生後の経過期間が9年以上であることを前提とする.

表-3 附着塩化物イオン検出量⁹⁾

ポイント No.	a	c		d		e
		外桁	内桁	外桁	内桁	
C 橋	1.3	2.8	7.7	38.5	38.3	17.4
D 橋	5.1	5.7	16.7	108	222	12.7
F 橋	1.2	104	162	394	258	103
H 橋	0.3	79.0	79.1	783	689	194
I 橋	1.4	28.4	93.1	227	307	54.1
J 橋	0.6 5.6	183	89.8	211	197	-
K 橋	14.7	96.8	157	1,930	2,110	48.0
L 橋	1.5	195	227	692	2,360	427
M 橋	34.5	102	246	1,062	457	151
Q 橋	7.1	18.0	40.9	123	301	36.8

注) 計測ポイントは下図参照

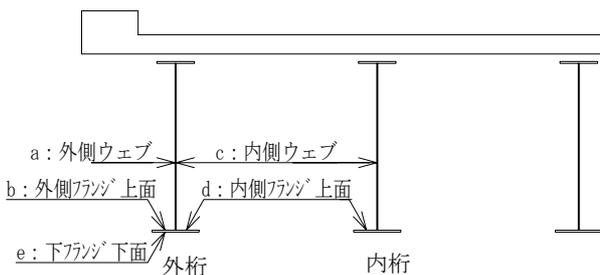


図-4 主桁計測ポイント

3.1 島根県東部, 中部地域の橋梁の腐食実態

島根県東部, 中部地域の調査位置の拡大図を図-5に示す. C 橋の位置は表していないため, 図-2を参照されたい.

(1) 海岸近傍 (J, K, L 橋)

海岸近傍の橋梁の多くは, さび安定化補助処理を用いている.

J 橋は中海沿いに位置する離岸距離 2.8km, 経年 26

年の橋梁である. 塩化物イオンの検出量は内側ウェブ面で 89.8~183mg/m², 下フランジ上面で 197~211mg/m², ただし外側ウェブ面は 0.6~5.6 mg/m²である. 外桁外面ウェブ面 (計測ポイント a) は雨水の当たる環境にあり, 内側桁 (c, d) の付着量に比べ非常に小さい値しか認められない. 一方, 内側桁では, ウェブ面 (c) よりフランジ上面 (d) での検出量が高い. 内側ウェブ面の付着塩は, 結露水に流されることにより, 内側フランジ上面へ移動し再堆積すると考えられる⁷⁾. 以下, 他の橋梁についても計測値は同様な傾向を示す. J 橋の下フランジ上面のさびはもろく, 環境を遮断する緻密なさびは形成されていない. 中海は汽水湖であり, 海上のような厳しさではないものの, 飛来塩分の影響を受けていると思われる, 要観察である評価 2 とした.

島根県中部に位置する K, L 橋は海岸線に近接 (それぞれ 0.9km, 1.3km) しており, 竣工後それぞれ 20 年, 27 年が経っている. これらの橋梁は調査橋梁のうちで最も表面状態が悪い (写真-7, 8). 両橋からは高い塩化物イオンが検出され, K 橋は 96.8~2110mg/m², L 橋では 195~2360mg/m²に達している. それぞれの低い側の数値は内側ウェブ面, 高い値は内側下フランジ上面の値である. 外桁外側ウェブ面はそれぞれ 14.7, 1.5 mg/m²である. K 橋の外側ウェブは被膜ははがれ落ちるまでにはいたっていないが, 内桁側ウェブはこぶ状のふくれが大きく (10~20mm, 写真-7(b)), ウェブ下方の被膜ははがれ落ち荒れた状態になっている. K, L 橋は強い塩分環境に曝され, 厳しい腐食環境にある. 要観察である評価 2 とした.

(2) 平野部 (F, G, H, I 橋)

F, H, I 橋は大社湾にひらける斐川平野に位置する, 離岸距離はそれぞれ, 10.0km, 5.0km, 5.2km のさび安定化補助処理された橋梁である.

表4 調査橋梁と調査結果の概要

橋梁 No. 竣工年 (経年), 表面状態 橋梁形式, 主桁本数 (離岸距離) *	外観評価* 評点: a,b,c,d	外側主桁と内側主桁各部位のさび厚 (μm), 表面状態
A 橋 1996年 (10), 無塗装 3 径間連続鉄桁橋, 3 主桁 (11.0km)	正常 5, 3, 5, 3	a: 124~138, b: 263~291, c: 125~135, d: 270~310, 外ウェブは褐色になるが, 内桁側は赤茶けた色合いのままである。 下フランジ上面は外内面とも粒子の粗いさびが分布する。
B 橋 1997年 (9), 無塗装 単純非合成鉄桁橋, 3 主桁 (11.0km)	正常 5, 3, 3, 3	a: 170~186, b: 257~264, c: 157~225, d: 271~316, 表面状態は A 橋と同様である。両橋とも, さび表面をケレンすると 40~100 μm 程度落ちる (ウェブ, フランジとも)。
C 橋 2001年 (5), 無塗装 単純非合成鉄桁橋, 5 主桁 (33.0km)	正常 5, 5, 5, 5	a: 67, b: -, c: 71~88, d: 197, 全体に赤茶けた外観である。下フランジ上面は粒子の粗いさびが 分布する。
D 橋 1989年 (17), 無塗装 単純曲線鋼床版箱桁橋, 2 箱桁 (22.5km)	正常 5, 3, 5, 3	a: 126, b: -, c: 89~171, d: 247~635, ウェブの内外両面とも触るとさび片が付いてくる。内桁側連結ボ ルト周りは, 初期さびや赤茶けた部分が残る。
E 橋 1999年 (7), 無塗装 単純合成箱桁橋, 単箱桁 (27.0km)	正常 ウェブ: 5 フランジ: 5	上流側ウェブ: 73~111, フランジ下面: 80~206, 下流側ウェブ: 98~205。ウェブ, フランジ下面とも触るとさび片が付いてくる。 さびは粗く不均一。結露水の流れ筋が目立つ。
F 橋 1983年 (23), 補助処理 単純合成鉄桁橋, 5 主桁 (10.0km)	要観察 B, B, 3, 2	a: 56~112, b: 72~94, c: 72~479, d: 165~1244, 外ウェブは処理剤の退色がある。内桁ウェブは全体にさびに換わ りつつある。内ウェブ桁端部で径 5mm 内外のさびが分布する。
G 橋 1981年 (25), 無塗装 2 径間単純合成 H 形鋼桁橋, 3 主桁 (14.0km)	正常 5, 3, 3, 3	a: 117~188, b: 145~231, c: 127~422, d: 270~484, 外ウェブは褐色系になっているがさび目は一様ではない。下フラ ンジ上面は数mmの粒子の粗いさびが分布する。
H 橋 1981年 (25), 補助処理 3 径間単純合成鉄桁橋, 4 主桁 (5.0km)	正常 A, A, 5, 5	a: 110, b: 88, c: 76~166, d: 97~980, 外ウェブは処理剤の退色がある。内桁ウェブは全体にさびに換わ りつつある。西風を受ける面の変化が大きい。
I 橋 1982年 (24), 補助処理 3 径間単純合成鉄桁橋, 3 主桁 (5.2km)	要観察 B, B, 2, 2	a: 105, b: 283, c: 76~426, d: 283~983, H 橋の 0.9km 下流に位置する。表面状態は H 橋より悪く, 内桁ウ ェブ桁端部で径 10mm 程度のこぶ状のふくれが多く分布する。
J 橋 1980年 (26), 補助処理 単純合成鉄桁橋, 3 主桁 (2.8km)	要観察 B, 2, 2, 2	a: 74, b: 766, c: 71~287, d: 303~766, 外ウェブは処理剤の退色がある。内桁ウェブ, 横構は全体にさび が拡がり始めている。さびは柔らかい。
K 橋 1986年 (20), 補助処理 2 径間単純合成 H 形鋼桁橋, 2 主桁 (0.9km)	要観察 A, 2, 2, 2	a: -, b: -, c: 73~765, d: 747~765, 内桁ウェブ被膜は径 20mm 程度のこぶ状のふくれが多く分布。フ ランジ上面は塵埃やさびの汚れが拡がり, 地肌が見えない。
L 橋 1979年 (27), 補助処理 単純合成箱桁橋, 2 箱桁 (1.3km)	要観察 B, 2, 2, 2	a: 49, b: -, c: 75~934, d: 839~1007, 内ウェブ上方で被膜はふくれ (径 10~20mm), 内ウェブ下方やフ ランジ下面は被膜ははがれさびが拡がる。表面の凹凸が激しい。
M 橋 1991年 (15), 外面のみ 2 径間単純合成 H 形鋼桁橋, 2 主桁 (3.5km)	正常 A, A, 3, 3	a: 24, b: -, c: 24~666, d: -, 外ウェブ処理剤の退色が進む。内桁ウェブは粒子の粗いさびが分 布する。下フランジコバ面のケレン後は硬いさび 104 μm が見ら れる。
N 橋 1990年 (16), 無塗装 2 径間単純合成 H 形鋼桁橋, 2 主桁 (3.5km)	正常 3, 3, 3, 3	a: 355, b: 268~302, c: 251~464, d: 302~729, 外ウェブは暗褐色に変わりつつあるが, 不均一である。内桁下フ ランジ上面は数 mm の粒子の粗いさびが分布する。
O 橋 1991年 (15), 補助処理 2 径間単純合成 H 形鋼桁橋, 2 主桁 (4.0km)	正常 5, 3, 3, 3	a: -, b: -, c: -, d: -, 内外ウェブは被膜がさびに変わりつつある。外桁側が先行する が, 不均一である。内桁下フランジ上面は数 mm の粒子の粗いさ びが分布する。
P 橋 2003年 (6), 補助処理 単純合成箱桁橋, 単箱桁 (4.2km)	正常 A, A, A, A	a: -, b: -, c: -, d: -, 竣工後間もない塗装橋梁のような外観。処理被膜は全ての部材で 健全である。
Q 橋 1983年 (23), 補助処理 3 径間単純合成鉄桁橋, 2 主桁 (3.5km)	正常 A, 5, B, 4	a: -, b: -, c: -, d: -, 外ウェブの被膜は残留, 変・退色はない。内ウェブ側の被膜は一 部で退色, 下フランジ, 横構のエッジ部に沿ってさびが生じ始め ている。さびの目は細かい。結露水の流れ筋が目立つ。

*外観評価をした主桁ポイント a,b,c,d はそれぞれ, 主桁外側のウェブ, 下フランジ上面, 内桁側または内桁のウェブ, 下フランジ上面を表す (図4 参照)。また, 離岸距離は海岸までの最短の距離を示し, 北西 (季節風) 方向の海岸からの距離を表示するものではない。



(a)下フランジ下面とウェブ



(b)支点上補剛材 (スカーラップが無くさびが堆積)

写真-1 A橋



(a)外側ウェブ



(b)下フランジ内桁側上面 (さびは厚く粗い)

写真-2 D橋



(a)外側ウェブと下フランジ



(b)上フランジ下面 (初期さびが残る)

写真-3 E橋



(a)内側ウェブ



(b)下フランジ上面 (被膜がはがれ始めている)

写真-4 F橋



(a)外側ウェブ



(b)下フランジ上面 (さびは厚く粗い)

写真-5 G橋



(a)内側ウェブ



(b)下フランジ下面 (さびに換わりつつある)

写真-6 H橋



(a)外側ウェブ



(b)内桁側ウェブ (20mm 程度のこぶ状さびが分布)

写真-7 K橋



(a)ウェブ・下フランジ



(b)下フランジ・横桁下面 (いたるところで被膜が落ちる)

写真-8 L橋



(a)外側ウェブ



(b)下フランジケレン後 (硬いさびが残る)

写真-9 M橋



(a)外側ウェブ (結露筋が多数見られる)



(b)下フランジ・横構 (さびに換わりつつある)

写真-10 Q橋

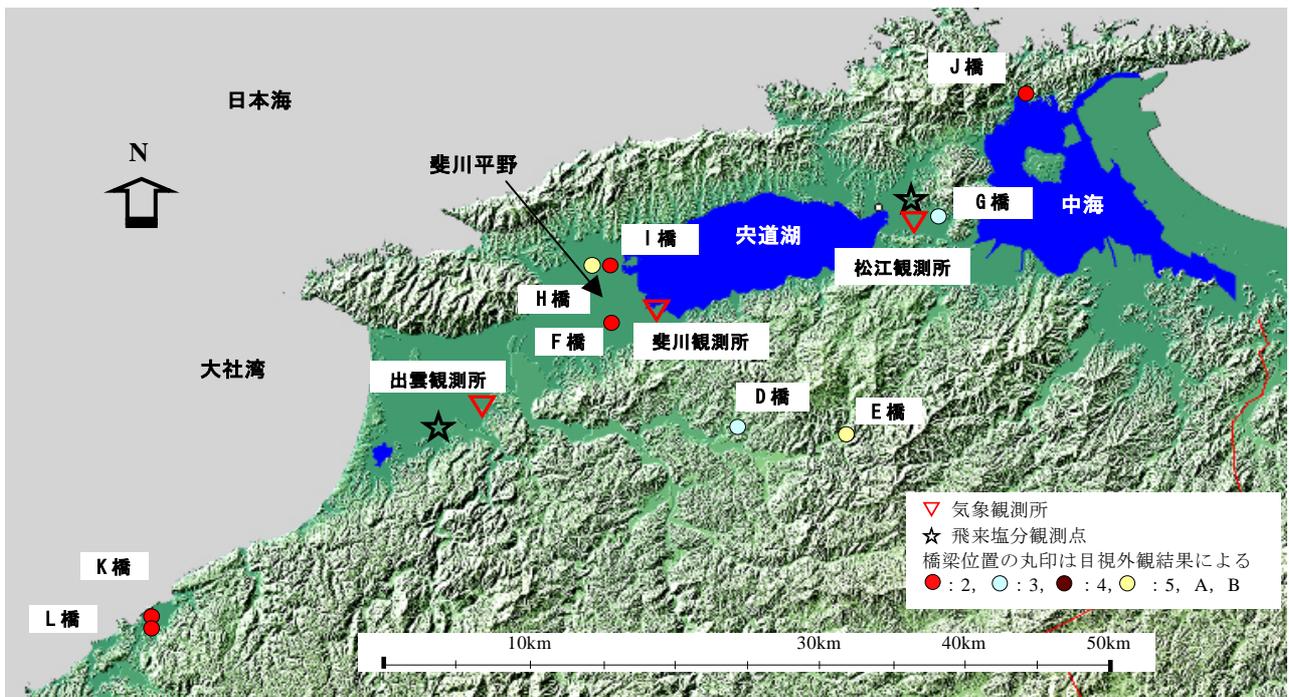


図-5 島根県東部，中部地域の調査位置図

F橋は竣工後23年が経ち、処理被膜がさびに換わり始めている。内桁ウェブ桁端部付近では径5mm程度のさびが分布する（写真-4(a)）。下フランジ上面は塵埃が堆積し、処理被膜がはがれ始めているのか、さび汁を含む塵埃が薄膜をつくっているのか判別しづらい（写真-4(b)）。このような場合、塵埃やさび汁を拭き取った後のさびの拵がりを観察する必要がある。F橋の場合、内桁下フランジ上面の被膜のはがれた後のさび厚から評価は2とした。F橋からは塩化物イオンを、内桁ウェブ面で $104 \sim 162 \text{mg/m}^2$ 、内桁下フランジの上面で $258 \sim 394 \text{mg/m}^2$ 、外側ウェブ面では 1.2mg/m^2 を検出した。

H, I橋は斐川平野北側の同一河川に架かる、竣工後それぞれ25年、24年の橋梁である。塩化物イオンをH橋の内桁側で $79 \sim 783 \text{mg/m}^2$ 、外側ウェブ面で 0.3mg/m^2 、I橋の内桁側で $28.4 \sim 307 \text{mg/m}^2$ 、外側ウェブ面で 1.4mg/m^2 検出した。外側ウェブは安定化処理剤の退色が見られるものの塗装橋梁のような外観を呈している（写真-6(b)）。I橋よりもH橋の方が検出された塩化物イオン量が多いにもかかわらず、鋼板の表面状態はH橋の方が良く、H橋の内桁ウェブは処理被膜が風化しさびに置き換わり始めている（写真-6(a)）。他方、I橋の内桁側は径10mm程度のこぶ状のふくれが生じている。この内桁ウェブのこぶ状さびの有無とさび厚から、H, I橋の外観評価はそれぞれ、正常である評価5、要観察である評価2とした。この表面状態の差異の要因については、現在のところ不明である。

G橋は離岸距離14.0km、竣工後25年を経る無塗装橋梁である。ウェブ表面を触ると、いまだにさび片がついてくる状態である（写真-5）。さらに下フランジ上面では、

初期さびの風化が進んでおらず、さび目は粗く全体は不均一である。この橋梁については、さび厚さから評価3とした。

(3) 山地部 (C, D, E橋)

C, D, E橋は竣工後それぞれ5年、17年、7年経過し、離岸距離はそれぞれ33.0km、22.5km、27.0kmの無塗装橋梁である。

C橋（調査位置は図-2参照）は竣工後5年しか経たず、下フランジ上面を除き、さび厚さも薄い。下フランジ上面のさび厚はウェブからの流れさびが堆積したものと考えられ、厚く計測している。初期の段階として、評価は5とした。また、C橋の表面付着物の測定結果では、塩化物イオンを最大で 40mg/m^2 程度（内桁下フランジ上面）しか検出されず、飛来塩や凍結防止剤の影響は認められなかった。

D橋はG橋と同様に、ウェブ表面を触ると、いまだにさび片がついてくる状態である（写真-2）。さらに下フランジ上面でも、初期さびの風化が進んでおらず、さびは厚く粗い。離岸距離が長いにもかかわらず、D橋からは塩化物イオンを内桁側で $5.7 \sim 222 \text{mg/m}^2$ 、外側ウェブ面では 5.1mg/m^2 検出した。風化が遅れている表面状態から付着塩分の影響は小さいと考えられる。さびが厚いことから、評価は3とした。

E橋のウェブの表面状態はD, G橋と同様である。ウェブには雨水や結露の流れ筋が多数見受けられる（写真-3）。上フランジの裏面には赤茶色の初期さびが残ったままの状態である。初期の段階として評価は5とした。

D橋やG橋に限らず、ほとんどの橋梁の下フランジ上面は、流れさびや塵埃が堆積しやすいため、塩化物イオ

ンをためやすくする。E橋では下フランジは曲げ加工され、有害な飛来物や水分の滞留がないことから、防食上有利な形式と考えられる。

C, D, E橋は腐食環境が良好と思われることから、保護性さびの形成が期待できる。

3.2 島根県西部地域の橋梁の腐食実態

島根県西部地域の調査位置図を図-6に示す。A, B橋の位置は図-2を参照されたい。

(1) 海岸近傍の橋梁 (M, N, O, P, Q橋)

M, N, O, P橋は離岸距離が、3.5~4.2kmの同一の河川にかかる橋梁である。そのうち、N橋のみ無塗装とした耐候性鋼橋梁、他は安定化補助処理された橋梁である。P橋のみ経年が若く6年、それ以外は15~16年を経ている。P橋を除くM, N, O橋は全体にさびが厚めであり、特に下フランジ上側はさびが厚い。また、ウェブ、下フランジの処理被膜はさびに換わりつつある。M橋では粗い表面をワイヤブラシでケレン後、さび厚さを再計測した。ケレン後の鋼板表面では100 μ m程度の硬い緻密なさびを確認した(写真-9(b))。下フランジ上面の粗いさびは流れさびが堆積しているものと思われ、3橋ともさび厚さから外観評価は3になる。島根県東部の山地部では初期さび風化が遅れているのに対し、これらの3橋の腐食は早く進んでいるように思われる。

P橋は安定化処理被膜が塗装橋梁に見間違ふほどにきれいに残る。全ての部位で評価はAである。

Q橋は海岸ぎわの標高380mの山裏に位置(離岸距離3.5km)し、竣工後23年経過しても、ほとんどの部材で安定化処理被膜が残留している(写真-10(a))。外、内ウェブには結露水の流れ筋が多数見られる。一部下フランジや横構CT鋼のエッジ部で安定したさびに置き換わりつつある(写真-10(b))。評価は4とした。M橋の内桁側で102~1062mg/m²、ウェブ外側で34.5mg/m²、Q橋の内桁側で18~301mg/m²、ウェブ外側で7.1mg/m²の塩化物イオンを検出した。この2橋の鋼板の表面状態は前述のとおり、漸次保護性さびが生成され始めている段階にあり、塩分環境の影響は強くない、また付着塩分の影響は小さいものと考えられる。

浜田の風配図を図-7に示す。風配図は、毎日の最大風速を記録した風向を、平成15年4月から18年3月までの3ヶ年分積算した。強風時に飛来塩が増加するとされる¹²⁾ことから、ここでは最大風速が7m/sec以上の風速時のみを対象とした。図からは、西方向で小さなピークを持つが、南西方向からの風が卓越することが分かる。M橋からP橋の一連の橋梁の場合、丘陵を河川が侵食、蛇行しながら流下した地形であり、海風が直接河川を遡上するようなことがない、また本来季節風の吹走する北西方向の風が、山地に沿って南西方向の風向に変わっていることにより、海塩粒子が山地や植生に吸着緩和されている可能性を示唆する。Q橋の場合、標高はそれほど高

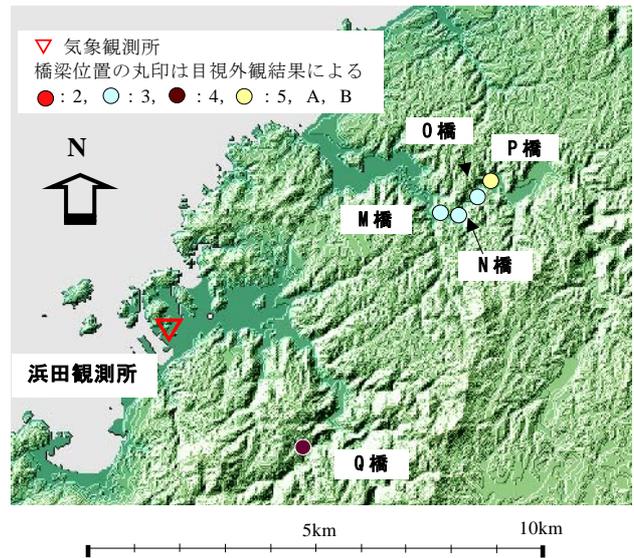


図-6 島根県西部の調査位置図

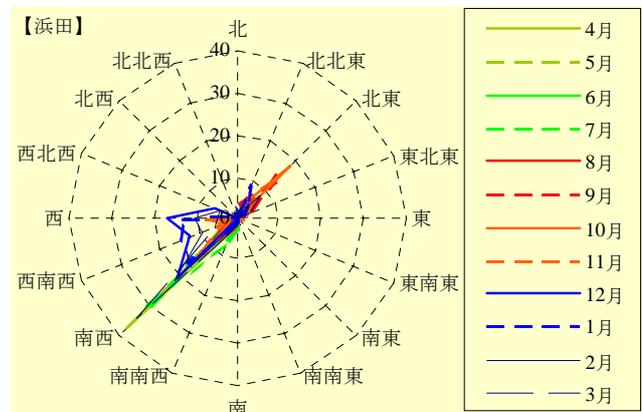


図-7 アメダスデータによる風配図 (H15~H17年度)

くないが、架橋地点での飛来塩を遮断する作用によって、保護性さびの生成にとって良い状態が保たれていると考えられる。

(2) 山地部の橋梁 (A, B橋)

A, B橋(調査位置は図-2参照)は離岸距離が11.0km、経年数がそれぞれ10年、9年の若い無塗装橋梁であり、初期さびが拵がったままの状態である(写真-1(a))。下フランジ上面はさびの厚い箇所になっており、ウェブからの流れさびが堆積したものであると考えられる。さび厚さから評価は3とした。

両橋とも、内桁側ウェブの支点上補剛材にスカーラップが無く、流れさびが堆積している(写真-1(b))。外桁の内桁側に面するウェブや内桁ウェブは結露水の流れ筋が多く見られ、下フランジ上面は流水経路になった結果と考えられる。橋台上で、泥土に埋まりウェブを孔食するケースが見られるように、さびの堆積は鋼板のぬれ時間を長くし好ましくない。構造設計上の留意点として、外側ウェブ支点上補剛材のスカーラップを通常より大きくする(50R程度)としている³⁾が、外桁の内側ウェブ側や内桁ウェブの支点上補剛材下端にも、外側ウェブと同じく50R程度のスカーラップを設けるのが良いと思わ

れる。

3.3 松江, 出雲の飛来塩分量調査結果

出雲では平成16年2月から17年1月の間、松江では平成17年1月から12月の間に飛来塩分量の調査が行われている。以下に、これらの飛来塩分量調査結果について述べる。

飛来塩分量の調査位置、気象観測所の位置を図-5に、図-8に風配図を、図-9(a), (b)に飛来塩分量調査結果を示す。図-8の風配図は、図-7と同様に毎日の最大風速を記録した風向を、3ヶ年分積算した値による。また、図-9は塩分量の観測値と、観測月の毎日の7m/sec以上の最大風速記録値を風向別に積算し、強風の吹く方位を風速値の累計値として併せて示した。2地点での飛来塩分量調査は、土研式タンクによる計測を島根県土木部が行ったものである。図-9(a)より、出雲では、西または西北西の風による塩分飛来の影響が大きいことが分かる。通年の卓越風である西南西の風の強弱と飛来塩分量の多寡には関係が見受けられない。表面付着物分析では、斐川平野に位置するH, I橋, またF橋の表面から塩化物イオンを検出しているがこの飛来塩の影響を受けているものと

推察される。また、離岸距離が22.5kmにもおよぶD橋の表面付着物分析からも塩化物イオンを検出しているが、これらの風によるものか不明である。H, I, F橋は真西の大社湾からの離岸距離よりも、西北西方向の谷地形からの離岸距離の方が短く(それぞれ6.8km, 7.8km, 10.0km), その方向からも季節風を受けている可能性がある¹³⁾。なお、本文では表-4脚注に示すとおり、断り書きのない離岸距離は季節風の方位によらず海岸までの最短距離として記している。

図-9(b)より、松江では、飛来塩を運ぶ風として、通年の卓越風である西風を基本に、西北西と西南西の風の影響が高い。逆に北西の風と飛来塩分量との関係は見受けられない。西方から飛来する海塩粒子は、強風時に松江(西南西方向の離岸距離35km)まで達する。市内に位置するG橋は、その外観目視調査結果から、初期さびが残留するような腐食速度の遅い状態にあり、塩分環境による悪い影響は見受けられない。松江の市街地を過ぎる間に吸着、緩和されるか、または付着量として影響のないほどの低い値であるものと推察される。なお、G橋の塩化物イオンの付着量は未計測である。

松江で9月に観測された高塩分は、台風14号の通過に

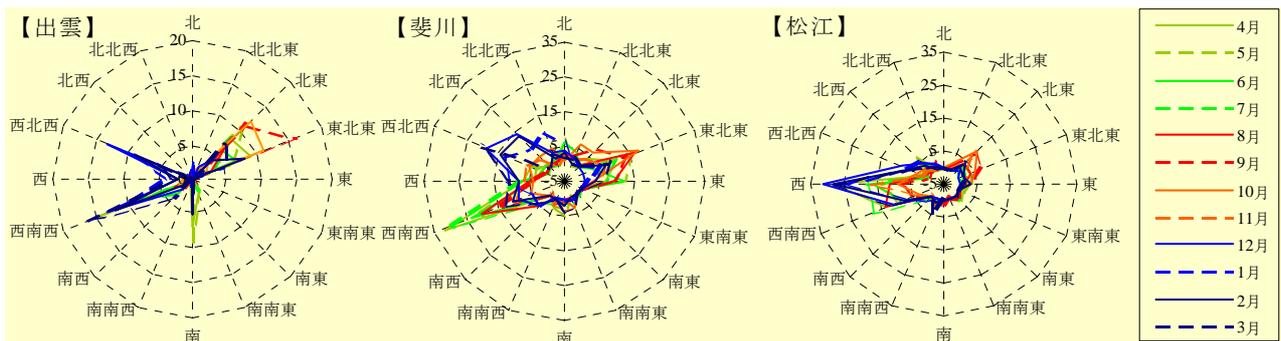


図-8 アメダスデータによる風配図 (H15~H17年度)

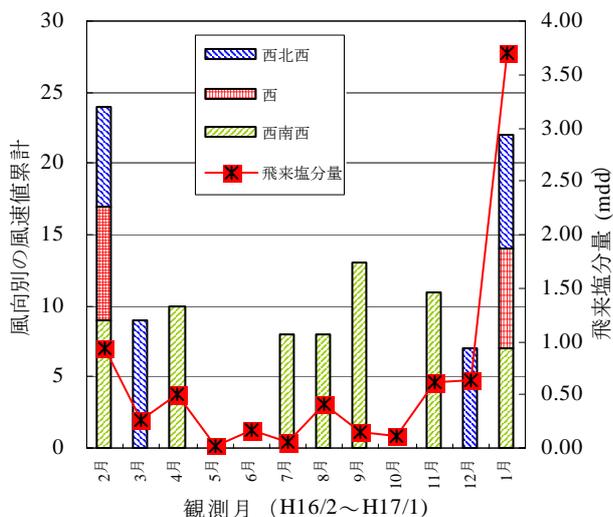


図-9(a) 飛来塩分観測値と風向別の風速値累計【出雲】

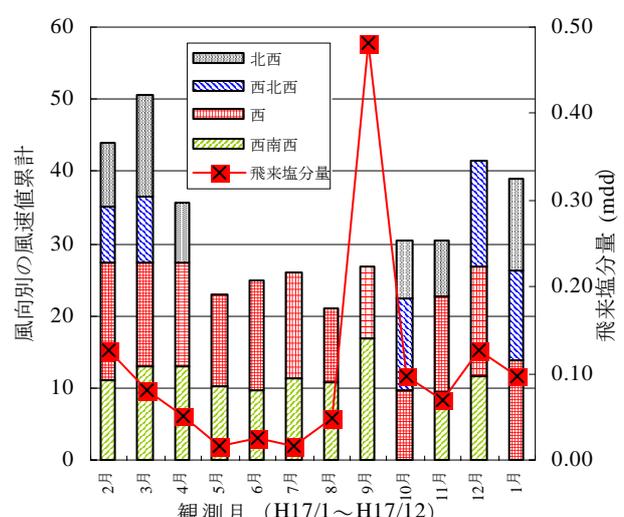


図-9(b) 飛来塩分観測値と風向別の風速値累計【松江】

出雲との比較のため1月を後ろへまわした

伴う吹き返しの風（平成 17 年 9 月 7 日：南西の風，最大瞬間風速 29.9m/sec）によってもたらされたものと考えられる。

出雲，松江の計測地点の離岸距離はそれぞれ，4.0km，9.0km である．しかしながら飛来塩分量はいずれも 0.05mdd を大きく超え，0.63mdd，0.10mdd（それぞれ年間平均値，松江 9 月の突出値を除いた場合は 0.071mdd）を観測している．西方向の大社湾から吹き込んでくる季節風は，微地形の影響を受け，宍道湖東岸まで海塩粒子を運んでくるものと考えられる．

2 地点の塩分調査は，今後の橋梁建設に向けて行われたものである．両橋は概ね南北方向の架橋が計画され西風を遮るかたちの主桁配置となることから，風の回り込みによる内桁側への塩分付着は大きくなるものと推察される．

3.4 調査結果のまとめと課題

(1) 腐食実態

全ての橋梁で外桁外側ウェブ面は外観評価結果が高く，さび厚さも薄い．付着塩化物イオン量の少なさからも，雨水の洗い流し作用を受けていることが分かる．他方下フランジ上面では，流れさびや塵埃が堆積し，さびは厚い．

飛来塩の影響を受ける橋梁では，同様に下フランジ上面で塩化物イオンの検出量が大きいことから，構造部位の下側にある水平部材の劣化状況を知ることがさび評価の調査のポイントになるものと思われる．フランジ上面にさび汁が塵埃とともに広がるような場合は，その表面を良く拭き取ってから観察せねば，さびの状況を知ることができない．その点で下フランジ下面はエッジ部から腐食が進む場合が多く，さびの状態はより分かり易い．

さび安定化補助処理された橋梁で飛来塩の影響を受けている部位は，共通して処理被膜にこぶ状のふくれを生じている．付着する塩化物イオン量が多いほど，そのふくれは大きい．この処理被膜のふくれと大きさは，環境条件の悪さを教えてくれる．ただし，ふくれのはがれ落ちてしまった後の鋼板表面は，単に処理被膜が風化し保護性さびに置き換わりつつある状態と見誤る心配がある．さび評価する際は，架橋地点の腐食環境を予め把握しておくことが欠かせない．見誤る心配のある場合，外観目視のみでなく触診によって，さびのもろさ（ポーラスな状態）を確認し，鋼板地肌との差異が認められれば不安定な状態を疑ってみるのが良い⁶⁾．

島根県で，離岸距離規定（5km）に準ずれば，多くの場所で沿岸の山裏側までを含むことになる．県西部の橋梁に見られるように，山地や丘陵内の谷部に位置する橋梁は離岸距離が 5km 以内であっても良い状態を保つものがある．また，東部の橋梁に見られるように 5km を超える平野部であっても，塩分環境に影響された悪い状態の橋梁がある．これらは微地形の影響が大きく作用する

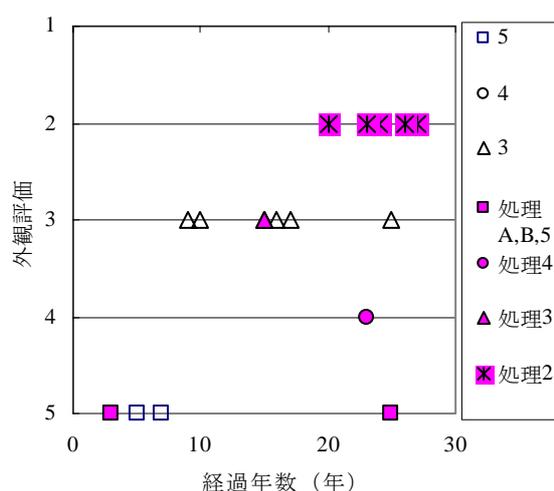


図-10 目視外観評価と経過年数の関係

ことを示しており，内陸に向かって平野部が広がるような地形以外では，離岸距離規定によらず架橋地点での個別の判断が必要になる．

(2) 腐食環境の把握

目視外観評価と経過年数の関係を図-10 に示す．図中の凡例で，“処理”のついたマークは，さび安定化補助処理された橋梁の結果を示す．この図から海岸近傍の橋梁（評価 2）を除くと，10 年以上経過した後も粒子の粗い状態を示す評価 3 の橋梁が多いことが分かる．島根県の高湿度の影響による地域特性を示すものかも知れない．今後，他地域との比較検討などを行う必要がある．

海岸近傍や山裏に位置しながら評価 3 とした橋梁は，平野部よりも湿度が高いと考えられる．また，塩化物イオンを検出したにもかかわらず，鋼板ぬれ時間の短さから表面状態を良好に保つと思われる橋梁がある．これらは飛来塩分の影響のみならず，鋼板のぬれ時間などの気象状況との関係が，腐食環境としてどのように影響を与えているか，適切な指標で整理することが必要である．

近年の研究の成果に，暴露試験片による調査（ワッペン試験）法の初年度腐食量 A 値による環境評価の提案¹⁴⁾とともに，年間の鋼材ぬれ時間 TOW (h)，飛来塩分量 C (mdd)，気温 (T)，平均風速 W (m/sec) などによって，環境の腐食性を化学反応の速度に着目して定義する，「地域環境腐食性指数 (Z)」が提案されている¹⁵⁾．これらは，地域固有の気象要素を用い，耐候性鋼にとっての腐食環境を調査，定義するための強力なツールになるものと思われる．山陰固有の気象や，微地形の影響が耐候性鋼材にどのような影響を与えているか，今後の調査課題としたい．

4. まとめ

離岸距離が 5km を超える山地や平野部のほとんどの調査橋梁は初期さびの風化が遅れ，外観評価基準は 5 段階評価のうち 3 にある．長い期間この状態を保ち，正常

な状態と思われる。一方、離岸距離の短い調査橋梁は海塩粒子の影響を受けているものが多く、評価が2となる橋梁は今後の継続した調査により、他の防食法の要否やその必要となる時期について把握せねばならない。

海岸近傍に山地や丘陵がある地形や、山地に挟まれる平野部では、海塩粒子の飛来は微地形の影響を受けている。島根県で離岸距離規定（日本海沿岸部Ⅱ：5km）に準ずれば、多くの場所で沿岸の山裏側までを含むことになることから距離規定によらず、個別の判断が必要である。今後、島根県の気象風土を、初年度腐食量A値や地域環境腐食性指数Zなどを用い調査する予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、島根県土木部より飛来塩分の計測データを提供頂きました。ここに記し謝意を表します。また、気象観測データはアメダス（気象庁）より、本文中の地図はカシミール3Dを用いました。

参考文献

- 1) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，pp.64-72，1997.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編，p.183，2002.
- 3) 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）他，1993.
- 4) 三木千寿・市川篤司：現代の橋梁工学，pp.66-67，数理工学社，2004.
- 5) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，pp.III-30-35，2005.
- 6) 松崎靖彦，大屋誠，安食正太，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理された耐候性鋼橋梁の腐食実態と評価法に関する一考察，土木学会論文集 F Vol.62 No.4，pp.581-589，2006.
- 7) 大屋誠，武邊勝道，安食正太，古川貴士，松崎靖彦，麻生稔彦：付着塩分量による島根県内既設耐候性橋梁の腐食環境評価，平成18年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.3-4，2006.
- 8) 大屋誠，武邊勝道，安食正太，古川貴士，松崎靖彦，麻生稔彦：耐候性橋梁における付着塩分量とさびの関係，平成18年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.5-6，2006.
- 9) 武邊勝道，大屋誠，松崎靖彦，安食正太，古川貴士，麻生稔彦：耐候性鋼橋梁における腐食と付着塩分組成の関係，第15回環境地質学シンポジウム論文概要集，pp.157-160，2005.
- 10) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.77-87，2003.
- 11) 紀平寛：エコ・コンシャスな未来への耐候性鋼橋梁技術ーリスク管理型最小保全制度実現へ向けた耐久化学の枠組とその構成技術ー，橋梁と基礎 vol.39，pp.44-48，2005.
- 12) 建設省土木研究所：飛来塩分量全国調査(Ⅳ)ー飛来塩分量の分布特性と風の関係ー，pp.19-20，1993.
- 13) 大屋誠，松崎靖彦，麻生稔彦，安食正太：島根県における既設耐候性橋梁の実態調査，平成17年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.523-524，2005.
- 14) 社団法人日本鉄鋼連盟：第10回土木鋼構造研究シンポジウムー鋼橋性能向上研究 研究成果報告ー，pp.33-34，2006.
- 15) 紀平寛，田辺康児，楠隆，竹澤博，安波博道，田中睦人，松岡和己，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，No.780/I-70，pp.71-86，2005.

(2006年9月11日受付)