

既存耐候性橋梁の付着塩分量とさび厚に関する相関分析

An analysis of the relationship between adhesive sodium and rust thickness on weathering steel bridges

○後藤 悟史* 麻生 稔彦** 宮本 文穂***
Satoshi GOTO Toshihiko ASO Ayaho MIYAMOTO

ABSTRACT This paper reports a detailed investigation on the adhesive sodium of the existing weathering steel bridges for the purpose of obtaining the deterioration criterion on their accurate and efficient assessments. Then, the correlation analyses among the adhesive sodium, offshore distance and rust thickness are conducted. It becomes clear that, the adhesive sodium is mainly distributed on the lower flange of the beam. Moreover, the relationship between adhesive sodium and offshore distance can be approximated by the Weibull distribution. In the same environment, a roughly linear relation between adhesive sodium and rust thickness can be established.

Keywords: 耐候性橋梁, 付着塩分量, さび厚, 離岸距離

Weathering steel bridge, adhesive sodium, rust thickness, offshore distance

1. はじめに

LCC 削減を目的とし、塗装の塗り替えを必要としない耐候性鋼材の鋼橋への適用実績は年々増加しており、2002 年度における無塗装耐候性橋梁の建設量は全鋼橋の 15%程度となっている¹⁾。耐候性鋼材は、将来にわたり腐食減耗量が十分に小さく、設計上問題ないレベル（100 年で 0.5mm 以下）であることを条件として鋼橋に適用されるが、この低腐食速度状態は「さび安定化状態」と表現され¹⁾、これには飛来塩分量が大きく関係するとされている。道路橋示方書では、無塗装で耐候性鋼材を用いる条件として、「飛来塩分量が 0.05mg/100cm²/day を超えない地域」と規定されており、離岸距離に応じて 1 年間の飛来塩分量調査を義務づけている。

しかし、これまでの実態調査により、飛来塩分量のみでは説明できない有害な腐食さびの発生事例が数多く報告されている²⁾³⁾。また、飛来塩分量の計測には 1 年以上の期間を有するため、これに変わる、正確で効率良く評価し得る新しい腐食性指標が求められている。紀平ら⁴⁾⁵⁾は暴露試験片の

初期一年間の腐食減耗量を正確に測定することで、架橋環境の腐食性を評価する方法を提案している。

一方、実際の橋梁計画にあたっては近隣の耐候性橋梁のパフォーマンスからその適否を判断することが少なくない。この場合には、新たに飛来塩分量を測定するよりも、架橋位置の地形特性を含んだ有益な情報が得られることが多い。既存橋梁から得られる定量的な腐食性因子の一つに、鋼材表面の付着塩分量が挙げられる。付着塩分量は、実際に鋼材に付着し腐食を促進させる直接的原因となる塩分量で、飛来塩分量に比べより厳密な尺度と言える。これを用いて架橋環境の腐食性を評価することができれば、より正確で効率良く耐候性橋梁の適否を判断できると思われる。

そこで、本研究では既存の耐候性橋梁の付着塩分量に着目し、山口県全域を対象としてこれを調査した。調査結果より、付着塩分量と離岸距離・経過年数・年平均降水量・さび厚との相関を分析し、付着塩分量の評価パラメータとしての可能性を検討した。

* 宇部興産機械(株) 橋梁・鉄構設計 Gr. (〒755-8633 宇部市大字小串字沖ノ山 1980)

**工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 助教授 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

***工博 山口大学 工学部 知能情報システム工学科 教授 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

表-1 調査対象橋梁

橋名	構造形式	経過年数(年)	離岸距離(km)	さび外観評点
A	鋼床版連続箱桁	3.5	0.6	表面処理
B	鋼床版単純鉄桁	11.7	1.0	表面処理
C	単純鉄桁	5.3	1.6	4
D	単純鉄桁	2.9	1.8	2
E	鋼床版単純鉄桁	9.0	3.0	4
F	連続鉄桁	6.1	3.3	4
G	単純鉄桁	3.6	3.8	3
H	合成単純鉄桁	7.2	4.0	表面処理
I	合成連続鉄桁	6.4	5.4	表面処理
J	連続箱桁	11.9	6.2	4
K	単純鉄桁	3.1	6.3	5
L	単純鉄桁	3.1	6.9	5
M	単純鉄桁	7.8	7.0	表面処理
N	連続箱桁	1.3	9.4	5
O	連続鉄桁	1.4	12.1	5
P	単純鉄桁	6.7	15.0	2
Q	連続鉄桁	1.3	16.0	桁端部塗装
R	単純鉄桁	5.9	20.0	4
S	鋼床版連続鉄桁	3.1	26.6	4
T	鋼床版連続鉄桁	6.0	3.0	1

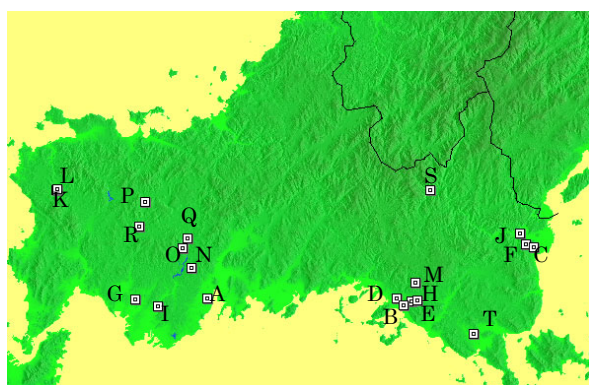


図-1 調査対象橋梁位置

2. 既存耐候性橋梁の付着塩分量調査

調査対象橋梁は、山口県における既存の耐候性橋梁 20 橋である。表-1 に、対象橋梁の構造形式・経過年数・離岸距離・さび外観評点を示す。表-1 中の経過年数は竣工年月から調査年月までとし、さび外観評点は橋梁中の下フランジにおける最低点としている。また、図-1 に各橋梁の架橋位置を示す。

写真-1 に示す表面塩分計を用い、鋼材表面の付着塩分を測定した。測定箇所は主桁端部とし、雨が当たる [外] とあたらない [内] について、それぞれウェブ・下フランジ上面・下フランジ下面とした。測定箇所の概略図を図-2 に示す。また付着塩分測定箇所におけるさび厚を電磁膜厚計により測定した。さらに、気象条件による影響を考慮するため、架橋場所の年平均降水量を近隣のアメダスポイントから取得した。



写真-1 表面塩分計

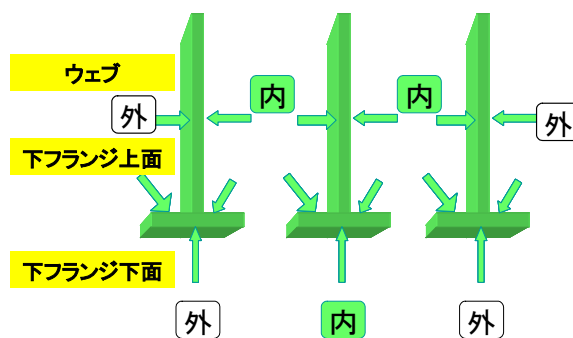


図-2 測定箇所概略図

3. 調査結果

調査結果の例として、表-1 中の R, P, T の 3 橋について示す。

【事例 1 : R 橋】

写真-2 に R 橋の全景写真を示す。R 橋は橋長 58.0m、幅員 8.0m の単純 2 主桁箱桁橋である。R 橋の外観は、耐候性橋梁特有のチョコレート色をしており、桁端部においてもうろこ状のさびや層状剥離さびは発生していない。外観評点を 4 と評価できる良い状態であった。

図-3 に、付着塩分量およびさび厚の測定結果を主桁断面図上で示す。この結果より、付着塩分量はウェブよりも下フランジ上面の方が多い。これは、垂直部材よりも水平部材の方が堆積、付着しやすいためと考えられる。また同じウェブ・下フランジであっても外側よりも内側の方が多い。これは、外側は風雨により塩分が付着しにくいためであると予想される。また、付着塩分量が多いほどさび厚が厚い傾向がみられるが、両者の関係については後で検討することとする。

【事例 2 : P 橋】

写真-3 に P 橋の全景写真を示す。P 橋は橋長



写真-2 R橋

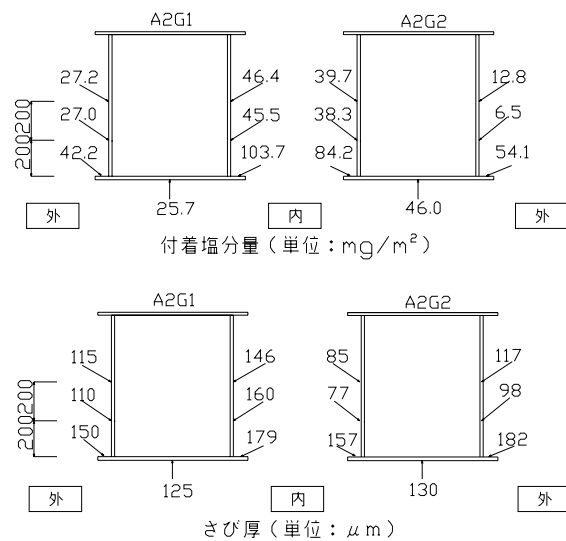


図-3 R橋 付着塩分量とさび厚

47.0m, 幅員 3.3m の単純 2 主鋼桁橋である。ほとんどの部位は評点 4 以上であるが、桁端部において、下フランジ上面内側でうろこ状のさびが発生している。また、A1 側 G2 下フランジ上面外側では隣接する道路橋から降り落ちる土砂が堆積し、苔が生じている部分もある。

図-4 に測定結果を示す。測定不能とは、うろこ状のさびや苔のために表面塩分計の測定面を鋼材表面に密着させることができなかったためである。測定結果から、ウェブよりも下フランジ上面の、また外側よりも内側の付着塩分量が多いという傾向は R 橋と同様であるが、R 橋に比べ全体的に塩分量は多い。これは、両橋の経過年数はほぼ同程度であるため、P 橋の離岸距離が小さいこと、また隣接橋が存在し桁下空間の風通しが悪いことが原因として考えられる。



写真-3 P橋

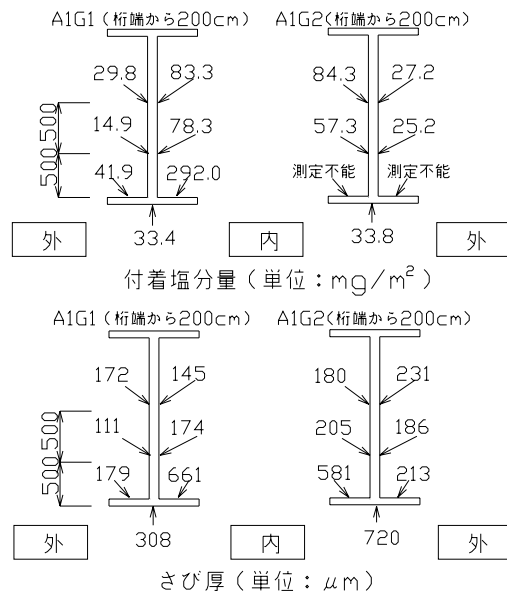


図-4 P橋 付着塩分量とさび厚

【事例 3 : T 橋】

写真-4 に T 橋の全景写真を示す。T 橋は橋長 55.5m, 幅員 17.0m の 2 径間連続鋼床版 8 主鋼桁橋である。主桁本数が 8 本と多く、また、桁端から 6m のあたりまで河川の護岸が設置されており、桁下空間も 87cm 程度と低い。よって、桁端部の風通しが非常に悪く、外観評価により 3 箇所で評点 1, 5 箇所で評点 2 と判定された。

図-5 および図-6 に T 橋の付着塩分量とさび厚の測定結果をそれぞれ示す。この結果から、ウェブよりも下フランジ上面の、また外側よりも内側の付着塩分量が多いという傾向はこれまでと同様である。また、下フランジ上面に着目すると下流側よりも上流側の方の塩分量が多い傾向がみられる。これは、塩分を含む海風が下流側から桁下へ吹き込むが、主桁間に流れる気流の特性が何らかの影響を与えていると考えられる。



写真-4 T橋

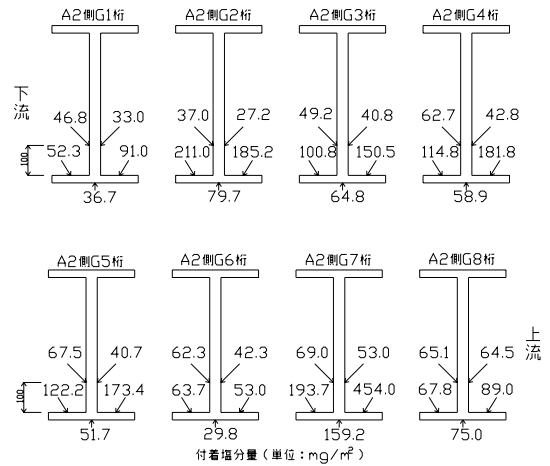


図-5 T橋 付着塩分量

4. 離岸距離と付着塩分量の関係

図-7 に全橋梁のうち裸仕様の 14 橋について、経過年数と下フランジ上面の付着塩分量との相関を示す。この図から経過年数が多いほど付着塩分量も多くなるのがわかる。また、図-8 に離岸距離がほぼ等しい E, F, G, T の 4 橋について、下フランジ上面の付着塩分量を経過年数で除した年付着塩分量と年平均降水量との相関を示す。山口県では、降水量の多い地域は離岸距離の大きい内陸側であり、この影響を排除するため離岸距離が同等の橋梁を対象とした。図-8 から、降水量が多いほどおおむね付着塩分量は減少する傾向にある。これは、風雨による桁の洗い流しや、飛来塩分自体の減少の影響であると予想される。よって、図-7 および図-8 の関係をふまえ、付着塩分量が受ける経過年数や降水量の影響を考慮し、付着塩分量をこれらで除して正規化し、離岸距離と付着塩分量の関係を検討した。

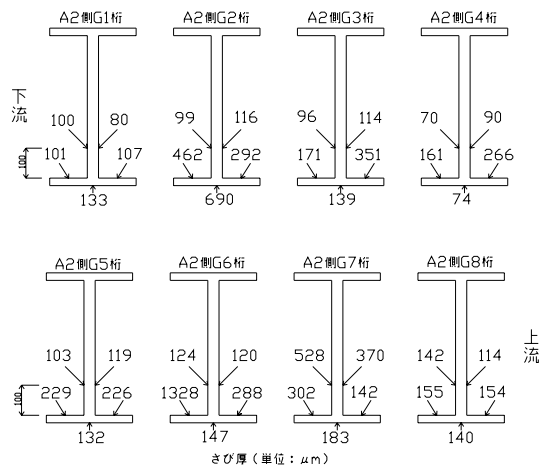


図-6 T橋 さび厚

全ての付着塩分量の測定結果を下フランジ下面、下フランジ上面およびウェブの 3 部位について、それぞれ内側と外側の計 6 ケースに分類する。各橋梁について、ケース別の付着塩分量の最大値と離岸距離との相関を分析した。また、表面処理や塗装が施されている橋梁は、塩分の付着条件が裸仕様のものとは異なると考えられるため、これらの橋梁を除く全 14 橋にて検討した。

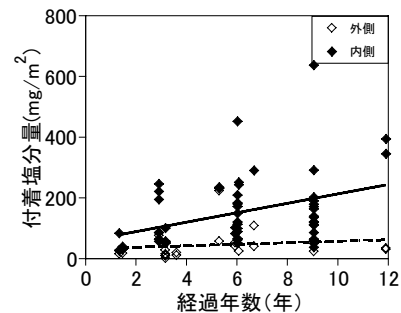


図-7 経過年数と付着塩分量 (下フランジ上面)

図-9 に離岸距離と部位別の付着塩分量の関係を示す。また、すべての相関についてワイブル関数による近似を試み、算出された近似式と近似曲線を同図上に示す。これらの結果より、下フランジ下面は内側・外側とも相関は低い。特に内側は、測定不能箇所があったためデータ数が少なくなっており、今回の調査結果だけで判断することは難

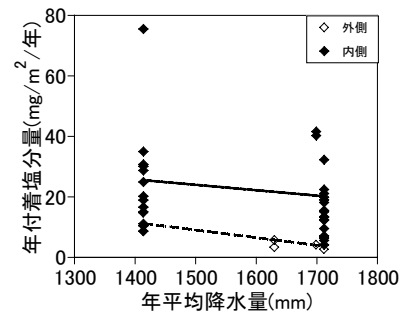


図-8 年平均降水量と年付着塩分量 (下フランジ上面)

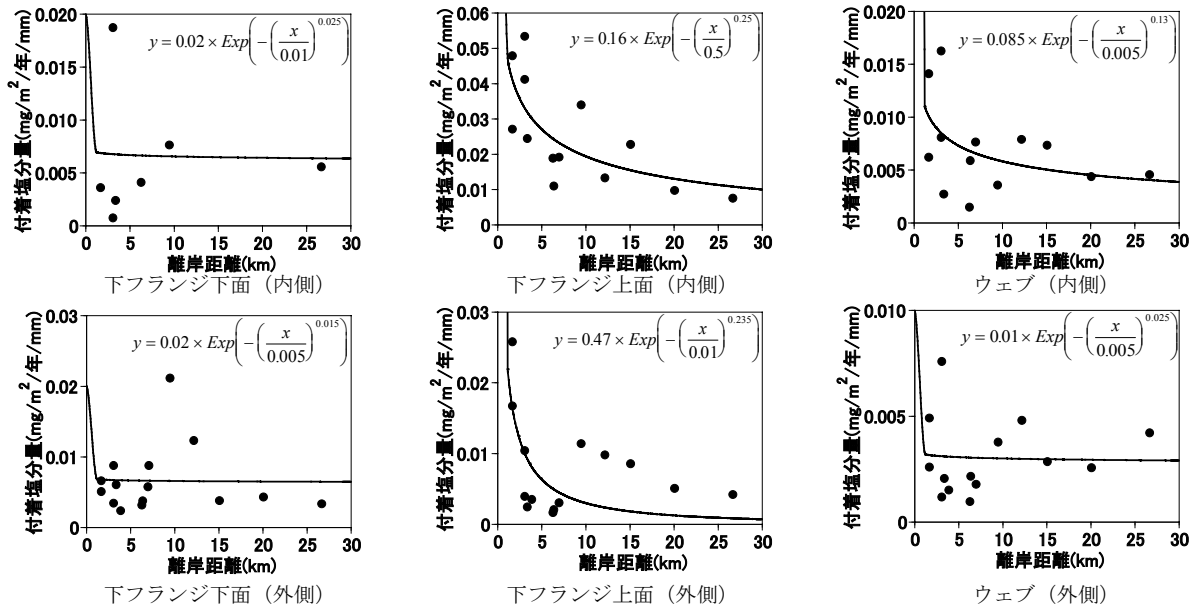


図-9 離岸距離と付着塩分量

しいと考える。一方、下フランジ上面は、離岸距離が小さくなるほど付着塩分量は急増する傾向にあり、内側・外側とも相関は高い。また両者の相関はワイブル関数によりおおむね表現することができる。ウェブも離岸距離が小さくなるほど付着塩分量は増加する傾向がわかるが、ワイブル関数による近似の精度は低い。

5. 付着塩分量とさび厚の関係

4. と同じ計 6 ケースについて裸仕様の全 14 橋の付着塩分量とさび厚の相関を分析した。ただし、データは測定箇所全てのものを使用し、付着塩分量・さび厚とも正規化はしないこととした。

図-10 に各部位別の相関図と相関係数を示す。下フランジ上面外側でわずかに正の相関がみられるものの、全ての部位でばらつきは大きく、ほとんど相関はみられない。これは、さび厚が付着塩分量のみで表現できない、塩分以外の影響を無視できないことを示している。

以上の結果をふまえ、環境条件がほぼ同一であるデータを抽出して検討することを目的に、橋梁別の付着塩分量とさび厚の相関を分析した。検討結果の例として、図-11 に C, N, K, P 橋の相関図を示す。C 橋および N 橋については、付着塩分量とさび厚との間に高い正の相関が得られている。これは、同じ環境条件であれば、さび厚が付着塩分量で表現できることを示している。一方、K 橋および P 橋は、下フランジ下面を除いた場合に高

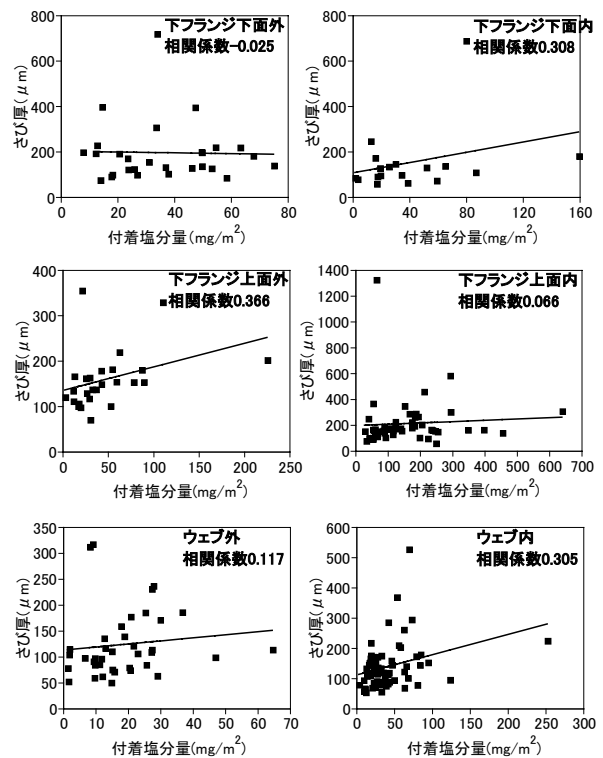


図-10 付着塩分量とさび厚(全橋を対象)

い相関が得られる。両橋は桁下空間が狭く、風通しが特に悪いため、付着塩分量は少ないものの河川やのり面からの湿気が直接的に影響を与えたと考える。このように、腐食の主たる要因が塩分ではない場合は、付着塩分量だけではさび厚を表現できないことも考えられる。

表-2 に橋梁別の付着塩分量とさび厚の相関係

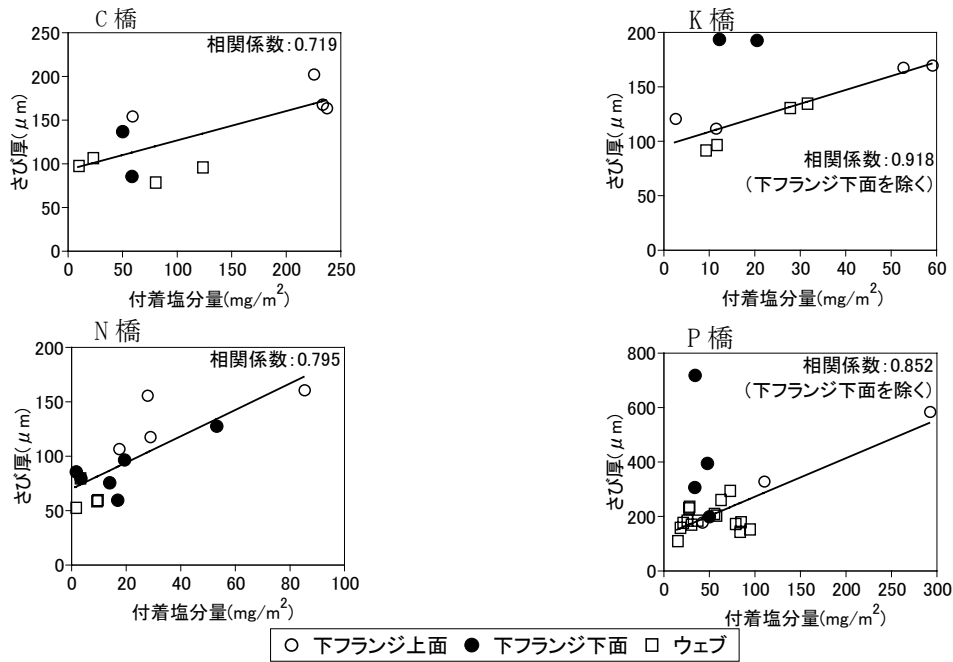


図-11 付着塩分量とさび厚（橋梁別）

表-2 付着塩分量とさび厚の相関係数

橋梁	下フランジ 下面あり	下フランジ 下面なし
C	0.719	0.742
D	0.064	0.162
E	0.600	0.650
F	0.338	0.832
G	0.724	0.728
J	0.655	0.802
K	0.457	0.918
L	0.392	0.760
N	0.795	0.805
O	0.571	0.646
P	0.444	0.852
R	0.668	0.672
S	-0.441	-0.131
T	0.086	0.074

数の一覧表を示す。ほとんどの橋梁で正の相関が得られ、両者は部位に関わらず線形関係があることがわかる。また、下フランジ下面を除くとほぼ全ての橋梁で相関係数が高くなり、下フランジ下面の腐食の進行は、付着塩分量よりも周囲の直接的な環境条件に大きく影響を受けることが予想される。

6. おわりに

付着塩分量はウェブより下フランジ上面の方が、また外側より内側の方が多くなることが明らかとなった。これは、腐食性さびの報告例が下フランジ上面について多いことを十分に説明できる結果であろう。また、離岸距離が小さくなると急激に付着塩分量は多くなり、特に下フランジ上面の付着塩分量 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{年}/\text{mm}$) は離岸距離 (km) に対してワイブル関数でおおむね近似できることを示した。

さらに、同一橋梁内であれば付着塩分量とさび厚に線形関係があることが明らかとなった。これは、同じ環境条件であれば、部位に関わらず付着塩分量がさび厚の指標となることを示している。しかし一方で、さび厚には周囲の環境がより大きな影響を与え得ることも予想され、付着塩分量を耐候性橋梁の適否の指標にするためには、今後より多くの橋梁を調査しデータの蓄積を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 三木千壽・市川篤司：現代の橋梁工学，数理工学社，2004.12
- 2) 麻生稔彦，井上岳大，小長谷克明：山口県における耐候性鋼材を使用した橋梁の腐食調査，鋼構造年次論文報告集，Vol.11，pp.489-494，2003.11
- 3) 廣門公二，中村聖三，高橋和雄：長崎県における耐候性鋼無塗装橋梁の実態調査，鋼構造年次論文報告集，Vol.11，pp.511-518，2003.11
- 4) 紀平寛，田辺康児，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，No.780/I-70，pp.71-86，2005.1
- 5) 中山武典，紀平寛，幸英昭，鹿毛勇：腐食減耗評価方法の高精度化（さび付き鋼材の除錆方法），第145回腐食防食シンポジウム資料，腐食防食協会，pp.59-65，2004.6