

# 山口県における耐候性鋼橋の表面付着塩類調査

麻生稔彦 (社会建設工学科) 烏田晃平 (社会建設工学専攻)  
大屋誠 (松江工業高等専門学校) 武邊勝道 (松江工業高等専門学校)

## An investigation of adhesion salts on the surface of weathering steel bridges in Yamaguchi prefecture

Toshihiko ASO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Kohei KARASUDA (Graduate School of Civil and Environmental Engineering)

Makoto OHYA (Matsue National College of Technology)

Masamichi TAKEBE (Matsue National College of Technology)

**Abstracts:** Weathering steel has been used increasingly for structural components of steel bridges due to high resistance of corrosion. It can be used for constructions without anticorrosion coating. However, in some cases, very severe surface corrosion has been observed. This paper reports accumulating salt on the weathering steel bridges in Yamaguchi prefecture. Accumulating salts on bridges were analyzed by ion-exchange chromatography. Composition and quantity of accumulating salts, relationship between rust thickness and Cl<sup>-</sup> are discussed. Regional differences of accumulating salts are also described.

**Key Words:** weathering steel bridge, accumulating salt, corrosion state

### 1. はじめに

耐候性鋼材は表面に発生する保護性さびにより腐食速度が低減できるため、無塗装でも橋梁に適用した場合には従来の塗装による防食に比べ、維持管理費用の大幅な低減が見込める。このため、近年では耐候性鋼材を用いた橋梁の建設が増加している。ただし、飛来塩分の多い環境下では、保護性さびが期待通りに生成せず、そのため十分な耐食性を示さない恐れがある。耐候性鋼橋梁に本来の防食性能を発揮させるためには、耐候性鋼材の特性や使用環境についての理解が欠かせない。

耐候性鋼材は架設場所の環境条件が重要であり、腐食によるさびの発生には表面に付着する塩類が大きな原因の1つであるとされている<sup>1)</sup>。山口県においては、道路橋示方書により離岸距離が日本海側で5 km以上、下関から下松の地域で2 km以上、光市から岩国市で1 km以上の地域では、飛来塩分量調査を省略して無塗装耐候性鋼橋梁の適用が可能であるとされている。しかし、この飛来塩分量調査の省略可

能地域は大枠の区分しかなされておらず、ローカルな環境には対応できない。さらに、海岸からの距離にのみ着目した基準には、山間地などで腐食の原因となりうる路面凍結防止剤の影響が考慮されていない。

以上のことから、より細かな地域特性を反映した腐食環境の推定のためには、飛来塩分量とは別の判断指標が必要となる。この指標として、本研究では既設橋梁の付着塩類に着目した。既設橋梁に付着している塩分量は、建設時から現在までの塩分付着現象の積み重ねを表していると考えられ、数十年前に建設された橋梁を調査対象として選べば、数十年分の飛来塩分調査に匹敵する情報が得られると期待できる。また、鋼材の腐食と直接関係するのは付着塩分であることから、付着塩類組成はより具体的な腐食環境情報を与えると期待できる。本研究では、耐候性鋼橋梁の主桁表面に付着している塩類組成の分析を行い、付着塩類とその量、さび厚、地域、離岸距離との関係を検討する。ここで、「塩分」は物質中に含まれるNaClを指す意味として用いられることが多いが、海水中の塩類

表-1 調査橋梁一覧

橋梁名	架設場所	構造形式	表面処理	経過年数(年)	離岸距離(km)	腐食さびの発生
A橋	山口市	連続箱桁	あり	5	0.2	なし
B橋	周防大島町	単純鈑桁	あり	20	0.7	あり
C橋	光市	連続鈑桁	あり	3	1.1	なし
D橋	下松市	単純鈑桁	あり	13	1.0	なし
E橋	下松市	単純鈑桁	なし	11	4.2	なし



図-1 調査橋梁架設場所

全てを意味する単語として用いられることもあり、明確な定義付けはなされていない<sup>2)3)</sup>。そこで本研究では、塩分とは塩化ナトリウムを表し、塩類とは水溶性の無機成分を表すと定義した<sup>3)</sup>。

## 2. 調査方法

### 2.1 対象橋梁

本研究において、調査を行った橋梁は5橋であり、その概要を表-1に、架設場所を図-1に示す。

A橋は箱桁であり、他の橋梁は鈑桁である。また、A~D橋はさび安定化補助処理がなされており、E橋は裸仕様である。経過年数は3~20年で、離岸距離は0.2~4.2kmと比較的海岸に近いものについて調査を行った。なお、B橋のみに層状剥離さびの発生が見られた。

### 2.2 調査方法

試験方法は、各橋梁の主桁ウェブと下フランジ上下面についてガーゼふき取り試験法により付着物を採取した。イオン分析は、自然界に広く存在し、さびの発生に強く影響を与える陰イオン  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  と、それに結合するとされる陽イオン  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  の7種類のイオンを対象とする。

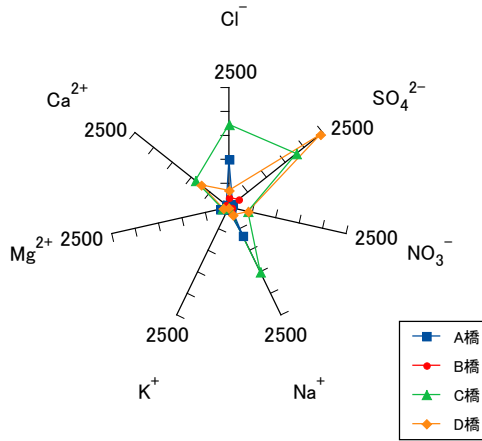
このうち、 $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  はイオンク

ロマトグラフ、 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  は発光分析装置(ICP)を用いて検出する。

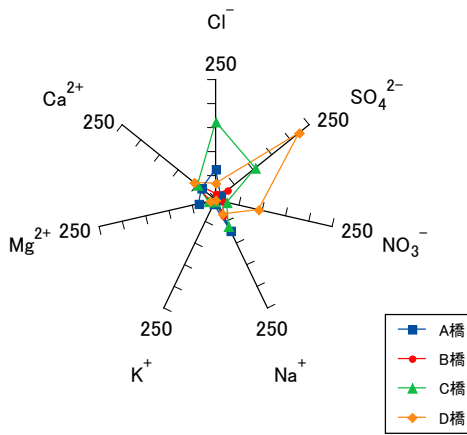
## 3. 調査結果

### 3.1 付着塩類量と種類・部位との関係

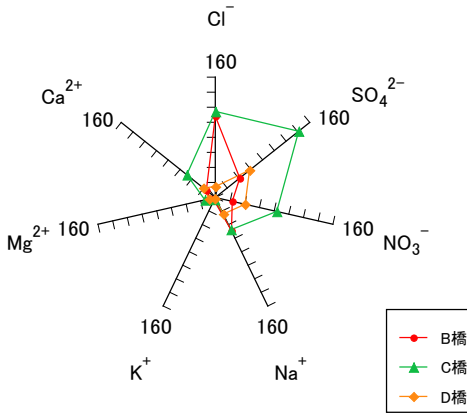
付着塩類の分析結果は ppm で得られる。これを面積当りの重量( $\text{mg}/\text{m}^2$ )へ変換すると、各付着塩類について定量的に比較検討することが可能となる。さらに面積当りの重量を、各イオンの分子量で除し、電荷の価数の絶対値をかけることで電荷等量( $\text{meq}/\text{m}^2$ )へ変換し、陽イオンと陰イオンの個数を比較検討する。図-2はA~Eの各橋梁における付着塩類量を部位ごとに示したものである。また、図-3は海水に含まれる溶存イオンの塩類組成比率である。これらの橋梁のうち、付着塩類量の多い橋梁に着目すると、A橋における付着塩類組成は  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  に富む特徴があり、図-3の海水中の塩類組成比率とも形が酷似している。このことから、A橋における付着塩類は海水によるものが大きいことが考えられる。一方、C橋、D橋では  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  だけではなく、 $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が多い。これらの橋梁の架設地点付近には工業地帯が広がっており、大気中に排出された排ガスなどに含まれる硫黄化合物による影響が大きいためであると考えられる。また、ウェブと下フランジ下面は、下フランジ上面に比べ付着塩類量



(a) 下フランジ上面



(b) ウェブ



(c) 下フランジ下面

図-2 瀬戸内側付着塩類量(mg/m²)

が少なく、その付着塩類の割合も下フランジ上面とは異なる。特に、下フランジ下面では  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が大きい。一般に、 $\text{CaSO}_4$  に比べ  $\text{NaCl}$  の方が溶解度が高く、水に溶けやすいことが知られている<sup>3) 4) 5)</sup>。このため、外桁では雨による洗い流し、内桁では露水による洗い流しのため、付着塩類が洗い流され、さらにより溶けやすい  $\text{NaCl}$  がフランジ上面や桁下へ

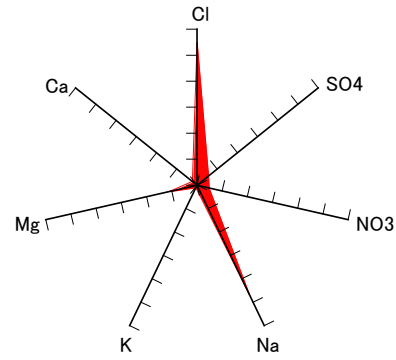


図-3 海水塩類組成比率

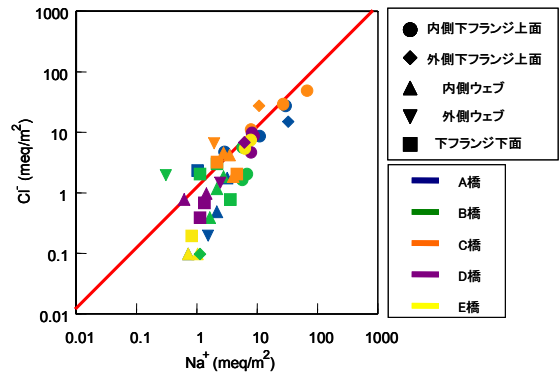


図-4 各橋梁における  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の相関図

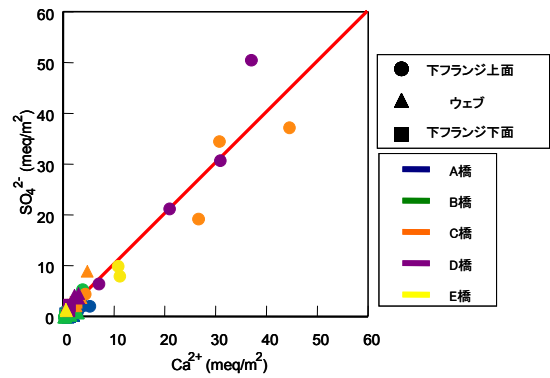


図-5 各橋梁における  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  の相関図

洗い流され、ウェブ、下フランジ下面における  $\text{CaSO}_4$  の付着量の割合が相対的に多くなった可能性が考えられる。

図-4 は各橋梁における  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  のイオンの個数の割合を示したものである。実線は海水の  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  比を表している。実線の右下にプロットされる点は、海水に比べ  $\text{Na}^+$  が多く、 $\text{Cl}^-$  が少ないことを示している。部位別に比較すると、いずれの橋梁も下フランジ上面に対してウェブおよび下フランジ下面では  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  は共に付着量が少ない。これは、外桁では雨水がウェブに付着した付着塩類を洗い流し、それが下フラ

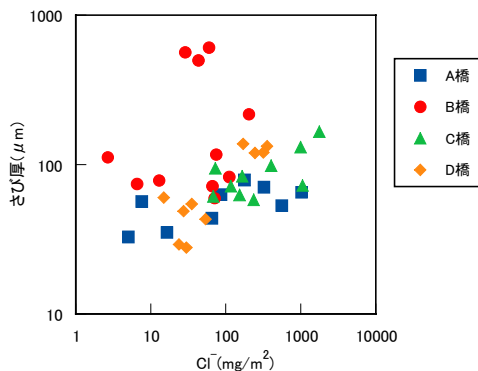


図-6 さび厚-Cl<sup>-</sup>相関図

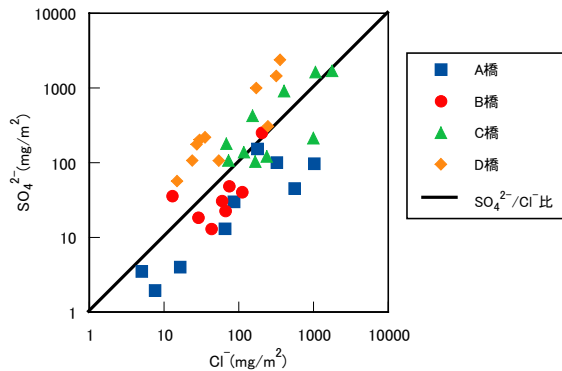


図-8 Cl<sup>-</sup>-SO₄²⁻相関図

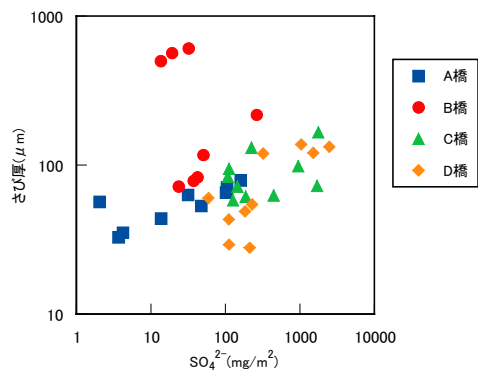


図-7 さび厚-SO₄²⁻相関図

ンジ上面に堆積すると考えられる。一方で、雨水による洗い流しの影響を受けにくいと考えられる内桁では、鋼材表面に露水が生じ、ウェブに付着した付着塩類を洗い流し、それが下フランジ上面に堆積すると考えられる。

図-5は各橋梁におけるCa<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のイオンの個数の割合を示したものである。実線はCaSO<sub>4</sub>のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Ca<sup>2+</sup>比を表している。図-5から、工業地帯付近に架設されたC橋およびD橋の下フランジ上面に多く付着していることがわかる。また、Ca<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は高い相関を示し、その相関係数は0.95を示す。Ca<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はイオンの個数1:1で結合することから、鋼材表面に付着していたCa<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はCaSO<sub>4</sub>として存在していたと考えられる。

### 3.2 付着塩類の量と腐食の関係

図-6は各橋梁の拭き取り調査を行った部位におけるさび厚と表面に付着していたCl<sup>-</sup>量の相関を示したものである。図-7は各橋梁の拭き取り調査を行った部位におけるさび厚と表面に付着していたSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>量の相関を示したものである。一般に、Cl<sup>-</sup>やSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>などの陰イオンは鋼材の腐食に深く関わる要因として知られて

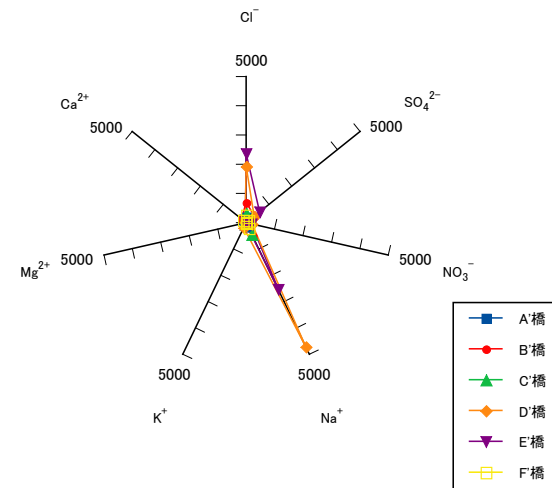
おり、鋼材表面において化学凝縮による水膜を生じさせる<sup>2)</sup>。この水膜の存在により鋼材表面で化学反応が発生し、腐食が進行する。図-6から、層状剥離さびの発生が唯一見られたB橋では他の橋梁に比べ、さび厚に比べCl<sup>-</sup>が低いことがわかる。これは、さびの進行によりNa<sup>+</sup>はさび層の中間部へ、Cl<sup>-</sup>はさびと鋼材の境界部へ分かれて分布するため、表面のみの拭き取りでは全量のCl<sup>-</sup>の採取はできなかつたためであると考えられる。

B橋を除く他の橋梁については、さび厚とCl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>量は正の相関関係を示し、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量が多いほど、さび厚も大きくなるのがわかる。さび厚とCl<sup>-</sup>の相関係数は0.58であり、さび厚とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の相関係数は0.68であるが、これらの相関は中程度にとどまる。これは、さびの生成には、付着塩類量だけではなく、大気中の湿度や気温などの気象条件<sup>3)</sup>や、各橋梁の架設場所の環境などの影響が大きいと考えられる。

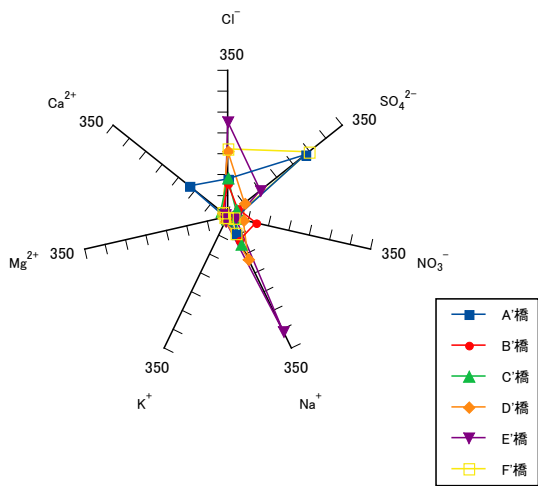
図-8は各橋梁の拭き取り調査を行った部位について、表面に付着していたCl<sup>-</sup>量とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>量の相関を示したものである。Cl<sup>-</sup>は海水に由来し、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は排ガスに由来するものと考えられるため、両者の相関は高くないと予想されたが、相関係数0.54であり中程度の相関であった。このため、Cl<sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のいずれがさび厚に強く影響を与えるかを判断することは困難である。

### 4. 付着塩類の量・種類と地域の関係

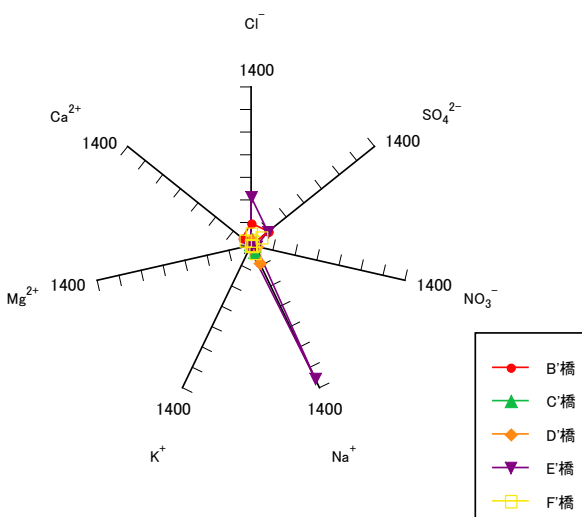
地域差を検討するため、瀬戸内側と日本海側<sup>4)</sup>の各橋梁における付着塩類量の組成比率を比較する。図-9は日本海側で調査された各橋梁における付着塩類量をそれぞれ示したもので



(a) 下フランジ上面



(b) ウェブ



(c) 下フランジ下面

図-9 日本海側付着塩類量 (mg/m<sup>2</sup>)

ある。ここで、日本海側の橋梁はいずれもさび安定化補助処理がされており、経過年数は 19

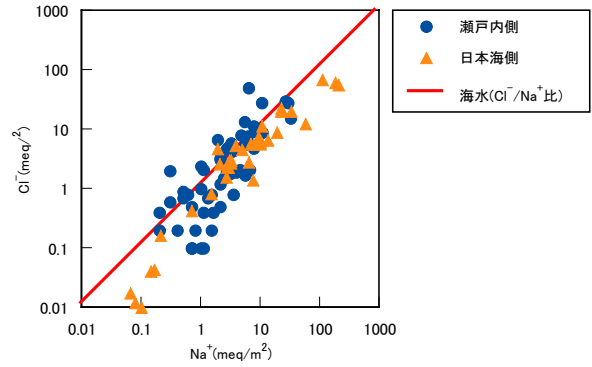


図-10 Na<sup>+</sup>とCl<sup>-</sup>相関図

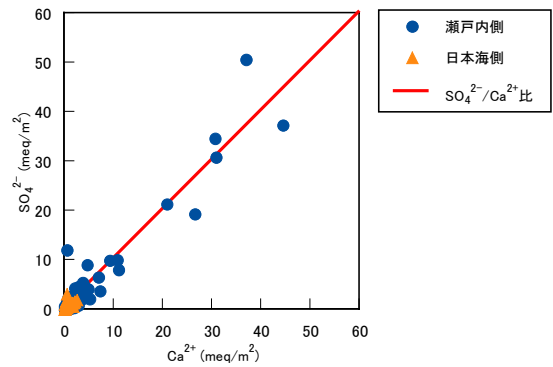


図-11 Ca<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相関図

～26年で、離岸距離は0.9～10.0kmと比較的海岸に近いものを対象とした。

図-2と図-9を比較すると、瀬戸内側の付着塩類量に対し、日本海側の付着塩類量が多い傾向にある。これは、日本海側では、冬季に日本海から偏西風によって運ばれる海塩粒子が山脈などの障害を受けずに飛来し、付着するためと考えられる。一方、瀬戸内側では日本海側ほどの飛沫はないと推定される。

また、日本海側ではNa<sup>+</sup>の付着量が多いことから、全体の陽イオンの付着量は陰イオンの付着量より多い。陰イオンはCl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の3種類について検出したが、鋼材表面が大気に晒されていること、腐食は鋼材表面から進行することから、さびの生成過程<sup>1)</sup>(カソード反応)で発生する水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)などの他の陰イオンが付着塩類中に含まれている可能性が考えられる。一方で、瀬戸内側の工業地帯ではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量が多いことから、C橋およびD橋では陰イオンの付着量は陽イオンの付着量より多い。これより、陰イオンの付着量が多い橋梁は総じて工業地帯であることから、排ガスなどに含まれる重金属が桁表面に付着していた可能性が考えられる。

図-10は瀬戸内側と日本海側におけるNa<sup>+</sup>と

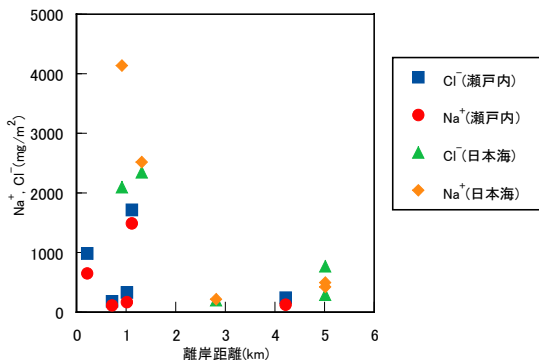


図-12 離岸距離と Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>付着量の関係

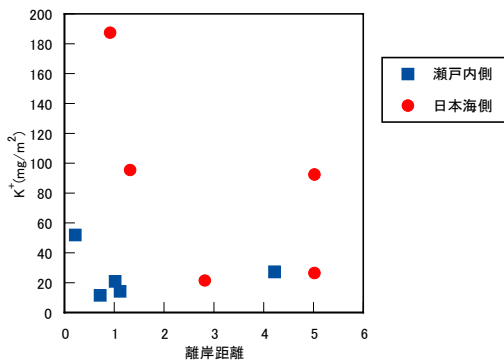


図-15 離岸距離と K<sup>+</sup>付着量の関係

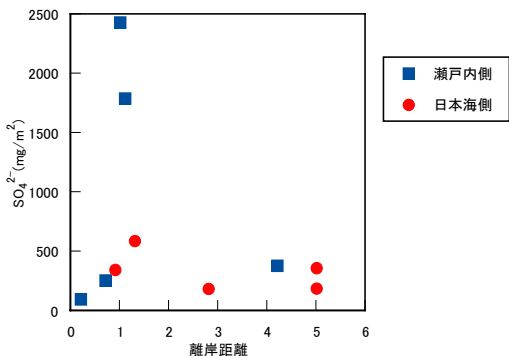


図-13 離岸距離と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>付着量の関係

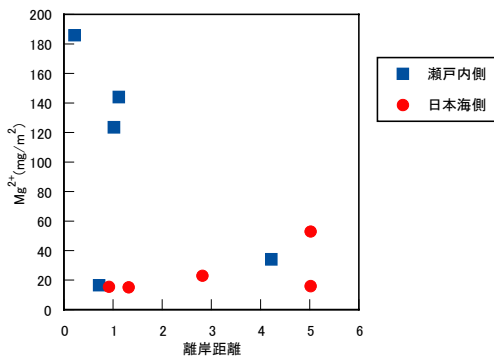


図-16 離岸距離と Mg<sup>2+</sup>付着量の関係

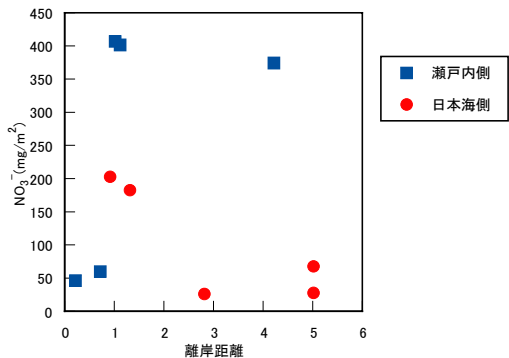


図-14 離岸距離と NO<sub>3</sub><sup>-</sup>付着量の関係

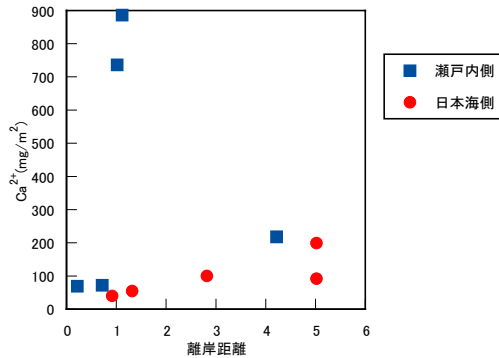


図-17 離岸距離と Ca<sup>2+</sup>付着量の関係

Cl<sup>-</sup>の相関をそれぞれ示したものである。実線は海水の Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>比を表している。どちらも Na<sup>+</sup>と Cl<sup>-</sup>は正の相関を示すが、日本海側に比べ、瀬戸内側はばらつきが大きい。一方、日本海側ではほぼ実線に沿っており、付着塩類中の Na<sup>+</sup>と Cl<sup>-</sup>は日本海側では、海水中に含まれる NaCl に由来していると考えられる。瀬戸内側では、工業地帯付近では Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>だけではなく、Ca<sup>2+</sup>および SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量も多い橋梁が見られるため、付着塩類中の Na<sup>+</sup>と Cl<sup>-</sup>の由来は NaCl によるものだけではない可能性が考えられる。図-11 は瀬戸内側と日本海側における Ca<sup>2+</sup>と

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の相関をそれぞれ示したものである。実線は CaSO<sub>4</sub>の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Ca<sup>2+</sup>比を表している。瀬戸内側は日本海側に比べ、Ca<sup>2+</sup>と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の値が大きい。これは、日本海側では Ca<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の供給源が瀬戸内側に比べ少ないことを表している。

図-12 は、瀬戸内側と日本海側の各橋梁における離岸距離と Cl<sup>-</sup>付着量の関係を示したものである。図-13~17 は、瀬戸内側と日本海側の各橋梁における離岸距離と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>付着量の間をそれぞれ示したものである。離岸距離が 2km 以内の橋梁は瀬戸内側、日本海側共に Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>付着量が共

に高いものが多いことがわかる。一方で、離岸距離が 2km 以上の橋梁は、距離による  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  付着量の変化は乏しいことがわかる。また、2km 以内の橋梁について日本海側の  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  付着量が瀬戸内側に比べ高いことがわかる。これより、海岸からの距離が近い地域では瀬戸内側に比べ日本海側の環境がより厳しいということがわかる。

このような傾向が見られるのは  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  について最も顕著である。一方で、海塩粒子に含まれる割合の少ないと思われる他の付着塩類については、離岸距離との関係は薄いものであることがわかる。

## 5. まとめ

付着塩類の量と種類・部位の関係について、ウェブ、下フランジ下面に比べ下フランジ上面の付着塩類量が多く、その組成は異なることが確認できた。これは、外桁では雨による洗い流し、内桁では露水による洗い流しのため、付着塩類が洗い流され、さらにより溶けやすい  $\text{NaCl}$  がフランジ上面や桁下へ洗い流され、ウェブ、下フランジ下面における  $\text{CaSO}_4$  の付着量の割合が相対的に多くなった可能性が考えられる。

腐食が著しく進行した橋梁については、さび厚に比べ  $\text{Cl}^-$  の付着量が少ないものの、さび厚と  $\text{Cl}^-$  および  $\text{SO}_4^{2-}$  の間には相関があることが明らかとなった。これは、さびの進行により  $\text{Na}^+$  はさび層の中間部へ、 $\text{Cl}^-$  はさびと鋼材の境界部へ分かれて分布するため、表面のみの拭き取りでは  $\text{Cl}^-$  全量の採取ができなかったためであると考えられる。腐食の著しく進行した橋梁を除く他の橋梁において、さび厚と  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  の量の間には正の相関関係を示し、 $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  付着量が多いほど、さび厚も大きくなるが、その相関は中程度にとどまる。これは、さびの生成には、付着塩類量だけではなく、大気中の湿度や気温などの気象条件や、橋梁の架設場所の環境などの影響が大きいと考えられる。

付着塩類の量・種類と地域の関係について、付着塩類組成には地域性があることが確認できた。日本海側では、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の付着量が付着塩類組成の大半を占め、特に海岸近辺に架設された橋梁については、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の付着量が高く、付着量の比率が海水の塩類組成の比率と合致することから、海水の影響を強く受けてい

ると考えられる。一方で、瀬戸内側でも、日本海側の橋梁と同様に海岸近辺に架設された橋梁について海水の影響を強く受けていると考えられるものが確認できた。さらに、工業地帯の近辺に架設された橋梁では  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  の付着量が多い。これは、工業地帯で排出される排ガスなどに含まれている硫黄化合物の影響を強く受けていると考えられる。

## 参考文献

- 1) 三木千壽, 市川篤司: 現代の橋梁工学, 2004.
- 2) 松村明: 大辞泉, SHOGAKUKAN 2006, 2006.
- 3) 武邊勝道, 松崎靖彦, 大屋誠, 安食正太, 古川貴士, 麻生稔彦: 耐候性鋼橋梁の表面状態と付着塩類量の関係, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, 172-180, 2007.
- 4) 竹邊勝道, 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集, pp.157~160, 2005.
- 5) 大屋誠, 竹邊勝道, 安食正太, 古川貴士, 松崎靖彦, 麻生稔彦: 付着塩分量による腐食環境評価の検討, 土木学会第 61 回年次学術講演回講演概要集, pp.1278~1279, 2006.
- 6) 気象庁の気象観測(電子閲覧室)  
<http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>

(平成 19 年 9 月 28 日受理)