

## 道路橋の長寿命化のための調査・対策技術に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、澤田守、高橋実  
坂本佳也、篠田隆作

### 【要旨】

道路橋に耐候性鋼材を無塗装で適用する場合、個々の橋の環境条件や局所的な腐食環境等によっては緻密なさび層が形成されない場合があるため、適切に維持管理していく必要がある。点検にあたっては、外観で異常なさびを判断することが困難な場合があり、さび状態を定量的に評価できる手法が求められている。本研究は、耐候性鋼材の定量的な点検手法としてイオン透過抵抗法および電位法に着目し、架橋から 10 年以内の実橋を対象に追跡調査を行い、各計測方法の適用性を検討した。また、暴露試験片を用いた室内試験を行い、計測に影響を及ぼす要因を整理するとともに計測時の留意点を検討した。

キーワード：耐候性鋼材、イオン透過抵抗法、電位法、さび厚

### 1. はじめに

1960 年代から、道路橋において耐候性鋼材が無塗装での使用がされはじめている<sup>1)</sup>。耐候性鋼材の防食機能は、普通鋼材に適量の合金元素を添加することにより、鋼材表面に緻密なさび層を形成させ、鋼材表面を覆うことで鋼材の腐食速度を普通鋼と比べて低下させるものとされている<sup>2)</sup>。緻密なさび層は、適度に乾湿が繰り返され、かつ、大気中の塩分量が少ない条件において形成されるが、鋼材表面に湿潤状態が継続するような環境条件、あるいは、飛来塩分量や付着塩分量が多い環境条件においては形成されず、層状剥離さび等の異常さびが形成され、耐候性鋼の防食機能を失う事例も報告されている<sup>3)</sup>。そのため、耐候性鋼材の維持管理において、供用中に異常なさびが生じていないか確認を行い、耐候性鋼材の不適合が明らかとなった場合には、速やかにその原因を取り除くことや、必要に応じて塗装を行うなどの適切な対応策を講じることが求められている。

一方、耐候性鋼材は外観で異常なさびと判断することが困難な場合があり、また点検員の熟練度によってばらつきが生じることが懸念される。このため、さび状態を定量的に評価できる手法（イオン透過抵抗法、電位法等）が求められており、各種の研究<sup>例えば 3)、4)</sup>が進められている。これらの手法により、できるだけ早い段階で将来的に異常さびに至るかどうかが把握できれば、予防保全としての措置が実施できる可能性が広がるが、これらの手法の現場への適用性と現場で計測す

る際の、標準的な方法や計測の留意点については必ずしも明らかとなっていない。

このような背景から、本研究では耐候性鋼材の定量的な点検手法の確立に向けて、供用開始から 10 年以内の実橋を対象に追跡調査を行い、各計測方法の適用性を検討した。また、暴露試験片を用いた室内試験を行い、計測に影響を及ぼす要因を整理するとともに計測時の留意点を検討した。

### 2. 実橋追跡調査

#### 2.1 検討概要

耐候性鋼材の異常なさびを外観観察により判断する場合の課題等の把握と定量的にさびの状態を評価する手法（イオン透過抵抗法、電位法）の実橋への適用性や適用にあたっての留意点や課題等を把握することを目的に、耐候性鋼橋 3 橋を対象に、供用開始後 10 年以内の期間の中で、さび状態の継続的な調査を行った。

#### 2.2 対象橋梁

追跡調査の対象橋梁は、建設から時間があまり経過していない供用 10 年以内で、比較的飛来塩分量が多い耐候性鋼橋を対象とした。具体的には和歌山県紀勢自動車道に位置する 3 橋を選定した。橋梁の位置図を図-1 に、橋梁概要を表-1 に示す。なお、表中の飛来塩分量は供用開始前にドライガーゼ法により計測された 1 年間(1 回/月、計 12 回)の平均値である。

#### 2.3 調査項目および調査要領

調査項目および調査要領について表-2 に示す。調査

は鋼道路橋防食便覧<sup>1)</sup>に示されている外観観察、セロファンテープ試験に加えて、さび状態の定量的な評価手法としてイオン透過抵抗法、電位法、さび厚測定を行うとともに、付着塩分量の計測も行った。また計測者の違いによる外観評価や各種測定値のばらつきを把握するため経験年数10年以上の熟練技術者と未経験者がそれぞれ調査を行った。

イオン透過抵抗法は、鋼材表面を覆う物質のイオンの移動に対する抵抗値を測定するものであり、イオン抵抗値が高いほど鋼材の腐食速度が遅いことを表す。イオン透過抵抗の測定装置の構成図を図-2に示す。測定装置を2点で接触させ、硫酸ナトリウム水溶液を電解液として、交流インピーダンス法の原理を用いて測定した。

電位法は、腐食反応における電位差を測定するものであり、電位差が大きいほど鋼材の腐食速度が遅いことを表す。電位測定装置の構成図を図-3に示す。地鉄の導通をとり、電解液(0.1molの硫酸化ナトリウム)を触媒として一定時間、プローブを接着して、参照電極(飽和銀・塩化銀電極(SSE))との電位差を測定した。

対象橋梁3橋の計測を行っているが、本稿では、B橋の内容を示す。B橋に対する調査箇所を図-4に、調



図-1 橋梁位置図

(背景地図出典：国土地理院電子国土 Web)

表-1 橋梁概要

橋梁名	A橋	B橋	C橋
所在地	和歌山県西牟婁郡上富田町朝来地先	和歌山県西牟婁郡白浜町安宅	和歌山県西牟婁郡すさみ町周参見地先
架設完了	2014年12月	2015年1月	2014年3月
橋長	58.0m	276.0m	142.0m
橋梁形式	鋼単純合成少数(3主桁)桁橋	鋼5径間連続合成少数(2主桁)桁橋	鋼3径間連続少数(2主桁)桁橋
離岸距離	1.3km	2.0km	1.9km
飛来塩分量	0.009mdd	0.022mdd	0.024mdd

表-2 調査項目および調査要領

調査項目	調査要領
①外観観察	外観評点法による外観評価 <sup>5)</sup> を行う。
②セロファンテープ試験	鋼材表面に生成された浮きさびをセロファンテープに付着させてさびの粒子の大きさと均一性の状態を評価する。
③さび厚計測	電磁式膜厚計を用いて、9点/箇所計測を行う <sup>1)</sup> 。
④イオン透過抵抗計測	イオン透過抵抗測定機を用いて、1点/箇所計測を行う。さび厚とイオン透過抵抗値の関係から、保護性さび又は異常さびであるか評価する。
⑤電位計測	電位測定機を用いて、1点/箇所計測を行う。さび厚と電位の関係から、保護性さび又は異常さびであるか評価する。
⑥付着塩分計測	表面塩分計を用いて、1点/箇所計測を行う。計測値はセンサー部に蒸留水を注入し、10秒間攪拌を行ってから、5秒後の値を記録する <sup>1)</sup> 。

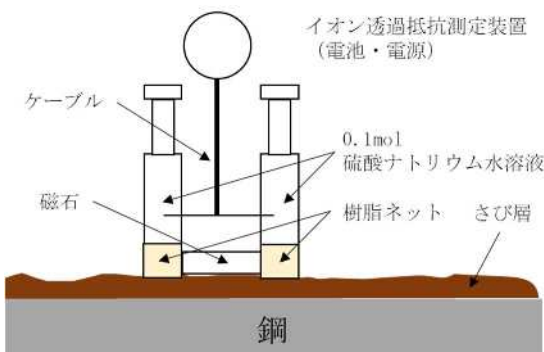


図-2 イオン透過抵抗測定イメージ図

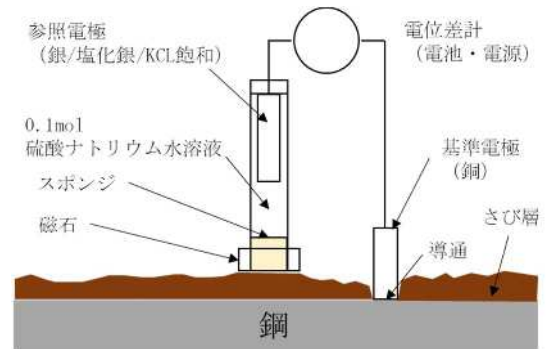


図-3 電位測定イメージ図

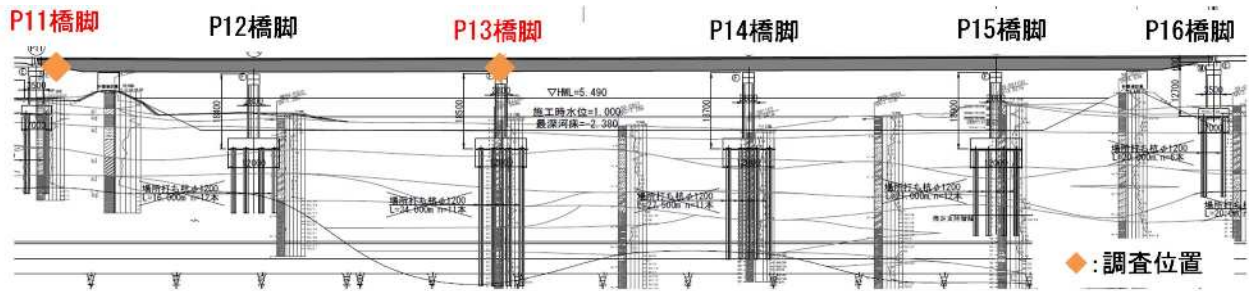


図-4 調査位置 (B橋)

調査部位を図-5に示す。計測のためのアプローチが可能である箇所を対象とし、計測箇所は主桁および横桁の上フランジ下面・ウェブ面・下フランジ上下面としている。

## 2.4 調査結果

ここでは、B橋における追跡調査のうち熟練技術者が計測した結果を主に示す。

### 2.4.1 イオン透過抵抗値及びさび厚

さび厚とイオン透過抵抗値の関係を図-6に示す。縦軸にイオン透過抵抗値（さび層の緻密性或いは保護性に相当する指標）を、横軸にさび厚値（腐食速度に相当する指標）で整理している。既往の研究<sup>6)</sup>ではイオン透過抵抗値とさび厚値の関係からさびの状態 I-5～I-1 に区分する評価方法(以下、I 評点区分という。)が示されており、図中に併記している。また図中には4年9ヶ月、5年6ヶ月、6年1ヶ月経過した定点での観測結果に加えて、10ヶ月および1年7ヶ月経過した

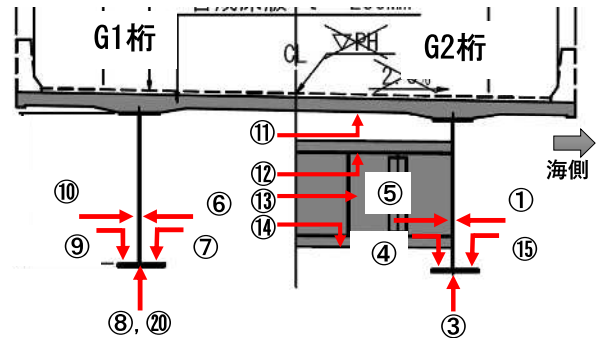


図-5 調査部位(B橋 P11 橋脚側)

ワッペン試験片貼付跡および鋼面研掃実後9ヶ月経過した箇所での観測結果を一つの経年月変化として捉えて併せて記載している。

図中のエリアI内は、外観評価が5～3となり、腐食速度は微小の領域と判断されたものである。経年とともに、「I-5；初期さび、未成長さび(A)」から「I-4；保

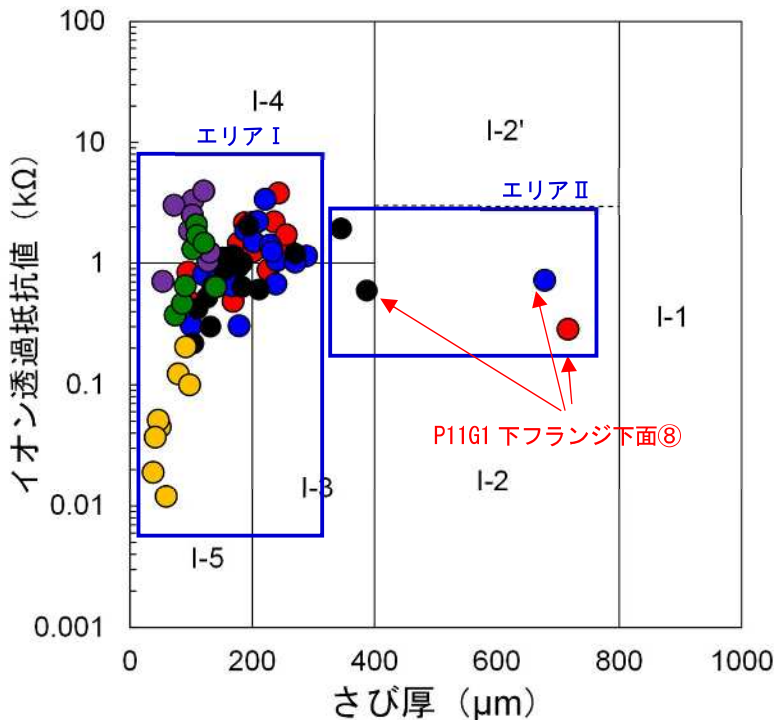
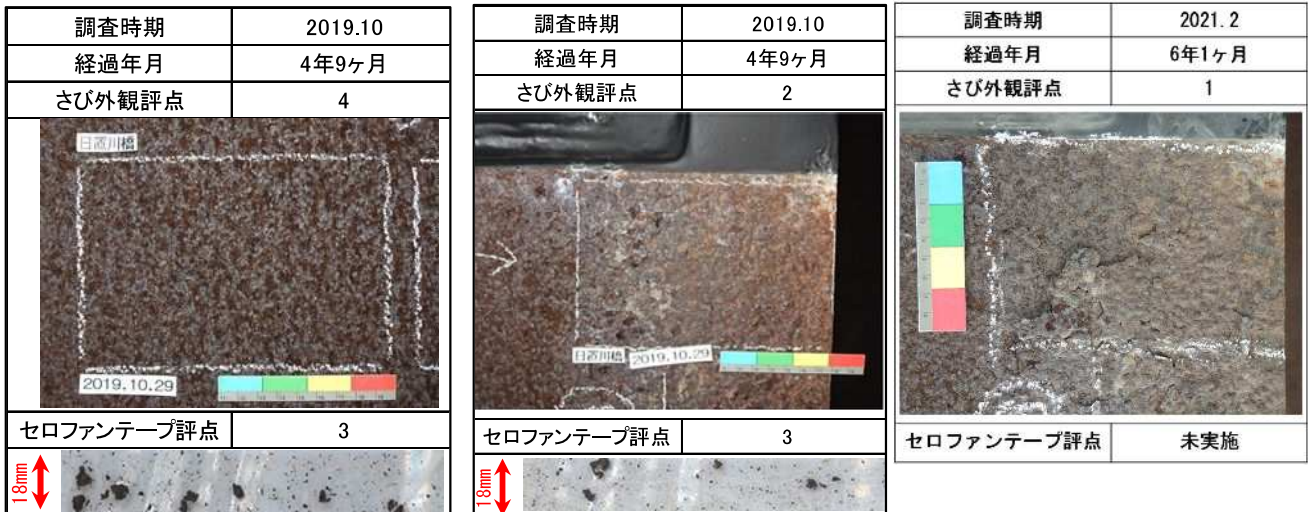


図-6 さび厚とイオン透過抵抗値の関係の例 (B橋 P11 橋脚)

経過年数	定点	ワッペン試験片貼付跡	鋼面研掃箇所
9ヶ月			
2回目：2020年7月			●
10ヶ月		●	
1回目：2019年10月		●	
1年7ヵ月		●	
2回目：2020年7月		●	
4年9ヶ月	●		
1回目：2019年10月	●		
5年6ヶ月	●		
2回目：2020年7月	●		
6年1ヶ月	●		
3回目：2021年2月	●		

- I-5 ; 初期さび・未成長さび (A)
- I-4 ; 保護性さび
- I-3 ; 未成長さび (B)
- I-2 ; 要観察状態を示すさび (A)
- I-2' ; 要観察状態を示すさび (B)
- I-1 ; 異常を示すさび



(a) G2 側ウェブ面⑥ (エリア I) (b) 下フランジ下面⑧ (4年9ヶ月) (c) 下フランジ下面⑧ (6年1ヶ月)

図-7 外観観察結果およびセロファンテープ試験結果 (B 橋 P11 橋脚側 G1)

護性さび」に向かいつつある箇所がほとんどである。一方、図中のエリアII内は外観評価 1 または 2 と判断されたものである。

図-6において、エリア I およびエリア II における外観観察結果とセロファンテープ試験の結果を図-7 に示す。セロファンテープ試験の評価基準は鋼道路橋防食便覧を参考とした。架設完了後 4 年 9 ヶ月経過した調査時における P11 橋脚 G1 桁 G2 側ウェブ面⑥(エリア I)のさび外観評点は 4 と、P11 橋脚 G1 桁下フランジ下面⑧(エリア II)のさび外観評点は 2 とした。P11 橋脚 G1 下フランジ下面⑧は架設完了後、6 年 1 ヶ月では図-7(c)に示すように層状さびが確認され外観評価は 1 とした。当該位置の 4 年 9 ヶ月経過時点における測定結果は図-6 において I-2(要観察状態を示すさ

び)となっており、異常さびに至る前の状態を評価できる可能性を示唆している。ただし、特にさび厚の測定値にばらつきがみられるため測定にあたってはバラつきができるだけ小さくなるよう留意する必要があることが分かった。

#### 2.4.2 電位

さび厚と電位の関係を図-8 に示す。縦軸に電位値 (さび層の緻密性或いは保護性に相当する指標) を横軸にさび厚値 (腐食速度に相当する指標) を図示し、電位値とさび厚値の関係からさびの状態を図中に示す E-5~E-1 に区分する評価方法<sup>6)</sup> (以下「E 評点区分」という。)により評価した。

図-8 より定点(4年9ヶ月、5年6ヶ月、6年1ヶ月)は、ほとんどの箇所が、「E-5 ; 初期さび、未成長さび

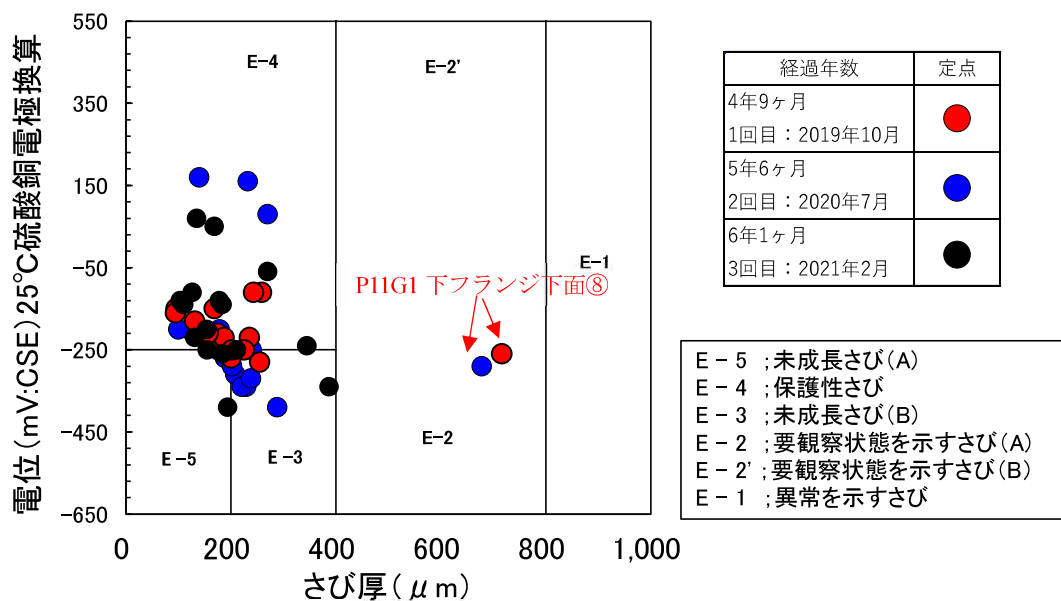


図-8 さび厚と電位の関係の例 (B 橋 P11 橋脚)



(A)」、「E-4 ;保護性さび」、「E-3 ;未成長さび(B)」の区分と判定された中、「E-2 ;要観察状態を示すさび(A)」に至っている箇所が1箇所(P11 橋脚 G1 桁下フランジ下面⑧)で見られた。これは前項のイオン透過抵抗法により要観察状態を示すさび(I-2)と評価された箇所と同じである。特にさび厚の計測値にばらつきがみられることは2.4.1と同様である。電位計測についてはデータ数が少ないため引き続き計測を行い、データを蓄積して分析を深める予定である。

## 2.5 計測者による評価の違いの考察

耐候性鋼材のさび層の状態把握については、評価者の経験などによって評価のばらつきが生じることが指摘されている。そこで、経験年数10年以上の熟練者の評価と対比させるため、未経験者による判定を同様に実施し比較した。それぞれの外観評価およびイオン透過抵抗判定結果を表-3に示す。表には熟練者による外観評価において評点2に分類された箇所を抜粋した。

外観評価については、熟練者による評価は未経験者による外観観察よりも厳しい評価(さびが進行しているという評価)の傾向であった。C橋の2箇所において未経験者は評点3とし、計測者による差が確認された。これは、未経験者が写真見本<sup>7)</sup>を参考に判定したこと一方で、熟練者は周辺情報や今までの知見を踏まえた評価を総合的に判定していることが主な要因であると考えられる。

イオン透過抵抗判定についても、熟練者と未経験者の判定結果に差が確認され、熟練者がより厳しい判定であった。さび厚およびイオン透過抵抗値の計測値が、測定方法などによりばらつきが生じた可能性が考えられる。また、さび厚計測に使用した電磁膜厚計は熟練者と未経験者で同一ものを使用していないことも原因の一つとして考えられる。表に示した評点2に分類した観察箇所は全て下フランジ下面であり、イオン透過抵抗値を上向き姿勢で計測するため不安定な測定となり、測定姿勢によるばらつきが生じた可能性がある。

## 3. 室内試験による計測に影響を及ぼす指標の検討

### 3.1 検討概要

耐候性鋼材のさびの状態を外観観察により評価する場合、前述の通り技術者の能力等によりばらつきが生じる可能性がある。他方、さび状態を定量的に評価できると考えられる手法(イオン透過抵抗法、電位等)が提案されているが、各種の要因によって計測した値にばらつきが生じる可能性があり、実橋で適用するにあたり計測の留意点等を把握し整理する必要がある。

このため、耐候性鋼材さび状態の定量的評価にあたって、計測時の温湿度条件、計測前の清掃手法等の条件が、さび厚、イオン透過抵抗、電位差の測定結果に与える影響について検討を行った。

### 3.2 計測対象

本検討に用いる耐候性鋼の試験片は、飛来塩分量が少ない田園部で約36年間暴露した試験片1、2(写真-1)と、飛来塩分量が多い海岸部で約6カ月間暴露した試験片3、4(写真-2)を対象とした。

### 3.2 計測項目及び計測方法

計測項目は、イオン透過抵抗法、電位法、さび厚とした。さび厚の計測は、電磁膜厚計を用いて、試験片1及び2は9点を計測し、試験片3及び4は同一箇所3点を計測し、それぞれ平均値を整理した。実橋での計測時間について、イオン透過抵抗は30秒、電位は1分<sup>8)</sup>とする事例がある。本検討では計測時間による影響を確認するため、イオン透過抵抗は10秒毎に計測し、10秒から10分で60回の計測を行った。また、電位は30秒毎に計測し、30秒から30分で60回の計測を行った。

### 3.3 試験ケース

試験ケースを表-4に示す。同一試験片を対象に、温度、湿度、計測実施前の清掃手法を変化させて前項の項目を計測した。温度及び湿度については、春秋を想定した20℃・60%をCASE1とした。同様に、冬季0℃・60%をCASE2、夏季40℃・60%をCASE3、乾燥20℃・

表-3 外観評価における評点2の判定箇所

対象橋	観察箇所				熟練者(経験10年以上)		未経験者	
	No	脚	主桁	観察面	外観評価	イオン透過抵抗判定	外観評価	イオン透過抵抗判定
B橋	③	P13	G2	フランジ下面	2	I-3	2	I-4
B橋	⑧	P11	G1	フランジ下面	2	I-2	2	I-4
C橋	③	P1	G2	フランジ下面	2	I-3	3	I-4
C橋	③	P2	G2	フランジ下面	2	I-2	3	I-4



写真-1 試験片 (田園部で36年暴露)

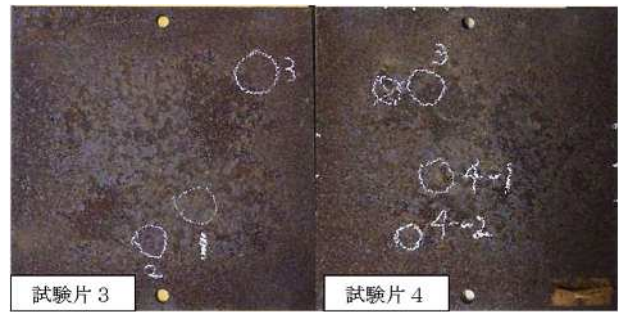


写真-2 試験片 (海岸部で約6カ月暴露)

30%をCASE4、湿潤20℃・80%をCASE5とした。目標とする温度と湿度は恒温室で管理した。計測実施前の清掃は既往の研究を参考に、刷毛とヘラの組合せで設定した。刷毛やヘラの作業標準として、写真-3に示すように縦横全面に1回ずつ清掃することを、表-4における「1回」と定義した。ヘラを用いた清掃では、浮きさびが取れる程度の弱い力による操作作業とした。

### 3.4 計測結果

#### 3.4.1 さび厚の計測結果

図-9にさび厚の計測結果を示す。計測前の清掃は無しとし、計測時の温室度の条件の異なるCASE1～CASE5を比較するとその差が小さいことから、温度や湿度がさび厚に与える影響は小さいと言える。計測前の清掃の条件が異なるCASE1及びCASE6～CASE8を比較すると、さび厚計測値が大きい試験片3-1では、清掃の程度が大きい程、さび厚が減少する傾向が確認され、CASE-8(刷毛6回+ヘラ1回)では、同条件で清掃を行わないCASE-1と比較して約35%のさび厚の計測値低下が確認された。防食便覧では「鋼板に付着したほこりや異物、浮きさびなどを、はけで除去し、対象部のさび厚さを計測する」と記載があり、本検討では試験片3-1の様にさび厚が大きい場合、刷毛3回程度の清掃(CASE-6)によりCASE-1と比較して、200 $\mu$ m程度のさび厚の差が確認された。またヘラを用いた清掃では、さび厚の差は小さかったが、これは浮きさびが取れる程度の弱い力によりヘラを操作したためと考えられる。強い力によりヘラを操作して清掃した場合には、測定対象のさびが過剰に除去される可能性があると考えられる。

以上の検討より、さび厚の経年変化などの追跡調査を計画する際には、刷毛3回程度を目安に統一的な清掃条件を設定し、浮きさび等がさび厚計測に及ぼすばらつきの影響を極力小さくするよう工夫することが望ましいと考えられる。

表-4 試験ケース

CASE	温度(℃)	湿度(%)	清掃
1	20	60	無し
2	0	60	無し
3	40	60	無し
4	20	30	無し
5	20	80	無し
6	20	60	刷毛3回
7	20	60	刷毛6回
8	20	60	刷毛6回+ヘラ1回



写真-3 刷毛とヘラの作業標準

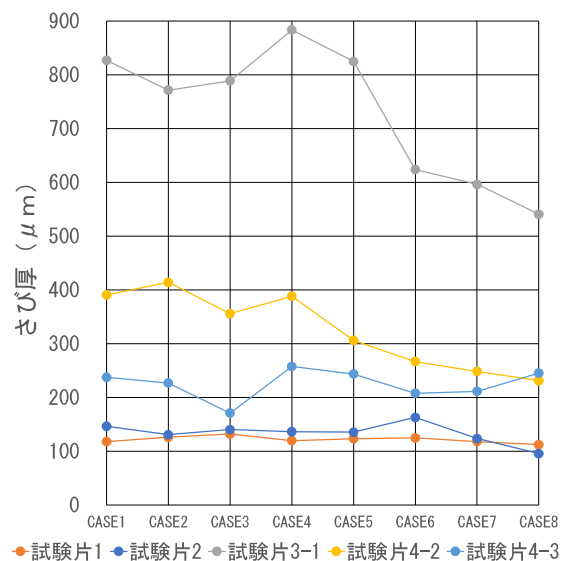
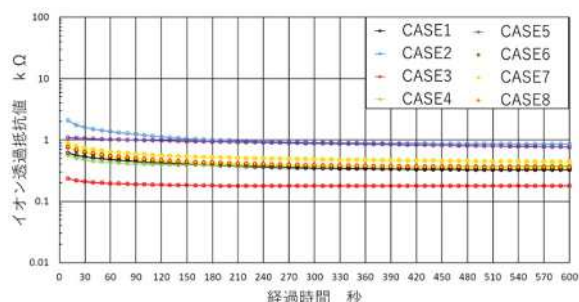
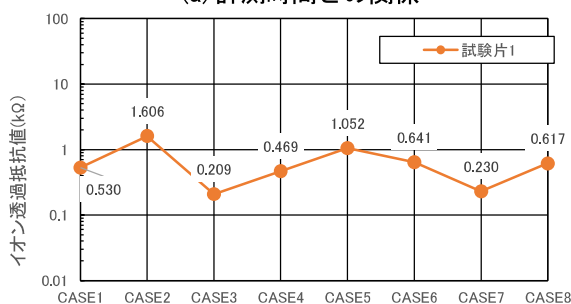


図-9 さび厚の計測結果



(a) 計測時間との関係



(b) 計測時間 30 秒における結果

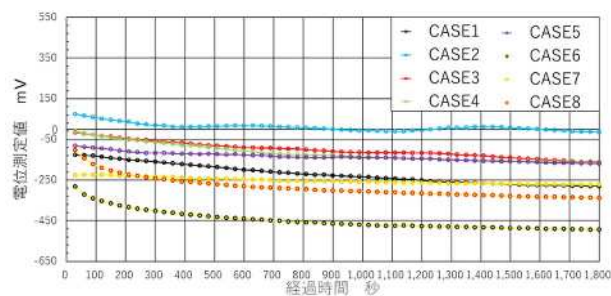
図-10 イオン透過抵抗の計測結果 (試験片 1)

### 3.4.2 イオン透過抵抗の計測結果

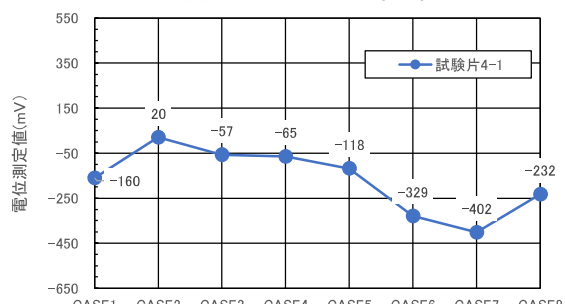
図-10(a)にイオン透過抵抗値と計測時間の関係を、試験片 1 について代表で示す。図-10(b)は、計測時間 30 秒の各 CASE の値を示している。標準条件の  $0.5\text{k}\Omega$  (CASE1) に対して、最大値  $1.6\text{k}\Omega$  (CASE2: 温度  $0^\circ\text{C}$ )、最小値  $0.2\text{k}\Omega$  (CASE3: 温度  $40^\circ\text{C}$ ) であった。標準条件の結果に対して、 $39\%\sim 303\%$ の範囲の値となり、温度が低いほどイオン透過抵抗の計測値が高くなる結果が得られた。これは試験片 1 以外の試験体でも同様な傾向が確認された。従って、追跡調査など同一箇所でも複数の計測結果を比較する場合は、季節変動および日変動を考慮し、計測時の温度条件が同程度となる様に適切な時期を選定するなど、温度による変動量を極力小さくするよう工夫して計測することが望ましいと考えられる。

### 3.4.3 電位の計測結果

図-11(a)に電位と計測時間の関係を示す。図-11(b)より、計測時間 5 分の各 CASE の値を示している。標準条件  $-160\text{mV}$  (CASE1) に対して、最大値  $+20\text{mV}$  (CASE2: 温度  $0^\circ\text{C}$ )、最小値  $-402\text{mV}$  (CASE6: 刷毛 3 回) であった。電位の計測においては、温湿度および清掃条件の各要因により、計測値の差が生じたが、各要因による計測値の増減に対する明確な傾向は確認されなかった。この原因としては、電位の計測では、原理上、電極の接触状態が計測値に影響を及ぼすことが考えられ、しかしながら、電極の接触状態を一定に保つことは難しく、このことが一連の実験の計測値に



(a) 計測時間との関係



(b) 計測時間 5 分における結果

図-11 電位の計測結果 (試験片 4-1)

影響を及ぼした可能性が考えられる。なお、電位法による計測時には、既往の検討<sup>9)</sup>を参考に照合電極の種類に対応した温度換算が実施されている。

## 4. まとめ

供用 10 年以内の耐候性鋼橋を対象にした調査および暴露試験片を用いた室内試験を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 耐候性鋼材の定量的な点検手法として、供用 10 年以内の実橋におけるイオン透過抵抗および電位を計測し、外観に基づくさび評点とおおよそ関連した評点が得られることを確認した。
- 2) 観測時の温度および計測前の清掃手法の違いがさび厚やイオン透過抵抗値、電位などの計測結果に影響を及ぼすことを確認した。追跡調査を行う場合には測定条件を記録し条件を合わせて測定する必要があるなど、測定の際の留意点を把握した。

## 謝辞

本研究の一部は、(国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所、(一社)日本橋梁建設協会、(一社)日本鉄鋼連盟、長岡技術科学大学、日鉄住金防蝕株式会社)による共同研究「耐候性鋼橋の長寿命化に関する共同研究」の一環として行っており、ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、 2014.3.
- 2) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編、 2017.11.
- 3) 紀平寛：耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断、材料と環境、Vol48、 pp.697-700、
- 4) 鹿島和幸、原修一、岸川浩史、幸英昭：耐候性鋼さび層の電位による保護性評価、材料と環境、Vol49、 pp.15-21、2000
- 5) (一社)日本鋼構造協会：耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術、JSSC テクニカルレポート No.73、2006
- 6) 紀平寛、塩谷和彦、幸英昭、中山武典、竹村誠洋、渡辺祐一：耐候性鋼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
- 7) (一社)日本鋼構造協会：耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全、JSSC テクニカルレポート No.86、2009
- 8) 鹿島和幸、原修一、岸川浩史、幸英昭：耐候性鋼さび層の電位による保護性評価、材料と環境、Vol49、 pp.15-21、2000
- 9) 独立行政法人土木研究所、日本構造物診断技術協会：自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書、第 357 号、2007



# RESEARCH ON INVESTIGATION AND COUNTERMEASURE TECHNOLOGIES TO EXTEND THE SERVICE LIFE OF ROAD BRIDGES (2)

Research Period: FY2018-2021

Research Team: Bridge and Structural Engineering Research Group

Author: JOSEN Yasushi

SAWADA Mamoru

TAKAHASHI Minoru

SAKAMOTO Yoshiya

SHINODA Ryusaku

**Abstract:** It is difficult to determine anomalous rust from the appearance of weathering steel. Therefore, a method to quantitatively evaluate the rusting condition is under study. In this study, a follow-up survey was conducted on an actual bridge within 10 years of its construction, and the applicability of a measurement method that can be quantitatively evaluated was examined. In addition, laboratory tests were conducted using exposure specimens, and the indices that affect the measurements were summarized.

**Keywords:** Weathering steel, Ion Transfer Resistance Method, Potential Method