

イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出 ～定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して～

西川和廣・中野正則・安波博道・落合盛人・五島孝行・中島和俊

1. はじめに

2000年代に入り、わが国では道路インフラへの投資が抑制されはじめるとともに、建設コストの削減が強く求められるようになり、鋼道路橋では耐候性鋼橋梁の採用が急増した。中には適用条件を十分に考慮せずに使ったため、最近になってこれらの橋の一部に異常さびがみられるようになってきた。海からの飛来塩分のみならず、凍結防止剤を含む路面水の飛散や、排水装置の不備による漏水等が原因であると考えられる(写真-1)。耐候性鋼橋梁は、塩分が影響して発生した異常さびの補修塗装には多大な労力がかかることが知られている¹⁾。そのため、なるべく早期に異常さびを検知し、早期に補修することが重要である。



写真-1 排水装置の破損による異常さびの例

一方、平成26年度よりすべての道路橋に対して5年に一度の定期点検が義務付けられた。橋梁定期点検要領²⁾では、耐候性鋼橋梁はさびの外観によって健全度を判定することとなっている。これは板厚減少量とさび外観との相関性を利用したものであるが、実際の点検業務においては、判定結果が点検員の熟練度に左右されやすい、異常さびの発生範囲の特定が難しいなどの課題がある。

これに対し、さびの状態を客観的に診断する手法の一つとしてイオン透過抵抗法がある。イオン透過抵抗法を用いた計測装置は20年以上前に開発されたものであり、計測の基本技術は確立している。しかし、当時は装置が大きい、計測に時間

がかかるなどの問題があったが、最近、装置の改良が進み、鋼道路橋塗装・防食便覧資料集³⁾にも紹介されるなど、実用に供することができるようになった。そこで、(一財)土木研究センターでは、実橋でのデータ蓄積と計測の信頼性向上のために、イオン透過抵抗法の実用化開発を行った日鉄住金防蝕(株)との共同研究を開始した。

本稿は、イオン透過抵抗法の計測値からさびの状態の評価区分法、およびその区分法に従った耐候性鋼橋梁の維持管理法に関する提案を行なったものである。

2. イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁のさび評価

2.1 イオン透過抵抗法とRST

イオン透過抵抗法は、イオン透過抵抗値とさび厚を測定することで、耐候性鋼橋梁のさびの状態を診断区分する方法である。イオン透過抵抗値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示し、抵抗値が高いほど環境遮断性が高く、鋼材の腐食速度が遅い状態にあることを表す。

また、実構造物のイオン透過抵抗値をインピーダンス法の原理を用いて計測する装置がRST(Rust Stability Tester)である。RSTによる計測状況を写真-2に示す。



写真-2 RSTによる計測状況

2.2 イオン透過抵抗法の評価区分図

紀平らは、イオン透過抵抗値を計測するRSTを開発するとともに、図-1に示すさびの評価区分図(本稿では「紀平の評価区分図」と呼ぶ。)を作成

した^{4),5)}。本図は、耐候性鋼材のさびの状態を断面顕微鏡観察により、A,B:初期さび、C:保護性さび、D:異常さびに分類した上で、日本各地で観察した多数の耐候性鋼橋梁および暴露試験片のさびの状態を、測定したイオン透過抵抗値とさび厚のグラフに表示したものである。

また、その後、紀平らは、図-2に示す耐候性鋼橋梁のさび外観の評点区分（日本橋梁建設協会と日本鉄鋼連盟とが提案する“外観評点”）を採り入れた評価区分図（図-3）を提案した⁶⁾。本図ではさび外観評点法と同様にさびの状態を5段階に分類し、それぞれの領域区分を行っている。I-5とI-3は「未成長さび」、I-4は「保護性さび」、I-1は板厚減少が生じ対処が必要な「異常を示すさび（本稿では「異常さび）」と称している。またI-2は、今後も板厚減少が進行するか進行が留まるかの見極めが必要な状態であることから「要観察状態を示すさび（本稿では「要観察さび）」と称している。

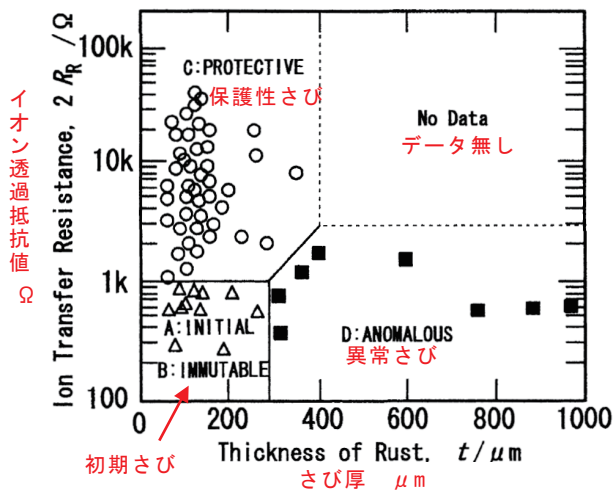


図-1 耐候性鋼に生成した錆の分類（紀平の評価区分）^{4),5)}

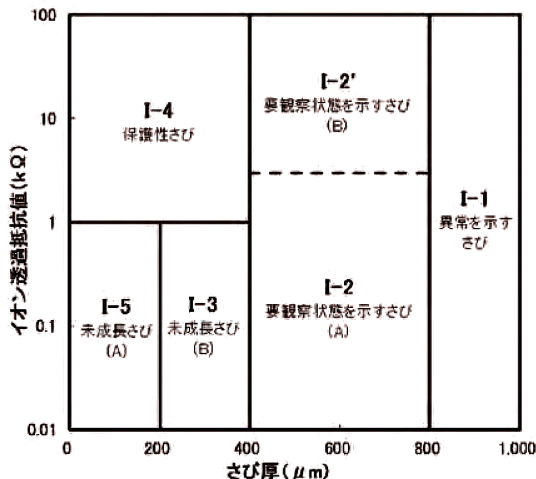


図-3 イオン透過抵抗法による評価区分⁶⁾

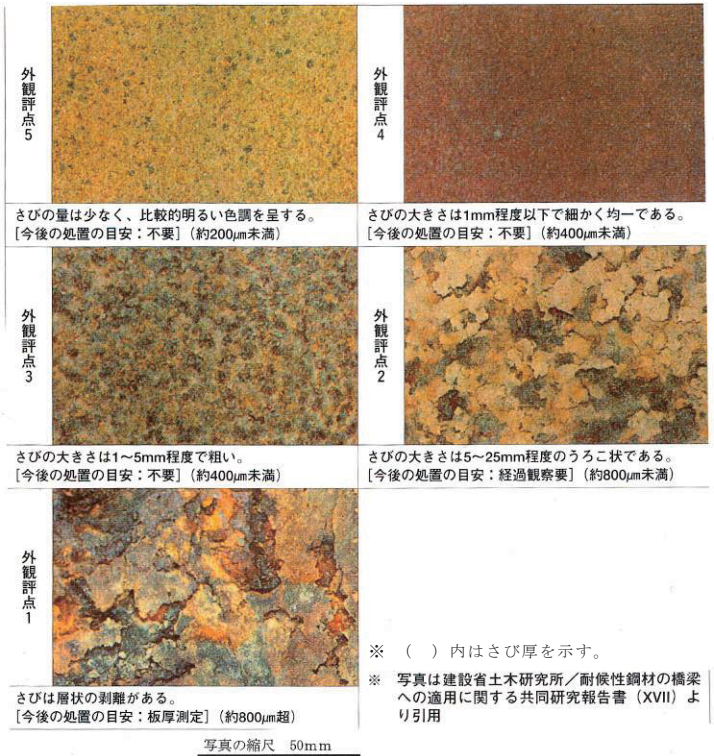


図-2 さび外観の評点区分

3. RSTを用いた実橋計測試行

3.1 土研センターにおける実橋計測試行

建設から約29年（建設後に増設された桁は約22年）が経過した鋼桁橋のC橋においてRSTによる計測を試行した。試行者は耐候性鋼橋梁の健全度評価に精通した当センターの職員である。周辺環境が穏やかな本橋は全体としては健全な状態であるが、添架される水道管が結露する影響により横構の一部に異常さびが生じている（写真-3）。本橋の代表的な計測点の外観状況を写真-4に示す。また、さび厚、イオン透過抵抗値、および図-2に基づく外観評点を表-1に示す。また、計測結果の評価区分図を図-4に示す。図中の記号は外観評点ごとに色分けしている。計測結果から以下のことが考察される。



写真-3 異常さびの発生状況

土研センター



⑪(3)



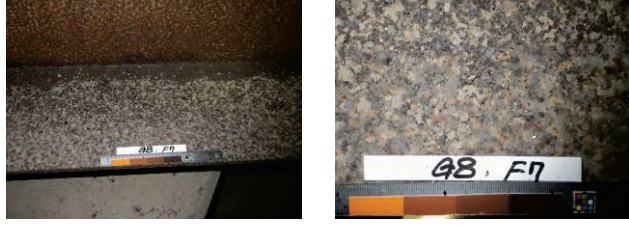
⑫(4)



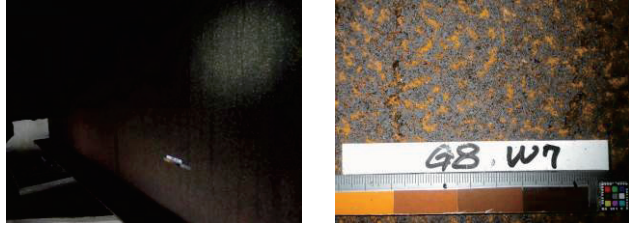
⑬(3)



⑭(2)



⑮(2)



⑯(4)



⑰(1)

写真-4 測定箇所状況 (()内は外観評点を示す)

表-1 C橋の測定結果

計測点番号	さび厚 (μm)	イオン透過抵抗 (Ω)	外観評点	建設後経過年数
①	126	908	4	29
②	135	1057	4	
③	166	189	3	
④	261	327	3	
⑤	156	175	3	
⑥	152	366	4	
⑦	222	393	3	
⑧	182	481	3	
⑨	369	475	2	
⑩	161	1153	4	
⑪	250	903	3	
⑫	140	313	4	
⑬	216	310	3	
⑭	341	508	2	22
⑮	294	463	2	
⑯	116	98	4	
⑰	378	760	1	

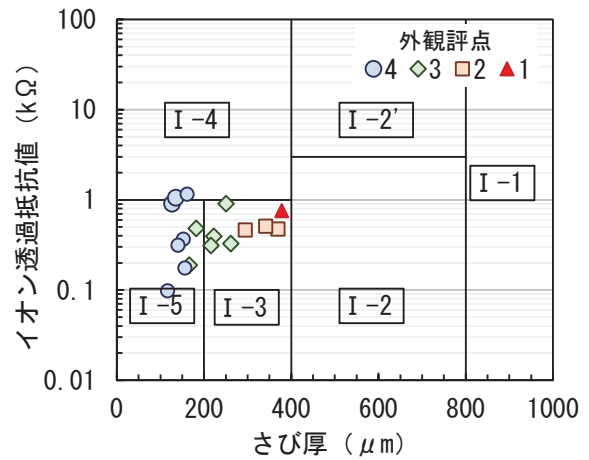


図-4 C橋の測定結果

- (1) 計測点17点のうち、15点は未成長さびのI-5またはI-3に属し、2点が保護性さびI-4の下限近くに位置し、建設から20年以上が経過したにもかかわらず、全体としてさびの進行が緩やかであると判断できる。
- (2) 外観評点では「2」とした3点は、さび厚が400 μm以下であることから未成長さびI-3に分類される。ただし、同じI-3に分類された他の計測点（外観評点「3」と「4」）に比べ、さび厚は厚い。
- (3) 異常さびが生じた計測点⑰（写真-3）は、さびの脱落により測定時点のさび厚が薄いため、

I-3に分類された。さびの脱落が生じなければ、I-2またはI-1に分類される可能性が高い。

3.2 今井らの試行報告

佐藤、岩崎、今井らの研究報告^{7),8)}によれば、箱桁橋のウェブとフランジの5箇所においてイオン透過抵抗値の経過観察ならびにワッペン式暴露試験を行い、架設後10年から17年までの7年間の追跡調査から、経年によるイオン透過抵抗値とさび厚の動きを観察している。この橋は海からの飛来塩分の影響を受け、下フランジにはうろこ状の浮きさびが生じている。調査結果として、評価区分図(図-5)により以下のように報告されている。

- (1) 架設から17年経過した時点で、ウェブはいずれも保護性さび(I-4)の領域に至った。一方、下フランジはほとんどの測定点が要観察さび(I-2)の領域にあり、20年経過後にはさび厚は異常さび(I-1)の区分に至る可能性がある。
- (2) 下フランジに設置したワッペン試験片のさび厚とイオン透過抵抗値の関係から、経年とともに抵抗値の上昇は減速するが、さび厚は増加しており10年経過時点では要観察さび(I-2)の区分に入ることが推察される。
- (3) これらから、イオン透過抵抗法を使用して経年調査することで、補修の必要性を判断する維持管理技術として適用できると考えられる。

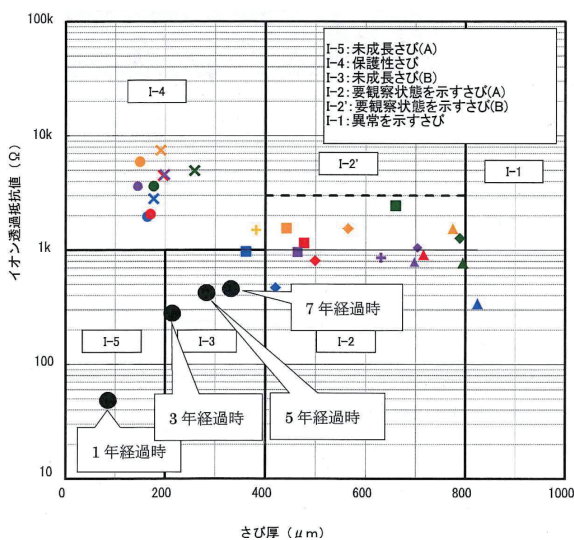


図-5 箱桁橋のイオン透過抵抗値の経過観察^{7),8)}

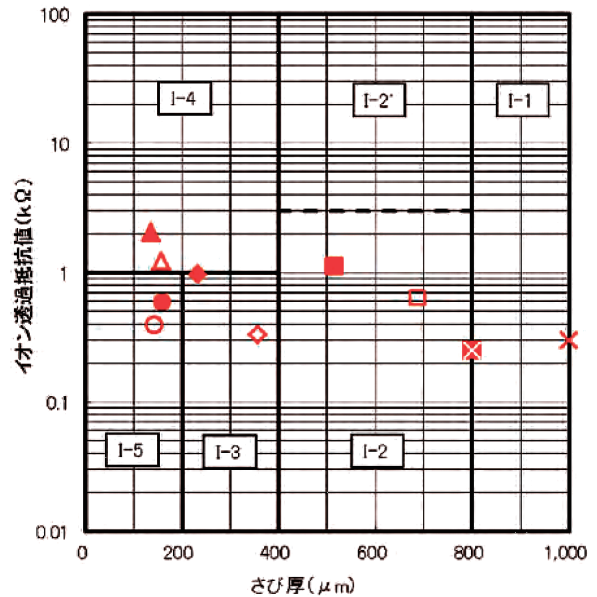


図-6 トラス橋の測定結果⁹⁾

3.3 橋梁調査会の試行報告

藤原らの調査報告⁹⁾によれば、内陸に建設されたトラス橋を対象に、下弦材の格点部と水漏れにより異常さびが生じた下横構に対して計測試行し、主にRSTの実用性を検討している。計測結果の評価区分図を図-6に示す。試行結果からRSTについて以下のように評価している。

- (1) RSTは簡便で短時間に現場計測が可能である。
- (2) 評価区分図による等級分けは概ね外観からの直観的な評価と一致する。
- (3) 評定のバラツキが無くなるとともに詳細のさび状態を把握することができる。

3.4 実橋での計測試行からの考察

3.1~3.3の実橋におけるRSTの計測試行より、以下のことが考察される。

- (1) さび厚とイオン透過抵抗値による評価区分図により、未成長さび(I-5, I-3)、保護性さび(I-4)、要観察さび(I-2)、異常さび(I-1)のいずれに入るかを定量的、客観的に評価することができる。
- (2) RST抵抗値は、保護性さび(I-4)では1~10kΩを呈するが、要観察さび(I-2)の多くは0.1~1kΩの範囲に分布している。
- (3) 建設から既に20~30年以上が経過した時点でのさびの状態は、将来的に腐食環境が変化しない限りほぼ安定しているものと思われる。したがって、要観察さび(I-2)に属する計測点の中には、将来さび厚が増加し異常さび(I-1)の領域に移行するものが出現するかも知れない

土研センター

が、急速に板厚減少を伴うような異常さびが生じるか否か現時点では不明である。

- (4) 外観目視で評点2と判定した状態でも、本評価区分図によれば未成長さび (I-3) と評価される場合がある。
- (5) 現時点のさびの状態を表示したこの評価区分図は、補修の必要性を判断する技術として有用であるが、いつ補修を行うかという具体的な維持管理行動との関連は明らかになっていない。

4. RST実測値と定期点検診断との関係付け

4.1 西川の評価区分図

著者の西川は、耐候性鋼橋梁に対する維持管理の現場対応の実態と、図-1に示した紀平の評価区分図を考慮して、RST評価区分図を修正した評価区分図 (本稿では「西川の評価区分図」と呼ぶ) 図-7を提案してきた。本図ではさびの状態を表-2に示す橋梁定期点検の対策区分判定²⁾ と関係付けを行ったものである。本図の特長を以下に示す。

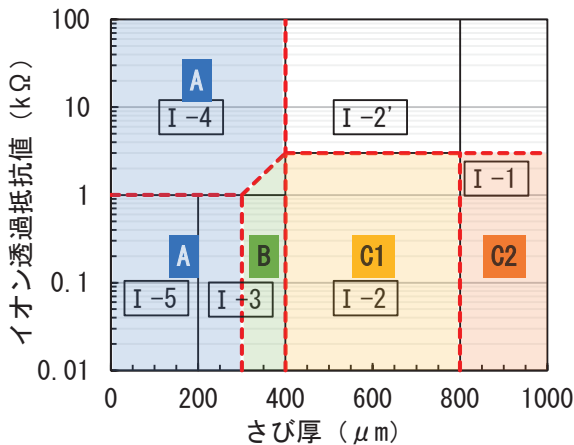


図-7 イオン透過抵抗法による評価区分 (西川の評価区分)

表-2 対策区分の判定区分²⁾

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

- (1) 保護性さびも劣化の過程と見られたものが、対策区分判定が「A」という評価を付けることにより、橋梁に生じる他の損傷と同様に「損傷ではない」との位置付けることができる。

- (2) 要観察さび (I-2) と診断された場合、これまでは“次回の定期点検時に観察すればよい”と判断される場合が多いようである。しかし現実には、数年で異常さびに移行した事例も見られるため、この時点で補修対策を施した方がよい場合もある。これに対し、この領域を「C1」とすることにより予防保全として何らかの行動を起こす動機が生まれる。少なくとも「観察」ではなく「監視」の意識が変わる。

- (3) 一般に外観目視で評点付けの判定が難しい外観評点「3」と「2」のグレーゾーンについて、未成長さび (I-3) の領域を「A」と「B」に区分することにより、「B」に区分された場合には定期点検の要領にしたがって、必要に応じ補修対象と判断することも可能となる。また、この領域のさびの状態は、多数の実橋と試験から整理した紀平の評価区分図と整合している。

- (4) 異常さびは外観で識別できるためRSTの計測は不要である。しかし本区分図によってC2と定義することにより、補修の時期を次回の定期点検までとの期限を設けることとなり、手遅れに至るのを阻止できる。

4.2 西川の評価区分図を用いた診断の試行事例

4.2.1 C橋の診断

図-4に示した計測結果を、西川の評価区分図にプロットしたものを図-8に示す。図-4では「未成長さび (I-3)」と評価された領域の測定箇所は、図-8では「B」すなわち“状況に応じて補修を行う”と判定される。これにより、実際に試行者が外観からの評価した評点 (外観評点2) に近づく診断結果となり、熟練者の判定が反映されやすくなっているものと思われる。

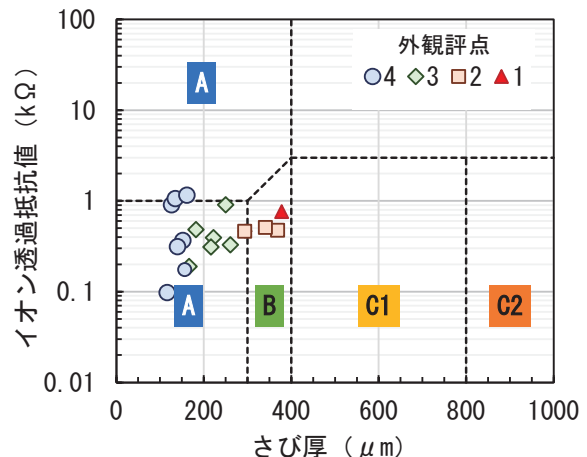


図-8 C橋の測定結果 (西川の評価区分)

4.2.2 橋梁調査会論文の診断

同様に、図-6に示した計測結果を西川の評価区分図にプロットしたものを図-9に示す。図-6では「I-2」と評価した橋梁部位のさびの状態を「C1」と判定することにより、その部位については“要観察状態を示すさび”から“予防保全として早期に対処すべし”と診断される。これにより、定期点検のシステムにしたがって診断結果を実際の行動を認識することが可能となり、耐候性鋼橋梁では異常さびの早期対策実施の行動に移す動機が生まれる。

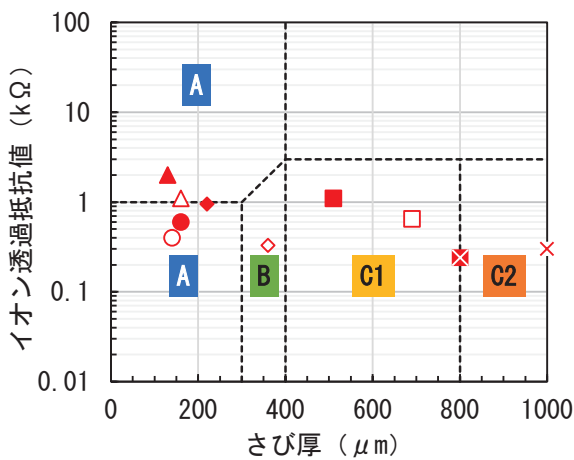


図-9 トラス橋の測定結果（西川の評価区分）

5. まとめ

実橋梁におけるRSTを用いた計測の試行、既往文献の検討成果の分析、ならびに新たに提案した評価区分図による健全度診断を試行した結果から、イオン透過抵抗法の実用性と、今後の改良目標を以下にまとめる。

(1) 耐候性鋼橋梁の健全度評価において、従来のさび外観評価とさび厚による評価に加え、イオン透過抵抗法(RST)を実用することにより、定量的、客観的な評価、診断が行えるようになる。

- (2) 異常さびの周辺をRSTで探査することにより、補修範囲を適切に判断することができる。
- (3) 定期点検時に、RSTを用いた計測と西川の評価区分図による健全度診断を行うことにより、定期点検のシステムに従って診断結果から維持管理の対策行動に直結できる。
- (4) 定期点検等による経年変化のデータを蓄積していくことにより、RSTによる健全度診断の信頼性向上に努めたい。
- (5) また、データ蓄積により、C1（要観察さび（I-2））に属する計測点が、その状態を将来的にも維持し続けるか、あるいはC2（異常さび（I-1））に移行するかについて見極めたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、平成26年3月
- 2) 国土交通省：橋梁定期点検要領、平成26年6月
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、平成22年10月
- 4) 紀平寛：腐食計測法による耐候性鋼さび安定度診断、溶接学会誌、第63巻(1994)第6号、pp.19～24、1994
- 5) 紀平寛、宇佐見明：安定さびの工学的定義と耐候性鋼橋超長期耐久化への展開、材料と環境、49、No.1、pp.10～14、2000
- 6) 紀平寛、塩谷和彦、幸英昭、中山武典、竹村議洋、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) 佐藤恒明他：耐候性鋼橋の腐食減耗量の継続調査、土木学会第69回年次学術講演会、I-593、pp.1185～1186、2014.9
- 8) 今井篤実他：イオン透過抵抗法を用いた耐候性鋼橋梁の維持管理技術、土木学会第70回年次学術講演会、I-432、pp.861～862、2015.9
- 9) 藤原英之、諸隈成幸：イオン透過抵抗法による耐候性鋼材のさび評価の試行、J-BECレポート、Vol.11、pp.12～16、2015

西川和廣



(一財)土木研究センター理事長
Kazuhiro NISHIKAWA

中野正則



(一財)土木研究センター専務理事
Masanori NAKANO

安波博道



(一財)土木研究センター材料・構造研究部長、博(工)
Dr.Hiromichi YASUNAMI

落合盛人



(一財)土木研究センター材料・構造研究部 主幹研究員
Morito OCHIAI

五島孝行



(一財)土木研究センター材料・構造研究部 主幹研究員
Takayuki GOTO

中島和俊



(一財)土木研究センター材料・構造研究部 主任研究員
Kazutoshi NAKASHIMA