



入門講座

鋼の防錆・防食技術－9

鋼橋・鋼構造物の防錆・防食

－予防保全実現への学術、技術、政策、そして財源－

Anti Corrosion Measures for Steel Bridges and Structures

－ Science, Technology, Policy and Finance for Proactive Maintenance －

紀平 寛

Hiroshi Kihira

日鉄住金防蝕(株) 社長付 部長
横浜国立大学客員教授

1 はじめに

高度成長期に建設された道路や橋、上下水道など、いわゆる社会資本の高経年化が進んでいる。臨海工業地帯における大規模な製造基盤設備においても同様である。これらを総称してここではインフラストラクチャーということにする。インフラストラクチャーの多くは、コンクリート構造物や鋼構造物により構成されている。いずれも地球上には異なる化合物として安定に存在していた物質を、人工的に有用な物質に変換し、工業材料として部材に用いている。つまりいずれの工業材料も、大自然の摂理により化学反応を起こし、元の物質に戻ろうとするので、高経年化により、いわゆる劣化と認識される現象が進む。ただし、高経年化したからといって老朽化したとは限らない。メンテナンスを適正に行えば、鋼構造物の劣化速度は極限まで低減できるのであるから、インフラストラクチャーに先進的な防食設計法や資産管理法を適用すれば、その健全性を半永久に維持することも可能である。最近ではリスクベース設備管理といった概念が提唱され、研究も進み、メンテナンスに関わる技術も幾多実用化されている。

にもかかわらず、未だにインフラストラクチャーの劣化が社会問題となっている。新聞・テレビ等マスメディアを通じて、その実情も報道されている。例えば2012年8月30日の読売新聞¹⁾には、「崩落の恐れ橋、全国に」という見出しでインフラストラクチャーの危機に関する記事が大きく掲載された。全国15万7000橋の内、建設から50年以上経過したものは、現在約9%である。この割合は2021年に28%に、2031年に53%になると算定されている。インフラストラクチャー劣化の直接的な主原因は「腐食」と「疲労」であり、いずれも時間とともに緩慢に、条件によっては急速に進む現象である。現在も全国に幾多の「危ない橋」が存在する。このまま放置す

れば、さらにその数を増やすことになりかねない。国土交通省により道路橋の実態に関わる統計が公開されている。道路橋は一つの象徴であり、この例題の解法を横展開することでインフラストラクチャー全体の安全と安心を確保しようというのが戦略となる。大都市地下空間、水道・ガス配管、電力・通信設備など、人工物であるインフラストラクチャー全体に視野を広げると、潜在する劣化の問題は重要性を増しつつある。早く気づき、対策を講ずるべきであろう。

橋梁など身近な陸上インフラストラクチャーが曝される環境はさほど特殊なものではなく、腐食の主原因は、水分と塩分である。このうち、塩分があっても水分がなければ鋼は腐食しないので、水分が腐食を起こす原因であり、塩分が腐食の加速因子であると認識しておくのがよい。塗装等有機物を用いる場合には、太陽光、特に紫外線も、劣化加速因子に加わる。鋼構造物の防食設計をするにあたっては、表面に水分が滞留しないように工夫を凝らすことが肝要である。鋼橋・鋼構造物の腐食による構造体としての経年劣化は、「鉄がさびる」という至極あたりまえの現象による。また、鉄がさびるのを防ぐ技術は幾多実用化されており、その適用を適正になせば、高経年化しても設備は腐食で老朽化することはない。前述のように、インフラストラクチャーが危機的状況を迎えてつづけるのは、技術がないのではなく、社会のマネジメント・システムに問題があると、その本質を正しく認識すべきである。

本著は、鋼の防錆・防食の入門講座と位置づけられているが、単に現存の防食技術を羅列するのではなく、未来に向けて解決すべき課題を整理し、この分野で活躍しようと志す方々への参考としたい。

2 予防保全実現への国家的取り組みとその進捗

防錆や防食は、鋼構造物等金属製品を長寿命化させるために施される措置である。一般には、さび発生を抑制する措置が防錆であり、金属の腐食を抑制または制御する措置が防食と捉えられている。しかしながら、両者の定義に明確な境界を見出すのは難しい。これは、防食なる概念の中に防錆も含まれるためと思われる。

鉄鋼材料に腐食が起こるのは古くより自明の理として知られていたにも関わらず、橋の設計基準書である道路橋示方書・同解説²⁾（以下、道示）に腐食や疲労に対する考慮の必要性が明記されたのは、21世紀に入ってからのことである。ただしそれ以前の道示にも、腐食環境に配慮して最小板厚を選べるとする規定が一行だけあった。一見意味不明のこの規定は、より厚い鋼板を橋梁部材に使えば多少の腐食減耗を起こしても鋼構造物としての耐荷力に影響しないという橋梁の防食設計理念を示唆するものである。つまり最小板厚を規制すれば鋼構造物の耐腐食性は上がるのである。当時の問題は、そう伝える説明が、明治時代以来全くなされていなかった点にある。この説明不足により、鋼橋は一切腐食しないとか、鏽一文腐食してはならないといった誤解が広がった。自然現象として起こる腐食現象に、人間の創った法・規定を遵守させようとすることは不可能である。道示²⁾は2002年3月に改定された。第5章耐久性の検討が加わり、部材の経年劣化を考慮に入れた設計を必須とする規定が施行された。この結果、鋼橋の分野に大きなパラダイム転換が起きた。橋梁は腐食しないのだからメンテナンスしなくてよいと誤認識されていたのが、橋梁は自然現象により腐食するので防食設計や維持・管理が必須と再認識されたのである。

道示²⁾第5章には枠組み規定が示されたのみであったので、具体的方法論については、それからの提案や協議でまとめて行くことになった。著者らが関わった無塗装耐候性鋼橋梁については、2005年12月に発行された鋼道路橋塗装・防食便覧³⁾（以下、防食便覧）や、（社）日本鋼構造協会・鋼橋性能向上委員会から発行されたテクニカルレポートNo.73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」（以下、JSSC-TR73）⁴⁾、同テクニカルレポートNo.86「耐候性鋼の適用性と防食予防保全」（以下、JSSC-TR86）⁵⁾などにて、具体的方法論が総合的に提示された。

さらにJSSC-TR73⁴⁾には、第6章維持管理にて「耐候性鋼橋梁の所要の防食性能を供用中に満足させるため、適切な維持・管理を行わなくてはならない」とする規定案が示された。要求された鋼橋寿命の半永久化は、設計と材料のみでは実現できない。その実現は維持・管理実行権限を持つ者によっ

てのみ可能になるので、設備管理者の責任事項と再認識された。

このような議論の流れの中で、国土交通委員会調査室は、2007年度からの取り組みとして「長寿命化修繕計画策定事業」の創設⁶⁾を報じた。橋梁については従来の対症療法的な修繕や架け替えから、予防保全に基づく長寿命化修繕計画に従った修繕および架け替えへと、政策転換がなされた。

2007年8月には米国ミネソタ州にて、添接板の強度不足による破断が原因で巨大な落橋事故が起き、多数の犠牲者が出た。昔の設計基準書の誤りが修正されたにもかかわらず、実橋添接板の強度不足に気づかず、安心して適切な対応をしなかったところ、不運感の大きい結末が生じた。

この事故は世界に影響を与え、我が国でも意識が高まり、橋梁の実態調査が進んだ。2008年末には、地方自治体管理の全国13万4400橋のうち、通行止めなど交通規制措置がとられた危険な橋は約977橋、過去5年間に一度も点検されていない橋は約8万橋と、結果報道⁷⁾された。このように2007年を起点に、2002年の道示改訂を起点とするもう一つのパラダイム転換が起きた。すなわち、維持管理の重要性が再認識され、予防保全の策定が国家的に開始される年となった。

国会決議が必要な国の予算制度や自治体公会計制度などに阻害要因があり、管理責任を担う技術者の悩みが大きい。道路法第42条に道路管理者の維持管理努力責任が規定されているものの、その技術基準を定める政令の策定は、個別事情の複雑性もあって、十分進んでいない。公共構造物の維持管理に必要な、優れた保全技術を有する企業は数少なくかつ弱小である。各地に分散する橋梁全数の予防保全をできる状況にはない。社会資本全体を視野に入れると、危険感ほさらに大きなものとなる。

現在の対応は、いわゆる偽性安心⁸⁾（危険なのにそれを見ずに安心している状態）にあった過去のつけを解消する、いわばクライシスマネジメント（危機管理）に近い。設備管理者に尋ねると、実態としては対症療法的対応がなされているにすぎないのが実情であり、予防保全には至っていないと言う。ただし、インフラストラクチャーの予防保全がどのように定義されるものか、未だ明確ではない。実際の劣化程度に関わらず、一定期間毎に部材を新品に一律更新する保全方法を予防保全と称することもある。鋼構造物に生じた微小な異常を検知して、それを適時に補修・補強して、鋼構造物としての安全性を長期に確保する保全活動を、対症療法的保全とするのか、予防保全の一種とみなすのか、議論は尽くされていないのが実情である。つまり、インフラストラクチャーの予防保全は、未だ一つの構想であり、厳密な定義があるわけではない。今後創造的議論が必要な研究課題の一つと言える。これからこの分野に携わる方々には、「インフラストラ

クチャーの予防保全とは何か？」と自ら問いただし、ブラッシュアップする議論に参画いただけるとよい。

インフラストラクチャーの予防保全は、技術者だけの課題ではない。我が国の財政システムでは、建設には予算がつくが、維持・管理には予算がつかない時代が長く続いた。つまり、全国に広がる巨大な人工空間の安全と安心を支えるインフラストラクチャーのアセット・マネジメント法構築は、これからの課題である。新聞報道¹⁷⁾ された橋梁を例にすると、全国に約15万7000橋あるとされる中、地方自治体管理の全国13万4400橋もあるとされる。数字は若干異なるが国土交通省が開示した統計によると、15m以上の橋梁は全国に15万7000あり、国土交通省直轄となる高速自動車国道の占める割合は4%、直轄国道は8%、補助国道は8%、都道府県道は22%、市区町村道は58%とある。都道府県道と市区町村道に架かる15m以上の橋梁数は全体の80%となる。通行規制がなされている橋の数は平成24年1月現在で全国1379橋となっており、このうち市区町村道は1215橋もある⁹⁾。いずれの数値をみてもインフラストラクチャーの予防保全は、地方政府の課題となっていることがわかる。

前述の課題に関しては、2008年頃から、横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センターで行われた文理融合型共同研究の場で、政府中枢を諮問する財政学者らとこの問題を学術的に協議した。財政系メンバーの一人は、国会公述もしてくださった。我が国の財政システムは2010年に改正され、地方政府への補助金支給に関する一括交付金制度が改革された。すなわち、社会資本整備総合交付金制度が施行され、このうち、地域活力基盤創造交付金制度の一つに、前述の長寿命化修繕計画策定事業が位置づけられ、道路財源も充てられた。これにより、地域の実情を反映した柔軟で効率的な社会資本整備が可能となった。インフラストラクチャーの保全を行う地方政府に補助金が支給される財政システムになったのである。平成24年4月時点で、地方自治体1,757団体のうち、点検（定期点検および緊急点検を含む）を実施している自治体は1,618団体となった。うち、都道府県47団体は全自治体で点検実施（100%）、政令市19団体も全自治体で点検実施（100%）、市区町村1,690団体のうち1,551団体で点検実施（92%）と、橋梁の点検は全国的に大きく進んだ⁹⁾。通行規制されている橋の数がこの数年で増えたように見えるが、もとよりメンテナンスできずに危険になっていた橋が、点検により数多く見出されたと解釈すべきであろう。安全なインフラストラクチャーにするための進歩の過程と言える。公共物を大切に自治体が市民の安全と安心を支えて栄えるという、あたりまえの構図が、ようやく行政として可能になった。20世紀から学術的議論がなされていたことではあるが、改革は21世紀に入ってから10年以上もかけて進化したわけであ

る。この時期は、政局の混乱が甚だしい時期でもあった。民主主義国家の改革には、学術に基づく正しい見解の公表と理解活動が必須であることを記し、この国が衆愚に陥らないよう、警鐘しておきたい。

3 我が国の財政事情と 新たな公共事業

前述のとおりインフラストラクチャーの予防保全を行うための制度改革は進んだものの、未だ地方政府による保全活動が完全に実施可能になったわけではない。地方政府を中心とした地域のビジネスモデルが未確立である。地域のビジネスモデルを成立させるためには財源が必要である。しかしながら中央政府の巨額財政赤字が、財源用意の障碍になっている。そこで、我が国中央政府の巨額財政赤字について理解を深めてみたい。

日本銀行調査統計局の主要部門・取引項目残高表（2011年12月末）¹⁰⁾ をリアレンジして作成した、日本国金融資産の貸借対照表を表1に示す。この表には、例えば政府（地方政府も含む）の累積負債が1098.8兆円と負債の部に計上され、累積資産が473.7兆円と資産の部に計上される。差し引き625.1兆円の債務超過があると純資産の部に負の数値で計上される。日本国全体の金融資産の状態を全て示すには、政府、金融機関、非金融法人企業、民間非営利団体、そして家計の各部門を同様に整理すればよい。貸借対照表の会計計算原理は熱力学第一法則にあるエネルギー不滅の法則に似ており、資金価値不滅の法則で平衡計算を行う。借方（資産合計）＝貸方（負債・純資産合計）と平衡（バランス）するように国内純資産合計額を求めると、その数字は253兆円となる。つまり日本国全体として253兆円の剰余金を保有するのである。誤差脱漏があり完全合致はしないが、国内純資産合計額にほぼ相当する額が、対本邦海外純資産として－247.2兆円と計上されている。つまり国内の剰余金は海外に投融資され、海外諸国は本邦に対し正味247.2兆円債務超過になっている。企業会計と同じく剰余金の安易な使用はできない。諸外国の経済が破綻する恐れがある。我が国の特徴は、家計の純資産が1139.6兆円と巨額である点を指摘できる。つまり日本人は働いて良く貯蓄をするので、貯蓄資金がフリーズしないよう政府は公債を発行して金融機関経由で資金を借入し、その分を歳出して国内に資金循環を生じさせている。それでも資金が国内に余るので、海外にも投融資して国際的な資金循環を生じさせている。投融資の回収が行われている結果、日本国の国際収支の内、所得収支が黒字化している。経常収支を相償としなければ為替は円高となる。手段は貿易収支の赤字化であるので、為替相場の適正化には輸入を促す内需の拡大が必

要であろう。政府単独でみると会計状態は最悪に見えるが、日本国全体は、きわめて健全な財務体質を持っているのである。善意、誠意、勤勉をモットーとする日本国民の、戦後の長年の活動成果により、我が国は世界最強の財務体質を有する国家になれたとも評価できよう。企業経営において決算書の一部をなす貸借対照表は、その企業の会計状態を正しく評価する上で重要な経営指標である。日本国の経営者は日本国民であるから、正しい国家経営にも、日本国金融資産の貸借対照表を、参考にすべきである。

2008年9月に起きた米国発の金融危機、いわゆるリーマンショック以降、政府は定額給付金など緊急財政歳出を行った。また政権交代後は、「コンクリートから人へ」の掛け声の下、公共事業を大幅に縮減し、子育て支援等直接家計への給付を増額した。これらの財政措置の過程で日本国の金融資産がどのように変化したか、図1に示す。図より、政府純資産における債務超過額は約140兆円増えた分、家計および金融機

関の純資産は増え、非金融法人企業の純資産は減少したことがわかる。金融機関と家計の純資産増加額合計が政府借入増加額総計を越え、2011年12月末に約159兆円の増加を示した点は興味深い。この分、非金融法人企業の純資産が減少し、国内一般企業の経営が厳しい局面に入っていることが、マクロに理解できる。そのまま放置すればフリーズされてしまう家計の純資産が増えたので、政府は公債を発行し、金融機関から資金をさらに借入し、歳出を行う必要があるとも言えよう。政府と家計との間で資金が行き交いしているだけでは国内景気は良くならない。資金の流れから外れた民間企業の仕事が減る。つまり非金融法人企業の純資産が減少し続ける可能性を指摘できる。そうすると、国民の創意工夫の場である国内雇用機会も減る。大学卒業者の就職活動は至難を極め、親の失業により貧困にあえぐ小中学生が増える事態になるのも理解できる。

図2には、日本国政府の一般会計歳出額と国内景気の指標

表1 日本国金融資産の貸借対照表 (2011年12月末)

借方		(単位: 兆円)		貸方	
資産		負債		純資産	
政府	473.7	政府	1098.8	政府	-625.1
金融機関	2801.1	金融機関	2780.7	金融機関	20.4
非金融法人企業	818.5	非金融法人企業	1136.9	非金融法人企業	-318.4
民間非営利団体	55.8	民間非営利団体	19.3	民間非営利団体	36.5
家計	1499.5	家計	359.9	家計	1139.6
		負債合計	5395.6	国内純資産合計	253.0
		純資産		負債・純資産合計	5648.6
資産合計	5648.6				
対本邦海外資産	352.8	対本邦海外負債	600		
		対本邦海外純資産	-247.2		
対本邦海外資産合計	352.8	対本邦海外負債・純資産合計	352.8		

日本銀行調査統計局：主要部門・取引項目残高表 (2011年12月末) より作成

注) 金融資産のみの貸借対照表であり、不動産等非金融資産は含まない。

政府には地方公共団体、社会保障基金も含む。

純資産＝資産－負債。ここで、純資産のマイナス値は債務超過であることを示す。

貸借対照表の原理により、純資産合計額＝対本邦海外純資産。合致しないのは誤差・脱漏によると思われる。

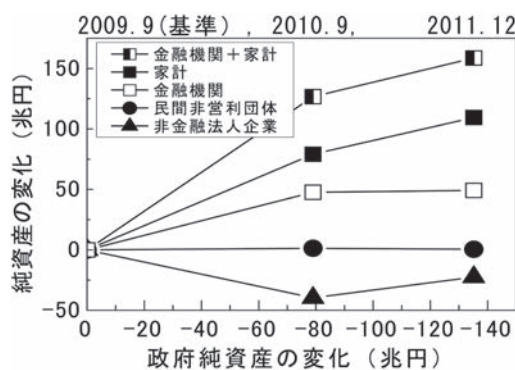


図1 政府純資産の変化に対する、家計、金融機関、民間非営利法人、非金融法人企業の純資産の変化

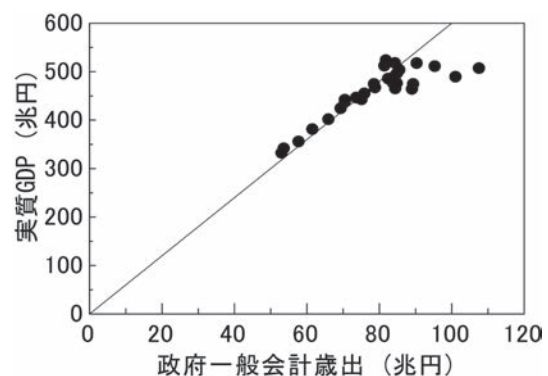


図2 政府一般会計歳出額と実質国民総生産額の関係

である実質国民総生産（GDP）額の関係を示した。経済原理として、政府が歳出を増やせば国内景気が良くなって、実質GDPも増加するはずである。1990年ころまではその関係が成立していた。しかしその後はGDP成長が停滞し、最近では政府が歳出を増やしても景気が良くならない現象が生じている。公共事業の大幅縮減に代表されるように、国内景気を刺激しない政府歳出を増やしているためと解釈できる。

図3には、実質GDPに対して政府税収がどのように変化したかをプロットしてみた。実質GDPが増えれば、税収も増えるはずであるが、その原理が成立していたのは1990年代までである。その後は実質GDPの増加にも関わらず、税収が減少している。つまり、財務体質世界最強とも言える我が国において国内景気が沈滞しているのは、税収不足による巨額の財政赤字が世論を戦々恐々とさせ、歳出に制限が加わったためとも解釈できる。政府とは、予算を予算どおりに当該年度内に使いきってしまう機構である。税収を得たら、その額を当該年度内に使いきってしまうのが原則であるから、税収を政府が蓄財するわけではない。適正な税収の増加を可能とするセンスよい歳出で国内に富を再配分する政府の機能が、誤った政策の継続により不全に陥ったとも言える。結果、格差拡大等、昨今の各種社会現象が起きていると解釈できる。

いうまでもなく、税収／GDP比の適正化が、成長性ある日本経済の再興に向けた課題である。建設国債は後世に資産を遺すので一定額の発行ができる一方、赤字を補填するだけで後世に残らない経費のために赤字国債を発行するのは、財政法で原則禁止している。このため、毎年赤字国債発行のため、特例国債法を国会決議しなくてはならない。これが政治的取引に使われ、政局が不安定になる原因である。これらの社会運営上の障碍を排除するためには、財政法や日銀法の見直し議論が必要のように思える。

2012年8月には消費税増税法案が国会決議された。これまで生産人口とカウントされてきた、いわゆる団塊の世代の定年退職により、多人数が年金受給者と化す。第一義的には年

金・医療・介護に関わる歳出が自動的に増えるので、それを賄うための消費税増税と説明されてきた。年金は、家計への直接歳出に該当する。政府と家計の間の資金の行き交いだけでは国内雇用の方は失われる。これからの日本国を運営する若い世代の国民は、公共事業をはじめとする、雇用創出への政府歳出こそが日本再生への課題であることを、正しく理解して欲しい。政府資金の流れが社会保障に重点化せざるを得ない状況下において、企業経営者はその事業領域を見直す時期にある。政府は歳出を増やしているのであるから、公共事業依存体質の企業から、日本型福祉社会樹立に貢献しうる価値創造型企業にシフトすれば、企業会計の悪化を未然に防げる可能性が高まる。産業構造の改革に成功すれば、日本経済の再興も可能のように思える。

議会で財政決議をするには、政治に関わる。昔の日本の大票田は農村にあった。政治モデルで表現すれば、この時期の日本は「農村国家」と言えよう。終戦後高度成長期に入り、農業は機械化され生産性が向上した。農業人口は減り、代わりに建設業が台頭した。票田は地方の建設業人口に移った。この時期の日本は、政治モデル的に「土建国家」とできる。2008年の政権交代を機に、現在は「脱土建国家」と認識される。都市・市民の浮動票が政治を動かす時代であるので「都市・市民国家」になったともいえよう。このような有権者をバックグラウンドにして、国民のコンセンサスが得られる公共事業とは一体どのようなものがあるだろうか？ 2011年9月に財政学者の井手ら¹¹⁾は、「雇用連帯社会—脱土建国家の公共事業」と題する著書を発行し、問いかけをしている。日本は、国民個人の生存権、自由権、幸福追求権を保障する民主主義国家である。そうあり続けるためには、雇用保障された人々が連帯できるメカニズムを備えた社会をさらに発展させなければならない。井手らの著書¹¹⁾のタイトルは、まさに日本国民への重要なメッセージである。一時喧伝された公共事業悪玉論を早急に脱し、新たな公共事業のあり方について、未来志向の議論をなすべき時である。我が国は、課題先進国である。世界に前例のない新たな社会を築く創造的な機会に恵まれたと、前向きに受け止めればよい。

少なくともすでに建設したインフラストラクチャーの維持・管理は、国民の安全・安心に必須不可欠である。インフラストラクチャーの予防保全は、新たな公共事業の一つとして、推進すべき課題である。

4 予防保全法の具体例

鋼橋・鋼構造物の予防保全を可能とする具体的方法例が検討されている。塗装鋼構造物については、鋼道路橋塗装・防食便覧³⁾に詳しい説明がある。塗膜の劣化状態を監視して活

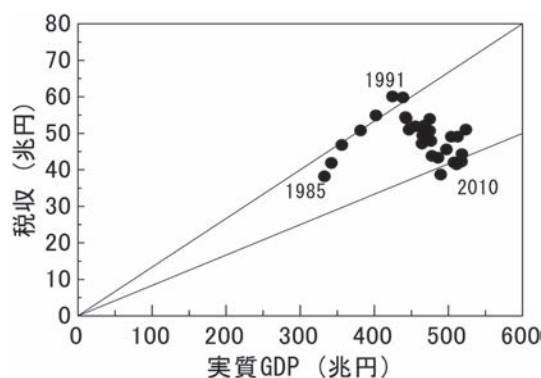


図3 実質国民総生産額と政府税収の関係

膜と呼ばれる塗膜残留層があるうちに再塗装を施すのが、塗装橋梁のメンテナンス法である。最近では再塗装にかかるコストを下げるため、フッ素系塗料など耐久性の高い塗料も用いられるようになった。防錆の範囲で維持・管理するので鋼材の腐食は一切起こらないはずである。塗装橋梁の架け替え理由を腐食が原因とする割合が大きいことが知られているが、これは長年メンテナンスができなかった地方財政の窮状によると解釈すべきであり、鋼構の塗装技術そのものの不備に帰着するステレオタイプな議論は、的外れである。やむなく鋼材腐食が起きてしまった塗装橋梁の補修塗装工法は、次に述べる耐候性鋼の補修塗装工法でカバーすればよい。

同書³⁾には無塗装耐候性鋼橋梁（以下、無塗装橋梁）についての説明も掲載されている。ここでは、著者らが関わった無塗装橋梁について、JSSC-TR73⁴⁾やJSSC-TR86⁵⁾の基本思想を要約し、入門者への一助としたい。いうまでもなく、保全の実施責任は設備管理者にあるので、前記の学術的成果を参考に、設備管理機構毎に規程を用意し、維持・管理を行うことになる。それぞれ異なるので、ここに記す方法のみが汎用化されたわけではない点、あらかじめ留意いただきたい。

4.1 無塗装橋梁の腐食リスク制御とエンドポイント

耐候性鋼とは、さびでさびを抑制するという性質を有する耐食低合金鋼の一種であり、長年の曝露により形成されるさびは防食的保護機能を有する¹²⁾とされる。一昔前まで、耐候性鋼材には安定さび (magic rust) が形成するので腐食速度がゼロになるという認識があった。しかし、これは誤りである^{2,4,5)}。2002年3月に改定された道示²⁾には、「耐候性鋼には鋼材に適量の合金元素を添加することで、鋼材にちみつなさび層を形成させ、これが鋼材表面を保護することで以降のさび進展が抑止され、腐食速度が普通鋼に比べて低下する」と正しく解説された。

この鋼材の特徴を活かして造られる橋梁は一般に塗装をしないので、無塗装耐候性鋼橋梁と称される。無塗装橋梁とか耐候性鋼橋梁と略してよい⁴⁾とされた。この鋼材の腐食リスクを正しく認識し、耐候性鋼材の対環境抵抗性能を適切に活用すると、塗装橋梁では必須とされる定期的な再塗装を省略可能な、無塗装橋梁を造ることができる。ライフサイクルコストと地球環境負荷を最小化でき、もって橋梁としての価値も最大化できるので、適用が広がっている。

無塗装橋梁の腐食リスクの扱い方を検討していくにあたり、良くない出来事、すなわちエンドポイント¹³⁾の設定が必要となる。「無塗装耐候性鋼橋梁が腐食により供用設計期間以上の寿命を実現できなくなる事態（例えば、設計供用期間に至る以前に生じた回復不能な腐食損傷によって橋梁の閉鎖や落橋が起きる事態）」をエンドポイントーA（以下、EP-A）

と設定するのを提案した¹⁴⁾。一般に橋梁の設計供用期間は100年と設定され、寿命は100年を超える半永久が期待される。

前述においてEP-Aとしたのは、それ以外にも部材の経年劣化により生じうる種々の良くない出来事をエンドポイントと設定できるからである。今後の議論によりEP-B以降の設定やそれに対応する方策を順次検討していけばよい。

4.2 リスク制御点の設定と技術の充実

無塗装耐候性鋼橋梁にてEP-Aを回避する予防保全法を可能とするため、様々な利用技術を開発した。一般公式化のため、リスク制御ポイント (Risk Controlling Point, RCP) を以下のとおり設定し、対応する技術を充実させた。

- (RCP-A)：維持管理負荷を最小化できる橋梁の計画・設計法、
- (RCP-B)：供用中の監視を可能とする点検・診断法、
- (RCP-C)：万が一異常に遭遇した場合に適用できる補修・補強法、

これらが揃い保障感が高まれば、安全に腐食リスクを冒せるようになる。すなわち、ライフサイクルコスト最小化への取り組みを、安心して遂行できるようになる。

図4に、各RCPの位置づけを示すブロック図と関係する技術の例を示す。(RCP-A) 計画・設計段階においては、架橋環境の腐食性、すなわち環境の作用力を求め、その作用力に対抗できる抵抗力をもつ耐候性鋼を選ぶ。従来からのJIS-SMA耐候性鋼材に加え、耐塩害性を高めたニッケル系高耐候性鋼各種が材料選定の候補となる。

一連の材料選定作業を効率的に進めるため、耐候性鋼材の腐食抵抗を示す耐候性合金指標計算法が提示された¹⁵⁾。これを取込み実用化した腐食減耗予測ソフト^{16,17)}の出力例を図4の(RCP-A)に示した。この技術により無塗装橋梁の適用が受容可能なリスク範囲にあるか否か、事前に検討できるようになった。基準となるJIS-SMA耐候性鋼材の一年間の腐食減耗量を用いると、作用力を局部環境腐食性指標として定量化することができる。この考え方に基づき、短期曝露試験による耐候性鋼材の新しい現地適用性評価方法^{4,5)}を提案した。この方法で得た局部環境腐食性指標を用いる腐食リスクの照査指針も明らかにした^{4,5,18,19)}。

無塗装橋梁が(RCP-B) 供用段階に入ると、計画・設計段階で想定したとおりに腐食が抑制されているかどうかを実証的に監視する必要がある。最小限の維持管理には定期的点検が必須である。耐候性鋼橋梁の場合、生じたさびの状態で正常か異常か判定できる。定量的な手法として、図4の

(RCP-B) に示したイオン透過抵抗測定器を用いる診断法を実用化した^{20,21)}。1989年公表の本機による知見²⁰⁾を指針にして、半定量的な目視外観観察法など各種さび状態の判定基準も体系的に用意した^{4,5,22)}。

万が一の異常に対する用意が、(RCP-C) コンティンジェンシー・プランである。用いた耐候性鋼材の抵抗力よりも環境の作用力が強い場合には腐食速度が速くなる。さびは厚く成長し、いわゆる異常を示すさび²²⁾ (以下、異常さび) を形成する。異常であっても損傷ではないので、落ち着いて原因を究明し、その原因を排除すればよい。

補修が必要と診断された場合には、当該部位に補修塗装を行う。耐候性鋼材のさびは一般に固着性が強く、補修塗装の下地処理が困難な場合があった。そこで、簡便かつ確実な下地処理法として、図4の (RCP-C) に示すダイヤモンド付スレンスロータや、多少のさびが残留していても効き目のある補修塗装用ジンクリッチプライマーを開発し、実用化した²³⁻²⁶⁾。これらにより、無塗装橋梁の腐食リスク対応技術が一通り揃った。

4.3 防食セキュアネス・マトリックスの設定と展開

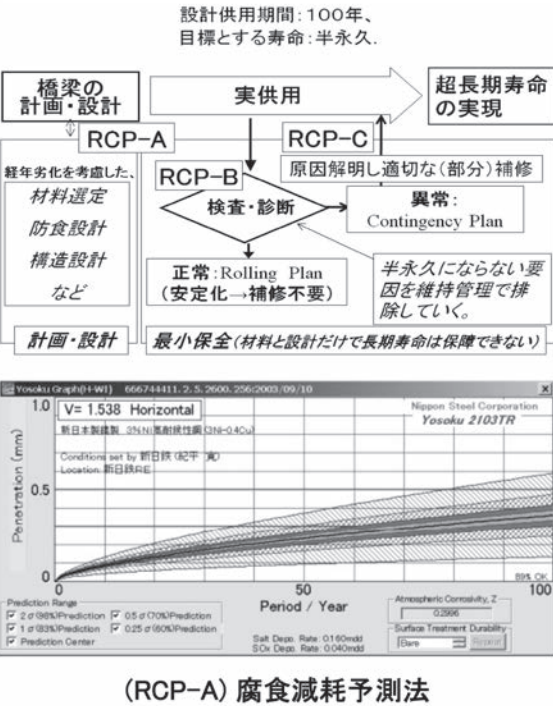
公共事業体が地域住民に対しリスクなる用語を用いて橋梁の安全性を説明するのは、世論に危険と誤解されるリスクがある。(Secureness) = (Riskiness) の関係⁸⁾があるので、リスクベース工学の本質を尊重した上で、あえて防食セ

キュアネス・マトリックスと称し、図5のような設定を提案した^{4,28,29)}。すなわち、個別橋梁状態の健全度に相関のあるさび状態ランクを縦軸にとり、当該橋梁における状態の広が

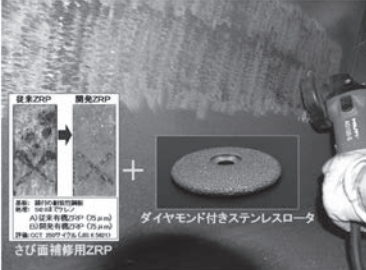
状態	ランク	状態の規模			
		(a) 微小 Micro	(b) 局所的 Minor	(c) 局部的 Local	(d) 全面的 Macro
正常 (Ⅰ)	A	計画・設計時策定の 維持管理計画に従う			
	B				
	5				
	4				
要観察 (Ⅱ)	3	原因究明、維持管理水準の見直し			
	2				
異常 (Ⅲ)	1	原因究明、維持管理水準の見直し 必要に応じ損傷回避への補修検討			
損傷 (Ⅳ)	0	補修・補強の検討		更新の検討	

図5 防食セキュアネス・マトリックス (案)
ランクAはさび安定化補助処理皮膜や塗装塗膜が初期に比べ顕著な変退色の見られない水準；ランクBは前記の皮膜に変退色が生じている水準；ランク5、4、3は鋼部材表面にさびが形成しているものの腐食速度が十分遅く、無塗装橋梁として正常と判断できる水準；ランク2は鱗状さびなどが観察され、曝されている環境の腐食性がやや高いと示唆される、要観察と判断すべき水準；ランク1は、層状剥離さびなど、厚いさびの形成が見られ、腐食速度が高まっていると示唆される、異常と判断すべき水準；ランク0は、部材として要求される機能が阻害されるに至った損傷と判断される水準。橋梁中最も劣位の水準の広がり規模を (a) 微小から (d) 全面的まで4段階で表わし、腐食リスクのポジショニングを行う。なお、局所的な腐食であっても構造物全体に及ぼす影響が大きい部位であれば (d) 全面的としてリスク・ポジショニングし、維持・管理上の適正な判断に繋げる。

ミニマムメンテナンス橋梁実現へのリスク制御ポイント



(RCP-B) 定量的検査法



(RCP-C) 補修塗装法

図4 ミニマムメンテナンス橋梁実現へのリスク制御ポイントRCP-A、BおよびCの設定と、開発したリスク制御ツールの例

り規模を横軸にとって、状態に応じた予防保全的対応指針を記入した表である。リスク管理は安全領域内にて行うものなので、予防保全は損傷に至る以前の異常段階までに講ずるのが標準となる。本提案の手法は、予防的最小措置 (Minimum Maintenance) を施すためのセキュアネス表現法であり、数年の内に落橋が起きうるリスクの高い状態をもカバーする、一般の損傷リスク・マトリックスとは異なる。後者では損傷や落橋により被る社会的・経済的被害規模を考慮するが、前者はそのような事態を一切起こさせないための、健全度管理法である。

防食セキュアネス・マトリックスを用いると、地域に分散する複数橋梁の腐食状態を一目で全容把握できる。図6は地域橋梁の調査見解を地図上に要約表示した例である。セキュアネスをビジュアルに文書化すると、情報を経営者と共有化することになり、予防保全計画や予算を策定する上でも、地域住民と連携をとる上でも、役立つ。

図7には、部分的に異常を検知したニッケル系高耐候性鋼橋梁の診断結果と補修後状態を要約した²⁷⁾。上部構からの漏水が原因で桁端の微小領域に異常さび発生を検知したが、開発した補修塗装工法を用いて部分補修を行い、セキュアネス・マトリックス上のリスクポジションをナビゲートした。その3年後に検査した結果、橋梁としての防食セキュアネスは十分維持されていることも確認できている。

5 まとめ

銅橋・鋼構造物の防錆・防食分野への入門者がこの分野の大きな流れを知ること、最近の新しい概念を示す書物を読むにあたって一助になろう。まず、本分野の課題である予防保全の実現に向けた学術、技術、政策、そして財源の課題

解決に関わる進捗を整理した。銅橋・鋼構造物の防錆・防食については、今や幾多の技術が揃っている。それにも拘わらず、高経年化による「危ない橋」が全国に多数見出されているのは、防錆・防食等メンテナンス実施のための予算がつかなかったためである。学術による見解が政府の政策転換を促し、さらに財政システムも刷新した。地方政府に多少なりとも予算がつくようになったので、橋梁の点検や長寿命化計画策定が大きく進んだ。今後は計画的にメンテナンスが施されていくようにする、国民による国家経営が必要である。

ただし、最近の報道にもあるように財源不足は深刻である。政府財政の実情について国民的に議論していく必要がある。予防保全の具体的方法は、設備管理責任者の所属する組織により異なる。基本的には、計画・設計時に経年劣化を考

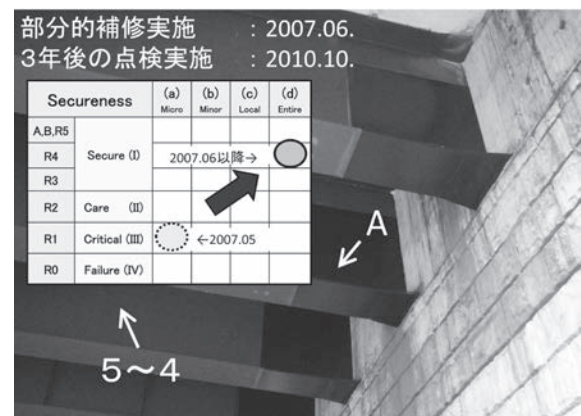


図7 ニッケル系高耐候性鋼橋梁に見出された異常部の補修塗装により生じた状態変化を、防食セキュアネス・マトリックスを用いて表現した例
2007年5月には、桁端部からの塩分を含む漏水により部分的に腐食が進み、異常 (Critical) と診断された。2007年6月に行った部分補修塗装により、その後は橋梁としての健全性が保たれている。補修工法には、図4のRCP-Cに掲載した方法を用いた。

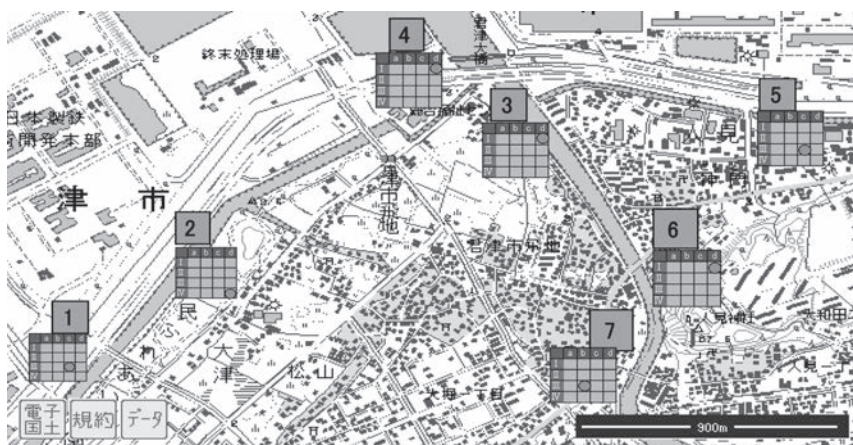


図6 防食セキュアネス・マトリックス・アイコンを用いて地域橋梁の腐食リスクを把握した例
橋梁1,7,5はメンテナンスが必要、橋梁2はダメージ大、橋梁3,4,6は健全と、ひと目で把握できる。

慮すること、供用時には定期的な点検・監視を行うこと、異常が見出されたらその原因を究明して原因を排除すること、の3点を体系化すればよい。腐食を加速する原因の排除が困難と判断される場合には、防食措置を追加するなど、適正な措置を施す。万が一のためのコンティンジェンシー・プランとして、必要な技術も用意しておくのがよい。これらPDCAを回すことにより、鋼橋・鋼構造物の寿命を半永久化することも不可能ではない。解説では情報開示が進んでいる橋梁を主に説明をおこなった。他の公共設備・民間設備も含め、インフラストラクチャーの予防保全を、新たな公共事業の一つとして推進するのがよい。各地の雇用機会も増えるので、地方経済の活性化や政府税収の増加にもつながるであろう。

謝 辞

本文に記載の、横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センターで行われた文理融合型共同研究は、新日本製鐵株式会社（現、新日鐵住金株式会社）からの研究資金提供により賄われた。記して謝辞に代えさせていただきたい。

参考文献

- 1) 読売新聞, (2011.8.30) 9.
- 2) 道路橋示方書・同解説, I共通編, II鋼橋編, (社) 日本道路協会, (2002.3)
- 3) 鋼道路橋塗装・防食便覧, (社) 日本道路協会, (2005.12)
- 4) テクニカルレポート 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術, 日本鋼構造協会, (2006.10) 73.
- 5) テクニカルレポート 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全, 日本鋼構造協会, (2006.10) 86.
- 6) 信國隆裕, 近藤智哉: 立法と調査, (2007.2) 264, 61.
- 7) 夕刊読売新聞, (2008.12.16) 17.
- 8) 紀平寛: 無塗装耐候性鋼橋梁の防食とセキュアネス, ふえらむ, 14 (2009), 292-298.
- 9) 国土交通省ホームページ:
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 10) 日本銀行ホームページ:
<http://www.boj.or.jp/statistics/sj/>
- 11) 井手英策編著: 雇用連帯社会—脱土建国家の公共事業, 岩波書店 (2011.9.28)
<http://www.iwanami.co.jp/.BOOKS/02/8/0229160.html>
- 12) 岡田秀弥, 細井祐三, 内藤浩光: 鉄と鋼, 55 (1970), 355-365.
- 13) 中西準子, 益永茂樹, 松田裕之: 演習・環境リスクを計算する, 岩波書店, (2003)
- 14) 紀平寛, 今井篤実, 藤井康盛, 潮田浩作: 材料と環境 2007講演集, C-311 (2007), 311-334.
- 15) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼慎, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 土木学会論文集, 738 (2003.7) I-64, 271-281.
- 16) 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: 土木学会論文集, 780 (2005.1) I-70, 71-86.
- 17) H.Kihira, T.Senuma, M.Tanaka, K.Nishioka, Y.Fujii and Y.Sakata: Corrosion Science, 47 (2005) 2377-2390.
- 18) 中山武典: ふえらむ, 13 (2008), 804-808.
- 19) 紀平寛: 無塗装橋梁用鋼材のプロダクト・セキュアネス向上への取り組み, セイフティ・エンジニアリングSE Report, 36 (2009.6.1) 2, 通巻154号, 10-15.
- 20) H.Kihira, S.Ito and T.Murata: Corrosion, 45 (1989), 347-352.
- 21) 今井篤実, 立花仁, 松本洋明, 紀平寛: 第29回鉄構塗装技術討論会発表予稿集, (2006.10), 1-6.
- 22) 紀平寛, 塩谷和彦, 幸英昭, 中山武典, 竹村誠洋, 渡辺祐一: 土木学会論文集, 745 (2003.10) I-65, 77-87.
- 23) 平松幹次郎, 三塚喜彦, 今井篤実, 相賀武英, 松本剛司, 永井昌憲, 里隆幸, 木下俊也, 紀平寛: 第29回鉄構塗装技術討論会発表予稿集, (2006.10), 7-10.
- 24) 松本剛司, 里隆幸, 永井昌憲, 平松幹次郎, 今井篤実, 相賀武英, 木下俊也, 紀平寛: 第30回鉄構塗装技術討論会発表予稿集, (2007.10), 67-70.
- 25) 松本剛司, 永井昌憲, 里隆幸, 平松幹次郎, 今井篤実, 相賀武英, 木下俊哉, 紀平寛: 第27回防錆防食技術発表大会講演予稿集, 201 (2007), 111-114.
- 26) 平松幹次郎, 今井篤実, 相賀武英, 松本剛司, 永井昌憲, 里隆幸, 木下俊哉, 紀平寛: 第27回防錆防食技術発表大会講演予稿集, 202 (2007), 115-118.
- 27) H.Kihira, A.Imai, M.Hiramatsu, T.Aiga, T.Matsumoto, T.Sato and M.Nagai: ECS Transaction, (2009.2), 16 (2009) 43, 115-124.
- 28) H.Kihira: Corrosion Science, 49 (2007), 112-119.
- 29) 紀平寛: 材料と環境2006, A-306 (2006), 105-108.

(2012年10月24日受付)