



入門講座

リスクベース工学入門-5

無塗装耐候性鋼橋梁の防食とセキュアネス

Indices for Securing of Anti-corrosion Performances on Unpainted Weathering Steel Bridges

紀平 寛

Hiroshi Kihira

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所
鋼材第一研究部 主幹研究員
横浜国立大学 客員教授

1 はじめに —リスクと好運、安全と安心—

前報¹⁾の冒頭にて小林により、「我が国では、リスク (risk) という言葉が汎用されているが、本質は理解されていない」とする重要な指摘があった。本稿はリスクベース工学入門という趣旨で依頼された解説であるので、この機会に日本語なる思考ツールの中の、リスクなる外来概念の位置づけや狙いについて今一度考えてみたい。確定的なものではないのだが、今後の発展的議論のため、思うところをたたき台として提示する。

まず「安全第一」とされる所以は、例えば戦後になって日本国憲法の最高法規となった基本的人権の尊重なる人類の普遍の自然権思想にあると言えよう。この憲法規定は、誤りある政策や行為の結果生じた膨大な犠牲者の人命や自由、そして幸福追求権と引き換えに成立したものである。米国国是は Freedom & Democracy、日本国国是は Basic Human Rights と選択された過去は変えられない。我が国の場合、敗戦により得た権利と義務である点が特徴的である。この再認識をもとにその本質的意義を深く考えることが、リスク概念を解釈していく上で重要である。

リスクなる用語の語源は、イタリア語の risicare、すなわち「勇気をもって試みる」という意味にある²⁾。P・バーンスタインはその著書であるリスク³⁾にて「人類に未来ある限りリスクが生ずる」と原理を述べている。過去は変えられないので未来を創るために、人類は必然として生ずるリスクを冒さなくてはならない。そもそも未来は不確実なものであるから、リスクをゼロにしたり排除したりすることはできない。

人権がより高く尊重される社会を創るため、組織は安全第一をモットーに、実践可能な安全管理の仕組みを定着させてきた。その中でリスクマネジメントは、人間脳に誘起されるリスク感覚を体系的に言語化・定量化・共通認識化する意義

を与える。経営学においてセリング (販売活動) とマーケティング (売れる仕組み創り) が異なる概念であるように、現場で直面する危険管理と、安全の仕組み創りのためのリスク管理は異なる概念である。前者は戦術的で、後者は戦略的と言える。

リスクなる外来概念が導入され定着し始めているものの、その位置づけは私たちの思考ツールである日本語の中で十分整理しきれていないと感ずる。多くの国語辞典ではリスクを単に危険とし、説明は不十分である。そのような中、正田の著書である安全心理学⁴⁾において、日本語概念の危険には以下の2つの側面があると説明された。すなわち、

- ①危険性といわれるような事態の中に本来的に存在し、現実生起する危険 (hazard)。
- ②危険感といわれるような、われわれが行動の結果に賭けるとき心理状態、危険事態の中に本人があえて入り込んでいく危険 (risk)。

この見解により、辞書等に誤訳が記載されているのではなく、日本語の危険なる用語に意味の二重性があったと再認識できた。普段何気なく使っている同一用語の中に異なる概念が共存するとは、気付きにくいものである。

技術的原理に基づき照査をなしうる安全性の程度 (safeness) や危険性の程度 (hazardousness) を横軸にとり、心理的感覚である安心感の程度 (peacefulness) や不安感の程度 (anxiousness) を縦軸にとって、脳 (B) から誘起される概念をそれぞれ配置してみた。図1 (a) にて、危険感の程度 (riskiness) の位置づけは、危険性と不安感の中間に配置するのが妥当であろう。するとその反対側に保障感の程度 (secureness) を配置することができる。ここで保障感とは、要求される多種多様な要素の信頼性が照査・確認された

とき生ずる、不安の少ない感覚としておく。

不安感の高い業務であっても、安全性を確保して行えば好運な結末に至る。逆に安心したまま危険性の高い業務を行うと不運な結末に至る。それぞれ対応する象限に好運感や不運感の程度 (fortunateness、unfortunateness) を示す軸を配置した。

図1 (a) を135°左回転して+X'、±Y' 軸のみ抽出すると、図1 (b) が得られる。入力変数となる危険感の程度 (+X' 軸) と、好運感や不運感の程度 (±Y' 軸) とで直交座標ができた。何らかの関数により X' と Y' の関係が結ばれると考えると興味深い。例えば図中の曲線のような非線形関数になるのだろう。

リスクなる用語にも意味の二重性がある。リスク学用語小辞典⁵⁾やリスクマネジメント用語辞典⁶⁾にてそれが示唆されている中、リスクなる用語は意味の二重性に配慮なく使われ、混乱してしまう。国際的な各種規定にも広くその傾向がみられ、今やその修正は不可能に近い。本来は以下の通りと解釈すれば、議論の際に障害が減るだろう。

Risk＝危険感。前向きなチャンスに付随する危険と思われる事態について、その危険性または安全性を確信できない時に誘起される、ハラハラドキドキ感や不安感を伴う心理的感覚。危険性が高まっている場合には危機感ということもある。

Riskiness＝危険感の程度。客観性を有する定量的または半定量的な指標で表すことができる。例えば、

$$Riskiness = L.O.F. \times C.O.F. \dots\dots\dots (1)$$

や、定義された望ましくない状態に至る確率

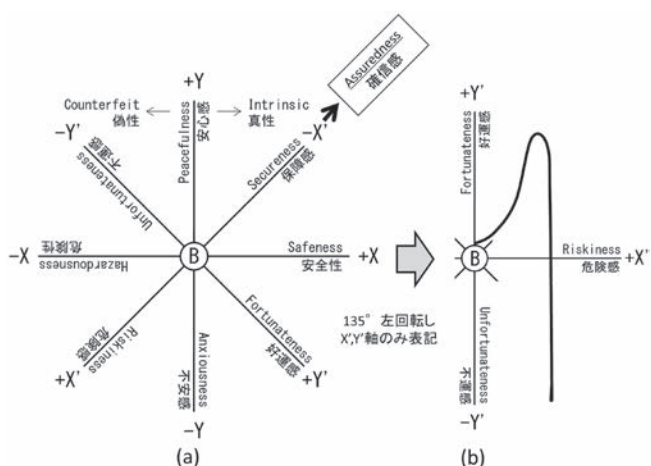


図1 危険感と好運感、安全性と安心感など、外来概念リスクの整理と再認識

などであるが、これら危険感の程度を示す指標も単にリスクと世界中で言われてしまっている。なお、L.O.F.はLikelihood of Failure [故障などの発生確率、厳密には人間感覚も含めた確からしさ(尤度)]、C.O.F.はConsequence of Failure [故障などが発生した場合に想定される被害の大きさ(影響度)]である。

リスクネスの指標化指針が示されたことにより、リスクベース工学が成立したと言えよう。さらなる発展を日本語で障碍なく促すために、基本概念の体系的仕分けと適切な用語定義が重要になっている。リスクとリスクネスは仕分けして、複合的な議論をより明解化していくのが良い⁷⁾。

安心なる用語にも意味の二重性がある。前述のとおり、危険なのに安心してしまう偽性安心 (counterfeit peacefulness) と、安全性が照査され保障感の高まりに伴って感ずる真性安心 (intrinsic peacefulness) である。さらに図1 (a) では確信感 (assuredness) を、保障感 (secureness) を高めた結果得られる感覚と位置付けた。学んで創れば自信が付き、実践して体験すれば確信を得る。

組織や個人の能力により、冒しうるリスクは異なる。受容可能なリスク (acceptable risk) を大きくする人材育成や技術開発は、競争力向上への鍵である。確信力ある人材チームの編成と責任あるリーダーシップ、それを支え普及を促す組織的・社会的制度が必要となる。個人にあっては、自己の強みをさらに活かす創造、訓練、準備などによって、リスクを乗り越える力を高めるのが良い。

我が国のコンプライアンスが目指すものは、憲法最高法規の基本的人権を尊重しあう社会の実現にあると言えよう。国民はその本質を世界に伝える使命も担っている。人権を尊重しあい、人を活かしあう社会こそ、真性安心社会 (society of intrinsic peacefulness) と言えよう。未だ完璧には遠いのが実情であるが、その水準を高めるには幾多のリスクを安全に冒す未来創りが必須である。

人権の尊重とその保障は異なる概念である。保障と保証も異なる概念である。自らの人権を保証しなくてはならないのは自分のみであるわけだから、保障感の高い未来社会を創るには、各々の自由を使って協力し合い、日々スパイラル・アップしていくのが良い。リスクベース工学の意義や狙いは、安心保障力を高めることにあると言えよう。

2 鋼橋腐食リスクに対応できる 社会的制度創りの進捗

私たちの暮らす社会は人工物で満たされている。利便性や効率性へのニーズにより技術は日々進化し、その度合いは巨大化への一途を辿っている。全ての設備材料は環境と化学反応を起こし、期待される機能は経年的に劣化する。鉄鋼材料も例外ではなく、古くより腐食が起こるのは自明の理として知られていた。それにも関わらず、橋の設計基準書である道路橋示方書・同解説（以下、道示）において腐食や疲労に対する考慮の必要性がはっきり明記されたのは、21世紀に入ってからのことである。

ただし、以前から道示には、腐食環境に配慮して最小板厚を選べるとする規定があった。より厚い鋼板を橋梁部材に使えば鋼橋梁としての耐腐食性が上がる。問題はそう伝える説明が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り、腐食リスクへの適切な対応ができないう、タブーに満ちた偽性安心社会が生じた。

2002年3月に改定された道示⁸⁾において、第5章耐久性の検討が加わり、半永久的な寿命を持つミニマムメンテナンス橋梁実現⁹⁾のため、部材の経年劣化を考慮に入れた設計は必須とする規定が施行された。その後は、工業材料の経年劣化をリスクとして認識しなくてはならなくなった。腐食リスクを社会的に認知したということは、真の安心社会実現へ向けた改革が始まったことを意味する。結果として、鋼橋の分野に大きなパラダイム転換が起きた。

道示第5章には枠組み規定が示されたのみであったので、具体的な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。2005年12月に発行された鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁰⁾（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）¹¹⁾などにて、新パラダイムでの具体的方法論が示されるに至った。

さらにJSSC-TR73には、その第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。その達成は維持・管理実行権限を持つ者によってのみ可能となるので、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¹²⁾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。

この事故を契機に国内の意識は高まり、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(hazardous)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8万橋と報道¹³⁾され、危険感が明確化された。このように2007年には、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、予防保全の策定が開始された年となった。

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るようで、管理責任を担う技術者の悩みは相変わらず大きい。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、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、その整備は十分進んでいない。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はできる状況にない。社会資本全体を視野に入れると、さらに危険感は大きなものとなる。

現在の対応は、偽性安心にあった過去のつけを解消するクライシスマネジメントであるが、この経験は公共構造物の未来創りに活かされるであろう。社会資本の高経年化が進む中、社会的な情勢変化に適切かつタイムリーに対応できる制度改革や技術革新、さらには人材育成への教育制度や研究投資の方針再検討、地方の底力を活かすビジネスモデル確立への工夫や調整などが急務である。

橋梁など社会資本の高経年化を例題にして、真性安心社会の実現にむけた国土政策や予算制度のあり方を、広く国民的に議論するのが良い。完全安全領域内で行う予防保全に転換するのは、環境負荷軽減への一つの鍵であり、また雇用増による地方経済活性化への機会ともなる。これまで官・学・産は、偽性安心の呪縛を解く責任を果たしてきた。真性安心社会実現への適正な措置がとれるか否かは、今や民意を問う政治課題と言えよう。

3 鋼橋の予防保全への リスクベース工学の応用

3.1 無塗装橋梁の腐食リスクとエンドポイント設定

リスクベース工学的アプローチが役に立った事例として、

無塗装耐候性鋼橋梁^{14,15)}のケースを紹介する。耐候性鋼とは、耐食性のある低合金鋼の一種である。一昔前まで、耐候性鋼材には安定さび (magic rust) が形成し腐食速度がゼロになるという認識があったが、これは誤りである¹¹⁾。2002年3月に改定された道示⁹⁾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も良い¹¹⁾。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、定期的な再塗装を省略できる無塗装橋梁を造れる。ライフサイクルコストと地球環境負荷を最小化でき、もって橋梁価値を最大化することができる。無塗装橋梁に取り組んだ理由は、最も難しい点を突破すれば、それより難易度の低い一般の塗装鋼橋も含め、広く鋼構造物の長期耐久化が可能になると考えたことによる。

腐食に関わるリスク指標の扱い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¹⁶⁾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-A (以下、EP-A) と設定するのを提案¹⁷⁾している。一般に橋梁の設計供用期間は100年と設定され、寿命は100年を超えるのが期待されている。

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が考えられるからである。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、順次検討していくのが良い。

3.2 リスク制御点の設定とツールの充実

無塗装耐候性鋼橋梁にてEP-Aを回避する予防保全を容易に可能とするため、様々な利用技術を開発してきた。すなわち、リスク制御ポイント (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・補強法の3点¹⁷⁾の充実である。これらが揃い保障感が高まれば、限界まで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2に各RCPの位置づけを示すブロック図と著者らチームで開発した技術の例を示す。(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¹⁸⁻²⁴⁾が材料選定の候補となる。

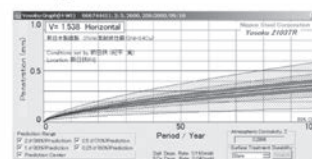
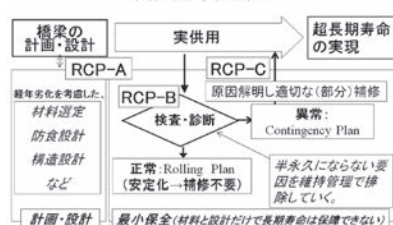
一連の材料選定作業を効率的に進めるため、耐候性鋼材の腐食抵抗を示す耐候性合金指標計算法が提示された²⁵⁾。図2の(RCP-A)には、著者らチームにより実用化した腐食減耗予測ソフト^{26,27)}の出力例を示した。これを用いてリスク限界に迫るのである。この理論では基準となるJIS-SMA耐候性鋼材の一年間の腐食量がわかれば、その環境の作用力を局部環境腐食性指標として定量化できる^{26,27)}。この原理を応用し、短期曝露試験による耐候性鋼材の新しい現地適用性評価方法^{11,28,29)}が提案された。この方法で得た局部環境腐食性指標を用いる腐食リスクネス照査指針も明らかになっている^{11,30)}。

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推移し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2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、著者らチームで実用化した^{31,32)}。1989年公表の本機による知見³¹⁾を指針にして³³⁾、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^{11,33,34)}。

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³³⁾ (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。

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

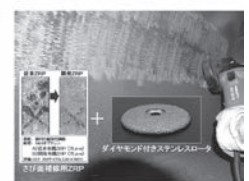
設計供用期間：100年、目標とする寿命：半永久。



(RCP-A) 腐食減耗予測法



(RCP-B) 定量的検査法



(RCP-C) 補修塗装法

図2 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

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2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、著者らチームで開発し、実用化した^{31,35-39)}。これらにより、無塗装橋梁の腐食リスク対応ツールを一通り充実でき、限界まで安全に腐食リスクを冒すことを可能とした。図1(b)における好運感の最大化、すなわちライフサイクルコスト最小化による橋梁価値最大化を安全に取り組むことができる。

3.3 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、誤解を招く危険感がある。前述のとおり、(Secureness) = - (Riskiness) の関係があるので、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3のような設定を提案している³⁹⁻⁴¹⁾。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はるか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

状 態	ラン ク	橋梁の状態規模			
		(a) 微小 Micro	(b) 局所的 Minor	(c) 部分的 Local	(d) 全面的 Macro
正常 (Ⅰ)	A	通常の維持・管理			
	B				
	5				
	4				
	3				
要観察 (Ⅱ)	2	原因究明と排除、経過観察、対応措置			
異常 (Ⅲ)	1	原因究明と排除、損傷回避への対応措置			
損傷 (Ⅳ)	0	補修・補強の検討		更新の検討	

図3 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部分塗装の塗膜が初期と比べ顕著な変退色が見られない水準；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は十分に遅く、無塗装橋として正常と判断できる水準；ランク2は鱗状のさびなどが観測され、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ことが示唆される、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すべき水準。1橋梁中の最も劣位な水準の広がり規模を (a) 微小～ (d) 全面的まで4段階で表して、腐食リスクのポジショニングを行う。

であり、数年の内に落橋が起きうるリスクネスが高い状態で用いる一般の損傷リスク・マトリックス^{1,2)}とは異なる概念に基づく。後者では損傷や落橋により被りうる社会的・経済的被害規模を考慮するが、前者ではそのようなことを一切起こさせないのが前提となる。

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¹⁷⁾。図4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ことは、事業経営情報を共有化することになり、予防保全計画を策定する上でも、地域住民と連携をとる上でも、役立つであろう。

図5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を要約した³⁹⁾。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。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1年後に検査

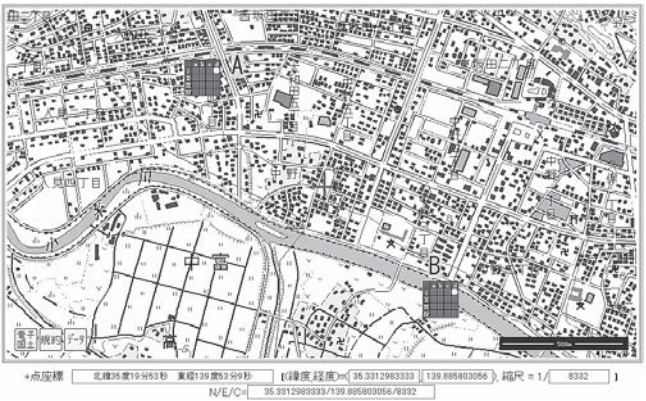


図4 防食セキュアネス・マトリックス・アイコンを用いて地域橋梁のリスク状態を把握した例

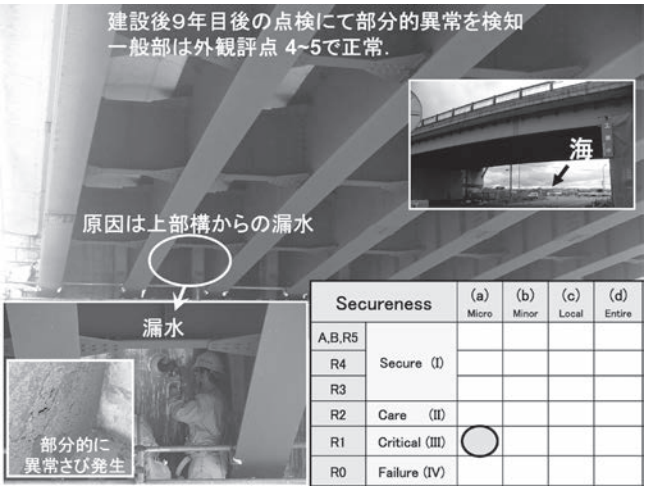


図5 上部構の不具合により微小部分に異常さび発生した耐候性鋼橋梁の状態を、防食セキュアネス・マトリックスに表示した例

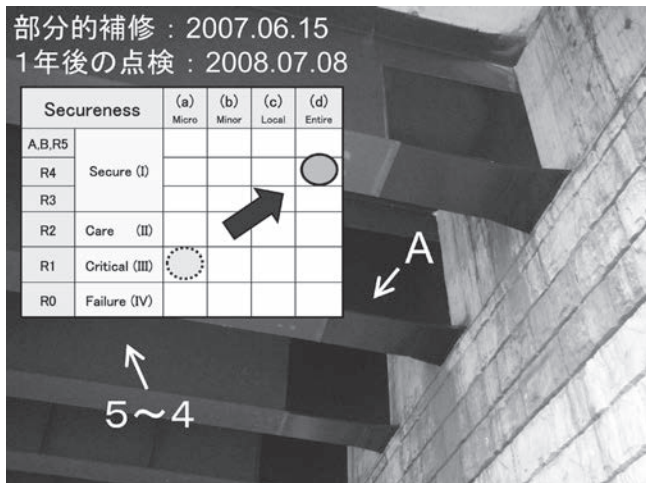


図6 耐候性鋼橋梁の異常部を補修塗装して得た状態変化を防食セキュアネス・マトリックス上に表現した例
当該橋梁の微小領域でランク1の異常にあったが、部分補修により、全的にランク4以上の正常状態にできた。

した結果は図6のとおりであり、橋梁としての防食セキュアネスは十分な高さに維持されている³⁹⁾。

ここでは無塗装橋梁の腐食リスク管理技術の開発例を紹介したが、本手法は塗装鋼構造物の防食管理法へと応用できる可能性がある。対象毎の価値観に応じた維持・管理水準の仕訳などについてさらに議論を進め、可能な範囲を抽出できれば、塗装橋梁等のミニマム・メンテナンス化も進めることができる。

4 まとめ

外来概念リスクの本質を日本語で修得するのは重要である。日本語の危険なる概念や世界的に使われているリスクなる外来概念をよく分解し、モノ(概念)・コト(要素)のコトワリ(理)を会得するのが良い。本報における試行では、リスクと好运、安全と安心に関わる概念関係を、より明確にできた。潜在的危険感を管理するリスクマネジメントは、リスクを安全に冒して価値を最大化する共有戦略の策定と実行に用いるのが良い。

リスクベース工学的アプローチで課題を立案し、チームを作って順次実行した結果、無塗装橋梁のセキュアネスをさらに高める術を数多く創出できた。

リスクベース工学はrisk informed工学¹⁾とも言われる。皆の危険感を言語化・指標化・可視化・体系化して照査可能にする術を会得するのが良い。製品やサービスの提供にあたっては、顧客の心に保障感を誘起させる安心保障力、すなわちブランド力を高め、その価値を世界に遍く広めるのが良い。

参考文献

- 1) 小林英夫：ふえらむ，14 (2009)，42-46.
- 2) 木原重光，富士彰夫：リスク評価によるメンテナンスーRBI/RBM 入門，日本プラントメンテナンス協会，(2002)
- 3) ピータ・バーンスタイン，青山護 訳：リスクー神々への反逆ー(上，下)，日経ビジネス文庫，(2001.8.1)
- 4) 正田亘：安全心理学，恒星社厚生閣 (1985.2.25)
- 5) 日本リスク研究学会編：リスク学用語辞典，丸善，(2008.1.31)
- 6) 上田和勇，亀井克之：基本リスクマネジメント用語辞典，同文館出版，(2004.12.10)
- 7) 紀平寛，関根和喜，藤井康盛，高橋学：第55回材料と環境討論会講演集 (CD-ROM)，D-208 (2008)
- 8) 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)
- 9) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：ミニマムメンテナンス橋く鋼橋編>パンフレット，
- 10) 鋼道路橋塗装・防食便覧，(社)日本道路協会，(2005.12)
- 11) 日本鋼構造協会：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，(2006.10)
- 12) 信國隆裕，近藤智哉：立法と調査，(2007.2) 264，61.
- 13) 夕刊読売新聞，(2008.12.16)，17.
- 14) 岡田秀弥，細井祐三，内藤浩光：鉄と鋼：55 (1970)，355-365.
- 15) 中山武典，藤井康盛，福本博光：ふえらむ，10 (2005)，932.
- 16) 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)
- 17) 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.
- 18) 紀平寛，伊藤叡，溝口茂，村田朋美，宇佐見明，田辺康児：材料と環境，49 (2000)，30-40.
- 19) Kihira, H., Usami, A., Tanabe, K., Ito, M., Shigesato, G., Tomita, Y., Kusunoki, T., Tsuzuki, T., Ito, S. and Murata, T.: Electrochemical Society Proceedings, 99-26 (1999), 127-136.
- 20) 塩谷和彦，川端文丸，天野慶一：川崎製鐵技報，33 (2) (2001)，97-101.
- 21) 竹村誠洋，田中賢逸，鈴木伸一，森田健治，藤田栄：まてりあ，40 (2001)，289-291.
- 22) T.Ishikawa, T.Ueno, A.Yasukawa, K.Kandori, T.Nakayama and T.Tsubota: J.Materials Chemistry, 12 (2002)，2416-2420.
- 23) Ishikawa, T., Motoki, T., Yasukawa, A., Kandori, K., Nakayama, T. and Yuse, F.: J.Colloid and

- Interface Sci., 250 (2002), 74-81.
- 24) 川野晴弥, 岡野重雄, 堺雅彦, 中山武典, 湯瀬文雄, 長谷薫: 神戸製鋼技法, 52 (2002), 25-28.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) H.Kihira, T.Senuma, M.Tanaka, K.Nishioka, Y.Fujii and Y.Sakata: Corrosion Science, 47 (2005), 2377-2390.
- 28) 藤井康盛, 田中睦人, 紀平寛, 松岡和巳: 新日鉄技報, (2007) 387, 53-75.
- 29) 中山武典: ふえらむ, 13 (2008), 804-808.
- 30) 紀平寛, 潮田浩作: 第53回材料と環境討論会講演集, C-108, (2006), 273-276.
- 31) Kihira, H., Ito, S. and Murata, T.: Corrosion, 45 (1989), 347-352.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) (独) 北海道開発土木研究所, (社) 日本橋梁建設協会, (社) 日本鉄鋼連盟: 無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準法に関する研究報告書, (2004.3)
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) Hiroshi Kihira, Atsumi Imai, Mikijiro Hiramatsu, Takehide Aiga, Tsuyoshi Matsumoto, Takayuki Sato and Masanori Nagai: ECS Transaction, in press, (2009.2).
- 40) Hiroshi Kihira: Corrosion Science, 49 (2007), 112-119.
- 41) 紀平寛: 材料と環境2006, A-306 (2006), 105-108.

(2009年2月2日受付)