

# 3%ニッケル高耐候性鋼の適用可能性検討方法

## 3% Ni-Advanced Weathering Steel and Its Applicability Assessing Method

紀平 寛<sup>(1)</sup>      田中 睦人<sup>(2)</sup>      安波 博道<sup>(3)</sup>      竹澤 博<sup>(4)</sup>  
*Hiroshi KIHIRA*      *Mutsuto TANAKA*      *Hikomichi YASUNAMI*      *Hiroshi TAKEZAWA*  
 楠 隆<sup>(5)</sup>      松岡 和己<sup>(6)</sup>      原田 佳幸<sup>(7)</sup>      田辺 康児<sup>(8)</sup>  
*Takashi KUSUNOKI*      *Kazumi MATSUOKA*      *Yoshiyuki HARADA*      *Koji TANABE*

### 抄 録

耐塩害性を高めた3%ニッケル高耐候性鋼の無塗装橋梁への適用が期待される中、その適用可能性検討方法として、長期の腐食減耗予測技術を独自に開発した。最近提案されている、より合理的な無塗装橋梁の維持管理方法についても併せて体系的に解説する。

### Abstract

As a method to assess applicability of 3% Ni-advanced weathering steel to unpainted structures, a computer software for corrosion prediction was developed. Also, recently proposed minimum maintenance methods for unpainted structures, which are more elaborated than ever, are also described systematically.

### 1. はじめに

耐候性鋼は、さびでさびを制するというユニークな特性ゆえに橋梁をはじめとする多くの実構造物に適用されてきた。その機能を活かしてこの鋼材を適用し、維持管理コスト低減に成功している事例は多い。一方で、飛来塩分の多い海浜地域などに不用意に適用した場合、問題を生じることもあった。近年では内陸地域でも凍結防止剤散布の影響を受け、局所的な異常を示すさび形成が認められることもある。建設省土木研究所より提唱されたミニマムメンテナンス橋構想に代表されるように、今後橋梁をはじめとした構造物においては、更なる維持管理コストの縮減をしつつも超長期にわたり安心して実使用が可能となる耐候性鋼材、表面処理技術、構造設計方法などが求められている。

わが国全体としてアジア諸国等とのコスト競争力を維持発展させる21世紀型インフラストラクチャーの一形態として、安全で安心なライフサイクルコスト(LCC)ミニマムを指向した構造物を実現する耐候性鋼の利用技術開発に大きな期待が寄せられている。当該技術の発展を促すため、(社)腐食防食協会・さびサイエンス研究会において、耐候性鋼の腐食現象についての検討がなされ、2001年6月25日に開催された第132回腐食防食シンポジウムに“さび安定化”の定義が提案された<sup>1)</sup>。また、東京工業大学創造プロジェクト“都市

基盤施設研究体”においても耐候性鋼適用に関する議論が進められ、2001年4月に耐候性鋼適用に関する基本認識も提案された<sup>2)</sup>。

2002年3月に道路橋示方書・同解説、I共通編、鋼橋編<sup>3)</sup>以下、道路橋示方書改訂の際に、これらの一連の議論が反映され、“第5章耐久性の検討”が加えられ、低ライフサイクルコストの半永久橋梁実現へ向け、部材の経年劣化を考慮した設計が義務づけられた。また、橋梁の長期耐久性は材料と設計だけで実現できるものではない。道路橋示方書には、防せい防食措置が適切に機能しているかを点検し、不具合が生ずれば補修するなど、適切な対応が必要、と明

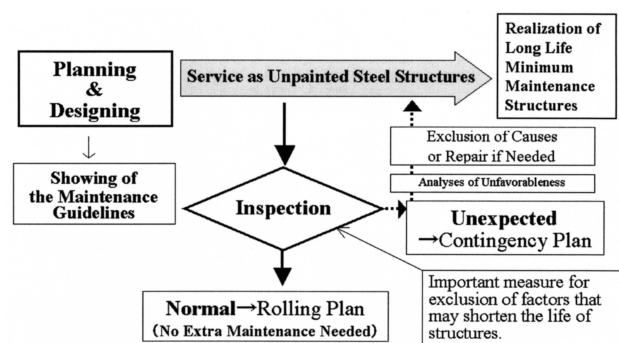


図1 耐候性橋梁のミニマムメンテナンス化技術群の位置づけ  
System image of minimum maintenance bridge technologies for weathering steel

<sup>(1)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL0439-80-2284

<sup>(2)</sup> 厚板営業部 マネジャー

<sup>(3)</sup> (財)土木研究センター 研究開発四部 部長

<sup>(4)</sup> 大阪支店 厚板グループ マネジャー

<sup>(5)</sup> 東海鋼材工業株式会社 橋梁事業部 取締役事業部長

<sup>(6)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員

<sup>(7)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 表面処理研究部 主任研究員

<sup>(8)</sup> 日鉄テクノリサーチ株式会社 総合材料センター 技術主管

記されている。従来の設計基準書と抜本的に異なる点は、性能照査型設計と呼ばれるように、使用性能が満たされることを前提に材料の選定には自由度が増やされているところにある。つまり図1に示すとおり、材料選定を含む設計、検査、診断、そして万が一不具合が発生した時に備えた補修技術の3点について総合的に技術開発を進めている。

## 2. 耐候性鋼のさび安定化

“さび安定化”という用語を、“腐食速度が異常や要観察を示すさび発生が起きない程度に低減している状態”と定義する。ここで異常を示すさびとは層状さびであり、要観察を示すさびはうろこ状さびである。これらを鋼材の腐食速度が高まっていることを示す信号として扱う。建設省土木研究所、(社)日本橋梁建設協会、(社)鋼材倶楽部で行った全国41橋曝露試験結果に基づき、JIS G 3114に記載のSMA耐候性鋼(以降、JIS-SMA耐候性鋼)は、50年で片側0.3mm以内の腐食減耗に収まると予測される環境条件で使用可能と判断された。この環境条件は、飛来塩分量0.05 mg/dm<sup>2</sup>/day以下の環境に相当する<sup>3)</sup>。この範囲内で用いれば耐候性鋼の腐食速度は十分小さく、上述の異常を示すさび発生は起きないと考えられる。

最近では設計供用期間を100年とすることが示されている<sup>3)</sup>ので、その期間に対応する適用環境限界内での片側累積腐食量を予測すると0.5mmとなる<sup>4)</sup>。一般の塗装した鋼橋において、100年を超える長期にわたり全く鋼材表面に減耗が起きえないとすることは実態的に無理がある。すなわち、道路橋示方書に示された、腐食環境や製作および輸送中の取り扱い等を考慮して定める最小板厚規定は、長期にこの程度の表面減耗が起きたとしても、構造物の耐荷力性能上の寿命には至らないように設計や維持管理するためのものと解釈されるのが必然であろう。逆の見方をすれば、この程度の僅かな腐食減耗に収まるなら、塗装しない方が合理的な場合があるとも言えよう。

いずれにせよ、100年を超えるような長期には塗装/無塗装を問わず、鋼材の表面減耗は生じうるので、これを考慮に入れた設計と維持管理法をより明確化していくことが、橋梁の安全と安心を保証することになる。すなわち、“鋼材の腐食を防止または一定の限度内に抑制する”<sup>5)</sup>べく、適用環境に応じた材料選定、板厚設定、構造設計、さらには維持、管理を遂行すれば、無塗装耐候性橋梁の半永久寿命を実現することができる。

さび安定化の概念図と、後述する外観評点の対応イメージを図2に示す。耐候性鋼の腐食速度は、腐食環境の厳しさに依存して変化する。腐食環境がマイルドである場合、腐食速度がきわめて小さいため、さび発生も遅く、その保護機能の高まりは起こりにくい。ただし構造物の長期安定性を考えた場合、鋼材の減耗が僅小なので全く問題の無い状態である。腐食環境の厳しさが中程度の場合には、耐候性鋼に含まれる合金元素の作用により保護機能の高いさびが形成し、腐食速度が経年的に低減して、長期の腐食減耗が構造物の安定性を維持できる状態となる。

さらに腐食環境条件の厳しさが高い場合には、保護機能のあるさびは生成せず、腐食速度が高まって、構造物として期待される状態をはずれ、異常を示すさびが形成する。耐候性鋼ではさびを安定化すれば、腐食速度が十分低減しているため、さびが風化していく量に対し、新たに生成するさび量がそれと同等以下となつて、さびは厚くならない。このことの意味を助けるため図3を示した。腐食環

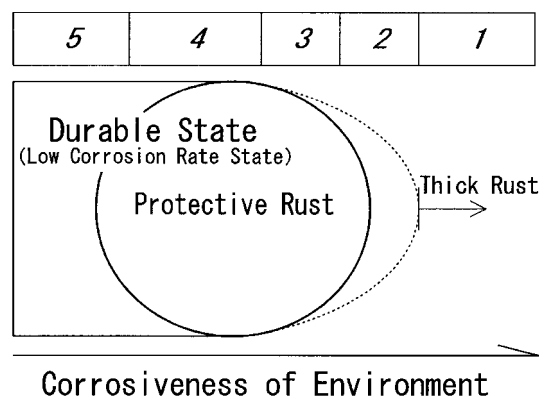


図2 さび安定化状態のイメージと外観評点の関係  
Relationship between the durable state image and visual ratings of rust

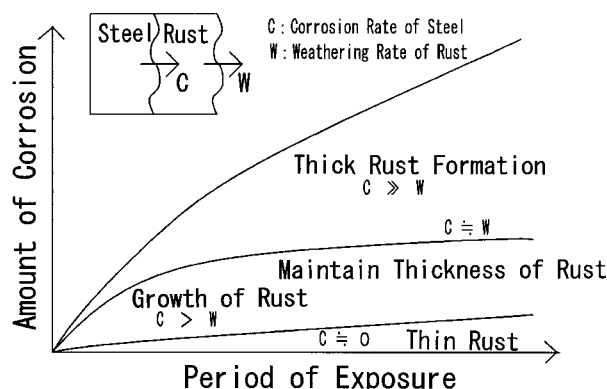


図3 耐候性鋼の腐食状態とさび外観・厚さの変化挙動の模式的説明  
図(腐食によるさび補給速度と、さび自体の風化減耗速度とのバランスによりさび厚や外観が変化する)

Schematic interpretations for appearances and thicknesses of rusts relating to corrosion rates (Balance between the rate of rust supplying and that of weathering dominates the appearance and thickness of rust.)

境の厳しさや、保護性さび形成の度合いに応じて鋼材の腐食速度が変化するため、図3に従いさびの厚さや外観が変化する。すなわち、表面に形成するさびは、鋼材の腐食速度を示すセンサーとして機能していることになる。後述のさび外観5段階評点付け法(橋建協-鉄連法)は、図2のさび安定化概念に基づいて、腐食速度基準の合理性を追求した方法である。

国内鉄鋼各社から商品化されたニッケル系高耐候性鋼<sup>6)</sup>の合金成分設計は、保護性さび形成領域を拡大する方向で検討されているため、適用環境限界は合金成分に応じて異なる。

## 3. 耐塩害性を高めた3%ニッケル高耐候性鋼

商品化当初、海浜・海岸耐候性鋼と称された耐塩害性を高めた新しい耐候性鋼の適用については、100年で片側0.5mmまでの腐食減耗に抑制されるべきとの指針<sup>5)</sup>を得て、適用限界環境に関する研究がなされている。狭義の海浜や海岸では、飛来塩分量が高すぎる場合が多い。利用者からの誤解を招かないよう、これら耐塩害性を高める基本元素<sup>6)</sup>であるニッケルを0.4%以上添加した一連の新鋼材を、「ニッケル系高耐候性鋼」と称することになった<sup>9)</sup>。新日本製鐵が世界初で商品化した新鋼材は3%Ni-0.4%Cu系であることから、名称を「3%ニッケル高耐候性鋼」とした。従来を継承するため、“3%ニッケル高耐候性鋼(海浜耐候性鋼)”と括弧付き表記をすることもある。ニッケル系と入れる理由は、従来からある高P系の高耐候

性鋼材と区別するためである。三木ら<sup>5</sup>が提案する耐候性合金指標(V値)によると、3%ニッケル高耐候性鋼は、V 1.55と、現在の各種高耐候性鋼の中で最も高い耐候性を示す。

3%ニッケル高耐候性鋼のさび安定化機構は、“材料と環境”誌に掲載された論文<sup>6</sup>に詳述した。異常を示すさび層状剥離さび等が発生するのは、その下のさび/鋼界面が低pH化することによって腐食反応速度が速くなるためである。従来材であるJIS-SMA耐候性鋼では、長期曝露により環境遮断機能の高い保護性さびが形成するが、3%ニッケル高耐候性鋼はそれに加え、形成するさびのイオン

交換機能をニッケルの増量添加により制御して、飛来塩分に含まれるNa<sup>+</sup>イオンをさび/鋼界面に捕獲できるようにして、腐食界面の低pH化を抑制した。

鋼材設計コンセプトの実証曝露試験を、千葉県君津市岸壁にて9年間行った。結果の一例として覆いなし垂直暴露材の断面マクロ写真を図4に示す。JIS-SMA耐候性鋼はほぼ全量が層状さびに変化したのに対し、3%ニッケル高耐候性鋼はメタル部分の殆どが残留する結果になった。覆い下での曝露試験結果でも、両者には有意な差異が観測された。三木ら<sup>6</sup>の論文にて示された耐候性合金指標V値から腐食速度パラメータへの変換式は、一般に異常を示すさびが発生しやすい橋梁内桁での耐久性を考慮し、新日本製鐵(株)にて行われた一連の覆い下曝露データを基準として定式化されたものである。

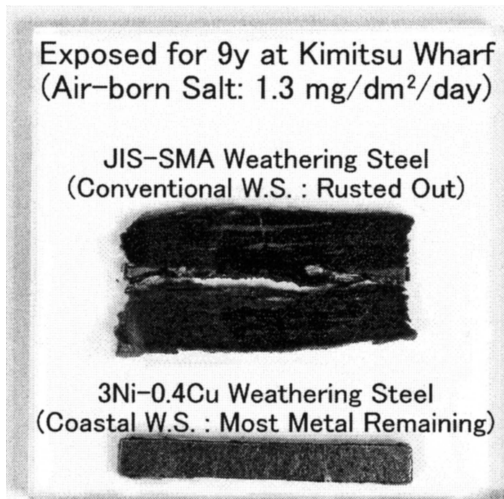


図4 千葉県君津市岸壁にての理論実証曝露試験結果例。岸壁から10mの位置で覆いなし垂直に設置し、9年間曝露したJIS-SMA材(上)と3%ニッケル高耐候性鋼の断面マクロ写真

An example of cross sectional macro picture of exposed steels for the demonstration of alloy design concepts. The exposure site was located at 10 m from the sea shore at a wharf in Kimitsu city, Chiba, Japan, where conventional JIS-SMA and 3% Ni advanced weathering steels were vertically exposed without shelter for 9 years.

#### 4. ニッケル系高耐候性鋼の適用可能性検討法

この世の全ての物質は化学反応を起こす。コンクリート、樹脂、塗装鋼材なども例外ではなく、耐候性鋼においては保護性のさびが形成したからと言って表面で起こる化学反応である腐食が完全に停止するわけではない。

道路橋示方書に“鋼材の防せい防食法には表面被覆、表面改質、電気防食、鋼材自体の改質など多くの方法があるが、一般的には鋼材表面に何らかの被覆を形成することによって、鋼材自体の腐食を防止又は一定の限度内に抑制しようとするものである”と解説されている。従って耐候性鋼の場合、建設地の腐食環境を良く吟味して、保護性さび形成機能を生かし、鋼材自体の腐食を一定限度内に抑制するように使わなくてはならない。つまり耐候性構造物としての異常を示すさびの発生が起きないと考えられる範囲内で用いるのが原則である。これは前述のとおり、設計供用期間100年を目安にすると片側0.5mmの腐食減耗に相当するので<sup>4,5</sup>、従来からのみなし適合仕様<sup>3</sup>に準ずれば、3%ニッケル高耐候性鋼においても同様の適用可否判断が合理的である。

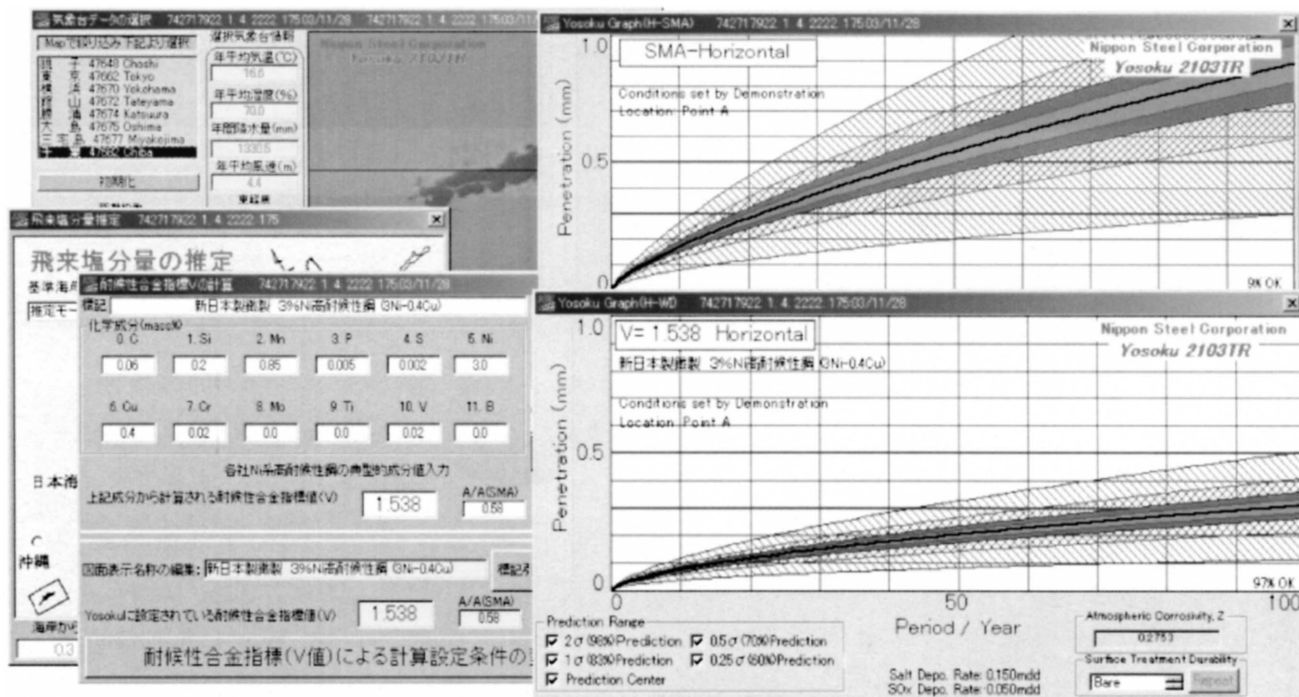


図5 気象条件, 推定飛来塩分量, 合金組成を入力して得た耐候性鋼の腐食減耗予測例

Examples of computer aided corrosion prediction schemes estimated from meteorological data, simulated air born salt deposition rate, alloy composition of steels, etc.

そもそも半永久的な耐久性を検討するという事は、計画あるいは設計段階にて建設地の環境条件を吟味し、供用期間中に起こりうる鋼材の表面減耗量を予測してその結果を構造物に反映すること、すなわち「部材の経年劣化を考慮した<sup>3)</sup>」橋梁の設計や製作を行うということである。この工程を含めて維持管理指針が策定され、橋梁管理者に伝達されることで、安全で安心なミニマムメンテナンス橋の実現が可能となる。体系化されつつある鋼橋の耐久化技術論への理解が深まるにつれ、橋梁建設事業における価値判断によっては100年で片側腐食0.5mm以下にこだわらないことも生じうる。この場合、設計では高耐候性材料(鋼材、表面処理剤など)の選定や腐食代の設定など適切な防食手段によって安全と安心を確保する提案ができれば。これらを前提とした保全技術によって、更なる維持管理費の縮減を実現することは十分可能であろう。そのための基本ツールが鋼材の腐食減耗予測技術となる。

耐候性鋼の経年腐食減耗 $Y$ (mm)は、年数 $X$ に対し $Y=AX^B$ なる累乗則でよく表されることが知られている。しかしながら速度パラメータとなる $A$ 値および $B$ 値の推定方法がこれまで明らかではなかったため、10年程度の曝露試験結果を回帰してこれらを求めていた。そこで、 $A$ 値、 $B$ 値の推定計算アルゴリズムを開発し、曝露試験をせずとも、建設地の環境条件と合金成分を吟味して入力すると任意の耐候性鋼材について腐食減耗量の推定ができる、図5に示すような腐食減耗予測シミュレーションソフトウェアを開発した<sup>7)</sup>。

新日本製鐵㈱では、耐候性鋼に精通した専門家が諸条件の設定を行えるので、実構造物への3%ニッケル高耐候性鋼の適用可能性検討に当該ソフトウェアを活用している。表面処理適用や塗装/再塗装などによる防食効果についても、長期の表面減耗量としてシミュレーションが可能である。計画・設計段階における材料の選定は、長期のミニマムメンテナンス化において最も重要な検討事項である。腐食減耗予測技術は、無謀な適用による腐食損傷を無くして耐候性鋼橋梁への信頼性を飛躍的に高め、ライフサイクルコストミニマム化による納税者負担の軽減を可能とする技術として貢献できよう。

## 5. さび安定化の点検・診断法

耐候性橋梁の長期耐久化は、計画段階での建設環境吟味と最適材料の選定および最適板厚の設定が正確になされれば、半ば成功するものと考えられる。しかしながら、施工や使用中に生ずる種々の問題、あるいは予想できなかった環境の変化などにより不具合が発生することもあり得る。したがって定期的な点検は必須である。無機系材料とは違い、鋼材は大気環境中で母材内部の化学的劣化は生じない。したがって、表面の状態のみを管理すればよい。

図6には、(社)日本橋梁建設協会・無塗装橋梁部会からの依頼を受け、(社)日本鉄鋼連盟・橋梁研究会・耐候性鋼防食設計ワーキンググループで解析/検討され提案された、さび安定化概念を基本とするさび外観観察法の判定基準案<sup>8)</sup>(橋建協-鉄連法)を紹介する。目視外観観察を基本とし、補佐的にさび厚計測を用い、評点2以下になっていないことを点検する方法である。9年目以降で評点3以上であればさび安定化状態にあると言える。判定精度を上げるイオン透過抵抗法、電気化学的電位測定法、定量X線分析法など、各種手法についても判定基準案が体系的に見直され、(社)日本鉄鋼連盟・橋梁研究会・耐候性鋼防食設計ワーキンググループより提案されている<sup>9)</sup>。このうちイオン透過抵抗法はRust State Tester(RST)として新

Rating	Status	Typical Appearance	Rust Thickness
5	Normal	Thin rust due to very low corrosion rate.	less than ca. 200 $\mu\text{m}$
4		Attached rust particles of less than ca. 1mm in horizontal average size.	less than ca. 400 $\mu\text{m}$
3		Attached rust particles of ca. 1mm - 5mm in horizontal average size.	
2	Observation needed	Rust like fish scale.	from ca. 400 $\mu\text{m}$ to ca. 800 $\mu\text{m}$
1	Unexpected	Thick and/or delaminated rust.	More than ca. 800 $\mu\text{m}$

Status can be judged after 9 years of exposure, confirming that there is no trace for delaminated rust to have fallen off.

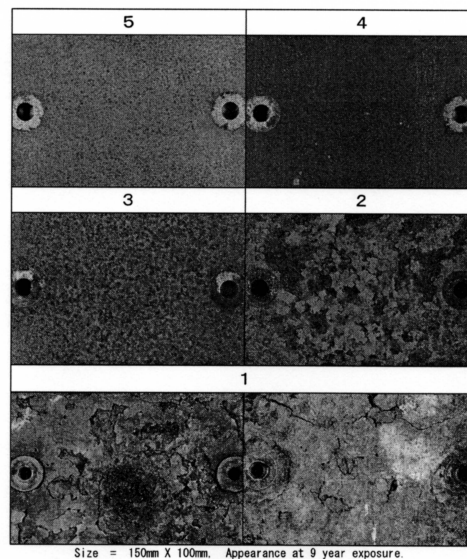


図6 目視外観評点法およびさび厚測定法の基準(案)および目視外観評価を行った耐候性鋼曝露試験材の例<sup>8)</sup>

Ratings for visual inspection method relating to the rust thickness ranges proposed by Japan Association of Steel Bridge Construction and Japan Iron and Steel Federation, together with exposed test samples typical to the each rating category.

日本製鐵㈱が独自に開発・実機化し、広く現場適用を可能として、診断の信頼性向上に貢献してきた<sup>9)</sup>。RSTは、日鉄防食株式会社により市販化されている。ニッケル系高耐候性鋼においても、これらの点検・診断方法をそのまま適用できる。

## 6. 補修技術

前述の点検、評価にて、異常を示すさびが発生したからといってその橋梁の寿命を意味するものではない。また、ライフサイクルコスト的に考えれば異常を示すさび発生が即ち耐候性鋼適用の失敗というわけでも無い。ただし、少なくともその部位における環境条件は、適用環境限界を超えていることは確かである。異常を示すさび発生が起きている領域には、適切な防食措置または原因の排除を施さない限り半永久橋実現に支障を来す。すでに従来型JIS-SMA材での補修事例もあり、補修は可能である。より効率的かつ効果的な補修技術体系について、(社)日本鋼構造協会、(社)日本橋梁建設協会や(社)日本鉄鋼連盟に組織されたいくつかの研究会や委員会活動にて、高いレベルの技術を有する企業と連携し、開発を推進している。ニッケル系高耐候性鋼における万が一の場合でも、同様の手法が適用できる。

## 7. 実構造物への適用

3%ニッケル高耐候性鋼適用は、1998年の北陸新幹線北陸道架道橋(図7)、土佐くろしお鉄道の奈半利橋(図8)、神戸空港連絡橋等数々の橋梁に適用が進み、また山形自動車道鶴岡インターチェンジ入り口に程近い緑地公園にあるモニュメント「空(くう)」にかける階段(図9)などにも適用されている。3%ニッケル高耐候性鋼の出荷量は、2004年3月時点で約17,000トンとなり、国内鉄鋼各社のニッケル系高耐候性鋼出荷量を累計すると約2万数千トンとなっている。ミニマムメンテナンス化への官学民の取組みが広がっている。

## 8. おわりに

橋梁は、一旦架設されると、そう簡単に架け替えることができない社会資本であるが故に、半永久とも言われる超長期の寿命が求められる。これまでは、鋼材表面に長期に累積しうる減耗の取り扱い方法について十分な明示的議論はできないでいた。2002年3月の道路橋示方書の改訂により、鋼橋の超長期耐久化技術の開発に向け、本格的な議論とその具体化に取り組むことができるようになった。部材の経年劣化を考慮して計画、設計、製作、維持管理を行い、橋梁利用者への安全と安心を最小限のライフサイクルコストで確保する技術論が構築されつつある。ニッケル系高耐候性鋼や腐食減耗予



図7 3%ニッケル高耐候性鋼(海浜耐候性鋼)が世界で初めて採用された北陸新幹線北陸道架道橋。耐候性の高いさび安定化処理剤(ラスコールN)の適用に加え、船底型ボックス桁、鋼管桁など塩分の付着が最小になるよう構造形状も工夫された

A bridge for Hokuriku Bullet Train Railway over Hokuriku High Way to which 3% Ni advanced weathering steel is applied for the first time in the world, where the pipe and ship bottom like shape designs of viaducts are devised not to accumulate deposited salt, together with the application of weather resistant surface treatment called RusCor N. to realize minimum maintenance features.



図8 3%ニッケル高耐候性鋼(海浜耐候性鋼)の裸使用が採用された土佐くろしお鉄道の奈半利橋

Nahari bridge for Tosa Kuroshio Railways, Kochi, Japan where 3% Ni advanced weathering steel is applied without any surface treatment.

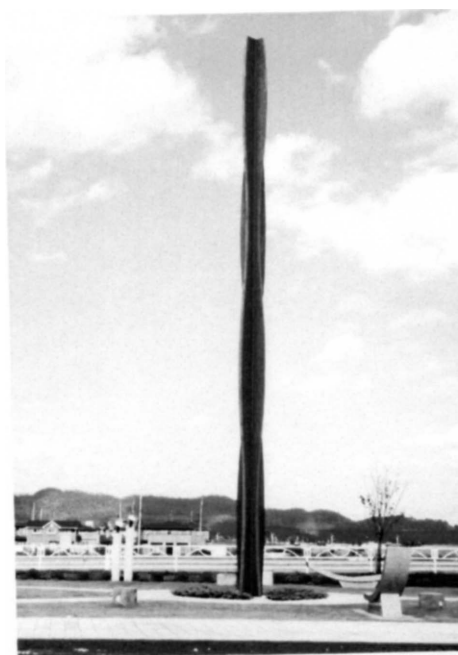


図9 山形自動車道鶴岡IC入り口に程近い緑地公園にある3%ニッケル高耐候性鋼の一枚板から作られたモニュメント「空にかける階段」(彫刻家 富樫実作、高さ21m、重さ40t)

A monument, created by Mr. Minoru Togashi, the sculptor, with height of 21m and weight of 40t made of solid 3% Ni advanced weathering steel named 'Stairway to Kuh (空),' installed in a park near Tsuruoka Interchange of Yamagata High Way. Note that standing for sky or naught in daily use, the Chinese character '空' in Buddhism sutra symbolizes the concept for the ultimate origin of everything in the universe.

測技術をはじめ、耐食材料や耐候性鋼利用技術群のさらなる充実がはかられ、納税者負担を大幅に軽減しつつも社会資本整備をはかって国際競争力を高める、ミニマムメンテナンス構造物の普及に期待がかかっている。

## 謝 辞

鋼橋をミニマムメンテナンスで長期耐久化させる技術体系は、官・学・産の数多くの有識者と共に調査活動や議論を行って築き上げられてきたものである。本文記載の各研究会や委員会メンバー諸氏のご貢献に敬意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 大塚俊明、三澤俊平：提案(さび安定化の定義) 第132回腐食防食シンポジウム資料 腐食防食協会 2001-6-25 p.3
- 2) 市川篤司：無塗装橋梁の耐久性 耐候性鋼材の橋梁への適用に関するシンポジウム論文等報告 東京工業大学創造プロジェクト「都市基盤施設研究体」東京工業大学土木工学専攻「鋼橋梁設計工学講座」2001-4 p.40-47
- 3) 道路橋示方書・同解説、共通編、鋼橋編 社団法人日本道路協会、2002-3
- 4) 加納勇、渡辺祐一：橋梁用新耐候性鋼 土木学会誌 特集 87 (4)、5-8 (2002)
- 5) 三木千壽、市川篤司、鶴飼慎、竹村誠洋、中山武典、紀平寛：無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案 土木学会論文集 (738/I-64)、271-281 (2003-7)
- 6) 紀平寛、伊藤観、溝口茂、村田朋美、宇佐見明、田辺康児：海浜耐候性鋼の成分設計コンセプト創出 材料と環境 49(1)、30-40 (2000)
- 7) Kihira, H.: A Concept toward Durable Bridge Design by Use of Weathering Steel. Proc. 17th US-Japan Bridge Engineering Workshop. Public Works Research Institute, Tsukuba Japan, 2001-11, p.337-350
- 8) 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研究 土木学会論文集 (745/I-65)、77-87 (2003-10)
- 9) 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 48(11)、697-700 (1999)