

博士論文

金属サンドイッチパネル設置による
鋼板桁橋の腐食環境改善に関する研究

(A study on improvement of corrosion environment of a steel
plate girder bridge by installing metallic sandwiched panel)

2022年3月

立花 周作

Shuusaku TACHIBANA

山口大学大学院創成科学研究科

学位論文の要旨

社会インフラの基幹をなす橋梁の老朽化に伴い、適切な維持管理や長寿命化が求められている。しかし、個々の橋梁の経年劣化は同じではなく、交通量や架橋環境などに大きく影響を受けるため、個々の橋梁劣化の進行程度も異なる。そのため、個別に劣化の原因を特定・排除し、適切な対策を実施することが必要である。

本論文では緻密なさびの生成が、環境に大きく影響される耐候性鋼橋梁に着目する。本研究では耐候性鋼橋梁において鋼桁全体を金属サンドイッチパネルで覆う環境改善による防食の効果を明らかにすることを目的とする。金属サンドイッチパネルで覆われた桁内空間は、雨水による洗浄や風の流れによる乾湿効果が期待できないため、これまで金属サンドイッチパネルの耐候性鋼橋梁への採用は判断できなかった。本論文では、暴露試験により耐候性鋼材の腐食挙動と防食効果の有効性を示し、金属サンドイッチパネルによる環境改善の防食効果を明らかにした。さらに、金属サンドイッチパネルを使用した場合のライフサイクルコストを算出することにより、金属サンドイッチパネル設置による経済面でのメリットについて考察した。

本論文は6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的、論文の構成と内容を述べた。

第2章では、鋼橋に用いられる防食方法に関する既往の研究を整理した。

第3章では、金属サンドイッチパネル内外で曝露試験を行い以下の知見を得た。

- 1) 金属サンドイッチパネルに覆われた桁内は年間を通して1日の温度・湿度の変動幅が小さく、桁外の急激な気象変化には追従しない。桁内気温と桁内露点の温度差が大きいため、桁内濡れ時間は桁外の濡れ時間の1/5以下に抑えられる。
- 2) 床版が薄く桁高が低い構造では、季節により桁内の気温上昇が避けられない場合もあるが、桁内の湿度は低く濡れ時間も大幅に減少するため、耐候性鋼橋梁を含めた鋼橋で防食効果が期待できる。
- 3) 金属サンドイッチパネル設置後の桁内への飛来塩分は検知されなかった。

第4章では、鋼桁内部空間に小型試験体を配置し、腐食の推移、環境改善による防食効果および内面塗装について考察した。

- 1) イオン透過抵抗法による評価区分で未成長さび領域にある無処理鋼材と無塗装鋼材では、5年間経過後もほぼ同じ状態にある。
- 2) ブラストによる素地調整を行った鋼材は、素地調整後も初期塩分が存在し、かつ、さび生成時に鋼板内部にまで付着塩分が侵入している場合も考えられる。しかし、経年によるさび厚の増加速度は緩やかであり、ブラスト処理後に金属サンドイッチパネルを設置する方法も有効である。

3) 桁外との環境遮断による効果が確認できたものの、さびの進行を完全に抑えることは困難であることが明らかになった。

第 5 章では、新設する桁に初期から金属サンドイッチパネルを計設置したケースと、供用開始後 50 年を経過した橋梁に設置したケースの経済効果を検討した。

1) 100 年の設計供用期間のうち 1 回でも塗り替え塗装が必要な場合は、金属サンドイッチパネルの環境改善による防食法は経済的に優位である。

2) 供用後 50 年を経過した跨線橋の近接目視点検費用（50 年間）の積み上げは、維持管理費を増大させる。

第 6 章では、本研究のまとめと今後の課題を述べた。

Abstract

With the deterioration of bridges as social infrastructure, appropriate maintenance and life extension are required. However, aging degradation of individual bridges is not the same. Since traffic volume and bridge environment are different for each bridge, the degree of deterioration of the bridge is also different. Therefore, it is necessary to identify and eliminate the causes of individual deterioration and to take appropriate measures.

This paper focuses on weathering steel bridges that the formation of dense rust is greatly influenced by the environment. The purpose of this study is to clarify the effect of anticorrosion by the environmental improvement which covers the whole steel girder with the metal sandwich panel for weathering steel bridge. Since the space in the girder covered with the metal sandwich panel cannot be expected to have the effect of washing by rainwater or drying and wetting by the flow of wind, the adoption of the metal sandwich panel for weatherproof steel bridges has not been judged until now. In this thesis, the corrosion behavior of weathering steel and the effectiveness of corrosion protection are shown by exposure test, and the corrosion protection effect of environmental improvement by metal sandwich panel is clarified. In addition, this study examines the economical advantages by the metal sandwich panel installation by calculating the life cycle cost.

This paper consists of six chapters.

Chapter 1 describes the background and purpose of this research.

Chapter 2 summarizes previous studies on corrosion protection methods used in steel bridges.

In Chapter 3, exposure tests were conducted inside and outside the metal sandwich panel and the following findings were obtained.

1) In the girder covered with the metal sandwich panel, fluctuation range of temperature and humidity is small throughout the year, and it does not follow the sudden weather change of outside of the panel. Since the difference between the temperature and dew point in the panel is large, the wet time in the panel is suppressed to 1/5 or less of the wet time of outside the panel.

2) At the structure which has thin floor slab and low height girder, the temperature rise in the panel may be unavoidable depending on season. However, since the humidity in the panel is low and the wet time is also greatly reduced, the anticorrosive effect can be expected in the steel bridge including the weathering steel bridge.

3) Amount of air born salt into the panel after the metal sandwich panel installation was not detected.

In Chapter 4, a small test specimen was placed in the inside space of the steel girder, and the transition of corrosion, anticorrosion effect by environmental improvement and inner surface painting were examined.

- 1) The untreated steel and the uncoated steel in the ingrown rust region evaluated by the ion permeation resistance method are kept almost same condition after five years.
- 2) It is also conceivable that the initial salinity of the steel material subjected to the substrate adjustment by blasting exists even after the substrate adjustment, and that the adhering salinity penetrates into the inside of the steel plate at the time of rust formation. However, the increase rate of rust thickness due to aging is slow, and a method of installing a metal sandwich panel after blasting is also effective.
- 3) Although the effect of environmental isolation from outside the girder was confirmed, it became clear that it was difficult to completely suppress the progress of rust.

Chapter 5 examined the economic effects of installing metal sandwich panels on new girders from the beginning and installing them on overbridges 50 years after the start of service.

- 1) If repainting is required even 1 time during the design service period of 100 years, the anticorrosion method by environmental improvement of the metal sandwich panel is economically superior.
- 2) Accumulating the cost of close visual inspection (for 50 years) of the overbridge that has been in service for 50 years increases the maintenance cost.

Chapter 6 summarizes this research and describes future issues.

目 次

第1章	序 論	1
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	9
1.3	論文の構成と内容	10
第2章	防食方法に関する既往の研究	14
2.1	耐食性材料に着目した鋼橋長寿命化技術	15
2.2	被覆防食に着目した鋼橋長寿命化技術	19
2.3	環境改善に着目した鋼橋長寿命化技術	25
第3章	金属サンドイッチパネル内の腐食環境評価	33
3.1	概 要	34
3.2	調査対象橋梁の環境	34
3.3	調査対象橋梁の構造仕様	36
3.4	金属サンドイッチパネルの仕様と接合構造	37
3.5	桁内環境の評価方法	41
3.6	桁内環境の評価結果	45
3.7	本章のまとめ	54
第4章	金属サンドイッチパネル内の耐候性鋼の腐食挙動	56
4.1	概 要	57
4.2	調査対象橋梁の環境と構造	57
4.3	桁内曝露試験体の仕様	59
4.4	桁内曝露試験体の評価項目	60
4.5	桁内曝露試験体の評価結果	61
4.6	桁外曝露試験体との比較	73
4.7	本章のまとめ	79
第5章	金属サンドイッチパネルの経済効果に関する検討	81
5.1	概 要	82
5.2	LCC の検討方針	82
5.3	新設桁（自然環境の厳しい臨海部河川上）	84
5.4	既設桁（市街地部の幹線鉄道上）	102
5.5	本章のまとめ	121
第6章	結 論	123
6.1	本研究のまとめ	124
6.2	今後の課題	128

【附 録】	130
附録-1 ワッペン試験片曝露写真	131
附録-2 小型試験体曝露写真	145
附録-3 工場塗装費単価内訳	166

・ワッペン試験片曝露写真

- 1) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (垂直)
- 2) 【3%Ni】 桁内 5 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (垂直)
- 3) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (水平)
- 4) 【3%Ni】 桁内 5 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (水平)
- 5) 【JIS-SMA・3%Ni】 桁外 2 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (垂直)
- 6) 【JIS-SMA・3%Ni】 桁外 2 年間のワッペン試験片曝露試験写真 (水平)

・小型試験体曝露写真

- 1) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 3 (さび外観評点 5) 無処理仕様 (垂直・水平)
- 2) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 4 (さび外観評点 4) 無処理仕様 (垂直・水平)
- 3) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 5 (さび外観評点 3) 無処理仕様 (垂直・水平)
- 4) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 6 (さび外観評点 2) 無処理仕様 (垂直・水平)
- 5) 【3%Ni】 桁内 5 年間の水準 7 (さび外観評点 2) 無処理仕様 (垂直・水平)
- 6) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 8 (動力工具処理) 無塗装仕様 (垂直・水平)
- 7) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 9 (動力工具+水洗処理) 無塗装仕様 (垂直・水平)
- 8) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 11 (有機ゾンクッチペイント) 簡易塗装仕様 (垂直・水平)
- 9) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 12 (さび安定化補助処理) 簡易塗装仕様 (垂直・水平)
- 10) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 13 (RC-II) 塗り替え塗装仕様 (垂直・水平)
- 11) 【JIS-SMA】 桁内 5 年間の水準 14 (RC-I) 塗り替え塗装仕様 (垂直・水平)
- 12) 【JIS-SMA】 桁内・桁外のブラスト (さび外観評点 1) 無塗装仕様 (垂直・水平)
- 13) 【JIS-SM】 桁外 2 年間の C-5・C-5 (沖縄仕様) 塗装仕様 (垂直・水平)
- 14) 【JIS-SM】 桁内・桁外の D-5 塗装仕様 (垂直・水平)

・工場塗装費単価内訳

- 1) 一般外面塗装/C-5 塗装系
- 2) 内面塗装/D-5 塗装系
- 3) 一般外面/金属溶射 (亜鉛アルミ) +ふっ素樹脂塗装

第 1 章
序 論

第1章 序 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 道路橋インフラの現状

社会インフラの老朽化は目に見える形で進行し、維持管理や長寿命化というキーワードを聞く機会も増えてきた。道路橋も例外ではなく、国土交通省道路局の資料¹⁾によると、国内の道路橋は2018年3月調べで全国に約72万橋（橋長2.0m以上）あり、建設後50年を経過した橋梁の割合は、2019年時点で全体の27%、10年後の2029年時点では52%に増加する見込みであり、将来に向けて全国の橋梁の老朽化がより深刻化することが予測される。

この50年という期間は、本質的な構造物自体の寿命を想定しているわけではなく、慣例的に旧大蔵省の通達²⁾³⁾「50年経過した道路橋は架け替えの予算要求をしてもよい」を参考に50年程度と考えられていたが、50年前と比較した交通量の増加や車両の大型化による現在の損傷状況を考えると架け替えや大規模修繕を検討していく上での一定の目安にはなる。

なお諸外国を見てみると、スイスでは道路橋50年、鉄道橋100年⁴⁾、ドイツでは構造物の寿命は50年～100年⁴⁾、フランスは100年～120年⁴⁾、イギリスでは主要部材の疲労に対して120年の寿命、容易に交換できる部材は60年～120年と想定⁴⁾されているが、現実的には供用開始後に実荷重や使用頻度に変化していく中、各国とも明確な設定根拠はないように思われる。

国内での道路橋の点検は、近年まで各道路管理者の判断に委ねられていたこともあり、損傷や劣化現象を可視化、共有化する状況にはなく、問題が発生した時点で個別に補修・補強されることが多かった。しかし、相次ぐ床版コンクリート片の落下⁵⁾やトンネル天井板崩落⁶⁾などの重大事故により、維持管理の重要性を国民全体で認識することとなり、2014年7月より5年に1回の近接目視点検が義務化⁷⁾⁸⁾された。

その後2019年8月の道路メンテナンス年報⁹⁾で、2014年度から2018年度にかけて調査した5年間の既設橋近接目視点検（一巡目）結果が公開され、全国の橋梁における初回の点検・調査での判定区分の割合は、早期に措置を講ずべき状態（判定区分Ⅲ）が10%（約68,400橋）、緊急に措置を講ずべき状態（判定区分Ⅳ）が0.1%（約700橋）であり、老朽化の進行が避けられない現実が明らかになった。初回（1巡目）の橋梁点検時の健全性診断区分を表-1.1に、判定区分と建設経過年数を図-1.1に示す。

この近接目視点検は健全なインフラ機能保持に重要な役割を果たすが、対象となる橋梁はさまざまであり、特に鉄道上や道路上に架橋されている場合の近接目視点検は、関係機関との事前協議、資機材の計画、手配も必要であり、橋梁点検業務のコスト増の要因¹⁰⁾になっている。

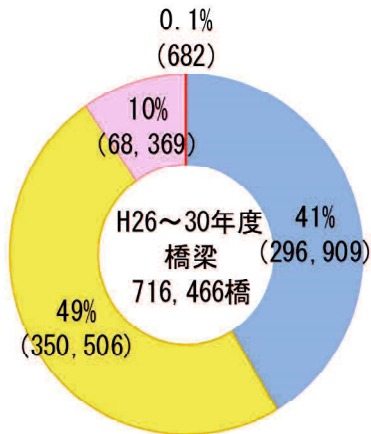
しかし、コスト削減に向けた色々な調査や研究がなされる中においては、老朽化インフラの予防保全は事後保全と比較して30年間の維持管理・更新費の合計費用負担が約3割削減できるという報告¹¹⁾もあり、長期的な視点において近接目視点検の拡充と効率化を進めていく必要がある。

このような状況の中においては、経年とともに増大する維持管理費の抑制、点検の容易さと確実性、点検時の安全性（第三者、作業員）および異常を発見した場合の応急措置対応など効果的かつ持続可能な長寿命化技術の開発・実用化が期待される。

表-1.1 健全性の診断区分

区 分		状 態
I	健 全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

○ 判定区分(橋梁)



○ 判定区分と建設経過年数(橋梁)

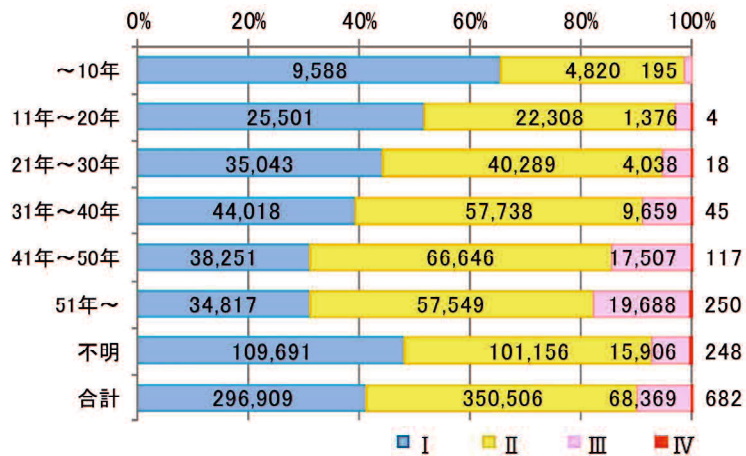


図-1.1 判定区分と建設経過年数

1.1.2 鋼橋架け替えの現状

老朽化の進む道路インフラであるが、架け替えとなる場合は、う回路の設置、既設橋の撤去やそれに伴う交通規制など財政面、日常生活面に与える影響は大きい。国土技術政策総合研究所の報告¹²⁾¹³⁾によると、道路橋の架け替えは、河川や道路の拡幅など計画的な線形の変更、想定外の自然災害などの理由が大きな要因であり、建設時に想定していた設計荷重や交通量の増大による疲労の影響、腐食による劣化など、上部構造の損傷が大きな要因ではないことがわかる。鋼橋に着目すると、

平成18年度（平成8年7月1日から平成18年6月30日）の報告¹²⁾では、国直轄、各都道府県および政令指定都市が管理している479橋の鋼橋が撤去または更新され、上部構造の損傷が原因となるのは59橋（12.3%）、内鋼材の腐食は29橋（6.1%）であり、鋼橋架け替えの大半（78.0%）が河川改修、交通混雑による幅員変更、都市計画など改良工事や機能的な理由によるものであった。

また、平成28年度（平成18年7月1日から平成28年6月30日）の報告¹³⁾では、277橋の鋼橋が撤去または更新され、上部構造の損傷が原因となるのは51橋（18.4%）、内鋼材の腐食が原因となるのは31橋（11.2%）と比率は増加しているものの、過年度の報告と同様の傾向である。

しかしながら、両報告ともに上部構造の損傷の中では、鋼材の腐食の比率が50%以上と高い数値を示していることから、鋼橋の長寿命化（設計供用期間100年）を考えると、発さび抑制や環境因子の排除など、防食技術を主体とした適切な維持管理が重要な課題となる。

1.1.3 防食の観点からの長寿命化技術

現在採用されている鋼橋の防食方法は、被覆による方法、耐食性材料を使用する方法および環境改善による方法がある。鋼橋の防食方法の内容を図-1.2に、それぞれの防食方法の種類と特徴を表-1.2～表-1.4に示す。なお、供用中の既設橋への防食対応については、被覆による防食または環境改善による防食を選択することになる。

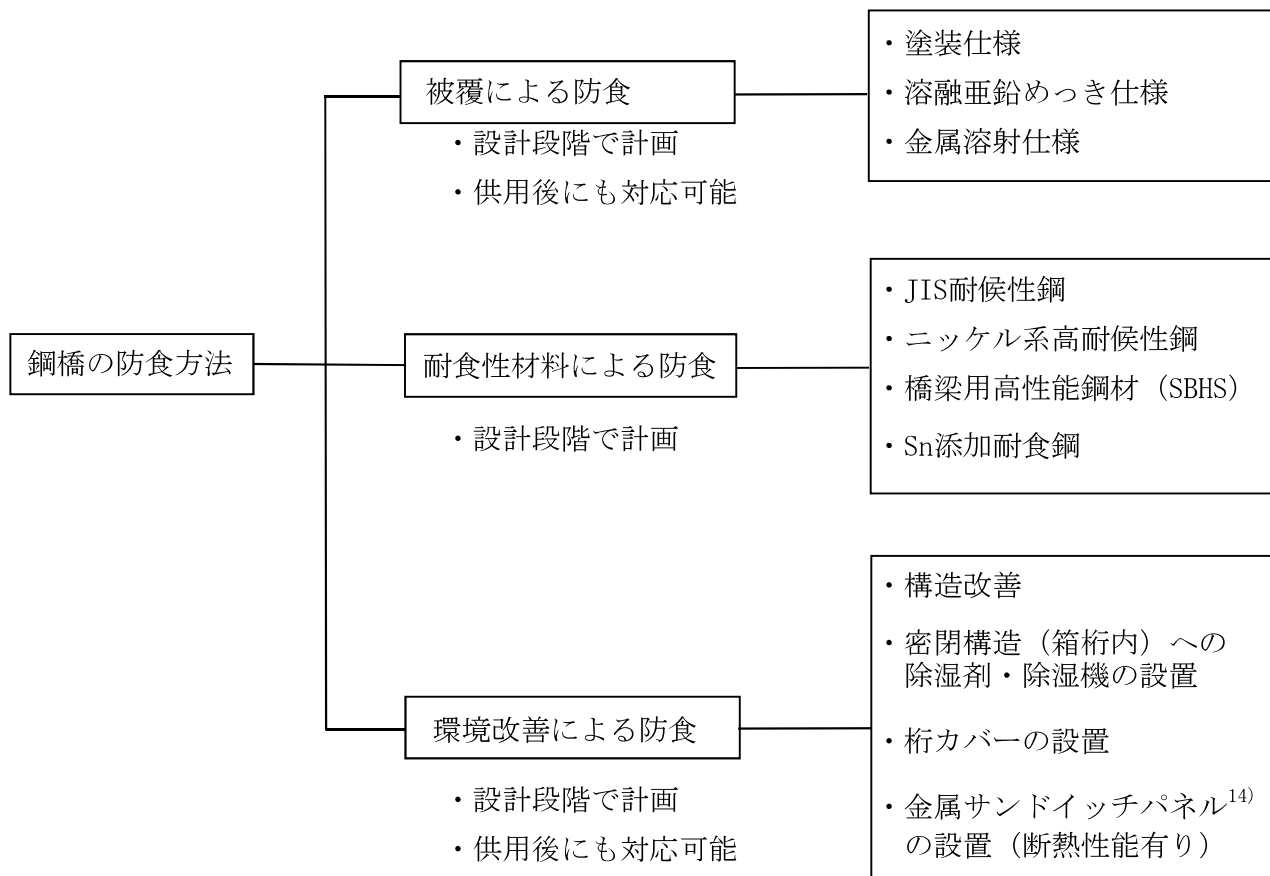


図-1.2 鋼橋の防食方法

表-1.2 被覆防食の種類と特徴

被覆防食の種類	主たる防せい防食原理	機能低下形態	機能喪失時の補修方法
塗装	塗膜による大気環境との遮断	塗膜の劣化	塗り替え塗装または、金属溶射（部分的）
溶融亜鉛めっき	亜鉛酸化物による防護皮膜および亜鉛による犠牲防食	亜鉛層の減少	塗り替え塗装または、金属溶射（部分的）
金属溶射	溶射金属の保護皮膜および溶射金属による犠牲防食	溶射金属層の減少	塗り替え塗装または、金属溶射

表-1.3 耐食性材料の種類と特徴

耐食性材料の種類	主たる防せい防食原理	機能低下形態	機能喪失時の補修方法
JIS耐候性鋼	緻密なさびの生成による腐食の抑制（供用時には防食性能を有しない）	層状剥離さびの発生とそれに伴う断面減少	塗装 金属溶射（部分的）
ニッケル系高耐候性鋼	同上【高耐候性】	層状剥離さびの発生とそれに伴う断面減少	塗装 金属溶射（部分的）
橋梁用高性能鋼材（SBHS400W, 500W, 700W）	同上【高降伏点】	層状剥離さびの発生とそれに伴う断面減少	塗装 金属溶射（部分的）
Sn添加耐食鋼	塗装欠陥部における耐食改善効果	塗膜の劣化	塗り替えまたは、 金属溶射（部分的）

表-1.4 環境改善の種類と特徴

環境改善の種類	主たる防せい防食原理	機能低下形態	機能喪失時の補修方法
構造改善	環境因子の滞留防止構造による腐食抑制（主に設計段階）	構造の不具合、不純物の堆積による滞留	構造の見直し、不純物の除去（定期的な清掃）
密閉構造＋除湿剤	湿度コントロールによる結露抑制	除湿剤の吸湿能力低下	除湿剤の乾燥、交換
密閉構造＋除湿機	湿度コントロールによる結露抑制	除湿機の不具合による機能低下	除湿機、電源設備のメンテナンス、交換
桁カバーの設置	カバー素材による環境因子遮断	カバー素材の劣化、損傷	カバー素材外面への補修 塗装、交換
金属サンドイッチパネル（断熱性能有り）	パネルによる環境因子遮断 断熱材による結露抑制	金属サンドイッチパネルの損傷	金属サンドイッチパネルの補修、交換

この中で被覆と耐食性材料による防食法は化学分野、製鋼技術の進歩・発展にともない、耐久耐候性の向上、用途に応じた材料の選択肢も増えてきた。しかしながら我が国の架橋環境はさまざまであり、海岸部など環境の厳しい地域においては、研究や実験による成果どおりの性能を発揮できないケースも報告¹⁵⁾¹⁶⁾され、塗装による塗り替えなど維持管理費の負担も大きい。また被覆による防食は耐久性が向上したとはいえ、金属溶射など一部の仕様¹⁷⁾以外は100年の設計供用期間を想定した場合に塗り替え作業が必要になる。耐食性材料では、ニッケル系高耐候性鋼や高強度で耐候性仕様の橋梁用高性能鋼材も実用化されているが、緻密な保護性さびが生成されない、かつ、原因の排除ができず塗装仕様への変更が必要な場合は、異常さびのブラストによる処理など逆にコストの負担が大きくなるケースも想定^{15), 18)}される。

一方、環境改善による防食法は、主に滞水の防止など設計段階で構造改良、工夫¹⁹⁾がなされるとともに、箱桁など（準）密閉空間に対しては、除湿剤、除湿機の配置により結露を抑制する検討²⁰⁾²¹⁾が行われてきた。しかし、これらの対策は一定の効果が確認されているものの、対象が限定的で具体的な評価までにはいたっていない。

このように今まで鋼橋全体に着目した技術（製品）開発が進められてこなかった環境改善による防食法であるが、表-1.5に示す設計・維持管理に関する考え方、基準の変遷^{22)~29)}の中で、断熱材を2枚の金属薄板で挟んだ金属サンドイッチパネル¹⁴⁾が鋼橋で採用されるようになった。

通常の使用は、2002年3月の道路橋示方書²⁷⁾で明示された100年を目安とする耐久性の確保、2014年7月に施行された近接目視点検（5年毎）の義務化⁷⁾、「設計供用期間100年を標準とする」現行規定²⁹⁾に対応した製品として、近接目視点検を行う常設足場機能を優先したものであるが、鋼桁全体を覆うという観点で、環境改善の用途にも応用できる可能性がある。

なお、この金属サンドイッチパネルを常設足場として取り付けた関東地区臨海部の塗装鋼橋において、海塩粒子や紫外線など桁外からの環境因子を遮断できる効果が報告³⁰⁾されているが、腐食環境の厳しい地域や耐候性鋼橋梁への適用については検証されていない。

また、従来から裏面吸音板や景観を目的としたパネルなどで、鋼桁を部分的に覆う方法にも一定の防食上の効果は見られるが、更新が必要な部材で構成されている上、密閉性の確保が難しく環境改善による防食法の概念とは異なるものである³¹⁾³²⁾。

鋼桁全体を金属サンドイッチパネルで覆うことにより、発さびやさびの進行抑制効果が確認できれば、維持管理作業の容易さと合わせて環境改善による新しい防食法の有効な選択肢となる。

表-1.5 設計・維持管理に関する基準（考え方）の変遷

項 目	道路橋示方書・同解説	周辺技術・基準動向
1973年2月 (昭和48年)	<p>【Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編】²²⁾ 設計の基本 [本文] 「構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。 橋はできるだけ直橋とするのがよい。 設計計算にあたっては、構造物の強度・変形・安定などを検討し、適当な安全度を確保するものとする。」</p>	<p>SMA41, SMA50, SMA58の規定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1971年12月 (昭和46年) 鋼道路橋塗装便覧(初版) ・ 1979年2月 (昭和54年) 鋼道路橋塗装便覧(改訂版)
1980年2月 (昭和55年)	<p>【Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編】²³⁾ 設計の基本 [本文] 「構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。 橋はできるだけ直橋とするのがよい。 設計計算にあたっては、構造物の強度・変形・安定などを検討し、適当な安全度を確保するものとする。」</p>	<p>道路橋示方書・同解説 (Ⅰ～Ⅴ)</p>
1990年2月 (平成2年)	<p>【Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編】²⁴⁾ 設計の基本 [本文] 「構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。 設計計算にあたっては、構造物の強度・変形・安定などを検討し、適当な安全度を確保するものとする。」</p>	<p>技術の進歩、研究成果の反映</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1990年6月 (平成2年) 鋼道路橋塗装便覧(改訂版) ・ 1991年7月 (平成3年) 道路橋耐風設計便覧
1994年2月 (平成6年)	<p>【Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編】²⁵⁾ 設計の基本 [本文] 「構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。 設計計算にあたっては、構造物の強度・変形・安定などを検討し、適当な安全度を確保するものとする。」</p>	<p>車両大型化 (A、B活荷重)</p>

<p>1996年12月 (平成8年)</p>	<p>【 I 共通編 II 鋼橋編】²⁶⁾ 設計の基本 [本文] 「構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。 設計計算にあたっては、構造物の強度・変形・安定などを検討し、適当な安全度を確保するものとする。」</p>	<p>耐震性向上 (兵庫県南部地震対応)</p>
<p>2002年3月 (平成14年)</p>	<p>【 I 共通編 II 鋼橋編】²⁷⁾ 設計の基本理念 [本文] 「橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。 設計は、理論的な妥当性を有する手法、実験等による検証がなされた手法等適切な知見に基づいて行うものとする。」 設計の基本理念 (説明文) 耐久性に関する事項については、時間の概念が必要であることから、一定の知見が得られているものについては、100年を目安に設置した。</p>	<p>性能規定化と耐久性向上</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2002年3月 (平成14年) 鋼道路橋の疲労設計指針 ・ 2005年12月 (平成17年) 鋼道路橋塗装・防食便覧
<p>2012年3月 (平成24年)</p>	<p>【 I 共通編 II 鋼橋編】²⁸⁾ 設計の基本理念 [本文] 「橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の確実性及び容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。」 設計の基本理念 (説明文) 耐久性に関する事項については、性能を照査するのにあたって設計上目標とする時間の概念が必要であることから、一定の知見が得られているものについては、100年を目安に設定されている。</p>	<p>耐震、維持管理の充実</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2013年 (平成25年) 社会資本メンテナンス元年 ・ 2014年3月 (平成26年) 鋼道路橋防食便覧 ・ 2014年7月 (平成26年) 近接目視点検の施行 ・ 2016年12月 (平成28年) 跨線橋の効率的な維持管理
<p>2017年11月 (平成29年)</p>	<p>【 I 共通編】²⁹⁾ 設計の基本理念 [本文] 「橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、維持管理の確実性及び容易さ、施工品質の確保、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。」 設計供用期間 [本文] 「橋の設計にあたっては、適切な維持管理が行われることを前提に、橋が性能を発揮することを期待する期間として、設計供用期間を定めることとし、100年を標準とする。」</p>	<p>長寿命化の合理的な実現 部分係数設計法 限界状態設計法 (熊本地震対応)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2019年 (平成31年) ~ 近接目視点検2巡目

1.2 本研究の目的

日本の経済成長とともに拡充してきた道路網であるが、その1部は架橋環境、交通量の増大や過積載など経年の供用により損傷が散見されるようになった。その中で鋼橋に着目すると、鋼材の腐食が上部構造の損傷の50%以上に及ぶことが報告され、鋼橋の長寿命化（設計供用期間100年）は、発錆抑制や環境因子の排除など、防食技術を主体とした適切な維持管理が重要な課題となることが分かってきた。

現状の課題を踏まえ、本研究は鋼橋の中でも緻密なさびの生成が架設地点の環境に大きく影響される耐候性鋼橋梁において保護性さびが生成されない場合や、周辺環境の変化により被覆防食などの検討が必要な場合に、従来の補修方法とは異なる鋼桁全体を金属サンドイッチパネルで覆う環境改善による防食の効果を明らかにすることを目的とする。

目的達成のため、実証実験による計測データ評価と経済性の観点からアプローチを行う。

- 1) 気象条件の厳しい地域での腐食環境を適切に評価し、環境改善による防食法としての有効性を精査する。
- 2) 耐候性鋼橋梁のさび進行状況を想定した曝露試験により、環境改善による防食法の効果と有効な補修対応を評価する。
- 3) 設計供用期間100年を想定し、環境改善による防食法適用の経済的優位性を現実的な架橋環境で検討する。

塗装が施された鋼桁を金属サンドイッチパネルで覆う場合には、桁自身に防食措置が施されているため環境変化による防食進展のリスクは少ない。一方、金属サンドイッチパネルで覆われた桁内空間は、雨水による洗浄や風の流れによる乾湿効果が期待できないため、これまで耐候性鋼橋梁への採用は判断できなかった。

金属サンドイッチパネル内の腐食環境と耐候性鋼の腐食挙動が適切に評価できるよう、調査対象橋梁は無塗装での耐候性鋼橋梁を計画する場合に飛来塩分の測定を省略することのできない厳しい気象環境である沖縄地区離島の臨海部に建設された鋼橋を選定し実証試験を実施した。

次に曝露試験の方法は、さびの進行した無処理の小型試験体、素地調整や補修塗装を想定した小型試験体を桁内へ配置し、初期付着塩分量、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響、さびの進行速度から耐候性鋼の腐食挙動を考察する。特に無塗装仕様の場合は、初期の付着塩分量の数値とさび外観評点を明確にした上で、経年のさび厚変化、イオン透過抵抗値の推移から環境改善効果を評価する。

なお、現在の国の財政を踏まえると公共事業に関わる技術は、経済的な効果がなければ継続的な採用に結び付かない。ここでは河川上の新設橋に建設時から金属サンドイッチパネルを設置するケースと100年の設計供用期間の内、50年が経過した後に幹線鉄道上の高架橋（既設橋）へ設置する2ケースの架橋環境を想定し、従来の防食仕様とのライフサイクルコストを検討する。5年毎の近接目視点検と塗り替え塗装を主たる維持管理コスト対象として計上するが、現実的には鋼橋被覆の劣化抑制（揮発性有機化合物削減）、緊急補修工事対応、点検内容の充実度、足場の設置・撤去時の安全面なども金属サンドイッチパネル設置のメリットとして考えられるが、具体的な数値の精査が困難であり比較項目から外している。

2017年11月道路橋示方書・同解説の本文に100年の設計供用期間が記載され、維持管理の容易さの重要性、必然性は増している。建設コストと維持管理コストは切り離すことのできない車の両輪であり、金属サンドイッチパネルの設置による腐食環境の改善が、新しい防食法として鋼橋インフラの延命化と維持管理コストの削減に結び付くものであるか経済的な観点での評価も行う。

1.3 論文の構成と内容

本論文の構成は、次の6章よりなる。本研究の構成フローを図-1.3に示す。

第1章では、本論文の概要として、道路橋インフラの現状、鋼橋の防食技術（方法）、研究の目的、論文の構成と内容を述べる。

第2章では、鋼橋の防食方法を耐食性材料、被覆、環境改善に区分し、実績、特色、基準・仕様の変遷を踏まえ既往の研究を述べる。

第3章では、金属サンドイッチパネルに覆われた鈹桁の桁内空間の防食環境を評価する。調査対象橋梁は、さびの生成や進行に着目した試験であるため無塗装耐候性鋼材の採用に関して飛来塩分の測定を省略することのできない沖縄地区臨海部の鋼橋を選定した。

調査に際しては、従来の環境改善で実施されてきた設計面での構造仕様の変更ではなく、鋼桁全体を断熱材を有する金属サンドイッチパネルで囲う閉塞された空間になるため、桁外からの環境因子の遮断性、温湿度の変化、濡れ時間、ワッペン試験片の曝露試験など多角的な視点から評価する。また、実験中に桁内で確認されたワッペン試験片上の塩分付着や上フランジ下面で観察された結露現象についても考察する。

合わせて桁外に遮へい式曝露架台を設置し、亜熱帯地域の厳しい条件下での桁外と桁内環境の差を数値により明らかにする。

第4章では、供用中の耐候性鋼橋梁を金属サンドイッチパネルで覆った場合の腐食環境を把握するため、さびの進行した無処理の小型試験体、素地調整や補修塗装を想定した小型試験体を作成し、腐食の推移と防食効果の有効性を述べる。

塗装が施された新設桁では、この桁外と遮断された内部空間の環境改善効果について一定の検証データ³⁰⁾が存在するが、補修塗装後や飛来塩分の付着した耐候性鋼橋を覆った事例はなく、桁内気温の上昇、雨水による洗浄効果と風の流れによる乾湿効果が期待できない環境下での、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響が確認できていない。

特に初期の付着塩分量、さび外観評点など無処理の小型試験体の評価は難しいが、さび厚の推移、鋼材表面の変状およびイオン透過抵抗法により計測・観察したデータをもとに防食効果が期待できる条件を明確にする。

第5章では、2002年3月の道路橋示方書「設計の基本理念」に記載された100年を目安とする耐久性を考慮し、環境改善による防食法として金属サンドイッチパネルを適用した場合のライフサイクルコストを算出する。金属サンドイッチパネルを設置する維持管理上のメリットは大きいですが、経済的な効果がなければ継続的な採用に結びつかない。

対象橋梁は、実際の臨海部河川上の新設桁（設計供用期間100年）と供用開始後50年が経過した幹線鉄道上の既設橋（残りの設計供用期間50年）とし、5年に1度の近接目視点検、塗装の塗り替えおよびそのために必要な仮設足場の設置・撤去、資機材を維持管理コストとして積み上げる。

なお、新設桁の計画段階で環境改善による防食法を採用する場合は工場塗装をD-5に、被覆防食の場合は工場塗装をC-5と金属溶射の2ケースで検討し、それぞれ検査路1条を設置することを前提として比較する。

第6章では、以上の結果を取りまとめ、今後の金属サンドイッチパネルによる環境改善を目的とした防食技術の研究に対する課題をまとめる。

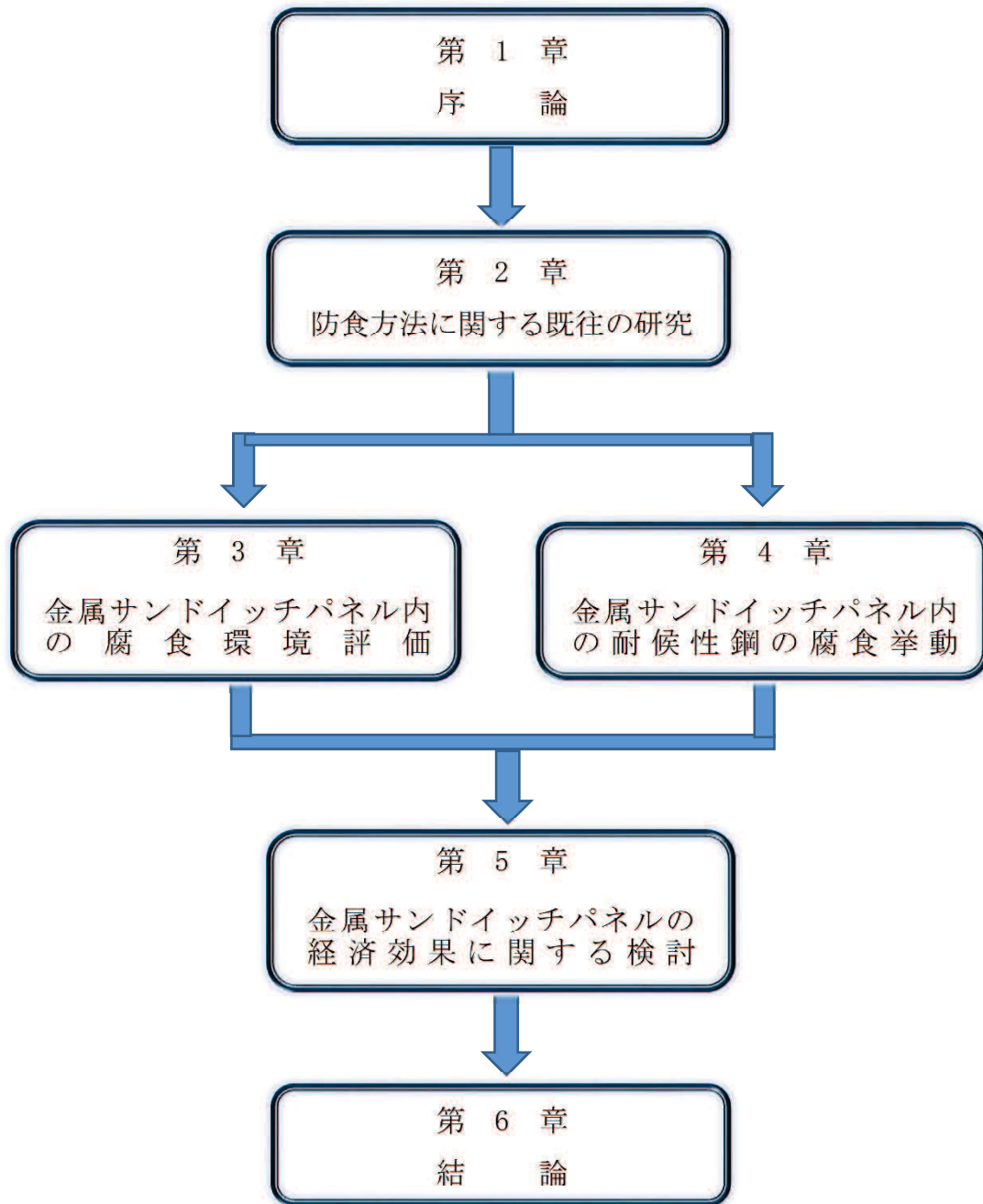


図-1.3 本論文の構成フローと方針

参考文献（第1章）

- 1) 国土交通省ホームページ(政策・仕事, 道路, 老朽化対策の取り組み) : <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf> (最終検索日 2021年7月20日)
- 2) 西川和廣 : 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, 1994. 10
- 3) 大蔵省令第十五号 : 減価償却資産の耐用年数等に関する省令 別表 第一 機械及び装置以外の有形減価償却資産の耐用年数表, pp. 1967, 1965. 3. 31
- 4) 宮崎昭二 : 橋の寿命 Life of Bridge, 川田技報, Vol. 3, pp. 5-9, 1983. 1
- 5) 星隈順一, 玉越隆史, 白戸真大, 増田安弘, 小原 誠, 正木 守 : コンクリート片落下による第三者被害の予防措置技術の性能試験法に関する調査検討, 国土技術政策総合研究所資料, 第 953 号, 2017. 3
- 6) 国土交通省 トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 : トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書, 2013. 6. 18
- 7) 国土交通省道路局 : 道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について (道路法施行規則の一部改正等), 2014. 4. 2
- 8) 国土交通省道路局 : 道路法施行規則の一部を改正する省令の公布について, 2016. 10. 28
- 9) 国土交通省 道路局, 道路メンテナンス年報, 2019. 8
- 10) 川西 寛, 丸山 収, 三木千壽 : 市町村の橋梁点検業務の費用分析と対策について, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 459-471, 2016. 3
- 11) 吉武竜馬 : 持続的・効率的なインフラメンテナンスの推進 予防保全の早期実現, 月間建設, Vol. 64, pp. 6-9, 2020. 7
- 12) 玉越隆史, 大久保雅憲, 市川明広, 武田達也 : 橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料, 第 444 号, 2008. 4
- 13) 白戸真大, 藤田裕士, 高橋慶 : 橋梁の架替に関する調査結果 (V), 国土技術政策総合研究所資料, 第 1112 号, 2020. 6
- 14) 日鉄エンジニアリング株式会社 : NS カバープレート™, Cat. No. C0426, 2019. 4 版
- 15) 後藤宏明, 守屋 進, 内藤義巳, 山本基弘, 藤城正樹, 斎藤 誠 : 耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討, 材料と環境, Vol. 59, pp. 10-17, 2010.
- 16) 独立行政法人土木研究所, 関西ペイント株式会社, 神東塗料株式会社, 中国塗料株式会社, 日本ペイント株式会社, 大日本塗料株式会社, 日鉄防蝕株式会社 : 鋼橋防食工の補修方法に関する共同研究報告, 共同研究報告書, 第 414 号, pp. 40, pp. 100-107, 2010. 12
- 17) (一社) 日本橋梁建設協会, 鋼橋のライフサイクルコスト (技術短信) No.10, 2020. 9 (改)
- 18) 今井篤実, 山本哲也, 麻生稔彦 : 耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 2, pp. 347-355, 2012.
- 19) (社) 日本橋梁建設協会 : 無塗装橋梁の手引き, 1998. 3
- 20) 庄野好希, 浦 剛史, 槌谷 直, 庄野 泉, 田中 正明 : 除湿剤を用いた箱桁内面防錆システムの実橋への適用, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-198, 2008. 9

- 21) 杉崎幸樹, 酒井修平, 西本 悟, 大間知 良晃: 鋼箱桁橋の桁内除湿による防食効果に関する調査, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-259, 2009. 9
- 22) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1973. 2
- 23) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1980. 2
- 24) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1990. 2
- 25) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1994. 2
- 26) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1996. 12
- 27) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2002. 3
- 28) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2012. 3
- 29) (公社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017. 11
- 30) 七浦恒康, 佐藤弘隆, 藤川敬人, 鈴木恵太: 臨海部橋梁における高耐食外装材の防食性能, 橋梁と基礎, Vol. 48, pp. 25-28, 2014. 10
- 31) 首都高速道路株式会社: 附属施設物設計施工要領 第 8 編 [恒久足場], 2019. 6
- 32) 廖 金孫, 田中正明, 原 直人, 柴崎 剛, 藤野陽三: 橋梁化粧板内部の環境腐食性評価と鋼桁防食性向上への提案, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 1, pp. 67-78, 2006. 3

第 2 章

防食方法に関する既往の研究

第2章 防食方法に関する既往の研究

これまで鋼橋を対象とした鋼材腐食に関する研究は、JIS耐候性鋼、高ニッケル系鋼など鋼材の成分をコントロールすることによる耐食性の向上と塗料、溶融亜鉛めっきなど鋼材表面の被覆の耐久性に着目した取り組みがなされてきた。このような耐食性材料や被覆防食の開発は、鋼橋の長寿命化や適用範囲の拡大に大きく貢献してきたが、架橋環境や経年により期待された効果が確認できないケースも明らかになってきた^{1), 2), 3)}。さらに環境改善による防食に着目した研究も進められているが、解決すべき課題も多い^{4), 5)}。ここでは既往の研究を整理し、防食技術に関する仕様・要点を以下に概説する。

2.1 耐食性材料に着目した鋼橋長寿命化技術

コークスによる高炉から錬鉄の製造を始めたイギリスは、1779年に世界ではじめてセバーン川のアイアンブリッジ溪谷にコールブルックデール橋（鋳鉄製）を建設した。その後1858年にヘンリー・ベッセマーのベッセマー工程（Bessemer Process）による製鋼（転炉法）の技術が確立すると、1883年にブルックリンブリッジ（アメリカ）、1890年にフォース鉄道橋（イギリス）、1911年のホーエンツォレルン橋（ドイツ）など、当時の先端技術を駆使し現在にも通ずる鋼橋の建設が始まった。

しかしながら、防食技術は研究開発段階であり数多くの鋼橋は塗装をしても経年とともにさびによる劣化現象を抑えることができなかった。鋼橋の建設を進めていたアメリカは、1900年頃から塗装寿命を延命する鋼板としてCu（銅）の添加の有効性を発見し、「含銅鋼」を市販したのが、耐候性鋼材のはじまりである⁶⁾。

1933年になって、U. S. Steel社からCORTEN-Aが商品化され、その後Cu（銅）、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、P（りん）を添加した低合金鋼に耐候性能があることを発見し、低合金耐候性高張力鋼が開発された。そして長寿命化を目的とした無塗装耐候性鋼での橋梁建設が行われたのは、アメリカのハイウェイ（1964年）であった。その後1967年に日本、1969年にドイツ、最初に鉄橋を建設したイギリスは1972年に入ってから無塗装耐候性鋼による本格的な橋梁建設が進められた。

2.1.1 JIS耐候性鋼

耐食性金属材料の使用による防食は、使用鋼材自体に腐食速度を低下させる合金元素を添加することによって改質させた材料を使用するものである。耐候性鋼材は、普通鋼材に耐候性能の向上に有効なCu、P、Crなどの合金元素を添加したものであり、大気中で乾湿を適切に繰り返すうちに鋼材表面に緻密なさび層が形成されていく。そして、それ以降の発さびの進展を普通鋼材と比べて低下させることで、鋼材の腐食による板厚の減少が抑制される⁷⁾。

国内での耐候性鋼は、1955年（昭和30年）に開発、市販され、鋼橋としては愛知県三河湾の海岸線に知多2号橋（合成桁橋）が1967年に初めて建設された⁶⁾。1968年（昭和43年）4月に「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」としてJIS化（JIS G 3114）され、1972年の道路橋示方書Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編にSMA41、SMA50、SMA58が加えられたことにより、1973年以降に耐候性鋼材を使用した橋梁が数多く建設されるようになった。

当初は日本の気象条件に対する耐候性鋼材の適用性について十分な知見がなく、社会資本の整備拡充とともに、初期建設費の縮減と維持管理の軽減への期待から適用地域に制限を設けることなく建設が進められてきた。その後の耐候性鋼橋梁の増加に伴い、適用可能な環境条件や設計・施工および維持管理について留意する必要が生じ、当時の建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会の三者による「耐候性橋梁の橋梁への適用に関する共同研究」⁸⁾が、1981年から11年間にわたって実施され、耐候性鋼橋の適用に関する指針が示された。

現行の適用可能環境は、図-2.1に示す飛来塩分量の測定を省略して耐候性鋼材を無塗装で使用可能な適用地域が示されているのに加えて、凍結防止剤の塩分と水面または植生からの湿気に対する規定がある⁹⁾。

飛来塩分量 $\leq 0.05\text{mdd}$ (mdd : $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$)

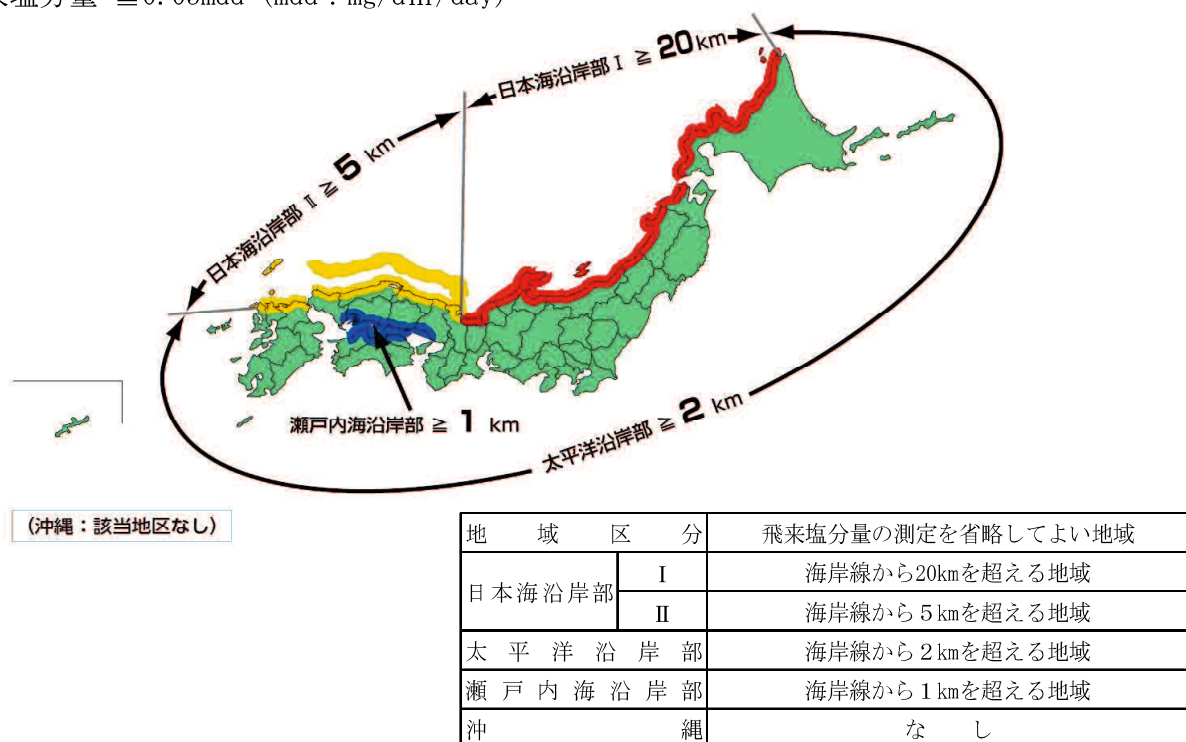


図-2.1 無塗装耐候性鋼橋梁の適用地域区分⁸⁾

2.1.2 ニッケル系高耐候性鋼

JIS耐候性鋼材は、塩分環境に曝露されると塩化物イオンがさび内層から地鉄界面まで侵入、濃縮し、緻密なさび層の形成を阻害すると考えられている¹⁰⁾。これに対してニッケル系高耐候性鋼は、鋼材中へのニッケル増量添加が内層さびを改質し、ナトリウムイオンの内層さびへの濃化を促し、塩化物イオンをさびの外側に留まらせる効果を期待して開発されたものである^{11), 12)}。

化学成分は「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (JIS G 3114)」をベースに、クロム (Cr) 添加量を少なくし、ニッケル (Ni) 添加量を1~3%に設定している。

国内では、耐塩分性を向上させた耐候性鋼として、ニッケル高耐候性鋼が、1998年 (平成10年) に開発、製品化され、同年に北陸新幹線北陸道架道橋 (橋脚および上部工) に採用されている。

なお現時点では、このニッケル系高耐候性鋼の採用に関する指針がなく、適用可否はミルメーカーの提供する曝露試験データ¹²⁾に基づく判断となる。このため架橋する環境条件に応じて鋼材選定ができるように、既存の研究成果より「耐候性合金指標V値 (Weathering alloy Index)」が提案¹³⁾されている。耐候性合金指標V値の算定式を図-2.2に示す。耐候性能が優れている場合は、V値が高い傾向となる。

しかし、地域や地形などの複雑な実鋼橋の腐食状況を必要なレベルで予想することは容易でなく、環境条件に応じた適切な鋼材選定を遂行するためには、今後も種々の実曝露データの拡充と供用後の長期的な検証も必要であり、産官学が一体となった研究が期待される。

【耐候性合金指標 (v 値)】

$$v = 1 / \{ (1.0 - 0.16[C]) \cdot (1.05 - 0.05[Si]) \cdot (1.04 - 0.016[Mn]) \cdot (1.0 - 0.5[P]) \cdot (1.0 + 1.9[S]) \cdot (1.0 - 0.10[Cu]) \cdot (1.0 - 0.12[Ni]) \cdot (1.0 - 0.3[Mo]) \cdot (1.0 - 1.7[Ti]) \}$$

ただし、 $0.9 \leq v \leq 2.5$

図-2.2 耐候性合金指標の算定式

2.1.3 橋梁用高性能鋼材 [SBHS]

橋梁用高性能鋼材SBHS(Steels for Bridge High Performance Structure)は、鋼橋の高品質化と製作コスト削減を目的として開発された鋼材である¹⁴⁾。製鋼過程における熱加工制御技術(TMCP)による組織制御などにより、従来の鋼材と比較して、降伏強度、引張強度、破壊靱性、溶接性、加工性が向上している¹⁴⁾。図-2.3にSBHSの降伏強度を示す。

実用化に向けた研究の結果、2008年(平成20年)に「橋梁用高降伏点鋼板」としてJIS化(JIS G 3140)された。この橋梁用降伏点鋼板には、SBHS400、SBHS500、SBHS700に加えて耐候性鋼板SBHS400W、SBHS500W、SBHS700Wも設定されており、長スパンの耐候性鋼橋梁にも適用可能ある。なお降伏強度は従来鋼と比較して、SBHS400(W)は10~23%(+35~75N/mm²)、SBHS500(W)は9~19%(+40~80N/mm²)、SBHS700(W)は2~5%(+15~35N/mm²)向上し、鋼重減による経済的な効果も期待できる。また、SBHS400(W)、SBHS500(W)は予熱の省略が可能であり、SBHS700(W)は、予熱温度を100~120℃から50℃まで低減できる利点がある¹⁵⁾。国土交通省試算によると、東京ゲートブリッジ(2012年供用)の主橋梁部分(全長760m)にSBHS500が採用されたケースでは、総重量約3%、総工費約12%の削減が確認されている¹⁶⁾。東京ゲートブリッジ(内面塗装は、変性エポキシ樹脂塗料一層)の全景を写真-2.1に示す。

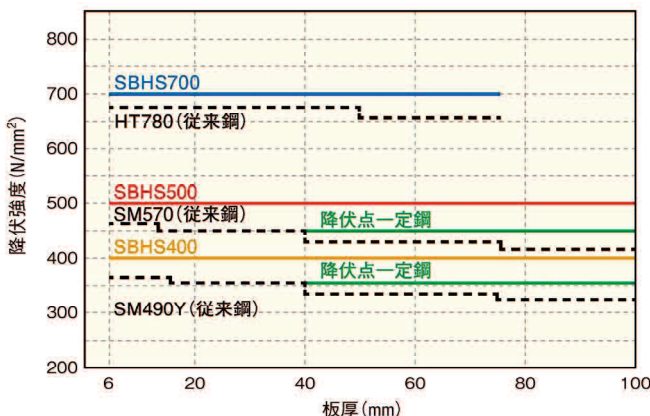


図-2.3 SBHSの降伏強度¹⁷⁾



写真-2.1 東京ゲートブリッジ¹⁸⁾

2.1.4 Sn添加耐食鋼

鋼材に微量のスズ（Sn）を添加することにより、塗装欠陥部における耐食改善効果が得られるため、塗装の塗り替え周期を延長化できる耐食鋼板である。

原理はFeのアノード反応（溶解反応）と同時に、鋼材に含まれるSnも溶出し、溶出したSnイオンがFeのイオン溶出を抑制することにより、腐食の進行を抑えることができる。

塗装周期延長鋼の耐食性メカニズムを図-2.4に示す。

また塗装を行うため、耐候性鋼橋梁が適用できないような塩害の厳しい環境や凍結防止剤散布地域で効果を発揮する。なお、塗装周期延長耐食鋼はJIS規格化学成分の範囲内で微量のSnを添加しているため、鋼橋で使用されるJIS鋼材規格の全てに適合し、従来鋼と同様の品質が確保されている。

なお、本鋼材に塗装の耐久性を向上させる効果はなく、塗膜の剥離面積が15%（早い時期の塗り替えを検討する）となる期間が、従来鋼と比較して2倍になることを実験等で確認することにより¹⁹⁾、C-5塗装仕様において100年間の塗り替え回数が1回となり、維持管理費の低減になると評価している²⁰⁾。Sn添加耐食鋼を橋梁へ適用した塗装の塗り替えイメージを図-2.5に示す。

国内での最初の実績は、2012年兵庫県の東播磨南北道／水足新辻第5高架橋で、翌年の2013年には阪神高速道路(株)の4号湾岸線三宝ジャンクション橋梁に採用されている。

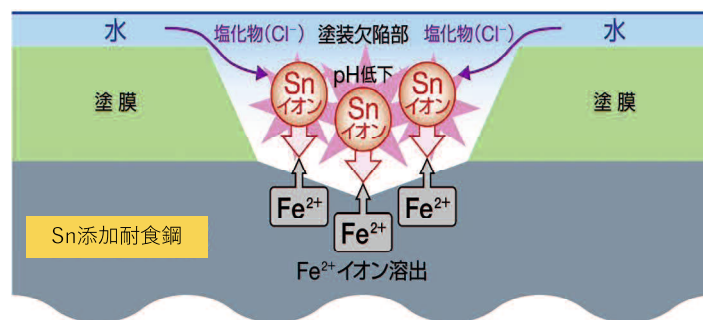


図-2.4 耐食性のメカニズム²¹⁾

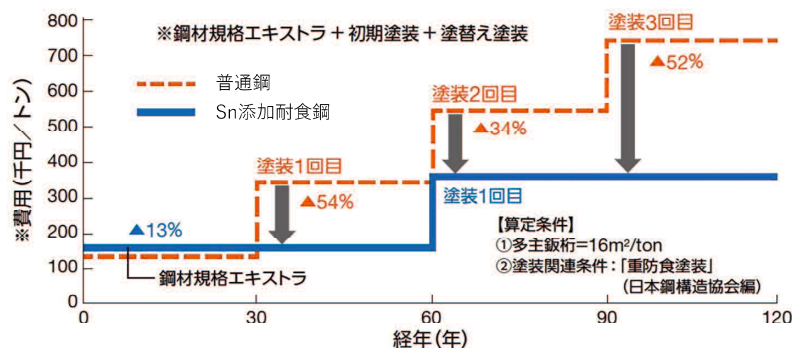


図-2.5 Sn添加耐食鋼の塗り替えイメージ図²¹⁾

2.2 被覆防食に着目した鋼橋長寿命化技術

鋼橋は鉄（鋼材）を加工して製作されるが、鉄は自然界に酸化鉄として存在する鉄鉱石から酸素を取り除き精錬されているため、そのままの状態に放置しておく、再び酸素を取り込んで酸化しようとする。この酸化還元反応による腐食は、長期にわたり徐々に鋼橋の性能を低下させる要因であるため、その対策として現在多く使用されているのが被膜防食である。ここでは、塗装を中心に水分、酸素、塩分などの環境因子から鋼橋を長期間保護するため、国内で進められている被覆による防食技術について述べる。

2.2.1 塗装仕様

国内で鉄構造物の防錆に塗装が使用され始めたのは、1881年に塗料の製造が開始されたことによる⁷⁾。当時の塗料は現地でボイル油と鉛丹を混合した油性さび止め塗料（顔料にボイル油を混入した糊状の塗料）で、その後1900年頃から鋼橋の建設が増加してくると、下塗りに鉛丹さび止め、上塗りに酸化鉄を主成分としたベンガラと鉛系さび止め顔料を調合した油性調合塗料が用いられるようになった⁷⁾。

しかし、下地処理は黒皮面を手工具で処理するだけであったため、固着した黒皮やさびはそのままであり、短い周期での塗り替えを必要とした。現在の合成樹脂塗料の開発が進んだのは、1955年頃であり、ブラスト処理の標準化や鋼などの下地の保護を目的とした下塗り塗料、下塗りと上塗り塗料との密着性確保を目的とした中塗り塗料、景観性能の付与を目的とした上塗り塗料など、特性の異なる複数の塗料を組み合わせる塗装システムと作業手順の基盤が確立されたのは、1960年代に入ってからである⁷⁾。

ここでは、鋼道路橋の塗装仕様が体系化された1971年以降の塗装仕様の変遷を日本道路協会の便覧に基づき述べる。

(1) 鋼道路橋塗装便覧（初版発行）²²⁾ 1971年12月20日（昭和46年）

今までの防食技術を体系化し、鋼道路橋塗装便覧の初版が発行される。

比較的厳しい腐食環境を想定したジंकリッチプライマーに塩化ゴム系塗料を組み合わせた塗装系を含め外面用3種類と内面用塗装系が制定された。

【外面用塗装系】

- ・長ばく形エッチングプライマー＋鉛系さび止め（鉛丹さび止め）ペイント
＋長油性フタル酸樹脂中・上塗り塗料
- ・ジंकリッチプライマー＋塩化ゴム系下塗り塗料＋塩化ゴム系中・上塗り塗料
- ・ジंकリッチプライマー＋厚膜形ジंकリッチペイント＋エポキシ樹脂下塗り塗料＋ポリウレタン樹脂塗料用中塗り塗料＋ポリウレタン樹脂上塗り塗料

【内面用塗装系】

- ・長ばく形エッチングプライマー（ジंकリッチプライマー）
＋タールエポキシ樹脂塗料（永久塗装）

なお、塩化ゴム系塗料については、1968年から1972年にかけて製造された一部の製品にPCB（ポリ塩化ビフェニル）が可塑剤として使用されていた⁷⁾。

(2) 鋼道路橋塗装便覧（改訂版）²³⁾ 1979年2月10日（昭和54年）

橋梁規模の大型化（製作工場～現場塗装間隔の長期化）などにより、鉛系さび止め塗料と現場塗装との塗装間隔の長期化に起因した層間剥離を防止するために、フェノールMIO塗料を工場塗装の最終層に追加する塗装系が制定された。

またフェノールMIO塗料の溶剤に侵されにくい特性を利用して、鉛系さび止め塗料と塩化ゴム系塗料の塗り重ねを可能とした塗装系が追加され、長期防錆形塗装系として「無機ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り+エポキシMIO+ポリウレタン樹脂上塗り」の塗装系および金属被覆として、溶融亜鉛めっきと金属溶射法が制定された。

【外面用塗装系】新規追加仕様

- ・A塗装系 一般塗装系（環境の腐食因子の強くない地域）
長ばく形エッチングプライマー+鉛系さび止めペイント+フェノールMIO塗料
+長油性フタル酸樹脂中・上塗り塗料
- ・B塗装系 一般塗装系（海岸地域や重化学工業地域など環境の腐食因子の強い地域）
長ばく形エッチングプライマー+鉛系さび止めペイント+フェノールMIO塗料
+塩化ゴム系中・上塗り塗料
- ・C塗装系 長期防錆形塗装系
ジंकリッチプライマー+厚膜形ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り塗料
+エポキシMIO塗料+ポリウレタン樹脂中・上塗り塗料

【内面用塗装系】

- ・D塗装系
長ばく形エッチングプライマー（ジंकリッチプライマー）
+タールエポキシ樹脂塗料3回塗り〈永久塗装〉

(3) 鋼道路橋塗装便覧（改訂版）²⁴⁾ 1990年6月10日（平成2年）

腐食環境別に適用する塗装系が明確に定義され、厳しい腐食環境の場合に、ふっ素樹脂塗料を追加し、C塗装系で全工場塗装を採用した。表-2.1に腐食環境分類、表-2.2に外面用塗装系の適用分類を示す。さらに内面用塗装系の明色仕上げに変性エポキシ樹脂塗料内面用が追加され、下フランジ下面、継手部への下塗り塗装を1層増し塗りすることによる安全性、耐久性向上が図られた。

また、現場塗装開始前の発さび防止、素地調整作業の効率化、除さび効果の向上を目的とし、C・D塗装系については部材製作時に無機ジंकリッチペイントで連結部（摩擦接合面）を塗装する方法が認められた。

表-2.1 腐食環境分類

一般環境	やや厳しい環境	厳しい環境
飛来塩分の影響を受けず、かつ、自動車排気ガスや工場ばい煙の影響を強く受けない環境。	飛来塩分の影響を受ける環境。または自動車排気ガスや工場ばい煙の影響を強く受ける環境。	潮風が強く、飛来塩分の影響を強く受ける環境。

表-2.2 外面用塗装系の適用分類

腐食環境の分類	塗 装 系		通常の場合	上塗りの色調を長期間保持する場合
一般環境	A塗装系	鉛系さび止め+長油性フタル酸上塗り	A-1	A-3、A-4
		またはシリコンアルキド上塗り	A-2	
やや厳しい環境	B塗装系	鉛系さび止め+塩化ゴム系上塗り	B-1	C-3、C-4
厳しい腐食環境	C塗装系	ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り+ポリウレタン樹脂またはふっ素樹脂上塗り	C-1 C-2	

[全工場塗装の場合]

無機ジンクリッチプライマー+無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料下塗（2回）
+ふっ素樹脂塗料中・上塗り

[工場塗装+現場塗装の場合]

〈工場〉無機ジンクリッチプライマー+無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料下塗
+エポキシ樹脂MIO塗料
〈現場〉ふっ素樹脂塗料中・上塗り

(4) 鋼道路橋塗装・防食便覧²⁵⁾ 2005年12月26日（平成17年）

塗装および塗装以外の新しい防食の開発と普及が進んだことにより、鋼道路橋に対する防食手法について統一、体系化された。

「道路橋仕様書・同解説 II 鋼橋編（平成14年3月）」に記述のある塗装、耐候性鋼材、溶融亜鉛めっき、金属溶射を中心に最新の技術資料が取りまとめられ、架設環境などの適用条件に応じて自由に合理的な防食設計ができるよう、基本的な防食原理から設計、施工、維持管理まで幅広い内容が記述された。あらゆる環境において重防食塗装を適用し、塗り替え周期を伸ばすことでライフサイクルコストの低減を図る方針となる。

塗替え塗装においても、従来よりも耐久性に優れる重防食塗装系を基本し、素地調整を1種（プラスチック工法）で行うRe-I 塗装系（スプレー）が追加された。（重防食塗装系の一般化、LCCの重視）

また、新設時の一般外面塗装系は、塗装便覧のA塗装系（A-1～A-4）、B塗装系（B-1）、C塗装系（C-1～C-4）を取り扱わないこととし、C-5（A-5）塗装系に限定された。

[C-5（全工場塗装）]

無機ジンクリッチプライマー+無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料下塗（2回）
+ふっ素樹脂塗料中・上塗り

(5) 鋼道路橋防食便覧2014年3月31日²⁶⁾ (平成26年)

社会基盤施設ストックの急速な高齢化や道路橋示方書の改訂および防食技術の技術的知見の蓄積等を踏まえ、防食機能の確保に重要な素地調整方法、複数の防食法の併用、防食適用後の診断および環境保全対策の見直し拡充が図られた。

近年の塗装材料の安全性、耐久性の進歩が目覚ましい反面、同一塗料、同一仕様にしても製作工場や架橋現場での品質管理の実状が把握できない面もあり、必ずしも耐久年数は同じではない現実を踏まえ、防食性能に大きく影響する素地調整について、その方法、程度、留意事項が見直されている。

- ・優れた防食材料を採用したとしても素地調整が適切に実施されないと本来の防食性能は発揮されない。
- ・素地調整は付着している塩分などの環境因子を排除することが重要であり、腐食進行の抑制に大きな効果がある。
- ・初期コストも大きな要素であるが、長期的な維持管理や環境への配慮を考えた場合は、動力工具による方法からブラスト法の採用を優先することが望ましい。

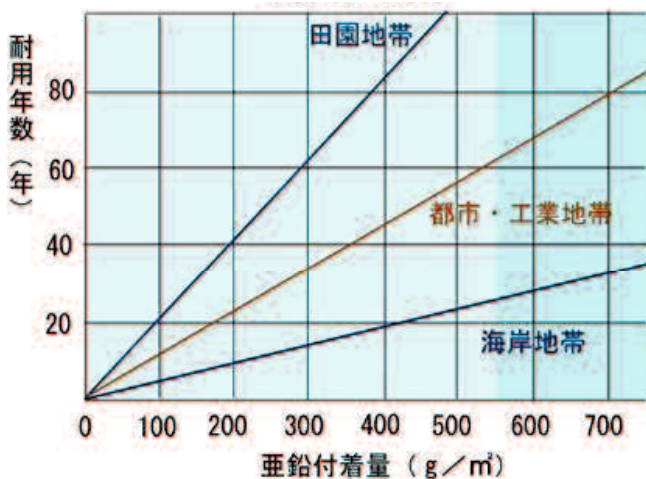
2.2.2 溶融亜鉛めっき仕様

溶融亜鉛めっきは、亜鉛による犠牲防食作用を利用したもので、亜鉛を鋼材に付着させてその表面に形成した亜鉛被膜により環境遮断を行い、鋼材を保護する方法である。

国内では、1876年(明治9年)に初めて工業化され、その後1963年(昭和38年)にJIS H 8641が制定された。鋼橋に初めて採用されたのは、流藻川橋(H形橋梁/橋長13m、鋼重23 t)で、その後、1964年(昭和39年)12月に竣工した新温井川橋(群馬県藤岡市)では(社)日本溶融亜鉛鍍金協会が数回に渡り現地調査を実施し、2006年時点(42年経過)においても外観的に鉄さびは見られず亜鉛付着量の減少量も、 $5.08 \text{ g/m}^2/\text{年}$ (フランジ)、 $4.85 \text{ g/m}^2/\text{年}$ (ウェブ)と、協会が各地で実施してきた図-2.6に示す曝露試験の田園地帯の結果とほぼ一致した良好な結果が示されている²⁷⁾²⁸⁾。なお、このように有効な防食法として期待された溶融亜鉛めっきであるが、めっき槽を大型化できないことや製作上の工夫が必要なことから近年では主構造への使用が減少している。

一方、厳しい環境下で使用されている本州四国連絡橋では、溶融亜鉛めっきを施した橋梁付属物の一部は供用開始から15年程度経過した時点で、外観が赤褐色に変色し亜鉛層と合金層が消耗し始めている現象が報告されている。当初の維持管理計画では、設置から補修までの期間が30年に設定されていたことから考えると、塗装仕様と同じく、海塩粒子の影響を受ける環境では、期待する不動態皮膜が形成されず、めっき被膜の消耗が早いことも確認されていることから、溶融亜鉛めっきの採用にあたっては、適用可能な環境範囲内であることを調査しておくことが必要となる。

現在は、純亜鉛(その他の元素0.3%以下)からなるめっき浴の後、アルミニウム4~10%、マグネシウム3%以下、その他元素0.3%以下で残部亜鉛からなる合金めっき浴(二浴法)として、従来の溶融亜鉛めっき仕様より耐食性が優れる「亜鉛アルミニウム合金めっきJIS H 8643:2019」が2019年11月20日に制定され、防食性能も向上しているが、対応可能な大きさは、長さ7.0m×幅1.8m×深さ2.0m(めっき槽L8.0m×W2.2m×D2.5m)で、通常の溶融亜鉛めっき槽(L17.0m×W2.1m×D3.6m)より小さく検査路、ガードレールなどの橋梁付属品分野での実績が増えている。



暴露試験地域	腐食速度 (g/m ² /年)	耐用年数
都市・工業地帯	8.0	62
田園地帯	4.4	113
海岸地帯	19.6	25

図-2.6 環境別耐用年数²⁸⁾

2.2.3 金属溶射仕様

鋼橋で使用される金属溶射は、鋼材に対して電気化学的に卑な電位を示す亜鉛 (Zn)、アルミニウム (Al) およびそれらの合金類などを熱源により加熱融合し微細な溶融金属粒子を作り、これを高圧の空気や燃焼フレイムなどによって、鋼材表面に吹き付けて皮膜を形成させる方法である²⁹⁾³⁰⁾。

この溶射皮膜は、環境遮断作用と電気化学的防食作用を保有するため、溶射被膜に傷等が生じて母材が局部的に露出すると、皮膜の損傷部分に水分が吸収されることによって、溶射皮膜の金属と鋼材との間に局部電池が形成され、電位の低い皮膜金属が溶出し、電位の高い金属である鋼材が電気化学的に保護される。

溶射技術は1910年スイスで開発され、国内には1919年 (大正8年) に導入された。1971年 (昭和41年) に亜鉛溶射やアルミニウム溶射の新たなJIS規格 (JIS H 8300、JIS H 9300等) が制定され、1972年 (昭和47年) に架設された関門橋では、厳しい腐食環境下での長期耐久性を期待して、補剛桁の防食下地処理として亜鉛溶射が採用された。

その後、金属溶射のJIS規格はIS02063との整合化が図られ、2011年に「亜鉛・アルミニウム及びそれら合金の溶射JIS H 8300 : 2011」へと改正された。

現在、鋼橋の防錆に採用されている溶射法は、熱源として酸素-可燃性ガス炎を用いるガス溶線式フレイム溶射法、あるいは熱源としてアーク放電を用いるアーク式溶射法が多いが、大断面の施工が要求される鋼橋など製作工場内での大型鋼構造物の防食溶射は、施工能力が高く、ランニングコストの安いアーク溶射が主流になっている。

次に溶射材料として亜鉛、アルミおよび亜鉛、アルミ合金が多く使用されているが、材料の選択とともに重要なのが素地調整である。素地調整として、溶射皮膜を鋼素地と密着させるため鋼材表面に無機質粒子とエポキシ系樹脂によって構成された粗面形成材を塗布して粗面化を行う粗面形成材法も開発されているが、皮膜厚の管理が難しく施工技量が必要であるため、作業条件に制約がない場合は、ブラスト法の採用が優先する。

近年では、北海油田等の海洋構造物の防食として使用されてきたアルミニウム・マグネシウム合金溶射+封孔処理に全面ふっ素樹脂塗装を採用した防食法が、亜熱帯地域の海上部でも採用され³¹⁾、100年間の設計供用期間中に塗り替え塗装を必要としない防食性能を発揮することが期待されている。

そのためには耐久性の高い防食材料の選定に加えて、良好な溶射皮膜を確実に得るために、構造上の制約や施工条件にも十分な配慮を行うことが重要になる。

2.2.4 水洗い

洗浄は鋼橋の長寿命化手法として有効な技術であるが日本においては実用化されていないのが現状である。しかし米国では塗装橋梁に加えて無塗装の耐候性橋梁においても多く採用されている方法であり、実橋での研究成果に裏付けられている。ニューヨーク州橋梁公団における鋼桁洗浄作業状況を写真-2.2に示す。1970年にスパイクタイヤの使用が禁止された米国は、それ以降、凍結防止剤が多量に散布されるようになり、その影響で1980年には一部の州で無塗装耐候性橋梁の建設が一時禁止された。これは凍結防止剤の主成分である塩化カルシウムにより、緻密なさびが形成される前に、鋼材に腐食が発生するためである。その後の研究で凍結防止剤の悪影響は、漏水部において極めて顕著となり、凍結防止剤散布地域（沿岸部における飛来塩分を受ける地域を含む）で耐候性鋼橋梁の性能を確保するには、漏水を防ぐ技術、および漏水による塩分付着除去を中心とした対策が緻密なさびの生成に効果的であることが判ってきた。なお、無塗装の耐候性橋梁においては建設時からのさびの生成状況を計画的に記録しておくことが重要であり、さびの進行が認められる場合は洗浄以外の手法を考えることが必要になる。

このように無塗装の耐候性橋梁においても鋼材表面に付着した海塩粒子や汚れを除去することにより延命化が期待できる洗浄手法ではあるが、架橋下の水源（河川）を利用し、洗浄後の濁水をそのまま処理（放水）する作業が認められない³²⁾排水基準の厳しい国内においては、経済性や環境面での課題も多い。また、洗浄前における鋼橋の付着物の性状、洗浄時期・方法やその効果に関する定量的な知見が少ない現状では、適正な評価も難しく、環境負荷やコストなど試験施工を通して実態に即したデータを検証していくことから進めなくてはならない。国内で簡易移動吊足場を用いた洗浄状況（試験施工）を写真-2.3に示す³²⁾。



写真-2.2 ニューヨーク州橋梁公団洗浄作業³²⁾



写真-2.3 簡易移動吊足場を用いた洗浄状況³²⁾

2.3 環境改善に着目した鋼橋長寿命化技術

環境改善による防食は雨水の滞水や塵芥の堆積防止構造、漏水箇所の改良などの対策を基本として実施されてきたが、ここでは桁間や桁全体をカバーする方法や桁内部空間の環境を改善する研究内容を述べる。

2.3.1 桁カバーによる方法

海外では、海塩粒子など環境因子の侵入を防ぐ目的で橋梁を囲い腐食環境を調査した結果、塗膜は通常の場合より耐久性が良く、塗装の塗り替え間隔の長期化、さらには、塗り替えを省略できる可能性があるとして報告^{33), 34)}されている。橋梁を囲うという観点では1960年代以降、都市部の高架橋を中心に景観向上のためのカバー（以下、化粧板）が取り付けられてきた。この化粧板内の環境に着目し、実橋において曝露試験を実施した報告³⁵⁾があるが、化粧板を設置した箇所は紫外線照射、不純物の付着や雨水の浸入が減少したことによる一定の効果が見られるものの、密閉性に課題があり以下の現象が確認されている。

- ・現状の化粧板構造は不純物の侵入をある程度遮断できるが、化粧板パネル間にすき間が存在するため、そのすき間から不純物が化粧板内部に侵入することがある。また、雨水の浸入が発生する個所では、海塩粒子と工場排出ガス中の腐食性を持つ硫酸イオンが雨水と一緒に化粧板内部に侵入する可能性が高い。

- ・水浸入個所を除く化粧板内一般部の腐食速度は、化粧板外部より若干小さいものの、ほぼ同程度であった。化粧板内部で雨水の浸入が生じた個所では、化粧板内部一般部より腐食速度がはるかに大きかった。雨水と飛来不純物の侵入は化粧板内部の鋼材腐食発生要因である。

この化粧板内部の環境腐食性を改善するには、雨水と飛来不純物の侵入を防止することが重要で、化粧板の構造改良による密閉性向上が有効な対策であるが、化粧板の板厚は薄く、取り付けボルト径も小さいため、当時の知見では判らなかったすき間腐食や異種金属腐食により劣化・損傷し、取り外されている箇所も散見されており、その対策は困難である。写真-2.4に都市内高速の化粧板設置状況を示す。

また、都市内の重交通箇所には、騒音の低減、反射音吸収を主目的とした裏面吸音板が設置されているが、更新が必要な部材で構成されていること、環境因子遮断機能が低く密閉性の確保が難しく化粧板と同様の課題がある。写真-2.5に裏面吸音板の設置状況を示す。

イギリスでは従来の化粧板より密閉性と強度を有する繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics）やガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics）で既存のI型多主桁の橋の周りを囲みボックス構造³⁶⁾とし、防食・美観の向上を計るような試みも具体化している。この方法は、ブリッジエンクロージャーシステム（Bridge Enclosure System）と呼ばれ他の機関とのインターフェースをとることなく、桁内部への移動が可能であり、安全に点検が実施できる利点もある。

国内では同様な構造として、沖縄県内に建設された鋼箱桁の桁間部に繊維強化プラスチックとアルミ合金製の桁カバーを設置し、環境調査を実施した報告^{37), 38)}がある。

なお、古来より商品をラッピングするという発想は一定の保護効果があり経験工学的にも有効と考えられており、近年では鋼桁を海塩粒子から保護する目的で、塩囲いと呼ばれる透明なプラスチック波板で囲う簡易的な方法³⁹⁾、軽量で採光性のある特殊な膜で囲う方法⁴⁰⁾が採用されている。さらには日本海沿岸に架橋されたコンクリート橋においても、防水板としてプラスチック板を桁間に配置、すき間にエポキシ樹脂パテ材をシールし、海塩粒子の侵入を防ぎ効果を上げている事例⁴¹⁾もある。このコンクリート橋では、1982年に塩害対策を実施し、2年後の1984年、12年後の1994年に追跡調査が実施されているが、いずれも防水板内コンクリート中の含有塩分量の増加は認められていない。塩囲いによる防護状況を写真-2.6に、膜式橋梁外装工法を写真-2.7に、コンクリート橋への防止板設置状況を図-2.7に示す。

しかしながら、いずれも遮断機能や100年の設計供用期間を満足させるには課題があり、今後の改良が望まれる。



写真-2.4 都市内高速の化粧板設置状況



写真-2.5 裏面吸音板の設置状況

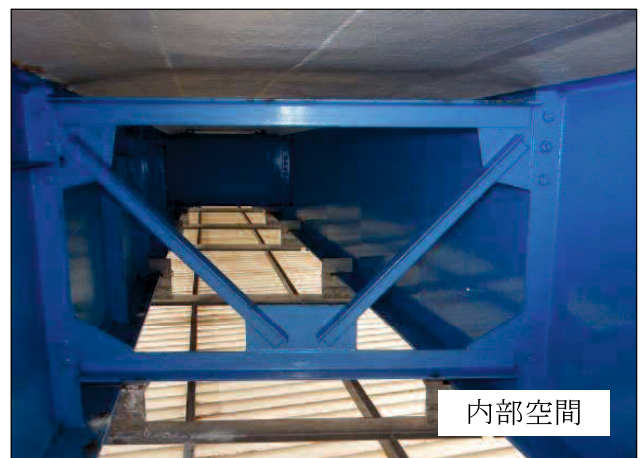


写真-2.6 塩囲いによる防護状況³⁹⁾

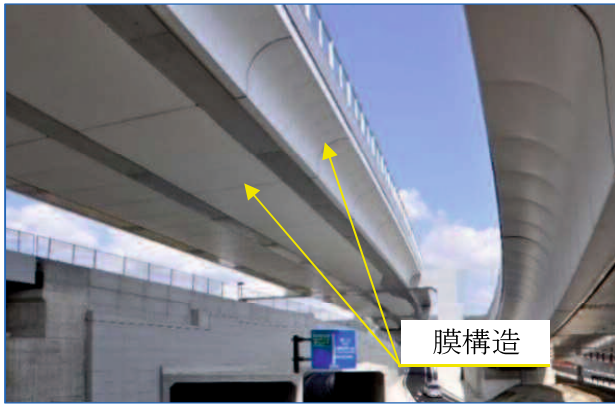


写真-2.7 膜式橋梁外装工法⁴⁰⁾

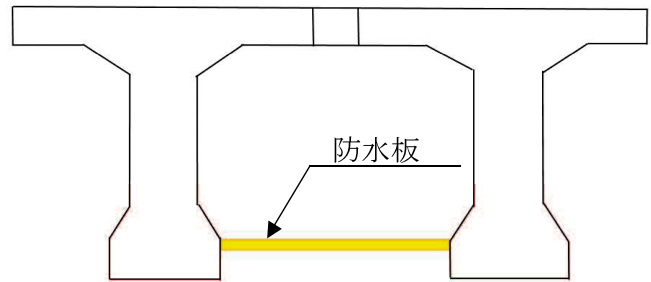


図-2.7 防水板（プラスチック）設置状況⁴¹⁾

2.3.2 桁内除湿システムによる防食技術

桁内除湿による防食は初期投資が必要になるが、除湿機の稼働状況の確認と湿度のモニタリングを行うことにより、長期にわたり確実な防食管理が可能となるため、欧州の吊り橋、斜張橋を中心に進められてきた⁴²⁾。デンマークのリトルベルト橋（1970年）、ファロー橋（1985年）、フランスのノルマンディ橋（1994年）が代表的な事例⁴³⁾である。我が国では欧州の技術を参考に新尾道大橋（1999年）へ試験的に初めて採用^{44), 45)}、その後北海道室蘭市の白鳥大橋⁴³⁾でも実証試験が行われ、除湿の有効性が確認されている。中小規模の橋梁への適用例は少ないが、北海道十勝地方の白鳥橋⁴⁶⁾や中央自動車道長野線の西沢橋⁵⁾においても、桁内の相対湿度を管理することによる防食性能が評価されている。西沢橋の除湿器と送風ダクトの設置状況を写真-2.8に示す。桁内除湿システムは、密閉状態に近い鋼橋箱桁内の水分を除湿機で除去しながら内部に乾燥空気を循環させ、桁内の湿度を一定値（臨界湿度）以下に保つことにより、内面の防食を図るものである。桁内除湿システムの概念を図-2.8に示す。理論的には相対湿度が100%にならない限り鋼板表面に結露は生じず、腐食反応が起きないはずであるが、表面にダスト・塩類などが付着している場合、吸着効果により臨界湿度は50～70%に低下するとされている⁴⁷⁾。2010年に建設された羽田空港D滑走路では、今までの研究をもとに52万^m2の空間へ除湿システムが計画的に配置され相対湿度が常時50%以下にコントロールされている⁴⁸⁾。

なお、除湿システムを検討する際には、箱桁内はダイヤフラムなどにより多数の部屋に分割されているため局所的な湿度の上昇が懸念されるケースも想定されるので、数値流体解析手法などにより事前の検証を行うことが必要である。また、構造的に複雑で乾燥空気の循環が期待できない箇所や重要な構造箇所については、内面塗装などの被覆処理を行うことが肝要である^{49), 50)}。羽田D滑走路ジャケット部の除湿イメージを図-2.9に、桁内部と除湿用配管を写真-2.9に示す。

この除湿機による除湿システム（湿度制御）は、箱桁内部に限られること、桁内への電源設備が必要不可欠な上に、計画的な配置と設置費用、運転・維持管理等のランニングコスト、さらに耐久年数経過後の設備更新費用も発生するため、内面塗装面積の比率が大きく点検・補修などのメンテナンスワークの困難な多室箱桁どの長大橋において、経済的かつ効果的な防食方法であると考えられる。

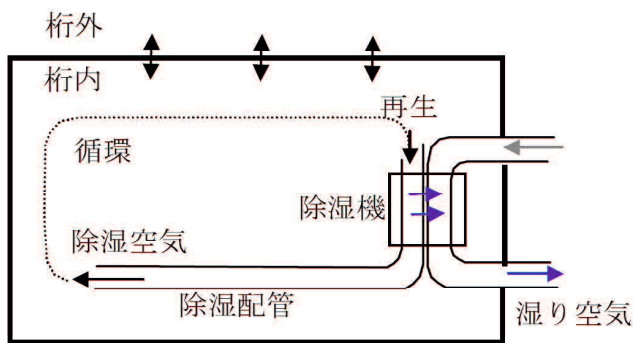


図-2.8 桁内除湿システムの概念⁴³⁾

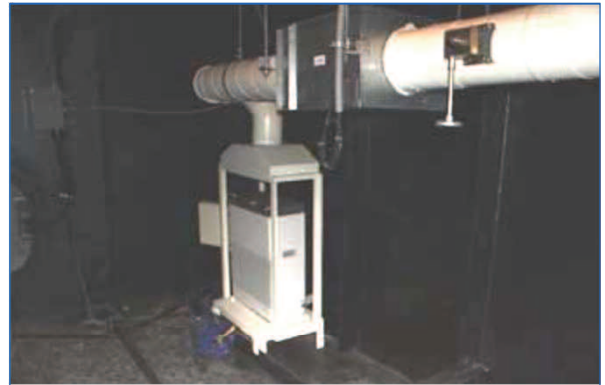


写真-2.8 除湿機と送風ダクト（西沢橋）⁵⁾

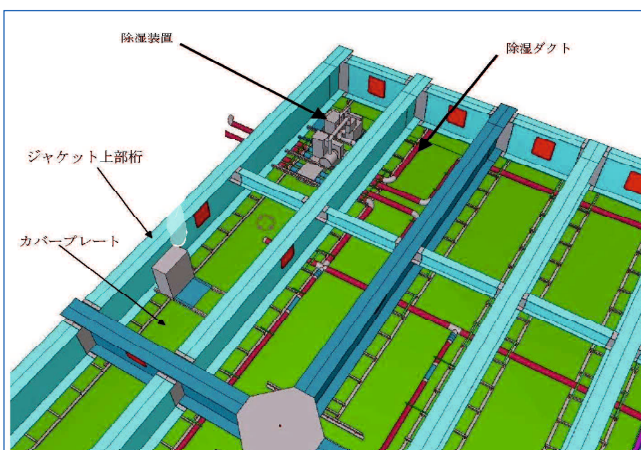


図-2.9 除湿システムイメージ⁴⁸⁾



写真-2.9 桁内部と除湿用配管⁴⁸⁾

2.3.3 箱桁内部の除湿剤による防食技術

箱桁の内部でさびが発生する主な要因は、現場継手部や開口部（マンホール、ハンドホール）などからの漏水、塩分などの腐食性物質を含む外気の流入、および構造物内外の温度差による結露の発生などである。一方、箱桁の内部は密閉に近い状態であり、海塩粒子など環境因子の侵入がほとんどなく、鋼材の腐食速度は非常に小さいと考えられている^{46), 49)}。

しかし、箱桁の密閉性を向上させることにより、外部からの環境因子を大幅に遮断できたとしても、相対湿度が比較的高い地域では箱桁内部に結露が発生し、結露水の生成による腐食進行の課題が残る。そこで箱桁内の湿度をコントロールし結露水の発生を抑えることが可能で、取り扱いが容易、安価、半永久的な除湿効果が期待できる除湿剤に着目した環境改善方法が検討されてきた。

この方法は、継手部のシーリングなどにより箱桁内部の密閉度をさらに向上させ、漏水および環境因子の侵入を防止すると共に、除湿剤（調湿剤）による湿度コントロールにより相対湿度を概ね85%以下に制御することで結露を防止し、腐食の発生と進行を制御する防食技術である。

また、箱桁においても側面と底面を密閉性の高いパネルで覆い、箱桁と同様の構造を形成することで、除湿剤による湿度コントロールが可能になるという実験結果⁵¹⁾もある。

本システムのポイントは除湿剤の性能と効果的な配置であるが、除湿剤については日本工業規格JIS Z 0701に定めているB型のシリカゲル乾燥剤が安全性や桁内での作業性に最適であり、さらには原則として取り替えが不要であるため経済性や維持管理面でも優れている。以下にB型のシリカゲルの特徴を述べる。

- ・毛細管凝縮により周囲湿度が高い時に吸湿し、周囲湿度が低い時に常温下で水分を放出する。
- ・化学的に安定した物質であり、半永久的に調湿効果が期待できる。
- ・安価である。
- ・人体への毒性がなく、取り扱いが安全である。

B型シリカゲルの吸湿特性グラフを図-2.10に、実際の箱桁内への設置状況を写真-2.10に示す。

この除湿剤を箱桁内部へ設置する防食技術は、箱桁内部の相対湿度を長期間85%以下にコントロールできることが確認されたが、結露水の発生を抑えても不純物の付着量が多ければ、相対湿度85%以下の状況下においても腐食が発生する可能性は避けられない。このように取扱いが容易で安価な上、半永久的に防食効果が期待できる除湿剤ではあるが、建設環境（地域）、設置空間の構造、気象条件などによりその効果が不安定であるため、全ての箱桁構造に適用するにはリスクが大きいと考える。

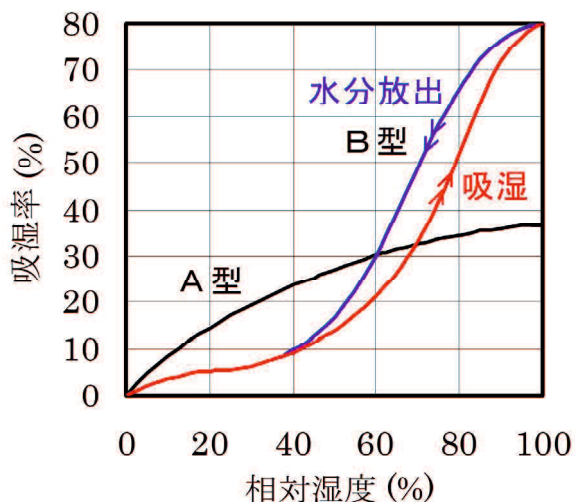


図-2.10 B型シリカゲルの吸湿特性グラフ⁵¹⁾



写真-2.10 箱桁内への設置状況⁵¹⁾

参考文献（第2章）

- 1) 後藤宏明, 守屋 進, 内藤義巳, 山本基弘, 藤城正樹, 斎藤 誠: 耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討, 材料と環境, Vol. 59, pp. 10-17, 2010.
- 2) 国土交通省 東北地方整備局, 道路部・東北技術事務所: 東北地方における道路橋の維持・補修の手引き (案)【改訂版】, 2018. 8
- 3) 独立行政法人土木研究所, 関西ペイント株式会社, 神東塗料株式会社, 中国塗料株式会社, 日本ペイント株式会社, 大日本塗料株式会社, 日鉄防蝕株式会社: 鋼橋防食工の補修方法に関する共同研究報告, 共同研究報告書, 第 414 号, pp. 40, pp. 100-107, 2010. 12
- 4) 廖 金孫, 松井繁憲, 串田守可, 篠原 正, 藤野陽三: 鋼製箱桁内部の環境腐食性および除湿剤による防錆に関する研究, 土木学会論文集, No. 749/VI-61, pp. 137-148, 2003. 12
- 5) 杉崎幸樹, 酒井修平, 西本 悟, 大間知 良晃: 鋼箱桁橋の桁内除湿による防食効果に関する調査, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-259, 2009. 9
- 6) (社) 日本橋梁建設協会: 無塗装橋梁の手引き, 1998. 3
- 7) (社) 日本橋梁建設協会: 鋼橋技術の変遷, 2010. 5
- 8) 国土交通省, (一社) 日本鉄鋼連盟, (一社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究 (I) 耐候性鋼材の適用環境評価手法に関する検討, 国総研資料 第 777 号, 2014. 1
- 9) (公社) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, 2014. 3
- 10) 浅見勝彦, 菊地迪夫: 長期大気暴露した耐候性鋼さび層のキャラクターゼーション, 日本金属学会誌, 第 66 巻, 第 6 号, pp. 649-656, 2002.
- 11) 岡野重雄: 橋梁用高性能鋼材とその適用例, 溶接学会誌, 第 76 巻, 第 7 号, pp. 506-512, 2007.
- 12) 紀平 寛, 田中睦人, 安波博道, 竹澤 博, 楠 隆, 松岡和己, 原田佳幸, 田辺康児: 3%ニッケル高耐候性鋼の適用可能性検討方法, 新日鉄技報, 第 380 号, pp. 28-32, 2004.
- 13) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼 真, 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, No.738/I-64, pp. 271-281, 2003. 7
- 14) 本間宏二, 田中睦人, 松岡和己, 糟谷 正, 川崎博史: 橋梁用高性能鋼 BHS の利用技術開発, 新日鉄技報, 第 387 号, pp. 47-52, 2007.
- 15) 三木千壽, 市川篤司, 楠 隆, 川端文丸: 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp. 1-10, 2003. 7
- 16) 保坂鐵矢, 池田忠睦: 東京ゲートブリッジの概要—景観性と構造的性 特に、塗装耐久性—, (一社) 日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会, 第 15 回技術発表大会, 2012. 5. 17
- 17) (一社) 日本鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会: 橋梁用高性能鋼材, 2012.
- 18) (一社) 日本鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会: 高性能鋼の概要, 2019. 10

- 19) 菅江清信, 上村隆之, 田中睦人, 児玉正行, 壱岐 浩 : Sn 添加耐食鋼の塗装寿命延長化の検証と7年間の曝露試験結果, 土木学会第71回年次学術講演会, I-025, 2016.9
- 20) 菅江清信, 上村隆之, 安藤隆一, 都築岳史 : 塗装周期延長耐食鋼 (CORSPACE®) の開発と実用化, 新日鉄住金技報, 第400号, pp.79-85, 2014.
- 21) 日本製鉄株式会社ホームページ (厚板/コルスペース/CORSPACE) : <https://www.nipponsteel.com/product/plate/list/06.html> (最終検索日 2021年7月16日)
- 22) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋塗装便覧, 1971.12
- 23) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋塗装便覧, 1979.2
- 24) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋塗装便覧, 1990.6
- 25) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.12
- 26) (公社) 日本道路協会 : 鋼道路橋防食便覧, 2014.3
- 27) (社) 日本溶融亜鉛鍍金協会 : 溶融亜鉛めっき橋梁の追跡調査 (新温井川橋), 2006.3
- 28) (一社) 日本溶融亜鉛鍍金協会ホームページ (溶融亜鉛めっきの耐食性) : <https://aenmekki.or.jp/mekki/tabid/75/Default.aspx> (最終検索日 2021年3月28日)
- 29) 内田雅信, 辻井 元, 大繩登史男 : 防錆溶射技術の現場適用, 溶接学会誌, 第75巻, 第2号, pp.31-35, 2006.
- 30) 上野和夫 : 溶射技術入門 (三訂版), (一社) 日本溶射学会刊, 2017.
- 31) 宜保 勝, 與儀克明, 原田政彦 : 伊良部大橋主航路部の耐久性設計について, 土木学会第65回年次学術講演会, CS4-019, 2010.9
- 32) 磯 光夫, 勝俣 盛, 越後 滋, 菅原 登志也, 安江 哲, 藤野陽三 : 橋梁の付着物調査と洗浄技術の実用化, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.2, pp.220-236, 2010.4
- 33) Vassie.P.R. : Corrosion of structural steelwork in bridge enclosures, box sections and anchorage chambers, Br.Corros.J.Vol.22, No.1, pp.37-44, 1987.
- 34) McKenzie.M. : Corrosion Protection-The Environment created by bridge enclosure, Research Report 293, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, pp.1-24, 1991.
- 35) 廖 金孫, 田中正明, 原 直人, 柴崎 剛, 藤野陽三 : 橋梁化粧板内部の環境腐食性評価と鋼桁防食性向上への提案, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.1, pp.67-78, 2006.3
- 36) Head.P. : Use of Fibre Reinforced Plastics in Bridge Structures, Proc. IABSE Congress Helsinki, pp.123-128, 1988.
- 37) 久保圭吾, 亀子 学, 山下修平, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉 : FRP 防護板を用いた鋼桁間の腐食環境改善に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会, I-165, 2012.9
- 38) 中野麻衣子, 井口 進, 山下修平, 下里哲弘, 田井正行, 澤田知幸 : アルミ合金製の多機能防食デッキ内部の腐食環境調査, 土木学会西部支部沖縄会, 第8回技術研究発表会 Session1, 材料・塩害, pp18-19, 2019.1
- 39) 株式会社構造技研新潟ホームページ : <https://www.kozogiken-niigata.co.jp> (最終検索日 2021年3月28日)

- 40) 太陽工業株式会社ホームページ : <https://www.taiyokogyo.co.jp> (最終検索日 2021 年 3 月 28 日)
- 41) 西川和廣, 上阪康雄, 塚田幸広, 山本幹雄 : 日本海沿岸に架けられたコンクリート橋の塩害対策, 橋梁と基礎, Vol. 34, No. 1, pp. 29-36, 2000. 1
- 42) Bloomstine, M.L., Rubin, F. and Veje, E. : Corrosion protection by means of dehumidification, IABSE Symposium-Rio de Janeiro, pp. 373-382, 1999. 8
- 43) 大島雅人, 田高 淳, 鈴木恵太, 坂本良文, 藤野陽三 : 鋼箱桁橋梁の経済性を考慮した桁内除湿設計と実証試験, 土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 1, pp. 119-130, 2007. 3
- 44) 金子正猪, 溝上義昭, 内藤 真 : 乾燥空気による箱桁内防食—新尾道大橋—, 橋梁と基礎, pp. 31-34, 1995. 5
- 45) 廣田昭次, 小島久邦, 東 秀樹 : 新尾道大橋桁内除湿設備の最適運転の試み, 本四技報, Vol. 26, No. 98, pp. 18-24, 2002. 3
- 46) 松井繁憲, 寺西 功, 三田哲也, 藤野陽三 : 鋼箱桁内部防錆実験の報告, 鋼構造論文集, 第 2 巻, 第 7 号, pp. 63-71, 1995. 9
- 47) ジャン・ポール・ルベ, マフレット・ヒルト(著)山田健太郎(訳) : 鋼橋(鋼橋および合成橋の概念と設計) 2016. 6
- 48) 鈴木大介, 野口孝俊, 鈴木紀慶, 風野裕明 : 羽田 D 滑走路におけるカバープレートを採用したジャケット構造の防食法としての優位性の検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-119, 2010. 9
- 49) 廖 金孫, 松井繁憲, 串田守可, 篠原 正, 藤野陽三 : 鋼製箱桁内部の環境腐食性および除湿剤による防錆に関する研究, 土木学会論文集, No. 749/VI-61, pp. 137-148, 2003. 12
- 50) 立花周作, 麻生稔彦 : 金属サンドイッチパネル製カバーによる防食法の腐食環境改善効果に関する検証, 土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 3, pp. 456-466, 2020.
- 51) 庄野好希, 浦 剛史, 槌谷 直, 庄野 泉, 田中 正明 : 除湿剤を用いた箱桁内面防錆システムの実橋への適用, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-198, 2008. 9

第 3 章

金属サンドイッチパネル内の腐食環境評価

第3章 金属サンドイッチパネル内の腐食環境評価

3.1 概要

本章では、亜熱帯地域の臨海部に架橋された単純合成鈹桁橋の側面と下フランジ全体を金属サンドイッチパネルで覆った鋼桁内部空間の腐食環境について、実験により明らかにすることで得た知見を述べる。この金属サンドイッチパネルで鋼桁を覆う手法は、外部からの環境因子を抑制する効果が期待できる環境改善による防食法の1つであるが、その閉塞された桁内の環境評価に関する研究報告は少ない。実験では断熱性能を有する金属サンドイッチパネルが取り付けられた鋼橋に着目し、環境因子抑制レベル、温湿度の変化、濡れ時間、ワッペン試験片の曝露試験に加えて、実験中に桁内で観察された結露現象についても考察する。

また、架橋近傍の防潮堤上（桁外）で遮へい曝露試験を行い、環境の厳しい地域での桁内・桁外の腐食環境を可視化することにより、金属サンドイッチパネルによる環境改善の効果を数値で評価することとした。

金属サンドイッチパネルを利用した防食法は、常設足場機能を付加したパネルで鋼橋全体を覆うことにより、腐食環境改善による鋼桁本体の長寿命化と維持管理機能の向上を同時に進めて行く考え方である。この金属サンドイッチパネルは、飛来塩分や紫外線など外部からの腐食・劣化環境因子の進入を抑制するとともに、ポリイソシアヌレートフォームで充填された芯材が保有する断熱性能により結露の発生も抑えることが確認¹⁾されている。鈹桁に設置すれば箱桁構造に、鋼箱桁に設置すれば2重の箱桁構造となり従来腐食上の観点において弱点になる添接部にも直接外気が触れることはない。なお設置方法については、鋼橋の構造や周辺環境、維持管理計画により、鋼橋全体を覆うケースと桁間のみに取り付ける2ケースが基本となる。鋼桁は様々な状況下であり、腐食環境は桁の構造（ウェブと下フランジに囲まれた空間容積）や架橋位置などにより大きく異なるため、構造や地域別に実証的かつ継続的な腐食環境の調査が必要である。

3.2 調査対象橋梁の環境

調査対象橋梁は沖縄県久米島町の臨海部に架橋された鋼橋とした。

久米島は周囲48kmの海岸線を有し、年平均気温23.7℃、相対湿度76.8%、降雨量約2,500mmと島全体が亜熱帯地域特有の厳しい状況下にある。久米島の位置を図-3.1に、調査対象橋梁の架橋位置を図-3.2に、沖縄・大阪・東京の気象データ²⁾を表-3.1に、地域別年平均飛来塩分量³⁾を図-3.3に、地域別腐食速度³⁾を図-3.4に示す。年平均風速4.3mの潮風が海塩粒子を巻き上げ島内の構造物に降り注ぎ、前述の海塩粒子の影響が相まって、日本全国の海岸線と比較しても腐食速度は2倍以上速く、この地域での試験データは、今後国内で環境改善を検証していく上での有効な指標になると考える。周辺環境を写真-3.1に、全景を写真-3.2に示す。

本橋の架橋位置は海岸から直線距離で約100mの河川上で、計画高水位から金属サンドイッチパネル（裏面）までの離隔は1.0m程度と小さく、海岸部からの飛来塩分と川面からの湿気の影響を受けやすい環境にあり、これまでの調査⁴⁾によると、架橋位置での飛来塩分量は2012年8月と9月に1.0 mddと高い数値が確認されている。

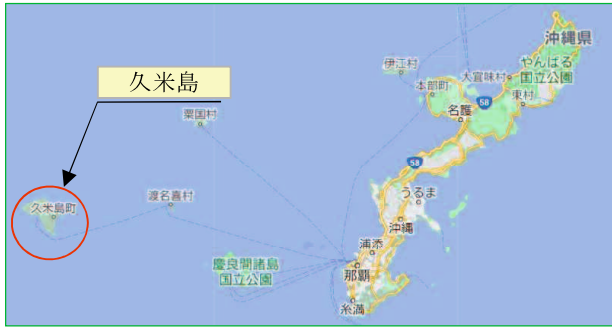


図-3.1 久米島位置図



図-3.2 架橋位置図

表-3.1 気象データ (沖縄・大阪・東京)

地点・測定項目	降水量 (mm)	温度 (°C)	相対湿度 (%)	平均風速 (m/S)	日照時間 (hr)
2015 久米島	2058.5	23.5	76	4.3	1691.3
那覇	1425.0	23.6	73	5.2	1813.8
大阪	1648.5	17.2	66	2.4	2006.2
東京	1781.5	16.4	68	2.8	1966.6
2016 久米島	2856.0	24.1	77	4.3	1762.0
那覇	2368.0	24.1	74	5.1	1757.2
大阪	1453.5	17.7	65	2.4	2127.0
東京	1779.0	16.4	69	2.8	1841.7
2017 久米島	1953.5	23.6	74	4.2	1705.6
那覇	1907.0	23.6	71	5.0	1646.0
大阪	1275.5	16.8	64	2.4	2184.6
東京	1430.0	15.8	68	2.9	2050.9
2018 久米島	2699.5	23.4	78	4.4	1896.0
那覇	2469.5	23.5	74	5.3	1876.5
大阪	1651.5	17.4	65	2.4	2265.6
東京	1445.5	16.8	70	3.0	2112.2
2019 久米島	2767.0	23.8	79	4.4	1611.2
那覇	2637.5	23.9	77	5.2	1665.6
大阪	1219.0	17.6	66	2.4	2101.2
東京	1874.0	16.5	70	2.9	1909.0
5年間平均	2466.9	23.7	76.8	4.3	1733.2
那覇	2161.4	23.7	73.8	5.2	1751.8
大阪	1449.6	17.3	65.2	2.4	2136.9
東京	1662.0	16.4	69.0	2.9	1976.1

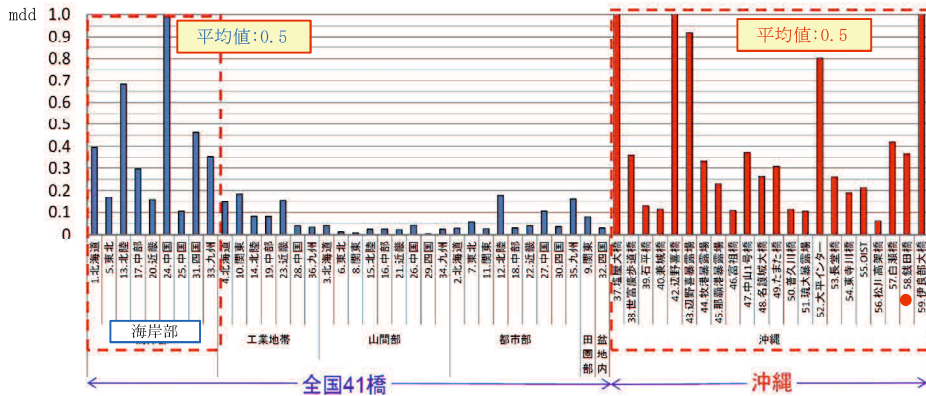


図-3.3 地域別年平均飛来塩分量

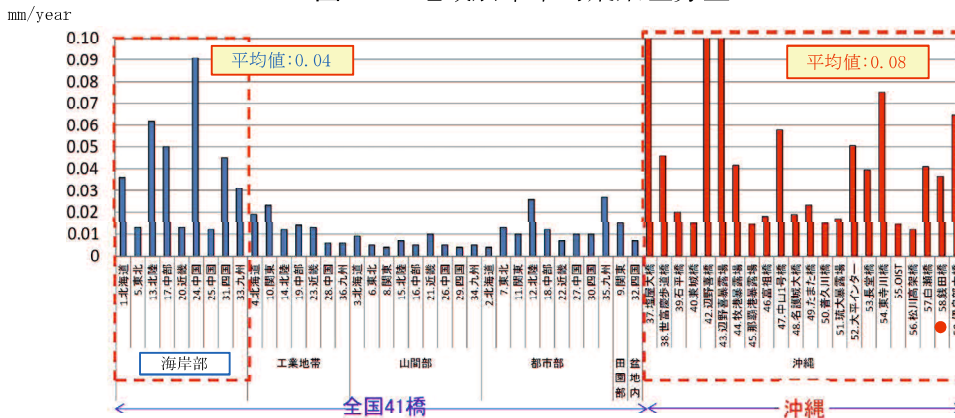


図-3.4 地域別腐食速度



写真-3.1 調査対象橋梁の周辺環境

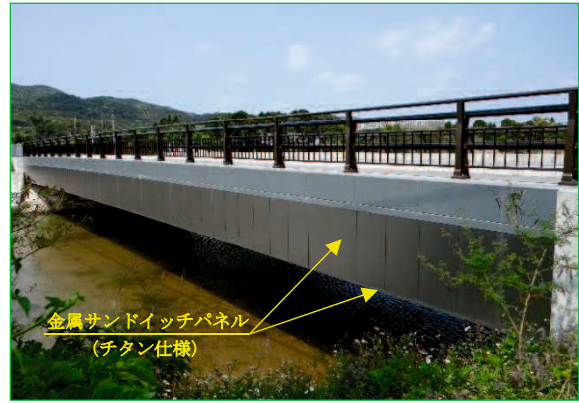


写真-3.2 調査対象橋梁の全景

3.3 調査対象橋梁の構造仕様

調査対象橋梁の構造形式は、床版にI形鋼を組み込んだ単純合成鈹桁橋⁵⁾である。橋梁諸元を表-3.2に、断面を図-3.5に、合成床版の構造概要を図-3.6に示す。

表-3.2 橋梁諸元

形式	単純合成鈹桁橋		
橋長	39.5m	幅員	10.25m
桁高	1.1m	床版厚	160mm
防食	D-5塗装+金属サンドイッチパネル (外皮材/チタン仕様)		
竣工	2015年8月		

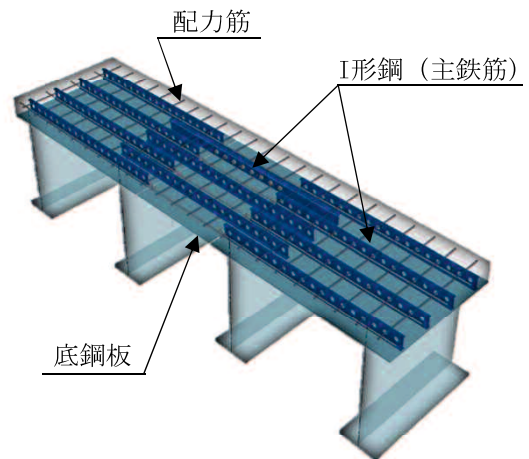


図-3.6 合成床版の構造概要図⁵⁾

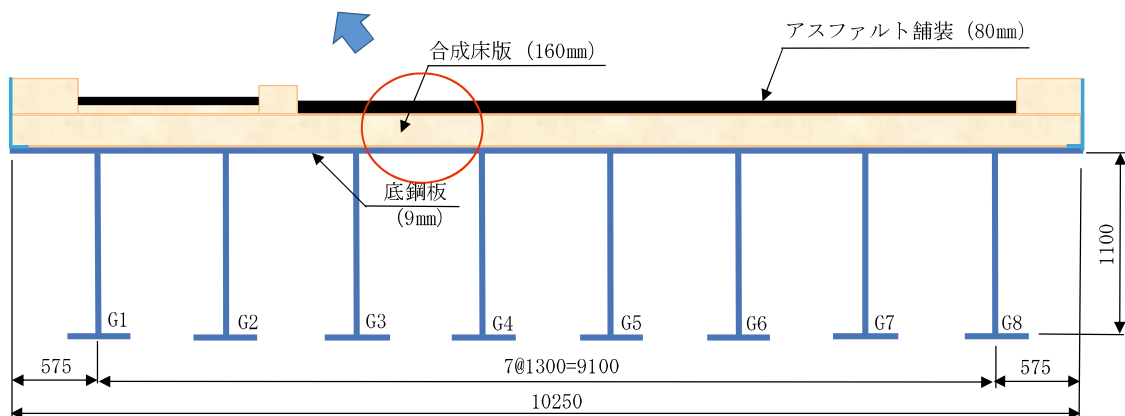
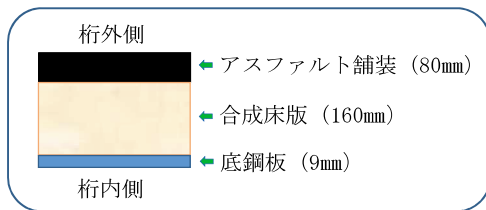


図-3.5 調査対象橋梁の断面図

製作は沖縄本島の中城湾より2キロ圏内の橋梁工場で加工され、2014年12月18日に仮組立検査、翌年1月上旬に工場塗装（D-5）を完了している。その後架橋現場へは台船による海上輸送が行われ、2015年1月28日より桁架設を開始、2015年3月下旬に金属サンドイッチパネルの取付けを完了した。工場塗装から金属パネル設置までの期間は約80日である。

3.4 金属サンドイッチパネルの仕様と接合構造

3.4.1 金属サンドイッチパネルの仕様

金属サンドイッチパネルは、外皮材が高耐食性の金属薄板、内皮材はガルバリウム塗装鋼板で、その金属薄板の間に高い断熱性能を有するポリイソシアヌレートフォーム（硬質ウレタンフォーム断熱材）の芯材が充填されたパネルで構成される。

金属サンドイッチパネル（裏面）の断面⁶⁾を図-3.7に、仕様を表-3.3に示す。

本橋は海岸部に近接し飛来塩分の影響を大きく受けるため、外皮材に純チタン板を使用したサンドイッチパネルを鋼桁全周に設置している。また、金属サンドイッチパネルの相互や床版、橋台などとの接合はゴムパッキンや外皮材と同材質の高耐食性の目地板をすき間なく配置し、外部からの環境因子が侵入できない構造で設計されている。

なお、この金属サンドイッチパネルに囲まれた桁内は、独立した作業空間となり、他の機関とのインターフェースをとる必要がなく、任意の時間帯に鋼桁の近接目視、詳細点検が可能で、補修や補強工事にも対応できる仕様になっているのが特長である。

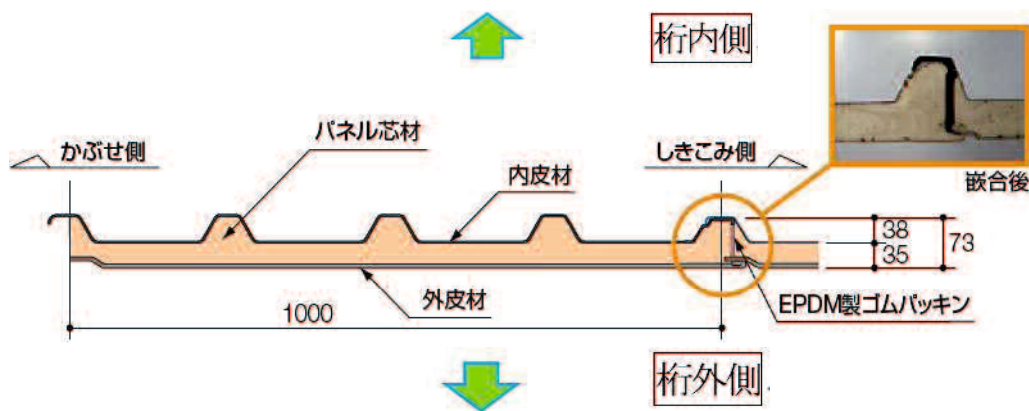


図-3.7 金属サンドイッチパネル（裏面）断面図

表-3.3 金属サンドイッチパネルの仕様

名称	構成	材料	厚さ	単位重量
金属サンドイッチパネル (チタン仕様)	内皮材	ガルバリウム 塗装鋼板	0.6mm	10kg/m ²
	芯材	ポリイソシア ヌレート フォーム	35mm	
	外皮材	純チタン板	0.4mm	

3.4.2 金属サンドイッチパネルの断熱性能

金属サンドイッチパネルの芯材に使用しているポリイソシアヌレートフォームは、ポリイソシアネートとポリオールから得られるプラスチック発泡体により構成された硬質ウレタンフォーム断熱材⁷⁾の一つである。結合の熱安定性に優れ、ロックウールやグラスウール断熱材より熱伝導率が低く、高い断熱性と難燃性を有する材料である。

断熱性能の指標である熱伝導率と熱抵抗値を表-3.4に示す。

なお、今回の調査対象橋梁で設計されている合成床版と鋼床版を比較した場合、断熱性能は熱抵抗値 (R) と比例するため、構造物の容積 (桁高×幅員) が同じであれば、コンクリート構造である合成床版の方が路面側の熱抵抗値 (R) が高く、桁内のピーク温度は抑えられると判断できる。しかし、コンクリートと鋼板の熱伝導率 λ はアスファルトよりも大きいため、桁内のピーク温度を抑えるにはアスファルトの舗装厚を増やすことが効果的な対策となる。

また、金属サンドイッチパネルのかわりに鋼板のみで鋼桁を覆った場合も、鋼板と鋼桁の間に一定の空間 (空気層) が存在するため、結露の抑制効果が期待できるが、鋼板自体の熱伝導率 ($\lambda=55$) は金属サンドイッチパネル ($\lambda=0.020$) と比較して高く、桁外側に結露が発生した時点で、桁内側の鋼板面に結露が発生する頻度は多いと考えられる。

表-3.4 熱伝導率と熱抵抗値

建材等名称	λ : 熱伝導率 (W/m・K)	R : 熱抵抗値 (t=10mm) (m ² ・K/W)
硬質ウレタンフォーム断熱材 ⁷⁾	0.023	0.43478
[金属サンドイッチパネル ⁸⁾]	0.020	0.50000
ロックウール断熱材 ⁷⁾	0.038	0.26316
グラスウール断熱材 ⁷⁾	0.042	0.23810
鋼板 ⁷⁾	55	0.00018
FRP ⁷⁾	0.26	0.03846
アルミニウム ⁷⁾	210	0.00005
アスファルト ⁷⁾	0.11	0.09091
コンクリート ⁷⁾	1.6	0.00625

単位 : W (ワット) 、K (ケルビン)

3.4.3 金属サンドイッチパネルの接合構造

金属サンドイッチパネル接合部の嵌合構造と目地構造の配置⁶⁾を図-3.8に示す。

橋軸直角方向のパネル接合部は、外気と接する側に外皮材の純チタン板をラップさせ、その間にEPDM(エチレンプロピレンゴム)を挟み圧縮して接合する嵌合構造であり、嵌合後には気密性能が高く、風雨の侵入や紫外線の影響を回避できるため長期的な耐久性が期待できる。

嵌合構造の嵌合前⁶⁾を写真-3.3に、嵌合後⁶⁾を写真-3.4に示す。

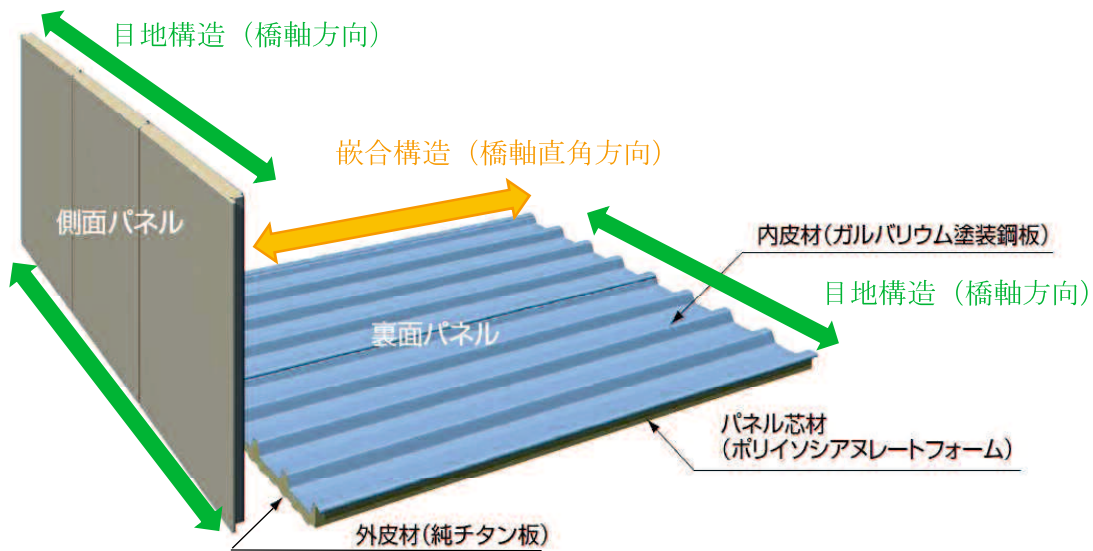


図-3.8 嵌合構造と目地構造の配置図

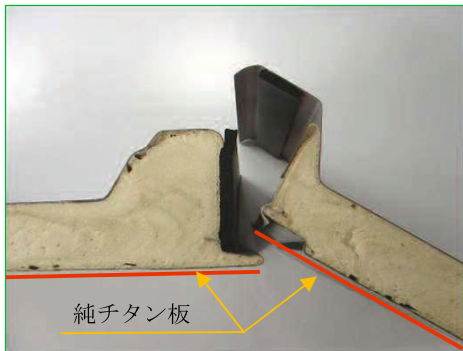


写真-3.3 嵌合前

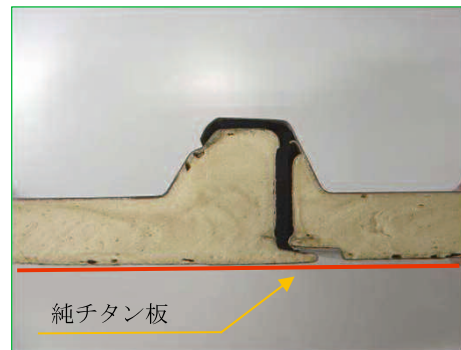


写真-3.4 嵌合後

次に橋軸方向の目地の配置を図-3.9に、橋台との目地構造の取り合いを図-3.10に示す。

日射熱の影響が大きい側面パネルの目地材 (“a”、“b”) には、耐熱性の高いシリコンスポンジ、他の目地材にはウレタンスポンジ製のゴムパッキンを挟み気密性を確保している。それぞれのゴムパッキンは、純チタン板に覆われているため風雨の侵入や紫外線の影響を回避でき、長期的な耐久性が期待できる。なお、雨水の浸入が考えられる“b”部目地の下部には水抜き孔を設置し、速やかに排水する構造であり、また、補修が必要と認められた場合は、桁内から目地内部へシリコンシーラントを注入することで、所定の機能を維持することが可能である。

なお、金属サンドイッチパネルに覆われた桁内は、断熱パネルと嵌合構造により高い気密性と環境因子の遮断効果が確認されているが、内外での外気のやりとりは橋軸方向に配置されている目地構造で行われている。

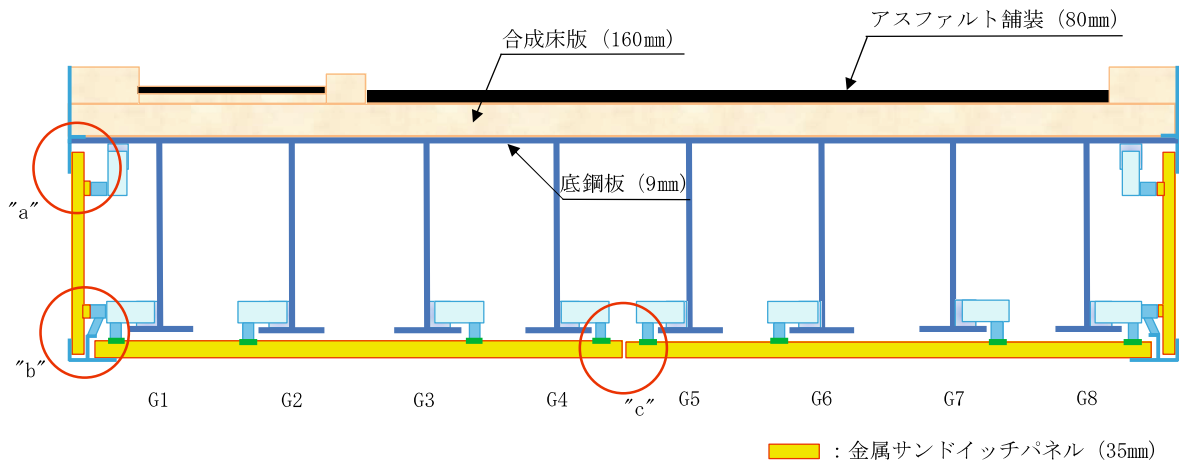
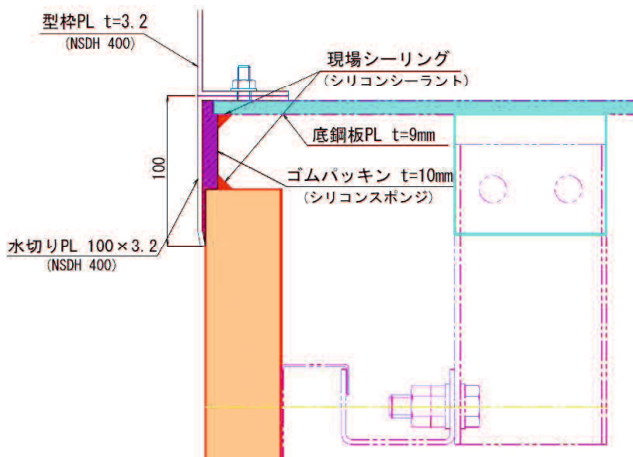
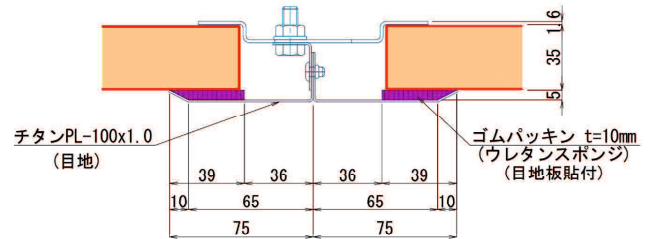


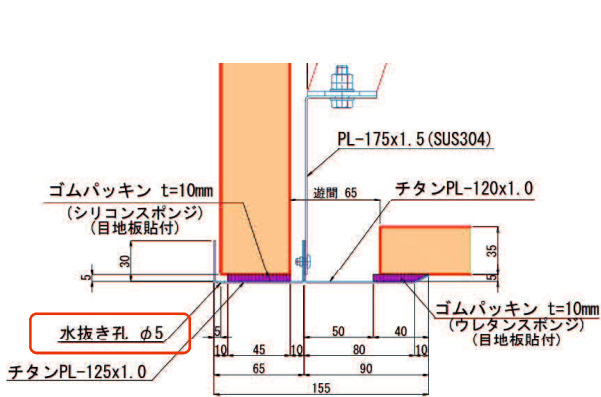
図-3.9 橋軸方向の目地配置図



"a"部目地



"c"部目地



"b"部目地

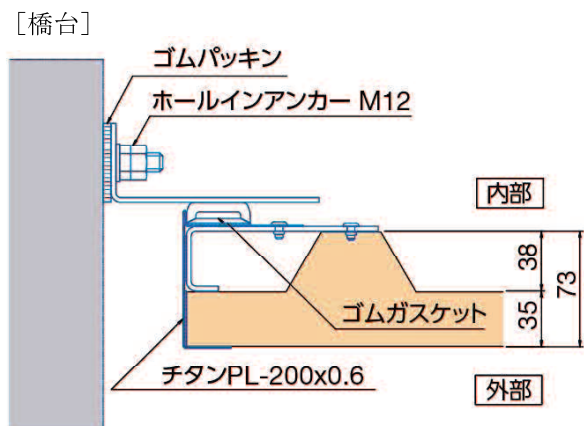


図-3.10 橋台との目地構造の取り合い

3.5 桁内環境の評価方法

金属サンドイッチパネルに覆われたG7-G8桁間で曝露試験を行い、桁内環境を評価する。断面方向の曝露試験片設置箇所を図-3.11に、橋軸方向の設置箇所を図-3.12に示す。

なお、以下本論文では金属サンドイッチパネルと合成床版で覆われた環境を桁内、金属サンドイッチパネルの外側の環境を桁外と記す。

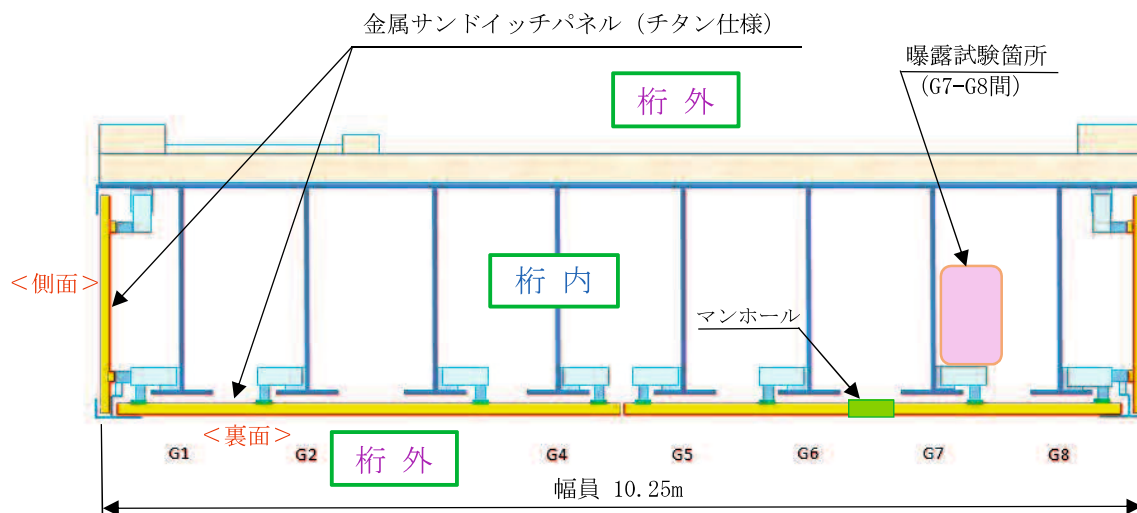


図-3.11 曝露試験箇所（断面方向）

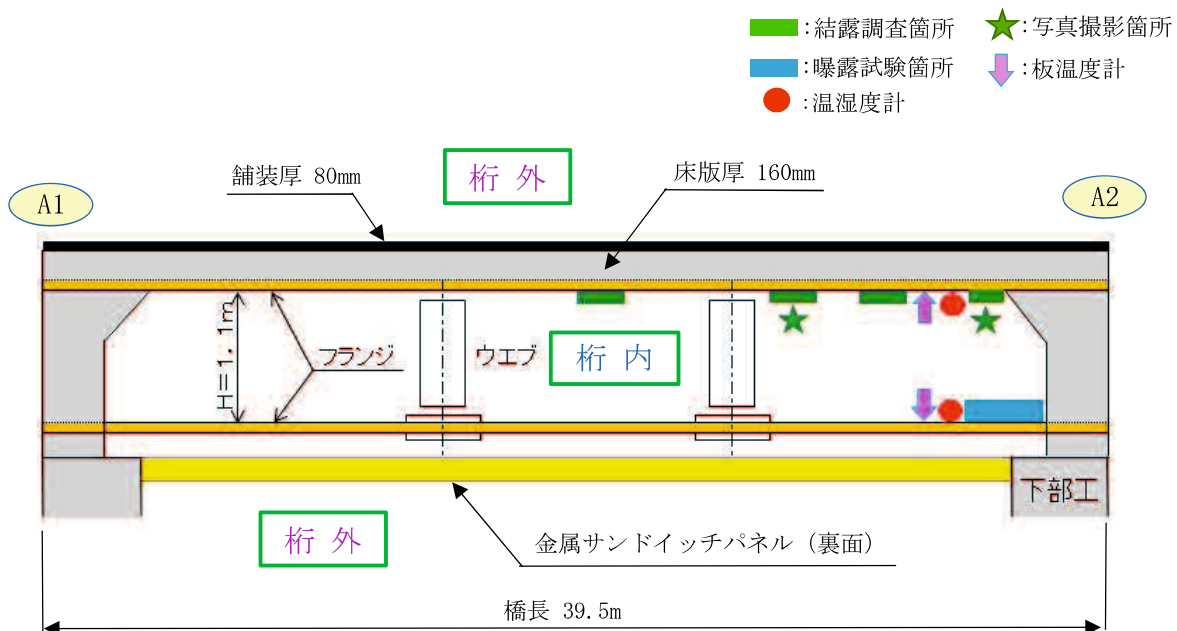


図-3.12 曝露試験箇所（橋軸方向）

3.5.1 桁内環境の計測方法

(1) 桁内空間飛来塩分量の計測

JIS Z 2382 の大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定に基づくドライガーゼ法（垂直）により桁内の飛来塩分量を1年間計測した。計測期間は、2015年8月27日にドライガーゼを設置した後、第1回から第4回まで約3ヶ月ごとに回収して分析を行った。

- ・採取日（第1回） 2015年12月4日
- ・採取日（第2回） 2016年3月24日
- ・採取日（第3回） 2016年6月14日
- ・採取日（第4回） 2016年9月21日

(2) 桁内の温湿度計測

温湿度・板温度計は、**図-3.12**に示す桁端部付近へ設置した曝露試験体（ワッペン試験片）近傍に取り付け2015年8月27日から計測を開始した。温湿度・板温度計の桁断面方向の配置を**図-3.13**に、桁平面方向の配置を**図-3.14**に示す。また、ウェブと下フランジおよび上フランジ下面での板温度計測状況を**写真-3.5**と**写真-3.6**に示す。

温湿度の計測は、LASCAR electronics社の温湿度データロガー（EL-USB-2）、板温度の計測はエスペックミック社サーモレコーダー（RT-14）を使用し、それぞれ30分ごとの記録とした。

なお桁内の目視点検において、計測中に上フランジ下面に結露跡が観察されたため、その後の状況を追跡調査した。

(3) 桁内での曝露試験（ワッペン試験片）

さびの進行速度の調査としては裸鋼板を桁内に一定期間放置し、その鋼板の腐食減耗量で評価する方法を採用した。裸鋼板の形状は、板厚2mm×幅50mm×長さ50mmの表面を微鏡面仕上げしたワッペン試験片とし、気密・防水用ブチル両面テープ（厚さ0.8mm）を裏面全体に貼付け、アクリル板で作成した架台に固定した。

裸鋼板の材質は、耐食性材料であるJIS-SMAと3%ニッケル材の2種類とし、曝露期間を1年、2年、3年、4年、5年の5期間に定めた。**表-3.5**にワッペン試験片の化学成分表を示す。

ワッペン試験片の設置箇所は、長期にわたる調査が確実かつ効率的に遂行できるよう、桁外からのアクセス、計測時の試験片への接触回避、桁外から桁内へ入る際の外気との接触防止（マンホール開閉時）を考慮し、**図-3.11**の橋梁断面図および**図-3.12**の橋梁側面図に示すG7-G8間のA2側桁端部付近とした。

1期間あたり水平方向、垂直方向にそれぞれ2枚を配置、1期間分（8枚）×5期間＝計40枚の桁内への設置状況を**写真-3.7**に示す。

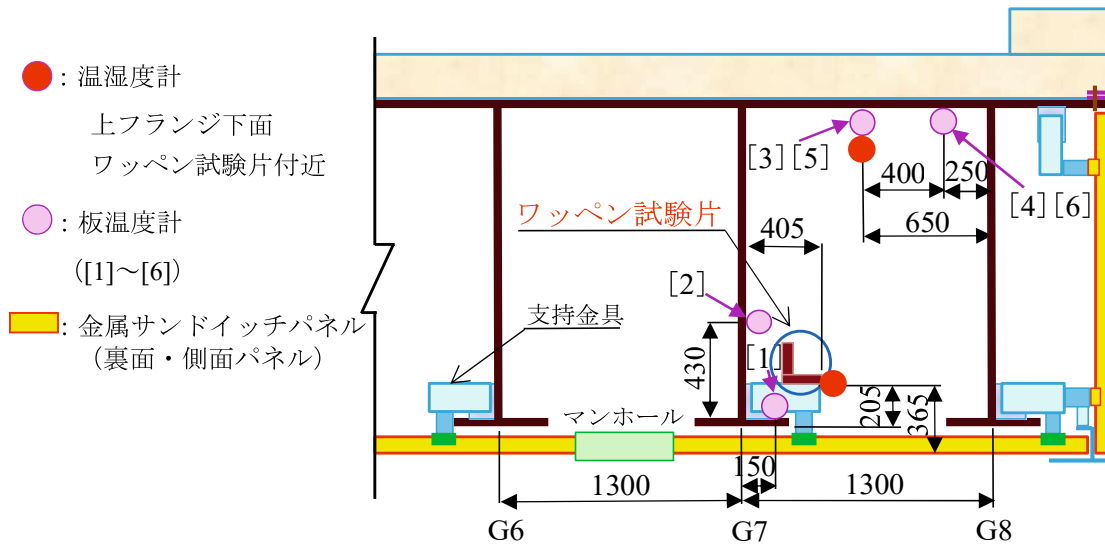


図-3.13 温湿度・板温度計の桁内配置図（断面）

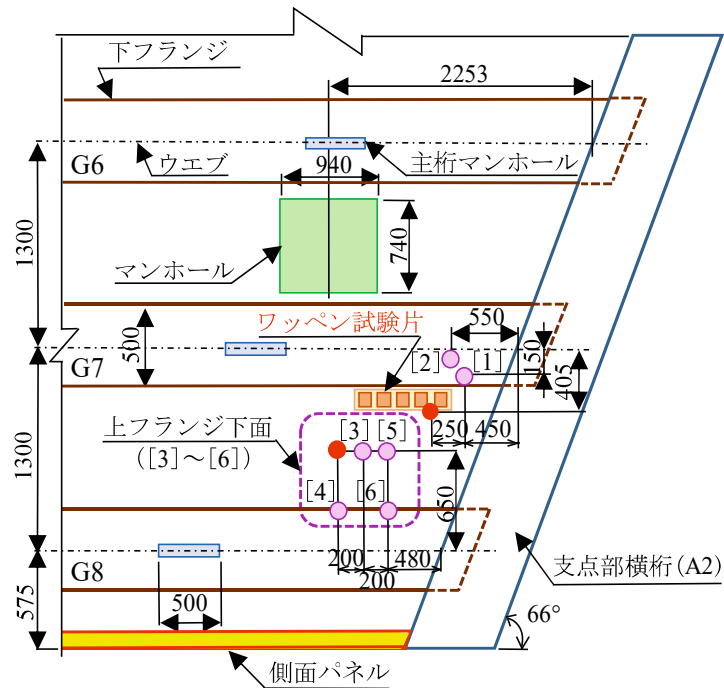


図-3.14 温湿度・板温度計の桁内配置図（平面）



写真-3.5 板温度計[1] [2]



写真-3.6 板温度計[3] [5]

3.5.2 桁外環境の計測方法

(1) 桁外飛来塩分量の計測

桁外の飛来塩分量は今回の調査対象橋梁へ架け替える前に、旧橋（3径間単純鉄筋コンクリートT桁橋）の桁間で計測された既往データ⁴⁾を参考とした。旧橋での計測方法も、桁内と同様のJIS Z 2382に基づくドライガーゼ法（垂直）である。

(2) 桁外の温湿度計測

桁内計測との相対差を確認するため、調査対象の橋梁から下流側100mにある防潮水門ゲート上に桁外曝露架台を設置し、桁内と同様の温湿度データロガーにより30分間隔で計測した。桁外曝露架台位置を写真-3.8に示す。

(3) 桁外での曝露試験（ワッペン試験片）

桁内と同様のワッペン試験片を2期間分作成し、前述の桁外曝露架台で曝露試験を実施した。気象環境が厳しいことから曝露期間は1年、2年目の2年間としJIS-SMAと3%ニッケル材を水平方向、垂直方向にそれぞれ2枚配置した。1期間分（8枚）×2期間＝16枚の設置状況を写真-3.9に示す。

表-3.5 ワッペン試験片の化学成分表

ワッペン試験片	化学成分								単位 (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	
JIS-SMA材	0.18 以下	0.15 ～ 0.65	1.25 以下	0.03 5以下	0.03 5以下	0.30 ～ 0.50	0.45 ～ 0.75	0.05 ～ 0.30	
3%ニッケル (3%Ni)	0.18 以下	0.15 ～ 0.65	1.40 以下	0.03 5以下	0.03 5以下	0.30 ～ 0.50	0.08 以下	2.50 ～ 3.50	



写真-3.8 桁外曝露架台位置



写真-3.7 桁内曝露試験状況

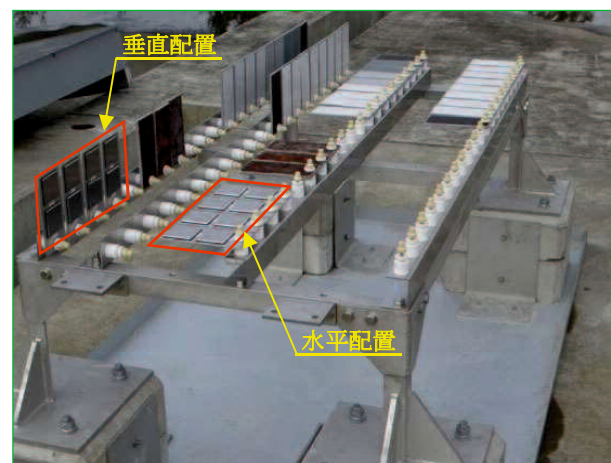


写真-3.9 桁外曝露試験状況

3.6 桁内環境の評価結果

3.6.1 飛来塩分量の計測結果

桁内の飛来塩分量を2015年8月より1年間ドライガーゼ法（垂直）により計測したが、全期間を通して飛来塩分量は、0.000mddであり数値上検知されなかった。

次に、旧橋の桁間部（桁外）で測定した飛来塩分計測結果⁴⁾を図-3.15に、また飛来塩分計測時の旧橋外観を写真-3.10に示す。2011年12月～2012年12月で、平均0.478 mdd、2012年8月と9月にそれぞれ0.979 mdd、1.003 mddを示し、通年でJIS-SMA適用基準の0.05 mddを大幅に上回る飛来塩分量である。

この結果より、臨海部の飛来塩分量の多い気象状況においても金属パネルは、外部からの腐食因子を遮断していることが確認できる。

3.6.2 桁内と桁外の気象計測結果

(1) 年間を通しての計測結果

2017年4月から2018年3月の桁内と桁外の年温湿度集計を表-3.6に示す。桁内の空間は桁外と比較して、気温は年平均で3.6℃高く、夏季にその傾向が顕著であり最高気温は43.0℃まで上昇する。季節で比較すると春・夏季の平均気温差は5.3℃と大きい、秋・冬季の平均気温差は1.9℃、最高気温の差も0.5℃と小さく、日照時間が短く日差しが穏やかになる秋・冬季は、桁内と桁外の数値が同一傾向を示している。

次に桁内気温と露点の年間推移を図-3.16に、桁外気温と露点の年間推移を図-3.17に、桁内と桁外相対湿度の年間推移を図-3.18に示す。桁内の年間を通じての平均気温と平均露点の差は7.0℃、桁外は4.7℃であり（表-3.6）、桁内が高気温時にその差が顕著となる。そして気温と露点温度との差が大きい桁内環境（図-3.16）は、桁外（図-3.17）と比べて結露発生リスクが軽減できると考える。

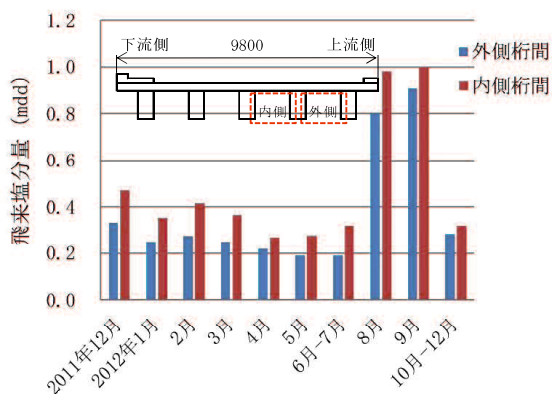


図-3.15 年間飛来塩分量（旧橋）



写真-3.10 旧橋全景（コンクリートT桁橋）

表-3.6 年温湿度集計表

久米島（2017年4月～2018年3月）			
期 間	項 目	桁 内	桁外曝露架台
2017年4月～ 2017年9月	気 温	33.2 ℃	27.9 ℃
	(最高気温)	43.0 ℃	39.0 ℃
	(最低気温)	17.5 ℃	13.0 ℃
	相対湿度	63.7 %	78.6 %
	絶対湿度	23.1 g/m ³	21.5 g/m ³
2017年10月～ 2018年3月	露 点	25.2 ℃	23.6 ℃
	気 温	22.6 ℃	20.7 ℃
	(最高気温)	36.5 ℃	36.0 ℃
	(最低気温)	9.5 ℃	7.0 ℃
	相対湿度	69.2 %	73.3 %
2017年4月～ 2018年3月	絶対湿度	14.4 g/m ³	13.8 g/m ³
	露 点	16.5 ℃	15.6 ℃
	気 温	27.9 ℃	24.3 ℃
	(最高気温)	43.0 ℃	39.0 ℃
	(最低気温)	9.5 ℃	7.0 ℃
2017年4月～ 2018年3月	相対湿度	66.5 %	75.9 %
	絶対湿度	18.7 g/m ³	17.7 g/m ³
	露 点	20.9 ℃	19.6 ℃

相対湿度の変動は年間を通じて桁内46.0～92.0%、桁外37.0～98.5%であり、桁内相対湿度は桁外と比較して年平均で9.4%低い数値となる。また桁内では冬季、桁外では夏季の湿度が高くなる傾向が見られ、特に4月～9月の桁内相対湿度は桁外より14.9%低く（表-3.6）、雨量の多い時期でも安定した環境下にある。なお、空気1m³中の水蒸気量を表す容積絶対湿度で比較すると、桁内18.7g/m³に対して、桁外（曝露試験架台上）17.7g/m³と、桁内には絶対湿度が年平均で1.0g/m³（5.6%）多く存在する。このことから、桁内は絶対湿度差を上回る飽和水蒸気量が確保できる環境であると考えられる。

もう一つの指標であるISO9223の定義「0℃以上かつ相対湿度80%以上」による年間の濡れ時間比較表を表-3.7に示す。久米島地区の桁外環境は厳しく、多湿で降雨量が多い4月～9月の期間は53.5%が濡れ時間であり、年間を通して42.0%と高い数値となっている。

しかし、そのような気象環境においても桁内の濡れ時間は、桁外の1/5以下（全計測時間の7.6%相当）と少ない。そして飛来塩分粒子などの外部因子遮断効果を加えると、桁内は腐食が生じにくい環境であると判断できる。

本計測において、金属サンドイッチパネル内での気温上昇が明らかになったが、相対湿度の低下と濡れ時間の抑制が期待でき結露の防止には望ましいと考える。なお、近接目視点検など桁内での維持管理作業については、桁内の気温上昇を踏まえた適切な計画の策定が重要になる。

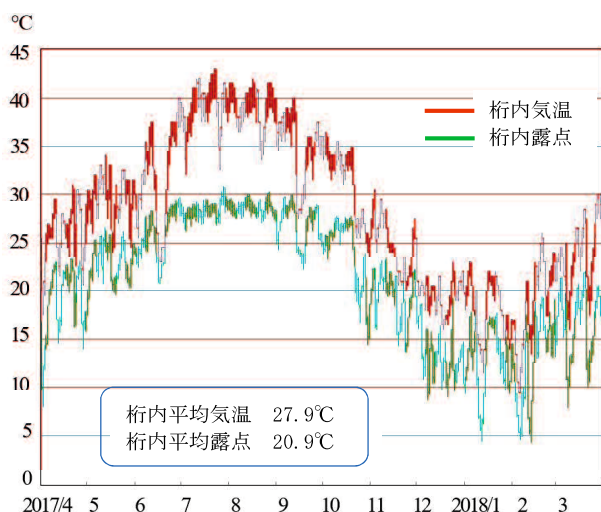


図-3.16 桁内気温と露点の年間推移

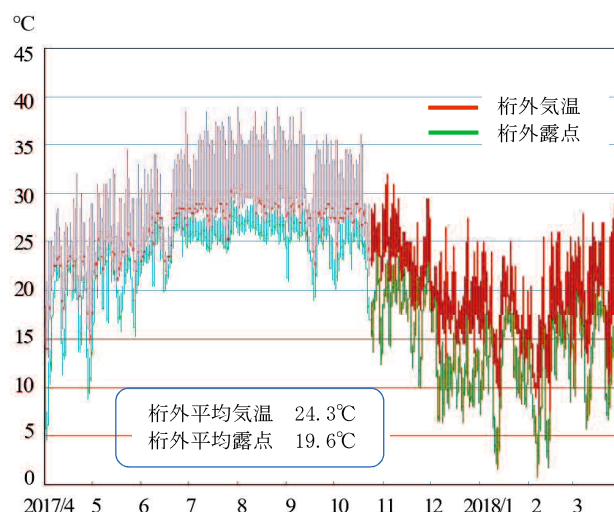


図-3.17 桁外気温と露点の年間推移

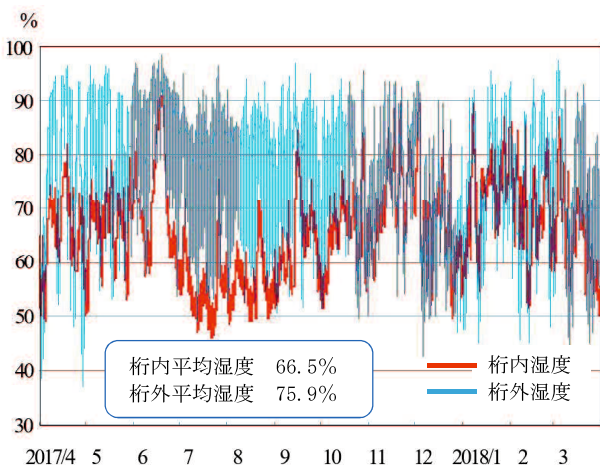


図-3.18 桁内と桁外相対湿度の年間推移

表-3.7 濡れ時間の比較表

期 間	桁 内	桁外曝露架台
2017.4～2017.9	12,330 分 (4.7%)	140,640 分 (53.5%)
2017.10～2018.3	27,870 分 (10.6%)	80,430 分 (30.6%)
2017.4～2018.3	40,200 分 (7.6%)	221,070 分 (42.0%)

() 内は、計測時間に対する濡れ時間の比率を示す。

(2) 特定日の計測結果

桁外の年間最高気温日（2017年8月1日）と最低気温日（2018年2月7日）に着目して24時間の桁内外温湿度の変化を評価した。桁外の最高気温日の気温・温度推移を図-3.19に、相対・絶対湿度推移を図-3.21に示す。なお、桁内の年間最高気温日（2017年7月22日深夜）にも着目し、桁外の最高気温日の温湿度推移と比較する。桁内の年間最高気温日の気温・温度推移を図-3.20に、相対・絶対湿度推移を図-3.22に示す。

桁外の年間最高気温日（2017年8月1日）は終日晴天で、桁外の気温変化27.5～39.0℃に対し、桁内の気温変化は38.5～41.5℃と高温域にあるが変動幅は3.0℃と小さい。また桁外の気温は夜間に低下するが、桁内のピーク気温は深夜となる。部位別ではアスファルト舗装された路面側に近い主桁上フランジの温度は、深夜から早朝にかけて徐々に低下するが、日照による桁外気温の上昇に合わせて時間差で高くなり、夕刻のピーク後も深夜まで高い温度で推移する。裏面の金属サンドイッチパネルに近く日照の影響を受けない主桁下フランジの温度は、桁内気温の動きに近似し、午前時間帯は主桁上フランジの温度より高い値となる。

桁内の湿度は24時間を通じて50.5～59.0%と変動幅が小さく、桁内気温がピークになる深夜に低い値を示すが、桁外湿度は日照や桁外気温の変化に合わせて、52.5～92.0%と大きく変動する。

なお、桁外、桁内の年間最高気温日の気温ピーク値がそれぞれ追従しないのは、金属サンドイッチパネルに使用されている芯材（ポリイソシアヌレートフォーム）の断熱効果によるものであり、桁内は日中主に路面から取り込んだ日射熱が深夜まで保持され、桁外は日没、風などの気象条件により、徐々に気温が低下してくる自然現象に委ねられるからである。但し、上フランジ側は路面からの日射熱の影響を受けやすい環境にあり、桁内気温と異なる動向を示す時間帯がある。

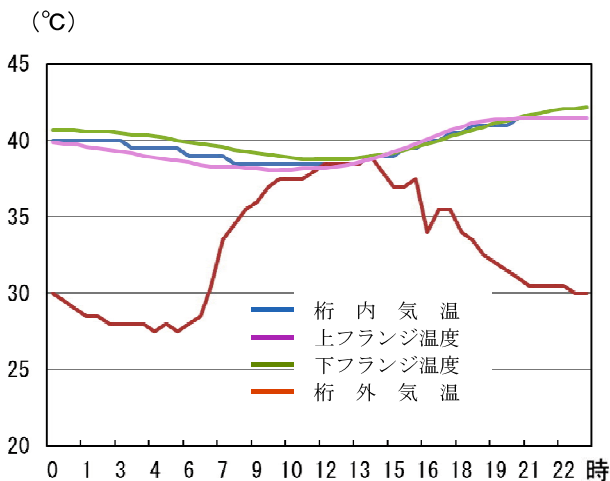


図-3.19 気温・温度推移（2017年8月1日）

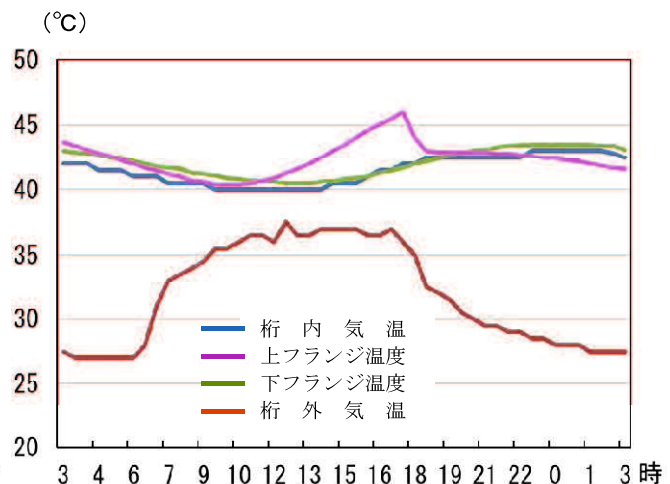


図-3.20 気温・温度推移（2017年7月22日）

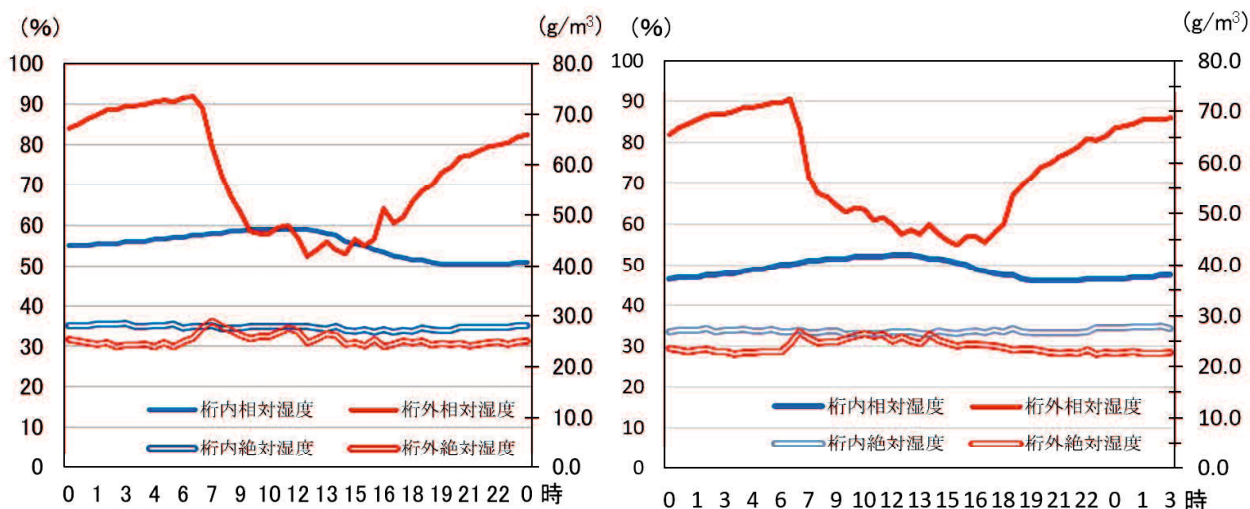


図-3.21 相対/絶対湿度推移 (2017年8月1日)

図-3.22 相対/絶対湿度推移 (2017年7月22日)

次に最低気温日の気温・湿度推移を図-3.23に、相対・絶対湿度推移を図-3.24に示す。

桁外の年間最低気温日 (2018年2月7日) は曇時々晴の天候で、桁外の気温は7.0~17.5℃と時間帯によって大きく変化するが、桁内気温は11.5~14.5℃の範囲であり最高気温日と同様に変動幅は小さい。桁内気温は、概ね桁外気温の変化に連動しているものの追隨には時間差を伴っており、その変化は1日を通して緩やかである。

また冬季の桁内気温も日中に取り込んだ熱量が桁内に残留し、桁内のピーク気温は深夜となる。そして主桁の上下フランジは、午前中ほぼ同一温度で推移するが、午後からは主桁上フランジの温度が上昇している。これは、年間最高気温日と同様に、路面側からの日照が主桁上フランジの温度に大きく影響を与えていると考えられる。

一方、冬季の桁内湿度は63.5~76.0%と桁外の45.5~72.5%に対して高い数値を示しているが、桁外気温の変化に大きく連動することはなく、24時間を通じて安定している。

桁内と桁外の気温と湿度が季節や時間帯により逆転しても、その変動幅は年間を通して桁内の方が小さいことを確認できた。この結果から、断熱効果を有する金属サンドイッチパネルを利用した防食法は、鋼桁の腐食環境の改善に効果があると言える。

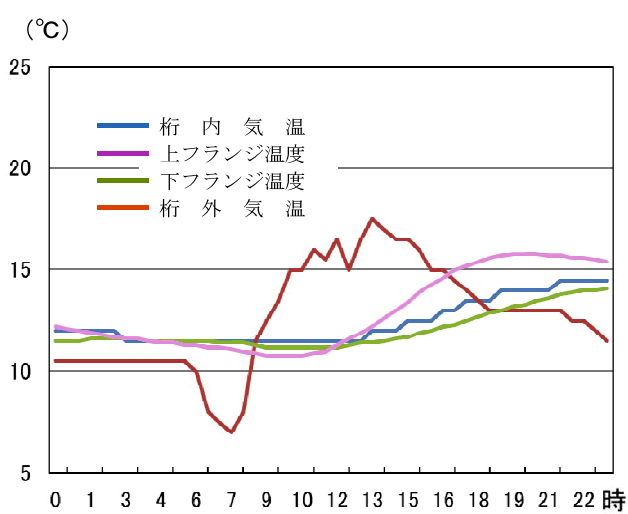


図-3.23 気温・温度推移 (2018年2月7日)

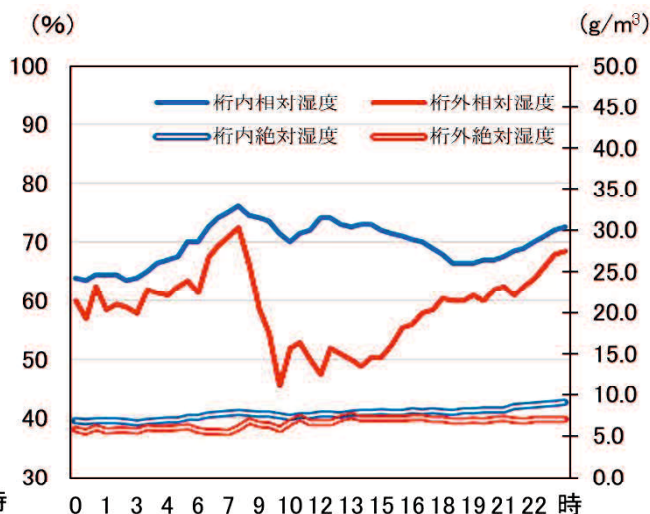


図-3.24 相対/絶対湿度推移 (2018年2月7日)

3.6.3 曝露試験（ワッペン試験片）の評価

桁内のワッペン試験片は2015年8月から5年間、桁外のワッペン試験片は2016年6月から2年間の曝露試験を実施した。

桁外ワッペン試験片は、架橋位置から100m下流の防潮水門ゲート上に遮へい曝露架台を設置し、2016年6月13日より曝露を開始した。腐食環境の厳しい地域であるため2年間の曝露期間とし、1年目の試験片回収を2017年6月22日に、2年目の試験片回収を2018年6月14日に行った。桁内および桁外ワッペン試験片の曝露評価結果を表-3.8に、桁内5年目の垂直姿勢の曝露状況を写真-3.11に、桁内5年目の水平姿勢の曝露状況を写真-3.12に、桁外2年目の垂直姿勢の曝露状況を写真-3.13に、桁外2年目の水平姿勢の曝露状況を写真-3.14に示す。

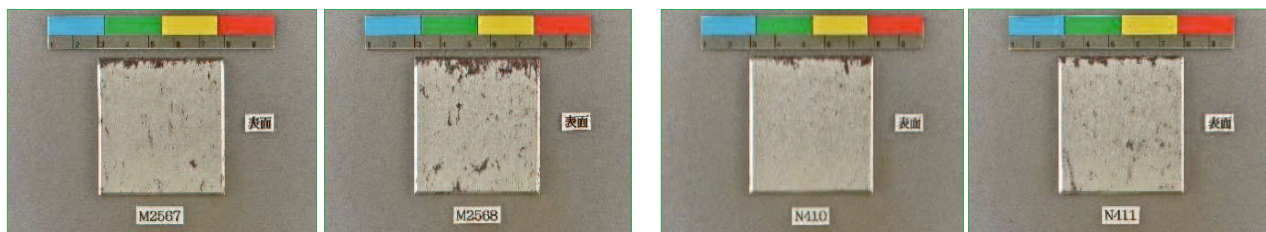
なお、この章で記載していない他の経年曝露写真は、附録-1「ワッペン試験片曝露写真」として整理した。

表-3.8 ワッペン試験片曝露評価結果

鋼種	曝露姿勢	位置・期間	試験片番号	さび厚 (μm)	付着塩分量 (mg/m^2)	腐食減耗量 (mm)	鋼種	曝露姿勢	位置・期間	試験片番号	さび厚 (μm)	付着塩分量 (mg/m^2)	腐食減耗量 (mm)
JIS-SMA	水平	桁内1年目	M2549	15	32	0.002	3%Ni	水平	桁内1年目	N392	10	35	0.002
			M2550	14	30	0.002				N393	7	33	0.002
		桁内2年目	M2553	24	40	0.003			桁内2年目	N396	10	23	0.002
			M2554	17	23	0.003				N397	10	22	0.002
		桁内3年目	M2557	21	31	0.003			桁内3年目	N400	17	53	0.003
			M2558	30	32	0.003				N401	26	51	0.003
		桁内4年目	M2561	45	53	0.004			桁内4年目	N404	21	59	0.003
			M2562	40	52	0.004				N405	24	58	0.003
		桁内5年目	M2565	41	64	0.005			桁内5年目	N408	20	71	0.005
			M2566	30	68	0.005				N409	24	80	0.005
		桁外1年目	M2701	389	48	0.097			桁外1年目	N421	82	240	0.064
			M2702	389	162	0.102				N422	209*	353	0.068
	桁外2年目	M2705	586*	368	0.149	桁外2年目		N425	439*	556	0.114		
		M2706	488*	332	0.187			N426	255	379	0.103		
	垂直	桁内1年目	M2551	1	2	0.000		垂直	桁内1年目	N394	0	3	0.000
			M2552	0	1	0.000				N395	0	2	0.000
		桁内2年目	M2555	0	0	0.000			桁内2年目	N398	0	0	0.000
			M2556	0	0	0.000				N399	0	0	0.000
		桁内3年目	M2559	0	0	0.000			桁内3年目	N402	0	12	0.000
			M2560	0	7	0.000				N403	0	10	0.000
		桁内4年目	M2563	0	6	0.000			桁内4年目	N406	0	16	0.000
			M2564	1	6	0.000				N407	0	10	0.000
		桁内5年目	M2567	0	4	0.000			桁内5年目	N410	0	6	0.000
			M2568	0	4	0.000				N411	0	6	0.000
桁外1年目		M2703	186	256	0.036	桁外1年目	N423		115	227	0.029		
		M2704	187	235	0.038		N424		122*	363	0.035		
桁外2年目	M2707	187*	132	0.045	桁外2年目	N427	167	135	0.041				
	M2708	193*	171	0.052		N428	149*	137	0.047				

■ : 桁外曝露試験片の計測結果

* : 輸送時にさびの剥落を確認



M2567

M2568

N410

N411

JIS-SMA

3%Ni

写真-3.11 桁内5年目垂直姿勢の曝露状況

さび厚は電磁式膜厚計（分解能 $1\mu\text{m}$ ）を用いプローブ径 $\phi 13$ に対して $\phi 14\text{mm}$ の孔を9箇所明けた紙製のマスク（厚さ 1mm ）をワッペン試験片上にセットし、同一位置で鋼材上の腐食生成物の厚さを計測、9点の平均値とした。

桁内に設置した水平姿勢の試験片は、JIS-SMA材、3%ニッケル材ともに1年目からワッペン試験片の全面に発さびが確認できた。しかし、5年経過時点でも発さびの進行はほとんどなく、桁架設（金属パネルの設置）までに主桁上フランジ下面に付着した塩分が1年程度で結露水として滴下した後、飛来塩分のない安定した桁内環境のためさびの進行が抑制されていると考える。

付着塩分量は $22\sim 80\text{ mg/m}^2$ 検出されたが、経年変化がほとんどないことから、桁架設までの段階で鋼桁表面に飛来塩分や汚れが付着し、微細なすき間や毛細管が形成されることで、相対湿度が $50\sim 70\%$ と比較的低い桁内環境においても結露が発生し、主桁上フランジに残存していた海塩粒子とともにワッペン試験片表面に付着したと推察できる。

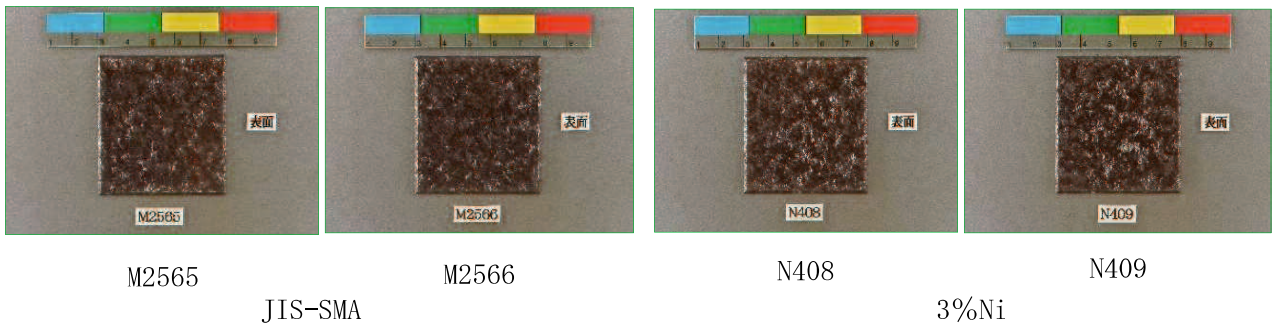


写真-3.12 桁内5年目水平姿勢の曝露状況

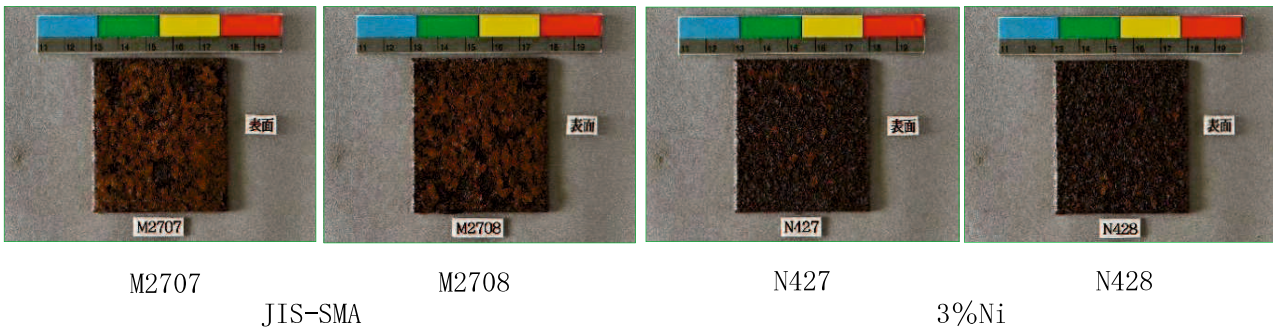


写真-3.13 桁外2年目垂直姿勢の曝露状況

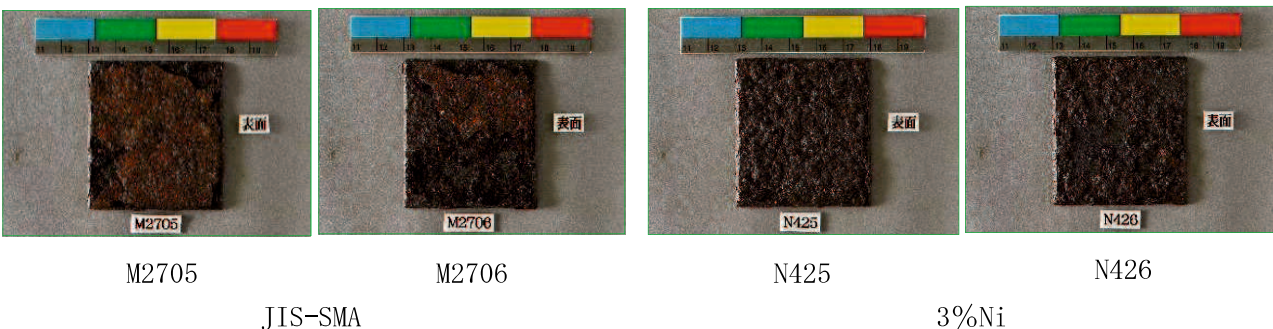


写真-3.14 桁外2年目水平姿勢の曝露状況

腐食減耗量も0.002~0.005mmで変化がなく、さびの進行が抑えられている。また、桁内の環境ではJIS-SMA材と3%ニッケル材の耐候性能に関する明確な数値上の差異は認められなかった。なお、付着塩分量と腐食減耗量の数値が経年で微増傾向にあるのは、桁内作業中にマンホールから海塩粒子が侵入したと想定される。（安全上の観点から桁内に立ち入る期間、マンホールは常に開けた状態にしておくことを原則とした）

桁内に設置した垂直姿勢の試験片は、JIS-SMA材、3%ニッケル材ともに1年目から微小な点さびが見られるものの、2年目以降その進行は目視では認識できないほどに抑制され、腐食減耗量も0.000mmと数値上検知されなかった。付着塩分量は0~16 mg/m²検出されているが、ドライガーゼ法で計測した結果では金属サンドイッチパネル設置後の桁内への飛来塩分浸入が認められないため、水平姿勢と同様に海上輸送や桁架設時に桁に付着した塩分粒子が、桁内の水蒸気や結露水に溶解込みワッペン試験に付着したものと考えられる。

桁外に設置したワッペン試験片は、経年とともに全ての鋼種、曝露姿勢において腐食減耗量が増加している。

また鋼種よりも曝露姿勢の影響が大きく、2年目の垂直姿勢の腐食減耗量が0.047~0.052mmに対して水平姿勢は0.114~0.187mmと約3倍高い数値を示す。今回の曝露試験結果を耐候性の腐食減耗予測モデルの式(1)⁹⁾に当てはめた腐食減耗量曲線を図-3.25に、片側経年腐食減耗量の数値を表-3.9に示す。なお3%ニッケル材については耐候性合金指標（V値）を考慮した換算式があるが、ここでは一般式(1)により想定される腐食減耗量の最大値の傾向を確認した。

$$Y=AX^B \quad (1)$$

ここに、Y：片側経年腐食減耗量（mm）、A：局部環境腐食性指標、B：保護性さび形成効果指数、X：曝露期間（年）

今回の試験の中で一番厳しい条件となる桁外の水平姿勢においてのみ、3%ニッケル材の優位性が確認できた。桁外2年目垂直試験片のさび厚と付着塩分量について、整合性が取れていないのは、ワッペン試験片の分析を行うために輸送している段階でさびの剥離があったことによる。

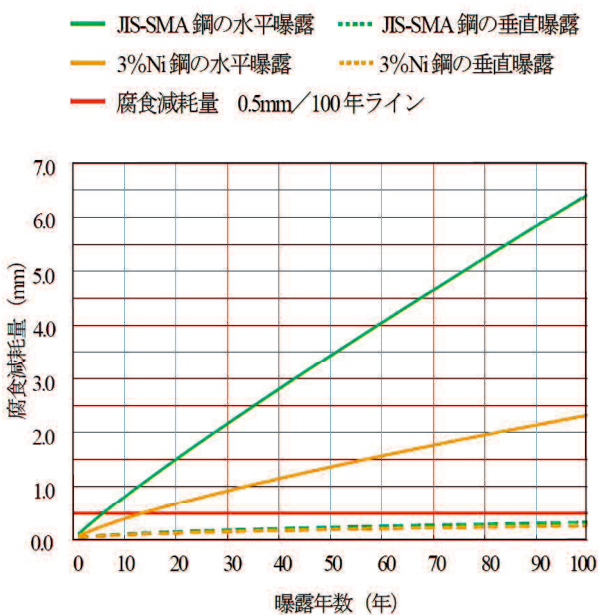


表-3.9 経年腐食減耗量

ワッペン試験片	曝露姿勢	腐食パラメータ		腐食減耗量 (mm)	
		A	B	X=50年	X=100年
JIS-SMA材	水 平	0.100	0.904	3.43	6.43
	垂 直	0.038	0.468	0.23	0.32
3%ニッケル材 (3%Ni)	水 平	0.067	0.771	1.36	2.33
	垂 直	0.035	0.440	0.19	0.26

図-3.25 桁外ワッペン試験片の腐食減耗量曲線

3.6.4 桁内上フランジの結露経過観察

桁内の曝露試験を進めていく過程で、上フランジ下面に大きな球状の結露跡が観察され、その現象は図-3.26の調査対象橋梁の架橋地形図のA2側に多く見られた。架橋位置の周辺状況を写真-3.15に示す。

結露の発生原因や時期は桁内環境を評価する上で重要な基準になるため、金属サンドイッチパネルの設置後にも同様の事象が生じるのか実験で確認した。

まず、図-3.12に示す結露跡の多く見られた上フランジ中央部の3箇所とA2側桁端部1箇所の計4箇所を観察場所に設定し、中央部は50×50cm、桁端部は30×15cmの範囲をテープで囲み位置を固定した。その後写真による記録を残し、テープで囲んだ内部の結露跡を純水で拭き取り経年調査を開始した。桁中央部の結露状況を写真-3.16に、追跡調査結果を写真-3.18に、桁端部の結露状況を写真-3.17に、追跡調査結果を写真-3.19に示す。

結露の発生時期を特定するため3ヶ月ごとに経過観察を実施したが、2019年2月28日の段階で、4箇所全てに当初のような丸く大きな結露の形跡は確認できなかった。

しかし、主桁上フランジの下面を指で触れると季節、時間帯により薄い水膜を感じることがあり、上フランジは床版をかえして外気の影響を受けている可能性が考えられる。ただし、直接外気と接触している金属サンドイッチパネル（裏面）のパネル外皮材面が明らかに結露している写真-3.20に示す状態でも、桁内のウェブ、下フランジおよび金属サンドイッチパネルの内皮材には経過観察時に、結露や水膜の発生は一度も認められなかった。

この結果から、上フランジ下面の結露跡は本調査開始以前についたものであると判断できる。

なお、A2側（右岸）に多く結露跡が確認されたのは、樹木に囲まれたA1側に対して、A2側は海岸からの風を遮るものがなく、気象庁ホームページ¹⁰⁾で確認される冬季に多く発生する北東、南東方向からの風が川に沿ってA2側に集中する架橋位置の地形上の影響が大きいと推察する。

つまり、金属サンドイッチパネルの設置前に鋼桁へ付着する飛来塩分量に差が生じていることになる。この傾向を確かめるため、2019年11月14日にA1側とA2側近傍の金属サンドイッチパネル（海側の側面パネル）の付着塩分量を電導度法（サンコウ電子研究所製SNA-3000の表面塩分計）とイオンクロマトグラフ法によるC1分析（250×250mmの範囲をガーゼにより拭き取り）の2通りの方法で測定した。その結果、気象状況により日常的に風雨に曝されるものの、電導度法は3箇所の平均値でA1側8.7mg/m²、A2側72.3 mg/m²、イオンクロマトグラフ法ではA1側3mg/m²、A2側45mg/m²といずれの測定法でも潮風を遮る樹木のないA2側の付着塩分量が多い現象を数値上で確認できた。



図-3.26 調査対象橋梁の架橋地形図



写真-3.15 架橋周辺状況（海側から撮影）

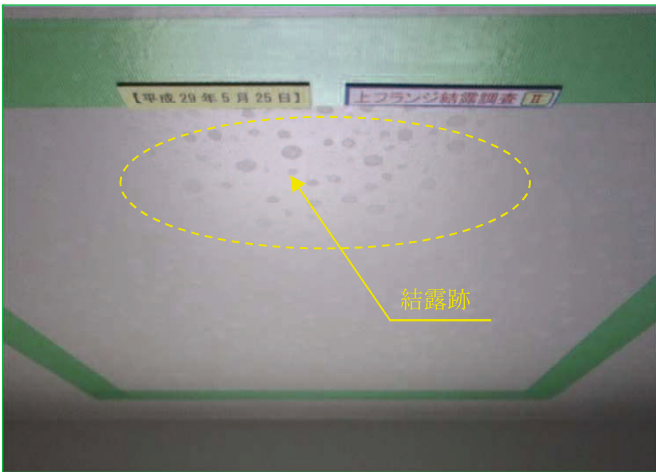


写真-3.16 桁中央部の結露跡（2017年5月）

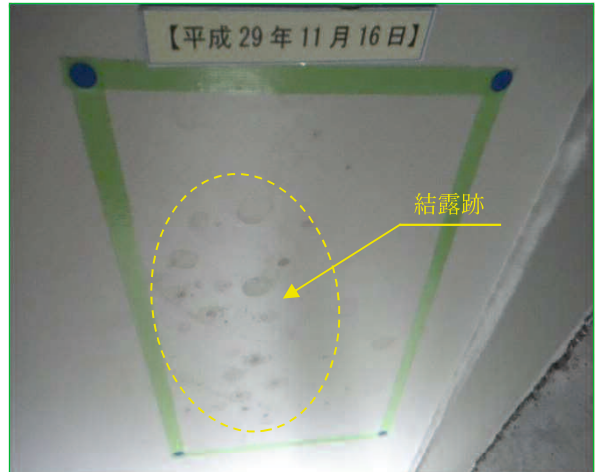


写真-3.17 桁端部の結露跡（2017年11月）

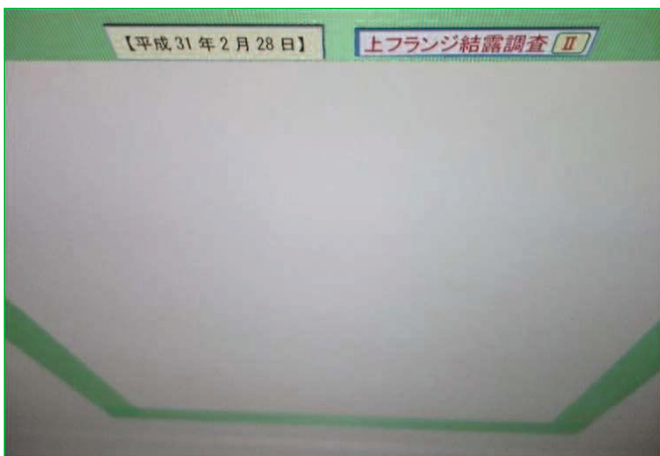


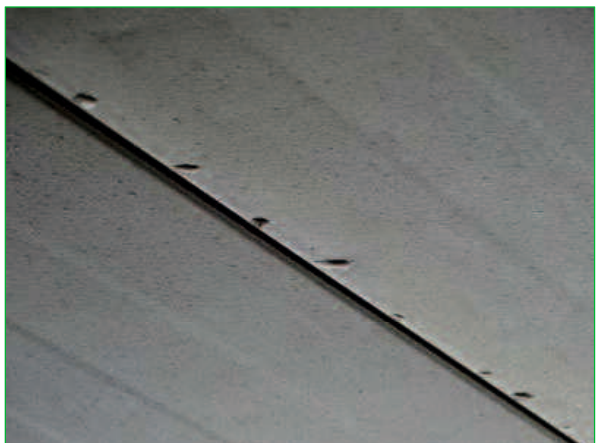
写真-3.18 桁中央部（2019年2月）
〈再結露なし〉



写真-3.19 桁端部（2019年2月）
〈再結露なし〉



マンホール部（外皮材）



一般部（外皮材）

写真-3.20 金属サンドイッチパネル（外皮材）の結露状況

3.7 本章のまとめ

断熱性能を有する金属サンドイッチパネルを用いた環境改善による防食法は、腐食環境因子の影響を受ける地域においても鋼橋の採用が可能となり、塗装仕様の簡素化にも繋がる技術である。

しかし日本の環境は多種多様であり、国内各所において防食効果を発揮し、かつ長期間の耐久性能と高い安全性が担保できる技術でなければならない。

今回のモニタリングはその前提条件を踏まえ、国内有数の厳しい環境下に採用された橋梁を選定し、防食性能を検証した。

ここでは、亜熱帯地域（臨海部）に架橋された鋼橋を対象に5年間の腐食環境調査で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 金属サンドイッチパネルを設置した調査対象橋梁の桁内気温は桁外と比較して年平均で3.6℃上昇し、相対湿度は9.4%程度低下することを確認した。特に日射量と日照時間が多くなる春季から夏季は、桁内と桁外の温湿度差が顕著に現れる。また1日を通して、桁内気温とフランジ温度が同様に推移していることから、金属サンドイッチパネルに囲まれた桁内空間全体が桁外と異なる環境下にあると認められる。
- (2) 桁内は年間を通して1日の温度・湿度の変動幅が小さく、桁外の急激な気象変化には追従しない。また桁内気温と桁内露点の温度差が大きいことにより、ISO 9223で算出した年間の桁内濡れ時間は、桁外の濡れ時間221,070分に対し1/5以下の40,200分に抑えられるため、結露の抑制効果が期待できる。
- (3) 桁外の最高気温日と最低気温日の両日ともに、桁外気温と桁内気温の変動にタイムラグがあり、深夜に桁内気温がピーク値を示している。この傾向は日中晴れた日に多く、桁内に蓄積された日射熱が金属パネルの断熱効果により深夜まで保持されていると考える。
- (4) 桁内に垂直設置したワッペン試験片の腐食減耗量はJIS-SMA、3%ニッケル系ともに5年間の全計測結果が0.000mm、水平設置は0.005mm以下と材質に関係なく低い数値を示し、かつ、変動幅が微小である。また、経年の桁内調査でマンホールから海塩粒子が侵入した可能性も否定できないが、さび厚の増加は抑えられている。
- (5) 桁内の垂直、水平姿勢のワッペン試験片のさび生成に差異が見られた。主に主桁上フランジに残存していた塩分が、結露水としてワッペン試験片に付着したと考えられる。5年間、ワッペン試験片の付着塩分量がほぼ同一数値を示すことから、主桁上フランジへ付着していた塩分は、1年間のうちに結露水とともに滴下したと推察できる。
- (6) 金属サンドイッチパネルの設置後に1年間ドライガーゼ法で飛来塩分の測定を実施したが、数値上桁内へのあらたな塩分侵入は検知されなかったため、桁に付着した塩分は、桁塗装後のヤード保管、海上輸送、桁架設時に付着したと考えられる。架橋後に水洗いなどで桁全体の付着塩分を除去することは現実的でなく、製作段階で桁に一定の被覆防食を施すことが重要になる。
- (7) 断熱性能を利用した金属サンドイッチパネルの防食法（環境改善）は、床版厚が薄く桁高が低い構造では、季節により桁内の気温上昇が避けられない場合もあるが、桁内の湿度は低く濡れ時間も大幅に減少するため、耐候性鋼橋梁を含めた鋼橋で防食効果が期待できると考える。

参考文献（第3章）

- 1) 七浦恒康, 佐藤弘隆, 藤川敬人, 鈴木恵太: 臨海部橋梁における高耐食外装材の防食性能, 橋梁と基礎, Vol. 48, pp. 25-28, 2014. 10
- 2) 国土交通省気象庁 (過去の気象データ/沖縄県久米島, 沖縄県那覇市, 大阪, 東京): <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (最終検索日 2020年12月20日)
- 3) 下里哲弘: 沖縄における橋梁の長寿命化戦略～鋼橋の新防食技術への挑戦～, 土研新技術ショーケース 2014 in 沖縄, 2014
- 4) 琉球大学大学院理工学研究科: 久米島錢田橋白瀬橋腐食環境調査, pp. 6-8, 2011.
- 5) 日鉄エンジニアリング株式会社: パネルブリッジ[®], Cat. No. KC121, 2020. 1 版
- 6) 日鉄エンジニアリング株式会社: NS カバープレート[™], Cat. No. C0426, 2019. 4 版
- 7) 国立研究開発法人建築研究所: 平成 28 年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報 (住宅) 現行版, 第三節 熱貫流率及び線熱貫流率, 2016
- 8) 日鉄鋼板株式会社: イソダッハ R 設計・技術資料, 2021. 6
- 9) 紀平 寛, 田辺康児, 楠 隆, 竹澤 博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和己, 原田佳幸: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 780/I-70, pp. 71-86, 2005. 1
- 10) 国土交通省気象庁 (過去の気象データ/沖縄県久米島): <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (最終検索日 2019年11月28日)

第 4 章

金属サンドイッチパネル内の耐候性鋼の腐食挙動

第4章 金属サンドイッチパネル内の耐候性鋼の腐食挙動

4.1 概要

本章では、供用中の耐候性鋼橋を金属サンドイッチパネルで覆った鋼桁内部空間の環境改善の効果を実験により評価する。金属サンドイッチパネルによる環境改善は、常設足場機能を付加した内皮材、芯材（断熱材）、外皮材の三層で構成されるパネルで鋼橋全体を覆い、長寿命化と維持管理機能の向上を同時に進めて行く考え方であり、塗装により防食された鋼橋においては、環境改善の効果が確認されている¹⁾。

しかし飛来塩分の付着した耐候性鋼橋やその補修塗装後に覆った事例はなく、風雨による洗浄や乾湿など自然環境と異なる条件下での、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響、さびの形態が確認できていない。

耐候性鋼橋への金属サンドイッチパネルの適用について、さびの進行した無処理の小型試験体、素地調整や補修塗装を想定した小型試験体を桁内へ配置し、初期付着塩分量、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響、さびの進行速度から耐候性鋼の腐食挙動を考察する。

4.2 調査対象橋梁の環境と構造

調査対象橋梁の架橋環境と金属サンドイッチパネルの構造仕様は第3章の「金属サンドイッチパネル内の腐食環境評価」で述べている。金属サンドイッチパネル内に設置する小型試験体は、ワッペン試験片と同じG7とG8桁間の桁中央部側に設置し、温湿度、板温度の計測を2018年4月から1年間実施した。橋梁側面図を図-4.1に、桁内配置イメージを図-4.2に、桁内配置状況を写真-4.1に示す。

温湿度の計測は、LASCAR electronics社の温湿度データロガー（EL-USB-2）、板温度の計測はエスペックミック社サーモレコーダー（RT-14）を使用し、それぞれ30分ごとの記録とした。温湿度計および板温度計の小型試験体付近の配置状況を写真-4.2に、上フランジ下面の配置状況を写真-4.3に示す。また、2018年4月から2019年3月の桁内計測と気象庁ホームページ²⁾から算出した年温湿度集計を表-4.1に、濡れ時間の比較を表-4.2に示す。

桁内の空間は桁外と比較して、気温は年平均で4.0℃高く、相対湿度は10.6%低い。特に4月～9月に着目するとそれぞれ6.1℃、17.2%とその差が顕著となる。反面、日照時間が短く日差しが穏やかな秋・冬季は桁内と桁外の数値が同一傾向を示している。

また、ISO9223で定義される「0℃以上かつ相対湿度80%以上」で集計した年間濡れ時間は、桁外277,860分（年間の50%以上）、桁内60,990分となり飛来塩分粒子などの外部因子遮断効果を加えると、桁内は結露の発生を抑制できる環境であると判断できる³⁾。

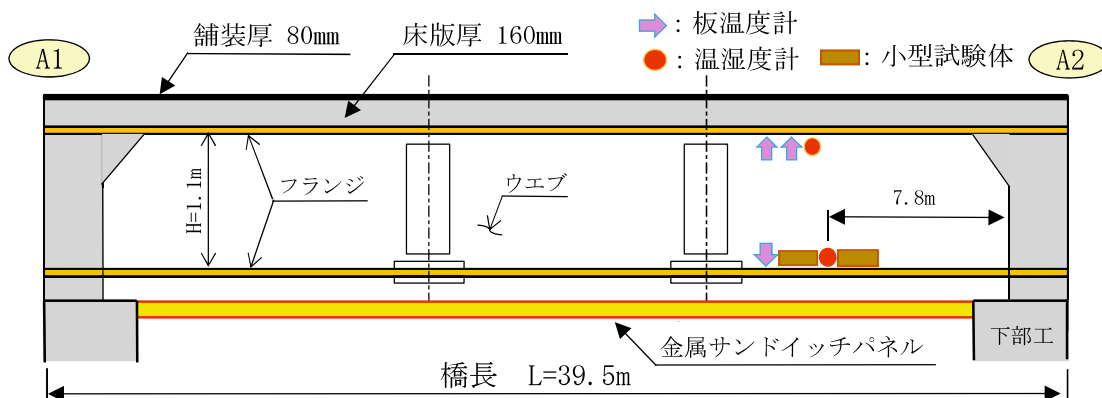


図-4.1 橋梁側面図

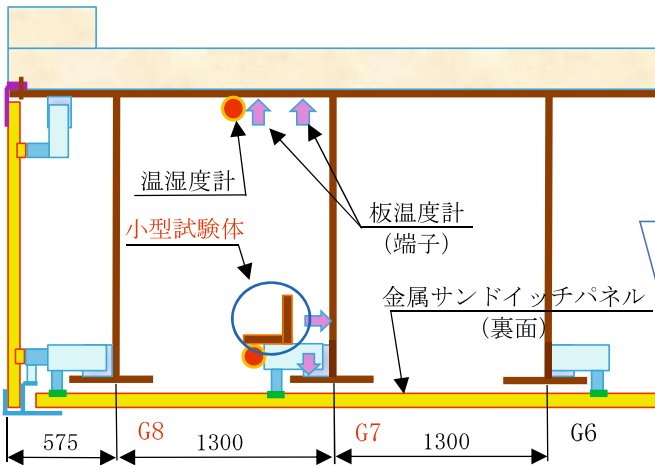


図-4.2 桁内配置イメージ図



写真-4.1 桁内配置状況

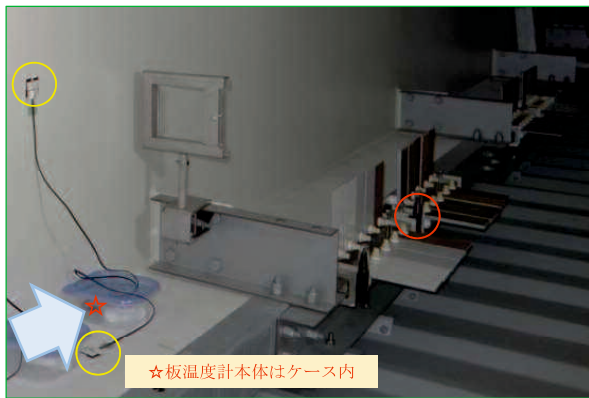


写真-4.2 小型試験体付近の配置状況

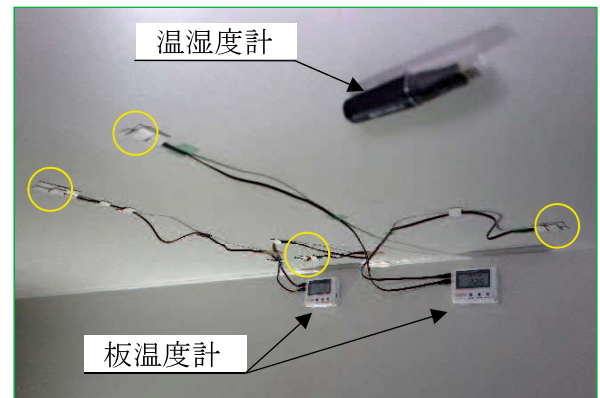


写真-4.3 上フランジ下面の配置状況

表-4.1 年温湿度集計表

久米島 (2018年4月～2019年3月)			
計測期間	項目	桁内	気象庁データ
2018年4月～ 2018年9月	気温	32.7 °C	26.6 °C
	(最高気温)	41.0 °C	32.7 °C
	(最低気温)	18.5 °C	11.3 °C
	相対湿度	65.1 %	82.3 %
	絶対湿度	22.9 g/m ³	21.1 g/m ³
2018年10月～ 2019年3月	露点	25.3 °C	23.3 °C
	気温	22.6 °C	20.8 °C
	(最高気温)	31.0 °C	28.7 °C
	(最低気温)	15.0 °C	10.3 °C
2018年4月～ 2019年3月	相対湿度	71.3 %	75.2 %
	絶対湿度	14.5 g/m ³	13.8 g/m ³
	露点	17.1 °C	16.3 °C
	気温	27.7 °C	23.7 °C
2018年4月～ 2019年3月	(最高気温)	41.0 °C	32.7 °C
	(最低気温)	15.0 °C	10.3 °C
	相対湿度	68.2 %	78.8 %
	絶対湿度	18.7 g/m ³	17.5 g/m ³
	露点	21.3 °C	19.8 °C

表-4.2 濡れ時間の比較表

計測期間	桁内*	気象庁データ*
2018年4月～ 2018年9月	15,750 分	173,340 分
2018年10月～ 2019年3月	45,240 分	104,520 分
2018年4月～ 2019年3月	60,990 分	277,860 分

集計方法* : 桁内30分、気象庁データ60分単位

4.3 桁内曝露試験体の仕様

断熱性能を有する金属サンドイッチパネルで鋼橋の側面と下フランジの全面を覆う環境改善による防食法は、従来の桁カバー（化粧板）⁴⁾ 構造とは異なり密閉性が高く、桁外環境との遮断効果が大きい仕様で設計されている。

現在、被覆された鋼橋においては実橋への適用も進み、防食効果が確認されているが、耐候性鋼橋に採用された事例はなく、風雨による桁の洗浄や日照による鋼桁表面の乾湿の繰り返しが少ない環境下での緻密な保護性さびの形成に与える影響の検証が必要になる。

そこで桁内に設置する小型試験体の水準は、主に耐候性鋼橋に着目した仕様を選定した。小型試験体の水準を表-4.3に、桁内での試験体配置状況を写真-4.4に、試験体設置前の桁内状況を写真-4.5に、試験体の桁内搬入状況を写真-4.6に示す。小型試験体の輸送や桁内への搬入時には、環境因子の影響を受けないよう慎重に作業を行った。

水準1は新設橋のC-5仕様、水準2は新設橋のD-5仕様で、特に新設桁の設計段階から金属サンドイッチパネルを採用した場合のD-5仕様の有効性を確認する。

水準3～水準6は自然曝露させた「さび外観評点5～2」のJIS-SMA鋼板で、さびの状態に応じた桁内での経年変化を、水準7は同じく自然曝露させた「さび外観評点2」のニッケル系鋼でJIS-SMA鋼との差異を合わせて評価する。

水準8～水準10は「さび外観評点1」の鋼材表面に各種素地調整を行ったケース、水準11と水準12は有機ジンクリッチペイント、さび安定化補助処理など簡易な塗装を施したケース、水準13と水準14は塗り替え塗装を実施したケースで、それぞれの処理後に金属パネルを設置した場合の効果を検証した。

なお水準8～水準14の小型試験体は、3%塩水を4か月以上散布し、人為的にさびさせた「さび外観評点1」のJIS-SMA鋼板を使用した。また水準1～水準2と水準11～水準14の小型試験体は、素地に達する人工キズを付加した試験体を作成するとともに、それぞれ垂直と水平の2方向へ直角配置とし、人工キズ周辺の発さびを観察した。

表-4.3 小型試験体の水準

区分	水準	姿勢	仕様	鋼材	素地調整	プライマー		ミストコート	下塗		中塗	上塗
新設橋対応	1	垂直	C-5塗装系 ⁸⁾ [ミルプライマー塗布なし]	JIS G 3106 溶接構造用鋼 (SM)	ISO Sa 2.5	無機ジンクリッチペイント 600g/m ² (75μm)	-	エポキシ樹脂塗料下塗 160g/m ²	エポキシ樹脂塗料下塗	-	ふっ素樹脂塗料中塗 170g/m ² (30μm)	ふっ素樹脂塗料上塗 140g/m ² (25μm)
		水平	エポキシ樹脂塗料下塗 540g/m ² (120μm)						エポキシ樹脂塗料上塗 140g/m ² (25μm)			
新設橋対応	2	垂直	D-5塗装系 ⁸⁾ [ミルプライマー塗布なし]	JIS G 3106 溶接構造用鋼 (SM)	ISO St 3	-	-	-	変性エポキシ樹脂塗料内面用	-	-	-
		水平	変性エポキシ樹脂塗料内面用 410g/m ² (120μm)						変性エポキシ樹脂塗料内面用 410g/m ² (120μm)			
既設橋対応	3	垂直	無処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	-	-	-	-	-	-	-	-
		水平	さび外観評点5									
	4	垂直	無処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	-	-	-	-	-	-	-	-
		水平	さび外観評点4									
	5	垂直	無処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	-	-	-	-	-	-	-	-
		水平	さび外観評点3									
	6	垂直	無処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	-	-	-	-	-	-	-	-
		水平	さび外観評点2									
	7	垂直	無処理	高耐候性鋼 (ニッケル系鋼)	-	-	-	-	-	-	-	-
		水平	さび外観評点2									
	8	垂直	動力工具処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	2種ケレン	-	-	-	-	-	-	-
		水平	動力工具処理									
	9	垂直	動力工具処理 +水洗処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	2種ケレン	-	-	-	-	-	-	-
		水平	動力工具処理 +水洗処理									
10	垂直	ブラスト処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	1種ケレン	-	-	-	-	-	-	-	
	水平	ブラスト処理										無塗装
11	垂直	有機ジンクリッチペイント塗装	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	2種ケレン	有機ジンクリッチペイント 240g/m ²	-	-	-	-	-	-	
	水平	有機ジンクリッチペイント塗装			有機ジンクリッチペイント 240g/m ²	-	-	-	-	-	-	
12	垂直	さび安定化補助処理	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	2種ケレン	表面処理剤 (15μm)	表面処理剤 (15μm)	-	表面処理剤 (40μm)	-	-	-	
	水平	さび安定化補助処理			表面処理剤 (15μm)	表面処理剤 (15μm)	-	表面処理剤 (40μm)	-	-	-	
13	垂直	Re-II塗装系 ⁸⁾	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	2種ケレン	有機ジンクリッチペイント 240g/m ²	-	-	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²	弱溶剤形塗料中塗 140g/m ²	弱溶剤形塗料上塗 120g/m ²	
	水平	Re-II塗装系 ⁸⁾			有機ジンクリッチペイント 240g/m ²	-	-	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²	弱溶剤形塗料中塗 140g/m ²	弱溶剤形塗料上塗 120g/m ²	
14	垂直	Re-I塗装系 ⁸⁾ H17年12月～	JIS G 3114 耐候性鋼 (SMA)	1種ケレン	有機ジンクリッチペイント 600g/m ²	-	-	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²	弱溶剤形塗料中塗 170g/m ²	弱溶剤形塗料上塗 140g/m ²	
	水平	Re-I塗装系 ⁸⁾ H17年12月～			有機ジンクリッチペイント 600g/m ²	-	-	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²	弱溶剤形塗料中塗 170g/m ²	弱溶剤形塗料上塗 140g/m ²	

水準区分/ : 無処理仕様 : 無塗装仕様 : 簡易塗装仕様 : 塗り替え塗装仕様

全ての小型試験体の側面および裏面には、2種ケレン後に変性エポキシ樹脂塗料による塗装を行い、曝露試験中に周囲からのさびの影響を受けないよう配慮した。

4.4 桁内曝露試験体の評価項目

桁内曝露試験体の計測は、金属サンドイッチパネルの常設足場機能を利用することにより、桁内での評価とした。表-4.4に小型試験体の評価項目を示す。

この表中のイオン透過抵抗測定は、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り、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関する抵抗値を示し、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と判断できる。

今回は小型試験体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RST法⁵⁾を採用し、その評価は耐候性さび安定化評価技術の体系化で報告されたイオン透過抵抗法による評価区分⁶⁾に基づいた。

なおイオン透過抵抗値および付着塩分量は、小型試験体の中央部1箇所での計測値を、さび厚・塗膜厚・鋼材表面膜厚は図-4.3に示すマスクによる定点計測を行い、それぞれ12点の計測値から最大値と最小値の2点を除いた10点の平均値を採用した。

また、水準11～水準14は経年により塗膜下の残存さびが成長し、塗膜厚+さび厚+塗膜と鋼材表面間の空間の厚さ（空洞）などが混在している状態と考えられるため、計測値を「鋼材表面膜厚」と定義した。

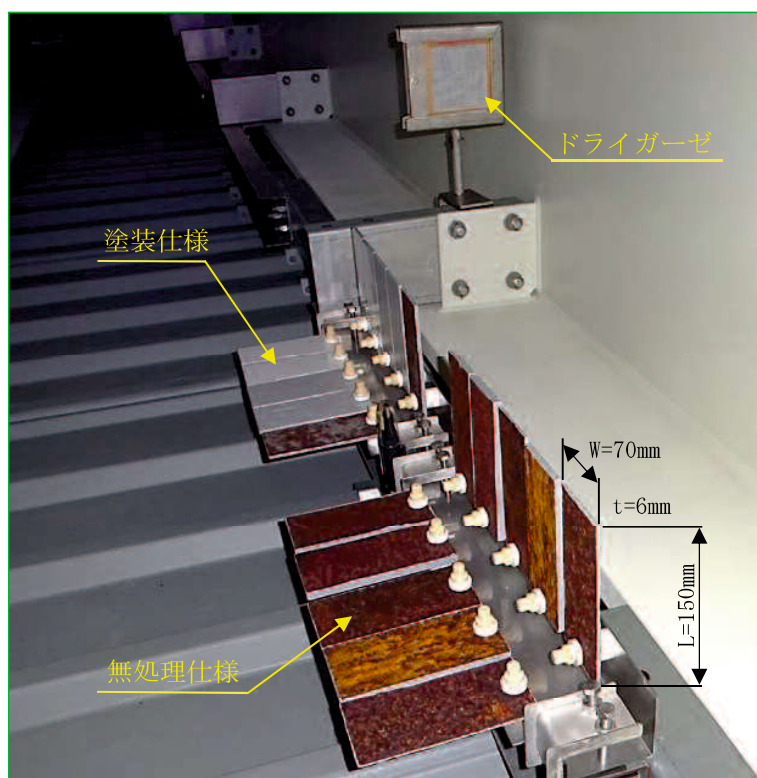


写真-4.4 小型試験体の配置状況

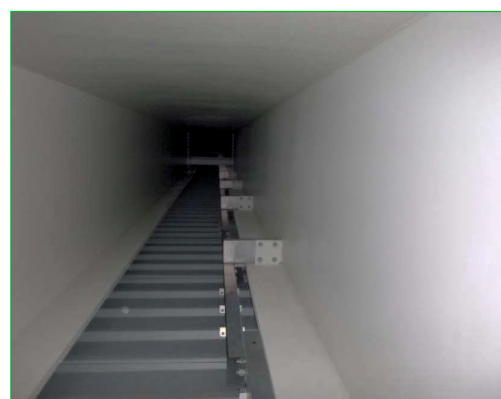


写真-4.5 試験体設置前の桁内状況

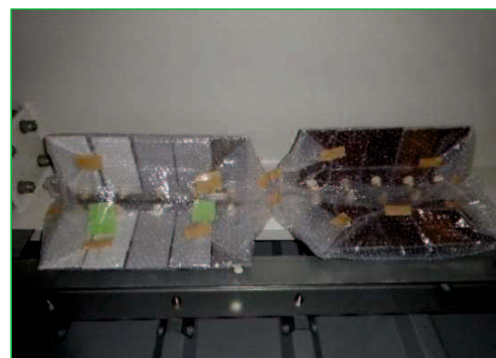


写真-4.6 試験体の桁内搬入状況

4.5 桁内曝露試験体の評価結果

4.5.1 初期小型試験体の付着塩分量

さびの進行した小型試験体を曝露試験する際に重要な指標は、小型試験体に残存する塩分量である。無処理仕様の水準3～7の小型試験体作成後に計測した付着塩分量、素地調整仕様の水準8～水準11と塗り替え塗装仕様の水準12～水準14の小型試験体作成後（素地調整前）と素地調整後に計測した付着塩分量を表-4.5に示す。

4.5.2 小型試験体の曝露評価

小型試験体は 2015年8月27日に桁内へ配置した後、初回評価を2016年11月15日に、その後は約1年間隔で計4回行った。5年間の計測日を以下に示す。

- ・ 第1回 2016年11月15日（曝露日数 446日間）
- ・ 第2回 2017年11月16日（曝露日数 812日間）
- ・ 第3回 2018年11月22日（曝露日数 1183日間）
- ・ 第4回 2019年11月14日（曝露日数 1540日間）
- ・ 第5回 2020年11月25日（曝露日数 1917日間）

表-4.4 小型試験体の評価項目

項目 (対象水準)	内容 (測定機器)
外観評価 (全水準)	1年経過ごとに写真記録 (接写撮影用カメラ)
さび厚計測 (水準3～10) 塗膜厚計測 (水準1、2) 鋼材表面膜厚計測 (水準11～14)	1年経過ごとに12点/枚計測し中央値10点で評価 〔電磁膜厚計: Elcometer 456 / elcometer社製〕
イオン透過抵抗計測 ・さび面 (水準3～10) ・塗装面〔簡易塗装含〕 (水準1、2、11～14)	1年経過ごとにイオン透過抵抗を1点/枚計測 〔イオン透過抵抗測定装置: C40G/日鉄防食社製〕
付着塩分量計測 (水準3～10)	1年経過ごとに付着塩分量を1点/枚計測 〔表面塩分計: SNA-3000/サンコウ電子研究所社製〕

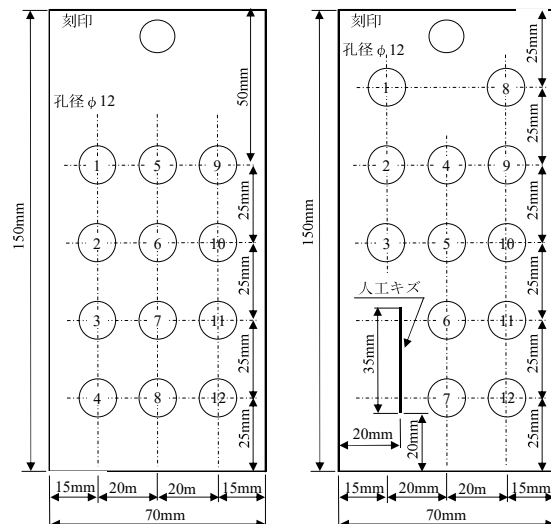


図-4.3 小型試験体の厚さ計測用マスク

表-4.5 小型試験体の初期付着塩分量

水準	姿勢	仕様 (鋼材)	付着塩分量 (mg/m ²)	水準	姿勢	仕様 (鋼材)	付着塩分量 (mg/m ²)		水準	姿勢	仕様 (鋼材)	付着塩分量 (mg/m ²)					
							素地調整前	素地調整後				素地調整前	素地調整後				
3	垂直	無処理 さび外観評点5	5.4	8	垂直	動力工具処理	1,740	1,193	12	垂直	動力工具処理 + さび安定化 補助処理 (JIS-SMA)	>1,999	>1,999				
	水平	(JIS-SMA)	7.6		水平	(JIS-SMA)	>1,999	1,660		水平		1,717	>1,999				
4	垂直	無処理 さび外観評点4	7.0	9	垂直	動力工具処理 + 水洗処理	>1,999	760	12*	垂直	(JIS-SMA)	1,656	>1,999				
	水平	(JIS-SMA)	6.5		水平	(JIS-SMA)	1,243	885		水平		1,828	1,566				
5	垂直	無処理 さび外観評点3	48	10	垂直	ブラスト処理	>1,999	174	13	垂直	Re-II (JIS-SMA)	1,572	1,381				
	水平	(JIS-SMA)	49		水平	(JIS-SMA)	1,440	63		水平		>1,999	603				
6	垂直	無処理 さび外観評点2	381	11	垂直	動力工具処理 + 有機ジンク リッチ ペイント (JIS-SMA)	>1,999	583	13*	垂直	(JIS-SMA)	>1,999	499				
	水平	(JIS-SMA)	100		水平		>1,999	1,122		水平		1,826	540				
7	垂直	無処理 さび外観評点2	973	11*	垂直	(JIS-SMA)	>1,999	1,298	14	垂直	Re-I (JIS-SMA)	>1,999	106				
	水平	(ニッケル系鋼)	1,201		水平		1,948	946		水平		1,696	607				
水準区分													14*	垂直	(JIS-SMA)	>1,999	309
														水平		>1,999	47

注) 水準番号の*記号は、人工キズ有りを示す。
赤字は、素地調整後の付着塩分量が大きい箇所を示す。

(1) 無処理仕様の曝露評価

JIS-SMA鋼のさび外観評点5～2とニッケル系鋼のさび外観評点2のさび厚・イオン透過抵抗値〔無処理仕様〕を表-4.6に、さび厚の推移〔無処理仕様〕を図-4.4に示す。また、さび外観評点5～4のイオン透過抵抗値の推移を図-4.5と図-4.6に、初期と5年目曝露後の状況を写真-4.7と写真-4.8に示す。なお、この章で記載していない全水準の経年曝露写真は、附録-2「小型試験体曝露写真」として整理した。

さび外観評点5と4は、5年間を通してさび厚・イオン透過抵抗値の変動が微小である。結露が少なく環境因子の影響を受けない桁内は、 $10\text{mg}/\text{m}^2$ 以下の初期付着塩分が存在しても鋼材表面のさび進行は抑制され、未成長さびの状態が継続していると判断できる。

さび外観評点3のイオン透過抵抗値の推移を図-4.7に、初期と5年目曝露後の状況を写真-4.9に示す。

さび外観評点3の小型試験体は、鋼材表面に初期付着塩分が $50\text{mg}/\text{m}^2$ 程度存在し、経年によるさび厚の微増が見られる。桁外からの塩分供給が遮断された環境であり、さびの進行速度は緩やかであるが、さび外観評点5～4と比較して初期付着塩分量が多いため、現段階では内在塩分の影響によるさびの進展であると評価できる。

次にさび外観評点2のJIS-SMA鋼とニッケル系鋼のイオン透過抵抗値の推移を図-4.8と図-4.9に、さび外観評点2のJIS-SMA鋼の初期と5年目曝露後の状況を写真-4.10に、ニッケル系鋼の5年間の曝露状況を写真-4.11に示す。

どちらも初期のさび厚が $500\ \mu\text{m}$ 程度あり、要観察状態を示すさび領域からのさび進行状況を調査した。桁内環境であっても早期にさびは進行し、JIS-SMA鋼（水平）を除き2年目から異常を示すさびへと移行した。これはJIS-SMA鋼が $381\text{mg}/\text{m}^2$ （垂直）と $100\text{mg}/\text{m}^2$ （水平）、ニッケル系鋼はさらに $973\text{mg}/\text{m}^2$ （垂直）と $1,201\text{mg}/\text{m}^2$ （水平）のより多くの塩分が初期の段階で鋼材表面付近に存在していた影響と考えられる。特にさび外観評点2のニッケル系鋼は、3年目に層状剥離さびの脱落が広範囲で確認され、5年目の調査時には鋼材表面から層状剥離さびが全て脱落（表面が均一に剥離）し、あらたな素地が露出した状態になっている。

なお、本調査で作成した無処理仕様の小型試験体は自然曝露によるものであり、さび進行の支配的な要因である初期付着塩分量に大きな差異が存在している。第3章の桁外で実施した遮へい式曝露試験では、JIS耐候性鋼と比較しニッケル系鋼ワッペン試験片の優位性が確認⁷⁾されていることを踏えると、今回の結果はあくまでも特定の条件下での事象として評価する必要がある。

また、小型試験体のさび厚の変動は、金属サンドイッチパネル設置前に鋼桁へ付着し結露水とともに滴下した付着塩分量が少いこと、その後は金属サンドイッチパネルにより桁内への塩分侵入が遮断されていることにより、垂直、水平設置での差が微小で、主に初期の付着塩分量に影響を受けていると推察できる。

表-4.6 さび厚・イオン透過抵抗値
[無処理仕様]

水準仕様	姿勢番号	さび厚 μm (イオン透過抵抗値 Ω)					
		初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
3 さび外観評点5 (JIS-SMA)	垂直 3-1	138 (225)	125 (246)	118 (369)	122 (336)	124 (214)	130 (378)
	水平 3-2	129 (175)	126 (164)	141 (165)	137 (203)	142 (149)	144 (211)
4 さび外観評点4 (JIS-SMA)	垂直 4-1	130 (564)	136 (503)	134 (619)	133 (1.11k)	136 (377)	142 (671)
	水平 4-2	124 (507)	121 (574)	120 (584)	126 (704)	126 (382)	135 (715)
5 さび外観評点3 (JIS-SMA)	垂直 5-1	245 (575)	273 (653)	231 (581)	267 (904)	286 (456)	238 (1.06k)
	水平 5-2	258 (705)	263 (577)	334 (896)	381 (2.85k)	383 (716)	283 (2.33k)
6 さび外観評点2 (JIS-SMA)	垂直 6-1	499 (304)	817 (6.78k)	880 (5.74k)	999 (8.47k)	1,024 (6.05k)	1,072 (15.4k)
	水平 6-2	487 (1,564)	664 (28.2k)	720 (43.8k)	792 (51.9k)	791 (42.6k)	809 (72.0k)
7 さび外観評点2 (ニッケル系鋼)	垂直 7-1	569 (540)	966 (31.1k)	1,110 (115k)	1,200 (223k)	1,097 (16.7k)	208 (634)
	水平 7-2	523 (666)	894 (5.51k)	973 (76.6k)	289 (360)	355 (74)	224 (1.03k)

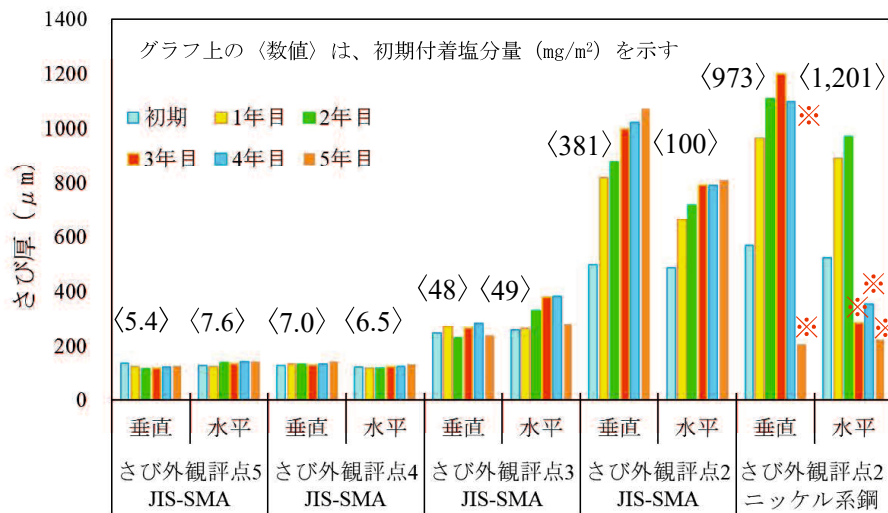


図-4.4 さび厚の推移 [無処理仕様]

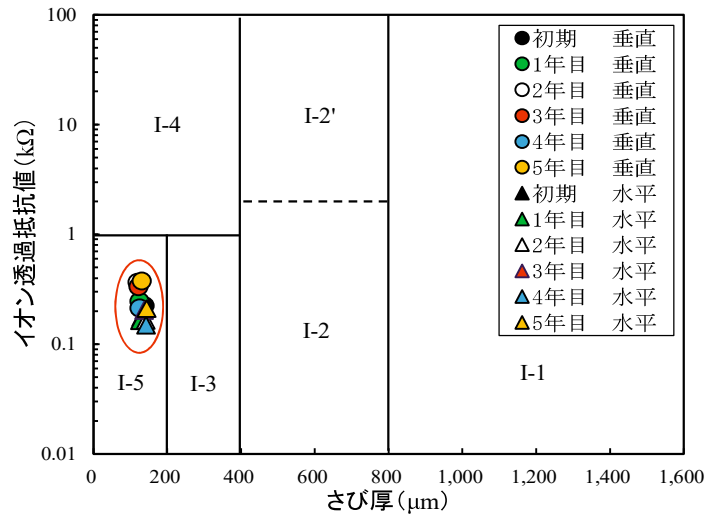


図-4.5 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
JIS-SMA (評点5)

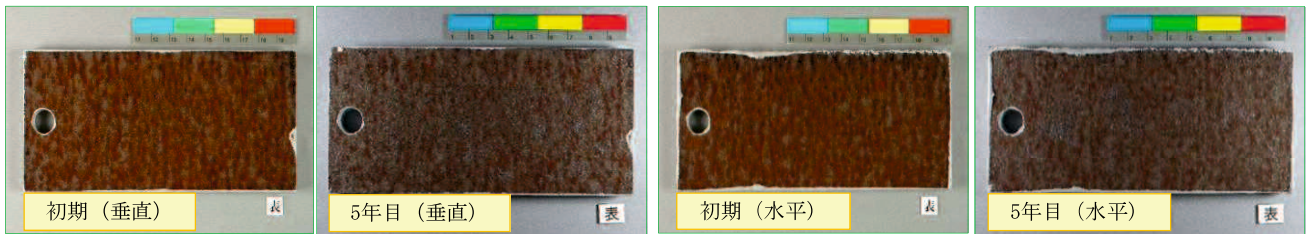


写真-4.7 さび外観評点5 (JIS-SMA)

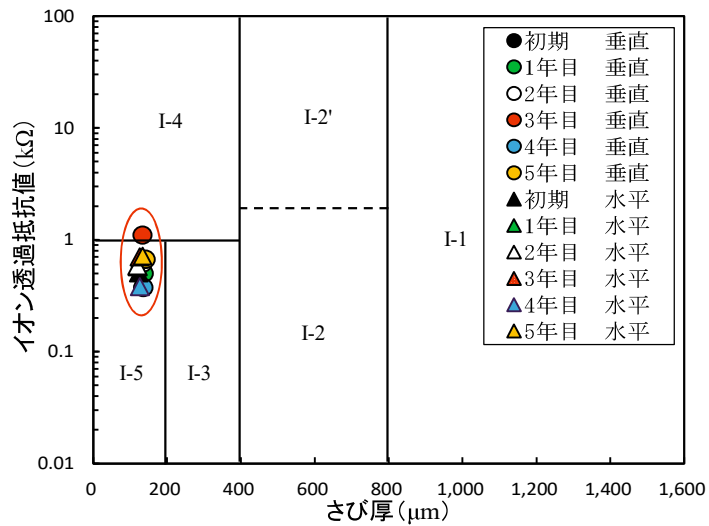


図-4.6 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
JIS-SMA (評点4)

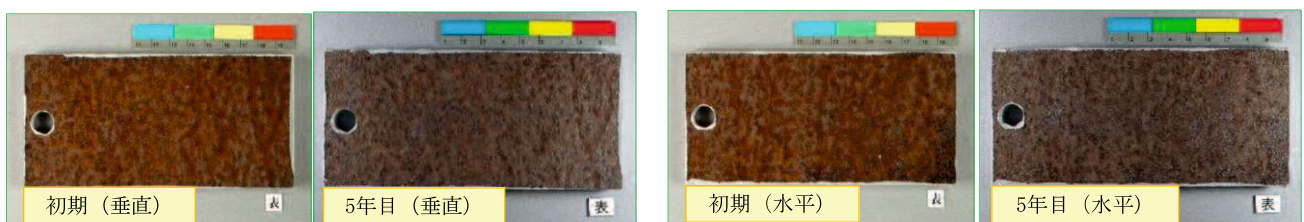


写真-4.8 さび外観評点4 (JIS-SMA)

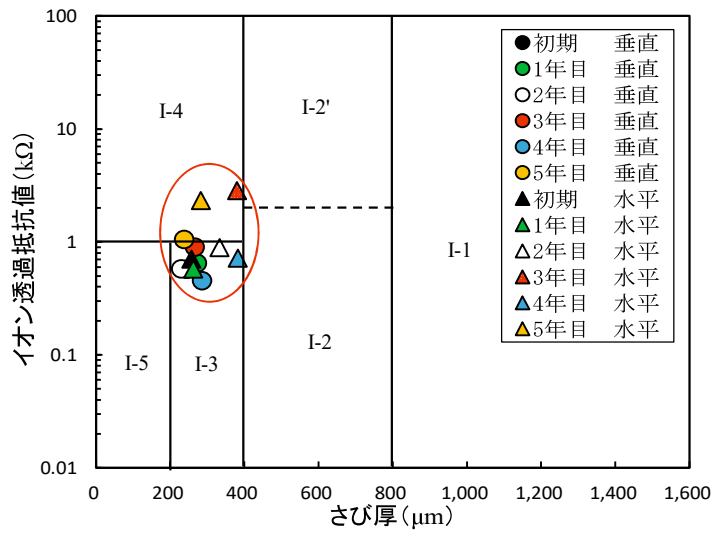


図-4.7 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
JIS-SMA (評点3)

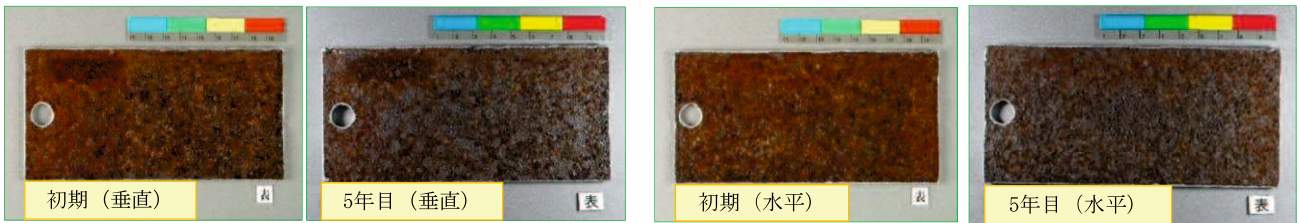


写真-4.9 さび外観評点3 (JIS-SMA)

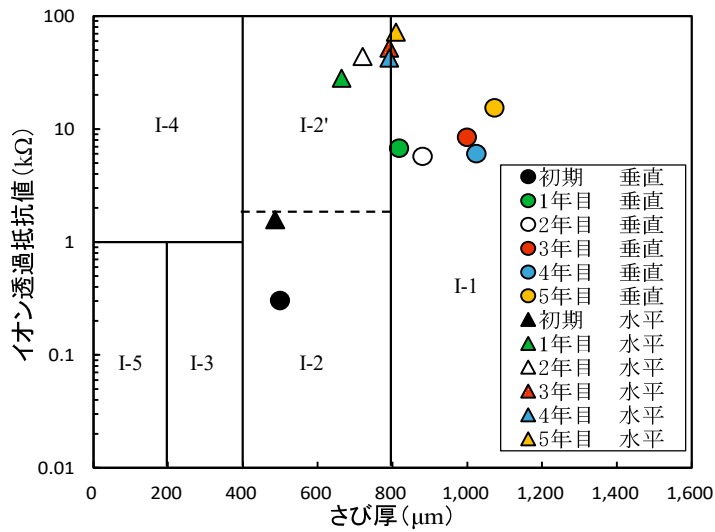


図-4.8 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
JIS-SMA (評点2)

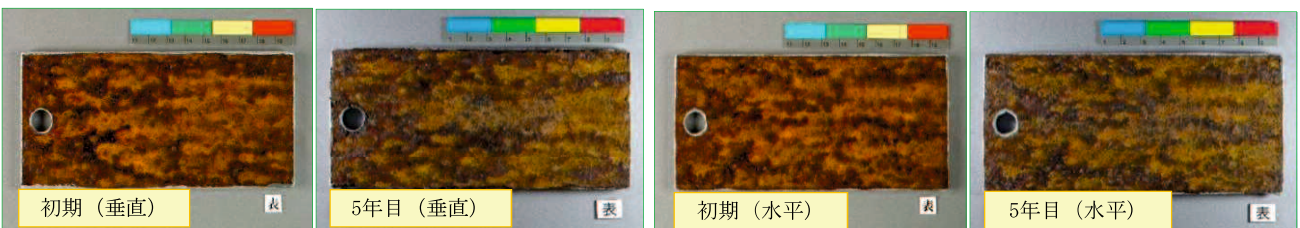


写真-4.10 さび外観評点2 (JIS-SMA)

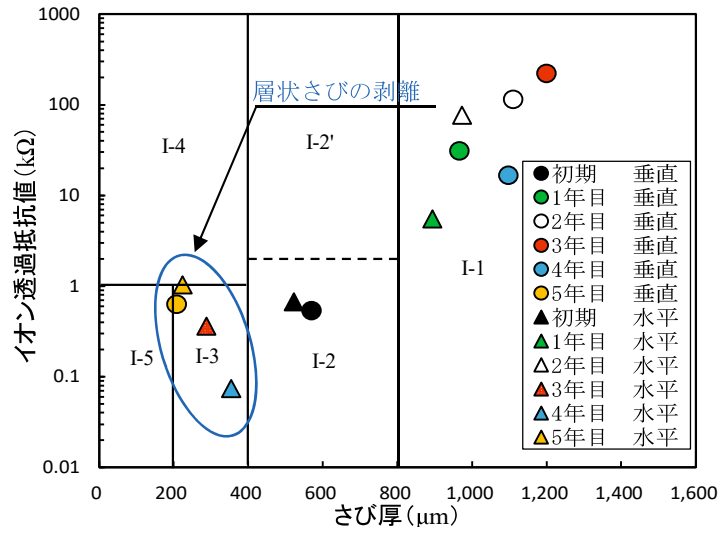
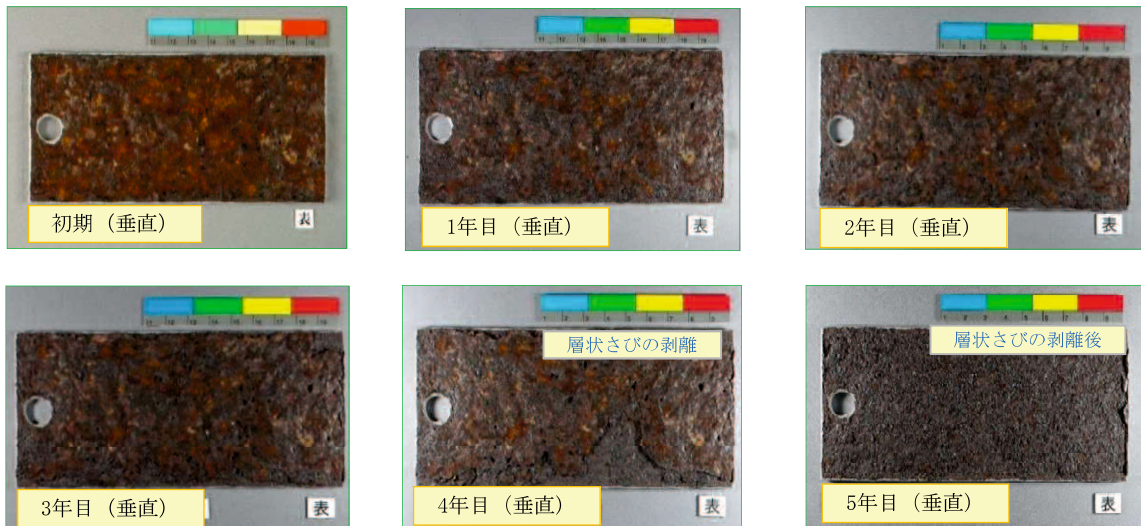


図-4.9 さび厚・イオン灯火抵抗値の推移
ニッケル系鋼（評点2）

【垂直】



【水平】

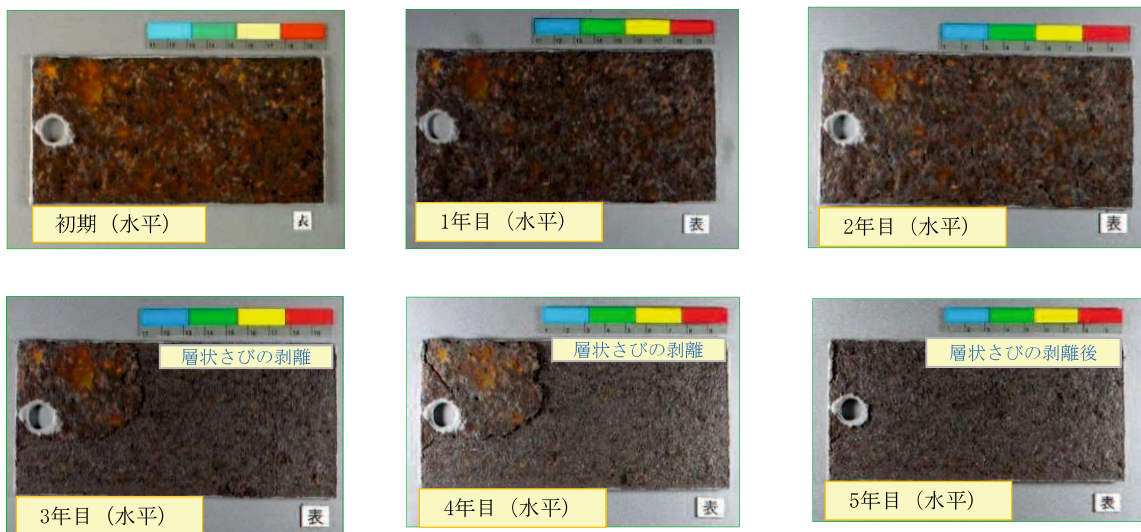


写真-4.11 さび外観評点2（ニッケル系鋼）

(2) 無塗装仕様の曝露評価

JIS-SMA鋼のさび外観評点1（人工さび）に2種ケレン、2種ケレン+水洗処理および1種ケレンを施したさび厚・イオン透過抵抗値〔無塗装仕様〕を表-4.7に、さび厚の推移〔無塗装仕様〕を図-4.10に示す。また、2種ケレンと2種ケレン+水洗処理のイオン透過抵抗値の推移を図-4.11と図-4.12に、初期と5年目曝露後の状況を写真-4.12と写真-4.13に示す。

2種ケレンと2種ケレン+水洗処理の小型試験体は、1年目にさびが急速に成長し120 μ m程度のさび厚になるが、2年目以降の進行は遅く概ね150 μ m以下に抑えられている。また、イオン透過抵抗値もばらつきがあるが23 Ω ~110 Ω 内の安定した数値であり、未成長さびの領域（I-5）を維持している。桁内環境は、鋼材表面のさびを除去することで、その後のさび生成を抑制する効果が期待できる。

なお、素地調整後の付着塩分量が少ない2種ケレン+水洗処理を施した試験体のさび厚が2種ケレンの試験体よりも増加している現象は、水洗により鋼材表面の付着塩分量が一時的に減少しても孔食部分に残存している内在塩分⁸⁾と水洗時に孔食部分へ浸透した水分が最初の1年間で反応を進めたと推察する。

表-4.7 さび厚・イオン透過抵抗値
〔無塗装仕様〕

水準仕様	姿勢番号	さび厚 μ m (イオン透過抵抗値 Ω)					
		初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
8 2種ケレン (JIS-SMA)	垂直	1 (0)	126 (31)	113 (23)	113 (110)	119 (47)	127 (195)
	水平	3 (0)	122 (34)	121 (33)	120 (93)	124 (35)	150 (106)
9 2種ケレン+ 水洗処理 (JIS-SMA)	垂直	15 (0)	118 (45)	133 (28)	144 (91)	144 (33)	165 (204)
	水平	5 (0)	135 (76)	133 (30)	144 (92)	151 (29)	173 (144)
10 1種ケレン (JIS-SMA)	垂直	0 (0)	24 (0)	42 (0)	58 (12)	64 (0)	71 (22)
	水平	0 (0)	21 (0)	32 (0)	43 (10)	53 (0)	75 (15)

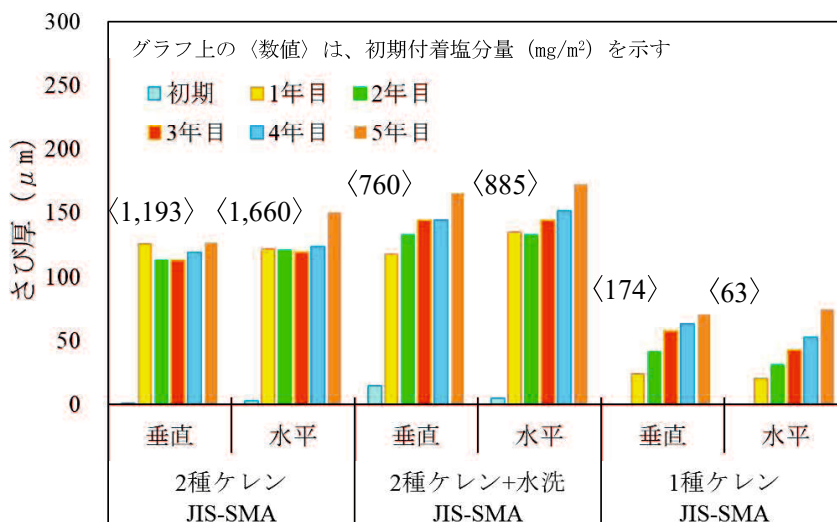


図-4.10 さび厚の推移〔無塗装仕様〕

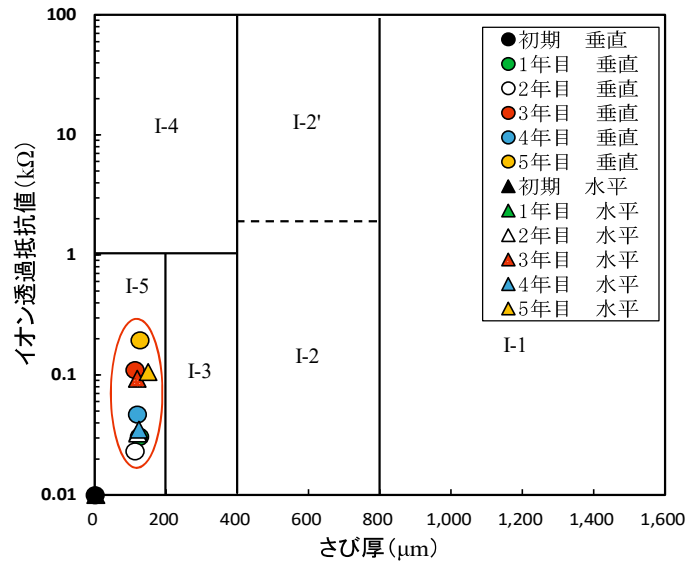


図-4.11 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
(2種ケレン)

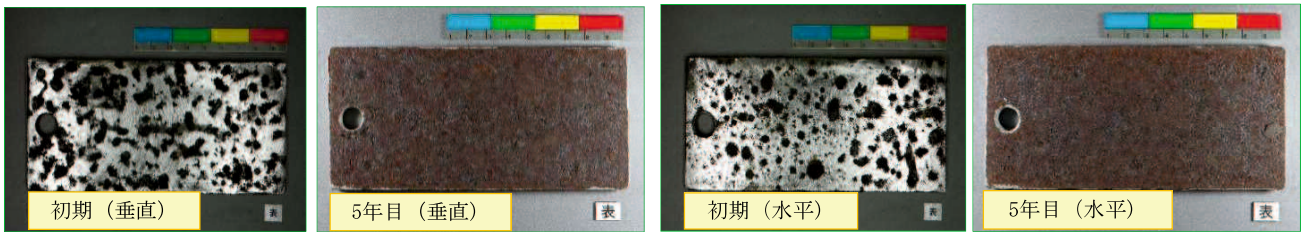


写真-4.12 2種ケレン

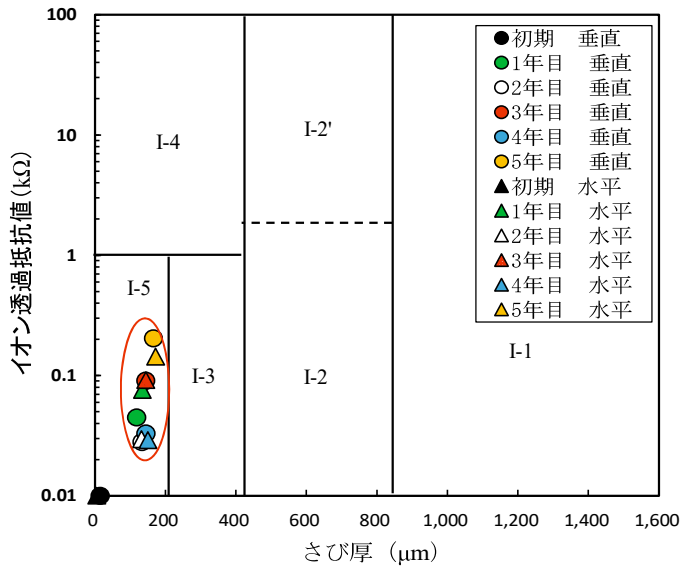


図-4.12 さび厚・イオン透過抵抗値の推移
(2種ケレン+水洗)

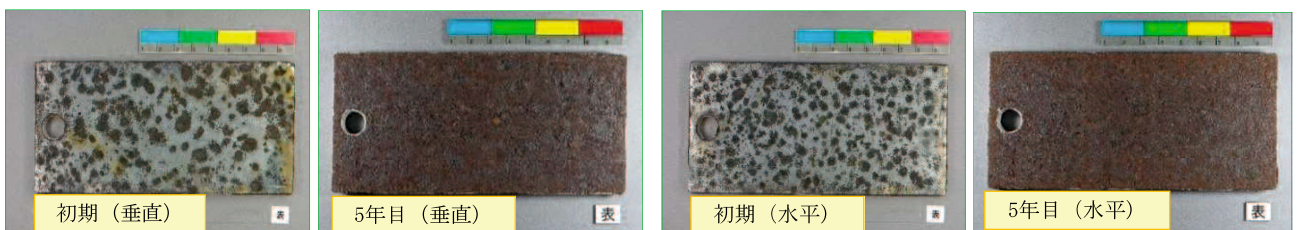


写真-4.13 2種ケレン+水洗

(3) 簡易塗装仕様の曝露評価

JIS-SMA鋼のさび外観評点1（人工さび）に2種ケレン＋有機ジンクリッチペイント塗装および2種ケレン＋さび安定化補助処理を施した鋼材表面膜厚とイオン透過抵抗値〔簡易塗装仕様〕を表-4.8に、鋼材表面膜厚の推移〔簡易塗装仕様〕を図-4.13に示す。またそれぞれの初期と5年目曝露後の状況を写真-4.14と写真-4.15に示す。

2種ケレン＋有機ジンクリッチペイントの組み合わせは、鋼道路橋塗装・防食便覧⁹⁾に記載されていないが、今回の桁内環境において、部分的な腐食防止対策（補修塗装）や犠牲防食作用の有効性確認を目的として試験対象とした。設置後1年間は、計測値や外観上の変化が少なく安定していたが、2年目から鋼材表面膜厚の増加を確認した。内在塩分の影響により鋼材表面と塗膜の間でさびが徐々に成長し空隙が広がっていると考えられ、その進行は表-4.5の小型試験体の初期付着塩分量に示す素地調整後の付着塩分量と相関関係があると判断できる。

なお、有機ジンクリッチペイント表面には2年目で膨れが発生、4年目で塗膜が剥離し鋼板面が露出する現象に発展した。桁内環境でも長期的な防食効果は期待できず短期・緊急的な補修にのみ対応可能と思われる。

2種ケレン＋さび安定化補助処理の小型試験体は、1年目から鋼材表面膜厚の数値が伸びている。これは初期の付着塩分量が素地調整後も1,500mg/m²以上と高いのに加えて、さび安定化補助処理の被膜が鋼材表面を大気から完全に遮断するものではなく、経年とともに失われていく性質によるものであり、塗膜の膨れ現象は有機ジンクリッチペイントより早い2年目から確認された。また、この小型試験体の素地調整後の付着塩分量が、素地調整前より高い数値を示しているケースもあり、電動工具による2種ケレン時に鋼材内面のさびが攪拌され、活性化した可能性も考えられる。

表-4.8 鋼材表面膜厚・イオン透過抵抗値
[簡易塗装仕様]

水準仕様	姿勢番号	鋼材表面膜厚 μm (イオン透過抵抗値 Ω)					
		初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
11 2種ケレン+ 有機ジンクリッチ ペイント (JIS-SMA)	垂直11-1 キズ無し	87 (130k)	89 (122k)	100 (44k)	98 (34k)	100 (31k)	102 (57k)
	水平11-2 キズ無し	80 (622k)	83 (6k)	104 (10k)	152 (7k)	148 (6k)	144 (10k)
	垂直11-3 キズ有り	105 (84k)	109 (63k)	227 (29k)	249 (35k)	286 (5k)	279 (14k)
	水平11-4 キズ有り	92 (704k)	93 (38k)	105 (9k)	110 (25k)	116 (6k)	147 (42k)
12 2種ケレン さび安定化 補助処理 (JIS-SMA)	垂直12-1 キズ無し	107 (>40G)	138 (81k)	160 (68k)	151 (832k)	150 (31k)	159 (350k)
	水平12-2 キズ無し	142 (>40G)	229 (67k)	292 (64k)	291 (9M)	331 (69k)	336 (19M)
	垂直12-3 キズ有り	113 (>40G)	170 (406k)	194 (53k)	184 (2M)	223 (50k)	231 (22M)
	水平12-4 キズ有り	117 (>40G)	159 (336k)	178 (77k)	172 (16M)	239 (269k)	230 (31k)

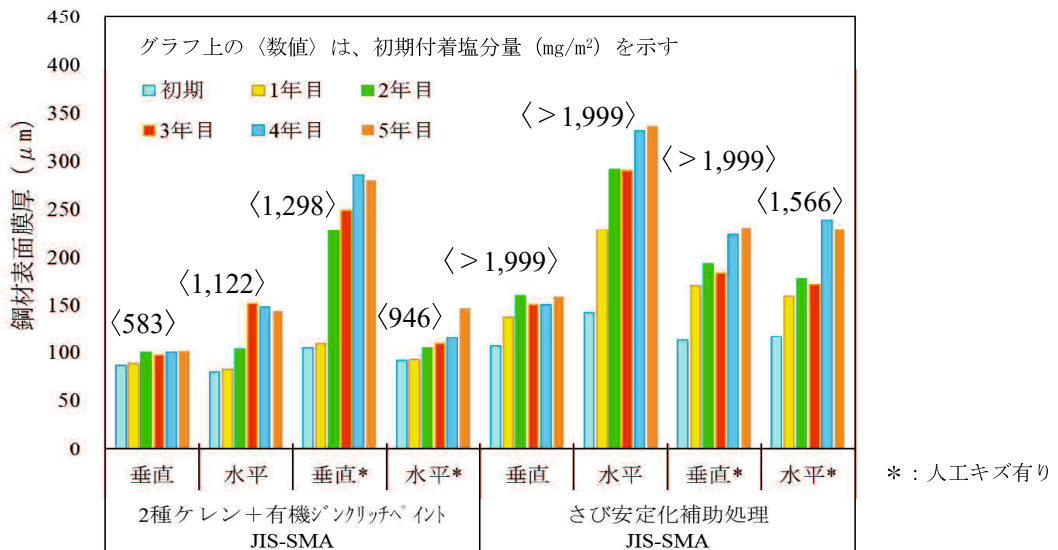


図-4.13 鋼材表面膜厚の推移
[簡易塗装仕様]

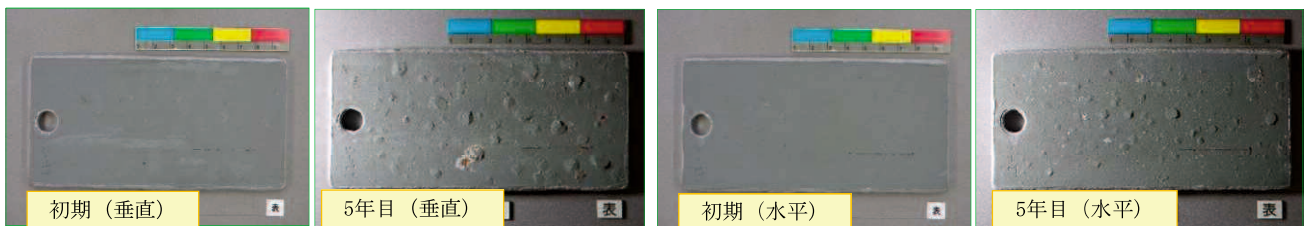


写真-4.14 2種ケレン+有機ジンクリッチペイント



写真-4.15 2種ケレン+さび安定化補助処理

(4) 塗り替え塗装仕様の曝露評価

JIS-SMA鋼のさび外観評点1（人工さび）にRc-II、Rc-I塗装を施した鋼材表面膜厚・イオン透過抵抗値〔塗り替え塗装仕様〕を表-4.9に、鋼材表面膜厚の推移〔塗り替え塗装仕様〕を図-4.14に示す。また、それぞれの小型試験体の初期と5年目曝露後の状況を写真-4.16と写真-4.17に示す。

Rc-IIの小型試験体は、耐候性に優れるふっ素樹脂塗料を採用した機能の高い塗装仕様であり、5年間の鋼材表面膜厚の変動は小さい。しかし4年目のイオン透過抵抗値が急激に低下し、写真-4.16に示す塗膜表面の膨れ現象が顕著になってきた。これは、桁内での環境因子の遮断と塗膜の存在により、表面付近は健全な状態を維持しているものの、塗膜の下に内在するさび（腐食生成物）が徐々に拡大し、塗膜と鋼材表面間に空洞が生成され、さび厚の増加とともに塗膜を内部から押し上げている現象であると推察する。

一方、ブラストによる1種ケレンで素地調整しRc-IIと同様の塗装仕様で作成したRc-Iの小型試験体は、5年間を通して鋼材表面膜厚およびイオン透過抵抗値の変動幅が小さく、初期の性能を維持している。

Rc-IIは、素地調整が2種ケレンであり、電動工具では除去しきれなかった強固で塩分を含むさび層が、鋼材内に残留したことによる早期の膨れ現象であり、ふっ素樹脂塗料の優れた耐候性能により、かろうじてさびを塗膜内に抑え込んでいる状態である。

飛来塩分の多い地域においては、ブラスト工法による素地調整程度1種で旧塗膜を完全に除去するRc-I塗装系を採用する必要がある。

表-4.9 鋼材表面膜厚・イオン透過抵抗値
〔塗り替え塗装仕様〕

水準 仕様	姿勢 番号	鋼材表面膜厚 μm (イオン透過抵抗値 Ω)					
		初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
13 Rc-II (JIS-SMA)	垂直13-1 キズ無し	398 (>40G)	406 (>40G)	409 (>40G)	417 (>40G)	449 (29G)	482 (>40G)
	水平13-2 キズ無し	316 (>40G)	317 (>40G)	326 (>40G)	339 (>40G)	347 (24G)	346 (>40G)
	垂直13-3 キズ有り	301 (>40G)	299 (>40G)	294 (>40G)	301 (>40G)	306 (30G)	317 (38G)
	水平13-4 キズ有り	343 (>40G)	351 (>40G)	361 (>40G)	358 (>40G)	364 (30G)	426 (>40G)
14 Rc-I (JIS-SMA)	垂直14-1 キズ無し	363 (>40G)	337 (>40G)	347 (>40G)	347 (>40G)	345 (>40G)	342 (>40G)
	水平14-2 キズ無し	358 (>40G)	311 (>40G)	326 (>40G)	319 (>40G)	319 (>40G)	322 (>40G)
	垂直14-3 キズ有り	374 (>40G)	346 (>40G)	343 (>40G)	332 (>40G)	333 (>40G)	335 (>40G)
	水平14-4 キズ有り	363 (>40G)	344 (>40G)	348 (>40G)	349 (>40G)	345 (>40G)	343 (>40G)

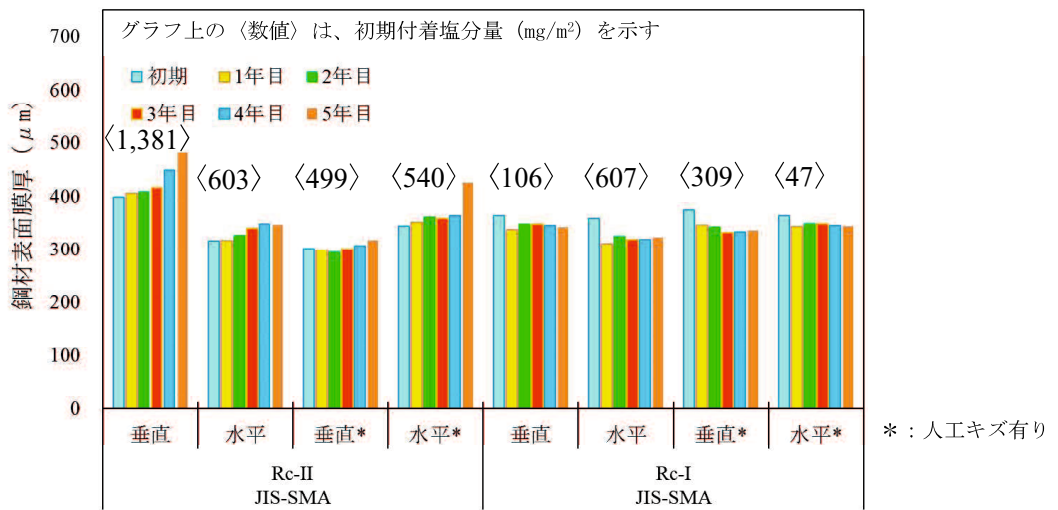


図-4.14 鋼材表面膜厚の推移
[塗り替え塗装仕様]

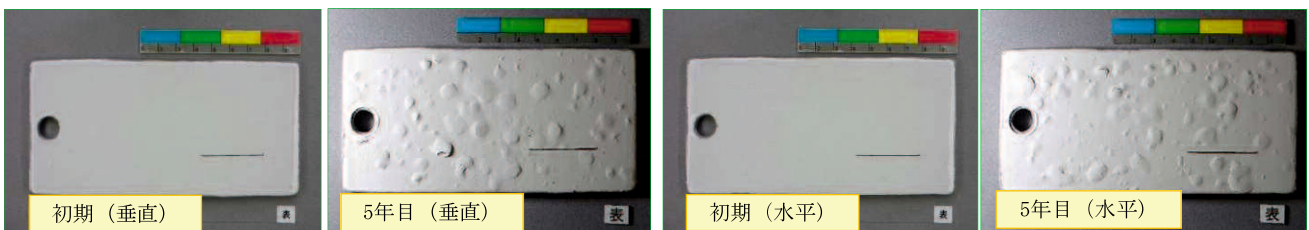


写真-4.16 Rc-II

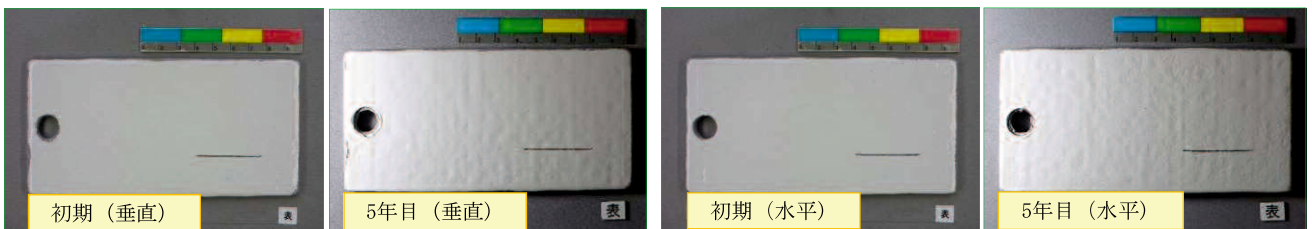


写真-4.17 Rc-I

4.6 桁外曝露試験体との比較

桁内の小型試験体の曝露状況について整理してきたが、表-4.3の小型試験体の水準に示す新設橋を対象とした水準1と水準2、そして水準10は素地調整がブラスト処理であり、桁内と桁外の曝露状況を客観的に評価できると考え、桁外で同仕様による曝露試験も実施した。

桁外の小型試験体は、調査対象橋梁から下流側100mにある防潮水門ゲート上に遮へい式の曝露架台を設置し計測を進めた。桁外曝露架台の構造を写真-4.18に、桁外小型試験体の配置を写真-4.19に示す。なお桁外のC-5塗装については、下塗りに変性エポキシ樹脂塗料をもう一層塗布した沖縄地区C-5塗装仕様¹⁰⁾も作成し比較の対象とした。

また、桁外での試験は腐食環境の厳しい地域であるため2年間の曝露期間とし、2016年6月13日より曝露を開始し、1年目の試験片回収を2017年6月22日に、2年目の試験片回収を2018年6月14日に行った。

4.6.1 無塗装仕様（1種ケレン）の曝露評価

人為的にさびさせたさび外観評点1のJIS-SMA鋼に1種ケレン処理をした小型試験体のさび厚・イオン透過抵抗値を表-4.10に、さび厚の推移を図-4.15に示す。また、桁内と桁外のイオン透過抵抗値の推移を図-4.16に、桁内の初期と5年目、桁外の初期と2年目の曝露状況を写真-4.20と写真-4.21に示す。

1種ケレンにより素地調整し桁内に配置した小型試験体は、最初の2年間にさび厚が増加し、その後の2年間の進行は緩やかである。これは1種ケレンで除去できなかった初期付着塩分が鋼材表面で反応した後、金属サンドイッチパネルの環境遮断機能により桁内への新たな塩分供給がなく、結露が少ない安定した環境でさびの進行が抑制されている状態であると推察する。

したがってこの環境下では未成長さびの状態が継続し、保護性さびへの移行は期待できないと判断できる。

一方、桁内と腐食状態を比較するために試験対象とした同一架橋環境下における桁外曝露架台の小型試験体はさびの進行が著しく、2年目で要観察状態を示すさびから異常を示すさびへ移行している。塩分の供給を遮断することの重要性とその効果を再認識させる結果である。

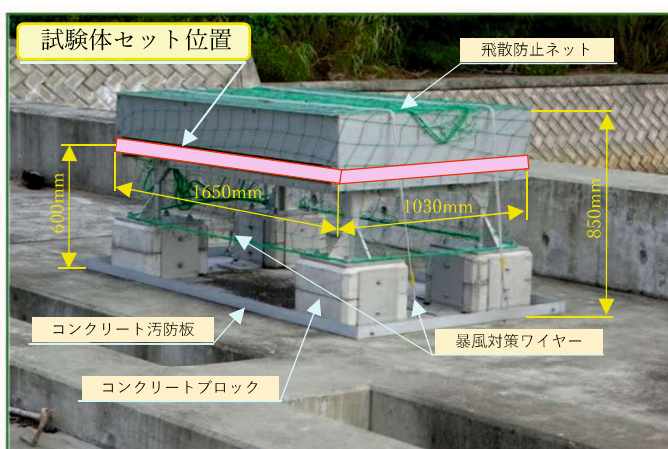


写真-4.18 桁外曝露架台の構造



写真-4.19 桁外の小型試験体配置

表-4.10 さび厚・イオン透過抵抗値
(1種ケレン)

水準 仕様	曝露 位置	姿勢 番号	さび厚 μm (イオン透過抵抗値 Ω)					
			初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
10 1種ケレン (JIS-SMA)	桁内	垂直 10-1	0 (0)	24 (0)	42 (0)	58 (12)	64 (0)	71 (22)
		水平 10-2	0 (0)	21 (0)	32 (0)	43 (10)	53 (0)	75 (15)
1種ケレン (JIS-SMA)	桁外	垂直 F6-1	55 (0)	188 (313)	371 (538)	—	—	—
		水平 F6-2	57 (0)	456 (1,5k)	851 (2.7k)	—	—	—

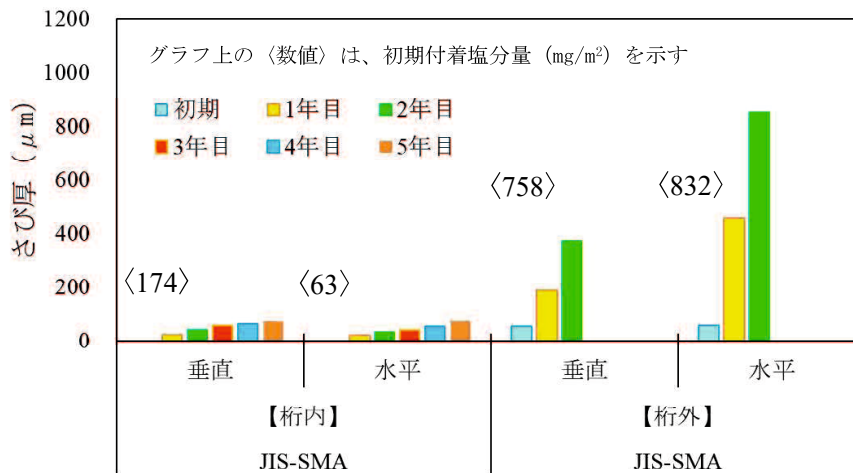


図-4.15 さび厚の推移 (1種ケレン)

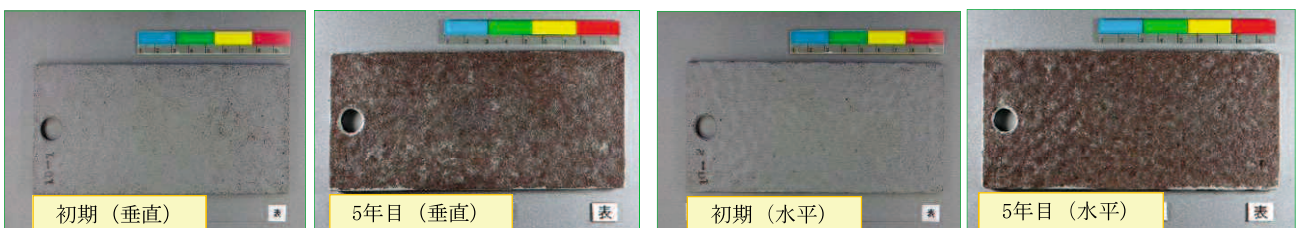


写真-4.20 1種ケレン【桁内】

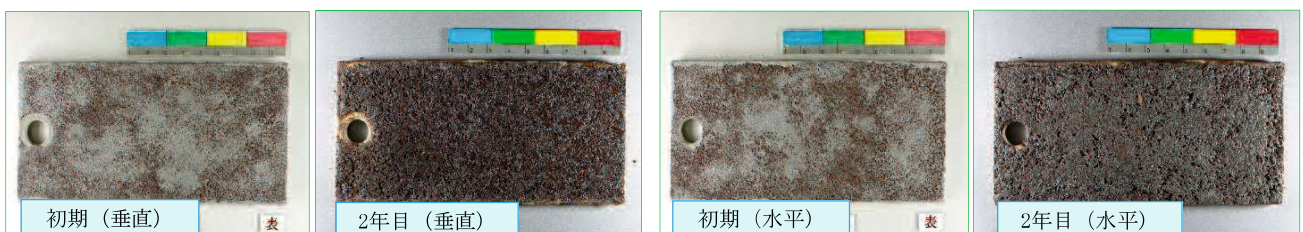


写真-4.21 1種ケレン【桁外】

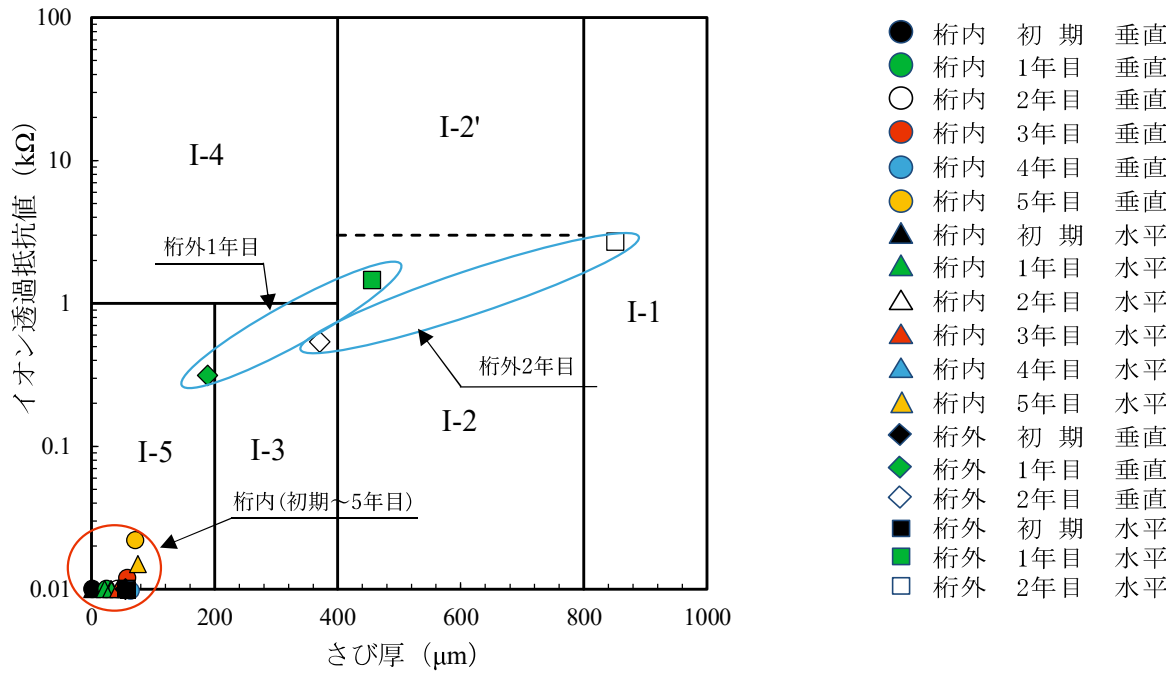


図-4.16 さび厚・イオン透過抵抗値の推移【桁内+桁外】
(1種ケレン)

4.6.2 新設橋塗装仕様の曝露評価

今回の調査目的は、金属サンドイッチパネルに覆われた耐候性鋼の腐食挙動であるが、近年では長寿命化や維持管理面に配慮し、JIS鋼材で製作・塗装された鋼橋に設置する選択肢も増えていく傾向にある。

関東地区臨海部での報告¹⁰⁾や一般的な認識において金属サンドイッチパネルに覆われた桁内の防食上のリスクは少ないが、国内有数の厳しい腐食環境下にある沖縄地区での新設桁に設置した桁内環境に関するデータが検証されていないことから、桁外と合わせて新設橋塗装仕様を本試験対象に加えた。

JIS-SM鋼にC-5、D-5塗装を施した桁内と桁外およびC-5（沖縄地区仕様）の桁外小型試験体の塗膜厚・イオン透過抵抗値を表-4.11に、それぞれの曝露状況を写真-4.22～写真-4.26に示す。なお、C-5、D-5塗装ともにミルプライマー工程は省略している。

新設橋塗装仕様の小型試験体は桁内5年間、桁外2年間の曝露期間において、桁外の素地に達する人工キズを付加した部分以外にさびの発生、膨れなどの現象は確認できなかった。

特に桁内に設置したC-5、D-5塗装の小型試験体は写真-4.22と写真-4.25の通り、5年間の曝露経過後も初期と変わらない外観状態である。

表-4.11 塗膜厚・イオン透過抵抗値
[新設橋塗装仕様]

水準仕様	曝露位置	姿勢番号	付着塩分量(mg/m ²)					塗膜厚 μ m (イオン透過抵抗値 Ω)					
			1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	初期	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
1 C-5 ミルプライマー 塗布なし (JIS-SM)	桁内	垂直1-1 キズ無し	12	2	0	2	3	334 (>40G)	335 (>40G)	334 (>40G)	337 (>40G)	333 (>40G)	327 (>40G)
		水平1-2 キズ無し	20	6	19	30	30	344 (>40G)	350 (>40G)	346 (>40G)	350 (>40G)	345 (>40G)	344 (>40G)
		垂直1-3 キズ有り	—	—	—	—	—	348 (>40G)	353 (>40G)	349 (>40G)	354 (>40G)	352 (>40G)	349 (>40G)
		水平1-4 キズ有り	—	—	—	—	—	340 (>40G)	341 (>40G)	341 (>40G)	345 (>40G)	342 (>40G)	339 (>40G)
C-5 ミルプライマー 塗布なし (JIS-SM)	桁外	垂直F1-1 キズ無し	923	853	—	—	—	323 (>40G)	314 (>40G)	310 (>40G)	—	—	—
		水平F1-2 キズ無し	1,210	827	—	—	—	331 (>40G)	327 (>40G)	319 (>40G)	—	—	—
		垂直F1-3 キズ有り	—	810	—	—	—	320 (>40G)	317 (>40G)	310 (>40G)	—	—	—
		水平F1-4 キズ有り	—	916	—	—	—	334 (>40G)	330 (>40G)	325 (>40G)	—	—	—
C-5 ミルプライマー 塗布なし 沖縄地区仕様 (JIS-SM)	桁外	垂直F2-1 キズ無し	1,400	523	—	—	—	407 (>40G)	398 (>40G)	389 (>40G)	—	—	—
		水平F2-2 キズ無し	1,779	1,002	—	—	—	423 (>40G)	415 (>40G)	407 (>40G)	—	—	—
		垂直F2-3 キズ有り	—	613	—	—	—	407 (>40G)	397 (>40G)	391 (>40G)	—	—	—
		水平F2-4 キズ有り	—	880	—	—	—	397 (>40G)	387 (>40G)	379 (>40G)	—	—	—
2 D-5 ミルプライマー 塗布なし (JIS-SM)	桁内	垂直2-1 キズ無し	4	0	0	2	3	292 (>40G)	290 (>40G)	297 (>40G)	296 (>40G)	295 (>40G)	290 (>40G)
		水平2-2 キズ無し	7	0	3	26	35	283 (>40G)	280 (>40G)	286 (>40G)	284 (>40G)	282 (>40G)	276 (>40G)
		垂直2-3 キズ有り	—	—	—	—	—	297 (>40G)	297 (>40G)	302 (>40G)	302 (>40G)	301 (>40G)	297 (>40G)
		水平2-4 キズ有り	—	—	—	—	—	292 (>40G)	291 (>40G)	297 (>40G)	297 (>40G)	296 (>40G)	294 (>40G)
D-5 ミルプライマー 塗布なし (JIS-SM)	桁外	垂直F3-1 キズ無し	585	395	—	—	—	283 (>40G)	276 (>40G)	276 (>40G)	—	—	—
		水平F3-2 キズ無し	1,436	746	—	—	—	288 (>40G)	282 (>40G)	284 (>40G)	—	—	—
		垂直F3-3 キズ有り	—	415	—	—	—	266 (>40G)	258 (>40G)	260 (>40G)	—	—	—
		水平F3-4 キズ有り	—	546	—	—	—	288 (>40G)	283 (>40G)	285 (>40G)	—	—	—

また、表-4.11の人工キズのない小型試験体で計測した付着塩分量は1年目より2年目が小さく、桁内に新たな塩分が侵入していないことを示している。数値上2mg/m²～20mg/m²計測されているのは、製作工場での鋼桁の塗装完了後、海上輸送、桁架設を経て金属サンドイッチパネル設置までの期間に鋼桁に付着した海塩粒子が結露水とともに滴下した影響と考えられる。

一方、桁外で2年間曝露した小型試験体は、表面に汚れが目立つものの、塗膜厚とイオン透過抵抗値の変動は微小である。しかし、全ての小型試験体の人工キズ付近に発さびの進行が確認され、D-5塗装を桁外で2年間曝露したケースでは、人工キズより約30mmの広範囲に膨れが広がっていた。この事象は、発さびに加えて紫外線などの環境因子による塗膜劣化の影響であると推察できる。

また、沖縄地区C-5塗装仕様は、C-5 塗装と比較して、人工キズの発さびが抑制されている。塗膜損傷の防止と適切な維持管理により、亜熱帯地域の臨海部においても防食・耐久性が確保できる仕様であると考えられる。

なお、年平均風速4.3mの潮風の影響を直接受ける桁外の付着塩分量は2年間の計測期間中395mg/m²～1,779mg/m²と高い数値で推移している。1年目と2年目で乖離があるのは、1年目（2016年）の10月4日に台風18号（最大瞬間風速59.7m）が島内に最接近し、曝露架台全体が海水を含んだ風雨に曝された影響であると思われる。このような状況下においても、金属サンドイッチパネルで覆われた桁内には桁外からの塩分侵入は認められなかった。

この水準1および水準2の曝露結果より、架設直後に金属サンドイッチパネルを設置する場合は、一定量の飛来塩分や紫外線の影響が考えられるが、本州地域と同様に鋼桁外面にC-5塗装系を適用する必要性はなく、D-5塗装系の防食性能で対応可能な環境にあると評価できる。

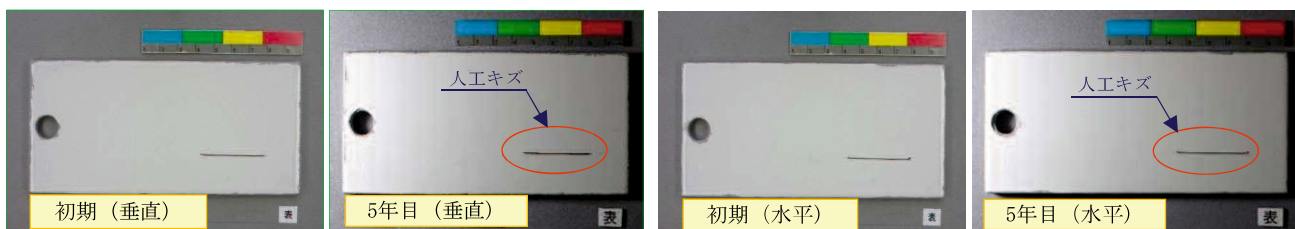


写真-4.22 C-5【桁内】

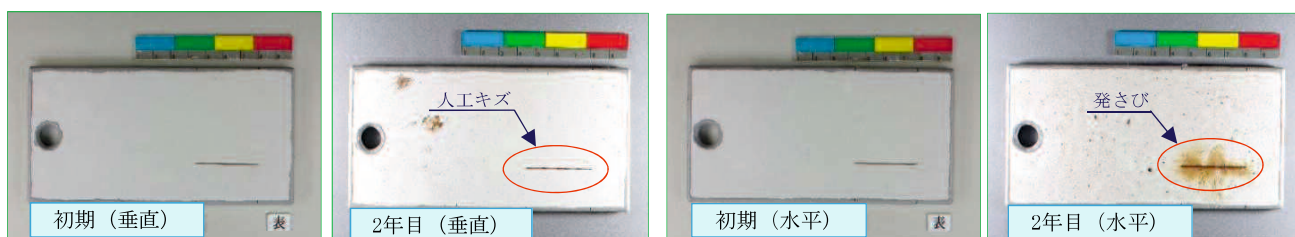


写真-4.23 C-5【桁外】

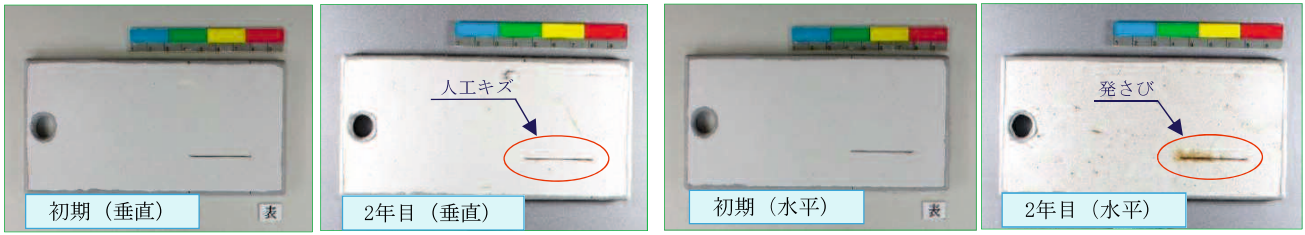


写真-4.24 C-5 (沖縄地区仕様) 【桁外】

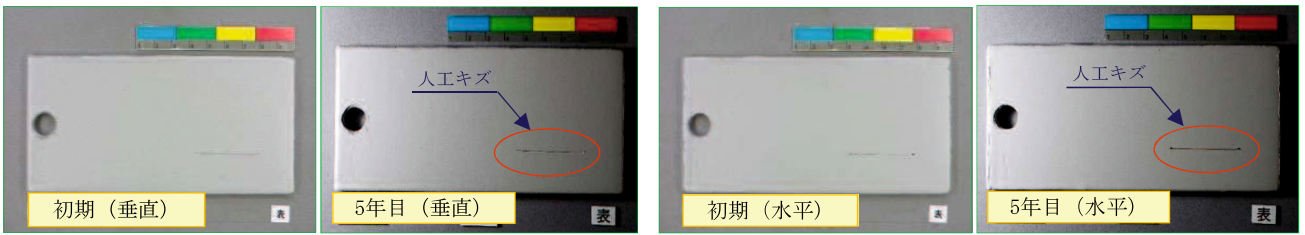


写真-4.25 D-5 【桁内】

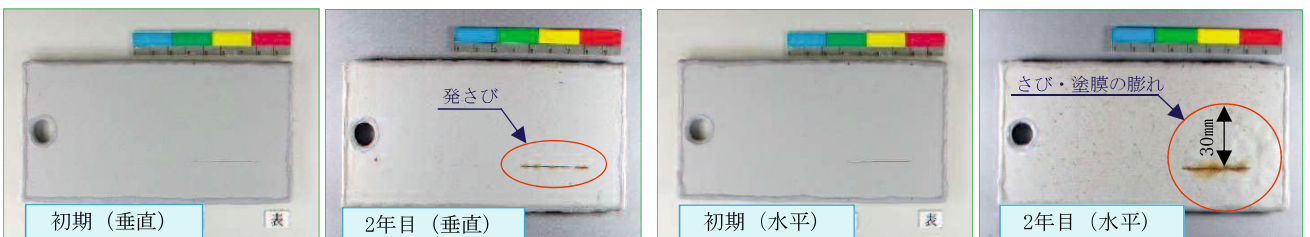


写真-4.26 D-5 【桁外】

4.7 本章のまとめ

JIS耐候性鋼を無塗装で使用できない亜熱帯地域において、既設の耐候性鋼橋に着目した試験体により環境改善効果が検証できれば、塗装橋を含めた鋼橋全体の有力な延命化技術に結び付くと考え、断熱性能を有する金属サンドイッチパネルで鋼桁全体を覆ったケースでの桁内腐食環境改善効果の有効性を評価した。

沖縄県久米島町の臨海部に架橋された厳しい環境下における5年間の桁内腐食環境調査で得られた知見をまとめる。

- (1) 桁内の気温は桁外と比較して年平均で4.0℃上昇し、相対湿度は10.6%低下することを確認した。またISO 9223で定義される桁内の年間濡れ時間は、桁外の1/5程度に減少し、飛来塩分の侵入も数値上は計測されなかった。
- (2) 金属サンドイッチパネルで耐候性鋼橋を覆うことによる桁内気温の上昇、雨水による洗浄効果と風の流れによる乾湿効果が期待できない防食上のリスクを懸念したが、イオン透過抵抗法による評価区分で初期に未成長さび領域（I-5, I-3）にある無処理仕様（水準3～水準5）と無塗装仕様（水準8～水準10）は、5年間経過後もほぼ同領域内に存在することが検証できた。これは耐候性鋼橋が未成長さびの領域にあること、またケレン作業（塩分除去）により未成長さびの領域へ戻すことで環境改善による防食効果が機能し、桁内での近接目視点検や適切な維持管理などの継続的な確認と合わせて、耐候性鋼橋の延命化に有効な手段であると評価できる。
- (3) 桁内に配置した既設橋対応の小型試験体の水準6～水準9と水準11～水準13は、進行速度に差はあるものの経年により、さび厚の増加→うろこ状さび→層状剥離さびへの移行や鋼材表面膜厚にふくれが発生する現象が確認された。特に水準6と水準7の無処理仕様に関しては、イオン透過抵抗法による評価区分が要観察状態を示すさびからの計測開始であり、外部からの塩分供給が遮断された桁内環境においても、さび進行に大きく影響する付着塩分量が多い場合は、その進行を抑制することが困難であることが明らかになった。
- (4) 耐候性鋼橋梁の異常を示すさびは、塩分の付着、蓄積が大きな要因であり、海岸部など飛来塩分量が多く腐食の進行が抑制できない場合に、金属サンドイッチパネルを設置することが有効な対策になると考える。しかし耐候性鋼橋梁の場合、鋼材に内在している塩分量が多いと桁内環境でも腐食の進行が確認できるため、1種ケレンにより付着塩分量を50mg/m²以下にするか、Re-I塗装を施す必要がある。
- (5) ブラストによる素地調整を行った既設橋対応の水準10の小型試験体は、素地調整後も174mg/m²（垂直）の初期塩分量が存在し、かつ、さび生成時に鋼板内部にまで付着塩分が侵入している場合も考えられるが、経年によるさび厚の増加速度が緩やかであり、ブラスト処理後そのまま無塗装の状態でも金属サンドイッチパネルを設置する方法も有効な選択肢になると考えられる。
- (6) 亜熱帯地域の厳しい環境下においても、桁内に設置した鋼箱桁内面に適用される水準2の小型試験体に経年劣化や変状は見られなかった。金属サンドイッチパネルは鋼橋の現場継手部に存在するすき間のない連続した構造体であり、環境因子を遮断する塗膜保護の効果が高くなることを考えると、内面塗装の簡素化への応用も期待できる。

参考文献（第4章）

- 1) 七浦恒康, 佐藤弘隆, 藤川敬人, 鈴木恵太: 臨海部橋梁における高耐食外装材の防食性能, 橋梁と基礎, Vol. 48, pp. 25-28, 2014.
- 2) 国土交通省気象庁 (過去の気象データ/沖縄県久米島): <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (最終検索日 2020年3月28日)
- 3) 廖金孫, 松井繁憲, 串田守可, 篠原正, 藤野陽三: 準密閉環境における一般構造用鋼の大気腐食, 材料と環境, Vol. 54, pp. 383-390, 2005.
- 4) 廖金孫, 田中正明, 原直人, 柴崎剛, 藤野陽三: 橋梁化粧板内部の環境腐食性評価と鋼桁防食性向上への提案, 土木学会論文集F, Vol. 62, No. 1, pp. 67-78, 2006.
- 5) 西川和廣, 中野正則, 安波博道, 落合盛人, 五島孝行, 中島和俊: 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～, 土木技術資料, Vol. 59-4, pp. 68-73, 2017.
- 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) 立花周作, 麻生稔彦: 金属サンドイッチパネル製カバーによる防食法の腐食環境改善効果に関する検証, 土木学会論文集A1, Vol. 76, No. 3, pp. 456-466, 2020.
- 8) 今井篤実, 山本哲也, 麻生稔彦: 耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察, 土木学会論文集A1, Vol. 68, No. 2, pp. 347-355, 2012.
- 9) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005. 12
- 10) 沖縄総合事務局開発建設部, 沖縄県土木建築部監修: 沖縄地区鋼橋塗装マニュアル, 2008.

第 5 章

金属サンドイッチパネルの経済効果に関する検討

第5章 金属サンドイッチパネルの経済効果に関する検討

5.1 概要

金属サンドイッチパネルは、鋼構造物の劣化を促進させる自然要因（海塩粒子、紫外線など）や人為要因（硫黄酸化物、凍結防止剤など）を効果的に遮断できる環境改善機能を備えている。また、足場機能を利用して計画的かつ詳細な近接目視点検が可能であり、道路橋示方書（平成29年）の本文に示される「100年間の設計供用期間と維持管理上の確実性および容易さの実現」を達成する有効な手段として期待される。しかしながら、橋梁インフラの長寿命化に貢献できる技術であっても、単なるコスト増の結果であれば、これからの社会に受け入れられるものではない。

ここでは、維持管理が困難と想定される架橋環境下において、金属サンドイッチパネルを建設時から設置したケースと設計供用期間の内、50年が経過した後に設置した既設橋の2ケースについて鋼橋のライフサイクルコスト（LCC）を算出し、従来の被覆防食との経済性比較を行う。

5.2 LCCの検討方針

5.2.1 LCC算定期間の考え方

構造物の老朽化は、建設年度で一律に決まるのではなく、立地環境や維持管理の状況等によって異なる。鋼橋に着目すると一律な老朽化ではなく、過積載、大型車両の通行量増大にともなう疲労損傷や鋼部材とコンクリートの地際で発生する局部的な腐食などが、耐久性に深刻な影響を与えているという報告¹⁾もある。したがって橋の寿命は、適切な点検、診断、措置により100年を超えての延命も十分可能であると考えられるが、本章でのライフサイクルコストの算出に際しては、2002年3月に道路橋示方書の「設計の基本理念（説明文）」、2017年11月に「設計供用期間（本文）」に示された100年（標準）を設定する。

5.2.2 前提条件

LCCの検討期間は、新設桁、既設桁共に100年間の設計供用期間を考えるが、既設桁の場合は今までの供用期間を全体の100年間から差し引くものとする。

新設桁の本体製作に関するコストは共通でありLCCの算出に考慮しないが、金属サンドイッチパネルの設置を前提とした鋼桁構造は桁内環境が箱桁と同様になるため、外面塗装に内面仕様（D-5）²⁾を適用する。これにより製作時の工場塗装および現場添接部の塗装コストは、本体C-5/継手部F-11²⁾、本体D-5/継手部F-12²⁾、本体金属溶射（亜鉛アルミ）/継手部金属溶射仕様²⁾の3ケースを考慮している。本章での金属溶射（亜鉛アルミ）とは、金属溶射（亜鉛アルミ擬合金溶射＋全面ふっ素樹脂塗装）を示す。

金属サンドイッチパネルを設置しない場合は、桁間部に点検用の検査路を設置することが一般的であり、今回はFRP製（100年間の耐久性）の検査路1条を初期コストに加えた。

また、100年というスパンで考えた場合、活荷重、交通量の変動など時代の要請により、現状実施されている桁の補強、床版打ち換えなどの補修・補強工事も考えられるが、その頻度や必要性の判断はコスト比較において横並びの条件であるため、今回のLCC算出には含まない。

維持管理の観点に着目すると、金属パネル自体の信頼性が重要になるため、金属パネルはメーカーの疲労試験、風洞実験など既往の報告により100年^{3)~5)}の耐久性が検証された製品を選定した。

なお、発注形態により諸経費が変化するため、コストの積み上げは、直接労務費および直接工事費を基本とする。

5.2.3 LCC検討フロー

新設桁のLCC算出の検討フローを図-5.1に、既設桁の検討フローを図-5.2に示す。

(1) 新設桁〈臨海部河川上〉

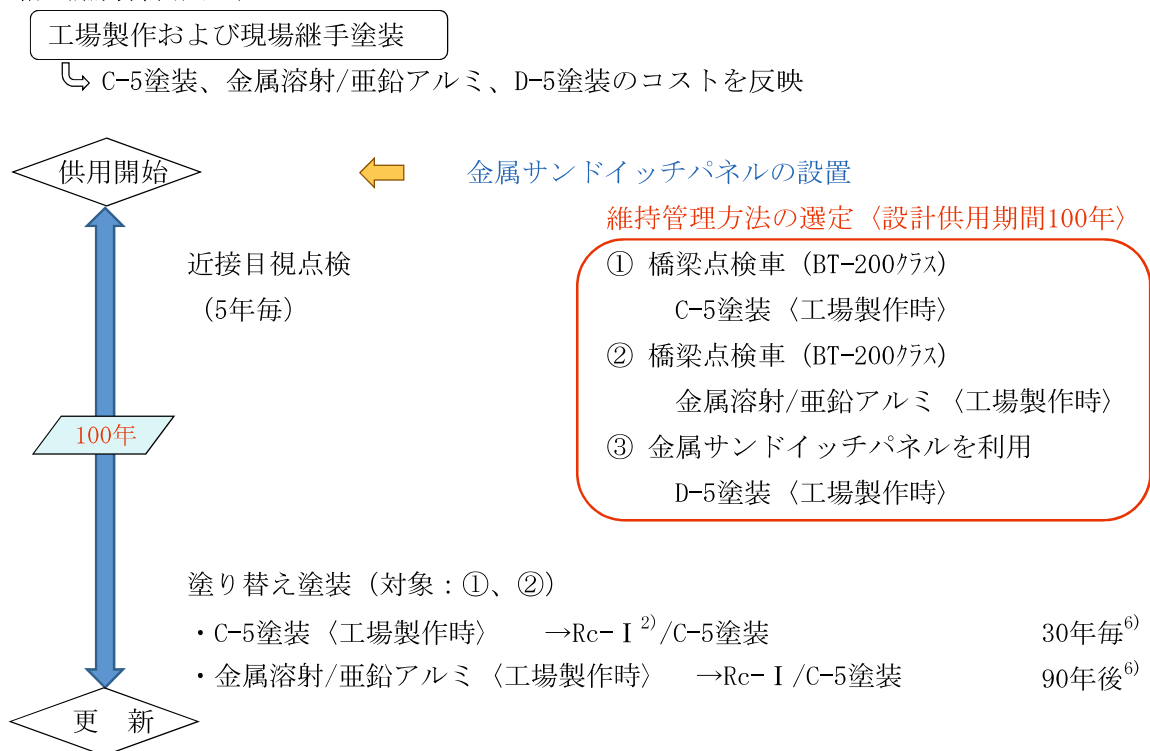


図-5.1 新設桁の検討フロー

(2) 既設桁〈幹線鉄道上/市街地部〉

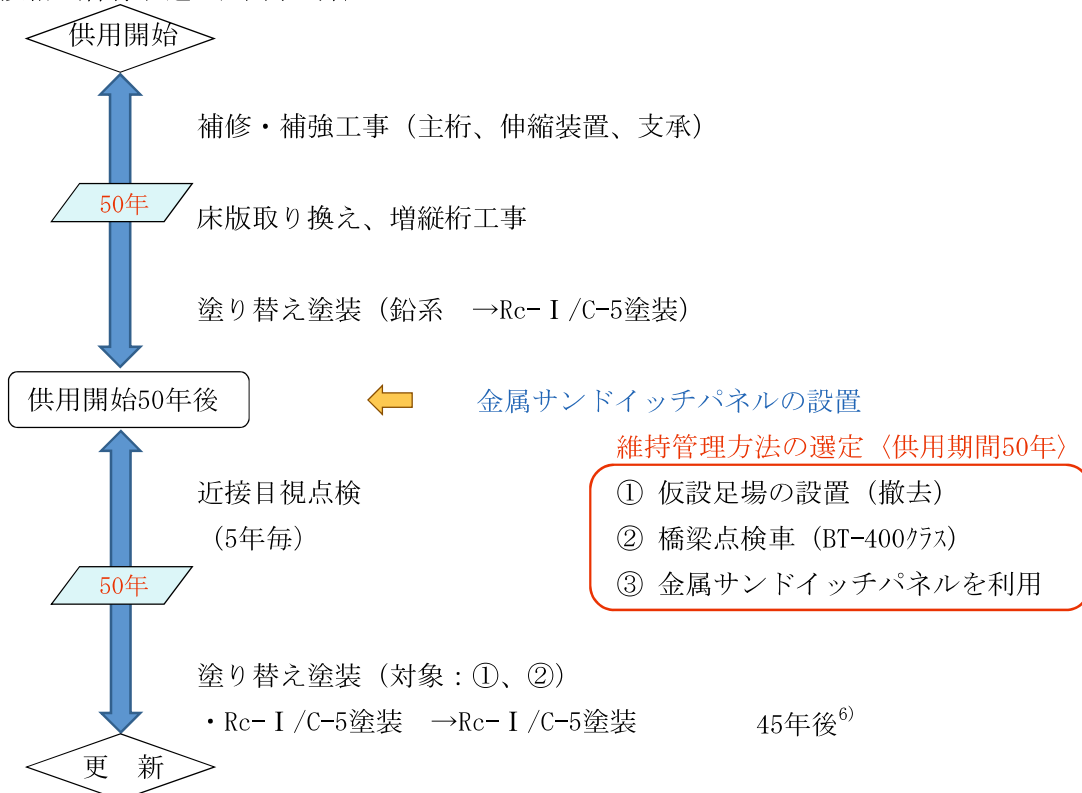


図-5.2 既設桁の検討フロー

なお、100年経過後も社会的、経済的な影響を考えれば、長期間の通行止めが伴う更新は現実的でなく、補修・補強の費用が新設の費用を上回るケースにおいても、既設の構造物を再生するシナリオを選択肢に加えておく必要がある。

5.3 新設橋（自然環境の厳しい臨海部河川上）

新設橋のLCC検討は、亜熱帯地域に属する沖縄県久米島地区の臨海部河川上で架け替えられた鋼橋を対象とした。島内ではその腐食環境の厳しさから、今まで鋼橋が採用された事例はなく、町の管理する橋梁インフラ約100橋は本橋を除きすべてコンクリート橋である。また、本橋の架け替え前の橋梁形式はRC単純T桁橋（3径間5主桁）で1979年12月に建設されたが、コンクリートの劣化による鉄筋露出と剥落、強度不足を伴う損傷が認められたため2015年に架け替えられた。供用開始から三十数年の寿命であった。島内の車両登録台数は約8,000台（内大型特殊車は29台）であり、コンクリート劣化の事由としては、首都圏などで問題となっている重交通、過積載、車両の大型化の影響ではなく、厳しい腐食環境が要因であると考えられる。

従来のLCC検討の場合、飛来塩分量が多い亜熱帯地域の臨海部（過去の観測で飛来塩分量0.05mdd以上）では、耐候性鋼材の使用が認められていないため、塗装の塗り替えが必要な鋼橋の採用は難しく、橋種選定でコンクリート橋が優位になるケースが多かった。

ここでは設計供用期間100年を前提に、被覆防食の耐久性向上や環境改善機能を踏まえ、気象条件の厳しい地域に適した防食仕様を選定し、製作・架設段階での被覆仕様、近接目視点検、塗り替え塗装を個別に算定し維持管理コストを比較した。

5.3.1 構造仕様

臨海部河川上に架設された鋼橋の断面図を図-5.3に、平面図を図-5.4に示す。

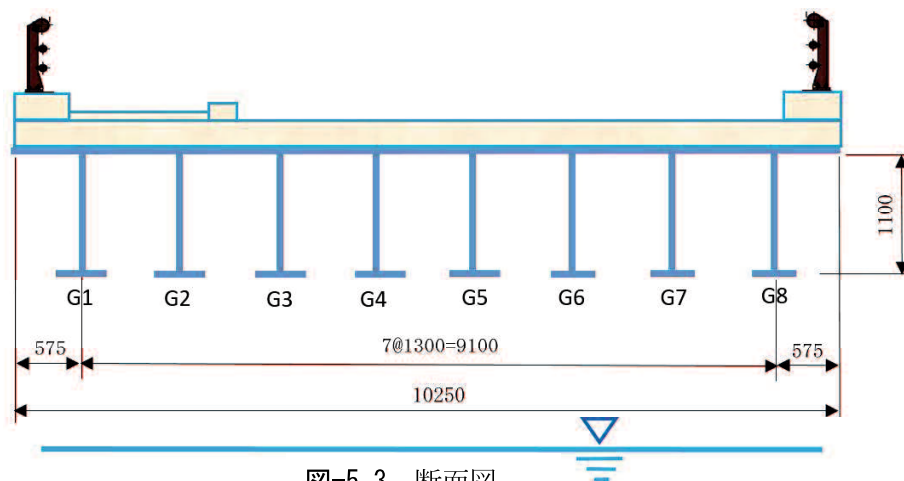


図-5.3 断面図

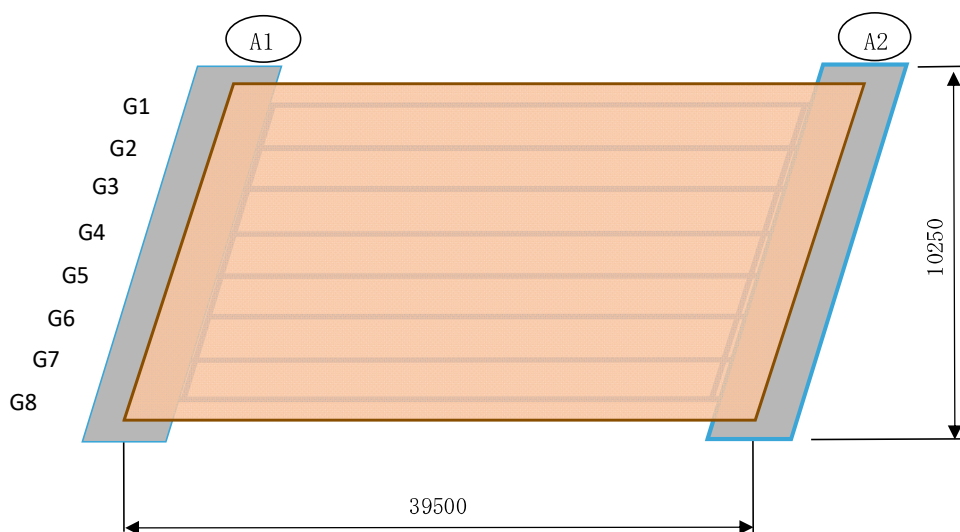


図-5.4 平面図

5.3.2 検討条件

- (1) 対象橋梁は、亜熱帯地域臨海部の河川上に新設された鋼橋で、設計供用期間を 100 年とする。
- (2) 鋼橋の構造仕様は、橋長 $L=39.5\text{m}$ 、全幅員 $B=10.25\text{m}$ 、橋面積 $A=404.9\text{ m}^2$ の単純合成鋼桁橋で、主桁下フランジ下面と水面との離隔が小さく、維持管理上長期間の仮設足場の設置が難しい状況下にある。
- (3) 恒久足場を設置しない場合の外装塗装は C-5 塗装または金属溶射（亜鉛アルミ）を採用するものとし、設置する場合は D-5 塗装とする。
- (4) 恒久足場を設置しない場合は、桁下の点検用に FRP 製の検査路を 1 条考慮する。
- (5) C-5 塗装の推定耐久年数を 30 年間⁶⁾とし、設計供用期間内に 3 回塗り替え塗装を実施する。（海岸部/厳しい環境）
- (6) 金属溶射（亜鉛アルミ）の推定耐久年数を 90 年間⁶⁾とし、設計供用期間内に 1 回塗り替え塗装を実施する。（海岸部/厳しい環境）
- (7) 金属溶射（亜鉛アルミ）の 90 年経過後の塗り替え塗装は、現行の RC-I 仕様とする。
- (8) 恒久足場を設置したケースでは、箱桁と同等以上の良好な桁内環境であるため、設計供用期間内の鋼桁塗り替え塗装は不要と考える。
- (9) 恒久足場を設置しない場合の 5 年に 1 度の近接目視点検は、橋梁点検車（BT-200）の使用を前提とする。なお、点検作業は昼間に橋面から実施する。
- (10) 近年の防食仕様として 100 年以上⁶⁾の期間において塗り替え不要という、アルミニウム・マグネシウム合金溶射+封孔処理（+全面ふっ素樹脂塗装）が開発されているが、実施例が少なく施工費算定にも不確定な要素があるため、ここでは検討の対象としない。

5.3.3 新設桁の製作費諸費用（工場製作、現場継手塗装）

(1) 工場塗装

1) 基本条件

- ・ 塗装面積 工場塗装 1,364 m²（ミルプライマー有り）
- ・ 工場塗装単価は、附録-3に示す。

2) 仕様別工場塗装費

塗 装 仕 様	数 量 (m ²)	単 価 (円/m ²)	金 額 (円)	備 考
C-5塗装	1,364	7,027	9,584,828	
D-5塗装	1,364	2,824	3,851,936	
金属溶射（亜鉛アルミ）	1,364	20,287	27,671,468	

(2) 現場塗装

1) 基本条件

- ・ 作業時間 昼間作業
- ・ 塗装面積 現場継手部 51.0 m²
- ・ 時間的制約 受けない
- ・ 新橋継手部現場塗装 K5 =1.44

2) F-11（本体 C-5塗装）塗装費

塗 装 仕 様 ²⁾	数 量 (m ²)	単 価 ⁷⁾ (円/m ²)	金 額 (円)	備 考
素地調整（ISO St3）	51.0	4,663	237,813	K5適用外
変形エポキシ樹脂塗料下塗 （ミストコート）	51.0	862	43,962	
超厚膜形エポキシ樹脂塗料	51.0	3,895	198,645	
ふっ素樹脂塗料用中塗（濃彩色）	51.0	747	38,097	K5適用外
ふっ素樹脂塗料上塗（濃彩色）	51.0	1,203	61,353	K5適用外
計		11,370	579,870	

3) F-12（本体 D-5塗装）

塗 装 仕 様 ²⁾	数 量 (m ²)	単 価 ⁷⁾ (円/m ²)	金 額 (円)	備 考
素地調整（ISO St3）	51.0	4,663	237,813	K5適用外
変形エポキシ樹脂塗料下塗 （ミストコート）	51.0	862	43,962	
超厚膜形エポキシ樹脂塗料	51.0	3,895	198,645	
計	51.0	9,420	480,420	

4) 金属溶射（亜鉛アルミ）継手仕様

塗装仕様 ²⁾	数量 (m ²)	単価 ⁷⁾ (円/m ²)	金額 (円)	備考
素地調整 (ISO Sa2.5)	51.0	7,961	406,011	K5適用外
研削材及びケレンかす回収・積込工	51.0	3,940	200,940	K5適用外
金属溶射 (封孔処理含む)	51.0	20,000	1,020,000	見積り
ふっ素樹脂塗料用中塗 (濃彩色)	51.0	747	38,097	K5適用外
ふっ素樹脂塗料上塗 (濃彩色)	51.0	1,203	61,353	K5適用外
計		33,851	1,726,401	

(3) 検査路

検査路	桁長 (m)	単価 (円/m)	金額 (円)	備考
FRP製	38.6	130,000	5,018,000	メーカー見積り

5.3.4 橋梁点検車 (C-5塗装) によるLCC

橋梁点検車による近接目視点検イメージを図-5.5に示す。

(1) 近接目視点検方法 (橋梁点検車/BT-200)

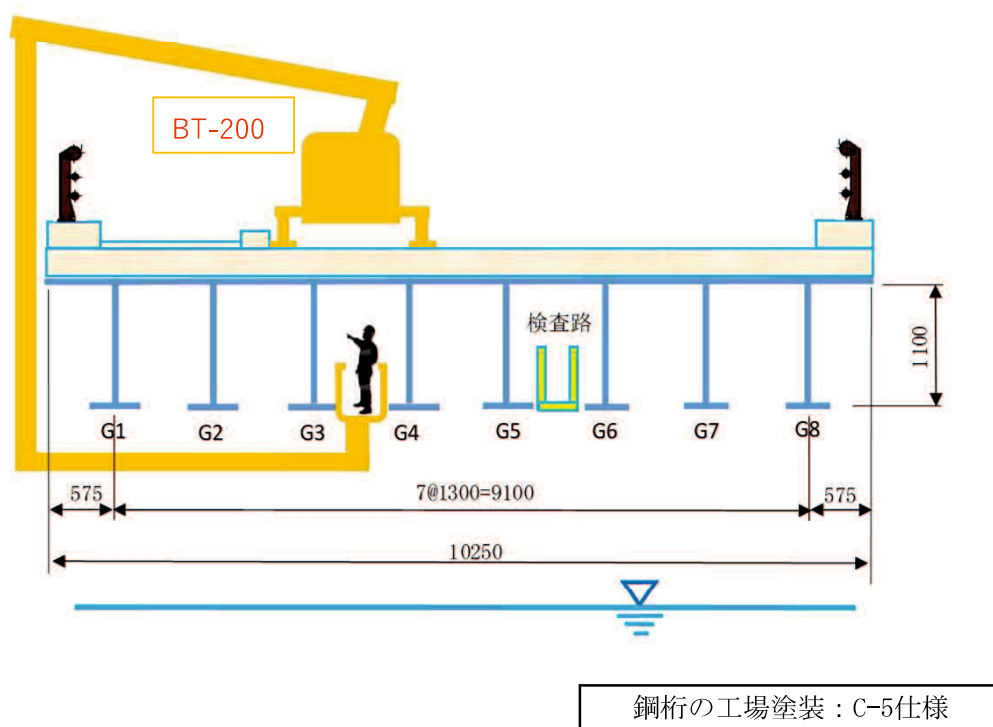


図-5.5 橋梁点検車による近接目視点検イメージ

(2) 近接目視点検コスト（5年に1回）

1) 基本条件

・点検作業時間	昼間作業
・設計技術者の職種 ⁸⁾	
主任技師	55,300 円/人
技師 (A)	48,700 円/人
技師 (B)	40,600 円/人
技師 (C)	32,700 円/人
技術員	27,900 円/人
・労務費 ⁹⁾	
運転手 (一般)	22,200 円/人
交通誘導警備員A	13,000 円/人
交通誘導警備員B	10,800 円/人

2) 近接目視点検集計表（5年/回）：橋梁点検車使用

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
計画準備 橋梁台帳等出力	式	1		9,090	
業務計画書作成	式	1		49,170	
部材番号図作成	式	1		27,270	
現地踏査	式	1		38,135	
関係機関との協議資料作成	式	1		50,590	
定期点検	式	1		70,530	(昼間)
報告書作成	式	1		344,420	
打合せ協議	式	1		132,550	
機械経費 (BT-200)	式	1		141,008	
計				862,763	

a) 計画準備

・橋梁台帳等出力¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (C)	人	0.15	32,700	4,905	(出力基準単位:10橋)
技術員	人	0.15	27,900	4,185	同上
計				9,090	

・業務計画書作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	0.15	55,300	8,295	(作成基準単位:10橋)
技師 (A)	人	0.15	48,700	7,305	同上
技師 (C)	人	0.60	32,700	19,620	同上
技術員	人	0.50	27,900	13,950	同上
計				49,170	

・部材番号図の作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (C)	人	0.45	32,700	14,715	鋼橋
技術員	人	0.45	27,900	12,555	鋼橋
計				27,270	

D : 作成日数

$$D=A_1/y$$

A1 : 部材番号図作成面積 (m²)

A1 = 橋長 × 全幅員 (地覆外縁間距離)

y : 日当り作成面積

鋼橋 : $y=7.55 \times A_1^{0.85}$

$$D= 404.9 \quad / \quad 1242.2$$

$$= 0.3 \text{ 日}$$

b) 現地踏査¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	0.15	55,300	8,295	外業、内業含む
技師 (B)	人	0.35	40,600	14,210	外業、内業含む
技師 (C)	人	0.35	32,700	11,445	外業、内業含む
技術員	人	0.15	27,900	4,185	外業、内業含む
計				38,135	

c) 関係機関との協議資料作成¹⁰⁾

対象 : 1 機関 (河川管理者)

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (B)	人	0.70	40,600	28,420	外業、内業含む
技師 (C)	人	0.55	32,700	17,985	外業、内業含む
技術員	人	0.15	27,900	4,185	外業、内業含む
計				50,590	

d) 定期点検¹⁰⁾

昼間 (河川上)

橋梁点検車

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (B)	人	0.6	40,600	24,360	外業、内業含む
技師 (C)	人	0.9	32,700	29,430	外業、内業含む
技術員	人	0.6	27,900	16,740	外業、内業含む
計				70,530	

D : 点検日数 (日/橋)

$$D = A_1 / (8 \times Y_b) \times K_1 \quad \text{1日=8時間}$$

A₁ : 定期点検面積 (m²)

A₁ = 橋長 × 全幅員 (地覆外縁間距離)

Y_b : 1時間当りの基準作業量 (m²/h)

$$Y_b = a \times A_1^b = 70.0 < 170 \text{m}^2/\text{h}$$

K₁ 足元条件係数 K₁=1.2 (点検車)

$$a=5.62 \quad b=0.42 \quad \text{最大作業量 } 170 \text{m}^2/\text{h}$$

$$D = 404.9 / ((8 \times 70) \times 1.2)$$

$$= 0.6 \text{ 日}$$

e) 報告書作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	1.0	55,300	55,300	
技師 (A)	人	1.0	48,700	48,700	
技師 (B)	人	2.1	40,600	85,260	
技師 (C)	人	2.1	32,700	68,670	
技術員	人	3.1	27,900	86,490	
計				344,420	

D : 報告書作成日数

$$D = 0.0001 \times N^2 + 0.057 \times N + 2.1 \quad N : \text{実橋梁数 (橋)} \quad N=1$$

$$D = 2.1 \text{ 日}$$

f) 打合せ協議¹¹⁾

中間打合せ1回

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	1.0	55,300	55,300	業務着手、成果品納入時
技師 (B)	人	1.5	40,600	60,900	同上+中間打合せ
技師 (C)	人	0.5	32,700	16,350	中間打合せ
計				132,550	

g) 機械経費¹¹⁾

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
橋梁点検車賃料 (BT-200)	日	0.84	120,000	100,800	1.4 (供用日数/運転日数)
運転手 (一般)	日	0.6	22,200	13,320	昼間
燃料費	L	24.0	140	3,360	5.0L/h × 4.8h
安全費	人	0.68	13,000	8,840	交通誘導警備員A 6.8/10
安全費	人	1.36	10,800	14,688	交通誘導警備員B13.6/10
計				141,008	

(3) 現場塗り替え足場の構造

現場での塗り替え塗装時の足場構造を図-5.6に示す。

なお、河川上での塗り替え塗装用足場は、シート張り防護とする。

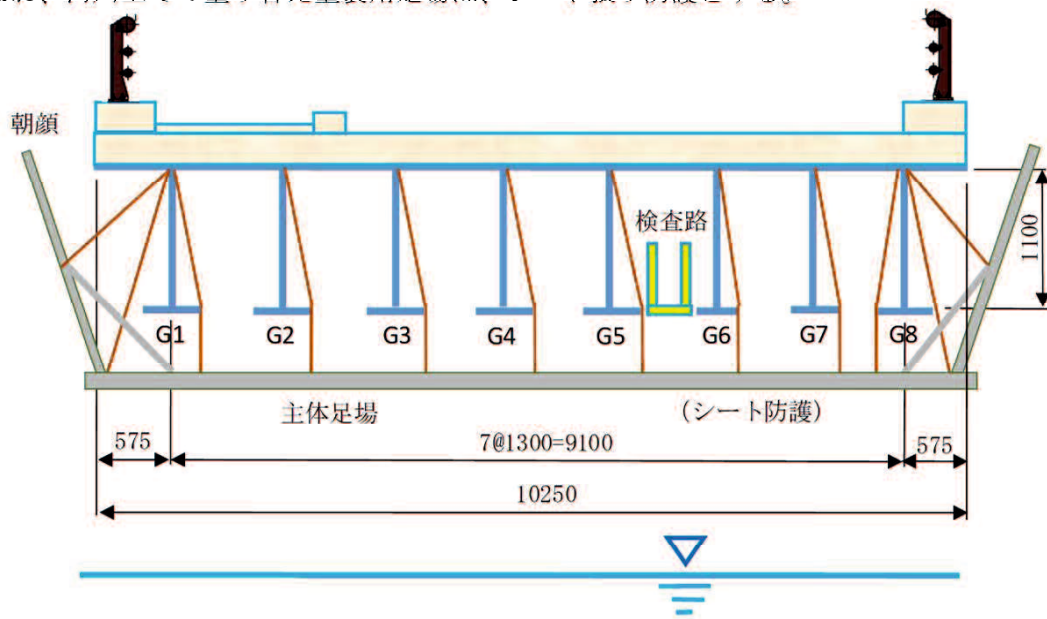


図-5.6 現場塗り替え塗装時の足場構造

(4) 現場塗り替え塗装コスト

現場塗り替え塗装は、供用後、30年、60年、90年経過時の3回とする。

1) 基本条件

- ・架橋環境 海岸部（厳しい環境） 耐久年数 30年⁶⁾
- ・塗装面積 桁外面全体 1,415m² (現場継手部51m²含む)
- ・時間的制約 受けない

2) 塗り替え塗装費と作業日数 塗装仕様 Rc-I 塗装系（スプレー）

名称・規格 (沖縄県：濃彩色)	単価 ⁷⁾ (円/m ²)	金額 (円)	標準施工量 ⁷⁾ (m ² /日)	作業日数 (日)
清掃・水洗い	156	220,740	1,050	1.3
1種ケレン（プラスト法/乾式）	6,849	9,691,335	55	25.7
研削材及びケレンかす回収・積込工	3,940	5,575,100	70	0.0 *
防食下地 有機ジンクリッチペイント	1,103	1,560,745	360	3.9
下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	1,252	1,771,580	225	6.2
下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗				
中塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	637	901,355	450	3.1
上塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	1,150	1,627,250	450	3.1
計		21,348,105		43.3

*：1種ケレンに含む

(5) 現場塗り替え塗装の仮設足場コスト

塗装塗り替え足場の設置（撤去）は、現場塗り替え塗装に合わせる。

1) 基本条件¹²⁾

・足場工費

主体足場工費 = $(L1+L2 \times T1 + (N1+N2) y) \times A$ (円)

朝顔工費 = $(L1+L2 \times T5 + (N1+N2) y) \times A$ (円)

・防護工費

シート張防護工費 = $(L1+L2 \times T8 + (N1+N2) y) \times A$ (円)

L1L2：賃料係数 T1、T5、T8、N1、N2の賃料歩掛係数を表-5.1に示す。

T1：主体足場を供用している月数（月） T5：朝顔を供用している月数（月）

T8：防護部を供用している月数（月）

N1：設置歩掛係数

N2：撤去歩掛係数

y：橋りょう特殊工単価（円／人）

A：橋面積（m²） A=W×L（W：地覆外縁間距離(m) L：橋長(m)）

表-5.1 賃料歩掛係数表（T1、T5、T8、N1、N2）

桁形式		L1	L2	N1	N2
プレートガーダ (パイプ吊り足場)	主体足場	201	108	0.029	0.02
プレートガーダ	朝顔	134	78	0.014	0.010
	シート張防護工	97	60	0.006	0.003

・労務費⁹⁾

橋りょう特殊工 33,600 円／人（昼間）

・作業時間帯 昼間作業（8時間）

・作業人員 1パーティ 6人

・作業日数 主体足場 $(404.9 \times (0.029+0.020) / 6) = 3.3$ 日

朝顔 $(404.9 \times (0.014+0.010) / 6) = 1.6$ 日

シート張防護工 $(404.9 \times (0.006+0.003) / 6) = 0.6$ 日

・供用日数 $(3.3+1.6+0.6) \times 1.5 = 8.3$ 日

・塗装日数 46.1日

・足場供用月数 $(8.3+46.1) / 30 = 1.81 \rightarrow 1.8$ 箇月

2) 足場の設置・撤去費

面積= 404.9m²

工種	単位	数量	単価	金額	摘要
足場工・防護工					$A = 39.5 \times 10.25 = 404.9 \text{ m}^2$ 労務費 = (N1+N2) × y 損料 = L1+L2×T1 N1= 0.029 L1= 201 L2 = 108 N2= 0.020 $y = 33,600$ 労務費 = (N1+N2) × y 損料 = L1+L2×T5 N1= 0.014 L1= 134 L2 = 78 N2= 0.010 $y = 33,600$ 労務費 = (N1+N2) × y 損料 = L1+L2×T8 N1= 0.006 L1= 97 L2 = 60 N2= 0.003 $y = 33,600$ T1T5T8 = 足場供用月数 1.8箇月
主体足場					
労務費	m ²	404.9	1,646	666,465	
足場賃料	m ²	404.9	395	159,935	
朝顔					
労務費	m ²	404.9	806	326,349	
足場賃料	m ²	404.9	274	110,942	
シート張防護工					
労務費	m ²	404.9	302	122,279	
賃料	m ²	404.9	205	83,004	
計				1,468,974	

(6) LCCの集計 (設計供用期間100年)

橋梁点検車 (C-5塗装) によるLCCの集計を表-5.2に示す。

集計項目=工場製作塗装費 (C-5塗装) +現場添接部塗装費 (F-11) +検査路+維持管理費

維持管理費は、近接目視点検 (5年/回) +現場塗り替え塗装費 (30年/回)

表-5.2 橋梁点検車 (C-5塗装) によるLCC集計表

(千円)

供用開始からの年数	建設時	5	10	15	20	25	30*
製作時諸費用	15,183						
近接目視点検		863	863	863	863	863	722
現場塗り替え塗装							22,817
累計	15,183	16,046	16,909	17,772	18,635	19,498	43,037

供用開始からの年数	35	40	45	50	55	60*	65
製作時諸費用							
近接目視点検	863	863	863	863	863	722	863
現場塗り替え塗装						22,817	
累計	43,900	44,763	45,626	46,489	47,352	70,891	71,754

供用開始からの年数	70	75	80	85	90*	95	100
製作時諸費用							
近接目視点検	863	863	863	863	722	863	863
現場塗り替え塗装					22,817		
累計	72,617	73,480	74,343	75,206	98,745	99,608	100,471

注) 初期コスト計上分 = 工場塗装(C-5) + 現場継手部塗装(F-11) + 検査路 (FRP)
 30、60、90年目の近接目視点検 (*) は、現場塗り替え塗装用の足場を利用する。
 現場塗り替え塗装には、足場費用を含む。

5.3.5 橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）によるLCC

(1) 近接目視点検方法（橋梁点検車/BT-200）

5.3.4 橋梁点検車+C-5塗装と同じであるが鋼桁の塗装は金属溶射（亜鉛アルミ）とする。

(2) 近接目視点検コスト（5年に1回）

5.3.4 橋梁点検車+C-5塗装と同じ。

(3) 現場塗り替え足場の構造

5.3.4 橋梁点検車+C-5塗装と同じ。

(4) 現場塗り替え塗装コスト

5.3.4 橋梁点検車+C-5塗装と同じ、但し現場塗り替え塗装は90年後の1回のみ。

(5) 塗り替え塗装足場のコスト

5.3.4 橋梁点検車+C-5塗装と同じ、但し現場塗り替え足場は90年後の1回のみ。

(6) LCCの集計（設計供用期間100年）

橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）によるLCCの集計を表-5.3に示す。

集計項目＝工場製作塗装費（金属溶射）＋現場添接部塗装費（金属溶射）＋検査路＋維持管理費

維持管理費は、近接目視点検（5年/回）＋現場塗り替え塗装費（90年後に1回）

表-5.3 橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）によるLCC集計表（千円）

供用開始からの年数	建設時	5	10	15	20	25	30
製作時諸費用	34,415						
近接目視点検		863	863	863	863	863	863
現場塗り替え塗装							
累計	34,415	35,278	36,141	37,004	37,867	38,730	39,593

供用開始からの年数	35	40	45	50	55	60	65
製作時諸費用							
近接目視点検	863	863	863	863	863	863	863
現場塗り替え塗装							
累計	40,456	41,319	42,182	43,045	43,908	44,771	45,634

供用開始からの年数	70	75	80	85	90*	95	100
製作時諸費用							
近接目視点検	863	863	863	863	722	863	863
現場塗り替え塗装					22,817		
累計	46,497	47,360	48,223	49,086	72,625	73,488	74,351

注) 初期コスト計上分 = 工場(金属溶射)＋現場継手部(金属溶射)＋検査路 (FRP)

金属溶射の塗り替え塗装は、Rc-I 塗装系（スプレー）とする。

90年目の近接目視点検（*）は、現場塗り替え塗装用の足場を利用する。

現場塗り替え塗装には、足場費用を含む。

5.3.6 金属サンドイッチパネル（D-5塗装）によるLCC

金属サンドイッチパネルによる近接目視点検イメージを図-5.7に、外観を写真-5.1に、設置後の桁内部を写真-5.2に示す。

(1) 近接目視点検方法（金属サンドイッチパネルを利用）

■：金属サンドイッチパネル

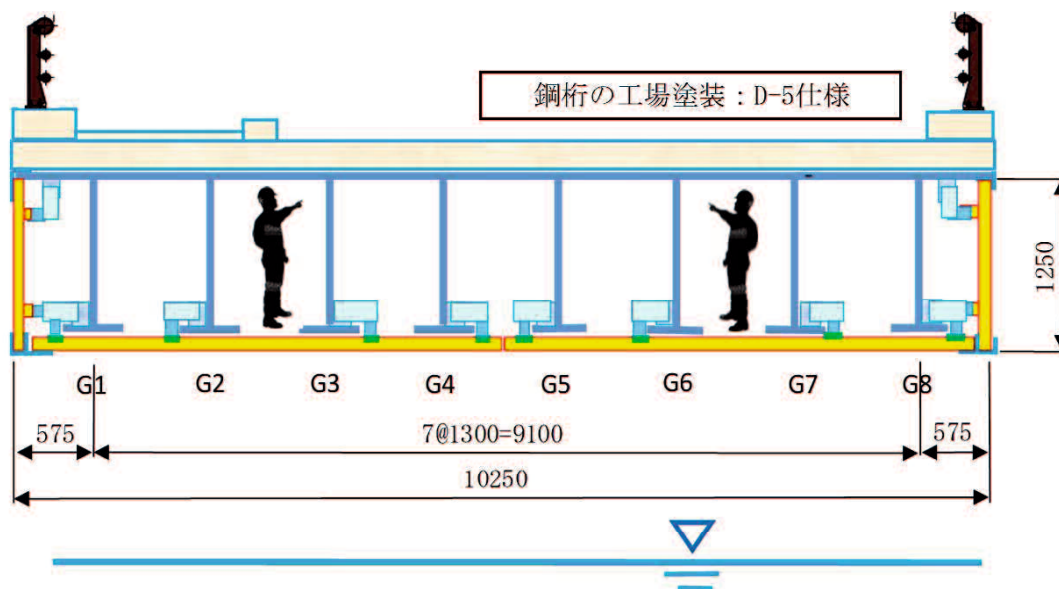


図-5.7 金属サンドイッチパネルによる近接目視点検イメージ（河川上）



写真-5.1 金属パネル（外観）



写真-5.2 金属パネル（桁内部）

(2) 近接目視点検コスト（5年に1回）

近接目視点検の内容は同じである。常設足場機能を利用するので、橋梁点検車は計上しない。

近接目視点検集計表（5年/回）：金属サンドイッチパネル（常設足場）を利用

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
計画準備 橋梁台帳等出力	式	1		9,090	
業務計画書作成	式	1		49,170	
部材番号図作成	式	1		27,270	
現地踏査	式	1		38,135	
関係機関との協議資料作成	式	1		50,590	
定期点検	式	1		70,530	(昼間)
報告書作成	式	1		344,420	
打合せ協議	式	1		132,550	
計				721,755	

(3) 金属サンドイッチパネルの構造³⁾

鋼橋に設置した金属サンドイッチパネル（裏面）の断面を図-5.8、仕様を表-5.4に示す。

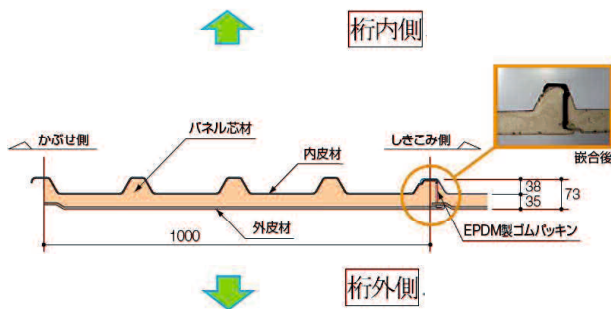


表-5.4 金属サンドイッチパネル（裏面）の仕様

名 称	構 成	材 料	厚 さ	単 位 重 量
金属サンドイッチパネル (チタン仕様)	内皮材	ガルバリウム 塗装鋼板	0.6mm	10kg/m ²
	芯材	ポリイソシア ヌレート フォーム	35mm	
	外皮材	純チタン板	0.4mm	

図-5.8 金属サンドイッチパネル（裏面）の断面図

(4) 金属サンドイッチパネルの製品費（メーカー見積り）

1) 裏面パネル単価（チタン仕様）	60,000円/m ²	設置面積	404.9 m ²
	裏面パネル計		24,294,000 円
2) 側面パネル単価（チタン仕様）	65,000円/m ²	設置面積	98.8 m ²
	側面パネル計		6,422,000 円
	製品費計		30,716,000 円

(5) 金属サンドイッチパネルの設置費¹²⁾（新設橋／河川上）

1) 基本条件

- ・作業時間（WT）

WT=8時間（昼間作業）

- ・作業効率

新設桁の作業効率 = 既設桁 × 1.4

- ・設置面積（A）

A = 裏面パネル / 404.9m² + 側面パネル / 98.8m² = 503.7m²

- ・労務費⁹⁾

橋りょう世話役 40,100 円/人

橋りょう特殊工 33,600 円/人

普通作業員 19,300 円/人

- ・部材荷揚げ工歩掛は、表-5.5のパネルタイプによる。

表-5.5 部材荷揚げ工歩掛

工 種	日当り施工量	編 成 人 員 (人)		諸 雑 費 率 (%)
ルーバータイプ	100m ² /日	橋りょう世話役	1	26
		橋りょう特殊工	5	
		普通作業員	1	
パネルタイプ	85m ² /日	橋りょう世話役	1	26
		橋りょう特殊工	4	
		普通作業員	1	

現場環境条件の係数は、表-5.6の一般用地内・河川高水敷部による。

一般用地内・河川高水敷部 係数 (α) = 1.0

表-5.6 現場環境条件

環 境	係数 (α)
一般用地内・河川高水敷部	1.0
現道上からの部材荷揚	0.9
主要道路上・鉄道上	0.8

注) 時間制約がある場合は別途積算する。

・部材取付工歩掛は、表-5.7のパネルタイプによる。

表-5.7 部材取付工歩掛

工 種	日当り施工量	編 成 人 員 (人)		諸雑费率 (%)
ルーバータイプ	30m ² /日	橋りょう世話役	1	23
		橋りょう特殊工	4	
		普通作業員	1	
パネルタイプ	30m ² /日	橋りょう世話役	1	23
		橋りょう特殊工	5	
		普通作業員	1	

〈部材荷揚げ工〉

1日あたり施工量 (Dn)

$$\begin{aligned}
 D_n &= 85 \text{ m}^2/\text{日} \times \alpha \times \text{WT}/8 \times 1.4 \\
 &= 85 \times 1.0 \times 8/8 \times 1.4 \\
 &= 119.0 \text{ m}^2/\text{日}
 \end{aligned}$$

所要日数 (d)

$$\begin{aligned}
 d &= A / D_n \\
 &= 503.7 / 119 \\
 &= 4.2 \text{ 日}
 \end{aligned}$$

〈部材取付け工〉

1日あたり施工量 (Dn)

$$\begin{aligned}
 D_n &= 30 \text{ m}^2/\text{日} \times \text{WT}/8 \times 1.4 \\
 &= 30 \times 8/8 \times 1.4 \\
 &= 42.0 \text{ m}^2/\text{日}
 \end{aligned}$$

所要日数 (d)

$$\begin{aligned}
 d &= A / D_n \\
 &= 503.7 / 42.0 \\
 &= 11.9 \text{ 日}
 \end{aligned}$$

2)設置費 (河川上)

名 称	規 格	数 量	単 位	単 価	金 額 (円)
部材荷揚げ工	パネルタイプ				
労務費	昼間				
橋りょう世話役		4.2	人	40,100	168,420
橋りょう特殊工		16.8	人	33,600	564,480
普通作業員		4.2	人	19,300	81,060
諸雑費	労務費計×26.0%	1	式		211,630
小計					1,025,590
部材取付け工	パネルタイプ				
労務費	昼間				
橋りょう世話役		11.9	人	40,100	477,190
橋りょう特殊工		59.5	人	33,600	1,999,200
普通作業員		11.9	人	19,300	229,670
諸雑費	労務費計×23.0%	1	式		622,394
小計					3,328,454
計					4,354,044
		1	m ²	8,644	

(6) LCCの集計（設計供用期間100年）

金属サンドイッチパネル（D-5塗装）によるLCCの集計を表-5.8に示す。

集計項目＝工場製作塗装費（D-5）＋現場添接部塗装費（F-12）＋金属サンドイッチパネルの製品・設置費＋維持管理費
維持管理費は、近接目視点検（5年/回）

表-5.8 金属サンドイッチパネル（D-5塗装）によるLCC集計表 (千円)

供用開始からの年数	建設時	5	10	15	20	25	30
製作時諸費用	4,332						
近接目視点検		722	722	722	722	722	722
金属サンドイッチパネルの設置	35,070						
累計	39,402	40,124	40,846	41,568	42,290	43,012	43,734

供用開始からの年数	35	40	45	50	55	60	65
製作時諸費用							
近接目視点検	722	722	722	722	722	722	722
金属サンドイッチパネルの設置							
累計	44,456	45,178	45,900	46,622	47,344	48,066	48,788

供用開始からの年数	70	75	80	85	90	95	100
製作時諸費用							
近接目視点検	722	722	722	722	722	722	722
金属サンドイッチパネルの設置							
累計	49,510	50,232	50,954	51,676	52,398	53,120	53,842

注) 初期コスト計上分 = 金属サンドイッチパネルの製品費＋金属サンドイッチパネルの設置費＋工場塗装(D-5)＋現場継手部塗装(F-12)

5.3.7 LCC検討結果

臨海部河川上に架橋された新設橋の設計供用期間（100年）を想定した維持管理方法別のLCC集計を表-5.9に、維持管理方法別LCCのグラフを図-5.9に示す。

設計供用期間のLCCを算出した結果、初期（建設時）コストは金属サンドイッチパネル設置が高くなるが、100年間の維持管理コストで考えると橋梁点検車（C-5塗装）や橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）の近接目視点検作業費と塗り替え塗装費用の負担が徐々に増加し、金属サンドイッチパネル設置による維持管理のコストが最小となる。

橋梁点検車（C-5塗装）は、1回目の塗り替え塗装を行う30年目から金属サンドイッチパネル設置とほぼ同額で推移し、60年、90年目の塗り替え塗装年次に大きく差が開いていく。

橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）は、被覆の耐久性が90年であり、塗り替え塗装が必要になる90年経過後に初めて金属サンドイッチパネル設置のLCCと逆転する。なお、金属溶射（亜鉛アルミ）の塗り替え塗装はRc-Iになるため、設計供用期間を延長して検討した場合、2回目の塗り替え塗装は120年目と想定される。

また、金属サンドイッチパネル設置と橋梁点検車（金属溶射/亜鉛アルミ）の初期コストの差は小さく、近接目視点検の効率化、付属品の取り換えや補修の作業性を想定すると実際の価格差はもっと早く縮小されると考えらる。

近年採用が始まったアルミニウム・マグネシウム合金溶射+封孔処理（+全面ふっ素樹脂塗装）と比較した場合、塗り替え塗装が必要ないため初期（建設時）コストが同程度であれば100年間の維持管理コストは、ほぼ同額と考えられるが、金属サンドイッチパネルを設置する環境改善による防食法はLCCの数値評価には表れない維持管理の確実性、容易さや海塩粒子、紫外線などの影響を回避できる環境改善面において優位性が認められる。

表-5.9 維持管理方法別のLCC集計表

(千円)

維持管理内容	維持管理方法	建設時	30年間集計	60年間集計	90年間集計	100年間集計
近接目視点検 (5年毎)	橋梁点検車 〈C-5塗装〉	15,183	43,037*	70,891*	98,745*	100,471
	橋梁点検車 〈金属溶射/亜鉛アルミ〉	34,415	39,593	44,771	72,625*	74,351
	金属サンドイッチパネル 〈D-5塗装〉	39,402	43,734	48,066	52,398	53,842

* : 塗り替え塗装含む

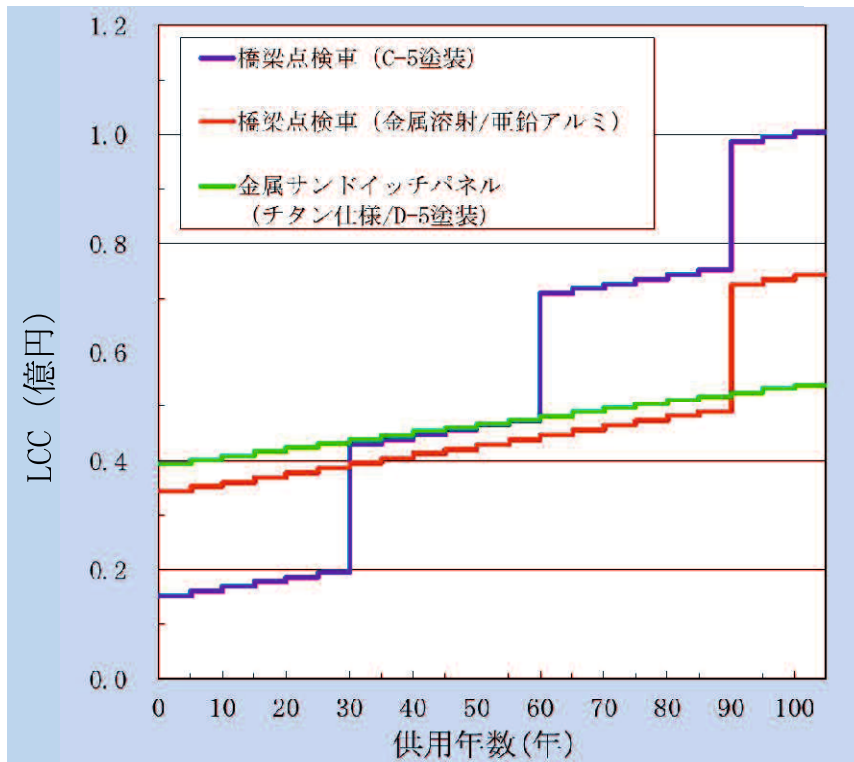


図-5.9 維持管理方法別LCCグラフ

5.4 既設橋（市街地部の幹線鉄道上）

既設桁のLCC検討は、定期点検や補修・補強の作業に関して、鉄道事業者を始めとした他の関係機関との調整が必要な地域（鉄道上、道路・交差点上など）に建設された鋼橋を対象とする。

検討する鋼橋は、幹線鉄道上（複線）に建設された高速自動車道で、点検時間・時間帯の制約、交通規制が困難であり、遮音壁・落下防止柵の設置などにより大型の橋梁点検車が必要なケースを想定した。LCC算出の期間は、道路橋示方書に記載されている設計供用期間（100年間）が基本であるが、対象橋梁は供用開始後50年が経過していると考え、100年-50年=50年で経済効果を評価する。なお、供用中の50年間は鋼桁、床版の補修・補強など適切な維持管理が実施されてきたものとし、かつ、現場での塗り替え塗装はLCC算出の直前（50年目）にRc-I塗装系で完了していることを前提とした。なお金属サンドイッチパネルの桁への固定は、疲労耐久性を検証した多点支持の骨組構造の採用、かつ、必要な取り付けボルトを桁内へ全て集約しボルト落下のリスクが回避できること、落下防止ワイヤーの設置などフェールセーフを取り入れた安全面に配慮した設計仕様になっていることを必須条件とした。

5.4.1 構造仕様

幹線鉄道上に架橋された高架橋の断面図を図-5.10に、平面図を図-5.11に示す。また、高架橋の全景を写真-5.3に示す。

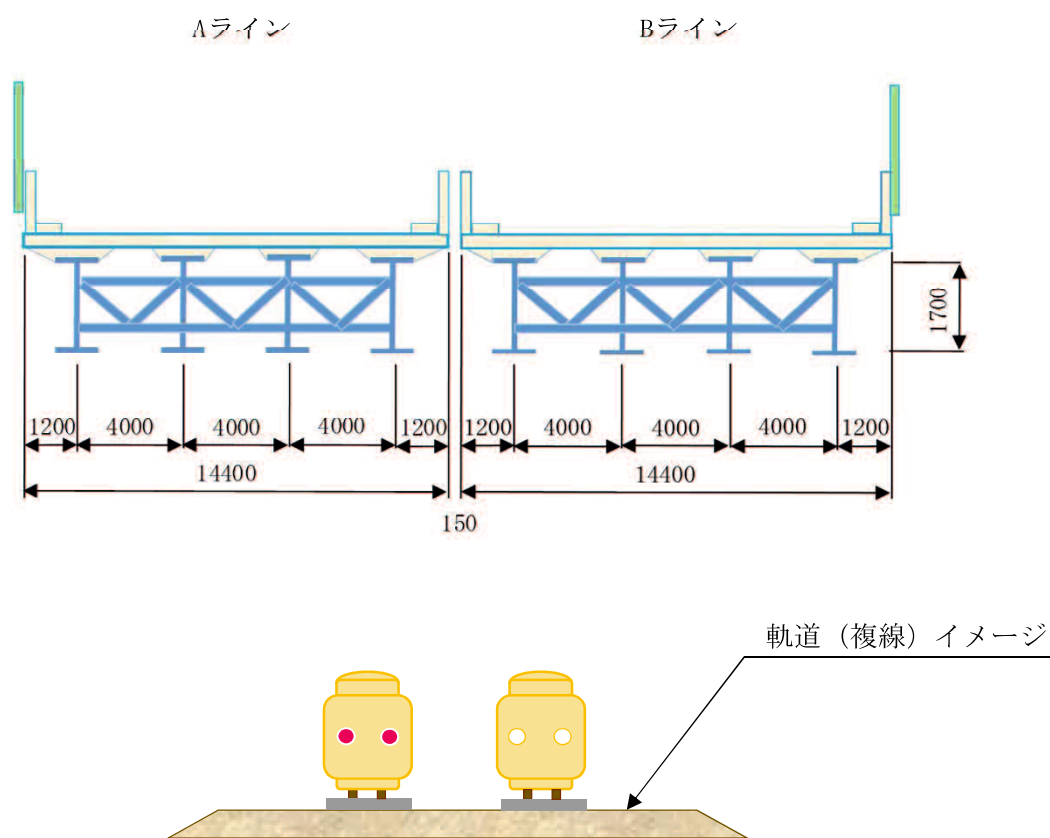


図-5.10 断面図

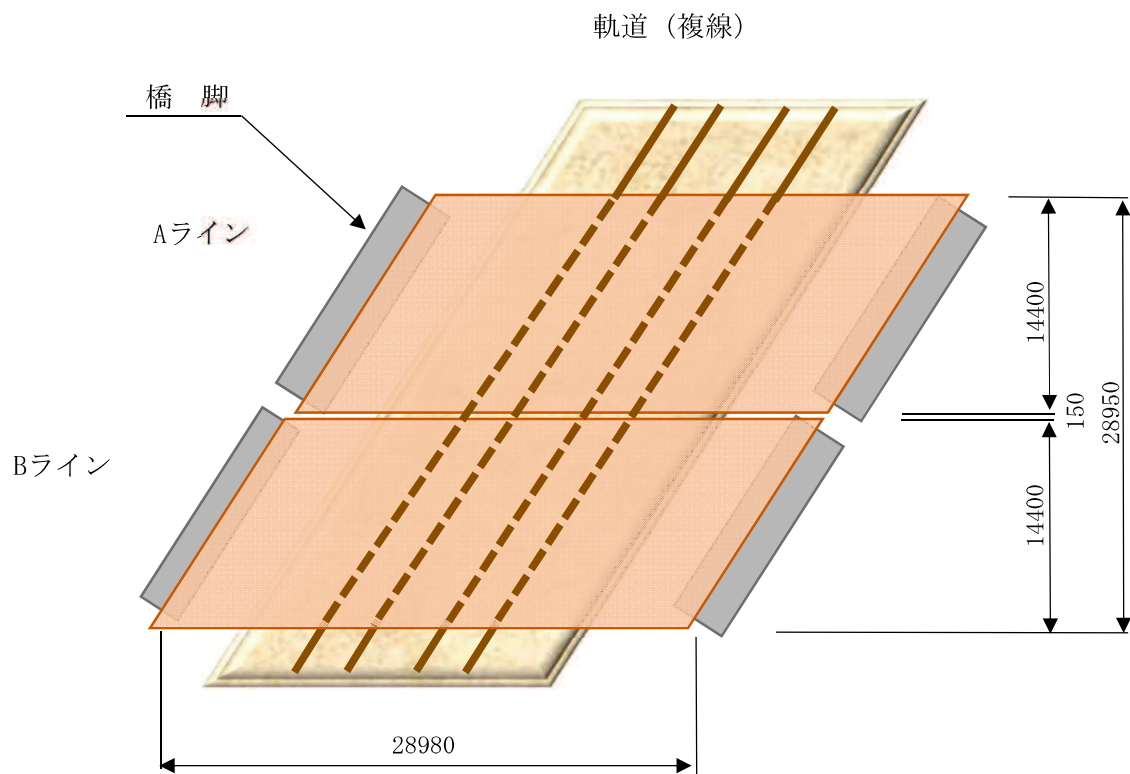


図-5.11 平面図



写真-5.3 高架橋 (跨線橋) 全景

5.4.2 検討条件

- (1) 対象橋梁は、幹線鉄道上の高速道路高架橋（既設橋）で、供用開始から50年間経過しているものとする。
- (2) 鋼桁の構造仕様は、橋長 $L=28.98\text{m}$ 、全幅員 $B=14.4\text{m}$ 、橋面積 $A=417.3\text{ m}^2$ の単純合成鋼桁橋2橋で、主桁下フランジ下面と架線の上に橋梁点検車のプラットフォームが入れる空間が確保されている。
- (3) 設計供用期間は100年とするが、供用後50年が経過しているため、恒久足場設置後の50年間（100年-50年）での比較とする。
- (4) 鋼桁部の塗り替え塗装（RC-I/C-5）は、恒久足場設置の直前に実施されているものとする。
- (5) 恒久足場を設置しない場合は、C-5 塗装の推定耐久年数を45年間⁶⁾とし、設計供用期間内に1回塗り替え塗装を実施する。（市街地部/やや厳しい環境）
- (6) 幹線鉄道上であり、45年経過後の塗り替え塗装は、現行のRC-I（全面板張り防護）とする。
- (7) 橋梁点検車による点検作業の時間帯は、鉄道事業者との協議で決定される事項であり、本橋のケースでは、午前1時25分～午前4時5分の2時間40分（実質）とする。
- (8) 恒久足場を設置しない場合の5年に1度の近接目視点検は、仮設の点検足場（シート養生）を設置するケースと夜間の橋梁点検車による2ケースを検討する。なお、上下線の幅員、遮音壁などを考慮し橋梁点検車は、BT-400の使用を前提とする。
- (9) 仮設足場（主体足場）は、AラインとBラインを連続して設置する。塗り替え塗装足場は塗装作業の効率性を考慮し、AラインとBラインを個々に設置する。（中央部にも朝顔有り）

5.4.3 仮設足場によるLCC

仮設足場による近接目視点検イメージを図-5.12に示す。

(1) 近接目視点検方法（仮設足場内での点検）

幹線鉄道上での仮設点検用足場は、シート張り防護とする。

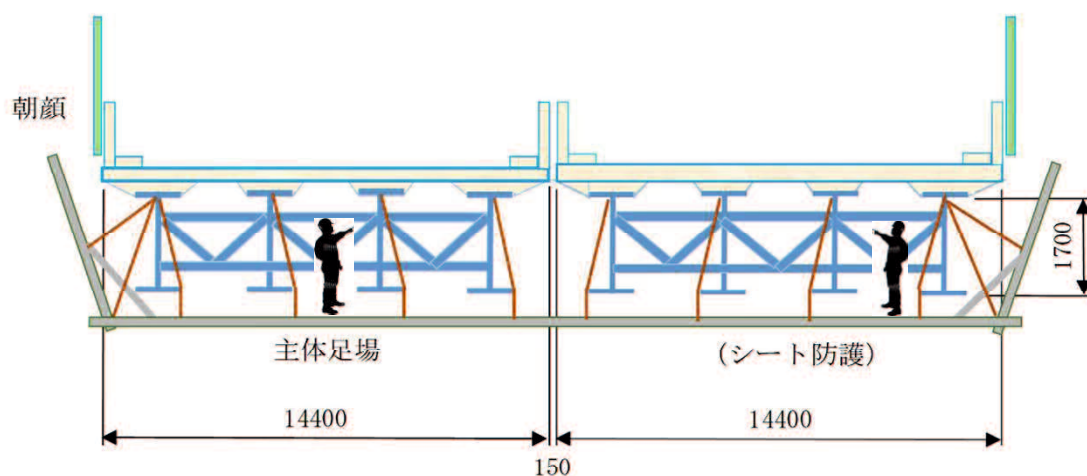


図-5.12 仮設足場による近接目視点検イメージ

(2) 近接目視点検コスト（5年に1回）

1) 基本条件

・点検作業時間	仮設足場の場合	：昼間作業		
・設計技術者の職種 ⁸⁾				
主任技師	55,300 円/人	(昼間)	-	(夜間)
技師 (A)	48,700 円/人	(昼間)	-	(夜間)
技師 (B)	40,600 円/人	(昼間)	60,900 円/人	(夜間)
技師 (C)	32,700 円/人	(昼間)	49,050 円/人	(夜間)
技術員	27,900 円/人	(昼間)	41,850 円/人	(夜間)
・労務費 ⁹⁾				
運転手 (特殊)	-	(昼間)	32,700 円/人	(夜間)

2) 近接目視点検集計表（5年/回）：仮設足場（点検は昼間、足場の設置・撤去は夜間作業）

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
計画準備 橋梁台帳等出力	式	1		18,180	
業務計画書作成	式	1		98,340	
部材番号図作成	式	1		36,360	
現地踏査	式	1		76,270	
関係機関との協議資料作成	式	1		101,180	
定期点検	式	1		164,570	(昼間)
報告書作成	式	1		367,730	
打合せ協議	式	1		169,200	
足場・防護工	式	1		8,560,036	(仮設)
計				9,591,866	

a) 計画準備

・橋梁台帳等出力¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (C)	人	0.3	32,700	9,810	A・Bラインで新設橋×2相当
技術員	人	0.3	27,900	8,370	同上
計				18,180	

・業務計画書作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	0.3	55,300	16,590	A・Bラインで新設橋×2相当
技師 (A)	人	0.3	48,700	14,610	同上
技師 (C)	人	1.2	32,700	39,240	同上
技術員	人	1.0	27,900	27,900	同上
計				98,340	

・部材番号図の作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (C)	人	0.6	32,700	19,620	鋼橋
技術員	人	0.6	27,900	16,740	鋼橋
計				36,360	

D : 作成日数

$$D=A_1/y$$

A₁ : 部材番号図作成面積 (m²)

A₁ = 橋長 × 全幅員 (地覆外縁間距離)

y : 日当り作成面積

$$\text{鋼橋} : y = 7.55 \times A_1^{0.85}$$

$$D = 834.6 \quad / \quad 2297.2$$

$$= 0.4 \text{ 日}$$

b) 現地踏査¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	0.3	55,300	16,590	外業、内業含む
技師 (B)	人	0.7	40,600	28,420	外業、内業含む
技師 (C)	人	0.7	32,700	22,890	外業、内業含む
技術員	人	0.3	27,900	8,370	外業、内業含む
計				76,270	

c) 関係機関との協議資料作成¹⁰⁾

対象：2 機関（鉄道事業者、道路管理者）

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (B)	人	1.4	40,600	56,840	外業、内業含む
技師 (C)	人	1.1	32,700	35,970	外業、内業含む
技術員	人	0.3	27,900	8,370	外業、内業含む
計				101,180	

d) 定期点検¹⁰⁾

昼間（鉄道上） 仮設足場

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (B)	人	1.4	40,600	56,840	外業、内業含む
技師 (C)	人	2.1	32,700	68,670	外業、内業含む
技術員	人	1.4	27,900	39,060	外業、内業含む
計				164,570	

D：点検日数（日/橋）

$$D = A_1 / (8 \times Y_b) \times K_1 \quad \text{1日=8時間}$$

A₁：定期点検面積（m²）

A₁ = 橋長 × 全幅員（地覆外縁間距離）

Y_b：1時間当りの基準作業量（m²/h）

$$Y_b = a \times A_1^b = 70.8 < 170 \text{ m}^2/\text{h}$$

K₁ 足元条件係数 K₁=1.0（足場）

a=5.62 b=0.42 最大作業量 170m²/h

$$D = 417.3 / (8 \times 70.8) \times 1.0$$

$$= 0.7 \text{ 日} \times 2 = 1.4 \text{ 日}$$

e) 報告書作成¹⁰⁾

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	1.1	55,300	60,830	
技師 (A)	人	1.1	48,700	53,570	
技師 (B)	人	2.2	40,600	89,320	
技師 (C)	人	2.2	32,700	71,940	
技術員	人	3.3	27,900	92,070	
計				367,730	

D：報告書作成日数

$$D = 0.0001 \times N^2 + 0.057 \times N + 2.1 \quad N: \text{実橋梁数 (橋)} \quad N=2$$

$$D = 2.2 \text{ 日}$$

f) 打合せ協議¹⁾

中間打合せ2回

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
主任技師	人	1.0	55,300	55,300	業務着手、成果品納入時
技師 (B)	人	2.0	40,600	81,200	同上+中間打合せ
技師 (C)	人	1.0	32,700	32,700	中間打合せ
計				169,200	

g) 近接目視点検の足場（防護工）の設置

①基本条件¹²⁾

・足場工費

$$\text{主体足場工費} = (L1 + L2 \times T1 + (N1 + N2) y) \times A \text{ (円)}$$

$$\text{中段足場工費} = (L1 + L2 \times T2 + (N1 + N2) y) \times A \text{ (円)}$$

$$\text{朝顔工費} = (L1 + L2 \times T5 + (N1 + N2) y) \times A \text{ (円)}$$

・防護工費

$$\text{板張防護工費} = (L1 + L2 \times T8 + (N1 + N2) y) \times A \text{ (円)}$$

$$\text{シート張防護工費} = (L1 + L2 \times T8 + (N1 + N2) y) \times A \text{ (円)}$$

L1L2N1N2：賃料係数 T1、T2、T5、T8、N1、N2の賃料歩掛係数を表-5.10に示す。

T1：主体足場を供用している月数（月）

T2：中段足場を供用している月数（月）

T5：朝顔を供用している月数（月）

T8：防護部を供用している月数（月）

N1：設置歩掛係数

N2：撤去歩掛係数

y：橋りょう特殊工単価（円/人）

A：橋面積（m²） A=W×L（W：地覆外縁間距離(m) L：橋長(m)）

表-5.10 賃料歩掛係数表 (T1、T2、T5、T8、N1、N2)

桁形式		L1	L2	N1	N2
プレートガーダ (パイプ吊り足場)	主 体 足 場	201	108	0.029	0.02
	中 段 足 場	126	77	0.013	0.007
プレートガーダ	朝 顔	134	78	0.014	0.010
	板 張 防 護 工	217	141	0.027	0.012
	シ ー ト 張 防 護 工	97	60	0.006	0.003

- ・ 労務費⁹⁾
 橋りょう特殊工 28,600 円/人 (昼間)
 42,900 円/人 (夜間)
- ・ 作業時間帯 夜間作業 (き電停止中の3時間)
- ・ 作業人員 1パーティ 6人
- ・ 点検作業のため、中段足場工と板張防護工は考慮しない。
- ・ 作業日数 主体足場 $(839.0 \times (0.029+0.020)/6) \times 8/3=18.3$ 日
 朝 顔 $(839.0 \times (0.014+0.010)/6) \times 8/3= 8.9$ 日
 シート張防護工 $(839.0 \times (0.006+0.003)/6) \times 8/3= 3.4$ 日
- ・ 供用日数 $(18.3+8.9+3.4) \times 1.5= 45.9$ 日
- ・ 点検日数 1.4日
- ・ 足場供用月数 $(45.9+1.4) / 30 = 1.57 \rightarrow 1.6$ 箇月
- ・ 設置面積 橋長 \times (総幅員 $\times 2+0.15$) $=28.98 \times (14.4 \times 2+0.15) = 839.0\text{m}^2$

②足場の設置・撤去費

面積= 839.0m²

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額	摘 要
足場工・防護工					$A=28.98 \times (14.4 \times 2+0.15)=839.0\text{m}^2$
主体足場					労務費 $= (N1+N2) \times y \times (8\text{hr}/3\text{hr})$
労務費	m ²	839.0	5,605	4,702,874	損 料 $= L1+L2 \times T1$ N1= 0.029
足場賃料	m ²	839.0	373	312,947	L1= 201 L2 = 108 N2= 0.020
					y = 42,900
朝 顔					労務費 $= (N1+N2) \times y \times (8\text{hr}/3\text{hr})$
労務費	m ²	839.0	2,744	2,302,216	損 料 $= L1+L2 \times T5$ N1= 0.014
足場賃料	m ²	839.0	258	216,462	L1= 134 L2 = 78 N2= 0.010
					y = 42,900
シート張防護工					労務費 $= (N1+N2) \times y \times (8\text{hr}/3\text{hr})$
労務費	m ²	839.0	1,029	863,610	損 料 $= L1+L2 \times T8$ N1= 0.006
賃 料	m ²	839.0	193	161,927	S = 97 L2 = 60 N2= 0.003
					y = 42,900
計				8,560,036	T1T5T8 = 足場供用月数 1.6箇月

(3) 塗り替え塗装足場の構造

現場での塗り替え塗装時の足場構造を図-5.13に示す。また、塗り替え塗装用の架設足場の外観を写真-5.4に、内部を写真-5.5に示す。

なお、幹線鉄道上での塗り替え塗装用足場は、板張り防護（シート防護付加）とする。

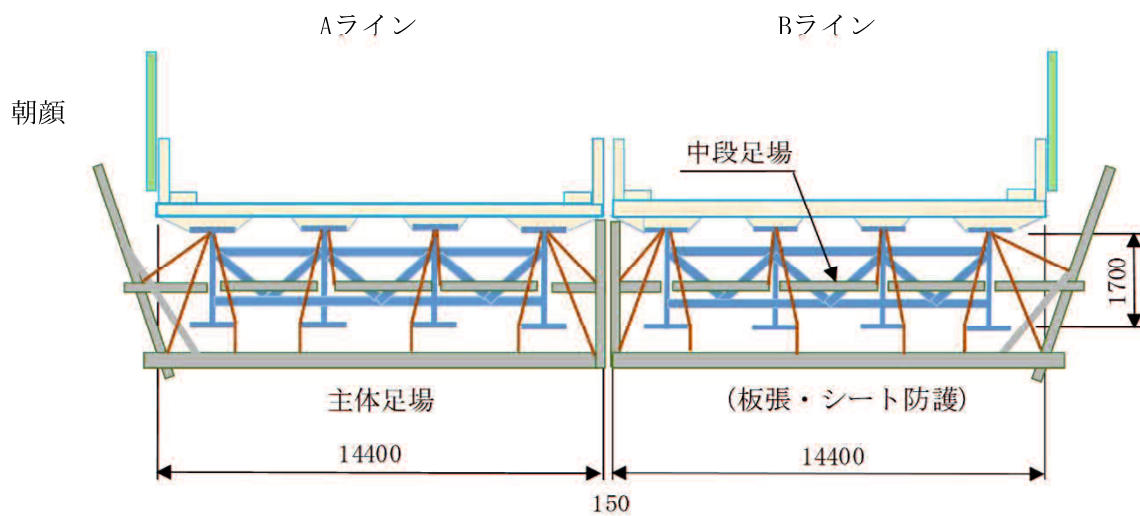


図-5.13 現場塗り替え塗装時の足場構造



写真-5.4 塗装用仮設足場（外観）



写真-5.5 塗装用仮設足場（内部）

(4) 現場塗り替え塗装コスト

現場塗り替え塗装は、45年後とする。（供用開始50年目にRc-I 塗装を実施済み）

1) 基本条件

- ・ 架橋環境 市街地部（やや厳しい環境） 耐久年数 45年⁶⁾
- ・ 塗装面積 桁外面全体 2,445m² (現場継手部156m²含む)
- ・ 時間的制約 受ける

2) 塗り替え塗装費と作業日数 塗装仕様 Rc-I 塗装系（スプレー）

名称・規格 (大阪府：濃彩色)		単価 ⁷⁾ (円/m ²)	金額 (円)	標準施工量 ⁷⁾ (m ² /日)	作業日数 (日)
清掃・水洗い		138.0	337,410	1,050	2.3
1種ケレン（プラスト法/乾式）		5,990	14,645,550	55	44.4
研削材及びケレンかす回収・積込工		3,504	8,567,280	70	0.0 *
防食下地	有機ジンクリッチペイント	1,092	2,669,940	360	6.7
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	1,243	3,039,135	225	10.8
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗				
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料中塗	634.4	1,551,108	450	5.4
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	1,148	2,806,860	450	5.4
計			33,617,283		75.0

*：1種ケレンに含む

(5) 現場塗り替え塗装の仮設足場コスト

1) 基本条件

(2) 近接目視点検コストの足場（防護工）のコスト算出方法に準ずる。

- ・ 作業日数
 - 主体足場 $(417.3 \times (0.029 + 0.020) / 6) \times 8 / 3 = 9.1$ 日
 - 中段足場 $(417.3 \times (0.013 + 0.007) / 6) \times 8 / 3 = 3.7$ 日
 - 朝顔 $(417.3 \times (0.014 + 0.010) / 6) \times 8 / 3 = 4.5$ 日
 - 板張防護工 $(417.3 \times (0.027 + 0.012) / 6) \times 8 / 3 = 7.2$ 日
 - シート張防護工 $(417.3 \times (0.006 + 0.003) / 6) \times 8 / 3 = 1.7$ 日
- ・ 供用日数 $(9.1 + 3.7 + 4.5 + 7.2 + 1.7) \times 1.5 = 39.3$ 日
- ・ 塗装日数 75.0日
- ・ 足場供用月数 $(39.3 + 75.0) / 30 = 3.81 \rightarrow 3.8$ 箇月
- ・ 設置面積 橋長×総幅員×2=28.98×14.4×2 =834.6m² (A+Bライン)

2) 足場の設置・撤去費

面積= 417.3 m² (Aライン)

工種	単位	数量	単価	金額	摘要
足場工・防護工					A = 28.98×14.4= 417.3 m ²
主体足場					労務費 = (N1+N2) × y × (8hr/3hr)
労務費	m ²	417.3	5,605	2,339,105	損料 = L1+L2×T1 N1= 0.029
足場賃料	m ²	417.3	611	254,970	L1= 201 L2 = 108 N2= 0.020
					y = 42,900
中段足場					労務費 = (N1+N2) × y × (8hr/3hr)
労務費	m ²	417.3	2,288	954,782	損料 = L1+L2×T2 N1= 0.013
足場賃料	m ²	417.3	418	174,431	L1= 126 L2 = 77 N2= 0.007
					y = 42,900
朝顔					労務費 = (N1+N2) × y × (8hr/3hr)
労務費	m ²	417.3	2,744	1,145,071	損料 = L1+L2×T5 N1= 0.014
足場賃料	m ²	417.3	430	179,439	L1= 134 L2 = 78 N2= 0.010
					y = 42,900
板張防護工					労務費 = (N1+N2) × y × (8hr/3hr)
労務費	m ²	417.3	4,461	1,861,714	損料 = L1+L2×T8 N1= 0.027
賃料	m ²	417.3	752	313,809	L1= 217 L2 = 141 N2= 0.012
					y = 42,900
シート張防護工					労務費 = (N1+N2) × y × (8hr/3hr)
労務費	m ²	417.3	1,029	429,540	損料 = L1+L2×T8 N1= 0.006
賃料	m ²	417.3	325	135,622	L1= 97 L2 = 60 N2= 0.003
					y = 42,900
計				7,788,483	
Aライン+Bライン 合計				15,576,966	T1T2T5T8 = 足場供用月数 3.8箇月

(6) LCCの集計 (供用期間50年)

仮設足場によるLCCの集計を表-5.11に示す。

集計項目 = 維持管理費

維持管理費は、近接目視点検 (5年/回) + 現場塗り替え塗装費 (45年後)

現場塗り替え塗装費には、塗装足場も含む。

表-5.11 仮設足場によるLCC集計表

(千円)

供用開始からの年数	50	55	60	65	70	75	80
近接目視点検		9,592	9,592	9,592	9,592	9,592	9,592
現場塗り替え塗装							
累計		9,592	19,184	28,776	38,368	47,960	57,552

供用開始からの年数	85	90	95 *	100
近接目視点検	9,592	9,592	1,032	9,592
現場塗り替え塗装			49,194	
累計	67,144	76,736	126,962	136,554

50年～100年間の集計

(千円)

136,554

注) 近接目視点検 (*) は、現場塗り替え塗装用の足場を利用する。

5.4.4 橋梁点検車 (BT-400) によるLCC

橋梁点検車 (BT-400) による近接目視点検イメージを図-5.14に示す。

(1) 近接目視点検方法 (橋梁点検車/BT-400)

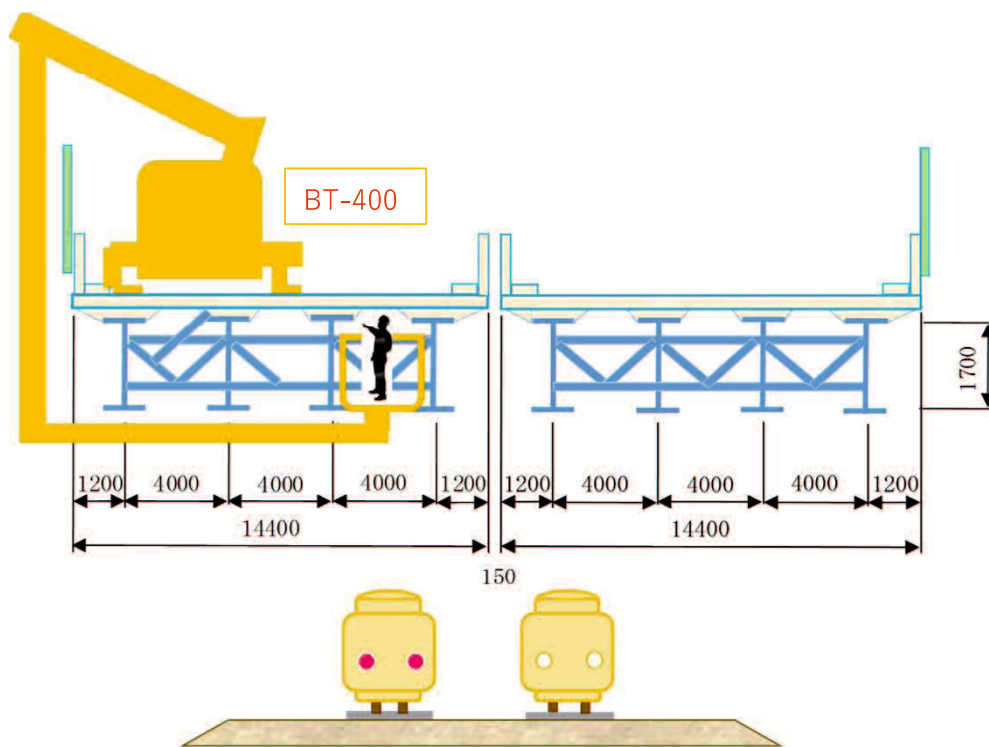


図-5.14 橋梁点検車 (BT-400) による近接目視点検イメージ

1) 点検作業タイム (夜間作業)

鉄道上での夜間点検タイムスケジュールを図-5.15に示す。

工種	23:00			0:00			1:00			2:00			3:00			4:00			5:00											
	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60									
列車運行時間帯	■																		■											
線路閉鎖時間帯							■																							
き電停止時間帯							休電			■												4:15 復電								
検電、接地確認・解除							■															■								
点検作業 (橋梁点検車)							←■→																							

図-5.15 夜間点検タイムスケジュール (鉄道上)

2) 橋梁点検車による点検作業時間

幹線鉄道上での点検作業であり、線路閉鎖は終電通過後のAM0時45分から始発通過前のAM4時45分の4時間実施されるが、近接目視点検作業が可能な時間帯は、実質AM1時25分～AM4時5分の2時間40分しか確保できない。

(2) 近接目視点検コスト (5年に1回)

1) 基本条件

- ・点検作業時間 橋梁点検車 : 夜間作業
- ・点検方法 仮設足場から機械経費 (BT-400) に変更。

上記2項目を除き、5.4.3 仮設足場によるLCCと同じ。

2) 近接目視点検集計表 (5年/回) : 橋梁点検車 (夜間作業)

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
計画準備 橋梁台帳等出力	式	1		18,180	
業務計画書作成	式	1		98,340	
部材番号図作成	式	1		36,360	
現地踏査	式	1		76,270	
関係機関との協議資料作成	式	1		101,180	
定期点検	式	1		634,770	(夜間)
報告書作成	式	1		367,730	
打合せ協議	式	1		169,200	
機械経費 (BT-400)	式	1		4,428,612	
計				5,930,642	

注) 機械経費には、高速上の規制費を含む。

a) 定期点検¹⁰⁾

夜間 (幹線鉄道上) 橋梁点検車

職 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
技師 (B)	人	3.6	60,900	219,240	外業、内業含む
技師 (C)	人	5.4	49,050	264,870	外業、内業含む
技術員	人	3.6	41,850	150,660	外業、内業含む
計				634,770	

D : 点検日数 (日/橋)

$$D = A_1 / (8 \times Y_b) \times K_1 \quad \text{1日} = 2.7 \text{時間 (2時間40分)}$$

A₁ : 定期点検面積 (m²)

A₁ = 橋長 × 全幅員 (地覆外縁間距離)

Y_b : 1時間当りの基準作業量 (m²/h)

$$Y_b = a \times A_1^b = 70.8 < 170 \text{m}^2/\text{h}$$

K₁ 足元条件係数 K₁ = 1.2 (点検車)

$$a = 5.62 \quad b = 0.42 \quad \text{最大作業量 } 170 \text{m}^2/\text{h}$$

$$D = 417.3 / ((2.7 \times 70.8) \times 1.2)$$

$$= 1.8 \text{日} \times 2 = 3.6 \text{日}$$

b)機械経費¹¹⁾

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
橋梁点検車賃料 (BT-400)	日	5.0	600,000	3,000,000	1.4 (供用日数/運転日数)
回送費	往復	1	100,000	100,000	
運転手 (特殊)	日	3.6	32,700	117,720	夜間
燃料費	L	77.8	140	10,892	8.0L/h×2.7h×3.6
高速道路規制費	回	4	300,000	1,200,000	交通整理員含む
計				4,428,612	

(3) 現場塗り替え足場の構造

5.4.3 仮設足場によるLCCと同じ。

(4) 現場塗り替え塗装コスト

5.4.3 仮設足場によるLCCと同じ。

(5) 塗り替え塗装足場のコスト

5.4.3 仮設足場によるLCCと同じ。

(6) LCCの集計 (供用期間50年)

橋梁点検車 (BT-400) によるLCCの集計を表-5.12に示す。

集計項目 = 維持管理費
 維持管理費は、近接目視点検 (5年/回) + 現場塗り替え塗装費 (45年後)
 現場塗り替え塗装費には、塗装足場も含む。

表-5.12 橋梁点検車 (BT-400) によるLCC集計表

(千円)

供用開始からの年数	50	55	60	65	70	75	80
近 接 目 視 点 検		5,931	5,931	5,931	5,931	5,931	5,931
現 場 塗 り 替 え 塗 装							
累 計		5,931	11,862	17,793	23,724	29,655	35,586

供用開始からの年数	85	90	95 *	100
近 接 目 視 点 検	5,931	5,931	1,032	5,931
現 場 塗 り 替 え 塗 装			49,194	
累 計	41,517	47,448	97,674	103,605

50年～100年間の集計
(千円)

103,605

注) 近接目視点検 (*) は、現場塗り替え塗装用の足場を利用する。(昼間作業)

5.4.5 金属サンドイッチパネルによるLCC

金属サンドイッチパネルによる近接目視点検イメージを図-5.16に、金属サンドイッチパネル設置後の外観を写真-5.6に、内部を写真-5.7に示す。

(1) 近接目視点検方法（金属サンドイッチパネルを利用）

維持管理作業（近接目視点検および補修・補強）は任意の時間帯で対応可能、設計供用期間中の塗装の塗り替え作業は不要となる。

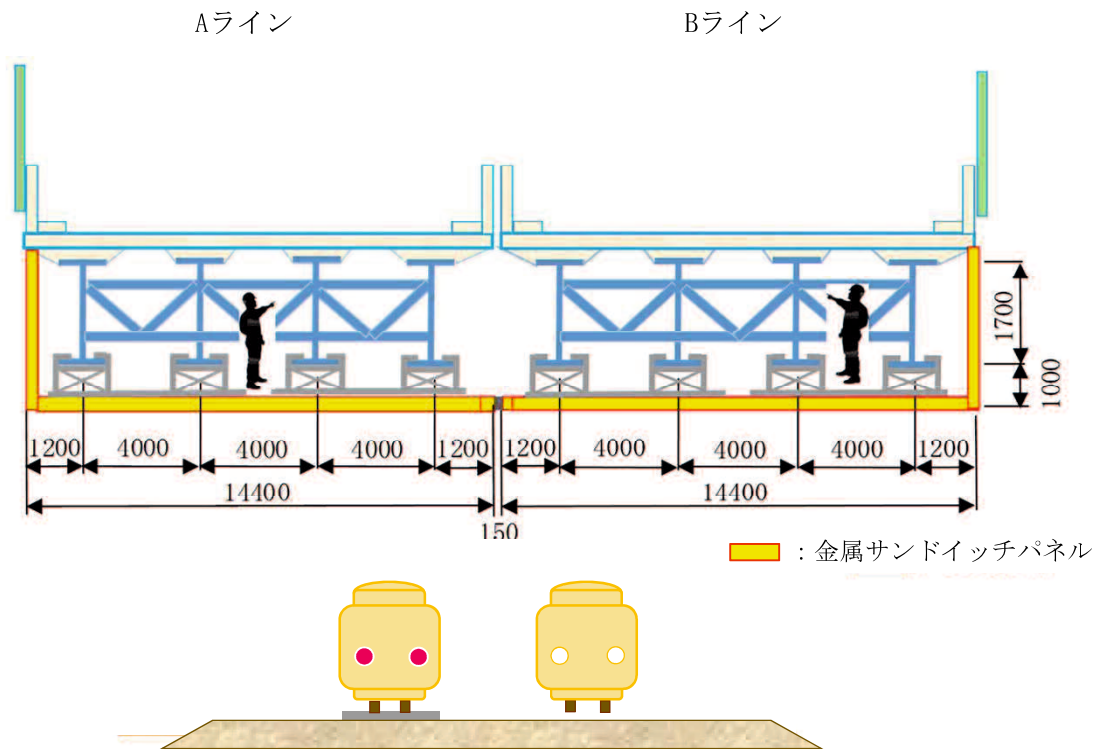


図-5.16 金属サンドイッチパネルによる近接目視点検イメージ（跨線部）



写真-5.6 金属サンドイッチパネル（外観）

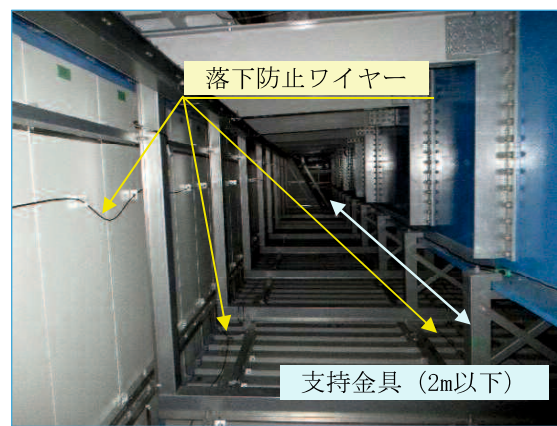


写真-5.7 金属サンドイッチパネル（桁内部）

(2) 近接目視点検コスト（5年に1回）

近接目視点検の内容は、5.4.3 仮設足場によるLCC同じである。金属サンドイッチパネルを利用するので、仮設足場・防護工は計上しない。

近接目視点検集計表（5年/回）：金属サンドイッチパネルを利用

工 種	単 位	数 量	単 価	金 額 (円)	備 考
計画準備 橋梁台帳等出力	式	1		18,180	
業務計画書作成	式	1		98,340	
部材番号図作成	式	1		36,360	
現地踏査	式	1		76,270	
関係機関との協議資料作成	式	1		101,180	
定期点検	式	1		164,570	(昼間)
報告書作成	式	1		367,730	
打合せ協議	式	1		169,200	
計				1,031,830	

(3) 金属サンドイッチパネルの構造³⁾

鋼橋に設置した金属サンドイッチパネル（裏面）の断面を図-5.8、仕様を表-5.4に示す。

(4) 金属サンドイッチパネルの製品費（メーカー見積り）

1)裏面パネル単価（カラスステンレス仕様）	50,000円/m ²	設置面積	779.9 m ²
裏面パネル計			38,995,000 円
2)側面パネル単価（カラスステンレス仕様）	55,000円/m ²	設置面積	174.4 m ²
側面パネル計			9,592,000 円
製品費計			48,587,000 円

(5)金属サンドイッチパネルの設置費¹²⁾（既設橋／幹線鉄道上）

1)基本条件

- ・作業時間（WT）

WT=4時間（夜間作業）

- ・設置面積（A）

$$A = \text{裏面パネル} / 779.9 \text{ m}^2 + \text{側面パネル} / 174.4 \text{ m}^2 = 954.3 \text{ m}^2$$

- ・労務費⁹⁾

橋りょう世話役 51,750 円/人（夜間）

橋りょう特殊工 42,900 円/人（夜間）

普通作業員 28,500 円/人（夜間）

- ・部材荷揚げ工歩掛は、表-5.5のパネルタイプによる。
現場環境条件の係数は、表-5.6の主要道路上・鉄道上による。
主要道路上・鉄道上 係数 (α) =0.8

- ・部材取付工歩掛は、表-5.7のパネルタイプによる。

〈部材荷揚げ工〉

1日あたり施工量 (Dn)

$$\begin{aligned}
 Dn &= 85 \text{ m}^2/\text{日} \times \alpha \times WT/8 \\
 &= 85 \times 0.8 \times 4/8 \\
 &= 34.0 \text{ m}^2/\text{日}
 \end{aligned}$$

所要日数 (d)

$$\begin{aligned}
 d &= A / Dn \\
 &= 954.3 / 34 \\
 &= 28.0 \text{ 日}
 \end{aligned}$$

〈部材取付け工〉

1日あたり施工量 (Dn)

$$\begin{aligned}
 Dn &= 30 \text{ m}^2/\text{日} \times WT/8 \\
 &= 30 \times 4/8 \\
 &= 15.0 \text{ m}^2/\text{日}
 \end{aligned}$$

所要日数 (d)

$$\begin{aligned}
 d &= A / Dn \\
 &= 954.3 / 15.0 \\
 &= 63.6 \text{ 日}
 \end{aligned}$$

2)設置費（幹線鉄道上）

名 称	規 格	数 量	単 位	単 価	金 額 (円)
部材荷揚げ工	パネルタイプ				
労務費	夜間				
橋梁りょう役		28.0	人	51,750	1,449,000
橋りょう特殊工		112.0	人	42,900	4,804,800
普通作業員		28.0	人	28,500	798,000
諸雑費	労務費計×26.0%	1	式		1,833,468
小計					8,885,268
部材取付け工	パネルタイプ				
労務費	夜間				
橋りょう世話役		63.6	人	51,750	3,291,300
橋りょう特殊工		318.0	人	42,900	13,642,200
普通作業員		63.6	人	28,500	1,812,600
諸雑費	労務費計×23.0%	1	式		4,311,603
小計					23,057,703
計					31,942,971
		1	m ²	33,473	

(6) LCCの集計（供用期間50年）

金属サンドイッチパネルによるLCCの集計を表-5.13に示す。

集計項目 = 金属サンドイッチパネルの製品費と設置費+維持管理費
 維持管理費は、近接目視点検（5年/回）

表-5.13 金属サンドイッチパネルによるLCC集計表

(千円)

供用開始からの年数	50	55	60	65	70	75	80
近接目視点検		1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032
金属サンドイッチ パネルの設置	80,530						
累 計	80,530	81,562	82,594	83,626	84,658	85,690	86,722

供用開始からの年数	85	90	95	100
近接目視点検	1,032	1,032	1,032	1,032
金属サンドイッチ パネルの設置				
累 計	87,754	88,786	89,818	90,850

50年～100年間の集計
(千円)

90,850

注) 初期コスト計上分 = 金属サンドイッチパネルの製品費+設置費

5.4.6 LCC検討結果

幹線鉄道上の供用開始から50年経過した既設橋の設計供用期間（100-50=50年）を想定した維持管理方法別のLCC集計を表-5.14に、維持管理方法別LCCのグラフを図-5.17に示す。

経済性の観点で考えると、残りの供用年数の中で塗り替え塗装が1回想定される場合は、金属サンドイッチパネル設置の優位性が確認される。架橋環境が良好で塗り替え塗装が必要とならないケース（塗装の推定耐久年数50年以上）では、橋梁点検車、仮設足場の順でLCCを低く抑えることが可能になる結果を示しているが、橋梁点検車による幹線鉄道上の近接目視点検は、夜間の制限された時間帯での作業となり、点検自体の充実度（確実性）と安全面（架線への接触リスク）に課題が残る。

また点検費用の観点に着目すると、法令で定められた近接目視点検費用（50年間）の積み上げは、大型橋梁点検車でライフサイクルコストの50%、架設足場の場合は60%を超える結果となり、維持管理費の負担を増大させている。さらに点検時に発見された補修対応や床版剥落などの緊急対応を考えた場合、金属サンドイッチパネル（常設足場機能）を活用できるメリットは大きく、維持管理作業の充実とコスト縮減に貢献することが期待できる。

表-5.14 維持管理方法別のLCC集計表

(千円)

維持管理内容	維持管理方法	供用開始 50年目	供用開始 70年集計	供用開始 90年集計	供用開始 95年集計	供用開始 100年合計
近接目視点検 (5年毎)	仮設足場	—	38,368	76,736	126,962*	136,554
	橋梁点検車	—	23,724	47,448	97,674*	103,605
	金属サンドイッチ パネル（常設足場）	80,530	84,658	88,786	89,818	90,850

*：塗り替え塗装含む

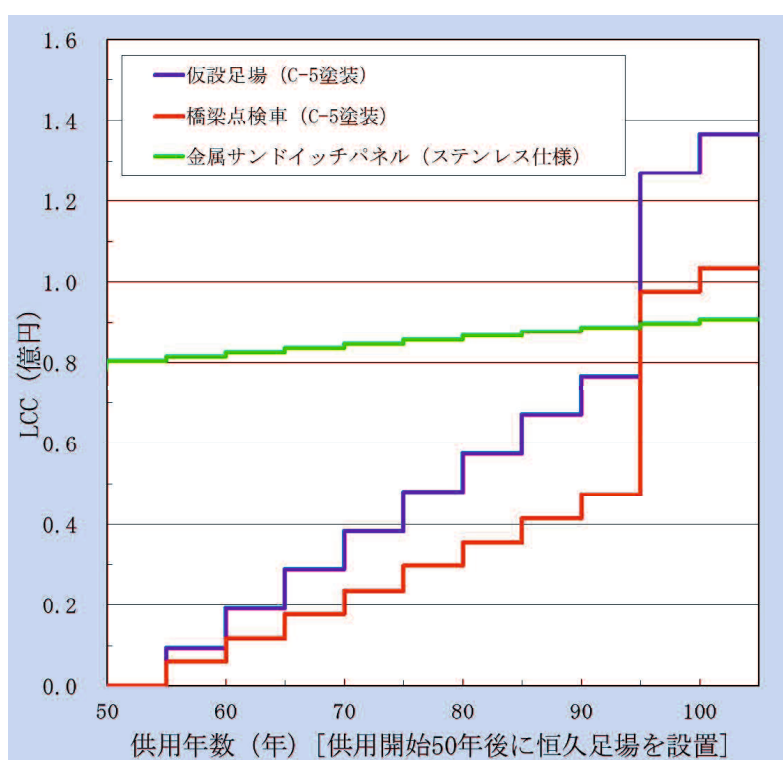


図-5.17 維持管理方法別LCCグラフ

5.5 本章のまとめ

臨海部河川上に建設された新設橋（LCC対象期間100年）、幹線鉄道上に建設された既設橋（LCC対象期間50年）の両ケースにおいて、金属サンドイッチパネルを設置することによる経済効果が確認された。

特に塗り替え塗装の回数が多くなる地域においては、その効果が顕著になるとともに塗り替え塗装時に発生する研削材やケレンかすなど有害な物質の処理も不要となり、現在の課題である環境保護にも貢献すると期待できる。

また、断熱性能を有する金属サンドイッチパネルで鋼桁全体を覆うことは、海塩粒子、紫外線、埃などの環境因子から塗膜や鋼材を保護する効果に加えて年間の濡れ時間、結露の発生も抑制できるメリットが有り、構造物本体の耐久性、長寿命化にも結び付くと考えられる。

緊急の補修・補強工事が発生した場合においても、地域住民、鉄道事業者への説明や協議事項は少なくなり、初動体制の構築が早くなる。

安全面に着目すると、万が一、床版コンクリートの剥落やボルトの落下などが生じても、金属サンドイッチパネル内部で受け止めることができるため第三者被害の防止、危険の伴う夜間点検作業時の点検車運転事故や架線との接触リスクも排除できる。

さらにLCCでの評価には表れないが、常設足場機能の利用により点検の時期や時間を自由に選定できるため、メンテナンス技術者の効率的な配置、点検ノウハウの共有化や点検精度の向上にも繋がります。総合的な観点において金属サンドイッチパネル設置の優位性が認められる。

参考文献（第5章）

- 1) 三木千壽：橋の寿命-プラス100年プロジェクトの提案，コンクリート工学，Vol. 50, No.7, 2012. 7
- 2) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014. 3
- 3) 日鉄エンジニアリング株式会社：NS カバースプレート™，Cat. No. C0426, 2019. 4 版
- 4) 日鉄エンジニアリング株式会社：恒久足場 チタン・ステンレスパネルの耐久性，2019. 11
- 5) 七浦恒康，佐藤弘隆，藤川敬人，鈴木恵太：臨海部橋梁における高耐食外装材の防食性能，橋梁と基礎，Vol. 48, pp. 25-28, 2014. 10
- 6) (一社) 日本橋梁建設協会：鋼橋のライフサイクルコスト（技術短信）No.10, 2020（改）
- 7) (一財) 建設物価調査会：土木コスト情報，2021年4月春
- 8) 国土交通省大臣官房：技術調査課設計業務委託等技術者単価，令和2年度
- 9) (一財) 建設物価調査会：建設物価，2021. 4
- 10) 国土交通省道路局：道路橋定期点検業務積算資料（暫定版），平成31年3月
- 11) 国土交通省道路局：道路橋定期点検業務積算資料（暫定版），平成31年2月
- 12) (一社) 日本建設機械施工協会：橋梁架設工事の積算，令和2年度版

第 6 章

結 論

第6章 結 論

6.1 本研究のまとめ

鋼橋の防食方法の1つである環境改善による防食は、主に設計段階で水切り板の設置など桁端部付近を中心に滞水を防止する構造検討、供用中の鋼橋においては、漏水、滞水部を補修する内容が多く、被覆による防食や耐食性材料による防食と比較し、限定的な範囲での対応と考えられてきた。しかし、金属サンドイッチパネルで鋼桁全体（裏面＋側面）を覆い、鋼桁内部と外部環境とを遮断する方法は、供用開始後の適用も可能であり、設置が完了した時点で環境因子の侵入を抑制することが可能となる。架設環境にかかわらず同様の効果が期待できる点で、従来の防食法とは異なる特徴を有している。

反面、耐食性材料で製作された鋼橋は、自然環境（風雨・乾湿）の中で、保護性さびが生成されるため、外部環境と遮断することの是非が問われる。また、供用中の橋梁は、塗装、耐候性鋼橋梁、それぞれ塗装による補修をしたケースなど様々であり、これからの鋼材表面（さび）の腐食進行状況の確認も必要である。

今回は、亜熱帯地域の臨海部に架橋された厳しい環境下の鋼橋を対象に、金属サンドイッチパネルに囲まれた桁内空間の動向、そして初期塩分を含んだ自然曝露の耐食性鋼材など各種試験体の経年変化を観察・計測し、環境改善の効果を評価した。

また、金属サンドイッチパネルは断熱性による環境改善に加えて常設足場機能を有している。これは2013年に社会資本メンテナンス元年として、インフラ長寿命化基本計画が決定され、その後公布された5年に1度の近接目視点検の義務化（2014年7月1日）、「跨線橋の計画的な維持及び修繕が図られるよう、道路管理者はあらかじめ鉄道事業者等との協議により、跨線橋の維持又は修繕の方法を定めておく」という道路法施行規則の一部を改正する省令（2016年10月28日）にも合理的に対応できる構造であり、継続的かつ確実な維持管理に結び付いていくと考えられる。

(1) 第1章

本論文の概要として、道路橋インフラの現状、鋼橋の防食技術（方法）、研究の目的、論文の構成と内容を述べた。

(2) 第2章

鋼橋の防食方法を耐食性材料、被覆、環境改善に区分し、実績、特色、基準・仕様の変遷を踏まえ既往の研究を整理した。

(3) 第3章

金属サンドイッチパネルに覆われた鋼桁内部空間の腐食環境をワッペン試験片、温湿度計、飛来塩分量により評価するとともに桁外に設置した同様のデータと比較し、環境改善効果を考察した。

- ① 桁内気温は桁外と比較して年平均で3.6℃上昇し、相対湿度は9.4%程度低下することを確認した。特に、日射量と日照時間が多くなる春季から夏季は、桁内と桁外の温湿度差が顕著に現れている。
- ② 桁内の垂直、水平姿勢のワッペン試験片のさび生成に差異が見られた。主に主桁上フランジに残存していた塩分が、結露水としてワッペン試験片に付着したと考えられる。5年間、ワッペン試験片の付着塩分量がほぼ同一数値を示すことから、主桁上フランジの付着していた塩分は、1年間のうちに結露水とともに滴下したと推察できる。
- ③ 金属サンドイッチパネル設置後に、1年間ドライガーゼ法で飛来塩分の測定を実施したが、数値上桁内へのあらたな塩分侵入は検知されなかった。桁内ワッペン試験片の塩分は、桁塗装後のヤード保管、海上輸送、桁架設時に付着したと考えられる。架橋後に水洗いなどで桁全体の付着塩分を除去することは現実的でなく、製作段階で桁に一定の被覆防食を施すことが重要になる。
- ④ 桁外気温と桁内気温の変動にタイムラグがあり、深夜に桁内気温がピーク値を示している。この傾向は日中晴れた日に多く、桁内に蓄積された日射熱が金属サンドイッチパネルの断熱効果により深夜まで保持されている。

5年間の調査期間中、外気と接触している金属サンドイッチパネルの外皮材面が明らかに結露している状態でも、桁内のウェブ、主桁下フランジおよび金属サンドイッチパネルの内皮材に結露や水膜の発生は一度も認められなかった。しかし路面（床版）と直接接している上フランジ下面には、薄い水膜を確認できる時間帯があった。この現象は、上フランジの床版厚が16cmと薄く、路面からの日射熱の影響を受けていたと考えられる。

金属サンドイッチパネルに使用されている厚さ35mmの芯材（ポリイソシアヌレートフォーム）の断熱効果は高く、鋼桁を金属サンドイッチパネルで覆うことによる結露発生リスクは小さいと判断できる。

(4) 第4章

鋼桁内部空間にさびの進行した無処理の小型試験体、素地調整や補修塗装を想定した各種小型試験体を配置し、初期付着塩分量、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響、さびの進行速度から金属サンドイッチパネルによる環境改善効果の有効性を考察した。

- ① 金属サンドイッチパネルで耐候性鋼橋を覆うことによる桁内気温の上昇、雨水による洗浄効果と風の流れによる乾湿効果が期待できない防食上のリスクを懸念したが、イオン透過抵抗法による評価区分で初期に未成長さび領域（I-5，I-3）にある無処理仕様（水準3～水準5）と無塗装仕様（水準8～水準10）は、5年間経過後もほぼ同領域内に存在することが検証できた。これは耐候性鋼橋が未成長さびの領域にあること、またケレン作業（塩分除去）により未成長さびの領域へ戻すことで環境改善による防食効果が機能し、桁内での近接目視点検や適切な維持管理などの継続的な確認と合わせて、耐候性鋼橋の延命化に有効な手段であると評価できる。
- ② 亜熱帯地域の厳しい環境下においても、桁内に設置した鋼箱桁内面に適用される水準2の小型試験体に経年劣化や変状は見られなかった。金属サンドイッチパネルは、鋼橋の現場継手部に存在するすき間のない連続した構造体であり、環境因子を遮断する塗膜保護の効果が高くなることを考えると、内面塗装の簡素化への応用に結び付く可能性を確認した。
- ③ 初期付着塩分量（内在塩分も含む）の多い、既にさびの進行が見られる試験体は、金属サンドイッチパネルで外部からの海塩粒子の侵入を遮断しても、それまでに自身の保有する塩分によりうろこ状さびから層状剥離さびへと移行し、試験体から脱落しているケースもあった。しかし、5年間の調査期間においては、その後の発さびは抑えられており、海塩粒子を遮断することによる環境改善効果と判断できる。

今回の調査では桁外との環境遮断による効果が確認できた反面、さびの進行を完全に抑えることは困難であることが明らかになった。しかし発さびの進行速度は抑制されており、100年を標準とする設計供用期間においては、近接目視点検などの維持管理を通して耐候性鋼橋の寿命をコントロールできると考える。

また、補修塗装や塗り替え塗装を行う場合とのコスト比較も重要な課題になるが、常設足場機能を利用した安全かつ継続的な詳細点検や緊急時の補修対応が可能であり、従来からの塗装による被覆防食と同じく、鋼橋の長寿命化を進めていく上での有効な技術となる。

(5) 第5章

金属サンドイッチパネルで鋼桁を覆う環境改善による防食は、鋼橋の長寿命化、維持管理の効率化および塗装の簡素化に結び付く技術であるが、反面設置する際の製品代と取り付け費の負担も大きい。ここでは、設計供用期間 100 年で計画された亜熱帯地域の新設橋（河川上）と 50 年間の供用期間を経て、残り 50 年の設計供用期間を想定した既設橋（鉄道上）においてライフサイクルコストを算出した。

① 新設橋（設計供用期間 100 年）

初期のコストは金属サンドイッチパネルの設置が高くなるが、C-5 塗装とは 30 年目からほぼ同額で推移し、60 年目以降は大きく差が開く結果となった。金属溶射（亜鉛アルミ擬合金）とは 90 年経過後に逆転するが、そもそも初期コストの差が小さく、足場機能や近接目視点検の密度や自由度・補修の事態を想定すると金属サンドイッチパネルの優位性が認められる。近年採用が始まったアルミニウム・マグネシウム合金溶射＋封孔処理（＋全面ふっ素樹脂塗装）と比較した場合は、塗り替え塗装が必要ないため初期コストが同程度であれば 100 年間の維持管理コストはほぼ同額と考えられるが、海塩粒子や紫外線などの影響を回避できる桁内環境は、ライフサイクルコストでは現れない鋼橋長寿命化の可能性を有する。

② 既設橋（設計供用期間 50 年）

経済性の観点で考えると、残りの供用年数の中で塗り替え塗装が 1 回想定される場合は、金属サンドイッチパネル設置の優位性が確認される。架橋環境が良好で塗り替え塗装が必要とならないケースでは、橋梁点検車、仮設足場の順でライフサイクルコストを低く抑えることが可能となるが、橋梁点検車による幹線鉄道上の近接目視点検は、夜間の制限された時間帯での作業となり、点検自体の充実度（確実性）と安全面（架線への接触リスク）に課題が残る。

また現在、近接目視点検は 5 年に 1 度が必須であり、点検に関わる交通規制（渋滞）、仮設足場設置・撤去時の地域への影響（騒音）に加えて、鉄道事業者との協議・立会も必要であり、維持管理手法の選択には実態に即した総合的な判断が求められる。

③ 近接目視点検のコスト

幹線鉄道上の高架橋では、法令で定められた近接目視点検費用（50 年間）の積み上げが、大型橋梁点検車でライフサイクルコストの 50%、架設足場の場合は 60%を超える結果となり、維持管理費の負担を増大させている。さらに点検時に発見された補修対応や床版剥落などの緊急対応を考えた場合、金属サンドイッチパネル（常設足場機能）を活用できるメリットは大きく、維持管理作業の充実とコスト縮減に貢献することが期待できる。

6.2 今後の課題

(1) 環境改善効果の評価基準の策定

鋼桁を環境改善目的で覆う場合は、住宅で使用されるサッシや壁材のように密閉性や断熱性能など一定の評価基準を設定することが必要であると考えられる。

日常の概念では、商品を箱などのケースに入れさらに包装紙や風呂敷で包むことは、商品を保護することに寄与し、外装が立派であれば視覚的な満足感も得ることができる。

鋼橋で考えると、塗装された新設桁や適正な方法で補修塗装された既設桁の場合は、どのような製品で覆ってもその後の影響は少ないと考えられるが、塗膜が劣化していたり、塩分が付着している場合は、覆うことがリスクになる場合もあり注意が必要になる。

特に初期塩分を介在する耐候性鋼橋梁を覆う場合は、桁外からの海塩粒子の侵入を遮断しないとその後のさびの進行に大きな影響を与え、また断熱性能が低い場合は桁内の相対湿度が上昇するなど環境遮断効果が抑制される。

また桁高が低いなど、桁内空間容積が小さい場合は、桁外から取り込まれる日射熱による桁内気温上昇や、熱伝導率の高い材料を側面パネルに使用すれば桁内点検時に熱傷を負うケースも想定されるため、事前に周知しておく必要がある。

そして、長期にわたる橋梁インフラの維持管理、点検者の安全を確保するため、設計供用期間中の耐久・耐風性能、疲労強度など、適切な条件を設定し、安全性能を公開しておくことが肝要である。

(2) 金属サンドイッチパネル外面の点検システム確立

2014年7月から義務化された社会インフラの近接目視点検は、多点支持された骨組構造、軽量な部材、取り付けボルトを全て桁内に配置した構造である金属サンドイッチパネルにも適用される。

現時点において5年に1度の近接目視点検や維持管理作業は、桁内部から任意の時間帯に安全に行えるが、金属サンドイッチパネルの外面（外皮材）だけは遠方目視点検になる。

金属サンドイッチパネルは、シンプルな板構造で、かつ、パネルは1枚単位で落下防止ワイヤーで鋼桁と固定されており、安全上は桁内からの点検と遠方目視で支障はないと考えられるが、100年の設計供用期間を勘案した場合、精度が高く効率的な点検方法を明確にしておくことが重要になる。

その1つの方法としてドローン技術による橋梁点検システムの有効活用が考えられる。現在試験的に行われているドローン技術を利用した点検は、一般的な鋼橋の場合、主桁、横桁、対傾構などの狭隘部への侵入や日照条件に制約を受けるが、金属サンドイッチパネルの外面（外皮材）は、障害物のない単純な面構造であり、側面、裏面パネルに沿って周囲を撮影する作業であり、構造部材との干渉や照度確保の問題も少ない。撮影要領（解析レベルなど）や費用の問題など課題も多いが、決められた点検ルールを遵守し、近接目視により近づけていく努力と工夫が必要である。

(3) 持続可能なイノベーション

近年の国土交通省道路関係予算配分方針によると直轄事業費の約30%が維持修繕費に充てられている。この比率は現在の橋梁ストックと今後の老朽化を考えるとますます高まることは周知の事実である。現在金属サンドイッチパネルは、100年間の耐久年数を想定しているが、長大橋を保有する本四連絡橋が供用期間を200年間に変更していることを考えると、一般の道路橋においても同様の期間を設定する時代は近い。そのため製品の材質や構造を見直し、日々新しい技術に目を向け開発に挑戦していく必要がある。特に芯材に使用している断熱効果の高いポリイソシアヌレートフォームは、産業廃棄物として処理されるため、同等以上の機能・品質を担保した上でリサイクル可能な材質への変更が課題となる。

また鋼桁を覆って塗膜の劣化を抑え寿命を高めることは、塗装仕様の簡略化や延命化に結びつくものであり、塗料から排出される溶剤などの揮発性有機化合物（VOC）も同時に削減することを意味するため、社会への貢献度は大きい。これからの需要や社会のニーズを考えると、素材メーカー、塗料メーカー、建材メーカーなど関係業界全体で知恵を出し合い、持続可能な生産システムとリサイクル体制の構築が急がれる。

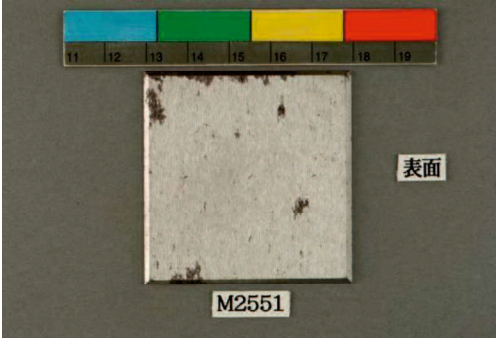
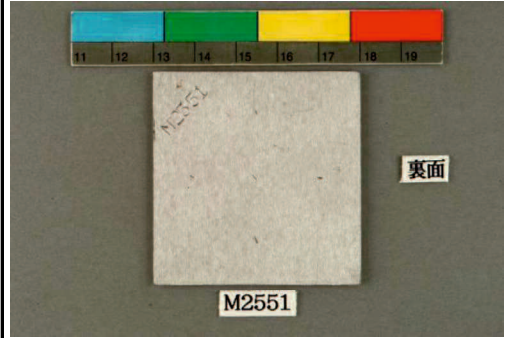
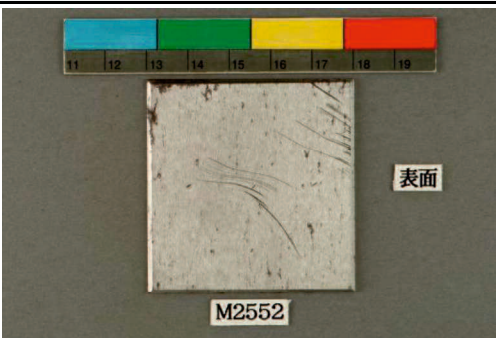
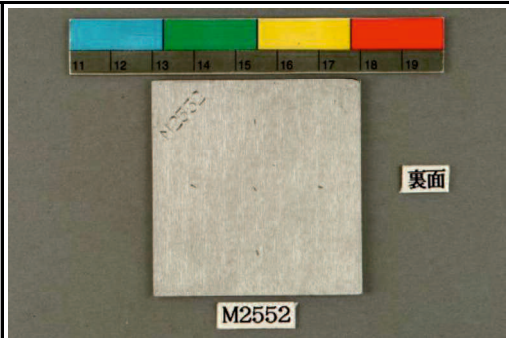
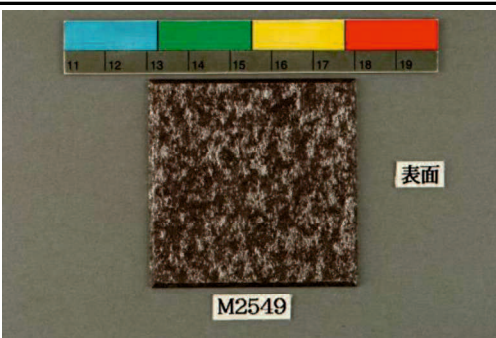
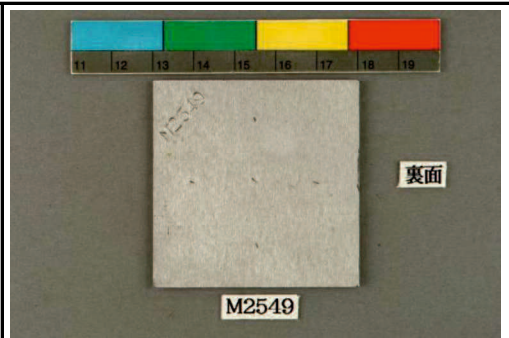
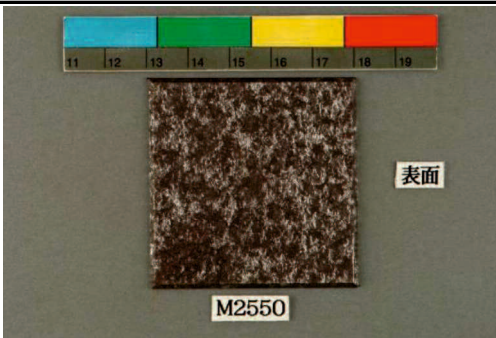
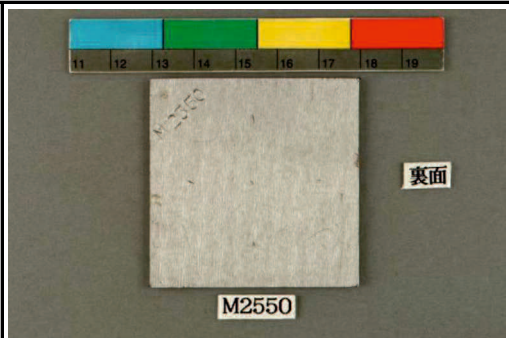
【附 録】

附録-1 ワッペン試験片曝露写真

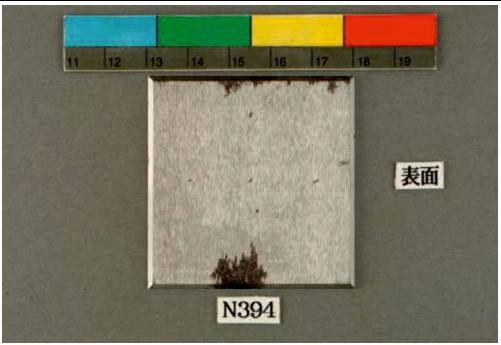
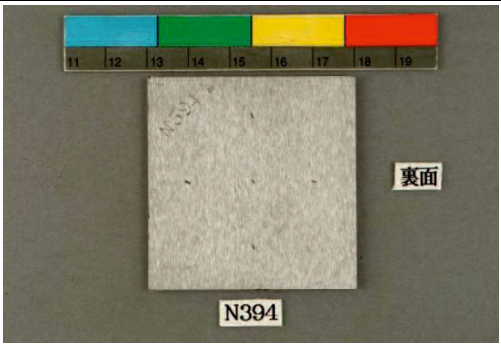
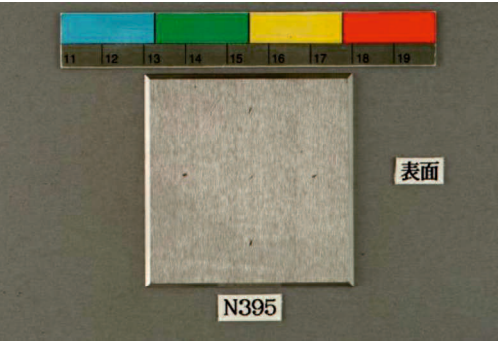
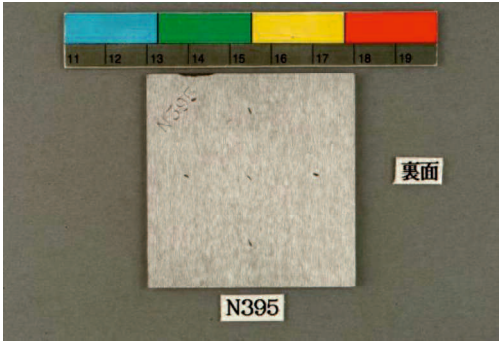
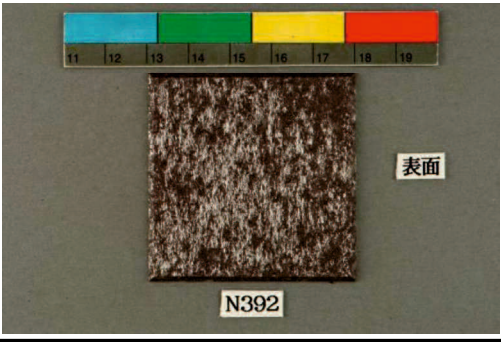
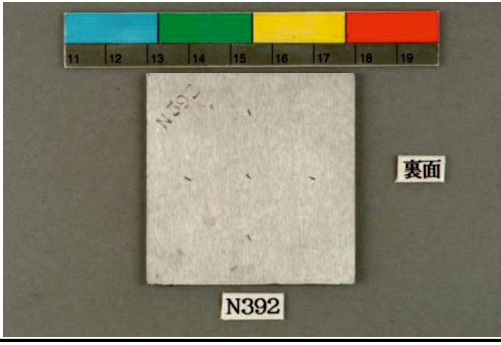
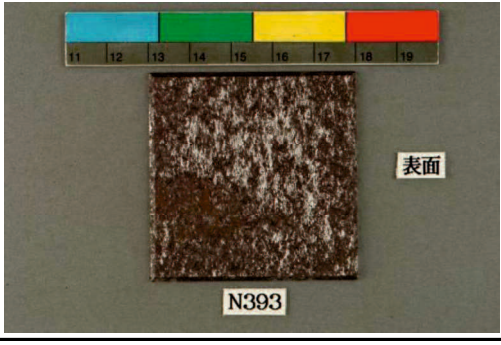
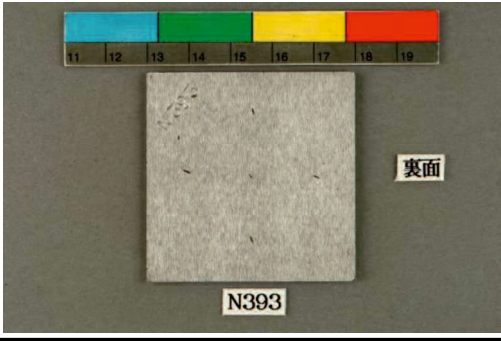
附録-2 小型試験体曝露写真

附録-3 工場塗装費単価内訳

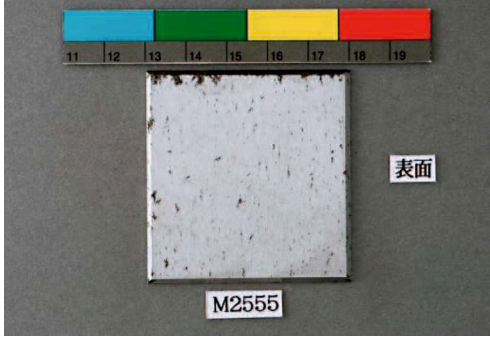
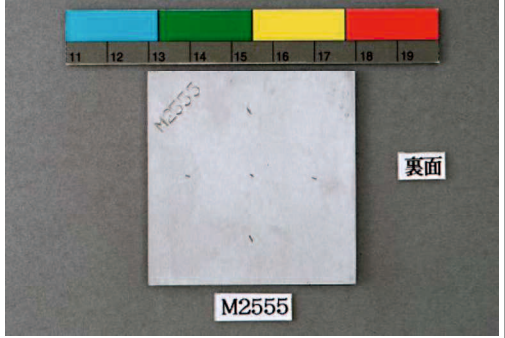
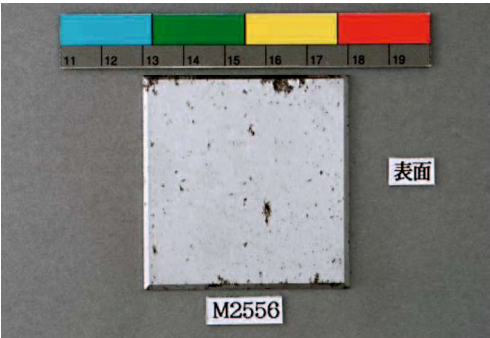
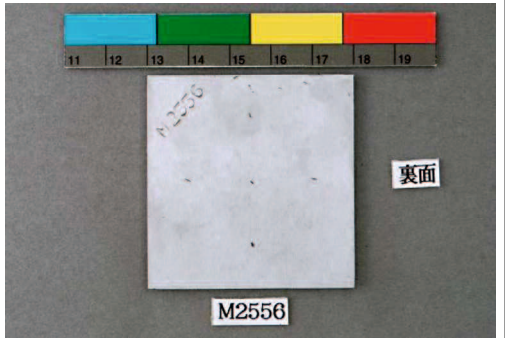
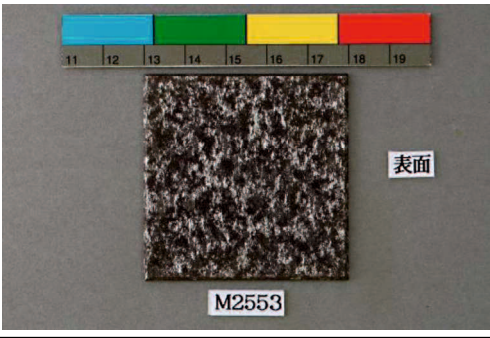
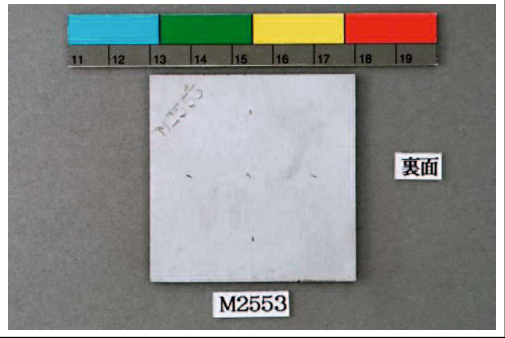
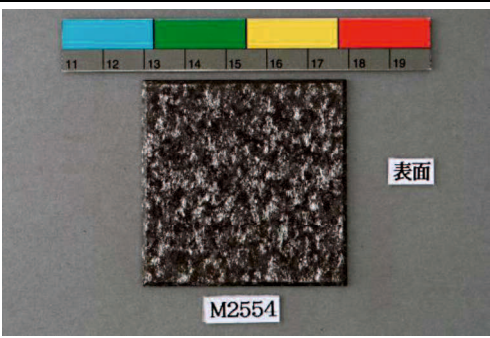
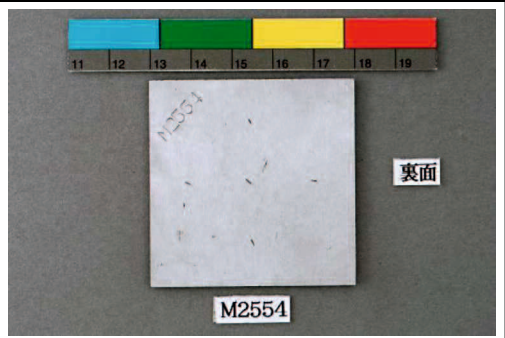
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [1年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	1年材(2015. 8. 27~2016. 11. 15)	
材質	—	JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2551	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	2		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	1		
試験片番号	—	M2552	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	1		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2549	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	32		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	15		
試験片番号	—	M2550	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	30		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	14		

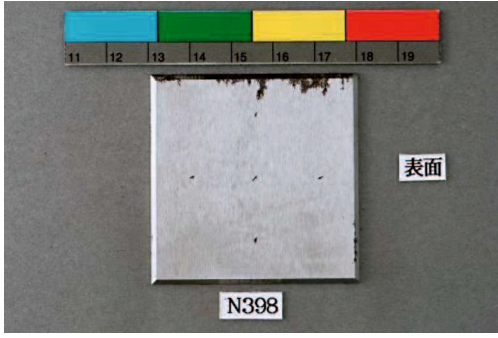
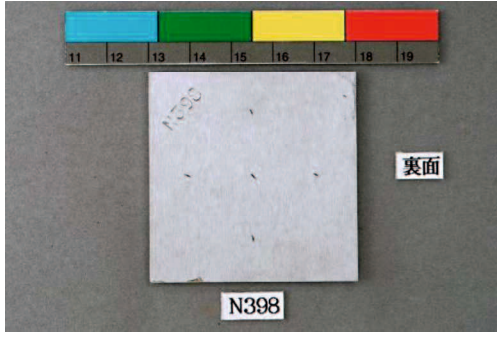
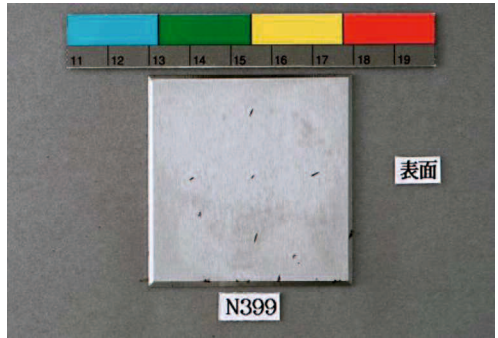
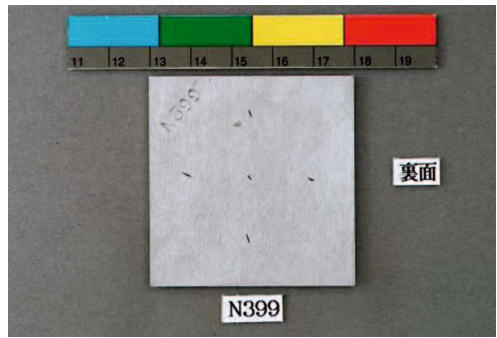
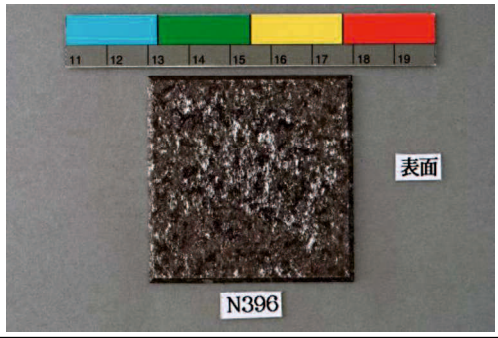
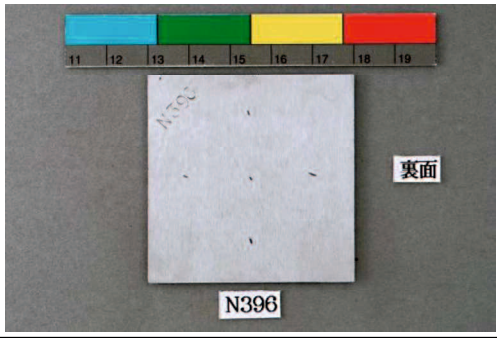
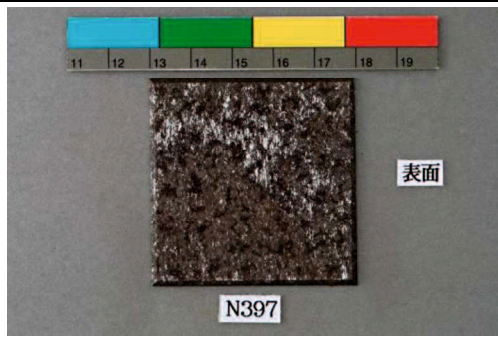
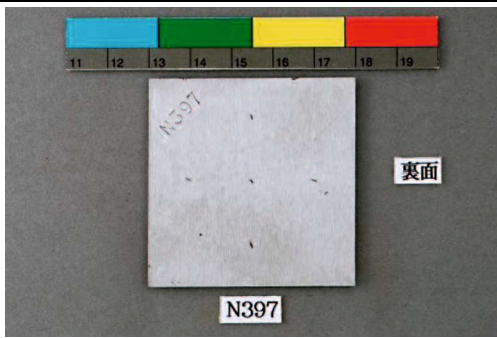
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [1年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	1年材(2015. 8. 27~2016. 11. 15)	
材質		3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N394	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	3		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号		N395	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	2		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N392	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	35		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	10		
試験片番号		N393	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	33		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	7		

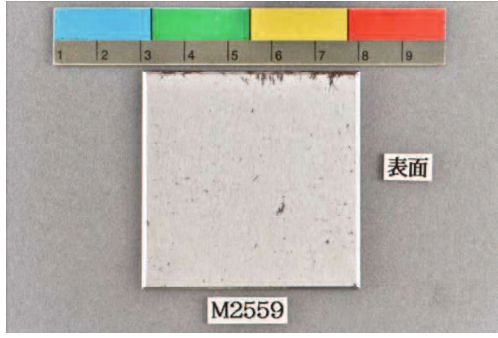
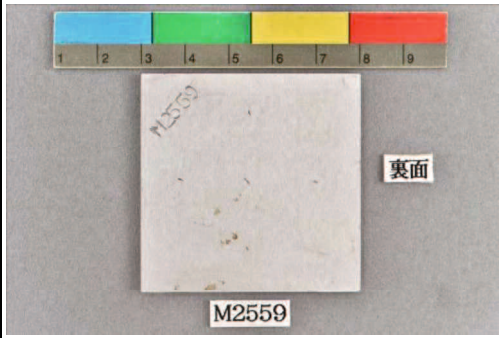
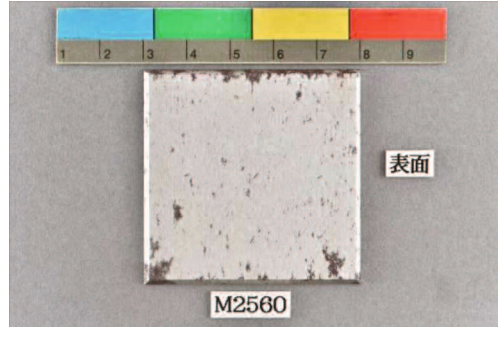
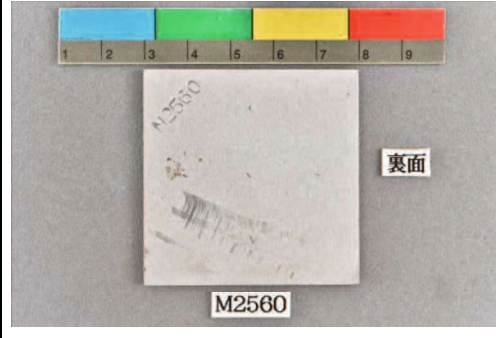
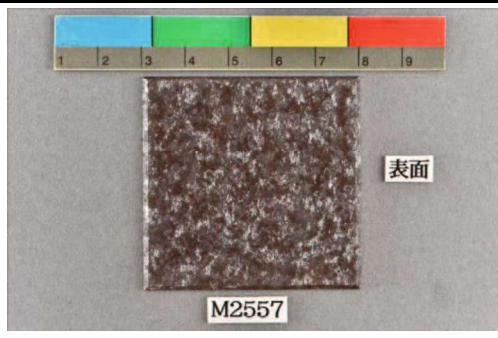
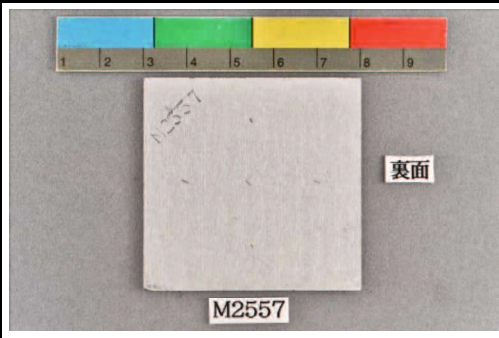
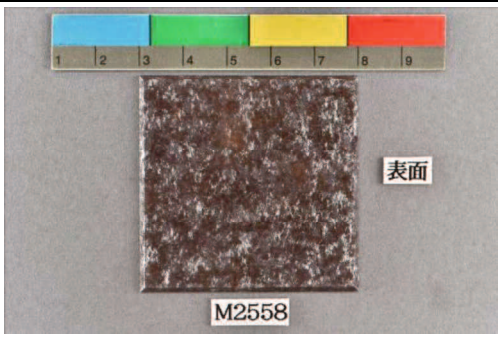
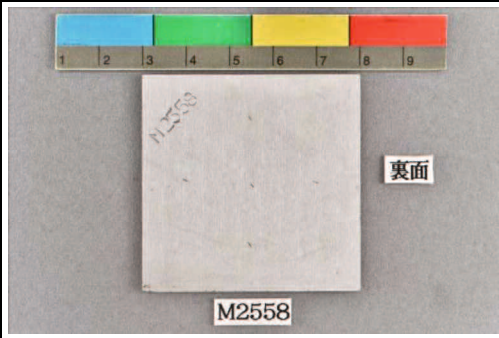
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [2年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	2年材(2015. 8. 27~2017. 11. 16)	
材質		JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		M2555	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	0		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号		M2556	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	0		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢		〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		M2553	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	40		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	24		
試験片番号		M2554	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	23		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	17		

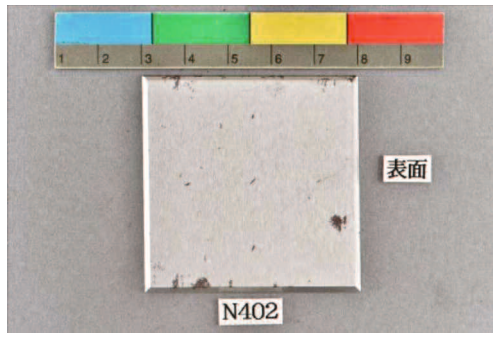
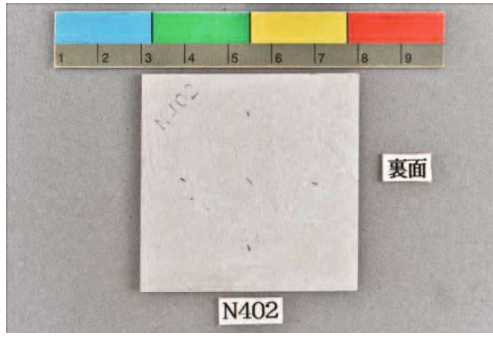
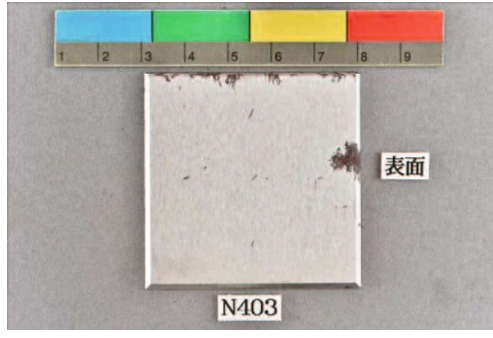
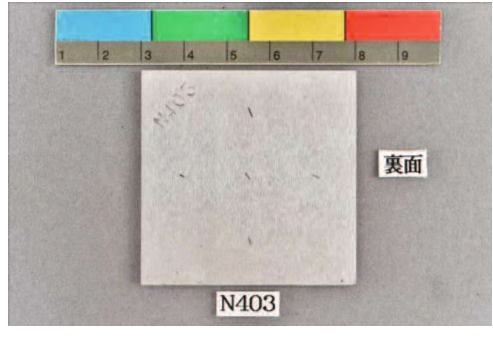
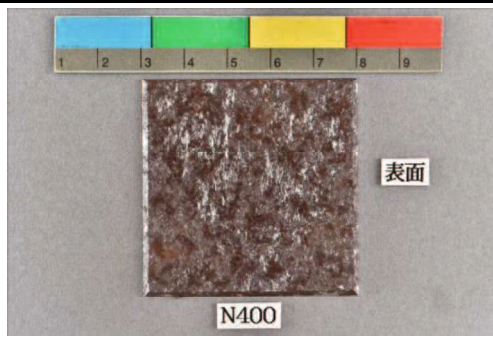
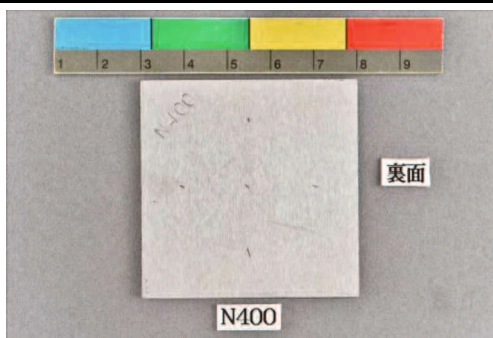
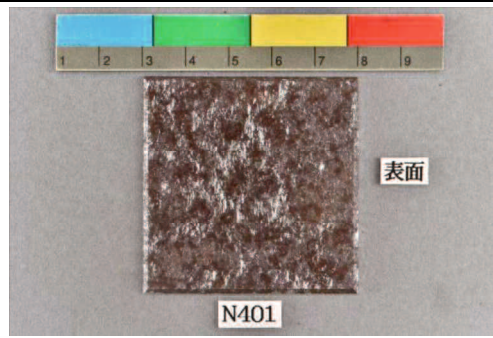
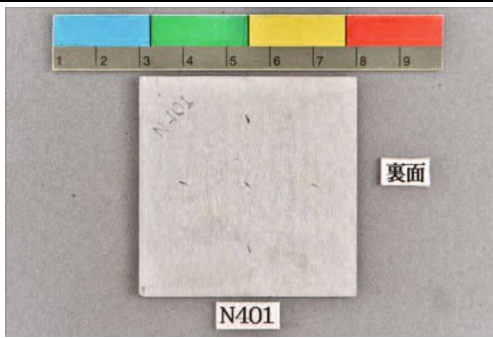
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [2年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	2年材(2015. 8. 27~2017. 11. 16)	
材質		3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N398	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	0		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号		N399	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	0		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢		〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N396	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	23		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	10		
試験片番号		N397	
曝露写真			
[付着塩分量(mg/m ²)]	22		
[腐食減耗量(mm)]	0.002		
[平均さび厚(μm)]	10		

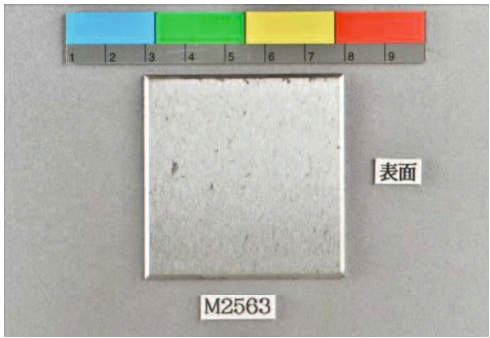
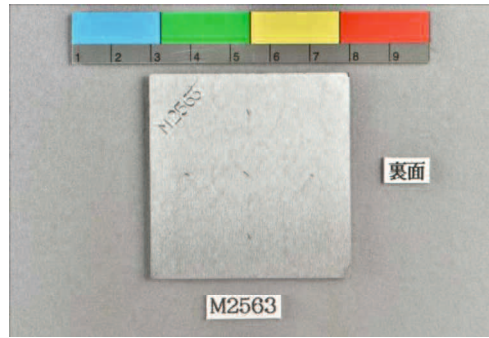
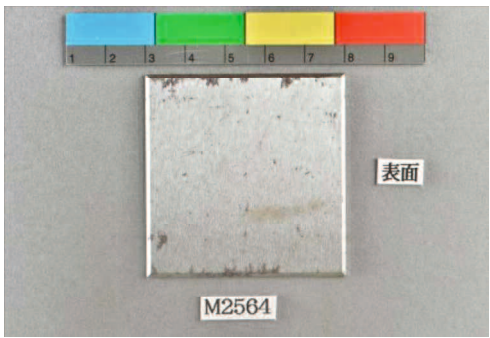
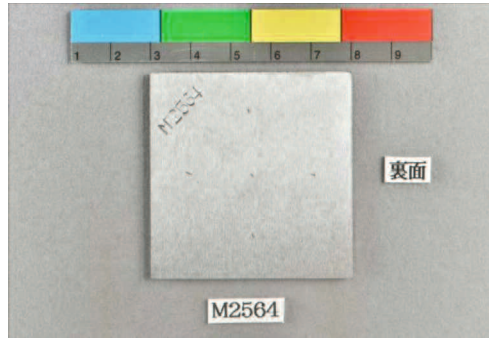
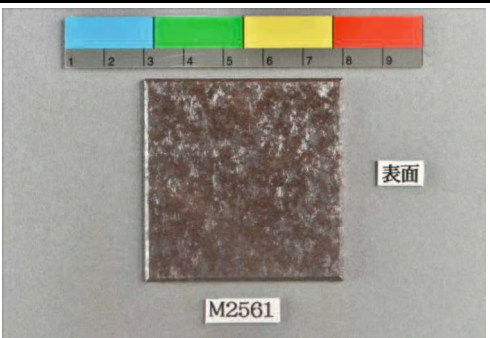
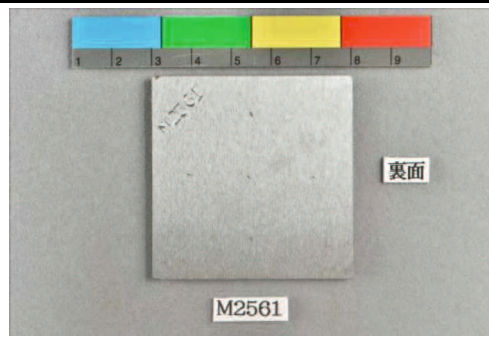
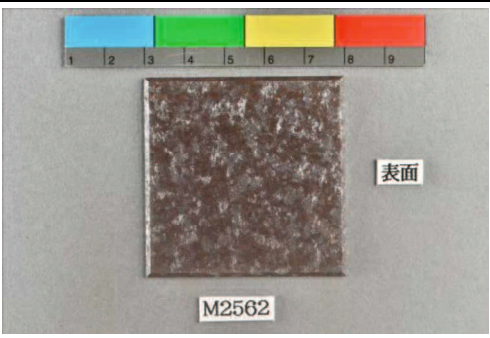
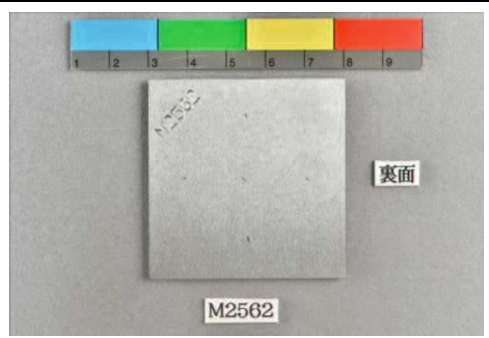
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [3年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	3年材(2015. 8. 27~2018. 11. 22)	
材質	—	JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2559	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	0		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号	—	M2560	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	7		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2557	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	31		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	21		
試験片番号	—	M2558	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	32		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	30		

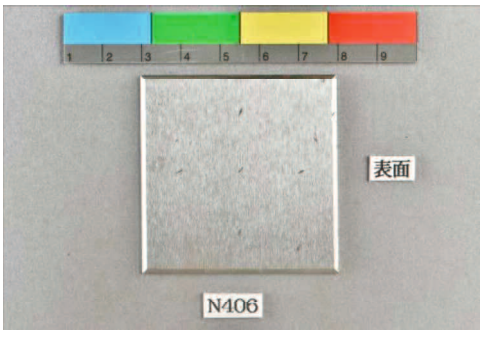
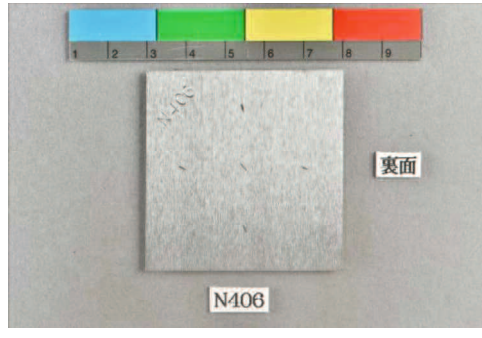
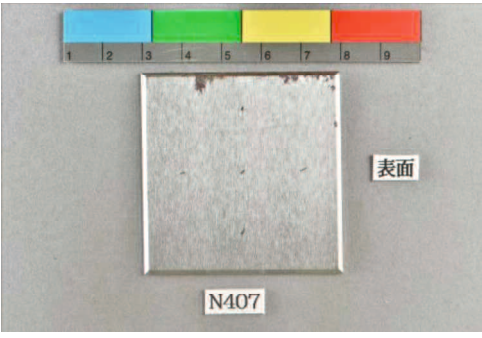
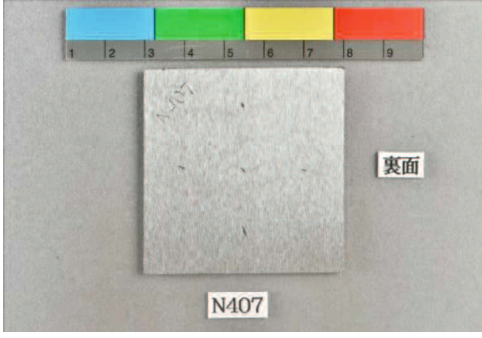
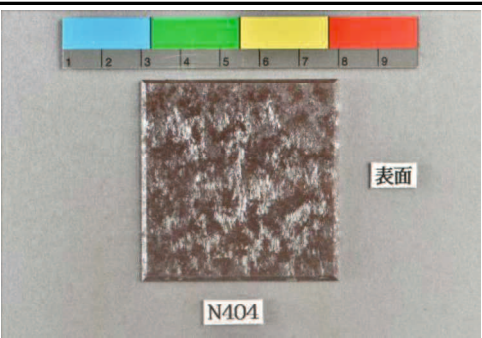
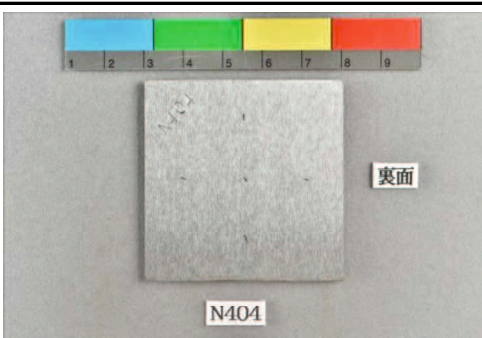
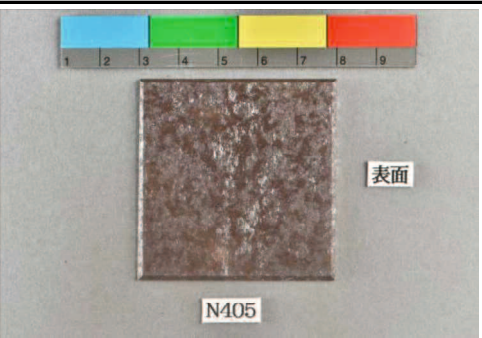
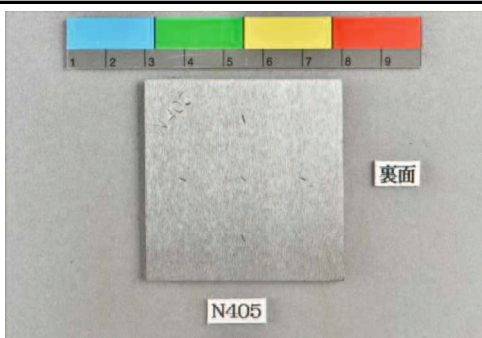
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [3年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	3年材(2015. 8. 27~2018. 11. 22)	
材質		3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N402	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	12		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号		N403	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	10		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N400	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	53		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	17		
試験片番号		N401	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	51		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	26		

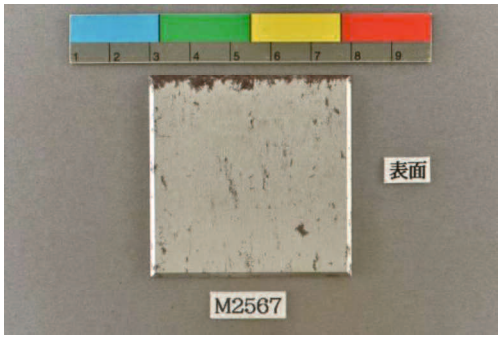
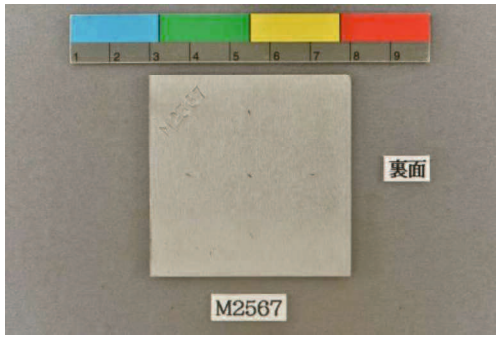
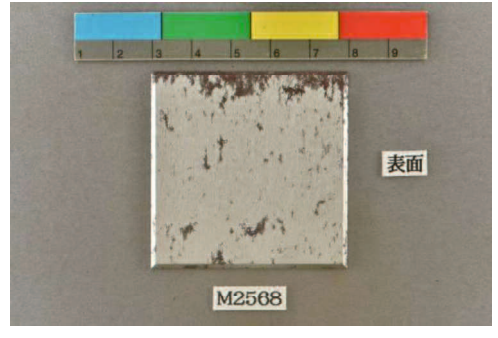
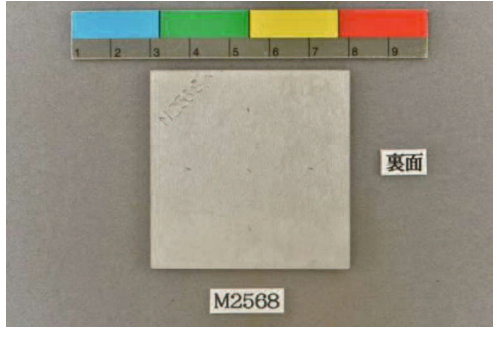
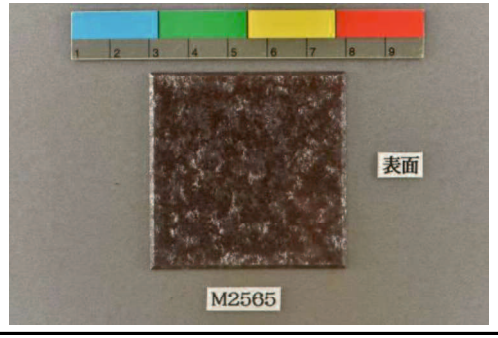
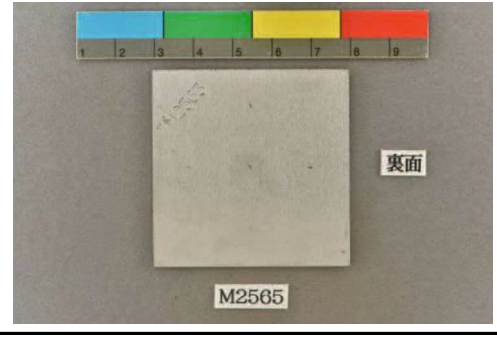
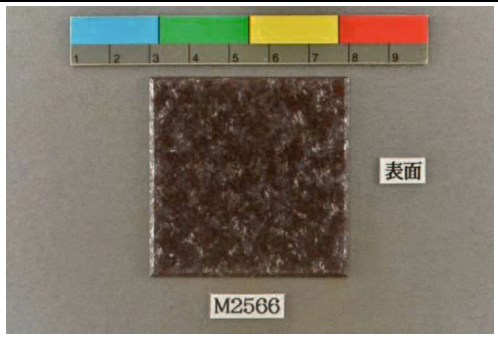
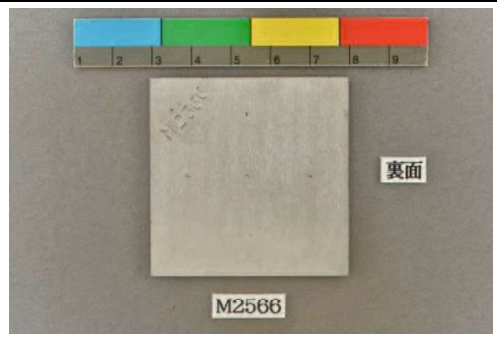
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [4年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	4年材(2015. 8. 27~2019. 11. 14)	
材質	—	JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2563	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	6		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号	—	M2564	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	6		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	1		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2561	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	53		
[腐食減耗量(mm)]	0.004		
[平均さび厚(μm)]	45		
試験片番号	—	M2562	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	52		
[腐食減耗量(mm)]	0.004		
[平均さび厚(μm)]	40		

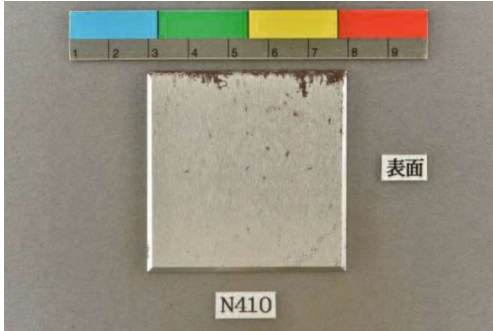
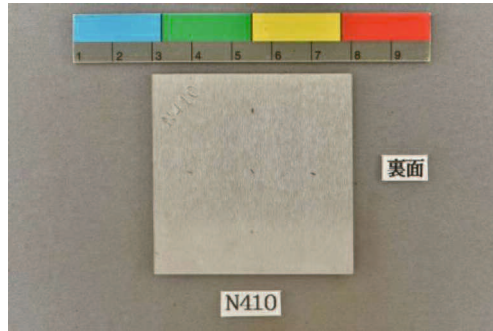
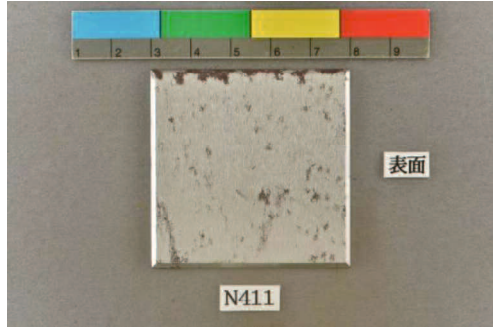
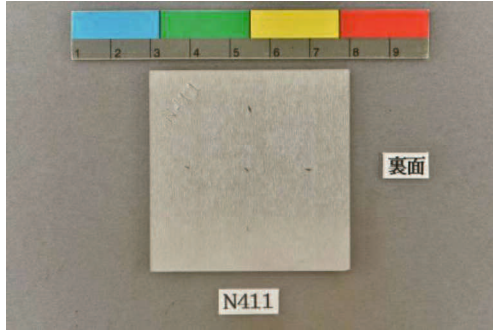
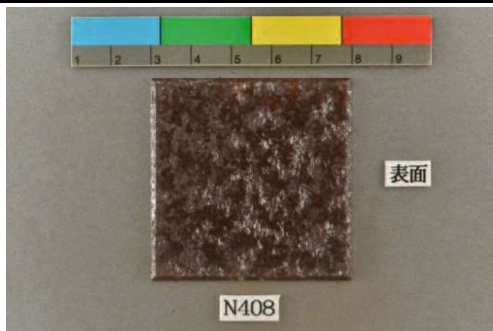
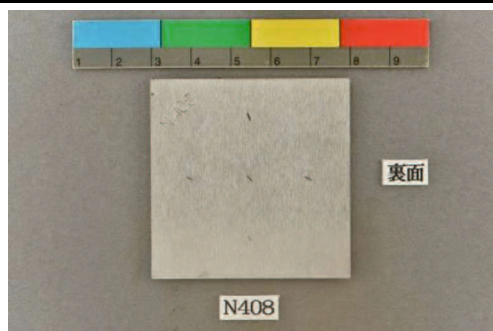
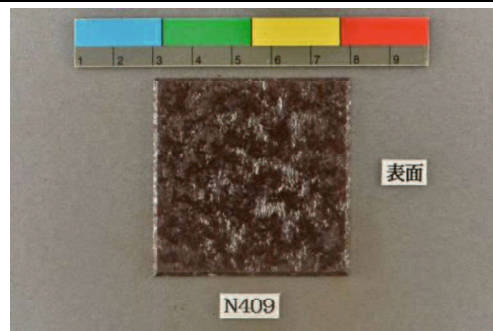
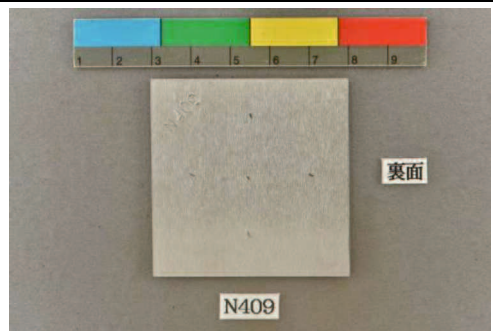
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [4年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	4年材(2015. 8. 27~2019. 11. 14)	
材質	—	3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	N406	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	16		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号	—	N407	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	10		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	N404	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	59		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	21		
試験片番号	—	N405	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	58		
[腐食減耗量(mm)]	0.003		
[平均さび厚(μm)]	24		

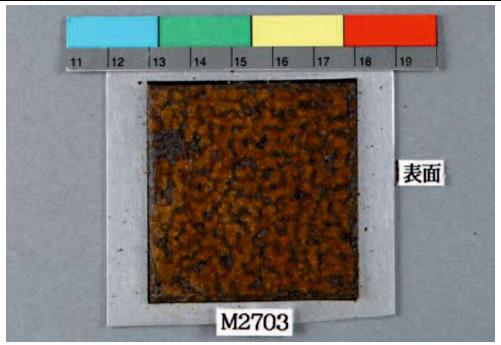
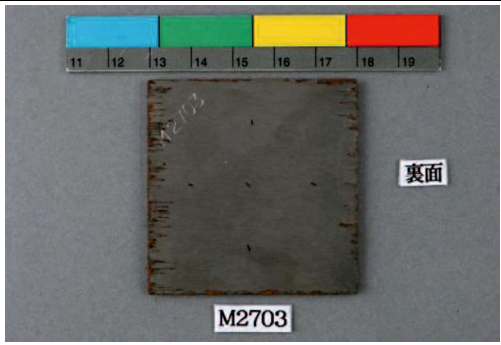
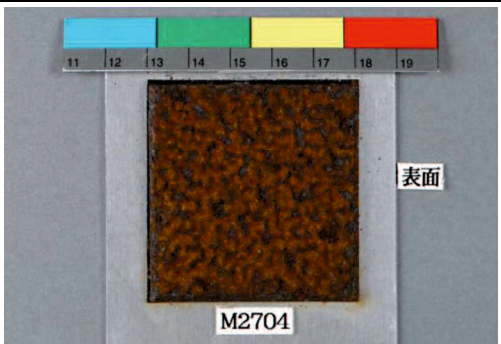
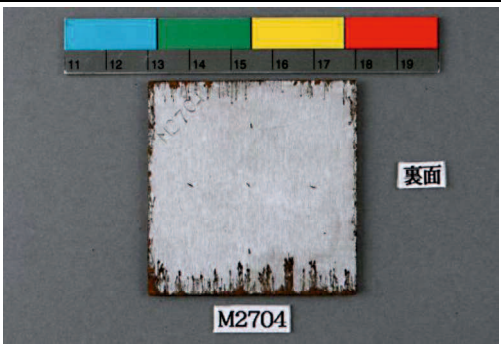
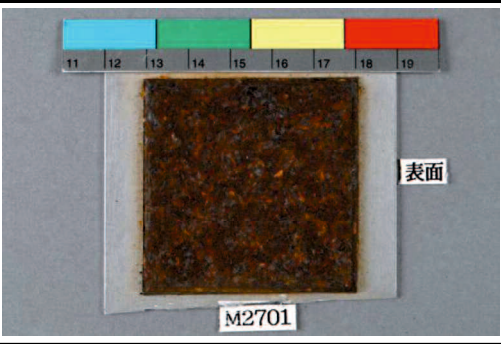
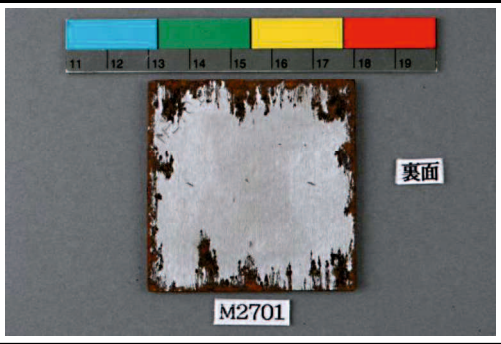
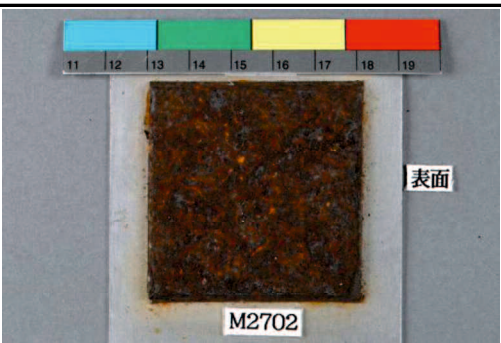
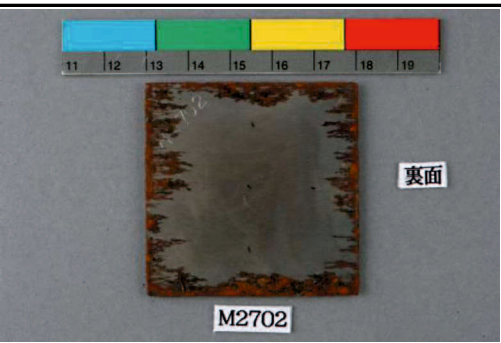
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [5年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	5年材(2015. 8. 27~2020. 11. 25)	
材質	—	JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2567	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	4		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号	—	M2568	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	4		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2565	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	64		
[腐食減耗量(mm)]	0.005		
[平均さび厚(μm)]	41		
試験片番号	—	M2566	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	68		
[腐食減耗量(mm)]	0.005		
[平均さび厚(μm)]	30		

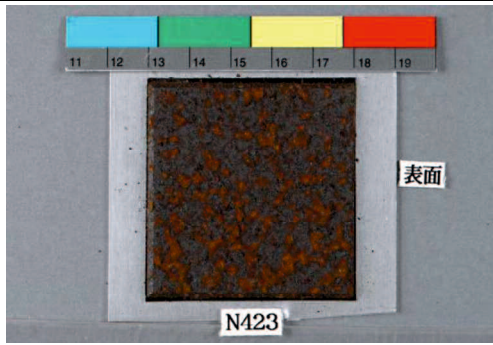
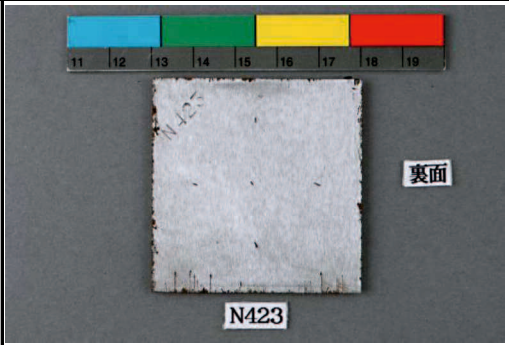
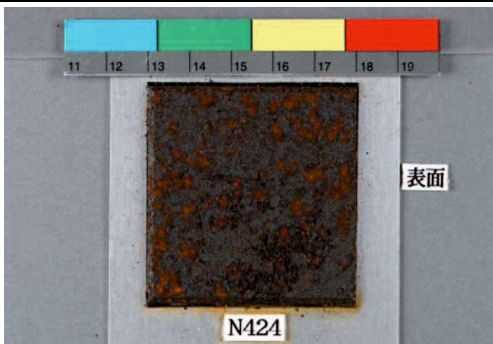

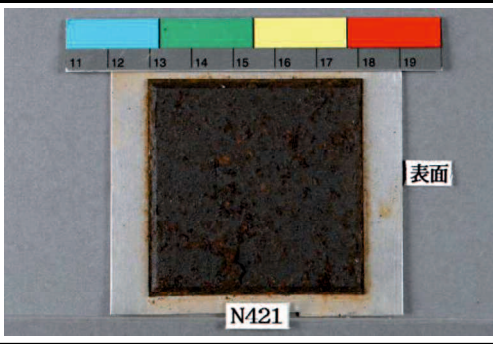
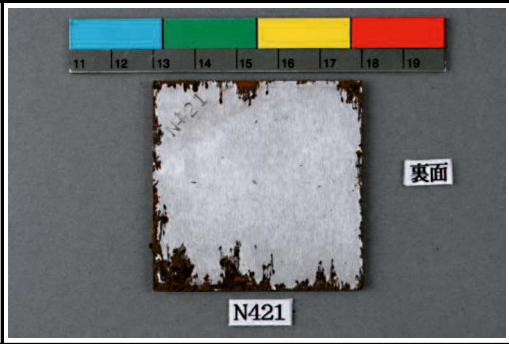
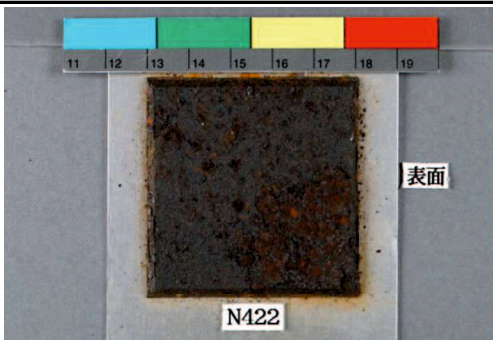
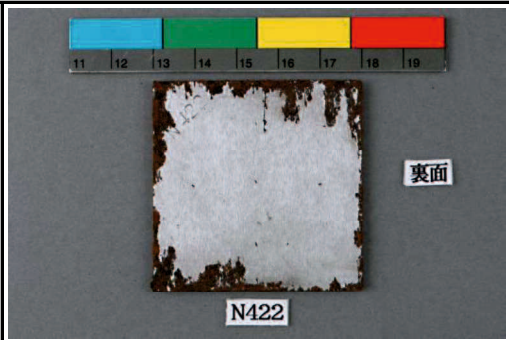
【桁内】ワッペン試験片評価結果 [5年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	5年材(2015. 8. 27~2020. 11. 25)	
材質	—	3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	N410	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	6		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
試験片番号	—	N411	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	6		
[腐食減耗量(mm)]	0		
[平均さび厚(μm)]	0		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	N408	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	71		
[腐食減耗量(mm)]	0.005		
[平均さび厚(μm)]	20		
試験片番号	—	N409	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	80		
[腐食減耗量(mm)]	0.005		
[平均さび厚(μm)]	24		

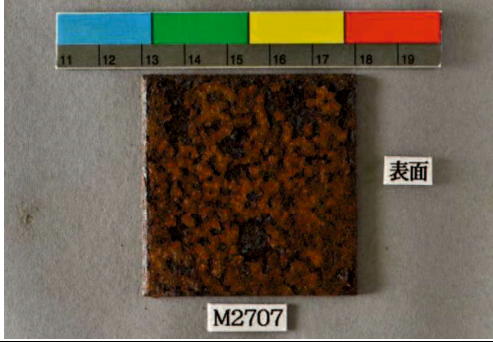
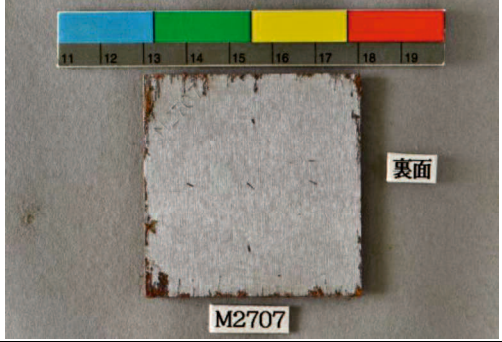
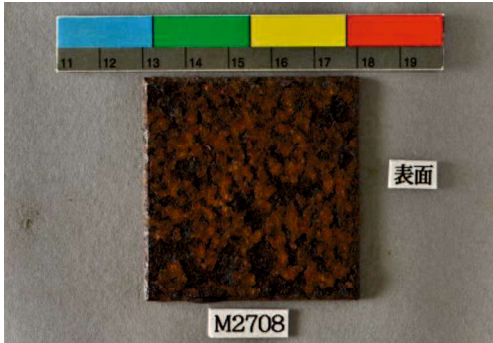
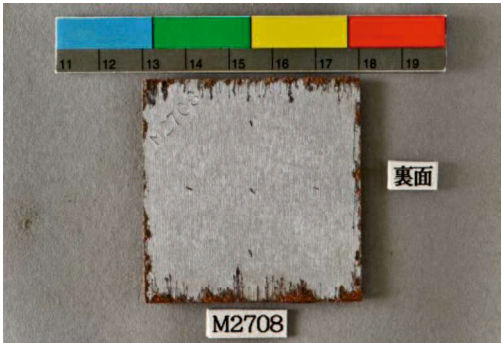




【桁外】ワッペン試験片評価結果 [1年材] JIS-SMA

曝露期間	計測値	1年材(2016. 6. 13~2017. 6. 22)	
材質		JIS-SMA	
曝露姿勢		〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		M2703	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	256		
[腐食減耗量(mm)]	0.036		
[平均さび厚(μm)]	186		
試験片番号		M2704	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	235		
[腐食減耗量(mm)]	0.038		
[平均さび厚(μm)]	187		
曝露姿勢		〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		M2701	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	48		
[腐食減耗量(mm)]	0.097		
[平均さび厚(μm)]	389		
試験片番号		M2702	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	162		
[腐食減耗量(mm)]	0.102		
[平均さび厚(μm)]	389		

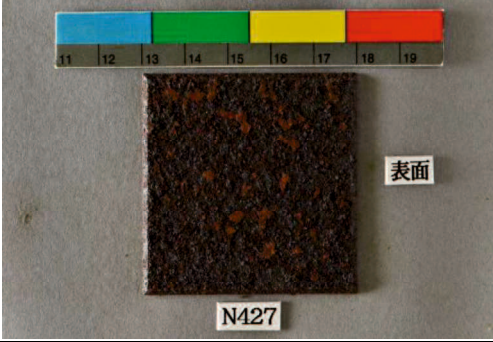

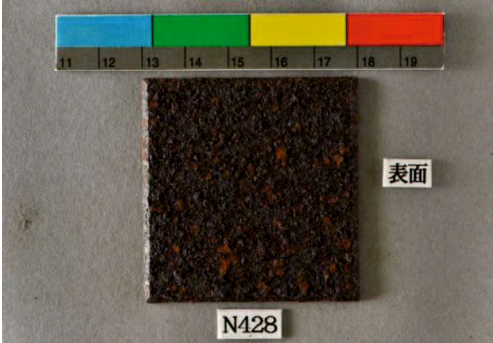
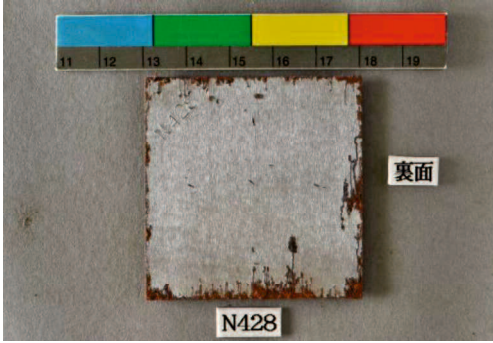
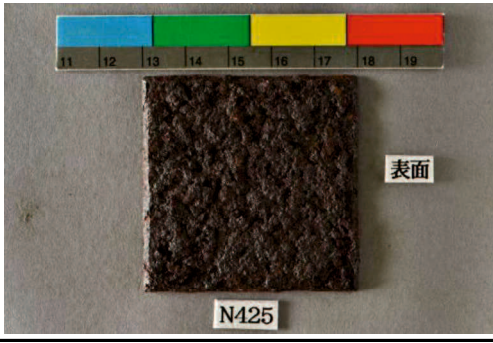
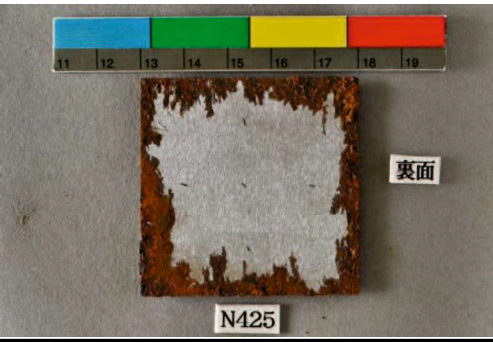
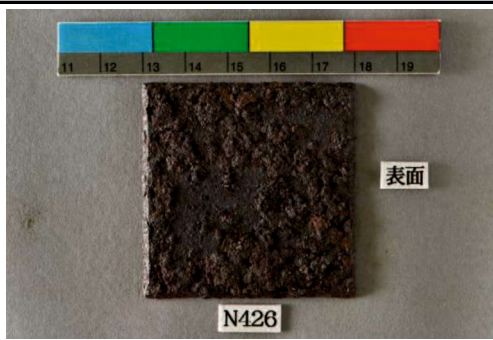
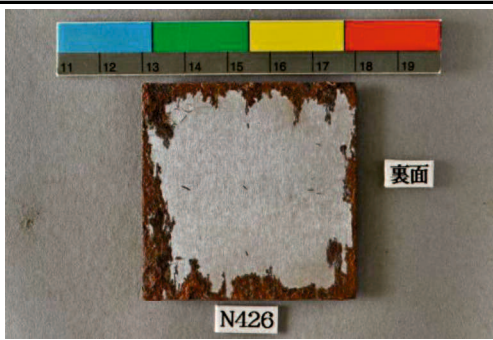
【桁外】ワッペン試験片評価結果 [1年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	1年材(2016. 6. 13~2017. 6. 22)	
材質		3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N423	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	227		
[腐食減耗量(mm)]	0.029		
[平均さび厚(μm)]	115		
試験片番号		N424	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	363		
[腐食減耗量(mm)]	0.035		
[平均さび厚(μm)]	122		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N421	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	240		
[腐食減耗量(mm)]	0.064		
[平均さび厚(μm)]	82		
試験片番号		N422	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	353		
[腐食減耗量(mm)]	0.068		
[平均さび厚(μm)]	209		

【桁外】ワッペン試験片評価結果 [2年材] JIS-SMA

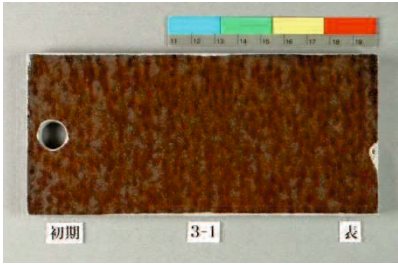
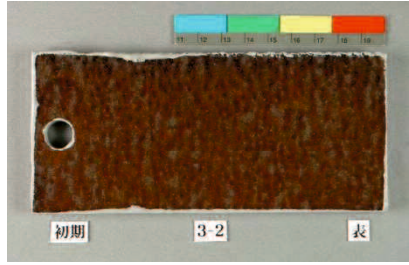
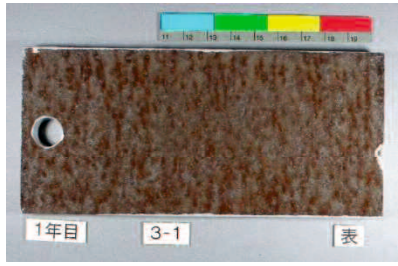

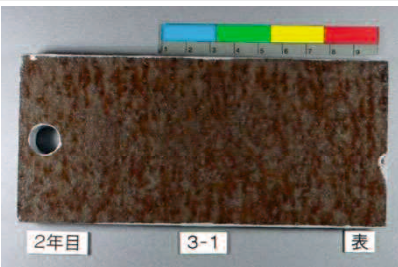
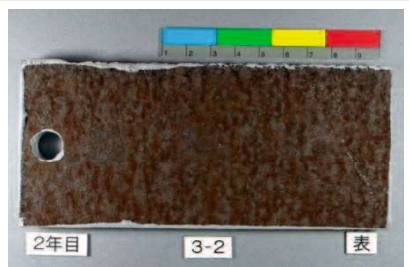
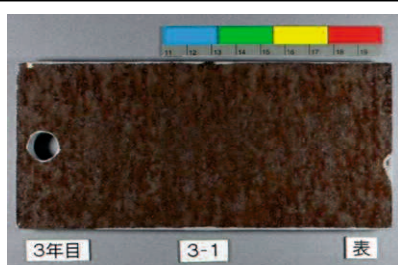
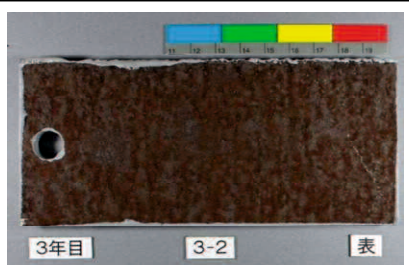
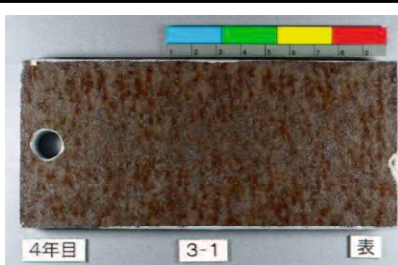
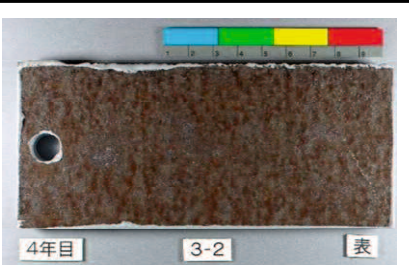
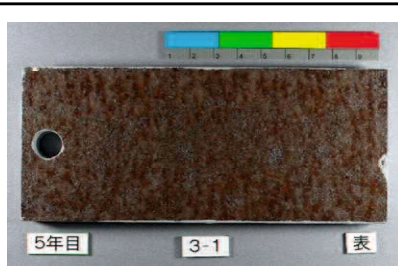
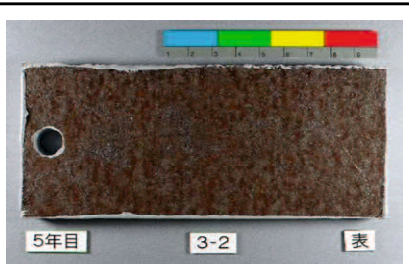
曝露期間	計測値	2年材(2016. 6. 13~2018. 6. 14)	
材質	—	JIS-SMA	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2707	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	132		
[腐食減耗量(mm)]	0.045		
[平均さび厚(μm)]	187		
試験片番号	—	M2708	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	171		
[腐食減耗量(mm)]	0.052		
[平均さび厚(μm)]	193		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面	—	表面	裏面
試験片番号	—	M2705	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	368		
[腐食減耗量(mm)]	0.149		
[平均さび厚(μm)]	586		
試験片番号	—	M2706	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	332		
[腐食減耗量(mm)]	0.187		
[平均さび厚(μm)]	488		

【桁外】ワッペン試験片評価結果 [2年材] 3%Ni

曝露期間	計測値	2年材(2016. 6. 13~2018. 6. 14)	
材質		3%Ni	
曝露姿勢	—	〈垂直〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N427	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	135		
[腐食減耗量(mm)]	0.041		
[平均さび厚(μm)]	167		
試験片番号		N428	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	137		
[腐食減耗量(mm)]	0.047		
[平均さび厚(μm)]	149		
曝露姿勢	—	〈水平〉	
表面 / 裏面		表面	裏面
試験片番号		N425	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	556		
[腐食減耗量(mm)]	0.114		
[平均さび厚(μm)]	439		
試験片番号		N426	
曝露写真	—		
[付着塩分量(mg/m ²)]	379		
[腐食減耗量(mm)]	0.103		
[平均さび厚(μm)]	255		

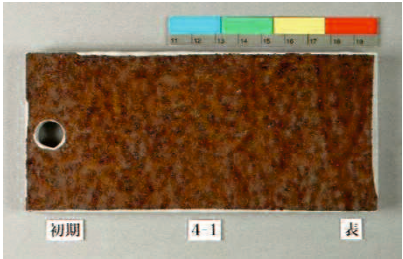
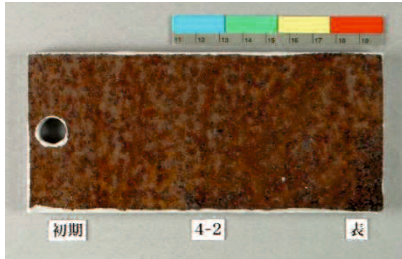
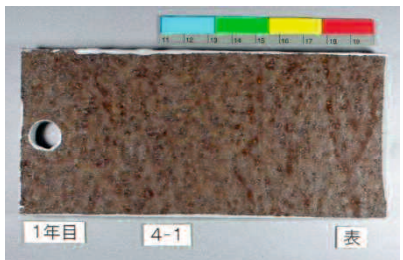
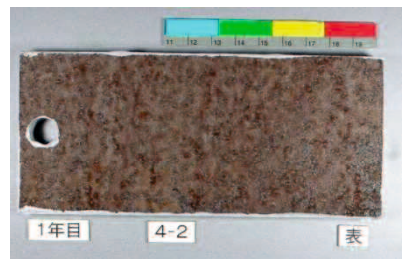
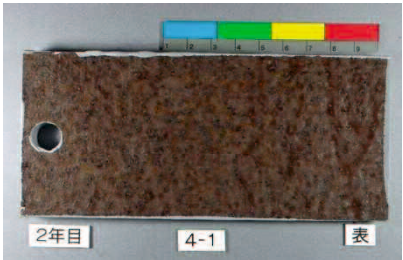
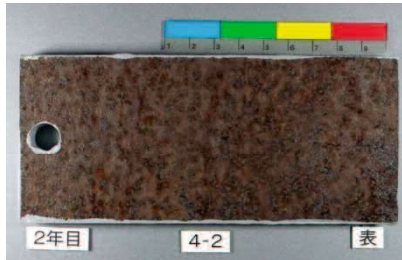
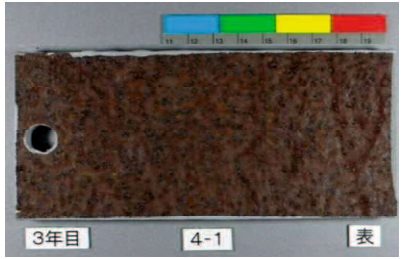
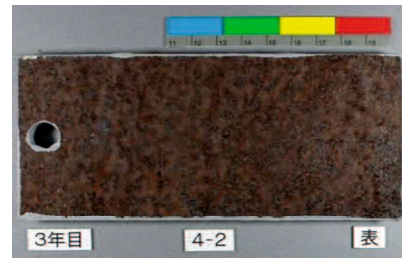
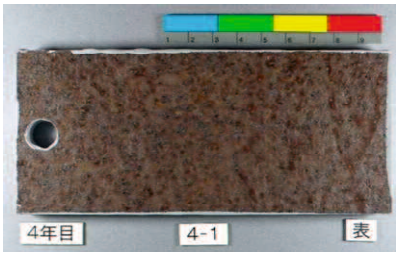
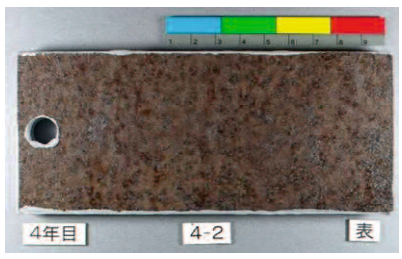
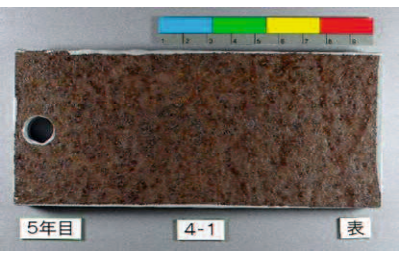
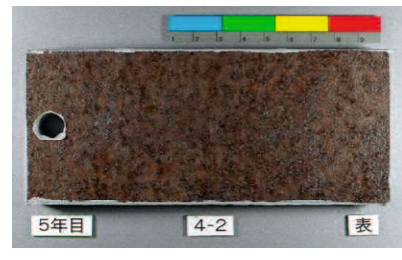
【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準3] 無処理仕様 (さび外観評点5)			水準 3 (さび外観評点5)	
水 準			水 準 3 (さび外観評点5)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
付 着 塩 分 量	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	138 μm		
		129 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	5.4 mg/m^2		
		7.6 mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	125 μm		
		126 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	118 μm		
		141 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	122 μm		
		137 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	124 μm		
		142 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	130 μm		
		144 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

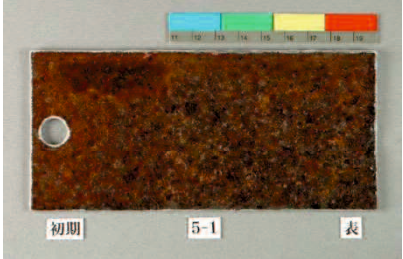
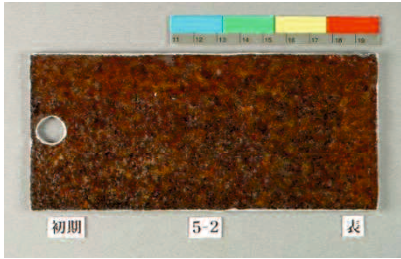
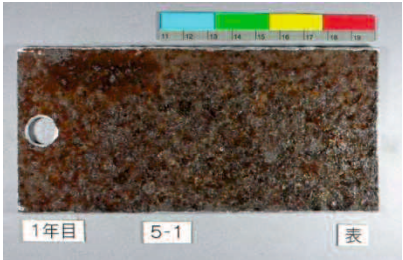
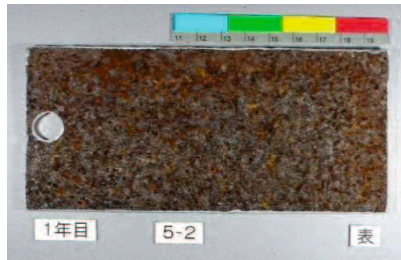
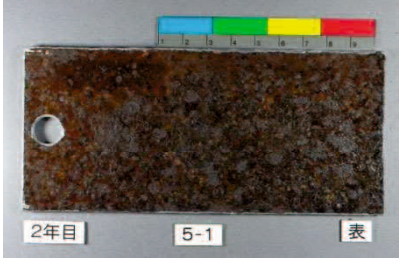
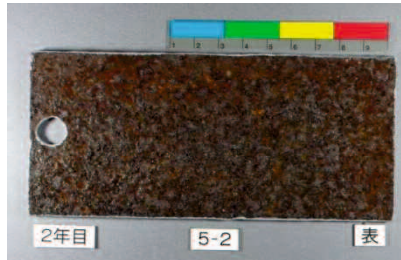

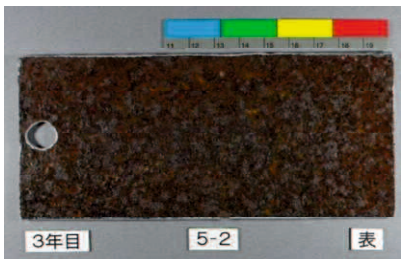
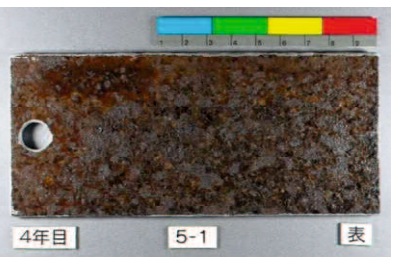
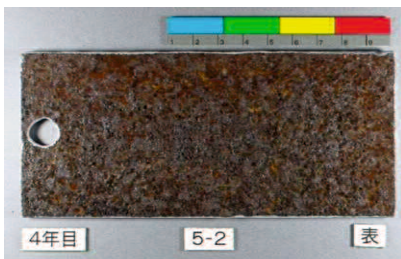


【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準4] 無処理仕様 (さび外観評点4)			水準 4 (さび外観評点4)	
水 準			水 準 4 (さび外観評点4)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
付 着 塩 分 量	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	130 μm		
		124 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	7.0 mg/m^2		
		6.5 mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	136 μm		
		121 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	134 μm		
		120 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	133 μm		
		126 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	136 μm		
		126 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	142 μm		
		135 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準5] 無処理仕様 (さび外観評点3)			水準 5 (さび外観評点3)	
水 準			水 準 5 (さび外観評点3)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
付 着 塩 分 量	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	245 μm		
		258 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	47.8 mg/m^2		
		49.2 mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	273 μm		
		263 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	231 μm		
		334 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	267 μm		
		381 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	286 μm		
		383 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	238 μm		
		283 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

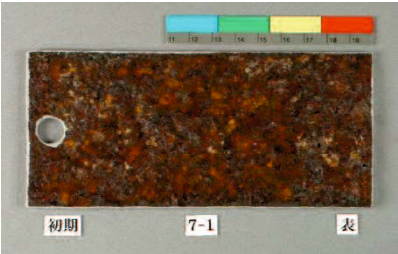
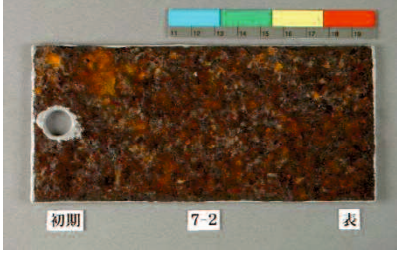
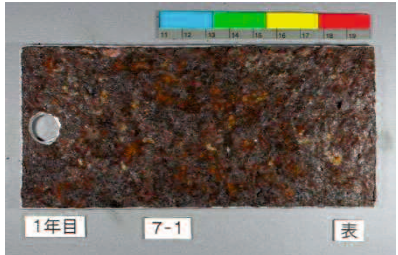
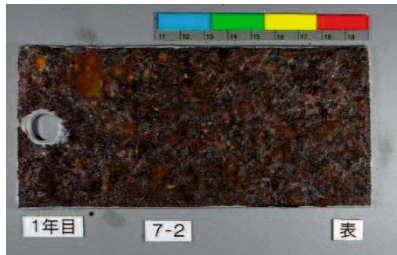

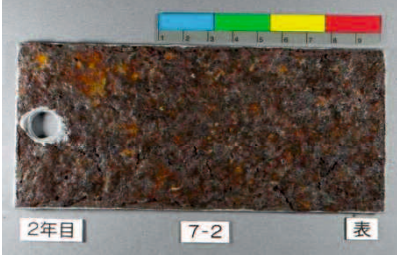
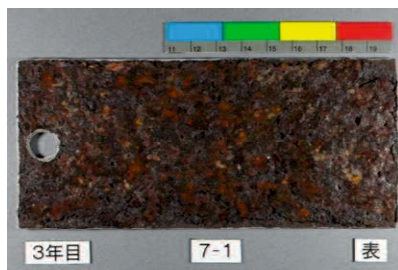


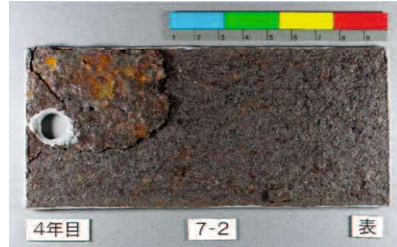


【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準6] 無処理仕様 (さび外観評点2)			水準 6 (さび外観評点2)	
水 準			水 準 6 (さび外観評点2)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
付 着 塩 分 量	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	499 μm	<p>初期 6-1 表</p>	<p>初期 6-2 表</p>
		487 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	381 mg/m^2		
		99.6 mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	817 μm	<p>1年目 6-1 表</p>	<p>1年目 6-2 表</p>
		664 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	880 μm	<p>2年目 6-1 表</p>	<p>2年目 6-2 表</p>
		720 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	999 μm	<p>3年目 6-1 表</p>	<p>3年目 6-2 表</p>
		792 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	1,024 μm	<p>4年目 6-1 表</p>	<p>4年目 6-2 表</p>
		791 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	1,072 μm	<p>5年目 6-1 表</p>	<p>5年目 6-2 表</p>
		809 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

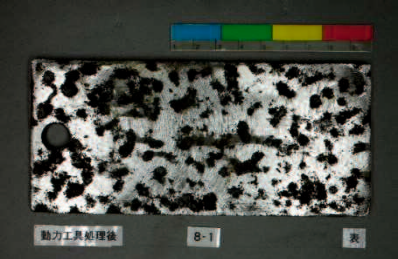
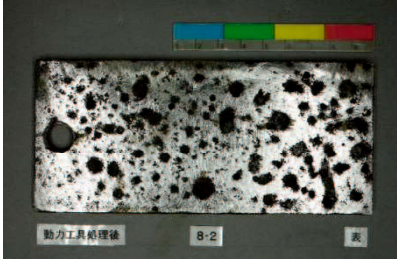

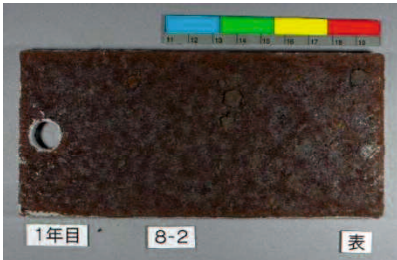
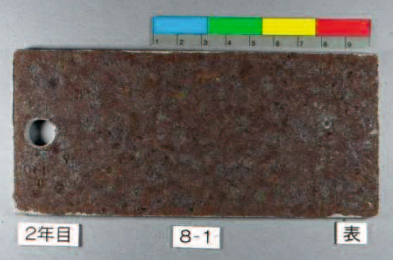
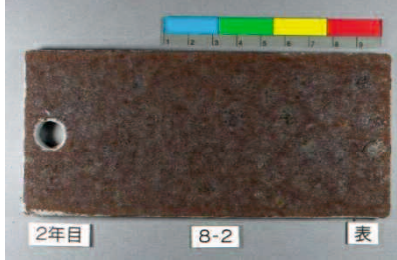
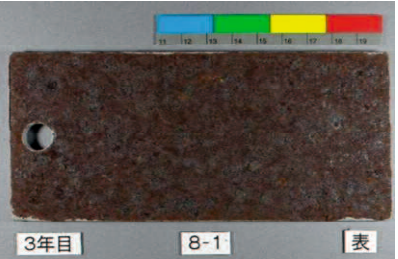
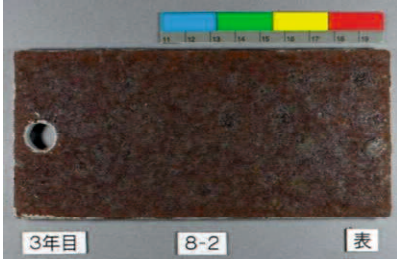
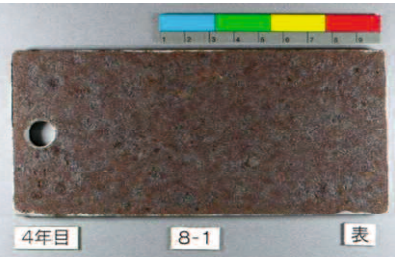
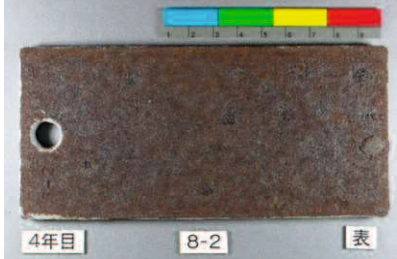
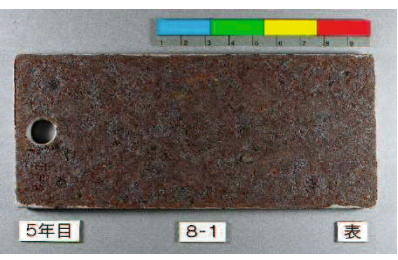
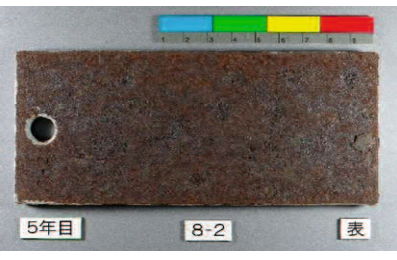
【桁内】 小型試験体評価結果

3%Ni

[水準7] 無処理仕様 (さび外観評点2)			水準 7 (さび外観評点2)	
水 準			水 準 7 (さび外観評点2)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
付 着 塩 分 量	素地調整前		—	—
	素地調整後		—	—
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	569 μm	 <p>初期 7-1 表</p>	 <p>初期 7-2 表</p>
		523 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	973mg/m ²		
		1,201mg/m ²		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	966 μm	 <p>1年目 7-1 表</p>	 <p>1年目 7-2 表</p>
		894 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	1,110 μm	 <p>2年目 7-1 表</p>	 <p>2年目 7-2 表</p>
		973 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	1,200 μm	 <p>3年目 7-1 表</p>	 <p>3年目 7-2 表</p>
		289 μm (さび剥落)		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	1,097 μm (さび剥落)	 <p>4年目 7-1 表</p>	 <p>4年目 7-2 表</p>
		355 μm (さび剥落)		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	208 μm (さび剥落)	 <p>5年目 7-1 表</p>	 <p>5年目 7-2 表</p>
		224 μm (さび剥落)		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m ²		
		mg/m ²		

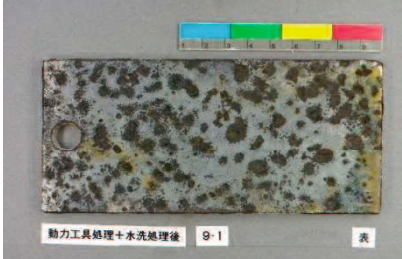
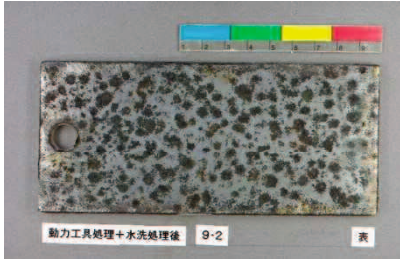
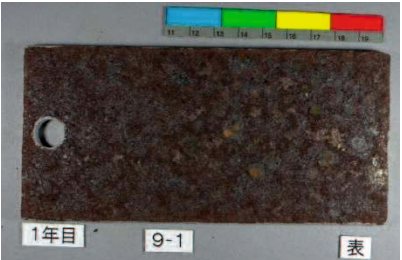
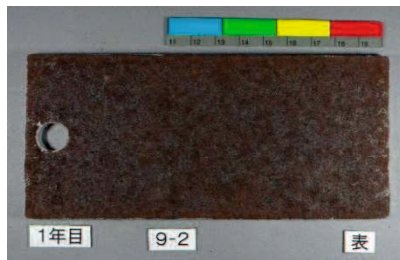
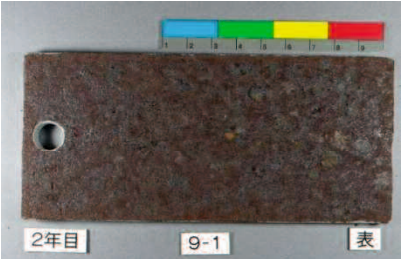
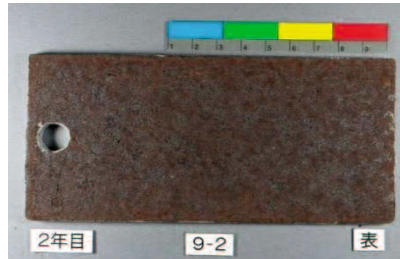
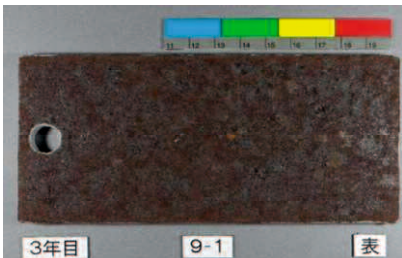
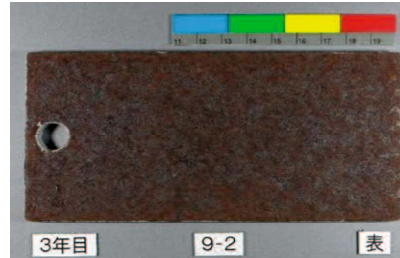
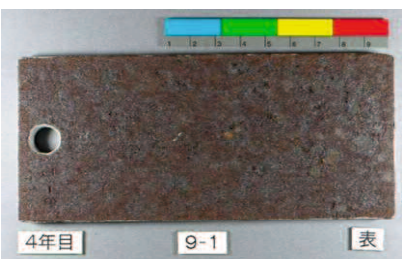

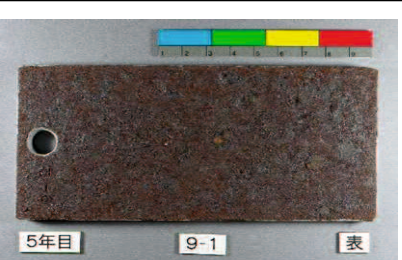
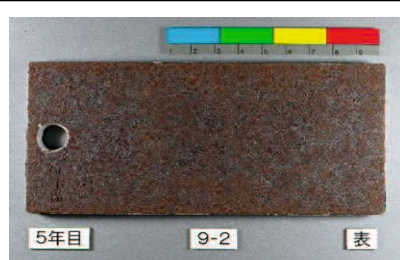
【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準8] 無塗装仕様 (動力工具処理)			水準 8 (動力工具処理)	
水 準			水 準 8 (動力工具処理)	
曝 露 姿 勢			垂 直	水 平
さ び 厚	素地調整前	771 μm	642 μm	
	素地調整後	1 μm	3 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前	1,740 mg/m^2	>1,999 mg/m^2	
	素地調整後	1,193 mg/m^2	1,660 mg/m^2	
初 期	さ び 厚 上段 (垂直)	1 μm		
	下段 (水平)	3 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段 (垂直)	126 μm		
	下段 (水平)	122 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段 (垂直)	113 μm		
	下段 (水平)	121 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段 (垂直)	113 μm		
	下段 (水平)	120 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段 (垂直)	119 μm		
	下段 (水平)	124 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段 (垂直)	127 μm		
	下段 (水平)	150 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (垂直)	mg/m^2		
	下段 (水平)	mg/m^2		

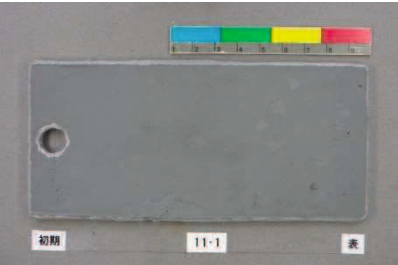
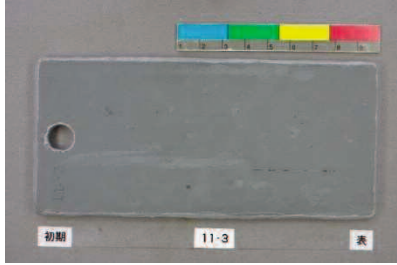
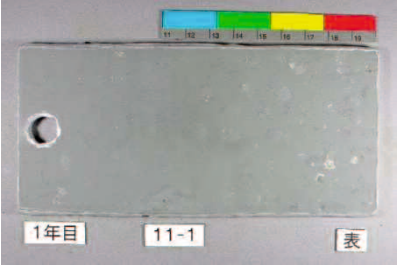
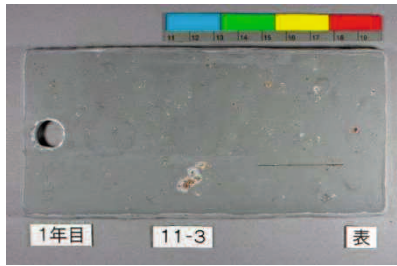
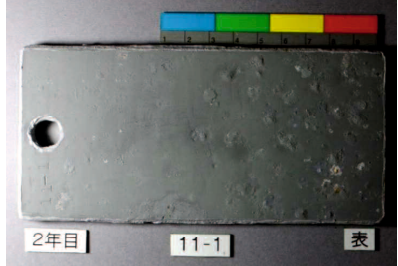
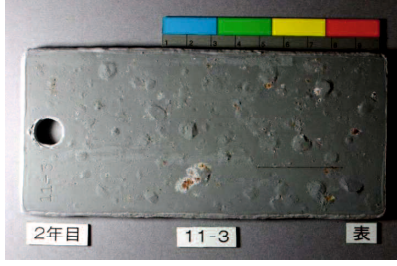
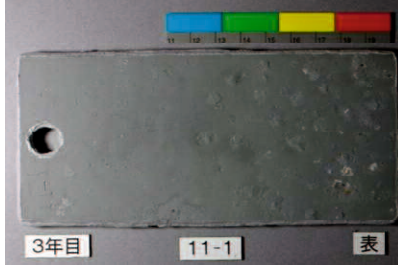
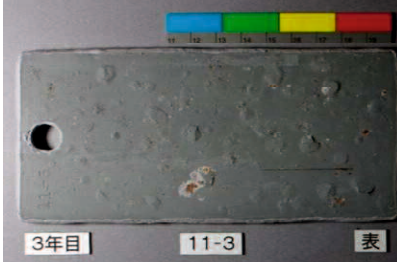
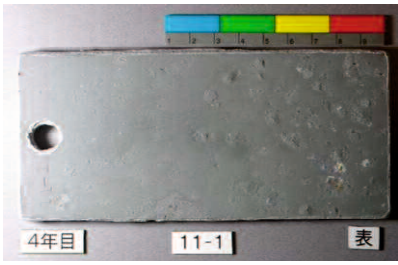
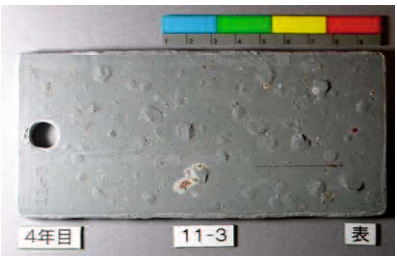


【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準9] 無塗装仕様 (動力工具+水洗処理)			水準 9 (動力工具+水洗処理)	
水 準			垂 直	水 平
曝 露 姿 勢				
さ び 厚	素地調整前	814 μm	672 μm	
	素地調整後	15 μm	5 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前	>1,999 mg/m^2	1,243 mg/m^2	
	素地調整後	760 mg/m^2	885 mg/m^2	
初 期	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	15 μm		
		5 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	118 μm		
		135 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	133 μm		
		133 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	144 μm		
		144 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	144 μm		
		151 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	165 μm		
		173 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈垂直〉 下段〈水平〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

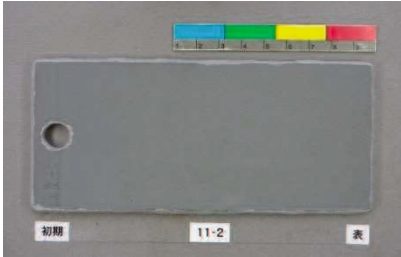
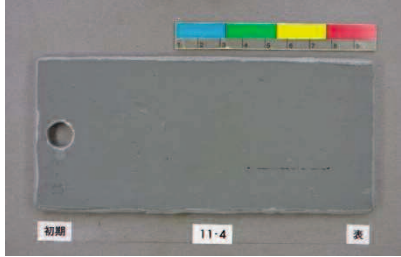
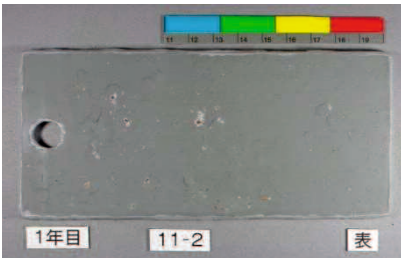
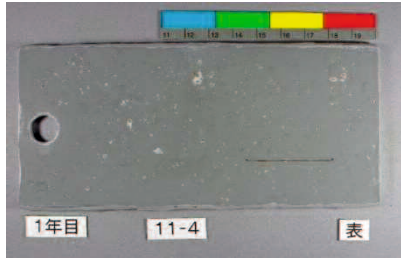

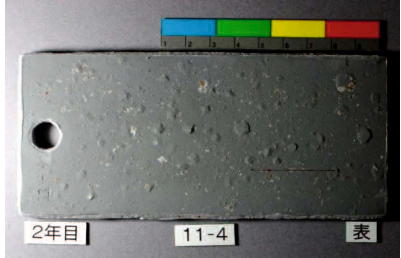
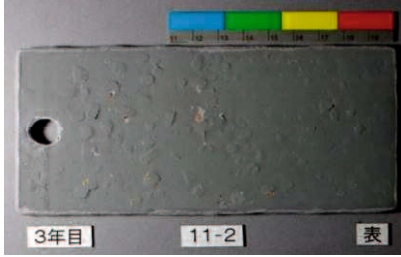
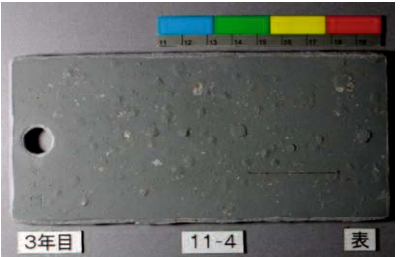
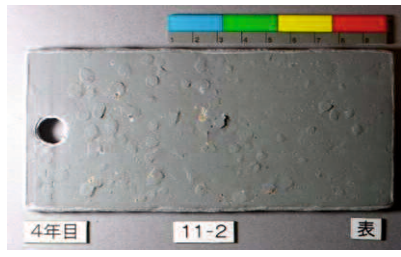
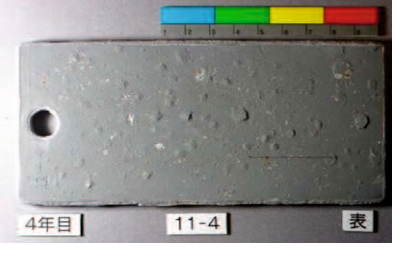
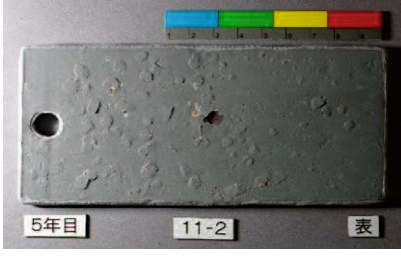

【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準11] 簡易塗装仕様 (有機ジンクリッチペイント) / 垂直			水準 11 (有機ジンクリッチペイント)	
水 準			水 準 11 (有機ジンクリッチペイント)	
曝 露 姿 勢			垂 直 (人工キズなし)	垂 直 (人工キズ有り)
さ び 厚	素地調整前	824 μm		
	素地調整後	2 μm		
付 着 塩 分 量	素地調整前	>1,999 mg/m^2		
	素地調整後	583 mg/m^2		
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	87 μm		
		105 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	89 μm		
		109 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	100 μm		
		227 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	98 μm		
		249 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	100 μm		
		286 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	102 μm		
		279 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

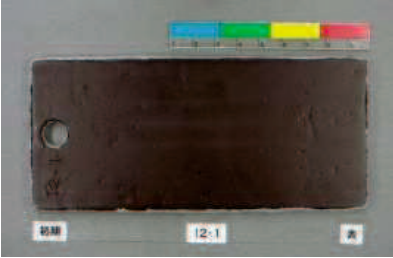
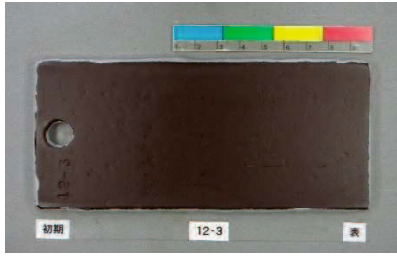
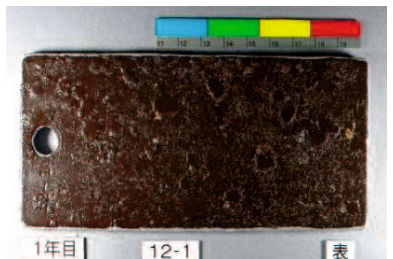

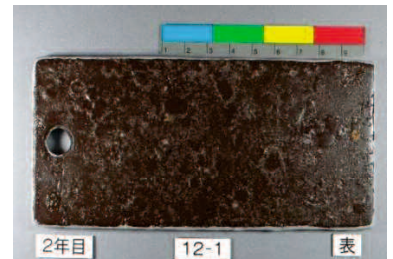
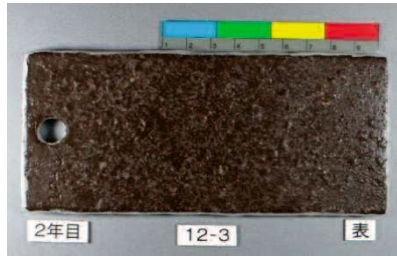
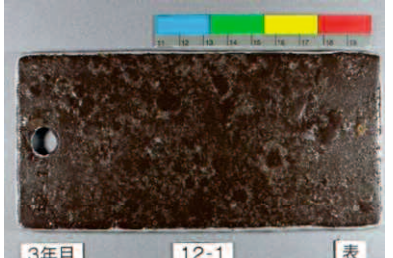
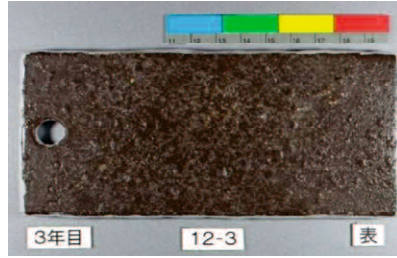

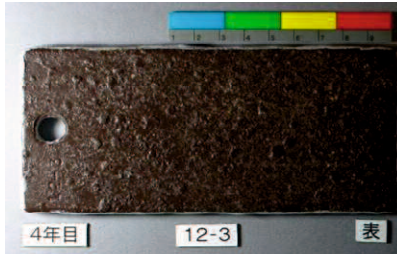


【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準11] 簡易塗装仕様 (有機ジンクリッチペイント) / 水平			水準 11 (有機ジンクリッチペイント)			
水 準			水 準 11 (有機ジンクリッチペイント)			
曝 露 姿 勢			水 平 (人工キズなし)		水 平 (人工キズ有り)	
さ び 厚	素地調整前		636 μm		579 μm	
	素地調整後		0 μm		11 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前		>1,999 mg/m ²		1,948 mg/m ²	
	素地調整後		1,122 mg/m ²		946 mg/m ²	
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	80 μm				
		92 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	83 μm				
		93 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	104 μm				
		105 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	152 μm				
		110 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	148 μm				
		116 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	144 μm				
		147 μm				
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²				
		mg/m ²				

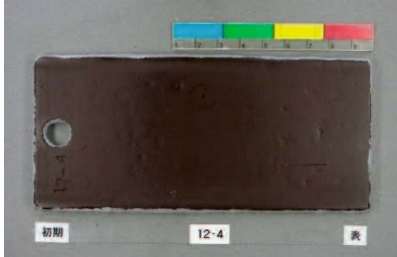

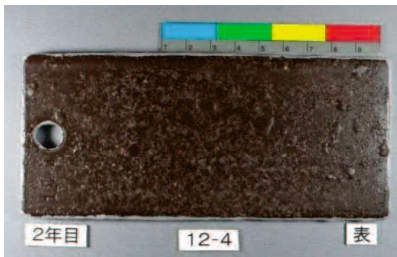
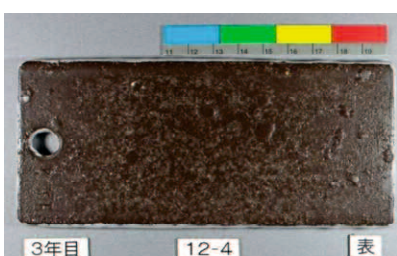


【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

水 準		水 準 12 (さび安定化補助処理)		
曝 露 姿 勢		垂 直 (人工キズなし)	垂 直 (人工キズ有り)	
さ び 厚	素地調整前	664 μm	628 μm	
	素地調整後	16 μm	11 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前	>1,999 mg/m^2	1,656 mg/m^2	
	素地調整後	>1,999 mg/m^2	>1,999 mg/m^2	
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	107 μm		
		113 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	138 μm		
		170 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	160 μm		
		194 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	151 μm		
		184 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	150 μm		
		223 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	159 μm		
		231 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		

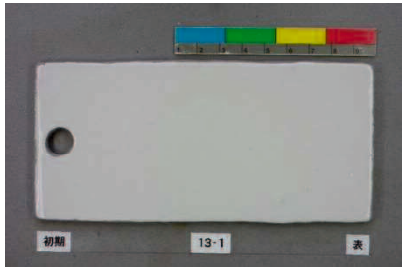
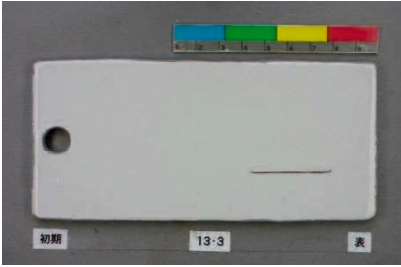

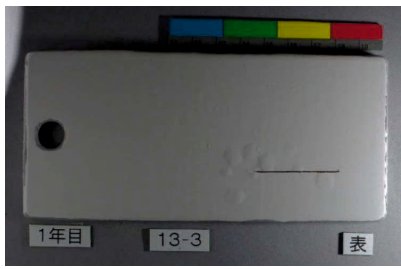
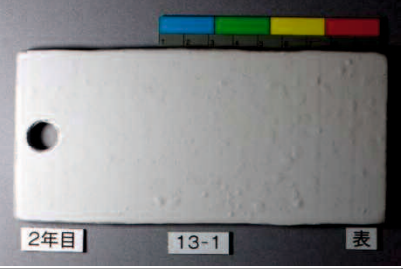
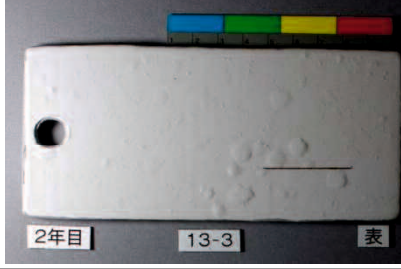
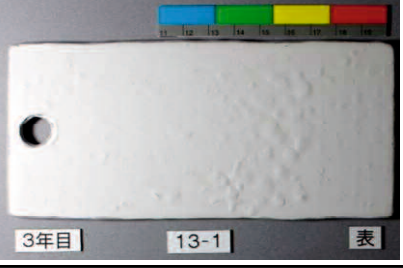
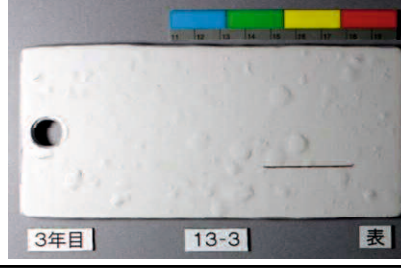
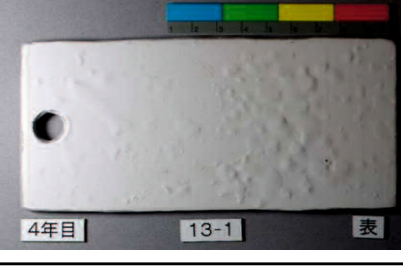
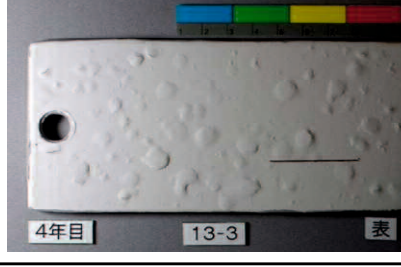




【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準12] 簡易塗装仕様 (さび安定化補助処理) / 水平			水準 12 (さび安定化補助処理)			
水 準			水 準 12 (さび安定化補助処理)			
曝 露 姿 勢			水 平 (人工キズなし)		水 平 (人工キズ有り)	
さ び 厚	素地調整前		794 μ m		585 μ m	
	素地調整後		23 μ m		11 μ m	
付 着 塩 分 量	素地調整前		1,717 mg/m ²		1,828 mg/m ²	
	素地調整後		>1,999 mg/m ²		1,566 mg/m ²	
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		142 μ m			
			117 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		229 μ m			
			159 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		292 μ m			
			178 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		291 μ m			
			172 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		331 μ m			
			239 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉		336 μ m			
			230 μ m			
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉		mg/m ²			
			mg/m ²			

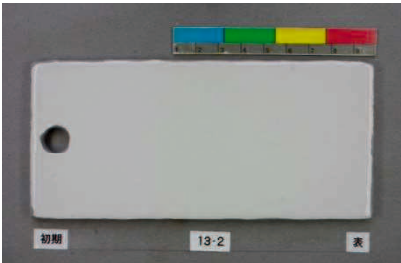
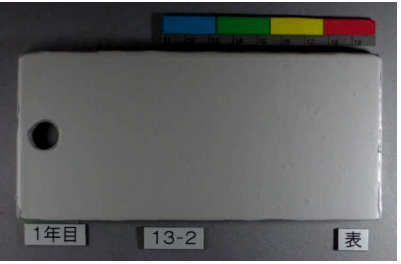
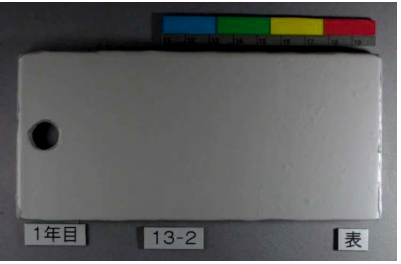
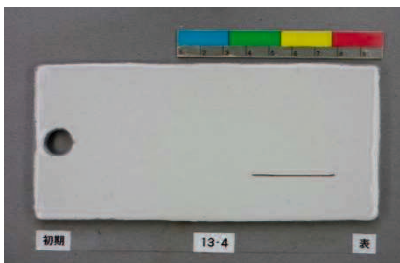
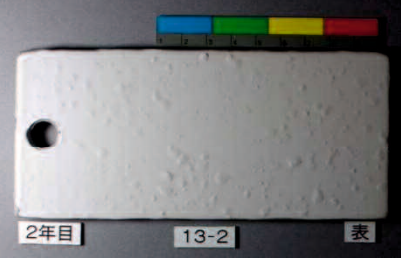

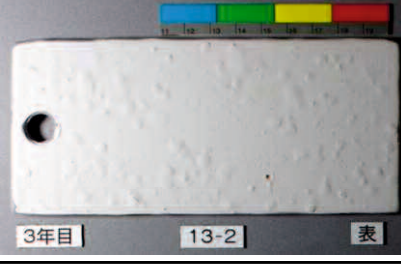
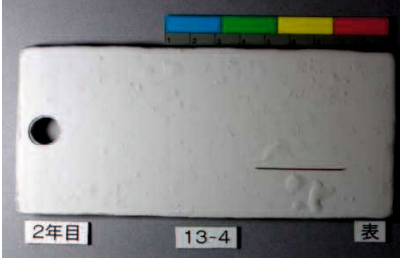
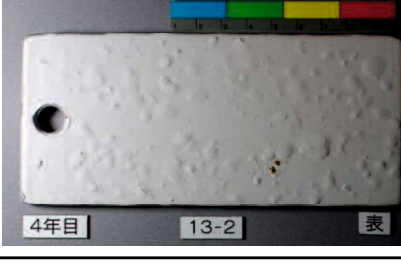
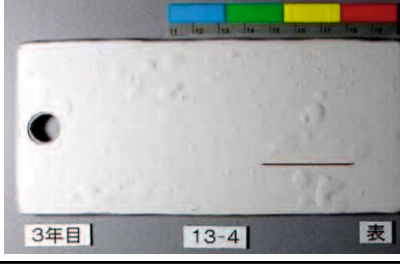
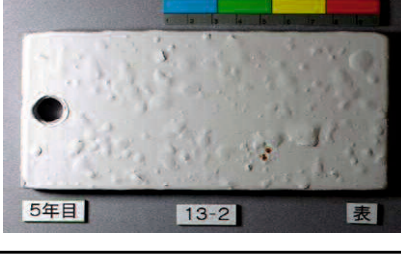

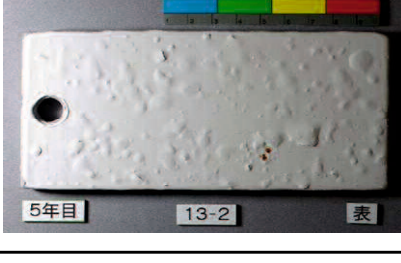

【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準13] 塗り替え塗装仕様 (Rc-II) / 垂直			水 準 13 (Rc-II)	
水 準			水 準 13 (Rc-II)	
曝 露 姿 勢			垂 直 (人工キズなし)	垂 直 (人工キズ有り)
さ び 厚	素地調整前	661 μm		
	素地調整後	3 μm		
付 着 塩 分 量	素地調整前	1,572 mg/m^2	>1,999 mg/m^2	
	素地調整後	1,381 mg/m^2	499 mg/m^2	
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	398 μm		
		301 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	406 μm		
		299 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	3.7 mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	409 μm		
		294 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	0 mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	417 μm		
		301 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	0 mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	449 μm		
		306 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	4.7 mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	482 μm		
		317 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	9.1 mg/m^2		
		mg/m^2		

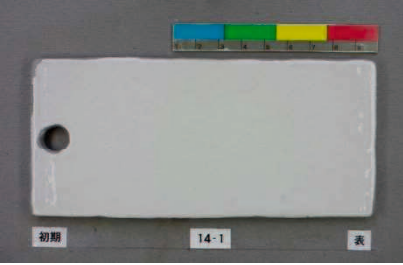
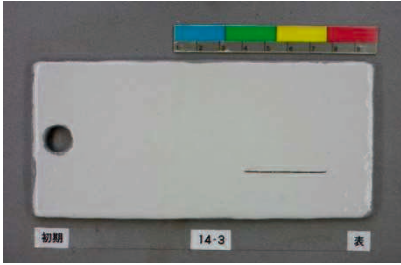
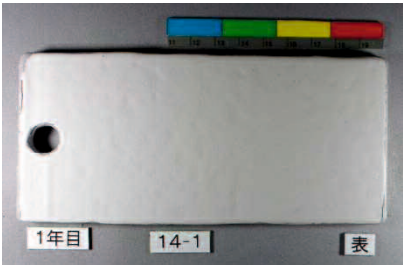
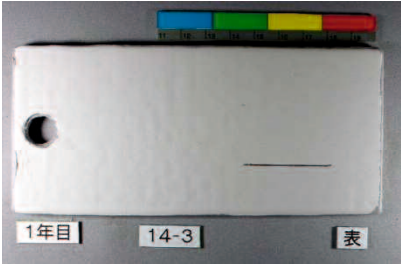
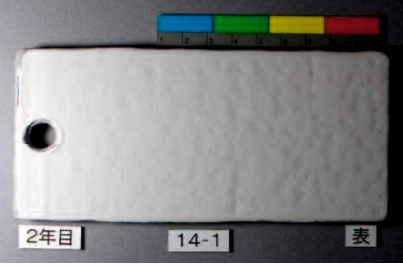
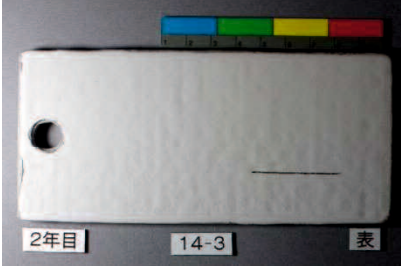
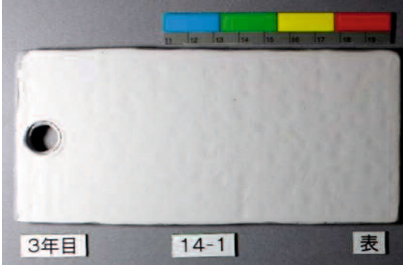
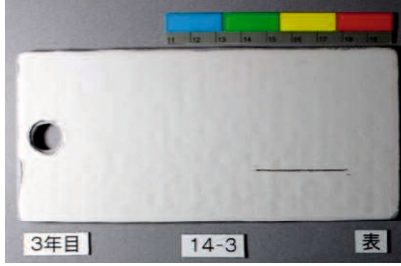
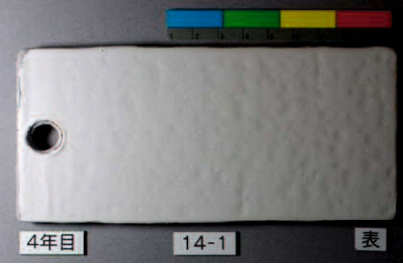
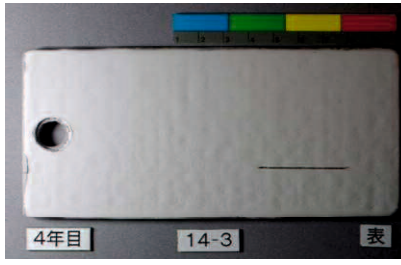
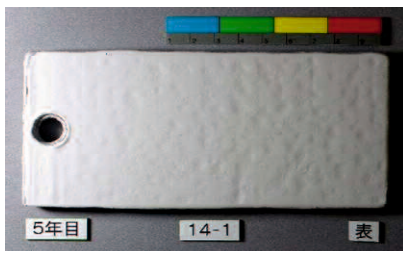
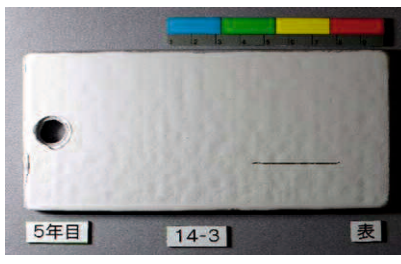
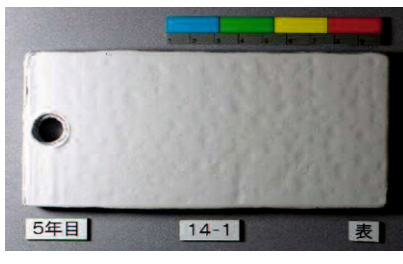
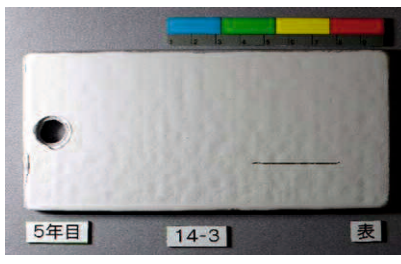
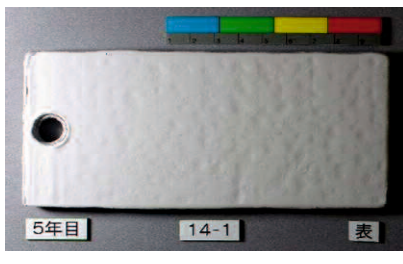
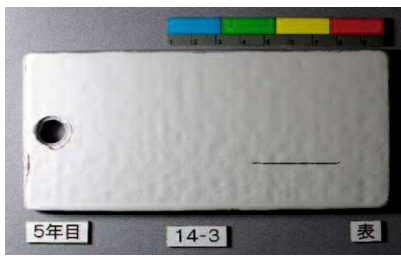
【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準13] 塗り替え塗装仕様 (Rc-II) / 水平			水準 13 (Rc-II)	
水 準			水 準 13 (Rc-II)	
曝 露 姿 勢			水 平 (人工キズなし)	水 平 (人工キズ有り)
さ び 厚	素地調整前	772 μ m		749 μ m
	素地調整後	3 μ m		18 μ m
付 着 塩 分 量	素地調整前	>1,999 mg/m ²		1,826 mg/m ²
	素地調整後	603 mg/m ²		540 mg/m ²
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	316 μ m		
		343 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	317 μ m		
		351 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	12.0mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	326 μ m		
		361 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	4.2mg/m ²		
		mg/m ²		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	339 μ m		
		358 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	21.0mg/m ²		
		mg/m ²		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	347 μ m		
		364 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	47.3mg/m ²		
		mg/m ²		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	346 μ m		
		426 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	57.4mg/m ²		
		mg/m ²		

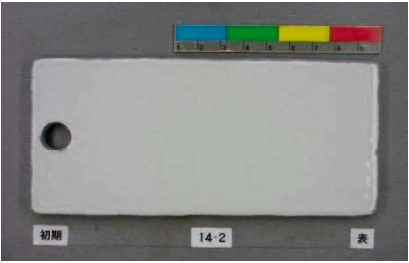


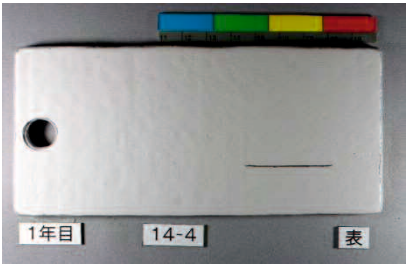
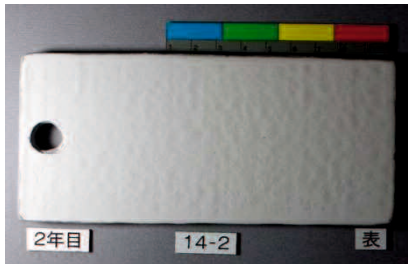
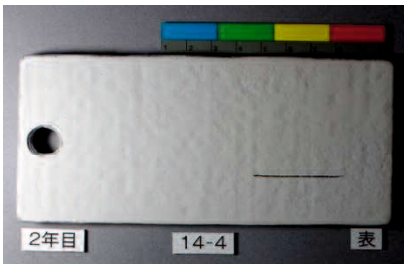
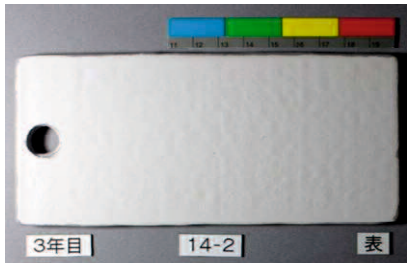
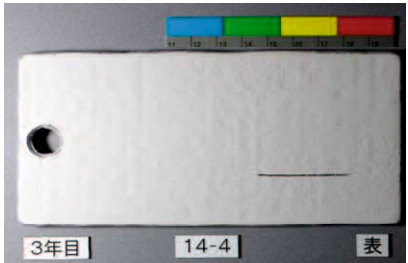




【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準14] 塗り替え塗装仕様 (Rc-I) / 垂直			水 準 14 (Rc-I)	
水 準			水 準 14 (Rc-I)	
曝 露 姿 勢			垂 直 (人工キズなし)	垂 直 (人工キズ有り)
さ び 厚	素地調整前	637 μ m		
	素地調整後	0 μ m		
付 着 塩 分 量	素地調整前	>1,999 mg/m ²		
	素地調整後	106 mg/m ²		
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	363 μ m		
		374 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	337 μ m		
		346 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	5.1mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	347 μ m		
		343 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	0mg/m ²		
		mg/m ²		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	347 μ m		
		332 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	0mg/m ²		
		mg/m ²		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	345 μ m		
		333 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	7.0mg/m ²		
		mg/m ²		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	342 μ m		
		335 μ m		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	4.0mg/m ²		
		mg/m ²		

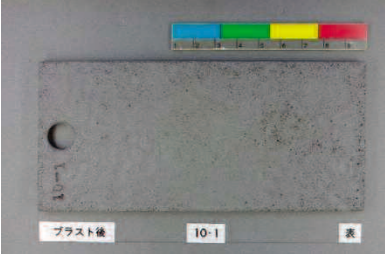
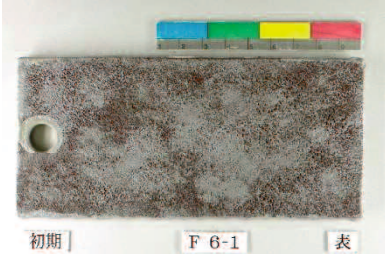
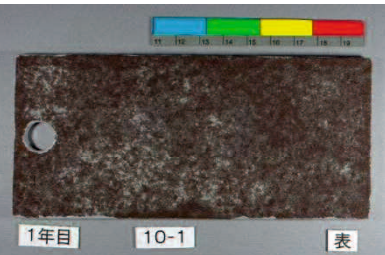
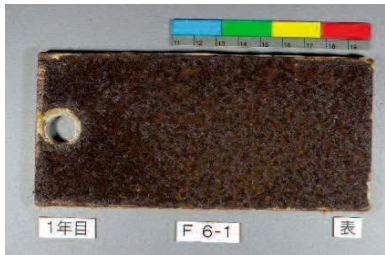
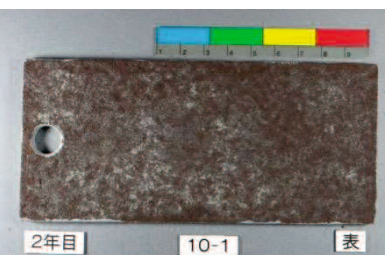
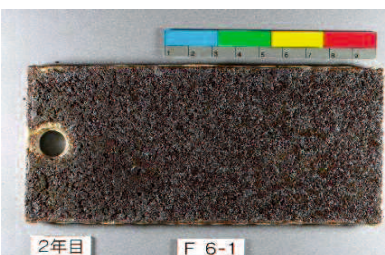
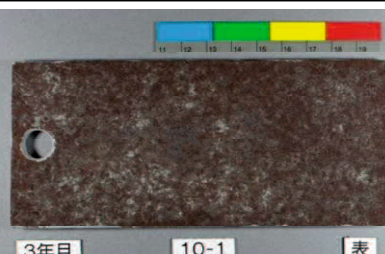
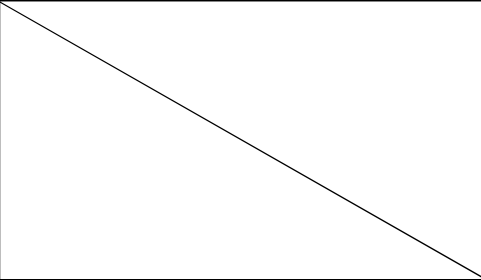
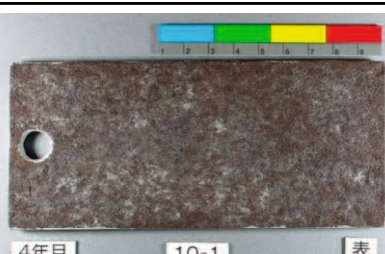
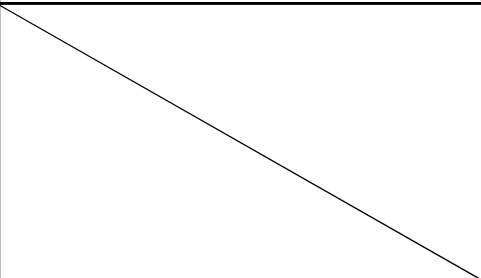
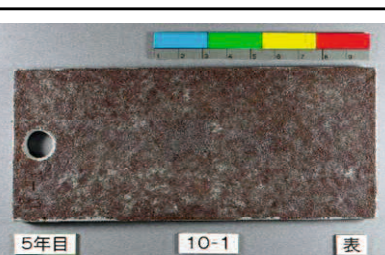
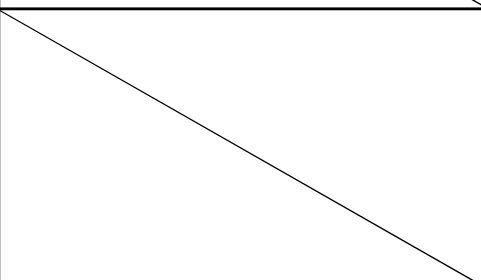
【桁内】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

[水準14] 塗り替え塗装仕様 (Rc-I) / 水平			水準 14 (Rc-I)	
水 準			水 準 14 (Rc-I)	
曝 露 姿 勢			水 平 (人工キズなし)	水 平 (人工キズ有り)
さ び 厚	素地調整前	576 μm		
	素地調整後	0 μm		
付 着 塩 分 量	素地調整前	1,696 mg/m^2		
	素地調整後	607 mg/m^2		
初 期	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	358 μm		
		363 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m^2		
		mg/m^2		
1 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	311 μm		
		344 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	27.0 mg/m^2		
		mg/m^2		
2 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	326 μm		
		348 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	2.7 mg/m^2		
		mg/m^2		
3 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	319 μm		
		349 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	24.0 mg/m^2		
		mg/m^2		
4 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	319 μm		
		345 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	45.0 mg/m^2		
		mg/m^2		
5 年 目	鋼材表面膜厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	322 μm		
		343 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	54.0 mg/m^2		
		mg/m^2		

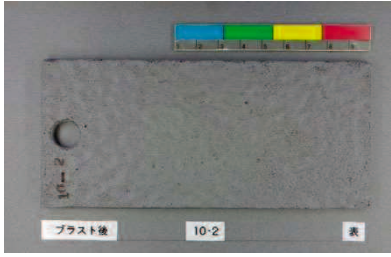
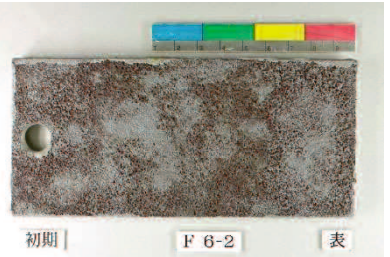
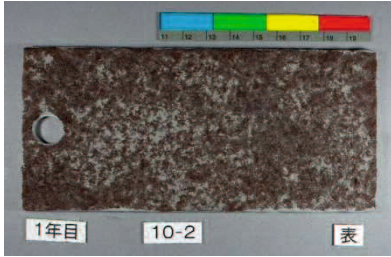
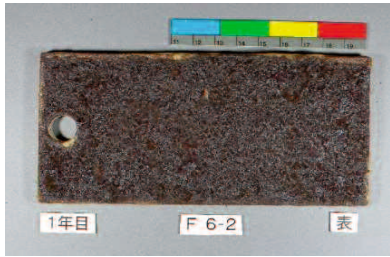
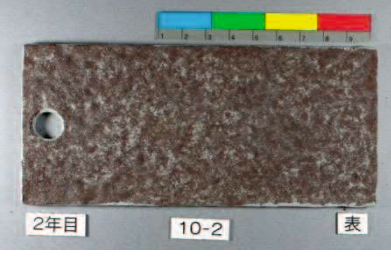
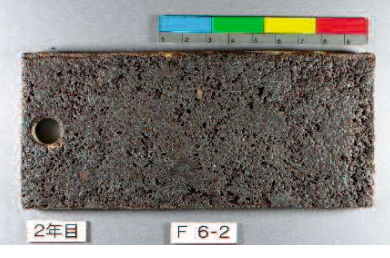
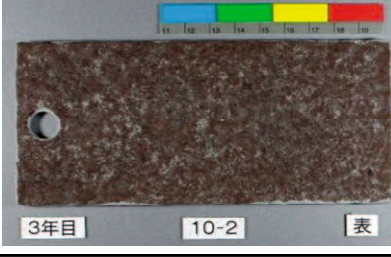
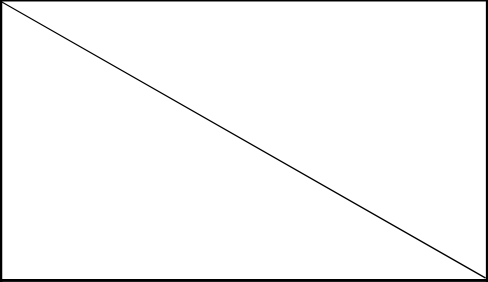
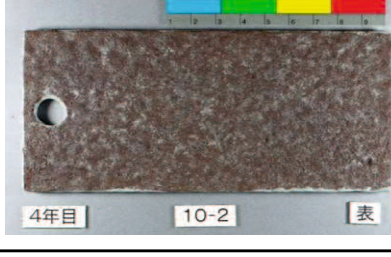
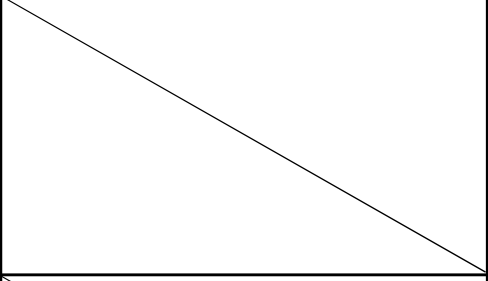

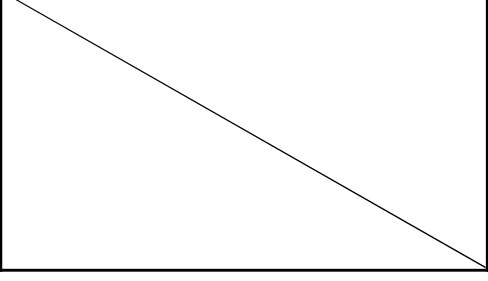
【桁内・桁外】 小型試験体評価結果

JIS-SMA

曝露姿勢			垂 直	
曝露環境			桁 内	桁 外
さ び 厚	素地調整前	642 μm	746 μm	
	素地調整後	0 μm	55 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前	$>1,999 \text{ mg/m}^2$	$>1,999 \text{ mg/m}^2$	
	素地調整後	174 mg/m^2	758 mg/m^2	
初 期	さ び 厚	0 μm	 <p>プラスト後 10-1 表</p>	 <p>初期 F 6-1 表</p>
	上段 (桁内)	55 μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚	24 μm	 <p>1年目 10-1 表</p>	 <p>1年目 F 6-1 表</p>
	上段 (桁内)	188 μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚	42 μm	 <p>2年目 10-1 表</p>	 <p>2年目 F 6-1 表</p>
	上段 (桁内)	371 μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚	58 μm	 <p>3年目 10-1 表</p>	
	上段 (桁内)	μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚	64 μm	 <p>4年目 10-1 表</p>	
	上段 (桁内)	μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚	71 μm	 <p>5年目 10-1 表</p>	
	上段 (桁内)	μm		
	下段 (桁外)	mg/m^2		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		

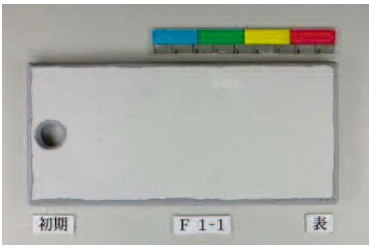
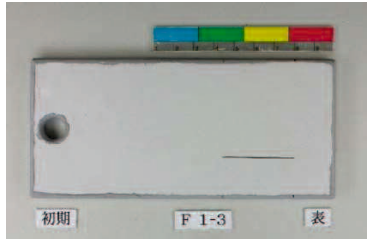
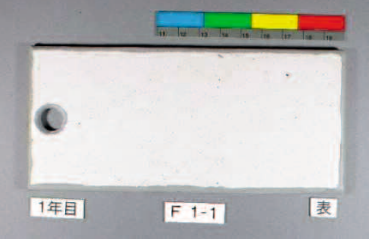
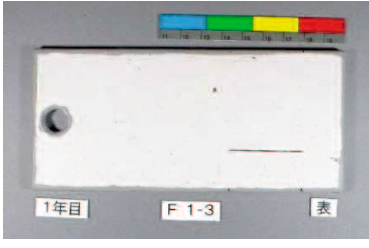
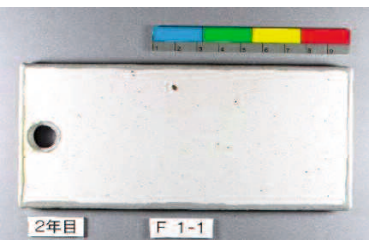
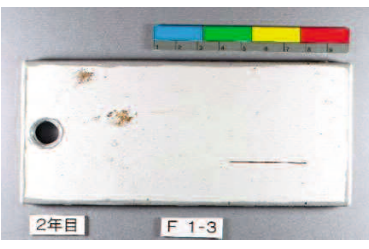
【桁内・桁外】 小型試験体評価結果

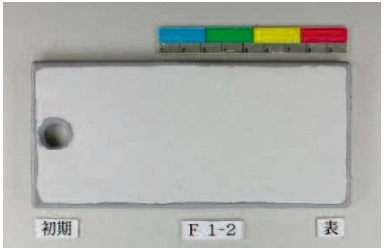
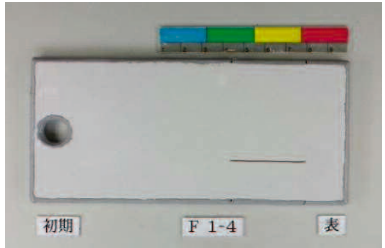
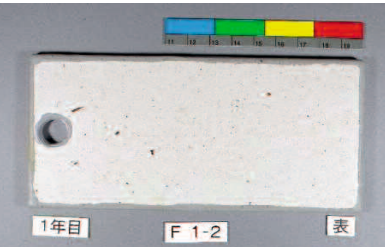
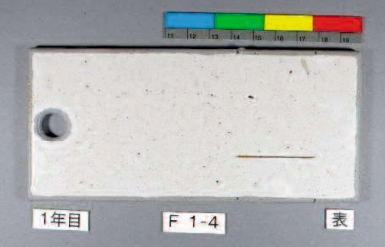
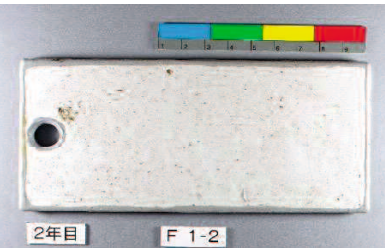
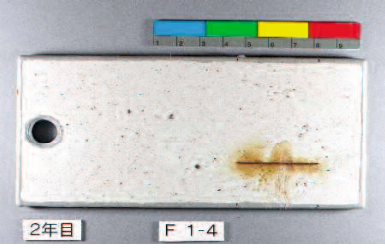
JIS-SMA

曝露姿勢			水 平	
曝露環境			桁 内	桁 外
さ び 厚	素地調整前	729 μm	804 μm	
	素地調整後	0 μm	57 μm	
付 着 塩 分 量	素地調整前	1,440 mg/m^2	>1,999 mg/m^2	
	素地調整後	63 mg/m^2	832 mg/m^2	
初 期	さ び 厚	0 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	57 μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
1 年 目	さ び 厚	21 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	456 μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
2 年 目	さ び 厚	32 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	851 μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
3 年 目	さ び 厚	43 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
4 年 目	さ び 厚	53 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		
5 年 目	さ び 厚	75 μm		
	上段〈桁内〉			
	下段〈桁外〉	μm		
	付 着 塩 分 量	mg/m^2		

【桁外】 小型試験体評価結果

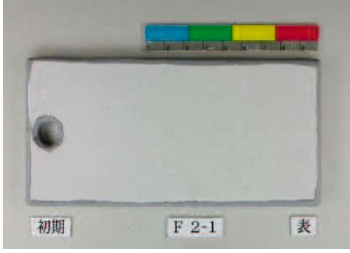
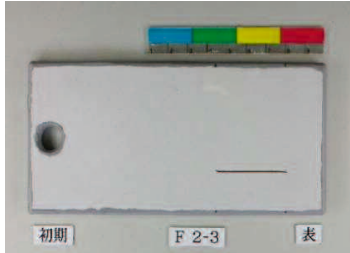
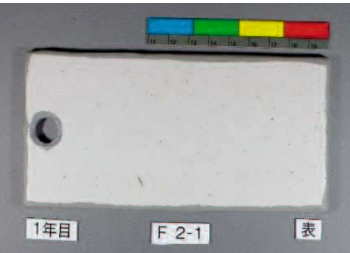


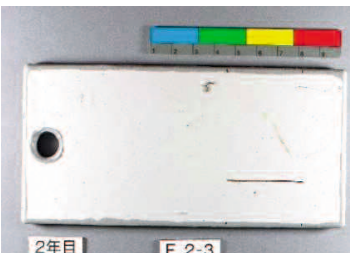
JIS-SM


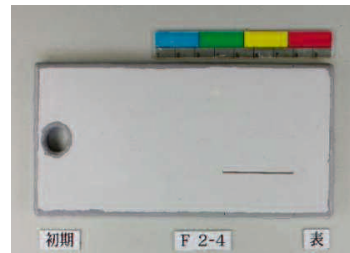


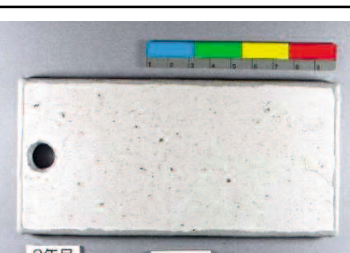

[塗装仕様 C-5]			垂 直	
曝 露 姿 勢			人 工 キ ズ	
			人工キズなし	人工キズ有り
初 期	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	323 μm		
		320 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	314 μm		
		317 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	923mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	310 μm		
		310 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	658 mg/m ²		
		970 mg/m ²		

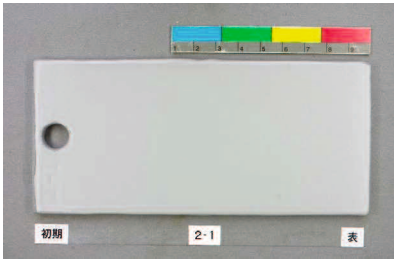
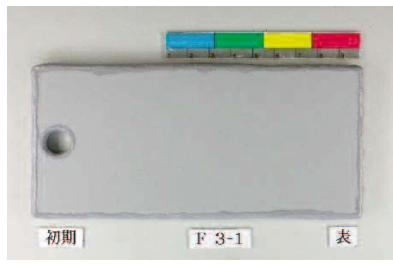

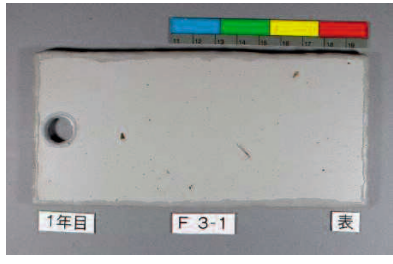

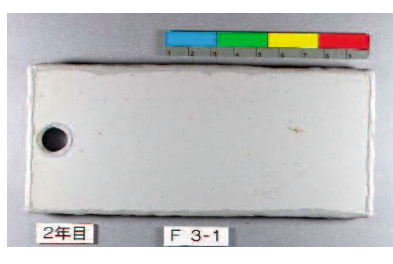
曝 露 姿 勢			水 平	
人 工 キ ズ			人 工 キ ズ	
			人工キズなし	人工キズあり
初 期	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	331 μm		
		334 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	327 μm		
		330 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	1,210 mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	319 μm		
		325 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	653mg/m ²		
		983mg/m ²		

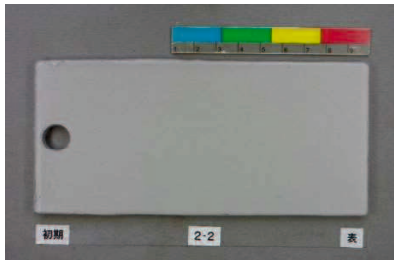
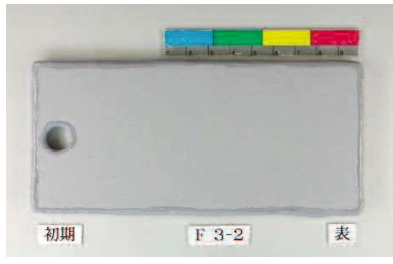



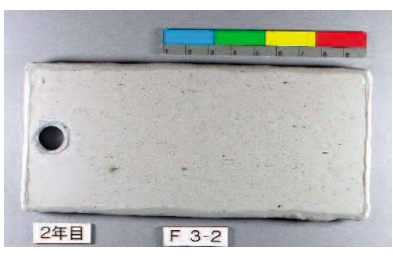
【桁外】 小型試験体評価結果

JIS-SM

[塗装仕様 C-5 (沖縄仕様)]			垂 直	
曝 露 姿 勢			人 工 キ ズ	
			人工キズなし	人工キズ有り
初 期	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	407 μm		
		407 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	398 μm		
		397 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	1,400mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	389 μm		
		391 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	461mg/m ²		
		548mg/m ²		

曝 露 姿 勢			水 平	
人 工 キ ズ			人 工 キ ズ	
			人工キズなし	人工キズあり
初 期	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	423 μm		
		397 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	415 μm		
		387 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	1,779mg/m ²		
		mg/m ²		
2 年 目	塗 膜 厚 上段〈なし〉 下段〈有り〉	407 μm		
		379 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈なし〉 下段〈有り〉	792mg/m ²		
		814mg/m ²		

[塗装仕様 D-5 (人工キズなし)]			垂 直	
曝 露 姿 勢			曝 露 環 境	
			桁 内	桁 外
初 期	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	292 μm		
		283 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	290 μm		
		276 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	4 mg/m ²		
		585mg/m ²		
桁内5年目 桁外2年目	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	290 μm		
		276 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	3mg/m ²		
		321mg/m ²		

曝 露 姿 勢			水 平	
曝 露 環 境			桁 内	桁 外
初 期	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	283 μm		
		288 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	280 μm		
		282 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	7mg/m ²		
		1,436mg/m ²		
桁内5年目 桁外2年目	塗 膜 厚 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	276 μm		
		284 μm		
	付 着 塩 分 量 上段〈桁内〉 下段〈桁外〉	35mg/m ²		
		613mg/m ²		

[塗装仕様 D-5 (人工キズ有り)]			垂 直	
曝 露 姿 勢			曝 露 環 境	
			桁 内	桁 外
初 期	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	297 μm		
		266 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	297 μm		
		258 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		mg/m ²		
桁内5年目 桁外2年目	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	297 μm		
		260 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		354mg/m ²		

曝 露 姿 勢			水 平	
曝 露 環 境			桁 内	桁 外
初 期	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	292 μm		
		288 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		mg/m ²		
1 年 目	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	291 μm		
		283 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		mg/m ²		
桁内5年目 桁外2年目	塗 膜 厚 上段 (桁内) 下段 (桁外)	294 μm		
		285 μm		
	付 着 塩 分 量 上段 (桁内) 下段 (桁外)	mg/m ²		
		546mg/m ²		

【工場塗装（一般外面／C-5塗装系）】

100㎡当り

名 称	規 格	単 位	数 量	単 価	金 額	備 考
無機ゾンクリッチプライマー		㎡	100	340	34,000	ミルプライマー（18,500円/t）
橋梁塗装工	製品ブラスト	人	6.3	27,500	173,250	2021年度鋼橋製作工単価
諸雑費		式	1		15,592	9%
橋梁塗装工		人	7.0	27,500	192,500	1.4人×5回
無機ゾンクリッチペイント		kg	70	1,170	81,900	建設物価2021年4月 沖縄
エポキシ樹脂塗料下塗	（ミストコート）	kg	16	1,030	16,480	建設物価2021年4月 沖縄
エポキシ樹脂塗料下塗		kg	60	1,030	61,800	建設物価2021年4月 沖縄
ふっ素樹脂塗料中塗	中彩A	kg	17	1,330	22,610	建設物価2021年4月 沖縄
ふっ素樹脂塗料上塗	中彩A	kg	14	5,000	70,000	建設物価2021年4月 沖縄
塗料用シナー		l	8.2	155	1,271	比重 0.85
エポキシ樹脂塗料用シナー		l	15.5	375	5,812	比重 0.85
ふっ素樹脂塗料用シナー	中塗り用	l	2.0	375	750	比重 0.85
ふっ素樹脂塗料用シナー	上塗り用	l	1.6	410	672	比重 0.85
工具損料		式	1		26,130	（塗料＋希釈材）×10%
合 計					702,767	7,027 円/㎡

【工場塗装（内面／D-5塗装系）】

100㎡当り

名 称	規 格	単 位	数 量	単 価	金 額	備 考
無機ジンクリッチプライマー		㎡	100	340	34,000	ミルプライマー（18,500円/t）
橋梁塗装工	動力工具	人	2.3	27,500	63,250	2021年度鋼橋製作工単価
諸雑費		式	1		1,897	3%
橋梁塗装工		人	2.8	27,500	77,000	1.4人×2回
変性エポキシ樹脂塗料 内面用		kg	45	1,030	46,350	建設物価2021年4月 沖縄
変性エポキシ樹脂塗料 内面用		kg	45	1,030	46,350	建設物価2021年4月 沖縄
エポキシ樹脂塗料用シンナー		l	10.60	375	3,975	比重 0.85
工具損料		式	1		9,668	（塗料＋希釈材）×10%
合 計					282,490	2,824 円/㎡

【工場塗装（一般外面／金属溶射〈亜鉛アルミ〉＋ふっ素樹脂塗装）】

100㎡当り

名 称	規 格	単 位	数 量	単 価	金 額	備 考
無機ゾンクリッチプライマー		㎡	100	340	34,000	ゾンプライマー（18,500円/t）
橋梁塗装工	製品ブラスト	人	6.3	27,500	173,250	2021年度鋼橋製作工単価
諸雑費		式	1		15,592	9%
金属溶射(亜鉛アルミ)		㎡	100	15,000	1,500,000	100μm以上
橋梁塗装工		人	4.0	27,500	110,000	2021年度鋼橋製作工単価
エポキシ樹脂塗料下塗		kg	16	1,030	16,480	封孔処理
エポキシ樹脂塗料下塗		kg	60	1,030	61,800	建設物価2021年4月 沖縄
ふっ素樹脂塗料中塗	中彩A	kg	17	1,330	22,610	建設物価2021年4月 沖縄
ふっ素樹脂塗料上塗	中彩A	kg	14	5,000	70,000	建設物価2021年4月 沖縄
エポキシ樹脂塗料用シンナー		l	15.5	375	5,812	比重 0.85
ふっ素樹脂塗料用シンナー	中塗り用	l	2.0	375	750	比重 0.85
ふっ素樹脂塗料用シンナー	上塗り用	l	1.6	410	672	比重 0.85
工具損料		式	1		17,812	(塗料＋希釈材)×10%
合 計					2,028,778	20,287 円/㎡

謝 辞

本研究を進めるにあたり多くの方々のご指導、ご支援、ご厚意をいただきました。

企業人としての業務経験しかない私を、学問の世界へ導いていただき、終始あたたかいご指導と激励を賜りました山口大学大学院創成科学研究科教授 麻生稔彦先生に心より感謝の意を表します。

また、それぞれのご専門分野を通して、学位論文をいろいろな観点から真摯に評価していただきました創成科学研究科進士正人教授、吉武勇教授、中島伸一郎准教授、渡邊学歩准教授に厚くお礼を申し上げます。研究者としての心得と視野を広げることができました。

沖縄県久米島町での曝露試験に際しては、琉球大学大学院理工学研究科の下里哲弘教授から貴重な研究データとアドバイスをいただきました。高度な研究機関として、地域行政との厚い信頼関係を構築され、防食研究に取り組まれる姿勢に多くを学びました。

久米島町建設課の皆様には、調査対象橋梁のご提供に深謝するとともに橋梁インフラの維持管理、長寿命化に取り組む姿勢に敬意を表します。

日鉄防食株式会社殿には、豊富な調査経験に基づく適切なアドバイス、曝露試験体の作成、設置から毎年の計測、正確な分析にご協力いただきました。防食技術を通して社会インフラの長寿命化に取り組む技術者魂と情熱を感じました。

最後に、社会人ドクターへの挑戦を快く受け入れてくれた日鉄エンジニアリングの職場の皆様、家族の支えによりこの日が迎えられたことに感謝します。