

第2章 耐候性鋼橋の適用環境評価方法の概要と課題

2.1 鋼橋設計における防食の考え方

耐候性鋼材を用いた橋には、耐候性鋼材に塗装をして用いる塗装耐候性鋼橋と、裸仕様あるいはさび安定化補助処理のみを施した無塗装耐候性鋼橋（以下、「耐候性鋼橋」という。）に分類される（図2.1.1）。鋼材表面に皮膜を形成する表面処理であるさび安定化補助処理は、酸素や水分・塩分等を含む腐食環境と鋼材表面を遮断して鋼材の発せいを防止する通常の塗装とは異なり、主に鋼材からの流れさびを抑制することを目的として施工されたものであり、鋼材表面を大気から完全に遮断するものではなく、経年とともに徐々に失われていく。したがって、設計供用期間中の劣化に対して、塗装のように塗替え等で機能を回復させる措置を行わないのが原則となる。このようなことから、さび安定化補助処理を行った鋼材を用いた橋は無塗装耐候性鋼橋に分類される。

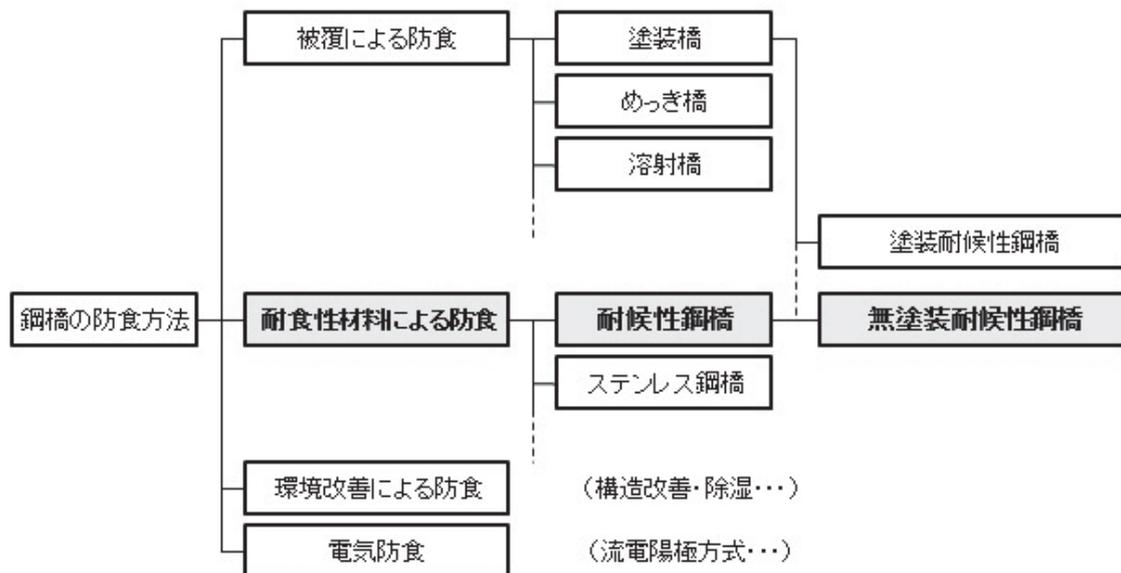


図 2.1.1 耐候性鋼橋の位置付け^{2.1)}

道路橋における一般の耐候性鋼橋には、JIS G 3114 に規定される溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材の W 種（以下、「JIS 耐候性鋼材」という。）あるいは耐塩害性を高めたニッケル系高耐候性鋼材が使用されている。耐候性鋼材における防食に対する基本的な考え方は次のとおりである。

- ① 耐候性鋼材は、適切な環境条件のもとでは緻密なさびが鋼材表面を覆うことで、やがて、腐食減耗は小さくなる。すなわち、腐食速度が減少するものの完全にゼロにはならない。
- ② しかし、耐候性鋼橋では適用環境条件の選定及び適切な維持管理により、供用期間中の鋼材の腐食減耗量をどのように制御するかが重要である。
- ③ 腐食減耗量を適切に制御するためには、橋の構造計画、設計、施工（製作・架設）及び維持管理の各段階で適切な配慮や措置を行う必要がある。

2.2 耐候性鋼橋の適用環境評価の考え方

2.2.1 耐候性鋼橋が適用可能とされる環境条件

JIS 耐候性鋼材については、図 2.2.1 に示す地域では一般に無塗装で橋に用いることができる。本図は、建設省土木研究所、(社) 日本橋梁建設協会、(社) 鋼材倶楽部 (現、日本鉄鋼連盟) の 3 者で行った耐候性鋼材の全国 41 橋暴露試験結果^{2.2)}に基づき作成され、道路橋示方書・同解説 (日本道路協会、2012.3)^{2.3)} (以下、「道路橋示方書」という。) II 鋼橋編 第 5 章の解説に記載されたものである。

| 地域区分 | | 飛来塩分の測定を省略してよい地域 |
|---------|----|-------------------|
| 日本海沿岸部 | I | 海岸線から 20km を超える地域 |
| | II | 海岸線から 5km を超える地域 |
| 太平洋沿岸部 | | 海岸線から 2km を超える地域 |
| 瀬戸内海沿岸部 | | 海岸線から 1km を超える地域 |
| 沖縄 | | なし |

| | | |
|---------|----|---|
| 日本海沿岸部 | I | 北海道稚内市から松前町までの日本海に面した地域 青森県外ヶ浜町から福井県までの日本海に面した地域 |
| | II | 京都府から山口県下関市までの日本海に面した地域 福岡県北九州市から長崎県平戸市までの日本海に面した地域 |
| 太平洋沿岸部 | | 日本海 I, II, 瀬戸内海, 沖縄, 離島を除く全域 |
| 瀬戸内海沿岸部 | | 兵庫県神戸市から山口県光市までの瀬戸内海に面した地域 徳島県鳴門市から愛媛県大洲市までの瀬戸内海に面した地域 |
| 沖縄 | | 沖縄県全域と離島 |

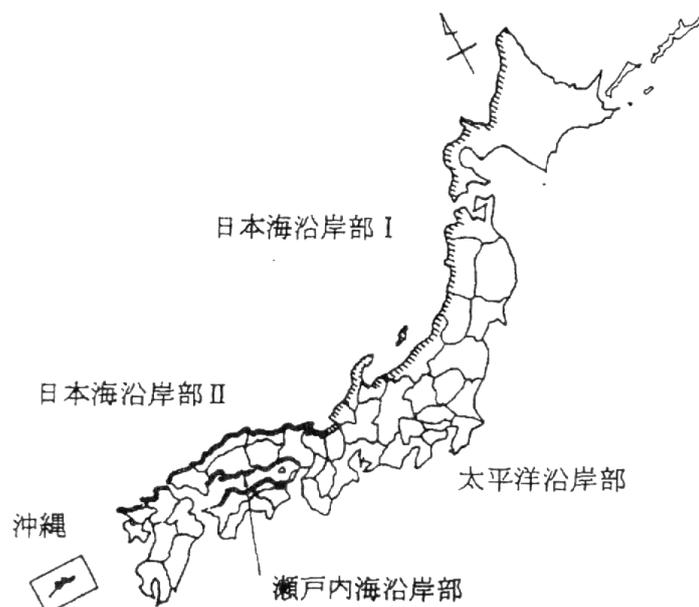


図 2.2.1 耐候性鋼材を無塗装で使用する場合の適用地域^{2.2)}

この適用地域は、国内における耐候性鋼橋の適用手法についての調査結果を考慮しつつ、暴露試験データによる 50 年間の腐食減耗量がおおむね 0.3mm 以下と予測される環境条件として定められた。また、文献 2.2) の暴露試験結果によると、橋桁内の側方遮蔽条件では飛来塩分量がおおむね 0.05mdd 以下である。2002 年(平成 14 年)の道路橋示方書では、耐久性に対する設計上の目標期間として 100 年を目安とすることが示されているものの、適用地域は以前のもので踏襲されている。これは、適切な維持管理を前提とすれば、50 年で腐食減耗量がおおむね 0.3mm 以下と予測される環境条件では、100 年での腐食減耗量も 0.3mm を大きく超える可能性が少なくと考えられたこと、及び 50 年を超える長期の腐食減耗量の推定の限界があることなどが考慮されたものである。

2. 2. 2 耐候性鋼橋の防食設計に対する要求性能

耐候性鋼材に限らず、どのような橋の材料も経年的に劣化する。道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の第 5 章に、「鋼橋の部材の設計にあたっては、経年的な劣化による影響を考慮しなければならない」との記載がある。経年的な劣化による影響を考慮する方法については、三木、市川ら^{2.4)}による研究が、また、鋼道路橋塗装・防食便覧^{2.5)}に示された耐候性鋼材の適用に関する具体的な留意事項が参考とできる。また、紀平ら^{2.6)}や鹿毛ら^{2.7)}によって腐食減耗予測手法の研究が行われており、耐候性鋼材の経年的な劣化による影響を考慮する具体的方法論が検討され、その成果は文献 2.1) にまとめられている。それによれば、 A_{SMA} 値による防食性能照査法が提案されている。

道路橋示方書では、鋼橋の部材設計において最小板厚規定が設けられており、「鋼材の最小板厚は、腐食環境や製作及び運搬中の取扱い等も考慮して定めなければならない」とされている。すなわち、鋼部材に一般的な取り扱いや通常の維持管理を行う中で生じる可能性のある不測の減耗が生じて耐荷力に影響を及ぼさないように、板厚の下限値に配慮した設計が行われるべきことが規定されている。

文献 2.1) には、耐候性鋼橋の防食に対する要求性能について、以下のように示されている。

耐候性鋼橋の防食に対する要求性能

- (1) 耐候性鋼橋は、設計供用期間中、想定される作用（環境）のもとで、鋼材の腐食減耗量が予め想定した範囲内にあるものとする。
- (2) 耐候性鋼橋は、設計供用期間中、流れさびによって美観・景観が損なわれない状態にあるものとする。

なお、橋の設計にあたっては、設計供用期間中に橋としての機能が保持されるように、例えば以下の耐腐食性能レベルに応じて、部材の経年劣化の影響を考慮することを考える。文献 2.1) では、以下の 3 つの耐腐食性能レベルが提案されている。

耐腐食性能レベルⅠ： 設計供用期間中の腐食減耗量が、設計上耐荷力性能に影響がない範囲に留まる性能レベル。腐食減耗量が片面当たり平均 0.5mm/100 年以下であることを目標とする。一般に耐候性鋼橋では、この性能レベルⅠを満足させることが目標になる。例えば、さびの外観が図 2.2.2 に示す外観評点 3～5 に保持された場合には、本性能レベルを満足するものと考えられる。

耐腐食性能レベルⅡ： 設計供用期間中の腐食減耗量が性能レベルⅠより大きい、予め腐食しろを

見込むことにより、設計上耐荷性能に影響がない範囲に留まる性能レベル。腐食の進行をある程度制御することのできる範囲として設定するもので、腐食減耗量は平均 1.0mm/100 年以下であることを目標とする。例えば、さびの外観が図 2.2.2 に示す外観評点 2 以上に保持されている場合には、本性能レベルを満足するものと考えられる。

耐腐食性能レベルⅢ： 一般に取替えを前提とする部材に適用する。したがって、腐食減耗量を制御できない場合も許容することになる。例えば、さびの外観が図 2.2.2 に示す外観評点 1 でも許容されると考えられる。

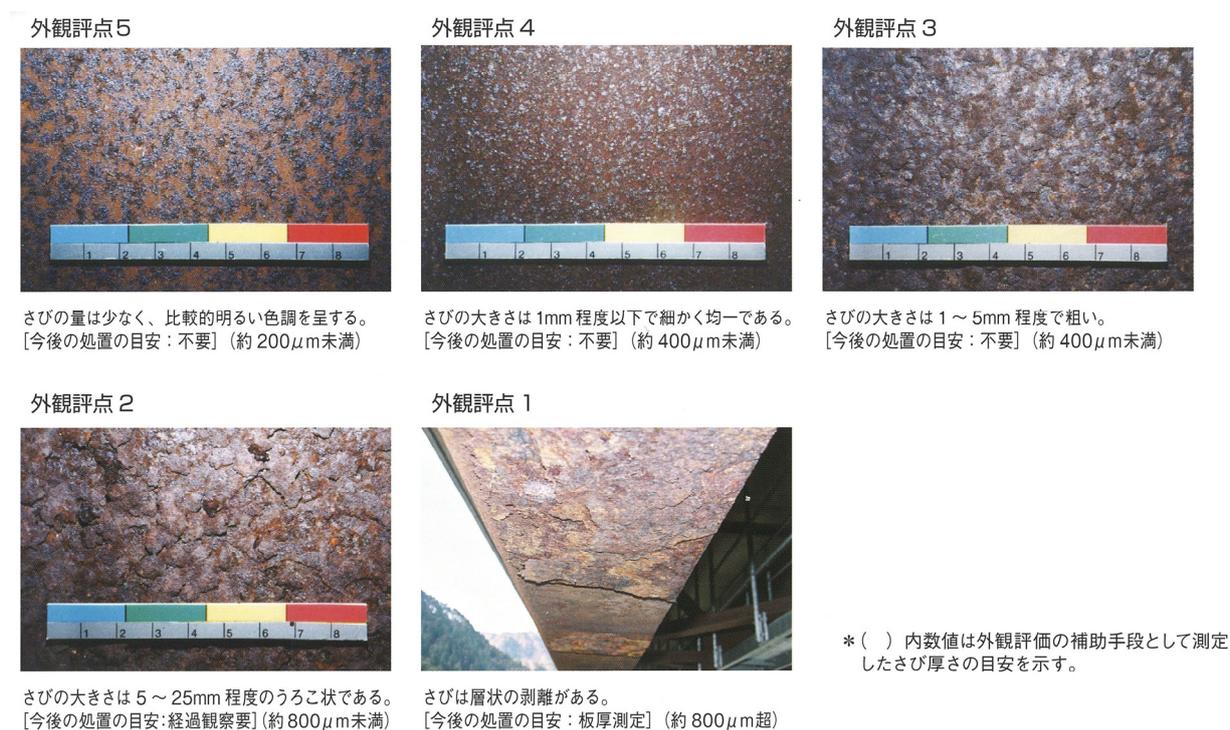


図 2.2.2 耐候性鋼橋のさび外観評点^{2.8)}

上記の腐食性能レベルにおいては、耐腐食性能レベルⅠが、道路橋示方書の考え方に整合する要求性能であると考えられる。すなわち、耐腐食性能レベルⅠが選択された場合には、最小板厚規定の運用により腐食しろの設定は不要であると考えられる。一方、耐腐食性能レベルⅡ及びⅢは、腐食しろの設定や、それを前提とした維持管理法（点検・診断方法及び検査を確実に実施するための構造設計上の配慮、異常時でも容易に補修が可能な構造詳細への配慮、簡単で効率的かつ効果的な補修工法、損傷しやすい部材を容易に交換できるシステム等）を採用することが前提であり、長期にわたり耐荷力を所定の水準以上に保つための総合的な対策が必要となる。

実橋の耐荷力性能については、個別に橋の置かれた状況等を考慮した様々な視点から、検討していくことになる。

耐候性鋼材の防食機能の評価に必要となる、耐候性鋼材のさび安定化に関わる概念としては、図 2.2.3 に示すものが提案されている^{2.1)}。なお、ここでいうさび安定化とは、耐候性鋼橋で通常想定する保護性さびの形成によって目標とした腐食速度の低下した状態を含んでいることに注意が必要である。耐候性鋼材は、十分マイルドな腐食環境ではきわめて遅い腐食速度を呈する（図 2.2.3 中の A）。

適当な環境条件下では表面に緻密なさび層（保護性さび）を形成し、これが腐食を次第に抑制する（図 2.2.3 中の B）。このように、適切な環境条件のもとでは、腐食減耗の進行は完全に停止することはないが、特別な維持管理を必要としない程度に腐食速度が十分に低減した、さび安定化状態（図 2.2.3 中の A、B）となる。この結果、設計供用期間中の腐食減耗量を予め想定される範囲内に抑制することができることになる。ただし、さびの状態は腐食環境の厳しさに依存して変化することになる。塩分量が多い環境、湿潤状態が継続する環境では異常さび（図 2.2.3 中の C：厚い層状さびの形成や剥離）になるので、適用する環境条件には注意する必要がある。

維持管理にあたっては、現地における実橋の定期的な点検が基本となる。構造計画、設計の段階では種々の検討情報をもとに環境条件などにある仮定を設けて橋の設計を行うことになるが、その仮定に基づく防食が正常に機能しているのかどうかを確認するためには、現地における点検が必須である。確実に維持管理を行いうる橋の設計を行うためには、設計者も現地における点検に参画することが望ましい。維持管理における点検・診断の方法、リスクの管理方法、そして万が一の対応措置方法については、文献 2.1)、2.9) に示されており、参考にできる。

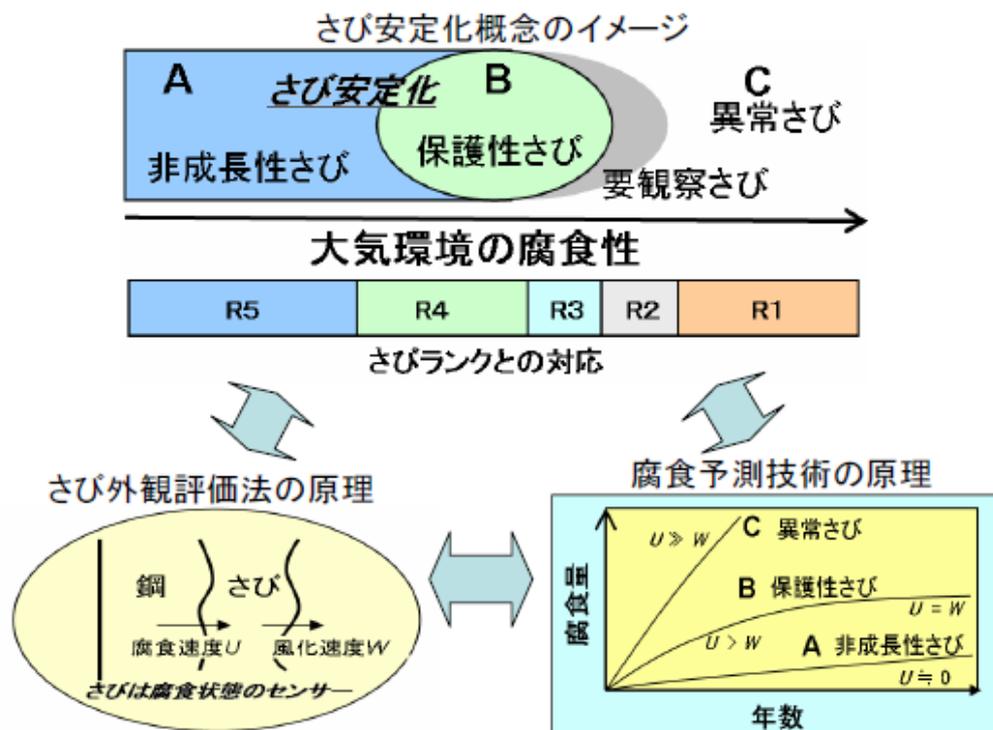


図 2.2.3 さびの状態と腐食減耗の関係を示すさび安定化概念^{2.1)}

2.2.3 腐食環境を考慮した耐候性鋼材の適用性判定手法

(1) 飛来塩分量を判定指標とする方法とその課題

耐候性鋼橋の適用可否は、架橋位置における腐食環境を考慮した耐候性鋼材の腐食減耗量の予測に基づいて判断することが基本となる。橋の各部の腐食に影響を及ぼす塩分や湿気の程度は、架橋地点の地域特性、地形と橋との位置関係、部位・部材によって作り出される局所的な腐食環境によって異なるので、例えば図 2.2.4 のように、一つの橋の中においても対象とする部位を区分して評価したほうが合理的であると考えられる。耐候性鋼材の無塗装での適用に際しては、その防食性能を發揮させ

るために、実橋の置かれる環境条件や施工条件などに十分配慮することが求められる。耐候性鋼橋の適用性を評価する代表的な方法として、表 2.2.1 に示す 3 種類の方法が提案されている。表 2.2.1 中の①に記載した、現地暴露試験による方法は、3 つの方法のうち最も精度が高いと思われるものの、5 ～10 年に及ぶ現地での暴露試験を行う必要があるため、時間と費用がかかり、現実的ではない。②に記載の飛来塩分量による判定は、これまで多くの実績がある。

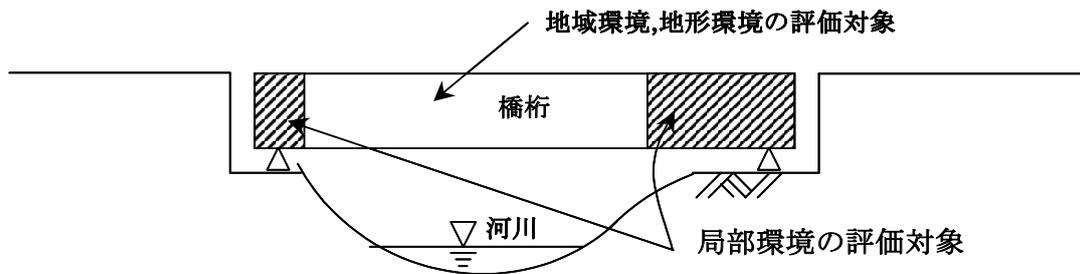


図 2.2.4 環境区分と影響範囲の例

表 2.2.1 耐候性鋼材の適用環境評価方法の概要

| 検討方法 | 概要 |
|---------------------------|--|
| ① 現地暴露試験による方法 | <ul style="list-style-type: none"> 適用環境条件を反映した鋼材の暴露試験で得られる経年に伴う腐食減耗量のデータに基づき適否の判定を行う方法。 相関が証明されている腐食減耗量推定式(※)に回帰して外挿した所定年数後の腐食減耗量が許容値以内に収まるか否かで判定する。 ※$Y=AX^B$ (X: 暴露期間(年)、Y: 腐食減耗量(mm)) 上記式を用いて経年腐食減耗量を求めるには、パラメータ A と B を回帰的に決定する必要があるが、一般には多年にわたるデータが必要である。 |
| ② 飛来塩分量を判定指標とする方法 | <ul style="list-style-type: none"> 飛来塩分量を耐候性鋼材裸使用の適否判定指標として用いる方法。 この方法では海岸からの距離、地域特性、季節変動、年変動を把握し、周辺の既存調査結果と比較するなど慎重に検討することが望ましい。 飛来塩分量の測定は一般に月次で行い 1 年以上継続する必要がある。 飛来塩分量の測定を省略して、国内地域ごとに海岸からの距離と飛来塩分量の分布特性などに基づく回帰式を用いて検討する方法もある。 |
| ③ 環境因子データに基づく腐食減耗量予測による方法 | <ul style="list-style-type: none"> 建設地近隣の環境因子データ(飛来塩分量、気温、湿度等)を基に橋の代表部位における耐候性鋼材の平均腐食減耗量を計算により予測する技術を用いて適否の判定を行う方法。 腐食減耗予測理論から導出された局部環境腐食性指標 A_{SMA} を用いる適否判定方法は、この範疇に入る。 |

耐候性鋼橋の建設においては、計画段階で橋全体に影響を及ぼす地域腐食環境を評価することになる。JIS 耐候性鋼材に関しては、これまで飛来塩分量を適用可否判定の指標とする方法が用いられてきた。この手法は、全国 41 橋の床版下、桁内側下部の環境における暴露試験と飛来塩分量測定(側方遮蔽条件)の結果^{2.2), 2.10)}に基づいたものである。しかしながら、この手法に関しては、飛来塩分量の具体的な測定手法が明確に示されていないことから、測定手法により生じる環境条件のばらつき

の影響が十分に反映されていないと考えられる。計画段階で環境測定を行う場合は、一般的には図 2.2.5 のように側方が開放された条件で行う場合が多い。同一の橋において側方開放条件と側方遮蔽条件で飛来塩分量を図 2.2.6 に示すように測定した。両者の塩分測定結果の比較を図 2.2.7 に示す。図 2.2.7 からわかるように、飛来塩分の測定条件によって、大きな差異とばらつきが見られた^{2.1)}。このように飛来塩分量の評価にあたっては、測定の方法や方向による差異、時期による変動などに注意が必要である。飛来塩分量は、元々風速に比例する値であることから、大気の腐食性を示す値としてはバラツキが大きく、精度の良い検討を行うには信頼性に課題があるとの指摘もある^{2.1)}。

また、耐候性鋼材の腐食速度を支配する 2 大因子として、付着塩分量と濡れ時間がある^{2.6)}。濡れ時間とは、湿潤状態にある時間を表わすパラメータで、ISO 9223 によれば年間で相対湿度が 80% 以上かつ温度が 0℃ 以上の時間と定義されている。影響が大きいとされている濡れ時間に関わる情報を考慮せずに適否の判定を行うことは、腐食減耗を過少に評価する可能性があるため、より精度をあげるためには、この影響を取り込んだ評価を行うべきであると考えられる。



図 2.2.5 一般に行われている側方開放条件の飛来塩分量 C_0 および側方開放条件の硫酸化物量 S_0 の測定風景の例

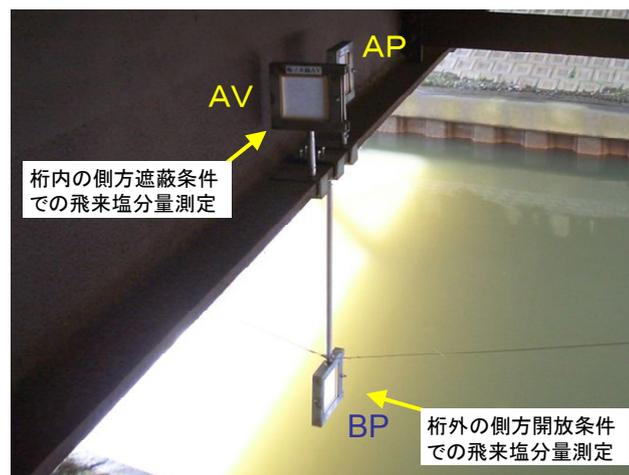


図 2.2.6 飛来塩分捕捉器具の橋への取り付け方の違いによる測定値の差異を検討する試験実施状況 (AP、AV は側方遮蔽条件で風が当たりにくく、BP は一般の方法と同様に側方開放条件で風が当たりやすい)

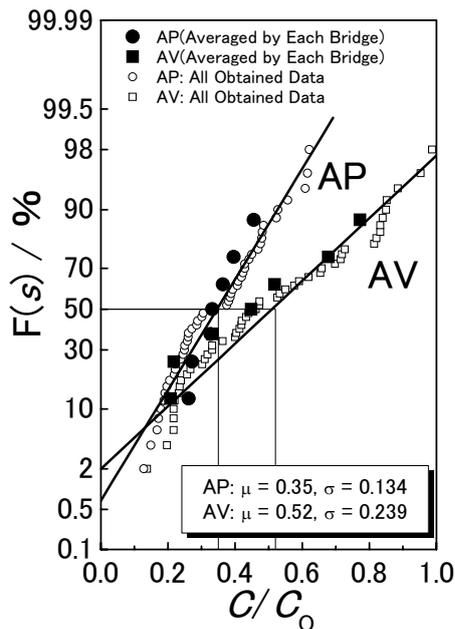


図 2.2.7 桁外に取り付けられた塩分捕捉器で測定された側方開放条件の飛来塩分量 C_0 と桁内で測定された側方遮蔽条件の飛来塩分量 C の実測値比較と正規確率統計解析^{2.1)}

(2) 局部環境腐食性指標（耐候性鋼材の腐食減耗量）を判定指標とする方法

JIS 耐候性鋼材の経年腐食減耗量 $Y(\text{mm})$ は、式 (2.2.1) で示されること^{2.1), 2.11)} が知られている。

$$Y = A_{\text{SMA}} \cdot X^{B_{\text{SMA}}} \quad (2.2.1)$$

ここで、 X は暴露開始からの経過年数、 A_{SMA} および B_{SMA} は暴露環境および合金成分から決まる腐食速度パラメータである。 A_{SMA} 値は、 $X=1$ (年) とおいたときの腐食減耗量 Y 値に相当し、JIS 耐候性鋼材が暴露されたその局部の環境の腐食性を定量的に示す指標であることを意味するので、局部環境腐食性指標と呼ばれる^{2.6)}。一方、 B_{SMA} 値は、さびの保護性の上昇に伴う腐食速度低減の度合いの逆数に相当する値であることから、 $1/B_{\text{SMA}}$ 値は保護性さび形成効果指数と呼ばれる^{2.6)}。局部環境腐食性指標 A_{SMA} は、耐候性鋼材の腐食を支配する付着塩分量と濡れ時間の双方を含む複合的作用の結果として得られる値である。飛来塩分量に比べ無為な変動も小さく、より扱いやすい指標である。

JIS 耐候性鋼材に関する前述の全国 41 橋暴露試験で得られた暴露試験データを元に A_{SMA} と B_{SMA} の関係を定式化すると A_{SMA} 値から経年腐食減耗量（平均値）を計算できる。 A_{SMA} については、桁内側での飛来塩分量と近隣の気温・湿度等の環境因子データから計算する方法及び暴露試験で求める方法が提案され、図 2.2.8 に示すフローにて腐食減耗予測計算を行うことが提案されている^{2.1), 2.6), 2.7)}。

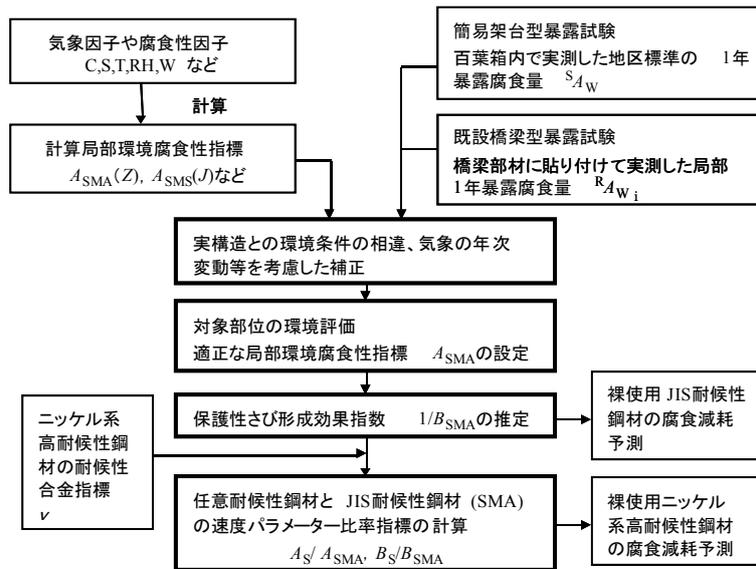


図 2.2.8 耐候性鋼材の腐食減耗予測計算フロー図

検討の対象とする橋の部位は、全国 41 橋暴露試験を行った橋の部位に該当する、桁内側下フランジ部とすることを提案する。この部位は雨がかりがなく腐食環境として厳しい傾向にあるため、防食設計のための代表部位として扱うことができると考えられる。JIS 耐候性鋼材と成分系の異なるニッケル系高耐候性鋼材については、腐食速度パラメータを A_S 、 B_S とおき、JIS 耐候性鋼材の A_{SMA} 、 B_{SMA} とのそれぞれの比を任意の耐候性合金指標 (ν 値)^{2.12)} と関連付ける変換方法を用いて、 A_{SMA} 値 $\rightarrow B_{SMA}$ 値 $\rightarrow A_S$ 値と B_S 値という手順で腐食速度パラメータの変換を行うことを提案する^{2.1)}。このような手順により、適正な局部環境腐食性指標 A_{SMA} に対し、各種の ν 値を持つ耐候性鋼材の予測腐食減耗量 $Y(X=100)$ を計算した結果の例を図 2.2.9 に示す。

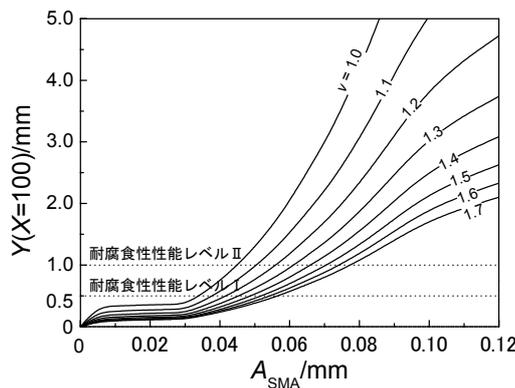


図 2.2.9 各種耐候性鋼材の 100 年後の予測腐食減耗量 $Y(X=100)$ (ν 値は鋼材成分から算術計算可能な耐候性合金指標、 A_{SMA} は適正な局部環境腐食性指標)

局部環境腐食性指標 A_{SMA} を計算により推定する方法も提案されている^{2.1), 2.6), 2.7)}。また、実測されたワッペン試験片の腐食減耗量 A_W から、より適正な局部環境腐食性指標 A_{SMA} に変換する考え方^{2.9)} も提案されている。計算による局部環境腐食性指標についての説明は文献 2.6) に詳しいので、参考にできる。

2.3 簡易な適用環境評価方法の検討

従来、耐候性鋼材の適用環境評価法として、飛来塩分量という間接的な指標により判断している。しかしながら、評価精度を向上させるためには、飛来塩分という間接的な指標ではなく、様々な要因を含む環境そのものを反映した直接の腐食減耗量を評価する現地暴露試験のデータを基にした評価方法が考えられる。ここでは、耐候性鋼材の適用環境評価法のうち、文献 2.1) によって新たに提案されたワッペン式暴露試験を用いた適用環境評価技術の整備・充実に向けた課題について検討することにする。図 2.3.1 に、提案されているワッペン試験片を用いる短期暴露試験法の概要を示す。ワッペン試験とは、薄く軽量の板状試験片を既設の橋の部材あるいは簡易架台（百葉箱）の専用装着板に接着して暴露を行う試験法であり、以下のような利点がある。

- 1) 1年間の暴露データ (A_w) から、局部環境腐食性指標 A_{SMA} 値に近い値を実測できる。
- 2) 実橋の様々な部位に試験片を取り付けることにより、部位ごとの環境の腐食性を定量的に把握することが可能である。
- 3) 飛来塩分量測定（1回/月、12回/年の現地回収）に対して、1年間の暴露の期間中、試験片の設置と回収の2回だけ現地に行けば良い。

図 2.3.2 は、本研究で提案する、短期暴露試験による適用環境評価法の概念図である。ワッペン式暴露試験によって得られる1年間の腐食減耗量 (A_w) を、橋の対象部位（代表部位として雨がかりがない内桁下フランジ部を想定）における局部環境腐食性指標 A_{SMA} 値へ適正に補正し、防食の耐腐食性能レベルに対応したしきい値と比較することにより、耐候性鋼材の現地適用性可否の判定を行うという手法である。耐腐食性能レベルは一般的にはレベル I（腐食減耗量が片面平均 $0.5\text{mm}/100$ 年以下）が目標となる。耐腐食性能レベル I に対応するしきい値としては、全国 41 橋暴露試験等のデータに基づき、 $A_{SMA} \leq 0.03\text{mm}$ が提案されている^{2.1)}。また、腐食減耗量とさび厚との相関関係から、簡易に現地測定できるさび厚を代替指標とする方法も提案されている^{2.1)}。



図 2.3.1 ワッペン試験片を用いた環境の腐食性実測方法の例

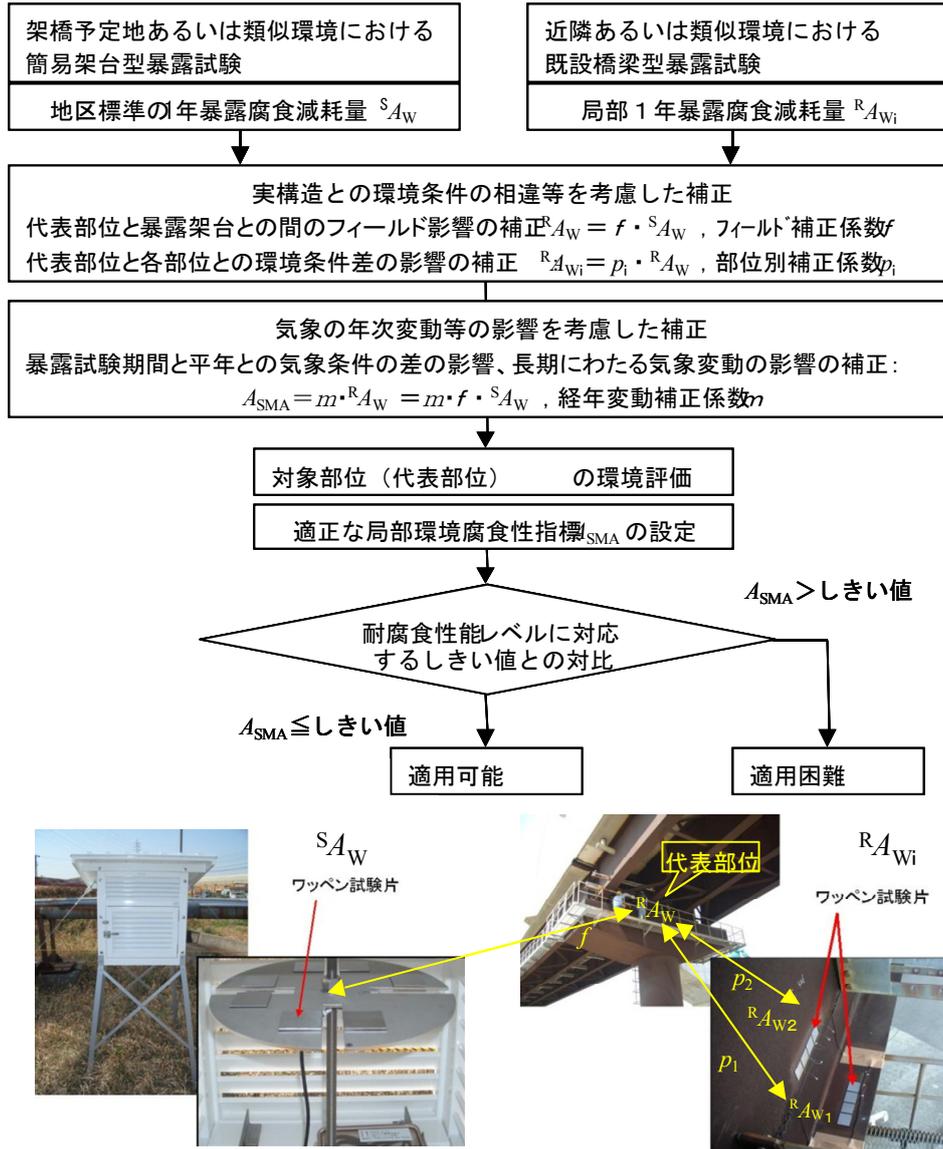


図 2.3.2 短期暴露試験による適用環境評価方法の概念図

ワッペン試験片を用いた短期暴露試験結果を、実橋における腐食減耗量へと結び付ける方法として、以下の方法を提案し、本研究においては、これらの補正方法に関する基礎データを収集する。

百葉箱などの暴露容器により得られるワッペン試験片の腐食減耗量平均値 S_{Aw} と、橋の代表部位である下フランジの上下平均でのワッペン試験片腐食減耗量 R_{Aw} の関係は、フィールド補正係数 f を用い、式(2.3.1)で表わされる。

$$R_{Aw} = f \cdot S_{Aw} \tag{2.3.1}$$

ここで、 R_{Aw} : 橋の代表部位である下フランジの上下平均でのワッペン試験片腐食減耗量
 S_{Aw} : ワッペン試験片の腐食減耗量平均値
 f : フィールド補正係数

同様に、部位別補正係数を p_i とすれば、部位別の腐食減耗量 ${}^R A_{Wi}$ への補正は、式(2.3.2)により表わされる。

$${}^R A_{Wi} = p_i \cdot {}^R A_W \quad (2.3.2)$$

ここで、 ${}^R A_{Wi}$ ：部位別の腐食減耗量

p_i ：部位別補正係数

${}^R A_W$ ：橋の代表部位である下フランジの上下平均でのワッペン試験片腐食減耗量

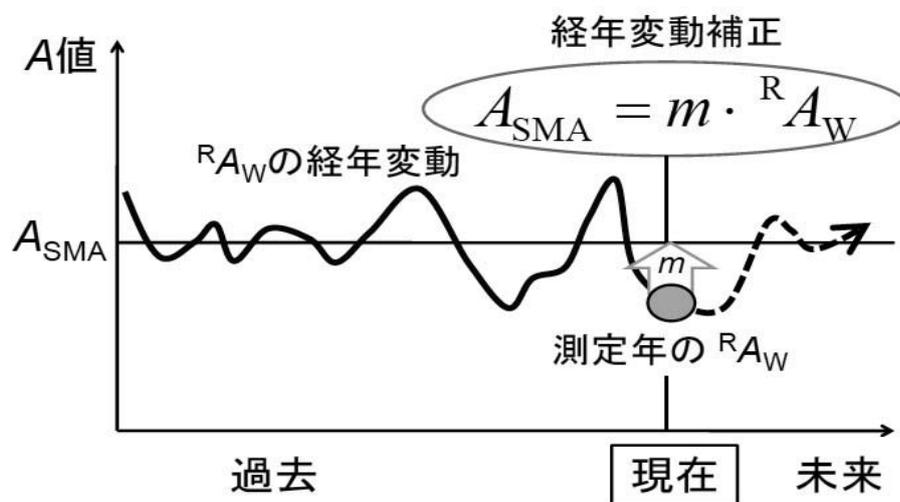


図 2.3.3 気象の年次変動による A 値の変動と測定年の実橋の代表部位におけるワッペン腐食減耗量 ${}^R A_W$ 値からの適正 A_{SMA} 値への補正法 (イメージ)

図 2.3.3 にイメージを示すように、気象には年次変動があるため、 A 値が年次により変動することが確認されている^{2.9)}。これに対処するため、短期の気象変動の影響については、経年変動補正係数 m を用いて長期の平均値を補正して A_{SMA} 値とすることを提案する。

橋の代表部位における適正な A_{SMA} 値は式(2.3.3)により求めることを提案する。年次変動を補正する係数 m 値の設定方法の例は文献 2.9)に示されているので、それを参考にできる。

$$A_{SMA} = m \cdot {}^R A_W = m \cdot f \cdot {}^S A_W \quad (2.3.3)$$

ここで、 A_{SMA} ：局部環境腐食性指標

m ：年次変動を補正する係数

${}^R A_W$ ：橋の代表部位である下フランジの上下平均でのワッペン試験片腐食減耗量

${}^S A_W$ ：ワッペン試験片の腐食減耗量平均値

式(2.3.3)を変形すると、実測される S_{Aw} 値に対する橋の代表部位の適正 A_{SMA} 値の倍率 s (以下、「補正倍率」という。)を、式(2.3.4)で表わすことが可能となる^{2.9)}。

$$s = \frac{S_{Aw}}{A_{SMA}} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{f} = s_m \cdot s_f \quad (2.3.4)$$

- ここで、 s ：橋の代表部位の適正 A_{SMA} 値の倍率
 S_{Aw} ：ワッペン試験片の腐食減耗量平均値
 A_{SMA} ：局部環境腐食性指標
 m ：年次変動を補正する係数
 f ：フィールド補正係数
 s_m ：経年変動補正倍率
 s_f ：フィールド補正倍率

図2.3.4に、本研究において検討した橋の代表部位の設定方針を示す。橋の代表部位として、全国41橋暴露試験の際に暴露試験片が取り付けられた中桁下部の橋台に近い位置を想定している。この部位は橋の中でも降雨による洗浄が期待できないため、橋の部位の中では長期に見て相対的に厳しい腐食環境である。つまり、実橋においては、桁端部等の局部環境の影響が大きく出る範囲などの特定の条件の場合を除き、一般には相対的に厳しい腐食環境となる桁内側の下フランジ部を橋の代表部位とすることになると考えられる。

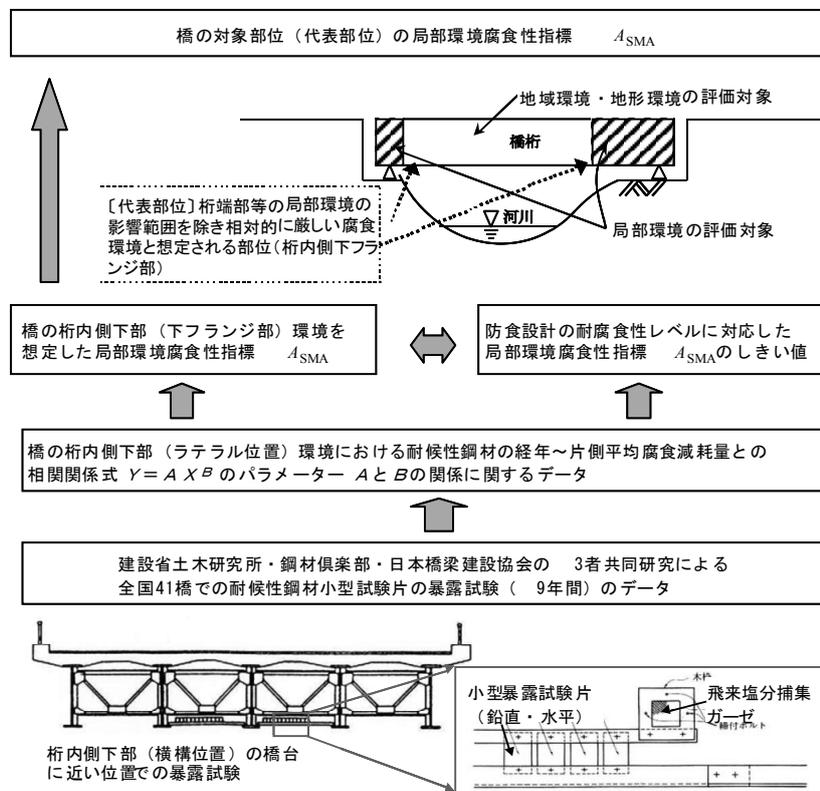


図 2.3.4 全国 41 橋暴露試験データ採取位置を参考とする橋の代表部位の設定方針

図 2.3.5 は暴露位置の例を示す。このように、近接した場所において暴露試験を実施したとしても、局所的な環境が完全には一致しないことも考慮に入れなければならない。橋の一般の環境区分の例を表 2.3.1 に示す。この表のように、耐候性鋼橋の耐久性に影響を及ぼす要因としては、様々な現場条件や影響要因が想定される。ワッペン試験片を用いた暴露試験の技術の信頼性・実用性を高めるための検討フローを、図 2.3.6 に示す。図中の項目について、技術改良とデータ蓄積を図っていく必要がある。

本研究では、より安価で簡単な暴露試験方法を模索するために、文献 2.1)にて提案された標準型百葉箱に加え、図 2.3.7 に示すような木製小型百葉箱および塩ビ製円筒型暴露容器を新たに考案・試作し、これらを用いたワッペン暴露試験データを集積する。

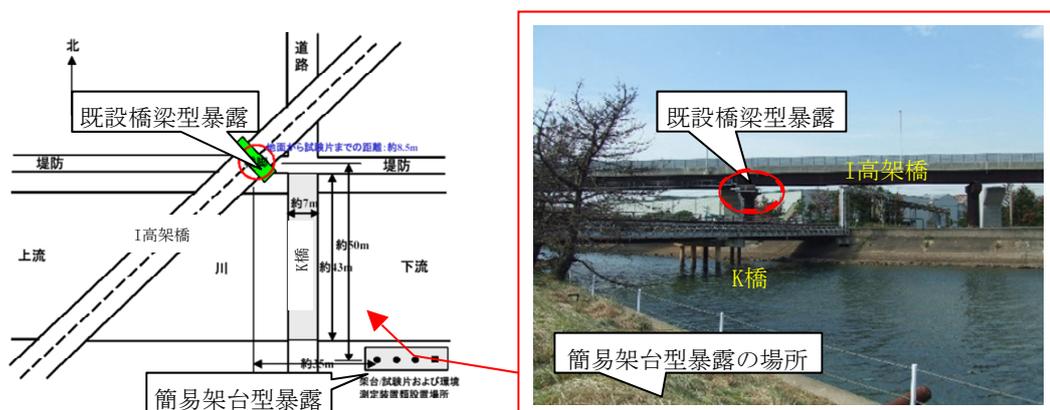


図 2.3.5 現地環境評価のための暴露試験位置の例（愛知県）

表 2.3.1 橋の環境区分として想定される現場条件・影響因子

| 環境区分 | | 環境因子と想定される現場条件・影響要因 | |
|------|----------------------------|---|---|
| 地域環境 | 架橋地点の地域特性により決まり、橋全体に影響する環境 | ・飛来塩分（海塩粒子） | 海岸からの距離減衰、季節風・台風の年次変動 |
| | | ・飛来塩分（凍結防止剤） | 寒冷地における塩化物系凍結防止剤の路面散布量の年次変動 |
| | | ・湿度（鋼表面水分） | 年平均湿度の年次変動、植生 |
| | | ・気温（鋼表面湿度） | 年平均気温の年次変動 |
| 地形環境 | 架橋地点の地形と橋との関係によって作りだされる環境 | ・飛来塩分（海塩粒子） | 桁下空間高、河川に沿った飛来塩分の遡上の有無、海風と橋軸との角度、周辺地形による海風の風向・風速の変化、植生帯等による遮蔽吸収 |
| | | ・飛来塩分（凍結防止剤） | 道路交通量、近接する路線・橋との位置関係 |
| | | ・湿度（鋼表面水分） | 桁下空間高、河川・湖水との距離、河川水量、植生 |
| | | ・気温（鋼表面温度） | 桁下空間高、周辺地形による日陰影響、橋軸方位 |
| 局部環境 | 部位・部材固有の局所的な狭い範囲の環境 | 桁と近接する地山との位置関係、護岸や橋台との位置関係、桁の形状や床版・その他部材との関係（雨がかりの有無、通気性の差異、飛来塩分・結露水等の滞留の有無）、植生 | |

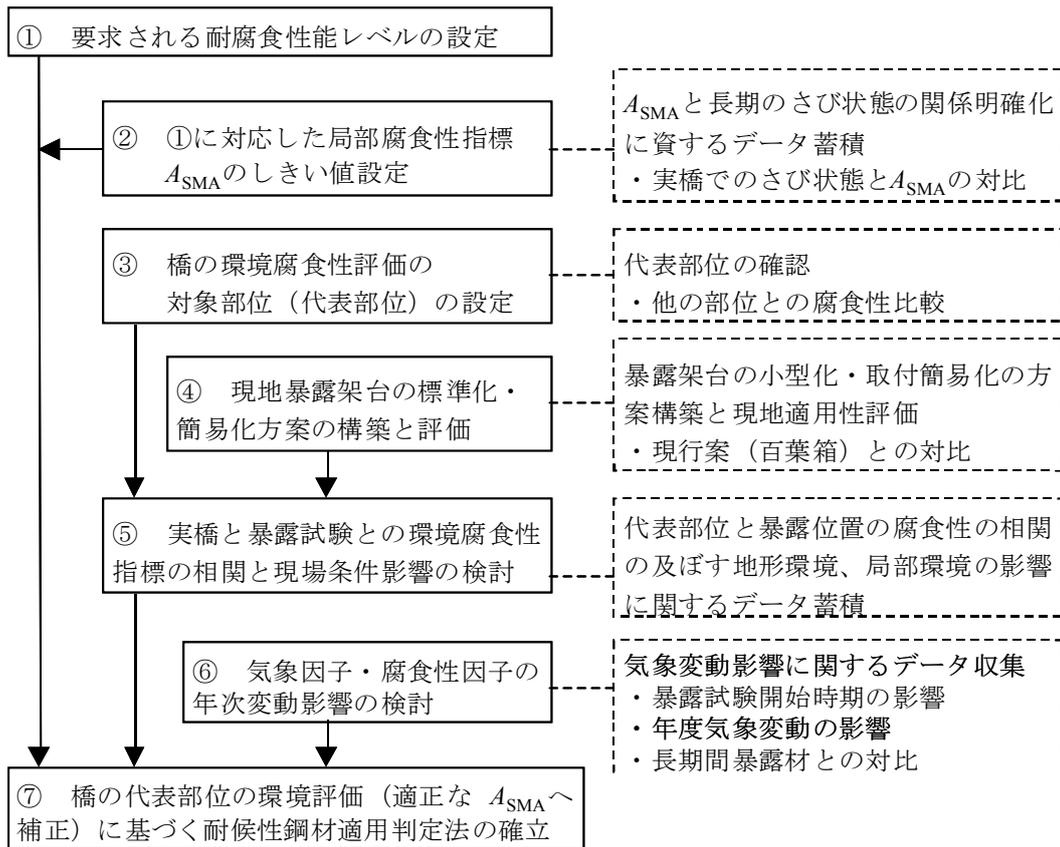


図 2.3.6 ワッペン式暴露試験を用いた適用環境評価技術の検討課題



図 2.3.7 ワッペン試験片用小型暴露容器の例（木製小型百葉箱および塩ビ製円筒型暴露容器）

2.4 提案手法のニッケル系高耐候性鋼材への適用性

ニッケル系高耐候性鋼材は、JIS 耐候性鋼材に対して主にニッケル (Ni) を多く (1~3%) 添加して耐塩害性を高めた耐候性鋼材であり、1997 年より国内で実適用が開始されている^{2.13),2.14)}。ニッケル系高耐候性鋼材は、引張試験、シャルピー衝撃試験などの化学成分以外の機械的性質は JIS 耐候性鋼材と同一で、引張強さ 400N/mm² 級・490N/mm² 級・570N/mm² の各強度グレードがあり、耐食性能以外の設計は JIS 耐候性鋼材と同様に実施することができる。また、各母材の化学成分系に対応した溶接材料および接合材料(高力ボルト)も開発され、実用化されている^{2.1)}。

耐候性能に関しては、耐候性合金指標 ν 値にて評価することが提案されている^{2.12)}。この指標は、各種鋼材の耐候性に及ぼす合金元素の影響をそれぞれの元素ごとに検討して定められたものであり、東京工業大学創造プロジェクト研究体 SIG1 (高性能鋼材の橋梁への適用に関する研究会) (以下、「東工大創プロ」という。)での研究成果を基に提案されたものである。この耐候性合金指標では、 $[x]$ を合金成分 x の mass%値を表すものとして、 $0 \leq [C] < 1.5$ 、 $0.1 < [Si] < 5$ 、 $0.1 < [Mn] < 10$ 、 $0 \leq [P] < 0.15$ 、 $0 \leq [S] < 0.03$ 、 $0 \leq [Cu] < 1.1$ 、 $0 \leq [Ni] < 5$ 、 $0 \leq [Mo] < 0.6$ 、 $0 \leq [Ti] < 0.12$ の範囲内において、次式により計算される ν 値が高い鋼材ほど、高い耐候性能を示すとされている。

$$\nu = 1 / \{ (1.0 - 0.16[C]) \cdot (1.05 - 0.05[Si]) \cdot (1.04 - 0.016[Mn]) \cdot (1.0 - 0.5[P]) \cdot (1.0 + 1.9[S]) \cdot (1.0 - 0.10[Cu]) \cdot (1.0 - 0.12[Ni]) \cdot (1.0 - 0.3[Mo]) \cdot (1.0 - 1.7[Ti]) \} \quad (2.4.1)$$

ただし、 $0.9 \leq \nu \leq 2.5$

従来、耐候性元素とされていたクロム (Cr) についてはさび皮膜形成作用による腐食抑制効果が期待できるものの、例えば図 2.4.1 に示すように、高飛来塩分環境下の結露条件においてある量の Cr 添加は、腐食界面の低 pH 化を促し、大気腐食が加速されるという報告がある^{2.15)}。現時点では、高飛来塩分環境下における制御不能な不確定要因を排除するため、JIS 耐候性鋼材に比べて飛来塩分環境の厳しい箇所に適用されるニッケル系高耐候性鋼材は、一般に Cr 無添加とすることが基本とされている。したがって耐候性合金指標 ν の評価式(2.4.1)は Cr 無添加鋼への適用が原則とされている。ただし、不可避免的に混入する不純物 Cr や、JIS 耐候性鋼材に含まれる程度の Cr 量(0.5mass%)以下であれば、その含有を許容しても大きな誤差を生じないと考えられている^{2.16)}。

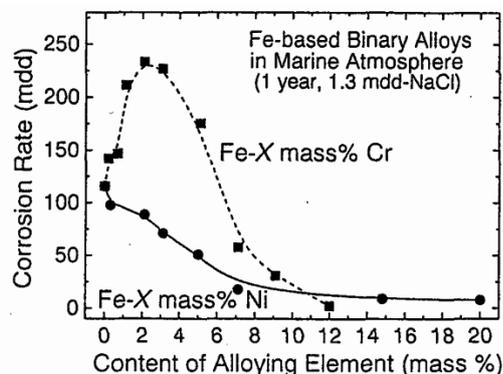


図 2.4.1 鋼材へのニッケルおよびクロム添加が及ぼす腐食減耗速度への影響

表 2.4.1 ニッケル系高耐候性鋼材の種類と特性

| 種類の記号 | 化学成分 | 引張試験、シャルピー衝撃試験 |
|--------------|---|----------------|
| SMA400W-MOD | 3%Ni-Cu 系 2.7%Ni-Cu-Ti 系 2.5%Ni-極低炭素-Cu 系 1.5%Ni-Mo 系 1%Ni-Cu 系 1.0%Ni-Cu-Ti 系 | SMA400W と同一 |
| SMA490W- MOD | | SMA4900W と同一 |
| SMA570W- MOD | | SMA570W と同一 |

表 2.4.2 引張強さ 490N/mm² 級鋼の化学成分(例)

| 種類 | 摘要 | 化学成分(mass%) | | | | | | | | | | ν値 |
|---------------|-----|-------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Cu | Cr | Ni | Mo | Ti | |
| 高Ni系 | 成分例 | 0.06 | 0.20 | 0.85 | 0.005 | 0.002 | 0.33 | 0.02 | 3.01 | 0.00 | 0.01 | 1.53 |
| | | 0.05 | 0.32 | 0.50 | 0.006 | 0.001 | 0.47 | - | 2.71 | - | 0.037 | 1.57 |
| | | 0.02 | 0.27 | 0.91 | 0.008 | 0.003 | 0.36 | 0.03 | 2.70 | - | 0.014 | 1.49 |
| 低Ni系 | 成分例 | 0.09 | 0.21 | 1.37 | 0.012 | 0.002 | 0.75 | 0.02 | 1.18 | 0.01 | 0.00 | 1.21 |
| | | 0.07 | 0.28 | 0.71 | 0.008 | 0.002 | - | 0.04 | 1.50 | 0.29 | - | 1.27 |
| | | 0.06 | 0.25 | 1.09 | 0.010 | 0.002 | 1.00 | 0.04 | 1.02 | - | 0.047 | 1.31 |
| JIS G 3114 | 規定値 | - | 0.15 | - | - | - | 0.30 | 0.45 | 0.05 | - | - | - |
| | | 0.18 | 0.65 | 1.40 | 0.035 | 0.035 | 0.50 | 0.75 | 0.30 | - | - | - |
| SMA490AW | 成分例 | 0.14 | 0.20 | 0.95 | 0.018 | 0.010 | 0.35 | 0.50 | 0.20 | - | - | 1.01 |

ν 値の計算にあたっては、母材が耐候性鋼材としての基本機能を有していることが前提であるとされており、防食に関わる化学成分としては、種々の添加元素のうち Cu または Ni のいずれか 1 種以上、望ましくは 2 種以上を所定量含有していることが条件である^{2,16)}。また、橋梁用鋼材として溶接性などを確保するためにその他添加元素への配慮も必要となるが、現在国内メーカーで製造・販売されている JIS 耐候性鋼材や、表 2.4.1 に示すニッケル系高耐候性鋼材はこの前提条件を満足し、溶接性などへの配慮もなされている。ニッケル系高耐候性鋼材は現時点で JIS 規格が制定されておらず、メーカーごとに成分系が異なっているが、これまで適用実績のあるニッケル系高耐候性鋼材について、表 2.4.1 に種類と特徴を、表 2.4.2 に化学成分の例をそれぞれ示す。

ニッケル系高耐候性鋼材の A_S 値および B_S 値は、耐候性合金指標 ν 値を用いて、それぞれ A_{SMA} 値および B_{SMA} 値から次の経験式で算定することが提案されている^{2,12)}。

$$A_S / A_{SMA} = -0.144 + 4.95 \nu^{-1} - 13.37 \nu^{-2} + 15.03 \nu^{-3} - 5.45 \nu^{-4} \quad (2.4.2)$$

$$B_S / B_{SMA} = 0.5545 + 0.45 \nu^{-1} \quad (2.4.3)$$

これらの関係式を用いると、JIS 耐候性鋼材の初年腐食量 A_{SMA} 値を決定した場合、ニッケル系高耐候性鋼材の任意の期間における予測腐食減耗量 Y を計算で求めることができ、予測腐食減耗曲線を描

くことができる。また上記の A_S/A_{SMA} 比や B_S/B_{SMA} 比は長期暴露データによる回帰指標の比較であるため、保護性さびによる防食機能が十分発揮されない1年暴露で得た腐食量比とは異なる場合もある点には注意が必要である。比較的厳しい環境条件である飛来塩分量が 0.05mdd を超えるような条件においても、十分に保護性さびの形成が期待できる条件においては、図 2.4.2 に示されるとおり、 ν 値と A_S/A_{SMA} の関係はおおむね整合していることが示されている^{2.1)}。

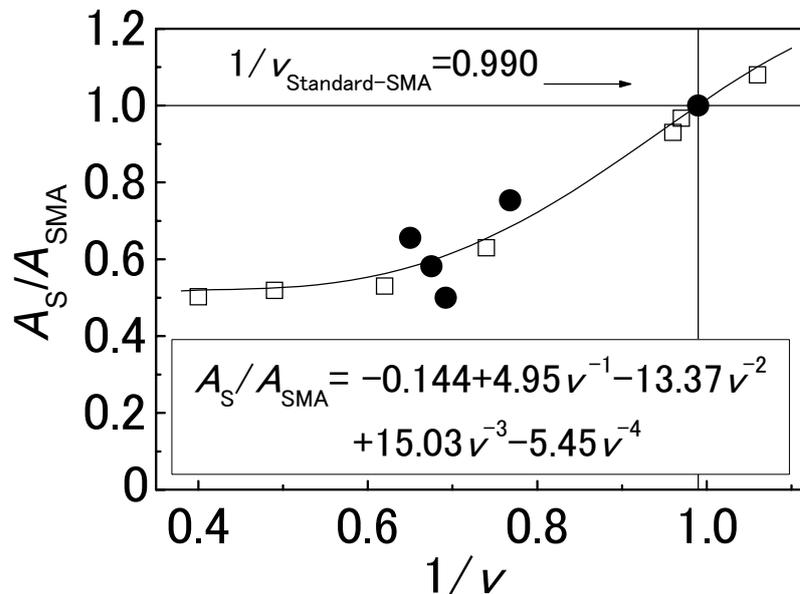


図 2.4.2 A_S/A_{SMA} と ν 値の関係の検証例

本技術を適用することで、局部環境腐食性指標 A_{SMA} が定まると任意の耐候性合金指標 ν 値を持つ耐候性鋼材について 100 年後の予測腐食減耗量 $Y(X=100)$ を計算することができることになる。図 2.4.3 は、一例として、 $A_{SMA}-\nu-Y$ の関係を計算によりプロットしたものである^{2.18)}。この図を用いて適用環境の腐食性に対して防食の要求性能に適合する鋼材の選定や、設計で考慮すべき腐食減耗量を検討することが提案されている^{2.1)}。なお、図 2.4.3 の $A-\nu-Y$ プロット図を用いた検討を実施するにあたっては、補正等により適正化した局部環境腐食性指標 A_{SMA} 値を用いる。

提案されている腐食減耗予測シミュレーション技術では、暴露試験における環境因子測定値のばらつきに起因する誤差を考慮して平均腐食量を確率統計論的に計算することが提案されており、図 2.4.3 では、正規確率 50% の予測腐食減耗量の計算値が予測値として表示されている。

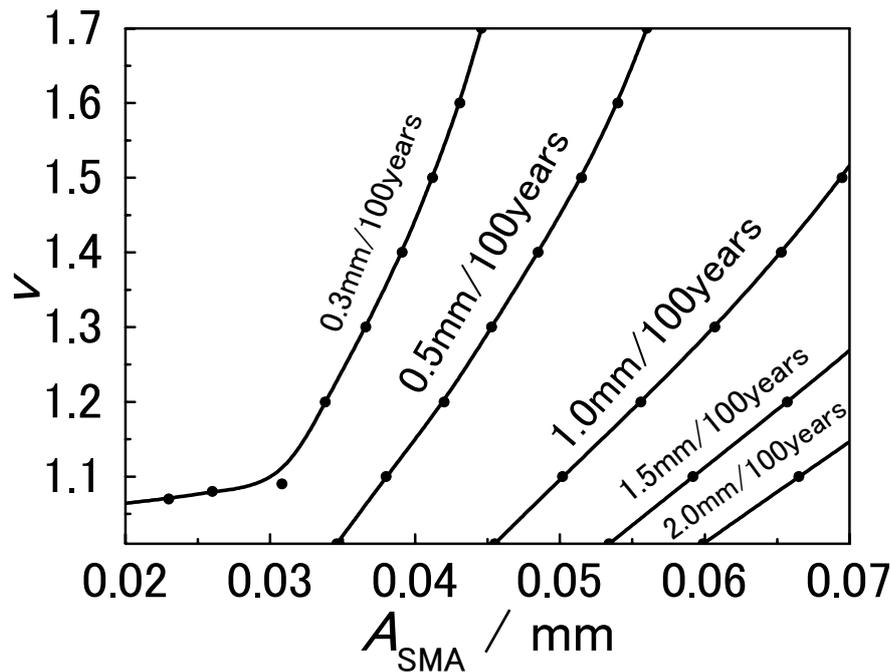


図 2.4.3 局部環境腐食性指標 A_{SMA} と耐候性合金指標 v から計算される 100 年後の予測腐食減耗量 $Y(X=100)$

2.5 経年的環境変化と腐食減耗挙動

文献 2.1) で適正な A_{SMA} のしきい値が検討されており、文献 2.2) で示された 3 者共研の 41 橋暴露試験の 9 年間の試験結果の回帰分析結果から、 A_{SMA} 値と 100 年の腐食減耗量の推定値の関係をプロットしたものが図 2.5.1 である。図中には、Type-A^{2.6)} と Type-B^{2.7)} の腐食減耗予測モデルにより計算された 100 年後の予測腐食減耗量に対し、全国 41 橋データの全てを用いた回帰により外挿した 100 年後の回帰腐食減耗量をプロットしている。この図より、 A_{SMA} のしきい値として 0.03mm 以下がひとつの目安として提案されている。ただし、図 2.5.1 中に示すとおり、実測データの全てを用いた回帰により得た A_{SMA} 値や回帰腐食減耗量をみると、 $A_{SMA} < 0.03\text{mm}$ の領域であっても、腐食減耗予測式から理論計算される 100 年後の予測腐食減耗量を大きく外れるケースが数点生じている。具体的には、a 橋、b 橋、及び c 橋における暴露試験結果である。

図 2.5.2 に、傾向を外れた 3 橋へ腐食減耗予測モデル^{2.8)} を適用し、暴露試験結果と比較したものを示す。図中の実線は暴露試験データの初期のデータ(a 橋、b 橋は 1~9 年、c 橋は 1~3 年)を使った回帰曲線、破線は 18 年目での実測結果にフィットするように調整した回帰曲線をそれぞれ表している。初期データによる回帰曲線(実線)は、暴露年数の少ない部分とよく一致しているが、18 年目の結果はいずれも初期データからの予測を表す実線から外れており、18 年目の結果にフィットさせた破線とは傾向が異なることがわかる。図 2.5.2 の回帰曲線の右側に、3 者共研の暴露試験における A_{SMA} と B_{SMA} の関係を図化し、各橋での A_{SMA} 、 B_{SMA} のシフトをプロットした図を示す。この図に着目すると、a 橋では約 7 年時点で適正な A_{SMA} 値が 0.016mm から 0.045mm にシフトし、b 橋では約 7 年時点で 0.024mm から 0.040mm にシフトし、さらに c 橋では 3 年時点で 0.019mm から 0.037mm にシフトしたと考えると、腐食減耗予測に用いる $A_{SMA} - B_{SMA}$ チャートの一般的傾向範囲 (Natural Upper-

Natural Lower の中間) に全て入ることがわかる。また、図 2.5.2 中には、参考までに暴露試験片の外観画像も表示したが、破線上に載る回帰データでは外観評点は 2 となっており、環境変化が一つの原因となっていると考えられる。したがって、今後の長期的傾向を把握する上では、a 橋の適正 A_{SMA} 値は 0.045mm、b 橋は 0.040mm、及び c 橋は 0.037mm とするのが妥当と考えられる。図 2.5.2 においてこれらを考慮すれば、実測値と理論値は良く合っていると評価される。

この結果を考慮すると、無塗装耐候性鋼橋を維持管理するにあたっては、環境の腐食性が経年的に大きく変化して異状腐食が発生する可能性があるため、それを想定して定期的に点検を行い、異常腐食が生じていないことを確認する必要があることがわかる。

一方で、無塗装橋に関する異常腐食を生じさせない良好な状態を保持するための維持管理手法(2.1)、(2.9)、(2.17)、(2.18)についての検討が行われており、本研究で取り組んだワッペン試験法を予防保全の実施に向けて応用、展開することによって、耐候性鋼橋の適用性検討をより安価で簡便に実施することや、維持管理による耐候性鋼橋を長寿命化することなどが期待される。そのための課題としては、提案されているワッペン試験法の実施方法、ならびに得られたデータを用いた耐候性鋼橋の適用環境評価手法の更なる高度化が挙げられる。次章以降で、これらについて検討した結果を報告する。

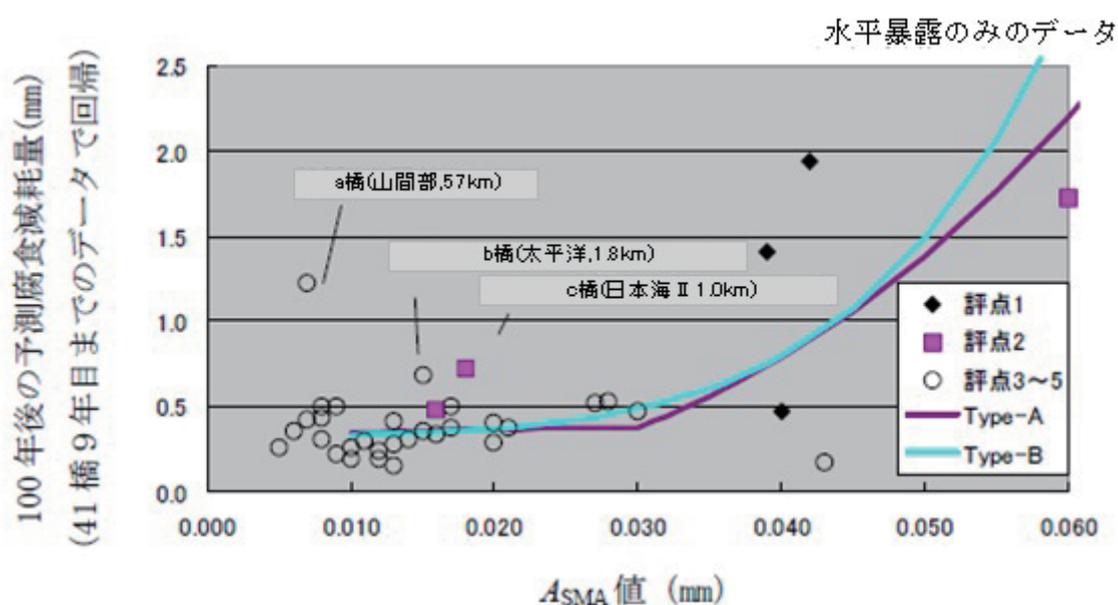


図 2.5.1 100 年後の回帰および予測腐食減耗量と A_{SMA} 値の関係^{2.1)}

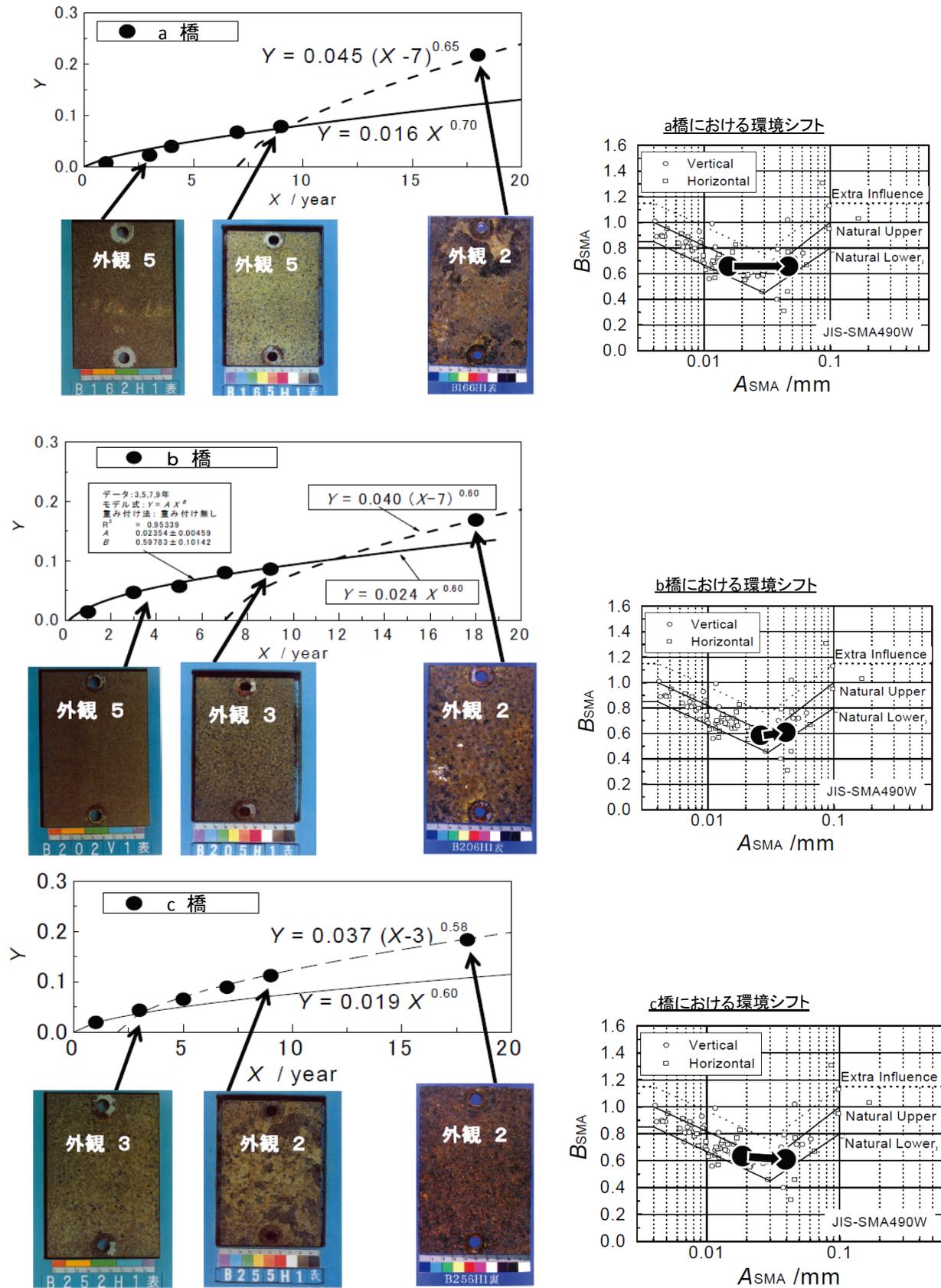


図 2.5.2 a 橋、b 橋、c 橋における実測暴露試験データの腐食減耗予測モデルによる解釈

【2章参考文献】

- 2.1) 日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 73, 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術, 2006.10
- 2.2) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) 整理番号第 88 号, 1993.3
- 2.3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2012.3
- 2.4) 三木千壽, 市川篤司：現代の橋梁工学—塗装しない鋼と橋の技術最前線—, 数理工学社, 2004.12
- 2.5) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.12
- 2.6) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦, 松岡和巳, 原田佳幸：耐候性鋼の腐食減耗予測モデルの研究, 土木学会論文集 No. 780/I-70, pp. 71-86, 2005.1
- 2.7) 鹿毛勇, 塩谷和彦, 竹村誠洋, 小森務, 古田彰彦, 京野一章：実曝露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測, 材料と環境 Vol. 55, pp. 152-158, 2006.
- 2.8) 日本鉄鋼連盟, 日本橋梁建設協会：耐候性鋼の橋梁への適用, 2010.6
- 2.9) 日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 86, 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全, 2009.9
- 2.10) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XV) 整理番号第 71 号, 1992.3
- 2.11) 堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計：各種金属材料および防錆被覆の大気腐食に関する研究 (第 5 報) 金属素材類暴露 5 ヶ年の結果, 防食技術 16(4), pp. 153-158, 1967.
- 2.12) 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法の提案, 土木学会論文集 No. 738/I-64, pp. 271-281, 2003.
- 2.13) 保坂鐵矢, 加藤 順, 楠 隆：高耐候性鋼の開発と無塗装橋梁への適用, 橋梁と基礎, Vol 36, No 6, pp 31~ 38, 2002.6
- 2.14) 南邦明, 徳富恭彦, 田中陸人, 鹿毛勇, 松下政弘：整備新幹線の鋼鉄道橋におけるエッケル系高耐候性鋼の適用, 橋梁と基礎, Vol 47, No 9, pp. 12-17, 2013.9
- 2.15) 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, 2003.10
- 2.16) 紀平寛：耐候性合金指標 (v 値) と腐食減耗予測 (橋梁分野), 溶接学会誌 Vol. 76, pp. 38-41, 2007.
- 2.17) 紀平寛：無塗装橋梁用鋼材のプロダクト・セキュアネス向上への取り組み, セイフティ エンジニアリング, 第 36 巻 2 号, pp. 10-15, 2009.
- 2.18) 紀平寛：無塗装耐候性鋼橋梁の防食とセキュアネス, ふえらむ 14, pp. 292-298, 2009.