

実橋調査に基づく耐候性鋼橋梁の 腐食要因とさびレベル推定に関する検討

麻生稔彦¹・後藤悟史²・田畑 晃³・宮本文穂⁴

¹正会員 山口大学大学院准教授 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:aso@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 宇部興産機械(株) 橋梁・鉄構設計Gr. (〒755-8633 宇部市大字小串字沖の山1980番地)

³学生会員 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁴フェロー会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

耐候性鋼橋梁の建設数は増加するものと予想されるが、本来の防食性能を発揮させるためには、耐候性鋼材の特性ならびに使用環境について理解することが必要である。本報では九州・山口地域の耐候性鋼橋梁を対象としたさび外観調査結果をもとに、さび外観評点と環境要因との関係を検討した。構造データ、地形データおよび気象データを説明変数とした数量化理論I類による分析から、さび外観評点には離岸距離のみならず平均気温や降水日数が影響することが明らかとなった。また、数量化理論I類により得られる回帰式を用いて九州・山口地域の橋梁のさびレベル推定を行った結果、推定値と調査値は良い対応が見られた。

Key Words : *weathering steel bridge, rust level, quantification method I, meteorological condition*

1. はじめに

耐候性鋼材は保護性さびにより腐食速度を十分に低減しうる機能を持っており、橋梁に適用した場合には従来の塗装による防食に比べ、維持管理費用の大幅な低減が見込まれている。耐候性鋼材を使用した橋梁は、我国においても40年近い実績があり、今後も建設数は増加するものと予想される。耐候性鋼橋梁に本来の防食性能を発揮させるためには、耐候性鋼材の特性ならびに使用環境についての理解が欠かせない。橋梁の建設地点の環境は千差万別であり、耐候性鋼材の使用環境に適した鋼材選定、さび安定化補助処理および構造細目の検討が必要になる。

耐候性鋼橋梁はミニマムメンテナンス³⁾を実現しうる橋梁であるが、点検業務が欠かせない。すなわち、設計時に想定した防食性能を確認する必要があり、期待する防食性能の発現が困難と判断された場合には、予防保全の観点からさらに点検・保守に傾注しなければならない。期待する防食性能が発現できない原因としては、腐食環境が設計時の想定と異なることが多いと考えられる。腐食の進展に関する既往の研究には、紀平ら³⁾の成果が見られるが、複雑な構造を持つ実橋梁のデータに基づいた検討も必要であろう。

近年になり、耐候性鋼橋梁の腐食実態調査が様々な地域で実施されてきている⁴⁾⁸⁾。既設の耐候性鋼橋梁では、凍結防止剤の影響⁹⁾や構造に起因する水の不始末によるもの⁸⁾など、ある程度原因が特定される腐食も報告されている。また、そのような明確な原因が特定されないにもかかわらず、道路橋示方書に示されている無塗装耐候性鋼橋梁の適用地域⁹⁾において、腐食の進んだ事例が報告されている。耐候性鋼材の腐食に影響を与える因子は塩分と水分が代表的であり、鋼材の腐食は橋梁のおかれた地域環境、地形環境および局部環境に左右される¹⁰⁾。「鋼道路橋塗装・防食便覧」¹⁰⁾によれば、地域環境とは架橋地点を代表し橋全体に影響する環境であり、地形環境とは、架橋地点の地形と橋との関係によって作り出される環境とされている。また、局部環境とは部材そのものによって作り出されるような局部的な狭い範囲の環境である。これらの環境が腐食に与える影響を明らかにできれば、耐候性鋼材が持つ特性を十分に発揮できる計画、設計が従来以上に可能になると考えられる。しかし、これまでの調査では個々の橋梁の状態をまとめているものがほとんどであり、腐食環境とさびの進展に関して、実橋梁における調査結果をもとに体系立てて検討した例は見られない。

表-1 収集データ

	量的データ	質的データ
構造データ	経過年数, 橋長	伸縮装置種類
地形データ	離岸距離	桁下空間の利用状況

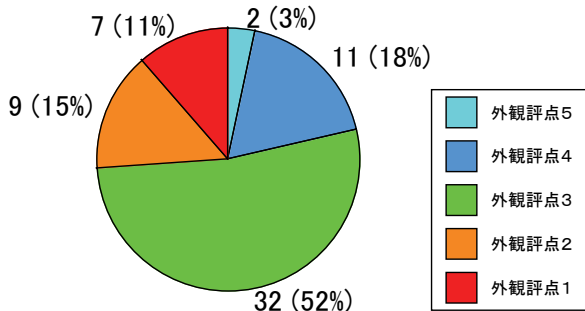


図-1 外観評点別橋梁数

本報では、九州・山口地域の耐候性鋼橋梁を対象として、それらの橋梁のさび外観調査結果をもとに、さび外観評点と環境要因との関係を検討する。これまで、耐候性鋼橋梁の使用可否は主として離岸距離に基づいておこなわれている。これは飛来塩分の影響を考慮するためであるが、さびの進展には橋梁のおかれている環境、特に気象要因も大きく影響すると考えられる。そこで、本研究では気象データも含めた解析を数量化理論I類を用いておこない、橋梁のさび外観評点を環境要因による重回帰式で表現することを試みる。また、数量化理論I類により得られる回帰式を用いて、実橋梁のさびレベル推定の可能性についても言及する。

2. 使用データ

(1) 橋梁データ

九州・山口地区では337橋の耐鋼性鋼橋梁について、さび外観調査が実施されている⁴⁾。調査橋梁のうち、66%の橋梁が鉸桁形式であり、さらに全体の78%の橋梁が無塗装仕様である。多くのデータに基づいた検討をおこなう観点から、今回は無塗装鉸桁形式の耐候性鋼橋梁を検討の対象とする。これらの橋梁の調査票には種々の項目についての記載があるが、本研究では、さびの生成・促進に影響をあたえるであろう要因として、表-1に示す構造データおよび地形データを選定した。なお、表-1において量的データとは、定量的に数値で与えられるデータであり、質的データは数値での表現が困難なデータを示している。このう

表-2 さび外観評点¹⁾

状態	評点	目視外観 (例)	さび厚
正常	5	腐食が進まず、さびも薄い	200 μ m程度未満
	4	平均外観粒径1mm程度以下で均一なさび	400 μ m程度未満
	3	平均外観粒径1~5mm程度のさび	400 μ m程度以上
要観察	2	外観粒径5~25mm程度のうろこ状剥離があるさび	800 μ m程度未満
異常	1	層状剥離が起きているさび	800 μ m程度以上



写真-1 評点1の例



写真-2 評点2の例

ち、離岸距離は地域環境に関係するものであり、橋長および桁下空間の利用状況は地形環境に関係するものと考えている。また、伸縮装置の種類は桁端の局部環境に関係する。今回の検討対象地域は道路橋示方書⁹⁾における日本海沿岸部II, 太平洋沿岸部および瀬戸内海沿岸部を含んでいる。それぞれの地域では風向が飛来塩分量に大きく影響を与えると考えられるため、離岸距離と卓越風向を相互に考慮した検討が望ましい。しかし、卓越風向を考慮するためには地形図の詳細な検討およびシミュレーションが必要なため、今回は離岸距離のみを用いている。橋梁の腐食を促す塩分は、海塩のみでなく凍結防止剤に由来するものも無視できないと考えられる。しかし、現状では凍結防止剤の使用量や飛散状況は明確になっていない。本検討においても凍結防止剤の影響は考慮していないが、橋梁架設地域の気温が凍結防止剤の使用量と間接的にはある

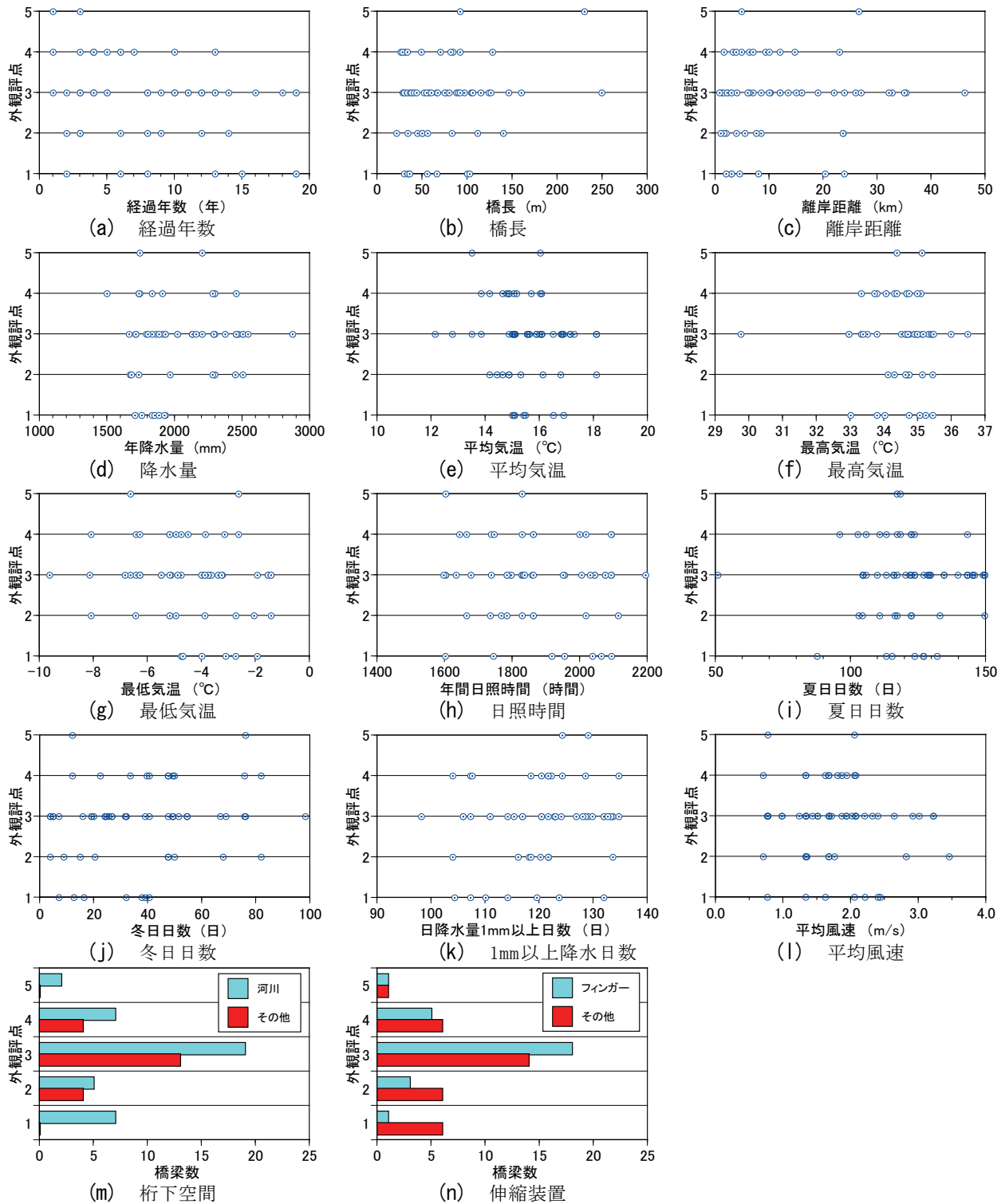


図-2 外観評点とアイテムの関係

が関連するものと考え、後に述べる気象データを考慮する。

これらの事項が全て記録されている61橋について、以後の検討を進める。これらの61橋について、さび外観評点別の橋梁数を図-1に示す。さび外観評点は耐候性鋼橋梁の点検に一般的に用いられており、その内容を表-2に示す。なお、本研究では、各

橋梁の調査部位のうち最も評点の低い値を、その橋梁のさび外観評点としている。61橋のうち、経過観察が必要な評点2および1の橋梁は全体の26%である16橋であり、45橋は評点3以上の正常な状態である。写真-1は、層状剥離さび(評点1)の例であり、写真-2は下フランジに発生した評点2のさびの例である。

図-2(a)~(c)に橋梁に関するデータ(以下、アイテム

表-3 気象アイテム相関係数

	年降水量	平均気温	最高気温	最低気温	年間日照時間	夏日日数	冬日日数	日降水量1mm以上日数	平均風速	平温期度日	高温期度日	低温期度日	平均日降水強度
年降水量	1.000												
平均気温	0.124	1.000											
最高気温	-0.045	0.424	1.000										
最低気温	-0.258	0.787	0.190	1.000									
年間日照時間	-0.068	0.449	0.149	0.217	1.000								
夏日日数	0.333	0.680	0.753	0.225	0.271	1.000							
冬日日数	0.171	-0.829	-0.153	-0.969	-0.310	-0.237	1.000						
日降水量1mm以上日数	0.459	-0.040	-0.045	-0.080	-0.738	0.152	0.098	1.000					
平均風速	-0.077	0.327	-0.055	0.427	0.389	-0.157	-0.487	-0.263	1.000				
平温期度日	-0.435	0.138	-	-	0.085	-0.577	-0.634	-0.254	0.560	1.000			
高温期度日	0.313	0.661	-	0.217	0.261	-	-0.226	0.135	-0.136	-0.566	1.000		
低温期度日	-0.270	0.776	0.190	-	0.353	0.241	-	-0.153	0.436	0.612	0.233	1.000	
平均日降水強度	-	0.165	-0.008	-0.241	0.347	0.294	0.133	-	0.069	-0.342	0.282	-0.212	1.000

ムと称す)のうち、量的に表されるアイテムとさび外観評点の関係を示す。今回の検討対象とした全ての橋梁が建設後20年以内にあり、近年になって耐候性鋼橋梁の建設が進んでいることがわかる。橋長は、150m以下の橋梁がほとんどであり、離岸距離は30km未満が大半である。図-2(m)~(n)は質的アイテムごとに外観評点別の橋梁数を示したものである。ここで、桁下空間の利用状況は、蒸発による橋梁下面への水分の供給が想定される河川とそれ以外に分類した。また、伸縮装置種類については、既往の研究によりフィンガージョイント使用時には良好な外観評点を示す場合が多いことが報告されているため⁴⁾、フィンガージョイントとその他と分類している。今回の橋梁では、河川上に建設された橋梁が多く、伸縮装置別では、非排水型鋼製フィンガーとその他(主としてゴムジョイント)の橋梁数がほぼ同数となっている。

(2) 気象データ

対象とする橋梁を決定したことにより、各橋梁直近のアメダス観測点から、気象データの入手が可能となる。さびの進展には、温度や降水量が関係すると考えられるため、年間降水量、平均気温、最高気温、最低気温、年間日照時間、夏日日数、冬日日数、日降水量1mm以上日数および平均風速の9種類の気象データを収集した。ここで、夏日は最高気温が25℃以上となった日であり、冬日とは最低気温が0℃以下となった日である。また、湿度が公開されているアメダス観測点は少なく、全ての橋梁について収集できなかったため今回は検討の対象としていない。これらのアメダスデータは気象庁のホームページより得た¹²⁾。

図-2(d)~(l)は気象データとさび外観評点の関係である。これらの気象データは、観測点によりやや異なるものの、ほぼ20年間の平均値を用いている。対象としている橋梁は、年降水量がおおむね1500~

3000mm、年間日照時間が1600~2200時間の場所に架設されている。最高気温は1橋を除いてほぼ33~37℃でありばらつきは少ないが、最低気温は-1~-10℃とややばらつきが大きい。

図-2の個々のアイテムと外観評点の間には、明瞭な相関関係は見受けられない。このことより、さびの生成には種々の条件が相互に影響することが確認できる。

3. 気象データの整理

数理化理論I類を適用する場合、説明変数(アイテム)を多くするほど重相関係数や決定係数は高くなり、見かけの精度は向上する。しかし、これはあてはまりが良いだけで、モデルの汎化性能が高いわけではない¹³⁾。そのため、説明変数の絞り込みを行う必要がある。また、アイテム間で相関が高い場合には、一方のアイテムの削除が必要となる¹⁴⁾。表-3の上段は全ての橋梁についての気象アイテム間の相関係数であり、冬日日数と最低気温のように相関係数が非常に高い場合がある。本研究では、アイテムの整理には相関係数を判断基準とし、相関係数が0.7以上である場合には、いずれかのアイテムを用いないものとした。この場合には表-3の温度に関するアイテムおよび冬日、夏日の日数等が該当し、これらのアイテムは直接使用できない。そこで、収集した気象データをもとに、本研究では気温および降水に関するアイテムとして以下の4つを新たに導入する。

1) 高温期度日

さびの生成反応は高温状態でより進む³⁾。そのため、最高気温のような瞬間的な値でなく、高温期の程度と期間を表すパラメータとして、最高気温と夏日日数より高温期度日を次式で設定する。

表-4 アイテム組み合わせ

	地形データ		構造データ			気象データ								
	離岸距離	桁下空間利用状況	経過年数	橋長	伸縮装置	年降水量	降水1mm以上日数	平均日降水強度	平均気温	平温期度日	高温期度日	低温期度日	年間日照時間	平均風速
パターン1	○	○	○	○	○			○		○	○	○	○	○
パターン2	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○		○
パターン3	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○
パターン4	○	○	○	○	○	○	○		○		○			○
カテゴリー区分数 CASE-A	3	2	4	3	2	4	3	3	4	3	3	3	4	4
カテゴリー区分数 CASE-B	5	2	4	3	2	3	3	3	4	3	3	3	3	4

高温期度日 = 最高気温 × 夏日日数 (1)

なお、本論文で用いる度日は、空調分野や生態学で用いられる度日とは異なっている。

2) 低温期度日

高温期度日に対応し低温期の程度と期間を表すパラメータとして、低温期度日を次式で設定する。

低温期度日 = 最低気温 × 冬日日数 (2)

3) 平温期度日

夏日、冬日を除く期間の長さや温度状態を表すために、平温期度日を次式で設定する。

$$\text{平温期度日} = \frac{\text{最高気温} - \text{最低気温}}{2} \times \text{平温日数} \quad (3)$$

ここで、

平温日数 = 365 - (夏日日数 + 冬日日数) (4)

式(3)の温度差/2に代えて平均気温を使用することも考えられるが、表-3より平均気温と他のアイテムの相関が高い。そのため、ここでは最高気温と最低気温の温度差の半分を平温期温度とする。

4) 平均日降水強度

表-3において日降水量1mm以上の日数と年間日照時間の相関が高くなっている。そのため、これらの両アイテムを同時に考慮するために、年降水量を1mm以上の日降水量が観測された日数で除すことにより、平均日降水強度とする。

平均日降水強度 = 年降水量 / 日降水量1mm以上日数 (5)

これらの新たに設定したアイテムおよび他の気象アイテムとの相関係数を表-3下段に示す。表中の「-」は、そのアイテムの計算に用いた気象アイテムの位置を示す。新しいアイテムを導入することによりアイテム間の相関係数は小さくなり、分析に必要なデータの整理を行うことができた。ただし、低温期度日と平均気温の相関係数が0.7以上となっているため、これらは同時には用いないこととする。

4. 数量化理論 I 類による分析

実橋梁における調査結果をもとに、耐候性鋼橋梁のさび生成におよぼす要因の解明およびさび外観評点予測式の構築を目的として、数量化理論 I 類を用いた分析を行う。数量化理論 I 類では、数的データのみでなく質的データを考慮した分析が可能となる。一方で、数量化理論 I 類は重回帰分析において説明変数が質的に与えられている場合に相当する。そのため、アイテムの組み合わせにより、適合や予測の良否が発生しうる。そこで、本研究では、表-3の相関関係を考慮し、表-4上段の4パターンについて検討をおこなう。地形データと構造データは全てを使用し、気象データを4種類の組み合わせとした。パターン1では降水および気温について前章で示したパラメータを用いた。パターン2は平均日降水強度に代えて年降水量と降水1mm以上日数を使用した。この際、表-3より日降水量1mm以上日数は年間日照時間と相関が高いため、年間日照時間を除いている。パターン3はパターン2で日照時間を採用し、日降水量1mm以上日数を除いた場合である。パターン4はパターン2をもとに高温側に着目し、低温期度日と平温期度日を除いて、観測平均気温を用いた場合である。

(1) カテゴリー分類

数量化理論 I 類の適用にあたっては、各アイテムのカテゴリー分けが必要となる。カテゴリー分けにあたって、一般にカテゴリー区分数が多くなるほど推定精度は向上する。しかし、カテゴリー区分をむやみに多くすることは実用的でなく、さび外観評点をアイテムにより説明することが困難となる。

そこで、本検討では全てのアイテムについてカテゴリー区分をカテゴリー区分内の標本数がほぼ同数となるように、3区分、4区分および5区分の3通りとし、赤池情報量基準 (AIC) を用いることでカテゴリー分類を得ることとする¹⁵⁾。すなわち、さび外観評点を X_j 、あるアイテムをカテゴリー化したものを X_u とすると、次式で得られる $AIC(X_j; X_u)$ が最小となるカテゴリー区

表-5 重回帰分析との比較

	重回帰分析		数量化理論 I 類			
			CASE-A'		CASE-A	
	重相関係数	適合率	重相関係数	適合率	重相関係数	適合率
パターン1	0.47	41.0	0.49	50.0	0.61	50.8
パターン2	0.47	41.0	0.61	55.7	0.66	57.4
パターン3	0.46	41.0	0.53	50.8	0.62	54.1
パターン4	0.44	41.0	0.67	62.3	0.71	67.2

表-6 CASE-A,B の比較

	CASE-A			CASE-B		
	重相関係数	決定係数	適合率	重相関係数	決定係数	適合率
パターン1	0.61	0.37	50.8	0.68	0.47	91.8
パターン2	0.66	0.44	57.4	0.73	0.53	90.2
パターン3	0.62	0.38	54.1	0.68	0.47	91.8
パターン4	0.71	0.50	67.2	0.79	0.57	88.5

分を採用する¹⁶⁾。

$$AIC(X_j; X_u) = (-2) \sum_{k=1}^{l_j} \sum_{v=1}^{l_u} n_{(jk)(uv)} \ln \left\{ \frac{n \cdot n_{(jk)(uv)}}{n_{(jk)} \cdot n_{(uv)}} \right\} + 2(l_j - 1)(l_u - 1) \quad (6)$$

ここで、 n : 標本数、 $n_{(jk)(uv)}$: さび外観評点が k で、アイテム X_u のカテゴリー v に属する該当数、 $n_{(jk)}$: さび外観評点 k に属する評本数、 $n_{(uv)}$: カテゴリー v に属する標本数、 l_j : さび外観評点の分割数、 l_u : アイテムのカテゴリー区分数。

これにより得られたカテゴリー区分数を表-4の下段に示す。ここで、CASE-Aは目的変数を表-2に示す1~5のさび外観評点とした場合であり、CASE-Bは後に述べるように、さび外観評点を2段階にグルーピングした場合である。CASE-Aでは、経過年数、年降水量、平均気温、年間日照時間および平均風速については4区分、その他の量的アイテムは3区分とする。

(2) 重回帰分析との比較

数量化理論I類は、説明変数として量的データに加え質的データをも扱うことができるが、今回の検討では2項目のみが質的データである。量的データが質的データの4倍以上となっているため、質的データを考慮しなくとも外観評点の推定が可能であることも考えられる。そこで、重回帰分析と数量化理論I類について分析結果を比較した。目的変数をさび外観評点の5区分とし(CASE-A)、前節で決定したカテゴリー区分を用いた解析結果を表-5に示す。ここで、CASE-A'は重回帰分析と同じアイテムのみ(数的アイテムのみ)を用いた場合であり、CASE-Aより2アイテム少ない。また、適合率とは、目的変数であるさび外観評点の実測値と解析による推定値の差である残差の絶対値が0.5未満に入っている橋梁の割合である。これは、さび外観評点が整数であるのに対し、回帰式より得られる値は実数となるため、小数第1位を四捨五入することにより推定値とするためである。この結果より、パターンにより差があるものの、重相関係数および適合率ともに重回帰分析より数量化理論I類(CASE-A')の方が高い。重回帰分析が説明変数の値をそのまま使用

表-7 CASE-B パターン4 相関係数

アイテム	アイテムレンジ	単相関係数	偏相関係数
離岸距離	0.491	0.259	0.493
経過年数	0.400	0.124	0.423
橋長	0.112	0.097	0.153
高温期日数	0.336	0.120	0.386
年降水量	0.253	0.043	0.240
降水1mm以上日数	0.582	0.195	0.593
平均気温	0.795	0.105	0.547
平均風速	0.318	0.165	0.327
桁下空間利用状況	0.208	0.118	0.290
伸縮装置	0.321	0.288	0.439

するのに対し、数量化理論I類では各説明変数を3または4区分に区分分けされる。そのため、各説明変数におけるデータのばらつきが均されるためであろう。また、CASE-A'とCASE-Aを比較するとアイテムが2つ増えるため、CASE-Aの方が重相関係数が見かけ上大きくなっている。しかし、表-5の結果では数量化理論I類を用いても適合率は最大67%と高い精度を示すものではない。そのため、推定精度の改善を図る必要がある。

(3) 目的変数の簡略化

目的変数であるさび外観評点は、表-2に示すように補修が必要な評点1、経過観察が必要な評点2、および補修・観察が必要でない(健全な状態)評点3, 4, 5の5区分で規定されている。本検討で目的とする環境要因の評価およびさびレベル推定式の構築は、耐候性鋼材のLCC評価、維持管理に資するためである。そのため、補修・観察が必要なレベルにあるか否かに着目し、評点1, 2を改めてさびレベル1、健全な状態である評点3, 4, 5をさびレベル2と定義する。目的変数をこの2区分(CASE-B)として解析を行い、4.2で示した目的変数が5区分(CASE-A)の場合と比較する。目的変数を2区分とするにあたり、新たにカテゴリー区分を行う必要がある。4(1)と同様にAICに基づくカテゴリー区分分けおこなった結果を、表-4最下段に示す。

数量化理論I類による解析結果を表-6に示す。CASE-BではCASE-Aに比べて全てのパターンで、重相関係数、適合率ともに向上している。特に、適合率は全て90%前後となっている。これは、目的変数であ

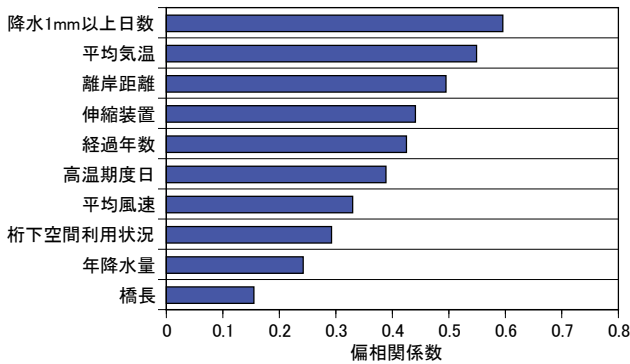


図-3 CASE-B パターン4 偏相関係数順位

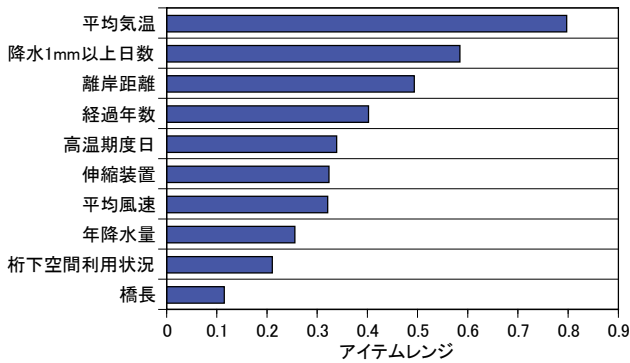


図-4 CASE-B パターン4 アイテムレンジ順

るさび外観評点を2区分としたため、5区分に比べて適合が容易になったためである。

この結果よりパターン4の重相関係数が最も高いことが示された。そこで、CASE-Bのパターン4について、アイテムとさびレベルの関係を検討する。パターン4の単相関係数、偏相関係数およびアイテムレンジを表-7に示す。アイテムレンジは、各アイテムについて、カテゴリ数量の最大値と最小値の差として定義される。すなわち、アイテムの変動が目的変数であるさびレベルの変動に与える影響を表す。また、図-3は各アイテムを偏相関係数の大きさ順に、図-4はアイテムレンジの大きさ順にそれぞれ並べたものである。パターン4では単相関係数と偏相関係数の符号の不一致は見られず、多重共線性は発生していない。偏相関係数は日降水量1mm以上日数が最も大きく、以下、平均気温、離岸距離の順となっている。日降水量1mm以上日数は当該地域の湿潤状態に関係すると考えられ、さびの生成反応は高温ほど早く進む。また、従来、海由来の海塩粒子の影響が離岸距離で評価されているように、さびの発生には海塩の影響が大きい。これらのアイテムがさびの生成に大きく関与するであろうことは経験的に知られていることであるが、今回用いた実橋調査結果からも確かめられたことになる。また、アイテムレンジも、順番に逆転が見られるものの、これら3アイテムが上位を占めており、平均気温や降水

表-8 CASE-B パターン4 カテゴリ数量

アイテム	カテゴリ	カテゴリ数量
離岸距離 (km)	0-3	0.021
	3-6	-0.275
	6-10	0.141
	10-20	0.216
	20-	-0.085
経過年数 (年)	0-4	0.014
	4-8	0.269
	8-12	-0.117
	12-	-0.130
橋長 (m)	0-45	-0.010
	45-90	-0.051
	90-	0.061
高温期度日 (°C日)	-4000	-0.121
	4000-4500	-0.106
	4500-	0.215
年降水量 (mm)	-1850	-0.145
	1850-2250	0.041
	2250-	0.108
降水1mm以上日数 (日)	-118	0.201
	118-124	-0.381
	124-	0.199
平均気温 (°C)	-15.0	-0.029
	15.0-15.5	0.178
	15.5-16.5	0.330
	16.5-	-0.465
平均風速 (m/s)	-1.3	0.221
	1.3-1.7	-0.097
	1.7-2.1	0.029
	2.1-	-0.067
桁下空間利用状況	河川、湖	-0.072
	谷、一般道、鉄道	0.136
伸縮装置	非排水型鋼製フィンガー	0.184
	その他	-0.137
定数項		1.738

日数、離岸距離がさびレベルに大きな影響を与えることがわかる。一方、高温期度日については、偏相関係数、アイテムレンジとも平均気温より小さい。このことはさびの進展には、高温期のみでなく1年を通じた気温が関係することを示している。また、年降水量よりも降水1mm以上日数の偏相関係数とアイテムレンジがともに大きいことから、さびレベルには湿潤な期間の長さが関係している。

表-8はパターン4のカテゴリ数量である。対象とする橋梁の諸元および気象データから表-8中の該当するカテゴリ数量を読みとり、全てのカテゴリ数量と定数項を加算することにより、さびレベルが得られる。アイテム内で正負の符号が混在しているものの、概観すればある程度の傾向を見ることができる。地形データに関しては、離岸距離が大きくなるほどさびレベルは大きくなり、桁下空間が河川等で水分が供給される場合には小さくなる。構造データでは、経過年数が長くなるほど、また、ゴムジョイントなどを用いた場合にさびレベルが低下する傾向を示している。これは文献4)にも示されてお

表-9 さびレベル推定

	A橋	B橋	C橋	D橋	E橋	F橋	G橋	H橋	I橋	J橋	K橋	L橋
離岸距離	7	20	20	24	19	25	50	37	35	6	9	15
経過年数	8	3	4	11	6	13	2	8	5	14	6	12
橋長	88.7	58.0	57.7	42.0	15.0	31.0	53.0	58.0	80.0	359.0	58.0	95.0
平均気温	14.6	13.8	13.5	15.7	15.7	14.4	14.3	14.3	14.3	17.3	16.7	16.8
高温期度日	3798	3522	4113	4336	4884	4041	3813	3813	3813	5026	4712	4305
低温期度日	-247	-487	-505	-70	-176	-437	-392	-392	-392	-75	-103	-52
平均日降水強度	17	15	17	14	16	14	16	16	16	21	18	17
年降水量	1734	1909	2203	1736	1802	1680	1807	1807	1807	2470	2230	2158
降水1mm以上日数	104	129	129	122	114	120	115	115	115	117	124	128
年間日照時間	2018	1737	1602	1746	1822	1735	1982	1982	1982	2194	1966	1950
平温期度日	4014	3649	3588	4189	3815	3724	3859	3859	3859	4081	3908	4033
平均風速	1.3	1.9	0.8	1.9	1.6	1.8	1.4	1.4	1.4	3.0	1.6	2.0
桁下空間利用状況	河川	ダム湖	河川	河川	谷	河川	河川	河川	河川	河川	河川	谷
伸縮装置	フィンガー	ゴム	フィンガー	フィンガー	ゴム	ゴム	フィンガー	ゴム	フィンガー	ゴム	フィンガー	フィンガー

実測値		4	3	4	3	3	2	4	2	3	4	3	2	的中率
CASE-A	パターン1	3	3	4	3	3	3	4	3	4	2	3	3	50.0
	パターン2	3	2	4	3	2	3	3	3	4	2	4	3	16.7
	パターン3	3	2	4	3	2	3	3	2	3	2	4	3	33.3
	パターン4	3	2	4	3	3	2	2	1	3	2	3	3	50.0

変換値		2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	的中率
CASE-B	パターン1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	66.7
	パターン2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	75.0
	パターン3	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	58.3
	パターン4	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	83.3

り、フィンガージョイントに比べて漏水等が発生しやすい可能性がある。また、気象データに関して、高温期度日が高いほど、また、年間降水量が多いほどさびレベルは大きくなる。以上は、個々のアイテム毎に見た傾向であり、さびレベルはこれらの和となる。

5. 箱桁橋におけるさびレベルの推定

表-8に示すパターン4のカテゴリー数量と同様のカテゴリー数量が全てのパターンについて求められ、さびレベルの推定式が得られる。ここで、CASE-Aでは1~5のさび外観評点をそのままさびレベル1~5とし、CASE-Bでは前述のようにさびレベル1,2とする。これらの推定式が他形式橋梁へ適用できるか否かを検討する。推定式は無塗装鋼桁橋から得られたものであるが、推定式の構築に全ての鋼桁橋のデータを用いているため、ここでは九州・山口地域にある12橋の無塗装鋼桁橋を対象とする。アイテムには鋼桁橋固有のものは含まれていないものの、鋼桁橋と箱桁橋では局所的な腐食環境が異なることも考えられる。特に、表-9に示す推定橋梁のうち、F橋およびJ橋は1本主桁である。

表-9の推定値は、各推定式から得られた値の小数第1位を四捨五入して求めている。また、表中の変換値は、異常があるさび外観評点1,2を改めて1、健全な状態であるさび外観評点3,4,5を2としている。

実測値と推定値を比較すると、さびレベルを5区分としたCASE-Aでは、的中率は最大でも50%であり、半数の橋梁しか推定できない。一方、さびレベルを2区分としたCASE-Bでは、パターン4において83.3%の橋梁についてさびレベルの推定値と調査値が一致している。推定に用いた橋梁数が少ないことから、定量的に断定することは困難であるが、この程度の的中率であれば耐候性鋼橋梁の適用可否検討にあたって、実用的に有用な情報を与えることが可能であろう。5区分のさびレベルはさびの進行を評価する上では意味を持つが、事前の適用性可否の検討あるいは実際の管理においては、要観察または異常な状態のさびの発生が想定されるか否かの判断が重要である。この観点に立てば、CASE-Bでおこなった2区分での出力も有用である。ただし、この推定式は九州・山口地区の橋梁調査結果および気象データに基づいているため、他地区への適用には再評価が必要である。

6. まとめ

耐候性鋼橋梁はミニマムメンテナンスが可能な橋梁である。しかし、使用環境の判断や適切な点検を誤れば腐食が進行するリスクも併せ持つ。管理者、設計者にはこのリスクの最小化が求められる。そのためには、鋼材の性質や腐食についての理解、また、合理的

な点検・管理の実施がかかせない。

本研究では、無塗装耐候性鋼橋梁について、実橋調査結果をもとに、数量化理論I類を用いて、さび外観評点と各種要因の関係を検討した。その結果、今回用いたデータでは日降水量1mm以上日数、平均気温、離岸距離がさび外観評点に影響することが定量的に明らかとなった。そのため、耐候性鋼材の使用適否の検討には、これまでの離岸距離のみならず気象に関する評価も必要である。また、数量化理論I類より求まる回帰式を用いたさびレベル推定では、九州・山口地区に限定した場合に80%以上の橋梁で実測値と推定値が一致した。この方法は計画時の耐候性鋼材の適用可否や供用後の点検業務の計画に適用することが可能であろう。一方で、今回の推定式は気象データを用いているため、推定式の適用地域は限定される。

本研究は、実態調査結果を統計的に処理することにより検討を進めた。統計的な検討では基となるデータの質と量が重要であることは言うまでもない。耐候性鋼橋梁は今後も建設数の増加が見込まれ、合理的な設計、施工、維持管理のためには諸データの蓄積と公開が一層望まれる。

謝辞: 本研究で用いた九州・山口地区の耐候性鋼橋梁実態調査は九州橋梁・構造工学研究会に設置された「九州・山口地区における耐候性鋼橋の調査・研究分科会（主査：九州工業大学山口栄輝教授）」の活動の成果である。貴重な助言、資料提供をいただいた分科会のメンバーに、心より感謝の意を表します。また、ご助言をいただいた日本橋梁建設協会、日本鉄鋼連盟の関係各位にも感謝いたします。

参考文献

- 1) 三木千尋, 市川篤司: 現代の橋梁工学, 数理工学社, 2004.
- 2) 西川和廣: ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案, 橋梁と基礎, pp.64-72, 1997.
- 3) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸: 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, pp.71-86, 2005.
- 4) 山口栄輝, 中村聖三, 廣門公二, 森田千尋, 園田佳巨, 麻生稔彦, 渡辺浩, 山口浩平, 岩坪要: 九州・山口地区における耐候性橋梁の実態調査, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.243-254, 2006.
- 5) 山口栄輝, 坂口哲也, 原田和洋, 大木本崇: 九州北東部, 南東部における耐候性鋼橋梁のさび状況, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.667-674, 2004.
- 6) 岩崎英治, 長井正嗣, 加賀谷悦子, 成田英樹, 高橋拓也: 新潟県内の耐候性鋼橋の腐食状況と腐食環境, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1119-1128, 2005.
- 7) 樺山好幸, 嵯峨正信, 藤田尚, 広岡秀司, 三浦正純: 高知自動車道における無塗装耐候性橋梁の現状と課題, 橋梁と基礎, Vol.34, pp.19-24, 2000.
- 8) 麻生稔彦, 井上岳大, 小長谷克明: 山口県における耐候性鋼材を使用した橋梁の腐食調査, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.489-494, 2003.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II鋼橋編, 2002.
- 10) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.
- 11) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 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 (XVII), 整理番号第85号, 1993.
- 12) <http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>
- 13) 山口和範, 高橋淳一, 竹内光悦: よくわかる多変量解析の基本と仕組み, 秀和システム, 2004.
- 14) 管民郎: Excelで学ぶ多変量解析入門, オーム社, 2001.
- 15) 林知己夫, 駒沢勉: 数量化理論とデータ処理, 朝倉書店, 1982.
- 16) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎: 情報量統計学, 共立出版, 1983.

(2006. 10. 25 受付)

STUDY ON CORROSION FACTORS OF WEATHERING STEEL BRIDGES BASED ON ON-SITE OBSERVATIONS

Toshihiko ASO, Satoshi GOTO, Hikaru TABATA and Ayaho MIYAMOTO

In order to use the corrosive protection characteristic of a weathering steel bridge effectively, it is very important to understand the corrosion factor and rust mechanism. In this paper, the relationship between rust level of weathering steel bridge and structural property, geographical data and meteorological factors was analyzed. From the results of Quantification Method 1, rust level is influenced by not only distance from shore but also rainy days and average temperature. Prediction of rust level using regression coefficients obtained from Quantification Method 1 was also carried out. Estimated rust level was suited well for the investigation results of bridges in Kyushu-Yamaguchi region.