

# 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究

藤原 博<sup>1</sup>・三宅 将<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー 博士 (工学) 日本道路公団東京第三管理局所沢管理事務所 (〒359-0012 埼玉県所沢市大字坂之下761-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本道路公団北海道支社建設部建設第二課 (〒0004-8512 北海道札幌市厚別区大谷地西5-12-30)

日本道路公団 (JH) が管理する全国の鋼橋の中から 624 橋を抽出して行った塗膜調査データの統計分析から、腐食環境、鋼橋型式及び部位別の塗膜劣化状態を評価するとともに画像処理によって定量化した塗膜の経年劣化度を、統計处理的に劣化傾向特性を類似する理論的傾向曲線に近似させ、それを塗膜寿命曲線とする検討を行った。その結果、塗り替え時期を判断する 10 ~ 20 年程度の実用的な範囲であれば二次曲線によって塗膜寿命予測曲線を表すことが可能であること、マイルド環境、塩分飛来環境及び高温多湿環境に対する塗膜寿命予測曲線を求めたことにより各環境下における鋼橋塗膜の寿命予測が可能であることを示した。

**Key Words :** *steel bridge, paint film deterioration ratio, image processing system, estimating remaining life, deterioration model, corrosion depth*

## 1. まえがき

鋼橋 (鋼道路橋) の防食方法として塗装が広く用いられているが、防食性能を保持するためには定期的な塗り替えが必要となる。わが国における鋼橋の塗装面積はおよそ 4 千万 m<sup>2</sup> であり、このうち毎年 300 万 m<sup>2</sup> 程度の塗り替えを行っている<sup>1)</sup>。鋼橋塗装の塗り替えはマイルド環境では平均 10 年程度で繰り返されており<sup>2)</sup>、鋼橋の増加とともに塗り替え面積と塗り替えに要する費用が年々増加を続けている<sup>1)</sup>。

年々増加する鋼橋塗装の塗り替えを計画的かつ効率的に実施するためにも、また近年注目を集めているライフサイクルコスト (LCC) の合理的評価のためにも、塗膜の寿命予測が重要である。しかし現在、塗膜寿命を予測するために行われている目視観察主体の塗膜調査では、調査員の個人差による調査データのばらつきを免れることが困難である。寿命予測の精度を高めるためには科学的手法による塗膜劣化度の定量的評価が必要不可欠であり、筆者らは塗膜の劣化状態を撮影した画像から、画像処理システムによって塗膜劣化度を定量的に評価する「塗膜劣化度診断システム」を開発<sup>3)</sup>した。

そこで本研究では、JH が管理する全国の鋼橋の中から 624 橋を抽出して行った鋼橋塗膜の実態調査や、東京、北陸及び沖縄の各暴露場で行った塗装試験板の暴露試験などによって得られた塗膜の経年劣化度を「塗膜劣化度診断システム」を用いて定量化し、得られた経年データを理論的傾向曲線に近似さ

せ、それを塗膜寿命曲線とすることで塗膜寿命を予測する検討を行った。

## 2. 実態調査データによる鋼橋塗膜の劣化傾向

### (1) 実態調査

鋼橋が設置されている全環境を網羅するために田園・山間・山岳、住宅地、交差道路、側道隣接、河川・湖沼、工場、海上・海岸の 7 環境を指定し、表-1 に示すように北海道から沖縄までの 624 橋を選定した。

調査は、JH 維持修繕要領<sup>4)</sup> 及び (社) 日本鋼構造協会の鋼橋塗膜調査指針<sup>5)</sup> に準じ、外観観察と付着性試験を行うとともに塗膜付着物質の分析を行った。しかし、本論文では、この調査結果の内容が膨大なため、これらの中から外観観察結果を中心に検証することにした。なお、調査はそれぞれの対象橋梁を管理する JH の 93 管理事務所に所属する調査員によって行われたが、後に調査の際に各現場で撮影した塗膜の外観写真と調査データを基に塗膜調査を専門とする技術者が調査データの再評価を行い、調査員の経験差や主観による個人差の解消を図った。調査箇所、調査項目及び調査頻度を表-2 に示す。

目視観察では、調査対象橋梁の各調査箇所ごとに表-3 ~ 表-6 に示す評価基準により、さび、はがれ、ひびわれ及び白亜化の各劣化度を段階評価す

表-1 調査橋梁の内訳

道路名	調査橋梁数	主たる環境					型式					塗装系			調査数					
		田園・住宅地	山間・山岳含む	海上・海岸	河川・湖沼含む	市街・道路・鉄道	工場	鉄桁	箱桁	トラス	鉄桁＋箱桁	鉄桁＋トラス	A塗装系	B塗装系	C塗装系	径間数	目視観察 (km)	テープ剥離試験 (個所)	ゴパン目テープ試験 (個所)	塗膜付着物質の採取・分析 (点)
道央自動車道	65	28	5	24		8	50	8	1	5	1	41	24		520	10.803	1178	120	60	
札幌自動車道	9		4	2		3	8				1	8	1		101	1.784	77	76	38	
東北自動車道	62	25	17		19	1	51	10		1	55	7			352	8.001	484	132	62	
常磐自動車道	14	5	2		7		14				9	5			188	3.898	388	40	20	
東名高速道路	59	16	17	1	20	5	59				56	1	2		485	7.979	1859	431	218	
東関東自動車道	9	6			2	1	7	1		1	9				161	2.922	322	52	26	
中央自動車道	80	24	18		24	14	72	3		5	78		2		769	11.539	1490	210	100	
関越自動車道	7	2			4	1	6	1			4	3			67	1.612	146			
北陸自動車道	48	18	1		28	1	45	3			41	6	1		338	8.158	751	176	88	
名神高速道路	18	5			9	4	13	4		1	15		3		74	1.790	272	56	28	
東名阪自動車道	8	4			4		8				8				92	1.381	348	64	18	
伊勢自動車道	3	3					3				3				12	0.221	48	24	12	
東海北陸自動車道	4	1			3		2	2			4				14	0.342	56	40	20	
近畿自動車道	5					5	5						5		16	0.353	64	24	12	
西名阪自動車道	6	4				2	6				6				12	0.297	48	8	4	
阪和自動車道	2	1	1				1	1			2				4	0.158	16		6	
舞鶴自動車道	2		1		1		2				2				8	0.279	32			
中国自動車道	40	2	9		24	5	39	1			40				210	4.727	500	116	58	
山陽自動車道	18	2	4		9	3	17	1			18				94	2.151	208	88	42	
山陽倉敷早島支線	1					1	1				1				2	0.036	4	4	2	
広島自動車道	3				3		3				3				24	0.511	48	12	6	
九州自動車道	17	4	2		11		16	1			17				72	1.332	160	24	12	
宮崎自動車道	8	2	1		5		6	2			8				41	0.832	84	26	18	
長崎自動車道	7	3	2	1	1		6	1			6	1			30	0.729	64	24	12	
沖縄自動車道	2			2				2					2		14	0.350	44	12	6	
京葉道路	6					6	6				4	2			172	2.724	344	32	16	
千葉東金道路	2	1				1	2				2				26	0.424	52			
日光宇都宮道路	2		2				1	1			2				14	0.258	28	8	4	
新利根川橋	2	1			1			1	1		2				29	1.103	68			
海南湯浅道路	2				2		1	1			2				5	0.178	20	8	4	
京滋バイパス	2		1		1		1	1			2				9	0.486	36			
老ノ坂亀岡道路	1	1					1				1				3	0.116	12			
第二神明道路	3	1	1			1	3				3				8	0.261	32	4	2	
姫路バイパス	1					1	1				1				3	0.085	12			
太子竜野バイパス	1	1						1			1				3	0.095	12			
広島呉道路	1			1				1					1		22	1.015	44			
関門橋	13	1	2	2		7	13				9		4	133	2.398	399	39	20		
第三京浜道路	14					14	12	1		1	13		1	174	2.880	316	312	157		
横浜新道	11					11	6	2		3	8		3	49	1.422	24	24	12		
横浜横須賀道路	21	12	6			3	18	2		1	21			188	3.512	104	56	28		
小田原厚木道路	19	12	7				18			1	19			259	3.014	426	57	25		
西湘バイパス	8	1		6		1	4	2		2			8	117	2.343	223	209	110		
真鶴道路	1		1				1				1				2	0.020				
富士宮道路	1	1					1				1				2	0.031	4	4	2	
西富士道路	1	1					1				1				4	0.089				
藤枝バイパス	4	4					4				4				13	0.489	11			
掛川バイパス	2	2					2				2				2	0.066				
磐田バイパス	9	9					9				9				9	0.252				
全道路	624	203	104	39	178	94	6	545	54	1	22	2	542	61	21	4946	95.446	10858	2512	1248

(注) A 塗装系：鉛系さび止め／フタル酸， B 塗装系：鉛系さび止め／塩化ゴム系，  
C 塗装系：ジンクリッチペイント／塩化ゴム系を示す。

表-2 調査箇所、調査項目及び調査頻度

型式	調査箇所		○印が調査の実施を示す		
			目視観察	付着性試験(注)	塗膜付着物質の採取・分析
鋼桁橋	ウェブ	外桁の外側 (端部2箇所, 中央部1箇所)	○	○	○
		外桁の内側または内桁 ( " )	○	○	○
	フランジ	下フランジの下面 (端部2箇所, 中央部1箇所)	○	○	○
		上フランジの下面 ( " )	○	○	○
箱桁橋	補強縦桁・補強鋼板	端部2箇所, 中央部1箇所	○		
	対傾構・横構	支点部1箇所, 中央部1箇所	○		
箱桁橋	ウェブ・下フランジ	端部2箇所, 中央部1箇所	○	○	○
	箱桁内面	下フランジ上面2箇所, ウェブ1箇所	○		
	縦桁・横桁・ブラケット	端部2箇所, 中央部1箇所	○		

(注) 付着性試験は、テープ剥離試験とゴバン目テープ試験をいう。

るとともに、劣化面積率（さび、はがれ、ひびわれの合計面積率）については、塗膜劣化度の標準図<sup>6)</sup>によって求めている。なお、塗膜状態に応じた各評点の意図する意味は次のとおりである。

①さびの評点

塗膜表面に見られるさびは、塗膜の下で鋼材が腐食していることを意味しているため、塗膜劣化の決定的な欠陥状態を示している。JHでは、さび面積率がおよそ3%に達した時点塗り替え時期と判断して塗り替え工事を行っており、さび面積率3%を限界点として、観察値に段階を設けて塗り替え時期に計画性を持たせるようにした評価法となっている。

②はがれ（剥離）の評点

塗膜のはがれるということは、鋼橋の素材を防食している被覆が無くなるかまたは薄くなり、塗膜の防食機能低下に直結する問題なので塗膜にとって重大な欠陥となるとともに、鋼橋の外観を著しく阻害することから早急な塗り替えを余儀なくされる場合がある。JHでは、過去の例から対象面積の3分の1（33%）以上の層間剥離が生じた場合は塗り替えを実施することになっているので、この面積率を限界点としてさびの評点と同様に段階的評価を行っている。

③ひびわれの評点

塗膜のわれは重大欠陥と言えないまでも、われから塗膜剥離または発錆へと進展する可能性は極めて大きいので塗膜欠陥として重要視される。塗膜のわれは表面ひびわれから深われへと進行し、この時点になるとはがれと発錆が共存している場合が多い。このため、われの端緒であるひびわれに重点を置いて、われが発生しているか否かで評価している。

④白亜化の評点

上塗り塗膜に白亜化現象を生じるようになると、塗膜の大気環境に対する抵抗性が弱まり、雨水な

表-3 さびの評点<sup>4)</sup>

評点	塗膜の状態
40	さびが調査面積の3%以上に見られる
30	" 1%以上3%未満に見られる
20	" 0.3%以上1%未満に見られる
10	" 0.1%以上0.3%未満に見られる
0	塗膜に異常が見られない

表-4 はがれの評点<sup>4)</sup>

評点	塗膜の状態
30	はがれが調査面積の33%以上に見られる
24	" 16%以上33%未満に見られる
18	" 10%以上16%未満に見られる
12	" 3%以上10%未満に見られる
6	" 3%未満に見られる
0	塗膜に異常が見られない

表-5 ひびわれの評点<sup>4)</sup>

評点	塗膜の状態
10	ひびわれが著しい
5	ひびわれが発生している
0	塗膜に異常が見られない

表-6 白亜化の評点<sup>4)</sup>

評点	塗膜の状態
10	初期に比べて著しく白っぽく、初期の塗装色が推定できない
5	初期の塗装色は推定できるが、かなり白っぽくなっている
0	初期と比べ、ほとんど変化がない

どの水分、SOx、NOxなどの酸性物質が塗膜を浸透し易くなるので発錆への誘因となることから、白亜化が発生しているか否かで評価している。

表-7 調査データの環境別構成

環境分類	データ総数		データ内訳					
	総件数	構成比 (%)	A塗装系(件)	構成比 (%)	B塗装系(件)	構成比 (%)	C塗装系(件)	構成比 (%)
田園・山間	21930	30.4	19701	31.0	1370	22.6	462	17.6
住宅地	7990	11.1	6773	10.7	0	—	0	—
交差道路	8170	11.3	7358	11.6	87	1.4	22	0.8
側道隣接	12069	16.7	11419	18.0	411	6.8	1787	67.9
河川	20016	27.8	18182	28.7	815	13.4	0	—
工場	885	1.2	0	—	0	—	361	13.7
海上・海岸	1066	1.5	0	—	3378	55.8	0	—
合計	72126	100	63433	100	6061	100	2632	100

(注) 他に欠測値データ 3455 件

(2) 調査データ

表-1によると、マイルドな腐食環境を対象としたA塗装系が542橋で、調査橋梁総数624橋の86.9%を占めている。また、工場地帯や海上・海岸などの腐食環境を対象としたB塗装系が61橋で9.8%、C塗装系が21橋で3.3%となっている。これを調査データ数で示すと表-7のようになる。

表-7に示す全調査データ72126件のうち、A塗装系が63433件で調査データ全体の87.9%を占めており、残りの8693件12.1%がBあるいはC塗装系となっている。この塗装系の構成は、土木研究所が調べたわが国の鋼橋塗装の現状<sup>7)</sup>とほぼ一致していることから、本論文では特に断りがない限り最も多く用いられているA塗装系を対象に検討を進めることにした。表-7に示したA塗装系データ63433件について、それぞれ表-3～表-6に示した4劣化現象で評価し環境別、経年別に平均値を求め図-1に示す。なお、図中の曲線は平均評点に対する近似曲線であり、次式によって求めた。

$$Y = a_2 X^2 + a_1 X \quad (1)$$

図-1によると、いずれの環境でも平均評点は経年につれて大きくなることを示しており、平均評点に対する相関係数は0.962とかなり良い相関関係にあることが分かる。なお、15年を過ぎると図-2に示すように環境別の平均評点にかなりのばらつきが見られるようになることから、本検討では図-1に示した平均評点20点付近までのデータ、経年としては14年目までのデータを対象にした。

(3) 塗膜劣化と塗り替え時期との関係

データ数の87.3%を占める鉸桁橋を対象に、架設環境別に塗り替え履歴を調査した結果、図-3に示すように新設塗膜の第1回塗り替えは各環境とも約10年程度で行われていることが分かった。ちなみに、JR在来線約100橋を対象にした鋼鉄道橋の調査結果<sup>8)</sup>では、鋼道路橋のA塗装系に相当

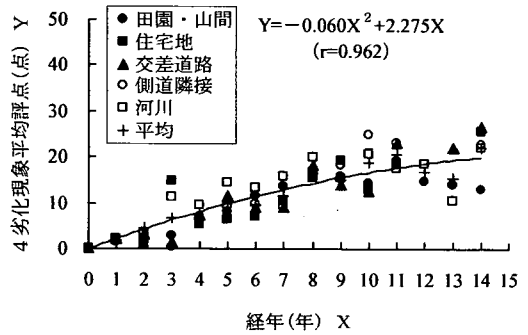


図-1 環境別平均評点と経年との関係 (14年目まで)

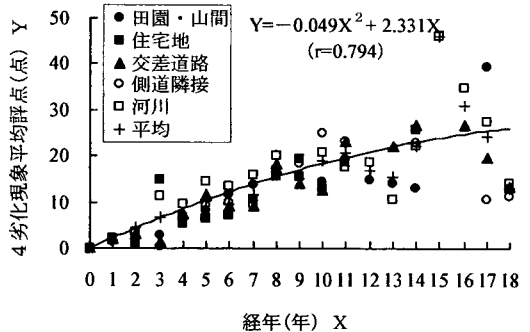


図-2 環境別平均評点と経年との関係 (全データ)

する塗膜の塗り替え周期は平均10年程度であることが報告されている。

鋼道路橋と鋼鉄道橋とでは構造型式が異なるので、同じ環境でも塗膜の劣化状態が異なっており一概に比較することは難しい。すなわち、鋼道路橋は特別なケースを除いては大部分が上路式であるため、桁は床版で覆われることから塗膜劣化の主要因である太陽光中の紫外線が遮断され、直接

雨水や降雪など塗膜劣化要因の影響を受けるのは外桁外面だけである。しかし、この反面、外桁内面や内桁は通気性が悪くなるために付着汚染物が多くなり、桁表面に結露が生じ易く発錆要因を形成している。これに対して鋼鉄道橋の多くは開床式構造となっているため、鋼道路橋と全く反対の塗膜劣化条件を形成し易いことになる。

このように、構造型式の異なった鋼橋の塗膜劣化を単純に比較することはできないが、前述のように塗膜の塗り替え周期が鋼道路橋と鋼鉄道橋とも約10年という結果を示していることは、構造型式の影響よりも鋼橋が架設されている環境すなわち大気環境が大きく影響するものと考えられる。

なお図-3によると、2回目以降の塗り替え周期は塗り替え回数を増すごとに各環境ともに短くなる傾向を示しているが、この理由は別途行った研究により塗り替え時の素地調整に関する品質管理不足、すなわち劣化した塗膜を健全な塗膜と判断して除去せずに塗料を塗り重ねるため、塗膜が鉄素地面に密着していない状態となり、塗膜の早期剥離・早期劣化に進むことが明らかにされている。

#### (4) 各劣化現象別評点の相関係列

表-8には、各塗膜劣化現象の相関係列を示したが、この結果からは、各塗膜劣化現象ともそれぞれに良い相関性が見られ、個々の劣化現象が他の劣化現象の誘因になっていることを示しているものといえる。

1章でも述べたように、本研究では「塗膜劣化度診断システム」を用いて定量化したデータを基に検討を行っているが、本システムでは塗膜劣化現象をさび、はがれ、ひびわれの3劣化現象に絞って定量化している。従来の目視観察による評価基準では、2章(1)で述べたようにさび、はがれ、ひびわれ及び白亜化の4劣化現象で評価することになっているが、白亜化現象を画像処理するとチョーキングなのか塗膜劣化なのかの判断が困難であるために、塗膜劣化度診断システムでは、白亜化を除いたさび、はがれ、ひびわれの3劣化現象で塗膜劣化度を評価している。

表-8によると、4劣化現象合計評点と3劣化現象合計評点との相関係数は $r = 0.997$ と非常に良い関係にあることから、3劣化現象で塗膜劣化度を評価することの妥当性が確かめられたといえる。

#### (5) 橋梁型式及び橋梁部位による塗膜劣化の特徴

図-4～図-7は橋梁型式別部位別に、それぞれ3劣化現象平均評点と経年との関係を示したものである。

図-4及び図-5に示すように、鉸桁橋のウェブ及

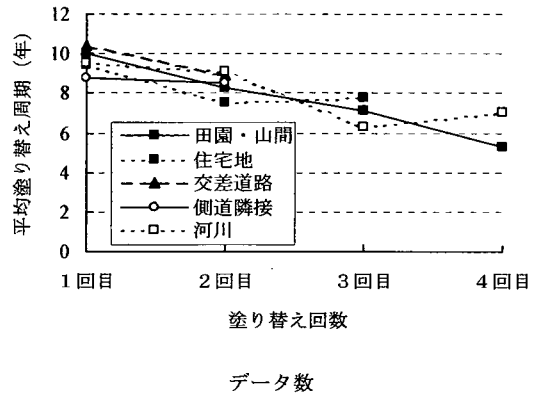


図-3 環境別平均塗り替え周期

環境分類	塗り替え回数				合計
	1回目	2回目	3回目	4回目	
田園・山間	114	25	2	1	142
住宅地	43	19	4	—	66
交差道路	53	10	—	—	63
側道隣接	36	6	—	—	42
河川	124	33	5	1	163
合計	370	93	11	2	476

表-8 各劣化現象別評点の相関係列

	3劣化現象	さび	はがれ	ひびわれ	白亜化
4劣化現象	0.997	0.991	0.928	0.367 (0.866)	0.953
3劣化現象	—	0.993	0.938	0.354 (0.886)	0.926
さび	—	—	0.894	0.288 (0.858)	0.926
はがれ	—	—	—	0.370 (0.864)	0.837
ひびわれ	—	—	—	—	0.397 (0.735)

(注) 4劣化現象とは、さび、はがれ、ひびわれ、白亜化の合計評点をいう。また、3劣化現象とは、さび、はがれ、ひびわれの合計評点をいう。  
( )内は10年目までのデータによる相関係数

び下フランジの塗膜劣化は経年に対して比較的良好な相関性が見られるものの、いずれの部位でも河川環境のデータには顕著なばらつきが見られる。

いずれの部位でも河川環境のデータに著しいばらつきが見られる理由は明らかではないが、冬季路面に積もった雪を河川上の橋梁から河川に投棄することがあるので、その際に雪中に含まれる融雪塩が桁に付着し塗膜劣化を促進させるものと推察され、雪を投棄する橋梁と投棄しない橋梁の違いが塗膜劣化の差となっているものと考えられる。

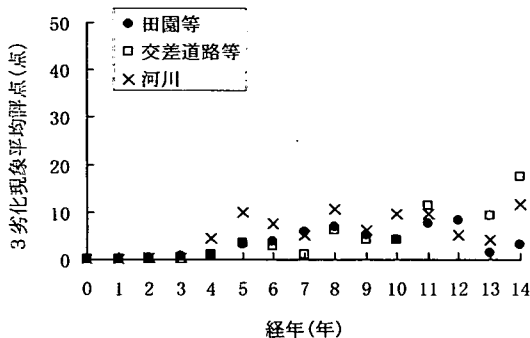


図-4 塗膜劣化と経年との関係 (鋼桁橋ウェブ)

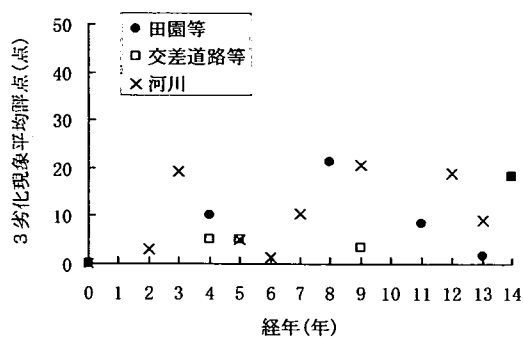


図-5 塗膜劣化と経年との関係 (鋼桁橋下フランジ)

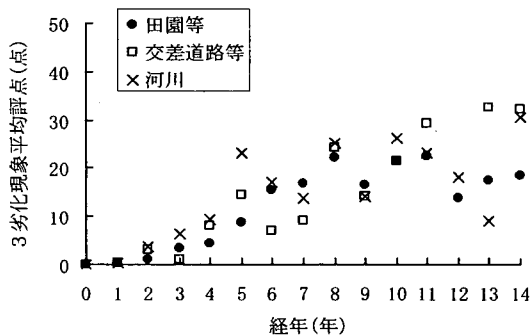


図-6 塗膜劣化と経年との関係 (箱桁橋ウェブ)

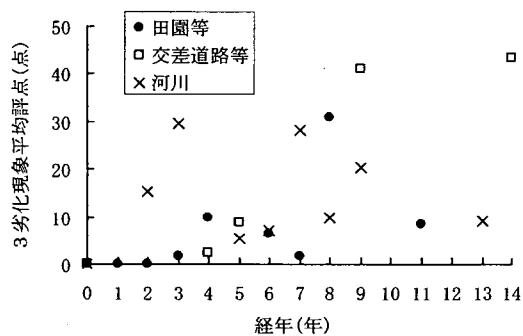


図-7 塗膜劣化と経年との関係 (箱桁橋下フランジ)

また、河川上の橋梁は他の環境に比べて水分の影響すなわち結露の影響を受け易い。A塗装系の中・上塗りに用いるフタル酸樹脂塗料は、軟質な上に水分によって溶解し易い性質を持つため、結露を受けると塗膜は膨潤し、ふくれ(ブリストア)が生じる。橋梁部位で見ると、鉛直部材であるウェブよりも水平部材である下フランジの方が結露の影響を受け易い。しかし同一橋梁の下フランジでも、河川水面からの高さの違いや水面直上かあるいは河岸上なのかによって微妙に結露量や結露時間などに差が生じており、このことが下フランジのデータのばらつきとなっているものと考えられる。

図-6及び図-7は箱桁橋のウェブと下フランジについて示したものであるが、田園環境と交差道路・側道隣接環境のデータは多少弱いながらもウェブ、下フランジとも経年との相関性は見られるものの、河川環境ではデータのばらつきが顕著であり経年に対する相関性は見られていない。河川環境のデータのばらつきは鋼桁橋と同様に融雪塩と結露の影響によるものと推察される。なお、鋼桁橋と箱桁橋は構造的にウェブと下フランジ下面の

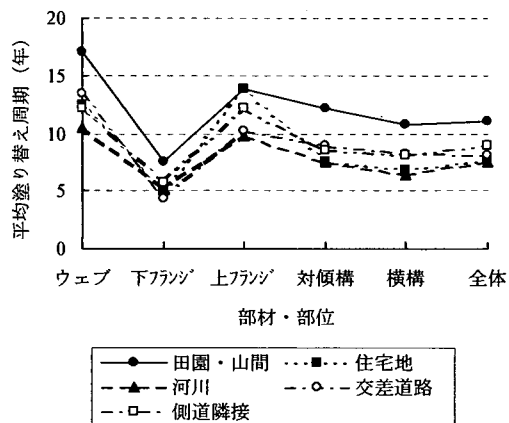


図-8 部材別平均塗り替え周期 (鋼桁橋)

面積比が異なることから、橋梁単位で塗膜劣化度を評価すると両者の特徴が見られるものと思われるが、今回の箱桁橋のデータが鋼桁橋のデータに対して約10%程度と少ないことから、今後のデータ蓄積を待って検討したいと考えている。

鋼桁橋はウェブ、フランジの他、対傾構、横構などの部材から構成されるとともに、使用方法も

水平部材として、鉛直部材としてあるいは斜め部材として用いられる。図-8は、鉸桁橋について部位別の平均塗り替え周期すなわち塗膜の劣化速度を環境別に調べたものである。これによると、各環境ともに下フランジ、横構及び対傾構など主として水平部材として使用されている部材・部位の劣化速度が速く、反面ウェブのように鉛直部材として使用されている部材の劣化速度は遅いことが分かる。これらの水平部材は飛来塩分による塩素や、自動車排気ガスなどによる硫酸化物や窒素酸化物の付着量（堆積量）が多い個所であり、桁内部に位置することから直接雨水による洗浄効果が少ない部分である。また、付着塩分は潮解性であり、これらの部材・部位は風通しがあまり良くないために、塗膜表面の濡れ時間が長くなることがウェブに比べて塗膜劣化が速くなる原因と考えられる。なお、下フランジの塗膜劣化速度が他の部材に比べて速いことから、最近の塗装仕様では新設あるいは塗り替え時に、下フランジのみを一層増し塗りを行い全部位の塗膜劣化速度を一様にする方法がとられることが多くなっている。

#### (6) 劣化面積率の経年変化

図-9は3劣化現象平均評点と劣化面積率（さび、はがれ、ひびわれの合計面積率）との関係を示したものであるが両者には非常に良い関係が見られる。また、図-10は4劣化現象平均評点と劣化面積率との関係を示したものであるが、3劣化現象平均評点と同様良い関係が見られる。このことは、劣化面積率による塗膜劣化度評価は、現在行われている、さび、はがれ、ひびわれ及び白亜化の4劣化現象による段階的評価を反映しており、白亜化を除く3劣化現象の合計面積率で塗膜劣化度を評価する「塗膜劣化度診断システム」の実用性を示したものとイえる。

### 3. 顕在劣化面積率と塗膜下腐食深さの関係

鋼橋塗膜の塗り替えは、塗膜表面の劣化度（顕在劣化）から経験的に塗膜下の腐食度（塗膜下腐食）を推定することによって行われているが、顕在劣化と塗膜下の腐食度（塗膜下腐食）との関係については必ずしも明らかになっていなかった。しかし筆者らは、実橋のデータを用いて顕在劣化面積率と塗膜下腐食面積率などとの関係を明らかにしており<sup>9)</sup>、重回帰式によって塗膜下腐食度を推定することによって塗り替え時期を的確に判断する可能性を示した。

以下にその概要を述べるとともに、このとき用い

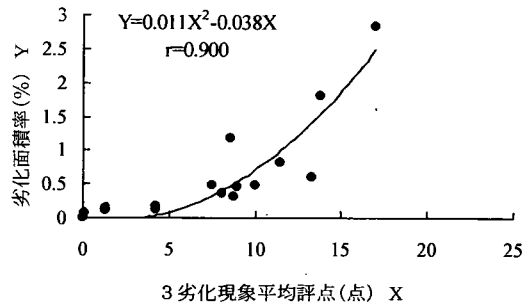


図-9 3劣化現象平均評点と劣化面積率との関係

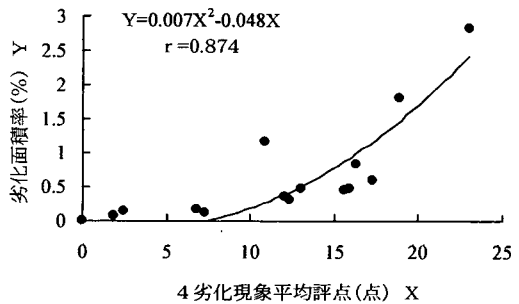


図-10 4劣化現象平均評点と劣化面積率との関係

たデータにより、顕在劣化面積率と腐食深さとの関係について検討した。

#### (1) 検討データ

##### a) 調査対象橋梁

調査橋梁として、代表的な環境として田園地域、交通量の多い都市地域及び海岸地域から各環境ごとに表-9に示す各2橋を選定した。

##### b) サンプルの抽出

各調査橋梁ごとに、さびを対象とし、次に示す4グレードの部分抽出してサンプルとした。サンプルは、1橋当たり10箇所とし、以下の①～④のグレードのものが2箇所以上の複数になるように抽出した。

- ①ごく軽微な部分：1～2mmφ程度の点さびが100×100mmの中に1～2個存在している箇所。
- ②さびが中程度に発生している部分：前記①の中に数点の点さびが存在している箇所。
- ③かなりの点さびが発生している部分：前記②以上の発錆がある箇所。
- ④さびふくれが発生している部分：さびふくれが前記②以上に発生している箇所。

##### c) 調査項目と測定方法

各橋梁毎に抽出したサンプル箇所について、次

表-9 調査橋梁名

設置環境	道路名	橋梁名	塗装年	塗装系
田園	東北道	思川橋	1985	A
	中央道	甲府南 IC 第 6 ランプ橋	1972	A
都市 (重交通)	第三京浜道路	市境高架橋	1976	A
	横浜横須賀道路	日野 IC 第二橋	1979	A
海岸	東関東道	二俣高架橋	1981	C
	西湘バイパス	萬丈橋	1985	B

- A) 鉛系さび止めペイント+フタル酸樹脂塗料
- B) ジンクリッチプライマー+塩化ゴム系塗料
- C) 鉛系さび止めペイント+フェノール MIO 樹脂塗料+塩化ゴム系塗料

の3項目を測定した。

- ① 塗膜劣化度の数量化測定：塗膜の劣化状態を撮影し、「塗膜劣化度診断システム」<sup>3)</sup>にて数量化する。
- ② 塗膜下腐食の数量化測定：前記①の撮像部塗膜を剥離し、塗膜下腐食の状況を撮影して画像処理装置にて数量化測定を行う。
- ③ 塗膜下腐食度（深さ）の測定：前記②の剥離部にシリコン樹脂系型剤を流し込んで腐食状況の凸部を作製し、これに石膏を流し込んで腐食部の状態を複製する。この複製の腐食断面部を光学顕微鏡（50倍）で測定し、塗膜下腐食度（深さ）を測定する。

d) 検討データ

前項 c) に示した測定手順に従って撮影した塗膜表面のさび発生状態（顕在劣化）と、その部分の塗膜を剥離して撮影した鋼表面の発錆状態（塗膜下腐食）について「塗膜劣化度診断システム」を用いて測定し、それぞれさびの個数（劣化個数）、このさびが占める面積率（劣化面積率）、さびの粒径分布を求めた。

測定は各橋梁ごとに10箇所行い、検討に用いたデータは顕在劣化データ、塗膜下腐食データそれぞれ60サンプル（6橋×10サンプル）である。

(2) 顕在劣化面積率と腐食深さとの関係

全60サンプルデータについて、顕在劣化面積率と塗膜下腐食面積率との関係を示すと図-11のようになるが、既に報告<sup>9)</sup>したように個々の橋梁と同様に両者の相関は非常に良く、顕在劣化面積率により塗膜下腐食面積率を推定できることが証明された。

図-12は、各橋梁のサンプルデータについて、経年と腐食深さとの関係を示したものであるが、経

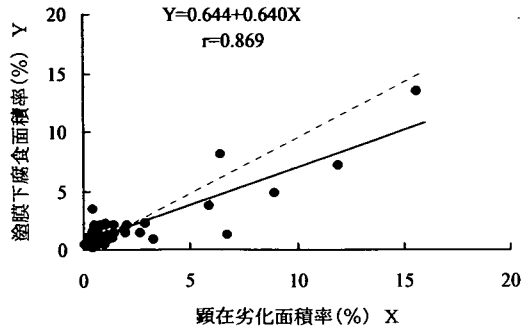
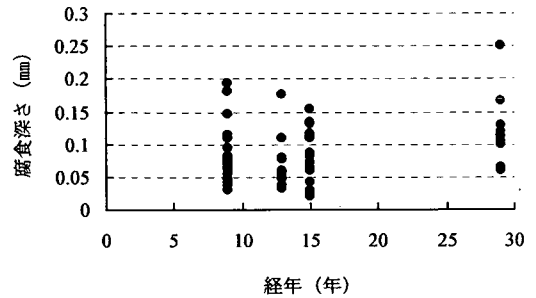


図-11 顕在劣化面積率と塗膜下腐食面積率



- 9年：甲府南 IC 橋第 6 ランプ橋（田園）  
萬丈橋（海岸）
- 13年：二俣高架橋（海岸）
- 15年：思川橋（田園）  
日野 IC 第 2 橋（都市）
- 29年：市境高架橋（都市）

図-12 腐食深さの経年変化

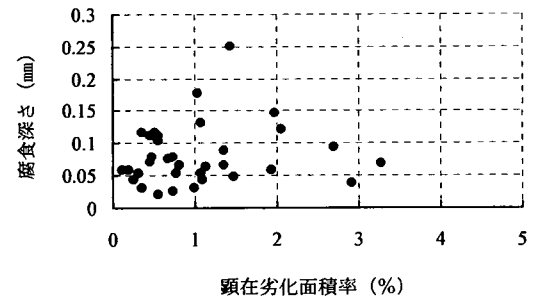


図-13 腐食深さと顕在劣化面積率との関係

年と腐食深さとの関係は特に見られず腐食深さの最大値は 0.25 mm となっている。なお、腐食環境と腐食深さとの関係は特に認められていない。これは、JHのように鋼橋の点検管理がマニュアルに基づいて定期的に行われており、かつ、定期的な



塗り替えが繰り返されている場合には、経年、腐食環境に関わらず鋼橋の腐食深さはある程度以上には進まないことを意味している。

図-13は、図-12に示した腐食深さについて顕在劣化面積率との関係で表したものであるが、図を一瞥するとプロットしたデータのほとんどが腐食深さ 0.20 mm、顕在劣化面積率 3%の包括範囲に入っており、前に述べたように経年と腐食深さとの関係が認められていないことを考慮すると、顕在劣化面積率 3%のときの腐食深さは最高 0.20 mm程度として良いと思われる。

#### 4. 塗膜の寿命予測

塗膜は紫外線エネルギーによって分解され、塗膜消耗を促進しながら劣化が進行するため<sup>10)</sup>、塗膜の光酸化に伴う表層破壊速度及び水、酸素の拡散速度が分かれば塗膜寿命の予測は可能になる。しかし、鋼橋塗膜のように大気中に曝されていて、降雨または結露により wet / dry が不規則に繰り返される場合には理想式で求めるには難しく、実橋の実証的データを統計的に解析することにより、塗膜寿命を検討することにした。そこで本章では、実橋の塗膜調査データから統計的に塗膜劣化の経年変化を求め、得られた塗膜劣化曲線を寿命予測曲線とすることの実用性について考察を加えた。

##### (1) 塗膜劣化曲線の検討データ

塗膜の寿命予測を検討する前提として、実橋の塗膜実態調査データ、塗装試験板の暴露データ及び実橋の塗膜調査データについて、統計処理的に劣化特性を理論的傾向曲線に近似させる検討を行った。検討に用いたデータの概要を表-10に示す。

##### a) 実態調査データ

2章で示した実態調査データのうち、A塗装系データ 63433 件を対象とした。なお、劣化面積率については、塗膜調査の専門家が、調査の際に撮影した塗膜の外観写真と標準図<sup>9)</sup>とを見比べて求めた。

##### b) 塗装試験板データ

検討に用いた塗装試験板の塗装方法及び暴露方法などの詳細については既に報告<sup>11)</sup>しているのので、本論文では省略する。なお、塗装試験板は水平に暴露していることから下フランジとして扱うことにした。

##### c) 実橋調査データ

表-11に示すように、常磐自動車道の中から建設以来一度も塗り替え経験のない 21 橋梁を選定した。経年別の橋梁を選択した理由は、同一橋梁を

表-10 塗膜劣化曲線検討データの概要

検討データ	暴露場所及びデータ数	腐食環境	暴露期間(年)	劣化面積率の測定方法
実態調査	全国 624 橋 (63433 データ)	マイルド	1～18	SSPC 標準図との比較
塗装試験板	東京(町田) 北陸(親不知) 沖縄(許田) 各 1 データ	マイルド 塩分飛来 高温多湿	1～6年	画像処理による定量化
実橋塗膜	常磐道 21 橋 (239 データ)	マイルド	4～15	

表-11 塗膜劣化測定用実橋

No.	橋梁名	インターチェンジ区間	橋種	経過年
1	草加高架橋	草加～三郷西	鈹桁	4年9月
2	中妻高架橋	北茨木～いわき勿来	鈹桁	8年6月
3	花園川橋	鈹桁	箱桁	8年6月
4	里根川橋	鈹桁	鈹桁	9年6月
5	花貫川橋	日立北～高萩	鈹桁	9年9月
6	中郷高架橋	高萩～北茨木	鈹桁	9年9月
7	大北川高架橋	鈹桁	鈹桁	9年9月
8	田尻高架橋	日立南太田～日立北	鈹桁	11年10月
9	大森高架橋(下)	鈹桁	鈹桁	11年11月
10	宮田川橋	鈹桁	トラス鈹桁	11年8月
11	江戸川橋	三郷TB～流山	箱桁	12年
12	今上川橋	鈹桁	鈹桁	12年
13	茂宮川高架橋	日立南太田～日立北	鈹桁	12年
14	大場川橋	三郷TB～流山	鈹桁	13年
15	三郷高架橋	三郷～三郷TB	鈹桁	13年
16	三郷インターランプ橋	鈹桁	鈹桁	13年
17	大森橋(上)	日立南太田～日立北	鈹桁	13年11月
18	大森橋(下)	鈹桁	鈹桁	13年11月
19	久慈川橋	那珂～日立南太田	鈹桁	14年
20	大森高架橋(上)	日立南太田～日立北	鈹桁	14年4月
21	那珂川橋	水戸～那珂	鈹桁	15年

調査箇所は全てウェブである。

追跡測定するためには長期間の調査を必要とするため、同じ環境に設置されたA塗装系の橋梁を経年別に選択することにより、塗装条件、暴露条件は異なるものの広義に同一視するという前提で選択したものである。

##### (2) 塗膜劣化曲線の検討

これまでにも塗膜の寿命予測を行う手法として、回帰式や成長曲線などから試みている例<sup>12)～14)</sup>が多く、これらはいずれも塗膜劣化現象の最大値を 100%、すなわち対象面積全てにさびが発生する極限時点までを各種曲線で近似している。しかし、実際には 0.2～5%程度の劣化面積率で塗り替えを

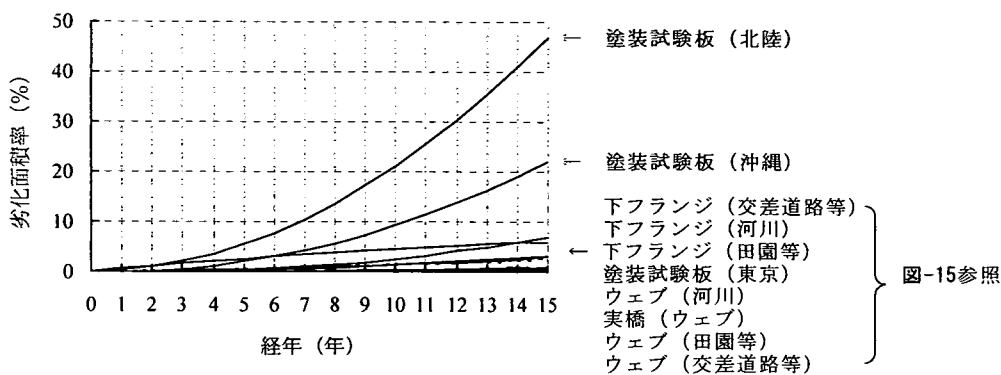


図-14 塗膜劣化曲線 (部位別, 環境別)

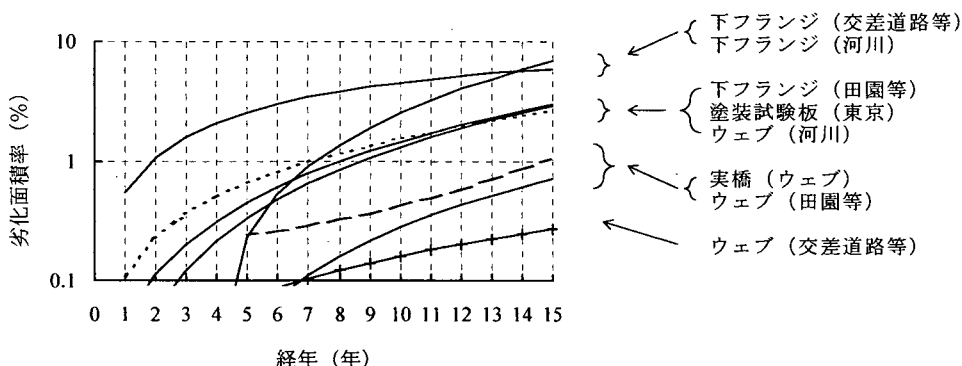


図-15 塗膜劣化曲線 (図-14の対数表示)

行っており、塗り替え時点を塗膜寿命と考えれば塗膜劣化の極限時点までの予測は必要なく、塗り替え時点までの塗膜劣化曲線を得る目的であればパラメータが多く複雑な計算する回帰式や成長線を用いる必要はない。そこで本研究では、曲線の中で最も取り扱い易い二次曲線を用いて塗膜の劣化曲線を求めることにした。

表-10に示す検討データについて、それぞれ環境別、部材別に二次曲線への適合性を検証した結果、二次曲線で回帰できることが確認できた。二次曲線では、S字形曲線すなわち最初は変化が加速し、やがて減速し始めるというパターンの曲線は表すことはできないが、塗り替え時期を判断する10～20年程度の実用的な範囲であれば、これらの二次曲線によって劣化傾向は把握できるものと考えられる。

### (3) 塗膜の寿命予測曲線

塗膜の寿命予測を行う場合、塗膜の寿命を明確にする必要がある。しかし塗膜寿命については、鋼橋を管理する管理者の立場によって塗膜寿命に

対する考え方が異なったり、同じ塗装系でも鋼橋の設置環境や維持管理の状態で塗膜の劣化程度・劣化速度が異なる等の事情によって一概に定義することは非常に困難である。そのため、従来から経験豊富な塗装技術者の判断に任されてきた経緯がある。

本研究では、塗膜の寿命予測を検討するに当たり、JHにおける鋼橋の維持管理状態及び2章における実態調査結果などから、以下のような条件を設けることにした。

- ①塗装系はマイルド環境で用いられるA塗装系(油性さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料系)を対象とする。
- ②寿命予測のための劣化度評価はさび、はがれ、ひびわれの合計面積率(劣化面積率)で行う。
- ③寿命予測は鋼橋の設置環境別に行う。
- ④寿命予測は実証的データに基づいて検討された塗膜劣化曲線を用いる。

4. (2)で求めた全ての塗膜劣化曲線を図-14に示す。図-14によると、劣化曲線は環境によって大きく、①塩分飛来環境(北陸)、②高温多湿環境(沖

表-12 塗膜寿命予測曲線のパラメータ

暴露条件		二次回帰式 ( $Y=a X^2$ )		適用環境
実態調査	ウェブ	田園・山間・住宅地	$Y=0.004X^2$ ( $r=0.839$ )	マイルド環境
		交差道路・側道隣接	$Y=0.001X^2$ ( $r=0.644$ )	
		河川	$Y=0.011X^2$ ( $r=0.621$ )	
	下フランジ	田園・山間・住宅地	$Y=0.013X^2$ ( $r=0.846$ )	
		交差道路・側道隣接	$Y=0.041X^2$ ( $r=0.790$ )	
		河川	$Y=0.011X^2$ ( $r=0.570$ )	
実橋	田園・山間・住宅地	$Y=0.003X^2$ ( $r=0.829$ )	マイルド環境	
塗装試験板	東京	$Y=0.005X^2$ ( $r=0.954$ )	マイルド環境	
	北陸	$Y=0.206X^2$ ( $r=0.999$ )	塩分飛来環境	
	沖縄	$Y=0.109X^2$ ( $r=0.986$ )	高温高湿環境	

Y : 劣化面積率, X : 経年, r : 測定値との相関係数

縄), ③その他のマイルド環境の3つに大別することができる。

図-14に示す劣化曲線のうち, マイルド環境として分類された8本の塗膜劣化曲線(図-15)について見ると, 15年目の劣化面積率では最小値がウェブ(交差道路等)で約0.5%, 最大値が下フランジ(交差道路等)で約7%となっているが劣化傾向はほぼ一致している。また, 部位別に劣化傾向を見ると下フランジ(全ての環境)及び塗装試験板(東京)の劣化面積率が大きく, ウェブ(全ての環境)の劣化面積率が小さくなっている。これは, 2.(5)で述べたように水平部材と鉛直部材との構造的な違いによる飛来塩分による塩素や, 自動車排気ガスなどによる硫酸化物や窒素酸化物の付着量(堆積量)の差であるとともに, 結露時間の違いに起因するものである。

以上から, 環境条件によって3つに大別された塗膜劣化曲線のうち, マイルド環境の劣化曲線については下フランジとウェブの部位別に分けることも考えられるが, 2.(5)の検討で橋梁型式及び橋梁部位による劣化傾向よりも環境による影響の方が大きいことが明らかになっており, また, 目視観察によるデータのばらつきなどの影響も考えると, 現段階では部位別に塗膜劣化曲線を分けることはあまり合理性がないように考えられる。なお, これについては, 今後画像処理による定量的なデータの蓄積による再検討が必要と考えている, また, 今回用いたデータには2章の図-3に示したように, 塗り替え回数が2回以上の橋梁が約2割程度含まれていることから, 2.(3)で述べたように塗り替え時の品質管理上の問題を整理した上でデータの再整理が必要と考えている。

塗膜劣化曲線を環境別に3分類し再計算したものを塗膜寿命予測曲線として図-16に, 各塗膜寿命予測曲線式のパラメータを表-12に示す。なお, 各曲線には上下限の95%信頼限界値曲線を示した。

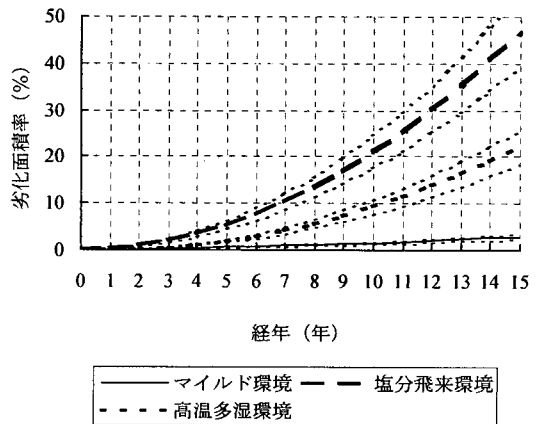


図-16 塗膜寿命予測曲線

## 5. 塗り替え時期の判定

鋼橋の塗膜寿命については明確な定義はなく, 鋼橋の設置環境, 適用されている塗装系, ランニングコスト, 管理水準及び重要性などによって様々に異なって定義されている。また, 鋼橋に対する立場の違い, すなわち鋼橋管理者であるか塗料(塗装)関係者であるかによっても塗膜寿命に対する考え方が異なっている。塗膜寿命の定義があまりない理由として吉田<sup>12)</sup>は, ①劣化の要因は多数でその作用は複雑である, ②使用条件が一定していない, ③寿命の判定基準が様でない等を挙げ, 塗膜寿命の一律的な判定は大変困難であるとしている。塗膜寿命を定義するには, これらについて明確な答えを与えなければならないが, 数多く行われている過去の研究でも未だ解決されていない。

本研究では, ①及び②については2章で行った膨大な実態調査データを統計的に処理することで

表-13 直線回帰式のパラメータ

橋梁名 (経年)	最頻値 $\lambda$	平均値 $\mu$	単位 (mm)
			標準偏差 $\sigma$
甲府南 IC 第 6 ランプ 橋 萬丈橋 (9年)	0.133	0.150	0.160
二俣高架橋 (13年)	0.178	0.189	0.200
日野 IC 第二橋	0.156	0.193	0.211
思川橋 (15年)			
市境高架橋 (29年)	0.218	0.239	0.275

対処したが、③については具体的な判定基準がない。

このように塗膜寿命についての明確な定義がない現状では、塗膜寿命予測曲線が得られたとしても塗り替え時期を判定する基準がなく、塗膜寿命予測曲線の持つ意味が半減することになる。そこで本研究では、3章で行った塗膜表面に見られる顕在劣化面積率と塗膜下腐食における腐食深さとの関係から塗膜寿命を推定し、前節で求めた塗膜寿命曲線に当てはめることにより塗膜の寿命予測の可能性を探ることとした。

(1) 最大腐食深さの分布

検討では、3章の表-9に示す6橋 60 データについて、各データの腐食深さの最高値を選び極値とし、これらを順序統計量とし極値プロットを行い、腐食深さの極値プロットを経年別に求め、経年の違いによる極値分布を図-17に示した。なお、各回帰直線から得られた最頻値( $\lambda$ )、平均値( $\mu$ )、標準偏差( $\sigma$ )を表-13に示す。

次に、最大腐食深さの分布から最大腐食深さの予測図を求めることにした。図-17に示す各回帰直線から最大腐食深さの上限値を求め、それをプロットして求めた回帰直線を30年まで外挿したものを図-18に示す。

図-18によると、最大腐食深さは0.02 mm/年(直線回帰式  $Y=0.0164X$ 、ただし Y: 最大腐食深さ、X: 経年)で直線的に増加することになり、このことは、一般的に言われている鋼材の腐食速度 0.02 mm/年と整合的である。なお、図-18によると、A 塗装系の塗り替え周期である10年<sup>2)</sup>時点における最大腐食深さは0.2 mm程度になると考えられる。

(2) 塗膜寿命と塗り替え時期

3章の図-13によると、顕在劣化面積率と腐食深さとの相関性は見られないものの、顕在劣化面積率3%と腐食深さ0.20 mmの範囲にデータ数の95%が含まれている。また図-12によると、経年と腐食深さとの関係は特に見られず腐食深さの最高値は0.25 mmとなっている。なお、3.(2)に述べたように腐食環境と腐食深さとの関係も特に見られていな

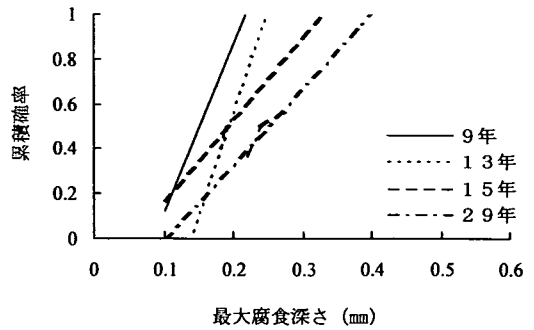


図-17 最大深さの分布

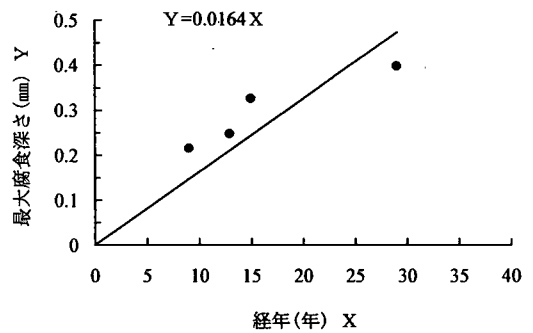


図-18 最大深さの予測

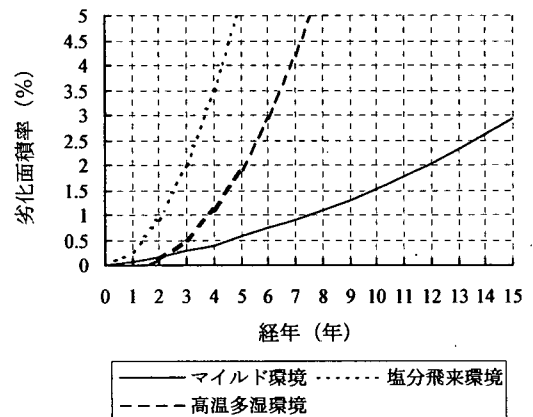


図-19 塗膜寿命予測曲線 (図-16について劣化面積率5%以下を表示)

い。以上から、塗膜下腐食(腐食深さ)0.20 mmに相当する顕在劣化面積率は3%程度と考えられる。

図-19は、図-16についてを劣化面積率5%以下で表示したものである。図-19から各環境における塗り替え時期を推定すると、顕在劣化面積率3%

に相当する年数はマイルド環境で 15 年、高温多湿環境で 6 年、塩分飛来環境で 4 年となり、過去の調査事例<sup>2)</sup>と一致した結果が得られた。

## 6. おわりに

本論文では、鋼橋（鋼道路橋）塗装の現状における技術的問題点を明らかにした上で、塗膜劣化の定量的評価と塗膜の寿命予測の可能性を検討した<sup>16)</sup>。

本論文では塗膜表面に顕在的に生じた劣化現象から、劣化面積率の推移を推定して塗膜寿命を予測するという点に焦点を合わせて論述し、塗膜劣化という物理化学的な点には触れなかった。しかし、鋼橋を管理する立場からはこの点を避けて通るわけにはいかないため、塗膜劣化を総合的に直接診断する手法の開発が目下の急務と考えている。そのためには、塗膜が形成される塗装手法のデータからスタートした膨大なデータを合理的に整理し、その中から何をパラメータにすれば塗膜寿命を的確に判定することができるかという点を見出すことが、今後に残された最も重要な課題であると考えている。

また、本論文で取り上げたデータは、いずれもマイルドな腐食環境を対象とした A 塗装系の調査データであり、鋼橋に採用されて日が浅い重防食塗装系については、実橋や塗装試験板の暴露期間が短く塗膜劣化が進行していないことやデータが少ないことから本研究では対象としなかった。今後は、これらの追跡調査データを蓄積し、より幅広い塗装系に適用していくことが望まれる。

謝辞：本研究を取りまとめるに当たり、東京大学藤野陽三教授（大学院工学系研究科社会基盤工学

専攻）、東京大学辻川茂男教授（大学院工学系研究科金属工学専攻）のご指導を賜りました。ここに厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 片脇清士：橋と塗装，社団法人日本鋼橋塗装専門会，平成 8 年。
- 2) 松田哲夫，藤原博，佐久間智：鋼橋塗装の実態調査，鋼橋塗装，Vol.18，No.4，pp.27-37，1990.4。
- 3) 藤原博，三宅将，赤井隆晃，河野幸弘，出川定男：画像処理による鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する研究，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.85-96，1998.7。
- 4) 日本道路公団維持修繕要領—橋梁編—：第 2 編鋼橋造物 鋼橋塗装，pp.1-15，昭和 63 年 5 月。
- 5) 社団法人日本鋼構造協会指針：鋼橋塗膜調査，JSSC，Vol.18，No.18，pp.43-60，1982.10。
- 6) ASTM，Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surface. D-610-95，(Steel Structures Paint Council. SSPC-Vis-2)。
- 7) 片脇清士：道路橋の塗装の歴史と展開，鋼橋塗装，Vol.23，No.1，pp.51-63，1996。
- 8) 桐村勝也，江成孝文：鋼鉄道橋における塗膜の耐久性に関する一考察，色材，Vol.66，No.12，pp.730-735，1993。
- 9) 藤原博，菅野照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.167-181，1996.4。
- 10) 菅野照造：鋼橋の防錆防食塗装，石川島播磨技報，別冊第 6 号，pp.17-24，1982。
- 11) 藤原博，田原芳雄：新設鋼道路橋に適用する重防食塗装系に関する研究，土木学会論文集，No.563/I-39，pp.23-34，1997.4。
- 12) 吉田豊彦：塗膜の寿命 (I)，色材，Vol.65，No.5，pp.308-316，1992。
- 13) 吉田豊彦：塗膜の寿命 (II)，色材，Vol.65，No.6，pp.364-377，1992。
- 14) 吉田豊彦：塗膜の寿命 (III)，色材，Vol.65，No.7，pp.435-440，1992。
- 15) 吉田豊彦：塗膜の寿命 (IV)，色材，Vol.65，No.8，pp.500-510，1992。
- 16) 藤原博，鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究，東京大学博士論文，2000.9。

(2001.1.31 受付)

## QUANTITATIVE ANALYSIS ON DETERIORATION AND REMAINING LIFE OF STEEL BRIDGE PAINTING BASED ON FIELD DATA

Hiroshi FUJIWARA and Masaru MIYAKE

With the results of field investigations and outdoor exposure experiments of painted specimens, time-lapse deterioration of paintings was statistically analyzed by using "Automatic Evaluation System for Paint Film Deterioration" in order to establish deterioration curves logically. Quadratic curves were found to be well fitted to the paint film deterioration within the practical period of 10 to 20 years. Estimation curves were established for three corrosive environments such as mild environment, seashore environment, and tropical environment (hot and highly humid).