

さらに、雨がかり環境では、付着塩分に大きなばらつきが生じ[9]、外桁の内向き側ウェブ面などの直接雨がかりのない構造一般部においては、安定的なデータが得られることから、季節依存性も考慮した年間モニタリングには外桁の内向き側ウェブ面などの直接雨がかりのない構造一般部が適すると判断する[10]。以上のことから、各鋼橋における計測箇所は、鋼橋でも最も対象面積が多く、桁端部や排水施設からの水分供給の影響を受けず、雨がかり環境でない橋梁桁内面のウェブ垂直面とする。地域別の腐食を検討するには、地点以外の影響を排除することが望ましく、計測箇所は下フランジから上がり 20cm[10]、桁端部や排水施設からの雨水の影響を受けない中間部、桁下空間は河川部、下流からの風が吹きつける面（下流面）に統一する。

3. 腐食モニタリング

3.1 腐食の評価方法

ワッペン試験片による腐食減耗量 y (mm) の算出方法は、一定期間鋼橋に張り付けた試験片を回収し、試験片表面に付着した腐食生成物を JIS Z 2383 (大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法) の附属書 A (参考) 腐食生成物を除去する化学的方法に準拠したクエン酸水素二アンモニウム水溶液を用いて板厚減少量 (g) を計測し、腐食減耗量 y (mm) に換算して評価する。クエン酸水素二アンモニウム水溶液に試験片を浸漬する際には、僅かではあるが母材の減肉も生じるため、ブランク材を同時に浸漬させ、ブランク材の減肉重量を差し引くことで、腐食によってのみ減肉した重量を計測する。また、福井県沿岸部は冬季荒天時に著しい越波の発生[11]により飛来塩分が増加する傾向があり、季節依存性が考えられるため、1年間を冬期と夏期の2つに分けて計測を行う。2つの平均値を半年間における腐食減耗量 y とし、12-5月と6-11月とする。

ワッペン試験片は JIS G 3106 に規定されている溶接構造用圧延鋼板 SM490A を使用し、表面は機械仕上げ (仕上げ記号▽▽▽) および面取りを行い、大きさは 50 mm×50 mm×2mm とする[12]。貼り付け方法は、鋼橋の温度や乾湿環境をワッペン試験片で再現できるよう熱伝導シート (COH-4065LVC, Taica) と両面テープを使用して貼り付ける[13]。設置枚数は1か所当たり5枚とする。設置期間は6ヶ月 (12-5月) 回収、6ヶ月 (6-11月) 回収、12ヶ月回収、24ヶ月回収、36ヶ月回収をそれぞれ1枚ずつとする。計測期間は2017年12月から2020年12月の36ヶ月

である。

3.2 腐食の整理方法

普通鋼材の大気中における鋼板の腐食速度は、腐食発生初期段階では比較的早いですが、時間の経過とともに低下していく。これは、初期段階では点状のさびが多数発生し、付着物の吸着を誘発することで、錆の発生が促進され、その後、腐食生成物層が経時的に厚くなることで生じる保護作用によるものである。以上のことから、大気中における鋼材の腐食速度と時間の関係として、一般的に次式で示されることが広く知られている[14,15]。

$$y = a \cdot t^b \quad (1)$$

錆び層の緻密性は耐候性鋼材に比べて大幅に小さいものの、錆が発生した普通鋼においても表面に対する内層の緻密さは生じ、錆び層の形成による保護作用は多少なりとも発生する[14]ため、普通鋼についても本式を適用した。耐候性鋼材の耐腐食性能レベルとして設計供用期間 100 年の許容腐食減耗量が示され、レベル I は 0.5mm 以下、レベル II は 1.0mm 程度、レベル III は許容値を設けず取替前提としている[5]。設計供用期間 100 年の許容腐食減耗量が腐食環境として示されているため、福井県内 15 地点における腐食減耗量 y (mm) と暴露される期間 t (year) の関係性を分析し、暴露期間 100 年における腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ (mm) を算出する。三木ら[16]は3年間の暴露に対して、本手法を適用しており、3年間4プロットの範囲では本研究でも用いることが可能であると考えた。

3.3 係数 b の検討

y を腐食減耗量 (mm) とすると、暴露環境から決まる腐食速度パラメータ a および b 、暴露される期間 t (year) を用いた式 (1) に基づき、各地点における累乗回帰曲線 ($y = a \cdot t^b$) および相関係数 R を算出する。図 2 に累乗回帰曲線を示す。次に、累乗回帰曲線における係数 b について検討を行い、係数 b が 1 を超える場合、係数 b の補正を行う。係数 b が 1 を超えることは、流動加速腐食のような特殊な減肉[17]では考えられるが、腐食環境が非常に厳しい促進試験における無塗装鋼材においても 1 を超えることはないことから[18]、係数 b が 1 を超える式が生じた際には係数 b を 1 とした線形関係として用いる。図 2 より、SMi, SS, AO では 0.5 年の値が小さくそれ以外の 1 年、2 年、3 年が線形に近い関係にある場合に $b < 1$ となる。0.5 年の精度および式 (1) を採用する限度が $b < 1$ となる原因と考えられる。

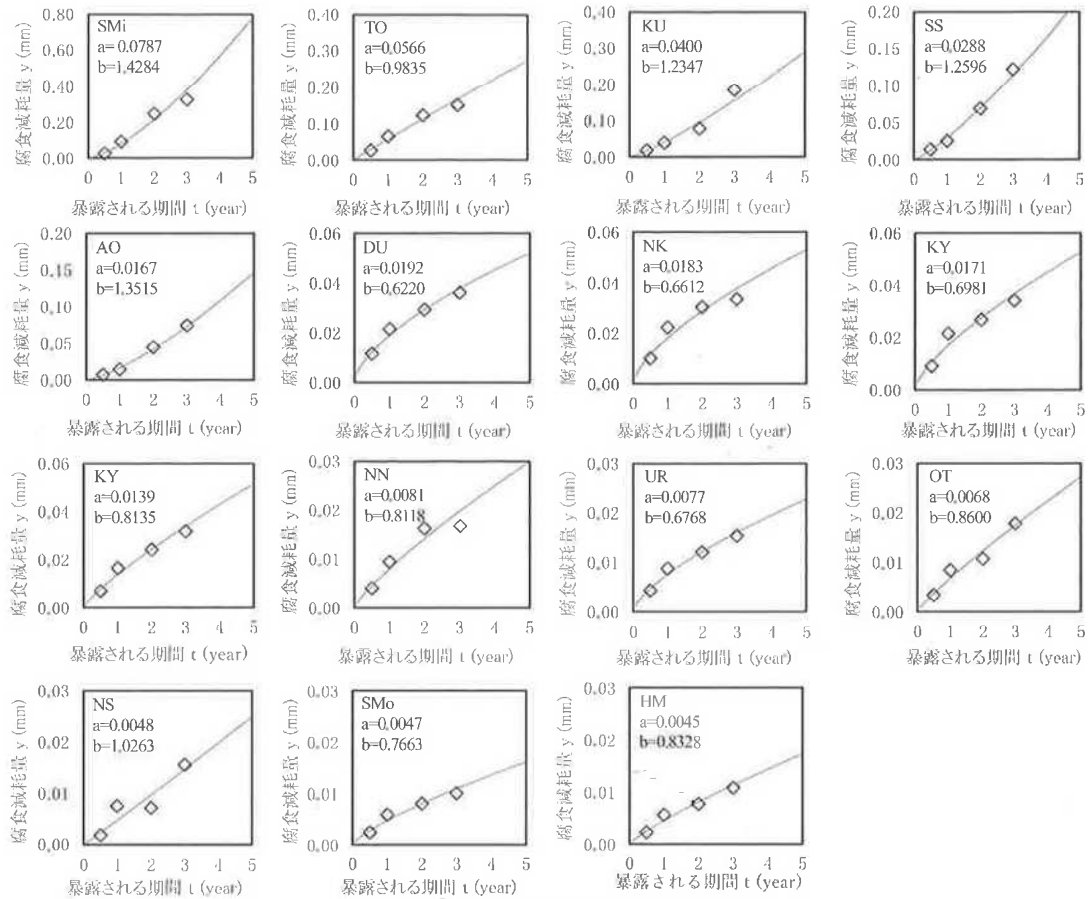


図2 各橋梁における累乗回帰曲線

耐腐食性能レベルⅢに該当する厳しい腐食環境では、地点SMiで $b=1.4284$ 、TOで $b=0.9835$ 、KUで $b=1.2347$ 、SSで $b=1.2596$ 、AOで $b=1.3515$ となり、係数 b が1に近い若しくは超える値となる。耐腐食性能レベルⅠに該当する比較的穏やかな腐食環境の地点NSでも $b=1.0263$ となり、係数 b が1を超える値となるが係数 b を1とする線形関係として整理する。

3.4 腐食減耗量と暴露期間の関係

各地域の暴露期間100年における腐食減耗量 $y_{t=100}$ (mm)を表2に示す。すべての地点において腐食減耗量 y と暴露される期間 t の相関係数 R は、いずれも0.9以上であり相関性が高く、腐食モニタリング結果は妥当であると判断する。

4. 環境作用モニタリング

4.1 付着塩分の評価方法

付着塩分と飛来塩分には関連性が示されており、付着塩分を調べることで飛来塩分を推定できる可能性が示唆されている[18]。本研究は実橋での計測が可

表2 累乗回帰曲線の係数 a 、 b 、相関係数および暴露期間100年における腐食減耗量

地点名	a	b	R	$y_{t=100}$ (mm)
SMi	0.1094	1	0.983	10.940
TO	0.0539	1	0.976	5.390
KU	0.0528	1	0.943	5.280
SS	0.0377	1	0.977	3.770
AO	0.0234	1	0.977	2.340
DU	0.0192	0.6220	0.985	0.337
NK	0.0183	0.6612	0.955	0.385
KY	0.0171	0.6981	0.956	0.426
YK	0.0139	0.8135	0.981	0.589
NN	0.0081	0.8118	0.968	0.470
UR	0.0077	0.6768	0.984	0.174
OT	0.0068	0.8600	0.972	0.357
NS	0.0049	1	0.919	0.490
SMo	0.0047	0.7663	0.968	0.160
HM	0.0045	0.8328	0.974	0.208

能であり、橋梁に付着する塩分量を直接計測できるため、付着塩分量を環境作用として評価する。

マーキング方法およびひと月当たりの付着塩分量の計測方法模式図を図3に示す。ワッペン試験片貼付箇所の隣に仮止めテープによりマーキングを行い、計測箇所が同じになるよう付着塩分量を計測する。ひと月当たりの付着塩分量を計測するため、以下の手順で作業を行う。まずマーキングを行い、計測箇所を固定し1回目の計測を行う。次に1回目の計測を行ったマーキング箇所をエタノールおよび純水で洗浄し、付着塩分をリセットする。洗浄により付着塩分をリセットしても必ず塩分量がゼロになるとは限らないため、付着塩分がリセットされた状態を確認するため2回目の計測を行い、2回目の計測結果を次月の初期値とする。1回目の計測結果と前月の2回目の計測結果（初期値）の差をひと月当たりの付着塩分量とすることで、洗浄で取り切れなかった付着塩分の把握が可能となり、ひと月あたりの付着塩分量を計測することができる。耐候性鋼材の場合、錆面を計測すると表面塩分のみならず錆内に蓄積した塩分を合わせて計測してしまうため、15cm×15cmのプラスチック板を耐候性鋼材ウェブ面に貼付け、プラスチック板面を計測することで、付着塩分のみを計測する。

計測にはポータブル表面塩分計（SNA-3000、榊サンコウ電子研究所）を使用する。本計測器は電気伝導率法（JIS Z 0313に対応）であり、計測範囲は塩分

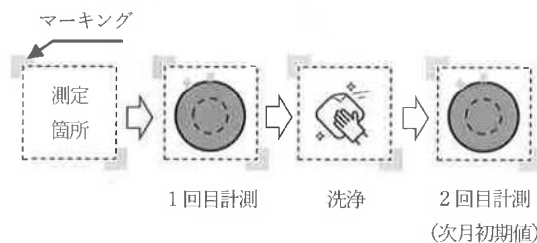


図3 マーキング方法と月毎付着塩分の計測方法の模式図

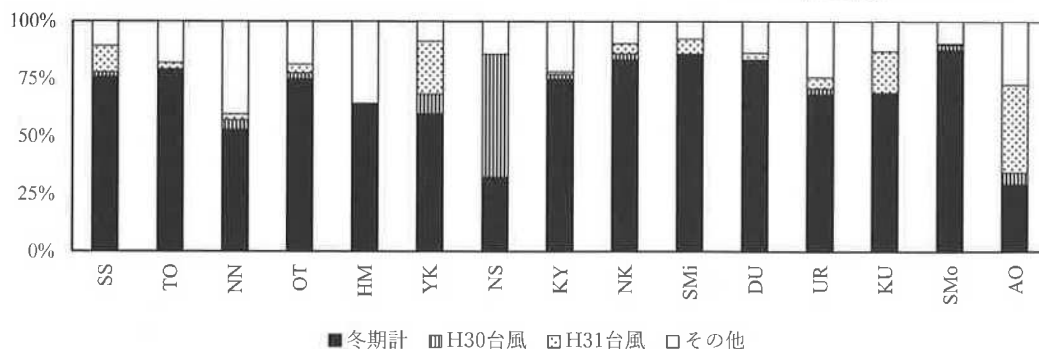


図4 各橋梁における付着塩分量の内訳

量では0-1,999mg/m²、電気伝導率では0-1,999mS/cmである。計測1回目である2017年12月頭の付着塩分量は、各地点の橋梁建設年度、塗装補修履歴などに差があるため、塩分量から除外する。計測期間は2017年12月から2020年12月の36ヶ月である。

4.2 月平均付着塩分量の推定

各地域における付着塩分量の内訳を図4に示す。内訳は冬季の影響および福井県に接近した台風の影響を確認するため、冬季4ヶ月（12-3月）、平成30年台風20号・21号のあった2018年9月、平成31年台風19号のあった2019年10月、それ以外の4区分とする。内訳は冬季68%、平成30年台風6%、平成31年台風8%、それ以外18%である。福井県内のほとんどの地域で冬季の付着塩分の割合が多いことがわかる。中には夏季の主に台風による付着塩分の割合が多い地域も確認できる。

福井県では、春季(4-6月)は1割未満、夏季(7-9月)は約1割、秋季(10-11月)は約1割と少なく、夏期に付着塩分が小さくなる傾向があり[20]、付着塩分が全くない時期もあることから春季、夏季、秋季の関連性は低いと考えられる。対し、冬季4ヶ月（12-3月）で年間付着塩分量の約7割を占めるため、冬季データから月平均付着塩分量Cを推定できる可能性がある。

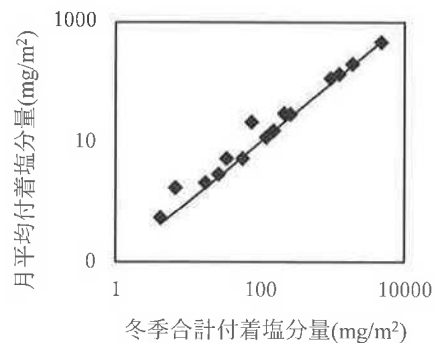


図5 冬季合計付着塩分量C_wと月平均付着塩分量Cの関係

る。冬季4ヶ月合計値 C_W と月平均付着塩分量 C の関係を図5に示す。冬季4ヶ月合計値 C_W と月平均付着塩分量 C の相関係数は $R=0.995$ と相関性が高く、冬季4ヶ月合計値 C_W から月平均付着塩分量 C を推定することができ、次式で示すことができる。

$$C = 0.100 \cdot C_W \quad (2)$$

季節依存性のある地域では、月平均付着塩分量 C を簡便に推定できる可能性が考えられる。NSは台風の影響が大きく、本式で推定すると危険側になる事が考えられるが塩分量が小さいため問題ないと判断する。

4.3 付着塩分と相関の高い地域環境

表3に月平均付着塩分量 C と評価対象地域の地理的諸元を示す。離岸距離と月平均付着塩分量 C の相関係数は平均 $R=0.914$ (嶺北地域 $R=0.870$, 嶺南地域 $R=0.957$)、標高と月平均付着塩分量 C の相関係数は平均 $R=0.396$ (嶺北地域 $R=0.778$, 嶺南地域 $R=0.014$) であり、月平均付着塩分量 C は離岸距離との相関性が高いことが示された。しかし、地点 NN や OT は離岸距離が 10km 以下にも関わらず、付着塩分量が非常に小さいことから、河川距離について検証する。

河川の終点は海岸であり、河川距離に応じて離岸距離が長くなりやすい。また、河川距離に応じて標高は高くなることから、離岸距離と標高の両因子を考慮したパラメータと考えられる。河川距離 De と月平均付着塩分量 C の相関係数は平均 $R=0.961$ (嶺北地域 $R=0.979$, 嶺南地域 $R=0.943$) であり、付着塩分は離岸距離より河川距離 De との相関性が高いことが示された。

5. 地形環境評価

5.1 気象データの傾向

腐食損傷は離岸距離や標高など、地形に依存する気象因子が報告されている[21]。そこで、気象外乱の地形的依存性について検討する。また、計測する地点が変わることで大きく変化する気象外乱を把握し、地域別の腐食損傷の原因の一つとして評価できると考えられる。

気象台で計測される気象データには、主に(a) 降水量、(b) 温度、(c) 湿度、(d) 風向および風速がある。福井県内の約 10km 離れた FK 気象台および HR 観測所 (図1) の気象データを比較した結果 (図6)、(b)温度と(c)湿度には大きな差が見られず、(d) 風速

に顕著な違いが見られる。つまり、風データは局所的に異なりやすい気象外乱であり、多地点のモニタリングに基づいてこの傾向性を分析する。

表3 評価対象地域の付着塩分量と地理的諸元

地域名	地点名	月平均付着塩分量 C (mg/m ²)	離岸距離 (km)	標高 (m)	河川距離 De (km)
嶺北地域	SS	137	2.4	1	2.7
	TO	201	0.1	8	0.1
	NN	5	4.2	149	40.5
	OT	3	9.1	127	50.3
	HM	1	20.9	260	52.5
	YK	30	16.0	15	28.5
	NS	2	55.3	558	63.4
	KY	30	34.5	119	37.1
	NK	12	20.4	35	21.7
嶺南地域	SMi	469	0.0	35	0.0
	DU	16	3.7	17	3.7
	UR	2	10.5	60	14.2
	KU	116	1.1	1	1.2
	SMo	5	9.2	107	16.6
	AO	22	1.0	8	1.1

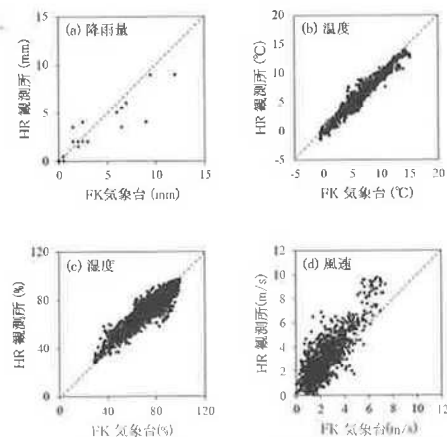


図6 観測点の違いによる気象データの比較

表4 風データのモニタリング箇所

地点名	計測位置
SS	橋梁高欄
TO	上流側河川敷(50m 離れ)
NN	橋梁高欄
OT	右岸建物屋上(100m 離れ)
HM	橋梁高欄
YK	橋台上歩道(30m 離れ)
NS	橋梁高欄
KY	下流側河川敷(20m 離れ)
NK	橋梁高欄
SMi	橋梁高欄
DU	上流側河川敷(30m 離れ)
UR	上流側河川敷(250m 離れ)
KU	下流側河川敷(20m 離れ)
SMo	下流側河川敷(10m 離れ)
AO	上流側河川敷(10m 離れ)

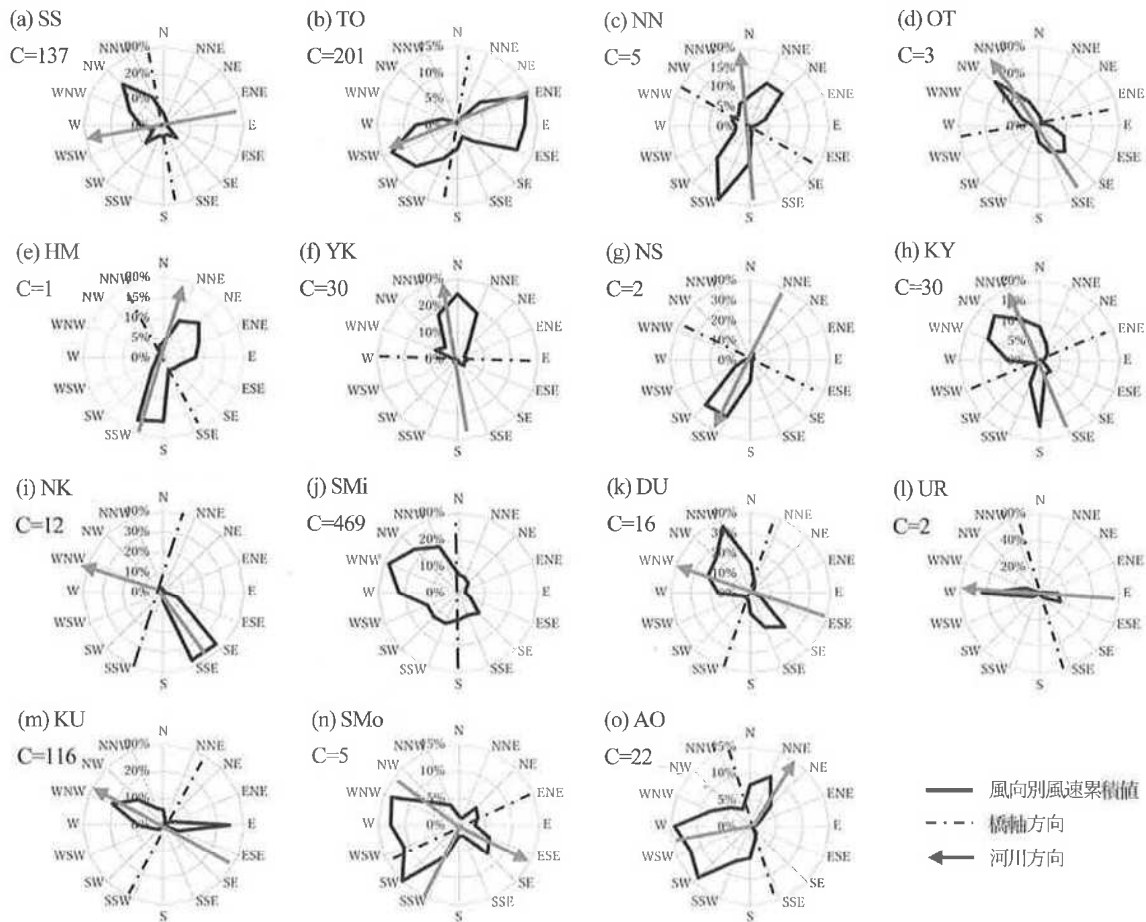


図7 橋軸方向、河川方向および風向別の累積風速率

5.2 各橋梁における風の傾向性

各橋梁における風向風速計の設置箇所は表4のとおりとする。計測期間は2019年11月から2020年6月の8ヶ月である。風データの多地点モニタリング結果を図7に示す。図中の一点鎖線は橋梁の橋軸方向、矢印線は河川方向、矢印は流下方向を示す。10分間隔の風速を方位ごとに累積することで、方位別の卓越風向を把握することが可能であり、累積風速率(%)が大きい方位を卓越風向とする。

計測箇所15地点の内12地点で卓越風向と河川方向が一致し、河川の下流側と上流側の2方向に卓越風向であることが示された。(f)YK, (g)NS および (i)NK は1方向からの風が顕著であるが、上流側および下流側の2方向の風に分類することができる。卓越風向と河川の向きが異なる地点(a)SS と(k)DU は、共に海岸に近い位置にあり、卓越風向と海岸方向が一致している。これは、海岸に近い河川の蛇行により、卓越風向と河川の向きが異なるものであるが、海岸方向と一致する。つまり、河川の下流側の風は河川を遡上する風、河川の上流側の風は河川を流下

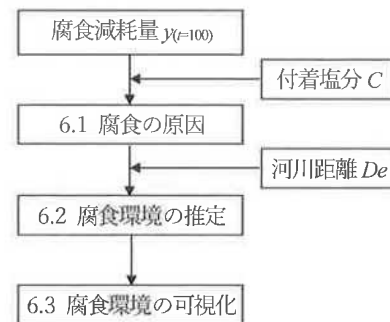


図8 地域別の腐食環境レベル評価フロー

する風が橋梁へ作用する傾向がある。この傾向に基づき、海塩由来の飛来塩分は河川遡上を主として内陸へ影響し得る[5]と仮定し、次章の議論を進める。

6. 地域別の腐食環境レベル評価

図8に地域別の腐食環境レベル評価のフローを示す。5章までに得た知見から、付着塩分と河川距離に基づく腐食環境の可視化を計る。

表5 各橋梁の付着塩分量と季節割合

地点名	a	b	月平均付着塩分量 C (mg/m ²)	季節割合(%)			
				冬	春	夏	秋
SMi	0.1094	1	469	85	4	2	9
TO	0.0539	1	201	79	3	4	14
KU	0.0528	1	116	68	5	2	25
SS	0.0377	1	137	76	2	4	18
AO	0.0234	1	22	29	14	11	46
DU	0.0192	0.6220	16	83	5	8	4
NK	0.0183	0.6612	12	83	4	7	6
KY	0.0171	0.6981	30	75	10	8	7
YK	0.0139	0.8135	30	60	5	10	25
NN	0.0081	0.8118	5	53	12	28	7
UR	0.0077	0.6768	2	68	6	11	15
OT	0.0068	0.8600	3	75	5	13	7
NS	0.0049	1	2	32	14	54	0
SMo	0.0047	0.7663	5	88	4	3	5
HM	0.0045	0.8328	1	64	16	10	10

6.1 腐食と付着塩分の関係

暴露初年1年間の腐食量に相当する係数aは、表5に示す実橋の月平均付着塩分量Cと高い相関性(相関係数R=0.972)を示し(図9)、付着塩分の影響が大きいほど係数aが大きくなる(図10)。これは、暴露初年1年間は付着塩分により腐食が促進されたためと考えられる。

腐食減耗量と暴露期間の整理の結果、厳しい腐食環境では、飛来塩分の付着・蓄積が多いことで腐食生成物層の保護性は期待できず、係数bの値が大きくなり、また、暴露初年1年間の腐食量を示す係数aも大きくなる。比較的穏やかな腐食環境では、飛来塩分の付着・蓄積が比較的少ないが付着塩分が暴露初年1年間の腐食を促進させる。どちらの腐食環境においても共通するのは付着塩分であり、実橋梁の付着塩分量Cと暴露期間100年における腐食減耗量

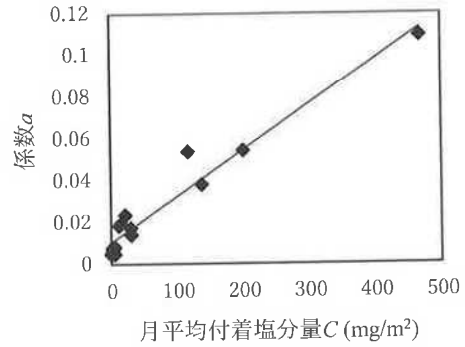


図9 月平均付着塩分量と累乗回帰曲線における係数aの関係

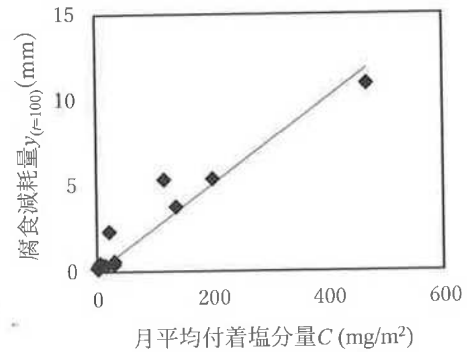


図11 月平均付着塩分量Cと腐食減耗量y_{t=100}の関係

y_{t=100}には関係があると考えられる。暴露期間100年における腐食減耗量y_{t=100}と実橋の月平均付着塩分量Cの関係を分析した結果を図11に示す。

実橋梁の月平均付着塩分量Cと暴露期間100年における腐食減耗量y_{t=100}には線形関係があり、相関係数はR=0.959と相関性が高く、付着塩分が腐食の主要原因であるといえる。雨がかりのない橋梁内面一般部では、月平均近付着塩分量Cから暴露期間100年における腐食減耗量y_{t=100}を推定することが可能であり、次式で示すことができる。

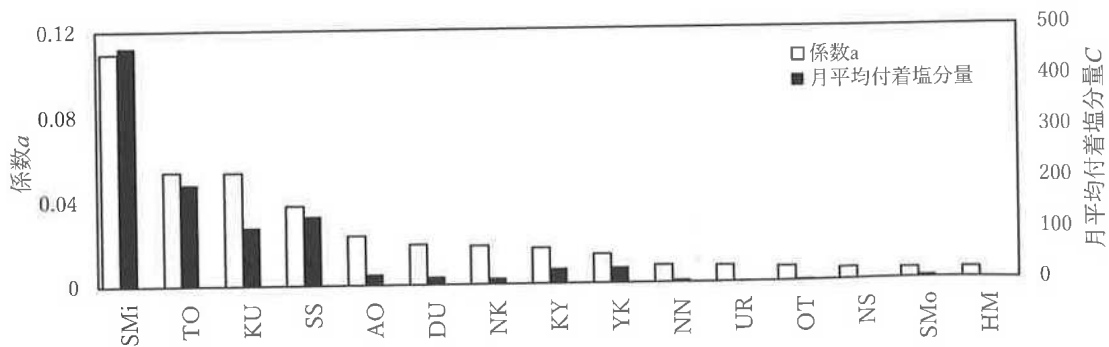


図10 地点ごとの累乗回帰曲線における係数aと月平均付着塩分量C

$$y_{(t=100)} = 0.0252 \cdot C \quad (3)$$

なお、鋼材の環境因子を考える上で橋梁全体に影響する因子に塩化物系凍結防止剤の大気中への飛散が報告されているため[22]、凍結防止剤の影響について検討する。海岸から 20km 以上離れた地点 HM, NS は海塩の飛来が少ないことが予想され、この2つの地点を含めたすべての箇所ですべての箇所で冬季に凍結防止剤が散布されている。地点 HM および NS は、共に付着塩分がほとんどなく、凍結防止剤の付着は考えにくい。地点 NS は冬季の塩分の付着以上に夏季の台風の強風による塩分の付着が顕著であり(図4)、凍結防止剤の付着は影響がほとんどないといえる。凍結防止剤の付着がない理由としては、冬季の橋梁上では除雪した雪が高欄と並行した雪壁になりやすく、この雪壁が路面の凍結防止剤の飛散を抑制していると考えられる。地点 KY や YK は離岸距離が十分にあるが冬期の付着塩分量が多い。これは 6.2 節で示す河川距離の影響が考えられる。

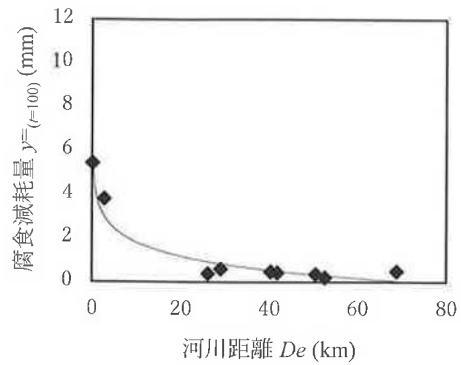
6.2 河川距離と腐食の関係

橋梁架橋地点での卓越風向は河川を遡上する風と流下する風の2種類であり、河川を遡上する風により海塩由来の塩分が橋梁に付着すると考えられる。運搬経路の長さに応じて海風内の塩分が散逸し減少すると考えられるため、運搬距離に相当する河川距離 De と月平均付着塩分量 C に関係性があると考えられる。河川距離 De と月平均付着塩分量 C には4.3節に示したように相関性が高い。このことから、海風が伝搬した過程で経路である河川距離 De に応じて付着塩分が減少する考えは一定の妥当性がある。河川距離は国土交通省の河川距離標の考え方を参考に、国土地理院地図を使用して河口から河川の流心距離を累積して算出する。こ線橋や湖沼に架かる橋梁の河川距離は、最も近くにある河川の河川距離に加え、集水面積の考え方を参考に、こ線橋地点に降った雨が最も近くにある河川に流出する距離を加えた距離とする。

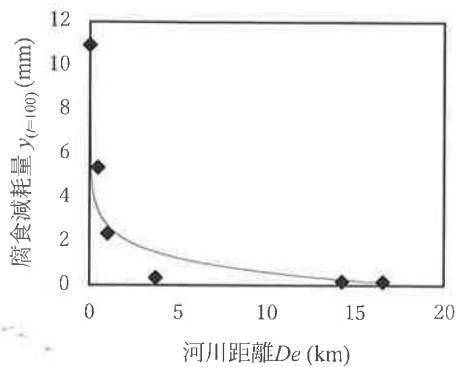
運搬距離に相当する河川距離 De と腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ の関係を図12に示す。嶺北地域 N と嶺南地域 S では飛来塩分量に大きな差があるため、それぞれの地域で推定式を算出した結果を式(4)および式(5)に示す。

$$y_{N(t=100)} = -0.906 \cdot \log_e De + 3.883 \quad (4)$$

$$y_{S(t=100)} = -0.928 \cdot \log_e De + 2.729 \quad (5)$$



(a) 嶺北地域



(b) 嶺南地域

図12 河川距離と付着塩分量の関係

式(4)は嶺北地域 N, 式(5)は嶺南地域 S に適用する。河川距離 De と腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ の相関係数は式(4)が $R=0.977$, 式(5)が $R=0.971$ である。離岸距離と腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ の相関係数は嶺北地域 N が $R=0.893$, 嶺南地域 S が $R=0.948$ であり、河川距離 De と腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ の相関性は高く、海塩由来の飛来塩分は河川遡上を主として内陸へ影響し得るとする仮定は妥当と考える。

嶺北地域では河川距離 De が 41.9km 地点で腐食減耗量 $y_{(t=100)}=0.5\text{mm}$, $De=24.1\text{km}$ 地点で $y_{(t=100)}=1.0\text{mm}$ となる。嶺南地域では $De=11.1\text{km}$ 地点で $y_{(t=100)}=0.5\text{mm}$, $De=6.5\text{km}$ 地点で $y_{(t=100)}=1.0\text{mm}$ となり、嶺南地域は嶺北地域に比べて腐食環境が穏やかであることが示され、飛来塩分量[6]と同様の地域差を示した。

6.3 腐食環境の可視化

腐食モニタリングの傾向に基づき、環境作用データである付着塩分と風データの多地点モニタリングの結果を利用し、腐食環境の可視化を試みる。耐候性鋼材の耐腐食性能レベルとして設計供用期間 100 年の許容腐食減耗量が示され[5]、設計供用期間 100 年の許容腐食減耗量が 0.5mm 間隔で腐食環境として

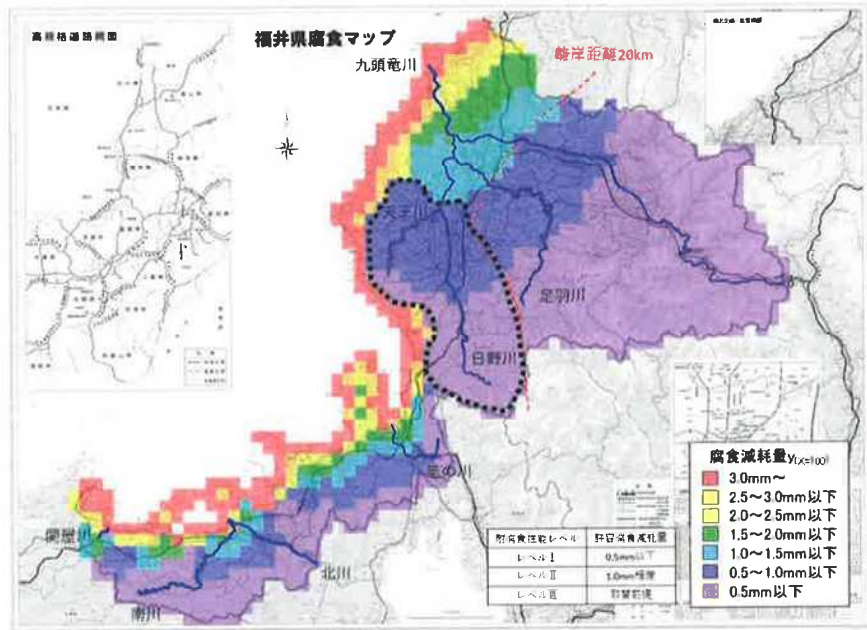


図13 暴露期間100年における腐食環境の可視化結果

示されているため、0.5mm ごとの7段階で可視化する。可視化のメッシュサイズは5.1節で検討した気象台データに差がある10km以下とし、県内河川に架橋される橋梁の間隔を考慮し決定することが適当と考えられる。福井県の最大河川である九頭竜川の河口に近い橋梁の直線距離間隔を10橋分計測した結果、平均2.4km(最小1.2km, 最大4.3km)であり、2km間隔であれば平均間隔と同程度であり、かつ、気象台データに差がある間隔以下であるため2km間隔とする。以上をもとに腐食環境の可視化結果を図13に示す。

海岸に近い地域では非常に厳しい腐食環境であり、嶺北および嶺南どちらの地域でも河川距離0.1km当たりの腐食減少量が0.05mm以上になる河川距離は1.8~1.9kmであり、海岸から約2km以内は腐食環境が大きく変化するため、腐食損傷の進行に注意する必要がある。また、従来の離岸距離による腐食環境評価と今回の河川距離による腐食環境評価を比較すると(表3)、腐食環境評価が異なる地域として、図13の点線で囲む地域であり、従来の腐食環境評価より穏やかな腐食環境になると考えられる。よって、点線で囲む地域は腐食対策費の縮減や耐候性鋼材の無塗装使用の可能性の検討を推奨する。要因として、山地が腐食環境を穏やかにすることが考えられる。海からの風は海水面とほぼ同じ標高の河口から内陸に進入する。一方、標高の高い山地は壁のように風が内陸に進入するのを防ぐ。風は海塩粒子を含んでおり、山地は風が内陸に進入するのを防ぐと同時に

風に含まれる海塩粒子の進入を防ぐ効果があると考えられ、河川距離による腐食環境評価は山地の効果を含めた評価方法であると考えられる。 $y_{(t=100)}=0.5\text{mm}$ 地点は嶺北地域 $De=41.9\text{km}$ 、嶺南地域 $De=11.1\text{km}$ であり、明らかに腐食環境に差があることがわかる。このことから、道路橋示方書に示される対策区分[4]の境目は福井県内である可能性が考えられ、嶺北地域は日本海沿岸部Ⅰ、嶺南地域は日本海沿岸部Ⅱに相当する可能性がある。

7. まとめ

本研究では、腐食環境を地域別に把握することを目的として、モニタリング鋼板を用いて既設橋梁設置型ワッペン式曝露試験を行い、地域別腐食速度を明らかにした。そのうえで腐食と環境作用を回帰分析することで腐食環境と付着塩分量の傾向性を明らかにし、河川距離に着目した腐食環境の推定手法を提案し、福井県下の橋梁を対象に分析した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 福井県は全般的に付着塩分量に季節依存性があり、このような地域では、冬季の付着塩分量 C_w から月平均付着塩分量 C を推定できる可能性がある。
- 2) 月平均付着塩分量 C と暴露期間100年における腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ には線形の関係があり、雨がかりのない橋梁内面一般部では、月平均近付着塩分量 C から暴露期間100年における腐食減耗量

$y_{(t=100)}$ を推定することができる。

- 3) 飛来塩分の運搬経路である河川距離 De と暴露期間 100 年における腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ の関係には高い相関性があり、河川距離 De から暴露期間 100 年における腐食減耗量 $y_{(t=100)}$ を推定することができる。

本研究の結果、塩分量と腐食減耗量には線形関係があり、雨がかりのない橋梁内面一般部での腐食は付着塩分が主原因であり、腐食因子に重みはなく、塩分量から腐食量を推定することが可能である。また、海風が伝搬した過程で経路である河川距離に応じて付着塩分が減少する考えの妥当性を示し、風速および卓越する風向の割合が付着塩分と河川距離の関係に影響すると考えられる。本研究では嶺北地域と嶺南地域の 2 系統の関係解明に留まっており、風データが与える影響の重みの解明は今後の課題である。

参考文献

- [1] 社会資本整備審議会道路分科会:道路の老朽化対策の本格実施に関する提言, 2014.
- [2] 国土交通省:インフラの長寿命化とデータ利活用に向けた取組, 2018.
- [3] 国土技術政策総合研究所:橋梁の架替に関する調査結果(V), 国総研資料第 1112 号, p. I -23, 2020.
- [4] 公益社団法人日本道路協会:道路橋示方書(Ⅱ鋼橋・鋼部材編)・同解説, p.144, 2017.
- [5] 日本鋼構造協会:耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術, テクニカルレポート No.73, 2006.
- [6] 福井県橋梁定期点検マニュアル(案), pp.11, 2007.
- [7] 藤井堅, 中村秀治, 山口詩織, 海田辰将, 須藤仁, 服部康男, 石川智巳:旧余部橋梁の飛来塩分による腐食実態と腐食影響評価における開園輸送解析モデルの適用性について, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.1, pp.98-113, 2017.
- [8] 広瀬望, 武邊勝道, 大屋誠, 佐藤誠:腐食環境評価の高度化に向けた鋼材への付着塩分量の推定のための基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.605-612, 2014.
- [9] 吉田翔太, 鈴木啓悟, 佐々木栄一, 近藤泰光:日本海沿岸地域に位置する鋼橋の付着塩分量調査研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.22, pp.482-488, 2014.
- [10] 鈴木啓悟, 吉田翔太, 佐々木栄一, 竹谷晃一, 前田健児, 近藤泰光:海岸部に位置する橋梁の腐食環境モニタリングと統計的腐食因子分析, 土木

学会論文集 A2, 72, pp.731-737, 2016.

- [11]加藤広之, 横山大地, 小林健一, 西嶋靖子, 佐藤勝弘, 五十嵐雄介, 西崎孝之:長周期波を考慮した漁港の越波による被害の再現と対策について, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, I, 856-861, 2016.
- [12]国土技術政策総合研究所: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-, 777 号, pp.27, 2014.
- [13]坂本達朗:高腐食環境における鋼構造物の塗膜下腐食現象と防食性向上法に関する研究, 九州大学学位論文, 甲第 13215 号, 2016.
- [14]土木学会:腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル, 鋼構造シリーズ 18, 2009.
- [15]貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 林秀幸, 押川渡:腐食生成物の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法, 材料と環境, 61, pp.483-494, 2012.
- [16] 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, 1-64, pp.271-281, 2003.
- [17]長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一:流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響-腐食速度の流速依存性-, INSS JOURNAL, Vol.7, pp.104-122, 2010.
- [18]伊藤義人, 岩田厚司, 貝沼重信:鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進試験と促進倍率に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1021-1029, 2002.
- [19]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.
- [20]前田:日本海岸地域における橋梁洗浄時期の検討, 近畿地方整備局研究発表会論文集, 一般部門(安全・安心) I, No.8, 2019.
- [21]片山英樹, 柳生進二郎, 松波成行, 萩原正:気象データを活用した腐食環境シミュレーションの検討, 第 73 回土木学会年次学術講演会, V-346, 2018.
- [22]野口恭平, 徳増秀俊, 繁田匡寿, 小池宏之進, 坪倉佑太, 八木知己:周囲に障害物のない橋梁路面から大気中に飛散した凍結防止剤の主桁への付着特性, 土木学会論文集 A1, Vol.76, No.3, pp.510-522, 2020.

(2021年3月17日原稿受理)

予防保全例



下面への水の影響を低減