橋梁表面へ付着する塩分量の部位別予測と 維持管理技術の高度化への適用

野口恭平

論文目次

第	1	章	序	論
	-			H

1.1	はじめ	ح	1
1.2	腐食に。	よる鋼橋の劣化機構と対策	2
	1.2.1	腐食の発生機構	
	1.2.2	耐候性鋼	
	1.2.3	塗装	
1.3	飛来塩	分とその付着に関する既往の研究	8
	1.3.1	海塩粒子の生成と飛来塩分の捕集装置	
	1.3.2	実測に基づく大気中の塩分分布や挙動	
	1.3.3	海塩粒子の発生量・大気中の分布などの数値予測	
	1.3.4	観測・実験・数値計算による橋梁等構造物周辺または部位別付着塩分量	
	1.3.5	飛来塩分量や付着塩分量の低減	
1.4	本研究の	の目的と構成	15
	1.4.1	研究課題と研究目的	
	1.4.2	研究内容と本論文の構成	
参考	文献		19

第2章 現地観測による飛来塩分量および気象要素の獲得と 橋梁表面の付着塩分量調査

2.1 概説
2.2 対象橋梁と気象観測
2.3 表面付着塩分量の計測
2.4 円筒型飛来塩分捕集器による飛来塩分の計測と精度検証
2.4.1 円筒型飛来塩分捕集器
2.4.2 土研式タンク法およびドライガーゼ法との比較
2.4.3 エアサンプラーとの比較
2.5 ドライガーゼ法の気流特性と捕集効率41
2.5.1 風洞実験による捕集装置周りの風況評価手法
2.5.2 風洞実験結果
2.5.3 大気中塩分濃度と風況に基づくドライガーゼ法による捕集塩分量の評価
2.6 本章のまとめ
参考文献

論 文 目 次

第33	章 数値	ē計算による橋梁部位別の付着塩分量評価
3.1	概説	
3.2	提案す	る橋梁表面の付着塩分量評価モデル54
3.3	定常流	れ場計算の支配方程式と計算アルゴリズム55
	3.3.1	支配方程式
	3.3.2	乱流モデル
	3.3.3	壁領域での取り扱い
	3.3.4	計算アルゴリズム
3.4	非定常	流れ場計算の支配方程式と計算アルゴリズム58
	3.4.1	支配方程式
	3.4.2	乱流モデル
	3.4.3	壁領域での取り扱い
	3.4.4	計算アルゴリズム
3.5	粒子追	跡法による非定常流れ場での付着量計算61
	3.5.1	移流過程
	3.5.2	拡散過程 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
3.6	対象橋	梁周りの定常流れ場計算63
	3.6.1	定常流れ場計算領域と境界条件
	3.6.2	算出された定常流れ場の特性
3.7	橋梁へ	の付着塩分量評価モデルにおける塩分の衝突フラックス評価位置
	3.7.1	流入変動風の計算概要
	3.7.2	流入変動風の計算結果
	3.7.3	鉛直平板周りの非定常流れ場計算
	3.7.4	鉛直平板周りの定常流れ場計算
	3.7.5	鉛直平板周りの非定常流れ場と定常流れ場の比較
	3.7.6	粒子追跡の計算領域と計算条件
	3.7.7	大気中塩分の壁面への衝突フラックス評価位置の決定
3.8	雨水に	よる付着塩分の洗浄効果83
	3.8.1	表面状態の違いが表面付着塩分の洗浄効果に与える影響
	3.8.2	暴露角度の違いが表面付着塩分の洗浄効果に与える影響
3.9	橋梁部	位別の付着塩分量計算
	3.9.1	橋梁表面に付着する塩分量の計算アルゴリズム
	3.9.2	橋梁部位別の付着塩分量計算結果と観測値との比較
	3.9.3	橋梁主桁表面の付着塩分量の面的分布
3.10	本章の	まとめ
参考	专文献	

論 文 目 次

第 4	章 橋梁表面おける結露による水滴の発生とその流下に伴う
	付着塩分の洗浄効果
4.1	概説
4.2	領域気象モデル WRF について100
	4.2.1 概要
	4.2.2 支配方程式
4.3	領域気象モデル WRF の計算領域と計算条件103
	4.3.1 計算領域
	4.3.2 初期・境界条件
	4.3.3 物理モデルおよび化学モデル
	4.3.4 ナッジングによるデータ同化手法
4.4	領域気象モデル WRF の算出結果と観測値との比較109
4.5	対象橋梁主桁表面温度の算出114
	4.5.1 支配方程式と境界条件
	4.5.2 部材角度を考慮した放射の変換
	4.5.3 表面温度の計算結果
4.6	結露による発生水量の算出と表面水分の定義118
	4.6.1 結露による発生水量の決定手法
	4.6.2 発生水量の計算結果
4.7	結露で生じた水滴の流下による橋梁表面の付着塩分洗浄効果測定実験120
	4.7.1 水滴の流下開始水量
	4.7.2 水滴の限界非分裂水量
	4.7.3 水滴流下による洗浄効果
4.8	結露で生じた水滴の流下による洗浄を踏まえた付着塩分量計算125
	4.8.1 結露水の流下を踏まえた付着塩分量の計算アルゴリズム
	4.8.2 結露水の流下を踏まえた付着塩分量の計算結果
4.9	本章のまとめ129
参	专文献

論文目次

第 5 章	⋸ 統計	的手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現
	およ	び付着塩分量の評価
5.1	概説	
5.2	擬似乱数	发
5.3	使用する	3確率変数と確率分布関数の適用138
	5.3.1	確率変数間の依存性
	5.3.2	風向
	5.3.3	風速
	5.3.4	降水量・連続降雨時間・連続無降雨時間
	5.3.5	大気中塩分濃度
5.4	モンテオ	カルロシミュレーションによる付着塩分量計算144
	5.4.1	モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量の計算アルゴリズム
	5.4.2	モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量の計算結果
5.5	風向に対	対する確率分布関数の適用149
	5.5.1	対象地点・データと利用する確率分布関数
	5.5.2	近似手法と計算例
	5.5.3	相関を考慮したモンテカルロシミュレーションの実行
	5.5.4	対象橋梁地点の観測データに対する適用
	5.5.5	WRFによる風向・風速・大気中塩分濃度を利用したモンテカルロ
		シミュレーション
5.6	本章の言	まとめ162
参考	文献	

第6章 結論および今後の課題

6.1	結論	.165
6.2	今後の課題	.168

付録 A	円筒型飛来塩分捕集器の管内流速測定実験	171
付録 B	離散変数に関する仮説検定	173
付録 C	ワイブル確率紙を用いたパラメータの同定	175
付録 D	風速の確率密度関数と累積分布関数	177
付録 E	モンテカルロシミュレーションによる橋梁表面付着塩分量の区間推定	183
参考文献	ť	185

第1章 序論

- Fig. 1.2.1 実構造物におけるさび・腐食の例
- Fig. 1.2.2 腐食発生の模式図
- Fig. 1.2.3 普通鋼の環境別腐食速度
- Fig. 1.2.4 暴露 9 年目の耐候性鋼の板厚減少量と飛来塩分量の関係
- Fig. 1.2.5 板厚減少量・さび厚と付着塩分量の関係
- Fig. 1.2.6 板厚減少量の経年劣化
- Fig. 1.2.7 50 年後推定板厚減少量と飛来塩分量の関係
- Fig. 1.2.8 飛来塩分量またはZ値と初年腐食量Asmsの関係
- Fig. 1.2.9 塗膜寿命予測曲線
- Fig. 1.3.1 大気中に存在する粒子状物質の粒径分布
- Fig. 1.3.2 土研式タンク法
- Fig. 1.3.3 飛来塩分量と離岸距離の関係
- Fig. 1.3.4 ドライガーゼ法
- Fig. 1.3.5 フィルターパック法
- Fig. 1.4.1 本論文の構成

第2章 現地観測による飛来塩分量および気象要素の獲得と 橋梁表面の付着塩分量調査

- Fig. 2.2.1 天鳥橋の外観 (左図:海側からの遠景,右図:桁周りの様子)
- Fig. 2.2.2 天鳥橋の位置
- Fig. 2.2.3 排水管固定部位の劣化の様子
- Fig. 2.2.4 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A~d
- Fig. 2.2.5 気象観測装置および飛来塩分捕集器具の設置状況
- Fig. 2.2.6 風向別平均風速
- Fig. 2.2.7 風向別生起頻度
- Fig. 2.2.8 天鳥橋桁下での気象観測の様子
- Fig. 2.2.9 桁下での風向別平均風速
- Fig. 2.2.10 桁下での風向別生起頻度

図 一 覧

- Fig. 2.3.1 ポータブル表面塩分計
- Fig. 2.3.2 主桁表面への付着塩分量
- Fig. 2.4.1 円筒型飛来塩分捕集
- Fig. 2.4.2 円筒型飛来塩分捕集器の詳細図
- Fig. 2.4.3 導電率測定器
- Fig. 2.4.4 円筒型飛来塩分捕集器から得られた大気中塩分濃度
- Fig. 2.4.5 円筒型飛来塩分捕集器のガーゼ層別捕集塩分量
- Fig. 2.4.6 計測に用いた土研タンク
- Fig. 2.4.7 ドライガーゼ法よる観測の様子
- Fig. 2.4.8 円筒型飛来塩分捕集器-土研式タンク法-ドライガーゼ法の捕集量比較
- Fig. 2.4.9 MiniVol TAS
- Fig. 2.4.10 円筒型飛来塩分捕集器-エアサンプラーの計測塩分濃度比較
- Fig. 2.4.11 平均風速に対する円筒型飛来塩分捕集器とサンプラーの濃度比
- Fig. 2.5.1 土研式タンク周りの定常流れ場
- Fig. 2.5.2 風洞の外観
- Fig. 2.5.3 風洞の詳細
- Fig. 2.5.4 風洞実験で用いる風速計
- Fig. 2.5.5 キャリブレーションの様子
- Fig. 2.5.6 風速計測点
- Fig. 2.5.7 捕集器具と風速計の設置例
- Fig. 2.5.8 ガーゼに沿う面の風速コンター
- Fig. 2.5.9 風洞風速に対するガーゼ前後面での風速
- Fig. 2.5.10 風向別の風洞風速に対するガーゼ前後面での風速比率
- Fig. 2.5.11 ドライガーゼ法による飛来塩分観測値と計算値

第3章 数値計算による橋梁部位別の付着塩分量評価

Fig. 3.5.1 粒子追跡法における座標系の定義 Fig. 3.6.1 対象橋梁周りの定常流れ場計算領域 Fig. 3.6.2 橋台部におけるモデルの断面図 Fig. 3.6.3 接近風向ごとの流線図 Fig. 3.6.4 風向別の橋梁断面周りの風速コンター図とベクトル図 Fig. 3.7.1 ドライバ領域の概要 Fig. 3.7.2 ラフネスブロックの様子 Fig. 3.7.3 ドライバ部の風速コンター図 Fig. 3.7.4 recycle station 中心点でのパワースペクトル密度 Fig. 3.7.5 recycle station における乱れの強さの鉛直分布 Fig. 3.7.6 鉛直平板周りの流れ場計算領域と格子分割 Fig. 3.7.7 鉛直平板周りの非定常流れ場における風速コンター Fig. 3.7.8 鉛直平板上流側での風速パワースペクトル密度 Fig. 3.7.9 鉛直平板上流側での揚力係数のパワースペクトル密度 Fig. 3.7.10 直平板周りの定常流れ場における風速コンター Fig. 3.7.11 非定常流れ場と定常流れ場の主流方向風速値の比較 Fig. 3.7.12 粒子追跡計算領域 Fig. 3.7.13 粒子位置の重み付き平均による風速決定 Fig. 3.7.14 非定常流れ場における粒子追跡から得られた鉛直平板への付着塩分量 Fig. 3.7.15 非定常流れ場における粒子追跡と提案モデルによる付着塩分量の比較 Fig. 3.7.16 鉛直平板部位別の大気中塩分衝突フラックスの評価位置 Fig. 3.8.1 付着塩分の洗浄効果測定実験に用いる供試体 Fig. 3.8.2 供試体への塩水付着用の装置 Fig. 3.8.3 暴露供試体設置の様子 Fig. 3.8.4 暴露角度の定義 Fig. 3.8.5 I字鋼とトタン板における洗浄後の残存塩分率 Fig. 3.8.6 暴露後の供試体表面の水滴の様子 Fig. 3.8.7 暴露角度別のI字鋼に洗浄後の残存塩分率 Fig. 3.9.1 橋梁表面付着塩分量の計算アルゴリズム Fig. 3.9.2 橋梁部位別付着塩分量の計算値と観測値の比較 Fig. 3.9.3 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A~d(再掲) Fig. 3.9.4 付着塩分量面的分布 Fig. 3.9.5 中央主桁下フランジ下面の劣化の様子

図 一 覧

第4章 橋梁表面おける結露による水滴の発生とその流下に伴う 付着塩分の洗浄効果

- Fig. 4.2.1 η座標系の概要
- Fig. 4.3.1 WRF の計算領域
- Fig. 4.3.2 Domain 3 の標高
- Fig. 4.3.3 Domain 3 の土地利用
- Fig. 4.3.4 対象橋梁地点における温湿度・表面気圧・短波放射・降水量の WRF による 計算値と観測値の比較
- Fig. 4.3.5 対象橋梁地点における月別平均風速・風向別平均風速・風向別生起頻度の WRFによる計算値と観測値の比較
- Fig. 4.3.6 南紀白浜および潮岬における WRF による計算値と気象庁観測値の比較
- Fig. 4.3.7 期間平均大気中塩分濃度の WRF による計算値と観測値の比較
- Fig. 4.3.8 日本時間 2013 年 5 月 17 日 9 時の Domain 3 における風速と濃度のコンター図
- Fig. 4.5.1 海側主桁を例とした熱伝導方程式の境界条件
- Fig. 4.5.2 気温と主桁表面温度の計算結果
- Fig. 4.5.3 nの値を変更した場合の主桁表面温度の計算結果
- Fig. 4.6.1 主桁表面における結露による発生水量の計算結果
- Fig. 4.6.2 結露によって主桁表面に生じた日最大水量の月別積算値
- Fig. 4.7.1 水滴の流下中の分裂の様子
- Fig. 4.7.2 マイクロピペット
- Fig. 4.7.3 水滴の流下開始水量実験結果
- Fig. 4.7.4 水滴の非分裂率実験結果
- Fig. 4.7.5 水滴流下後の残存塩分率実験結果
- Fig. 4.8.1 水滴の流下を考慮した付着塩分量計算領域の概要
- Fig. 4.8.2 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A~d(再掲)
- Fig. 4.8.3 水滴の流下による洗浄を踏まえた付着塩分量の計算アルゴリズム
- Fig. 4.8.4 水滴の流下による洗浄を考慮した付着塩分量の計算結果と観測値
- Fig. 4.8.5 水滴の流下による洗浄の様子の一例

第5章 統計的手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現 および付着塩分量の評価

- Fig. 5.2.1 標本数別の擬似乱数の平均と分散
- Fig. 5.3.1 風向別平均風速
- Fig. 5.3.2 降水時の風向別平均降水量
- Fig. 5.3.3 降水時の降水量と風速の関係
- Fig. 5.3.4 正規化した風向のヒストグラム
- Fig. 5.3.5 ワイブル分布の形状例
- Fig. 5.3.6 風向 WSW におけるワイブル分布による風速の近似
- Fig. 5.3.7 ポアソン分布とガンマ分布を用いた降水の表現
- Fig. 5.3.8 ワイブル分布による降水量の近似
- Fig. 5.3.9 ワイブル分布による連続降雨時間の近似
- Fig. 5.3.10 ワイブル分布による連続無降雨時間の近似
- Fig. 5.4.1 モンテカルロシミュレーションによる時系列データの作成アルゴリズム
- Fig. 5.4.2 モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量計算例
- Fig. 5.4.3 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A~d(再掲)
- Fig. 5.5.1 地点「京都」における風速 u 成分の確率密度関数
- Fig. 5.5.2 風速 u 成分と v 成分の混合確率分布関数による近似
- Fig. 5.5.3 元データと生成データの風向別平均風速,生起頻度,風速と頻度の積
- Fig. 5.5.4 対象橋梁地点での風速 u 成分と v 成分の混合確率分布関数による近似
- Fig. 5.5.5 対象橋梁地点の風向別平均風速,生起頻度,風速と頻度の積
- Fig. 5.5.6 対象橋梁地点での WRF 計算値に対する混合確率分布関数による近似
- Fig. 5.5.7 WRF による対象橋梁地点の風向別平均風速, 生起頻度, 風速と頻度の積, 大気中塩分濃度
- Fig. 5.5.8 WRF 計算値を用いたモンテカルロシミュレーションによる付着塩分量計算例

付録

- Fig. A.1 風洞の詳細
- Fig. A.2 実験模型
- Fig. A.3 風向別の接近風速に対する管内風速の比
- Fig. A.4 模型別の接近風速と管内風速の関係
- Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数
- Fig. E.1 雨のあたらない部位の付着量分布
- Fig. E.2 雨のあたる部位の付着量分布
- Fig. E.3 雨の当たる部位での付着量の平均値の分布

第1章 序論

Table 1.2.1 塗膜劣化に及ぼす環境因子の作用

Table 1.3.1 海面または海面直上での海塩粒子の個数濃度,質量濃度,生成率

第2章 現地観測による飛来塩分量および気象要素の獲得と 橋梁表面の付着塩分量調査

- Table 2.2.1 天鳥橋上流側計測点での 16 方位別平均風速とその時の桁下の風況の関係
- Table 2.4.1 天鳥橋地点に直撃または接近した台風
- Table 2.5.1 ドライガーゼ法による捕集塩分量推定における計算条件

第3章 数値計算による橋梁部位別の付着塩分量評価

- Table 3.6.1 対象橋梁周りの定常流れ場計算の境界条件
- Table 3.7.1 ドライバ領域の境界条件
- Table 3.7.2 鉛直平板周りの非定常流れ場計算の境界条件
- Table 3.7.3 鉛直平板周りの定常流れ場計算の境界条件

第4章 橋梁表面おける結露による水滴の発生とその流下に伴う 付着塩分の洗浄効果

- Table 4.3.1 WRF の計算領域詳細
- Table 4.3.2 GLCC による土地利用 24 区分
- Table 4.3.3 WRF で利用する物理モデル一覧
- Table 4.3.4 WRF で算出されたパラメータと観測値との相関係数
- Table 4.5.1 熱伝導方程式および発生水量に関するパラメーター覧
- Table 4.7.1 供試体面が鉛直の場合の初期付着塩分量
- Table 4.7.2 供試体面が水平面に対し 30°傾いた場合の初期付着塩分量

第5章 統計的手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現 および付着塩分量の評価

- Table 5.2.1 擬似乱数を標本とした場合の標本数別の棄却領域外となる統計量数
- Table 5.2.2 得られた統計量数を標本とした場合に新たに得られる統計量
- Table 5.3.1 風向別の風速に関するワイブルパラメータと決定係数
- Table 5.3.2 降水に関するワイブルパラメータと決定係数
- Table 5.4.1 算出された付着塩分量の部位別信頼区間
- Table 5.5.1 風向への確率分布適用に関する対象地点
- Table 5.5.2 元データと算出されたデータの風速 u 成分と v 成分の相関係数
- Table 5.5.3 元データの第1主成分と最も近い 16 方位との角度差
- Table 5.5.4
 元データ (WRF) と算出されたデータの風速 u 成分・v 成分・濃度の相関

 係数

第1章 序論

1.1 はじめに

古くから土木は人類の生活と密接に関わっており、その持続的発展のためにも土木工学 は半永久的に我々と共にあると予想される.現代においても発展途上諸国における土木技 術の必要性は論を待たず、先進諸国においても維持管理の観点からその重要性は増すばか りである.国内においては2014年に公益社団法人土木学会が創立100周年を迎え、これま での土木のあり方を顧みると同時に、土木工学は総合工学であるとの思想のもと、次の100 年をよりよくするための努力の必要性が説かれている[1.1][1.2].

そのような中で、2011 年 3 月 11 日に始まる東日本大震災の復興作業に面して、土木工 学が持つ役割や責任の大きさを改めて感じるところである. 震災からすでに 5 年が経過す るが、その爪痕はまだ至るところに残っており、ハードとソフトの両面において復興には これからも多くの時間が必要と予想される [1.3] [1.4]. これは 2016 年 4 月 14 日 (本震 16 日)の熊本地震でも同様であり、迅速な復興が望まれる [1.5]. このような状況において 我々土木技術者に求められるものは大きい. 被災地の復興を支えることはいうまでもなく、 同じような被害を生まぬように土木構造物の新設および維持管理に努めることが重要であ る. また、最近では危機耐性 [1.6] [1.7] という言葉も使われるようになった. これは「狭 義 (従来)の設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が、単体またはシス テムとして、破滅的な状況に陥らない」性能とされる. つまり、「想定外」にいかに対応す るのかが求められるといえる.

一方,2012年12月2日に発生した山梨県大月市笹子町中央自動車道上り線笹子トンネル天井板落下事故では,走行中の車両複数台が巻き込まれ,死者9名の人的被害となった. 笹子トンネルは高度経済成長期に完成および供用されており,完成から約40年経過していることから,老朽化が事故の一因と考えられている[1.8].国外では2007年に米国ミネソタ州で供用中の鋼トラス橋が突然落橋し,多数の死傷者を出しており,補修補強の遅れが致命的な事態となることを示唆している[1.9].これらの事故は土木技術者だけではなく世間に広く維持管理の在り方を問いかけるものであった.トンネルや橋梁など社会基盤構造物は人々の生活を広く支えており,その安全性が十分に保たれることがとりわけ重要である.我々土木技術者は,このことを念頭に各々の課題に取り組むべきである.

我が国の道路構造物は、橋梁とトンネルのいずれも老朽化が進んでいる. 全国の橋梁数 は約70万橋で,うち建設後50年を超える橋梁(2m以上)の割合は,2013年時点では18% であるが、20年後の2032年には67%へと増加する. 同様に全国のトンネル約1万本のう ち、建設後50年を超えるものの割合は、2013年の約2千本が2033年には約5千本にな る. したがって、計画的な予防保全や維持管理がますます重要となっている. 橋梁やトン ネルなどについては、道路法施行規則によって近接目視による5年に1回の点検が定めら れるようになった. しかし、地方では職員不足や財政力不足のために十分な対応がとれな いこともあり、今後のさらなる支援や維持管理技術の向上が望まれる[1.10].



Fig. 1.2.1 実構造物におけるさび・腐食の例



Fig. 1.2.2 腐食発生の模式図

1.2 腐食による鋼橋の劣化機構と対策

橋梁の損傷形態として、上部構造について考えると、鋼橋では腐食、繰り返し外力によ る亀裂・破断、変形、高力ボルト遅れ破壊などがある [1.11]. コンクリート橋では、塩害 (内部の鋼材の腐食に起因)、アルカリ骨材反応、中性化、凍害、化学的浸食などが知られて いる [1.12]. 橋梁は海や河川、山地といった地形的障害を克服するうえで重要であり、日 常の交通網の形成だけではなく、緊急時のインフラの確保という観点からも大きな役割を 持つ. したがって、上述のような劣化因子に対し十分な対策を講じるとともに、損傷が発 生した際には速やかに対応し、機能の低下や損失を防ぐ努力が求められる.

1.2.1 腐食の発生機構

15m以上の鋼橋について、上部構造の損傷による架け替え理由を見ると、ほぼ半数が鋼材の腐食であると報告されている [1.13]. したがって、鋼橋あるいは橋梁鋼部材の維持管理を考えるうえで、腐食の発生を無視することはできない. Fig. 1.2.1 は橋梁および高速道路の落下防止柵の様子の一例で、部材にさびが生じ、何らかの対策が必要と思われる.



Fig. 1.2.3 普通鋼の環境別腐食速度 [mm/year] [1.15]

腐食とは、鉄鉱石中の酸化鉄を還元して得られた鋼が、酸化鉄という安定な状態に戻ろ うとする現象である.なお、腐食のうち表面だけに生じるものをさびと呼ぶ.一般の環境 で起こる腐食は特に湿食と呼ばれ、金属表面に液体状態の水が存在するときに生じる.腐 食は電気化学反応で、その機構は Fig. 1.2.2 のように表される.このとき、アノードおよび カソードではそれぞれ式 (1.2.1)および式 (1.2.2)で表される反応が生じる.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \tag{1.2.1}$$

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \to 2OH^-$$
(1.2.2)

この2式を踏まえてさらに式 (1.2.3)-(1.2.5) へと反応が進み,最終的に赤さびである水 和酸化鉄 (Fe₂O₃·H₂O) が生じる.

$$\operatorname{Fe}^{2+} + 2\operatorname{OH}^{-} \to \operatorname{Fe}(\operatorname{OH})_{2}$$
 (1.2.3)

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 3Fe(OH)_2$$
 (1.2.4)

$$2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$$
(1.2.5)

これらの反応式から分かる通り,腐食は水と酸素が不可欠な現象である.逆にいえば, 腐食の基本的な対策はこれらを金属表面から絶つことである [1.14].

一方,腐食の3大因子として,水・酸素とともに塩分がしばしば挙げられる.塩分は潮 解性を持つため,水分を集めることで鋼材表面の湿潤状態が長く保たれることがその理由 である.さらに,強電解質であるので,水に溶けることで水の電気伝導度を大きくし,腐 食反応を促進する.Fig.1.2.3は異なる環境で9年間暴露された普通鋼の平均腐食速度であ り,海岸部での値がほかの地域に比べ大きいことが分かる [1.15].これは塩分のうち,特 に海塩粒子の影響と考えられる.したがって,防食においては飛来塩分環境を把握し,必 要に応じて対策を施す必要がある.



Fig. 1.2.4 暴露 9 年目の耐候性鋼の板厚減少量と飛来塩分量の関係 [1.18]



Fig. 1.2.5 板厚減少量・さび厚と付着塩分量の関係 [1.19] [1.20]

1.2.2 耐候性鋼

近年使用量が増加しているのが耐候性鋼である [1.16]. 耐候性鋼は鋼やニッケル,クロ ムなどの合金元素を適量添加しており,表面に緻密なさびを発生させることで酸素や水の 透過を低減し,腐食の進行を抑制するという仕組みを持つ.したがって,塗装を行うこと なく使用できることから,定期的な塗り替えの必要がなく,ライフサイクルコストの点で 有利である.1998年からはより耐塩分性能が向上したニッケル系高耐候性鋼も使われるよ うになった [1.17].

しかし,耐候性鋼の表面さび膜は,塩分が過剰に供給されると破壊されてしまうため, 無塗装で使用できる地点が限られている.建設省土木研究所・(社)鋼材倶楽部・(社)日本 橋梁建設協会の共同研究 [1.18] において,全国暴露試験で得られた暴露 9 年目の耐候性 鋼の板厚減少量と飛来塩分量の関係を Fig. 1.2.4 に示す.両者には強い相関がみられる.こ



Fig. 1.2.6 板厚減少量の経年劣化 [1.18]

Fig. 1.2.7 50 年後推定板厚減少量と飛 来塩分量の関係 [1.18]

のような関係性については、他にも Fig. 1.2.5 のように、例えば岩崎ら [1.19] や後藤ら(さび厚) [1.20] が実測より示している.また、Fig. 1.2.6 は耐候性鋼の板厚減少量の経年劣化例で、 $Y = A_{SMA}X^{B_{SMA}}$ の相関曲線で概ね表される.ここで、X = 1 year のとき $Y = A_{SMS}$ となることから、 A_{SMS} は最初の1年間の板厚減少量に相当する.この式に基づき推定された暴露50年目の耐候性鋼の板厚減少量がFig. 1.2.7 に示される.これらの図より、層状剥離さびがなく、かつ50年後の推定板厚減少量がおよそ 0.3 mm となるときの飛来塩分量 0.05 mdd (= mg/m²/day) を許容値として、飛来塩分量が 0.05 mdd 以下の地点または海岸線から一定以上離れた地域では、飛来塩分量の測定なしに耐候性鋼を使用してもよいとしている.これは道路橋示方書 [1.21] にも記載されている.なお、コンクリート構造物についても同様に、道路橋示方書 [1.22] において、地域と海岸線からの距離ごとに必要な最小かぶりが規定されている.

反対にいえば、それ以外の地点ではあらかじめ飛来塩分量を把握し、無塗装耐候性鋼の 適用可否を判断する必要がある.しかし、海に囲まれ山地の多い日本では橋梁の多くは飛 来塩分量の多いと思われる地域に位置するため、飛来塩分量の調査も多くの地点において 必要となる.さらに、耐候性鋼の使用において「安全」とされる地域でも、飛来塩分量は 地形や気象の影響を受け様々であり、一概に離岸距離だけでは判断できない可能性に留意 すべきと考えられる.

さらに,紀平らは,飛来塩分量のみでは A_{SMS} を十分には説明できないことを示した [1.23]. Fig. 1.2.8 (a) のように A_{SMS} は飛来塩分量に対するばらつきが大きいことが分かる. そこで,ぬれ時間や硫黄酸化物などの効果を導入した式 (1.2.6) で定義される Z 値を提案 することで, Fig. 1.2.8 (b) のように精度良い表現が可能になることを明らかにした.なお, Z 値から A_{SMS} を求める式も併せて提案している.

$$Z = \alpha \cdot TOW \cdot \exp(-\kappa \cdot W) \cdot \frac{C + \delta \cdot S}{1 + \varepsilon \cdot C \cdot S} \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right)$$
(1.2.6)



Fig. 1.2.8 飛来塩分量または Z 値と初年腐食量 Asmsの関係 [1.23]

環境因子	現象								
太陽光線	紫外線は高いエネルギーを持ち、塗膜のビヒクルボリマーや顔料に吸収される。 そのため、ポリマーの結合エネルギーの弱い部分が解離し、励起状態となる。 赤外線は熱エネルギーとして働き、この化学変化を促進する。								
酸素	ポリマー中の励起された水素と結合し、ポリマーを酸化する。(主鎖の切断や橋かけを生じさせる)								
水分	塗膜内部に酸素を運ぶ。塗膜中に浸透し、膨潤させる。被塗面に達し、腐食させる。								
熱	冷暖の繰り返しによる疲労劣化。塗膜と素地との熱膨張係数の差が付着低下をもたらす。								
亜硫酸ガス硫化水素	紫外線・水によって硫酸となり、樹脂を分解する。Fe(素地)と反応し、Fe2SO3の結晶を生成する。								
海塩粒子	塗膜の電導性を高め、素地金属の腐食を促進させる。								
その他	砂粒・粉塵等の衝突が塗面に傷をつける。微生物はかびを発生させる。								

Table 1.2.1 塗膜劣化に及ぼす環境因子の作用 [1.26]

*TOW*は年間ぬれ時間 [h], *W*は年平均風速 [m/s], *C*は飛来塩分量 [mdd], *S*は硫黄酸化物量 [mdd], *T*は気温 [K], *E*_aは腐食反応の活性化エネルギー, *R*は気体定数, αは桁数調整の係数, κ , δ, εは各因子の影響度を示す定数である.いずれにせよ,耐候性鋼の板厚減少には飛来塩分の寄与があり,式 (1.2.6) に従って腐食減耗を推定するためには, 1 年間分の飛来塩分量を見積もる必要がある.

1.2.3 塗装

耐候性鋼に加え,表面に被覆を施すこと(表面被覆)が防食法として挙げられる.表面 被覆には溶融亜鉛メッキや金属溶射などがあるが,最も一般的であるのは塗装による橋梁 表面への塗膜の形成である.塗膜の役割は鋼材と腐食促進物質を遮断することで,プライ マー・下塗り・中塗り・上塗りを組み合わせた塗装系が規定されている.特に腐食環境の 厳しい地点では,重防食塗装系と呼ばれる塗装系が採用される.重防食塗装系では,プラ イマーとして無機ジンクリッチペイントを用い,犠牲防食作用を期待する.下塗りのエポ



Fig. 1.2.9 塗膜寿命予測曲線 [1.27]

キシ樹脂は耐水性を重視し、外気に接する上塗りには耐候性の確保を目的にポリウレタン 樹脂やフッ素樹脂が利用される [1.24]. しかし、防食性能が低下するまでの期間は橋梁の 供用期間より短いので、塗膜の塗り替えは必要である [1.25].

Table 1.2.1 に示すように、塗膜の劣化に影響する環境因子として、太陽光線、酸素、水 分,熱,亜硝酸ガス硫化水素,海塩粒子などが挙げられる [1.26]. 塗膜の耐久性において はその消耗速度が重要であり、劣化機構は次のように考えられる.まず、塗膜表層の薄い クリヤー膜の樹脂結合が分解し、樹脂の低分子量化やクラックを生じることで塗膜光沢の 低下が始まる. 高分子樹脂の分解には特に太陽光線が影響し, 樹脂の結合エネルギーを上 回る波長エネルギーを受けることで原子や分子同士の結合が切れて劣化が進行する.次に, 塗料中の顔料が抜け出すことで塗膜表面に微小な穴が開き、白亜化を生じて塗膜は減少す る. 塗膜の消耗速度については長年の暴露試験より, 厳しい腐食環境ではエポキシ樹脂塗 膜は 10 μm/year, ポリウレタン樹脂上塗塗膜は 2 μm/year, ふっ素樹脂上塗塗膜は 0.5 μm/year とされる [1.26]. ただし、塗膜の消耗速度は日射の程度に影響されることから、大塚・楠 原は塗膜の消耗速度と残存膜厚を確率分布で表現し、塗膜の消失期間を推定する手法を開 発した [1.24]. また,藤原・三宅は,塗膜への付着塩分は,潮解性によりぬれ時間を長く することで劣化の進行を早めることを指摘するとともに、観測データに基づいて Fig. 1.2.9 に示される環境別の塗膜寿命予測曲線を得た [1.27]. 他にもコンクリートの表面被覆の欠 損形態に応じた塩分拡散解析の試みが行われている [1.28]. なお, 被塗面に塩分が付着し たまま塗装すると、早期に層間剥離や膨れなどが生じるとされる。このため、特に海浜地 区の橋梁に対し現場での塗装を行う場合には注意を要する [1.29].

このように、塗装橋においても、塗膜の適切な選択や劣化の予測、さらには施工管理の ために、あらかじめ飛来塩分量を把握しておくことが望ましい.

これらを念頭に,新設橋梁においてはあらかじめ当該地点の飛来塩分量や橋梁への付着 塩分量を把握あるいは予測しておくことが望ましい.同様に,既設橋梁についても維持管 理の観点から塩分量の情報を把握すべきといえる.

7

1.3 飛来塩分とその付着に関する既往の研究

橋梁などの構造物の老朽化が進み,維持管理が喫緊の課題となっている中で,飛来塩分 はそれらの劣化の進行における重要な因子である.我が国は四方を海に囲まれており,か つ国土のほとんどを山地が占めているため,多くのインフラ構造物は海岸部に集中する. そのため,Fig.1.2.3 からも分かるように飛来塩分として海塩粒子の影響が大きいと考えら れ,構造物の維持管理を考える上でその存在は無視できない.一方,山間部においても, 1994年のスパイクタイヤの使用が禁止されたころから凍結防止剤の散布量が急増してお り,橋梁表面へ付着する塩分の供給源となっている [1.30].そのため,飛来塩分に関する 研究は農学や工学の分野を中心に行われてきた.農学では農作物の塩害(特に塩風害) [1.31]対策に端を発するものが多く,工学においては架空送電設備[1.32]や橋梁を意識し たものが多い印象である.特に橋梁については,例えば紀平ら[1.23]や鹿毛ら[1.33]は, 年間ぬれ時間*TOW*(Time of wetness)と飛来塩分量から表される指標を用いて,耐候性鋼 の腐食速度を評価した.山下ら[1.34]は飛来塩分量とコンクリート表面の塩分濃度とに相 関があることを実験的に確かめた.海外においても塩化物イオンの腐食速度に対する影響 は,例えばCorvo et al.[1.35]が述べている.このように,飛来塩分は我々の生活の様々な ところに影響を及ぼしており,その振る舞いを十分に把握する必要がある.

塩分が構造物の劣化を引き起こすまでの過程として,海塩粒子(および凍結防止剤)に ついて述べると,(i)海面での生成(路上への散布),(ii)陸地への輸送(自然風や車両走行 による大気中への飛散),(iii)構造物地点の飛来塩分量や大気中塩分濃度,(iv)部位近傍の 大気中塩分濃度と風況,(v)構造物表面への付着,(vi)洗浄などの外的要因による構造表 面からの離脱,(vii)構造部位の劣化,と表すことができる.以降では海塩粒子を中心に, 飛来塩分の空間分布や捕集法,構造部位への付着などに関する既往の研究を次の通りに分 類し,各々で例を挙げつつ概説する.

- 海塩粒子の生成と飛来塩分の捕集装置
- 実測に基づく大気中の塩分分布や挙動
- 数値計算による海塩粒子の発生量や大気中の分布予測
- 観測・実験・数値計算による橋梁周辺または部位別付着塩分量
- 飛来塩分量や付着塩分量の低減

なお、本論文で用いる用語のうち、塩分に関するものの定義は次の通りである.塩分の うち、橋梁などの壁面に付着したものを「付着塩分(量)」と呼び、主に mg や mdd、mg/m²/day などの単位で表す.次に、付着塩分となる前の大気中に浮遊した状態の塩分を「飛来塩分」 と呼ぶ.飛来塩分はその単位によって、「飛来塩分量」または「大気中塩分濃度(=飛来塩 分濃度)」と区別しており、前者は付着塩分と同様に mg や mdd、mg/m²/day などの「量」 を示す単位で表すが、後者は mg/m³という単位体積当たりの量、すなわち「濃度」を示す 単位を持つ.次元解析的に考えると、大気中塩分濃度 [mg/m³] に適当な風速 [m/s] と時間 [s] を乗ずることで、単位面積あたりの付着塩分量 [mg/m²] を表すことができる.

Table 1 Number concentration, $\theta_0(U_i, m)$, salt-mass concentration, $m\theta_0(U_i, m)$, and production rate, $F_0(U_i, m)$, of giant sea-salt particles at the sea surface.

Range of mass of salt (<i>m</i> :gm)	log m = 11.5-11	11-10.5	10.5-10	10-9.5	9.5-9	9-8	8.5	8.5-8	1	1.5-	8 1	.0-8	
$\theta_0(\text{cm}^{-8}) \text{ for } U_i = 3$ $m\theta_0(10^{-12}\text{gm cm}^{-3}) \text{ for } U_i = 3$ $F_0(\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}) \text{ for } U_i = 3$.161	.0902 .048 1.60 2.75		.0264 4.70	. 022 12. 4	0 .(51.3	0288 3	.040 225	0	.878		.800	
Wind force at 10-m level, $U_{\tilde{c}}$	0	1	2 3	4	5	6	7	8	9	10			
Multiplication factor to be approximation values of θ_0 , $m\theta_0$ and F_0	ove 0	0	0 1	2.05	2.33	3.084	. 38	5.38	9.63	14.8			



Fig. 1.3.1 大気中に存在する粒子状物質の粒径分布 [1.38]

1.3.1 海塩粒子の生成と飛来塩分の捕集装置

海塩粒子の基礎的な特性は鳥羽 [1.36],鳥羽・田中 [1.37] に詳しい. それによると,大 気中に入り内陸深くまで輸送されるような海塩粒子は,主に「風波に取り込まれた気泡が 海面に浮上して破裂することによって生成される」ものである.一方,海岸近くの砕波帯 で生成される粒子は大きいので,影響が及ぶ範囲はごく一部と考えられる.また,海の近 くでは塩分組成は海水のそれと考えられ,10⁻⁸g程度より小さい微粒子として存在する. 海面での海塩粒子の生成率と海面直上での個数濃度と質量濃度を,様々な観測資料をもと に各質量の階級および風力ごとに整理した結果がTable 1.3.1 である.さらに,海面上の高 さz(\leq 10 m)における海塩粒子の個数濃度 θ (z)をTable 1.3.1の海面直上での個数濃度 θ_0 の関数として次式のように与えた.

$$\log\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) = -m^{\frac{2}{3}}u_i^{-1}X(RH_i,\gamma_i,z)$$
(1.3.1)



Fig. 1.3.2 土研式タンク法 [1.39]

Fig. 1.3.4 ドライガーゼ法 [1.40]

(1.3.2)



Fig. 1.3.3 飛来塩分量と離岸距離の関係 [1.39]

m は海塩核の質量, u_i は 10 m 高さでの風速, X は 10 m 高さでの相対湿度 RH_i ・海面に おける風の摩擦係数 $\gamma_i^2 \cdot z$ の関数である. それよりさらに上空では, 10 m 高さでの個数濃 度 θ_i と係数 a を用いて次のように簡単に与えられるとした.

$$\theta(z) = \theta_t \exp(-\alpha z)$$

また,海塩粒子などの粒子状物質の粒径は,Fig.1.3.1 に示すように,一般に対数正規分 布に従うとされる [1.38].

このような海塩粒子が各種構造物に付着し劣化を引き起こすが、構造物への作用を的確 に評価するためには、まず大気中において海塩粒子がどのように分布し、また輸送される かを把握する必要がある.

実際に飛来塩分量を測定した研究として建設省土木研究所 [1.39] が行った全国調査が

よく知られている. 土木研究所は 1984 年か ら 87 年までの 3 年間に渡り, Fig. 1.3.2 に 示すいわゆる土研式タンク法 (土研法) に よって全国 266 地点の飛来塩分量を測定し た. 土研法は 10 cm 四方のステンレス板に 付着した塩分を水でポリタンク内に流し込 み,回収された塩水から飛来塩分量を算定 する手法である. さらに Fig. 1.3.3 に示すよ うに,観測結果より飛来塩分量が両対数軸 上で離岸距離と概ね直線関係にあることを 明らかにした. このとき,回帰直線の傾き はおよそ-0.6 となる.

土研法とともに日本国内で使用実績があ る捕集装置として, Fig. 1.3.4 [1.40]のドラ イガーゼ法 (ガーゼ法)が存在する. JIZ Z 2382 [1.41] に規定されており, 10 cm × 20 cmのガーゼを二つ折りにして 10 cm 四方と し,これを木枠に固定して塩分を採取する 手法である.他にもウェットキャンドル法 が知られる.ウェットキャンドル法は溶液 を入れたびんに心棒を挿入し,心棒に巻き 付けたガーゼで塩分を捕集する装置である が,日本国内での使用頻度は土研法やガー ゼ法と比べてあまり高くないようである.



Fig. 1.3.5 フィルターパック法 [1.45]

これらの捕集装置の捕集性能や相互比較に関する研究,および新たな捕集装置の提案も 行われている.中村ら [1.42] は飛来塩分をガーゼ法,4 面での捕集を可能にした土研法, ウェットキャンドル法で捕集し,鋼材腐食減耗量と比較することで,風況や降水に応じた 捕集効率を議論した.武邊ら [1.43] は土研法とガーゼ法を比較し,ガーゼ法の塩分捕集量 の方が多いことを確認した.岩崎 [1.44] らは飛来塩分と風向・風速および捕集器具の設置 方向の影響を調べるために,通常のガーゼ法と土研法に加え,それぞれに基づきかつ全方 位から捕集できるような装置を作成し,土研法は設置方向の影響を受けやすいが,ガーゼ 法はその影響は小さいことを示した.

ここまでに示した手法は「受動的」な装置で、塩分粒子自身の挙動によって捕集を行う ものである. 一方、塩分を含む大気を強制吸引することでフィルターサンプリングする「能 動的」な捕集装置 (エアサンプラー) も存在する. その一例が Fig. 1.3.5 に示すフィルター パック法 [1.45] で、この装置を用いた全国環境研究協議会 (全環研) 酸性雨調査研究部会 による日本各地での観測データ [1.46] が公開されている. このような装置は気象条件によ らず安定した捕集が期待されるが、電力が必要であることや一般に高価であることから、 設置の簡易なガーゼ法や土研法との併用や、それらと比較しつつ運用することが必要と考 えられる.

1.3.2 実測に基づく大気中の塩分分布や挙動

実際に飛来塩分の捕集を行い,各種の検討を加えた研究は数多くあり,ここに例示する. このような研究は戦前にはすでに存在し,例えば松平 [1.47] は,塩分捕集効率が風速に依 存することや大気中の塩化物イオン量は風向によって異なることを示した.それ以降も金 内・青葉 [1.48] や幸喜 [1.49] が大気中塩分の水平・鉛直分布を調べ,これらが地形の影 響を受けることを明らかにした.地形の影響に関連して岩崎ら [1.50] は,飛来塩分は山地 などのために離岸距離のみで説明できるものではなく,風向別の平均風速に基づいて表す ことが可能であることを示した.浜田ら [1.51] も海岸部で飛来塩分量を計測し,風速と線 形関係があることや汀線からの距離とともに減少することを確認した.また,Chen et al. [1.52] は台湾の海岸部の複数地点において土研法で飛来塩分を捕集し,飛来塩分が離岸距 離やモンスーンの影響を受けることを示すとともに,得られた塩分量と風速・風向や降水 量・離岸距離から,任意地点の飛来塩分量予測モデルを提案した.大屋ら [1.53] は飛来塩 分量を風力エネルギーで表現することを提案した.

大気中の海塩粒子濃度の季節変動を Lovert [1.54] が調査しており,濃度の自然対数と風 速に線形の関係があることを示した.村上ら [1.55] は砕波帯内での海塩粒子の発生量に着 目して風との関連を検討し,砕波位置付近に海塩粒子の大きな供給源があることを示した.

部材への付着や浸透も併せた検討例を以下に挙げる. 広瀬ら [1.56] [1.57] は山陰地方で の観測から,鋼材への付着塩分量と風速および大気中塩分濃度には正の相関があり,また 大気中塩分濃度には有義波高が影響すると述べている. さらに,大気中の塩化物イオンと 付着塩分の比から,飛来塩分の鋼材への付着率について検討した. 佐伯ら [1.58] は各地点 の飛来塩分量は地点個別の条件の影響を強く受けること,飛来塩分量とコンクリート内部 への浸透量には相関があることを示した.

以上より,飛来塩分量は周辺地形に支配されるほか,気象の影響を強く受けるといえ, 離岸距離や大まかな地域区分のみの評価では不十分と考えられる.したがって,橋梁など の構造物においては,離岸距離だけではなく,その地点ごとに周辺地形や植生などに基づ いて飛来塩分環境を把握すべきである.さらに,飛来塩分が鋼やコンクリートの部材に与 える影響も,付着率や浸透量を踏まえて把握しなければならないと考えられる.

1.3.3 海塩粒子の発生量・大気中の分布などの数値予測

先の項では飛来塩分について観測に基づく既往の研究を紹介した. 観測は当該地点の腐 食環境を把握する有力な手法である.しかし, 観測の実施には多くの時間や人的・経済的 コストを要することや,維持管理実務においては複数橋梁を広域的かつ同時に対象としな ければならないことを考えると, 観測を行うことなく数値計算によって予測できることが 望ましいと考えられる.ここでは,海塩粒子の発生や輸送に関する数値計算例を採り上げ, 以下に例示する.

宇多ら [1.59] は移流沈降領域と拡散領域を設定し、それぞれで飛来塩分量の計算モデル を作成することで、波浪条件と海岸条件ごとにパラメータを決定した. 仲座ら [1.60] は数 値流体力学による大気の流れと Fick の拡散方程式を用いて海塩粒子の挙動を解析し、粒子 の降下速度を考慮することで観測値の分布を再現できることを示し、植生背後の飛散拡散 予測に適用した. 山田ら [1.61] は大気の流れと Fick の拡散方程式に加えて海塩粒子の沈 降速度と湿性沈着(降雨による大気中塩分濃度の希釈)を考慮することで観測結果を精度 よく再現することに成功した. Zhang et al. [1.62]は慣性沈着を詳細に検討し,沈着速度を 土地利用と気象条件ごとに粒径と密度の関数としてパラメータ化した.加藤・赤井 [1.63] は海塩粒子の拡散,慣性沈着,諸物性を踏まえた予測を行い,海岸付近での濃度分布は観 測値とよく一致し,地形や観測の捕集効率を適切に考慮すれば崖上地形での観測塩分量も 再現できることを示した.

細山田・山田ら [1.64]-[1.66] は風の場や波動場の計算,飛来塩分の発生過程や移流・拡 散過程の計算に基づいた予測を行い,海底構造物の影響や塩分の輸送傾向を調べるととも に,飛来塩分観測値の分布を再現した.ここで,海水面の乱れの度合いをエネルギー減衰 量とし,海水面下で生成される気泡量と気泡から生成する飛沫量を計算することで,飛来 塩分発生量を次のように計算した.それぞれ連続条件式と1次元修正ブシネスク方程式で ある. η は水位変動, Q は1次元線流量,g は重力加速度,D は平均水深,h は水深,x は 水平座標,t は時間,F_d は砕波減衰係数である.これらと気泡径などを考慮して飛来塩分 発生量を求めている.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1.3.3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial x} \right) + Bgh^3 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} - F_d Q$$
(1.3.4)

一方,海塩粒子発生個数が地上 10 m 風速 U₁₀に比例するというより簡易的なモデルも提案されている [1.67]. この式は領域気象モデル WRF でも採用されている. 詳細は 4 章に譲る.

$$\frac{\partial F_n}{\partial r} = c_1 U_{10}^{\ c_2} r^{-A} \left(1 + c_3 r^{c_4} \right) \times 10^{c^5 \exp\left(-B^2\right)}$$
(1.3.5)

他にも、Cooperative Research Centre (CRC) for Construction Innovation [1.68] は塩分濃度 の鉛直分布を数値流体力学に基づき検討した.小窪・岡村 [1.69] は海水飛沫の発生・輸送・ 付着過程をモデル化し,波浪・気象・海岸状態を入力とすることで、陸上任意地点での飛 来塩化物イオン量算定モデルを提案した. Manders et al. [1.70] は化学輸送モデルである LOTOS-EUROS を用いてヨーロッパの海塩粒子濃度分布を再現したが、観測値に対し過剰 評価であり,海塩粒子発生の不確かさと乾性沈着のパラメータ化に問題があると考察した. 須藤ら [1.71] は式 (1.3.1) とレイノルズ平均乱流モデルに基づき、数十 km 四方を対象と した風況と海塩粒子輸送の数値解析を行った.

一方,領域気象モデルを用いた大気中塩分濃度の予測に関する研究が近年進んでおり, 例えば木原ら [1.72],当真ら [1.73],小畑・村上 [1.74],広瀬ら [1.75],野口ら [1.76][1.77] が検討を行っている.広域的な情報を勘案しつつ任意地点の気象要素や大気中塩分濃度を 得られるため,予測精度向上など今後の更なる発展が期待される.

1.3.4 観測・実験・数値計算による橋梁等構造物周辺または部位別付着塩分量

ここまでに例示したように、ある地点での飛来塩分環境や大気中の塩分分布を観測や数 値計算で検討した研究は数多く存在する.一方、橋梁表面の付着塩分量や劣化具合は部位 別に異なることが観測や実験、数値計算から知られている.したがって、維持管理実務に おいては、塩分の付着しやすい部位をあらかじめ把握しておくことが望ましいと考えられ る.ここでは、橋梁などの構造物の部位別の腐食環境についての研究例を示す.

武邊ら [1.78] は耐候性鋼を念頭に置いた腐食環境評価において, Na+と Cl⁻の量がさび 厚と正の相関を持ち,イオン量が一定以上になると評点も悪くなること,下フランジ部で の付着量が多いことを示した.岩崎ら [1.19] は卓越風向が一定であれば部位別の飛来塩分 量の比率はほぼ一定であり,また飛来塩分量と腐食量の相関が高いことを示した. An et al. [1.79] は橋梁部位別の付着塩分量の多寡を調べるために,鋼塗装橋各部位への付着量と, 同じ部位に設置したモルタル試験片への浸透塩分量を比較した.

中西ら [1.80] は風洞内で粒子を飛散させて 2 主桁および 3 主桁橋梁断面模型への部位 別付着量を調べ,観測値の分布を概ね再現するとともに,地面の影響を考慮することで実 際の塩分分布に近づくことを明らかにした.チェンデラら [1.81] は 5 種類の橋梁断面周 りの流れの様子を Particle Image Velocimetry (PIV) 解析で調べ,塩分が付着しやすい部位 を考察した.さらに,固気二層流解析によって粒子挙動をラグランジュ的に追跡し,実験 結果と概ね一致することを示した.長谷部ら [1.82] [1.83] は風洞実験で得られる可視化画 像の煙の濃淡を輝度として評価し,正方形角柱や 2 主桁橋において剥離せん断層内外で濃 度が大きく異なることを明らかとした.さらに,模型表面に設置したフィルターで粒子を 捕集し,上流側衝突面への付着量が多いことを確認した.

加藤・武田 [1.84] は2 主桁橋への付着量を修正 k-ε モデルを用いた数値流体力学で解析 し、観測値の傾向を再現した.山田ら [1.85] [1.86] は円柱と角柱を対象に3次元数値解析 によって部位別の付着量の違いを再現するとともに、実橋の複数点における飛来塩分量を 海塩粒子の発生・移流・拡散を踏まえて算出した. Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation [1.87] は橋梁各部位への付着量を、粒子の放出高さを変えつつ計算 し、橋梁の海面からの高さによる影響を検討した.中村ら [1.88] は対象形状周りをポテン シャル流れとし、重力の影響を検討しつつ粒子を放出すると、条件によっては下フランジ へ多く付着するなど現実的な挙動を示すことを確認した.小畑ら [1.89] は数値流体解析と ラグランジュ的な粒子挙動評価によって、風上面や箱桁の下面に多く付着することを確認 した.また、海塩粒子の発生、輸送、橋梁周りの流体解析などの一連の計算を行えるよう なソフトウェアの開発も行われている [1.90].

以上は飛来海塩粒子に関する研究であるが,参考に凍結防止剤についての研究を例示す る. 岩崎ら [1.91] は橋梁部位別の凍結防止剤の飛散量を調査しており,路面上に散布した 凍結防止剤が橋梁へ再付着し,部位によっては腐食の原因となる可能性に言及した. 武邊 ら [1.92] は付着塩分の成分を分析し,凍結防止剤が飛来塩分の供給源であることを確かめ た. 秦ら [1.93] [1.94] は車両走行による凍結防止剤の飛散を車両周りの流れ場に基づき検 討した.

1.3.5 飛来塩分量や付着塩分量の低減

塩分は三大腐食因子の一つであるので、これを橋梁表面から絶つことが防食の基本的な 考え方であり、表面塗装などの対策が施される.ここでは、飛来塩分や付着塩分の量その ものの低減についての研究例を紹介する.

強制洗浄は橋梁に付着した塩分を低減させる有力な維持管理手法と考えられる.例えば, 原ら [1.95] は凍結防止剤が散布される耐候性鋼橋梁を対象にその効果を調査し,水洗部の さび層厚の増加速度が抑制され,さび生成重量が低減するなどの結果を得た.磯ら [1.96] は塗装鋼板,裸鋼板,コンクリートそれぞれで洗浄の効果を検討した.小畑 [1.97] や梶村・ 宮本 [1.98] は橋梁洗浄機を開発し,その効果を確認した.また,永田ら [1.99] は洗浄時 期の決定という観点から,鋼橋での結露生成をシミュレーションした.

結露は基本的に腐食を促進すると考えられる一方,過大に成長したり風などの外力を受けたりした水滴は部材表面を流下し,その過程で塩分を洗浄する可能性もある. 梶村・宮本 [1.100] は付着塩分量の観測値が増加の一途をたどるのではなくある値に収束する様子から,結露水の流下の影響を示唆している. 武邊ら [1.101] はこのような水滴による洗浄を検討するため, 塗装橋に付着したイオンの挙動を調べた.

結露のように自然現象として期待される付着塩分の減少機構として,外側の部材においては降雨による洗浄が考えられる. Cole et al. [1.102] [1.103] は降雨および風による付着塩分の部材表面からの離脱について実験を行った. Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation [1.104] は雨滴の挙動を数値計算で再現し,塩分洗浄への寄与を調べた.椿ら [1.105] はコンクリート供試体の表面に付着させた塩化物の洗い流しについて,塩化物の湿潤状態や水滴の入射角に基づいた関係式を実験的に導出するとともに,表面に到達した水の流れ方と塩分洗浄への影響を調べた.

飛来塩分そのものを減らす試みとして,飯塚ら [1.106] は海岸防風林の海風中塩分の減 少効果を観測によって調べた.中村ら [1.107] [1.108] は海岸近傍に設置した透過性構造物 の性能を実験および解析から検討した.

空気力学的対策による橋梁への付着抑制を目指して,加藤・竹田 [1.84] は橋梁の形状を 工夫することで,桁間へ塩分が侵入しづらい構造が存在することを数値計算から明らかに した.また,繁田ら [1.109] [1.110] は橋梁に付加部材を設置することで流れを制御し,付 着量が低減するような付加部材の設置位置や組み合わせを検討した.

1.4 本研究の目的と構成

前節で採り上げたように,飛来塩分や付着塩分に関する研究は多岐に渡る.簡易な装置 で飛来塩分を捕集することから始まり,近年では計算機の能力向上もあって,塩分の発生 や輸送および橋梁表面への付着などについての数値計算も多くみられるようになった.し かし,改善すべき課題や未検討の項目もいまだ残っており,さらなる研究が望まれる.

1.4.1 研究課題と研究目的

飛来塩分の捕集においては土研式タンク法やドライガーゼ法による観測実績が豊富では あるが、それらの装置による捕集塩分量と真の飛来塩分量との関係は不明のままである. 土研法やガーゼ法による捕集は風況や降水など気象要素の影響を受け,また,どれだけの 塩分捕集率を有するかは未解明である.さらに,これらの装置はある地点の大気中の塩分 をあくまで「量」として得るもので,mdd値としてしばしば表される.しかし,大気中の 飛来塩分環境を基に,数値計算によって橋梁の部位別の腐食環境を評価する際には,橋梁 断面周りの風況を考慮しつつ大気中塩分「濃度」に基づく評価が必要と考えられる.これ は,飛来塩分量は大気中塩分濃度と風況の2つの要素に基づく指標であること,橋梁各部 位近傍の局所的な風況が付着塩分量の評価に際し重要と考えられること,このとき大気中 塩分濃度に適当な風速と時間を乗ずることで付着塩分量を評価できることなどが理由とし て挙げられる.一方,エアサンプラーによる塩分捕集も行われるが,これは電源が必要か つ一般に高価である.以上より,土研法やガーゼ法のように電源を必要としない受動的な 塩分捕集の仕組みを持ち,同時に大気中塩分を濃度として評価できる装置が必要と考えら れる.さらには,維持管理の効率化や高度化を考えると,観測を行わずとも大気中塩分濃 度を評価できるような手法の構築が期待される.また,実務においては複数橋梁を管理す る必要性から,個々の橋梁に対してではなく広域的にかつ同時に管理橋梁の腐食環境を把 握できることが望ましい.

道路橋示方書 [1.21] [1.22] では塩分に関する指針は離岸距離のみで表されるが,飛来塩 分環境は周辺地形や植生の影響を受けることから,橋梁架設地点ごとに接近風向や周辺地 形の特徴を勘案した腐食環境の評価が必要と考えられる.さらに,同一の橋梁でも部位に よって付着塩分量や劣化具合が異なるため,部位別の付着量をあらかじめ把握しておくこ とが維持管理実務の上で有効と考えられる.しかし,既往の研究の多くは定性的な傾向は 再現できても定量的な評価には至らないものが多い.また,空気の流れと塩分粒子挙動の 連成計算が必要であるなど複雑であり,より簡単な予測モデルの利用が好ましい.

橋梁表面への付着塩分量の定量的な評価において,飛来塩分環境や風況に基づいて付着 塩分を精度よく予測することは重要であるが,同時に付着した塩分の離脱を予測に反映さ せる必要がある.塩分の自然洗浄作用として雨滴や結露水の流下による洗浄が考えられる が,いずれも表面付着塩分量を評価するうえで十分に検討されているとはいえない.

腐食や塩害は非常に長い時間スケールでの問題ともいえ,数日や数年の検討に留まらず, 数十年といった長期間の付着塩分量の動向を把握する必要があるとも考えられる.このと き,例えば過去のある1年間の飛来塩分や付着塩分の観測値や計算値を有するとしても, これが将来の1年あるいはより長期間の状態を必ずしも表すとはいえない.また, $Y = A_{SMA}X^{B_{SM4}}$ で表される将来の腐食減耗量予測に際しては初年減耗量 A_{SMS} が必要である. このとき,より一般性のある予測を行うためには元となるデータを統計的に処理すること で A_{SMS} を定めるべきと考えられる.しかし,現状ではそのような予測手法が確立している とはいえない.

このようの背景のもと、本研究では特に飛来海塩粒子に着目し、橋梁部位別の付着塩分 量の定量的な評価を行うことを目的とし、以下に大別される内容について検討を行った.

飛来塩分量(または大気中塩分濃度)の観測による精度良い把握.

● 各種の洗浄効果も加味した橋梁部位別の付着塩分量の定量的な評価手法の構築.

さらに,以上の内容を前提に,維持管理のさらなる効率化・高度化を念頭に,次の項目 にも取り組んだ.

16

- 大気中塩分濃度および気象要素の数値計算による広域的な評価.
- 統計的な手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現およびこれらを用いた付着 塩分量の評価手法の開発.

また、より長期的な目標として、飛来塩分や気象特性、および橋梁や周辺地形に応じた 気流特性などの各要素に対しパラメータ化を施すことで、個々の橋梁に対して複雑な計算 を必要としない評価モデルに昇華させることを考えている.

1.4.2 研究内容と本論文の構成

本論文は先述の目的達成を目指し、序論である本章と以降の2章から5章,およびまと めの6章から成る.全体構成をFig.1.4.1に示し、各章の内容を以下に概説する.

2 章では、対象とする鋼塗装橋表面への付着塩分量計測と、当該地点での気象要素およ び飛来塩分捕集のための現地観測について説明する.対象橋梁への塩分付着状況を把握し、 かつ数値予測における比較対象として利用するとともに、新たに開発した塩分捕集器具の 性能を調べつつ現地の塩分環境調査を行う.また、ドライガーゼ法を採り上げ、風洞実験 によって捕集装置周りの流れ場特性を調べる.さらに、大気中塩分濃度と風速および風向 を捕集塩分量と関連付ける評価モデルを提案し、ドライガーゼ法の塩分捕集効率について 検討する.

3 章では、橋梁部位別の付着塩分量を推定するための基礎的な検討について記す.ここ では、現地観測で得られた橋梁架設地点の気象要素と大気中塩分濃度を入力としたときの 予測手法を考える.まず、付着塩分量は橋梁周りの空気の流れに支配されると考え、数値 流体力学の手法に基づいた定常流れ場を算出する.このとき、接近風向別に流れ場を算出 することで、観測で得られた風向の変化への対応を可能にする.次に、現地観測による大 気中塩分濃度と気象要素および橋梁周りの定常流れ場を利用して表面への付着塩分量を評 価する手法を提案するとともに、必要となるパラメータの同定について述べる.さらに、 付着塩分の自然浄化作用の一つである降雨の影響を調べるための実験と、得られた結果の 定式化について説明する.最後に、洗浄効果も踏まえた対象橋梁表面の残存塩分量を算出 し、付着塩分量の観測値との比較を行うことで、提案手法や関連する個別技術の精度や妥 当性の検討を行う.

4 章では、現地観測に代わる気象要素・大気中塩分濃度の獲得手法として領域気象モデ ルを導入する. 広域的な気象要素算出と同時に、海塩粒子の生成から輸送までを考慮した 計算を行うことで当該地点の情報を評価し、観測値と比較しつつ予測精度を検証する. さ らに、結露で生じる水滴の流下による付着塩分の洗浄について、発生水量を予測するため の数値計算と流下時の洗浄力評価実験を行う. このとき、発生水量の予測には領域気象モ デルで得られた値を利用する. また、得られた結果を踏まえた部位別の付着塩分量計算を 行い、その効果を考察する.

5 章では,腐食環境を統計的に把握することを目的に,気象要素や大気中塩分濃度の確 率変数化を行う.さらに,そのままでは確率分布関数による表現が困難な風向について, 確率的な表現方法を提案するとともにその適用可能性を探る.これらを利用してモンテカ ルロシミュレーションによる付着量計算も行い,その妥当性を検証する.

最後に6章にて本論文をまとめるとともに、今後の展開について述べる.

	第5章 統計的手法を用いた大気中塩分濃度と 気象要素の表現および付着塩分量の評価	 ・擬似乱数 ・使用する確率変数と確率分布関数の適用 ・風向に対する確率分布関数の適用 	気象・大気中塩分濃度の獲得			橋梁周りの流れ場計算		付着塩分の離脱	・モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量		付着塩分量の評価	
	第4章 橋梁表面おける結露による水滴の発生と その流下に伴う付着塩分量の洗浄効果	・領域気象モデルWRFについて ・領域気象モデルWRFの計算領域と計算条件 ・領域気象モデルWRFの算出結果と観測値との比較					 ・対象橋梁主桁表面温度の算出 ・結露による発生水量の算出と表面水分の定義 ・結審ホルドキャ端の拡下ドトトを移動主面の 	・昭略にエレにか個の肌下による簡素変更の付着塩分洗浄効果測定実験	・結認で牛じた水滴の流下による洗浄を略まえた	付著塩分量計算		
第1章 序論 ・はじめに ・腐食による鋼橋の劣化機構と対策 ・飛来塩分に関する既往の研究 ・本研究の目的と構成	第2章 現地観測による飛来塩分量および気象要素の 獲得と橋梁表面の付着塩分量調査	 ・対象橋梁と気象観測 ・表面付着塩分量の計測 ・円筒型飛来塩分捕集器による飛来塩分の計測と 	精度検証 ・ドライガーゼ法の気流特性と捕集効率	第3章 数値計算による橋梁部位別の付着塩分量評価	 ・定常流れ場計算の支配方程式と計算アルゴリズム ・非定常流れ場計算の支配方程式と ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	□ 毎ノルーシベム ・対象橋梁周りの定常流れ場計算	・雨水による付着塩分の洗浄効果		・提案する橋梁表面の付着塩分量評価モデル	 ・ 粒子追跡法による非定常流れ場での付着量計算 ・ 橋梁への付着塩分量評価モデルにおける塩分の 	側矢ノフック人評価位直 ・橋梁部位別の付着塩分量計算	第6章 結論および今後の課題 ・結論 ・今後の課題

Fig. 1.4.1 本論文の構成

参考文献

- [1.1] 公益社団法人土木学会:土木学会誌,第 99 巻,第 11 号,2014.
- [1.2] 公益社団法人土木学会:土木学会誌,第100卷,第5号,2015.
- [1.3] 復興庁:復興・創生期間に向けた新たな課題への対応, https://www.reconstruction.go.jp topics/m15/12/20151225_kadaihenotaiou.pdf, 2015.
- [1.4] 復興庁:復興の現状と課題, https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-1/160809_gennjyoutokadai.pdf, 2016.
- [1.5] 土木学会地震工学委員会地震被害調査小委員会: http://committees.jsce.or.jp/eec205/node/26, 2016.
- [1.6] 土木学会東日本大震災フォローアップ委員会・原子力安全土木技術特定テーマ委員会:原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの 視点), 2013.
- [1.7] 本田利器,野津厚,高橋良和:「危機耐性」という考え方とそのための設計体系の 指針化,土木学会誌,第101巻,第3号,26-29,2016.
- [1.8] 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,

http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/tunnel/pdf/130618_houkoku.pdf, 2013.

- [1.9] 国土交通省 (道路橋の予防保全に向けた有識者会議):道路橋の予防保全に向けた提言, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_2.pdf, 2008.
- [1.10] 国土交通省:予防保全の取り組み, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf, 2013.
- [1.11] 国土交通省:鋼橋 (上部構造)の損傷事例, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf, 2009.
- [1.12] 国土交通省:コンクリート橋 (上部構造)の損傷事例, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_2.pdf, 2009.
- [1.13] 国土交通省国土技術政策総合研究所:橋梁の架替に関する調査結果 (IV),国総研資料,第444号,2008.
- [1.14] 山田健太郎, 舘石和雄: 鋼橋の維持管理, コロナ社, 2015.
- [1.15] 社団法人日本道路協会:鋼道路橋塗装·防食便覧, I-10-I-11, 2005.
- [1.16] 一般社団法人日本橋梁建設協会: 耐候性鋼橋梁実績資料集, 第 21 版, 2015.
- [1.17] 一般社団法人日本鉄鋼連盟,一般社団法人日本橋梁建設協会:耐候性鋼の橋梁への 適用,2010.
- [1.18] 建設省土木研究所,社団法人鋼材倶楽部,社団法人日本橋梁建設協会:耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告(XX)一無塗装耐候性鋼橋梁の設計・試行要領(改定案),共同研究報告書,第88号,1993.
- [1.19] 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡: 耐候性鋼橋梁の断面部位別の 腐食特性とその評価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, 297-311, 2010.
- [1.20] 後藤悟史,麻生稔彦,宮本文穂:既存耐候性橋梁の付着塩分量とさび厚に関する相 関分析,鋼構造年次論文報告集,第13巻,333-338,2005.

- [1.21] 社団法人日本道路協会:道路橋示方書·同解説,I 共通編·II 鋼橋編,丸善,2012.
- [1.22] 社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, 丸善, 2012.
- [1.23] 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, 71-86, 2005.
- [1.24] 大塚雅裕,楠原栄樹:重防食塗装の劣化予測手法の開発,構造工学論文集, Vol. 62A, 492-502, 2016.
- [1.25] 細井章浩, 伊藤義人, 金子恵介, 杉浦友樹: 鋼橋塗装の部分劣化対策に関するライ フサイクルアナリシス, 構造工学論文集, Vol. 57A, 669-680, 2011.
- [1.26] 山内健一郎:ふっ素樹脂塗料の耐久性と厚膜型ふっ素樹脂塗料, DNT コーティング 技報, No. 13, 22-27, 2013.
- [1.27] 藤原博, 三宅将: 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究, 土木学会論文集, No. 696/I-58, 111-123, 2002.
- [1.28] 中村慶一郎,松本理佐,服部篤史,河野広隆:ピンホールや剥がれの表面被覆材欠 損部からのコンクリート中への塩分拡散解析,平成 28 年度土木学会関西支部年次 学術講演会講演概要集, V-32, 2016.
- [1.29] 冨山禎仁,西崎到:現場塗装時の塩分が鋼道路橋の塗膜性能に及ぼす影響に関する 検討:構造工学論文集, Vol. 61A, 552-561, 2015.
- [1.30] 木村恵子,曽根真理,並河良治,桑原正明,角湯克典:凍結防止剤散布と沿道環境, 国土技術政策総合研究所資料,第412号,2007.
- [1.31] 山本晴彦:農作物における塩害「塩風害」の特徴,日本海水学会誌,第61巻,第2
 号,110-117,2007.
- [1.32] 架空送電設備の鋼材腐食・摩耗現象調査専門委員会:架空送電設備の鋼材腐食・摩 耗現象,電気学会技術報告,第1163号,2009.
- [1.33] 鹿毛勇,塩谷和彦,竹村誠洋,小森務,古田彰彦,京野一章:実暴露試験に基づく ニッケル系高耐候性鋼の長期腐食予測,Zairyo-to-Kankyo, 55, 152-158, 2006.
- [1.34] 山下寛生,下村匠,山田文則:飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に 関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, .1011-1016, 2007
- [1.35] Corvo, F., Betancourt, N., and Mendoza, A.: The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel, Corrosion Science, Vol. 37, No. 12, 1889-1901, 1995.
- [1.36] 鳥羽良明:海塩粒子-大気と海洋との相互作用の一要素として-,海と空,第41巻, 第3・4合併号,71-118,1966.
- [1.37] 鳥羽良明,田中正昭:塩害に関する基礎的研究(第一報)海塩粒子の生成と陸上への 輸送モデル,京大防災研究所年報,第10号B,331-342,1967.
- [1.38] 集じん技術の基礎, https://pub.nikkan.co.jp/uploads/book/pdf_file5101d657490ea.pdf, 2016.
- [1.39] 建設省土木研究所:飛来塩分量全国調査 (IV) -飛来塩分量の分布特性と風の関係 -,土木研究所資料第 3175 号, 1993.
- [1.40] 一般財団法人日本ウエザリングテストセンター:http://www.jwtc.or.jp/irai/irai-5.html, 2016.

- [1.41] 日本工業規格: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, JIS Z 2381, 1998.
- [1.42] 中村英二郎,安里昌樹,羽地龍志:環境に適した製品創生のための腐食環境予測・ 評価システムの開発 (その 1)-腐食環境因子測定について-,沖縄県工業技術セン ター研究報告書,第9号,61-70,2007.
- [1.43] 武邊勝道,大屋誠,安達良,大田隼也,落部圭史,梶谷慧,北川直樹,立花裕介, 原貴之:土研式タンク法とドライガーゼ法で得られる飛来塩分量の比較,Zairyo-to-Kankyo, 57, 500-505, 2008.
- [1.44] 岩崎英治,小島靖弘,高津惣太,長井正嗣:塩分捕集器具の設置方向と飛来塩分の 関係,構造工学論文集,Vol.56A, 616-629, 2010.
- [1.45] 野口泉,大塚英幸,秋山雅行,酒井茂克,加藤拓紀:フィルターパック法による亜 硝酸ガス濃度の測定,大気環境学会誌,第42巻第3号,162-174,2007.
- [1.46] 国立環境研究所地球環境研究センター:全国酸性雨データベース, http://db.cger.nies.go.jp/dataset/acidrain/ja/04/index.html, 2016.
- [1.47] 松平康男:御前崎に於ける"潮風"の調査, 海と空, 20, 1, 24-33, 1940.
- [1.48] 金内英司,青葉光正:前砂丘の潮風の塩分分布について,新砂防,20(31),21-23, 1967.
- [1.49] 幸喜善福:海岸付近の空中塩素量に関する研究,琉球大学農学部学術報告,第17号, 162-175, 1970.
- [1.50] 岩崎英治,長井正嗣,大久保雄介,松岡寛和:新潟県内の飛来塩分と風向・風速の 関係,構造工学論文集 Vol.52A, 773-780, 2006.
- [1.51] 浜田純夫,日野伸一,兼行啓治,長谷川博:海岸付近の飛塩調査とコンクリートに 浸透する塩分,第8回コンクリート工学年次講演会論文集,85-88,1986.
- [1.52] Chen, Y., Chiu, H., Chan, Y., Chang, Y., Yang, C.: Prediction model of air-borne salt distribution in the coastal region of northern Taiwan, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, No. 3, 259-268, 2012.
- [1.53] 大屋誠,武邊勝道,広瀬望,松崎靖彦,大久保優太朗,児玉悠,吉岡優佳:長期飛 来塩分量調査と風向風速データによる飛来塩分量の予測,土木学会第71回年次学 術講演会講演概要集,93-94,2016.
- [1.54] Lovert, R. F.: Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantic, Tellus, 30, 358-364, 1978.
- [1.55] 村上和男,加藤一正,清水勝義,福田眞人,宮崎啓示:砕波帯内における海塩粒子 の発生に関する現地調査,第39回海岸工学講演会論文集,1046-1050,1992.
- [1.56] 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 塩分量推定のための基礎的検討,構造工学論文集,Vol. 60A, 605-612, 2014.
- [1.57] 坪倉佑太,広瀬望,武邊勝道,大屋誠:山陰地方における大気中の塩分濃度計測に 基づく鋼材への塩分付着率の推定,構造工学論文集, Vol. 62A, 549-558, 2016.
- [1.58] 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No.1, 1-20, 2010.
- [1.59] 宇多高明,小俣篤,小西正純:海岸からの飛来塩分量の計算モデル,海岸工学論文

集, 第 39 巻, 1051-1055, 1992.

- [1.60] 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄: 飛塩 (海塩粒子) 拡散の数値流体力学 的解析, 海岸工学論文集, 第40巻, 1036-1040, 1993.
- [1.61] 山田文彦, 滝川清, 外村隆臣: 有明海沿岸域における飛来塩分の拡散機構とその数 値モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, 1216-1220, 1997.
- [1.62] Zhang, L., Gong, S., Padro, J., Barrie, L.: A size-segregated particle dry deposition scheme for atmospheric aerosol module, Atmospheric Environment, 35, 549-560, 2001.
- [1.63] 加藤央之,赤井幸夫:簡易型飛来塩分予測モデルの構築と評価,農業気象,57(2), 79-92,2001.
- [1.64] 細山田得三,山田文則,田安正茂:波動場数値計算の砕波判定によって発生する飛 来塩分とその輸送に関する数値実験,海岸工学論文集,第49巻,1256-1260,2002.
- [1.65] 山田文則,細山田得三:海面から発生する飛来塩分に関する実地観測とその飛来塩 分発生・輸送数値モデルの開発,海岸工学論文集,第50巻,1176-1180,2003.
- [1.66] 山田文則,下村匠,細山田得三:飛来塩分の発生・輸送シミュレータの開発,コン クリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, 865-870, 2005.
- [1.67] Gong, S. L.: A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and supermicron particles, Global Biogeochemical cycle, Vol. 17, No. 4, 1097, 8-1~8-7, 2003.
- [1.68] Cooperative Research Centre (CRC) for Construction Innovation: Effect of height of bridge above water on salt deposition levels, 2005-003-B-02, Icon.Net Pty Ltd., Brisbane, Australia, 2006.
- [1.69] 小窪幸恵, 岡村甫:海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量の算定モデル, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 4, 259-268, 2009.
- [1.70] Manders, A. M. M., Schaap, M., Querol, X., Albert, M. F. M. A., Vercauteren, J., Kuhlbusch, T. A. J., Hoogerbrugge, R.: Sea salt concentrations across the European continent, Atmospheric Environment, 44, 2434-2442, 2010.
- [1.71] 須藤仁,服部康男,平口博丸,木原直人:レイノルズ平均乱流モデルに基づく風況・ 海塩粒子輸送解析-期間累積飛来塩分量の空間分布の推定-,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, 1161-1165, 2010.
- [1.72] 木原直人,平口博丸,高橋章,藤田慎一:時間変化する気象条件を考慮できる大気 中の海塩粒子濃度予測手法の開発,電力中央研究所報告,N08021, 2009.
- [1.73] 当真嗣竜,東條良太,山田義智,湯浅昇:海岸における風況と飛来塩分量の相関に 関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1, 863-868, 2011.
- [1.74] 小畑誠,村上太郎:腐食環境評価のための浮遊塩分量調査とその数値予測について、 構造工学論文集, Vol. 60A, 596-604, 2014.
- [1.75] 広瀬望, 坪倉佑太, 武邊勝道, 大屋誠, 高見航右, 土江彩季: 異なる空間スケール に着目した海塩粒子輸送予測システム開発のための基礎的検討, 土木学会第 71 回 年次学術講演会講演概要集, 95-96, 2016.
- [1.76] 野口恭平,白土博通,秦聡一朗,金城佑紀,八木知己:領域気象モデルによる風況 及び飛来塩分の推定,土木学会第70回年次学術講演会講演概要集,1181-1182,2015.
- [1.77] 野口恭平,金城佑紀,秦聡一朗,白土博通,八木知己,中西克佳:任意地点橋梁に
おける部位別の飛来塩分量予測,土木学会論文集 A1,修正中.

- [1.78] 武邊勝道,松崎靖彦,大屋誠,安食正太,古川貴士,麻生稔彦:耐候性鋼橋梁の表 面状態と付着塩類量の関係,土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 2, 172-180, 2007.
- [1.79] An, L., Mihoichi, K., Noguchi, K., Hata, S., Kaneshiro, Y., Shirato, S.: Effect of environmental factors on chloride ingress into concrete in the marine atmosphere zone of Wakayama prefecture, fib Symposium 2015 (Concrete-Innovative and Design, 295-296), Copenhagen, Denmark, 18-20 May, 2015.
- [1.80] 中西克佳,加藤真志,岩崎英治:風洞実験による橋梁断面の部位別付着塩分分布評価手法に関する基礎的研究,土木学会論文集 A1, Vol. 67, No. 2, 326-335, 2011.
- [1.81] チェンデラ ロナルド,勝地弘,山田均,佐々木栄一:橋桁周りの飛来塩分挙動推 定に関する研究,構造工学論文集, Vol. 58A, 528-541, 2012.
- [1.82] 長谷部寛,小杉翼,畑本詩音,河合泰斗,中山駿也,野村卓史:橋梁周りの飛来塩 分挙動推定のための流れの可視化画像の画像処理法,第 22 回風工学シンポジウム 論文集,353-358,2012.
- [1.83] Hasebe, H., Sakakibara, Y., Yamaya, K., Sone, R., Haruki, Y., Nomura, T.: Wind tunnel experiment to estimate the amount of airborne sea salt adhering to the surface of a bridge, Proc. 14th International Conf. on Wind Eng., ID_2336, USB flash drive, Porto Alegre, Brazil, 22-26 June, 2015.
- [1.84] 加藤真志,武田勝昭:飛来塩分の数値解析的評価技術の橋梁への適用〜耐候性鋼材 適用地域拡大への試み〜,鋼構造論文集,第7巻,第28号,45-54,2000.
- [1.85] 山田文則,細山田得三:海岸構造物への飛来塩分の付着過程に関する研究,海岸工 学論文集,第51巻,1126-1130,2004.
- [1.86] 山田文則,細山田得三,下村匠,佐藤賢介:構造物周辺における飛来塩分の輸送過程に関する数値解析と現地観測,コンクリート工学年次論文集,Vol. 28, No. 1, 1001-1006, 2006.
- [1.87] Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation: Case-based reasoning in construction and infrastructure projects – final report, 2002-059-B, No.16, Icon.Net Pty Ltd., Brisbane, Australia, 2005.
- [1.88] 中村秀治,藤井堅,緒方琴未,田口義隆:地形影響を考慮した飛来塩分量の推定と 構造物への塩分付着に関する検討,鋼構造論文集,第14巻,第55号,2007.
- [1.89] 小畑誠,李国泰,渡辺泰成,後藤芳顕:局所および広域解析を組み合わせた付着塩 分量推定法に関する研究,構造工学論文集, Vol. 58A, 668-678, 2012.
- [1.90] コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会: LECCA (Long time Evaluation Program for Concrete Structures by Computational Analysis) シリーズ, http://lecca-users.com/index.php?FrontPage, 2016.
- [1.91] 岩崎英治,永藤壽宮,湯浅昭,西剛広:凍結防止剤の飛散と鋼橋の腐食,構造工学 論文集, Vol. 58A, 655-667, 2012.
- [1.92] 武邊勝道,大屋誠,広瀬望,落部圭史,麻生稔彦:飛来および付着塩分組成に基づく凍結防止剤の橋梁桁下への飛来量の検討,土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 2, 314-324, 2012.

- [1.93] 野口恭平,秦聡一朗,白土博通,八木知己:車両走行による凍結防止剤の飛散がもたらす周辺塩分環境の変化,土木学会第71回年次学術講演会講演概要集,91-92,2016.
- [1.94] 秦聡一朗,白土博通,野口恭平,八木知己:車両走行による凍結防止剤の飛散に起因する塩分の分布特性の変化,土木学会論文集A1(構造・地震工学),登載決定済, 2016.
- [1.95] 原修一,三浦正純,内海靖,藤原俊明,山本雅貴:高圧水洗のさび性状および腐食 速度に及ぼす影響,Zairyo-to-Kankyo, 54, 343-349, 2005.
- [1.96] 磯光男,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, 220-236, 2010.
- [1.97] 小畑誠:塩分の飛来・付着特性と塗装の劣化を考慮した鋼桁洗浄システムの開発, 平成20年度建設技術研究開発助成制度,2012.
- [1.98] 梶村周平, 宮本重信: 消雪用水を利用した橋梁洗浄の研究, 平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 施工・安全管理・対策部門, No. 13, 2014.
- [1.99] 永田和寿,伊藤弘太,山田仁,小畑誠,宮本重信:効率的な桁洗浄に向けた鋼橋の 腐食環境調査と考察,構造工学論文集, Vol. 57A, 691-702, 2011.
- [1.100]梶村修平,宮本重信:鋼橋重腐食部への亜鉛テープ被覆等によるコスト縮減の予測, 平成25年度近畿地方整備局研究発表会論文集,調査・計画・設計部門 No.17, 2013.
- [1.101]武邊勝道,大屋誠,安達良,安食正太,大田隼也,願永留美子,北川直樹,古川貴 士,松崎靖彦,麻生稔彦:橋梁桁内の付着イオンの露による洗い流し効果について, Zairyo-to-Kankyo, 57, 188-193, 2008.
- [1.102] Cole, I. S., Lau, D., Chan, F., Paterson, D. A.: Experimental studies of salts removal from metal surfaces by wind and rain, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 39, No. 4, 333-338, 2004.
- [1.103] Cole, I. S., Paterson, D. A.: Holistic model for atmospheric corrosion Part 7 Cleaning of salt from metal surfaces, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 42, No. 2, 106 -111, 2007.
- [1.104] Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation: Final report: Learning system for life prediction of infrastructure, 2005-003-B-12, Icon.Net Pty Ltd., Brisbane, Australia, 2007.
- [1.105]椿龍哉,定月良倫, El-Desouky, M. I.: コンクリート表面に付着した塩化物の表面 水流による洗い流し,セメント・コンクリート論文集, Vol. 65, No. 1, 384-391, 2011.
- [1.106]飯塚肇,玉手三棄寿,高桑東作,佐藤正雛:形防風林試験報告(第1報)防風林に よる海風中の塩分減少効果に関する研究,林業試験場研究報告,No.45, 1950.
- [1.107] 中村文則,小林豪毅,高木利光,児玉敏雄:塩分粒子の飛散実験による透過性構造物の塩分低減効果の検討,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, I_1056-I_1060, 2011.
- [1.108] 中村文則,小林豪毅,島田玄太,永田千広,高木利光,児玉敏雄:海岸近傍に設置

した透過性構造物の飛来塩分の低減効果に関する現地実証実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, I_1061-I_1065, 2011.

- [1.109]繁田匡寿,八木知己,杉井謙一, Mbithi Michael Kinama,野口恭平,白土博通:空 気力学的対策による橋梁各部材への海塩粒子付着量低減に関する研究,土木学会第 71回年次学術講演会講演概要集,113-114,2016.
- [1.110]繁田匡寿, 八木知己, 野口恭平, ビシィ・マイケル・キナマ, 杉井謙一, 白土博通: 空気力学的対策による橋梁各部位への飛来海塩粒子付着量の低減,構造工学論文集, Vol. 63A, 修正中.

第2章 現地観測による飛来塩分量および気象要素の

獲得と橋梁表面の付着塩分量調査

2.1 概説

橋梁の維持管理に際し、当該地点の腐食環境を評価するための現地観測がしばしば行わ れる.腐食環境には飛来塩分量が寄与することから、わが国では土研式タンク法 [2.1] や ドライガーゼ法 [2.2] を用いた塩分捕集実績が多く存在する.しかし、これらの装置は接 近風向別の特性が十分に明らかにされているとはいえず、一方で装置そのものが気流を乱 す可能性もある.さらには、捕集部そのものの捕捉性能や、捕集塩分が雨水の影響で流出 することも考えられる.このように、大気中の塩分捕集効率について検討すべき点が残っ ており、真の飛来塩分量を獲得できているかも不明のままである.また、大気の強制吸引 による塩分捕集 [2.3] も行われるが、このような装置の捕集精度は高いと考えられる一方 で、一般に高価なうえ装置の運用に電力を必要とすることから、複数地点で長期にわたり 観測を行うことが難しい場合もあると予想される.

一方,橋梁の部位別に付着塩分量や劣化具合が異なることが知られており,橋梁の腐食 環境評価も部位別に行うことが望ましい.このとき,数値計算によって現実的に部位別の 付着塩分量の評価を行うには,対象周囲の風況を考慮しつつ,大気中塩分濃度に基づく予 測を行う必要があると考えられる.具体的には,大気中塩分濃度 [mg/m³] に適当な風速 [m/s] と時間 [s] を乗ずることで,付着塩分量 [mg/m²] の評価が可能と考えられる.しか し,先述の捕集装置は飛来塩分を量としてとらえることは可能でも,通過流量の定義に難 点があるため,濃度として評価することは難しい.

以上より,本章では主に,1) 雨滴の影響を受けず,2) 接近流に対する塩分捕集特性が明 らかであり,3) 大気中の塩分環境を濃度として評価可能な捕集器具を新たに開発し,その 性能について検討を加える.この装置によって得られた大気中塩分濃度は,次章において 橋梁部位別の付着塩分量評価に際し,入力値として利用することを想定している.また, ドライガーゼ法を採り上げ,捕集装置周りの気流特性を明らかにし,大気中塩分濃度との 関係解明を試みる.

以下に本章の構成を示す.

2.2 節では本研究で一連の検討対象とする鋼塗装橋と,当該地点における気象観測の概要を説明する.2.3 節では,既往の研究に倣って対象橋梁表面の付着塩分量を部位別に計測し,腐食環境を調査した.2.4 節では,新たな飛来塩分捕集器具を作成して実測を行い,その性能について従来の装置との比較検討を行った.2.5 節では,ドライガーゼ式捕集装置周りの気流特性を風洞実験で調べ,その捕集効率把握のための検討も行った.最後に2.6 節に本章のまとめを記す.



Fig. 2.2.1 天鳥橋の外観 (左図:海側からの遠景,右図:桁周りの様子)



Fig. 2.2.2 天鳥橋の位置 [2.4]

2.2 対象橋梁と気象観測

Fig. 2.2.1 に本研究の対象橋梁である天鳥橋(和歌山県西牟婁郡すさみ町国道 42 号上, 北緯 33.52°, 東経 135.54°)の外観を, Fig. 2.2.2 にその位置を地図上に示す.天鳥橋は 1967 年に架設竣工された 3 主 I 桁を有する片側 1 車線の鋼道路橋で,表面にはふっ素系樹脂塗 装(下塗り:エポキシ樹脂,中塗りおよび上塗り:ふっ素樹脂)が施されている.橋軸は北 北西-南南東,橋長 50 m,支間長約 38 m で, 6.0%の縦断勾配のため地面から下フランジ までの距離は 2.8 (北北西)-4.8 m (南南東)と変化する.西南西側は太平洋に,東北東側は 崖に面するため,海風が多く吹き,多くの海塩粒子が飛来する厳しい腐食環境にあるとい える.例えば Fig. 2.2.3 は内陸側の排水管の様子であるが,固定用の部材が劣化し破断に至 っている.これは雨の影響を受けやすい部位であるため濡れの状態になりやすく,かつ表 面に達した雨滴が流れにくい構造であり,かつ塩分が細部に蓄積した結果と予想される.

Fig. 2.2.4 は天鳥橋の断面図を示しており、下フランジの上面には約 30°の傾斜がある. 図中に赤色の四角で示す A-d の 30 点は後述する付着塩分量の計測位置である. 各桁の片 面ごとにウェブ部に 3 点,下フランジの上下面に 1 点ずつで付着塩分量の計測を行った.



Fig. 2.2.3 排水管固定部位の劣化の様子



Fig. 2.2.4 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A-d (単位:mm)

なお,ここでいう付着塩分量は,厳密には橋梁表面に施された塗膜への付着塩分量を意味 するが,簡単のため以降では橋梁への付着塩分量と呼ぶ.また,図面左側の主桁より順に 海側主桁,中央主桁,崖側主桁と呼ぶ.

この天鳥橋架設地点において、2010年11月に風向・風速や降水量の観測を開始し、2016年12月現在も継続中である.使用機器は Vantage Pro2 (Davis Instrument Corp., Hayward, CA, USA)である.この装置の計測間隔は10分で、平均風速(3杯式)や卓越風向(矢羽式)、積算降水量の他に、温湿度や短波放射および気圧の計測も可能である.この装置を海側主桁から約7m離れた位置に、地面から約5mの高さに設置した.後述する塩分捕集器具の設置状況と併せてFig.2.2.5に図示する.高さ約4mの柱を設置し、それに気象観測装置およびバッテリー用のソーラーパネル、各種の飛来塩分捕集器具(後述)を取り付けた.



Fig. 2.2.5 気象観測装置および飛来塩分捕集器具の設置状況



Fig. 2.2.6 風向別平均風速 (単位:m/s)

Fig. 2.2.7 風向別生起頻度



Fig. 2.2.8 天鳥橋桁下での気象観測の様子



Fig. 2.2.9 桁下での風向別平均風速 (単位:m/s) Fig. 2.2.10 桁下での風向別生起頻度

観測例として 2013 年の風況について, Fig. 2.2.6 に風向別平均風速を, Fig. 2.2.7 に風向 別生起頻度を示す. 図中の赤色の長方形は橋軸方向を表す. 平均風速と生起頻度のいずれ も西寄りの風が卓越しており, これは天鳥橋の西側が海で東側が崖という局所的な地形が 影響したためと考えられる. したがって, 天鳥橋地点では年間を通じて海塩粒子を多く含 んだ海風が吹いているといえ, 厳しい腐食環境にあることが推測される.

また,後に示すドライガーゼ法による飛来塩分観測位置の風況評価を目的に,中央主桁のスパン中央付近において下フランジ下面の約1m下方に,気象装置 Vantage Vue (Davis Instrument Corp., Hayward, CA, USA)を Fig. 2.2.8 のように設置した. Vantage Vue は Vantage Pro2の小型モデルという位置づけで,概ね同等の観測が期待できる.ただし,計測間隔はデータロガーの容量と天鳥橋地点を訪れる作業頻度の都合で1時間とした.この装置による観測は 2016 年 6 月 29 日より開始した.

Table 2.2.1 天鳥橋上流側計測点での 16 方位別平均風速とその時の桁下の風況の関係

Dire.	VP	Ν	NNE	NE	ENE	Е	ESE	SE	SSE
	VV	WNW	SW	WSW	WSW	Е	SW	SW	SW
Speed [m/s]	VP	0.5962	0.4646	0.4172	0.3926	0.4073	0.6502	1.8736	1.1016
	VV	0.0392	0.0328	0.0493	0.0333	0.0400	0.1629	1.0425	0.5247
	Ratio	0.0657	0.0705	0.1181	0.0849	0.0982	0.2505	0.5564	0.4763
Dire.	VP	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
	VV	SW	SW	SW	WSW	W	WNW	WNW	WNW
Speed [m/s]	VP	1.2630	1.8973	1.7722	1.2396	2.0310	2.0292	1.5412	0.5961
	VV	0.5956	1.2634	0.6706	0.3057	0.6449	0.7683	0.5099	0.0575
	Ratio	0.4716	0.6659	0.3784	0.2466	0.3175	0.3786	0.3308	0.0965

*VP = Vantage Pro2 (windward), VV = Vantage Vue (under the middle girder).

2016 年 6 月 29 日~10 月 7 日に天鳥橋上流側 (Vantage Pro2) と桁下 (Vantage Vue) で観 測された風況について, Fig. 2.2.9 に風向別平均風速を, Fig. 2.2.10 に風向別生起頻度を示 す.約3か月の観測結果であり、通年の傾向を示すものではないことを注記しておく.上 流側に対して桁下の風速は小さいことから、天鳥橋地点に到達した風は橋や地形の影響で 強く減衰することが分かる.また,発生風向を見ると上流での風向に対し限られた範囲で しか風は吹いておらず、地形や橋台などの影響で接近風が整流されたといえる. したがっ て、上流側での風況でガーゼ法による観測地点である桁下空間の風況を代表することは難 しい. そこで,現状では桁下の風況観測期間はごく限られているため,得られた期間にお いて上流側と桁下の風況を関連付け、この関係は他の期間でも同様とみなし、後に示す検 討を行うことにした、具体的には、天鳥橋上流側での風向別平均風速を求め、上流側の風 向ごとに桁下での平均的な風向と風速を算出し、1対1の変換が可能と考えた.この関係 を Table 2.2.1 に示す. 例えば,上流側で北風が吹く際の平均風速は 0.5962 m/s であり,こ の間に桁下では西北西の風が平均 0.0392 m/s で吹くといえる. なお, 上流側で崖よりの風 (東の風を除く)が吹くとき,桁下では西よりの風に変化しているが,その風速値は非常に 小さく、実際にはほぼ無風の状態と考えられる.また、上流側において、南西の風向時に 比較的大きな風速を示すが,発生頻度は小さく,その影響は限定的と思われる.

なお、この期間に桁下での降水は観測されておらず、桁下に設置したドライガーゼ法に おいて雨滴による捕集塩分の離脱はないと考えられる.

2.3 表面付着塩分量の計測

Fig. 2.2.4 に示す A-d の 30 点における付着塩分量の測定にはポータブル表面塩分計 SSM-21P (東亜ディーケーケー株式会社, Fig. 2.3.1)を用いた.測定セルを磁力で対象部位に固



Fig. 2.3.1 ポータブル表面塩分計



Fig. 2.3.2 主桁表面への付着塩分量

定し,計測部に注入した蒸留水を攪拌して塩分を溶解させることで電気伝導率を測定でき, ISO 8502-9 [2.5] および JIS Z 0313 [2.6] に準じて水可溶性塩分濃度に換算した. なお,計 測点はいずれもスパン中央であるが,横構や対傾構の制約から多少前後する. およそ 1-2 か月に一度の頻度で計測を行い,計測後は蒸留水で計測点を洗浄し,次回の計測に備えた.

観測結果の一例として,2011年4月28日~5月27日における日換算の単位面積当たり の付着塩分量をFig.2.3.2(a) に示す.いずれの桁においても下フランジ上面の付着量が他 の部位に比べ多く、これは既往の報告 [2.7][2.8] とも一致する.また、ウェブ部において 上部よりも下部の方で付着量が多いのは、大気中の海塩粒子に作用する重力の影響や、結 露による洗い流しで付着塩分が下方へ移動するためと予想される.多くの観測期間で同様 の結果が得られた一方、Fig.2.3.2(b) のように下フランジ上面よりも下面の方が付着量の 多いこともある.原因の特定にはさらなる調査が必要であるが、海側主桁での剥離流れが 下流側の桁の下面に集中して衝突する可能性や、桁表面に生じた水分とともに塩分も下フ ランジ下面まで移動したのち、水分が蒸発し塩分のみが残留した可能性が考えられる.ま た、秋から冬にかけて付着塩分量は増す傾向にあり、後に示す大気中塩分濃度の大小に対 応するものと考えられる.





(b) ガーゼ部

(c) 遮蔽版





Fig. 2.4.2 円筒型飛来塩分捕集器の詳細図

2.4 円筒型飛来塩分捕集器による飛来塩分の計測と精度検証

本研究では、1)従来よりも精度良い大気中の塩分環境評価と、2) 飛来塩分を濃度とし て評価し、数値計算による橋梁表面の付着塩分量計算へ利用することを念頭に、独自の塩 分捕集器具を製作し、実際に大気中塩分濃度の計測を試みた.さらに、土研式タンク法や ドライガーゼ法などの従来の捕集装置や、大気強制吸引型のエアサンプラーによる捕集塩 分との比較も行ったので、以下に詳述する.

2.4.1 円筒型飛来塩分捕集器

飛来塩分を計測するうえで重要な要素として、下記の項目が考えられる.

- ・大気中の海塩粒子について、高い捕集率を有すること.
- ・風向別の捕集性能が明らかであること.
- ・一度捕集した塩分を雨や風などの外乱の影響で逃がさないこと.
- ・飛来塩分を量だけではなく濃度としても評価できること.

本研究では以上を念頭に、円筒型飛来塩分捕集器 (Tubular Collecting Device, TCD)の製作を試みた.装置の外観を Fig. 2.4.1 に、詳細な寸法を Fig. 2.4.2 に示す. この装置は外直径 100 mm,内直径 96 mm,長さ 20 mmのアルミニウム製リング 10 個のそれぞれにガーゼ



Fig. 2.4.3 導電率測定器

を張り一列に重ね, さらにその前後に同径で長さ 400 mm の筒を取り付けることで全長 1 mのパイプ状を成す. ガーゼを 10 層にすることで,従来のガーゼ法よりも高い飛来塩分捕 集率を有すると期待できる. 前後に付けた 400 mm の筒は雨水の影響を除去し, ガーゼ部 を保護することを目的としており,雨ざらしの地点でも精度よい捕集が可能と考えられる. 捕集器の片側には遮蔽板として直径 180 mm のアルミニウム製の円盤を開口部より 20 mm の隙間を空けて取り付けている. これにより遮蔽版側からの大気の流入を防ぎ, 一方向か らの飛来塩分を捕集できると思われる. 天鳥橋地点は崖の影響で一方からの風が卓越して いるが,開けた地点では海側と内陸側の両方から風が吹くと考えられ, それぞれ大気中塩 分濃度は異なると考えられる. そのため,海側と内陸側からの接近風それぞれにおいて濃 度を評価すべきと思われる.以降では遮蔽版のない方を流入口,遮蔽版側を流出口と呼ぶ.

この装置は両端とも解放されているため、流入口から内部に進入した大気は流出口から 出ていくことが可能である.そのため、流れの連続条件より管内において面平均風速は一 定であることから、接近風速に対する内部流速を調べることでガーゼ部を通過する大気体 積が求まり、捕集塩分量と併せて大気中塩分濃度を評価することができる.風洞実験で接 近風速と内部風速の比を調べており、結果として接近風向によらずほぼ一定の値 (α = 0.112)を示すことが確認された [2.9].係数 α の導出法は付録 A に詳述する.この係数を 用いると、大気中塩分濃度 C [mg/m³] は式 (2.4.1)で表される.

$$C = \frac{M}{\sum_{i} \alpha \cdot A \cdot V_{n_i} \cdot \Delta t}$$
(2.4.1)

M: 10 層のガーゼで捕集された塩分量 [mg], A: 円筒型飛来塩分捕集器の断面積 [m²], V_{ni}: 第 *i* ステップにおける平均接近風速 [m/s], Δ*t*: 各ステップの経過時間 (本研究では風 速・風向の観測頻度である 10 min).

この装置を Fig. 2.2.5 のように,地上約3mの地点に流入口を橋軸直角方向かつ海側である西南西に向けて設置した.橋梁への付着塩分量計測と同時に装置を交換しており,およそ 1-2 か月ごとの平均値として値が得られている.塩分量の計測はガーゼを蒸留水に浸すことで塩分を溶出させ,導電率測定器 Cond 3210 (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten Gmbh, Fig. 2.4.3) と溶液の重量から絶対量を算出した.大気中塩分濃度の観測結果を Fig.



Fig. 2.4.4 円筒型飛来塩分捕集器から得られた大気中塩分濃度



Fig. 2.4.5 円筒型飛来塩分捕集器のガーゼ層別捕集塩分量

2.4.4 に示す. 濃度は季節変動を見せており, 主に夏から秋にかけて値が大きくなる傾向に ある. これは主に台風によって多くの海塩粒子が大気中に巻き上げられることに起因する と考えられる. いずれの年においても概ね同様の傾向を示すことから, 円筒型飛来塩分捕 集器には一定の捕集性能があると思われる. また, このように濃度として大気中の塩分環 境を評価することに成功したので, 橋梁部位別の付着塩分量評価に際して入力値として利 用することができる.

Fig. 2.4.5 は円筒型飛来塩分捕集器内の 10 層のガーゼそれぞれの捕集塩分量の例を示す. ガーゼ番号は若番ほど流入口に近いことを意味する. 基本的には 2011 年 3 月 6 日~4 月 28 日のように,流入口から流出口に向かうにつれて捕集塩分量が減少することから,想定通 りに捕集器内を大気が一方通行していると考えられる.しかし,10 層目のガーゼでも塩分



Fig. 2.4.6 計測に用いた土研タンク (単位:mm)



Fig. 2.4.7 ドライガーゼ法よる観測の様子

が捕集されていることから、10層のガーゼでも全ての塩分を捕集できていない可能性を考慮すべきと思われる.この場合,通常のガーゼ法では多くの塩分が通過している可能性があり,その捕集精度について一考の余地がある.一方,2011年5月27日~6月30日のように流出ロ側の付着量が上流側に比べて多い期間も存在することから,風が逆流している可能性や,雨滴が装置下流側の筒を伝ってガーゼ部まで流れている可能性が考えられ,さらなる検討を要する.

2.4.2 土研式タンク法およびドライガーゼ法との比較

円筒型飛来塩分捕集器の塩分捕集性能を検証するため、土研式タンク法およびドライガ ーゼ法との比較を行った.土研法は2012年4月27日から、ガーゼ法は2015年8月28日 より計測を行っている.本研究で採用した土研タンクをFig.2.4.6に示す.円筒型飛来塩分 捕集器の約1m下方に設置して計測した.また、ガーゼ法は雨滴の影響を考慮して中央主



Fig. 2.4.8 円筒型飛来塩分捕集器-土研式タンク法-ドライガーゼ法の捕集量比較

Date	No. ^a	Date	No. ^a	Date	No. ^a
2012		2014		2015	
June 19	1204	July 10	1408	May 12	1506
Sep. 30	1217	Aug. 10	1411	July 16	1511
2013		Oct. 5	1418	Sep. 9	1518
June 21	1304	Oct. 13	1419		
Sep. 5	1317				
Sep. 16	1318				

Table 2.4.1 天鳥橋地点に直撃または接近した台風

桁の約1m下方に取り付けた.設置の様子をFig.2.4.7に示す.寸法はJIS 規格 [2.2] に準 じてガーゼ部100mm四方,外枠150mm四方で,ガーゼ直交方向の厚さは18mmとした. ただし,2016年3月31日までの計測に用いたものは外枠が162mm四方で厚さも30mm とやや大きいが,捕集塩分量には大きな影響はないと考え,以下の考察を加えている.

Fig. 2.4.8 は円筒型飛来塩分捕集器,土研法,ガーゼ法で得られた塩分量の mdd 値による 比較である. mdd 値への変換に際して,円筒型飛来塩分捕集器と土研法では捕集部面積当 たりの量として計算しているが,ガーゼ法は規格に従って捕集面積の2倍 (2 dm²) とした.

おおよその期間において3捕集器の値は概ね一致しているが、土研法の値が突出した期間が複数見られる.このような期間では橋梁架設地点に台風が接近し、巻き上げられた海水が直接タンク内に侵入したと予想される.Table 2.4.1 は天鳥橋地点へ強く影響したと考えられる台風の一覧を示す.土研法の捕集量が突出する期間はいずれも台風が接近しており、大量の海水や塩分を含んだ雨滴が直接タンク内に侵入したことが示唆される.一方、同期間の円筒型飛来塩分捕集器の捕集量は土研法に比べると他の期間に比較的近い値を示した.したがって、台風のような異常気象時において、円筒型飛来塩分捕集器には海水や



Fig. 2.4.9 MiniVol TAS

雨水の流入除去効果が期待され,従来の装置よりも大気中の塩分環境を精度よく評価する ことができると考えられる.ガーゼ法はまだ観測回数が十分とはいえず,さらにデータの 蓄積を進める予定である.次章では,このように円筒型飛来塩分捕集器を用いて得られた 大気中塩分濃度を用いて橋梁部位別の付着塩分量を算出する.ただし,このように得られ る付着量はあくまで大気中に浮遊する塩分に起因するものであり,海水や塩分を含んだ水 滴が直接壁面に到達することで塩分をもたらす効果については別途検討する必要がある.

いずれの期間・捕集装置においても,耐候性鋼材を無塗装使用できる目安である 0.05 mdd をはるかに上回っており,これからも天鳥橋が厳しい腐食環境にあることが認められる.

2.4.3 エアサンプラーとの比較

円筒型飛来塩分捕集器の塩分捕集性能の検証として,エアサンプラーMiniVol TAS (Airmetrics, Eugene, OR, USA) との比較も行った.装置をFig. 2.4.9 に示す.この装置は電力が必要なため,計測は現地作業中の数時間に限られる.流量はコントロール部で 1–10 L/min の範囲で調整が可能であり,2015年9月30日までは5 L/min で,以降では捕集量を増すために 8 L/min とした.海塩粒子の捕捉にはフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルター T60A20 (PALLFLEX PRODUCTS) を採用した.この装置を海側主桁から約7m地点の地面上に設置し,その近傍に比較用の円筒型飛来塩分捕集器を用意した.フィルターで捕集した塩分はガーゼと同様に蒸留水に溶出させることで計測した.

Fig. 2.4.10 に円筒型飛来塩分捕集器とサンプラーで計測した塩分量を濃度で比較する. 概ね一致する日も多い一方,円筒型飛来塩分捕集器による濃度がサンプラーに対し突出す る日も認められる. Fig. 2.4.11 は計測時間中の平均風速ごとに整理した,サンプラーに対 する円筒型飛来塩分捕集器で計測される塩分濃度の比を表す.円筒型飛来塩分捕集器から 得られる濃度が突出するような日はいずれも平均風速が小さいことが分かる.これは低風 速時における円筒型飛来塩分捕集器の捕集性能が十分ではないことを示唆しており,原因 の一つとして,サンプラーの強制吸引という能動的な捕集方法に対する,円筒型飛来塩分



Fig. 2.4.10 円筒型飛来塩分捕集器-エアサンプラーの計測塩分濃度比較



Fig. 2.4.11 平均風速に対する円筒型飛来塩分捕集器とサンプラーの濃度比

捕集器の受動的な塩分捕集機構が考えられる.静穏の状態を仮定すると,式 (2.4.1)の分母に相当する値はゼロとなるが,そのような状況でも海塩粒子のいくらかは自身の拡散によって円筒型飛来塩分捕集器内に侵入すると思われる.このとき,算出される濃度は無限大となり,現実的な評価とはいえない.ここまで極端ではなくとも低風速時には同じような現象が生ずると予想され,円筒型飛来塩分捕集器による濃度評価における課題といえる.

なお,2015年11月26日についてはサンプラーによる濃度の方が突出している.この日 は崖側からの風が卓越するという特異的な気象条件であったことが原因と考えられる.

2.5 ドライガーゼ法の気流特性と捕集効率

JIS で規定されるドライガーゼ法 (ガーゼ法) は土研式タンク法と並んで国内でよく使用される塩分捕集器具であり,使用実績も豊富である.ガーゼ法は,(i) 構造が簡単であること,(ii) 小型・軽量であること,(iii) 計測が容易であることなどから,橋梁の部位ごとに設置することで飛来塩分量の関係調査などにも利用されている [2.8].

ここで,既往の研究 [2.10] によると,飛来塩分量 Q [mg/dm²/day] と大気中塩分濃度 C [g/m³]との関係は,捕集面方向の風速成分 u_x [m/s] と捕捉率 γ_x を用いて次式で表される.

$$Q = 8.64 \times 10^5 \cdot \gamma_x \cdot C \cdot |u_x| \tag{2.5.1}$$

一般にはガーゼ法などの捕集器具によって飛来塩分量 O が与えられるので、それに基づ き大気中塩分濃度 C を算出することになる.逆に、数値解析やサンプラーによる捕集から 濃度 C が既知の場合も考えられる.しかし,風速 ux は観測あるいは数値計算による予測が 可能であるが、捕捉率 у は十分に明らかにされているとはいえない、捕捉率が表す効果と して,接近流が捕集装置自身の形状に影響され,塩分粒子とともに装置を迂回することや, ガーゼなどの捕集部そのものの性能が考えられる. したがって, 捕捉率を適切に評価しな ければ真の飛来塩分量や大気中塩分濃度を得ることはできないといえる.また、ガーゼ法 による飛来塩分量の観測実績は豊富であるので、真の飛来塩分環境の把握や大気中塩分の 濃度による表現を行ううえでもこれらを援用できることが望ましい. ガーゼ法の捕捉率を 検討した例として岩崎ら [2.11] や小畑ら [2.12], 壁面への付着率については広瀬ら [2.13] [2.14] があるが、いずれもサンプラーによる大気中塩分観測値や風況に関して明確な傾向 を見出すには至っていない.この理由として,ガーゼ法の捕捉率に風速依存性や風向依存 性が存在するためと予想される。特に塩分捕集部であるガーゼはメッシュ状の素材で、そ の傾向が強いと思われる.類似の研究として農学の分野では古くから網の防風効果が調べ られており、風速が大きいほど防風効果は小さく、また網目が大きくなることでも防風効 果は小さくなることが分かっている [2.15]--[2.17]. さらに,捕集装置の周りに形成される 流れ場は自身の構造によって風向ごとに異なると予想される.したがって、飛来塩分量や 大気中塩分濃度の評価に際しても風況に応じた捕集率を考慮すべきと考えられる.しかし、 ガーゼのような非常に細かい網目の物体周りの流れ場特性に関して十分に検討されている とはいえない.

本節では、風洞実験を行うことでガーゼ式捕集装置周りの風速特性を風向別に調べた. 得られた結果をもとに、ガーゼ法によって観測された捕集塩分量を大気中塩分濃度と風況 から推定する手法を提案する.

2.5.1 風洞実験による捕集装置周りの風況評価手法

飛来塩分を捕集する際には捕集装置自身が気流をかく乱するため、全ての塩分を捕集で きるわけではないと予想される.例えば、Fig. 2.5.1 は土研式捕集器具周りの気流を CFD で 定常解析した結果得られた風速ベクトル図 [2.9] であるが、接近流が箱体を迂回している



Fig. 2.5.1 土研式タンク周りの定常流れ場 (単位:m/s) Fig. 2.5.2 風洞の外観



(b) 上面図

Fig. 2.5.3 風洞の詳細 (単位:mm)

ことが分かる.したがって、ドライガーゼ法においても捕集装置周囲の気流特性をあらか じめ把握しておくが望ましいといえる.本研究では風洞実験によって接近流とガーゼ近傍 上流側および下流側の風速関係の把握を試みた.

本実験で使用した風洞は、京都大学大学院工学研究科桂キャンパス C1 棟地下に設置さ れた、Fig. 2.5.2 に示す吹き出し式エッフェル型室内回流式風洞である. 測定部は高さ 1,800 mm, 幅 1,000 mm (2,000 mm に変更可)、長さ 6,550 mm である. 詳細な構造は Fig. 2.5.3 に 示す. 風速は 0–30 m/s の範囲で連続的に変えることができる. また、模型設置位置付近で ほぼ一様な風速分布をとり、かつ平均風速 10.0 m/s 時の主流方向乱れ強度が 0.3% となるこ 0 2 4



Fig. 2.5.4 風洞実験で用いる風速計



Fig. 2.5.5 キャリブレーションの様子

とが確認されている.

風速計としてアネモマスタープロフェッショナル・スタンダード Model 6036 (KANOMAX, Fig. 2.5.4)を用いた. この装置は1方向からの0.01-30.0 m/s までの風速を先端のプローブで計測でき,得られたデータは USB 接続で直接コンピュータ内に取り込むことができる.本計測に先立ち Fig. 2.5.5 のように風速計のみを風洞内に設置し,風洞電動機の回転数と風速計の指示値とのキャリブレーションを行い,任意の風速で計測できるよう両者の関係を求めた.

計測に際して観測と同様のガーゼ部 100 mm 四方,外枠 150 mm 四方,厚さ 18 mm の捕 集装置を用意した.観測では捕集装置を橋梁からぶら下げて設置しているので,その影響 も再現するため固定に用いたコの字型のアルミ材を両端に取り付けた.厚さ方向の中央に 市販の医療ガーゼ (川本産業株式会社)を2重にして取り付けた.このとき,装置周りの 風速に影響しないよう,ガーゼにたわみができない程度の張力を与えている.

接近風に対する捕集装置の設置角度(偏角)は、ガーゼ面が風軸に直交する場合を0°と すると、0°、22.5°、45°、67.5°の4通りである.風速計測点はFig. 2.5.6に示すガーゼ上9 点のそれぞれ前後面で、ガーゼ直交方向ではなく風軸線上に風速計を配置した.これは風 速計が1方向しか計測できないことと、計測部の覆いの影響で適切な計測とならない可能



Fig. 2.5.6 風速計測点 (黒丸が計測位置,単位:mm)



Fig. 2.5.7 捕集器具と風速計の設置例

性を考慮したためである. なお,風向が大きくなるにつれて木枠の厚みの影響で計測位置 がガーゼ面から離れるが,各ケースでなるべくガーゼ面に近い点で計測するようにした. 0°のときに計測位置が最もガーゼに近づき,ガーゼ面と計測部との距離は約10mmとなる. また,67.5°のときは一部の計測点が木枠と被るため計測を省略した.上下流ごとに計測さ れた風速値の平均を面平均風速と考えた.

捕集器具は Fig. 2.5.7 に示されるように風洞内ほぼ中央にアルミ材を用いて支柱より支持した.支柱固定部を回転させることで任意の風向を再現できる. 接近風速は風速依存性を検討するため 1, 3, 5 m/s の 3 通りとした. 計測時間はそれぞれ 1 min で, その間の平均値を求めた.



⁽c) 接近風速 3 m/s, 風向 45°, 上流側

(d) 接近風速 3 m/s, 風向 45°, 下流側

Fig. 2.5.8 ガーゼに沿う面の風速コンター (単位:m/s)

2.5.2 風洞実験結果

Fig. 2.5.8 に実験より得られた風速コンターの一例を示す.いずれも捕集装置の下流側から見通した図で,ガーゼと同じ 100 mm 四方の範囲に相当する. (a) および (b) は風向 0° (ガーゼ面が風軸に直交) で接近風速が 3 m/s の場合で,9 つの計測点から作成したコンターなのでやや粗いが,前面では概ね等方的な分布であり,妥当な結果といえる.中心部でやや風速が大きいのは木枠の影響が最も小さいためと考えられる.一方,ガーゼ背面では



Fig. 2.5.9 風洞風速 (横軸) に対するガーゼ前後面での風速 (縦軸)(単位:m/s)



Fig. 2.5.10 風向 (横軸) 別の風洞風速に対するガーゼ前後面での風速比率 (縦軸)

中心よりも周囲の方で風速が大きい傾向にある.詳細は不明であるが,ガーゼと枠組みの 影響によって複雑な流れが形成されていると推測され,CFD などの利用によって詳細な流 れ場把握が必要と思われる.(c)および(d)は風向45°で接近風速3m/sの場合で,左側の 方が右側に対し上流側に位置している.前後面とも左側の方で風速が大きい傾向にあるが, 上流側ほど捕集装置の影響を受けないためと思われる.後面中央付近で風速が大きいのは 木枠で剥離した流れが再付着する位置であるためと予想される.

Fig. 2.5.9 は風洞風速とガーゼ上下流近傍の面平均風速との関係を風向別に示している. 風洞風速が大きくなるにつれてガーゼの前後面近傍の風速も大きくなるが,その変化は非 線形であることが分かる.したがって,ガーゼを含むドライガーゼ式捕集装置周りの風速 分布は,矩形について一般に見られる特徴とは異なり,接近風速に依存するといえる.このとき,前後面別・風向別に原点を通るように2次近似を施すと,風洞風速U[m/s]およびガーゼ近傍風速 u [m/s]を用いることで上流側の近似式は式 (2.5.2)-(2.5.5)で,下流側は式 (2.5.6)-(2.5.9)で表すことができる.

$$u_{up=0} = 0.0465U^2 + 0.1423U \tag{2.5.2}$$

$$u_{up_{22.5}} = 0.0385U^2 + 0.2832U \tag{2.5.3}$$

 $u_{up_{45}} = 0.0347U^2 + 0.5464U \tag{2.5.4}$

 $u_{up_{-67.5}} = 0.0347U^2 + 0.7639U \tag{2.5.5}$

 $u_{down \ 0} = 0.0533U^2 + 0.1063U \tag{2.5.6}$

 $u_{down \ 22.5} = 0.0621U^2 + 0.0603U \tag{2.5.7}$

 $u_{down-45} = 0.0522U^2 - 0.0403U \tag{2.5.8}$

$$u_{down_{67.5}} = 0.0076U^2 - 0.0009U \tag{2.5.9}$$

また, Fig. 2.5.10 は風洞風速に対するガーゼ前後面それぞれでの風速比率を示す.前面 では風向が大きいほど比率が大きく,逆に背面では小さくなり,同時に前面と背面の風速 差が大きくなることが分かる.前面では風向が大きくなるにつれて接近風がガーゼに沿う ように流下するため流れに対する抵抗が小さくなり,結果としてガーゼ前面近傍の風速が 大きくなると考えられる.それに伴いガーゼ直交方向の風速成分が小さくなるため,背面 の風速が小さくなるといえる.さらに,接近風速が小さいほど前面と後面の風速差が大き く防風効果が高いといえ,これは網に関する研究から得られた知見 [2.15]-[2.17] とも一致 することから,ガーゼが捕集装置周りの気流を複雑にしていると考えられる.このような 効果が飛来塩分の捕集時にガーゼの塩分捕捉率として現れると思われ,捕集量の評価に際 して適切に反映させる必要があると考えられる.

2.5.3 大気中塩分濃度と風況に基づくドライガーゼ法による捕集塩分量の評価

式 (2.5.1) のように大気中塩分濃度 C [mg/m³] と捕集塩分量 Q [mg/m²] を関連付ける際 には捕捉率が必要となるが、そのためにはガーゼ近傍風速の接近風速に対する非線形性や 風向別の特性を反映させる必要があることが前節より示唆される.ここではドライガーゼ 法で得られる塩分量の推定式を提案し、その妥当性や改善点について検討を行う.

ここで、ガーゼへの付着塩分量について、ガーゼ前後での風速と後述の橋梁表面への付 着塩分量計算に用いる式 (3.2.1) に基づいて、次式のように表すことが可能と考えられる.

(2.5.10)

$$Q = CU_{up}\Delta t - \alpha CU_{down}\Delta t + \beta C \int_{0}^{\Delta t} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} dt$$

右辺第1項はガーゼ面への塩分の衝突フラックスを表しており,ガーゼ上流側の風速 U_{up} [m/s] で決まる.第2項は塩分を含む接近風がガーゼを通過する効果を表しており,ガー ゼ下流側の風速 U_{down} [m/s] とその際の塩分捕捉の程度を表す係数 α で決まる.ガーゼ上流 側およびガーゼを通過する風速と,付着塩分量および通過塩分量との関係が1対1である かは不明であり, α の決定にはさらなる検討が必要であるが,本研究では簡単のため $\alpha=0$ または1として,基礎的な影響を考えることにした.第3項は大気中の海塩粒子の拡散に よる沈着であり,拡散係数 D [m²/s] と沈着量に関する捕捉率 β で表される.ここで,拡散 による沈着の挙動について速度の概念を導入すると,通常の風の流れに対し非常に小さい と予想される.また,拡散による沈着量自体が慣性衝突に起因する量に対して小さいこと からも, $\beta=1$ としても影響は小さいと思われる.なお,拡散係数として空気の動粘性係数 $D = 1.5 \times 10^{-5}$ [m²/s] を採用した.

ここで、U_{down}についてはガーゼ直下で計っているため、計測値をそのまま用いてガーゼ を通過する風として評価しても問題はないと思われる.しかし、衝突フラックスに関わる U_{up}の評価位置にはさらなる議論が必要である.すなわち、捕集装置から遠く離れた点の風 速値は捕集装置の影響を受けておらず、相対的に大きいものの、その一部は捕集装置を迂 回するため、ガーゼに衝突する塩分量を適切に表すことはできないと思われる.一方、ガ ーゼ直前の風速値はそのままガーゼに向かう風を表すといえるが、捕集装置の影響で風速 は大きく低下しており、海塩粒子の慣性によって付着が生じることを念頭に考えると、こ れも適切な評価とはならないと予想される.そこで本研究では、捕集装置の影響を受けて いない風速として観測による風速値を用いる場合と、風洞実験で得られたガーゼ前面での 風速値を用いる場合とで付着量の検討を行い、評価点に関する知見を得ることを目指した.

ガーゼ法の観測点近傍での気象観測を開始したのは 2016 年 6 月 29 日なので,それ以前 の捕集塩分量について検討を加えることができない.そのため,Table 2.2.1 に示した関係 がいずれの期間にも共通すると仮定し,任意の期間における桁下での風況時系列データを 算出した.また,このような関係を用いた場合と桁下での観測値をそのまま用いた場合に 得られるガーゼへの付着塩分量 (2016 年 6 月 29 日~7 月 20 日)の比を算出し,その他の 期間にも適用できるものと仮定の上で計算結果を補正した.なお,大気中塩分濃度は円筒 型飛来塩分捕集器で得られた値を用いたので,対象期間ごとに一定値となる.

8期間におけるドライガーゼ法の観測値と上記手法による計算値を Fig. 2.5.11 に示す. 付着量は規格に従い 2 dm² 当たりの量として表した. 図中には 4 種類の計算値を示してお り,その概要は Table 2.5.1 で説明する. ガーゼを通過する塩分の捕捉に関して, α=1 の場 合は α = 0 に比べて約 1-2 割程度の塩分損失が認められた. 期間ごとに損失量や割合が異 なるのは,風速や風向によって塩分を含む風のガーゼ通過率が異なるためといえる. 岩崎 ら [2.11] がある 2 期間について求めたガーゼそのものの塩分捕捉率は 0.68 と 0.83 である から,断定はできないものの,本研究の手法でガーゼを通過する塩分量を評価することが できる可能性がある. 衝突フラックスを決める風速の評価位置について,観測による接近



Fig. 2.5.11 ドライガーゼ法による飛来塩分観測値と計算値 (単位:mdd)

Table 2.5.1 ドライガーゼ法による捕集塩分量推定における計算条件

Head	U_{up}	α
Calc. 1	Wind speed observed	0
Calc. 2	Wind speed observed	1
Calc. 3	Wind speed modified by experiment	0
Calc. 4	Wind speed modified by experiment	1

風速を用いた場合は風洞実験を踏まえた値を利用した場合に対し約2倍の付着量となった. 桁下空間では多くの場合で風向が0°または22.5°であり、このような風軸とガーゼ面が直 交に近いときはガーゼ近傍での風速逓減率が高いことが原因と考えられる.

計算値と観測値を比較すると、両者のオーダーは概ね一致したが、大小関係は期間によ って様々である.桁下空間の風況補完方法の影響もあり、いずれの計算値も観測値より小 さい期間も存在するが、一方で観測による接近風速を用いると観測値より大きく、実験を 踏まえると観測値より小さくなるような期間も複数見られる.したがって、適切な位置の 風速を用いて衝突フラックスを評価することで、観測値を精度よく再現できる可能性があ る.ただし、適切な風速評価位置はガーゼ周りの流れの非線形性のために接近風速によっ て異なると考えられる.したがって、風洞実験によってより詳細に捕集装置周りの風速を 計測するとともに、CFDによってそれらを補完しつつ、流れ場および付着特性の評価を行 うことが必要といえる.

実験と計算結果を通じて考えると、風が捕集装置周りを迂回することによる塩分損失の 方が、ガーゼ自体の捕捉率に対し大きな影響を持つと考えられる.逆に、迂回の影響も踏 まえて上流側の風速評価位置を決定できれば、おおまかな付着量を再現できる可能性があ るといえる.ただし、本研究の検討は捕集装置周りに障害物が存在しないことを前提とし ているため,得られた関係が橋梁壁面の近傍に設置した捕集装置に対しても成り立つかは 不明である.

また、今回の実験はガーゼと木枠を一体とした捕集装置を対象として行ったが、木枠あ るいはガーゼだけの場合について同様の実験を行い、各々の特性も把握しておくことが望 ましいと考えられる.さらに、円筒型飛来塩分捕集器で得られた大気中塩分濃度を利用し ているが、これは天鳥橋上流側での観測値である.本研究では橋梁周りの濃度を一定と考 えて各種の計算を行っているが、実際に桁下で濃度計測を行う必要がある.加えて、ガー ゼの前面と背面で大気中塩分濃度が必ずしも保たれているとはいえないため、その影響の 検証も必要である.一方、サンプラーによる観測値の利用や、領域気象モデルによって時 系列データを算出することでより精度よい検討が可能になると思われる.

2.6 本章のまとめ

対象橋梁地点の腐食環境を把握するための現地観測として,気象要素,飛来塩分量,大 気中塩分濃度,および橋梁への付着塩分量の計測を行った.さらに,ドライガーゼ法の捕 集効率を検証するとともに捕集塩分量と大気中塩分濃度の関連付けを目指し,風洞実験に よる捕集装置周りの流れ場評価,および捕集塩分量の推定式の提案とその精度について検 討を行った.

- 対象橋梁地点で観測された風向・風速より,対象橋梁背後の崖の影響で海側からの風が卓越することが確認された.したがって,対象橋梁は常に海塩粒子を含んだ風にさらされ,非常に厳しい腐食環境にあるといえる.一部の部材に雨水や飛来塩分の蓄積が原因と考えられる損傷が確認されており,腐食環境の厳しさを示唆している.また,橋梁自身や周辺地形の影響のために橋梁の上流側と桁下空間とでは風況が異なり,桁下ではごく限られた風向に集中して風が吹くことが明らかとなった.
- 橋梁部位別の付着塩分量は既往の研究と同様の傾向を示しており、下フランジの上面に付着が集中していた.ただし、期間によっては下フランジ下部の付着量の方が多く、 橋梁周りの大気の流れ場の詳細な調査や、塩分を含んだ水滴の回り込みなどを検証す る必要がある.また、ウェブ部では下方ほど値が大きく、原因として海塩粒子に作用 する重力の効果や、結露水などによる付着塩分の移動が考えられる.
- 新たに開発した円筒型飛来塩分捕集器は、大気中塩分濃度の季節変動を再現できるほか、土研式タンク法やドライガーゼ法と概ね同様の捕集塩分量を示すことから、一定の捕集精度を有すると考えられる.そのうえで土研法による台風時の過剰捕集を抑制するなど、大気中の塩分環境を従来よりも精度よく評価することが可能と予想される.また、大気中の塩分環境を濃度として評価することに成功したので、これを橋梁部位別の付着塩分量の数値計算に利用することが可能である.一方、塩分を含む大気を強制吸引するサンプラーとの比較より、円筒型飛来塩分捕集器は低風速時に大気中塩分濃度を過大評価する可能性が示唆された.そのため、低風速時における大気中塩分濃度の補正方法について検討する必要がある.
- ドライガーゼ法の捕集装置周りの気流特性把握を目的として、風洞実験を行うことで 接近風向別に捕集装置ガーゼ面前後の風速を計測した.ガーゼ前後の風速値の比較か

ら、風速が大きいほどガーゼの防風効果が小さく、網に関する既往の研究と合致する ことが示された.また、接近風向がガーゼ面と平行になるにつれて風がガーゼ面に沿 って流下する成分が増すので、ガーゼ前面の風速は大きくなり、逆に背面では小さく なることが分かった.さらに、接近風速とガーゼ前後面の風速の関係は非線形である ことが明らかとなった.したがって、ドライガーゼ法による飛来塩分捕集効率を適切 に評価するためには、風速および風向に応じた捕集効率を考慮する必要がある.

 大気中塩分濃度と風向・風速からドライガーゼ法による捕集塩分量を推定する手法を 開発した.提案手法は主に、(1)上流側風速に基づく大気中塩分のガーゼへの付着、
 (2)ガーゼ前後面の風速差に基づくガーゼ自体の塩分捕捉率の2つから成る.提案手 法は観測値のオーダーを十分に再現することが示された.したがって、大気中塩分の ガーゼへの衝突フラックスを適切に定めることで、定量的な予測精度を向上させるこ とが可能と考えられる.そのためには、捕集装置周りの気流特性を風洞実験や CFD に よって詳細に把握することが有効と考えられる.また、領域気象モデルによる大気中 塩分濃度の計算値を利用し、濃度の空間的・時間的変動の影響を考慮する必要がある. なお、ガーゼ背面の風速値を利用することで約1-2割の塩分損失を再現しており、既 往の研究との比較からガーゼの塩分捕捉率を説明できる可能性が示唆された.

参考文献

- [2.1] 建設省土木研究所:飛来塩分量全国調査 (IV) 飛来塩分量の分布特性と風の関係 -,土木研究所資料第 3175 号, 1993.
- [2.2] 日本工業規格: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, JIS Z 2381, 1998.
- [2.3] 野口泉,大塚英幸,秋山雅行,酒井茂克,加藤拓紀:フィルターパック法による亜 硝酸ガス濃度の測定,大気環境学会誌,第42巻第3号,162-174,2007.
- [2.4] 国土地理院: 地図地理院 (電子国土 Web), http://maps.gsi.go.jp/, 2013.
- [2.5] International Organization for Standardization: Preparation of steel substrates before application of paints and related products Tests for the assessment of surface cleanliness
 Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts, ISO 8502-9, 1998.
- [2.6] 日本工業規格:素地調整用ブラスト処理面の試験及び評価方法, JIS Z 0313, 2004.
- [2.7] 武邊勝道,松崎靖彦,大屋誠,安食正太,古川貴士,麻生稔彦:耐候性鋼橋梁の表 面状態と付着塩類量の関係,土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 2, 172-180, 2007.
- [2.8] 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡: 耐候性鋼橋梁の断面部位別の 腐食特性とその評価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, 297-311, 2010.
- [2.9] 野口恭平,姜詠,奥田慧,倉田直弥,白土博通,八木知己,森下尊久,田中雄三: 海塩粒子付着量の予測精度向上に関する基礎的研究,構造工学論文集,Vol. 59A, 585-595, 2013.
- [2.10] 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.780,71-86,2005.
- [2.11] 岩崎英治,小島靖弘,高津惣太,長井正嗣:塩分捕集器具の設置方向と飛来塩分の 関係,構造工学論文集,Vol. 56A, 616-629, 2010.
- [2.12] 小畑誠,村上太郎:腐食環境評価のための浮遊塩分量調査とその数値予測について, 構造工学論文集, Vol. 60A, 596-604, 2014,
- [2.13] 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 塩分量推定のための基礎的検討,構造工学論文集,Vol. 60A, 605-612, 2014.
- [2.14] 坪倉佑太,広瀬望,武邊勝道,大屋誠:山陰地方における大気中の塩分濃度計測に 基づく鋼材への塩分付着率の推定,構造工学論文集,Vol. 62A, 549-558, 2016.
- [2.15] 鈴木清太郎,坂上務:網目と模型防風林の防風効果について,農業気象,第4巻, 5-6,1948.
- [2.16] 谷信輝:網の防風効果について、農業気象、第15巻、第3号、6-10、1960.
- [2.17] 真木太一: 防風網に関する研究 (4) 風洞実験による種々の防風網付近の風速分布特
 性,農業気象,第38巻,第2号,123-133,1982.

第3章 数値計算による橋梁部位別の付着塩分量評価

3.1 概説

土木研究所が実施したような全国各地での飛来塩分量測定 [3.1] は、地形や土地利用の 違いによる局所性には留意すべきではあるが、その地点の代表的な腐食環境を把握するう えでは大変有用な情報と思われる.一方、橋梁表面の付着塩分量が部位別に異なることは 多くの観測 [3.2] [3.3] や実験 [3.4] [3.5]、および数値計算 [3.4] [3.6]-[3.8] によって指摘 されている.これは橋梁自体の形状や地面などの周辺地形の影響を受けることで、橋梁断 面周りの風の流れが個々の部位付近によって異なるためと考えられる.したがって、例え ば橋梁の上流側のような、ある代表点における飛来塩分量だけでは、部位別の腐食環境を 十分に把握することはできないと考えられる.

橋梁の劣化因子である付着塩分量を部位別に特定できれば,維持管理の頻度や注視すべき部位,塗膜の厚さなどを決定する上で有用な情報になると思われる.特に,付着塩分量の評価を実測ではなく数値計算に基づく予測から実現することができれば,人的・経済的・時間的コストの点からも効果的と考えられる.上に例示した既往の数値計算による橋梁表面の付着塩分量評価手法は,流体である大気と固体である海塩粒子の固気二相流解析や,流体の支配方程式とともに濃度の輸送方程式を解くことで付着量の評価を行っている.大気中の海塩粒子は風に乗って橋梁各部位へと輸送されることから,橋梁部位ごとの局所的な風況に基づき付着塩分量の評価を行うことは妥当な手法といえる.しかし,より簡便な付着塩分量評価を実現するためには,風の流れ場のような最低限の情報からの付着量予測が望ましい.さらには,橋梁断面周りの流れ場も橋梁形状や周辺地形に応じた指標化を施し,個々の橋梁に対して上述のような複雑な計算を行わずに済むことが理想的ではある.

本研究ではその第1段階として,前章に示した天鳥橋 (和歌山県西牟婁郡すさみ町国道 42 号上,3 主 I 桁鋼橋,ふっ素系塗装樹脂)を対象橋梁に選定し,数値計算によって部位 別の付着塩分量を評価する手法の検討を行った.また,降雨強度と橋梁表面に付着した塩 分洗浄効果の関係を実験的に検討し,付着塩分量評価に組み込むことに成功したので,本 章で併せて紹介する.

以下に本章の構成を示す.

3.2節では、橋梁部位別の付着塩分量を評価するためのモデルを提案する.さらに、提案 モデルを利用するための付着計算アルゴリズムを示し、付着計算に際し必要となる入力や パラメータについて確認する.3.3-3.5節では、以降の検討に利用する数値計算手法を概説 する.3.2節と3.3節はそれぞれ、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)によ る定常流れ場および非定常流れ場の計算手法を示す.3.5節は算出された流れ場中におけ る粒子挙動評価法、いわゆる粒子追跡法について説明する.3.6節では、対象橋梁と簡易的 に模擬された周辺地形周りの定常流れ場計算の概要と、算出された流れ場の特性について 検討する.3.7節では、提案モデルに必要なパラメータ決定法を示す.3.8節では、雨水に よる付着塩分の洗浄を評価する実験の概要と、付着塩分量計算に適用するための洗浄効果 の定式化について示す. 3.9 節では,上述の要素技術を組み合わせて実際に対象橋梁の部位 別付着塩分量の推定を行い,提案モデルの妥当性や改善点について考察する.最後に 3.10 節において,本章のまとめを記す.

3.2 提案する橋梁表面の付着塩分量評価モデル

本研究で提案する付着塩分量評価モデルは2つの塩分付着機構の和から成る.1つは塩 分を含んだ大気が風によって移動し、その慣性で壁面に付着する「慣性衝突による付着」 である.これには塩分粒子に作用する重力の影響も含まれる.もう1つは大気中と壁面間 の濃度差に起因する「拡散による沈着」である.提案モデルは式(3.2.1)のように表され、 第1項が慣性衝突による付着、第2項が拡散による沈着を表す.2章でドライガーゼ法の 捕集塩分量評価に用いた式(2.5.10)はこの式を基に考案したものである.

$$Q = C\left(V_n + V_g \cos\theta\right) \Delta t + C \int_0^{\Delta t} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} dt$$
(3.2.1)

ここで, *Q*: 付着塩分量 [mg/m²], *C*: 大気中塩分濃度 [mg/m³], *V_n*: 対象部位近傍における壁面直角方向風速成分 [m/s], *V_g*: 塩分粒子 (ここでは海塩粒子)の終端速度 [m/s], *θ*: 水平面に対する部材の傾斜角, Δ*t*: 刻み時間 [s], *D*: 拡散係数 (20°C および 1 気圧における空気の動粘性係数 1.5 × 10⁻⁵ m²/s) である.

本章における付着塩分量評価に際して、各パラメータは次のように与えられる、大気中 塩分濃度 C には円筒型飛来塩分捕集器を用いて得られた値 (2 章)を橋梁断面周りでは一 定として適用する.壁面直角方向風速成分 V_nは,橋梁断面周りの無次元定常流れ場 (3.6 節)と観測による接近風速 (2章)から評価することができる.大気中塩分濃度と風速を掛 け合わせることで単位時間・単位面積当たりの塩分の質量フラックスとなり、本論文では これを大気中の塩分の壁面への衝突フラックスとも呼ぶ.終端速度 Vgは粒子に作用する重 力と空気の抵抗力のつり合いから求めることができ、3.7節に示す粒子の諸元を仮定する と 0.011 m/s となり, Stokes の重力沈降速度式と概ね一致する [3.9]. 時間刻み Δt は現地観 測で得られる気象要素のデータ間隔に合わせて 600 s である. したがって, 600 s ごとの付 着塩分量を算出し、それらを対象期間に渡り合算することが本研究の付着塩分量評価にお ける基本的な考え方となる.ただし、大気中塩分濃度は約1-2か月の観測期間に対し1つ の値しか得られないので、その間では一定値とした. また、定常流れ場を利用することか らも大気中塩分濃度の時間変動や空間変動は考えないが、流れの非定常性に由来する濃度 の時間・空間的な変動は今後の課題として検討が必要である. 拡散係数 D について, ここ で想定しているのは大気中と壁面間の濃度拡散なので、その挙動には流体の基礎的な物性 値である空気の動粘性係数が支配的と考え,拡散係数として使用した.なお,第2項の被 積分部は壁面への沈降速度を表しており、無限鉛直平面を仮定し、境界条件としてその面 上での濃度をゼロとした1次元の拡散方程式を解くことで得られる [3.9].

なお、大気中の塩分が部材表面に付着するときの付着率がしばしば問題となり、実際に

54

付着率を測定しようとする試みも存在する [3.10]. 一方,塩分は潮解性を持つため基本的 には湿った状態と考えられるので、ここでは簡単のためにも付着率は 100%とし、壁面に接 触した粒子は表面で反発することなく全てが付着すると考えた. このように付着塩分量を 求めた後に、雨水による付着塩分の洗浄を反映させ、残存塩分量の評価を行う.

提案式を用いるときに問題となるのが,壁面直角方向風速成分 V_nを壁面からどれだけ離れた位置で評価するかである.この手法では付着塩分量が大気中の塩分の壁面への衝突フラックスに大きく依存するので,評価点を適切に与えなければ付着量の予測を精度よく行うことができないといえる.壁面直角方向風速成分,すなわち大気中塩分の壁面への衝突フラックスの評価位置を決定するための手法は 3.7 節にて述べる.

3.3 定常流れ場計算の支配方程式と計算アルゴリズム

流れを特徴づける無次元数として、慣性項と粘性項の大きさの比であるレイノルズ数 Re が重要である.例えば、角柱や円柱周りの流れ場特性はレイノルズ数の増減に応じて変化 することが知られている [3.11]. このレイノルズ数を用いると、十分な格子解像度を与え て乱流の完全なシミュレーション (Full turbulence simulation, FTS) を行うためには、少な くとも Re^{9/4}のオーダーの格子数が必要となる.しかし、工学や自然科学で扱う乱流場のレ イノルズ数は一般に大きいことから、このような計算を実行することは事実上不可能と考 えられる.したがって、直接解く流れとそれ以外のモデル化を施す流れとに分けることが 必要となる.

このとき、定常流れまたは乱れに対し非常にゆったりとした非定常流れのみを解こうと すると、いわゆる乱流の全てがモデル化の対象となる.具体的には、ナヴィエーストーク ス式にレイノルズ平均を施すことで得られるレイノルズ平均モデルを解くことになる.こ のような数値計算を RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes または Reynolds-averaged numerical simulation) といい、以下に支配方程式や本研究で採用する計算アルゴリズムを概 説する [3.12].

3.3.1 支配方程式

支配方程式の表記法は書籍や文献によっていくつかあるようだが、当然ながらその本質 は全く同等である.例えば、梶島 [3.12] に従えば、非圧縮実在流体の支配方程式であるナ ヴィエーストークス方程式はデカルト座標系で式 (3.3.1) のように書くことができる.下 付き添え字は Einstein の総和規約に従う.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2v D_{ij} \right)$$
(3.3.1)

vは動粘性係数 [m²/s] である. D_{ii}はひずみ速度テンソルで, 次式で表される.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(3.3.2)

式 (3.3.1) にレイノルズ平均を施すと, RANS 方程式である式 (3.3.3) が得られる. 文字 に付されたバーは平均値成分であることを示す.

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_i \overline{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u'_i u'_j} + 2\nu \overline{D}_{ij} \right)$$
(3.3.3)

3.3.2 乱流モデル

このように、右辺第2項に風速変動成分であるレイノルズ応力が現れるが、これに何ら かのモデル化を施す必要があり、ブシネスクの渦粘性モデルを用いると、次のようになる.

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - 2\nu_T \overline{D}_{ij}$$
(3.3.4)

kは乱流エネルギー $[m^2/s^2]$, v_T は渦動粘性係数 $[m^2/s]$ である. なお,右辺第1項は縮約 をとるときに数学的に必要となる項である. したがって,渦動粘性係数に適当なモデルを 与えることで, RANS 方程式を解くことが可能となる. このようなモデルを乱流モデルと いい,よく使われるモデルとして $k-\epsilon$ モデルが存在し,渦動粘性係数を次式のように表す.

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.3.5}$$

 ε はエネルギー散逸率 ε [m²/s³], C_{μ} は定数である.以上より, RANS 方程式は式 (3.3.6) と表すことができ,式 (3.3.7)の連続式,式 (3.3.8)の乱流エネルギーkの輸送方程式,式 (3.3.9)のエネルギー散逸率 ε の輸送方程式と併せることで解くことが可能となる.

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_i \overline{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2(\nu + \nu_T) \overline{D}_{ij} \right\}$$
(3.3.6)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{3.3.7}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{v_T}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}$$
(3.3.8)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \left(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{v_T}{\sigma_{\varepsilon}} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\}$$
(3.3.9)

ここに示した乱流モデルは特に標準 k-ε モデルと呼ばれるものである.各輸送方程式の 第1項は時間発展項であり,定常流れを対象とする通常の RANS の計算ではゼロとなる. なお,形式的には式 (3.3.6) は式 (3.3.3) に対し,拡散係数として動粘性係数に渦動粘性係 数が加わったものとみなせ、レイノルズ応力の非等方成分が表れている.レイノルズ応力 の等方成分は式 (3.3.10)のように圧力項に加わる.

$$\overline{P} = \overline{p} + \frac{2}{3}k \tag{3.3.10}$$

Pkは平均流による乱流エネルギーの生産率を示す項であり、式 (3.3.11) で表される.

$$P_k = 2v_T \overline{D}_{ij} \overline{D}_{ij}$$
(3.3.11)

以上の式中の定数群は次式の通りである.

$$C_{\mu} = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.3$$
 (3.3.12)

3.3.3 壁領域での取り扱い

標準 $k-\varepsilon$ モデルは高レイノルズ数型のモデルといわれる. これは接近風が小さい時に適用することができないということではなく,相対的に風速 (つまりレイノルズ数)が小さくなる壁面近傍において適切な計算ができないことを意味する. 壁面付近では粘性の効果が大きくなるため,エネルギーk を保有する変動のスケールとエネルギー散逸 ε を担う変動のスケールを分離することができなくなり, kの方程式と ε の方程式が独立ではなくなるからである. したがって, $k-\varepsilon$ モデルを使わないように壁領域の計算を簡略化するか,壁領域の計算も可能なように $k-\varepsilon$ モデルを修正する必要がある.

ここでは、壁面近傍のメッシュを削減するためにも、壁関数として対数則を適用した. これは壁面に接するセルを対数領域 (摩擦速度 u_r で無次元化された第1セルの壁面からの 距離 y_p ⁺がおよそ>30 かつ<200 となる、上限は文献による) に配することで、粘性底層や緩 和層のような壁面近傍の複雑な流れの処理を省略するものである.対数領域での流速分布 は式 (3.3.13)のように書ける.式中の定数は $\kappa = 0.41$ (カルマン定数), B = 5.5 とした.

$$u_{p}^{+} = \frac{1}{\kappa} \ln y_{p}^{+} + B \tag{3.3.13}$$

ここで、 $u_{p}^{+} = u_{p}/u_{\tau}$ 、 $y_{p}^{+} = y_{p}u_{\tau}/v$ で、それぞれ風速と壁面からの距離についての無次元数 である.また、第1セルでの乱流エネルギーとエネルギー散逸率をそれぞれ k_{p} および ε_{p} と 表すとき、壁近傍では乱れのエネルギー生成と散逸がつり合うという局所平衡と、レイノ ルズ応力一定の領域であることを仮定すると、次のようになる.

$$k_{p} = \frac{u_{T}^{2}}{\sqrt{C_{\mu}}}$$
(3.3.14)

$$\varepsilon_p = \frac{u_T^3}{\kappa y_p} \tag{3.3.15}$$

粘性低層や緩和層も含めたモデル化として、次のスポルティング (Spalding) 則 [3.13] を用いることができる.このとき、第1セルが $y_p^+ < 30$ の領域に位置しても構わないが、 第2セルが壁面に近いと結局 $k-\epsilon$ モデルが破綻するため、その利用には注意を要する.

$$y_{p}^{+} = u_{p}^{+} + e^{-\kappa B} \left[\exp(\kappa u_{p}^{+}) - 1 - \kappa u_{p}^{+} - \frac{(\kappa u_{p}^{+})^{2}}{2} - \frac{(\kappa u_{p}^{+})^{2}}{6} \right]$$
(3.3.16)

3.3.4 計算アルゴリズム

本研究では Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE) 法を用いて反復 計算を行った. SIMPLE 法は,流体の運動方程式と連続式を,運動方程式と圧力方程式の 形へと変換したうえで,それらを解く手法である. 3.6 節の計算では,緩和係数を圧力につ いては 0.2,風速,乱流エネルギーおよびエネルギー散逸率については 0.4 を与えた. 3.7 節の計算ではいずれも 0.1 とした.本研究ではコロケート格子を用いた差分を行っており, 勾配項に 2 次精度中心差分,発散項に 1 次精度風上差分,ラプラシアン項に 2 次精度中心 差分を採用した.連立 1 次方程式のソルバとして圧力方程式には対角不完全コレスキー分 解による代数幾何マルチグリッドソルバを,その他の方程式にはガウス・ザイデル法によ る緩和法ソルバを用いた.

数値解法の手順として、最初に境界条件の設定を行い、離散化方程式を解いて中間速度 を求め、セル境界でのフラックスを修正する.次に圧力方程式を解き、セル境界での質量 フラックスを修正する.この時の渦動粘性係数の値は、その前の反復計算の最後の乱流エ ネルギーとエネルギー散逸率の値より算出し、その後に乱流エネルギーとエネルギー散逸 率の輸送方程式の反復計算を行う.これらの方程式の反復計算が完了したら渦動粘性係数 を新たに算出する.そして新しい圧力場から速度および境界値を順に更新し、収束するま でこの反復計算を繰り返す.圧力、風速、乱流エネルギー、エネルギー散逸率の絶対残差 が 10⁻⁸以下 (3.6 節)または 10⁻⁵以下 (3.7 節)となることを収束条件とした [3.14] [3.15].

3.4 非定常流れ場計算の支配方程式と計算アルゴリズム

乱流の比較的大きな構造を直接計算の対象とし、それより細かい乱れのみにモデル化を 施す計算をラージエディシミュレーション (Large eddy simulation, LES) という. ナヴィエ ーストークス式にレイノルズ平均を施す RANS とは異なり、空間的に大小のスケールを分 離するためのフィルターをかけることになる. また、必然的に非定常流れを解くことにな る. 以下に支配方程式や本研究で採用する計算アルゴリズムを概説する [3.12].

3.4.1 支配方程式

LES の基礎方程式には、ナヴィエーストークス方程式にフィルターをかけて粗視化した
ものが利用される.このとき,格子より大きいグリッドースケール (GS) の渦を直接解き, それより小さいサブグリッドスケール (SGS) の渦をモデル化する.このような呼び名は, 一般にフィルター幅は格子幅程度であることに由来する.フィルターをかけた非圧縮流れ の連続式と運動方程式はそれぞれ式 (3.4.1) および式 (3.4.2) と表される.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\tau_{ij} + 2\nu \overline{D_{ij}} \right)$$
(3.4.2)

上付きのバーは平均ではなくフィルター処理を意味することに注意が必要である. \overline{D}_{ij} は ひずみ速度テンソルの GS 成分で、次の通りである.

$$\overline{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right)$$
(3.4.3)

これらの式を用いれば SGS 渦を解く必要はないが,フィルターで粗視化された流れにお ける残余の応力と呼ばれる τ_{ij}を与える必要があり,次式のように SGS 渦の効果を表す. この式の左辺の量は計算できないことから,右辺のように 2 項の差を考え,これに対しモ デル化を施す必要がある.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i' u_j'} - \overline{u_i} \overline{u_j}$$
(3.4.4)

3.4.2 乱流モデル

流れ場をフィルターで分離すると、運動エネルギー $\overline{k} = \overline{u_i u_i}/2$ は GS 成分 $k_{GS} = \overline{u_i u_i}/2$ と SGS 成分 $k_{SGS} = (\overline{u_i u_i} - \overline{u_i u_i})/2$ とに分けることができる.このとき、GS エネルギーの保存式 は次式のように書くことができる.

$$\frac{\partial k_{GS}}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial k_{GS}}{\partial x_j} = \tau_{ij} \overline{D}_{ij} - \overline{\varepsilon}_{GS} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u}_i \tau_{ij} - \frac{\overline{p}\overline{u}_j}{\rho} + v \frac{\partial k_{GS}}{\partial x_j} \right)$$
(3.4.5)

右辺第1項が SGS エネルギーksGs への輸送率を表す. これを用いると SGS エネルギーの保存式は次式のようになり、このとき右辺第1項に生成率として現れる.

$$\frac{\partial k_{SGS}}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} = -\tau_{ij} \overline{D}_{ij} - \overline{\varepsilon}_{SGS} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u}_i \tau_{ij} - \frac{1}{2} \left(\overline{u_i u_i u_j} + \overline{u}_j \overline{u_i u_i} \right) - \frac{\overline{pu_j} - \overline{pu_j}}{\rho} + v \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} \right)$$
(3.4.6)

上式において,右辺第1項の生成率と第2項の SGS エネルギーの散逸が局所的につり合うと仮定し,さらに渦粘性近似を施すと,次式が得られる.

$$\varepsilon_{SGS} = 2v_e \overline{D}_{ij} \overline{D}_{ij}$$
(3.4.7)

さらに,次元を考慮し,かつフィルター幅Δを代表長さとすると,SGS 渦動粘性係数は 次式で表される.フィルター幅は格子体積の3乗根とした.

$$v_e = (C_s \Delta)^2 \left| \overline{D} \right| \tag{3.4.8}$$

これが Smagorinsky モデルと呼ばれるもので、LES における代表的な乱流モデルである. 式中の $|\overline{D}|$ は GS ひずみ速度テンソルの大きさで、次式より得られる.

$$\left|\overline{D}\right| = \sqrt{2\overline{D}_{ij}\overline{D}_{ij}} \tag{3.4.9}$$

 C_s はモデル中の唯一の無次元定数で Smagorinsky 定数と呼ばれ,理論値は 0.173 とされる. これは一様等方乱流では実験値によく一致するといわれるが,せん断乱流に対しては 0.10–0.15 程度への修正が必要とされる. そのため,本研究では $C_s = 0.12$ とした.

3.4.3 壁領域での取り扱い

GS 速度について壁面速度ゼロの境界条件を与えると,壁面では乱れの GS 成分もゼロと なるはずであるが,式 (3.4.8) より, GS 速度に勾配があると SGS 乱れが生じてしまう.し たがって,モデルを修正するために,次式のように減衰関数を導入する.

$$v_e = \left(C_s f_s \Delta\right)^2 \left|\overline{D}\right| \tag{3.4.10}$$

減衰関数 f_s は van Driest 関数と呼ばれ,次式で表される.

$$f_s = 1 - \exp\frac{-y^+}{A^+} \tag{3.4.11}$$

 A^+ は無次元定数で,通常は約25が与えられる. $y^+ = yu_r/v$ は壁面からの無次元距離である.壁面摩擦応力 τ_w および摩擦速度 u_r については,計算格子が十分に細かければ壁面近接点は粘性低層内にあると考えられるので,乱流応力が無視でき,次式のように表せる.

(3.4.12)

$$\tau_{w} = \rho u_{\tau}^{2} = \mu \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right|_{wall}$$

なお, LES では乱れの大部分は GS 成分として直接解いており,式 (3.4.11) が関わるの は残余の応力とされる SGS 成分なので,その適用においては RANS ほど気を配る必要は ないともいえる.

3.4.4 計算アルゴリズム

Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) 法を用いた反復計算を行った.まず境 界条件を読み込み,離散化された運動量方程式から格子の中心速度場を計算する.次にセ ル単位で質量フラックスを計算する.その後,圧力方程式を解き,得られた圧力から質量 フラックスと速度場を修正して,連続条件を満たす値に近づける.再度離散化された運動 量方程式を解くところまで戻り,繰り返し計算を行うことでより正確な値に近づける.本 研究ではその繰り返し回数を2回とした.反復が終われば次のタイムステップに移行して 計算する.また,本研究ではコロケート座標を用いた差分法により離散化を行った.粘性 項には2次精度中心差分,移流項には1次精度風上差分,時間項には2次精度の陰的オイ ラー法を用いた [3.14] [3.15].

3.5 粒子追跡法による非定常流れ場での付着量計算

本研究では大気中塩分濃度に基づく橋梁部位別の付着塩分量評価を考える.ここで,大 気中塩分濃度は海塩粒子の集合として表されるものである.実際の海塩粒子の壁面への付 着現象は粒子個々の挙動に基づくと考えられるので,非定常流れ場における粒子追跡法に よって部材表面への付着量を精度よく評価できると思われる.以降の検討に備えて,本研 究で採用する粒子追跡法の概要を示す.なお,本研究では非定常流れ中の粒子挙動を考え ること,移流に比べ拡散の効果は小さいと考えられることから,下記のうち移流過程のみ を利用するが,参考までに粒子の拡散挙動の考え方も併せて示す.

3.5.1 移流過程

移流過程では、粒子が大気からの抵抗力と重力および浮力を受けながら移動すると考える.このとき、ある粒子の運動方程式は次式で表される.

$$m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_{\mathbf{D}} - m\mathbf{g}\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right)$$
(3.5.1)

ここで, m: 粒子の質量 [kg], v: 粒子の速度ベクトル [m/s], F_D: 抵抗力ベクトル [N], g: 重力加速度ベクトル [m/s²], p: 大気の密度 [kg/m³], p_p: 粒子の単位体積質量 [kg/m³] で ある. 式中の抵抗力ベクトルは次式で表される.



Fig. 3.5.1 粒子追跡法における座標系の定義

$$\mathbf{F}_{\mathbf{D}} = \frac{1}{2} C_D A_p \rho \left| \mathbf{u} - \mathbf{v} \right|^2 \frac{\mathbf{u} - \mathbf{v}}{\left| \mathbf{u} - \mathbf{v} \right|}$$
(3.5.2)

ここで、*C_D*: 抗力係数、*A_p*: 粒子の流れ方向投影面積 [m²], u: 流速ベクトル [m/s] であ り、抵抗力が流速と粒子速度の相対速度によって定義される. 抗力係数はレイノルズ数の 関数であり、レイノルズ数の大きさに応じて式 (3.5.3)(層流領域、10⁻⁴ < *Re* < 2)、式 (3.5.4) (遷移領域、2 < *Re* < 500)、式 (3.5.5)(乱流領域、500 < *Re* < 10⁵)のように表される [3.9].

$$C_D = \frac{24}{Re}$$
 (3.5.3)
 $C_D = \frac{10}{\sqrt{Re}}$ (3.5.4)
 $C_D = 0.44$ (3.5.5)

乱流過程の評価にはランダムウォーク法 [3.16] を利用することができる. ランダムウォ ーク法とは、物質の拡散を確率的な挙動と見なし、乱数により移動量を算出する方法であ る. 算出過程は次の通りである.まず、渦度についての3次元拡散方程式の解を球座標系 で表し、それに微小体積を乗ずることで、微小体積における渦度を表す式が得られる.こ の式は、ある一つの要素が微小体積内に存在する確率と同義である.また、ある要素を中 心として拡散による移動を考えた時、拡散によって特定の微小体積内に要素が移動する確 率とも同義である.これを積分することで、次式のように、粒子が半径 r_iの球内に存在す る確率 P_iが得られる.なお、添え字のiはi番目のタイムステップを意味する.

$$P_{i} = \frac{4\pi}{\left(4\pi Dt\right)^{3/2}} \int_{0}^{r_{i}} \exp\left(-\frac{r^{2}}{4Dt}\right) r^{2} dr$$
(3.5.6)

ここで, 乱数として *P_i*, *Q_i*, *R_i*(0 < *P_i*, *Q_i*, *R_i* < 1) を用意し,式 (3.5.7) および角度を表 すための式 (3.5.8)・式 (3.5.9) に与えることで,変数 *r_i*, *θ_i*, *φ_i*が求められる.これらの文 字の定義は Fig. 3.5.1 に示す通りである.

$$\theta_i = \pi Q_i \tag{3.5.8}$$

$$\varphi_i = 2\pi R_i \tag{3.5.9}$$

得られた変数と次の3式を用いることで,拡散過程における粒子の移動量が算出される.

$$x_i = r_i \sin \theta_i \cos \varphi_i \tag{3.5.10}$$

$$y_i = r_i \sin \theta_i \sin \varphi_i \tag{3.5.11}$$

$$z_i = r_i \cos \theta_i \tag{3.5.12}$$

3.6 対象橋梁周りの定常流れ場計算

本研究では、橋梁部位別の付着塩分量把握のための情報を得ることを目的に、CFD を用 いて対象橋梁周りの流れ場を算出し、局所的な風況把握を試みた.その際に、接近風向別 の流れ場を算出し、風向の違いによる流れの特性を評価することで、現地の風況を考慮し た付着塩分量の推定を目指した.また、中西ら [3.17] が行った実験からも分かるように、 橋梁断面周りの流れ場は周辺地形の影響を強く受けると考えられる.そこで、本研究では 対象橋梁とその橋台に加えて、地面や崖、護岸などの周辺地形も併せてモデル化を行い、 それらの影響を考慮した流れ場を算出した.流れ場の解析にはオープンソースコードであ る Open source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM, ver. 2.1.0) [3.18] を採用した.

なお、実際の自然風は時々刻々と変化する非定常なものなので、より現実的な付着塩分量の評価を実現するには非定常流れ場に基づく検討が必要と考えられる.一方、腐食は非常に長い時間スケールでの現象ともいえ、橋梁表面への付着塩分量もそのような長期の風況に支配されるとも予想される.また、橋梁構造や周辺地形も取り入れた複雑形状周りのLESによる非定常計算は容易ではない.そのため、本研究ではRANSによって計算負荷の小さい時間平均的な定常流れ場の算出を行い、部位ごとの時間平均的な風況特性に基づく付着塩分量の再現性を検討することにした.

3.6.1 定常流れ場計算領域と境界条件

天鳥橋は橋軸が北北西-南南東であり,西側の太平洋と東側の崖に挟まれるという局所 的な地形に存在する.そのため,年間を通じて海側からの風が卓越しており,常に潮風に さらされている.逆に,崖側からの風の頻度や風速は低く,また含まれる塩分量も相対的



Fig. 3.6.1 対象橋梁周りの定常流れ場計算領域 (角度は風向と橋軸直角方向のなす角)

に小さいと予想される.したがって、付着塩分量の評価に際しては海風を考慮するのみで 十分と考え、崖側から風が吹く状態の流れ場算出は省略した.さらに、橋軸方向の風の寄 与も小さいと思われるので、併せて省略する.ここで、天鳥橋およびその周辺地形が橋軸 直角方向に対し対称であると仮定する.このとき、観測で得られる16方位の接近風向に対 応する流れ場を算出するには、風向と橋軸直角方向とがなす角を0°として、0°、22.5°、45°、 67.5°の4通りの計算領域を考えればよい.



Fig. 3.6.2 橋台部におけるモデルの断面図

これら 4 つの定常流れ場計算領域を Fig. 3.6.1 に示す.いずれの領域においても対象橋 梁である天鳥橋,その橋台,地面,崖,海面,消波ブロックを簡単にモデル化しており, 計算領域内のモデルの配置角度を変えることで 4 つの風向を再現した.流入した風は海上, 消波ブロック部,橋梁部,崖の順に領域内を進み,流出面から領域外に出る. Fig. 3.6.2 に モデル断面の様子を示す.なお,これは橋台部分での断面を表しているため,3 主桁の構 造は図中には見られない.橋梁部分のモデルは先に示した Fig. 2.2.4 に準ずるが,簡単のた め高欄および地覆は省略している.ここで,天鳥橋の幅を *B* = 8.2 m とすると,橋梁のスパ ン長は 4.63*B*,護岸上面から下フランジの下面までの高さを一定値とすると 0.46*B* と表せ る.このように,現地の地形をおおまかに模擬し,流れの計算を行った.なお,対象モデ ルは 3 次元 Computer-Aided Design (CAD) ソフトウェアの1つである FreeCAD で作成し, Standard Template Language (STL) 形式に変換して利用した.

計算領域の大きさは 0°の領域が 280 m (主流 = y 方向) × 200 m (主流直角 = x 方向) × 300 m (鉛直 = z 方向), 22.5°が 100 m × 200 m × 300 m, 45°が 100 m × 300 m × 300 m, 67.5°が 100 m × 450 m × 300 m である.計算格子 (メッシュ)の生成には OpenFOAM 付属の自動格 子生成ユーティリティ SnappyHexMesh を利用した.格子数は 0°の領域から順に約 689 万 個,約 391 万個,約 438 万個,約 583 万個である.なお,3 次元の計算領域であるから,橋 梁断面周りの 2 次元的な風速分布だけではなく,橋軸方向の分布を示すことも可能である.

Table 3.6.1 に定常流れ場計算の境界条件を示す.表中で面を表す A-F は Fig. 3.6.1 (a) に示した記号と対応する.流入風は 2 m/s の一定値とした.これは橋梁モデルが主に矩形の集合体とみなせることから,流れの剥離点が固定されるので,橋梁周りの風速分布は風速によらずほぼ一定と考えられるためである.3.9 節で示す付着塩分量計算に際しては,ここで得られる流れ場をあらかじめ流入風速である 2 m/s で除すことで無次元化しておき,無次元化された流れ場にその都度の接近風速を乗ずることで,様々な風速に対応した.流出面について,0°の領域では C の面のみを流出面としたが,他の風向の計算においては,風が橋台や崖に沿って流下すると考えられるため,C の面に加えて D の面も流出面として計算を行った.また,固体壁面と海面 (F) は摩擦面とし,その他の面はすべり面の境界条件を与えた.なお,桁高を代表長にとるとレイノルズ数は 2.67 × 10⁵ となる.

Param.	A (inlet)	В	C (outlet)	D
	$u_x = 0$	$u_x = 0$	$\partial u_x / \partial x = 0$	$u_x = 0$
U	$u_y = 2$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$
	$u_z = 0$	$\partial u_z/\partial z = 0$	$\partial u_z / \partial z = 0$	$\partial u_z / \partial z = 0$
р	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	0	$\partial p/\partial n = 0$
k	$6.0 \times 10^{-4} (0 \text{ deg.})$ $6.0 \times 10^{-3} (\text{others})$	$\partial k/\partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$
З	$4.83 \times 10^{-6} (0 \text{ deg.})$ $1.46 \times 10^{-4} (\text{others})$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial arepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$

Table 3.6.1	対象橋梁周	りの)定常流れ	湯計算	の境	界条	:件
-------------	-------	----	-------	-----	----	----	----

Param.	D (outlet)	E	F	Solid wall
	$\partial u_x/\partial x = 0$	$\partial u_x / \partial x = 0$	$u_x = 0$	$u_x = 0$
U	$\partial u_y / \partial y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$u_y = 0$	$u_y = 0$
	$\partial u_z/\partial z = 0$	$u_z = 0$	$u_z = 0$	$u_z = 0$
р	0	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$
k	$\partial k/\partial n = 0$	$\partial k/\partial n = 0$	logarithmic law	logarithmic law
З	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial arepsilon / \partial n = 0$	logarithmic law	logarithmic law

3.6.2 算出された定常流れ場の特性

それぞれの計算領域から得られた流線図を Fig. 3.6.3 に示す. 流線の色は流入面内での 流入位置によって変えており, B の面に近い流線が青色で表される.

まず,橋梁および橋台と崖の間にらせん状の流れを確認することができる.また,0°以 外の風向ではそのような流れの多くが崖に沿うようにして流下する様子も見られる.さら に,桁間では循環流れが形成されており,これが塩分の付着に強く寄与すると思われるが, 風向ごとにその形状は異なることが分かる.したがって,付着塩分量を精度よく計算する うえで接近風向の影響を正しく反映させることが必要と推測される.

Fig. 3.6.4 には橋梁断面周りの風速スカラーのコンター図とベクトル図を示す.スカラーの配色は桁周囲を詳細にみるため 0-2 m/s に限定したので,橋梁周囲の一部は適切な正確な表示ではないことを注記する.0°の領域を見ると,最上流側の下フランジ部で大きな剥離が生じており,その一部が桁間に流入して反時計回りの循環流れを形成することが分かる.また,上流側の桁間と下流側の桁間を比べると,下流側の方が壁面近傍の風速が大きく,より塩分が表面に付着しやすいと考えられる.このような桁間の特徴は22.5°の領域においても概ね同様である.なお,0°の領域では接近流が直接橋梁に衝突する最上流側の桁の外側面付近において,接近流に対し風速が減衰することが分かる.壁面に向かうにつれて当然風速は小さくなるが,乱流エネルギーの過剰生成が必要以上の減衰を生じている可





(b) 22.5°



(c) 45°



(d) 67.5°

Fig. 3.6.3 接近風向ごとの流線図





(b) 22.5°



Fig. 3.6.4 風向別の橋梁断面周りの風速コンター図とベクトル図

能性もあり、今後の検証が必要である.このような反時計回りの流れは中西ら [3.17] の地 面を考慮した風洞実験の結果とも一致している.一方、45°になると上流側の桁間の方で風 速が大きくなる.射角が一定以上に大きくなると橋軸に沿う成分が次第に増すため、手前 の空間に流入しやすくなると考えられる.最後に、67.5°の領域では、いずれの桁間におい ても風速は小さく、他の領域のような循環流れは見られない.接近風の大部分が橋梁や周 辺地形に沿って流下し、流れが桁下空間に至らないためと考えられる.

本研究では、天鳥橋とその橋台および周辺地形として崖や消波ブロックを簡単に再現し、 風向別の定常流れ場の算出を行った.ただし、流線図やベクトル図からも分かるように、 算出される流れは地形の影響を強く受けると思われる.したがって、付着塩分量を予測す るうえでどこまでのモデル化が精度上許容されるかは別途詳細に検討する必要があると考 えられる.また、今回の計算では桁間に反時計回りの循環流れが形成されており、これは 既往の研究とも一致する一方、流れが桁から離れるような部位では海塩粒子の付着にほと んど寄与しないと予想される.全体に占める割合としては小さいと予想されるが,接近風の変動によって循環流れも乱れるはずであり,このような効果の再現の必要性は付着量の 計算結果とともに検討すべき内容と考えられる.

今回の計算においては、乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデルを採用して RANS 方程式を数 値的に解いた.標準 $k-\varepsilon$ モデルは渦粘性が常に正なので計算の安定性に優れ、適用実績も 豊富であるといった長所をもつ.しかし、一方では剥離やせん断をもつ流れの再現性が十 分ではないことも指摘されている [3.19]. そのため、乱流モデルとして Kato-Launder の修 正モデル [3.20]、MMK モデル [3.21]、RNG $k-\varepsilon$ モデル [3.22]、Realizable $k-\varepsilon$ モデル [3.23] といった $k-\varepsilon$ モデル系統のほか、 ε の代わりに比散逸率 ω を用いた $k-\omega$ モデルなどが開発 されており、計算精度を向上させる点で検討の余地がある.

3.7 橋梁への付着塩分量評価モデルにおける塩分の衝突フラックス評価位置

提案する部位別付着塩分量の評価手法においては、大気中塩分の壁面への衝突フラックス、つまり壁面直角方向風速成分の評価位置が課題となる.本研究では評価位置を決めるために次のように考えた.

まず,検討に用いる物体を簡単な形状とするため,断面辺長比 B/D=0.01 (D=1 m)の鉛 直平板を対象とした.矩形断面は B/D=0.65 付近で抗力係数が最大,かつ背圧係数が最小 となることが知られている [3.24] が,これは放出される前縁剥離渦の影響と考えられる. そのため,より基本的な条件での検討となるよう,渦の影響をできるだけ避けるために薄 い板状物体を選択した.ただし, B/D を変化させた場合や矩形以外の形状での検討も今後 必要である.次に,非定常な流れの中で粒子個々の挙動をラグランジュ的に追跡すること ができれば,得られる橋梁表面への付着塩分量は限りなく実際の値に近づくと予想される. したがって,このような手法で得られる付着量を真値として比較対象とし,一方で提案手 法の塩分衝突フラックス評価位置を様々に変えることで,フラックスの適切な評価位置を 決定することができると考えられる.

3.7.1 流入変動風の計算概要

鉛直平板周りの非定常流れ場を計算し,得られた流れ場で粒子挙動を追跡することで, より実現象に即した付着塩分量計算が可能と思われるが,そのためには流入変動風をあら かじめ作成する必要がある.LESの工学的応用について,流入変動風の作成は最大の課題 の一つである [3.25].流入変動風を作成する方法として,波数空間の3次元エネルギース ペクトルを規定して,そのフーリエ逆変換で人工的な等方性乱流の流入変動風を作成する 方法 [3.26] [3.27] や,周波数空間のパワースペクトル密度やクロススペクトル密度を目標 として乱数を発生させ,擬似的に風速波形を生成する方法 [3.28],流入から対象物までに 助走区間(ドライバ領域)を設けることで乱流を発達させる方法 [3.29] などがある.本研 究ではドライバ領域を設ける方法で流入変動風の作成を行うことにした.ただし,計算負 荷の低減を図るため,鉛直平板周りの計算を行う領域とは別にドライバ領域を用意し,さ らに主流方向に対し周期境界を併用した.このドライバ領域でLESによって作成された変 動風を鉛直平板周りの計算における流入変動風として利用する.



Fig. 3.7.1 ドライバ領域の概要



Fig. 3.7.2 ラフネスブロックの様子

ドライバ領域の概略を Fig. 3.7.1 に示す. 鉛直平板の長さ D (= 1 m) とすると, 領域の大きさは 40D × 20D × 2D と表せる. 流入口の中心を原点とし, 主流方向 x, 鉛直方向 y, スパン方向 z とした座標系を用いると, 格子数は (N_x, N_y, N_z) = (400, 200, 20) である. 格子分割は等間隔で, 総格子数は 160 万個である.

ラフネスブロック(障害物)をドライバ領域の下面に設置して流入変動風を作成する手法は建築の分野でよく用いられる [3.30][3.31]が、本研究では領域の下面だけではなく上面にもラフネスブロックを設置した.これは、鉛直平板を含む範囲($-0.5D \le y \le 0.5D$)において、鉛直方向の風速分布や乱れの大きさをできるだけ一様とするためである.ラフネスブロックは $0 \le x \le 29D$ の間に上下合わせて117個を千鳥格子状に配置した.大きさはいずれも $0.2D \times D \times 0.2D$ である.計算領域のラフネスブロック周りを拡大した様子をFig. 3.7.2に示す.また、本研究ではOpenFOAMに備わる mappedPatch という機能を用いて周期境界を作成した.これにより、周期境界の参照断面(recycle station, x = 26D)の風速を抽出し、流入口に再び戻すことができる.このとき、流入口の面平均風速は常に一定に保たれるため、乱流の発達において十分有用と考えられる.

境界条件は Table 3.7.1 の通りである.ただし、主流方向の流入風速は流入口での面平均 が 2 m/s であることを意味する.また、Solid wall はラフネスブロック表面に関する条件で ある.時間刻みは $\Delta t = 0.02$ s で、鉛直平板長さを代表長とすると無次元時間刻み $U\Delta t/D =$ 0.04 として表される.生成された変動風が概ね定常状態となった t = 1000-2000 s (Ut/D =

Param.	Inlet	Side wall	Upper & lower wall	Outlet	Solid wall
	$u_x = 2$	$\partial u_x/\partial x = 0$	$u_x = 0$	$\partial u_x/\partial x = 0$	$u_x = 0$
U	$u_y = 0$	$\partial u_y/\partial y = 0$	$u_y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$u_y = 0$
	$u_z = 0$	$u_z = 0$	$u_z = 0$	$\partial u_z/\partial z = 0$	$u_z = 0$
р	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	p = 0	$\partial p/\partial n = 0$
v_{SGS}	$\partial v_{SGS} / \partial n = 0$				

Table 3.7.1 ドライバ領域の境界条件

2000-4000)の結果を用いて以降の議論を行う.以降では特に断らない限り,この間のデータを用いている.

3.7.2 流入変動風の計算結果

Fig. 3.7.3 に t = 1500 s (Ut/D = 3000) のときの風速コンターを示す. 領域上下面に設置し たラフネスブロックと周期境界が作用して一定の乱れを持つ流れが生成されたと考えられ る. Fig. 3.7.4 に recycle station の中心点 ((x, y, z) = (26D, 0, 0)) における風速変動から得ら れたパワースペクトル密度 (PSD) を示す. サンプリング周波数は 200 Hz である. 図中の 赤線は両対数グラフ内で傾き-5/3 の直線であり,得られた PSD は全体的には Kolmogorov の-5/3 乗則に従うため,この点では乱流の条件を満たすといえる. ここで,Kolmogorov の -5/3 乗則とは,エネルギーの生成と散逸がつりあう慣性領域において,エネルギースペク トルが波数の-5/3 乗に比例するというもので,次式で表される [3.32] [3.33]. E(k) はエネ ルギースペクトル [m³/s²], C_k は Kolmogorov 定数, ε はエネルギー散逸率 [m²/s³], k は波 数 [/m] である.

$$E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$$
(3.7.1)

しかし、0.09 Hz 付近にピークが見られる. これは主流方向に設定した周期境界の影響と 考えられる. 領域中心付近の平均風速が 2.45 m/s であり、流入口から recycle station までの 距離が 26D であることから、流れが流入口から recycle station に到達するまでに 10.6 s を 要するといえる. このため 1/10.6 = 0.094 Hz 付近で PSD が大きくなったと考えられる. さ らに、他にもピークを持つ周波数が存在するが、これらは 0.094 Hz のおよそ倍数の周波数 なので、同様に周期境界が影響したものと予想される. 乱流として十分とはいえないこの ような周期を除くためには、周期境界を用いずに領域を長くすることで流入変動風を作成 する方法や、エネルギースペクトルを元にして作成する方法などが考えられるが、今後の 検討課題である.



(a) 主流方向成分



(b) 鉛直方向成分

(c) スパン方向成分

Fig. 3.7.3 ドライバ部の風速コンター図 (t = 1500s)

本研究ではこの変動風を用いて鉛直平板周りの流れ場計算を行い,その結果はさらに粒 子追跡に利用される.したがって,ここで生じた流れの周期が付着計算に影響する可能性 も考えられる.そこで,鉛直平板周りの流れ場計算から得られる風速波形において,周期 境界に起因したと考えられる節と節とに挟まれる流れを粒子追跡に利用することで,この 影響を限りなく抑えられると考えた.

Fig. 3.7.5 に recycle station における-0.5*D* ≤ *y* ≤ 0.5*D* の範囲の乱れ強さの鉛直方向分布を 示す.スパン方向については-0.5*D* ≤ *z* ≤ 0.5*D* の範囲を平均した.主流方向乱れ強さは平均 して 5.5%,鉛直方向は 2.3%,スパン方向は 1.4%であった.したがって,主流方向につい て,ある程度の乱れを持つ流れを作成できたといえる.スパン方向の乱れ強さは比較的小 さいが,本研究ではスパン方向に一様な 2 次元鉛直平板を用いるため影響は小さいと思わ れる.なお,各方向の乱れ強さ *I* は次式より導出した. u'_{x} , u'_{y} , u'_{z} は変動風の標準偏差, U_{x} は recycle station 中心点 (*x*, *y*, *z*) = (26*D*, 0, 0) における主流方向平均風速である.

$$I_{x} = \frac{u'_{x}}{U_{x}}, \quad I_{y} = \frac{u'_{y}}{U_{x}}, \quad I_{z} = \frac{u'_{z}}{U_{x}}$$
(3.7.2)



(a) 主流方向成分



(b) 鉛直方向成分

(c) スパン方向成分

Fig. 3.7.4 recycle station 中心点でのパワースペクトル密度



Fig. 3.7.5 recycle station における乱れの強さの鉛直分布



Table 3.7.2 鉛直平板周りの非定常流れ場計算の境界条件

Param.	Inlet	Side wall	Upper & lower wall	Outlet	Solid wall
	$u_x = 2$	$\partial u_x/\partial x = 0$	$\partial u_x / \partial x = 0$	$\partial u_x/\partial x = 0$	$u_x = 0$
U	$u_y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$u_y = 0$	$\partial u_y/\partial y = 0$	$u_y = 0$
	$u_z = 0$	$u_z = 0$	$\partial u_z/\partial z=0$	$\partial u_z/\partial z = 0$	$u_z = 0$
р	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	p = 0	$\partial p/\partial n = 0$
v_{SGS}	$\partial v_{SGS}/\partial n = 0$				

なお、ある地形や建物上を吹く風のような状況ではなく、本研究のように理想空間内に おける一般的な議論を行う場合には、等方性乱流の性質を持つ流入変動風の利用が理想的 ではある.一方、本研究のドライバ領域には上下面にラフネスブロックを設置したため、 変動風は上下面に近いほど風速は小さくなり、逆に乱れ強さは大きくなる.ただし、本研 究では鉛直平板前面への粒子の付着を考えるため、鉛直方向において鉛直平板を含む範囲 ($-0.5D \le y \le 0.5D$) で乱れ強さがおよそ一様であれば付着量評価に対して影響は小さいと 考えられる.しかし、その周りの影響を受ける可能性も考えられるため、等方性乱流を用 いて本研究の妥当性を検討する必要がある.

粒子追跡を行う際の時間刻みを考慮し,時間刻みを $\Delta t = 0.02$ s から 0.001 s ($U\Delta t/D = 0.04$ から 0.002) に変更して t = 1500-1600 s (Ut/D = 3000-3200) の 100 秒間を再計算した. この 100 秒間における recycle station における- $0.5D \le y \le 0.5D$ かつ- $0.5D \le z \le 0.5D$ の範囲の乱 れ強さを算出すると,主流方向で 5.1%,鉛直方向は 1.8%,スパン方向は 1.3%であった. これまでの検討と大きく特性が変わらないことから,以降の計算ではこの 100 秒間の流れ を流入変動風として用いることにした.



(a) 主流方向成分



(b) 鉛直方向成分

(c) スパン方向成分

Fig. 3.7.7 鉛直平板周りの非定常流れ場における風速コンター

3.7.3 鉛直平板周りの非定常流れ場計算

Fig. 3.7.6 に鉛直平板周りの流れ場計算領域を示す.大きさは $25D \times 20D \times 2D$ で,流入口 の中心を原点とする座標系 (主流方向 x,鉛直方向 y,スパン方向 z) を設定すると, x = 10D の位置に鉛直平板 (厚み 0.01D,スパン方向長さ 2D) が存在する.格子分割数は (N_x , N_y , N_z) = (187, 276, 10) で,鉛直平板に近いほど小さい不等間隔格子を用いた.図中で十字に 黒い帯が見えるのは,平板周りの格子が小さく密集しているためである.総格子数は約 50 万個である.先に示した LES による非定常流れ場の支配方程式および計算アルゴリズムに 準じて計算を行った.境界条件は Table 3.7.2 に示すが,流入口の風速各成分はそれぞれ面 平均値である.実際には作成した流入変動風を $\Delta t = 0.001$ s ($U\Delta t/D = 0.02$) ごとに流入させ る. この条件で 100 s (Ut/D = 200) まで計算を行った.

Fig. 3.7.7 に t = 70 s (Ut/D = 140) における風速コンターを示す. 鉛直平板の後方にカルマン渦が生成されており,妥当な非定常流れ場が算出されたと推測される. また,その変



(b) 鉛直方向成分

(c) スパン方向成分

Fig. 3.7.8 鉛直平板上流側での風速パワースペクトル密度

動が鉛直平板の上流側にも影響していると考えられる. さらに, (x, y, z) = (9.75D, 0, 0) に おける主流方向風速変動の PSD を Fig. 3.7.8 に示す. この点は鉛直平板中心から 0.25D だ け上流に位置する. ただし, 十分なデータ数を確保するため t = 200 s (Ut/D = 400) まで別 途計算し, 200 秒間の結果に基づいて算出した. サンプリング周波数は 1 kHz である. 主 流方向成分とスパン方向成分については,ドライバ領域で生じた周期 (0.094 Hz) がそのま ま鉛直平板周りの流れ場にも残っている. 一方, 鉛直方向成分についてはその周期は目立 たない. これは, カルマン渦が生成されたことで新たにより支配的な周期が生まれ,ドラ イバ部で生じた周期が抑えられたためと考えられる.

Fig. 3.7.9 に揚力係数の PSD を示す. 0.345 Hz におけるピークは鉛直方向風速の PSD に 生じたピークと概ね一致しており,カルマン渦に起因すると考えられる. このとき,式 (3.42) よりストローハル数を計算すると $S_t = 0.14$ である. 既往の研究 [3.24] の $S_t = 0.15$ におおよそ一致することから,妥当な計算が行われたと推測することができる. ここで式



Fig. 3.7.9 鉛直平板上流側での揚力係数のパワースペクトル密度

(3.7.3) に用いた値について、代表長 D = 1 m で、接近風速 U は鉛直平板が存在する範囲
 (-0.5D ≤ y ≤ 0.5D) の平均流入風速として U = 2.45 m/s である. f は渦放出の周波数で 0.345
 Hz を与えた.

$$S_t = \frac{f \cdot D}{U} \tag{3.7.3}$$

また,抗力係数の *t* = 50-100 s (*Ut/D* = 100-200)の平均は *C_D* = 1.95 で,既往の研究 [3.24] からも妥当な値といえる. なお,抗力係数 *C_D* と揚力係数 *C_L* は以下の式から算出した.

$$C_D = \frac{Drag}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL}$$
(3.7.4)

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2}\rho U^2 BL}$$
(3.7.5)

Drag は抗力 [N], Lift は揚力 [N], ρ は空気密度 [N/m³], U は接近風速(= 2.45 m/s), D は 鉛直平板長さ (= 1 m), B は鉛直平板厚さ (= 0.01 m), L はスパン長 (= 2 m) である. なお, 流れによる圧力とせん断応力に起因する力において,主流方向成分を抗力,鉛直方向成分 を揚力として算出した.

本研究では計算負荷低減のため、不等間隔格子を用いることでメッシュ数の削減を図った.そのため、鉛直平板から離れるほどメッシュが粗くなり、計算精度が低下する可能性がある.また、スパン方向の格子分割を十分に行っているとはいえない.より精密な格子分割を施した計算領域で流れ場解析を行い、計算結果の妥当性を検討する必要がある.

.ram.	Inlet	Side wall	Upper & lower wall	Outlet	Solid wall
	$u_x = 2$	$\partial u_x / \partial x = 0$	$\partial u_x / \partial x = 0$	$\partial u_x/\partial x = 0$	$u_x = 0$
U	$u_y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$u_y = 0$	$\partial u_y / \partial y = 0$	$u_y = 0$
	$u_z = 0$	$u_z = 0$	$\partial u_z/\partial z = 0$	$\partial u_z/\partial z = 0$	$u_z = 0$
р	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	p = 0	$\partial p/\partial n = 0$
k	Initial value	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	logarithmic la
З	Initial value	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial arepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	logarithmic la

Table 3.7.3 鉛直平板周りの定常流れ場計算の境界条件

3.7.4 鉛直平板周りの定常流れ場計算

RANS 方程式を解くことで鉛直平板周りの定常流れ場を算出した.計算領域や格子分割 は鉛直平板周りの非定常流れ場計算と同じものを用いた.境界条件を Table 3.7.3 に示す. 初期条件は流入変動風を元に作成した.まず,式 (3.7.6) に従い,変動風の標準偏差を用い て格子ごとに乱流エネルギーkを算出した.エネルギー散逸率 ε の算出には式 (3.7.6) で得 られる乱流エネルギーkと式 (3.3.14) および式 (3.3.15) を用いた.

$$k = \frac{1}{2} \left(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2 \right)$$
(3.7.6)

収束判定は 3.3 節に記した条件に加え, 抗力係数が LES で得られた平均値である 1.95 となることより行った.

Fig. 3.7.10 に算出された定常流れの風速コンターを示す.当然ながらカルマン渦のよう な時間依存の流れは見られないが,剥離領域で主流方向の風速が大きいなど,非定常流れ に対応すると思われる分布を確認することができる.

3.7.5 鉛直平板周りの非定常流れ場と定常流れ場の比較

非定常流れ場と定常流れ場それぞれに基づく付着量計算を行い、両者の結果を比較する ので、非定常流れ場と定常流れ場を比較し、以降の検討の妥当性を確認する.非定常流れ 場は t = 50-100 s (Ut/D = 100-200) で時間平均し、定常流れ場と比較した. Fig. 3.7.11 に、 $-0.5D \le y \le 0.5D$ かつ $-0.5D \le z \le 0.5D$ の範囲の壁面方向風速の面平均を、x = 0(流入口) か ら x = 10D (鉛直平板) までの範囲において 0.05D 間隔で比較した結果を示す.非定常流れ の方がやや大きい傾向にあるが、全体的な傾向は定常流れ場と一致する.また、壁面への 付着量に特に寄与する壁面付近では両者はほぼ同じといえる.したがって、算出された非 定常流れ場は平均的には定常流れ場と概ね同等であると思われる.ただし、標準 $k - \varepsilon$ モデ ルを用いたことから、固体壁への衝突部分において乱流エネルギーが過大評価されている と考えられる.これが定常流れ場の主流方向風速の減衰を生じた可能性もあり、他の乱流 モデルを適用することも含めて検討を要する.



(a) 主流方向成分



(b) 鉛直方向成分

(c) スパン方向成分

Fig. 3.7.10 鉛直平板周りの定常流れ場における風速コンター



Fig. 3.7.11 非定常流れ場と定常流れ場の主流方向風速値の比較

3.7.6 粒子追跡の計算領域と計算条件

粒子追跡を行う領域は $9.5D \le x \le 10D$, $-0.5D \le y \le 0.5D$, $-0.25D \le z \le 0.25D$ で表される $0.5D \times D \times 0.5D$ の直方体とした. これは, Fig. 3.7.12 に示すように, 鉛直平板の上流側中 央部に相当する. この領域に含まれる非定常および定常それぞれの風速値を, 0.05D 間隔 で格子状に抽出して粒子追跡に用いた.非定常流れ場の風速利用については後で詳述する.

領域内の塩分濃度を 0.01 mg/m³と仮定し,これを基に配置する粒子数を式 (3.7.7) と式 (3.7.8) から求めた.式 (3.7.7) は半径 *a* [m] の粒子に含まれる塩化物イオン量 *M* [kg]を算 出する式である [3.34].

$$M = \frac{4}{3}\pi a^3 \cdot \rho_p \cdot \text{Cl}^- / 100 \tag{3.7.7}$$

既往の研究 [3.35] より,海塩粒子の単位体積質量は $\rho_p = 1,110 \text{ kg/m}^3$ とした. 粒子半径 a は文献 [3.36] にある 2–20 µm という値を参考にa = 10 µmとした. 海水塩化物イオン濃 度は Cl⁻ = 1.9%とした. 式 (3.7.7) で得られた粒子 1 個あたりの塩化物イオン量 M [kg] と 大気中塩分濃度 C [kg/m³] を用いると, 1 m³ あたりに存在する海塩粒子個数 n [個/m³] は 次式で表される. このように決まる初期配置粒子数は N = 28,224 個であり,領域内に一様 に配置した.

$$n = \frac{C}{M} \tag{3.7.8}$$

風速は 0.05D 間隔の格子状のみで抽出しているため,格子点以外に粒子が存在するとき, その位置の風速は重み付き平均によって算出した. 粒子の存在する一辺 0.05D の立方体の 頂点に Fig. 3.7.13 に示す通りに番号を付け, 粒子位置に基づき 8 つの直方体に分割した. 各頂点での風速ベクトルを u₁, u₂, …, u₈ とし, 各頂点番号を含む直方体の体積を V₁, V₂, …, V₈ とすると, 粒子位置の風速 u は, 次式で表される.

$$\mathbf{u} = \frac{\sum_{i} \mathbf{u}_{i} V_{9-i}}{\sum_{i} V_{i}}$$
(3.7.9)

粒子追跡の時間刻みは緩和時間 τ_p を超えないよう定めた [3.9]. 緩和時間は次式で表される. μ は流体の粘性係数で, 20°C および 1 気圧での空気の粘度 1.809 × 10⁻⁵ [Pa·s] を用いた.

$$\tau_p = \frac{2a^2\rho_p}{9\mu} \tag{3.7.10}$$



Fig. 3.7.12 粒子追跡計算領域 Fig. 3.7.13 粒子 (青丸) 位置の重み付き平均 による風速決定

鉛直平板周りの非定常流れ場には、カルマン渦とドライバ部の周期境界に起因する周期 がそれぞれ認められた.したがって、これらの周期に留意したうえで粒子追跡を行う必要 がある.まず、カルマン渦による周期はおよそ 2.9 s である.そこで、この周期が付着数に 与える影響を低減するため次のようにした.最初に N 個の粒子を放出するのは t = 58.4 s (Ut/D = 116.8)のときで、以後 2.9 sの 1/4 である 0.725 s (Ut/D = 1.45)ごとに N 個の粒子 を放出し、36.975 s (Ut/D = 73.95、周期 2.9 sの 5 倍)後の t = 95.375 s (Ut/D = 190.75)のと きに最後の放出を行った.つまり、少しずつ放出の時刻を変えることで計 52 回の粒子追跡 を行うとみなせる.また、t = 58.4 s (Ut/D = 116.8)とt = 95.375 s (Ut/D = 190.75)のいずれ のときも、周期境界によると思われる主流方向風速変動波形の節に位置する.したがって、 このように粒子を放出することでドライバに起因する周期をある程度抑えることができる と考えられる.以上を踏まえ、52 回の試行それぞれにおける付着粒子数のアンサンブル平 均を非定常流れ場における付着粒子数 q とした.

以上に示す条件のもとに、配置数 N = 28,224 個の粒子に対して粒子追跡計算を行うことで、Nに対する付着粒子数 q_i (i = 1-52)を得られる.しかし、あらかじめ配置した N 個の粒子のみを考えると、計算が進むにつれて粒子の壁面への付着や領域外への離脱によって領域内の濃度が次第に減少する.さらに、たとえ異なる試行で同一の付着数 q_i が得られたとしても、全粒子の計算に要する時間がそれぞれ異なれば、付着塩分量を厳密に比較することができないといえる.したがって、算出された付着数 q_i を、領域内の塩分濃度(粒子個数)を一定に保った状態での単位時間当たりの付着数 q_i 'に変換する必要がある.

そこで領域内の海塩粒子濃度を一定に保つために、付着率 q_i/N と領域内の残存粒子数変 化率 f(t)/N を利用する換算を考えた. 2 つの比率は初期配置数 N に依存しない比率と仮定 する.まず、N 個の粒子放出後について、 Δt 経過後は領域外への離脱や壁面への付着に伴 い $N_1 = N - N \times f(\Delta t)/N$ だけ粒子が減る.このとき、 N_1 だけ新たに粒子を配置し、その N_1 がもとの N と同じ比率で減少するとみなせば $t = 2\Delta t$ における減少数も決まる.また、同じ



Fig. 3.7.14 非定常流れ場における粒子追跡から得られた鉛直平板への付着塩分量



Fig. 3.7.15 非定常流れ場における粒子追跡と提案モデルによる付着塩分量の比較

比率で付着すると考えると, N₁×q_i/N の粒子が付着するとみなせる.このような粒子の減 少および配置を繰り返すと次第に配置数が一定値に収束し,それに伴い付着数も収束する. このように得られる値を初期濃度に対する付着数q_iと定義した.

3.7.7 大気中塩分の壁面への衝突フラックス評価位置の決定

非定常流れ場における粒子追跡から得られた鉛直平板への付着量を Fig. 3.7.14 に示す. ただし,流れの影響のみを考えるために,重力の効果は無視して計算した.ここでは鉛直 平板を鉛直方向に 10 分割し,領域ごとの付着量を評価した.端部ほど付着量が多いのは, 平板に衝突した流れが迂回するように上下方向に流下することで,それらの部位近傍での 風速が増すためと考えられる.また,平板の上下でほぼ対称な分布であり,鉛直平板周り の非定常流れ場が一定の精度を持つことを示唆している.ここで得られた付着量を真値と して衝突フラックスの評価位置を考察する.

付着塩分量推定のための提案モデルに必要な定常流れ場に関する準備として、粒子追跡の計算領域に相当する $9.5D \le x \le 10D$, $-0.25D \le z \le 0.25D$, かつ鉛直方向については各部位の上流側投影部分で表される $0.5D \times 0.1D \times 0.5D$ の範囲から, 0.05D 間隔で格子状に風速



Fig. 3.7.16 鉛直平板部位別の大気中塩分衝突フラックスの評価位置

を抽出し,鉛直平板と平行な面ごとに平均を取った.面と面との間は線形補間で対応した. 領域内塩分濃度は 0.01mg/m³で一定とし,どの位置の面平均風速をこの濃度に乗ずると非 定常流れ場での粒子追跡による付着量に一致するかを調べた.鉛直平板の 10 分割された 部位のうち,中央すぐ下の領域における非定常流れ場における比較を Fig. 3.7.15 に示す. この領域においては,壁面から 33.5 mm の位置で大気中塩分の衝突フラックスを定義する ことができるといえる.その他の部位も併せて評価位置を Fig. 3.7.16 に示す.部位で多少 の違いはあるものの,適切な評価位置は壁面から 30-40 mm の範囲にあることが分かった. そこで,これらのおよその平均である 35 mm を全部位に適用可能な評価位置とし,橋梁へ の付着塩分量を計算にも利用することにした.

ただし、今後の課題として、35 mm という評価位置が異なる形状に対する付着にも有効 かを検討する必要がある.また、接近風向が違う場合の特性も調べるべきである.最終的 にはこれらを踏まえて,任意の形状に利用可能な無次元パラメータとして整理することで、 簡単な付着塩分量予測に貢献することできると考えられる.

3.8 雨水による付着塩分の洗浄効果

橋梁の維持管理を考えるうえで,強制洗浄によって付着塩分を除去することは部材の劣 化を抑制するという点で効果的と考えられる.例えば,各種の部材に対する洗浄の有効性 を調べた研究 [3.37][3.38] や,開発した洗浄機の効果を確認した研究 [3.39][3.40] が存在 する.強制洗浄の他にも付着塩分を取り除く効果として,流体抗力などの外力による再飛 散 [3.41] や,橋梁表面に付着した雨水や結露水の流下による自然的な洗浄が考えられる. 雨水については橋梁の外側に面する部位への洗浄効果が想定され,着色した水滴を海塩粒 子に見立てて雨滴による洗浄を考えた研究 [3.42] や,空中での雨滴挙動のシミュレーショ ンから洗浄への寄与を検討した研究 [3.43] が見られる.しかし,降水量や降雨強度と洗浄 力との関係が十分に明らかにされたとはいえない.そこで,塩分を付着させた供試体に対 し降雨を模擬した洗浄を行うことで,雨水による洗浄効果の定量的な評価を実験的に試み た.





(a) I 字鋼供試体

(b) トタン板



Fig. 3.8.1 付着塩分の洗浄効果測定実験に用いる供試体

Fig. 3.8.2 供試体への塩水付着用の装置

3.8.1 表面状態の違いが表面付着塩分の洗浄効果に与える影響

Fig. 3.8.1 に本研究で使用した2種類の供試体を示す.1つ目は,実橋に適用される塗装 仕様(C-5 塗装系)を施したI字鋼供試体で,試験面は100mm四方である.もう1つはト タン板で,150mm四方の試験面を持つ.高さの影響を除くため,トタン板はI字鋼の上に 設置して実験を行った.トタン板はふっ素系の塗装をされたI字鋼表面に対し滑らかであ り,表面状態の違いが付着塩分の洗浄効果に与える影響が明らかになると期待できる.

以下に示す各実験ケースについて、2種類の供試体を89個ずつ用意した.全ての供試体 に対してあらかじめ霧吹きを用いて重量濃度約1.75%の塩水を吹きかけ、これを初期状態 とした.このとき、各供試体にできるだけ一様に塩水を付着させるため、Fig.3.8.2のよう に供試体の周りを55 cm×55 cm×50 cmの木枠で覆い、向かい合う2面に設けた穴(供試 体表面から35 cmの高さ)から各面につき2秒ずつ、合計4秒塩水を吹きかけた.その後、 実験室内で約1日放置して自然乾燥させ、表面の水分が十分に蒸発したことを目視で確認 した.89個の供試体のうち、45個を初期付着塩分量の計測に、残りの44個を雨水への曝



Fig. 3.8.3 暴露供試体設置の様子

Fig. 3.8.4 暴露角度の定義



Fig. 3.8.5 I字鋼とトタン板における洗浄後の残存塩分率

露用に使用した. なお,表面塩分量の計測にはポータブル表面塩分計 SSM-21P (東亜ディ ーケーケー株式会社)を用いた.

本実験は京都大学桂キャンパス構造実験室横の通路で行った.雨水を模擬するために, 地面から3mの高さに設置したノズルから水道水を散布した.供給雨量は12mm/hで一定 とし,曝露時間を2,3,4,5minと変えた4ケースの実験を行った.つまり,供試体と暴 露時間の組みで8ケースになる.ここで,洗浄後の残存塩分が単位面積に散布される水量 のみに依存すると仮定すると,曝露時間を時間降水量に換算することが可能で,それぞれ 0.4,0.6,0.8,1.0mm/hと表せる.供試体はFig.3.8.3のように1度に4つずつ,いずれも 試験面を水平面から60°の角度で設置した.供試体の暴露角度 θの定義はFig.3.8.4の通り である.また,自然風の影響を除くために実験設備全体をビニルシートで目張りした.こ のとき,散布水はおよそ鉛直に落下することが確認された.暴露終了後に供試体表面の残



(b) 暴露時間 3 min (0.6 mm/h)

(a) 暴露時間 2 min (0.4 mm/h)



(c) 暴露時間 4 min (0.8 mm/h)

(d) 暴露時間 5 min (1.0 mm/h)

Fig. 3.8.6 暴露後の供試体表面の水滴の様子

存塩分量を測定し,残存塩分率 *S*[%] として洗浄効果を評価した.残存塩分率は初期付着 塩分量に対する洗浄後の残存塩分量として表される.

Fig. 3.8.5 に以上の実験結果を示す. 図中の縦棒は計測結果のばらつきを表す. これは洗 浄後の付着塩分量の平均値にその標準偏差を加減したものを初期付着塩分量の平均値で除 すことで定義した. なお,時間降水量が 0.6 mm/h 以上のときはばらつきが非常に小さいた め,図上では縦棒が平均値のプロットと重なり認められない. 供試体の種類によらず,時 間降水量が多くなると残存塩分率が小さくなり,洗浄効果が大きくなることが分かる. ま た,I 字鋼とトタン板の結果を比較すると,トタン板に対する洗浄効果の方が大きいとい える. これはトタン板の方が表面粗度が小さく滑らかなので,表面付着塩分の移動に対す る拘束が弱く,洗浄されやすいものと考えられる. このとき,残存塩分率のプロットから 得られる回帰曲線より,時間降水量 *r* [mm/h] と残存塩分率 *S* [%] の関係は,I 字鋼は式 (3.8.1) で,トタン板は式 (3.8.2) でそれぞれ表される.ただし,残存塩分率を100%を超え ないように時間降水量に制限を課している.

$$S = \begin{cases} 100 & (r \le 0.329) \\ 0.1231r^{-6.03} & (r \ge 0.329) \end{cases}$$
(3.8.1)
$$S = \begin{cases} 100 & (r \le 0.160) \\ 0.1231r^{-6.03} & (r \le 0.160) \end{cases}$$
(3.8.1)

$$S = \begin{cases} 0.3902r^{-3.03} & (r \ge 0.160) \end{cases}$$
(3.8.2)

付着塩分の洗浄が始まる時間降水量は I 字鋼で r=0.392 mm/h, トタン板で r=0.160 mm/h と判断できる. したがって, 表面粗度の影響が近似曲線に表れたといえる.

Fig. 3.8.6 は各暴露時間後の I 字鋼表面の水滴の様子を示す. 暴露時間 2 min (0.4 mm/h) では、全体的に水滴が付いているがまばらな箇所が部分的に存在する. 暴露時間 3 min (0.6 mm/h) になると水滴の流れた道筋が認められ、そのために水滴の存在しない箇所が増えている. 暴露時間 4 min (0.8 mm/h) ではさらに水滴が減っており、5 min (1.0 mm/h) になると 逆に水滴が増加し全面に付着している. このような水滴の付着と流下およびその後の再付着を繰り返しつつ塩分が洗浄されると思われる. また、3 min のときに流路が見られ、残存塩分率もこのときに大きく減少したことから、水滴同士が合体しながら塩分を吸収しつつ流下することで、付着塩分を洗浄したと考えられる. これは流下した水滴の内部に塩分が 存在することを意味しており、多くの実橋梁において水のたまりやすい構造部分に塩分が 濃縮されやすいと推測され、重点的に維持管理を施す部位の指標になると思われる.

ただし、本実験では供試体の大きさの影響についての検討が十分とはいえない。例えば、 供試体が鉛直方向に大きくなると、上部から流下する水の影響のため、下方の部位ほど洗 浄力は大きくなると予想される。一方、実験結果を見ると、わずかな降雨でも大きな塩分 洗浄力が期待できることから、最終的な残存塩分量に対する影響はそれほど大きくはない とも考えられる。

3.8.2 暴露角度の違いが表面付着塩分の洗浄効果に与える影響

実橋梁では部位によってその角度は様々である.また,同じ部位でもその時の風向や降 雨強度によって様々な入射角度で雨滴が部位表面に衝突する.したがって,部位表面に対 する雨滴の入射角度の違いが残存塩分率に与える影響を把握しておくことが望ましい.こ こでは散布水の落下方向は鉛直のままとし,供試体の設置角度を変えることで衝突角度の 違いを再現し,付着塩分洗浄効果への影響を調べた.

実験は I 字鋼供試体を対象に行った.供試体を 90 個用意し,このうち 30 個を初期付着 塩分量の計測に,残りの 60 個を水平面に対する暴露角度が 0°,30°,90°となる各ケースの 洗浄実験用に 20 個ずつ使用した.曝露時間は 3 min (0.6 mm/h に相当) とした.

Fig. 3.8.7 に実験結果を示す. 暴露角度 60°の残存塩分率は Fig. 3.8.5 に示した値である. 暴露角度が 90°の場合は残存塩分率が約 100%であり,曝露面に雨滴がほとんど接触してい ないために洗浄が生じないと考えられる. なお,値が 100%を超えている理由は,初期付着 塩分の計測と洗い流しに用いる供試体は別の個体なので,それぞれの初期付着塩分平均値 にわずかながら差が存在したためと推測される. 暴露角度が 0°の場合は 90°よりは残存塩



Fig. 3.8.7 暴露角度別の I 字鋼に洗浄後の残存塩分率

分率が低いものの,30°や 60°と比較すると高い値を示した.これは90°とは違い曝露面に 雨滴は接触する一方,曝露面が水平なために付着した雨滴が十分に流れないので,30°や 60° より洗浄量が少ないと考えられる.最後に30°と 60°では30°の方がやや洗浄効果が大きい が,残留塩分率は共に非常に小さく,大きな差は認められない.

したがって、時間降水量が一定で、かつ部位表面の粗度が同じであれば、表面付着塩分 の洗浄効果に寄与するのは曝露面への雨滴の当たり易さと付着した水滴の流れ易さと考え られる.また、今回の実験結果を踏まえると、付着塩分量には特に雨滴の当たり易さの影 響が大きいと予想される.また、実際には風の影響で雨滴が斜角を持つことから、対象表 面が鉛直であっても洗い流し効果を期待することができると考えられる.そのため、雨滴 が接触できるような位置に存在する部位であり、かつその部位がある程度の迎角を持つこ とで、表面に付着した水滴が流下しさえすれば、表面付着塩分の十分な洗浄が生じると考 えられる.

以上より,対象橋梁がふっ素系塗装を施されていることから,式 (3.8.1) で表される I字 鋼供試体を水平面から 60°の角度に設置して行われた実験結果を,橋梁表面に付着した塩 分の洗浄効果の評価に用いることにした.

3.9 橋梁部位別の付着塩分量計算

以上の検討から,提案モデルを利用して橋梁表面に付着する塩分量を推定するために必要な要素を準備することができた.本節では,実際に提案モデルを利用して付着塩分量計算を試み,現地観測による実測値との比較を行うことで,モデルの妥当性や改善点について検討を行う.

3.9.1 橋梁表面に付着する塩分量の計算アルゴリズム

Fig. 3.9.1 に本研究で採用する橋梁部位別付着塩分量の計算アルゴリズムを示す.時間刻 みは観測で得られる気象要素の頻度に合わせて 600 s とした. そのため, 600 s ごとの付着



Fig. 3.9.1 橋梁表面付着塩分量の計算アルゴリズム

塩分量を算出し、それらを対象とする期間に渡って積算することで、ある期間における最 終的な付着塩分量の評価が可能と考えられる.ただし、観測から得た大気中塩分濃度は数 か月の対象期間に対し1つの値しか持たないので、その間の濃度は一定として計算した. 時間刻みごとの計算概要は次の通りである.添え字の*i*が時間刻みを表す指標である.

まず、大気中塩分濃度 C_{0i} および接近風速 V_{0i} ・風向 D_{0i} を決定する.これらの値は 2 章 で示したように現地観測で得られている.繰り返しになるが、ここでは大気中塩分濃度は $C_{0i} = C_0$ で一定となる.

次に、付着に寄与する大気中塩分の壁面への衝突フラックスを算出するために、壁面近 傍での壁面方向風速成分 *V_{ni}*を決定する.初めに、与えられた接近風向 *D_{0i}*に応じて、あら かじめ CFD で計算しておいた対象橋梁周りの接近風向別の定常流れ場を参照する.このと き、算出した定常流れ場を流入風速 (2 m/s) で無次元化しておくと、接近風速 *V_{0i}*を無次元 流れ場に乗ずることで、その時間刻みでの部位近傍風速値を評価することができる.この ように、流れ場計算はオフラインで実行しておき、その結果のみを時間刻みのループのた びに参照している.なお、もし風向が橋軸方向または崖(東北東)よりの場合は、大気中塩 分の付着への寄与はないと考え *V_{ni}* = 0 として計算する.

その後,式 (3.2.1) に示した付着塩分量の評価モデルに基づき,大気中塩分濃度 $C_{0i} = C_0$ と壁面方向風速成分 V_{ni} を利用することで,ある部位への付着塩分量 Q_i を算出する.これ を前ステップ時点での総付着塩分量 X_{i-1} に加えることで,付着塩分量を更新する.

さらに、雨がかりが考えられる橋梁外側の部位については、現地観測で得られた時間降水量に基づき、実験的に特定した雨水による付着塩分量の洗浄効果の評価式 $S(r_i)$ を、ここまでの積算塩分量 $X_{i-1} + Q_i$ に対し適用する.このように求まる付着塩分量をその時刻での最終的な値 X_i とした.その後、i = i + 1として次の時刻の計算へ移る.

以上の手続きを 1-2 か月程度の対象期間に渡って,部位ごとに繰り返しかつ合算することで,ある期間の累積付着塩分量を部位別に評価することができる.

3.9.2 橋梁部位別の付着塩分量計算結果と観測値との比較

Fig. 3.9.2 に付着塩分量の計算値と観測値との比較を,2つの期間を例に示す.計算値は 慣性衝突による付着の重力成分を無視した場合の結果を併記した.付着塩分量は単位面積 当たりの値を日数で除して表した (mg/m²/day).また,横軸は対象橋梁の各部位を示してお り,便宜のため Fig. 3.9.3 として2章に示した橋梁断面図を再掲した.ここで,雨水による 洗浄効果を施す部位は,橋梁の外側に面する部位として,A-D および a-d とした.なお, いずれの部位もスパン中央での値を算出し,観測値との比較を行った.

まずウェブ部について、観測値と計算値が概ね一致する一方、部位 H-J を含むウェブ面 のように、より上部での付着塩分量が多いという観測値の傾向に反する面も見られる.こ れは、桁間の定常流れ場が反時計回りに循環していることから説明が可能である.つまり、 循環流れの接線ベクトルが向かう方向に位置する部位 (例えば J や M) では、壁面方向の 風速が大きいことで付着量も多くなり、逆に離れる方向となる部位 (例えば H と K) では 風速とともに付着量も小さくなるためと考えられる.したがって、定常流れだけでは説明 できない付着現象が存在すると考えられ、付着塩分量の推定精度向上のためには、定常流 れの精緻化とともに、非定常流れ場における大気中塩分の付着特性を調べ、付着塩分量の 予測式へ適切に反映させる必要があると考えられる.

次にフランジ部について,観測値は下フランジ上面の付着塩分量が下フランジ下面より 大きいという傾向を示した.一方,計算では,海塩粒子に作用する重力の効果を反映させ ることで,部位によっては同様の傾向を再現することに成功した.重力を無視した場合は 下フランジ上下面の値の大小が逆転することからも,特にフランジ部のような水平寄りの 面を有する部位においては,付着傾向を適切に再現するためには重力の影響を考慮する必 要があると考えられる.ただし,重力を加味してもいまだ上面の付着量の方が小さい部位 も存在する.この原因として,定常流れ場の精度検証が必要であるとともに,ウェブ部と 同様に流れの非定常成分の付着への寄与,設定した粒子の終端速度の妥当性,ウェブ部に 付着した塩分が結露などで生じた水滴の流下に伴い下フランジ部まで移動している可能性 など,詳細に検討すべきと考えられる.

最後に、雨水による洗浄を施した部位では、観測値に対し計算値の方が小さい傾向にあった.今回は洗浄効果を A-D および a-d の 8 点に一様に適用させた.しかし、例えば A や d の部位は床版の影となるため、雨滴が到達しづらいと予想される.したがって、大気中 を降下する雨滴に作用する重力や空気抵抗、自然風の作用を総合的に考え、部位ごとの被 洗浄可能性を詳細に検討する必要があると思われる.

以上より,提案した橋梁各部位への付着塩分量評価モデルと,それに付随する各種の現 地観測や実験および数値計算を利用することで,全体的には観測で得られた付着塩分量の



Fig. 3.9.2 橋梁部位別付着塩分量の計算値と観測値の比較



Fig. 3.9.3 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A-d (単位:mm,再掲)

値や傾向を再現することが可能と考えられる.予測精度をさらに向上させるためには,定 常流れ場の精度検証,非定常流れの付着への寄与,粒子に作用する重力の影響(すなわち 浮遊粒子の密度や粒径)の精査,海塩粒子の構造表面への詳細な付着機構の解明,部位の 形状や迎角に応じた衝突フラックスの評価位置,結露などによる付着塩分の移動や離脱な どに対して詳細な検討が必要となる.

このように、さらなる精度向上はいまだ必要であるが、本研究で提案した手法を用いる ことで、橋梁部位別の付着塩分量を定量的に評価することが可能になると考えられる.塩 分は鋼橋や鋼部材の腐食における重要な因子であるので、維持管理実務に際しては付着塩



Fig. 3.9.4 付着塩分量面的分布 (2011年3月6日~4月28日,単位:mg/m²/day). 図は上から (a) 海側ウェブ部, (b) 海側下フランジ上面, (c) 下フランジ下面, (d) 崖側下フランジ上面, (e) 崖側ウェブ部を表す. (i)-(vi) は Fig. 3.9.3 参照. (1/2)

分量の多寡を部位別に把握しておくことが望ましいと考えられる.例えば,付着塩分量の 多い部位を集中的に監視することで,塗膜の塗り替えや表面の洗浄などの維持管理を行う 目安となるほか,重塗装を施す部位を決定することも可能と思われる.また,付着塩分量 を数値計算によって知ることができるので,建設前の設計段階でも部位別の腐食環境を把 握することが可能であり,橋梁形状の工夫を行うことで塩分の付着しづらいような構造の 最適化に利用することもできると考えられる.

3.9.3 橋梁主桁表面の付着塩分量の面的分布

本研究では対象橋梁周りの3次元定常流れ場を計算したので,ある部位における面的な 付着塩分量分布も算出することができる.Fig. 3.9.4 は3 主桁それぞれのウェブ部両面およ び下フランジ上下面の計5 面について,付着塩分量の2次元的な面分布を示す.付着塩分 量推定のための提案モデルに従って 50 mm 四方の格子状に風速値の抽出および付着塩分 量を算出し,それらから補間的にコンター図を作成した.なお,壁面方向風速成分につい て,橋軸方向に平滑化フィルターを施したうえで付着量計算に利用した.

図示した5面において、同じ面においても付着量は均一ではなくある分布を持つことが 分かる.これは橋梁自体の形状や周辺地形および接近風向の影響のため、部位ごとに局所 的な風環境が存在するためと考えられる.例えば、中央主桁の下フランジ下面に着目する



Fig. 3.9.4 付着塩分量面的分布 (2011年3月6日~4月28日,単位:mg/m²/day). 図は上から (a) 海側ウェブ部, (b) 海側下フランジ上面, (c) 下フランジ下面, (d) 崖側下フランジ上面, (e) 崖側ウェブ部を表す. (i)-(vi) は Fig. 3.9.3 参照. (2/2)



Fig. 3.9.5 中央主桁下フランジ下面の劣化の様子.海側 (写真右側)端部の劣化が目立つ

と、海側端部の付着量が他よりも大きいことが分かる.これは Fig. 3.9.5 に示すように、実 橋でも当該の部位において劣化が進行していることが確認でき、付着塩分量が多いことが 示唆される.また、橋台側の方がスパン中央部よりも多く付着しており、吹き溜まりのよ うになることで付着量が増加するためと考えられる.面ごとに比較すると、観測と同様に 下フランジ周りの付着量がウェブ部よりも多いことも確認することができる.これらの図 からも、効率的な維持管理においては、このような局所的な付着量分布をあらかじめ把握 しておき、付着塩分量の多い部位を集中監視することが望ましいといえる.

3.10 本章のまとめ

本章では、数値計算による橋梁部位別の付着塩分量推定を目的に、付着塩分量評価モデ ルを提案した.また、提案モデルの利用に際し必要となる各種パラメータを特定するため の検討を併せて行い、必要となる数値解析手法の概要も説明した.さらに、橋梁表面に付 着した塩分が離脱する要素の一つとして、雨水による付着塩分の洗浄効果を実験的に評価 した.対象橋梁である3主桁鋼橋を対象に提案モデルによる付着塩分量計算を行い、実測 値との比較を行うことで、その妥当性や改善点を検討した.以下に本章のまとめを示す.

提案モデルについて,

 数値計算によって橋梁部位別の腐食環境を把握することを目的に、橋梁表面の付着塩 分量の評価モデルを提案した.このモデルは大気中塩分の慣性衝突による橋梁表面へ の付着と拡散による沈着を考慮している.入力として大気中塩分濃度と当該地点の風 向・風速が必要で、対象橋梁周りの定常流れ場計算から得られる部位近傍風速に基づ いた付着量評価が可能である.

対象橋梁周りの流れ場計算について,

● 提案モデルによる付着塩分量評価に際し必要となる部位近傍の壁面直角方向風速成 分を得ることを目的に,数値流体力学 (CFD)の技術を用いてレイノルズ平均モデル
(RANS) を解くことで,対象橋梁モデル周りの定常流れ場計算を行った.それに際し, 対象橋梁とその橋台に加え,周辺地形として海面,消波ブロック,地面,崖のモデル 化も併せて行った.さらに,接近風向別の定常流れ場を算出し,対象橋梁地点の風況 を考慮した付着塩分量評価を可能とした.

算出された定常流れ場は対象橋梁や周辺地形の影響を受けた分布であり、橋梁だけではなく周囲の環境を考慮することが対象橋梁周りの風速分布を把握するうえで重要と考えられる.また、特に桁間において接近風向に応じて異なる流れ場が形成されることが分かった.したがって、橋軸直角方向の接近風による2次元計算だけではなく、橋梁周りの流れを3次元的にとらえる必要があるといえる.桁間では基本的に反時計回りの循環流れが形成されたが、その強度や発生位置は接近風向によって異なる.ここで、定常的な循環流れが形成されることから、循環流れが壁面から離れる方向となる一部の部位では大気中の塩分が付着しづらく、流れの非定常成分の寄与について検討する必要がある.

大気中塩分の壁面への衝突フラックス評価位置について,

- 提案モデルにおいては大気中塩分の壁面への衝突フラックスを壁面からどれだけ離れた位置で評価すべきかが問題となる。本研究では、非定常流れにおいて海塩粒子 個々の挙動を追跡することで、より実現象に忠実な付着塩分量評価が可能と考え、真 値として比較対象に利用した。一方、提案モデルにおいてフラックスの評価位置を 様々に変えることで、適切な付着量評価位置を検討した。ただし、ここでは鉛直平板 を対象とした検討を行っており、異なる形状や寸法、および角度を有する物体にも今 回の結果を利用することができるかは別途検証が必要である。
- 鉛直平板を鉛直方向に 10 分割し,各領域でフラックス評価位置の検討を行ったところ,いずれの部位でも壁面からおよそ 35 mm 離れた地点で提案モデルによる付着塩分量が真値と一致することが明らかとなった.対象橋梁の付着塩分量評価においてもこの結果を利用した.ただし,検討に用いた定常および非定常の鉛直平板周り流れの算出条件,粒子追跡に用いた大気中塩分濃度や海塩粒子の粒径・密度などの影響について,今後の検証が必要と考えられる.

雨水による橋梁表面の付着塩分量の洗浄効果について、

- 橋梁表面の付着塩分量を定量的に精度よくとらえるには、付着した塩分が表面から離 脱する効果を考慮する必要がある.ここでは、その一要因として橋梁表面に到達した 雨水による洗浄効果を実験的に検討した.
- 実橋に適用される塗装仕様 (C-5 塗装系)を施した I 字鋼供試体とトタン板供試体を 用いた実験より,洗浄後の残存塩分率は時間降水量の増加とともに小さくなることが 確認された.また,表面が滑らかなトタン板の方で残存塩分率が小さく,表面粗度が 付着塩分の移動を拘束する役割を持つことが示された.また,供試体の暴露角度を変 えることで洗浄特性は大きく変わることが明らかとなった.実橋においては,雨水が 表面に到達する位置に存在する部材であることと,表面に到達した雨滴が付着塩分と ともに流下できるような構造であることが,雨水による付着塩分の洗浄が生じる条件

と考えられる.

対象橋梁表面の付着塩分量計算結果について,

- 提案モデルに基づいて対象橋梁部位別の付着塩分量を計算し,現地観測による実測値との比較を行ったところ,全体的な付着傾向の再現が概ね可能であることが明らかとなった.また、ウェブ部では付着量のオーダーが一致し、下フランジ部では上面の方が下面よりも付着量が大きいという傾向を再現することができた.ただし、ウェブ部において、観測値は下方ほど付着量が大きい傾向を示すが、計算値は面によっては反対の結果であり、反時計回りの循環流れに強く依存したものと考えられる.また、下フランジ部においても、一部では上下面の傾向が逆転して算出されており、流れ場計算の精度とともに、海塩粒子に作用する重力の影響として取り込んだ海塩粒子の終端速度の妥当性について検討を行う必要がある.
- 面ごとの2次元的な付着量分布の算出も行い、同じ面でも部位によって付着量は異なることを明らかにした.これは、橋梁自体や周辺地形の影響を受けることで、部位ごとに局所的な風況が存在するためと考えられる.したがって、橋梁維持管理の実務においては、このような局所性をあらかじめ把握しておき、付着量の多い部位を集中監視することが可能と思われる.
- さらなる精度向上はいまだ必要であるが、本研究で提案した手法を用いることで、橋梁部位別の付着塩分量を定量的に評価することが可能になると考えられる.例えば、付着塩分量の多い部位を集中的に監視することで、塗膜の塗り替えや表面の洗浄などの維持管理を行う目安となるほか、重塗装を施す部位を決定することも可能と思われる.また、付着塩分量を数値計算によって知ることができるので、建設前の設計段階でも部位別の腐食環境を把握することが可能であり、橋梁形状の工夫を行うことで塩分の付着しづらいような構造の最適化に利用することもできると考えられる.

参考文献

- [3.1] 建設省土木研究所:飛来塩分量全国調査 (IV) -飛来塩分量の分布特性と風の関係
 -,土木研究所資料第 3175 号, 1993.
- [3.2] 武邊勝道,松崎靖彦,大屋誠,安食正太,古川貴士,麻生稔彦:耐候性鋼橋梁の表面状態と付着塩類量の関係,土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 2, 172-180, 2007.
- [3.3] 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡: 耐候性鋼橋梁の断面部位別の 腐食特性とその評価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, 297-311, 2010.
- [3.4] チェンデラ ロナルド,勝地弘,山田均,佐々木栄一:橋桁周りの飛来塩分挙動推 定に関する研究,構造工学論文集, Vol. 58A, 528-541, 2012.
- [3.5] Hasebe, H., Sakakibara, Y., Yamaya, K., Sone, R., Haruki, Y., Nomura, T.: Wind tunnel experiment to estimate the amount of airborne sea salt adhering to the surface of a bridge, Proc. 14th International Conf. on Wind Eng., ID_2336, USB flash drive, Porto Alegre, Brazil, 22-26 June, 2015.

- [3.6] 加藤真志,武田勝昭:飛来塩分の数値解析的評価技術の橋梁への適用〜耐候性鋼材 適用地域拡大への試み〜,鋼構造論文集,第7巻,第28号,45-54,2000.
- [3.7] 中村秀治,藤井堅,緒方琴未,田口義隆:地形影響を考慮した飛来塩分量の推定と 構造物への塩分付着に関する検討,鋼構造論文集,第14巻,第55号,2007.
- [3.8] 小畑誠,李国泰,渡辺泰成,後藤芳顕:局所および広域解析を組み合わせた付着塩 分量推定法に関する研究,構造工学論文集, Vol. 58A, 668-678, 2012.
- [3.9] 高橋幹二:エアゾロル学の基礎,森北出版,2003.
- [3.10] 坪倉佑太,広瀬望,武邊勝道,大屋誠:山陰地方における大気中の塩分濃度計測に 基づく鋼材への塩分付着率の推定,構造工学論文集,Vol.62A, 549-558, 2016.
- [3.11] 日本風工学会:風工学ハンドブックー構造・防災・環境・エネルギーー,朝倉書店, 2007.
- [3.12] 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂, 1999.
- [3.13] Spalding, D. B.: A single formula for the law of the wall, Journal of Applied Mechanics, 28, 455-458, 1961.
- [3.14] 越塚誠一:数值流体力学,培風館, 98-110, 1997.
- [3.15] Ferziger, J. H., Perić, M. (小林敏雄,大島伸行,坪倉誠 訳): Computational methods for fluid dynamics (コンピュータによる流体力学),シュプリンガー・ジャパン, 2003.
- [3.16] Lewis, R.I.: Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering system, Cambridge University Press, 2005.
- [3.17] 中西克佳,加藤真志,岩崎英治:風洞実験による橋梁断面の部位別付着塩分分布評価手法に関する基礎的研究,土木学会論文集 A1, Vol. 67, No. 2, 326-335, 2011.
- [3.18] OpenCFD Ltd. (ESI Group): The open source CFD toolbox, http://www.openfoam.com/, 2004.
- [3.19] 一般財団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析,森 北出版, 2016.
- [3.20] Kato, M., Launder, B. E.: The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, Ninth symposium on "turbulent shear flows", 10-4, Kyoto, Japan, August 16-18, 1993.
- [3.21] 村上周三, 持田灯, 近藤宏二:改良 k-e による2次元建物モデル周辺気流の数値計 算, 生産研究, 47巻, 2号, 107-111, 1995.
- [3.22] Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., Speziale, C. G.: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 7, 1510-1520, 1992.
- [3.23] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu., J.: A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows—Model development and validation, Computers Fluids., Vol. 24, No. 3, 227-238, 1995.
- [3.24] 中口博,橋本貴久裕,武藤真理:矩形断面の柱の抗力に関する一実験,日本航空学 会誌, Vol. 16, No. 168, 1-5, 1968.
- [3.25] 飯塚悟,村上周三,持田灯,土屋直也:生成された変動風を流入境界条件とする 2 次元角柱周辺流れの LES,東京大学生産研究,52巻,1号,71-74,2000.

- [3.26] Lee, S., Lele, S.K., Moin, P.: Simulation of spatially evolving turbulence and the applicability of Taylor's hypothesis in compressible flow, Phys.Fluid, A4, 7, 1521-1530, 1992.
- [3.27] 伊藤靖晃, 白土博道, 野澤剛次郎: LES におる等方性乱流場における変動空気力の 空間相関評価に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 59A, 616-626, 2013.
- [3.28] 岩谷祥美:任意のパワースペクトルとクロススペクトルを持つ多次元の風速変動シ ミュレーション,日本風工学会誌,11,5-18,1982.
- [3.29] 野澤剛二郎,田村哲郎:流入変動風作成におけるラフネス配置と乱流境界層の性状, 土木学会第58回年次学術講演会,247-248,2003.
- [3.30] 田村哲郎:都市における風の乱流構造に関する LES,日本流体力学会会誌ながれ, 29, 3-14, 2010.
- [3.31] 吉川優,中村良平:数値流体解析による高層建築物の風荷重評価,大成建設技術センター報,第43号,1-4,2010.
- [3.32] 後藤俊幸: 流体乱流とくりこみ群, 数理解析研究所講究録, 1134 巻, 89-100, 2000.
- [3.33] 梶田健一,後藤俊幸:乱流における局所エネルギー散逸率とエネルギー流束の統計, 数理解析研究所講究録, 1285 巻, 201-210, 2002.
- [3.34] 小窪幸恵, 岡村甫:海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量の算定モデル, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 4, 259-268, 2009.
- [3.35] 岩崎英治,伊藤俊,小島靖弘,長井正嗣:数値シミュレーションによる橋梁断面周 辺の飛来塩分の推定,土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 4, 752-766, 2010.
- [3.36] 加藤央之,赤井幸夫:簡易型塩分飛散予測モデルの構築と評価,農業気象,57(2), 79-92,2001.
- [3.37] 原修一,三浦正純,内海靖,藤原俊明,山本雅貴:高圧水洗のさび性状および腐食 速度に及ぼす影響,Zairyo-to-Kankyo, 54, 343-349, 2005.
- [3.38] 磯光男,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, 220-236, 2010.
- [3.39] 小畑誠:塩分の飛来・付着特性と塗装の劣化を考慮した鋼桁洗浄システムの開発, 平成20年度建設技術研究開発助成制度,2012.
- [3.40] 梶村周平, 宮本重信: 消雪用水を利用した橋梁洗浄の研究, 平成24年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 施工・安全管理・対策部門, No.13, 2014.
- [3.41] 松坂修二, 増田弘昭: 微紛体の再飛散現象, 紛体工学会誌, Vol. 29, No. 7, 530 (30)-538 (38), 1992.
- [3.42] Cole, I. S., Lau, D., Chan, F., Paterson, D. A.: Experimental studies of salts removal from metal surfaces by wind and rain, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 39, No. 4, 333-338, 2004.
- [3.43] Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation: Final report: Learning system for life prediction of infrastructure, 2005-003-B-12, Icon.Net Pty Ltd., Brisbane, Australia, 2007.

第4章 橋梁表面おける結露による水滴の発生と

その流下に伴う付着塩分の洗浄効果

4.1 概説

水は3大腐食因子の一つなので、橋梁表面に生じる水分は基本的に腐食を促進させると 考えられる. 序論でも述べたように腐食は電気化学反応であり、水と酸素の存在によって 電子の移動が生じ、結果として鉄が酸化する [4.1]. そのため、例えば紀平ら [4.2] や鹿毛 ら [4.3] など、腐食環境の評価式には一般に水の影響を表すパラメータとしてぬれ時間 (Time of wetness, *TOW*) が使われ、ぬれ時間の増加とともに腐食環境が悪化するとされる. ぬれ時間については ISO 9223 [4.4] で述べられており、結露や降雨、融雪、高湿度など様々 な原因のぬれを見積もる指標として、「相対湿度 80%以上かつ気温 0 度以上」が挙げられ ている. このような理由から部材表面のぬれについては多様な研究がなされている. 例え ば、年平均気温と年平均湿度から年間ぬれ時間を統計的に推定する手法 [4.5]、Atmospheric Corrosion Monitor (ACM) 型腐食センサによるぬれ時間の評価 [4.6] [4.7]、温湿度や鋼表面 温度の実測による結露時間の評価 [4.8]、箱桁内の結露生成シミュレーション [4.9]、断熱 塗料による結露抑制 [4.10]、屋根瓦の温湿度の非定常解析に基づいた結露発生量予測 [4.11] などである.

ここで,過去の観測結果 [4.12] より,橋梁表面に付着する塩分量は時間に比例して増加 するのではなく,次第に収束するような変化を見せる可能性が示唆されている.この原因 として,付着塩分量の増加に伴い新たな塩分が付着しづらくなることや,外的な要因で付 着塩分が取り除かれることが予想される.後者については,風などの外力による再飛散 [4.13] や,水滴の移動による洗浄 [4.14] が挙げられる.このうち水滴の移動による洗浄に ついては,強制洗浄 [4.15]-[4.17] や雨水による洗浄 [4.18]-[4.20] に関する研究が行われ ているが,結露による洗浄についてはあまり検討されていない.これは最初に述べたよう に,結露は一般に腐食を促進するとみなされていることが一因と思われるが,結露で生じ た水滴が過大に成長したり風などの外力を受けたりすると,部材表面を流下する過程で付 着塩分を洗浄する可能性は十分に考えられる.いずれにせよ,付着塩分量を推定する際に この効果を無視すると,特に長期の付着量予測において予測値は過大になりやすいといえ る.前章において,雨水による付着塩分の洗浄について実験的に検討を行ったが,この作 用は雨滴の到達する橋梁外側の面のみに限られ,桁間となる部位では降雨による洗浄は生 じない.したがって,特に桁間の部位における付着塩分量の精度よい評価のためには,結 露による水滴流下に伴う塩分洗浄を考慮することが必要と考えられる.

本章では、このような結露に起因する橋梁表面付着塩分の洗浄効果を再現し、かつ前章 に示した筆者らの付着塩分量推定手法に組み込むことで、より精度のよい付着塩分量の定 量的評価を実現することが目的である.以下は温湿度や放射を入力とした熱伝導計算によ る対象橋梁の鋼桁表面温度の算出、それに基づく発生水量の予測、および水滴の流下に伴 う洗浄効果の測定実験から成る.また、入力となる気象要素の算出には領域気象モデルを 利用したので、その概要ならびに計算条件および計算結果も併せて示す.

なお,以上に示したように,水分の発生が腐食にとってどのようにふるまうかを一概に 論ずることは難しいと思われる.鋼材の腐食を考える際には,水分による腐食の進行と, その流下に伴う塩分減少による腐食の抑制を総合して検討すべきといえる.ただし,本研 究では付着塩分量の定量的な評価を目的にしており,水滴流下による塩分洗浄にのみ着目 して検討を行っていることをここに記しておく.

以下に本章の構成を示す.

4.2-4.4 節では領域気象モデル WRF について述べる.4.2 節に領域気象モデルを必要と する理由と共に WRF の概要を,4.3 節に本研究での計算条件を,4.4 節に得られた結果に ついて説明する.4.5-4.8 節では結露の発生とその流下による洗浄について述べる.4.5 節 に WRF の計算結果を利用した対象橋梁主桁温度の算出を,4.6 節に得られた温度に基づく 発生水量の評価を,4.7 節に水滴の流下による付着塩分洗浄効果を示す.4.8 節では結露に よる水滴の発生とその流下による付着塩分の洗浄も考慮した付着塩分量計算のアルゴリズ ムを示すとともに,実際に付着量計算を行い,洗浄効果を確認する.最後に4.9 節にて本 章のまとめを述べる.

4.2 領域気象モデル WRF について

耐候性鋼の無塗装利用可能地域は飛来塩分量と離岸距離に基づき規定されている [4.21]. しかし,飛来塩分量は地形や気象の影響を強く受けるため,離岸距離だけでは構造物地点 の腐食環境を適切に評価することは難しい.さらに,捕集器具やワッペン試験片を用いた 現地観測では時間や費用を要するのはやむを得ず,また維持管理の実務においては,複数 の構造物を広域的かつ同時に管理をしなければならない.このような状況を踏まえると, 構造物ごとに現地観測やモニタリングを行うのではなく,腐食環境を広域的かつ同時に, さらには簡易的に集中監視できることが望ましいといえる.

本研究では領域気象予測モデルの1つである Weather Research & Forecasting (WRF) model [4.22] を採用し、数値解析によって任意地点の気象要素や大気中塩分濃度を推定する手法 について検討を行った.WRFの計算においては、格子状に整備された気象要素や標高およ び土地利用のデータを初期値や境界条件として与え、データよりも細かな計算格子を設定 することで、元のデータをスケールダウンさせつつ任意地点および時間のデータを得るこ とが基本的な運用となる.WRFの利用例は多岐に渡るものの、土地利用や標高に基づいた 計算のためにその精度は土地依存と考えられることから、利用に際しては対象地点での予 測精度を把握する必要がある.また、大気中塩分濃度の算出は十分に検討されているとは いえず、併せて精度検証が必要といえる.本研究では対象橋梁である天鳥橋地点を中心と した計算領域を設定し、当該地点と周辺のアメダス観測地点における気象要素と大気中塩 分濃度の算出精度を検証した.

4.2.1 概要

WRF は次世代型のメソ数値気象予測モデルで,数十メートルから数千キロメートルまで



Fig. 4.2.1 η座標系の概要 [4.24]

の気象現象を対象とし,大気研究と現業の気象予測の両方に適応することができる.また, 実気象場の解析に加え,理想条件でのシミュレーションにも対応する.WRFの開発は1990 年代後半にアメリカ大気研究センター (National Center for Atmospheric Research, NCAR), アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration),空軍気象局 (Air Force Weather Agency, AFWA),海軍研究所 (Naval Research Laboratory),オクラホマ大学 (University of Oklahoma),連邦航空局 (Federal Aviation Administration, FAA) によって始め られた.現在の利用は130 か国以上25,000 人以上に至る.

WRFには2つのソルバが用意されており,それぞれ ARW (Advanced Research WRF) お よび NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model) と呼ばれる. ARW は主に研究用, NMM は現 業用として用いられ,本研究でもそれに倣い ARW を用いた.モデルに関する詳細は User's Guide [4.23] や Technical Note [4.24] から得られ,本報の記述も主にこれらに従う.本研究 で用いたのは WRFV3.5 (バージョン 3.5) であるが, 2016 年 12 月現在では最新の WRFV3.8 が配布されている.以下では簡単のため, ARW と NMM やそのバージョンを区別せず WRF と呼ぶ.また,差分方法として,時間差分に3次精度のルンゲ・クッタスキーム,空間差 分に2次精度からから6時精度のスキームなど,高精度な計算スキームを備えている.

一方, WRF のワーキンググループの1つである Atmospheric Chemistry グループは, WRF Atmospheric Chemistry (WRF-Chem) Model パッケージを提供している [4.25]. これは WRF 内に組み込むことで,本研究で対象とする海塩粒子の他にも,火山灰や二酸化炭素など様々 な化学種を気象要素とともに解析することができる.

4.2.2 支配方程式

WRFは3次元完全圧縮非静水圧モデルであり,鉛直方向には式 (4.2.1) および Fig. 4.2.1 で表される地形に沿った座標系 (σ座標系または η 座標系) が採用されている.また,μは

式 (4.2.2) で表され、単位面積当たりの質量を表す.式中の *p*_hは圧力の静水圧成分, *p*_{hs} および *p*_{ht} はそれぞれ地表と上部境界での値である.つまり、この座標系では地表部で1、上部境界で0となる.

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \tag{4.2.1}$$

$$\mu = p_{hs} - p_{ht} \tag{4.2.2}$$

対象とする空間について、平面を x および y 座標,鉛直方向を η 座標で定義すると、フ ラックス形式のオイラー方程式を基に、湿度・地図投映を考慮したうえで、各変数の変動 成分を用いることで支配方程式は表される.各方向の運動量式は次のように表される.

$$\partial_{t}U + m_{x} \left[\partial_{x} (Uu) + \partial_{y} (Vu) \right] + \partial_{\eta} (\Omega u) + (m_{x} / m_{y}) (\alpha / \alpha_{d}) \left[\mu_{d} (\partial_{x} \phi' + \alpha_{d} \partial_{x} p' + \alpha'_{d} \partial_{x} \overline{p}) + \partial_{x} \phi (\partial_{\eta} p' - \mu'_{d}) \right] = F_{U}$$

$$(4.2.3)$$

$$\partial_{t}V + m_{y} \left[\partial_{x} (Uv) + \partial_{y} (Vv) \right] + \left(m_{y} / m_{x} \right) \partial_{\eta} (\Omega v) + \left(m_{x} / m_{y} \right) \left(\alpha / \alpha_{d} \right) \left[\mu_{d} \left(\partial_{x} \phi' + \alpha_{d} \partial_{x} p' + \alpha'_{d} \partial_{x} \overline{p} \right) + \partial_{x} \phi \left(\partial_{\eta} p' - \mu'_{d} \right) \right] = F_{V}$$

$$(4.2.4)$$

$$\partial_{t}W + (m_{x}m_{y} / m_{y})[\partial_{x}(Uw) + \partial_{y}(Vw)] + \partial_{\eta}(\Omega w) - m_{y}^{-1}g(\alpha / \alpha_{d})[\partial_{\eta}p' - \overline{\mu}_{d}(q_{v} + q_{c} + q_{r})] + m_{y}^{-1}\mu_{d}'g = F_{W}$$

$$(4.2.5)$$

u, v, wは共変速度 (covariant velocities), η は鉛直方向の反変速度 (contravariant velocity), θ は温位で, それぞれに μ を乗ずることでフラックス表記 U, V, W, Ω, Θ となる. φ はジ オポテンシャル, pは圧力, α は密度の逆数, q_v , q_c , q_r はそれぞれ水蒸気, 雲, 雨の混合 比, g は重力加速度を表す. また, 上付きのバーは平均値成分を, アポストロフィは変動 成分を, 下添えの d は乾燥空気に関する値を意味する. m_x em_y は地図投影に関する係数 である. 運動量式の右辺はコリオリ項や曲率項を含んでおり, 等方的な地図投影の場合は $m_x = m_y = m$ として次のように書くことができる.

$$F_{U_{cor}} = + \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) V - eW \cos \alpha_r - \frac{uW}{r_e}$$
(4.2.6)

$$F_{V_{cor}} = -\left(f + u\frac{\partial m}{\partial y} - v\frac{\partial m}{\partial x}\right)U + eW\sin\alpha_r - \frac{vW}{r_e}$$
(4.2.7)

$$F_{W_{cor}} = +e\left(U\cos\alpha_r - V\sin\alpha_r\right) + \left(\frac{uU + vV}{r_e}\right)$$
(4.2.8)

 r_e は地球の半径, α_r は y 軸と子午線との回転角である, $f \ge e$ は地球の回転角速度 Ω_e および緯度 ψ を用い表される.

$$f = 2\Omega_e \sin \psi$$

$$e = 2\Omega_e \cos \psi$$

$$(4.2.9)$$

次に、質量保存則とジオポテンシャル式はそれぞれ次のように書くことができる.

$$\partial_t \mu'_d + m_x m_y \left[\partial_x U + \partial_y V \right] + m_y \partial_\eta \Omega = 0 \tag{4.2.11}$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} \Big[m_x m_y \Big(U \partial_x \phi + V \partial_y \phi \Big) + m_y \Omega \partial_\eta \phi - m_y g W \Big] = 0$$
(4.2.12)

温位や各種混合比の保存式は次の通りである. ただし, Q_m は q_m (= q_v , q_c , q_r , …) に μ を 乗じたフラックス表記である.

$$\partial_t \Theta + m_x m_y \left[\partial_x (U\theta) + \partial_y (V\theta) \right] + m_y \partial_\eta (\Omega \theta) = F_\Theta$$
(4.2.13)

$$\partial_t Q_m + m_x m_y \Big[\partial_x (Uq_m) + \partial_y (Vq_m) \Big] + m_y \partial_\eta (\Omega q_m) = F_{Q_m}$$
(4.2.14)

乾燥密度の逆数に関する静水学的関係は次のように表される.

$$\partial_{\eta}\phi' = -\overline{\mu}_d \alpha'_d - \alpha_d \mu'_d \tag{4.2.15}$$

以上の式 (4.2.3)-(4.2.14) に状態方程式 (4.2.16) を加えた式群が実際に解かれる.各式 の右辺にはコリオリ項らに加え,混合項や物理モデルが含まれる.式 (4.2.16) において, *p*₀ は参照圧力で通常は 10⁵ Pa, *R*_d は乾燥空気の気体定数, *y* は比熱比 (定圧比熱と定積比 熱の比) である.

$$p = p_0 \left(R_d \theta_m / p_0 \alpha_d \right)^{\gamma} \tag{4.2.16}$$

4.3 領域気象モデル WRF の計算領域と計算条件

計算期間は標準時で2013年3月15日12時~2014年3月15日12時(日本時間2013年3月15日21時~2014年3月15日21時)とした. このうち,次節での比較検討に用いるのは2013年3月22日以降のデータであり,最初の約1週間は助走期間として設けている.



Fig. 4.3.1 WRF の計算領域

Table 4.3.1 WRF の計算領域詳細

Name of domain	Size of domain	Size of grid	*Number of grids
Domain 1 (d01)	$621 \text{ km} \times 621 \text{ km}$	$9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$	$69\times69\times29$
Domain 2 (d02)	$207 \; km \times 207 \; km$	$3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$	$69 \times 69 \times 29$
Domain 3 (d03)	63 km × 63 km	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	$63 \times 63 \times 29$

* (East-West direction) \times (North-South direction) \times (vertical direction).

4.3.1 計算領域

本研究では Fig. 4.3.1 に示す計算領域を作成した.計算領域の中央に対象橋梁の天鳥橋 が位置する.また、3 段階のネスティングを採用しており、領域同士のデータの受け渡し は双方向の 2-way nesting とした.ネスティングの手法を採用することで対象周辺を細かな 格子で精度よく計算できるとともに、粗い格子を親領域として用いることで広範囲の地形 や気象条件を効率的に取り込むことが可能となる.各領域の大きさや格子分割の詳細を Table 4.3.1 に示す.なお、大領域を Domain 1、中領域を Domain 2、小領域を Domain 3 と 呼ぶ.親領域と子領域の格子長の比は 3 対 1 が推奨されており、本研究でもそれに倣った. 時間刻みも同様で、Domain 1 より順に 54 s、18 s、6 s とした.より小さな時間刻みを設定 することで数値安定性や計算精度は増すと考えられるが、反対に計算時間が増加すること になる.

4.3.2 初期·境界条件

初期・境界条件として,気象情報には気象庁のメソ数値予報モデル GPV (MSM) [4.26] を 利用した.この気象庁 MSM は標準時で 0 時から 3 時間ごと (4 回/日) にデータが与えら



Fig. 4.3.2 Domain 3 の標高

Fig. 4.3.3 Domain 3 の土地利用

れており,解像度は地上で 0.05°(約 5 km)四方,気圧面で 0.1°×0.125°である.物理量は 1,000–100 hPa の 17 層の気圧面と地上について提供されている.ただし,気象庁 MSM に は高層部分や地表面温度などが含まれないため,米国立環境予測センター (NCEP)の最終 全球解析データ (Final Analysis, NCEP-FNL) [4.27] を補完的に用いた.NCEP-FNL は標準 時で 0 時から 6 時間ごと (4 回/日) にデータが与えられており,解像度は 1°(約 111 km)四 方である.物理量は 1,000–10 hPa の 26 層の気圧面と地上について提供されている.なお, NCEP-FNL は WRF に標準搭載されており,かつ全球に対しデータが与えられているので,地球上の任意の地点を対象として容易に利用することができる.

地形情報には、米国地質研究所 (United States Geological Survey, USGS) の 30 s (約 1 km) メッシュ [4.28] が標準搭載されており、こちらも利用は容易である. Fig. 4.3.2 に Domain 3 の標高の様子を示す.対象橋梁周辺の大部分は海のため標高は低いが、北東側は紀伊半 島の内陸側に相当する山地が広がっている.したがって、基本的に海側から風が吹きやす いものの、その分布は山地の影響を受けて形成されると考えられる.

土地利用情報にも USGS の 30 s (約 1 km) メッシュを利用することができるが、日本の 土地利用の実情には即さないことが例えば小畑ら [4.29] や秋本ら [4.30] によって指摘さ れている.そこで、国土地理院の発行する 100 m メッシュ [4.31] を導入した.このとき、 国土地理院の土地利用区分を USGS の 24 区分 (Global land cover characterization, GLCC) に 関連付け、GLCC に当てられた粗度などの条件をそのまま適用した.ただし、区分 21 と 22 は領域内に該当する土地利用が存在しないことを確認の上で、それぞれ河川地および湖沼 (21) とその他の用地 (22) として用いた.GLCC の 24 区分を Table 4.3.2 に、Domain 3 の 土地利用の様子を Fig. 4.3.3 に示す.大部分が海 (利用区分:16) と山地 (15) で構成され るが、北西部には田辺市街 (1) とその周辺の田畑 (4) が見られる.そのやや南は白浜市街 (1) と南紀白浜空港 (22) に対応する.さらに南方に見られる区分 1 は順に周参見、串本、 潮岬を表すと考えられる.

No.	Category	No.	Category
1	Urban and Built-up Land	13	Evergreen Broadleaf
2	Dryland Cropland and Pasture	14	Evergreen Needleleaf
3	Irrigated Cropland and Pasture	15	Mixed Forest
4	Mixed 2 and 3	16	Water Bodies
5	Cropland/Grassland Mosaic	17	Herbaceous Wetland
6	Cropland/Woodland Mosaic	18	Wooden Wetland
7	Grassland	19	Barren or Sparsely Vegetated
8	Shrubland	20	Herbaceous Tundra
9	Mixed 7 and 8	21	Wooded Tundra (→Lakes)
10	Savanna	22	Mixed Tundra (→Others)
11	Deciduous Broadleaf Forest	23	Bare Ground Tundra
12	Deciduous Needleleaf Forest	24	Snow or Ice

Table 4.3.2 GLCC による土地利用 24 区分

これらの情報を対象とする計算領域の初期・境界条件として使えるように編集する必要 があるが,WRFではその作業はWRFPreprocessing System (= WPS)を始め、標準搭載され ている機能によって容易に行うことができる.

4.3.3 物理モデルおよび化学モデル

物理モデルは WRF-Chem のチュートリアルに倣い Table 4.3.3 の各モデルを用いた. なお,モデルの選択や組み合わせについては既往の報告 [4.32] があるほか,筆者ら [4.33] も 一部検討済みであり,新潟平野部を中心として予測精度を検証している.

化学モデルには the Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport model (GOCART) お よび the Modal Aerosol Dynamic Model for Europe / the Secondary Organic Aerosol Model (MADE/SORGAM) の2種類を用い,それぞれで大気中塩分濃度を算出した.GOCART は 粒径を基準に4つのビン (半径 0.1–0.5, 0.5–1.5, 1.5–5.0, 5.0–10.0 μ m) に分け,それぞれ の範囲の濃度を算出するもので,WRF で利用できる化学モデルの中では比較的軽負荷とさ れる.一方,MADE/SORGAM では粒径に応じて3つの対数正規分布を仮定し,その重ね合 わせによって全体の塩分濃度を評価する手法である.海塩粒子の発生個数は風速の関数と して式 (4.3.1) と,それに付随する式 (4.3.2) および式 (4.3.3) で表される [4.34] [4.35].

$$\frac{\partial F_n}{\partial r} = c_1 U_{10}^{\ c_2} r^{-A} \left(1 + c_3 r^{c_4} \right) \times 10^{c^5 \exp\left(-B^2\right)}$$
(4.3.1)

$$A = 3$$
 (4.3.2)

$$B = (b_1 - \log r)/b_2 \tag{4.3.3}$$

Table 4.3.3 WRF で利用する物理モデル一覧

Heads	Heads in Japanese	Models
Microphysics	雲物理	WSM5
Cumulus Parametrization	積雲	Grell 3D
Surface Layer	接地層	MM5 similarity theory
Land-Surface	地表面	Noah Land Surface Model
Planetary Boundary Layer	大気境界層	Yonsei University Scheme
Longwave Radiation	長波放射	Rapid Radiation Transfer
Shortwave Radiation	短波放射	Dudhia scheme

r は相対湿度 80%での半径, U₁₀ は地上 10 m での風速で, 他の係数は式 (4.3.4) に示される.

 $c_1 = 1.373, c_2 = 3.2, c_3 = 0.057, c_4 = 1.05, c_5 = 1.190, b_1 = 0.380, b_2 = 0.650$ (4.3.4)

なお、この式は大西洋などでの観測に基づき導出されており、日本周辺の海洋でも必要 な精度を得られるかは十分に検討されておらず、今回の計算においても留意する必要があ る.ただし、海塩粒子の個数濃度や重量濃度が風速に依存することは知られており [4.36]、 その点では妥当なモデルと思われる.

4.3.4 ナッジングによるデータ同化手法

ナッジング (Nudging) とは、計算値をあらかじめ用意された解析値や観測値に近づける 手法である.数値計算においては必ず何らかの誤差が生じるといえるが、ナッジングには そのような計算の進行に伴い生じる誤差を最小限に抑える役目を持つといえる.ナッジン グの適用法については、例えば義江ら [4.37] や石原ら [4.38] が検討している.ナッジン グの適用の概要は式 (4.3.5) で表される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F(\theta) + G_{\theta} W_{\theta} (\hat{\theta}_0 - \theta)$$
(4.3.5)

 θ は任意の変数で、 $F(\theta)$ は通常の計算値、 $\hat{\theta}_0$ はナッジングに用いられる解析値や観測値 である. W_{θ} は重みで、 G_{θ} はナッジングの強度を決めるナッジング係数と呼ばれ、デフォル ト値である 0.0003 を用いた.本研究では大領域である Domain 1 の平面風速、温度、比湿 に対しナッジングを適用した.



Fig. 4.3.4 対象橋梁地点における温湿度・表面気圧・短波放射・降水量の WRF による計算 値と観測値の比較



Fig. 4.3.5 対象橋梁地点における月別平均風速・風向別平均風速・風向別生起頻度の WRF による計算値と観測値の比較 (1/2)

4.4 領域気象モデル WRF の算出結果と観測値との比較

WRFで得られた値の精度検証のため、対象橋梁の天鳥橋地点の算出データを2章に示し た現地観測値と比較した.Fig.4.3.4 に気温,湿度,表面気圧,短波放射,降水量の月別平 均値または積算値を示す.いずれのパラメータも季節変動を明確に再現しており,値も高 い精度で一致した.短波放射(すなわち日射)がやや過大評価されているが、これは対象 橋梁そばの崖によって日射の一部が遮られる効果を、WRFの計算では再現することができ なかったためと考えられる.なお、短波放射が過大評価されたのは春から秋にかけてであ る.日の出の方位は春分の日と秋分の日に真東で、夏季はそれよりも北に寄ること、およ び橋梁と観測地点が崖の西側に位置することから、これらの時期では日射が崖に遮られる 時間が長くなることが過大評価の原因と推測される.また、6月に日射量が少ないのは梅 雨の時期が再現されたためといえる.降水量も全体的には観測値の傾向をよくとらえたが、 観測値の方がやや大きい傾向にある.このうち、9月は複数の台風が対象橋梁地点に接近 したことで降水量観測値が大きくなったと推測される.このような特殊なイベントをWRF で十分に再現できていない可能性があり、計算格子解像度の影響や適用モデルの選定など について検討する必要がある.

Fig. 4.3.5 に,月別平均風速,風向別平均風速,風向別生起頻度を示す.計算値は地上 10 m (*z*₁₀) での値 *U*₁₀を用いるので,観測値をべき乗則 (べき乗数 *p* = 1/7) [4.39] を用いて地 上 10 m 相当の値に変換した.べき乗則は式 (4.4.1) で表される.この式は対象とする高さ *z* における風速 *U*を示している.

$$U = U_{10} \left(\frac{z}{z_{10}}\right)^p \tag{4.4.1}$$

温湿度や気圧を精度よく再現することができた一方、風速の季節変動は概ね再現された



Fig. 4.3.5 対象橋梁地点における月別平均風速・風向別平均風速・風向別生起頻度の WRF による計算値と観測値の比較 (2/2)



Fig. 4.3.6 南紀白浜および潮岬における WRF による計算値と気象庁観測値の比較 (1/2)

ものの計算値と観測値が大きく離れており,生起頻度も異なる風向にピークが見られる. これは天鳥橋そばに崖が存在するので,当該地点が局所性の強い風況を持つためと考えられる.風速や頻度の観測値が海面である西側にピークを持つことからも崖の影響が示唆される.したがって,今回採用した1km四方の計算格子ではこのような特殊な地点の風況を 再現するには十分とはいえないと思われる.

一方, Fig. 4.3.6 には,近隣の気象庁観測地点である南紀白浜と潮岬における期間別平均 風速,風向別平均風速,風向別生起頻度の計算値と観測値の比較結果を示す.対象橋梁地 点に比べ良好な計算値が得られたことが分かる.特に南紀白浜においては,期間別平均風 速は9月までは精度良い一致を見ており,風向別平均風速および生起頻度も概ね再現され



Fig. 4.3.6 南紀白浜および潮岬における WRF による計算値と気象庁観測値の比較 (2/2)

た. この観測地点は南紀白浜空港内に設置されているため周囲に障害物はほぼなく,WRF における周辺地形や土地利用が現地の様子によく一致するためと推測される.このように, 今回の計算条件でも広域的にはある程度妥当な計算が行われたと考えられる.ただし,い ずれにせよ風速値に関して改善の余地があり,より細かな格子を採用するとともに高解像 度の気象や地形情報を境界条件に与えた計算や,WRFよりも小さな空間スケールを対象と した計算 [4.40] を CFD に基づき行うことで,風速や風向の精度良い再現に至ると考えら れる.

ここで,以上のパラメータについて計算値と観測値との相関係数を Table 4.3.4 に示す. 相関係数もこれまでに図示した結果と概ね対応しており,風速は相関が小さいものの,他 のパラメータは良い相関を示した.相対湿度の相関はやや低く,雲物理のモデルが強く影 響すると予想され,種々のモデルによる感度分析が検討に値すると思われる.

Fig. 4.3.7 に期間平均大気中塩分濃度を示す. 図中の観測値は円筒型飛来塩分捕集器によ

Wind speed	Temperature	Relative	Surface pressure	Short wave	
	Temperature	humidity	Surface pressure	radiation	
0.5374	0.9814	0.8389	0.9965	0.9287	

Table 4.3.4 WRF で算出されたパラメータと観測値との相関係数



Fig. 4.3.7 期間平均大気中塩分濃度の WRF による計算値と観測値の比較

るもので、WRF の計算値は観測期間に対応する数か月ごとの平均である.計算値は GOCART と MADE/SORGAM のそれぞれから得た.ただし、WRF で得られる大気中塩分濃 度 C_{WRF} [kg/kg (dry air)]を円筒型飛来塩分捕集器で得られる大気中塩分濃度 C_{TCD} [mg/m³] と比較するため、20°C および 1 気圧における空気密度 ρ = 1.205 kg/m³ と単位変換のための 係数 m = 0.001 を用いて次式のように単位変換を行った.

 $C_{TCD} = m\rho C_{WRF} \tag{4.4.2}$

GOCART による計算値が観測値を比較的精度よく再現した一方で,MADE/SORGAM は 過小評価となった.ただし,これはいずれの地点を対象とした計算においても同様の精度 を示すことを保証するものではない.対象橋梁地点は海に面しており,比較的大きな粒子 が飛来しやすい特殊な条件ともいえるので,他の海岸部や内陸地点での予測精度も今後検 討すべきといえる.また,先述の風速の過大評価が影響している可能性もあり,併せて留 意しなければならない.なお,8月29日~10月18日で観測値が大きいのは降水量と同様 に台風の影響と考えられ,WRFによる再現可能性の検証が必要である.

Fig. 4.3.8 は日本時間 2013 年 5 月 17 日 9 時の Domain 3 における地上 10 m での東西方向 風速と南北方向風速,および最下層セルの GOCART による 1.5-5.0 µm 海塩粒子の濃度の 平面コンター図である.風速は地形に沿った分布をしており,局所性が強いといえる.ま た,海上の方が陸上よりも風速の絶対値が大きい傾向にあるが,これは海面の粗度の方が





(c) 1.5-5.0 µm 海塩粒子の濃度 [µg/kg-dryair]

Fig. 4.3.8 日本時間 2013 年 5 月 17 日 9 時の Domain 3 における風速と濃度のコンター図

小さいことの影響と考えられる.一方,海塩粒子濃度も陸地に沿ったような分布ではある が風速ほど明確ではなく,海上から陸地に向けて単調に減少している.また,陸地の濃度 は海上に比べ非常に小さい.ここに示したのはある時刻でのコンター図であるが,月別や 年間の面的分布を調査し,地区ごとの値として風況や塩分濃度やその他のパラメータを整 理することが,橋梁架設地点の腐食環境や,部位別の付着塩分量や劣化度合いを推定する うえで有用な情報になると考えられる.

Symbol	Name	Unit	Value
a_s	鋼板日射吸収率	-	0.725
C_{v}	鋼板の熱容量	J/m ³ /K	$3.61 imes 10^6$
α	対流熱伝達率	$W/m^2/K$	5.0
α'	湿気伝達率	$kg/m^2/s$ (kg/kg')	0.0185
\mathcal{E}_g	地面長波吸収率	-	0.94
\mathcal{E}_{S}	鋼板長波吸収率	-	0.9
λ	鋼板熱伝導率	W/m/K	53
$ ho_g$	地面日射反射率	-	0.2
σ	シュテファン・ボルツマン定数	$W/m^2/K^4$	$5.67 imes 10^{-8}$

Table 4.5.1 熱伝導方程式および発生水量に関するパラメーター覧 (k および n は本文参照)

4.5 対象橋梁主桁表面温度の算出

結露の発生には物体表面の温度と空気の温湿度が影響すると考えられる.ここで、表面 温度を得るためには、放射を勘案しつつ熱伝導方程式から算出する必要がある.本章では、 対象橋梁である天鳥橋3主桁のウェブ部を3枚の鋼板としてモデル化し、その温度変化を 1 次元熱伝導方程式の差分計算で求めた.実際にはウェブ部の鉛直方向の温度分布や下フ ランジの影響も併せて考慮する必要があると思われるが、研究の導入部ということもあり、 条件を簡単にするためこのような設定とした.将来的には2次元や3次元の計算に基づく 温度分布予測を行う予定である.放射や温湿度などの入力値にはWRFの計算値を用いて おり、そのため600sごとに境界条件の更新を行った.なお、WRFで得られた物理量のう ち風速が観測値に対して過大評価されたが、水滴の発生量予測と洗浄効果の再現という本 章の目的において、その本質に影響を与えるものではないと考え、付着塩分量計算を含め たいずれの計算においてもWRFの結果を入力として用いることにした.表面温度の計算 期間はWRFの計算結果を用いるため2013年3月22日~2014年3月11日とした.

4.5.1 支配方程式と境界条件

以下の計算手法やパラメータは各種文献 [4.11] [4.41]-[4.44] を参考にした.表面温度の 算出に際して,天鳥橋の3主I桁ウェブ部をそれぞれ厚さ20mmの鋼板としてモデル化し た.その上で,時間 t[s] および厚さ方向位置 x[m] の関数である鋼板の温度 T(t,x)[K] に ついて,式 (4.5.1) のように厚さ方向のみの1次元熱伝導方程式を解いた.このとき,厚 さ方向は2次精度中心差分,時間方向は前進差分とした.なお,厚さ方向の格子幅は $\Delta x =$ 2 mm,時間刻み $\Delta t = 0.1$ s とした. C_v および λ はそれぞれ鋼板の単位体積当たりの熱容量 [J/m³/K] と熱伝導率 [W/m/K] で,普通鋼の値を採用した.なお,以降の式も併せて,式中 のパラメータは Table 4.5.1 にてまとめて説明する.



Fig. 4.5.1 海側主桁を例とした熱伝導方程式の境界条件 (⇔は対流熱伝達を,→または←は放射を表す)

$$C_{\nu}\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$
(4.5.1)

3 主桁それぞれの両面で計 6 面の境界条件として,対流熱伝達と放射による熱流を考え ており,式 (4.5.2) で表される.右辺第 1 項は対流熱伝達で,外気温 T_{out} [K] と鋼板表面温 度 T_s [K] の熱交換である.外気の温湿度は WRF の結果を橋周りの空間に一様に与えた. α は対流熱伝達率 [W/m²/K] で,本来は風速の関数とすべきであるが,簡単のため気象条 件によらない定数とした. k は放射の変換に関する係数であり,次節で詳述する. ρ_g は地 面の日射反射率で,アスファルトの値とした. θ は地面に対する部材の傾斜角である.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{out} - T_s) + J_{solar} + J_a + J_g - J_r + nJ_r$$

$$(4.5.2)$$

一方で放射は、日射である短波放射 J_{solar} [W/m²] (右辺第 2 項および式 (4.5.3)) と、長波 放射として天空からの放射 J_a [W/m²] (右辺第 3 項および式 (4.5.4)),地面の放射 J_g [W/m²] (右辺第 4 項および式 (4.5.5)),鋼板自身の放射 J_r [W/m²] (右辺第 5 項および式 (4.5.6)),向 かい合う鋼板からの放射 J_r [W/m²] (右辺第 6 項および式 (4.5.6))を考えた.周辺環境とし て床版と地面を考慮しているが、簡単のため床板は放射を遮るのみで、それ自体の放射の 収支は考えないものとした.したがって、床版の影となる橋梁内側の面では $J_{solar} = J_a = 0$ となる.また、天鳥橋の内陸側には崖があり、日射の一部を遮る効果を持つと思われるが、 橋梁崖側での日射量計測データがないため、暫定的に崖の存在を無視した.なお、 a_s およ び ϵ_s はそれぞれ鋼板の日射吸収率と長波吸収率で、天鳥橋の塗装色を参考に赤色ペイント の値とした. ϵ_g は地面の長波吸収率で、アスファルトの値とした. σ はシュテファン・ボル ツマン定数 [W/m²/K⁴] である.なお、これらの境界条件について、海側主桁を例に Fig. 4.5.1 にて模式化した.

$$J_{solar} = \left\{ k \, a_s + \rho_g \left(1 - \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \right\} J_{solar}$$
(4.5.3)

$$J_{a}^{'} = \left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right)\varepsilon_{s}J_{a} \tag{4.5.4}$$

$$J_g = \left(1 - \frac{1 + \cos\theta}{2}\right) \varepsilon_s \varepsilon_g \sigma T_g^4 \tag{4.5.5}$$

$$J_r = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \tag{4.5.6}$$

4.5.2 部材角度を考慮した放射の変換

放射の取り扱いに際しては,放射源と鋼板との相対角度を考慮する必要がある.長波放 射は式 (4.5.4) と式 (4.5.5) のように部材角θの変数として変換することができる.一方, 式 (4.5.3) の短波放射 (日射,鉛直下向きの量として算出される)は,第2項の地面での反 射成分はθに基づき変換することができる.しかし,第1項は厳密には太陽からの直達成 分と空気中での散乱成分に分け,かつ直達成分は太陽の位置も踏まえる必要がある.しか し,今回のWRFの計算では短波放射の成分ごとの算出は行われていない.

そこで、短波放射の変換を簡単に行うために、鉛直下向き短波放射量を一括して斜面短 波放射量に変化させる係数 k (month, hour, θ , φ) を導入した. この係数 k は月ごとおよび 1 時間ごと (12 か月 × 24 時間 = 288 通り) に整理されており、地面に対する鋼板角度 θ (= 90°) の部位が方位角 φ (西南西または北北東) を向く場合の、鉛直下向き短波放射量に対 する斜面短波放射量の比を表す. 係数 k の決定には国立研究開発法人新エネルギー・産業 技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) の日射量データベース [4.45] を用いており、具体的には次のようにした. ただし、この日 射量データはアメダスを元に作成されているため、天鳥橋地点でのデータは存在しない. そのため、天鳥橋近傍であり、日射量に大きな差がないと思われる潮岬地点の値を代用す ることにした.

まず,平均年日射量が任意の部材角度と方位角について 1時間ごとに提供されているの で,365日分の毎時値 (365日×24時間)を月ごとに同時刻で平均をとることで,12か月 ×24時間分の情報に圧縮した.これは,日ごとの値のままでは平均年と計算対象期間のか い離が影響し,表面温度計算への影響が大きくなる可能性を危惧したためである.この処 理を天鳥橋主桁の部材角度・方位角,および水平面それぞれで行った.その後に月ごとお よび時間ごとに水平面と斜面との比をとることで k を定めた.

また,実際には鋼板からの放射の全てが向かい合う鋼板の温度変化に影響するわけでは なく,これを考えるための形態係数を乗じた熱流を用いるべきといえる [4.46].しかし, 天鳥橋における形態係数について十分な検討ができておらず,暫定的に*n*=0.5という値を 適用することにした.つまり,向かい合う桁からの放射の 50%がその桁の温度変化に寄与 することを意味する.今後より詳細な検討が必要な箇所である.



Fig. 4.5.2 気温と主桁表面温度の計算結果



Fig. 4.5.3 nの値を変更した場合の主桁表面温度の計算結果

4.5.3 表面温度の計算結果

以上に基づき,2013 年 3 月 22 日正午~2014 年 3 月 11 日正午の桁温度の変化を連続し て算出した.なお,桁温度の初期値はその時の外気温と仮定した.計算結果の一例として, 2013 年 6 月 24 日 0 時から 30 日 24 時までの 1 週間における気温と 3 主桁表面温度の変化 の様子を Fig. 4.5.2 に示す.なお,各主桁とも両面での温度差はほぼ見られなかったので, 各桁の海側面 (西南西側)の温度を代表値として示した.これは鋼板の熱伝導率が主桁の 厚さに対して十分に大きいためと考えられる.

気温と表面温度ともに、日中に温度が上がり夜間に下がるという一般的な傾向を再現す ることができた.また、東側の崖側主桁では午前に、西側の海側主桁では午後に、それぞ れ他の桁と比べて大きな温度上昇がみられるが、これは日射を強く受ける時間が桁ごとに 違うためと考えられる.中央主桁で急な温度上昇が見られないのは、床版で日射や天空か らの放射が遮られるためといえる.したがって、表面温度が上がりにくい中央主桁におい て、特に結露が発生しやすいと予想される.さらに、各桁の表面温度が気温に少し遅れて 追随するような変化をしており、過去の実測の傾向 [4.47] にも一致するなど妥当な結果と いえる. どの日とも特に午前中に主桁表面温度が気温を下回る傾向にあり、このような時 間帯において結露が発生する可能性があるといえる.また、Fig. 4.5.3 に、海側主桁につい て、先述のnの値を 0.5 から 0.3 および 0.7 へと変化させた場合の温度変化を示す.この n は向かい合う桁からの放射に乗ずる係数なので、n が大きいほど多くの放射を受け、桁温 度が上昇する様子を確認することができる.ただし、形態係数や周辺環境の設定と併せて 実際に表面温度を計測することで、計算結果の妥当性の検証が必要である.

4.6 結露による発生水量の算出と表面水分の定義

前節に示した計算によって主桁表面温度の時系列変化が得られたので,大気の温湿度と 併せて結露発生量の予測が可能になると考えられる.ここでは各桁表面に生じる水量の算 出法を述べる.さらに,水滴流下による洗浄に際して利用する水量の定義についても併せ て説明する.

4.6.1 結露による発生水量の決定手法

ある時間 Δt [s] における結露による発生水量 ΔW [kg/m²] は式 (4.6.1) から計算した.こ の式は、外気の絶対湿度 X_{out} [kg/kg'] と表面飽和絶対湿度 $X_{s,sat}$ [kg/kg'] の差が正であれば 結露が生じ、負であれば蒸発して水量が減ることを意味する. α 'は湿気伝達率 [kg/m²/s (kg/kg')] である.

$$\Delta W = \alpha' (X_{out} - X_{s,sat}) \cdot \Delta t \tag{4.6.1}$$

式 (4.6.1) に関連して, 温度 *T* [K] に基づく絶対湿度 *X* [kg/kg'] の算出には,式 (4.6.2) の Tetens の式 [4.48] と相対湿度 *RH* [%],および式 (4.6.3) の水蒸気圧 *E* [hPa]・大気圧 *P* (= 1013.25 hPa) と絶対湿度の関係 [4.42] を利用した.なお,簡単のため時刻によらず大気 圧は 1013.25 hPa で一定とした.

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5(T-273.15)}{T-35.85}} \times \frac{RH}{100}$$
(4.6.2)
$$X = 0.622 \frac{E}{P-E}$$
(4.6.3)

4.6.2 発生水量の計算結果

計算結果の一例として,2013年6月24日0時から30日24時までの1週間における, 結露によって3主桁表面に生じた水分量の変化をFig.4.6.1に示す.ここでも各桁の海側 面(西南西側)の水量を代表値として示した.なお,ここでは発生した水の流下は考えて いないので,水量の増減に寄与するのは式(4.6.1)で表される凝結と蒸発のみである.



Fig. 4.6.1 主桁表面における結露による発生水量の計算結果



Fig. 4.6.2 結露によって主桁表面に生じた日最大水量の月別積算値

Fig. 4.5.2 より,気温よりも主桁表面温度の方が低かった 26 日に結露の発生を確認する ことができた.3 主桁のうち中央主桁において最も多く,かつ長時間にわたって水分が生 じているが,これはこの桁が最も放射の影響を受けにくいために温度が低いままで保たれ るからと考えられる.また,この日以外にも気温よりも表面温度の方が低い時間帯が存在 するが,結露の発生は認められなかった.したがって,大気と桁の温度関係だけではなく, 結露の発生には空気中の水分量すなわち湿度も密接に関係することが示唆される.

Fig. 4.6.2 は月ごとの日最大発生水量の積算値を示す.発生水量は 5 月から 7 月で多い が、これは梅雨に相当するために湿度の高い日が多いからと考えられる.湿度が高いと露 点が気温に近づくため、わずかな温度変化でも結露が生じやすい環境といえる.2 月の発 生量も比較的多いが、この理由は気温が低いために飽和水蒸気量が小さいからと考えられ る.一方、湿度が冬に比べて高い 8 月や 9 月で結露の発生がほぼないのは、気温が高いた





Fig. 4.7.1 水滴の流下中の分裂の様子

Fig. 4.7.2 マイクロピペット

めに鋼板の温度が上昇しやすいことの影響の方が強いからと考えられる.今後は天鳥橋に おいて実際に主桁温度の計測を行うとともに、結露発生の有無の確認が必要である.加え て、パラメータや境界条件などの妥当性の検証も求められる.さらに、水滴の凝結と蒸発 による潜熱の影響や,崖や海の考慮による放射条件の変化なども併せて検討すべきである. なお、付着塩分量計算においては、結露により生じる水量に加えて、押川ら[4.49]が示 した塩分の潮解性で形成される水膜の存在も考慮した.押川らは平均活量係数などに着目 することで、部材表面に形成される水膜厚さを付着塩分量と相対湿度に基づいて理論的に 導いており、実測との整合性も確認している.本研究では、熱力学的問題である結露と、 化学的問題である潮解性に起因する水膜とが互いに独立であるとの仮定の上で、両者の和 として部材表面に存在する水量を定義した.

4.7 結露で生じた水滴の流下による橋梁表面の付着塩分洗浄効果測定実験

数値計算によって、結露水の流下に伴う洗浄を考慮しつつ付着塩分量を推定するために は、水滴が塩分の付着した面を流下する際の洗浄力を調べる必要がある. さらには、部材 表面における水滴の挙動に関する特性をあらかじめ把握しておくことが望ましい. ここで は水滴の洗浄力に加え、水滴が流下を始める水量(流下開始水量)および水滴が流下中に 分裂しない最大の水量(限界非分裂水量)を調べることにした.後者については窓ガラス や入浴中など日常的に目にすることができるが、全ての水滴がその形状や水量を保ったま ま部材表面を流下するのではなく、道筋に小さな水滴を残しつつ移動することがある. Fig. 4.7.1 は供試体表面を移動する水滴の様子であるが、もともと1つであった水滴が流下中に 複数に分裂したことが分かる. このような特性を把握しておくことが洗浄効果の適切な評 価に際し有効と思われる.

実験には雨水による洗浄効果測定実験でも用いた I 字鋼供試体を用いた. 試験面は 100 mm 四方で, C-5 塗装系が塗布されている. 供試体の設置角度は2種類であり, 橋梁ウェブ 部を想定して試験面を鉛直 (水平面に対し 90°) としたケースと, 下フランジ部上面を想定 して試験面を水平面から 30°傾けたケースである. ただし, 先の表面温度計算をウェブ部

Table 4.7.1 供試体面が鉛直の場合の初期付着塩分量

	流下開始水量					非分裂水量			洗浄効果		
	Salt 0	Salt 1	Salt 2	Salt 3	Salt 4	Salt 5	Salt 6	Salt 7	Salt 8	Salt 9	Salt 10
平均*	0	799	1305	1388	2958	866	1049	1709	781	1049	1709
標準偏差*	0	96	122	107	255	58	69	133	57	71	133
変動係数*	-	0.121	0.093	0.077	0.086	0.067	0.066	0.078	0.073	0.066	0.078

* 平均 [mg/m²], 標準偏差 [mg/m²], 変動係数 [-]

Table 4.7.2 供試体面が水平面に対し 30°傾いた場合の初期付着塩分量

	流下開始水量					非分裂水量			洗浄効果		
	Salt 0	Salt 1	Salt 2	Salt 3	Salt 4	Salt 5	Salt 6	Salt 7	Salt 8	Salt 9	Salt 10
平均*	0	799	1305	1388	2958	866	979	1474	781	979	1619
標準偏差*	0	96	122	107	255	58	61	111	57	61	94
変動係数*	-	0.121	0.093	0.077	0.086	0.067	0.062	0.075	0.073	0.062	0.058

* 平均 [mg/m²], 標準偏差 [mg/m²], 変動係数 [-]

についてのみ行ったので、今回の付着塩分量計算で使用するのは 90°の実験結果のみであ る.いずれの測定においても、あらかじめ霧吹きで重量濃度 1.75%塩化ナトリウム水溶液 を供試体に噴霧したのち、供試体表面の水分を蒸発させるため、実験室内で約1日放置し た.また、霧吹きの噴霧回数を変えることで、異なる初期塩分量に対応した.付着塩分量 測定にはポータブル表面塩分計 (SSM-21P,東亜ディーケーケー)を用いた.流下開始水量 測定では各ケースで 32 個、非分裂水量測定と洗浄効果測定では 20 個の平均値を初期塩分 量とした.90°のケースの初期値一覧を Table 4.7.1 に、30°を Table 4.7.2 に示す.便宜上 Salt 0、Salt 1、・・のように名前を付けており、各ケースで若番ほど初期付着塩分量が少ない. なお、Salt 6 と Salt 9 および Salt 7 と Salt 10 では初期塩分の塗布を同時に行ったため、そ れぞれ同じ初期塩分量となっている.これら供試体の表面に Fig. 4.7.2 のマイクロピペッ ト (LP20、エル・エム・エス)で任意の大きさの水滴を作成した.この装置は 2-20 μL の 水量を 2 μL の分解能で計ることができる.装置の先端にピペットチップ (110, Quality Scientific Plastics) を接続して用いた.

4.7.1 水滴の流下開始水量

水滴流下による洗浄を適切に考慮するうえで,部材表面に生じた水滴が流下を始める水量(流下開始水量)を調べる必要がある.ここでは供試体面が水平面から90°傾いたケースでは30 µL,30°では100または110 µLを初期水量とし,その水滴に新たに2 µL ずつ水を継ぎ足すことで流下を始める水量を調べた.初期付着塩分量はSalt 0 (付着なし)からSalt4までの5通りで,それぞれで50個ずつ水滴を作成して流下開始水量を測定した.



(a) 供試体面が鉛直

(b) 供試体面が水平面に対し 30°傾斜

Fig. 4.7.3 水滴の流下開始水量実験結果

Fig. 4.7.3 は水滴の水量で整理した累積流下確率を示す.供試体角度および初期塩分量に よらず,累積流下確率は緩やかな変化を見せており,ある水量で急激に累積確率が増加す ることはなかった.すなわち,ある水量ですべての水滴が流下を始めるわけではないとい える.これは供試体ごとあるいは同一供試体内でも微妙な表面状態の違いがあり,水滴の 初期配置位置に左右されるためと考えられる.さらに,初期付着塩分量の影響は明確では なく,付着量の増減がそのまま水滴の流下しやすさに寄与するわけではないと考えられる. ただし,付着塩分のばらつきが原因の可能性も否定できないので,より多様な塩分状態に 対して実験を行うことで,水滴流下への影響を精査する必要がある.

ここで以降の検討を簡単にするため,累積流下確率が6割を超える水量を暫定的に流下 開始水量と設定した.例えば,供試体面が鉛直の場合,36µLでは累積流下確率は0.6未満 で,38µLでは0.6を超えることから,Salt0では38µLが流下開始水量となる.このとき 他のケースでは,数µLの違いであることも考慮すると,多少の増減はあるもののSalt0と 違いはほぼなく,流下開始水量に対する付着塩分量の影響は小さいと考えられる.そこで 本研究では,水滴流下の表現を簡単にするためにも,以降の検討では38µLを供試体面が 鉛直の場合の流下開始水量とし,それ以下では水滴は部材面で移動しないとした.供試体 面が30°傾斜している場合も同様に考え,118µLを流下開始水量とみなすが,供試体面が 鉛直の場合よりも初期付着塩分量による流下特性の差が大きいことから,より慎重に検討 する必要があると思われる.また,流下開始水量をある値に固定するのではなく,実験結 果をもとに確率的に与える手法も検討に値すると思われる.

4.7.2 水滴の限界非分裂水量

流下開始水量のとき,水滴に作用する重力と壁面との摩擦力がほぼつりあうような状態 なので,水滴は部材表面をゆっくりと流下する.しかし,水量が増加するにつれて重力の 作用が大きくなるので,水滴の流下速度も次第に大きくなる.さらに水量を増すと水滴は 流下過程で分裂し,自身の通り道に複数の小さな水滴を残すようになる.したがって,水 滴の流下による表面付着塩分の洗浄効果を適切に議論するためには,水滴がこのような分



(a) 供試体面が鉛直

(b) 供試体面が水平面に対し 30°傾斜

Fig. 4.7.4 水滴の非分裂率実験結果

裂を生じる水量の把握が必要である.つまり,流下開始時の水量と実質的に流下する水量 とのずれを反映させるべきといえる.ここでは両迎角において Salt 5-7 の 3 通りの初期塩 分量を用意し,流下開始水量と同様にその影響を調べた.また,各迎角において 5 種類ま たは 4 種類の水量を持つ水滴を 10 個ずつ用意し,それぞれの流下時の挙動を観察するこ とで,水滴の分裂に関する特性の把握を試みた.

Fig. 4.7.4 に水滴の非分裂率を水量ごとに示す.先の図とは違い累積分布関数ではないことを注記しておく.初期付着塩分量や試験面の角度によらず,基本的に水量の増加に伴い水滴が分裂する確率が高くなった.これは,流下中の水滴の形状保持に対して,重力や摩擦力などの外力が支配的なためと考えられる.ただし,供試体面が鉛直の場合のSalt 5 においては,他よりも非分裂率が小さく,水滴の吸収した塩分量によって分裂特性が変化する可能性が考えられる.しかし,Salt 6 と Salt 7 には大きな違いが認められず,現段階で原因を特定することは難しい.したがって,Salt 5 で非分裂率が 6 割を超える水量を付着塩分量によらない値として,供試体面が鉛直の場合で 42 µL,30°の場合で 134 µL を限界非分裂水量とした.

4.7.3 水滴流下による洗浄効果

水滴流下による塩分洗浄効果を Salt 8-10 の 3 通りの初期塩分量について,5 種類の水量 で測定した.この5 種類は,(i) 流下開始水量,(ii) 限界非分裂水量,(iii) 流下開始水量 + 限界非分裂水量 × 1/3,(iv) 流下開始水量 + 限界非分裂水量 × 2/3,(v) 流下開始水量 + 限界非分裂水量である.水滴はポータブル表面塩分計の(円形である)計測部最上端に相 当する位置に与えた.各ケースにつき 10 回の試行を行い,洗浄後の塩分量を測定した.

実験結果は初期塩分量に対する洗浄後の残存塩分量の比率である残存塩分率 S [%] で整理した.ここで,表面塩分計の計測部のうち水滴が通過するのは一部なので,計測される 塩分量そのままでは洗浄力を適切に評価することはできない.そこで,水滴の通過する領域と計測部との面積比を用いることで,式 (4.7.1)のように塩分量を換算した.左辺は S₁



(a) 供試体面が鉛直

(b) 供試体面が水平面に対し 30°傾斜

Fig. 4.7.5 水滴流下後の残存塩分率実験結果

および S₁'が水滴通過部の洗浄前と洗浄後の単位面積当たりの塩分量 [mg/m²] で,それらの比として残存塩分率 [%] を表す.右辺は S₀と S₀'が表面塩分計による洗浄前と洗浄後の単位面積当たりの塩分量 [mg/m²], A₀と A₁が計測部全体および水滴通過部の面積 [m²] である.水滴通過部の面積 A₁は,水滴を半球とみなした時の直径に計測部の直径を乗ずることで得られる長方形の面積として計算した.

$$(S =)\frac{S_1}{S_1} \times 100 = \frac{S_0 A_1 - (S_0 - S_0) A_0}{S_0 A_1} \times 100$$
(4.7.1)

Fig. 4.7.5 に水量ごとの残存塩分率を示す. 全体的には水量とともに残存塩分率も増加す る傾向にあるが,水量が多くなると残存塩分率の差はあまり見られないようになる. ここ で,残存塩分率が最も小さい,つまり塩分洗浄力が最も大きいのは流下開始水量のときで ある. これは,水量自体は少ないものの水滴の流下が遅いので,より多くの塩分を溶かし つつ流下するためと考えられる. 流下開始水量から水量を増やすと残存塩分率は大きくな ることからも,水滴の水量よりもむしろ流下速度が塩分洗浄に対し支配的と考えられる. 水量の増加とともに残存塩分率の変化が小さくなるのは,水量の増加による水滴流下速度 の増加と洗浄力の上昇とが次第につり合うためと思われる. なお,後に示す付着塩分量計 算においては Salt 8 の結果を付着量によらず適用可能な関係として用い,水量については 線形補間で対応することにした. ただし,実橋梁における付着塩分の洗浄については,水 滴個々の洗浄力とともに流下する水滴の数も重要と考えられる. 水滴の水量が増すと水滴 同士の合体が生じやすくなり,結果として水滴数は減るように思われる. しかし,その詳 細は不明であり,ある範囲の付着塩分に対する総合的な洗浄力の評価に際しては水量と水 滴数に留意すべきである. なお,次節の数値計算では,水滴の合体や蒸発による水滴数の 増減も考慮しつつ洗浄の評価を行っている.

今回行った3種の実験のいずれにおいても、初期付着塩分量の影響は明確には得られな かった.現状では水滴の挙動に対する付着量の影響を厳密に評価することは難しいといえ

124



Fig. 4.8.1 水滴の流下を考慮した付着塩分量計算領域の概要

る.より幅広い初期値に対する実験や、供試体へ塩分を付着させる方法 [4.50] [4.51] に対 し検討を加える必要があると考えられる.また、水滴の流下条件や洗浄効果は表面粗度の 影響を受けると考えられる.例えば、粗度が大きくなると水滴の流下に要する水量が増す とともに、流下中の抵抗が大きくなるので流下速度は小さくなると予想される.したがっ て、異なる塗膜や耐候性鋼を対象とする場合については別途検討が必要となる.

4.8 結露で生じた水滴の流下による洗浄を踏まえた付着塩分量計算

ここまでの検討で,領域気象モデル WRF の計算結果として気象要素と大気中塩分濃度 の時系列データが,熱伝導方程式の計算から主桁表面温度およびそれに基づく発生水量の 時系列データが得られた. さらに,水滴の流下条件と洗浄力を実験的に求めた. ここでは これらを組み合わせ,水滴の流下も考慮した付着塩分量評価を試みた. Fig. 4.8.1 に示すよ うに3 主桁両面の計 6 ウェブ面の各々で 50 mm (橋軸方向) × 1,850 mm (鉛直方向)の計算 領域をスパン中央に設けた. この領域を一辺 0.5 mm の正方形格子に分割し,格子ごとに 塩分の付着および洗浄を考えた.なお,計算領域の上下左右それぞれに 10 層ずつ仮想の格 子を配置しており,領域端部に生じた水滴を適切に評価することができるように配慮した. また,今回は下フランジ部の熱計算には至っていないので,付着塩分の洗浄についても今 後の課題とする. 以降の計算の刻み時間は $\Delta t = 600$ s であり,各刻み時間での手順は次の 通りである.

4.8.1 結露水の流下を踏まえた付着塩分量の計算アルゴリズム

3 章に示した計算アルゴリズムに倣い,まず Fig. 4.8.2 (再掲) に示す 30 点への付着塩分 量を計算する.ただし,入力となる大気中塩分濃度と風速・風向には,観測値ではなく WRF による計算値を利用した.30 点への付着量をこのように求めたのち,ウェブ部に相当する 値を計算領域 (50 mm × 1,850 mm) 内の各格子に対し,橋軸方向には一様に,鉛直方向は 線形補間的に与えた.ただし,外挿となる範囲には最も外側の値を一様に与えた.得られ た値を前ステップまでの残存塩分量に格子ごとに加えることで付着塩分量を更新した.



Fig. 4.8.2 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A-d (単位:mm,再掲)

次に、水滴の発生・流下および洗浄を考える.前ステップからの水量変化に応じて、増加であれば領域内に水滴を配置し、減少であれば水滴を除去または既存の水滴の水量を減らした.配置する水滴の初期水量は、流下開始水量より十分に小さくかつ計算時間が過大にならない値として4µLを選択した.また、水滴は半球をつぶした形を想定し、部材接触部の半径は、部材表面からの高さの2倍とした.水滴形状は既往の研究 [4.19] を参考に決定したが、部材表面の状態にも依存するので、今後詳細な検討が必要である.領域内のどの位置に水滴を配置する、またはどの位置の水滴水量を減らすかは、乱数によって決めた.なお、水滴を新たに配置すると既存の水滴と重なることがある.その場合はそれらを合体させ新たに1つの水滴とし、もとの座標の重みつき平均によって新たな配置位置を定めた.

その後、合体を繰り返すことで水量が流下開始水量を超えた水滴は流下するとし、その 道筋上の格子に付着している塩分を洗浄させた.このとき簡単のため、限界非分裂水量を 超える水滴は、超過分の水量をもともとの地点に残し、限界非分裂水量以下の水量分だけ を流下させた.限界非分裂水量を超える水滴は、本来であれば流下に伴い水量を徐々に減 らし、併せて洗浄力を変化させるべきといえ、この点は今後の改善が必要である.また、 流下経路上に他の水滴があればその都度合体、再配置および流下を繰り返した.水滴は複 数の格子にまたがって存在するので、格子に占める水滴の面積を計算し、その割合に応じ て格子ごとの洗浄力を修正した.計算領域の下端に到達した水滴は計算領域から取り除き、 下フランジ部への影響は考えないものとした.実際には自身に吸収した塩分とともに下フ ランジ上面あるいは下面まで到達し、これらの部位の塩分供給源になるとも予想される. しかし、今回はフランジ部の表面温度および発生水量計算には至っていないので、ウェブ 部のみの評価に留めた.将来的には下フランジ部への寄与も含めて検討を行う必要がある.

全ての水滴に対し以上の操作を施したのち,外側を向く海側主桁の海側面および崖側主桁の崖側面 (観測点 A-D および a-d を含む面) に対し雨水による洗浄効果を適用した.こ



Fig. 4.8.3 水滴の流下による洗浄を踏まえた付着塩分量の計算アルゴリズム

のように得られる付着塩分量がその時間刻みでの最終的な塩分量となる.

以上の操作を1ステップとし、対象とする計算期間に渡り繰り返すことで最終的な付着 塩分量を求めることができる. Fig. 4.8.3 にフローチャートとして計算アルゴリズムをまと める. ただし、水滴の配置や除去の判断に乱数を用いたので、100 回の計算の平均を各部 位の最終的な付着量とした.



(a) 2013 年 5 月 24 日 ~ 7 月 4 日 (b) 2013 年 12 月 11 日 ~ 2014 年 3 月 11 日

4.8.2 結露水の流下を踏まえた付着塩分量の計算結果

Fig. 4.8.4 に計算結果の一例として, 2013 年 5 月 24 日~7 月 4 日および 2013 年 12 月 11 日~2014 年 3 月 11 日の付着量の観測値と計算結果を示す.計算値は A-d の 30 点に相当 する値を代表して掲載した.また、水滴流下による洗浄を考慮したものと、比較としてそ れを考えないものを併記した. つまり、後者の計算結果は前章の手法に従って得られるも のである.下フランジ部では水滴流下による洗浄を考えていないので、そこでは2つの計 算値は重なっている. 2013 年 5 月 24 日~7 月 4 日について 2 つの計算値を比べると,雨 がかりのない内側の桁では水滴流下による洗浄の効果が明確に表れており、洗浄を考慮す ることで計算値は観測値に近づいたといえる、したがって、雨がかりのない橋梁内側の部 位において、特に長期予測における付着量の過大算出を抑制し、精度よい評価が可能にな ると期待することができる.なお、雨がかりのある部位では水滴流下の有無によらず計算 値はほぼ同じであった.これは水滴流下よりも雨水による洗浄の影響が強く表れたためで ある. 一方, 2013 年 12 月 11 日~2014 年 3 月 11 日においては結露水の流下による洗浄効 果はごくわずかしか認められず、また、ここに示した期間以外では水滴流下による洗浄効 果は全く現れなかった.そのため,数年や数十年という長期間で考えたときに,既往の報 告 [4.12] に見られるような付着塩分の収束性が再現されるかはさらに検討を要する.他の 期間を対象とした計算において洗浄効果が表れなかった理由として、それらの期間では気 温の変化が小さいことや相対湿度が低いことが考えられる. そのため, 桁表面温度や湿度 の算出精度が非常に重要といえ、熱伝導計算に用いた WRF 値も含めて精度検証と必要に 応じた改善が必要である.

Fig. 4.8.5 は水滴の流下による洗浄の様子を可視化するために作成した図で、中央主桁崖 側面の計算領域に対応する.この領域を鉛直方向に4分割して表示しており、色が濃いほ ど付着塩分量が多いことを示す.ただし、図の作成に際してはFig. 4.8.4 とは異なり、仮想 的な付着塩分量と発生水量変化を与えている.図中には水滴が流下した後の筋が見られ、 周囲に比べて色が薄く付着塩分量が少ないことが分かる.流下経路が直線ではないのは、 流下の過程で水滴同士が合体し、その際に水滴がもとの水滴群の重心位置に再配置される

128

Fig. 4.8.4 水滴の流下による洗浄を考慮した付着塩分量の計算結果と観測値



Fig. 4.8.5 水滴の流下による洗浄の様子の一例 (計算領域を鉛直に 4 分割しており, 縦軸 は下フランジからの高さ)

ためである.また,流下方向にも色の濃淡があるのは,水滴との合体と分裂が起こること でその都度水量が変わり,結果として洗浄力も変化したからといえる.このように,水滴 の流下と洗浄に関してある程度妥当な計算が行われていると考えられる.

今回の計算をより改善するにあたって,熱伝導方程式や結露発生量に寄与するパラメー タの妥当性確認や,床版や崖の影響を調べる必要がある.また,凝結・蒸発時の潜熱の影 響や,風による換気効果も考慮すべきといえる.さらには,主桁表面温度のほか,桁間ご とに空間の温湿度を実際に計測するなど,境界条件となる温湿度の状態や計算結果の妥当 性の検証を進めたいと考えている.

また、本章の冒頭に記したように、水は腐食を促進させるとともに、流下に際して付着 塩分を洗浄することで、腐食を抑制する効果も持つと考えられる.本研究の手法は定量的 な付着塩分量の推定に利用することができる一方、発生水量から部位別のぬれ時間を導く ことも可能と考えられるので、将来的にはこの両面から橋梁部位別の腐食環境を検討する こともできると思われる.

4.9 本章のまとめ

橋梁表面の付着塩分量を推定する上で,付着を阻害する効果や付着塩分の離脱を無視す ると,特に長期的な予測において実際との齟齬が生じると考えられる.本章では結露など によって橋梁表面に生じる水滴が部材表面を流下し,その過程で付着塩分を洗浄する過程 を数値計算および実験によって再現した.また,一連の計算に用いる入力値を領域気象モ デルWRFで算出することで,観測によらない気象要素・大気中塩分濃度データの獲得,お よびそれらを用いた付着塩分量評価の実現性も併せて検証した.

領域気象モデル WRF について,

- 観測によらない気象要素や大気中塩分濃度の算出を目指し、領域気象モデル WRF を 導入した.対象橋梁地点を中心とした計算領域を作成し、計算結果を観測値と比較し たところ、温度・湿度・表面気圧・短波放射・降水量については季節変動を精度よく 再現し、値も概ね一致した.短波放射がやや過大評価されたほか、降水量が観測値に 対し小さい値を示したが、いずれも計算解像度の問題と考えられる.したがって、局 所的な地形を再現する必要や台風などの特殊なイベントの再現に課題が残る.
- 風速や風向は観測値とのかい離が大きく、局所的な地形の影響がより強く表れたと考えられる.より細かな格子の採用や、高解像度の気象や地形情報の境界条件としての利用、WRFよりも小さな空間スケールを対象とした計算をCFDに基づき行うことで、風速や風向の精度良い再現に至ると考えられる.
- 大気中塩分濃度は GOCART モデルを用いることで円筒型飛来塩分捕集器による観測 値を概ね再現することに成功した.ただし、いずれの地点でも GOCART モデルで同様 の精度を得られることを保証するものではなく、その他の海岸部や内陸部においても 精度検証を継続する必要がある.
- 風速と大気中塩分濃度のコンター図より、いずれも地形の影響を受けた分布を示すといえる.ただし、局所性は風速の方が強く、濃度コンターの変化は比較的なだらかであった.また、この図のように大気中塩分濃度を平面的に広範囲にわたり把握しておくことが、複数橋梁を同時に対象としなければならない維持管理実務において有益と考えられる.

結露による水滴発生量予測とその流下に伴う付着塩分量の洗浄について,

- 対象橋梁ウェブ部を3枚の鋼板としてモデル化し、領域気象モデルWRFより得られた放射や各種温度を入力として1次元熱伝導方程式を解くことで、桁表面温度の時間変化を算出することに成功した.表面温度が気温を追随するような変化を見せるなど妥当と考えられる結果が得られた.さらに、露点との関係から主桁表面において発生する水量を予測した.また、付着塩分の潮解性によって形成される水膜を併せて考慮することで、橋梁表面に発生する水量として定義した.
- 水滴の部材表面での挙動と流下時の洗浄力を調べるために、C-5 塗装系を施した I字 鋼供試体を用いた実験を行った.水滴が部材表面で流下を始める水量や流下時に分裂 する水量を調べ、それらに基づき水滴の流下時の塩分洗浄効果を水量ごとに検証した. その結果、付着塩分の洗浄力は水量が少ないほど大きいことが明らかとなった.これ は水量が少ない時ほど水滴がゆっくりと流下するので、より多くの塩分を自身に溶か しつつ流下するためと考えられる.したがって、付着塩分の洗浄に対しては水滴の大 きさよりも流下速度の方が支配的であると考えられる.
- 以上を踏まえた付着塩分量計算を実施することで、雨水による洗浄の影響がない橋梁
内側の部位において水滴の流下による付着塩分の洗浄を再現するに至り,より観測値 に近い値を算出することに成功した.したがって,本研究で示した手法を用いること で,結露によって生じた水滴流下に伴う洗浄も考慮した付着塩分量評価が可能となっ た.今後の課題として,表面温度や発生水量を観測によって把握し,計算結果との比 較から計算の妥当性を確認する必要がある.また,崖や床版など周辺環境の精緻な再 現や凝結などによる潜熱の影響を考慮することで,計算精度の向上を図ることができ ると考えられる.

本章で重要なことの1つは、結露による水滴の発生とその流下による付着塩分の洗浄効 果の再現に成功したことである.もう1つは、領域気象モデルWRFの利用によって風向・ 風速や温湿度、気圧や放射、および大気中塩分濃度を算出したことで、現地観測による値 を一切用いることなく橋梁表面の付着塩分量評価が可能となったことである.多くの橋梁 が高度経済成長期に建設された日本ではそれらの老朽化が深刻であり、効率的な維持管理 の実施が喫緊の問題となっている.また、近年は計算機の能力向上も著しく、WRFやCFD などの大規模計算も比較的容易になってきた.したがって、数値計算による精度良い予測 の実現がますます重要となっており、本章の検討はそれに資するものと考えられる.

参考文献

- [4.1] 山田健太郎, 舘石和雄: 鋼橋の維持管理, コロナ社, 2015.
- [4.2] 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.780,71-86,2005.
- [4.3] 鹿毛勇,塩谷和彦,竹村誠洋,小森務,古田彰彦,京野一章:実暴露試験に基づく ニッケル系高耐候性鋼の長期腐食予測,Zairyo-to-Kankyo, 55, 152-158, 2006.
- [4.4] International Organization for Standardization: Corrosion of metals and alloys --Corrosivity of atmospheres -- Classification, ISO 9223, 1992.
- [4.5] Kucera, V., Tidblad, J., Mikhailov, A. A.: Some new ideas for characterization of atmospheric corrosivity in connection with development of improved standards - a contribution of Swedish and Russian members of TC156/WG4, ISO/TC156/WG4-N314 Annex-A, 1999.
- [4.6] 元田慎一,鈴木揚之助,篠原正,辻川茂男:海洋性大気環境の腐食性評価,第 121 回腐食防食シンポジウム資料, 1-8, 2001.
- [4.7] 坂本達朗,田中誠,江成孝文:鋼橋梁模擬試験体の部位別表面温度分布測定による 結露性の評価,日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集,No.06-52, 207-208, 2006.
- [4.8] 原修一,上村隆之,門長猛,幸英明:山間部橋梁桁各部位の実測結露時間による濡 れ環境評価,Zairyo-to-Kankyo, 55, 75-81, 2006.
- [4.9] 小畑誠,安田大樹,永田和寿,後藤芳顕:熱流体解析による箱桁内の腐食環境シミ ュレーション,構造工学論文集, Vol. 53A, 834-843, 2007.
- [4.10] 永田和寿, 堀田広己, 原聡太郎, 山口隆司, 北原武嗣: 断熱塗料を用いた結露抑制

に関する研究,構造工学論文集, Vol. 62A, 595-602, 2016.

- [4.11] 伊庭千恵美, 鉾井修一:屋根瓦における結露発生に関する検討,日本建築学会環境
 系論文集,第74巻,第639号,587-593,2009.
- [4.12] 梶村修平,宮本重信:鋼橋重腐食部への亜鉛テープ被覆等によるコスト縮減の予測, 平成25年度近畿地方整備局研究発表会論文集,調査・計画・設計部門 No.17, 2013.
- [4.13] 松坂修二, 増田弘昭: 微紛体の再飛散現象, 紛体工学会誌, Vol. 29, No. 7, 530 (30) -538 (38), 1992.
- [4.14] 武邊勝道,大屋誠,安達良,安食正太,大田隼也,願永留美子,北川直樹,古川貴 士,松崎靖彦,麻生稔彦:橋梁桁内の付着イオンの露による洗い流し効果について, Zairyo-to-Kankyo, 57, 188-193, 2008.
- [4.15] 原修一,三浦正純,内海靖,藤原俊明,山本雅貴:高圧水洗のさび性状および腐食 速度に及ぼす影響,Zairyo-to-Kankyo, 54, 343-349, 2005.
- [4.16] 磯光男,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, 220-236, 2010.
- [4.17] 小畑誠:塩分の飛来・付着特性と塗装の劣化を考慮した鋼桁洗浄システムの開発, 平成20年度建設技術研究開発助成制度,2012.
- [4.18] Cole, I. S., Lau, D., Chan, F., Paterson, D. A.: Experimental studies of salts removal from metal surfaces by wind and rain, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 39, No. 4, 333-338, 2004.
- [4.19] Cole, I. S., Paterson, D. A.: Holistic model for atmospheric corrosion Part 7 Cleaning of salt from metal surfaces, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 42, No. 2, 106 -111, 2007.
- [4.20] Cooperative Research Centre (CRC) Construction Innovation: Final report: Learning system for life prediction of infrastructure, 2005-003-B-12, Icon.Net Pty Ltd., Brisbane, Australia, 2007.
- [4.21] 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 (XX) 一無塗装耐候性鋼橋梁の設計・試行要領(改定案),共同研究報告書,第88号,1993.
- [4.22] The Weather Research & Forecasting Model, http://www.wrf-model.org/index.php, 2016.
- [4.23] National Center for Atmospheric Research, ARW Version 3 modeling system user's guide, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf, 2014.
- [4.24] National Center for Atmospheric Research, A description of the advanced research WRF version 3, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf, 2008.
- [4.25] Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry, http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/, 2016.
- [4.26] 一般財団法人気象業務支援センター:メソ数値用法モデル GPV (MSM), http://www.jmbsc.or.jp/hp/online/f-online0c.html, 2016.
- [4.27] NCEP FNL Operation Model Global Tropospheric Analysis, http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2, 2015.
- [4.28] USGS Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30), https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30,

2015.

- [4.29] 小畑誠,村上太郎:腐食環境評価のための浮遊塩分量調査とその数値予測について, 構造工学論文集, Vol. 60A, 596-604, 2014.
- [4.30] 秋本祐子,日下博幸:入力データおよび地上面パラメータの変化に対する領域気象
 モデル WRFの感度実験―夏季晴天日の関東平野を対象としてー,地理学評論,88-3,324-340,2010.
- [4.31] 国土地理院国土数値情報ダウンロードサービス, http://nlftp.mlit.go.jp/, 2015.
- [4.32] 金洙列,松浦智典,松見吉晴, Tracey H. Tom,安田誠宏,間瀬肇,西野博史:山陰 沿岸気象予測へのメソ気象モデル WRF のパラメータ感度分析に関する研究,土木 学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, I_1236-I_1240, 2012.
- [4.33] 野口恭平,白土博通,秦聡一朗,金城佑紀,八木知己:領域気象モデルによる風況 及び飛来塩分の推定,土木学会第70回年次学術講演会講演概要集,1181-1182,2015.
- [4.34] Monahan, E. C., Spiel, D. E., Davidson, K. L.: A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption, Oceanic Whitecaps, Volume 2, 167-174, 1986.
- [4.35] Gong, S. L.: A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and supermicron particles, Global Biogeochemical cycle, Vol. 17, No. 4, 1097, 8-1~8-7, 2003.
- [4.36] Lewis, E. R., Schwartz, S. E.: Sea salt aerosol production: Mechanisms, methods, measurements and models – A critical review, American Geophysical Union, 2004.
- [4.37] 義江龍一郎,三浦翔,望月政法:風環境評価のための標準上空風データの整備に向けた領域気象モデル WRFの検証,日本風工学会論文集,第40巻,第4号(通算第145号),113-122,2015.
- [4.38] 石原孟, 菊池由佳:メソスケールモデルを用いた洋上風況予測と実測による検証, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, 1169-1170, 2016.
- [4.39] 橋と風編集グループ:橋と風, 144-147, 1990.
- [4.40] 広瀬望, 坪倉佑太, 武邊勝道, 大屋誠, 高見航右, 土江彩季: 異なる空間スケール に着目した海塩粒子輸送予測システム開発のための基礎的検討, 土木学会第 71 回 年次学術講演会講演概要集, 95-96, 2016.
- [4.41] 廣瀬哲也,長島清二:「屋根遮熱・断熱塗装システム」の開発,塗装の研究, No. 142, 55-59, 2004.
- [4.42] 鉾井修一,池田哲朗,新田勝通:建築環境工学 II,朝倉書店,2015.
- [4.43] 西岡真稔, 湊崇徳: 街路熱環境の向上を目的とした壁面計画手法に関する検討, http://www.kinki-shasej.org/upload/pdf/kankyo264nishioka.pdf, 2016.
- [4.44] 八光電機:各種物質の性質:金属(固体)の性質, http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm, 2016.
- [4.45] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO):日射量データベース閲覧システム, http://app0.infoc.nedo.go.jp/index.html, 2016.
- [4.46] 木村建一:建設設備基礎, https://code.google.com/archive/p/setukiso/downloads2016, version 0.8.0, 2009.
- [4.47] 長尾隆史, 萩澤亘保, 大倉一郎:道路橋用アルミニウム床版-鋼桁橋の温度変化測 定, アルミニウム橋研究会 ALST 研究レポート 22, 2011.

- [4.48] Tetens, O.: Uber einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys., 6, 297-309, 1930.
- [4.49] 押川渡, 篠原正, 元田慎一: 強電解質が給水して出来る水膜組成と水膜厚さの推定, Zairyo-to-Kankyo, 52, 293-298, 2003.
- [4.50] Hasebe, H., Sakakibara, Y., Yamaya, K., Sone, R., Haruki, Y. and Nomura, T.: Wind tunnel experiment to estimate the amount of airborne sea salt adhering to the surface of a bridge, Proc. 14th International Conf. on Wind Eng., ID_2336, USB flash drive, Porto Alegre, Brazil, 22-26 June, 2015.
- [4.51] 渡邉亮太, 貝沼重信, 平尾みなみ: 超音波噴霧器を用いた定量塩付着手法および塩付着性状に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, 115-116, 2016.

第5章 統計的手法を用いた大気中塩分濃度と気象要

素の表現および付着塩分量の評価

5.1 概説

橋梁の腐食は非常に長い時間スケールでの問題ともいえる.しかし,付着塩分量や板厚 減少量に関する研究は数多くなされているが,長期的に見たときに付着塩分量がどれ程に なるか,また,そのときの付着塩分量が部材に与える影響はどのようであるかは十分に検 討されているとはいえない.さらに,例えばある地点での1年分の観測データがあったと しても,これが必ずしもその地点の長期的な傾向を表すとはいえない.したがって,今後 5年の付着塩分量を知りたいときに,1年間の観測値を5倍するだけでは十分な予測とは ならない可能性もある.一方,耐候性鋼の板厚減少量予測に必要な初年減耗量を与えると きに,より一般性のある予測のためには元となるデータを統計的に処理することが望まし いと考えられる.そこで,風速や降水量,大気中塩分濃度などを確率変数で表し,それに 基づく統計的な予測を行うことで,長期的な腐食環境把握や耐候性鋼の初年減耗量評価が 可能になると考えられる.本章では,統計的手法としてモンテカルロシミュレーションに よる大気中塩分濃度や気象要素の表現,および付着塩分量評価の可能性を検証する.

モンテカルロシミュレーション (Monte Carlo simulation) とは,推定した確率分布に従っ て数値 (乱数) を発生させ,それをもとに求めたい物理量の分布を知る方法である [5.1]. 第2次世界大戦中に John von Neumann と Stanisław Marcin Ulam (ともに米国) が中性子拡 散の問題に用いたのが始まりで,名前は賭博で有名なモンテカルロ (モナコ) に由来する [5.2].モンテカルロシミュレーションの適用例には,台風を確率変数で表すことによる風 荷重や設計風速の評価 [5.3]-[5.5],文化財建造物の地震火災による消失リスクの評価 [5.6], 集合住宅の給水・給湯負荷の算定モデルの検討 [5.7],ニホンザルの群れにおいてオトナメ スの個体数に基づく群れの存続確率の推定 [5.8] など多岐に渡る.この手法を橋梁表面の 付着塩分量評価に適用することで,将来の1年間やより長期間において,付着塩分量の取 りうる範囲や閾値超過確率を提示することができ,維持管理実務への適用が可能になると 考えられる.特に,確率分布を適用することで,風速や大気中塩分濃度の極値の外挿が可 能となり,より信頼性の有する情報として付着塩分量を示すことができると思われる.

以下に本章の構成を示す.

5.2 節では本研究で用いる擬似乱数の性質を確認する. モンテカルロシミュレーション による計算精度には乱数の特性が直結するので,あらかじめその特性を確認する必要があ る.5.3 節では対象橋梁地点における現地観測で得られた気象データに対して確率分布関 数の適用性を調べる.5.4 節ではモンテカルロシミュレーションを用いた橋梁表面への付 着塩分量計算アルゴリズムとともに,それに基づく付着塩分量計算結果を示す.5.5 節では 確率分布関数によって風向を表現するための手法の提案と,その適用性を検討する.最後 に5.6 節に本章のまとめを記す.



Fig. 5.2.1 標本数別の擬似乱数の平均と分散

5.2 擬似乱数

本研究では MATLAB (R2010a または R2014a, MathWorks) [5.9] を用いてシミュレーショ ンを行う. 乱数として MATLAB に標準装備されている擬似乱数を用いるが, モンテカルロ シミュレーションを行う際には, 使用する擬似乱数が十分に一様乱数に近い性質を持つか を把握しておくことが重要である.ここでは擬似乱数の性質の確認のために行った検討に ついて記す.

初めに一様乱数の性質を確認する.一様乱数は式 (5.2.1) で表される.

$$f_X(x) = \begin{cases} 1 & (0 \le X \le 1) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$
(5.2.1)

このとき, 平均 µ0 と分散 σ0²はそれぞれ式 (5.2.2) と式 (5.2.3) で表すことができる.

$$\mu_0 = \int_0^1 x f_X(x) dx = 0.5 \tag{5.2.2}$$

$$\sigma_0^2 = \int_0^1 (x - \mu_0)^2 f_X(x) dx = 0.08\dot{3}$$
(5.2.3)

まず,擬似乱数の基本的な性質を確認するために,乱数の標本数を 10³ 個, 10⁴ 個, 10⁵ 個, 10⁶ 個, 10⁷ 個と変化させ,それぞれの平均と分散を調べた.ただし,発生させる擬似 乱数の範囲は (0,1) である. Fig. 5.2.1 に擬似乱数の平均と分散について,標本数ごとに 10 回の試行の結果を示す.これらから標本数が十分であれば,一様乱数と同程度の平均と分 散を示すことが分かる.

次に,擬似乱数の等確率性をカイ自乗 (χ^2)分布を用いた統計的仮説検定から検証した. 範囲 (0, 1)を k 個の等間隔のビンに分割し, j 番目のビンが観測される確率を p_j , そのビンの観測度数を X_j とする.ただし,標本数 n は $n = \sum X_j$ と表せる.このとき,帰無仮説を

Table 5.2.1 擬似乱数を標本とした場合の標本数別の棄却領域外となる統計量数

Sample size	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 ³	9522	9490	9526	9459	9508	9534	9546	9507	9501	9482
10^{4}	9467	9504	9516	9478	9470	9501	9487	9456	9494	9511
10 ⁵	9497	9490	9499	9487	9509	9496	9519	9500	9528	9498

Table 5.2.2 得られた統計量数を標本とした場合に新たに得られる統計量

Sample size	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
104	8.10	12.99	5.31	13.75	12.44	15.08	16.69	12.64	4.67	16.20

「 $\forall j, p_j = 1/k$ 」,対立仮説を「 $\exists j, p_j \neq 1/k$ 」とすると、検定統計量として式 (5.2.4)を利用することができる.詳細は付録 B に記す.

$$\chi^{2} = \sum_{j=1}^{k} \frac{\left(X_{j} - n/k\right)^{2}}{n/k}$$
(5.2.4)

この統計量は自由度 k - 1のカイ自乗分布を持ち, 棄却領域は $\chi_a^2 < \chi^2$ である. α は有意 水準で,帰無仮説を棄却した場合にその判断が誤っている確率を表す.本研究では $\alpha = 0.05$, k = 100 として検定統計量を1万回発生させ,そのうち棄却領域外(自由度 100 - 1 = 99 より, <123.23) となる個数を調べた. つまり,統計量が棄却されない確率が19/20, すなわち9,500 個程度であれば,発生させた乱数群は一様に分布するとみなせる. これを1回の試行とし,標本数ごとに10回の試行を行った. 標本数は計算負荷を考慮して10³ 個,10⁴ 個,10⁵ 個とした. Table.5.2.1 より,いずれの標本数および試行でも検定量が棄却領域外となる個数は概ね 9,500 個であり,本研究で用いる擬似乱数は十分な等確率性を持つと考えられる [5.1] [5.10] [5.11].

ただし、どれ程 9,500 に近ければよいかという点で問題となるので、得られた統計量群 を新たな標本として再び式 (5.4) を用いた検定が必要となる.ここではカイ自乗分布を生 起確率が互いに 0.1 で等しい 10 区間に分け、各々に生じる統計量数について検定を行っ た.例えば、10⁴ 個の乱数から統計量数を求める操作を 10⁵ 回行い、α = 0.05 を採用する. このとき、擬似乱数が十分に一様であれば 10 区間ごとに 10⁴ 個の統計量が得られ、新たに 得られるカイ自乗値は棄却領域外(自由度 10-1=9より、<16.91)となるはずである.こ れを 10 回行い、得られたカイ自乗値を Table 5.2.2 に示す.いずれも棄却領域外であるこ とから、使用する擬似乱数は十分に一様乱数に近い性質を持つと考えられる.ただし、よ り厳密には標本数や発生させる統計量数の増減の影響も検討する必要がある [5.12].

5.3 使用する確率変数と確率分布関数の適用

まず初歩的な検討として、対象橋梁である天鳥橋地点に設置した気象観測装置 (Davis, VantagePro2) から得られる気象データを利用して検討を行った. この装置では風速と風向 は 2.5 s ごとに取得され、10 分間ごとの代表値として風向は 16 方位の最頻値が、風速は平 均値が記録される. 風速はもともと mile/h で得られたデータが保存時に m/s に自動変換さ れるため、実際に得られる風速値 [m/s] は 0, 0.4, 0.9, 1.3, …, のように不等間隔の離散 値である. ここで、0 m/s と出力されるものには、真に風速がゼロであるケースと、微風 (<0.2 m/s) が四捨五入されてゼロとなったケースが含まれる. そこで、前者は風向を特定 することができないことからもそのままゼロとし、後者は風向が記録されることから、切 り捨てられた範囲 (0, 0.2) の中間値である 0.1 m/s へと機械的に置き換えた. この処置は、 風速計の精度が十分に良ければ 0 m/s の出現頻度がゼロになるという報告からも妥当なも のと考えられる [5.13] [5.14]. 降水量は 10 分間の積算値が click という単位で出力される. 本研究で用いる気象観測装置には降水量計測用のカップがついており、このカップに雨水 が十分満たされるとカップが反転し、降水量として 1 click が記録される仕組みである. な お、1 click = 0.254 mm である.

本研究では付着塩分量の推定に必要な変数として、風向、風速、大気中塩分濃度、降水 量、連続降雨時間、連続無降雨時間の6つを考え、各々に確率分布のあてはめを試みた. ただし、大気中塩分濃度の観測値は期間ごとに1つしか得られておらず、データとして十 分な解像度を有するとはいえないため、付着塩分量計算に際しては期間ごとの観測値をそ のまま用いることにした.また、確率分布の利用ではなく、観測値のヒストグラムを線形 補間し、得られた折れ線に基づく乱数を発生させる方法でもシミュレーションは可能であ る.しかし、この手法では発生する値は限りなく観測値の傾向や特徴を反映したものにな り、また観測された事象を超える現象は生じえない.一方、元データに対し確率分布によ る近似を施すことでデータの外挿が可能となり、元データの期間中では未発生であった、 将来生じうる極値に対する予測を実現することができる.ただし、いずれにせよ元となる データがその地点の傾向を十分に再現するものでなければ、その特異性が予測値に大きく 影響することになる.したがって、可能な限り長期間のデータに基づきシミュレーション を行うことが好ましいといえる.本節では対象橋梁地点での一般的な議論のために、2011 年 10 月 18 日~2013 年 10 月 17 日の2 年間分の観測値を利用して検討を行った.

5.3.1 確率変数間の依存性

モンテカルロシミュレーションを行う際には確率変数間の相関や依存性を適切に再現す ることが必要となる.そこで、以降の検討に先立ち、観測で得られた風速、風向、降水量 について互いの相関・依存性を確認した.

Fig. 5.3.1 は風向別平均風速を示しており,西寄りの風向で風速が大きいことが分かる. これは海と崖に挟まれるという対象橋梁地点の立地に影響されるものである.したがって, 当該地点の風速には風向への依存性があるといえる.一方,Fig. 5.3.2 は降水時の風向別平 均降水量で,風速のように風向に対して明確な傾向を有するとはいえない.最後にFig. 5.3.3 は風速と降水量の関係で,やはり特徴的な関係はないように思える.このとき,式 (5.3.1)





Fig. 5.3.2 降水時の風向別平均降水量



Fig. 5.3.3 降水時の降水量と風速の関係

より得られる風速と降水量に関する相関係数 ρ は、全データについて 0.0102、降雨時に限っても 0.1063 となり、両者の相関は小さいといえ、付着量計算への影響も小さいと予想される.ここで、 σ_X 、 σ_Y はそれぞれ X と Y の標準偏差を、 $\sigma_{X,Y}$ は X と Y の共分散を表す.相関係数は正の完全相関のとき 1 を、負の完全相関のとき -1 を、無相関のとき 0 となる [5.1].

$$\rho = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{5.3.1}$$

以上より,対象橋梁地点においてモンテカルロシミュレーションを行うには,風向と風速の依存性を適切に反映させる必要がある.確率変数間の相関を考慮する方法として Vickery の手法 [5.15] や直交変換法 [5.3],修正直交変換法 [5.16] が報告されている.し かし本研究では,風向別に風速の確率分布を作成することで確率変数間の依存性を再現す ることができると考えシミュレーションを行った.



Fig. 5.3.4 正規化した風向のヒストグラム (最右列は風速ゼロ)



5.3.2 風向

先述のように、モンテカルロシミュレーションで将来生じうる極値の予測を行うために は、元となるデータに確率分布を適用すべきであるが、観測で得られた風向のヒストグラ ムに十分に適合する既存の確率分布を見つけることはできなかった. Fig. 5.3.4 に正規化し た風向のヒストグラムを示す. 複数のピークの存在に加え, 当然ではあるがいずれの風向 においても一定の風が生起することが分かる.また、風向は数直線で表されるような物理 量ではないことも既存の確率分布を適用できない理由として挙げられる. そのため, ここ での検討では観測で得られたヒストグラムの通りの頻度で風向が決まると仮定した. すな わち、正規化されたヒストグラムを確率質量関数とみなし、付着塩分量を得るためのモン テカルロシミュレーションを行うことにした.このとき、無風も含めた17の場合を対象と した. なお,風向に対する確率分布の適用については本章の後半で議論を行う.

5.3.3 風速

風速はワイブル分布で精度よい近似が可能であることが既往の報告から知られており, 本研究でもそれに倣うことにした.ワイブル分布は寿命や故障データのモデル化によく用 いられる [5.17]. ワイブル分布の確率密度関数は式 (5.3.2) で, 累積分布関数は式 (5.3.3) で表される.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v-\gamma}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v-\gamma}{c}\right)^k\right\}$$
(5.3.2)

$$F(v) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{v-\gamma}{c}\right)^k\right\}$$
(5.3.3)



Fig. 5.3.6 風向 WSW におけるワイブル分布による風速の近似

	Ν	NNE	NE	ENE	Е	ESE	SE	SSE	
k	1.124	1.142	1.080	1.054	1.094	1.144	1.191	1.238	
С	0.640	0.450	0.387	0.376	0.579	0.852	1.102	1.343	
R^2	0.774	0.691	0.620	0.598	0.753	0.834	0.878	0.903	
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	All
k	S 1.503	SSW 1.534	SW 1.422	WSW 1.380	W 1.520	WNW 1.300	NW 1.024	NNW 1.132	All 1.118
k c	S 1.503 1.844	SSW 1.534 2.165	SW 1.422 1.533	WSW 1.380 1.684	W 1.520 3.020	WNW 1.300 2.680	NW 1.024 1.864	NNW 1.132 0.769	All 1.118 1.992

Table 5.3.1 風向別の風速に関するワイブルパラメータと決定係数

式中の k は形状パラメータで, (1,∞) のとき確率密度関数は上に凸な形状, (0,1] のと き単調減少型で,特に k=1 のとき指数分布に一致する (Fig. 5.3.5). c は尺度パラメータで 分布の広がりを決め,値が大きいほど裾の長い形状となる. y は位置パラメータで分布の 下限値を決めるが,分布形状には影響しないので,ワイブル分布は実質的に2変数の確率 分布といえる.

16 方位別と全風向をまとめたケースのそれぞれにおいて,確率紙を用いる方法に基づい て形状パラメータ k と位置パラメータ c を決定した (付録 C). 得られたパラメータと決定 係数 R²の一覧を Table 5.3.1 に示す.決定係数は分布関数がどれだけデータを再現してい るかを表す指標で [0,1] の値をとり,1に近いほど精度よい近似であることを示す.西寄 りの風向では決定係数が概ね 0.9 を超えており,ワイブル分布が精度よく風速観測値を再 現したことがわかる.一方,東寄りの風向では西寄りの風向に対し精度が落ちることが確 認された.対象橋梁の東側が崖であることから,東寄りの風が観測されるときは崖に衝突



Fig. 5.3.7 ポアソン分布とガンマ分布を用いた降水の表現

した大気が舞っている状態と考えられ、自然風とは異なる性質を持つためと予想される. ただし対象橋梁地点では東寄りの風は低頻度かつ低風速のため塩分付着への寄与は小さく, また付着塩分量計算に際しては考慮しないので、以降の検討を行う上で支障はない.

また,近似の例として橋軸直角方向となる風向 WSW のときの風速の確率密度関数と累積分布関数の様子を Fig. 5.3.6 に示すが,この図からもワイブル分布を利用することで良好な近似ができたと考えられる. その他の風向の近似の様子は付録 D に掲載する.

5.3.4 降水量·連続降雨時間·連続無降雨時間

降水を確率分布で再現する手法として、ポアソン分布とガンマ分布を利用した例 [5.18] が存在する.この手法では、雨が降り始めてから止むまでを1つの事象としてとらえ、単 位時間当たりの降雨生起回数をポアソン分布で、各事象の降水量をガンマ分布で近似して いる.これに倣い、観測で得られた1日当たりの生起回数と降水量分布を近似すると Fig. 5.3.7 のように表される.なお、ポアソン分布は離散分布であるが、分かりやすいように折 れ線で表示した.ここで、ポアソン分布の確率質量関数とガンマ分布の確率密度関数はそ れぞれ式 (5.3.4) と式 (5.3.5) で示される.

$$p_x(t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} \exp(-\lambda t)$$
(5.3.4)

$$f_X(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-\lambda x)$$
(5.3.5)

また, Γ(k) はガンマ関数で, 次式の通りである.

Table 5.3.2 降水に関するワイブルパラメータと決定係数

	Precipitation	Duration of rainfall	Duration of no rainfall
k	0.800	0.883	0.560
С	7.133	2.710	18.252
R^2	0.824	0.657	0.812

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty s^{k-1} e^{-s} ds \tag{5.3.6}$$

式 (5.3.4) のポアソン分布において変数 λ は発生率であり、観測データより容易に推定 することができる.式 (5.3.5) のガンマ分布では、変数 λ と k は平均 μ と分散 σ^2 を用いて 次のように表される.

$$\mu = \frac{k}{\lambda}$$
(5.3.7)
$$\sigma^2 = \frac{k}{\lambda^2}$$
(5.3.8)

Fig. 5.3.7 を見ると、降水量はガンマ分布で精度よく近似されたが、生起頻度はポアソン 分布で十分に説明されたとはいえない、したがって、この手法でいずれの場合でも降水を 表現可能とはいえないようである.そこで、本研究では降水を各刻み時間における降水量 と連続降雨時間・連続無降雨時間の3変数として表現する手法の検討を試みた.

降水量,連続降雨時間,連続無降雨時間のヒストグラムを描くといずれも単調減少であったので,風速と同様にワイブル分布を適用することにした.単調減少型の確率分布の代表例は指数分布であるが,ワイブル分布は形状パラメータkが1以下のとき単調減少型であり,特に k=1のときは指数分布に一致すること,また,指数分布の1変数に対しワイブル分布は2変数であるから,ワイブル分布で概ねデータの傾向を表すことができると考えられる.ただし,降水量は風向・風速と同様に10分ごとに記録されているが,本研究ではこれを1時間降水量に編集した上で確率分布を適用した.これは10分刻みのデータから作成した3つの確率変数のヒストグラムとワイブル分布の適合性が低かったためである. 1時間刻みに変換することで適合率が向上したことから,降水量の時間的な変動が比較的激しいと予想され,刻みを細かくし過ぎると逆に全体的な特徴を損なうためと考えられる.

降水の風速および風向への依存性はないと考え、風向や風速と独立してワイブル分布に よる近似を行った.パラメータの同定は風速と同じく確率紙を用いる方法である.得られ たパラメータと決定係数の一覧を Table 5.3.2 に示す.また、降水量、連続降雨時間、連続 無降雨時間の確率密度関数の様子をそれぞれ Fig. 5.3.8, Fig. 5.3.9, Fig. 5.3.10 に示す.な お、降水量には非降水時の情報は含まれておらず、無降雨時間として別途考慮する.



Fig. 5.3.8 ワイブル分布による降水量の近似

これらより、ワイブル分布によって降水の特徴を概ね再現することができたといえる. しかし、風速に比べてずれのある部分が見られ、例えば降水量は全体的にやや過大評価で ある.さらに、連続降雨時間や連続無降雨時間では短期間となる部分でワイブル分布の方 が過小評価となる傾向もみられる.このような理由として、分布作成に用いた2年間のデ ータが天鳥橋での降雨の傾向を十分に代表するものではない可能性が考えられる.つまり、 観測値が特異であったとする考え方である.また、1 時間データに変換したことで標本数 が十分でなかったために、大きな降水量の頻度が相対的に高くなり、パラメータ同定に影 響した可能性も考えられる.したがって、ある閾値を設け、それ以上の降水量や経過時間 を取り除いて近似することで、全体として妥当な表現が可能となる可能性がある.また、 対象橋梁地点以外での再現性についても検討を行い、ワイブル分布を用いる妥当性も含め て幅広く検証する必要があると考えられる.

5.4 モンテカルロシミュレーションによる計算塩分量計算

ここまでに得られた確率分布を利用して算出される付着塩分量と、観測で得られた気象 要素の時系列データに従い計算した付着塩分量とを比較し、モンテカルロシミュレーショ ンの付着塩分量推定への適用性を検討した.ここでは、適用性の検討ということで観測期 間と同じ数か月を対象とし、同期間に観測された気象情報から分布関数の作成とモンテカ ルロシミュレーションによる付着量算出を行った.また、モンテカルロシミュレーション による計算では、比較のために風向と風速の依存性を無視した計算も行った.なお、以下 の付着塩分量計算結果の図には付着塩分量の観測値も併せて示すが、ここではあくまで参 考値であり、モンテカルロシミュレーションによる付着量と比較することには大きな意味 はない.あくまでモンテカルロシミュレーションの手法を利用することができるか否かの 検討が目的であるため、第1の比較対象は通常計算による付着量である.計算値と観測値 との差異は前章までに議論されている.



Fig. 5.3.9 ワイブル分布による連続降雨時間の近似



Fig. 5.3.10 ワイブル分布による連続無降雨時間の近似

5.4.1 モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量の計算アルゴリズム

モンテカルロシミュレーションを用いた時系列データ作成の計算アルゴリズムを Fig. 5.4.1 に示す.その後の付着塩分量推定は前章までに準じており,ここでは割愛する.まず, 対象期間の選定により計算長さLが決まる.ここでの推定では対象期間に対応して大気中 塩分濃度が観測値より自動的に与えられるが,濃度の時系列データも利用可能な場合はタ イムステップのループ内で処理を行う.対象期間が決まれば 600 s ごとに気象要素を決定 する.各時間刻みにおいて,まず風向を Fig. 5.3.4 のヒストグラムに従い決定し,次に風向 別の累積分布関数に基づき風速を求める.降水量は1時間刻みデータから累積分布関数を 作成したため,1時間ごとに値を発生させる.そのため,連続する6ステップ (600 s × 6 = 3,600 s = 1h) は一定の降水量となる.なお,この時点では対象期間において常に降水があ るとして処理する.



Fig. 5.4.1 モンテカルロシミュレーションによる時系列データの作成アルゴリズム

対象期間中の各時間刻みについて風向・風速・降水量が決まったのちに,降雨時間と無降雨時間を反映させる.まず連続無降雨時間の累積分布関数から値を一つ発生させ,これを A_1 [h]とおく.次に連続降雨時間の累積分布関数から値を一つ発生させ,これを B_1 [h] とおく. B_1 が決まれば再び連続無降雨時間について値を発生させ A_2 とおく.この操作を A_i と B_i の総和 [h] が予測期間の長さLに達するまで繰り返す.その後,無降雨期間に相当する [B_i+1, A_{i+1}]の範囲の降水量をゼロへと変換することで,降水のない期間を再現した.



(a) 2013 年 5 月 24 日~7 月 4 日

(b) 2013 年 10 月 18 日~12 月 11 日

Fig. 5.4.2 モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量計算例

以上の手順で風向,風速,雨量,および大気中塩分濃度(期間中一定)の時系列を作成す ることができるので,これに従い部位別の付着塩分量を計算する.本研究ではこのような 気象データ作成と付着量計算を1回の試行とした.以下に示すのは1万回の試行で得られ た付着塩分量の平均である.また,この1万回の試行結果のばらつきから付着塩分量の取 りうる範囲や閾値超過確率を評価することが可能である.試行回数が多いほど予測精度は 向上するものの,計算機の能力に大いに依存するので,適切な試行回数を検討することが 必要である.

5.4.2 モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量の計算結果

Fig. 5.4.2 に 3 種類の付着計算結果と観測値をある 2 期間について示した. また, Fig. 5.4.3 として付着塩分量評価位置を再掲した. まず, 通常の計算値(緑・四角)とモンテカルロシ ミュレーションによる値(青・三角)を比較すると, 両者は概ね一致することがわかる. し たがって, モンテカルロシミュレーションによって気象要素を確率分布で表現し, 乱数で 得られた時系列データを用いても, 橋梁への付着塩分量計算を行うことが可能と考えられ る. ただし, 風向に対し適切な近似を施すこと, 大気中塩分濃度の時系列データを用いて 同様のシミュレーションを実施することが課題として残る.

ここで、通常の計算値とモンテカルロシミュレーションによる値はおおむね一致するも のの、モンテカルロシミュレーションの方がわずかであるが付着量が大きく算出された. この理由は2つ考えられる.1つは確率分布と元データとの近似精度である。特に高風速 域の精度が落ちると付着量へ及ぼす影響は大きいと考えられる。実際に風向によっては高 風速域の頻度を大きめに近似している。しかし、これを近似精度が悪いとみなすか、ある いは近似曲線の方がより自然な風速評価を行ったとみなすかの判断は難しい。もう1つの 理由は、近似精度にも通ずるが、データの外挿が行われたことが挙げられる。例えば、風



Fig. 5.4.3 天鳥橋の断面図と付着塩分量計測位置 A-d (単位:mm,再掲)

速で考えると将来起こりうるかもしれない強風を考慮したことになる.これは長期的な予 測を行う上では特に必要なものと思われ,ここでは過大評価の要因であるものの,将来起 こりうる現象を適切に評価するためには重要な要素と考えられる.

次に,風速と風向の依存性を考慮しないモンテカルロシミュレーション(黄・ひし形)に 着目すると,他の計算と比べて付着量が小さい部位が目立つ.対象橋梁地点の場合は風速 の大きい風向と発生頻度の高い風向がともに西よりで一致しているが,依存性を無視する とこのような相乗効果を無視することになり,付着量の過小評価につながると考えられる. このように,モンテカルロシミュレーションに際して確率変数間の相関や依存性を考慮す ることの重要性が改めて示された.

以上に示したモンテカルロシミュレーションによる付着塩分量は1万回の試行の平均よ り求めた.しかし,乱数に基づく計算を行う以上,平均値も必ず推定上の誤差を有してい る.したがって,付録 E に従い付着塩分量平均値の区間推定を行うことで予測誤差を検証 した.2013年10月19日~12月11日における付着塩分量の95%信頼区間について,6つ の部位を例にTable 5.4.1 に示す.今回のように1万回の試行を行った場合には信頼区間は 十分に小さく,推定値の信頼度は高いと考えられる.ただし,AとDの部位は他に比べて 信頼区間は大きい.これらの部位では付着塩分の雨水による洗浄効果を考慮したことが原 因と考えられる.すなわち,例えば期間中で同じ降水量であったとしても,そのうちいつ 降水が生じるかで最終的な残存塩分量は容易に変化すると考えられる.したがって,洗浄 も踏まえた付着計算を行う際には,雨水の影響を受ける部位の信頼区間に注視することが 必要といえる.一方,もし許容する信頼区間があらかじめ設定されていれば,求める信頼 区間が得られた時点で計算を止めるようなプログラムとすることで,計算時間の短縮を図 ることも可能と考えられる.今回は十分な試行回数が得られたため平均値としての議論で 十分といえるが,このように付着量の取りうる範囲としての検討が必要な場合もある.

D E Κ Ν 0 А Sample mean 0.3602 10.8721 16.1657 150.1682 1.1977 32.1498 \overline{X} 10.4096 Lower 0.3448 16.1559 150.1388 1.1973 32.1447 L confidence limit (0.96)(0.96)(1.00)(1.00)(1.00)(1.00)11.3346 150.1976 1.1981 32.1549 0.3756 16.1755 Upper confidence limit U(1.04)(1.04)(1.00)(1.00)(1.00)(1.00)

Table 5.4.1 算出された付着塩分量の部位別信頼区間 (単位:mg/m²/day) (括弧内は平均値に対する比率,小数第3位を四捨五入)

橋梁への将来の付着塩分量を推定するうえでモンテカルロシミュレーションは有力な手 法と考えられる.しかし、長期予測に際しては付着と同時に塩分の壁面からの離脱を考え る必要がある.この効果を無視すると計算期間が長くなるにつれて予測誤差は次第に大き くなると予想される、本研究では雨水や結露で生じる水滴による付着塩分の洗浄について 検討を行った.本章では雨水の確率分布による再現は試みたものの,結露に関しては今後 の課題である.結露の再現には日射や温湿度も必要になることから、より多変数を対象と したシミュレーションが可能となるよう検討を行う必要がある.これらを実現することが できれば、各種の洗浄によって付着塩分量が離脱する効果を再現しつつ、対象とする年数 によらず精度良い付着塩分量の評価が可能になると考えられる. 塩分は塗膜の劣化や鋼部 材の腐食に際して重要な因子なため、その経年的な動向を把握することが重要であるとと もに、付着塩分量から表面に形成される水膜厚さの推定にも応用が可能と考えられ、維持 管理に際して有益な情報を与えることができると思われる。一方、本研究では単位面積あ たりの付着塩分量を算出しているが、実務においてはどれだけの範囲を対象とするかが重 要となる. つまり, 同じ単位面積あたりの付着量としても, 1 m²を平均的に表したものと 1 cm²を平均的に表したものとでは、その意味合いは大きく異なるといえる.特に、桁端部 では流れの変化も急であるから、付着塩分量もより細かに分布していると考えられる.こ のような基準を考えることが、維持管理を行う上で重要と考えられる.

5.5 風向に対する確率分布関数の適用

将来起こりうる現象を適切に把握するためには、対象とする確率変数に対し確率分布に よる近似を施したうえでモンテカルロシミュレーションを行う必要がある.しかし、風向 を何らかの確率分布で直接近似することは難しい.これは風速や濃度とは異なり、風向の ような角度で表される変数は、数直線上で示される互いに大小の概念を持つ値ではないこ とが一因として挙げられる.台風シミュレーションにおいて、台風の進行方向を正規分布 で表現した例 [5.19] はあるが、これは一部の方角に台風の進路が集中することで可能とな る特殊な状況と予想される.

本研究では風向を確率分布によって表現するために、「風速と風向」の2変数を「風速の 東西成分(u成分)と南北成分(v成分)」という新たな2変数に置き換えることを考えた.

Table 5.5.1 風向への確率分布適用に関する対象地点

地方	地点
北海道	- 札幌,旭川,釧路,稚内,函館
東北	青森,盛岡,大船渡,仙台,秋田,山形,福島
関東・甲信越	東京, 父島, 水戸, 銚子, 新潟, 奥日光, 長野
中部	浜松,石廊崎,名古屋,高山,津
近畿	大阪,京都,舞鶴,彦根,奈良,和歌山,潮岬
中国・四国	広島,下関,松江,高松,室戸岬
九州・沖縄	福岡,八幡,佐世保,阿蘇山,宮崎,種子島,那覇,名護,与那国

この操作は変数の数はそのままに風向を2種類の風速で表現することが可能であるから, 既存の確率分布を適用することができると考えられる.また,CFD や領域気象モデルのよ うな数値計算では,風速および風向は風速の東西成分と南北成分(あるいは u 成分と v 成 分)として解かれるので,このような風速と風向の風速2成分への分解はある程度理にか なうものとも思われる.本節では風速2成分への確率分布の適用可能性を検討し,風向を 統計的に表現することで,モンテカルロシミュレーションによる付着塩分量計算を試みる.

5.5.1 対象地点・データと利用する確率分布関数

日本各地の気象台やアメダス観測地点から適当な 45 か所を採り上げ,2014 年の1 年間 における毎正時前 10 分値の風速と風向を元データとして確率分布の適用可能性を検討し た.対象地点は Table 5.5.1 に示す通りで,なるべく全国各地から抽出するようにした.い ずれの地点でも風向は 16 方位または静穏 (風速 0.2 m/s 以下)の17 通りで示されており, 風速は 0.1 m/s 刻みである.なお,ワイブル分布や対数正規分布において静穏という現象を 取り込むことは難しい.これら確率分布のパラメータを決定するためには風速の対数をと る必要があるからである.そのため,以下では簡単のため静穏とされるデータは全て無視 して検討を行った.ただし,風速計の精度が十分に良ければ 0 m/s の出現頻度がゼロにな るともいわれることから,無風データの直接の取り込みはできないものの,確率分布の近 似によって微小風速として再現される可能性もある.

確率分布関数には式 (5.5.1)の対数正規分布とワイブル分布の混合確率分布関数 [5.16] [5.19] を利用した.

$$f(v) = a \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln v - \lambda}{\xi}\right)^2\right\} + (1 - a) \times \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v - \gamma}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v - \gamma}{c}\right)^k\right\}$$
(5.5.1)

右辺第1項が対数正規分布に,第2項がワイブル分布に相当する.λとζは対数正規分 布のパラメータで,対数正規分布の平均μと分散 σ²を用いて次のように表される.

$$\lambda = \ln \mu - \frac{\xi^2}{2} \tag{5.5.2}$$

$$\xi^2 = \ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right\}$$
(5.5.3)

aは混合パラメータで、a=0のときワイブル分布に、a=1のとき対数正規分布に一致する. この分布を利用し、両分布の特徴を適宜取りいえることで、ワイブル分布単独よりもさらに柔軟な近似が可能と考えられる. 混合パラメータ aの決定法は次の通りである. まず、対数正規分布とワイブル分布それぞれで近似を行うことで各々のパラメータ ($\mu \ge \sigma$ および $k \ge c$)を決定する. その後、得られた 4 パラメータは固定し、最小 2 乗法を利用することで混合パラメータ aを決定することができる. ここで、簡単のため対数正規分布を $g_i = g(v_i)$ 、ワイブル分布を $h_i = h(v_i)$ 、目標とする分布を $p_i = p(v_i)$ とすると、誤差の 2 乗の総和 S は次のように書くことができる.

$$S = \sum_{i} \{ag_i + (1-a)h_i - p_i\}^2$$
(5.5.4)

この Sの a による 1 次偏微分をゼロとすることで、最適な a が次のように決定する.

$$a = \frac{\sum_{i} \{(p_i - h_i)(g_i - h_i)\}}{\sum_{i} (g_i - h_i)^2}$$
(5.5.5)

ただし, *a* の範囲に制限を課しており,0以下や1以上となる場合にはそれぞれ0または1と置き換えた.なお,検討した45地点から日本各地を網羅するような混合パラメータのマップ作成が目的ではなく,あくまで確率分布の適用による風向の再現可能性を探ることが重要である.

5.5.2 近似手法と計算例

検討に用いた気象台またはアメダスデータは風向を 16 方位で表すため,風速と風向を そのまま風速 u 成分と v 成分に分解すると, Fig. 5.5.1 (a) のように東西南北の4風向に対 応して風速ゼロの発生頻度が卓越する.なお, u 成分と v 成分のそれぞれで西 (東向き)の 風と南 (北向き)の風が正の風速に対応する.これは確率分布を適用するうえで障害とな るので,元のデータにあらかじめ回転行列を乗ずることで 11.25°(= 360°/16/2) だけ回転さ せ,近似が可能なデータへと変換した.Fig. 5.5.1 (b) が回転後の値であり,風速ゼロのピ ークが除かれたことが分かる.このとき,風速ゼロを中心として左右に 2 つの山を有する 分布となるので,風速を正の領域と負の領域に区別し,それぞれで近似を行うことで風速 の再現が可能と考えられる.なお,この操作は風向の定義を便宜上一時的に置き換えるに すぎないが,回転後の風速値は厳密には東西成分や u 成分と呼べるものではない.しかし,



Fig. 5.5.1 地点「京都」における風速 u 成分の確率密度関数

簡単のために回転後の風速値も回転前の元データと同様に東西成分やu成分と呼称する. Fig. 5.5.2 に 6 地点 (札幌,仙台,父島,奥日光,潮岬,八幡)を例として,混合確率密 度関数による風速u成分とv成分の近似例を示す.図中には正側と負側それぞれにおける 混合パラメータを併記した.地点によって正側と負側の分布形状が異なるのは周囲の地形 の影響を受けるためと考えられるが,いずれの地点でもu成分とv成分それぞれで正側と 負側の2つの確率分布関数によって元の風速値を良好に再現することができた.したがっ て,風速と風向を風速2成分に分解し,さらに正負の2領域に分割してそれぞれに近似を 施すことで,結果的に確率分布による風向の再現が可能となり,将来起こりうる極値の再 現に至ると考えられる.ここに例示した地点以外でも概ね同様の近似精度が確認されてお り,任意の地点においてこのような風速と風向の表現が可能と思われる.

5.5.3 相関を考慮したモンテカルロシミュレーションの実行

このように得られた回転後の風速 u 成分とv 成分の近似関数を利用することでモンテカ ルロシミュレーションを行うことができる.ただし,風速と風向の関係と同様に,u 成分 とv 成分にも一定の相関が存在するので,モンテカルロシミュレーションにおいてはこれ を適切に再現する必要がある.例えば札幌での両者の相関は-0.6539 と比較的大きく,これ を無視すると良好な予測とならないといえる.しかし,先の検討のように風向別の風速分 布を求めるような作業は u 成分とv 成分については難しいので,修正直交変換法 [16][19] を利用して相関の再現を試みた.修正直交変換法では,まず回転後の元データの共分散行 列から得られる固有ベクトルによって,回転後の元データを互いに相関のない座標系へと 変換する.次に,変換した座標系において確率分布による近似を施し,モンテカルロシミ ュレーションを行うことで必要個数の値を算出する.その後,もとの座標系へと再変換す ると同時に,直交変換前データの近似で得られる分布に合うよう微修正を加えることで, 必要な相関を考慮しつつ目標となる確率変数を得ることができる.ここでは u 成分とv 成 分の 2 変数のみを対象として修正直交変換法を用いたモンテカルロシミュレーションを行 い,最終的に得られる風速と風向を元データと比較することで計算の妥当性を検証した. なお,発生させるデータ個数は元データに合わせて 24 × 365 個の1年間分とした.

152



Fig. 5.5.2 風速 u 成分と v 成分の混合確率分布関数による近似 (1/2)



Fig. 5.5.2 風速 u 成分と v 成分の混合確率分布関数による近似 (2/2)

Table 5.5.2 元データと算出されたデータの風速 u 成分と v 成分の相関係数

	Sapporo	Sendai	Chichijima	Okunikko	Shionomisaki	Yahata
Original	-0.6539	-0.4464	0.1033	0.2842	0.2218	0.0102
Produced	-0.6157	0.0288	0.0898	0.2477	0.2056	0.0704

Table 5.5.3 元データの第1主成分と最も近い 16 方位との角度差 [deg]

	Sapporo	Sendai	Chichijima	Okunikko	Shionomisaki	Yahata
*	123.4350	135.0631	80.2212	184.7324	193.7454	88.8531
Diff.	10.935	0.0631	9.7788	4.7324	8.7546	1.1469

*1st principal component

先の6地点における元データとモンテカルロシミュレーションで算出されたデータの風 速 u 成分と v 成分の相関係数を Table 5.5.2 に,風向別平均風速と生起頻度,および風向別 に平均風速と生起頻度を掛け合わせたものを Fig. 5.5.3 に示す.風速と頻度の積はその風 向の影響度に相当すると考えられる.なお,モンテカルロシミュレーションでは 100 回の 計算を行い,各々で得られる風況や相関係数の平均を図表に示した.100 回の平均では信 頼区間が十分に限定されない可能性も残るが,確率分布による近似の可能性を評価するう えでは十分と考えられる.札幌,父島,奥日光,潮岬の4地点では元のデータとモンテカ ルロシミュレーションによる風向別の特性が概ね同様の傾向を見せており,確率分布関数 が元データの特徴を残しつつ適切な近似を行えていると考えられる.また,各地点の相関 もおおよそ保たれており,修正直交変換法が精度よく機能したといえる.45 地点のほとん どにおいて同様の結果を得た.

一方,仙台ではモンテカルロシミュレーションによる値の元データからのずれが目立つ 不自然な分布である.同じ現象がいくつかの地点で見られた.これらの地点に共通するの は共分散行列の第1主成分が16方位を表す22.5°の倍数に近いということである.Table 5.5.3 に 6 地点における元データの第1主成分,およびそれと最も近い16方位との角度差 を示す.仙台は他の4地点に比べ角度差が小さいことが分かる.これは旭川や秋田なども 同様で,主成分が16方位に近いほど大きなずれが表れる傾向にある.つまり,直交変換後 のデータが16方位にほぼ重なる座標系で表されるため,座標軸方向となる風向を風速2成 分で表すと Fig. 5.5.1 (a)と同様に多数の風速ゼロが生じることが原因と考えられる.定量 的な判断は難しいが,第1主成分と16方位のいずれかとの差がおよそ3°を下回ると直交 変換後の近似が難しくなり,差が小さくなるにつれて風向別の平均風速や生起頻度に明ら かなずれが表れるようになる.6地点のうち八幡では,風向別の風速や生起頻度に明ら かなずれが表れるようになる.6地点のうち八幡では,風向別の風速や生起頻度に明ら かなずれが表れるようになる.6地点のうち八幡では,風向別の風速や生起頻度は明らか に不自然なものではないが,直交変換後のデータにはゼロ付近のピークが存在しており, 十分な近似とはなっていない.直交変換後のデータに対し元データと同じように11.25°の 回転を与えることによってゼロのピークを取り除くと近似自体は可能になるものの,直交 変換されたデータには相関がないという前提を崩すため,ここでは適用できない.これは



Fig. 5.5.3 元データと生成データの風向別平均風速, 生起頻度, 風速と頻度の積 (1/2)



Fig. 5.5.3 元データと生成データの風向別平均風速, 生起頻度, 風速と頻度の積 (2/2)



Fig. 5.5.4 対象橋梁地点での風速 u 成分と v 成分の混合確率分布関数による近似



Fig. 5.5.5 対象橋梁地点の風向別平均風速,生起頻度,風速と頻度の積

風向を 16 方位で離散的に表した場合に固有の問題と予想されるが、いずれにせよ仙台や 八幡のような地点において、直交変換によってパラメータ間の相関を再現することは困難 と思われる.しかし、八幡のようにそもそもの相関 (0.0102) が非常に小さい場合には、直 交変換を行うことなく、つまり相関を考慮せずともある程度のシミュレーションが可能と も考えられる.

以上より、16方位で表される風向を元データとする場合には、地点ごとの風向特性によっては適用が難しい場合もあるものの、多くの地点では風速と風向を風速 u 成分と v 成分 で表現し、かつ直交変換を用いて両者の相関を再現することで、適切なモンテカルロシミュレーションを実行することができると考えられる.

5.5.4 対象橋梁地点の観測データに対する適用

対象橋梁地点 (天鳥橋)の風速と風向の観測データに対しても同様の計算を行った. 2011 年 10 月 18 日~2013 年 10 月 17 日の 2 年間分の 10 分ごとの観測値を元データとし,



Fig. 5.5.6 対象橋梁地点での WRF 計算値に対する混合確率分布関数による近似 (1/2)

6×24×365×2個の値を算出した. Fig. 5.5.4 に風速の u 成分と v 成分に対し混合確率分布 関数を用いて近似を施した結果を示す.対象橋梁地点で観測された風速には多数の微小値 が含まれるため,回転処理後にも関わらずゼロ付近に多くの値が存在することが分かる. また,v成分は正負でやや傾向が異なる一方,u成分は明確な境界が見られないことから, 値を正負に分割することなく1つの確率分布で近似を行った.気象台・アメダスデータと 同様に精度よく近似されており,対象橋梁地点のような地形の影響を受けた局所性の非常 に強い風況でも,風速と風向を風速2成分に分解することで近似が可能と考えられる.

Fig. 5.5.5に観測データとモンテカルロシミュレーションによる生成データから得られた 風向別の平均風速,生起頻度,平均風速と生起頻度の積を示す.モンテカルロシミュレー ションにより算出した値は概ね元のデータの傾向を再現しており,妥当な計算が行えたと 考えられる.また,相関係数は元データが-0.4392,生成データが-0.4431であり,直交変 換によって精度よく相関が再現することができた.

5.5.5 WRF による風向・風速・大気中塩分濃度を利用したモンテカルロシミュレーション 最後に,領域気象モデル WRF で得られた対象橋梁地点のデータを利用して,風向・風速 に加え大気中塩分濃度も同時に対象とした3変数のモンテカルロシミュレーションを行っ た.基本的な方法はこれまでに説明した通りで,風速と風向は風速2成分へ分解して処理 を行った.

Fig. 5.5.6 に WRF で得られた風速 u 成分, v 成分, 大気中塩分濃度を混合確率分布関数 で近似した結果を示す.WRF で算出される風速と風向はそもそも u 成分とv 成分として計 算されたものなので,気象台・アメダス値の 16 方位別の風向から算出した場合とは違って 両成分ともゼロ付近に値が集中することが分かる.そのような分布を正負に分けて各々近 似を施すことで全体の分布傾向を良好に再現することができたといえる.ただしv 成分の 負側は近似曲線と元のデータがややずれており,WRF の計算精度も含めて近似の妥当性の 検証を進める必要がある.大気中塩分濃度は単調減少に分布しており,形状パラメータが 1 以下となるワイブル分布を主成分とした混合確率分布関数によって良好な近似を行えた.



Fig. 5.5.6 対象橋梁地点での WRF 計算値に対する混合確率分布関数による近似 (2/2)



Fig. 5.5.7 WRF による対象橋梁地点の風向別平均風速, 生起頻度, 風速と頻度の積, 大気中塩分濃度

	Orignial						Produced					
		u	v	С			u		v		С	
ı	ı	1.0000	-0.2120	-0.0350		-	1.0000		-0.2118	_	0.0187	
۱	v		1.0000	0.4799					1.0000		0.1852	
c	C			1.0000							1.0000	

Table 5.5.4 元データ (WRF) と算出されたデータの風速 u 成分・v 成分・濃度の相関係数

Adhesion amount [mg/m²/day]



Fig. 5.5.8 WRF 計算値を用いたモンテカルロシミュレーションによる付着塩分量計算例 (2013 年 3 月 22 日~2014 年 3 月 11 日)

Fig. 5.5.7には元のデータとモンテカルロシミュレーションによるデータの風向別平均風 速,生起頻度,平均風速と頻度の積,大気中塩分濃度を示す.いずれも両者の値は同様の 分布傾向を示しており,領域気象モデルの算出値に対しても良好なシミュレーションが可 能と考えられる.風向を 16 方位で表す気象台・アメダス観測値のように直交変換後の近似 が難しいこともないと予想されるので,むしろ計算は容易と思われる.

Table 5.5.4 は元データと生成されたデータにおける 3 変数間の相関を表す.上で示され たように風向別の特性はおおよその再現がされたものの,生成されたデータの大気中塩分 濃度と風速 2 成分との相関が元のデータに対し小さく算出された.この理由として,風速 と濃度の次元が異なるためお互いの分散に大きな差があり,直交変換を行う際に分散の大 きい風速の影響が濃度よりも強く表れた可能性が考えられ,さらなる検討を要する.

Fig. 5.5.7 に示された値を用いて橋梁部位別の付着量計算を行った結果を Fig. 5.5.8 に示 す.通常の計算とモンテカルロシミュレーションによる計算とで全体的な傾向は一致する ことから,風速2成分と大気中塩分濃度を対象としたモンテカルロシミュレーションを利 用することで橋梁の付着塩分量を再現できる可能性が示された.一方,モンテカルロシミ ュレーションによる値が通常の付着量計算の結果に対し過小評価された.確率分布関数の 元データに対する近似の影響とも考えられるが,風向別の平均風速や大気中塩分濃度に大 きな差が見られないことからも、相関の再現が不十分であることが原因と考えられる.モ ンテカルロシミュレーションの付着量計算への適用妥当性を判断するうえで、今後は確率 分布関数の近似精度とともに変数間の相関を再現する方法についてさらなる検討が必要と 考えられる.

5.6 本章のまとめ

本章では腐食環境を統計的に把握することを目的に,確率分布による気象要素や大気中 塩分濃度の表現を試み,かつモンテカルロシミュレーションを用いた橋梁への付着塩分量 計算手法について検討を行った.

- 対象橋梁地点で観測された気象情報を利用した検討を行った.風向と風速に一定の依存性が認められたので、16方位別の風速分布に対してそれぞれワイブル分布による近似を行い、ワイブル分布が各風向の風速分布を良好に再現することを確認した.降雨については降水量・連続降雨時間・連続無降雨時間の3変数を考え、それぞれをワイブル分布による表現が可能であることを明らかにした.これらを用いたモンテカルロシミュレーションに基づく付着塩分量計算においても、通常の付着量計算とおよそ同等の計算が可能であることを示すとともに、風向と風速の依存性を無視すると付着量の再現性が低下することが明らかとなった.また、確率分布関数による元の観測値の近似を行うことで、将来起こりうる極値の再現が可能となり、より信頼性を有する値として将来の腐食環境評価を実現することができるといえる.
- 風向を確率分布によって表現するために、風速と風向の2変数を風速の東西成分(u 成分)と南北成分(v成分)に分解することを考えた.各地の気象台やアメダスおよび 対象橋梁地点における観測値を用いた検討から、任意の地点においてこの方法で風向 の確率分布による表現が可能であることが明らかとなった.さらに、u 成分とv 成分 の相関を考慮したモンテカルロシミュレーションを実現するために修正直交変換法 の適用性を検討した.多くの地点では相関を再現しつつ元の風況を表すことが可能で あるものの、一部の地点では16方位別の風向表示に起因して直交変換時に分布が乱 れてしまうため、適用には注意を要することが示された.
- 領域気象モデル WRF で算出された風速 u 成分と v 成分,および大気中塩分濃度の 3 変数を対象に,修正直交変換法を用いたモンテカルロシミュレーションの適用可能性 を検討した.得られる風速と大気中塩分濃度の風向別の特性は元の値の傾向と概ねー 致するものの,大気中塩分濃度と風速 2 成分との相関が小さくなった.WRF の算出値 の精度を確認するとともに,直交変換時に変数間の分散の違いを考慮するための処理 を行うなど,さらなる検討が必要である.また,このように得られた時系列データを 用いて橋梁への付着量計算を行い,概ねの傾向の再現は可能であるが,一部の部位で は付着量が過小評価となることが示された.これは風速と大気中塩分濃度の相関を過 小評価したことの影響と考えられ,精度良い相関の再現方法について検証する必要性 が示唆される.

参考文献

- [5.1] 北村隆一, 堀智晴: 工学のための確率・統計, 朝倉書店, 2006.
- [5.2] 薩摩順吉:理工系の数学入門コース7 確率・統計, 岩波書店, 1989.
- [5.3] 松井正宏,田村幸雄,田中俊輔:風向特性を考慮した矩形高層建物の風荷重評価, 第17回風工学シンポジウム論文集,499-504,2002.
- [5.4] 山口敦, 石原孟:台風シミュレーションと気象解析を利用した設計風速評価手法の 提案, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, 173-176, 2009
- [5.5] 河合弘泰,橋本典明:確率台風モデルの構築とそれを用いた高潮の出現確率分布の 試算,港湾空港技術研究所資料, No. 1122, 2006.
- [5.6] 樋本圭佑,田中哮義:京都市内にある文化財建造物の地震火災による消失リスク, 京都大学防災研究所年報,第54号B,2011.
- [5.7] 高田宏,村上三郎:モンテカルロシミュレーションによる集合住宅の給水・給湯負荷算定法に関する検討,日本建築学会環境系論文集,第 578 号, 39-45, 2004.
- [5.8] 坂田宏志,鈴木克哉:モンテカルロシミュレーションによるニホンザル群の存続確 率の推定,兵庫ワイルドライフレポート,1号,75-79,2013.
- [5.9] MathWorks: MATLAB, http://www.mathworks.co.jp/products/matlab/, 2016.
- [5.10] 脇本和昌: 乱数の知識, 森北出版, 36-48, 1970.
- [5.11] 脇本和昌:身近なデータによる統計解析入門,森北出版, 91-104, 1973.
- [5.12] 広井誠:番外編:擬似乱数の検定,http://www.geocities.jp/m_hiroi/light/pystat04.html, 2007.
- [5.13] 光田寧:超音波風速温度計とその大気境界層研究への応用,天気, Vol. 18, No. 8, 377-385, 1971.
- [5.14] 橋と風編集グループ:橋と風, 1990.
- [5.15] Vickery, P. J., Twisdale, L. A.: Prediction of hurricane wind speed in the United States, J. Struct. Eng., 121, 1691-1699, 1995.
- [5.16] 石原孟,ホタイホム、チョンチーリョン、藤野陽三:台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案、第18回風工学シンポジウム論文集、 5-10,2004.
- [5.17] 村田厚生:確率・統計の基礎,大学教育出版, 1999.
- [5.18] 中村元, 虫明功臣: 歪度を持つ水文統計量の統計解析とその確率模型, 生産研究, 44 巻, 4 号, 177-183, 1992.
- [5.19] Ishihara, T., Siang, K. K., Leong, C. C., Fujino, Y.: Wind field model and mixed probability distribution function for typhoon simulation, Proc. The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI), 412-426, Seoul, Korea, September 12-14, 2005.

第6章 結論および今後の課題

6.1 本研究の結論

第1章「序論」では、鋼橋上部構造の損傷形態の一つである腐食の発生機構を概説し、 水・酸素とともに塩分の腐食への寄与が大きいことを示した.また、防食技術として耐候 性鋼と塗装について、既往の研究を採り上げつつ、それらを適切に使用するためには飛来 塩分環境や部材への付着塩分量を把握する必要があることを確認した.さらに、現行の道 路橋示方書では地域別の離岸距離のみで塩分環境を評価しているが、実際には飛来塩分は 地形や植生の影響を受けて局地的な分布となることを考慮する必要がある.以上を念頭に、 飛来塩分に関する既往の研究を広く紹介しつつ当該分野の課題を挙げるとともに、橋梁部 位別の付着塩分量の定量的な評価を行うことを本研究の目的とし、以下に大別される内容 について検討を行った.

- 飛来塩分量(または大気中塩分濃度)の観測による精度良い把握.
- 各種の洗浄効果も加味した橋梁部位別の付着塩分量の定量的な評価手法の構築.

さらに,以上の内容を前提に,維持管理のさらなる効率化・高度化を念頭に,次の項目 にも取り組んだ.

- 大気中塩分濃度および気象要素の数値計算による広域的な評価.
- 統計的な手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現およびこれらを用いた付着 塩分量の評価手法の開発.

第2章「現地観測による飛来塩分量および気象要素の獲得と橋梁表面の付着塩分量調査」 では、3 主 I 桁を有する鋼塗装橋表面への付着塩分量の計測と、当該地点における大気中 塩分濃度および気象観測を行った.また、ドライガーゼ法に着目し、捕集装置周りの気流 特性や捕集効率について検討を行った.以下に第2章の結論を示す.

- 新たに開発した円筒型飛来塩分捕集器は大気中塩分濃度の季節変動を再現することができるほか、土研式タンク法やドライガーゼ法と概ね同様の捕集塩分量を示すことから、一定の捕集精度を有すると考えられる。そのうえで、土研法による台風時の過剰捕集を抑制するなど、大気中の塩分環境を従来よりも精度よく評価することが可能と予想される。また、大気中の塩分環境を濃度として評価することに成功したので、これを橋梁部位別の付着塩分量の数値計算に利用することが可能である。
- ドライガーゼ法の捕集装置周りの気流特性把握を目的として風洞実験を行い、接近風 速が大きいほどガーゼの防風効果は小さく、網に関する既往の研究と合致することが 示された.さらに、接近風速とガーゼ近傍の風速の関係は非線形で、かつ風向にも依 存することが明らかとなった.したがって、ドライガーゼ法による飛来塩分捕集効率 を適切に評価するためには、風速および風向に応じた捕集効率を考慮する必要がある.
- 大気中塩分濃度と風向・風速からドライガーゼ法による捕集塩分量を推定する手法を 開発した.提案手法は主に以下の2つから成り、観測値のオーダーを十分に再現する ことが示された.(1)ガーゼ上流側風速に基づく大気中塩分のガーゼへの付着,(2)ガ

ーゼ前後面の風速差に基づくガーゼ自体の塩分捕捉率.したがって、大気中塩分のガ ーゼへの衝突フラックスを適切に定めることで、定量的な予測精度を向上させること が可能と考えられる.そのためには、捕集装置周りの気流特性を風洞実験や CFD によ って詳細に把握することが有効と考えられる.

第3章「数値計算による橋梁部位別の付着塩分量評価」では、数値計算によって橋梁部 位別に腐食環境を評価することを目的に、付着塩分量の評価モデルを提案した.このモデ ルは大気中塩分の慣性衝突による橋梁表面への付着と拡散による沈着を考慮しており、橋 梁周りの流れ場に依存する.併せて提案モデルに必要となる各種パラメータの特定と、橋 梁表面に付着した塩分が離脱する要素の一つとして、雨水による付着塩分の洗浄効果を実 験的に評価した.最後に、3主桁鋼塗装橋を対象に提案モデルによって付着量を計算し、 実測値との比較を行った.以下に第3章の結論を示す.

- 数値流体力学 (CFD) の手法を用いてレイノルズ平均モデル (RANS) を解くことで橋 梁周りの定常流れ場を算出し,流れの分布は対象橋梁形状と周辺地形に影響され,特 に桁間では接近風向に依存することが明らかとなった.また,桁間では基本的に反時 計回りの循環流れが形成されるため,一部の部位では塩分が付着しづらく,流れの非 定常成分の寄与について検討する必要がある.一方,鉛直平板を対象に,定常および 非定常流れと粒子個々の追跡手法に基づく検討から,壁面からおよそ 35 mm 離れた位 置の風速を用いることで付着塩分量の算出が可能であることを明らかにした.ただし, 対象物体の形状や角度,流れの算出条件,海塩粒子の濃度や粒径・密度などの影響の 検証が必要である.
- 橋梁表面に付着した塩分が表面から離脱する要素の一つとして,橋梁表面に到達した 雨水による洗浄効果を実験的に検討し,洗浄後の残存塩分率は時間降水量の増加とと もに小さくなることが確認された.また,表面粗度が小さい方が残存塩分率も小さい ことが分かった.一方,供試体の暴露角度を変えることで洗浄特性は大きく変わるこ とが明らかとなった.実橋においては,雨水が表面に到達する位置に存在する部材で あることと,表面に到達した雨滴が付着塩分とともに流下することができるような構 造であることが,雨水による付着塩分の洗浄が生じる条件と考えられる.
- 提案モデルに基づき対象橋梁部位別の付着塩分量を計算し、ウェブ部の付着量のオー ダーや下フランジ部上下面の大小関係など、観測値の全体的な傾向を概ね再現するこ とに成功した.ただし、ウェブ部において観測値は下部ほど大きいが計算値は面によ っては逆であり、下フランジ部でも一部では上下面の大小が逆転した.流れ場計算の 精度とともに、海塩粒子に作用する重力の影響について検討が必要である.面ごとの
 2 次元的な付着量分布も算出し、同じ面でも橋梁自体や周辺地形に起因する局所的な 風況の影響で部位によって付着量は異なることを明らかにした.橋梁維持管理の実務 においては、このような局所性をあらかじめ把握しておき、付着量の多い部位を集中 監視することが可能と思われる.

第4章「橋梁表面おける結露による水滴の発生とその流下に伴う付着塩分量の洗浄効果」 では、結露で橋梁表面に生じた水滴が流下し、その過程で付着塩分を洗浄する効果を数値
計算および実験によって検証した.また,一連の計算に用いる入力値を領域気象モデル WRFで算出し,観測によらない気象要素・大気中塩分濃度の算出,および付着塩分量評価の実現性も併せて検証した.以下に第4章の結論を示す.

- 観測によらない広域的な気象要素や大気中塩分濃度の獲得を目的に、領域気象モデル WRFを導入した.温湿度,表面気圧,短波放射,降水量は季節変動を精度よく再現し、 値も概ね一致した.風速や風向は観測値とのかい離が大きく、局所的な地形の影響が 強く表れたと考えられる.大気中塩分濃度は円筒型飛来塩分捕集器による観測値を概 ね再現することができたが、複数の地点を対象に精度検証を継続する必要がある.
- 対象橋梁ウェブ部を3枚の鋼板としてモデル化し、WRFで得られた放射や気温を入力 とした1次元熱伝導方程式を解くことで、桁表面温度の時間変化の算出に成功した. 表面温度が気温を追随するような変化を見せるなど妥当と考えられる結果で、さらに 露点との関係から主桁表面に発生する水量を予測した.また、付着塩分の潮解性によって形成される水膜を併せて考慮し、橋梁表面に発生する水量として定義した.
- 水部材表面で水滴が流下を始める水量や流下時に分裂する水量,および流下時の塩分 洗浄効果を実験的に検証し,洗浄力は水量が少ないほど大きいことが示された.これ は水量が少ない時ほど水滴がゆっくりと流下することでより多くの塩分を自身に溶 かすためと考えられ,付着塩分の洗浄には水滴の大きさよりも流下速度の方が支配的 であることが明らかとなった.
- 以上を踏まえた付着塩分量計算を実施し、雨水による洗浄の影響がない橋梁内側の部 位において水滴の流下による塩分洗浄を再現するに至り、より観測値に近い値を得る ことができた.計算精度向上のために、表面温度や発生水量を観測によって把握し、 計算結果との比較から計算の妥当性を確認するとともに、周辺環境の精緻な再現や凝 結などによる潜熱の影響を考慮する必要がある。

第5章「統計的手法を用いた大気中塩分濃度と気象要素の表現および付着塩分量の評価」 では、将来の腐食環境を統計的に把握することを目的に、確率分布による気象要素や大気 中塩分濃度の表現と、モンテカルロシミュレーションを用いた橋梁への付着塩分量計算手 法について検討を行った.以下に第5章の結論を示す.

- 風向と風速の依存性を表現するために16方位別に風速分布をワイブル分布で近似し、いずれの風向でも良好な再現が可能であることを確認した.降雨については降水量・ 連続降雨時間・連続無降雨時間の3変数を考え、いずれもワイブル分布によって表現が可能であることを明らかにした.これらを用いたモンテカルロシミュレーションによって通常の付着塩分量計算とおよそ同等の計算が可能であることを示し、風向と風速の依存性を無視すると付着量の再現性が低下することが明らかとなった.また、確率分布によって元の観測値を近似することで、将来起こりうる極値を再現することで、 将来の腐食環境をより適切に評価することが可能になったといえる.
- 風速と風向の2変数を風速の直交2成分に分解し、かつ必要に応じて各々を正負に分離することで、任意地点において間接的に風向の確率分布による表現が可能であることが明らかとなった.さらに、風速2成分の相関を考慮したモンテカルロシミュレーションを実現するために修正直交変換法の適用性を検討し、多くの地点では相関を再

現しつつ元の風況を表すことができるが、一部の地点では 16 方位別の風向の表現に 起因して直交変換時に分布が乱れるため、注意を要することが示された. WRF で算出 された風速2成分と大気中塩分濃度の3変数を対象に同様の検討を行ったところ、濃 度と風速との相関が小さくなった.また、得られた時系列データを用いて付着塩分量 計算を行うと、一部の部位では付着量が過小評価となることが示された.WRFの算出 値の精度確認とともに、直交変換時に変数間の分散の違いを考慮するための処理を行 うなど、さらなる検討が必要である.

本研究では、大気中塩分濃度や風向・風速を利用し、かつ周辺地形も考慮した流れ場を 算出したことで、橋梁部位別の付着塩分量を簡易的に評価可能なモデルを提案することが できた.現行の道路橋示方書では離岸距離のみで塩分環境を評価しているので、橋梁個々 の立地や形状なども踏まえて橋梁部位別の腐食環境を評価できる本研究の手法は維持管理 の上で意義あるものである.対象橋梁周りの流れ場を算出する必要は残るが、将来的には 橋梁形状や周辺地形もパラメータ化することで、維持管理実務に資する手法になると期待 することができる.また、本手法を用いることで、例えば付着塩分量の多い部位を集中的 に監視することで、塗膜の塗り替えや表面の洗浄などの維持管理を行う目安となるほか、 重塗装を施す部位を決定することも可能と思われる.さらに、付着塩分量を数値計算によ って知ることができるので、建設前の設計段階でも部位別の腐食環境を把握することが可 能であり、橋梁形状の工夫を行うことで塩分の付着しづらいような構造の最適化に利用す ることもできると考えられる.

さらに、領域気象モデルによって気象要素や大気中塩分濃度を算出することで、現地観 測による値を一切用いることなく、かつ降雨や結露による洗浄も考えつつ、橋梁表面の付 着塩分量評価が可能となった.多くの橋梁が高度経済成長期に建設された日本ではそれら の老朽化が深刻であり、効率的な維持管理の実施が喫緊の課題となっている.複数橋梁を 広域的かつ同時に管理しなければならないことを踏まえると、観測を必要としないことは 維持管理戦略上大変有利と考えられる.近年は計算機の能力向上も著しく、WRF や CFD などの大規模計算も比較的容易になってきた.したがって、数値計算による精度良い予測 の実現がますます重要となっており、本研究はそれに資するものと考えられる.

最後に,飛来塩分や付着塩分はあくまで構造物の劣化因子の一つに過ぎず,得られた塩 分環境に基づき,橋梁部材がどのように劣化するのかを常に意識することが重要と考える.

6.2 今後の課題

本研究の橋梁部位別付着塩分量の評価モデルにおいて,より簡易的な予測を実現するためには,橋梁周りの定常流れ場計算も省略することが望ましい.本研究であらかじめ計算が必要なのは定常流れ場のみなので,大気中塩分濃度との連成解析や粒子挙動の評価が必要な既往の手法に比べると,付着量推定に必要な負担は少ないといえる.しかし,多くの橋梁に対し流れ場計算を行うことは現実的とはいえず,パラメータ化の必要があり,主桁の数や形状などの特徴や周辺地形を大別し,その組み合わせを以って付着量の評価を可能

とすることが求められる.

橋梁表面の付着塩分量評価に際し、本研究では橋梁周りの定常流れ場を利用したが、大 気中に浮遊する塩分粒子の壁面への付着においては、流れの非定常性の寄与を考慮する必 要があると考えられる.付着塩分量には長期的な風況が支配的と思われるので定常流れ場 による評価で概略をつかめるものの、塩分が付着する部位とそうでない部位とが明確に分 かれてしまう.したがって、定常流れ場による評価を基本とし、その上で非定常成分の寄 与を考慮することで、より精度よく実測値を再現することができると考えられる.また、 定常流れ場を前提としているので、いずれの部位近傍でも大気中塩分濃度は一定と考えて いるが、時々刻々と変化する気流の中で大気中塩分濃度がとる分布は十分に明らかになっ ておらず、併せて検討が必要である.

付着塩分量の定量的な評価を実現するためには、表面に付着した塩分の離脱も再現する 必要があり、本研究では雨水と結露水に着目し、その洗浄効果を実験および数値計算より 再現した.しかし、塩分の離脱に寄与する現象は他にも存在する可能性はある.例えば、 風の作用や橋梁の振動などが考えられ、付着塩分量に与える影響を検討すべきである.ま た、壁面に接触した塩分粒子の付着率は極めて重要である.塩分は潮解性を持つため基本 的には湿った状態であり、そのため壁面に到達した全ての塩分粒子が付着するという考え 方には一定の根拠があるものの、詳細はいまだ不明である.一方、鋼部材への付着率を具 体的に検討しようとした例もあり、検討の余地がある.

付録 A 円筒型飛来塩分捕集器の管内流速測定実験

円筒型飛来塩分捕集器を用いて大気中の塩分環境を評価するためには、管内を通過する 大気の体積を求める必要がある.本研究では、2 種類の風洞実験によって接近風速と管内 風速との対応を風向別に調べることで式 (2.4.1)中の係数 α を求め、大気中塩分濃度の評 価に利用した [1].実験に用いた風洞は、京都大学大学院工学研究科桂キャンパス C1 棟地 下に設置された吹き出し式エッフェル型室内回流式風洞である.測定部は高さ 1,000 mm, 幅 700 mm,長さ 5,000 mm で、最大風速は 15 m/s である.詳細な構造は Fig. A.1 に示す. また、風洞の大きさの制限から、Fig. A.2 に示す 3 通りの円筒模型を用いて実験を行った.



(a) 側面図



(b) 上面図

Fig. A.1 風洞の詳細 (単位:mm)





1 つ目の実験では、流出口側の筒と遮蔽版を除いた Fig. A.2 (a) に示す模型を用いた.接近風向の違いを再現するために、この模型を風洞内で様々な偏角で設置し、風速計(Anemomaster Model 6003, Kanomax) によって管内風速を計測した.風速計測位置は剥離領域内に入らないよう、流入口より 300 mm だけ下流側の断面中心部とした.風洞風速は 2–12 m/s の範囲で変化させ、模型偏角は 0–55°の範囲を 5°刻みとした.Fig. A.3 は接近風速に対する管内風速の比を風向別に示しており、風向に対する変化は極めて鈍く、風向・風速に依らずこの比はほぼ一定となることが分かる.したがって、全ケースから得られた比の平均である 0.192 を風向・風速によらず利用できる風速比とした.

2つ目の実験では、Fig. A.2 の 3 つのモデルそれぞれにおいて、風向は風軸と円筒軸が一 致するように固定し、接近風速ごとの管内風速を調べた. Fig. A.4 は接近風速と管内風速の 関係を示しており、いずれの模型においても両者には線形な関係があることが分かる.ま た、Fig. A.2 (a) と (b) の違いは下流側の筒の有無であり、両者のプロットはほぼ重なるこ とから、円筒内壁の摩擦が管内風速に与える影響はほぼないものと考えられる.一方、遮 蔽版を有する (c) の模型は他のものと比べて管内風速は小さく、遮蔽版によって風速すな わち流量は 0.57 倍になることが明らかになった.

以上より,2 つの実験から得られた係数をかけ合わせることによって,接近風速に対する円筒型飛来塩分捕集器内の風速は,α=0.112 (=0.197×0.57)を用いて求めることが可能となる.

172

付録 B 離散変数に関する仮説検定

k個のカテゴリーを持つ離散分布から得られた観測値を考える.*j*番目のカテゴリーが観 測される母集団確率を p_j ,そのカテゴリーの観測頻度を X_j とすると、 X_j の総計、つまり標 本数nは $n = \sum X_j$ と表せる.このとき、帰無仮説を「 $\forall j, p_j = p_{j,0}$ 」、対立仮説を「 $\exists j, p_j \neq p_{j,0}$ 」 と設定する.

ここで、 $\forall j$ を考えると、 X_j の発生数は試行回数 n、生起確率 $p_{j,0}$ の二項分布に従う.また、標本(試行回数)が大きいとき、二項分布は正規分布で近似されるから、 $X_j \sim N(np_{j,0}, np_{j,0}(1 - p_{j,0}))$ と表される. $N(\mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布を表す. さらに、二項分布がポアソン分布で近似されるとすれば、 $E[X_j] = np_{j,0} = Var(X_j)$ と考えることができるから、 $X_j \sim N(np_{j,0}, np_{j,0})$ とも表すことができる. したがって、 X_j は以下のように標準正規分布で記述することができる.

$$\frac{X_j - np_{j,0}}{\sqrt{np_{j,0}}} \sim N(0, 1)$$
(B.1)

このとき,標準正規分布の平方和はカイ自乗分布で表すことができるので,設定した仮説の検定統計量として,式(B.1)より式(B.2)が導かれる.

$$\chi^{2} = \sum_{j=1}^{k} \frac{\left(X_{j} - np_{j,0}\right)^{2}}{np_{j,0}}$$
(B.2)

本文中の式 (5.2.4) においては, *k* 個のカテゴリーが等間隔であるので, $\forall j, p_{j,0} = 1/k$ と 表すことができる.また,本文中にも示す通り,この検定統計量は自由度 *k*-1 のカイ自乗 分布を持ち,棄却領域は $\chi_{\alpha}^{2} < \chi^{2}$ となる [2].

付録 C ワイブル確率紙を用いたパラメータの同定

ワイブル分布の形状パラメータと尺度パラメータを決めるためにワイブル確率紙を利用 した.確率紙とは、対象とする確率分布の分布関数が直線で描かれるように目盛を工夫し たグラフ用紙である [2].したがって、分布ごとに別の確率紙があり、ワイブル分布であれ ばワイブル確率紙と呼ばれる.確率紙の利点として、得られたデータがどの分布に従うか 分からないときに、適当な確率紙にプロットしてそれが直線状になれば、その確率紙の分 布を採用してよいと判断が可能なことが挙げられる.それに加え、データが直線状に表さ れることから、最小二乗法の適用が容易という長所もある.

ワイブル分布の累積分布関数において自然対数を2度とると、式(C.1)となる.

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-F(\nu)}\right\} = k\ln(\nu-\gamma) - \ln c^k$$
(C.1)

したがって、横軸を ln ($v - \gamma$)、縦軸を ln ln {1 - F(v)}⁻¹とすると、傾き k、切片-ln c^kの 直線が描かれる.このとき、横軸には保有しているデータを当てればよいが、縦軸の値に はプロッティング・ポジション公式が利用される.プロッティング・ポジション公式は第 *i* 位順序統計量に非超過確率を与えるもので、主なものは式 (C.2) で与えられる.第*i* 位順 序統計量とは、得られたデータを昇順に並べたとき、その*i* 番目のことをいう.

$$p_i = \frac{i - \alpha}{n + 1 - 2\alpha} \tag{C.2}$$

nはデータ数, α は [0,1)の定数で, 値により別の名の公式で呼ばれる. 代表的なものに Weibull 公式 ($\alpha = 0$), Hazen 公式 ($\alpha = 0.5$), Gringorten 公式 ($\alpha = 0.44$) などがある [3].本 研究では Weibull 公式を採用した.

先述の通り式 (C.1) は直線となるので、プロットした値との誤差の二乗の総和を考え、 最小二乗法を適用できる.このとき、直線 y = ax + bの傾きと切片が式 (C.3) から求まる ので、二つのパラメータ $k \ge c$ を得ることができる [2].





Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (1/6)



Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (2/6)



Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (3/6)



Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (4/6)









Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (5/6)



Fig. D.1 風速の確率密度関数と累積分布関数 (6/6)

付録 E モンテカルロシミュレーションによる橋梁表面付着塩分量の区間推定

モンテカルロシミュレーションのように統計的に算出した値は必ず推定上の誤差を有している.ここでは誤差検証の手法を概説する [2].

E.1 中心極限定理

以降の検討に備え、中心極限定理について説明する. *n* 個の確率変数 X_1 , X_2 , …, X_n が 互いに独立で、それぞれが平均 μ_i 、分散 σ_i^2 の分布に従うとき、これらの和 $Y = \sum X_i$ の平均 μ_Y と分散 σ_Y^2 は式 (E.1)、式 (E.2) で与えられる.

$$\mu_{Y} = \mathbf{E}\left[\sum_{i=1}^{n} X_{i}\right] = \sum_{i=1}^{n} \mu_{i}$$

$$\sigma_{Y}^{2} = \mathbf{Var}\left[\sum_{i=1}^{n} X_{i}\right] = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{i}^{2}$$
(E.2)

さらに n が十分に大きいとき, Y は平均 μy, 分散 σy² の正規分布で近似することができる. これを中心極限定理といい, 例外はあるものの基本的に X_iの従う分布によらず成立する. Y が正規分布に収束するために要する n は, X_iの形状が正規分布に近いほど少ない.

この定理を本研究に適用する.本研究では確率変数 X_i は付着塩分量である.したがって, 付着塩分量を与える母集団の平均を μ ,分散を σ^2 としたとき, $\forall i$, $\mu_i = \mu$, $\sigma_i^2 = \sigma^2$ が成立す る.また,標本平均について考えるため,新たに $\overline{X} = Y/n = \sum X_i/n$ と設定する.このとき, 標本平均 \overline{X} の平均と分散はそれぞれ式 (E.3) と式 (E.4) で表される.

$$\mathbf{E}\left[\overline{X}\right] = \mathbf{E}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_{i}\right] = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu_{i} = \frac{1}{n}\cdot n\mu = \mu$$
(E.3)

$$\operatorname{Var}\left[\overline{X}\right] = \operatorname{Var}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_{i}\right] = \frac{1}{n^{2}}\sum_{i=1}^{n}\sigma_{i}^{2} = \frac{1}{n^{2}}\cdot n\sigma^{2} = \frac{\sigma^{2}}{n}$$
(E.4)

つまり, *n* 個の確率変数 *X*₁, *X*₂, …, *X*_nの平均 (標本平均) は, 平均 μ , 分散 σ^2/n の正規 分布に従う.これが意味するのは, 標本平均は母集団の平均を中心にばらつくが, 標本数 が大きいほどそのばらつきは小さくなるということである.

ここで,2013年10月18日~12月11日の計算を例に付着塩分量 Xiがとる分布を確認する. Fig. E.1 は降雨の影響を考えない部位(K)における,モンテカルロシミュレーションで算出した1万回分の付着量のヒストグラムである.図中には併せて正規分布による近似曲線を示しており,降雨の影響がない場合は付着量は正規分布に従うといえる.一方,Fig. E.2 は降雨の影響を考慮して計算した部位(A)を示しており,正規分布ではなく単調減少



Fig. E.1 雨のあたらない部位の付着量分布

Fig. E.2 雨のあたる部位の付着量分布



Fig. E.3 雨の当たる部位での付着量の平均値の分布

型に分布することが分かる.このように,*Xi*の分布が正規分布ではない場合には,中心極限定理が成り立つかを別途確認する必要がある.ここでは,1万個の付着量を100個ずつ 平均し新たに100個の平均付着量とし,どのような分布をとるか調べた.その結果はFig. E.3に示す通りで,データ数が少なく粗いものの,平均値が正規分布に従うことが分かる. 以上より,全ての部位において中心極限定理が適用可能であると確認することができたので,これを踏まえ以下の検討を行う.

E.2 付着塩分量の区間推定

1 万回の試行で得られた付着塩分量の平均や分散をもとに,真の平均すなわち母集団平 均μが存在すると予想される区間 (*L*, *U*)を確率的に推定する.区間 (*L*, *U*)を信頼区間, *L*を下限信頼区間,*U*を上限信頼区間といい,危険率αを用いて次のように書くことがで きる.

$$\Pr[L \le \mu \le U] = 1 - \alpha$$

この式は標本を繰り返しとり、それに応じた信頼区間をその都度計算したとき、各々の 信頼区間に μ が含まれる確率が $1 - \alpha$ であることを示す.しかしこれを、ある標本から求 まる信頼区間に μ が含まれる確率が $1 - \alpha$ であると読み替えても問題はないと思われる.

この考えに基づき,モンテカルロシミュレーションによって得られた付着塩分量の信頼 区間を算出する.いずれの部位でも付着量の平均は正規分布に従うことが確認されたので, 標本平均 *X* について次式が成立する.

$$\Pr\left[\mu - Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \le \overline{X} \le \mu + Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = \Pr\left[\overline{X} - Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \le \mu \le \overline{X} + Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha$$
(E.6)

 Z_{α} は標準正規分布において、その点より上側の確率が 100 α %となる点の値で、 σ/\sqrt{n} は \overline{X} が従う正規分布の標準偏差である.したがって、 $1-\alpha$ に対する母集団の平均 μ の信頼区間は次の通りであり、例えば $\alpha = 0.05$ であれば、95%信頼区間と呼ばれる.

$$\left(\overline{X} - Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \ \overline{X} + Z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \tag{E.7}$$

なお、 σ^2 の推定値には不偏分散 s^2 を用いた.

$$s^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})}{n-1}$$
(E.8)

参考文献

- [1] 野口恭平,姜詠,奥田慧,倉田直弥,白土博通,八木知己,森下尊久,田中雄三: 海塩粒子付着量の予測精度向上に関する基礎的研究,構造工学論文集, Vol. 59A, 585-595, 2013.
- [2] 北村隆一, 堀智晴: 工学のための確率・統計, 朝倉書店, 2006.
- [3] 池淵周一, 椎葉充晴, 宝馨, 立川康人: エース水文学, 朝倉書店, 2006.

謝 辞

本論文は京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野におい て,筆者が取り組んで参りました研究を取りまとめたものです.本論文の完成は先生方ほ か関係各位のご協力があってのものと思い,以下に感謝の意を表します.

白土博通教授(社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野)には,研究室に配属された 2011 年から現在に至るまで,本論文のテーマである飛来塩分と橋梁への付着について, 常に熱心にご指導いただきました.お忙しい時でも時間を割いてくださり,些細なことで も丁寧にご教示くださいました.深く感謝の意を表するとともに,お礼申し上げます.

八木知己教授(社会基盤工学専攻構造工学講座構造ダイナミクス分野)には、研究のみならず日々の研究室での生活に関しても多くのご助言を賜りました.異動されてからも常にお気遣いくださり、研究者として将来を見据えたご指摘を数多く賜りました.厚く御礼申し上げます.

河野広隆教授(都市社会工学専攻構造物マネジメント工学講座構造物マネジメント工学 分野)には、本論文の取りまとめに際して的確なご助言・ご指導を賜りました.おかげさ まで、より完成度の高い論文としてまとめることができたと確信しております.ここにお 礼申し上げます.

安琳准教授(社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野)には、コンクリート工学の 視点から飛来塩分に関する諸問題についてご指導いただきました.鋼橋中心の研究を行っ ている筆者にとって大変勉強になりました.ここにお礼申し上げます.

服部洋元助教(社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野,現:株式会社ニチゾウテ ック)には、プログラミングに関する疑問点について、いつでも快く応じていただきました. 日常生活でも些細なことからお力添えいただきました.ここにお礼申し上げます.

早田具子秘書(社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野)には,事務手続きなどの 面から研究生活をご支援いただきました.また,日常生活において問題のないよう常にご 配慮くださいました.深く感謝いたします.

森信人准教授(京都大学防災研究所)には,領域気象モデルWRFの取り扱いについてご 指導いただきました.伊藤靖晃博士(清水建設株式会社)・松宮央登博士(一般財団法人電 カ中央研究所)には,研究内容について多くの具体的かつ有益なご指摘を賜りました.ま た,研究の進捗についても常に気にかけてくださいました.厚くお礼申し上げます.学会 など発表の場において有益かつ的確なご助言を賜りました,公益社団法人土木学会や一般 社団法人日本風工学会の会員各位にもお礼申し上げます.

宮坂康弘氏 (有限会社宮坂製作所)・河内伸治氏 (元京都大学技術職員) には,現地観測 や風洞実験に際し,飛来塩分捕集器具や気象観測装置の製作・設置・補修法を中心に多大 謝 辞

なるご協力を賜りました.学生の安全を第一に多様なご発想を以って本研究の遂行にご尽 力くださったことに深く感謝いたします.

本研究は腐食班として共に研究を行って参りました学生各位との共同の成果と考えてお ります.何も知らない筆者に本研究の基礎や数値計算手法を丁寧にご指導くださった奥田 慧(現:東京急行電鉄株式会社),倉田直弥(現:株式会社 IHI),姜詠(現:西日本電信電 話株式会社)の先輩諸氏に改めてお礼申し上げます.また,金城佑紀(現:東京電力株式会 社),秦聡一朗(現:株式会社 IHI インフラシステム),三歩一奏人,Mbithi Michael Kinama, 井伊悠,繁田匡寿,石渡純也,白井睦弥の後輩諸氏のご協力があって本論文は完成に至り ました.ここに深く感謝いたします.

橋梁工学研究室の学生各位にも日頃より大変お世話になりました.特に今年は本論文執 筆に追われる筆者に代わって,細かなことから研究室関連の活動を担当していただきました.改めてお礼申し上げます.

本研究の一部は、本州四国連絡高速道路株式会社、国土交通省近畿地方整備局紀南河川 国道事務所、JFE スチール株式会社との共同研究として行われたものです.また、本研究 の一部は、JSPS 科研費 16J09269 (特別研究員奨励費)、一般社団法人日本鉄鋼連盟、一般財 団法人防災研究協会の助成を受けました.博士後期課程3年次には、独立行政法人日本学 術振興会特別研究員 DC2 として採用していただくことで、研究のみならず日常生活におい ても不自由なく過ごすことができました.なお、数値計算の一部には京都大学学術情報メ ディアセンターのスーパーコンピュータを利用しております.関係各位に謝意を表します.

最後になりますが、9年間もの学生生活を京都で送ることになった筆者を温かく見守っ てくれた北九州の家族に深く感謝するとともに、京都大学博士後期課程の学生として共に 切磋琢磨して参りました友人各位に深い感謝と敬意を表し、本論文の結びといたしたく存 じます.

野口 恭平