

# 論文 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

山田 文則<sup>\*1</sup>・細山田 得三<sup>\*2</sup>・下村 匠<sup>\*3</sup>・佐藤 堅介<sup>\*4</sup>

**要旨**：コンクリート構造物表面の塩分量は、コンクリート中の塩分の侵入過程を解析する際に境界条件として用いられることから、重要な指標となっている。本研究では、構造物周辺における飛来塩分の輸送量および構造物表面の各部位に到達する塩分量に関する現地観測を行った。さらに、現地を再現した地形での数値解析を行い、構造物周辺の飛来塩分の輸送過程について検討を行った。その結果、現地観測より、構造物の壁面に付着する塩分量は大気中を輸送される塩分量より少ないこと、構造物の各部位では到達塩分量が異なることが明らかになった。計算結果より、構造物周辺における飛来塩分の輸送過程が明らかとなった。

**キーワード**：飛来塩分、構造物、輸送過程、付着塩分量、数値解析、現地観測

## 1. はじめに

飛来塩分による構造物の塩害は、海水面から発生した塩分粒子が風によって輸送され、構造物の表面に付着し、塩化物イオンが内部に侵入することによって進行する。構造物の表面の塩分量は、構造物中に浸透する塩分量を計算する上で境界条件となるため、重要な指標である。この表面塩分量を予測するには、大気中の飛来塩分の輸送過程の計算を行い、構造物表面における到達塩分量を求め、さらに、雨などによる長期的な洗い流し効果を考慮する必要がある。

飛来塩分の輸送過程に関する既往研究としては、仲座ら<sup>1)</sup>、田中ら<sup>2)</sup>、永島ら<sup>3)</sup>、著者ら<sup>4)</sup>によって数値計算が行われている。これらより、飛来塩分の輸送過程が精度よく計算できるようになってきた。一方、この構造物周辺の飛来塩分の輸送量と壁面に付着する塩分量の関係については明らかにされていない。

本研究では、構造物周辺の飛来塩分の輸送量と各部位の到達塩分量の関係を明らかにするために、このうち数時間オーダーの短期間にお

ける構造物周辺の飛来塩分の輸送量および構造物の各部位の到達塩分量について現地観測を行った。さらに、波動場における飛来塩分の発生、大気中の輸送過程を含めて、現地を再現した計算を行い、構造物周辺の飛来塩分の輸送過程について検討を行った。

## 2. 飛来塩分の現地観測

### 2.1 観測場所および観測期間

実地観測は、2006年1月10日に実施した。観測場所は、新潟県上越地区に位置する図-1のような名立大橋である。図に見られる橋桁側面は海向きの方角 295° に垂直な壁面であり、この側面は汀線から 42m 程度の位置に設置してある。橋梁は、橋長 75.3m、幅員 21.0m であり、PC 単純バイプレ空中床版型の構造である。この地域周辺では、冬季に季節風の作用を受け、気象・海象条件が厳しく、飛来塩分が大量に輸送される。そのため、この橋梁は、塩害防止対策として 4 種方式による電気防食工法が試験的に行われている。

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科エネルギー・環境工学専攻 工修 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 工博

\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 工博 (正会員)

\*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻



図-1 観測を行った名立大橋

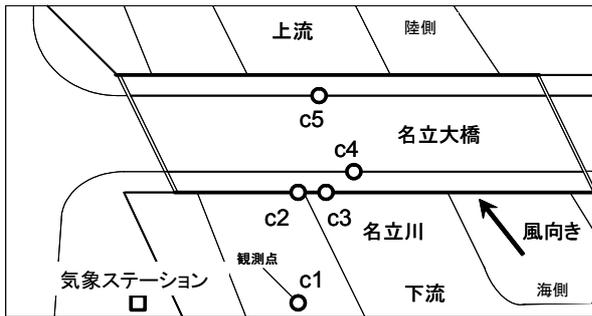


図-2 輸送塩分量の観測点の配置

## 2.2 観測方法および観測点の配置

観測は観測ガーゼ法で行った。大気中の飛来塩分の輸送量の測定は、ガーゼを透過性にする方法で行った。構造物の壁面の付着塩分量の測定は、ガーゼ裏面にプラスチック板を入れ、不透過性したものを壁面に貼り付けた。採取した塩分量の分析は、ガーゼを蒸留水に浸し、その水溶液中のCl<sup>-</sup>濃度を塩化物イオンメータを用いて測定した。その後、暴露時間および受風面積をもとに単位時間・単位面積当たりの付着塩分量(mg/m<sup>2</sup>/h)を算定した。観測時間は、降雨・降雪のない時間帯を利用し、2~3時間程度とした。

観測点は、構造物周辺における飛来塩分の輸送量を測定するために、図-2のように橋桁周辺に観測番号c1~c5の5箇所に設置した。観測点c1は橋桁の下に設置し、観測点c2~c5は橋桁上の各位置に設置した。観測点の向きは、橋桁側面と同様の295°の向きに設置した。ただし、観測点c1は、270°の方向に設置したため、ほかの観測点の向きとの差を角度αとし、式(1)により補正した値を観測値とした。

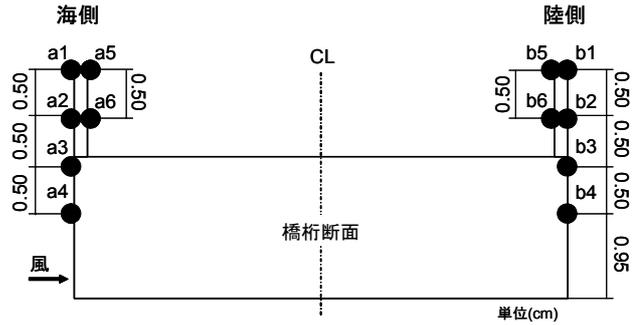


図-3 付着塩分量の観測点の配置

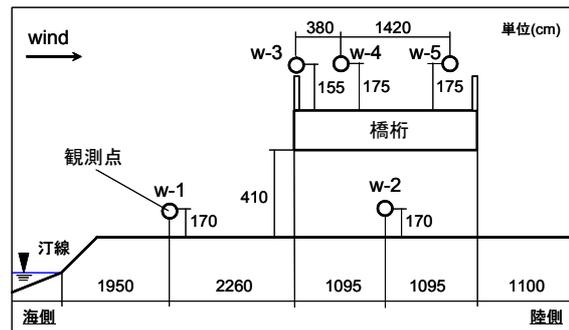


図-4 風速・風向の観測点の配置

$$c = c_0 \cdot \cos\{(2.0 - \alpha/180) \cdot \pi\} \quad (1)$$

ここで、 $c$ は補正後のc1の観測値、 $c_0$ は補正前の観測値である。図-3は、構造物の壁面における付着塩分量の観測点を示したものであり、観測点a1~a6およびb1~b6の12点を橋桁壁面に設置した。この図の観測点a1~a6までが海側に近い橋桁の壁面上であり、観測点b1~b6は陸側の壁面上に位置している。実際の観測では、海側からの風が観測点a1~a4の設置してある壁面に直接吹き付けるような状態であった。風速は、図-2の左下における四角印の位置に設置した簡易的な気象ステーションを用いて、1分間隔の風速および風向を測定した。また、図-4のように橋桁周囲の観測点w1~w5の5箇所において3杯式風速計を用いて、短時間の風速・風向の測定を行った。

## 2.3 観測結果および考察

### (1) 気象および海象条件

図-5は、気象ステーションにおける観測時間内の風速と風向の観測結果を示したものである。

図に示す通り、風速は、観測開始時では変動はあるが7m/s程度であり、観測後半にかけて9m/sを超えるほど風が強くなっている。観測全体の風速の平均は、7.4m/s程度であった。風向は、南西方向からの風が多く、観測全体の平均風向は西南西で242°程度であり、現地の風速は斜めの方向から吹くような傾向にあった。

表-1は、橋桁周辺の各観測点における風速の観測結果を示したものである。観測値は、3杯式風速計を用いて、30~60s程度の平均風速を求め

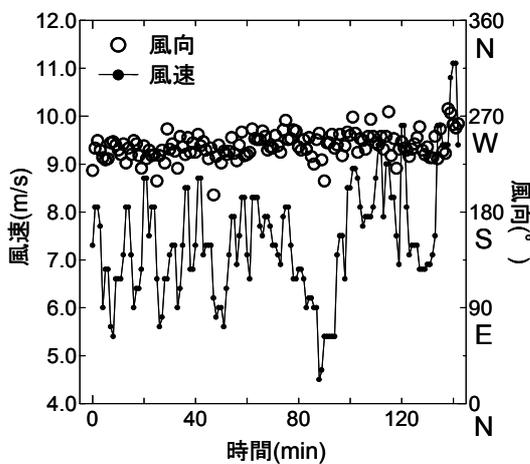


図-5 気象ステーションによる観測結果

表-1 風速・風向の観測結果

観測点番号	観測開始時間	風速 (m/s)	風向 (°)
w-1	2006/1/10/ 15:10	7	260
w-2	2006/1/10/ 15:10	7	270
w-3	2006/1/10/ 15:10	7	260
w-4	2006/1/10/ 15:10	6	180
w-5	2006/1/10/ 15:10	7	225

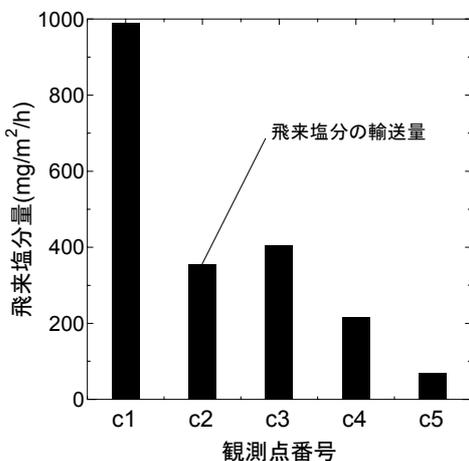


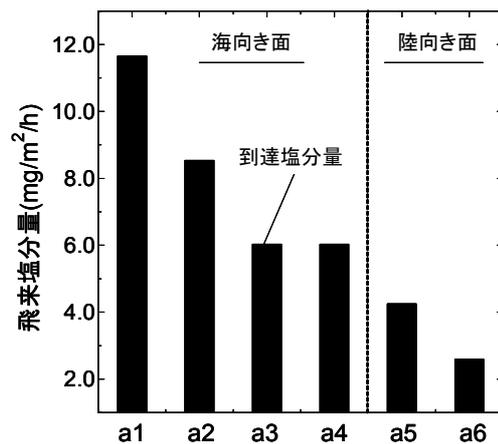
図-6 構造物周辺の飛来塩分の輸送量

たものである。表に示すように、橋桁周辺では各観測点で7m/s程度であった。

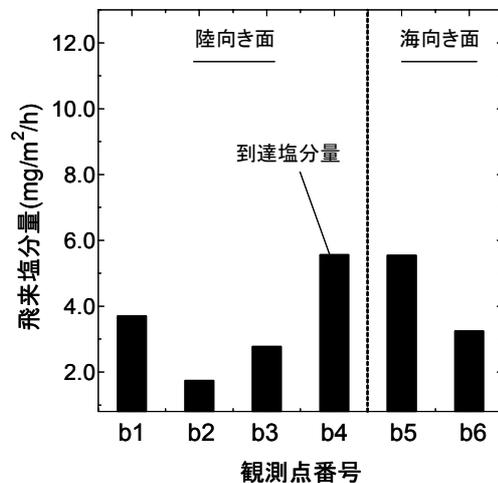
波浪条件は、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)<sup>5)</sup>の新潟県上越市直江津におけるデータを参考にした。観測時では、波高は1m~2m程度、波向きは北西から西向きであった。

## (2) 構造物周辺における飛来塩分の輸送量

図-6は、構造物周辺における飛来塩分の輸送量を観測点ごとに示したものである。図に示すように、橋桁上の塩分量は、橋桁下の塩分量の1/2程度になっている。橋桁上では、飛来塩分量は海岸側のほうが大きい傾向にある。観測点c2とc3では、海岸からの距離は同様であるが、c3のほうが1割程度大きな値となっている。観測点c3のほうの設置位置が45cm程度高く、この



(a) 海側の壁面



(b) 陸側の壁面

図-7 構造物の壁面における付着塩分量

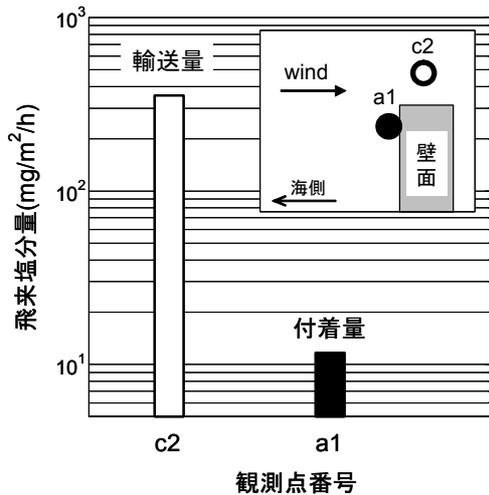


図-8 飛来塩分の輸送量と付着量の比較

位置での風速が強かったためと考えられる。

### (2) 構造物の各部位における付着塩分量

図-7(a)は、橋桁の海側の壁面における付着塩分量を示したものである。観測点 a1~a4 は海向き、観測点 a5 と a6 は陸向きの壁面である。図に示す通り、直接風が吹き付ける海向きの壁面は、逆の方向を向いている壁面の 2 倍程度の塩分量になっている。海向きの壁面では、高い位置に設置した観測点 a1 の値が最も塩分量が高い傾向にあった。図-7(b)は、橋桁の陸側の壁面における付着塩分量である。観測点 b1~b4 は陸向き、観測点 b5 と b6 は海向きの壁面である。図に示す通り、両壁面の付着塩分量は、図(a)の壁面に比べて差が小さい。陸向きの壁面では、橋桁側面の中央付近に設置した観測点 b4 が最も塩分量が高い結果であった。これらの結果より、壁面への到達塩分量は構造物の各部位によって異なり、海に近く、海向きの方向の壁面において最も高くなる傾向にあった。各壁面では、飛来塩分が一定に付着するのではなく、鉛直分布をもって付着していることがわかった。

図-8 は、大気中の飛来塩分の輸送量と構造物の壁面における付着塩分量の比較を行ったものである。図では、観測における壁面の付着量は、大気を輸送している塩分量の 1/30 程度であり、両者は大きくことなることがわかった。これは、壁面近傍において風速が急激に減少することが影響していると考えられる。

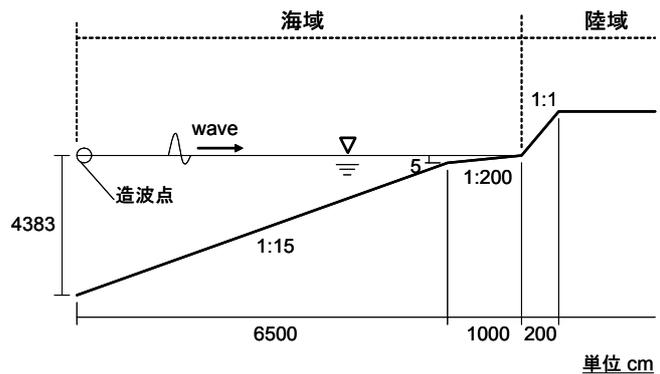


図-9 海域の計算地形

## 3. 数値計算による飛来塩分量の輸送過程

### 3.1 数値計算方法

本計算モデルは、著者ら<sup>4)</sup>によって作成された飛来塩分の発生・輸送シミュレータを用いて計算を行った。実際の計算は、以下のような順で計算を行っている。

- 1) 海岸波動の伝播計算
- 2) 海水面での砕波によるエネルギー逸散量と飛来塩分の発生量の計算
- 3) 飛来塩分の舞い上がりの計算
- 4) 飛来塩分の輸送量の計算

風の場の計算は、別途に行っておき、その結果を飛来塩分の輸送量の計算に用いた。

### 3.2 計算条件

波動場は 1 次元であり、大気空間の領域と対応した図-9 のような空間で計算を行った。図の海底地形は、実際の海底地形データがないため、観測時の波浪の状態をできるだけ再現するように調整した。入射条件は、沖側の造波点より波高 0.5m、周期 7.0s とした。波動場から発生する飛沫粒径は、0.005mm、0.010mm、0.010mm の 3 種を与えた。飛来塩分の発生に寄与する比例係数 a は、海岸側の観測点 c1 において観測と計算結果が一致するように  $a=1.45 \times 10^{-6} \exp^{0.467U}$  を与えた。ここで、U は水平方向の風速であり、比例係数 a は波動場の砕波による海水面の乱れの度合いと飛沫の発生量の関係を示したものであり、著者ら<sup>4)</sup>の報告においては式(2)に含まれる係数である。

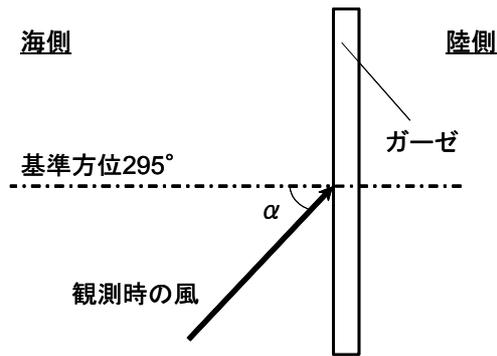


図-10 風速の方位による補正

表-3 風速の補正

観測点番号	補正角度 $\alpha$ (°)	補正係数 $\cos((2-\alpha/180)\pi)$	風速(補正後) m/s
w-1	10	0.98	6.89
w-2	0	1.00	7.00
w-3	10	0.98	6.89
w-4	90	0.00	0.00
w-5	45	0.71	4.95

$$c_a = a \cdot F_d E \quad (2)$$

ここで、 $c$ は飛来塩分の発生量、 $F_d$ は碎波減衰係数、 $E$ は波の全エネルギー量である。飛来塩分の輸送過程の計算領域は断面2次元であり、図-9に示すような海域上空の75mと図-4に示す陸域75mを組み合わせた水平距離150m、鉛直高さ12.5mである。計算に用いた格子数は、 $1500 \times 250$ であり、格子間隔は水平方向0.10m、鉛直方向0.05mである。計算の境界条件としての気流は、観測点w1の結果を再現するように、左端より7.45m/sとし、鉛直方向には一様に与えた。

### 3.3 計算結果および考察

#### (1) 風速の計算結果

観測結果における風速は、現地の風が橋梁に対して斜めに吹いていたため、風速を橋桁側面と垂直な方位295°に換算し、計算結果との比較を行った。方位による風速の補正は、図-10のように方位295°を基準とし、その方位との差から式(3)を用いて行った。

$$U = U_0 \cdot \cos\{(2 - \alpha/180) \cdot \pi\} \quad (3)$$

$$(-180 \leq \alpha \leq 180)$$

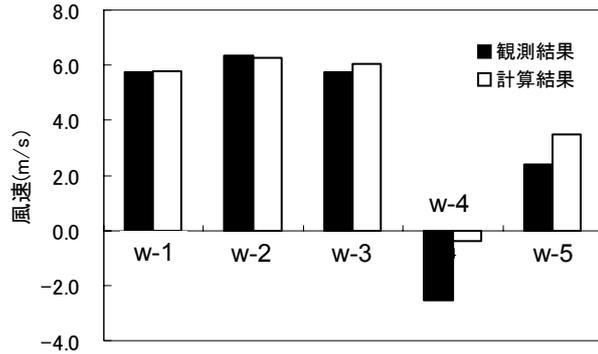


図-11 構造物周辺の風速の比較

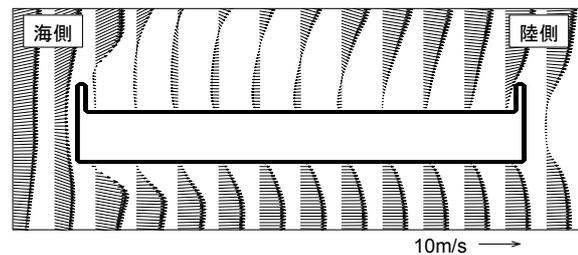


図-12 構造物周辺の風の分布

ここで、 $U$ 、 $U_0$ 、 $\alpha$ は、補正後の風速(m/s)、観測による風速(m/s)、基準方位295°からの角度(°)である。表-3は補正係数と補正後の風速を示したものである。

図-11は、風速の計算結果と補正後の観測結果を比較したものである。図に示す通り、計算結果は、観測結果をよく表現できている。観測点w-4では、橋桁上で風が回り込んでいるために、風速が負の方向を示している。ただし、観測時において観測点w-4およびw-5は、風向が細かく変化していた。

図-12は、橋桁周辺の風速のベクトル図を示したものである。図に示すように、橋桁上部において風速の変化が激しく、下部周辺では水平風速が強いことがわかる。

#### (2) 飛来分の輸送過程の計算

図-13は、構造物周辺の飛来塩分の輸送過程の観測と計算結果を比較したものである。図に示すように、計算結果は観測における橋桁上の飛来塩分の輸送量の結果をよく表現できている。

図-14は、海水面から発生した飛来塩分量の空間分布を表したものである。上図が橋桁周辺、

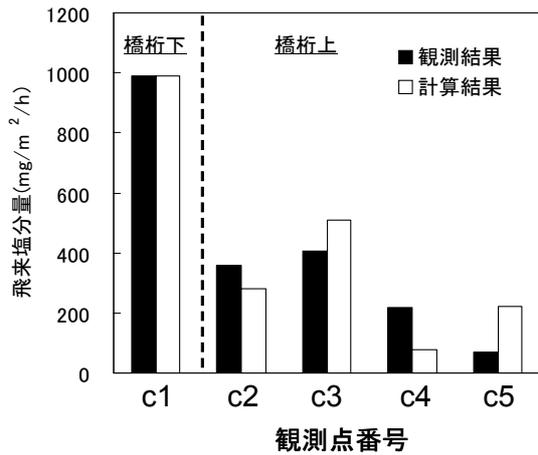


図-13 輸送量の観測結果との比較

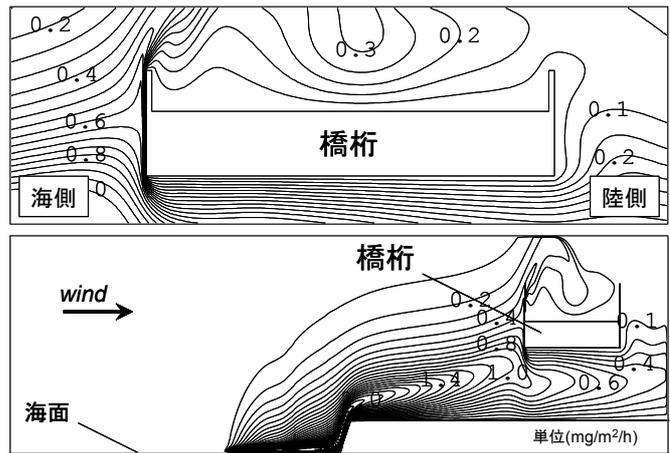


図-14 飛来塩分量の空間分布(断面2次元)

下図が領域全体の飛来塩分量の分布である。図に示すように、橋桁の海側壁面の周辺および鉛直高さが低い位置で塩分量が高い傾向にある。図-7(a)に示す付着量の観測結果では、壁面の高い位置のほうが付着塩分量は大きかったが、計算では壁面から少し離れた位置の塩分の輸送量は低い位置のほうが大きくなっており、両者は異なる傾向を示していた。

構造物の壁面に付着する塩分量は、壁面近傍の飛来塩分の輸送量および風の状態に影響を受ける現象であると考えられる。そのため、飛来塩分の付着過程は、壁面近傍における飛来塩分の輸送量、風速および風の乱れなどを考慮することで数値モデル化できると考えられる。

#### 4. 結論および今後の課題

本研究では、構造物周辺における飛来塩分の輸送過程および壁面に付着する塩分量に関する検討を行った。その結果、現地観測より、構造物の壁面に付着する塩分量は大気中を輸送される塩分量より少なくなること、構造物の各部位では到達塩分量が異なることが明らかになった。計算結果より、構造物周辺における飛来塩分の輸送過程が明らかになった。

今後は、構造物の壁面における雨などの洗い流しを考慮した表面塩分量の現地観測を行うとともに、その数値解析モデルの開発を行う予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、橋梁の一部資料は(財団法人)海洋架橋・橋梁調査委員会に御提供をいただいた。現地観測には長岡技術科学大学大学院の小原敏秀君、木下茂生君に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄: 飛沫(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, No.2, pp.1036-1040, 1993
- 2) 田中孝和, 富山潤, 伊良波繁雄, 吉村忍: ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.789-794, 2004
- 3) 永島勝, 下村匠: コンクリート構造物への飛来塩分の影響因子に関する感度解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1047-1052, 2004
- 4) 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, pp.865-870, 2005
- 5) 全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS): (<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)