

平成 21 年 3 月修了  
博士（工学）学位論文

海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量算定モデル

**Calculation Model for Airborne Chloride Ion  
Based on Seawater Aerosol Production**

平成 21 年 2 月 12 日  
高知工科大学 工学研究科 基盤工学専攻

学籍番号 1116002

小窪 幸恵

Sachie KOKUBO

# 海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量算定モデル

## Calculation Model for Airborne Chloride Ion Based on Seawater Aerosol Production

### 目 次

<b>1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 問題提起	1
1.2.1 維持管理の効率化と劣化予測	1
1) ブリッジマネジメントシステムに対する劣化予測の位置づけ	1
2) 劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測システム	1
1.2.2 塩害劣化予測と飛来塩化物イオン量の評価	2
1) 塩害劣化	2
2) 塩害劣化予測における飛来塩化物イオン量の評価	3
2-1) 土木学会	3
2-2) 国道橋梁マネジメントシステム	4
3) 既存塩分浸透予測式の精度検証	4
1.3 研究目的	7
1.4 既往研究の概要	7
<b>2 章 提案モデルのコンセプト</b>	<b>9</b>
2.1 海水飛沫発生に対する波力の影響	9
2.2 海水飛沫輸送に対する飛沫粒径分布の影響	9
2.3 海水飛沫発生における海岸状況の影響と海水飛沫発生場の分類	12
2.4 飛来塩化物イオン量算定モデルコンセプトのまとめ	14
2.5 論文構成	14
<b>3 章 飛来塩化物イオン量算定モデル I：海水飛沫の発生と輸送</b>	<b>15</b>
3.1 まえがき	15
3.2 海岸における大粒径飛沫の発生と輸送	15
3.2.1 海水飛沫発生基準点のモデル化	15
1) 海水飛沫発生場に対する飛沫発生基準点の定義	15
2) 潮位変化の影響	16
3.2.2 海水飛沫発生基準点における飛沫径の個数濃度分布モデル	18
1) モデル概要	18
2) 飛沫径分布の検討	19
3) 海水飛沫発生に関する定数、係数値の検討	20
3.2.3 海水飛沫発生基準点上における飛沫個数濃度の鉛直分布モデル	21
1) モデル概要	21

3.2.4	風による移流と飛沫の自由落下による海水飛沫輸送モデル	22
3.3	海上における小粒径飛沫の発生、蓄積と輸送	23
3.3.1	まえがき	23
3.3.2	海面における飛沫の発生個数濃度	23
3.3.3	海上における飛沫の鉛直方向への蓄積	25
	1) モデル概要	25
	2) 吹走距離の推定方法	26
3.3.4	海水飛沫の陸上輸送	27
<b>4 章</b>	<b>飛来塩化物イオン量算定モデルⅡ：海水飛沫の対象表面への付着</b>	<b>29</b>
4.1	まえがき	29
4.2	海水飛沫個数濃度から塩化物イオン流速への変換	29
4.2.1	大粒径飛沫モデルの場合	29
4.2.2	小粒径飛沫モデルの場合	30
4.3	風向変化に対する流速補正	30
<b>5 章</b>	<b>飛来塩化物イオン量算定過程</b>	<b>31</b>
5.1	はじめに	31
5.2	入力データの取得、決定と補正	32
5.2.1	データ一覧	32
5.2.2	波浪、気象データ	32
	1) 波高、周期	32
	2) 風向、風速	33
	3) 降水量	35
	4) 潮位または海面変動	35
5.2.3	対象地点情報	35
	1) 海岸地形に対する風の流れの仮定	35
	2) 輸送距離の補正と算定	36
	3) 対象地点高度の定義	36
	4) 対象地点距離の定義	38
<b>6 章</b>	<b>短期計測結果によるモデルの検証</b>	<b>39</b>
6.1	まえがき	39
6.2	消波護岸後方における計測例による検証	39
6.2.1	計測概要	39
6.2.2	解析条件と仮定	40
6.2.3	解析結果と計測値の比較検証	41

6.3	砂浜海岸における計測例による検証	47
6.3.1	計測概要	47
6.3.2	解析条件と仮定	47
6.3.3	解析結果と計測値の比較検証	48
6.4	まとめ	50
<b>7章</b>	<b>中長期計測結果によるモデルの検証：飛来塩分量全国調査との比較</b>	<b>51</b>
7.1	飛来塩分量全国調査概要	52
7.2	解析条件	52
7.2.1	調査地点概要	52
7.2.2	入力情報ならびに解析仮定	52
7.3	解析結果と計測値の比較検証	53
7.4	既往研究モデルとの解析精度の比較	55
<b>8章</b>	<b>総括</b>	<b>57</b>
8.1	結論	57
8.2	今後の課題	59
<b>謝 辞</b>		<b>61</b>
<b>参考文献</b>		<b>62</b>
<b>付 録</b>		
1	海水の塩分と塩素量	66
2	物性値	66
3	終末落下速度の算出過程	67
4	我が国各地の海浜断面形状	67

# 1 章 序論

## 1.1 研究背景

道路をはじめとするインフラストラクチャー（インフラ）は、個人の生活から経済活動に至るあらゆる社会活動の基盤であり必要不可欠な存在である。特に、道路を連結する橋梁は身近なインフラの一つで、我が国においては約 15 万橋（長さ 15m 以上）の橋梁が日夜活躍している。しかしながら、多くの橋梁が戦後の高度成長期に集中して建設されたことからこれら橋梁の老齢化が近年急速に進んでいる。老齢化の進行は加速的で、2006 年時点に建設後 50 年を超える橋梁は全体の約 6%（約 9000 橋）であったが、2016 年には 20%、2026 年には 47%と倍増する予定である<sup>1,1)</sup>。こうした状況の中で、新たに整備すべきインフラよりも既存インフラの維持管理に要する費用や人的資源の比重が大きくなりつつあり、維持管理の効率化が強く求められている。

維持管理の効率化を達成する手法として、近年、インフラを社会資本とみなしたアセットマネジメントが注目されている。マネジメントの視点や手法を社会資本であるインフラの運営に適用する試みで、中でも橋梁を対象としたシステムはブリッジマネジメントシステム（BMS）として、その重要性とある種の取り組み易さから優先的に検討が進められている。マネジメントシステムにおいては、目標を達成するための計画、例えば効果的な運営計画を検討し、それを実施、改善する過程を繰り返すことで目標達成するが、この際 BMS においてはシステムを実行する上で対象となる橋梁の将来予測が不可欠となり、中でも経年劣化は科学的に予測が可能な事象である。

本研究は、こうした経年劣化の予測精度を向上させることがマネジメントシステムの実用性を高めるためには不可欠であると考え、コンクリート構造物に対して致命的な劣化現象である塩害劣化の予測精度向上に必要な飛来塩化物イオン量算定モデルの構築を目指すものである。

## 1.2 問題提起

### 1.2.1 維持管理の効率化と劣化予測

#### 1) ブリッジマネジメントシステムに対する劣化予測の位置づけ

ブリッジマネジメントシステム（BMS）の特徴は点検やモニタリング等の科学的手法により対象を定量評価し、精度の高い劣化予測と合わせて維持管理を効率化することである。マネジメントの実行において予測が不可欠であることは PDCA サイクル（plan/Do/Check/Action）のはじめに Plan がくることからも明かである。このため劣化予測の精度が BMS 全体の実用性または現実性を左右する。BMS の先駆者である米国やヨーロッパ諸外国では劣化予測の手段として統計的な確率論を用いることが主流であるが、我が国においては工学的な物理モデルによる予測を用いる方向にある。

#### 2) 劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測システム

一方、岡村ら<sup>1,2)</sup>は、BMS をはじめ総合的な維持管理システムの構築には劣化予測精度の向上が不可欠であるとし、劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測とそれによる全国規模の橋梁群に対する劣化予測例を示した。具体的には我が国の既存の RC 橋梁約 1000 桁に対する 2030 年までの劣化予測を

塩害劣化に対して行った。劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測としては松島<sup>1.3)</sup>や Thoft-Christensen<sup>1.4)</sup>の研究があるが、岡村らは個別橋梁の劣化予測ではなく数百といった橋梁群の劣化予測に対して劣化要因のばらつきを考慮することで国や自治体といった維持管理組織に必要な劣化予測の精度向上方法を提案した。図 1.1 に岡村らの提案した橋梁群に対する劣化予測の手順と概要を示す。

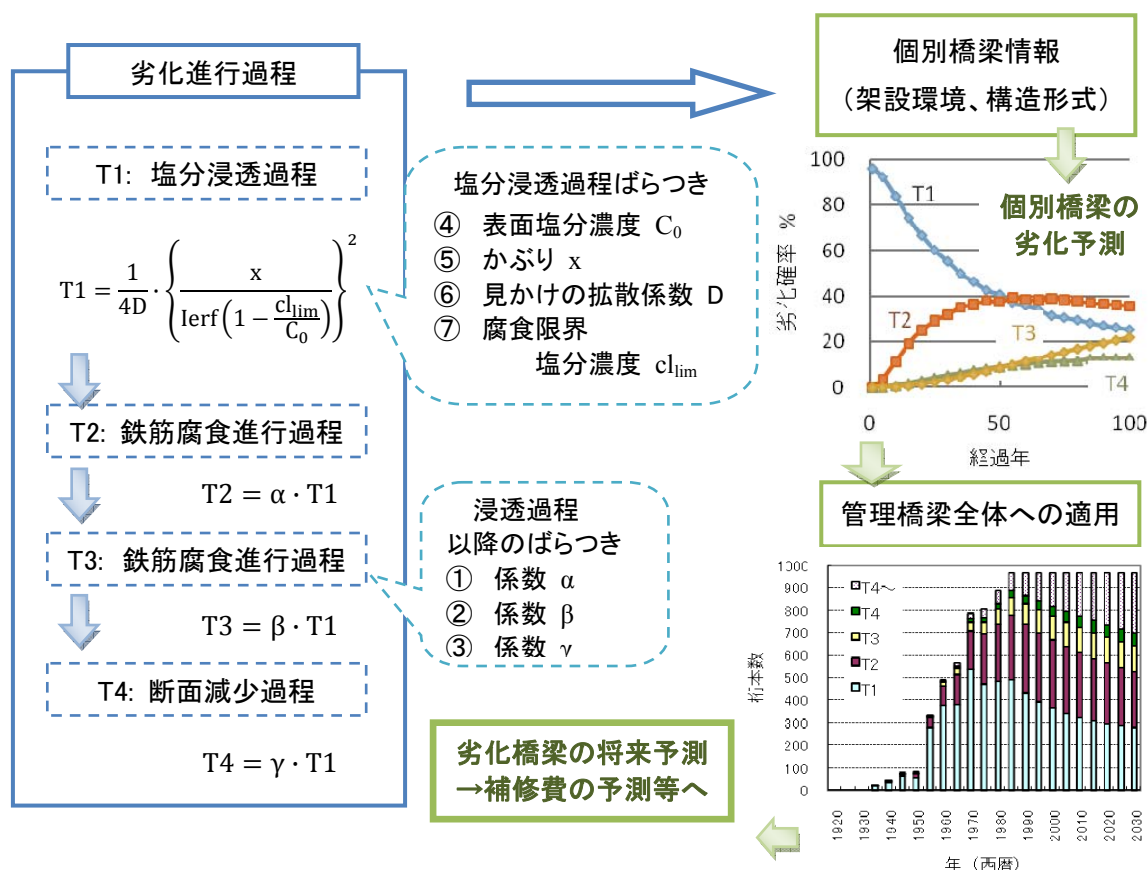


図 1.1 劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測手順と概要

## 1.2.2 塩害劣化予測と飛来塩化物イオン量の評価

### 1) 塩害劣化

道路構造物、特にコンクリート橋梁に注目する際代表的な劣化現象にはいくつか種類があるが、塩害劣化は特に致命的となりやすく海洋からの飛来塩に起因するため我が国の広域で多くの橋梁において懸念すべき劣化現象である。塩害劣化は内在または外部から飛来する塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、内部の鉄筋の腐食膨張を誘引することで鉄筋とコンクリートの破壊を引き起こすため構造躯体そのものの破壊を引き起こす。構造物への飛来塩が厳しい場所では建設後 10 年足らずで鉄筋を覆うコンクリートが剥落し腐食した鉄筋が露出することも珍しくない。我が国の道路は海岸に沿って敷設されているため、劣化対象となる構造物数が多く、劣化進行速度に加え数の点からも影響の大きい劣化現象であると言える。

## 2) 塩害劣化予測における飛来塩化物イオン量評価の現状

塩害劣化の原因となる塩化物イオンは、建設時に初期塩として内在する場合と道路の凍結防止のために撒かれる塩化カルシウムによる場合、そして建設後外部から進入する場合とがある。初期塩による塩害劣化は使用材料に対する塩化物イオン量の規制により対策が採られ解決の方向にあり、一方凍結防止剤の使用は人為的であるため維持管理の観点からの最良の選択がなされるべきである。残る外部、すなわち海洋からの飛来する塩化物イオンを遮断することは容易ではなく、構造物の立地環境により飛来塩化物イオン量は大きくことなる。このため任意環境下における飛来塩化物イオン量の予測・推定が必要となり、これにより劣化予測が可能となる。

劣化予測の精度を向上させるには劣化過程の順に精度を上げていくべきであるが、現在実用されている塩害劣化予測はコンクリート表面の塩化物イオン濃度の仮定を出発点としている。例えば、土木学会コンクリート標準示方書では、海岸から目標地点までの海岸距離により表面塩化物イオン濃度を決定し、国道BMSでは海岸距離に対象地域の地理的・気象的区分を加えたパラメータから決定する方法を採っている。以下に、現在最も一般的な塩害劣化予測として、土木学会と国道BMSにおけるコンクリート構造物への塩分浸透過程を概述する。

### 2-1) 土木学会

塩化物イオン浸透過程の予測、照査はコンクリート標準示方書維持管理編<sup>1.5)</sup>ならびに設計編<sup>1.6)</sup>ともコンクリート表面の塩化物イオン濃度一定として解いた Fick の第 2 法則 (拡散方程式) の解(式 1.1)を基本として使用している。式 1.1 に目標とする経過年数 $t[\text{year}]$ 、かぶり深さ $x[\text{cm}]$ 、材料と外部環境に対して適切な拡散係数 $D[\text{cm}^2/\text{year}]$ とコンクリート表面部の塩化物イオン濃度 $C_0[\text{kg}/\text{m}^3]$ を代入すれば、目標経過年におけるかぶり位置の塩化物イオン濃度 $C(x, t)[\text{kg}/\text{m}^3]$ が算出される。なお、 $C_0[\text{kg}/\text{m}^3]$ は塩化物イオン濃度であり、構造物の耐用期間中一定である。

$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + C(x, 0) \quad (1.1)$$

$C(x, 0)$  : 初期塩化物イオン濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$

表 1.1 に設計編における表面塩化物イオン濃度の参考値を示す。表面塩化物イオン濃度は、構造物周辺の環境の環境条件やコンクリートの品質に影響を受けるため類似の構造物や実測データに基づき決定することが望ましくとされているが、そういった実績やデータによらない場合、表の値により表面塩化物イオン濃度を求めてもよいとしている。維持管理編では海岸距離のみによる分類であったが、設計編では海岸距離に加え、飛来塩分の多い、少ない地域による分類が追加された。なお、設計編には「海岸付近の高さ方向については、高さ 1m が汀線からの距離 25m に相当すると考えて $C_0$ を求めてよい」との注釈があるが、海岸付近がどの範囲を指すのか、基準高さを何として距離換算を行うのか明確でない。

表 1.1 コンクリート標準示方書によるコンクリート表面における塩化物イオン濃度  $C_0 (\text{kg}/\text{m}^3)$

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、中国、四国、九州		4.5	3.0	2.0	1.5	1.0

## 2-2) 国道橋梁マネジメントシステム

実橋の維持管理に対する動きとして、国土交通省では近年橋梁マネジメントシステム（以降国道 BMS と呼ぶ）に対する試行錯誤を重ねている。2006 年 12 月時点の聞き取り<sup>1.7)</sup>では、同年 11 月から塩害対象地区の管理橋梁に対する塩害劣化予測の試行を行っている。国道 BMS における塩分浸透までの劣化予測は、浸透予測としては土木学会と同様の式 1.1 を用いることとし、この際の表面塩化物イオン濃度 $C_0$ を飛来塩分量 $C_{air}$ [NaCl・mdd (mg/dm<sup>2</sup>/day)]の関数(式 1.2)として定義している。 $C_{air}$ は式 1.3 より地域区分（地域区分毎の 1km 換算飛来塩分量 $C_1$ [NaCl・mdd]）と海岸距離 $d$ [km]からなり、式 1.2、1.3 は、1984 年から 3 年間全国 266 箇所で行われた飛来塩分量調査と 76 地点での暴露試験の結果を統計解析により決定したものである<sup>1.8) 1.9)</sup>。

$$C_0 = 1.2C_{air}^{0.4} \quad (1.2)$$

$$C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6} \quad (1.3)$$

表 1.2 に海岸線から目標地点までの距離と地域毎の $C_1$ を示すとともに、式 1.2、1.3 より算出した $C_{air}$ と $C_0$ を示す。なお、国道 BMS では式 1.3 に用いる海岸距離を海岸線から目標地点までの距離を表 1.2 中の計算海岸距離として $C_{air}$ と $C_0$ を算定している。

表 1.2 国道の橋梁マネジメントシステムにおける塩害予測の環境評価

\* 台風の影響を考慮する場合には $C_1=1.0$ を用いる

地域区分	地域	海岸線からの距離(km)	対策区分	計算海岸距離(km)	C <sub>1</sub> (NaCl ・mdd)	C <sub>air</sub> (NaCl ・mdd)	C <sub>0</sub> (NaCl ・kg/m <sup>3</sup> )
A	沖縄県	海上部と海岸線から 100 m まで	I	0.001	0.62 (1.0)*	39.12	5.2
		上記以外の範囲	II	0.1		2.47	1.7
B	北海道、秋田県の一部市町村と秋田、山形、新潟、富山、石川、福井県	海上部と海岸線から 100 m まで	I	0.001	0.92	58.05	6.1
		100m をこえて 200m まで	II	0.1		3.66	2.0
		200m をこえて 300m まで	III	0.2		2.42	1.7
C	上記以外の地域	海上部	I	0.001	0.34	21.45	4.1
		海岸線から 100m まで	II	0.001		21.45	4.1
		100m をこえて 200m まで	III	0.1		1.35	1.4
D		上記以外	塩害対策区分外地域				

## 3) 既存塩分浸透予測式の精度検証

土木学会と国道橋梁マネジメントシステムに採用されている塩分浸透式の実橋梁に対する予測精度を検証する。検証は二つの方法で行い、方法 1 は実橋のコアサンプルから得られた塩分濃度分布に対して式 1.1 による回帰分析より表面部（かぶり 1cm 部）の塩分量を算出しこれと予測式の表面部塩分量を比較する。方法 2 では想定したかぶり位置の塩分濃度が予測式 1.1 において同濃度となる経過年を算出し、この算出経過年と実橋の経過年を比較する。方法 1 が飛来塩分量モデルの検証を目的としたのに対して、方法 2 は各構造部位の現実的なかぶり位置の塩分量を対象とすることで式 1.1 による塩分浸透過程を含んだ予測モデルの検証を目的としている。



検証に用いたデータの概要は表 1.3 に示す通りで、高知県の国道データについては土佐国道事務所



よりデータ提供を受け、青森県道については文献 1.10 を参考にした。

表 1.3 データ概要

\*かぶりの想定値：桁 3cm、橋脚・橋台 7cm とする \*見かけの拡散係数  $D$ ：土木学会  $\log D = [4.5(w/c)^2 + 0.14(w/c) - 8.5] + \log(3.15 \times 10^7)$ ，国道 BMS  $\log D = -3.9(w/c)^2 + 7.2(w/c) - 2.5$ により 1983 年以前に建設した橋脚・橋台を  $w/c=60\%$ として、'84 年以降に建設した部材を  $w/c=55\%$ として計算 \*初期塩量：高知国道は各橋梁におけるかぶり深部の塩分濃度が 2 か所以上同じ値をとる場合その最低値を初期塩量とし、青森県道は初期塩量なしとする。

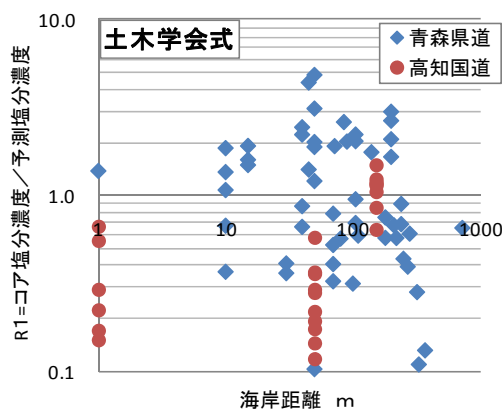
		高知国道 55 号橋梁	青森県道
コア数		評価方法①29, ②16	評価方法①②55
コア採取 状況	海岸距離	0, 50, 150m	0-725m
	橋梁経過年	22-55 年	4-47 年
	コア採取位置	高さ 1-15m、桁・橋脚・橋台	高さ 2-25m、橋脚・橋台
橋梁位置			

精度検証結果を表 1.4 と図 1.2、1.3 にまとめる。方法 1 ではコンクリート表面部のコア塩化物イオン濃度と予測塩化物イオン濃度比  $R1$  を、方法 2 では仮想鉄筋位置の塩分量に達する予測年と実経過年の比  $R2$  を精度検証の指標とし、各  $R$  は 1 以下で安全側、1 以上で危険側の予測結果を示している。

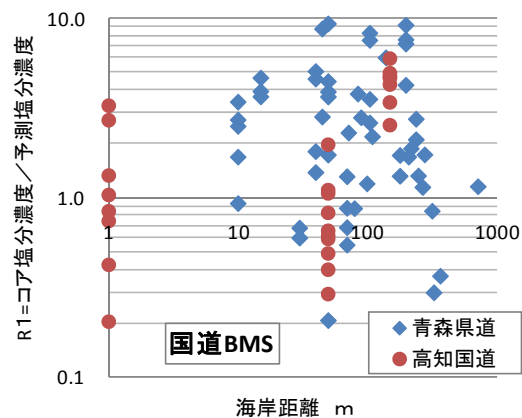
図 1.2、1.3 より精度の良悪は海岸距離に対して特に傾向を示しておらず、海岸距離により決定したコンクリート表面部の塩化物イオン量と予測精度に関係がないことがわかる。予測値と実測値の対応が悪いケースを詳細にみると、青森県道の海岸距離 100m を超える橋梁において多く、データ参考元の文献によれば大規模河川上流において海岸距離からの予想を超える塩分浸透量が確認されている。大規模河川上には輸送される飛来塩を遮るものがなく上流まで多くの飛来塩が到達することが予想される。また、高知国道のデータでも同一海岸距離にある構造物においても塩分浸透がかなり異なることから、飛来塩分量は海岸距離または地域区分以外の要因に大きく左右されることが考えられる。

表 1.4 既存劣化予測式の精度検証結果

	検証指標	上：安全側 下：危険側	土木学会	国道 BMS
			平均値	(変動係数)
方法 1	表面 (1cm) における $R1 = \text{コア塩分濃度} / \text{予測塩分濃度}$	$R1 < 1$	0.43 (0.59)	0.57 (0.42)
		$R1 > 1$	1.98 (0.44)	3.53 (0.62)
方法 2	鉄筋位置の塩化物イオン濃度浸透に対する $R2 = \text{予測経過年} / \text{実経過年}$	$R2 < 1$	0.20 (1.15)	0.23 (0.89)
		$R2 > 1$	4.53 (1.55)	14.32 (2.20)

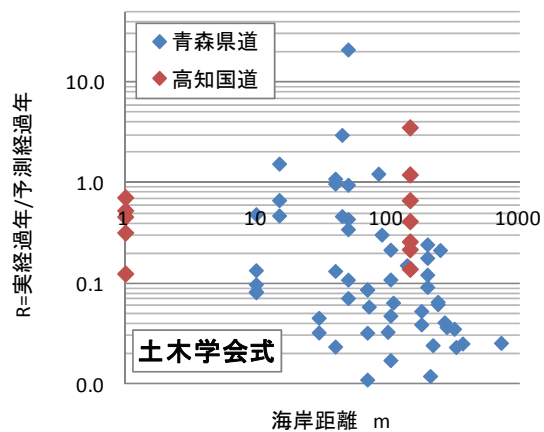


(a) 土木学会式

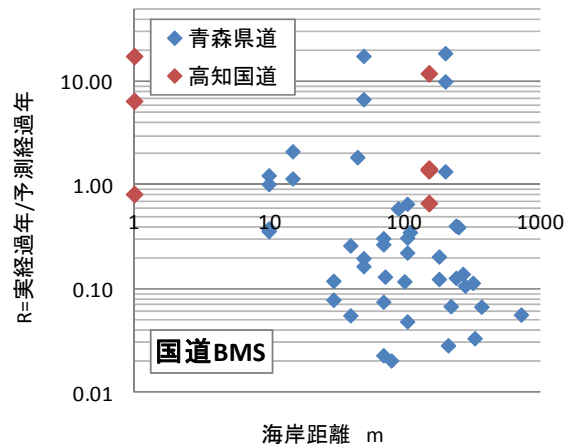


(b) 国道橋梁マネジメントシステム

図 1.2 方法 1 による塩分浸透予測精度評価



(a) 土木学会式



(b) 国道橋梁マネジメントシステム

図 1.3 方法 2 による塩分浸透予測精度評価

また、方法 1 の結果を劣化外力の予測精度、方法 2 を塩分浸透過程の予測精度と捉えると、安全側、危険側ともに塩化物イオン浸透過程の予測段階において精度がさらに低下する結果となり浸透過程の予測式の検討が必要であることも本精度評価より示唆される。

### 1.3 研究目的

以上より構造物の効率的な維持管理には劣化予測が不可欠であり、またコンクリート構造物の経年劣化に対して塩害劣化は優先的に検討すべき劣化現象である。劣化予測の精度の向上においては、劣化外力であるコンクリート表面に飛来する塩化物イオンの量を評価することが必要であるが、現在劣化予測に用いられる劣化外力はコンクリート表面の塩化物イオン量であり飛来塩化物イオン量ではない。今後、塩害劣化予測の全体精度を向上させるためには劣化外力の評価精度を向上させる必要があり、すなわち陸上構造物に到達する飛来塩化物イオン量の算定モデルが必要となる。

本研究の目的は、海洋から陸上構造物に到達する飛来塩化物イオン量の算定モデルを構築することで、コンクリート構造物に対して致命的劣化現象である塩害劣化の予測の精度向上に貢献し、維持管理の効率化、マネジメントシステムの実用性の向上に繋げることである。

### 1.4 既往研究の概要

海岸距離と地域区分による地理情報より劣化外力を推定するに至った背景は 1984 年発行の道路橋の塩害対策指針（案）<sup>1.11)</sup>まで遡る。同指針は建設省が 1982 年に行った全国沿岸部のコンクリート橋損傷状況調査の結果を反映したもので、調査の結果、塩害損傷の程度は海岸距離と橋梁の経過年に大いに関係するとともに、北海道と東北および北陸の日本海側と沖縄県に損傷橋梁が多いことが確認された<sup>1.12)</sup>。この理由として、日本海側では冬期季節風による強い潮風が、沖縄県では台風の常襲とともに温度と湿度の高い亜熱帯海洋性気候が塩害による腐食環境を促進する理由として考えられた。これらの調査結果をもとに作成された塩害対策指針（案）は全国を 3 つの地域区分に分け、海岸距離を各地域区分に対して 2 つから 3 つに分類、地域区分と海岸距離の組合せで 8 通りを最終的に三つの対策区分として提案を行い、対策区分毎に対象部材に応じた最少かぶり厚を規定した。（\*表 1.2 の地域分類は塩害対策指針（案）の分類と同じである）

この全国調査以降、地理条件に加え、風による気象条件、そして波浪条件の影響を加味した飛来塩分量、または飛来塩化物イオン量からの算定研究が行われてきた。（塩分量の定義は研究者毎に異なるが、海水成分の比率はほぼ一定と考えられるため（付録 1）各研究者の定義する塩分量と本研究で算定目標とする塩化物イオン量を相互に換算することが可能である。以下における塩分量と塩化物イオン量の使い分けは各研究者が使用する用語を用いる。）また、飛来塩分量、塩化物イオン量の算定を目標とした研究成果は、大きく分けて①現場観測の結果に対する考察を通じて有意となるパラメータの回帰分析により算定式を提案したものと、②海水飛沫の発生・輸送過程に対して何らかの理論モデルを提案し算定モデルを提案したものがあり、①の回帰分析による算定式は、暫定的手法としてや特定の環境下での使用には有効であり、選択されたパラメータは飛来塩の発生と輸送に対して影響の大きな要因と考えられる。こうした算定式の初期の例として、浜田<sup>1.13)</sup>は山口県の海岸での飛来塩分量観測（風速約 2m から 8m、海岸距離 20m から 500m）の結果より風速と海岸距離による算定式を式 1.4 として提案した。

$$C = (-2680/d^2 + 510/d + 1.64)W \quad (1.4)$$

C : 付着塩分量 [g/m<sup>2</sup>/hr], d : 汀線からの距離[m], W : 風速[m/s]

浜田らは飛来塩分量に対する高度が与える影響についても考察しているが、式 1.4 の適用範囲は「平

地で海拔 2~3m 程度の低地における」と限定し、高度の影響を無視している。また、前項で述べた国道アセットマネジメントに使用されている式も飛来塩分量全国調査<sup>1.8)</sup>の結果を回帰分析して得られた式である。しかしながら、回帰分析による算定式は観測地と異なる環境下での適用に対しての精度を保証できないため、多様な環境下における飛来塩分、塩化物イオン量を評価するためには発生・輸送機構から検討する必要がある。

これに対して、宇多ら<sup>1.14)</sup>は飛沫の発生量は風速の 2 乗に比例、塩分量の鉛直分布は指数分布とし、輸送過程は移流沈降と拡散過程によるとして発生と輸送過程を分けてモデル化した。モデル式に対する各係数は文献 1.8 の飛来塩分量全国調査の結果に回帰することで決定し、係数値は波浪条件（日本海型か太平洋型か）と海岸地形（岩礁地帯か砂浜か）の別に決定している。浜田らや宇多らのモデルをはじめ既往研究による飛来塩分量特性と算定モデルについて文献 1.15 に解説が詳しい。

また、山田義智ら<sup>1.16)</sup>は、海岸状況と風速により飛沫発生と塩分量の鉛直分布を決定し、その後の輸送過程を落下速度が風速と海岸距離により決定するとして移流拡散方程式により計算モデルを提案している。

細山田・山田文則ら<sup>1.17)1.18)</sup>は飛沫の発生量は波の乱れによるとして波のエネルギー減衰量と風速の関数により発生過程を決定、飛沫鉛直分布を指数分布とした。飛沫発生後の輸送過程を、連続の式とナビエ・ストークス方程式による数値計算により算出することを提案した。なお、飛沫径を 5, 1, 0.5, 0.1, 0.05\*mm の 5 段階と具体的にし、飛沫径差が輸送に及ぼす影響を検討している。（\*論文 1.18 中には 0.5mm とあるが文脈から 0.05mm とと思われる）

このほか、田中ら<sup>1.20)</sup>や永島ら<sup>1.21)</sup>は複雑な地形や構造物周辺の飛沫の輸送過程やコンクリート付着過程について数値計算による検討を行っており、永島らは、山田・細山田の飛沫発生モデルを利用している。

スピック<sup>1.22)</sup>は、観測波浪値から碎波点と碎波波高を推算し、海岸線での飛来塩化物イオン量鉛直分布を碎波波高の 2 乗と風速の 3 乗および海面水温の関数として定式化した。海岸線から内陸への塩化物イオンの輸送は移流拡散方程式によるとして飛来塩化物イオン量算出モデルを提案した。また、日本海側の季節風などの状況化においては、強風により海上で波頭が飛ばされる現象、すなわち白波による海水飛沫が発生、輸送されることをモデルに組み込んでいる。

以上の研究は陸上構造物の塩害劣化の原因となる飛来塩分量または塩化物イオン量の算定を目的としているが、海洋から飛来する海水飛沫や塩分に関する検討はその他の分野においても早くからなされてきた。地球規模の大気と水循環を把握する目的（海塩粒子が降水機構に及ぼす影響等）からは海洋で発生する微小な海塩粒子に関する研究が<sup>1.23)1.24)</sup>、農林学においては海岸付近の作物の塩害防止のため飛塩量と防風林に関する検討が<sup>1.25)1.26)1.27)</sup>、電力関連機関においては飛来塩による金属の腐食や電気障害を背景とした研究<sup>1.28)</sup>がそれぞれ 1965 年前後にある程度総括的な報告がなされている。

中でも鳥羽らのグループは 1960 年代より大気と海洋の相互作用の見地から海塩粒子の発生から輸送までのモデル化を行い<sup>1.29)</sup>、台風時の飛来塩分量の算定に対する適用も検討している<sup>1.30-33)</sup>。鳥羽らの研究は高度数千 m、水平距離数百 km スケールにおいて有意となる海塩飛沫を扱うため、対象とする飛沫粒径は大きくても数百  $\mu\text{m}$  程度であるが、この範囲の飛沫径の発生輸送過程に対する観測、実験を通じた検討はほとんど例がない。なお加藤らは鳥羽らのモデルを参考に飛来塩分量特性をより検討し易い数値モデルの構築を行っている<sup>1.34)1.35)</sup>。

## 2 章 提案モデルのコンセプト

### 2.1 海水飛沫発生に対する波力の影響

陸上構造物に到達する塩化物イオンの発生過程は、海水中に含まれる塩化物イオンが海面の乱れを契機として海水飛沫を発生し、これが主に風の作用で輸送されると考えられる。このため、波力の関数として飛沫の発生量を仮定し、輸送過程において風の影響を考慮することが現実的なモデルであると考えられる。この仮定は飛来塩分量に対する相関が風速よりも波高の方が強いとする計測例<sup>2.1)</sup>や飛来塩量が風速に比例しないとする計測例<sup>2.2)-2.4)</sup>の存在からも裏付けられ、こうした計測例は台風到来前に風は弱いけれど高波が海岸に到達している状態や季節風時に長時間の強風により波が発達した後、風に弱まった際など波力と風速が伴わない場合に起こると考えられる。

### 2.2 海水飛沫輸送に対する飛沫粒径分布の影響

陸上に到達する海水飛沫の大きさは一律ではなく、ある粒径幅をもった飛沫群が海洋で発生し、陸上に到達すると考えられる。これは過去の計測例の多くより指摘されており、陸上における飛来塩分量の鉛直、水平分布を左右する要因と考えられる。具体的には、海岸から風下方向の塩分量、すなわち塩分量の水平分布の傾向は大きくには図 2.1 の A と B に分かれる。傾向 A は海岸付近の塩分量が最も多く、距離に対して最初は急激にその後緩やかに減少する。傾向 B は緩やかに減少傾向を示すものの距離に対する塩分量が不安定に上下する。水平分布に対する傾向 A は、複数の研究者<sup>2.2)-2.5)</sup>により指摘されており、この理由を大気中の飛沫粒径差、大きな粒径飛沫は落下速度が速いため距離に対して急速に減少するが、小さな飛沫は落下速度が遅いため長距離の飛行が可能であるためとの推測報告を行っている<sup>2.2)-2.4)</sup>。

一方、海岸線付近の飛来塩分量の鉛直分布は、図 2.2 中の C と D の傾向にわかれる。傾向 C は、地面より数十 cm 上空で塩分量が最大となり上空へ行くほど指数関数的に減少し、傾向 D は塩分量の鉛直分布がほぼ一定である。鉛直分布が傾向 C となる理由を、玉手<sup>2.2)</sup>は微細な飛沫粒子は拡散によって上空へ運ばれるが、比較的大きい飛沫は海面より高く打ち上げられないからではないかと推測している。傾向 D を示す観測例としては、幸喜<sup>2.4)</sup>が沖縄で行った異なる三海岸での観測があり、海岸線からの距離が 0, 2, 11m の観測結果が三海岸とも鉛直方向に飛来塩量の差がない分布を示している。幸喜はこの理由を沖縄では沖のサンゴ礁で砕波が発生するため、砕波時に発生する大粒径の飛沫は海岸線までにすでに落下してしまっており陸上へ到達する際には比較的に小さな飛沫が鉛直方向に差のない状態であるためと推測している。

これらの知見を総合すると、観測塩分量の水平・垂直

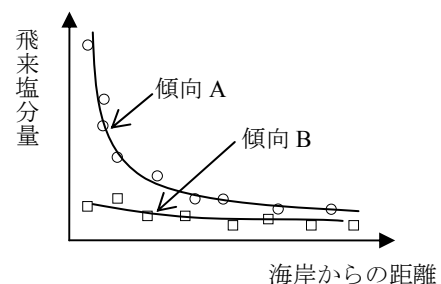


図 2.1 観測塩分量水平分布の概念図

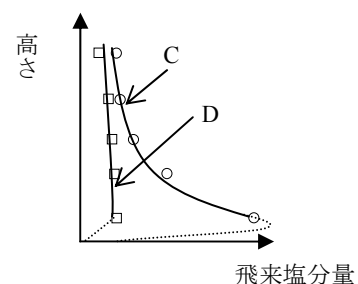


図 2.2 海岸線付近における観測塩分量鉛直分布の概念図

分布の傾向が統一的に説明できる。すなわち、海上と海岸で発生する飛沫粒径には幅があり、飛沫径が大きいほど大量の塩分を含むが、打上高に制限がある上に落下速度も速いため短い時間で大気中から消える。一方、小さな粒径飛沫は、風と波の作用で上空まで舞い上がり落下速度も遅いため長時間空中を浮遊する。飛沫の最大の供給機会は波の砕波時と考えられ、大きな飛沫は砕波地点の限られた範囲にしか飛来しないが、小さい飛沫はより高く広い範囲まで飛来する。従って、塩分量の水平、鉛直分布は海岸線からの距離ではなく砕波地点からの距離により決定する。

また、大気中の粒子に対する粒子径と輸送、すなわち粒子の落下速度を一般的にイメージできる事象として降水や黄砂が身近である。降水のもととなる雲を構成する雲粒の粒径は直径  $14\sim 20\mu\text{m}$  が最も数多く、直径が  $80\mu\text{m}$  に達するものが混じることもある。雨滴は通常直径約  $200\mu\text{m}$  以上  $6\text{mm}$  程度まででこれ以上大きい雨滴は空気抵抗により分裂するとされる<sup>2.6)</sup>。また、中国内陸部より飛来する黄砂は発生源近辺では  $100\mu\text{m}$  を超えるような粒子もあるが、粒径の大きいものほど輸送途中で落下し、北京で観測される粒径は  $5\sim 20\mu\text{m}$  程度、数千  $\text{km}$  離れた日本に到達する黄砂の粒子径は平均粒径  $4\mu\text{m}$  程度とされる<sup>2.7)</sup>。

以上より飛沫径差が飛沫の輸送に及ぼす影響が大きいことを言及した。このため飛沫径毎の落下速度の決定が重要となり、本論文では飛沫径を球形と仮定した場合の終末速度  $w_d[\text{m/s}]$  (重力と抵抗力、浮力が釣りあって一定速度となった速度) を式 2.1 により算定したものを用いる<sup>2.8)</sup>。

$$w_d = \left\{ \frac{4gd}{3C_D} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{\text{air}})}{\rho_{\text{air}}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$g$  : 重力加速度 $[\text{m/sec}^2]$ 、 $d$  : 飛沫直径 $[\text{m}]$ 、 $\mu$  : 空気粘性係数 $[\text{kg/m/sec}]$ 、 $\rho_p$  : 飛沫 (海水) 密度 $[\text{kg/m}^3]$ 、 $\rho_{\text{air}}$  : 空気密度 $[\text{kg/m}^3]$ 、 $C_D$  : 抵抗係数

$$C_D = 24/\text{Re} \quad (\text{Re} < 1) \quad (2.2)$$

$$C_D = (0.55 + 4.8/\sqrt{\text{Re}})^2 \quad (1 < \text{Re} < 10^4) \quad (2.3)$$

$$\text{Re} : \text{レイノルズ数} \quad \text{Re} = \frac{(w_d \cdot d)}{(\mu/\rho_{\text{air}})} \quad (2.4)$$

なお、本論文においては飛沫径に対する終末速度を落下速度と仮定するが、実際には飛沫は打ち上げの頂点から速度 0 より次第に終末落下速度に到達する。速度 0 の状態からの落下速度の時間変化は式 2.5 で表され、 $t = 3\tau$  で終末速度の 95% に達する<sup>2.9)</sup>。 $\tau$  は緩和時間と呼ばれ、新しい力の状態に応じて粒子が加速または減速するとき、その速度を調整するのに必要な時間とされる。

$$w(t) = w_d(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.5)$$

表 2.1 に単位密度粒子の標準状態（20℃、1 気圧）における終末速度（ $t = 3\tau$ ）到達時間を示す<sup>2,9)</sup>。表より明らかなように飛沫径が大きくなるほど終末速度までの到達時間が長くなり、飛沫直径 100 $\mu\text{m}$  で 1 秒程度となる。下記に詳述するように本研究で対象とする飛沫は最大で数千  $\mu\text{m}$  程度と想定しており、式 2.5 より数千  $\mu\text{m}$  の飛沫の終末速度到達時間は数秒程度となる。このため、極大の海水飛沫が影響する飛沫発生点近辺においては飛沫落下速度を終末速度としたことによる誤差が予想される。すなわち、このような状況下では実際の落下時間は終末落下速度を用いた場合よりも長いためより遠くに飛沫が輸送されることとなり、この影響は輸送力となる風速値が大きいくほど大きくなる。

図 2.3 は、式 2.1–2.4 より求めた飛沫直径に対する落下速度を示したものである。落下速度に対する飛沫径の関係は常に一定ではなく、直径 100 $\mu\text{m}$  程度までは落下速度は飛沫径の 2 乗に比例するのに対し、その後飛沫径の増大とともに落下速度の増加率は減少し、飛沫径の 1 乗、そして 0.5 乗へと比例係数を下げる。

一方、表 2.2 は直径 0.1 から 10000 $\mu\text{m}$  (1cm) の飛沫の落下速度とこの飛沫が 1m 落下するのに必要な経過時間、風速 10m/s において 1m 落下する際の経過時間、そして海水中の塩化物イオン量を 1.9%として一海水飛沫中に含まれる塩化物イオン量と逆に塩化物イオン量 1mg に必要な飛沫個数を示した。

表 2.2 飛沫径に対する輸送量の比較  
\*塩化物イオン量は海水中 1.9%として計算

飛沫直径 [ $\mu\text{m}$ ]	落下速度 [m/s]	1m 落下時間	風速 10m/s, 1m 落下 時の輸送距離	1 飛沫辺り Cl 量* [mg/個]	Cl 1mg 辺りの 飛沫個数
0.1	3.4E-7	34days	29,463 km	1.0E-14	9.8E+13
1	3.0E-5	9hour	324 km	1.0E-11	9.8E+10
10	3.0E-3	5min	3 km	1.0E-8	9.8E+7
100	0.24	4sec	41m	1.0E-5	9.8E+4
1000	3.9	0.3sec	2.5 m	1.0E-2	9.8E+1
10000	17.7	0.06sec	0.6 m	1.0E+1	9.8E-2

表 2.2 より直径 0.1 $\mu\text{m}$  の飛沫は落下速度が遅すぎるため 1m 落下するのに約 1 ヶ月の時間がかかり、この飛沫径が塩害劣化に対して有意であれば海岸距離に関係なく塩害が頻発するはずである。逆に直径 10000 $\mu\text{m}$  では落下速度が速すぎて飛沫の輸送の機会ほとんどないと考えられる。従って、飛沫径範囲としては直径 1 $\mu\text{m}$  程度から数千  $\mu\text{m}$  程度の範囲と推測される。飛沫径と落下速度の関係の一方、

表 2.1 単位密度粒子の標準状態  
における終末速度到達時間

飛沫直径 ( $\mu\text{m}$ )	時間 (ms)
0.01	0.00002
0.1	0.00026
1.0	0.011
10	0.94
100	92

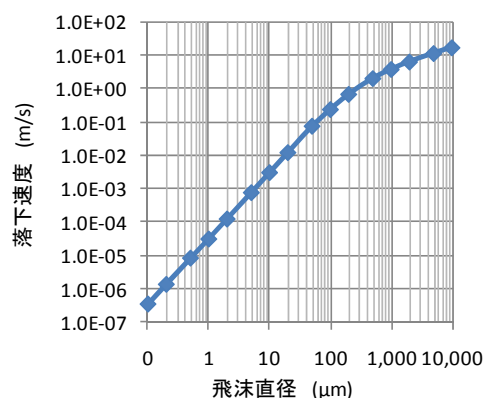


図 2.3 海水飛沫の落下速度  
\*海水中塩分量 35%、水温、気温 20 度  
として計算



当然ながら一飛沫中に含有する塩化物イオン量は飛沫の体積、すなわち直径の3乗に比例する。従って、直径の大きな飛沫は落下速度も速く存在個数も少ないと考えられるが、構造物に付着した際の塩害に対するインパクトが大きい、一方小さな粒径飛沫は含有する塩分量は少ないが数が多く遠方まで飛来するため海岸から離れた地域での塩害を引き起こすと考えられる。

### 2.3 海水飛沫発生における海岸状況の影響と海水飛沫発生場の分類

海水飛沫の発生機会となる波の砕波とは、海面の安定性の崩壊をきっかけに波が崩れる現象であり、海面の挙動の中でも日常的かつ最もダイナミックな現象である。海上、海岸ともに砕波は発生するが、海上と海岸では砕波の発生形態は異なる。海上における砕波は、波が風により十分発達した結果波頭より白く砕け白波と呼ばれる。一方、海岸における砕波は海底勾配の影響を受けた急な波形変形や障害物への衝突により砕波する。台風や季節風時の越波被害からも想像できるように、高波が構造物に衝突すると大量の飛沫を高い位置まで打ち上げるが、同じような波が砂浜に入射しても構造物斜面におけるような砕波状況とはならない。このように海岸における砕波は海岸地形や構造物の有無に大きく左右され、海水飛沫の発生もこれに大きな影響を受けると考えられる。

このように砕波地点状況の違いによる飛沫発生状況の違いをモデル化するために本論文においては1) 堤防・護岸、2) 離岸堤、3) 岩礁、4) 海浜、5) 海上の5つの飛沫発生場を特に想定する。

図2.4に各飛沫発生場の概念図を示し、以下に特徴をまとめる。

#### 1) 堤防・護岸

陸地と海面の境界に位置し、陸地を防護するために設置される。道路等の陸地と接しているため、高波、強風時には越波等の被害が問題となり、見た目にも飛来塩化物イオンの発生が多い。なお、堤防と護岸の違いは一般的に堤天端と背後地との関係により使い分けられ、背後地と天端がほぼ同じ高さであれば護岸、背後地が低く裏法があるような場合は堤防と呼ぶ。

#### 2) 離岸堤

海岸より沖側に主に消波の目的で設置される構造物で、そのためテトラポッド等の消波材で被覆されている場合が多い。離岸堤部で波が完全に砕波する場合と、波力が離岸堤を通過して岸側まで伝播し、汀線で再び砕波する場合がある。

#### 3) 岩礁

岩礁海岸には、浜に岩石が点在する場合と海岸から陸にかけて切り立った崖地の前面に岩石が存在している場合がある。

岩礁海岸における海面と岩石の関係は潮位により異なり、岩石が海面上にある場合には海面下に岩石が隠れた状態よりも飛沫の発生量が増加すると考えられる。宇多ら<sup>2,10)</sup>は独自の飛来塩分量算定モデルにより飛来塩分量全国調査を分析した結果、特に日本海側では岩礁海岸での飛来塩分量は砂浜海岸の6.5倍程度の飛沫発生となると報告している。このように岩礁にお



図 2.5 堤防



図 2.6 離岸堤



図 2.7 岩礁



る飛沫発生量は浜よりも多いと認識されているものの、岩礁海岸にも浜型、崖型、その他海岸構造物との混在する場合があります、飛沫発生量は海岸状態により異なるため一概に砂浜の何倍と定量できないと考えられる。

#### 4) 海浜

海浜における砕波は海底水深の低下による浅水変形の結果生じ、入射波の波高に応じて沖から岸に向けて波が次第に崩れる。砕波の状態は入射波と海底勾配に左右される。砕波は上記1) から3) に比較して穏やかである。



図 2.8 海浜

#### 5) 海上

海上で発生した飛沫が陸上に到達するには風が強い必要があり、風が強ければ発生飛沫量も多い。よって、強風が継続する場合、例えば冬季日本海等の季節風下において海上で発生、輸送される飛沫が陸上構造物の塩害に影響する可能性がある。こうした海上で発生する飛沫の発生と輸送過程を鳥羽らはモデル化している。また、鳥羽ら<sup>2.11)</sup>のモデルによれば飛沫の発生範囲は風が継続する海上範囲となり、日本海側地域においては日本海を横断する数百 km の海上範囲となる。

また一方で、宇多ら<sup>2.10)</sup>によれば同様の季節風が来襲する日本海側地域における砂浜海岸と岩礁海岸の観測においては 6.5 倍の飛塩量差が解析結果として得られる一方、太平洋側海岸においては砂浜海岸と岩礁海岸に飛塩量差がないと報告しており、このことは季節風による海上飛沫発生の影響よりも海岸状態による飛沫発生の影響が大きいことを示唆している可能性が高い。

以上に分類した飛沫発生場は、1) ～ 4) が海岸近辺であるのに対して5) のみ海上における飛沫発生である。海上で発生する飛沫と海岸付近で発生する海水飛沫とでは、飛沫発生地点から到達地点までの飛距離が大きく異なるため、前項の飛沫径と落下速度の検討で述べたように陸上構造物の塩害に対して有意となる飛沫粒径範囲が異なる。

また、図 2.4 に各飛沫発生場とともに陸上の目標地点との関係を示してある。我が国の海岸は多種多様であり、砂浜や岩礁浜といった自然海浜と海岸保全の目的で設置された消波堤や防波堤などが隣接している。図のように異なる飛沫発生場が海岸に混在している場合、風向が変化することで異なる飛沫発生場で生じた海水飛沫が目標地点に到達するため、任意地点に到達する飛来塩化物イオン量の算定は飛沫発生場とともに風向との関係を把握することが重要となる。

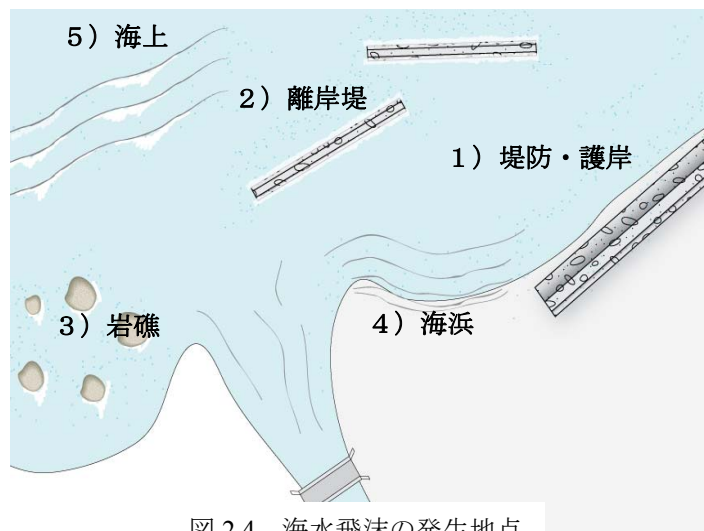


図 2.4 海水飛沫の発生地点

## 2.4 飛来塩化物イオン量算定モデルコンセプトのまとめ

以上の議論より、陸上構造物の塩害劣化を引き起こす塩化物イオンは海水飛沫の形で輸送され、飛沫の発生は碎波時の波力により決定し、発生後の輸送過程において風の影響を受けるとしてモデル化を行う。特に、飛沫の発生時点における1) 飛沫発生場の状況と2) 飛沫粒径分布の二点がその後の輸送過程に対して最も影響が大きいと考えられる。また飛沫発生場と飛沫粒径分布には互いに関連があり、飛沫発生場を海上と海岸に大別すると海上で発生した飛沫が陸上に到達するには海岸で発生した飛沫粒径分布よりも小さい飛沫粒径分布である必要がある。従って、本提案モデルでは飛沫発生場と陸上への到達する飛沫粒径分布の関係として、海上から飛来する飛沫を小粒径飛沫、海岸から飛来する飛沫を大粒径飛沫として区別し、特に海岸付近で発生する大粒径飛沫の発生、輸送過程のモデル化を行う。なお、小粒径飛沫の発生輸送過程は鳥羽らのグループにより統一的な検討がすでになされており本論文においてはこの成果を活用する。

## 2.5 論文構成

本論文の全体構成を以下に述べる。

第1章では、本研究目的に至った背景と問題提起として、構造物の維持管理マネジメントの実用化に対して劣化予測の必要性を述べ、特にコンクリート構造物に対して致命的劣化現象である塩害劣化の予測過程における飛来塩化物イオン量算定モデルの必要性を既往モデルならびに既往研究の概要とともに述べた。これより本研究目的を飛来塩化物イオン量の算定モデルの構築とし、第2章においては本研究で提案するモデルのコンセプトをまとめている。また、飛来塩化物イオン量の算定モデルは、塩化物イオンの輸送媒体となる海水飛沫の発生と輸送、そして付着、捕捉過程からなるとし、3章においては海水飛沫の発生と輸送過程を、海岸付近から陸上へ輸送される大粒径飛沫、海上から陸上へ到達する小粒径飛沫の別にまとめた。陸上における海水飛沫が対象構造物表面に付着、捕捉される過程を第4章とし本提案モデルが完成する。第5章においては、本提案モデルを具体的に計算する際の計算過程と計算条件をまとめている。提案モデルに対する検証を第6、7章にまとめ、第6章では検証対象が既往研究による数時間から数十時間の比較的短時間の計測結果であるのに対して、第7章は1ヶ月単位の1年から3年までの長期計測結果である。短期計測のほうが詳細な入力情報が得られているが、最終的には全国各地の任意構造物に到達する飛来塩化物イオン量の算定が目的となるため7章のような長期の計測結果との比較検証を行う必要がある。最後に第8章に本論文のまとめと提案モデルに対する議論を述べる。

## 3 章 飛来塩化物イオン量算定モデルⅠ：海水飛沫の発生と輸送

### 3.1 まえがき

陸上構造物に到達する塩化物イオンは、海面から空气中へ打ち上げられた海水から成る飛沫（海水飛沫）として風により輸送され構造物表面に付着・捕集される。海水飛沫の発生場を海岸と海上に二分すると、海岸で発生した飛沫は輸送距離が短いため、比較的大きな飛沫が陸上へ到達するが、海上で発生する飛沫は大きいものほど早く落下するため比較的小さな飛沫しか陸上へ到達できない。また、大きな飛沫が砕波時のしぶき等により直接的に発生するのに対して、数  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  の小さな飛沫は海面気泡の破裂により生成することが既往の研究<sup>3.1)</sup>より報告されている。こうした小さな飛沫の発生から輸送過程については鳥羽らによる統一的な研究成果があるが、大きな飛沫の発生・輸送過程、特に海岸状況と発生飛沫粒径分布の両方の検討を行った研究は未だない。

本章では、陸上の任意地点高度に到達する飛来塩化物イオン量を算定するために必要な海水飛沫の発生と輸送過程を海岸と海上での発生飛沫、すなわち大、小粒径飛沫に分けて検討する。本論文において新たな提案となる海岸での大粒径飛沫の発生と輸送過程を 3.2 項に示し、3.3 項で鳥羽らの研究グループによりまとめられた小粒径飛沫の発生から輸送までの各モデルを概説する。

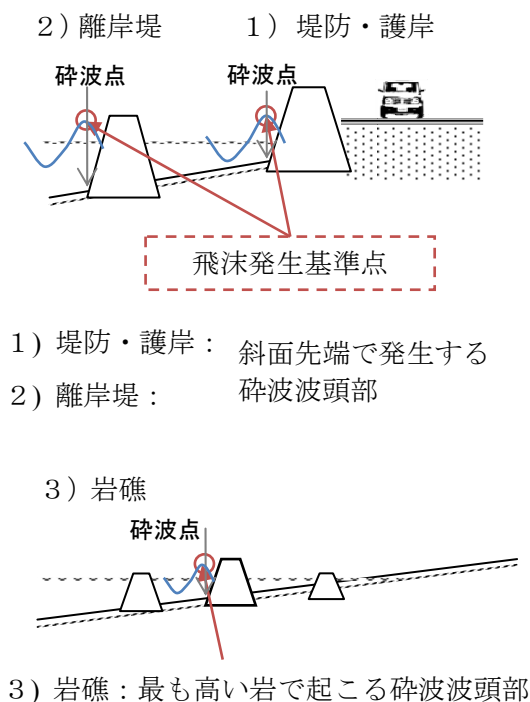
### 3.2 海岸における大粒径飛沫の発生と輸送

#### 3.2.1 海水飛沫発生基準点のモデル化

##### 1) 海水飛沫発生場に対する飛沫発生基準点の定義

沖から海岸へ入射してくる波は、海岸状態に応じて砕波し、その砕波位置や砕波状況は海岸状態により異なる。このため、2章で分類、定義した 1) 堤防・護岸、2) 離岸堤、3) 岩礁、4) 海浜の飛沫発生場に対して海水飛沫の発生点を 1 点定め、この点を飛沫発生基準点として海水飛沫の発生とその後の輸送過程に対する出発点とする。

1) 堤防・護岸、2) 離岸堤、3) 岩礁における飛沫発生基準点は入射波に対する障害物上での砕波として統一的に定義し、障害物斜面が海底と接する水深地点の砕波波高の頂点を飛沫発生基準点と仮定する。なお、1)～3)の海岸においては各障害物の沖側全面もしくは後方で砕波する可能性もあるが、障害物斜面上での砕波による飛沫発生が有意であり、前後砕波による飛沫発生量は無視できると仮定する。なお、飛沫発生基準点の算定は合田<sup>3.2)</sup>が提案した砕波帯内の任意水深にお



- 1) 堤防・護岸： 斜面先端で発生する  
2) 離岸堤： 砕波波頭部

- 3) 岩礁  
砕波点  
3) 岩礁：最も高い岩で起こる砕波波頭部

図 3.1 飛沫発生基準点の概要

ける碎波波高算定式により求めることとする。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0', K_s H_0'\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\beta_0 = 0.028(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta] \quad (3.2)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[\tan \theta] \quad (3.3)$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H_0'/L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\} \quad (3.4)$$

$H_0'$  : 換算沖波波高[m]、 $K_s$  : 浅水係数、 $h$  : 海底水深[m]、 $L_0$  : 沖波波長[m] ( $L_0 = 1.56 \cdot T^2$ )

$T$  : 周期[sec]、 $\theta$  : 海底勾配[度]

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh kh + kh(1 - \tanh^2 kh)}} \quad (3.5)$$

$k$  : 波数[m<sup>-1</sup>] ( $k = 2\pi/L$ )、 $L$  : 波長[m] ( $L = \sqrt{ghT}$ )、 $T$  : 周期[sec]

以降、堤防・護岸、離岸堤、岩礁の飛沫発生場を入射波が堤防等の障害物斜面上で飛沫発生が有意な海岸として、海浜に対して「波浪障害海岸」と呼ぶ。

一方、海浜における飛沫発生基準点は、任意海底勾配に入射する波高と周期より碎波地点を算出し、この碎波波頭部と定義する。

海浜における碎波点は式 3.6 の碎波限界となる水深波高比により決定する。具体的に、波浪観測データより入力値となる沖波高 $H_0$ が得られれば式 3.7 より海岸方向へ進むにつれ浅水変形により波高変化し、式 3.6

による碎波水深 $h_b$ と碎波波高 $H_b$ 比に至る点で波が碎波することになる。

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.83 \quad (3.6)$$

$$\frac{H_h}{H_0} = K_s \quad (3.7)$$

$H_h$  : 水深  $h$  における波高[m]、 $H_0$  : 沖波高[m]、 $K_s$  : 浅水係数 (式 3.5)

なお、沖波高とは水深が波長の約 1/2 よりも大きい地点の波高で、海底の影響が無視できるとされる深海波の波高となる。全国の観測点における水深は一律ではないため、任意の入射波に対して波浪観測地点が浅海波の領域にある場合は、式 3.7 により観測値を補正して観測点の水深による差異を取り除く必要がある。

## 2) 潮位変化の影響

潮汐現象として月と太陽の起潮力により規則的な海面変化（天文潮）が起こるほか、気温・水温の変化や気圧の変化等によっても水位が変化（気象潮）する。（5.2.2 項で詳述）我が国沿岸の天文潮による潮位変化は数十 cm から数 m 程度で、これに台風や高潮による気象潮により数 m 程度まで海面が

### 4) 海浜

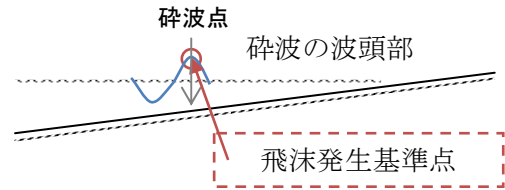


図 3.2 海浜の場合の飛沫発生基準点

変動することが起こりえる。数  $m$  の海面変動が起これば砕波点も大きく異なるため、これに対応するため海面変動に対する飛沫発生基準点の変化をモデル化する必要がある。

変動をモデル化するためには基準となる海面を決定する必要であり、これを東京湾平均海面 (T.M.S.L.) とする。T.M.S.L.は潮位変化や陸上高さの基準面として用いられている基準である。図 3.3 に T.M.S.L.から  $\pm y_s$  の海面変動に対する飛沫発生基準点の変化の概念図を示す。図 3.3 上図は障害物設置海岸の例で、同海岸における飛沫発生基準点は水平方向への変化はなく上下方向にのみ変動する。一方、図 3.3 下図の海浜においては海面変化により汀線が移動し、上下方向とともに水平方向にも飛沫発生基準点変化する。海浜においては T.M.S.L.海面と陸地の接点を原点とし飛沫発生基準点の変化を示した。

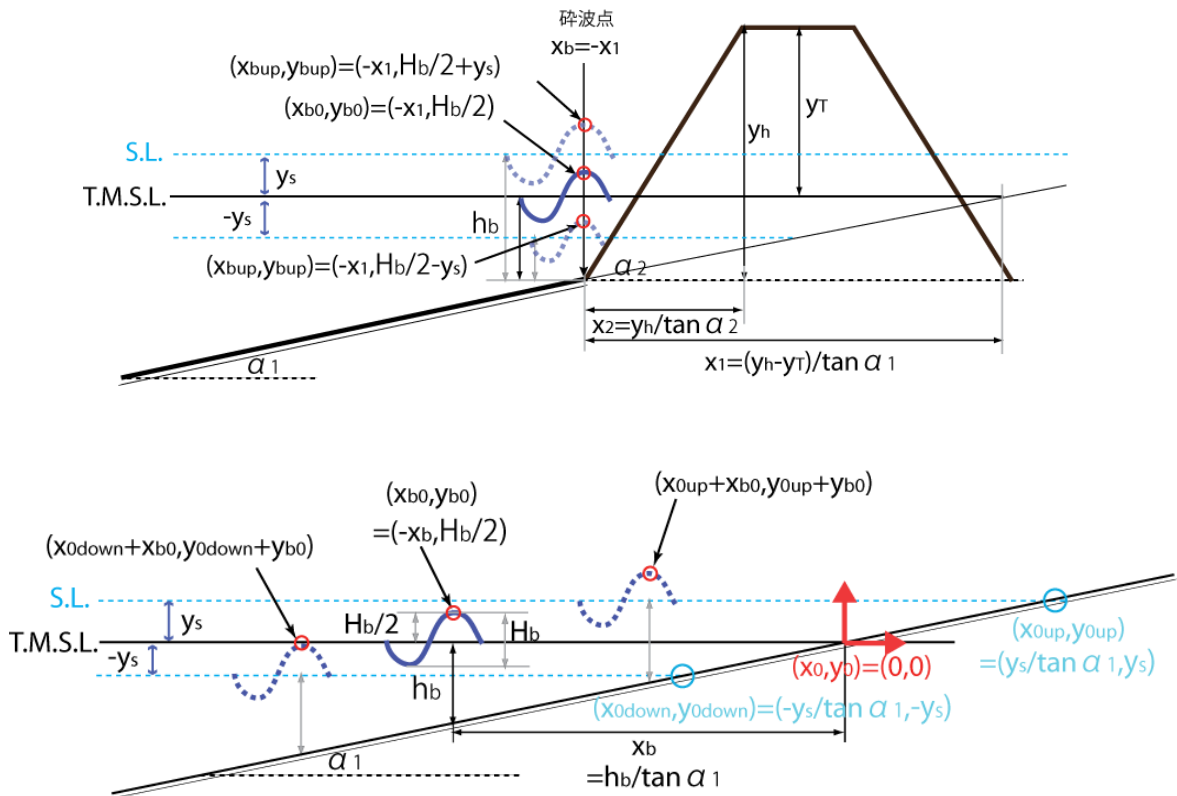


図 3.3 潮汐現象による飛沫発生基準点の変化  
上) 波浪障害海岸 下) 海浜

### 3.2.2 海水飛沫発生基準点における飛沫径の個数濃度分布モデル

#### 1) モデル概要

海水飛沫の発生過程は、前項で定義した飛沫発生基準点に砕波時に飛沫が発生し、それが鉛直分布するとしてモデル化する。飛沫発生基準点に発生する総飛沫個数を $\theta_{\text{total}}$ とし、総飛沫個数は砕波時の波のエネルギーを表す波高の関数として式 3.8 で仮定する。

$$\theta_{\text{total}} = \delta \cdot \theta_0 \cdot f(H_b) \cdot (1/T) \quad (3.8)$$

$\theta_{\text{total}}$  : 発生総飛沫個数、飛沫発生基準点における総飛沫個数濃度[個/m<sup>3</sup>/sec]

$\delta$  : 飛沫発生場に関する係数、 $\theta_0$  : 基準発生飛沫個数 [個/m<sup>3</sup>]、 $T$  : 周期 [sec]

$f(H_b)$  :  $H_b$  の関数、 $f(H_b) = C \cdot H_b$ 、 $H_b$  : 砕波波高[m]で本論文では $C = 1$ とする。

なお、式 3.8 は周期で除することで秒の時間単位となる。

$\delta$ は飛沫の発生個数を決定する無次元の定数で、飛沫発生場の状況を発生飛沫個数に反映する係数と定義する。本論文においては、飛沫発生場として海浜と障害物設置海岸に分け、海浜で7、波浪障害海岸で1とした。また、基準発生飛沫個数は $\theta_0 = 1.0 \times 10^4$ と仮定する。 $\delta$ ならびに $\theta_0$ の検討は本項 3)にて詳述する。

飛沫発生基準点に発生する飛沫は一様粒径ではなく、さまざまな粒径の飛沫が発生し、その飛沫毎の発生時の打ち上げ高さと風の作用により輸送過程が決定する。このため、海水飛沫の発生と輸送のモデル化において飛沫の粒径分布を仮定することが必要となる。本論文では飛沫径分布を $f(d)$ とし、これを指数関数として式 3.9 により仮定する。海洋で発生する飛沫の粒径分布に関する既往研究としては定常状態の海上での観測された小さな粒径飛沫の観測例は多くあるものの、海岸で発生する比較的大きな飛沫径分布に関する実測例は見当たらない。このため後述する Koga ら<sup>3.3)</sup>や松永ら<sup>3.4)</sup>の風洞水路実験による結果を参考に指数分布と仮定した。これについては本項 2)で詳述する。

$$f(d) = \frac{1}{d_a} \exp\left(-\frac{1}{d_a} \cdot d\right) \quad (3.9)$$

$f(d)$  : 飛沫発生基準点における飛沫個数濃度の分布関数

$d_a$  : 平均飛沫直径[m]、 $d$  : 対象飛沫直径[m]

式 3.9 中で $\frac{1}{d_a} = \lambda$ とおいた $f(d) = \lambda \exp(-\lambda \cdot d)$ は指数分布の確率密度関数の形であり、 $d_a$ を平均飛沫直径と定義するのは確率密度関数の平均が $1/\lambda$ となるためである（分散は $1/\lambda^2$ ）。

平均飛沫直径 $d_a$ は飛沫発生場により異なるとし、本論文においては海浜では $d_a = 50\mu\text{m}$ 、波浪障害海岸では $d_a = 400\mu\text{m}$ と仮定する。平均飛沫直径 $d_a$ と飛沫発生量の関係として本項 3)にて詳細検討を行う。

なお、任意直径 $d_i$ の発生飛沫個数濃度 $\theta_{d_i\text{-total}}$ は式 3.10 の通り、微小直径範囲 $\Delta d$ の積分値として得られる。なお、具体的な計算は飛沫直径範囲を  $10\mu\text{m}$  から  $5000\mu\text{m}$  とし、 $\Delta d = 10\mu\text{m}$ で積分を行う。

$$\theta_{d_i\text{-total}} = \theta_{\text{total}} \cdot \frac{\int_{d_i - \frac{\Delta d}{2}}^{d_i + \frac{\Delta d}{2}} \frac{1}{d_a} \exp\left(-\frac{1}{d_a} d\right) dd}{\int_{d=0}^{\infty} \frac{1}{d_a} \exp\left(-\frac{1}{d_a} d\right) dd} \quad (3.10)$$

式 3.9 と 3.10 の関係を図 3.4 に示す。

なお、検討する空間は、海から陸方向に水平方向、海から上空に鉛直方向、汀線方向に奥行きとし



て、奥行き 1m における空間と定義する。

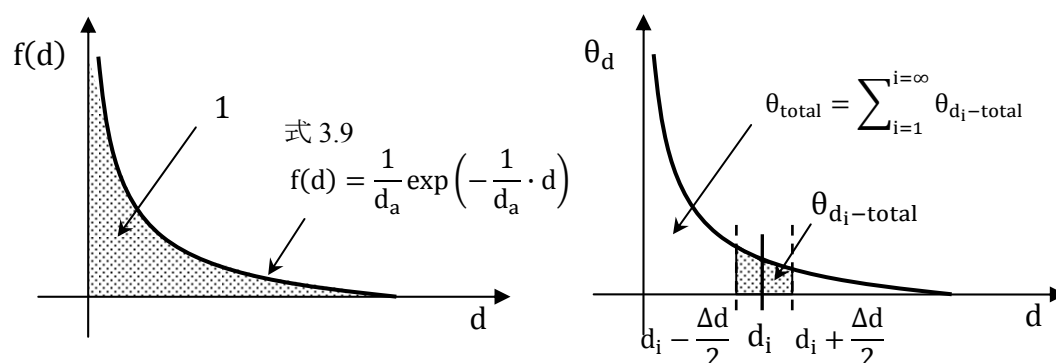


図 3.4 式 3.9 と 3.10 概念図

## 2) 飛沫径分布の検討

海洋物理の分野において空気中の飛沫径分布は多くの実測が報告されている<sup>3.5)</sup>ものの、数百  $\mu\text{m}$  までの小さな飛沫を対象とする観測例が多数でしぶきから直接発生する飛沫のように大きな飛沫の観測例は見当たらない。また、構造物の塩害劣化に対する検討を目的とした既往研究において飛沫径分布を検討した例は少なく、筆者の調べる限りスパキット<sup>3.6)</sup>が直径 1~300 $\mu\text{m}$  の半円形で分布形を仮定したものに限られる。

このように実海岸における飛沫径分布に関する検討資料が得られないため、式 3.9 のモデル化に際して Koga ら<sup>3.12)</sup>の実験結果を参考にした。Koga らは風洞水路（図 3.5）内で発生させた風波が碎波する際に発生する飛沫を、飛沫径クラス  $3.5 < \log m < 8.0$ （直径約 55 から 2560 $\mu\text{m}$ ）毎に鉛直方向の飛沫個数をカウントし、その結果を報告している。

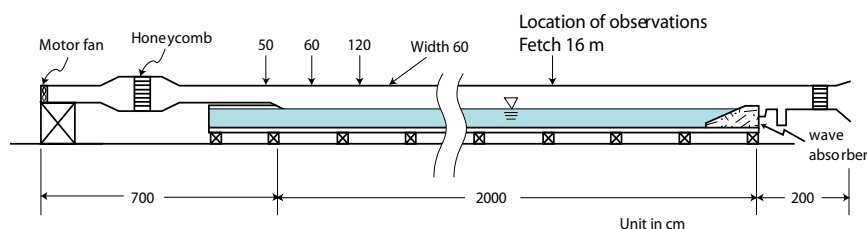


図 3.5 風洞水路の概要

具体的には、風洞内代表風速 14、15、16m/s 時に吹走距離 16m 地点において濾紙またはマグネシウム煙で被覆したスライドガラスに飛沫を捕捉し、飛沫径と捕集痕の大きさの関係をあらかじめ調べた上で、時間当たり単位平面に捕集される飛沫数をカウントした。実験結果を図 3.6 に示す。

この結果より、任意高さにおける飛沫径の個数濃度分布は指数分布で近似され、例として図 3.7 に代表風速 14m 時の高さ 11、15、19cm における単位体積あたりの飛沫個数の分布を示した。なお、図 3.6 の実験より直接得られるのは、捕捉面あたりにのこる飛沫クラス毎の飛沫個数であり、流速  $F$  [個/cm<sup>2</sup>/sec]である。これを個数濃度  $\theta$  [個/cm<sup>3</sup>]とするには流速を各高さ風速で割ればよく次式による。

$$\theta = F/U \quad (3.10)$$

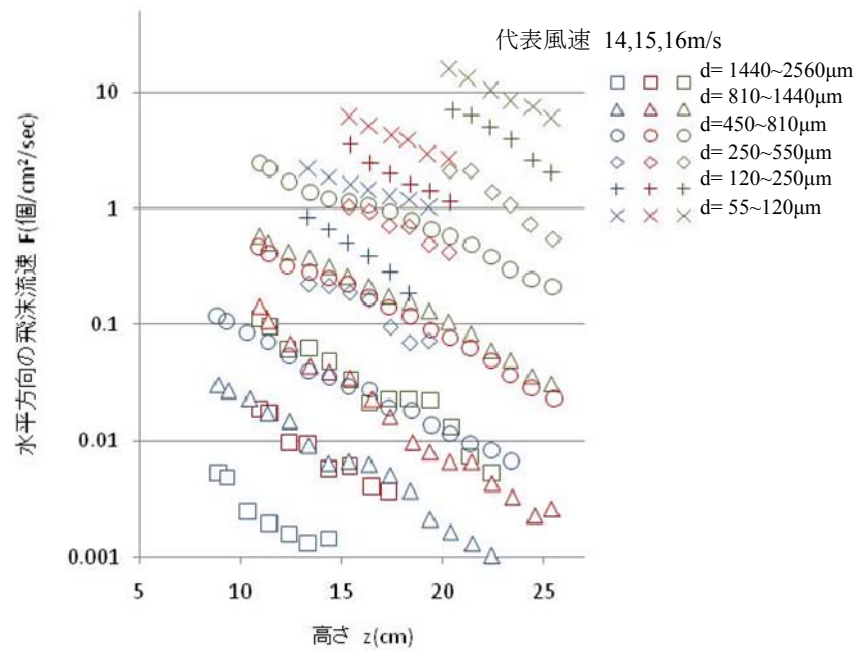


図 3.6 水平方向の飛沫流速の鉛直分布

図 3.7 より飛沫直径が小さいほど飛沫個数濃度が大きく、直径の増大に従い個数濃度は急激に小さくなる。また、測定地点における有義波高は約 7.5cm であるが、波頭に近づくほど飛沫個数が多く、鉛直方向に飛沫個数濃度が減少することが確認される。なお、同様の実験が松永ら<sup>3.4)</sup>によっても行われ、飛沫径に対する個数濃度が指数分布の形であることが報告されている。

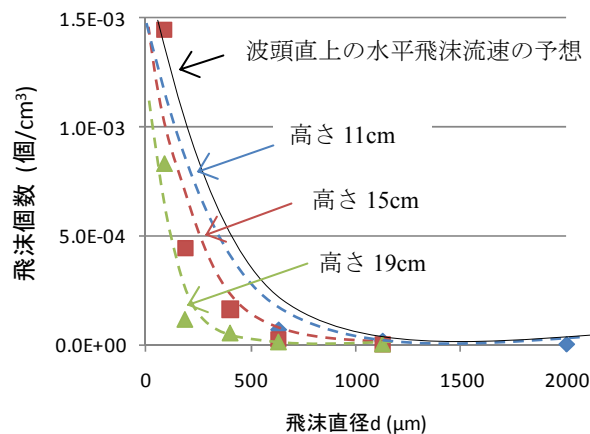


図 3.7 任意高さにおける飛沫径毎の個数濃度

\*図 3.6 より高さ 11cm 地点風速 11.4m/s、高さ 15cm 地点 12.3m/s、高さ 15cm 地点 13.2m/s として算定

### 3) 海水飛沫発生に関する定数、係数値の検討

以上に述べた海水飛沫の発生モデルは、式 3.8 を構成する発生飛沫個数の決定係数 $\delta$ と基準発生飛沫個数 $\theta_0$ 、式 3.9 を構成する平均飛沫直径 $d_a$ の決定が重要となる。本論文においては第 6 章で詳述する既往研究による現地計測結果との比較検討により、 $\theta_0 = 1.0 \times 10^4$  [個/m<sup>2</sup>]で一定とし、 $\delta$ と $d_a$ を飛沫発生場の種類によって異なる定数とした。具体的には、海浜では $\delta = 7, d_a = 50\mu\text{m}$ 、波浪障害海岸では $\delta = 1, d_a = 400\mu\text{m}$ と仮定した。

海浜と波浪障害海岸では砕波の形態が異なり、海浜では海底の影響により浅水変形し波頭から次第に波が崩れていく。一方、障害物に入射波が衝突して砕波する場合には、波が崩れるというよりも打ち上げられる作用が大きいことが目視観測からも明らかである。このように、砕波状態が異なることで発生飛沫粒径幅が異なることが推測され、目視観測より海浜砕波による波の崩れにより発生した飛



沫径は、障害物へ波が衝突した際に発生する飛沫径よりも小さい飛沫群が発生していると考えられる。これより飛沫発生場毎に平均飛沫直径 $d_a$ を仮定した。一方、例えば $1\text{cm}^3$ の水塊が分裂し、飛沫となる場合、生成する飛沫径が小さいほうが発生飛沫個数が多くなる。このような平均飛沫直径差による発生個数への影響を発生飛沫個数の決定係数 $\delta$ に現れる。

図 3.8 に $H_b = 2.5\text{m}$ 、 $T = 7\text{sec}$ 、 $\theta_0 = 1.0 \times 10^4$ として、飛沫発生場が海浜の場合 $\delta = 7, d_a = 50\mu\text{m}$ 、障害物設置海岸の場合 $\delta = 1, d_a = 400\mu\text{m}$ とした飛沫発生基準点上の発生飛沫個数濃度 $\theta_{di-total}$ の分布を、図 3.9 に図 3.8 の個数分布を飛沫量に換算した場合の分布を示す。式 3.8 より飛沫の総個数濃度 $\theta_{total}$ は海浜で $2.5 \times 10^4$  [個/ $\text{m}^2/\text{sec}$ ]、波浪障害海岸で $3.6 \times 10^3$  [個/ $\text{m}^2/\text{sec}$ ]と 7 倍の差があるが、図 3.9 の発生総飛沫量としては海浜で $1.0 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}^3/\text{sec}$ 、波浪障害海岸で $7.3 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}^3/\text{sec}$ で約 70 倍の波浪障害海岸での飛沫量が海浜海岸を上回る。

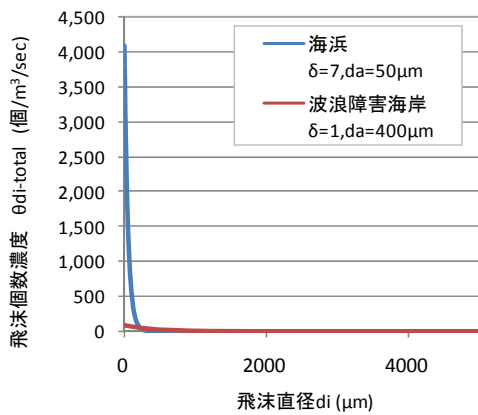


図 3.8 海浜と障害物設置海岸の発生飛沫個数濃度分布の比較

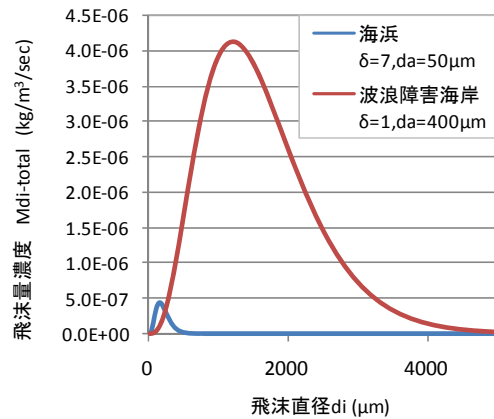


図 3.9 海浜と障害物設置海岸の発生飛沫量の比較

\* 図 3.8、3.9 ともに $H_b = 2.5\text{m}$ 、 $T = 7\text{sec}$ 、 $\theta_0 = 1.0 \times 10^4$ として算定

### 3.2.3 海水飛沫発生基準点における飛沫個数濃度の鉛直分布モデル

#### 1) モデル概要

飛沫発生基準点において発生した飛沫は発生と同時に鉛直方向へ分布すると仮定する。鉛直分布を式 3.11 とし、これを用いて任意飛沫直径任意高さにおける飛沫個数濃度 $\theta_{di,z_j}$ を式 3.12 により算出する。飛沫の鉛直分布を式 3.11 の指数関数とするのは、実測による塩分量の鉛直分布が指数関数を示す<sup>3.7)</sup>とともに、飛沫の落下速度と鉛直拡散の釣り合いの結果として指数関数の鉛直分布となることによる<sup>3.8)</sup>。このため多くの研究者により飛沫個数または塩分量の鉛直分布は指数関数により表されている<sup>3.9)3.10)</sup>。

$$f(z) = \frac{1}{z_a} \exp\left(-\frac{1}{z_a} \cdot z\right) \quad (3.11)$$

$z_a$  : 飛沫の鉛直分布に対する平均高さ[m]

$z$  : 飛沫発生基準点からの高さ[m]

$$\theta_{d_i, z_j} = \theta_{d_i-total} \cdot \frac{\int_{z=z_j-\frac{\Delta z}{2}}^{z=z_j+\frac{\Delta z}{2}} \frac{1}{z_a} \exp\left(-\frac{1}{z_a} \cdot z\right) dz}{\int_{z=0}^{z=\infty} \frac{1}{z_a} \exp\left(-\frac{1}{z_a} \cdot z\right) dz} \quad (3.12)$$

$\theta_{d_i, z_j}$  : 飛沫発生基準点上の高さ $z_j$ における直径 $d_i$ の  
飛沫個数濃度 [個/m<sup>3</sup>/sec]

$\theta_{d_i-total}$  : 飛沫発生基準点上に発生する直径 $d_i$ の  
総飛沫個数濃度 [個/m<sup>3</sup>/sec]

また、飛沫個数濃度の鉛直分布に対する平均高さ $z_a$ は、図 3.10 下図の面積が1/2となる高さである。鉛直分布は砕波の際の波高が高いほど高くなるとして、 $z_a$ を砕波波高の関数として次式で仮定する。

$$z_a = \varepsilon \cdot H_b \quad (3.13)$$

$\varepsilon$  : 鉛直分布に対する平均高さ $z_a$ に関する係数

なお、本論文においては海浜においては $\varepsilon = 6$ とし、波浪障害海岸では $\varepsilon = 3$ とする。これは平均飛沫直径 $d_a$ や

発生飛沫個数決定係数 $\delta$ と同様に第 6 章の実験結果を参考に決定し、このため $d_a$ や $\delta$ 、ならびに基準発生飛沫個数 $\theta_0$ との組み合わせとして成立するものである。

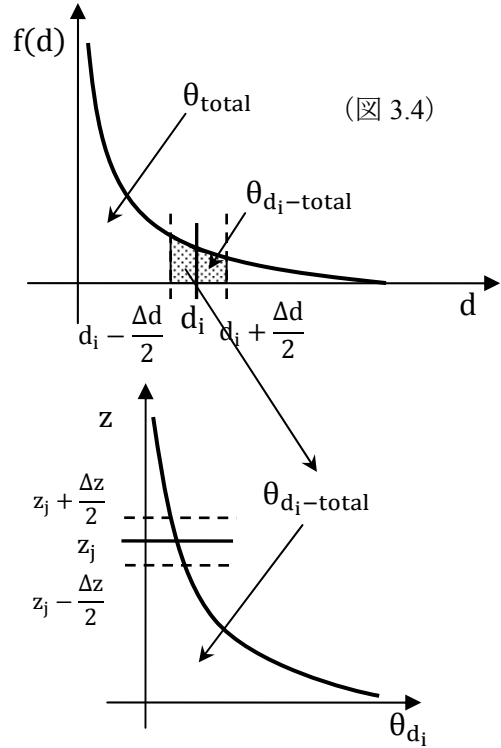


図 3.10 式 3.12 概念図

### 3.2.4 風による移流と飛沫の自由落下による海水飛沫輸送モデル

砕波点上に分布した海水飛沫は風による水平移流と重力による自由落下を行いながら目標地点まで輸送されると仮定する。この際、風速の鉛直分布は一定とし、観測風速は海面または地表面から 10m 高度における風速値を使用する。また、風は地表面に沿って流れると仮定する。

飛沫発生基準点から陸上の目標地点までの距離を $x$ 、風速を $U$ とすると基準点から目標地点までの輸送時間は $x/U$ で求められ、飛沫径 $d_i$ の落下速度を $w_{d_i}$ とすると飛沫は $w_{d_i} \cdot (x/U)$ だけ落下する。よって、目標地点における飛沫発生基準点からの高さ $z_j$ に到達する代表直径 $d_i$ の飛沫個数濃度は次式により算出される。

$$\theta_{d_i, z_j, x} = \theta_{d_i-total} \cdot \int_{z=z_1}^{z=z_2} \frac{1}{z_a} \exp\left[-\frac{1}{z_a} \cdot \left\{z_j + w_{d_i} \left(\frac{x}{U}\right)\right\}\right] dz \quad (3.14)$$

$\theta_{d_i, z_j, x}$  : 目標地点高度に到達する直径 $d_i$ の飛沫個数濃度 [個/m<sup>3</sup>/sec]

$\theta_{d_i-total}$  : 飛沫発生基準点上に周期時間あたりに発生する代表直径 $d_i$ の飛沫個数 [個/m<sup>3</sup>/sec]

$z_a$  : 飛沫の鉛直分布に対する平均高さ[m]、 $z_j$  : 飛沫発生基準点高さから目標点までの高さ[m]

$w_d$  : 飛沫直径 $d$ の終末落下速度 [m/s] (式 2.1)

### 3.3 海上における小粒径飛沫の発生、蓄積と輸送

#### 3.3.1 まえがき

海洋物理分野の研究成果より<sup>3.1)</sup>直径0.1 $\mu\text{m}$ 程度から数百 $\mu\text{m}$ の比較的小さい飛沫は海面の気泡が破裂する際に発生することが報告されている。鳥羽らの研究グループは、これらの海水飛沫（本論文では小粒径飛沫と呼ぶ）の発生過程を風速と波力により発生飛沫個数が決定し、移流拡散状態下（風による移流と乱流拡散、自由落下）で海上を風が吹走することで、その吹走距離に応じて鉛直方向の飛沫量が決定するとしてモデル化した。汀線以降の陸上輸送においては海上と同じ移流拡散に加え、地表物体による飛沫捕捉効果を考慮したモデルを提案している。

本論文では、汀線より数 km 以上離れた一帯、すなわち 2.3 項で分類した海上で発生し陸上に飛来する飛沫はしぶきによる直接発生ではなく、海面気泡の破裂により生じた小粒径飛沫が有意であると仮定し、これら小粒径飛沫による飛来塩化物イオン量の算定は鳥羽らのモデルを参考にする。次項以降に鳥羽モデルによる小粒径飛沫の発生、蓄積と輸送過程を概説する。なお、大粒径飛沫の発生時に仮定した飛沫発生基準点に相当する点を海面と陸地の境界点とし、この点を陸上輸送の出発点とする。

#### 3.3.2 海面における飛沫の発生個数濃度

Iida らは海面における飛沫の発生個数濃度は風と波の作用によるとして次式により表した<sup>3.11)</sup>。

$$\log \theta_c = C_0 \log(u_*^2 / \nu \sigma_p) + C_1 \quad (3.20)$$

$$u_* : \text{空気摩擦速度 [m/s]} \quad u_* = \sqrt{C_{D10}} \cdot U_{10} \quad (3.21)$$

$$C_{D10} : \text{摩擦係数 [m/s]} \quad C_{D10} = (1.0 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-33.8} \quad (3.22)$$

$$U_{10} : \text{高度 10m 平均風速 [m/s]}$$

$$\nu : \text{空気動粘性係数 [m}^2\text{/s]} \quad (13.2 \times 10^{-6} @ 0^\circ\text{C}, 15.02 \times 10^{-6} @ 25^\circ\text{C}, 15.4 \times 10^{-6} @ 25^\circ\text{C})$$

$$\sigma_p : \text{ピーク角周波数 [sec}^{-1}] \quad \sigma_p = 2\pi / 1.05 T_s \quad (3.23)$$

$$T_s : \text{有義波周期 [s]}, w_s : \text{落下速度 [m/s]}$$

式 3.20 は海面高さ  $z_c$  [m] における単位体積あたりの飛沫個数濃度  $\theta_c$  [個/ $\text{cm}^3$ ] を波浪に関する無次元パラメータ  $u_*^2 / \nu \sigma_p$  の関数としてモデル化したものである。式 3.20 とこれを構成する係数値  $C_0$ 、 $C_1$  の決定は海上における飛沫計測結果に対して、鳥羽<sup>3.8)</sup>により提案された飛沫の鉛直分布モデル（式 3.24）により逆解析することで決定された。係数  $C_0$ 、 $C_1$  は飛沫径のクラス毎に決定され、これを表 3.1 にまとめる。なお、 $z_c$  は有義波高  $H_s$  [m] に対して  $z_c = 0.635 H_s$ 、 $u_*^2 / \nu \sigma_p$  は風の応力と波の周期を含む無次元パラメータで海上の風波の崩れる割合や白波の存在率など海面境界過程の記述が可能なパラメータとされる。

$$\log(\theta_{zn} / \theta_{on}) = -m_n^{2/3} U_{10}^{-1} \hat{\chi}(u_*, z) \quad (3.24)$$

表 3.1 小粒径飛沫の発生個数濃度算定式（式 3.20）に対する係数一覧<sup>3.11)</sup>  
\*m:  $10^{12}$ g 単位で表わされる一飛沫中の海塩質量

class	log m 範囲*	直径 d 範囲 $\mu\text{m}$	平均直径 $\mu\text{m}$	$C_0$	$C_1$	落下速度 m/s
1	$1 < \log m < 1.25$	$6.7 < d < 9.8$	8.25	0.79	-3.35	0.0020
2	$1.25 < \log m < 1.75$	$9.8 < d < 14.4$	12.1	0.69	-3.11	0.0045
3	$1.75 < \log m < 2.25$	$14.4 < d < 21.1$	17.7	0.38	-2.71	0.0097
4	$2.25 < \log m < 2.75$	$21.1 < d < 31.0$	26	0.67	-4.16	0.0208
5	$2.75 < \log m < 3.25$	$31.0 < d < 45.6$	38.5	1.0	-5.84	0.0441
6	$3.25 < \log m < 3.75$	$45.6 < d < 66.9$	56.5		-6.14	0.0900
7	$3.75 < \log m < 4.25$	$66.9 < d < 98.1$	82.5		-6.40	0.1764
8	$4.25 < \log m < 4.75$	$98.1 < d < 144.4$	121.2		-6.88	0.3339

図 3.11 は式 3.20 と表 3.1 の係数値より算出した各粒径クラスの代表飛沫の単位体積あたりの飛沫個数濃度であり、図 3.12 は図 3.11 の個数濃度を海水質量に換算したものである。図 3.11 より無次元パラメータの増加とともに飛沫個数が増加し、直径  $100\mu\text{m}$  程度の飛沫に比べ数十  $\mu\text{m}$  の飛沫個数は 10～100 倍多くなる。しかし、飛沫の海水質量としては（図 3.12）は直径  $8\mu\text{m}$  の飛沫中の海塩質量を最小値とし、その後飛沫個数と飛沫体積の兼ね合いで増減するが、概ね飛沫径とともに増加する。この傾向は、無次元パラメータが大きいほど顕著となり、無次元パラメータが大きくなる台風や季節風時には、大きい飛沫が飛来塩化物イオン量を左右することが考えられる。

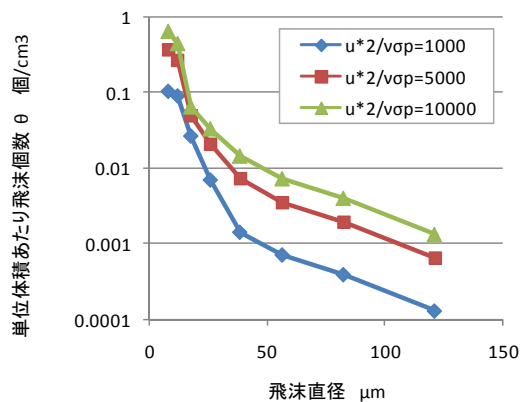


図 3.11 無次元パラメータ  $u_*^2/v\sigma_p$  を変数とした飛沫粒径と飛沫個数の関係

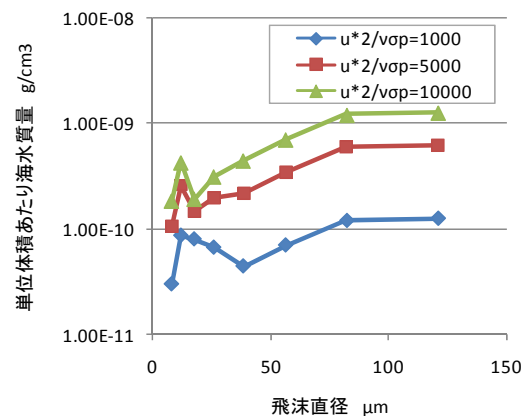


図 3.12 無次元パラメータ  $u_*^2/v\sigma_p$  を変数とした飛沫粒径と海水質量の関係

### 3.3.3 海上における飛沫の鉛直方向への蓄積

#### 1) モデル概要

田中<sup>3,13)</sup>は、海上における波浪が定常状態であれば海面から発生する飛沫個数も定常であり、風速  $U$  による水平移流と飛沫の自由落下（落下速度  $W$ ）と大気中の鉛直( $z$ )拡散が式 3.25 の通りバランスした結果、吹走距離  $x$  [m]（風が海上を吹く距離）における飛沫の鉛直分布が式 3.27 より表されたとした。式 3.26 は式 3.25 に対する境界条件である。

$$U \frac{\partial \theta}{\partial x} = W \frac{\partial \theta}{\partial z} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (x > 0, z > 0) \quad (3.25)$$

$$\theta = 0 \quad (x = 0) \quad U \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (x \rightarrow \infty) \quad D \frac{\partial \theta}{\partial z} = F \quad (z = 0) \quad \theta = 0 \quad (z \rightarrow \infty) \quad (3.26)$$

$$\theta(\xi, \zeta) = \exp(-2\zeta) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) \exp(-2\zeta) - \left(\frac{1}{2} + \zeta + 2\xi\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\xi} \exp\left(-\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right)^2\right) \quad (3.27)$$

$$D : \text{鉛直方向の渦拡散係数 [m}^2/\text{s]} \quad D = k u_* (z + z_0) \quad (3.28)$$

$k$  : カルマン係数 [=0.4]<sup>3,8)</sup>、 $u_*$  : 空気摩擦速度 [m/s]、 $z$  : 海面からの高さ [m]

$$z_0 : \text{粗度定数} \quad z_0 \cong \epsilon/30 \quad (3.29) \quad \epsilon : \text{粗面平均高さ [m]}$$

なお、式 3.27 は個数濃度  $\theta(\xi, \zeta) = \theta/\theta(\infty, 0)$ 、吹走距離  $\xi = W^2 x / 4DU$ 、高度  $\zeta = Wz / 2D$  の無次元数で表わされている。渦拡散係数  $D$  は式 3.28 により高度に対して決定されるが、本論文においては海上における小粒径飛沫の鉛直分布を高度 100m までと仮定し、その中間高度の 50m における渦拡散係数を定数として用いる。

$\theta(\infty, 0)$  は海上を十分吹走し定常に達した海面の個数濃度であり、これを式 3.20 より得られる飛沫クラス毎の個数濃度  $\theta_c$  とすると、無次元変数  $u_*^2 / v \sigma_p$  の波浪条件下における吹走距離  $x$  の地点における鉛直方向の飛沫個数濃度分布  $\theta(x, z)$  は次式で表わされる。

$$\theta(x, z) = \theta_c \times \theta(\xi, \zeta) \quad (3.30)$$

図 3.13 は無次元高度  $\zeta$  と吹走距離  $\xi$  に対する無次元個数濃度の関係を示している。式 3.27 中の無次元高度  $\zeta$  と無次元吹走距離  $\xi$  は落下速度  $W$  の関数となっていることから飛沫粒径毎に個数濃度の増加傾向が異なることがわかる。図 3.13 左図より個数濃度は海面近くから高くなり、無次元吹走距離  $\xi$  が 2 で鉛直方向の飛沫個数濃度がほぼ飽和する。これは海面からの飛沫の供給と自重による落下が釣りあった状態であり、式 3.27 を  $\xi = \infty$  とした場合、 $\theta(\infty, \zeta) = \exp(-2\zeta) = \exp(-\frac{W}{D} z)$  の鉛直一次元の対数分布に近付くことがわかる。

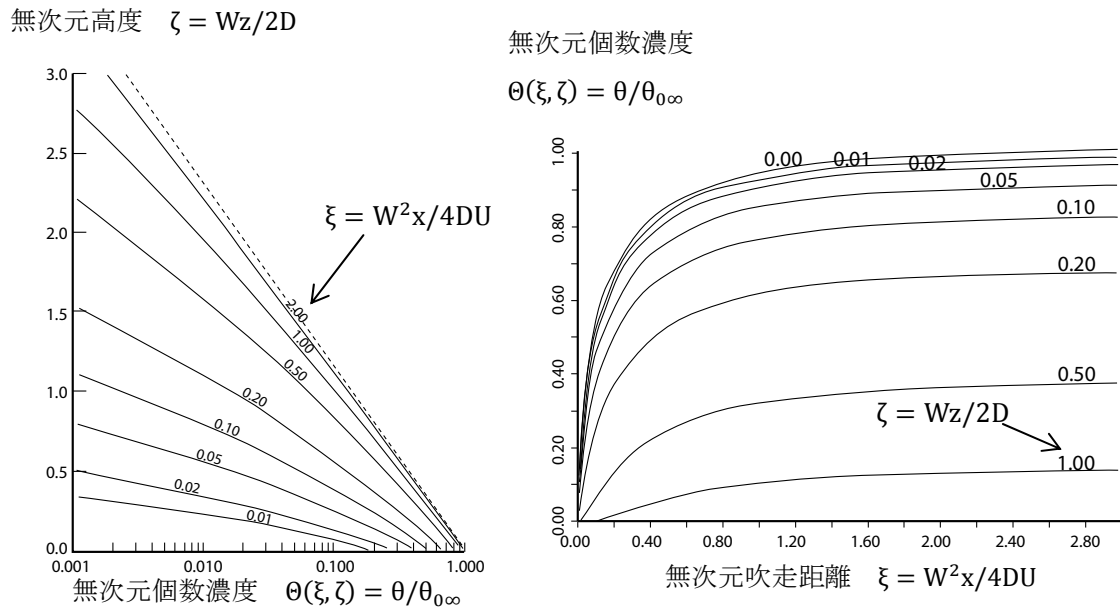


図 3.13 無次元高度（左図）と無次元吹走距離（右図）に対する無次元個数濃度<sup>3.13)</sup>

## 2) 吹走距離の推定方法

鳥羽、田中らは、海上波浪に応じて海面より発生する飛沫個数が決まり、これが吹走距離に応じて大気中の鉛直方向へ蓄積するとして小粒径飛沫の発生過程を表した。このため、小粒径飛沫の発生過程を具体的に計算するには、風が吹き続ける距離である吹走距離、すなわち海上風の時系列の情報が必要となる。

吹走距離とは風が海上を吹いた距離であり、これに対して風が吹き続けた時間を吹走時間という。通常、吹走距離は天気図をもとに推定されるが<sup>3.2)</sup>、この方法で長期、多地点の吹走距離を推定することは困難であるため、本論文では以下の方法で推定した吹走距離を用いることとした。なお、本論文においては海上風の代わりに飛来塩の到達目標地点付近の沿岸における風速、風向値を用いる。

吹走距離の推定に用いる風向、風速データは 5.2.2 に詳述するよう一時間毎の計測値で、風向として北を  $0^\circ$  で  $22.5^\circ$  間隔の 16 方位で記録されたものを用いる。小粒径飛沫の算定に対しては海上において風が継続する（継続風）場合の吹走距離を推定する必要がある、継続風と判断する条件として①海風向からの風である、②一時間毎の風向変化が  $\pm 22.5^\circ$  の範囲にある、の 2 点を満たす場合とした。

吹走距離の推定には 2 種類あり、①任意時間に到達する小粒径飛沫の算定、②一時間以上のある一定期間内に到達する小粒径飛沫の算定を目的とする場合である。

任意時間に到達する小粒径飛沫の算定を目的として吹走距離の推定を行う場合、図 3.14 の手順による。図に示すよう対象地点に対する海風範囲を決定し、小粒径飛沫の算定時刻  $T(i)$  の一時間前  $T(i-1)$  の風向を確認する。 $T(i-1)$  時の風が継続風の条件を満たす場合、すなわち海風方向からの風でかつ  $T(i)$  時の風向から  $\pm 22.5^\circ$  の風向の風である場合には時刻  $T(i)$  には少なくとも一時間海上を吹走した風が到達していると考え、 $T(i-1)$  の風がこの条件を満たさないならば吹走距離は 0 となる。継続風の条件を満たす限り一時間毎過去にさかのぼることにより、対象時刻  $T(i)$  に到達する継続風の継続時間が決定し、継続時間内の平均風速を乗ずることで吹走距離を推定する。

一方、一定期間内に到達する小粒径飛沫を算定するために用いる吹走距離は、期間中に継続風の条件を満たす継続時間を上記の方法で全て抜き出し、各々に継続時間中の平均風速を乗じることによって吹走距離を算出する。

なお、降水量データも風向、風速と同様に得られており、継続風であっても降水があれば、その際小粒径飛沫の発生と蓄積はリセットされるとして吹走距離を算定する。

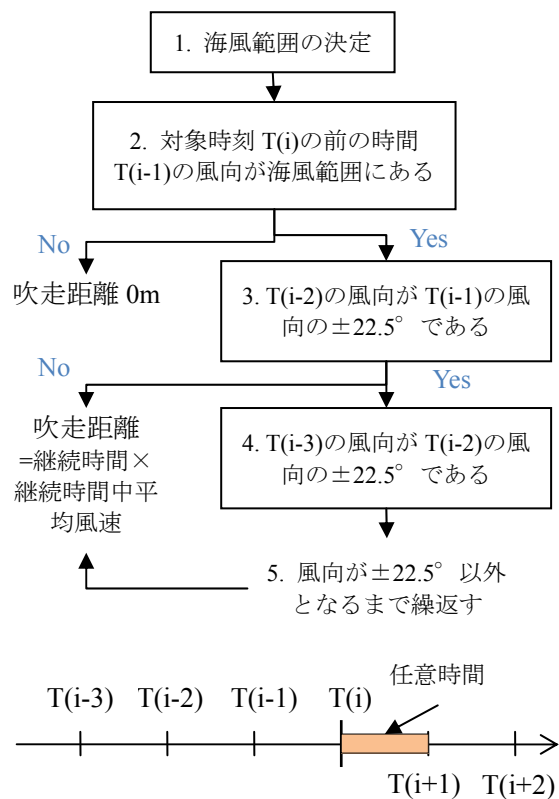


図 3.14 任意時間に到達する小粒径飛沫算定のための吹走距離の推定方法

### 3.3.4 海水飛沫の陸上輸送<sup>3.14)</sup>

前項までで飛沫の供給がなされる終点での海塩飛沫の鉛直分布が飛沫径クラス毎に算出される。本論文では、飛沫供給の終点を汀線と仮定し、これを基準として田中らの陸上への輸送モデルを以下のとおり参考とする。

基準線から陸上側（風下方向）への海塩飛沫の輸送は前項同様の移流拡散方程式で表わされる。田中は、風速  $U$  [m/s]、鉛直渦拡散係数  $D$  [ $m^2/s$ ]、飛沫の落下速度  $W$  [m/s]を一定とした場合、定常状態における移流拡散方程式、式 3.30 に対して式 3.31 の境界条件の解を式 3.32 として提示した。式 3.31 中の境界条件には陸上物体により飛沫が捕捉される効果が含まれており、 $\lambda$ を捕捉係数として、風速と地表付近の粒子個数濃度に比例するとして  $D \frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda U \theta(X, 0)$ とした。なお、田中らの現場計測によれば捕捉係数  $\lambda = 3 \times 10^{-2}$ 程度とされており、この係数検討の際の計測は新潟県直江津付近の汀線から 40km までの間において国道 18 号沿いに 5 つの測点で行われた。計測は道路より多少離れた人家の影響が少ない田園中や川沿いとされる<sup>3.15)</sup>。

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} = W \frac{\partial \theta}{\partial z} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (X > 0, z > 0) \quad (3.30)$$

$$\theta = \theta_{00} \exp\left(-\frac{W}{D} z\right) \quad (X = 0) \quad D \frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda U \theta \quad (z = 0) \quad \theta \rightarrow 0 \quad (z \rightarrow \infty) \quad (3.31)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) \exp(-2\zeta) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) + \left(1 + \frac{1}{2\gamma}\right) \exp[2\gamma\{\zeta + 2(1 + \gamma)\xi\}] \operatorname{erfc}\left[\left(1 + 2\gamma\right)\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right] \quad (3.32)$$

無次元個数濃度 $\Theta = \theta/\theta_{00}$ 、距離 $\xi = W^2 X/4DU$ 、高度 $\zeta = Wz/2D$ 、捕捉落下比 $\gamma = \lambda u/W$ 、 $\theta_{00}$ は  $X=0$ 、 $z=0$  のときの飛沫個数濃度であり、前項で算出される汀線における海面高さ。汀線から飛沫が飛来する距離  $X$  [m]は、前項の吹走距離  $x$  と区別するため大文字としている。

以上より、目標地点高度に到達する飛沫個数濃度は次式より算出される。

$$\theta(X, z) = \theta_{00} \times \Theta \quad (3.33)$$



## 4 章 飛来塩化物イオン量算定モデルⅡ：海水飛沫の対象表面への付着

### 4.1 まえがき

前章までに大、小海水飛沫の発生から目標地点までの輸送過程のモデル化を行った。この結果、目標地点高度に到達する飛沫個数濃度が得られ、これに風速値を乗じることで目標表面に対する流速を時間あたりの付着量とみなす。また、この流速量は対象表面垂直方向から風が吹くことを想定しており、これ以外の方向から風が吹く場合には流速の補正が必要となる。

一方、海水飛沫を含む粒子の付着理論としては van der Waals 力や静電気力、吸着液体飛沫による表面張力の影響があるとされる<sup>4,1)</sup>が、塩害のように海洋から風に乗って構造物に海水飛沫が到達する場合、飛沫の付着は表面への衝突過程に大きく左右されると考えられる。海水飛沫がコンクリートをはじめとする構造物表面に衝突すれば、飛沫や構造物表面の水分状況にもよるが、はね返り等による表面からの離脱は少ないであろう。しかしながら、飛沫径が極端に小さい場合、構造物周辺の風の流れに追従し飛沫が構造物に衝突しないことが考えられる。(質量の大きな飛沫ほど慣性力により衝突する。) このことから、海水飛沫の付着は慣性衝突に左右されると考えられる。慣性衝突しない飛沫は小さな飛沫であるため、飛沫発生地点付近の塩化物イオン量に対して比較的影響が小さいものの、小粒径飛沫の影響が大きくなる発生地点遠方ほど衝突効率に対する検討が必要となる可能性がある。本論文においては飛沫の衝突効率の検討まで至っておらず今後の検討課題とする。

### 4.2 海水飛沫個数濃度から塩化物イオン流速への変換

構造物表面への付着過程を、飛沫個数濃度から構造物表面を時間あたりに通過する流速への変換として表す。大、小粒径飛沫とも基本的な考え方は同じであるがモデルの説明過程が異なるため別々にまとめる。

#### 4.2.1 大粒径飛沫モデルの場合

まず、飛沫個数濃度を塩化物イオン量へ変換する。直径 $d_i$ の飛沫に含まれる塩化物イオン量は次式より算出される。

$$M_{d_i} = V_{d_i} \cdot \rho_s \cdot (Cl/100) \quad (4.1)$$

$M_{d_i}$  : 直径 $d_i$ [m]の飛沫に含まれる塩化物イオン量[kg/個]、 $V_d$  : 直径 $d_i$ の飛沫体積 $[V_{d_i} = \frac{\pi d_i^3}{6}, m^3]$ 、

$\rho_s$  : 海水密度[kg/m<sup>3</sup>]、Cl : 海水塩化物イオン濃度[=1.9%]

式 3.14 より得られる飛沫発生基準点から距離  $x$ 、高さ $z_j$ の地点に到達する直径 $d_i$ の飛沫個数濃度 $\theta_{d_i,z_j,x}$ に飛沫あたりの塩化物イオン量を乗じることで、目標地点高度に到達する塩化物イオン量が次式により得られる。

$$M_{d_i,z_j,x} = \theta_{d_i,z_j,x} \cdot M_{d_i} \quad (4.2)$$

$M_{d_i,z_j,x}$  : 目標地点高度に到達する塩化物イオン量[kg/m<sup>3</sup>/sec]

この $M_{d_i, z_j, x}$ に一秒あたりの風による移動距離  $U$ （風速値）を乗じることによって直径 $d_i$ の飛沫による塩化物イオン流速 $F_{d_i, z_j, x}$ が式 4.3 より得られ、全飛沫径の塩化物イオン流速を和することで目標表面の塩化物イオン流速が得られる。

$$F_{d_i, z_j, x} = M_{d_i, z_j, x} \times U \quad (4.3)$$

$$F_{z_j, x} = \sum_{i=1}^{i=\infty} F_{d_i, z_j, x} \quad (4.4)$$

$F_{d_i, z_j, x}$ ：目標地点高度における水平塩化物イオン流速 [kg/m<sup>2</sup>/sec]、 $U$ ：一秒あたりの風の移動距離 [m]

以上より、飛沫の発生輸送過程を空間体積当たりの濃度としてモデル化し、構造物表面に到達した時点で表面を通過する流速として時間あたりの付着飛来塩化物イオン量を決定した。このモデル化の特徴として、飛沫個数濃度から流速に変換する際に風速値を乗ずるため、付着塩化物イオン量が風速に比例することになる。飛沫の発生が常時あり、発生飛沫個数濃度が定常であれば問題ないが、碎波のたびに飛沫発生とする本モデルにおいては風速が早すぎると飛沫発生が間に合わず到達量が発生量を上回ることが起こりえる。すなわち目標地点高度に到達する飛来塩化物イオン量を過大評価する恐れがある。これに対して、到達飛来塩化物イオン量を風速の関数により減少させる等の対応が考えられるが、本論文においては具体的な解決策をモデルに組み込むに至っておらず、今後の改善項目としている

#### 4.2.2 小粒径飛沫モデルの場合

小粒径飛沫においても式 3.33 より汀線から距離  $X$ 、高さ  $z$  における飛沫個数濃度が算定される。これを構造物表面を通過する流速とするには、大粒径飛沫の場合と同様に個数濃度に風速を乗じればよい。

$$F_d = \{10^6 \cdot \theta(X, z) \cdot M_d\} \times U \quad (4.5)$$

$F_d$ ：塩化物イオン量[kg/m<sup>2</sup>/sec]、 $\theta(X, z)$ ：目標地点高度に到達する飛沫個数濃度 [個/cm<sup>3</sup>]

$M_d$ ：直径 $d$ [m]の飛沫に含まれる塩化物イオン量 [kg/個]、 $U$ ：風速 [m/s]

大粒径飛沫の際と同様に、式 4.5 で得られた任意直径  $d$  の飛沫による塩化物イオン量を飛沫径範囲について求め、和することで小粒径飛沫による全塩化物イオン流速が求められる。

#### 4.3 風向変化に対す流速補正

前項で述べた塩化物イオン流速は、対象構造物表面に対して垂直方向からの流速として定義している。よって、これ以外の風向時には水平塩化物イオン流速の補正が必要となる。

構造物表面に対する垂直方向から $\theta^\circ$ だけ風向がずれた場合に補正後の水平塩化物イオン流速 $F'$ は次式によるとする。

$$F' = F \times \cos \theta \quad (4.6)$$

$F$ ：構造物表面に対して垂直方向から通過する塩化物イオン流速 [kg/m<sup>2</sup>/sec]

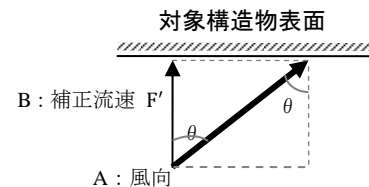


図 4.1 表面垂直方向以外からの風向時の流速補正の概念図

# 5 章 飛来塩化物イオン量算定過程

## 5.1 はじめに

本章では第3, 4章で述べた任意地点高度へ到達する飛来塩化物イオン量の算定過程を示すととも

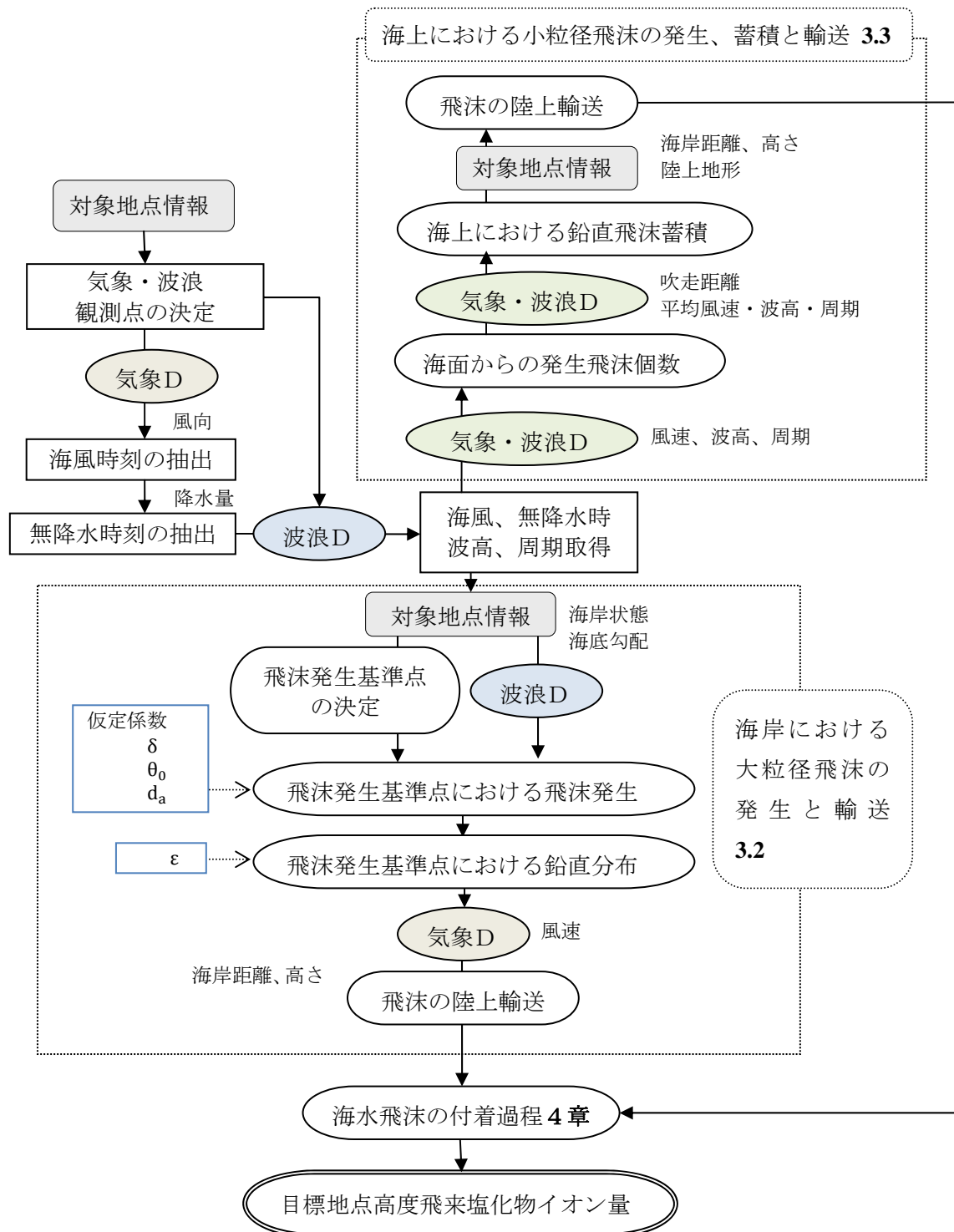


図 5.1 飛来塩化物イオン量算定までの流れ

に、入力データの定義と取得ならびに補正方法についてまとめる。図 5.1 に飛来塩化物イオン量算定の流れを示す。

飛来塩化物イオン量算定の大まかな流れは 1) 入力データの取得、2) 大粒径飛沫による到達飛来塩化物イオン量の算定、3) 小粒径飛沫による到達飛来塩化物イオン量の算定、4) 大、小粒径飛沫の和による飛来塩化物イオン量の決定、から成る。

入力データには 2 種類あり、一つは波浪、気象等の時系列の計測データで、もう一つは対象地点付近の海岸状況、汀線からの距離、高さ、汀線から対象地点まで、または対象地点周辺の地形といった対象地点に関する情報である。次項に各項目の概要と取得、決定方法ならびに補正方法について述べる。

## 5.2 入力データの取得、決定と補正

### 5.2.1 データー一覧

表 5.1 に入力情報の一覧を示し、次項より各情報の取得方法ならびに補正方法について述べる。

表 5.1 飛来塩化物イオン量算定に対する入力情報一覧

		大粒径飛沫	小粒径飛沫
発生過程	波浪情報	波高、周期、潮位	波高、周期
	気象情報	風向、風速、降水量	
	対象海岸情報 ・海岸障害物の場合	海岸状況、海底勾配 斜面勾配、天端高	-
輸送過程	気象情報	風向、風速	
	地理情報	陸上輸送距離	
		基準面（海面 OR 地面）からの高さ	
付着、捕捉過程	気象情報	風向、風速	
	付着対象情報	付着面特性（通過性材 OR NOT）	

### 5.2.2 波浪、気象データ

本論文で提案する飛来塩化物イオン量算定モデルは、波浪または気象に関する入力データを対象期間中の時系列データより一時間毎に取得し、一時間毎の飛来塩化物イオン量を出力することを基本とする。将来的には入力データに対する簡略化またはモデル化を行い、より効率的な算定システムを目指すことも考えられるが、モデルの基礎段階を検討する現時点においては取得が比較的容易で時間感覚としても検討しやすい一時間単位の波浪、気象データを用いることとした。

#### 1) 波高、周期

我が国における波浪データの観測・収集は主に気象庁<sup>5.1)</sup>と国土交通省港湾局<sup>5.2)</sup>においてなされており、沿岸波浪観測においては、気象庁では全国 6 地点（2008 年 4 月現在）、国土交通省港湾局においては全国 54 地点（2008 年 4 月現在）で観測を行っている。両観測とも波高 $H$ と周期 $T$ の観測結果を

有義波として整理しており、本論文における観測地点の波高、周期は有義波波高、周期を使用する。有義波とは、波群中の波高の大きい方から数えて 1/3 の数の波の波高と周期を平均した 1/3 最大波の波高と周期で  $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$  で表わされ、本論文で用いる波浪入力データは有義波を用いる。なお、波浪データの観測タイミングは気象庁と港湾局で異なり、気象庁では毎正時の 25 分前から 5 分前までの 20 分間に収集したデータより波浪解析を行い、港湾局では毎偶数正時の前後 10 分ずつ 20 分間のデータより波浪解析を行う毎偶数時観測と 20 分間の観測を連続して行う連続観測の 2 種類を行っている。

一方、観測波高  $H_{obs}$  を入力データとして用いる際、観測波高を沖波波高  $H_0$  に変換する必要がある。沖波とは水深が波長の約 1/2 よりも大きい地点の波で、海底の影響が無視できるとされる深海波を指す。全国の観測における水深一律ではないため、ある入射波の波高と周期に対して波浪観測地点が浅海波の領域にある場合には観測波高はすでに海底の影響を受けて波形変形したものであるためこれを補正して観測点による差異を取り除く必要がある。海底の影響を受けて波高が変化することを浅水変形といい、観測波高が浅海域にある場合の観測波高と沖波波高の関係は式 5.1 により表わされ、浅水係数  $K_s$  は式 5.2 により算出される。

$$\frac{H_{obs}}{H_0} = K_s \quad (5.1)$$

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh kh + kh(1 - \tanh^2 kh)}} \quad (5.2)$$

$k$  : 波数 =  $2\pi/L$ 、 $h$  : 観測点水深 [m]

$L$  : 沖波波長 =  $1.56 \cdot T_{1/3}^2$  [m]、 $T_{1/3}$  : 有義波周期 [sec]

なお、本研究においては観測波高を沖波高に変換したものを入力波高として碎波波高を算定するが、通常碎波波高は換算沖波波高  $H_0'$  をもとに算定されるのが一般的である。参考までに換算沖波波高は次式により算定される。

$$H_0' = K_r K_d K_f H_0 \quad (5.3)$$

$H_0$  : 沖波、 $K_r$  : 屈折係数、 $K_d$  : 回折係数、 $K_f$  : 海底摩擦による波高減少率

なお、屈折とは、水深が 1/2 波長よりも岸側の浅海域に入ると海底の影響を受けて波が曲がる現象で、屈折の影響で波が収れん・発散し波高が変化する。一方、回折とは波が防波堤などの障害物の遮蔽域へまわり込む現象である。実海岸における屈折、回折状況は波向情報を必要とし、海岸状況や入射波に応じた詳細な検討が必要である。また、海底摩擦による波浪減衰が有意となるのは海底勾配が 1/300 程度以下と緩やかな場合で、これに対して我が国の海底勾配は比較的急であるため、実用的には海底摩擦による波浪減衰を無視することが多いとされる<sup>5.3)</sup>。

## 2) 風向、風速

本論文では、飛来塩化物イオンは海から陸方向への風により海上から陸上の目標地点へ輸送されると仮定しているため、陸から海へ向けて風が吹く場合には飛来塩化物イオンの輸送は行われな

い。風向、風速データは現地計測値が得られない場合には気象庁の観測データより一時間毎の値を用いることとする。風向とは風が吹いてくる方向であり、北を基準に 16 方位で表され、風速は単位時間に大気が移動した距離として観測されている。風向、風速は正時前 10 分間の平均風向、風速であり、

例えば 15 時の風向、風速は 14 時 50 分から 15 時 00 分の 10 分間に観測されている。気象庁による風向、風速観測は、全国約 150 ヲ所の地上気象観測、約 850 ヲ所の地域気象観測（アメダス）にて実施されており、ホームページ上<sup>5.1)</sup>より過去のデータの閲覧が可能である。

任意目標地点の風向、風速は近隣の観測データより得ることとするが、観測点を選択するさいには観測点の高さならびに周辺地形を考慮する必要がある。通常風速の鉛直分布は一様ではなく、地表付近では地表物体の影響で風速が弱まり、高さが上がるほど風は強まる。高さで風速変化は通常対数もしくはべき法則（式 5.4<sup>5.4)</sup>）で表わされる。本研究においては、塩化物イオン算定モデルにおいては風速の鉛直分布を一定と単純化して検討しているが、入力値となる風速値については観測点による誤差を検討するため高さによる風速の影響を考慮とする。

$$\frac{U}{U_0} = \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.4)$$

ここで  $U$ 、 $U_0$  は地面からの高さ  $z$ 、 $z_0$  における風速を表し、係数  $n$  は地表面の状態により表 5.2 のような値が用いられている。

気象庁の風速観測は、平らで開けた場所において地上 10m の高さで測定することを標準としているが、こうした空間の確保が困難な場合、例えば市街地内の観測においては、周辺建物で最も高い建物の 1.3～1.5 倍以上の高さに設置する等の対策が取られている。

一方、風が地表面の影響を受けることから考えられるように、海上から内陸に吹く風は地形や地上物体の影響で弱められる。文献 5.3 には海上風と内陸風に対する米国で使用される参考値として表 5.3 の比率を紹介している。

以上より、任意地点の風速を周囲の観測データより推測するには、水平方向ならびに鉛直方向の補正の要否に関する検討が必要で、また風向については周辺地形や海岸線形状からの検討が必要である。

表 5.2 風速のべき法則に関する係数<sup>5.5)</sup>

地表面の状態	n
平野、草原	7
森林、高い建物のない市街地 住宅街	4
大都市郊外周辺、市街地	3
大都市中心付近	2

表 5.3 海上風速に対する観測風速の比率<sup>5.3)</sup>

\*風速は海面上または地面上約 10m の値

風の方向	観測地点	比
海から陸	沖合 3～5 km	1.0
	海岸	0.9
	8～16 km 内陸	0.7
陸から海	海岸	0.7
	沖合 16 km	1.0

### 3) 降水量

風向、風速同様に降水量についても気象庁よりデータの取得が可能である。気象庁による降水量は、例えば 12 時の降水量であれば、11 時 00 分から 12 時 00 分までの間に観測された降水量の合計で、全国約 150 ヶ所の地上気象観測所に加え、約 1300 ヶ所の地域気象観測（アメダス）にて観測が行われている。なお、気象庁データベース上の表記方法として、地上気象観測所の場合「--」は無降雨を、「0.0」で降水量が 0.5mm に満たない場合を示し、一方アメダスでは「0」は全く降水がなかったか、降水量が 1mm に満たない場合とされている。本論文では、降水量に関わらず、降水時には飛来塩化物イオンの発生、輸送ともに停止すると仮定したが、アメダスの降水量データを用いる場合は、無降水か 1mm 未満の降水量か判断できないため、降水量の判断としては地上気象観測所、アメダスともに 0 または 0.0 でない降水がある場合に降水ありのため該当時刻の飛来塩化物イオン量を 0 とした。

本来飛来塩化物イオン量の降水による減少率は降水量により異なると考えられ、微量の降水であれば飛沫の発生、輸送に対して影響が少ないと考えたためである。なお、降水量の目安としては、1 時間雨量 3mm 未満で弱い雨、もしくは小雨程度とされる。

### 4) 潮位または海面変動<sup>5.3)</sup>

海面は一日 1 回または 2 回昇降を繰り返し、この現象を潮汐現象と呼ぶ。日常的な海面変動は月と太陽の引力と地球の公転による遠心力による潮汐現象（天文潮）によるものであるが、これ以外に台風や風を原因とする気象潮の影響を受ける。

天文潮による潮差としては、我が国沿岸の最大潮差が日本海沿岸で 0.15～0.25m、太平洋沿岸で 1.0～1.5m、瀬戸内海沿岸で 2.0～3.0m、有明海沿岸で 2.5～4.5m 程度とされる。また、一回の海面昇降の差である潮差の他に、潮差に対する平均水面も場所または時期により変化する。平均水面は差は 0.2～0.4m 程度とされ、夏に高く冬に低く、北日本で小さく西日本で大きい。

平常時の潮汐現象が天文潮として予測される潮位変化にほぼ従う一方で、気象潮により潮位の異常上昇がしばしば発生する。近年顕著な高潮例として 1959 年の伊勢湾台風時には名古屋港の平均満潮位 T.P.1.2m のところ最高潮位 T.P.3.89m まで上昇した。

以上より、潮汐現象により数十 cm から数 m の海面昇降が発生する。海面高さが数 m のオーダーで変化すると、例えば海面 1m の上昇で海岸勾配 1/10 で 10m、1/100 で 100m 海岸線が陸側に移動することとなり、特に海岸付近に到達する飛来塩化物イオン量に対して無視できない影響を与えられらる。

## 5.2.3 対象地点情報

対象構造物に到達する飛来塩化物イオン量を算定するためには、海水飛沫の発生点と最終到達点との位置関係を明確にする必要があり、飛沫の輸送過程は風の流れの定義に左右される。本項では、海浜と波浪障害海岸に対する海水飛沫発生点から目標地点までの距離と高さについての定義を述べる。

### 1) 海岸地形に対する風の流れの仮定

本論文においては海岸状況を海浜と波浪障害海岸の二分類して飛沫発生基準点を定義した。一方、風の流れは基本的に地面に対して水平に流れとし、風速の鉛直分布は一樣であると仮定する。（本来風速の鉛直分布は対数またはべき数で表わされる）しかしながら、波浪障害海岸においては障害物

後方の地形が複雑であるため図 5.2 に示すように、海面から障害物天端までは海面と障害物斜面に水平に風が移動し、天端以降そのまま水平に風が流れると仮定する。

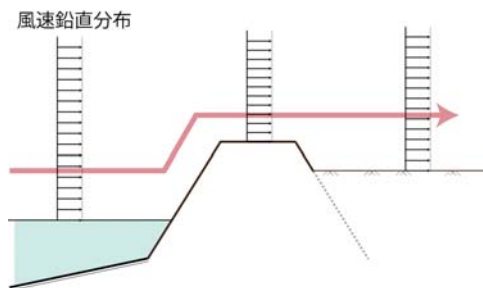


図 5.2 波浪障害海岸における風の流れ

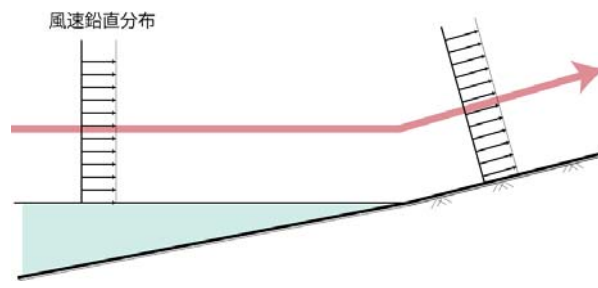


図 5.3 海浜における風の流れ

## 2) 輸送距離の補正と算定

飛沫発生地点と最終到達地点の間には海と陸の両方が存在し、陸上における飛距離の基準として「最短海岸距離」を用いる。最短海岸距離は、汀線から直角方向に目標地点までを結ぶ距離のうち最短のものと定義する。また、風向が変化すると汀線から目標地点までの飛距離が変化するため汀線から風向線上の飛距離を「海岸距離」と呼ぶこととする。

なお、広辞苑によれば汀線とは海面と陸地の交わる線で、干満 2 汀線の間を海岸線であり、海岸とは海陸の境界のある一帯を指す。

### 風向による飛距離の補正

飛沫発生後の輸送過程を検討するには、飛沫発生基準点から目標到達地点までの輸送距離を入力する必要がある。輸送距離は海上と海岸に分けて考えることができ、海上における輸送距離は飛沫発生基準点から汀線（海と陸の境界）までとする。汀線は潮位変化により移動するため、東京湾平均海面高さの汀線を基準とし、これより陸側の目標地点までの距離を陸上における輸送距離と定義し、この陸上輸送距離を海岸距離と呼ぶこととする。

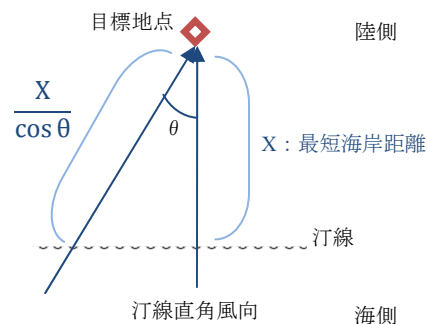


図 5.4 風向による飛距離の補正

一方、風が汀線直角方向以外から吹く場合、図 5.4 に示すとおり汀線直角方向からの風と比べて飛距離が増加することとなる。このため、汀線から最短の海岸距離を基準海岸距離  $X$  とした場合、風向による海岸距離の増加は、汀線直角方向より  $\theta$  の角度から海風が吹く場合、海岸距離は  $\frac{X}{\cos \theta}$  となる。

## 3) 対象地点高度の定義

陸上の目標地点における高さの定義は、通常地面または海面のどちらかを基準としている場合が多い。図 5.5 に波浪障害海岸、図 5.6 に海浜における地面もしくは海面からの高さが与えられた際の飛



沫発生点との高さ関係を示す。飛沫発生地点に対する目標地点高度を  $Z$  とすると、波浪障害海岸の場合、地面から目標地点高度までの高さ  $Z_{in}$  が入力値となる場合は式 5.4、海面からの場合は式 5.5 より  $Z$  を算定する。なお、海面を基準とする場合は潮汐現象により海面が変化するため、基準高さとして東京湾平均海面（T.M.S.L.）に対して潮位差  $\pm y_s$  が生じる。

一方、海浜の場合は高さ基準を地面とする場合式 5.6 により、海面とする場合は観測地点の地面高さと T.M.S.L. の差を  $Z_b$  とし式 5.7 より  $Z$  を算定する。

$$\text{波浪障害海岸、目標地点高度として地面を基準とする場合：} Z = Z_{in} - \left( \frac{H_b}{2} + y_b \right) \quad (5.4)$$

$$\text{波浪障害海岸、目標地点高度として T.M.S.L. 海面を基準とする場合：} Z = Z_{in} - \left( \frac{H_b}{2} + y_t \right) + y_s \quad (5.5)$$

$$\text{海浜海岸、目標地点高度として地面を基準とする場合：} Z = Z_{in} - \frac{H_b}{2} \quad (5.6)$$

$$\text{海浜海岸、目標地点高度として T.M.S.L. 海面を基準とする場合：} Z = Z_{in} + \frac{H_b}{2} + (z_b - y_s) \quad (5.7)$$

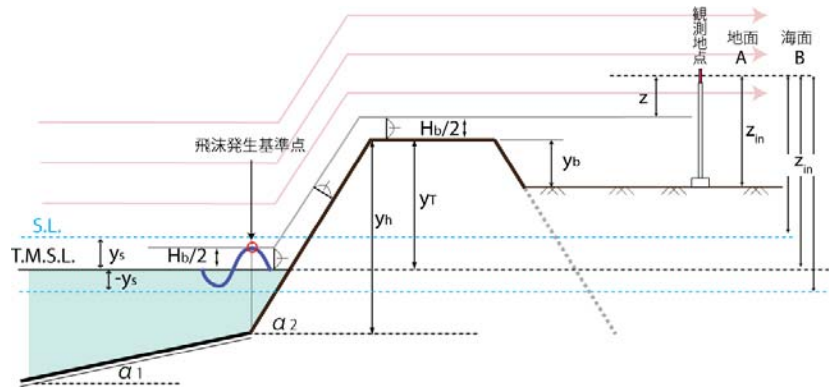


図 5.5 波浪障害海岸における飛沫発生点と対象高さの関係

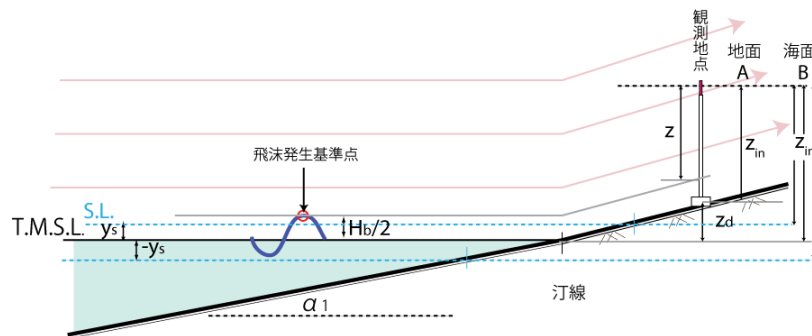


図 5.6 海浜における飛沫発生点と対象高さの関係

## 4) 対象地点距離の定義

飛沫の発生から輸送過程を扱う上で、飛沫発生地点から目標地点までの距離を入力する必要がある。特に、波浪障害海岸における距離程は図 5.7 中の赤太線で示すように複雑であるが、簡単に $x_1$ と $x_2$ の和として表す(式)。 $x_2$ は現場での計測値で障害物天端端部からの目標地点までの直線距離とし、 $x_1$

波浪障害海岸、飛沫発生基準点から目標地点までの距離： $X = x_1 + x_2$  (5.8)

$x_1$ ：飛沫発生基準点から障害物天端までの距離  $x_1 = (y_h - y_s - h_b) \sin \alpha_2$

$x_2$ ：障害物天端端部から目標地点までの距離

一方、海浜からの輸送距離は図 5.8 より飛沫発生基準点、すなわち砕波点から汀線まで汀線から目標地点までの距離の和となる。

波浪障害海岸、飛沫発生基準点から目標地点までの距離： $X = x_1 + x_2$  (5.9)

$x_1$ ：飛沫発生基準点から汀線までの距離  $x_1 = \frac{h_b}{\tan \alpha_1}$

$x_2$ ：汀線から目標地点までの距離

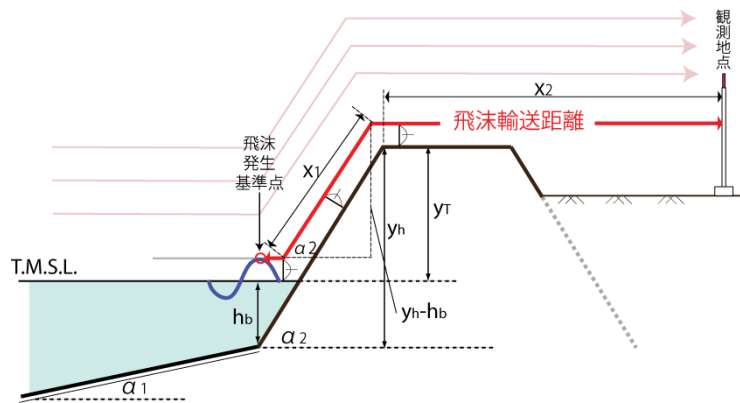


図 5.7 波浪障害海岸における飛沫発生点からの対象地点距離

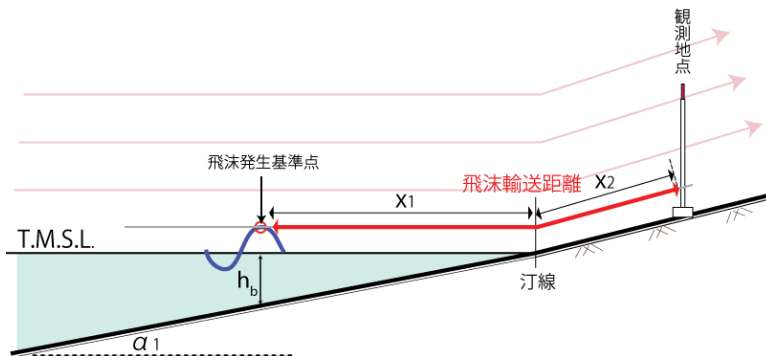


図 5.8 海浜における飛沫発生点からの対象地点距離

## 6章 短期計測結果によるモデルの検証

### 6.1 まえがき

本論文で提案する飛来塩化物イオン量算定モデルを検証するためには、少なくとも1) 飛来塩分量結果、2) 周辺海岸状況の確認、3) 波浪・気象情報の取得が必要である。飛来塩の計測は多数の研究者により行われているもののこれら全ての情報が入手可能な文献は少ない。本論文では上記1)～3)が取得可能な計測結果として櫛田・松永ら<sup>6.1)6.2)</sup>と、村上ら<sup>6.3)</sup>の飛来塩分量ならびに風向、風速の実測を含む研究報告を参考にする。

### 6.2 消波護岸後方における計測例による検証

#### 6.2.1 計測概要

櫛田・松永ら<sup>6.1)6.2)</sup>は北九州の響灘に面する海岸で冬季季節風下において飛来塩分量と風速・風向の計測を行った。計測地点の位置図と周辺環境の参考となる航空写真を図 6.1、海岸状態である消波護岸の断面図を図 6.2 に示す。

飛来塩分の計測点は、図 6.3 の通り消波護岸背後より10、20、50、100、200、300m 地点、高さ2、4、6、8、10m の計 30 点で行われた。

飛来塩分の捕捉は円筒金網に設置したガーゼにより行われ、イオン測定器で塩分濃度を求め、時間当たりの付着塩分量を記載値としている。一方、本論文では塩化物イオン量を対象とするため、記載の計測塩分量に0.54を乗じる(付録1参照)ことで塩化物イオン量に変換した値を用いる。

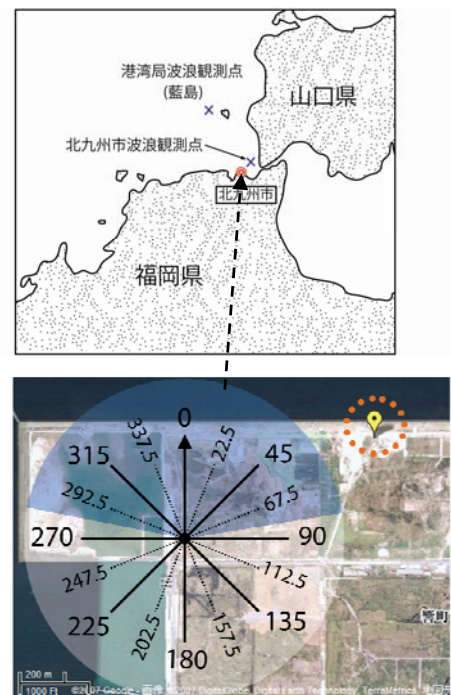


図 6.1 塩分量計測位置と波浪観測点

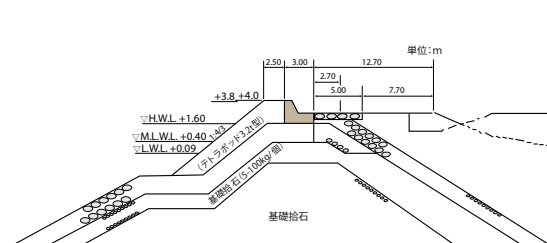


図 6.2 消波護岸断面図

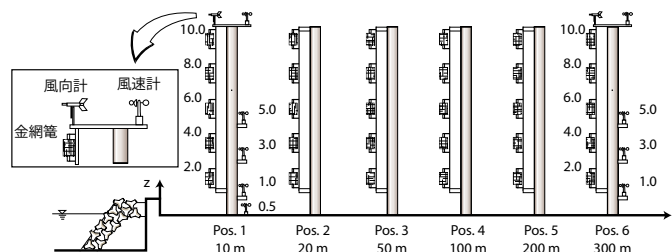


図 6.3 飛来塩分量、風速・風向測定地点

### 6.2.2 解析条件と仮定

櫛田・松永らは結果の重複する2件の論文により計測結果を報告しているが、その中より表6.1に示す結果に対してモデル検証を行う。

表6.1に海岸付近で発生する大粒径飛沫による飛来塩化物イオン量算定に必要な入力条件として、風速、風向、波高、周期、そして潮位を示す。なお、計測海岸は消波護岸であるため、同海岸を「波浪障害海岸」として解析を行う。表6.1のケースNoの頭に”A”のつくものは有義波高 $H_{1/3}$ 、周期 $T_{1/3}$ 、平均潮位を北九州市が計測地北東6km沖合で観測している値とした文献記載値より得たデータであり、”B”のつくケースは有義波高、周期を国土交通省港湾局による藍島（水深-20.7m）での2時間ごとの観測結果の平均により、風速 $U_{10}$ ならびに風向を護岸後方300m地点、高度10mにおける現場観測平均風速値である。なお、全計測結果とも降雨の影響をうけていない。

表6.1 計測条件

風向は真北を0度として時計回りに360度 \*は30分短縮  
( )内番号は、(1,2)とすると1が文献6.1によるケースNo、2が文献6.2によるケースNoである

ケース No	計測開始日時	計測時間 hour	$U_{10}$ m/s	風向	$H_{1/3}$ m	$T_{1/3}$ sec	平均潮位 m
A1(2,2)	1998/11/20,17:30-	7	5.49	303	0.79	5.0	+0.45
A2(3,3)	1998/12/8,14:00-	25	7.94	308	1.29	6.0	+0.39
A3(4,4)*	1998/12/9,15:30-	2	5.79	313	1.29	6.4	+0.42
A4(8,6)	1999/1/7,17:30-	15	12.5	307	2.43	6.9	+0.32
A5(9,7)	1999/1/8,8:30-	3.5	12.1	307	2.28	6.7	+0.18
A6(-,11)	2000/1/20,16:30-	16	9.54	315	1.76	6.4	+0.26
B1(6,-)	1998/12/10,7:30-	9	4.85	309	0.68	4.6	0
B2(7,-)	1999/1/7,14:30-	3	13.10	304	2.39	6.9	0
B3(10,-)	1999/1/8,12:00-	3	13.01	285	2.35	7.1	0
B4(11,-)	1999/1/8,15:00-	2.5	13.04	280	2.12	6.5	0

計測地点は海岸直角方向が真北となるため、海風範囲は西北西（ $292.5^\circ$ ）より北をはさんで東北東（ $67.5^\circ$ ）と定義し、これは図6.1の16方位に対する青色の範囲となる。また、図6.2の消波護岸断面を参考に本モデル検討に必要な断面寸法を図6.4と仮定する。

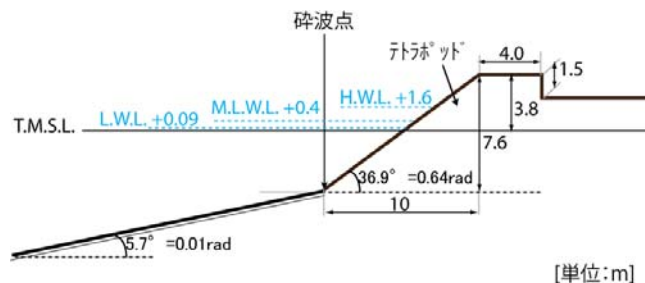


図6.4 消波護岸の仮定断面寸法

一方、小粒径飛沫による塩化物イオン量算定条件として、各ケースの計測前に海風範囲において継続風とみなされる風が吹いた継続時間とその際の平均風速、風向、沖波高、周期を表6.2にまとめる。なお、風速、風向値は気象庁による下関、波浪値は国土交通省港湾局の藍島のデータに基づいた。ケ

ース A6 は波浪データが不明であるため表 6.1 の A6 の値を用いている（沖波高は表 6.1 有義波高より沖波高に変換）。

小粒径飛沫の陸上輸送における地表面への捕捉係数は、航空写真より平地もしくは草むら程度と想定し  $\lambda = 1.0 \times 10^{-3}$  とした。これは 3.3.4 項で田中らの提案した  $\lambda = 3 \times 10^{-2}$  の  $1/30$  で、田中らの  $\lambda$  が周辺に人家、田園のある川沿いであることから比較的に決定した。

表 6.2 小粒径飛沫の発生蓄積と輸送に対する計算条件

ケース No	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4
継続時間 [hr]	6	7	14	15	30	4	0	12	34	37
平均風速 [m]	6.78	6.26	6.17	8.26	8.78	10.2	-	8.00	8.79	8.86
平均風向 [度]	298	304	301	305	305	310	-	302	306	305
平均沖波高 [m]	1.24	1.54	1.47	2.02	2.28	1.84	-	1.85	2.31	2.33
平均有義波周期 [sec]	5.1	5.6	6.0	6.0	6.5	6.4	-	5.7	6.5	6.6

### 6.2.3 解析結果と計測値の比較検証

図 6.5 から 6.7 に全 10 ケースの計測値と解析結果による塩化物イオン量の鉛直分布の比較図を示す。図 6.5 の解析結果は大、小粒径飛沫の和による塩化物イオン量を、図 6.6 を大粒径飛沫のみ、図 6.7 を小粒径飛沫のみによる塩化物イオン量として示した。各図は護岸後方からの距離毎に示してあり、左上図から風速値の小さい順に並べている。

図 6.5 から 6.7 より大粒径飛沫と小粒径飛沫の飛来の傾向が異なることが確認できる。図 6.6 の大粒径飛沫のみによる塩化物イオン量は鉛直方向に指数分布し、飛距離と風速に応じて一定に減少、ケース毎の鉛直分布勾配も一様である。また、図 6.7 に示す小粒径飛沫による塩化物イオン量は、鉛直方向にほぼ一様で飛距離による減少率が小さい。これは大きな粒径飛沫が存在しないため鉛直方向の分布が一様に近く、飛沫径範囲が小さいため大粒径飛沫に比較して落下が遅いためである。

図 6.5 の計測値と解析値の比較において比較的良好な対応を示した A3、A5、A4 を除く各ケースを風速の順に考察する。まず、B1 では継続風がないため計算上小粒径飛沫を含まず、他ケースに比較して鉛直分布が急で飛距離による飛来塩化物イオン量の減少率が大きくなっている。次に A1 では小粒径飛沫による塩化物イオン量のみで実測値を上回る結果であり、大・小粒径飛沫の和の鉛直分布からも小粒径飛沫の量を過大評価していることがわかる。A2 は特に護岸直ぐ後方での計測と解析値の対応が悪いが、A2 の実計測値は他の計測結果と比べて風速、波高のわりに計測値が大きすぎるため解析の問題とともに入力データもしくは計測値の問題も考えられる。特に、ケース A2 は計測時間が 25 時間と他ケースに比較して 2 倍以上長く、このため波浪、気象値に平均値を使用することに無理があること、又は計測中のアクシデント等が考えられる。残りの A6、B3、B4、B2 は護岸後方 100m 以上の計測地点における解析結果が実測値に比べて大きすぎ、また鉛直勾配も急過ぎる。海岸から遠方の飛来塩量には小粒径飛沫の影響が大きく、鉛直勾配の傾向からみて小粒径飛沫の算定量が過大であるように見えるが、大粒径飛沫の鉛直分布勾配によっても結果は変わるため現時点での評価は定まらない。

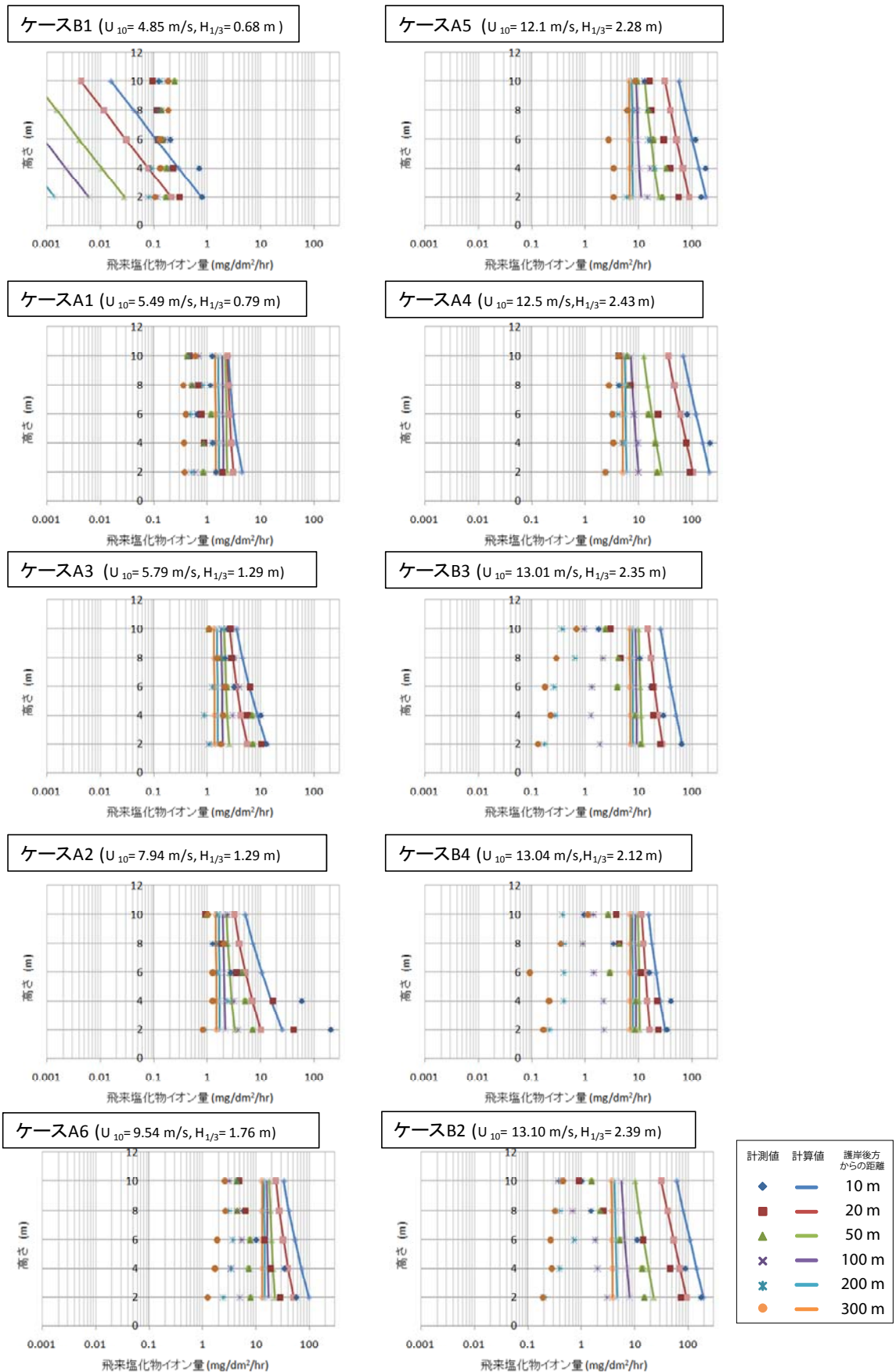


図 6.5 計測結果とモデル計算結果の比較 (大、小粒径飛沫の和)



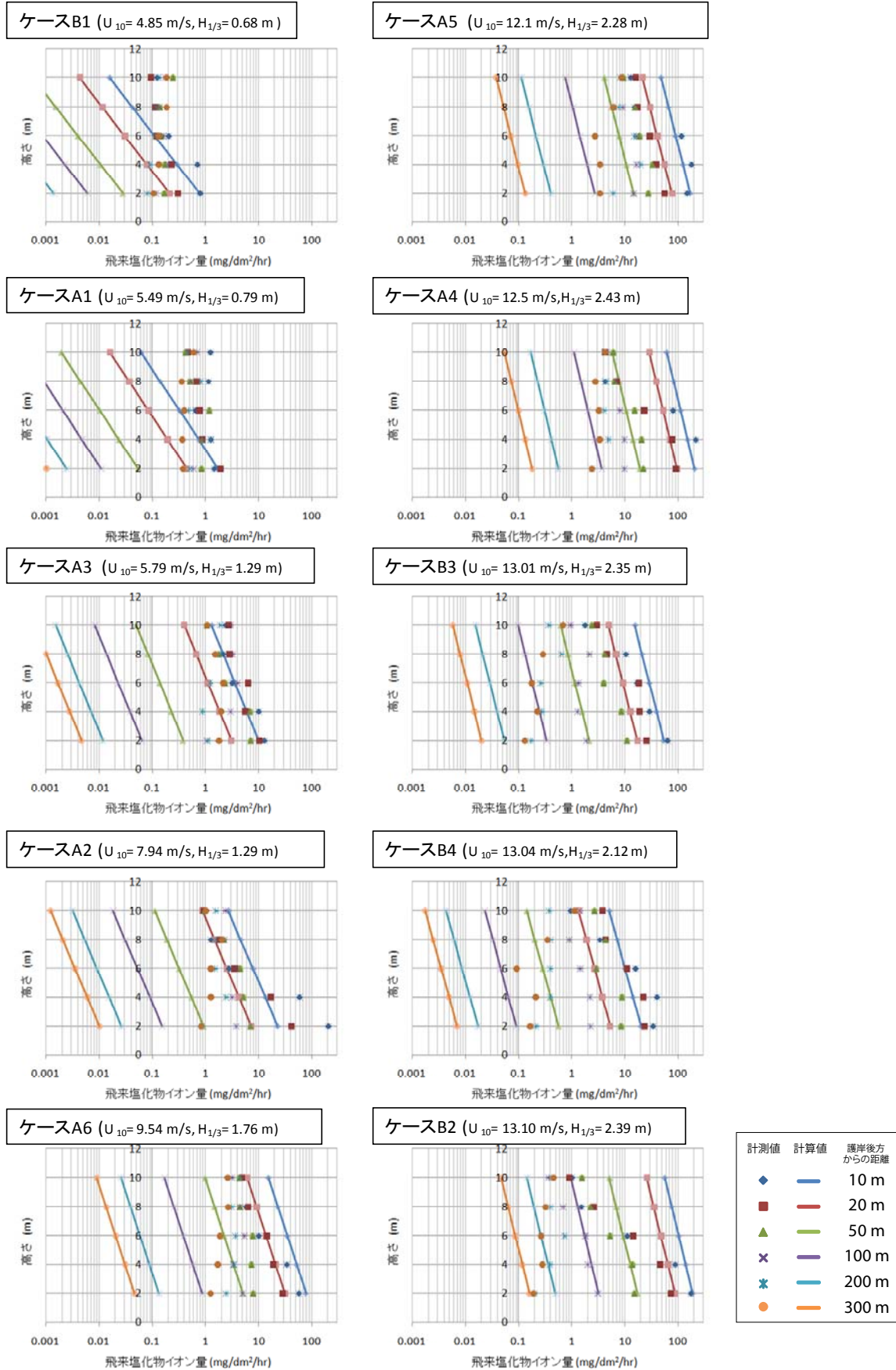


図 6.6 計測結果とモデル計算結果の比較 (大粒径飛沫のみ)

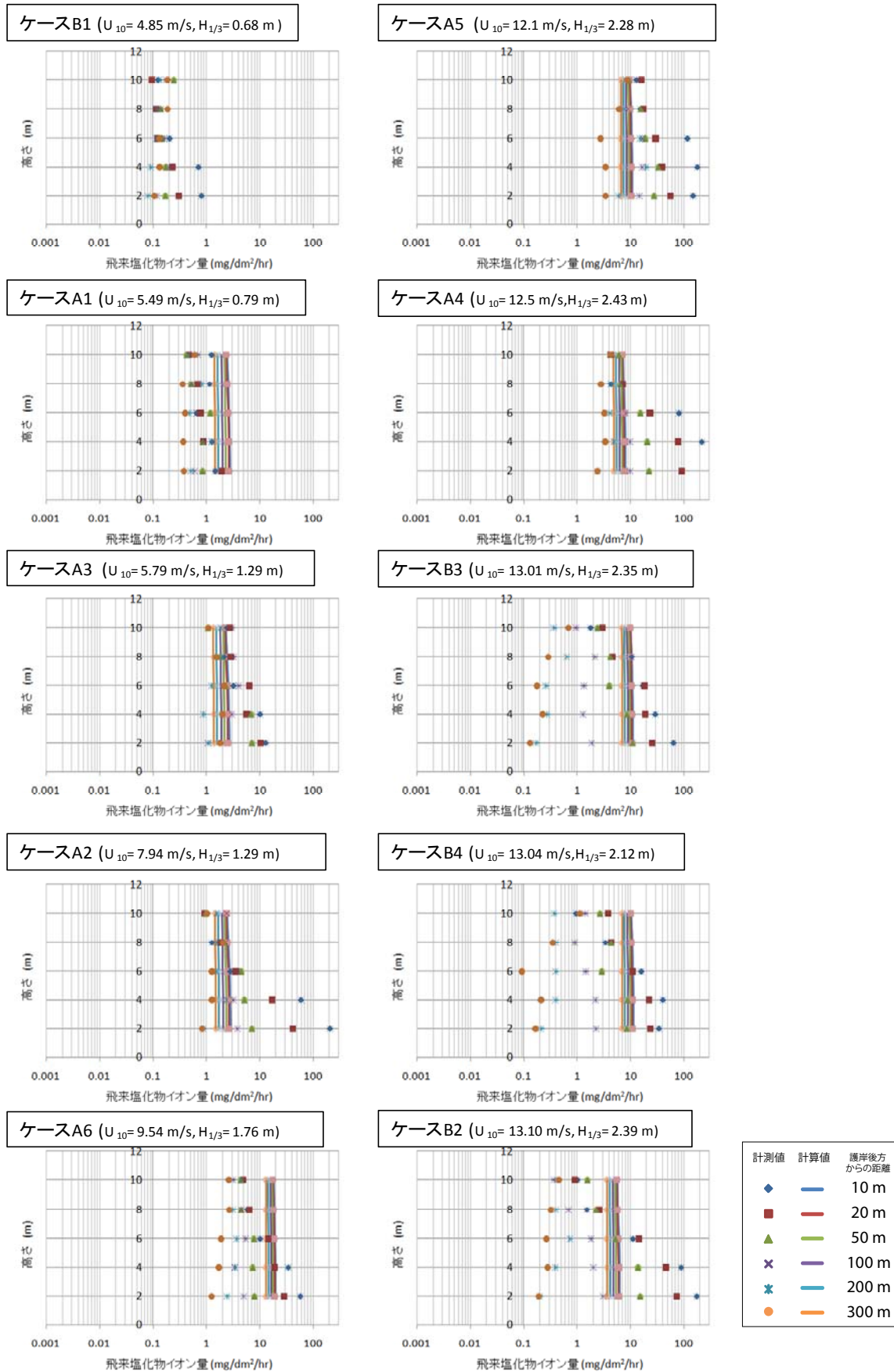


図 6.7 計測結果とモデル計算結果の比較 (小粒径飛沫のみ)



一方、図 6.8 から 6.9 に横軸の計測飛来塩化物イオン量、縦軸に解析飛来塩化物イオン量として計測ケース毎の比較図を示す。図 6.8 の計算飛来塩化物イオン量は、大、小粒径飛沫の和による値で、図 6.9 にはこれらの内訳として大粒径飛沫のみの場合と小粒径飛沫のみの場合の比較図を示した。

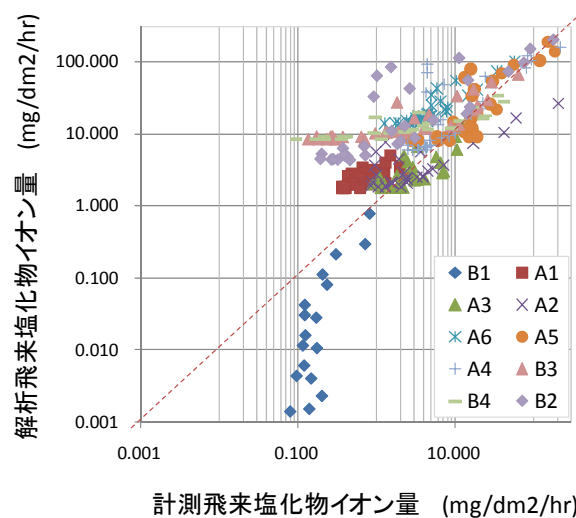


図 6.8 計測結果と解析結果（大、小粒径飛沫）の比較

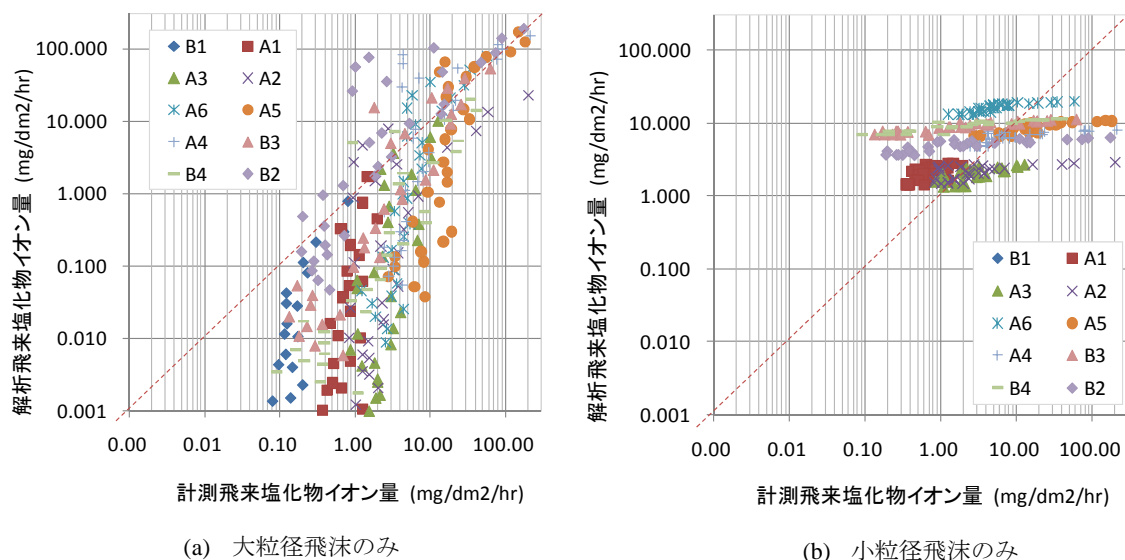


図 6.9 図 6.8 に対する大、小粒径飛沫による算定飛来塩化物イオン量の内訳

また図 6.8、6.9 に対する定量評価として計測値を解析値で除した値  $R$ （式 6.1）に対する平均値と変動係数（式 6.2）を用いる。

$$R = X_e / X_a \quad (6.1)$$

$X_e$  : 計測飛来塩化物イオン量、 $X_a$  : 解析飛来塩化物イオン量

$$CV = \frac{STDEVP}{AVERAGE} \quad (6.2)$$

CV : 変動係数、AVERAGE :  $R$  の平均

$$\text{STDEVP : 標準偏差 : STDEVP} = \sqrt{\frac{\sum(R-\bar{R})^2}{n}} \quad (6.3)$$

n : データ数

計測値と解析値の比  $R$  は 1 に近いほど解析精度が良く、 $R > 1$  で計測値のほうが解析値を上回り図 6.10 の概念図の右下半分の範囲に  $R$  が存在することを示す。逆に  $R < 1$  の場合は解析値が計測値を上回り図 6.10 左下部に  $R$  が存在することを示す。表 6.3 に  $R$  の平均と変動係数を示し、平均値が 1 に近いほど、変動係数が小さいほど解析精度が良いこととなる。

表 6.3 に計測値と解析値の比  $R$  を A.大、小粒径飛沫による塩化物イオン量、B.大粒径飛沫のみ、C.小粒径飛沫のみによる塩化物イオン量に分けて示す。A は図 6.8 に対応し、B は図 6.9 左図、C が右図に対応している。

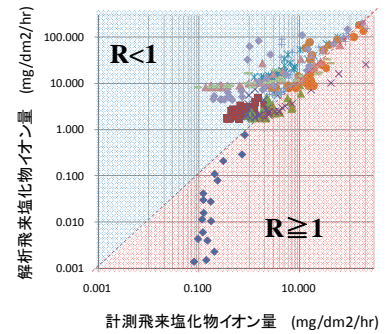


図 6.10  $R \geq 1$  と  $R < 1$  の範囲

表 6.3 よりケース B1 や A1 の大粒径飛沫のみで飛来塩化物イオン量を算定した場合  $R$  が 1000 を超えており、これは計測値が解析値の 1000 倍の差があることとなる。ケース B1 や A1 では風速、波高値が小さいため大粒径飛沫の発生数が少ないためこのような結果となる。表 6.3 は飛来塩化物イオン量の不足分を小粒径飛沫が補うことで大、小粒径飛沫の和による塩化物イオン量の精度を上げており、大、小粒径飛沫の和として塩化物イオン量を算定することで大粒径飛沫のみ、小粒径飛沫のみによる解析よりも精度を向上することが数値的にも示された。

表 6.3 飛来塩化物イオン量の計測、解析比  $R$  の平均と変動係数一覧

上段 :  $R$  平均、下段 : 変動係数

		ケース No.									
		B1	A1	A3	A2	A6	A5	A4	B3	B4	B2
A. 大・小 粒径飛沫	$R \geq 1$	1056	-	1.46	2.33	-	1.36	1.40	-	1.32	-
		2.6	-	0.3	0.8	-	0.2	0.0	-	0.1	-
	$R < 1$	-	0.30	0.67	0.54	0.27	0.60	0.60	0.29	0.23	0.24
		-	0.36	0.29	0.44	0.47	0.38	0.46	1.03	1.06	1.07
B. 大粒径 飛沫のみ	$R \geq 1$	1057	1365	315	147	51.5	35.1	13.1	14.3	50.0	1.1
		2.6	2.3	1.6	1.7	1.5	1.5	1.4	1.8	2.3	0.0
	$R < 1$	-	0.85	0.89	0.32	0.62	0.61	0.42	0.54	0.33	0.47
		-	0.0	0.0	0.1	0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	0.7
C. 小粒径 飛沫のみ	$R \geq 1$	-	-	1.9	8.3	2.0	3.5	8.5	2.3	2.2	8.1
		-	-	0.5	1.9	0.3	1.1	1.2	0.5	0.3	0.9
	$R < 1$	-	0.32	0.68	0.62	0.31	0.70	0.65	0.23	0.23	0.21
		-	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.2	1.2	1.1	0.9

### 6.3 砂浜海岸における計測例による検証

#### 6.3.1 計測概要

村上ら<sup>6.3)</sup>は茨城県鹿島灘の波崎海洋研究施設近辺の海岸で飛来塩分量ならびに風速の計測を行った。図 6.11 に計測地点と波崎海洋研究施設の航空写真を示す。写真より確認できるよう、周辺の海岸は砂浜海岸である。

村上らは、10×10cm の平面状のガーゼを約 2 時間空气中に放置し、これを Kent-Taylor 社の電導度計により塩分量を計測した。論文記載値には塩分量から換算した飛沫量であるため、飛沫中の成分比は海水と同じであり飛沫量の 1.9% が塩化物イオン量（付録 1 参照）とした換算値を用いる。

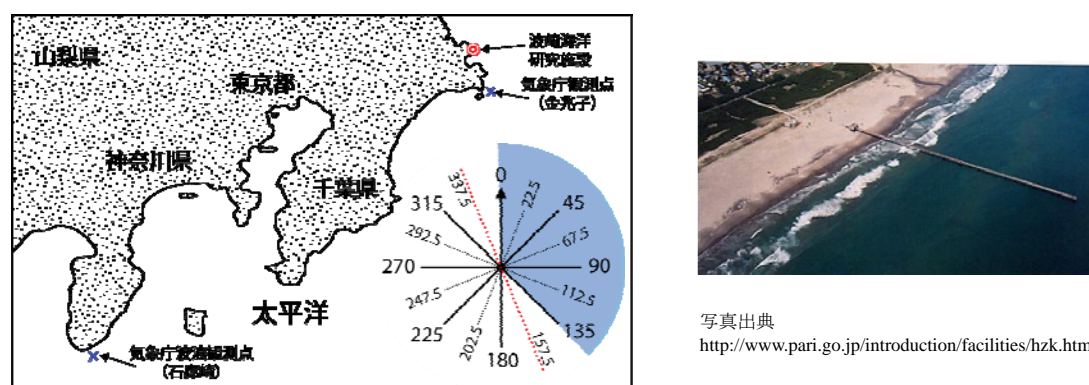


図 6.11 計測地点概要

#### 6.3.2 解析条件と仮定

村上らは全 9 ケースの計測を報告しているが、本検討に使用可能な計測結果としてケース No.2 と 9 の計測結果を参考にする。ケース No.2 と 9 の計測条件を表 6.4 に結果を図 6.12 に示す。

表 6.4 計測環境と算定される碎波帯

ケース No	計測開始日時	計測時間 [hour]	風速 [m/s]	風向 [°]	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [sec]
2	1992/12/22,11:00-	2	3.3	1.5	1.3	6.0
9	1993/11/6,9:00-	2	2.5	89.5	0.52	7.5

風速、風向は論文記載の現場計測値で、波浪値は気象庁、石廊崎測候所による計測値である。石廊崎測候所の波浪計設置水深は - 50m で表の値は調査時刻の有義波高と周期の平均である。また、海底勾配は資料より 1/20 と仮定した。図 6.11 より汀線は北北西（337.5°）から南南東（157.5°）の方向であるとし、これより海風範囲は北（0°）から南東（135°）の範囲と仮定する。

図 6.12 の計測結果は、ケース No.2 が汀線後方 7.5m 1 地点での鉛直方向の計測であるのに対して、No.9 は汀線後方 7.5、27.5、32.5、47.5、57.5m の多地点で計測された。図 6.12 よりケース No.2 は No.9 の少なくとも 2 倍の塩化物イオン量であり、またケース No.2 は汀線後方より約 50m にわたって塩化物イオン量の鉛直分布が 0.01mg/dm<sup>2</sup>/hr 単位の変動しかないとわかる。

一方、小粒径飛沫の影響を検討するために、ケース No.2、9 の計測前にどのような風が吹いていたか表 6.5 にまとめる。表の風速、風向値は銚子の観測結果で、銚子の風速は波崎海岸の測定値より若干高めである。これは銚子の観測標高が 20m とやや高い場所にあるためと考えられるため、表 6.9 には 5 章で述べた風速の鉛直補正として係数  $n$  を 7 として行った値を示す。補正した風速値は観測値に近い値となっている。

また、計測海岸の海岸線はおよそ北北西から南南東の方向に沿っており、ケース No.2 では 9 時の時点において陸風で、その後ほぼ海岸線に沿った方向から風が吹いていたと予想され、No.9 では計測前の午前 3 時までの 6 時

間 NNE から ENE の  $45^\circ$  の間隔から風が吹いていた。以上の風況よりケース No.2 では継続風による小粒径飛沫の発生輸送はないとし、No.9 では平均風速 2.1m/s (4 時から 9 時の平均補正風速) が 6 時間継続し、その後 9 時から 10 時の現場計測中に東 ( $90^\circ$ ) からの風により飛沫がガーゼに蓄積、その際の波高と周期が 0.6m と 7.3s として小粒径飛沫による塩化物イオン量を算出する。

なお、小粒径飛沫の陸上輸送に関する地表捕捉係数は、前項消波護岸後方計測と同様に  $\lambda = 1.0 \times 10^{-3}$  として計算する。

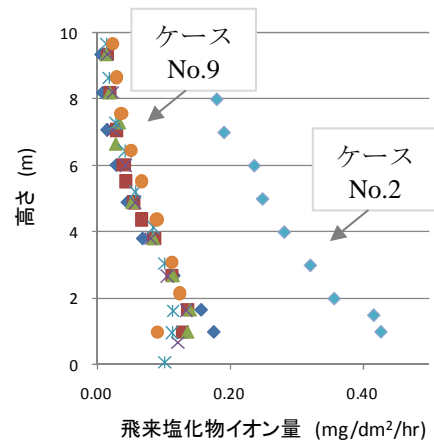


図 6.12 ケース No.2 と 9 の計測結果

表 6.5 銚子の風況

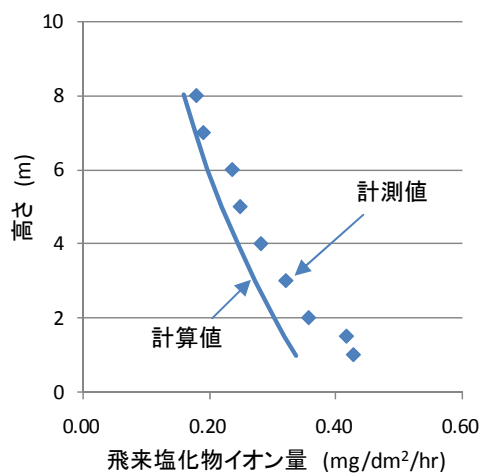
ケース No.2 1992/12/22				ケース No.9 1993/11/6					
時	風速	補正風速	風向	時	風速	補正風速	風向	T13	H13
9	3.7	3.2	NW	3	2.3	2.0	NNW	7.0	0.61
10	6.5	5.6	NNW	4	1.1	0.9	NNE	7.5	0.67
11	4.6	3.9	NNW	5	4.7	4.0	ENE	7.1	0.60
12	4.9	4.2	NNW	6	0.7	0.6	NE	7.1	0.54
13	3.9	3.3	N	7	2.4	2.1	ENE	7.4	0.52
				8	2.6	2.2	ENE	7.3	0.55
				9	3.5	3.0	NE	7.3	0.50
				10	3	2.6	NE	7.3	0.49
				11	2.5	2.1	ESE	7.6	0.54

### 6.3.3 解析結果と計測値の比較検証

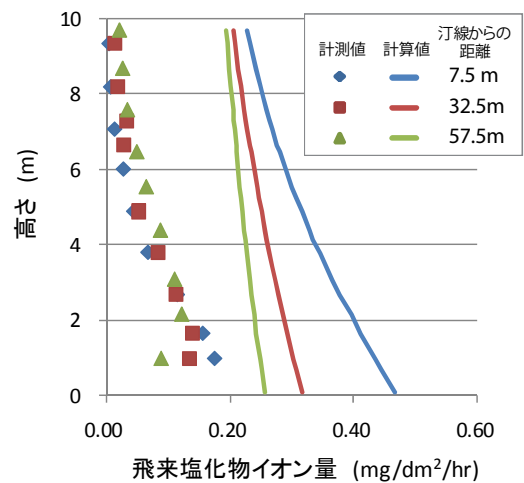
図 6.13 に計測飛来塩化物イオン量と計算飛来塩化物イオン量の鉛直分布の比較図を示す。図 6.13 左図(a)がケース No.2、右図(b)がケース No.9 の結果を示しており、ケース No.9 は汀線後方より 7.5、32.5、57.5m 地点での結果のみ示した。3.2 項で仮定した大粒径飛沫の発生、輸送過程を決定する係数または定数値 (発生飛沫個数決定係数  $\delta$ 、基準発生飛沫個数  $\theta_0$ 、平均飛沫直径  $d_a$ 、飛沫鉛直分布平均高さ  $z_a$ ) の仮定は、本章の消波護岸後方 (波浪障害海岸) と砂浜 (海浜) における実計測結果を参考に決定したが、本項砂浜海岸の計測例が 2 ケースと数が少ないため、波高、風速、飛来塩分量計測結

果とも大きいケース No.2 を優先して海浜に対する係数値を仮定した。このため、ケース No.9 は No.2 に比べて計測値と解析値の適合が悪く、計測値は解析値の半分以下である。

ケース No.9 の結果を考察するために、大、小粒径飛沫に分けて計測結果と比較した図が図 6.14 となる。(ケース No.2 は継続風がないため小粒径飛沫の影響を受けない) 図 6.14 左図が大粒径飛沫のみ、右図が小粒径飛沫のみの計算飛来塩化物イオン量と計測値の鉛直分布である。図 6.14 より大、小粒径飛沫ともに各々の飛沫のみで計測値の飛来塩化物イオン量を上まわっていることがわかる。また、大・小飛沫ともに距離により飛来塩化物イオン量の減少が解析値は計測値よりも大きく、これを改善するには平均飛沫径を下げるか、または風向値による実際の飛来距離の延長を疑う必要があるが、残念ながら文献からの読み取りのみでは判断が困難となる。

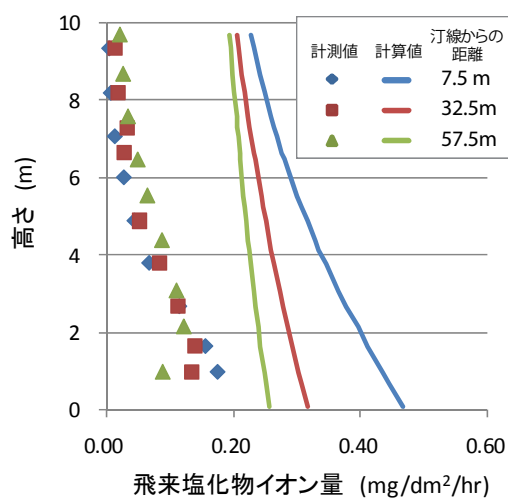


(a) ケース No.2  
汀線からの距離 7.5m

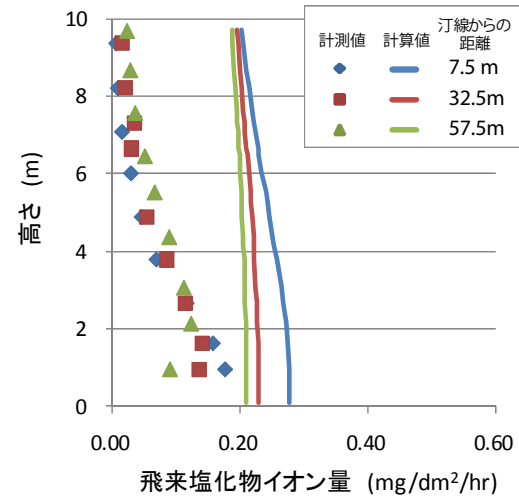


(b) ケース No.9 (大、小粒径飛沫)  
汀線からの距離 7.5、32.5、57.5m

図 6.13 計測飛来塩化物イオン量と計算飛来塩化物イオン量鉛直分布の比較



(a) 大粒径飛沫のみ



(b) 小粒径飛沫のみ

図 6.14 ケース No.9 (図 6.13(b)) に対する大、小粒径飛沫の内訳

表 6.6 にケース No.2 と 9 の計測値と解析値の適合精度について式 6.1 から 6.3 による計測、解析値の比の平均と変動係数により数値として示した。

表 6.6 飛来塩化物イオン量の計測、解析比  $R$  の平均と変動係数一覧

上段 :  $R$  平均、下段 : 変動係数

ケース	A. 大・小粒径飛沫		B. 大粒径飛沫のみ		C. 小粒径飛沫のみ	
	$R \geq 1$	$R < 1$	$R \geq 1$	$R < 1$	$R \geq 1$	$R < 1$
2	--	--	1.18	-	--	--
	--	--	0.06	-	--	--
9	--	0.25	2.10	0.43	--	0.30
	--	0.57	0.42	0.50	--	0.62

## 6.4 まとめ

本章では波浪障害海岸に対する実測例として北九州で行われた消波護岸後方での結果を、海浜の例として茨城県鹿島灘の砂浜海岸で行われた飛来塩量計測結果に対して、3, 4章で述べた飛来塩化物イオン量算定モデルを適用し、モデルを構成する3つの係数値、発生飛沫個数決定係数 $\delta$ 、平均飛沫直径 $d_a$ 、飛沫鉛直分布平均高さ $z_a$ 、および定数である基準発生飛沫個数 $\theta_0$ を決定した。

本章で検証対象とした計測結果は数時間から数十時間の計測であり、風速、風向については比較的详细にデータが得られるものの、継続風の状況や潮位等不足する情報も多い。今後の課題として本提案モデルに必要な係数、および定数値に対して具体的な検討、計測、実験を行う必要がある。

次章では、本章で参考とした計測に比較してより長期的な飛来塩分量調査結果に対して提案モデルの適用と結果の検証を行う。

## 7 章 中長期計測結果によるモデルの検証：飛来塩量全国調査との比較

第6章に続き実測飛来塩化物イオン量と本提案モデルによる解析結果の比較を行う。第6章では数時間から数十時間計測された飛来塩化物イオン量を対象としたが、本章では一ヶ月単位で一年から三年間計測された飛来塩化物イオン量の調査計測値との比較検証を行う。

### 7.1 飛来塩分量全国調査概要<sup>7.1)</sup>

飛来塩分量全国調査は1984年12月より3年間、当時の建設省土木研究所が主体となり、全国266地点における飛来塩分量の測定を行ったものである。表7.1に調査期間と調査地点数をまとめる。調査地点は全国に渡り、このように長期に渡る飛来塩分量調査は他に例を見ない。

調査方法は図7.1に示す土研式塩分捕集器を、測定地点に設置し、月1回ポリタンクごと交換、タンク内の液体からモール法により塩素イオン濃度( $\text{Cl}^-$  mol/l)を求め、一か月間の塩分量( $\text{NaCl}$  mg)を算出、これを一日あたり $1\text{dm}^2$  ( $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ )に飛来した塩分量( $\text{NaCl mdd}=\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ )として月毎に換算している。なお、土研式塩分捕集器は、長期の飛来塩分量測定の目的に開発された捕集器で、屋根つきのケース内にステンレス製の板を設置し、その板に付着、もしくは衝突してホースからタンクへ落下した塩分量が計測される。月一回のタンク交換時には、捕集板とホースに付着した塩分を蒸留水で洗い流すことで月毎の計測値を初期化している。

調査報告書より得られる情報として、地図、地点名、大まかな住所による調査地点、海岸線からの距離、海面からの高さ、塩分捕集器が面している方向(16方位)、捕集器方向における海岸線状況が示されている。なお、海岸線の状況は、砂浜型、岩磯型、港湾埋立て地、その他の4分類としている。

表 7.1 調査期間と地点数

調査期間			調査 地点 合計
1984/12- 1985/11	1985/12- 1986/11	1986/12- 1987/11	
112 地点	56 地点		266  地点
3 地点			
43 地点			
	52 地点		

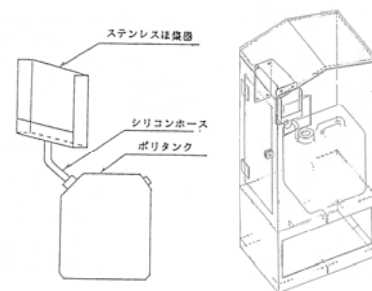


図 7.1 土研式塩分捕集器

捕集板は $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ のステンレス製板、シリコンホース、ポリタンク、それらを格納する格納箱から成り、格納箱の捕集板の前面は飛来塩捕集のための通風口が開いている。



## 7.2 解析条件

### 7.2.1 調査地点概要

本論文で対象とする調査地点は静岡県天竜川の右岸とし、図 7.2 に調査地点と波浪、気象の観測点の位置関係を示す。

図 7.3 は天竜川河口部の航空写真と右岸部の拡大写真を示しており、調査報告書によると調査地点の海岸状態は「砂浜海岸」であるが、航空写真から確認すると西よりの風が吹いた場合、消波堤の影響をうける可能性があることがわかる。また、右岸部における具体的な観測点は不明であり、調査地点の特定が可能な情報は海岸線からの距離のみで、海岸線より 100m、500m、1000、3000、6000m の 5 地点における計測結果に対してモデルを適用する。



図 7.2 飛来塩分量計測点と波浪、気象観測点の位置関係

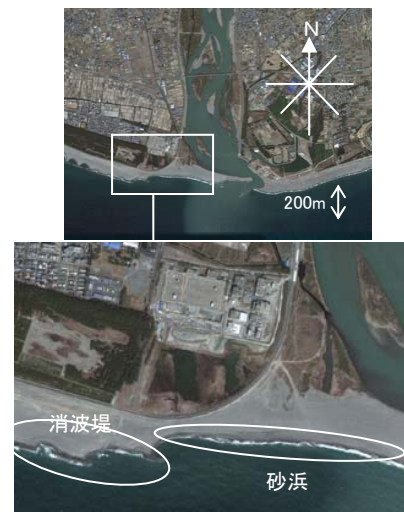


図 7.3 天竜川河口航空写真（上）と右岸部拡大（下）

### 7.2.2 入力情報ならびに解析仮定

モデル計算に用いる入力データの一覧を表 7.2 に示す。入力気象データは気象庁による磐田（最短海岸距離約 700m、標高 3m）を、波浪データは同じく気象庁による石廊崎（沖約 1km、水深-50m）における観測結果を用いる。気象データについては風速、風向、降水量とも一時間毎のデータとし、波浪データは 3 時間に一回のデータであるため、計測該当時間の 2 時間前も計測時間と同様の波高、周期として一時間毎のデータとした。なお、対象地域に対する潮位データが得られなかったため、潮位については考慮しない。

飛来塩の計測は 12 月 10 日から翌月 10 日の一ヶ月単位で最短一年間継続して行われており、解析上は 10 日から翌月 9 日の単位で解析を行った。なお、波浪値のエラーが一月あたり 15 時間以上の月のについては解析を除外している。



表 7.2 解析条件一覧

調査地点	海岸線からの距離	海面からの高さ	調査期間
	100 m	2 m	1984/12/10-1987/12/9
	500 m	6.3 m	1984/12/10-1987/12/9
	1000 m	6.7 m	1984/12/10-1985/12/9
	3000 m	9 m	1984/12/10-1985/12/9
	6000 m	12.3 m	1984/12/10-1985/12/9
海風範囲	海岸直角方向	海風範囲	
	南 (180° )	112.5° ~247.5°	
気象観測点	観測点名	標高	海岸からの距離
	磐田 (気象庁)	3 m	700 m
波浪観測点	観測点名	水深	海底勾配
	石廊崎 (気象庁)	-50 m	1/20

### 7.3 解析結果と計測値の比較検証

図 7.4 に解析と計測結果による飛来塩化物イオン量の比較を示し、表 7.3 に図 7.4 の精度評価結果を示す。精度評価は 6 章と同様に計測値を解析値で除した値  $R$  の平均と変動係数で示し、 $R \geq 1$  が図 7.4 各図の右下半分を  $R < 1$  が左上半分の範囲となり、 $R$  の平均値が 1 に近いほど解析精度が良く、変動係数は図中右下半分、左下半分範囲における  $R$  のばらつきを表している。

表 7.3  $R$ =計測値／解析値の平均と変動係数一覧

\* ( ) 外は平均値、内は変動係数、「 - 」は  $R \geq 1$  か  $R < 1$  どちらかみの範囲に分布している場合

計測地点 海岸線からの距離		計測期間		
		1984/12/10-1985/12/9	1985/12/10-1986/12/9	1986/12/10-1987/12/9
100 m	$R \geq 1$	9.08 (1.25)	5.30 (1.05)	44.98 (2.19)
	$R < 1$	0.49 (0.79)	- (-)	- (-)
500 m	$R \geq 1$	7.27 (1.31)	6.34 (1.06)	57.36 (2.59)
	$R < 1$	0.16 (0.00)	- (-)	- (-)
1000 m	$R \geq 1$	6.55 (1.04)	計測なし	計測なし
	$R < 1$	0.11 (0.00)		
3000 m	$R \geq 1$	6.48 (1.28)	計測なし	計測なし
	$R < 1$	0.42 (0.81)		
6000 m	$R \geq 1$	7.82 (1.39)	計測なし	計測なし
	$R < 1$	0.14 (0.00)		

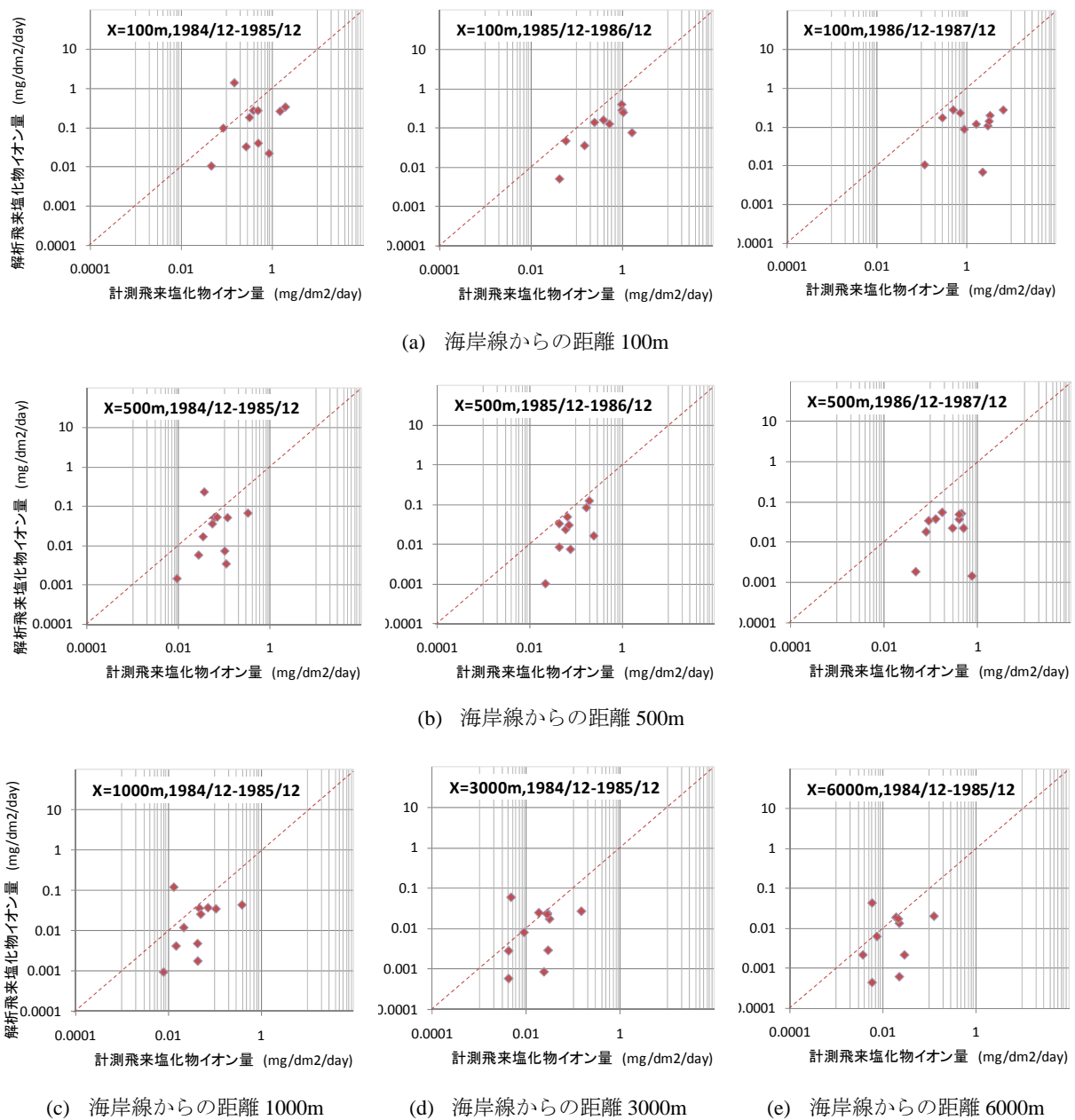


図 7.4 解析結果による飛来塩化物イオン量と計測結果の比較

表 7.3、図 7.4 よりわかる傾向は、1985/12-1986/12 のひと月分の計測を除いて、計測値に対して解析値が過少評価する結果となっており、海岸線から近い計測地ほど解析精度が良く、計測地が海岸から離れるほど解析精度が下がる結果となった。

まず海岸線からの距離が延長するほど解析精度が悪くなる理由としては、陸上輸送距離が延びるにつれて地形、地上物体または状況の影響が強くなることが考えられるが、単純に考えれば輸送距離が延びれば、輸送中の地表面の補足や拡散により解析値がより小さくなると考えられる。しかし、現在の解析結果はすでに過少評価の傾向であることから発生モデルの精度不足が考えられる。この裏付けとして、1996 年 12 月より一年間の計測に対する解析値は特に過少評価の傾向であり、この年のデー

タを詳細にみると、他年に比べ高波高、強風の頻度が高い上、この際の風向が海風範囲外（22.5°程度ずれる）にあるため飛来塩化物イオン量として0となるケースが確認された。このことより、現モデルを構成するモデル係数値は海浜海岸に対して比較的低い風速、波高計測結果（風速 3.3m/s 波高 1.34m まで）により決定したため高風速、波高域ではモデル係数が合わないこと、また取得した気象データに対する信頼性による原因が考えられる。すなわち風向、風速の気象データは計測点から数 km 離れた気象観測点における毎正時平均値であるため実際の計測点との誤差が考えられるほか、実際の海岸では平均風向が例え海岸線方向から吹いていても風の乱れや地形の影響で陸上への到達が可能となるなど、より地域的な気象の影響を受けることが考えられる。

#### 7.4 既往研究モデルとの解析精度比較

本項では既往の飛来塩分量算定モデルとの比較とし、宇多ら<sup>7.2)</sup>と山田ら<sup>7.3)</sup>の提案モデルとの比較を行う。

宇多らは海岸空間を飛沫供給領域、慣性領域、移流拡散領域、拡散領域に分類し、飛沫の供給が飛沫供給領域と慣性領域からなされるとし、移流拡散領域と拡散領域を飛沫輸送領域としてモデル化している。飛沫発生過程のモデル化としては飛沫粒径を一定とし、発生量が風速の2乗に比例するとし、陸上輸送においては発生飛沫量と塩分濃度が比例するとして鉛直分布をもった塩分濃度が内陸方向へ輸送されるとしている。移流拡散領域における塩分濃度の鉛直分布は指数分布と仮定し、拡散領域においては鉛直方向に一樣な分布となると仮定し陸上に任意地点任意高度に到達する塩分濃度算定モデルを提案している。また、モデルを構成する各係数は全国調査による塩分量の結果に回帰することで決定され、これらの値は波浪条件（日本海型、太平洋型）と海岸地形（岩礁海岸、砂礫海岸）の別に決定した値が提案されている。

一方、山田らは飛来塩分の算定モデルとして長期と短期の場合に分けて提案しており、計測期間が一月となる飛来塩分量の算定を長期計測と位置づけている。長期の場合の飛来塩分の算定は、汀線での飛来塩分発生量を沖波高に比例するとし、発生飛沫粒径は 0.001mm と 0.01mm の2種類としている。汀線で発生した飛来塩分は汀線上に指数分布で鉛直分布し、輸送過程を風の場の計算と移流拡散方程式により数値計算を行うことを提案している。

図 7.5 に宇多らのモデルによる解析値と計測値の比較図を示す。なお、計測は飛来塩分量全国調査の 1986 年の太平洋、砂礫海岸における結果である。一方、図 7.6 の山田らのモデルによる解析値と計測値の比較を示す。山田らの計測値は土研式塩分捕集器を用いて独自に行った結果である。計測地は新潟県上越市の名立大橋で文献中の写真より前面海岸が砂浜と多少の岩礁と離岸堤で構成された河川橋上で、汀線からの距離およそ 50m、地面からの高さ約 7m に捕集器を設置している。計測期間は 2004 年 1 月から一ヶ月単位の飛来塩分量を採取し一年間継続している。

以上の宇多ら、山田らのモデル精度と前項で示した本論文提案モデルの精度を計測値と解析値の比 R で比較することとし、この結果の一覧を表 7.4 に示す。図 7.7 は前項図 7.4 をまとめた結果である。各図の比較ならびに表 7.4 の精度評価数値より、本提案モデルによる解析結果は宇多モデルにおよばないものの、概ね計測値の傾向を表現していることがわかる。また、図 7.5 の宇多らの結果はモデル

係数により回帰した結果であるため、本モデル係数の今後の改善を行えば、提案モデルは今後有用な飛来塩化物イオン量算定システムとして機能し得ると考えられる。

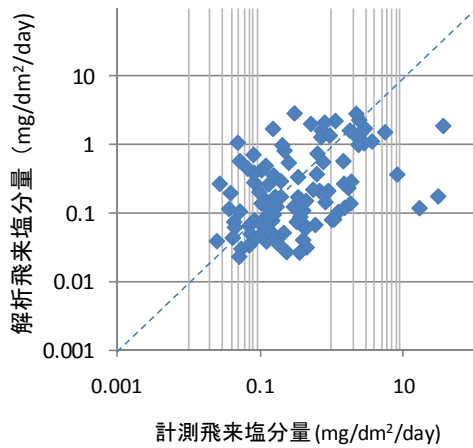


図 7.5 宇多モデルによる  
解析値と計測値  
太平洋、砂礫海岸、1986 年

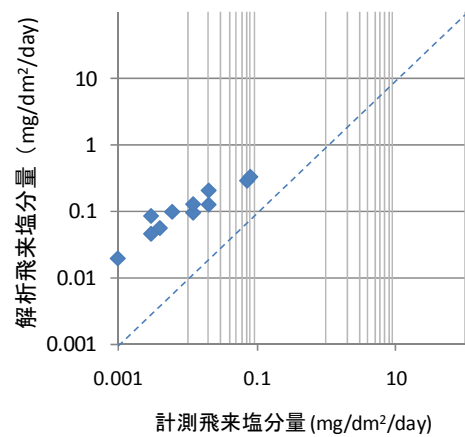


図 7.6 山田モデルによる  
解析値と計測値  
新潟県名立大橋、2004 年

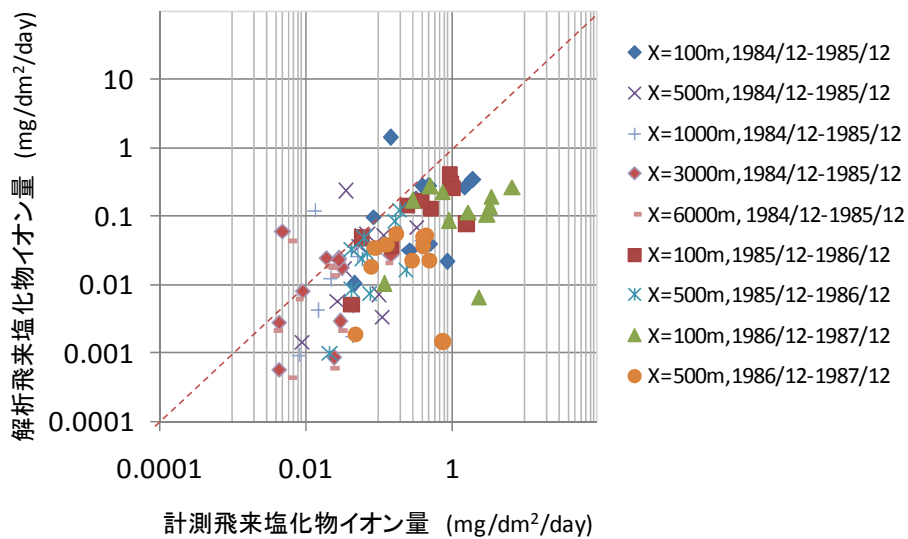


図 7.7 提案モデルによる解析値と計測値比較  
(図 7.4 の統合図)

表 7.4 R=計測値／解析値の平均と変動係数一覧

\* ( ) 外は平均値、内は変動係数、「 - 」は  $R \geq 1$  か  $R < 1$  どちらかのみの範囲に分布している場合

	提案モデル	宇多モデル	山田モデル
$R \geq 1$	19.00 (3.65)	4.10 (1.02)	- (-)
$R < 1$	0.35 (0.96)	0.39 (0.71)	0.10 (0.59)

# 8 章 総括

## 8.1 結論

本論文では任意環境下の目標地点高度に到達する飛来塩化物イオン量を算定するためのモデルの構築、ならびにモデルを構成する係数および定数値を既往の飛来塩量計測結果の逆解析により提案し、別の既往計測により提案モデルの検証を行った。

第1章では本研究目的に至る背景と問題提起とともに、既存の塩害劣化予測手法、特にコンクリート中への塩分浸透過程までの精度評価を行い、劣化予測全体精度の向上には飛来塩分量の評価システムの構築が必要であることを示した。

第2章では既往の飛塩量計測結果から得られる知見や既往研究例を参考に、本論文提案モデルのコンセプトをまとめた。これより本提案モデルは、陸上構造物に到達する飛来塩化物イオンは「海水飛沫」として海洋より発生、輸送され構造物表面に付着又は捕捉される過程とし、1) 波力により飛沫の発生量が決定し、2) 海水飛沫の輸送過程は飛沫粒径に左右され、また3) 海岸状況が飛沫径分布や発生状況に大きく左右するため、海岸状況の分類定義を行うこととした。

第3章では第2章で提案するモデルコンセプトに基づき、海岸で発生し陸上構造物へ有意となる飛沫を大粒径飛沫、海上から発生する飛沫を小粒径飛沫とし、本論文で新たにモデル提案を行うのは大粒径飛沫の発生、輸送過程とし、小粒径飛沫の発生、輸送過程については鳥羽らのグループによる既往研究を参考にすることとした。

大粒径飛沫の発生過程は飛沫発生基準点に発生した飛沫が鉛直方向に打ち上げられるとしてモデル化した。発生飛沫の総個数 $\theta_{total}$ は波高の関数(式 8.2)として決定し、これが式 8.1 の飛沫径分布を示す。各飛沫径飛沫が式 8.3 により飛沫発生基準点上に分布し、風による輸送の結果式 8.4 で任意地点高度に到達する飛沫個数濃度が決定する。以上の仮定は飛沫個数濃度で扱い、目標地点高度の表面に付着、捕捉する塩化物イオン量が表面に対する飛沫の通過量(流速)として飛沫個数濃度に風による単位時間移動距離(風速と同値)で求められる。

$$\theta_{d,z0} = \theta_{total} \cdot \frac{1}{d_a} \exp\left(-\frac{1}{d_a} \cdot d\right) \quad (8.1)$$

$$\theta_{total} = \delta \cdot \theta_0 \cdot f(H_b) \cdot (1/T) \quad (8.2)$$

$$\theta_{d,z} = \theta_{d-total} \cdot \frac{1}{z_a} \exp\left(-\frac{1}{z_a} \cdot z\right) \quad (8.3)$$

$$\theta_{d,z,x} = \theta_{d-total} \cdot \frac{1}{z_a} \exp\left[-\frac{1}{z_a} \cdot \left\{Z + w_d \left(\frac{X}{U}\right)\right\}\right] \quad (8.4)$$

$\theta_{d,z0}$  : 飛沫発生基準点直上の飛沫個数濃度分布[個/m<sup>3</sup>/sec]、 $d$  : 飛沫直径[m]、 $H_b$  : 碎波波高[m]、 $T$  : 周期[sec]、 $\theta_{d,z}$  : 飛沫発生基準点上高さ $z$ における直径 $d$ の飛沫個数濃度[個/m<sup>3</sup>/sec]、 $\theta_{d-total}$  : 飛沫発生基準点上に発生する直径 $d$ の総飛沫個数 [個/m<sup>2</sup>/sec]、 $Z$  : 目標地点における飛沫発生基準点からの高さ[m]、 $X$  : 飛沫発生基準点から目標地点までの距離[m]、 $\theta_{d,z,x}$  : 目標地点高度に到達する直径 $d$ の飛沫個数濃度[個/m<sup>3</sup>/sec]、 $\delta$ 、 $\theta_0$ 、 $d_a$ 、 $z_a$  : 発生、輸送に関する係数、定数値

以上の発生、輸送モデルの構成係数および定数値は海岸状況毎に決定した。海岸状況は堤防、岩礁等の入射波に対する障害物が存在する海岸として「波浪障害海岸」、砂浜等障害物の存在しない海岸として「海浜」の2分類を提案した。海岸に障害物がある場合とない場合では碎波の形態が異なり、飛沫の発生状況も異なると推測されるためである。上記二海岸に対して式 8.1 から 8.4 を構成する係数、定数値の検討を行い、各値を次表の通り決定、提案した。

表 8.1 モデル係数、定数値一覧

	発生飛沫個数 決定係数 $\delta$	基準発生飛沫個数 $\theta_0$	平均飛沫直径 $d_a$	飛沫鉛直分布 平均高さ $z_a$
波浪障害海岸	1	$1.0 \times 10^4$ 個/m <sup>2</sup>	400 $\mu$ m	$3 \cdot H_b$
海浜	7		50 $\mu$ m	$6 \cdot H_b$

第4章では、海水飛沫の構造物表面への付着過程を、空間あたりの飛沫が対象表面を通過する量として得られるとし、式 8.4 で得られる目標地点高度に到達する飛沫個数濃度に風速を乗じることで飛沫の通過量、すなわち流速を付着量と仮定した。なお、風が構造物表面に垂直以外の方向から吹き付ける場合、通過量の補正を行うこととした。

第5章では、提案した飛来塩化物イオン量算定モデルの計算過程と入力情報の取得または補正方法について述べた。

第6章では、数時間から数十時間までの比較的短時間で行われた計測結果として北九州の消波護岸後方において冬期季節風環境化で行われた計測例と茨城県鹿島灘付近の砂浜海岸で行われた計測例を用いて、提案モデルを構成する3つの係数と1つの定数値を逆解析により決定した。この結果、大粒径飛沫による塩化物イオン量が汀線直ぐ後方における低部の飛来塩化物イオン量を再現し、小粒径飛沫による塩化物イオン量が汀線後方の高部や、汀線から数百 m 後方における飛来塩化物イオン量鉛直分布を再現するのに適当であることを確認した。計測結果と解析結果の適合評価として計測値を解析値で除した値  $R$  の平均値を  $R \geq 1$  の場合と  $R < 1$  の場合に分けて行った。この結果、消波護岸後方での適合評価として計測ケース毎の  $R$  平均が  $R \geq 1$  で 1.3 から 1092、 $R < 1$  で 0.67 から 0.24 となった。これは計測値が解析値の 1.3 倍から 1092 倍、解析値が計測値の 1.56 倍 ( $=1/0.64$ ) から 4.16 倍 ( $=1/0.24$ ) 程度であることを示している。計測値が解析値の 1092 倍となるケースは計測前の風向データより小粒径飛沫の影響がないと判断したケースであり、飛来塩化物イオン量を大粒径飛沫のみで算定した場合である。このことから、継続風がなければ小粒径飛沫の影響がないとするのは極端なモデル化であることが考えられ、今後改良が必要であると考えられる。

第7章では土木研究所全国調査における静岡県天竜川での計測結果を検証材料とした。これは一ヶ月単位の飛塩量を、土研式塩分捕集器を用いて一年から三年継続して計測した結果である。この計測値に対する解析値の精度評価を行うとともに、既往研究モデルによる同捕集器を用いた精度評価との比較を行った。本提案モデルの精度評価は、全体的に解析値が過少評価する傾向にあり、海岸線からの距離が離れるほど解析精度が低下する結果となった。また、既往研究モデルとして宇多らならびに山田らのモデルとの精度比較は次表の通りである。

表 8.2 解析精度の比較

R=計測飛来塩化物イオン量/解析飛来塩化物イオン量の平均と変動係数

\* () 内は変動係数

	提案モデル	宇多モデル	山田モデル
$R \geq 1$	19.00 (3.65)	4.10 (1.02)	- (-)
$R < 1$	0.35 (0.96)	0.39 (0.71)	0.10 (0.59)

表 8.2 より全体として宇多モデルの解析精度が良いこととなるが、宇多らの結果は計測結果に最適な係数値による解析結果であり完全な精度評価の結果ではない。このことを考慮すれば本提案モデルによる解析精度は概ね良好であると言える。

## 8.2 今後の課題

以上より、任意環境下における飛来塩化物イオン量算定モデルの構築、ならびに検証を行った。

精度評価の結果、現時点では既存モデルによる解析精度を上回るには至らなかったものの、今後本提案モデル各部精度向上や入力データに対する追加検討を行うことで、既存モデルにより有効な塩化物イオン量算定モデルへ改善可能と考えられる。

このための今後の課題として以下の項目を挙げる。

### 1) 大粒径飛沫発生過程に対するモデル係数、および定数値の各値の個別検討

提案モデルを構成する 3 つの係数ならびに 1 つの定数値は、本論文においては既往の飛来塩分量計測結果に提案モデルを逆解析させることで決定した。このため、本提案係数、定数値は、採用計測の範囲での適用性しか望めず、また海岸状態の詳細や潮位など計測報告より得られる以外の事象が計測値に影響していることもあり得る。従って、今後各係数、定数の個別検討を目的とした計測、実験を通じて詳細検討を行う必要がある。

### 2) 小粒径飛沫の発生判断（継続風の決定方法）またはモデル化

本研究では、陸上構造物に到達する海水飛沫のうち、海上と海岸で発生するものではその飛沫径分布ならびに発生過程は大きく異なるとの仮定より、海上と海岸で別の飛来塩化物イオン量算定過程を採るとした。その際、海上で発生し陸上まで輸送される飛沫を小粒径飛沫とし、これを鳥羽、田中らの既往研究を参考に飛来塩化物イオン量算定を行った。鳥羽、田中らは、海上を風が一定方向より吹き続けることで、数  $\mu$  から数百  $\mu$  程度までの飛沫が鉛直方向に蓄積し、汀線からは風による移動流と自由落下ならびに乱流拡散により輸送されたとした。このモデルに対する入力として、小粒径飛沫の発生を検討する際海上を風が吹きわたる時間ならびにその際の風速値を必要とするが、本論文では地上気象観測よりこれを推定した。しかしながら、限られた地上気象観測点の情報より海上の風況を推定することは困難であり、この精度不足が小粒径飛沫による塩化物イオン量の精度低下をもたらしたと思われる。このため、入力となる対象地点の風況の推定方法を改善するか、小粒径飛沫による飛来塩化物イオン量算定システム自体の再検討が必要となる。

## 3) 入力データとしての気象、波浪情報ならびに環境情報の必要性

本研究は、構造物の塩害劣化予測精度の向上に貢献することを目的に飛来塩化物イオン量の算定モデルを構築した。従って、最終的に全国で供用されている構造物に適用可能である必要がある。一方、提案モデルを実構造物に対して活用するには気象、波浪情報ならびに対象構造物周辺の環境情報が必要であり、入力データの精度が解析精度に大きく影響する。このため、飛来塩化物イオン量、塩害劣化予測の精度向上のためには、全国各地の気象、波浪情報と環境情報の整備が必要となる。



## 謝 辞

本論文を審査していただきました主査の岡村 甫先生（高知工科大学教授）、副指導教員的那須清吾先生（高知工科大学教授）ならびに藤澤伸光先生（高知工科大学教授）、副査の島 弘先生（高知工科大学教授）、野尻洋一先生（高知工科大学教授）に心より御礼申し上げます。

岡村先生には本研究におけるフレームから細部に至るまで数多くのご助言と熱心なご指導をいただきました。また、助手としての五年間、博士課程学生として二年間の長きに渡り研究者としての姿勢や思考方法から集中力のあり方、組織の長として決断と責任の取り方、教育者または一人の人間として立ち居振る舞いに至るまで多く姿を拝見する機会を与えて頂きました。と同時に、今後の私の人生に大きな指針を与えて頂きました。先生から教えて頂いたことを今後の私の人生に活かすことが何よりものご恩返しと考えておりますが、本論文に対する謝辞としてここに深くお礼申し上げます。

本論文に対する副指導教員を引き受けてくださった那須先生、藤澤先生に深謝いたします。那須先生には学内業務に多忙を極める中副指導を引き受けて頂いた上、維持管理やマネジメントといった視点によるアドバイスからモデル細部の定式化にまでご助言をいただきました。藤澤先生には修士論文でお世話になって以来、私の支離滅裂な質問に対し、いつも論理的でシンプルな回答をいただきました。本論文に対しても博士論文として相応しい論文構成から言葉遣いまで細部にわたりご助言をいただきました。本当にありがとうございました。

島先生、野尻先生には副査を勤めていただきました。島先生には、学部時代のタイ留学でお世話になって以来、いつも厳しいながら本質的なご助言をいただきました。また、所属が怪しいにもかかわらずコンクリート研の一員としてさまざまなイベント事にも招待して頂きました。野尻先生には、物理屋の視点から研究の基本事項についてご教授いただき、先生の 30 秒で返答すべしというスタイルにより自身の思考の危うさを気づかされよいトレーニングとなりました。先生が望まれる形の議論が進行したかどうかは全く自信がありませんが、私自身には楽しい思い出です。お二人の先生に深くお礼申し上げます。

大内雅博先生（高知工科大学准教授）、宮地日出夫先生（高知工科大学助手）をはじめとするコンクリート研究室の皆さんには実験室やセミナーなどで助けていただきました。特に、後輩である太田兵庫君、小野正人君は現場に同行し、体力のない私をおおいに助けてくれました。ありがとうございました。

本論文中で参考しました資料の一部を国土交通省四国地方整備局ならびに土佐国道事務所より拝借いたしました。四国地方整備局ならびに土佐国道事務所では、必要データの収集のみならず数日間の研修も体験させていただきました。特に、波浪データについては高知港湾・空港整備局のご手配で独立行政法人港湾空港技術研究所より拝借しました。担当者の方をはじめ皆様のご協力に深く感謝いたします。

最後に家族への感謝とともに、精神面の励ましのみならず研究についてもいつも議論の相手となってくれた主人にお礼を言います。

## 参考文献

### 1 章

- 1.1) 「確実な点検と予防保全が今後のテーマ」 NIKKEI CONSTRUCTION, 2007.12.14
- 1.2) S.Nasu, H.Okamura and S.Kokubo, “Maintenance and Management of Concrete Bridges”, IANMAS’04 Kyoto, 2004
- 1.3) 松島学「コンクリート構造物の塩害劣化とライフサイクルコスト」第 8 回信頼性技術ワークショップ, 平成 13 年
- 1.4) P.Thoft-Christensen, “Modelling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures”
- 1.5) 土木学会「コンクリート標準示方書 維持管理編」2001 年制定
- 1.6) 土木学会「コンクリート標準示方書 設計編」2007 年制定
- 1.7) 国土交通省「橋梁マネジメントシステムの概要 資料-2」2006 年（四国地方整備局より提供）
- 1.8) 建設省土木研究所「土木研究所資料第 3175 号 飛来塩分量全国調査（IV）」平成 5 年 3 月
- 1.9) 建設省土木研究所「共同研究報告書第 258 号 ミニマムメンテナンス PC の開発に関する共同研究報告書（II）」平成 12 年 12 月
- 1.10) 藤田弘昭 他「青森県日本海沿岸における RC 橋梁の塩害に関する調査」土木学会論文集 E, Vol.62 No.2, 330-34, 2006
- 1.11) 日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」昭和 59 年 2 月
- 1.12) 日本道路協会「橋梁に関する地区講習会 講義要旨」昭和 58 年度
- 1.13) 浜田純夫 他「海岸付近の飛塩量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論文集, 1986
- 1.14) 宇多高明 他「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, 1992
- 1.15) 日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム委員会報告書・論文集」JCI-C64, 2004
- 1.16) 山田義智 他「海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究」日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.21-26, 1998
- 1.17) 細山田得三 他「波動場数値計算の碎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, pp.1256-1260, 2002
- 1.18) 山田文則「海岸構造物周辺のしぶきから発生する飛来塩分の輸送とその長期的観測」海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.1121-1125, 2004
- 1.19) 山田文則「海岸に隣接した構造物周辺の飛来塩分の発生・輸送過程とその長期的な予測計算」海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1216-1220, 2007
- 1.20) 田中孝和 他「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
- 1.21) 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
- 1.22) Supakit S. “Systematic Calculation for Bridge Structures Under Aerosol Chloride Attack” 社会システムマネジメント学会 2006
- 1.23) 鳥羽良明「海塩粒子」海と空, 41, 3・4 合併号, pp.71-118, 1966

- 1.24) Ernie R. Lewis and Stephen E. Schwartz, “Sea Salt Aerosol Production”, Geophysical monograph 152, 2004
- 1.25) 幸喜善福, 長沢 喬「海岸付近の空中塩分量について (II)」日林講集, 80, pp.315-317, 1969
- 1.26) 幸喜善福「海岸保全の見地からの沖縄の飛塩に関する研究」琉球大学農学部学術報告, 25, pp.429-554, 1978
- 1.27) 内田茂男「海岸における空中塩分の測定について」防風林に関する調査報告, 治山事業参考資料 第Ⅱ輯, 林野庁, pp.56-64, 1950
- 1.28) 塩害対策専門委員会気象小委員会「塩害と気象」電気協同研究, 第20巻, 第3号, 1964
- 1.29) 鳥羽良明, 田中正昭「塩害に関する基礎的研究 (第一報)」京都大学防災研究所年報第10号B 昭和42.3
- 1.30) 田中正昭「塩害に関する基礎的研究 (第6報)」京都大学防災研究所年報第15号B 昭和47.4
- 1.31) 田中正昭, 鳥羽良明「台風9119号による塩害と内陸への塩分侵入量について」京都大学防災研究所年報第36号B-2 平成5.4, 1993
- 1.32) 田中正昭「台風時における海岸での海塩粒子濃度分布について」京都大学防災研究所年報第37号B-2 平成6.4, 1994
- 1.33) 田中正昭「台風時における海塩粒子の内陸への輸送について」京都大学防災研究所年報第38号B-2 平成7.4, 1995
- 1.34) 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), pp.79-92, 2001
- 1.35) 加藤央之 他「塩分飛散予測手法の高度化 (その1)」電力中央研究所報告 T03019 平成16.3

## 2 章

- 2.1) 仲座栄三 他「強風時の飛来塩分量と降雨中塩分濃度に関する研究」海岸工学論文集, 第45巻, pp.1176-1180, 1998
- 2.2) 玉手三棄寿 他「防風林による海風中の塩分減少効果に関する研究 (II)」農林省林業試験場報告, 100, pp.55-82, 1957
- 2.3) 藤原滉一郎, 梅島嗣郎「海岸段丘上における潮風中の塩分分布について」北海道大学農学部演習林研究報告, 第21巻, 第2号, 1962
- 2.4) 幸喜善福「海岸保全の見地からの沖縄の飛塩に関する研究」琉球大学農学部学術報告, 25, pp.429-554, 1978
- 2.5) 浜田純夫 他「海岸付近の飛塩量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論文集, 1986
- 2.6) 小林壽太郎「気象をはかる」日本規格協会, 1988
- 2.7) 国立環境研究所 HP, 菅田誠治「黄砂の多寡をもたらすもの」  
<http://www.nies.go.jp/kanko/news/22/22-5/22-5-04.html>
- 2.8) 高橋幹二「基礎エアロゾル工学」養賢堂, 昭和57年11月
- 2.9) ウィリアム C・ハインズ「エアロゾルテクノロジー」井上書院, 1985
- 2.10) 宇多高明 他「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, 1992
- 2.11) 鳥羽良明, 田中正昭「塩害に関する基礎的研究 (第一報)」京都大学防災研究所年報第10号B, 昭和42.3

### 3 章

- 3.1) 鳥羽良明「海塩粒子」海と空, 41, 3・4 合併号, pp.71-118, 1966
- 3.2) 合田良實「わかり易い土木講座 17 海岸・港湾」土木学会編、彰国社, 1998 (二訂版発行)
- 3.3) Yoshiaki Toba, Momoki Koga “A Parameter Describing Overall Conditions of Wave Breaking, Whitecapping, Sea-spray Production and Wind Stress” Oceanic Whitecaps, ed. By E.C.Monahan and G.Mac Niocaill, pp.37-47, 1986
- 3.4) 松永信博 他「強風によって輸送される白波砕波上の飛沫量と風応力の関係」土木学会論文集, No.635/II-49, pp.113-126, 2002
- 3.5) Ernie R. Lewis and Stephen E. Schwartz, “Sea Salt Aerosol Production”, Geophysical monograph 152, 2004
- 3.6) Supakit S. “Systematic Calculation for Bridge Structures Under Aerosol Chloride Attack” 社会システムマネジメント学会, 2006
- 3.7) 村上和男 他「植栽による飛沫(海塩粒子)の軽減に関する現地実験」海岸工学論文集 第 42 巻, 1995
- 3.8) 鳥羽良明 (第 II 編担当)「海洋科学基礎講座 1 海洋物理」東海大学出版会, 1970
- 3.9) 山田義智 他「海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究」日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.21-26, 1998
- 3.10) 山田文則 他「海岸に隣接した構造物周辺の飛来塩分の発生・輸送過程とその長期的な予測計算」海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1216-1220, 2007
- 3.11) Noriko Iida, Yoshiaki Toba, Masaaki Chaen ”A New Expression for the Production Rate of Sea Water Droplets on the Sea Surface” Journal of Oceanography, Vol.48, pp.439-460, 1992
- 3.12) Momoki Koga and Yoshiaki Toba, “Droplet distribution and dispersion processes on breaking wind waves ” Sci. Rep. Tohoku Univ. ,Ser. 5, Vol.28, No.1, pp.1-25, 1981
- 3.13) 田中正昭「台風時における海岸での海塩粒子濃度分布について」京都大学防災研究所年報第 37 号 B-2 平成 6.4, 1994
- 3.14) 田中正昭「台風時における海塩粒子の内陸への輸送について」京都大学防災研究所年報第 38 号 B-2 平成 7.4, 1995
- 3.15) 田中正昭「塩害に関する基礎的研究 (第 6 報)」京都大学防災研究所年報第 15 号 B, 昭和 47.4

### 4 章

- 4.1) William C. Hinds, “Aerosol Technology”, John Wiley & Sons, Inc. , 1999

### 5 章

- 5.1) 気象庁 <http://www.jma.go.jp>
- 5.2) 国土交通省港湾局「全国港湾海洋波浪情報網 ナウファス」<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 5.3) 合田良實「わかり易い土木講座 17 海岸・港湾」土木学会編、彰国社, 1998 (二訂版発行)
- 5.4) 小林壽太郎「気象をはかる」日本規格協会, 1988
- 5.5) 理科年表オフィシャルサイト [http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo\\_011.html](http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_011.html)

## 6 章

- 6.1) 樫田操 他「冬期響灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測」海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.1246-1250, 1999
- 6.2) 松永信博 他「冬期季節風下において消波護岸から発生した海水飛沫の陸上への輸送に関する現地観測」土木学会論文集, No.712/II-60, pp.107-116, 2002
- 6.3) 村上和男 他「植栽による飛沫（海塩粒子）の軽減に関する現地実験」海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.1036-1240, 1995

## 7 章

- 7.1) 建設省土木研究所「土木研究所資料第 3175 号 飛来塩分量全国調査 (IV)」,平成 5 年 3 月
- 7.2) 宇多高明 他「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, 1992
- 7.3) 山田文則「海岸に隣接した構造物周辺の飛来塩分の発生・輸送過程とその長期的な予測計算」海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1216-1220, 2007

## 付 録

### 1 海水の塩分(Salinity)と塩素量(Chlorinity)

参考：「海洋科学基礎講座 1 海洋物理」東海大学出版会, 1970

国際海洋学委員会(International Association of Physical Oceanography)の定義によると、「塩分とは海水 1kg に溶解している固形物質の全量をグラムであらわしたものである。ただし、このときはすべての炭酸塩は酸化物に変え、臭素、ヨウ素を塩素で置換し、有機物は酸化する。」とあり、塩分 S は千分率‰で表わされる。海水中の塩分は、外洋水においては平均として 35‰含有するがこれには地域差があり、紅海のように乾燥地域の閉じた海では濃度が高く、河川からの流れ込みの強い地域では濃度が低い特徴がある。一方、塩分の主要成分は表 1 に示すとおりで、主要成分の存在比がほぼ一定である。このため、実際に塩分を知る場合には塩素量を測定し、成分比一定により塩分への換算が行われる。なお国際委員会によれば「塩素量とは、海水 1kg 中に含まれる塩素、臭素、ヨウ素の全量をグラムで表したものである。ただし臭素とヨウ素は塩素に置換されているものとする。」

以上より、本文では構造物を構成する鋼材の腐食を促進する物質を塩化物イオンとみなし、これを海水中の塩素量とみなす。従って、海水から成る海塩飛沫中には 19‰(1.9%)の塩化物イオンが含有する。また、塩分量から塩化物イオン量に換算する場合は、 $19\text{g}/35\text{g} \approx 0.54$  より、0.54 を塩分量に乗じることとする。

表 1 海水 1 kg 中のイオンの量 (塩素量 19.00‰のとき)

成分		g	成分		g
塩素イオン	Cl <sup>-</sup>	18.98	ナトリウム・イオン	Na <sup>+</sup>	10.56
臭素イオン	Br <sup>-</sup>	0.065	カリウム・イオン	K <sup>+</sup>	0.38
硫酸イオン	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.65	マグネシウム・イオン	Mg <sup>++</sup>	1.27
重炭酸イオン	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.14	カルシウム・イオン	Ca <sup>++</sup>	0.40
ホウ酸分子	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.026	ストロンチウム・イオン	St <sup>++</sup>	0.013
計					34.484 g

### 2 物性値

参考：「海洋科学基礎講座 1 海洋物理」東海大学出版会, 1970

高橋幹二「基礎エアロゾル工学」養賢堂, 昭和 57 年 11 月

表 2 空気と海水の主要な物性値

	空 気		海水 * 塩分 35‰	
	0 °C	20 °C	0 °C	20 °C
密度 ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.29	1.21	1028	1025
粘性係数 μ [kg/m/sec]	1.71E-5	1.81E-5	1.89E-3	1.09 E-3
動粘性係数 v=μ/ρ [m <sup>2</sup> /sec]	1.32E-5	1.50E-5	1.84E-6	1.06E-6

### 3 終末落下速度式の算出過程

参考：高橋幹二「基礎エアロゾル工学」養賢堂、昭和 57 年 11 月

本論文における落下速度の仮定として、海塩飛沫を球形と仮定した飛沫の終末速度（重力と抵抗力、浮力が釣りあって一定速度となった速度）を以下の過程により算出する。

静止流体中の質量 $m$ 、密度 $\rho_p$ の粒子が重力により速度 $w$ [m/s]で沈降するとき運動方程式は次式となる。

$$m \frac{dw}{dt} = mg - mg \frac{\rho_{air}}{\rho_p} - F_D \quad (1)$$

$F_D$ は抵抗力で、空気中の飛沫が空気と相対運動するとき、飛沫は空気の粘性により流れの方向に抵抗  
力 $F_D$ を受ける。また、 $F_D$ は空気密度 $\rho_{air}$ の流速 $u$ の流れの中に固定された直径 $d$ の球形粒子について  
式で表わされる。

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_{air} u^2 \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (2)$$

$C_D$ ：抵抗係数（ $Re$  数の関数）、 $\frac{1}{2} \rho_{air} u^2$ は流体の運動エネルギーの代表量、 $\frac{1}{4} \pi d^2$ は球の投影面積である。

式 1 の右辺各項は重力、浮力、抵抗力であり、時間が経過するにつれて左辺加速度が 0 に近付き、  
流体中の飛沫は一定速度、すなわち終末速度に到達する。式 1 より終末速度 $w$ は次式となる。

$$w = \left\{ \frac{4gd}{3C_D} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{air})}{\rho_{air}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

抵抗係数 $C_D$ はレイノルズ数 $Re = (w \cdot d)/(\mu/\rho_{air})$ の関数で次式より求める。

$$C_D = 24/Re \quad (Re < 1) \quad (4)$$

$$C_D = (0.55 + 4.8/\sqrt{Re})^2 \quad (1 < Re < 10^4) \quad (5)$$

$\mu$ ：空気粘性係数

### 4 我が国各地の海浜断面形状

参考：野田英明、橋本宏「新体系土木工学 79 漂砂と海岸保全施設」土木学会編、技報堂出版 1981

