

日本海沿岸での飛来塩分の実地観測と その対策法の評価

FIELD OBSERVATION OF THE SEA SALT SPRAY IN THE COAST OF THE JAPAN SEA AND EVALUATION OF COUNTERMEASURE AGAINST SEA SALT TRANSPORTATION

山田文則¹・細山田得三²

Fuminori YAMADA, Tokuzou HOSoyAMADA

¹学生会員 工修 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

²正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教授

The Sea salt spray is small particles of seawater, splashed up by wind and wave action. Transport of salt spray is also affected by wind, geographical condition and configuration of coastal structures. In this study, integrated numerical code which covers 1) wave propagation with wave breaking, 2) generation of sea salt spray flux in the surface, 3) advection-diffusion of sea salt spray, is developed. Field observation in Niigata Pref. is also carried out to compare the numerical results. It is shown that the amount of the spray generated on the sea surface is related to both wind and wave action. The amount of sea salt spray production and transportation can be estimated by the numerical model. The salt spray production around coastal structures or shoreline are shown clearly. Characteristics of the coastal structure and geographical condition affect the transport of the sea salt spray. The effects of salt spray reduction is evaluated quantitatively by the numerical study.

Key Words : Sea Salt Spray, Salt Damage, Wave Breaking, Field Study, Numerical Study

1. はじめに

近年, 建設技術の向上により生活空間がより海岸側へ張り出した形となり, 海岸・海洋空間の利用が進んでいる。それに伴い, 海岸近傍では多数の構造物が設置されてきた。しかしながら, このような場所に構造物を設置する場合, 塩分による耐久性および設計強度における信頼性の低下を考慮する必要がある。塩害に対する研究が盛んに行われてきた。塩害は, 海面から水分を含んだ飛来塩分が発生し, 風によって輸送され構造物に付着することによって生じる。そのため, 仲座ら^{1), 2)}, 村上³⁾らおよび著者ら⁴⁾は, 飛来塩分の輸送過程に関する実地観測および数値解析を行い, その空中での輸送過程をほぼ明らかにしている。飛来塩分の発生過程に関しては, 樋田⁵⁾, 村上⁶⁾および細山田・著者⁷⁾によって研究が行われ, 砕波帯から大量の飛来塩分が発生していることを指摘している。一方, 飛来塩分の軽減対策に関する研究では, 浅井ら⁸⁾は沖側に砕波帯を移動させることにより, 汀線付近に輸送される飛来塩分量を軽減できること, 村上ら³⁾は実地観測により離岸堤の背後では, 観測される飛来塩分量が減少する

ことを報告している。しかし, このような飛来塩分の発生源を制御する軽減対策に関しては, 十分な資料が不足しているのが現状であり, 数多くの現場へ適用する際には, 数値実験による検討を行う必要があると考えられる。また, 飛来塩分は地域性が強い現象であるために全国各地で実地観測が行われているが, 日本海沿岸では観測例が少なく, 資料も不足している。

本研究では, 日本海沿岸に位置する新潟県中越地方の海岸において実地観測を行い, 気象・海象条件と飛来塩分量の関係について検討を行った。さらに, 飛来塩分の軽減対策として飛来塩分の発生源を制御する方法に注目し, 沖側海域に海岸構造物を設置した場合の数値実験を行い, その軽減効果について検討を行った。

2. 実地観測

(1) 観測期間および観測場所

実地観測は, 図-1の新潟県中越地方に位置する西山町・出雲崎町の3箇所の海岸で行った。観測期間

は2003年1月～12月である。観測を行った海岸は、それぞれ以下のような特徴がある。

- ・ 観測海岸1：汀線から沖側へ数百メートルの位置に海岸構造物が設置してあり、碎波帯が汀線から遠い海岸
- ・ 観測海岸2：砂浜であり、消波ブロックなどの海岸構造物が少ない海岸
- ・ 観測海岸3：汀線から沖側に向かって50m付近に離岸堤が多数設置してあり、激しい碎波帯が汀線に近い海岸

(2) 観測方法

観測は乾燥ガーゼ法で行った。塩分捕捉器は、縦横10cm×10cmの捕捉窓を設置した2枚の亚克力板の間にガーゼを挟んだものを用いた。塩分捕捉器を空气中に放置し、観測終了時にポリエステル袋に入れて分析作業にいたるまで保存した。分析は、ガーゼを蒸留水(20ml)に浸し攪拌した後、この水溶液中のNa⁺濃度をコンパクトナトリウムイオンメータ(堀場C-122)を用いて測定した。その後、NaCl濃度に換算を行い、暴露時間および受風面積をもとに風向きに垂直な単位面積当りの付着塩分量(g/m²/h)を算定した。観測時間として、降雨、降雪がない時間帯を選ぶことにより、降水による誤差を除去した。このため、降雨・降雪の多い冬季では、1回の計測時間は10～120分程度と短時間であり、一方、降雨の少ない夏季では300～540分程度である。

観測点は、各海岸において汀線から500m以内の範囲に3点から10点を配置した。塩分捕捉器はステンレス製のポールまたは既設のポールに地面から0.5～2.0mの高さで設置した。

(3) 観測結果および考察

図-2(a)(b)(c)は、海陸風の卓越していた各観測日の飛来塩分量と風速の関係を表したものである。この図の飛来塩分量は、各観測日の観測点全体の結果より汀線から50m地点での飛来塩分量を算出したものである。風速は各海岸で簡易風速計を用いて測定した結果である。この図に示す通り、冬季では、各海岸で観測される飛来塩分量が平均的に大きく、塩分量は0.1～1.0g/m²/h程度であった。一方、冬季以外の季節では、塩分量は0.0001～0.001g/m²/h程

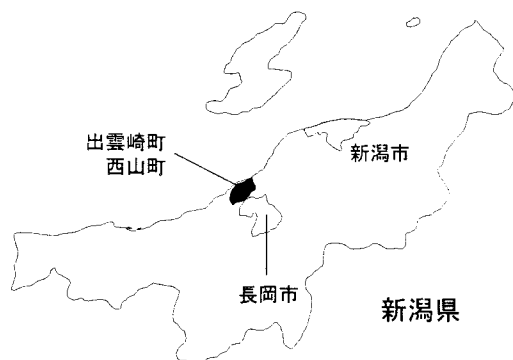


図-1 観測場所(新潟県中越地方)

度であり、日本海沿岸域では季節による飛来塩分量の変動が非常に大きいことがわかる。

各海岸の飛来塩分量と風速の変動を比較した場合では、両者は同様の傾向で変動していることがわかる。この結果から、海岸付近で観測される飛来塩分量は、風速に強く依存しているといえる。図-3は、3箇所の海岸の飛来塩分量と風速の観測結果をまとめたものである。この図に示す通り、ばらつきは見られるものの風速と飛来塩分量は、対数グラフ上で直線的に増加していることがわかる。今回の観測に関する限り回帰計算の結果、飛来塩分量と風速の関係は式(1)で示されることがわかった。

$$c = c_1 \cdot 0.167 \exp(0.43u) \quad (1)$$

ここで、 c 、 c_1 および u は、観測される飛来塩分量、基準となる風速での飛来塩分量、観測点での風速である。また、式(1)に示した直線(図-3中の実線)からのずれは、ある種の傾向を持っている。これは、飛来塩分は地域性が強い現象であり、各海岸の海底

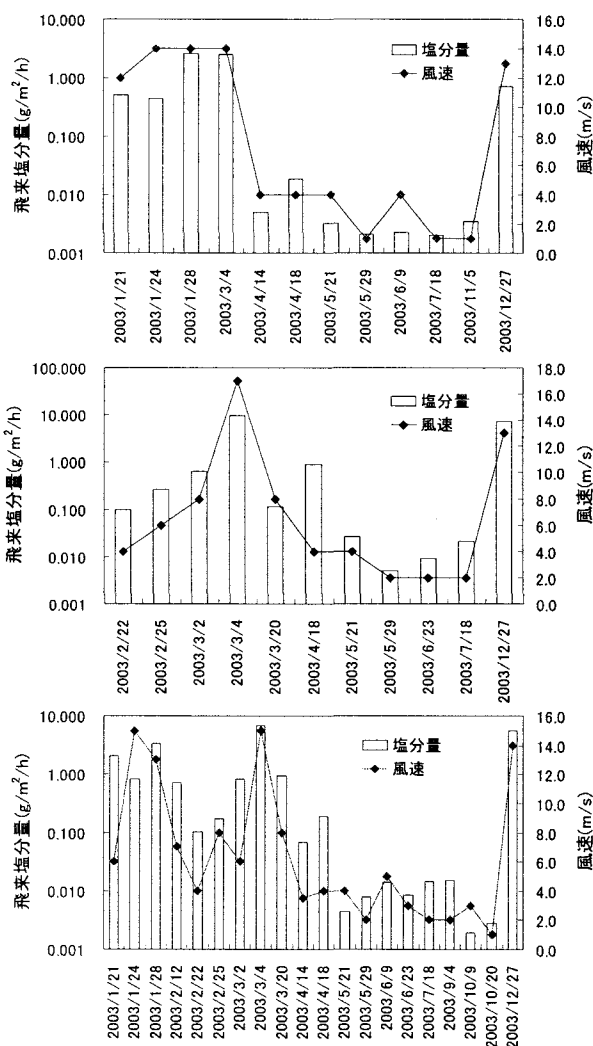


図-2 飛来塩分量と風速の関係
(a) 観測海岸1(上), (b) 観測海岸2(中),
(c) 観測海岸3(下)

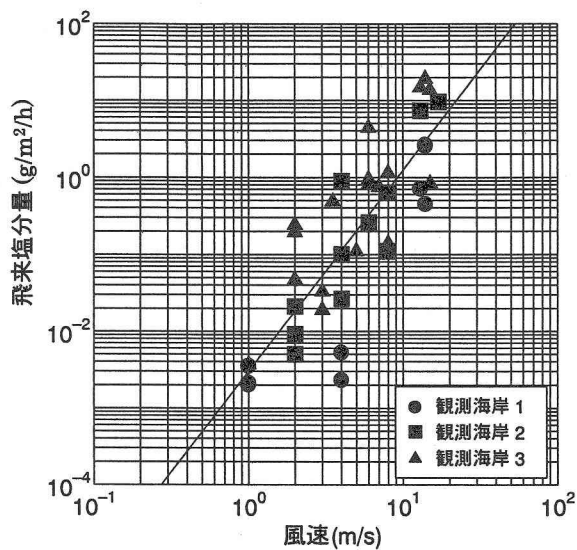


図-3 飛来塩分量と風速の関係



図(a) 2003年4月18日の海岸の様子



図(b) 2003年5月21日の海岸の様子

図-4 同じ風速で異なった波高レベルの海岸の様子

地形によって飛来塩分の発生量および発生位置が大きく異なるためであると推察される。今回の観測結果では、沖側に碎波帯がある観測海岸1が他の海岸に比べ飛来塩分量は少なくなる傾向にあった。しかしながら、同一の海岸で同様の風が吹いている場合においても飛来塩分量にばらつきが見られる。これは波浪条件によるものであり、海岸近傍の飛来塩分は風だけでなく波浪条件にも影響を受けているといえる。たとえば、図-2(b)の観測海岸2の4月18日と5月21日の観測結果では、両者の風速が4m/sであるにもかかわらず、飛来塩分量に大きく差が見られる。

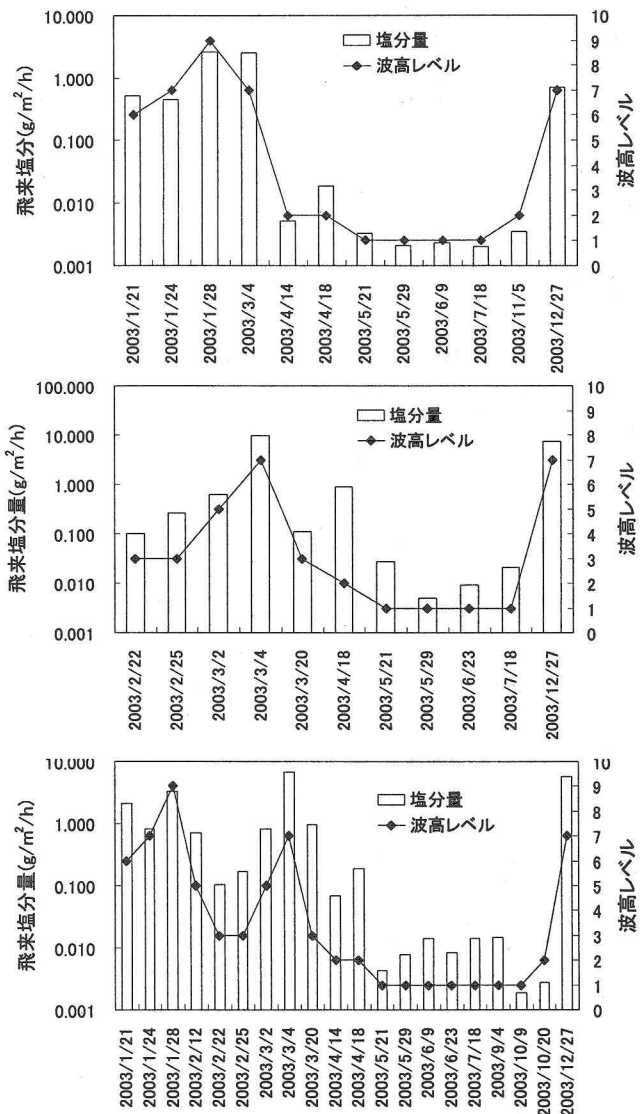


図-5 飛来塩分量と波高レベルの関係
(a) 観測海岸1(上), (b) 観測海岸2(中),
(c) 観測海岸3(下)

図-4(a) (b)は、同じ風速で異なった波高レベル(4月18日, 5月21日)の海岸の様子を表したものである。この図より、両者は波の状態が異なっており4月18日の方の波高が高いことがわかる。そのため、海面から大量に飛来塩分が発生している4月18日の方が輸送される塩分量は大きく、両者に差が生じたと考えられる。

図-5(a) (b) (c)は、各海岸の飛来塩分量と波高レベルを表したものである。ここでいう波高レベルとは、気象庁の公開している日本海の推定波高データから、新潟県沿岸の波高を波高レベルとして著者らが算定したものである。この図に示す通り、飛来塩分量と波高レベルに関しても風速の場合と同様に類似した傾向にある。これより、観測される飛来塩分量は風速だけでなく波によっても影響を受けることが明らかになった。しかしながら、本研究で算出し

た波高レベルは、気圧配置から推算されたものであり、観測点近くの海岸の波高は異なると考えられる。今後、この点については、詳細な波浪データを測定し、改善していく必要がある。

3. 数値解析

(1) 数値モデルの構成

数値モデルは3次元であり、1)波動場、2)飛来塩分の発生過程、3)飛来塩分の輸送過程、4)定常な風の場合の計算によって構成されている。1)、2)および3)については、同じ時間ステップで計算を行っている。4)はオフライン処理で一度だけ計算を行い、その結果を飛来塩分輸送の計算に用いている。以下に各数値モデルについて順に説明する。

a) 波動場の計算

波動場の計算は、式(2)、(3)に示す連続条件式および修正ブシネスク方程式を用いて行った。実際の計算では、式(3)を平面2次元に拡張して計算を行っている。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \quad (3)$$

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

ここで、 η 、 Q 、 g 、 D 、 h 、 x 、 t は水位変動、1次元の線流量、重力加速度、平均水深、水深、水平座標、時間であり、 F_d はDibajniaら⁹⁾による碎波減衰係数である。

b) 飛来塩分の発生の計算

碎波から発生する飛来塩分は大別して2種類に分けることができる。1つは、碎波により海水面がちぎれ、しぶき状になって大気中に飛散するもの。もう一方は、碎波によって海水面が乱れ、海水面下に気泡が混入することによって発生するものである。前者の場合では、比較的に大粒の飛来塩分が強風によって輸送されるため、内陸部への輸送量も大きく、海岸近傍での塩害の主な要因となっていると考えられる。一方、後者は、発生する飛来塩分粒子が非常に微小なため輸送される量も少ない。そのため、今回の解析では、前者について数値計算を行い、後者は解析結果に与える影響が小さいと考え無視している。

飛来塩分の発生は、碎波によるエネルギー損失が関与すると考え、碎波帯での発生量は式(4)、(5)を用いて計算を行った。

$$c_a = a \cdot F_d E \quad (4)$$

$$a = 1.92 \times 10^{-7} \cdot \exp(0.467u) \quad (5)$$

ここで、 c_a 、 F_d および E は、飛来塩分の発生量、碎波減衰係数および波の全エネルギー量である。係数 a は、観測から求められる値であり、 u は水平風速を示している。

大気空間での飛来塩分の発生時の境界条件は、村上ら⁶⁾の観測結果より海面上で式(6)、(7)のような指数分布を与えている。

$$c = c_0 \cdot \exp(-Az) \quad (6)$$

$$A = w_s / E_z \quad (7)$$

ここで、 c 、 c_0 、 A 、 Ez および z は、各高さでの飛来塩分量、海面上の飛来塩分量、鉛直方向の飛来塩分の減衰率を示した係数、鉛直方向の拡散係数、鉛直高さである。

c) 飛来塩分の輸送の計算

飛来塩分の輸送は、式(8)のような移流・拡散方程式を用いて計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right) - Q_a \quad (8)$$

ここで、 w_s 、 Q_a および k はそれぞれ海塩粒子の沈降速度、塩分吸収量、風の計算で求めたk-ε乱流モデルによって計算した乱流拡散係数である。飛来塩分の沈降速度 w_s の計算には、一般的に浮遊砂の沈降速度に対して用いている方法を採用した。すなわち、粒子の沈降速度を規定する式は、以下に示す式(9)、(10)、(11)である。

$$C_d \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \frac{Ds^3}{\mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \quad (9)$$

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} (1.0 + 0.150 \cdot \text{Re}^{0.687}), \quad \text{Re} = \frac{Ds \cdot V_s}{\nu_{air}} \quad (10, 11)$$

ここで、 C_d 、 Re は抵抗係数および粒子レイノルズ数であり、式(10)、(11)で評価される。 ν_{air} 、 Ds 、 μ 、 ρ_s 、 ρ_f はそれぞれ、空気の動粘性係数、飛来塩分粒子の粒径、空気の粘性係数、飛来塩分粒子の密度および周囲流体の密度である。これら3式において粒径を既知として w_s の初期値をストークスの沈降速度として反復計算を行い、飛来塩分の粒径に応じた沈降速度を求めた。

d) 風の場合の計算

風の場合の計算は、大気为非圧縮性と仮定し、式(12)、(13)の連続式およびNS方程式を用いて計算を行った。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) \quad (12, 13)$$

ここで、 u_i , x , t , P , g_{x_i} , ν_t はそれぞれ、 i 方向の流速、3次元座標、時間、圧力、 i 方向重力加速度、乱流粘性係数である。

(2) 計算条件

波動場の計算領域は平面2次元で図-6のような210m×350mの範囲である。左端(沖側)から50m地点に海岸構造物が設置してあり、その背後から300m地点まで1:20の一定勾配とした。汀線は左端より250m地点とした。入射波は、周期9s、波高1.0m、2.0m、3.0m、4.0mの4種を左端(0m)の位置より与えた。大気空間は、3次元で210m×350m×30mの範囲である。気流は左端(沖側)において風速15m/sを面に一様に与えている。発生する飛来塩分の粒径は、直径1.00mm、0.50mm、0.25mm、0.10mm、0.05mmの5種を与えている。

(3) 計算結果および考察

図-7(a)(b)は、潜堤を沖側に設置した場合と設置していない場合の飛来塩分の分布図を示したものである。この図(a)に示すように、構造物を設置していない場合では、汀線付近で大量の飛来塩分が発生し、風の作用により内陸部へ輸送されているのがわかる。一方、図(b)に示す潜堤を設置した場合では、沖側で大量の飛来塩分が発生し、汀線までの間に大量に減少している。この結果から、潜堤を沖側へ設置した場合の方が、空間全体での飛来塩分の発生源の範囲は大きくなるが、陸域へ輸送される飛来塩分量は減少することがわかった。

図-8および表-1は、鉛直2次元空間で構造物を設置した場合と設置していない場合の計算結果である。図および表の値は、各位置での飛来塩分量を鉛直方向に積分したものである。この図に示す通り、いずれの波高の場合も構造物を設置した場合のほうが、構造物周辺での局所的な飛来塩分の発生量は大きいですが、内陸部へ輸送される飛来塩分量は減少している

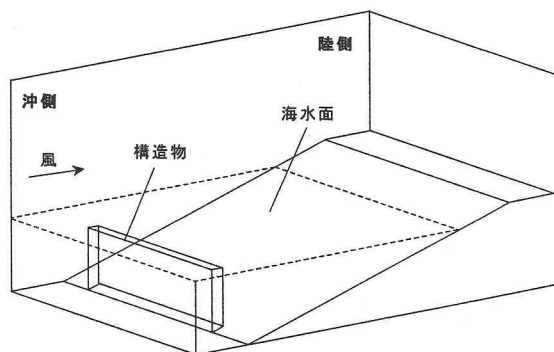


図-6 計算地形

ことがわかる。また、表-1の減少率は、汀線から90m地点で構造物を設置した場合に飛来塩分量がどの程度減少したかを示したものである。表より、波高が3mおよび4mの場合では、減少率は50%程度となっており、構造物を設置することによって高い軽減効果が見られる。しかしながら、この軽減効果は、構造物から汀線までの間に発生した飛来塩分が沈降することによって生じる。そのため、軽減効果は発生する飛来塩分の粒径すなわち沈降速度に大きく依存する結果になると考えられる。図-9は、波高4mを与えた場合の各粒径の飛来塩分分布を示したものである。この図からわかるように、飛来塩分の粒径が小さい場合にはあまり沈降せずに内陸部へ輸送されている。微小な粒径の飛来塩分だけを与えて計算を行った場合には、構造物を設置した場合の方が内陸部へ輸送される飛来塩分量は大きくなる傾向にあった。これらより、今回のような計算条件の場合では、沖側で粒径の大きい飛来塩分を発生させる工夫が内陸部へ輸送される飛来塩分の軽減に有効であると考えられる。ただし、今回の解析では、飛来塩分の粒径を直径1.0～0.05mmで計算を行っており、微小な粒径を無視している。そのため、飛来塩分の十分な軽減効果を検討する場合、より微小な塩分粒径を含めた解析が必要と考えられる。

4. 結論

本研究では、日本海沿岸域に位置する新潟県において実地観測を行うと共に、沖海域に構造物を設置した数値実験を行い、内陸部へ輸送される飛来塩分量の軽減効果について検討を行った。実地観測の結果、日本海沿岸域では、観測される飛来塩分量は時期によって大きく変化していることが明らかになった。飛来塩分は、風速と入射してくる波高および海

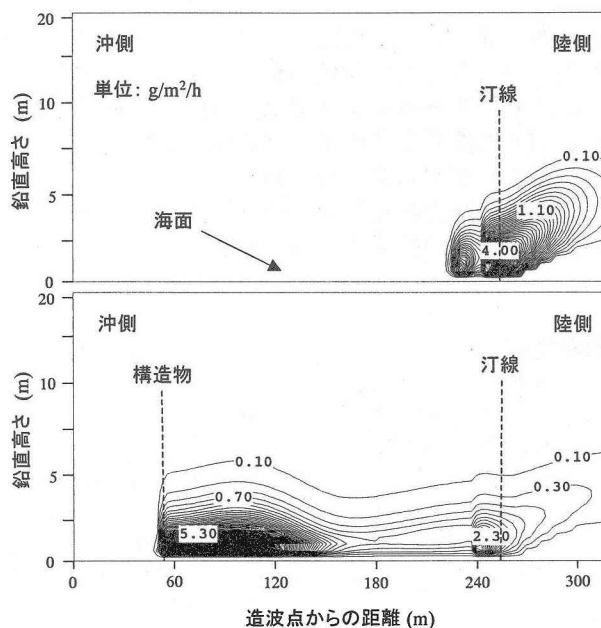


図-7 飛来塩分の濃度分布
(a) 構造物なし(上), (b) 構造物設置(下)

表-1 内陸部へ輸送される飛来塩分量の減少率

		飛来塩分量 (g/m ² /h)							
入射波高		1.0m		2.0m		3.0m		4.0m	
構造物の有無		なし	設置	なし	設置	なし	設置	なし	設置
造波点からの距離 (m)	60	0.00	97.18	0.00	351.96	0.00	710.15	0.00	1134.23
	250	56.43	10.33	137.06	49.96	245.12	113.06	359.88	192.50
	260	56.26	9.27	169.17	42.72	292.06	103.34	428.28	192.81
	300	22.57	5.93	72.73	24.05	140.91	56.39	222.54	102.51
	340	6.49	4.24	28.78	14.93	65.46	32.16	113.32	56.67
飛来塩分量の減少率(%)		34.7		48.1		50.9		50.0	

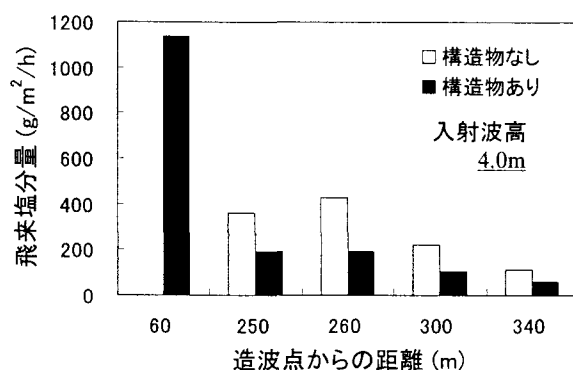
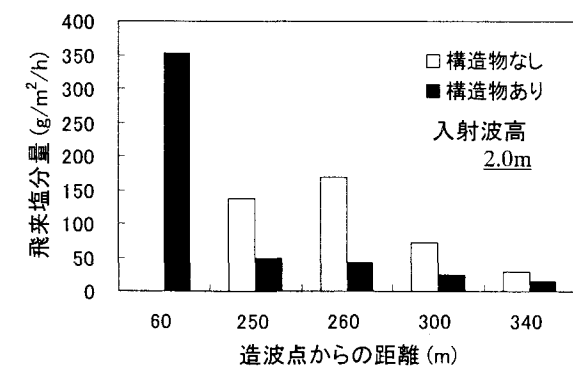


図-8 各位置での飛来塩分の鉛直積分量

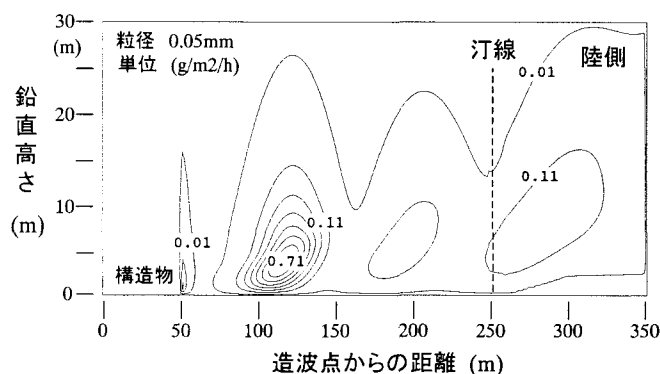
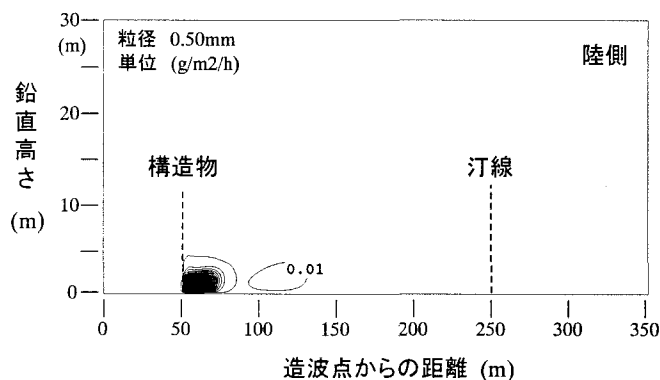


図-9 各粒径の飛来塩分の空間分布

底・海岸地形に影響を受けて発生・輸送されることが明らかになった。数値実験の結果、今回のような条件で計算を行った場合では、内陸部へ輸送される飛来塩分は沖側で発生する飛来塩分の粒径に強く依存することが明らかになった。

今後は、構造物の形状と位置を変化させた数値解析を行い、その結果について検討を行う予定ある。

参考文献

- 1) 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦：大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性，海岸工学論文集，第38巻，pp.896-900，1991。
- 2) 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，pp.1036-1040，1993。
- 3) 村上和男・山田邦明・西守男雄：沿岸域の飛沫に関する現地調査—津田における現地調査結果とアンケート調査結果—，港湾技研報告，No.784，48p，1994。
- 4) 山田文則・細山田得三：海面から発生する飛来塩分

に関する実地観測とその飛来塩分発生・輸送数値モデルの開発，海岸工学論文集，第50巻，pp.1176-1180，2003。

- 5) 樋田操：強風下の沿岸海域から発生する飛沫量とその陸域への輸送に関する研究，博士論文（九州大学），150p，1999。
- 6) 村上和男・加藤一正・清水勝義・柳嶋真一・中村聡志・尾崎 靖・福田真人・宮崎啓司・山田邦明・西守男雄：飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査，港湾技術研究所報告，第34巻，第四号，pp.302-311，1995。
- 7) 細山田得三・山田文則・田安正成：波動場数値計算の砕波判定によって発生する飛来塩分とその輸送に関する数値実験，海岸工学論文集，第49巻，pp.1256-1260，2002。
- 8) 浅井 正・村上和男・西守男雄：波浪条件や海底性状の変化が飛沫の発生に与える影響に関する2次元水路実験，海岸工学論文集，第42巻，pp.1191-1195，1996。
- 9) Mohammad Dibajnia，渡辺晃：波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル，海岸工学講演会論文集，第34回，pp.291-295，1987。