

# 論文 飛来塩分の発生・輸送シミュレータの開発

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

要旨：飛来塩分は，海水面より発生し，風によって空気中を輸送され，構造物に到達する。構造物に飛来する塩分を精密に予測することを目的として，本研究では，飛来塩分の波動場からの発生とその輸送に関する数値モデルの開発を行った。その結果，本数値モデルの計算結果は海岸から数百 m の範囲で行った飛来塩分の実地観測結果をよく表現できることが明らかとなった。また，飛来塩分は気象条件だけでなく波浪条件にも影響を受けていることが数値計算上示された。

キーワード：飛来塩分，塩害，数値解析，実地観測，波動場

## 1. はじめに

飛来塩分は，海水面から発生し，風によって輸送され，構造物に到達する。コンクリート構造物表面の塩分量は，コンクリート中の塩分の侵入過程を解析する際に境界条件として用いられることから，鉄筋コンクリート構造物の塩害に対する耐久性を評価する上で，重要な指標となっている。

海岸やその周辺の地形の影響を受ける飛来塩分の動態を汎用的に予測するには，地形等の各種要因を合理的に考慮できる数値モデルを開発することが有効であると考えられる。飛来塩分の輸送過程の数値シミュレーション例はいくつか報告されている<sup>1)2)</sup>。

一方，台風襲来時，および季節風の卓越する冬季の日本海沿岸などでは，波動場から発生したしぶき状の飛来塩分が大量に輸送される。このような場合では，大気中の飛来塩分量は波浪条件に大きく影響を受けると考えられるので，精度よく予測するには，飛来塩分の輸送過程だけでなく，波浪場における飛来塩分の発生過程を表現できる数値モデルの開発が必要である。

著者ら<sup>3)4)5)</sup>および永島ら<sup>6)</sup>は，より一般性のある方法を目指し，波動場における飛来塩分の発



図 - 1 新潟県中越地方

生過程，大気中の輸送過程を，一貫して計算する数値モデルの開発を目的とした研究を行っている。本論文では，数値モデルの概要と，飛来塩分の実地観測による検証について述べる。

## 2. 飛来塩分の実地観測

### 2.1 観測場所および観測期間

飛来塩分の観測場所は図 - 1 の日本海沿岸域の新潟県中越地方に位置する西山町の石地海岸である。この海岸は図 - 2 のように汀線の背後に高さ 3m 程度の盛土が設置してあり，その盛土上には高さ 5m の防風壁が設置してある。観測は 2003 年 1 月 23 日に実施した。

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

\*2 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 博士(工学) (正会員)

\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 博士(工学)

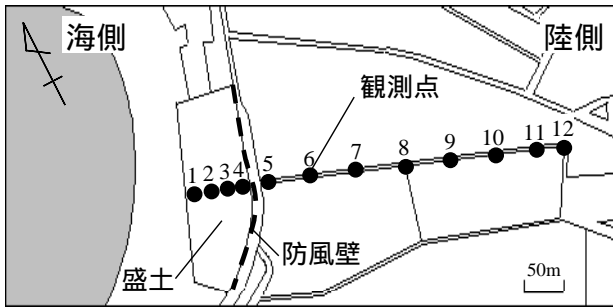


図 - 2 観測点の配置

## 2.2 観測方法および観測点の配置

観測方法は村上ら<sup>7)</sup>を参考に乾燥ガ - 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 - 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チル袋に入れて分析作業にいたるまで保存した。分析はガ - ゼを蒸留水(20ml)に浸し攪拌した後、この水溶液中の Na<sup>+</sup>濃度をコンパクトナトリウムイオンメータを用いて測定した。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時間・単位面積当りの付着塩分量 (g/m<sup>2</sup>/h)を算定した。1 回の計測時間は 10 ~ 120 分程度と短時間である。

観測点は、図 - 2 のように No.1 ~ No.4 を防風壁の前面に、No.5 ~ No.12 を防風壁の背後に設置した。塩分捕捉器はステンレス製のポ - ルに地面から 1.0m 程度の高さで設置した。

## 2.3 観測結果および考察

図 - 3 は飛来塩分の輸送量に関する実地観測の結果と風速の測定結果を示したものである。風速は防風壁に近づくにつれ減少する傾向が見られる。防風壁の背後では、防風壁から離れるに従い風速は増加している。図に示すとおり、風速の変化に伴い、観測される飛来塩分量も変化している。飛来塩分量は汀線付近の観測点 No.1 で高く、防風壁に近づくにつれて減少している。防風壁の背後では、飛来塩分量は風速と異なり一定の値を示している。この結果より、防風壁による風の減少効果により、壁の前面で大粒の飛来塩分が沈降し、壁の背後では沈降し

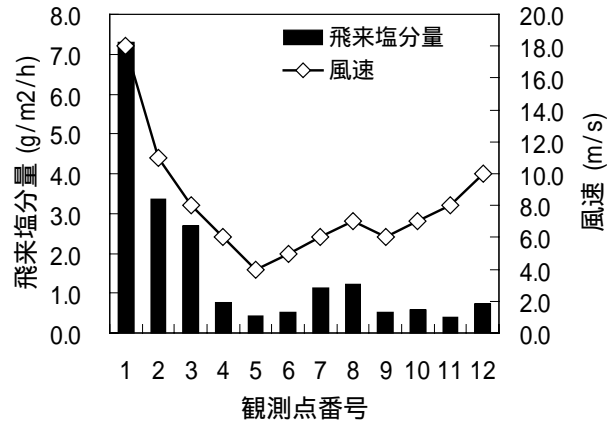


図 - 3 飛来塩分量と風速の観測結果

にくい微小な粒径の塩分が輸送されていると考えられる。

次章において、この観測を再現した数値計算を行い、観測結果との比較を行う。

## 3. 数値解析

### 3.1 数値モデル全体の構成

大気中の飛来塩分濃度が高い冬季の日本海沿岸では、厳しい気象・海象作用により海水面から大量のしぶきが発生し、飛来塩分として大気中に供給される。本研究の数値モデルは、この波動場からのしぶきの生成過程とその輸送過程が計算できる統合数値モデルである。

数値モデルは以下のような素過程によって構成されており、これらのモデルを結合することにより飛来塩分の発生から輸送を一貫して表現している。

- ・ 風場の計算
- ・ 波動場の計算
- ・ 飛来塩分の発生過程の計算
- ・ 飛来塩分の移流・拡散過程の計算

実際の計算では、風場をオフライン処理であらかじめ計算しておき、他の計算は時間ステップごとに行う。図 - 4 に数値モデル全体の構成図を示す。

### 3.2 数値解析の方法

- (1) 波動場および飛来塩分の発生過程の計算  
砕波から発生する飛来塩分は、2 つに大別する

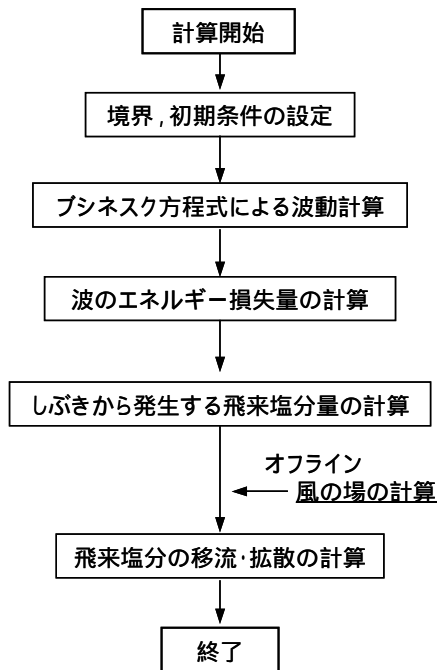


図 - 4 数値モデルの構成図

ことができる。ひとつは砕波によって海水面がちぎれることによって発生する飛沫, もうひとつは砕波帯によって海水面下に生成される気泡が海水面で破裂することによって発生する飛沫である。海岸近傍に輸送される大部分の飛来塩分がしぶき状のものであると考え, 本研究では前者を考慮して計算を行った。後者の気泡から発生する飛沫は少ないと考え, 無視している。

飛来塩分の発生要因となるしぶきは, 砕波帯によって海水面が乱れることによって生成される。そのため, 本研究では, 海水面の乱れの度合いを砕波による波のエネルギー - 減衰量とし, 海面上に生成される飛沫量を計算することによって, 飛来塩分の発生の計算を行った。波動場において飛来塩分の発生に寄与する乱れは, 修正ブシネスク方程式による波動場の数値計算における砕波減衰係数を用いて計算した。式(1), (2)に1次元の連続条件式および1次元の修正ブシネスク方程式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

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

ここで,  $\eta$  は水位変動(m),  $Q$  は1次元の線流量 ( $m^2/s$ ),  $g$  は重力加速度( $m/s^2$ ),  $h$  は平均水深(m),  $D (=h + \eta)$  は全水深(m),  $x$  は  $x$  方向の水平座標,  $t$  は時間(t),  $B$  はブシネスク方程式の形に応じた定数( $B=1/21$ )である。 $F_d$  は Dibajnia ら<sup>8)</sup>による砕波減衰係数(1/s)である。本研究では  $F_d$  を用いて波動場の波のエネルギー - 損失を評価した。

砕波帯でのしぶき状の発生量は式(3), (4)を用いて計算を行った。

$$c_a = aF_d E \quad (3)$$

$$a = b_1 \exp(b_2) \quad (4)$$

$$b_1 = 2.279 \times 10^{-6}, \quad b_2 = 0.467U$$

ここで,  $c_a$  は飛来塩分の発生量( $g/m^2/h$ ),  $E$  は波の全エネルギー - 量である。係数  $b_1, b_2$  は海岸地形および気象・海象条件に依存した値であり, 各海岸で異なると考えられる。係数  $a$  は観測から求めた値であり,  $U$  は水平風速( $m/s$ )を示している。ただし, 浅井ら<sup>9)</sup>の研究によれば風によって海水面から大気中に飛散する塩分量は海上風速 13m/s で限界となり, 風速がこれ以上増加しても発生する塩分量は一定となることが示されている。そのため, 式(4)における水平風速  $U$  は 13m/s が限界であり, 風速がそれ以上の場合も  $U$  は 13m/s として計算を行っている。

発生時に大気中に舞い上がったしぶきの分布は飛沫粒子の沈降と鉛直方向の拡散が釣り合った状態の式(5)で評価できると仮定し, 式(6)で計算を行った。

$$w_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \nu_t \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$c(y) = c_0 \exp(-Ay) \quad , \quad A = w_s / \nu_t \quad (6)$$

ここで、 $c$  は飛来塩分量( $g/m^2/h$ )、 $c_0$  は海水面での飛来塩分量( $g/m^2/h$ )、 $w_s$  は飛来塩分の沈降速度( $m/s$ )、 $A$  は飛来塩分の鉛直方向の減衰係数( $1/m$ )、 $y$  は鉛直高さ( $m$ )、 $\nu_t$  は  $k$ -乱流モデルから求められる乱流拡散係数( $m^2/s$ )である。

### (2) 風の場合および飛来塩分の輸送の計算

空気を非圧縮性流体と考え、式(7)、(8)に示す質量保存則(連続式)と運動量保存則(ナビエ・ストークス方程式)により、風の場合の数値計算を行った。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} - g_x + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} - g_y + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

ここで、 $x, y$  は 2次元座標、 $u, v$  は  $x, y$  方向の流速( $m/s$ )、 $t$  は時間( $s$ )、 $P$  は圧力( $Pa$ )、 $g_x, g_y$

は重力加速度( $m/s^2$ )である。計算はオフライン処理として 1 回だけ行い、定常風の場合の解を塩分の拡散計算に用いた。飛来塩分の拡散は、式(9)の拡散方程式により計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + (v - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \nu_t \left( \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

ここで、 $w_s$  は大気中での飛来塩分粒子の沈降速度( $m/s$ )である。

以上の各方程式の解法は、有限差分法を用いた。有限差分法は領域内の関数分布を各格子点上の値で置き換えた離散化データを用いて、微分方程式の近似解を求める方法である。

### 3.3 計算条件および入力パラメータ

#### (1) 数値モデルの検証

計算領域は 2次元であり、図 - 5 のような

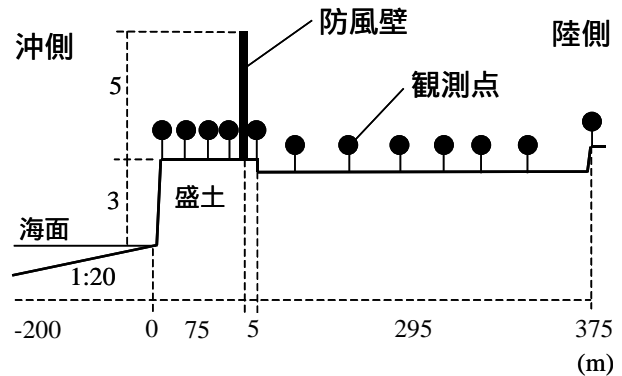


図 - 5 計算地形

表 - 1 計算モデルの入力・出力パラメータ

	入力パラメータ	記号	単位	出力パラメータ	記号	単位
計算全体	総時間ステップ数	NT	個			
	時間間隔	DT	s			
	総格子数	NX,NY	個			
	格子間隔	DX,DY	m			
	地形データ	H	m			
波動場	入射波高	$\eta_0$	m	波高減衰係数	$F_d$	1/s
	入射周期	$T_0$	s	波の全エネルギー量	E	kg・m/m
				波高		m
飛来塩分発生	風速	U,V	m/s	塩分の発生量	ca	g/m <sup>2</sup> /h
	波のエネルギー量	E	kg・m/m			
風の場合	波高減衰係数	$F_d$	1/s			
	境界での風速	U	m/s	風速	U,V	m/s
	大気粘性係数		m <sup>2</sup> /s	乱流拡散係数	$\nu_t$	m <sup>2</sup> /s
	圧力	P	Pa			
	収束許容誤差	epsi				
飛来塩分輸送	塩分の発生量	ca	g/m <sup>2</sup> /h	大気中の飛来塩分量	c	g/m <sup>3</sup> /h
	風速	U,V	m/s			
	乱流拡散係数	$\nu_t$	m <sup>2</sup> /s			
	塩分粒子の沈降速度	$w_s$	m/s			

表 - 2 計算条件

	CASE	構造物	波高 m	周期 s	風速 m/s
地形	1	あり	4.0	9.0	30.0
	2	なし	4.0	9.0	30.0
波浪	3	なし	6.0	9.0	30.0
	4	なし	3.0	9.0	30.0
	5	なし	2.0	9.0	30.0
	6	なし	1.0	9.0	30.0
風速	7	なし	4.0	9.0	40.0
	8	なし	4.0	9.0	30.0
	9	なし	4.0	9.0	20.0
	10	なし	4.0	9.0	17.5
	11	なし	4.0	9.0	15.0
	12	なし	4.0	9.0	12.5
	13	なし	4.0	9.0	10.0
	14	なし	4.0	9.0	7.5
	15	なし	4.0	9.0	5.0

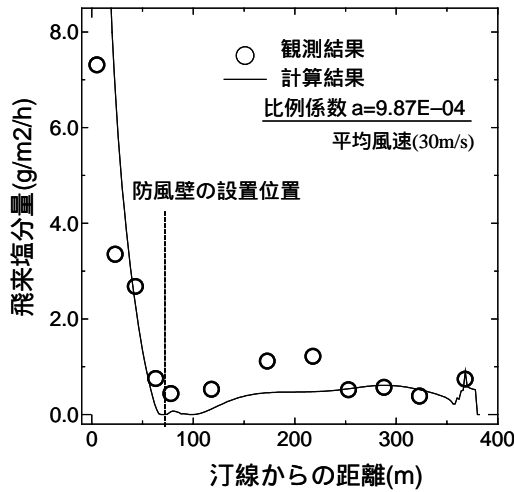


図 - 6 計算と観測結果の比較

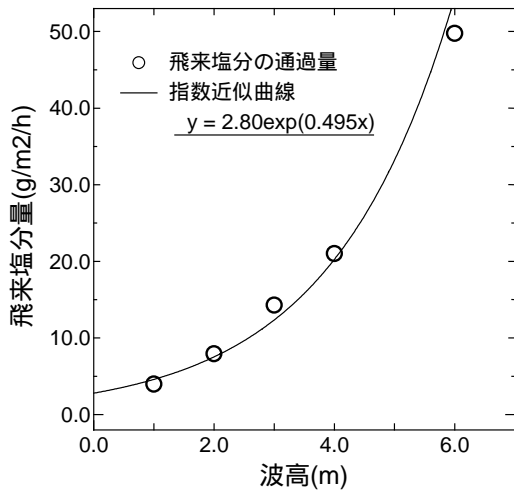
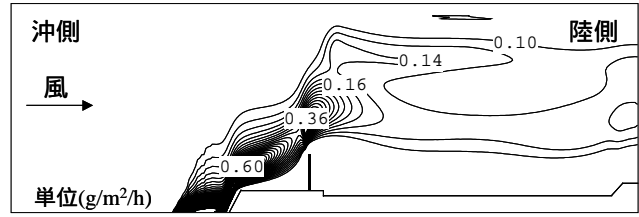


図 - 8 飛来塩分と波浪条件の関係

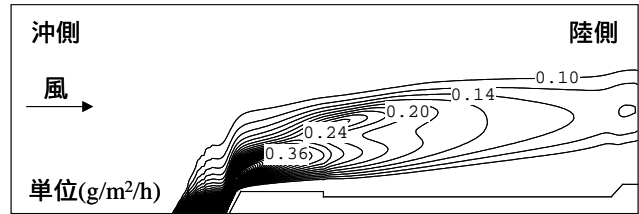
600m × 40m の空間とした。気流は左端(沖側)より風速 30m/s を鉛直方向に一様な分布で与え、右端(岸側)で自由流出とした。波動場の計算は大気空間の領域と対応させ、沖海域(造波点)を 0m、海岸地点を 600m とした。海底地形は沖海域(造波点)から 200m 程度までを 1:20 の一定勾配として計算を行っている。入射波の条件は新潟西海岸の設計波浪である周期 9s および波高 4.0m を与えた。発生する飛来塩分の粒径には直径 1.000mm、0.100mm、0.010mm、0.001mm、0.0001mm を与えている。計算では、粒径の影響を式(9)の拡散方程式における飛来塩分粒子の沈降速度  $w_s$  で考慮している。表 - 1 に計算に必要な入力パラメータと出力パラメータを示す。

(2) 各パラメータの感度の計算

表 - 2 のような地形、風速および波浪条件を



(a) 防風壁設置



(b) 防風壁なし

図 - 7 飛来塩分の空間分布

変化させた計算を行った。CASE2 ~ 15 までは、図 - 5 の地形において防風壁を設置しない条件で計算を行った。表以外の計算パラメータは(1)と同様の条件を与えた。

3.3 計算結果および考察

(1) 数値モデルの検証

図 - 6 は、数値解析の結果と観測結果を比較したものである。ここでは、計算結果が実地観測結果と一致するように係数  $a$  の値を定めている。係数  $a$  は、波動場における海水面の乱れの度合いと海水面で発生する飛来塩分量の関係を示した比例係数である。今回の場合では、平均風速 30m/s で全体の計算を行っているが、先に述べた理由より、式(4)の係数  $a$  の算出に用いた  $U$  は 13m/s を与えている。本計算モデルによる計算結果は、観測結果の傾向をよく表現できている。飛来塩分は、防風壁の近辺で急激に減少しており、障害物による影響が再現できている。

(2) 各パラメータの感度

飛来塩分の輸送過程は気象、海象条件および海岸地形に強く影響を受ける現象である。それらのパラメータと飛来塩分の輸送量の関係について数値計算による検討を行った。

図 - 7 は防風壁を設置した場合としない場合の飛来塩分の輸送量を表したものである。図に示すとおり、防風壁の設置により飛来塩分の輸送過程が変化している。これは、防風壁を設置

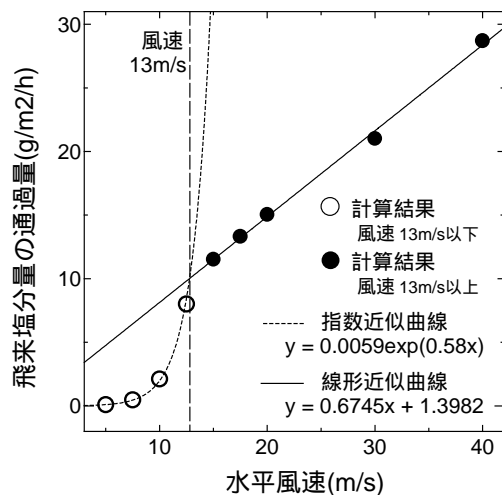


図 - 9 飛来塩分と風速の関係

することで、防風壁の前面および背後で風速が減少したためである。特に、防風壁前面の風速の減少により、大粒の飛来塩分が早い段階で地面へ沈降したことが、飛来塩分の輸送過程に影響を及ぼしたと考えられる。

図 - 8 は表 - 2 の C A S E 2 - 6 における飛来塩分の輸送量と波高の関係を示したものである。図に示す飛来塩分量は、図 - 5 の盛土上を通過する飛来塩分量の平均値である。図のように輸送される飛来塩分量は、入射波高の増加に対して指数的に増加する傾向が見られた。

図 - 9 は飛来塩分の輸送量と水平風速の関係を示したものである。図の計算結果は、白丸が水平風速 13m/s 以下、黒丸が水平風速 13m/s 以上の場合である。図に示すとおり、風速が 13m/s 以下の場合では指数近似曲線に、13m/s 以上の場合では線形近似曲線に一致している。これは、式(4)の  $b_2$  に含まれる風速  $U$  が 13m/s 以上増加しないためである。そのため、風速 13m/s 以上で、波浪条件が一定な場合では、海水面から発生する塩分量が一定となり、風速と飛来塩分の輸送量の関係が線形的になったと考えられる。

#### 4. 結論

本計算モデルは、飛来塩分の実地観測の結果をよく表現できること、飛来塩分の輸送量は、風速だけでなく波浪条件の影響を受けることが明らかになった。

今後は、実験および観測データを用いた詳細な計算結果の検証と行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄: 飛沫(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, No.2, pp.1036-1040, 1993
- 2) 田中孝和, 富山 潤, 伊良波繁雄, 吉村 忍: ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.789-794, 2004
- 3) 細山田得三, 山田文則, 田安正成: 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, No.2, pp.1256-1260, 2002
- 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, No.2, pp.1176-1180, 2003
- 5) 山田文則, 細山田得三: 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, No.2, pp.1121-1125, 2004
- 6) 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
- 7) 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, 1994
- 8) Mohammad D, 渡辺晃: 波動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
- 9) 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, No.2, pp.1191-1195, 1996