

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

Production and Transportation Processes of Sea Salt Spray around Coastal Structures and its Long-term Analysis

山田文則¹・細山田得三²・下村 匠³

Fuminori YAMADA, Tokuzou HOSoyAMADA, Takumi SHIMOMURA

Sea salt spray, which is generated by coastal waves and transported by winds sticks to the surface of structures adjacent to coastal zone, harms long-terms durability of the structures, because salinity contained in the spray disintegrates the structural material. In this study, numerical simulation for long-term characteristics of production and transportation of sea salt spray are carried out. Field measurements are also conducted to confirm the validity of the numerical results. The comparison between adherent salt observed with PWRI(Doken) method and transported salt by numerical model shows possibility of empirical formula to estimate the long-term adhesion salt amount to the structures.

1. はじめに

海岸付近では、海域から発生する飛来塩分が建設構造物に付着し、塩害によって構造物の長期耐久性が損われるため問題となっている。特に、コンクリート構造物がその被害を受けることから、その維持管理上、構造物の表面に到達する塩分量を正確に把握し、それに応じた設計を行う必要がある。構造物に到達する飛来塩分量を評価する方法としては、従来から土研方式による現地観測が一般的に行われてきた。たとえば、代表的なものでは、森ら(1985)、片脇ら(1985)、藤原ら(1988)によるコンクリート道路橋に関する全国調査がある。宇多ら(1992)は、これらの調査結果をまとめることにより、各海岸特性に応じた飛来塩分の輸送量に関する数値モデルを提案している。このような経験的な数値モデルは容易に長期間な飛来塩分の輸送量を計算できる長所を持つが、個別の海岸地形および構造物の形状を考慮できないといった問題点がある。海岸および海底の地形を考慮した数値モデルとしては、著者ら(2006)のような飛来塩分の輸送過程を移流・拡散方程式を用いて計算するモデルがある。しかしながら、このモデルでは、実際に塩害を受けるような構造物を対象にして計算しておらず、構造物へ到達した塩分量の評価指標である1ヶ月単位の土研方式の観測結果を再現していなかった。

そこで、構造物へ到達する塩分量を数値解析で評価することを目的として、海岸に隣接する構造物を対象に短

期間の詳細な飛来塩分の発生・輸送過程に関する数値解析を行った。さらに、長期的な飛来塩分の輸送過程に関する数値計算を行い、土研方式による観測結果を数値解析に基づき予測する検討を行った。

2. 現地観測

(1) 構造物周辺における短期間の飛来塩分の観測

a) 観測場所および期間

現地観測は新潟県上越地方の海岸近傍に位置する名立大橋(図-1)で実施した。この地方は季節風の作用を受ける冬季に、気象・海象条件が厳しく、大量の飛来塩分が発生および輸送される。観測を実施した名立大橋周辺も飛来塩分の輸送量が大きく、この橋では橋桁下部において試験的に4種の塩害対策が実施されている。観測期間は2004年1月および2月であり、観測は降雨・降雪がない日に3回実施した。

b) 観測方法および観測点の配置

観測方法は乾燥ガーゼ法であり、大気中を輸送している飛来塩分を採取する方法である。1回の観測時間は、4～6時間程度である。観測点は、図-2に示すように橋桁上部を中心に5点設置した。なお、同位置において風

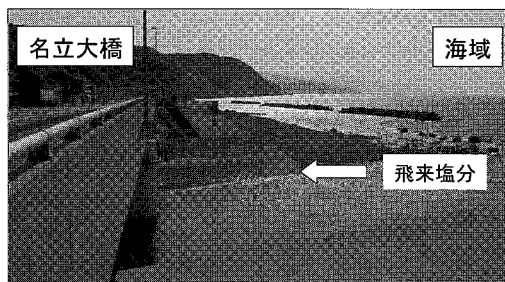


図-1 名立大橋(新潟県上越)

1 正会員 博(工) (株)アイ・エヌ・エー 海岸部
2 正会員 工博 長岡技術科学大学准教授 工学部 環境・建設系
3 正会員 工博 長岡技術科学大学准教授 工学部 環境・建設系

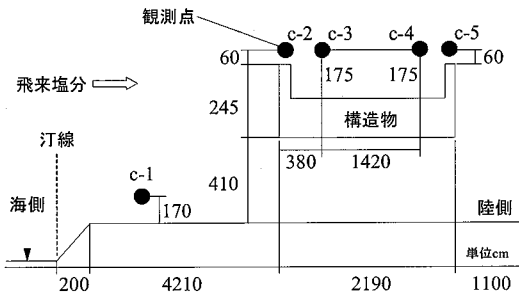


図-2 観測点の配置

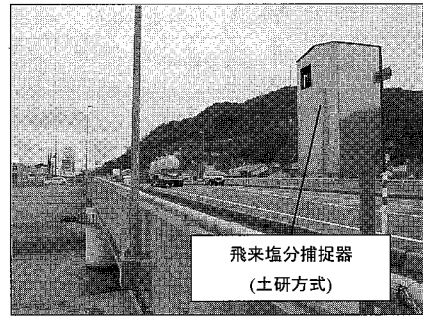
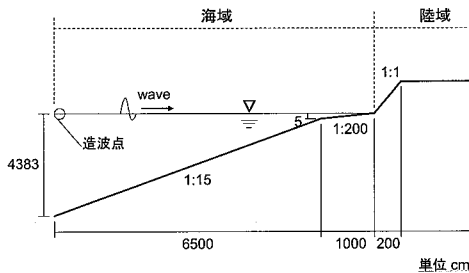
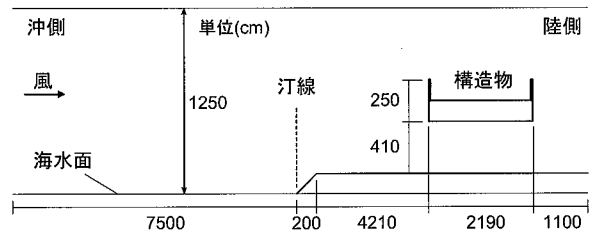


図-3 土研方式の観測



(a) 波動場(波の計算領域)



(b) 大気空間(飛来塩分の輸送)

図-4 計算領域（名立大橋周辺）

向・風速も測定した。

(2) 土研方式による長期的な観測

a) 観測場所および観測期間

観測場所は短期的な観測と同様、名立大橋で実施した。観測期間は2004年1月～12月の1年間である。

b) 観測方法および観測点の配置

観測方法は土研方式であり、図-3に示すようなボックス型の捕捉器に入り込む飛来塩分を採取する方法である。観測器は、橋桁の海側壁面と垂直方向に向くように設置されており、一回の観測時間は1ヶ月間である。また、飛来塩分の観測と同時に、名立大橋から沿岸方向に数十mの位置に設置されている気象ステーションを用いて、風向・風速の観測を行った。

3. 数値解析

(1) 計算方法

短期的な計算は細山田ら（2002）および山田・細山田（2004）を参考に、1) プシネスク方程式による波動場の計算、2) 飛来塩分の発生過程の計算、3) 定常な風の場の計算、4) 移流・拡散方程式による飛来塩分の輸送過程の計算を統合する方法で行った。

長期的な計算は、著者ら（2006）を参考に行った。飛来塩分の発生量の計算は、波動場の計算を行わず、沖波高から式（1）を用いて計算を行った。

$$c_s = a_s \cdot \eta \quad (1)$$

ここで、 c_s は汀線での飛来塩分の発生量、 a_s は発生に関する比例係数、 η は沖波高である。発生した飛来塩分量から、式（2）および（3）により汀線における鉛直分布を与えた。

$$c(z) = c_0 \cdot \exp\left(-\frac{w_s}{v_t} \cdot z\right) \quad (2)$$

$$c_0 = \frac{-(w_s/v_t) \cdot c_s}{\exp\{-(w_s/v_t) \cdot nz\} - 1.0} \quad (3)$$

ここで、 c は海水面からの鉛直高さ z における飛来塩分量、 c_0 は海面上の飛来塩分量、 w_s は飛来塩分粒子の沈降速度、 v_t は乱流拡散係数、 nz は大気空間の鉛直高さである。海水面近傍での乱流拡散係数 v_t は $0.025 \text{ m}^2/\text{s}$ を与えた。

気象条件として1日または1週間単位の風速および風向の観測結果を入力し、1年間にわたって計算を行った。飛来塩分の発生量の計算に必要な海象条件は、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）の名立大橋に近い新潟県直江津の観測点における観測結果を与えた。

(2) 境界条件および計算条件

a) 短期間の飛来塩分の発生・輸送過程の計算

計算領域は波動場と大気空間に分かれる。波動場の領域は図-4(a)のように造波点から遡上域までとする。格子間隔は 0.10 m であり、格子数は1500格子である。波動計算の造波点は左端であり、造波点から 75 m 地点が汀線である。大気空間の計算領域は図-4(b)に示すよ

表-1 各観測日の風速と波高

	観測日	観測時間	平均風速 (m/s)	平均波高 (m)
第1回観測	2006/1/10	12:00-17:00	5.3	1.61
第2回観測	2006/2/10	11:00-15:00	11.9	1.48
第3回観測	2006/2/13	12:00-18:00	12.5	2.10

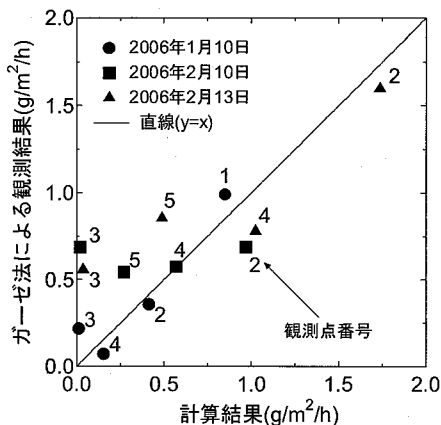


図-5 観測結果と計算結果

うな水平方向 150 m, 鉛直方向 12.5 m の断面 2 次元の空間であり, 波動場の計算空間と海水面で接合している。計算格子の間隔は水平方向 0.10 m, 鉛直方向 0.05 m の等間隔格子であり, 格子数は 1500×250 格子である。風は左端に与え, 右端を自由流出するようにしている。風速は橋桁下部 c-1 地点の観測結果に一致するように与えた。計算時間は 80 秒間であり, 0.004 秒間隔で計算を行った。飛来塩分の粒径は, 直径 0.001 mm, 0.010 mm の 2 種類とした。

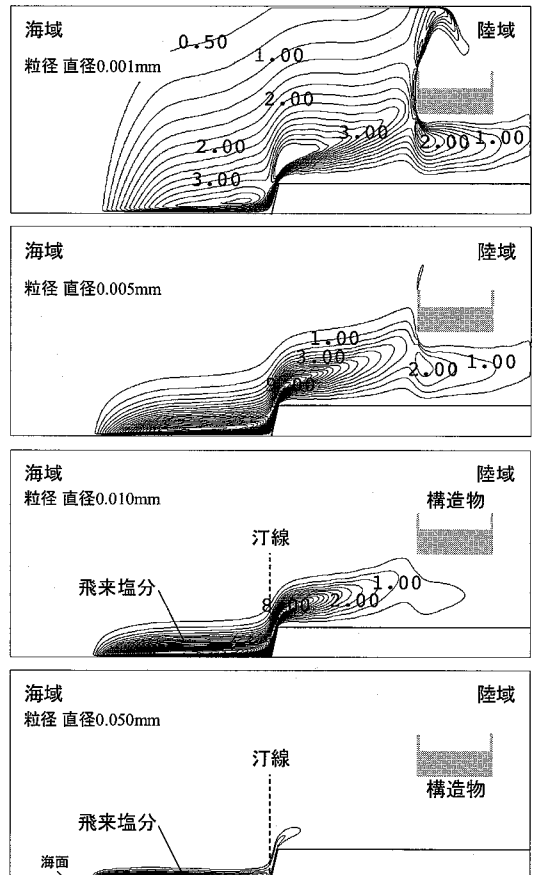
b) 長期的な飛来塩分の輸送過程の計算

大気空間の計算領域は, 短期間の計算に用いた図-4 (b) と同様の空間である。計算格子の間隔は水平方向に 0.50 m, 鉛直方向に 0.10 m の等間隔であり, 格子数は 300×125 格子である。計算時間の間隔は 0.004 秒であり, 1 日または 1 週間単位で定常となるまで計算を行い, それを一年間繰り返している。計算の入力条件となる風速は, 毎分の観測結果を 1 日または 1 週間単位で平均した値を与えた。海象条件は NOWPAHS の 2 時間間隔のデータを 1 日または 1 週間単位で平均した。

(3) 計算結果および考察

a) 短期間の飛来塩分の発生・輸送過程の計算

図-5 は構造物の各部位における飛来塩分の輸送量の観測結果と計算結果を比較したものである。各観測時における平均風速と平均波高は表-1 のようであった。図の 1～5 の番号は各観測点の番号であり, 図-2 の c-1

図-6 各粒径の飛来塩分の輸送過程 (単位 $\text{g/m}^2/\text{h}$)

～c-5 に対応している。図に示すように, 海側の壁面付近の観測点 2 では, 観測結果をよく再現できている。一方, 橋桁上の観測点 3 では, 計算による飛来塩分量が観測結果に比べて小さい傾向にある。これは, 計算では観測点 3 の位置で風が巻くことによって, 風速が小さくなったためである。実際の観測では, 構造物に対して斜め方向からの風であったため, 風が巻いている位置が断面 2 次元の計算結果とは異なっていた。図の丸印の観測日 1 月 10 日の計算結果は, 各位置とも観測結果をよく再現できていることがわかる。一方, 風速がより大きい 2 月 10 日および 2 月 13 日では, 結果にばらつきが見られる。これは, 計算に用いた飛来塩分の粒径分布が原因と考えられる。

図-6 は, 水平風速 7.5 m/s を境界で与えた場合の飛来塩分の各粒径における輸送過程を示したものである。各粒径において, 構造物周辺の飛来塩分の輸送過程が変化しており, 粒径 0.05 mm では構造物周辺にほとんど到達していない。一方, 飛来塩分粒径の最も小さい場合では, 構造物の上部まで飛来塩分が輸送されており, 風速 7.5 m/s 程度の場合では構造物上部には比較小さ

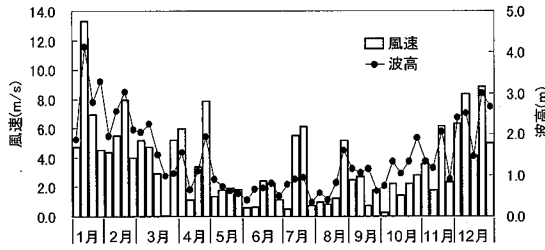


図-7 気象・海象条件の観測結果 (週単位)

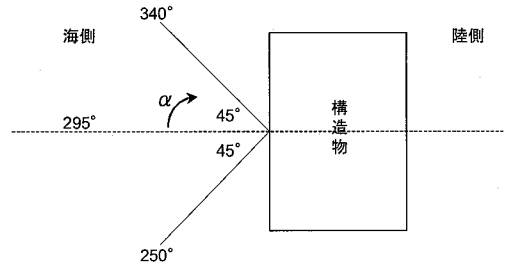


図-8 風向による風速の補正

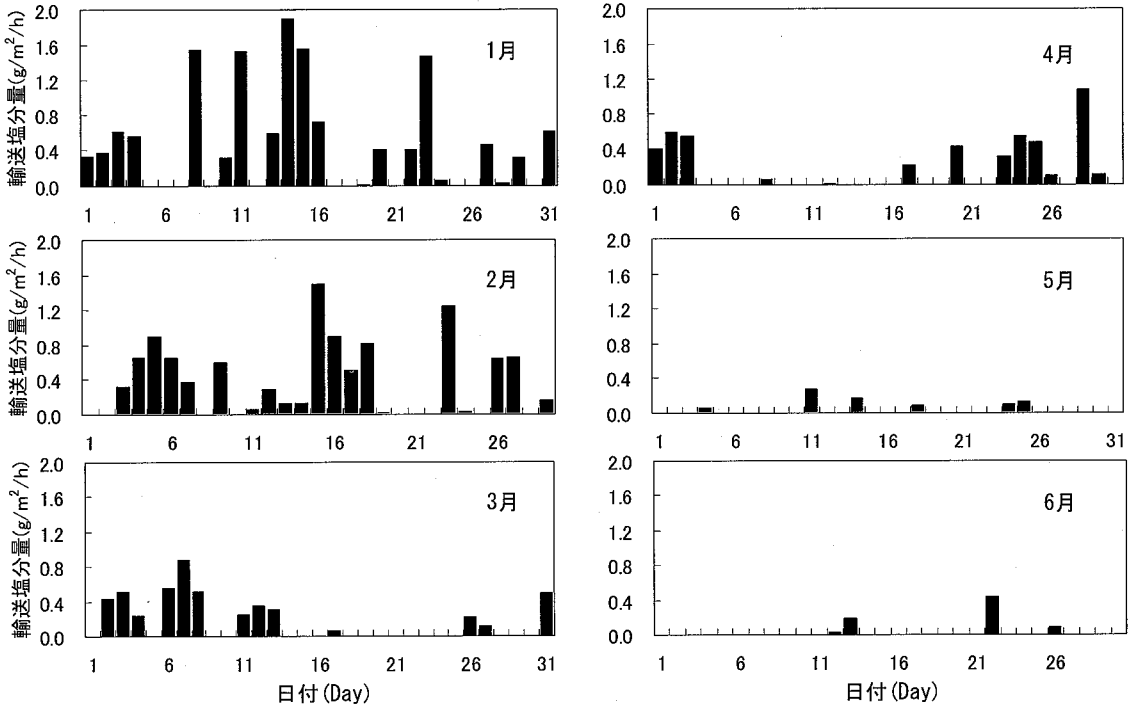


図-9 計算による各日の飛来塩分の輸送量

い粒径の塩分粒子だけが到達する結果となった。このように鉛直方向に高い位置に設置された構造物では、飛来塩分の輸送過程は粒径の影響を強く受けることがわかった。飛来塩分の粒径分布は各気象・海象条件において変化するが、今回の解析では一定の値を使用している。そのため、風速 10 m/s 以上の場合では、計算で与えた飛来塩分粒径が現地観測より小さく、構造物周辺の飛来塩分の輸送過程が異なると考えられる。ただし、飛来塩分の輸送過程の傾向は、飛来塩分の粒径だけでなく、構造物周辺の風速の状態によっても大きく変化するものと考えられる。

b) 長期的な気象・海象条件の観測結果

図-7 は、計算の入力条件となる気象・海象条件を一週間単位で平均したものである。風速は、図-8 のように構造物の海側壁面と垂直な方位 295 度を基準として、

45 度の範囲に入る風向のみを海風として風速を与えた。それ以外は、陸風として風速 0.0 m/s とした。数値解析は断面 2 次元であるため、風向によって風速を補正する必要がある。風向による風速の補正は式 (4) のように 295 度が補正係数 $a_w=1.0$ となるように与えた。

$$u = u_0 \cdot a_w$$

$$a_w = \cos\{(2 - \alpha/180)\pi\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 u は補正後の風速、 u_0 は風速の観測値、 a_w は補正係数、 α は基準角度 295 度からの風向の角度である。図-7 に示すように、5 月～10 月は気象・海象条件は穏やかであり、1 月～3 月および 11 月～12 月の冬季に気象・海象条件が厳しくなっている。これは日本海沿岸では冬季に季節風が卓越するためであり、このような地域では年間における飛来塩分の輸送量の季節変動が大きく、各季節単位を予測できるような長期的な数値解析を行う

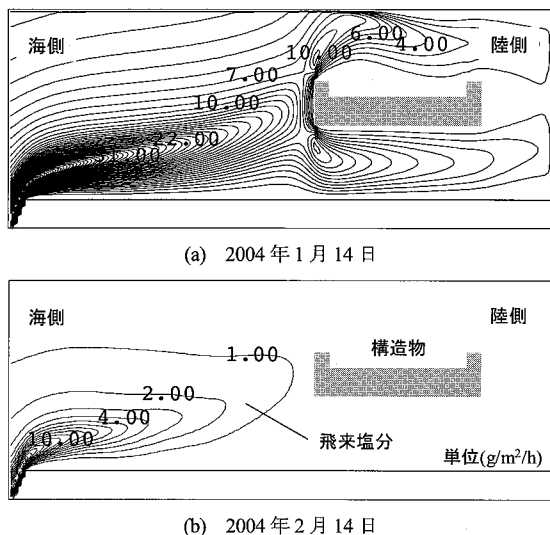


図-10 各日における飛来塩分の輸送過程

ことが有効的である。

c) 長期的な飛来塩分の輸送過程の計算

図-9は、2004年1月から6月の構造物の海側壁面上における各日の飛来塩分量の計算結果である。図に示すように、飛来塩分の輸送量は季節によって大きく差があり、大量に塩分が飛来しているのは4月頃までである。冬季の1月および2月では、飛来塩分の輸送量の大きい日が多く、各日の塩分量の変動も大きい。

図-10は1月14日と2月14日の構造物周辺の飛来塩分の輸送過程を表した計算結果である。図-10(a)の1月14日では、風速16m/s・波高4.6m程度と気象・海象条件が厳しく、飛来塩分は構造物の周辺に大量に輸送されている。一方、図-10(b)の2月14日は風速2m/s・波高1m程度と気象・海象条件が穏やかであり、このような日では構造物まで到達している塩分量は小さいことがわかる。

図-11は、土研方式による観測結果と飛来塩分の輸送量を1日単位および1週間単位で計算した結果を各月単位でまとめたものである。図の観測結果と計算結果はグラフスケールが異なっている。これは、観測値が構造物に到達する塩分量を示しているのに対して、計算結果は構造物周辺の大气中の飛来塩分の輸送量を示しているためである。図の黒丸は1日単位の計算結果であり、各値は近似曲線の周辺に分布しており、数値解析により土研方式の観測結果の傾向を再現できている。

土研方式の観測方法では一般に1回の観測が1ヶ月単位であるため、1日単位ではなく1週間単位の計算でも1ヶ月単位の塩分量を予測できると考えられる。図の白丸が1週間単位の計算結果と観測結果を示したものであ

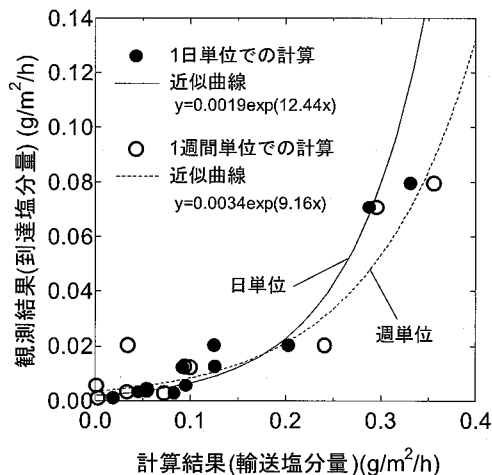


図-11 土研方式の観測結果と計算結果の比較

り、1日単位の計算結果と比べてばらつきは大きいですが、観測結果の傾向を再現できている。計算結果にばらつきが大きい原因としては、計算の入力条件である風速と波高の変動が一致していないためである。

4. 結 論

海岸に隣接する構造物周辺では、飛来塩分の輸送過程は、その粒径によって大きく変動していること。長期的な1日および1週間単位の飛来塩分の輸送過程の数値計算を行うことで、土研方式の観測結果の傾向を再現できることが示された。1週間単位で計算を行った場合でも、1日単位の場合とほぼ同様の結果を得ることができた。

参 考 文 献

- 森 芳徳・片脇 清・守屋 進・佐伯彰一・宮田年耕・中野正則・佐藤和徳・田中良樹(1985): 飛来塩分量全国調査(I), 土木研究所資料, 第2203号, 86p.
- 片脇 清・西崎 到・守屋 進・篠原洋司・中野正則・田中良樹・鹿嶋久義(1985): 飛来塩分量全国調査(II)-全体計画見直しに伴う調査実施要領の改訂-, 土木研究所資料, 第2257号, 104p.
- 藤原 稔・箕作光一・田中良樹(1988): 飛来塩分量全国調査(III)-調査結果およびデータ集-, 土木研究所資料, 第2687号, 266p.
- 宇多高明・小俣 篤・小西正純(1992): 海岸からの飛来塩分利用の計算モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1051-1055.
- 細山田得三・山田文則・田安正成(2002): 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.
- 山田文則・細山田得三(2004): 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.
- 山田文則・細山田得三・上村雄一(2006): 波浪推算モデルを援用した飛来塩分の発生・輸送過程に関する数値解析とその現地観測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1141-1145.