

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

山 田 文 則*・細山田 得 三**

日本海沿岸域では、冬季の海象条件が厳しく防災上の理由から消波ブロックなどの海岸構造物が多数設置されている。このような構造物の形状および設置位置によっては大量のしぶきが発生し、飛沫として内陸部へ輸送される。本研究では、海岸構造物周辺のしぶきによって発生する飛来塩分の発生・輸送に関する数値モデルの開発を行った。さらに、日本海沿岸における海岸構造物の設置位置の異なる 2 箇所の海岸で長期的な実地観測を行った。その結果、海岸構造物が沖側に設置してある海岸の方が内陸部へ輸送される飛来塩分量は少なくなる傾向が示された。

1. はじめに

日本海沿岸域では、冬季の海象条件が厳しく防災上の理由から消波ブロックなどの海岸構造物が多数設置されている。このような構造物は、入射してきた波を強制的に砕波させることによって波高を減衰させる。しかしながら、冬季の日本海沿岸のような気象・海象条件の厳しい地方では、海岸構造物の周辺で大量の飛沫が発生し、海岸近傍に大量の塩分をもたらす場合がある。海面から発生した塩分は、橋やコンクリート構造物などの建設構造物の長期的な耐久性を阻害するため、その実態調査と対策が土木工学のさまざまな分野で盛んに行われている。飛来塩分の研究としては、仲座ら(1991, 1993)、村上ら(1994, 1995)、滝川ら(1996, 1998) および山田・細山田(2003)において海岸近傍の飛来塩分の輸送過程について実地観測および数値計算による研究が行われ、その空中での輸送過程の理解が進んでいる。一方、波動場から発生する飛来塩分の発生過程に関しては、村上ら(1992)、樋田(1999)によって実地観測が行われている。飛来塩分は地域性が強い現象であり、数値モデルによる検討が有効である。細山田ら(2002)は、しぶきを含まない海面上の気泡から発生した飛来塩分を対象とし、かつ海岸構造物の形状に応じた飛来塩分の発生に関する数値計算を行っている。しかし、冬季の日本海沿岸のような厳しい気象・海象条件の場合に発生する飛来塩分は主にしぶき状のものであると予想できるため、しぶき状の飛来塩分を考慮した数値モデルの開発が必要である。

本研究では、海岸構造物近傍のしぶきによって発生する飛来塩分の発生・輸送に関する数値モデルの開発を行った。さらに、著者らは、昨年度冬季のみに限り、3 箇所の海岸で実地観測を行い、その中で海岸構造物が汀線付近にある海岸では観測される飛来塩分量が大きくなることを示した。今回の報告では、この結果をさらに発展させるため、海岸構造物の設置位置の異なる 2 箇所の

海岸で 1 年間におよぶ長期的な実地観測を行った。また、海岸から内陸部へ数十 km におよぶ広域な範囲を対象とした飛来塩分の実地観測も行い、これらの結果についても報告する。

2. 実地観測

(1) 観測期間および観測場所

現地観測は 2003 年 1 月～2004 年 1 月の 1 年にわたって実施した。観測場所は、図-1 のような新潟県中越地方に位置する出雲崎町および西山町の 2 箇所の海岸である。これらの海岸に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 m の位置および汀線から数十 m の位置に消波ブロックが設置してあり、通常は沖側の海岸構造物付近で砕波が見られる。
- ・観測海岸 2：汀線から沖側へ数十 m の位置に消波ブロックが設置してあり、入射波の波高が比較的に低い場合でも、構造物付近の砕波帯からしぶきの発生が見られる。

観測海岸 1 を飛来塩分の発生源となる砕波帯が沖側にある海岸、観測海岸 2 を砕波帯が汀線付近にある海岸として観測を行った。

広域的な観測は 2004 年 1 月～3 月の冬季のみ実施した。観測場所は、長岡市、柏崎市および西山町である。

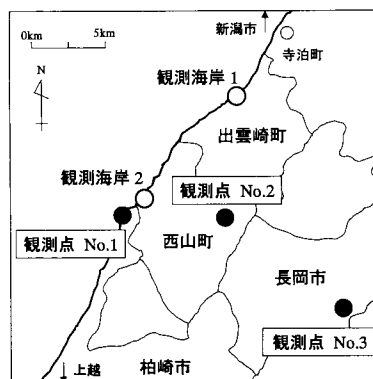


図-1 観測場所および観測点

* 学生会員 修(工) 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

** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

これらの地方では季節風の作用により大量の降雪が見られ、内陸部の長岡市では1m以上の積雪が見られる豪雪地帯である。2004年度においては例年に比べ降雪量が少なく、幸い雪が観測に与える影響は少なかった。

(2) 観測方法

長期的な観測は縦10cm×横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塩分捕捉器を用いた。この方法は一般的な乾燥ガーゼ法であり、大気中に輸送する飛来塩分の捕捉によく用いられる。塩分捕捉器は空気中に一定時間放置し、観測終了時にポリエステル袋にいれて分析作業にいたるまで保存した。分析ではガーゼを蒸留水(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($\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$)を算定した。観測時間は、降雨、降雪のない時間を利用することにより、降水による付着量の低下を除去した。そのため、1回の観測時間は、降水量の多い冬季では10~120分程度、一方、夏季では300~540分程度である。

広域的な観測は図-2のようなボックス型の塩分補足器を製作して用いた。この捕捉器は10cm×10cmの捕捉窓を設置してあり、その奥にステンレス製の捕捉板が設置してある。その捕捉板に付着した飛来塩分を箱の中に設置してあるプラスチック製の容器に集める方法である。この方法は、風が不透過性となるためにガーゼ法などの観測方法に比べ採取される飛来塩分量は少なくなるが、降水がある場合でも観測できるなどの利点がある。観測点の設置は、海岸近傍で最も多い風向きである方位 300° の方向に設置した。観測点は、図-1のように海側から内陸部20km程度の範囲に3点設置した。1回の観測期間は約1週間(168時間)である。

(3) 観測結果および考察

a) 長期的な観測 (2箇所の海岸)

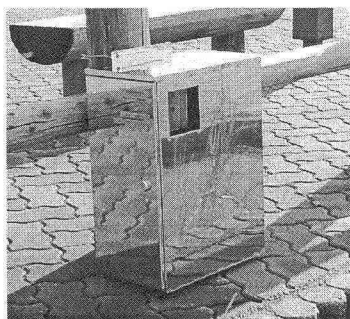


図-2 飛来塩分捕捉器

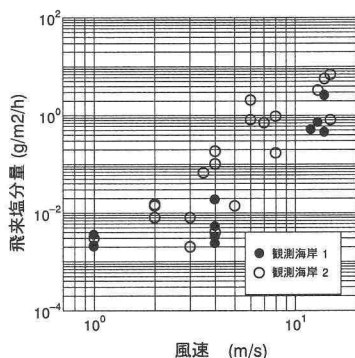


図-3 各海岸の飛来塩分量と風速の関係

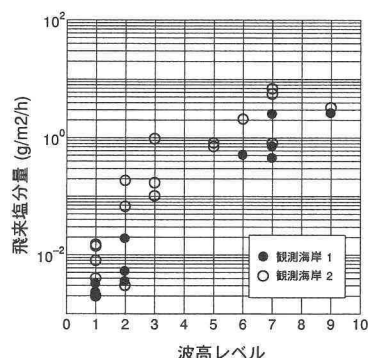


図-4 各海岸の飛来塩分量と波高レベルの関係

図-3は観測された飛来塩分量と風速の関係を表したものである。図に示すように、観測される飛来塩分量は風速に比例して増加する傾向にある。また、この観測結果は直線上になっておらず、結果にばらつきが見られる。これは、各観測日における海象条件の変化が影響を及ぼしているためと考えられる。海岸近傍で観測される飛来塩分は、大部分が海岸構造物の周辺および汀線付近の碎波帯から発生する。そのため、内陸部へ輸送される飛来塩分量は、風速だけでなく波浪条件にも影響を受けると考えられる。

図-4は、観測による飛来塩分量と波浪条件を示したものである。この図の波高レベルは、著者らが気象庁のホームページに記載してある日本海の波浪予測から新潟県周辺の波高を波高レベルとして10段階に振り分けしたものである。波高レベルと波高の関係は表-1のようにになっている。図に示すように、観測される飛来塩分量は、ばらつきは見られるが波高レベルに比例して増加している。また、風速の場合と同様に、飛来塩分量は観測海岸1のほうが少ない傾向にあった。ただし、この波高レベルは風速から波高を推定したものであり、実際の海岸の波高とは異なる。今後、この点については実際に観測を行い改善していく必要がある。

図-5は、観測海岸1と観測海岸2で1年間に観測される飛来塩分量を比較したものである。この図からわかるように、観測海岸1では観測日全体において飛来塩分が少なく観測される傾向にあった。これは、観測海岸1のような沖側で飛来塩分が大量に発生する場合は、発生した飛来塩分が汀線までの間に沈降するために、汀線付近への輸送量が減少するためと考えられる。

また、飛来塩分量は1月~3月および12月に大量に観測されている。一方、そのほかの季節では、非常に少なくなる傾向が見られる。新潟県のような日本海沿岸域では、季節による気象・海象条件の差が著しく大きく、冬季では強風・激浪であり、夏季ではほとんど波がない状

態である。そのため、飛来塩分の発生・輸送量に関しても季節による気象・海象条件が大きく影響していることがわかった。

b) 広域的な観測

図-6は各観測日の飛来塩分量と風速を表したものである。図の観測日は観測開始の日付であり、風速は海岸近傍の寺泊町に設置してある風速計の値を用いている。図-6(a)は海側に設置した観測点 No. 1の結果である。図に示すように、飛来塩分量は、風速に依存して変動している。特に、風速が弱まった3月10日以降では、飛来塩分量も急激に減少している。また、この図の3月3日の飛来塩分量は風速に対して少ない値を示しており、降雪が影響していると考えられる。図-6(b)および(c)は海岸から内陸側へ5 km程度位置する観測点 No. 2, および20 km程度進んだ観測点 No. 3である。この図からわかるように、海側に設置してある観測点より飛来塩分量が少なくなっている。一方、内陸部の観測点(b), (c)を比較した場合では、ほとんど観測される飛来塩分量に差が見られない。これより、冬季の日本海沿岸のような強風が吹き続ける場合では飛来塩分は海岸近傍で急激に減少し、内陸部ではほとんど変動しないことがわかった。また、このような豪雪地帯では、急な坂道の周辺および山岳部で塩化物系(NaCl, CaCl₂)の凍結防止剤を大量に散布している。観測点 No. 2の周辺においても散布が見られ、これが観測結果に影響している可能性が考えられ

表-1 波高と波高レベルの関係

0.0~0.5	1
0.5~1.0	2
1.0~1.5	3
1.5~2.0	4
2.0~2.5	5
2.5~3.0	6
3.0~3.5	7
3.5~4.0	8
4.0~4.5	9
4.5~	10

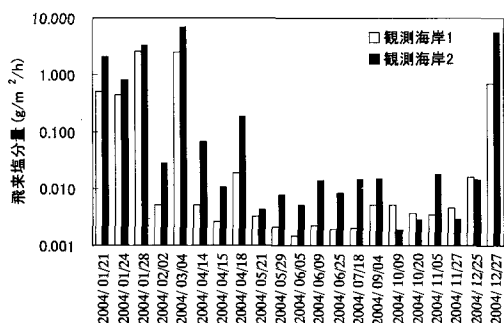
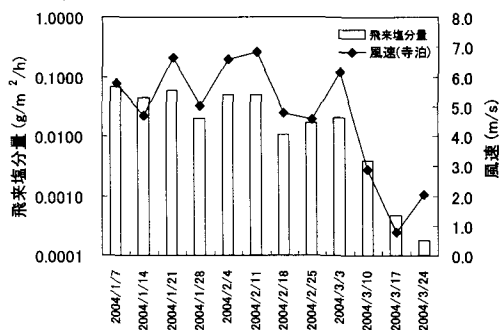
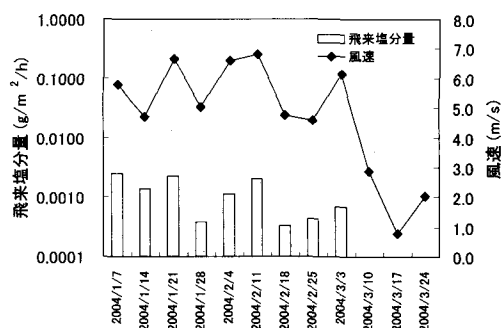


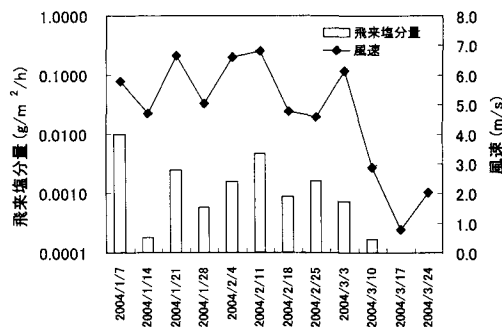
図-5 各海岸の飛来塩分量の比較



(a) 観測点 No. 1



(b) 観測点 No. 2



(c) 観測点 No. 3

図-6 各観測日の飛来塩分量と風速の関係

る。しかしながら、内陸部の観測点においてもばらつきは見られるが、海側の風速と似たような傾向で飛来塩分量が変動している。そのため、内陸部へ輸送されている飛来塩分は海岸近傍で発生したものであると考えられる。今後、凍結防止剤の散布状態とその影響についても調査する必要がある。

3. 数値解析

(1) 計算方法

a) 数値モデルの構成

本計算モデルは3次元であり、以下のような数値モデルで構成されている。

- ・修正ブシネスク方程式による波動場の計算
- ・波動場から発生する飛来塩分の発生計算
- ・移流拡散方程式による飛来塩分の輸送に関する計算
- ・定常な風の場の計算

これらのモデルを結合することにより、波動場から発生する飛来塩分の発生から輸送までを一貫した計算を行っている。各計算モデルは、細山田ら (2002) の 2 次元モデルを 3 次元に拡張して計算を行っている。ただし、細山田ら (2002) の飛来塩分の発生モデルは、海水面下に生成した気泡から発生した飛来塩分を考慮したものであり、しぶきから発生する飛来塩分を考慮していない。そのため、本研究ではしぶきによる発生を従来のモデルに導入して計算を行った。

b) 飛来塩分の発生の計算

海岸近傍で観測される大部分の飛来塩分は波動場から発生したものであり、大別して 2 種類に分けることができる。1 つは、砕波によって海水面が乱され海水中に混入した気泡が海水表面上で破裂することによって発生するもの。もう一方は、砕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である。前者は微小な粒径の飛沫であり主に内陸部まで輸送される。一方、後者は大粒の飛沫であり海岸近傍に大量の飛沫をもたらす。そのため、今回の解析では、しぶき状の飛沫を対象とした計算を行い、気泡から発生する飛沫は海岸近傍での輸送量が少ないと考え無視した。

しぶき状の飛沫の発生は、砕波による波のエネルギーが海水面を乱すことによって生じると考え、砕波帯での発生量は式 (1), (2) を用いて計算を行った。

$$c_a = a F_d E \dots\dots\dots (1)$$

$$a = 1.92 \times 10^{-7} \exp(0.467 U) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 c_a , F_d , E は飛来塩分の発生量、砕波減衰係数、波の全エネルギー量である。係数 a は観測から求めた値であり、 U は水平風速を示している。

発生したしぶきは、村上ら (1994) が行った砕波帯上の飛沫濃度の調査結果を参考に大気中に分布させた。この結果によれば、砕波帯上の飛沫濃度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 (3), (4) で近似できる。

$$w_0 \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = k \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$c(z) = c_0 \exp(-Az), \quad A = k/w_s \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 c , c_0 , w_s , A , z , k は、飛来塩分濃度、海水面での飛来塩分濃度、飛来塩分の沈降速度、飛来塩分の鉛直方向の減衰係数、鉛直高さ、 k - ϵ 乱流モデルから求められる乱流拡散係数である。ただし、村上ら (1994) が行った調査結果では、気泡から発生した飛沫としぶきから発生した飛沫を合わせた量である。しかし、気泡によって

発生したものは量が少なく調査結果に与える影響が少ないと考え、砕波帯上で観測された飛沫はすべてしぶきであるとして計算を行った。

(2) 計算条件および境界条件

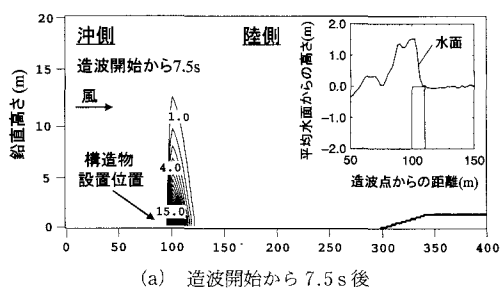
波動場は平面 2 次元であり、縦 100 m × 横 400 m の範囲である。海岸構造物は、領域の左端 (沖側) より 100 m, 50 m および 200 m の各位置に設置した。設置構造物は天板が水面から 0.0 m の潜堤である。造波は領域の左端 (沖側) より周期 9 s, 波高 2.0 m を与えた。

大気空間は、3 次元で縦 100 m × 横 400 m × 高さ 20 m の範囲である。気流は左端 (沖側) において風速 10 m/s を面に一様に与えている。発生する飛来塩分は、直径 5.00 mm, 1.0 mm, 0.50 mm, 0.10 mm, 0.50 mm の 5 種の粒径を与えている。

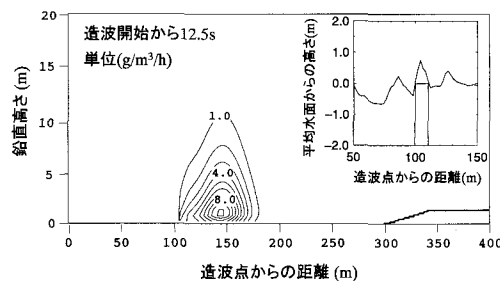
(3) 計算結果および考察

図-7 は、飛来塩分の輸送と海岸構造物付近の波高分布を示したものである。図-7(a) は造波開始から 7.5 s 後であり、飛来塩分の発生時から 1.0 s 後である。図に示すとおり、海岸構造物の周辺で砕波が発生し、飛来塩分が高く舞い上がっている。発生した飛来塩分は、高さにしたがって指数的に減少している。図-7(b) は造波開始より 12.5 s 後である。発生した飛来塩分が風により輸送されるとともに、分布が発生時より広がっている。また、低い位置の飛来塩分濃度が急激に減少していることがわかる。これは粒径の大きい飛来塩分が沈降したためであり、飛来塩分粒子の移流と沈降が卓越した状態であると考えられる。今回の解析では、数百 m の範囲で計算を行っているため、飛来塩分の発生時の分布を沈降と鉛直拡散が釣り合った状態であると仮定している。実際の現象を考えた場合、しぶき状の飛来塩分の発生時の分布は砕波によって供給されるしぶき粒子への慣性力、風の移流および乱れ、粒子の沈降速度などを考慮する必要があると考えられる。

図-8 は、構造物の設置位置を変化させた場合の計算結果である。図の計算は 2 次元で計算した場合であり、(a) は構造物を汀線から沖側方向に 50 m 付近に設置した場合、(b) は 200 m 付近に設置した場合である。図に示すように、沖側の構造物からしぶきによる飛来塩分の発生がわかるが、沈降によって岸まで到達する量が減少し、汀線より陸側へ輸送される飛来塩分量が少なくなっている。今回の計算条件の場合では、構造物を沖側へ設置したほうが構造物を設置しない場合より、汀線から陸側へ輸送される塩分量は少なくなっていた。しかし、この結果は発生する飛来塩分の粒径に強く依存しており、直径 0.05 mm 以下の粒子を沖側で大量に発生させた場合では、構造物を沖側に位置したほうが汀線より陸側へ輸送される塩分量は増加する傾向にあった。

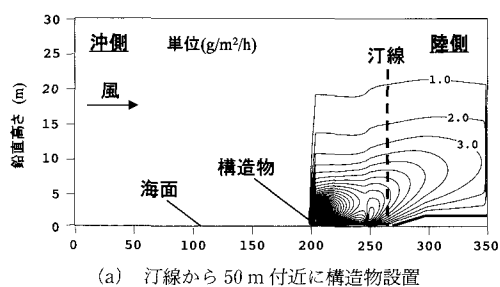


(a) 造波開始から 7.5 s 後

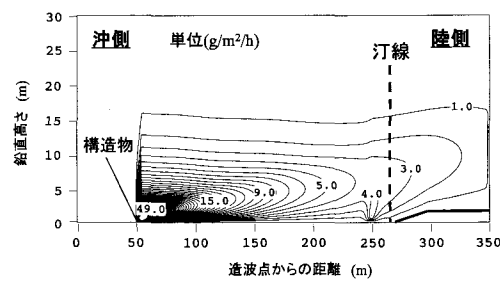


(b) 造波開始から 12.5 s 後

図-7 飛来塩分の輸送と構造物周辺における波動場の計算結果



(a) 汀線から 50 m 付近に構造物設置



(b) 汀線から 200 m 付近に構造物設置

図-8 飛来塩分の輸送の計算結果

4. 結 論

飛来塩分に関する発生・輸送過程を明らかにするために、長期的・広域的な実地観測および3次元数値モデルの開発を行った。その結果、日本海沿岸では、観測される飛来塩分量は、冬季に著しく大きく、そのほかの季節では少ないこと。海岸構造物が沖側に設置してある海岸では飛来塩分量が少なくなり、一方、汀線付近に海岸構造物が設置してある海岸では塩分量が大きくなる傾向にあること。海岸から内陸部へ20 km地点での飛来塩分量と海岸近傍の風速の変動は一致する傾向にあること。海岸構造物の設置位置によって汀線より陸側へ輸送される飛来塩分量が変化することが明らかになった。

今後は、今回の観測および計算結果を基礎データとして飛来塩分の軽減対策に関して検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991): 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.
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄 (1993): 飛沫(海塩粒子)拡散の数値流体力学解析, 海岸工学論文集, 第40

巻, pp. 1036-1040.

- 滝川 清・山田文彦 (1996): 内海沿岸域における飛来塩分特性とその対策について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1176-1180.
- 滝川 清・山田文彦・外村隆臣・荒木宜博 (1998): 飛来塩分特性の数値モデルと防風ネットを用いたその抑制効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1181-1185.
- 樋田 操 (1999): 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), 150 p.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司 (1992): 砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1046-1050.
- 村上和男・山田邦明・西守男雄 (1994): 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—, 港湾技術研究所報告, No. 784, 48 p.
- 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 (1995): 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.
- 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 (2003): 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.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 291-295.