

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

山 田 文 則*・細山田 得 三**

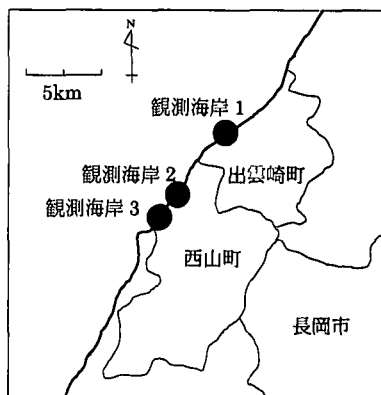
北陸から北海道にかけての日本海側では、1～3月の月平均風速は太平洋側・瀬戸内海沿岸の2～3倍程度となる。このような条件下では、激浪により波動場で大量の飛来塩分が発生し、内陸部深くに輸送される。本研究では、新潟県の3箇所の海岸で飛来塩分に関する現地観測を行い、地形や海岸構造物、気象・海象と飛来塩分の関係について検討を行った。さらに、波動場から発生する飛来塩分の輸送について3次元の数値解析を実施した。その結果、冬季の日本海側では、飛来塩分は波動場で大量に発生し、汀線から数百mの間で大量の飛来塩分が観測されることが明らかになった。本計算モデルは現地観測とほぼ同様の結果を得ることができた。

1. はじめに

飛来塩分は、建設構造物などの腐食や長期的な耐久性に影響を与えているため、その動態について土木工学の分野で関心が集まっている。塩分によって長期的な耐久性が阻害される構造物としては、特にコンクリート構造物と鋼構造物が挙げられる。このような構造物が海岸付近に設置されると海水に直接接触することと空气中を飛来する塩分によって腐食が進行する。そのため、飛来塩分の発生とその輸送に関する研究が海岸工学の分野で盛んに行われている。従来の研究では、仲座ら(1991, 1993)、村上ら(1995)、滝川ら(1998)の研究報告により、現地観測および数値解析の結果から飛来塩分の内陸部への輸送過程は明らかにされつつある。しかしながら、飛来塩分は非常に地域性が強い現象であり、気象・海象によっても複雑に影響を受ける。仲座ら(1993)は、台風の通過点となる沖縄では他県と比較にならないほど飛来塩分量が多いことを報告している。一方、日本海に面した海岸では冬季には定期的に高い飛来塩分量が観測される。従来、飛来塩分の観測および数値解析は太平洋側や沖縄などを対象として盛んに行われているが、日本海側や北海道での十分な研究事例は少ない。

北陸から北海道にかけての冬季日本海側では、気象・海象条件が著しく厳しく、1～3月の月平均風速は太平洋側・瀬戸内海の2～3倍程度となる。このような条件下では、激浪により波動場で大量の飛来塩分が発生し、その後、塩分は強風により内陸部の深くまで輸送される。発生源に近い海岸付近では著しく飛来塩分量は多くなるが、波動の影響を受けた飛来塩分の発生過程および空中での輸送過程は十分に把握されていない。

本研究では、新潟県中越地方に位置する3箇所の海岸で飛来塩分に関する現地観測を行い、地形や海岸構造物、気象・海象条件と飛来塩分の関係について検討を行った。さらに、波動場数値モデルと飛来塩分の発生モデル



図一 観測場所(新潟県中越地区)

および輸送モデルを結合させて観測現場を対象とした3次元の数値解析を実施し比較および検討を行った。

2. 現地観測

(1) 観測期間と観測場所

現地観測は、図一の新潟県西山町・出雲崎町に位置する3箇所の海岸で行った。観測期間は、2003年1月～4月である。図二(a)(b)(c)に各海岸の地形を模式的に示す。各海岸の特徴は、以下のようになっている。

- 観測海岸1：汀線付近は石段で覆われ、沖側の遠い位置に砕波帯がある。
- 観測海岸2：砂浜であり、消波ブロックなどの構造物が少なく、砕波帯が汀線付近である。また、砂浜の背後に高さ3m程度の盛土および防風壁が設置してある。
- 観測海岸3：砂浜であり、汀線から沖側に向かって50-100m付近に離岸堤が多数設置しており、激しい砕波帯が海岸に近い。

(2) 観測方法

観測点は塩分捕捉器を既設のポールや電柱に地面から0.5m～2.0mの高さで設置した。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

* 学生会員 長岡技術科学大学大学院工学研究科 建設専攻
** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

除去した。このため、1回の計測時間は、10～120分程度とばらつきがある。

観測は乾式ガーゼ法で行った。塩分捕捉器は、縦横10 cm×10 cmの捕捉窓を設置した2枚のアクリル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至るまで保存した。分析は、ガーゼを蒸留水(20 ml)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ー(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・単位時間当たりの付着塩分($\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$)を算定した。

(3) 観測結果の検討

図-3は、新潟県中越地区の3箇所の海岸で1月～3月に行った12回の観測結果を飛来塩分量と汀線からの距離でまとめたものである。この図で、①気象条件0：陸風が卓越している場合、②気象条件1：海風が風速0-10 m/sの範囲である場合、③気象条件2：風速11 m/s以上、波高3 m以上の場合に分類した。図に示す通り、飛来塩分量は汀線から100 m付近までに急激に減少し、その後、緩やかに減少する傾向があった。また、気象条件2の観測結果では、飛来塩分は強風により内陸部深くまで大量に輸送されている。この結果から、冬季の日本海側のような激浪・強風の気象条件下では、飛来塩分は非常に多く発生し、大量の塩分が内陸部深くまで輸送されているといえる。一方、季節風が弱まった日は、海岸付近の風は一日中陸風となる。図-3の気象条件0に示

す通り、このような条件では飛来塩分はほとんど観測されない傾向にあった。陸風が一日中吹く要因は、積雪のために陸地の温度が上がりにくく、常に海水の温度の方が高いためと考えられる。

図-4は、各観測海岸の観測結果を地図上に数値として示したものである。この図で、①丸印・実線の枠：季節風が強い場合(第11回観測)、②三角印・点線の枠：季節風が弱まっている場合(第6回観測)、③四角印・細かい点線の枠：波がなく、風も弱い場合(第14回観測)の観測結果である。表-1は、図-4に対応した3回の観測日の気象条件と飛来塩分量を示したものである。ここで、波高レベルは海上保安庁が公開している新潟県沿岸の波高データを以下のように分類したものである。

- a) 波高レベル1：波高0 m～1 m未満
- b) 波高レベル2：波高1 m～2 m未満
- c) 波高レベル3：波高2 m～3 m未満
- d) 波高レベル4：波高3 m～4 m未満
- e) 波高レベル5：波高4 m～

この図に示す通り、同様の海岸でも各気象条件の違いにより、飛来塩分量は大きく異なっている。特に、②と③の観測結果を比較した場合、風速はほとんど差がないにもかかわらず、飛来塩分量は数倍～数十倍の差が見られる。これは波浪条件の違いにより、飛来塩分の発生量が変化したためであると考えられる。一方、①と②の結果を比較した場合では、すべての海岸で①の方が飛来塩分量は数倍～数十倍の値になっている。この結果から、内陸部へ輸送される飛来塩分量は、風などの気象条件だけでなく海象条件にも敏感であるといえる。

観測海岸2の①(第11回)の結果では、飛来塩分量は、防風壁の背後で局所的に減少を示している。この要因は、防風壁が十分に高い場合では、大きい粒径の飛来塩分が防風壁を乗り越えることができずその前面で沈降したこ

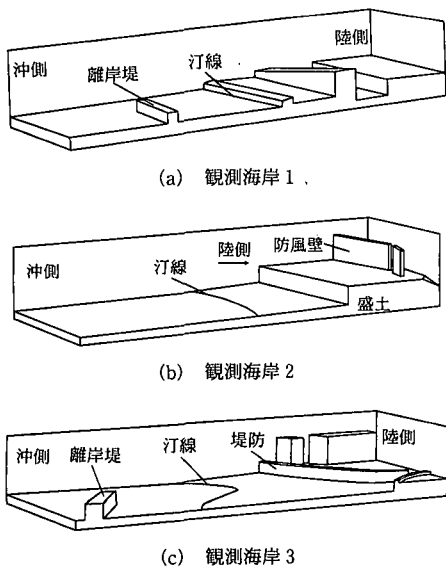


図-2 各観測海岸の地形図

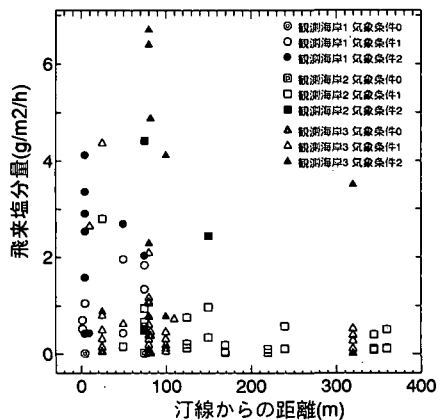


図-3 飛来塩分量と汀線からの距離

と、および、防風壁の上空で飛来塩分が激しく拡散されることにあると考えられる。以上より、海岸付近に設置されている防風壁に局所的な飛来塩分軽減効果があることが明らかになった。ただし、飛来塩分が激しく拡散される場合、局所的な飛来塩量は減少するが、広範囲に飛来塩分が広がるために軽減対策として十分といえない可能性もある。

次に、図-4の各観測海岸の飛来塩分量を比較した場合、汀線からの距離がほぼ同じでも値は異なっている。これは、各海岸で構造物設置などにより海底地形が変化し、それに伴い飛来塩分の発生源である砕波帯の位置と砕波形式が変化するためと考えられる。今回の観測では、飛来塩分量は砕波帯が比較的に遠い位置にある観測海岸1で最も少ない傾向にあった。一方、海岸構造物が汀線付近にある観測海岸3では、汀線付近で激しい砕波が生じるため、飛来塩分量は最も大きくなる傾向にあった。この結果から、海岸付近の飛来塩分量は、海岸地形および消波ブロックなどの構造物の設置位置にも強く影響を受けると考えられる。具体的には、激しい砕波帯が汀線付近にあるほど、飛来塩分は、大量に内陸部へ輸送される傾向にあるといえる。

表-1 観測結果と気象条件

	日付 年月日	波高 レベル	風速 m/s	風向き θ (deg)	飛来塩分量 g/m ² /h
第8回 観測海岸2	2003/2/22	2	5	280	0.482
	2003/2/22	2	3	280	0.114
	2003/2/22	2	0	—	0.023
	2003/2/22	2	1	—	0.020
	2003/2/22	2	5	280	0.074
	2003/2/22	2	5	280	0.104
	2003/2/22	2	5	280	0.102
観測海岸3	2003/2/22	2	4	0	0.137
	2003/2/22	2	4	0	0.025
	2003/2/22	2	2	0	0.028
	2003/2/22	2	5	0	0.381
	2003/2/22	2	4	0	0.109
	2003/2/22	2	5	0	0.104
	2003/2/22	2	5	0	0.305
第11回 観測海岸1	2003/3/4	5	14	280	2.895
	2003/3/4	5	14	280	4.113
	2003/3/4	5	10	280	1.950
	2003/3/4	5	14	280	2.681
	2003/3/4	5	10	280	1.341
	2003/3/4	5	10	280	1.828
	2003/3/4	5	10	280	1.828
観測海岸2	2003/3/4	5	17	280	4.418
	2003/3/4	5	13	280	2.438
観測海岸3	2003/3/4	5	15	270	6.703
	2003/3/4	5	13	270	6.399
	2003/3/4	5	15	270	3.504
第14回 観測海岸1	2003/4/15	0	3	45	0.004
	2003/4/15	0	3	45	0.002
	2003/4/15	0	3	0	0.002
	2003/4/15	0	3	25	0.002
観測海岸2	2003/4/15	0	6	335	0.019
	2003/4/15	0	5	335	0.003
	2003/4/15	0	4	335	0.009
	2003/4/15	0	4	315	0.007
観測海岸3	2003/4/15	0	4	20	0.009
	2003/4/15	0	4	25	0.080

3. 数値解析

(1) 数値モデルの概要

波動場から発生する飛来塩分は、現地観測が示すように気象・海象や地形・構造物の条件に強く影響される複雑な現象であるため、実地形に対応した数値実験を行う必要があると考えられる。そこで、細山田 (2002) の断面2次元での波動場数値計算と飛来塩分の発生とその輸送に関する数値モデルを3次元に拡張し、実地形に対応した飛来塩分の発生と輸送モデルの開発を行った。

(2) 数値モデルの構成

数値モデルは、実地形に対応した3次元モデルであり、以下のような素過程によって構成されている。

- 分散性を含んだ波動場数値計算による砕波の強さ、エネルギー減衰の評価とこれに応じた気泡と飛来塩分の発生のモデル化
- 定常な風の場合の数値計算
- 発生した飛来塩分の風による移流・拡散

実際の計算では、風の場合 (b) のみオフラインとし、(a)、

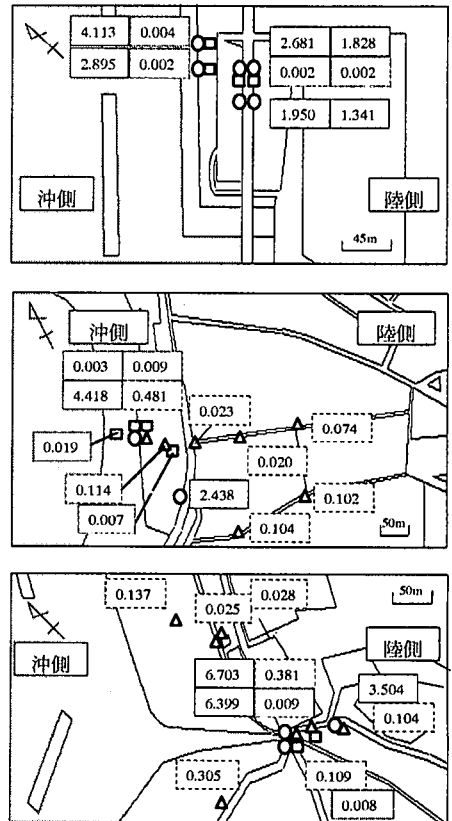


図-4 3地点での観測結果 (単位 g/m²/h)
(a) 観測海岸1 (上), (b) 観測海岸2 (中), (c) 観測海岸3 (下)

(b) の過程を結合してモデルを構成している。飛来塩分の発生モデルは、海水面の乱れの強さに合わせて発生する飛来塩分の粒径を変化させ、砕波が強い部分では発生する飛来塩分の粒径が大きくなるものとした。輸送モデルにおいても粒径の分布を反映させている。

(3) 計算条件

風と飛来塩分輸送の計算領域は 3 次元空間で $135\text{ m} \times 360\text{ m} \times 20\text{ m}$ の範囲である。計算に用いた実地形は図-2 (a), (b), (c) と同じである。各海岸の地形は、航空写真と国土地理院の地形図から標高データを作成し、計算モデルに読み込んで利用した。図-2(a), (c) には沖側に離岸堤が設置されている。図-2(b) の陸側には高さ 3 m の盛土があり、その上に防風壁が設置されている。気流は左端(沖側)において風速 15 m/s を与えた、右端(陸側)を自由流出とした。波動場の計算は風の領域と対応させ左端 (0 m) で造波を与えた。入射波の条件は周期 9 s, 波高 1.0 m とした。ただし、観測海岸 1 は、この計算領域より沖側に砕波帯があるため、波高を 0.5 m として計算を行った。砕波帯から発生する飛来塩分の粒径は、波動場数値計算に用いた砕波減衰係数 F_d が 2.5 以下の場合(弱い砕波)では直径 0.01 mm , F_d が 2.5 以上の場合(強い砕波)では直径 0.01 mm と 0.1 mm と仮定した。この仮定の妥当性については今後検討を要する。

(4) 計算結果および考察

図-5, 6 は、各観測海岸の飛来塩分量を表した平面分布と鉛直分布図である。この平面図は海面から 5 m の位置を表したものであり、左端が沖側、右端が陸側である。

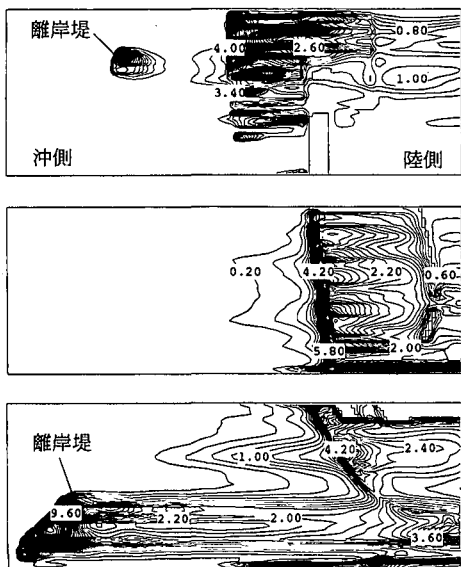


図-5 高さ 5 m での飛来塩分量の平面分布
(a) 観測海岸 1 (上), (b) 観測海岸 2 (中), (c) 観測海岸 3 (下) (単位 $10^{-5}\text{ g/m}^3/\text{h}$)

いずれの計算結果も離岸堤および汀線付近で、飛来塩分は発生し陸側へ輸送されているのがわかる。図-6 の各海岸の鉛直断面図に示す通り、砕波帯から発生した飛来塩分は、汀線までの間に大量に減少し、その後、陸側に進むに従い緩やかに減少する傾向がある。また、堤防や盛土の背後では、飛来塩分は急激に減少している。特に (b) に示す防風壁の背後では、飛来塩分量は減少が著しく大きい傾向があった。これは、先にも述べたように、構造物の設置により飛来塩分が沈降または拡散したためと考えられる。

各海岸の計算結果を比較した場合では、飛来塩分量は観測結果と同様に各海岸で異なっている。飛来塩分量は、観測海岸 3, 観測海岸 2, 観測海岸 1 の順で多い傾向にあった。これは、観測海岸 1 では、飛来塩分の発生源となる砕波帯が沖側の遠い位置にあり、汀線付近までに大部分の飛来塩分が沈降するためと考えられる。観測海岸 2 では、盛土および防風壁が設置されていることにより、飛来塩分は内陸部へ輸送されにくい状態となる。そのため、観測海岸 3 と比較した場合、輸送される飛来塩分量は少ない傾向になると考えられる。

図-7 は、計算結果と観測結果を比較したものである。(a) は風速 15 m/s , 波高 0.5 m , (b) および (c) は風速 5 m/s , 波高 1.0 m として計算を行った。計算結果は、海水面から 5 m の位置の値である。飛来塩分の発生に関する係数 α (細山田ら, 2002) を調整して発生のピークを観測値と一致させている。(a), (b), (c) の観測結果は、第 8 回, 第 9 回, 第 11 回の結果を用いた。また, (c) の

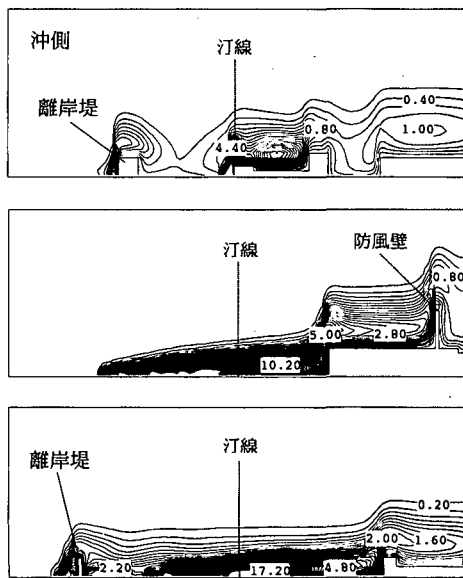


図-6 飛来塩分量の鉛直分布の計算結果
(a) 観測海岸 1 (上), (b) 観測海岸 2 (中), (c) 観測海岸 3 (下) (単位 $10^{-5}\text{ g/m}^3/\text{h}$)

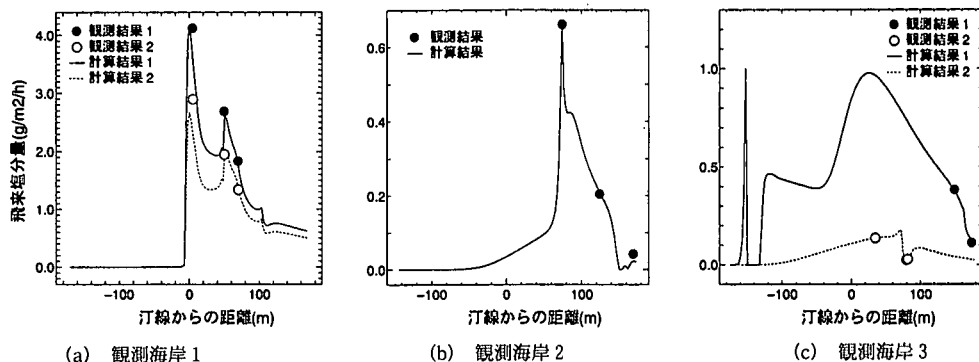


図-7 計算結果と観測結果の比較

観測結果 1, 2 は、それぞれ図-4(c)に示す上側の三角印、中央に示す河川の上流にある三角印の結果である。

実線は構造物の背後、点線は構造物が設置されていない位置での計算結果である。この図に示す通り、(a)の計算結果は全体的に観測結果をよく表現できている。汀線付近の計算結果は小さくなっているが、これは観測位置が海面から3~4mであるのに対し計算では5mの結果を用いているためである。(b)の計算結果は、防風壁による飛来塩分量の軽減をよく表現できている。(c)では、実線を比例係数 $a=1297$ 、点線を比例係数 $a=689$ で計算を行った。比例係数に差が生じた要因は、離岸堤付近の碎波に原因があると考えられる。今回の解析では、碎波モデルは局所水深モデルを使用しているため、離岸堤付近のような複雑な地形を正確に表現するのは困難である。その結果、構造物付近の碎波減衰係数 F_d は小さく計算され、離岸堤付近で発生する飛来塩分量は小さくなったと考えられる。

4. 結論および考察

本研究では、海面から発生する飛来塩分の実地観測と飛来塩分の発生とその輸送に関する数値モデルの開発および検討を行った。その結果、飛来塩分は碎波帯から汀線付近までの間に急激に減少し、その後、緩やかに減少する傾向があること。堤防や盛土・防風壁などの構造物の背後では、飛来塩分は局所的に減少することが明らかになった。また、内陸部へ輸送される飛来塩分量は、碎波帯の位置に影響を受けることが明らかになった。3箇所の観測海岸の観測および計算結果から、碎波帯が沖側

にある場合では、汀線付近の飛来塩分量は少なくなる傾向にあった。計算結果と観測結果の比較から、本計算モデルは飛来塩分の発生と輸送現象をよく表現できていた。

冬季の日本海側では、飛来塩分は海面から大量に発生し、汀線から数百mの間で大量に観測されることが明らかになった。これより、飛来塩分は内陸部深くまで輸送されていると予想され、より内陸側での観測、計算を行う必要があると考えられる。波動に応じた飛来塩分発生に関する係数 a についての定量的な評価も今後の課題である。

参考文献

- 滝川 清・山田文彦・外村隆臣・荒木宣博 (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制御効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1181-1185.
- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991): 大気環境アメニティーの一要素としての飛来塩分特性, 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的解析, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1036-1040.
- 植田 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.
- 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.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西村男雄 (1995): 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. 1036-1040.
- 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.