

大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂観測と海浜変形予測

佐藤 慎 司* ・山本 幸 次** ・和田 一 範***
伊澤 武 仁**** ・大谷 靖 郎***** ・橋 本 新*****

1. はじめに

我が国では、港湾・漁港等の海岸構造物の建設および河川・海食崖等からの供給土砂の減少などに起因する著しい海岸侵食が全国各地で発生している。このような沿岸漂砂の収支バランスが壊れたことによる海岸侵食の対策として、最近ではヘッドランド工法が多く用いられるようになってきた。しかし、ヘッドランド工法の計画および設計に関しては、施工事例や試験施工などの経験的な手法に基づいて行われている現状にある。特に、ヘッドランドの突堤部とヘッド部の堤長および形状の効果を定量的に評価する手法は確立されていない。さらに、ヘッド部がない場合には、ヘッドランドの突堤部の設置によって冲向きの砂移動を助長するケースも見られることから、ヘッドランド周辺の砂移動の実態把握も必要となっている。また、ヘッドランド周辺の現地観測については、大野鹿島海岸の宇多ら(1994)による観測の報告がなされている程度と非常に数少ない。

本研究では、石巻湾に位置する大曲海岸において、ヘッドランド周辺の流況および海浜変形、養浜砂の移動状況の現地観測を実施するとともに、現地観測結果に基づき海浜流計算と汀線変化計算を組合せたヘッドランド諸元(突堤部の堤長とヘッド部の効果)に関する計画手法を提案し、この計算手法の現地海岸への適用性について検討を行った。

2. 大曲海岸の概要

大曲海岸は、図-1に示すように仙台湾沿岸北部の石巻湾に位置する延長約7kmの砂浜海岸であり、東端に石巻港、西端に鳴瀬川河口がある。海底地形は、水深30m以浅の等深線が海岸線とほぼ平行であり、沿岸方向に比較的一様な海底勾配となっており、水深10m以浅の海底勾配は1/50前後である。また、底質の中央粒径は、

汀線付近では0.3mm程度、水深7m付近では0.15mm程度、水深10m付近では0.1mm程度となっている。

大曲海岸では、西向きの沿岸漂砂が卓越し、石巻港による沿岸漂砂の遮断および遮蔽域形成に伴う著しい侵食が生じた(望月ら, 1990)。このため、ヘッドランド工法による侵食対策に1990年から着手し、1998年には突堤長が100mの暫定形状のヘッドランド(ヘッド部なし)が8基設置されることとなる。なお、これらのヘッドランドは、1990年に港湾堤、1990年～1991年に6号堤と7号堤、1992年に4号堤、1993年に5号堤、1995年～1996年に3号堤、1996年～1998年に1号堤と2号堤が施工されている。

石巻港の沖合6km(水深20m地点)における1992年～1996年の5年間の波浪観測結果を図-2に示す。有義波高は、0.5m未満が38%、1m未満が84%を占めているが、2m以上も1.5%程度ある。有義波周期は、5s～8sが49%を占め、波高の増大とともに周期が長くなる傾向が見られる。波向は、SSE(146.25°～168.25°)が約半分を占めているが、平均的な海岸線の法線の角度が約156°であることから、西向きの沿岸漂砂が発達する東寄りの波向が卓越していることが分かる。

大曲海岸周辺では、汀線・浅深測量が1982年以降毎年実施されている。図-3に測量成果から求めたヘッドランドの建設前および建設後の変化土砂量の沿岸分布を示

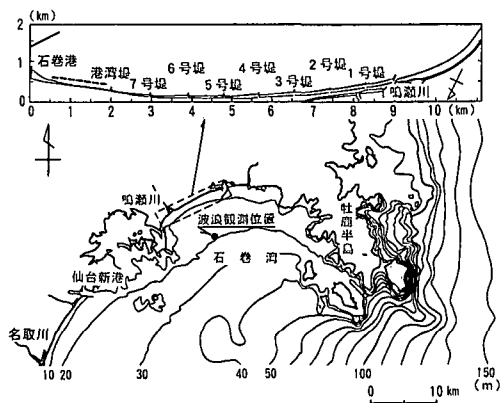


図-1 調査位置

* 正会員 工博 建設省 土木研究所 海岸研究室長
** 正会員 建設省 土木研究所 海岸研究室
*** 正会員 前 宮城県 土木部 河川課長
**** 宮城県 石巻土木事務所長
***** 正会員 (株)アイ・エヌ・エー 海岸部
水修 (株)アイ・エヌ・エー 海岸部

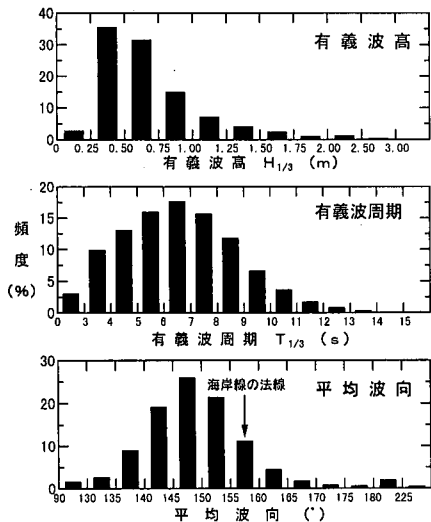


図-2 石巻港沖の波高・周期・波向

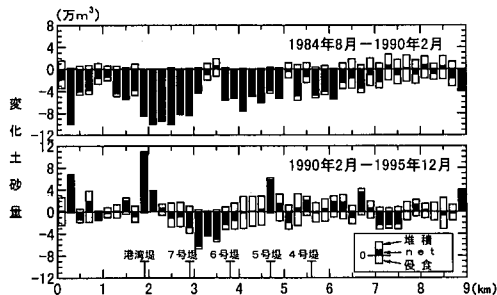


図-3 ヘッドランドの設置前後の土砂変化量

す。なお、深浅測量は、沖合約1 km (水深約10 m)まで実施されている。ヘッドランドの建設前の1984年～1990年では、ほぼ全域で侵食傾向が顕著であり、約6年間の侵食土砂量は約170万 m^3 となっている。また、石巻港防波堤の遮蔽域境界付近で侵食量が最大となり、鳴瀬川河口に向かって侵食量が減少する傾向が認められることから、これらの侵食は西向き沿岸漂砂に起因しているものと判断される。

一方、ヘッドランドの建設後の1990年～1995年では、堆積に転じている箇所も見られ、約5年間の変化土砂量は約12万 m^3 の堆積となっていることは、ヘッドランドによる西向き沿岸漂砂の制御効果が現れたものと考えられる。また、侵食土砂量のピーク位置が約1 km西側に移動しており、侵食域が西に向かって拡大したことがうかがえる。

3. ヘッドランド周辺の土砂移動の現地観測

3.1 現地観測の内容

現地観測は、図-4に示すようにヘッドランド5号堤～港湾堤の約4 km区間を対象として実施した。観測は、ヘッドランド7号堤と6号堤の中間で実施した約1万 m^3 の試験養浜に合わせて1996年9月の約1ヶ月間に集中的に行っており、養浜砂(中央粒径:0.27 mm)の移動状況を追跡するために、深浅測量、蛍光砂・底質調査(38地点)を実施した。蛍光砂については、養浜砂の細粒分を0.25 mmのフルイによって除去した後に1 m^3 の赤色蛍光砂を作成し、試験養浜の完了時に投入した。

また、図-4に示した5地点(St.1～St.5)において、波浪・流況・砂面変動の連続観測を1ヶ月間実施した。波浪・流況観測では、自記式の水圧式波高計および電磁流速計を設置し、毎正時(1時間毎)に20分間の測定を行った。なお、水深10 m付近のSt.1では、超音波式波高計も併設している。砂面観測では、自記式の砂面計を設置して毎正時(1時間毎)に測定を行った。

3.2 現地観測結果

図-5に沖合(水深10 m)のSt.1の波高・波向およびSt.2, St.4, St.5の流速・流向を示す。なお、St.3は、観測機器の流出・破損のためデータが得られていない。また、St.2およびSt.4では、土砂の堆積に伴う観測機器の埋没によって流況データが部分的に欠測となっている。観測期間中には、有義波高で2 m程度以上の高波浪が4回来襲しており、波向は、西向きの沿岸漂砂が発達するSSE～SEが卓越する。

平均流速ベクトルを見ると、最も水深の浅いヘッドランド6号堤西側のSt.5では、ヘッドランドに沿う沖向きの流れが卓越しており、高波浪の来襲時には平均流速が50 cm/sを超える流れが生じている。6号堤先端のSt.4では、沿岸方向が西向き、岸沖方向が沖向きの流れが卓越しており、St.5と同様に高波浪の来襲時には平均流速が50 cm/sを超える流れが生じている。養浜砂の投入地点前面のSt.2では、水深がほぼ等しいSt.4に比べて平均流速が全般的に小さいが、St.4と同様に西寄りの沖向

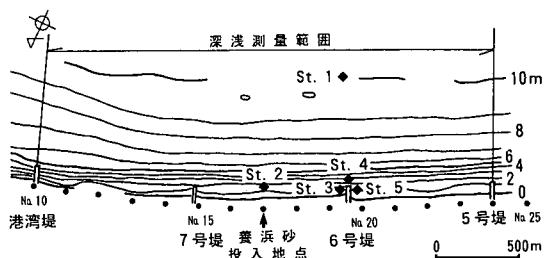


図-4 現地観測位置

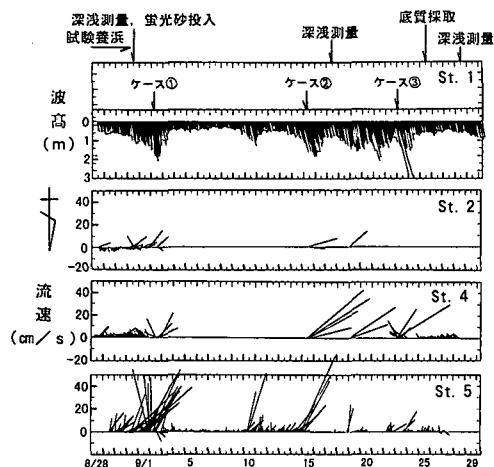


図-5 現地観測時の波浪・流況

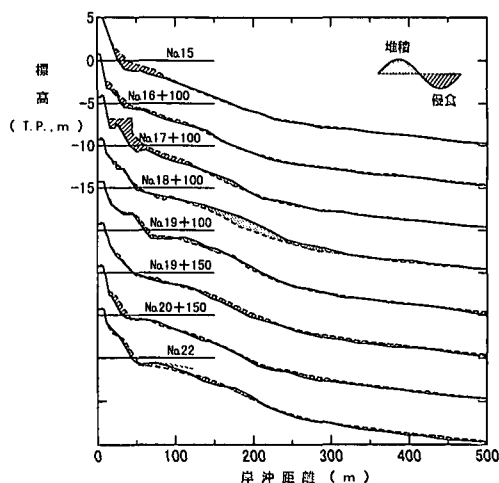


図-7 代表測線の海浜断面地形変化

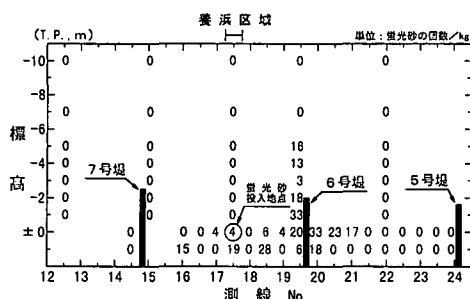


図-6 検出された蛍光砂の分布状況

き流れが卓越している。

試験養浜完了時に投入した蛍光砂の1ヶ月後の分布状況を図-6に示す。ヘッドランド7号堤と6号堤の間に投入した蛍光砂は、東側の7号堤方向にも移動しているが、主として西向きの沿岸漂砂によって6号堤方向に運ばれたものと推定される。6号堤周辺では、ヘッドランドの沖合の水深5mまで蛍光砂が移動しているとともに、ヘッドランドの下手側にも蛍光砂が分布していることは、現状のヘッドランドによる沿岸漂砂の捕捉率が低いことを示している。また、ヘッドランドの沖合まで蛍光砂が移動していることから、現状のようにヘッド部がない場合には、突堤部に沿う沖向き流れの発生によって沖向きの土砂移動が助長されていることが分かる。

図-7に蛍光砂調査とほぼ同一期間となる養浜完了時と1ヶ月後の海浜断面地形の比較を示す。一部を除いていずれも侵食傾向となっており、ヘッドランド6号堤東側の測線 No. 18+100 m 以外では顕著な土砂の堆積が見られない。蛍光砂調査でも明らかのように、養浜砂の大部分は6号堤を越えて西側に移動したことが予想される。

4. ヘッドランドによる海浜変形予測

4.1 海浜流計算

これらの観測データを用いて海浜流シミュレーションの検証計算を行い、計算モデルの再現性および計算条件を確認した。検証計算は、図-5中に示した3ケースについて行っており、高波浪の来襲時で観測データが揃っている時期を選定した。計算範囲は、沿岸方向3,300 m×岸沖方向1,600 mであり、格子間隔は10 mとした。入力波浪には、各ケースのSt. 1における観測データを用いており、地形データは、各ケースに最も近い時期の深浅測量成果をもとに作成した。

図-8に検証計算結果から流速ベクトルの平面分布を示す。なお、図中にはヘッドランド周辺の流況観測地点の位置も示してある。波高が3 mを超えるケース③を見ると、最大流速が1 m/sを超える西向きの沿岸流が全域で発達しており、ヘッドランドによって流れがやや沖向きに蛇行する形となる。ヘッドランド近傍では、循環流が発生しているが、流速は、0.4 m/s程度以下である。St. 2およびSt. 4付近では、流速が1 m/s程度の西向き流れとなっており、St. 5付近では、約0.3 m/sの西寄りの沖向き流れとなっている。

波高が2 m前後のケース①およびケース②では、ケース③に比べて全体的に流速が小さいが、いずれも西向きの沿岸流が卓越している。2ケースともに、St. 4付近では約0.4 m/sの沖寄りの西向き流れ、St. 5付近では約0.3 m/sの西寄りの沖向き流れとなっている。St. 2付近では、ケース①が約0.2 m/sの岸向き流れ、ケース②が約0.5 m/sの西向き流れとなっている。

これらの検証計算結果を図-5に示した流況観測結果

と比較すると、St. 4の流向はやや異なっているが、いずれの地点においても流速値はほぼ合致しており、ヘッドランド近傍における循環流の発生を含めた全体的な流況は計算によって再現されているものと判断される。

次に、ヘッドランドの突堤部の堤長を0 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 mとし、各ケースに堤長150 mのヘッド部を組合せた12ケースのヘッドランド形状について予測計算を行った。計算条件は、地形条件および波浪条件を除いて検証計算と同一である。地形データは、深淺測量成果をもとに平行等深線のモデル地形を作成

し、格子間隔は10 mとした。入力波浪については、図-2に示した石巻港の波浪観測結果をもとに、以下に示す3ケースの代表波浪を設定した。波向は、いずれも出現頻度がピークとなるSEとSSEの間($\alpha=147.5^\circ$)とした。なお、代表波浪のエネルギー頻度の割合も合せて示してある。

- 1) $H_{1/3}=1.0$ m, $T_{1/3}=6.0$ s : 45.2%
- 2) $H_{1/3}=2.0$ m, $T_{1/3}=9.0$ s : 40.7%
- 3) $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=12.0$ s : 14.1%

図-9に予測計算結果から得られる流速ベクトルの平面分布の一例を示す。図-9に示す波高が3 mのケースでは、ヘッド部がない場合は、突堤部に沿う冲向き流れが発達しているが、ヘッド部がある場合は、いずれも上手側の冲向き流れが抑制されるとともに下手側に循環流が形成されている。この傾向は、突堤部の堤長が長いほど、波高が大きいほど顕著となる。このようにヘッド部を設置することにより、ヘッドランド周辺の流況が大きく変化し、ヘッドランドの上手側では堆積の助長、下手側では侵食の軽減が図れるものと考えられる。

4.2 沿岸漂砂の捕捉率

海浜流の計算結果から渡辺ら(1984)の漂砂式を用いて漂砂量分布を計算し、ヘッドランド形状の変化による沿岸漂砂の捕捉率について検討を行った。始めにヘッドランド形状12ケースと波浪3ケースを組合せた36ケースの計算結果から、各ケースのヘッドランドの中心線上における通過漂砂量を求める。次に各代表波高ランクのエネルギー頻度の割合を考慮して、ヘッドランド形状毎に沿岸漂砂の平均通過率を算定した。

図-10は、ヘッドランドの形状と沿岸漂砂の通過率の関係であり、突堤部の堤長は、汀線から突堤先端までの距離である。突堤部の堤長が長くなるとともに、沿岸漂砂の通過率は減少していくが、突堤長が100 m以上では通過率の減少割合が小さくなっている。ヘッド部がない場合の通過率は、突堤部の堤長が50 mで約55%、100 m

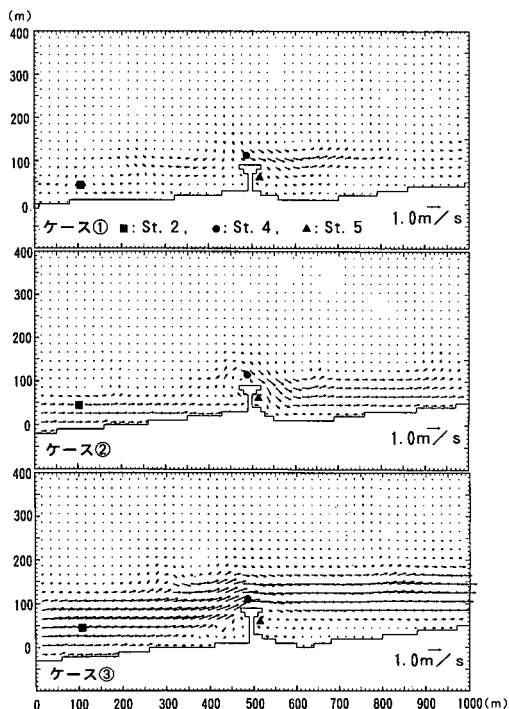


図-8 海浜流計算の検証計算結果

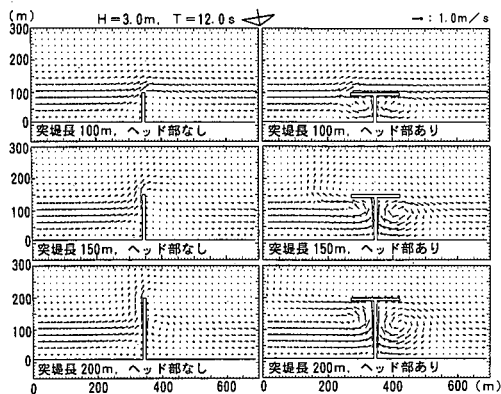


図-9 ヘッドランドの海浜流計算結果

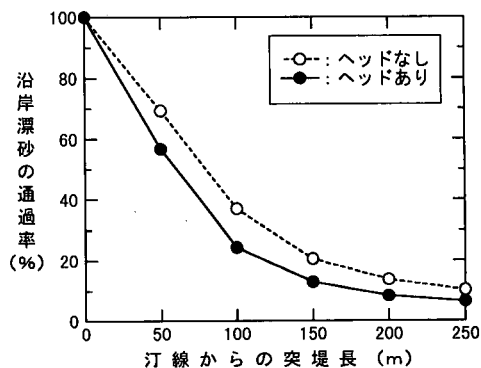


図-10 ヘッドランドの漂砂通過率

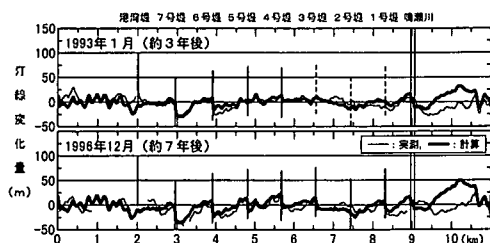


図-11 汀線変化モデルによる検証計算結果

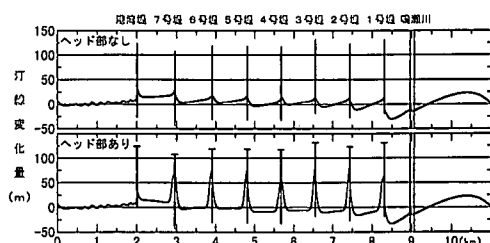


図-12 汀線変化モデルによる予測計算結果

で約25%, 150 mで約15%であり, ヘッドランドの建設費は, 設置水深の増大とともに急激に増大することから, ヘッドランドの効果と経済性の関係から最適な突堤長が存在するものと考えられる。なお, 波高別の計算結果によると, 堤長150 mのヘッド部の効果は, 5%~15%の通過率の低減となり, 波高の増大とともにヘッド部による通過率の低減効果も高くなっている。

4.3 汀線変化計算

海浜流計算から求めたヘッドランド形状と沿岸漂砂の通過率の関係を汀線変化モデルに組み込むことにより, 種々のヘッドランド形状の汀線変化予測が可能となる。汀線変化モデルでは, 小笹・Brammpton (1979) の沿岸漂砂量公式を用いており, 漂砂量係数は, $K_1=0.154$, $K_2=1.62K_1 \times 0.75$ とした。漂砂の移動高さは $h=6.1$ m, 鳴瀬川からの供給土砂量は 2.4 万 m^3/yr とした。入力波浪は, 石巻港の波浪観測結果から以下に示す3方向の波向別のエネルギー平均波を求め, 波向別のエネルギー頻度に対応させて1ヶ月毎に入力した。

- 1) $H=0.87$ m, $T=8.4$ s, $\alpha=139.8^\circ: 32.6\%$
- 2) $H=0.79$ m, $T=7.5$ s, $\alpha=149.1^\circ: 48.2\%$
- 3) $H=0.95$ m, $T=7.1$ s, $\alpha=161.0^\circ: 19.2\%$

このモデルを用いて大曲海岸におけるヘッドランド設置後の汀線変化の再現計算を行った結果を図-11に示す。再現期間は, ヘッドランドの施工開始直前の1990年2月から1996年12月までの約7年間である。検証汀線データは, 深浅測量成果から作成した。計算結果によると, ヘッドランドの上手側(東側)では堆積, 下手側(西側)では侵食となる汀線変化傾向が再現されており, 汀線変化量もほぼ一致している。ただし, 鳴瀬川河口以西については, 土砂採取等の影響により, 計算値の評価が難しい。なお, 沿岸漂砂量は, ヘッドランドがない時期には西向きに4万 m^3/yr 程度であり, 突堤が設置されると徐々に漂砂量は減じて1~2万 m^3/yr 程度となっている。

ヘッドランドの突堤部を50 m延伸し, 堤長150 mのヘッド部を設置するとともに, 最小砂浜幅が50 mとなるように養浜を行った場合の予測計算結果を図-12に

示す。ヘッド部の有無により計算結果を比較すると, ヘッド部がある場合には, ヘッドランド基部において顕著な堆積が生じており, ヘッド部の設置による効果が明らかである。全体的には, ヘッドランドの近傍を除いて大きな違いはなく, ヘッドランド基部の土砂堆積の影響により汀線位置が5 m~10 m程度後退している。しかしながら, ヘッドランド部の存在は, 先述のように冲向き流れの発達を抑制する効果があることに加えて, ヘッドランド基部に土砂が堆積することは, ヘッドランド堤体の安全性の確保に多大の効果が期待できる。

5. ま と め

本研究では, ヘッドランド周辺の砂移動に関する現地観測データをもとに, 海浜流シミュレーションにより種々のヘッドランド形状に対する沿岸漂砂の捕捉率を評価し, この捕捉率を組み込んだ汀線変化モデルを提案した。この予測モデルは, ヘッド部と突堤部の堤長や形状の侵食防止・海浜安定化に対する効果の定量的な評価が可能であり, 大曲海岸のヘッドランド周辺の汀線変化を良く再現していることから, 他の現地海岸のヘッドランド計画に対しても適用性が高いものと考えられる。

ただし, 計算精度については, ヘッド部の捕捉率の評価を含めて今後も向上を図って行くことが不可欠である。大曲海岸では, 突堤部の延伸およびヘッド部の設置が検討されていることから, これらの施工に際しては, ヘッドランド工法の設計・計画手法の確立に向けてモニタリング調査を実施することが必要である。

参 考 文 献

- 宇多高明・斉藤光司・横田喜一郎・大原 茂・川中島洋二・内田恵三 (1994): 大野鹿島海岸のヘッドランド周辺の海浜流観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 576-580.
- 小笹博昭・Brammpton, A. H. (1979): 設けのある汀線変化計算, 港湾技術研究所報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-104.
- 望月倫也・宇多高明・大瀬光男・大谷昭郎 (1990): 仙台北部の海浜変形の実態, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 369-373.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・嶺山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.