

バリアー・アイランド上の越波によるラグーン内での土砂堆積

田 中 仁*・山 内 健 二**

1. はじめに

ラグーンと海域を隔てるバリアーアイランド（以下、バリアーと略す）の形成に関しては、おもに自然地理学者により地形学的な研究がなされている（例えば、Nordstrom et al., 1990）が、海岸工学・土砂水理学の視点によるアプローチ（例えば、宇多ら, 1992）はきわめて少ない。今後、地球温暖化に伴う海面上昇により、バリアー上の越波が顕在化し顕著な地形変化を来す可能性がある。また、海面上昇によらずとも、ラグーン前面海浜の汀線が後退しバリアー自体がやせることによっても同様な事態が発生する。干潮時、ラグーン内には干潟が現れ、豊かな生物環境が形成されている場合が多い。このようなラグーン内の環境保全のためには、バリアー上の砂移動に関し従来の地形学的検討のみでなく、ダイナミックスに立脚した砂移動現象に関する検討が必要である。

そこで、本研究では宮城県仙台市・蒲生干潟を対象として調査を行い、干潟内の土砂堆積の実態を明らかにするとともに、土砂堆積量を推定する手法について検討を行った。

2. 蒲生干潟について

調査対象である蒲生干潟および周辺の地形を図-1に示す。蒲生干潟はもともと七北田川の旧河道部である（田中, 1995）。当初、七北田川は現河口近くで2 kmほど北上してから仙台湾に注いでいたが、仙台港の建設着手を機に、まず締め切り堤が設けられて河口が現在の位置に付け替えられた。その後、旧河道部の北側半分が埋め立てられ仙台港が建設されるとともに、現在の干潟が形成された。蒲生干潟は約1000 m×150 mの広さを有するラグーンであり、渡り鳥の飛来地として市民に親しまれている（栗原, 1980）。

仙台港南防波堤の建設後、防波堤からの反射波により付け根付近での汀線の後退が顕在化した（運輸省塩釜港工事事務所, 1984）。このため局所的な侵食を防ぐ目的で1977年から1979年にかけて翼堤が構築された。その後

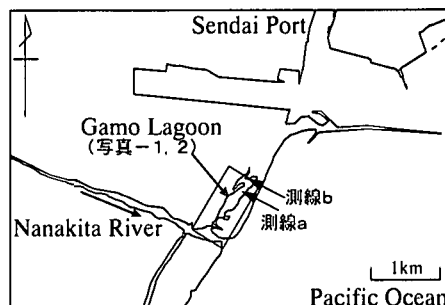


図-1 蒲生干潟、七北田川河口周辺の地形

安定した汀線形状を示しているものの、依然として干潟奥部のバリアーは痩せており、このことが、バリアー上の越波による蒲生干潟内での土砂堆積が顕著に現れるようになってきたことの一つの理由と考えられる。

3. 蒲生干潟内で見られる土砂堆積

(1) 観測データ

a) 航空写真

河口近傍の航空写真は1990年5月から1994年3月までは毎月、それ以降は2ヶ月に一度撮影されている。また、宮城県により不定期に撮影された斜め写真や、国土地理院による航空写真も入手して本研究の解析に使用した。

今回解析した航空写真の中で大規模な堆積が認められたのは3ケースあった。また、干潟までは至らないものの砂州上に砂の堆積が認められるものが2ケースあった。写真-1, 2に土砂堆積が顕著に現れたケースの堆積前後の航空写真を示す。ラグーンの左端に数列の舌状の堆積地形が認められる。また、これ以外の場所でも、堆積前の写真に見られる黒みがかった植生領域が消滅し、砂に覆われてしまっている。

b) バリアーの縦断形状

特に堆積が顕著な干潟奥部は汀線からラグーン水際までの距離が短い場所である。森（1995）の行った仙台湾南海岸での測量結果によれば、バリアー頂部高さは3 m、越波が発生する直前のバリアー部の前浜勾配は0.1～0.12と比較的急勾配であった。一方、上原ら（1996）は

* 正 会 員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

** 学生会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻



写真-1 干潟内への土砂堆積前後の航空写真
(撮影, 上: 93年11月2日, 下: 93年12月2日)



写真-2 干潟内への土砂堆積前後の航空写真
(撮影, 上: 94年9月3日, 下: 94年11月1日)

干潟の奥部にあたる測線 a, b (図-1 参照) で横断測量を行い, 台風時の大時化によりおよそ 4,300 m³ の土砂が流入されたと報告している。測線 a, b での横断面の経年変化を図-2 に示す。水平方向に 50 m, 高さとして 1.5~2.0 m 程度の堆積が見られる。測量データの時間間隔は長い, この断面図および航空写真上の平面図から干潟内での堆積土砂量をおおよそ見積もることができ

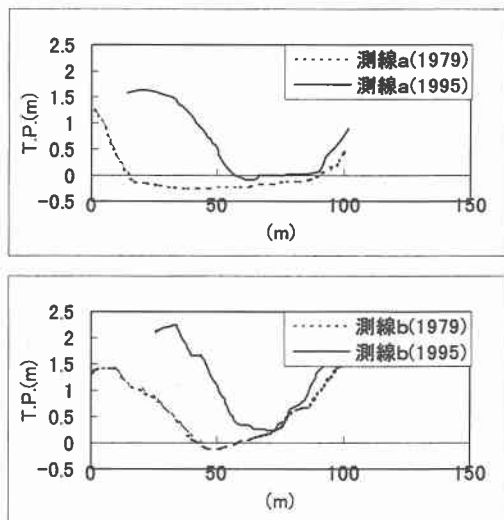


図-2 干潟内での横断面の変化 (上原ら, 1996)

る。

c) 外力データ

波浪データとして, 仙台港沖合い 4 km ほどの地点で運輸省により観測されている有義波高, 有義波周期および波向きを用いた。なお, 観測波浪データは水深 20 m での波浪であるので, 浅水変形および屈折による波高変化を考慮して沖波の波浪データに換算した。

また, 仙台港において運輸省により観測されている検潮記録を潮位データとして用いた。

(2) 土砂堆積量と波浪条件との関係

先に示したように土砂堆積の判定は1ヶ月, または2ヶ月間隔の航空写真により行われたが, 今回のデータに関する限りその間に複数回にわたって高波浪が来襲することが無かったので, 土砂堆積を生じさせた波浪を容易に特定することが出来た。

Ogawa・Shuto (1984) によれば, 波のうちあげ高 R_u は以下のように表わされる。

$$\frac{R_u}{H_0} = \frac{0.46}{\beta} s^{-0.12} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.2} \left[3.04 s^{1.07} - \frac{2.94 \pi \zeta^2 A^2}{F^2} \right. \\ \left. \cdot s^{-0.09} m^2 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.75} \right] + \pi A \zeta^2 m^2 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1} \dots (1)$$

ここで, H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, s : 斜面勾配, m : 前浜勾配, β, ζ, A, F : 諸係数である。一樣勾配斜面 ($s = m = 0.1$) として算定した打ち上げ高さに潮位の変動を考慮することにより, 干潟前面での打ち上げ高さを知ることができる。

図-3, 4 はそれぞれのケースについて, 2 時間ごとの 1/3 有義波データから算定したうちあげ高さ (潮位も加算) を示したものである。

1994年9月のケースではバリアー高(約3m)を大きく越える波が約一半継続している。他のケースについても同様な解析を行ったところ、越波を生じさせた波浪の来襲時期を特定することが出来た。さらに、それぞれのケースに見られる堆積規模の違いは、うちあげ高さがバリアー高を越えている期間(越波期間)とその規模(うちあげ高さ-バリアー高)の相違に起因していることが判った。

(3) バリアー上の越波生起確率

本来、越波という現象を支配する主因子として波形勾配、波向き、天端高、のり面勾配、海底勾配、潮位などが挙げられるが、これ以外にも多くの関連因子が存在する。しかしながら、関連因子を最小に絞り、蓄積された観測データに統計的処理を施すことにより、簡易に将来の長期的な見通しを立てることができ、対策を講じる上では重要な情報となり得る。

バリアー上の越波が発生する条件としては前述したような多くのパラメーターを考慮する必要があるが、この様なデータが全て揃うケースは希である。ここでは、支

配パラメーターとして日平均のうちあげ高さのみを選び、そのヘーズン・プロットを求めた。

観測データである日平均有義波データは、1988年6月から1996年11月まで約9年分のデータを用い、波の遡上の算定には式(1)を用いた。図-5は計算した日平均うちあげ高さの超過確率を対数正規分布にプロットしたものである。日平均うちあげ高さが3mを越えるような大規模な越波発生 の再現期間は約7.8年であることが判る。

(4) 輸送土砂量の算定モデル

地形変化量をより厳密にかつ定量的に把握するためには、前記したようなうちあげ高さを知るだけでは不十分であり、越波量さらにはこれに伴う土砂輸送量の評価が不可欠である。

従来、防波護岸や海岸堤防などにおける期待越波量を算定するための研究は盛んに行われてきているが、その多くの水理模型実験では構造物上の越波を対象としているため、今回のような越波に伴う砂移動現象に関する検討が行われているケースは少数ない。

このような点を踏まえて、Hancock et al. (1994)、Kobayashi et al. (1996)は砂丘上の越波実験を行い、越波量と砂移動量の関係を調べている。今回、蒲生干潟内で大規模な堆積が認められた2ケース(1993年11月、1994年9月)について、波浪データから期待越波量を算定し、現場スケールでの越波量と砂移動量の関係につい

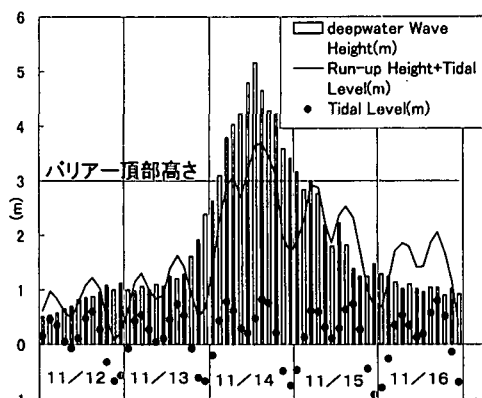


図-3 バリアーへのうちあげ高さ (1993年11月)

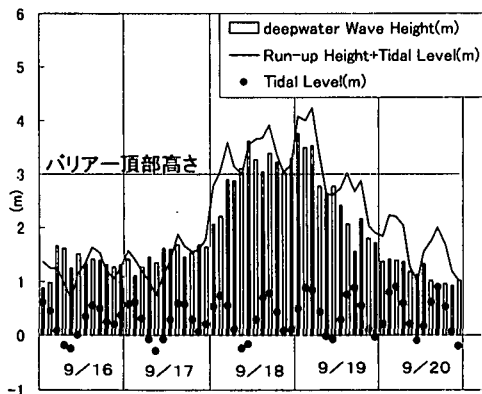


図-4 バリアーへのうちあげ高さ (1994年9月)

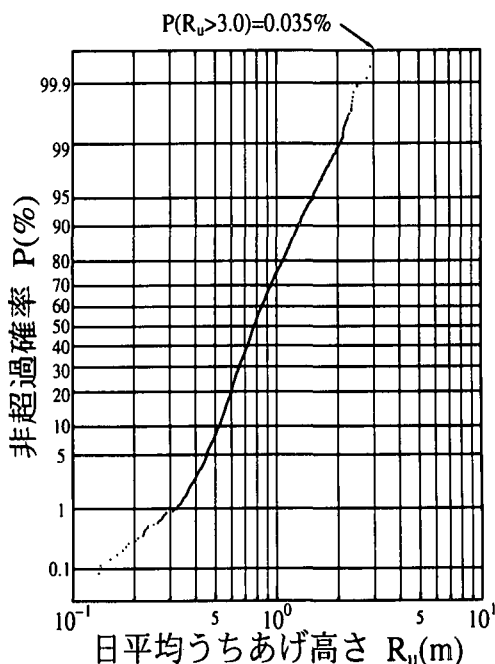


図-5 日平均うちあげ高さ超過確率の対数正規分布

て調べ、実験値との比較・検討を行う。

a) 期待越波量の算定方法

Hancock et al. (1994), Kobayashi et al. (1996) は De Waal and Van der Meer (1992) の式をもとに砂丘上の越波量を計算しているが、もともとこの式が人工構造物を対象としたものであるため、今回の計算にはなじまない。そこで、ここではより簡単な式形の富永ら(1971)による次式を用いる。

$$Q = \alpha(R - H_c)^n \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Q (cm^3/cm) : 1 波あたりの越波量, R (cm) : うちあげ高さ, H_c (cm) : バリアーの高さである。ここで、 α と n は今回のバリアー形状を考慮して、 $\alpha = 0.5$, $n = 2$ とした。現地に適用する際は潮位変動も考慮する必要があるので上式を

$$Q = \alpha(R + \text{Tide} - H_c)^n \dots\dots\dots (3)$$

とする。ただし、Tide (cm) : 潮位であり、また、うちあげ高さの計算には式 (1) を用いる。

ここで、式 (3) は規則波に対する式であり、実際の波浪の不規則性を考慮していない点に注意しなければならない。合田 (1970) は越波量の計算に際して波浪の不規則性を導入することの重要性を指摘するとともに、その計算法を提案した。ここでは、合田 (1970) の手法にならない、周期を一定として波高がレーリー分布式に従うと仮定して、期待越波量を求めた。

b) 越波量と砂移動量の関係

以上の手法を用いることにより、上記の二つのイベントに対して累計の越波量を求め、その結果を図-6 に示した。図-3、図-4 に見られるように 1994 年 9 月の時の

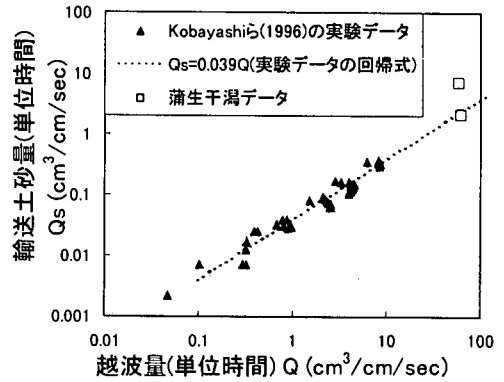


図-7 越波量と輸送土砂量の関係

方が越波の継続時間が長い。このため、図-6 に見られるような累計量の相違が生じている。

前述した方法で計算された越波量と横断面データおよび航空写真上から見積もられた堆積土砂量（空隙は含まない）との関係から、表-1 にあるように土砂濃度 $C_s = Q_s/Q$ を求めることが出来る。また、この結果を Kobayashi et al. (1996) の実験結果とともに図-7 に示す。これより、本研究により得られた結果は横軸・縦軸の値ともに実験室規模をはるかに上回るのもであることが分かる。また、実験ではほぼ一定値の堆積濃度 ($C_s = 0.04$) をとるのに対して、蒲生干潟での輸送土砂濃度を表す C_s 値は、これより若干大きめの値をとっているものの、実験値の傾向がおおよそ捉えられている。このことは、波浪データおよびバリアー形状に基づいて算定した越波量 Q にこの体積濃度 C_s を乗じることによって、越波に伴う輸送土砂量を推定することができることを示唆している。

4. ま と め

(1) 過去 9 年間蓄積された波浪データからバリアー上の越波の生起確率を求めた結果、1994 年 9 月に発生したような大規模な地形変化が 7, 8 年に一度発生するものと予測される。

(2) 観測された波浪データをもとに計算した越波量と蒲生干潟内での土砂堆積量との関係を調べた結果、輸送土砂の体積濃度を表す C_s 値は 0.03~0.12 の間を取ることが判った。この値は Kobayashi らの実験値に比べてやや大きめの値を取っているものの、両者のデータ間にはきわめて近い傾向が見出され、本計算モデルの現地適用性が示された。

(3) ここに示した手法を用いることにより、波浪条件、バリアーの縦断形状をもとに、ラグーンへの輸送土砂量を算定することができ、海面上昇に伴い顕在化するものと危惧されるラグーン埋没の対策立案のために有用

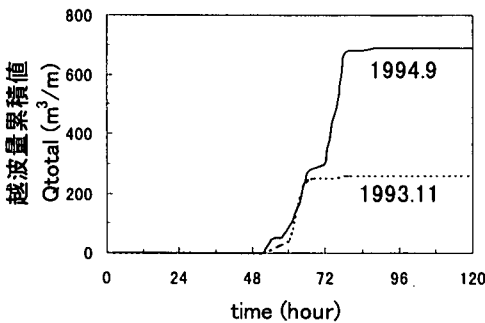


図-6 累積越波量

表-1 越波量、堆積土砂量及び土砂濃度

	越波量累積値 Q_{total} (m^3/m)	堆積土砂量 Q_s (m^3/m)	土砂濃度 $C_s = Q_s/Q_{\text{total}}$
1993.11	261	10	0.038
1994.9	688	80	0.116

な知見を与えることが出来る。

謝辞：本研究を行うにあたって、東北大学工学部災害制御研究センター・首藤伸夫教授より貴重な助言を頂いた。また、運輸省第二港湾建設局・塩釜港工事事務所ならびに宮城県仙台東土木事務所から貴重な資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。最後に、本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 上原忠保・山下秀雄・岩淵 勝 (1996): 蒲生ラグーンの水容積の変化, 平成七年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 216-217.
- 宇多高明・山本幸次・永瀬恭一・五十嵐竜行 (1994): バリアーの形成過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 551-555.
- 運輸省塩釜港工事事務所 (1984): 仙台港深浅及び汀線地形測量成果整理報告書, 134 p.
- 栗原 康 (1980): 干潟は生きている, 岩波新書, 219 p.
- 合田良実 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 9 巻, 第 4 号, 41 p.
- 田中 仁 (1995): 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 169-181.
- 富永正昭・佐久間襄 (1972): 海岸堤防に関する研究 (11), 土木研究所報告 143-3, 36 p.
- 森 俊哉 (1995): 仙台港南部の砂浜海岸における海浜形状変化, 東北大学工学部土木工学科卒業論文, p. 106.
- De Waal, J. P. and J. W. Van der Meer (1992): Wave runup and overtopping on coastal structures, Proc. 23 rd Int. Conf. Coastal Eng., pp. 1758-1771.
- Hancock, M. W. and N. Kobayashi (1994): Wave overtopping and sediment transport over dunes, Proc. 24 th Int. Conf. on Coast. Engng., pp. 2028-2042.
- Kobayashi, N., Y. Tega and M. W. Hancock (1996): Wave reflection and overwash of dunes, Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 150-153.
- Nordstrom, K. F., N. Psuty and B. Carter (ed.) (1990): Coastal Dunes, Form and Process, John Wiley & Sons, 392 p.
- Ogawa, Y. and N. Shuto (1984): Run-up of periodic waves on beaches of non-uniform slope, Proc. 19 th Int. Conf. on Coast. Engng., pp. 328-344.