

高波浪時における汀線近傍の地形変化に及ぼす長周期波と短周期波の役割

島田 玄太*・内野 敬太**・関 克 己***・水 口 優****

本研究では、汀線付近の砂面高および遡上波の水面変動を連続して捉えることが可能な観測システムにより得られた大規模侵食のデータを基に、地形変化に及ぼす長周期波、短周期波の役割に注目しながら one storm (大規模侵食を含む 8 日間) の波浪と地形変化の特徴を検討した。その結果①汀線付近の地形変化は満潮前後で生じていること、②汀線付近の侵食は重複波となる長周期成分によってもたらされ、遡上域でエネルギーを失う短周期波は堆積に寄与することが確認された。③満潮直前に生じる大規模侵食の開始条件は長周期成分のパワーが短周期成分のパワーを上回っていることに加え、④潮位が上昇することで berm 頂付近 (の急勾配な地形) にその大きなパワーを持った長周期成分が到達することが推察された。

1. はじめに

本研究では島田ら (2002) に引き続き、汀線付近の砂面高および遡上波の水面変動を連続して捉えることが可能な観測システムを用いて得られた大規模侵食のデータを基に地形変化に及ぼす長周期波、短周期波の役割に注目して侵食発生条件を調べた。特に侵食開始条件、終了条件に注目しながら one storm (大規模侵食を含む 8 日間) の波浪と地形変化の特徴を検討した。なお今回解析対象とする大規模侵食とは、遡上域の岸側に堆積砂で形成される berm が年に数回程度の高波浪によって短時間で侵食される現象である。

2. 現地観測概要

茨城県波崎海岸にある独立行政法人港湾空港技術研究所 (以下港空研) の観測用棧橋に空中発射型超音波式波高計 (以下 AEUWG) を遡上域の約 55 m 区間に岸沖方向に 12 台設置し、サンプリング周波数 5 Hz でデータを連続収録した。AEUWG は砂面、および水面を感知可能であり砂面露出時には砂面鉛直位置を、遡上波が存在する時には水面変動を、無人かつ連続的に計測することが可能である。なおうち 2 台 (ch. 10, ch. 11) は港空研常設の AEUWG を借用したものであるために、チャンネル番号は設置位置順と一致しない (図-1 参照)。上記の観測システムは計測間隔が岸沖約 5 m であり遡上波の遡上過程、遡上域の地形変化過程を詳細に追うことが困難である。また侵食時の岸側不動点を捉えることも出来なかった。したがって 2002 年 7 月 18 日に計測間隔を 3 m に短縮し、さらに沖向きを正に取った座標上の $X=0$ m 地点から岸側-23 m 地点まで観測点 (5 計測点) を増設した新観測システムに移行した。

本研究では旧観測システムのもと 2001 年 8 月 22 日に関東地方に接近した台風 11 号による侵食現象の解析を

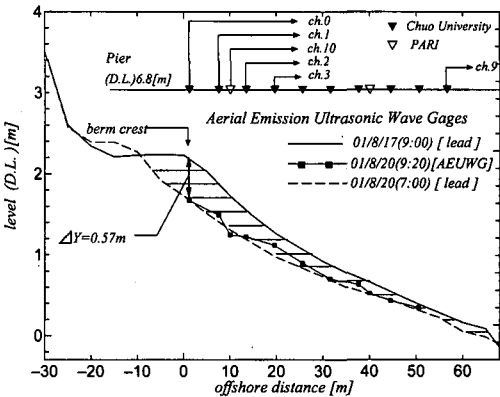


図-1 AEUWG の設置位置と大規模侵食時の断面地形変化 (旧観測システム)

主とし、大規模侵食が生じた時間を含む 8 月 17 日から 8 月 24 日の (侵食が生じる) 満潮時に注目した。大規模侵食が生じる前後の断面地形、AEUWG の設置位置を図-1 に示す。図-1 より ch. 0 ($x=1.2$ m) の AEUWG の設置位置はおおよそ berm 頂位置にあることが分かる。また ch. 9 ($x=56.6$ m) は干潮時に砂面が露出する最も沖側の地点であり、遡上域沖側端に位置している。なお以下の解析に用いる天文潮位は、鹿島港での計算天文潮位とした。

3. 台風 0111 号の経路と 8 日間の砂面変動

砂面変動を起こす以前の 2001 年 8 月 17 日から砂面変動が安定する 24 日までを地形変化から見た one storm とし、その期間において各チャンネルの砂面変動を捉えたものが図-2 である。砂面高は 10 分毎に 10 秒間 (遡上波の周期のオーダー) を取り出しその間に 1 cm 以上の変化がないところを砂面が露出したと判断し、その間の平均値を砂面高とした。また実線で示したものは潮位の変動であり、砂面データが欠損している時間は潮位の上昇によって砂面の露出が無い時間である。図より明らかに汀線付近の有意な地形変化は全て満潮時に生じ

工修 (株)アイ・エヌ・エー (前中央大学院生)
* 学生会員 中央大学大学院理工学研究科
** 学生会員 工修 中央大学大学院理工学研究科
*** 学生会員 工修 中央大学大学院理工学研究科
**** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

ており、以下満潮時に注目して解析を行った。まず one storm 期間の全満潮時に [a]~[m] の符号を付け、特に大規模侵食時は [be] とし、大規模侵食直前の 2 回の満潮に [1], [2] を付けた。

図-2を見ると、大規模侵食は 8 月 19 日に生じており、台風が関東地方接近する 8 月 22 日より以前に生じている。また大規模侵食が生じた 8 月 19 日の台風中心は九州の南約 600 km 地点に位置していた。One storm 全体で見ると、大規模侵食の以前にも小規模な侵食 (ch. 0 の砂面低下がおおよそ 10 cm) が 2 回生じており、侵食後も満潮前後に小規模な侵食が 8 月 23 日まで続いている。砂面変動を見ると ch. 0 (berm 頂) の砂面変動が最も大きく沖に行くにしたがって小さくなるのが分かる。干潮時は砂面の変動は殆ど無く、台風が最接近している期間も干潮時に侵食は生じておらず、むしろ堆積傾向にあるように見て取れる。また各満潮時で上げ潮に伴い侵食が生じる直前に堆積する傾向も見られる。

4. 各満潮時の ch. 9 の (遡上域沖側端) パワースペクトル

図-2 で示した各満潮 (満潮を中心とする約 1 時間) における ch. 9 (遡上域沖側端) の水面変動のパワースペクトルを求めたものが図-3(a)~(d) である。

パワースペクトルを長周期成分 ($f \leq 0.04$ Hz) と短周期成分 ($f \geq 0.04$ Hz) に分けて地形とその関係を見ると、大規模侵食が生じる満潮 [be] で侵食前の満潮と比較して長周期成分のパワーが増大していることが見て取れる。また、短周期成分の満潮 [a], [b] のパワーは満潮 [be] より大きい。侵食は生じていない。大規模侵食後、台風最接近に伴いさらに長周期波のパワーは増大し満潮 [f] でピークに達するが、大規模侵食はその 2 日前の長周期成分の発達段階 (満潮 [be]) で生じていることが分かる。ま

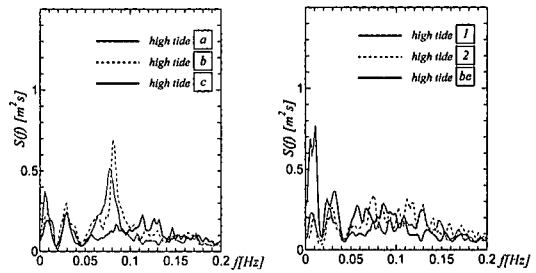


図-3(a) 満潮 a, b, c における ch. 9 のパワースペクトル

図-3(b) 満潮 1, 2, be における ch. 9 のパワースペクトル

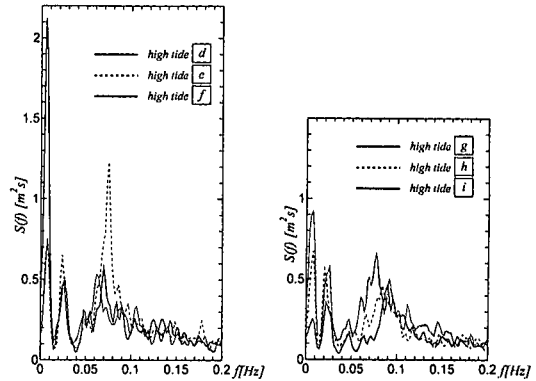


図-3(c) 満潮 d, e, f における ch. 9 のパワースペクトル

図-3(d) 満潮 g, h, i における ch. 9 のパワースペクトル

た台風接近により短周期成分のパワーがピークとなるのは満潮 [e] である。今回の大規模侵食の 1 例からの考察になるが、台風の最接近以前に来襲するうねり性の波 (に含まれる長周期成分) が大規模侵食を生じさせる要因として考えられる。加藤ら (1989) は波崎の現地観測データにおいて、berm が侵食される 28 ケースを対象に長周

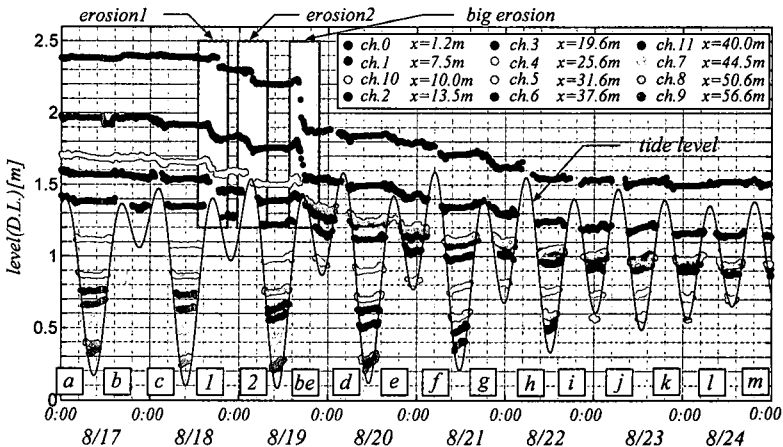


図-2 one storm における砂面変動の時系列 (図中の実線は計算天文潮位)

期波の波高との関係を検討している。それによると、berm 地形が侵食を受けた時は長周期波の波高が高いことを同様に示している。また短周期波のピークの以前に長周期波のパワーの増大が見られ、それによって berm が侵食されるケースを示している。

5. AEUWG 群による遡上波の鉛直換算波形の算出と遡上波のパワースペクトル

図-3(a)~(d)を見ると長周期成分のスペクトルは重複波特有の腹節パターンをなしていることが見て取れる。長周期成分のパワーと地形変化を関係づけるに当たって、節の周波数帯でのパワーを得ることは難しい。そこで反射点となる汀線での遡上波形を AEUWG 群のデータより求め、遡上波のパワースペクトルを算出することを試みた。

遡上波の鉛直換算遡上波形は水面を感知する最も岸側の 2 点の水面変動で各時間の水面直線を算出し、さらにその一つ岸側の 2 点での砂面データから 10 分毎に砂面直線を算出し、この 2 直線の交点を瞬間的な遡上波の到達位置とした。なお最も岸側に設置した ch. 0 を遡上波が越える時は、ch. 0 での水面高さを遡上到達高とみなした。

この方法によって算出した鉛直換算遡上波形のパワースペクトルを各満潮時（満潮を中心とする約 1 時間）で

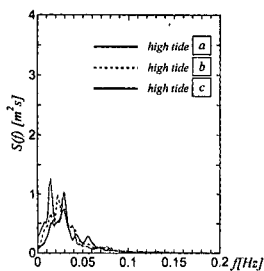


図-4(a) 満潮 a, b, c における遡上波のパワースペクトル

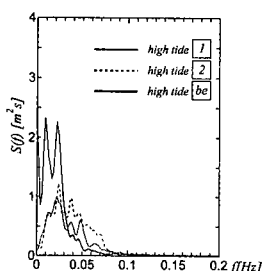


図-4(b) 満潮 l, 2, be における遡上波のパワースペクトル

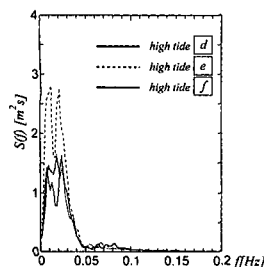


図-4(c) 満潮 d, e, f における遡上波のパワースペクトル

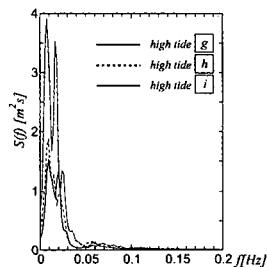


図-4(d) 満潮 g, h, i における遡上波のパワースペクトル

算出したものが図-4(a)~(d)である。

これを見ると ch. 9 地点で節であった周波数帯も、汀線の反射点付近であることから長周期成分のパワーが存在していることが見て取れる。また短周期成分は碎波、遡上により減衰しパワーが殆ど無くなっている。ただし短周期成分のパワーは、旧観測システムの AEUWG 群の設置間隔が広いため、正確に算出されていないことが考えられる。

6. 遡上域における長周期、短周期成分のパワー（0 次モーメント）の比較

汀線付近の地形変化と長周期成分、短周期成分のパワーの関係を検討するために、各成分のエネルギーの指標である 0 次モーメント m_0 を求めた。ここでは 4, 5 節での検討結果より長周期成分は鉛直換算遡上波形から得られる $m_{0\text{lsw}}$ を、短周期成分は ch. 9 の水面変動から得られる $m_{0\text{s.ch.9}}$ を地形変化に寄与する要因として検討する。図-5 は $m_{0\text{lsw}}$ と $m_{0\text{s.ch.9}}$ を図-2 に対応した各満潮ごとに示したものである。これを見ると大規模侵食が生じる満潮 [be] で長周期成分の $m_{0\text{lsw}}$ が短周期成分の $m_{0\text{s.ch.9}}$ を初めて上回っていることが見て取れる。

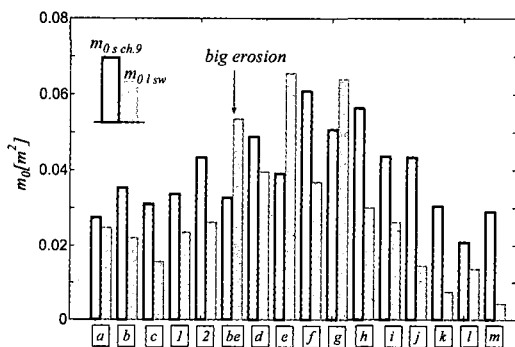


図-5 各満潮時の長周期、短周期成分のパワー（0 次モーメント）の比較

7. ch. 9 (遡上域沖側端) と汀線での長周期成分の比較

大規模侵食前後の満潮 [c] と満潮 [f] で鉛直換算遡上波形と ch. 9 の水面変動でクロススペクトル解析を行い、位相、コヒーレンス、伝達関数を求めたものが図-6 である。図-6 の伝達関数を見ると長周期成分はほぼ 2 の一定値を示し、ch. 9 (遡上域沖側端) の入射波の振幅が汀線付近まで保存されていることを示している。

また図-6 の phase を見ると侵食前の満潮 [c] と侵食後の満潮 [f] で重複性と進行性を示す境界の周波数はそれぞれ 0.035 Hz と 0.03 Hz であり、侵食後に反射点(汀

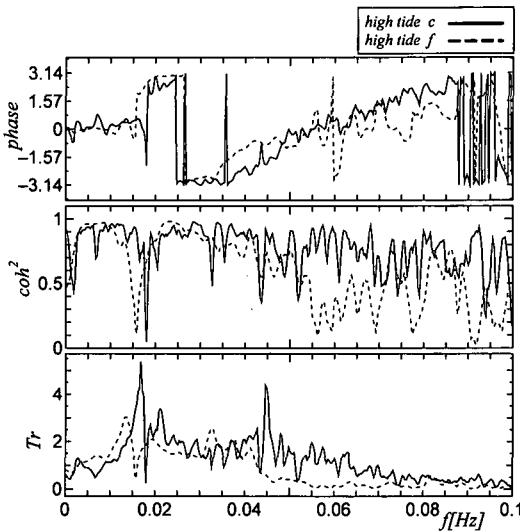


図-6 ch. 9 の水面変動と鉛直換算遡上波形の水面変動の位相, コヒーレンス, 伝達関数

線) 付近が緩勾配になり境界周波数が低周波側にシフトしたことを示している。また, 図-4 を侵食前から後まで追うと, 明らかに高周波数側のパワーが減少し境界周波数が低周波数側になったことがわかる。これより大規模侵食が生じた後に地形が安定する原因として, 進行波と重複波の境界となる周波数変化の寄与が考えられる。

8. 新観測システムによる遡上域の勾配と長周期波, 短周期波の関係

新観測システムのもと 2002 年 9 月 1 日から 10 月 1 日の毎午前 9 時を中心とする 30 分間の鉛直換算遡上波形からパワースペクトルを算出し, さらに境界周波数を $1/25 \text{ Hz}$ として m_{01sw} と m_{0ssw} を求めて遡上域の勾配との関係を検討した。解析対象としたのは潮位の高い順に並べ, 高い方から 3 分の 1 (全 11 ケース) を選び満潮, もしくは満潮に近い時間帯のものとした。なお対象とした期間は大規模侵食のような急激な地形変化は見られず緩やかな堆積と侵食が生じている期間である。

遡上域の勾配を算出するに当たって, まず鉛直換算遡上波形から 30 分間の平均値 (平均汀線) を求め, 同時に平均からのずれの rms 値を求めその鉛直区間を遡上域と定義した。遡上域内の計測地点と, その一つ岸側と沖側の計測点を加えた計測地点での砂面高から, 最小二乗法によって求めた傾きを遡上域の勾配と定義した。ここで勾配の絶対値については, AEUWG の桟橋設置鉛直位置の精度に問題があり相対的な変化のみの議論とする。

図-7(a), (b) は遡上域の勾配と m_{01sw} と m_{0ssw} の関係を示したのである。これを見ると長周期成分のエネルギーが増加するに伴い遡上域の勾配が緩勾配化するのに

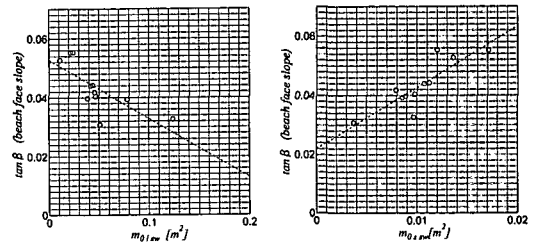


図-7(a) 長周期成分の m_{01sw} と遡上域の勾配の関係

図-7(b) 短周期成分の m_{0ssw} と遡上域の勾配の関係

対して短周期成分のエネルギーは増加するに伴い遡上域の勾配が急勾配となっていることが分かる。つまり長周期成分は侵食に, 短周期成分は堆積に寄与することが推察される。

前節までの検討結果も含め, 入射波のうち反射波を形成する長周期成分は侵食に, 碎波 (および遡上時の砂浜への浸透等) によって減衰する短周期成分は堆積に寄与していると考えられる。さらに言えば, 重複波となる長周期成分では打上げ時の岸向漂砂以上に引き波によって砂が沖に運ばれるのに対して, 打上げのみで引き波が無い短周期成分は岸向漂砂を生じさせるものと考えられる。

9. 大規模侵食期間 (8 時間) の岸沖漂砂量について

次に図-2 の大規模侵食が生じる満潮 [be] の 8 時間 (13 時~20 時) を解析対象期間とし, 各チャンネルの砂面変動データから岸沖漂砂量を算定することを試みた。なお ch. 1 ($x=7.5 \text{ m}$) において遡上波 1 波によって最初に顕著に砂面低下する時間 15 時 47 分から砂面高の低下が止まった 17 時 00 分までの 1 時間強を急速侵食期間と呼ぶことにする。

図-2 を見ると急速侵食の前後で ch. 3 地点より沖側では砂面変動が殆ど無い。つまり ch. 3 ($x=19.6 \text{ m}$) 付近を不動点として岸側 (berm 付近) の砂が沖側に通過していると考えられる。そこで ch. 3 での (沖向き) 漂砂量を定量的に把握するために砂の連続式を侵食期間の 5 分

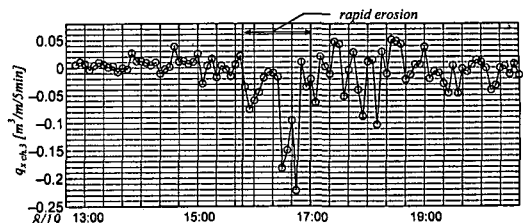


図-8 ch. 3 の岸沖漂砂量

毎の砂面高 (ch. 0 から ch. 3 まで) のデータを用い岸沖漂砂量 q_x を求めた。ただし今回のデータにおいては岸側の砂面高の不動点が捉えられていないため、港空研の定常観測における地形測量の結果より $x = -22$ m 地点を不動点とし岸側の初期値とした。また波崎海岸における底質の平均中央粒径は 0.18 mm であることより空隙率は 0.4 を用いた。このようにして求めた結果を岸向きを正にして示したものが図-8 である。これを見ると急速侵食期間で ch. 3 より岸側の砂が ch. 3 地点を通過し急激に沖に流出していることが分かり、その最大沖向き漂砂量は $0.22 \text{ m}^3/\text{m}/5 \text{ min}$ に達する。

10. 短周期成分と長周期成分のパワー (m_0) と漂砂量, 侵食開始条件の検討

短周期成分と長周期成分の m_0 と岸沖漂砂量の関係, および侵食開始, 終了条件を検討するため, 前節で求めた岸沖漂砂量を毎正時を中心とする 1 時間毎に直した漂砂量と, 同時間の遡上波スペクトルから算出した長周期成分 $m_{0\text{lsw}}$ および ch. 9 の水面変動のパワースペクトルから算出した短周期成分 $m_{0\text{sch.9}}$ との関係を検討した。また 8 節と同様に遡上域の勾配 (相対的な値) を求め, 潮位を上記の諸量と併せて示したものが図-9 である。13 時を中心とする 1 時間のデータは, AEUWG 群によって鉛直換算遡上波形が算出できる潮位に達していないため欠損とした。

図-9 を見ると潮位の上昇に伴い, 短周期成分の $m_{0\text{sch.9}}$ が上昇しているのに対して, 長周期成分の $m_{0\text{lsw}}$ は潮位によらずほぼ一定の値を示している。このことは, 短周期成分は碎波後の波高が水深に依存するのにに対して長周期成分は常に汀線付近に波高減衰せずに到達していることを示している。図-9 の 7 時間の対象期間に限って侵食開始条件を検討すると, 図-5 にもあるように潮位が上昇した結果, 遡上域に到達する短周期成分のパワーが増大しても, まだ長周期成分のパワーが上回っているという特徴がある。しかし, この期間に限れば短周期成分と長周期成分の m_0 の差と漂砂量の関係については, 長周期成分が相対的に大きい程侵食されるという関係は認められない。すなわち大規模侵食が生じるか否かは, 潮位が上昇し (波浪上昇に相まって) 遡上波が berm 頂付近に到達した段階での長周期成分のパワーと短周期成分のパワーの関係で決まると考えられる。

11. おわりに

本研究によって得られた主要な結論は以下の通りであ

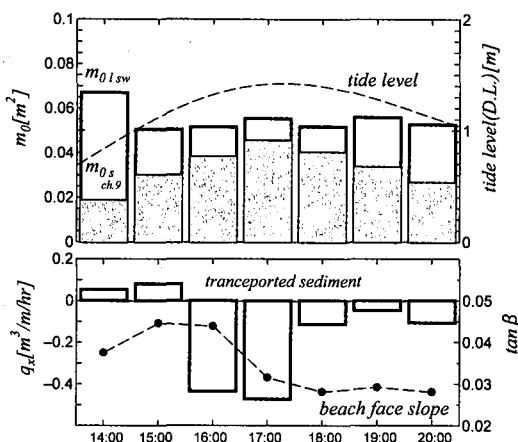


図-9 満潮 [be] を含む 7 時間の長周期成分, 短周期成分の 0 次モーメント, 岸沖漂砂量, 遡上域の勾配と潮位の関係

る。①汀線付近の有意な地形変化は満潮前後で生じている。②汀線付近の侵食は重複波となる長周期成分によってもたらされ, 遡上域でエネルギーを失う短周期波は堆積に寄与するものと推察される。③満潮直前に生じる大規模侵食の開始条件はその時点で遡上域における長周期成分のパワーが短周期成分のパワーを上回っていることに加え, ④前堤条件として潮位が上昇することで berm 頂付近の急勾配な地形にその大きなパワーを持った長周期成分が到達することが考えられる。⑤また侵食終了条件は, 大規模侵食後に汀線付近の地形が緩勾配化し, 進行波と重複波の境界周波数が低周波数側に変化することが重要な要素として考えられる。

謝辞: 独立行政法人港湾空港技術研究所, 漂砂研究室の関係者の積極的な協力に感謝したい。特に柳嶋慎一さんを初めとする波崎勤務の方々には, 観測システムの点検, 維持にご協力頂いている。また観測システムを開発・設置して頂いた (有) 中央工測の小栗保二さん, 観測システム設置にあたり協力して頂いた中央大学流体研究室に所属する学部生, 及び O.B. の方々にも感謝している。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 354-358.
- 島田玄太・関 克己・野原威一郎・小栗保二・関本恒浩・水口 優 (2002): 汀線近傍におけるストーム時大規模侵食の現地観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 586-590.