

突堤の沿岸漂砂捕捉機能に関する研究

榎 木 亨*, 出 口 一 郎**

1. ま え が き

海浜に建設される種々の構造物がその周辺海浜に与える影響を予測する場合にしばしば One line theory に基づく数値予測法が用いられる。この方法は海浜断面積の変化量と汀線の変動量が比例関係にあるといういわゆる $A-l$ 特性を仮定しているため、岸沖方向の漂砂移動あるいは沿岸漂砂が汀線方向に異なった岸沖方向分布形状をもつことによって生ずるような汀線変動に対しては予測することができない。しかしほぼ平衡状態にある自然海浜に海岸構造物を設置した場合、構造物によって強制的に変形させられた波浪に対応して海浜断面が新たな平衡断面に遷移する過程、あるいは変形させられた波浪によって新たな漂砂輸送流れとしての海浜流が発生するような状態においては先に述べた岸沖方向の漂砂移動は決して無視することができず、One line theory が仮定している $A-l$ 特性が成立しないものと判断される。こうした海岸構造物のうち、汀線にほぼ直角に出た埋立地の護岸、港湾の防波堤、導流堤あるいは海岸侵食防止工法としての突堤といった沿岸方向の漂砂移動を阻止してしまう機能をもつ突堤状の構造物周辺の汀線変動を One line theory で予測する場合には、特に構造物がどの程度沿岸漂砂を捕捉するかということ及び捕捉された沿岸漂砂がどの程度汀線変動に寄与するか ($A-l$ 特性がそこなわれるか) ということを明らかにする必要がある。

本研究は移動床平面実験によってこうした突堤状の構造物が漂砂移動にどのような影響を及ぼすかということをも明らかにし、上述の問題点について検討を加えたものである。

2. 突堤の沿岸漂砂捕捉機能に関する実験

(1) 実験装置及び方法

実験に用いた水槽は長さ 15m、高さ 0.6m、幅 10m の平面水槽で、模型海浜は水深 15cm 以深は勾配 1/20 の固定床、それ以浅は勾配 1/10 の平行等深線をもつ厚さ 6cm の実験砂 ($d_{50}=0.05\text{ cm}$) を敷きつめ移動床とした

ものを初期海浜とした。実験波は換算沖波波高 $H_0=5.0\text{ cm}$ 、周期 $T=1.28\text{ 秒}$ のものを用い、初期海浜に対する波の入射角は一樣水深部 $h=40\text{ cm}$ で 30° とした。なお、実験はなるべく一次元モデルの仮定が成立する条件、すなわち岸沖方向漂砂移動が無視できる条件で行なわれなければならないことから、予備実験で先述の初期海浜に突堤を設置しない自然海浜に波を入射させ、岸沖方向の漂砂移動がほぼ無視できる平衡海浜に達するまでに必要な造波時間、そのときの局所沿岸漂砂量 q_y 及び漂砂帯全域にわたって積分された全沿岸漂砂量 Q_y の汀線方向分布等について検討を加えた。その結果、後述するように自然海浜断面は造波時間 90 分でほぼ平衡状態に達し、そのときの汀線と碎波点及び最終遡上点までの平均的な距離 l_b 及び l_r は両者ともほぼ 56cm であることから実験に用いる突堤の長さ l は汀線から沖へそれぞれ 25cm、50cm、75m 及び 100cm 突出した計 4 ケース ($l/l_b=0.5, 1.0, 1.5$ 及び 2.0) とした。最終遡上点から突堤先端までを突堤の有効長を l_e とすると $l_e/(l_r+l_b)=0.75, 1.0, 1.25$ 及び 1.5 の 4 ケースとなる。なお突堤は先述の初期海浜に約 2 時間波を作用させて作成した平衡海浜の水槽ほぼ中央に設置した。地形変動の測定は汀線 (y 軸) 方向に 20cm~40cm 間隔に設けた測線上岸沖 (x 軸) 方向 5cm 間隔の 1 125~1 395 測点において行ない、波高の測定は汀線方向 60cm 間隔、汀線から沖方向 10cm の約 270 測点で行なった。さらに 16mm シネカメラで波峯線と投入されたトレーサーの動きを撮影することによって海浜流と波向の測定も行なっている。実験ケース及びそれぞれのケースの水深測定時間 (造波時間) をまとめて表-1 に示す。なお海浜流及び波向の測定は造波開始直後に、波高の測定は表-1 に示す最終の水深

表-1 実験ケース

Case No.	堤 長 (l cm)	水深測定時間 (min.)
1*	—	0, 30, 60, 90
2	25	0, 15, 30, 45, 60
3	50	0, 5, 10, 15
4	75	0, 5, 10, 15
5	100	0, 5, 10, 15, 30
6	25	0, 2, 5, 10

注: * 予備実験

* 正会員 工博 大阪大学教授
** 正会員 工修 大阪大学講師

測定後に行なっている。

(2) 解析方法

漂砂帯全域にわたって岸沖方向に積分された全沿岸漂砂量 Q_y は漂砂の連続方程式を岸側及び沖側の地形変形限界点 $x=-x_0$ 及び $x=x_m$ の間で積分し、差分化した(1)式に測定された水深 $h(i, j)$ を入力して求めた。ただし j は y 軸(汀線)方向に $\Delta y=40$ cm 間隔に設定された測線の第 j 番目の測線で $1 \leq j \leq 25$, i は x 軸(沖)方向に $\Delta x=5$ cm 間隔にとった第 i 番目の測点を表わし $1 \leq i \leq n_x$ ($=45$), t は Δt 時間間隔の地形測定時間, λ は底質砂の空隙率である。

$$\left. \begin{aligned} Q'_{y,j+1} &= Q'_{y,j} - \frac{\Delta y}{\Delta t} (1-\lambda) (A'_{j+1,t} - A'_{j,t}) \\ A'_{j,t} &= \int_{-x}^{x_m} h_j dx = \frac{\Delta x}{2} \left\{ 2 \sum_{i=1}^{n_x} h_{i,j} - (h_{1,j} + h_{n_x,j}) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式の境界条件は水槽側壁からの漂砂流入量 $Q'_{y,1}=0$ という条件を用いた。また突堤の沿岸漂砂捕捉率 T_r は突堤のすぐ上手側及び下手側測線 $y=\Delta y \times j$ 及び $y=\Delta y \times (j+1)$ における全沿岸漂砂量 $Q'_{y,j}$, $Q'_{y,j+1}$ を用いて次式のように定義した。

$$T_r = Q'_{y,j} - Q'_{y,j+1} / Q'_{y,j} \dots\dots\dots (2)$$

一方、自然海浜における沿岸漂砂量の岸沖方向分布形状は橋本ら⁷⁾にならい Δt 時間に各測点 (i, j) で生じた水深変化量 $\Delta h(\Delta x, i, \Delta y, j)$ を汀線(y 軸)方向及び岸沖(x 軸)方向の固有ベクトルに展開することによって推定した。

3. 自然海浜における海浜変形

まず予備実験として行なった突堤を設置しない場合の自然海浜の海浜変形過程における地形変動特性、全沿岸漂砂量及び沿岸漂砂の岸沖方向分布等について考察を加える。図-1 及び 2 に造波開始 0~30 分及び 60~90 分間に生じた水深変化量 Δh を等深線で表わした等 Δh 線(図 a) 及び Δh から計算される岸沖方向固有ベクトルのうち固有値の大きい 2 つ (e_1 , e_2) の岸沖方向分布を示す。

図-1 (a) に示す造波開始直後の地形変化は初期汀線より沖側が

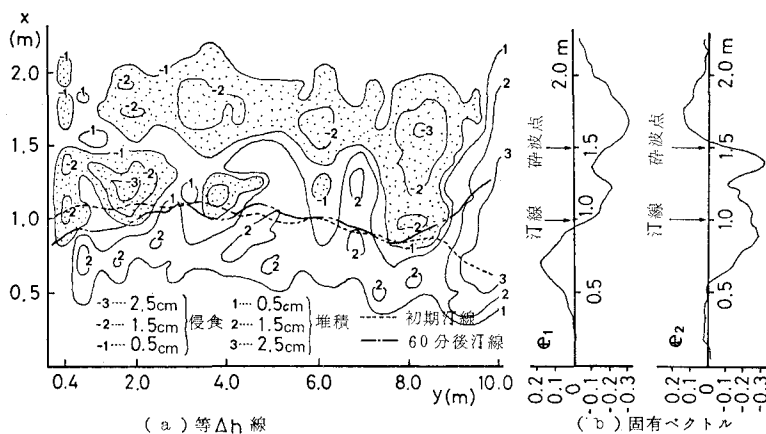


図-1 造波開始 0~30 分の地形変化

侵食域, 岸側が堆積域となり, 侵食域と堆積域がほぼ初期汀線に平行な線で区別され岸沖方向漂砂が卓越していることを示している。一方, 図-2 (a) に示す造波開始 60~90 分間の等 Δh 線は沿岸漂砂上手側 $y<6.0$ m の領域で侵食, $y>6.0$ m で堆積地形を示し, 沿岸漂砂による地形変動が卓越していることがわかる。こうした地形変動に対する岸沖方向固有ベクトルをそれぞれ 図-1 及び 2 の (b) に示してある。これらの図より, それぞれの造波時間における固有値が最大となる固有ベクトル e_1 は図 a に示す等 Δh 線と比較して明らかに岸沖方向漂砂と沿岸漂砂による地形変動に対応し, さらに 図-2 (b) に示す固有ベクトルも 図-1 (b) に示す e_1 の分布形状との類似性を考慮すると岸沖方向漂砂による地形変動に対応しているものと推定される。しかし 図-1 (b) に示す造波開始直後の e_2 の物理的意味は明らかでない。また造波開始 60~90 分の e_1 及び e_2 に対する固有値 λ_1 及び λ_2 の相対的な重要度はそれぞれ 53.5% 及び 14.0% となることから, 造波開始 90 分後ではもはや岸沖方向漂砂による地形変動の 14% 以下に低下しており,

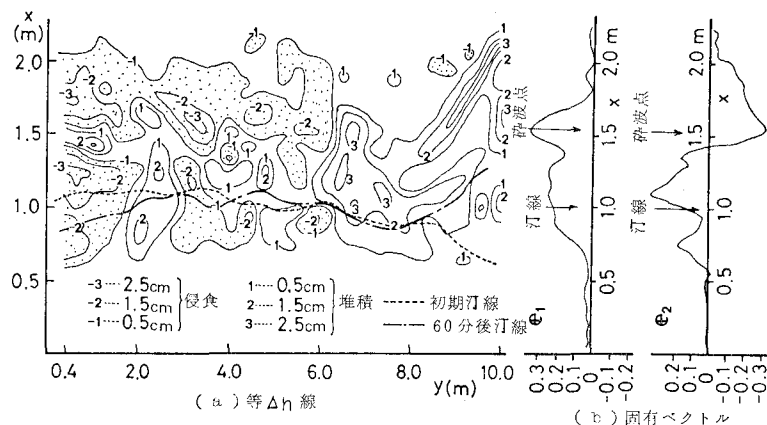


図-2 造波開始 60~90 分の地形変化

海浜断面もほぼ平衡状態に達しているものと推定できる。これについては同一の波浪及び底質を用いた二次元移動床実験においても確認している。なお造波開始 30～60 分の地形変動は 図-1 及び 2 に示す岸沖漂砂が卓越する場合から沿岸漂砂が卓越する場合への遷移的な変動を示している。

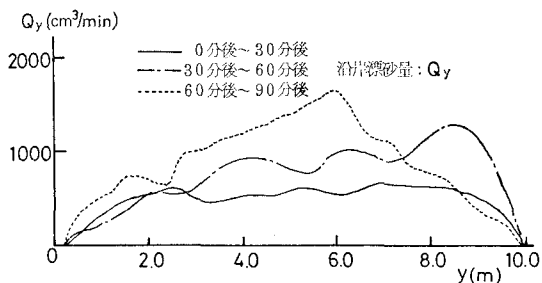


図-3 自然海浜の全沿岸漂砂量

図-3 は式 (1) から計算される Q_y の汀線方向分布を各造波時間別に示したものである。汀線変動はまず水槽両端側壁から生じ、汀線に対する波の入射角が減少することによって Q_y も減少する。造波時間 0～30 分ではこうした Q_y の減少は水槽側壁から約 1m 以内 ($y < 1.0$ m 及び $y > 9.0$ m) にかぎられ、その間ではほぼ一様な Q_y が生じているのに対し、造波開始 60～90 分ではすでに沿岸漂砂による汀線変動が水槽体及んでおり、 Q_y の分布形状は $y=6$ m 近くにピークをもつ三角形に近い形状を示し、 Q_y の最大値も造波時間とともに増加する。Komar²⁾ は全沿岸漂砂量は海浜勾配にはほとんど依存しないということを指摘しているが、予備実験で行なった自然海浜の海浜断面は波の作用時間の増加とともに急勾配になっていくことから、一つの海浜変形過程においては CERC 公式³⁾にみられるようなあらわな形ではないにしても、海浜勾配が変化すると漂砂移動の外力となる碎波帯内の波浪変形にも差異が生ずることから、全沿岸漂砂量はある程度海浜勾配に依存していると考えの方が妥当であろう。

なお 図-2 に示すほぼ平衡状態に達している自然海浜の変形過程においては、汀線の変動量と海浜断面積変化量の間には明確な比例関係が存在していることが確認された。また造波開始 90 分後になった波高分布の測定結果から平均的な碎波波高 H_b は 7～8cm、碎波角 θ_b は 14～17°、汀線と碎波点及び最終遡上点の間隔は両者とも約 50cm であった。

4. 突堤周辺の海浜変形及び堤長変化にともなう沿岸漂砂捕捉率について

図-4 及び 5 に $l=50$ cm 及び $l=100$ cm の突堤を設置した場合に生じた造波開始初期の地形変動に対する

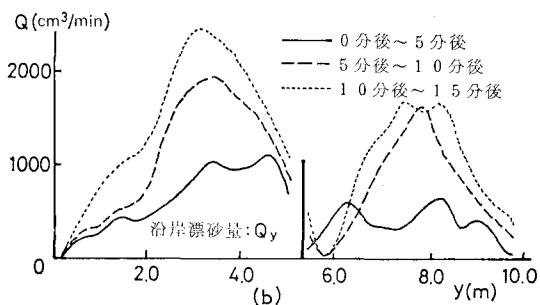
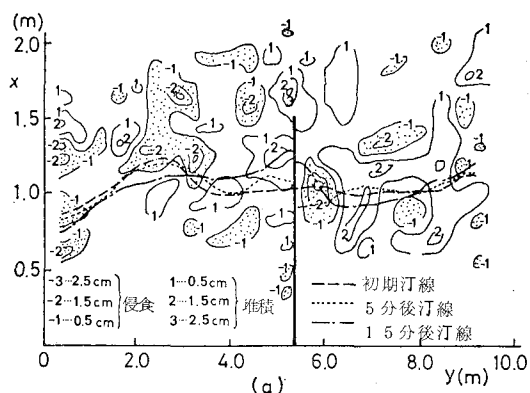


図-4 $l=50$ cm の地形変化

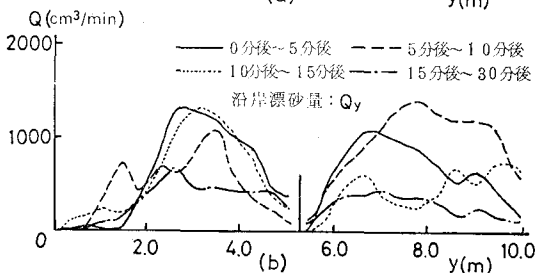
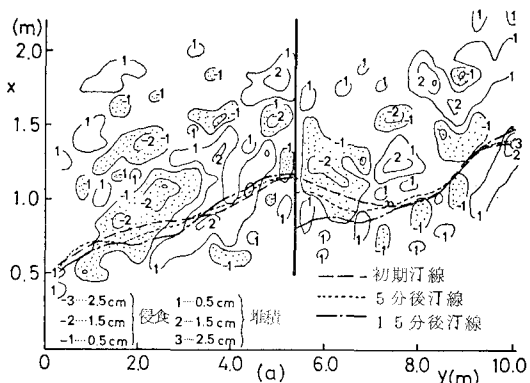


図-5 $l=100$ cm の地形変化

等 dh 線 (図 a) と (1) 式から計算される全沿岸漂砂量 Q_y の汀線方向分布 (図 b) を示す。まず先端がほぼ碎波点となる $l=50$ cm の突堤を設置した場合は 図-4 に示すように突堤の漂砂上手側 ($y=5.2$ m 付近) では汀線と突堤先端の中間地点 ($x=1.25$ m) 及び先端地点 ($x=1.75$ m) に顕著な堆積地形があらわれるが、汀線付

近の水深変化は小さく、突堤で捕捉された沿岸漂砂が直ちに汀線の前進には結びついていない。なお、突堤先端部の堆積は突堤に沿う離岸流によって生じたものであるが、造波開始 5 分後にはすでにその一部が先端を回りこんで下手側まで堆積域を広げている。漂砂下手側 ($5.4\text{ m} < y < 6.2\text{ m}$) では汀線付近を中心に侵食され大きな汀線の後退がみられる。また、さらに波を継続して作用させると漂砂上手側では堆積域が汀線付近まで広がると同時に突堤先端部の堆積部の底質が波により向岸方向に輸送され下手側汀線付近に堆積し、その結果汀線は漂砂の上手、下手側を問わず前進する。この漂砂の回りこみは 図-4 (b) に示す Q_y の汀線方向分布にも明確に現われている。すなわち造波開始後 5 分以上経過すると突堤の下手側で Q_y が最小となる地点が突堤より若干下手側 ($x \approx 5.8\text{ m}$) に移動しており、これは突堤先端を回りこんだ底質が $5.4\text{ m} < y < 5.8\text{ m}$ の領域に堆積していることを示している。堤長がさらに短い $l=25\text{ cm}$ の場合は、ここには図では示していないが、造波開始直後から突堤先端を回りこむ漂砂が生じ、造波開始 30 分でもはやその漂砂捕捉機能を失ってしまった。

一方 $l=100\text{ cm}$ の場合は突堤が完全に砕波帯をカバーしているため強い離岸流が生じ、突堤上手側汀線付近 ($y \approx 5.2\text{ m}$) は離岸流によって侵食され、 $x=1.75\text{ m}$ 付近から堆積が生じる。しかし堤長が長い場合突堤の先端を回りこんで下手側に移動する漂砂はみられない。また下手側突堤とりつけ部付近では一部突堤による回折波による小さな堆積部が生じているが、漂砂の供給がほぼ完全に断たれているために広範な侵食が生じ汀線の顕著な後退がみられる。さらに波を作用させると漂砂上手側の堆積域が岸側に広がり堆積量は増加するが、強い離岸流のため前ケース同様汀線の前進にはつながらない。突堤下手側において突堤の回折波の影響をうける領域では入射波の波形勾配が小さくなることにより、突堤設置前の平衡海浜より前浜勾配が急な新たな平衡海浜に遷移する。

堤先端がやはり砕波帯外に出る $l=75\text{ cm}$ の場合も 図-5 に示す場合と同様の水深及び汀線変動を示す。

つぎに 図-4 及び 図-5 の (b) に 2 例を示してある Q_y の汀線方向分布より (2) 式を用いて計算される突堤の沿岸漂砂捕捉率 Tr の突堤長変化に伴う変化を 図-6 に示す。なお、図-4 及び 5 に示す Q_y は $y=0$ で $Q_y=0$ という境界条件を与えて計算したものであり、したがって $y=10\text{ m}$ (水槽の漂砂下流端) において計算される Q_y には水深測定に誤差に基づく漂砂移動量と突堤及び漂砂下手側水槽側壁に発生する離岸流等によって計算領域外に流出してしまう漂砂移動量が誤差として集積され、必ずしも 0 にはなっていない。さらにこの量は波の作用時間とともに増加する傾向にあるため、図-6 中

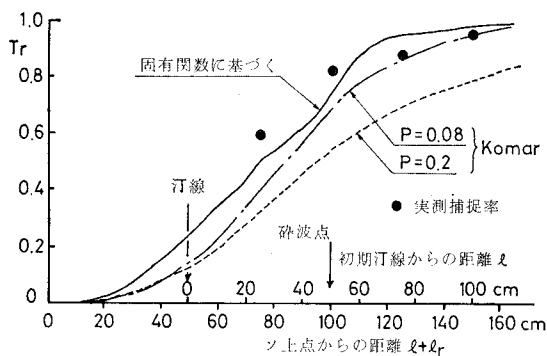


図-6 沿岸漂砂捕捉率

に黒丸で示してある実験値としては以上のような誤差の少ない造波時間 10 分以内に計算された捕捉率の最大値を示した。さらに同図には Komar²⁾ 及び 図-2 (b) に示す固有ベクトル e_1 に基づく沿岸漂砂量分布において、突堤先端からの漂砂の回りこみを無視して計算される捕捉率も示してある。ただし、Komar の沿岸漂砂量分布の計算には実験で得られた平均的な水深波高比として 1.3 を用い、水平混合と底部摩擦の相対的な大きさを表わすパラメータ P に対しては 0.08 及び 0.2 とした場合の計算結果を示してある。図-6 より明らかなように捕捉率は堤長の増加にともなって増加し、全般的には 図-2 (b) に示す固有ベクトル e_1 に基づいて計算した捕捉率が比較的実測値に近い値を与える。また、突堤長が短かく、その先端が砕波帯内にとどまる場合の (2) 式から求まる捕捉率は固有ベクトルに基づいて計算される捕捉率よりも大きい値を示し、突堤長が長い場合は逆の傾向を示しているがその理由は明らかでない。一方 Komar の沿岸漂砂量分布には底質の移動限界が考慮されていないため、特に P を大きくとった場合 (この場合の沿岸流速はよりなめらかな分布を示す) は砕波帯外でもある程度の漂砂移動が生ずることになる。したがって 図-6 にみられるように実験で得られる捕捉率よりは小さい捕捉率を与える。なお、今回の実験では掃流形式の漂砂移動が卓越し、沖側の地形変形限界は漂砂の移動限界とほぼ一致しており、その地点は最終潮上点から約 1.6 m 沖側、水深にして 12~13 cm 程度であった。一方、図-6 に示す漂砂捕捉率は波の作用時間の増加にともなって減衰していく。しかし突堤の上手側では突堤に沿う離岸流のため堤体周辺の海底地形が乱され、精度の高い水深測定が困難になることから捕捉率の時間減衰特性については明らかにすることができなかった。参考のために 16 mm シネカメラで測定された離岸流の最大流速を表-2

表-2 最大離岸流速

堤 長 (l cm)	25	50	75	100
最大離岸流速 (cm/sec)	26.4	28.0	31.8	34.8

に示すが、堤長が長くなるにつれて離岸流速は単調に増加する。また自然海浜における平均的な沿岸流速の最大値は約 40 cm/sec 程度であった。

以上で考察したように堤長のいかにかわらず突堤の上手側では離岸流により、堤長が長い場合は突堤下手側では入射波が突堤によって回折し波浪特性が変化することによって岸沖方向の漂砂移動が生じ、海浜断面積の変化量と汀線変動量は直接結びつかず、自然海浜では成立していた $A-I$ 特性が突堤周辺では成立しないことは明らかである。しかし突堤の漂砂上手側では離岸流と波向がほぼ逆方向に重なり合った複雑な流体運動を示すことから、突堤によって捕捉された沿岸漂砂量の何 % が汀線変動に寄与するかということは本実験では明確にすることはできなかったが、捕捉率の時間減衰特性とともに今後解明しなければならない問題点としてあげておく。

5. 結 語

以上本論文において著者らはまず移動床平面実験で計測される地形変動量から岸沖方向に積分された全沿岸漂砂量を求める方法を提案し、この方法に基づいて突堤周

辺の地形変動特性、特に突堤長の変化にともなう沿岸漂砂捕捉機能に対する解析を行なった。実験で得られた沿岸漂砂捕捉率は経験的固有関数から推定される沿岸漂砂の岸沖方向分布から計算される捕捉率と比較的よく一致することが判明した。またほぼ平衡状態にある海浜に突堤を設置した場合においても突堤周辺では岸沖方向の漂砂移動が生じ、いわゆる $A-I$ 特性は成立しない。しかし突堤で捕捉された漂砂の何 % が汀線変動に寄与するかを明らかにするには波と流れ（離岸流）によって生ずる漂砂移動量をより定量的に把握する必要がある。最後に本研究を行なうにあたり、大阪大学学生（現大成建設）橋詰幸信君には、実験及びそのデータ整理において熱心な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・宇多高明：経験的的海浜変形モデルの移動床実験への適用，第 27 回海講論文集，pp. 250～254, 1980.
- 2) Komar, P. D.: Nearshore Current and Sand Transport on Beaches, in Coastal and Shelf Dynamical Processes, Bryan Johns (ed.) Elsevier Press (in press).
- 3) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, U.S. Govt. Printing Office, 1973.