

前浜の二次元的地形変化と潮位・波について

加藤 一正*・田中 則男**・灘岡 和夫***

1. はじめに

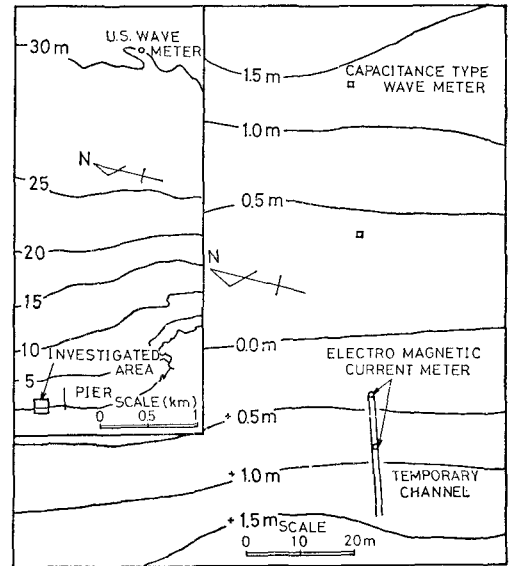
前浜は、一般市民が海と接することのできる重要な場であり、汀線の出入りを含む前浜の変化は、従来より注目されてきた。その結果、最近では汀線変化を予測する 1 line theory が、ほぼ実用的な段階に達し、さらに現在は、前浜や浅海部の海底地形の三次元的な海浜変形予測モデルを確立する努力がなされている。しかしこのモデル確立のために解決しなければならない問題が数多く残されている。その一つに、「前浜は、岸側の明確な境界条件を与えるところである」という新しい観点に立って、前浜地形変化を見ることがある。

本報告は、前浜の二次元的地形変化と潮位・波との関連について、1980年8月30日～9月3日の間、茨城県阿字ヶ浦海岸で実施した現地観測の成果を、外力も含めて経験的固有関数 (empirical eigenfunction) で解析した結果について述べるものである。

2. 現地観測

図一1 に示す阿字ヶ浦海岸の漂砂観測用棧橋(建設省)より北約 240m 地点の前浜に、汀線に対してほぼ直角に仮設水路(以下、水路)を設置した。水路は高さ 0.9m の鉄板を間隔 1m で、平行に2列岸沖方向 22m の長さ に並べたものであり、その沖側・岸側端は解放されている。

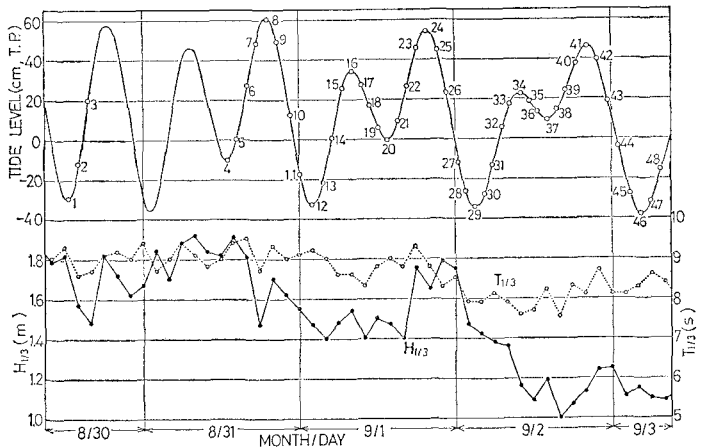
前浜断面地形測量のために、水路中心線上に前浜の勾配に沿って、40cm 間隔、計 56 点の測点を設定した。以下の解析のために、水路の沖側端の測点を No. 1 とし、沖側から順番に番号を付け岸側端の測点を No. 56 とする。地形測量は、図一2 に示すように8月30日に3回、その後一時中断して、8月31日13時から9月3日7時まで連続 45 回実施した。途中の測定



図一1 現地観測海岸(阿字ヶ浦)

実施時刻を満潮・干潮時に一致させたため、測定間隔はやや前後するが平均 1.5 時間である。

各測点のレベル測量には、底部に長さ 10 cm、径 5 mm



図一2 レベル測量実施時刻と潮位、沖波有義波高・周期

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
 ** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長
 *** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室

の黄銅棒を取り付けたスタッフを用いた。これによって、測量中に遡上波の作用によってスタッフがぐらつくことを防止した。各時刻のレベル測定は、常に沖側から開始し、順次岸側に移動しつつ実施した。このとき、前回に測定した形跡(スタッフ底部の黄銅棒による小さな穴)が砂面に残っているところは、地形変化がなかったものと考えられるので、測定を省略した。したがって、毎回の測定点数は異なるが、平均的には41点、測定所要時間は10分程度であった。

水路内に入射・遡上する波の特性を測定するために、水路延長沖側30mおよび55mの地点に容量式波高計を、水路内に電磁流速計をそれぞれ設置した(図-1)が、連続記録が取得できなかった。このため、沖合いの水深-30m地点(図-1)の既設超音波式波高計で測定された有義波高・周期を解析に使用した。この沖波は2時間間隔偶数時に測定されているので、水路内レベル測定時のそれらを内そうして求め、以下の解析に使用した。観測期間中の有義波高・周期、潮位(日立港実測)は、図-2に示されている。なお、前浜の平均勾配は1/15、底質粒径は0.2mmであった。また、9月2日には水路の北側で蛍光砂調査を実施した。これについては別報を参照されたい。

3. 水路内二次元的な前浜地形変化の概略

図-3は、横軸に水路内のレベル測定点、縦軸に測量実施時刻を示す番号(図-2)をとって、観測期間中の水路内の地形変化を等高線(T.P.基準)で示したものである。図中の左寄りの一点鎖線(測定実施時刻番号、6~9、

15~17, 22~26付近)は、日立港での実測潮位に波のset-upとして10cm(推定値)を加えたレベルの位置、言い換えると平均水面と前浜斜面の交わる地点の経時変化を示したものである。また、右寄りの点線はそれより岸側(図中右側)がレベル測量を省略した地点、すなわち波が遡上しなかった地域との境界を示している。

図-3より、観測期間中の潮位、波の遡上位置の変化に対応して水路内の測点は次の3地域に分けられる。

I地域(No. 1~23): 最高潮位よりレベルの低い地域で、ほとんど常に波の作用を受けている。

II地域(No. 24~42): 最高潮位よりレベルが高く、波の平均的な遡上高さよりレベルが低い地域。

III地域(No. 43~56): 波の平均的な遡上高さよりレベルが高い地域。

図-4は、後述式(3)で計算した各測点のレベル変化

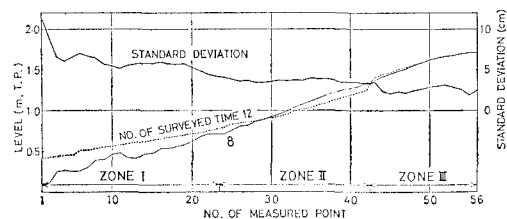


図-4 レベル変化の標準偏差と満潮・干潮時の断面

の標準偏差と満潮時(測量実施時刻番号8, 図-3)、干潮時(同12)の断面形状を示している。図によると、レベル変化量は沖側測点で最大で、岸に向うにつれて徐々に少なくなる。また、断面を比較すると、堆積・侵食の程度が異なることから、土砂収支はこの水路内に限られるものではなく、水路沖側端において土砂の出入があったと見なされる。

次に、水路内のレベル変化と外力との関連について述べる。外力としては、沖波有義波高・周期から微小振幅波理論で計算した波形勾配、エネルギーフラックスと実測潮位(日立港)の三要素を取り扱った。ただし、波向きが測定されていないので、エネルギーフラックスの計算にはそれを考慮していない。

図-5は、各測点のレベル変化と潮位変化の相関係数を5分ずつずらして計算したとき、相関が最も大きくなる時間差をプロットしたものである。この図によると、レベル変化の潮位変化からの遅れは、I地域で80分、II地域で100分、III地域では130分程度になっている。なお、各測点とも時間遅れの変化による相関係数の変化は小さいものであった。一方、波形勾配・エネルギーフラックスの

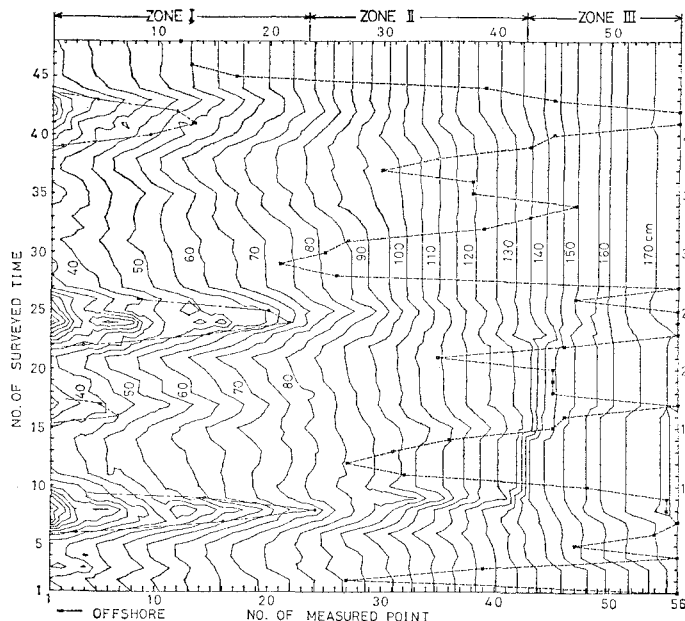


図-3 水路内の地形変化の等高線図(T.P.基準)

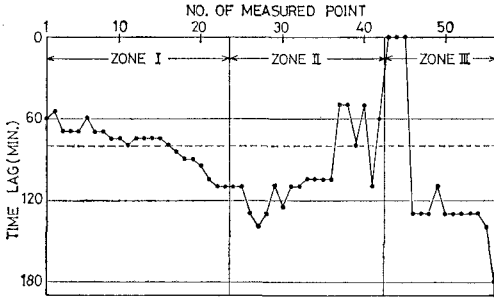


図-5 潮位変化に対する地形変化の時間遅れ

変化についても同様な計算を行ったが、これらについては地形変化の時間遅れはほとんど0であった。

図-6 は、各測点のレベル変化と波形勾配、エネルギーフラックス、潮位との相関係数をそれぞれ実線、一点鎖線、点線で示したものである。このうち、潮位との相関係数の計算では、80 分の時間遅れ(図-5、破線)を考慮した。この図を地域別にみると、I 地域では潮位、II 地域では波形勾配、エネルギーフラックス、III 地域ではエネルギーフラックスと、それぞれレベル変化の間に強い負の相関があることが分る。

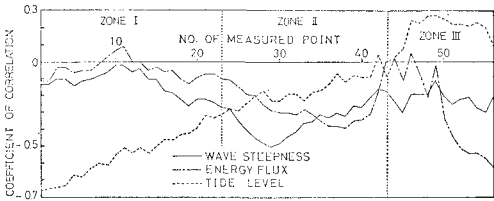


図-6 各測点のレベル変化と外力変化との相関係数

4. 経験的固有関数による前浜地形変化と外力の解析

多数点のレベル変化の時系列データを用いて、経験的固有関数を計算し、地形変化の特性を検討した報告は数例ある²⁾⁻⁵⁾。本調査では、前浜地形の変化と同時に外力も測定しており、しかもその外力の変化と地形変化に関連性があることが先に示された。そこで、地形変化を外力との関連でとらえるために、地形変化の時系列データだけを用いるのではなく、さらに外力も含めて経験的固有関数の解析を行った。

地形レベル、波形勾配、エネルギーフラックス、潮位の単位が異なるので、まず各物理量の変化を平均が 0、分散が 1 になるように基準化する。すなわち、 $i(=1, \dots, n_x)$ で示される物理量の測定時刻番号 t の値 $x_{i,t}$ を

$$x'_{i,t} = (x_{i,t} - \bar{x}_i) / S \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_t} \sum_{t=1}^{n_t} x_{i,t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n_t - 1} \sum_{t=1}^{n_t} (x_{i,t} - \bar{x}_i)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

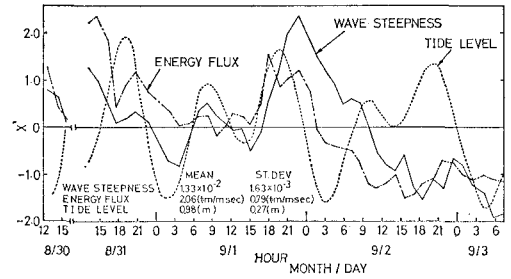


図-7 波形勾配、エネルギーフラックス、潮位の変動(基準化後)

で基準化する。図-7 は、波形勾配、エネルギーフラックス、潮位について基準化したものの経時変化である。

さて、基準化したデータを用いて経験的固有関数を求める手順は次のとおりである。まず、任意時刻 t の各物理量の測定値の組を

$$X_t = (x'_{1,t}, x'_{2,t}, \dots, x'_{n_x,t})^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

であらわす。そうすると、

$$a_{i,j} = \frac{1}{n_t - 1} \sum_{t=1}^{n_t} x'_{i,t} \cdot x'_{j,t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を要素とする相関行列 A (もとの物理量間の相関行列になる) の固有ベクトル e_n 、すなわち経験的固有関数と

$$C_{n,t} = e_n^T X_t \quad \dots\dots\dots (6)$$

で計算される $C_{n,t}$ を用いて、 X_t は次式で表わされる。

$$X_t = \sum_{n=1}^{n_t} C_{n,t} e_n \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) は、 e_n の時間変動特性が $C_{n,t}$ によって表わされることを示している。そこで、 e_n の時間変動特性と物理変量 $x'_{i,t}$ の時間変動特性がどのような関係にあるかを調べるために、 $C_{n,t}$ と $x'_{i,t}$ の相関係数を計算する。式 (1)~(3) より $x'_{i,t}$ の平均値は 0、分散は 1 である。一方、 $C_{n,t}$ については、

$$\frac{1}{n_t} \sum_{t=1}^{n_t} C_{n,t} = \frac{1}{n_t} e_n^T \sum_{t=1}^{n_t} X_t = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{1}{n_t - 1} \sum_{t=1}^{n_t} C_{n,t}^2 = e_n^T A e_n = \lambda_n \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるので、平均値は 0、分散は λ_n (A の固有値) となる。したがって、 $C_{n,t}$ と $x'_{i,t}$ の相関係数は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n_t - 1} \sum_{t=1}^{n_t} C_{n,t} x'_{i,t} / (\sqrt{1} \cdot \sqrt{\lambda_n}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \sum_{t=1}^{n_t} a_{i,j} e_{n,j} = \sqrt{\lambda_n} e_{n,i} \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

となる。したがって、 e_n の時間変動特性 ($C_{n,t}$) と各物理変量 $x'_{i,t}$ ($i=1, \dots, n_x$) の変動との相関係数の組は、ベクトル $\sqrt{\lambda_n} e_n$ で表わされる。

経験的固有関数の解析は、まず最初に物理変量数を 59 ($=n_x$) とし、 $x_1 \sim x_{56}$ は水路内の各測点のレベルを沖から順番に対応させ、 x_{57} を波形勾配、 x_{58} をエネルギーフラックス、 x_{59} を潮位とする。ここで、潮位変化は

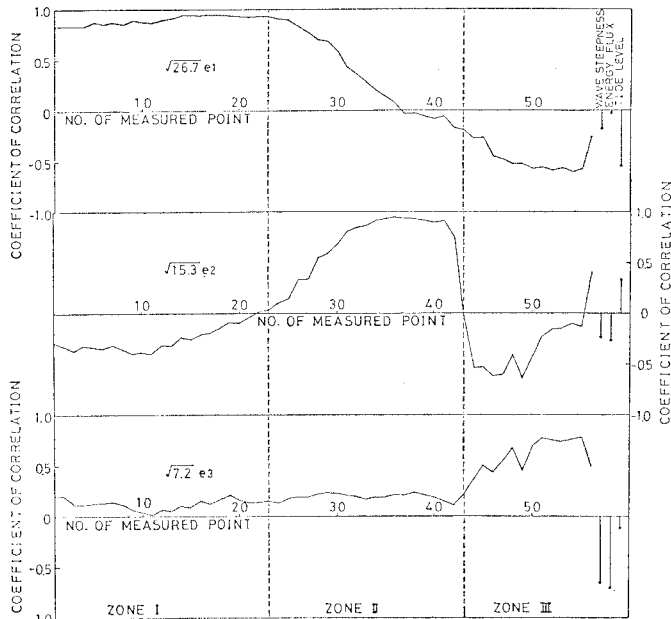


図-8 地形、外力の経験的固有関数 ($\sqrt{\lambda_1}e_1 \sim \sqrt{\lambda_3}e_3$)

各地形レベル測量前 80 分のもを用いた。測定回数は 48 ($=n_i$) である。計算の結果得られた経験的固有関数に固有値の平方根を掛けたもの ($\sqrt{\lambda_n}e_n$) を、 $n=1 \sim 3$ について 図-8 に示す。縦軸は、先述したように各 e_n の時間変動と各物理変量のそれとの相関係数である。もちろん、この表示は、各 e_n にスカラー量 $\sqrt{\lambda_n}$ を掛ただけであるから、従来のような経験的固有関数としてもみることができる。図-8 を、このような 2 つの見方によって以下に検討する。なお、 $n=3$ までの寄与率は 83.3 % である。

図-8 によると、 e_1 は主に I 地域の地形変化の特徴をとらえている。 e_1 の時間変動 ($C_{1,t}$) は I 地域のレベル変化ときわめて強い正の相関があり、また潮位とは負の相関があるが、波形勾配、エネルギーフラックスとはほとんど関係がない。このことより、 e_1 のモードは潮位との関連が強く、I 地域は潮位が上昇すると侵食され、下降すると堆積していることを示している。

e_2 は主に II 地域の地形変化の特徴をとらえている。 e_2 の時間変動は II 地域の地形変化と強い正の相関があり、外力のうち波形勾配・エネルギーフラックスとは負の相関がある。また潮位とは正の相関がある。したがって、II 地域は、潮位が上昇し、波形勾配、エネルギーフラックスが減少すると堆積する傾向にあると言える。

e_3 は主に III 地域の地形変化の特徴をとらえている。 e_3 の時間変動は III 地域の地

形変化と強い正の相関があり、また波形勾配、エネルギーフラックスとは強い負の相関があるので、III 地域ではこれらの外力が減少すると堆積が生じる。

以上のように、 e_1, e_2, e_3 は前節で区分した I, II, III の地域の地形変化の特徴をそれぞれ外力との関係で示している。しかし、この解析では i) I 地域では e_1, e_2, e_3 ともに潮位と負の相関があるが、この地域だけに限定して解析すると潮位の影響がさらに明確になる。ii) 例えば測点 50 のレベル変化は e_2 では沖波と正の相関があるのに対し、 e_3 ではそれと負の相関になっている。iii) I, II, III 地域の地形変化の潮位変動に対する時間遅れがそれぞれ異なるにもかかわらず、全域一定の時間遅れしか考慮せざるを得なかった等の不十分な点がある。

そこで、次に地域を限定して経験的固有関数を求めた。図-9 は、I, II, III の各

地域毎に地形変化と外力の変化について同様に解析して得られた経験的固有関数を、 e_1, e_2 について示している。ここでは、潮位変化からの地形変化の時間遅れとして、I 地域は 80 分、II 地域は 100 分、III 地域は 130 分を考慮した。まず、各地域の e_1 に注目すると、I 地域では潮位の影響がさらに明確になっている。II 地域は、潮位に比べて波形勾配・エネルギーフラックスの影響を強く受け、それらが減少すると堆積する傾向にある。III 地域は、130 分前の潮位が高くかつ波形勾配、エネルギーフラックスが小さいときに堆積する。一方、各地域の e_2 は、いずれもほぼ中央を境にして沖側と岸側で地形変化の傾向が反対になっていることを示す。このことを外力との関連でとらえると、I 地域では潮位が上昇し、波形勾配、エネルギーフラックスが減少すると沖側が侵食され岸側が堆積する。II 地域は、外力との明確な関連がな

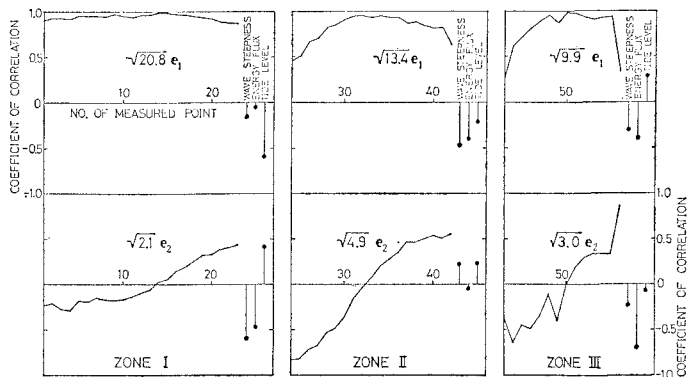


図-9 地域別の地形、外力の経験的固有関数 ($\sqrt{\lambda_1}e_1, \sqrt{\lambda_2}e_2$)

い。Ⅲ地域は、エネルギーフラックスが減少すると岸側において堆積する。

5. おわりに

前浜地形はそのレベルによって、Ⅰ：最高潮位よりレベルの低い地域、Ⅱ：最高潮位よりレベルが高く波の平均的な遡上高さよりレベルが低い地域、Ⅲ：波の平均的な遡上高さよりレベルが高い地域に分けられる。外力も含めた経験的固有関数の解析により、各地域の地形変化は外力と関係があることが明らかになった。

この経験的固有関数の解析では、測定された各物理変数の変動特性だけを考慮している。このことに留意して、解析結果を補足しておく。まったく静穏で波のないときの潮位変動を考えると、それに伴う流速は前浜の漂砂を引き起すほどのものではない。ところが、Ⅰ地域の地形変化は特に潮位変化と強い負の相関があるという結果になったことから、次のことが考えられる。沖波が変化しても、それに応じて碎波、碎波帯内の乱れによって入射波のエネルギー消費の程度が変化し、最終的に汀線まで到達してⅠ地域の地形を変化させる波の影響はほぼ一定になる。このため、Ⅰ地域の地形変化と沖波の相関は非常に小さい。しかし、到達した波の影響は swash zone の水深と密接な関係があり、ある地点の水深が変化（潮位が変化）すると、その地点の波の影響の程度が変化して地形が変化する。したがって、潮位変動は外力というよりも外的状況の変化とみなすほうが適している。

波形勾配とエネルギーフラックスが、Ⅱ地域の地形変化に同じような影響を及ぼすという結果は、これらの外力の変動がよく似ていた（図-6、両者の相関係数は0.68）ためである。この両者の効果を分離するために

は、両者が異なる変動をするときに観測しなければならない。

地形の変化が潮位変化に遅れて応答しているのは、それが地下水位の変化とも関係しているためと考えられる⁶⁾。したがって、今後の調査では地下水位の測定を実施する必要がある。また、本調査では土砂収支が水路内に限られていないので、さらに深い水深まで地形測量をする必要もある。

なお、ここでは各物理変数を式(1)～(3)で基準化したけれども、外力も含めた経験的固有関数の解析では次元解析による各物理変数の無次元化データをもとにする方法も考え得る。

最後に、本調査は海岸研究会での合同観測に参加して実施したものである。観測において、多大な協力をいただいた多くの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 灘岡和夫・田中則男・加藤一正：螢光砂を用いた局所的砂移動と移動量の観測，第28回海岸工学講演会論文集，1981。
- 2) Winant, D. C., D. L. Inman and C. E. Nordstrom: Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, J.G.R., Vol. 80, No. 15, pp. 1979-1986, 1975.
- 3) 田中則男・加藤一正：阿賀野川東海岸における沿岸砂州の特性について，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 274-278, 1976.
- 4) 橋本 宏・宇多高明：経験的固有関数による海浜変形の解析，土木学会論文報告集，No. 305, pp. 59-72, 1981.
- 5) Aubrey, D. G.: Seasonal patterns of onshore/off-shore sediment movement, J.G.R., Vol. 84, No. C10, pp. 6347-6354, 1979.
- 6) Duncan, J. R.: The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development, Marine Geol., 2, pp. 186-197, 1964.