

波向が周期的に変化する場における海浜地形変化

宇多高明*・坂野 章**

1. ま え が き

我が国の沿岸では、波向の季節的变化に応じて周期的な地形変動の見られる海岸がある。太平洋に東面する茨城県沿岸はこのような海岸の1つである。宇多ら(1986a)は、北茨城沿岸において、岬と岬とに挟まれた区間において岬の南側と北側とで堆積、侵食状況が周期的に変化することを見出した。また、阿字ヶ浦海岸では、12年以上継続されている波向と地形の観測により、波向が確かに周期的モードを持ち、またそれに応じた汀線変動が見られることが明らかにされており、更に、波向が周期的に変化する場での汀線変動の理論解も求められている(宇多ら, 1988)。また、鹿島灘沿岸では、侵食防止のために12基のヘッドランドが建設されているが、追跡調査によれば、ヘッドランド間の汀線変化には卓越した季節変動が見られた(住谷ら, 1988)。更に、霞ヶ浦内の湖浜地形変化においても風向の季節変化に応じた湖浜地形変化が見出された(宇多ら, 1987)。

このように、波向変動に応じた地形変化は、かなり普遍的現象であって、その機構を詳細に理解することは漂砂現象の解明の上で役立つと思われる。しかしながら現地海岸では空間・時間スケールが長いので、観測によって解明を進めるのはかなり困難である。そこで本研究では移動床平面実験によって現地海岸の地形変化の再現性を調べるとともに、理論値との比較検討を行った。更に、これに基づいて沿岸漂砂が卓越する場での相似則について検討した。

2. 汀線変化の理論解

波の入射方向が季節的に変化する場において、沿岸漂砂を遮断する構造物がある場合の汀線変化の理論解については、茨城県阿字ヶ浦海岸での地形変化を対象として解が求められている(宇多ら, 1988)。構造物の回折効果は無視したとき、波向 θ が1年周期で変化する場の汀線変化は、

$$y(x, t) = \theta_0 \sqrt{\frac{F}{\omega h}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega h}{2F}} x\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega h}{2F}} x - \frac{\pi}{4}\right) \dots\dots\dots (1)$$

と表わされる。ここに t :時刻, x :沿岸方向距離, θ_0 :碎波点における波向変化の振幅, ω :波向変化の角周波数, h :漂砂の移動高, F :漂砂量係数(波のエネルギーフラックスに比例する)である。また、構造物から距離 x の地点の汀線変化の振幅 $a(x)$ は、式(1)より、

$$a(x) = \theta_0 \sqrt{\frac{F}{\omega h}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega h}{2F}} x\right) \dots\dots\dots (2)$$

と与えられる。式(2)は汀線変動の振幅が構造物からの距離とともに指数関数的に減少することを示す。

いま、式(1)で表わされる現象を実験的に再現することを考える。平面実験においては、平面水槽の大きさに制限があるために、構造物の影響が無視できる位置を構造物から限りなく遠ざけることはできない。構造物から l の地点と構造物位置での汀線変動の振幅の比 ε は

$$\varepsilon = \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega h}{2F}} l\right) \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。 ε は十分小さいという条件を満足しなければならないが、いま、

$$\sqrt{\frac{\omega h}{2F}} l \cong 3 \dots\dots\dots (4)$$

とおくと、実用上 ε は十分小さくなる。 $\omega = 2\pi/T_s$ の関係を代入して書き直すと、次式が得られる。ここに T_s は波の入射方向を変化させるときの周期である。

$$T_s = \frac{\pi}{9} \cdot \frac{h}{F} \cdot l^2 \dots\dots\dots (5)$$

この式は模型の大きさを定める際に利用される。

3. 移動床水理模型実験

3.1 実験方法

実験は幅30m、長さ23m、深さ1mの平面水槽を用いて行った。海浜模型はこの平面水槽の中央部に中央粒径 $d_{50} = 0.25$ mmの砂を用いて造った。初期海浜地形を図一に示す。汀線付近の勾配は約1/10、前浜の平坦面

* 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

高さは7 cm とし、沖合には水深15 cm の平坦面を造った。波を斜め入射させるには、2 台の造波機を海岸線の法線に対し $\pm 24^\circ$ となるよう設置し、順に片側の方向から波を入射させた。波の入射角は沿岸漂砂を卓越させるためできるだけ大きくする必要がある。しかし、平面水槽の中での造波機の配置を考えると入射角の上限値が存在する。そこで実験ではこの上限値を選定した。

模型実験において、 T_s は式 (5) に明らかなように、 F , h , l と関係し、独立には定められない。そこで、予備実験を実施していくつかの定数を定めた。予備実験では、波の入射方向を一方方向 (造波機②) に固定し、経過時間にはほぼ比例して地形変化量の増加する時間は数時間程度と考え、波を5時間作用させた。次に、この間の地形変化より漂砂の移動高 (h)、漂砂量係数 F を定めた。予備実験時の波浪条件は、中央粒径 0.25 mm の底質を用いたとき、沿岸漂砂による地形変化が図-1 の浅海域の急斜面で完結し、沖合の平坦部では有意な地形変化が生じない条件より設定した。海浜断面形がほぼ相似な形状を持った駿河海岸の模型実験によると、この条件を満足する波浪として $H_{in} \approx 5$ cm, $T \approx 1.2$ s の波を選ぶことができる (宇多ら, 1986b), この結果、初期と5時間後の海浜変形より海浜断面積変化量とが求められ、それらの相関より漂砂の移動高 (h) が $h = 0.19$ m と定まった。また、初期から5時間までの侵食・堆積土砂量の変化割合として、 $F = 4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ が求められた。地形変化量より漂砂量係数 F を逆算する際には、碎波点における入射角を与える必要がある。これには、突堤間の中央において 0, 2.5 hr 後に測定された入射角の平均値 22° を用いた。一方、平面実験では水槽の大きさと造波機の配置より、突堤間の間隔は最大で6 m が限度であった。そのため構造物から最も離れた地点までの距離は $l = 3$ m となる。これらの値を式 (5) へ代入すると、 $T_s = 4.1 \text{ hr}$ となる。このことから $T_s = 4 \text{ hr}$ とし、2方向からの波を交互に与えた。また波の作用時間は全体で7時間とした。

波の入射方向を周期的に変化させるに際しては、波のエネルギーが海浜模型外に逸散しないように、1 台の造波機両端から模型までの間に導波板を設置した。また、沿岸漂砂を遮断する構造物としては、沿岸方向に6 m 離して2基の突堤を設置した。実験の測定項目は地形、碎波波高、碎波波向、汀線位置であって、沿岸方向に0.5 m 間隔で設けた13本の測線上において波向を変える毎に測定した。また、特に汀線測定では $X = 1.0$ m, 5.0 m 断面において、汀線位置が5 cm 変化する毎にその位置を調べ、汀線位置の時間的な変化を詳細に調べた。

3.2 実験結果

最初に代表時期における等深線形について調べた。Y

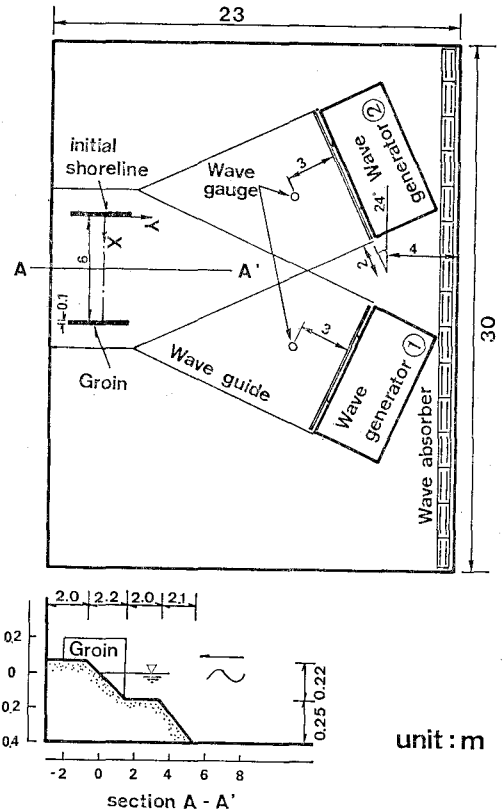


図-1 実験装置

軸に関し反時計回りの方向から波を1時間作用させた時点の海浜地形を図-2 に示す。-20 cm 以深の等深線はX軸と平行であり、波による変化はほとんど生じなかった。また、-15 cm 付近にある平坦部での地形変化は小さい。-12.5 cm 以浅の等深線は汀線とほぼ平行であり、 $X \geq 3$ m では沖に凸形を示し、 $X < 3$ m の範囲で凹形となった。また、-12.5 cm ~ +5 cm の間の等深線は汀線とほぼ平行であって、地形変化が主として沿岸漂砂によって生じたことがわかる。ただし、詳細に見ると堆積域においては+2.5 ~ +5.0 cm 間の等深線間隔が侵食域のそれより広く、逆に、侵食域においては-10 ~ -2.5 cm の間の等深線間隔が堆積域のそれより広がっている。つまり、堆積地形と侵食地形では全く対称的な変化が生じるのではなく、堆積域では陸上部に平坦面が形成されたのに対し、侵食域では海面下に緩勾配斜面が形成された。その後、波向を時計回りの方向として波を2時間 (合計3時間) 作用させた後の地形を図-3 に示す。図-2, 3 を比較すると、入射方向を変えた結果 $X = 3$ m の中心線に関して左右で対称的な地形変化を生じたことが明らかであり、また陸上部の平坦面の形成や海面下での緩勾配斜面の形成なども両者で良く一致する。

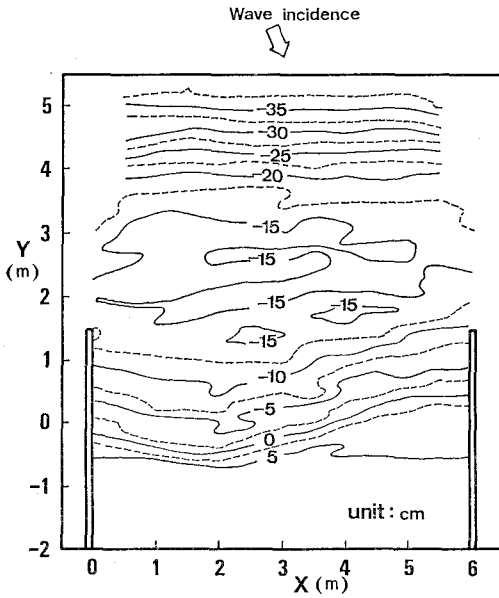


図-2 等深線図 (波作用1時間後)

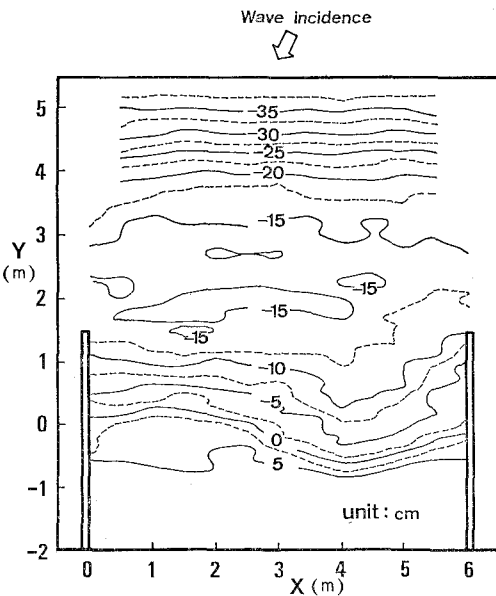


図-3 等深線図 (波作用3時間後)

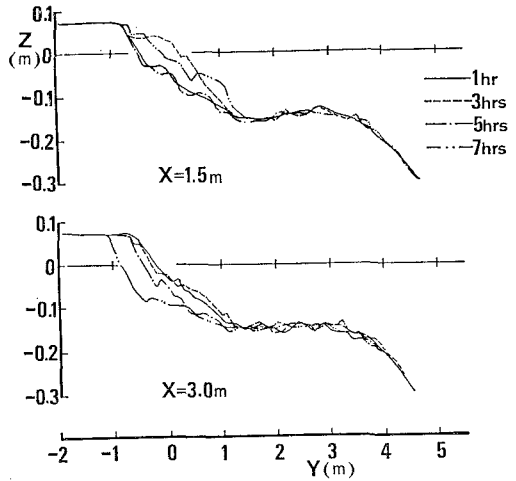


図-4 海浜断面形の経時変化

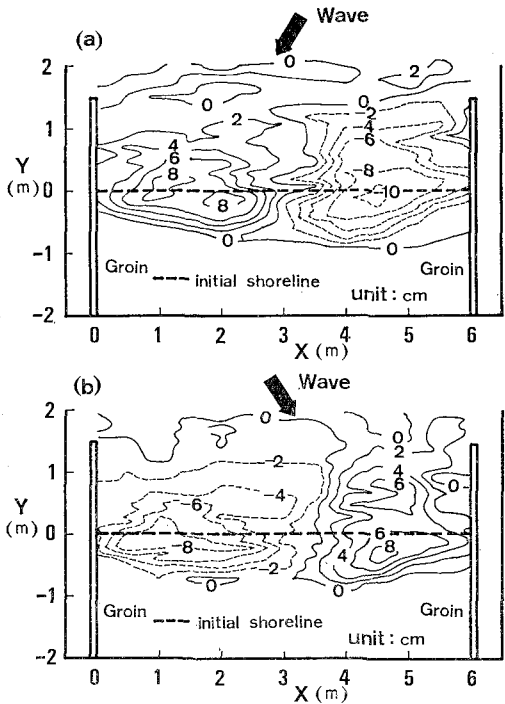


図-5 地形変化量の平面分布 (a: 1~3hr, b: 3~5hr)

次に、代表測線に沿う海浜断面形の変化を図-4に示す。代表断面は、汀線変化の著しい $X=1.5\text{m}$ 断面と中央の $X=3.0\text{m}$ 断面を選んだ。同図には、波作用1, 3, 5, 7時間後の断面形を示した。 $X=1.5\text{m}$ 断面では、波作用1, 5時間後は構造物に関して漂砂の下手側、波作用3, 7時間後は構造物の上手側となる。 $X=1.5\text{m}$ 断面の地形変化は侵食、堆積時に係わらず $Y \leq 1.5\text{m}$ の範囲の水深15cm以浅でのみで生じた。堆積時には上方に凸な

断面形が、また侵食時には凹形の断面形が形成された。また、1, 5時間後の断面形はほぼ重なったが、3, 7時間後の堆積時の断面形には差があり、特に7時間後ではバー・トラフの形成が見られた。また、 $X=3.0\text{m}$ 断面では、波作用後5時間まではほぼ初期地形を保っていたが、その後前浜が著しく侵食された。この断面は堆積、侵食域の境界に位置するので、漂砂の方向が周期的に変化することはあっても断面変化は生じないはずである。

それにもかかわらず5時間以降断面変化が生じたのは、次の2つの理由が考えられる。①土砂の一部が突堤沖へ流出し、その分全体的に侵食が進んだこと。②突堤の回折効果により突堤周辺へと中央部から土砂が運ばれたことである。以上の点より、5時間より後のデータについては、設定条件からのずれがかなり大きいから、理論値との比較の際に十分な配慮が必要である。

図-4 に示した断面変化図によれば、地形変化は $Y \leq 2.0\text{ m}$ の範囲で生じている。そこでこの範囲のみ着目して地形変化量の平面分布図を図-5 にまとめた。図の (a) は波作用後1~3時間の変化量を、(b) は3~5時間の変化量を示す。(a)、(b)共に、最大の地形変化は突堤の隣接部では生じておらず、それより約1m離れた $X=1.0\text{ m}$ 、 5.0 m 断面で生じた。これは、突堤の回折効果によるものである。また堆積、侵食量の分布形は、中央に位置する $X=3.0\text{ m}$ 断面を境にほぼ線対称であって、左右対称的な地形変化が周期的に生じたことが明らかである。また、海浜の地盤高の鉛直変化量の振幅は約8cmである。一方、変動量の岸沖分布は、初期汀線付近で最大値をとり、それより岸側、沖側に減衰し、また、その減衰割合は岸側の方が大きい。このような分布形は、沿岸漂砂が岸沖方向に分布形を有するために生ずるものである。

4. 汀線変化の理論解と実験値の比較

理論解は式 (1) で与えられるから F , h , ω を実験値より定めれば汀線変化の理論解と実験値との比較が可能となる。まず、漂砂の移動高を海浜断面面積の変化量 ΔA と汀線変化量 Δy の相関より定めると、 $\Delta A(\text{m}^2)$ と $\Delta y(\text{m})$ の間には、相関係数 $\gamma=0.95$ で式 (6) が成立した。

$$\Delta A = 0.14 \Delta y + 0.002 \dots \dots \dots (6)$$

一方、波の作用時間が長くなると汀線位置は波向の周期変化に対応した変化からかなりずれてくる。そこでこれらのノイズ成分をできる限り除くために、1~3時間のみの地形データを用いて回帰式を求めると、相関係数 $\gamma=0.97$ で次式が得られた。

$$\Delta A = 0.13 \Delta y + 0.007 \dots \dots \dots (7)$$

ΔA と Δy の回帰係数は漂砂の移動高を与えるので、 $h=0.13\text{ m}$ となる。

漂砂量係数の F を定めるためには、漂砂量を直接測定するのが最も望ましい。しかし、実際にはその測定法は確立されていないので、本研究では地形変化量より逆算することとした。この場合、微小時間内の地形変化量を求める必要があるが、時間が短いと地形測量に伴う誤差が大きくなり、有意な結果を得られない。また、地形測定を行うために波の作用を中断すると造波停止、開始時に著しい地形変化が生ずる。このような点より、 F は波

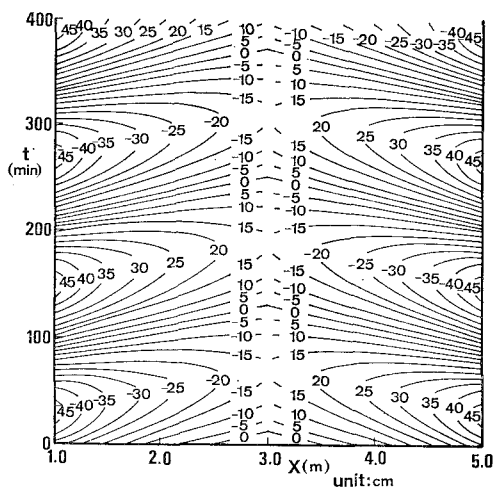


図-6 汀線変化量の時空間分布 (理論解)

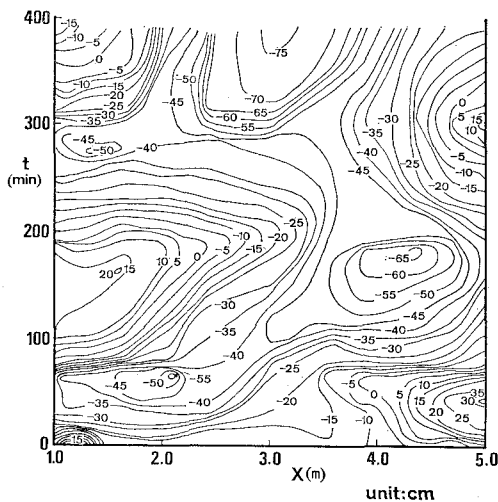


図-7 汀線変化量の時空間分布 (実験結果)

作用1~3時間の地形データを用いて算定した。すなわち、この間の土砂量の変化割合を算出し、更に、突堤間の中央測線で測定された $t=1, 3\text{ hr}$ での入射角の平均値 21° を用いると、 $F=9.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ となった。また波向変化の角周波数 ω は、波向変化の周期が4時間であるから $\omega=4.36 \times 10^{-4}(\text{rad}/\text{s})$ となる。ところで、式 (1) によれば座標の原点は突堤位置 ($X=0$) に置かれているから、突堤と汀線との接点で振幅が最大となるはずである。しかし、測定値 (図-5) によれば、突堤の回折効果のため突堤近傍での振幅は小さく、両側の突堤より約1m離れた位置で振幅が最大となった。そこで両側の1m部分のデータを除き、 $X=1.5\text{ m}$ に仮想壁があると仮定して実験との比較を行うこととした。これらの値を用いて式 (1) より汀線の時空間変化を求め、図-6 に示

した。同図は基準線 (X 軸) から汀線までの距離を $X-t$ 図としてまとめたものである。汀線の前進, 後退量が, 時空間的に周期的に生じ, その現象が一定の伝播速度 ($V = \sqrt{2\omega F/h}$) で伝わることを示している。ただし, $X=3.0\text{m}$ 付近で見られる等値線の不連続は, 突堤間の長さを十分長くできなかったために生じた誤差による。同様に実験の結果を図-7 に示す。理論解では波向は余弦関数で与えたのに対し, 実験では矩形波を与えた。したがって, 厳密には比較できないが, 矩形波をフーリエ級数展開したとき第1次モードは当然余弦関数となるから両者を比較して良いと考えられる。高周波モードはノイズ分となる。理論解より予見された周期的な堆積, 侵食状況は実験結果と良く一致していることがわかる。一方, 理論解では堆積, 侵食量が沿岸方向にその振幅を減じつつ伝播するが, 実験では侵食が沿岸方向にほぼ同時に生じ, 位相差は小さいことが特徴的である。

5. 沿岸漂砂の卓越する場での海浜変形の相似性

式 (1) で与えられる汀線変化に関し, 現地と模型とで $X=0$ 地点での汀線変動の振幅が相似となる条件より, 水平スケールについて考える。水平スケールの比を X_r とすると, 式 (2) より次の関係が得られる。

$$X_r = (F_r^{1/2} \cdot h_r^{-1/2}) \cdot (Ts)_r^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

ここに, r は現地と模型の比である。 F_r は現地と模型で漂砂量係数を与えれば定められる。また, h_r は漂砂の移動高の比であって, 実測データや予備実験によって定まる量である。したがって, 式 (8) は X_r か $(Ts)_r$ のいずれか一方が与えられたとき, 他方を計算する式として使うことができる。また, 鉛直方向の縮尺 Z_r は漂砂の移動高が相似条件を満足するとすれば次式で与えられる。

$$Z_r = h_r \dots\dots\dots (9)$$

実験では, 波向変化の周期を4時間とした。実験の結果, F と h は予備実験の値と変化し, F は約2.4倍の $F=9.5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$, h は約0.7倍の $h=0.13\text{m}$ となった。 F 値が大きくなった理由としては, 予備実験における波の作用時間が長過ぎ, これにより F 値が過小評価されたことがあげられる。ところで, 予備実験と本実験における F , h の値の差違は, 構造物から十分離れた位置での汀線変動の振幅の減衰比 ε に変化をもたらす。そこで, これらの値を式 (3) へ代入すると $\varepsilon \approx 0.2$ となり, 条件は変化したものでも ε が十分小さくならなければならない条件はほぼ満足されていたことがわかる。

ここで述べた相似則の特徴は次のようである。式 (8), (9) に明らかなように, 相似則の中には波浪条件や底質条件が陽形式で含まれていないが, それらの効果は, 漂

砂の移動高とエネルギーフラックスに関する定数 F の相似に含まれている。移動高については, 外洋に面した現地海岸では 10m のオーダーであることが知られている (宇多ら, 1987)。一方, ごく一般的な規模を持つ移動床平面実験 (底質は砂とする) における移動高は $10 \sim 20\text{cm}$ のオーダーであり, さらにその正確な値は本研究のように予備実験を行えば求まる。したがって鉛直縮尺は式 (9) により明らかになる。一方, 水平縮尺については F_r , h_r が与えられても $(Ts)_r$ が定まらない限り求められない。現地海岸での波向変動は1年周期が卓越していることは既に述べた。一方, 模型実験では一般に模型の大きさには限界があり, 模型実験を行う際, 各パラメータの間には式 (5) が成立する必要がある。すなわち模型の大きさより l が与えられれば, Ts が定まる。こうして最終的に $(Ts)_r$ が求まり, 更に X_r が決められることになる。ところで本研究の方法では, 鉛直縮尺は漂砂の移動高の縮尺のみから定まる。漂砂の移動高は波浪と底質条件の組み合わせで決まり, 波浪と底質粒径の組み合わせを一義的条件として与えられるものではない。すなわちその組み合わせについては任意性が残される。しかし, 地形変化は沿岸漂砂が卓越する岸沖漂砂による地形変化は十分小さくしなければならず, しかも漂砂の動き易さは漂砂量係数 F の縮率の中に自動的に含まれている。これらの点より, 波浪条件設定に際しての任意性はかなり低いと考えられる。

6. 結 論

- ①波向が周期的に変化する場での海浜変形に関する移動床模型実験を行った。実験結果は, 理論解と良い対応を示した。
- ②理論式に基づき, 沿岸漂砂が卓越する場での海浜地形変化の相似則を示した。この相似則は, 漂砂の移動高と漂砂量係数に関する縮率が含まれており, 波浪・底質条件の効果は陰形式で評価される。

参 考 文 献

- 宇多高明・住谷勉夫・小林洋三 (1986a): 茨城県における海浜変形の実態, 地形, Vol. 7, No. 3, pp. 141~163.
 宇多高明・小俣 篤・山本幸次 (1986b): 駿河海岸安定化手法調査報告書, 土木研究所資料, 第2285号, 67p.
 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄 (1987): 霞ヶ浦における風波による湖浜変形の実態, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 161~170.
 宇多高明・小俣 篤・齋藤友伸 (1988): 阿字ヶ浦海岸における海浜地形の長期的変動とその原因, 土木学会論文集, No. 399/II-10, pp. 165~147.
 住谷勉夫・園部武正・宇多高明・伊藤 隆・猿田正則・横田喜一郎 (1988): 鹿島灘沿岸におけるヘッドランドの建設による海浜の安定化, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 437~441.