

着色砂による岸沖方向の海浜過程に関する実験

日野 幹雄*・山下 俊彦**・米山 晋***

1. はじめに

海岸変形の機構は普通考えられているほど単純ではない。すなわち、海岸に波が入射してくると、この波の作用により砂が移動を開始する。しかし、各点での砂粒子が一様に移動を始めるのではなく、ある場所では砂が全く動かず、ある場所では盛んに移動する。この砂移動による底面地形変化が逆に波の形を変化させ、さらにそれが砂移動の形態を変化させる。その結果、始めは砂移動のみられなかった場所でも砂が動くようになる。そのような過程を繰り返すことにより、地形は安定形状に近づくのであろう。しかし安定状態が唯一でない可能性も考えなければならないであろう。つまり、海岸変形は複雑なフィードバックプロセスである。これを図-1に示す。

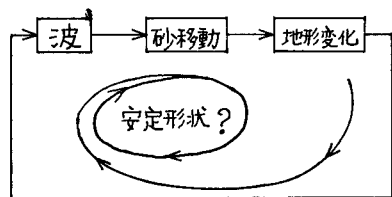


図-1 海岸過程

海浜変形を実験的に取り扱った研究は数多く¹⁾、砂移動を支配している流速場、主に底面流速に関する研究²⁾も報告されている。

本研究では、この現象を従来と異なった視点から、すなわち個々の砂粒子の移動に注目して実験解析を行なった。以下にその結果を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 移動床での実験

実験は 1/20 の勾配をもつ斜面を設置した 2 次元造波水路で行ない、斜面上に 5 cm の厚さで一様に砂 ($d=0.7\text{ mm}$) を敷いた。次に、汀線とこれから 50 cm おきの 4 ケ所の位置の砂を水路横断方向に 2.5 cm 幅で取り

去り、ラッカスプレーで着色した黄、赤、青、緑の 4 色の砂粒子を埋めた。座標は原点 ($X=0\text{ m}$) を汀線位置にとり、沖側を正とした。青の砂の位置 ($X=1.0\text{ m}$) は初期底面形状における碎波点の位置と一致している。

実験条件は、水深 25 cm、沖波波高 4.13 cm、周期 1.5 秒である。砂移動形態は典型的な堆積型であり、碎波形態は最初 plunging 型であった。

2.2 固定床での実験

移動床での実験と併せて、定量的なデータを得る為に固定床での実験も行なった。

まず第 1 に、砂移動に大きく関与している底面流速をレーザードップラー流速計（日本科学工業製）を用いて測定した。測定は、 $X=0.4\sim 3.0\text{ m}$ の範囲で 20 cm 間隔の地点に於いて底面から 1 cm の位置で行なった。又、同時に、各点での波高変動を容量式波高計を用いて測定した。データ処理は次のように行なった。まず波形記憶解析装置（菊水電子工業製）を用い、波動装置のシャフトに取付けたリリーススイッチをトリガーとして得られた出力を AD 変換し、一時記憶させる。次にオンラインでミニコン（YHP 製）の MT に転送し、これを解析した。尚、測定間隔は 0.05 s で、50 波分をアンサンブル平均した。

第 2 に、個々の砂粒子の移動状況を調べる為、固定床上に砂粒子を 30 個程度投入し、その挙動を一周期毎に 35 mm カメラで撮影した。投入位置は $X=1.5, 2.2, 2.6\text{ m}$ である。このフィルムより砂粒子の位置を読みとり以後の解析に用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 移動床に於ける着色砂の移動

図-2 に波の作用後 15 分の着色砂の移動状況をヒストグラムで示してある。縦軸は 3.5 cm 四方に存在する着色砂の個数である。この時点では、 $X=0\sim 0.9\text{ m}$ 区間では砂はほとんど移動せず、 $X=1.0\sim 1.6\text{ m}$ 区間で侵食し、 $X=1.0\text{ m}$ 付近で堆積し bar の形成が見られた。しかし、着色砂の移動形態は、そのほとんどが掃流状態で表面を滑ってゆくものであった。尚、青の着色砂は bar の下に埋まってしまい、ほとんど移動しなかった。

* 正 会 員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 東京工業大学大学院 土木工学科

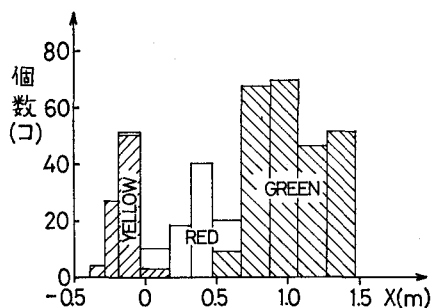


図-2 着色砂の表面分布

このヒストグラムより、着色砂の移動形態には2つの異なったパターンのあることがわかる。すなわち緑の着色砂の空間的に一樣に近い分布と、黄、赤の砂の明確なピークを持つ正規分布的な分布である。前者は一樣に岸方向に移動しているが、これはその初期の位置($X=1.5\text{ m}$)が常に侵食傾向にあることと密接に関連している。一方後者は、そのピークをとる X の値が卓越移動方向を示しているが、その距離は緑の着色砂の移動距離に比して非常に短い。

その後、さらに波を作用させると、碎波点下に堆積した砂が抵抗となり碎波形態を変えるようになる。そしてこの碎波が、逆に、碎波点付近の砂を岸側に追いやる。すなわち、bar は徐々に岸側に移動してゆく。

各着色砂の移動状況を詳細に述べる。

1) 青の着色砂は波の作用後すぐに埋もれてしまい、25分後位までそのままである。25分を過ぎると、上述した状況(堆積した砂が抵抗となり、碎波形態が変化)になり、侵食され、再び表層に表われる。この時、急激に碎波点付近が掘れるので、かなりの量の砂が岸側に運ばれる。ある程度侵食が進んだ後は、比較的ゆっくりとした侵食速度に落ちつく。

2) 赤色の着色砂は最初少し移動し、その後埋もれ、しばらくして再び動き出す。

3) 緑色の着色砂は先程述べたように、常にほぼ一定した速度で侵食が続く。

4) 汀線に設置した黄色の着色砂はほとんど移動しない。

最終的に、波を1時間25分作用させた。この状態で採取した砂に含まれる着色砂の数の空間的分布を示したのが図-3である。これよりわかるように、B.P. 以深には表層のみに着色砂が存在しているがその数は少ない、B.P. 以浅では次のようなことがわかる。

1) 着色砂の存在は底面より4 cm以上の所に限られている。

2) 15分後の着色砂の空間的分布と同様に、青の砂の分布に比較した場合の緑の砂の分布の空間的一様性が見られる。

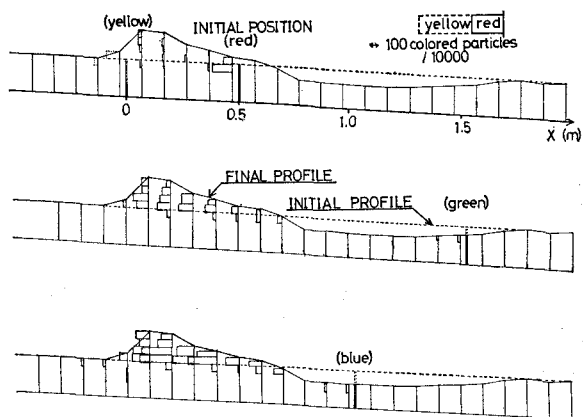


図-3 着色砂の空間分布

3) ある地点に於ける高さ方向の分布は、 X 方向の空間的分布に比較して一樣である。

全体を通して言えることは、海浜変形には波と底質の相互作用により、一度埋もれた砂が時間の経過と共に再び動き出すといった複雑なフィードバックプロセスが存在することが認められた(図-1)。

3.2 底面流速及び波高の時間的・場所的变化

海岸変形の要因には、従来波の流速の正負方向の非対称性が主として考えられてきた。しかし、波の流速の場所による変化も重要である(表-1)。流速の非対称性を考慮した論文としては、

柴山・堀川(1980)³⁾、野田・松原(1980)⁴⁾があげられる。波による底質の移動に関して流速の場

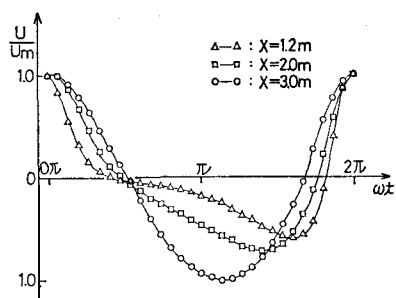
所的变化を考慮した論文はないが、Postma(1967)⁵⁾は潮汐に伴う底質移動を取り扱う場合に流速の場所的变化を考慮し、その重要性を指摘した。本論文では、この両者を考慮し、それを数式化するために因子分析の方法を応用する。

3.2.1 底面流速

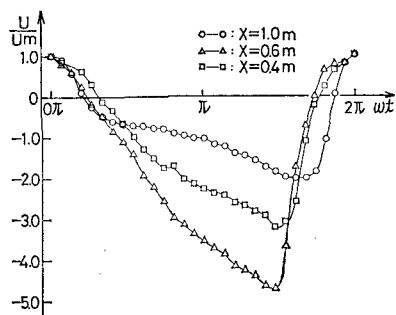
図-4は各点での流速の最大値で無次元化した流速の時間的变化であり、図-5は流速の最大値、最小値の場所的变化である。岸向きの流速を正とし、最大流速のである位相を 0π としてある。これらの図より、沖ではほぼ正弦的であった波形が、碎波点に近づくにつれ、非対称性を次第に増してゆく様子が良くわかる。又、岸向きの最大流速は碎波点直前まで増加している。しかし、ひとたび碎波点を過ぎると、流速変動の形は非常に異なったものとなり、岸向きの最大流速は急激に減少し、沖向きの最大流速が卓越するようになる。本実験の場合、この正負の最大流速の B.P. 以深、以浅での卓越性の相違は砂の移動と密接に関連している。すなわち、初期においては、砂の移動方向は B.P. 以深で岸向き、以浅で沖向き

表-1

砂移動 { 流速の非対称性
流速の場所的变化



(a) B.P. 以深



(b) B.P. 以浅

図-4 無次元化した流速の時間変化

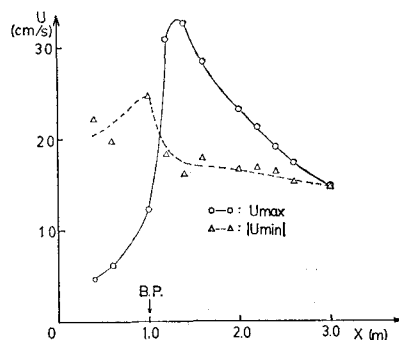


図-5 流速の最大値、最小値の場所的变化

であり、図-3 の地形変化から砂移動の限界速度を推定すると 27 cm/s 程度と考えられる。

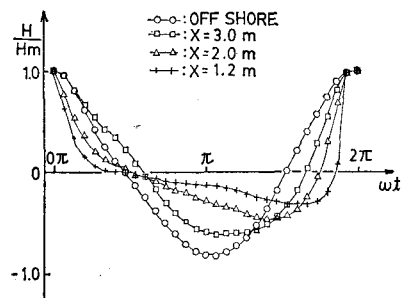
3.2.2 波高変化

図-6 は各点での無次元化された波高の時間的变化であり、図-7 は波高の最大値、最小値の場所的变化である。流速と同様に B.P. 以深、以浅では大きくその様子が異なる。

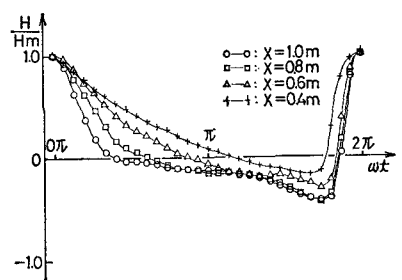
3.3 因子分析法を用いたラグランジュ速度の推定

海岸変形を取扱う場合に基礎的諸量である、ある地点の砂の移動方向と移動距離を求める為には、先に 3.2.1 で述べたように、流速の非対称性と場所的な流速の変化が重要である。

そこで本研究では、より正確な砂移動形態を知る為に実験より求めるオイラー速度からラグランジュ速度を求



(a) B.P. 以深



(b) B.P. 以浅

図-6 無次元化された波高の時間変化

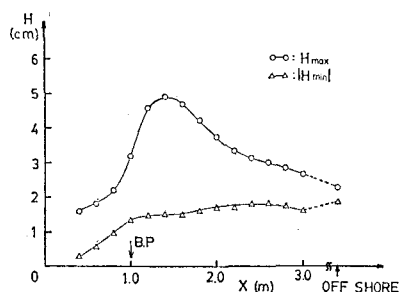


図-7 波高の最大値、最小値の場所的变化

め、流速の場所的变化をも考慮する。まず、オイラー流速の場所的、時間的变化を表現するために、ここでは項数が少なくすむ因子分析法を用いる。流速データの無次元化を次のように行なった。

$$\tilde{U}_{ij} = \frac{U_{ij} - \bar{U}_i}{\sigma_i} \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで U_{ij} は j 番目の地点の位相 i の流速であり、 $\bar{U}_i$ 、 σ_i は次のようになる。

$$\bar{U}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij}, \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (U_{ij} - \bar{U}_i)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

さて、流速は B.P. 以浅と以深では大きくその様子が異なっていることは先に見た通りである。そこで、本研究では、因子分析法を B.P. の沖側と岸側のそれぞれに対して適用した。B.P. より岸側の流速は 2ヶ所のためのデータしかない為、ここでは B.P. 以深の 8ヶ所での流速変動に関する解析を報告する。

今、(1)式で求められる $\tilde{U}_{ij}$ が第1～第 N 因子で表わせるとすると、次式ようになる。

$$\tilde{U}(x, t) = \sum_{k=1}^N F_k(t) \cdot f_k(x) \quad (R=1, \dots, N) \quad \dots\dots\dots(3)$$

図-8 は (2) 式で示される平均値と標準偏差の時間的変化を示したものである。平均値は、もはや正弦的とはいえず、特に正負の最大流速の間かなりの相違が見られる。すなわち、最大流速に関して言えば、岸向きが卓越しており、これが砂の移動に大きく関与している。

図-9 は因子負荷行列、すなわち第1因子～第3因子の時間的変動であり、図-10 は因子評価ベクトル、すなわち各因子の重みの場所的変化である。又、各因子のきき方は第1因子が 68%、第2因子、第3因子がそれぞれ 14% であり、この3つの因子で 96% 現実の流速を再現できる。

図よりわかるように、第1因子は平均流速の2倍の周波数成分をもつ因子であり、その重みの場所的変化は正

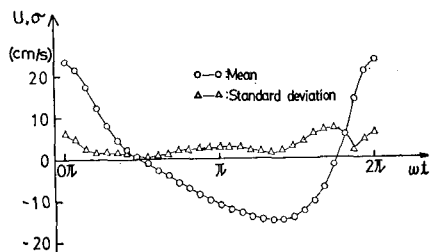


図-8 流速の平均値 $\bar{U}_i$ と標準偏差 σ_i^2

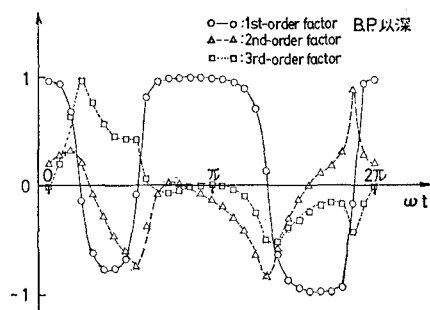


図-9 因子の位相変化 $F_k(t)$

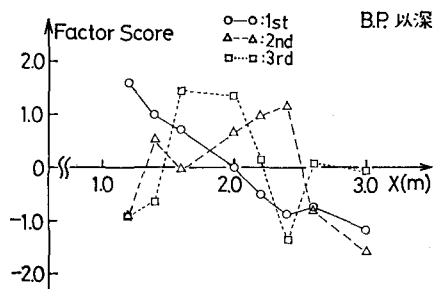


図-10 因子の重み $f_k(t)$

から負へほぼ直線的に変化している。この為、第1因子は流速の非対称性の場所的変化を表わしていると考えられる。第2因子、第3因子はその割合も第1因子に比して小さく、又そのパターンも明確でない。

次に、因子分析の結果を利用してラグランジュ速度を求める。

(1), (3) 式を用いて逆算された実流速 $U(x, t)$ は次のようになる。

$$U(x, t) = \tilde{U}(x, t) \cdot \sigma(t) + \bar{U}(t) \\ = \sigma(t) \cdot \sum_{k=1}^N F_k(t) \cdot f_k(x) + \bar{U}(t) \quad \dots\dots\dots(4)$$

時刻 $t=0$ に $x=a$ に存在する水粒子のラグランジュ流速 $U_L(a, t)$ は、水粒子の移動距離が小さい場合に、オイラー流速を用いて近似的に次式で表わせる。

$$U_L(a, t) = U(a, t) + \left\{ \int_0^t U(a, \tau) d\tau \right\} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} U(x, t) \right\}_{x=a} \quad \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式に (4) 式を代入することによりラグランジュ流速が求まる。これより、 $t=0$ に $x=a$ にいた粒子の Δt 秒後の位置 X を求めると

$$X = a + \int_0^{\Delta t} U_L(a, \tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。計算結果は次節に述べる。

3.4 斜面上の砂粒子の挙動

砂の基本的な移動を知る為に、砂粒子を写真で追跡する実験を行なった。図-11 には $X=1.5$ m, 2.2 m, 2.6 m に投入した 30 個程度の砂粒子の位置の平均と標準偏差を示してある。これより次のようなことがわかる。

1) 平均移動距離は、B.P. に近づくにつれ変化の割合が大きくなっている。これは B.P. 以深での岸向き最大流速が B.P. に近づくにつれ急激な増大を示していることと対応している。

2) $X=2.2$ m, 2.6 m に投入した砂粒子群の場所的な標準偏差は時間と共に増大する傾向を持っているが、 $X=1.5$ m に投入した場合は、標準偏差はそれ程変化せず最後には減少している。これは、前述した砂の B.P. に収束する傾向を示している。

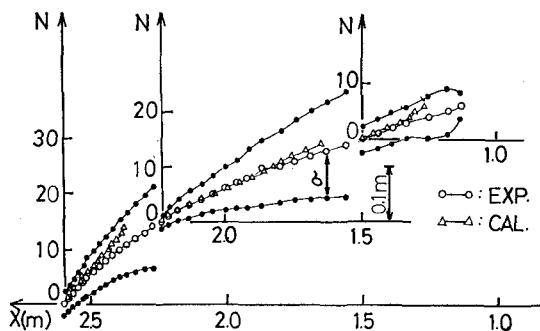


図-11 斜面上の砂移動

3) 砂粒子の位置の分散 σ^2 の時間的変化から拡散係数 ε_x を求めてみる。 ε_x と σ^2 には式 (7) のような関係があり、

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

実験結果から ε_x を求めたのが 図-12 である。この図によると拡散係数の時間変化は、 $X=1.494$ m の場合を除いて、相対拡散理論（拡散時間が短い時は、拡散係数は拡散時間に比例し、拡散時間が長くなると拡散時間の2乗に比例）によりよく表わされることがわかる。

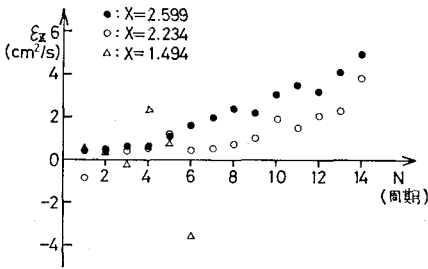


図-12 拡散係数の時間変化

4) 次に、先程の底面流速の因子分析の結果を用いた砂粒子移動の解析について説明する。

理論的に取扱うには、一方向流れの場合に Yalin⁹⁾、岸・福岡⁷⁾によって行なわれたような粒子に働く流体力を考慮した砂の移動を考えるべきであろう。又、海岸変形の場合には、河川の場合にあまり問題とならない重力の分力の作用が比較的大きい。これは次式のように表わすことができる。

$$\left(M + \frac{1}{2}m\right) \frac{dC_s}{dt} = -G \sin \theta - R_s \dots\dots\dots (8)$$

$$\left(M + \frac{1}{2}m\right) \frac{dC_n}{dt} = L - G \cos \theta - R_n \dots\dots (9)$$

しかし、ここでは第1近似として、砂粒子は流速がある限界値を超えると水粒子と一緒に動くことと仮定し、微小時間 ($dt=0.05$ s) 毎に式 (6) により逐次計算を行ない、砂の移動を解析した。尚、(3) 式で因子分析で得られた第1因子のみを考慮した。

砂粒子群の初期位置は実験と同じ3点とし、固定床上の砂移動の限界流速として ± 15 cm/s を採用した。実際の移動床の場合には 3.2.1 で述べたように 27 cm/s 程度である。図-11 に計算結果と実験値との比較を示す。この図より両者のかなり良い一致が見られる。これは、

砂は限界流速以上では水と一緒に動くという仮定がかなり実際の現象と一致している、第1因子のみで十分に各点の流速を表わすことができるという為であろう。

ここでは解析を行っていないが、砂粒子の移動個数と平均移動速度の積により掃流砂量を計算し、その場所的变化より海浜地形の変化を予測できる。

4. おわりに

着色砂を用いた波による斜面上の底質移動の実験を行なうことによって、砂の移動形態が明確になった。すなわち、砂移動の2種の異なったパターンや、波と底面形状との間の複雑なフィードバックプロセスが確認された。

併せて、固定床に於いて底面流速を測定し、因子分析法を用いて砂粒子移動の解析を行ない、実測値と比較、検討した。

波による地形変化は 図-1 に示したような複雑なフィードバックプロセスから成り立っている。波によってどのような海浜変形が起こるかという研究は数多く行なわれているが、地形の変化と共に波がどのように変化するかを研究した例は少ない。しかし、海浜変形を知る為には両者共重要であり、今後、地形変化に伴う波の変形を研究してゆく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 例えば、渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 172~176, 1979.
- 2) 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢幸・堀川清司：斜面上で碎波する波の底面流速に関する実験的研究、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 40~44, 1980.
- 3) 柴山知也・堀川清司：波による掃流砂量と堆積型海浜の形成機構に関する研究、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 192~196, 1980.
- 4) 野田英明・松原雄平：岸沖向き漂砂量に関する研究、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 197~201, 1980.
- 5) Postma, H.: Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment, Estuaries, pp. 158~179, 1967.
- 6) Yalin, M. S.: An expression for bed-load transportation, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, pp. 221~250, 1963.
- 7) 岸 力・福岡捷二：河床粒子の Saltation の機構と掃流砂量、第19回水理講演会講演集、pp. 59~64, 1966.
- 8) Crickmore, M. J. and G. H. Lean: The measurement of sand transport by means of radioactive tracers, Proc. Roy. Soc., A, Vol. 266, pp. 402~421, 1962.