

蛍光砂を用いた局所的砂移動と移動量の観測（第2報）

加藤 一正*・田中 則男**・近藤 隆道***

1. ま え が き

現在、海浜変形に関する数値シミュレーションの試みが盛んに行われるようになってきているが、依拠すべき砕波帯内の局所的漂砂量公式が現在のところ十分信頼おける段階にないので、二次元モデルに関しては未だ満足な状態に達していない。

著者らは、現地砕波帯内の1点に蛍光砂を投入し、その周辺で数時間にわたり底質のコアサンプルを採取する調査を実施してきた。その目的は、蛍光砂の移動方向、移動速度、混合層厚を求め、同時に測定した外力（波、流れ）と関連付けて、局地的漂砂量の評価式を得ようとするものである。この調査方法によって得られたデータの解析手法および調査方法の有効性については前報^{1),2)}に述べたとおりである。

本報告は、その後実施した同様の調査結果に基づいて、局地漂砂量の平均流方向成分、波の進行方向成分と外力との関係を検討したものである。

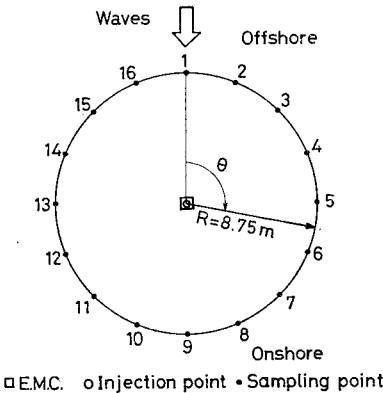
2. 観測方法・観測概況等について

(1) 観測方法

まず、図一1に示すように半径 $R (=8.75\text{ m})$ の円を砕波帯内の調査地点に設置する。前もって調査地点の海浜から採取した砂を用いて、3色の蛍光砂を作っておき1時間間隔で3回にわたり色の異なる蛍光砂を、それぞれ5 kg 円の中心に投入する。

最初の蛍光砂投入5分後より、図一1に示す円周上の16地点ではコアサンプルの採取を開始し、その後15分間隔で計21回の採取を実施する（5時間5分）。得られるコアサンプルは、層厚2 cmで分割し、表層から6層までの各層に含まれる蛍光砂の数を暗室で紫外線を照射してカウントする。

観測期間中、図一1の円の中心に電磁流速計を設置し、流速の水平二成分を測定する。今回報告する調査では、流速計の設置高は砂面上8~25 cmであった。



図一1 調査方法の概略図

(2) 観測概況

現地調査は、大洗海岸（1981年、2日間）、須田浜（1982年、3日間）、須田浜（1983年、2日間）の砕波帯内（D.L. 0 m 付近）で実施した。調査地点の水深は0.5~1.0 mであった。

調査実施中の平均的な沖波諸元、潮差、潮位変化の傾向を表一1に示す。表中に(?)を付してあるのは、この期間中の波浪観測が欠測であったために、直前の波浪諸元から推定したものである。潮差は、調査実施中の最高潮位と最低潮位（大洗港、鹿島港）の差である。潮位変化の傾向の矢印は調査中の潮位変化の一般的傾向を示すものであり、例えば右上りの矢印は潮位が上昇したことを意味する。表一1によると、沖波有義波高は、大洗海岸のときが小さく須田浜のときが大きい。1983年は、観

表一1 調査実施中の海象条件

調査海岸	調査名 (月/日/年)	有義波高 (m)	有義波周期 (s)	潮 差 (m)	潮位変化 の傾向
大 洗	8/31/81	0.52	6.0	0.68	↗
	9/ 2/81	0.38	5.7	0.74	↗
須 田 浜	7/28/82	1.50	8.5	0.27	↘
	7/29/82	1.20	8.8	0.14	→
	7/30/82	1.0 (?)	8.4 (?)	0.25	↗
須 田 浜	8/24/83	1.02	5.7	1.05	↗
	8/25/83	0.85	7.5	0.81	↗

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 高潮津波研究室長
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部長
*** 第二港湾建設局 塩釜港工事事務所

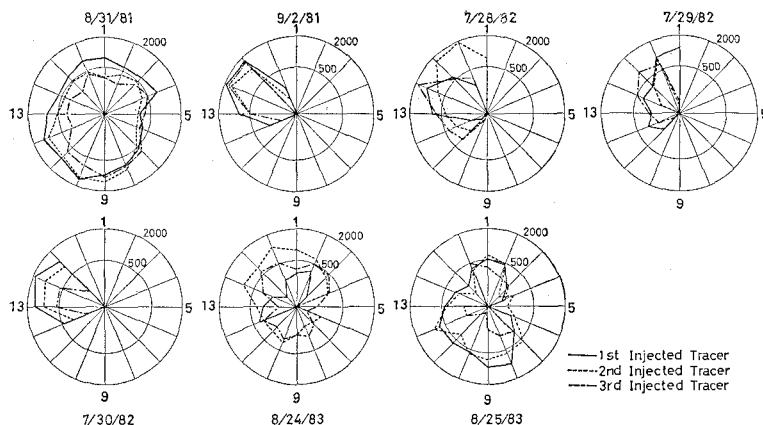


図-2 蛍光砂の移動方向の分布

測時の潮差が最も大きい。このため、潮位の低いときの流速記録には、流速計のセンサーがしばしば海面上に現われることによるノイズが相当含まれた。1983年の調査については、潮位が高くなり正常な流速記録が得られた第2回目の蛍光砂投入後のデータについてのみ解析をした。なお、須田浜海岸では、砕波帯内の流速記録に周期100s程度の顕著な長周期変動が観測された。

3. 蛍光砂の平均移動速度と移動方向

(1) 蛍光砂の平均移動速度と移動方向

図-2は、各サンプリングポイントにおいて21回採取したコアサンプル中に含まれていた蛍光砂の総数の方向分布を各調査について示したものである。蛍光砂数は、対数表示になっていることに注意されたい。蛍光砂の移動方向は、特定の方向に集中していることもあるが、蛍光砂の投入点から全方向に向う場合もあることが分る。

このようなデータから、蛍光砂の移動速度とその方向を、前報^{1),2)}と同様にして次式で算定した。

すなわち、

$$u_m = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \frac{R}{t} \cos \omega \, d\omega \, dt}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \, d\omega \, dt} \quad (1)$$

$$v_m = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \frac{R}{t} \sin \omega \, d\omega \, dt}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \, d\omega \, dt} \quad (2)$$

$$V_t = \sqrt{u_m^2 + v_m^2} \quad (3)$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{v_m}{u_m} \right) \quad (4)$$

である。ここに、 $C(\omega, t)$ は蛍光砂投入後の時刻 t における円周上の点 (R, ω) での蛍光砂数、 V_t は蛍光砂の平均移動速度、 θ_t は蛍光砂の移動方向であり、角度は図-3に示すように No. 1 のサンプリングポイントより時計回りに定義してある。

式(1)~(4)によって計算した V_t 、 θ_t を図-4に破線の矢印で示してある。同図には、流速の水平二成分より計算した、観測期間中の平均流の速度($\bar{V}$)、波の主方向(P)が実線の矢印で示されている。波の主方向を示す矢印の長さは、同方向の流速成分(u_p)の標準偏差($\sqrt{u_p^2}$)の大きさを表わしている。さらに、 u_p の skewness も計算し、波の主方向を正にとって白丸で示してある。Skewness を示す白丸が波の主方向を反対方向にあるものは、その値が負であることを意味する。

図-4によると、蛍光砂の平均移動速度は平均流の速度の影響を受けているようであるが、その移動方向は平均流向とずれている。このずれは、波の流速変動の skewness と密接に関連していることが前報で示された。

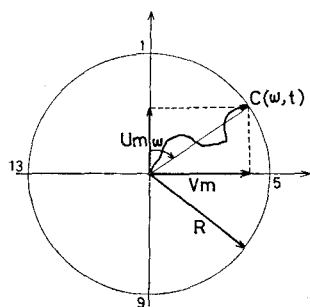


図-3 蛍光砂移動速度の座標系

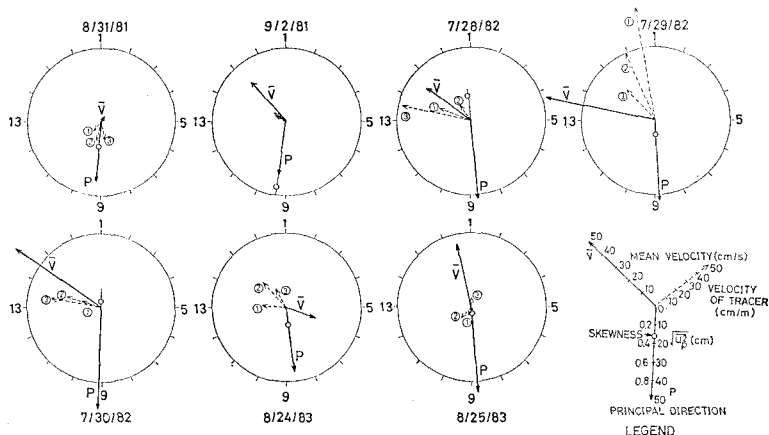


図-4 蛍光砂の平均移動速度と外力の関係

そこで、蛍光砂の平均移動速度を平均流方向成分と波の主方向成分に分解して外力との関連性について調べることにする。

(2) 平均流方向への平均移動速度

蛍光砂の平均移動速度 V_t の平均流方向成分 V_s と波の主方向成分 D は、図-5 に定義した角度 ϕ_t , ϕ_s を用いて、それぞれ次式で表わされる。

$$V_s = V_t \cdot \frac{\sin \phi_t}{\sin \phi_s} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$D = V_t \cdot \cos \phi_t \cdot \left(1 - \frac{\tan \phi_t}{\tan \phi_s}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5), (6) の計算において、波の主方向はそれぞれの蛍光砂投入後から調査終了までの流速記録から計算したものを使用した。以後に出てくる外力の代表値はすべて同様にして計算した値である。

図-6 は、式(5)で計算された V_s と平均流 $\bar{V}$ との関係をプロットしたものである。図中の実線は沿岸流公式と沿岸漂砂量公式を組み合わせ、さらに蛍光砂の碎波帯内における平均埋没深さが碎波波高に比例するとして得られた関係²⁾ を局所砂移動に適用したものである。図-

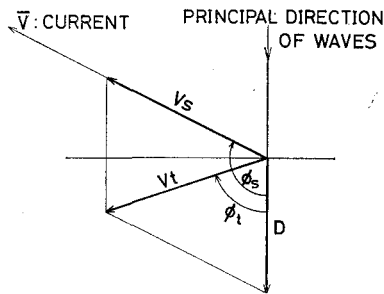


図-5 座標のとり方および記号の定義

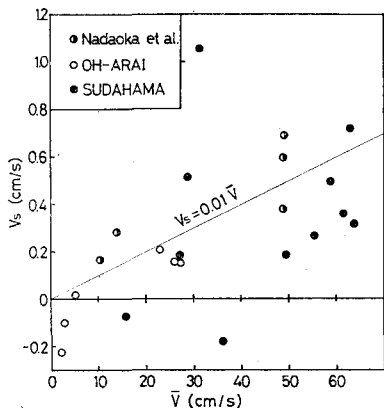


図-6 V_s と $\bar{V}$ の関係

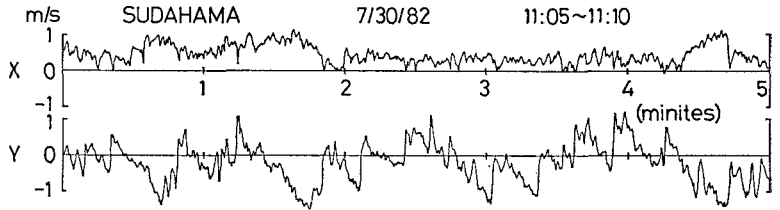


図-7 流速波形記録の一例

6 にプロットされたデータのほとんどは

$$V_s = 0.01 \cdot \bar{V} \quad \dots\dots\dots (7)$$

の直線のまわりにあることが分る。

(3) 波の進行方向への平均移動速度

まず、skewness が負になる原因について述べる。図-7 は、流速記録の一例であり、Y 成分がほぼ波の主方向の流速成分に対応している(流速の正は岸向き)。Y 成分の特徴は、短い周期(通常の入射波周期)の変動と周期 100 s 程度の変動が重なっていることである。しかも、長周期変動の振幅のほうが大きい。

図-8 は、1 時間の流速波形記録を移動平均して長周期成分を除去して skewness を計算した結果 ((skewness)_s) と、除去された長周期成分の skewness ((skewness)_L) を示したものである。横軸は、移動平均の時間長 (s) である。この図によって、短周期成分の skewness の値は正であるが、長周期成分のそれは負になっていることが分る。したがって、skewness が負になるのは長周期変動の波形の非対称性によるものと言える。

式(6)で計算された D を流速変動の有義波高 $H_{u1/3}$ で無次元化したものと、skewness の関係を図-9 に示す。ただし、今回の流速データには顕著な長周期成分が含まれていたため、ゼロアップ、ゼロダウンクロス法で $H_{u1/3}$ を計算することが出来なかったため、 $H_{u1/3} = 4.0 \sqrt{u_p^2}$ によって $H_{u1/3}$ を求めた。なお、波の主方向は岸向きであるので、図-9 で $D > 0$ のときは岸向きの移動、 $D < 0$ のときは沖向きの移動とみなすことができる。図-9 によると、skewness だけでは、蛍光砂の波の主方向への

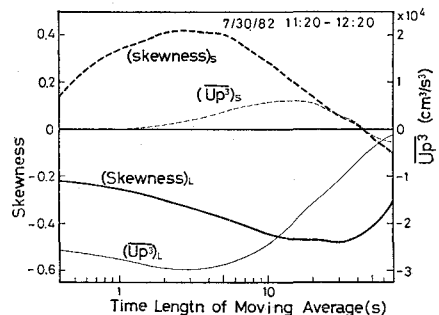


図-8 長周期変動と短周期変動の skewness

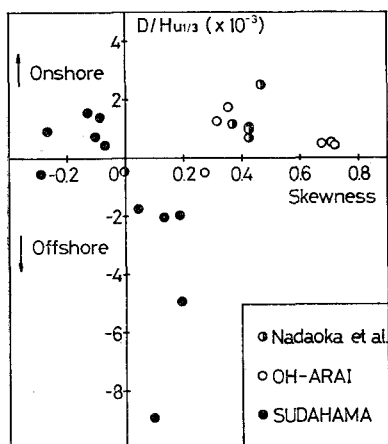


図-9 D と skewness の関係

移動を十分に説明できないようである。

そもそも, skewness は波形の上下の非対称性を表わすパラメータである。浅海域の波形は, 上下の非対称性と同時に前面が急勾配になる前後の非対称性の特徴も有する。流速変動の前後の非対称性が底質移動と関係していることは, 従来より指摘されているので skewness の他に波形の前後の非対称性の効果も取り入れて, 波の主方向の砂移動特性を調べる必要がある。

ここでは, 合田⁹⁾の提案する波形の前傾度パラメータの応用として, 加速度波形の skewness ($\bar{u}_p^3$) をパラメータとして導入する。長周期変動の振幅が大きくても, 周期が長いので, $\bar{u}_p^3$ は通常の入射波の前後の非対称性を強く表現する。このパラメータの底質移動に及ぼす効果としては, 次のようなことが考えられる。

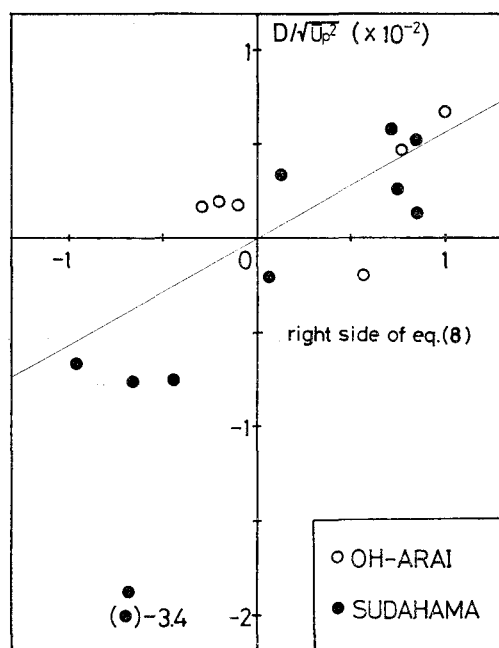
- ① 前傾した波峰の通過時に浮遊砂濃度が高くなり, その後の沖向き流れによって浮遊砂は沖に運ばれる。
- ② しかしながら, 流速に長周期変動があるときは, 浮遊砂はその流れによっても運ばれる。図-7によると, 平均流速をさし引いて考えれば, 長周期の流速成分が正(岸向き)のとき前傾した波峰が通過することが多い。すなわち, 浮遊砂移動は岸向きとなる。

このように, $\bar{u}_p^3$ の底質移動方向に及ぼす効果は長周期成分の強さによって異なる。長周期成分が強いと skewness の値が負になることは図-8 で示した。そこで, skewness の正負によって底質の移動方向を判別することを考え, 波の主方向への蛍光砂移動速度を

$$\frac{D}{\sqrt{\bar{u}_p^2}} = a \cdot S_k + b \cdot \text{sgn}(S_k) \bar{u}_p^3 / g^3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

とおくことにする。ここで, S_k は流速変動の skewness, $\text{sgn}(S_k)$ は skewness の符号, g は重力加速度, a, b は係数である。

図-9 のすべてのデータを用い, $\bar{u}_p$ は 0.2 s 間隔の流

図-10 D と skewness, $\bar{u}_p^3$ の関係

速値から計算し, 最小自乗法によって係数を求めたところ, $a=0.024$, $b=-85.14$ となった。得られた係数を用いて, 式(8)の左辺を縦軸にとり, 右辺を横軸にとってデータを再プロットしたのが図-10である。波の主方向への蛍光砂の移動速度は, 流速波形の上下, 前後の非対称性と関連しているようである。

(4) 蛍光砂の鉛直混合層厚

海底面下の蛍光砂数の鉛直分布から, Kraus⁴⁾の提案した 80% Cut-off で定義される蛍光砂の埋没深さを底質の鉛直混合層厚とし, 外力との対応を検討する。

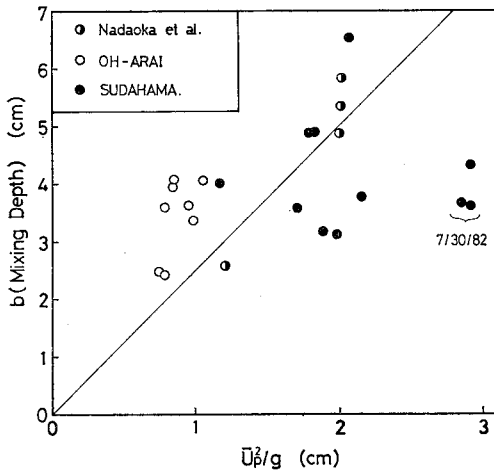
Sunamura ら⁵⁾は, 混合層厚 b は Shields のパラメータと関連があることを指摘している。そこで, 流速変動の分散 $\bar{u}_p^2$ と混合層厚の関係を, 図-11 にプロットして示す。図より, 7/30/82 のデータはややはずれるもののほとんどのデータは, 図中に実線で示された。

$$b = 2.5 \cdot \bar{u}_p^2 / g \quad \dots\dots\dots (9)$$

の直線で近似し得る。

$u_{p1/3} = 2.0 \sqrt{\bar{u}_p^2}$ の関数式と長波近似を用い, さらに, 碎波帯内の波高水深比を一定 ($=0.65$) とすれば, 式(9)より $b=0.1H_{1/3}$ の関係を得る。Kraus⁴⁾は, 碎波帯内の平均的な混合層厚 $\bar{b}$ と碎波波高の間に $\bar{b}=0.027H_b$ の関係があると述べているのに対し, 今回の混合層厚は大きなものになっている。

砂層の鉛直混合の機構を説明するものの一つとして, Madsen⁶⁾の円弧すべりによる力学的不安定性の考え方がある。これは, 波形の前傾化, すなわち前後の非対称


 図-11 混合層厚と $\bar{u}_p^3$ の関係

性によるものである。このことは、混合層厚を決めるパラメータに式(8)で用いた $\bar{u}_p^3$ のようなものが含まれることを示唆している。しかし、混合層厚がほぼ式(9)で表現できることは、碎波帯内の場合 $\bar{u}_p^3$ の効果は支配的ではないように考えられる。

4. 局地的漂砂量

蛍光砂移動速度の空間的平均値を時間的平均値 V_t で代用すると、単位幅当りの局地的漂砂量は次のようになる。

$$Q = b \cdot V_t \quad \dots\dots\dots (10)$$

V_t については、式(5)、(6)によって平均流方向成分 V_s と波の主方向成分 D に分解できるので、局地漂砂量も同様な成分 (Q_s, Q_D) に分けて表示する。

そうすると、局所的漂砂量の平均流方向成分 Q_s は式(7)、(9)より次式となる。

$$Q_s = \frac{0.025}{g} \bar{V} \cdot \bar{u}_p^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

一方、波の主方向 Q_D を求めるために、図-10 にプロットされたデータを、図中の実線で近似すれば、

$$\frac{D}{\sqrt{\bar{u}_p^2}} = 0.02 \cdot S_k - 72.4 \cdot \text{sgn}(S_k) \cdot \frac{\bar{u}_p^3}{g^3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の関係をj得る。したがって、式(9)、(12)より、

$$Q_D = \frac{1}{g} (\bar{u}_p^3)^{3/2} \cdot \left(0.05 \cdot S_k - 181 \cdot \text{sgn}(S_k) \cdot \frac{\bar{u}_p^3}{g^3} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。この式は、波が直角入射するときの岸沖漂砂量式とみなすことができる。このとき、長周期成分がなければ $S_k > 0$ であるので $\text{sgn}(S_k) = 1$ とおける。

5. あとがき

蛍光砂を用いた現地調査の結果をとりまとめたが、まだまだデータ数が不十分であることは否定できない。また、荒天時のデータは含まれていない。このようなことを考えると、今後さらに現地データを蓄積していかなければならないと思うし、蛍光砂を使用する方法(荒天時にはほとんど不可能)だけでなく、別の調査手法を開発して、結果の相互チェックもしなければならない。

今回の調査結果によると、特に岸沖漂砂量については波形の上下、前後の非対称性が重要な支配要因であることが分った。したがって、海浜変形の二次元モデルを開発していく際には、沖波と碎波帯内の波の非対称性の関係に注目した現地調査も必要である。

なお、調査結果の詳細は、別報で述べる予定である。

最後に当り、現地観測に参加した東京工業大学灘岡和夫氏(当時港湾技術研究所)をはじめとする数多くの方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 灘岡和夫・田中則男・加藤一正: 蛍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, pp. 178~182, 1981.
- 2) 灘岡和夫・田中則男・加藤一正: 蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp. 75~126, 1981.
- 3) 合田良実: 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第4号, 1985年12月(予定).
- 4) Kraus, N. C.: Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, Jour. of Sedimentary Petrology, Vol. 55, No. 1, pp. 3~14, 1985.
- 5) Sunamura, T. and N. C. Kraus: Prediction of average mixing depth of sediment in the surf zone, Marine Geology, 62, pp. 1~12, 1985.
- 6) Madsen, O. S.: The stability of a sand bed under the action of breaking waves, MIT Report, No. 182, 1974.
- 7) 加藤一正他: 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, 1985年(予定).