

砂れん上の底質の浮遊に着目した漂砂観測法について

——室内実験による検討——

入江 功*・寺崎賢次**・加藤一正***

1. ま え が き

現地漂砂量の測定は、海岸工学における古くからの課題であった。沿岸漂砂量に関しては、試験突堤等沿岸構造物周辺の海浜変形の情報から漂砂量を推定し、これを波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分と関係付けることが試みられ、近年は、蛍光砂を用いて漂砂量を推定する手法も試みられている。海域の一点における漂砂量(近頃は局地漂砂量と呼ばれる。)に関しても、最近著者の一人が蛍光砂手法を応用することを提案¹⁾しており、その他にもある種のトラップを用いる方法や、浮遊砂濃度と流れの同時測定を行なって、その積として浮遊砂量を求める試み²⁾などがある。

これらの方法は、それぞれに利害得失を持ち、残念ながらいずれも決定的な方法とは言いがたい。しかし、荒天時にも観測が可能であり、継続的な観測記録を得る可能性があることを重視すると、浮遊砂濃度と流速の同時測定を行う方法が最も注目されるところである。

そこで本研究では、浮遊砂濃度および浮遊砂量に関する室内の基礎的な二次元実験によって、浮遊砂濃度と流速の同時測定による漂砂量測定法の具備すべき条件について検討し、その結果に基づいて現地用漂砂量測定装置を試作した。

2. 底質移動に関する室内実験

2.1 波による浮遊砂濃度分布の測定

(1) 実験方法

実験は、図-1に示す長さ25m、幅1m、高さ0.6mの片面ガラス張り波と流れが同時に発生できる水路で行なった。フラップ型造波機により規則波を発生させ、廻流パルプ、スクリーンを通じ波の進行方向同じ向きに流れを発生させる。移動床は、二分されている水路のガラス面側に、4.5mの区間を10cmの厚さで水平に砂を敷きならして造った。浮遊砂濃度の測定は、サイフォン

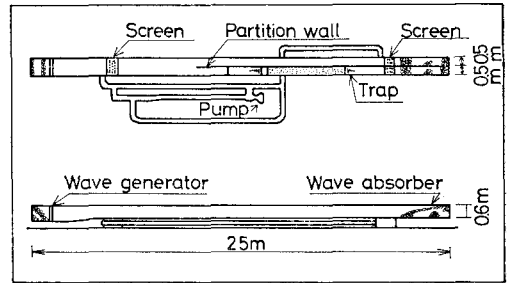


図-1 実験水路

による採水法で行なった。

浮遊砂濃度は、砂れん近傍が最も高く、この部分の砂移動が波の下での漂砂現象を大きく支配する。川又³⁾は、沢本ら⁴⁾の砂れん周辺の組織渦の拡散理論に基づき、砂れん頂部から上方へ η (η は砂れん波高)より下の範囲が渦層であることを示した。そこで、図-2に示すように、砂れん1波長分の渦層の領域を6つに区分し、各領域の図心の位置で浮遊砂濃度を求めた。実験は、表-1に示す27ケースを行なった。

(2) 実験結果

図-3は、浮遊砂重量濃度分布の測定結果の一例を示している。 $d_{50}=0.2\text{ mm}$ の実験では、砂れん近傍の測定値($z=0, 1\text{ cm}$)が上方水中の測定値を用いて求めた直線の近傍に存在している。 $d_{50}=0.07\text{ mm}$ の実験においても、砂れん近傍の測定値が $z\approx 6\sim 8\text{ cm}$ より下方での測定値を用いて求めた直線の近傍に存在している。そこで、図-3の直線を外挿して求めた $z=0\text{ cm}$ における砂れん近傍の濃度 c_{b1} と図-2のZone 1~3で測定し

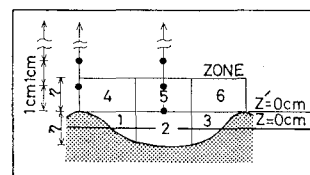
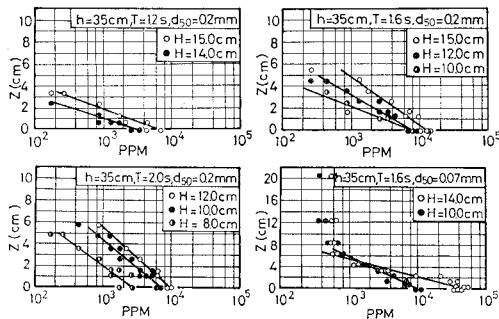


図-2 浮遊砂濃度の測定点

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室
 *** 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

表一 実験ケース（波の下での浮遊砂濃度の測定）

Case	水深 h cm	周期 T s	波高 H cm	底質粒径 d_{50} mm	底面濃度 c_{bI} PPM	濃度勾配 β_o'	Case	水深 h cm	周期 T s	波高 H cm	底質粒径 d_{50} mm	底面濃度 c_{bI} PPM	濃度勾配 β_o'
1	35	1.6	15.0	0.2	13 500	1.85	15	25	1.40	10.0	0.2	9 000	1.16
2	35	1.6	12.0	0.2	8 200	1.57	16	25	1.40	8.0	0.2	2 100	1.15
3	35	1.6	10.0	0.2	8 600	1.02	17	25	1.4	6.0	0.2	640	0.75
4	35	2.0	12.0	0.2	10 000	2.45	18	20	1.27	8.0	0.2	5 000	0.84
5	35	2.0	10.0	0.2	7 400	2.25	19	20	1.27	6.5	0.2	1 400	0.87
6	35	2.0	8.0	0.2	2 800	1.97	20	15	1.10	6.0	0.2	4 500	0.76
7	35	1.2	15.0	0.2	5 800	1.04	21	15	1.10	5.0	0.2	1 800	0.71
8	35	1.2	14.0	0.2	2 800	0.92	22	35	1.6	14.0	0.07	50 000	1.41
9	35	1.68	14.0	0.2	6 400	1.60	23	35	1.6	10.0	0.07	10 000	2.55
10	35	1.68	11.5	0.2	2 400	1.58	24	30	1.6	13.0	0.07	40 000	2.40
11	35	1.68	8.5	0.2	1 600	1.01	25	25	1.6	10.0	0.07	22 000	2.95
12	30	1.56	12.0	0.2	9 000	1.29	26	25	1.6	5.0	0.07	6 600	2.60
13	30	1.56	10.0	0.2	2 300	1.50	27	12	0.95	5.4	0.07	16 000	1.34
14	30	1.56	7.5	0.2	1 150	1.20							

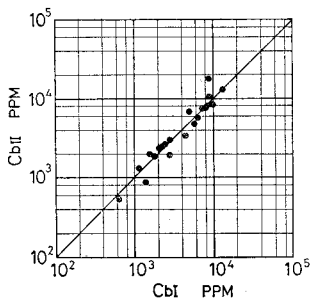


図一 浮遊砂濃度分布の一例 ($h=35$ cm)

た濃度の平均値 ($z=0$ cm での平均濃度) c_{bII} との関係を図一四に示した。これらの結果から、砂れん近傍の浮遊砂濃度 ($z=0$ cm) は、上方水中の濃度を外挿することで近似的に求まるものと思われる。本実験により得られた c_{bI} とシールズ数 ϕ_m

$$\phi_m = f_w \frac{u_b^2}{2(\rho_s/\rho_w - 1)g d_{50}} \quad \text{..... (1)}$$

の 3 乗との関係を図一五に示す。ただし、 f_w : Jonsson の粗度係数 (粗度高さとして実測した砂れん波高を用いた)、 u_b : 底面における水粒子速度の最大値、 ρ_s : 砂の密度、 ρ_w : 水の密度、 g : 重力加速度である。図より、砂れん近傍の濃度 c_{bI} と ϕ_m の間には以下のような関係



図一四 底面濃度 ($z=0$ cm) の外挿値 c_{bI} と測定値 c_{bII} の関係

のあることがわかる。

$$c_{bI} = 5\,000(\phi_m^8)^{0.6} \quad \text{..... (2)}$$

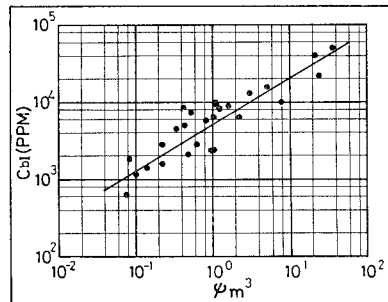
次に、浮遊砂濃度分布勾配について検討を試みる。

Skafel ら⁵⁾ は、鉛直方向の拡散係数を一定として次式の実験式を提案している。

$$\bar{c} = \bar{c}_a \exp \left[-\frac{1}{\beta_o} (y - a) \right] \quad \text{..... (3)}$$

$$\beta_o = K \frac{1}{\omega} v_* \left(\frac{v_* d_{50}}{\nu} \right)^{-2.2} a_m \quad \text{..... (4)}$$

ここに、 a : 基準点高さ ($=3.0d_{50}$)、 $\bar{c}_a$: 基準点高さ a での浮遊砂濃度、 ω : 底質の沈降速度 ($=g(\rho_s/\rho_w - 1)d_{50}^2/18\nu$)、 ν : 動粘性係数、 v_* : 摩擦速度 ($=\sqrt{f_w/2}u_b$)、 a_m : 水粒子水平軌動振幅、 K : 実験定数である。Skafel らは、式(4)の実験定数 K の値を 8.7 としている。しかし、本実験で得られた結果を整理すると $K=29.0$ ⁶⁾ を得た。 $K=29.0$ として計算した β_o と実験で得られた濃度分布を直線近似して得られた勾配 β_o' の関係を図一六に示す。ばらつきはあるものの両者は、比較的良好な対応を示している。以上から本実験の範囲内では、浮遊砂濃度分布勾配が式(4)で表示できるようである。また、鉛直方向の拡散係数 ($Kv_*(v_*d_{50}/\nu)^{-2.2}a_m$) が z に関係がある場合についても、浮遊砂濃度分布曲線の外挿により c_a ($=c_{bI}$) が求められるのではないと思われる。このように、浮遊砂の濃度分布が底面近くまで求められれば、



図一五 底面濃度 c_{bI} とシールズ数 ϕ_m の 3 乗との関係

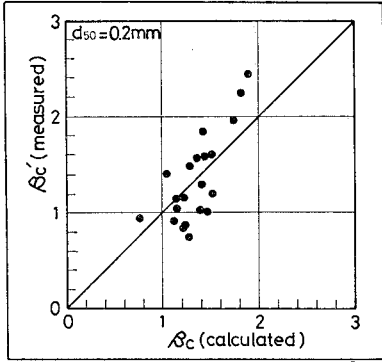


図-6 濃度勾配の測定値 $\beta c'$ と計算値 βc

沿岸方向の漂砂量については、平均流の鉛直分布を明らかに見積ることが出来るものと思われる。但し、後に述べるように波動運動による流向変化が著しい岸沖漂砂については、別の扱いが必要である。

2.2 波および波と同方向の定常流が共存している場の浮遊漂砂量の測定

(1) 実験方法

浮遊砂濃度を砂れんの峯の高さを $z'=0\text{ cm}$ ($z'=z+\eta/2$) の基準とし、それより上方に 0.5 cm 間隔で測定した。測線は、砂れんの峯上、谷上の2測線とした。浮遊砂濃度の連続測定には、透過光量減衰方式の濁度計を用い、測定値を同時に同じ測定点からサイフォンによって採水して得られた浮遊砂濃度で校正した。底面から同じ高さで水路の横断方向に 5 cm ずれた点の流速を電磁流速計で測定し、浮遊砂濃度測定点の流速とした。実験は、水深、周期、底質粒径をそれぞれ $h=35\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$, $d_{50}=0.2\text{ mm}$ に固定し、波高 H , 定常流速 U_s を変化させて、表-2 に示す 12 ケースを行なった。

(2) 実験結果

図-7 は、浮遊砂濃度分布を外挿して求めた cb_I ($z=0\text{ cm}$ の地点の濃度) と Bijker の用いたパラメーター ($V^2 + \xi^2 u_b^2/2$) との関係を示している。ここで、 V は断面平均流速、 $\xi=c_h \sqrt{f u_b/2g}$ (c_h はシェジエの係数) である。また、プロットしたデータの下に濃度勾配 $\beta c'$ の値を記した。今回の実験では、 cb_I および $\beta c'$ は定常流の存在に

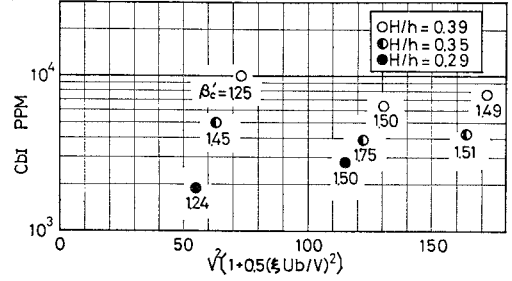


図-7 底面濃度 c_I と U_b, V との関係

よって有為な変化を示さなかった。

浮遊漂砂量は、以下の式で与えられる。

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)c(t) dt = \overline{u \cdot c} \quad \text{.....(5)}$$

u と c の実測データを、 $\Delta t=0.017\text{ s}$ で AD 変換し得られたデジタル値を用いて q_s を計算した。さらに

$$\bar{q}_s = \bar{u} \cdot \bar{c} \quad \text{.....(6)}$$

についても計算した。

図-8~10 は、 $U_s=12.5, 10, 5\text{ cm/s}$ における $q_s, \bar{q}_s$ を ωd_{50} で無次元表示した $\phi_s, \bar{\phi}_s$ の鉛直分布を示している。図中、波・定常流の進行方向に $\phi_s, \bar{\phi}_s$ を正に取り、また白丸は砂れんの峯上で黒丸は砂れんの谷上で測定されたことを示す。図から、 $z'=2\text{ cm}$ 程度を境にして、それより上方では ϕ_s と $\bar{\phi}_s$ がほぼ一致しているが、それ以下では両者は大きく異なっており ϕ_s が急激に減少することがわかる。このことから、本実験では、 $z'=1.5\sim 2.0\text{ cm}$ を境にして、それより上方では浮遊漂砂量が浮遊砂濃度の平均値と流速の平均値の積でも表示でき、それより下の層においては $c \cdot u$ のみでしか表示できないことがわかる。川又は、砂れんの頂部より η の高さより下の範囲を渦層と考えたが、今回の検討結果によれば、この渦層が ϕ_s と $\bar{\phi}_s$ が一致しない領域に相当するものと思われる。

ある高さを境に上方で $\phi_s \equiv \bar{\phi}_s$ 、下方で $\phi_s \neq \bar{\phi}_s$ と異なる理由を砂移動から考察する。 $\phi_s \equiv \bar{\phi}_s$ を代表する点として ㉔ ($z'=3.0\text{ cm}$) を、 $\phi_s \neq \bar{\phi}_s$ を代表する点として ㉕ ($z'=1.0\text{ cm}$) を選び砂れん峯上での濃度 c , 流速 u の時間変化を図-11 に示す。図中の値は、20 波分を平均して求めたものである。㉕では、濃度の時間変動が大きく特に冲向き流速時に高濃度の浮遊砂が出現している。㉔では、濃度の時間変動が㉕に比べ少なく㉕で見られる高濃度のピークが消滅している。すなわち、 $\phi_s \equiv \bar{\phi}_s$ の領域では、 $\phi_s \neq \bar{\phi}_s$ の領域で見られる冲向き流速時の高濃度の浮遊砂が、消滅したため $\bar{c} \cdot \bar{u}$ でも表示できたものと思われる。以上から、砂れんの峯から η 上方の点より下の層では、複雑な現象が存在しているため、浮遊漂砂量

表-2 実験ケース ($h=35\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$, $d_{50}=0.2\text{ mm}$)

Case	定常流速 $U_s(\text{cm/s})$	波 高 $H(\text{cm})$	Case	定常流速 $U_s(\text{cm/s})$	波 高 $H(\text{cm})$
A-1	0	14.8	A-7	10	13.3
A-2	0	13.4	A-8	10	11.6
A-3	0	11.1	A-9	10	9.9
A-4	5	13.7	A-10	12.5	12.5
A-5	5	11.8	A-11	12.5	11.2
A-6	5	10.0	A-12	12.5	9.9

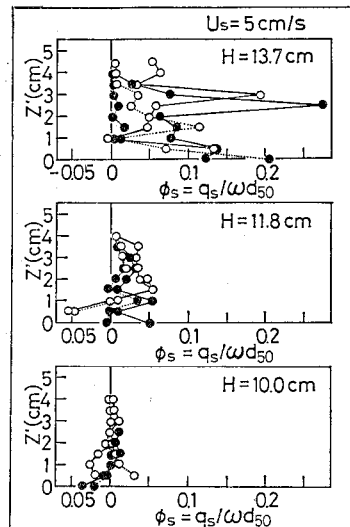
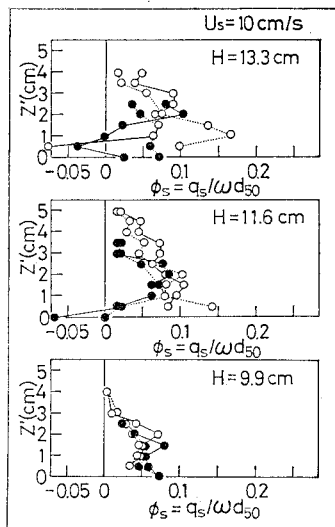
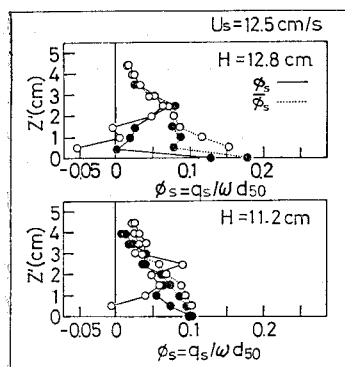


図-8 $\phi_s, \bar{\phi}_s$ の鉛直分布 ($U_s=12.5$ cm/s) 図-9 $\phi_s, \bar{\phi}_s$ の鉛直分布 ($U_s=10$ cm/s) 図-10 $\phi_s, \bar{\phi}_s$ の鉛直分布 ($U_s=5$ cm/s)

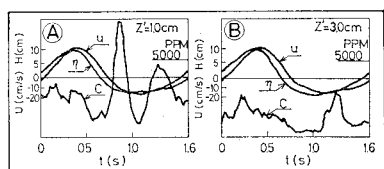


図-11 波の1周期間における濃度 c , 流速 u の変動

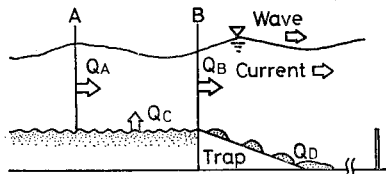


図-12 全漂砂量 Q_A の測定法

は $\bar{c} \cdot \bar{u}$ のみ表示できることがわかった。しかし、掃流砂も含めた底辺近くの漂砂量の測定は困難であり、よって地形測量等によって別途見も積る必要がある。

砂れん頂部から η だけ上の高さより上方の浮遊漂砂量 q_s が、下方の漂砂量 q_b に対しどの程度の割合にあるかを調べるために、以下の方法で q_b を評価し検討した。

図-12 に示すように、断面 A から入ってくる漂砂量を Q_A 、断面 B から出ていく量を Q_B 、AB 間で生じた地形変化量を Q_D とする。これらの量の間には、 $Q_B - Q_A = Q_D$ の関係がある。 Q_B は、トラップに捕砂された量 Q_D に等しく $Q_B = Q_D$ であることから $Q_A = Q_D - Q_C$ で表わされる。ここで、 Q_D 及び Q_C が測定可能な値であるので Q_A を求めることができる。したがって、断面 A において q_s を測定すれば、

$$q_b = Q_A - q_s \quad \dots\dots (7)$$

により q_b が評価できる。

図-13 は、上記の方法で測定した q_s と、 Q_A, q_s から評価した q_b との比 q_s/q_b を定常流速の大きさに整理したものである。 $U_s=0$ cm/s のときの波高を同図の右上に示しておいた。 q_s についての測定値はすべて正（岸向き）であった。したがって、 q_s/q_b の値が負になるのは、一例を除いて q_b が負（沖向き）になったため

である。この結果は、図-12 の ④ において、沖向き流速時に浮遊砂濃度が高くなっていることと対応する。 q_s/q_b の絶対値が 1.0 付近にあり、 q_s と q_b とは同程度の量であったことがわかる。このことは、岸沖の漂砂量を知るには、 q_s を測定する ($\bar{u} \cdot \bar{c}$ で評価が可能) と同時に他の方法によって q_b を測定しなければならないことを示している。

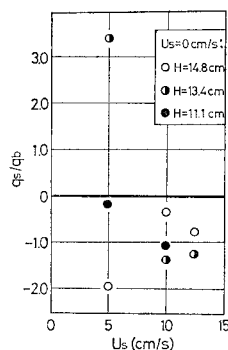


図-13 浮遊漂砂量 q_s と下方の漂砂量 q_b との割合

3. 現地用漂砂量測定装置

以上の考察に基づいて試作した漂砂量測定装置を図-14 に示す。濃度は、図中左側の鉛直方向に 10 対の素子を持つ光学式濃度計と図中右側のポンプを同時に用いて測定する。浮遊砂濃度の鉛直分布は、光学式濃度計で得られる濃度を、ポンプで採水して得られる濃度で校正し求める。流速は、電磁流速計により測定する。

