

Swash zone における岸沖漂砂量の算定式

砂 村 継 夫*

1. はじめに

自然海浜における汀線変化を定量的に予測しようとする場合、解決しなければならない重要な問題の一つに swash zone における net の岸沖漂砂量の算定がある。この問題については、現象の複雑さのため実験室・現地を問わず、ほとんど研究が行われていなかった。最近、現地観測¹⁾や大型造波水路によるアプローチ²⁾が行われているが、まだ外力や底質粒径との関連において漂砂量を算定できる段階ではない。そこで、ここでは二次元造波水路実験の結果をもとに一般化された漂砂量算定式を求め、この式の現地への適用性について鹿島³⁾の大型水路実験データを用いて検討した。

2. Swash zone における底面流速

漂砂量の定式化に必要な物理量の一つに波のもつ底面流速がある。ここでは静水時汀線における底面流速を求めることを試みる。このためには静水時汀線上での波高が必要となる。図-1 は砕波後の波高変化を示すもので、1/10 勾配のケースを除き、佐々木・佐伯⁴⁾が作った

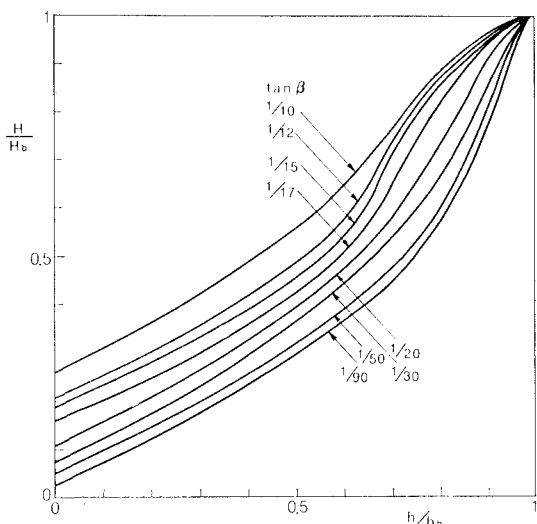


図-1 砕波後の波高変化

図である。1/10 勾配の曲線は水口⁵⁾のデータをもとにして描かれている。この図から静水時汀線（すなわち $h/h_b=0$ ）における H/H_b の値を読み取り、海底勾配 $\tan \beta$ との関係調べてみると 図-2 のようになり、静水時汀線における波高 H_s (図-3) は

$$H_s/H_b = 2.5(\tan \beta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で示される。すなわち H_s は、砕波波高 H_b と砕波帯内の海底勾配 $\tan \beta$ (ただし一様勾配) の関数で与えられることがわかる。一方、静水時汀線における平均水位の上昇量 h_s (図-3) は次式で表わせる⁶⁾。

$$h_s/H_b = 1.63(\tan \beta) + 0.048 \quad \dots\dots\dots (2)$$

浅海近似が成立すると仮定するならば、静水時汀線の底面付近における最大流速 u_s は

$$u_s = (H_s/2)\sqrt{g/h_s} \quad \dots\dots\dots (3)$$

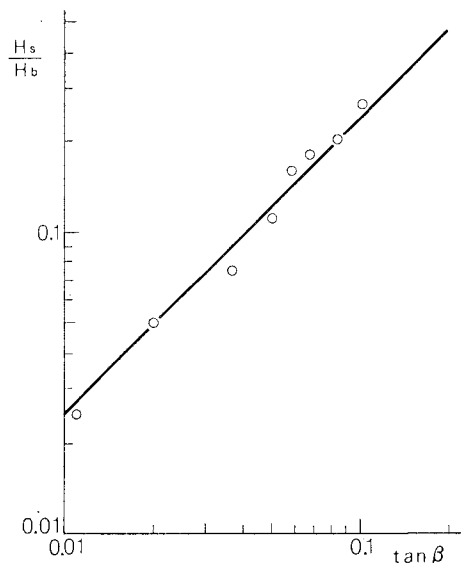


図-2 静水時汀線における相対波高 (H_s/H_b) と海底勾配 ($\tan \beta$) との関係

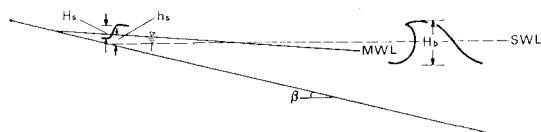


図-3 定義図

となり、式(1)~(3)より u_s は H_0 と $\tan \beta$ の関数として表わせる。すなわち

$$u_s = 1.25(\tan \beta) \sqrt{\frac{gH_0}{1.63(\tan \beta) + 0.048}} \quad \dots (4)$$

ここに g は重力の加速度である。

3. 2次元造波水路実験

Swash zone における net の漂砂量のデータを得るため、2次元実験を行った。長さ 21 m、高さ 0.7 m、幅 0.5 m の造波水路の一端に粒径 0.2 mm の標準砂で 1/10 勾配の斜面を作り、これに実験波を合計 1 時間作用させた。実験開始後 5, 15, 30, 60 分に砂面計を用いて水路中心線上の地形を測量した。波の周期は 1.2, 1.8, 2.0, 2.5 s とし、波高を適宜変化させて合計 16 ケースの実験を行った。1 時間後の海浜プロファイルをもとにして初期 ($t=0$) の静水時汀線上の断面を通る net の漂砂量 (1 時間の平均値) $\bar{Q}$ を求めた (表-1)。ここで得られたデータ数では充分ではないので、既往の実験 (一様な初期海底勾配をもち底質材料として砂を用いているもの) のうち実験開始後 1 時間のデータが得られるもの^{7)~12)}を利用した。なお既往の資料の中で $\bar{Q}$ が与えられている場合はその値を、そうでない場合は海浜プロファイルから $\bar{Q}$ を求めた。

Swash zone ならびに砕波帯の地形は時間的に変化する。このため swash zone での波の状態も、厳密に言えば、時々刻々と変化するわけであるが、ここでは実験開始後 1 時間は初期の静水時汀線上での波の状態が保たれると仮定した。

表-1 実験条件および結果

Run No.	T (s)	H_0 (cm)	H_b^* (cm)	u_s^{**} (cm/s)	$\bar{Q}^{***}$ (cm ³ /cm/s)	$\bar{Q}/wD$
1	1.2	2.2	4.4	17.9	0.020	0.39
2	1.2	4.6	7.6	23.6	0.00080	0.017
3	1.2	6.6	10.1	27.1	-0.015	-0.29
4	1.2	8.8	12.5	30.2	-0.013	-0.26
5	1.8	2.1	5.2	19.5	0.016	0.32
6	1.8	4.2	8.8	25.1	0.047	0.94
7	1.8	6.3	12.0	29.8	0.024	0.48
8	1.8	8.4	14.7	33.0	0.023	0.46
9	1.8	10.5	17.4	35.9	0.0099	0.20
10	1.8	12.6	20.0	38.3	-0.0039	-0.080
11	2.0	11.2	19.3	37.2	0.0060	0.12
12	2.5	1.9	5.3	19.5	0.027	0.53
13	2.5	3.8	9.6	26.6	0.041	0.82
14	2.5	5.7	13.0	31.5	0.11	2.3
15	2.5	7.6	16.1	34.1	0.084	1.7
16	2.5	9.4	18.9	36.9	0.042	0.85

注: * 式(9)による計算値, ** 式(4)による計算値, *** マイナスは沖向きを示す。

4. 漂砂量算定式

Swash zone における net の漂砂量 $\bar{Q}$ がパワー (せん断力 × 流速) で表現できると考える。すなわち

$$\bar{Q} \sim \tau \times U \quad \dots (5)$$

ここに τ はせん断力で $\tau = f_w \rho u_s^2/2$, f_w は摩擦係数, ρ は流体の密度である。次に U として次式を仮定する。

$$U = u_0 - u_s \quad \dots (6)$$

ここに u_0 は漂砂の方向が変化する限界の流速で、この段階では未知量である。式(5), (6)より

$$\bar{Q} \sim f_w \rho u_s^2 (u_0 - u_s)/2 \quad \dots (7)$$

まず式(7)が成立するかどうかを検討する。ここで $f_w = \text{const.}$ と考えると、式(7)は

$$\bar{Q} = k u_s^2 (u_0 - u_s) \quad \dots (8)$$

となる。 k は $[T^2 L^{-1}]$ の次元をもつ定数である。

図-4 は、今回行った実験のデータと既往の実験データを用いて、底質粒径 D および波の周期 T 別に $\bar{Q}$ (cm³/cm/s) と u_s (cm/s) との関係をプロットしたものである。 $\bar{Q}$ の正の値は岸向きを示す。なお u_s の計算 [式(4)] に必要な $\tan \beta$ は初期勾配の値を用い、 H_0 は次式¹³⁾による計算値を用いた。

$$H_b/H_0 = (\tan \beta)^{1/5} (H_0/L_0)^{1/4} \quad \dots (9)$$

ここに H_0 は沖波波高, L_0 は沖波波長である。

図-4 からわかるように、データにかなりのバラツキがみられる。図中の曲線は式(8)の関数形を実験データにできるだけ fit させた結果である。曲線に附されている u_0 の値は、その曲線が横軸を切る点の u_s の値である。データ群と曲線との間にずれが見られるケースもあるが、全体の傾向は

$$k = 2.6 \times 10^{-6} \text{ s}^2/\text{cm} \quad \dots (10)$$

とした式(8)で表現できる。従って swash zone における net の漂砂量算定式に、上述したようなパワーの考え方が適用できると思われる。

次に u_0 の値 (図-4) は、底質粒径が同じならば周期が長いほど大きくなり、周期が同じならば粒径が大きいほど大きいことがわかる。そこで

$$u_0 \sim D^{1/2} T \quad \dots (11)$$

とおく。重力加速度 g , 流体の動粘性係数 ν と底質の比重 s を使って上式の次元を合わせ、次式を仮定する。

$$u_0 = A g^{7/6} (s-1)^{1/6} \nu^{-1/3} D^{1/2} T \quad \dots (12)$$

ここに A は無次元定数である。図-4 中の u_0 の値と上式の右辺 $g^{7/6} (s-1)^{1/6} \nu^{-1/3} D^{1/2} T$ の値を計算してプロットした結果 (図-5) から A を求めると

$$A = 1.0 \times 10^{-2} \quad \dots (13)$$

となる。なお計算には $\nu = 1.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ (水温 20°C) および $s = 2.65$ を用いた。

D , w (底質の沈降速度), ρ_s (底質の密度), ρ および g を用いて式(7)を正規化すると

$$\frac{\bar{Q}}{wD} \sim \frac{f_w \rho u_s^2/2}{(\rho_s - \rho)gD} \cdot \frac{u_0 - u_s}{w} \quad \dots (14)$$

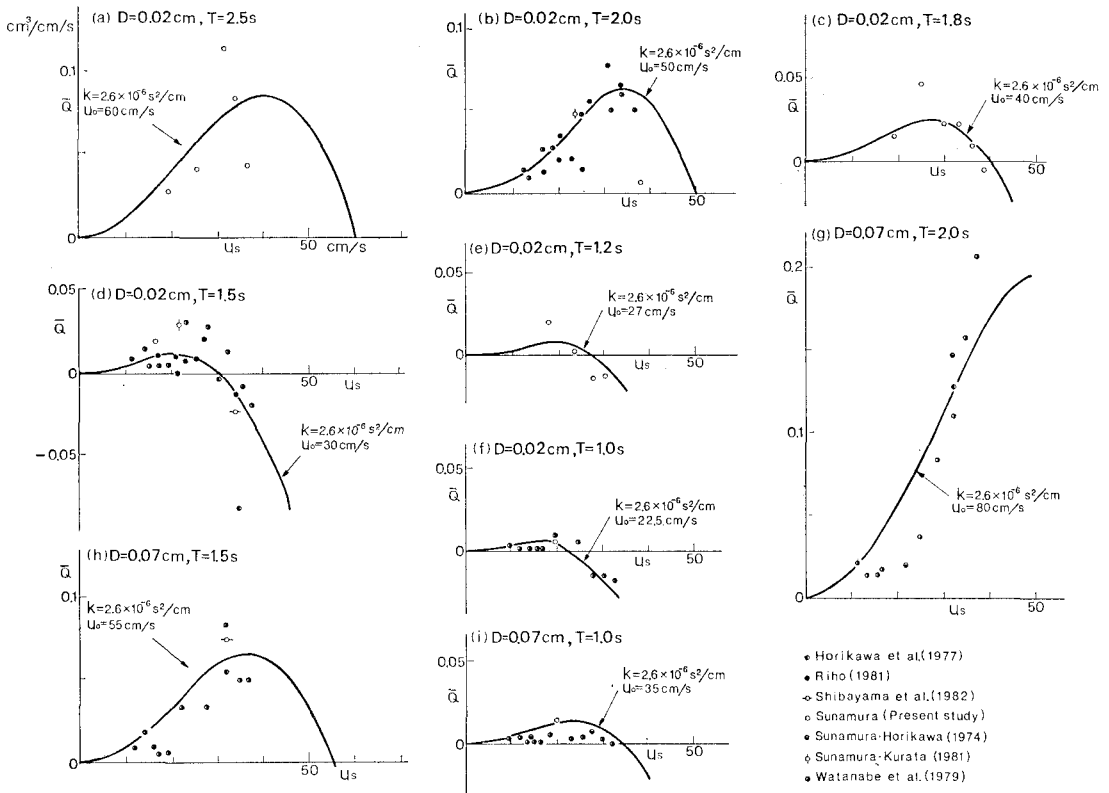
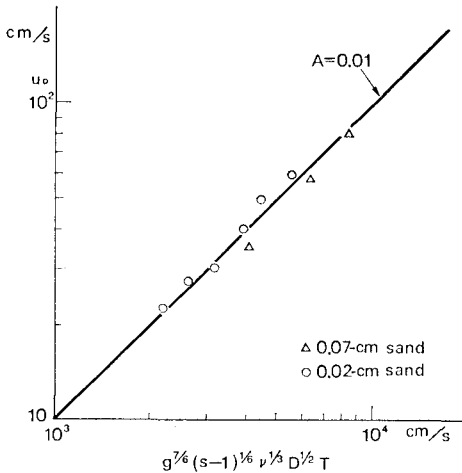
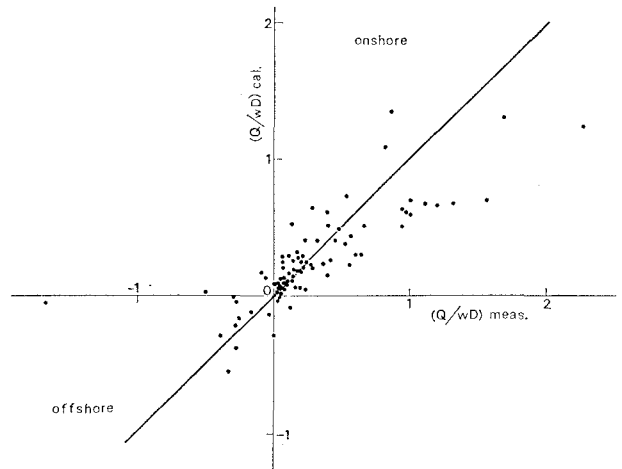
図-4 静水時汀線における net の漂砂量 ($\bar{Q}$) と底面流速 (u_s) との関係図-5 u_0 と $g^{1/6}(s-1)^{1/6} \nu^{1/3} D^{1/2} T$ との関係

図-6 実測値と式 (18) による計算値との相関

ここで $f_w = \text{const.}$, $\rho_s = \text{const.}$ とすると

$$\frac{\bar{Q}}{wD} = K \frac{u_s^2(u_0 - u_s)}{g w D} \quad (15)$$

ここに $K = f_w / [2[(\rho_s/\rho) - 1]] = \text{const.}$ である。 K と k との関係は式 (8) と (15) から

$$k = K/g \quad (16)$$

であるので、式 (10) と (16) より K の値は

$$K = 2.55 \times 10^{-3} \quad (17)$$

となる。したがって無次元漂砂量は式 (12) と (15) から次式で与えられる。

$$\frac{\bar{Q}}{wD} = K \frac{u_s^2 [A g^{1/6} (s-1)^{1/6} \nu^{1/3} D^{1/2} T - u_s]}{g w D} \quad (18)$$

ここに $A = 1.0 \times 10^{-2}$, $K = 2.55 \times 10^{-3}$ である。

式 (18) の適合性を確認するため、この式による計算値と実測値とをプロットしたものが図-6 である (w の値は水温 20°C におけるものを用いた)。かなりデータのバラツキがあるが、全体的には両者の間により相関があると言える。

5. 現地への適用性

式 (18) を現地に適用する場合には、 u_s の値を知らねばならない。そのためには h_s を推定するか、実測するしかない。式 (2) を用いて h_s を推定するにしても、複雑な地形を呈する現地の砕波帯でこの式が成立するという保証はない。また h_s の実測には多くの困難を伴う。そこで次式を仮定し式 (18) から h_s を消去することにする。

$$H_s/h_s=0.78 \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式と式 (3) を式 (18) へ代入すると

$$\frac{\bar{Q}}{wD}=K \frac{0.78H_s[Ag^{1/6}(s-1)^{1/6}\nu^{-1/3}D^{1/2}T-(0.78gH_s)^{1/2}/2]}{4wD} \quad \dots\dots\dots (20)$$

が得られる。上式中の [] 内の正負によって net の漂砂の方向が変化する。その限界は $\bar{Q}=0$ とおいて

$$\frac{H_s}{gT^2}=\frac{4A^2}{0.78}\left[\frac{g(s-1)}{\nu^2}\right]^{1/3}D \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。この式は、漂砂の方向が波高 H_s 、周期 T と無次元底質粒径 $[g(s-1)/\nu^2]^{1/3}D$ の関数で与えられることを示している。なお、この無次元粒径は Ackers・White¹⁴⁾ が用いたものと同じである。

現在のところ、 H_s と $\bar{Q}$ の現地データがほとんど無いので、鹿島¹⁵⁾による大型造波水路実験の結果 (表-2) を用いて式 (20) の現地への適用性について検討する。

表-2 よりわかるように、CASE 1-8 では静水時汀線上での net の漂砂量がゼロである ($\bar{Q}=0$)。まず、このケースのデータを用いて式 (21) から A を求めてみると

$$A=6.1\times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる ($s=2.65$ および $\nu=1.01\times 10^{-2}\text{ cm}^2/\text{s}$ を用いた)。次に 表-2 中の他のケースのデータを用いて式 (20) の左辺と K を除いた右辺を計算 ($w=8\text{ cm/s}$ とした) した結果をプロットしたものが図-7 である。デー

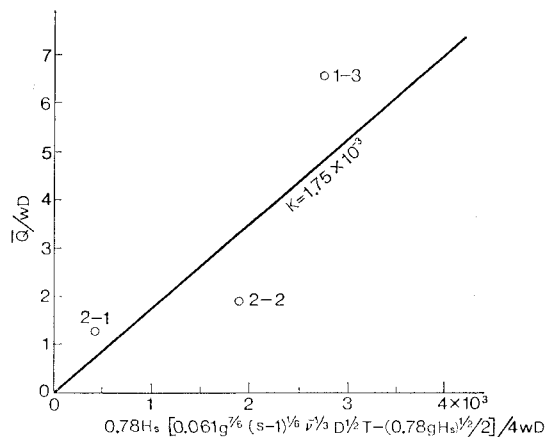


図-7 大型水路実験のデータ (表-2) を用いた式 (20) の検討結果

タ数が少なく、データ・ポイントにかなりのバラツキも見られるが、図中の直線が示すような右上りの傾向がある。このことは、式 (20) が現地に適用可能なことを暗示している。図中の直線から K の値を求めると

$$K=1.75\times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。

6. おわりに

二次元水路実験のデータにもとづき swash zone における岸沖漂砂量の算定式 [式 (18)] を求めた。静水時汀線上での底面流速、波の周期、底質粒径が与えられれば、net の漂砂量のみならず漂砂の方向も同時に計算することができる。ただし、ここで用いた漂砂量のデータは 1 時間平均のものであるため、秒～分の時間間隔でこの式を用いる時には定数 A および K の値を変えねばならないであろう。この点は今後の課題である。

一方、大型水路実験データを用いて検討した結果、式 (20) を現地に適用できる可能性が強いことがわかった。現地では波高 H_s の測定場所を厳密に決定することは困難であるが、ほぼ swash zone の沖側端と考えてよいであろう。 A および K の値については広範な現地データを用いて今後再検討する必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (自然災害特別研究、研究代表者: 尾崎 晃北大教授) ならびに財団法人鹿島学術振興財団研究助成金 (研究代表者: 西村仁嗣筑波大助教授) を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 小川由信・首藤伸夫: 波打帯での水理特性および砂移動の現地観測, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 212~216, 1981.
- 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三: 大型造波水

表-2 大型水路実験の結果

CASE	H_s^* (cm)	T (s)	D (cm)	$\bar{Q}^{**}$ (cm ³ /cm/s)
1-3	45	9	0.047	2.50
1-8	20	3	0.047	0
2-1	7	6	0.047	0.50
2-2	25	9	0.047	0.70

注: * 文献 15) 図-11 より, ** 実験開始後 3~4 時間の平均値 [文献 16) 図-1.3.9 より].

- 路による岸沖漂砂の実験的研究 (2), 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232, 1982.
- 3) 前出 2).
 - 4) 佐々木幹夫・佐伯 浩: 碎波後の波の変形に関する研究 (2), 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 39~44, 1974.
 - 5) 水口 優・辻岡和男・堀川清司: 碎波後の波高変化についての一考察, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 155~159, 1978.
 - 6) 前出 4).
 - 7) 堀川清司・砂村継夫・柴山知也: 二次元海浜変形に関する実験的研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 170~174, 1977.
 - 8) 利穂吉彦: 二次元海浜変形と岸沖漂砂に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士論文, 94 p., 1981.
 - 9) 柴山知也・堀川清司・矢吹信喜・半田真一: 二次元海浜変形予測手法の実験による検討, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 249~253, 1982.
 - 10) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 920~938, 1974.
 - 11) 砂村継夫・倉田雄司: 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 222~226, 1981.
 - 12) 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.
 - 13) 前出 10).
 - 14) Ackers, P. and W. R. White: Sediment transport, new approach and analysis, Jour. Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041~2061, 1973.
 - 15) 前出 2).
 - 16) 電気事業連合会海岸水理研究委員会: 海岸水理に関する研究報告 (第四次中間報告), 217 p., 1982.
-