

沿岸漂砂量の新算定法について

京都大学教授 防災研究所 工学博士 岩 垣 雄 一
京都大学助教授 防 災 研 究 所 榎 木 亨

1. 緒 言

沿岸漂砂量の推定は海岸防禦や港湾埋没の調査研究において、欠くことのできない基本的調査事項の一つであつて、古くからその算定方法を確立しようとする努力が払われてきた。しかしながら、漂砂現象が複雑であることと観測が困難であることのために、まだ十分な算定法が確立されていないのが現状である。

沿岸漂砂量は沿岸流によつて支配され、また沿岸流は波が海岸に斜めに砕波することに基因するのであるから、波の特性と沿岸流との関係、さらに沿岸流と沿岸漂砂量との関係を明らかにすれば、波と沿岸漂砂量を結び付けることができるはずである。従来は、沿岸流を発生させる波のエネルギーと漂砂量との関係を多くの資料から見出して経験式を導き、それによつて長期間の漂砂量を推定する方法がとられてきた。Munch-Petersen¹⁾の公式や Beach Erosion Board が提案した経験式²⁾などがそれにあたる。著者の一人もこの方法を踏襲し、実験水槽によつて漂砂量を測定するとともに、宮津及び明石海岸における観測値をも加え、波形勾配をパラメーターとした漂砂量と波のエネルギーとの関係を明らかにしたり。そして、この結果を明石海峡北岸の西垂水海岸における年間漂砂量の推定に応用したり³⁾。しかしながら、このような沿岸漂砂量の関係式は、底質粒径の効果が含まれていないため、一般的な関係をあらわしているものとはいえないし、また同じ海岸でも漂砂量に及ぼす粒径の効果は、波のエネルギーの大小によつて異なるであろうから、小さい波のときの実測結果を、そのまま大きいエネルギーをもつ波の場合の漂砂量算定に用いることには疑問がある。著者らはたまたま、明石海峡北岸に構築された新しい海岸構造物に堆積した砂の量を測定する機会を得たが、この堆砂量が上述の経験式から得られる値と非常に異なっていることから、漂砂量を単に波のエネルギーのみによつて関係づけようとする従来の方法を改め、底質粒径をも考慮した新しい漂砂量の表示法を考究する必要にせまられた。

本論文ではこのような理由から、漂砂をもたらし沿岸流と結び付け、これに沿岸流速公式を導入して、漂砂量と波の特性との新しい関係式を提案するとともに、この漂砂量公式にもとづいて、漂砂量に及ぼす波の諸特性の影響を考察し、さらにあらためて明石海峡北岸の漂砂量を算定しなおして、さきに発表した西垂水海岸における推定年間漂砂量³⁾を訂正する。

2. 沿岸漂砂量の算定方法

いま漂砂の移動帯の中を l とし、その l の中を単位時間に移動する全漂砂量を Q_s とすれば、汀線に平行に単位巾あたり単位時間に移動する平均の漂砂量 $\bar{q}_s$ は

$$\bar{q}_s = Q_s / l \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。沿岸流にともなう海底の摩擦速度が沿岸流速に比例するものとし、平均の漂砂量 $\bar{q}_s$ に対応して平均の沿岸流速 V を用いることにすれば、両者の関係を開水路における Kalinske-Brown 型の流砂量公式⁴⁾に適用して、つぎのような関係式が仮定される。

$$\frac{\bar{q}_s}{Vd} = \Lambda_1 \left[\frac{V^2}{\{(\sigma/\rho) - 1\}gd} \right]^m \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Λ_1 及び m は常数、 d は底質の平均粒径、 σ 及び ρ はそれぞれ底質及び海水の密度、 g は重力加速度である。(2) 式を仮定した根拠は、著者の一人が行なつた漂砂の実験の結果⁵⁾が、平均値でなく局所的な漂砂量とやはり局所的な沿岸流速とを用いた (2) 式の関係式を満足するからであつて、これについては別の機会に発表するつもりである。

さて、(2) 式における平均沿岸流速 V は、Putnam-Munk-Traylor⁶⁾のエネルギー理論から、

$$V = k_1 \{ (giH_b^2/T) \sin 2\alpha_b \}^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

であらわされる。ここに、 k_1 は常数、 i は砕波点から汀線までの平均海底勾配、 H_b は砕波高、 T は波の周期、

α_b は碎波点における波の峯線と汀線のなす角である。また、(1)式における漂砂帯の巾 l は、沖波の波長 L_0 と $\cos \alpha_b$ の積で割った無次元量が相当沖波波形勾配 H_0'/L_0 に比例することを実験によつて明らかにした⁹⁾。すなわち、

$$l/L_0 \cos \alpha_b = k_2 H_0'/L_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 k_2 は比例常数である。(1)、(3) 及び (4) 式を用いて (2) 式を変形し、さらに碎波高 H_b が相当沖波波高 H_0' にほぼ等しいという関係を用いると、つぎの式が得られる。

$$\frac{Q_s}{\psi} = \Lambda_2 \left(\frac{k_3 E_t i^{2/3}}{\varphi} \right)^m \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

$$\Lambda = g^{1/2} (H_0'/L_0)^{1/6} H_0'^{3/2} i^{1/3} d (\sin 2\alpha_b)^{1/3} \cos \alpha_b \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\varphi = (\sigma - \rho) g^{3/2} d H_0'^{1/2} L_b (H_0/L_0)^{1/6} (\sin 2\alpha_b)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$E_t = (1/16) \rho g (L_b H_b^2 / T) \sin 2\alpha_b \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\Lambda_2 = \Lambda_1 k_1 k_2 (2\pi)^{-1/6} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$k_3 = 16(2\pi)^{1/6} k_1^2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

で、 Λ_2 及び k_3 はいずれも常数である。また (8) 式の E_t は沿岸方向に単位巾当り、単位時間に運ばれる碎波のエネルギーをあらわす。著者の一人が行なつた実験結果と宮津及び明石海峡北岸における実測資料を用いて、(5) 式で示される無次元量 Q_s/ψ と $E_t i^{2/3}/\varphi$ との関係を図-1 に示すような結果がえられる。この図から、ある程度の散乱がみられるが、底質粒径の異なつた実験及び実測のそれぞれの結果は、ほぼ

$$\frac{Q_s}{\psi} = 31.7 \left(\frac{E_t i^{2/3}}{\varphi} \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

であらわされる直線上にのつてることがわかる。

なお、(11) 式であらわされる漂砂量の関係式が実際の海岸に適用できるかどうかを調べるため、明石海峡北岸に新らしく設けられた海岸構造物に堆積した砂の量の実測結果と、設置後の漂砂堆積期間中における風の資料から追算した波を用いて、(11) 式より求められる推定漂砂量とを比較したところ、表-1 に示す値がえられた。ただし、この場合波の追算に用いた風の記録としては、神戸海洋気象台の陸上における記録をそのまま採用せず、その値を補正し海上の風に換算して用いた。両者の風速の関係については R. W. Schloemer⁹⁾の研究があり、平均的に陸上の風は、もし陸に向つて吹くとき海上の風速の 79%，一方海に向つて吹くとき海上の風速の 60% の風速をもつことが明らかにされている。また京都大学気象学研究室で行なつた明石海峡における実測の結果では、海上の風速と陸上の風速の比が 4/3 という値となつており、著者らもこの値を採用して神戸海洋気象台における値を補正して用いた。

表-1 からわかるように、(11) 式を用いた推定値は実測値とほぼ一致しており、さらに実測した測線以外にも若干の堆積事実が認められるので、このことを考慮すれば、この推定値は実際の漂砂堆積量と非常によく一致しているものと断定してよいであろう。

3. 沿岸漂砂量に及ぼす諸要素の影響

沿岸漂砂量に及ぼす沖波波形勾配の影響については、著者の一人がすでに波のエネルギーと漂砂量との関係を用いて考察を進めたりが、ここでは前節で明らかにした漂砂量算定公式 (11) 式にもとづいて、諸要素の影響を調べ検討することにする。

(1) 沖波の入射角 α_0 の影響

図-1 無次元漂砂量 Q_s/ψ と $E_t i^{2/3}/\varphi$ との関係

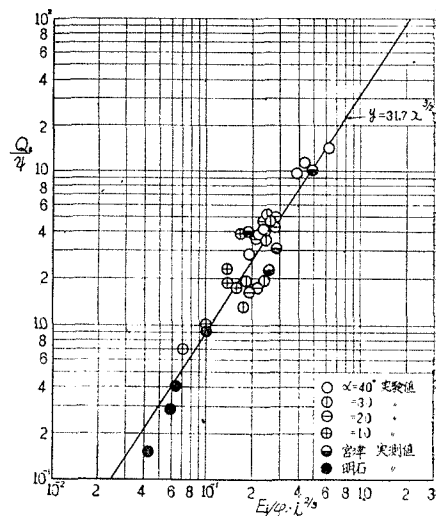


表-1 明石海峡北岸における漂砂量の実測値と推定値

漂砂方向	西から東方向へ (m^3)	東から西方向へ (m^3)	差 (m^3)
推定値	2,830	713	2,117
実測値	—	—	1,882

(11)式であらわされる漂砂量公式をかきかえると, $H_b \approx H_0'$ を考慮して

$$Q_s = 31.7 \times \left(\frac{1}{16}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{-3/2} \cdot g^{-1/4} \cdot H_0'^{15/4} \cdot T^{-3/2} \cdot i^{4/3} \cdot d^{-1/2} \cdot \left(\frac{H_0'}{L_0}\right)^{-1/12} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cos \alpha_b \quad (12)$$

となり, さらに $T = (2\pi L_0/g)^{1/2}$ 及び $H_0' = K_b H_0$ の関係を用いると, (12)式は

$$Q_s = k_4 H_0^3 \cdot i^{4/3} \cdot d^{-1/2} \cdot K_b^{11/3} \cdot (H_0/L_0)^{-2/3} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cos \alpha_b \quad (13)$$

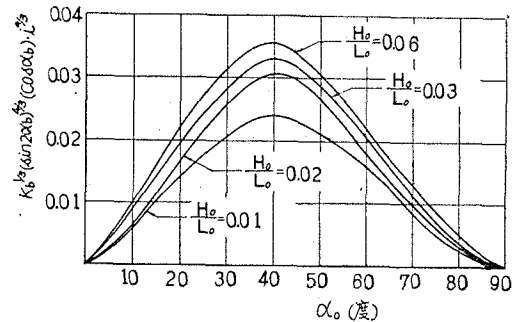
ここに

$$k_4 = 31.7 \left(\frac{1}{16}\right)^{3/2} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{-3/2} g^{1/2} (2\pi)^{-3/4} \quad (14)$$

で, K_b は砕波点における屈折係数である。

いま, 沖波波高 H_0 及び沖波波長 L_0 と底質粒径 d を一定とすれば, (13)式から漂砂量 Q_s は $\{i^{4/3} K_b^{11/3} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cos \alpha_b\}$ に比例する。屈折係数 K_b 及び砕波角 α_b は, Snell の法則から等深線が汀線に平行な海岸の場合には H_0/L_0 と沖波の入射角 α_0 の関数であり, i は平衡勾配の場合を考えれば H_0'/L_0 によって定まる⁹⁾ので, H_0/L_0 を与えれば $\{i^{4/3} K_b^{11/3} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cos \alpha_b\}$ と α_0 との関係を計算して求めることができる。図-2 は H_0/L_0 をパラメーターとして両者の関係を示したもので, この図から波形勾配に無関係に α_0 が 40° のとき沿岸漂砂量が最大となることがわかる。この結果は Shay-Johnson¹⁰⁾ の実験結果とよく一致し, (11)式の漂砂量公式と波の屈折理論から, 沿岸漂砂量に及ぼす沖波の入射角の影響をうまく説明することができる。

図-2 等深線が汀線に平行な海岸に対する $\{i^{4/3} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} k_b^{11/3} \cos \alpha_b\}$ と α_0 の関係



(2) 沖波の波高及び周期の影響

(13)式はつぎのように変形できる。

$$\frac{Q_s}{k_4 H_0^3 d^{-1/2}} = i^{4/3} K_b^{11/3} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{2/3} (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cos \alpha_b \quad (15)$$

この式で, i は H_0'/L_0 の関数であり, α_b 及び K_b は等深線が汀線に平行な海岸では H_0/L_0 と α_0 の関数であらわされるから, α_0 をきめると $Q_s/k_4 H_0^3 d^{-1/2}$ と H_0/L_0 の関係を求めることができる。図-3 は α_0 をパラメーターとした両者の関係を示したものである。いま

$$\frac{Q_s}{k_4 H_0^3 d^{-1/2}} = \beta \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^\gamma \quad (16)$$

とおけるものとすれば, Q_s は $H_0^{3+\gamma}$ に比例することになり, また L_0 が T^2 に比例することから, Q_s は $T^{-2\gamma}$ に比例することになる。図

図-3 等深線が汀線に平行な海岸に対する α_0 をパラメーターとした $(Q_s/k_4 H_0^3 d^{-1/2})$ と H_0/L_0 の関係

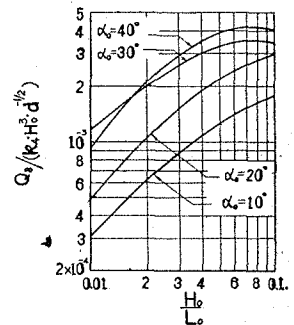


表-2 H_0 の巾数 $3+\gamma$ 及び T の巾数 -2γ の値

α_0	$H_0/L_0 = 0.01$		$H_0/L_0 = 0.03$		$H_0/L_0 = 0.08$	
	$3+\gamma$	-2γ	$3+\gamma$	-2γ	$3+\gamma$	-2γ
10°	4.0	-2.0	3.8	-1.6	3.5	-0.9
20°	4.1	-2.3	3.8	-1.7	3.4	-0.8
30°	3.8	-1.6	3.6	-1.2	3.0	0
40°	4.3	-2.6	3.7	-1.4	3.0	0

一3 から大よその γ の値を求め, H_0 の巾数 $3+\gamma$ 及び T の巾数 -2γ を表にすると, 表-2 に示すような値が得られる。この表から, Q_s は H_0/L_0 の値が 0.01 程度のとき, α_0 の大きいときを除いて H_0^4 にほぼ比例し, T^2 に逆比例すること, また H_0/L_0 の値が 0.08 程度の大きい波形勾配のときには, α_0 の小さいときを除いてほぼ H_0^3 に比例し, T はあまり影響しなくなることがわかる。

(3) 波形勾配の影響

(1) 及び (2) においては、沖波の波形勾配が一定であるとして各要素の影響を調べてきたが、ここでは沿岸方向に運ばれる碎波のエネルギー E_i を一定として、波形勾配が漂砂量に及ぼす影響を新しい公式にもとづいて考察してみよう。

(13), (14) 及び (8) 式から漂砂量 Q_s は $H_b \approx H_0' = K_b H_0$ 及び $T = (2\pi L_0/g)^{1/2}$ の関係を用いて、つぎのようにかきかえられる。

$$Q_s = k_5 E_i^{4/3} \cdot i^{4/3} \cdot d^{-1/2} \cdot K_b \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{4/3} \cdot \left(\frac{L_0}{L_b}\right)^{4/3} \cdot H_0^{-1/3} \cdot \cos \alpha_b \quad (17)$$

ここに、

$$k_5 = 31.7 \times (2\pi)^{-1/12} \times (16)^{-1/6} g^{-3/2} \rho^{-4/3} \{(\sigma/\rho) - 1\}^{-3/2} \quad (18)$$

一方、 E_i が一定という条件

$$E_i = \frac{1}{16} \rho g \left(\frac{g}{2\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/2} \left(\frac{L_b}{L_0}\right) H_0^{5/2} K_b^2 \sin 2\alpha_b = \text{const} \quad (19)$$

から、 ρ を一定とすれば

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/2} \left(\frac{L_b}{L_0}\right) H_0^{5/2} K_b^2 \sin 2\alpha_b = k_6 = \text{const} \quad (20)$$

とすることができる。(20)式を用いて (17) 式の $H_0^{-1/3}$ を消去すれば、次式がえられる。

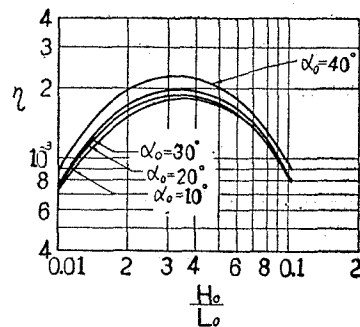
$$Q_s = k_5 k_6^{-2/15} E_i^{4/3} d^{-1/2} \eta \quad (21)$$

ここに、

$$\eta = i^{4/3} K_b^{19/15} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{19/15} \left(\frac{L_0}{L_b}\right)^{6/5} (\sin 2\alpha_b)^{2/15} \cos \alpha_b \quad (22)$$

いま E_i のほか d も一定とすれば、 Q_s は η に比例することになるから、 Q_s のかわりに η に及ぼす H_0/L_0 の影響を調べればよいことになる。等深線が汀線に平行な海岸では、 K_b 及び α_b は前述したように H_0/L_0 及び α_0 の関数であり、 i 及び L_0/L_b H_0'/L_0 すなわち $K_b H_0/L_0$ の関数であるから、 η は H_0/L_0 及び α_0 の関数となる。図-4 は α_0 をパラメーターとして η と H_0/L_0 の関係を示したもので、この図から H_0/L_0 の値が 0.03 付近で η が最大となることがわかる。すなわち、 E_i が一定の場合には、沖波の入射角 α_0 に関係なく、 $H_0/L_0 \approx 0.03$ で漂砂量が最大となることが理解される。

図-4 等深線が汀線に平行な海岸における η と α_0 及び H_0/L_0 の関係



(4) 海浜勾配

海浜勾配の影響は、(13)式から Q_s が $i^{4/3}$ に比例することが示されているが、 i は平衡勾配を考慮する場合 H_0'/L_0 によつて定められるから、したがつて Q_s に及ぼす i の影響は、沖波波形勾配及び沖波の入射角の影響に包含されてしまうことになる。

(5) 底質粒径の影響

以上の議論はすべて底質粒径が一定とした場合のものであつたが、(13)式からわかるように Q_s は $d^{1/2}$ に逆比例することが理解される。

4. 明石海峡北岸の漂砂量の推定

ここでは以上に提案した新しい漂砂量公式を用いて、海岸浸食の推定を行なうため、実際海岸として明石海峡北岸をとりあげ、北岸沿岸の5地点における沿岸漂砂量を推定し、従来調査してきた結果と比較検討することにする。なお、ここで取り扱う明石海峡北岸とは西須磨から明石までをさすものである。

(1) 明石海峡北岸の海岸地形および底質

(13)式による漂砂量の算定において、海浜勾配及び底質粒径の値を明確にする必要があるが、実際の海岸断面において海浜勾配は一様な勾配を示さず、どのような海浜勾配をとるべきかは十分に考慮しなければならない。著者らは、この勾配の値として実測海浜断面から漂砂有効移動帯における平均勾配をとつて、その値を計算に適用することとした。

また実測した底質の粒径も水深の変化にともなつて変化しているので、一断面を代表する粒径を一つの粒径で表

わすのは非常に困難であつて、実際の漂砂量算定にあたつて迷うことが多いが、著者らは沿岸漂砂の最も多い領域である汀線付近の粒径をもつて代表させた。明石海岸の各地点の平均海浜勾配、および代表粒径は表一3に示すような値をもっている。

(2) 明石海峡北岸における波の屈

折および回折について

海岸に來襲してくる波の特性のうち沖波の特性は、Sverdrup-Munk-Bretschneider の Fetch グラフ¹¹⁾を用いて容易に求められる。

表一4はこの各地点に來襲してくる沖波の波高、周期及び風速の算定結果である。

表一3 明石海峡北岸における海浜勾配及び底質粒径の値

地 点	西須磨	塩 屋	垂 水	西舞子	明 石
海 浜 勾 配	0.10	0.12	0.12	0.10	0.09
底質粒径(mm)	1.23	3.22	3.89	4.68	11.40

表一4 明石海峡北岸の沖波の波高周期及び風速の値

風 向		E				ESE				SE			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
風 速 (m/s)	A	5.0	8.4	13.5	—	4.8	7.5	11.8	17.5	4.8	8.0	12.0	17.5
	B	4.5	7.5	11.5	16.5	4.5	7.6	11.8	16.0	4.5	7.8	12.0	17.0
	C	4.5	7.3	11.5	16.5	4.5	7.5	11.5	16.0	4.5	7.3	11.8	17.0
	D	—	—	—	—	—	—	—	—	4.5	7.3	11.5	16.0
	E	—	—	—	—	4.2	7.5	10.9	15.0	4.2	7.5	10.9	15.0
波 高 (m)	A	0.51	1.00	1.7	—	0.51	0.95	1.60	2.30	0.51	1.00	1.60	2.32
	B	0.50	0.98	1.7	2.35	0.5	1.0	1.70	2.40	0.51	1.00	1.70	2.40
	C	0.50	0.98	1.7	2.35	0.50	0.98	1.70	2.40	0.50	0.96	1.70	2.40
	D	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	0.96	1.60	2.30
	E	—	—	—	—	0.43	0.96	1.60	2.15	0.43	0.96	1.60	2.15

風 向		SSE				S				SSW			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
風 速 (m/s)	A	4.7	7.5	11.3	17.0	4.5	7.5	11.3	16.5	4.0	7.0	10.8	14.5
	B	4.5	7.5	11.5	16.5	4.5	7.5	11.5	16.5	4.2	7.2	11.0	16.0
	C	4.5	7.3	11.5	16.5	4.5	7.3	11.5	16.5	4.5	7.5	11.5	16.5
	D	4.5	7.5	11.5	16.0	4.5	7.5	12.5	16.5	4.5	8.0	12.5	18.0
	E	4.8	8.0	12.5	18.0	4.5	7.5	11.5	16.5	8.0	14.0	—	—
波 高 (m)	A	0.5	0.95	1.60	2.30	0.50	0.95	1.60	2.35	0.42	0.93	1.50	2.10
	B	0.50	0.98	1.70	2.35	0.45	0.98	1.70	2.35	0.43	0.95	1.60	2.40
	C	0.50	0.98	1.70	2.35	0.50	0.98	1.70	2.35	0.50	0.98	1.70	2.35
	D	0.50	0.96	1.60	2.30	0.50	0.96	1.70	2.35	0.50	1.00	1.70	2.50
	E	0.50	1.00	1.70	2.4	0.50	0.96	1.60	2.35	0.60	1.05	—	—

風 向		SW				WSW				W			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
風 速 (m/s)	A	6.4	11.0	18.0	—	3.5	5.8	8.3	10.5	3.0	5.6	8.0	11.0
	B	9.0	17.5	—	—	3.5	5.8	8.3	10.5	3.0	5.6	8.0	11.0
	C	13.0	—	—	—	3.5	5.8	8.3	10.5	3.0	5.8	8.0	11.0
	D	13.0	—	—	—	3.0	5.6	8.0	11.0	3.0	5.6	8.0	11.0
	E	—	6.0	8.5	12.0	3.0	5.6	8.0	11.0	3.0	5.6	8.0	11.2
波 高 (m)	A	0.58	1.10	1.70	—	0.35	0.83	1.40	1.95	0.30	0.80	1.40	2.15
	B	0.58	1.20	—	—	0.35	0.83	1.40	1.95	0.30	0.80	1.40	2.15
	C	0.62	—	—	—	0.35	0.83	1.40	1.95	0.30	0.83	1.40	2.15
	D	0.62	—	—	—	0.30	0.80	1.40	2.15	0.30	0.80	1.40	2.15
	E	—	0.85	1.35	2.20	0.30	0.80	1.30	2.15	0.30	0.80	1.30	2.00

A：西須磨，B：塩屋，C：垂水，D：西舞子，E：明石の各地点を示す。

表一4に示した沖波は海岸へ到達するまでに屈折を生じ、また淡路島によつて回折して砕波点にきたときの波は、沖波が直進して海岸に到達する場合の波高と非常にことなっている。これらの屈折係数、回折係数は各地点、各方向、各波の周期によつてことなるが、著者らは表一4に示した沿岸5地点の砕波点における屈折係数 K_b および

砕波角 α_b を求めるため、波向線法を用いて各地点での屈折図 (縮尺 1/7500) をえがいた。しかしながら図から直接この K_b 及び α_b を求めるには図が小さく精度の上から疑問があるので、まず周期 3sec 及び 4sec の波は等深線 2.5m, 周期 5sec, 6sec 及び 7sec の波は等深線 5m における入射角及び屈折係数を求め、その水深より浅い領域ではほぼ汀線と平行な等深線をもつ海岸と考え、Breaker Index と Snell の法則を用いて算定した α_0 , α_b , K_b 及び H_0/L_0 の関係を屈折図と併用して、所要の α_b 及び K_b をえるように努めた。

すなわち、 $h=2.5$ m あるいは 5m における入射角 α と屈折係数 K を屈折図より求め、つぎに $h=2.5$ m あるいは 5m より深い水深における等深線が汀線と平行な場合の α に対する沖波の入射角 α_0^* を、図-5 を用いて逆算し、この α_0^* と H_0/L_0 とを用いて、汀線と平行な等深線をもつ場合の砕波角 α_b および $H_b/H_0 \approx K_b$ を求めるグラフ¹²⁾ から所要の α_b と K_b をえることができる。(註)

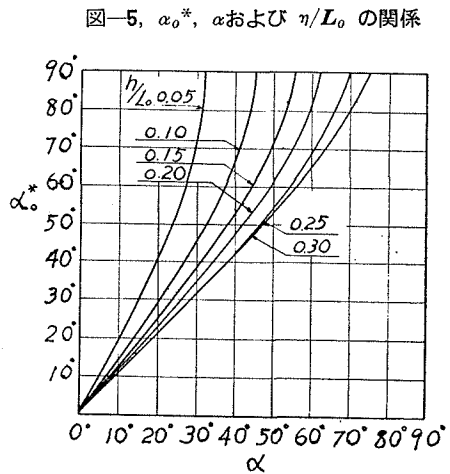
表-5 はこのようにして算定した屈折係数と砕波角の値であつて、表中* 印は淡路島による回折の影響をも考慮した値である。

表-5 明石海峡北岸沿岸の屈折係数および砕波角

方 向		E				ESE				SE			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
屈折係数	A	0.435	0.466	0.455	—	0.895	0.900	0.900	0.920	0.935	0.940	0.940	0.930
	B	0.830	0.720	0.700	0.680	0.830	0.890	0.820	0.720	0.910	0.900	0.920	0.930
	C	0.520	0.600	0.675	0.670	0.890	0.800	0.850	0.760	0.960	0.955	0.975	0.950
	D	—	—	—	—	—	—	—	—	0.480	0.500	0.510	0.755
	E	—	—	—	—	0.760	0.785	0.805	0.840	0.815	0.830	0.850	0.880
砕波角	A	17°30'	18°00'	17°36'	—	17°00'	20°00'	22°42'	18°24'	12°48'	13°00'	16°18'	16°12'
	B	16°00'	21°36'	21°40'	21°24'	21°00'	20°48'	25°20'	24°48'	11°30'	13°00'	19°00'	18°30'
	C	23°30'	26°00'	30°00'	30°00'	18°30'	21°30'	24°30'	23°30'	13°00'	15°00'	14°48'	17°24'
	D	—	—	—	—	—	—	—	—	21°15'	21°00'	20°00'	18°24'
	E	—	—	—	—	31°30'	27°00'	28°00'	29°00'	20°48'	22°24'	25°13'	21°12'
方 向		SSE				S				SSW			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
屈折係数	A	0.970	0.970	0.970	0.980	0.990	0.980	0.980	0.980	0.975	0.970	0.975	0.920
	B	0.990	0.990	0.980	0.960	0.960	0.970	0.970	0.980	0.950	0.898	0.910	0.835
	C	0.990	0.990	0.995	0.990	0.980	0.980	0.940	0.930	0.890	0.880	0.850	0.890
	D	0.675	0.700	0.730	0.760	0.950*	1.050*	1.11 *	1.020*	0.071*	0.071*	0.071*	0.074*
	E	0.095*	0.113*	0.140*	0.165*	0.048*	0.047*	0.046*	0.045*	0.900	0.970	0.960	0.950
砕波角	A	9°12'	6°00'	5°12'	7°00'	2°48'	5°00'	7°24'	7°36'	10°00'	15°00'	18°48'	17°36'
	B	1°30'	1°30'	3°36'	8°30'	8°00'	6°30'	9°00'	11°12'	14°00'	17°48'	18°36'	22°24'
	C	1°00'	1°00'	3°24'	5°30'	8°12'	8°30'	11°48'	18°24'	19°12'	20°12'	24°00'	20°30'
	D	25°00'	23°30'	23°15'	22°00'	19°30'	17°30'	18°00'	17°10'	8°30'	8°00'	8°00'	7°30'
	E	6°30'	7°00'	8°30'	9°24'	6°12'	6°00'	6°12'	6°30'	18°00'	18°00'	17°30'	17°00'
方 向		SW				WSW				W			
周 期 (sec)		3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
屈折係数	A	0.680	0.700	0.730	0.730	0.046*	0.041*	0.047*	0.038*	0.266	0.252	0.242	0.275
	B	0.520	0.820	0.810	0.800	0.039*	0.036*	0.034*	0.035*	0.300	0.313	0.356	0.356
	C	0.760	0.760	0.750	0.740	0.031*	0.045*	0.070*	0.091*	0.250	0.350	0.435	0.500
	D	0.995	0.995	0.995	0.995	0.960	0.970	0.960	0.980	0.960	0.980	0.960	0.945
	E	0.920	0.915	0.890	0.930	0.810	0.815	0.760	0.860	0.520	0.545	0.530	0.480
砕波角	A	21°00'	23°00'	24°48'	24°48'	22°30'	23°30'	23°45'	24°00'	22°30'	23°00'	24°00'	25°00'
	B	23°30'	26°00'	26°00'	25°00'	22°30'	25°00'	27°30'	26°48'	25°00'	25°00'	25°15'	20°00'
	C	26°00'	26°00'	26°00'	26°12'	23°30'	25°00'	26°00'	27°00'	28°30'	29°18'	31°30'	26°24'
	D	0°45'	0°30'	0°00'	0°15'	10°36'	11°00'	10°00'	8°18'	17°00'	16°00'	17°00'	12°30'
	E	16°12'	16°18'	19°48'	15°00'	18°24'	18°30'	22°30'	19°24'	26°00'	27°00'	25°00'	26°30'

A: 西須磨, B: 塩屋, C: 垂水, D: 西舞子, E: 明石の各地点を示す。

註) 回折現象を含む場合は上記の特定水深における $K \cdot K'$ (K' は回折係数) を用いて相当沖波波形勾配 $H_0'/L_0 = K' \cdot K(H_0/L_0)$ を求め、この H_0'/L_0 と α_0^* を用いて Snell の法則と Breaker Index から求められる H_0'/L_0 , α_0 , α_b 及び K_b のグラフから所要の α_b , K_b をえる。



(3) 明石海峡の風

明石海峡の各風向別の風速頻度については、著者らは昭和30年1月～12月の1年間の記録を整理し、すでに発表した¹⁾、その後の記録を整理し、昭和30年1月～昭和34年12月までの5年間の風速頻度を示したのが図-6である。この結果からみると、5年間を通じて海風のうち風速の大きい風の方向は W、WSW の2方向であることがわかるであろう。なお表-6は神戸海洋気象台における昭和34年1月から12月までの1年間の風向別の記録を示したものである。

表-6 風向別の風速頻度 (昭和34.1～昭和34.12)。

風速(m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
風向															
W	69	90	156	156	138	102	75	36	21	21	21	3	0	0	3
WSW	30	66	72	87	102	96	72	57	33	21	9	18	9		
SW	21	39	45	57	66	63	42	21	12	9	3				
SSW	24	48	63	45	48	12	3	3							
S	18	57	57	24	24	6	3	0	0	0	3				
SSE	15	51	36	21	3	0	9	0	0	0	3				
SE	27	75	69	54	9	3	0	0	3						
ESE	33	72	51	21	21	9	6								
E	33	90	66	42	15	12	12	0	3						

図-6 および 表-7 の風の記録はいずれも神戸海洋気象台における陸上の記録であり、第1節でもふれたように海上の風はこの陸上の風の記録から推定しなければならない。すなわち気象学において地上風の風速は上層風のほぼ1/2、1/4の風速であり、海上の風の風速は上層風の2/3、1/4という値になることが知られており、海上でも陸上においても上層風の風速が変らないものとする、海上の風は地上の風速の4/3倍の風速をもつことになる。明石海峡の海上の風と陸上の風の風速の比もまた実測結果により、ほぼ4/3倍という値をとることはすでに述べたが、この海上の風速で波の発生、発達が支配されるわけであるから、次節において述べる漂砂量算定に用いる風速も、またこの補正を行なつて所定の風速としなければならない。

(4) 風速と漂砂量の関係と年間漂砂量の推定

年間漂砂量を算定するに当つては、海岸各地における波の記録がほとんどないため、風の記録から各地に來襲してくる波を追算して、その値を用いて各地における風向、風速と漂砂量の関係を求めておけば便利である。図-7は表-3、表-4及び表-5のそれぞれの値を用い、(13)式によつて西須磨、塩屋、垂水、西舞子、明石の各海岸における風向、風速と漂砂量の関係を計算して求め示したものである。

図-7の各地の漂砂量を示すグラフと表-6に示す風速頻度の結果を用いて昭和34年1月から12月までの1年間の各地を通過する漂砂量を算定した結果が表-7である。

表-7 各地の年間漂砂量 (昭34.1～昭34.12)

地 点	明 石	西 舞 子	垂 水	塩 屋	西 須 磨
西から東へ向う漂砂量	39,150m ³	66,970m ³	21,420m ³	8,220m ³	8,190m ³
東から西へ向う漂砂量	710m ³	2,630m ³	3,920m ³	2,520m ³	2,990m ³
差(西から東へ)	28,440m ³	64,340m ³	17,500m ³	5,700m ³	5,300m ³

この表から垂水以東と垂水以西においてその漂砂量の実態が著しくことなっていることがわかるであろう。この原因はつぎの各項によるためと思われる。すなわち、

(1) 表-6の値において、W、WSW及びSWの3方向の風が頻度が多く、かつ9m/s以上の大きな風速があるのはこの3方向以外にはSSEの11m/sの3回とSE9m/sの3回及びS9.0m/sの3回を数えるにすぎない。

図-6 神戸海洋気象台における風向別風速頻度図 (昭和30年1月から昭和34年12月まで)

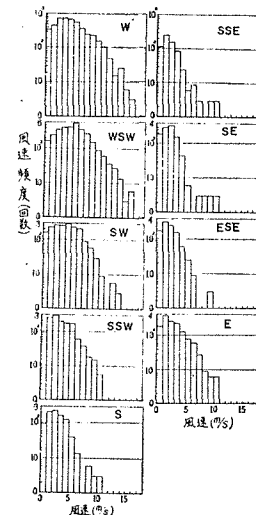
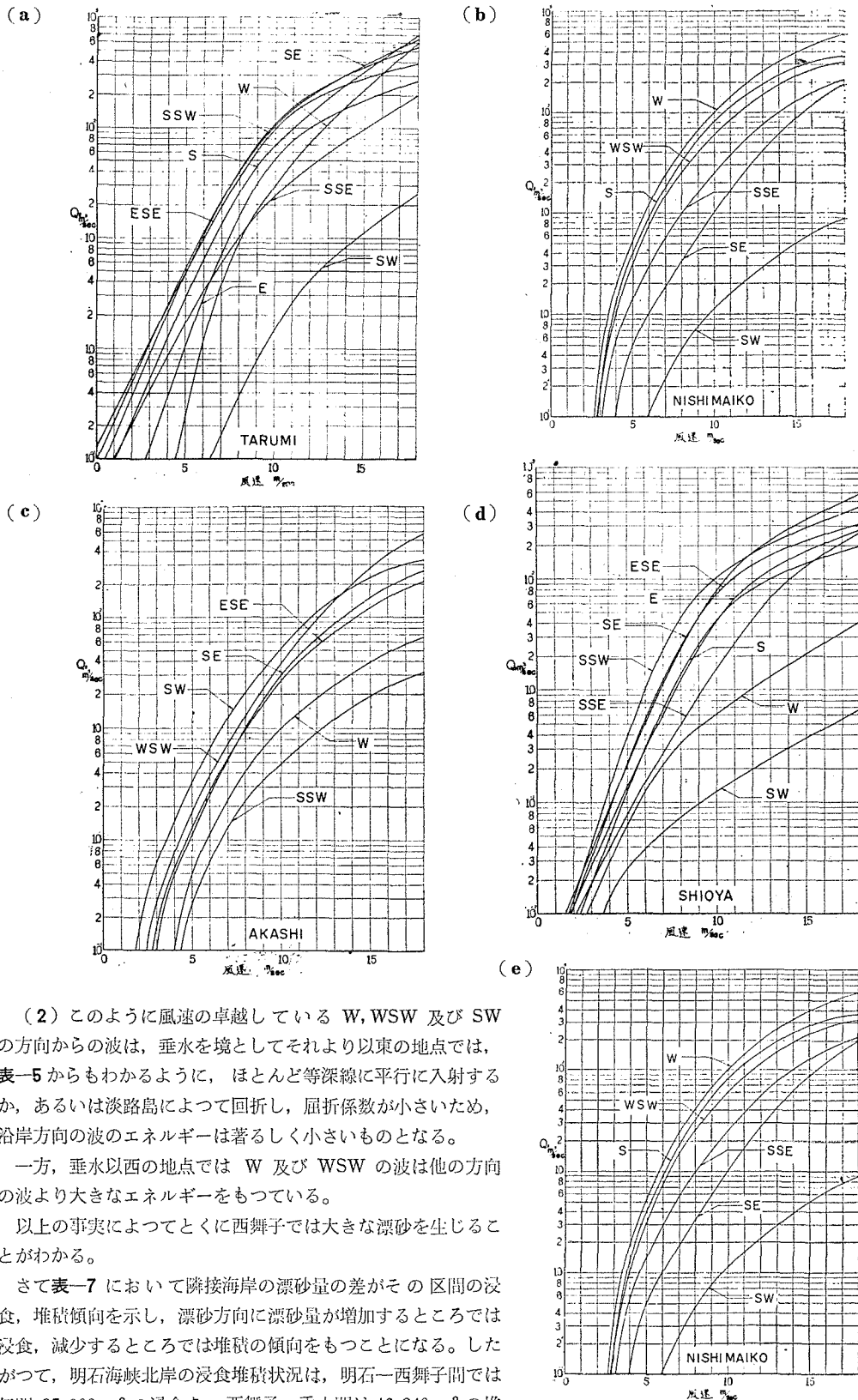


図-7 風速と漂砂量との関係



(2) このように風速の卓越している W, WSW 及び SW の方向からの波は、垂水を境としてそれより以東の地点では、表-5 からわかるように、ほとんど等深線に平行に入射するか、あるいは淡路島によつて回折し、屈折係数が小さいため、沿岸方向の波のエネルギーは著しく小さいものとなる。

一方、垂水以西の地点では W 及び WSW の波は他の方向の波より大きなエネルギーをもっている。

以上の事実によつてとくに西舞子では大きな漂砂を生じることがわかる。

さて表-7 において隣接海岸の漂砂量の差がその区間の浸食、堆積傾向を示し、漂砂方向に漂砂量が増加するところでは浸食、減少するところでは堆積の傾向をもつことになる。したがつて、明石海峡北岸の浸食堆積状況は、明石-西舞子間では年間 35,900 m³ の浸食を、西舞子-垂水間は 46,840 m³ の堆

積、垂水一塩屋間は $11,800 \text{ m}^3$ の堆積、塩屋一西須磨間はほぼ平衡という結果がえられる。しかしながら、この論議はこれらの海岸線に砂を捕捉しようとする海岸構造物や水路などの障害物がない場合のことであつて、この西舞子一垂水間での顕著な堆積傾向が舞子の浜を造成したものと考えられる。しかしながら近年、明石一西舞子間の宿命的な浸食の防止対策として、漂砂捕捉を目的とした防砂堤工事が行なわれ、西舞子より以東の漂砂の補給を断つたため、浸食領域が東へ移行し、従来堆積すべきところの垂水以東の海岸も浸食傾向にかわつている。このように1方向の漂砂の卓越している海岸においては、漂砂の上手側が浸食される場合、その浸食箇所の浸食防止対策として完全な漂砂捕捉を目的とした工法はその影響範囲を下手側に移行するのみであるから、海岸線全体の傾向を十分考慮のうえ慎重に浸食防止対策を決定しなければならない。

5. 結 語

以上著者らは長期の海浜過程を支配するであろうと考えられる沿岸漂砂について、その漂砂量算定公式を提案し、さらにその算定式の妥当性を明石海峡北岸における海岸構造物による堆砂状況から検証した。

ついでこの新しい算定公式にもとづいて沿岸漂砂量に及ぼす波の諸特性、地形、底質、粒径の影響を論議し、従来実験的に認められてきた諸事実を確認した。つぎにこの漂砂量の算定式の適用例として、明石海峡北岸をとりあげ、算定式にもとづいて風向別の風速と漂砂量の関係を求め、それによつて明石海峡北岸各地の年間漂砂量を推定して、浸食傾向の領域と堆積傾向の領域を明らかにした。

今後なおこの漂砂量算定に用いた沿岸漂砂の性状についてさらに基礎的な研究を行ない、算定式の確認をしたいと考えている。最後に本研究に終始御指導を賜つた石原藤次郎教授に謝意を表するとともに、本研究が文部省試験研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Munch-Petersen, J. : Uber Materialwanderung an Küsten des Baltischen Meeres, Proc. 5th Hydrological Conf of the Baltic States, Helesinki, 1936.
- 2) Watts, G.M. : A Study of Sand Movement at South Lake Worth Inlet, Florida, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No.49, 1953, pp.1~36.
- 3) Caldwell, J.M. : Wave Action and Sand Movement near Anaheim Bay, California, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No.68, 1956, pp.1~21.
- 4) 樫木亨, 村上正 : 沿岸漂砂量の推定について, 海岸工学講演会講演集, 昭.32.11, pp.41~49.
- 5) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 樫木亨, 村上正 : 明石海峡北岸の浸食調査について (第2報), 神戸市明石海峡調査報告書, 昭.33.5, pp.1~10.
- 6) Rouse, H. : Engineering Hydraulics, John Wiley & Sons, New York and Chapman & Hall Ltd., London, 1950, p.770.
- 7) Putnam, J.A., Munk, W.H. and Traylor, M.A. : The Prediction of Longshore Currents, Trans. A.G.U., Vol.30, No.3, 1949, pp.337~345.
- 8) Schloemer, R.W. : Analysis and Synthesis of Hurricane Wind Patterns over Lake Okeechobee, Florida, Hydrometeorological Report, No.31, 1954.
- 9) 岩垣雄一, 樫木亨 : 海岸の平衡勾配に関する二, 三の問題について, 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, 昭.31.11, pp.233~240.
- 10) Johnson, J.W. : Sand Transport by Littoral Currents, Proc of 5th Hydraulic Conference, Bulletin No.34, State University of Iowa, Studies in Engineering, 1953, pp.89~109.
- (1) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 村上正 : 明石海峡北岸の浸食調査について, 海岸工学講演会講演集, 昭.31.11, pp.185~193.
- (2) 土木学会編 : 水理公式集, 昭.23.8. pp.259~260.