

波動場の歪みを考慮に入れた岸沖漂砂量公式

石田 昭*・浅井 功**・川合正恭***・喜岡 渉****

1. ま え が き

海浜変形シミュレーションを精度よく行なうのには、海浜流場および波動場の計算方法もさることながら、何といっても波による岸沖漂砂量の算定方法を確立することが不可欠である。しかしながら現時点では、定形波理論に基づく漂砂量を取り扱っている段階であり、現地波に対応するような波動場での岸沖漂砂量については確立された算定方法が得られていない。

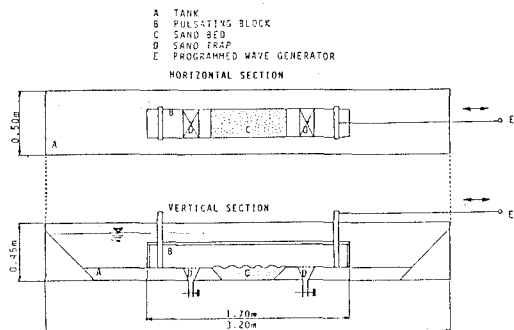
一方 Hursbergen ら¹⁾によれば、波動場は、正弦波形から若干の歪みを示すだけでも、漂砂量はもとより、漂砂の方向さえも変化させてしまうことが報告されている。したがって精度の高い方法を見出すためには、波形の峰および谷の部分の尖り方の違いだけでなく、波形の前面と後面の勾配の違いに起因する流速場の歪み、をも考慮に入れた漂砂量公式が是非とも必要になってくる。

本研究は、コンピュータ制御によって作動する任意振動流発生装置、および漂砂量捕砂装置を備えた特別の水槽を作成し、この装置を用いて得た多くの漂砂量データに基づいて、波動場の歪みを考慮に入れた漂砂量公式を見出そうとするものである。また一様水深域の非定形波現象および重複波現象への算定公式の適用例、および時空スペクトル成分の合成法を利用した斜面上の波浪への適用例についても述べる。

2. 実験装置と漂砂量データ

漂砂量データを得るために作成した実験装置は図一1に示すようなものである。これは矩形容器を逆にしたような pulsating block (図中 B で示す) をコンピュータ制御によって任意に振動させるものである。

実験は流速波形が有限振幅波理論で表示されるような歪み(上下の非対称と呼ぶ)を与えた実験シリーズ A と碎波点近傍での波浪のように波形の前面と後面とが違うような歪み(前後の非対称と呼ぶ)を与えた実験シリ



図一1 実験装置

ズ B とを行なった。両者ともに 2 倍波までの和とした。

pulsating block の動きを x とすると、block 内の水粒子の速度 u および加速度 $\dot{u}$ は次のようになる。

$$u = \frac{\partial x}{\partial t}, \quad \dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

ここで x を

$$x = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + A_2 \sin\left(\frac{4\pi}{T}t + \theta_2\right)$$

と表示する。周期 T は 1.4 秒、 A_1 は 5 cm とし、 A_2 は 0 から 1 cm の間で変化させた。A シリーズは $\theta_2 = 0$ とし、B シリーズは θ_2 を種々を変化させた。使用した底質は市販の珪砂(比重 2.65)で粒径は 0.05 cm, 0.029 cm, 0.019 cm の 3 種類とした。表一1 は一例として粒径 0.019 cm の漂砂量データを示したものである。 Φ は無次元漂砂量、 Ψ は無次元掃流力、 Ω は無次元質量力で次のように定義した。

$$\Phi_{on} = \frac{q_{on}}{w_0 \cdot d}, \quad \Phi_{off} = \frac{q_{off}}{w_0 \cdot d} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Psi_{on} = \frac{f_w}{2} \cdot \frac{u_{on}^2}{sgd}, \quad \Psi_{off} = \frac{f_w}{2} \cdot \frac{u_{off}^2}{sgd} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Omega_{on} = \frac{c_M \cdot \pi}{6} \cdot \frac{\dot{u}_{on}}{sg}, \quad \Omega_{off} = \frac{c_M \cdot \pi}{6} \cdot \frac{\dot{u}_{off}}{sg} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、添字の on, off は岸向、沖向を意味している。また q は単位時間・単位幅当りの漂砂量で、空隙を含んだ体積表示である。 w_0 は底質の沈降速度、 d は底質の粒径である。式(2)の f_w は Jonsson の摩擦係数であ

* 正会員 工 博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科

** 正会員 工 修 西松建設株式会社

*** 学生員 名古屋工業大学大学院生

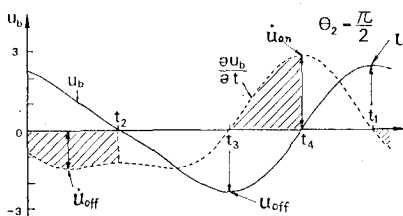
**** 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科

表—1 漂砂量データの一例

Λ_2 (cm)	θ_2 (degree)	u_{max} (cm/sec)	u_{avg} (cm/sec)	Ψ_{on} $\times 10^{-3}$	Ψ_{off} $\times 10^{-3}$	Ω_{on} $\times 10^{-3}$	Ω_{off} $\times 10^{-3}$	Experiment ($\times 10^{-3}$)		
								ϕ_{on}	ϕ_{off}	ϕ_{net}
0.00	0	22.4	-22.4	117.2	117.2	51.7	51.7	142.0	168.0	-26.0
0.00	0	22.4	-22.4	117.2	117.2	51.7	51.7	186.0	186.0	0.0
0.10	0	23.3	-21.5	125.1	109.5	51.7	52.3	80.1	182.0	-101.9
0.10	0	23.3	-21.5	125.1	109.5	51.7	52.3	159.0	254.0	-95.0
0.30	0	25.1	-19.7	141.6	94.9	51.7	56.6	34.7	297.0	-262.3
0.30	0	25.1	-19.7	141.6	94.9	51.7	56.6	97.5	310.0	-212.5
0.50	0	26.9	-18.0	158.9	81.1	51.7	62.4	3.3	412.0	-408.7
0.50	0	26.9	-18.0	158.9	81.1	51.7	62.4	14.3	668.0	-653.7
0.50	20	26.7	-18.8	156.2	87.8	58.8	58.3	18.6	417.0	-398.4
0.50	40	26.3	-20.3	152.6	99.6	65.0	52.6	42.8	281.0	-238.2
0.50	60	25.6	-21.9	145.7	112.5	69.7	46.9	150.0	160.0	-10.0
0.50	90	23.9	-23.9	130.2	130.2	72.4	36.7	286.0	112.0	174.0
0.50	30	26.5	-19.6	154.3	93.5	62.1	55.6	14.3	28.4	-14.1
0.50	60	25.6	-21.9	145.7	112.5	69.7	46.9	119.0	70.1	48.9
0.50	90	23.9	-23.9	130.2	130.2	72.4	36.7	506.0	190.0	316.0
0.50	150	19.6	-26.5	93.5	154.3	67.8	48.0	933.0	471.0	462.0
0.50	180	18.0	-26.9	81.1	158.9	62.4	51.7	1019.0	455.0	564.0
0.50	-30	26.5	-19.6	154.3	93.5	48.0	67.8	24.4	735.0	-710.6
0.50	-60	25.6	-21.9	145.7	112.5	33.8	71.3	86.3	645.0	-558.7
0.50	-90	23.9	-23.9	130.2	130.2	36.7	72.4	273.0	434.0	-161.0
0.50	-150	19.6	-26.5	93.5	154.3	55.6	62.1	818.0	52.8	765.2
0.50	-180	18.0	-26.9	81.1	158.9	62.4	51.7	781.0	27.4	753.6
1.00	0	31.4	-15.9	206.0	66.6	66.6	81.3	42.8	775.0	-732.2
1.00	40	30.6	-21.6	196.7	110.3	78.3	68.3	66.8	572.0	-505.2
1.00	60	29.4	-24.1	184.2	132.2	87.6	61.6	139.0	679.0	-540.0
1.00	90	27.1	-27.1	160.4	160.4	93.1	49.1	700.0	318.0	382.0
1.00	120	24.1	-29.4	132.2	184.2	91.8	37.1	1117.0	110.0	1007.0
1.00	180	15.9	-31.4	66.6	206.0	81.3	66.6	1074.0	37.5	1036.5
1.00	240	24.1	-29.4	132.2	184.2	61.6	87.6	812.0	147.0	665.0
1.00	270	27.1	-27.1	160.4	160.4	49.1	93.1	387.0	452.0	-65.0
1.00	300	29.4	-24.1	184.2	132.2	37.1	91.8	118.0	1031.0	-913.0
1.00	360	31.4	-15.9	206.0	66.6	66.6	81.3	24.0	927.0	-903.0
0.00	0	22.4	-22.4	117.2	117.2	51.7	51.7	119.3	106.3	13.0
0.05	0	22.9	-22.0	121.1	113.4	51.7	51.5	130.9	131.0	-0.1
0.10	0	23.3	-21.5	125.1	109.5	51.7	52.3	133.8	202.6	-68.8
0.15	0	23.8	-21.1	129.1	105.8	51.7	53.1	147.8	187.8	-40.0
0.20	0	24.2	-20.6	133.2	102.1	51.7	53.9	115.3	221.2	-105.9
0.25	0	24.7	-20.2	137.4	98.5	51.7	55.1	71.7	216.9	-145.2
0.30	0	25.1	-19.7	141.6	94.9	51.7	56.6	66.6	189.0	-122.4
0.35	0	25.6	-19.3	145.8	91.4	51.7	58.0	68.4	334.9	-266.5
0.40	0	26.0	-18.8	150.1	87.9	51.7	59.5	74.8	515.8	-441.0
0.45	0	26.5	-18.4	154.5	84.5	51.7	61.0	68.8	436.4	-367.6
0.50	0	26.9	-18.0	158.9	81.1	51.7	62.4	39.3	573.1	-533.8
0.50	15	26.8	-18.5	157.4	85.1	57.1	59.4	30.6	415.1	-384.5
0.50	45	26.2	-20.7	151.3	102.8	66.4	51.2	43.6	440.7	-397.1
0.50	75	24.7	-23.0	137.9	121.9	71.7	41.9	105.0	380.1	-275.1
0.50	90	23.9	-23.9	130.2	130.2	72.4	36.7	163.1	253.1	-90.0
0.50	105	23.0	-24.7	121.9	137.9	71.3	31.7	272.2	227.4	44.8
0.50	120	21.9	-25.6	112.5	145.7	71.3	33.8	435.6	141.1	294.5
0.50	135	20.7	-26.2	102.8	151.3	69.9	37.1	337.0	110.0	227.0
0.50	165	18.5	-26.8	85.1	157.4	65.7	53.4	317.9	75.7	242.2
0.50	180	18.0	-26.9	81.1	158.9	62.4	51.7	356.7	58.5	298.2
0.50	195	18.5	-26.8	85.1	157.4	59.4	57.1	336.2	51.2	285.0
0.50	225	20.7	-26.2	102.8	151.3	51.2	66.4	359.7	61.9	297.8
0.50	240	21.9	-25.6	112.5	145.7	46.9	69.7	324.9	115.4	209.5
0.50	255	23.0	-24.7	121.9	137.9	41.9	71.7	260.6	181.6	79.0
0.50	270	23.9	-23.9	130.2	130.2	36.7	72.4	152.3	84.5	67.8
0.50	285	24.7	-23.0	137.9	121.9	31.7	71.3	19.8	81.1	-61.3
0.50	315	26.2	-20.7	151.3	102.8	37.1	69.9	57.4	141.7	-84.3
0.50	345	26.8	-18.5	157.4	85.1	53.4	65.7	60.8	216.0	-155.2

$A_1=5\text{cm}, T=1.4\text{sec}, d=0.019\text{mm}$

るが、ここでは粗度として砂粒径を用いて f_w を算定し



図—2 u_{on} , u_{off} , $\dot{u}_{on}$, $\dot{u}_{off}$ の定義

た. u_{on} , u_{off} は最大流速を意味し, s は底質の水中比重である. 式 (3) の c_M は球の質量係数 1.5 を用い, $\dot{u}_{on}$, $\dot{u}_{off}$ は図—2 に示すように, 底質に制動が作用している時間内 (図中ハッチを施してある) での加速度の岸向および沖向の最大値を意味している.

3. 岸沖漂砂量公式の提案

図—3 は A シリーズのデータについて Φ_{on} と Ψ_{off} の関係及び Φ_{off} と Ψ_{on} の関係をプロットしたもので, 次

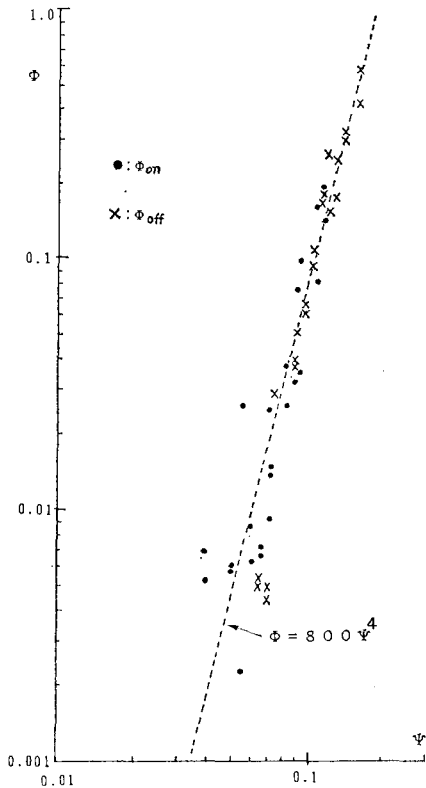


図-3 実験Aシリーズの Φ と Ψ の関係

の関係式が成り立つようである。

$$\Phi_{on} = 800 \Psi_{off}^4, \quad \Phi_{off} = 800 \Psi_{on}^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

即ち、岸向漂砂量は沖向流れの最大掃流力によって決まり、沖向漂砂量は岸向流れの最大掃流力によって決まる。ただし Ψ が小さな値の時には若干ばらつきが見られるが、正味の漂砂量はかなり正確に次式に従うことがわかっている。

$$\Phi_{net} = \Phi_{on} - \Phi_{off} = 800(\Psi_{off}^4 - \Psi_{on}^4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

次にBシリーズのデータを図-3 にプロットすると、ばらつきが当然のことながら大きくなってしまふ。そこで、波形の前後の非対称性を示すパラメータを導入するべく、種々の方法を試みたが、その結果によると次式で表示するのが良いことがわかった。

$$\Phi_{on} = A \Psi_{off}^n \cdot \Omega_{on}^m, \quad \Phi_{off} = A \Psi_{on}^n \cdot \Omega_{off}^m \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式はAシリーズのように前後の非対称がない場合には $\Omega_{on} \equiv \Omega_{off}$ となるから、式(4)と同じ形になるはずである。正味の漂砂量は差を取って次式で表示される。

$$\Phi_{net} = A(\Psi_{off}^n \cdot \Omega_{on}^m - \Psi_{on}^n \cdot \Omega_{off}^m) \quad \dots\dots\dots (7)$$

係数Aおよび指数 n, m をA, B 両シリーズの実験データから決めると、

$d=0.05 \text{ cm}$ では、 $A=1.90, n=0.18, m=1.58$

$d=0.029 \text{ cm}$ では、 $A=3.71, n=2.05, m=-0.30$

$d=0.019 \text{ cm}$ では、 $A=3.20, n=2.61, m=-1.10$

表-2 A, n, m と u_b/w_0 の関係

U_b/W_0	A	n	m
0~2	$10 \left(\frac{U_b}{W_0} \cdot \frac{1}{10} \right)$	0	2
2~5		$\frac{1}{2} \left(\frac{U_b}{W_0} - 2 \right)$	$3 - \frac{1}{2} \frac{U_b}{W_0}$
5~8	3.16		
8~		3	-1

となる。A, n, m が粒径によって変化するので、それらを u_b/w_0 (u_b : 底面最大流速で u_{on} と同じ) の関形で表示することにした。その結果は表-2 のようにまとめることができる。

表-2 の係数から次のようなことがわかる。

- 1) 流速比 u_b/w_0 が2以下の場合には、 $n=0, m=2$ であるから、掃流力 Ψ よりも質量力 Ω の影響の方が強い。現象としては掃流砂が卓越している。
- 2) u_b/w_0 が2より大きくなると、浮遊砂が少しづつ増えて、逆方向の掃流力が影響するようになる。
- 3) u_b/w_0 が6になると、 $n=2, m=0$ であるから、質量力による掃流砂は影響がなくなり、逆方向掃流力によって砂れん背後に巻き上げられた浮遊砂が卓越するようになる。
- 4) u_b/w_0 が6以上になると m の値が負となるので、前傾波形であっても沖向漂砂量の方が多くなる。

4. 非定形進行波への適用

提案した漂砂量公式(6), (7)を砂堆の発生現象が見られる二次波峰現象に適用してみる。この現象は、Bijker ら²⁾ および Van de Graaff ら³⁾ によっても報告されているように、粒径によって砂堆の発生場所が異なることが知られている。しかし、その原因がわかっていない。著者らは二次波峰現象下の質量輸送が大きな役割を演じていると考えていたが、本報告の結果では必ずしも質量輸送速度の影響だけではなさそうである。

二次波峰現象下の底面流速は石田ら⁴⁾の方法によって算定することにした。彼らは正弦波が一様水深域に進んだときの非定形波形を、KdV 方程式に基づく数値解析、および時空スペクトル解析を用いて調べている。それによると非定形波は基本成分波 A_{01} 、基本波と同じ波速で進行する2倍の周波数を持つ拘束波 A_{02} 、波速が定形波の分散関係式に従っている2倍の自由波 A_{12} (Fontanat 波と呼ばれている) および、 A_{01} と A_{12} の非線形干渉によって発生する、いわゆる差の波 A_{11} と和の波 A_{13} 等いくつかの時空スペクトル成分により構成されている。彼らは、時空スペクトル A_{nm} をアーセル数の関数として次式のように与えている。

$$\log a_{nm} = \alpha(\log U_T)^2 + \beta(\log U_T) + \gamma \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで a_{nm} は初期波形の振幅 $H_0/2$ によって規準化

した時空スペクトル成分の振幅で、 U_r はアーセル数である。

$$a_{nm} = \frac{A_{nm}}{(H_0/2)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$U_r = \frac{H_0 L^2}{h^3} \quad \dots\dots\dots (10)$$

α, β, γ および式 (16) の初期位相 θ_{nm} のいくつかは表-3 に示すような値である。一様水深領域での水位波形および底面流速波形を次のように表示する。

$$\eta(x, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} \cos(S_{nm}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M B_{nm} \cos(S_{nm}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$S_{nm} = (mk_1 + n\Delta k)x - m\sigma_1 t + \theta_{nm} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで k_1, σ_1 は基本波の波数と周波数、 Δk は Foutanet 波の波数 k_2 と $2k_1$ の差 $\Delta k = k_2 - 2k_1$ であり、その求めかたは文献 4) を参照。 $2\pi/\Delta k$ は二次波峰の発生間隔 L_{0V} と呼ばれているものである。 B_{nm} は浜田の理論を使うと、 A_{nm}, k_1, σ_1 等の値から、 B_{01}, B_{02}, B_{11} ,

表-3 α, β, γ および θ_{nm} の値

a_{nm}	α	β	γ	θ_{nm}
a_{01}	-0.137	0.263	-0.118	0
a_{02}	-0.536	2.27	-2.82	0
a_{11}	-0.865	4.11	-5.38	0
a_{12}	-0.646	2.61	-3.08	π
a_{13}	-0.903	4.16	-5.41	π

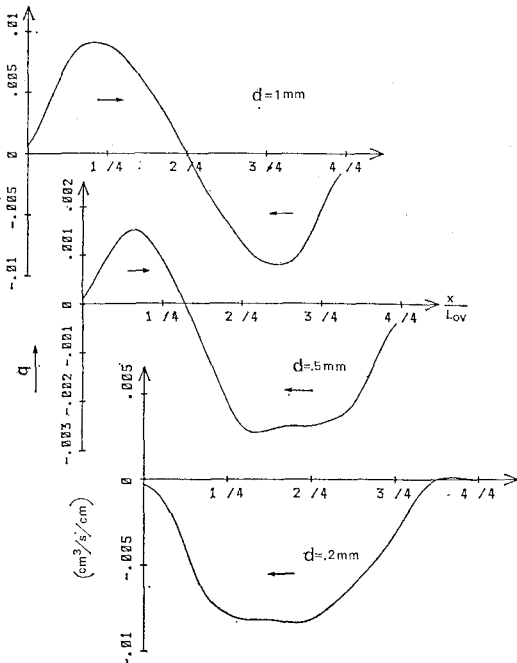


図-4 二次波峰現象下の計算漂砂量

B_{12}, B_{13} については計算することができるので、この 5 成分で $u(x, t)$ を求めることにする。このようにして求めた底面流速を使って式 (7) から正味の漂砂量を計算したのが、図-4 である。計算の条件は、水深 20 cm, 周期 1.5 sec, 波高 $H_0=8$ cm, $s=1.65$ である。粒径は 1.0 mm, 0.5 mm, 0.2 mm の 3 ケースとした。

粒径が粗い場合には L_{0V} 間で平均した漂砂量は 0 であるが、前傾波形となる $x=0 \sim 1/2 L_{0V}$ の間は岸向漂砂となり、後傾波形となる $x=1/2 L_{0V} \sim L_{0V}$ の間は沖向漂砂となる。結果として $1/2 L_{0V}$ 付近に砂堆が発生することになる。粒径が細くなるにつれて、 L_{0V} 間で平均した漂砂は沖向となること、 $\partial q/\partial x$ が最小となる位置、即ち砂堆の発生する位置が $1/2 L_{0V}$ の位置から $1/4 L_{0V}$ および $x=0$ 付近にまで移動していくことがわかる。以上の計算結果は Van de Graaff ら³⁾の実験を非常に良く説明する結果となっている。このことは前述したように砂堆の発生場所が変化するのは、質量輸送速度の方向が、 $x=1/4 L_{0V}$ で交わることが原因であろうとする考え方が、必ずしも正しくはないことを示している。

5. 重複波への適用

重複波浪下の漂砂に関しては、重複波の節 (Node) に砂が堆積する現象 (Nタイプ移動と呼ばれている) と腹 (Loop) に堆積する現象 (Lタイプ移動と呼ばれている) とがあることが知られている。Nタイプ移動は粗砂の場合に、Lタイプ移動は細砂の場合に生ずることが知られている。またNタイプ移動については波形の非線型性が影響しており、Lタイプの場合には質量輸送現象が影響しているということが言われている。ここでは底面流速として Tadjbakhsh-Keller の理論式を使って計算漂砂量を求めてみることにする。ただし質量輸送速度のような恒流成分は計算の中に入れないことにする。結果的には

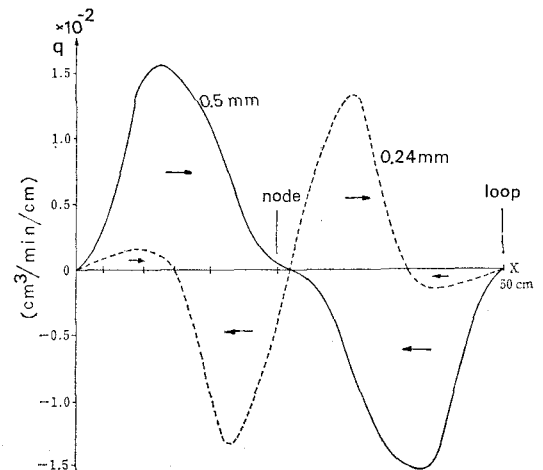


図-5 重複波浪下の計算漂砂量

恒流を入れなくてもLタイプ移動が現われることがわかった。計算条件は $d=0.5$ mm, 水深 10 cm, 波高 4 cm, 周期 1.05 sec の場合と, $d=0.24$ mm, 水深 15 cm, 波高 6.5 cm, 周期 0.92 sec の2ケースについて行なった。水槽実験では前者はNタイプ移動となり, 後者はLタイプ移動を示すことがわかっている。

図-5 は計算結果を示したものであり, 計算によってもNタイプ移動, Lタイプ移動が生じていることがわかる。このように式(7)は従来, 重複波の漂砂現象に大きな影響を与えるであろうと考えられてきた質量輸送速度の効果についても疑問を投げかける結果となっている。

6. 斜面上の進行波への適用

次に斜面上の進行波に式(7)を適用してみることにする。

斜面上の進行波の底面流速を見積ることは困難な問題で, 現時点では波形, 底面流速ともに確立された算定方法はない。そこで4章で用いた方法を拡張して, 底面流速を算定することにする。即ち深水条件を満足する沖合から計算を始めるものとし, 任意点での $A_{nm}(x)$ の値はその水深におけるアーセル数 $U(x)$ から決まるものと仮定する。次に位相 $S_{nm}(x, t)$ については式(14)のような積分で与えることにする。

$$S_{nm}(x, t) = \int_{x=0}^x (mk_1 + n\Delta k) dx - m\sigma_1 t + \theta_{nm} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$x=0$ は深水領域に置いた計算の始点である。上式により計算した $S_{nm}(x, t)$ を式(12)の S_{nm} として代入し, 底面流速を与えることにする。

図-6 は計算例である。沖波波高 5 cm, 周期 1.2 sec として, 汀線にはば平行(若干の屈曲を持つ)な等深線を持つ海域に, 入射角 30° で入射した時の汀線と直角方向の継断形状を示したものである。底質は粒径 1.0 mm と 0.2 mm の2ケースで計算した。点線は初期地形を示し, 実線は1時間後の地形を示している。粗砂の場合には全体的に岸向漂砂が生じ, step型海浜が形成されることがわかる。細砂では全体として沖向漂砂となりbar型海浜が形成されることが示されている。

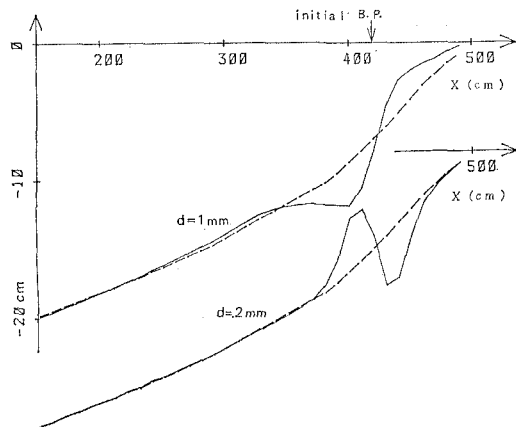


図-6 計算による海浜断面形状

7. 結 語

岸沖漂砂量を算定する方法として無次元掃流力と無次元質量力とを導入した。それによって波形の歪みを考慮に入れた算定公式を提案することができた。この方法は実験室規模での種々の現象を説明できるようであることもわかった。しかし現地海浜に適用するにはまだ無理があるようである。今後の問題としてはポンプを利用した振動流装置等によって, 現地規模の周期を持つ振動流下の精確な漂砂量データを蓄積し, 式(7)の係数および指数を見出す必要がある。本研究は運輸省第五港湾建設局による「底質移動に対する港湾構造物の機能に関する調査」の一環として行なったものであり, 関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hursbergen, C. H.: Proc. 14th Conf. on Coastal Engg. pp. 392~411, 1974.
- 2) Bijker, E. W., E. V. Hijum and P. Vellinga: Proc. 15th Conf. on Coastal Engg., pp. 1149~1167, 1967.
- 3) Van de Graaff J. and W. Tilmans: Proc. 17th Conf. on Coastal Engg., pp. 1140~1157, 1980.
- 4) 石田 昭・喜岡 渉・浅田耕司: 日本流体力学会誌第2巻第4号, 371~380, 1983.
- 5) 石田 昭: 底質移動に対する港湾構造物の機能に関する調査報告書(3), 運輸省第五港湾建設局, p. 113, 1988.