

## 二次波峯現象における底質移動

石田昭・平山秀夫・細井正延

土木工学科

(1977年9月9日受理)

## Sediment Transport under Secondary wave Motion

Akira ISHIDA, Hideo HIRAYAMA and Masanobu Hosoi

Department of Civil Engineering

(Received September 9, 1977)

Experiment shows that for certain intervals along wave channel, the surface of mobile bed acquires periodic irregularities called dune in this paper. This dune that is similar in shape with the antidune on the bed of open channel, develops under nonpermanent wave motion known as secondary waves or solitons. In this experimental study following facts were obtained.

(1) There is a considerable correlation between height and length of this dune. This relation was formularized from experimental observations.

(2) The length of this dune is identical with the recurrence distance of secondary waves.

(3) The mechanism that this dune develops can be explained in connection with asymmetrical wave formes of longitudinal velocity on the mobile bed.

## 1. 緒言

浅水領域での波は水深波長比が小さくなるほど非線型性が強くなって Soliton 分裂とか二次波峯現象とか呼ばれる非定形波となることが知られており<sup>1),2)</sup>、著者の一人<sup>3)</sup>はすでにこの現象の発生する原因が Phillips<sup>4)</sup>の非線型共鳴干渉の理論によって説明できるものであることを見出ししてきた。すなわち、造波装置によって単一周波数の波を発生させたつもりでも、非線型相互干渉によって波数と周波数の異なる数個の波が発生し、その振幅が大きくなった場合には主峯と主峯の中間にいくつもの二次波峯がみられるというものである。干渉によって発生する波の振幅が小さい場合には単なる非定形波現象で、二次波峯は出現しない。しかし底面に砂を敷いて水底変化を調べると二次波峯が発生する場合はもちろんのこと発生しない程度の非定形波現象においても水底には波長の数倍程度の長さを持つ比較的規則正しい正弦波的变化が生じていることが見出され、このような水底変化を Karakiewicz<sup>5)</sup>は Multi Barと呼んでいる。確かに一番岸近くの波形の峯は沿岸砂州 (Bar) に相当しているが、著者らは河床上に発生する Sand wave にならって Dune と呼ぶことにした。ただし形状的には正弦波のようになって前

後対称の Sand wave であるので河床上で発生する Antidune に似ている。本報告はこの二次波峯現象 (単なる非定形現象も含めて) において発生する Dune の特性を実験的に調べると同時に Dune の発生機構を明らかにしたものである。

## 2. 実験方法

実験に使用した波浪水槽は全長 26.4m, 幅 60cm, 高さ 1.2m の片面ガラス張り水槽である。一端に造波装置を取り付けて波を起し、他端には約 1/10 勾配で碎石を置いて反射をなくすための消波性海浜とした。底面には均一な粒径の砂 ( $d_{50}=0.15\text{mm}$ ) を長さ 17.1m, 厚さ 20cm で一様に敷き並べ、その沖側には砂止めを設置した。砂床上での水深が 20, 30, 40cm の三種類について周期と波高をそれぞれ変化させて水底変化の様子を観測した。表面波の波長は 10m 間隔で設置した 2 台の波高計を進むのに要する時間から決定し、反射率は Healy の方法によって測定した。実験経続時間は 20 時間であるが、ほとんどの場合 12~15 時間で安定状態になるようである。実験の条件は Table-1 に示すようなものである。底質の粒径は  $d_{50}=0.15\text{mm}$  の一種類しか行っていないので粒径によ

Table 1 Experimental conditions and dimensions of dune under secondary wave motion.

Run No.	T (sec)	L (m)	H (cm)	h (cm)	$L_d$ (m)	$H_d$ (cm)	r (%)	
1	1.3	2.00	10.51	30	2.36	7.4	3	●
2	0.82	1.00	5.06	30	—	—	2	○
3	1.77	2.92	10.22	30	5.75	15.8	1	●
4	1.77	2.84	5.36	30	—	—	3.6	○
5	1.77	2.91	7.17	30	1.10	4.8	3.1	●
6	1.3	1.73	9.7	20	3.25	9.1	8	●
7	1.3	1.78	9.3	20	3.30	11.4	6	●
8	1.3	1.70	4.96	20	—	—	4.2	●
9	1.77	2.48	10.19	20	7.35	10.0	2.9	●
10	1.75	2.41	5.34	20	0.95	3.0	3.8	●
11	1.75	2.44	7.62	20	6.50	11.3	1.4	●
12	1.77	2.51	11.66	20	7.10	8.8	4.6	●
13	0.82	0.95	8.44	20	0.45	2.7	5.3	●
14	0.82	0.94	5.57	20	—	—	—	○
15	1.3	2.21	10.38	40	1.05	3.0	2.9	●
16	1.3	2.20	15.15	40	2.54	5.6	2.4	●
17	1.77	2.91	8.88	30	5.45	9.2	5.3	●
18	1.06	1.49	11.66	30	0.72	—	3.6	●
19	1.16	1.72	12.54	30	1.90	3.5	3.1	●
20	2.17	3.66	11.70	30	10.90	16.3	6.4	●
21	1.97	3.32	10.14	30	8.05	15.5	6.3	●
22	1.78	2.92	8.02	30	5.50	7.3	4.3	●
23	1.32	2.04	10.94	30	2.55	9.3	—	●

る変化をみることはできなかった。尚二次波峯現象の波形、波圧および水粒子速度の波数周波数スペクトル解析の方法および実験方法などは文献1)~3)を参照されたい。

### 3. Dune の特性

#### (1) 底質の移動特性

底質の移動状況は粒径と底面流速によって大きく変わるわけであるが、一般的にいうと最初の段階では波長の短かい砂漣 (ripple) が発生し、第2段階では表面波の波長の半分程度の sand wave ができる。これは反射現象によって発生する部分重複波によって生ずるものであろうと思われるが、次の段階では消えることが多い。第3段階では2通りに分かれ、表面波の非定形性が大きい時には第2段階でできていた sand wave が消えて、表面波の数倍程度の Dune が形成されるようになる (Photo-1)。後述するようにこの Dune の波長は二次波峯の発生間隔と一致している。表面波の非定形性が小さい場合には第2段階で発生する sand wave が一旦消えて、峯の位置が若干ずれた位置で再び発生したり、部分的に Dune が発生したりする。Table-1では前者を白丸印 (Dune発生せず) 後者を半分白丸印 (不完全な Dune) として整理してある。砂漣 (ripple) はすべての段階で発生しているが、最終

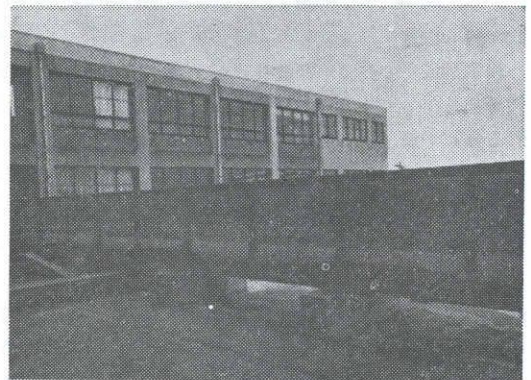


Photo. 1 Completely developed dunes on mobile bed.

的には Dune の峯と谷の位置でその波長が違い、Dune の峯近くに発生しているものほど波長が長い傾向がある。

#### (2) Duneの形状的特性

Dune の形状は前述したように正弦波形に近い形をしており、むしろ開水路の Antidune と似ている。Antidune の場合は射流域において発生する定常表面波のために底面流速が場所的に変化しそれに伴って底質の輸送量も場所的に変化するために発生するものである。そして

最終的には表面定常波と Antidune は同位相の波形になることが知られている<sup>6)</sup>。二次波峯現象下での Dune の場合には波高の場所的分布曲線と Dune とが同位相になっている。すなわち二次波峯発生点 (波高が大きい) に Dune の峯が位置し、二次波峯の追い越し点 (波高が小さい) に Dune の谷が位置する関係にある。この関係は Dune の発生機構のところで考察を加える。

さて、Dune の波高を  $H_d$ 、波長を  $L_d$  とし、表面波の平均波高 (場所的な平均) を  $H$ 、基本波長を  $L$  で表わすことにする。まず Dune の波高と波長の関係を調べたのが Fig-1 である。Fig-1 では周期によって区別して

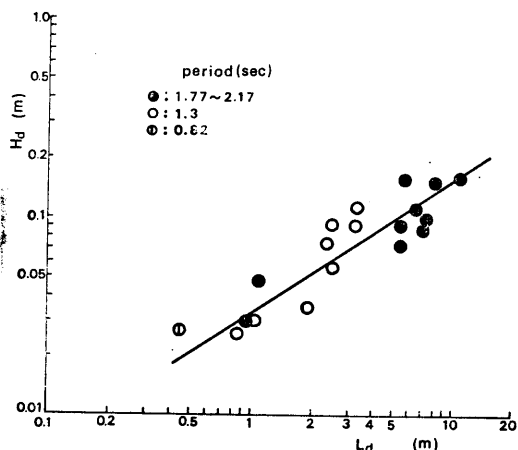


Fig. 1 Relationship between height and length of dune.

示してあるが、これによると周期には無関係に  $H_d$  と  $L_d$  の間にはほぼ(1)式が成立することがわかる。

$$H_d = 0.34 L_d^{2/3} \quad (1)$$

また二次波峯発生間隔式から算出した値と観測したDune

の波長との関係をプロットしたのが Fig-2 である。これを見ると Dune の波長  $L_d$  は二次波峯の発生間隔  $X$  と一致し  $L_d = X$  となることがわかる。発生間隔と波長の比 ( $X/L$ ) の値は水深波長比 ( $h/L$ ) と波高水深比 ( $H/h$ ) の関数であり、 $H/h \leq 0.1$  のときには(2)式で与えられることをすでに報告した<sup>3)</sup>。

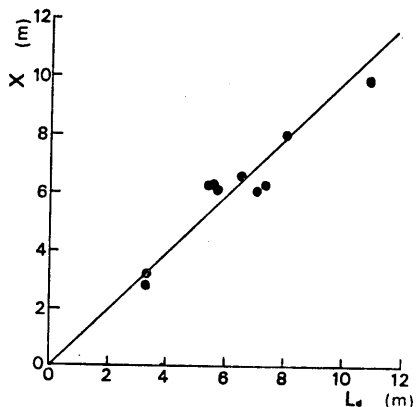


Fig. 2 Length of dune and recurrence distances of secondary wave crest.

$$X/L = \frac{L'}{L - 2L'} \quad (2)$$

ここで  $L'$  は周期が基本波の半分すなわち  $T/2$  を持つような微小振幅波の波長である。波高が大きくなった場合には上式の  $X$  に  $h/L$  と  $H/h$  の関数である次のような補正係数  $\alpha(H/h, h/L)$  を掛ければよい。

$$\alpha\left(\frac{H}{h}, \frac{h}{L}\right) = A \times \frac{h}{L} + B \quad (3)$$

ここで  $A$  と  $B$  は  $H/h$  の関数で Table-2 のような値である。これによって Dune の間隔を求めることができる。

Table 2 Modification coefficients  $\alpha$  for length of dune.

H/h	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50
A	4.690	7.136	8.543	8.940	8.862	9.098
B	0.5823	0.3404	0.1789	0.0831	0.0082	-0.0474

### (3) Dune の発生限界

Fig-3 の一点鎖線は Dune の発生限界を示したもので、石原一榎木<sup>7)</sup>による底質の移動限界式および McCowan の破波限界式をも一緒に示してある。この図を見ると Dune の発生する限界として  $h/L_0$  ( $L_0$  は沖波波長) の値に上限があることがわかる。ただし本実験では粒径が一種類だけであるので粒径によってどのように限界が変るかは不明であるが、 $d_{50} = 0.15\text{mm}$  に関するかぎり

$h/L_0 = 0.2$  が上限のようである。一般には底質の移動限界条件よりも波高が大きくなるか水深が浅くならないと Dune は発生しないことがわかる。

Fig-4 は二次波峯の発生限界式として知られる Miche の式と Dune の発生限界とを示したもので、Dune は二次波峯の発生領域よりも広い領域で発生することがわかる。すなわち二次波峯が明瞭には発生しないような単なる非定形波においても Dune が形成されることを示している。

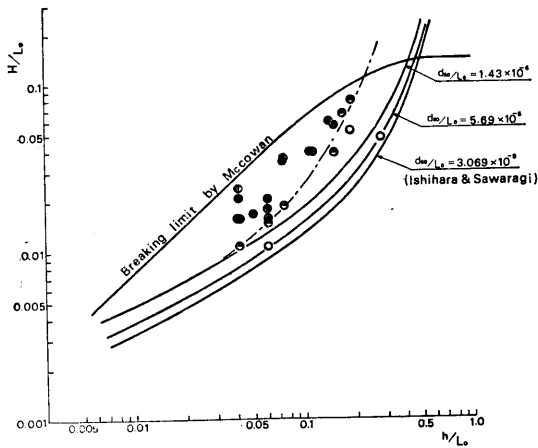


Fig. 3 Developmental criterion of dune in terms of wavestepness and shallowness.

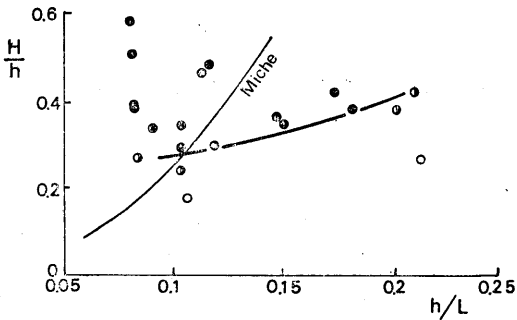


Fig. 4 Developmental criteria of dune and secondary wave crests.

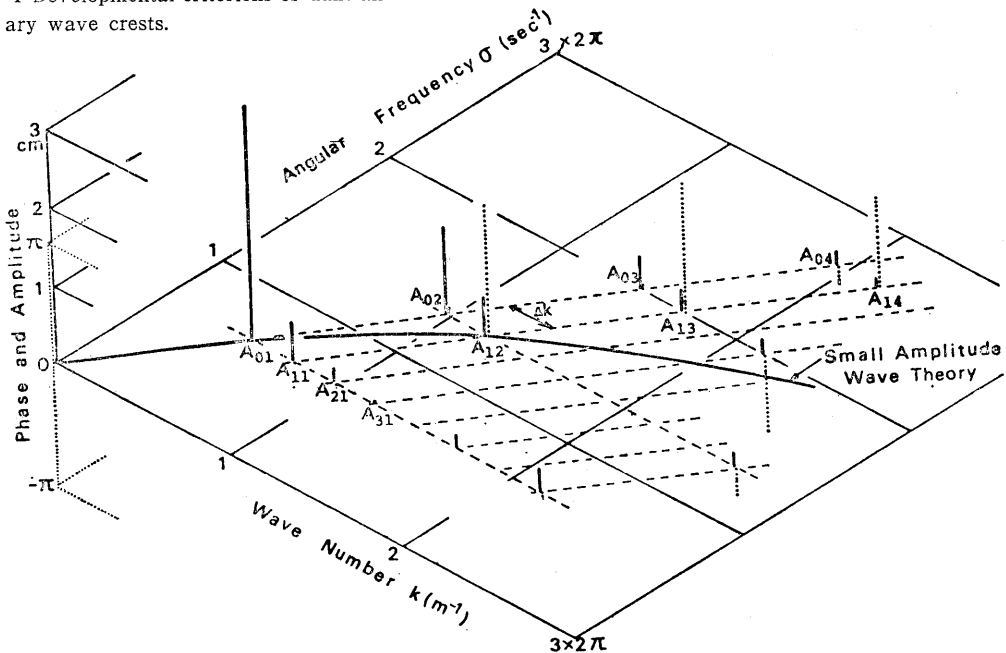


Fig. 6 Two dimensional spectrum  $A(f, k)$  of wave level under secondary wave motion.

#### 4 Dune の発生機構

##### (1) 二次波峯現象の特性

これまでに述べてきたことから明らかなように Dune 発生機構は二次波峯の発生機構と密接に関連している。そこで二次波峯現象について簡単に述べてみる。Fig.-5 は主峯および二次波峯群の軌跡を  $(x-t)$  平面上で示したもので、この図からわかるように時間波形は周期性を持っているが空間波形には周期性がない。また造波板直前

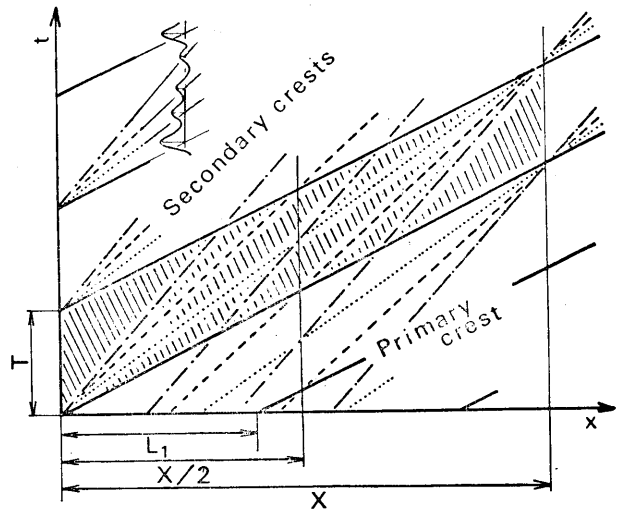


Fig. 5  $(x-t)$  diagrams of a primary crest and secondary wave crests.

( $x=0$ )から分裂を開始する二次波峯群は一定距離( $X$ )進行するごとに再び時間波形が元に戻っている。この現象を波形の再帰現象といい、 $X$ が再帰間隔あるいは二次波峯発生間隔である。Fig.-5で斜線を施した部分の水位記録を重調和解析すると波数周波数線スペクトルが得られ、結果の一例を示すと Fig.-6 のようになる。この図は波数周波数平面上に垂直に実線で振幅  $A_{n,m}$  を示し、点線で  $x=0, t=0$  における初位相  $\theta_{n,m}$  を示したものである。この図の中で振幅の大きい有意成分波は  $A_{01}, A_{02}, A_{03}$  などのストークス波を構成するような成分波と  $A_{11}, A_{12}, A_{13}$  などの成分波であり、結局二次波峯現象の水位変動  $\eta(t, x)$  は(4)式で近似的に表示できることがわかる。

$$\begin{aligned} \eta(t, x) = & A_{01}\cos(k_1x - \sigma_1t) + A_{02}\cos 2(k_1x - \sigma_1t) \\ & + A_{03}\cos 3(k_1x - \sigma_1t) + A_{11}\cos\{(k_1 + \Delta k)x - \sigma_1t\} \\ & + A_{12}\cos\{(2k_1 + \Delta k)x - 2\sigma_1t + \pi\} \\ & + A_{13}\cos\{(3k_1 + \Delta k)x - 3\sigma_1t + \pi\} \end{aligned} \quad (4)$$

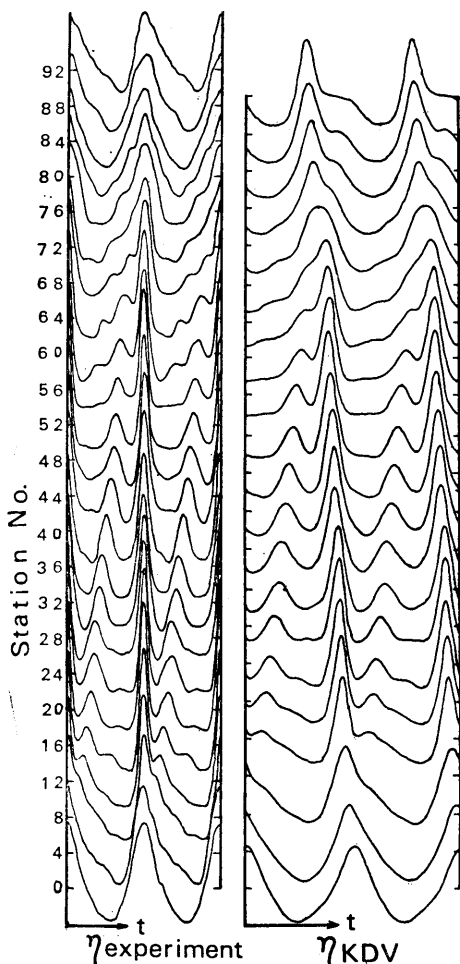


Fig. 7 Wave forms obtained from experiments and numerical calculations.

ただし分裂する二次波峯の数が4個になると  $A_{03}$ の初期位相が0から  $\pi$ に変化し、 $A_{23}$  ( $\theta_{23} \div \pi$ )の値がかなり大きくなる。 $A_{12}$ は自由波の分散関係式を満たす波であり、Fontanet waveとも呼ばれている。上式で  $k_1, \sigma_1$ は基本波(造波装置で発生させようとした波)の波数と周波数であり、Fig.-5の記号を使えば、

$$k_1 = \frac{2\pi}{L_1}, \quad \sigma_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

である。 $A_{11}, A_{12}, A_{13}$ などの成分波が発生する理由はPhillipsの非線型共鳴干渉の理論によって説明できることを著者らは報告している。Fig.-7はFig.-5の中で斜線を施した部分の時間波形を示したもので、左側が実験波形であり、右側はKDV方程式に基づいて数値計算した結果である。Fig.-5とは空間軸( $x$ 軸)が逆になっているが、 $x=0$ (station 0)の二次波峯の追い越し点における時間波形は正弦波形に近い形をしていることがわかる。分裂を開始すると時間波形の前面がつっ立った形

Table 3 Amplitudes and phases of component waves calculated from some experimental records.

Amplitude Phase	Height	Pressure	Bottom Velocity
$A_{01}$ (cm)	1.082	1.017	11.935
$\theta_{01}$ (rad)	0.0	0.0	0.0
$A_{11}$ (cm)	0.289	0.268	3.886
$A_{11}/A_{01}$	0.267	0.264	0.326
$\theta_{11}$ (rad)	-0.637	-0.732	-0.497
$A_{21}$ (cm)	0.138	0.112	1.974
$A_{21}/A_{01}$	0.128	0.110	0.165
$\theta_{21}$ (rad)	-2.617	-2.698	-2.907
$A_{02}$ (cm)	0.309	0.248	2.605
$A_{02}/A_{01}$	0.286	0.244	0.218
$\theta_{02}$ (rad)	0.752	0.737	0.497
$A_{12}$ (cm)	0.518	0.426	4.790
$A_{12}/A_{01}$	0.478	0.419	0.401
$\theta_{12}$ (rad)	-2.593	-2.596	-2.426
$A_{22}$ (cm)	0.156	0.137	2.221
$A_{22}/A_{01}$	0.144	0.135	0.186
$\theta_{22}$ (rad)	1.402	1.395	0.944
$A_{03}$ (cm)	0.181	0.131	1.622
$A_{03}/A_{01}$	0.144	0.129	0.136
$\theta_{03}$ (rad)	-0.619	-0.448	-0.051
$A_{13}$ (cm)	0.169	0.115	1.696
$A_{13}/A_{01}$	0.156	0.113	0.142
$\theta_{13}$ (rad)	-2.298	-2.169	-3.793
$A_{23}$ (cm)	0.177	0.078	0.513
$A_{23}/A_{01}$	0.108	0.077	0.043
$\theta_{23}$ (rad)	1.808	-4.296	-1.145

となり、後面が緩やかになるさらに進行して二次波峯の発生点 (Fig.-5 では  $x=X/2$  の地点, Fig.-7 では station 40付近) では主峯と主峯の中央に明瞭な二次波峯が発生して時間波形は対称形となり、主峯は非常に尖った形状になる。発生点を過ぎると再び非対称形となるが、今度は主峯の前方が緩やかで後方がつ立った形になる。さらに進行すると初期波形に戻っており、再帰現象があることがわかる。このように波形が非対称形になることが Dune の発生に大きな影響を与えることを次に述べる。

(2) Duneの発生機構

二次波峯現象の水位変動が(4)式で表示できるということは底面上での水粒子速度も(4)式のような形で表示できることを意味し、底面流速  $u_b$  の時間分布曲線も Fig.-7 のような分布曲線になる筈である。Fig.-8は小型プロベラ式流速計を使って水位と同様の観測を行ない波数周波数スペクトルを算出した一例であり、Fig.-6と同じような傾向を示している。Table-3には同時に得られた波形、波圧についての解析結果も示してある。ただし流速の場合にはプロベラ式流速計の特性として流向が逆転する時

に雑音のような乱れが記録されてしまう。したがって解析にあたっては流速が正から負へ変化する付近 (その逆の場合も然り) は雑音成分を除くべく、滑らかに修正して読取っている、とくに高周波成分は信頼度が低い。Fig.-9の底面流速分布  $u_b$  は実験による値でなく、一旦波数周波数スペクトルに分解した後、6個の有意成分波を再合成した分布形に基づいて作ったものである。

砂運が発生している場合の底質の移動状況は波峯が通過する時 (岸向きの流速となり、これを正にとる) に掃流状態で岸へ向って移動し、谷が通過する時 (沖向き流速) に浮遊状態で沖へ向って移動する性質があり、浮遊状態での移動量が漂砂現象に大きな影響を与えているのが特徴である。そこで掃流状態での移動限界流速を  $u_c$  とし、浮遊状態での移動限界流速を  $u_f$  とする。浮遊状態の時には  $u_c$  以下になっても  $t$  時間は浮遊しているものと仮定する。Fig.-9は各点における底面流速  $u_b$  の時間分布を模式的に示したもので、斜線部分は掃流状態を意味し、点で示した部分は浮遊状態で移動していることを意味している。掃流状態における  $x$  方向流砂量  $q_x$  の大小関係は  $u_c$  の値によって変る。たとえば(a)ではまったく底質が動かず、(c)でだけ動くような場合も考えられる

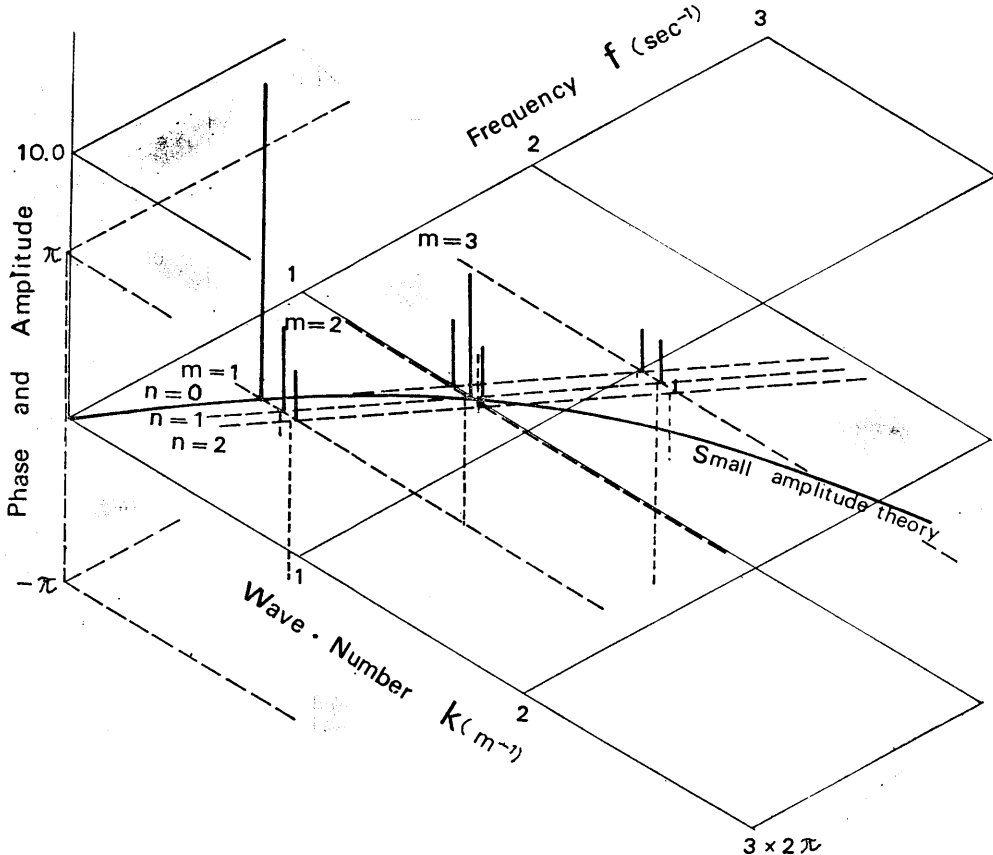


Fig. 8 Two dimensional spectrum of horizontal velocity on bed

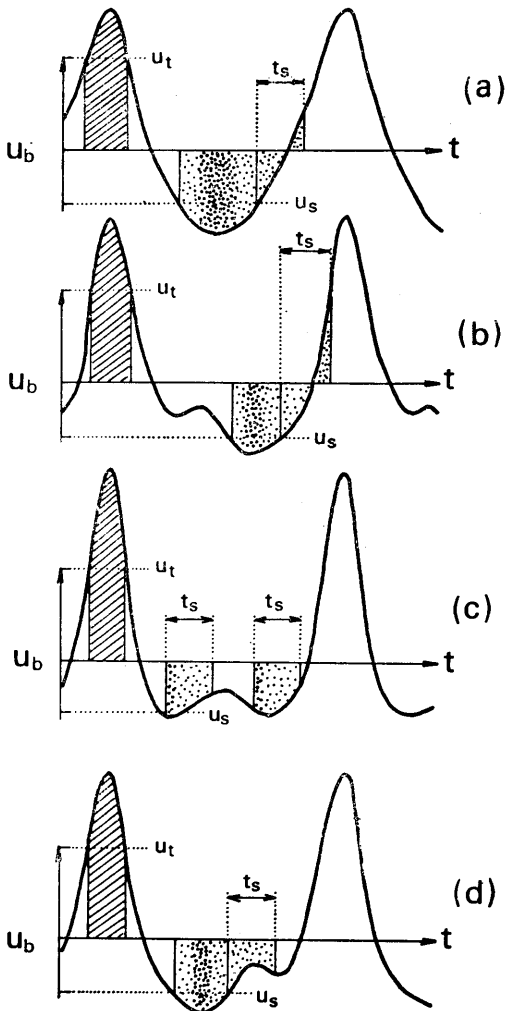


Fig. 9 Schematic explanation of transportation mechanism under asymmetric wave forms of horizontal velocity component.

が、一般的にいえば(a)では  $u_b$  が小さいが移動している時間が長く、(c)では  $u_b$  が大きい時間が短いといえる。したがって、 $x$  方向流砂量の変化は場所的にそれほど大きくないといえるが、浮遊砂のほうは次に述べるようにならかなりの変化が考えられる。(a)は  $x=0$  および追い越し点での流速分布であるが、この場合冲向き流速は(c)の発生点より大きいので浮遊砂濃度は高く<sup>8)</sup>、 $x$  方向の全流砂量は負となるだろう。(b)は  $x=X/4$  の地点であるが、時間波形は前方が急勾配となっているので浮遊した底質は短時間後に正方向の流速に乗って岸向きに運ばれ、全流砂量は正の方向にかなり大きな量となる。(c)は二次波峯の発生点であるが、冲向き流速は(a)よりかなり小さく濃度は低い。しかし冲向きに移動している時間は長い

で全流砂量は正であるが(b)よりも小さな値となるだろう。(d)は  $x=\frac{3}{4}X$  の地点で、 $u_b$  の時間波形は後面が急勾配となり、浮遊した後の流速が冲向きのままで長く続く。また濃度もかなり高いので全流砂量は負あるいは0に近い値となる。(a)から(d)までを1サイクルとする現象が繰り返されるのでこれを基にして全流砂量の空間分布を模式的に示したのが Fig. 10 上段の図である。これから  $\partial q_s / \partial x$  を求めると中段の図のようになり、(6)式の連続式から判

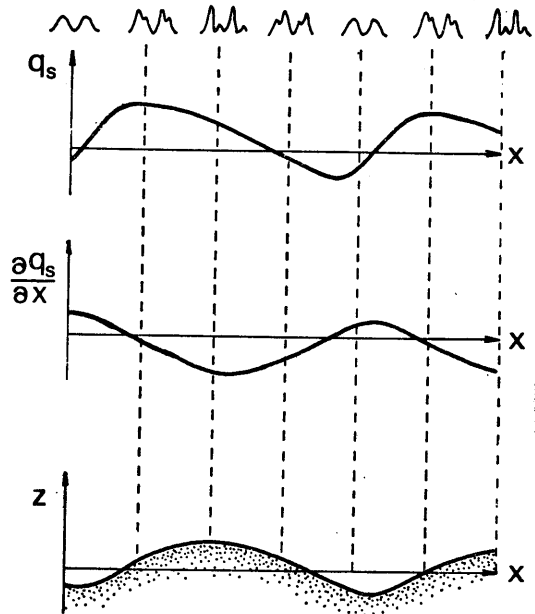


Fig. 10 Schematic explanation of developmental mechanism of dune.

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = -\gamma_s \frac{\partial z}{\partial t} \quad (6)$$

断して水底変化は下段の図のようになる。すなわち二次波峯の発生点に砂が堆積し、追い越し点は砂が取られることになる。以上が浅水領域で見られる Dune と名付けた Multi Bar の発生する機構である。

### 5 結 論

浅水領域の底面に発生する波長の長い Sand wave を Dune と名付けたが、Dune の特性および発生機構に関して以下のようなことが明らかになった。

(1) 著者らが Dune と呼ぶこの Sand wave は形状的には開水路移動床で見られる Antidune に似ている。Antidune は表面の定常波と同位相にあるが、この場合の Dune は波高分布曲線と同位相になる。

(2) Dune の波高  $H_d$  と波長  $L_d$  の間にはかなり明瞭な関係があり、実験的に(1)式が成立する。

(3) Dune の波長  $L_d$  は二次波峯の発生間隔と同じであり、表面波の波高、周期および水深などの関数として与えられる。

(4) Dune の発生機構を明らかにすることができた。すなわち、底面流速  $u_b$  の時間分布曲線が二次波峯発生点の前後で非対称になることが原因であり、とくに冲向き流速の分布曲線が強い影響を与えている。

最後に本研究は昭和51年度文部省科学研究費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) 細井正延・石田昭：二次波峯現象における非線型性の解析，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 47～52, 1970.
- 2) 石田昭・石田和生：浅水領域における波形の分裂現象—二次波峯現象と Soliton について—，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 403～409, 1973.
- 3) 石田昭：浅水領域での分裂波 Soliton の特性について，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 41～46, 1975.
- 4) Phillips, O.M.: On the dynamics of unsteady waves of finite amplitude, part1, the elementary interactions, J.F.M., Vol. 9, pp. 193～217, 1960.
- 5) Karakiewicz, B.B.: Wind waves in surf zones, Abstract of 14th coastal Engineering Conference, 1974.
- 6) Yalin, M.S.: Mechanics of Sediment Transport, 2nd Edition, Pergamon Press, 1977.
- 7) 石原藤次郎・榎木亨：漂砂の移動限界流速，限界水深，および移動量について，第17回海岸工学講演会講演集，1960.
- 8) 細井正延・稲垣青生：進行波による浮遊砂の濃度分布について，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 325～328, 1975.