

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

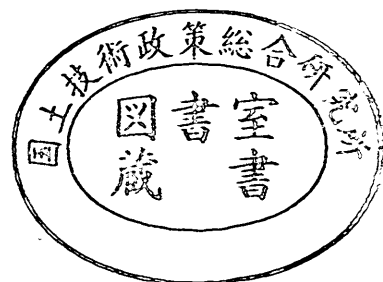
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 12

NO. 4

DEC. 1973

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



1973

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第12巻 第4号 (Vol. 12, No. 4), 1973年12月 (Dec. 1973)

目 次 (CONTENTS)

1. 波と流れによる砂移動に関する実験
..... 田中則男・小笹博昭・小笠原昭..... 3
(Experiments on Sand Movement by Waves and Currents
.....Norio TANAKA, Hiroaki OZASA and Akira OGASAWARA)
2. 楕円柱体近似による固定船体に働く波力の理論および実験
..... 合田良実・高山知司・笹田 正..... 23
(Theoretical and Experimental Investigation of Wave Forces on a Fixed Vessel
Approximated with an Elliptic Cylinder
..... Yoshimi GODA, Tomotsuka TAKAYAMA and Tadashi SASADA)
3. 空港アスファルト舗装のわだちぼれ
..... 森口 拓・浅島豊明・渋谷英男..... 75
(Rutting of Asphalt Pavements for Airports
..... Hiraku MORIGUCHI, Toyoaki ASAJIMA and Hideo SHIBUYA)
4. 連続載荷方式による急速圧密試験
..... 梅原靖文・松本一明・成田 実・梅田裕史.....131
(Rapid Consolidation Test Under Continuous Loading
.....Yasufumi UMEHARA, Kazuaki MATSUMOTO, Minoru NARITA
and Hirojumi UMEDA)
5. 各種地盤における平均応答スペクトル
..... 土田 肇・倉田栄一・石坂徳三・林 聡.....171
(Average Response Spectra for Various Site Conditions
..... Hajime TSUCHIDA, Eiichi KURATA, Tokuzo ISHIZAKA
Satoshi HAYASHI)
6. 太径鉄筋を用いたコンクリートはりのひびわれ
..... 関 博.....201
(Crack Characteristics of Reinforced Concrete Beams with Large-sized Deformed Bars
.....Hiroshi SEKI)
7. ドラグヘッドに関する研究 (第1報)
——ドラグヘッドの基礎形状について——
..... 八木得次・奥出 律・是石昭夫.....233
(Study of Drag Suction Head (Part 1)—On the Basic Geometry of Draghead—
..... Tokuji YAGI, Tadasu OKUDE and Akio KOREISHI)

1. 波と流れによる砂移動に関する実験

田中 則男*・小笹 博昭**・小笠原 昭**

要 旨

波と流れが共存する場合に、漂砂に関する諸特性量（浮遊砂重量濃度分布、掃流漂砂量、リップル形状）が波だけの場合とどのように異なるかという点は、港湾・航路の埋没、河口閉塞等の問題を取り扱う際に是非検討しておかねばならない事項である。それにもかかわらず、波と流れが共存する場合の漂砂に関する実験例は少なく、それらについても無次元表示された形に整理されていないために現象の統一的な解釈が不可能であったり、流れを加えた際における砂移動状態についての物理的な考察が不足していたりするように思われる。

著者等はまず波だけの場合の砂移動を無次元表示した形で示し、続いて波に加えた流れの断面平均流速に関する無次元量の変化に伴って砂移動の無次元量に変化する様子を検討した。

すなわち浮遊砂濃度分布については、従来いわれた濃度分布型の多様性（「く」の字型、逆「く」の字型、指数型）を重要視せず、ほぼ $c > 100$ ppm の所で濃度分布は指数型になるとしてデータを整理した。濃度分布の基準点の高さは $a = 0.05h$ とおき、 c_a , e_z を求めている。続いて波だけの場合の c_a を $c_{a0} \sim w_0/u_b$ のグラフ (Fig. 15) としてまとめ、流れを加えた場合の c_a の変化を $c_a/c_{a0} \sim U/w$ のグラフ (Fig. 16) によって示した。 e_z については、波だけの場合の e_z を $e_{z0}/\nu \sim u_b\delta/\nu$ のグラフ (Fig. 17) であらわし、流れを加えた場合における e_z の変化を $e_z/\nu \sim Uh/\nu$ のグラフ (Fig. 18) によって示した。

掃流漂砂量については、波だけによる掃流漂砂量を $\bar{q}_{B0}/u_b d \sim u_b^2/[(\sigma/\rho - 1)gd]$ のグラフ (Fig. 18) であらわし、流れを加えた場合における掃流漂砂量の変化については、順流の場合について岸向、冲向、Net の各漂砂量の変化する様子を示した (Fig. 20)。

波に流れを加えた場合におけるリップルの変形については、Fig. 22 に示すように、 $d_0/\lambda \sim Ud/\nu$ (波長)、 $d/\lambda \sim Ud/\nu$ (波高)、 $\beta/\lambda \sim Ud/\nu$ (対称性) の各グラフによって検討した。

以上の検討により、著者等が解析したデータの範囲内では流れだけによって砂が移動する限界流速を境として漂砂に関する諸特性量の遷移がおこることがわかった。

* 水工部 漂砂研究室長

** 水工部 漂砂研究室

1. Experiments on Sand Movement by Waves and Currents

Norio TANAKA*

Hiroaki OZASA**

Akira OGASAWARA**

Synopsis

When shoalings of port, sea route, and estuary are studied, investigations are required on the subject that how sand movement (bed load, suspended load, form of ripples) by waves and currents differs from it by only waves. Nevertheless, few experiments have been made about sand transport by waves and currents (Inman & Bowen (1963), Abou-Seida (1964)). These results have not been shown in non-dimensional form, so sand movement by waves and currents cannot be understood as a whole. Moreover, we think that these papers need more detailed physical considerations.

In this paper, first of all, some characteristic values of sand movement by only waves are shown in non-dimensional form. About rate of bed load, see Fig. 19. And about concentration curve of suspended load, see Fig. 15, 17. After that, it is studied by experiments how non-dimensional values of sand movement change according to change of non-dimensional average velocity of current. (bed load—Fig. 20, concentration curve of suspended load—Fig. 16 & Fig. 18, form of ripples—Fig. 22)

Especially, in the studies of concentration curve of suspended load, we considered that it became exponential type distribution and $[a]$ (height of standard point of concentration curve, Eq. (1)) was $0.05h$ (h ; water depth). According to these considerations, C_a (concentration of suspended load at $z=0.05h$) and ε_s have been determined.

The result that, in the range of our experiments, characteristic values of sand movement changed at the threshold velocity by only current, was obtained by investigations.

* Chief of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	3
1. 緒 論	7
2. 実験施設, 方法および実験条件	7
3. 波に流れを加えた場合における漂砂の諸特性量の変化	10
3.1 水理量 (波長, 波高, 水粒子速度) の変化	10
3.2 浮遊砂濃度分布の変化	12
3.3 掃流漂砂量の変化	17
3.4 リップル形状の変化	19
4. 結 論	20
参 考 文 献	21
記号一覧表	22
附 録 波に一樣流れが加わった場合における波長, 波高, 水粒子速度の計算	22

1. 緒 論

波に流れを加えていった場合に、漂砂に関する諸特性量（浮遊砂濃度分布、掃流漂砂量、リップル形状）がどのように変化するかという問題は、港湾、航路の埋没、沿岸漂砂、河口閉塞、潮流のある場での漂砂現象といった問題を考える際に是非検討しておかねばならない事項である。それにもかかわらず、従来二、三の実験的な検討例があるのみであり、系統的な実験および実験結果の統一的な整理はいまだ行なわれていないようである。

Inman & Bowen¹⁾, Abou-Seida²⁾ は、波に流れを加えていった場合に、波高、波長、底近傍水粒子速度、掃流漂砂量、リップル形状がどのように遷移していくかを実験的に調べているが、両者の実験条件の間には大きい差異がある。

中村・白石・佐々木・伊藤^{3,4)} は、波に流れが加わった場合に、 $U_b = |u_b| = |u_{wave} + U_{flow}|_{z=-h}$ という波と流れが合成した場合の底面水粒子速度の絶対値の平均量をもって流速の特性量とし、掃流漂砂量の変化を開水路移動床の場合の整理法にならって検討している。

また、波と流れが共存した場における浮遊砂濃度分布の現地観測値としては、J.K. Jensen & T. Sorensen⁵⁾ によるものがある。

著者等は、まず波だけによる前述した漂砂の諸特性量を、無次元化して示している。波に流れを加えていった

場合には、流れの断面平均流速を用いて定めた流れに関する無次元量の変化に伴って、無次元化された漂砂の諸特性量がどのように変化していくかを実験的に検討し、Inman & Bowen および Abou-Seida の実験結果をも含めて、実験結果の統一的解釈を行なうことを試みた。

2. 実験施設、方法および実験条件

Fig. 1 に実験水路を示す。造波機はフラッター式のものである。水路中央部 9m に厚さ 10cm で底質をしき、その両端に杉板製の砂止めをもうけ、砂止めの両側は緩やかな勾配で水路床にすりつけた。水路縦断方向には E 断面を観測箇所とし、水路横断方向の観測断面は $y=0.0$ cm の水路壁面から $y=11.3, 50.0, 88.7$ cm の 3ヶ所とした。なお壁面は環流パイプ側がガラス壁面、 $y=100.0$ cm の所が鋼板壁となっている。

流れは、平面図に示されたバルブを適当に操作することにより波に対して順流、逆流がおこせるようになっており、流れは環流パイプ、タンク、スクリーンを通じて水路中に吐き出される。吐出しおよび吸い込みの所で波は若干変化するようである。環流パイプを通る流量は、ベンチュリー管、水銀マンオメーターによって測定できるようになっている。

Fig. 2-a, b は実験に用いた底質（砂および石炭粉）の粒径加積曲線である。砂の諸元は $d_{50}=0.16$ mm, ふるい分け係数 $S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}}=1.21$, 密度 $\sigma=2.73$ g/cm³

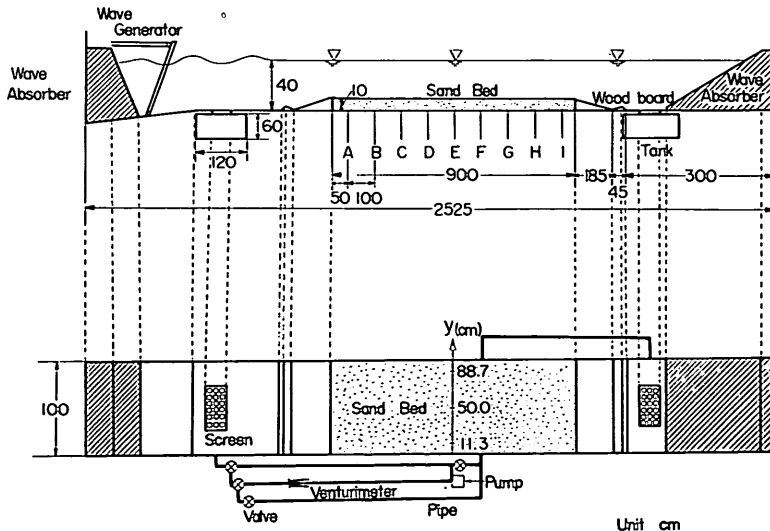


Fig. 1 Experimental Channel

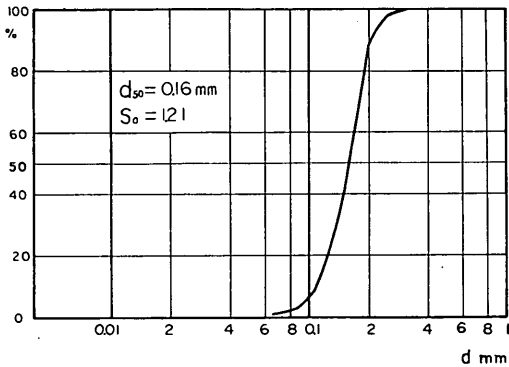


Fig. 2-a Grain size accumulation curve (Sand)

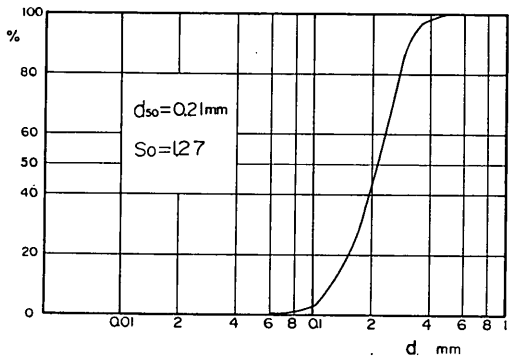


Fig. 2-b Grain size accumulation curve (Coal)

であり、石炭粉の諸元は $d_{50}=0.21\text{mm}$, $S_0=1.27$, $\sigma=1.60\text{ g/cm}^3$ である。

実験はまず移動床面を平らにならし、A～I断面の $y=11.3, 50.0, 88.7\text{ cm}$ 地点において底面高をポイントゲージによって測定した。続いて30～60分程度所定の波と流れをかけた後、水粒子速度、掃流漂砂量、浮遊砂濃度分布、波高、波長、リップル形状の順に測定を行なった。以上の測定には約90分を要した。最後にポイントゲージによって移動床面高を測定した。それぞれの測定は次の要領で行なっている。

イ) 水粒子速度

正逆プロペラ式流速計を用い、E断面の $y=11.3, 50.0, 88.7\text{ cm}$ の各箇所において、底面上2cmの所から25cmの所まで1～3cmきざみで水粒子速度の測定を行なった。測定値は電磁オシログラフにデジタル形式のパルスとして記録させた。このパルス間隔が最もまっている所のパルス間隔を5波程度について読みとり、これから求めた水粒子速度データの平均値をもって、

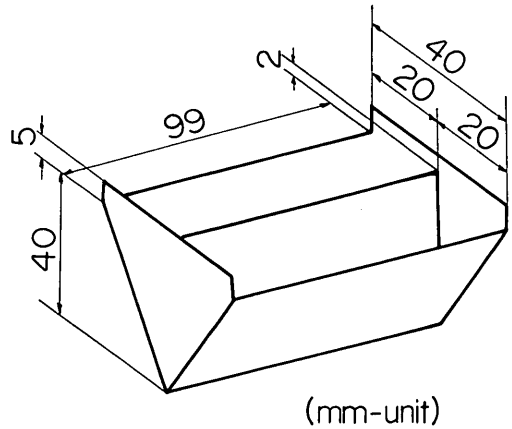


Fig. 3 Measuring trap of bed load

各実験ケースにおける岸向、冲向各方向の水粒子速度の最大値とした。また流れだけの流速分布も測定した。

ロ) 掃流漂砂量

Fig. 3 に示す掃流漂砂量測定器を、長辺が流れに直交するように底質中に埋めこみ、岸向、冲向各方向の掃流漂砂量を測定した。移動床面には反射波の存在によると思われる大きなうねりが存在していて（特に Exp I-1～I-10 において顕著であった）、このうねりや移動床面に発生したリップルの中のどの位置に測定器をおくかが、掃流漂砂量の測定値に大きな影響を与えると思われる。そのために、うねりの山と谷、リップルの山と谷、 $y=11.3, 50.0, 88.7\text{ cm}$ の各位置、計12箇所に測定器をうめこんで掃流漂砂をトラップし、それらの平均として冲向、岸向掃流漂砂量を求めた。本測定器を用いて掃流漂砂量を求める場合、底面の乱れが大きくなってきた時（特に逆流の場合）や、底面水粒子速度が大きくなってきた時には、測定器中央の仕切り板をとびこえて砂が移動し、逆方向の掃流漂砂として計量される側に砂が入ったり、あるいは測定器中にトラップされない掃流漂砂がでてきたりして、測定精度が悪くなってくるようである。

ハ) 浮遊砂濃度分布

E点 $y=50.0\text{ cm}$ において、サイホン式採水器により底面から0.5～3cmきざみに各箇所浮遊砂を採取し、浮遊砂重量濃度分布を求めた。一箇所の採水に要する時間は約30秒であった。採水はリップルの山および谷上において、それぞれ行なっている。

ニ) 波高、波長

波高は容量式波高計を用いてA～I点において測定した。波長はE点付近で二台の波高計（一台が水路縦断方

波と流れによる砂移動に関する実験

向に可動で、一台は固定)を用いて、両波高記録の位相が一致する二地点を見出し、その時の波高計間の距離を測定して波長とした。波長の測定精度は $\pm 10\text{cm}$ 程度と思われる。

ホ) リップル形状

E点付近において、ガラス壁面 ($y=0.0\text{cm}$ の所にあたる) をとらして、Fig. 4 に示すリップルの波長 λ 、波高 d 、リップルの山から谷までの距離 β を測定した。移動床面上に発生したうねりの山においてリップルのスケールが大きく、うねりの谷においてリップルのスケールが小さかったので、うねりの半波長にわたってリップル形状を測定し、それらの測定値の平均値を λ 、 d 、 β のデータとした。

Table 1 は実験条件の一覧表である。表中の Q はベンチュリー管、マンメーターによって測定したパイプを通る流量、 h はA~I断面における断面測定結果から

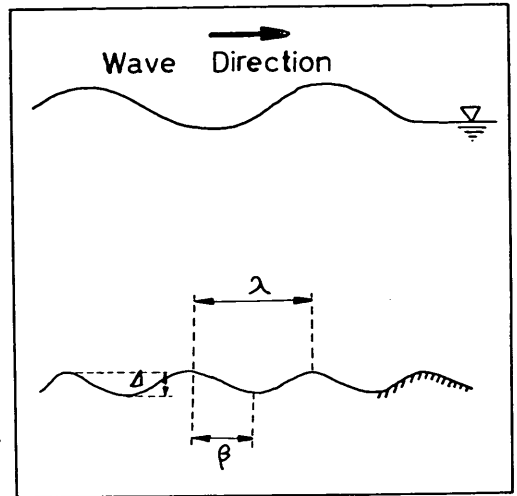


Fig. 4 Sketch of ripples

Table 1 Experimental Case and Data

Exp. Case	Q (l/sec)	U (cm/sec)	h (cm)	H (cm)	T (sec)	ν (cm ² /sec)	Bottom material	Direction of flow	remarks
I-1	0	0	30.5	11.4	2.0	0.00881	Sand		
2	11.3	3.6	31.0	11.0	"	0.00891	"	Following flow	
3	18.9	6.2	30.7	11.2	"	0.00867	"	"	
4	32.5	10.6	30.8	10.9	"	0.00897	"	"	
5	52.1	17.0	30.7	10.4	"	0.00862	"	"	nearly U_{cr}
6	71.4	23.4	30.5	10.3	"	0.00837	"	"	
7	-20.0	-6.6	30.1	12.8	"	0.00858	"	Opposing flow	
8	-35.2	-11.7	30.1	14.6	"	0.00881	"	"	
9	-52.9	-17.6	30.1	14.9	"	0.00932	"	"	nearly U_{cr}
10	-71.3	-24.1	29.6	14.5	"	0.00949	"	"	
II-1	0	0	29.8	11.3	1.25	0.00981	"		
2	15.8	5.3	30.0	11.0	"	0.01012	"	Following flow	
3	32.3	10.8	30.0	10.8	"	0.00997	"	"	
4	54.1	18.1	29.8	10.3	"	0.01078	"	"	nearly U_{cr}
5	71.3	23.9	29.8	10.0	"	0.01117	"	"	
6	-13.0	-4.3	30.1	11.6	"	0.01178	"	Opposing flow	
7	-33.1	-11.0	30.2	12.3	"	0.01172	"	"	
8	-55.1	-18.3	30.1	13.3	"	0.01226	"	"	nearly U_{cr}
III-1	0	0	29.3	9.8	"	0.01311	Coal		
2	17.2	5.8	29.6	9.8	"	0.01351	"	Following flow	
3	30.8	10.4	29.8	9.4	"	0.01375	"	"	nearly U_{cr}
4	50.0	17.3	28.9	9.5	"	0.01062	"	"	
5	-17.2	-5.8	29.5	10.2	"	0.00983	"	Opposing flow	
6	-30.7	-10.3	29.8	11.6	"	0.00938	"	"	nearly U_{cr}
7	-54.8	-18.3	29.9	12.2	"	0.00983	"	"	

求めた平均水深, U は $Q/b \cdot h$ (b は水路幅) によって求めた流れの断面平均流速, H は $(H_D + 2H_B + H_F)/4$ によって求めた波高 (0.05~0.10 程度の反射率と思われる反射波が存在していた), T は波の周期である。なお備考に記した「 U_{cr} 程度」というのは, 流れだけで底質を動かせる状態の時の断面平均流速を, 岩垣公式を用い, 摩擦速度が断面平均流速の 1/10 すなわち $U/u_* = 10$ とおくことによって求め, ほぼ流れだけによる底質移動限界に近い状態であることを確認して実験が行なわれたことを示している。底質としては, Exp. I-1~I-10, II-1~II-8 においては砂を用い, Exp. III-1~III-7 においては石炭粉を用いた。

3. 波に流れを加えた場合における漂砂の諸特性量の変化

3.1 水理量 (波長, 波高, 水粒子速度) の変化

波に流れを加えた場合の波長, 波高の変化は, 一様流の場合について富永⁹⁾, 1/7 乗分布の流れについて Hunt⁷⁾, 放物線分布の流れについて浜田・加藤⁹⁾ によって取り扱われている。彼等の取り扱いはいずれも, 波が流れのない場から流れのある場に出てきた時の波高波長の変化を, 場が変わった際の遷移状態の発生を考慮することなしに取り扱ったものである。したがって理論的に考慮されたモデルと著者等の実験とは異なったものなのであるが, ここでは実験結果と共に, 参考までに一様流の場合についての計算結果も示す。なお富永が示した波に一様流を加えた場合における波長, 波高の変化の計算の詳細については附録を参照されたい。

Fig. 5 に波に流れを加えた場合の波長の変化を示す。図中, 曲線は富永が示した式による一様流を波に加えた

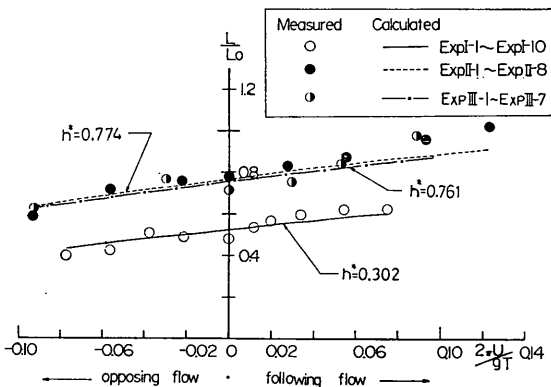


Fig. 5 Change of wave length by added currents

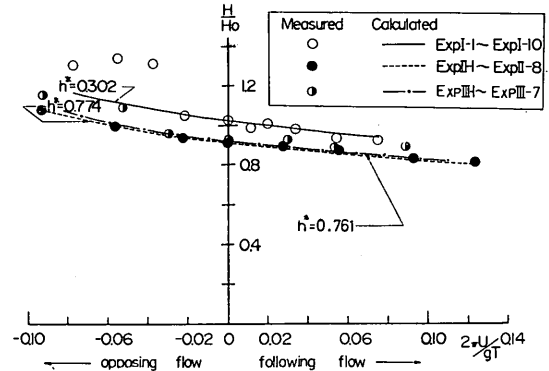


Fig. 6 Change of wave height by added currents

場合の波長変化の計算結果である。なお, 実験値について U は波に加えた流れの断面平均流速であり, L は E 点付近で得られた測定値である。 h^* は水深に関する無次元量で, $h^* = \frac{4\pi^2 h}{gT}$ である。

Fig. 6 に波に流れを加えた場合の波高の変化を示す。図中, 曲線は富永が示した式による波高変化の計算結果である。なお, 実験値として用いた波高はすべて Table 1 に示した値である。Fig. 6 によると Exp. I-8~I-10 の場合 ($2\pi U/gT < -0.03$ のデータ) に計算値とのづれがでてきている。

なお, 実験において次の事項が確認された。

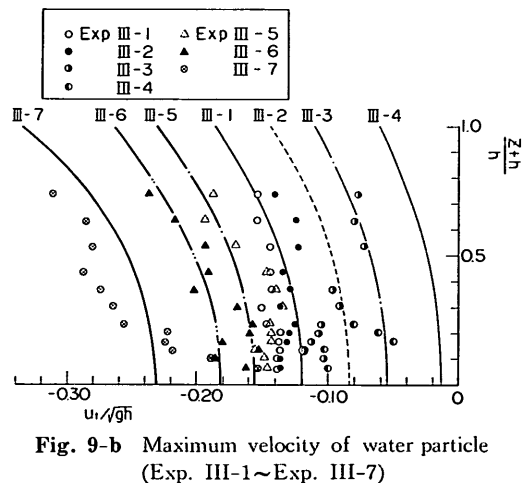
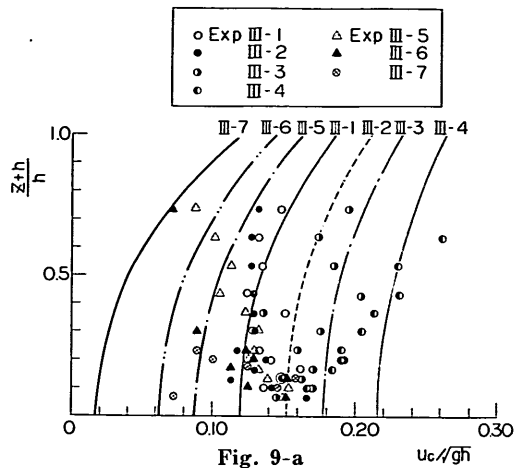
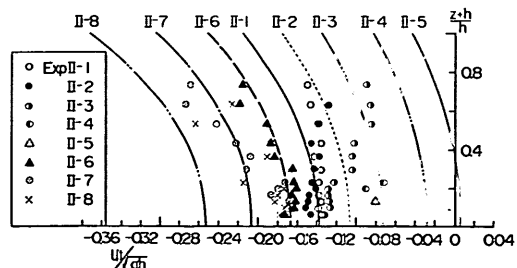
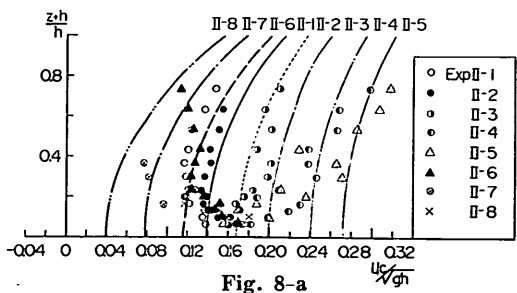
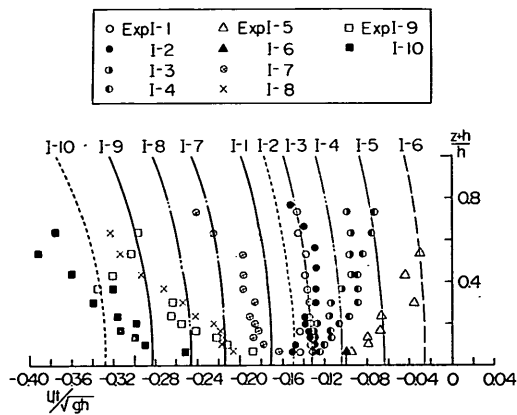
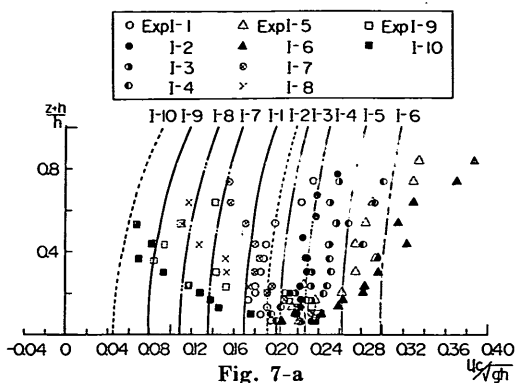
イ) 順流の場合には, A~I 点において測定された水路縦断方向の波高分布は, 特に流れが強くなってきた場合には特徴的であるが, A から I へと指数的に波高が減少していく形になる。一方, 逆流の Exp I-7 では水路縦断方向に波高が増大していく形になっていた。

ロ) Exp. I-8~I-10, II-7~II-8, III-7 では崩れ波型碎波が見られた。

波に一様流が加わった場合における水粒子速度の変化については浜田・加藤⁹⁾ が取り扱っている。彼等の取り扱いも, 波に流れが加わった場合における波長波高の変化と同じく, 波が流れのない場から流れのある場に出てきた際の遷移状態の発生を考慮していないため, 著者等の実験とは異なった条件についての解であるが, 参考までに実験結果と共に計算結果も示してある。なお, 浜田・加藤の示した, 波に一様流が加わった際における水粒子速度分布式から求めた, 水粒子速度の最大値の計算の詳細については附録を参照されたい。

Fig. 7-a, b, Fig. 8-a, b, Fig. 9-a, b に $y=50.0$ cm における水粒子速度の最大値の鉛直分布を示す。図

波と流れによる砂移動に関する実験



中の曲線は、附録に示す式による計算値である。実験結果から次の諸点が考察される。

- イ) 山における水粒子速度は底面から離れるに従い流れに大きく影響されるが、底層近くでは流れを加えても波だけの場合の水粒子速度からそれほど変化しない。
- ロ) 谷における水粒子速度は底面から離れた所では勿論のこと、底層近くにおいても流れに影響されてかなり変化する。
- ハ) $y=11.3, 50.0, 88.7$ cm における水粒子速度の測定値によると、水路横断方向における水粒子速度の相異は数 cm/s 程度存在している。実験結果の一例を Fig. 10 に示す。
- ニ) 流れだけの流速分布はほぼ対数則に近い形状となっている。実験結果の一例が Fig. 11 に示されている。

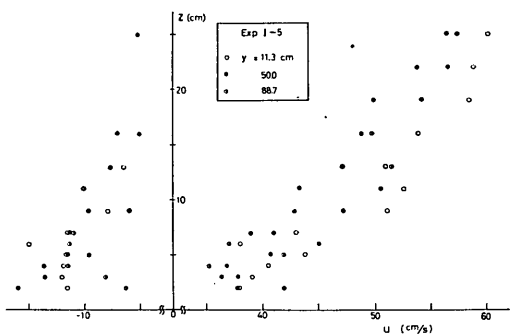


Fig. 10 Maximum velocity of water particle at $y=11.3, 50.0, 88.7$ cm

3.2 浮遊砂濃度分布の変化

波に流れを加えた場合における浮遊砂濃度分布の変化を系統的に検討した実験例は、著者等の知るかぎり存在しないようである。本節では波に流れを加えていった場合における浮遊砂濃度分布の変化を系統的に記述しようと試みる。

Fig. 12-a, b, Fig. 13-a, b, Fig. 14-a, b はリップル山上における浮遊砂重量濃度分布を示している。図から次の諸点が考察される。

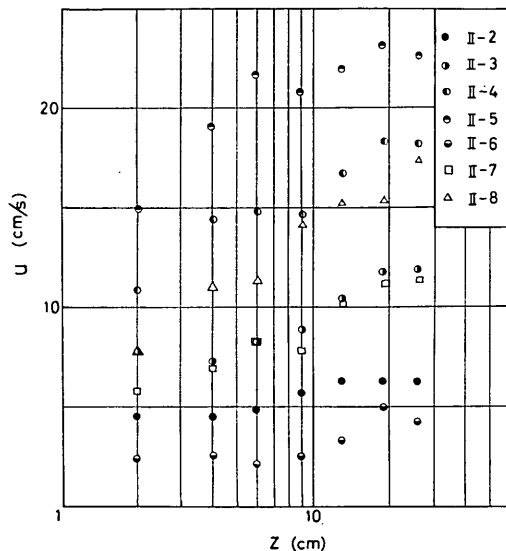


Fig. 11 Velocity distribution curve of current

- イ) 我々の実験の範囲では、波だけの実験 (Exp I-1, II-1, III-1)における濃度分布は、すべていわゆる「く」の字型分布となる。
- ロ) 正逆流ともに流れが Table 1 に示す U_{or} 程度に速

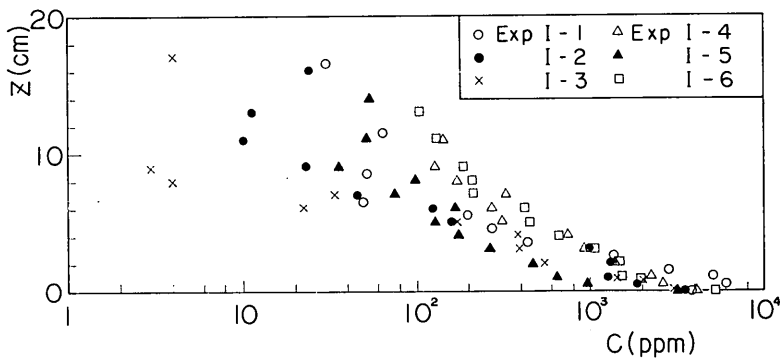


Fig. 12-a Concentration curve of suspended load

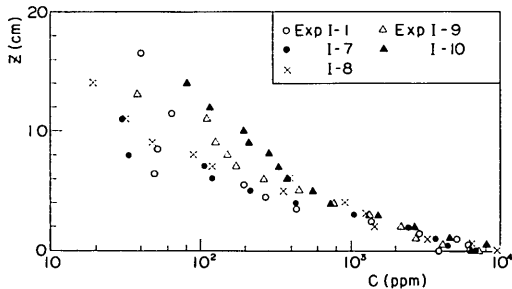


Fig. 12-b Concentration curve of suspended load

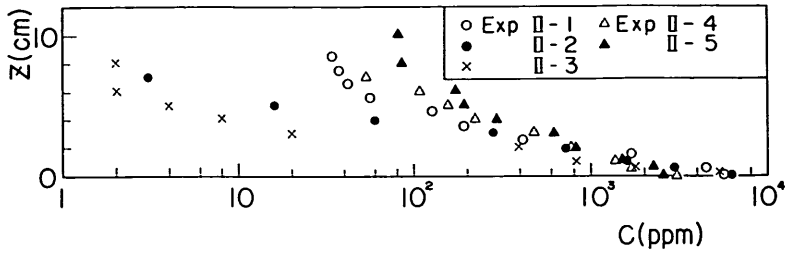


Fig. 13-a Concentration curve of suspended load

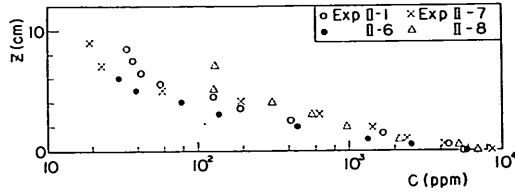


Fig. 13-b Concentration curve of suspended load

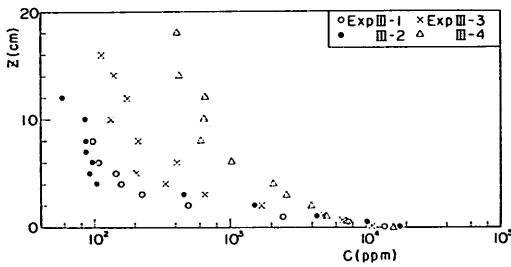


Fig. 14-a Concentration curve of suspended load

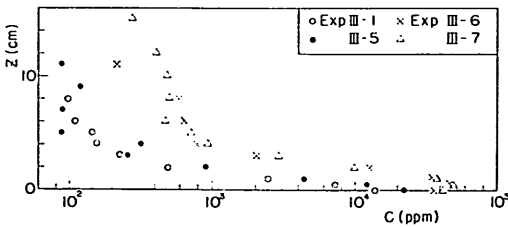


Fig. 14-b Concentration curve of suspended load

い時には、底面から離れた低濃度の所の濃度が増加し、みかけ上指数型の濃度分布となる。また濃度分布に弱い屈曲点が見られる。

さて浮遊砂濃度分布は一般に次式に従って検討される。

$$\frac{c}{c_a} = \exp \{-w(z-a)/\epsilon_z\} \quad \dots\dots (1)$$

上式において

c; 底面からの距離 z の点における浮遊砂重量濃度

a; 底面から濃度分布の基準点までの距離

c_a; 濃度分布の基準点における浮遊砂重量濃度

w; 浮遊砂の沈降速度

ε_z; 鉛直方向の拡散係数

浮遊砂濃度分布を (1) 式によって定式化する際に問題となってくるのは、いわゆる「く」の字型、逆「く」の字型、指数型といった異なった濃度分布型の存在をどう処理するかという点と、(1)式における a, c_a, ε_z をいかに定めるかという点である。

浮遊砂の濃度分布型については、「く」の字型、逆「く」の字型、指数型が存在することが従来から指摘されており¹⁰⁾、野田・岩佐¹⁰⁾、田中・新保¹¹⁾、服部¹²⁾は濃度分布の勾配急変点を浮遊砂濃度の基準点にとっている。これに対し、本間・堀川・鹿島¹³⁾は、濃度分布基準点を a = 0.1h とし、浮遊砂濃度分布が指数型に従うとして検討を行なっている。著者等は以下に示す理由によって濃度勾配急変点の存在を特に考慮せず、底面に近い高濃度の部分について指数型分布を考えて問題を整理することにした。すなわち、

イ) 田中・新保による浮遊砂平均粒径の鉛直分布によると、急変点以高において平均粒径が急激に減少する型の分布となっている。したがって濃度勾配急変点以高における浮遊砂は、使用底質のうちの微細な部分から構成されているものと考えられること

ロ) 濃度分布急変点以高の濃度は、以低のそれより濃度が 1 ~ 2 オーダー低く、工学的意味においては「く」の字型あるいは逆「く」の字型といった区別の意味は

少ないこと
である。

著者等による実験結果の整理方針は以下の通りである。

イ) 濃度がほぼ 100 ppm より高い部分では(1)式に示す指数型の濃度分布型が成立すると考える。

ロ) 濃度分布の基準点を $a=0.05h$ (若干のデータについては、 $a=0.05h$ ととれないため、やむをえず $a=0.10h$ とした) とする。

ハ) 底質沈降速度については水温の影響が大きいことから、実験時の水温が判明しているケースについては、 w が Stokes 則に従うとして水温補正を行なう。

以上の方針により、波だけの場合については、著者等の実験ケースの他に他の研究者による実験データを加えて c_a, ϵ_z を求めた。なお、著者等が行なったように、サイホンによって採水されたデータから c_a, ϵ_z を求める場合には、著者等の場合で一箇所の採水に約30秒を要し、このことは得られた浮遊砂濃度分布が波の一周期について時間平均したものであり、 c_a, ϵ_z としては各位置における瞬間的な c_a, ϵ_z の、波の一周期間にわたる平均値を求めていることに相当している。

3.2.1 c_a の算定

Fig. 15 は波だけの浮遊砂濃度分布について、 c_a, w, u_b (微小振幅波理論より計算した底面における水粒子速度の最大値) を求め、縦軸に c_a 、横軸に w/u_b をとってプロットしたものである。サフィックス o は波だけによる実験の c_a, w であることを示している(以下同様)。これによると、実験値は使用底質の種類ごとに明瞭なグループをなしており、底質が砂および石炭粉であるケースについては、 w_0/u_b の減少につれて c_{a0} が増加する傾向が見られる。しかし底質が合成樹脂である場合については、この図の範囲では明瞭な傾向は見出されない。なお実験値が底質の種類ごとにグループをなして分布するのは、底質の材質によって底面におけるリップルの発達の様相が異なり、リップルの相異は浮遊砂現象に影響を与えるためと考えられる。なお底質に合成樹脂を用いた場合には、リップルは発生していない。(ここで底質の材質というのは、化学的意味での材質の他に、粒度や底質の形状など物理的条件にも左右されるものと考えられるが、明確なところは不明である。)

Fig. 16 は、波に流れを加えた場合における基準点濃度の変化を検討するために、 c_a/c_{a0} を縦座標に (c_a は

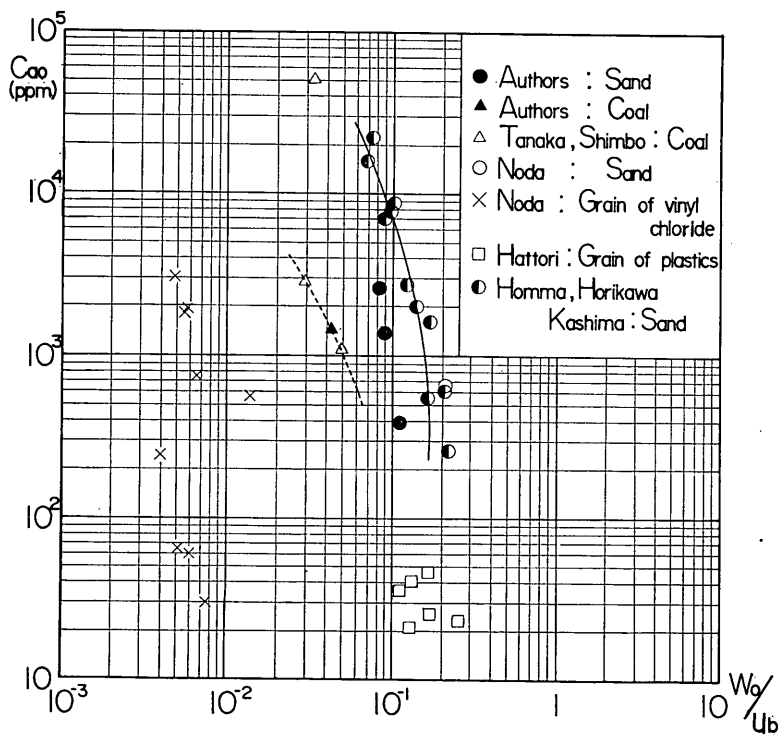


Fig. 15 $c_{a0} \sim w_0/u_b$ (concentration of suspended load at the standard point by only waves)

波と流れによる砂移動に関する実験

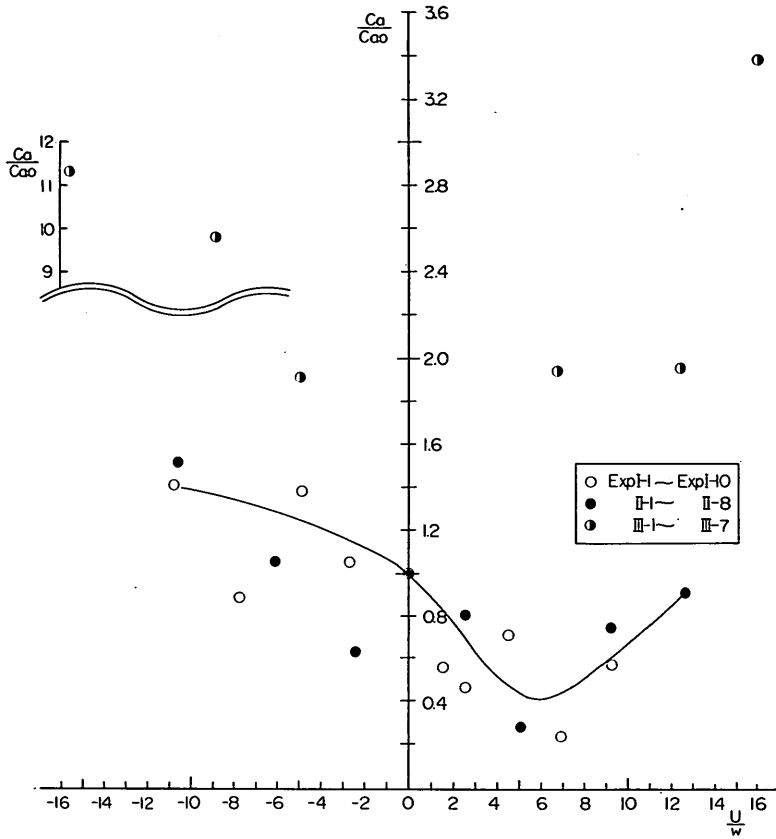


Fig. 16 $c_a/c_{a0} \sim U/w$ (change of c_a by added currents)

波に流れを加えた場合における基準点濃度), U/w を横座標に (U は流れの断面平均流速) とって示したものである。底質が砂の場合には、波の周期が異なる Exp I 系と Exp II 系との間に明瞭な差異はなく、波の周期の影響はあらわれていない。 $0 < U/w < 8$ の範囲では c_a/c_{a0} は U の増加にもかかわらず減少し、 $U/w > 8$ の範囲(この範囲においては流れだけによって底質が移動する)においては、 U/w の増加にしたがって c_a/c_{a0} は増大する。 $U/w < 0$ の範囲においては U/w の減少にともなって c_a/c_{a0} が増加し、順流と逆流の場合とで c_a/c_{a0} の変化のパターンが異なっている。順流の場合と逆流の場合とでこのように c_a/c_{a0} の変化のパターンが異なっているのは、底面近くにおける乱れの状況が異なっているためと考えられるが、今後詳細な検討を進める必要がある。なお、底質が石炭粉の場合には、順・逆流ともに c_a/c_{a0} は流れが強くなるに従い増大していく。

3.2.2 e_z の算定

Fig. 17 は波だけの場合について $(\epsilon_{z0}/\nu) \sim (u_b \delta/\nu)$ のグラフを示したものである。(δ は $\sqrt{\nu l/\pi}$ によって計算される境界層厚に関する指標である。) 野田・岩佐¹⁴⁾ は、同様な図から底質の材質にかかわらず ϵ_z/ν が $u_b \delta/\nu$ の増加と共に増大すると指摘しているが、本図で砂、石炭粉、塩ビ粉などのデータを一括して考えるのは無理があり、データが底質の材質ごとに群をなすと考えるべきであろう。また、底質が異なるとリップルの形成状況が異なり、リップルの形成状況が異なると、土屋・星畑¹⁵⁾ が考察しているように底質の舞上り高さが異なると考えられる。 Fig. 17 によると、底質が砂、石炭粉の場合にはほぼ $u_b \delta/\nu$ の増加につれて ϵ_{z0}/ν も増大していく傾向がみられる。

続いて波に流れが加わった場合における ϵ_z について考察してみる。波に流れが加わった場合、 ϵ_z に関する量は次のようになる。

$$\epsilon_z = f_1(T, H_0, h, U, d, \sigma, \rho, \mu) \dots (2)$$

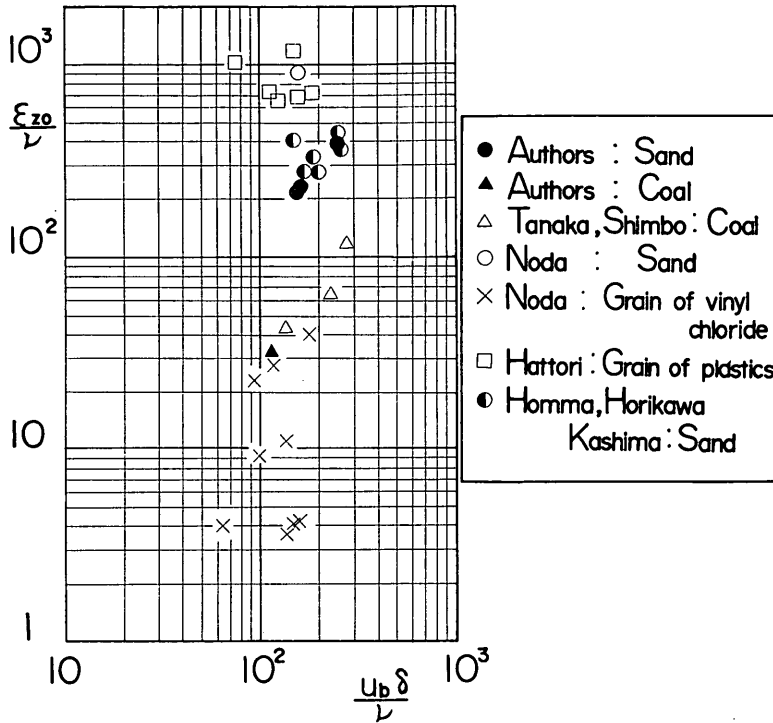


Fig. 17 $\epsilon_{z0}/\nu \sim u_b \delta/\nu$ (diffusion coeff. by only waves)

上式において

- d ; 底質粒径
- σ ; 底質の密度
- ρ ; 水の密度
- μ ; 粘性係数

である。

次元解析の結果、次のように無次元量が求まる。

$$f_2\left(\frac{\epsilon_z T}{h^2}, \frac{H_0}{h}, \frac{TU}{h}, \frac{d}{h}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{T\mu}{\rho h^2}\right) = 0 \dots (3)$$

(3)式において

$$\frac{\epsilon_z T}{h^2} \cdot \frac{h^2}{\nu T} = \frac{\epsilon_z}{\nu}$$

$$\frac{H_0}{h} \cdot \frac{h}{L_0} = \frac{H_0}{L_0}$$

$$\frac{TU}{h} \cdot \frac{h^2}{\nu T} = \frac{Uh}{\nu}$$

と無次元量を変換すると、 ϵ_z に関する無次元量が次のように定まる。

$$\frac{\epsilon_z}{\nu} = f_3\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{Uh}{\nu}, \frac{d}{h}, \frac{\sigma}{\rho}\right) \dots (4)$$

(4)式において H_0/L_0 は沖波波形勾配の影響に関する項、

Uh/ν は波に加えた流れの流速の影響、従って流れ自体の乱れの影響に関する項、 d/h は底質粒径に関する項、 σ/ρ は底質密度に関する項である。

Fig. 18 は波に流れを加えていくと ϵ_z がどのように変化するかを検討するために、 ϵ_z/ν を縦座標に、 Uh/ν を横座標にとってプロットしたものである。Exp I~III の各実験シリーズ共に順流および逆流流速の増加につれ

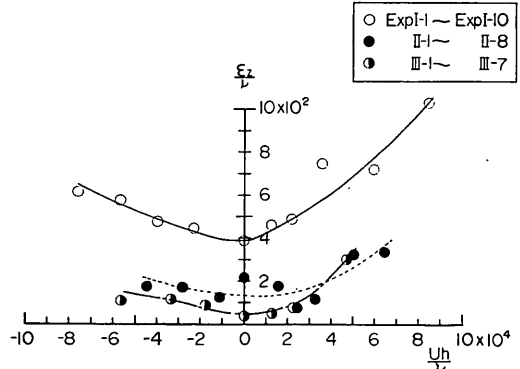


Fig. 18 $\epsilon_z/\nu \sim Uh/\nu$ (change of ϵ_z by added currents)

て ε_z の値は増加するが、その増加率は順流の方が高い。図において、波の周期の異なる Exp I 系と Exp II 系とが異なった線上にプロットされるのは、 H_0/L_0 の相異によるものと考えられる。これに対し、 H_0/L_0 がほぼ等しい実験である Exp II 系と Exp III 系との間における ε_z/ν の相異は底質の相異によるものと考えられる。なお、Exp III 系の ($\varepsilon_z/\nu=3 \times 10^2$, $Uh/\nu=4.7 \times 10^4$) で示される点が Exp II 系とほぼ同一線上にプロットされるのは、普通は石炭粉が底質の場合には砂が底質の場合にくらべてリップルが小スケールであるにもかかわらず、このケースにおいてはリップルのスケールが底質砂の場合とそれほどかわらない程度に大きかった ($\lambda=7.6$ cm, $d=1.4$ cm) ことによるものと思われる。このことは、 ε_z の値に対して底面に形成されたリップルが大きな影響を与えることを示すものと考えられ、興味深い。

以上のように波に流れを加えた場合における浮遊砂濃度分布について考察してきたが、今後検討を要する課題としては、流れが増大してくると (Exp I-4~I-6, I-9~I-10, II-5, II-8, III-4)、ほぼ $c > 100$ ppm 以上の高濃度の範囲でも濃度分布が指数分布にならず、折れてくるのが Fig. 12~14 からわかるが、このことは波の一周期について時間平均しても底層近くで ε_z が鉛直方向に一定になっていないことを示すものと考えられる。本節での取り扱いのごとく $\varepsilon_z = \text{const.}$ の仮定が成立しなくなるが、物理的機構の詳細については今後詳細に検討し

ていく必要があろう。

3.3 掃流漂砂量の変化

波に流れを加えた場合における掃流漂砂量の変化を検討した研究としては、緒論において述べたように、Inman & Bowen によるもの、Abou-Seida によるもの、中村・白石・佐々木・伊藤によるものがあるが、Inman & Bowen, Abou-Seida の研究については無次元表示した形で実験結果が検討されていないため、実験結果の統一的な解釈ができない。さらに中村等による研究は、無次元表示した形で整理されているとはいえ、さらに砂輸送現象に対する物理的な考察を進めながら、掃流漂砂量の検討を行なっていく必要があると考える。中村等による実験については各ケースにおける掃流漂砂量が明らかでないため本節における検討には含んでいないが、ここでは Inman & Bowen, Abou-Seida, 著者等の実験結果を整理し、統一的に解釈しようと試みる。

Fig. 19 は波だけによる掃流漂砂量を、吉岡¹⁰⁾ になって $\bar{q}_B/u_b d \sim u_b^2/(\sigma\rho-1)gd$ のグラフにプロットしたものである。 $(\bar{q}_B$ は Vincent¹⁷⁾, Inman & Bowen, 著者等のデータについては冲向漂砂量と岸向漂砂量との平均値であり、Abou-Seida のデータについては岸向漂砂量である。) 波の特性ごとにデータの傾向が異なり、無次元表示に若干難点があるが、他に適当な掃流漂砂量の算定図ができていないことから、波だけによる掃流漂砂量の検討に本図を用いることとする。本図から Inman &

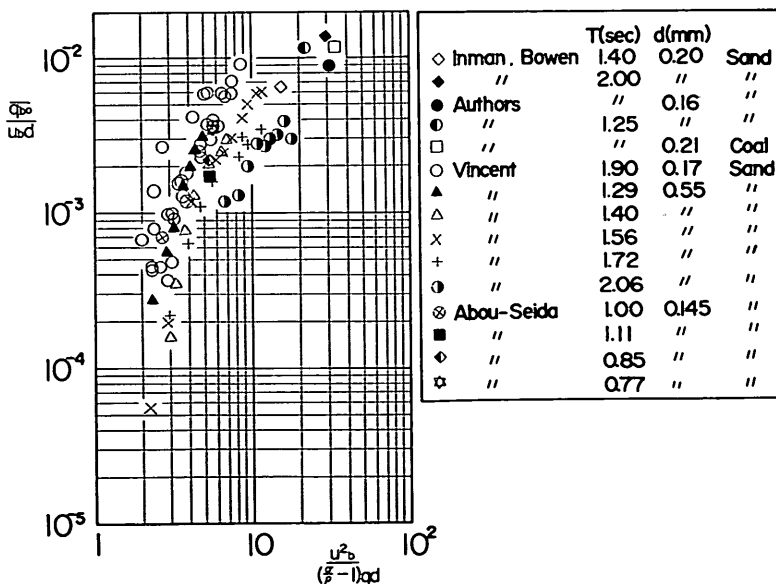


Fig. 19 $\bar{q}_B/u_b d \sim u_b^2/(\sigma\rho-1)gd$ (bed load by only waves)

Bowen, 著者等は Abou-Seida に比して掃流力のより大きな波について実験を行なっていることがわかる。

Fig. 20-a, b, c は、波に順流を加えた場合における掃流漂砂量の変化を示している。Fig. 20-a は岸向漂砂

量を示しているが、著者等のデータによると、波に加えた流れが流れだけで砂を動かせる限界流速をこえると、流れがより弱い場合の漂砂量にくらべて、漂砂量が急激に増加していく様子がわかる。Inman & Bowen のデータ

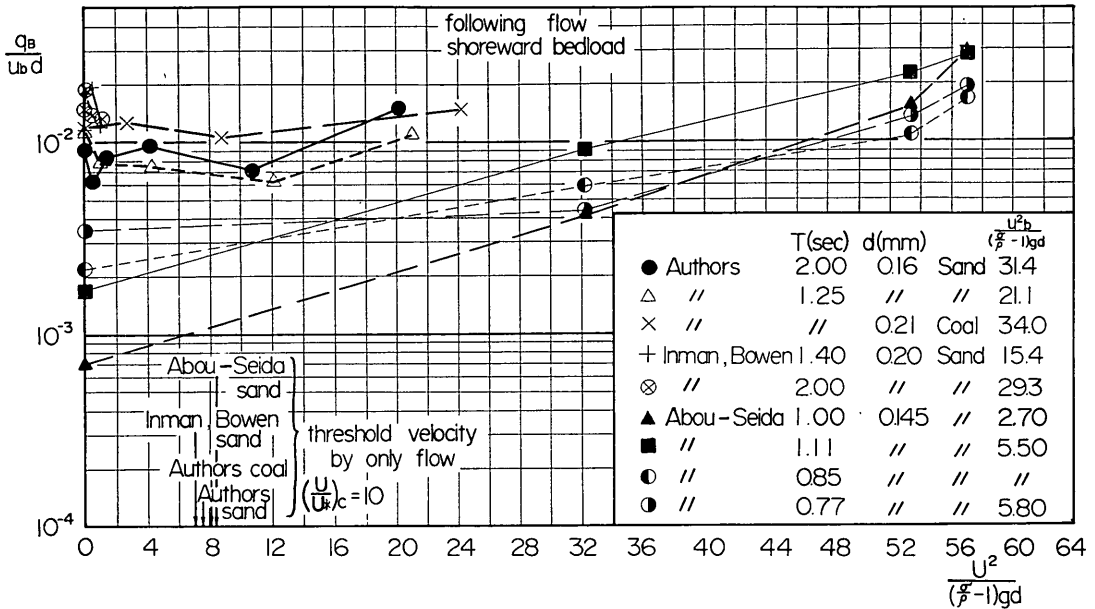


Fig. 20-a Change of shoreward bed load by added currents (following flow)

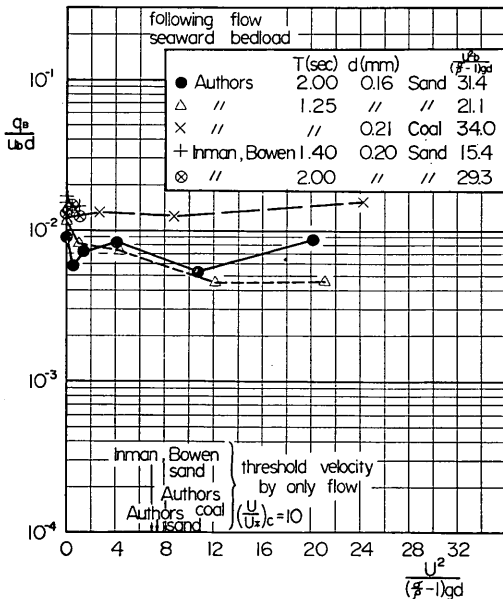


Fig. 20-b Change of seaward bed load by added currents (following flow)

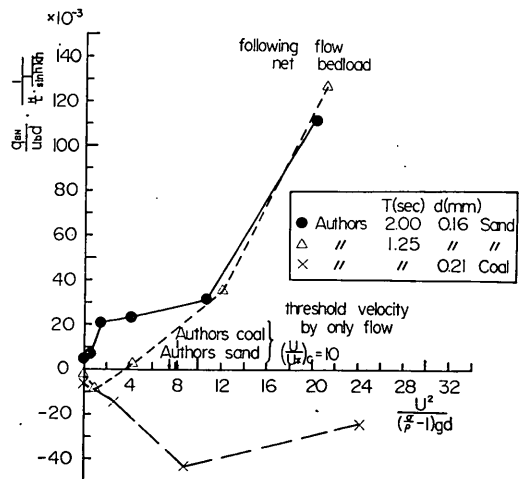


Fig. 20-c Change of net bed load by added currents (following flow)

については、波に加えた流れが弱く漂砂量の変動はデータのばらつきであると考えられる。また Abou-Seida のデータについては、波に加えた流れが流れだけで砂を動かせる限界流速より大きく、漂砂量は波だけの場合の漂砂量に比べてかなり大きくなったと考えられる。

Fig. 20-b は波に流れを加えた場合における冲向掃流漂砂量の変化を示している。底質に砂を用いた著者等のデータについては、流れの増大ともない冲向掃流漂砂量の減少していく様子がうかがわれる。

Fig. 20-c は、岸向漂砂量から冲向漂砂量を減じたものを Net の掃流漂砂量と定義し、波に流れを加えた場合における Net の掃流漂砂量の変化を検討したものである。ただし、漂砂量を無次元化するための流速の次元を持った量として次のように境界層外縁における質量輸送速度 u_M を基準量とする形式をとって、無次元化を行っている。すなわち、

$$u_b \propto \frac{H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh kh}$$

$$u_M \propto \frac{1}{\sinh^2 kh} \cdot \frac{H^2}{LT} = u_b \cdot \frac{H}{L} \cdot \frac{1}{\sinh kh}$$

であるから、Net の掃流漂砂量を無次元化した縦座標の無次元量は、 $\frac{q_{BN}}{u_b d} \cdot \frac{1}{(H/L) \cdot (1/\sinh kh)}$ となっている。

図によって、底質として砂を用いた著者等の実験については、流れだけによる移動限界流量をこえると Net の掃流漂砂量が急激に増加していくことがわかる。Exp I 系と Exp II 系との間で、波の周期による差違もあらわれないようである。しかし底質として石炭粉を用いた著者等の実験については傾向が不明であり、底質として石炭粉を用いた場合においては、著者等が用いた掃流漂砂量測定器の信頼性に疑問があるように思われる。

Fig. 21-a, b, c は、波に逆流を加えた場合における掃流漂砂量の変化を示す。岸向、冲向、Net の各漂砂量について明確な傾向はあらわれていず、波に逆流が加わった場合は底面近傍における乱れが増大してくるために、本実験に用いた掃流漂砂量測定器の精度が悪くなってくると思われる。

3.4 リップル形状の変化

本間・堀川・鹿島¹⁸⁾は次元解析の結果より実験値を整理し、波によるリップルの波長、波高を算定するために、 $d_0/\lambda \sim u_b d_0/\nu$ 、 $\Delta/\lambda \sim \Delta/d_0$ の二種類の図面を与えている。(d_0 は $H/\sinh kh$ で与えられる底面水粒子移動全振幅である。) 著者等は波に流れを加えた際におけるリップルの変形を検討するために、流れの効果を示す無次元量

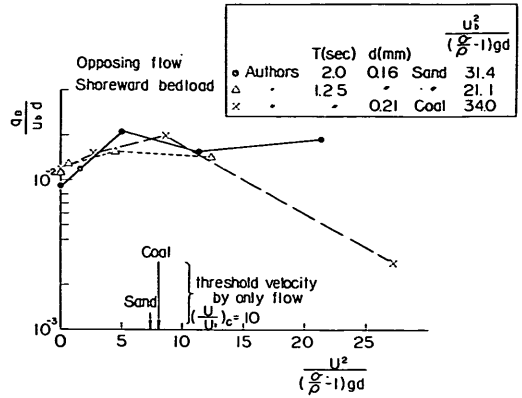


Fig. 21-a Change of shoreward bed load by added currents (opposing flow)

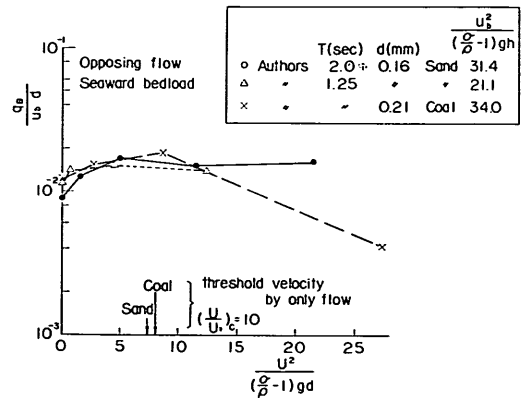


Fig. 21-b Change of seaward bed load by added currents (opposing flow)

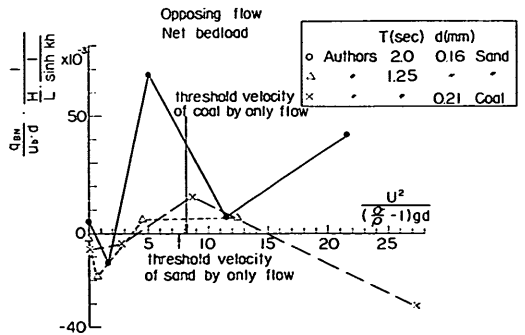


Fig. 21-c Change of net bed load by added currents (opposing flow)

として砂粒レイノルズ数と同様の指標である Ud/ν をとり、リップルの波長変化を $d_0/\lambda \sim Ud/\nu$ のグラフ (Fig. 22-a) で、リップルの波高変化を $\Delta/\lambda \sim Ud/\nu$ のグラフ

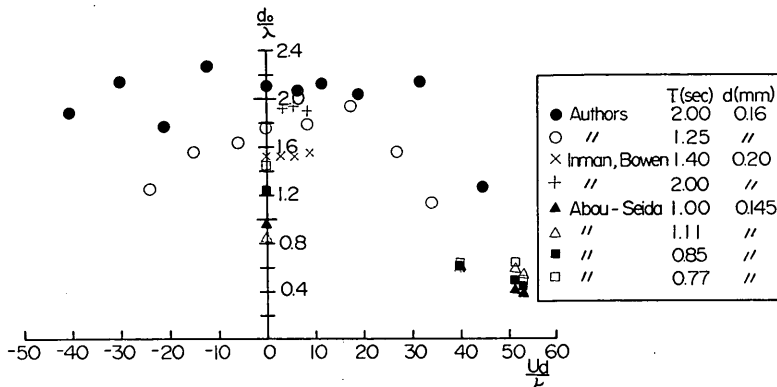


Fig. 22-a $d_0/\lambda \sim U*d/\nu$ (change of ripple length by added currents)

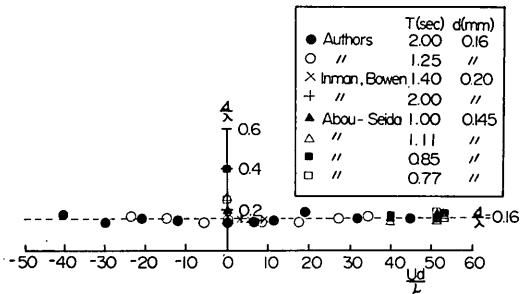


Fig. 22-b $\Delta/\lambda \sim U*d/\nu$ (Change of ripple height by added currents)

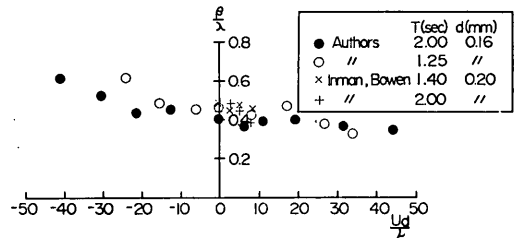


Fig. 22-c $\beta/\lambda \sim U*d/\nu$ (Change of ripple symmetry by added currents)

(Fig. 22-b) で、リップル形状の対称性の検討を $\beta/\lambda \sim U*d/\nu$ のグラフ (Fig. 22-c) によって検討した。ただしデータとして用いたケースの底質はすべて砂である。

Fig. 22-a によると、順流、逆流の場合とも流れの増大にともないリップル波長 λ の増加がみられ、特に流れだけによって底質が動く限界流速をこえると、 λ が急激に増大する。Inman & Bowen のデータは $U*d/\nu$ が小さいために λ がそれほど変化していないこと、Abou-Seida のデータは十分 $U*d/\nu$ が大きくなっているために λ の増大がみられたことがわかる。

Fig. 22-b によると $U*d/\nu$ の増大にもかかわらず $\Delta/\lambda \approx 0.16$ となっており、波に流れを加えてもリップルの波形勾配は一定のまま波高が増大していくことがわかる。

Fig. 22-c によると、波だけの場合 $\beta/\lambda = 0.4 \sim 0.5$ であるが、順流を加えると β/λ が減少すること (すなわちリップルが非対称になっていくこと)、逆流を加えると β/λ が 0.5 をこえて増加していくこと (すなわちリップルが一旦対称になっていくこと) がわかる。

4. 結 論

著者等は、波に流れを加えていった場合に浮遊砂濃度分布、掃流漂砂量、リップル形状がどのように変化するかを検討し、他の研究者による実験結果も含めて、統一的に現象を解釈しようと試みた。本研究によって得られた結果を要約すると次のようになる。

イ) 浮遊砂濃度分布は普通には (1) 式で検討されるが、(1)式を用いる際に問題になってくるのは、「く」の字型、逆「く」の字型、指数型といった濃度分布型の多様性をどう処理するかという点と、 a, c_a, ϵ_z をいかに定めるかという点である。著者等は、分布型の問題については「く」の字型、逆「く」の字型、指数型の区別を重要視せず、ほぼ $c > 100$ ppm の所 (大方の場合従来いわれた濃度分布勾配急変点以低の所にあたる) で濃度分布が指数分布に従うとして実験結果を整理することにした。濃度分布基準点としては $a = 0.05h$ ととり、 c_a, ϵ_z を求めた。 c_a については、波だけによる濃度分布から、 $c_a \sim w/u_0$ のグラフ (Fig. 15) を

まとめ、各底質ごとに w/u_b の減少につれて c_a が増加する様子を示した。波に流れを加えた場合の c_a の変化については、 $c_a/c_{a0} \sim U/w$ のグラフ (Fig. 16) によって波に加える流れの変化に伴ってその変化する様子を示した。順流の場合と逆流の場合とで c_a の変化の様子が異なり、このことは順流の場合と逆流の場合とで底面近くにおける乱れの強さが異なることによるものと考えられる。 ε_z については波だけによる ε_z を、野田にならって $\varepsilon_z/\nu \sim u_b \delta/\nu$ のグラフ (Fig. 17) によって整理し、各底質ごとに $u_b \delta/\nu$ の増加に伴って ε_z の増加する様子を示した。波に流れを加えた場合の ε_z の値の変化については、次元解析より、 $\varepsilon_z/\nu \sim U h/\nu$ のグラフ (Fig. 18, 波の波形勾配や底質の差の影響を示す項がパラメーターになっている) によって ε_z の値の変化を検討し、 U の増加に伴ない ε_z が増大していく様子を示した。

- ロ) 底質の相異によるリップルの形成状況の相異は、浮遊砂濃度分布に影響し、従って c_a , ε_z の算定にあたって大きな影響をおよぼすと考えられる。
- ハ) 掃流漂砂量の検討にあたっては、まず波だけによる掃流漂砂量を吉岡にならって $\overline{q_b}/u_b d \sim u_b^2/(\sigma\rho-1)gd$ のグラフ (Fig. 19) に整理した。波に流れを加えた場合の掃流漂砂量の変化については、順流の場合について Fig. 20 の3種類の図面を与え、流れだけによって砂が動く限界流速をこえると岸向、Net の各漂砂量が急激に増加することを示した。逆流の場合、底質が石炭粉の場合については本実験で用いた掃流漂砂測定器の信頼性に疑問があると思われ、結論はでなかった。
- ニ) 波に流れを加えた場合のリップルの変形については、本間・堀川・鹿島が示したリップルのスケールの算定図の拡張をはかり、Fig. 22 に示した三種類の図面を与えた。リップルの波長については $d_0/\lambda \sim Ud/\nu$ のグラフ (Fig. 22-a) によって、順流・逆流の場合とも流れの増加に伴ない λ が増加していくことを示した。リップルの波高 (Fig. 22-b) は、流れを加えてもリップルの波形勾配 d/λ を一定に保って増加していく。また $\beta/\lambda \sim Ud/\nu$ のグラフ (Fig. 22-c) によって、順流の場合にリップルが非対称になっていき、逆流の場合にはリップルは一旦対称になった後、 β/λ が増加していくことを示した。

謝 辞

本研究の実施、および報告書のとりまとめにあたって

は、海洋水理部長佐藤昭二博士にいろいろ有益な御教示をいただいた。心から御礼申しあげる次第である。

なお本研究の全般的指導は田中がこれにあたり、小笹が実験結果の解析、報告のとりまとめを行なった。小笠原は小笹と協力して実験、データ整理を行なった。

(1973年9月29日受付)

参 考 文 献

- 1) Douglas L. Inman & Anthony J. Bowen: Flume experiments on sand transport by waves and currents, Proc. 8th Conf. Coastal Engineering, p. 137-150, Mexico.
- 2) M.M. Abou-Seida: Sediment transport by waves and currents, Technical Report No. HEL-2-7, Berkeley, California, 1964.
- 3) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄・伊藤三甲雄: 波と流れによる砂の移動について, 第15回海岸工学講演会講演集, 1968.
- 4) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 波と流れによる砂の移動について(II), 第17回海岸工学講演会講演集, 1970
- 5) J. Kirkegaard Jensen & Torben Sorensen: Measurements of sediment suspension in combination of waves and currents, Proc. 13th Conf. Coastal Engineering, p. 1097-1104, Canada
- 6) 富永政英: 流れと波について——河口に侵入して来る波および流れのある海域に発生する風波について, 海岸災害研究ニュース, 海岸災害総合研究班, 第6号, 昭 42.3, p. 28~43
- 7) Hunt, J.N.: Gravity waves in Flowing Water, Proc. Roy. Soc. London, A, Vol. 231, 1955, p. 496
- 8) 浜田徳一, 加藤 始: 流れをさかのぼる波についての一計算, 第8回海岸工学講演会講演集, 1961
- 9) 前出文献 8)
- 10) 野田英明・岩佐敏博: 波による底質の浮遊機構(1), 第18回海岸工学講演会論文集, 1971
- 11) 田中則男・新保 修: 移動床模型実験用材料としての石炭粉の特性について, 港研報告, Vol. 12, No. 1, 1973
- 12) 服部昌太郎: 重複波による底質の浮遊機構, 第16回海岸工学講演会講演集, 1969
- 13) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講演会講演集, 1964
- 14) 前出文献 10)
- 15) 土屋昭彦・星畑国松: 浮遊砂の浮上機構について, 第25回土木学会年次学術講演会講演集, 1970
- 16) 吉岡 茂: 風波による海浜変形に関する基礎的研究 京都大学修士論文, 1971
- 17) Vincent, G.E.: Contribution to the study of sediment transport on a horizontal bed due to wave action, Coastal Eng. No. 6, 1958
- 18) 前出文献 13)

記号一覧表

L : 波の波長
 L_0 : 沖波波長
 H : 波の波高
 H_0 : 沖波波高
 T : 波の周期
 Q : 波に加えた流れの流量
 h : 水深
 U : 波に加えた流れの断面平均流速
 u_c : 波だけの場合、波の山が通過する際の水粒子速度の最大値
 u_t : 波だけの場合、波の谷が通過する際の水粒子速度の最大値
 u_b : 波だけの場合、底面における水粒子速度の最大値 (微小振幅波理論による計算値)
 U_{cr} : 岩垣公式と、 $U/u_* = 10$ とおくことによって求めた、流れだけで砂を動かせる限界状態における流れの断面平均流速
 u_* : 流れの摩擦速度
 d_0 : 底面における水粒子移動全振幅 (微小振幅波理論による計算値)
 d : 底質粒径
 σ : 底質の密度
 ρ : 水の密度
 ν : 水の動粘性係数
 w : 浮遊砂の沈降速度
 w_0 : 波だけの実験の時の浮遊砂沈降速度
 c : 底面から距離 z の位置における浮遊砂重量濃度
 c_a : 濃度分布の基準点における浮遊砂重量濃度
 c_{a0} : 波だけの実験の時の、濃度分布の基準点における浮遊砂重量濃度
 a : 底面から濃度分布の基準点までの距離
 ϵ_z : 鉛直方向の拡散係数
 ϵ_{z0} : 波だけの実験の時の、鉛直方向拡散係数
 δ : $\sqrt{\nu T/\pi}$ によって計算される境界層厚に関する指標
 q_B : 掃流漂砂量
 q_{B0} : 波だけの実験の際における、岸向掃流漂砂量と冲向掃流漂砂量の平均値
 q_{BN} : 岸向掃流漂砂量から冲向掃流漂砂量を減じた Net の掃流漂砂量
 λ : リップルの波長
 d : リップルの波高

β : リップルにおける山から谷までの距離

付 録

波に一樣流が加わった場合における波長、波高、水粒子速度の計算

1) 波に一樣流が加わった場合における波長変化の計算

$$(1 - U^*k^*)^2 = k^* \tanh(h^*k^*) \quad \dots\dots (1)$$

上式において、 h^* 、 U^* 、 k^* は、次のようにそれぞれ水深、流れの断面平均流速、波長の無次元量である。

$$h^* = 4\pi^2 h / g T^2$$

$$U^* = U / c_0 = 2\pi U / g T$$

$$k^* = g T^2 / 2\pi L$$

U ; 計算に際しては、本文 Table 1 に示す断面平均流速の一樣流が波に加わったとした。なお U の符号は順流を正に、逆流を負にとっている (U の符号については以下同様)。

L ; 変化した波長

L_0 ; 波だけの場合における沖波波長

(1)式を Newton の逐次近似法によって解き k^* を求め、 h^* をパラメーターとして、本文 Fig. 5 に示すように $L/L_0 \sim U^*$ のグラフに波長変化の計算結果が求められる。

2) 波に一樣流が加わった場合における波高変化の計算

$$\frac{H}{H_0} = 1 / \left\{ (1 + 2h^*k^* \operatorname{cosech} 2h^*k^*) \left(\frac{1}{k^*} - U^* \right) + 2U^* \right\} \quad \dots\dots (2)$$

上式において

H_0 ; 波だけの場合における沖波波高

H ; 変化した波高

である。

(2)式に h^* 、 k^* 、 U^* を代入して H/H_0 を求め、 h^* をパラメーターとして、本文 Fig. 6 に示すように $H/H_0 \sim U^*$ のグラフに波高変化の計算結果が求められる。

3) 波に一樣流が加わった場合における水粒子速度の最大値の計算

山における水粒子速度の最大値

$$u_o = U + \frac{\pi H/L(L/T - U)}{\sinh 2\pi h/L} \cosh \frac{2\pi(y+h)}{L} \quad (3)$$

谷における水粒子速度の最大値

$$u_t = U - \frac{\pi H/L(L/T - U)}{\sinh 2\pi h/L} \cosh \frac{2\pi(y+h)}{L} \quad (4)$$

H ; (2)式によって求めた波高の計算値

L ; (1)式によって求めた波長の計算値

U ; 流れの断面平均流速を代入して計算した。