

II—28 流れと波の共存場における底質の移動限界 について

運輸省船舶技術研究所 (正) 泉山 耕
 日本道路公団 (正) 幡鎌 俊昭
 岩手大学工学部 (正) 堺 茂樹
 北海道大学工学部 (正) 佐伯 浩
 北海道工業大学 (正) 尾崎 晃

1. 結 言 海岸工学の分野において、底質の移動現象のメカニズムの解明は、古くからの問題でありかつ現在残された最大の課題の一つであると言えよう。この問題についての研究は大きく二つの分野に分けられ、一つは底質砂の移動限界の把握、もう一つはその移動量の定量化である。本研究では前者に属する研究である流れと波の共存場、すなわち河口近傍や離岸流等海浜流発生域等における砂の移動限界を取り扱ったものである。本研究と同様の目的で行われた実験的研究としては、首藤等によりなされたものが報告されている。それは線形理論を用いた手法と潤動粘性係数の鉛直分布形状を仮定した二つの方法を用いて研究されている。本研究は、流れと波の共存場における底質砂の移動限界を、流速の定常成分と振動成分の合成流速に近似的に振動流として取り扱い、結果に対する定常流の関与の程度を調べることによって解明しようとしたものである。

2. 実験方法 実験は図-1に示す長さ24.0m、幅0.8m、深さ0.8mの鋼製ガラス張水槽を用いた。水槽の一端にはフラッター式造波機が設置されている。またもう一端には越流タンクが設置されている。流速を応範囲に変化させるため、運動の二次元性を高めるために水路中央部に隔壁を設け、実験に使用する水路の幅を36cmとしている。水路の床部はモルタルにより整形し、上流端には1/10の傾斜の斜面を設け、波を破砕させ、反射波をできる限り押えるようにした。流れを発生させるために、造波板の後に水中ポンプ(1.1ton/分の能力)を設置し回流させるようにしている。流量の調整は高水槽下部に取り付けられているバルブによった。また高流量の実験では、水路外の自吸式渦巻きポンプをも併用した。本実験に用いた波と流れの諸元は表-1に示すとおりである。流量の計測は一連の実験の開始時、中間、終了時の3回各3回づつ行い、表-1の流量値はその平均値である。計測値の間には、有意な差はなかった。流れを発生させるとタンク、ホース等の循環系中に滞水し静水時と比べ水位が下がるため、あらかじめ各流速についてこの差を求めたおき補正を行った。

底質として用いた砂の諸元を表-2に示す。均等係数からも判るとおり、かなり粒径がそろった砂であると言える。

砂の移動限界についての定義は研究者とそれぞれによって若干の違いがあるが、本研究における移動限界の決定に当たっては、目視観測から、Manohar による次の定義に従った。

図 - 1

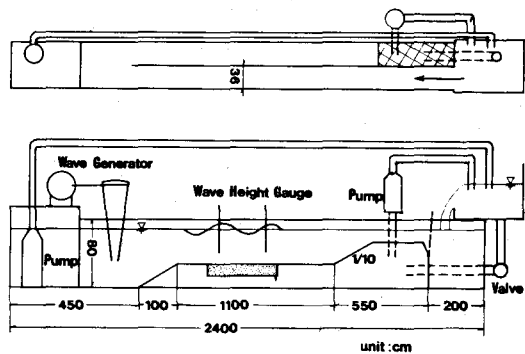


表 - 1

Wave Period T (Sec)	1.0, 1.8, 2.5
Discharge Q (ℓ /Sec)	0, 9.36, 28.58
Water Depth h (cm)	25, 32, 40

・初期移動限界 (Initial movement)

水底の表面に比較的突出した粒子がいくつか動き出す状態。

・全面移動限界 (general movement)

水底の表面の第一層の砂がほとんど動き出す状態。

実験は次の手順で行った。

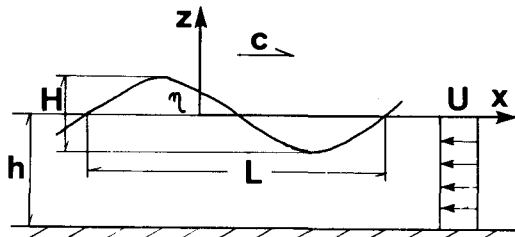
1. 水深, 周期とよ流量を設定する。
2. 砂面を平坦にならす。
3. 流れを発生させ, 定常状態が得られた事を確認の後, 波を起す。
4. 移動限界に達するまで徐々に波高を増大させる。ただし, 波高の増大は連続的には行わない。また造波板の最小振幅においても造波直後に砕波が起る場合はアータとしていない。

5. 移動限界に達した事を確認し, 波高等の測定を行う。なお, 波高, 波速の測定には一定間隔に離れた2台の抵抗棒式波高計を用いた。水温は全実験をとおして $11^{\circ}\sim 13^{\circ}\text{C}$ とほぼ一定であり, 動粘性係数 (ν) は $0.00123 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であった。

表-2

	Mean Diameter (cm)	Uniformity Coefficient	Density
Sand A	0.0177	1.46	2.67
Sand B	0.0320	1.63	2.68

図-2



3. 理論 (流れの中の波の理論と砂の移動限界)

(A) 一様流をさかのぼる微小振幅波の理論

図-2 に示すような一様流 U をさかのぼる波の速度ポテンシャル ϕ 中とすると次式で示される。

$$\phi = -Ux + \psi(x, z, t)$$

式中の x, z はそれぞれ水平, 鉛直軸を表し, t は時間を示す。連続式及び水底と水面での境界条件を用いて計算すると次式が得られる。

$$\phi = -Ux - \frac{\sigma + U^2}{2k \cdot \sinh(kh)} \cdot \cosh\{k(h+z)\} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$gk \tanh(kh) = \sigma^2 \{1 + U/C\}^2 \quad (2)$$

$$\eta = H \cdot \sin \theta / 2 \quad (3)$$

ここに, σ は角周波数, k は波数, C は波速である。今 関係式 (2) より波速は次式となる。

$$C = \left\{ (g/k) \tanh(kh) \right\}^{\frac{1}{2}} - U \quad (4)$$

また, 深海域 ($h \rightarrow \infty, U=0$) と浅海域において Energy Flux が一定とすると, この間の浅水係数 K_f は次式で示される。

$$K_{sf}^2 = 1 / \left[(1/k^* + G) \{1 + 2J \cdot k^* / \sinh(2J \cdot k^*)\} - 2G \right] \quad (5)$$

ここに, $K^* = gk/\sigma^2$, $G = \sigma U/g$, $J = \sigma^2 h/g$ であり, こゝの間には次の関係がある。

$$1 + K^* G = K^* \tanh(K^* J) \quad (6)$$

得られた結果から判断すると, 浅水係数 K_{sf} は実験により得られる値より若干大きめの値を示す事が明らかになった。また波速は実験値に非常に近い値を示した事から, 以後の解析には波高については実験により測定した波高を用い, 波速については (4) 式で示される理論波速を用いる事とする。

(B) 摩擦係数を用いた底質砂の移動限界

底質砂の移動限界についての層流理論を用いた理論式は次式で示される。

$$\frac{H_0}{L_0} = \alpha \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^n \cdot \sinh(k h_i) \cdot \left(\frac{H_0}{H}\right) \quad (7)$$

ここに、 h_i は移動限界水深であり、添字 0 は沖波についての量を表わす。また、 α 及び n は係数であり、提案者により異なる値となっている。(7)式は、波動による砂の移動限界を論ずる上で最も基本的な式とは言えようが、その導出過程において層流境界層を仮定し抵抗係数も定常流のとにより近似し、さらに底部の水理学的粗・滑についての考察、かな等の問題があり、適用に問題があるといは言い難い。この様な諸問題を解決すべく、多くの試み、考察がなされているが、本研究では底部せん断力の立場から移動限界を扱った堀川、渡辺の研究を参考に、実験結果の解析を進める。堀川等の概要は以下の如くである。

振動流による底面の摩擦応力 τ_B と底面近傍の水平流速 U_0 をそれぞれ次の式で表わす。

$$\tau_B = \hat{\tau}_B \cdot e^{i\theta_1} \quad (8)$$

$$U_0 = \hat{U}_0 \cdot e^{i\theta_2} \quad (9)$$

$\hat{\tau}_B$ は振幅、 θ_1 及び θ_2 は位相角を表わす。また τ_B が摩擦係数 f を用いた次式で表わされるとする

$$\tau_B = \rho_w \cdot f \cdot \hat{U}_0 \cdot U_0 \quad (10)$$

(10)式中の ρ_w は水の密度である。(8)、(9)、(10)式より、摩擦係数 f は次式となる。

$$f = \left(\frac{\hat{\tau}_B}{\rho_w \hat{U}_0^2}\right) e^{i(\theta_1 - \theta_2)} = \hat{f} \cdot e^{i(\theta_1 - \theta_2)} \quad (11)$$

(11)式より、砂粒の移動限界時の力の平衡関係は次式で示される。

$$(\rho_s - \rho_w) g d^3 \cdot \tan \varphi (\pi/6) = \rho_w \cdot K \cdot d^2 \cdot \tau_B \cdot (\pi/4) = \rho_w \cdot d^2 \cdot \hat{f} \cdot \hat{U}_0^2 (\pi/4) \quad (12)$$

ρ_s は砂粒子の比重、 φ は砂の内部摩擦角、 d は砂の粒径、 K は流体摩擦が砂移動に関与する程度と砂粒子相互の干渉効果を考慮した係数である。

$$\hat{f} = 2 s g d \tan \varphi / (3 K U_0^2) \quad (13)$$

$$S = \rho_s / \rho_w - 1$$

$\hat{f}$ の値が底面の粗・滑・流況により変化すると考え、この支配量として、 $\hat{U}_0$ 、 ν 、 d 及び振動流境界層厚の基準長 $\delta = (2\nu/\sigma)^{\frac{1}{2}}$ を用いたレイノルズ数

$$Re = \hat{U}_0 \cdot d / \nu, \quad R\delta = \hat{U}_0 \cdot \delta / \nu \quad (14)$$

を考え、 $\hat{f}$ を次式とする。

$$\hat{f} = a \cdot Re^P \cdot R\delta^Q \quad (15)$$

ここに a 、 P 及び Q は定数である。従って

$$\hat{f} = a \cdot 2^{\frac{P}{2}} \cdot U_0^P \cdot d^P \cdot \sigma^{\frac{Q}{2}} \cdot \nu^{-(P+\frac{Q}{2})} \quad (16)$$

粗面乱流時には分子粘性の影響は小さいと考えられるので $P = -\frac{Q}{2}$ となり、従って

$$\hat{f} = a \cdot (2 \hat{U}_0 / \sigma d)^{\frac{Q}{2}} \quad (17)$$

また、層流境界層が発達している時、砂面の時は粗度は $\hat{f}$ に影響を与えないと考えられるので $P = 0$ とおき、

$$\hat{f} = a \cdot (U_0 \delta / \nu)^P \quad (18)$$

本研究は、流床と波の共存場を扱っているが、同様の流場

図 - 3

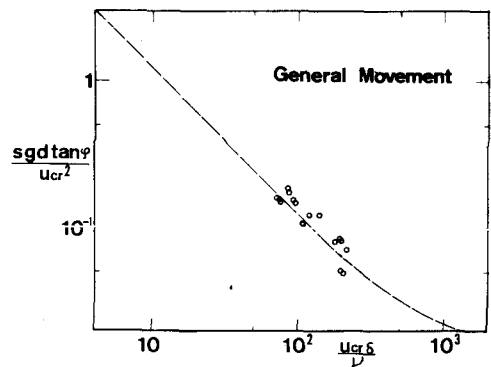
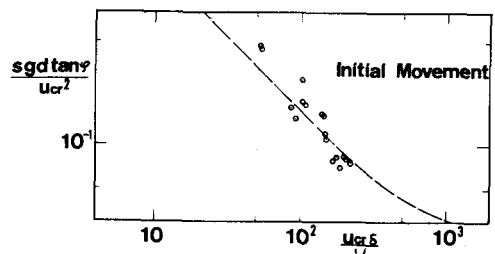


図 - 4



に於いてこの岩塩等の計測において、順流、逆流の比較を行うと、底部近傍では流速の対称性が大きいこと、実験中移動限界時における砂粒移動の方向に偏りが少なかったこと、砂山が発生した場合、その形状に対称性がとれていたこと等の理由により、底部近傍における振動流成分の卓越を仮定し、前記理論を適用して考察を進める。

4. 実験結果と考察

まず底面の粗滑、底面近傍の流況を考えてみる。Li-Manohar は表-3 のように分類している。この Li-Manohar の基準から本研究の実験結果をみてみると、粗度高きに粒径、 $\hat{U}_0$ とし線形理論より計算される次式を用いる。

$$\hat{U}_0 = U + (\sigma + U \cdot k) \cdot H / 2k \cdot \sinh(kh) \quad (19)$$

この結果、本実験の結果は主に粗面領域で「音波」、遷移領域となる。そしてそれらについて計算を行うと粗面領域における数ケースが乱流となったが、後に述べるように線形理論による解は過大な値を与えると考えられるので流況は層流と考え、式(18)を用いることとする。以上の結果より、底質の移動限界時の最大底部水平流速 U_{cr} と振動流の境界層厚 δ を用いた R_L と、(13) 式を変形した、 $\sigma g d \tan \phi / U_{cr}^2 = (3K/2) \cdot \hat{U}_0$ を用いて結果を整理したものが図-3、4、5、6 である。なおこの計算に当

表-3

	滑面 ($\delta/k^* > 6.54$)	遷移 ($6.54 > \delta/k^* > 4.02$)	粗面 ($4.02 > \delta/k^*$)
乱流	$\hat{U}_0 \cdot d^{0.2} / \nu > 1150$	$\hat{U}_0 \cdot d > 104$	$\hat{U}_0 \cdot \delta / \nu > 566$
層流	$U_0 \cdot d^{0.2} / \nu < 1150$	$\hat{U}_0 \cdot d < 104$	$\hat{U}_0 \cdot \delta / \nu < 566$

る $U=0$ の場合の実験結果を示したものである。

図中の破線は堀川等が数例の実験結果をまとめて得たもので(20)式で示される。両国からも判るように、本実験の結果にはある程度のばらつきはあるものの過去の研究成果に比較的良好一致を示している。もちろん波動だけによる移動限界の提示

図-5

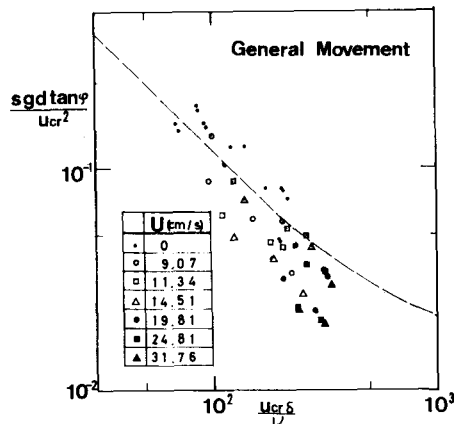


図-6

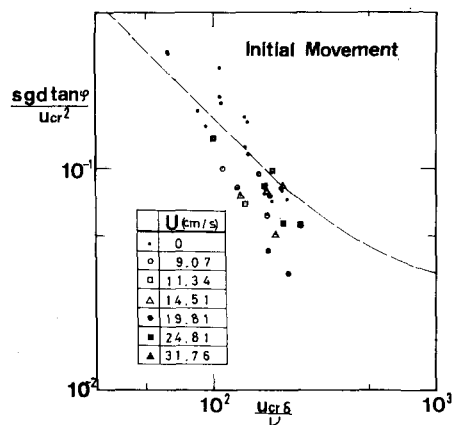


図-7

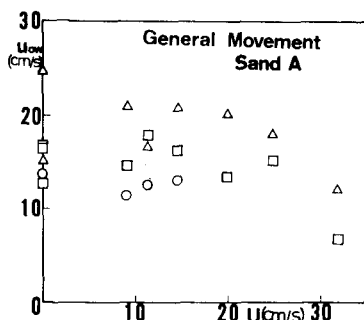
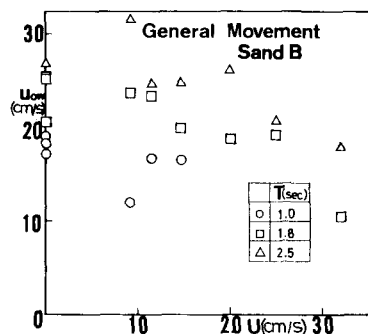


図-8



は本研究の主題はなから、両国の結果は、本実験系結果に対して摩擦係数を用いた理論を用いる事の適切さと、本実験における底質砂の移動限界の判断が妥当であった事を示していると言えよう。

全面移動 (General Movement) $S \cdot g \cdot d \cdot \tan \varphi / U_{cr} = 12 (U_{cr} \delta / \nu)^{-1}$
 初期移動 (Initial Movement) $S \cdot g \cdot d \cdot \tan \varphi / U_{cr} = 17 (U_{cr} \delta / \nu)^{-1}$ (20)

次に、流れに逆らって波が進行する場合の底質砂の移動限界を調べたものが図-5, 6 である。各定常流速 U に記号を変えて示されている。定常流速 U が大きくなる程、(20) 式で示される破線から離れてくる事が判る。図には用いられているハートレーのうち、 U_{cr} 以外は定数 δ 及び砂により固有な値であるから、この実験値が (20) 式から離れる理由は U_{cr} の見積り、即ち、(19) 式を用いる事によるものと思われる。ここで、(19) 式中の振動流成分の振幅の値と U_{ow} とおき、底質砂の移動限界時における U_{ow} と定常流速 U の関係を探る結果を図-7, 8, 9, 10 に示す。図-7, 8 は A 砂と B 砂の場合の全面移動の場合の結果であり、図-9, 10 は A 砂と B 砂をそれぞれ初期移動時の U_{ow} と U の関係を探ったものである。首藤等は定常流速 U に対する振動流成分の振幅 U_{ow} の減少の割合が 0.5 程度と報告しているが、本実験の結果の一部はこれに従うものの、全データを通してみると首藤等の結果とは異なっている。底質移動限界時の各流速成分の関係を全体にわたって調べるために無次元量 U/U_{ow} , U_{cr}/U_{ow} を用いてまとめた結果が図-11, 12 である。

図-11 は全面移動の場合であり、図-12 は初期移動の場合である。両国から、 U_{cr}/U_{ow} は、 U/U_{ow} に対してほぼ一定の割合で増加し、定常流速 U が $U=0$ の時、 $U_{cr}/U_{ow}=1$ である。また、 U/U_{ow} に対する U_{cr}/U_{ow} の変化は、底質粒径によって変わる事も明らかとなった。図-11, 12 より次のような関係が得られる。

$$\left(\frac{U_{cr}}{U_{ow}} \right) = K_c \cdot \left(\frac{U}{U_{ow}} \right) + 1 \quad (21)$$

(21) 式を書き換えると (22) となる。

$$U_{cr} = U_{ow} + K_c \cdot U \quad (22)$$

この式は、流れと波の共存場における底質の移動限界流速は、線形理論を用いた (19) 式中の定常成分を補正する事により得られる事が判る。また、この補正係数 K_c は粒径に依存し、本実験の場合では全面移動、初期移動の両移動限界ではほぼ $K_c \approx 0.3 \sim 0.5$ となる。

図-9

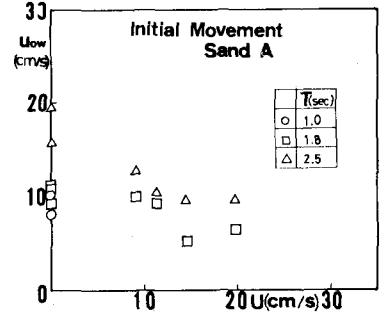


図-10

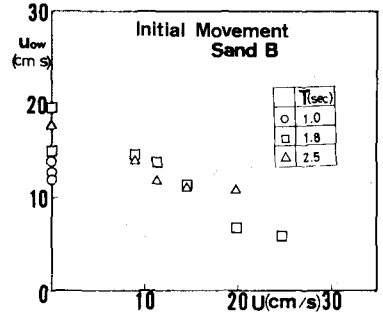


図-11

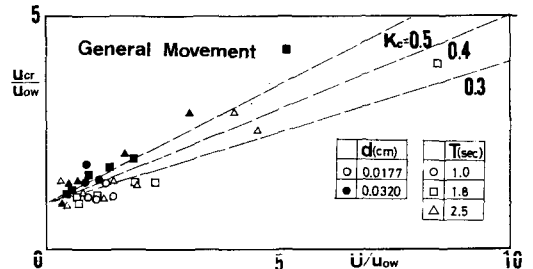
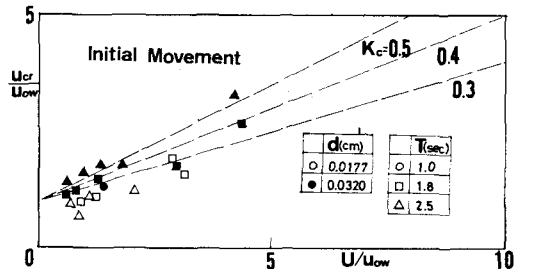


図-12



あとがき

本研究は、定常流と波動流の共存場における底質砂の移動限界を、底部近傍において振動流成分が卓越するとの仮定のもとに解析を行った。この結果、底質移動限界時の流速は床形状理論解において定常流の流速に補正係数を乗いる事によって得られ、その補正係数は砂の粒径に依存する事が明らかとなった。基本的には流れと波の共存場における砂の移動限界については、まず流れと波の共存場での境界層内の流速分布が明確に与えられない限り解決できない問題といえる。最後に、本研究を実施するに当り協力して戴いた北大工学部の小野敏行氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中 仁, 首藤伸夫, 青田茂夫: 波・流れ共存場における砂移動限界, 第34回土木学会年次学術講演会概要集
- 2) 田中 仁, 首藤伸夫: 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集
- 3) 堀川 清司, 渡辺 晃: 波による砂移動に関する一考察, 第13回海岸工学講演会論議
- 4) 岩垣 雄一, 浅野敏之: 波と流れの共存場における水粒子速度に関する研究, 第26回海岸工学講演会論文集
- 5) 宮永政英: 沿岸付近の流れと波の相互作用について, 海岸災害研究ニュース 第6号
- 6) 榎本 享: 漂石の移動限界流速および限界水深に関する研究, 第13回海岸工学講演会論文集