

II—6 波の質量輸送と砂移動の関係について

北見工業大学工学部 正員 佐藤 幸雄
北見工業大学工学部 正員 鎌 田 淑範

I. まえがき

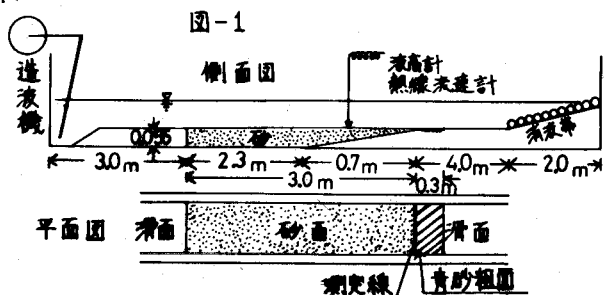
斜面上も進行するときの非対称性が大きい波による底質移動に関しては、水深が浅く浅くなり、非対称性が増長するとその殆んどが岸向き移動となり、また移動量も大きくなる。この場合の移動量の大小は海岸平衡勾配と形成する重要な値となるが、移動量の見積り方法に関しては斜面上の変形を伴う波の流速値が明確に把握されていないため従来より水平床の場合についての底質移動の問題が多く取扱われて来た。たとえば、移動量が波の周期によって変化する性質を調べた佐藤・田中¹⁾の研究、層流境界層内の質量輸送速度を用いて砂粒子の移動速度を求めた Eagleson & Dean²⁾の式ならびに底面流速に基づく層流の場合のせん断力を使用した Du Boys³⁾の流砂量公式を応用した樫木らの研究などがある。しかし、Eagleson & Dean²⁾の式の場合は砂の移動限界流速が考慮されていないため、僅かの質量輸送が存在しても砂は移動する結果となり実情に適合しない。また、樫木らの取扱いは底面における正負方向の流速に従ったせん断力の作用方向の取扱いが明瞭でないなどの問題点があり、未だ十分移動量の見積りが行われていない。本研究では、まず砂の移動限界ならびに移動量の測定を行ない、移動限界については、樫木らの式が比較的確当な値を示すことを確かめ、さらに、移動量に関しては Eagleson & Dean²⁾の式に移動限界流速を考慮した値を求め、また、せん断力による砂移動では樫木らと同様に Du Boys³⁾の式を用い、さらに、正流速、負流速に基づくせん断力を考慮した値について砂の移動量の測定値との関係と調べ、比較検討を行なったものである。

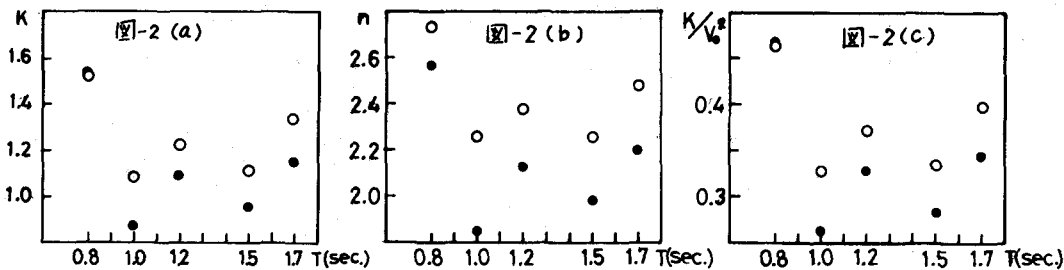
II. 実験方法

図-1に示すように2次元造波水槽の縦方向に巾20cmに仕切った部分に造波板側から3.0mから6.0mの位置まで水平に厚さ約5.0cm程度に砂を敷き測定区間とし、さらに、水槽の末端までを滑面

とし末端には砂利を積んで消波帯とした。反射波の測定は行っていないが測定区間上は目視によるとほぼ進行波となっているため反射波はほとんど発生していないと考えられる。実験波の周期は $T=1.7, 1.5, 1.2, 1.0$ secの4種類で水深は25cmで一定とした。実験に先立ち水深変化による底面最大流速を調べた結果、造波機の特長から各周期共に水深25cmのとき最も大きい流速が得られるようである。砂の粒径は $d=0.2, 0.4, 0.7, 0.9, 1.5$ mmの5種類を用いた。波高計は抵抗棒式で、底面流速は砂面より1cm程度上方の位置の流速と熱線流速計(円錐型プローブ)により測定した。

移動限界に関する測定では表層移動、全面移動に拘らず従来より多くの研究があるが、いずれも定性的な判定により行われており定量的な首藤らの研究⁴⁾でもかなり困難さを伴うことから、本研究でも目視による定性的判定も使用することとし、その場合移動量との関連を考慮、移動量が僅かでも現われる可能性がある最小な状態として表層移動のうちでも微動の状態と移動限界として採用することとした。また、移動量の測定では図-1の測定線の右側に粒径0.4mmの青色着色砂をラッカーで張り付けた粗面部分と30cm設置し、測定線の左側に敷いた砂が造波によって測定線を越して移動した量をすべて集積して移動量とした。この場合の造波時間 $100 \cdot T_{sec}$ (100波)であり、また砂面巾は15cmである。





III. 短周期の場合の流速計検定

熱線流速計の検定法として円盤の回転からアームによりトロコの往復運動に変換し、非定常的な検定を行なう場合、円盤の周期が普通実験機に使用する $T=2.0\text{sec}$ 以下の短周期のときにはプローブ、測定器械の追従性が悪くなることが考えられる。熱線流速計の原理より V, V_0 をそれぞれ流速が $U, 0$ のときのノリ=ア出力とし、 K, n を流速計の特性値とすると、一般に、

$$V^2 = V_0^2 + K U^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$\text{すなわち、} (V/V_0)^2 - 1 = (K/V_0^2) \cdot U^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

である。トロコの最大移動速度 $U_{\max}$ と周期 T 、円盤の回転半径 A の値は表-1 に示す通りである。円盤の回転半径、周期と表-1 の値のときのノリ=ア出力 V の記録を取り、各周期に対する $K, K/V_0^2, n$ の値を求めると図-2 (a), (b), (c) のようになり、 $T=0.8\text{sec}$ の場合は他の周期の場合に比べて極端に追従性が悪く、 $U=0$ に対して $V_0=1.82$ よりかなり大きい値を示していることから差異が大きく現われることになる。また、正流速(トロコを押す方向、●印)と負流速(トロコを引く方向、○印)の差異は円盤の回転ムラによる違いが現われたものと考えられる。次に、最大流速 $U_{\max}$ のときのノリ=ア出力 $V_{\max}$ を $10V, V_0$ を $0V$ としてリ=ア化した場合は、流速 U に対するリ=ア出力を E とすると、

$$E = \frac{10}{(U_{\max})^m} \cdot U^m \quad (3)$$

また式(2)より

$$U_{\max} = \left[\frac{(V_{\max}/V_0)^2 - 1}{K/V_0^2} \right]^n \quad (4)$$

であるから、

$$U = a E^{\frac{1}{m}} \text{ とすると、} a = \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{1}{m}} \left[\frac{(V_{\max}/V_0)^2 - 1}{K/V_0^2} \right]^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{よって、} K/V_0^2 = \frac{(V_{\max}/V_0)^2 - 1}{10^{\frac{1}{m}n} \cdot a^{\frac{1}{n}}} \quad (5) \quad \text{である。}$$

表-1

T(sec)	1.7	1.5	1.2	1.0	0.8
A(cm)	20.0	15.0	15.0	10.0	10.0
$U_{\max}$ cm/sec	74.54	63.10	78.87	62.96	78.70

($V_0=1.82$ ボルト)

リ=ア出力の記録より係数 a, m を求めたのが

図-2 (d), (e) であり、 $T=0.80\text{sec}$ の場合はやはり他周期に比べて差異が大きく、したがって極端に短周期の場合はその周期独自の検定曲線を用いる必要があると考えられる。次に測定値より求めた $m, n, a, V_{\max}, V_0$ を用いて式(5)により計算した K/V_0^2 の値と式(2)の K/V_0^2 の測定値と比較したものが図-2 (f) で各周期共通流速機器のリ=ア化は正常に行なわれていると云える。

IV. 砂の移動限界流速について

水平床の場合の砂の移動限界として、移動限界流速 U_c で表わす場合と移動限界水深で表わす場合がある。いま、移動限界水深 h_c のときの底面流速を微小振巾波理論を用いて移動限界流速 U_c に変換すると、移動限界水深 h_c に対しては一般に、

$$H_0/L_0 = \alpha \cdot (d/L_0)^n \left(\frac{1}{\sinh \frac{\pi H_0}{L_0}} \right) (H_0/H) \quad (6)$$

と与えられ、また、水深 h_c のときの底面最大流速と移動限界流速 U_c とすると、

$$U_c = \pi H / T \cdot \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{さらに、沖波の関係 } C_0/\sqrt{g L_0} = 1/\sqrt{2\pi} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{を用いると、 } U_c/\sqrt{g L_0} = \alpha/\sqrt{\pi/2} (d/L_0)^{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

の関係が得られる。一方、樫木らが行った Lamb の微小振中波理論による境界層内流速分布を用いて、その摩擦速度より求めた移動限界流速 U_c は、³⁾

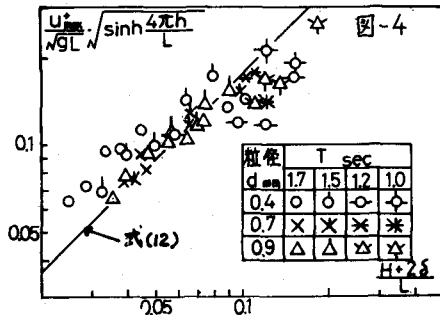
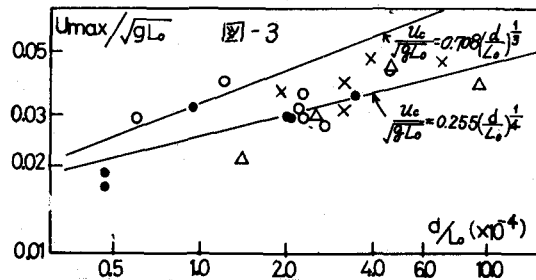
$$U_c = 28.22 d^{1/4} T^{1/2} \text{ (cm/sec)} \dots\dots\dots (10)$$

であり、式(9)の関係をを用いると、

$$U_c/\sqrt{g L_0} = 0.255 (d/L_0)^{1/4} \dots\dots\dots (11)$$

である。次に、実験により得られた正方向の場合の底面最大流速のうちで、表層移動(微動)の場合の値 U_c として $U_c/\sqrt{g L_0}$ と d/L_0 の関係で測定値を図示すると図-3 のようになり、図中の直線は式(9)において $\alpha = 0.565$, $\pi = 1/3$ とした佐藤・田中²⁾の表層移動の場合と、式(11)の樫木らの式を示したものであり、式(11)の場合が本研究の意図する移動限界を良く表わしているといえる。しかし粒径が小さい $d=0.02, 0.04 \text{ mm}$ の場合 $d/L_0 < 1.0$ に相当するものは、若干大きい値を示し、このことは、周期が $1.0, 0.8 \text{ sec}$ の短い場合で砂連の発生があり、砂粒の動揺は起るが岸方向に移動する微動の状態が起り難くなっていることを示している。

図-4は実験に使用した底面最大流速の正方向の場合の値について、波高 H に代えて静水面より波高中分面までの距離を考慮した $(H+2\delta)$ を使用して図示したもので、直線は式(7)と $T = \sqrt{(2\pi L/g) \cdot \coth(2\pi h/L)}$ の関係



を用いて求めた次のような式である。

$$(U_{max}^2/\sqrt{g L}) \sqrt{\sinh \frac{4\pi h}{L}} = \sqrt{\pi} \cdot (H+2\delta)/L \dots\dots\dots (12)$$

すなわち、最大流速の測定値はほぼ微小振中波理論に沿っているといえる。

V. 砂の移動量について

(1) Du Boys の式による場合

単位中、単位時間当りの砂移動量を体積で表わし Δg (cm^3/sec) とすると、 $\Delta g = \psi \cdot \tau (T - T_c) = \psi^2 U_c^2 (U_c^2 - U_{c,c}^2)$ (13)

ψ は粒径に関する係数、また、Lamb による層流境界層内流速分布 U_c は、 $U_c = \omega A \{ \sin(\omega x) - e^{-\beta x} \sin(\omega x - \beta z) \}$

である。したがって、せん断力は、底面において

$$\tau = -\mu \left(\frac{dU_c}{dx} \right)_{x=0} = \sqrt{2} \mu \omega A \beta \sin(\omega x + \pi/4)$$

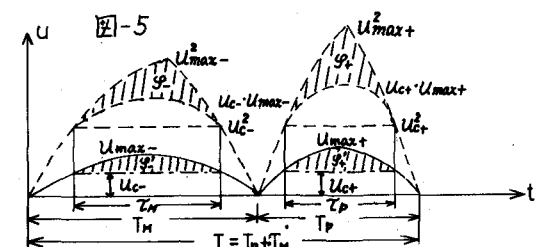
さらに、摩擦速度 U_c に関しては、

$$\left. \begin{aligned} U_{c,r}^2 &= \sqrt{2} \omega A \beta \sin(\omega x + \pi/4) = \sqrt{2} \omega \beta U \\ \text{また、} U_{c,c} &= \sqrt{2} \omega \beta U_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 U, U_c は底面流速(境界層外縁流速)、移動限界流速で、 $U = \omega A \sin(\omega x + \pi/4)$, $\omega = 2\pi/T$, $A = \pi H / \sqrt{2} \sinh \frac{2\pi h}{L}$ U_c には式(10)を用いることとする。 $\beta = \sqrt{\tau_0/\nu}$, $\nu = 0.01311 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (動粘性係数)である。つぎに式(14)を式(13)に代入し、さらに正流速、負流速による移動方向を考慮すると、

$$\Delta g = 2\psi^2 \nu^2 \left[\beta_+^2 U_+ (U_+ - U_{c,+}) - \beta_-^2 U_- (U_- - U_{c,-}) \right]$$

さらに、1周期間 T における平均移動量を求め、



$$\begin{aligned} g &= \frac{1}{T} \int_T \Delta g dt = \frac{2\psi^2 \nu^2}{T} \int_T [\beta_+^2 U_+ (U_+ - U_{c,+}) - \beta_-^2 U_- (U_- - U_{c,-})] dt \\ &= 2\psi^2 \nu^2 \bar{g}', \quad \bar{g}' = \frac{1}{T} \int_T [\beta_+^2 U_+ (U_+ - U_{c,+}) - \beta_-^2 U_- (U_- - U_{c,-})] dt \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

式(15)中の β_+ , β_- の値にはそれぞれ正流速、負流速発生時間、 T_p , T_m を用いることとし $\beta_+ = \sqrt{\pi/2T_p\nu}$, $\beta_- = \sqrt{\pi/2T_m\nu}$ とする。また、図-5の斜線部分の時間積分を g_+ , g_- とすると、式(15)の $\bar{g}'$ は

$$\bar{g}' = \frac{1}{T} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2T_p\nu}} g_+ - \sqrt{\frac{\pi}{2T_m\nu}} g_- \right) \dots\dots\dots (16)$$

となる。

一方、移動量(100波)の測定量と W_{gr} とし単位時間、単位巾当り g' とすると、 $g' = W / (100 \times 15) (g'_{sec/cm})$ でありまた、砂の空隙率ならびに砂面中に対する砂の実質移動部分の比率などによる係数 $\lambda (< 1)$ を考えると、

$$g' = \sigma \lambda g \quad (\sigma, \text{砂の比重 } 2.65)$$

さらに、Vincent の測定値(毎分、60cm中)に換算すると

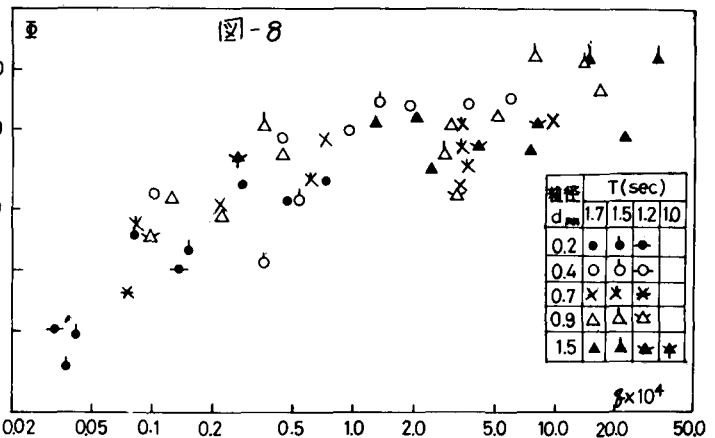
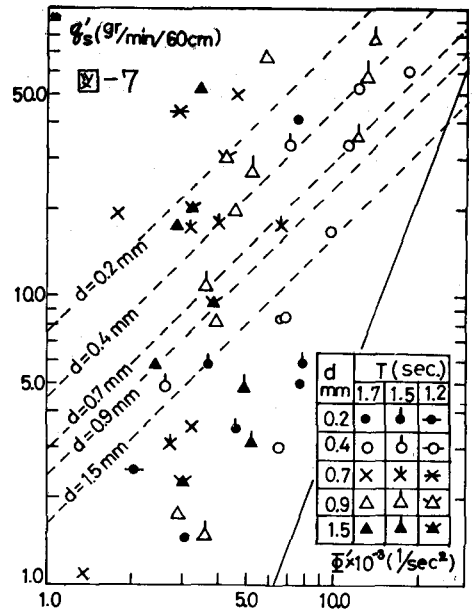
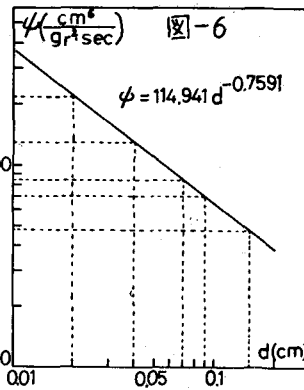
$g'_s = g' \times 3600 = 7200 \sigma \lambda P^3 \nu^2 \omega^2 \omega'$ 、(Pは水の密度)、いま ω' と測定値より求め、 g'_s の関係を図に示すと、図-7 となり、実線で示した Vincent の場合は g_s と g_s' とを加え値であるため ω' が大きく現われている。つぎに図-6 に示した Straub の ϕ の値を使用し、 $\lambda = 1$ とし計算した値と破線で示すと、粒径別には明らかでないがオーダー的には概ねおのずから方法より妥当な値を示しているといえる。

(2) Eagleson の式による場合
層流境界層内の質量輸送速度 u_e を用い、移動限界流速以上の流速による砂粒子の移動速度 v_s の1周期間の平均値 $\bar{v}_s$ は水平床の場合、

$$\bar{v}_s = (u_e - u_c) \quad \text{であり底面流速 } u \text{ を用いると、} \quad \bar{v}_s = (u - u_c) \cdot M(\beta d),$$

$$M(\beta d) = 5 - 8e^{-\beta d} \cos \beta d + 3e^{-\beta d} \sin \beta d \quad \text{---(17)}$$

である。いま式(17)と図-5の斜線部の g'_s, g'_s' の値を用いて次式のように表わす。 $\bar{v}_s = \frac{1}{T} [M(\beta d) g'_s - M(\beta d) g'_s'] = \omega' \dots (18)$
ここに、 d は粒径、 β, β_c は式(16)による。式(18)は ω' の値それ自身が砂粒子の移動速度を与えることになるが実際はそれ程砂粒子の速度は大きくないため、ある係数が必要となる。また、測定値より粒径の大きい場合移動量は小さいことなどを考慮して、上記 g' を用い、 $g = g'd = K \omega'$ (19)
と仮定し、 ω' の値と式(17)、(18)を用いて計算した。測定値に測した g と ω' の値を図示すると図-8 のように



なり、 ω' の増加に伴って、測定値にかなりのバラツキはあるが g の値が次第に増加する結果が得られた。しかし、 g が ω' に比例するのには ω' の値が小さい値のときであり、 ω' が大きい場合は急激に移動量は増加すると云える。以上の事柄より、今回の場合は水平床であるため質量輸送が比較的小さい場合であるが、質量輸送と砂移動の関連がある程度明らかとなり、碎波域における場合でも質量輸送を求めることにより砂移動の見積りが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤昭二・田中剛男 "水平床における波による砂移動について" 河田海講, 1962.
- 2) 石原謙次郎・植木亨 "漂砂の移動限界流速, 限界水深及び移動量について" オフショア誌, 1960.
- 3) Eagleson, P.S. & Dean "Wave induced motion of bottom sediment particles. proc. A.S.C.E. 85, 1959.
- 4) 首藤伸夫・青田茂雄 "波・流れ共存域における砂移動限界" 第24回年講, 1977.