

移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察

徳島大学助教授 工学部 京都大学 工学博士 榎 木 亨

1. 緒 言

近年、海岸における諸現象を解明するに当って、模型実験による場合が少なくないが、この模型実験によって得られた結果を現地海岸へ再現する際、いかなる法則によるべきかはきわめて重要な事柄であるにもかかわらず、現象の解明が遅れているため、その法則は確立されていない。しかしながら、波の変形を主とする現象を取り扱う場合、あるいは高潮、潮汐などの長周期の水位変動を主とする場合などの固定床における模型実験などについては、浅海波理論および Navier-Stokes の運動方程式を用いて求めた研究¹⁾²⁾や、砕波をふくむ現象の場合、砕波水深におよぼす波の周期の影響を調べて、縮尺の効果の入ってくる領域を明らかにした Diephuis³⁾の研究などがある。さらに、岩垣博士⁴⁾はこれらの固定床における海岸模型実験における相似率について、従来の研究成果を駆使して系統的にその相似性を論述している。

この固定床実験に対して、海岸地形の変化、構造物近傍の洗掘など、砂礫などの移動物質をふくむ現象を模型実験において取り扱う場合は、縮尺比について論じた一、二の研究⁵⁾⁶⁾があるのみであって、移動床実験は定性的な傾向をみるにとどまっている。著者も先年実験で求めた海岸平衡勾配を現地海岸へ適用する方法⁷⁾として、屈折および回折の影響を除くため、砕波特性を用いた無次元表示法を提唱したが、砂の移動をとまうような結果を、このような幾何学的諸量の無次元表示であらわすことに大きな疑問がある。

そこで、本論文では、まず汀線と直角方向の砂の移動に関する力学的な機構を考慮した相似率について、漂砂量公式と限界流速を示す式にもとづいて考察をすすめ、ついで、現地海岸の、ある平衡勾配から他の平衡勾配へ変形する場合、実験的に求めた平衡勾配の結果を適用してその変形過程を推定する方法を述べていくこととする。

2. 相似率に関する考察

著者は昨年⁸⁾の海岸工学講演会において、単位時間当りの漂砂量 q_s が、

$$q_s = C_s \cdot u^{*2} (u^{*2} - u_{c*}^{*2}) \quad (1)$$

で示される式に、浅海波理論、限界摩擦流速に関する式を用いることによってあらわされることを明らかにした⁸⁾。

(1) 式において C_s は砂の特性により定まる常数であり、摩擦速度 u^* および ω は次式によって与えられる。

$$u^{*2} = \frac{1}{\sqrt{\omega \nu}} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{\sin(\omega t + \pi/4)}{(\sin \omega t)^2} \cdot u_b$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ここに ν は動粘性係数、 u_b は浅海波理論の底部流速で、水深 h における波高、波長、周期を、 H, L, T とすると A はつぎの式で示される値である。なお添字 c は限界時を示す。

$$A = \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)}$$

また漂砂に関する連続方程式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

である。ここに λ は砂の空けき率、 z は垂直方向、 x は水平方向の距離を示す。

(1) 式に用いる u_b は浅海波理論が適用される領域では

$$u_b = \frac{\pi H}{T} \cdot \operatorname{cosech} \frac{2\pi h}{L} \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

であらわされるから、二次元の実験で模型をひずませない場合には、実際海岸と模型海岸における u_b の比は (4) 式であらわされる。

$$\frac{u_{b1}}{u_{b2}} = \frac{(H_1/T_1) \operatorname{cosech}(2\pi h_1/L_1)}{(H_2/T_2) \operatorname{cosech}(2\pi h_2/L_2)} \quad (4)$$

ここに添字 (1 および 2) はそれぞれ実際海岸および模型海岸の値を与えるものである。

(4) 式中の波高および周期などの特性に関しての相似率はすでに明らかにされていて、波の周期 T は垂直方向の縮尺比の $1/2$ 乗、波長および波高は垂直方向の縮尺比に等しいという関係が導かれている⁸⁾。この関係を用いると、(4) 式は、

$$\frac{u_{b1}}{u_{b2}} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{z_1}{z_2} \right) = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

となる。 z_1, z_2 は実際海岸および模型海岸の垂直方向の距離を示す。つぎに (2) 式において空けき率 λ を一定と仮定すると、

$$\frac{z_1/t_1}{z_2/t_2} = \frac{q_{s1}/x_1}{q_{s2}/x_2} \quad (6)$$

ここに t は時間をあらわす。いま模型をひずませない場合を考えているから、(6) 式より次式を導くことができる。

$$q_{s1}/q_{s2} = (z_1/z_2)^{1/2} \quad (7)$$

一方 (1) 式より、

$$q_s = C_s \left\{ \frac{u_b^2}{\sqrt{\omega/\nu} \cdot A} \right\}^2 \left[\frac{\sin(\omega t + \pi/4)}{(\sin \omega t)^2} \right] \\ \times \left\{ u_b^2 \frac{\sin(\omega t + \pi/4)}{(\sin \omega t)^2} - u_{bc}^2 \frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{(\sin \omega t_c)^2} \right\} \quad (8)$$

が導かれ、漂砂量が相似であるためには、(8)式の両辺の各項の比が等しければよい。したがって、次式が成立しなければならない。

$$\frac{q_{s1}}{q_{s2}} = \frac{C_{s1}}{C_{s2}} \cdot \frac{u_{b1}^4 / (\sqrt{\omega_1/\nu} \cdot A_1)^2}{u_{b2}^4 / (\sqrt{\omega_2/\nu} \cdot A_2)^2} \\ = \frac{C_{s1}}{C_{s2}} \cdot \frac{u_{b1}^2}{u_{b2}^2} \cdot \frac{u_{bc1}^2}{u_{bc2}^2} \cdot \frac{1/(\sqrt{\omega_1/\nu} \cdot A_1)^2}{1/(\sqrt{\omega_2/\nu} \cdot A_2)^2} \quad (9)$$

(9)式のはじめの等式および(5)式と(7)式、さらに波の特性に関する相似率より次式が求められる。

$$\frac{C_{s1}}{C_{s2}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (10)$$

(10)式を用いて、(9)式の後の等式より次の式がえられる。

$$\frac{q_{s1}}{q_{s2}} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \cdot \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \left(\frac{u_{bc1}}{u_{bc2}} \right)^2 \cdot \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \\ = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{u_{bc1}}{u_{bc2}} \right)^2 \quad (11)$$

(7)式と(11)式とから、砂の移動限界時の流速の比も、浅海波の底部流速の比と同様に、(12)式で示されることがわかる。

$$\left(\frac{u_{bc1}}{u_{bc2}} \right)^2 = \frac{z_1}{z_2} \quad (12)$$

移動限界時の流速については、昨年著者らが閉塞管を用いた基礎実験において、一定区間の圧力降下と平均流速から砂の移動限界摩擦速 u^*_c を明らかにし、その u^*_c と波の運動下の抵抗法則から求めた結果⁹⁾があるが、その結果をここで用いることにすると、漂砂の移動限界摩擦速度は、

$$(a) \quad \frac{u^*_c d}{\nu} < 10 \text{ の場合} \\ \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\} = 0.114 \left(\frac{u^*_c d}{\nu} \right)^{-2/3} \quad (13)$$

$$(b) \quad 10 < \frac{u^*_c d}{\nu} < 60 \text{ の場合} \\ \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\} = 0.028 \quad (14)$$

という実験式であらわされる。ここで σ は砂の比重、 ρ は流体の比重、 d は砂の粒径、 g は重力の加速度である。

浅海波理論を用いた層流境界層内の抵抗法則⁹⁾、

$$u^*_c = \frac{u_{bc}^2}{\sqrt{\omega/\nu} \cdot A} \cdot \frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{(\sin \omega t_c)^2}$$

を用いて、(13)式を変形すると、(15)式、(16)式のようになる。

(a) の場合；

$$\frac{u_{bc}^2}{\sqrt{\omega/\nu} \cdot A} \frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{(\sin \omega t_c)^2} \left/ \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\} \right. \\ = 0.114 \frac{u_{bc}^{-2/3}}{(\sqrt{\omega/\nu} \cdot A)^{-1/3}} \left\{ \frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{(\sin \omega t_c)^2} \right\}^{1/3} \\ \times \left(\frac{d}{\nu} \right)^{-2/3} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{bc}^2 &= m^{3/4} \cdot (\sqrt{\omega} \cdot A) \\ &\times \left[\frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{(\sin \omega t_c)^2} \right]^{-1} \cdot d^{1/4} \\ &\times \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right)^{3/4} \\ m &= \frac{0.114}{(\sqrt{\nu})^{1/3}} \cdot \nu^{2/3} \cdot g \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(16)式によって、模型と現地海岸の比をとり、(12)式を用いると、

$$\frac{(s_1 - 1)^3 \cdot d_1}{(s_2 - 1)^3 \cdot d_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (17)$$

がえられる。ここに $s = \sigma/\rho$ である。

(b) の場合も同様にして、

$$\frac{(s_1 - 1) \cdot d_1}{(s_2 - 1) \cdot d_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/4} \quad (18)$$

がえられる。

実験において実際の海岸の砂と同じ比重のものを用いるとすると、 $s_2 = s_1$ となり、(17)式および(18)式より、(a) および (b) のそれぞれの場合に、底質粒径の比はつぎのようになる。

$$(a) \quad \frac{u^*_c d}{\nu} < 10 \text{ の場合, } \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (19)$$

$$(b) \quad 10 < \frac{u^*_c d}{\nu} < 60 \text{ の場合, } \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/4} \quad (20)$$

すなわち、従来の幾何学的相似が底質粒径に適用できるのは、 $u^*_c d/\nu < 10$ という粒径の細かい領域の場合であって粒径が大きくなれば幾何学的相似は成り立たなくなることがわかる。

つぎに(19)、(20)式が適用される領域の波の特性と粒径の関係を明らかにしておこう。

浅海波理論における層流境界層内の抵抗法則において、 $\omega t = \pi/2$ とおくと(底部流速最大の場合)、

$$(u_b/u^*)^2 = \sqrt{2} \sqrt{\omega/\nu} \cdot A, \quad u_b = \omega A \quad (21)$$

であたえられるから、(a)の領域はつぎのように書きなおすことができる。

$$\frac{\omega \cdot A \cdot d \cdot \nu^{1/4}}{2^{1/4} \cdot \omega^{1/4} \cdot A^{1/4} \cdot \nu^{1/2}} < 10 \quad (22)$$

(22)式に $\omega = 2\pi/T$, $A = \frac{H}{2} / \sinh(2\pi h/L)$, および $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$ を代入すると、

$$T^{1/4} \cdot \left(\frac{H}{L_0} \right)^{1/2} \cdot d \cdot \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1/2} \\ < 10 \times 2^{1/2} \cdot \nu^{3/4} / [g^{1/2} \cdot (2\pi)^{1/4}]$$

となり、

$$T^{1/4} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right) \cdot d \cdot \left(\sinh \frac{2\pi h}{L}\right)^{-1/2} < 0.0108 \text{ (cm-sec 単位)} \quad (23)$$

という関係を与えることができる。ここに H_0 , L_0 は沖波の波高, 波長を示す。

(23) 式中の H/H_0 は h/L_0 の関数であり h/L もまた h/L_0 の関数であらわされることは, すでによく知られていることであるから, (23) 式を満足するような底質粒径は波の周期 T , 波形勾配 H_0/L_0 およびその位置によって大きく左右されることがわかる。

同様に (b) の場合は

$$0.0108 < T^{1/4} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right) \cdot d \cdot \left(\sinh \frac{2\pi h}{L}\right)^{-1/2} < 0.0648 \quad (24)$$

であたえられる。

図-1 は $(H_0/L_0) \cdot (H/H_0)$ が 0.04, 0.01 の波に対する, (a) の場合を満足する最大の粒径 d と T と h/L_0 の関係を (23) 式にもとづいて計算した結果であり, 図中の曲線より下の領域が (23) 式を満足する場合である。

図-2 も同様に (24) 式の右の不等式において, 式を

図-1 $\frac{u_*^* d}{\nu} = 10$ の場合の $d, T, h/L_0$ の関係

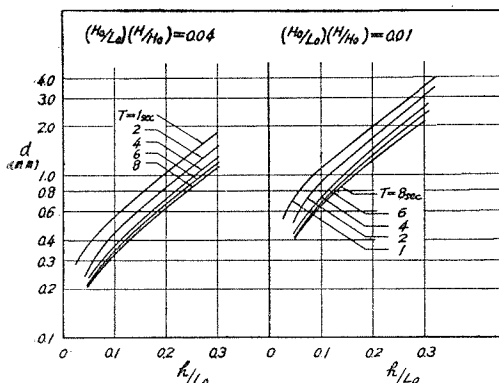
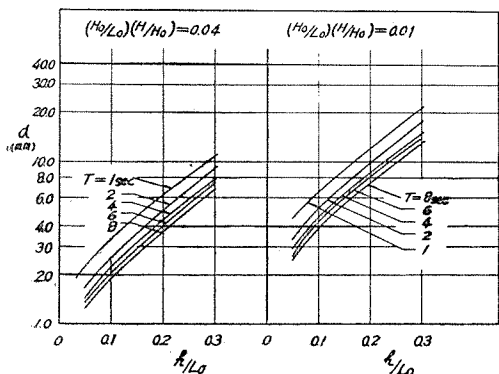


図-2 $\frac{u_*^* d}{\nu} = 60$ の場合の $d, T, h/L_0$ の関係



満足する最大粒径を, それぞれの波の周期, 位置について求めたものであり, 図-1 の曲線の上の領域と, 図-2 の曲線の下領域が (24) 式を満足する領域を示している。

この図から, 同じ $(H_0/L_0)(H/H_0)$ の波で, 同じ位置であっても, 波の周期が小さければ, 比較的大きな粒径でも粒径の比は垂直縮尺の比に等しくおいても差し支えないことがわかり, また, 同じ $(H_0/L_0)(H/H_0)$ の波でも, いかなる周期に対しても岸に近づくにつれて, (23), (24) 式を満足する場合の粒径は小さくなることが明らかである。さらに h/L_0 , T が一定の場合, 波形勾配が大きくなればなるほど, すなわち波が峻しくなるにしたがって, (23), (24) 式を満足する場合の粒径は小さくなっている。

以上の事柄から, 砂の移動の比較的激しい $h/L_0 = 0.1$ より小さい領域では, 波の穏やかな $H_0/L_0 = 0.01$ より小さい波形勾配の波においても 1 mm 以下の底質粒径でないと垂直縮尺比で底質粒径を縮めることはできないことがわかる。すなわち, それより大きい底質粒径を示す海岸では, 縮尺比の 1/4 乗の相似則によらなければならない。

なお, これらの論議は, 浅海波理論の層流境界層内部の砂の移動を対象としたものであって, 砂粒が大きくなって層流境界層外に出た場合, あるいは汀線に近づいて乱れが大きくなり浅海波理論の層流境界層理論が適用できなくなる領域ではこの考察は適用されなくなることには注意しなければならない。しかし, 実験によって砂の移動限界水深などを求めるに当たってはこの相似則によって十分と考えられよう。

3. ある平衡勾配から他の平衡勾配への変形過程に対する考察

以上のいずれかの相似則によって, 海岸変形に関する基礎的な実験である平衡勾配の実験結果を現地海岸に再現する場合, 実際の海岸変形は, ある波形勾配に対応した平衡勾配, あるいは平衡勾配に近い勾配から, 波高, 波長も変化した別の入射波に対応した平衡勾配に移り変わるため, 移り変わった最終的な形状はその変わった入射波に対応した平衡勾配の実験結果と相似則から推定することはできるけれども, もとの海岸地形のどの部分が隆起し, いかなる地点が浸食されているかという, その変形過程を明らかにすることはできない。

著者は, ここで, すでに発表した初期勾配 1/10 から出発して得られた平衡勾配の実験結果¹⁰⁾を用いて, 現地海岸の海岸地形の変化を推察する方法について考察してみよう。

著者の以下に述べるこの問題に対する考え方は, 岩垣博士の平衡勾配法¹¹⁾の考え方を発展させたものである。

この場合問題となるのは、このように初期勾配をことにする平衡勾配を求めるに当たって、著者が求めたような $1/10$ という一様な初期勾配から出発してえられた平衡勾配が適用できるかどうかということと、変形する場合にどの点を基点として変わっていくかということである。これらの疑問のうち、初期勾配の影響については、九州大学¹²⁾における一様な初期勾配が $1/10$, $1/20$ の各実験において、 H_0/L_0 および H_0/ad が一定の場合にえられる平衡勾配はほぼ一致し、その初期勾配の差異があまりあらわれなかったという実験結果を参照すれば、初期勾配のことになった海岸地形からの変形によって到達する平衡勾配であっても著者の求めた平衡勾配を適用することができるものと考えてさしつかえなからう。

つぎに海岸地形が変化していく場合、どの地点を基点として変化していくかということについては、従来から論議されてきた漂砂の移動限界水深があげられる。この漂砂の移動限界水深については、漂砂の動き始める水深と、掃流漂砂の顕著でなくなる水深の二種があることはすでに明らかにされているが、前者の場合は砂は移動してもきわめて微弱であり、海浜変形をもたらすほどの砂の移動は示さないことが実験によって示されている。したがって、この海浜変形の基点となるべき限界水深としては、後者の掃流漂砂の顕著でなくなる水深を選んでさしつかえなからう。この限界水深 (h_c) については著者の3種類の砂に対して行なった実験結果¹⁰⁾があるが、この場合これらの実験結果を現地海岸に適用する場合に前項で明らかにした相似率を参照しなければならない。

ここで、著者の平衡勾配および移動限界水深 h_c に関する実験結果を用いて、具体的な例を示し、これによって著者の考え方をさらに明確にしていくこととするが、この場合、現地海岸と実験との相似率が前項の (a) の場合、すなわち、粒径の比が垂直縮尺の比に等しい場合として説明していく。したがって、実験結果を d/H_0 別に整理し、この d/H_0 の値が等しい結果を適用すれば現地海岸のものを表わすものと考えられる。

いま、 $H_{01}=32.2\text{ cm}$, $L_{01}=13.7\text{ m}$, $H_{01}/L_{01}=0.0234$, $d/H_{01}=1.55\times 10^{-3}$ (これを①の波と称する) が作用して初期平衡勾配を形づくっているとき、入射波が変化して $H_{02}=62.5\text{ cm}$, $L_{02}=18.4\text{ m}$, $H_{02}/L_{02}=0.0488$, $d/H_{02}=5.55\times 10^{-3}$ (これを②の波と称する) になったとすると、その海浜地形がどのように変化するかを求めてみよう。

まず変形の基点となる水深を、限界水深 h_c と沖波波長 L_0 の比と H_0/L_0 および d/H_0 の関係を示す実験結果¹⁰⁾から求める。これによると、②の波に対しては $h_c/L_{02}=0.073$ という値がえられる。この h_c を①の波に対応した平衡勾配において求めるわけであるが、 $H_{01}/L_{01}=0.0234$ の波と $H_{02}/L_{02}=0.0488$ の波とは波長がこと

なっているため、さきの h_c を示す関係図から求めた $h_c/L_{02}=0.073$ を無次元量のまま、直接①の波の無次元化した平衡勾配上に求めることはできない。すなわち、①の波の平衡勾配をそのまま絶対値に換算して h_c そのものを求めるか、あるいは

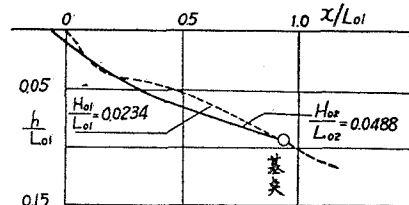
$$\frac{h_c}{L_{01}} = \frac{h_c}{L_{02}} \times \frac{L_{02}}{L_{01}} = \frac{h_c}{L_0} \times \frac{T_2^2}{T_1^2}$$

の変換式により h_c/L_{01} を求め、図-3 上の基点を求めなければならない。その結果、この場合 $h_c/L_{01}=0.098$ という値をえる。つぎにこの水深を基点として $H_{02}/L_{02}=0.0488$, $d/H_{02}=5.55\times 10^{-3}$ の波に対応した平衡勾配を追跡していくわけであるが、図-3 の縦軸、横軸は h/L_{01} , x/L_{01} であるから h_c/L_{02} を適用したときと同様に、

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{L_{01}} &= \frac{h}{L_{02}} \times \frac{L_{02}}{L_{01}} \\ \frac{x}{L_{01}} &= \frac{x}{L_{02}} \times \frac{L_{02}}{L_{01}} \end{aligned} \right\}$$

の変換をおこなって、図-3 上に求めていけば図中の実線のような新しい波に対応した海岸地形がえられる。ただし、この場合上式の x/L_{02} は、基点を 0 として岸向きに x/L_{02} をとって、その値を x/L_{01} に変換して図-3 上に点描していかなければならない。

図-3 ある平衡勾配から他の平衡勾配への変化



以上述べた方法により海岸地形は入射波を与えることにより推定することができ、新しい入射波によって汀線がどの程度前進あるいは後退するものか、従来全く未知とされていた汀線の前進後退量を推定することが可能となる。

なおこの場合、前項の相似率が浅海波領域での論議であったのにもかかわらず、砕波点以後の海浜変形にまでも、その相似則を適用しているため、きわめて大きな疑問が残されており、さらにまた、この推定を十分活用させるためには、さらに数多くの海浜変形の実験を行なって、 H_0/L_0 および d/H_0 の組合わせた各種の場合の平衡勾配を明らかにしておかなければならず、今後の研究に残された問題点は多い。

4. 結 語

以上著者は、従来ただたんにその粒径の相違のみによ

る移動床実験の結果の考察を現地海岸へ適用できうように前進せしめようとして、移動床の場合の相似率を、著者の求めた漂砂量公式、移動限界流速を示す基礎実験結果および浅海波理論における抵抗法則を用いて、考察し、従来考えられてきた粒径の比が垂直縮尺の比に等しくおけるのは、一部の場合のみであって、模型をはずさない場合でも、その底質粒径と限界摩擦速度とを用いた Reynolds 数 $u_* d / \nu$ の値によって粒径の比をかえなければならないことを明らかにした。さらに、いままで理論解析的な取扱いが不可能とされている海浜変形過程について、実験結果を実際の海岸に適用するに当たって、その具体的な方法を述べ、従来推定の方法がなかった汀線の前進あるいは後退量の推定可能であることを明らかにした。しかし、なおこれらの研究結果は実測値の比較ができなかったため、あくまで考察に終わったが、今後実測を行なってこの考察のうらづけを続けていくとともに、砕波領域における同様の研究を進めていくつもりである。

最後に本研究に対して、終始御指導を賜った京都大学の石原藤次郎教授および岩垣雄一教授に対し深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 連水頌一郎・樋口明生・吉田幸三；潮流を含む水理模型試験の相似性について，京都大学防災研究所年報，第2号，昭33.12，pp. 83~95.
- 2) Hudson, R.Y. and Moore, L.F.; The Hydraulic Model as an Aid in Breakwater Design, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng., 1951, pp. 205~212.
- 3) Diephuis, J.G.H.R.; Scale Effects Involving the Breaching of Waves, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 194~201.
- 4) 岩垣雄一；海岸および港湾の模型実験について，土木学会関西支部，海岸工学の最近の進歩，昭36.3，pp. 21~42.
- 5) Sayille, T. Jr.; Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies, Proc. 7th General Meeting, I.A.H.R., 1957.
- 6) 岩垣雄一・野田英明；海浜の Scale Effect について，土木学会年次学術講演会講演前刷，昭35.5，pp. 73~74.
- 7) 岩垣雄一・榎木 亨；海浜の平衡勾配と砕波による砂移動に関する実験，土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 2，昭30.11，pp. 99~105.
- 8) 石原藤次郎・榎木 亨；漂砂の移動限界流速，限界水深及び移動量について，土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 7，昭35.11，pp. 47~58.
- 9) Lamb, H.; Hydrodynamics, 6th ed. 620.
- 10) 岩垣雄一・榎木 亨；海岸の平衡勾配に関する二，三の問題について，京都大学防災研究所創立5周年記念論文集，1956，pp. 233~240.
- 11) 岩垣雄一；汀線浸食，土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 1，昭29.11，pp. 69~80.
- 12) 篠原謙爾・持東一郎・斎藤 隆；漂砂と波の特性に関する研究，土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 5，昭33.11，pp. 61~64.