

海浜変形の移動床模型実験における時間縮尺について

TIME SCALE FOR MODELING BEACH CHANGE

伊藤 政博*

By Masahiro ITO

A time scale for preserving the similarity of beach change processes between prototype and model under the unsteady condition is studied using a series of small- and large-scale experiments. The time scale is proposed as a function of experimental scale. By applying the time scale and the scale-model relationship to model experiments, the temporal beach change such as shoreline change and relative breaker point were well reproduced within the allowable range of experimental errors. Also, time scale is derived theoretically from the continuity equation of sediments and so on. The correspondence between the experimental and the theoretical time scales is discussed. The reliability of the proposed time scale and the scale-model relationship is checked by the movable bed model of beach change in the Ogata coast during a storm.

Keywords: time scale, scale model relationship, reproduction-model, movable bed model, beach change

1. ま え が き

海岸浸食の防止制御のために、これまで離岸堤が多く設置されてきたが、最近、珊瑚礁特有の消波機能を模倣した人工リーフ工法および安定海浜工法が試行されるようになってきた。このような海岸構造物で波および漂砂をコントロールして所要の目的を達成するためには、あらかじめその効果を十分予測しておかなければならない。この効果を予測するための一手法として、従来より移動床模型実験がしばしば実施されてきた。このような現地海岸⁽¹⁾を想定した現地模型実験⁽²⁾の実施にあたっては、何よりも現地の海浜変形を忠実に再現するために、波と底質との間の縮尺関係を規定する海浜変形の相似則と、さらに時間的に変化する現地波浪に対して模型の波の作用時間を規定するための時間縮尺が必要不可欠である。

海浜変形の時間縮尺に関する研究としては、野田³⁾が海浜変形の連続式および漂砂量式に基づいて時間縮尺を論じたのをはじめとして、Graaff⁽²⁾、Vellinga⁽³⁾およびHughes⁽⁴⁾らが、現地海岸を対象にして鉛直・水平方向の縮尺にひずみを入れた二次元模型実験を行って、時間

縮尺を検討している。最近、Kriebelら⁽⁵⁾はDean⁽⁶⁾の無次元沈降時間パラメーターに基づいて底質粒径を定めた無ひずみの模型実験結果に基づいて、時間縮尺を検討している。清水⁽⁷⁾は実規模ならびに中規模の造波水槽を用いた実験を行って岸沖漂砂量を求め、この岸沖漂砂量式に基づいて時間縮尺の検討を行っている。また、Sayao⁽⁸⁾は沿岸漂砂量に関する次元解析を行って、時間縮尺を議論している。このように海浜変形の時間縮尺がいくつか提案されてきたが、系統的な実験による裏付けと現地模型実験による十分な検証がなされていないので、一般的な使用に対する普遍性が乏しい現状である。

しかしながら、これまでに海岸構造物設置による海浜変形の予測に移動床模型実験がしばしば実施されてきたが、模型に使用する底質砂の粒径および時間縮尺の決定については、経験的手法にたよる場合が少なくない。たとえば、佐々木ら⁽⁹⁾はヘッドランドの形成実験について、現地海岸の地形変化（汀線移動）と模型とを比較して、試行的に時間縮尺を定めている。

そこで、本研究は、著者ら^{(10),(11)}が従来提案した海浜変形の相似則（海浜変形が相似となるために必要な底質の縮尺条件）を用いて、原型⁽¹¹⁾と模型⁽¹¹⁾の平衡海浜断面形状が相似になるように模型の実験条件を定め、初期海浜勾配に波を作用させて平衡形状へ移行する過程で、

* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

両者の海浜変形が相似になる時間縮尺を実験的に見出すことにする。また、海浜変形の連続式、岸沖漂砂量式および海浜変形の相似則を用いて時間縮尺を導き、実験的に求めた時間縮尺と比較検討を行う。さらに、暴浪による新潟県大潟海岸の海浜変形を対象にした二次元移動床による現地模型に、著者の海浜変形の相似則および時間縮尺を適用して再現性を調べ、その適用性について検討を加える。

2. 海浜変形の相似則

著者ら^{10),11)}は、次の考え方で海浜変形の相似則を実験的に求め、提案した。すなわち、原型と模型の海浜変形を相似にするために、外力としての波の特性の縮尺(実験縮尺)はFroude則に従うものとするが、漂砂には従来より指摘されているように縮尺効果が入ると考えられるので、その効果を模型に使用する底質砂の粒径にひずみとして含め、海浜断面形状が相似になる粒径縮尺と実験縮尺との関係を実験的に調べ、その結果をまとめてFig.1のように表わした。Fig.1は、底質砂の粒径縮尺 λ_d と実験縮尺 λ_t との関係で表わされており、相似則の成立する範囲の中央が一点鎖線で示してある。すなわち、海浜変形の相似則は次式のようなのである。

$$\lambda_d = 1.7^a \lambda_t^b, \quad \left\{ \begin{array}{l} 1 > \lambda_t \geq \frac{1}{2.2}, \\ \frac{1}{2.2} > \lambda_t, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a=0 \\ b=0.87 \\ a=-1 \\ b=0.2 \end{array} \right. \quad \dots\dots(1)$$

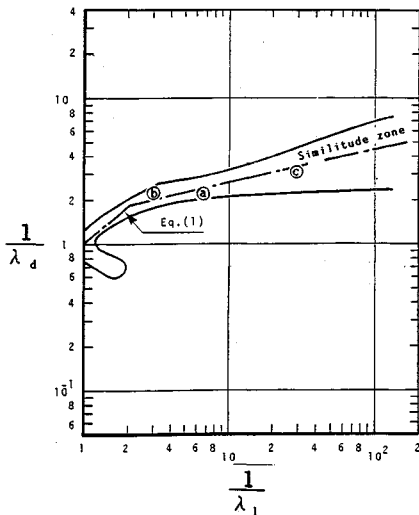


Fig.1 Scale-model relationship for beach changes by Ito and Tsuchiya.

注1) 本論文中では、「原型」と「模型」は実験スケールが相対的に「大きい」および「小さい」ものを指し、「現地海岸」とその「現地模型」とは区別して使うことにする。

ここに、粒径縮尺 $\lambda_d = (d)_m / (d)_p$ 、 $(d)_m$ および $(d)_p$ はそれぞれ模型および原型の底質砂の粒径、 $\lambda_t = 1/n$ は波高、波長、水深、海浜地形等の長さの実験縮尺、 a および b は定数である。この相似則は、原型と模型で鉛直・水平方向の縮尺は無ひずみであることが前提となっている。この相似則が満足されれば、原型と模型の海浜断面形状は相似となり、海浜変形のタイプももちろん一致する。

しかしながら、この種の模型実験では、原型に対して相似的に模型の縮尺を小さくしてゆくと、水の表面張力の影響による波の縮尺効果の介入が考えられる。波の縮尺効果についてはまだ十分究明されていないが、Diephuis¹²⁾によれば、砕波水深に及ぼす周期の影響は波形勾配によって異なるが、 $H_0/L_0 \leq 0.04$ では $T \geq 1.0$ sとすれば、砕波の縮尺効果は無視できるとしている。また、清水⁷⁾は、大小の造波水槽実験結果について、汀線の前進後退の限界を表わすSunamuraら¹³⁾のパラメーターと波高の関係を調べ、沖波波高が50 cm以下では、汀線移動に縮尺効果が現われるとしている。しかし、この研究では、汀線の前進後退を定性的に判別した結果に基づいているためにデータのばらつきが大きく、まだ検討の余地がある。したがって、本研究では、Diephuisの指摘する波の縮尺効果が入らないように留意して実験を行う。

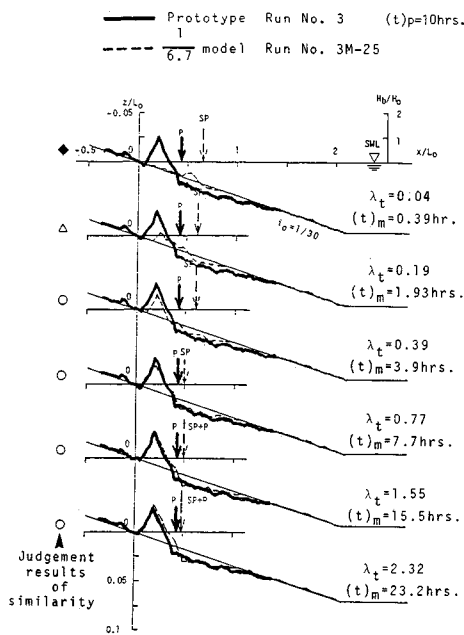
3. 実験方法および結果

式(1)の海浜変形の相似則を適用して、以下の方法で海浜変形の時間縮尺を見出すことにする。

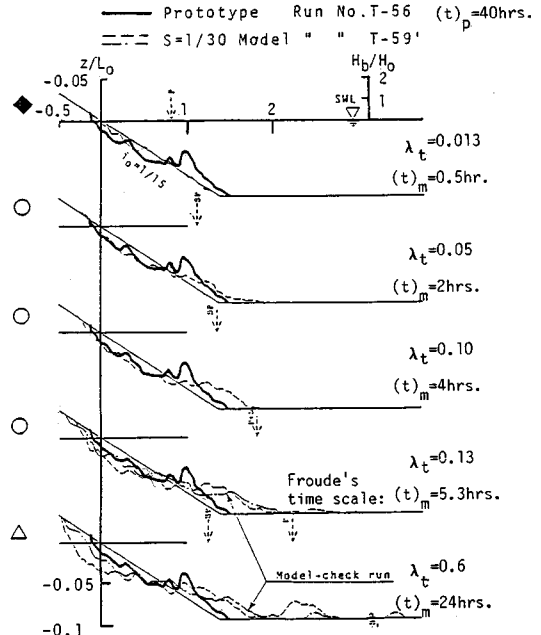
大型(長さ約78 m、幅1 m、深さ1.5 m)の造波水槽内に、Table 1のRun No. 3および4の条件で、一様な初期海浜勾配に規則波を作用させて、平衡海浜になるまでの海浜断面形状および砕波高、砕波点、砕波形式などの砕波特性を波の作用時間を適宜区切って測定し、これを原型とする。また、かつてSaville¹⁴⁾が超大型造波水槽を用いて、現地海岸規模の規則波を作用させた実験結果(Table 1, Run No. T-56)も原型とした。一方、模型は、中規模の造波水槽(長さ30 m、幅1 m、深さ1 m)を用いて、原型と模型の平衡海浜断面形状が相似になるように、式(1)を使って模型の実験条件を定める。この実験条件の設定に際しては、前述のように波の縮尺効果が入らないように、模型の周期が1 s以上になるようにした。非平衡あるいは平衡状態とは、原型模型の海浜断面形状および汀線移動などの経時変化がある程度安定したものを平衡、そうでないものを非平衡状態とした。Table 1には、こうして決定した原型に対する模型の実験条件例が示してある。この表に示してある原型(Proto.)と模型($\lambda_t = 1/n$)の縮尺関係がFig.1に併

Table 1 Examples of the experimental conditions for prototype and model.

Run No.	Experimental scale λ_l	Wave height in deep water H_0 (cm)	Period T (sec)	Wave steepness in deep water H_0/L_0	Water depth h (cm)	Initial beach slope	Dimensionless wave duration time t/T	Grain-size scale λ_d	Sand grain size d_{50} (mm)	Marks shown in Fig.1
3	Proto.	20.6	3.00	0.015	100.0	1/30	7.2×10^4	1/2.24	0.94	(a)
3M-25	1/6.7	3.5	1.16	0.017	15.0		7.4×10^4		0.42	
4	Proto.	21.8	2.00	0.035	100.0		10.8×10^4		0.94	
4M-18	1/3.0	8.1	1.15	0.039	33.3	1/15	7.5×10^4	1/2.24	0.42	(b)
T-56	Proto.	171.2	5.6	0.035	442.0		2.6×10^4			
T-59	1/30	5.8	1.02	0.036	14.7		2.6×10^4	1/3.07	0.15	(c)



(a) Case when beach change of prototype and model are in transitional state



(b) Case when beach change of prototype is in equilibrium state

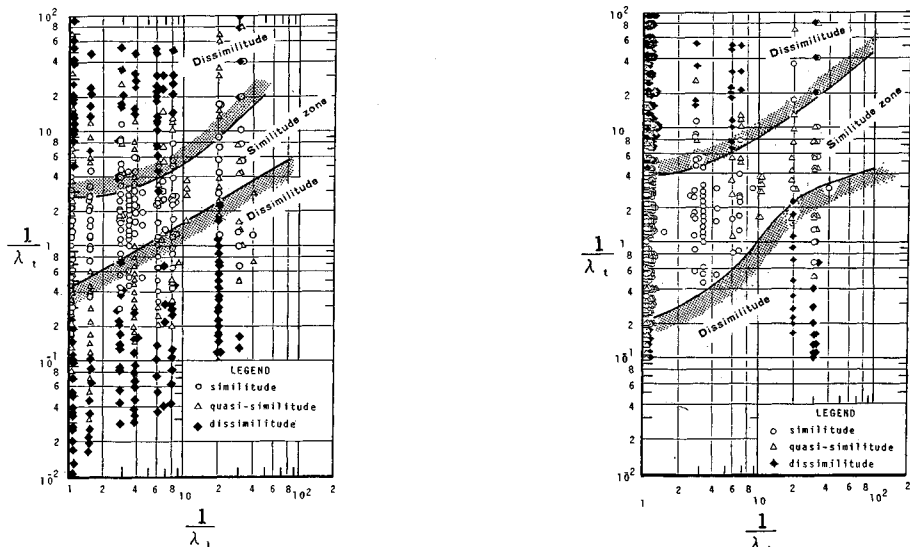
Fig.2 Similarity comparison of the prototype beach profile at the specialized wave operation time with temporarily varying model beach change.

示・比較してあるが、いずれも海浜変形の相似則を満足していることがわかる。模型実験は著者らが海浜変形の相似則を求めた場合と同様、水平・鉛直方向の縮尺にひずみを付けず、底質には原型の砂と同程度の比重を有する砂あるいは珪砂を使うことにした。模型の波の作用時間は原型と同程度かあるいはそれより長くして、海浜断面形状および碎波特性を小刻みに区切って測定した。この例として、Fig.2(a)には原型 (Run No.3) の海浜変形が非平衡状態 ($t < 20$ h) を選び、これに対して模型 (Run No.3 M-25) の波の作用時間縮尺 $\lambda_t = (t)_m / (t)_p$ を徐々に変化させ、両者の海浜変形が相似になる様子が示じてある。一方、Savilleの実験結果 (海浜変形がほ

とんど平衡状態, $t = 40$ h) を原型 (Run No. T-56) とその 1/30 模型 (Run No. T-59) について、時間縮尺の変化に伴う相似性の比較が Fig.2(b) に示してある。この図中には、碎波形式 (P: 巻き波, SP: 崩れ波, SP+P: 両者の中間) および実験の繰り返し 2 回目の結果が一点鎖線で示してある。

4. 海浜変形の時間縮尺

原型の特定な波の作用時間 ($t)_p$ における海浜断面形状に対して、模型の初期浜勾配から平衡形状に至る間を小刻みに区切って測定した海浜断面形状を重ねて、相似性の比較が Fig.2(a) および (b) に示してある。この



(a) Time scale for beach changes of prototype and model in transitional processes (b) Time scale when the beach profile of prototype only is in equilibrium

Fig. 3 Time scale to preserve the similarity of beach profile between prototype and model.

ような比較により、原型の波の作用時間を固定しておいて模型の波の作用時間を変化させ、両者が相似になるときの時間縮尺 $\lambda_t = (t_m)/(t_p)$ と実験縮尺 $\lambda_1 = 1/n$ の関係を調べることができる。こうすることによって、Fig. 2 から時間縮尺の変化に伴う相似性（相似、擬相似および非相似）の変化が良くわかる。相似性の比較照合は、原型と模型の間で汀線移動量、berm 頂の位置と高さ、沖浜における海浜変形の限界水深などの海浜変形の諸特性、および砕波点の位置などの相違が、実験誤差（平均誤差）の 2 倍以内の場合を「相似」、一方、実験誤差の 4 倍以上の相違があり海浜断面形状が正常海浜と暴風海浜のように根本的に異なる場合を「非相似」、これら 2 つの中間的な場合を「擬相似」とした。これらの相似性の判定基準で、相似のとき「○」印、擬相似のとき「△」印、および非相似のとき「◆」印として、判定した結果が Fig. 2 の比較図の左側に印してある。このような相似性の判定結果と他の実験資料を含めて、時間縮尺 λ_t と実験縮尺 $\lambda_1 = 1/n$ をそれぞれの逆数で整理した結果が Fig. 3(a) に示してある。また原型の海浜変形が平衡状態にある場合の結果が Fig. 3(b) に示してある。Fig. 3 から、海浜変形の時間縮尺が成立する関係の存在が良くわかる。Fig. 3(a) と (b) の時間縮尺はある幅をもった領域で表わされ、その領域の存在位置が若干異なっている。両方の図を重ねたものが Fig. 4 に示してある。Fig. 4 で示される共通領域は、原型の海浜変形が非平衡および平衡状態のいずれでも海浜変形の時間縮尺が成立するものと考えられる。この共通領域を 2 本の平行な実

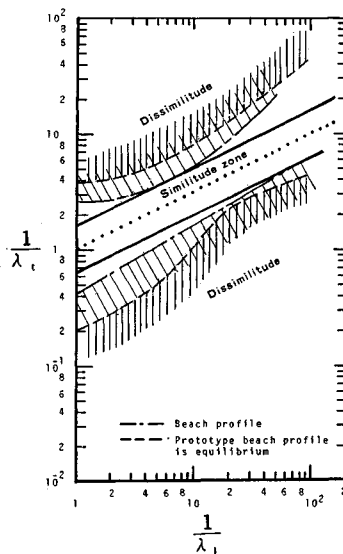
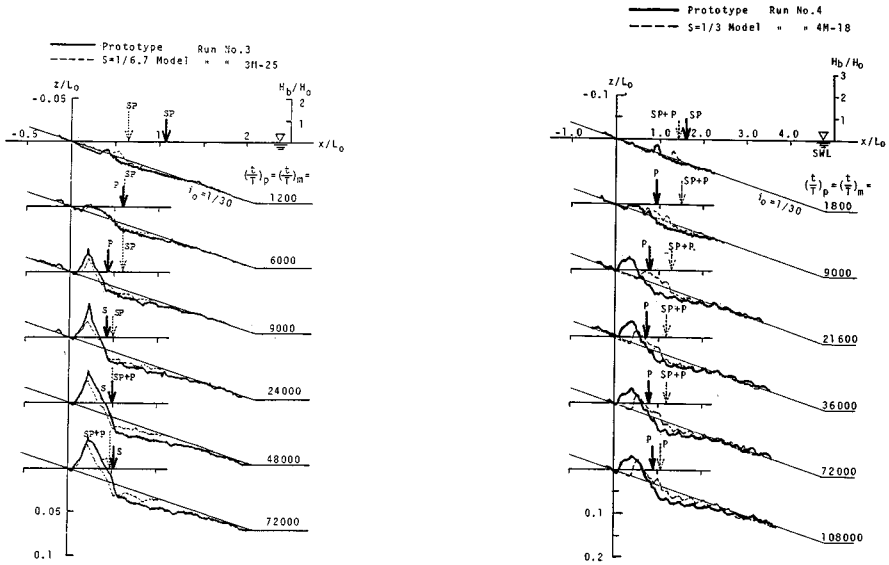


Fig. 4 Time scale for beach change which is obtained by overlapping Figs. 3(a) and 3 (b).

線で近似し、これを本研究における海浜変形の時間縮尺とする。この関係は次のように表わせる。

$$\frac{1}{1.6\sqrt{n}} \leq \lambda_t \leq \frac{1}{0.65\sqrt{n}} \dots\dots\dots (2)$$

このように、実験的に求めた海浜変形の時間縮尺が領域で表わされる理由の 1 つとして、海浜変形実験特有の実験誤差による影響が挙げられる。式 (2) で表わされる領域の平均的傾向を示す Fig. 4 中の点線が次式で表わさ



(a) Prototype (Run No.3) and model (Run No.3 M-25)

(b) Prototype (Run No.4) and model (Run No.4 M-18)

Fig.5 Similarity between prototype and model beach changes reproduced by using the time scale relationship.

れる Froude の時間縮尺と一致することは、底質粒径の縮尺がひずめて ($\lambda_d \neq \lambda_s$) あることを考えると、非常に興味深い。

$$\lambda_t = \frac{(t)_m}{(t)_p} = \frac{1}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (3)$$

5. 時間縮尺の検証

原型が波の作用によって初期海浜勾配から平衡状態へ時間的に変形する過程について、式(2)の時間縮尺を模型に適用して再現性を調べ、時間縮尺を検証する。

Table 1 中の Run No.3 の原型に対して、その模型 Run No.3 M-25 の波の作用時間を式(3)の時間縮尺で定めた場合、つまり無次元波の作用時間(波の作用数)が同程度の海浜断面形状および碎波特性の再現性が Fig.5(a) に示してある。同様に、Run No.4 の原型に対して Run No.4 M-18 の模型による再現結果が Fig.5 (b) に示してある。これらの海浜変形の再現図から、原型と模型で、水槽、造波機などが相似でないことによる実験誤差および初期海浜勾配の成型の影響を考慮すれば、海浜変形のみならず碎波特性の時間的な変化が比較的良く再現されているといえよう。特に、初期汀線からの無次元汀線移動量 X_{st}/L_0 および相対的碎波点の位置 X_b/L_0 の経時変化について、模型 (Run No.4 M-18) による原型 (Run No.4) の再現を、式(3)の時間縮尺を用いて整理した結果が Fig.6 に示してある。この図から、原型の汀線移動および碎波点の移動が模型で再現されている様子がわかる。さらに、Fig.6 で示した模型の再現性を実験誤差の影響を考慮に入れて調べてみる。

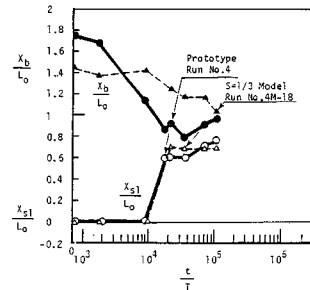


Fig.6 Time-dependent change of shoreline change and relative breaking position in prototype and model.

これまでに、著者¹⁰⁾は海浜変形の模型実験には不可避の実験誤差が介入することを明らかにするとともに、汀線移動量の実験誤差を沖波波形勾配との関係で次のように表わした。

$$\epsilon'_{\Delta X_{st}/L_0} = \pm 5.7 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1.20} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\epsilon'_{\Delta X_{st}/L_0}$ は汀線移動量の実験誤差である。式(4)を用いて、汀線移動量の実験誤差の影響を考慮して、模型の再現精度を検討する。この例として、Fig.7 には Run No.4 の原型と Run No.4 M-18 の模型について汀線移動量の再現精度が検討してある。この図中には、相似性の判定基準として式(4)で表わされる実験誤差の2倍以内を相似、2~4倍を擬相似、および4倍以上を非相似の3段階に分けて、相対的な違いが示してある。このように本研究で明らかにした時間縮尺を用いると、原型と模型の汀線移動量の相違は実験誤差の2倍以内に納まっていることから、再現性が良いといえよう。

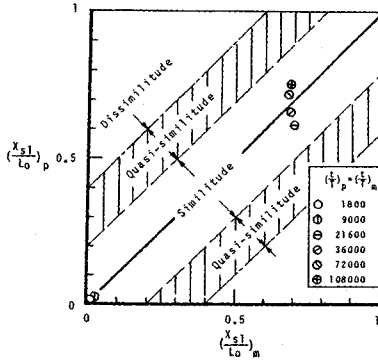


Fig. 7 Correspondence of shoreline movement in prototype and model when time scale and experimental error were considered.

このような検証によって、本研究の海浜変形の時間縮尺の妥当性が裏付けられよう。

6. 理論による時間縮尺

海浜変形の連続式、漂砂量式、および実験縮尺と底質砂の粒径縮尺の関係を定める相似則が与えられれば、海浜変形の時間縮尺を理論的に導くことが可能である。海浜変形を支配する漂砂量則は、これまでに数多くの式が提案されているが、砕波帯の内外を問わず海浜変形全域にわたって適用のできるものはないようである。したがって、ここでは沖浜の掃流漂砂領域に適用可能な土屋¹⁵⁾の式と、砕波帯の漂砂移動を対象にして求めた清水⁷⁾の式の2種類のタイプの実験式を用いて、時間縮尺を求める。

(1) 海浜変形の連続式

二次元海浜変形の連続式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\epsilon} \frac{\partial q_x}{\partial x} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h は海底の鉛直方向変動を表わす水深、 ϵ は底質砂の空隙率、 q_x は岸沖漂砂量、 t は時間、および x は海岸線に対して直角水平方向に取った座標である。

(2) 漂砂量式

土屋¹⁵⁾は、数多くの実験資料を整理し、底質の粒径 d とその摩擦速度 U_* で無次元表示した位相別の掃流漂砂量 Φ_* について、次のような関係式を提案している。

$$\Phi_* = K(\Psi_m - \Psi_c)^2 \dots\dots\dots (6)$$

一方、清水⁷⁾は大型造波水槽実験結果を含めた砕波点付近の海底地形変動からピーク漂砂量を求め、底質の沈降速度を用いて無次元化し、次のように表わしている。

$$\Phi = A\Psi_m^{3/2} \dots\dots\dots (7)$$

式(6)と(7)で、 $\Phi_* = q_x/U_*d$ 、 $\Phi = q_x/wd$ 、 w は底質の沈降速度、 $\Psi_m = \tau_m/sgd$ 、 $\Psi_c = \tau_c/sgd \approx 0.05$ で表わされる Shields 数および限界 Shields 数、 τ_m は

底面の波による最大せん断応力、 τ_c は底質の移動開始時のせん断応力、 $U_* = \sqrt{f_w/2} \cdot U_{bmax}$ で表わされる最大摩擦速度、 A は定数、 K は底質粒径と全振幅 $2a_w$ との比によって定まる定数で、式(10)で表わされる。また、 f_w は Jonsson による波動運動下の底面摩擦係数で、次のような Swart¹⁶⁾の簡略式がある。

$$\left. \begin{aligned} f_w &= 0.0025 \exp \left[5.21 \left(\frac{a_w}{k_s} \right)^{-0.19} \right], \text{ ただし } \frac{a_w}{k_s} > 1.57 \\ f_w &= 0.3, \text{ したがって } \frac{a_w}{k_s} \leq 1.57 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 k_s は粗度($\approx d$)。また、 U_{bmax} は底面における最大水粒子振幅速度で次式のようなになる。

$$U_{bmax} = \frac{\pi H}{2T \sinh kh} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 k は波数 $2\pi/L$ である。また、式(6)の K は次のように表わされる。

$$K = 1.7 \left(1 + 300 \frac{d}{2a_w} \right)^{2.5}, \text{ ただし } \frac{2a_w}{d} > 100 \dots\dots (10)$$

(3) 時間縮尺

a) 沖浜領域

式(5)から縮尺関係を求めると、次のようになる。

$$\lambda_t = \lambda_c \lambda_{q_x}^{-1} \lambda_h \lambda_x \dots\dots\dots (11)$$

また、式(6)の漂砂量式の右辺を展開し、 Ψ_c を一定とすると、次の3つの縮尺関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{q_x} &= \lambda_k \lambda_w^{5/2} \lambda_d^{-1} \lambda_m^5 \lambda_T^{-5} \lambda_{\sin h}^5 \lambda_s^2 \lambda_g^{-2} \\ \lambda_{q_x} &= \lambda_k \lambda_w^{3/2} \lambda_m^3 \lambda_T^{-3} \lambda_{\sin h}^3 \lambda_s^{-1} \lambda_g^{-1} \\ \lambda_{q_x} &= \lambda_k \lambda_w^{1/2} \lambda_d \lambda_m \lambda_T^{-1} \lambda_{\sin h}^{-1} \lambda_h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

式(11)と(12)から時間縮尺を求めると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_d \lambda_c \lambda_k^{-1} \lambda_w^{-5/2} \lambda_m^{-5} \lambda_T^5 \lambda_{\sin h}^5 \lambda_s^2 \lambda_g^2 \lambda_h \lambda_x \\ \lambda_t &= \lambda_c \lambda_k^{-1} \lambda_w^{3/2} \lambda_m^3 \lambda_T^3 \lambda_{\sin h}^3 \lambda_s \lambda_g \lambda_h \lambda_x \\ \lambda_t &= \lambda_c^{-1} \lambda_k \lambda_k^{-1} \lambda_w^{1/2} \lambda_d^{-1} \lambda_T \lambda_T^{-1} \lambda_{\sin h}^{-1} \lambda_h \lambda_x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、本研究で実験的に求めた時間縮尺と直接比較することを考える。そこで、2.および3.で述べた実験条件に従えば、次の仮定が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_c &= 1 && \text{(原型と模型で底質砂の空隙率は同じ)} \\ \lambda_s &= 1 && \text{(原型と模型で底質砂の比重は同じ)} \\ \lambda_l &= \lambda_x = \lambda_h = \lambda_m = \lambda_L = \lambda_{m_0} = \lambda_{L_0} && \text{(水平・鉛直方向の縮尺は同じ)} \\ \lambda_T &= \lambda_{L_0}^{1/2} \\ \lambda_{m_0/L_0} &= 1 && \text{(波は Froude 則に従う)} \\ \lambda_g &= 1 \\ \lambda_\nu &= 1 && \text{(原型と模型で水を使用し、水温も同じ)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

式(13)を(14)の仮定を使って整理すると、時間縮尺は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_d \lambda_k^{-1} \lambda_{rw}^{5/2} \lambda_i^{-1/2} \\ \lambda_t &= \lambda_k^{-1} \lambda_{rw}^{3/2} \lambda_i^{1/2} \\ \lambda_t &= \lambda_d^{-1} \lambda_k^{-1} \lambda_{rw}^{1/2} \lambda_i^{3/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

このように、掃流漂砂の支配的な沖浜領域における時間縮尺は、実験縮尺 λ_t 、底質砂の粒径縮尺 λ_d 、水粒子の加速度に関係する定数の縮尺 λ_k 、および底面摩擦係数の縮尺 λ_{rw} に関係することがわかる。また式(8)と(10)から、 $\lambda_{rw} \propto \lambda_k$ となるので、 λ_d 、 λ_t 、および λ_{rw} の縮尺が定まれば、式(15)から時間縮尺を求めることができる。

b) 砕波帯域

清水⁷⁾は、砕波点付近の漂砂量式(7)を用いて、同様な方法で求め、次のような時間縮尺を示している。

$$\lambda_t = \lambda_d^{1/2} \lambda_w^{-1} \lambda_{rw}^{3/2} \lambda_i^{1/2} \dots\dots\dots(16)$$

この式中、沈降速度の縮尺 λ_w には底質の粒径縮尺 λ_d が陰に含まれているが、両者の関係 ($w \propto d^m$)¹⁷⁾ は次のように表わされる¹⁸⁾。

$$\lambda_w \propto \lambda_d^m, \text{ただし } 2 \geq m \geq 1/2 \dots\dots\dots(17)$$

m は底質の沈降速度と粒径による Reynolds 数によって決まる数である。式(17)を用いて、式(16)を再整理すると、

$$\lambda_t \sim \lambda_d^{1-2m/2} \lambda_w^{-3/2} \lambda_i^{1/2} \dots\dots\dots(18)$$

で表わされ、結局、時間縮尺は式(15)と同様、 λ_d 、 λ_{rw} 、 λ_t によって与えられることがわかる。

(4) 時間縮尺の比較検討

a) 実験と理論の時間縮尺

式(15)および(18)から、時間縮尺は、底質砂の粒径縮尺 λ_d 、実験縮尺 λ_t および底面摩擦係数の縮尺 f_{rw} で規定され、 λ_{rw} が負のべき乗の形で入っていることが注目される。

粒径縮尺と実験縮尺が同じ ($\lambda_d = \lambda_t$) の場合、式(15)および(18)を検討する。この場合、 $\lambda_k = 1$ および $\lambda_{rw} = 1$ となるので、式(15)の時間縮尺はすべて $\lambda_t = \lambda_i^{1/2}$ となり、従来の Froude 則と一致する。また、式(18)中の m は、底質の沈降速度の Reynolds 数によって変化するので、式(18)は次式のようになる。

$$\lambda_t = \lambda_d^{1-2m/2} \lambda_i^{1/2} = \lambda_i^{1-m} \dots\dots\dots(19)$$

さらに、 $M = 1 - m$ とすれば、

$$\lambda_t = \lambda_i^M, \quad -1 \leq M \leq 1/2 \dots\dots\dots(20)$$

特に、この式で Reynolds 数が約 1000 以上(模型の底質砂が約 1 mm 以上)では、 $M \approx 1/2$ となり、時間縮尺は Froude 則に一致することになる。つまり、清水による時間縮尺は、 $\lambda_d = \lambda_t$ のとき、模型の粒径が約 1 mm 以下になると、時間縮尺がはずむことになる。

一方、海浜変形の連続式(5)、漂砂量式、および底質砂の粒径縮尺と実験縮尺の関係を表わす海浜変形の相似則として式(1)を使って、数値計算で時間縮尺を求める。このようにして2種類のタイプの漂砂量式から求

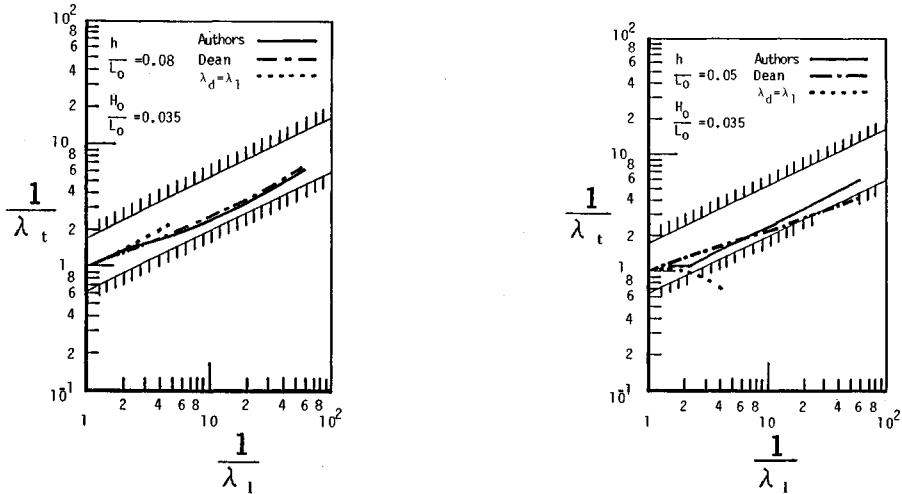
めた時間縮尺と Fig. 4 の時間縮尺を直接比較する。そこで Table 1 の Run No. 4 の実験条件を原型として、式(6)については沖浜領域の掃流漂砂に相当する水深波長比 $h/L_o = 0.08$ の位置の波特性を、また式(7)については砕波点近傍の $h/L_o = 0.05$ の位置の波特性を長波近似式を用いて、時間縮尺を計算した。また、比較のために、式(1)を用いる代わりに底質砂の粒径縮尺と実験縮尺の関係として、 $\lambda_d = \lambda_t$ および Dean⁶⁾の無次元沈降時間から得られる海浜変形の相似則式(21)を用いた場合についても計算した。

$$\lambda_w = \lambda_i^{1/2} \dots\dots\dots(21)$$

これらの計算結果を整理し、Fig. 8(a) および (b) に整理してある。Fig. 8(a) には、式(6)による掃流漂砂領域の時間縮尺について、底質砂の粒径縮尺として、海浜変形の相似則式(1)を用いた結果が実線、 $\lambda_d = \lambda_t$ が破線、Dean の式(21)が一点鎖線でそれぞれ示してある。また、Fig. 8(b) には、同様に式(7)による砕波点における時間縮尺がそれぞれの線で示してある。これらの図中に示した時間縮尺は、模型実験が可能な縮尺範囲 $\{(d)_m \geq 0.1 \text{ mm}, (H)_m \geq 1 \text{ cm}, \text{および } (T)_m \geq 1.0 \text{ s}\}$ の関係が示してある。この図中には、実験的に求めた式(2)の時間縮尺範囲が示してあるので、両者の対応がよくわかる。つまり、Fig. 8(a) および (b) から、著者らの海浜変形の相似則を用いると、沖浜および砕波点でも、計算と実験の時間縮尺がよく一致することが注目される。また、Dean の式による時間縮尺は、著者らの結果と比較的によく一致している。しかし、海浜変形の相似則として、 $\lambda_d = \lambda_t$ は、砕波点で実験による時間縮尺との対応があまり良くないことがわかる。

b) 従来提案された時間縮尺との比較

従来、研究発表された中で、特に二次元海浜変形を対象にした海浜変形の時間縮尺が本研究結果も含めて Table 2 にまとめてある。この表中、Graaff²⁾の式は、模型の水平・鉛直方向の縮尺にひずみがあり、底質の粒径が原型と模型で同一のとき、原型と模型の時間縮尺が同じになることを示している。Vellinga³⁾ および Hughes⁴⁾ は、ひずみ模型を使用し、時間縮尺を鉛直縮尺の Froude 則で与えている。Kriebel ら⁵⁾は無ひずみ模型の使用を前提として、Froude 則の時間縮尺を提案している。清水⁷⁾は漂砂量表示式に基づいて時間縮尺を導いている。このように、時間縮尺が数多く提案されているが、Kriebel らの研究以外は理論的なもので、実験による検証が十分行われていない。この表から、著者の時間縮尺は Kriebel の結果とよく一致していることがわかる。



(a) Time scale calculated by using the sand transport rate in the bed-load zone by Tsuchiya *et al.*

(b) Time scale calculated by using the sand transport rate in the surrounding zone of breaking point by Shimizu

Fig.8 Comparison of the time scale by Eq.(2) and the theoretical time scales.

Table 2 Similarity relationships and time scales of beach change.

Investigators	Similitude of beach change	Time scale	Comments
J. Van de Graaff (1977)	$\lambda_x = \lambda_y^{1/2}$ $\lambda_d = 1$ $1/20 \cong \lambda_y \cong 1/150$	$\lambda_t = 1$	Distorted model
Sayao, O.J. (1982)	$\Omega = \lambda_x \lambda_y^{-1}$	$\lambda_t = \lambda^{1/2} \Omega^3$	Distorted model
P. Vellinga (1982)	$\Omega = \lambda_x \lambda_y^{-1} \lambda_w^{0.28}$ $\Omega = (\lambda_x \lambda_w^2)^{0.28}$	$\lambda_t = \lambda^{1/2}$	Distorted model
Steven A. Hughes (1983)	$\lambda_x = \lambda_y^{3/2} \lambda_w^{-1}$	$\lambda_t = \Omega \lambda_y^{1/2}$	Distorted model
Kriebel, Bally & Dean (1987)	$\lambda_x = \lambda_y$ $\lambda_w = \lambda^{1/2}$	$\lambda_t = \lambda^{1/2}$	Undistorted model
Simizu (1988)	$\lambda_d = \lambda_1$	$\lambda_t = \lambda^{1/2} \lambda_d^{1/2} \lambda_w^{-1} \lambda_x^{-3/2}$	Undistorted model
Author	$\lambda_x = \lambda_y$ $\lambda_d = 1.7 \lambda_1^2$	$\frac{1}{1.6} \lambda^{1/2} \leq \lambda_t \leq \frac{1}{0.65} \lambda^{1/2}$	Undistorted model

* Distorted model: disagreement between vertical and horizontal scales.
** Undistorted model: agreement between vertical and horizontal scales.

7. 現地海岸の模型実験への適用¹⁹⁾

これまでに著者らが明らかにした海浜変形の相似則および本研究の時間縮尺を用いて、暴浪による新潟県大潟海岸の海浜変形を対象にして、二次元移動床による現地模型実験を行い、その再現性について検討してみる。

(1) 実験対象海岸の概要

1981年3月11月から3月18日にかけて中心気圧982mbの台風並の低気圧が日本海を通過し、これに伴って同海岸には高波浪が打ち寄せている。この期間、波は海岸に対してほとんど直角に入射しており、比較的二次元性が強かったものと推定される。この高波浪来襲前後の海底地形が京都大学防災研究所付属大潟波浪観測所の棧

橋で詳しく深浅測量されている。この海岸で、比較的海浜変形の著しい地点の粒径は $(d_{50})_p = 0.4 \text{ mm}$ 前後である。なお、この期間の潮位変化は直江津港の平均水位に対して、+50~-12 cmであった。

(2) 実験方法

a) 現地模型

現地海岸を縮尺 $\lambda_t = 1/50$ に縮小すると、式(1)から底質砂の粒径縮尺 $\lambda_d = 1/3.7$ となる。したがって、現地海岸は $(d_{50})_p = 0.4 \text{ mm}$ 前後であるから、 $(d_{50})_m = 0.11 \text{ mm}$ の粒径の砂を模型に使用すれば良いことになる。したがって、粒径の違いを検討するために2種類の $(d_{50})_m = 0.09 \text{ mm}$ と 0.15 mm の比較的粒径の均一な珪砂(砂と同程度の比重)を使用することにした。これらの底質で、高波浪来襲前の3月11日の岸沖約1000m区間の現地海浜断面を水平・鉛直方向とも1/50に縮小して、長さ30m、幅1m、高さ1mの造波水槽内に造った。

b) 実験波

実験波として、不規則波と規則波を用いた。不規則波には、現地波浪に良く似た Bretschneider 型のスペクトル分布を有する波を発生させた。不規則波の最大波、有義波および平均波が現地の1/50になるようにし、波の作用時間は式(3)の時間縮尺に従って定め、Fig.9のように段階的に変化させた。また、規則波は、Fig.9に示すように現地の時間平均波、有義波、および最大波に相当する3種類の波をFroude則で1/50に縮小して、不規則波の場合と同様に段階的に変化させた。

(3) 再現結果

高波浪前後の3月11日と18日における岸沖約300m

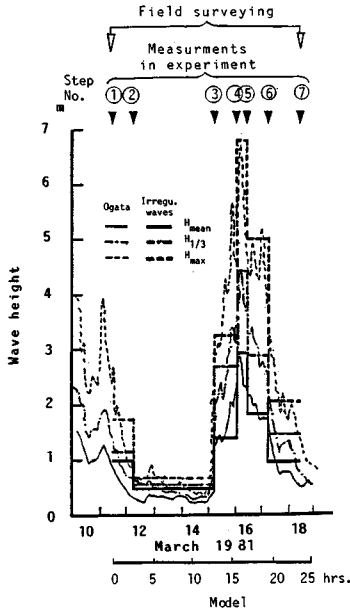


Fig. 9 Variation of wave height during storm and experimental waves used.

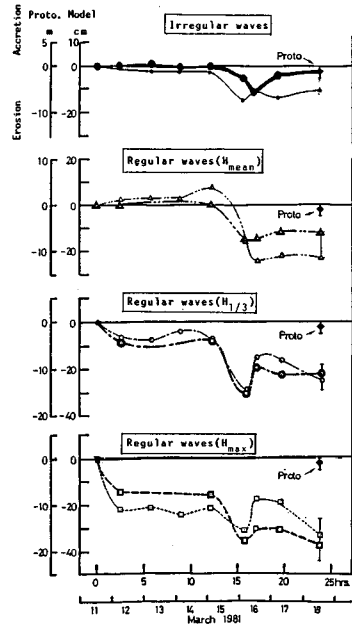


Fig. 11 Reproduction of shoreline change.

区間の現地海岸の断面形状を比べた結果、約 280 m 沖の海底では高波浪前後で約 70 cm 程度の海浜変形が生じていた (Fig. 10(a) 参照)。Fig. 10 には、高波浪前後の海浜断面形状と静水面には海浜変形の変動量が示してある。

底質砂の粒径 $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ の模型について、3月11日の現地海浜断面形状を初期海浜(実線)として、不規則波および3種類の規則波を現地海岸の高波浪と同じように作用させ、波の鎮まった3月18日の海浜断面形状を再現した結果が破線で Fig. 10(b)~(e) に示してある。特に、不規則波を使用した Fig. 10(b) は、高波浪前後で現地模型の海底が現地換算すると 280 m 沖で約 70 cm 前後の変形があり、Fig. 10(a) の現地海浜変形を良く再現しているといえる。また、Fig. 10(c)~(e) に規則波を使用した結果が示してあるが、Fig. 10(c) の平均波以外の実験波の使用は、反射波による“reflection bar”の発生が顕著で、再現性はあまり良くない。

汀線移動に注目して、再現性を整理した結果が Fig. 11 に示してある。この図では、模型の底質砂の粒径 $(d_{50})_m = 0.09 \text{ mm}$ を使用した場合、細い実線(不規則波)、二点鎖線(規則波・平均波)、一点鎖線(規則波・有義波)、および破線(規則波・最大波)で表わされている。また、 $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ の場合、それぞれ太い線で表わしてある。また、現地海岸の汀線移動は潮位変動による影響が示してある。結果的には、 $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ の方が 0.09 mm より再現性が良い理由の1つとして、現地海岸の汀線付近では $(d_{50})_p \approx 1.0 \text{ mm}$ であるか

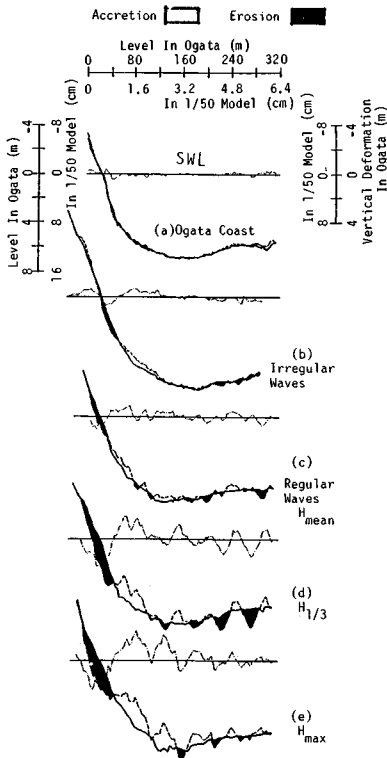


Fig. 10 Ogata's beach profile change at pre- (11th) and post- (18th) storm, and reproduction of beach profile changes by model.

ら、0.15 mm はこれに縮尺対応しているためと考えられる。以上から、不規則波の使用は再現性が良くなっていることがわかる。

以上、沿岸方向の漂砂量移動が少なからず存在する現地海岸に対して、現地模型では沿岸方向の漂砂量移動に拘束があることを考慮に入れば、海浜断面形状および汀線移動の再現性は、かなりの水準にあるといえよう。

8. 結 論

本研究で得られた結果は次のようにまとめられる。

(1) 原型と模型の海浜変形が式(1)の海浜変形の相似則に従うとき、初期浜勾配から平衡海浜断面形状へ移行する過程では、式(2)の時間縮尺が成立することがわかった。また、これらの海浜変形の相似則および時間縮尺を適用すると、海浜断面形状のみならず砕波点などの砕波特性も両者の間で相似性が保たれる。

(2) 本研究で提案した時間縮尺は、掃流漂砂領域および砕波点付近における漂砂量式を用いて理論的に求めた結果とも比較的良く一致することがわかった。

(3) 高波浪による現地海岸の海浜変形の現地模型実験に、本研究の海浜変形の相似則および時間縮尺を適用した結果、実験波として不規則波を用いると、再現性がかなり良くなった。また、規則波の場合、再現性は不規則波より多少劣るが、現地波浪の平均波を対象にした実験波を用いると、最大波および有義波に比べて、再現性は良いことがわかった。

最後に、本研究を進めるに際して、京都大学教授 土屋義人防災研究所所長より有益な助言を頂いたことを付記するとともに、大瀧海岸については、京都大学防災研究所附属大瀧波浪観測所で調査された貴重な資料を借用したことを記し、白井助教授をはじめとする関係者に絶大な感謝の意を表明します。さらに、本研究における実験は、著者研究室の卒業研究学生諸君の労に負うところが大きかったことを付記します。また、岩垣雄一教授より、本論文に対する貴重な意見を賜ったことを記し、深謝します。

参 考 文 献

- 1) 野田英明：海岸の模型実験，昭和42年度講習会テキスト，水理学・水文学における最近の進歩，pp.197~209, 1967.
- 2) Graaff, J. van de : Dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, Vol.1, pp.99~134, 1977.

- 3) Vellinga, P. : Beach and dune-erosion during storm surges, Coastal Engineering, Vol.6, No.4, pp.361~387, 1982.
- 4) Hughes, S.A. : Movable-bed modeling law for coastal dune erosion, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol.109, No.2, pp.164~179, 1983.
- 5) Kriebel, D.L., Dally, W.R. and Dean, R.G. : Undistorted Froude model for surf zone sediment transport, Proc. 20th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1296~1310, 1986.
- 6) Dean, R.G. : Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. of the Conf. on Engi. Dyna. in the Surf Zone, Institution of Engineers, Australia, pp.208~214, 1973.
- 7) 清水隆夫：岸沖海浜変形実験の相似性，電力中央研究所報告，研究報告書U87059, 41 p., 昭和63年2月.
- 8) Sayao, O.J. : Beach Profiles and Littoral Sand Transport, Ph. D. Thesis of Queen's Univ., 351 p., 1982.
- 9) 佐々木大造・日吉 功・宇多高明・中山 修：大規模ヘッドランドの形成手法に関する実験的検討，海岸工学論文集，第36巻，pp.454~458, 1989.
- 10) 伊藤政博・土屋義人：二次元海浜変形の相似則について，土木学会論文集，No.357/II-3, pp.177~186, 1985.
- 11) Ito, M. and Tsuchiya, Y. : Scale-model relationship of beach profile, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1386~1402, 1984.
- 12) Diephuis, J. G. H. R. : Scale effects involving the breaking of waves, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.194~201, 1958.
あるいは、岩垣雄一・榎木 亨：海岸工学，共立出版，pp.399~403, 1979.
- 13) Sunamura, T. and Horikawa, K. : Two dimensional beach transformation due to wave, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp.920~938, 1974.
- 14) Saville, T. Jr. : Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th IAHR, pp.A3-1~8, 1974.
- 15) 土屋義人・上田康裕・大下哲則：掃流漂砂量則について，第31回海岸工学講演会論文集，pp.306~310, 1984.
- 16) たとえば，Sleath, T. F. A. : Sea Bed Mechanics, John Wiley & Sons, pp.196~197, 1984.
- 17) 土木学会水理公式集改訂委員会編：水理公式集，昭和38年増補改訂版，土木学会，pp.359~861.
- 18) 土屋義人・伊藤政博：海浜変形の相似則に関する実験的研究，第24回海岸工学講演会論文集，pp.315~319, 1981.
- 19) 伊藤政博：暴浪による海浜変形の再現について，海岸工学論文集，第36巻，pp.349~353, 1989.

(1990.3.15・受付)