

水平な陸上への津波の遡上に関する研究

岩崎敏夫\*・富樫宏由\*\*

1. 序 論

深海波としての沖波が傾斜海浜に入ってきて、水深減少により相対的に波高を増大した浅海波は、汀線付近で急激なエネルギー変化、運動量変化を経て水深0の陸上に投げ出されて、一種の流れとなって遡上する。これが波の陸上遡上に至るまでの一般的過程であり、遡上は海岸過程を経た最後の現象である。

波からある過渡領域を経て流れに変わる遡上現象には種々の要素がからんでくるが、その要素のうちの何ほどの程度かを探し求めるために実験的研究がこれまでかなり行なわれてきた。その結果、かなり実験式も出されているが、適用範囲に問題があってあまり一般性がないようである。それゆえ、現在は、これまでの実験的研究の成果をもとにして、理論的に追求して波の遡上機構を解明しようとする傾向が強い。

陸上への津波遡上に関しては、初めて理論的解析法の糸口をつけたのが、Stoker<sup>1)</sup>の特性曲線法による扱い方であろう。その後、この特性曲線法を用いて、汀線付近の波の運動を理論的にくわしく論議したのが、Keller-Levine-Whitham<sup>2)</sup>、Ho-Meyer<sup>3)</sup>、Shen-Meyer<sup>4),4')</sup>らである。さらに、Méhauté<sup>5)</sup>、Freeman-Méhauté<sup>6)</sup>はやはり同じ問題を取り扱い、砕波直前の波から出発して、それが砕波後 bore となって sloping beach を進行し、ついには陸上に遡上する現象を実際に特性曲線法で計算し、遡上高を具体的に算出する方法を例示した。わが国では、岸博士<sup>7)</sup>が、ゆるやかな傾斜海浜上での津波のような長波の変形を、やはり特性曲線法で論じた研究がある。また首藤・松村の両氏<sup>8)</sup>は特性曲線式を適当に変形して、一様な傾斜海浜上の遡上高を解析的に求めることを試みた。また、福井・中村氏ら<sup>9),9')</sup>は、津波が陸岸に接近したときは、段波状になる場合が多いとして、段波津波の堤防におよぼす影響を解析的に求めている。

しかし、宮城県周辺の三陸沿岸では、湾の奥深く侵入した津波が砕波せずに岸壁を越えて陸上に遡上して隣接する施設に甚大な被害を与えている場合が見られる。すなわち、陸上への津波遡上が問題なのは、一様勾配における遡上よりもむしろ岸壁、護岸等の海岸構造物を越え

た津波が陸上奥深く遡上して住居地区に甚大な被害を与える場合であると思われる。このような研究に関して筆者等<sup>10),11)</sup>は、実験結果の一部を発表しているが、さらに実験を重ねて理論的な解析を試みた結果、理論と実験のかなり良好な一致を得たのでここに発表する次第である。

2. 理 論

(1) 鉛直岸壁での津波の挙動

後の実験でわかるごとく、侵入津波を有限振幅の長波と見なした孤立波を用いた実験では、鉛直岸壁からの部分反射に部分重複波の生成による波高増大および反射現象が非常に顕著であり、これを無視して水平床 (dry bed) 上への遡上現象は論じられない。また、水平床上への遡上波については、岸壁真上 (便宜上汀線と名づける) から陸上へ遡上直後に急激に波高を減じ、ついでゆるやかな勾配でほとんど直線的に波高が減少してゆく。したがって、汀線付近での急激な運動量変化とエネルギー変化は無視できないことが定性的に考察される。

これらのことから、まず有限振幅の長波の鉛直岸壁での部分反射による部分重複波の発生機構を (U・C) 特性線を用いて理論的に明らかにし、つぎに鉛直岸壁のすぐ近傍での波の変形を求め、しかるのちに水平床上への遡上の計算を行なった。

(2) 津波の鉛直壁での反射による重複波の発生理論  
摩擦を考慮した特性曲線式は、

$$\frac{dX}{dT} = U \pm C \dots\dots\dots (1)$$

の特性曲線上で

$$\frac{d}{dT}(U \pm 2C) = -f\left(\frac{U}{C}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここで各記号はつぎの式 (3) のごとくである。

$$X = \frac{x}{h_*} \dots\dots\dots (3)'$$

$$T = \frac{c_* t}{h_*} = \sqrt{\frac{g}{h_*}} \cdot t \dots\dots\dots (3)''$$

$$U = \frac{u}{c_*} \dots\dots\dots (3)'''$$

$$C = \frac{c}{c_*} = \sqrt{\frac{h + \eta}{h_*}} \dots\dots\dots (3)''''$$

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 工修 東北大学助手 同

ただし,  $h_*$  はある基準長さで,  $c_* = \sqrt{gh_*}$   
 侵入波の底面摩擦による変形を無視すれば, 式(2)で  
 $f=0$  において式(4)が得られる。

$$U \pm 2C = \text{const} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は,  $U \cdot C$  に関して線形であるから,  $(U \cdot C)$  面上の特性線で侵入波と反射波の干渉として重複波の発生機構を説明する。すなわち, 物理学的には正方向および負方向に進行する数多くの単単波(重ね合わせの原理による素波)の合成の理論である。この場合, 侵入波は  $\eta_i = \eta_i(x, 0)$ , また反射波は  $\eta_r = \eta_r(0, t)$  で与えられる特性境界条件である。つぎに, 鉛直壁の天端高が静水面の上から下へ次第に変化する3種類の場合について, 完全重複波から部分重複波になる現象について順次説明される。

以後の図表および計算において, 記号と各直線はつぎの意味を表わす。

- $r$ : 反射率  $0 \leq r \leq 1$   
 $C_i$ : 侵入波の無次元波速  
 $U_i$ : " 水分子速度  
 $C_r$ : 反射波の無次元波速  
 $U_r$ : " 水分子速度  
 $C_c$ : 鉛直壁の無次元天端高の式(3)''''による等価波速で(3)''''にて  $\eta = H_c$  とおいた値  
 $H_i$ : 侵入波の波高(静水面上)  
 $H_r$ : 反射波の " ( " )  
 $H_c$ : 鉛直壁の天端高(静水面上または下)  
 $(n)$ : 侵入波の分割点の番号  
 $(n)'$ : 反射波の "

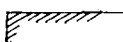
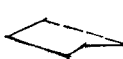
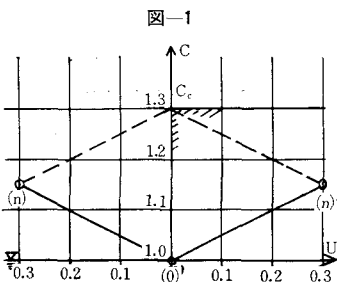
-  :  $C_c$  なる表示の図化  
 ————— : 侵入波及び反射波の特性初期値曲線  
 - - - - - : 正方向または負方向に向う特性曲線  
 : 特性初期値曲線の決定区域

図-1 は, 一般に  $[C_c - 1 \geq 2(C_i - 1)]$  で完全重複波を発生する場合のうち, 特に  $[C_c - 1 = 2(C_i - 1)]$  なる  $C_c$  が図示されている場合である。完全重複波の波速が侵入波の波速に対して  $[C_{i,r} - 1 \geq 2(C_i - 1)]$  になると, 壁面で流速は 0 となり, 式(3)''''により一般に波高は



2倍以上 [図-1 では,  $\frac{C_{i,r}^2 - 1}{C_i^2 - 1} = \frac{0.69}{0.32} \div 2.15$  (倍)] になる。反射率  $r=1$  として  $(n)'$  点を与えてあるが,  $0 < r < 1$  なるときは,  $(0) \sim (n)'$  特性境界値を  $r$  に応じて割りいて与えればよい (図-2, 3 も同様)。

図-2

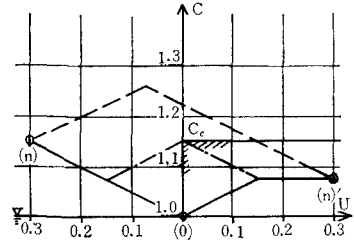


図-2 は, 一般に  $[0 < C_c - 1 < 2(C_i - 1)]$  で部分重複波を発生する場合のうち, 特に  $[C_c - 1 = C_i - 1]$  なる  $C_c$  が図示されている場合である。反射波の特性線は,  $[C_r - 1 = (C_c - 1)/2]$  までは侵入波と同じく  $C$  軸に対称に与え, その点から上は  $C_r$  は変化せず,  $U_r$  のみが増大するものとして与えてある。したがって, 侵入波は正方向に向うにつれて鉛直壁に衝突する波高は増大するが,  $C$  軸上で  $C_c$  なる表示の点までは侵入波と反射波は完全重複する(一点鎖線で示す)。それ以上の点の波は, 波高は鉛直壁の天端に等しい高さ  $C_c$  で cut されて増大せず, 流速は  $C_c$  なる点より下方で  $r$  に応じた値で反射されて負方向に向うゆえ, 侵入波と干渉して波高を増大して部分重複波となる。

図-3

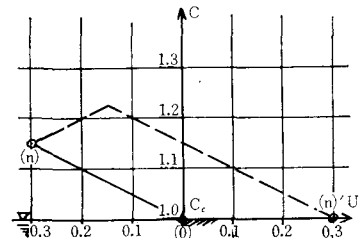


図-3 は,  $[C_c - 1 = 0]$  で反射波というよりは逆流(不定流)と干渉して部分重複波を発生する場合である。したがって, 侵入波は正方向に進行するにつれて分割点の波高は干渉しないが, 流速は静水面下で  $r$  に応じて反射されて, 侵入波と干渉して部分重複波を発生する。

### (3) 汀線における津波の変形

図-4 の断面 I-II 間のエネルギー方程式より,

$$u_s = m \sqrt{2g(h + \eta - H_c - h_s) + u_0^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $m$  は断面急縮による損失係数を表わす ( $h = h_*$ )。すなわち, 急縮損失水頭

$$h_l = f \frac{u_s^2}{2g}$$

において,  $f=0.1 \sim 0.3$  の程度<sup>12)</sup>であるが, いまかりに

$f=0.2$  とすると,

$$m = \frac{1}{\sqrt{1+f}} = 0.91 \dots\dots\dots (5)$$

となる。一方、断面 I-II 間では、水面低下(落下)による  $u_s, h_s$  を発生すると同時に、水位差による静水圧差を生じて運動量変化が起こる。断面 I-II 間の運動量式は、

$$\begin{aligned} & \frac{w_0}{2} \{ (h + \eta - H_c)^2 - h_s^2 \} \\ & = \frac{w_0}{g} \{ u_s^2 h_s - u_0^2 (h + \eta - H_c) \} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 $w_0$  は水の単位体積重量、 $g$  は重力の加速度を表わす。式(6)で  $u_0, (h + \eta - H_c)$  を汀線での遡上直前の部分重複波の流速、波高として 2.(2) の理論結果より与えられるものとすれば、式(4)、(6)より  $u_s$  を消去して

$$\begin{aligned} & (4m^2 - 1)^2 h_s^4 - 4m^2 \{ 2(4m^2 - 1)h_0 \\ & + (4m^2 - 3) \frac{u_0^2}{g} \} h_s^3 + 2 \{ (8m^4 + 4m^2 - 1)h_0^2 \\ & + 4m^2(2m^2 - 1)h_0 \frac{u_0^2}{g} + 2m^2(m^2 - 1) \left( \frac{u_0^2}{g} \right)^2 \} h_s^2 \\ & - 4m^2 h_0^2 \left( 2h_0 + \frac{u_0^2}{g} \right) h_s + h_0^4 = 0 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

これを無次元化すると、

$$\begin{aligned} & (4m^2 - 1)^2 \left( \frac{C_s}{C_0} \right)^8 - 4m^2 \left\{ 2(4m^2 - 1) \right. \\ & + (4m^2 - 3) \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 \left. \right\} \left( \frac{C_s}{C_0} \right)^6 + 2 \{ (8m^4 + 4m^2 - 1) \\ & + 4m^2(2m^2 - 1) \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 + 2m^2(m^2 - 1) \\ & \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^4 \} \left( \frac{C_s}{C_0} \right)^4 - 4m^2 \left\{ 2 + \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 \right\} \left( \frac{C_s}{C_0} \right)^2 \\ & + 1 = 0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで各記号は式(3)の表示法による。すなわち、 $c_s = \sqrt{gh_s}$ 、 $c_0 = \sqrt{g(h_0 - H_c)} = \sqrt{g(h + \eta - H_c)}$  とおけば、

$$\begin{aligned} C_s &= \frac{c_s}{c_*} = \frac{\sqrt{gh_s}}{\sqrt{gh_*}} = \sqrt{\frac{h_s}{h}} \\ C_0 &= \frac{c_0}{c_*} = \frac{\sqrt{g(h_0 - H_c)}}{\sqrt{gh_*}} = \sqrt{\frac{h + \eta - H_c}{h}} \\ U_0 &= \frac{u_0}{c_*} = \frac{u_0}{\sqrt{gh_*}} = \frac{u_0}{\sqrt{gh}} \end{aligned}$$

式(8)は  $C_s/C_0$  に関する 8 次方程式であるが、

$$X = \left( \frac{C_s}{C_0} \right)^2$$

とおき、各項の係数を  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  とおくとつぎの 4 次方程式を得る。  $m = \frac{1}{2}$  として

$$X^4 + \alpha X^3 + \beta X^2 + \gamma X + \delta = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\alpha = - \frac{4m^2 \{ 2(4m^2 - 1) + (4m^2 - 3) \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 \}}{(4m^2 - 1)^2}$$

$$\beta = 2 \{ (8m^4 + 4m^2 - 1) + 4m^2(2m^2 - 1) \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 + 2m^2(m^2 - 1) \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^4 \} / (4m^2 - 1)^2$$

$$\gamma = - \frac{4m^2 \{ 2 + \left( \frac{U_0}{C_0} \right)^2 \}}{(4m^2 - 1)^2}$$

$$\delta = \frac{1}{(4m^2 - 1)^2}$$

したがって、式(5)を用いて、 $m=0.91$  とおけば、式(9)より  $h_s = h \cdot C_s^2$  が求まり、式(4)より  $u_s$  が求まる。

#### (4) 水平な陸上への津波遡上について

陸上遡上については、Freeman-Méhauté の方法が適用される。rarefaction wave については 2.(3) より  $U_s, C_s$  がわかるから、式(1)、(2)を用いて遡上波の  $U, C$  を求めることができる。ただし、先端では、

$$C = aU \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が成立するものと仮定される。ここで定数  $a$  は  $a \leq 1/2$  なる条件で与えられているが、筆者らはこれを単に  $F_r$  数の逆数と見なして、 $a \leq 1$  なる条件に拡張して考えるものとする。式(1)、(2)より先端では、

$$d(U + 2C) = -f \left( \frac{U}{C} \right) \frac{dX}{U + C} \dots\dots\dots (11)$$

が成立するから、式(10)を代入して積分すれば、

$$\frac{U^2}{2} = \frac{U_n^2}{2} - f \frac{X - X_n}{a^2(1+a)(1+2a)} \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。したがって、式(10)、(12)より先端の  $U, C$  が求められ、rarefaction wave として陸上への遡上波形が得られる。

### 3. 実験

#### (1) 実験装置および器具

実験水路は、長さ 23.0 m、幅 0.5 m、高さ 0.5 m で、一端から 12.0 m は両面ビニール板張り、それから他端まで 13.0 m は鋼製板張りの二次元波動水路である(図-5)。この水路の両面鋼製板張りの側に端から長さ 10.0 m、幅 0.5 m、高さ 0.312 m の全面真ちゅう製の鉛直岸壁模型を設置した。水平な模型床上にビニールテープにて、5 cm 間隔で長さ測定用の目盛をつけ、また、2 mm 間隔で遡上波高測定用の目盛板を設けた(写真-1)。

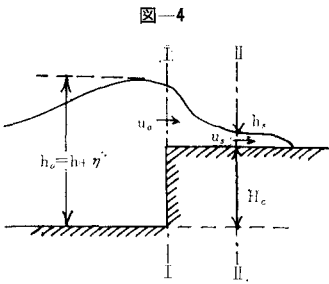
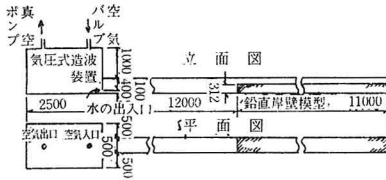


図-5 実験装置概略



水路の一端に設けた気圧式造波装置の概略は、図-5 および写真-1 に示されているが、長さ 2.5 m、幅 1.5 m、高さ 1.5 m、の全面鋼製板である。

測定器具としては、侵入波および重複波測定用に実験用階段抵抗式波高計を用い、遡上波測定用にはモータードライブ式 ニコン 35 mm カメラを用いた。

(2) 実験方法および結果

波高計を鉛直壁の 1.0 m 手前と、6.0 m 離れた 2 か所に設置する(写真-1)。鉛直壁の高さを 31.2 cm に保ったまま、水深を 20.0 cm から 42.0 cm まで種々

写真-1

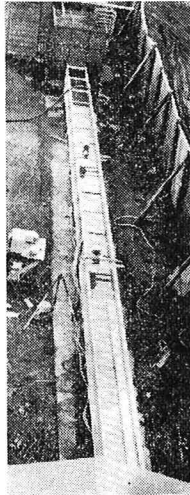
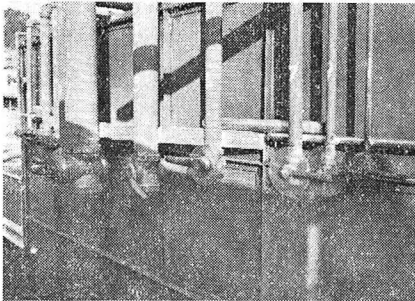
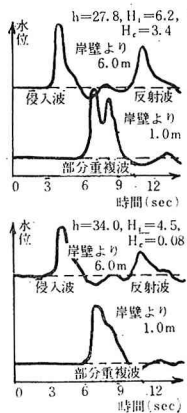


写真-2



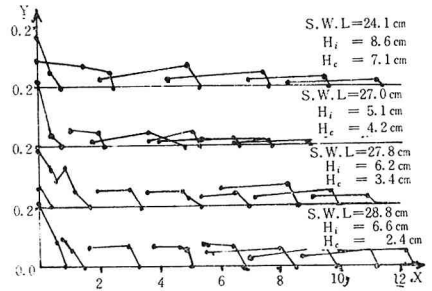
に変えて、各水深に対して鉛直岸壁の天端を越えて遡上するような種々の波高の孤立波を与えた。波を起こすには、chamber の valve (写真-2) を適当な時間間隔で、閉一開一閉の一連の操作を行なうことにより、任意の波長、波高の孤立波を得る。鉛直岸壁より 6.0 m 離れたところに設置した波高計にて侵入波高、反射波高を記録し、鉛直岸壁の手前 1.0 m のところでは、重複波高を記録した(図-6)。鉛直壁に衝突後、天端を越えて水平床面上に遡上した波は、モータードライブ式ニコン 35 mm カメラ 1 台を用いて、3 コマ/sec の速度で波形の時間的変化を撮影した。その結果の一部を写真-3~5 に示す。また、このような写真から波形を読みとった結果の二、三の例を図-7 に示した。

図-6



タードドライブ式ニコン 35 mm カメラ 1 台を用いて、3 コマ/sec の速度で波形の時間的変化を撮影した。その結果の一部を写真-3~5 に示す。また、このような写真から波形を読みとった結果の二、三の例を図-7 に示した。

図-7



(3) 実験結果に基づく計算例

実験と同じ侵入波を与えたときの 2. の理論による計算例の一つを示す。

計算上の諸式はつぎのように与える。

$$\tau_i = H_i \operatorname{sech}^2 \left( \frac{x}{h} \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{H_i}{h}} \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$C = \sqrt{gh \left( 1 + \frac{\tau_i}{h} \right)} \dots\dots\dots (14)$$

$$u = 2\sqrt{gh} \times \left( \sqrt{1 + \frac{\tau_i}{h}} - 1 \right) \dots\dots\dots (15)$$

また、実験結果の一つに基づいて諸元はつぎのように与える。

$$h = 28.8 \text{ cm} \quad H_i = 6.6 \text{ cm} \quad H_c = 31.2 \text{ cm}$$

写真-3

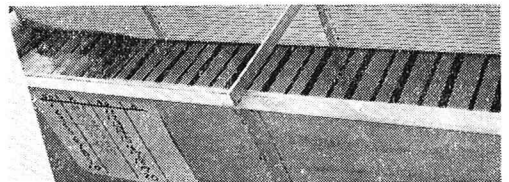


写真-4

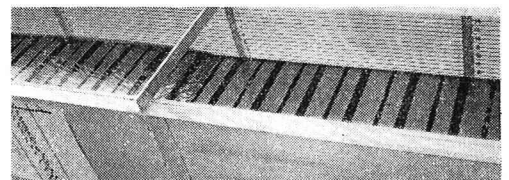


写真-5

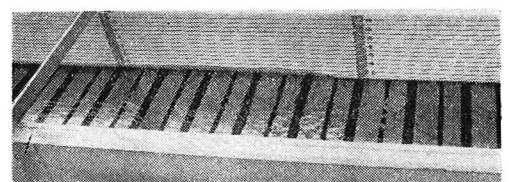


表-1

| 分割点                     | (5)  | (4), (6) | (3), (7) | (2), (8) | (1), (9) | (0), (10) |
|-------------------------|------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| $X$                     | 0    | 1        | 2        | 3        | 4        | $\infty$  |
| $\eta_i$                | 6.6  | 5.58     | 3.55     | 1.87     | 0.89     | 0         |
| $M_i = \eta_i/h$        | 0.23 | 0.19     | 0.12     | 0.07     | 0.03     | 0         |
| $C_i = \sqrt{1+M_i}$    | 1.11 | 1.09     | 1.06     | 1.03     | 1.015    | 1         |
| $U_i = 2(C_i - 1)$      | 0.22 | 0.19     | 0.12     | 0.06     | 0.03     | 0         |
| $(dX/dT)_i = U_i + C_i$ | 1.33 | 1.28     | 1.18     | 1.10     | 1.05     | 1         |

表-2

| 分割点                     | (5)'  | (4)', (6)' | (3)', (7)' | (2)', (8)' | (1)', (9)' | (0)', (10)' |
|-------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| $T$                     | 3.75  | 3.10       | 2.55       | 1.80       | 0.95       | 0           |
| $\eta_r$                | 1.15  | 1.15       | 1.15       | 1.15       | 0.86       | 0           |
| $M_r = \eta_r/h$        | 0.04  | 0.04       | 0.04       | 0.04       | 0.03       | 0           |
| $C_r = \sqrt{1+M_r}$    | 1.02  | 1.02       | 1.02       | 1.02       | 1.015      | 1           |
| $U_r = -U_i$            | -0.22 | -0.19      | -0.12      | -0.06      | -0.03      | 0           |
| $(dX/dT)_r = U_r - C_r$ | -1.24 | -1.21      | -1.14      | -1.09      | -1.05      | -1          |

表-3

|       |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| $T=0$ | $X$      | 0     | -1    | -2    | -3    | -4    | -5    | -6    | -7    | -8    | -9    | -10 |
|       | $\eta/h$ | 0     | 0.030 | 0.065 | 0.124 | 0.195 | 0.230 | 0.195 | 0.124 | 0.065 | 0.030 | 0   |
| 0.95  | $X$      | 0     | -1    | -1.90 | -2.80 | -3.70 | -4.75 | -5.85 | -6.95 | -8.00 | -9.00 |     |
|       | $\eta/h$ | 0.060 | 0.065 | 0.124 | 0.195 | 0.230 | 0.195 | 0.124 | 0.065 | 0.030 | 0     |     |
| 1.80  | $X$      | 0     | -0.85 | -1.70 | -2.60 | -3.65 | -4.85 | -6.00 | -7.10 | -8.15 |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.119 | 0.156 | 0.197 | 0.230 | 0.195 | 0.124 | 0.065 | 0.030 | 0     |       |     |
| 2.55  | $X$      | 0     | -0.75 | -1.63 | -2.75 | -4.00 | -5.20 | -6.35 | -7.40 |       |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.210 | 0.254 | 0.266 | 0.195 | 0.124 | 0.065 | 0.030 | 0     |       |       |     |
| 3.10  | $X$      | 0     | -0.80 | -2.00 | -3.30 | -4.55 | -5.70 | -6.85 |       |       |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.320 | 0.317 | 0.243 | 0.124 | 0.065 | 0.030 | 0     |       |       |       |     |
| 3.75  | $X$      | 0     | -1.15 | -2.55 | -3.85 | -5.05 | -6.25 |       |       |       |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.376 | 0.295 | 0.167 | 0.065 | 0.030 | 0     |       |       |       |       |     |
| 4.65  | $X$      | 0     | -1.50 | -2.85 | -4.15 | -5.35 |       |       |       |       |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.320 | 0.254 | 0.129 | 0.051 | 0     |       |       |       |       |       |     |
| 5.90  | $X$      | 0     | -1.45 | -2.45 | -3.05 | -3.62 | -4.21 | -5.23 | -5.95 |       |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.210 | 0.291 | 0.030 | 0.134 | 0.086 | 0.053 | 0.030 | 0     |       |       |     |
| 7.30  | $X$      | 0     | -1.44 | -2.92 | -4.11 | -4.36 | -4.60 | -5.73 | -6.65 | -7.30 |       |     |
|       | $\eta/h$ | 0.119 | 0.113 | 0.103 | 0.132 | 0.121 | 0.112 | 0.053 | 0.030 | 0     |       |     |
| 8.61  | $X$      | 0     | -1.40 | -2.90 | -4.40 | -5.61 | -6.14 | -6.62 | -7.13 | -8.00 | -8.60 |     |
|       | $\eta/h$ | 0.060 | 0.057 | 0.082 | 0.116 | 0.132 | 0.110 | 0.082 | 0.053 | 0.030 | 0     |     |
| 10.00 | $X$      | 0     | -1.53 | -2.91 | -4.45 | -6.12 | -7.30 | -7.61 | -8.22 | -8.65 | -9.46 | -10 |
|       | $\eta/h$ | 0     | 0.030 | 0.053 | 0.082 | 0.116 | 0.132 | 0.116 | 0.082 | 0.053 | 0.030 | 0   |
| 12.00 | $X$      | -2.00 | -3.62 | -5.14 | -6.72 | -8.42 | -9.63 | -9.91 | -10.5 | -10.8 | -11.6 | -12 |
|       | $\eta/h$ | 0     | 0.03  | 0.05  | 0.08  | 0.12  | 0.13  | 0.12  | 0.08  | 0.05  | 0.03  | 0   |

表-4

|       |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|-------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| $T=0$ | $X$      | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 0.95  | $X$      | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 1.80  | $X$      | 0.10 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 2.55  | $X$      | 0.05 | 0.25 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.05 | 0.02 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 3.10  | $X$      | 0.05 | 0.10 | 0.35 | 0.40 |      |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.02 |      |      |      |      |      |  |  |
| 3.75  | $X$      | 0.10 | 0.15 | 0.25 | 0.55 | 0.75 |      |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.05 |      |      |      |      |  |  |
| 4.65  | $X$      | 0.15 | 0.25 | 0.32 | 0.50 | 0.90 | 1.30 |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.05 |      |      |      |  |  |
| 5.90  | $X$      | 0.20 | 0.30 | 0.52 | 0.95 | 2.05 | 2.30 |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.09 |      |      |      |  |  |
| 7.30  | $X$      | 0.15 | 0.28 | 0.49 | 0.75 | 1.06 | 2.10 | 3.35 | 3.45 |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.09 |      |  |  |
| 8.60  | $X$      | 0.08 | 0.20 | 0.52 | 0.60 | 0.90 | 1.27 | 1.50 | 3.15 | 4.60 |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.11 |  |  |
| 10.00 | $X$      | 0.15 | 0.50 | 0.70 | 1.04 | 1.50 | 2.40 | 4.30 | 5.85 |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.11 |      |  |  |
| 12.00 | $X$      | 0.30 | 1.30 | 1.80 | 3.60 | 5.90 | 7.70 |      |      |      |  |  |
|       | $\eta/h$ | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.11 |      |      |      |  |  |

$$\therefore \eta_i = 6.6 \operatorname{sech}^2 (0.415 X) \dots\dots\dots (16)$$

よって、侵入波の 10 等分割点の各特性値は表-1 のように与えられる。これを  $t=0$  で与えたとき 2.(2) の理論による反射波の各特性値は表-2 のように求まる。表-1, 2 より図-8 のような  $(X, T)$  特性図および図-9 のような  $(U, C)$  特性図が得られ、その結果、図-10 の左半分 ( $X$  の負領域) のように侵入波、部分重複波および反射波の波形が求められる。

つぎに、2.(3) の理論により  $U_s, C_s$  を求めると、式 (1), (2) の差分計算により、図-8 の右半分 ( $X$  の正領域) のような特性図が得られ、その結果 図-10 の右半分 ( $X$  の正領域) のように水平な陸上への遡上波形が求められる。これは 図-8 の特性図から明らかなように、時間が経つにつれて  $X$  方向に分散する。いわゆる rarefaction wave と称されるものである。

結局、式 (16) で与えられた  $\eta_i = f(x)$  なる侵入津波の鉛直岸壁から水平な陸上への遡上は、図-9 に示すような特性境界条件 (または初期条件) のもとで、図-10 なる図式解  $\eta = f(x, t)$  として求められた。図-10 の波形の具体的な数値は、表-3, 4 に示してある。

#### 4. 考 察

3.(3) で行なった理論計算結果と同じ侵入波による実験結果とを比較して理論の妥当性を考察する。水平な陸上への津波遡上について、侵入波、反射波、部分重複波および遡上波の最大波高の軌跡の理論値と実験値を対比したのが 図-11 である。理論値は実験値より一般に多少大きい、比較的良好に一致している。すなわち、もう一歩厳密な理論的追求を要すると思われるが、大筋の考え方としては 2. の理論は妥当なもの

図-8

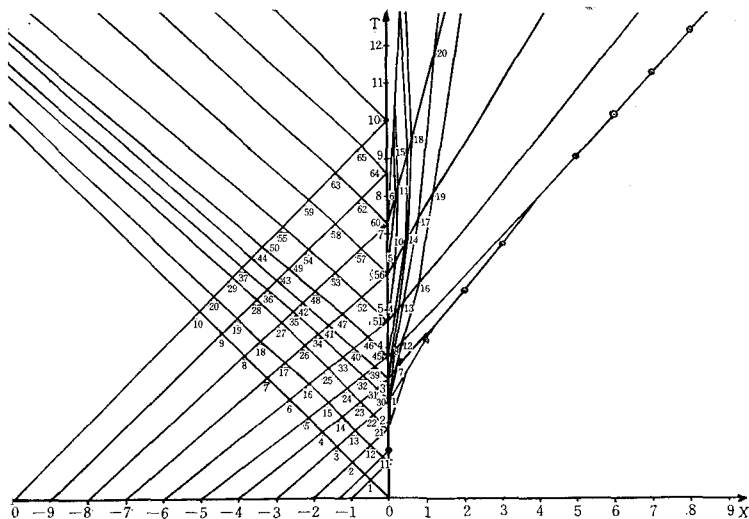


図-9

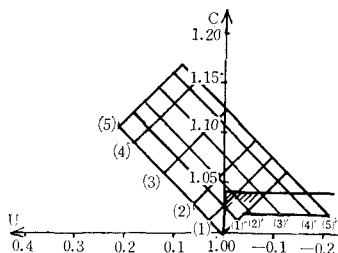


図-11

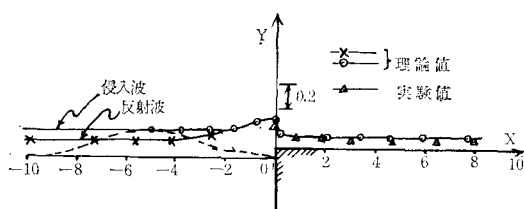


図-12

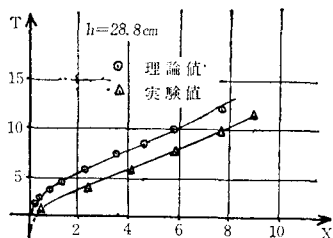
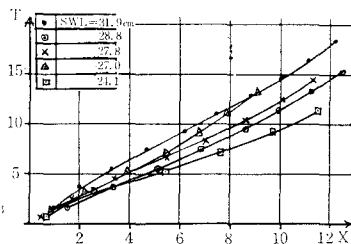
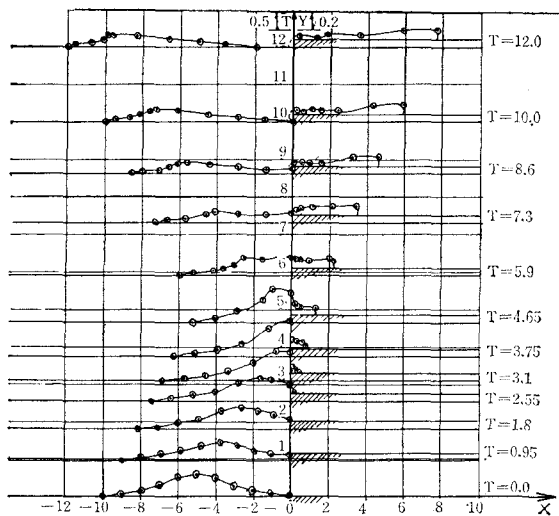


図-13



と考えられる。また、図-12 は遡上波の先端の速度変化を対比したもののだが、理論曲線では遡上直後は速度が小さいが、 $X$ が増すにつれて急激に速度を増し（すなわち、加速度がついている）、 $X=3$  付近で最大になる。これは断面急縮により盛り上がった水面が水平床上に落下して流速を増大することと、それにともなう水頭損失な

図-10



らびに急激な運動量増大により慣性力がつくこととして説明される。したがって、この急激な速度増大は急激な波高減少として表裏一体の関係となって現われる。ついで  $X$  が増すとゆるやかな曲線状に速度減少するが、これは流れと逆向きの底面摩擦力による速度減少であり、先端は水頭損失を受けて次第に波高減少してゆく。しか

し、先端に続く後の方の波高減少は、摩擦による水頭損失というよりはむしろ rarefaction wave の特性である wave element の分散によるものと解釈される。

また、実験曲線はこの図の中では理論曲線から相当ずれているが、 $T=5$  だけ上に平行移動すると理論曲線とほとんど一致する。すなわち、実験では  $0 < T < 3$  なる範囲の速度変化の様子が詳細にとらえられていないので、この図からただちに実験曲線または理論曲線の当否は判断できないが、他の 2, 3 の実験例と比較した図-13 によると理論曲線に近い傾向があるので、恐らく  $T$  軸が多少ずれているのではないと思われる。また、以前筆者らの一人岩崎<sup>10)</sup>の行なった実験によれば、多少実験条件は異なるが、 $X=0$  なる汀線付近の速度は小さく、 $X=3\sim 5$  で最大になり、5 以上ではゆるやかに速度減少していることからして、汀線付近では図-12 の実験曲線は点線のごとく変化して理論曲線に近づくのではないかという上述の推論がなされるのである。しかし、この点は今後の課題として追求してゆくつもりである。

## 5. む す び

4. で考察したように、実験結果の理論計算による照査の結果、理論と実験は比較的良好に一致することが認められたので、これを陸上への津波遡上の問題解決への手がかりの第一歩としてここに提案した次第である。今後さらに汀線付近の詳細な流速、波高変化をとらえて補正し、理論と実験のより厳密なる一致を期して、津波の重複理論、遡上理論を確立してゆきたい。

## 参 考 文 献

- 1) Stoker, J.J. : The Formation of Breakers and Bores, The theory of nonlinear wave propagation in shallow

water and open channels, Commu. Pure and Appl. Math., Vol. 1, 1948, pp. 1~87.

- 2) Keller, H.B., D.A. Levine and G.B. Whitham : Motion of a Bore over a Sloping Beach, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 7, 1960, pp. 302~320.
- 3) Ho, D.V. and R.E. Meyer : Climb of a Bore on a Beach, Part 1. Uniform beach slope, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 14, 1962, pp. 305~318.
- 4) Shen, M.C. and R.E. Meyer : Climb of a Bore of a Beach, Part 2. Non-uniform beach slope, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 16, 1963, pp. 108~112.
- 4') Shen, M.C. and R.E. Meyer : Climb of a Bore on a Beach, Part 3. Run-up, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 16, 1963, pp. 113~125.
- 5) Méhauté, B.L. : On Non-Saturated Breakers and the Wave Run-up, Proc. of 8th Conf. on Coastal Engineering, 1963, pp. 77~92.
- 6) Freeman, J.C. and B.L. Méhauté : Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY 2 1964, pp. 187~216.
- 7) 岸 力・花井正次 : 津波の変形と陸上への打上げ高, 第 8 回海岸工学講演会講演集, 昭 36.9, pp. 41~45.
- 8) 首藤伸夫・松村圭二 : 長波について (一様傾斜斜面上へのうち上げ高), 第 12 回海岸工学講演会講演集, 昭 40.11, pp. 176~179.
- 9) 福井芳朗・中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 : 津波の研究 (I) 一段波津波の波速について一, 第 9 回海岸工学講演会講演集, 昭 37.10, pp. 44~49.
- 9) 福井芳朗・中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 : 津波の研究 (II) 一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第 9 回海岸工学講演会講演集, 昭 37.10, pp. 50~54.
- 10) Iwasaki, T. : On the Run-up Tsunamis against the Vertical Sea Walls, Recent Studies on Tsunami Run-up, U.S.-Japan Cooperative Scientific Research Seminars on Tsunami Run-up, 1965. 4, No. 26.
- 11) 岩崎敏夫・富樫宏由 : 津波の鉛直岸壁から陸上への遡上について, 第 21 回年次学術講演会講演概要集 (第 II 部). 昭 41.5, II-77.
- 12) 本間 仁・安芸皎一 : 物部水理学, 岩波, 昭 35.7, p. 156