

# 長波遡上実験式の再検討

中村 武 弘 ・ 富 樫 宏 由

## Reexamination of the Experimental Equations of Run up of Long Waves

by

Takehiro NAKAMURA and Hiroyoshi TOGASHI

(Department of Civil Engineering)

This paper presents the results of an experimental study of the vertical rise of long waves on an uniform slope (1:60) connected with the horizontal bed.

The investigation is carried out by employing a wave like a solitary wave (a wave consisting of a single elevation :  $\eta = H \sin^2 \sigma t$ ,  $\sigma = \pi/T$ , on the toe of the slope).

The purpose of this laboratory study is to examine the reliability of the extrapolated straight line of the experimental equation by K. Kaplan.

In this paper the experimental waves are classified into three groups, i. e. breaking waves, surging waves and non-breaking waves, according to the wave profile on the shore line and the data of experiments are analyzed.

According to this classification, phenomena of run up of long waves are represented in detail.

Consequently it is shown that the extrapolated straight line by K. Kaplan may quite possibly be false.

### 1. 序 論

斜面上への長波の遡上高に関する実験的研究では、岸<sup>1)</sup>らの周期波によるものと、Hall-Watts<sup>2)</sup>、Kaplan<sup>3)</sup>らの孤立波による実験とがある。従来の風波を対象とした研究によれば、周期波の遡上高と孤立波の遡上高との最も大きな違いは、データをR/H (R:遡上高, H:波高)とH/L (L:波長)で整理して、 $R/H = f(H/L)$ と表わしたとき、周期波はR/Hにpeakを持つが孤立波の場合は実験の範囲が狭いせい或未だpeakを持つか否かはっきりしていない。しかし、津波のような長波を対象とした場合は、この性質についてはそのいずれの場合もまだよくわかっていないので、その解明がまたれていた。ところで周期性の津波の半波長だけをとりあげ、実験波を孤立波で模することは、湾水振動が起こらないとみなされる場合は妥当であるし、また実験波としても作り易いという利点がある。従ってその実験結果を用いて現実問題としての実際の津波の遡上高を見積ることも、ある程度可能で

あろう。しかしながら、従来の研究結果では実験範囲が狭いため、実地に適用するためにはKaplanがなしたように実験範囲外への実験直線の外挿をせざるを得ない。このときR/Hにpeakが有るか否かが問題となり、外挿には十分な注意が必要となる。この点についてはKaplan自身も認めながらも、実験直線の外挿を試み、それが1946年のアリューシャン津波の遡上高とよく一致することを報告している。一方、岸・花井<sup>4)</sup>はチリ津波の日本での適用計算において、Kaplanの外挿には疑問の余地があるとしている。また、岩崎・富樫・佐藤<sup>5)</sup>の1/30勾配斜面上での実験に於いては、 $H/L = 1 \times 10^{-3}$ 附近でpeakを持つことが示されている。

本研究は、1/60勾配の斜面上への孤立波状の1山の波を実験波形とする長波の遡上高に関する実験であり、Kaplanの外挿法の是非及びH/Lが実験範囲( $H/L = 5 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-3}$ )内でR/Hがpeakを持つか否かを調べようとするものである。本実験に於いては特に、汀線での波形がbreaking, surging, non-breaking

の三種類に分類でき、また、定性的にみてそれらの三種類の波の遡上の機構には相違があるので、 $R/H = f(H/L)$  等の関係を求めるとき、関数  $f$  がそれぞれ異なった関数形になると考えた。中でも surging は breaking と non-breaking の過渡状態と考えられるので、これは除いて breaking と non-breaking の二つについて最小二乗法による実験直線を求め、それぞれの遡上現象について考察した。また、non-breaking の波についての実験値と、砕波しない長波の遡上高に関する首藤の理論<sup>6)7)</sup>による理論値との比較も行った。

## 2. 実験装置、器具及び方法

造波装置は気圧式で、断面が深さ1.0m、巾1.0m、長さ60.0mの鉄筋コンクリート製の長水槽の一端に設置されている。他端には、水平距離48.0mで勾配が1/60の鋼鉄製の斜面が設けられてある。波高計は容量式で、斜面法先と汀線及びその中間点の計3本を使用し、遡上高( $R$ )の測定は斜面に付けられた目盛の目測によった。実験波の記号は Fig.1 に示す通りで、斜面法先への入射波形は、 $\eta = H \sin 2\sigma t$ ,  $\sigma = \pi/T$  なる1山の波である。実験波の諸元は、静水深  $h = 20 \sim 70$ cm を5cm間隔にとり、各々の水深に対して周期  $T = 20$

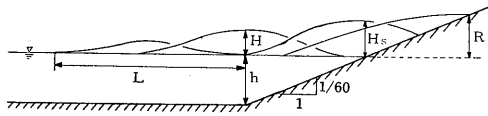


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental wave and a slope.

$\sim 60$ sec を約 20sec 間隔、波高  $H = 1 \sim 17$ cm を約 2cm 間隔で変化させた。実験波の個数は138個である。

## 3. 結果と考察

実験結果は Kaplan と同じように、 $H/L$  に対する  $H_s/H$ ,  $R/H_s$ ,  $R/H$  が両対数グラフにプロットされ、それぞれ Fig. 2, 3, 4 に示されている。その際筆者らは、汀線に於ける波形が記録波形から、定性的に次の三つに分類されることに注目した。

### a) breaking 波 (●印)

波先端が完全なる段波を形成している波で、これらは  $H/L > 2 \times 10^{-3}$  の領域でみられた。

### b) non-breaking 波 (○印)

砕波しないで遡上する波で、これらは  $H/L < 1 \times 10^{-3}$  の領域でみられた。

### c) surging 波 (◐印)

波先端が著しく変形又は砕波状に乱れはしているが、まだ段波には成っていない波で、a) と b) との間の過渡的状态の波である。

Fig. 2, 3, 4 を見ると、この分類による三種類の波の分布の相違がかなり明瞭に表われているのがわかる。また、このように分類できると理論的には、non-breaking の波には微小振幅波の線型理論が適用され、surging と breaking の波には非線型理論が適用されると考えられる。よって結果の整理に当たっては、surging (◐印) は過渡的な状態と考え、non-breaking (○印) だけによる実験直線と breaking (●印) だけによる実験直線との二本の直線を、最小

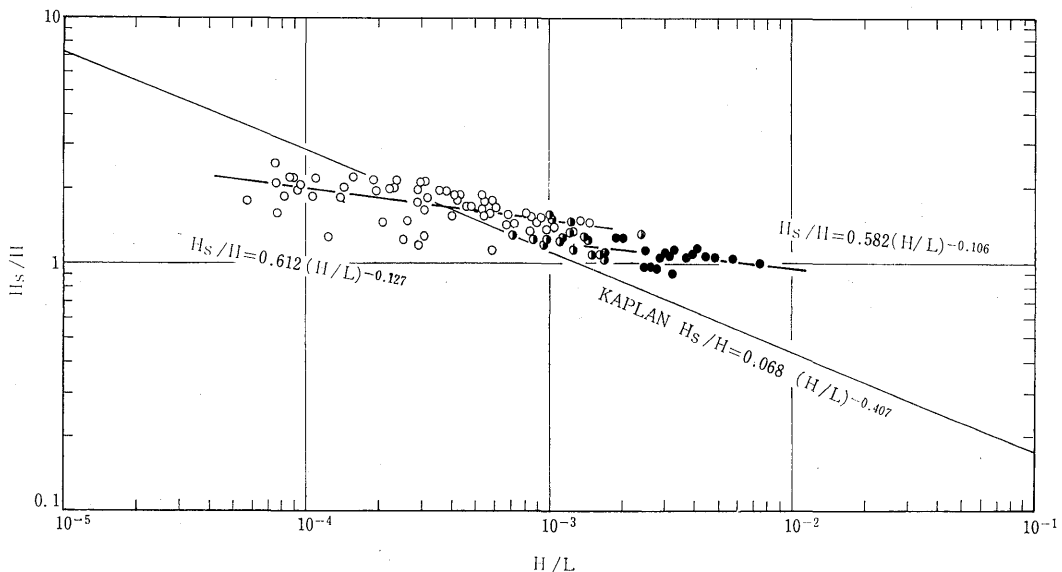


Fig. 2 Relation between  $H_s/H$  and  $H/L$ .

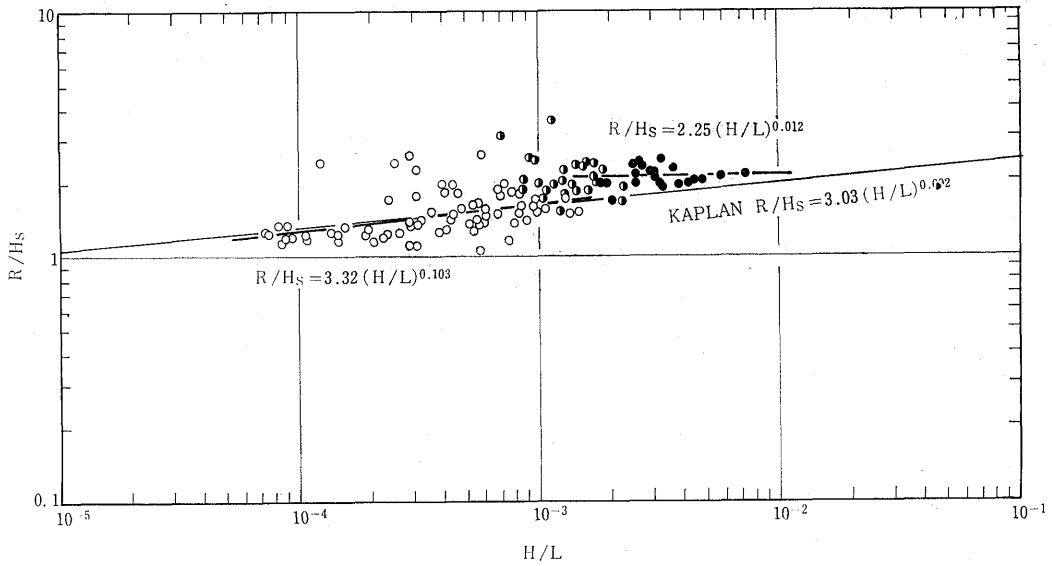


Fig. 3 Relation between R/Hs and H/L.

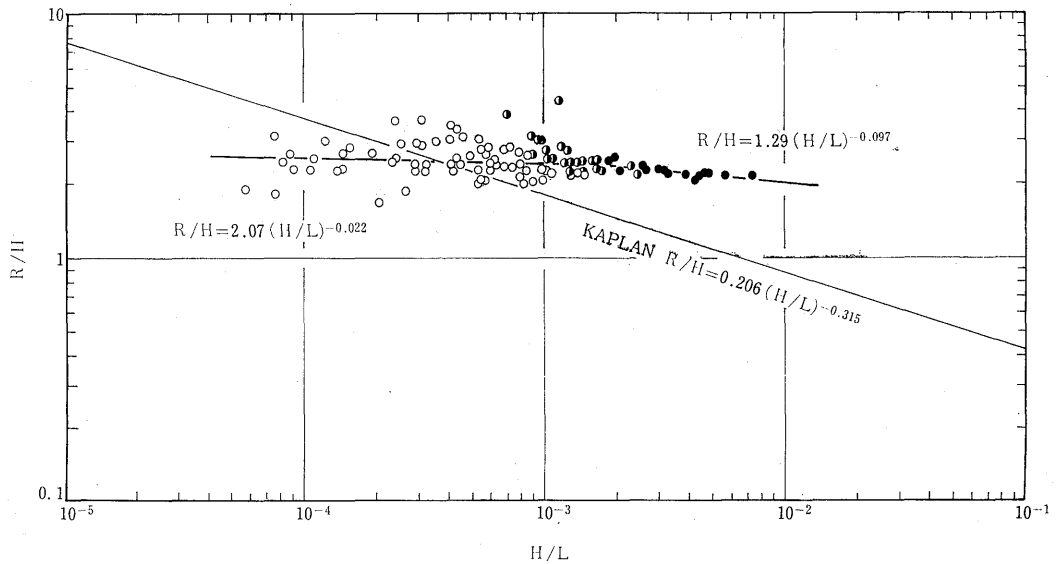


Fig. 4 Relation between R/H and H/L.

二乗法により求めた。なお、分類による実験波の個数は、○印 (non-breaking) 86個、◐印 (surging) 22個、●印 (breaking) は30個となった。また、Kaplanの実験範囲 ( $1 \times 10^{-3} < H/L < 1 \times 10^{-1}$ ) は、この分類によるとちょうど●印 (breaking) の領域に入ること注目される。以下それぞれの図について考察してみよう。

(1)  $H_s/H-H/L$  の関係 (Fig. 2) について

●印 (breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{H_s}{H} = 0.582 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.106} \quad (1-1)$$

○印 (non-breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{H_s}{H} = 0.612 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.127} \quad (1-2)$$

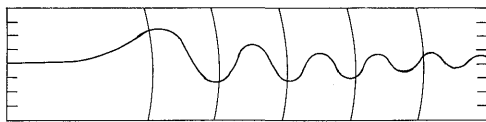
Kaplan の実験直線は

$$\frac{H_s}{H} = 0.068 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.407} \quad (1-3)$$

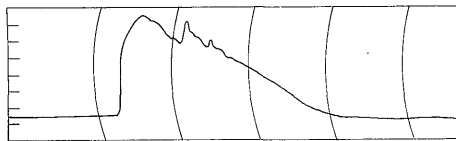
まず、Fig. 2 を見ると直ぐわかることは、 $H_s/H=1.3$  を境にして、breaking (●印) はそれより下に、

non-breaking (○印) はそれより上に、また surging (●印) は両者のほぼ境界付近上にそれぞれ分布していることである。その理由としては、breaking の波は汀線に達する前に砕波し、段波になっているから、それによるエネルギーの消散が続くため、汀線における波高の増幅率が小さいものと思われる。それに対し non-breaking の波は、緩斜面上での反射重複による波高増幅率が大きく表われているものと思われる。

次に、breaking の波に於いては Fig. 2 からわかるように、式(1-1)が式(1-3)の上の有りしかも傾きが小さくなっている。その主要な理由は、実験波形の相違によるものと思われる。Kaplan の実験波形は、孤立波状の分散波列の第一波についてなされたものであり、その波形は Fig. 5 に示されるもので



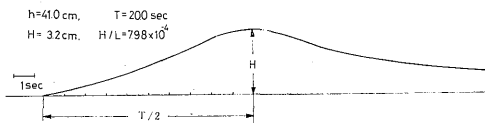
(a) Typical experimental wave (by Kaplan).



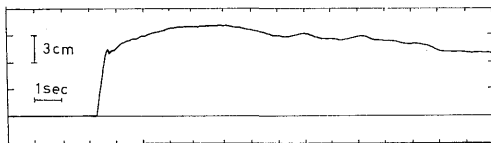
(b) Typical experimental shore line wave (by Kaplan).

Fig. 5

ある。このようなクノイド波状の波形の砕波は先端部からではなく頂部から起り、汀線波高 ( $H_s$ ) に対しては衝撃波面の背後の波形の影響が殆どなく、汀線波高は主として最初の衝撃波面の大きさによってきまり、遡上過程では減衰の一途をたどる。それに対し、筆者らの孤立波状の実験波  $\eta = H \sin^2 \sigma t$  は、Fig. 6 に示されるように砕波は先端部から発生発達し、衝撃波面の



(a) Typical experimental wave (by authors).



(b) Typical experimental shore line wave (by authors).

Fig. 6

背後部においては波頂がまだ残っていて直ぐには静水位まで落ちていない。そのため後続波形は shoaling 効果を受け、衝撃波面へエネルギーを供給しながらも比較的長くその形を保持し続け汀線波高を大きくしているものと考えられる。

non-breaking の波については他に比較検討すべき例がないが、Kaplan の外挿直線と比較すると傾きが小さい。

(2)  $R/H_s - H/L$  の関係 (Fig. 3) について

●印 (breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{R}{H_s} = 2.25 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.012} \quad (2-1)$$

○印 (non-breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{R}{H_s} = 3.32 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.103} \quad (2-2)$$

Kaplan の実験直線は

$$\frac{R}{H_s} = 3.03 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.092} \quad (2-3)$$

Fig. 3 を見てすぐわかることは、 $R/H_s = 1.7$  を境にして breaking (●印) はそれより上に、non-breaking (○印) はそれより下に、surging (●印) はほぼ境界線上にそれぞれ分布していることである。

まず、breaking の波について考えてみる。Kaplan によると、実験式は (2-3) であるが、実験誤差を考慮すると  $R/H_s = 2$  であると述べている。筆者らの実験式 (2-1) も  $R/H_s = 2.25$  となって Kaplan の結果とはほぼ一致する。また、筆者らの結果が若干大きいのは、簡単にいえば波形の相違であるが先端部に後続する波要素の追上げによるものであろう。しかしながら、汀線での波形がただ砕波しているという共通性だけで  $R/H_s = \text{const.}$  となることは興味深い。

一方、non-breaking の波は Fig. 3 を見ると、 $H/L$  が小さくなるに従って  $R/H_s$  も小さくなり、 $R/H_s = 1.0$  に漸近する傾向がうかがわれる。この理由は、surging の領域に近い  $H/L$  が大きいところでは、まだ進行波性が強く残っているため汀線での運動エネルギーが  $R$  の位置エネルギーに変換されて加わるからであり、surging の領域から離れ  $H/L$  が小さくなるに従って進行波性も薄らぎ  $R/H_s = 1.0$  に近づいていくものと思われる。このことから Kaplan の外挿は否定される。Kaplan の誤ちは、実験波が breaking に属する波であることを忘れ、non-breaking の波つまり、砕波せずに遡上する波について考えなかったために起こったと考えられる。即ち、全く異質の現象を混同したものと云えよう。したがって、式(2-2)と式(2-3)がよく一致しているのは偶然の一致と

みなされる。

(3) R/H-H/Lの関係 (Fig. 4) について

●印 (breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{R}{H} = 1.29 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.097} \quad (3-1)$$

○印 (non-breaking) だけによる実験直線は

$$\frac{R}{H} = 2.07 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.022} \quad (3-2)$$

Kaplan の実験直線は

$$\frac{R}{H} = 0.206 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.315} \quad (3-3)$$

(1)と(2)での考察を結びつけると当然このようになる。Fig. 4 より筆者らの実験波では、実験直線が H/L=1.5×10<sup>-3</sup> 付近に屈折点を持つことがわかる。

breaking の波については法先波高 (H) と遡上高 (R) とを直線的に結びつける解析的な理論はないが、non-breaking の波については首藤の理論がある。詳しくは後節 4. で比較するが、筆者らの実験直線とよく一致する。

(4) Kaplan の外挿法について

(1), (2), (3)において、実験波を汀線波形により分類し、それぞれの波形についての実験式を求め、それらが線型、非線型の現象を説明する式としては物理的に首肯しえるものであることを示した。

R/H-H/Lの関係においてまともてみると次のようになる。breaking の波は、衝撃波面の背後の波形の影響を受けるため、入射波の波形によって異なる直線になる。つまり、Fig.4における H/L>2×10<sup>-3</sup> での筆者らの実験式と Kaplan の実験式の違いは、入射波の違いによる。一方 non-breaking の波は、首藤の理論<sup>6)</sup>と松村の実験<sup>8)</sup>に示されるように、遡上高は入射波の先端から頂部までの部分によって決定されると考えられる。つまり、5×10<sup>-5</sup><H/L<1×10<sup>-3</sup>では、入射波の先端から波頂までの波形が孤立波の形に似ていれば、Fig. 4 における筆者らの実験直線が適用できると思われる。Kaplan の実験波の波頂より前の部分が筆者らの実験波形と似ていることから、Kaplan の実験式の外挿直線は式 (3-2)と式 (3-3)の交点 H/L=4×10<sup>-4</sup> 付近に屈折点をもつことは蓋し当然と見るべきであろう。

このような結果からして、Kaplan の外挿法は誤った判断を与える可能性が大きいことがわかる。

#### 4. 首藤の理論式<sup>9)</sup>との比較

筆者らの実験波のうちの non-breaking の波に対して、首藤の微小振幅長波の遡上高を求める理論式を適用し、実験値と理論値との比較をした。

筆者らの斜面法先での実験波形

$$\eta = H \sin^2 \sigma t, \quad \sigma = \frac{\pi}{T} \quad (5-1)$$

に対して首藤の式は、

$$\frac{R}{H} = \left[ J_0^2(U) + J_1^2(U) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5-2)$$

$$U = \frac{4\pi}{ST} \sqrt{\frac{h}{g}} = \frac{4\pi}{S} \cdot \frac{h}{L} \quad (5-3)$$

である。式 (5-3) に実験波の値を代入して求めた理論値と実験値を比較したものが、Fig.7である。ここで実験波のUの値は2.0<U<5.0であった。Fig. 7を見ると、個々の実験値が理論値より多少大きめであまりよく一致しているとは云えないが、Uの値がかなり大きいことを考えればほぼ満足すべきものと言えよう。

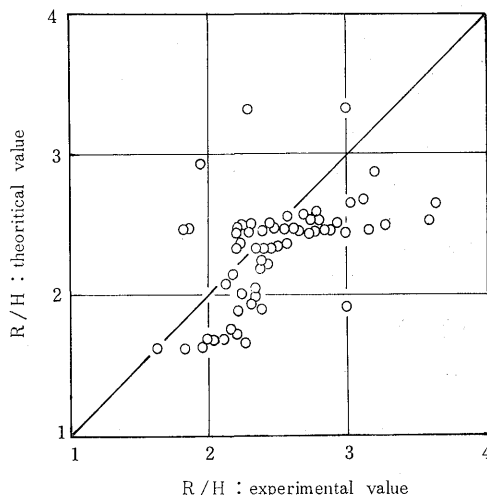


Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental R/H values.

また Fig. 4 の実験直線 (3-2) と比較するために、式 (5-3) を次のように変形した。

$$U = \frac{4\pi}{S} \cdot \frac{h}{H} \cdot \frac{H}{L} \quad (5-4)$$

ここで実験波のH/Lに対するH/hの平均特性を求めると、

$$\frac{H}{h} = 293 \left( \frac{H}{L} \right)^{1.03} \quad (5-5)$$

であった (Fig. 8)。

式 (5-5) を式 (5-4) に代入すると、

$$U = \frac{4\pi}{S} \cdot \frac{1}{293} \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.03} \quad (5-6)$$

となる。式 (5-6) に H/L の値を代入して描いたのが Fig. 8 の破線の曲線である。同図中の実線は式 (3-2) であるが、Fig. 7 ではあまりよい一致が見られないにも拘らず、平均的な理論曲線と非常によ

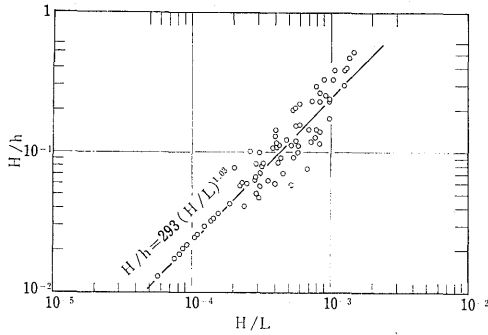
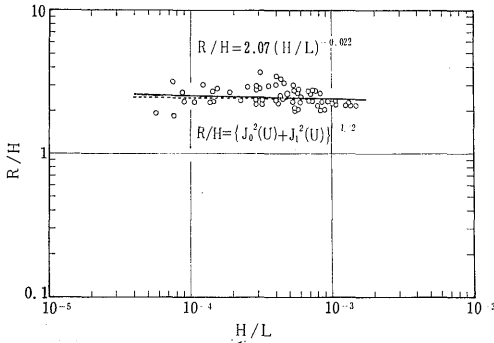
Fig. 8 Relation between  $H/h$  and  $H/L$ .

Fig. 9 Experimental straight full line and theoretical broken curve.

い一致を示している。

## 5. 結 論

1/60勾配の斜面上への長波の遡上高に関する実験を行ない、 $H_s/H - H/L$ ,  $R/H_s - H/L$ ,  $R/H - H/L$  の三つの関係について調べた。データ整理に於いて、汀線の波形より定性的に実験波を三種類に分類し、それぞれについての実験直線を得た。この分類が理論的にも妥当であり、また、得られた実験式によって遡上現象がかなりよく説明されることがわかった。

breaking の波 ( $H/L > 2 \times 10^{-3}$ ) に適用される式、

$$\frac{H_s}{H} = 0.582 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.106}$$

$$\frac{R}{H_s} = 2.25 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.012}$$

$$\frac{R}{H} = 1.29 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.097}$$

non-breaking の波 ( $H/L < 1 \times 10^{-3}$ ) に適用される式、

$$\frac{H_s}{H} = 0.612 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.127}$$

$$\frac{R}{H_s} = 3.32 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.103}$$

$$\frac{R}{H} = 2.07 \left( \frac{H}{L} \right)^{-0.022}$$

また、本実験範囲内では、 $R/H - H/L$  の関係において peak は明瞭には現われなかったが、屈折点が存在することがわかった。したがって、Kaplan の外挿法は誤まった判断に導く可能性の大なることを指摘した。

最後に、本研究は昭和49年度文部省科学研究費補助金、自然災害特別研究-I、「三陸大津波襲来時の被害予測（研究代表者：岩崎敏夫東北大学教授）」による研究の一部であることを記して謝意を表す。また、本実験全般にわたってご協力を頂いた本学土木工学科の平山康志技官ならびに卒業研究として協力頂いた道正典（現、K.K. 建設技術研究所）、森林敏夫（現、東亜建設工業K.K.）両君に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Kishi, T. : Transformation, Breaking and Run-up of a Long Wave of Finite Height ; Proc. 8th Conference on Coastal Eng., Mexico, 1962, pp.60~76.
- 2) Hall, J. V. Jr. and Watts, G. M. : Laboratory Investigation of the Vertical Rise of Solitary Waves on Impermeable Slopes ; Tech. Memo. No.33, B. E. B., Corps of Engineers, Mar. 1953.
- 3) Kaplan, K. : Generalized Laboratory Study of Tsunami Run-up ; Tech. Memo. No.60, B. E. B., Corps of Engineers, Jan. 1955.
- 4) 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，1961，pp.41~45.
- 5) 岩崎敏夫・富樫宏由・佐藤栄司：津波の汀線における水理特性と陸上遡上；第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp.427~433.
- 6) 首藤伸夫：長波のうちあげ高；第13回海岸工学講演会講演集，1966，pp.216~222.
- 7) Shuto, N. ; Standing Waves in Front of a Sloping Dike ; Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, 1972, pp.13~23.
- 8) 松村圭二：高潮及び津波に関する研究；昭和38年度海岸事業調査費報告書，建設省土木研究所.
- 9) 道正典・森林敏夫：一樣斜面上に於ける長波の変形と遡上高について；長崎大学工学部土木工学科卒業研究報告論文集，1974.