

津波の陸上遡上高に関する実験的研究

富 樫 宏 由*・中 村 武 弘**

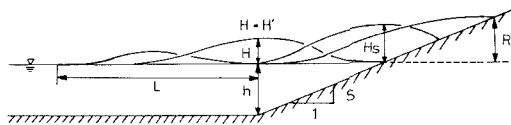
1. 緒 論

著者らは前報^{1),2)}において、津波の周期性を考慮した陸上遡上高に関する実験式を代表するものとして有名な Kaplan の式を取りあげ、一様斜面勾配 $S=1/60$ については著者らの実験結果と比較検討し、また $S=1/30$ については岩崎・富樫・佐藤³⁾、首藤⁴⁾の実験結果を整理し直して再検討した。一方、これらの実験結果に対して Keller & Keller⁵⁾、首藤^{4),6)}の微小振幅長波の完全重複波型の遡上理論式を適用して、従来不明であった実験式と理論式の結合を試み、Kaplan 式との現象特性の相違を明らかにした。さらに、Green の Shoaling 変形式と Kaplan 式の関係を解明して、波形勾配の小さい領域 ($H/L < 10^{-3}$) にまで実験式を外挿する Kaplan 流の津波推算式は完全に誤りであることを指摘した。

したがって、本研究においてはこうした研究成果を踏まえて、新たに $S=1/40$ の場合についてさらに実験範囲を拡げて追実験するとともに、従来の $S=1/20, 1/50$ の実験結果を再整理することによって、Keller & Keller、首藤の理論式の適用性を十分に検討し、非線形効果が大きくなって適合性の悪い領域には著者らの最適実験式を提案した。さらにまた、首藤⁶⁾の碎波条件式の適用性を実験的に検討するとともに、実験範囲内の平均的な実験直線から得られる各斜面上の長波のおおよその反射率を見積った。これによって、津波の陸上遡上高を算定する場合に、碎波進行波型か非碎波重複波型かあるいはその中間の Surge によって採用すべき算定式の合理的な選択が可能となる。

2. 実験装置、器具、方法および波の諸元

横断面が幅 1.0m、深さ 1.0m で、長さが 60.0m の鉄筋コンクリート製長水槽の一端に気圧式造波装置が設置されている。長水槽の中には幅 1.0m、他端の高さ 1.0m、水平距離 40.0m、したがって $S=1/40$ なる鋼板製の斜面が設けられている。波高計は容量式で、斜面のり先と汀線およびその他 1~3 点で測定し、陸上最大



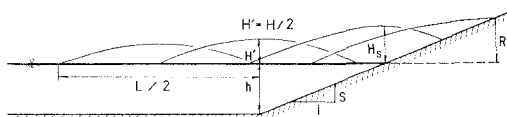
図—1

遡上高は目測によった。

実験波の記号は図—1に示すとおりで、斜面のり先への入射波形は前報¹⁾と同様に孤立波に類似させた非周期的な1種の正弦波で、 $\eta = H \sin^2 \sigma t$ ($\sigma = \pi/T, 0 \leq t \leq T$) なる静水面上の1山の波を与えた。ここで、入射波高 H は首藤⁴⁾ にならって静水面上の最高水位(峰高) H' に等しいみかけの波高ゆえ、 $H = H'$ であり、周期 T も波先端から最高水位に達するまでの時間を半周期 $T/2$ とみなして2倍したみかけの周期である。また、実験波の諸元は、静水深 $h=17.5\sim 75.0$ cm を $5\sim 10$ cm 間隔に 11 種類にとり、各 1 つの h に対応して周期 $T=6.9\sim 64.0$ sec を波形勾配と相対水深の実験範囲を考慮しながら、できるだけムラなく一様に分布するように任意間隔に設定し、波高 $H=1.2\sim 14.2$ cm も data が重複しない程度の適当な間隔に変化させた 130 個からなっている。

3. 一様勾配斜面上の遡上高に対する波形勾配の影響

まず初めに、従来 $S=1/40$ なる場合の実験例がないので、この勾配と比較的近くて実験例の多い $S=1/30$ の場合における前報²⁾の結果と比較検討する。この際、同じ図の中で周期波と非周期波が混在するので、取扱い上の混乱を避けるために1山の正弦波形を周期波の一部とみなした場合の記号のとり方を図—2に示す。相違点は、たとえば図—1の非周期波では $H'=H$ であるのに対して、図—2の周期波では $H'=H/2$ なるごとくである。ただし、図—3以下のごとく周期波と非周期を問わず波形勾配については混乱する恐れがないので'を省略して



図—2

* 正会員 工修 長崎大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科

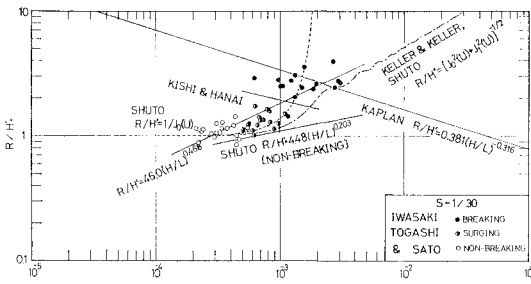


図-3

ある。また、相対陸上遡上高と相対汀線波高については、**図-3**のように周期波とみなした実験値がプロットしてある場合は混乱しないように'をつけてあるが、**図-4**のように周期波とみなした実験直線が混在してあっても、非周期波の実験値が主体にプロットしてある場合、あるいは**図-5**のように明らかに非周期波のみの実験結果を示す場合は概して'を省略してある。**図-3**の意味内容についてはすでに前報²⁾にて考察済みゆえここでは省略する。

図-4の破線は実験値を代表する2次回帰曲線であり、ピークを境に実直線で2分してある。また、鎖線は上述のように他に比較検討すべき実験例がないので、やむなく定性的な比較のために**図-3**から写しとった4本の実験直線である。混乱を防ぐために周期波とみなした実験直線式の相対遡上高にのみ'をつけてある。この図からわかる特徴は前報¹⁾の $S=1/60$ の場合と同様に、第1には R/H にピークが存在し、やはりKaplan流津波推算法の誤りが再確認されたこと、第2には斜面勾配が $S=1/30, 1/40$ と異なるにもかかわらず、このピークが奇しくもKaplan直線との交点に当たることである。さらに第3にはこのピークがKaplan直線とは全く逆傾向の岩崎・富樫・佐藤の直線とも交差することであろう。**図-3, 4**を比較して見ればわかるように、いずれにしても碎波進行波型(●印)の遡上高は $H/L \approx 2 \times 10^{-3}$ 付近で最大となり、 $H/L < 10^{-3}$ では過渡領域(●, ○印)を経て非碎波重複波型(○印)の遡上現象に移行し減少して行く。また、**図-4**で若干興味深いことは、著者らの

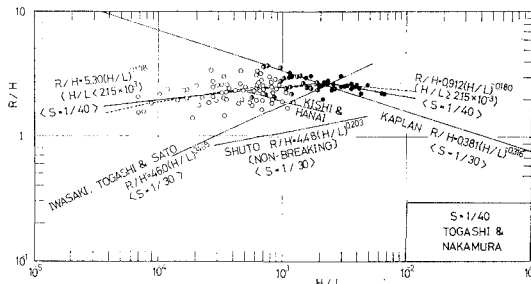


図-4

実験直線は $H/L \geq 2.15 \times 10^{-3}$ ではKaplanの直線あるいは岸・花井の周期波の直線にほぼ平行し、 $H/L < 2.15 \times 10^{-3}$ では首藤の非碎波重複波型の直線にほぼ平行していることであり、碎波進行波型かSurgeあるいは非碎波重複波型かによる遡上現象の定性的な類似性がある程度うかがわれるように思われる。

図-5は H' の斜面のり先から汀線までの斜面上でのShoaling変形、碎波による減衰あるいは反射重複に伴う波高増幅効果を示し、**図-6**は汀線から陸上における遡

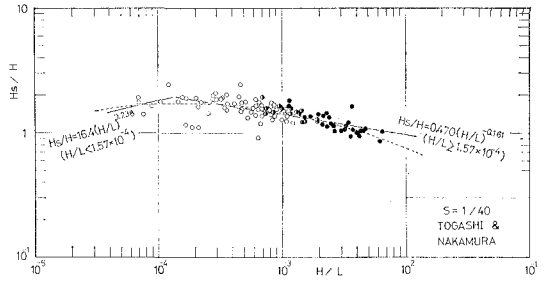


図-5

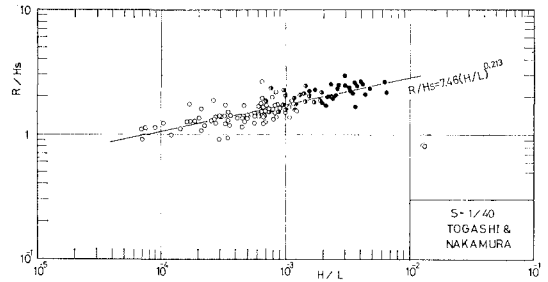


図-6

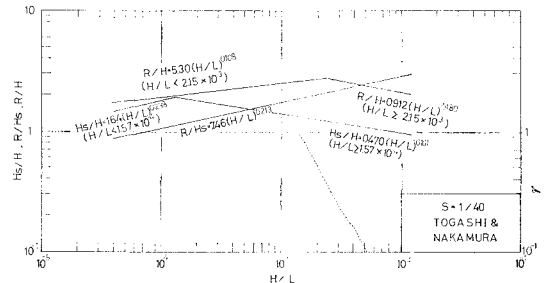


図-7

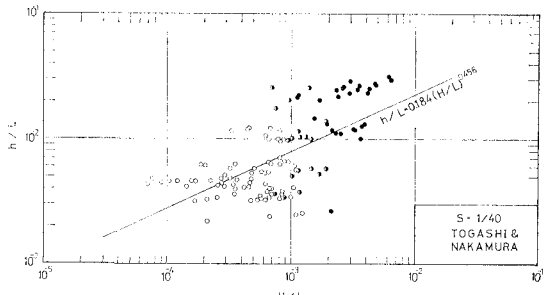


図-8

上効果を表わすが、両者を図-4の直線も含めてまとめたものが図-7である。図-7の破線は右側の縦軸 r との関係を表わし、前報²⁾で算出したと同様に図-8に示す関係式 $h/L=0.184(H/L)^{0.456}$ を首藤の碎波条件式に代入して求めた実験値全体の平均的な反射率である。図-5, 6, 7によれば、おおよそ碎波進行波型(●印, $r < 1$)の波はShoaling変形後の碎波によるエネルギー消散が大きいため波高増幅率は小さいが、汀線で段波から変換された強いSurgeによる陸上遡上効果が大きいため、結局 R/H は最も大きくなり、遷移波型(○印, $r \approx 1$)のSurgeではほぼ同等の効果、また非碎波型(○印, $r=1$)の波では逆転して陸上遡上効果は小さく、 R/H の大勢は反射重複による増幅効果によって決定されることがわかる。

ところで、図-7からわかるように○印の波は非碎波完全重複波型であるから、前報^{1), 2)}における $S=1/60, 1/30$ の場合と同様に Keller & Keller⁵⁾、首藤⁶⁾の理論式を適用してみたのが図-9の鎖線であり、適用に先立っては図-8の場合と同様に図-10に示す $h/L=0.009 \cdot (H/L)^{0.076}$ なる関係式を使って、 $U=(4\pi/ST)\sqrt{hg} = (4\pi/S)(h/L)=4.52(H/L)^{0.076}$ と置換している。全体的に実線で示す実験直線の方が大きく、一見して適合性のよくないことがわかる。

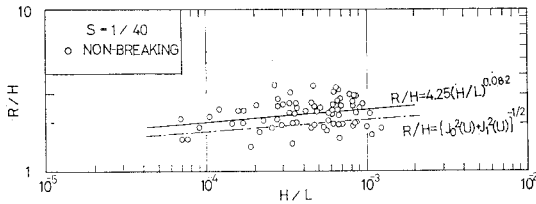


図-9

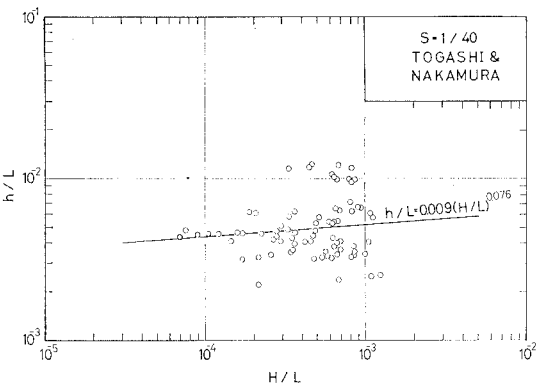


図-10

4. 一様勾配斜面上の遡上高に対する斜面勾配と相対水深の影響

図-11は前報²⁾に示した $S=1/30, 1/60$ の場合の実

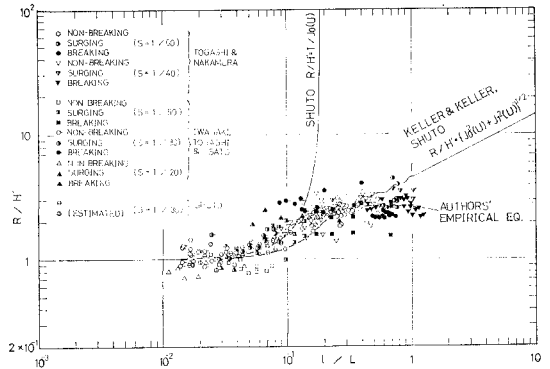


図-11

験値の他に $S=1/20, 1/40, 1/50$ の実験値を追加し、 H'/h なるパラメーターの不明確な Kaplan の実験直線を除き、新たに著者らの実験曲線を描いたものである。首藤⁴⁾の理論式

$$\frac{R}{H'} = \frac{1}{J_0(U)}, \quad U = \frac{4\pi}{S} \frac{h}{L} = 4\pi \frac{l}{L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(l : 斜面のり先から汀線までの距離)

は $0.20 \leq U \leq 1.5$, したがって $1.6 \times 10^{-2} \leq l/L \leq 1.2 \times 10^{-1}$ で与えられており、Keller & Keller⁵⁾、首藤⁶⁾の理論式

$$\frac{R}{H'} = \frac{1}{\{J_0^2(U) + J_1^2(U)\}^{1/2}}, \quad U = 4\pi \frac{l}{L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(ただし、 $H' \approx H_0 = 2a$: 沖合入射波高)

については特に適用範囲は与えられていない。しかし、図-11を見る限りでは、 $l/L \geq 10^{-1}$ では両式ともに一部分しか適合しないようであり、また $5 \times 10^{-2} \leq l/L \leq 10^{-1}$ においても碎波または Surge を含む実験値に比べて両式はともに若干小さく下まわっている。もっとも両式はそもそも微小振幅長波の完全重複波型の線形理論式であるから、碎波のような非線形性の著しい現象を含む幅広い領域にあまねく適合しないことはけだし当然ともいえよう。したがって、著者らはここに両理論式の間隙を埋めるような有限振幅長波を対象とした次式のような新たな実験式を提案する。すなわち

$$\log\left(\frac{R}{H'}\right) = 0.421 - 0.095 \log\left(\frac{l}{L}\right) - 0.254 \left\{ \log\left(\frac{l}{L}\right) \right\}^2, \quad 10^{-1} \leq \frac{l}{L} \leq 1.3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

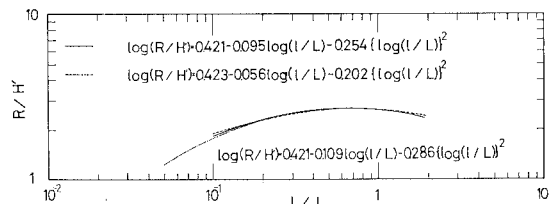


図-12

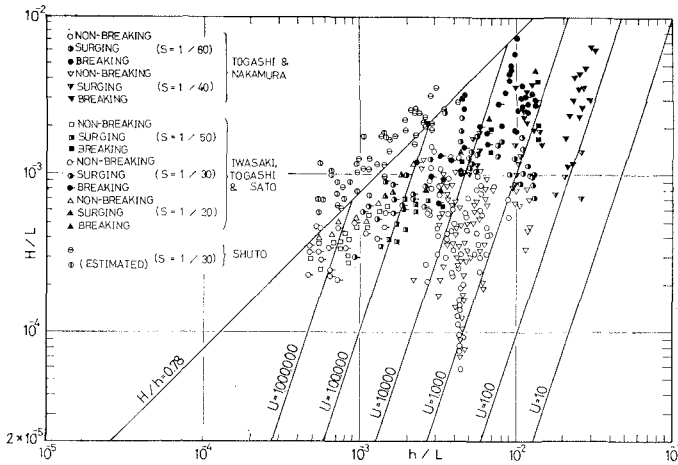


図-13

$$\log\left(\frac{R}{H'}\right) = 0.421 - 0.109 \log\left(\frac{l}{L}\right) - 0.286 \left\{ \log\left(\frac{l}{L}\right) \right\}^2, \quad 5 \times 10^{-2} \leq \frac{l}{L} \leq 1.3 \dots (4)$$

図-12の実線が著者らの $S=1/60, 1/40$ の実験値のみをまとめたものであり、破線は $l/L \geq 10^{-1}$ なる範囲の全実験値を斜面勾配に関係なくまとめたものであるが、両式にはほとんど差異がないから実線の式(3)を用いれば十分であろう。また、鎖線は $l/L \geq 5 \times 10^{-2}$ での全実験値を平均した実験曲線であって式(4)で与えられる。

ところで、図-11にプロットした全実験値をアーセル数との関係で調べたものが図-13であり、各実験波がいかなる範囲に属する波であることを明示しておこう。

5. 一樣勾配斜面上の碎波条件と反射率

図-14の縦軸 $(H'/L)/S$ の H'/L は、図-1の定義に

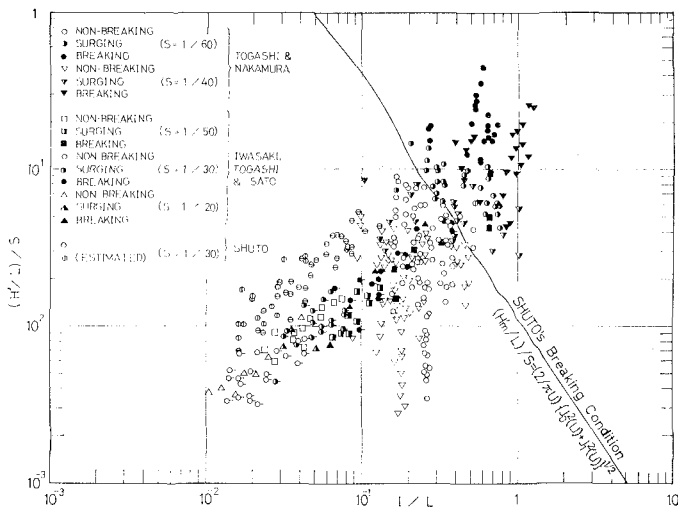


図-14

よる非周期波においては $H'=H$ ゆえ、みかけの波形勾配と一致するが、図-2のように周期波とみなす場合は波形勾配とはならないので、図-13の縦軸を単純に S で割った軸にはなっていないことに注意する必要がある。ただし、横軸はまさしく図-13の横軸を S で割ったかたちになっている。また、図-14の軸のとり方ではアーセル数が S の関数形になってしまうので省略されているし、 $H/h=0.78$ なる McCowan の碎波条件式も斜面上の周期波に対しては $H'/h=0.78$ となって図-13の表現と異なるゆえ不適当と思われるので削除してある。

ところで、斜面上の長波の碎波条件については種々問題があって未だ定説が見られないようであるが、ここでは著者らの実験結果のとりまとめに最も近い形式で提案されている首藤⁹⁾の碎波条件式の適用を試みて図示したのが図-14の実線であり、それは次式で与えられる。

$$\frac{H'_m}{L} \frac{1}{S} = \frac{2}{\pi} U^{-1} \{J_0(U) + J_2(U)\}^{1/2}, \quad U = 4\pi \frac{l}{L} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、ここでは沖合入射波高 $H_0=2a$ (a : 沖合入射波の振幅) に対して、 $H' \doteq H_0=2a$ と仮定し、 $H'_m=2am$ (am : 斜面上の碎波限界を与える入射波の最大振幅) とおいている。図-14によれば、首藤の碎波条件式は著者らの実験波の分類と符号し、Surge型(●印)となる過渡領域を境として碎波と非碎波の領域に2分し、碎波現象をかなり適確に説明しているものと思われる。しかし、この碎波条件からかなりはずれている岩崎・富樫・佐藤の実験波は、著者らの非周期的な単一波形とは異なり、1山の正弦波形のクノイド波状分散波列への変形とその個々の碎波が連続的に起こった結果であるから、現象の類似性が薄いと解釈してよいであろう。

次に図-14から、たとえば $S=1/40$ であれば、 $(H'/L)/S = 0.0931(l/L)^{0.875}$ なる回帰式を求めて、これで式(5)の両辺を割れば次式のように反射率が定義される。

$$r = \left(\frac{H'_m}{L} \frac{1}{S} \right) / \left(\frac{H'}{L} \frac{1}{S} \right) = \begin{cases} 1, & H' \leq H'_m \\ H'_m/H', & H' \geq H'_m \end{cases} \dots (6)$$

これを各斜面勾配ごとに求めた結果を図示したのが図-15の $a \sim f$ なる曲線であり、右側の縦軸 r との関係を示して

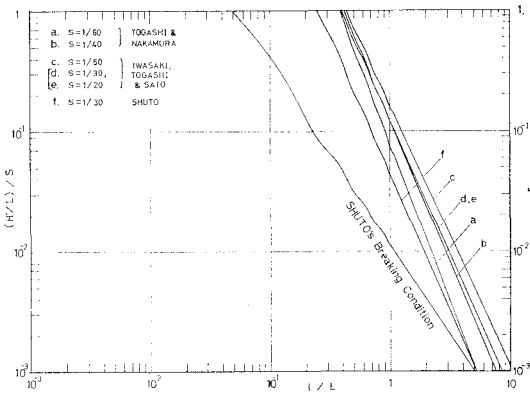


図-15

いる。d, eは全く一致して1本の曲線となっている。これを見ると、各実験条件ごとの特性的な相違があるにもかかわらず、平均的にはほぼ似たような反射率になるようであり、図-11の実験結果および図-12の著者らの実験曲線と対比して見るとそのピーク付近で反射率も最大となり、 $l/L < 4 \times 10^{-1}$ では完全反射することがわかる。fなる曲線は偶然か否か $l/L = 2.5 \times 10^{-1}$ 、すなわち共振点近傍で $r=1$ となっていてはなほだ興味深い。また、従来 $l/L > 1$ であれば Green の式を使った Shoaling 変形が議論されてよいといわれているが、図-15 によれば約 10% 以下の反射率で反射を無視した進行波としての取扱いが保証されることを示している。

6. 結 論

(1) 一樣勾配斜面上の津波の陸上遡上高に対する波形勾配の影響については、斜面勾配とか実験波形その他の実験条件の相違による変動がかなり大きいため、ある程度の定性的な傾向は把握できるが、定量的には未だ不明確な点が残っていて一般的な傾向を見出し難い。

(2) しかし、陸上遡上高に対する斜面勾配と相対水深の影響は明らかであり、従来の微小振幅長波理論式で

は十分に説明し得ない部分に、主として有限振幅長波を対象とした著者らの実験式(3),(4)を提案した。

(3) さらに、一樣勾配斜面上の陸上遡上現象に密接に関連する碎波条件を実験的に検証し、これから斜面上の長波の概略の反射率を見積り、津波の陸上遡上高を算定する理論式または実験式の適確な選択を可能ならしめた。

謝辞：本研究は昭和50年度文部省科学研究費補助金、自然災害特別研究（Ⅰ）「三陸大津波来襲時の被害予測（津波堤防破壊時を含む）」【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る。

なお、実験担当または図面の整理に熱心に努力された長崎大学工学部土木工学科の平山康志技官、ならびに実験を担当した元長崎大学生の前田一平君（現日本国土開発）、行本啓二君（現東洋建設）には、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 富樫宏由・中村武弘：津波の陸上遡上高に関する実験式の再検討；第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集，1974，pp. 299~300.
- 2) 富樫宏由・中村武弘：津波の陸上遡上高に関する実験式の再検討（続）；第30回年次学術講演会講演概要集，第Ⅱ部門，土木学会，昭50.10（投稿中）.
- 3) 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，昭45.11，pp. 427~433.
- 4) 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，昭41.12，pp. 216~222.
- 5) Keller, J.B. and H.B. Keller: Water Wave Run-up on a Beach; Research Report No. NONR-3828 (00), Office of Naval Research, Dept. of the Navy, 1964.
- 6) Shuto, N.: Standing Waves in front of a Sloping Dike; Coastal Engineering in Japan, Vol. 15, 1972, pp. 13~23.