

# 一様勾配斜面上の浅水波の碎波に及ぼす逆流の影響の表示法

## AN EXPRESSION FOR INFLUENCES OF OPPOSING CURRENT ON WAVE BREAKING OF SHOALING WAVE ON UNIFORM SLOPE

堺 茂樹\*・平山健一\*\*・佐伯 浩\*\*\*

By Shigeki SAKAI, Ken-ichi HIRAYAMA and Hiroshi SAEKI

Opposing currents affect the breaking processes of shoaling waves on uniform slopes. The wave breaking conditions depend on the normalized discharge per unit width of the opposing current as well as on the deep water wave steepness and uniform slope. Experiments were conducted to examine these effects on the breaker depth (or height) in the presence of the opposing current, as compare to the breaker depth (or height) in the absence of the current. A new empirical parameter was proposed to express the ratio of the breaker depth (or height) with and without the opposing current. The proposed new parameter accounts for the combined effects of the opposing current, deepwater wave steepness and uniform slope. The measured ratios of the breaker depth (or height) were shown to be expressed as a function of the proposed parameter.

Keywords: breaker depth, breaker height, opposing current

### 1. まえがき

碎波現象は海岸工学上きわめて重要な問題の1つであり、また本研究で扱う碎波特性に及ぼす逆流の影響は河口付近あるいは海浜流の発生する海域での碎波を説明するうえで考慮されなければならない要素の1つである。

碎波現象を流れの場で扱った最初のは Yu<sup>1)</sup>の研究であり、深海波を対象とした流れによる碎波に関する実験を行い、碎波限界を検討している。近年では、岩垣・浅野・山中・永井<sup>2)</sup>が一様水深上の浅海波の逆流による碎波の実験を行い、碎波限界式として Miche の式が妥当な近似を与えることを報告している。

著者ら<sup>3)</sup>は斜面上での碎波に及ぼす逆流の影響に関する実験から、碎波特性に及ぼす逆流の影響を表わすパラメーターとして無次元単位幅流量(後述)がきわめて有効であり、碎波特性は水底勾配、沖波波形勾配そして無次元単位幅流量に依存していることを示し、逆流上の碎波指標を提案した。この碎波指標では1/50, 1/30, 1/15の3種類の水底勾配上で0.006~0.08の範囲の数種類の

沖波波形勾配に対する碎波水深および碎波波高と無次元単位幅流量との関係が示されている。しかし、これらの関係が任意の水底勾配、沖波波形勾配で与えられている方が実用的である。そのためには逆流の影響が定式化され、さらにそれが水底勾配、沖波波形勾配、無次元単位幅流量の影響を含む単一のパラメーターで表わされることが望ましい。

本研究では逆流の影響を検討するため、逆流が存在する場合の碎波水深および碎波波高と存在しない場合の碎波水深および碎波波高との比に着目する。著者らが行った多くの実験の結果を再整理し、水底勾配、沖波波形勾配、無次元単位幅流量のすべての影響を含み、前述の比を一義的に決定し得るパラメーターを誘導する。さらに、このパラメーターにより碎波水深、碎波波高に及ぼす逆流の影響の定式化を行う。

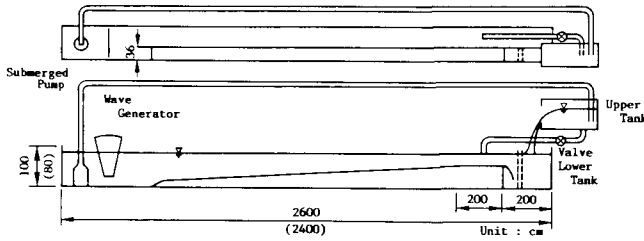
### 2. 実験装置および実験方法

実験には2つの造波水路が用いられ、これらは長さと同深さが若干異なっているが、逆流の発生方法や造波装置等は全く同一であり、その概略を図-1に示す。水路内部は木製の隔壁により36cm幅としてあり、これは単位幅流量を広い範囲で変化させるために行われた。水路内部の底面は2mの水平床と斜面部とから成り、斜面部の勾配  $S$  は1/50, 1/30, 1/15の3種類とした。これ

\* 正会員 工博 岩手大学助手 工学部土木工学科  
(〒020 盛岡市上田4-3-5)

\*\* 正会員 Ph. D. 岩手大学教授 工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科  
(〒060 札幌市北区北13西8)



図一 実験装置

ら底面は鋼製フレームにベニヤ板を張った物を用いて造られている。

逆流を発生させるには、まず造波板の背後に設置した水中ポンプにより水路岸側端の上方にある上部タンクに送水する。上部タンクの四角せきを越流した水は水路内の下部タンクへ落下するが、この際の水面の擾乱を静めるため下部タンクの内部に2枚のスクリーンが設置されている。下部タンクから越流した水は2 mの水平床を通過した後斜面上を逆流として流れる。流量を変化させるには上部タンクの底部に設けたパイプを通して隔壁の外側に送水し、流量の調整はパイプに付けたバルブの開閉により行った。また、水路内の水位は逆流を発生させたときに2 mの水平床上で跳水が生じたりあるいは水面が著しく乱れることのないように各流量ごとに定めた。

水路幅が36 cmと比較的狭いため逆流流速の横断分布には水路側壁の影響が現われる。また、水深が浅い所での鉛直分布は底面の影響を受けるが、水深が深い所では底面の近傍を除いてほぼ一様な分布となっている。

波形の測定には抵抗線式波高計と容量線式波高計が用いられ、測定間隔は  $S=1/50$  では25 cm,  $S=1/30$ ,  $1/15$  では15 cmとした。また、反射波の影響を除くため、造波開始から6波目から10波目までの5波を測定した。測定された波高の中で最大のものを砕波波高とし、その測定位置を砕波点と定義する。

なお、本研究で用いたデータの実験条件を表一に、また3.(2)で述べる方法により計算される沖波波形勾配  $H_0/L_0$  と無次元単位幅流量  $q^*$  ( $q^*=q/g^2T^3$ ,  $q$ : 単位幅流量,  $T$ : 周期,  $g$ : 重力加速度) の範囲を図二に示した。

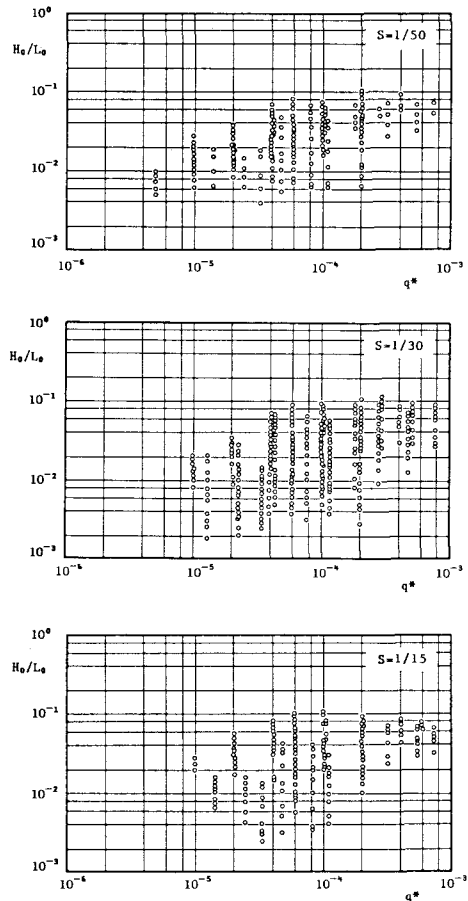
### 3. データの整理方法

#### (1) 水深の定義

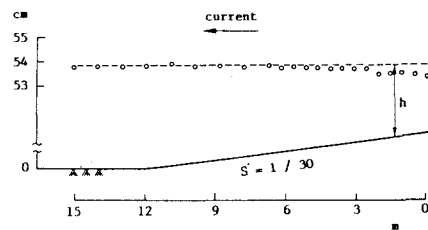
逆流を発生させたときの平均水位の例を示したのが図一三である。これは単位幅流量が  $452 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$  の場合であり、平均水位は沖側の比較的深い所ではほぼ一定であるが、水深が浅くなり逆流の平均流速が大きくなるにつれ、平均水位は低下し、流下方向に対して逆勾配となっ

表一

単位幅流量 $q$	0.0~790.0 ( $\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ )
周期 $T$	0.83~2.40 (s)
沖波波高 $H_0$	1.1~24.0 (cm)



図二 解析に用いたデータの  $H_0/L_0$  と  $q^*$  の範囲



図三 逆流による平均水位の変化と水深の定義

ている。この現象はすべての流量でみられたが、当然流量が大きいくほど顕著となる。波が存在すると wave set-

up, set-down)によりさらに平均水位は変化する。

碎波現象は局所的な平均水深と密接な関係があり、碎波点での波高、波長、水深間の関係あるいは逆流が存在する場合には波速と逆流の平均流速との関係などの議論には碎波水深として局所的な平均水深を用いるべきである。しかし、局所的な平均水深として定義される碎波水深から碎波位置を算定するには碎波点での平均水位の変化量も必要となる。一方、静水位を基準として定義される水深からは直接碎波位置を算定することができ、実用的である。

図-3に示したように比較的水深が深い沖側では平均水位はほぼ一定であり、ここでの平均流速を用いて計算される速度水頭は最大でも1mm以下であった。そこで、沖側での平均水位(図中破線)を静水位とみなし、これから底面までの深さを水深と定義する。

(2) 沖波波高の計算

著者ら<sup>4)</sup>は流れおよび波動による平均水位の変化を考慮に入れたエネルギーフラックスは式(1)で計算されること、および波動の線形解を代入しエネルギー損失がないとした場合のエネルギー保存は式(2)で表わされることを示した。

$$E_f = -\rho \int_{-h}^{\xi} \phi_t \cdot \phi_x dz \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $E_f$ : エネルギーフラックス、 $\rho$ : 流体の密度、 $\xi$ : 水位、 $h$ : 水深、 $\phi$ : 速度ポテンシャル(ただし、ベルヌーイの定数に関連する任意関数を含まない)、添字  $t, x$  はおのおの時間および水平方向の偏微分を表わし、また  $z$  は鉛直軸である。なお、右辺は時間に関する平均値である。

$$(c_g - U) \cdot \left(1 - \frac{U}{c}\right) \cdot E = c_{g0} \cdot E_0 = \text{const.} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $c_g$ : 流れに対する相対的群速度、 $U$ : 流れの平

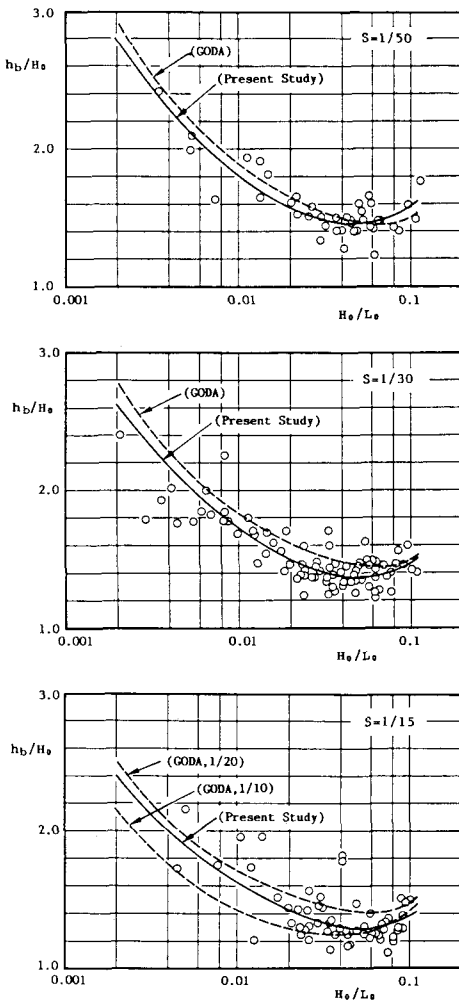


図-4 逆流が存在しない場合の碎波水深

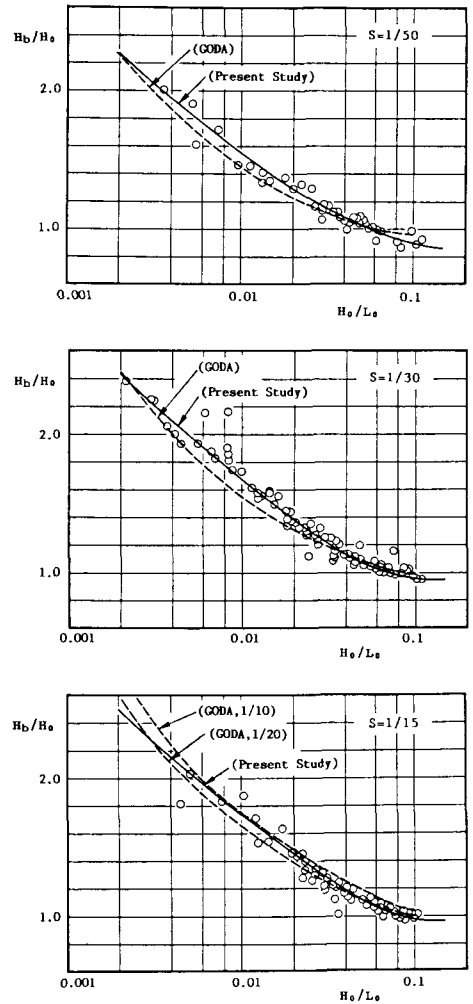


図-5 逆流が存在しない場合の碎波波高

均流速， $c$ ：流れに対する相対的波速， $E$ ：エネルギー密度，添字 0 は流れが存在しない深海での値を示す。

上式は流速の鉛直分布が一樣である場合に対するものであり，また 2. で述べたように本研究での水深の深い所での逆流流速も鉛直方向にほぼ一樣であったことから，深い水深を有する斜面上の 2～3 点での水深と波高を用い式 (2) から沖波波高を計算した。なお，逆流が存在しない深海での波長  $L_0$  は  $L_0 = gT^2/2\pi$  である。

#### 4. 新しいパラメーターによる逆流の影響の総合的評価

##### (1) 逆流が存在しない場合の碎波水深，碎波波高

本研究では碎波特性に及ぼす逆流の影響を検討するため，逆流が存在する場合の碎波水深および碎波波高と逆流が存在しない場合の碎波水深および碎波波高との比に着目する。まず，基準となる逆流が存在しない場合の碎波水深，碎波波高を決定する必要がある。図-4，図-5 は本研究での逆流が存在しない場合の実験で得られた  $h_b/H_0$  ( $h_b$ ：碎波水深， $H_0$ ：沖波波高) と  $H_0/L_0$  (沖波波形勾配) の関係および  $H_b/H_0$  ( $H_b$ ：碎波波高) と  $H_0/L_0$  の関係を水底勾配別に示したものである。碎波水深に関する結果には多少ばらつきがあるものの，全体的には図中の実線で示される平均曲線が得られ，以下の検討では逆流が存在しない場合の碎波水深，碎波波高としてこれらの平均曲線の値を用いる。なお，従来の研究結果と比較するため図中には合田により提案された碎波指標が破線で示されている。実験結果と碎波指標を比較すると多少異なる部分もあるが，この差は合田が碎波指標を検討する際に用いたいくつかの実験結果と碎波指標との差と同程度のものであり，むしろ本研究での結果は合田の碎波指標とよく一致しているといえる。

##### (2) 新しいパラメーターの誘導

著者ら<sup>3),4)</sup>は波浪変形に及ぼす逆流の影響を表わすパラメーターとして無次元単位幅流量  $q^*$  がきわめて有効であることをすでに報告している。そこで，逆流が存在する場合の碎波水深 ( $h_b$ )<sub>c</sub> と存在しない場合の碎波水深 ( $h_b$ )<sub>nc</sub> との比  $R_h = (h_b)_c / (h_b)_{nc}$  に対する  $q^*$  の影響を検討する。図-6 は  $R_h$  と  $q^*$  の関係を沖波波形勾配別に示したものであり，たとえば沖波波形勾配が 0.006 と分類されているものには 0.006 の ±5% の範囲 (0.0057～0.0063) にあるものも含まれている。 $R_h$  は  $q^*$  の増加に伴い直線的に増加している。また，その増加率は  $H_0/L_0$  によって大きく異なり， $H_0/L_0$  が小さいほど増加率は大きく，逆流の影響が強く現われている。図中の実線はおのおのの  $H_0/L_0$  に対して最少二乗法により計算された回帰直線である。図-6 は水底勾配  $S=1/30$  の場合であり， $S=1/15, 1/50$  でも定性的には全く同一の傾

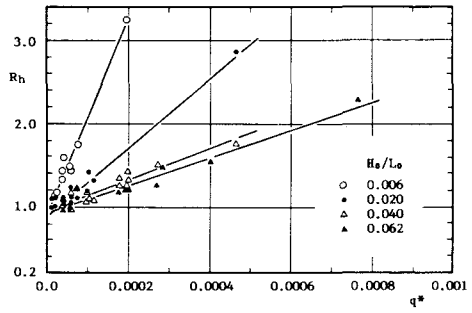


図-6 碎波水深に関する比  $R_h$  と  $q^*$  の関係 ( $S=1/30$ )

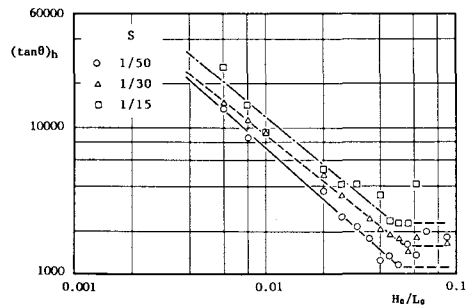


図-7  $(\tan \theta)_h$  と  $H_0/L_0$  の関係

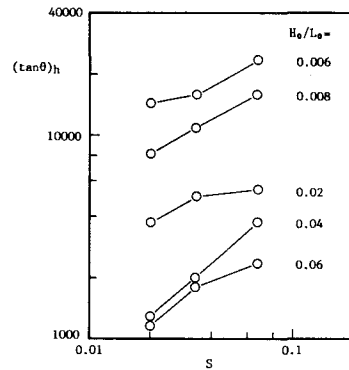


図-8  $(\tan \theta)_h$  と水底勾配  $S$  の関係

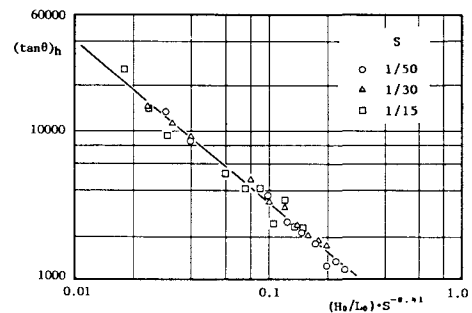


図-9  $H_0/L_0$  と  $S$  を組み合わせた量と  $(\tan \theta)_h$  の関係

向を示すが，おのおのの沖波波形勾配での増加率は水底勾配によって異なっている。つまり， $q^*$  の増加に伴う

$R_h$  の増加率は沖波波形勾配と水底勾配に依存していることがわかる。

増加率の特性を調べるため、図-6中の回帰直線の傾き  $(\tan \theta)_h$  と  $H_0/L_0$  の関係を両対数紙上で示したのが図-7である。水底勾配別に示されているが、いずれの水底勾配においても  $H_0/L_0 \leq 0.05$  の範囲では  $(\tan \theta)_h$  は  $H_0/L_0$  の増加に伴い直線的に減少している。 $H_0/L_0 > 0.05$  では若干不規則に変化しているが、ここではほぼ一定値となるものとする。以上のことより、 $(\tan \theta)_h$  は式(3)で表わすことができる。

$$(\tan \theta)_h \propto \begin{cases} (H_0/L_0)^a & H_0/L_0 \leq 0.05 \\ 0.05^a & H_0/L_0 > 0.05 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

また、図中の実線は  $H_0/L_0 \leq 0.05$  の範囲での回帰直線であり、その傾きは水底勾配にかかわらずほぼ同一であるが、 $(\tan \theta)_h$  の値は水底勾配が急であるほど大きい。 $(\tan \theta)_h$  と水底勾配との関係を  $H_0/L_0$  別にしたのが図-8である。若干のばらつきはあるが、全体的には水底勾配が大きいほど傾きも大きくなっており、以下の関係がみられる。

$$(\tan \theta)_h \propto S^b \dots\dots\dots (4)$$

結局、式(3)、(4)より、

$$(\tan \theta)_h \propto \begin{cases} (H_0/L_0)^a \cdot S^b \\ = (H_0/L_0)^a \cdot S^b & H_0/L_0 \leq 0.05 \\ (0.05)^a \cdot S^b & H_0/L_0 > 0.05 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。そこで、両対数紙上の縦軸に  $(\tan \theta)_h$ 、横軸に  $(H_0/L_0)S^c$  をとり、最小二乗法で求まる回帰直線の相関係数が最も高くなる  $c$  を求める。その結果、 $c = -0.41$  で相関係数は 0.98 となるが、 $-0.76 < c < -0.11$  の範囲でも 0.97 以上の相関係数が得られる。図-9は  $c = -0.41$  とした場合であり、 $(\tan \theta)_h$  に対する水底勾配と沖波波形勾配の影響がよく表現されている。図中の回帰直線の傾きから

$$(\tan \theta)_h \propto \begin{cases} ((H_0/L_0) \cdot S^{-0.41})^{-1.01} \\ = (H_0/L_0)^{-1.01} \cdot S^{0.41} & H_0/L_0 \leq 0.05 \\ 0.05^{-1.01} \cdot S^{0.41} & H_0/L_0 > 0.05 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

以上は  $q^*$  の増加に伴う  $R_h$  の増加率と  $H_0/L_0$ 、 $S$  の関係についてであるが、碎波波高に関する比  $R_H$  ( $R_H = (H_b)_c / (H_b)_{nc}$ )、 $(H_b)_c$ ：逆流が存在する場合の碎波波高、 $(H_b)_{nc}$ ：逆流が存在しない場合の碎波波高) と  $q^*$  の関係における増加率  $(\tan \theta)_H$  について同様な検討を行う。

図-10は水底勾配  $S=1/30$  での  $R_H$  と  $q^*$  との関係を示したものである。 $R_H$  と  $q^*$  の関係に対する  $H_0/L_0$  の影響は図-6に示した  $R_h$  と  $q^*$  の関係に対するものほど明瞭ではないが、 $H_0/L_0$  ごとの回帰直線(図中実線)を比較すると  $q^*$  に伴う  $R_H$  の増加率も  $H_0/L_0$  に依存して

いることがわかる。 $R_H$  の増加率は  $R_h$  の増加率に比べ小さいため、回帰直線の傾きは  $q^*$  の大きい所での  $R_H$  の変動に大きく影響される。そのため傾き  $(\tan \theta)_H$  と  $H_0/L_0$  あるいは  $S$  との関係は図-7あるいは図-8で示した  $(\tan \theta)_h$  に関するものに比べばらつきが大きい。そこで、傾きとして妥当な値と判断された結果のみを用いて直接  $(\tan \theta)_H$  と  $(H_0/L_0)S^{c'}$  との関係を検討すると、 $c' = -0.37$  で相関係数は 0.98 となり、また  $-0.65 \leq c' \leq -0.14$  の範囲で相関係数は 0.97 以上となる。図-11は  $c' = -0.37$  とした場合であり、図-9と同様水底勾配と沖波波形勾配の影響をよく表わしている。図中の回帰直線の傾きから、 $(\tan \theta)_H$  は以下の式で表わすことができる。

$$(\tan \theta)_H \propto \begin{cases} ((H_0/L_0) \cdot S^{-0.37})^{-0.88} \\ = (H_0/L_0)^{-0.88} \cdot S^{0.33} & H_0/L_0 \leq 0.05 \\ (0.05)^{-0.88} \cdot S^{0.33} & H_0/L_0 > 0.05 \end{cases}$$

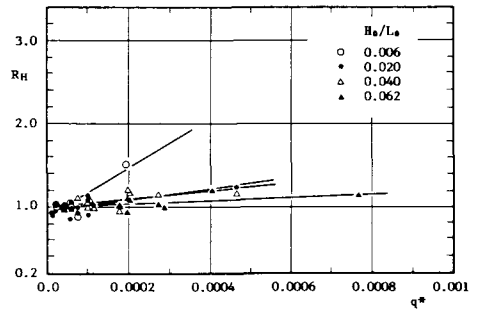


図-10 碎波波高に関する比  $R_H$  と  $q^*$  の関係 ( $S=1/30$ )

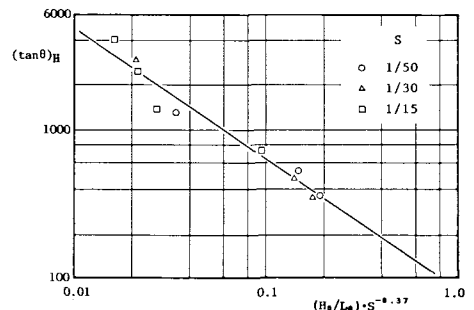


図-11  $H_0/L_0$  と  $S$  を組み合わせた量と  $(\tan \theta)_H$  の関係

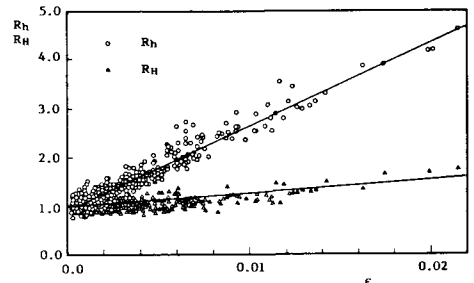


図-12  $\epsilon$  による  $R_h$ 、 $R_H$  の表示

.....(7)

以上のように、 $R_h$ ,  $R_H$  と  $q^*$  の関係における回帰直線の傾き  $(\tan \theta)_h$ ,  $(\tan \theta)_H$  と  $H_0/L_0$  および  $S$  との関係が明らかとなった。そこで、図-6 および図-10 に示される  $R_h$ ,  $R_H$  と  $q^*$  の直線的関係を  $R_h$  と  $q^* \cdot (\tan \theta)_h$  あるいは  $R_H$  と  $q^* \cdot (\tan \theta)_H$  の関係に書き替えると、 $H_0/L_0$ ,  $S$  にかかわらず 1 本の直線で表わされることになる。式(6), (7) に示すように、 $(\tan \theta)_h$  と  $(\tan \theta)_H$  とでは  $H_0/L_0$ ,  $q^*$  の乗数が若干異なる。しかし、碎波水深、碎波波高とも同一のパラメーターで表わされることが望ましい。高い相関が得られる  $c$ ,  $c'$  の範囲が比較的広いことから図-9, 図-11 の関係をあまり損なわず、さらに計算の簡便さを考慮し、以下の量を定義する。

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{q^*}{H_0/L_0} \sqrt{S} & H_0/L_0 \leq 0.05 \\ \frac{q^*}{0.05} \sqrt{S} & H_0/L_0 > 0.05 \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

$\epsilon$  を用いて全実験結果を表わすと、図-12 となり、 $R_h$ ,  $R_H$  と  $\epsilon$  の間にはきわめて明瞭な直線関係がみられ、水底勾配、沖波波形勾配の影響を含めた逆流の影響がよく表現されている。 $R_h$  に関しては  $\epsilon < 0.0004$  では  $R_h = 1$  となり  $\epsilon \geq 0.0004$  の範囲での回帰直線から

$$R_h = \begin{cases} 0.93 + 170 \epsilon & \epsilon \geq 0.0004 \\ 1.0 & \epsilon < 0.0004 \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

また  $R_H$  は

$$R_H = \begin{cases} 0.96 + 30 \epsilon & \epsilon \geq 0.0013 \\ 1.0 & \epsilon < 0.0013 \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

となり、逆流の影響が定式化される。

### 5. む す び

著者らの行った逆流が存在する斜面上での波浪の変形

に関する多くの実験の結果を再整理し、逆流が存在する場合の碎波水深および碎波波高と逆流が存在しない場合の碎波水深および碎波波高との比を求め、これらと水底勾配、沖波波形勾配、無次元単位幅流量との関係を検討した。その結果、式(8)で定義されるパラメーター  $\epsilon$  は逆流による碎波特性の変化に対する無次元単位幅流量、沖波波形勾配、水底勾配の影響をよく表わすことが明らかになった。また、図-2 に示す範囲においては、このパラメーターを用いて碎波水深、碎波波高に及ぼす逆流の影響を定式化することができた(式(9), (10))。

最後に、本研究に際し有益なご助言を賜った首藤伸夫教授(東北大学工学部)に深甚なる謝意を表します。また、実験結果の整理および解析にあたり笹本 誠技官(岩手大学工学部)、当時岩手大学大学院生 冷水康悦君と学生秋山喜弘君の多大な協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) Yu, Y. Y. : Breaking of waves by opposing current, Trans. A.G.U., Vol. 33, No. 1, pp. 39~41, 1952.
- 2) 岩垣雄一・浅野敏之・山中庸彦・永井文博：流れによる碎波に関する基礎的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 30~34, 1980.
- 3) 堺 茂樹・大塚夏彦・佐伯 浩・尾崎 晃：斜面上での碎波に及ぼす流れの影響に関する基礎的研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 138~142, 1981.
- 4) Sakai, S. and Saeki, H. : Effects of opposing current on wave transformation, Proceedings of 19th International Conference on Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 1132~1148, 1984.
- 5) 合田良実：碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp. 39~49, 1970.

(1987. 5. 20・受付)