

砕波後の波の屈折と波速に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE REFRACTION AND
WAVE CELERITY IN THE SURF ZONE

水 口 優*

By Masaru MIZUGUCHI

1. はじめに

近年、砕波後の波の挙動に対する関心がいろいろな方面で高まってきている。本論文もその一環をなすものであり、沿岸流の流速分布の理論における外力項の評価に寄与することを一つの目的として、砕波後の波の屈折現象および波向きがある場合（すなわち、沿岸流が存在する場合）の波速についての実験的研究の成果を報告するものである。

現在までのところ、平面水槽を用いたこの種の実験は皆無である。理論的な扱いにおいては、波と流れ（沿岸流）の干渉を無視して、スネルの法則と、長波理論の組み合わせを用いるのが通例である（たとえば、Longuet-Higgins¹⁾）。なお、2次元水槽を用いた砕波後の波の波速に関する実験的研究はいくつかある（たとえば、Horikawa・Kuo²⁾、佐伯・佐々木³⁾など）が、そこでは平均水位の上昇が考慮されておらず理論との比較という点で、水深の取り方に問題があろう。

2. 実験の概要

実験は東京大学工学部土木工学科所在の中型平面水槽

表-1 実験条件

ケース	1	2	3	4
周期 (sec)	0.80	0.80	0.80	0.81
沖波入射角 (deg)	10.3	10.2	20.5	20.5
波形勾配 (%)	4.4	2.7	5.2	3.3
砕波点 (cm)	41	26	45	27
平均汀線 (cm)	-18	-11	-15	-15
沿岸流速の最大値と砕波点での底面流速の振幅値との比	0.44	0.57	0.75	0.69
波高水深比 γ	1.21	1.11	0.91	1.10
一樣水深部水深 (cm)	34.2	34.8	35.0	35.2

* 正会員 工修 中央大学助教授 理工学部土木工学科

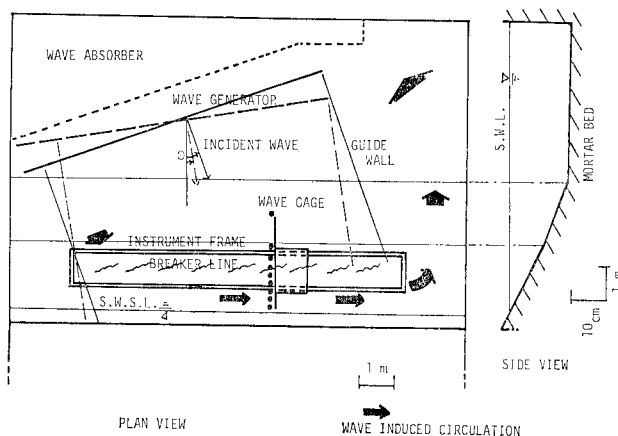
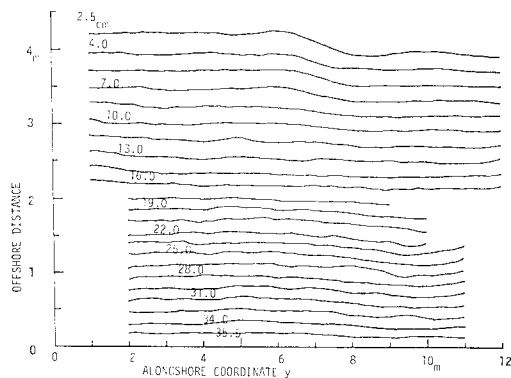


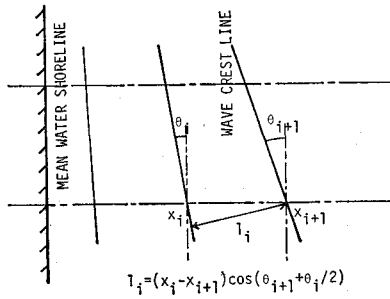
図-1 実験装置の概略

を用いて行った。実験装置の概要は図-1に示すとおりである。造波板は入射角にして0~20°まで調整可能である。底面地形はモルタル製で、図-2に示すとおりであるが、斜面勾配としては沖側（水深にして約15cm以下）で約1/15、岸側では約1/10である。なお、実験は



（図中の数字は一樣水深部（沖方向距離にして4.5m以上）底面を基準とする高度を表わす。）

図-2 実験水槽内底面地形



(θ_i, l_i は、それぞれ入射角および 0.2 秒間の波峰の伝播距離である.)

図-3 読み取り方法の説明

水口ほか⁴⁾によって報告されている沿岸流の断面分布に関するものと並行して行われたものである。

3. 測定および読み取り

実験ケースは表-1 に示す 4 つである。砕波点および平均汀線は、8 本の容量式波高計を用いて砕波帯内外の平均水位分布を測定し、それぞれ平均水位の上昇開始点および砕波帯内の平均水位を連ねた線と斜面との交点として求めた。

波向きおよび波速は、35 mm モータードライブカメラにより鉛直上方から 0.2 秒間隔でコマ取りしたものから読み取った。入射角 θ としては、砕波帯外においては波峰線と汀線のなす角度、砕波帯内においては砕波の先端（泡の前面）を連ねた線と汀線のなす角度を採用した。波速 c については、コマ取り間隔が長いために、その間の波の伝播距離 l を図-3 に示すように、汀線に垂直な線上の波峰（または、波の先端）の位置から算出した。なお、各ケース、沿岸方向一様性が実現されているとみなせる地点で 2 測線について読み取った。

4. 実験結果の整理

結果の整理にあたり従来の方法に習い、砕波後の波に対する各種の波動理論の適用性を検討する。変形しつつある波に対して、保存波の理論を適用することの便宜性には目をつぶるものとする。

まず、屈折に関しては、波動場として位相関数 $\chi (= \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \sigma t$, ここで、 \mathbf{k} : 2 次元波数ベクトル, σ : 角周波数, \mathbf{x} : 平面座標, t : 時間座標である) が定義されて、しかも \mathbf{k} および σ が (\mathbf{x}, t) に関してゆっくりと変動する関数ならば、波数 $\mathbf{k} [= (k_x, k_y)]$ は非回転となり次式が成立する⁵⁾。

$$\frac{\partial k_y}{\partial x} - \frac{\partial k_x}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

今回の実験においては、現象は沿岸方向すなわち y 方向に一様であり、いわゆる snell の法則 ($k_y = \text{const.}$) が成立することになる。屈折を伴う場合、砕波帯近傍においては必然的に沿岸流が発生し波の屈折現象もその影響を受ける。沿岸流の流速場 v が与えられたときの入射角 θ_i は次式に従うことになる⁶⁾。

$$\left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta_i\right) \frac{\sin \theta_i}{c} = \text{const.} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、沿岸流の寄与を無視して $v=0$ とおいて得られる入射角を θ_0 とすると次式を得る。

$$\theta_i - \theta_0 \approx \frac{v}{c} \tan \theta_0 \sin \theta_0 \dots\dots\dots(3)$$

式 (3) で与えられる量は、沿岸流の寄与が最も大きく出る（すなわち、 $v \sin \theta/c$ が最も大きい）CASE 3 で、最高 1.3° 程度になり得るものの、それは主として地形の非一様性に起因すると思われる実験の精度および読み取りの誤差に隠れてしまう量である。このことから以下の議論においては、屈折における沿岸流の影響は無視する。

一方、波の伝播距離も沿岸流の影響を受けて次のようになる。

$$l_i \approx l_0 \left(1 + \frac{v}{c} \sin \theta\right) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 l_i : 沿岸流の寄与を含めた波の伝播距離, l_0 : 沿岸流の寄与を無視した波の伝播距離である。この場合は、 l_0 の値そのものがかなり大きいことおよび測定データのばらつきが小さいことから、少なくとも CASE 3 においては沿岸流の影響が検出されることが期待される。

次の問題は、波速 c としていかなる理論を用いるかであるが、ここでは以下の 3 つを考える。

① 微小振幅波理論

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 g : 重力の加速度, $T (= 2\pi/\sigma)$: 周期, h : 平均水位の変化を考慮した水深, $L (= 2\pi/|k|)$: 波長である。

② 微小振幅長波理論

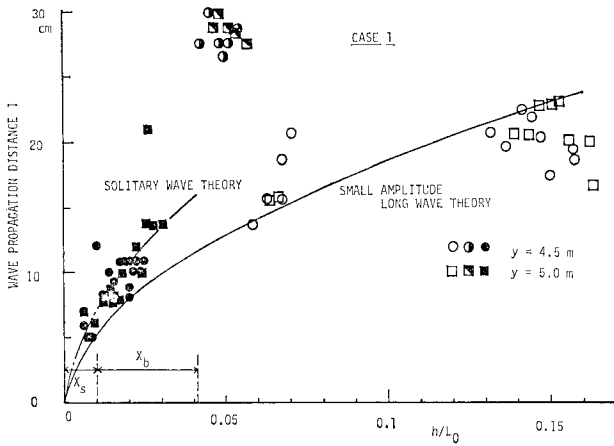
$$c = \sqrt{gh} \dots\dots\dots(6)$$

③ 有限振幅長波理論 (孤立波理論)

$$c = \sqrt{g(h+H)} \dots\dots\dots(7)$$

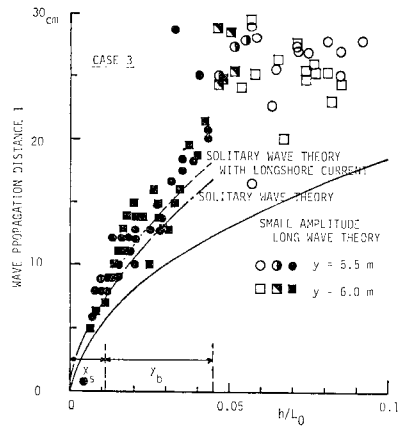
ただし、 H : 波高である。式 (7) における波高 H は、厳密には波峰高にとるべきであるが、ここではその差を無視した。

すでに述べたように砕波帯付近の現象を考える際には、水深 h に平均水位の変化を含む必要がある。ここでは、砕波帯内の set-up は考慮し、砕波帯外の set-down についてはその量も小さく無視するものとする。な



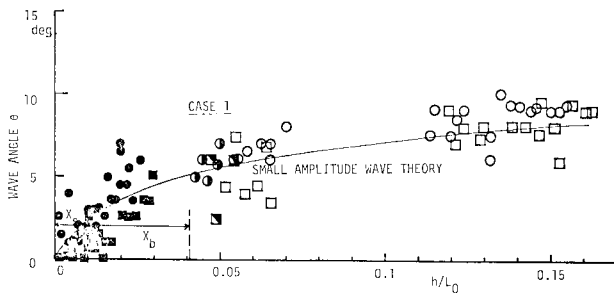
(波峰伝播距離の変化)

図-4 実験結果と各種理論の比較



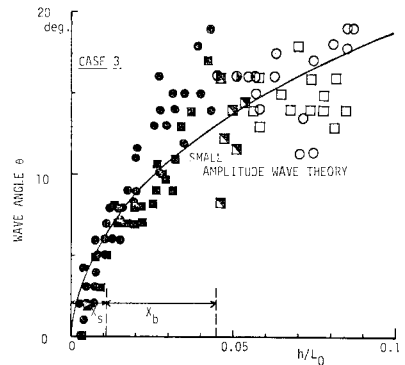
(波峰伝播距離の変化)

図-8 実験結果と各種理論の比較



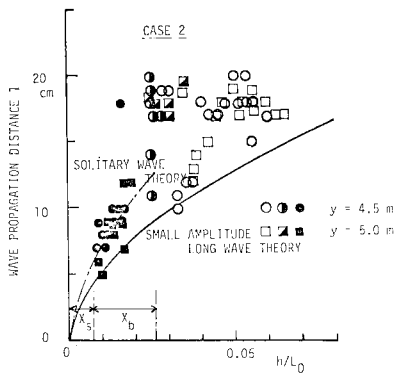
(入射角の変化)

図-5 実験結果と各種理論の比較



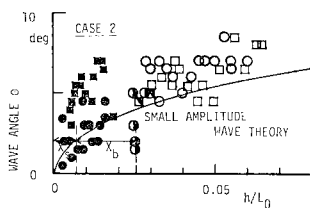
(入射角の変化)

図-9 実験結果と各種理論の比較



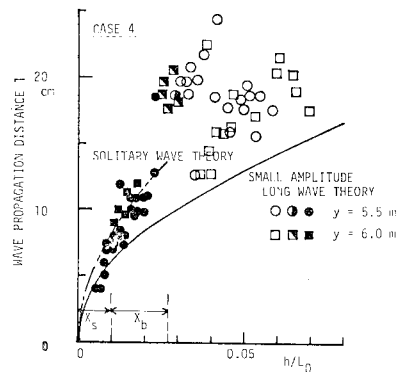
(波峰伝播距離の変化)

図-6 実験結果と各種理論の比較



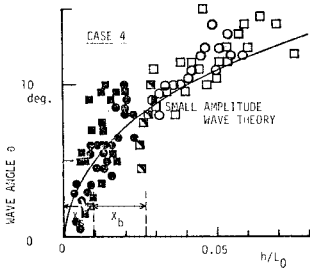
(入射角の変化)

図-7 実験結果と各種理論の比較



(波峰伝播距離の変化)

図-10 実験結果と各種理論の比較



(入射角の変化)

図-11 実験結果と各種理論の比較

お、今回の実験のように一様勾配斜面上の碎波帯内の波高は次式で表わされる⁷⁾。

$$H = r h \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 r ：波高水深比を表わす定数である。式(8)が成立する場合には、屈折に関しては式(6)、(7)は同じ結果を与える。今回の実験においても式(8)は成立し r の値は表-1に示すとおりである。

波速すなわち波の伝播距離は、上記(6)、(7)の両式による計算値と実験結果を比較検討する。沿岸流の寄与を無視した波の伝播距離 l_0 は屈折角の2次のオーダーを無視すると式(6)に対しては次式で表わされる。

$$l_0 = \sqrt{g} t (h_0 - m x_{i+1})^{1/2} - \frac{mg}{4} t^2 \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 t ：コマ取り間隔であり、水深 h は次式で表わされるものとしている。

$$h = h_0 - m x \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 m ：斜面勾配、 h_0 ：沖岸方向座標 x の原点での水深である。実際の計算にあたっては、碎波帯外では沖側の底面勾配の変化する地点を原点にとり、 m を底勾配にとった。碎波帯内では、碎波点を原点にとりなおし、 m として平均水位汀線と碎波点間の水深勾配をとることにより平均水位の変化を考慮した。

式(7)に対する波の伝播距離は、碎波帯内では、式(8)が成立することから、式(9)において重力の加速度 g を $(1+r)g$ と置き換えればよいことになる。碎波帯外における扱いについては波の理論としての式(7)の妥当性に問題があること、波高 H に対する表現が必要なことおよび碎波帯外の組織的なデータが得られていないことなどから、本論文では省略する。

5. 実験結果

横軸に相対水深比 h/L_0 (L_0 ：沖波波長) をとり、縦軸は屈折については波の入射角 θ 、波速については0.2秒間の波の伝播距離 l をとってプロットしたものが図-4~11である。図中の曲線はそれぞれに記された理論式

による計算値である。白ぬき、半分ぬりつぶし、ぬりつぶしはそれぞれ碎波前(波峰が巻く以前)、碎波途中(波峰の巻き始めから突っこみ点まで)、碎波後(突っこみ点以岸)の波を表わす。また、図中の X_s 、 X_b はそれぞれ静水汀線から平均汀線および碎波点までの距離を表わす。得られた結果を列記すれば以下ようになる。

(1) 碎波後の波の波速(定義としては波峰の伝播速度)は平均水位の上昇を考慮すれば、波と流れ(沿岸流)の干渉を無視した孤立波理論で十分近似できる。

(2) ただし、CASE 3においては碎波帯近くで実験値がやや大きくなる。すでに述べたように沿岸流の影響と考えられるために式(4)と孤立波理論に基づく扱いを組み合わせた計算を行った。なお、沿岸流速 v としては実測による水深方向平均値を用いた。結果は、図-8に示すように実験とほぼ一致した。

(3) 碎波点近傍では、碎波に伴う変形のためにかなり大きな(計算値の約2倍)波峰進行速度を示す。

(4) 碎波帯外の外側での波速は $h/L_0 < 0.1$ (L_0 ：沖波波長)の範囲では、微小振幅長波理論[式(6)]によるものよりもかなり大きく、孤立波理論[式(7)]による曲線の延長上にくるようである。

(5) 入射角 θ の変化については、碎波帯内外を通してスネルの法則と微小振幅波理論(碎波帯内では長波理論に一致する)の組み合わせがよい近似を与える。

(6) ただし、碎波進行時には入射角はほとんど変化しない。すなわち、波峰の運動は(巻き波型の)碎波時には底面の存在から独立と考えられる。

(7) そのために突っこみ点(plunging point)以浅の波の屈折については、碎波角をその点での初期値として与えることにより理論と実験の一致はさらに高まることなるう。

6. 結 論

今回の実験結果から結論されることは、碎波後の波の波速および屈折に関しては、水深に対し平均水位の上昇を考慮すれば、孤立波理論とスネルの法則もしくは波数の非回転条件によるものを用いてよいということになるう。前者の結論は非一様な斜面での不規則波による碎波となる現地観測⁹⁾の結果とも一致していて興味深い。

7. あとがき

実験結果を整理しての第1の感想は、それほど難しく考えることもないということであった。実験に際しては、辻岡和男・大嶋義隆、データの読み取り、解析に際しては、和田崇之・小宮達朗の諸氏のたいなる助けを得

た。紙面を借りて謝意を表す。本研究は、一部、文部省科学研究費（総合研究（A）、代表者 堀川清司）の補助を受けて実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) Longuet-Higgins, M.S. : Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778~6801, 1970.
- 2) Horikawa, K. and C.T. Kuo : A study on wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 69~81, 1966.
- 3) 佐伯 浩・佐々木幹夫 : 砕波後の波の変形に関する研究 (1), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 559~564, 1973.
- 4) 水口 優・大嶋義隆・堀川清司 : 沿岸流速の断面分布に

ついて, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 425~429, 1978.

- 5) たとえば, Phillips, O.M. : THE DYNAMICS OF THE UPPER OCEAN, Camb, Univ. Press. 261 p., 1969.
- 6) たとえば, Longuet-Higgins, M.S. : Recent progress in the study of longshore currents, WAVES ON BEACHES edited by R.E. Meyer, Academic Press, New York, pp. 203~248, 1972.
- 7) Bowen, A.J., D.L. Inman and V.P. Simmons : Wave set-down and set-up, Jour. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 2569~2577, 1968.
- 8) 堀田新太郎・水口 優 : 砕波後の波についての現地観測, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 151-154, 1978.
(1979.2.16・受付)