

孤立波の変形に関する研究(2)

佐伯 浩*・高木和博**・尾崎 晃***

1. 緒 論

前回の報告で、水深が直線的に変化し、水路幅が一定の場合の孤立波の変形と打ち上げ高さに関する実験結果について報告を行なった。今回は、水深が一定で、水路幅が直線的に変化する場合と、水深と水路幅が同時に直線的に変化する場合の孤立波の打ち上げ高さ、変形に関する実験について述べる。この水路幅が変化する場合の長波の変形に関しては、田中・室田・村岡・和田の実験が発表されているにすぎない。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた水槽は、両面ガラス張り鋼製で、深さ 1m、幅 0.8m、長さ 24m である。水路端には、0.8m×0.5m×1.5m の鋼製タンクを設け、それに真空ポンプが接続されている。ポンプで、タンク内に吸い上げた水塊を、タンクのパルプを急に開くことにより孤立波を

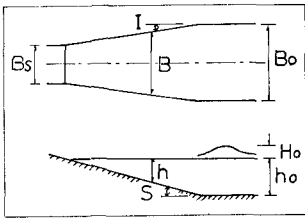


図-1

発生せしめた。このようにして発生せられた孤立波は再現性があり、タンクの口から、前面水深 h_o の 20 倍地点では、完成した孤立波が得られ、その波速・波形ともに、孤立波理論とよい一致を示した。水路床は 5mm 厚の塩ビ板を格子状鋼フレームに張ったものを用いた。側壁は、耐水ベニヤ板にビニール塗装したもので、滑らかである。波高の測定には、16mm カメラと抵抗線式波高計を用いた。実験範囲は、水深勾配 S が、 $S=1/50$ 、 $1/100$ の二種類であり、そのおのおのの勾配に対して、水路幅の変化率の半分の値 I を $I=1/15, 1/20, 1/25$ にして実験を行なった。また特別な場合として、 $S=0$ で I だけを変えて実験を行なった。用いた水深は $h_o=10, 15$,

20, 25 cm であり、 (B_s/B_o) の範囲は、 $0.2 < (B_s/B_o) < 1.0$ である。実験を行なった時の水温は 7°C であり、打ち上げ高さは、目測により求めた。水路の概略図を図-1 に示す。なお、 B_s は汀線部の水路幅である。

3. 波高の変化について

長波の波高変化に関する理論的研究は、Greenspan, 岸, 首藤, 室田らの研究結果が発表されている。また、水深・水路幅が同時に変化する場合の理論的研究は、岸, 室田・村岡・和田の研究がある。しかし、孤立波を用いた、水路幅・水深がともに変化する場合の実験は、これが初めてである。

普通長波の変形に用いる式は、Green の式と呼ばれるもので、これは本来、微小振幅長波の波高の変化を表わしたものであり、式 (1) で示される。

$$\frac{H}{H_o} = \left\{ \left(\frac{B_o}{B} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right) \right\}^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

一般に、波の波高変化式を求める場合は、エネルギー伝達の式を用いる。

$$E_o \cdot C_{G_o} \cdot B_o = E \cdot C_G \cdot B \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) において、 E は、孤立波理論の全エネルギーで次式で示される。

$$E = \frac{1}{2} \rho g h^3 \cdot \left(\frac{4H}{3h} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (3)$$

また、 C_G は群速度であるが、孤立波の場合は波速に等しいから、孤立波理論より次式を得る。

$$C = \left\{ gh \left(1 + \frac{H}{h} \right) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

式 (2), (3), (4) より、波高の変化式 (5) を得る。

$$\frac{H}{H_o} = \left\{ \left(\frac{B_o}{B} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^2 \cdot \left(\frac{1+H_o/h_o}{1+H/h} \right)^{1/2} \right\}^{2/3} \dots\dots\dots (5)$$

まず、水路幅の変化が、波高変化に及ぼす効果を調べるために、水底勾配 $S=0$ 、つまり水深一定で $[I]$ を変えて実験を行なった。水深一定の場合に、Green の式を適用すると、式 (1) は式 (6) のごとくなる。

$$\frac{H}{H_o} = \left\{ \left(\frac{B_o}{B} \right)^2 \right\}^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

沖波の相対波高 $(H_o/h_o)=0.2$ の場合を図-2 に示す。この図から、実験値は、Green の式にくらべて小さい波高を示している。この場合には、水路幅の変化率 I の値

* 正会員 北海道大学助教授工学部
 ** 正会員 東亜港湾工業 (株)
 *** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部

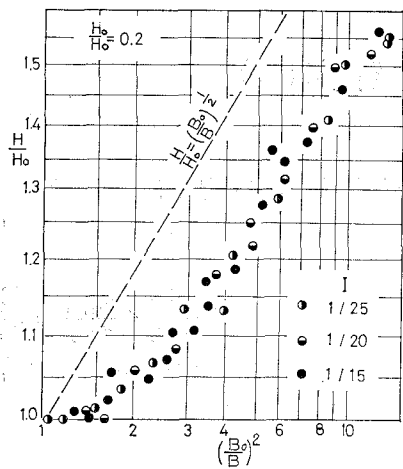


図-2

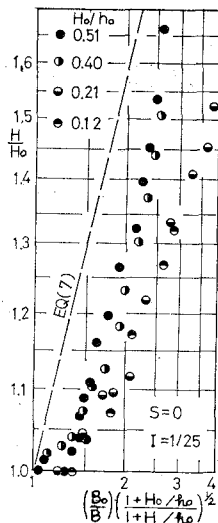


図-3 (a)

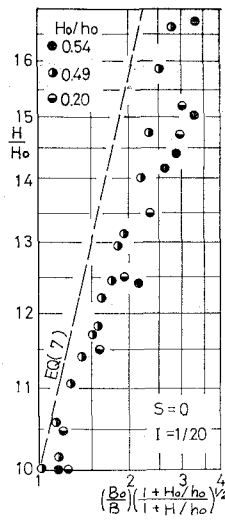


図-3 (b)

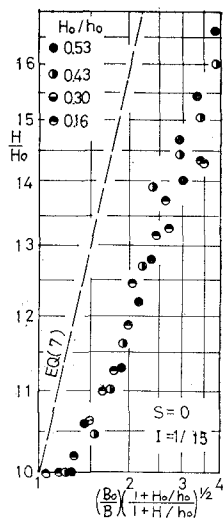


図-3 (c)

によっても明確な差は出ていない。また式(5)において、水深一定とすると、式(7)で表わされる。

$$\frac{H}{H_0} = \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right) \left(\frac{1 + H_0/h_0}{1 + H/h} \right)^{1/2} \right\}^{2/3} \dots\dots\dots (7)$$

この関係をプロットしたものが、図-3の(a), (b), (c)である。この図から、沖波相対波高(H_0/h_0)が大きくなるにつれて式(7)に近づくことがわかるが、理論値にくらべて小さい。また、変化率 $[I]$ に対する違いは明確ではない。これらの実験値は理論値よりかなり小さい値であるが、これは、側壁・底部によるエネルギー損失が予想外に大きいことを示している。孤立波の底部境界層におけるエネルギー損失の計算は Keulegan, 岩佐らによりなされているし、実験は、Daily・Stephanにより行なわれている。これらの波高減衰の Daily 実験値と、われわれが水深一定で行なった実験値とを比較した結果、わ

れわれの水路の方が、波高の減衰が大きく、底部のエネルギー損失も無視できないことが明らかとなった。

次に、水深と水路幅がともに直線的に変化する場合の実験結果の一例を示す。図-4の(a), (b)には、式(1)で示される表示をしたもので、Greenの式の適用性を調べたものである。この両図から(H_0/h_0)が大きいくほど、(H/H_0)は大きくなるが、これは図-3の場合と同じである。また、この場合には、途中から、Greenの式よりも実験値が大きくなっていることがわかる。また変化様相もGreenの式と異なっている。用いている波は、有限振幅長波と考えられるので、Greenの式より大きくなるのは当然のことである。これは、水路幅一様で、水深が直線的に変化する場合の実験値に非常によく似かよっている。

次に式(5)を検討してみる。図-5の(a), (b)は式(5)

に合うよう整理したものである。図中の破線は式(5)である。この場合も前と同様に、(H_0/h_0)が大きくなるにつれて、理論式に近づくが、その差は大きい。これは、 $I=1/25$, $1/15$ の場合も同様の結果である。以上述べてきたように、エネルギーの伝達量から求めた式は、実験値とかなり異なっている。われわれは以前に Pergrine が行なった孤立波の変形計算値と実験値を比較したが、波形の変化は似ているが、波高はかなり実験値と異なっていた。よって、正確に波高の変化を求めるには、底部・側壁摩擦の損失機構、底面・側面による反射等を考慮せねばならない。

4. 碎波点の波高(H_B)と水深(h_B)

孤立波理論の碎波理論は、すでに多くの人により研究されている。また水深が直線的に

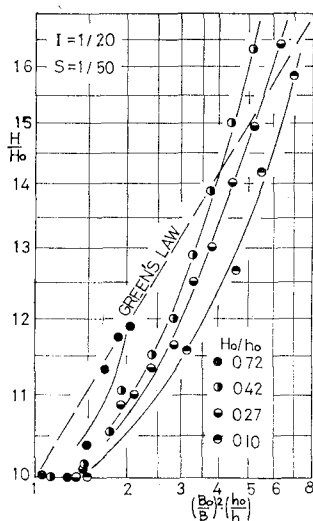


図-4 (a)

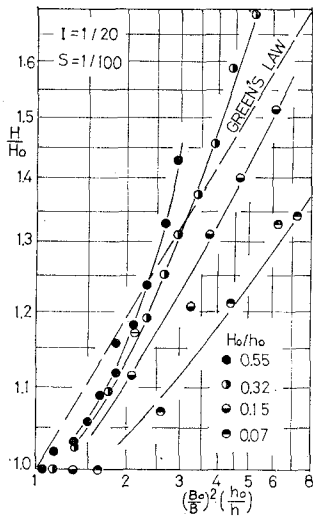


図-4 (b)

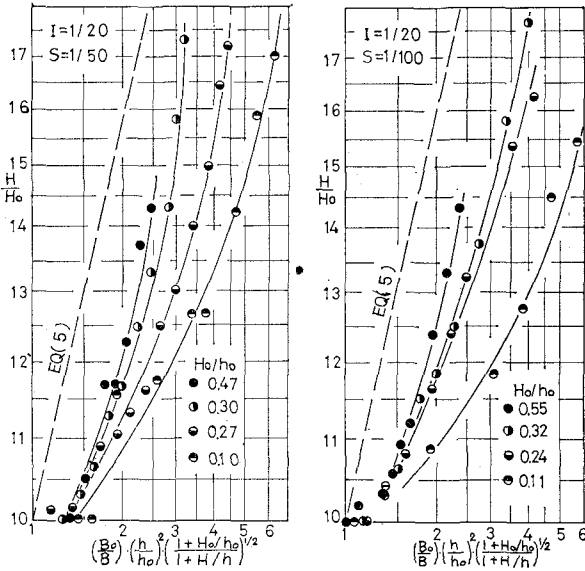


図-5 (a)

図-5 (b)

変化する場合の砕波限界についても, Ippen・Kulin, 岸・佐伯・加藤, 花安・佐伯・尾崎により実験されている。これらの結果から, (H_B/h_B) は $[S]$ と (H_0/h_0) により決まり, $S < 1/50$ の範囲では, $(H_B/h_B) = f(S)$ と近似できることがわかっている。図-6, 図-7 は $S=1/100$, $1/50$ の場合の砕波水深 (h_B/h_0) を示したものである。

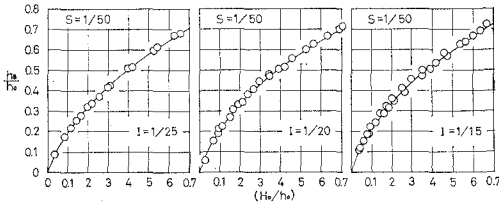


図-6

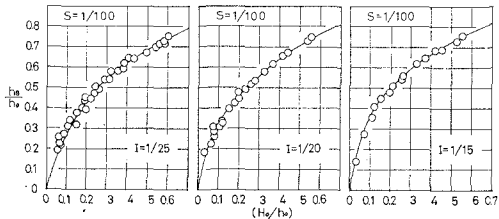


図-7

この $S=1/50$ の場合をまとめたものが, 図-8 である。この図中の $I=0$ の曲線は花安らにより求められたものである。この図から, 砕波水深は, I の値によっては, ほとんど変わらないようである。つまり, 水路幅が変化しても, 砕波の位置は, (H_0/h_0) が同じであれば, 同じ位置で砕波することを意味している。また $S=1/100$ の場合は, I の値によって (h_B/h_0) はかなり異なり, I が大きくなるにつれて, (h_B/h_0) は大きくなる。また, S

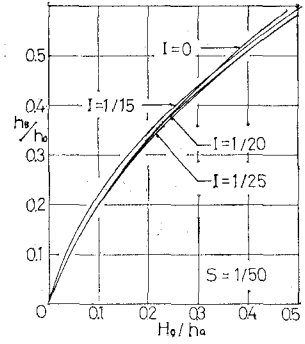


図-8

$=1/50$ と $1/100$ を比較すると, $1/100$ の方が $1/50$ より (h_B/h_0) が大きい。すなわち, 砕波点の位置が, $S=1/100$ の方が沖側であることを示している。図-9 には, $S=1/50$ の場合の砕波波高 (H_B/H_0) の実験値をまとめたものである。同一の勾配 $[S]$ でも, I が大きくなるにつれて, 砕波波高も大きくなる。これは $S=$

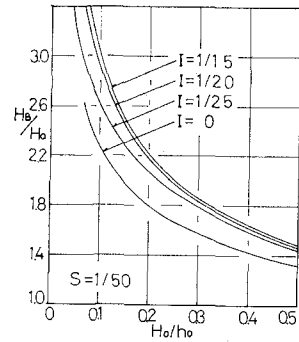


図-9

$1/100$ の場合も同じである。また, $S=1/50$ と $1/100$ とを比較すると, $S=1/50$ の方が大きい (H_B/H_0) を示す。

式 (2), (3) と $C = \sqrt{gh}$ と $(H_B/h_B) = K$ より, 次式を得る。

$$\frac{H_B}{H_0} = K^{4/7} \cdot \left\{ \left(\frac{H_0}{h_0} \right) \left(\frac{B_0}{B} \right)^{1/2} \right\}^{-4/7} \dots\dots (8)$$

$$\frac{h_B}{h_0} = K^{-3/7} \cdot \left\{ \left(\frac{H_0}{h_0} \right) \cdot \left(\frac{B_0}{B} \right)^{2/3} \right\}^{3/7} \dots\dots (9)$$

式 (9) で整理したものを図-10 の (a), (b) に示す。また式 (8) で整理したものを図-11 の (a), (b) に示す。図-10 の理論勾配は $(3/7)$ であり, 図-11 の理論勾配は, $(-4/7)$ であるが, 両実験値の勾配とも, 理論勾配よりも小さい値を示している。しかし, この表示を用いると, $[I]$ の値に関係なく一本の直線で表わされるようである。図-10 においては, $S=1/100$ の方が, h_B/h_0 の値が大きい。また, 図-10, 図-11 ともに I に無関係にみえるが, この I は, 横軸の B_B の中に含ま

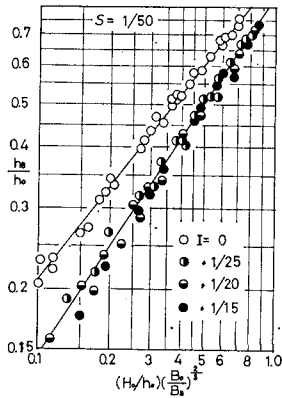


図-10 (a)

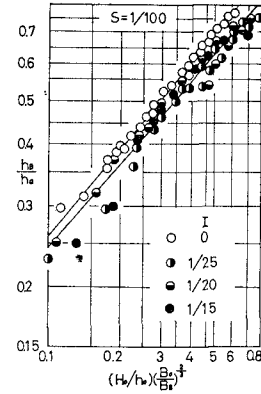


図-10 (b)

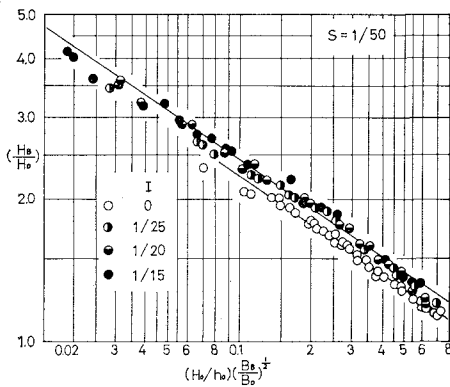


図-11 (a)

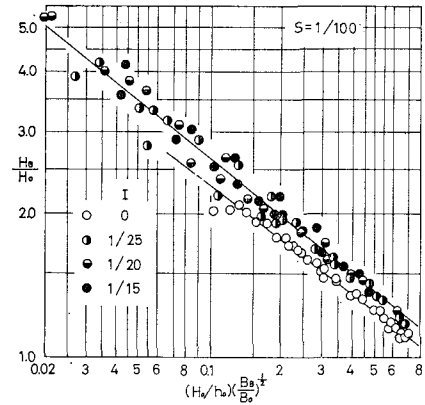


図-11 (b)

れているわけである。

5. 孤立波の打ち上げ高さ

水路幅が一定で、水底勾配 $[S]$ が直線的に変化する場合は、dry bed 上への孤立波の打ち上げ高さの理論的研究は、Freeman, Le Méhauté により行なわれた。またその実験的な裏付けは、岩垣・井上・大堀、岸・佐伯によりなされている。しかし、Le Méhauté 等の理論においては、dry bed 上の摩擦係数の見積りに問題が残るし、また計算も繁雑である。この水路幅一定の場合の孤

立波の打ち上げ高さの実験は、Hall・Watts ($S=1/1, 1/2.1, 1/2.4, 1/5.7, 1/11.4$), Kaplan ($S=1/30, 1/60$), 岸・佐伯・加藤 ($S=1/10, 1/15, 1/20, 1/30$), 花安・佐伯・尾崎 ($S=1/50, 1/75, 1/100$) によって行なわれ、十分な実験データが得られている。また実験式も得られ、その係数も決定されている。実際の津波の打ち上げ高さとの関係については、Kaplan が 1946 年のチリ地震津波が Hawaii を襲った時のデータから、実験値とよく一致していることを示しているし、わが国でも佐々木が昭和 8 年の津波のデータと Kaplan の実験値がよく一致して

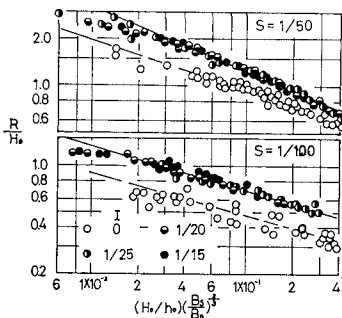


図-12

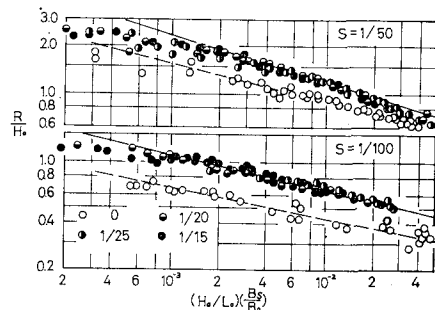


図-13

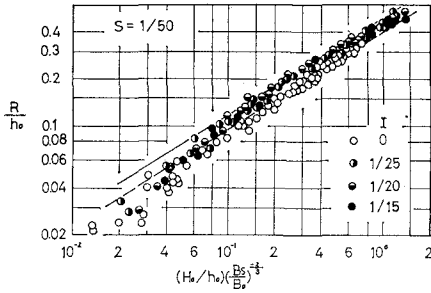


図-14 (a)

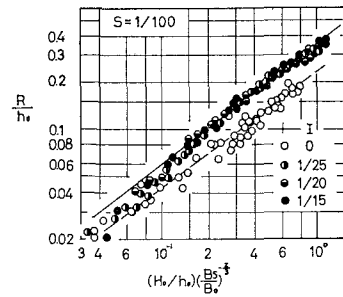


図-14 (b)

いることを報告している。今回は、水路幅と水深がともに直線的に変化する場合の打ち上げ高さの実験である。

図-12 に (R/H_0) と $(H_0/h_0) \times (B_0/B_0)^{2/3}$ との関係を示したものである。 $I=0$ のデータは花安らにより得られたものである。この図から、 $I=1/25, 1/20, 1/15$ の (R/H_0) は $I=0$ のそれに較べて大きい値を示し、また、底勾配 S が大きいほど打ち上げ高さも大きくなる。また同じ $[S]$ でも I が大きいほど、打ち上げ高さも大きくなるようである。図-13, 図-14 の場合も、図-12 の性質と同じである。図-13 中の L_0 は、Munk が求めた、孤立波の有効波長である。以上に述べた打ち上げ高さの性質は、砕波点の波高と砕波点の位置に関係している。 $S=1/50$ の場合を例にとると、図-8 より、 I の値に (h_B/h_0) は関係してない。よって (H_0/h_0) が同じであれば、砕波水深は同じである。また図-9 より、同じ (H_0/h_0) に対して、 I が大きいほど、 (H_B/H_0) が大きくなる。しかし $(H_0/h_0) > 0.2$ では、 $I=0$ を除いて、

ほぼ同じ値であるから、打ち上げ高さ $I=0$ と他の I とは差が大きく、 $I=1/25, 1/20, 1/15$ の場合はあまり差がない。 $S=1/100$ の場合もまったく同様である。

参考文献

- 1) Camfield, F.E. & Steet, R.L. : Shoaling of Solitary Waves on Small Slopes, Proc. A.S.C.E. Feb. (1969).
- 2) 岩垣・井上・大堀 : 法面上の波の遡上機構に関する実験的研究, 第 21 回土木学会年次学術講演会 (1966).
- 3) Kishi, T. : Transformation, Breaking and Run-up of a Long Wave of a Finite Height, Eighth Conf. Coastal Eng. (1962).
- 4) Kishi, T. & Saeki, H. : The Shoaling, Breaking and Run-up of the Solitary Wave on Impermeable Slope, Proc. Tenth Conf. Coastal Eng. (1966).
- 5) 岸・佐伯・加藤 : 一様勾配斜面上における孤立波の変形, 砕波および Run-up, 第 21 回土木学会年次学術講演会 (1966).
- 6) 花安・佐伯・尾崎 : 斜面上における孤立波の変形に関する研究 (I), 第 17 回海岸工学講演会論文集 (1970).
- 7) 室田・村岡・和田 : 長波の局所変形に関する実験的研究, 第 8 回海岸工学講演会講演集 (1961).