

浅海における波と地形

首 藤 伸 夫*・森 龍 三**

1. 序

浅い海に波が入ってきた場合、波は、地形、波の非線型性など種々の効果によって変形する。このような浅い海での波の変形を扱う方法にはいくつかのものが、次のような特徴によって大別される。

- (i) 海底からの反射を無視する。
- (ii) 波高が大きくなった事の効果をどの程度取り入れるか。
- (iii) 解析的表現が可能か否か。

反射の有無は、波と地形の相対的な関係を示すものであるが、従来の浅水変形の計算は反射を無視するのが普通であった。この反射を無視するという仮定のもとに得られた浅水変形理論のうち最も単純な形をし、しかも適合度の良いものを採用する。ここではクノイド波理論と呼び、波高 H 、周期 T 、水深 d を使って定義したアーセル数 gHT^2/d^2 が 40 より大きい所に適するものである¹⁾。

反射が大きくなったとき、解析解が容易にもとまるのは線形長波である。いま、沖の方は一定水深 (d_3) であり、それが一様勾配の斜面によって陸側の一定水深部 (d_1) に接続している海底を考える。ここで d_3 と d_1 の関係は $d_3 > d_1$ とする。

沖から入射した波の一部は陸側部へと通過し、一部は斜面により沖側へと反射される。一定水深部での線形長波および一様勾配斜面でのその一般解を水深変化点でつないで近似解をうることができる²⁾。このように容易に得られる解析解を実験値と比較して、浅水変形の計算にとりこむべき因子、さらに、おのおのの理論の適合範囲を決める際に使用するパラメータを明らかにする。

2. 浅水変形理論

(1) クノイドの浅水変形

ここで言うクノイド波理論とは、文献¹⁾によって既に得られた理論解である。ここでは、理論の概略と用いる理論式のみを提示する。

波高の有限性、波頂曲率の効果、水深変化の効果をも同時に含んでいる式が角谷によって与えられているが、実際には水路幅の効果を含んでいる方がより良いはずである。

クノイド波理論においては、水路幅が変化する効果をもとり入れてあり、実際の浅水変形の計算に必要とされる効果を包含しているものである。また、波は周期波として、基本波形は常に保持されソリトンの分裂のようなことは生じないものとし、かつ底面および側面での摩擦を無視するという仮定に立っている。なお、海底地形と波の相対的關係において、海底からの反射を無視できる範囲に適用できる理論である。

用いる理論式は、波高、水深、幅、周期、重力加速度をそれぞれ、 H 、 d 、 b 、 T 、 g とすると、

$$Hd^{5/2}b[gHT^2/d^2 - 2\sqrt{3}] = \text{const.}$$

で表わされる。本論文では、実験において幅 b を一定に行なったので、結極幅を単位幅として次式を用いた。

$$Hd^{5/2}[gHT^2/d^2 - 2\sqrt{3}] = \text{const.}$$

$gHT^2/d^2 = 100$ の所の波高 H_{100} を基準とした理論曲線を図-1 に示す。

(2) 微小振幅長波の浅水変形

線型長波を用いて得られる解として、従来よりよく知られている Green の定理がある。これは、斜面上で波が一方方向にのみ進む進行波だけを扱っており、海底からの反射がないという仮定に立つものである。しかし、水深が変化する場合、斜面上では入射波と反射波が共に存在し部分重複波となる。

そこで、微小振幅長波理論を用いて、水深の変化と

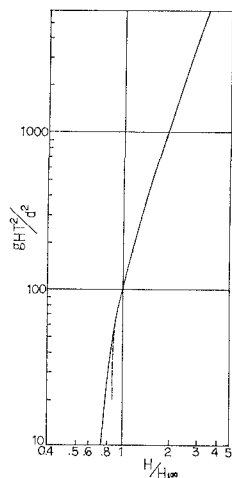


図-1 クノイド波の浅水変形

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 フジタ工業(株) 広島支店土木部工事課

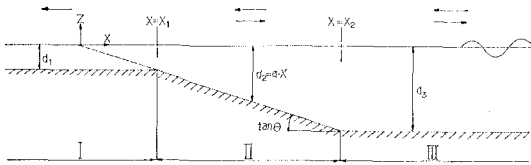


図-2 海底地形

海底からの反射の影響を考慮した場合の解析解を以下に示す。

図-2 のような海底地形を考え、領域を (I), (II), (III) の三つに分割する。波は (III) から (I) へと伝播する。(II) と (III) は、反射波と入射波が共に存在し、波高は両者の和で与えられる。(I) の領域は透過波だけとなる。そこで、各領域について解を求め、 $x=x_1$, $x=x_2$ の地点で解を接続することによって、(II) の領域での波高の変化を求めることができる。得られた理論式は、

$$|\eta_2| = A \sqrt{\frac{x_2}{x}} \sqrt{1 + \frac{1}{4n\sqrt{x_1}} \sin 4n(\sqrt{x} - \sqrt{x_1})}$$

である。ここで、 $|\eta_2|$ は (II) の領域での波高、 A は入射波高、 n は $n = \omega / \sqrt{ga}$ 、 ω は角周波数、 a は斜面の勾配である。 $d_3 = 40$ cm, 勾配 $1/20$, $T = 10.0, 5.0, 3.33, 2.0$ 秒として、入射波高が 1 cm の場合の (II) の領域での波高変化の理論曲線を図-3 に示す。図中の丸印が入射波高である。

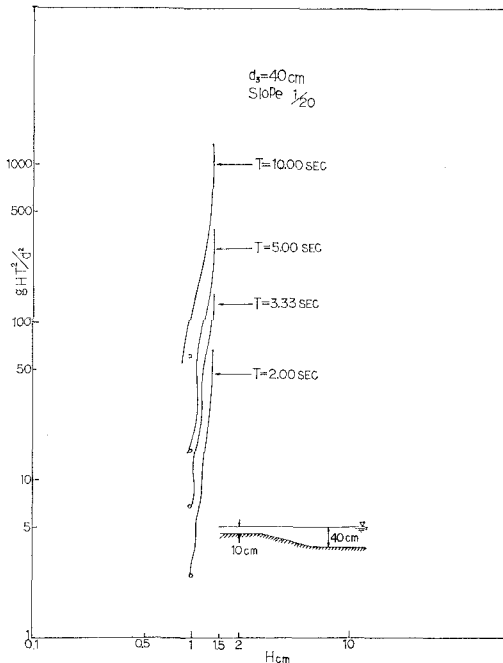


図-3 反射波を考慮した線型長波の浅水変形

3. 実験方法と実験結果

実験は中央大学理工学部水理実験室で行なった。使用

した水槽は、長さ 50 m, 幅、高さ、おののおの 1 m である。水槽のほぼ中央に高さ一定 (30 cm) で勾配が $1/7, 1/20, 1/30$ の台形斜面を設置した。水深を 40 cm, 45 cm, 50 cm として、各水深ごとに周期を 10 秒から 1.0 秒まで変化させた。実験中の入射波高は、約 1 cm から 10 cm 程度であった。

波高の測定は、沖側で入射波波高と反射率を測定し、斜面上においては等間隔に測定点を設けた。また、斜面を透過した後の一定水深での波高も測定したが、本論文では省略した。

次に実験値の一部を紹介する。

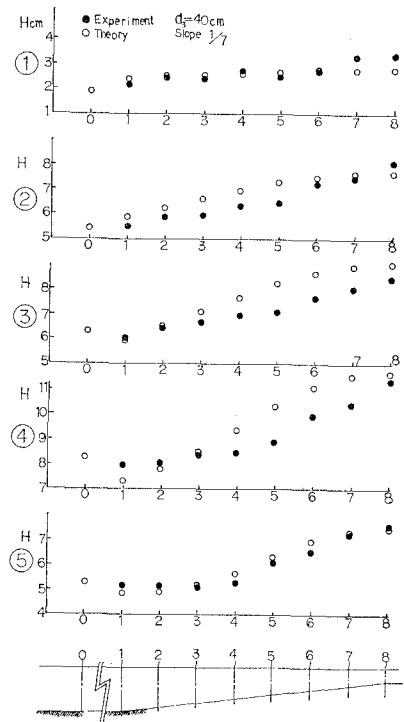


図-4 斜面上での波高分布

図-4 は、斜面上での波高分布を示し、横軸に測定点番号をとり、縦軸に波高 H をとった。図中の黒丸印が実験値であり、白抜きの丸印が反射波を考慮した理論値である。横軸の測定点番号で 0 というのは入射波を測定した地点を表わしている。図-4 から、斜面上では反射の影響を無視できないことがわかる。なお表-1 にデータの詳細を示しておいた。表中の平均相対誤差については後で述べる。

図-5 は、横軸に波高 H 、縦軸にアーセル数をとった。図中の曲線は、左から 2 番目までが微小振幅長波理論による理論曲線であり、残り 2 つがクノイド波の理論曲線である。

図-6 は、Healy の方法によって算出した反射率 K_r を縦軸にとり、横軸に斜面の底辺長 l と入射波の波長 L

表-1 実験の諸条件

	周期 (sec)	入射波波高 (cm)	反射率 K_r (%)	波形勾配	平均相対誤 差 (%)
①	10.0	1.94	26.0	0.98×10^{-3}	9.8
②	6.67	5.40	22.1	4.09×10^{-3}	4.9
③	5.00	6.33	14.2	6.39×10^{-3}	6.0
④	4.00	8.26	8.3	10.43×10^{-3}	7.1
⑤	3.33	5.27	6.6	7.99×10^{-3}	3.8

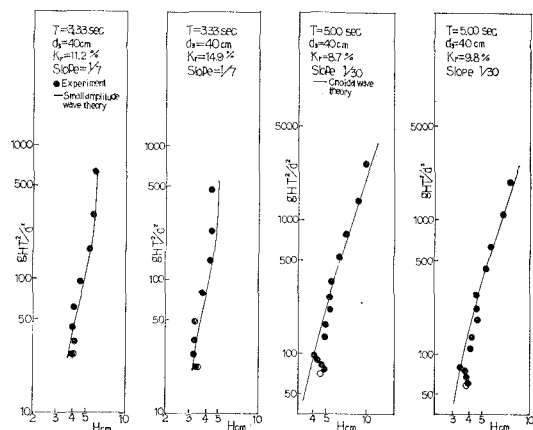


図-5 斜面上での理論値と実験値

の比をとったものである。斜面の勾配は 1/7 である。

図-7 は、図-6 と同様であるが、斜面の勾配が 1/30 である。なお、図中の曲線は、微小振幅長波理論から得られる曲線である。

4. パラメータの決定

斜面上での波高に関して、理論値と実験値を比較した図-5 について次のことがわかる。

まず、微小振幅長波理論によく合う実験値というもの、入射波のアーセル数が小さい場合であり、クノイド波理論に関しては、アーセル数が大きい場合である。そして、反射率の値に着目すると、今度は、前者に合うのは反射率が大きい場合で、後者に合うのは反射率が小さい場合である。さらに、斜面上の波高分布の傾向を見ても反射波の影響が無視できない場合とできる場合とは、著しい相違がある。

以上のことより、理論の適合領域を区分するための目安としてアーセル数を用いることにする。長波としての波高の有限性、分散性を示す無次元数で、最初の序にあげた (ii) の項目を示す数として好適なものである。

次に反射率について考える。

反射率は波と地形の相対的關係を示すものであるが、これは結果として得られるものであるから取り扱いにくいパラメータである。

線型長波理論⁹⁾によると、反射率の上限は斜面長 l と

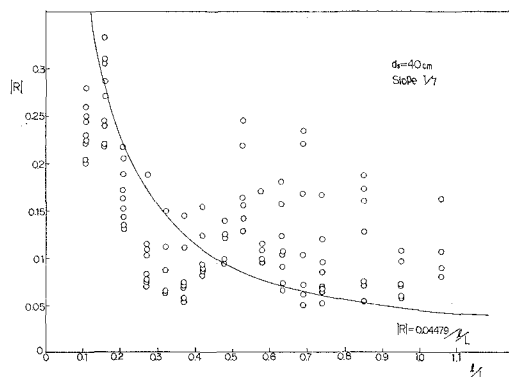


図-6 線型長波による反射率

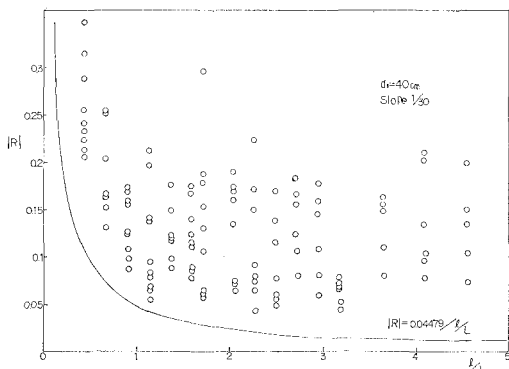


図-7 線型長波による反射率

波長 l との比の関係として与えられる。図-6、図-7 がそれである。したがって l/L をパラメータとして採用することも可能であろう。

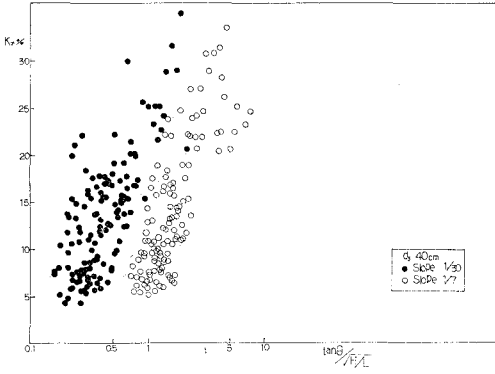
ところが、斜面勾配が急な 1/7 の時 (図-6) はともかく、緩やかな場合には図-7 に示す程度に理論値から大きく離れてしまう。

そこで、反射率には波形勾配 H/L が効いていること、また、現地の条件下では斜面の底辺長 l の決定が曖昧であることの理由により、 l/L はパラメータとして不適当であると判断した。

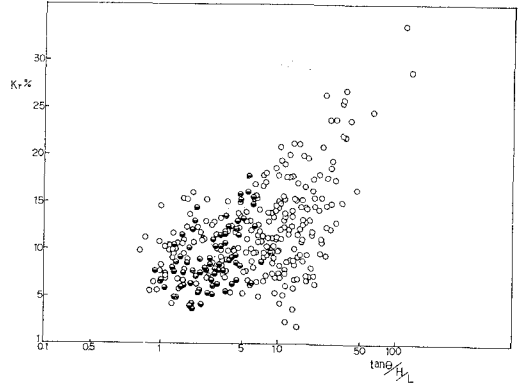
反射率を表すのに、イリバーレン数を使用する方法がある。海岸構造物からの反射がこれによって明らかになっているので⁴⁾、これによったのが図-8 である。図中黒丸印が勾配 1/30 で、白抜き丸印が 1/7 を示している。共に沖側の水深 d_3 は同じである。

ところが、緩勾配と急勾配とが明確に分割されすぎ、不適当である。

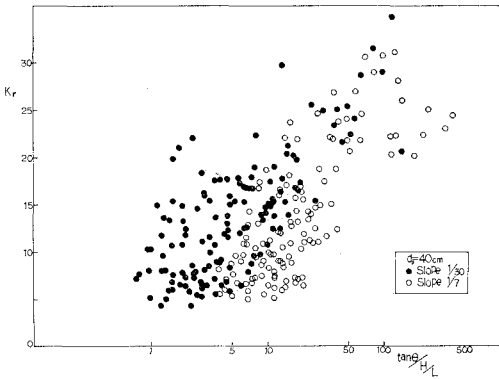
ついで、線型長波の斜面上での波高増幅を示すパラメータ⁵⁾として導入された斜面の勾配 $\tan \theta$ と波型勾配 H/L との比、と反射率を図-9 に示す。先程のイリバーレン数を用いた場合と異なる点は、緩急勾配間のパラツキが少なくなったのがわかる。そこで、この値をパラ



図—8 反射率のイリパーレン数による表示



図—10 反射率のクノイド波における上限



図—9 反射率の斜面・波形勾配比による表示

メータとして採用する。

5. 理論の適合範囲の決定

先に定めたパラメータを用いて、理論の適合領域の区分の決定を行なう。

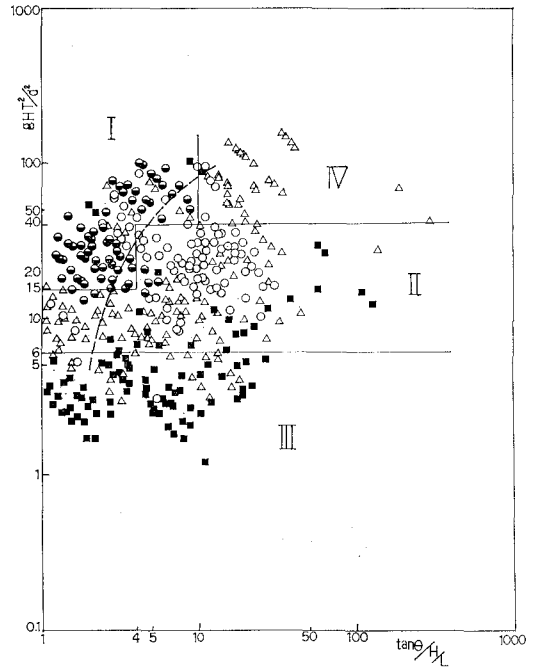
方法として、二つの方法を用いた。

(1) 目視による方法

これは、縦軸にアーセル数、横軸に波高をとり、実験における入射波波高および斜面上での波高をプロットしたグラフについて、線型長波理論曲線と、クノイド波理論曲線の両方の曲線を重ねて、比較し判定する方法である。そして、主に波高増幅の傾向に重点を置いて、なおかつ値の上でも良い一致をみるものを、その理論にあってるとみなすやり方である。

(2) 平均相対誤差による方法

第2の方法は、 $|(理論値)-(実験値)| \div (理論値)$ という値を斜面上の全測点について求め、全測点について平均した値によって判断する方法である。先に述べた目視による方法より、この方がより客観的でありうるが、一点でも大きく違う測定点があると影響を受けやすいので、両方法を採用することによっておのおのの欠点をおぎなえるものと考えられる。また、平均相対誤差が 10



図—11 理論適合領域の区分

% 以下のときよく合致するものとした。なお、グラフ中で、プロットした一つの印が実験の 1 ケースである。アーセル数や勾配比を与える水深 d 、波高 H 、波長 L は入射波のそれを用いてある。

図—10 は、2つの判定方法によって判別したものである。白抜きの丸印は反射を考慮した理論にあう実験値を表わし、丸印の内半分を黒く塗った印はクノイド波理論にあう実験値である。そして、縦軸に反射率を、横軸に勾配比をとった。図—10 から求まる事柄は、クノイド波理論にあう実験値の反射率がほぼ 10% 以下にしていることである。

図—11 が分類の結果である。図中の破線が先に述べ

た反射率 10% を示すものである。領域 (I) はクノイド波理論の適用域で、反射率 10% を示す破線の左側にある。領域 (II) は、反射波を考えに入れた線型長波理論の領域である。領域 (III) は長波理論は適用せず、表面波理論を使用すべき所、領域 (IV) は反射を考えに入れた非線型長波理論によるべき領域である。

6. 結 論

海の変形の過程を説明するのに、従来からいくつかの理論があるが、それぞれの適用範囲を数学的には決定されえず不明のままであった。

本研究では、多くの実験を通じて各理論の適用範囲を求めることができた。以下に各理論の適合範囲をまとめると、

クノイド波理論

$$40 \leq gHT^2/d^2, \tan \theta/H/L \leq 10$$

$$15 \leq gHT^2/d^2 \leq 40, \tan \theta/H/L \leq 4$$

線型長波理論

$$15 \leq gHT^2/d^2 \leq 40, 4 \leq \tan \theta/H/L$$

$$6 \leq gHT^2/d^2 \leq 15, 1 \leq \tan \theta/H/L$$

表面波理論

$$gHT^2/d^2 \leq 6$$

反射を考慮した非線型長波理論

$$40 \leq gHT^2/d^2, 10 \leq \tan \theta/H/L$$

となる。

謝辞

当時中央大学生であった、小林正巳、小池俊一、青木利光の諸君に、実験および資料解析に協力していただいた。ここに記して謝意を表する。

なお、本研究は、文部省科学研究費（研究代表者 東京大学 堀川清司教授）で行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 首藤伸夫：非線型長波の変形，第21回海岸工学講演会論文集，昭49.
- 2) 首藤伸夫・森 龍三：斜面上を通過する長波の変形，第31回年次学術講演概要集，昭51.
- 3) 首藤伸夫・森 龍三：斜面上を通過する長波の反射率，第3回関東支部年次研究発表会講演概要集，昭51.
- 4) Battjes: Surf similarity, Proc. 14th Conf. Coastal Engg., 1974.
- 5) 首藤伸夫：津波の計算における非線項と分散項の重要性，第23回海岸工学講演会論文集，昭51.