

斜面上の波の水粒子速度の鉛直分布について

岩 垣 雄 一*・酒 井 哲 郎**・川 島 毅***

1. ま え が き

水深の減少にともなう波の変形については、いままでに多くの研究が行なわれ、波高、波速、波長については、有限振幅波のエネルギー・フラックスが一定と仮定して求められる理論曲線は、実験結果とよく一致することがわかっている¹⁾。しかしながら、波による水粒子速度については、海中構造物に働く波力あるいは底質の浮遊・拡散などに対してきわめて重要な要因であるにもかかわらず、水深減少にともなうどのように変化するかについて、いままでほとんど研究が行なわれていない。

この研究は、こうした理由から水深の減少によって変形し砕波にいたる波の水粒子速度場の変化を明らかにしようとしたものである。すなわち、1/20 の一様勾配斜面上を進行し砕波するまでの波の峯と谷の位相における水平方向水粒子速度の鉛直分布を、水素気泡をトレーサとする方法によって測定し、その結果を波高および波形の変化と関連づけて検討するとともに、水平床の有限振幅波理論による理論値とも比較して、斜面上の波の水粒子速度場を解明する手がかりを得ようとしたものである。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験には京都大学工学部土木工学教室の波浪実験水槽を用いた。水槽の長さは 30 m、幅は 50 cm、高さは 75 cm である。水槽の一端に不規則波を含めた各種の波を発生しうる電気油圧式造波機が設置されている。ただし、この実験ではピストン型造波板によって規則波のみを発生させた。水槽のうち造波機から 19 m は、両側面がガラスばりになっており、勾配 1/20、長さ 8 m の斜面を造波機から約 10 m はなして設置した。波高計としては電気抵抗線式波高計を用い、一様水深部に 2 台、斜面上に砕波点を含めて 4 台設置した。水平方向水粒子速度の鉛直分布の測定は、水素気泡をトレーサとする方法によった²⁾。水粒子速度の測定点は、6 つの波高計設置位置のうち一様水深部の造波機に近い方のものを除いた 5 点とした。なお測定点が多く、実験ケースによってそ

の位置を変える必要があるため、陰極線の下端は直接斜面上に固定せず、移動可能な“コ”の字形のわくに張ったものを用いた。そのため、わくの下端が底面付近の水粒子速度場を乱すことになった。

(2) 実験方法

斜面上の 4 つの測定点のうち、最深部のものは斜面先端に設置したが、そののち砕波点付近をさらにくわしく調べるため、斜面上の 4 つの測定点を砕波点から沖約 1 m の間に集中して実験を行なった。陰極線のパルス電圧は、測定点を波の峯あるいは谷が通過する直前に加えはじめ、通過直後に撮影した。6 台の波高計の水位記録はペン書きオシログラフによって行なったが、同時に、カメラのシャッターをおした瞬間をストロボ接点を用いて記録した。各測定点での撮影は、いくつかの波について行ない、その間、波形記録は 6 台の波高計でのものすべてについて記録し、撮影終了後一度造波機をとめてからふたたび次の測定点での撮影を行なった。

水粒子速度を求めるために、波の峯あるいは谷が測定点を通過した瞬間に発生させた気泡列のどれを選択するかについては、いろいろの考え方があるが、ここでは撮影されたフィルム上の気泡列群のうち間隔がもっとも大きい 2 つの気泡列を選んで水平方向水粒子速度を求めた。

一様水深部の水深はつねに 25.5 cm とした。斜面の勾配は 1/20 で長さが 8 m であるから、斜面最後端は水槽底面から 40 cm の高さにあり、したがって斜面上で砕けた波は遡上したのちもど流れとなって逆流することになる。陰極線に加えるパルス電圧のパルスくりかえし周期およびパルス幅は、それぞれつねに 20 m sec および 10 m sec とした。実験は表-1 に示すように、斜面上の

表-1 実験条件

case	h_5 (cm)	T (sec)	H_5 (cm)	case	h_5 (cm)	T (sec)	H_5 (cm)
1-1	25.5	0.8	4.2	III-I	25.5	1.0	6.3
3-1	25.5	1.0	6.3	I-II	25.5	1.5	4.4
1-2	25.5	1.5	4.5	II-III	25.5	1.5	5.5
3-2	25.5	1.5	6.3	III-III	25.5	1.5	6.0
1-3	25.5	2.0	4.7	I-III	25.5	2.0	4.4
3-3	25.5	2.0	6.0	II-III	25.5	2.0	5.5
I-I	25.5	0.9	4.9	III-III	25.5	2.0	6.5
II-I	25.5	1.0	6.1				

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 運輸省第2港湾建設局

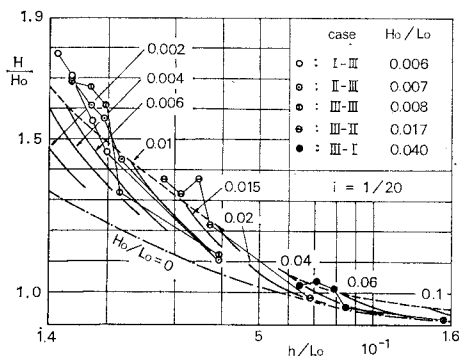


図-1 波高変化

測定点の間隔を粗くとした場合には、1—1 から 3—3 の 6 ケースについて行ない、4 つの測定点を砕波点付近に集中させた場合には、I—I から III—III の 9 ケースについて行なった。ただし添字の 5 から 1 までの数字は一樣水深部から砕波点にいたる測定点を示すものである。

3. 実験結果および考察

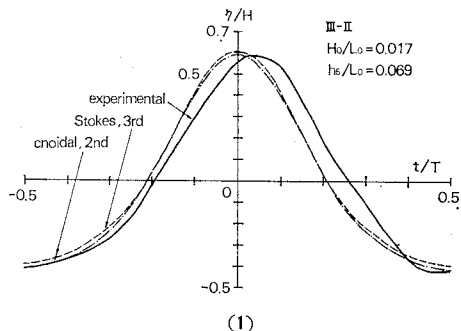
表-1 に示した 15 の実験ケースのうち、ここでは斜面上の 4 つの測定点を砕波点に集中させた I—III, II—III, III—III, III—II, III—I の 5 つのケースの実験結果について検討することにする。

(1) 波高および波形の変化

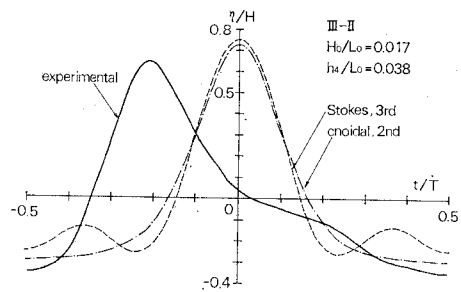
まず水粒子速度の鉛直分布を検討するまえに、水深変化による波高変化について調べてみよう。ペン書きオシログラフの $h_5 \sim h_1$ の測定点の波形記録のうち特定の 1 波をそれぞれ選んで波高を求め、有限振幅波理論による shoaling 曲線¹⁾と比較したのが図-1 である。図からわかるように、波高の実験値はほぼ有限振幅波の shoaling の理論曲線と一致している。

次に波高と同様に波形の変化を調べてみると、図-2 (1)~(3) のようである。この例は ケース III—II のものであり、測定点は h_5, h_1, h_1 である。図中には、比較のために各測定点での T, h および H を与えた場合の Stokes 波の第 3 次近似解³⁾ およびクノイド波の第 2 次近似解⁴⁾ による理論波形をも示してある。水深が減少するにつれて、峯がとがり谷が平坦になるとともに、前面の谷から峯までの時間がしだいに減少し前かがみな波形になっていくことがわかる。なお (1) の一樣水深部 h_5 での実験波形がやや後側にかたよっているが、一樣水深部の長さが波形の安定に十分でないことによるものと思われる。

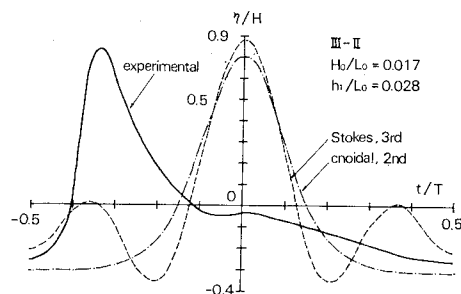
いま、波形の特性を表現するパラメーターとして、図-3 に示すように、 η_0/H および t_c/T をとり、各実験ケースについて横軸に h/L_0 をとってその変化を示したのが、図-4 および図-5 である。図-4 からわかるように、水深が減少するにつれて η_0/H の値は増加して峯



(1)



(2)



(3)

図-2 波形変化 (1)~(3)

がしだいに鋭くなり、しかも H_0/L_0 の値が大きいくほど同じ h/L_0 の値に対しその傾向が著しいことがわかる。図中には、波高の変化の理論曲線を用いて求められた、Stokes 波とハイパボリック波の波の峯高 η_0 の変化の理論曲線¹⁾をも示してある。実験値は理論曲線とくらべ、水深減少による増加の割合が小さいことがわかる。

一方、図-5 に示した t_c/T は η_0/H と逆に、水深の

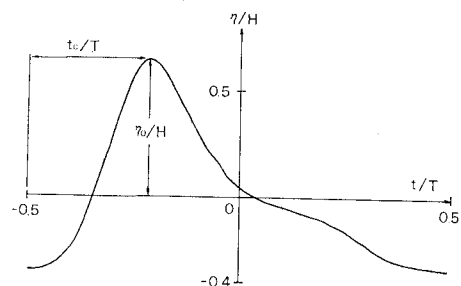
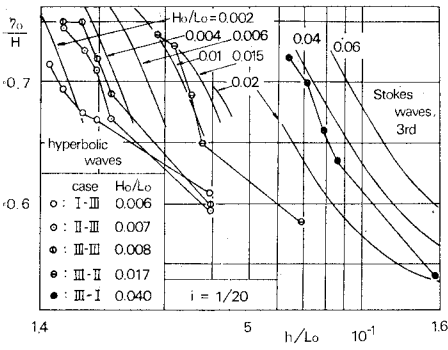
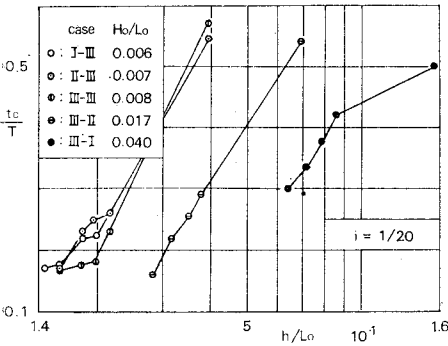


図-3 波形に関するパラメータ

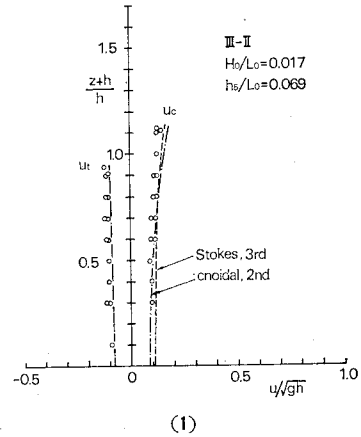

 図—4 η_0/H の変化

 図—5 t_c/T の変化

減少にともなう減少し、しだいに前かがみの波形になり、しかも H_0/L_0 の値が大きいくほど、同じ h/L_0 の値に対してその傾向が著しい。このことは水平床の波理論では説明しえず、著者らが浅水理論の非線型の第1近似の基本方程式をせつ動法を用いて解いた一様勾配斜面上の有限振幅長波の解⁵⁾の傾向と定性的に一致するものである。

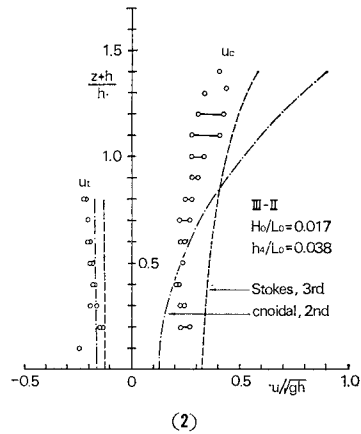
(2) 水平方向水粒子速度の鉛直分布の変化

5つの測定点で、水素気泡をトレーサとする方法によって得られた、水平方向水粒子速度の波の峯および谷での鉛直分布を、無次元化して示した例が図—6 (1)~(3)である。この例は、図—2 (1)~(3)と同じ III-II の場合である。図中、同じ $(z+h)/h$ に対し、白丸を線で結んで示しているのは、いくつかの波の実験値のばらつきの程度を示すものである。また図—2と同様、2つの有限振幅波理論による理論値を比較のために示している。この図から、実験値は水深の減少にともなう、 u_c 、 u_t ともその値を増し、とくに u_c は水面近くで急に大きくなっていくことがわかる。 u_c の実験値を Stokes 波の理論値³⁾とくらべた場合、分布の形はほぼ似ているが値そのものは小さい。一方、クノイド波の u_c の理論値⁴⁾は、一様水深部を除いて、分布の形そのものが実験値と異なり、水面付近では実験値とくらべて急に増大することがわかる。

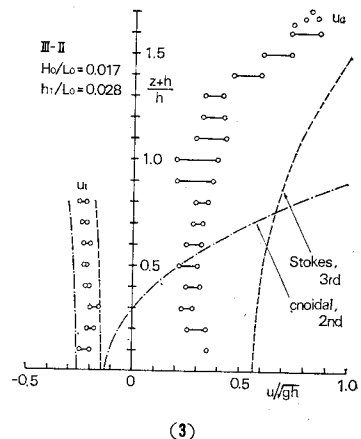
いま u_c および u_t の鉛直分布の特性をパラメーター表示するため、図—7に示すように、 $u_c/\sqrt{gh}$ および $u_t/\sqrt{gh}$ の大きさは鉛直方向の平均値 $(u_c/\sqrt{gh})$ および $(u_t/\sqrt{gh})$ を求めてそれで代表させ、 u_c の鉛直分布については、水面付近の平均値より大きい部分の平均勾配 $d(u_c/\sqrt{gh})/d(z+h/h)$ を求めてこれで表わすことにす



(1)

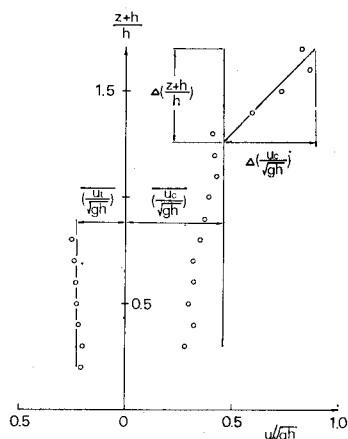


(2)

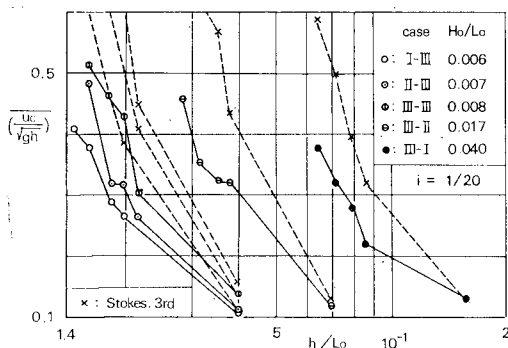


(3)

図—6 (1)~(3) 水平方向水粒子速度の鉛直分布の変化



図—7 水平方向水粒子速度の鉛直分布に関するパラメーター



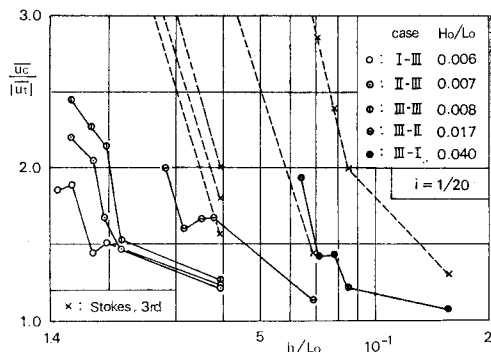
図—8 $(u_c/\sqrt{gh})$ の変化

る。波形の場合と同様、各ケースについて、 $(u_c/\sqrt{gh})$ 、 $\overline{u_c/|u_t|}$ および $\Delta(u_c/\sqrt{gh})/\Delta(z+h/h)$ の水深変化による変化を示したのが、図—8、図—9 および図—10 である。3つの図を見てわかのように、3つのパラメーターとも水深の減少によって増加することがわかる。しかもこの傾向は、同じ h/L_0 に対して H_0/L_0 が大きいほど著しい。

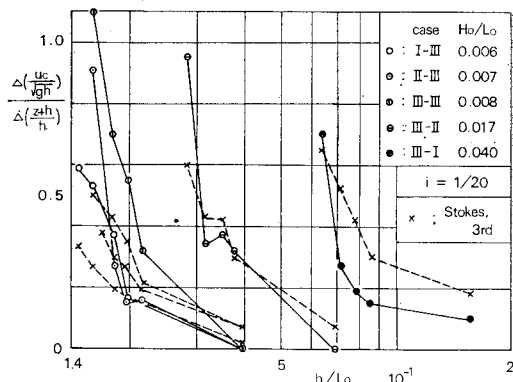
図—6 で述べたように、斜面上ではクノイド波の理論値¹⁾の分布の傾きは実験値のものよりかなり急であり、ここでは、分布の形がより実験値に近い Stokes 波の理論値³⁾に基づく3つのパラメーターの値を、比較のために×印で示してある。Stokes 波による3つのパラメーターの理論値については、その変化の傾向は実験値と一致するが値そのものはかなりの相違がある。特に $(u_c/\sqrt{gh})$ および $\overline{u_c/|u_t|}$ については実験値よりかなり増加の割合が大きい。特に $(u_c/\sqrt{gh})$ の実験値が理論値より小さい原因の一つとして、2. (2) で述べたように斜面上のもどり流れの影響が考えられる。

4. あとがき

以上、本研究は実験水槽内に設置された 1/20 勾配の



図—9 $\overline{u_c/|u_t|}$ の変化



図—10 $\Delta(u_c/\sqrt{gh})/\Delta(z+h/h)$ の変化

斜面上を進行し変形して碎波にいたる波の水平方向水粒子速度の鉛直分布を、水素気泡をトレーサとして測定した。水粒子速度の大きさおよびその鉛直分布の特性は、波の峯での鉛直方向の平均値、その値と波の谷での平均値との比、およびその鉛直分布の平均勾配の3つの無次元パラメーターによって表現し、これらの変化について検討した。これらの結果は、水深減少によって変化する波形とともに、一様水深における場合と異なった斜面上での水粒子速度場の解明のための基礎的資料になるものと考えられる。

最後に、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを記して謝意を表するとともに、実験および資料の解析に協力を惜まなかった京都大学大学院学生月岡康一君に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・酒井哲郎：有限振幅波の shoaling について (2)，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 10-15, 1968.
- 2) 岩垣雄一・酒井哲郎：有限振幅波の水粒子速度に関する実験，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 15-21, 1969.
- 3) Skjelbreia, L.: Gravity waves, Stokes' third order approximation, Table of function, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, 1959.
- 4) Laitone, E.V.: The second approximation to cnoidal and solitary waves, Jour. of Fluid Mech., Vol. 9, pp. 430-444, 1961.
- 5) 岩垣雄一・酒井哲郎：一様勾配斜面上の有限振幅長波について，土木学会論文報告集，第196号，1971.