

砕波付近の表面水粒子速度に関する実験

岩垣 雄一*・酒井 哲郎**・開沼 淳一***・川島 毅****

1. 緒 言

浅海に進入した波は、水深の減少に伴って、波高、波速、波長および波形を変化させ、ついには砕波にいたる。進行波の砕波に関しては、理論的には一様水深の場合に、最大波高としてたとえば Yamada¹⁾ や首藤²⁾ の研究など数多くのものが発表されているが、これらは砕波限界として、波の峯での水平方向水粒子速度 u が波速 c に等しいという条件とか、波形の非対称化がすすみ波の前面が鉛直に立ちあがるという条件、あるいは級数解の収束性が失われるという条件など、いくつかのものをを用いている。一方、実験的には、斜面上の砕波に関して砕波水深、砕波高、さらに水粒子速度に関していくつかの研究があるが、上述の砕波限界に関する条件について実験的に検討した例は、斜面上の砕波に関して若干あるものの十分とはいえず³⁾、これらの砕波限界に関する条件の妥当性をあらためて検討する必要がある。

この実験は、実験水槽に 1/200 という水平床とみなせる程度のきわめて緩やかな勾配の斜面を設置し、その上で砕波にいたる波を対象として行なった。実験方法は、水表面に比重が 1 よりわずかに小さい合成樹脂製の小さなフロートを数多く浮かべてトレーサーとし、波の進行とともに波速に等しい速度で高速撮影機を移動させて、波の峯付近をフロートとともに撮影し、波速および波形の変化と波の峯付近の水面での水平方向水粒子速度の挙動を測定するもので、進行波の砕波に関する上述の条件を検討する目的で行なわれた。ここでは、その結果得られた波の進行にともなう、砕波付近の水面での水平方向水粒子速度の変化を示すとともに、砕波付近での波形と水粒子速度との関連を各種理論曲線と比較し検討する。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験は、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。水槽の一端にピストン型造波機が設置されており、造波機側から 11 m は鋼製水槽で、残り 19 m は両面ガラス張りである。水槽の中央部から水槽後端にかけて、アルミ板の斜面を設置した。まず 1/30 の勾配斜面を 1.8 m、さらに 1/200 勾配の斜面が 14.0 m つづいている。したがって斜面最後端は、水槽の水平底面から 13 cm の高さにあることになる。斜面後端につづいて、水槽後端の一様水深部には消波装置を設置した。なお、アルミ板斜面と側壁の間のすき間には、ビニールテープをはりつけ、すき間を通しての水の流出入によって波のエネルギーが減殺されることを防いでいる。

斜面前方の一様水深部には、2 本の電気抵抗線式波高計を設置し、一様水深部での波の周期、波高、波速を計測した。

砕波付近の波形、波高、波速、および波の峯における水粒子速度の変化を計測するため、高速度撮影機 (Milliken 社製 DBM-5) を使用した。この実験では、特定の波に注目し、その波が斜面を進行し砕波するまでの変化を計測することを目的としているので、高速度撮影機を水槽の移動台車にとりつけ、波の峯が撮影機の視野のほぼ中央に位置するように、その波とともに移動させながら、水槽の一方の側面とそれに接する水面とを斜上方から撮影した (図-1 参照)。波形を読みとるために、水槽ガラス面に 2 cm 角のメッシュを描き、波形とともに写した。水面での水粒子速度を計測するために水面に浮かべたフロートは、合成樹脂製で、直径 10 mm、厚さ 5 mm の平坦な円柱型である。撮影されたフィルムは、感光紙に拡大焼き付けし、それを用いて波の諸量を読みとった。

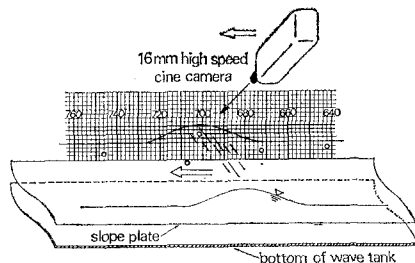


図-1 撮影方法

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科

*** 正会員 工修 京都府土木建築部

**** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

(2) 実験方法

ピストン型造波機によって起こした一連の波は、斜面上に進入するまえに、一様水深部で2台の波高計によって記録する。その後斜面上に進入した波のうち、波形が安定したのちのもので、反射の影響のない1波を選ぶ。この波を水槽上の台車を移動させながら追跡し、その波の峯の付近が写し込まれるようにしながら、砕波後まで撮影する。撮影は毎秒128コマで行なった(シャッター速度は $1/630$ secである)。とくに砕波点付近には、約40個のフロートが5~10 cmの間隔で浮かべてあるので、波によるこれらのフロートの運動の状態も同時に撮影される。したがって撮影されたフィルムには、斜め上方から見た、一方の側壁に貼られた2 cm角のメッシュとそれに接する波形およびいくつかのフロートが写っている。

(3) 実験結果の解析法

a) 波の峯およびフロートの走時曲線

現像されたフィルムのうち、砕波付近の連続する80コマを、1コマおきに感光紙に拡大焼き付けする。これらの感光紙上で、波の峯の水槽方向の位置 x を同時に写された2 cm角のメッシュから読みとる。ここで x は、 $1/30$ 勾配斜面と $1/200$ 勾配斜面との接接点を原点とし、波の進行方向を正にとった座標とする。読みとった x を横軸に、フィルムのコマ数を縦軸にとって、波の峯の走時曲線を描く(コマ数は、砕波付近の特定のフィルムを0としたものである)。なお、この段階では、走時曲線は実際には1コマおきの点として表わされている。

一方、フロートの位置 x は、波の峯のように簡単に決まらない。フロートは多くの場合側壁に接していないので、直接側壁のメッシュを用いることができない。そこで、あらかじめ水槽底面から適当ないくつかの高さの水平面内に、側壁のものと同様のメッシュ板を設置し、実験時と同じ高さから同じ方向に対して同じ撮影機でそれを撮影し、次のようにしてフロートの位置を決定した。すなわち、こうして得られたフィルムを、実験時に得られたフィルムと同じ拡大率で焼き付けし、その感光紙上で、水槽横断方向の直線群を延長し交点を求める。この場合、直線群はほぼ一点で交わり、しかもこの点は、実験時に波によって変化する水面の高さの範囲では、いずれの場合もほぼ同じ位置に存在するので都合がよい。したがって実験で得られたフィルムを拡大した感光紙上で、この交点O(図-2参照)とフロートの像の中心を直線で結べば、この直線(図-2のOAあるいはOB)は、フロートの中心を通して水槽側壁に直角に交わる水平な直線の像に対応することになるから、この直線と側壁における水面との交点(AあるいはB)の位置が、フロートの水槽方向の位置 x を表わすことになる。こうして、砕波付近の40コマのフィルムに写されたいくつかのフロートについて、その走時曲線を波の峯の走時曲線と同一

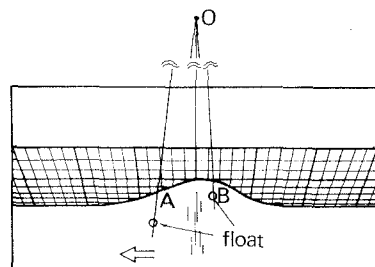


図-2 フロート位置の決定法

じ図上にプロットする。そして、のちの解析の都合上これら点群としての走時曲線を、なめらかな曲線で代表させる。

b) 波の進行に伴う水面での最大水平方向水粒子速度の変化

次に、各実験ケースの走時曲線図で、各フロートの走時曲線の勾配が最大になるコマ数(したがって時間)を決定する。これはフロートの水平方向速度 u_f が最大であることを意味する。この時間での波の峯の位置 x と、波の峯の走時曲線の勾配すなわち波速 c を求める。同様の操作を他のフロートについても行ない、 x と u_{fmax}/c の関係を、図上にプロットする。いま、 u_{fmax} を、水面における水平方向水粒子速度の最大値 u_{smax} とみなせば、これらの図は、波の進行に伴う砕波付近での、水面における最大水平方向水粒子速度の変化を表わすものと考えられる。

c) 砕波付近の水面での水平方向水粒子速度の分布

同様な u_s/c の値は、各フロートについて、その走時曲線上のいくつかの点からも求めることができる。また、フロートの走時曲線と波の峯の走時曲線の横軸上の差 x' (したがって、波の峯を原点とするフロートの位置)を求め、これをその点での c に波の周期 T をかけて求められる波長 L でわって、 x'/L と u_s/c との関係を各実験ケースの各フロートについてプロットする。

u_s/c と x'/L の関係の実験結果を、理論と比較するために、水深 h 、波高 H を知る必要がある。上述したように、 u_s は、特定のフロートの運動を追跡して得られたものであり、したがってその間に波自身も進行して変化しているため、ここではその間の平均的な値として、フロートの走時曲線上の点のうち、代表的な点に対応するフィルムを選んで、そのフィルム上の、波の峯の位置 x での水深 h を求める。一方、波高 H については、フィルムでは波の峯付近(長さ約70 cm)しか写っていないので、波の峯高はわかって、波の谷の高さは明らかでない。そのため、台車に約半波長はなして、さらに1台の波高計を設置し、撮影機とともに移動させて、波の谷付近の水位を記録する。また、この実験においては、フィルム上での最低の水位が波の谷の水位とみなせる場合も

多いので、波高計による水位と比較して、低い方を波の谷の水位とし、それとすでに求めた波の峯の水位とから波高を決定する。こうして得られた $T\sqrt{g/h}$ および H/h の値を用いて、比較のための理論値を計算する。

d) 砕波付近での波形

さらに、上述の選ばれたフィルム上で、側壁のメッシュを用いて、波の峯付近の空間的波形を求め同様に理論波形と比較する。

e) 一様水深部での時間波形

最後に、砕波点付近の波形とくらべるために、撮影した波の一様水深部における時間波形を、波高計の記録か

ら求める。

実験においては、一様水深部の水深はつねに 20 cm で、用いた波の周期は 0.85~2.32 sec、一様水深部での波高は 4.2~7.2 cm である。

3. 実験結果および考察

(1) 実験結果

前述した方法によって求めた、波の峯およびフロートの走時曲線の例を示したのが、図-3 (1)~(3) である。図の (1)~(3) は、同一の波の走時曲線図を分割して図示したもので、時間的に (3), (2), (1) の順になっている。点群は、なめらかな曲線を描く前の、1 コマおきにプロットされた点である。図中の $f_1 \sim f_3$ は各フロートを示す記号である。

砕波付近の水面での最大水平方向水粒子速度 u_{smax} と波速 c との比が波の進行とともにどのように変化するかを示したのが図-4 (1)~(7) である。図中には、計算された区間の、 $T\sqrt{g/h}$ および H/h の値をも示している。ただしこの値は、 u_s/c と x'/L の関係の図に示すいくつかの $T\sqrt{g/h}$ の平均値と H/h の最大値である。

図-5 (1)~(4)、図-6 (1), (2) および図-7 (1), (2) は、それぞれ前述した c), d), および e) の方法によって得られた結果の例である。これらの図で、同時に示された理論曲線は、いずれの場合も破線が Stokes 波の第 3 次近似解⁴⁾、一点鎖線がクノイド波の第 2 次近似解⁵⁾ である。

(2) 考察

図-3 (1)~(3) を見てわかるように、波の峯はその進行につれて、フロート f_1 , f_2 および f_3 の順に追い抜いていく。とくにフロート f_1 および f_2 は、波の峯が近づくにつれて速度を増し、追い抜かれたのちは、波の峯からはなれるにつれて速度を減少している。一方、フロート f_3 は、 f_1 , f_2 と同様波が近づくにつれてその速度を増すが、波の峯に追い抜かれてわずかに波の峯の後方に位置したのちは、ほとんど波の峯と同じ速度で運動していることがわかる。このことは明らかに、波が進行して砕波を開始すると、波の峯付近の水面での水平方向水粒子速度 u_s が、波速 c にほぼ等しくなることを示している。なお、2. (3), a) で述べた走時曲線を形成する点群をなめらかな曲線で近似したことによる誤差は、他の読み取り誤差およびフロートの追いつき性による誤差と同程度で数%である。

図-4 (1)~(7) は、波の峯付近の水面での水平方向水粒子速度の最大値が、波の進行に伴ってどのように変化するかを示したものであるが、いずれの場合もプロットされた点のうち u_{smax}/c の最大値は、0.93~1.0 の間にあり、進行波の砕波限界で、波の峯の水粒子速度が波速に等しくなるという条件は実験的にほぼ妥当であると

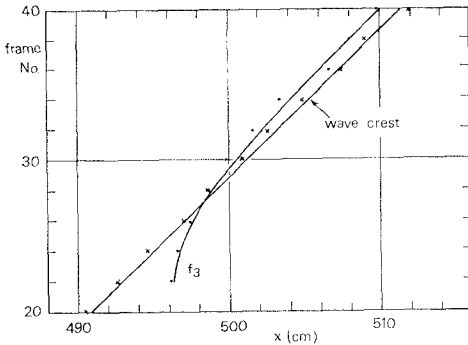


図-3 (1)

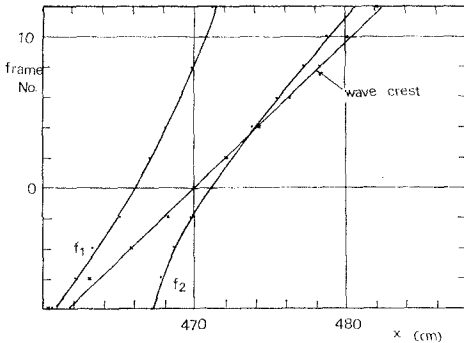


図-3 (2)

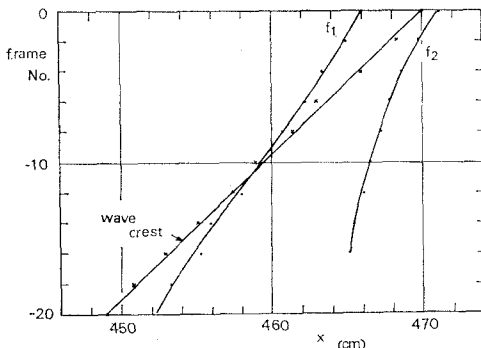


図-3 (3)

図-3 (1)~(3) 波の峯とフロートの走時曲線

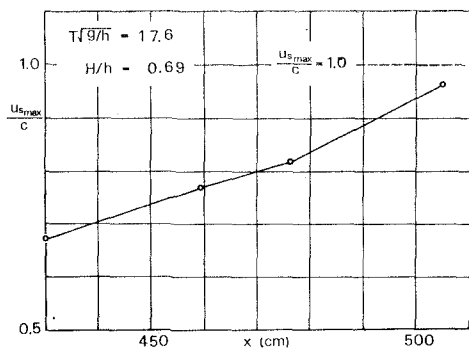


図-4(1)

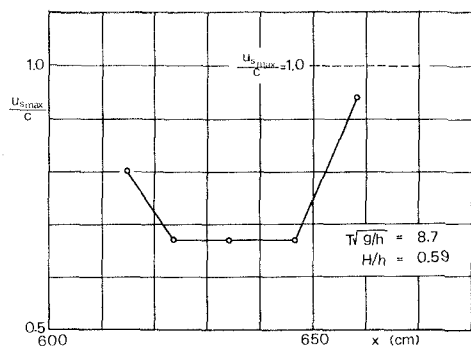


図-4(5)

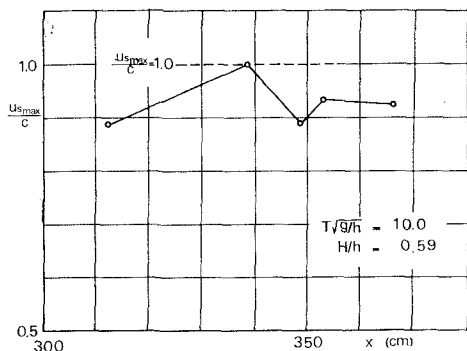


図-4(2)

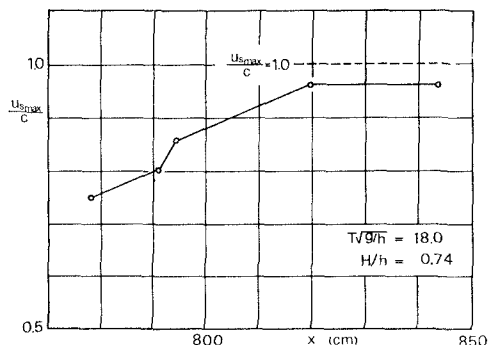


図-4(6)

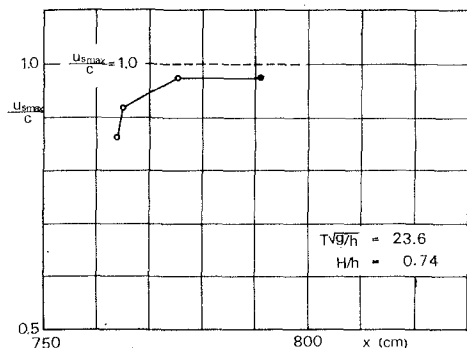


図-4(3)

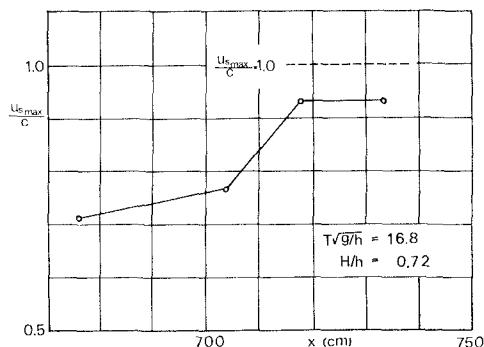


図-4(7)

図-4(1)~(7) 波の峯付近の最大水平方向水粒子速度の変化

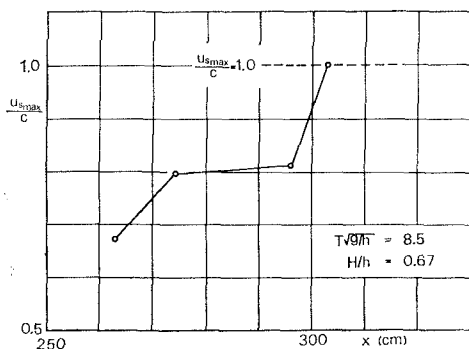


図-4(4)

いえる。ただし、その変化の仕方は、多くの場合 x に関して単調増加であるが、(2) の場合は一度最大になって再び減少し、(5) の場合は一度減少したのち再び増加している。なお、参考のために示した H/h の値は、(2) および (5) の場合を除いて 0.67 ~ 0.74 の間に存在し、Laitone⁵⁾ の砕波限界値 0.727 に近いが、(2) および (5) の場合は約 0.59 とかなり小さく、その理由は明らかでない。

次に、図-5 およびここには示さなかった他の場合の結果から次のことがいえる。 u_s/c の実験値の分布はば

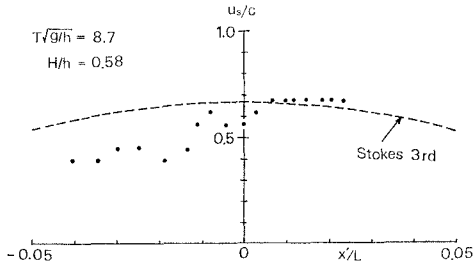


図-5 (1)

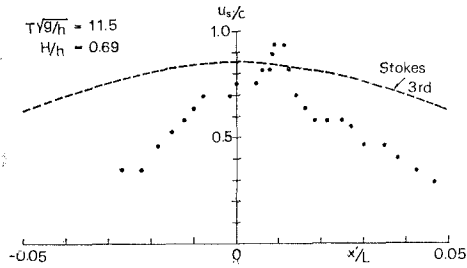


図-5 (2)

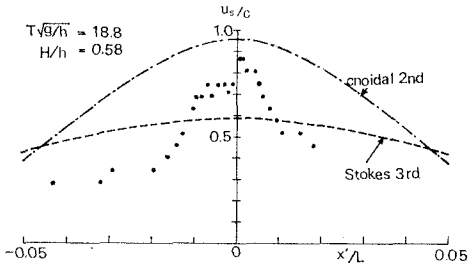


図-5 (3)

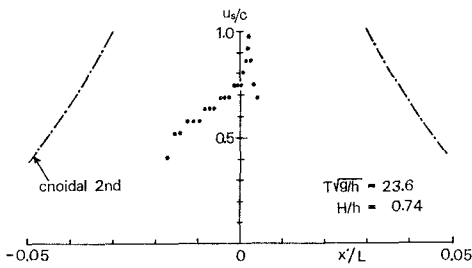


図-5 (4)

図-5 (1)~(4) 水面での水平方向水粒子速度の分布

らつきが大きい、その傾向としては、同時に示した Stokes 波⁴⁾ およびクノイド波⁵⁾ の理論曲線にくらべて、その変化が急であるといえる。また実験値の最大値は必ずしも $x'/L=0$ に存在せず、その付近にばらついている。なお、(1), (2) では、クノイド波の理論曲線はその値が 1 よりはるかに大きいため示していない。また、(4) の場合も、 $T\sqrt{g/h}=23.6$ とクノイド波の適用範囲内であるが、 H/h が 0.74 と大きく、やはり理論値の u_s/c の値は、 $x'/L=0$ の付近で 1 よりはるかに大きくなっている。また、Stokes 波の理

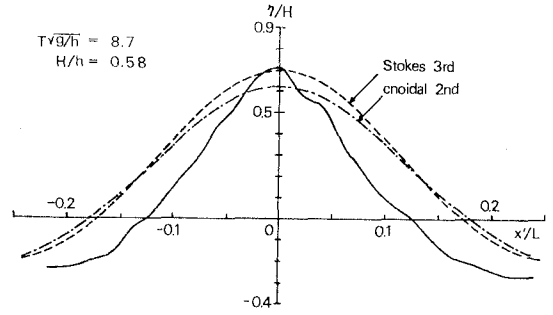


図-6 (1)

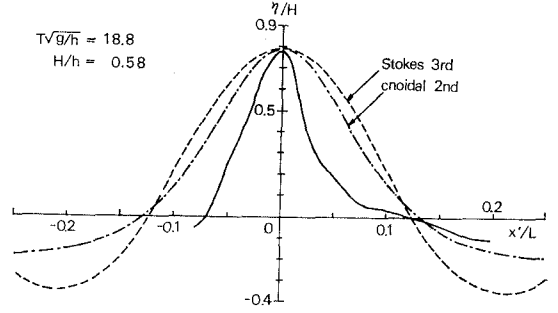


図-6 (2)

図-6 (1)~(2) 波の峯付近の波形

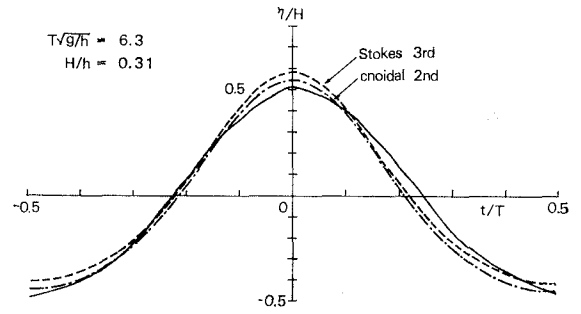


図-7 (1)

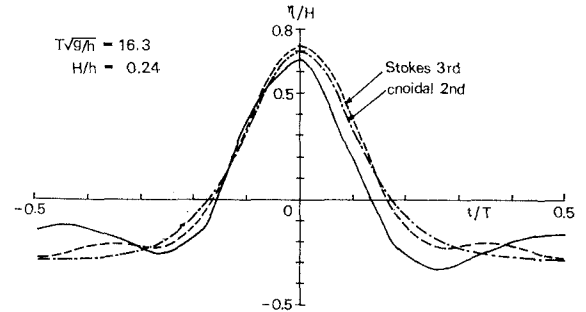


図-7 (2)

図-7 (1)~(2) 一樣水深部での時間波形

論曲線は、解の収束性が悪く示していない。

図-6 は、砕波点近傍での波の峯付近の波形であるが、他の結果も含めて、その傾向は2つの理論曲線と比較してやせており、これは図-5の u_s/c の傾向とよく一致する。

そのため、一様水深部での波形を検討した結果が図-7であるが、ここに示さなかった場合の結果も含めて、一般に、その時間波形は同じ条件での理論波形とほぼ一致しており、砕波点付近での u_s/c と x/L の関係および η/H と x'/L の関係の実験結果のようにやせた形の峯を示していない。

以上のように、波の進行に伴い、水面の水平方向水粒子速度の最大値は波速に近づき、砕波点近くではほぼ等しくなることが、実験的に明らかになったが、一様水深部から斜面上に進入して砕波点に近づくと、波形がやせ細ってくる現象については今後十分検討する必要がある。

4. 結 語

以上、従来進行波の砕波限界として用いられているいくつかの条件の妥当性を実験的に検討するために、 $1/200$ という水平床とみなしうる程度のきわめて緩やかな勾配の斜面上を進行して砕波する波を対象として、峯付近の波形および水面での水粒子速度を計測した。水粒子速度の測定にはフロートを利用したトレーサーを用い、高速撮影機を波とともに移動させ、波形とフロートの運動を撮影した(毎秒128コマ)。

その結果、砕波付近の進行波について、いままで実験

的に明らかにされていなかったつぎのような事実を見出した。

(1) 波が進行して砕波点に近づくと、波の峯付近の水面での水平方向水粒子速度の最大値は波速に近づき、砕波点付近ではほぼ等しくなり、従来進行波の砕波限界の1つとして用いられてきた、波の峯での水平方向水粒子速度が波速に等しいという砕波条件の妥当性が、実験的に確認された。

(2) 砕波点付近の波形および水面での水平方向水粒子速度の分布は、同じ条件での理論曲線とくらべてかなりやせており、その理由については今後検討する必要がある。

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、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yamada, H. : On the Highest Solitary Wave, Reports of Res. Ins. Appl. Mech., Univ. of Kyushu, Vol. V, No. 18, 1957, pp. 53-67.
- 2) 首藤伸夫 : 有限振幅波について一高次級数解による進行波の砕波限界一, 土木研究所報告, 第111号, 昭.36.
- 3) Iversen, H. W. : Waves and Breakers in Shoaling Water, Proc. 3rd Conference on Coastal Engineering, 1952, pp. 1-12.
- 4) Skjelbreia, L. : Gravity Waves, Stokes' Third Order Approximation, Table of Function, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, 1959, pp. 1-337.
- 5) Laitone, E. V. : The Second Approximation to Cnoidal and Solitary Waves, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 9, 1961, pp. 430-444.