

有限振幅波の水粒子速度に関する実験

岩 垣 雄 一*・酒 井 哲 郎**

1. 緒 言

波による水粒子速度は、砕波現象の機構、海中構造物に作用する波力、波による底質の浮遊や拡散の機構などを解明するうえで重要な要因であるにもかかわらず、その測定の困難さから、これまでほとんど実験的に取扱われたものがなく、わずかに 2, 3 の例^{1), 2), 3)}があるに過ぎない。

最近、きわめて短い時間間隔ごとに、水素気泡を電気分解によって水中に発生させ、その運動をトレースして、波による水粒子速度を測定する方法が提案された⁴⁾。著者らは、この方法を用いて、波浪実験水槽で起こした波による水平方向水粒子速度を測定した⁵⁾。この方法は、ある位相における水粒子速度の鉛直分布を測定するには適しているが、水粒子速度の時間的変化を測定するには適していない。そのため最近水流の乱れの測定に用いられはじめた hot film 流速計を用いて、波による水平方向水粒子速度の波の峰および谷の通過時の値と、1 周期にわたる時間的変化を求めた。この論文は、水素気泡による方法で得た結果とともに hot film 流速計による測定結果の代表的なものを示し、さらに微小振幅波理論、Stokes 波の第 3 次近似解、およびクノイド波の近似表現としての hyperbolic 波の理論式と比較検討したものである。

2. 実験装置および方法

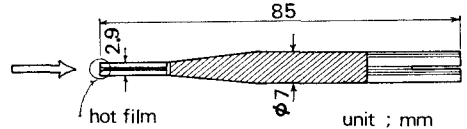
(1) 実験装置

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、その一端に設置した油圧式ピストン型波起し機によって波を起こした。

a) hot film 流速計による方法

用いた hot film 流速計とその probe は、DISA 製作の Type 55 D 05 および 55 A 81 である。この流速計は、ブリッジの抵抗の 1 つを形成している probe から輸送される熱量を電氣的に増幅するもので、probe は、図-1 に示すように、電氣的に熱せられた抵抗としてのうすい金属膜とサポートからなっており、実際には、流速計は、probe の抵抗（したがって温度）が

図-1 hot film の probe



ねに指定した抵抗値 (operating resistance) になっているのに必要な電力を計測する、いわゆる定温式である。

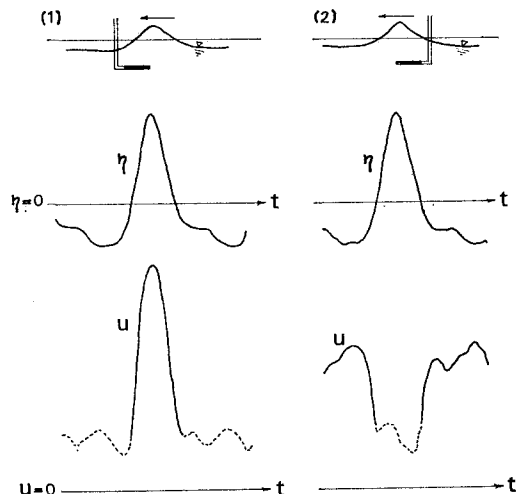
一般に、probe を熱するために流れる電流 I は、probe のまわりの流体の速度 U との間に、

$$\frac{R}{R-R_0} I^2 = A + BU^n$$

の関係があることが実験的に得られている。ここで R は operating resistance, R_0 は流体の温度での probe の抵抗値 (cold resistance), A, B および n は定数である。

しかしながら、 A, B および n の値は、特定の流体中において、特定の probe を用い、特定の overheating ratio $(R-R_0)/R$, および特定の流体温度などに対して、はじめて決まるものであり、実際には、流速と出力との関係を示す校正曲線は、これらの条件が変わるたびにあらためて決定する必要がある。図-2 に示すように、(1) の波の進行方向に probe が対向する場合の、波高計と流速計に接続されたガルバノメーターの振れの時間的変化のうち、水位が静水面より高い間の流速計の記録

図-2 波の進行方向と probe の方向との関係



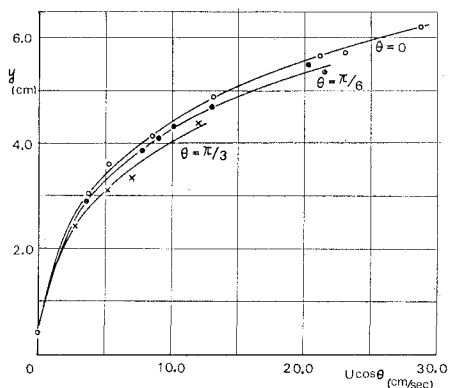
* 正会員 工博 京都大学教授 工学部

** 学生員 工修 京都大学大学院工学研究科

(実線部分)は信用できるが、水位が静水面より低い間のそれは信用できない。なおこの場合、流れの方向が逆転してもそれを probe は感知できず、絶対値だけを記録する。一方、probe の向きが (1) と反対の (2) の場合には、逆に、水位が静水面より低い間の流速計の記録(実線部分)は信用できるが、水位が静水面より高い間のそれは信用できない。

probe の向きと流れの方向が一致しない場合、probe は、probe に垂直な方向の速度成分のみを感知することになっているが、図-2 に示すように、流速計の記録は、較正曲線から得られる $u=0$ の位置まではふれずに脈動をくりかえしている。図-3 の $\theta=0$ の曲線は、流速計の較正曲線の 1 例である。この場合、横軸には台車の平均移動速度 U と、probe と水槽方向とのなす角度 θ の余弦 $\cos \theta$ との積 $U \cos \theta$ が、縦軸にはガルバノメーターの光点の振れ y がとってある。 $\theta=\pi/6$ の曲線は、probe を、台車の移動方向と 30° の角度をなして設置した場合の、 $U \cos 30^\circ$ と y の関係であり、 $\theta=\pi/3$ のそれは、同様に 60° の角度で設置した場合の $U \cos 60^\circ$ と y の関係である。このように、この hot film 流速計で、流れの方向と probe の方向が一致しない場合、 $\theta=0$ の較正曲線を用いて u を求めると、probe の方向の流速成分より小さ目に見積ることになる。

図-3 hot film 流速計の較正曲線と方向特性

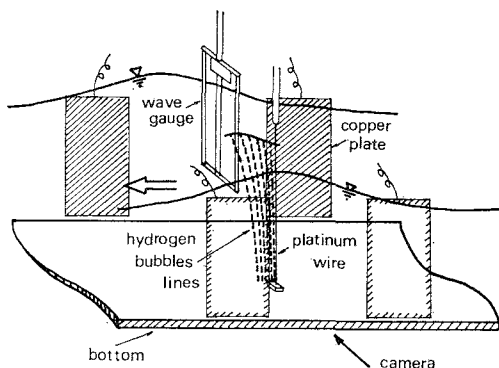


実験に際しては、電気抵抗線式波高計 1 台と hot film の probe を水槽横方向にならべ、また約 2 m はなして他の 1 台の波高計を設置して、ともに電磁オシログラフに接続した。

b) 水素気泡をトレーサーとする方法

この方法によって水粒子速度を測定する装置は、図-4 に示すように、水素気泡を発生させる水中電極として、直径 0.05 mm の白金線の一端を水槽底面に取りつけて張り、他端を波の峰の高さより数 cm の高さのところでポイントゲージにとりつけた。白金線の長さは、実験を行なった水深によって、約 40 cm と 30 cm の 2 種

図-4 水素気泡をトレーサーとする水粒子速度測定装置



類のものを用いた。陰極としては、水槽側壁のガラス面の内側に、 15×37 cm の銅板を 4 枚、陰極の前後左右に貼りつけた。一方、波高計 1 台を、陰極と水槽横方向にならべ、他の 1 台を約 2 m はなして設置し、両者は電磁オシログラフに接続した。水中電極にパルス電圧を加える装置は、出力電圧 400 V で、発生しうるパルスの周期は 4~700 ms、パルス幅は 0.4~70 ms である。陰極に発生し、波による流れによって運動する水素気泡の位置は、1 眼レフカメラによって水槽の側方よりガラス面を通して撮影した。

(2) 実験方法

a) hot film 流速計による方法

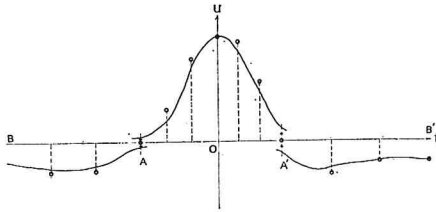
hot film 流速計の operating resistance を cold resistance の 1.00~1.15 倍にしたのち、probe を、測定する水粒子速度の値の範囲のいくつかの速度で検定台車で移動させ、hot film 流速計の較正曲線を決定する。図-3 の $\theta=0$ で示した曲線はその 1 例であるが、台車の平均移動速度 U とガルバノメーターの光点の変位 y との関係は、直線ではなく、 U の値が小さいほどその勾配は大きい。前述したように、probe は逆転する流れを正確に感知できないが、ここでは利用できる probe が 1 本のみであり、1 周期の間の u の時間的变化を完全な形で求められないため、便宜的方法としてつぎのようにした。まず probe を図-2 (1) の方向に向けて、 u が波の進行方向と同じ向きである間の u を測定したのち、波起し機を止めてから、ふたたび同じ条件で図-2 (2) の方向に向けて波を起こし、波の進行方向と逆の向きの間の u を測定する方法をとった。

こうして同じ波の条件で得られた 2 種類の記録のうち、十分波形が安定し、かつ反射の影響が入っていない波を選び、両者の流速計の記録のうち、それぞれ図-2 (1) および (2) の実線部分を、較正曲線を用いて読みとり、位相 0 の位置を合わせて、同一図上にプロットする。その例を示したのが図-5 であるが、一般に、(1) a) で述べたように、図の上下の記録は 0 にならない状態で overlap する。ここでは、1 周期における u の時

表—1 hot film 流速計を用いたときの実験条件

h (cm)	T (sec)	H (cm)	z_p+h (cm)	$T\sqrt{g/h}$	H/h	h (cm)	T (sec)	H (cm)	z_p+h (cm)	$T\sqrt{g/h}$	H/h
15.0	0.96	4.5	11.25	7.7	0.302	20.0	1.74	4.25	15.0	12.2	0.213
		3.65			0.243			3.45			0.174
		3.2			0.213			2.55			0.127
		2.25			0.150						
		1.5			0.101						
13.0	1.06	3.9	9.75	9.2	0.301	16.0	1.89	4.7	12.0	14.8	0.295
		3.3			0.252			3.9			0.243
		2.8			0.215			3.15			0.197
		1.95			0.150			2.25			0.142
20.0	1.74	5.95	15.0	12.2	0.298	16.0	1.89	4.9	0.8	14.8	0.306
		4.85			0.243			3.9			0.245
								3.05			0.191
								2.25			0.139

図—5 水粒子速度の時間的変化の決定方法



間的变化を求めるために、便宜的に、図に示すように overlap する部分の、上下の記録の絶対値の等しい位相が $u=0$ の位相であるとして記録を修正した。また BA, AO, OA' および A'B' を三等分し、それぞれの三等分点のうち B, O, B' に近い点の位相では、水粒子速度は probe と約 30° の角度をなし、残りの点では約 60° の角度をなすとして、図—3 を用いてこれらの点での u を図の丸印のように修正し、B, O および B' 点では水粒子速度の方向と probe の方向は一致するとして修正しなかった。

実験は、4 種類の $T\sqrt{g/h}$ の値について、それぞれ水深 h および波の周期 T を一定とし、波高 H を変えて行なった。実験条件は表—1 に示す。ここで z は、静水面を原点とし、鉛直上向きを正とした座標で、 z_p を probe 位置の z の値とすれば z_p+h ($z_p < 0$) は probe の底面からの高さを表わす。

b) 水素気泡をトレーサーとする方法

波起し機によって生じた波のうち、十分波形が安定したあとの波で、かつ水槽他端からの反射波の影響が入っていない波について、その峰が陰極設置位置を通過する直前に、適当なパルス周期 $4t$ のパルス電圧を加えはじめる。陰極に発生した水素気泡列が、波の進行方向への流れによって運ばれ、いくつかの水素気泡列が並んだ状態をカメラで撮影する。一方、2 台の波高計によって、陰極位置およびそれより約 2 m 離れた位置での時間的な波形を電磁オシログラフに記録する。電極にパルス電圧が加わると、波高計はそれを感知して、波形記録

に乱れが入るので、陰極位置の波における、第 1 パルスが加わった時刻 t_0 がわかる(波の峰の通過時を $t=0$ とすると $t_0 < 0$)。

$t_0 + (m-1) \cdot 4t$ と $t_0 + m \cdot 4t$ の算術平均 $t_0 + \{m - (1/2)\}4t$ がもっとも 0 に近づくように、film 上に写った m 番目および $(m+1)$ 番目

の気泡列を選ぶ(写真—1 参照)。つぎに film 上で、水槽底面から求める高さにおける、 m 番目および $(m+1)$ 番目の水素気泡列の間隔を求め、それを $4t$ で割れば、波の位相 $(x-ct)/L = -[t_0 + \{m - (1/2)\}4t]/T$ でのその高さにおける水平方向水粒子速度 u が近似的に得られる(ここで、 x : 陰極位置を原点とし波の進行方向を正とする座標、 c : 波速、 L : 波長)。この操作を水槽底面から種々の高さで行なえば、 u の鉛直分布が得られる。

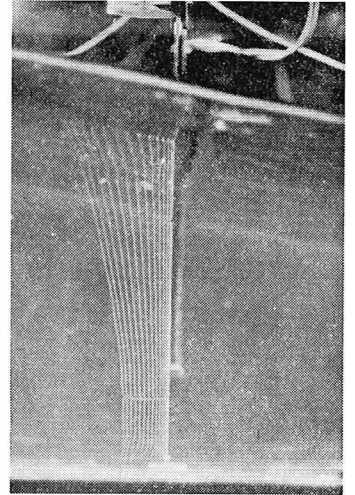
実験に用いた水深は、13~30 cm、波の周期は 0.9~2.0 sec、波高は 4.0~9.0 cm、パルス周期は 20~50 ms、パルス幅は 5~20 ms、カメラのレンズ絞りは 1.4、露出は $1/125$ sec である。

3. 実験結果および考察

(1) 実験結果

表—1 で示した実験条件で、hot film 流速計を用いて測定した水平方向水粒子速度の時間的変化の記録から、波の峰および谷の通過時の値 u_c および u_t を求め、そ

写真—1 水素気泡列



れぞれを $\sqrt{gh}$ で割ったものと、 H/h の関係を、 $T\sqrt{g/h}$ および $(z_p+h)/h$ をパラメーターとして示したのが、図-6 (1)~(5)である。図中には、微小振幅波理論、Stokes 波の第3次近似解⁹⁾およびクノイド波の近似表現としての hyperbolic 波の理論式⁷⁾による関係をも、それぞれ一点鎖線、実線および破線で示してある。hyperbolic 波の曲線は、その適用範囲 $K \geq 3$ (ただし、 K は第1種完全だ円積分)をこえて、 $K \geq 2$ の範囲で示しており、図の(4)、(5)では、 $K=3$ の点を小さい黒点で示してあり、図上この点より右側が $K \geq 3$ の領域である。微小振幅波理論では、 $u_c = u_t$ なので、直線は1本であるが、他の2つの有限振幅波理論によるものは、微小振幅波理論より上側のものが u_c 、下側のものが u_t である。

つぎに、 u の1周期にわたる時間的変化を、図-5の

図-6 (1)~(5) 波の峯および谷の通過時の水平方向水粒子速度と H/h の関係

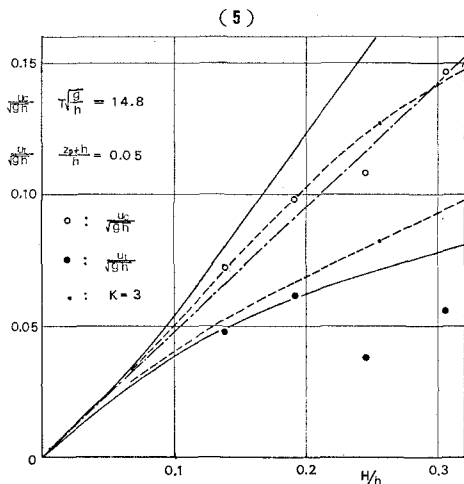
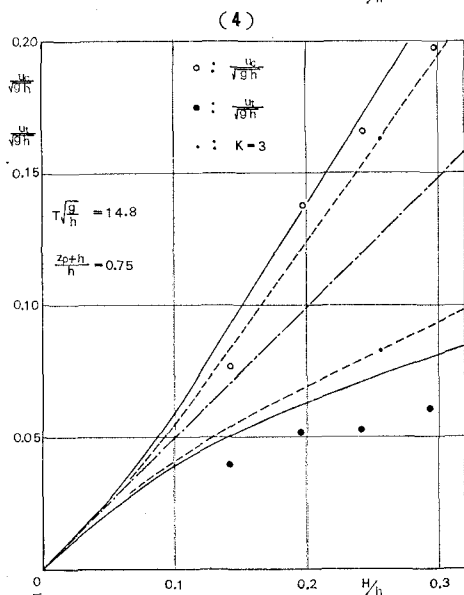
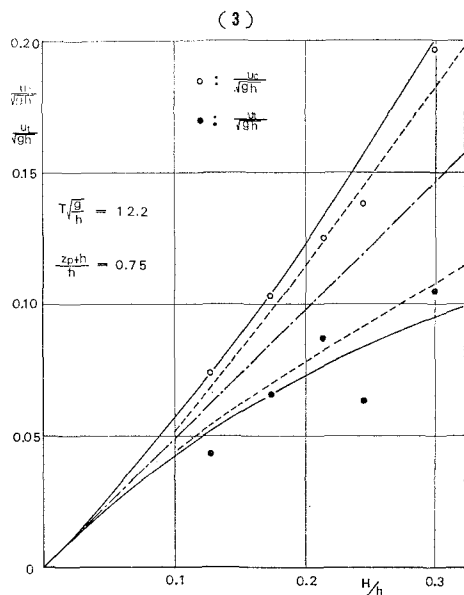
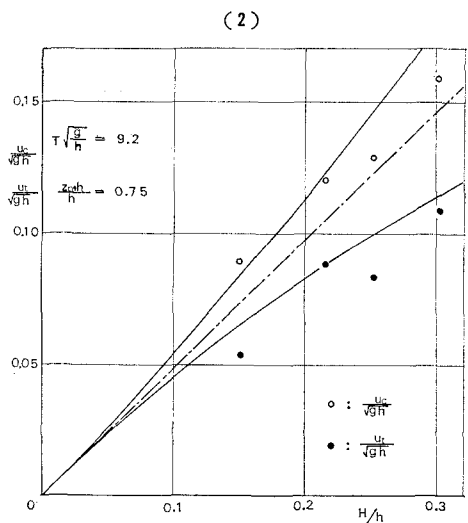
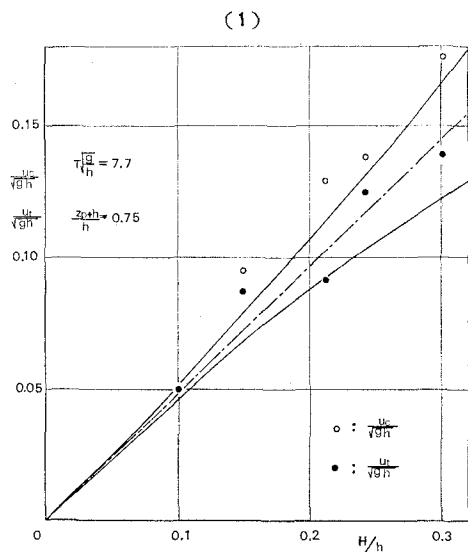


図-7 (1)~(5) 水平方向水粒子速度の時間的变化

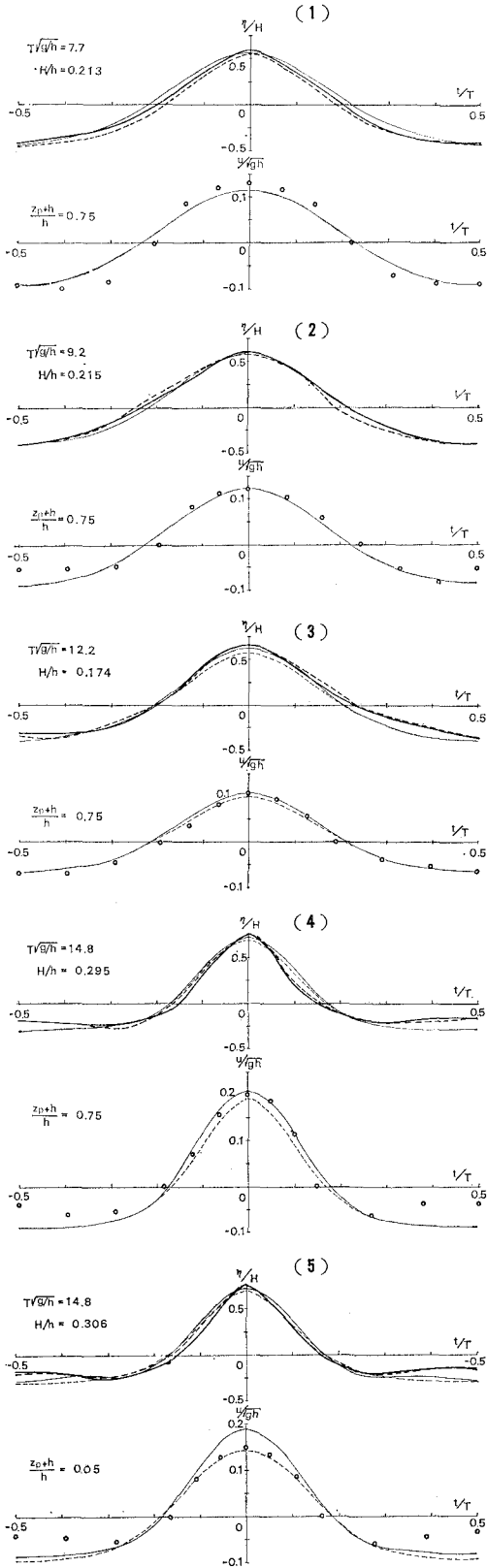
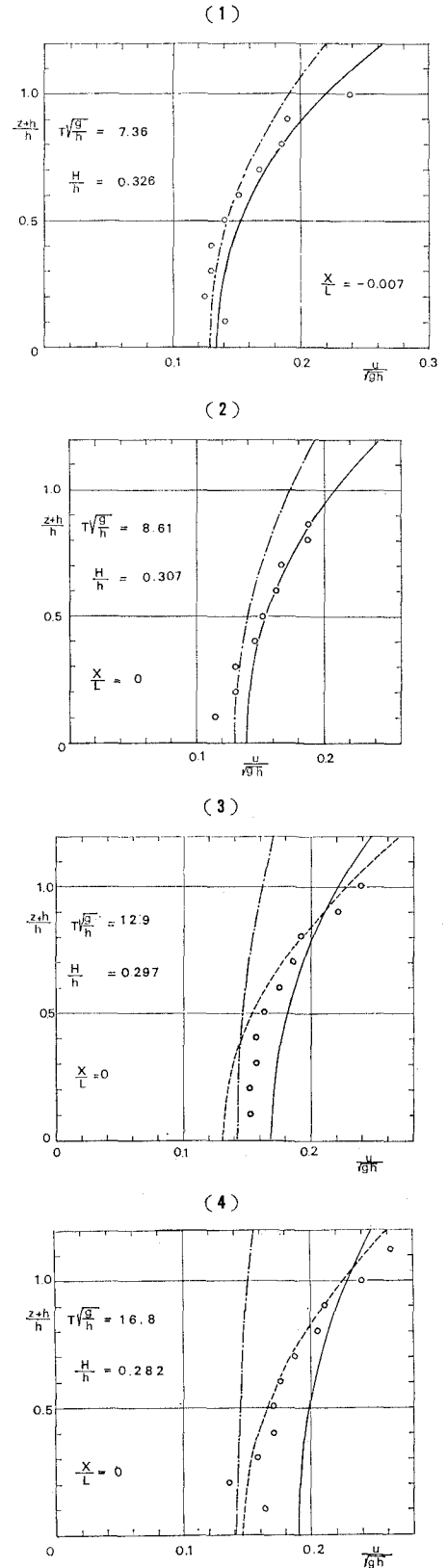


図-8 (1)~(4) 水平方向水粒子速度の鉛直分布



方法で求めて示したのが 図-7 (1)~(5) である。ただし (5) は probe の位置が $(z_p+h)/h=0.05$ と底面にきわめて近く、水粒子の運動は水平方向のみであると考え、上述の方法による修正は行なわなかった。図中には、同時に測定された水位 η の時間的変化をも示しており、太い実線は、 u の時間的変化を求めるための2つの記録(図-2 (1), (2))の(1)の場合のもの、太い破線は(2)の場合のものである。また比較のため、Stokes 波の第3次近似解および hyperbolic 波の理論式による η および u の時間的変化を、それぞれ細い実線と破線で示してある。

図-8 (1)~(4) は、水素気泡をトレーサとして測定した、波の峰の通過時付近の u の鉛直分布の二、三の例である。図中に示されている3種類の曲線は、上述した3つの理論によるものである。

(2) 考 察

hot film 流速計を用いて u を測定する場合に生ずる誤差で支配的なものは、較正曲線の決定の段階にあると考えられ、図-3 の較正曲線のばらつきに見られるように、約3%程度と思われる。また水素気泡をトレーサとして u を測定する場合に生じる誤差の原因の支配的なものは、撮影した film 上でのよみとり誤差と、パルス周期の誤差であり、これも約3%とみなされる。

図-6 (1)~(5) の実験結果は、ばらつきが大きく、とくに(1)の $T\sqrt{g/h}=7.7$ の場合は顕著であるが、他の4つの場合は、明らかに波の峰および谷の通過時の水平方向水粒子速度 u_c および u_t は、微小振幅波理論によるものよりも、有限振幅波理論である Stokes 波および hyperbolic 波の理論式によるものの傾向に近いことがわかる。ただし、(4)、(5)の $T\sqrt{g/h}=14.8$ の場合の u_t の実験値に、理論曲線の値よりかなり小さいものが多いが、これは 図-7 (4)、(5) の波形記録に見られるように、波の谷で二次波峰が発生していることによるものと思われる。なお、(3)~(5) には、Stokes 波のほか $K \geq 2$ の範囲の hyperbolic 波の理論式による曲線も示したが、(3)、(4) では、有限振幅波としての2つの理論の適用性を論ずることは困難である。しかし、(5)の $T\sqrt{g/h}=14.8$ で、底面付近の u_c の実験値は、明らかに、Stokes 波理論によるものよりも hyperbolic 波の理論式による曲線に一致している。

図-7 の u の時間的変化を見ても、(5)の $T\sqrt{g/h}=14.8$ 、 $H/h=0.306$ 、 $(z_p+h)/h=0.05$ の場合のそれは、波の谷の通過時付近を除いて、hyperbolic 波の理論式によるものによく一致し、Stokes 波理論によるものは峰付近でかなり大きい u を与えている。(3)、(4)の $T\sqrt{g/h}=12.2$ および 14.8 で、 $(z_p+h)/h=0.75$ の場合の実験値は、両理論による曲線の間にばらついていて、やはり両者の適用性の良否を論ずることは困難であ

る。なお、(2)の実験結果は、Stokes 波理論によるものとはほぼ一致しているが、(1)の実験結果は、かなり鈍頭形をなして、Stokes 波理論によるものからはずれているが、その原因はわからない。

図-8 (4) に示す、 $T\sqrt{g/h}=16.8$ で $H/h=0.282$ の場合の、波の峰の通過時付近の鉛直分布の実験値も、hyperbolic 波の理論式によるものにほぼ一致しており、とくに底面付近では Stokes 波理論によるものよりかなり小さい値を示しており、図-6 (5) および 図-7 (5) の傾向と一致している。 $(z+h)/h=0.75$ 付近では、両理論の値および実験値が接近し、図-6 (4) および 図-7 (4) の傾向と一致しているが、鉛直分布の傾向から見て、 $(z+h)/h=0.75$ の付近は、たまたま両理論の値が一致する付近であって、図-6 (4) および 図-7 (4) の実験結果はその表われである。また(3)の $T\sqrt{g/h}=12.9$ 、 $H/h=0.297$ の場合の実験値は、両理論による値のほぼ中間にあり、この傾向は 図-6 (3) および 図-7 (3) の傾向に一致しており、 $T\sqrt{g/h}=12.0 \sim 13.0$ では、実験値は両理論のどちらにもほぼ一致するとみてよいであろう。(1)および(2)の場合は、実験値自体は、Stokes 波理論によるものと一致しないものもかなりあるが、その分布の傾向は微小振幅波理論よりむしろ Stokes 波理論の傾向に一致している。

図-6 (5) の hot film 流速計の記録には、probe が水槽底面から 8 mm という、底面にごく近い位置にもかかわらず、図-2 の例に示すように、乱れ成分に相当するような変動は入っていなかった。同図にプロットされた実験値のうち、もっとも H/h の値の大きい場合の、次式で定義されるレイノルズ数

$$N_R = \sqrt{\frac{\pi}{\nu T}} \cdot H \left/ \sinh \frac{2\pi h}{L} \right.$$

を計算してみると、 $N_R=137$ となり、波による底面境界層が層流から乱流に遷移する限界レイノルズ数 $N_R=160^8)$ よりやや小さい。さらに、この場合の底面境界層を層流として、その厚さを、その点での水粒子速度が境界層外縁での水粒子速度の約 99% になる高さとするれば、 $z+h=6 \cdot \sqrt{\nu T/\pi}$ としてよいから、これを計算すると 4.8 mm となり、一応 probe は底面境界層外にあったと考えられる。

4. 結 言

以上、波による水粒子速度は、従来その測定の困難さから、ほとんど検討がなされていなかったが、著者らは、hot film 流速計および水素気泡をトレーサとする方法を用いて、波による水平方向水粒子速度の測定を試み、一応その時間的変化と鉛直分布を測定することができた。

その実験結果に関するかぎり、 $T\sqrt{g/h}=12.0 \sim 1.30$

では、実験値は Stokes 波理論および hyperbolic 波の理論式によるもののどちらにもほぼ一致し、 $T\sqrt{g/h}=14.8$ の場合は、Stokes 波理論よりむしろ hyperbolic 波の理論式によるものに一致する。

$T\sqrt{g/h}=14.8$ で $(z_p+h)/h=0.05$ の場合の実験で、もっとも波高の大きかった場合の、レイノルズ数 N_R は 137 で、底面境界層の層流から乱流への遷移の限界レイノルズ数 $N_R=160$ よりやや小さく、hot film 流速計の記録のいずれにも、乱れ成分に相当する変動は見られなかった。

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付記するとともに、この研究に協力して頂いた大学院学生川島毅君に深甚の謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Morison, J.R. and R.C. Crooke : The Mechanics of Deep Water, Shallow Water, and Breaking Waves, U.S. Army, Corps of Engineers, B.E.B., Tech. Memo. No. 40, March, 1953.
- 2) Elliott, John G. : Interim Report, Hydrodynamics Laboratory, Calif. Inst. of Tech., Contract NOy-12561 U.S. Navy, Bureau Yards and Docks, July, 1953.
- 3) Goda, Y. : Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder, Experiments and a Proposed Method of Wave Force Computation, Port and Harbour Technical Research Institute, Ministry of Transportation, Japan, Report No. 8, 1964.
- 4) 堀川清司・渡辺 晃・満岡英世 : 波による水粒子速度の測定方法について, 第 22 回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭 42, II 91.
- 5) 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 24 回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭 44, II 8.
- 6) Skjelbreia L. : Gravity Waves, Stokes' Third Order Approximation, Table of Function, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, 1959, pp. 1 ~ 337.
- 7) 岩垣雄一 : クノイド波に関する研究 (第 4 報) —hyperbolic waves について (1)—, 京大防災研究所年報, 第 10 号 B, 昭 42.3, pp. 283~294.
- 8) Collins, J.I. : Inception of Turbulence at the Bed under Periodic Gravity Waves, J. of Geophysical Research, Vol. 68, No. 21, 1963, pp. 6007~6014.