

波頂付近の流速分布に関する研究

佐藤幸雄*・鰐目淑範**

1. はじめに

波による水粒子速度は、海中構造物に作用する波力や砕波現象、波による砂移動の機構などを解明するうえで重要な要因である。しかし、波動現象は水位の変動が激しい非定常流であるため、流速分布の測定は簡単ではない。特に波頂付近の流速は容易に測定できないため、実験的にはほとんど取扱われていないのが現状である。

たとえば、プロベラ式流速計を用いた場合には、非定常な振動流に対して応答性が悪く、また水アカなどが羽根軸にからみ易い等の欠点がある。熱線流速計の場合は応答性も良く、波谷以下の測定には非常に優れているが波頂付近の流速を測定する際に、本来の使用法で用いると、加熱されたセンサーが波谷通過時に空中に露出して焼切ってしまう。さらに、水素気泡式ならびに浮遊粒子や浮子などを用いた場合には Lagrange 風の流速値が得られ、水粒子の軌道などの様相を調べるためには適しているが流速値の換算が面倒である。したがって、波頂付近の流速については様相が不明のまま近似的に理論式による値が今まで用いられてきた。実際には、海中に設置された鋼管杭、その他の海中構造物に作用する抗力を見積る場合等には波頂付近の流速値は重要であり、従来用いられてきた微小振幅波理論の波頂付近への適用性について検討する必要があると考えられる。

本研究は、熱線流速計とサーボ式水面追随器を併用することによって、熱線流速計のプロープセンサーを空中に露出させることなく、水面から一定の位置に設定し、波頂付近の流速を測定し、微小振幅波、有限振幅波の各理論値と若干の比較検討を行ったものである。

2. 実験装置ならびに実験方法

(1) 実験装置

実験にあたっては、北見工業大学工学部土木工学科港湾実験室の2次元水槽（長さ 20 m、幅 25 cm、高さ 50 cm、片面ガラス張り鋼製）を用い、波はフラッター式造波機によって起波し、水槽末端には砂利によって緩勾配の

消波浜を設けた。また、波高計は容量式波高計（一部は抵抗線式波高計）を用い、流速計は KANOMAX 1008、1010、1013 のユニットを用いた。

(a) 流速測定機器

図-1 のようにサーボ式水面追随器 (SMA-503) の触針桿に熱線流速計の円錐形プロープを取付けたサポートを取付固定具によって固定し、波動による水面動揺に即応して触針が上下運動するに伴ないプロープが上下運動する装置を用いて波谷から波頂までの部分の流速を測定した。この装置では、たとえば静水時に水面下 1 cm に設定されたプロープは水面動揺が起きても常時水面下 1 cm の位置にあり、空中に露出することはない。

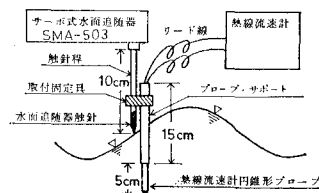


図-1 流速測定装置

ただし、水面動揺に対する水面追随器触針の応答性が悪くならないように取付固定具ならびにサポートは極力軽量にする必要があり、取付固定具はアクリライト製とし、サポートは 15 cm にして途中は細いリード線とした。プロープ、サポート、取付固定具、リード線の合計 35 g 程度である。面追随器 SMA-503 の触針が正常に応答できる取付重量限度は 60 g までである。

(b) プロープの検定

水面追随器触針に取付けられたプロープは、水面動揺に伴って同一断面内で上下運動をするため、プロープの検定は、プロープが水面に対して垂直な場合と平行な場合の二通りについて行ってみた。

水面に対して垂直な場合には、図-2 (a) における A 方向、B 方向の運動に対応するリニア出力はそれぞれ図-2 (a') のように記録される。また水面に対して平行な場合は図-2 (b) のように L 型アングルサポートを用いたが、A、B 各方向への運動に対応するリニア出力は図-2 (b') のように記録され、B 方向への運動に対する

* 北見工業大学工学部土木工学科助教授

** 北見工業大学工学部土木工学科助手

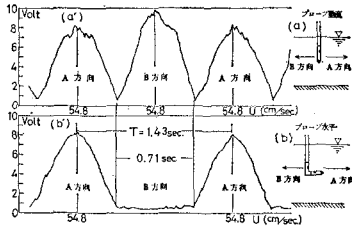


図-2 流速計検定出力

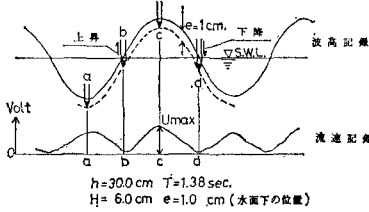


図-3 波高および流速の測定記録

リニア出力はほとんど0ボルトに近い値を示しており、プローブはこの方向への運動にはほとんど感応しないといえる。したがって、水面追従器にプローブを取付けて流速測定を行う際には、水位の上昇に伴ないプローブが上昇する時には流速の鉛直方向成分はほとんど記録されず、水平方向成分のみが記録されていると考えられる。また、反対に水位の下降時には図-2(b')の記録のB方向の出力に相当し、鉛直方向成分が含まれていると考えられるが、実際の測定では、実験波の波動と流速記録は一例を示すと図-3のように現われ、下向き鉛直方向成分が最大となるdの位相においてもリニア出力はほとんど0ボルトを示し、プローブの下降運動に対応するリニア出力は出ていない。これは、水面の下降速度が大きい場合でもそれに相当した速度でプローブが下降し、プローブが感応する相対速度は非常に小さくなるためと考えられる。同様のことが図-3のbの位相においてもいえ、a、cの位相では鉛直方向の成分は0となり水平方向速度成分のみが出力され、記録されていると考えられる。以上のことから、図-1のように水面追従器触針にプローブを取付けて流速測定を行なう場合には、水平方向成分が記録され、鉛直方向成分はほとんど含まれていないと考えられ、検定はプローブが水面に対して垂直な場合についてのみ行った。

また、熱線流速計のリニア出力電圧(E)と流速(u)との関係は次式で表わされる。

$$E=Au^B \dots\dots\dots (1)$$

ここで、定数A、Bは各プローブによって、また流体の種類、温度、過熱比などによって異なり、これらの条件が変わるたびに決定する必要がある。本実験においては、回転円板に取付けたロッドによって往復運動するトロコにプローブを設置し、その往復運動のリニア出力記録から定数A、Bを決定した。この検定は実験条件が

変るごとに行った²⁾。

(2) 実験方法

実験は等水深で行い、実験に用いた水深、波の諸元は表-1に示した。

測定区間は水平床の滑面であり、波高計と水面追従器触針、熱線流速計プローブを水槽横断方向の同一断面に設置し、波高と流速が位相的に等しく記録されるようにした。

表-1 実験波の諸元

h	T	H	$\frac{h}{L}$	$\frac{H}{L}$	$\frac{HL^2}{h^3}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{H}{L}\right)^{0.424}$	$T\sqrt{\frac{h}{g}}$	$\frac{\gamma_0 L^2}{h^3}$
20.0	1.00	1.27	0.1665	0.0106	2.277	0.073	7.00	1.489
	0.98	3.45	0.1692	0.0292	6.096	0.112	6.85	3.309
	0.98	5.79	0.1681	0.0487	10.632	0.139	6.86	5.866
	1.38	2.49	0.1105	0.0138	10.204	0.081	9.56	5.503
	1.41	4.83	0.1098	0.0263	19.971	0.107	9.87	13.730
	1.64	1.30	0.0913	0.0059	7.801	0.057	11.48	4.801
	1.67	2.31	0.0881	0.0102	14.897	0.072	11.69	8.420
	1.65	4.88	0.0896	0.0219	30.527	0.099	11.55	16.447
	0.98	1.24	0.2363	0.0098	1.281	0.070	6.12	0.951
	1.00	3.63	0.2280	0.0276	3.988	0.109	6.23	2.450
25.0	1.00	5.62	0.2278	0.0427	3.607	0.131	6.25	2.276
	1.38	1.23	0.1272	0.0063	1.390	0.072	8.64	0.695
	1.37	3.34	0.1274	0.0170	3.209	0.104	8.58	1.945
	1.35	6.34	0.1274	0.0323	15.615	0.117	8.45	9.532
	1.66	1.14	0.1039	0.0047	4.073	0.052	10.39	2.207
	1.66	3.06	0.1018	0.0125	11.911	0.078	10.39	6.916
	1.65	5.89	0.1043	0.0244	21.748	0.104	10.33	13.823
	0.98	0.79	0.2257	0.0060	0.518	0.057	5.62	0.354
	0.98	3.67	0.2271	0.0278	2.372	0.109	5.57	1.362
	0.99	6.59	0.2232	0.0490	4.410	0.139	5.67	2.520
30.0	1.37	1.11	0.1440	0.0053	1.785	0.054	7.82	0.750
	1.41	3.28	0.1359	0.0149	5.959	0.084	8.06	2.709
	1.38	6.03	0.1396	0.0281	10.316	0.110	7.89	4.986
	1.66	1.20	0.1129	0.0045	3.125	0.051	9.49	1.563
	1.66	3.43	0.1125	0.0129	8.972	0.079	9.49	5.014
	1.74	5.83	0.1052	0.0204	17.472	0.096	9.95	11.748

流速測定は波頂から3cmまでは0.5cm間隔で測定し、静水面下5cm以深は4cm間隔で底面から1cmの点まで測定した。

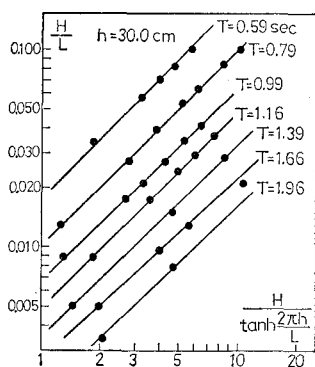
また、測定区間を挟んで500~600cmの間隔で2本の波高計を設置し波高計間を伝播する平均波速(C)を測定し、周期(T)は測定点の波高記録から求め、波長(L)を $L=C \cdot T$ によって求めた。

測定にあたっては、反射波の影響が入らないように、起波後5~10波目の波を採用した。

3. 実験結果ならびに考察

(1) 波長の測定

流速測定に先立ち、造波水槽の特性を調べるため、各水深(h)で周期(T)、波高(H)を変化させて波長(L)を測定し、Hが変化した場合の影響を調べてみた。微小振幅波の式にHを導入した形の(3)式によって測定値を整理すると $h=25.0$ cmの場合は図-4に示すように

図-4 実験波の特性 ($h=30.0$ cm)

なる。図-4の実線は(3)式を表わす³⁾。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots(2)$$

より

$$\frac{H}{L} = \frac{2\pi}{gT^2} \cdot \frac{H}{\tan(2\pi h/L)} \dots\dots\dots(3)$$

図から分るように波高変化による影響はほとんどなく、実験波の H と L の関係は微小振幅波理論によく一致している。

(2) 実験波の適用範囲⁴⁾

微小振幅波の適用範囲は $HL^2/h^3 \leq 2.63$, $H/L < 0.008$ であり、Iversen が求めた緩斜面上での波高変化を伴なう場合の適用範囲は $h/L \geq 0.5(H/L)^{0.424}$ であり、大概においては $0.1 < h/L < 0.5$ である。

第2次のストークス波の適用範囲は $HL^2/h^3 < 26.3$, $H/L < 0.0795$ であり、第3次ストークス波では $HL^2/h^3 \leq 48$ である。また、Wilson は瞬間的な衝撃などで生ずる波の実験から、静水面上の波峰の高さ (η_0) を用い、

$\eta_0 L^2/h^3 < 1$ なら Airy や Stokes の波

$1 < \eta_0 L^2/h^3 < 10$ ならクノイド波

$10 < \eta_0 L^2/h^3 < 40$ なら孤立波

$40 < \eta_0 L^2/h^3$ なら伝達に伴ない変形する波

と分類した。

本実験に使用した波は、表-1 より1波を除いて $HL^2/h^3 < 26.3$ であり、 $h/L > 0.5(H/L)^{0.424}$ である。また、ほとんどの波は $1 < \eta_0 L^2/h^3 < 10$ である。したがって、実験波は、微小振幅波、ストークス波もしくはクノイド波の領域にあると考えられる。

(3) 流速分布

本研究においては、鉛直方向成分については取扱わず、水平方向成分のうちでも、波頂通過時の水平方向の最大流速 ($U_{\max,+}$) の値についてのみ取扱うことにして、測定記録をデータ処理機 MELCOM-270 によって処理したが、測定結果の一部を水深、周期別に 図-5~図-8 に示した。縦軸に $(h+z)/L$ の値をとり、横軸には水平方向の最大流速 $U_{\max,+}$ を波速 C によって無次元化し

た $U_{\max,+}/C$ の値を用い、波形勾配 H/L 別に流速分布の状況を示している。ここで z はプローブ先端の位置を示し、静水面上で $z=0$ 、静水面より上向きに正の値とした。また、図中の実線、破線ならびに鎖線はそれぞれ微小振幅波、第3次ストークス波ならびにクノイド波の式を用いた計算値である⁵⁾。

微小振幅波の場合には、 $U_{\max,+}$ を $C=L/T$ で無次元化すると、

$$\frac{U_{\max,+}}{C} = \pi \left(\frac{H}{L} \right) \frac{\cosh 2\pi(h+z)/L}{\sinh(2\pi h/L)} \dots\dots\dots(4)$$

となり、第3次ストークス波の場合には、

$$\begin{aligned} \frac{U_{\max,+}}{C} = & \frac{1}{2} F_1^2 \cosh \frac{4\pi(h+z)}{L} \\ & + F_1 \cosh \frac{2\pi(h+z)}{L} \\ & + F_2 \cosh \frac{4\pi(h+z)}{L} \\ & + F_3 \cosh \frac{6\pi(h+z)}{L} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

となる。ここで、

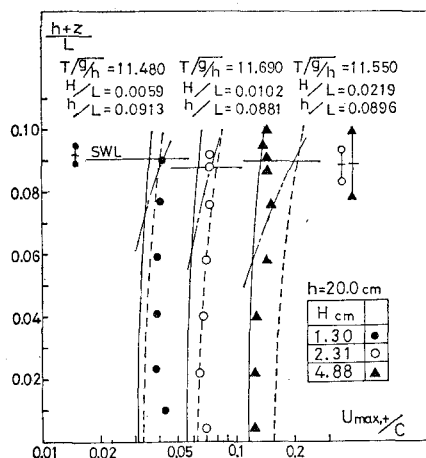
$$F_1 = \frac{\pi H}{L} (\sinh 2\pi h/L)^{-1}$$

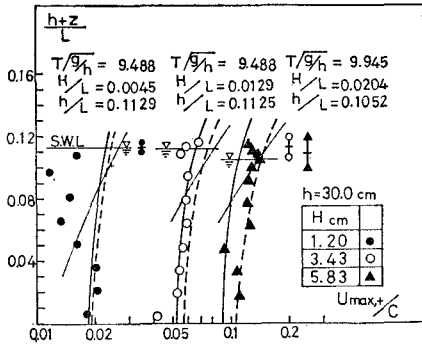
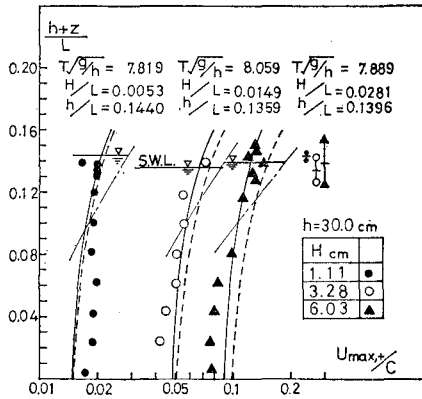
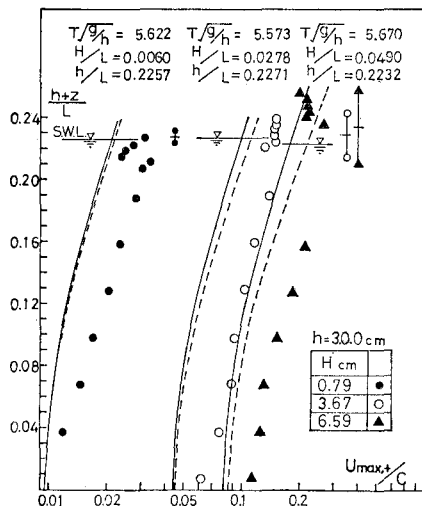
$$F_2 = \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right)^2 \cdot (\sinh 2\pi h/L)^{-4}$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \left(\frac{\pi H}{L} \right)^3 \cdot (11 - 2 \cosh 4\pi h/L) \cdot (\sinh 2\pi h/L)^{-7}$$

である。

図-5~図-8 の測定値において、 $H/L < 0.01$ の場合には、 $h/L < 0.2$ で波頂付近の流速が静水面下の流速に比べて特に大きくなるということはなく、水深方向にほぼ一様な分布となり、長波的性格を示している。計算値との比較では、ほとんどの波において微小振幅波、有限振幅波理論よりわずかに大きな値を示し、静水面付近で計算値と同程度の流速となる。 $h/L > 0.2$ では、流速分

図-5 流速分布 ($h=20.0$ cm, $T=1.70$ sec.)

図-6 流速分布 ($h=30.0$ cm, $T=1.70$ sec.)図-7 流速分布 ($h=30.0$ cm, $T=1.40$ sec.)図-8 流速分布 ($h=30.0$ cm, $T=1.00$ sec.)

布は底面から波頂付近に向けて徐々に大きくなり、傾斜した分布状況を示し、流速値は有限振幅波よりも大きい値を示す。一般に $h/L < 1/25$ で長波とみなせるが、本実験では $h/L \geq 0.881$ であり長波の適用限界を越えている。

$H/L > 0.01$ の場合には、微小振幅波、有限振幅波の分布状況と類似した傾きの流速分布を示し、 h/L が大きくなるほど、 H/L が大きくなるほど流速値は大きくなり $0.1 < h/L < 0.2$ では微小振幅波から有限振幅波へと近づく傾向とほぼ類似した結果が得られた。 $h/L > 0.2$ では H/L にかかわらず計算値よりもかなり大きな値を示し、 $0.1 < h/L < 0.2$ の場合 Ursell のパラメーターと同等の意味を持つ指標 HL^2/h^3 の値によって流速分布の状況が決まる。 HL^2/h^3 が 4 程度より小さい場合には流速分布は多小曲線を描いて静水面付近で微小振幅波の理論値と一致する。また、4 より大きい場合は微小振幅波から有限振幅波へかけて分布する。

波頂部分の流速値は、測定値が理論式による計算値ほど大きくなり、静水面付近の流速値と同じ程度かもしくは小さい流速値が現われているが、その原因は、データ数も少ないこともあり、不明である。

4. あとがき

本研究において、水面追随器に熱線流速計プローブを取付けることにより波頂付近流速分布を測定したが、 h/L , H/L によって流速分布の様相が異なり、特に $0.1 < h/L < 0.2$ の場合には Ursell のパラメーターが分布状況を表わし、その境界は $HL^2/h^3 \approx 4$ 程度である。さらに $h/L > 0.2$ では、測定流速値は理論式による計算値よりもかなり大きな値となり、その分布は、計算値に係数を乗じたような分布となっている。

今後は、これらの係数を決定するまで測定範囲を広げるとともに、適用限界を決定する必要があると考える。また、波形による考察やスペクトル表示等についても考えている。終りに、本実験を遂行するにあたり、水面追随器を用いた測定法などにご指導いただいた北海道大学工学部、佐伯助教授、ならびに実験等でご協力頂いた本学卒業生、4 年目学生諸君に対し深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、波部彌作：海岸工学，コロナ社，pp. 138~141, 1973.
- 2) 佐藤幸雄：熱線流速計の非定常的検定法について，土木学会北海道支部論文報告集，32 号，pp. 265~268, 1976.
- 3) 土木学会編：水理公式集，pp. 78, 1973.
- 4) 前出 3)，pp. 90~92.
- 5) 前出 3)，pp. 79~80.
- 6) 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 回海講講演集，pp. 15~21, 1969.