

II-3 規則波による流速分布の適用限界について(2)

北見工業大学工学部研究生 正会員 田中 淳
北見工業大学工学部 正会員 佐藤幸雄
北見工業大学工学部 正会員 鷺目淑範

I. まえがき

波の性質を知るうえで、重要な要因のひとつとして波の水粒子速度(流速)が挙げられる。現在、波を分類する際に最も容易で、広く用いられているものは波形および波高の適用限界によるものであり、一般に波の流速を算出する場合には、その適用範囲に当てはまる理論式を用いて計算するのが普通である。

前報では取扱いが簡単な電磁流速計を用いて水深方向に水平方向最大流速の測定を行い、その流速分布について微小振幅波および有限振幅波の理論値と比較したところ、波形・波高の適用限界とに差異が生じ、流速に関する適用限界も同様に比水深(H/L)、波形勾配(h/L)によって分類が可能であることが分かった。そこで、波形勾配を0.005~0.065までの10種類に設定した波について電磁流速計を用いて水平方向最大流速の測定を行い、その結果の考察に加えて、熱線流速計についても同様の測定を行うことによって、電磁流速計により得られた結果の妥当性を確認しようというものである。

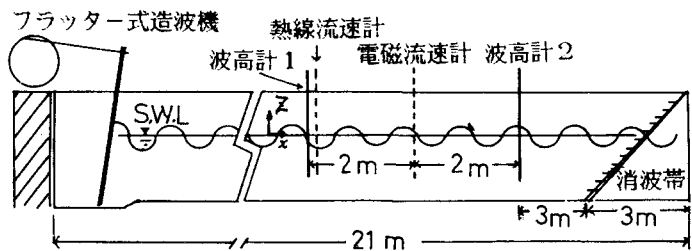
II. 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は、片面ガラス張り鋼鉄製2次元水槽で実験器具は図-1のように配置した。

流速計は電磁流速計(ACM-250)と熱線流速計(KANOMAX-1008)を使用して、それぞれ別々に測定を行った。なお、熱線流速計のセンサー部分には円錐形プローブを使用している。測定点Zは水深を h として $Z=(1.0-h)$ cmから $Z=-10$ cmまでは2cm間隔、 $Z=-10$ cmから波谷付近までは1cm間隔とし、起波後定常状態になった5~10波について各波の水平方向最大流速を求め、その平均値を測定点に対する水平方向最大流速 U とした。波高計は容量式波高計を使用し、波高計1の平均波高、平均周期を波高 H 、周期 T とし、波高計1,2の記録により波速 C を算出して、波長 $L=C \cdot T$ として求めた。

測定値は一度データレコーダに記録し、AD変換器を用いてFDに再集録したデータを処理に使用した。サンプリングタイムは T により異なるが、電磁流速計で0.003~0.005sec、熱線流速計で0.001~0.003secである。流速計の時定数は電磁流速計が0.05sec、熱線流速計が0.1secである。

図-1 実験器具の配置



III. 波形・波高の適用限界と実験波諸元

波形・波高の適用限界は種々提案されている。

第3次近似ストークス波の2次発生限界は $HL^2/h^3 \leq 48$ ----- (1)

微小振幅波の適用限界は第2次近似ストークス波の適用限界に比べ、波高が1/10程度であるとされる。第2次近似ストークス波の2次発生限界は $HL^2/h^3 \leq 8\pi^2/3$ (ただし、 $H/L < 1/4\pi$) それゆえ、微小振幅波の適用限界は $HL^2/h^3 \leq 8\pi^2/30$ (ただし、 $H/L < 1/40\pi$) ----- (2)

Iversen が緩傾斜面上での波高変化の実験により求めた微小振幅波の適用限界は

$$h/L \geq 0.50(H/L)^{1/2.38} \quad \text{----- (3)}$$

Wilsonらは静水面上の波峰の高さ η_0 を用いて $\eta_0 L^2/h^3 < 1$ なら Airy や Stokes の波 ----- (4)

$1 < \eta_0 L^2/h^3 < 10$ ならクノイド波 ----- (5)

$10 < \eta_0 L^2/h^3 < 40$ なら孤立波 ----- (6)

$40 < \eta_0 L^2/h^3$ なら伝達に伴い変形する波

(4)~(6)において $\eta_0 = H/2$ とし、各式の最大側を示したのが図-3, 図-5の(1)~(6)の曲線である。

実験波の諸元を表-1に示し、図-3, 図-5にH/L, h/Lで整理した。実験波は波形・波高の適用限界において(5)式のクノイド波領域、(4)式のAiry, Stokes波領域に分布している。

IV. 測定結果と考察

各実験波における流速の微小振幅波・有限振幅波理論値、および測定値は $\sqrt{gL}$ で無次元化し、それぞれ $U_s/\sqrt{gL}$, $U_s/\sqrt{gL}$, $U/\sqrt{gL}$ とした。詳しくは前報を参照のこと。

1. 電磁流速計による測定

(1) 流速分布

測定結果は縦軸に $(h+Z)/h$ 、横軸に $U/\sqrt{gL}$ をとり一例を図-2に示した。図中の点線は微小振幅波、一点鎖線は有限振幅波理論値を表し、実線は測定値を最小2乗法で $U/\sqrt{gL} = A((h+Z)/h)^2 + B$ (A, Bは各波ごとの定数)の形に近似させたものである。

流速分布の形状は図-2の8つの形態に分類できるが、それを記号化してH/L, h/Lで整理したのが図-3である。図-3の右側は流速分布の形態を模範的に示したもので、丸い記号(●, ○, ◎)から四角い記号(◇, □, ■)に移行するにつれて微小振幅波から有限振幅波の分布になることが分かる。H/L, h/Lでその様子を見ると、同一H/Lにおいてはh/Lが大きくなるほど微小振幅波から有限振幅波の流速分布に移行する傾向がある。実験波は(5)式が示すクノイド波領域にある波が微小振幅波の、また(4)式のAiry, Stokes波領域にある波が有限振幅波の流速分布に近い形状になっていることが分かる。これは、波形・波高の適用限界が一定のH/Lでh/Lが大きくなるにつれて有限振幅波のから微小振幅波へ移るということと相反する結果である。ただし、H/L < 0.02の領域では測定値の大半が有限振幅波の流速分布になっており、クノイド波領域にあることと合致する。

(2) 流速分布の傾き

前項では、測定値が理論値と比較してどの様な分布を示すかということを中心に分類してきたが、流速値の大小関係にかかわらず、形状を客観的に判断するために傾き $P = d\{(h+Z)/L\} / d(U/\sqrt{gL})$ を求めて比較を行った。

表-1 実験波諸元

NO.	T	h	H	h/L	H/L
1	0.804	35.0	3.85	0.3519	0.0387
2	0.813	35.0	5.02	0.3434	0.0492
3	0.811	35.0	6.22	0.3424	0.0608
4	0.803	32.5	3.22	0.3296	0.0327
5	0.806	30.0	3.85	0.3049	0.0391
6	0.799	30.0	4.89	0.3072	0.0501
7	0.803	30.0	5.76	0.3083	0.0592
8	0.796	27.5	2.36	0.2865	0.0246
9	0.794	27.5	2.68	0.2900	0.0282
10	0.805	25.0	3.80	0.2641	0.0401
	(0.788)	(25.0)	(3.74)	(0.2601)	(0.0389)
11	0.797	25.0	4.79	0.2674	0.0513
	(0.782)	(25.0)	(4.93)	(0.2614)	(0.0516)
12	1.051	25.0	8.42	0.1890	0.0636
13	1.002	27.5	6.95	0.2005	0.0507
14	1.002	27.5	5.44	0.2040	0.0403
15	1.002	27.5	4.32	0.2022	0.0317
	(0.956)	(27.5)	(3.95)	(0.2059)	(0.0296)
16	0.986	27.5	2.18	0.1998	0.0158
17	0.994	30.0	2.88	0.2161	0.0208
18	0.989	30.0	3.54	0.2178	0.0257
19	1.002	30.0	8.60	0.2132	0.0611
20	0.995	32.5	4.17	0.2303	0.0296
	(1.007)	(32.5)	(4.49)	(0.2258)	(0.0312)
21	1.005	32.5	5.74	0.2277	0.0402
	(1.015)	(32.5)	(5.52)	(0.2234)	(0.0379)
22	0.989	32.5	7.05	0.2322	0.0504
23	0.985	35.0	2.95	0.2421	0.0204
24	1.002	35.0	3.45	0.2413	0.0238
25	0.988	35.0	8.44	0.2442	0.0580
	(1.017)	(35.0)	(9.14)	(0.2336)	(0.0610)
26	1.195	35.0	1.73	0.1768	0.0087
27	1.193	35.0	2.73	0.1839	0.0147
28	1.205	35.0	3.66	0.1817	0.0190
29	1.215	30.0	1.91	0.1601	0.0102
	(1.173)	(30.0)	(1.95)	(0.1625)	(0.0105)
30	1.200	30.0	2.69	0.1654	0.0148
31	1.201	30.0	3.56	0.1660	0.0197
32	1.213	27.5	4.32	0.1529	0.0240
33	1.211	27.5	8.63	0.1578	0.0495
34	1.201	25.0	4.94	0.1495	0.0295
35	1.205	25.0	6.48	0.1502	0.0389
	(1.184)	(25.0)	(6.76)	(0.1506)	(0.0407)
36	1.481	25.0	5.46	0.1130	0.0247
37	1.487	27.5	2.49	0.1126	0.0102
38	1.524	27.5	4.65	0.1164	0.0197
39	1.523	35.0	1.35	0.1270	0.0049
	(1.466)	(35.0)	(1.50)	(0.1306)	(0.0056)
40	1.758	30.0	1.44	0.1008	0.0048
41	1.746	25.0	2.30	0.0965	0.0089
42	1.722	25.0	3.79	0.0983	0.0145
43	1.702	25.0	4.82	0.1014	0.0195
44	2.000	25.0	1.66	0.0777	0.0052

() は熱線流速計による緒元

図-4は縦軸に $(h+z)/h$ 、横軸に P をとって傾きの変化を表したものである。また、図-5は流速分布と同様に傾きの変化の形態を記号化して分類し H/L 、 h/L で表したものである。

図-2を見て分かる通り、微小振幅波と有限振幅波の流速分布は底面付近では差異はあまり見られないが、水面付近になるにつれて有限振幅波理論値の方は流速値の増加が大きくなり、その形状は微小振幅波に比べて丸みを帯びた曲線の傾向が強く見られる。それゆえ、理論値の傾き P を求めたときの特徴は有限振幅波ではその分布は狭く、総体的に小さな値になる。逆に微小振幅波では広範囲にわたって P は分布し、その値も大きめである。

図-3 流速分布状況と H/L 、 h/L

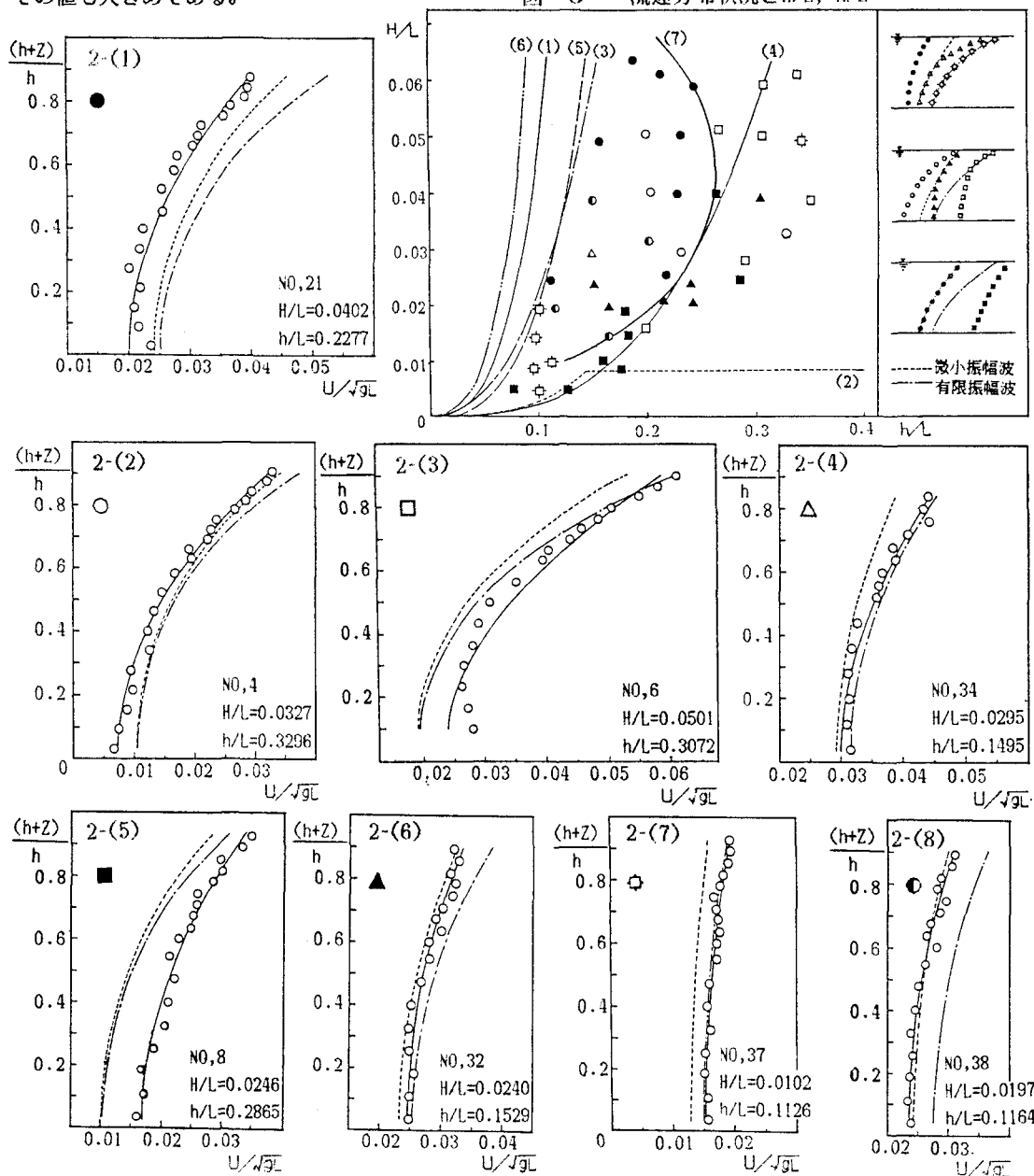


図-2 電磁流速計による水平方向最大流速 U の分布状況

図-5においては、白い記号（□，○，△）から黒い記号（▲，●，■）に移行するにつれて、微小振幅波から有限振幅波の形状に近くなるといえる。この様子を同一H/L について考察すると、h/Lが大きくなるに従い微小振幅波に近い形状を有するものが現れ、前項で得られた結果とは若干異なる。しかし、H/L<0.02 の領域においてはその大半が有限振幅波に近い形状であり、クノイド波のような波と言える。

(3) 平均流速による考察

測定値と理論値の総体的な大きさを比較するために平均流速を用いて考察を行った。

微小振幅波・有限振幅波理論値、測定値の平均流速は測定点に対する流速値を算術平均して $\bar{U}_b$ 、 $\bar{U}_s$ 、 $\bar{U}_t$ として求めた。

$\sqrt{gL}$ で無次元化した微小振幅波の理論式は Zに 関与しない部分をGとすると

$$\bar{U}_b/\sqrt{gL} = G \cdot \cosh 2\pi(h+Z)/L$$

$$G = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{L} \cdot \frac{\tanh 2\pi h/L}{\sinh 2\pi h/L}}$$

Gは各実験波のH/L,h/L により決まる固有の値であり、Gの値を求めて $\bar{U}_b$ 、 $\bar{U}_s$ 、 $\bar{U}_t$ の大小関係を H/Lによって整理したのが図-6である。図-6では、同一H/L で 1/Gが大きくなるに従い平均流速が微小振幅波より小さいものから、有限振幅波より大きくなるものに移り変わっている。その境界を示すものとして引いたのが図中の直線である。この直線は

$$1/G = -1070.660(H/L) + 94.240 \quad \text{-----} \quad (7)$$

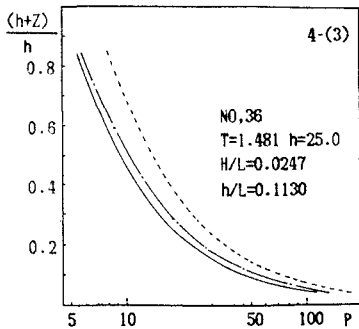
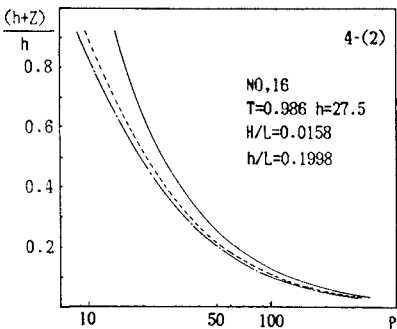
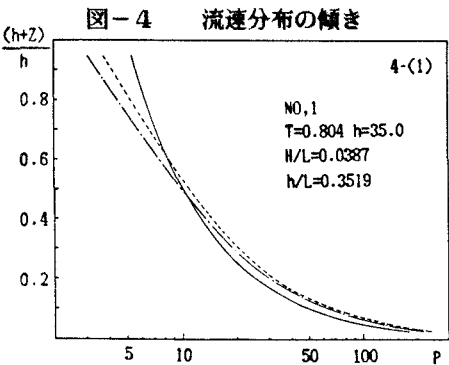
で表され、(7)式を満足する H/L,h/L を結んだのが図-3、図-5の太線である。この太線は流速分布や傾きの移り変わる境界線になり、流速についての適用限界と考えられる。

以上の結果は、前報で得られた結果とほぼ一致するものである。

2. 熱線流速計による測定

熱線流速計を用いて測定した流速分布の状況を図-7に示す。図-7において●は熱線流速計、○は電磁流速計による測定値であり、破線は熱線流速計の測定値を最小2乗法で近似した値である。

熱線流速計の測定値についても電磁流速計の場合と同様に流速分布、傾き、平均流速の各項目ごとに理論値との比較を行った。表-2はその結果を電磁流速計の結果と併せて示したものである。両者の流速分布を比べると水底付近では熱線流速計の測定値の方が小さくなって現れるが、水面付近になるにつれての流速の増加率は電磁流速計による増加率よりも大きい。ゆえに、水底付近では電磁流速計の測定値より小さい流速が水面付近では大きくなって、互いに交差し合う分布を示す測定値もある。表-2においては電磁流速計と熱線流速計の流速分布が互いに同じ記号で表されているものは少ないが、電磁流速計による分類を著しく否定するものはない。流速分布の傾きについては、どちらの流速計でも同じような記号で分類されることから、流速分布形状は互いに似通った



ものであると言える。平均流速による比較は、測定値と理論値による総体的な大きさの比較であるが、電磁流速計と熱線流速計の絶対的な流速値が若干異なり、平均流速については同じ記号で分類されない。そのため、平均流速を考察することによって電磁流速計の結果を追認することはできなかった。

しかし、総体的にみると熱線流速計の実験結果は電磁流速計の実験結果を否定するものではないと言える。

V. あとがき

電磁流速計を用いた流速の適用限界は波形・波高の適用限界と同様に H/L , h/L で表すことができた。この場合、実験結果に関する限り図-3、図-5の(7)の曲線を微小振幅波と有限振幅波との適用限界と考えることができる。この曲線は、前報で同様にして求めた曲線と数値的には若干異なるもののその差異は極めて微妙である。 $H/L > 0.02$ の領域では(7)の曲線を境にして、 h/L が大きくなると有限振幅波に、また、 h/L が小さくなると微小振幅波の適用範囲となる。これは、波形・波高の適用限界と一致していないが、 $H/L < 0.02$ の領域では一致して有限振幅波(クノイド波)の適用範囲となる。

熱線流速計による測定では、データが少ないこともあり満足な結果は得られなかったが、電磁流速計による結果を否定するようなものではなかった。

今後は、熱線流速計のデータを充実させて電磁流速計との比較を明瞭にするとともに、具体的な数値、数式を用いて流速の適用限界をより明確なものとしたい。

最後に、本研究を遂行するにあたり実験、データ処理にご協力頂いた本学港湾研究室の学生諸君に深甚の謝意を表します。

参考文献

土木学会編：水理公式集（昭和38年度版、昭和46年度版、昭和60年度版）

鰐目淑範・佐藤幸雄：「規則波による流速分布の適用限界について」 土木学会北海道支部論文報告集（昭和61年度）

図-5 傾きの形態と H/L , h/L

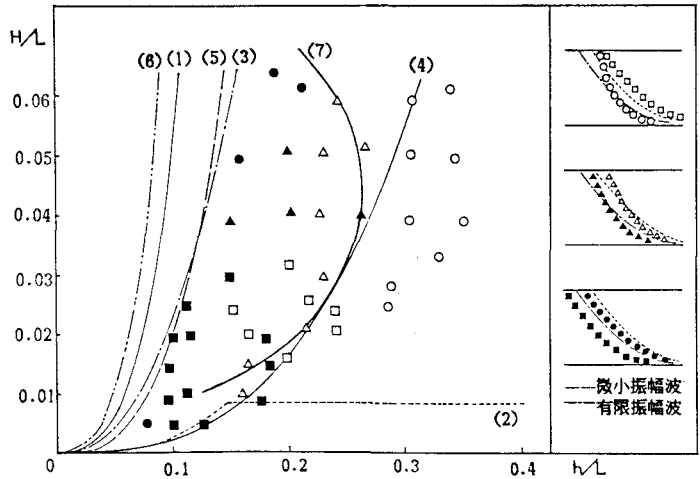


図-6 U_2 , U_6 , U_8 と G

