

超音波流速計による波の水粒子速度 に関する実験的研究

土 屋 義 人*・山 口 正 隆**

1. 緒 言

波の水粒子速度を正確に知ることは、波力および漂砂などの問題の解明にきわめて重要であるが、その測定の困難さのためか従来あまり研究が行なわれていなかったようである。しかし、最近、合田¹⁾、Méhauté²⁾ および岩垣ら³⁾ は規則波の場合についてそれぞれ、プロベラ式流速計、中立浮遊粒子を用いる方法、水素気泡式流速計およびホットフィルム流速計を用いて波の水平水粒子速度を測定し、有限振幅波理論との比較を行なっている。特に、合田は広範囲な実験より波の峯および谷における水粒子速度を表わす1つの実験式を与えた。これらの結果をみると、Méhauté は合田の実験式をも含めて種々の有限振幅波理論のいずれもが、波の水平水粒子速度を十分表現しえないと結論づけているのに対して、岩垣らはこれらの理論の適用範囲内では理論と実験値は比較的良好に一致すると述べている。いずれにせよこのことは波の水粒子速度の測定の困難さを示すものであろう。また、規則波による鉛直水粒子速度、さらに風波および現地波浪の水粒子速度についてはあまりその報告例がみられない。そこで、著者らは最近開発されたドップラー式超音波流速計を用いて、規則波、風波および現地波浪の水平および鉛直水粒子速度を測定してその特性を検討し、波動運動場の内部機構の解明に役立てようとするものである。すなわち本論文では、まず規則波の場合を扱い、周期および波高を広範囲に変化させて、波の水粒子速度を測定し、種々の有限振幅波理論との比較を行ない、超音波流速計の適用性について検討を加える。次に、風洞内で発生させた風波の水粒子速度を測定し、そのスペクトル特性とくに水位変動との相関性を詳細に検討し、風波の水粒子速度に対する相関性の適切な表示式を見い出そうとするものである。さらに、現地波浪に対しては観測で得られた水位変動および水粒子速度の資料に基づいて、これら相互の関連性を考察するつもりである。

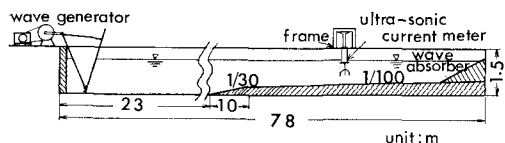
2. 規則波による実験

(1) ドップラー式超音波流速計の特性

この流速計は発信器より発信された超音波 (10 kHz) の振動数が水中の浮遊粒子の運動によるドップラー効果のためにずれることを利用して方向別の水粒子速度成分を測定しようとするものであり、微流速の測定ができること、応答性がよいこと、プローブによって流れを乱さないことおよび方向別の水粒子速度成分をそれぞれ別個に連続的に測定することができる大きな特徴をもっているが、一方、欠点としては水粒子そのものの移動速度を測定するのではなく、水中の泡やゴミなど超音波が散乱する粒子の移動速度を測定することになるので、その応答性が問題になることである。

(2) 実験装置および実験方法

実験は京大防災研宇治川水理実験所にある図一1 に示



図一1 実験装置の概略図

す長さ 78 m, 幅 1 m および深さ 1.5 m の一端に勾配 1/100 の斜面をもつコンクリート造長水槽を用いて行なった。実験装置は造波機側の水槽端より約 53 m の地点に鋼製のわくを組み、そこに超音波流速計をつり下げたものである。実験は、まず周期 T 、水深 h および流速計設置位置 z を一定にして、波高 H を広範囲に変化させて行ない、水平および鉛直水粒子速度を測定した。ついで、波高を一定にして流速計の設置位置を変化させて水粒子速度の鉛直分布を測定した。また、波高の測定は流速計と同じ鉛直平面内に設置した電気抵抗線式波高計により、記録の解析にはできるだけ反射の影響の入らない波を用いた。なお、流速計は3方向成分が検出できるの

表一1 実験波の特性

T (sec)	h (cm)	$T\sqrt{g/h}$	H (cm)
1.50	55.6	6.30	9.4~25.3
2.00	55.6	8.40	9.0~39.6
2.50	55.6	10.50	6.2~39.1
3.00	55.6	12.60	6.6~42.2
2.50	27.8	14.85	5.7~19.5
3.00	27.8	17.82	4.7~24.8

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

で、水路軸と直角方向の成分が0になるように設置した。実験条件を表-1に示す。

(3) 実験結果および考察

図-2は波の峯および谷の位相における水中の1点 z における水平水粒子速度 u_c および u_t の波高による変化を示したものであり、図中の記号1, 2, 3および4はそれぞれ Skjelbreia⁴⁾ による各次数の Stokes 波の理論曲線であり、また記号 c は水深として平均水深を用いて計算された Laitone⁹⁾ のクノイド波の第2近似解を示す。これらによれば、波の峯の位相では、実験値は第1次近似解の理論曲線によく一致しており、有限振幅波理論で与えられるほど水粒子速度の波高による増加の割合が大きくなり、砕波限界付近では第1次近似解よりさらに若干小さな値を与えている。そして、波の峯での $T\sqrt{g/h}$ の値の範囲におけるこの傾向は Méhauté らの結果にも見られる。一方、波の谷の位相では実験値は全体的に第4次近似解やクノイド波の第2近似解に近い値を与えて

いるが、特に $T\sqrt{g/h}$ の値が増加するにつれて、波高がかなり大きくなってもクノイド波理論によく一致するようである。次に、図-3は鉛直水粒子速度の最大値の波高による変化を示したものであるが、第3および第4次近似解では波高が大きくなると、波形にひずみが現われ、鉛直水粒子速度の最大値が計算できなかったの示していない。さらにこれらの図では位相の関係については議論しない。さて、これらから明らかなように、鉛直水粒子速度についても $T\sqrt{g/h}$ の値の小さい場合には、実験値は波高の小さな場合を除き理論曲線より全体的に小さくでており、あまり両者の対応はよくないが、 $T\sqrt{g/h}$ の値の増加とともにクノイド波の第2近似解によく一致するようになる。したがって以下の議論では Stokes 波の第1, 第4次近似解およびクノイド波の第2近似解と実験値との比較を行なうことにする。図-4は波の峯および谷の位相での水平水粒子速度の鉛直分布を示すものであり、波の峯の位相では、 $T\sqrt{g/h}$ の値の

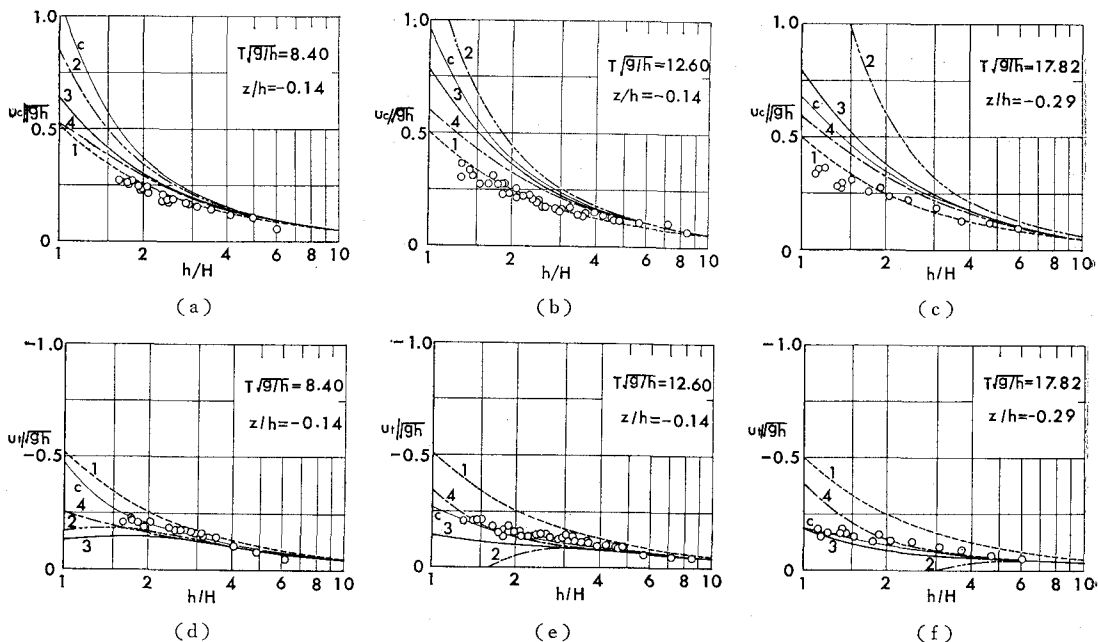


図-2 水平水粒子速度の波高による変化

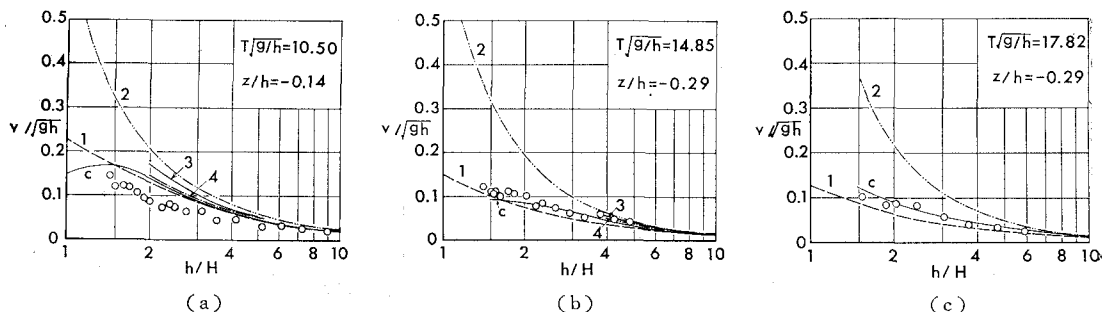


図-3 鉛直水粒子速度の波高による変化

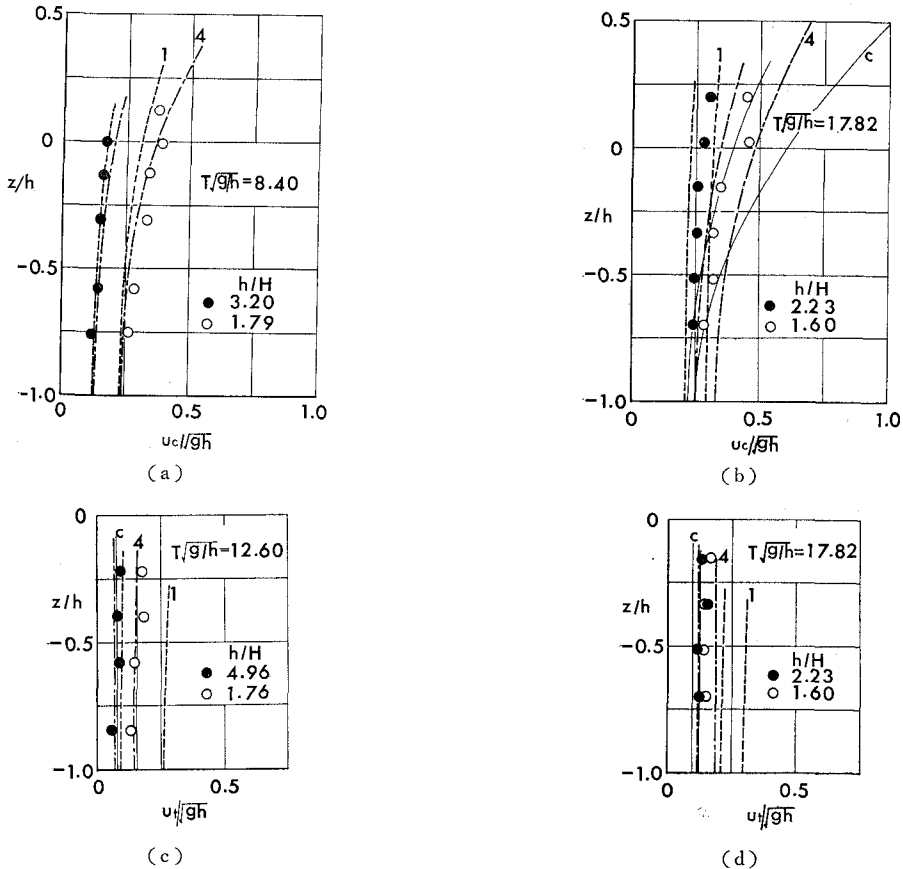
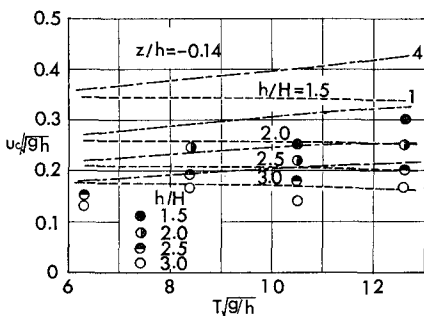
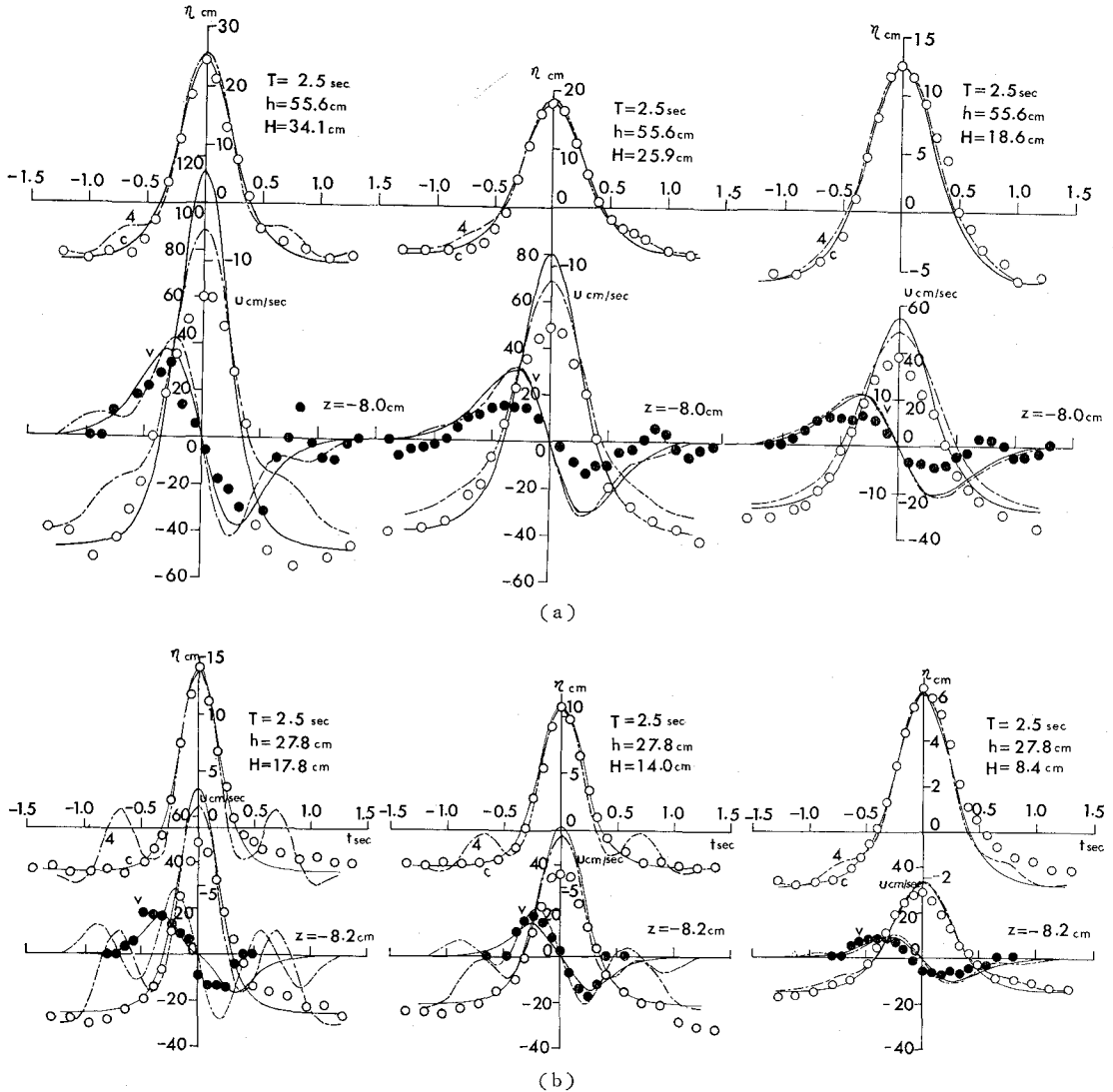


図-4 水平水粒子速度の鉛直分布

小さい場合には実験値は第4および第1次近似解に比較
 的によく一致しているが、 $T\sqrt{g/h}$ の値の大きい場合には
 これの間に図示される。しかし、その分布形状は理論で
 与えられるものに近いようである。またクノイド波の第
 2近似解は解の近似度が悪いので、かなり過大な値を与
 えている。一方、波の谷の位相では、第1次近似解より
 第4次近似解やクノイド波の第2近似解に近い値を与
 えている。図-5 は波高をパラメーターにして $u_c/\sqrt{gh}$
 と $T\sqrt{g/h}$ との関係を示したものであるが、 $T\sqrt{g/h}$ の
 値の増加とともに $u_c/\sqrt{gh}$ は増大し、絶対値を別にす

れば、この傾向は第4次近似解で与えられるものに近
 い。図-6 は水位と水平および鉛直水粒子速度の時間的
 変化について第4次近似解およびクノイド波の第2近似
 解と比較したものであり、図中の白丸は水平水粒子速度
 を示し、黒丸は鉛直水粒子速度を示す。これらの図で
 は、 $T\sqrt{g/h}$ の値および波高が大きいため、Stokes 波
 は解の収束性が悪くなり、波の谷付近に小山が見られる
 が、それらを除けば、水位の時間的変化についてはクノ
 イド波および Stokes 波理論と比較的によく一致して
 いる。しかし、水平水粒子速度については $T\sqrt{g/h}$ の値
 が大きく波高の小さい場合を除き、波形の傾向はよく一
 致しているが、絶対値がかなり小さい。一方、鉛直水粒
 子速度については、 $T\sqrt{g/h}$ の値が大きな場合、両者の
 対応が比較的によくつくが、 $T\sqrt{g/h}$ の値の小さな場合には
 実験値がかなり小さくでている。これは流速計増幅部
 の円柱の影響および記録計の操作の誤りによりその極値
 がわずかに cut されたためであろう。図-7 は水平およ
 び鉛直水粒子速度の鉛直分布についてその時間的な変化
 を示したものであって、この場合あまり波高が大きくな
 いので有限振幅波理論はそれぞれの適用範囲内で水位お
 よび水粒子速度の時間的変化の実験値と比較的によく一致


 図-5 水平水粒子速度の $T\sqrt{g/h}$ による変化



図—6 水位および水粒子速度の時間的変化 (白丸：水平速度，黒丸：鉛直速度)

している。しかし、クノイド波の第2近似解は、波高がそれほど大きくなくても水面に近づくほど過大な値を与える傾向がうかがえる。また第1近似解は水粒子速度については波の峯や谷の位相近くでは実験値とよい対応を示しているが、水位および水粒子速度の時間的な変化については当然のことながら、異なった形を与えている。

以上要約すると、次のようになる。すなわち、第1次近似解は水平および鉛直方向の水粒子速度に対してそのピーク付近では全体的によい近似を与えるが、その時間的な変化については妥当性が乏しい。また Stokes 波やクノイド波といった有限振幅波理論は、水位変化に対しては実験値ときわめてよく対応するが、水平水粒子速度に対しては一般に過大な値を与え、特に波高の大きい場合にその傾向が著しい。鉛直水粒子速度についても同様のことがうかがえるが、 $T\sqrt{q/h}$ の値が大きくなると、

クノイド波の第2近似解に近い値を与えるようである。

3. 風波による実験

(1) 実験方法

実験には同実験所に新設された循環式風洞水槽（海岸波浪シミュレータ）を用いた。実験はまず循環式風洞内で風の吹き出し口より約 38 m の地点の水槽底より 8 cm の位置に流速計を取り付け、水深を $h=40$ cm と一定にして風速を変化させ、循環式風洞水槽とした場合（recirculating）と波向制御装置を操作して通常の風洞と同じ状態で用いた場合（non-recirculating）とについて風波による水粒子速度を測定した。ただし、いずれの場合にも定常状態になったときの風波を対象とした。次に、水槽直線部で波向制御装置より約 10 m の地点において静水面より 11 cm の位置での流速を以上二つの場

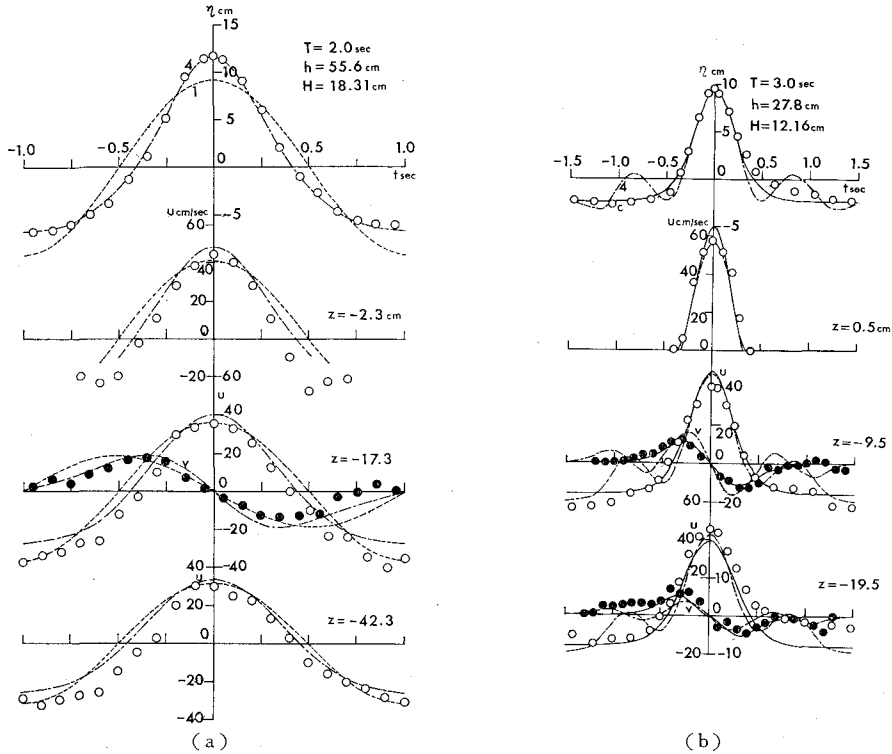


図-7 各高さにおける水粒子速度の時間的变化 (白丸：水平速度，黒丸：鉛直速度)

合について測定した。水位変動はそれぞれ流速計の近傍に設置した電気抵抗線式波高計によって測定した。なお流速計の設置方向は 2. の場合と同じである。記録は 0.1 sec ごとにサンプル数 600 個ないし 1200 個を読み取り、Blackman-Tukey の方法により lag 50 としてそれぞれのスペクトルを計算した。

(2) 実験結果およびその考察

図-8 (a) および (b) は循環式風洞水槽の場合とそうでない場合について、水底より 8 cm の位置での水粒子速度およびそのごく近傍での水位変動のパワースペクトルを図示したものである。図中の実線は水位変動 η 、破線は水平水粒子速度 u および 1 点鎖線は鉛直水粒子速度 v を示し、また点線および 2 点鎖線はそれぞれ η と u および η と v とのコヒーレンスを表わす。これらの実験では超音波流速計を用いるとき反射体として粉状物質をかなり投入したため、水面の摩擦係数がいわゆる contamination 効果のため減少し、低風速では風波があまり発達しなかった。したがって風速をかなり大きくしたので、得られた波は有義波高 10 数 cm で、しばしば white caps が見られ、循環式の場合にはかなり drift current が発生した。そのため得られた水平水粒子速度の記録はある正の平均流速のまわりのほとんど負の値をもたない変動であって、これは流れに波が加わった結果になっている。このような状態は多かれ少なかれ循環式でない場合すなわち non-recirculating のときにも見ら

れた。これらの結果から、中心周波数は異なっているが、水位変動および水粒子速度のスペクトルは中心周波数近傍ではそれぞれきわめてよく似た形をしており、両者の対応が密接であることがわかる。しかしながら、高

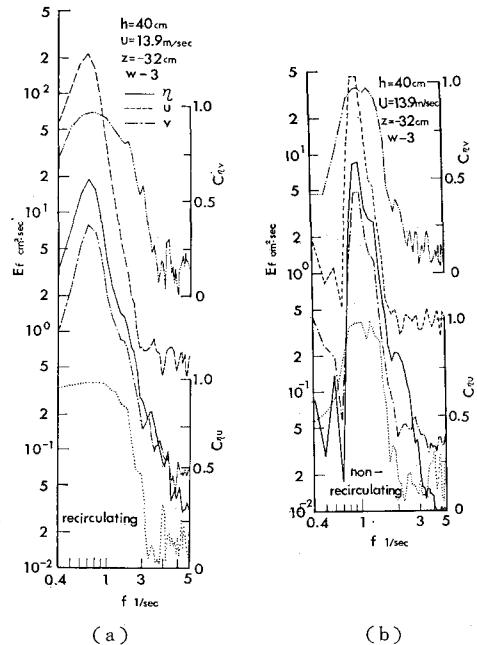


図-8 循環式風洞内での水位および水粒子速度のスペクトル特性

周波側では水位変動スペクトルがほぼ f^{-5} 則にしたがって減少しているのに対し、水粒子速度のスペクトルの高周波側には雑音が混入していることがわかる。この原因としては流速計を狭い場所に設置したため水槽側壁、底面および水面からの反射による雑音の混入とこの流速計の応答性の問題が考えられる。このことは図中に示したコヒーレンスの特性からもわかり、中心周波数近傍ではいずれの方向の水粒子速度についてもその値が1に近く、周波数が高くなるにつれてコヒーレンスの値が0に近づき、両者の相関性が弱くなっている。また水粒子速度のスペクトルは圧力のそれとは異なり、比較的高周波側でも減衰せず、水位変動との対応がよいようである。図-9(a) および (b) は直線水槽部で得られた波の

形の相関性を調べた際に用いたように両者のパワースペクトルまたはクロススペクトルより周波数応答関数を決定することが考えられる。さて、風波などの場合実測のパワースペクトルまたはクロススペクトルを用いて求め

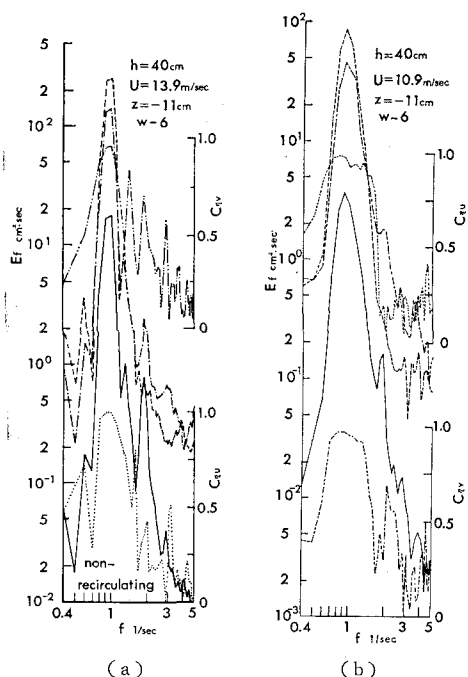


図-9 水槽直線部での水位および水粒子速度のスペクトル特性

水位変動および水粒子速度と循環式風洞水槽で風波を十分発達させたのち、波向制御装置を操作して直線水槽部に取りだした波についてスペクトル解析したものである。そして、図-9(a) は減衰領域における風波（ただし風は風洞内を循環している）の場合であり、また (b) は静かな水域に進入する風波に対応している。さて 図-9 から 図-8 と同様のことが明らかになるが、流速計の設置位置が静水面に近いので、図-8 に比べて鉛直方向の水粒子速度がかなり大きな値を示している。

次に、水位変動のスペクトルから水平および鉛直水粒子速度のスペクトルを推定する一便法を検討しよう。この場合通常の方法としては本間ら⁹⁾ が水面波形と圧力波

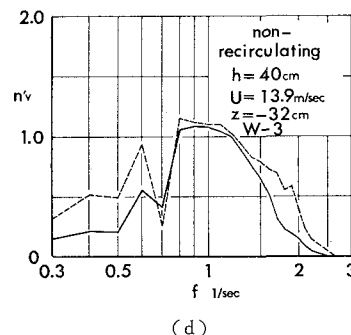
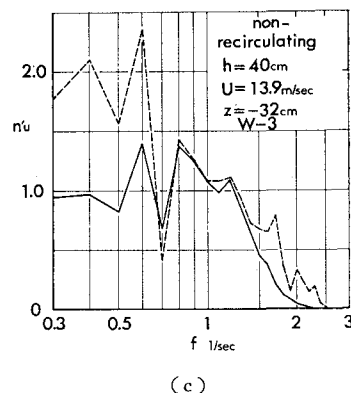
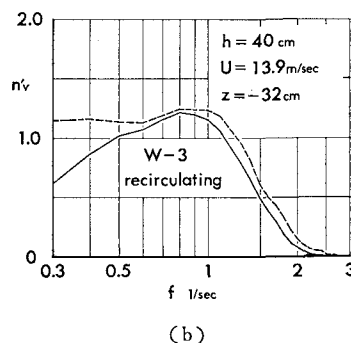
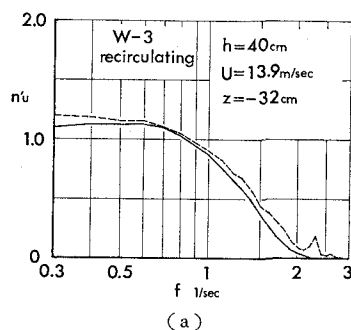


図-10 水平および鉛直水粒子速度に対する補正係数の周波数による変化

た周波数応答関数と微小振幅波理論より求められる周波数応答関数とは波の非線型性および風波の有限峯長の影響などのために、一般には一致しないので、水圧式波高計の場合には補正係数が用いられている。そこで、水粒子速度の場合についても水平および鉛直水粒子速度に対する補正係数 n_u' および n_v' を導入し、その特性を若干調べてみよう。 n_u' および n_v' は次式で与えられる。

$$n_u' = \{2\pi f \cosh k(h+z)/\sinh kh\}/G(f)$$

$$n_v' = \{2\pi f \sinh k(h+z)/\sinh kh\}/G(f)$$

ここに、 $G(f)$ は実測の水位変動と水粒子速度とのパワースペクトルあるいはクロススペクトルより求められる周波数応答関数である。図-10 は 図-8 の場合について求めた n_u' および n_v' の周波数による変化を示すものである。図中の実線および破線はそれぞれパワースペクトルおよびクロススペクトルより求めたものである。これらから、中心周波数付近では n_u' および n_v' は 1 より大きな値をとっているが、高周波側になるにつれ、当然のことながら急激な減少を示し、水圧式波高計の n 値とよく似た傾向を示すことがわかる。またこれらの図ではパワースペクトルより求めた値とクロススペクトルより求めた値とはかなりよく一致している。以上のようにしてこの補正係数の値をあらかじめ知っておけば、水位変動のスペクトルより水平および鉛直水粒子速度のスペクトルを推定することができる。しかし n_u' および n_v' は有限振幅波理論から明らかなように、二次的な波に対して一般に、

$$n_i' = f(z/h, h/H, h/L), i=u, v$$

と考えられるので、その挙動についてはさらに系統的な実験的検討が必要であることはいうまでもない。

4. 現地波浪による観測

(1) 観測方法

観測は 1970 年 11 月 3 日 12 時 40 分ころから京大防災研附属白浜海象観測所の海洋観測塔で行なった。この海洋観測塔は田辺湾内の平均水深 5.5 m の海中に設置されており、またこの場合の観測方法としては、この塔の海面下約 2 m のところに超音波流速計を据え付け、3 方向成分を電磁オシログラフに記録させ、同時に水位変動を容量式波高計によって測定し、自動平衡型記録計で記録した。このようにして得られた記録は、水位変動に対し $\Delta t=0.32$ sec, lag 50, 自由度約 20, 読みとり個数 $N=600$ として、また水粒子速度に対しては $\Delta t=0.25$ sec, lag 64, 自由度約 10, 読みとり個数 $N=324$ として解析された。この解析では自由度が若干不足していると思われるが、予備観測としてこの程度におさえられた。

(2) 観測結果およびその考察

図-11 は観測塔で得られた水位変動および方向別の

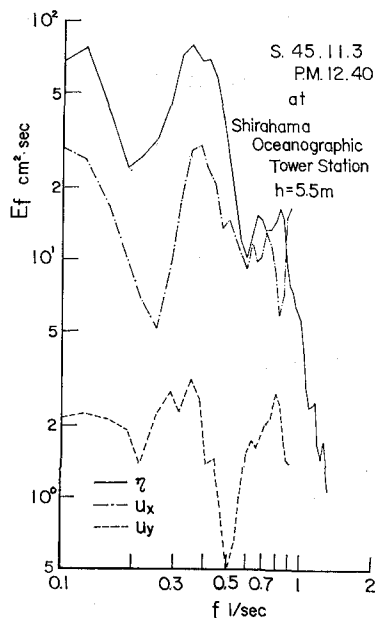


図-11 現地波浪による水位および水平水粒子速度のスペクトル特性

水平水粒子速度のパワースペクトルを示すものであり、実線は水位変動、破線および一点鎖線は水平 2 方向の水粒子速度のパワースペクトルをあらわす。さて、観測当日は天気は快晴であって風がほとんどなく、したがって波は周期数 sec, 波高最大 20 cm 程度で、海面は比較のおだやかであった。このことは水位変動のパワースペクトル図からも明らかであって、周期約 8 sec のうねりに、3 sec 周期前後の短い風波が重ねあわさっている。また、水位変動の高周波側のパワースペクトルは f^{-5} 則によってきわめてよくあらわされる。一方水粒子速度のパワースペクトルは中心周波数付近では、水位変動のそれと比較的よく対応がつき応答性もよいが、高周波側では雑音の混入が著しい。さらに、水平 2 方向の水粒子速度のパワースペクトルから、当然方向スペクトルを算出することができるはずであるので、今後検討を加えていきたい。

5. 結 語

以上、著者らは超音波流速計を用いて規則波、実験室内での風波および現地波浪の水平および鉛直水粒子速度を測定して次の結果をえた。

(1) 実験の範囲内では、Stokes 波やクノイド波といった有限振幅波理論は、波高のきわめて大きい場合、水位変化に対しては比較的良好に実験値と一致するが、水平水粒子速度に対しては過大な値を与えるようになって、波の峯の位相ではむしろ第 1 次近似解(微小振幅波理論)に近い値を与える。

(2) 風波の水位変動および水粒子速度の相関性は一

般にきわめてよく、水圧式波高計と同様な両者の相関をあらわす補正係数を導入すれば、水位変動のパワースペクトルから水粒子速度のそれを推定することができる。しかし、そのためには補正係数の特性を詳細に検討する必要がある。また現地波浪に対しても、同様に水位変動と水粒子速度の相関関係が強く現われる。

以上のように波浪に対する超音波流速計の適用性が認められたが、なお詳細な検討を行なうべきであって、とくに流速計増幅部の円柱の影響、水粒子速度と反射体粒子との位相速度の差、水槽壁面および表面からの反射による雑音の混入に伴う測定精度の低下などの問題が考えられるので、今後これらの点について検討を加えていくつもりである。

最後に、実験、資料解析および図面の作成に多大の助力をいただいた岡本義夫君に謝意を表わすとともに、現地観測は白浜海象観測所の西勝也助手をはじめ芹沢重厚技官および清水保隆技官の熱心なご協力によるものであ

ることを明記して謝意を表わす。なお計算はすべて京大大型計算機センターで行なったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Goda, Y. : Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder; Experiments and a Proposed Method of Wave Force Computation, Report of Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 8, 1964.
- 2) Méhauté, B.L., Divoky, D. and Lin, A. : Shallow Water Waves; A Comparison of Theories and Experiments, Proc. of 11th. Conf. on Coastal Eng., 1968, pp. 87~101.
- 3) 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, 1969, pp. 15~21.
- 4) Skjelbreia, L. and Hendrickson, J.A. : Fifth Order Gravity Wave Theory, Proc. of 7th Conf. on Coastal Eng., Vol. 2, 1961, pp. 184~196.
- 5) Laitone, E.V. : Series Solutions for Shallow Water Waves, Jour. of Geophys. Res., Vol. 70, No. 4, 1965, pp. 995~998.
- 6) 本間 仁・堀川清司・小森修蔵 : 水圧変動波形と水面波形の相関性, 第12回海岸工学講演会講演集, 1965, pp. 76~83.