

京都大学 工学部 正会員 岩垣雄一
 京都大学 工学部 正会員 酒井哲郎
 京都大学 大学院 学生員 ○石田 啓

1. 緒言

波による水粒子速度は、海岸工学上の種々の問題に対して極めて重要な役割を果たしており、特に海中構造物に作用する波力の算出には不可欠の要素である。従来、規則波の水粒子速度については多くの研究がなされてきたが、現地波浪が不規則であり海中構造物が不規則波力を受けることを考えると、今後は不規則波の水粒子速度および加速度を系統的に研究しその特性を明確にする必要がある。

本研究では実験水槽内で種々の不規則波を発生させ、その水粒子速度をドップラー式超音波流速計を用いて実測し、水面変動との対応をスペクトル密度および周波数応答の観点から考察した後、あらたに時間変化の観点から比較するものである。すなわち線型フィルターを用いて水面変動から水粒子速度および加速度の時間変化を算出し、同時の水粒子速度の実測記録およびこれから算出した加速度の時間変化と比較検討するが、特にここでは水平方向水粒子速度および加速度の時間変化を中心に述べることにする。

2. 実験装置および方法

実験は、京都大学工学部土木工学科地下実験室に設置された幅 50 cm 高さ 70 cm 長さ 27 m の実験水槽を用いた。水槽の一端には不規則波発生機¹⁾が設置されており、これに組み込まれている Band-Pass Filter (以下 B.P.F. と略す) の出力ゲイン形状を変えることにより、種々のスペクトルを有する不規則波を発生させることができる。波高計および流速計のプロローブは、造波板の前方 8 m の位置に設置した。流速計の実験室用プロローブを写真-1 に、構造概要を図-1 に示す。超音波流速計は超音波の指向角が小さい契を利用し、水中に発信した周波数 f_1 の音波のうち、図-1 の細線で示した球状部を通過する反射物体からの反射波のみを受信し、そこで生じたドップラーシフト f_d Hz を MIXTER-CARD で取り出し、ANALOG-CARD で電圧 V に変換し、さらに、LOW PASS FILTER (以下 L.P.F. と略す) を通して雑音を除去し、連続的な電圧 V_L に平滑化することにより、水粒子速度 u の時間変化を測定するものであり、 u と f_d および f_d と V の関係は線型である。

しかしパルス状の電圧 V が L.P.F. を通る時、その cut off frequency

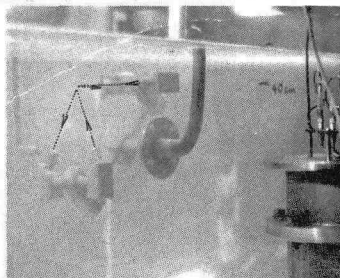


写真-1 超音波流速計プロローブ

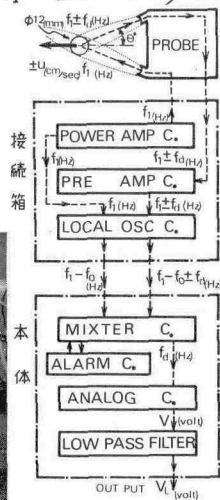


図-1 流速計構造概要

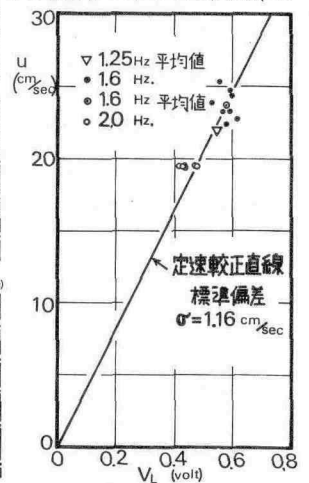


図-2 流速計較正直線

f_0 が小さいと出力に位相遅れおよび出力低下が生じるので、ここでは f_0 を 8.5 Hz に選び電氣的に検定した結果、5 Hz 以下の正弦電圧入力に対しては出力低下が無いことがわかった。図-2 はプローブを定速運動させて求めた定速校正直線と正弦運動させて求めた動的キャリブレーションの結果を示したもので、1.6 Hz 以下では出力低下は無く 2.0 Hz では若干の出力低下が生じるが、プローブの運動には、かなりの高周波数の振動が混入するので、実際は 2.0 Hz の波に対しても出力低下は定速校正直線の標準偏差 1.2 cm/sec の範囲内と悪われる。反射物体にはポリ塩化ビニール粉体(比重 1.22, 粒径 0.09 ~ 0.18 mm, 沈降速度 0.2 cm/sec 以下)を用いたが、連続体ではないために V_L には多少の雑音が混入することはやむを得なかった。実験時の水深は終始 45 cm に固定し、水粒子速度の測定は静水面下水深の 10%, 20%, 30% を選び、合計 20 ケースの実験をおこなったが、これらの記録はすべてデューレコーダーによって記録し、AD 変換器を用いて 0.08 sec 間隔でデジタル化した。

3. 線型フィルター

静水面での波高計の位置を原点とし鉛直上向きに z 軸をとると、微小振幅波理論では水面変動 η 、水平方向水粒子速度 u および加速度 $\dot{u}$ は (1) ~ (3) 式で表わされる。(4) 式で示した $R_u(\omega)$ は η に対する u の周波数応答関数であり、 η に対する $\dot{u}$ および u に対する $\dot{u}$ の周波数応答関数は $\omega R_u(\omega)$ および ω となる。

$$\eta(t) = \int_0^\infty M(\omega) \cdot \cos(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \quad \text{----- (1)}$$

$$u(t) = \int_0^\infty R_u(\omega) \cdot M(\omega) \cdot \cos(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \quad \text{----- (2)} \quad \dot{u}(t) = - \int_0^\infty \omega \cdot R_u(\omega) \cdot M(\omega) \cdot \sin(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \quad \text{----- (3)}$$

$$R_u(\omega) = \omega \cdot \cosh k(h+z) / \sinh kh \quad \text{----- (4)}$$

ただし、 ω は角周波数、 k は波数、 h は水深である。 u および $\dot{u}$ の時間変化は、(5) 式および (6) 式の Reid²⁾ の提案した線型フィルターにより η の時間記録から算出することができる。

$$G_s[y(t)] = a_0 y(t) + \sum_{n=1}^N a_n [y(t+nt) + y(t-nt)] \quad \text{----- (5)} \quad G_a[y(t)] = \sum_{n=1}^N b_n [y(t+nt) - y(t-nt)] \quad \text{----- (6)}$$

ここに a_n および b_n は、入力 $y(t)$ に対する出力 $G_s[y(t)]$ および $G_a[y(t)]$ の周波数応答関数のフーリエ係数である。実測の u の微分から $\dot{u}$ の時間変化を求める場合、 u に含まれる雑音が大きく影響するので、まず u の時間記録を L.P.F. (周波数応答関数 $F_c(\omega)$) に通して雑音を減じることとし、結局 $\omega \cdot F_c(\omega)$ の周波数応答関数を有する数値フィルター (6) 式を通して u から $\dot{u}$ を求めた。なお、計算にあたっては、 $N=25$, $\tau=0.08$ sec, $F_c(\omega)$ の f_c は 4.0 Hz とした。

4. 実験結果 および考察

水粒子速度の測定点 (以下 Z_p で示す) をそれぞれ水面下 4.5 cm, 9.0 cm および 13.5 cm に選んだ場合のうち代表的な 3 つのケースを例にとり、水粒子速度および加速度の特性を考察する。以下 η , u (u は鉛直方向水粒子速度) のパワースペクトル密度を S_η , S_u , $S_{\dot{u}}$ で表わす。図-3 および 図-6, 7 は、 $Z_p = -4.5$ cm での 0.63 Hz から 1.6 Hz までの B.P.F. を用いたケースの結果である。図-3 はそのスペクトル分布を示したもので S_η と S_u の形状は良く似ている。図-6 は水面変動 η の時間記録を用いて算出した u の時間変化と同時の実測の u とを比較したもので、両者は 0 付近および峯と谷付近でやや違いがあるが全体的にはほぼ一致している。図-7 は u から算出した $\dot{u}$ と η から算出した $\dot{u}$ とを比較したもので、 u の場合にくらべると u から求めた $\dot{u}$ には高周波数の振動が加わっていることがわかる。

図-4および図-8, 9は, $z_p = -9.0 \text{ cm}$ で 1.25 Hz の B.P.F. を用いたケースの結果であり, 図-4はそのパワースペクトル分布を示したもので, 図-8の u の時間変化ではやはり峯と谷の部分で実測値と計算値は若干差が生じている。また図-9では一般的に u から求めた $\dot{u}$ の方が大きくなることが多く, 2つのピークを生じている波もある。

図-5および図-10, 11は, $z_p = -13.5 \text{ cm}$ とし, B.P.F. のゲイン形状を 1.0 Hz を中心として山型に設定したケースであり, 図-5でわかるように, 測定尺が深くなるとやはり S_u は S_u にくらべて卓越周波数の付近でかなり小さくなっている。また図-10の u の実測値と計算値はほぼ合っているが, 図-11の $\dot{u}$ では u から求めた $\dot{u}$ に高周波数の振動が加わっている。以上の3ケースからわかるように, u の計算値と実測値は測定尺が異なっても全体の形状はほぼ一致している。一方 $\dot{u}$ では, 実測値 u から求めた $\dot{u}$ には u に混入している雑音の影響が効いてくるために高周波数の振動が加わっている。

5. 結語

以上の3ケースおよび他のケースの結果を総合して, 特に水面下10%, 20%および30%での不規則波の水平方向水粒子速度の時間変化は, 線型フィルター(微小振幅波理論)を用いて同時の水面変動からかなり正確に算出できることがわかったが, 超音波流速計には反射物体の不連続性に起因する雑音が混入する欠点があるので, 反射物体としてより適当なものを選びまた L.P.F. 部をさらに改良することにより, 一層正確なデータを得る必要がある。

最後に本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを記して謝意を表わすとともに, 超音波流速計の使用および改良に關し御世話になった海上電機株式会社桑原 清氏に感謝の意を表します。

—参考文献—

- 1) 岩垣雄一・木村晃: 任意スペクトルを持つ不規則波の造波の研究, 1970年度技術講演会講演集, 林松, 1972-10.
- 2) Reid, R. O.: Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749~786, 1957.

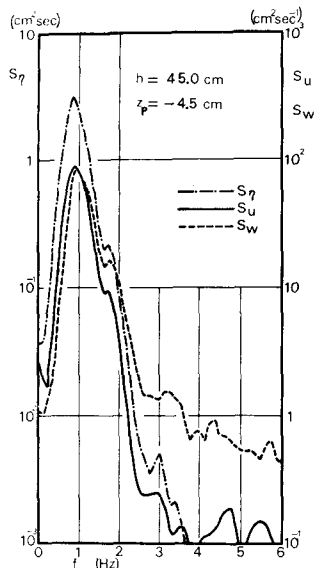


図-3 パワースペクトル(1)

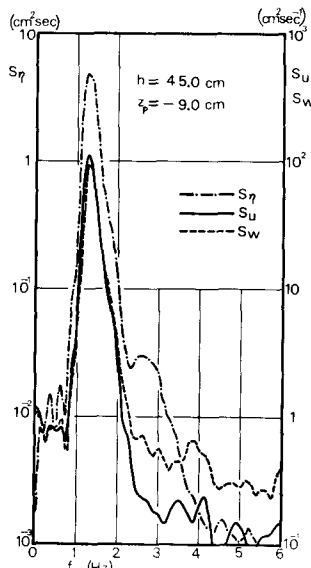


図-4 パワースペクトル(2)

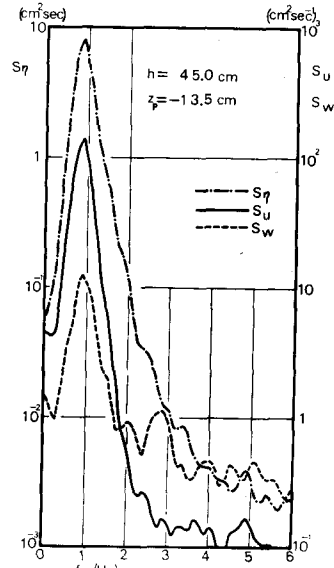


図-5 パワースペクトル(3)

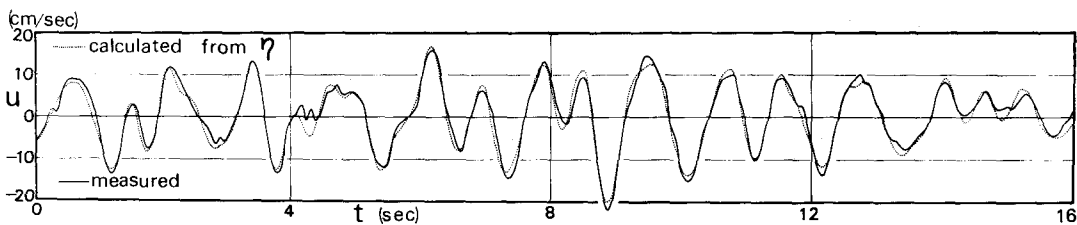


図-6 水平方向水粒子速度 u の時間変化 (1)

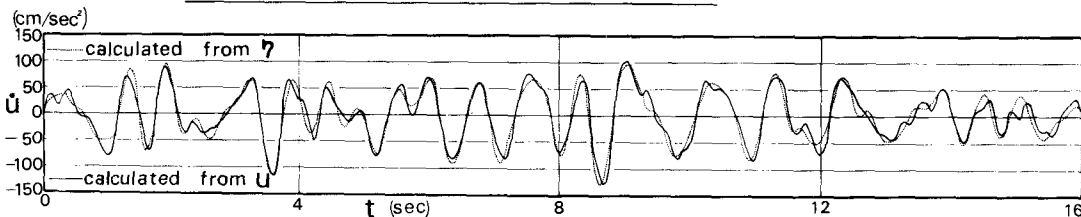


図-7 水平方向水粒子加速度 $\dot{u}$ の時間変化 (1)

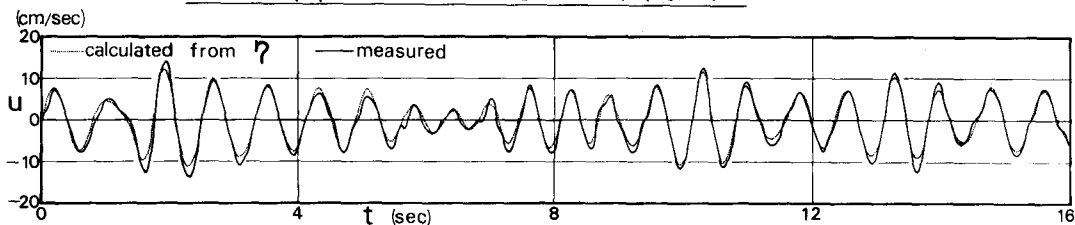


図-8 水平方向水粒子速度 u の時間変化 (2)

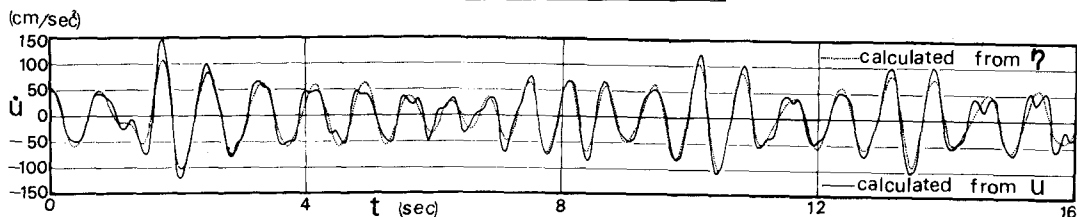


図-9 水平方向水粒子加速度 $\dot{u}$ の時間変化 (2)

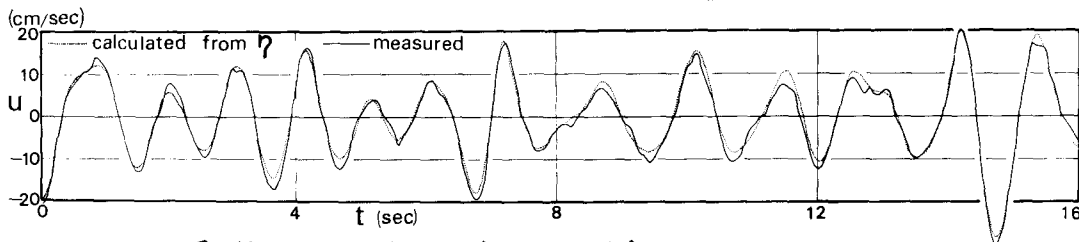


図-10 水平方向水粒子速度 u の時間変化 (3)

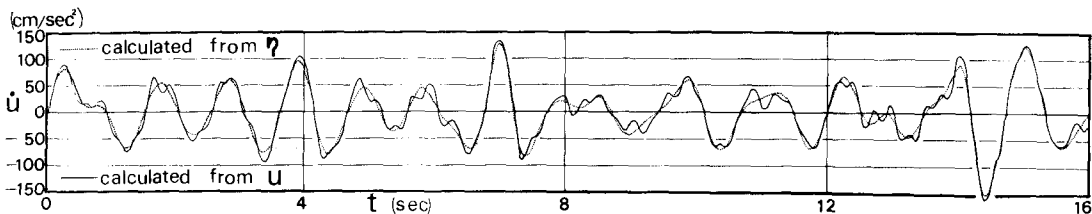


図-11 水平方向水粒子加速度 $\dot{u}$ の時間変化 (3)