

波運動に伴う乱れと底質の浮遊

堀 川 清 司*・渡 辺 晃**

1. 緒 論

波による浮遊漂砂に関してもっとも問題となるのは、浮遊砂濃度鉛直分布、基準点濃度、および濃度の時間的変動である。平均濃度の鉛直分布を決定する基本式としては、一般に次式が用いられる¹⁾。

$$\frac{d}{dz} \left(K_z \frac{d\bar{m}}{dz} \right) + w_0 \frac{d\bar{m}}{dz} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{m}$ は浮遊砂の時間平均濃度、 w_0 は浮遊砂の沈降速度、 K_z は鉛直渦動拡散係数で、 z は底面から上向きにとる。結局、濃度分布を考える際に重要となるのは K_z の評価であり、従来の研究の多くは、 K_z を渦動粘性係数でおきかえて式 (1) を解くというやり方であった。しかしながら、このような扱いのみでは浮遊現象の根本的機構の解明には達し得ないであろうし、濃度分布の形状は近似的に表示できても、基準点濃度や時間変動は決定されず、工学的にもあまり意義のないことになるおそれがある。

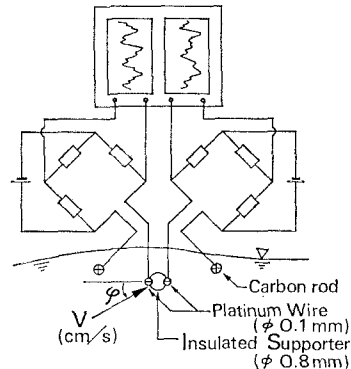
漂砂が問題となる場合、底面近傍では乱流状態になっているのがほとんどであるし、底面に存在する砂れんのためにいわゆる渦ができてることが多い。この渦がより高い周波数域の乱れを誘起し、それらが漂砂現象を支配していることを思うならば、波運動下の乱流機構を明確にせずには浮遊砂問題の真の解決は得られないことがわかる。ここでは、波に伴う乱れに対する新しい測定法を紹介したのち、それを用いて実際に測定を行なった結果について報告する。

2. 電解式乱れ流速計

波運動に伴う平均的な流速、すなわち主流の流速については、これまでも小型プロペラや Hot-film 流速計によって測定がなされているし、著者らも水素気泡式流速計を用いて境界層内の流速まで測定し、理論の適合性を検討してきた²⁾。しかしながら、乱れの流速を定量的に観測した例は皆無といってよい。波の運動下で底面近傍の乱れ流速を測定する場合の困難さのうち、特徴的なものをあげると次のようになる。i) 一般の流れの場と異なり、主流自身の方向（角度および正負）と大きさが

時間的にも場所的にも変化する、ii) しかもその時間変化の周期は、通常 1 ～ 数 sec でかなり短い、iii) 底面に砂れんが存在する場合は、その影響でかなり大きい渦（実験室の条件で径 1 ～ 数 cm）を生じる。したがって、従来水中での乱れ測定に有効であるとされてきた Hot-film 流速計で通常なされている各方向成分の乱れの検出方法³⁾を、波運動下の流れの場に応用することはきわめて困難である。Binder⁴⁾は最近、電気二重層の移流を利用した動電式 (electrokinetic) 乱流計について報告しているが、層流状態での出力が 0 という具合に、流速が等しくとも出力が流れの状態に左右されるという大きな欠点を有しているようである。

このような理由から、著者らは振動流における新しい乱れ測定法の開発に努めてきたが、電気分解を利用した乱れ流速計（電解式乱流計、Electrolytic Turbulence Transducer : ELETT と称す）が有効であるとの結論に達した。電解式乱流計の原理については不明の点も多いが、おおよそ次のように考えられる。水中の 2 本の電極間に直流電圧を印加すると、電極表面にイオンやガスの層が生じる。水が流動するとこの層はく離・輸送され、電極間の電気抵抗が変化する。したがって印加電圧は一定に保って、ホイートストン・ブリッジを用いて不平衡電流を測定すれば、流速を知ることができる。測定装置の概略を示したのが図一である。陰極に白金線、陽極には炭素棒を用いて、両者の間隔を数 cm で一定に保つと感度の安定性が得られる。炭素棒の周辺での流速変動による出力の変化はきわめて微小なので、白金線を流速に対する受感部と考えてよい。以下に述べる実験に



図一 電解式乱流計の概略

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科

用いた白金線の径は 100μ で、受感部分の長さは約 1 mm である。検定曲線の例を図-2に示してあるが、流速に対して出力は指数的に変化しており直線性がよくないので、現在リニアライザーを開発中である。

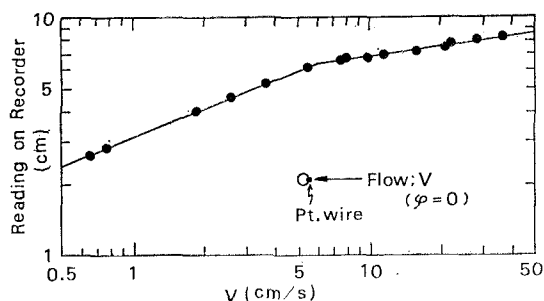


図-2 電解式乱流計の検定曲線

前述のとおり振動流の場合は、主流の大きさ、方向がともに変化するので、任意の方向の流速成分を求めるのはむずかしい。そこで受感部の白金線を径 0.8 mm の細いパークライトの棒にはわせた形のプローブを用いると、乱流計の出力は図-3のような方向特性をもち、その特性は流速の大きさ V にはほとんど関係しない。したがって、図-1に示されているように一対の受感部からなるプローブを用いてやれば、各受感部からの出力の比から流れの方向 $|\varphi|$ を決定できる。一方、各受感部か

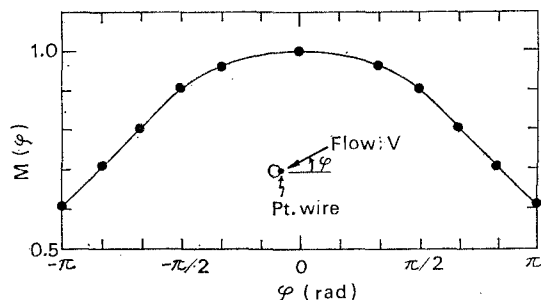


図-3 電解式乱流計の方向特性

らの出力は、方向特性 $M(\varphi)$ を媒介にして、流速の絶対値 V に関連する。このようにして、対になったプローブを用いることにより V と $|\varphi|$ が求まるから、流速の方向成分は $V \cdot \cos \varphi$ として定めることができる。

3. 電解式乱流計による乱れの測定

二次元造波水路で、波運動下的水粒子速度を電解式乱流計を用いて測定した。実験条件は、水深 30 cm 、水温 8.0°C 、波の基本周期 (T) 1.35 sec であって、水面波形は trough がやや flat になっていて正弦波からはずれるので、これを調和解して基本周期に対する波高を求めると 7.93 cm であった。二倍周波数成分は基本調和成分の約 3% である。底面には平均粒径 0.20 mm (淘汰係数 $\sqrt{d_{75}/d_{25}}=1.15$) の標準砂を厚さ 15 cm に敷きならし、波を起こして砂れんが平衡に達した状態で流速などを測定した。この時の砂れんの大きさは、波高 0.95 cm 、波長 5.7 cm である。

図-4の太い実線は、砂れんの谷上 0.5 cm の点で測定した流速の水平成分 U の変動記録を水面波の5周期分にわたって示したものである。図-1に示した電解式乱流計による出力記録を 0.01 sec ごとにサンプリングして、その値から電子計算機を用いて $V \cdot \cos \varphi$ を計算することにより得られる。このような流速変動記録から乱れ成分を分離するのはむずかしいが、ここでは U の基本調和成分 U_1 (図-4の細線) を U から差し引いたものを乱れ速度 u (破線) と定義する。

図-5は主流の鉛直流速について、微小振幅波理論による計算値 W_{cal} と実測値 W_{meas} との振幅を比較したものである。底面近くでもかなり大きい鉛直流速が存在することがわかる ($z \approx 0.5\text{ cm}$ で $\hat{W}_{meas} \approx 2\text{ cm/sec}$)。鉛直流速を無視した梶浦⁵⁾の乱流境界層理論によれば、このような条件のもとでの乱流境界層の厚さは約 3.5 cm になるが、砂れんのように大きい粗度が存在する時には鉛直運動も考慮して境界層理論を再検討する必要がある

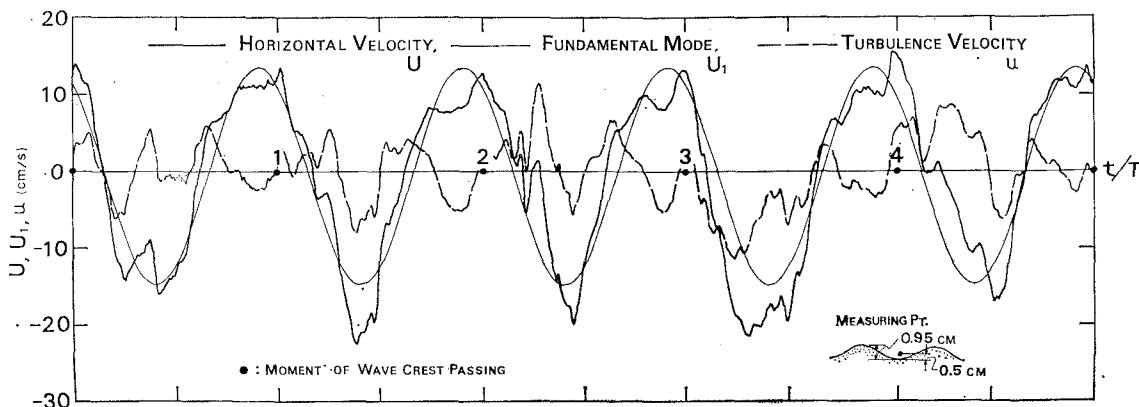
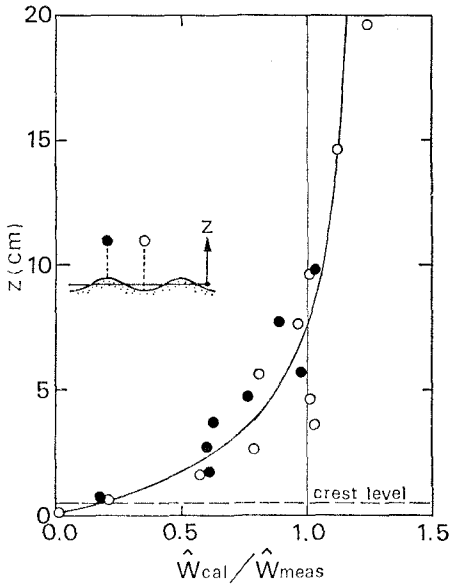
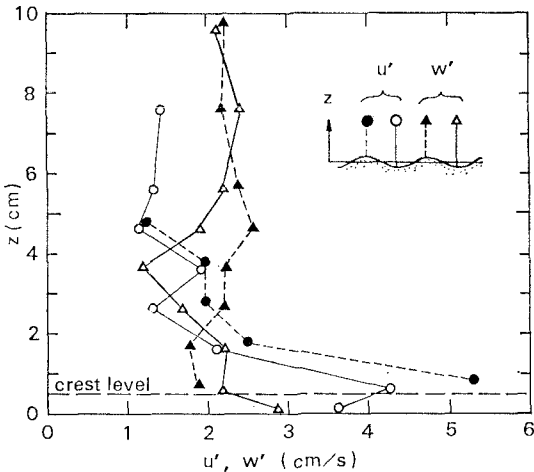


図-4 水平流速の時間変化と乱れの分離

図-5 W_{cal} と W_{meas} の比較図-6 乱れ強度 u' , w' の鉛直分布

うかと思われる。

乱れ強度の水平および鉛直成分の鉛直分布は図-6に示されている。鉛直成分 $w' = \sqrt{\overline{w'^2}}$ は高さには関係なくほぼ一定値をとるが、水平成分 $u' = \sqrt{\overline{u'^2}}$ は底面近くではきわめて大きいことがうかがわれる。また図には示されていないが、乱れのエネルギーに関する量 $u'^2 + w'^2$ は底面から離れるにしたがって単調に減少している。

図-4に破線で示された乱れ流速 u のエネルギースペクトル関数 $F(n)$ を求めると図-7が得られる。エネルギーの大部分は4 cps 以下の低周波数の領域に集中している。約10 cps より高い周波数域では、いわゆる-7乗則が成立しており、この結果からは乱れの時間的な micro scale がほぼ0.1 sec であるといえる。これは空気流の場

合と比較するときわめて大きい値であるが、Raichlen⁶⁾が開水路の定常流中で Hot-film 流速計を用いて得ている値と大体一致しており興味深い。さらにこのスペクトル関数 $F(n)$ の図を図-8のように $n^2 \cdot F(n)$ の形に書き直してみると、ピークが2つあることがわかる。2~3 cps のピークが渦(Vortex というよりもむしろ Circulation と呼ぶべきだが)に対応するもので、これより高い周波数(7 cps)の部分が、この渦より形成される純然たる乱れに対応するピークと考えられる。

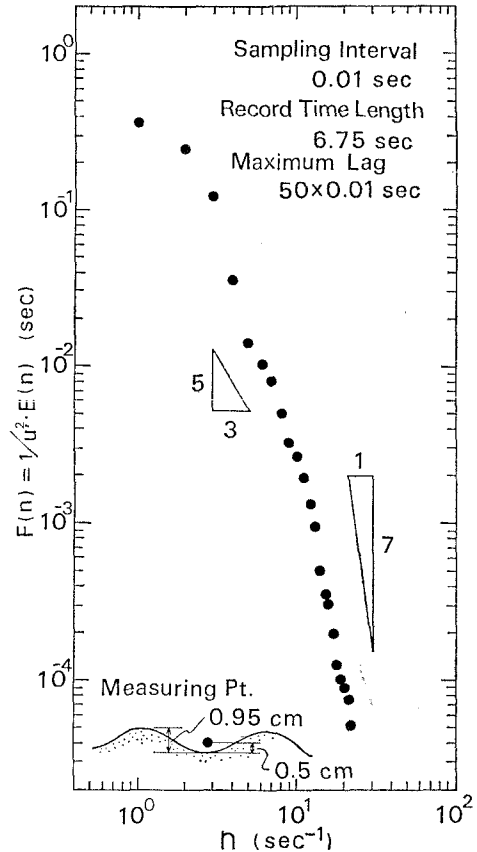


図-7 水平乱れ速度のスペクトル密度分布(1)

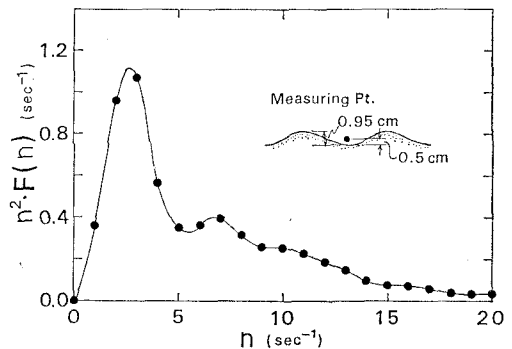


図-8 水平乱れ速度のスペクトル密度分布(2)

4. 浮遊砂の濃度と乱れ特性

流速測定と同一条件のもとで、フォトトランジスタ式濃度計により、浮遊砂濃度の時間変化を測定した。図9は平均濃度 $\bar{m}$ を差し引いた濃度変動 m' の RMS すなわち $\sqrt{m'^2}$ と、それを各高さの平均濃度で正規化した相対濃度変動 $\sqrt{m'^2}/\bar{m}$ の鉛直分布を、砂れんの山上と谷上のそれぞれについて示したものである。 $\sqrt{m'^2}$ の値は底面近くで最大で、高さと共に急速に減少している。また $\sqrt{m'^2}/\bar{m}$ の分布は、図6の鉛直乱れ強度 w' の分布と類似しているように思われる。

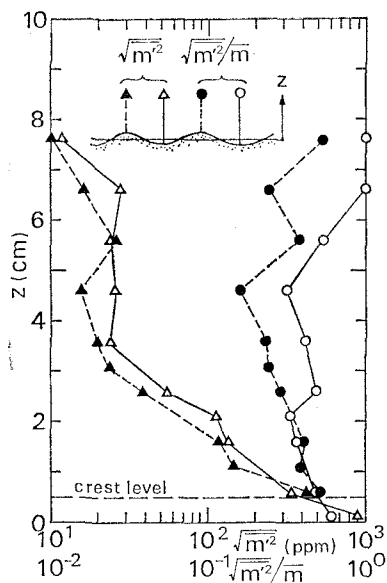


図9 浮遊砂濃度変動の鉛直分布

図10には、鉛直乱れ強度 w' と、各高さでの浮遊砂の平均沈降速度 w_0 の実測値が比較されている。 w_0 の値は、サイフォン・チューブにより採取した浮遊砂をエメリー管を用いて沈降分析して求めたものである。 w' と w_0 の大きさが同程度であることを除いては、両者の間には有意な相関は認められないようである。

浮遊砂平均濃度 $\bar{m}$ の分布を決定する式(1)から、濃度分布と沈降速度の実測値を用いて渦動拡散係数 K_z が計算される。一方、渦動粘性係数 ϵ_m を鉛直方向の乱れ速度 w のみと関連づけるために次式のような関係を想定する。

$$\epsilon_m = \frac{\overline{uw}}{\partial \bar{U} / \partial z} \sim \frac{l(\partial \bar{U} / \partial z) \cdot w}{\partial \bar{U} / \partial z} \sim l \cdot w \sim T_E \cdot w'^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 T_E は w に対する Eulerian integral time scale である。

図11は、電解式乱流計による測定結果に基づいて計算した $T_E \cdot w'^2$ と、上述の方法で求めた K_z を比較し

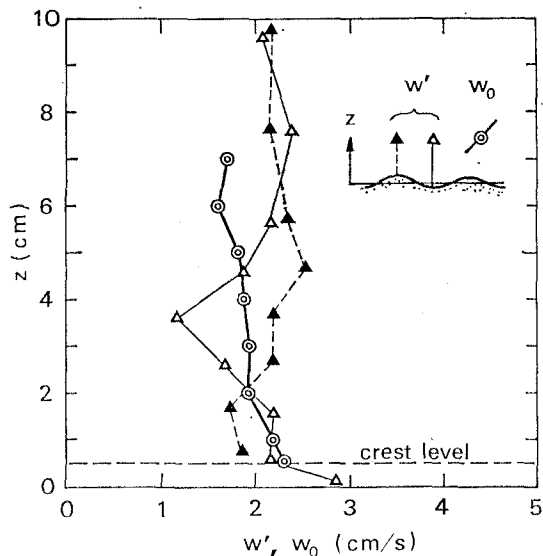


図10 乱れ強度と沈降速度の比較

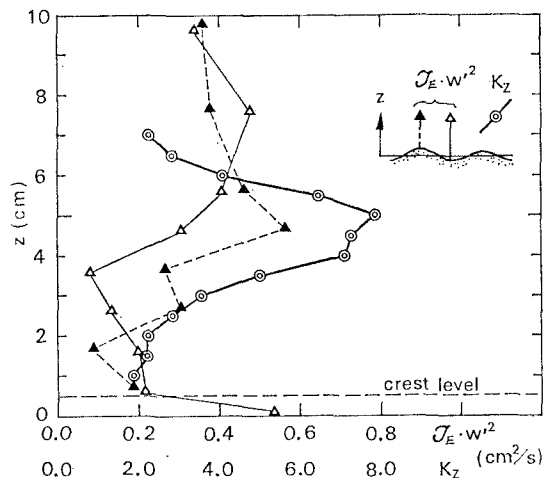


図11 拡散係数 K_z と $T_E \cdot w'^2$ の比較

たものである。 K_z の分布形状が $T_E \cdot w'^2$ のそれと良く似ているのは興味をひくが、絶対値は one-order 程度 K_z の方が大きくなっている。これに関しては、i) 式(1)で無視している項 $d(\bar{m}'w)/dz$ などの order の再評価、ii) 水粒子の運動量と浮遊砂との輸送形態の相違、iii) 式(2)の ϵ_m に関する表示、など多々問題が残されており、両者の関係をさらに明確にするためには、精確な実験資料を増すことに努めるとともに、理論的な面からも再検討の必要があろう。

5. 結 語

波による浮遊砂の問題を明らかにしていくためには、波運動下の乱れ機構を明確に観察・把握する必要があるという考えに立て、新たに電解式乱れ流速計を開発し、それによる若干の実験結果について報告した。今後に残

された課題は多いが、まず第一に乱流計を改良し、出力の直線化に努め、周波数特性についても明確にしていくと同時に、流速変動記録からの乱れの分離についてもより合理的な方法をさがしていかねばならない。

乱れの強度と底面粗度や波の条件との関係については実験ケースを増していくことにより、次第に明らかにしていくことができると思われる。また乱れ強度の鉛直分布については、乱れに関するエネルギー方程式を基にした理論的なアプローチも可能であろう。浮遊砂濃度と乱れの関係についても、今回は実験資料が少なかったために十分な考察はなされなかったが、convection term の order や渦動粘性係数の表示について再検討して、拡散係数の表示や濃度分布式をより合理的なものに改めていくとともに、基準点濃度についても明らかにしていきたい。基準点濃度は底面付近の Reynolds stress と関連していることが予想されるが、電解式乱流計により Reynolds stress を測定することも可能であると考えられるので、その目的にあった形のピックアップ、データ処理

法などに関しても今後研究をつづける予定である。

なお、本研究は文部省科学研究費による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、本間仁・堀川清司・鹿島遼一：波による浮遊砂に関する研究，第11回海岸工学講演会講演集，1964.
- 2) 堀川清司・渡辺晃：表面波による振動流境界層に関する実験的研究，第15回海岸工学講演会講演集，1968.
- 3) Hinze, J. O. : Turbulence, An Introduction to Its Mechanics and Theory, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1959.
- 4) Binder, G. : Potential Fluctuations Generated by Turbulence on a Small Wire, Proc. 12th Congress of IAHR, 1967.
- 5) Kajiura, K. : A Model of the Bottom Boundary Layer in Water Waves, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol. 46, 1968.
- 6) Raichlen, F. : Some Turbulence Measurements in Water, Jour. Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 93, No. EM 2, 1967.