

京都大学 工学部 正員 岩垣雄一
京都大学 大学院 学生員 平山秀夫

①はしがき：昨年の海岸工学講演会で、沈降速度を有する固体粒子が微小振幅波理論で表現される波動流体中を運動する場合、水平方向にはその水粒子速度と同じ速度で、鉛直方向には水粒子速度と静水中の沈降速度の和の速度で運動すると仮定すれば、固体浮遊粒子の1周期平均の沈降速度が、静水中の沈降速度に等しくなると、すなわち、浮遊粒子が鉛直方向に静水中での沈降速度以外に見かけ上質量輸送速度に相当する付加残留速度（浮遊粒子の質量輸送とよんだ。）を有する運動することと理論的に示し、かつまた不充分であったが若干の実験例を示し定性的な説明を加えた。ここではさらに Tadjbaksh & Keller の有限振幅重複波理論の3次近似を用いて同様な理論計算を行なうと同時に、数多くの実験を行ない、特に滑面床の場合における浮遊粒子の沈降速度の変化を定量的に調べようとするものである。

②実験装置および方法：実験は長さ5m、幅50cm、高さ60cmの銅製片面ガラス張り水槽を用いて行なった。水槽の一端は鉛直壁とし、これより2.5mの位置にフラッター式造波機を設置した。水槽底面には滑面にするため鏡面を敷いた。実験方法は、ほぼ完全な重複波を発生させ定常状態になったと思われる時点から浮遊粒子（ステロール樹脂、比重1.02、粒径約2mm）を所定の位置に投入し、ストロボを用いて浮遊粒子の挙動を撮影した。発生させた重複波は水深 $h=30$ cmで節の数が3つとなるように周期 $T=1.14$ sec、波長 $L=166.7$ cmと固定し、波高と測定点と適当に変えた。なお、ストロボ写真の実例を写真-1に示す。

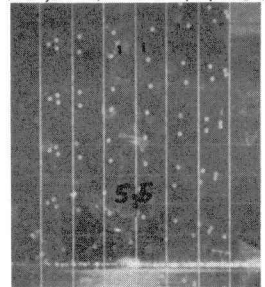
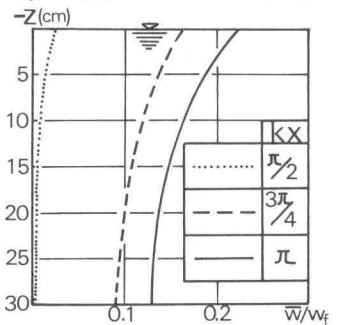
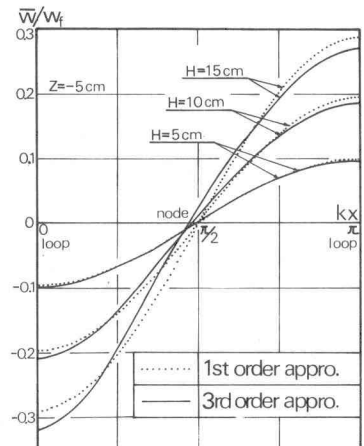


写真-1 ストロボ写真の実例

③浮遊粒子の運動への沈降速度の影響：以下沈降速度を有する浮遊粒子の運動についての若干の理論的考察を行ない、実験結果と比較検討する。今、前述のような仮定の下に浮遊粒子が重複波動中に運動している場合を考えて、その1周期における平均的位置を $(\bar{x}, \bar{z})$ とすると、その地点での浮遊粒子の挙動を表す浮遊粒子の速度 $u(\bar{x}, \bar{z}, t)$ および $w(\bar{x}, \bar{z}, t)$ は Tadjbaksh & Keller の3次近似を用いて次のように表わされる。なお、座標軸は反射板の位置を原点として、静水面上造波板に向かい x 軸を、静水面から鉛直上方に z 軸をとる。

図-1 $\bar{w}/w_0$ の鉛直分布(理論値)図-2 微小振幅波と有限振幅波理論による $\bar{w}/w_0$ の比較

$$u = ka \left\{ \cosh k(h+\bar{z}) / \sinh kh \right\} \sin at \cdot \sin k\bar{x} - 1.5 \left(\frac{\pi a}{L} \right)^2 C \times \left\{ \cosh 2k(h+\bar{z}) / \cosh 2kh \right\} (1 - \coth^4 kh) \cdot \sin 2at \cdot \sin 2k\bar{x} + (ka^3 / (8/k)^{1/2}) \left\{ 3\beta_3 \sin at \cdot \sin 3k\bar{x} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z}) - \beta_3 \sin 3at \times \sin k\bar{x} \cdot \cosh k(h+\bar{z}) - 3\beta_3 \sin 3at \cdot \sin 3k\bar{x} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z}) \dots \dots \dots (1) \right.$$

$$w = -ka \left\{ \sinh k(h+\bar{z}) / \sinh kh \right\} \sin at \cdot \cos k\bar{x} + 1.5 \left(\frac{\pi a}{L} \right)^2 C \times \left\{ \sinh 2k(h+\bar{z}) / \cosh 2kh \right\} (1 - \coth^4 kh) \cdot \sin 2at \cdot \cos 2k\bar{x} - (ka^3 / (8/k)^{1/2}) \left\{ 3\beta_3 \sin at \cdot \cos 3k\bar{x} \cdot \sinh 3k(h+\bar{z}) - \beta_3 \sin 3at \times \cos k\bar{x} \cdot \sinh k(h+\bar{z}) - 3\beta_3 \sin 3at \cdot \cos 3k\bar{x} \cdot \sinh 3k(h+\bar{z}) - W_0 \dots \dots \dots (2) \right.$$

ここで、 $C = (8/L^2 \pi \cdot \tanh^{2k} h / L)^{1/2}$ 、 $\beta_3, \beta_3, \text{および } \beta_3$ は kh の関数、 $a = H/2 - 1/1024 \cdot (\pi/L)^2 H^3 (27 \coth^6 kh + 27 \coth^4 kh + 96 \coth^2 kh - 63 + 11 \tanh^2 kh)$

$+6 \tanh^2 kh$), H は重複波の波高, h は水深, $k = 2\pi/\lambda$, $\alpha = 2\pi/T$, w_f は浮遊粒子の静水中の沈降速度である。

次に任意時刻 t における浮遊粒子の位置を $(\bar{x}+\xi, \bar{z}+\zeta)$ とすると, その地点での浮遊粒子の速度 $d\xi/dt$ および $d\zeta/dt$ は, Taylor 展開して ξ, ζ の 1 次の項までとると次式のようにになる。

$$\frac{d\xi}{dt} = u(\bar{x}+\xi, \bar{z}+\zeta, t) = u/\bar{x}\bar{z} + \xi \frac{\partial u}{\partial x}/\bar{x}\bar{z} + \zeta \frac{\partial u}{\partial z}/\bar{x}\bar{z} \quad (3)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = w(\bar{x}+\xi, \bar{z}+\zeta, t) = w/\bar{x}\bar{z} + \xi \frac{\partial w}{\partial x}/\bar{x}\bar{z} + \zeta \frac{\partial w}{\partial z}/\bar{x}\bar{z} \quad (4)$$

式 1 近似では (3) および (4) 式の式 2 項以下を省略して, $d\xi/dt = u/\bar{x}\bar{z}$, $d\zeta/dt = w/\bar{x}\bar{z}$ とし, これらより ξ, ζ を求める。次にこれら ξ, ζ を (3) および (4) 式に代入して $d^2\xi/dt^2$ および $d^2\zeta/dt^2$ の式 2 近似を求める。 $d^2\xi/dt^2$ および $d^2\zeta/dt^2$ は浮遊粒子の速度を表すから, これらの値の 1 周期平均をとれば, それぞれ x 方向と z 方向の浮遊粒子の 1 周期平均の残留速度を表すことになり, 水平方向のそれを $\bar{U}$, 鉛直方向のうち静水中の沈降速度を差し引いたそれを $\bar{W}$ とすれば, 若干の計算の結果次のように表現される。

$$\frac{\bar{U}}{w_f} = \frac{\pi H}{4} \left\{ \frac{\sinh k(\bar{z}+h)}{\sinh kh} \cdot \frac{\sinh k\bar{z} - (3/2)\alpha(\pi/2)^2 C \{ \sinh 2k(h+\bar{z})/\cosh 2kh \}}{x(1-\cosh^2 kh) \cdot \sinh 2k\bar{z} - (ka)^2 (\pi/2)^2 \{ -9ka/\beta_3 \sin 3k\bar{z} \cdot \sinh 3k(h+\bar{z}) + ka/\beta_3 \sin k\bar{z} \cdot \sinh k(h+\bar{z}) + (3/2)\beta_3 \sin 3k\bar{z} \cdot \sinh 3k(h+\bar{z}) \}} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\bar{W}}{w_f} = -\frac{\pi H}{4} \left\{ \frac{\cosh k(\bar{z}+h)/\sinh kh}{\cosh k\bar{z} - (3/2)\alpha(\pi/2)^2 C \{ \cosh 2k(h+\bar{z})/\cosh 2kh \}} \right. \\ \left. \times (1-\cosh^2 kh) \cdot \cosh 2k\bar{z} + (ka)^2 (\pi/2)^2 \{ -9ka/\beta_3 \cosh 3k\bar{z} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z}) + ka/\beta_3 \cosh k\bar{z} \cdot \cosh k(h+\bar{z}) + (3/2)\beta_3 \cosh 3k\bar{z} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z}) \} \right\} \quad (6)$$

以上の (5) および (6) 式の中の線部分が微小振幅波理論による結果である。以下ここでは, (6) 式のための検討を行なう。図-1 は $H=10$ cm の場合における $\bar{W}/w_f$ の鉛直分布で, 縦軸に静水面からの距離, 横軸に $\bar{W}/w_f$ ととり, $ka = \pi/2, 3\pi/4$, π の場所での理論値を示したものである。この図から残留速度は水表面に近い程大きくなっていることがわかる。図-2 は $\bar{z} = -5$ cm ($ka = -0.19$) の場合における (6) 式と微小振幅波理論による結果をそれぞれ波高別に比較したもので, 横軸は反射板からの距離を ka とし, 縦軸には $\bar{W}/w_f$ をとって示してあるが, 両者の差異はほとんどないことが明らかであろう。

図-3 (a), (b), (c) は (6) 式の理論結果と実験結果とを比較したもので, 縦軸に $\bar{W}/w_f$, 横軸に反射板からの距離をとって波高別に示したものである。(a), (b) および (c) はそれぞれ $\bar{z} \approx -5, -15, -25$ cm の場合における結果であるが, 図中 $\bar{z}$ の 2 種類の理論値を示したのは, 実験値の $\bar{z}$ がこれらの間に分布するからである。これらの図から明らかなように, 実験値は節近傍のみしかなく, かなり散乱しているが, それらの平均をとると, 節のところでほぼ 0 の値をとるという結果に一致するようである。しかし, 腹付近の実験値がないので, どのような理論の妥当性を十分検討するわけにはゆけなかった。全般的に, 実験値の $\bar{W}/w_f$ は波高のいかにかわらず, かなりのバラツキがあるが, 表面付近と底面付近とではバラツキの分布が若干異なっているように見うけられる。このことは底質の浮遊との関連において重要なように思われるので浮遊粒子の水平方向の移動特性とともに詳しく検討する必要がある。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付記するとともに, 実験に協力していただいた*中尾成邦君に心から謝意を表す。*当時工学部学生(現在 運輸省*4 港湾建設局勤務)

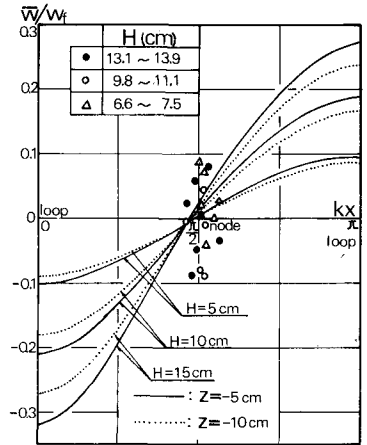
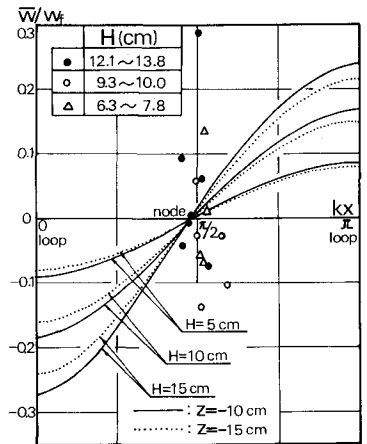
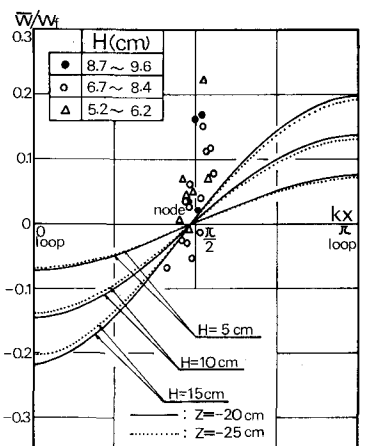


図-3 (a) $\bar{W}/w_f$ の理論値と実験値の比較 ($\bar{z} \approx -5$ cm)



(b) $\bar{W}/w_f$ の理論値と実験値の比較 ($\bar{z} \approx -15$ cm)



(c) $\bar{W}/w_f$ の理論値と実験値の比較 ($\bar{z} \approx -25$ cm)