

進行波による単一粒子の残留速度について

大阪府立工業高等専門学校 正員 平山秀夫
三和建設 田中隆久
村本建設 吉岡正弘

1. はしがき：これまで、進行波動中における質量輸送の問題は、Stokes や Longuet-Higgins とは
じめ Russell and Osorio などの多くの研究者によって理論と実験の両面からかなりの研究がなさ
れてきたが、特に最近、土屋・岡村は非回転非粘性の波動の場における質量輸送速度を、
有限振幅波理論における波速の定義の問題を踏まえて論じ、少なくとも Stokes 波の適用限
界内では、波速の式2定義に基づく質量輸送速度は、波速の式1定義に基づく結果に比
して実験値とかなりよく説明できることを示した。その後、著者の一人は、沈降速度を有す
る単一粒子の挙動を通して、それによる付加残留速度の出現を提示するとともに、その付
加残留速度を考慮することによって、波速の式2定義に基づく結果が、単一粒子の残留速
度の実験値をより一層説明できることを示したが、中には、造波してから測定開始するま
での時間などの実験条件の違いによって両者にかんがりの差異があることなども若干の実
験例で指摘した。本研究では、このような実験条件の違いによって、どの程度単一粒子
の残留速度に差異が生じてくるのかを実験的に究明するとともに、本実験のように端部を
有する、いわゆる普通の水槽内では、どのような理論が実験値に最もよく適合するかな
どについても議論する。さらに、従来ほとんど論じられていない鉛直方向の残留速度の分
布特性についても若干の検討を加える。

2. 実験装置・実験方法・解析方法：実験は前報の場合と全く同様に、水槽端部に消波工
を設置した長さ21m、幅70cm、高さ1mの片面ガラス張り水槽を用いて行った。実験の方法
は、造波して波高がほぼ定常状態になる7波目と100波目の場合に分けて、水表面の波峰
の位置から単一粒子（粒径 2.0^{mm} 、沈降速度 2.5% ）を水中に投入し、その挙動をストロボ
と照射して写真撮影した。実験条件は、水深 $h=49.5^{cm}$ で、周期 $T=1.0, 1.5, 2.0^{sec}$ の各場合につ
いて波高 $H=5\sim 15^{cm}$ の間で適当に変化させ、かつ測定位置も鉛直方向に3ヶ所変化させた。解
析方法は、このようにして得られたネガフィルムから、フィルムモーションアナライザーを用い
て、単一粒子の速度が $u=0, w=w_{max}$ と考えられる位置を1周期ごとに読みとり、これらの位
置の座標を用いて、単一粒子の水平および鉛直方向の残留速度を算定した。

3. 実験結果および考察：1) 単一粒子の沈降速度による付加残留速度：波動理論として
波速の式2定義に基づく Stokes 波の式2近似解を用いて、すでに示した方法によって単一
粒子の水平および鉛直方向の残留速度 $\bar{U}_{x2}, \bar{W}_{z2}$ を求めれば、それぞれ次式のようなになる。

$$\bar{U}_{x2} = \frac{1}{2}CF_1^2 \cosh 2k(h+\bar{z}) + \frac{1}{2}CF_2^2 \cosh 4k(h+\bar{z}) + \frac{\partial H^2}{\partial h} \coth kh \left\{ -F_1 \cosh k(h+\bar{z}) \sin k\bar{x} - F_2 \cosh 2k(h+\bar{z}) \cos 2k\bar{x} \right\} \\ + w_f \left\{ F_1 \sinh k(h+\bar{z}) \cos k\bar{x} - F_2 \sinh 2k(h+\bar{z}) \sin 2k\bar{x} \right\} - \frac{\partial H^2}{\partial h} \coth kh \dots \dots \dots (1)$$

$$\bar{W}_{z2} = -w_f + w_f \left\{ F_1 \cosh k(h+\bar{z}) \sin k\bar{x} + F_2 \cosh 2k(h+\bar{z}) \cos 2k\bar{x} \right\} + \frac{\partial H^2}{\partial h} \coth kh \left\{ F_1 \sinh k(h+\bar{z}) \cos k\bar{x} - F_2 \sinh 2k(h+\bar{z}) \sin 2k\bar{x} \right\} \\ \dots \dots \dots (2)$$

一方、波速の才1定義に基づく Stokes 波の才3次近似解 (Skjelbreia の解) を用いれば、水平および鉛直方向の残留速度 $\bar{U}_3, \bar{W}_3$ は、それぞれ次式のように求まる。

$$\begin{aligned} \bar{U}_3 = & \frac{1}{2} C F_1^2 \cosh 2k(h+\bar{z}) + \frac{1}{2} C F_2^2 \cosh 4k(h+\bar{z}) + \frac{1}{2} C F_3^2 \cosh 6k(h+\bar{z}) \\ & + w_j \{ F_1 \sinh k(h+\bar{z}) \cos k\bar{x} - F_2 \sinh 2k(h+\bar{z}) \cdot \sin 2k\bar{x} \\ & - F_3 \sinh 3k(h+\bar{z}) \cdot \cos 3k\bar{x} \} \end{aligned} \quad (3)$$

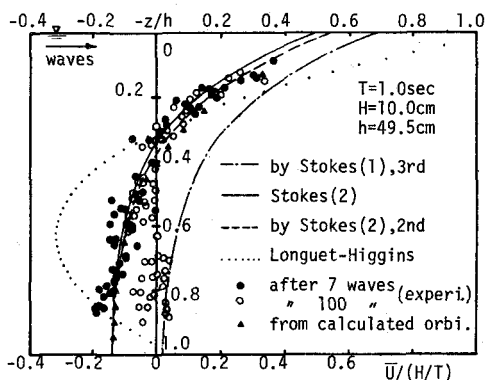
$$\begin{aligned} \bar{W}_3 = & -w_j + w_j \{ F_1 \cosh k(h+\bar{z}) \sin k\bar{x} + F_2 \cosh 2k(h+\bar{z}) \cos 2k\bar{x} \\ & - F_3 \cosh 3k(h+\bar{z}) \cdot \sin 3k\bar{x} \} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、上式 (3)~(4) 中の $F_1 \sim F_3$ は、それぞれ H および kh の関数で、 $k = \frac{2\pi}{L}$, $C = \frac{L}{T}$, L は波長である。

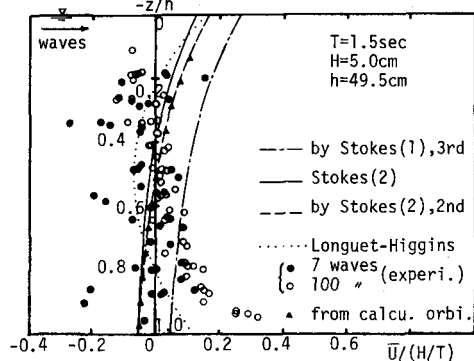
2) 残留速度に関する理論値と実験値の比較:

図-1 (1), (2) は、以上に示した水平方向の残留速度の理論値や Longuet-Higgins の Conduction sol. の結果と、実験値や差分法による運動軌跡から求められる結果 (図中 Δ 印) と比較したものである。これらの図から明らかなように、一般的には 7 波目の結果は、式 (1) の曲線に非常によく合致する場合が多いが、100 波目の場合には、どちらかと言えば、底面付近で、Longuet-Higgins の結果に類似してくるようである。一方、図-2 (1), (2) は、鉛直方向の残留速度について実験値と理論値と比較したもので、この図から、単一粒子の 1 周期平均の残留速度は、波高が大きく、かつ水表面に近いほど静水けでの沈降速度の値からかなり分散することがわかる。このように、残留速度の実験値が、かなり分散し、時空間的に変動性の著しい特性を有するということは、底質の浮遊機構を解明する上で非常に重要なことである。

最後に、本研究を行うにあたり、終始、暖かい御指導を賜わった岩垣伸一教授、御助言を賜わった土屋義人教授および酒井孝助教授に心から感謝の意を表すとともに、本研究は文部省科学研究費自然現象特別研究員 (代表者: 岩垣伸一教授) による研究の一部であることを付記し、謝意を表す。

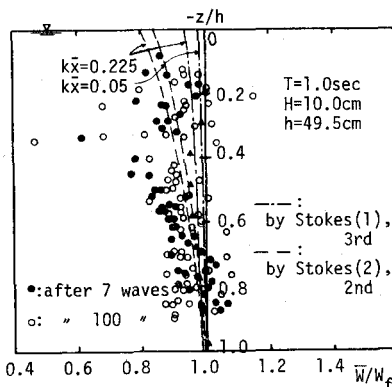


(1) $TV9/h = 4.5$ の場合

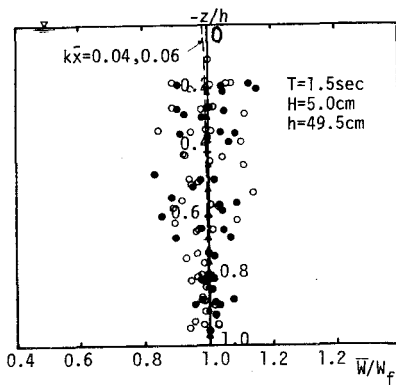


(2) $TV9/h = 6.7$ の場合

図-1 単一粒子の水平残留速度



(1) $TV9/h = 4.5$ の場合



(2) $TV9/h = 6.7$ の場合

図-2 単一粒子の鉛直残留速度