

重複波による浮遊粒子の挙動の特性について（続）

岩 垣 雄 一*・平 山 秀 夫**

1. 緒 言

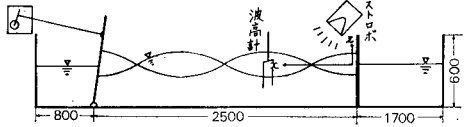
近年、海岸スペースの利用と開発が進むに伴い、波浪による海岸の侵食防止対策が強く叫ばれている。一方、港湾の埋没や河口閉塞などに見られる漂砂災害は、逆に漂砂の堆積が原因であって、その処理対策が問題となっている。このように、漂砂現象は非常に複雑で、そのすべてを解明することは、きわめて困難であるが、漂砂に関する最も基本的事項である、なぜ周期運動である波浪によって底質が浮遊し、あるいは輸送されるかという問題に関しても、なお十分満足すべき結果は得られてない。われわれは、この問題を解明するため、ここ3年間にわたって重複波動中における1個の浮遊粒子の挙動特性を主として実験的に調べてきているが、その成果はすでに、土木学会年次学術講演会¹⁾や海岸工学講演会^{2),3)}などで発表している。しかしながら、従来は節の部分の結果しかなく、必ずしも十分なデータが得られているとはいえなかった。

この研究は、これまでの研究成果をふまえ、さらに詳しく浮遊粒子の挙動特性を調べるため、前回に引き続いて、底面が滑面と粗面の場合の、重複波の腹の近傍を含むほぼ全域にわたる詳細な実験を行い、浮遊粒子の運動の中心位置の水平および鉛直方向の場所的变化による速度および運動軌跡の特性を実験的に調べ、有限振幅波理論を用いて、浮遊粒子が理論どおりに運動しているかどうかを検討する。ついで、前報³⁾に示した浮遊粒子の沈降速度による残留速度の理論結果のうち、ここでは特に鉛直成分について、その妥当性を検討するとともに、鉛直残留速度の場所的变化特性についても論じる。また、

前報で提示した、残留速度の分散値から定義した拡散係数を吟味するため、その後得られた、腹を含む数多くの実験データを用いて、それぞれ底面が滑面と粗面の場合の鉛直残留速度の分散を求め、その鉛直ならびに水平方向の分布特性を実験的に調べようとするものである。

2. 実験装置および方法

実験装置および実験の方法は、ただ浮遊粒子の投入位置を重複波の腹の付近および腹と節の中間付近を重点的



図一1 実験装置および座標系（単位 mm）

に選んだことを除けば、前報³⁾の場合と全く同様であるので、ここでは概略だけを示す。すなわち、実験は図一1に示すように、長さ5m、幅50cm、高さ60cmの鋼製片面ガラス張り水槽を用いて行った。撮影には接写用レンズを用いて、ひずみの少ない近接撮影を採用した。用いたストロボスコープは高照度で閃光時間が短く、閃光周波数は連続的に変えることができる。本実験に使用した照射時間間隔は0.075secで静水中の沈降速度の測定の場合には0.6secと一定にした。

実験の方法は、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（スチロール樹脂、比重1.02、粒径約2mm）を所定の位置に投入し、ストロボスコープを用いて浮遊粒子の挙動を撮影した。実験に用いた重複波の波長は常に一定で、節の数が3つとなるように水深30cmで周期1.14secとし、波高と

表一1 実験条件

実験番号 Run.	粗・滑	水深 h (cm)	周期 T (sec)	波高 H (cm)	照射周期 Δt (sec)	粒径 D (mm)	静水中の 沈降速度 W_f (cm/sec)	測定点 $-z$ (cm)	反射板からの 距離 kx
22-29	滑	30	1.14	8.19	0.075	1.90	2.16	15	$3\pi/4$
28-13	粗	"	"	9.79	"	"	2.18	"	"
33-18	滑	"	"	8.79	"	"	2.14	25	$\pi/4$
36-13	粗	"	"	8.72	"	"	"	15	"
37-22	"	"	"	9.80	"	"	2.15	25	"
40-11	滑	"	"	9.99	"	"	2.16	15	$9\pi/10$
44-17	粗	"	"	10.29	"	"	2.17	"	"

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

測定点を適当に変えた。波高は図-1に示すように、重複波の腹の位置に設置した電気抵抗式波高計を用いて測定し、ペン書オシログラフに記録させた。実験は滑面と粗面の両方の場合について、

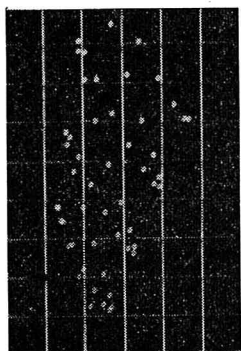


写真-1 ストロボ写真の実例 (Run.40-11)

それぞれ底面から5cm, 15cm, 25cmの深さに対して約20~80ケースずつ行い、浮遊粒子がほぼ同一鉛直面内で運動している場合のみを解析の対象とした。実験条件として代表的なものを表-1に示す。なお、実験で得られたストロボ写真の実例を写真-1に示す。

3. 解析方法

(1) 実験結果の解析法

前報³⁾の場合と同じく、ストロボ写真によって得られたネガフィルムから、モーションアナライザーを用いて浮遊粒子の運動の軌跡を読み取り、それからまた速度を求めた。読み取りは、 $u=w=0$ と考えられるところから始め、2.5~3周期までとした。

浮遊粒子の残留速度の水平成分 $\bar{U}$ および鉛直成分 $\bar{W}$ は、浮遊粒子の読み取り開始点の位置 (x_0, z_0) とその位置から1周期後における位置 (x_1, z_1) を用いて、それぞれ $\bar{U}=(x_1-x_0)/T$ および $\bar{W}=(z_1-z_0)/T$ (T は周期)として求めた。ただし、ここでは $\bar{W}$ から静水中の沈降速度 w_f を差引いた量 $\bar{W}'$ の結果だけしか解析していない。なお、実験結果の読み取り誤差はストロボスコープの照射周期によって異なり、0.075 sec および 0.6 sec の照射周期の場合、それぞれほぼ 0.07 cm/sec および 0.01 cm/sec 程度である。また、浮遊粒子が運動する面と直角方向に ± 1 cm 移動した場合にもほぼ同程度の誤差が生じる。

(2) 波動理論による速度および軌跡の計算法

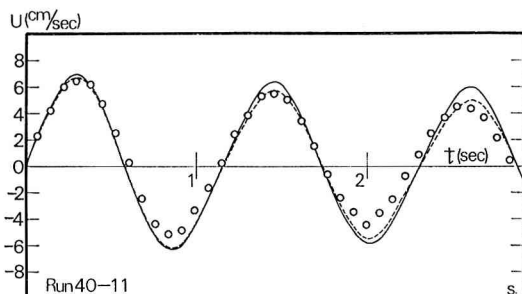
この計算法はすでに前報³⁾に示してあるので、ここでは詳細は省略する。いま、浮遊粒子が重複波動中を運動する場合、水平方向には水粒子の水平速度成分で鉛直方向には水粒子の鉛直速度と浮遊粒子の静水中での沈降速度の和の速度で運動すると仮定する。この仮定の下に浮遊粒子の速度および軌跡を算出するのであるが、その方法に2通りの方法が考えられる。第1の方法は、初期条件 $t=0$ での位置と速度から、 Δt 時間ごとに、逐次位置と速度を波動理論を用いて電子計算機で求めていく、いわゆる逐次計算法である。第2の方法は、実測の浮遊粒子の位置の座標を用いて、波動理論から各測定点におけ

る流速を見積る方法である。ただし、ここでは波動理論として Tadjbakhsh & Keller の第3次近似解⁴⁾を用いて計算した。両者による計算結果は後述する図中に示してある。

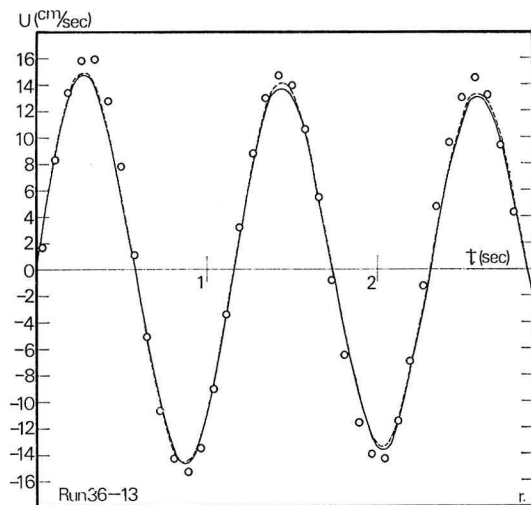
4. 実験結果および考察

(1) 浮遊粒子の速度および軌跡

前報³⁾で、重複波の節近傍での浮遊粒子の速度ならびに軌跡に関する実験例を示し、その一般的特性を論じた。ここでは、節以外での実験結果を示し、底面が滑面と粗面の場合における浮遊粒子の運動の特性の相違を調べてみる。



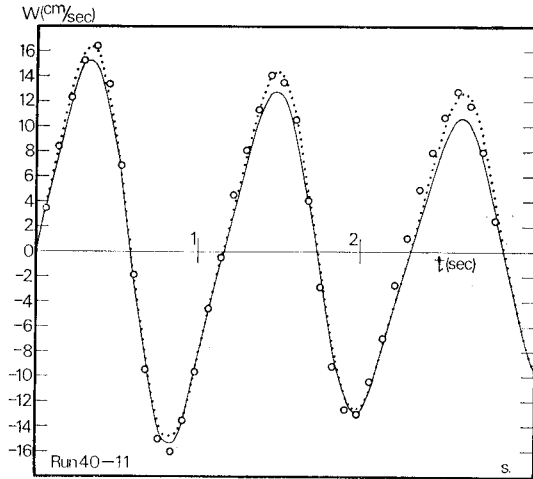
(a) 滑面 (腹付近)



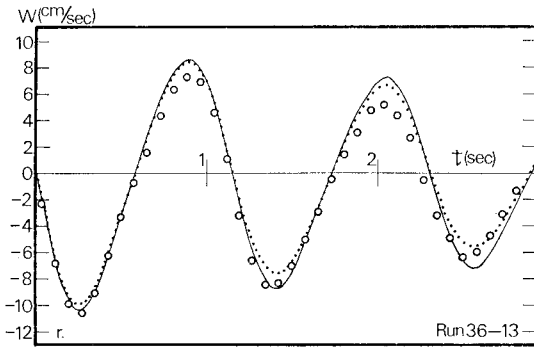
(b) 粗面 (腹と節の中間)

図-2 浮遊粒子の水平速度

図-2 (a), (b) はそれぞれ底面が滑面と粗面の場合の浮遊粒子の水平速度の例を示したもので、横軸は経過時間である。図 (a) は $kx \approx 9\pi/10$ (腹付近)、図 (b) は $kx \approx \pi/4$ (腹と節の中間付近) の位置での結果である。図中の実線および点線は、それぞれ有限振幅波理論による第1と第2の方法による理論曲線で、丸印は実験値を示す。これらの図から明らかなように、底面の粗滑によらず、流速の極大値付近で両理論値の差異が見られる一方、理



(a) 滑面 (腹付近)



(b) 粗面 (腹と節の間)

図-3 浮遊粒子の鉛直速度

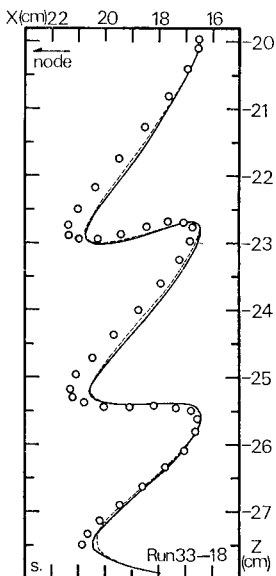
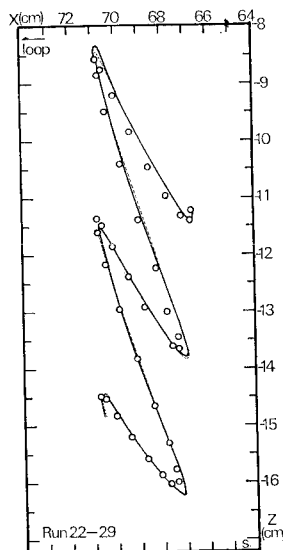
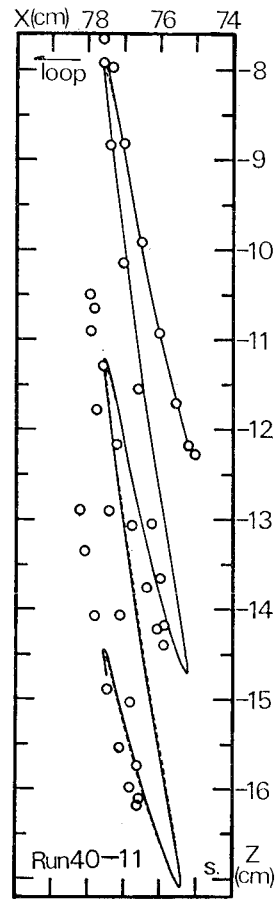
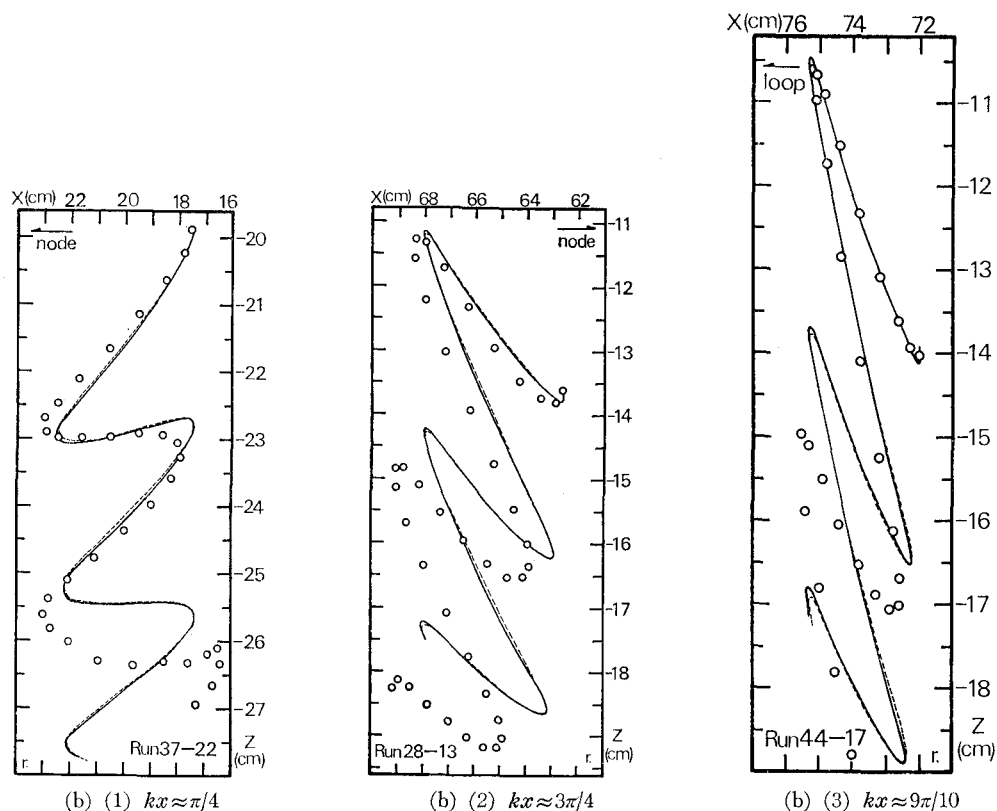
(a) (1) $kx \approx \pi/4$ (a) (2) $kx \approx 3\pi/4$ (a) (3) $kx \approx 9\pi/10$

図-4 浮遊粒子の軌跡 ((a) 滑面, (b) 粗面)

論値と実験値との差異も顕著である。これは前報で示した、節の部分では実験結果と理論値はかなりよく合致するという結果と異なる。

一方、鉛直速度についてその代表的なものを示したのが図-3で、(a)は滑面、(b)は粗面の場合である。鉛直速度成分の場合も、流速の極大値付近で実験値と理論値の差異が見られ、特に粗面の場合それが顕著である。

浮遊粒子の挙動を全般的に把握するためには、むしろ軌跡で調べたほうがわかりやすい。そこで軌跡の代表例として、滑面の場合を図-4(a)に、粗面の場合を(b)に示した。同図の(1), (2), (3)は浮遊粒子がそれぞれ反射板付近、腹と節の間、および腹付近を運動する場合である。横軸は反射板からの距離、縦軸は静水面からの距離である。 $x=0$ の地点が反射板、 $x=41.7$ cmが重複波の第1番目の節の位置である。また、図中の実線および破線はそれぞれ微小振幅波および有限振幅波理論による理論曲線で、丸印は実験値を示す。図(a), (2)のように理論値と実験値がかなりよく合致する場合もあるが、全般的には前報³⁾に示した節での結果と同様、粗面の場合



図—4 浮遊粒子の軌跡 ((a) 滑面, (b) 粗面)

もちろん滑面の場合でも、実験値と理論値は運動する水平および鉛直位置に無関係に合致しない場合が多く、浮遊粒子の運動はかなり複雑で、必ずしも理論どおりに運動してない。

(2) 沈降速度による浮遊粒子の鉛直残留速度

すでに前報³⁾で示したが、浮遊粒子が x 方向には水粒子速度で、 z 軸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いう仮定のもとに、重複波の1周期における平均の位置を $(\bar{x}, \bar{z})$ とし、Tadjbakhsh & Keller の第3近似解⁴⁾を用いて、理論的に残留速度を計算し、その鉛直成分から、静水中の沈降速度(w_f)を差引いた量($\bar{W}'$)を次式のように表わした。

$$\begin{aligned} \bar{W}'/w_f = & -(\pi H/L) \cdot \{\cosh k(h+\bar{z})/\sinh kh\} \cdot \cos k\bar{x} \\ & - (3k/2\sigma) \cdot (\pi a/L)^2 \cdot c \cdot \{\cosh 2k(h+\bar{z})/\cosh 2kh \\ & \times (1 - \coth^4 kh) \cdot \cos 2k\bar{x} + (ka)^3 \cdot (g/k)^{1/2} \\ & \cdot \{-9k/\sigma \cdot \beta_{13} \cdot \cos 3k\bar{x} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z}) \\ & + k/3\sigma \cdot \beta_{31} \cdot \cos k\bar{x} \cdot \cosh k(h+\bar{z}) + (3k/\sigma) \\ & \cdot \beta_{33} \cdot \cos 3k\bar{x} \cdot \cosh 3k(h+\bar{z})\} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

図—5 (a), (b) はそれぞれ底面が滑面と粗面の場合における、式(1)の理論曲線と実験値を比較したもので、横軸に反射板からの距離を $k\bar{x}$ で、縦軸には $\bar{W}'/w_f$ をとって波高別に示したものである。図中、実線と点線が式(1)の理論曲線で、深さ z の異なった値について理論

値を示したのは、実験データの z の値がこれらの間にはさまれるからである。図の(1), (2), (3)は浮遊粒子がそれぞれ $z \approx -5$ cm (水表面付近), -15 cm, -25 cm (底面付近)の地点を中心に運動する場合の結果である。これらの図から明らかなことは、まず第1に、底面の粗滑によらず実験値がかなり散乱していて、しかも波高による分布特性がほとんど見られないことである。しかしながら、図—6に示されるように、(a)の滑面の場合、これらの分散した実験値の平均値を考えると、理論値と実験値は、底付近を除いてかなりよく合致している。一方、(b)の粗面の場合には、両者の傾向はほぼ合致しているようであるが、全体的に実験値が理論値よりかなり小さく、負の値をとっている。第2に、実験値の散乱の分布の程度が、滑面と粗面の場合とでは異なり、全体的に粗面の場合が顕著であること。また、粗面の場合とは別として、滑面の場合は、実験値の分散の程度が節の部分で最も小さく、腹の部分に近づくにしたがって大きくなる傾向が見られることである。なお、図—6のプロットは図—5に示した実験データを $kx \approx \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ および $9\pi/10$ の4つの部分に分けて、それらの平均値を示したものである。

以上述べたように、浮遊粒子の鉛直残留速度が水平および鉛直方向にも場所的に変化し、しかもその値が波高

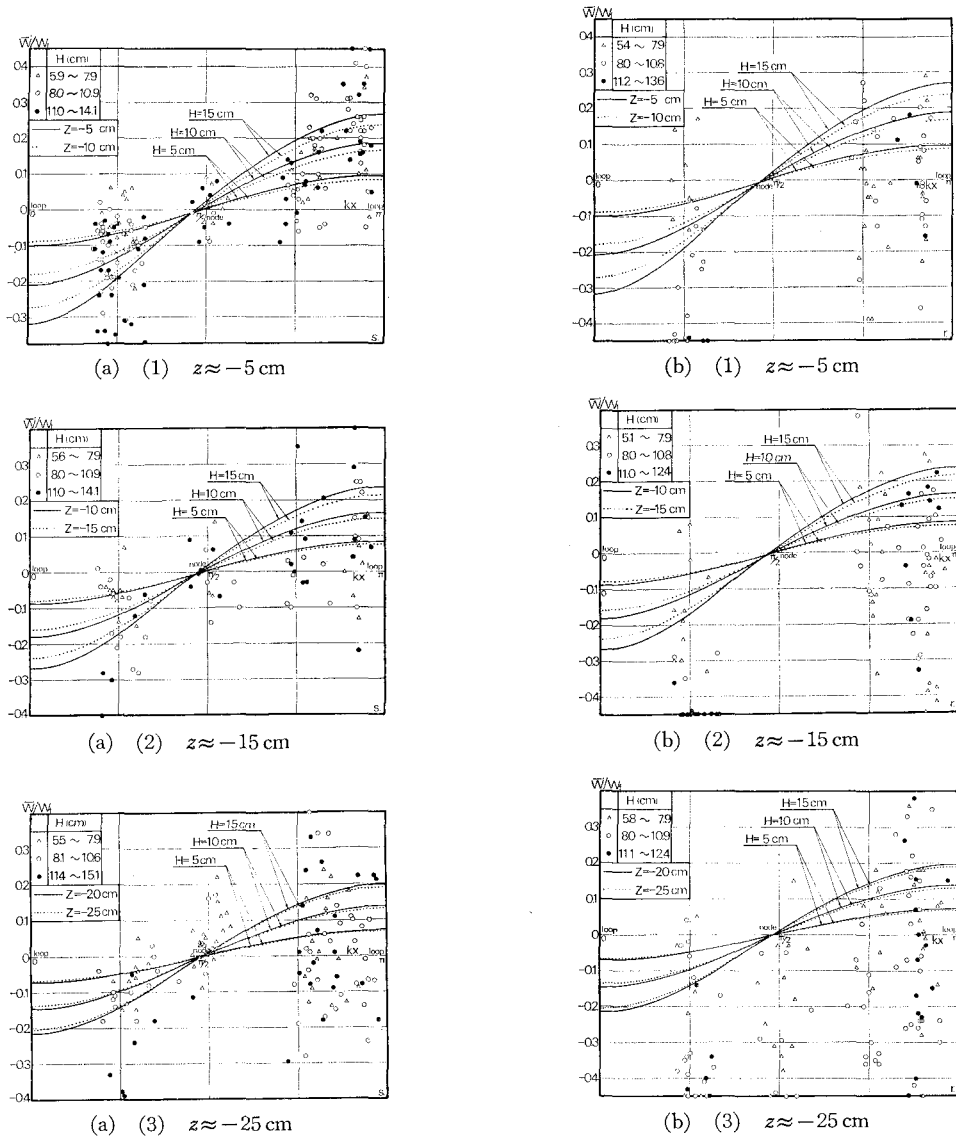


図-5 浮遊粒子の鉛直残留速度の理論値と実験値の比較 ((a) 滑面, (b) 粗面)

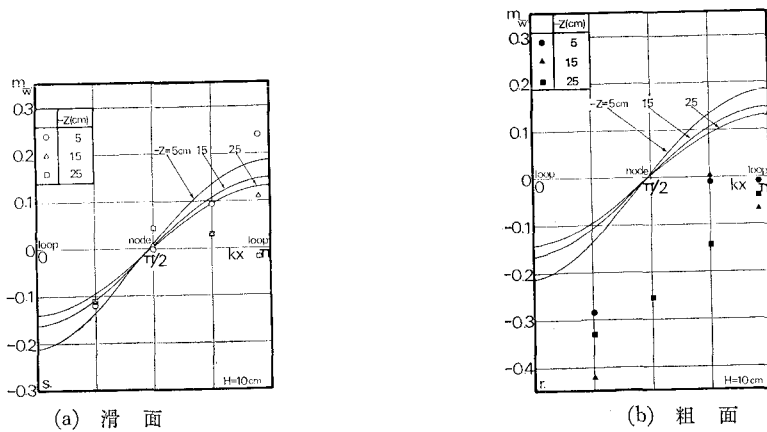


図-6 浮遊粒子の鉛直残留速度の平均値

によらずランダムであり、かつ底面の粗滑の状態によって大きく変動する。このような浮遊粒子の挙動の特性をさらに詳しく調べるために、その分散特性を検討する。

(3) 残留速度による拡散係数

前報³⁾で、潮流の水平混合と類似な考え方で、浮遊粒子の1周期後における残留速度の分散値から拡散係数を定義できることを示し、節の部分の水平および鉛直残留速度の実験結果から分散を求め、それらの鉛直分布特性を示した。その結果、鉛直残留速度の分散値の鉛直分布特性は、野田⁵⁾が重複波の節近傍のところの濃度分布から逆算して求めた拡散係数の鉛直分布と類似な傾向をもつことを示した。ここでは、前報で定義した拡散係数を算定する式をそのまま提示するとともに、その後得られた、重複波のほぼ全域にわたる鉛直残留速度の実験結果から、各深さでの分散値を求め、これらの鉛直ならびに水平分布特性を明らかにし、野田⁵⁾や服部⁶⁾の実験結果と比較し、定性的考察を加える。

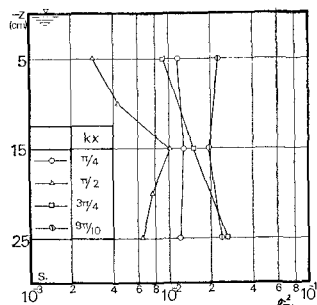
潮流の水平混合は一種の乱流拡散混合で、水粒子が1周期後に元の位置に戻らないでずれるが、その変位量がいわゆる乱流理論による混合距離に相当し、それを周期で割ったものが変動速度に対応するとして拡散係数を定義している⁷⁾。いま同様な考え方を浮遊粒子の鉛直拡散に適用すると、この場合の混合距離および変動速度に相当する量 l および w' は実験値の標準偏差 (σ) を用いて表わされ、それらから鉛直拡散係数 (k_z) は次のように表

現される。

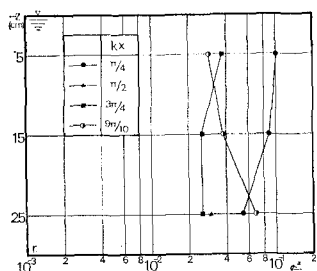
$$k_z = l \cdot w' = w_j^2 \cdot T \cdot \frac{N}{\sum_{i=1}^N (\bar{W}'_i / w_j - m)^2} / N = T \cdot w_j^2 \cdot \sigma^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\bar{W}'_i / w_j$ は各実験値で、 N はその個数、 $m = (\sum_{i=1}^N \bar{W}'_i / w_j) / N$ 、 $\sigma = [\{ \sum_{i=1}^N (\bar{W}'_i / w_j - m)^2 \} / N]^{1/2}$ である。この式 (2) から、波の周期と浮遊粒子の沈降速度がわかっている場合には、浮遊粒子の沈降速度の1周期平均の変化量の分散値を与えると拡散係数が求まる。本実験では、波の周期は一定で浮遊粒子の沈降速度もほぼ一定であるので、この分散値 (σ^2) の分布が拡散係数の分布を表わすことになる。

図-7 (a), (b) は、それぞれ底面が滑面と粗面の場合における分散値の鉛直分布を、それぞれ $kx \approx \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$, および $9\pi/10$ の4つの部分に分けて示したもので、横軸は浮遊粒子の鉛直残留速度の無次元量 $\bar{W}'/w_j$ の分散値である。滑面の場合、(a) から明らかなように、分散値は $kx \approx \pi/2$ (節) と $3\pi/4$ のところでは深さ方向に変化しているが、 $kx \approx \pi/4$ と $9\pi/10$ (腹) のところではほぼ一定であることがわかる。一方、粗面の場合には、(b) から明らかなように、節の部分での実験値が一部欠除し

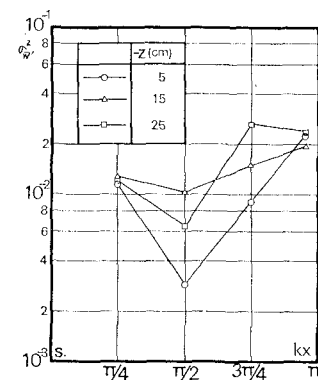


(a) 滑面

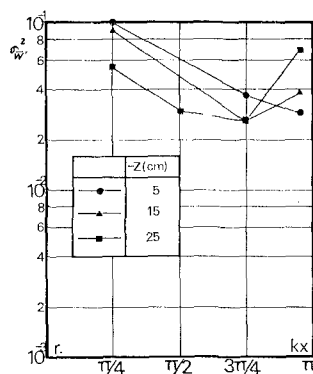


(b) 粗面

図-7 浮遊粒子の鉛直残留速度の分散値の鉛直分布



(a) 滑面



(b) 粗面

図-8 浮遊粒子の鉛直残留速度の分散値の水平分布

ているので全般的なことはわからないが、滑面に比較して分散値は全体的に大きく、その鉛直分布は水平位置によってかなり変化しており、これからだけでは明確な特性を見い出せない。

図-8 (a), (b) は鉛直残留速度の分散値の水平分布を、 $z \approx -5, -15, -25 \text{ cm}$ の位置に分けて示したもので、横軸に kx をとって、図-7の結果をそのまま書き換えたものである。これらの図から明らかなように、(a) の滑面の場合、深さ方向の位置 (z) の値によって若干の差異が見られるが、全体的には節の位置での分散値が最も小さく腹に近づくほど大きくなっていることがわかる。このことは、重複波の腹と節の位置での底質の鉛直濃度分布に関する服部⁹⁾の実験結果から推定される拡散係数の傾向と定性的には合致しているように思われる。しかしながら、服部の実験結果は、節と腹以外で濃度の鉛直分布を示してないので、これだけでは明確なことは言いえない。一方、(b) の粗面の場合にも、 $z \approx -5 \text{ cm}$ の位置での水平分布を除いて、ほぼ滑面の場合と同様な傾向があることがわかる。

5. 結 言

以上、重複波の腹近傍を含むほぼ全域にわたる実験を行い、底面が滑面と粗面の場合における浮遊粒子の挙動特性を前報の場合と全く同じ手法で実験的に調べ、その結果を波動理論と比較するとともに、鉛直残留速度の理論結果についてその妥当性をも論じた。同時に、鉛直残留速度の分散から、潮流の水平混合と類似な考え方で定義した拡散係数を実験的に検討し、重複波内部における鉛直拡散係数の水平ならびに鉛直分布を求め、その特性を調べた。その結果、波動の場合における底質の運動が、乱れの中の粒子の運動に類似していることから、波と浮

遊粒子との間に乱れに似た分散効果が存在するらしいことが明確になってきた。

以上のように、1個の浮遊粒子の挙動をラグランジュ的に追跡することによって、拡散係数の場所的分布を調べてきたが、今後は、このようにして得られた拡散係数の分布特性を吟味するため、染料や底質の浮遊濃度分布などにより検討を進め、波の場合での底質の浮遊機構の解明に努力したいと思う。

最後に、本研究を行うにあたり、実験にご協力いただいた、京都大学工学部学生古市真君に心から感謝の意を表するとともに、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し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・平山秀夫：重複波の波動下における浮遊粒子の沈降速度の変化について，第28回年次学術講演会講演概要第Ⅱ部，土木学会，pp. 6~7, 1973.
- 2) 岩垣雄一・平山秀夫：重複波による浮遊粒子の挙動について，第19回海岸工学講演会論文集，pp. 165~171, 1972.
- 3) 岩垣雄一・平山秀夫：重複波による浮遊粒子の挙動の特性について，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 319~326, 1973.
- 4) Tadjbakhsh, I. and J. B. Keller: Standing surface waves of finite amplitude, Jour. Fluid Mech., Vol. 10, pp. 1~11, 1967.
- 5) 野田英明：波による底質の浮遊，第14回海岸工学講演会講演集，pp. 306~314, 1967.
- 6) 服部昌太郎：重複波による底質の浮遊機構，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 147~152, 1969.
- 7) Higuchi, H: Hydraulic Model Experiment Involving Tidal Motion, Bull. DPRI, Kyoto Univ., 59, pp. 1~65, 1963.