

重複波のもとでの砂移動のメカニズムについて

灘岡 和夫*・入江 功**・近藤 隆道***・寺崎 賢次***

1. はじめに

重複波による砂移動のメカニズムを論じた主な理論としては、水粒子の質量輸送速度のパターンとの関連で論じた野田¹⁾による研究があるが、これは言うまでもなく、砂粒子の挙動が水粒子のそれとあまり変わらないということを前提としている。この前提が成り立つのは、底質粒子が微細・軽量で重複波の波高が大きい場合、すなわち底質粒子が十分浮遊した状態であると考えられるが、この逆の場合には砂粒子の挙動と水粒子の挙動はかなり異なってくる可能性がある。

底面付近を滑動ないし転動する砂粒子は波の全位相で常に運動状態にあるとは限らない——「着底の効果」。また、ripple が存在する場合にはそれに伴う組織渦によって砂粒子の挙動が大きく拘束される——「ripple の効果」。したがって、少なくとも底面付近にある砂粒子の移動のメカニズムを議論する際には、このような質量輸送以外の効果を考慮する必要がある。

本研究は、このような観点から、質量輸送以外の砂移動のメカニズムの具体的な内容を明らかにすることを目的として実験および理論的な検討を行ったものである。まず最初に、flat bed 上での砂移動について調べるために行った固定床実験の結果から、砂粒子の平均移動方向が可視化によって得られた水粒子の質量輸送方向と逆になる場合があることを示した。そこで、質量輸送以外のメカニズムを探るため、底面上を滑動する砂粒子の運動方程式に基づいた理論解析を行い、上述の砂粒子の「着底の効果」の内容を明らかにした。すなわち、重複波に有限振幅性がある場合には流速の加速度波形に非対称性が現われるため砂粒子に作用する慣性抵抗に差が生じ、その結果砂粒子の移動開始位相の非対称性が現われて砂粒子は節へ集まる、ということを示した。次に、ripple が存在する場合の砂移動機構を調べるために行った移動床実験の結果について述べ、上述の「ripple の効果」を具体的に検討した。

2. flat bed 上での砂移動

2.1 固定床実験

flat bed 上での重複波の流速場とそのもとで砂移動について検討するために固定実験を行った。実験に用いた水路は、長さ 44.5 m、幅 0.5 m の 2 次元水路で、木製の底板を水路中に水平に設置した。実験条件は、入射波高 $= 3 \sim 10$ cm、周期 $= 1.0 \sim 1.9$ s、水深 $= 25$ cm である。以下では、紙面の都合から、実験結果の一部分だけを示す。

図-1 は、水路の一端に捨石マウンドを有する混成堤を設置した場合の実験結果を示したものである。図の最上段が波高分布、二段目がレーザー・ドップラー流速計で測定した底面上 0.5 cm での水平方向の平均流速の分布である。平均流速の流向は図中の矢印で示すとおりであるが、これから平均流速は重複波の腹に向かって収束していることが分る。これは、粘性効果を考慮したときの 2 次オーダーの Euler 平均流速の理論値²⁾の予測するところと符合している（いまの場合、 $\delta = \sqrt{2\nu/\sigma} \approx 0.07$ cm であり、平均流速の測定点は境界層外縁に位置している）。ただし、実験値の方は、完全重複波でないため、

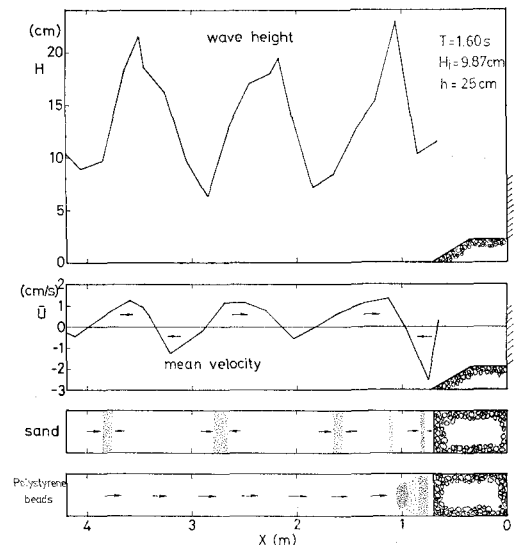


図-1

* 正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室長

*** 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室

堤体に向う流速が全般的に大きな値を示している。同図の第三段目の図は、水路を上から見たときの図で、波作用前に砂粒子(中央粒径 $d_{50}=0.33$ mm, 比重 $s=2.65$)を底面上にまばらにバラまいた後、波を作用させて砂粒子がどの場所に収束していったかを示したものである。これを見ると、砂粒子はすべて重複波の節の部分に集まっていることがわかる。一方、最下段の図は砂粒子の代りにポリスチレン粒子(中央粒径 $d_{50}=1.0$ mm, 比重 $s=1.05$)をバラまいて同様にその後の動きを追跡した結果を示したものである。この場合のポリスチレン粒子の挙動は水粒子の運動状態を可視化したものとなっていると考えられる。同図によると、ポリスチレン球は砂粒子の場合とは異なり全て堤体に向って動き、マウンド前面に掃き寄せられた形になっている。すなわち、水粒子の質量輸送方向は砂粒子の平均移動方向と一致していないことがわかる。このことは、過マンガン酸カリウムの水溶液で底面近傍の水粒子の運動を可視化した結果からも確認された。

砂粒子とポリスチレン粒子がこのような違った平均移動方向を示すというのはすべての実験ケースで見られたわけではないが、上に示した実験結果は、重複波のもとの平均的な砂移動方向を決定する因子として水粒子の質量輸送だけを考慮するのでは不十分であることを示している。

2.2 理論的検討

底面近傍を運動する砂粒子は、波の全位相で運動状態にあるとは限らない。そこでここでは、このような効果(「着底の効果」)を含んだ形で単一砂粒子の運動を追跡するための理論解析を行った。手法としては、砂粒子に関する運動方程式を数値積分して一周後の移動距離の残差を得ようとするもので、基本的には進行波に対する日野³⁾や土屋・清水⁴⁾の取扱いと同一であるが、ここではさらに底面境界層の存在を考慮した解析を行った。

解析に使用した運動方程式は以下のとおりである。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_s}{dt} &= u_s \dots\dots\dots (1.a) \\ \frac{du_s}{dt} &= \frac{3c_a}{4d(s+c_m)} \cdot |u-u_s| \cdot (u-u_s) \\ &\quad + \frac{1}{s+c_m} \cdot \frac{du_0}{dt} + \frac{c_m}{s+c_m} \cdot \frac{du}{dt} \\ &\quad \mp g \cdot \frac{s-1}{s+c_m} \cdot \mu_f \dots\dots\dots (1.b) \end{aligned} \right.$$

ここに、 x_s : 砂粒子位置の水平座標、 u_s : 砂粒子の速度、 u : 水粒子の速度(ここでは $z=d/2$ の値を使用)、 u_0 : 境界層外縁での水粒子速度、 d : 砂粒子の粒径、 s : 砂粒子の比重、 c_a : 抗力係数、 c_m : 仮想質量係数、 μ_f : 底面との摩擦係数、である。式(1.b)の右辺第2項は砂粒子周辺の圧力勾配に起因する項で、ここでは境界層外

縁での圧力勾配が境界層内にそのまま伝わるとしているため境界層外縁での水粒子加速度で表わされる形となっている。

砂粒子が静止状態から運動状態に移行する時点の算定は、 μ_f を静止摩擦係数 μ_{fs} とした時、式(1.b)の右辺の最初の三項の合計の絶対値が第4項の値を上回るかどうかを判定して行った。運動状態に入れば、当然のことながら μ_f は動摩擦係数 μ_{fm} となる。これらの係数と形状抵抗係数は、砂粒子の移動限界となる位置に関する理論値等が後に示す実験値になるべく近くなるように選び、ここでは $\mu_{fs}=0.5$, $\mu_{fm}=0.1$, $c_a=1.0$ とした。また、仮想質量係数 c_m は 0.5 としている。

次に、砂粒子運動の外力となる流速波形 u について触れておく。図-2 は底面上 0.5 cm での水平軌道流速波形の実験値を有限振幅重複波の第3次近似解による計算値とともに示したものである。これから分るように、重複波の場合には有限振幅性があっても進行波の場合とは異なって水平流速波形には(上下の)非対称性は現われない。したがって、進行波のもとの砂粒子の岸・沖方向移動に関してよく言われる流速波形の非対称性の効果は重複波の場合には期待できない。しかし、重複波の場合、流速波形の非対称性は現われないものの、図-2 からうかがえるように、加速度波形には非対称性が現われる。すなわち、有限振幅重複波の場合には、重複波の腹に向う方向の加速度よりも節に向う方向の加速度の方が大きくなる。

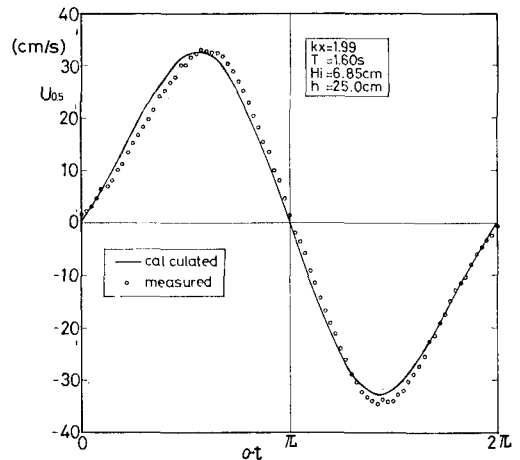


図-2 底面上 0.5 cm での水平軌道流速波形の測定例(節から腹に向う方向が正)

加速度波形のこのような非対称性は、砂粒子の運動に対しては慣性抵抗の非対称性となって現われるが、式(1.b)を見ると分るように、加速度項は線形であるので加速度波形に非対称性があっても一周積分すればこの項の寄与はゼロになる。しかし、ある位相で一時的に砂粒子が静止状態になる場合には事情が異なってくる。す

なわち、慣性抵抗に非対称性が存在するとそれが砂粒子の移動開始位相の非対称性となって現われ、その結果、重複波の節に向う砂粒子の平均的な移動が生じる可能性がある（つまり、節へ向う方向の加速度の方が大きいため節向きの位相の方が早めに砂が動き始める）。

この慣性抵抗の非対称性の効果は、流速が同じであるとする、式 (1.b) の形から分るように砂粒子の粒径 d が小さくなるほど形状抵抗項に比べて相対的に小さくなる。しかし実際には粒径が小さい場合、底面の波動境界層内部の流速が効くようになり、流速の 2 乗に比例する形状抵抗項は相対的に小さくなっていく。したがってここでは流速 u として底面境界層の存在を考慮した形のもを取扱った。重複波による波動境界層内の流速を与える理論としては野田²⁾による 2 次近似解があるが、ここでは境界層外縁流速として有限振幅重複波の 3 次近似解を与えたため（図-2 参照）、これに整合させ、かつ計算を簡単に行うためにここでは移流慣性項を省略した次式に基づいて境界層内の流速を算定した。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_0}{\partial t} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ν : 動粘性係数、 u_0 : 有限振幅重複波の 3 次近似解で与えられる境界層外縁流速、 z : 底面から上方にとった鉛直座標である。

野田²⁾の第 2 次近似解によると、境界層内部での流速波形には（上下の）非対称性が現われることが示されるが、式 (2) によっても同様に流速波形の非対称性が現われる。図-3 は、その非対称性を表わすパラメータとして流速波形の skewness をとってその鉛直分布を計算した例である。これから、流速波形の非対称性は底面に近づくほど大きくなり、非対称性の現われ方は節をは

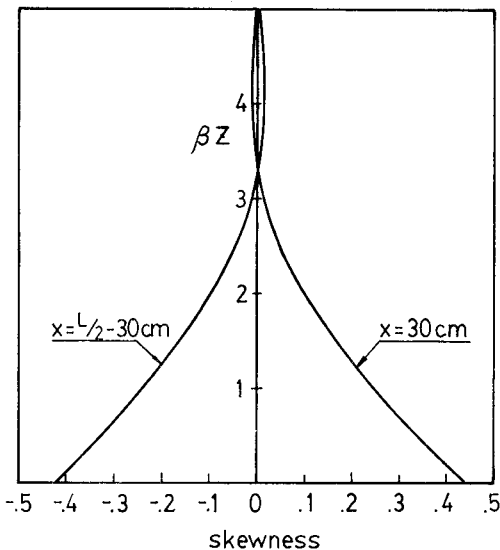
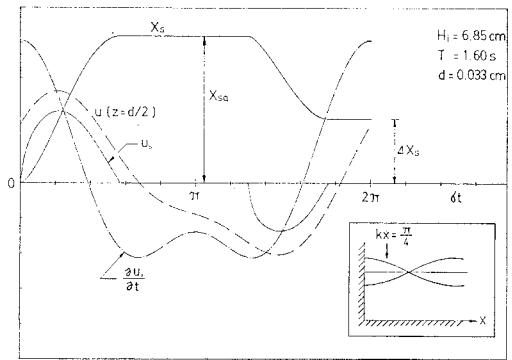


図-3 流速波形の skewness の鉛直分布 ($\beta=1/\delta=\sqrt{\sigma/2\nu}$, $T=1.60$ s, $H_t=6.85$ cm)

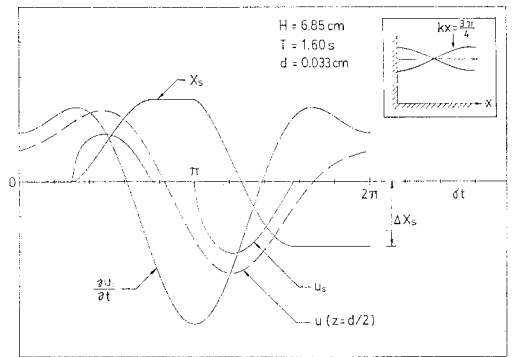
さんで逆転する形となるということが分る。また、流速波形の非対称性は重複波の節に向って砂粒子を運ぶ方向に現われているが、このことは、境界層の存在が、上述の加速度波形の非対称性の効果に加えて、通常の流速波形の非対称性に基づく砂輸送効果を付加するものとなることを示している。

それでは、このような流速波形を与えたときの砂粒子の運動を、式 (1) を数値積分することにより具体的に追跡して見た結果を以下に示す。図-4 (a), (b) は、一周期の砂粒子の運動を図中に示すように節をはさむ二所について計算した結果を示したものである。図中の破線で示された流速波形と一点鎖線で示された境界層外縁流速の加速度波形にはかなりの非対称性が現われており、これに伴って砂粒子の移動開始位相に節向きと腹向きとで大きな違いが生じていることが分る。このことを反映して砂粒子は、一周期後に、図中に示す Δx_s の距離だけ節の部分に近づくことになる。

次に、ここで述べた方法による計算値が実験値をどこまで説明し得るか具体的に検討した結果について述べる。実験は固定床上に砂粒子を適当に散布し、その後の砂粒子の運動を 8 mm フィルムに撮影して行った。図-5 (a) は砂粒子の一周期後の移動距離残差 Δx_s に関する理論値と実験値を比較した結果を示したものである。

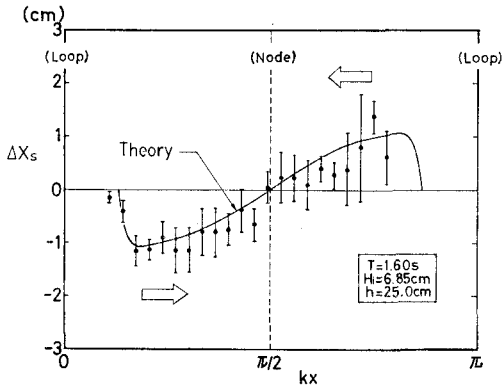


(a)

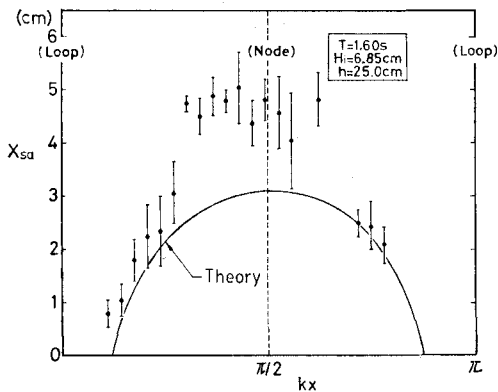


(b)

図-4 砂粒子の一周期内の動きに関する計算結果（縦軸のスケールは任意にとつてある）



(a) 一周期後の砂粒子の移動距離残差 Δx_s に関する理論値と実験値の比較



(b) 1 周期間に砂粒子が動く範囲 x_{sa} に関する理論値と実験値の比較

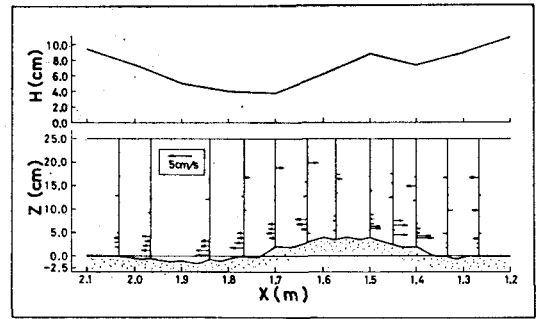
図—5

これを見ると、実験値とバラツキはあるものの、理論値は実験値の分布傾向をかなり良く説明していることが分る。図—5 (b) は、一周期に砂粒子が動く範囲 x_{sa} (図—4) についての理論値と実験値を比較したものであるが、この場合には節の付近で実験値が理論値を上回っている。これは節付近では流速が大きいため砂粒子が底面から若干浮遊した形で運動するためと考えられる。

3. ripple がある場合の砂移動

ripple が存在する場合の砂移動のメカニズムについて検討するために、長さ 25 m、幅 0.5 m の二次元水路を用いた移動床実験を行った。使用した底質材料は、砂 ($d_{50}=0.33$ mm, $s=2.65$) および石炭粉 ($d_{50}=0.27$ mm, $s=1.60$) である。実験条件としては、固定床実験の場合とほぼ同じであり、堤体は捨石マウンドを有する混成堤である。

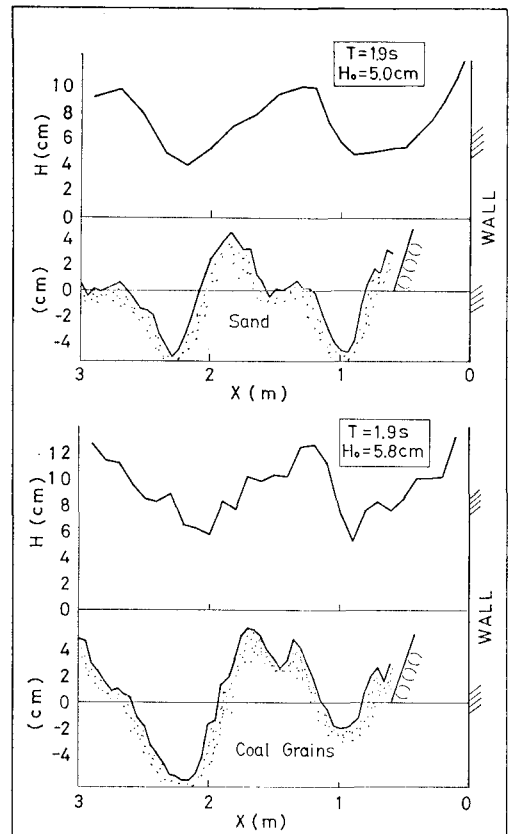
図—6 は、室内用の小型電磁流速計 (アメリカ合衆国、マーシュマクバーニ社製) を用いて水平方向平均流速の空間分布を測定した結果を示したものである。これから



図—6 平均流速の測定値の空間分布

明らかなように、砂面上数 cm の範囲には、重複波の節から腹の部分に向う平均流が明瞭な形で存在している。このような節から腹に向う平均流パターンに対して底面形状は節の部分に堆積する形となっており、流れのパターンから予想される地形変化とは逆の結果になっている。

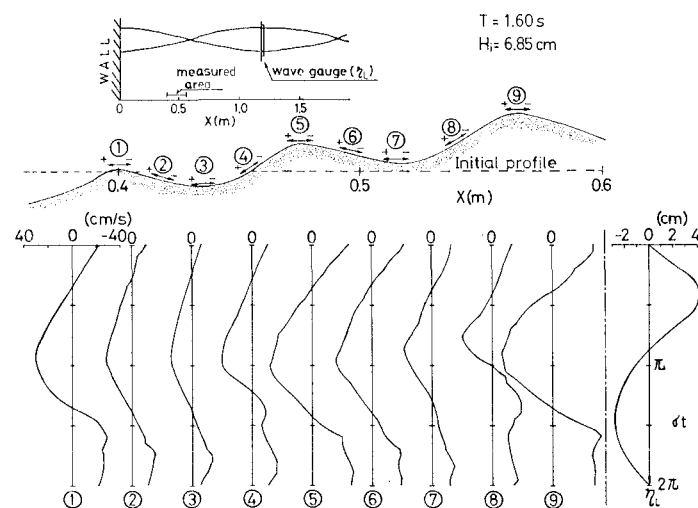
このような節への堆積傾向を示す実験結果は、ripple が発生しているものについては他の多くの実験ケースについて見られた。また水粒子の質量輸送パターンに基づいて砂粒子の平均移動方向を論じた野田¹⁾の論文中的実験結果においても、ripple が存在する場合には節への堆



図—7 底質材料の違いによる地形変化特性の変化の一例 (上段: 砂, 下段: 石炭粉)

積が生じている。しかしながら、底質材料として石炭粉を用いた場合には、堆積場所が節から腹へ変化する（あるいはその過渡状態となる）ケースが見られた（図—7）。

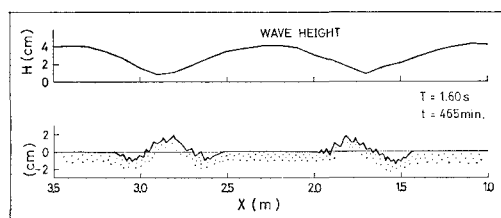
これらのことは、底質の浮遊が少ない場合 ripple に伴う組織渦による拘束効果が支配的であり、底質の浮遊が多くなるにつれて水粒子の質量輸送効果が支配的になってくることを意味している。ripple による拘束効果によって砂粒子が節に輸送されるためには、ripple の左右に生じる組織渦の強度に非対称性が存在する必要がある。実際、目視観察等によりこのような非対称性が存在することが確認できたが、より明確に把握するために、ここでは ripple 周辺の流速場をレーザー・ドップラー流速計によって測定して非対称性の現われ方を調べてみた。図—8 は、波作用開始後 50 分の時点での砂面形状をペイントで固定し、図中に示す 9 地点で流速波形を測定した結果（50 波平均）を示したものである。これを見る



図—8 リップル周辺の軌道流速波形の測定値

と、ripple の腹側の斜面に位置する ④ と ⑧ 地点での流速波形には腹向き最大流速が現われた後の位相で、ripple 背後の組織渦による流速の急激な逆転現象が見られる。しかし反対に、ripple の節側の斜面に位置する ② と ⑥ 地点での流速波形にはこのような現象は現われていない。このことは ripple の節側斜面に生ずる渦よりも腹側斜面に生ずる渦の方がより発達していることを示しており、それは染料による渦構造の可視化実験によっても確認された。

ripple 回りの渦のこのような非対称性は、砂粒子の輸送に対して次のような働きをしているものと考えられる。すなわち、腹向きの流速位相に ripple の節側斜面を掃流状態で運ばれた砂粒子は、その大部分が ripple の腹側斜面に生ずる組織渦に取り込まれ、流れの逆転時にその渦とともに節側へ投げ出される。これに対して節向きの流速位相ではこれと逆向きの現象が起こり得るが、節



図—9 微小振幅波に近い波を作用させたときの地形変化

側斜面に生ずる渦が弱いため渦への捕捉率は低くなる。したがってこれらの差し引きとして砂粒子は平均的に節側へ運ばれることになる。

それでは、このような渦強度の非対称性をもたらす要因は何であろうか。前節で述べた軌道流の加速度波形の非対称性はその要因の一つとして考えられる。これに関連して、例えば石田ら⁵⁾は、ripple が存在する場所での漂砂量に関するモデルに基づいて、重複波の有限振幅性によって節へ向く砂粒子輸送が説明できるとしている。しかし、図—9 に一例を示すように、実験によるとかなり微小振幅波に近い波のもとでも節での堆積現象が見られた。これは ripple の効果が必ずしも波の有限振幅性のみによっているのではなく、微小振幅波でも軌道流速と ripple のスケールが節に近いほど大きくなるため、ripple の左右での渦の形成に際しての渦度の集積に非対称性が現われるということに起因すると考えられる。

4. むすび

本論文では、重複波のもとでの砂粒子移動に関して、従来言われてきた水粒子の質量輸送効果以外のメカニズムについて実験と理論解析により検討した。その結果、flat bed 上の砂粒子に対しては、軌道流速の加速度波形と境界層内の流速波形の非対称性に起因する砂粒子の着底の効果が重要であることを明らかにし、ripple が存在する場合にはそれに伴う組織渦による拘束効果が底質の浮遊が少ない場合支配的になることを示した。

参考文献

- 1) 野田英明: 波動境界層における質量輸送と海底の洗掘, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 59~66, 1970.
- 2) 野田英明・川嶋康宏: 浅海重複波による質量輸送, 第 15 回海岸工学講演会論文集, pp. 24~29, 1968.
- 3) 日野幹雄・山下俊彦・米山 晋: 波による砂粒子の運動と掃流砂量に関する研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 213~217, 1982.
- 4) 土屋義人・清水 潔: 波による球状粒子の移動機構, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 233~237, 1982.
- 5) 石田 昭・林 功・高橋宏直: 沖浜領域における縦漂砂量の算定方法に関する研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 188~192, 1981.