

京都大学防災研究所 正員 野田 英明

運輸省第四港湾建設局 正員 ○川嶋 康宏

1. まえがき； 波動運動に伴って海底に発達する境界層は、浅海における波の變形や底質の移動現象を説明するために、きわめて重要である。著者らは従来から、重複波による砂堆の発生機構を説明するために、浅海重複波による底面付近での流れの挙動、とくに質量輸送とそれによる底質の移動について検討してきた。しかし、従来は主として、層流境界層でかつ底面が滑面という条件のみに限られていたので、今回は底面が粗面でかつ乱流境界層という条件についても実験を試み、若干の結果をえた。ここではその結果について述べる。

2. 実験装置と方法； 実験は長さ3m、幅0.3mおよび高さ1.0mの鋼製片面がラス張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送波機を設置した。水槽底面はアクリル樹脂板を用いて水平にし、これに1.10mのふりこを通し、0.85mmの穴に残る本津川産の砂をスス付けして固定粗面とした。粗面上における質量輸送速度とその鉛直分布を測定するためにつぎのような方法をとった。すなわち、過マンガン酸カリの微小粒子を水中に投入し、沈降中にできる一糸の細い赤色条痕を利用して、波の一周期ごとに、ストロボ・スコープを用いてこれと写真撮影し、その変位から質量輸送速度も算出した。つぎに波高の大きい場合には、水底のある特定な位置に粒径ほぼ1mmの底質100粒を投入してその移動状況と調べた。実験は水深 h を40cmと一定にし、波の周期 T および波長 L とそれぞれ、1.45sec および250cmと固定して、波高を変化させて行なった。

3. 粗面上の質量輸送速度とその鉛直分布； 実験に用いた重複波は鉛直壁よりの距離を x とすると、 $x=0$ および $1/25$ cmで振動の腹となり、この位置では水粒子は鉛直方向に移動するのみである。一方、 $x=62.5$ cmの位置は振動の節となり、水粒子の水平方向の速度成分は最大となる。さらに、層流理論によると、境界層内の質量輸送速度は無次元で表示すると、

$$U' = K(\eta) \sin 2kx \quad (1)$$

$$K(\eta) = -3 + 8 \exp(-\eta) \sin \eta + 3 \exp(-2\eta) \quad (2)$$

となる。ここに、 $\eta = z/\delta$ 、 z は鉛直方向の距離、 $\delta = \sqrt{\nu T/2\pi}$ 、 ν は動粘性係数、 $k = 2\pi/L$ であり、 $U' = U'/(\pi^2 H^2 / 32 L T \sinh^2 2kL)$ (H :波高、 U' :質量輸送速度)で与えられる。したがって、層流の場合、質量輸送速度は $L/4$ ごとにその方向がことなり、その大きさは重複波の腹および節の位置でつねり0となり、腹と節の中間すなわち、 $x=31.25$ cmおよび93.75cmにおいて最大となる。図-1および図-2はそれぞれ波高 H がほぼ4および6cmの場合における粗面上の質量輸送速度の鉛直分布を位置 $kx=0.5$ ($x=20$ cm), 0.8 (32cm), 1.57 (62.5cm), 1.95 (77.6cm), 2.34 (93.2cm) および3.14 (125cm) 別に示したものである。なお、粗面の場合、鉛直軸 z の原点は底面突起の平均位置と定めた。また、図中の実線は参考のために示した、滑面・層流理論にもとづく質量輸送速度の鉛直分布すなわち(1)式で示すものである。これらの図から明らかのように、測定結果は

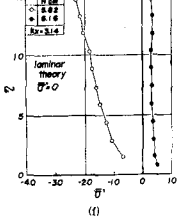
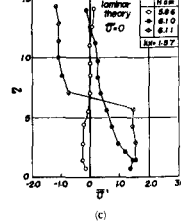
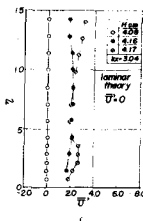
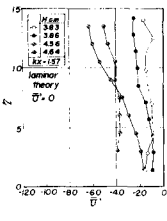
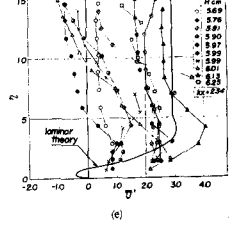
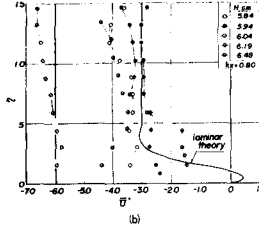
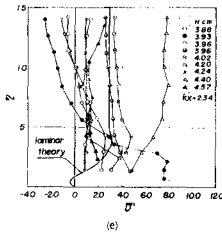
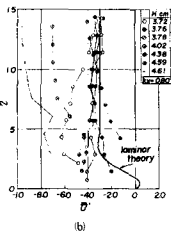
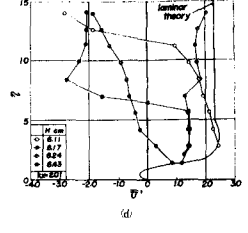
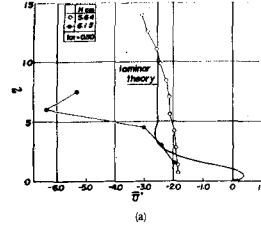
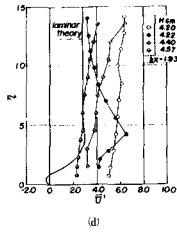
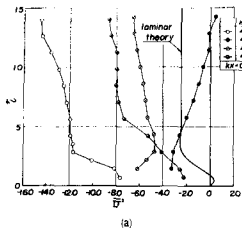


図-1 質量輸送速度の鉛直分布 ($H=4\text{cm}$)

図-2 質量輸送速度の鉛直分布 ($H=6\text{cm}$)

相当にはうっているが、その一般的傾向を示すにつぎのようである。(1) 実験値のはらつきは相当大きい、質量輸送の方向はいづれの実験結果もほぼ同じであって、層流理論によって示される移動方向と一致している。(2) $\gamma < 1.0$ では dye-streak が乱れて、質量輸送速度を測定することができなかった。(したがって、この付近では層流理論にみられる輸送方向の逆転層と確かめることができなかった。(3) 質量輸送速度の鉛直分布は、 γ の値が 10 程度になると、減少する傾向がみえる。とくに、最大質量輸送速度と示す位置 $yx = 2.34$ 付近では、この傾向が顕著であり、測定されたもののうち、いくつかは、逆方向に輸送のおこっていることがわかる。(4) 一般に、実験値は層流理論にもとづく計算値よりかなり大きい。Brebner らは、進行波による粗面上の質量輸送について実験を行ない、粗面では波の特性が同じであっても、底質粒径が大きくなると、質量輸送速度も大きくなることおよび小さい波高の場合でも、滑面におけるそれより大きくなることを示した。重複波についても同じ傾向が見えさせる。(5) Brebner および Collins によると、 $Re = H/\sqrt{\nu T} \sinh \kappa H$ で示される Reynolds 数の値が 90 以上になると、底面境界層は乱流に遷移することになる。しかし、彼らのその後の実験によると、粗面では滑面に対する限界 Reynolds 数より小さい値で遷移するようである。著者の実験は Re の値が $H=4\text{cm}$ および 6cm のそれぞれに対して、20 および 43 であって、滑面の場合には乱れていないと考えられる。しかし、粗面の場合、 $\gamma < 1.0$ で鮮明な dye streak が得られなことから、底面のごく近くで乱れが発生していると考えられ、これは Brebner や Vincent の結果と同じ傾向を示すようである。ただし、乱れの発達しているのは、水粒子速度の大きい重複波の節付近であると考えられる。

4. 固体粒子による質量輸送速度の判定と底質の移動: 波高 H がほぼ 10 cm になると、乱れのため染料法による質量輸送速度の測定は不可能になる。そこで、著者が滑面の場合に対して用いた固体粒子法によってこれを測定しようと試みた。しかし、単一粒子の場合、底面の突起によって固体粒子は転動、跳躍などの複雑な運動をするため、測定値は非常にこじってくる。したがって、底面突起の分布が固体粒子の移動に大きな影響を及ぼすことになる。これを避けるため、表-1に示すような特性をもつ、粒径 1 mm の数種の粒子を 100 粒ずつ水底に決め、その平均の移動速度を測定するものとした。

表-1 固体粒子の

物理的性質

	比重	$\tan \phi$
塩化ビニール粒	1.27	0.89
石炭粉	1.40	1.08
人工軽量骨材	1.84	1.16

図-3は $x=90\sim 100\text{ cm}$ の位置に投入された塩化ビニール粒子が時間の経過とともに移動していく過程と波高別に示したものである。同様

様に図-4は石炭粉粒子に対する結果である。ここに、縦軸は投入全個数 C_0 と任意の時間のある場所における個数 C との比と百分率で示したものであり、横軸は鉛直壁からの距離を示している。この実験結果において、質量輸送は前述したように、 $x=0\sim 62.5\text{ cm}$ の範囲では x の負の方向へ、

$x=62.5\sim 125\text{ cm}$ では正の方向へ輸送される。また、速さの最大はそれ以外の領域において、 $x=31.25$ および 93.75 cm である。これらの図から、粒子は投入位置からその両側に移動していくことがわかる。さらに、どの波高、いずれの底質においても、底質粒子は平均的に腹の方向に移動しているが、投入

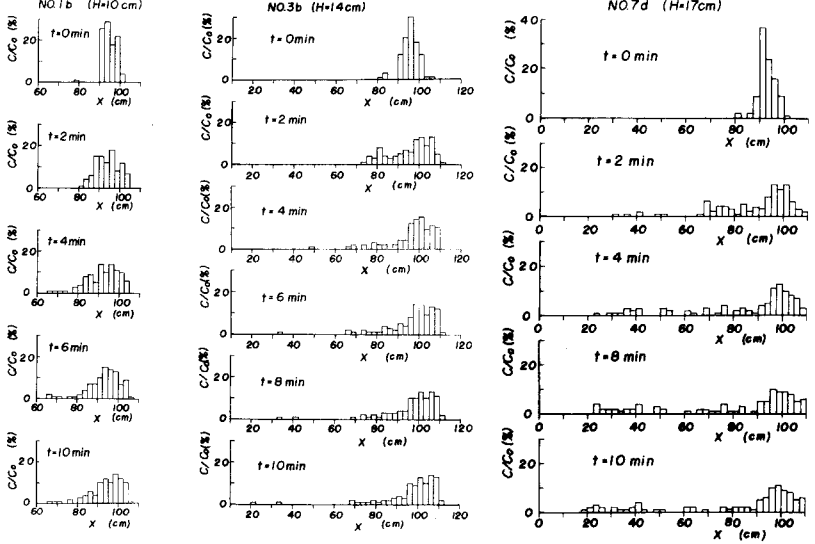


図-3 塩化ビニール粒子の移動過程

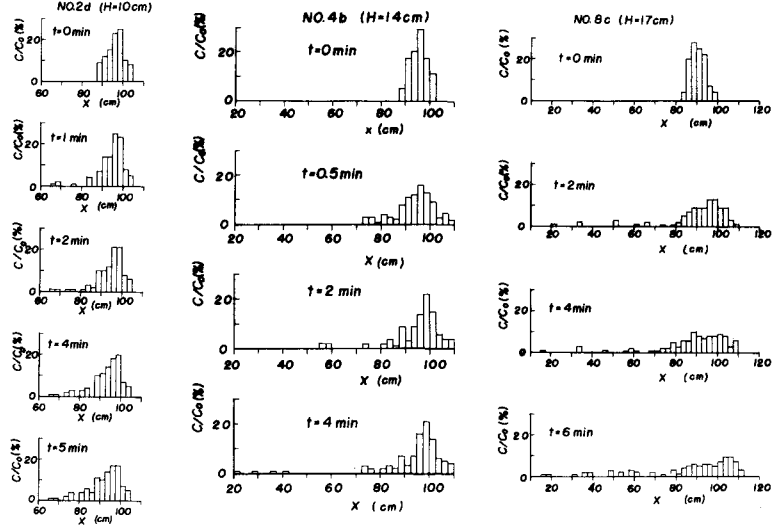


図-4 石炭粉粒子の移動過程

後数分経過すると $x > 105 \text{ cm}$ の領域における粒子数はほぼ一定となる。これは粒子の移動限界以下となるため粒子が運動を停止したことによるものである。波高が増大すると、両粒子とも質量輸送とは逆の方向に移動する数が増加し、その移動範囲も広くなるとともに短時間での範囲に分散する。この傾向は比重の重い炭粉粒子は塩化ビニル粒子の場合ほど顕著でない。さらに、ここでも示しているが、人工軽量骨材の場合 $H=10$ および 14 cm では、投入直後においてもほとんど移動しなかった。以上の結果から、重複波のような流体が周期運動とする場合、水粒子の往復運動と底面粗度の条件によって、底質は diffusion と advection の作用を受けて輸送されると考えられる。したがって、その移動過程を考察するにあたって、(1) 底質の diffusion は分子拡散と同様に、拡散の割合は距離に関する二次変数に比例する、(2) 底質の advection は質量輸送速度に比例する、と仮定すると、底質の粒子数 C の分布に関する式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial (UC)}{\partial x} \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 K および U は底質の拡散係数であり、一周期平均の移動速度であって、本便的には確率的な方法によって求められるべき値であると考えられる。いま、簡単のため、 K および U を一定とし、 $t=0$ で $C=C_0$ 、 $x \rightarrow \infty$ で $C \rightarrow 0$ という条件のもとに (3) 式を解くと、結局

$$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4K\pi t}} \int_0^\infty C_0(s) \exp \left[-\frac{(x-s-Ut)^2}{4Kt} \right] ds \quad (4)$$

となる。重複波の場合、 K および U は場所的に一定とは考えられないが、いま第一次近似として (4) 式を用い、 K および U に適当な値を与えて、実験結果にもっともよく合致する理論曲線と求め、 K および U の性質について検討しよう。

図-5 および図-6 は $x=91 \sim 96 \text{ cm}$ (質量輸送速度のもっとも大きいところ)

3) における、塩化ビニル粒子および炭粉粒子の粒子数の時間的変化を示すものから、図中の曲線は上の表に示される数値にもとづいて計算されたものである。これらの図からわかるように、 U の値は波高の増大とともに

増加するが、比重の増大とともに減少することを示している。なお、層流理論による質量輸送速度は $H=10 \sim 17 \text{ cm}$ に対して、 $U=0.7 \sim 2.1 \text{ cm/s}$ であるが、実験結果ではかなり小さいことがわかる。

	H (cm)	K (cm ² /sec)	U (cm/sec)	X (cm)	$\bar{X}$ (cm)
○	10	0.04	0.03	96	—
●	14	0.20	0.06	96	96
●	17	0.40	0.08	91	93

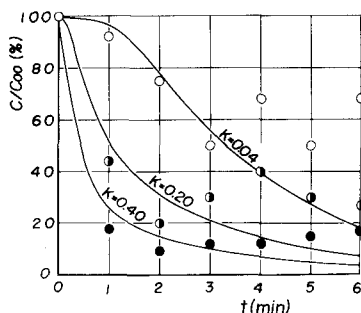


図-5 塩化ビニル粒子の移動過程の理論との比較

	H (cm)	K (cm ² /sec)	U (cm/sec)	X (cm)	$\bar{X}$ (cm)
○	10	0.01	0.01	96	96
●	14	0.10	0.01	96	95.5
●	17	0.25	0.02	91	90.5

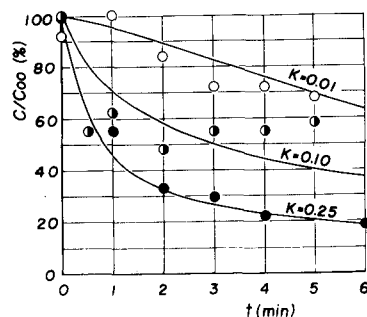


図-6 炭粉粒子の比較