

乱流境界層における質量輸送 — 重複波の場合 —

京都大学防災研究所 正員 野田 英明

1. まえがき

昨年度の年次学術講演会では、重複波によって底面に発達する層流境界層内の質量輸送について理論的、実験的に検討を加え、この質量輸送が漂砂の移動方向を決定する重要な要素の一つであることを明らかにした。その後、第10回海岸工学講演会では、波動乱流境界層について考察し、その流速分布を計算したが、今回はその結果から理論的に誘導される乱流境界層内の質量輸送速度について述べる。

2. 波動乱流境界層における質量輸送速度 (重複波の場合)

波動乱流境界層内部における流速分布を求めるために、前報では、境界層を3層に分け、それぞれの層内で渦動粘性係数が異なると考えて理論的取り扱いを行なってきたが、その後に行なった検討の結果から、乱流境界層の場合、3層モデルの最下層の厚さでも、層流境界層の全厚よりはるかに大きく、さらに、この層内において、水粒子速度の鉛直勾配はその上層に比べて非常に大きい。最下層における質量輸送速度を計算すれば、波動乱流境界層における質量輸送速度や漂砂の移動特性との関連をどのようにして十分検討できることがわかった。ただし、その計算や考察の過程は数式の関係からここでは省略する。

さて、浅海重複波の場合、 x 軸を鉛直壁から底面に沿って水平に、また z 軸を底面から鉛直上向きにとると、乱流境界層における質量輸送速度 $\bar{U}$ は、

$$\bar{U} = \frac{\pi^2}{\sinh^2 kh} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \left(\frac{L}{T} \right) K_t \sin 2kx \quad \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここに、 H は重複波の波高、 L は波長、 T は周期、 h は水深を表わし、また $k = 2\pi/L$ である。さらに、 K_t は鉛直分布すなわち z/δ に関係する係数であるが、 $U_0\delta/\nu$ および z_0/δ にも関係する。（ U_0 ：底面における最大水平水粒子速度、 z_0 ：粗度高、 $\delta = \sqrt{\nu T/2\pi}$ 、 ν ：水の動粘性係数）この K_t の値は前述した波動乱流境界層理論から求められるものであるが、 $U_0\delta/\nu$ や z_0/δ との関係は非常に複雑で、その関数関係を解析的に検討することは困難である。したがって、ここでは数値計算の結果からその特性を検討する。なお、層流境界層内の質量輸送速度は、 $U_0\delta/\nu$ や z_0/δ の値に関係なく、

$$K_t = (-3 + 8e^{-z/\delta} \sin \frac{z}{\sqrt{2}\delta} + 3e^{-\sqrt{2}z/\delta}) / 8 \quad \dots \dots \dots (2)$$

とおくことによってえられる。以上の結果から明らかのように、波動乱流境界層における質量輸送速度の分布特性は波動層流境界層内のそれと形式上類似していることがわかる。とくに、 x 方向の分布特性は、層流および乱流境界層のいずれにおいてもまったく同じであって、重複波の節および腹の部分でその速度はゼロ、それらの中間部分で最大となる。ただし、重複波の腹の付近では水粒子速度が小さいので、(1)式を適用する場合にはその遷移限界について注意する必要がある。

3. 数値計算例

波動乱流境界層内部における質量輸送速度の特性を明らかにするために、その鉛直分布について二、三の計算例を示そう。図-1は、 $z_0/\delta=0$ 、すなわち滑面の場合の K_t と z/δ の関係と、 $u_0\delta/\nu$ の値をパラメータとして計算した結果であって、 $z/\delta \leq 10$ の範囲について示したものである。なお図中の実線は比較のために示した層流理論によるその分布すなわち (2) 式を表わしている。この図から明らかなように、滑面乱流の場合、重複波による質量輸送の方向は層流のそれと一致し、波動境界層内部の流れの層流・乱流遷移限界

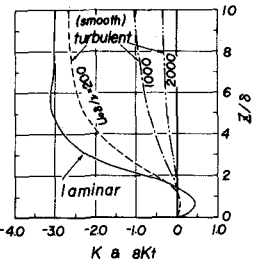


図-1 K_t と z/δ の関係 (滑面)

($u_0\delta/\nu = 113$) に近い $u_0\delta/\nu = 200$ の場合に対する鉛直分布は、層流理論にもとづく分布とそれほど大差はない。しかしながら、Reynolds 数が増大すると、 K_t の値は層流理論に比べて著しく小さくなることがわかる。また、乱流理論の場合にも $z/\delta < 1.4$ において、層流の場合と同様、逆転層があるがその値は小さい。図-2は粗面の場合の K_t と z/δ の関係を $u_0\delta/\nu$ をパラメータとして計算した一例であるが、 $u_0\delta/\nu$ の値が大きくなると逆転層の厚さがきわめて大きくなり、滑面とかなりことなった様相を呈するようになる。

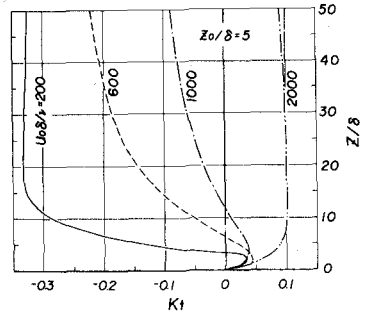


図-2. K_t と z/δ の関係 (粗面)

とくに、 $u_0\delta/\nu = 2000$ では滑面の場合とまったく逆の方向に質量輸送が起こることがわかる。また図-3は、 $u_0\delta/\nu = 1000$ と一定の場合の K_t と z/δ の関係を相対粗度 z_0/δ の値をパラメータとして示したものである。この図から明らかなようにたとえ $u_0\delta/\nu$ の値が一定であっても、 z_0/δ の値が大きくなるとやはり逆転層の厚さが大きくなり、この図では $z_0/\delta = 10$ および 15 の場合には滑面の場合とまったく逆に質量輸送の起こることがわかる。以上の結果は、底質の移動方向を決定する際きわめて重要であると考えられ、底質の大きさ、漂砂の移動形式 (浮遊か掃流) および砂水しの有無などによって種々の方向に漂砂が輸送されると推定される。これについては講演時詳述したい。

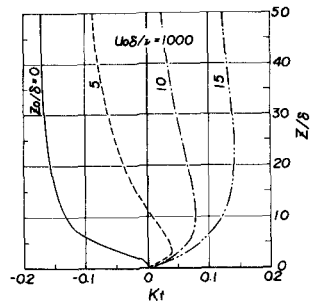


図-3 粗度の効果

図-4 は ナイロニ球による実験の結果と比較したもので、図中の破線は (1) 式においてナイロニ球の粒径に対応する高さまでの平均の質量輸送速度を示す理論曲線であり、実線は層流理論にもとづく同様の曲線である。この図から、 $u_0\delta/\nu = 400$ の場合、乱流理論にほぼ一致していることがわかるであろう。なお図の縦軸は質量輸送速度の無次元表示 $\lambda^* = \bar{u}mT / (3\pi^2 H^2 / 8L \sinh^2 kh)$ である。

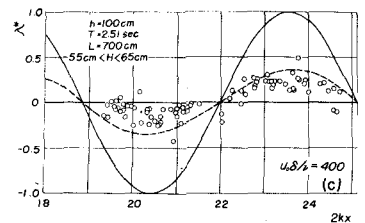


図-4 実験結果との比較