

大阪大学 工学部 正員 平田 健正
 大阪大学 工学部 正員 室田 明
 大阪大学 大学院 学生員 沢田 隆

1. はじめに 成層密度流の進行現象は界面に発生、発達する内部波と密接な関係があり、内部波のregime毎に界面現象を支配するパラメータがそれぞれ異なると思われるべきであろう。しかし従来、進行係数あるいは界面抵抗係数は普通リチャードソン数、クーリガン数といった断面平均の水理量を用いたパラメータで全般的に整理されており、このことがデータのばらつく一因と考えられる。そこで本研究は界面現象を解明するにあたり、新しく開発、試作したレーザスキャナ濃度計を用いて得られた濃度分布より、ある区間内の進行量を求め、これを内部波のregimeによって整理して、regime毎に現象を個別に考慮する必要のあることを示唆する結果を得た。

2. 実験装置および方法 実験水路は長さ10m、幅10cm、高さ20cmの側壁透明の塩化ビニル製である。本実験は上層流動、下層静止とし、塩水深の減少を防ぐため実験中適宜塩水を下流端より補給した。淡水深の制御は下流端壁によった。鉛直方向濃度分布は著者が試作したレーザスキャナ濃度計を水路上流端から4.3mと6.3mの2地点に設置して求めた。この装置は色素溶液中を透過する光量が色素濃度により決まるという特性を利用しており、レーザビームを反射させるミラーとビームを受ける光電池の光軸を一致させて上下に走査させることにより水路外から光電的に水路横断方向平均の濃度分布を求めるものである。なお走査速度は2.5cm/sとし、塩水に溶解させる色素としてはナチレンブルーを用いた。流速分布は水素気泡発生装置を用いて16mmシネカメラにより気泡の動きを撮影した。また、絶対密度差 ϵ は0.025とし、水路勾配は水平とした。本実験は内部フルード数 $Fr = 0.3 \sim 0.7$, $\psi = U_1^2 / \epsilon g = 40 \sim 3000$ の範囲で行なわれた。

3. 実験結果および解析 a) 進行速度 進行量算定に際し界面の決定が重要であるが、本研究ではレーザスキャナによる計測から得られた濃度の急変点を界面と定義した。この部分において局所リチャードソン数が急変することを確認している。濃度分布と流速分布をそれぞれ $C(z)$, $u(z)$ 、上流側下流側をそれぞれ添字 u, d で表わすことにすると進行速度 U_e は次式により算定できる。

$$U_e = \left[\int_0^{h_d} [\rho C u]_d dz - \int_0^{h_u} [\rho C u]_u dz \right] / (\rho_2 C_2 L) \quad \dots (1)$$

ここに L ; 区間長, h_d : 淡水深, C_2 : 下層の塩分濃度を表わす。図-1に進行速度 U_e と上層平均流速 U_1 との関係をクーリガンの結果とともに示した。図に示すように $U_1 = 8\%$ の値を境にして U_e の U_1 に対する増加率が大きく変化しており、両者で界面進行の機構が全く異なることがわかる。いずれの領域でも本実験の範囲では U_e の U_1 に対する増加は線形である。 $U_1 < 8\%$ の領域では同図に併記したクーリガンの実験結果より従来の研究の範囲での界面進行の機構と類似していることがわかる。また乱流域での限界クーリガン数の値0.178に対応する U_1 の値を本実験について求めると3.53cm/sとなり、同図において $U_e = 0$ とみなせる U_1 の値3%とほぼ一致し、このことから界面の不安定限界を実験的に決定するとき従来のように目視によるのではなく、算定される進行量より決定することの妥当性が示された。また、 $U_1 < 8\%$ の領域では目視観測によると短周期の内部波が発生しそのクレスト先端より淡水層への混合が起っており、

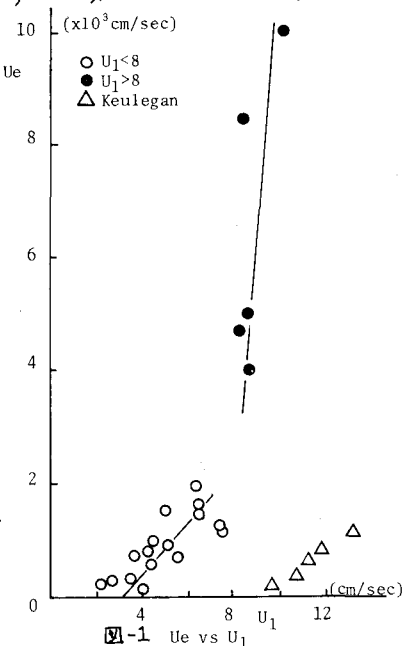


図-1 U_e vs U_1

$U_1 > 8\%$ の領域では波長 15 cm 、波高 2 cm 、周期 5 秒 程度の（短周期の内部波が重畳した）内部重力波が発生している。移動床水理学における regime に分類するならば、前者は粘性の卓越する ripple、後者は有効重力の卓越する dune に対応する。

b) 連行係数 連行速度を上層平均流速で無次元化して得られる連行係数 E に関してここで考察する。ここで界面近傍の水理量を用いた式 (2) で示される内部レイノルズ数 $Re\delta$ を用いる。

$$Re\delta = (U_1 - U_2) \cdot \delta / \nu_2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに δ は界面近傍での代表長さで図-2 で定義される。また U_1 は δ の領域内での平均流速、 ν_2 は塩水の動粘性係数である。連行係数 E をこの内部レイノルズ数 $Re\delta$ で整理した結果が図-3 である。図-1 での $U_1 < 8\%$ および $U_1 > 8\%$ の領域に対応する実験値を比べてみると、前者は $Re\delta < 1500$ の領域を占め $Re\delta$ の増加にともない E が増加する傾向がみられるのに対し、後者のそれは本実験の範囲では E と $Re\delta$ との間に明確な関係は見出せない。すなわち、 $U_1 < 8\%$ の領域 (ripple 領域) では内部粘性の効果が支配的であることを示す。

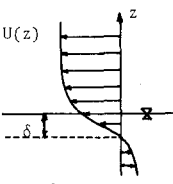


図-2

一方、 $U_1 > 8\%$ の領域 (dune 領域) では重力効果が卓越し、発生する内部重力波の砕波による連行加入が界面のせん断力に対して大きく寄与するものと考えられる。次に、 E を普通リチャードソン数で整理したのが図-4 である。全体的には E は Ri^{-1} の形で減少しているのがわかるが、ripple と dune の領域の Ri による明確な差異は、dune 領域に対応する実験値が少ないこともあって、見出せなかった。

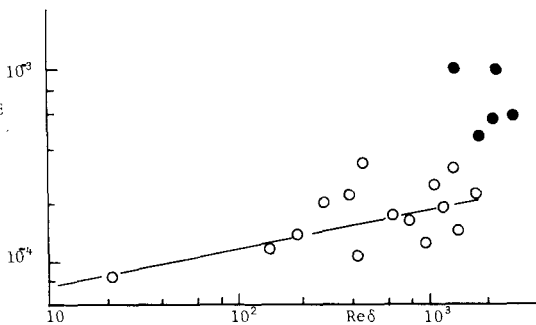


図-3 E vs $Re\delta$

c) 付加摩擦係数 界面連行による付加摩擦力 τ_{ia} はクーリガンによれば次式で表わされる。

$$\tau_{ia} = \rho \cdot U_e \cdot U_1 \dots\dots\dots (3)$$

また、付加摩擦係数 f_{ia} を用いると

$$\tau_{ia} = \frac{1}{2} f_{ia} \rho U_1^2 \dots\dots\dots (4)$$

とも表わせるので結局、付加摩擦係数は $f_{ia} = 2E$ となる。この f_{ia} と全抵抗係数 f_i との関係を示したのが図-5 である。なお図中の実線は $f_{ia} = f_i$ の関係を示す。かなりデータがばらついているが、ripple の領域では f_i の方が f_{ia} より 1 桁大きな値を示し、dune の領域に近づくにつれて f_i は f_{ia} の値に近ずき dune 領域ではほぼ等しくなる。これは前述したように ripple の領域では粘性効果や造波抵抗が卓越し、内部波の発達にともない連行加入による付加摩擦力が卓越することを示すものと考えられる。

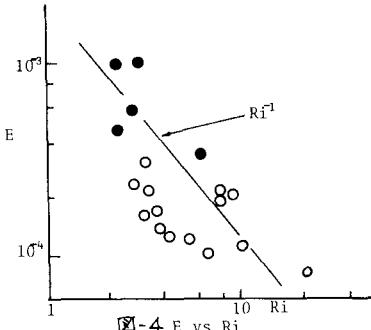


図-4 E vs Ri

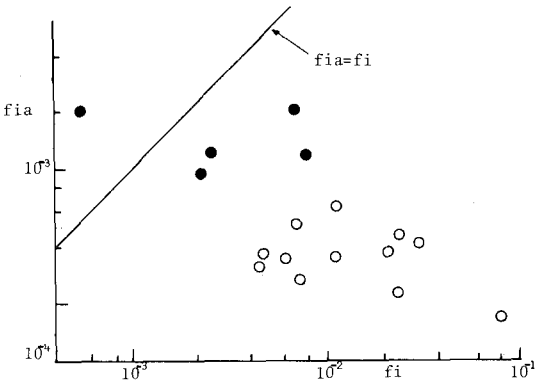


図-5 f_{ia} vs f_i

最後に本研究を行なうにあたり実験・データ解析等にご助力願った本学院生の長谷川靖明君に謝意を表したい。

<参考文献>

- 1) 室田・平田・沢田：関西支部年講Ⅱ-16 (昭50)
- 2) Keulegan, G.H.: J. Res. of Nat. Bur. of Standards Vol. 43 (1949)