

早稲田大学 大学院 学生員 鷺見 元宏
早稲田大学理工学部 正員 吉川 秀夫
東洋大学 工学部 正員 福井 吉孝

1. まえがき

岩崎¹⁾らの研究が指摘している様に、開水路跳水と内部跳水とは類似している点が多い。(しかしながら、内部跳水においては非流動層から流動層への混入が存在するという点で異なっている。本研究では、内部跳水全域にわたる総混入量を連行流量と定義する。この連行流量は、実験的には全体の流量の30%以上になる場合も存在し、内部跳水における無視できない現象である。

エネルギーの面から考えると、開水路跳水におけるエネルギー損失は最終的には熱に変換され外部へ逃げてしまう。(しかし、内部跳水では、流体の持つエネルギーの一部が二層間での連行に使用され、結果的には混合によるポテンシャルエネルギーの増加と静止していた流体を加速する事により運動エネルギーに変換される。この様にエネルギー収支の点から、通常の開水路跳水と内部跳水とはかなり異なっている。本研究は早川²⁾、中村³⁾、加藤⁴⁾らの研究を参考にし、連行流量について運動量の関係、界面に発生するまき渦、エネルギー損失に注目して考察を試みたものである。

2. 実験概要

アクリル樹脂製の巾70cm長さ2m高さ50cmの開水路を用い、下層流で実験を行った。ポンプで一定流量の塩水を供給しサイホンで排水した。連行流量を補給するために水面直下から一様に淡水を補給し、余分な淡水は樋を設けオーバーフローさせて排水した。そのため全体水深は常に47cmに保てられた。下流側条件の違いにより、完全内部跳水ともぐり内部内部跳水が生じ、本実験ではRun3,5,7がもぐり内部跳水である。本論文の図中でflagの付いたプロットはもぐり内部跳水を示している。なお、連行流量は内部跳水前後での塩分濃度の薄まり度合から算出し、界面の高さは染料を用いて目視により決定した。

3. 共役水深と運動量の関係

連行流量を仮定した場合の運動量の保存則を考える。上層における運動量が無視できる程度に上層水深が大きいのとする。体積の連続、密度の連続、運動量の連続は以下になる。

$$q_1 + \Delta q = q_2 \quad \text{--- (1)}$$

$$\rho_1 q_1 + \rho_0 \Delta q = \rho_2 q_2 \quad \text{--- (2)}$$

$$\rho_2 \frac{q_2^2}{h_2} - \rho_1 \frac{q_1^2}{h_1} = \frac{\rho_1 - \rho_0}{2} g h_1^2 - \frac{\rho_2 - \rho_0}{2} g h_2^2 \quad \text{--- (3)}$$

(1)、(2)、(3)より ρ_2 と q_2 を消去すると、

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 - (2F_{11}^2 + 1) \left(1 + \frac{\Delta q}{q_1}\right) \left(\frac{h_2}{h_1}\right) + 2 \left(1 + \frac{\Delta q}{q_1} - \varepsilon_1 \frac{\Delta q}{q_1}\right) \left(1 + \frac{\Delta q}{q_1}\right)^2 F_{11}^2 = 0 \quad \text{--- (4)}$$

$$\therefore \varepsilon_1 = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} \quad F_{11}^2 = \frac{q_1^2}{\varepsilon_1 g h_1^3}$$

(4)式において $\Delta q = 0$ とすると、開水路跳水と同様の

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8 F_{11}^2}) \quad \text{--- (5)}$$

の解を得る。

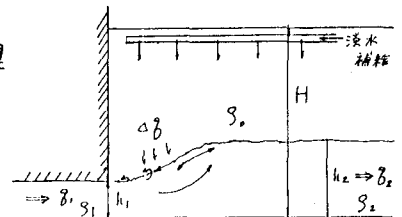


Fig1 説明図

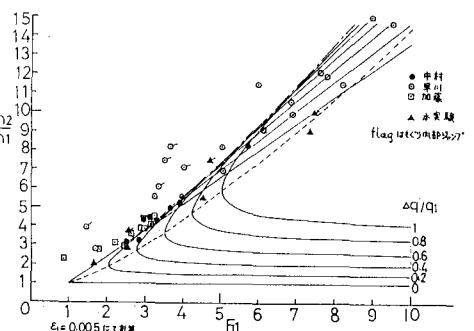


Fig2 内部フルード数と共役水深

(4)の3次方程式は.

$$-4\left\{\frac{1}{3}(2Fi^2+1)(1+\frac{\Delta q}{q_1})\right\}^3 + \left\{2(1+\frac{\Delta q}{q_1}-\varepsilon\frac{\Delta q}{q_1})(1+\frac{\Delta q}{q_1})^2 Fi^2\right\} < 0$$

の時3実解を持ち、それぞれ負解、常流解、射流解に対応する。

$$(h_2/h_1)_I = -2\alpha \cos \theta_0 \quad \text{： 負解} \quad \text{--- (6. a)}$$

$$(h_2/h_1)_{II} = -2\alpha \cos(\theta_0 + 2/3 \pi) \quad \text{： 常流解} \quad \text{--- (6. b)}$$

$$(h_2/h_1)_{III} = -2\alpha \cos(\theta_0 + 4/3 \pi) \quad \text{： 射流解} \quad \text{--- (6. c)}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{3}(2Fi^2+1)(1+\frac{\Delta q}{q_1})}$$

$$\theta_0 = \frac{1}{3} \cos^{-1} \frac{(1+\frac{\Delta q}{q_1}-\varepsilon\frac{\Delta q}{q_1})(1+\frac{\Delta q}{q_1})^2 Fi^2}{\sqrt{\frac{1}{27}(2Fi^2+1)^3}}$$

である。Fig 2 に(6.b)式と(6.c)式の曲線と実験結果を示す。Fig 3 には Fi と $\Delta q/q_1$ の関係を示す。Fig 3 の曲線は Fig 2 の包絡線を与える $\Delta q/q_1$ の値で、 $\varepsilon \rightarrow 0$ とした時は、 $\Delta q/q_1 = -1 + (2Fi^2+1)/Fi^3$ --- (7) となる。なお(6.b)の常流解と実験値は比較的良好に一致する。

4. 界面に生じるまき渦とエネルギー損失、連行流量

運動量方程式では連行流量を仮定する以外に方法がない。そこで連行流量を何らかの方法で予測する必要がある。内部跳水先端に発生するまき渦とエネルギー損失、連行流量が関係あると考えて、まき渦に注目してみる。

Fig 4 にレイノルズ数とストロハル数の関係を示す。まき渦の発生周期は界面の密度変動のスペクトルとビデオからの読み取りを併用した。RUN 6, 7 ではビデオから読み取った周期以外にその約1/2の周期がスペクトルより読み取れた。この現象が共鳴現象であるのか、また Re を小さくしたためか Fi によるものかは不明である。Fig 4 でストロハル数の小さい方がビデオから読み取った値である。RUN 6, 7 で大きい方の値を採用するならば、

ストロハル数は 0.3~0.45 程度一定になると思われる。次にビデオより渦の間隔 b と渦の連行速度 V_v を読み取り、かなり大胆ではあるが、カルマン渦の循環の式 $\Gamma = 2\sqrt{2} b V_v$ に代入して循環 Γ を計算した。Fig 5 に Γ とエネルギー損失の関係を示す。エネルギーは、 $E_1 = \rho_1 q_1^3 / 2h_1^2 + (\rho_1 - \rho_2) g h_1 q_1$ 、 $E_2 = \rho_2 q_2^3 / 2h_2^2 + (\rho_2 - \rho_3) g h_2 q_2$ 、 $\Delta E = E_1 - E_2$ として計算した。 Γ とエネルギー損失の間には正の相関があるようである。Fig 6 に $\Delta E/E_1$ と $\Delta q/q_1$ の関係を示す。まき渦の内部跳水については

かぶり部分の密度の流体が連行されてきたものと考えて修正した。すなわち、 $\Delta q/q_1 = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_2 - \rho_3)$ ； ρ_3 はかぶり部分の密度である。同図から、エネルギー損失と連行流量の間に密接な関係があるものとうかがわれる。

かぶり部分の密度の流体が連行されてきたものと考えて修正した。すなわち、 $\Delta q/q_1 = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_2 - \rho_3)$ ； ρ_3 はかぶり部分の密度である。同図から、エネルギー損失と連行流量の間に密接な関係があるものとうかがわれる。

参考文献

- 1) 岩崎：「インターナルジャンプの変動スペクトルに関する研究」、1971、海岸講演会
- 2) N. HAYAKAWA: "Mixing Induced by an Internal Hydraulic Jump", 1972, Water Resources Bulletin
- 3) 中村：「密度成層流の内部跳水」、1978、海岸講演会
- 4) 加藤：「浅流体、跳水と混入について」、1979、農業土木試験所

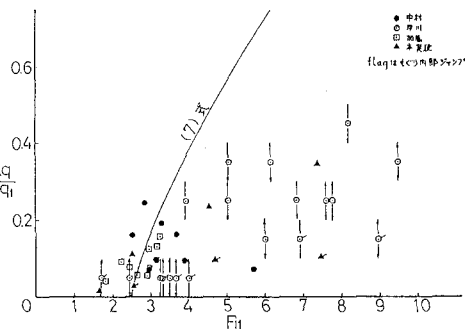


Fig 3 内部フルード数と連行流量

読み取れた。この現象が共鳴現象であるのか、また Re を小さくしたためか Fi によるものかは不明である。Fig 4 でストロハル数の小さい方がビデオから読み取った値である。RUN 6, 7 で大きい方の値を採用するならば、ストロハル数は 0.3~0.45 程度一定になると思われる。次にビデオより渦の間隔 b と渦の連行速度 V_v を読み取り、かなり大胆ではあるが、カルマン渦の循環の式 $\Gamma = 2\sqrt{2} b V_v$ に代入して循環 Γ を計算した。Fig 5 に Γ とエネルギー損失の関係を示す。エネルギーは、 $E_1 = \rho_1 q_1^3 / 2h_1^2 + (\rho_1 - \rho_2) g h_1 q_1$ 、 $E_2 = \rho_2 q_2^3 / 2h_2^2 + (\rho_2 - \rho_3) g h_2 q_2$ 、 $\Delta E = E_1 - E_2$ として計算した。 Γ とエネルギー損失の間には正の相関があるようである。Fig 6 に $\Delta E/E_1$ と $\Delta q/q_1$ の関係を示す。まき渦の内部跳水については

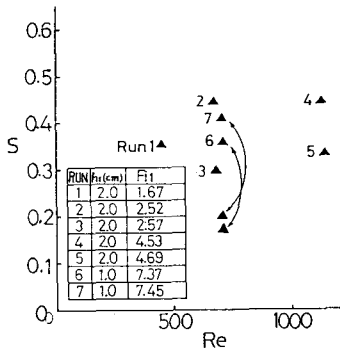


Fig 4 レイノルズ数とストロハル数

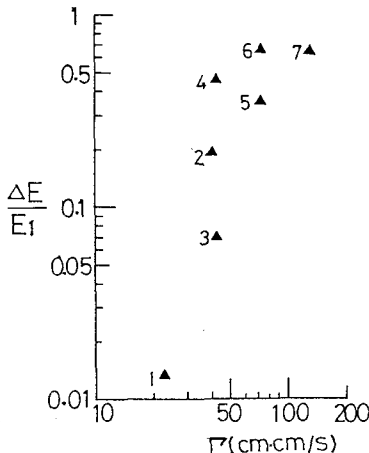


Fig 5 循環 Γ とエネルギー損失

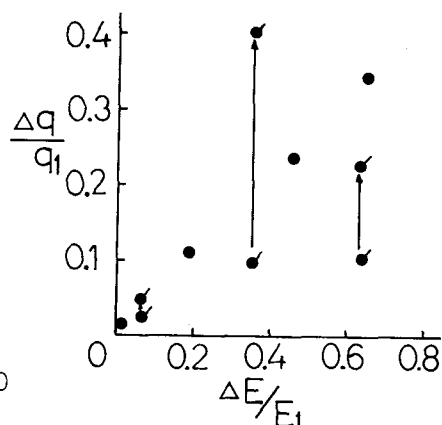


Fig 6 エネルギー損失と連行流量