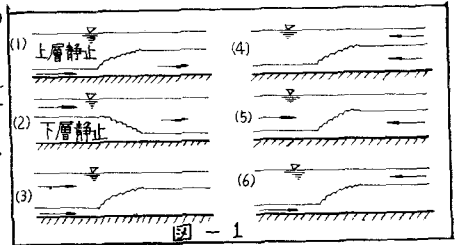


2 内部ジャンプの実験的研究

東北大学工学部 正員 岩崎敏夫
東北大学大学院 学生員 上原忠保
東北大学工学部 学生員 畑中仁一郎

1. はじめに

密度の異なる2流体において境界面の急変が存在する時、それは内部ジャンプと呼ばれる。ふつうのジャンプにおいてはジャンプに際してエネルギー損失が存在している。内部ジャンプについては、Schijf and Schönfeld⁽¹⁾ (1953) がエネルギー損失のあるジャンプは不安定であると述べているが、浜田⁽²⁾ (1958)、椎貝⁽³⁾ (1962)、岩崎⁽⁴⁾ (1966) はエネルギー損失のあるジャンプが安定であると考えてジャンプが存在した場合エネルギー損失の有無を吟味している。両者の考え方の正否を決めるには実際にジャンプを発生させる必要がある。エネルギー損失を伴う内部ジャンプの場合、部境界面に激しい攪乱が発生するであろう。このため不安定な境界面に大規模な渦動拡散が起り例えエネルギー損失があっても内部ジャンプは存在しないかもしれない。従って攪乱の特性にも興味を持たれる。又2層系の内部ジャンプの解析は上下層の運動量、流量等が保存されるかされないかによって結果が異ってくる。図-1の(1)(2)(3)のケースについて実験が行なわれているが上下層のInteractionについては不明である。本研究は上層静止、下層流上向きジャンプ(図-1の(1))の存在性、その攪乱の定性的考察、上下層のInteractionの有無及びジャンプの共役水深、ジャンプの長さ等を実験水槽で起した内部ジャンプによって明らかにせんとするものである。



2. 解析

浜田⁽²⁾ (1958)、岩崎⁽⁴⁾ (1966) は図-2のような内部ジャンプが成立している場合にジャンプ前後の2断面に対する運動量方程式、連続方程式より上流の内部フルード数と共役水深の関係を導いた。連続方程式は上層に対して $\rho_1 h_1 u_1 = \rho_1 h'_1 u'_1$ — ①

$$\text{下層に対して } \rho_2 h_2 u_2 = \rho_2 h'_2 u'_2 \text{ — ②}$$

上下層同時に運動量方程式を適用して

$$\rho_1 h'_1 u'^2_1 + \rho_2 h'_2 u'^2_2 - \rho_1 h_1 u^2_1 - \rho_2 h_2 u^2_2 = \frac{1}{2} \rho_1 g h^2 + \frac{1}{2} \rho_2 g h^2_2 (\beta - 1) - \frac{1}{2} \rho_1 g h^2 - \frac{1}{2} \rho_2 g h^2_2 (\beta - 1)$$

$h = h_1 + h_2 = h'_1 + h'_2$ と仮定すると

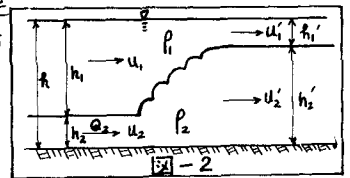
$$\frac{h'^2_1}{h'_1} (\varepsilon g h_1) + (1 + \varepsilon) \left(\frac{h^2_2}{h'_2} \right) \left(\frac{u^2_2}{\varepsilon g h_2} \right) + \frac{1}{2} (h_2 + h'_2) = 0 \quad \text{ただし } \varepsilon = \frac{\beta - 1}{\beta}$$

図-1のケース(1)の場合には $u_1 = 0$ より

$$\frac{h'_2}{h_2} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8 Fr'^2_2}) \text{ — ③ ただし } Fr'_2 = \frac{u^2_2}{\beta g h_2}, \beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

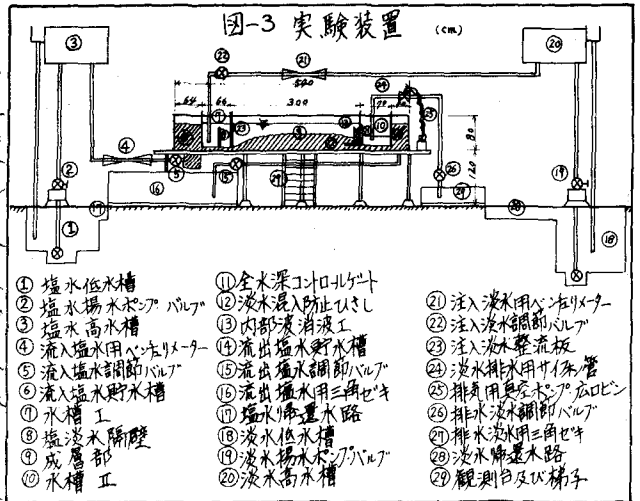
このケースはエネルギー損失 ΔE が存在して

$$\Delta E = \rho_1 \varepsilon g \frac{(h'_2 - h_2)^3}{4 h_2 h'_2} \cdot Q_2 > 0 \text{ である。}$$



3. 実験装置

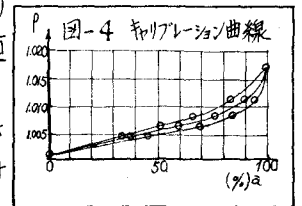
自由水面、水平床、上層静止下層流上向きジャンプ(図-1ケース(1))を発生させるため図-3のような実験装置を使用した。使用流体は水道水とロータミンBで着色した塩水である。実験水槽は長さ5.4m×巾50.0cm×深さ80cmで中央部3mが強化ガラス(10mm)、両端が塩化ビニル板(20mm)である。実験水槽には水槽Ⅰと水槽Ⅱが4本のガイド棒を通して上方よりそう入され所望の高さに固定できる。塩水は水槽Ⅰの下を流れ



成層部に流入し上向きジャンプを起した後、水槽Ⅱの下から流れ出る。流量の制御は流入、流出量調節バルブにて行い、流量の測定は上下両層とも流入量がベンチユリメーター、流出量が三角せきによってそれぞれ行う。水槽Ⅰは実験水槽底面からの高さでジャンプ上流の下層水深 h_1 を決定し⑥と成層部を仕切りかつ注入淡水と塩水の混合を防止する。水槽Ⅱは成層部と④とを仕切り、ジャンプ後流出する塩水を下層取水する。前面には淡水の流出を防止するための「水平ひし」を設置する。また水槽Ⅱは全水深コントロールゲートがあり溢流した淡水を貯えることができる。

4. 実験方法

水槽Ⅰ、Ⅱ及び淡水溢流せきを所定の高さにセットし、淡水湛水後下方から塩水を注入し成層状態を作る。ジャンプを起す操作による全水深の変化を防止するため淡水を溢流させておき(300~500%)塩水調節バルブ⑤を少し開くと貯水部⑥から成層部に塩水が流入する。同流量を塩水調節バルブ⑮によって流出させる。次第にバランスをとりながら流量を大きくしていき適当な流量に達したならば、⑮によって下流水深を制御する。濃度分布の測定は電導度法による。ブリッジ回路の特性を図-3に示す。低濃度時の感度がよいが高濃度部分で直線性がない。水槽Ⅰの右端を $x=0$ とし流下方向中心線上の6点 $x=20, 40, 80, 120, 165, 210$ cm境界面付近より塩水中に白金線アローブを降下させて1cm間隔で各測定の濃度の時間的変化をデータレコーダーにて記録する。キャリブレーションは実験終了後に標準溶液をピーカーにとり行つた。



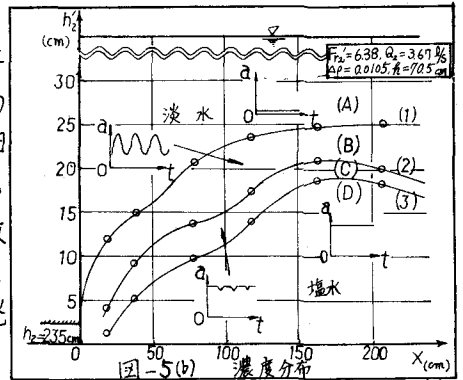
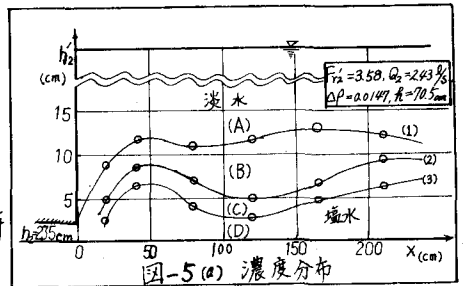
5. 実験に対する考察

ふつうのジャンプではジャンプの下流水深と上流水深の共役下流水深との関係によって安定な完全ジャンプが存在するかどうか決定されるが、内部ジャンプについても同様のことが言える。「4」で述べたバルブ⑮の制御によって、ジャンプ下流の塩水水深が上流の塩水水深の共役下流塩水水深よりも大きいときは、もぐりジャンプとなり、小さいときは射流状態でひき出す。そして両者が等しくなった時、完全内部ジャンプが成立する。完全内部ジャンプでは明白なローラーに類似したものが存在し、これを境として始端部へ塩水が攪乱しつつ落下し、後方には、すぐ下流に最高英がある。また内

部波がローラー終端より発生し下流に伝播する。その波高は最大10cmに達する。水槽上からの反射を防ぐため前面に消波工を設置した。ローラーの攪乱は境界面の不安定を増し淡水が塩水中に巻き込まれる。淡水の混入は淡水の補給を止めてジャンプを発生させると淡水が次第になくなること及び時間経過による塩水全体のうすまりから明らかである。この状態が続くと次第に下層塩水がうすまり共役水深以上となりジャンプはもぐりの状態になる。そこで実際には定常的なジャンプを維持するためにローラー部分で巻き込まれると思われる淡水量に近い量だけ余分に(ΔQ_2) 塩水を流出させて測定を行った。 ΔQ_2 は最大 Q_2 の15%のオーダーである。各ケースによって ΔQ_2 が異なるが状態の相異が認められないように制御を行う。実験範囲は、上流水深 $h_1=2.35\sim 5.0$ cm, 流入塩水量 $Q_2=2.16\sim 5.68$ %s, $\Delta\rho=\rho_2-\rho_1=0.0040\sim 0.0180$, 全水深 $h=60\sim 70$ cm, 実験中の密度変化は最大0.015 濃度測定時間は10~20分であった。

6. 実験結果及び考察

図-5にジャンプ内の濃度分布を示す。(a)は小さなジャンプ(b)は大きなジャンプの例である。淡水領域(A)よりアローを降下させていくと塩分濃度が淡水濃度からある大きさまで激しく振動する領域(B)がある。各測点について、時間的变化はランダムであるが最大濃度は決っている。降下につれ最大濃度、変動が大きくなり、そして最大濃度は増すが変動が小さくなる領域(C)に達する。その下は、変動のない領域(D)である。領域(D)内でも濃度は次第に大きくなりある高さで最大に達し、以下一定である。図-5において曲線(1)(2)(3)は、それぞれ、最初にその位置の最大濃度の50%以上を記録した高さ、最初に変動の小さくなった高さ、最初に変動のなくなった高さである。領域(B)の変動は流下とともに小さくなっている。このことは、内部ジャンプで発生する攪乱は滑動拡散をひきおこしているが、その大きさは、ジャンプの存在を不可能にする規模ではないこと、ローラーの部分に攪乱のあること、この攪乱による拡散及び内部波が下流に伝わっていることを示している。



内部ジャンプのローラー部で淡水が塩水に混入していることは理論において仮定された上下両層における連続方程式が各層毎に成立しなくなることと意味する。解析の項で引用した運動量方程式を両層同時に適用する考え方に対し、Yih and Guha⁽⁵⁾ (1954)と椎貝⁽³⁾ (1962)は、各層毎に運動量方程式を適用し、図-1 ケース(1)の場合、③式と全く同一の式を得ている⁽⁵⁾。しかしケース(2)の上層流に対しては、前者では、エネルギー損失が存在せず、後者⁽³⁾ではエネルギー損失が存在するという全く反対の結果となっている。しかも後者は上層流の下向きジャンプ、上向きジャンプの実験を行っている。ここで、各層について諸量保存の仮定の正当性が問題になる。本ケースの上層から下層への淡水の混入量 ΔQ_2 に近いものとして、流入塩水量 Q_1 と流入塩水量 Q_2 の差を ΔQ_2 と考えると、流入塩水量と測定開始時における流入塩水の密度とを用いて計算した内部フルード数との関係を調べたものが図-6で

あるが、はっきりした傾向はつかめなかった。

ジャンプ後の境界面は、かなり大きな波動が存在しており、その水深を決定するのは困難である。図-7はジャンプ後の水深を、便宜上、図-5の曲線(1)及び(3)における最高点と定め、内部フルード数に対してプロットしたものである。実線は理論式③である。予想されるように、曲線(1)による h_2 の実験値(●印)は、理論値より大きく、曲線(3)による h_2 の実験値(○印)は理論値より小さい。 Fr_2 が大きくなると差異が著しくなっている。又破線は Stanisol (0.777) 及び CCl_4 (1.59) の混合物を下層流体、淡水を上層流体として用いた図-1ケース(1)に対する Yih and Guha⁽⁵⁾ の実験結果である。境界面の基準について不明であるが、かなり小さ目である。

図-8は ジャンプの長さとして、目視観察によるローラーの長さ(l_1)と最高点の位置(l_2)を 図-5の曲線(1)から求めたジャンプ後の水深で無次元化したもので両者とも、ほぼ一定の比を示している。

7. むすび

上層静止、下層流上向きジャンプは実験的に起すことができる。このことはエネルギー損失が存在するジャンプが安定であり、また、攪乱が、2層の安定を破る程の大きさでないことを意味する。

上層淡水の下層塩水への混入は、運動量、流量の鉛直方向の移動を意味し、解析は両層同時に行うことが必要であり淡水混入量 ΔQ_2 の定量化をすすめる必要があると思われる。

本研究の一部の費用として昭和45年度文部省科学研究費の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Schijf J. B. and J. C. Schönfeld "Theoretical Considerations on the motion of salt and fresh water" Proc. Minnesota International Hydraulics Convention I. A. H. R. (1953)
- (2) 浜田徳一 「内部ジャンプについて」 第5回海岸工学講演会講演集 (1958)
- (3) 椎貝博美 "Some Aspects and experiments on the density Current" Trans. of J. S. C. E. NO 83 July (1962)
- (4) 岩崎敏夫 「密度流の諸問題」 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集 B (1966)
- (5) Yih C. S. and C. R. Guha "Hydraulic jump in a Fluid system of Two layers" Tellus VII (1955) 3

