

三次元貯水池における密度流先端部の運動

On density front advancing into a three-dimensional reservoir

東京工業大学工学部 ○ 福嶋 祐介
東京工業大学工学部 福岡 捷二
北海道開発局 宮本 高行

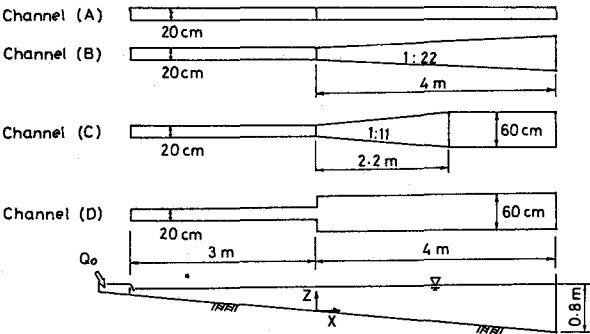
1. はじめに

洪水時に発生した高濃度の濁水が貯水池に流入すると、流入濁水は密度流となって貯水池内を流動する。貯水池における濁水の長期化を防止するためには、濁水の流動特性について十分な知識を得ることが必要である。著者らは、これまでに成層化した二次元貯水池に流入する濁水の運動について検討を行ない、いくつかの新しい知見を得てきた。¹⁾²⁾³⁾⁵⁾しかし、現実の貯水池は三次元的な幾何学的形状をもつので、この中で生ずる密度流現象は二次元の場合と異なることが予想される。本研究の目的は、流入濁水が下層密度流として運動する場合と中層密度流として運動する場合のそれぞれについて、貯水池の幾何学的形状が密度流先端部の運動にどのように影響するかを明らかにすることである。

2. 実験装置および実験方法

三次元貯水池の模型として最も単純な場合を考え、水路幅が流下方向に広がる矩形断面水路を用いた。実験装置および座標系を図一1に示す。水路Aは幅が流下方向に一定であり、水路Dは幅が途中で急に広がる。水路B、Cは水路AとDの間であり、途中で水路幅が滑らかに広がる。幅の変化率は、水路の半幅をbとして水路Bが $db/dx=1/22$ 、水路Cが $db/dx=1/11$ である。流路床勾配 i_0 はいずれも $i_0=1/10$ である。座標原点は水路幅の変化断面の中心軸上にとり、水平軸をX、鉛直軸をZ、これらと直角にY軸を選ぶ。以下では水路Aを用いて行なった実験を二次元実験、水路B、C、Dでの実験を三次元実験と呼ぶ。

実験は大別して下層流実験と中層流実験に分けられる。下層流実験は、水槽内を密度 ρ_1 の淡水で満たし、これより大きな密度 $\rho_d(=\rho_1+\epsilon_d\rho_1)$ の塩水を上流端から流入させて行なう。中層流実験は、水槽内を上層水の密度を ρ_1 、下層水の密度を $\rho_2(=\rho_1+\epsilon_0\rho_1)$ とし、上流端から密度 ρ_d の塩水を流入させて行なう。流入水の密度は、流入時の混合によって下層水の密度より小さくなるように調節されているので、躍層に到達した流入水はすべてが中層流を形成する。実験条件を表一1に示す。下層流実験は、図一1の4種類の水路を用いて、表一1の1および2の条件で行なった。中層流実験は水路Aと水路Cを用い、3の水理条件で行なった。以下では実験条件をA-1のように表わす。これは水路Aを用いた1の水理条件での下層流実験を意味する。表一1において設定密度に若干のはばがあるのは、同一の水理条件に対して多数回の測定を行なったためである。測定方法は文献2)で詳しく述べているのでここでは省略する。



図一1 実験装置

表一1 実験条件

Run No.	流入水		貯水池水		実験の種類
	相対密度差 ϵ_d	流入量 Q_0 (l/s)	上層の密度 ρ_1 (g/cm ³)	躍層の相対密度差 ϵ_0	
1	0.0096 ~0.0099	0.1	0.9972 ~0.9975	—	下層流実験
2	0.0272 ~0.0296	0.1	0.9969 ~0.9972	—	
3	0.0269 ~0.0291	0.1	0.9992 ~0.9998	0.0058 ~0.0068	中層流実験

3. 三次元下層密度流先端部の運動

三次元水路で生ずる下層密度流の流動形態を知るため、流入水をフルオレイセンナトリウムで着色し、35mmカメラを用いて水路の上、および側方から、8mmシネカメラを用いて水路の側方から先端部の運動を撮影した。図-2は、35mmカメラを用いて水路の上から5秒おきに撮影したフィルムをもとに先端形状の平面的な時間変化をスケッチしたものである。水路幅が急に拡がると(D-2)、下層密度流のフロントは初め同心円状に拡がるが、フロントの側面が壁面に達すると水路中央が凸となった扇状となって前進する。さらに流下し、先端が $X=100\text{cm}$ を通過した付近から前縁が出そろい、二次元的になる。幅の変化率が小さい水路B、Cではフロントの前縁形状の変化は急激ではなく、円弧状をなして進行する。

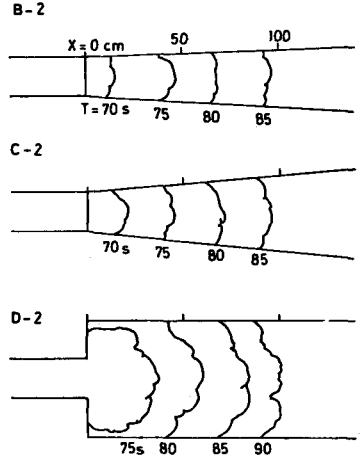


図-2 下層密度流先端部の平面形状

図-3は、Run 1とRun 2の条件に対し4種類の水路で得られた先端移動速度の流下距離に対する変化を示したものである。先端移動速度は幅の変化点を通じたときの先端移動速度 $v_{X=0}$ で無次元化されている。幅が一定の水路(A)では、いずれの条件に対しても先端移動速度は若干の変動を伴いながら次第に増加するが、急拡水路(D)では $0 \leq X \leq 140\text{cm}$ の範囲で先端移動速度が大きく減少し、その後ほぼ一定となる。これは、水路Dでは幅の急拡部では流れの剝離を伴い著しく三次元的な先端形状となるが、 $X=200\text{cm}$ を過ぎる付近から先端の前縁が出そろい再び二次元的な先端形状となることと対応している。水路B、Cでは幅の変化点を通じた直後に若干先端移動速度が増加した後、次第に二次元水路(A)との差があらわれはじめ、先端移動速度が減少してゆく、水路Dの値に漸近してゆく。以上の結果は次のように説明できる。水路幅の拡がりは単位幅流量の減少と側壁から受けるせん断力の減少という二つの効果をもっている。単位幅流量の減少は先端移動速度を減少させ、逆に側面せん断力の減少は先端移動速度を増加させる傾向をもつ。水路幅の増加率が小さい水路B、Cでは、 $X=0\text{cm}$ 付近で側面せん断力の減少の影響が大きく先端移動速度は増加するが、次第に単位幅流量の減少の影響があらわれ先端移動速度は減少してゆく。水路Dは水路幅が極端に変化しているため、単位幅流量の減少と剝離に伴うエネルギーロスの影響が顕著にあらわれたものと解釈される。

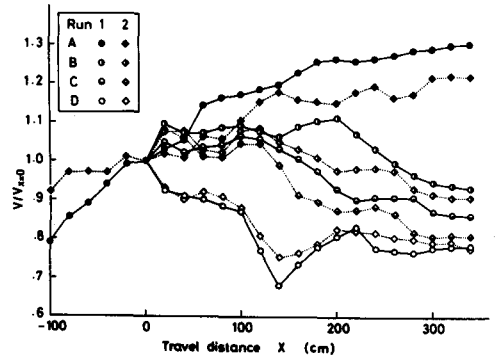


図-3 無次元先端移動速度の流下距離変化

水路Dの値に漸近してゆく。以上の結果は次のように説明できる。水路幅の拡がりは単位幅流量の減少と側壁から受けるせん断力の減少という二つの効果をもっている。単位幅流量の減少は先端移動速度を減少させ、逆に側面せん断力の減少は先端移動速度を増加させる傾向をもつ。水路幅の増加率が小さい水路B、Cでは、 $X=0\text{cm}$ 付近で側面せん断力の減少の影響が大きく先端移動速度は増加するが、次第に単位幅流量の減少の影響があらわれ先端移動速度は減少してゆく。水路Dは水路幅が極端に変化しているため、単位幅流量の減少と剝離に伴うエネルギーロスの影響が顕著にあらわれたものと解釈される。

三次元水路内で生ずる下層密度流の先端部形状と先端部内の流動特性を明らかにするため、水路Cの $X=83\text{cm}$ の断面における $Y=0, 5, 10, 15\text{cm}$ の位置で水素気泡法により流速分布の詳細な測定を行なった。流入水の最先端がこの断面に達した時刻を $t=0_s$ としてモータードライブ付35mmカメラで 0.5_s 間隔で連続撮影し、フィルムから先端部内の流速分布と流速零の高さ $\delta_{u=0}$ を読みとった。 $X=83\text{cm}$ で水路の半幅は $b=1.75\text{cm}$ であり、 $Y=15\text{cm}$ は側壁から 2.5cm の位置に相当する。また、先端部内の密度分布は、流速測定と同じ断面内の同一の高さ(Z)に6本の塩分濃度計検出ブローブ(KENEK製)を配置し、ブローブの高さを逐次変えることにより、先端が通過するときの塩分濃度を測定した。

図-4は、 $X=83\text{cm}$ の位置で測定した流速零の高さの時間変化を示したものである。この水路では幅の変化が急激ではなく、測定位置付近で先端移動速度の変化が小さいことを考慮すると、この図がほぼ下層密度流の先端部形状をあらわしていると考えられる。水路の中心軸上では、厚さが増加し $t=3_s$ で最

大となったのち、厚さは急激に減少している。側壁に近づくほど、フロント前縁の到達時刻および厚さが最大となる時刻が遅れる。また、フロントの後部では、側壁に近づくほど厚さが大きくなり、中央部が凹んだ形となっている。幅の一定な二次元の下層密度流では、フロントの厚さは横方向にはほぼ一様であり、図-4の形状とは非常に異なっている。

図-5、6は、測定断面を先端が通過したのち、 $3s$ 、 $5s$ 、 $7s$ 、および $20s$ 以上時間が経過したときの断面内の等流速線、等濃度線を比較したものである。 $t = 3s$ 、 $5s$ 、 $7s$ は、先端移動速度から換算すると最先端から 15 cm 、 25 cm 、 35 cm の位置に相当する。これらの断面では、流速分布の断面内変化が著しく、濃度分布もこれに応じて変化している。これより、先端部内の流れの構造は次のようなものと考えられる。フロントの後部では底面付近の流速は、フロントの移動速度よりも大きく、定常部から補給された流体は最先端部まで到達する。最先端に達した流入水の一部は鉛直方向に流動し、残りが横方向に運動方向を変え側壁に沿って回り込む。フロント形状は、中央部の盛り上がりが大きく、側壁に近づくに従って前面の勾配が緩やかになる。フロント後部では、側壁付近が厚く、中央部が凹んでいることから、フロントの前面を乗り越えた周囲水は水路の中央付近で下向きに流動し、フロント

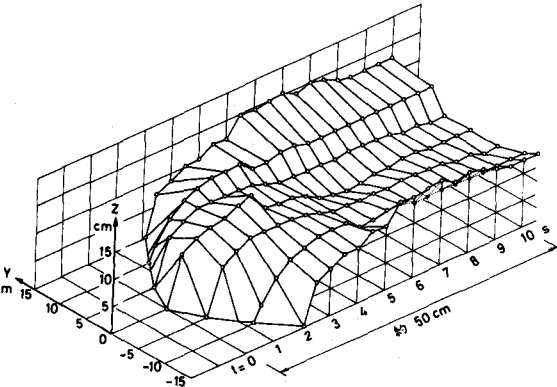


図-4 三次元下層密度流の先端部形状(水路C)

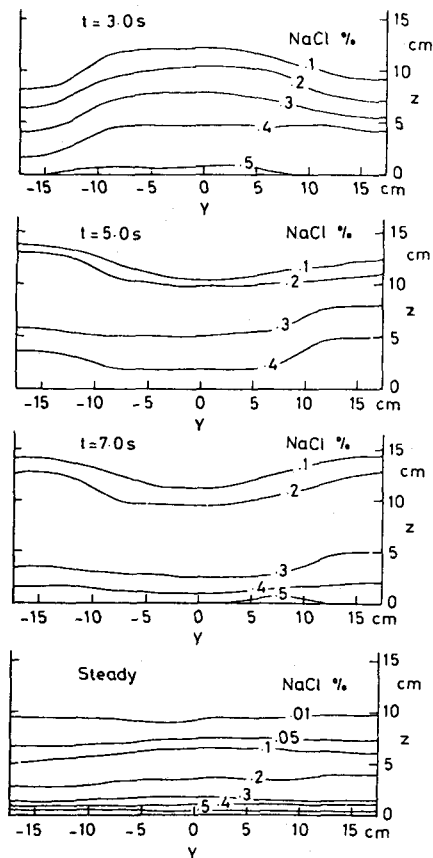
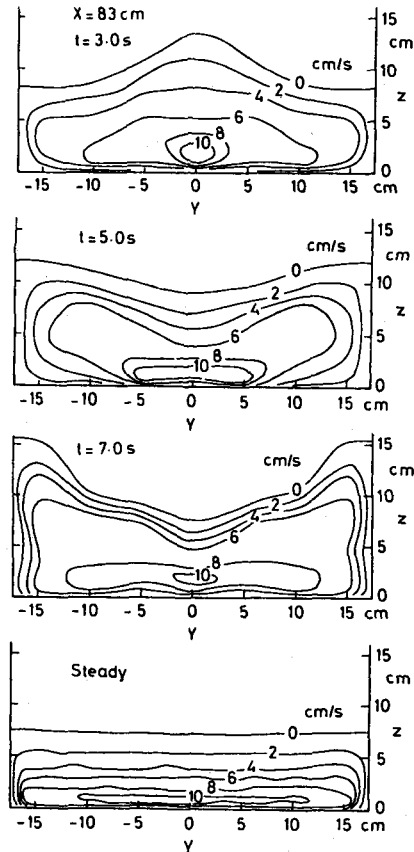


図-5 下層密度流の等流速線図($X=80\text{ cm}$,水路C) 図-6 下層密度流の等濃度線図($X=83\text{ cm}$,水路C)

の後部で下層に連行される。 $t = 5 \sim 7s$ の濃度分布をみると、側壁付近の流体の濃度はいずれの高さでも中央付近の濃度よりも大きくなっており、フロントの先端の濃度の高い流体が回り込んできたことを示している。フロントが通過し、定常部になると、流速分布、濃度分布の横方向変化は小さくなり、二次元の下層密度流定常部の分布形¹⁾に近い分布形となり、三次元性の影響は小さくなる。

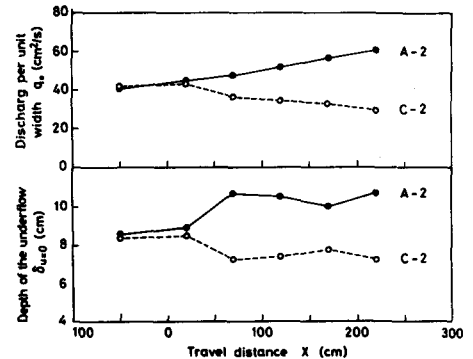
次に、二次元水路（水路A）と三次元水路（水路C）における下層密度流定常部の流動特性について述べる。図一7は、フロントが測定断面を通過後、定常になった下層密度流の中心軸上で測定した流速分布より求めた単位幅流量、下層厚さ、平均流速の流下距離変化を示したものである。二次元の場合には、上層水を連行混入することにより、単位幅流量、層厚は、流下方向に単調に増加する。三次元では、これに水路幅の拡大の影響が加わるため、 $X = 0 \text{ cm}$ より下流では、単位幅流量、層厚は減少している。2つの水路で下層への混入量の大きさを次のように見積った。水路幅拡大点の直上流($X = -50 \text{ cm}$)の単位幅流量と最下流の測定点における単位幅流量から全流量を求め、これらの差からこの区間での混入量を求めた。さらに、2断面間の境界面の面積が二次元流動（水路A）と三次元流動（水路C）で異なることを考慮し、単位接触面積あたりの混入量 Δq を計算する。水路Aの混入量は、 $\Delta q = 0.072 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ で、水路Cでは $\Delta q = 0.096 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ であった。つまり、水路幅の拡大による接触面積の増加を考慮しても、三次元水路では二次元水路よりも混入量が多い。これは、水路幅の拡大が下層密度流の流動機構を変化させ、混入量を増加させる流動機構をとっていることを示している。

次に、下層密度流定常部の単位幅流量と層厚から、平均流速を求め、先端移動速度と比較したのが図一8

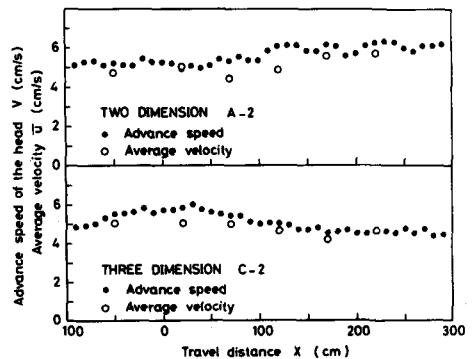
である。二次元と三次元のいずれの場合にも、平均流速は先端移動速度に比べて若干小さい値となるが、平均流速と先端移動速度の流下方向の変化はほぼ同じ傾向を示している。三次元水路では、幅の拡がりの程度に比べ、先端移動速度の減少割合が小さい。これは、三次元水路の場合、幅の拡大区間では二次元水路に比べて多くの上層水を混入していることと対応している。つまり、幅の拡大区間での混入量の増加が、単位幅流量の減少する割合を小さくした結果、三次元水路における先端移動速度の低下を小さくしたと考えることができる。

4. 三次元中層密度流先端部の運動

流入水は、貯水池の潜り込み点付近で周囲水と激しく混合するため、それ自身が密度分布をもつ。流入水の最大密度が下層流体の密度より小さい場合には、すべての流入水が中層密度流となる。ここでは、中層密度流先端部の運動に及ぼす水路幅の拡大の効果について考察する。実験は、水路A、Cを用い、流入端での希釈後の流入水の最大密度に比べ、躍層の下層流体の密度 ρ_2 が大きくなるように調整した。躍層の高さを $Z = 10 \text{ cm}$ としているので、流入水は $X = -100 \text{ cm}$ で躍層に達し、 $X = -50 \text{ cm}$ 付近で中層密度流となった後水路幅の拡大部 ($X \geq 0 \text{ cm}$) に進入する。



図一7 下層密度流定常部の単位幅流量と層厚の流下方向変化 (A-2, C-2)



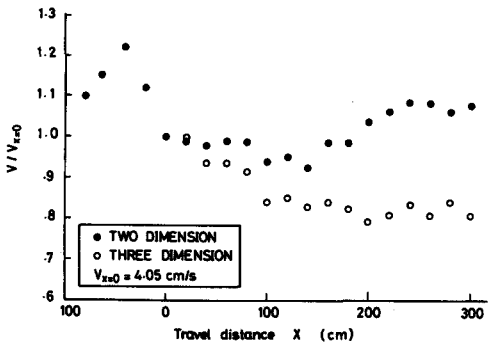
図一8 下層密度流定常部の平均流速と先端移動速度の比較 (A-2, C-2)

図一 9 は、水路幅変化点 ($X=0$ cm) 通過時の値で無次元化した先端移動速度である。はじめ、下層密度流として進入してきた流入水が $X=-100$ cm で躍層に到達すると、流入水の一部が躍層の下層流体を押し上げるため、流入水のフロント前方には段波状の内部孤立波が発生する²⁾。内部孤立波の波速は中層密度流の先端移動速度よりも大きいので、はじめ、中層密度流の運動は内部孤立波によって妨げられ、先端移動速度は減少するが、内部孤立波が先に進むに従って中層密度流の運動に対する影響は小さくなる。二次元中層密度流の先端移動速度が $X=100$ cm 付近まで減少を続けているのは以上の理由による。三次元水路では、水路幅の拡大によって内部孤立波の波高が減少する。中層密度流では、下層密度流に比べて界面での混合の程度が弱い。このため、三次元水路では幅の拡大による単位幅流量の減少効果が卓越し、先端移動速度は二次元の値に比べて小さくなっている。

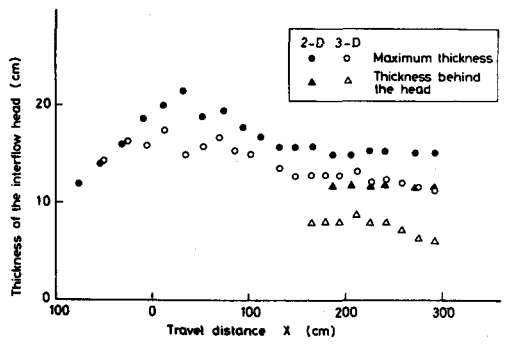
図一 10 は、中層密度流先端部の最大厚さとくびれ厚さを二次元と三次元で比較したものである。先端移動速度と同様に、三次元の場合の最大厚さ、くびれ厚さは二次元の値に比べ小さくなっている。しかし、最大厚さとくびれ厚さの比は二次元と三次元でほとんど等しい。

次に、中層密度流先端部内の流動機構を詳細に把握するため、先端部が通過するときの流速分布の時間変化を調べた。測定箇所は $X=80$ cm, $Y=0$ cm, および流下方向、横方向に 5 cm ずつ離れた計 4 箇所であり、測定間隔は 0.5 秒である。

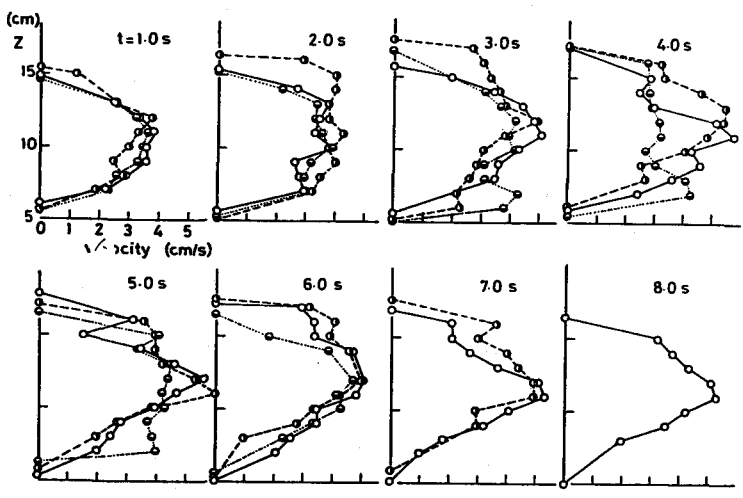
図一 11 は 各位置の流速分布である。ただし、時間 t は各測定位置をフロントが通過した時刻で基準化した。 $X=80$ cm をフロントが通過した後、 $X=85, 90$ cm に到達した時刻は、それぞれ 1.5 s, 3.0 s 後であった。この区間で水路幅の変化は小さいので、図一 11 は近似的に同一断面の流速分布をあらわしていると考えられる。この図から、水路 C での中層密度流の先端部内の流速分布は下層密



図一 9 無次元先端移動速度の流下距離変化 (中層密度流, A-3, C-3)



図一 10 中層密度流先端部の最大厚さとくびれ厚さの流下距離変化 (A-3, C-3)



図一 11 三次元中層密度流先端部内の流速分布の時間変化

- : $X=80$ cm, $Y=0$ cm
- : $X=85$ cm, $Y=5$ cm
- : $X=90$ cm, $Y=10$ cm

度流に比して横断方向の変化は小さい。 $t = 1_s$ では、各断面とも上下対称な正弦分布に近い分布形をなし、 $t = 2_s$ では、各断面とも流速分布は鉛直方向に一樣となる。 $t \geq 6_s$ になると、流速分布は再び正弦分布に近い分布形になる。中層密度流の場合にも、先端部の形状は、流速が零となる位置から推定することができる。流速が零となる位置は、各時刻で横断方向にほとんど差がなく、最大流速は、上・下の流速が零となる位置の中間の位置にあらわれている。以上のことから、この程度の水路幅が拡がり($db/dx=1/11$)の場合には、中層密度流の先端部内の流速分布、先端形状は横断方向にほとんど差がなく、二次元の中層密度流の流動特性に近いと考えることができる。一方、同じ水路における下層密度流先端部の流動特性は、二次元のそれと著しく異なっている。下層密度流と中層密度流とで水路の三次元性の影響が異なる原因は、重力の影響度合いの違いとして説明できる。下層密度流では、重力の作用する流下方向の運動が横方向よりも卓越しており、先端部内の流動が三次元的になり易い。これに対して、中層密度流では運動方向そのものが水平面内にあり、流体は進行方向と横方向に同程度に動くことができる。この結果、中層密度流では先端部内の流動が横断方向に一樣化することになる。

図-12は、中層密度流の先端速度 v_i を無次元化し、レイノルズ数 $Re(=v_i \delta_i / \nu)$ の関数としてプロットしたものである。実線は、Kaoが導いた理論式⁶⁾

$$v_i / (\epsilon_0 g r_1 \delta_i)^{1/2} = \sqrt{2} \quad (1)$$

である。ここに、 ϵ_0 ：躍層の上下流体の相対密度差
 $r_1 = (\rho_2 - \rho_d) / (\rho_2 - \rho_1)$ 、 δ_i ：先端部のくびれ厚さである。式(1)は、無限の水深をもつ二層界面に一樣な密度をもつ流入水が進入する場合について、エネルギーロスがないと仮定し導かれている。実験は、有限水深であり、混合の影響を無視できないことから、式(1)は実測値に対して最大値を与えると考えられる。

三次元の実測値は二次元の値に比べてやや小さい値を示すが、レイノルズ数とともに増加し、式(1)の理論値に漸近する傾向となっている。このことは、水路幅の拡がる三次元の場合でも、二次元の場合と同様に先端部の濁水厚が求まれば、先端移動速度が推定できることを示している。

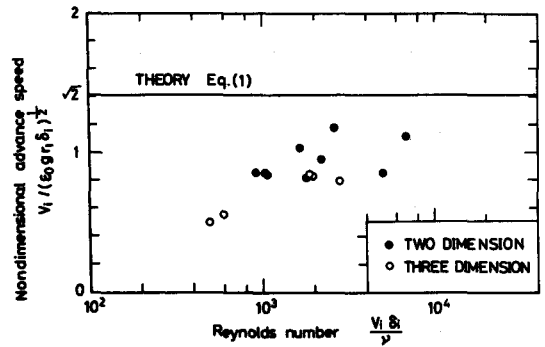


図-12 中層密度流の無次元先端移動速度とレイノルズ数

5. おわりに 水路形状の三次元性が、その中で生ずる密度流の流動特性にどのように影響するかを下層密度流、中層密度流という2つの流動形態について考察を行なった。その結果、下層密度流では、水路の三次元性によって先端部の運動が著しく三次元的になるが、中層密度流先端部の運動は横断方向にも比較的一様であり、二次元水路での運動に近いことを明らかにした。また、幅の拡がる三次元水路においては、流れの三次元性による混入量の増加によって、下層密度流の全流量が二次元水路よりも大きくなる。一方、中層密度流では、下層密度流に比べて流速が小さくなるため、幅の拡大に伴う混入量の増加は、顕著にはあらわれない。

参考文献 1) 福岡, 水村, 加納, 土木学会論文報告集, 第274号, 1978, pp.41~55, 2) 福岡, 福岡, 村田, 荒井, 土木学会論文報告集, 第293号, 1980, pp.65~77., 3) 福岡, 福岡, 土木学会論文報告集, 第294号, 1980, pp.73~84., 4) 福岡, 福岡, 宮本, 東工大土木工学科研究報告, 第26号, pp.67~103., 5) 福岡, 福岡, 中村, 土木学会論文報告集, 第302号, 1980, pp.55~65., 6) Kao, T. W., J. of Hydraulic Div., Proc. ASCE, Vol.103, HY5, 1977, pp.543~555.