

成層化した貯水池に進入する density front の運動

On Density Front Advancing in a Stratified Environment

東京工業大学 正 員 ○福岡 捷二
同 上 正 員 福嶋 祐介
同 上 学生員 村田 和夫
同 上 学生員 荒井 健

1. 序論 濁水が成層流体中に流入していくと、濁水の密度が周囲水より大きい、小さい、あるいは成層流体と同一かによって下層密度流、上層密度流、中層密度流を形成する。このような密度流現象は広く自然界で見られる¹⁾。濁水が湖や貯水池に流入して形成される密度流は、その代表的なものである。Maxworthy²⁾ は、貯水池等に流入する濁水の挙動を調べる目的で、密度分布が直線分布をしている静止流体中に一定密度の塩水を同一密度の位置に流入させた。そして、楔の進入長さとの幅の時間的変化を測定し、大きなリチャードソン数とレイノルズ数に対し、理論が実験とよく一致することを示した。増田・永田³⁾ は、海洋の温度躍層中の微細成層構造の発生機構を調べる目的で、密度が異なる2つの層の界面に流入する楔の運動を調べ、進入速度は楔が進入する界面の厚さに影響されることを示した。吉川・池田・川村⁴⁾ は、Goertlerの理論を躍層面に噴出する二次元噴流に拡張し、摂動法による解析と実験を比較した。最近、Kao⁵⁾ は、密度分布をもつ流入水が、成層した静止流体中に進入する時形成される先端部の定常移動速度を非粘性の条件のもとで理論的に求めた。著者らの1人⁶⁾ は、一様密度の静止流体中を斜面に沿って濁水が進行していく時に形成される下層密度流先端部の運動特性、内部構造について理論と実験の両面から考察し、density frontの発達機構、移動速度、混合機構を明らかにした。下層密度流について得られた成果は、成層貯水池内の濁水の運動を理解するうえで有用な知識を与える。

本研究は、このような斜面に沿う下層密度流の研究を基礎に、成層した静水中に流入する濁水の flow pattern、先端部の形成・発達機構、移動速度、流速分布・濃度分布を実験的に明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置及び実験方法 用いた実験

装置と座標系を図-1に示す。水槽は、長さ7m、幅0.2m、水深0.9mの片面ガラス張りである。水槽中には勾配 $1/10$ の底板が敷かれている。貯水池水は3層の異なる密度成層からなるものと考えられている。各密度成層は密度を調節した塩水によって、一様な密度をもつように作られている。これらの層は、水面から順に、 ρ_1 (清水)、 ρ_2 、 ρ_3 の密度をもつ。

全実験にわたって中間層の厚さは20cmに固定し、座標原点は、上層と中層の境界面と水路底の中心の交点にとる。これは堰から90cmの水平距離にある。X軸は上層と中層の境界面上に選り、流下方向を正とする。Y軸は上方を正とする。一定密度の着色した濁水を矩形堰から静かに流路底に沿って静水中に進入させた。濁水の運動を可視化するため、上層水と下層水はメチレンブルーで着色

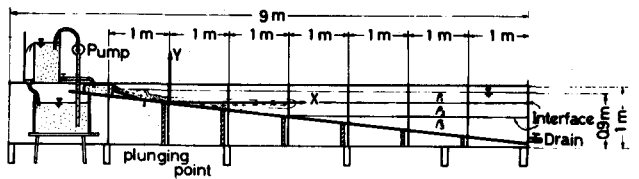


図-1 実験装置

Run No.	flow pattern	水温 (°C)	上層密度 (g/cm³)	中層密度 (g/cm³)	下層密度 (g/cm³)	濁水 (流入前) 密度 (g/cm³)	濁水 (流入前) 流量 (l/s)
1	A	25.4	0.999	1.005	1.023	1.010	0.4
2	A	24.0	0.999	1.002	1.021	1.010	0.1
3	B	23.0	0.999	1.002	1.020	1.018	0.1
4	C	23.0	1.000	1.002	1.021	1.025	0.1
5	B	20.9	1.000	1.002	1.021	1.020	0.1
6	C	18.9	0.999	1.002	1.010	1.021	0.1

表 実験条件

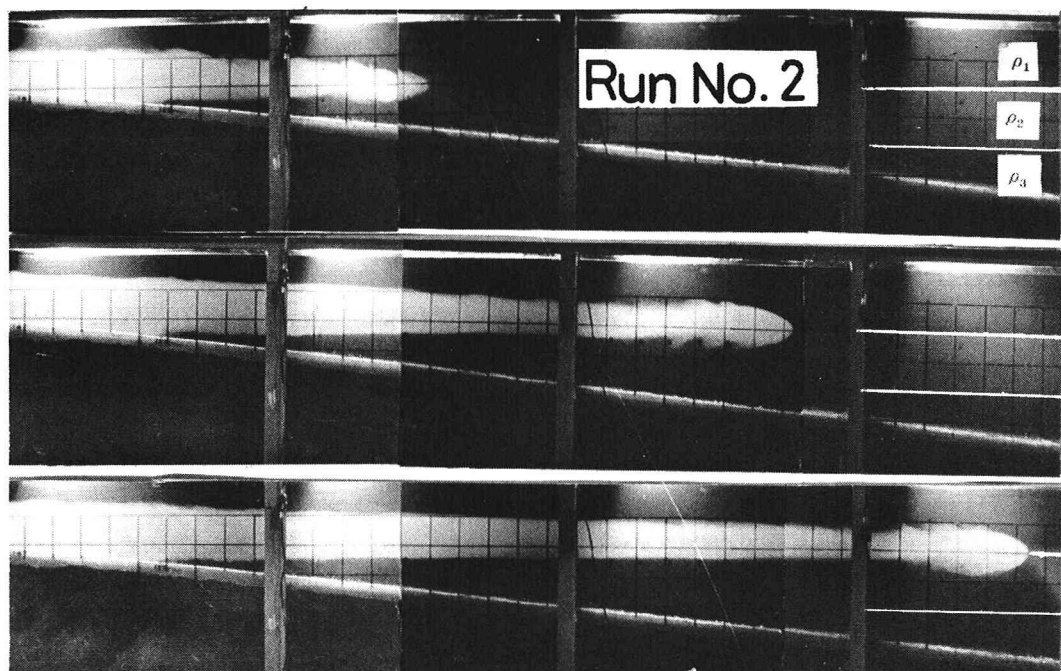


図-2 上層と中層の界面に進入する密度流

した。実験条件を表に示す。実験数は6種類である。この表中に示された濁水の流量と密度は流入前のものであり、濁水は堰から清水中に plume のように流入するため、流入直後の plunging point 付近では清水と激しく混合し流量が増大する。その結果、濁水の密度は著しく、小さくなる（多くの場合10倍程度うすまる）。濁水の先端速度・先端形状は、撮影した映画をフィルム解析し求めた。密度流の運動の時間的・距離的变化を知るために、4台のカメラを水槽に平行に設置して、10秒間隔に同時撮影した。図-2の3枚の組写真は、その一例(Run No.2)である。これは、上層と中層の界面に密度流が進入していく場合で、これより density front とそれに続く定常等流部の運動を見ることができる。流速分布は水素気泡発生装置を $X = 350\text{cm}$ の位置に固定し、最先端が 20cm 流下するごとに撮影し読みとった。密度分布はサイフォン原理を用いて次の方法で決定した。流入前の密度分布は境界面付近を密に採水し測定した。濁水の密度分布は、中央線上鉛直方向 2cm 間隔に 20 点同時に採水できるような装置を製作し、水流を乱さないような方法で採水した。採水試料は硝酸銀溶液で滴定し濃度を求め、これと比重計による値との対応をつけ密度とした。

3. 実験結果と考察

3-1 流入濁水の flow pattern

濁水の成層中への進入状況を pattern わけをするために、流入濁水の密度と中層水、下層水の密度を変化させて実験を行った。実験は各層の密度がそれぞれ一様である場合のみについて行った。濁水が、plunging point 付近で、希釈混合されても、決して下層水の密度を越えない密度をもつ流入水について、実験を行った。濁水は、清水中に斜面に沿って進入する。やがて、 ρ_2 の密度の中

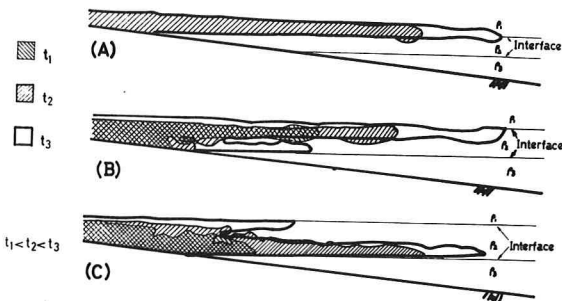


図-3 流入濁水の flow pattern

層に到達すると、濁水の密度が中層と比較して小さいかまたは大きいかによって中層の上面か下面かを進入していくことになる。この時濁水の運動方向が斜面沿いから水平方向に変化するため、重力の進行方向成分が消え、それまで有していた移動速度を保てず、運動方向変化位置付近に濁水の貯留が起る。貯留量は濁水がどのように進入するかによって異なる。図-3は濁水の密度成層中への進入の pattern と進入位置の時間変化を示す。図-3 (A)は斜面に沿って流入してきた濁水が上層と中層の境界に進入していくもので、Run No.1, Run No.-2 (図-2の組写真) が、このような flow pattern をもつ。この場合の流入前の濁水の密度は、pattern (B), (C) が起る場合に比べ小さく plunging point 付近での清水との混合によってほぼ上層と中層の界面付近の密度となり、上層と中層の境界に対称な形をなして進入していく。(A) の pattern では、運動方向が変化する地点での、濁水の貯留量は、殆んど変化しない。(B) の flow pattern は、Run No. 3, 5 で見出された。最初は、pattern (A) のように、上層と中層の間に対称な形で進入していき、その後、新たなフロントが下層上を流下する。この理由は、次のように考えることができる。

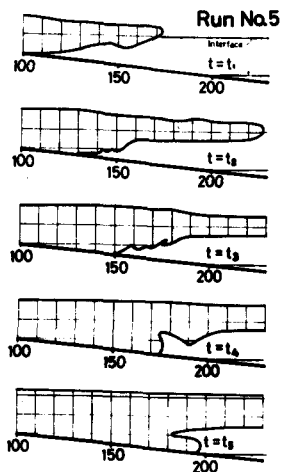


図-4 運動方向変化位置での貯留量の時間変化

最初、plunging point 付近で希釈された濁水は、上層と中層界面付近の密度をもち、両者の界面を進入する。しかし図-4に示すように時間が経過するにつれて、運動方向変化位置付近では、貯留のため濁水が水深方向と流下方向に増大していく。このため、当初清水で占められていた plunging point 付近の流体が貯留された濁水と次第に置きかわる。したがって、それ以後は plunging point 付近での周囲水による希釈効果の度合いは小さくなり、やがて中層水よりも重くなる。このため、中層下面を新たな密度流が進入していくものと思われる。(C) の pattern は始め濁水が下層上を進入していき、ある距離進むと上層と中層の界面に新しい濁水が入り込んでいく。濁水と下層流体の密度差が大きいため、pattern (A) のように対称なフロントを持たず、あたかも水平板上を密度流が流れるようになる。その結果、pattern (A) に比して抵抗が大きくなり、運動方向変化位置付近では、貯留量が時間的に増大する。貯留部の高さが増大することによって、上層と中層付近の希釈された流体が、やがて両者の境界面付近に進入していくことになる。

以上のことから、各密度成層間の密度差が小さく、かつ進入濁水との密度差も小さい時には、成層界面に進入していく濁水の先端は対称な形状をなす (pattern (A))。一方成層間の密度差が大きい時には (pattern (B), (C) の流れ)、Simpson,⁷⁾ 福岡⁶⁾ らの実験に見られるような固定境界面上を流れる密度流の先端形状に近い形で進入していく。

3-2 先端部の形成・発達と移動速度

成層中を進入する密度流の先端部がどのように形成され、進行していくかを調べるために、次のような実験を行なった。濁水が先端を形成し始める時から、上流端で濁水と同密度の3種類の着色水を30ccづつ30秒間隔に注入し、その後のそれぞれの着色水の動きを観察した。図-5は撮影した写真から先端の形成機構を概念的に示したものである。着色水は中心付近の最大流速にのって、ゆっくりと最先端に到達し、先端部にあった流体と混合する。この先端部の形成機構は、一様密度をもった静止流体中を斜面沿いに流下する密度流の場合と同じである⁹⁾。しかし先端部の発達率は非常に異なる。一様密度流体中を進入する場合は、定常等流部から送られてくる流体が大量に先端部に貯留され、

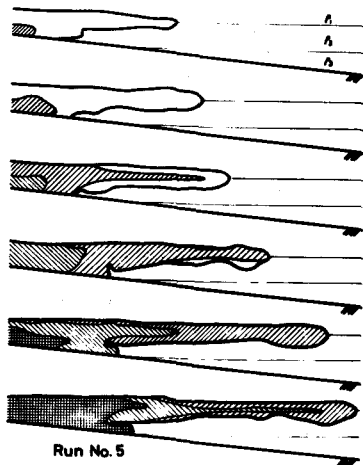


図-5 先端形成機構

先端部の最大高さは流下とともにほぼ直線的に増大する。しかし、水平に進入していく場合には、先端部への濁水の供給は少なく、ひとたび先端部が形成されると流下とともに先端高さは、ほとんど変化しない。

一様密度流体中を濁水が進入する場合には、先端に多数の lobe の消長が観察されたが⁶⁾、成層中に濁水が進入する時には、lobe の発生は観察されず先端形状は二次元的であった。この理由として次の3つが考えられる。(1)最先端の下面からの混入水は、濁水よりも重いので先端部は対流的に不安定とはならない。(2)周囲水との相対速度が小さいために、先端部界面に強い渦運動が現われにくい。(3)上流から先端部への濁水の供給が少なくこのため先端内部の渦運動が小さい。

図-6は、flow pattern(B)

の場合の先端部形状と移動速度の時間変化を示す。縦軸には移動速度、横軸には距離と時間をとっている。先端移動速度は $X=250\text{cm}$ まで減速していくことがわかる。斜面に沿って流下してきた濁水が上層と中層の境界面に達すると、運動方向が急に水平方向に変化する。そのため、重力の効果がなくなり、流体のもって

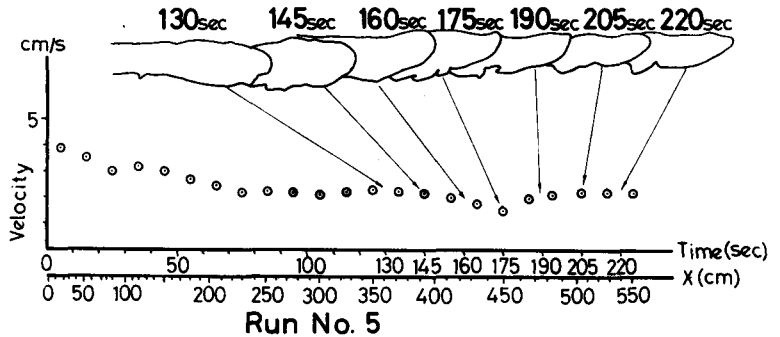


図-6 先端形状と移動速度

いた慣性が次第に失われ、速度が減ずる。 $250\text{cm} \leq X \leq 400\text{cm}$ の間は、先に述べたように上下対称な先端部が形成され先端高さ・先端形状はほぼ一定となり、移動速度の変化は認められない。先端部の移動速度は主として先端前面の界面勾配で規定されるが、この場合、先端部の上面と下面の勾配は、流下とともに変化していないため、移動速度はほぼ一定となる。

Kao⁵⁾は、このようなほぼ対称な形状をもつ front の定常移動速度を非粘性の仮定のもとに理論的に求めた。

すなわち、

$$U = \left(2 \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_2} r \cdot g \cdot h \right)^{1/2}$$

である。ここに $r = (\rho_2 - \rho_d) / (\rho_2 - \rho_1) = h_1 / h$ で与えられ、 ρ_d , h , h_1 はそれぞれ濁水の平均密度、等流部水深、界面から上方に測られた濁水の等流部の高さである。著者らの実測値と比較すると、上式は平均的に35%大きく見積られる。Kaoは濁水、及び周囲水に密度分布がある場合には、移動速度は上式よりも小さくなることを理論予測している。しかし著者らの実験の範囲内では上式は実測値を説明し得ない。

図-6によれば $400\text{cm} \leq X \leq 500\text{cm}$ では先端形状と移動速度はそれ以前と比較して明確な変化が現われる。この原因は境界面に生ずる内部孤立波との関連で論ずることができる。濁水が流入し先端部を形成すると、そのすぐ前方の界面上に内部孤立波が生じ、先端部移動速度よりも速く進む。水槽の末端は、固定壁で仕切られているため、内部孤立波は反射し、同じ界面上を戻ってくる。先端が上向き加減となる時間は、孤立波が発生し反射してきて最先端と出会う時間にほぼ対応する。このとき孤立波は先端を押し上げる。このような内部孤立波のために、出会い時間(図-6の例ではほぼ150sec)あたりから先端移動速度が減じ、孤立波の影響が消え去ると、移動速度は再び一定となる。

図-6を見ると、界面高さが時間とともに上昇している。これは、plunging部で希釈され、中層程度の密度となった濁水が、連続的に流入し中層に滞留するためその厚さが増したためである。

3-3 流速分布

図-7は、flow pattern (A) の型式を持つ密度流の種々の断面の中心線上で測定された流速分布を示す。前述のように、流入前の密度境界面の位置は、 $Y=0$ と $Y=-20\text{cm}$ である。図中に示された X' は密度流最先端から流速測定位置までの距離である。濁水は上層と中層の界面を進入してゆき、先端部がほぼ対称となっている。流速分布も最大流速付近を中心に対称形をなす。図-8は流速を最大流速、横軸を最大流速の半値半幅で無次元化したもので、流速分布はガウス分布で近似され、相似形が成立していることがわかる。

図-9は flow pattern (B) の型式の密度流流速分布の一例である。 X'_1 は上層と中層界面に流体が進入している時の先端からの距離、 X'_2 は下層界面上に流体が進入した時、その先端から流速測定位置までの距離を示す。この場合には密度流が初め上層と中層の境界に進入し、次いで下層界面上に進入していく。下層界面上を進入していく時も、流速分布はほぼ相似形を保つ。最大流速の位置は界面から濁水高さの約 $1/5$ で現われている。濁水が一樣密度の流体中を斜面に沿って進入する場合は、ほぼ一樣な流速分布をなす。⁹⁾ しかし、図-9では最先端部 ($X'_2 = 10 \sim 30\text{cm}$) の流速分布は、一樣となっておらず、底付近に最大流速をもつ。この理由は、3-2節で先端部が2次元的であることの原因としてあげた3つの原因のため、先端内部の渦運動が大きくなく、混合が弱いことによる。

3-4 密度分布

図-10は (C) の flow patternをもつ密度流の密度分布の一例を示す。図中 (○) 印は最先端が $X=450\text{cm}$ の位置に到達したときに、 $X=155\text{cm}$, $X=250\text{cm}$,

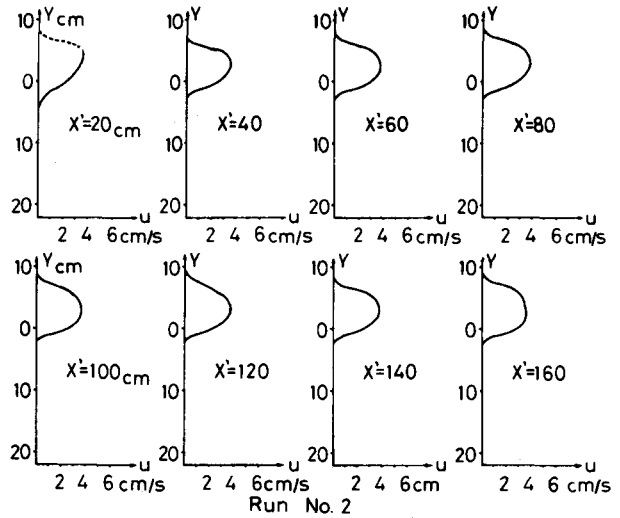


図-7 流速分布

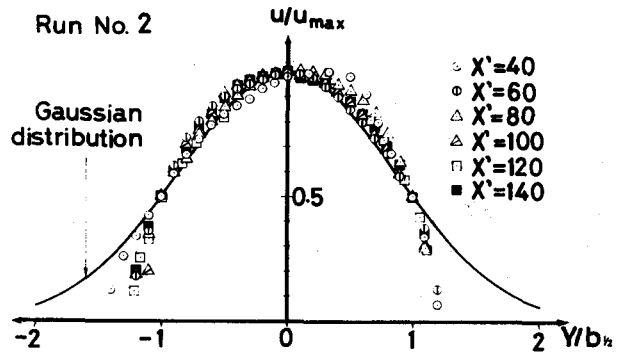
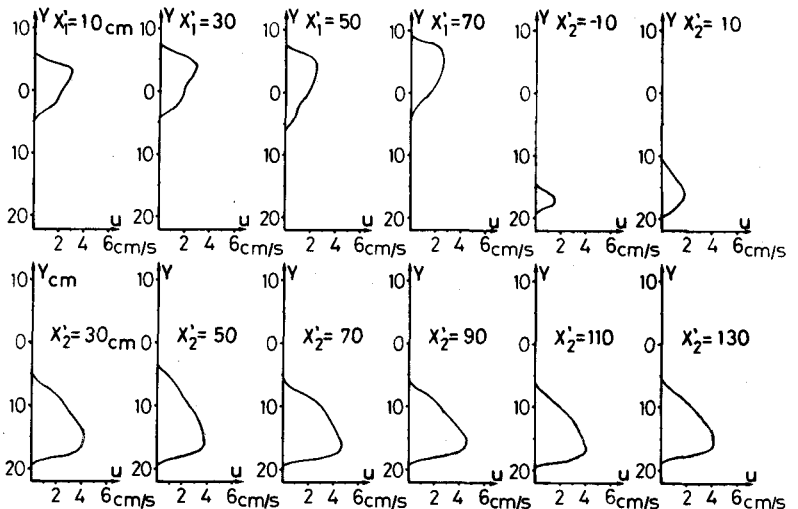


図-8 流速分布



Run No. 5
図-9 流速分布

$X = 355 \text{ cm}$ で測定した密度分布である。(△)印は、 $X = 500 \text{ cm}$ に先端が到達したときに、 $X = 155 \text{ cm}$ で測定した密度分布である。 X' は先端からの距離を示す。図中の(●)印と(▲)印は密度流が存在している領域を示す。flow pattern(C)では、初め下層界面上に濁水が進み、次いで上方界面に濁水が入る。密度測定時に、 $X = 255 \text{ cm}$ では上方界面に濁水が到達していたが、 $X = 355 \text{ cm}$ では到達していなかった。運動方向変化位置付近($X = 155 \text{ cm}$)の濁水は、底付近を除いて一様密度となっており、密度の高い部分は底付近を流下していることがわかる。またこの断面での(●)印と(▲)印を比較すると、密度分布は時間的に変化せず、中層内の濁水厚さが増大し、上層と

中層の界面が上昇している。 $X = 255 \text{ cm}$ をみると、上方界面に進入していく濁水は、ほぼ一様な密度となっている。 $X = 355 \text{ cm}$ では、上方界面に進入した濁水は未だ到達していないことから、 $Y = 10 \text{ cm}$ 付近で測定された密度勾配の急変は、濁水進入により上方界面が 10 cm 上昇したことを示す。従って $X = 255 \text{ cm}$ での上方界面付近の測定前の密度は、界面上昇のため、既に初期密度とは異なり、 $Y = -20 \text{ cm}$ から $Y = 10 \text{ cm}$ までほぼ一様となっているはずである。このことを考慮すると、 $X = 255 \text{ cm}$ で上方界面に流入した濁水は、自分と等密度の層に進入していることがわかる。一方下層境界上のように密度差が大きい所に進入した濁水は、一様密度中の斜面を流下する場合と、同様な分布形を示す。⁹⁾ $X = 255 \text{ cm}$, $X = 355 \text{ cm}$ の断面は、ほぼ定常等流とみなされ、この2つの断面の密度分布は流速分布と同様、相似な分布をもつ。

本研究は、それぞれの密度成層が、一様密度をもつという強い制限条件のもとで実験を行なった。流入水が密度分布をもつ場合は、全体的には自分と同じ平均密度をもつ層中に進入する。しかし、成層内の密度が一様なためと、流入水が密度分布を持つため周囲水との僅かな密度の違いで、流入水は上層と中層の界面か、下方界面上のいずれかに進入し、等密度の間には進入しにくい。従って、流入水は周囲水との間に明確な界面をもち、限定された厚さをもって、成層中をかなりの速度で進行することができる。一方各層が密度分布をもち、かつ流入水も密度分布をもつ場合には、流入水はそれぞれの密度に等しい場所に入っていく、鉛直方向に広く拡散することになる。その結果密度流全体は極めて遅い流速で運動する。濁質の滞留はこの場合が最も顕著になる。現在、線形的な密度分布をもつ静水中に、密度分布をもつ濁水が進入していく場合の運動を検討している。

参考文献

- 1) Turner, J.S., Buoyancy Effect in Fluids, Cambridge University Press, 1973.
- 2) Maxworthy, T., International Symposium on Stratified Fluid, Novosibirsk, 1972.
- 3) Masuda, A., Nagata, Y., Jour. of the Oceanographical Society of Japan, vol.30, 1974.
- 4) 吉川秀夫, 池田駿介, 川村幸生, 第19回水理講演会論文集, 1975.
- 5) Kao, T.W., Jour. of Hy. Div., Proc. Am. Soc. of Civil Engineers, vol. 103, HY5, 1977.
- 6) 福岡捷二, 水村和正, 加納敏行, 土木学会論文報告集投稿中
- 7) Simpson, J. E., Jour. of Fluid Mech., vol. 53, 1972.

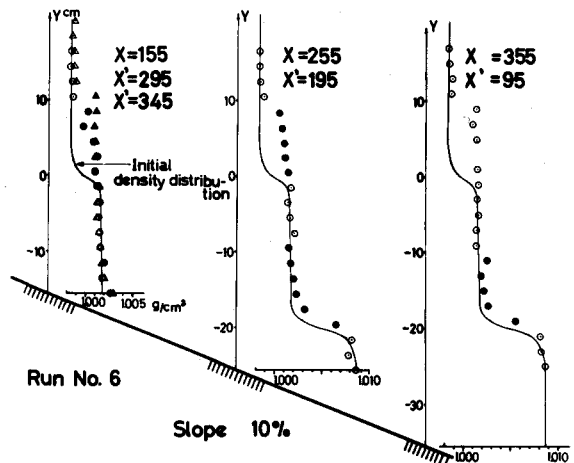


図-10 密度分布