

## 濁水中層密度流に関する実験的研究

### Experiments on Turbid Density Interflow

九州大学工学部 正員 秋山 壽一郎 J. AKIYAMA  
九州大学大学院 学生員 山口 正久 M. YAMAGUCHI  
九州大学工学部 正員 藤田 和夫 K. FUJITA  
九州大学工学部 正員 小松 利光 T. KOMATSU

#### 1. 緒言

洪水時に河川流域から生産される高濃度の濁質を含む濁水が貯水池や湖に流入すると、その密度差のため、中層、下層濁水密度流となって池内を流動する。このような濁水密度流は、下流水域の環境問題や堆砂問題と密接に関わる水理学上極めて重要な現象である。

貯水池が温度躍層を有する成層型である場合、濁水は流入点で希釈混合したのち、重力下層密度流として池底斜面に沿って一旦流下し、躍層を破壊することなく、躍層界面に沿って水平に向きを変えて、楔状に貫入することがある。これを中層密度流と呼ぶ。この問題に関しては従来より、濁水の長期化現象をもたらす沈降速度の極めて遅い微細粒子を対象として、実験、現地観測及び理論研究が活発に進められてきた。その結果、流入濁質の池内での流動機構に関しては、多くの知見が得られている。

例えば、成層型貯水池における流入濁質の運動を潜人、分岐現象も含めて総合的に扱った福岡ら<sup>1,2</sup>の研究がある。中層密度流の運動機構自体を対象としたものとしては、非粘性流体理論のもとで先端移動速度を求めたKao<sup>3,4</sup>の研究や連続成層場に流入する中層密度流の先端移動速度を求めたMaxworthy<sup>5</sup>の研究が代表的なものとして挙げられる。更に、極めて類似した流れとして、下層密度流先端部の運動がある。これに関しては、非定常先端部の流動特性を特性曲線法で解析した平野<sup>6</sup>らの研究がある。

固-液混相の濁水密度流の第一近似としての液-液単相密度流（擬似濁水密度流）は浮遊粒子の性質、主に沈降性を無視しているため、濁質の輸送過程は近似的に説明できるが、堆積機構は全く評価し得ない。自然界において、流入濁質は沈降速度が無視できない程度の粒子も当然含んでおり、それらは流入後直ちに池底に堆積するとは限らず、その一部は浮遊粒子として下層流により躍層界面まで輸送され、中層密度流として更に池内へ拡散して行くことが考えられる。

本研究ではこのような観点に立って、洪水流入に伴う沈降性濁質物質の挙動を池内の濁質輸送及び堆積過程の1つのmodeとみなして中層密度流に着目し、固-液混相の場合と液-液単相の場合の流動機構の差異を実験的に明らかにすることを目的としている。

#### 2. 実験装置及び方法

実験装置は図-1に示すように全長8.0m、幅0.4mで、上流側から6.0mまでは水深1.0m、残り2.0mは水深1.4mの両面アクリル製水槽を用いた。この水槽は厚さ10cmの透明アクリル版によって0.2mと0.19mの幅の2つの水槽に仕切られている。

実験水槽上流端には、流入用として前面に平板を備えた越流タンクが設置してある。下流端は水槽水位を一定に保つため越流ゼキを設けている。濁水が境界面に流入すると内部孤立波が発生する。内部孤立波は先端移動速度よりも早いため、下流端で反射した後、流れに悪影響を及ぼす。これを防止する目的で消波板が取り付けられている。両装置は界面の位置に応じて上下に移動可能となっている。

上層流体（密度 $\rho_1$ 、層厚 $h_1$ ）は常に淡水を使用し、下層流体（密度 $\rho_2$ 、層厚 $h_2$ ）は貯溜タンクで所定の濃度に調節した塩水を用い、淡塩水の2成層場を注意深く形成した。沈降性粒子による中

層密度流の場合と沈降速度が無視できる場合との比較検討を行うために、流入濁水 ( $\rho_0$ ) として浮遊ガラスビーズによる濁水とフルオレセインで着色した塩水をそれぞれ使用した。

座標軸を図-1に示す。x-軸は躍層界面に沿って流下方向を正に取り、y-軸は鉛直上方に取る。座標原点は平板の下流端から0.5m下流の点である。以下に濁水を流

入させた時の実験手順を述べる。流入水が塩水の場合もこれに準ずるので、ここでは必要な場合以外は割愛する。ガラスビーズと淡水を混合した所定の濃度をもつ濁水をまず貯水槽に作り、十分に攪拌した。更に、攪拌装置を取り付けた一定ヘッドの高架水槽に導き、放出口より一定供給量で越流タンクに噴出させた。流入時の慣性力の影響を出来るだけ少なくするために、放出口は鉛直下方に向けてある(図-1)。流入濁水は越流タンク内で上層淡水と希釈混合した後、界面上に貫入し、水平方向に流下していく。比較的粒径の大きな粒子は、越流タンクとその前面に取り付けた平板上に堆積するように工夫されている。

密度  $\rho_0$ 、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、及び界面の位置 ( $h_1/h_2$ ) を変化させ、繰り返し実験を行った。流入流量 ( $Q$ ) は濁水の場合は一定 ( $107.2\text{cm}^3/\text{s}$ ) で、塩水の場合は2通り ( $Q$ 、 $Q/2$ ) に変化させた。これら流入水及び周囲水の条件を揃えれば、塩水の場合は勿論、濁水中層流でも流れの再現性は極めて良好であった。実験条件を表-1に示す。表-1において、 $\varepsilon_0 = (\rho_0 - \rho_1) / \rho_1$ 、 $\varepsilon_0 = (\rho_0 - \rho_1) / \rho_1$ 、 $V_0$  = 初期先端移動速度、 $q_0$  = 単位幅流入流量、 $q_s$  = 単位幅流入濁質量、 $\beta = q_s / q_0$  である。

使用したガラスビーズの粒度分布は図-2に示すように、ほぼ一様で平均粒径 ( $d_{50}$ ) は  $43\mu$ 、比重 ( $\sigma$ ) は 2.50 である。この  $d_{50}$  に対応する静水中の沈降速度 ( $V_f$ ) は  $0.14\text{cm/s}$  である。流入濁水の密度は体積濃度 ( $c$ ) を用いると、 $\rho = (1.5c + 1) \rho_1$  と表される。濁質濃度及び塩分濃度分布の測定には、水深方向に2cm間隔で10点同時に採水出来る装置(採水器内径0.1cm、外径0.2cmのステンレス管を使用)を作成し、試料を1点につき約15cc注意深く採水した。塩分濃度の計測には電気伝導度計を使用し、濁質濃度は試料の乾燥重量を求めることによって行った。沈降性粒子の堆積過程を知るため、水槽底面に同時に開閉できるtrapを50cm間隔で5個設置した。先端移動速度はvideo cameraで frontを追跡し、V.T.R.で録画した画像を解析して求めた。写真撮影も同時に行った。

### 3. 流動特性

中層密度流の流動形態は、sharpな界面に侵入する場合と連続的な成層場に侵入する場合とでは異なることが知られている。sharpな界面に侵入する場合でも、Kao<sup>4</sup>の研究で示されたように、流動層厚と躍層界面の相対位置関係によって、流動形態は変化する。ここでは、混相中層流と単相中層流を比較することを目的としているので、下層流体の密度が流入水のそれに比して相対的に大きな場合、

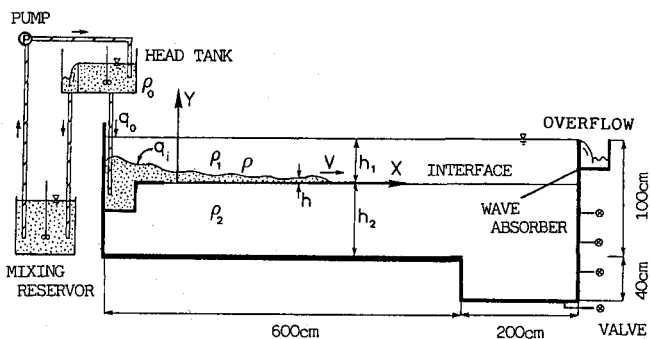


図-1 実験装置

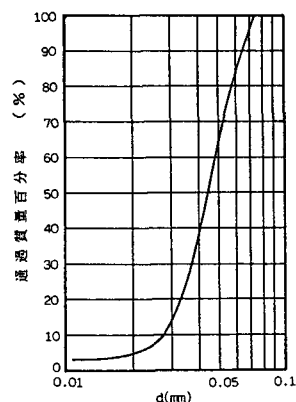


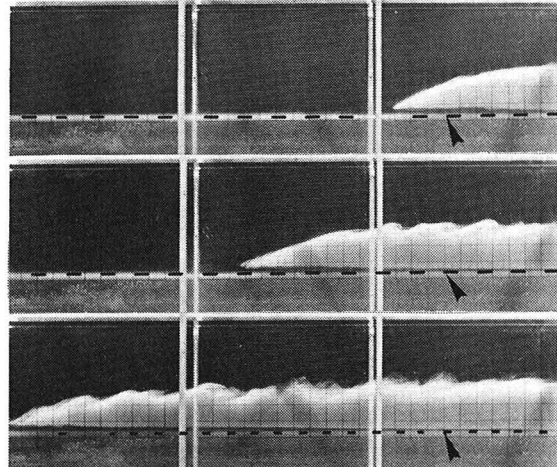
図-2 ガラスビーズの粒度構成

表 - 1 実験条件

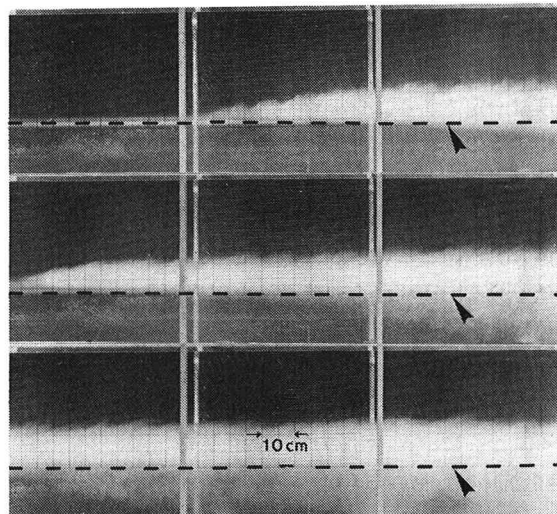
| Run No. | $q_0$<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) | $\beta$ | $\epsilon_1$ | $V_0$<br>( $\text{cm}/\text{s}$ ) | Run No. | $q_0$<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) | $\epsilon_0$ | $\epsilon_1$ | $V_0$<br>( $\text{cm}/\text{s}$ ) |
|---------|-------------------------------------|---------|--------------|-----------------------------------|---------|-------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------|
| T - 1   | 5.36                                | 0.0161  | 0.0320       | 2.27                              | S - 1   | 2.68                                | 0.0005       | 0.0255       | 0.83                              |
| T - 2   | 5.36                                | 0.0210  | 0.0270       | 2.35                              | S - 2   | 2.68                                | 0.0010       | 0.0205       | 1.08                              |
| T - 3   | 5.64                                | 0.0300  | 0.0290       | 2.53                              | S - 3   | 2.68                                | 0.0045       | 0.0260       | 2.08                              |
| T - 4   | 5.36                                | 0.0421  | 0.0280       | 2.78                              | S - 4   | 2.68                                | 0.0150       | 0.0360       | 2.27                              |
| T - 5   | 5.36                                | 0.0475  | 0.0340       | 3.63                              | S - 5   | 2.68                                | 0.0300       | 0.0425       | 3.40                              |
| T - 6   | 5.64                                | 0.0527  | 0.0295       | 3.33                              | S - 6   | 5.36                                | 0.0002       | 0.0260       | 0.80                              |
| T - 7   | 5.64                                | 0.0866  | 0.0325       | 5.13                              | S - 7   | 5.36                                | 0.0005       | 0.0350       | 1.08                              |
|         |                                     |         |              |                                   | S - 8   | 5.64                                | 0.0010       | 0.0205       | 1.44                              |
|         |                                     |         |              |                                   | S - 9   | 5.64                                | 0.0025       | 0.0195       | 2.20                              |
|         |                                     |         |              |                                   | S - 10  | 5.36                                | 0.0065       | 0.0240       | 3.20                              |
|         |                                     |         |              |                                   | S - 11  | 5.36                                | 0.0295       | 0.0425       | 4.50                              |

即ち、界面上を滑らかに侵入するtypeの中層流に対象をしぼって考察する。図-3a、3bにそれぞれ塩水、濁水中層流の写真の一例を示す。図中に矢印で界面の位置を示してある。塩水中層密度流では、先端部の上部界面に於て規則的な大規模渦が発生しているが、下部界面は躍層の位置と一致し、滑らかである。先端部は乱流状態であるが、それに続く定常部は比較的安定している。また、frontの形状は流下に伴い少しずつ変化していくことが観察された。

一方、濁水中層流では、アニリンブルーを投下した目視観測によれば、先端部のみならず、流動層全体に渡って乱流状態であることが確認された。塩水の場合と同様、先端部上部界面において大規模な渦が発生しており、渦によって上層へ巻き上げられた粒子はその沈降性のため、再度、主流動層に取り込まれ、流下方向に輸送される。図-3bより明らかなように、下部界面においては、主流域から離脱した粒子は先端部やや後方より鉛直下方へ沈降する。front部は大規模な渦運動を伴い、粒子は浮遊し易い。一方、後方定常部では乱れが相対的に弱いため、粒子は沈降を開始し、主流動層から離脱するものと考えられる。そのため先端部を除いて、下部境界面はあまり明瞭ではない。図-4に得られた塩分濃度及び濁質濃度分布の一例を示す。両分布とも縦軸は流動層厚で、横軸は濃度の最大値で無次元化している。濁水の場合は流動層内での粒子沈降のため、躍層界面付近に高濃度域が存在し、濃度分布は開水路浮遊砂のそれと同じ傾向を示すことが判る。図-5に先端部が5.0mに到



(a) 塩水中層流の流動形状



(b) 濁水中層流の流動形状

図 - 3

大値で無次元化している。濁水の場合は流動層内での粒子沈降のため、躍層界面付近に高濃度域が存在し、濃度分布は開水路浮遊砂のそれと同じ傾向を示すことが判る。図-5に先端部が5.0mに到

着したときの堆積粒子の単位面積あたりの重量を示す。 $x/L=0$ の点を除いて、流下方向に、ほぼ直線的に堆積量が減少することが認められる。

#### 4. 先端移動速度

まず、塩水中層流について考察する。図-6に侵入長( $L$ )と時間( $t$ )との関係を示す。図-6 aは  $Q/2=53.6\text{cm}^3/\text{s}$ 、図-6 bは $Q$ の場合である。図-3 aのような中層密度流では下層密度( $\rho_2$ )は直接流れに影響を与えず、水平底面上の下層流もしくは表層流とその運動特性が極めて類似していることが期待できる。Didden and Maxworthy<sup>1)</sup>は2次元及び軸対称の水平底面上の下層流と表層流との実験を行い、流動形態をgravity-inertia、gravity-viscous regionの2領域に区分した。彼らは2次元の場合、 $L$ は前者においては $t$ に比例し、後者においては $t^{7/8}$ に比例することを明らかにした。

図-6より、明らかに $L$ は $t$ に比例し、frontの移動速度は一定である( $V=V_0$ )。つまり、Diddenらの言うgravity-inertia regionに相当する。更に、流入相対密度差 $\varepsilon_0$ が大きくなる程、先端移動速度が増大することが判る。gravity-inertia regionでは抗力と圧力がバランスし、且つ、先端移動速度は一定である。front形状は流下に伴い変化するので、先端部の代表長さとして流動層厚( $h$ )を選ぶのは不適当と思われる。従って、ここでは代表長さとして $q/V$ を導入する。ここに、 $q$ は流動層の単位幅流量である。初期混合や流動層上部界面での連行による逆流などを無視すると、

$$\begin{aligned} & (\alpha_1/2) \varepsilon g (q/V)^2 \\ & = (c_d/2) V^2 (q/V) \quad (1) \end{aligned}$$

となる。ここに、 $\alpha_1$ =圧力分布補正係数、

$c_d$ =抵抗係数、 $\varepsilon = ((\rho - \rho_1)/\rho_1)$ である。(1)式より、

$$V = \alpha_2 (\varepsilon g q)^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 $\alpha_2 = (\alpha_1/c_d)^{1/3}$ 。初期連行量( $q_i$ )が流入量( $q_0$ )に比例するとして、初期混合率( $r$ )を定義すると、

$$r = q_i/q_0 \quad (3)$$

連続の式、及び質量保存の式より、

$$q = (1+r) q_0 \quad (4)$$

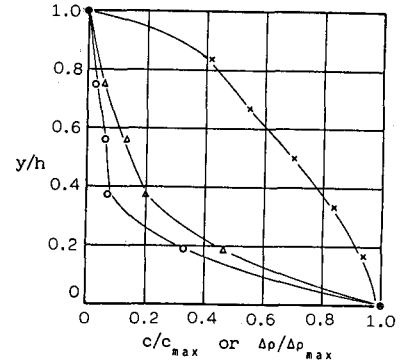


図-4 濃度分布の比較

- × 塩水中層 ( $x = 1.5\text{m}$ )
- 濁水中層 ( $x = 0.5\text{m}$ )
- △ 濁水中層 ( $x = 1.5\text{m}$ )
- ( $c_{\text{max}} = 0.029$ )
- ( $c_{\text{max}} = 0.019$ )

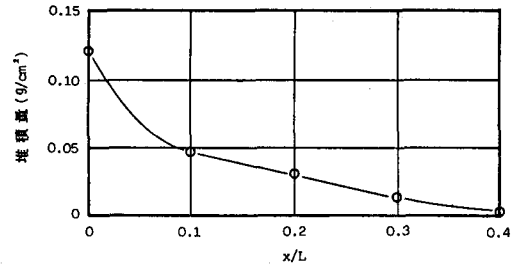
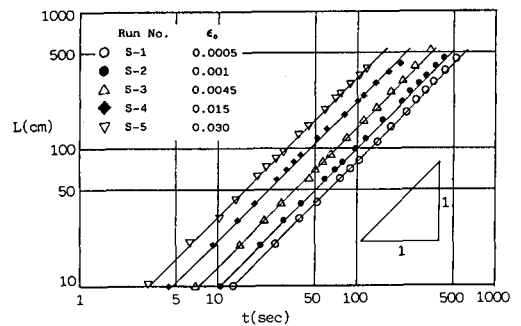


図-5 堆積量と流下距離との関係



(a) 流量 ( $Q/2$ )

$$\varepsilon = \varepsilon_0 / (1 + \gamma) \quad (5)$$

を得る。(4)、(5)式を(2)式に代入して、

$$V / (\varepsilon_0 g q_0)^{1/3} = \alpha_2 \quad (6)$$

となる。 $\alpha_2$ は流動層上部界面での上層水の連行量などによって決定される関数になると考えられるが、ここでは、 $\alpha_2 = 0.856$  (一定) とすると、 $V$ は流入条件 ( $q_0$ 、 $\rho_0$ ) と受容水条件 ( $\rho_1$ ) のみで近似的に表わされる。図-7に  $V$  と  $(\varepsilon_0 g q_0)$  との関係を示す。

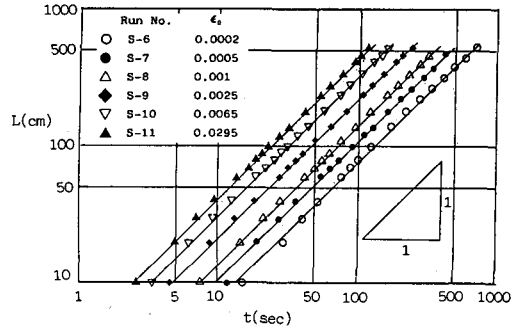
次に、濁水中層密度流の  $L \sim t$  関係を図-8に示す。初期流速 ( $V_0$ ) が流入濁水濃度に応じて変化することは塩水の場合と同様であるが、 $\beta = 0.0161$  の場合を除いて、いずれの場合も、今回の実験条件下 ( $\beta = 0.016 \sim 0.087$ 、 $d_{s0} = 43 \mu$ ) では、減速率は流入濁水濃度に依存せず一定であり、勾配が1.0から約0.86へ遷移する。固-液混相中層密度流は粒子を浮遊させるため、流動層は本質的に乱流であり、粘性力が効く gravity-viscous region は存在しないものと思われる。従って、この先端速度の特性の違いは粒子の沈降に伴う流動機構の変化に起因すると考えられる。図-3bで示したように、濁水中層流は浮遊粒子が流動層からまったく沈降しない先端部と粒子が離脱していく後続部分より成る。断面の平均的な乱流強度が  $V$  に比例するとすれば、先端移動速度が大きい程、 $V$  と  $V_f$  との比 ( $V_f/V$ ) が小さくなる。よって、 $V$  が一定である完全浮遊状態の濁水先端部が長くなると考えられる。 $V$  が大きいのは  $\varepsilon$  が大の時、即ち高濃度の場合であり、 $\varepsilon$  が小さい時は、その逆となる。図-8の傾向性は以上のように説明できる。従って、gravity-inertia region から粒子の沈降が流れに影響を及ぼす領域への遷移時間を  $t_t$  とすると、上記の条件下において濁水中層密度流の先端移動速度は、

$$V = V_0 \quad (0 \leq t/t_t < 1) \quad (7a)$$

$$= V_0 (t/t_t)^{-0.15} \quad (t/t_t \geq 1) \quad (7b)$$

で与えられる。

$\beta = 0.0161$  の場合の勾配は最初から約0.86であり、 $t \approx 150 \text{ sec}$  でさらに勾配が減少する。これは、流入濁水の濃度が小さい場合、frontの流動速度は遅く浮遊粒子は直ちに沈降を開始することが前者の理由であり、実験水槽が有限水深であるため、沈降してきた粒子群によって引き起こされた下層密度流によって、中層と下層との間に強い逆流が生じ、その結果、先端移動速度が更に、遅くなることが後者の理由と考えられる。他の  $\beta$  値では、この逆流による減少傾向は見られなかった。これは測定時間内に下層流が形成され無かったためである。式(7)を検証したのが図-9である。固-液混相中層密度流では、先端移動速度は一定ではなく減少し、流下と共に初期流速からのずれが顕著となることが判る。



(b) 流量 ( $Q$ )

図-6 進入長 ( $L$ ) と時間 ( $t$ ) の関係  
(塩水中層密度流)

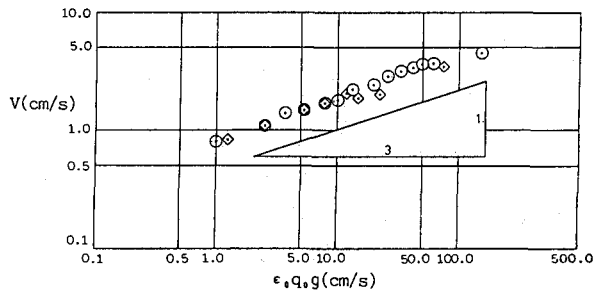


図-7 塩水中層密度流の先端移動速度 ( $V$ )

## 5. 結論

本報告では、沈降性微細粒子による濁水中層密度流と沈降性が無視できる程小さい微細粒子を擬した塩水中層密度流との流動特性の比較を試みた。濁水中層流では流下に伴い流動層から粒子が離脱沈降していくため、浮力fluxが保存される通常の中層密度流とは、その流動形態が著しく異なることを実験的に明らかにした。濁水中層流の先端移動速度は、frontの流下に伴う浮力fluxの減少効果のため、塩水の場合とは異なり一定とはならず、速度のずれが顕著となる。この減速効果のため、濁水中層密度流の先端移動速度は初期速度を失い、徐々に遅くなる事が認められた。

本研究では下層密度の効果や粒子の性質は考察されていない。これらは上述の減速率を決定する重要な要因であるので、今後に残された問題も多い。これらの点について、更に研究を進めていく予定である。

本研究の遂行に当たり、九州大学工学部水工土木学科粟谷陽一教授、松永信博助手、柴田敏彦技官から貴重な教示及び援助を受けた。実験並びにデータ整理に熱心に協力された高畑研君（4年生）、竹原幸生君（M2）、山本賢一君（M1）に心甚なる謝意を表す。尚、本研究は服部報公会の援助を得て行なったものである。

## 6. 参考文献

1. Didden, N and Maxworthy, T. (1982) "The Viscous Spreading of Plane and Axisymmetric Gravity Currents", J. of Fluid Mech., vol. 121, pp. 27~42
2. 福岡捷二、福岡祐介 (1980) "成層化した2次元貯水池中で分岐する密度流の解析的研究" 土木学会論文報告集、第294号、pp.73~84
3. 平野宗夫、羽田野袈裟義 (1981) "密度流先端部の流動特性について" 土木学会論文報告集、第314号、pp.67~73
4. Kao, T. W. (1977) "Density Currents and Their Applications", J. of Hydraulic Div., ASCE, vol. 103, HY. 5, pp. 543~555
5. Maxworthy, T. (1972), "Experimental and Theoretical Studies of Horizontal Jets", Int. sym. on Stratified Flow, Novosibirsk, pp. 611~618

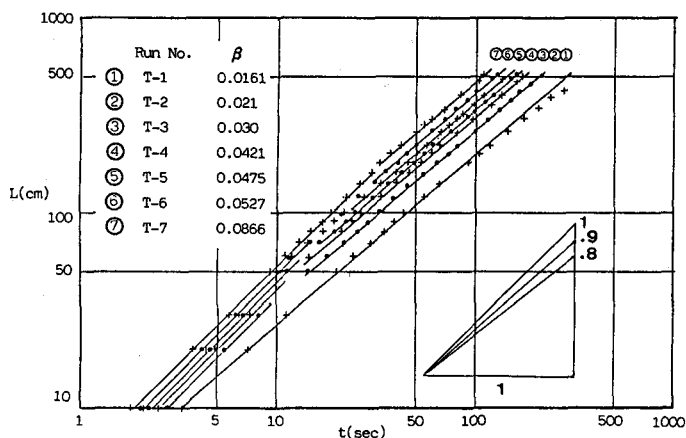


図-8 進入長 (L) と時間 (t) の関係  
(濁水中層密度流)

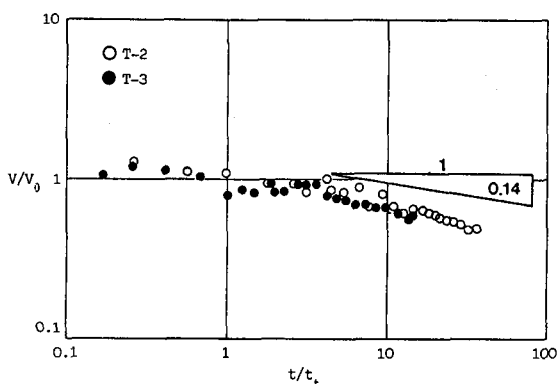


図-9 濁水中層密度流の先端移動速度 (V)