

# 傾斜路床上における泥水塊の挙動に関する研究

芦田 和男・江頭 進治・中川 一

## BEHAVIOUR OF TURBID WATER MASS RELEASED INTO TWO DIMENSIONAL RESERVOIR

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Hajime NAKAGAWA

### Synopsis

Turbid water with a prescribed volume flowing into fresh water, a turbidity current like thermals is formed, which we call "turbid water mass".

We carried out theoretical study on the behaviour of turbid water mass, and proposed physical and mathematical model for the wave height, density and advancing velocity of the head. Then, the parameters introduced in the model were investigated by experiments. Using these values of the parameters, applicability of the theory on the behaviour of the head was discussed.

### 1. 緒 言

近年、貯水池の堆砂や濁水現象は治水・利水および水環境に対して種々の被害を与えており、その機構の解明とそれに基づく現象の予測ならびに適切な対策は緊急を要する課題となっている。

著者らは、密度流による土砂輸送がこういった問題の中でかなり大きな影響をもち、その流動特性の解明が重要な課題の一つであると考えている。密度流研究は最近活発に行われてきており、その結果、定常給水時に形成される密度流定常部の流速分布、密度分布および界面抵抗などの諸特性がかなり明らかにされてきた<sup>1),2),3)</sup>。しかし、密度流先端部の移動速度、波高および密度などが時間的・場所的にどのように変化するかといった問題に対しては、解明すべき多くの問題が残されている。

こういった問題は最初、福岡ら<sup>4)</sup>によって論じられた。彼らは、先端部形状を簡単にモデル化することにより、体積連続関係、質量保存則および運動量保存則を用いて先端部の非定常運動を考察した。しかしながら、先端部の形状のモデル化や運動量保存則にさらに検討の余地があるように思われる。著者らは、福岡らのモデルとオーバーハングに関する Simpson の研究<sup>5)</sup>を参考にして路床とオーバーハング高さとの間の周囲水の取り込みによる連行を考慮したモデルを考案した<sup>6)</sup>。そのモデルに関して、体積、質量および運動量保存則をたて、移動速度、密度および波高の時間変化を求めた。これらの研究以外にも平野ら<sup>7)</sup>の研究などがあるが、いずれも連行および抵抗の評価については十分とは言えず、今後の研究に待つ所が多い。

定常給水時に形成される密度流については以上のような研究が行われており、それによって得られた知見は、貯水池密度流や海底で発生する乱流の問題を扱ううえで有用である。しかし、実際の密度流は、貯水池への洪水流入や海底陸棚の崩壊などに伴って形成されるため、非定常性の強い現象である。したがって、エネルギー、運動量および給水量などの供給条件が非定常な場合に形成される密度流、すなわち泥水塊や冷水塊などの挙動特性に関する研究が不可欠である。ここに、冷水塊および泥水塊とは、それぞれ水温差および浮遊物質の濃度差に起因した密度差によって形成される密度流の一形態であり、非定常な供給条件下で形成されるものをいう。

本研究では、こういった流塊のうちとくに泥水塊をとりあげ、混合が活発で流動層の厚い先端部と、流動

層厚がしだいに薄くなっていく後方部分の挙動に注目し、流塊の流動特性に関して理論的・実験的考察を行う。

以下第2章においては泥水塊に関する支配方程式を提案するとともに、先端部については種々の仮定やパラメータを導入し、波高、密度および流下速度に関して支配方程式を解き、それぞれの発達および減衰領域を求める。第3章においては、実験方法について概説し、流塊の形状、流速および濃度分布、さらには先端部における混合現象についても若干の実験的考察を行うとともに、第2章で導入した種々のパラメータについて検討する。第4章においては、第2章で提案した理論の適用性を検討する。

## 2. 流塊の挙動に関する理論的考察

### 2.1 基礎方程式

座標系および下層流れの模式図を Fig. 1 に示す。ここで、上層および下層の断面平均流速および密度は、それぞれ  $u_1, \rho_1$  および  $u_2, \rho_2$ 、それぞれの層厚および全水深は  $h_1, h_2$  および  $H$ 、密度境界面および底面でのせん断応力は  $\tau_i$  および  $\tau_b$  である。また、底面に沿って主流の向きに  $x$  軸、これより垂直上向きに  $z$  軸、底面が水平面となす角を  $\theta$  とする。いま、二次元流れ、およびブシネスク近似が成り立つものとして、微小項を省略すると運動方程式は次式のように表わせる。

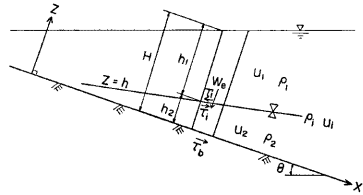


Fig. 1. Flow pattern of two layer model and coordinate system.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) = \frac{\rho}{\rho_0} g \sin \theta - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau}{\partial z} \dots (1)$$

ここに、 $u, w$ : 流速の  $x, z$  成分、 $\rho$ : 密度、 $\rho_0$ : 基準密度であって、 $\rho_1, \rho_2$  のいずれでもよい。また、 $p$ : 圧力、 $\tau$ : せん断応力である。なお、これらの諸量は全て時間平均量であり、以下、断わらない限り同様である。また、非圧縮性流体の連続式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots (2)$$

泥水塊の場合、浮遊物質を多量に含むために沈降速度の影響を考慮する必要がある。このとき、質量保存則は次式のように表わせる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu) + \frac{\partial}{\partial z}(cw) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial c}{\partial z} \dots (3)$$

ここに、 $c$ : 濃度、 $\epsilon_s$ : 浮遊物質拡散係数の  $z$  成分、 $w_0$ : 沈降速度である。

(2)および(3)式を底面 ( $z=0$ ) から界面 ( $z=h_2$ ) まで積分すると、下層に関する一次元の体積連続式および質量保存則が、それぞれつぎのように求まる<sup>8)</sup>。

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_2 h_2) = W_s \dots (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial x}(c_2 u_2 h_2) = c_1 W_s + \beta w_0 c_2 \dots (5)$$

ここに、 $W_s$ : 上層から下層への連行速度、 $c_1, c_2$ : 上層および下層の断面平均濃度、 $\beta$ : 侵食および堆積の効果を考慮した係数で、 $\beta w_0 c_2 = -\{\epsilon_s \partial c / \partial z|_{z=0} + w_0 c|_{z=0}\}$  である。また、圧力  $p$  を  $p = p_s + p_i$  ( $p_s$ : 静水圧、 $p_i$ : 変動圧) とおくと、圧力勾配は、 $\partial p / \partial x = \rho_1 g \sin \theta + \cos \theta \partial / \partial x \int_0^{h_2} \rho g dz + \partial p_i / \partial x$  ( $\Delta \rho = \rho - \rho_1, \rho_1 =$

const) のように表示できる。これを(1)式に適用して若干の演算を行うと、下層に関する一次元運動量式が次式のように導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial x}(u_2^2 h_2) - u_1 W_s = \frac{4\rho_2}{\rho_0} g h_2 \sin \theta - \frac{1}{2} \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{4\rho_2}{\rho_0} g h_2^2 \right) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (\rho_1 h_2) + \frac{\tau_1 - \tau_2}{\rho_0} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $4\rho_2 = \rho_2 - \rho_1$ 、 $u_1$  は界面流速であって、 $u_1 = 0$  とすれば  $u_1 W_s = 0$  とおける。

Fig. 2 は、泥水塊に関する流れの模式図と記号を示したものである。 $u_1$ 、 $\rho_1$  および  $h_1$  はそれぞれ先端

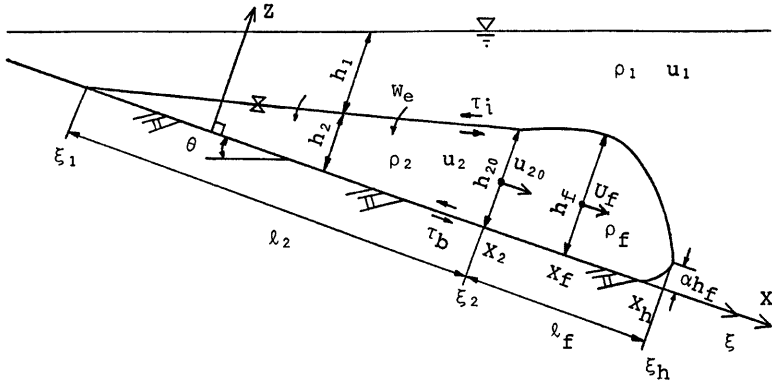


Fig. 2. Flow pattern of turbid water mass and definition sketch.

部重心の移動速度、密度および波高、 $ah_f$  はオーバ－ハング高さである。流塊先端部と後方部との接続断面における流速、密度および波高はそれぞれ  $u_{20}$ 、 $\rho_{20}$  および  $h_{20}$  である。また同図には、流塊先端部の流下速度で移動する移動座標系が示されており、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  および  $\xi_h$  はそれぞれ、流塊後端、接続点および最先端の  $\xi$  座標であって、 $l_2 = \xi_2 - \xi_1$ 、 $l_f = \xi_h - \xi_2$  である。

つぎに、基礎式をこの移動座標系に変換する。座標変換の式およびその微分形はそれぞれ(7)および(8)式で与えられる。

$$t_* = t, \quad \xi = u - x_f(t), \quad z_* = z \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t_*} - U_f(t_*) \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z_*} \dots \dots \dots (8)$$

この座標系を用いると、(4)、(5)および(6)式は、それぞれ次式のように表示される。ただし  $t_*$  の \*印は省略してある。

$$\text{体積保存則} : \frac{\partial h_2}{\partial t} - U_f \frac{\partial h_2}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi}(u_2 h_2) = W_s \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{質量保存則} : \frac{\partial}{\partial t}(c_2 h_2) - U_f \frac{\partial}{\partial \xi}(c_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial \xi}(c_2 u_2 h_2) = c_1 W_s + \beta w_0 c_2 \dots \dots \dots (10)$$

$$\begin{aligned} \text{運動量保存則} : & \frac{\partial}{\partial t}(u_2 h_2) - U_f \frac{\partial}{\partial \xi}(u_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial \xi}(u_2^2 h_2) - u_1 W_s \\ & = g' h_2 \sin \theta - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \xi}(g' h_2^2 \cos \theta) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_1}{\partial \xi} h_2 + \frac{\tau_1 - \tau_2}{\rho_0} \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 $g' = \Delta\rho/\rho_0 \cdot g$  である。

流塊の先端部とそれに続く流れとはきわめて異なった挙動を示す。たとえば、先端部ではその最先端が水路床より少しもちあがり、そこから周囲水が取り込まれ、激しい混合が起こる。その結果、取り込まれた流体は力学的不安定を起こして上方に運ばれ、先端部が移動するために先端内部から流出し、後方に残されていく。一方、後方部の流れは、定常密度流の場合に形成されるような等流部分とは異なり、流動層厚は後方ほど薄く、漸変二層流的な挙動を呈する。このように、流塊の先端部分と後方部分とでは、挙動特性がきわめて異なることから、流塊を先端部分とそれに続く後方部分とに分割して解析を進める。

2.2 流塊後方部の挙動に関する数値モデル

(9), (10)および(11)式を  $\xi_1$  から  $\xi_2$  まで積分することにより、流塊後方部の支配方程式を誘導しよう。まず、体積保存則を導く。(9)式を積分表示すると次式となる。

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\partial h_2}{\partial t} d\xi - \int_{\xi_1}^{\xi_2} U_f \frac{\partial h_2}{\partial \xi} d\xi + \int_{\xi_1}^{\xi_2} u_2 \frac{\partial}{\partial \xi} (u_2 h_2) d\xi = \int_{\xi_1}^{\xi_2} W_e d\xi \dots\dots\dots (12)$$

ここで、(12)式の各項についてそれぞれつぎのような演算を行う。

左辺第一項 =  $\frac{\partial}{\partial t} \int_{\xi_1}^{\xi_2} h_2 d\xi - h_2(\xi_2) \frac{\partial \xi_2}{\partial t} + h_2(\xi_1) \frac{\partial \xi_1}{\partial t}$

左辺第二項 =  $-U_f \{h_2(\xi_2) - h_2(\xi_1)\}$

左辺第三項 =  $u_2(\xi_2) h_2(\xi_2) - u_2(\xi_1) h_2(\xi_1)$

右辺第一項 =  $\bar{W}_e l_2$

ここに、 $\bar{W}_e$  は平均連行速度である。ここで、 $h_2(\xi_1) = 0$  および  $\int_{\xi_1}^{\xi_2} h_2 d\xi = A_2$  とおき、これらの関係を(12)式に用いると次式を得る。

$$\frac{\partial A_2}{\partial t} - h_2(\xi_2) \frac{\partial \xi_2}{\partial t} - U_f h_2(\xi_2) + u_2(\xi_2) h_2(\xi_2) = \bar{W}_e l_2 \dots\dots\dots (13)$$

さらに、 $h_2(\xi_2) = h_{20}$ ,  $u_2(\xi_2) = u_{20}$ ,  $q_0 = u_{20} h_{20}$  および  $r = U_f / u_{20} + \partial \xi_2 / \partial t / u_{20} - 1$  とおいて、上式を整理すると、後方部分に関する体積保存則は次式のようになる。

$$\frac{dA_2}{dt} = r q_0 + \bar{W}_e l_2 \dots\dots\dots (14)$$

つぎに、質量保存則を導く。(10)式を積分表示すると次式となる。

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\partial}{\partial t} (c_2 h_2) d\xi - \int_{\xi_1}^{\xi_2} U_f \frac{\partial}{\partial \xi} (c_2 h_2) d\xi + \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\partial}{\partial \xi} (c_2 u_2 h_2) d\xi = \int_{\xi_1}^{\xi_2} c_1 W_e d\xi + \int_{\xi_1}^{\xi_2} \beta w_0 c_2 d\xi \dots (15)$$

ここで、上式の各項について、(13)式を誘導したときと同様の演算を行うと、次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{c}_2 A_2) = \{U_f + \frac{\partial \xi_2}{\partial t} - u_2(\xi_2)\} c_2(\xi_2) h_2(\xi_2) + \bar{c}_1 \bar{W}_e l_2 + \beta w_0 \bar{c}_2 l_2 \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $\bar{c}_2 A_2 = \int_{\xi_1}^{\xi_2} c_2 h_2 d\xi$  である。いま、 $\bar{c}_2 = \bar{c}_1 + \Delta c$  とおくと、 $\Delta \bar{c}_2 = \text{const} \times \Delta c$  と書ける。この関係および(14)式に用いて上式を変形し、 $\bar{c}_1 = 0$  とすると、後方部分に関する質量保存則が次式のように得られる。

$$A_2 \frac{d\Delta \bar{c}_2}{dt} = -r \Delta \bar{c}_2 (1 - \frac{\Delta \rho_{20}}{\Delta \bar{\rho}_2}) q_0 - \Delta \bar{c}_2 \bar{W}_e l_2 + \beta \Delta \bar{c}_2 w_0 l_2 \dots\dots\dots (17)$$

流塊の後方部分においては、先端部近傍に形成されるような局所的な流れはみられない。したがって、静水圧近似がほぼ満たされることが推察される。そこで、運動量保存則を導くにあたり、(11)式右辺第三項を省略し、これを  $\xi_1$  から  $\xi_2$  の区間において積分表示すると次式のようになる。

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\partial}{\partial t} (u_2 h_2) d\xi - \int_{\xi_1}^{\xi_2} U_f \frac{\partial}{\partial \xi} (u_2 h_2) d\xi + \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\partial}{\partial \xi} (u_2^2 h_2) d\xi - \int_{\xi_1}^{\xi_2} u_1 W_f d\xi$$

$$= \int_{\xi_1}^{\xi_2} g' h_2 \sin \theta d\xi - \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \xi} (g' h_2^2) \cos \theta d\xi + \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\tau_1 - \tau_2}{\rho_0} d\xi \dots \dots \dots (18)$$

ここで、上式の各項を展開し、若干の変形を行うと次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_2 A_2) + \{u_2(\xi_2) - U_f - \frac{\partial \xi_2}{\partial t}\} u_2(\xi_2) h_2(\xi_2)$$

$$= g' A_2 \sin \theta - \frac{1}{2} g'(\xi_2) h_2^2(\xi_2) \cos \theta + \frac{\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2}{\rho_0} l_2 \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 $(\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2) l_2 / \rho_0 = \int_{\xi_1}^{\xi_2} (\tau_1 - \tau_2) / \rho_0 \cdot d\xi$ 、 $g' A_2 = \int_{\xi_1}^{\xi_2} g' h_2 d\xi$ 、 $g' = \Delta \rho_2 / \rho_0 \cdot g$ 、 $U_2 A_2 = \int_{\xi_1}^{\xi_2} u_2 h_2 d\xi$  である。なお、上式の誘導に際し、 $u_1 = 0$  と仮定されている。

上式に(14)式を代入すると、後方部分に関する運動方程式がつぎのように得られる。

$$A_2 \frac{dU_2}{dt} = r U_2 (u_{20} / U_2 - 1) q_0 - U_2 \bar{W}_f l_2 + \frac{\Delta \rho_2}{\rho_0} g A_2 \sin \theta - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho_{20}}{\rho_0} g h_{20}^2 + \frac{\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2}{\rho_0} l_2 \dots \dots \dots (20)$$

以上が、流塊後方部分を一つの mass としてみた場合の支配方程式である。

**2.3 先端部の挙動に関する数理モデル**

前述したように流塊の後方部分は成層流的な流動特性を示すのに対し、先端部近傍においては顕著な局所流が形成され、もはや静水圧近似が成り立たなくなるとともに連行機構も後方部のそれとは異なったものになる。しかし、このような相違点を別の形で評価できるものとする、2.2 の場合と同様、(9)、(10) および(11)式を  $\xi_2$  から  $\xi_h$  まで積分することにより、先端部を一つの mass としてみた場合の体積、質量および運動量保存則を導くことができる。先端部という意味で各諸量に添字  $f$  を付けてこれらの結果を示すとそれぞれ次式のようなものである。

$$\frac{dA_f}{dt} = -r q_0 + q_f \dots \dots \dots (21)$$

$$A_f \frac{d\Delta \bar{p}_f}{dt} = r (\Delta \bar{p}_f - \rho_{20}) q_0 - \Delta \bar{p}_f q_f + \beta u_0 \Delta \bar{p}_f \dots \dots \dots (22)$$

$$A_f \frac{dU_f}{dt} = \frac{\Delta \bar{p}_f}{\rho_0} A_f g \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho_{20}}{\rho_0} h_{20}^2 \cos \theta + r (U_f - u_{20}) q_0 - U_f q_f - \frac{1}{2} C_D h_f U_f^2 + \frac{\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2}{\rho_0} l_f \dots \dots (23)$$

ここに、 $A_f = \int_{\xi_2}^{\xi_h} h_2 d\xi$ 、 $\Delta \bar{p}_f A_f = \int_{\xi_2}^{\xi_h} \Delta \rho_2 h_2 d\xi$ 、 $A_f U_f = \int_{\xi_2}^{\xi_h} u_2 h_2 d\xi$ 、 $(\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_2) l_f / \rho_0 = \int_{\xi_2}^{\xi_h} (\tau_1 - \tau_2) / \rho_0 \cdot d\xi$  である。また、 $q_f$  は周囲水の先端部への連行量であり、 $C_D$  は偏差圧力項  $\int_{\xi_2}^{\xi_h} \partial p_1 / \partial \xi / \rho_0 \cdot h_2 d\xi$  に起因する抵抗を表すするための形状抵抗係数であって、これらはそれぞれ次式のように定義されている。

$$q_f = \int_{\xi_2}^{\xi_h} \bar{W}_f d\xi \dots \dots \dots (24)$$

$$C_D = \frac{2}{\rho_0 U_f^2 h_f} \int_{\xi_2}^{\xi_h} \frac{\partial}{\partial \xi} (p_1 h_2) d\xi \dots \dots \dots (25)$$

ここに、 $\bar{\tau}_1$  および  $\bar{\tau}_2$  は  $\xi_2$  と  $\xi_h$  区間の平均値である。

以上、泥水塊先端部に関する支配方程式が、それぞれ(21)、(22)および(23)式のように導かれた。

**2.4 先端部に関する支配方程式の特性**

先端部の挙動を解析し、その特性を検討するため、つぎのような定義および仮定を行う。

(I)先端部における連行量  $q_e$  は、先端部のオーバーハング高さ $\beta$ と底面との間における周囲水の取り込みによって評価されるものとして、これを次式のようにおく。

$$q_e = \alpha h_f U_f \dots\dots\dots (26)$$

(II)泥質の沈降および巻き上げの影響を省略し、 $\beta=0$  とおく。

(III)形状パラメータを導入し、これらをつぎのように表わす。

$$k_{s1} = h_{20}/h_f, \quad k_{s2} = l_f/h_f, \quad k_{s3} = -\xi_2/h_f, \quad k_{s4} = A_f/h_f^2 \dots\dots\dots (27)$$

(IV)流速および密度に関するパラメータを導入し、これらを次式で定義する。

$$k_p = u_{20}/U_f, \quad k_\rho = \Delta\rho_{20}/\Delta\bar{\rho}_f \dots\dots\dots (28)$$

さらに、 $\bar{v}_1 - \bar{v}_2 = 1/2 \cdot \rho_0 (f_1 + f_2) U_f^2$  とおき、以下、形状、流速および密度分布が相似性を保持する領域の現象を対象にし、これらに関するパラメータおよび連行を表示する無次元数  $\alpha$ 、形状抵抗係数  $C_D$ 、界面および底面の抵抗係数  $f_i$ 、 $f_s$  が時間的に変化しない場合を考える。

以上の仮定および定義を(21)~(23)式に適用すると次式が得られる。

$$dh_f/dt = b_1 U_f \dots\dots\dots (29A) \quad dh_f/dx = b_1 \dots\dots\dots (29B)$$

$$d\Delta\bar{\rho}_f/dt = b_2 \Delta\bar{\rho}_f U_f/h_f \dots\dots\dots (30A) \quad d\Delta\bar{\rho}_f/dx = b_2 \Delta\bar{\rho}_f/h_f \dots\dots\dots (30B)$$

$$dU_f/dt + b_4 U_f^2/h_f = b_3 \Delta\bar{\rho}_f g/\rho_0 \dots\dots (31A) \quad U_f dU_f/dx + b_4 U_f^2/h_f = b_3 \Delta\bar{\rho}_f g/\rho_0 \dots\dots (31B)$$

ここに、 $U_f dt = dx$  で、 $b_1, b_2, b_3$  および  $b_4$  はそれぞれ次式のようなものである。

$$b_1 = \{k_{s1}(k_u - 1) + \alpha\} / (2k_{s4} - k_{s1}k_{s3}) \dots\dots\dots (32)$$

$$b_2 = k_{s1}/k_{s4} \cdot \{(1 - k_u)(1 - k_\rho) - b_1 k_{s3}(1 - k_\rho) - \alpha/k_{s1}\} \dots\dots\dots (33)$$

$$b_3 = 1/k_{s4} \cdot (k_u \tan\theta + 1/2 \cdot k_p k_{s1}^2) \cos\theta \dots\dots\dots (34)$$

$$b_4 = -k_{s1}(1 - k_u)^2 + b_1 k_{s1} k_{s3}(1 - k_u) + \alpha + 1/2 \cdot C_D \{1 + k_{s2}/C_D \cdot (f_1 + f_s)\} \dots\dots\dots (35)$$

(29B), (30B)および(31B)式を解くと、先端部波高  $h_f$ 、密度  $\Delta\bar{\rho}_f$  および流下速度  $U_f$  について、それぞれ次式を得る。

$$h_f/h_{f0} = b_1 x_* + 1 \dots\dots\dots (36)$$

$$\Delta\bar{\rho}_f/\Delta\bar{\rho}_{f0} = (b_1 x_* + 1)^{b_2/b_1}, \quad (b_1 \neq 0) \dots\dots\dots (37A)$$

$$\Delta\bar{\rho}_f/\Delta\bar{\rho}_{f0} = \exp(b_2 x_*), \quad (b_1 = 0) \dots\dots\dots (37B)$$

$$(U_f/U_{f0})^2 = 2b_3/(b_1 + b_2 + 2b_4) \cdot \{(b_1 x_* + 1)^{\alpha_1 + b_2 + 2b_4/b_1} - 1\} F_{10}^2 + (b_1 x_* + 1)^{-2b_4/b_1}, \quad (b_1 \neq 0) \dots\dots (38A)$$

$$(U_f/U_{f0})^2 = 2b_3/(b_2 + 2b_4) \cdot F_{10}^2 e^{b_2 x_*} + \{1 - 2b_3/(b_2 + 2b_4) \cdot F_{10}^2\} \exp(-2b_4 x_*), \quad (b_1 = 0) \dots\dots (38B)$$

ここに、 $x_* = x/h_{f0}$ 、 $F_{10}^2 = \rho_0 U_{f0}^2 / \Delta\rho_{f0} g h_{f0}$  で、 $h_{f0}$ 、 $\Delta\rho_{20}$  および  $U_{f0}$  は  $x=0$  における値である。これらの議論より明らかなように、 $h_f$ 、 $\Delta\bar{\rho}_f$  および  $U_f$  の発達・減衰は、先に導入した形状、流速、密度などのパラメータによって規定される。そこで、以下これらについて検討しよう。なお、発達・減衰は増・減の意味にも使われる。

まず、波高の発達・減衰領域について調べる。(29A, B) および (36) 式からもわかるように、 $h_f$  の発達・減衰領域は  $b_1=0$ 、すなわち次式

$$k_{s1}(k_u - 1) + \alpha = 0 \dots\dots\dots (39)$$

で示される曲線を境界として定まる。**Fig. 3** は  $(k_{11}, k_2)$  平面上における  $h_f$  の発達・減衰領域について、 $\alpha$  をパラメータとして示したものである。図に示すように、 $\alpha$  が大きくなって先端からの周囲水の連行量が増加すると  $h_f$  の発達領域は拡大する。換言すると、 $k_2 < 1$  の条件、つまり、後方部から流体の供給がないような条件においても先端からの連行だけによって  $h_f$  が発達する領域が現われる。逆に、連行量が減少して  $\alpha = 0$  となった条件における発達領域は、 $k_2 > 1$  のときにしか存在しない。すなわち、後方部分から先端部への流体の輸送があるときにのみ波高は発達する。

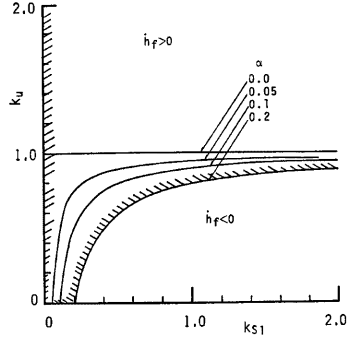


Fig. 3. The domains of increase and decrease for  $h_f$ . ( $\cdot = \frac{d}{dt}$ )

つぎに、密度の発達・減衰領域について調べる。(30A, B) および (37A, B) 式からもわかるように、 $\Delta \bar{\rho}_f$  の発達・減衰は  $b_2 = 0$  すなわち次式

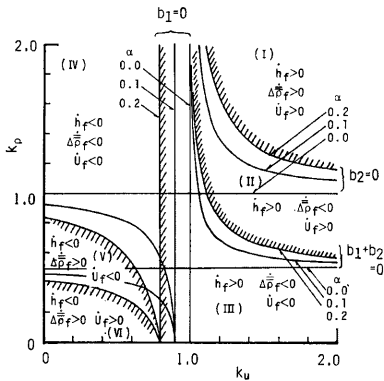
$$(1 - k_2)(1 - k_p) - b_1 k_{13}(1 - k_p) - \alpha / k_{11} = 0 \dots \dots \dots (40)$$

で示される曲線を境界として定まる。さらに、流下速度  $U_f$  の発達・減衰は、 $b_1 + b_2 = 0$ , ( $b_1 > 0$ ,  $b_2 < 0$ ), すなわち波高が増加するに伴って密度が減少し、 $U_f$  が一定となる条件

$$k_p = \frac{1}{2} + \frac{\alpha(2k_{14} - k_{11}k_{13})}{2(2k_{11}k_{14}k_2 - 2k_{11}k_{14} + \alpha k_{11}k_{13})} \dots \dots \dots (41)$$

で示される曲線を境界として定まる。

**Fig. 4** には、 $k_{11} = 0.95$ ,  $k_{12} = 4$ ,  $k_{13} = 2$ ,  $k_{14} = 4$  として、 $\alpha$  をパラメータに  $h_f$ ,  $\Delta \bar{\rho}_f$  および  $U_f$  の発達・減衰領域が示されている。同図において、各々の境界が(39), (40)および(41)式で示され、それぞれの発達領域は、 $b_1 > 0$ ,  $b_2 > 0$  および  $b_1 + b_2 > 0$ , 減衰領域は  $b_1 < 0$ ,  $b_2 < 0$  および  $b_1 + b_2 < 0$  である。図に示すように、流塊先端部の波高、密度および流下速度の発達・減衰は、流塊先端部の形状パラメータ、流速および密度分布に関するパラメータによって変化するが、上述の形状パラメータの条件下における発達・減衰は(I)~(VI)のように分類できる。



領域	$h_f$	$\Delta \bar{\rho}_f$	$U_f$
(I)	発達	発達	発達
(II)	発達	減衰	発達
(III)	発達	減衰	減衰
(IV)	減衰	減衰	減衰
(V)	減衰	発達	減衰
(VI)	減衰	発達	発達

Fig. 4. The domains of increase and decrease for  $h_f$ ,  $\Delta \bar{\rho}_f$  and  $U_f$ . ( $\cdot = \frac{d}{dt}$ )

とくに、領域(VI)においては、波高が減少するにもかかわらず、密度および流下速度が増加するという場合が起こる。これは、流塊先端部分から濁質以外の流体が流出し、その結果、波高が減少し、高濃度の先端部分を形成するために密度差が増大して流下速度も増加するという現象を示すものであると考えられる。しかし、こういった現象は、実際現象では考えにくく、数理モデルの適用外の領域とみなせる。

最後に、流下速度が一定となる条件を調べてみよう。まず、(38B)式についてみると、一般に  $b_3, b_4 > 0$  であるから右辺第二項は  $x_*$  が大きくなると 0 に近づく。この場合、先端部の流下速度およびそのときの条件は次式のようになる。

$$U_f = \sqrt{b_3/b_4} \sqrt{\Delta\rho_{f0}/\rho_0 \cdot gh_{f0}}, \quad k_p = 1, \quad \alpha = 0 \dots\dots\dots(42)$$

上式において、 $\tan\theta \ll 1$ ,  $k_p = 1$  および  $k_{t2}(f_1 + f_2) \ll C_D$  のとき、 $\sqrt{b_3/b_4} = \sqrt{k_{t1}^2/k_{t4}C_D}$  となり、先端部の流下速度に関する古典的な推定式と等価になる。また、 $b_1 + b_2 = 0$  のときも、 $x_* \rightarrow \infty$  とすると(42)式と同じ式を得る。

### 3. 流塊の挙動に関する実験的考察

ここでは、主として流塊の形状、先端部移動距離の時間変化、流速および濃度分布などに関する実験結果に基づき、前章で提示した数理モデルに含まれるパラメータについて検討する。

#### 3.1 実験装置および実験方法

実験水槽は、Fig. 5 に示すように、長さ 13.1m、幅 0.5m、深さ 0.5m の長方形断面の勾配可変水槽で、上流  $x = 4.3\text{m}$  より下流端  $x = 13.1\text{m}$  までは両面ガラス張りである。その他の主要な装置は、給用水槽①、これに付属する三方コック②、泥水を作るための混合水槽③、流量検定用水槽④、および給水ポンプな

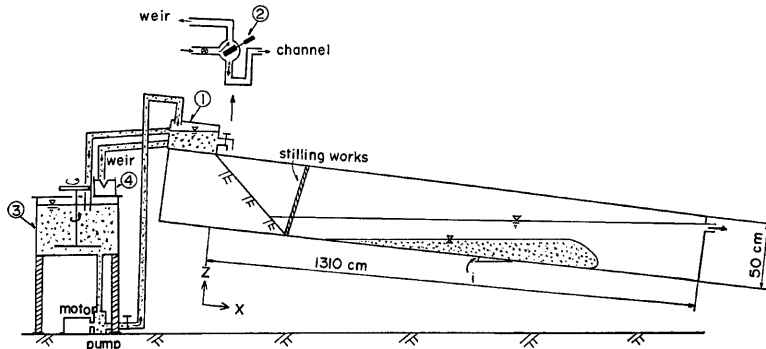


Fig. 5. Experimental apparatus.

どであって、混合水槽には 0.4kw の攪拌器が設けられている。ここで、三方コックは、③→①→④→③の経路で循環している泥水を実験水槽内へ所定の時間だけ供給するためのものである。また、給用水槽①は、水位を一定に保つことができ、流量の設定は、ポンプに付属した TS バルブと流量検定用水槽のポイントゲージとの読みによって行われる。

測定装置は、濃度測定用の光電管式濃度計 2 台、水温計測用ガラスサーミスタ温度計（センサー数 14 本）、6 打点式サーミスタ温度計 2 台、流速分布測定用（冷水塊実験）水素気泡発生器 1 台、8 mm および 16 mm ムービーカメラなどである。また、これらの測定器のうち、濃度計 2 台は測定用台車とこれに取り付けられている自動昇降装置によって、水深方向および流れ方向に自由に移動できる。



つぎに、実験方法を要約すると以下のようである。

水槽内に水道水あるいは地下水で一樣水温場を作り、比重2.66、中央粒径  $d_{50}=0.03\text{ mm}$  のパールクレイを用いて作った泥水を、水槽上流端より一定流量  $Q$ 、一定時間  $dt$  だけ給水し、泥水塊を発生させた。なお、水温差に起因した密度差が生じないように、泥水の水温と水槽内の水温を同一にした。

濃度分布を測定するために、つぎのような方法がとられた。水槽上に置かれた2台の台車に自動昇降器を固定し、これに濃度センサーを取り付け、台車間隔を一定に保ち、先端の移動速度と同じ速度で台車を動かしながら自動昇降器を上下させることにより、断面濃度を測定した。この方法によると、流塊が流下する過程で自動昇降器の上下動を行うと、ある深さにおける濃度の時間変化が知れる。このようにして任意の時刻におけるある断面の濃度分布が測定できる。

上記のような測定方法によって、先端部より0.5mおよび2.6m 後方部分の断面濃度分布を得た。また、同一実験条件のもとでくり返し実験を行い、先端から1.0mおよび3.1m 後方の濃度分布を得た。

形状は8mmおよび16mm ムービーカメラで撮影し、フィルム解析から求めたものと、濃度および水温計測から求めたものを併用した。流塊先端の移動距離と時間との関係は目視によって計測された。なお、流速分布は、冷水塊と泥水塊とでは流れの構造がほぼ同じであると考えられるので、冷水塊を対象として水素気泡によって測定した<sup>9)</sup>。

このような装置および方法によって、給水時間について、20秒、40秒および60秒、勾配 1/200、1/100、1/80、1/60の4通り、計12ケースの泥水塊の実験を行った。また、定常給水時の実験も2ケース行い、泥水塊との比較を行った。なお、下流端の境界条件は自由越流形式をとり、水槽内の水位が上昇しないようにした。実験条件は **Table 1** に示すとおりである。ここに、 $Q$ : 流入流量、 $q$ : 単位幅流量、 $i$ : 路床勾配、 $dt$ : 給水時間、 $T_a$ : 周囲水温、 $T_{in}$ : 流入水温、 $c_{in}$ : 流入水濃度、 $\Delta\rho$ : 流入水と周囲水との密度差である。

以下、Exp. 15-47, 48, 49および53について考察する。なお、得られた実験結果を **Table 2, 3, 4** およ

Table 1 Experimental conditions.

Exp.No.	$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$q$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$i$	$\Delta t$ (sec)	$T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$C_{in}$ (%)	$\Delta\rho/\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
15-47 I	1455	29.10	1/100	60	20.9	20.9	0.338	0.00211
II	"	"	"	60	22.2	22.2	0.338	0.00211
15-48 I	"	"	"	40	22.0	22.0	0.414	0.00258
II	"	"	"	40	22.2	22.2	0.534	0.00333
15-49 I	"	"	"	20	18.2	18.2	0.321	0.00200
II	"	"	"	20	18.5	18.2	0.317	0.00198
15-50 I	1455	29.10	1/80	60	20.0	20.0	0.380	0.00237
II	"	"	"	60	21.0	21.0	0.398	0.00248
15-51 I	"	"	"	40	21.4	21.4	0.580	0.00361
II	"	"	"	40	22.0	22.0	0.580	0.00361
15-52 I	"	"	"	20	17.8	17.8	0.316	0.00197
II	"	"	"	20	18.1	18.1	0.314	0.00196
15-54	1455	29.10	1/60	*	22.9	22.9	0.320	0.00199
15-53 I	1455	29.10	1/60	60	20.9	20.9	0.310	0.00193
II	"	"	"	60	22.9	22.9	0.310	0.00193
15-55 I	"	"	"	40	22.8	22.8	0.356	0.00222
II	"	"	"	40	22.9	22.9	0.348	0.00217
15-56 I	"	"	"	20	17.5	17.5	0.488	0.00304
II	"	"	"	20	18.2	18.2	0.352	0.00219
15-57 I	1455	29.10	1/200	60	20.2	20.2	0.346	0.00216
II	"	"	"	60	19.5	19.5	0.322	0.00201
15-58 I	"	"	"	40	22.0	22.0	0.506	0.00315
II	"	"	"	40	20.5	20.5	0.472	0.00294
15-59 I	"	"	"	20	17.8	17.8	0.322	0.00201
II	"	"	"	20	18.6	18.6	0.320	0.00199
15-60	1455	29.10	1/200	*	20.2	20.2	0.318	0.00198

(\* は定常給水)

Table. 2 Experimental results and various parameters measured at 0.5 m behind the leading edge.

Exp. 15-47

t (sec)	h <sub>f</sub> (cm)	U <sub>f</sub> (cm/s)	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> (sec)	ΔC <sub>f</sub> (%)	$\frac{k_D}{k_{S4}} q_e^*$	Re	Fr <sup>2</sup>	X <sub>f</sub> (cm)	$\frac{\Delta p_f(t)}{\Delta p_f(t_0)}$	$\frac{X_f(t)-X_f(t_0)}{h_f}$
165	14.3	2.451		0.1079		3305	0.638	514	1.000	0.00
222	15.3	2.350	222-165	0.0958	0.0144	3596	0.617	650	0.890	8.89
289	15.1	2.222	289-222	0.0857	0.0120	3355	0.625	800	0.790	18.94
358	16.0	2.096	358-289	0.0672	0.0305	3354	0.669	957	0.623	27.69
435	14.9	1.915	435-358	0.0593	0.0135	2853	0.680	1112	0.550	40.13
492	15.0	1.709	492-435	0.0522	0.0209	2564	0.611	1212	0.484	46.53
289	15.1	2.222	289-165	0.0857	0.0142	3355	0.625	800	0.794	18.94
358	16.0	2.096	358-222	0.0672	0.0240	3354	0.669	957	0.623	27.69
435	14.9	1.915	435-289	0.0593	0.0237	2853	0.680	1112	0.550	40.13
492	15.0	1.709	492-358	0.0522	0.0188	2564	0.611	1212	0.484	46.53

Table. 3

Exp. 15-48

t (sec)	h <sub>f</sub> (cm)	U <sub>f</sub> (cm/s)	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> (sec)	ΔC <sub>f</sub> (%)	$\frac{k_D}{k_{S4}} q_e^*$	Re	Fr <sup>2</sup>	X <sub>f</sub> (cm)	$\frac{\Delta p_f(t)}{\Delta p_f(t_0)}$	$\frac{X_f(t)-X_f(t_0)}{h_f}$
285	12.3	1.709		0.0583		2102	0.611	647	1.000	0.00
377	13.0	1.636	377-285	0.0501	0.0141	2127	0.673	810	0.859	12.54
465	11.7	1.544	465-377	0.0405	0.0204	1806	0.824	950	0.695	25.90
568	9.5	1.399	568-465	0.0360	0.0082	1329	0.937	1108	0.617	48.53
652	9.5	1.254	652-568	0.0350	0.0024	1191	0.775	1210	0.600	59.26
735	9.6	1.101	735-652	0.0249	0.0331	1057	0.831	1310	0.427	69.06
465	11.7	1.544	465-285	0.0405	0.0185	1806	0.824	950	0.695	25.90
568	9.5	1.399	568-377	0.0360	0.0139	1329	0.937	1168	0.617	48.53
652	9.5	1.254	652-465	0.0350	0.0064	1191	0.775	1210	0.600	59.26
735	9.6	1.101	735-568	0.0249	0.0230	1059	0.831	1310	0.427	69.06
568	9.5	1.399	568-285	0.0360	0.0149	1329	0.937	1168	0.617	48.53
652	9.5	1.254	652-377	0.0350	0.0119	1191	0.775	1210	0.600	59.26
735	9.6	1.101	735-465	0.0249	0.0202	1057	0.831	1310	0.427	69.06

Table. 4

Exp. 15-49

t (sec)	h <sub>f</sub> (cm)	U <sub>f</sub> (cm/s)	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> (sec)	ΔC <sub>f</sub> (%)	$\frac{k_D}{k_{S4}} q_e^*$	Re	Fr <sup>2</sup>	X <sub>f</sub> (cm)	$\frac{\Delta p_f(t)}{\Delta p_f(t_0)}$	$\frac{X_f(t)-X_f(t_0)}{h_f}$
218	12.6	1.969		0.0364		2481	1.385	517	1.000	0.00
290	11.8	1.782	290-218	0.0362	0.0005	2103	1.218	650	0.995	11.27
390	14.7	1.654	390-290	0.0268	0.0312	2431	1.137	822	0.736	20.75
479	13.7	1.546	479-390	0.0250	0.0070	2118	1.143	969	0.687	32.99
578	14.1	1.373	578-479	0.0226	0.0110	1936	0.969	1117	0.621	42.55
390	14.7	1.654	390-218	0.0268	0.0185	2431	1.137	822	0.736	20.75
479	13.7	1.546	479-290	0.0250	0.0204	2118	1.143	969	0.687	32.99
578	14.1	1.373	578-390	0.0226	0.0102	1936	0.969	1117	0.621	42.55

Table. 5

Exp. 15-53

t (sec)	h <sub>f</sub> (cm)	U <sub>f</sub> (cm/s)	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> (sec)	ΔC <sub>f</sub> (%)	$\frac{k_D}{k_{S4}} q_e^*$	Re	Fr <sup>2</sup>	X <sub>f</sub> (cm)	$\frac{\Delta p_f(t)}{\Delta p_f(t_0)}$	$\frac{X_f(t)-X_f(t_0)}{h_f}$
164	11.0	2.364		0.1293		2590		498	1.000	0.00
221	10.5	2.395	221-164	0.1112	0.0125	2515	0.805	632	0.860	12.76
279	10.8	2.250	279-221	0.0960	0.0131	2430	0.800	768	0.742	25.00
344	11.0	2.036	344-279	0.0778	0.0194	2236	0.796	907	0.602	37.18
416	9.9	1.837	416-344	0.0692	0.0093	1819	0.807	1043	0.535	55.05
496	8.6	1.747	469-416	0.0610	0.0125	1502	0.953	1140	0.472	74.65
279	10.8	2.250	279-146	0.0960	0.0145	2430	0.800	768	0.742	25.00
344	11.0	2.036	344-221	0.0778	0.0188	2236	0.795	907	0.602	37.18
416	9.9	1.837	416-279	0.0692	0.0152	1819	0.807	1043	0.535	55.05
496	8.6	1.747	469-344	0.0610	0.0114	1502	0.953	1140	0.472	74.65

び5に示す。

### 3.2 流塊の挙動

泥水塊は、浮遊物質の濃度差に起因した密度差によって形成されるが、その形成過程を述べるとつぎのようである。すなわち、供給された泥水は流入する際に周囲水と激しく混合し、潜入条件が満たされた場合、下層密度流が形成される。有効重力の流下方向成分および流入流体の先端部への運動量供給によって、先端部分は底面に沿って流下する。先端部がある程度流下して初期の給水による影響がなくなると、先端部には後方からの運動量の供給がなくなる。また、後方部分は、先端部が流下するために引き伸ばされるような状態になり、後方部分ほど流動層厚は薄くなる。また、流下過程において、先端部分では周囲水の取り込みがあり、その結果、先端部分の密度が減少し、起動力が小さくなる。さらに、底面および界面での摩擦によって運動量の減少がおり、流塊の流下速度はしだいに減衰する。このような流動特性は、定常密度流のそれとは非常に異なっている。定常密度流の場合は、定常部から先端部への運動量の供給が定常的にあるため、このような減衰特性を示さない。

このように、泥水塊は流下過程においてしだいに減衰しながら下流端に到達するか、あるいは流下途中で運動量をすべて失い、拡散もしくは決降して停止してしまう。泥水塊の典型的な減衰特性を示す一例として、先端部の移動距離と時間との関係を示すと Fig. 6 のようである。同図には、定常給水時の走時曲線も示されているので、泥水塊の減衰の程度がよくわかる。

### 3.3 流塊の形状

形状特性を調べる場合、目視やカメラ撮影による可視界面を基準にする方法と、水温分布や濃度分布の測定結果より定められる境界面を基準にする方法などが考えられる。後者に対しては、最大濃度の何%の所を界面にするかが問題であるが、ここでは、濃度がその断面の最大濃度の5%である水深を界面高さとして定義し、それが可視界面とどのような対応があるか調べてみよう。Fig. 7には、泥水塊の可視形状と、濃度計測から得られた界面高さが示されている。図中の各線は、ある時刻の可視形状を表わしており、厚い混合層があるために混合層上方の界面と下方の界面がみられる。

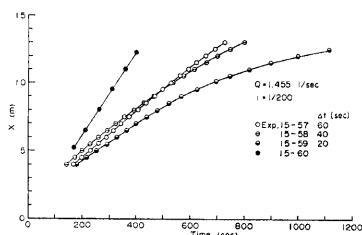


Fig. 6. The relation of time and the advancing distance of head.

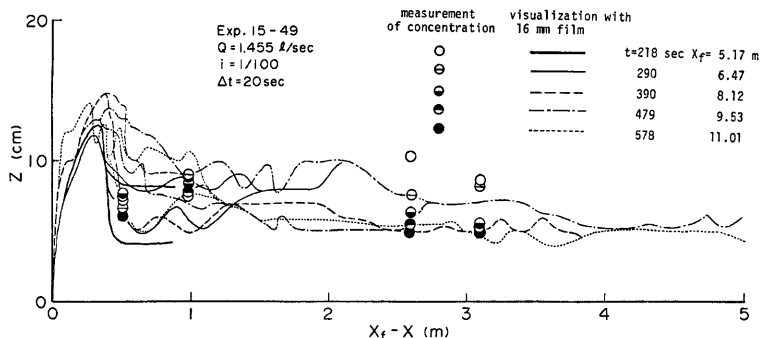


Fig. 7. Visualized shapes of turbid water mass obtained from 16mm cine-film. On the figure, the height of interface defined by the measurement of concentration are shown.

れ濃度計測による界面は、ほぼ、この混合層中にある。

先端部高さの時間変化はこの図からもわかるように、ほとんどないといってよい。また、流塊後方に関しては、濃度計測が先端から3.1m 後方の地点までしか得られていないので、計測からは界面高さの形状は判断しにくい。可視形状から判断すると、流動層厚は後方部分ほど薄くなっていることがわかる。

泥水塊と定常給水時の泥水密度流との形状特性の相違は、Photo. 1 および 2 のようである。すなわち、泥水塊の先端部形状は、定常密度流と同様であるが、後方部の流動層厚はしだいに薄くなっている。一方、定常密度流の後方部分は、上流端から定常的な給水があるため、界面高さはほぼ水槽の半水深程度にまで達し、等流状態にある。



Photo. 1 An example of turbidity current which is formed in supplying a prescribed amount of turbid water. We call such a current "turbid water mass".



Photo. 2 An example of turbidity current formed in case of constant supply of turbid water.

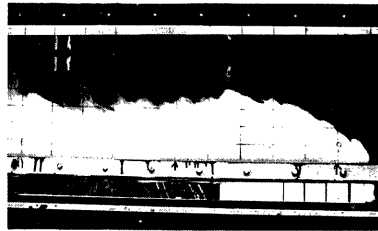


Photo. 3 A head of turbid water mass.

Photo. 3 は、泥水塊先端に示したものである。これより、前述の形状パラメータを概算する。 $l_f \approx 0.8\text{m}$ ,  $h_f \approx 0.2\text{m}$ ,  $h_{20} \approx 0.1\text{m}$  および  $A_f \approx 0.12\text{m}^2$  とすると各パラメータは次式のような値をもつ。

$$\left. \begin{aligned} k_{21} &= h_{20}/h_f \approx 0.5, & k_{22} &= l_f/h_f \approx 4.0 \\ k_{24} &= A_f/h_f^2 \approx 3.0, & k_{23} &= \frac{1}{2} l_f/h_f \approx 2.0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (43)$$

3.4 流速および濃度分布

Fig. 8 は、水槽上流端より  $x=6.5\text{m}$  地点に設置した水素気泥発生装置によって得られた冷水塊の流速分布形を示したものである。同図より、先端部から後方に行くほど流速は小さくなっている。また、混合の激しい先端部近傍をのぞけば、分布形はかなりよく似ている。そこで、流速分布の相似性をみるため、水温計測によって得られた界面高さで深さ  $z$  を無次元化し、流速を最大流速で無次元化して流速分布形を表示したものが Fig. 9 である。同図より、先端部近傍を除けば、後方部分ではかなりの相似性がみられる。したがって、後方部分においては流速分布の相似性を用いることの妥当性が示されたと言えよう。また、流速に関するパラメータ  $k_u$  に関しては、同図より大まかには、 $0.7 < k_u < 1$  程度であると思われる。

Fig. 10 は、 $c/c_{max}$  を横軸に、 $z/h_f$  を縦軸にとって泥水塊の濃度分布を示したもので、図中の分布形は  $t=390\text{sec}$  における4つの断面において測定されたものである。同図の結果より、分布形状はほぼ相似形を保っているのがわかる。また、密度に関する相似パラメータ  $k_\rho$  は、冷水塊の実験結果 Fig. 11 を参考に求めてみると、 $0.7 < k_\rho < 1$  程度の範囲内にあると思われる。

3.5 先端部の混合特性

2.4 において、先端部での連行量は、次式で近似できるものと想定した。

$$q_s = ah_f U_f \dots\dots\dots (26)$$

すなわち、先端部における連行量は、オーバーハング高さ  $d=ah_f$  と底面との間における周囲水の連行量に

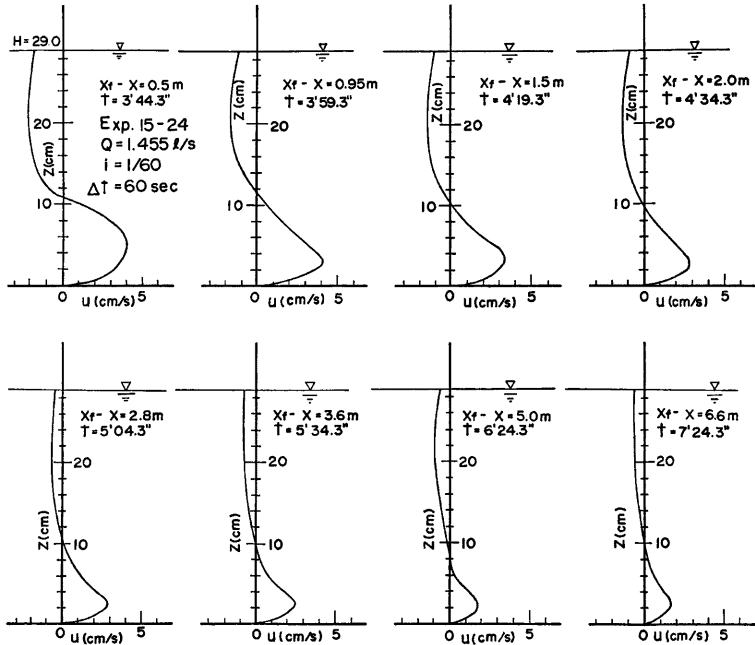


Fig. 8. Velocity profiles of the cold water mass in various sections behind the leading edge. (Some experiments of cold water mass were carried out to investigate the velocity distribution concerning the turbid water mass.)

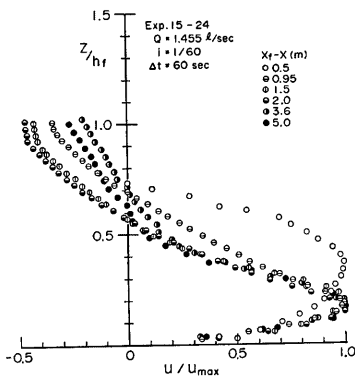


Fig. 9. Non-dimensional velocity profiles obtained from the results shown on Fig.8,

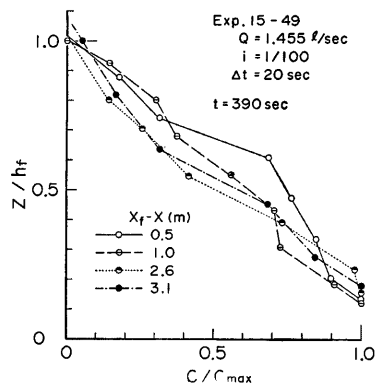


Fig. 10. Non-dimensional concentration profiles.

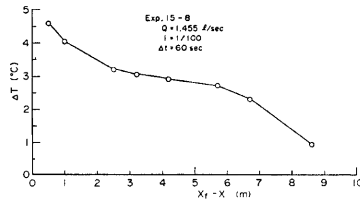


Fig. 11. Change of the temperature difference in cold water mass. ( $\Delta T$  is the temperature difference between  $T_s$  and  $T_{min}$ , where  $T_s$  is the temperature of the surrounding water,  $T_{min}$  is the lowest in the cold water mass.)

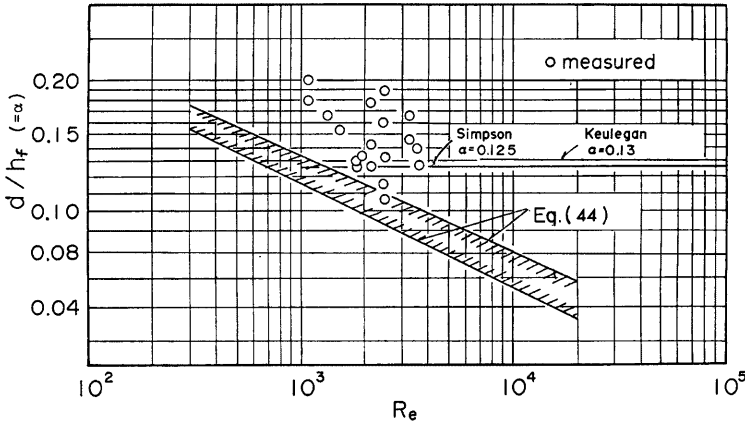


Fig. 12. The relation between  $\alpha$  and  $Re$ . ( $\alpha = ah_f/h_f$ ,  $Re = U_f h_f/\nu$ )

よって十分評価できるものと考えた。この節では、オーバーハング高さ  $d$  と波高  $h_f$  との比  $\alpha$  がどのような値をとり、これが連行量にどのような影響を及ぼしているかを考察する。

Fig. 12 は、オーバーハング高さ  $d$  と先端部波高  $h_f$  との比  $d/h_f (= \alpha)$  と  $Re$  数との関係をみたものである。図中には Simpson<sup>9)</sup>が提案した関係式

$$d/h_f = 0.61 Re^{-0.23 \pm 0.01}, \quad (Re = U_f h_f/\nu, \quad 300 < Re < 10000) \quad \dots \dots \dots (44)$$

Keulegan<sup>10)</sup>および Simpson<sup>11)</sup>らが提示した関係式が示されている。これらの研究者が得た結果と、著者らが得た結果を比較すると以下のようである。実験値は、 $Re$  数が 1000~4000 程度の狭い範囲のものであるが  $\alpha$  は 0.1 から 0.2 程度の範囲内にあり、(44) 式は若干これらの値よりも小さく評価されている。また、Keulegan が提案した  $\alpha$  の値を  $Re$  数が 1000 程度にまで適用できるものとしたとき、実験値はその周辺に存在している。

つきに、無次元連行率について若干考察しよう。先端部への連行量を与える(26)式の両辺を  $U_f h_f$  でわって無次元化すると次式の関係が成立する。

$$q_* = \alpha U_f h_f / U_f h_f = \alpha \quad \dots \dots \dots (45)$$

これは、オーバーハング高さと先端部波高との比  $d/h_f$  であり、ほぼ  $0.1 < \alpha < 0.2$  であった。

一方、体積保存則(21)式において、 $dA_f/dt=0$  とすると、 $q_s=rq_0$  となり、これを(22)式に代入し、 $\beta=0$  として  $U_f h_f$  で無次元化すると次式の関係が成り立つ。

$$q_s^* = \frac{q_s}{U_f h_f} = - \frac{k_{s4} h_f}{k_p \Delta \bar{\rho}_f U_f} \left( \frac{d \Delta \bar{\rho}_f}{dt} \right) \dots \dots \dots (46)$$

以上より、 $q_s = a h_f U_f$  および  $dA_f/dt=0$  が同時に成り立つ場合、(45)式と(46)式は等価になる。このことを利用すると実験的に見出しにくいパラメータ  $k_{s4}/k_p$  に関する有用な情報を得ることができる。

(46)式の右辺を直接実験より評価することは困難であるので、同式をつぎのように変形する。

$$\frac{k_p}{k_{s4}} q_s^* = - \frac{h_{f2} \{ \Delta \bar{\rho}_f(t_2) - \Delta \bar{\rho}_f(t_1) \}}{\Delta \bar{\rho}_f(t_2) U_f(t_2) (t_2 - t_1)} \dots \dots \dots (47)$$

上式に基づき、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  を実験的に求め、これと Re 数との関係をみたものが Fig. 13 である。同図より、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  は、0.006 から 0.03 程度の値をもち、Re 数の影響はあまりみられない。また、Fig. 14 には、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  と内部 Fr 数との関係が示されている。同図より明らかのように、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  は、内部 Fr 数に対してもあまり有意な変化を示さない。換言すると、 $k_p/k_{s4}$  は Re 数および Fr 数によって顕著な変化を示さない。

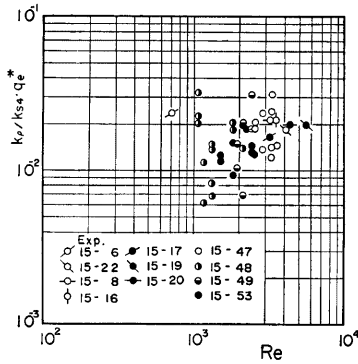


Fig. 13. The relation between  $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  and Re.

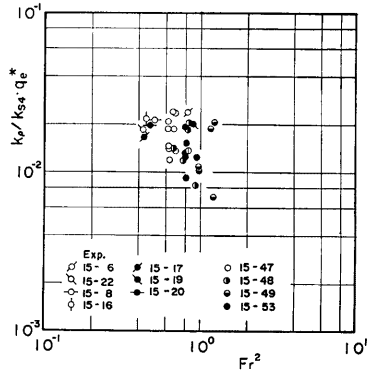


Fig. 14. The relation between  $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  and  $Fr^2$ .

さて、Fig. 13 および14に示すように、本論の実験範囲においては、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  は、 $0.008 < k_p/k_{s4} \cdot q_s^* < 0.03$  程度の範囲にある。一方、 $q_s^*$  は  $0.1 < q_s^* < 0.2$  の変化範囲にあった。したがって、これら2つの関係より  $k_p/k_{s4}$  の範囲を推定するとつぎようになる。

$$q_s^* = 0.1 \text{ のとき, } \left. \begin{array}{l} 0.08 < k_p/k_{s4} < 0.3 \\ 0.04 < k_p/k_{s4} < 0.15 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (48)$$

#### 4. 流塊先端部の挙動に対する理論の適用

ここでは、2.4 で理論的に求めた先端部の波高、密度および流下速度に関する(36)~(38)式が、流塊の運動特性をどの程度説明するかを検討しよう。これらの式には、 $k_{21}$ 、 $k_{22}$ 、 $k_{23}$ 、 $k_{24}$ 、 $k_p$ 、 $k_u$  および  $\alpha$  などのパラメータや形状抵抗係数  $C_D$  および境界面での抵抗係数  $f_i$ 、 $f_n$  など、Re 数に依存するような係数が含まれ

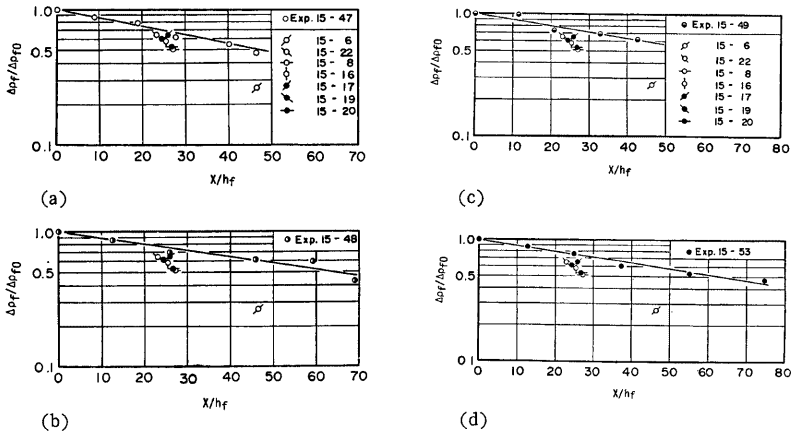


Fig. 15 (a)~(d) The change of the head density in flow direction. The full line on the figure is obtained from eq. (37B).

ている。こういったパラメータや係数は、実験からある程度求めることができるが、今回の実験ではこれらの値を精度よく求めることができなかった。したがって、ここではつぎのような方法によって理論の適用性を検討する。

まず、先端部の波高に関しては、場所的にほとんど変化しないことから、 $b_1=0$  として以下密度および流下速度に関し議論する。

この場合、密度分布式は(37B)式となるが、これを再記すると次式のようなのである。

$$\Delta \bar{\rho}_f / \Delta \bar{\rho}_{f0} = \exp(b_2 x_*) \dots \dots \dots (37B)$$

Fig. 15(a)~(d) は、泥水塊先端部密度の場所的変化を示したものである。同図より、密度は片対数紙上で直線的に変化しているのがわかる。実験値のこのような傾向は、(37B)式より推定される密度変化の傾向と一致するものであって、同式の妥当性を示すものである。なお、図中には、冷水塊の実験結果(Exp. 15-6, 22, 8, 16, 17, 19, 20)も載せられている。同図より、冷水塊先端部の密度の減少は、泥水塊のそれと比べてかなり大きいのがわかる。冷水塊の場合には、連行による密度減少以外に、水槽底面、側面および水面からのヒーティングによる密度の減少や、流下過程における周囲水からの熱伝導による密度減少などが加わるためであろう。

ここで、泥水塊に関し、図中の直線の傾きから  $b_2$  の値を求めると、Exp. 15-47, 48, 49および53のそれぞれにおいて、 $b_2 = -0.0146, -0.0110, -0.0114$ および $-0.0111$ となる。

つぎに、先端部の流下速度  $U_f/U_{f0}$  に関して、(38B)式、すなわち、

$$(U_f/U_{f0})^2 = 2b_3/(b_2+2b_4) \cdot F_{f0}^2 \exp(b_2 x_*) + \{1-2b_3/(b_2+2b_4) \cdot F_{f0}^2\} \exp(-2b_4 x_*) \dots (38B)$$

と実験値とを比較しよう。なお、上式の適用に際し、 $b_3$  は実験から得られた値すなわち、 $k_{21}=0.5, k_{24}=3.0, k_p=0.8, \tan \theta=0.01$ の程度の値を用いると(34)式より、ほぼ、0.03となり、 $b_4$  に関しては、適当な値を用いる。

Fig. 16 (a), (b) は、Exp. 15-49 および 53 について実験値と(38B)式の結果を比較したものである。同図より、(38B)式は、流塊の流下速度の減衰特性をよく表わした推定式であることがわかる。



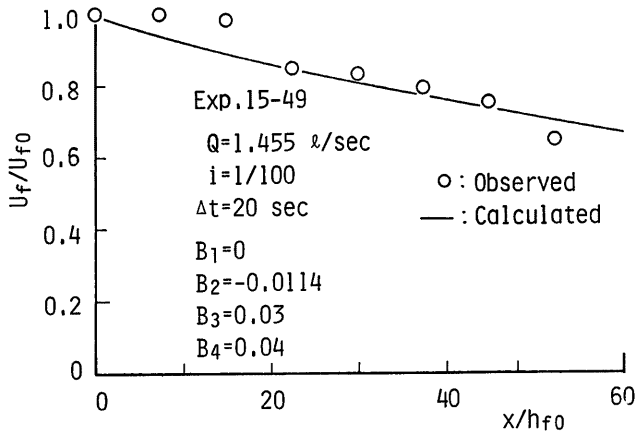


Fig. 16(a) Comparison between theoretical curve with eq.(38B) and experimental results concerning the advancing velocity.

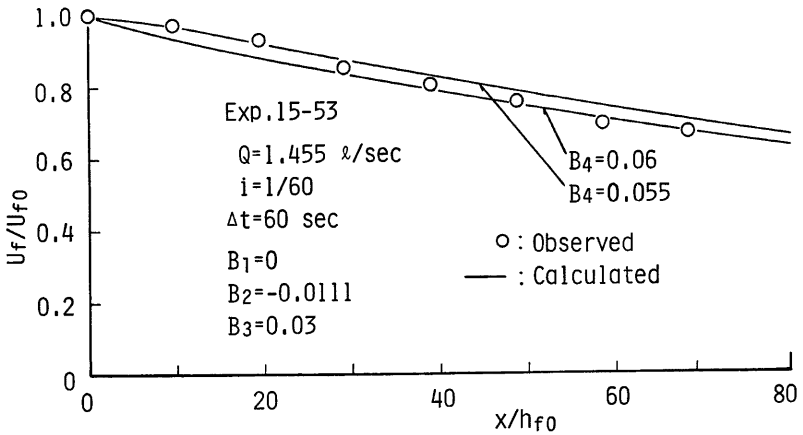


Fig. 16(b)

### 5. 結 語

以上、泥水塊に関し、とくに先端部の挙動に着目して理論的・実験的研究を行った。本研究において得られた主要な成果を要約すればつぎのとおりである。

(1) 基礎方程式に基づき、泥水塊を先端部および後方に分割して解析し、両者の支配方程式を提案した。とくに、先端部に関しては、種々のパラメータを導入して、波高、密度および流下速度に関する理論解を提示するとともに、各々の発達・減衰領域を考察した。

(2) 泥水塊の形状、流速および濃度分布、混合現象などに主眼点をおいて実験的考察を行った結果、形状に関しては、後方部の流動層厚がしだいに薄くなる傾向が明らかにされ、形状パラメータの概算値が求められた。また、先端部の波高は、今回の実験領域においては時間的にあまり変化しないことがわかった。流速および濃度分布に関しては、ある程度相似性が認められ、パラメータ  $k_p$  および  $k_p$  は、それぞれ  $0.7 < k_p < 1$ 、 $0.7 < k_p < 1$  程度になることがわかった。混合現象に関しては、先端部底面からオーバーハング高さまでの間の周囲水の取り込みが支配的であると考えて、まず、オーバーハング高さ先端部波高との比  $\alpha$  と Re 数との関係を調べた。その結果、 $\alpha$  は、 $1000 < Re < 4000$  において、Re 数とは無関係に、 $0.1 \sim 0.2$  にあることが明らかにされた。また、 $k_p/k_{s4} \cdot q_s^*$  と Re 数および Fr 数との関係より、 $k_p/k_{s4}$  は Re 数および Fr 数とは無関係に、(48)式のように示された。

(3) 泥水塊先端部の挙動に関する理論の適用性が検討された。その結果、波高の時間変化がない場合の密度分布および流下速度の分布式は、実験から得られた流塊の挙動特性とよく対応することがわかった。

このように、泥水塊の挙動特性がかなり明らかにされたが、今後さらに検討すべき問題点を記すと以下のようである。まず、精度のよい実験を行って、形状パラメータおよび  $k_p$ 、 $k_p$  といったパラメータについても詳細に検討する。さらに、先端部での連行量を何らかの方法（たとえばトレーサー実験など）で測定し、 $b_1 \sim b_3$  の値を実験的に求める必要がある。形状抵抗や境界面での抵抗に関しては、理論的・実験的に検討していかなければならない。また、ここで提案した理論解は、一般の密度流にも適用できるものと思われる。したがって、こういった密度流に対する理論の適用性も検討していきたい。

最後に、本研究は一部文部省科学研究費（奨励A）の補助を受けた。また、実験ならびに資料整理・図面作製などで京都大学防災研究所技官吉田義則氏に御協力いただいた。ここに記して感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 芦田和男・江頭進治：泥水密度流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，237号，1975，pp. 37-50.
- 2) 日野幹雄：密度流の流速分布および界面抵抗について，第23回水理講演会論文集，1979，pp. 347-353.
- 3) Egashira, S. and K. Ashida: Studies on the Structures of Density Stratified Flows, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 29, No. 267, 1980, pp. 165-198.
- 4) 福岡捷二・福嶋祐介：成層化貯水池での密度流の計算法，第15回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1978，pp. 477-480.
- 5) Simpson, J. E.: Effects of the Lower Boundary on the Head of a Gravity Current, J. Fluid Mech., Vol. 53, part 4, 1972, pp. 759-768.
- 6) 芦田和男・江頭進治・中川一：密度流先端部の挙動に関する研究，第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1979，pp. 239-242.
- 7) 平野宗夫・羽田野架義・赤司淳也：泥水密度流先端部の挙動について，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第2部，1978，pp. 395-396.
- 8) 芦田和男・江頭進治：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(1)，京都大学防災研究所年報，第18号B-2，1975，pp. 495-512.
- 9) 中川一：傾斜路床における冷水および泥水塊の挙動に関する研究，京都大学大学院修士論文，1981.
- 10) Keulegan, G. H.: An Experimental Study of the Motion of Saline Water from Locks into Fresh Water Channels, Nat. Bur. Stand. Rep. 5168, 1957.
- 11) Simpson, J. E. and R. E. Britter: The Dynamics of the Head of a Gravity Current Advancing over a Horizontal Surface, J. Fluid Mech., Vol. 94, Part 3, 1979, pp. 447-495.