

## 貯水池底層水の水面散布に関する基礎実験

## Experiment on water quality improvement of a reservoir by showering bottom cold water onto the water surface

道奥康治\*\*

Kohji MICHIOKU

\* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Performance of a new water quality improvement system in a reservoir is experimentally examined by using a hydraulic model. The facility is such that anaerobic and polluted bottom water is pumped up and showered on the water surface. Although some projects of this system are running in several reservoirs, their performance are not well known. The target of this study is to find how the discharged water is transported in a reservoir and how much water quality mixing is expected to occur. In order to focus on hydrodynamics of the system, fresh and salt waters are used as working fluids to simulate warm surface water and cold bottom water, respectively. Hydrodynamic behavior of the diffusing plume are examined based on a dimensional argument. The result would provide information in developing a high-performance system for reservoir water purification.

**Keywords:** water quality improvement, eutrophication, reservoir hydrodynamics, buoyant plume, aeration

## 1. はじめに

水温成層化した貯水池や湖沼では、密度成層の浮力安定効果によって鉛直混合が抑制される。上層との水質交換が断たれるために、底層の溶存酸素量は有機物の分解によって次第に減少する。このような嫌気状態のもとでは、底質の酸化化合物が還元されて硫化水素が発生したり、栄養塩が溶出するなど底層水質が劣化する。大流量で放流した場合には、底層の水が取水されて下流域に冷水害や腐臭をもたらす場合もある。強風時には風の吹き寄せ効果によって貧酸素水塊が湧昇し、沿岸部の養魚場に壊滅的な被害を与える。こうした水質環境上の問題を解決するために、様々な再曝気施設が国内外の貯水池に設置されているが、現時

か明らかではない。本報は、図-1 に示すように、底層水をポンプアップして水面で散布する曝気工法に関し、その水質改善効果を水理学的に検討するものである。写真-1のように一部の貯水池ではこのような水質改善装置が試験的に施工されているが、現場実験のみによって池内の水質拡散過程や再曝気率を定量的に把握することは困難である。ここでは、底層の冷水を塩水で代替した水理実験によって散水による水質混合特性を明らかにする。

## 2. 実験方法

図-2 に実験装置と諸元の定義を模式的に示す。1m × 1m × 1m の透明ガラス張り水槽に淡水(密度:  $\rho_0$ )を満たし、模型貯水池とする。貯水池の底層水と見立てた密度  $\rho_1$  の着色塩水を一定流量  $Q$  でノズルから鉛直下方に水面散布する。池内での



写真-1 底層水散布による水質改善工法  
(中国地建弥栄ダム貯水池)

点ではどの形態の曝気装置が最も効果的であるの

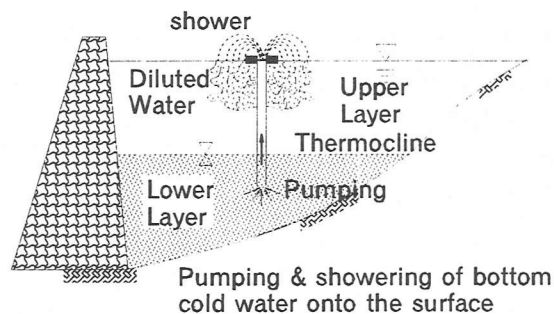


図-1 底層水の水面散布による曝気・水質改善の模式図

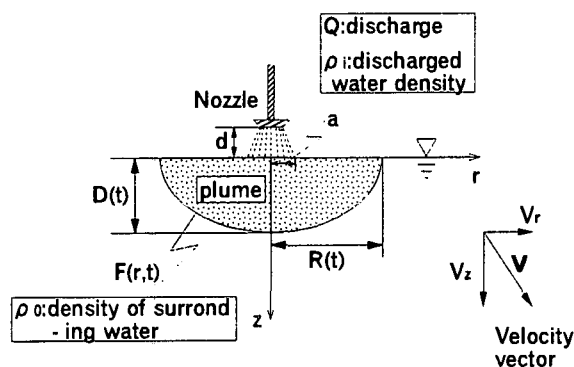


図-2 実験装置の模式図と諸元の定義

表-1 水理実験の条件

| CASE | d<br>cm | Q<br>cm <sup>3</sup> /s | a<br>cm | $\epsilon_0$<br>$\times 10^{-2}$ | $R_{i0}$ | $\hat{d}$ |
|------|---------|-------------------------|---------|----------------------------------|----------|-----------|
| 1    | 15      | 181.7                   | 7.21    | 0.180                            | 12.56    | 2.08      |
| 2    | 15      | 177.0                   | 7.21    | 0.369                            | 22.20    | 2.08      |
| 3    | 15      | 154.7                   | 8.32    | 0.490                            | 79.07    | 1.80      |
| 4    | 15      | 153.2                   | 8.32    | 0.897                            | 147.7    | 1.80      |
| 5    | 25      | 176.7                   | 10.0    | 0.897                            | 155.6    | 2.50      |
| 6    | 25      | 151.1                   | 10.0    | 0.510                            | 218.8    | 2.27      |
| 7    | 15      | 156.9                   | 8.32    | 1.499                            | 235.1    | 1.80      |
| 8    | 25      | 173.3                   | 10.0    | 0.889                            | 287.8    | 2.50      |
| 9    | 35      | 68.59                   | 7.84    | 1.460                            | 887.1    | 4.47      |
| 10   | 25      | 154.2                   | 10.0    | 0.949                            | 1003     | 2.27      |
| 11   | 25      | 153.2                   | 11.4    | 0.847                            | 1031     | 2.19      |
| 12   | 35      | 68.03                   | 7.84    | 2.002                            | 1237     | 4.47      |
| 13   | 35      | 149.7                   | 12.4    | 1.479                            | 1895     | 2.82      |
| 14   | 25      | 120.8                   | 11.4    | 1.490                            | 1906     | 2.19      |
| 15   | 35      | 152.0                   | 12.4    | 1.949                            | 2422     | 2.82      |
| 16   | 35      | 128.5                   | 12.4    | 1.695                            | 2945     | 2.82      |
| 17   | 35      | 94.15                   | 11.9    | 1.695                            | 4452     | 2.94      |

塩水の挙動はビデオカメラに集録される。流速は二成分電磁流速計で、塩分濃度は8チャンネルの電気伝導度計で計測し、信号はAD変換ボードQを通してPCに記録される。実験は流量、相対密度差  $\epsilon_0 = (\rho_i - \rho_0) / \rho_0$ 、ノズルと水面の間の鉛直距離  $d$  を変化させて、表-1の条件のもとに行われた。ここでは、主としてビデオカメラによる塩水塊の挙動特性に重点をおいて報告する。

### 3. 次元解析

図-2に示したように、対象とする現象はノズルを通る鉛直軸  $z$  に関して軸対象である。 $z$  は水面を原点にして鉛直下向きにとる。 $z$ -軸より半径方向の座標を  $r$ 、時間を  $t$  として各種水理量を以下のように定義する。

- \* 塩水塊の鉛直断面形状:  $F(r, t)$
- \*  $z$ -軸上の塩水塊の貫入深さ:  $D(t) = F(0, t)$
- \* 水面での塩水塊の拡散径:  $R(t)$
- \*  $(r, z)$ -方向流速成分:  $(V_r, V_z)$
- \* 塩水塊の浮力:  $B(r, z, t)$

### 3.1 関連物理量と代表スケール

関連物理量、すなわち散水流量  $Q$ 、「ノズル—水面」間の距離  $d$ 、散水半径  $a$ 、初期浮力差  $\epsilon_0 g = (\rho_i - \rho_0) g / \rho_0$  を用いて、次のように代表スケールを定義する。

- \* 速度スケール(平均散水強度):  $U_0 = Q / \pi a^2$
- \* 長さスケール:  $L_0 = a$  (cm)
- \* 浮力スケール:  $B_0 = \epsilon_0 g$  (cm/sec<sup>2</sup>)
- \* 浮力フラックス:  $F_B = B_0 U_0$
- \* 時間スケール:  $t_0 = L_0 / U_0 = \pi a^3 / Q$  (sec)

### 3.2 水理量の規準化

各水理量は代表スケールによって以下のように無次元化される。

#### (1) 座標

$$\hat{r} = r / L_0 = r / a, \quad \hat{z} = z / L_0 = z / a, \quad \hat{t} = t / t_0 = Q t / \pi a^3$$

#### (2) 水理量

$$\hat{F}(\hat{r}, \hat{t}) = F(r/a, Q t / \pi a^3) / a : \text{塩水塊の形状}$$

$$\hat{R}(\hat{t}) = R(t/t_0) / L_0 = R(Q t / \pi a^3) / a : \text{水面における塩水塊の拡散径}$$

$$\hat{D}(\hat{t}) = D(t/t_0) / L_0 = D(Q t / \pi a^3) / a : \text{貫入水深}$$

$$(\hat{V}_r, \hat{V}_z) = (V_r, V_z) / U_0 = (V_r, V_z) / (Q / \pi a^2) : \text{流速の}(r, z)\text{方向成分}$$

$$\hat{B}(\hat{r}, \hat{z}, \hat{t}) = B(r/a, z/a, Q t / \pi a^3) / \epsilon_0 g : \text{浮力}$$

### 3.3 無次元支配パラメーター

関連物理量より次元解析を行うと次の3つの無次元支配パラメーターが導出される。

$$(a) \hat{d} = d / L_0 = d / a : \text{ノズルと水面間の無次元距離}$$

$$(b) F_0 = U_0 / \sqrt{g L_0} = (Q / \pi a^2) / \sqrt{g a} : \text{散水量に関するフルード数}$$

$$(c) \hat{B}_0 = \epsilon_0 g a / U_0^2 = R_{i0} : \text{リチャードソン数}$$

### 4. 散水ノズルの特性

水面における単位時間あたりの散水量(以後「散水強度」と称する、雨量強度に相当する)  $U(r)$  の半径方向の分布を無次元化表示したものを図-3に示す。縦軸は速度スケールすなわち平均散水強度  $U_0 = Q / \pi a^2$  で無次元化した散水強度  $U / U_0$ 、横軸は無次元半径  $r/a$  をあらわす。ノズル中心軸上付近の  $0 \leq r \leq r_0$  ( $r_0/a = 0.091$ ) の範囲  $U=0$  となり  $r/a = 0.5$  付近でピークを有する双頭型の分布形を呈する。データはばらついているが、上記三つのパラメーターへの依存性は特に認められず、同図

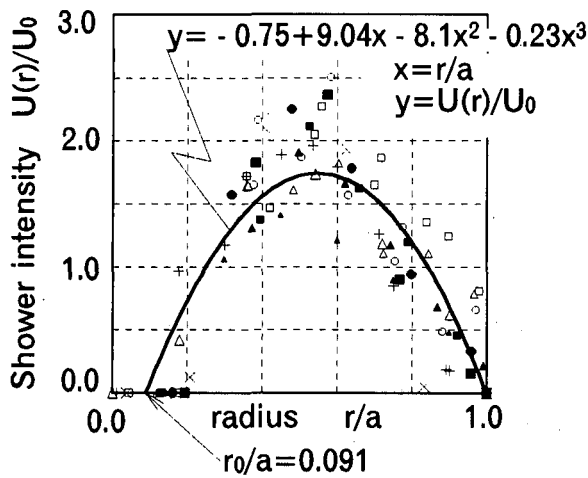


図-3 水面における散水強度  $U(r)$  の半径  $r$  方向分布、ここで、 $U_0 = Q/\pi a^2$  : 平均散水強度、 $Q$  : 散水量、 $a$  : 水面における散水面の半径

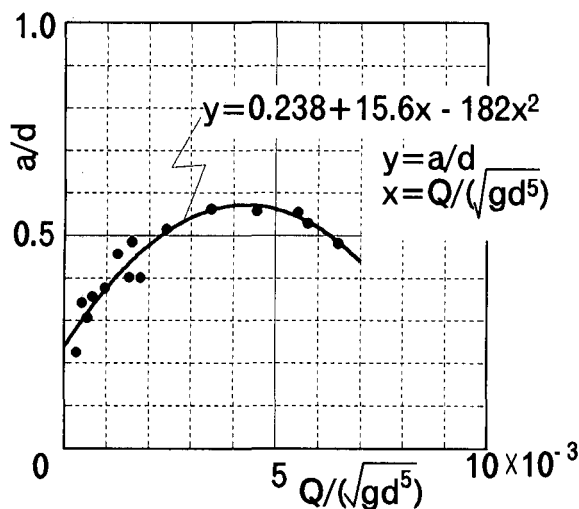


図-4 無次元散水半径  $\hat{a} = a/d$  と  $Q/(gd^5)^{1/2}$  の関係、ここで、 $d$  : 「ノズル-水面」間の距離

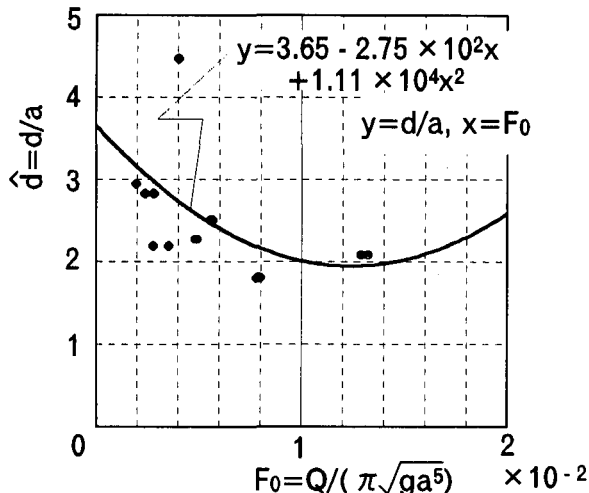


図-5 無次元距離  $\hat{d} = d/a$  と散水量に関するフルード数  $F_0$  の関係

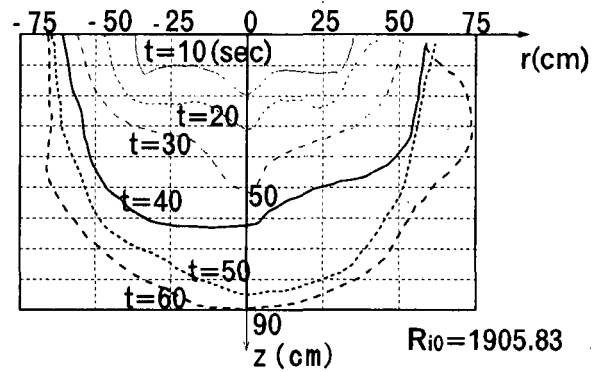


図-6 塩水塊の拡散過程、着色塩水の外縁の経時変化の例(CASE-1)

中の回帰曲線であらわしたような三次放物線の相似分布形によって近似することができる。

散水半径  $a$  は流量  $Q$  とノズルから水面までの距離  $d$  の関数としてあらわすことができよう。物理量 ( $a$ ,  $Q$ ,  $d$ ) より、次元解析的に次式のような関数関係を仮定することができる。

$$\hat{a} = a/d = F_1(Q/\sqrt{gd^5}) \quad (1)$$

図-4 は式(1)に関する実験値と二次放物線によってあらわした回帰曲線である。上式を変形すれば、無次元距離  $\hat{d}$  が第二のパラメーター  $F_0$  と次式のように一義的な関数関係を持つことになる。

$$\hat{d} = F_2\{(Q/\pi a^2)/\sqrt{ga}\} = F_2\{U_0/\sqrt{gL_0}\} \quad (2)$$

式(2)の関数関係に換算した実験値とその回帰曲線を図-5 にあらわす。

以上のように 3.3 で示した三つのパラメーターのうち  $\hat{d}$  については散水条件に関する物理量  $Q$ ,  $d$  によってのみ支配され、散水半径  $a$  は式(1)または式(2)から決定されることがわかる。

## 5. 池内での水質拡散過程

### 5.1 塩水塊の横方向・鉛直方向への拡散特性

図-6 は着色塩水塊の拡散過程をビデオフィルムよりトレースした一例である。各ケースについてこのような図より、時々刻々の塩水塊の水面における拡散径  $R(t)$  および先端水深  $D(t)$  を求める。これらの経時変化を図-7 と 8 に示す。両図中のシンボルは表-1 中の各ケースの記号に対応している。

このような池内の密度流的な拡散挙動に対しては ( $a$ ,  $U_0$ ,  $B_0$ ) より定義される  $\hat{B}_0 = R_{10}$  が支配パラメーターとなり、系外の散水過程に関するパラメーター ( $\hat{d}$ ,  $F_0$ ) が内部挙動へ直接関与することはないであろう。

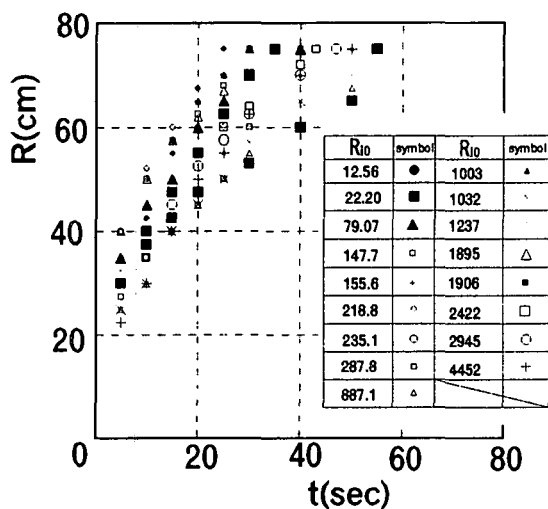


図-7 塩水塊水面における拡散径  $R(t)$  の経時変化

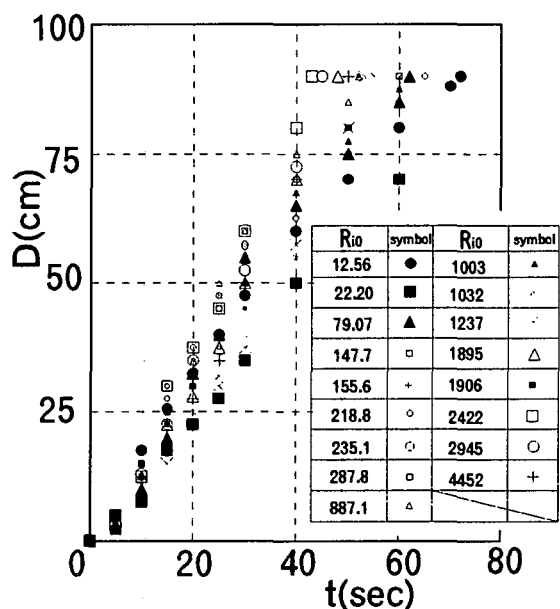


図-8 塩水塊の先端水深  $D(t)$  の時間変化

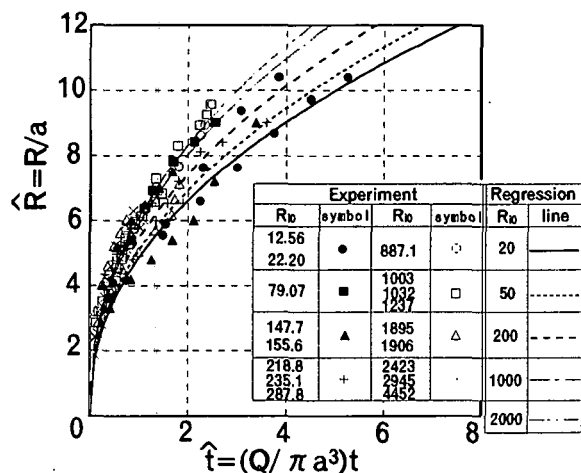


図-9 無次元拡散径  $\hat{R}(\hat{t})$  と無次元時間  $\hat{t}$  の関係

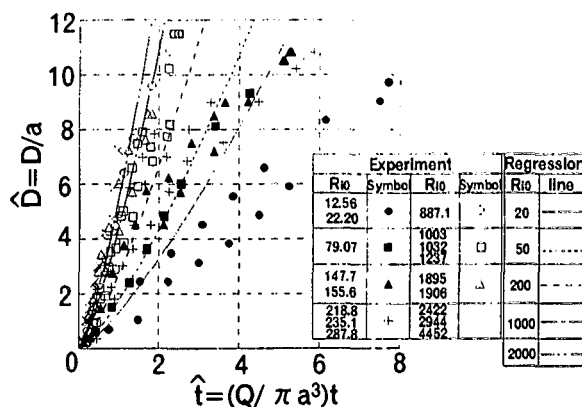


図-10 無次元先端水深  $\hat{D}(\hat{t})$  と  
無次元時間  $\hat{t}$  の関係

次に、3.2 において議論した次元解析に基づいて諸量を無次元化し  $\{\hat{R}(\hat{t}) \sim \hat{t}\}$ 、 $\{\hat{D}(\hat{t}) \sim \hat{t}\}$  間の関係をあらわしたものが図-9 と 10 である。図-9 より拡散径  $\hat{R}$  は無次元時間  $\hat{t}$  とともに増加するが、その増加率は時間とともに減少していることがわかる。また、 $R_0$  が小さいほど、すなわち水面での無次元浮力フラックス  $\hat{B}_0$  が小さいほど横方向への水塊の拡がりはややかである。一方、深層への侵入速度 ( $dD/dt$ ) についても図-10 が示すように  $R_0$  が大きい場合ほど大きくなる傾向が顕著に見られる。

以上のように、散水後の塩水塊はプルーム的挙動を呈し、ほぼ  $R_0$  によってその拡散過程を記述されることが明らかとなった。すなわち  $R_0$  の増加とともに水平方向・鉛直方向の拡散・混合が促進される。

## 5.2 プルームの力学特性を考慮した規準化

3.2 における議論は次元解析に基づいた形式的無次元化にとどまっており、プルームの動力学的特性を考慮したものではない。前節において示したように、 $R_0$  が塩水塊の拡散特性を支配していることが明らかであるため、密度流的特性を考慮してより合理的に規準化を行うべきである。

Chen and Rodi<sup>11)</sup> は定常鉛直プルームの希釈混合特性をその基礎方程式に基づいて考察し、以下のような無次元水理量を導出した(記号の定義は本研究のものに統一している)。

表-2 式(8)、(9)の各係数

| A    | B    | T    | U    | Q     | S      | K    |
|------|------|------|------|-------|--------|------|
| 4.16 | 0.53 | 0.45 | 1.31 | 0.038 | -0.052 | 0.20 |

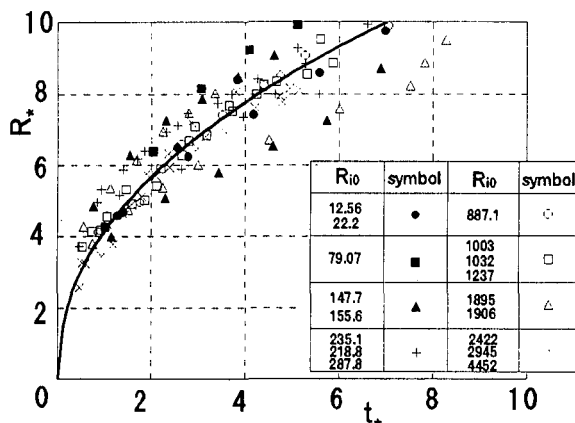


図-11 規準化された拡散半径  $R$  と時間  $t$  の関係

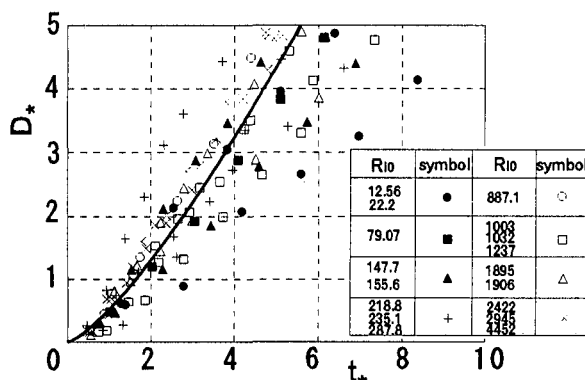


図-12 規準化された先端水深  $D$  と時間  $t$  の関係

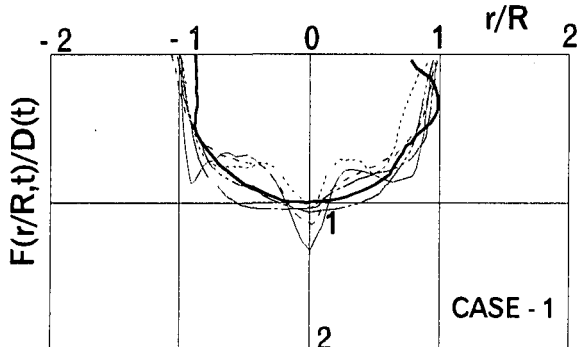


図-13 無次元化された塩水塊の形状

① 放流口からの距離：

$$z_* = 2^{-3/4} (R_{10})^{1/4} (\rho_i / \rho_0)^{-1/4} \cdot \hat{z} \quad (3)$$

② 流下方向流速：

$$V_{z*} = (2R_{10})^{-1/4} (\rho_i / \rho_0)^{-1/4} \cdot \hat{V}_z \quad (4)$$

③ 浮力(温度差)：

$$T_* = R_{10}^{-1/4} (\rho_i / \rho_0)^{3/4} (\Delta T / \Delta T_0) \quad (5)$$

以上の諸量を用いて、彼らは  $R_{10}$  や  $\rho_i / \rho_0$  の値に依存しない  $V_{z*} \sim z$  および  $T_* \sim z$  の間の普遍的関数関係を見出した。しかし、その解析は定常

過程を対象としたものであり、時間  $t$  に関する議論がなされておらず、ここで対象とする拡散過程に対して彼らの成果を直接応用することはできない。本来的には、非定常ブルームを合理的に定式化することによってはじめて、ここで対象とする拡散過程の普遍的記述を行うことが可能となる。

しかし、本論では彼らの解析を参考にして以下のような経験的記述を行い、ブルーム挙動を記述する普遍的関係を導出することにする。本実験は塩淡密度流が対象であり、温度差による体積膨張の効果を考慮する必要はない。したがって、本実験では  $\rho_i / \rho_0 \approx 1$  なる近似が成立し、式(3)、(4)、(5)に含まれる  $(\rho_i / \rho_0)$  はパラメーターより除外することができる。そこで、 $R_{10}$  のみを考慮して以下のような規準化を行う。

(1) 座標：

$$t_* = R_{10}^K \cdot \hat{t}, \quad r_* = R_{10}^L \cdot \hat{r}, \quad z_* = R_{10}^M \cdot \hat{z} \quad (6)$$

(2) 水理量：

$$V_{z*} = R_{10}^N \cdot \hat{V}_z, \quad V_{r*} = R_{10}^O \cdot \hat{V}_r, \quad B_* = R_{10}^P \cdot \hat{B},$$

$$R_* = R_{10}^Q \cdot \hat{R}, \quad D_* = R_{10}^S \cdot \hat{D} \quad (7)$$

以上において、\*がついた量は新たに規準化された物理量を、^を冠した項はこれまでの規準化に基く物理量である。また、(K, L, M, N, O, P, Q, S)はべき数をあらわす。

ここでは、可視計測より得られた  $(R, D)$  の経時変化特性に関し以下のような関数形を仮定する。

$$R = A \cdot t^T \quad (8)$$

$$D = B \cdot t^U \quad (9)$$

実験データの回帰分析より各係数が表-2のように決定された。

以上の係数を用いて  $(R \sim t)$  と  $(D \sim t)$  の関係をプロットすると各々図-11, 12 のようになる。支配パラメーターとは独立に明確なべき乗則が成り立っており、式(8)、(9)は普遍的な関数形であるといえる。

式(8)、(9)を変形して  $\hat{R}(\hat{t}) \sim \hat{t}$  および  $\hat{D}(\hat{t}) \sim \hat{t}$  間の関係式を導出すると次式のようなになる。

$$\hat{R} = A \cdot R_{10}^{(KT-Q)} \hat{t}^T \quad (10)$$

$$\hat{D} = B \cdot R_{10}^{(KU-S)} \hat{t}^U \quad (11)$$

表-2 で得られた各係数を用いれば式(10)、(11)の関係は図-9, 10 中の各曲線のようにあらわされる  $(R_{10})$  をパラメーターにとり線種を変えて表示している。式(10)、(11)はともに実験値の傾向と良く一致しており、式(8)、(9)の普遍的関数表示が有効であることが再確認される。

### 5.3 プルームの形状

プルーム塊がもし自己相似形を保ちながら貫入するとすれば、時々刻々のプルーム形状  $F(r, t)$  はその水平・鉛直長さスケール  $R(t)$ 、 $D(t)$  によって規準化することができよう。

図-13 は、無次元化されたプルーム形状  $F\{r/R(t), t\}/D(t)$  の一例をあらわす。他のケースについても同様にほぼ相似な形状で塩水塊が拡散することが確認されている。よって、無次元化された水塊形状は時間に独立で次式のような  $r/R$  のみに依存する関数として記述できる。

$$\phi(r/R) = F\{r/R(t), t\}/D(t) \quad (12)$$

式(12)は、唯二つの物理量  $R(t)$ 、 $D(t)$  を的確に評価することによって(例えば式(8)、(9))、水面散布された底層水の池内での拡散過程を時々刻々予測することが可能であることを意味する。

### 6. 底層水水面散布による水質拡散過程の予測手法の一例

式(1)より散水面の半径  $a$  が散水条件  $(Q, d)$  の関数として次式のように与えられる。

$$a = d \cdot F_1(Q/\sqrt{gd^5}) \quad (13)$$

この関係は採用する散水ノズルの構造に依存するので、ノズル毎に検証する必要があるだろう。

ある時間  $t$  における水面での拡散径  $R(t)$  は式(8)あるいは(10)より次式で与えられる。

$$R(t) = A \cdot a \cdot R_{i0}^{(KT-Q)} (Qt/\pi a^2)^T \quad (14)$$

同じく貫入深さ  $D(t)$  は、式(9)あるいは(11)より次式のように与えられる。

$$D(t) = B \cdot a \cdot R_{i0}^{(KU-S)} (Qt/\pi a^2)^U \quad (15)$$

式(13)の  $a$  を式(14)、(15)に代入すれば、散水条件  $(Q, d)$  と底層水の水質条件(水温あるいは相対浮力  $\epsilon_{0g}$ )を与えることによって  $R(t)$ 、 $D(t)$  の時間変化を予測できる。

さらに水塊形状を予測するためには、式(12)の相似関数形  $\phi(r/R)$  を用いて  $R(t)$ 、 $D(t)$  の値から

$$F(r, t) = \phi\{r/R(t)\} \cdot D(t) \quad (16)$$

のように形状を求めることができる。

ここでは、水質に関する直接的な検討は行っていないが、本論で得られた成果をもとに水質の近似的な予測評価を一つの試行として以下に行う。

今、保存性水質項目の一例として浮力を考える。プルーム内の浮力分布についてはその定量観測を待たなければ議論できないので、ここでは、水塊の体積平均された相対浮力  $B_v(t)$  の経時変化を考

える。浮力保存式は次式である。

$$B_v(t) = \int_0^{R(t)} F(r, t) \cdot 2\pi r dr = \int_0^t Q B_{i0} dt = Q B_{i0} t \quad (17)$$

( $Q, B_{i0}$ ) が時間的に一定の場合)

上式の  $B_v$  以外の量は全て本論で提案した方法により評価されるので、底層水の希釈混合過程  $B_v(t)$  を上式より予測することができる。保存性のある水質項目については上式中の  $(B_v, B_{i0})$  を対象水質の濃度  $(C_v, C_{i0})$  に置き換えるだけで同様の評価法が適用できる。水質項目として、非保存性のもの、例えば溶存酸素量を考えた場合、ノズル部および水面での再曝気による生産量を保存式に付加しなければならない。また、微生物などは散水システムのポンプや循環器系内で圧壊され死滅するので、消滅項を付加する必要がある。

### 7. おわりに

ここでは、可視計測に基く考察に重点をおいたが、同時に行った流速・濃度計測のデータ解析を行い、水質・運動量の拡散過程に関する定量的な検討が必要である。最後に示した水質評価法はあくまで体積積分された近似的算出法である。最終的な水質予測手法は濃度・流速などの空間分布を考慮して、再定式化されなければならない。

本論では流れの特性を支配する  $R_{i0}$  などの水理条件を可能な範囲で極力広範なものとした。次元解析においてスケール効果に関わるパラメータが使用されていないので、ここでの結果は現地に適用できると期待するが、貯水池での実証も必要であろう。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり建設省河川局開発課ならびに中国地建建設局の各位には現場見学や観測資料などの提供を頂き、多大なご協力を得た。また、研究当時本学工学部土木工学工学科4年次学生保久原均氏(日本道路公団勤務)には実験データ・整理にあたり協力を得た。

以上、記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Chen, C.J. and Rodi, W.: "Vertical Turbulent Buoyant Jets, A Review of Experimental Data", Pergamon Press, 83p., 1980.

(1999年4月23日受付)