

# エアリフトの開水路における水理機能に関する研究

服部 敦\*・和泉 清\*\*・吉川秀夫\*\*\*

都市河川の河床に堆積した有機物などがもたらす水質問題の対策に、エアリフトと呼ばれる散気装置を利用することを考えた。本論文は、水質改善のためにエアリフトの水理機能を検討したものであり、エアリフトによる揚水流量の計算法と循環流が効率よく生じるアスペクト比を明らかにした。また、現地実験を行い、エアレーションによるDO濃度の増加と底泥浮上によるSS濃度の増加の測定結果から水質改善機能を確認した。

**Keywords** : airlift, circulated flow, dissolved oxygen, water quality improvement

## 1. はじめに

都市河川や緩流等の底床上に堆積したヘドロや有機物などがもたらす水質悪化の問題は、親水機能の改善、向上の一環として関心が高い。また、それらの河床堆積物は河川断面積を減少させるため、河川の疎通能力を低下させる問題も含んでいる。このような問題への現状の対策は、浚渫による河床堆積物の除去や浄化用水の導入等にとどまっており、下水処理施設の整備状況や利水・親水計画などを考慮した、より積極的な水質改善策が模索されている。しかし、水資源の枯渇が年々深刻になり、河川は処理水による流量の占める割合が高くなることが予想される。従って、特に都市部中小河川の水質悪化の主な原因が、合流式下水管がもたらす降雨時の汚濁物質の流入であることも考慮すると、これからも水質改善を期待したい。

そのような水域で水質改善が望まれる場合、最も簡単な改善方法のひとつとして、エアレーションにより河川の自浄作用を高めることが考えられる。北村、橋本、福智<sup>1)</sup>は実河川で試された各種の人工曝気法の効果、経済性や運用性などの比較を行い、エアレーションによる人工曝気は他の方法に比べて初期投資額は高いが、効果と経済性では遜色なく、また運用性は特に優れていることを報告している。最近では、東京都大田区の中央部を流れる呑川でエアレーションが試されている。エアレーションは河川水に対して好気性状態を保つのに適した方法であり、底泥に対しては表層の数センチ程度を好気性に保つが、その下層ではなお嫌気性分解が行われる<sup>2)</sup>。従って、例えばDO濃度の高い海水が流入してくる感

潮水域のように高いDO濃度が保てる水域では、より積極的な底泥処理の試みとして底泥表層を浮上させ、底泥の好気性分解を促進させることが考えられる。その一例として丹羽、関根、吉川<sup>3)</sup>は開水路の底床上に設置した散気管より空気を注入し、bubble plumeにより開水路断面内に循環流を発生させ、それに伴う底面せん断応力の増加により河床堆積物を浮上させて効率的に流送することを考えた。

著者らは丹羽らの報告に引き続き、エアレーションを利用した河川の水質改善法として、エアリフトと呼ばれる、散気管上に鉛直に付設した矩形筒（以下、揚水筒と呼ぶ）を用いた散気装置を検討した。エアリフトの特徴は、bubble plumeが鉛直方向に揚水流量を徐々に増加するのに対し、揚水筒流入端で集中的に揚水するため、散気管のみに比べて底床上の流速をより増加させることが期待され、河床堆積物の浮上に対してより効果的なことである。また、運転性の特徴は揚水筒下端に散気管を設置できるので、揚水筒全長の調節により散気管の水深位置が選択でき、河床堆積物の浮上に対する効果の調整が行えることである。さらに、側壁を図-2に示すように設置し、開水路断面内に循環流を発生させ、底面せん断応力の増加や曝気された河川水を底泥表層上に流送することを考えた。

本報告はエアリフトの水理機構とその利用による水質改善について、それぞれ次の成果を述べたものである。

(1) 気液二相流モデルによるエアリフトの揚水流量の計算法と、循環流が効率よく得られる長方形断面のアスペクト比の室内実験による検討。

(2) エアリフトのDO濃度増加効果と河川の流れによるDO濃度の移流分散の定量的把握、および底泥浮上のため増加したSS濃度とVSS濃度の現地測定による水質改善効果の確認。

再浮上させた底泥に対するエアレーションの効果につ

\* 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程  
(〒169 新宿区大久保3-4-1)

\*\* 正会員 東京都土木技術研究所主任研究員

\*\*\* 正会員 工博 早稲田大学理工学部教授 土木工学科

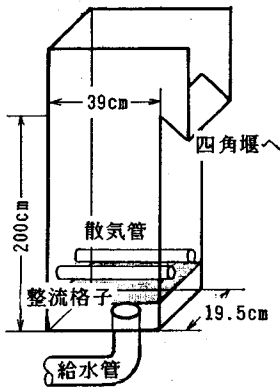


図-1 矩形管概略図

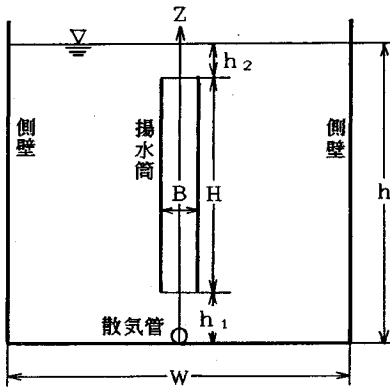


図-2 実験装置図

いては、和泉と遠藤<sup>4)</sup>によりその一部が報告されているのでそちらを参照されたい。

## 2. 実験概要

室内実験はエアリフトの揚水機構の解析、および断面内循環流の特性を明らかにするために行った。前者のための実験は、揚水筒内の空気混入率を表す断面平均ボイド率と水流量および散気量の関係を明らかにするための実験Ⅰと、揚水筒の両端での圧力の境界条件、および散気量と揚水流量の関係を明らかにするための実験Ⅱからなる。後者の実験は実験Ⅲとして、エアリフトと散気管のみによる循環流速分布をアスペクト比  $A_s = W/h$  を変化させて測定した。ここで、エアリフトと水槽の幾何形状に関する記号は図-2に示して定義する。なお、すべての室内実験は、外径 16 mm の塩化ビニル管に 5 cm 間隔で径 1 mm の孔を設けた散気管に同一のコンプレッサーで空気を送り、散気装置の条件を同一にして行った。

実験Ⅰ：鉛直に設置したアクリル製矩形管（高さ 200 cm、断面 19.5 cm × 39 cm）の底部中央に径 10 cm の給水管を設け、その下流に整流格子および散気管を設置した（図-1 参照）。給水管と接続したポンプより、表-1

表-1 矩形管実験条件

Run	$j_w$ (cm/s)
I-1	2.69
I-2	7.18
I-3	12.36
I-4	16.89

表-2 流入損失実験条件

Run	B (cm)	H (cm)	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)
II-1	10	25	7.2	10
II-2	5	25	7.2	10
II-3	10	25	3.4	10

表-3 揚水流量と散気量の実験条件

Run	B (cm)	H (cm)	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)
III-1.1	10	95	15	30
III-1.2	10	80	15	45
III-1.3	10	105	5	30
III-1.4	10	85	25	30
III-2.1	15	95	15	30
III-2.2	15	80	15	45
III-2.3	15	105	5	30
III-2.4	15	85	25	30
III-3.1	20	95	15	30
III-3.2	20	80	15	45
III-3.3	20	105	5	30
III-3.4	20	85	25	30

表-4 循環流の効率の実験条件

Run	H (cm)	$h_2$ (cm)	$A_s$	$j_w$ (cm/s)
IV-1	30	5	1.3~6.3	1.15
IV-2	30	5	1.3~6.3	3.51
IV-3	115	20	0.86	4.37
IV-4	115	20	0.86	2.63
IV-5	50	10	1.8	1.32
IV-6	50	50	1.1	1.32

表-5 現地実験条件

Run	W (cm)	B (cm)	H (cm)	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$j_w$ (cm/s)
V-1	325	10	300	15	11	4.12
V-2	325	10	300	15	11	2.50
V-3	325	10	200	15	119	5.83
V-4	325	10	200	15	115	4.12
VI-1	550	20	150	25	0	1.25
VI-2	550	20	150	25	45	2.92
VI-3	550	20	150	20	10	4.17

に示す実験条件に従って水を一定流量で矩形管に流し、散気量を変化させた。そして、気泡流のピエゾ水頭差を鉛直方向に 20 cm 間隔で 3 点設けた圧力タップより微差圧計 (Validyne 社製) で測定した。水流量は四角堰で、また散気量は大気圧での体積流量をロータ式流量計で測定した。

実験Ⅱ：幅 140 cm、高さ 50 cm、奥行き 30 cm の水槽中央にエアリフトを図-2 に示すように設置し、表-2 に示す実験条件に従い揚水筒の寸法を変えて、揚水筒内の鉛直方向の圧力分布を微差圧計 (Validyne 社製) で測定した。揚水流量は二次元電磁流速計 (計測技研社製) で流入流速分布を測定し求めた。散気量は、実験Ⅰと同様の方法で測定した。また、幅 120 cm、高さ 160 cm、奥行き 16 cm の水槽中央に先と同様にエアリフトを設置し、表-3 に示す実験条件に従い揚水筒の寸法を変えて、散気量と揚水流量を測定した。

実験Ⅲ：幅 720 cm，高さ 50 cm，奥行き 40 cm の水槽に，実験Ⅱと同様にエアリフトと散気管をそれぞれ設置し，水深を 40 cm で一定として水槽幅を側壁で仕切り，アスペクト比を変化させた。また，幅 120 cm，高さ 160 cm，奥行き 16 cm の水槽では，水深を変えてアスペクト比を変化させた。これらの実験装置を用いて，表—4に示す実験条件に従い，揚水筒の流入端の幾何条件を  $B=10\text{cm}$ ， $h_1=5\text{cm}$  に固定して揚水筒全高  $H$  とアスペクト比を変化させ，水槽の奥行き中央断面内の循環流速分布を二次元電磁流速計（計測技研社製）で測定した。散気量と揚水流量は，実験Ⅱと同様の方法で測定した。

現地実験は，エアリフトの水質改善効果を確かめるために行った。実験は東京都の隅田川支流で江東内部河川のひとつでもある仙台堀川で行った。仙台堀川は周辺市街地の下水道が普及しているため，比較的水質の良い感潮河川である。実験装置は以下に示す二種類を用いた。なお，エアリフトには外径 60 mm の塩化ビニル管に 5 cm 間隔で径 1 mm の孔を設けた散気管をそれぞれ用いた。

ひとつは，仙台堀川に設けられた清澄排水場の沈砂池への導水路のひとつ（長さ 10 m，幅 3.25 m）にエアリフト（全長  $L=2\text{ m}$ ）を設置した（Run V）。

ふたつめは，コンプレッサーや各種測定器具が積める全長 8 m，全幅 5.5 m の台船を用意し，台船中央からエアリフト（全長  $L=2\text{ m}$ ）を，また台船端から側壁を吊り下げて曝気槽を作った（Run VI）。曝気槽は，河川の中央に図—2に示す横断面に垂直に河川水が流入するように設置した。曝気槽の上下流端およびその中央の横断面と曝気槽上下流の河川横断面で，DO 濃度，SS 濃度および VSS 濃度分布の経時変化を複数の DO メーターと採水器を用いて測定した。さらに，曝気槽中央の横断面では，室内実験と同様の方法による循環流速分布測定と電気電導度計による塩分濃度の測定を行った。散気量はロータ式流量計で測定した。実験条件を表—5に示す。

### 3. ボイド率

エアリフトの揚水現象は，揚水筒内の空気と水の二相流体の見かけの密度が水の密度より小さくなることに起因する密度流として解釈できる。任意の点での空気と水の二相流体の密度  $\rho$  は次式で定義する。

$$\rho = \rho_a f_g + \rho_w (1 - f_g) \dots \dots \dots (1)$$

ここで， $\rho_a$  と  $\rho_w$  はそれぞれ空気と水の密度， $f_g$  はボイド率である。ボイド率は定常気泡流では，任意の点に空気が存在する確率の時間平均値と定義する。すなわち，定常気泡流を時間平均値を用いて考えるとき，ボイド率は任意の点での空気の存在する期待値である。密度流として扱うためには，式(1)よりボイド率が必要となるが，

ボイド率分布が一樣ではなく，また気泡と水に相対速度があるため問題は複雑になっている。

ボイド率は，流れ方向に流速分布およびボイド率分布が一定である鉛直円管内の定常気泡流について以下のような研究が行われている。Zuber と Findlay<sup>5)</sup>は断面平均ボイド率と水流量および空気流量の関係を，流速分布とボイド率分布により変化するパラメータを用いて整理している。しかし，パラメータの値は実験ごとに異なり，各分布が条件により変化することを示している。井上，青木ら<sup>6)</sup>は気泡と水の各相の流速分布とボイド率分布の測定を行い，以下の特性を報告している。すなわち，各相の流速分布は水流量が比較的小さい場合，単相流の滑面乱流の流速分布に比べ平坦化し，さらに水相流速分布は管中心軸で最大流速が現れない現象が生じることを報告している。また，ボイド率分布は管壁近傍に最大値を持ち，管中心軸に向かってある一定値に漸近する分布形であり，最大値は同じ断面平均ボイド率でも水流量が増加するほど大きくなることを報告している。この現象は水相流速分布と気泡の水に対する相対速度のため生じた，気泡に作用する管壁方向流体力に起因すると考えられる。上述のボイド率分布形の性質は，Lahey<sup>7)</sup>により鉛直三角断面管内の気泡流についても確認されており，隅角部にボイド率の最大値が生じることを報告している。赤井と竹中<sup>8)</sup>は対数分布則を拡張し，水相流速分布式とボイド率分布式を導いている。Wang，Lee ら<sup>9)</sup>はコニカルプローブを用いて水相の乱流測定を行い，ボイド率が管壁近傍で最大値を生じる現象をレイノルズ応力と気泡径を考慮した気泡に作用する管壁方向流体力の関係から説明している。しかし，赤井らや Wang らの分布式は，実験的に定めなくてはならない定数や水量量を含んでいるため，一般的な適用は難しいであろう。ここでは，実用の立場から矩形管の断面平均ボイド率  $\bar{f}_g$  を，Zuber らの方法を参考にした以下の方法により，断面平均量を用いて定めた。

気泡は非圧縮と仮定し，水と空気の連続式を次式に示す。

$$Q_a = A j_a = \bar{f}_g A \bar{u}_a = \text{const} \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_w = A j_w = (1 - \bar{f}_g) A \bar{u}_w = \text{const} \dots \dots \dots (3)$$

ここで，添字の  $a$  と  $w$  はそれぞれ空気と水の物理量を表し， $Q$  は体積流量， $j$  は容積流束であり，空気または水がそれぞれ単相で揚水筒全断面を流れるとした場合のみかけの断面平均流速と定義する。 $\bar{u}$  は空気と水がそれぞれ断面積  $\bar{f}_g A$  と  $(1 - \bar{f}_g) A$  の断面を通過する場合の断面平均流速， $A$  は揚水筒断面積である。なお， $\bar{u}$  は一般に各相の時間平均流速の断面平均値ではないことに注意する必要がある。従って， $\bar{u}$  は陰にボイド率分布の影響を含んでいるので，その影響を示すパラメータとしてスリップ速度  $\bar{u}_s$  を次式で定義する。

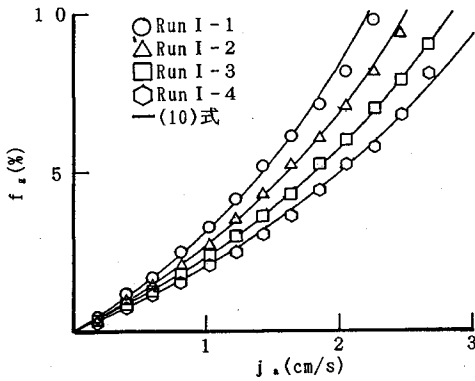


図-3  $\bar{u}_g$ と $j_a$ および $j_w$ の関係

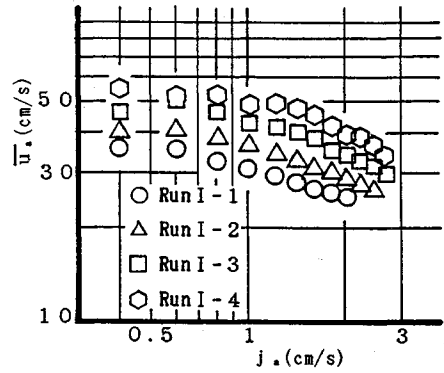


図-4  $\bar{u}_w$ と $j_a$ および $j_w$ の関係

$$\bar{u}_s = \bar{u}_a - \bar{u}_w \dots \dots \dots (4)$$

$\bar{u}_s$ は言うまでもなく、一般に気泡の水に対する相対速度の断面平均値とは異なる。簡単のため相対速度がゼロであると仮定すると、 $\bar{u}_s = 0$ はボイド率分布が一様であることを示し、 $\bar{u}_s > 0$ 、 $\bar{u}_s < 0$ はそれぞれボイド率分布が流速分布の平均流速より速い側および遅い側に片寄っていることを示す。実際の気泡流は相対速度があるため、 $\bar{u}_s$ は気泡径、ボイド率分布、壁面の存在などのため生じた相対速度分布の影響も含まれる。

式(2)、式(3)と式(4)より断面平均ボイド率は次式となる。

$$\bar{f}_g = \frac{j_a + j_w + \bar{u}_s - \sqrt{(j_a + j_w + \bar{u}_s)^2 - 4j_a\bar{u}_s}}{2\bar{u}_s} \dots \dots \dots (5)$$

一般に気泡流は $j_a \ll j_w$ の範囲であり、今回のエアリフトの実験もこの範囲にある。従って、

$$4\bar{u}_s j_a / (j_a + j_w + \bar{u}_s)^2 \ll 1$$

であるので、式(5)の右辺の分子第2項を Taylor 展開して第1次近似を行うと次式となる。

$$\bar{f}_g = \frac{j_a}{j_a + j_w + \bar{u}_s} \dots \dots \dots (6)$$

スリップ速度は、矩形管や散気管などの装置が一定であれば容積流束の関数と考えられる。 $\bar{u}_s$ と $j_a$ および $j_w$ の関係を実験Iより以下のように定めた。

$$\bar{u}_s = 37.14 + 0.161j_w - 9.161j_a \quad (\text{cm/s}) \dots \dots \dots (10)$$

揚水筒内の気泡流を、図-2に示すZ軸についての定常一次元の連続式と運動量式により解析する。気泡群のもつ運動量が水の運動量に比べ小さいので無視すると、運動量式は次のようになる。

$$\frac{d}{dz}(\rho_w Q_w \bar{u}_w + pA) + \bar{\rho}gA + \tau s = 0 \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $p$ は圧力、 $\tau$ は壁面せん断応力、 $s$ は揚水筒の潤辺長、 $\bar{\rho}$ は空気と水の二相流体の断面平均密度、 $g$ は重力加速度である。式(7)は、運動量補正係数を井上ら<sup>6)</sup>の実測した流速分布を考慮して1とした。

式(1)と式(3)を式(7)に代入し整理すると次式となる。

$$\rho_w A j_w^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{1 - \bar{f}_g} \right) + A \frac{dp}{dz} + \rho_w g (1 - \bar{f}_g) A + \tau s = 0 \dots \dots (8)$$

ただし、気泡群の重量は $\rho_a / \rho_w \ll 1$ であるので無視した。式(8)を実験Iの矩形管に適用し、ピエゾ水頭差の測定を行った2点間距離 $l$ について積分する。実験は、“ $\bar{f}_g = \text{一定}$ ”となる領域で行ったので次式が成立する。

$$\bar{f}_g = \frac{\Delta h_p}{l} + \frac{\tau}{\rho_w g R} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $\Delta h_p$ は距離 $l$ 離れた2点間のピエゾ水頭差、 $R$ は径深である。青木と井上<sup>10)</sup>の報告によると、気泡流の壁面せん断応力は、気泡群の混入による水相流速分布、乱流構造の変化や見かけの密度分布によるせん断応力分布の変化などのため、水单相流の滑面乱流の壁面せん断応力に比べて一般に大きくなる。その傾向は水流量に比べ空気流量が多いほど顕著であり、青木らの実験結果では最大20倍にも達している。しかし、実験Iで測定した $\Delta h_p$ と水单相流の壁面摩擦損失水頭の比は実験範囲内で約100以上なので、式(9)による $\bar{f}_g$ の計算値に対する $\tau$ の影響は小さいと考えてよいであろう。よって、式(9)で $\tau$ に関する右辺第2項を無視して $\bar{f}_g$ を計算した。この $\bar{f}_g$ の計算値と $j_a$ および $j_w$ の関係を図-3に示す。同図より、 $\bar{u}_s$ は近似的に次の実験式で与えた。

$$\bar{u}_s = 37.14 + 0.161j_w - 9.161j_a \quad (\text{cm/s}) \dots \dots \dots (10)$$

式(6)と式(10)を用いて $\bar{f}_g$ を計算し、図-3に実線で示した。同図より、実験結果は式(10)により良好に表現される。ただし、式(10)は厳密には図-1に示す実験装置にのみ適用できる実験式である。図-4に $\bar{u}_w$ と $j_a$ および $j_w$ の関係を示した。同図より、 $j_a$ がある値以下では $\bar{u}_w$ はほぼ一定値を示し、 $j_a$ がある値より増加するにつれ $\bar{u}_w$ は減少する傾向があることがわかる。これは、実験範囲では $j_a$ が増加するほど矩形管の壁面近傍により大きな最大値を持つボイド率分布になったためと考えられる。従って、より広範な条件の実験より式(10)を検証する必要がある。その際、上述の整理手順は有効な方法

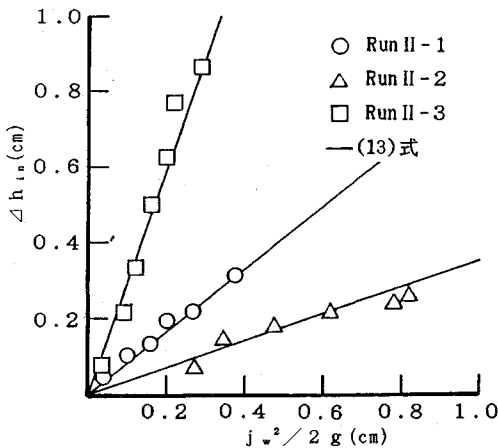


図-5 流入損失水頭と速度水頭の関係

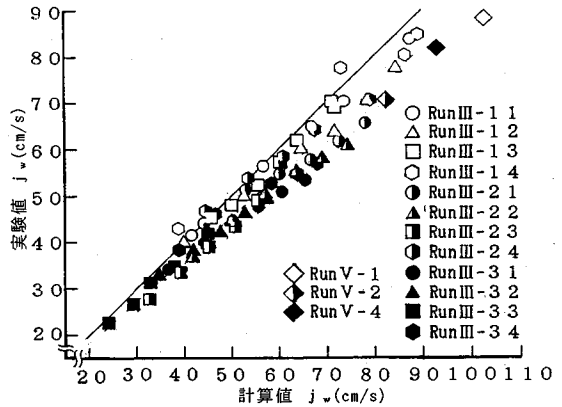


図-6  $j_w$ の実験値と計算値の比較

である。

#### 4. 揚水流量

式(10)は流れが十分に発達した定常気泡流のスリップ速度を与える。従って、エアリフトの場合は厳密には揚水筒流入端から等速流に発達する過程では適用できない。しかし、この部分は揚水筒全高に比べて短いので、式(10)を揚水筒全高に適用し、全高で断面平均ポイド率が一定である等速流として解析する。

式(7)を揚水筒全高  $H$  について積分すると次式を得る。

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho_w g} + (1 - \bar{f}_g)H + \frac{\tau_0 H}{\rho_w g R} = 0 \quad (11)$$

ここで、 $p_1$  と  $p_2$  はそれぞれ揚水筒流入端と流出端での圧力、 $\tau_0$  は壁面平均せん断応力である。 $p_1$  と  $p_2$  は実験Ⅱより以下のように定めた。

流入損失水頭は速度水頭に比例するとしてよいから、 $p_1$  はベルヌーイ式より次式で与えられる。

$$\frac{p_1}{\rho_w g} = H + h_2 - (1 + K) \frac{j_w^2}{2g} \quad (12)$$

ここで、 $K$  は流入損失係数である。実験Ⅱより、流入損失水頭  $\Delta h_{in}$  と速度水頭の関係を図-5に示す。同図より、 $K$  は揚水筒流入端の幾何条件の関数とした次式が適切であると考えられる。

$$K = 0.32 \left( \frac{B}{h_1} \right)^2 + 0.20 \quad (13)$$

ここで、 $h_1$  は水槽底面から揚水筒流入端までの距離、 $B$  は揚水筒幅である。式(13)に相当する例として管路の急縮流れの損失係数があげられ、その損失係数は管径の比の二乗にほぼ比例し、比例係数が約0.45である<sup>11)</sup>。これより、式(13)は妥当な実験式であると考えられる。

$p_2$  は、 $B/h_2 \leq 1$  ではほぼ静水面からの静水圧であるこ

とが実験Ⅱより確かめられた。実験Ⅱでは水面の盛り上がりは、最大で  $h_2$  程度であった。試算したところ、水面の盛り上がりに対する影響は、水の運動量に比べて二相流体のみかけの密度により生じた浮力が大きいことがわかった<sup>12)</sup>。以上より、今回は近似的に  $p_2$  を静水圧で与える。

$$\frac{p_2}{\rho_w g} = h_2 \quad (14)$$

ここで、 $h_2$  は揚水筒流出端から静水面までの距離である。

気泡流の壁面せん断応力は、主に滑面円管について報告されている<sup>13)</sup>が、本論では簡単のため、 $\tau_0$  を次式の水単相流の Darcy-Weisbach の式で近似する。

$$\tau_0 = \frac{1}{8} f \rho_w j_w^2 \quad (15)$$

ここで、 $f$  は摩擦抵抗係数である。

式(11)に式(12)、式(14)および式(15)を代入し、 $j_w$  について整理すると次式を得る。

$$j_w = \left( \frac{2g\bar{f}_g H}{1 + K + \frac{fH}{4R}} \right)^{1/2} \quad (16)$$

式(6)、式(10)、式(13)および(16)式より  $j_w$  が計算でき、実験結果との比較を図-6に示す。ただし、 $f = 0.035$  とした。計算値は  $j_w$  が増加するほど、すなわち  $ja$  が増加するほど、また  $B$  が広くなるほど実験値に比べ大きな値を与える。その主な原因は  $j_w$  が増加するほど、また  $B$  が広くなるほど等速流に達するまでの領域が長くなり、揚水筒全高で " $\bar{f}_g = \text{一定}$ " の仮定との相違が大きくなったためと考えられる。しかし、今回の計算結果の誤差が現地実験についても室内実験と同じく +10% 程度であるので、揚水流量は実用上十分な精度で計算できると言えよう。また、実用に際しては揚水筒流入端にベルマウスを設け、散気方法を散気板などの面源に改良することにより等速流に達するまでの領域を短くし、揚水効率を向上すると共に計算精度を向上できると考えら

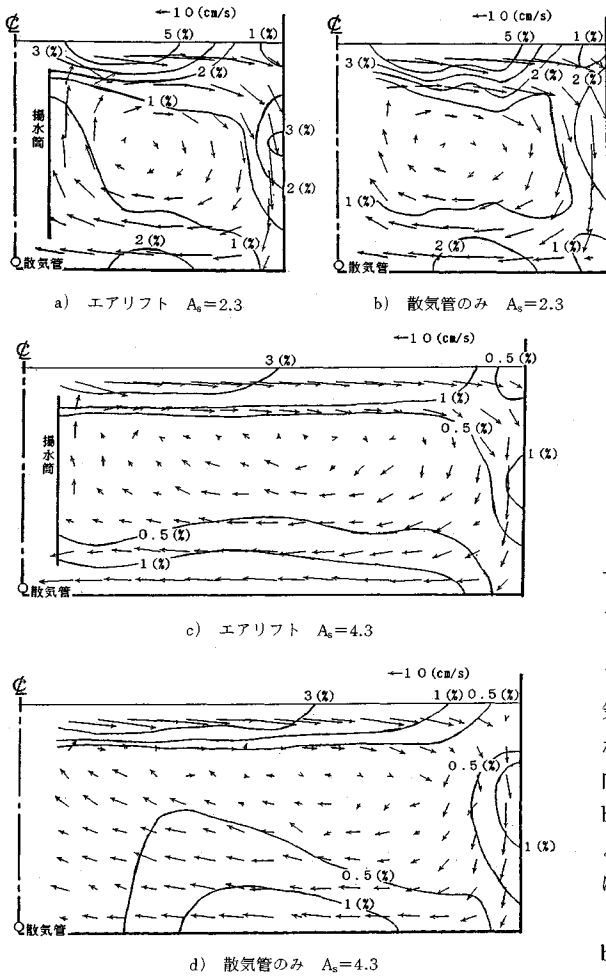


図-7 循環流速分布図 ( $j_a=3.51(\text{cm/s})$ )

れる。

### 5. 循環流

#### (1) エアリフトによる循環流の特徴

図-2に示すように鉛直に設けた側壁は、エアリフトにより揚水したため生じた水面での水平方向流を壁面に沿う下降流に変え、断面内に循環流を生じさせる。循環流は、河床に作用するせん断応力を増加させるため、底泥の浮上に効果的である。また、底泥を乱さないように河床と揚水筒流入端の距離を保った場合でも、循環流は曝気された河川水を底泥表層上に流送し、底泥表層の好気性状態の維持に効果的である。

図-7に実験Ⅲで測定したエアリフトと散気管のみにより生じた循環流速分布をそれぞれ示す。図中の等値線は断面内の全運動エネルギーを100%として、各部分での運動エネルギーの分布を百分率で示している。図-7よりエアリフトと散気管のみの循環流を比較すると、ア

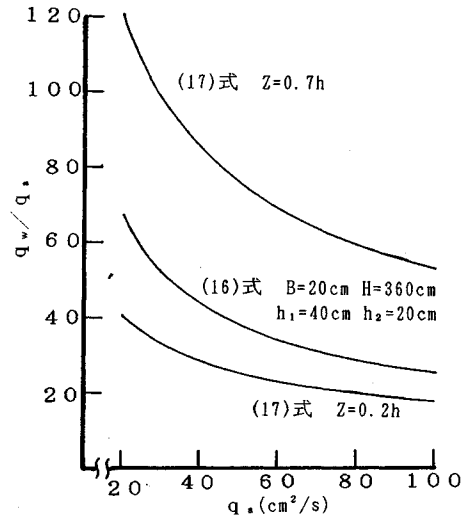


図-8 bubble plumeとエアリフトの揚水流量の比較

スペクト比  $A_s=2.3$  の a) と b) はほとんど差異がない。しかし、 $A_s=4.3$  では水槽底部付近の等値線が、エアリフトの c) は水槽底面に沿うように分布しているが、散気管のみの d) は散気管に接近するにしたがい徐々に広がっていき、運動エネルギーが集中しない分布になる傾向がみられる。これは両者の揚水機構の差異、すなわち、bubble plume に比較してエアリフトは揚水筒流入端でより集中的に揚水するためである。この効果をみるために以下の計算を行った。

Kobus<sup>14)</sup> は  $0.2h \leq Z \leq 0.7h$  の領域では散気管による bubble plume の水相流速分布はガウス分布で与えられるとして、揚水流量と散気量の関係を次式で提案している。

$$q_w = \left\{ -2\sqrt{\pi}gh_{aim}C(Z+Z_0)\frac{q_a}{u_b}\ln\left(1-\frac{z}{h_*}\right) \right\}^{1/2} \dots (17)$$

ここで、 $q_w$  と  $q_a$  はそれぞれ単位奥行きあたりの揚水流量と散気量、 $h_{aim}$  は大気圧に相当する水柱の高さ、 $C$  は流速分布の拡幅率、 $u_b$  は気泡群の平均上昇速度、 $Z_0 = 80\text{cm}$ 、 $h_* = h + h_{aim}$  である。Kobus の実験と同じ  $h = 430\text{cm}$  で、式 (17) より  $Z=0.2h$  と全揚水量として  $Z=0.7h$  での揚水流量を計算し、また、揚水筒の寸法を以下のように定めたエアリフトの揚水流量を式 (16) により計算し、図-8 に両者を比較した。

エアリフトは  $h_1$  の調節により揚水筒流入端周辺の流速の増減が行える特徴がある。また、エアリフトを運転する現地河川の諸条件により、 $h$ 、 $h_1$  および  $h_2$  は制限される。従って、 $h$ 、 $h_1$  および  $h_2$  を与えてから揚水流量が最大となる揚水筒幅  $B_{opt}$  を求めるのが実際的と考えられる。 $B_{opt}$  は  $dj_w/dB=0$  ( $d^2j_w/dB^2 < 0$ ) かつ  $d\bar{f}_g/dB=0$  ( $d^2\bar{f}_g/dB^2 > 0$ ) を満たすので、両辺を  $B$  で微分した式 (16) と式 (13) より次式を得る。

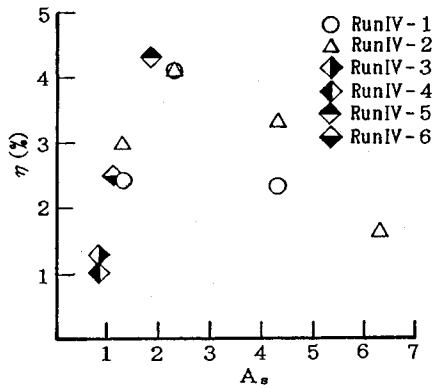


図-9 η と  $A_s$  の関係

$$B_{opt} = 0.92(fHh)^{1/3} \dots\dots\dots (18)$$

揚水筒の断面寸法は  $h_1 = 40$  cm,  $h_2 = 20$  cm 定め,  $f = 0.024$  を用いて式(18)より  $B = 20$  cm とした.

図-8より, エアリフトの揚水流量は散気管のみによる bubble plume の全揚水量に比較して半分程度であるが,  $Z = 0.2h$  までの揚水流量と比較すると 1.5 倍程度である. bubble plume と揚水筒への平均流入流速をそれぞれ  $q_w|_{z=0.2h} / (2 \times 0.2h)$ ,  $q_w / 2h_1$  とすると, 揚水筒の平均流入流速は散気管のみの約 3 倍であることがわかる. よって, エアリフトは揚水流量では散気管のみによる bubble plume の全揚水量に比較して不利であるが,  $h_1$  を調節することにより平均流入流速の増大が可能である. 以上の簡略な比較より, エアリフトは底泥の浮上に対して有利にすることができると言える.

(2) 循環流の効率とアスペクト比

循環流は, 循環流の運動エネルギーが最大となるアスペクト比で生じさせるのが最も効率がよいと考えられる. 以下では, 代表的な水理量を用いて循環流の効率を表し, 効率の良いアスペクト比について検討する.

循環流の運動エネルギーの代表値  $E_{kin}$  を次式で与える.

$$E_{kin} = \rho_w q_w \frac{\bar{v}^2}{2} \dots\dots\dots (19)$$

ここで,  $\bar{v}^2$  は循環流速の断面二乗平均値である. また, 空気を底床から注入するため水に与えられるエネルギーの代表値  $E_{air}$  は, 空気の運動エネルギーを無視するとポテンシャルエネルギーのみであるから次式で与えられる.

$$E_{air} = \rho_w g h q_a \dots\dots\dots (20)$$

$E_{kin}$  と  $E_{air}$  の比は, ポンプの効率と同じ性質があるので循環流の効率  $\eta$  を示すと考えられる. すなわち,  $\eta$  を次式で与える.

$$\eta = \frac{\bar{v}^2 q_w}{2ghq_a} \dots\dots\dots (21)$$

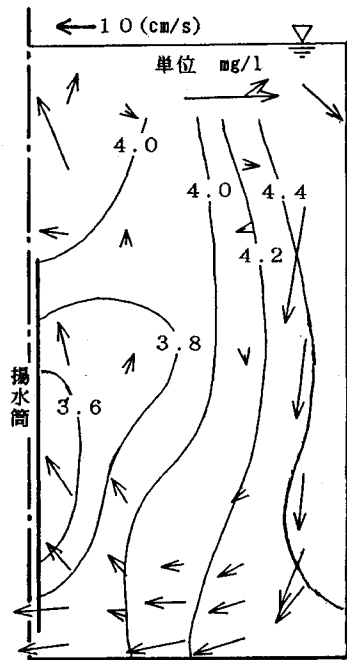


図-10 循環流速と DO 濃度の分布図 (Run V-4)

$\eta$  は  $q_w/q_a$  を含むので, 揚水効率の影響も含まれる. しかし, 揚水筒全高  $H$  を水深  $h$  に比べ極端に短くしなければ, 流入損失が支配的であると考えられる.  $B = 10$  cm,  $h_1 = 5$  cm と揚水筒流入端の幾何条件を固定して揚水効率の  $\eta$  への影響をほぼ一定とした実験Ⅲの結果より,  $\eta$  とアスペクト比  $A_s$  の関係を求めて図-9 に示した. 同図より,  $\eta$  は  $A_s = 2$  程度で最大値をとるが,  $2 \leq A_s \leq 4$  では  $\eta$  の変化が比較的少ない. 従って, 水深の変動がある場合は,  $A_s$  がこの範囲に収まるように側壁間隔を設定し, 効率の良い循環流が得られる.

以上を総合すると, 目標とする循環流速を  $\sqrt{v^2}$  として与えれば, 図-9 と式 (21) から  $q_w/q_a$  を計算し, さらに式 (16) より概略の必要散気量が求められる. 底泥の浮上に対して必要とする循環流速については, 丹羽ら<sup>3)</sup>の循環流の効果を考慮した流砂量の定量的評価を参照されたい.

6. エアリフトの実河川での水質改善効果

(1) エアリフトの DO 濃度増加効果

仙台堀川で行った現地測定の結果より, Run V-4 のエアリフトによる循環流速分布と DO 濃度分布を図-10 に示す. 同図より, 循環流は気泡群や水面で曝気された DO 濃度の高い河川水を側壁に沿って河床方向に流送し, 断面内の DO 濃度を一様に高めていることがわかる. このエアリフトの DO 濃度増加効果は, 河川水中に浮遊した有機物や底泥中の有機物質の酸化のために重要である. エアリフトの DO 濃度増加効果を二重境膜

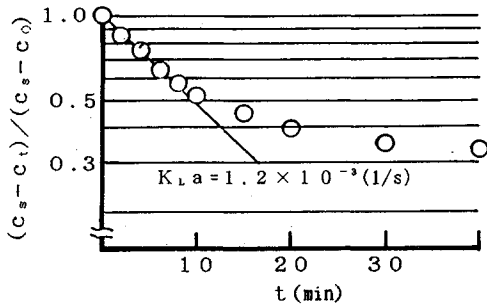


図-11  $(c_s - c_t)/(c_s - c_o)$  と  $t$  の関係

表-6 DO 濃度増加量の実測値と計算値の比較

Run	$f_a$ (%)	$K_L a \times 10^3$ (1/s)	$t$ (s)	$c_s$ (mg/l)	$c_o$ (mg/l)	$c_t$ (mg/l)	
						実測値	計算値
VI-1	1.5	1.5	24	7.8	3.3	3.4	3.4
VI-2	2.9	2.9	19	7.5	2.5	2.6	2.5
VI-3	4.3	4.3	20	7.8	1.9	2.2	1.9

説<sup>15)</sup>により検討し、河川の流れるなかでエアリフトを運転した場合の DO 濃度増加量の計算を試みた。

曝気水槽内での空気から水への酸素移動による DO 濃度変化は、二重境膜説より次式で与えられる。

$$\ln \frac{c_s - c_o}{c_s - c_t} = K_L a t \dots \dots \dots (22)$$

ここで、 $c_s$  は水の飽和 DO 濃度、 $c_o$  と  $c_t$  はそれぞれ曝気前と曝気時間  $t$  後の DO 濃度である。また、 $K_L a$  は総括酸素移動容量係数であり、 $K_L$  は総括酸素移動係数、 $a$  は曝気水槽内の水単位体積あたりの水と気泡群の接触面積である。 $K_L$  は気泡内の酸素の分圧、水の気泡境界面での運動、水面での曝気効果、水温や水質に影響されるが、本論では簡単のため一定値とする。また、曝気水槽内の河川水と気泡群の総接触面積が河川水中の気泡群の総体積に比例すると仮定し、この気泡群の総体積を  $\bar{f}_g Ah$  で近似すると、 $a$  について次の比例関係が成り立つ。

$$a \propto \frac{\bar{f}_g Ah}{WhL} = \frac{\bar{f}_g B}{W} \dots \dots \dots (23)$$

ここで、 $L$  はエアリフト全長である。以上より、 $K_L a$  は  $\bar{f}_g B/W$  に比例する。Akita と Yoshida<sup>16)</sup> は、 $K_L a$  が  $\bar{f}_g$  の 1.1 乗に比例すると報告しており、式 (23) は近似値を計算するために妥当な仮定と考えられる。式 (23) の比例定数を次に示す実験より定めた。

亜硫酸ナトリウムで完全に脱酸素した水道水を Run II-21 のエアリフトを用いて  $j_a = 4.32$  cm/s の散気量でエアレーションした場合の  $(c_s - c_t)/(c_s - c_o)$  と  $t$  の関係を測定し、その結果を図-11 に示す。同図より、 $c_t$  が約 2 mg/l では  $K_L a = 1.2 \times 10^{-3}$  (1/s) である。また、式 (6) と式 (10) より  $\bar{f}_g = 3.4 \times 10^{-2}$  であるので、 $K_L a$  は次式で与えられる。

$$K_L a = 0.29 \frac{\bar{f}_g B}{W} \dots \dots \dots (24)$$

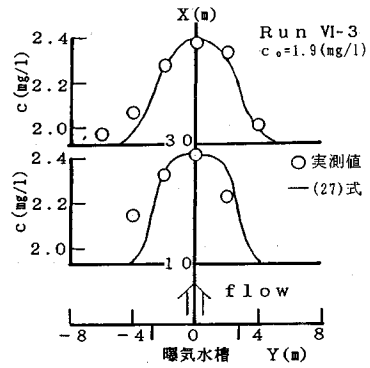


図-12 移流分散した DO 濃度分布図

曝気時間  $t$  は、河川水が曝気水槽全長、すなわちエアリフト全長  $l$  を河川の平均流速で通過するのに要する時間として次式で与えた。

$$t = \frac{L}{U} \dots \dots \dots (25)$$

ここで、 $U$  は河川の平均流速である。また、 $c_s$  (mg/l) は合田の文献<sup>17)</sup>より次式で計算した。

$$c_s = \frac{0.678(p_{atm} - p_w)(1 - n \times 10^{-5})}{T + 35} \dots \dots \dots (26)$$

ここで、 $p_{atm}$  (mmHg) は大気圧、 $p_w$  (mmHg) は飽和水蒸気圧、 $n$  (mg/l) は塩分濃度、 $T$  (°C) は水温である。

以上より、 $K_L a$ 、 $t$  および  $c_s$  を与えて、式 (22) より現地実験のエアリフトによる曝気後の DO 濃度  $c_t$  を計算し、実測値と比較したのが表-6 である。実測値は、曝気槽の下流端で測定した DO 濃度の断面平均値である。Run VI-3 は底層に河川水より DO 濃度の高い海水層が存在し、エアリフトでこの層が揚水されたため計算値に比べ実測値が大きくなった。しかし、計算値は測定精度や  $K_L a$  と  $t$  を定めるのに用いた仮定を考慮すれば満足な結果が得られた。

(2) DO 濃度の移流分散

エアレーションにより増加した DO 濃度は、河川の流れにより移流分散される。この実態を明らかにするために現地実験を行った。

座標軸を図-12 に示すようにとると、DO 濃度の移流分散は二次元定常の連続面源による乱流移流分散式で与えられる。

$$c = \frac{m}{2\sqrt{\pi U \epsilon X}} \int_{-w/2}^{w/2} \exp\left(-\frac{U(Y-Y')^2}{2\epsilon X}\right) dY' + c_o \dots \dots (27)$$

ここで、 $c$  は DO 濃度、 $m = (c_i - c_o)U$  は単位面積、単位時間あたりのエアレーションにより増加した酸素の質量、 $\epsilon$  は拡散係数である。式 (27) では、和泉と遠藤<sup>4)</sup>により報告された、仙台堀川の河床底泥の浮遊状態での酸素利用速度係数を参考にし、底泥による酸素利用を無視した。 $\epsilon$  は Weibel と Schatzmann<sup>18)</sup>の報告より次式で



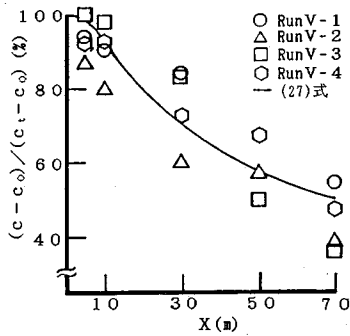


図-13 X軸上の移流分散したDO濃度分布図

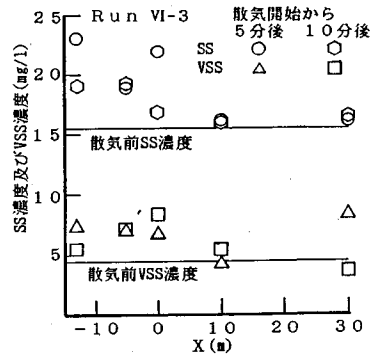


図-14 X軸上のSS濃度とVSS濃度の分布図

与えた。

$$\epsilon = 0.17u_*h \dots\dots\dots (28)$$

ここで、 $u_*$ は摩擦速度である。今回は、 $u_* \approx U/15$ として $\epsilon$ の概略値を定めた。図-12に式(27)と式(28)による計算値と実測値を示す。なお、 $m$ は実測値を用いた。また、図-13では $U \approx 3\text{cm/s}$ であるRunVについて、X軸上のDO濃度増加量 $(c - c_0)$ の変化を座標原点でのDO濃度増加量 $(c_1 - c_0)$ を100%として百分率で表し、計算値と実測値を比較した。図中の実測値はいずれも水深方向に3点でDO濃度を測定し、それらの平均値を示している。図-12と図-13より計算値は実験結果と定性的に一致しているの、以上より河川の流れによる移流分散をほぼ定量的に推定できる。

(3) エアリフトの底泥浮上効果

X軸上のSS濃度とVSS濃度の測定結果の一例を図-14に示す。エアリフトは $-2\text{m} \leq X \leq 0\text{m}$ に設置された。同図より、この場合では $X \leq 10\text{m}$ 程度までSS濃度とVSS濃度の増加が認められ、これはエアリフトの底泥浮上効果を示している。また、河川流速が約 $3\text{cm/s}$ と低流速であったため、エアリフトより上流にも同様な濃度増加がみられた。

VSS濃度の増加がわずかなことから、好気性分解の進んだ底泥表層部が主に浮上したと推察できる。これより、エアリフトのDO濃度増加効果を勘案すると、底泥の好気性分解をより促進できると考えられる。

7. おわりに

水質改善のためのエアリフトの水理機能の解明を行い、得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 揚水筒内の空気と水の二相流体に運動量式を適用することにより、エアリフトによる揚水流量を求める方法を確立し、その計算結果は実験結果と比較して実用上十分な精度であることが確かめられた。
- (2) 散気管のみのbubble plumeによる揚水に比べて、エアリフトは同一散気量による揚水流量は不利であるが、揚水筒流入端で集中的に揚水するため、揚水筒流

入端周辺の流速の増加が可能であることが確かめられた。また、長方形横断面内の循環流は、アスペクト比が2から4の範囲で効率よく生じることを循環流の運動エネルギーと散気により水に供給されるエネルギーの比より定量的に確かめた。

(3) 現地実験より、エアリフトのエアレーションにより増加したDO濃度は、横断面内に生じる循環流のため、横断面内で一様化されること、また、断面平均したDO濃度の増加量は二重境界説により十分な精度で推定できることが確かめられた。

(4) エアリフトのエアレーションにより増加したDO濃度の河川の流れによる移流分散を測定し、二次元定常移流分散の理論値と比較した。この結果より、DO濃度の移流分散をほぼ定量的に推定できることを確認した。また、河床底泥が横断面内に生じた循環流のため浮上し、河川水のSS濃度とVSS濃度を増加させることを現地実験より確かめた。

以上より、エアリフトは河川水のDO濃度を増加させて好気性を保ち、さらに底泥表層を河川水中に浮上させて底泥の好気性分解がより促進できることから、停滞水域での水質改善が行えると判断される。

謝辞：早稲田大学理工学部の遠藤郁夫教授から水質に関する実験について適切な御教示と御協力を頂いた。また、早稲田大学流体実験管理室の佐々木六造氏と当時早稲田大学学生であった山崎正和君(石川島播磨重工)には実験およびその整理に熱心な協力を頂いた。ここに記し、併せて謝意を表します。

参考文献

- 1) 北村誠一・橋本英・福智真和：河川の曝気浄化に関する研究(第一報)，水処理技術，Vol.11, No.10, pp.9～14, 1970.
- 2) 杉木昭典：水質汚濁一現象と防止対策一，技報堂出版，第2刷，p.344, 1975.
- 3) 丹羽克彦・関根正人・吉川秀夫：気泡流を伴う開水路流れの水理特性に関する実験的研究，土木学会論文集，第

- 411号, II-12, pp.117~125, 1989.
- 4) 和泉清・遠藤郁夫：エアレーションによって再浮上させた感潮河川域河床汚泥の酸素利用速度係数について，衛生工学研究論文集，第28巻，pp.59~65, 1992.
  - 5) Zuber, N. and Findlay, J.A. : Average volumetric concentration in two-phase flow systems, J.Heat Transfer, Ser.C 87-4, pp.453~468, 1965.
  - 6) 井上晃・青木成文ほか：垂直管内気ほう流の気体体積率および気・液流速分布，日本機械学会論文集（第2部），42巻360号，pp.2521~2531, 1976.
  - 7) 日本流体力学会編集：流体力学シリーズ2 混相流体の力学，朝倉書店，第1刷，pp.151~152, 1991.
  - 8) 赤川浩爾・竹中信幸：変分法による二相分散流の流動解析，第6回混相流シンポジウム講演論文集，pp.133~136, 1988.
  - 9) Wang, S.K., Lee, S.J. et al : 3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows, Int.J.Multiphase Flow, Vol.13 No.3, pp.327~343, 1987.
  - 10) 井上晃・青木成文：管内二相流の圧力損失に関する基礎的研究（第2報），日本機械学会論文集（第2部），32巻238号，pp.940~947, 1966.
  - 11) 日本機械学会：技術資料 管路・ダクトの流体抵抗，日本機械学会，第2刷，p.55, 1980.
  - 12) 服部敦・和泉清・吉川秀夫：エアリフトによる循環流の現地試験のための基礎的研究，水工学論文集，第35巻，pp.305~311, 1991.
  - 13) Akita, K. and Yoshida, F. : Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient in bubble columns, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., Vol.12, No.1, pp.76~80, 1973.
  - 14) Kobus, H.E. : Analysis of the flow induced by air-bubble system, Proc.ASCE, Vol.11 part 3, pp.1016~1031, 1968.
  - 15) Lewis, W.K. and Whitman, W.G. : Principles of gas absorption, Ind. and Eng. Chemistry, Vol.16, No.12, pp.1215~1220, 1924.
  - 16) 例えば植田辰洋：気液二相流一流れと熱伝達一，養賢堂，第1刷，pp.34~51, 1981.
  - 17) 合田健：水質工学 基礎編，丸善，第6刷，p.144, 1990.
  - 18) Webel, G. and Schatzmann, M. : Transverse mixing in open channel flow, J.Hydraulics Div, ASCE, Vol.103, No.HY10, pp.1173~1189, 1977.

(1991.10.29 受付)

## STUDY ON THE HYDRAULIC BEHAVIOR OF THE AIRLIFT IN AN OPEN-CHANNEL

Atsushi HATTORI, Kiyosi IZUMI and Hideo KIKKAWA

To improve a water quality in the stagnant reaches of urban rivers, the "airlift" apparatus can be efficiently introduced. Hydraulic behavior of the airlift was discussed by laboratory experiments. The discharge lifted and the suitable aspect ratio of the channel cross-section for the effective circulation of flow induced by the airlift can be determined by the aid of theoretical analysis. Field tests were also conducted in order to investigate the applicability of the airlift. The information on the characteristics of DO and SS behaviors caused by the airlift was also obtained.