

# 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

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW ACCOMPANIED BY INDUCED AERATION

丹羽克彦\*・関根正人\*\*・吉川秀夫\*\*\*

By Katsuhiko NIWA, Masato SEKINE and Hideo KIKKAWA

In recent years the sludge which has been piled up on the bed of urban rivers causes the lowering of the drainage ability and the water quality. But there is no effective idea for such problems.

The aim of this study is to wash away the sludge to downstream efficiently by discharging air into the water through orifices on pipes which set on river beds and producing the secondary flow.

This paper deals with the hydraulic behavior of the flow accompanied by induced aeration and the effect of aeration for the bed-material load.

Keywords: aeration, open-channel flow, secondary flow, bed-material load

### 1. はじめに

近年、都市河川では、河床にヘドロが堆積し、河川水の汚濁、悪臭の発生など河川環境を悪化させる問題や、このヘドロが河川断面積を減少させ、粗度を増加させることにより、河川の疎通能力を低下させる問題が起こっている。しかしながら、これらの問題に対する効率的な解決策はいまだ見出されていない。

現在、著者らは上記の問題に対する解決策として、従来より下水処理において用いられてきたエアレーションを応用し、水路床に設置した多孔管より水路内に散気し、発生した気泡噴流により強制的に断面内に二次流を生じさせることで水質悪化をもたらし、さらに、治水上の妨げとなる堆積底泥をより効率的に下流に流送させ、かつ、河川水のDOを増加させ水質改善を図ることを目的とした研究を進めている。

本報告は、それら一連の研究の中で、開水路流れに散気した場合の水理特性について検討を行い、さらに流砂

の問題にも適用し、散気することの流砂量に対する効果とその理由について考察したものである。

### 2. 実験概要

本研究を進めるにあたり、主に次の3つの基礎的な実験を行った。

第1に静水状態で気泡噴流により生じる循環流の特性を明らかにするために、最大幅53cmで幅を変化可能な高さ50cm、奥行き30cmの水槽と幅120cm、高さ160cm、奥行き15cmの2種類の長方形断面水槽を用い、水槽中央部底面上に設置した外径16mmの塩化ビニール管に5cm間隔であけられた径1mmの孔を通じて水槽内に散気した。具体的には、水槽内の水をポリスチレン粒子と同比重の塩水とし、ポリスチレン粒子をトレーサーとして、この粒子の運動をビデオ解析することにより循環流の流速分布を測定した。実験条件は、表-1に示す。散気量、アスペクト比、水深を変化させ流速

表-1 静水中での実験条件

CASE	孔一つ当り散気量 (cm <sup>3</sup> /sec)	水深 (cm)	水槽幅 (cm)	アスペクト比
0-1	11.20	21.0	53.0	2.52
0-2	22.40	14.0	30.0	1.36
0-3	33.60	11.0	30.0	1.28
0-4	44.80	11.0	30.0	1.00
0-5	56.00	120.0	120.0	1.00
0-6	77.20	120.0	120.0	1.00

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

\*\* 正会員 工博 早稲田大学助手 理工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科  
(同上)

表-2 流水固定床実験条件

CASE	底面粗度	流量 (l/sec)	孔一つ当り散気量 (cm <sup>3</sup> /sec)	散気管本数	散気孔間隔 (cm)	水深 (cm)	水面	アスペクト比	最大主流速 (cm/sec)
1-1	滑面	4.98	0.00 25.00	1	5.0	3.53 4.12	1/374 1/333	5.08 4.85	73.40 88.45
2-1	滑面	16.80	0.00 25.00	1	5.0	8.07 8.76	1/332 1/226	2.71 2.05	111.74 107.28
3-1	滑面	16.80	12.50	2	5.0	9.53	1/235	2.10	107.82
4-1	粗面	16.00	0.00 25.00	1	5.0	18.42 18.16	1/282 1/275	2.12 1.98	98.28 95.77

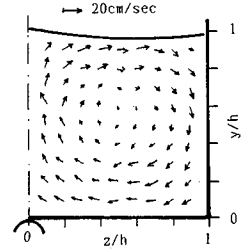


図-1 静水中循環流の流速ベクトル図

に及ぼす影響を調べている (実験 I)。

第2に、実験 I に流れを与えた場合に相当する流水中での実験を行った。実験は、全長 650 cm、幅 20 cm、高さ 40 cm のアクリル製長方形断面水路を使用し、水路床中央に縦断方向に実験 I と同様の散気管を 1 本設置した場合と、縦断方向に水路床中央より左右 5 cm の位置に 1 本ずつ、合計 2 本設置した場合の 2 つのタイプで行い、底面はベニア板を散気管の頂部までの高さに敷いた滑面固定床と、粒径 5 mm のガラス球をベニア板に敷き詰め接着した粗面固定床とした。また、実験条件は、表-2 に示すとおりであり、測定は、流速分布とせん断力分布を主に明らかにすることを目的として行った。まず、流速測定については、散気している関係上、主に直径 3 mm のプロペラ流速計を用いたが、気泡群の存在する範囲を除いては、2 チャンネルの X 型ホットフィルムによる三次元乱流計測を行い、二次流成分の測定も試みた。また、せん断力の測定は滑面固定床の場合、内径 1 mm、内外径比 0.6 のビトー管を用い、プレストンの方法により底面および壁面において行い、粗面固定床の場合には流速分布を測定し、それより計算でせん断力を求めた。なお、気泡噴流の影響を明らかにするために、同一の水力条件で散気しない通常の開水路流れについても同様の測定を行った (実験 II)。

第3に、実験 II で明らかになった流れの内部構造に関する知見に基づき、水路床上にガラス球、ポリスチレン粒子をそれぞれ平坦に敷き詰めた移動床上で散気による流砂量の変化と散気孔間隔や散気管の本数の違いによる流砂量の変化について測定を行い、そのメカニズムを明

らかにするとともに、効率的な散気量および散気孔間隔について調べた。具体的には実験 II で用いた水路で粒径 5 mm および 2 mm の比重 2.5 のガラス球を用いて行った実験 (Series-A, B, D) と、全長 800 cm、幅 80 cm、高さ 50 cm の木製長方形断面開水路で、粒径 2 mm、比重 1.024 のポリスチレン粒子を用いて行った実験 (Series-C) の合計 4 通り行い、同一水力条件下で散気量を増加させた場合の流砂量の変化 (実験 III・1) を調べ、また、Series-D においては、散気孔間隔や散気管本数の違いによる流砂量の変化について検討した (実験 III・2)。なお、流砂量の計測方法は、常に水路床が平坦になるように粒子を補給しつつ、水路下流端より流出する粒子を一定時間ごとに採取するというものである。実験条件は、表-3 に示すとおりであり、表中の水深と水面勾配の値は散気しない流れの場合である。

### 3. 静水中での循環流特性

水路底面より散気すると、生成される気泡噴流により断面内に循環流が生じる。よって、本研究においては、二次流の特性についての情報を得ることは不可欠なことである。しかし、流水中では、測定方法の制約上必ずしも容易でないため、静水中での予備的な実験も併せて行った。

発生した気泡の形状および上昇速度の分布については、只木<sup>1)</sup>、松本<sup>2)</sup>らの研究があり、その結果によれば本実験の範囲内においては、気泡の形状についてはほぼ球形であり、その直径および上昇速度は散気量や水深にはよらず、底面近傍での加速領域を除きほぼ一定値をとることが本研究においても確かめられた。

図-1 には、表-1 に示した 8 ケースの実験のうち、CASE 0・4 の循環流の流速ベクトル図を示している。ここで、鉛直方向に y 軸、水平方向に z 軸をとり、h は水深である。また、図中の半円は散気管を表わしている。これらの実験より、循環流に対して次のようなことが明らかになった。

- ① 同一散気量に対してもアスペクト比の違いによ

表-3 移動床実験条件

Series	流量 (l/sec)	水深 (cm)	水面勾配
A1	8.4	9.4	1/191
A2	10.0	18.0	1/875
A4	10.8	18.0	1/305
A5	9.5	19.3	1/178
B1	13.6	13.6	1/175
B2	13.6	13.6	1/225
B4	8.6	11.4	1/133
B5	9.2	16.8	1/190
C1	23.0	15.9	1/490
C3	22.7	27.0	1/333
D1	9.4	8.8	1/188
D2	14.2	17.8	1/180
D4	16.7	12.2	1/170
D5			

り、形成される循環流の流速ベクトルの大きさが異なり、アスペクト比が2のときに流速が最も大きくなり効率よく循環する。

② 同一アスペクト比の場合でも、散気量が異なれば生じる流速も異なる。しかしながら、散気量の増加に伴う流速値の上昇には限界がある。よって、散気量について効率的な最適値があると考えられる。

③ 散気管上部の上昇流に関しては、図-2(a)に示すように噴流周辺部および壁面の影響により負の値となる  $z/b_z > 2$  の範囲を除き、流速の鉛直方向成分  $v$  が水平方向 ( $z$  方向) に、気泡噴流に対して示されているのと同様、水深とは無関係にほぼ相似なガウス分布で近似されることが確かめられた。この気泡噴流の鉛直方向流速分布は、岩佐ら<sup>3)</sup>によれば次式で表示されており、本実験のような気泡循環流に対しても十分適用できることがわかる。

$$\frac{v}{v_{max}} = \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left[-0.693\left(\frac{z}{b_z}\right)^2\right] \dots\dots (1)$$

ここに、 $v$  : 流速の鉛直方向成分、 $v_{max}$  :  $y$  軸上の  $v$ 、  
 $\sigma$  : 標準偏差、 $b_z$  : 噴流の半値半幅。

また、図-3は、 $v_{max}$  の平均値と水中に存在する空気量との関係をこれまでのさまざまな実験値<sup>2), 4), 5)</sup>をもとに示したものである。従来は、 $v_{max}$  が単位時間当たりの散気量との関係でのみ示されていたが、この図では水深および散気量の条件が与えられれば  $v_{max}$  の平均値をほぼ予測できる。

④ 表面水平流に関しては図-4に示すように、あたかも  $O_1$  点を仮定の噴流源として生ずる噴流のごとくに放散する。仮想噴流源を新たな座標原点として水平方向を  $z_1$ 、鉛直下方を  $y_1$  とすると、図-2(b)に示すように表面流速の水平方向成分  $w$  の  $z_1$  方向成分は、③と

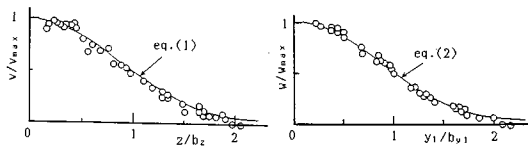


図-2(a) 上昇流の水平方向分布図 図-2(b) 表面水平流の鉛直方向分布図

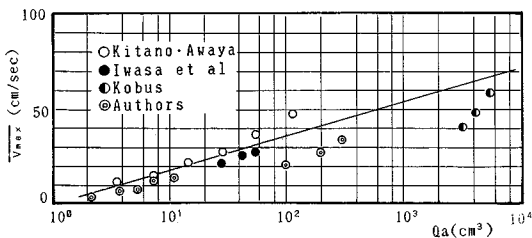


図-3  $v_{max}$  平均値と空気量の関係

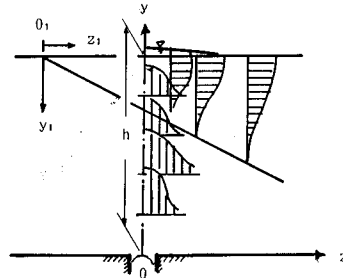


図-4 表面水平流の流況

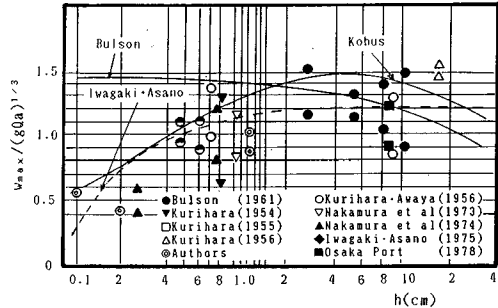


図-5 表面水平流の最大流速と空気量の関係

同様に  $0 < y_1/b_{y1} < 2$  の範囲でガウス分布となり、式(2)で表示できることがわかる。

$$\frac{w}{w_{max}} = \exp\left[-0.693\left(\frac{y_1}{b_{y1}}\right)^2\right] \dots\dots (2)$$

ここに、 $w$  : 流速の水平方向成分、 $w_{max}$  :  $z_1$  軸上の  $w$ 、  
 $b_{y1}$  : 噴流の半値半幅。

なお、噴流の場合、仮定の噴流源の位置は、

$$z_{01} = \pm 2 h \eta_b \dots\dots (3)$$

ここに、 $\eta_b$  : 噴流幅の勾配 ( $= 2.412 \sqrt{C^2}$ )、 $C$  : 混合距離係数、 $h$  : 水深。

であることが村岡<sup>6)</sup>により示されているが、CASE 0-4 の場合の実測値と式(3)により得られる値を比較すると、実験では  $z_{01} = \pm 6.0$  cm であり、式(3)によれば、 $z_{01} = \pm 6.4$  cm となる。よって、仮想噴流源の位置は、式(3)で求められることが確かめられた。

また、図-5は、岩垣ら<sup>7)</sup>の示した気泡管設置深さを与えたときの水平流の最大流速と空気量の関係の図に、著者らの実験結果を加えたものである。この図より、本実験のような気泡循環流においても他の気泡噴流のデータとさほど違いがないことがわかる。

#### 4. 気泡噴流を伴う流れの内部構造

##### (1) 主流速分布特性

気泡噴流を伴う流れの主流速(流れ方向流速)分布を図-6に示す。図-6は、一例としてアスペクト比が約

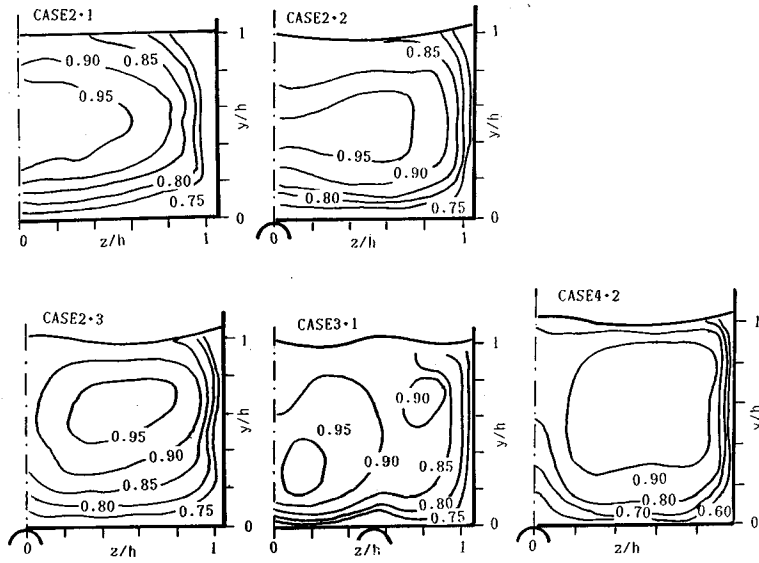


図-6 主流速  $u$  の等流速線図 ( $u/u_{max}$ )

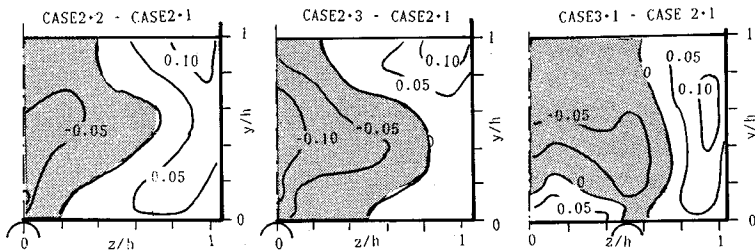


図-7 主流速  $u$  の等流速差線図 ( $\Delta u/u_{max}$ )

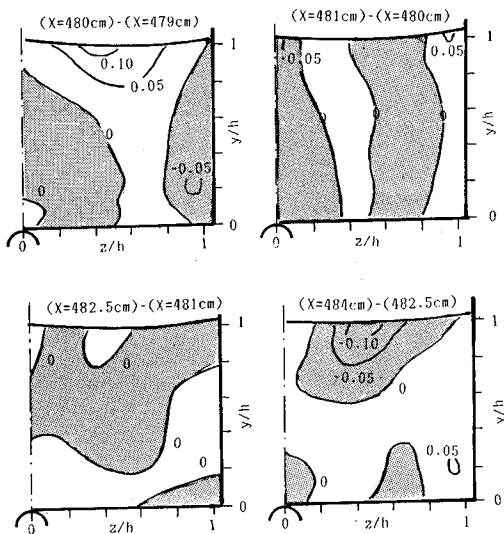


図-8 隣接する散気孔間での主流速分布の変化 ( $\Delta u/u_{max}$ )

2 の場合 (CASE 2・1, 2・2, 2・3, 3・1, 4・2) の主流速の等流速線図を表わし、図中の半円は散気管の位

置を示している。図-7は、散気による主流速の変化を定量的に調べるため、散気した場合の流速分布と散気しない場合の流速分布との差を等流速差線図で表わした。CASE 2・2, 2・3の散気管1本の場合では、主流速が水路中央部付近で減速、壁面付近で加速され、断面内の流速が散気しない通常の開水路流れの場合より一様化していることがわかる。これは、断面内に生じている二次流のために水路中央部の高速流体塊が比較的低速域である壁面および底面付近に輸送され、逆に水路中央部付近では、低速流体塊が持ち込まれるという運動量交換が行われるためである。また、CASE 3・1の散気管2本の場合もやはり同様な運動量交換が行われているため、断面内の主流速は同じ水路幅では散気管1本の場合より一様化することが知られる。

図-6および図-7で示した流速分布は散気孔を含む横断面 ( $x=480\text{cm}$ ) におけるものであるが、図-8には隣接する2つの散気孔間 ( $x=480\sim 485\text{cm}$ ) のCASE 2・3の場合の主流速分布の変化を示してある。同図は、ある断面での流速とその上流断面での流速との

差より示した等流速差線図であるが、その流速差は各断面における最大主流速の5%程度であり、散気孔間隔が5cm程度では散気孔を含む断面 ( $x=480$  cm) での測定値を代表値として用いてよいと考えられるため、以後は  $x=480$  cm のみを示す。

(2) 二次流特性

図-9および図-10には、CASE 2・3, 3・1の  $v$  と  $w$  の等流速線図およびCASE 2・1, 2・3, 3・1の二次流の流速ベクトル図を示す。なお、図-9において、 $v$  の等流速線図では上向きを正とし、 $w$  は散気管より壁面への向きを正としている。これらより、流水中においても図-1で示した静水中での循環流と類似した二次流が生じていることが認められる。特に  $\sqrt{v^2+w^2}$  で定義される二次流の大きさは、水路床付近では両者とも最大主流速のほぼ20%程度にまで達しており、通常の開水路流れの上記の比が5%以下の小さな値であることと比較すると、かなり強い循環が生じていることがわかる。

(3) 底面および壁面せん断力分布特性

散気に伴う底面および壁面のせん断力分布の変化を図-11に示す。この図より以下のようなことが知られる。なお、 $\bar{\tau}_b$ ,  $\bar{\tau}_w$  はそれぞれ水路底面および壁面に働く平均せん断力を表わしており、その値については表-4に示してある。

① 底面せん断力は散気することにより均等化し、また、平均底面せん断力は増加する。CASE 2・2, 2・3, 4・2の場合、 $z=5\sim 7$  cmの付近で最大となるが、この位置は、図-9で示した二次流ベクトルが大きな値を示す位置と対応している。また、CASE 3・1の場合は、 $z=1$  cm および  $z=8$  cm で最大値をとる分布となるが、これもやはり前述のことと同様なことがいえる。CASE 4・2の粗面での測定結果は、滑面のCASE 2・3の場合と比較し、平均値は若干小さいが分布形状はほとんど変わらないことがわかる。

② 壁面せん断力は、散気するとその平均値が増加する。これは、二次流により高速流体塊が壁面付近に輸送されるためである。

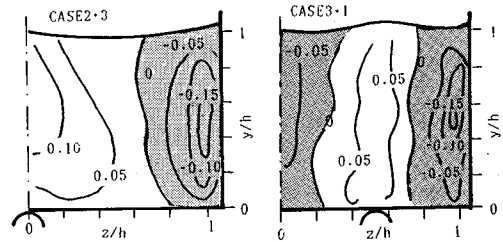


図-9(a) v の等流速線図 ( $v/u_{max}$ )

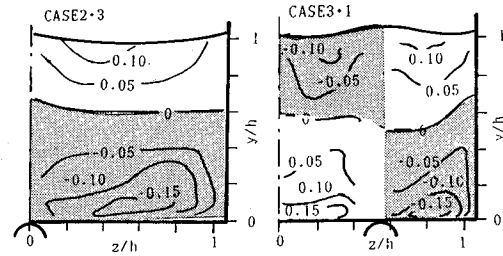


図-9(b) w の等流速線図 ( $w/u_{max}$ )

(4) 流れの乱流特性

流水中に散気するため気泡および微細な空気泡が断面内に存在することより、ホットフィルムによる測定値は、十分な精度をもつとはいえないが、主流速についてプロペラ流速計の計測値と比較したところ平均で1%程度の差であったためだいたいの性質を知ることが可能であると考へ測定を行った。図-12は、乱れ強度の等値線図である。これら一連の図より、散気によりいずれの方

表-4 底面および壁面の平均せん断力

CASE	底面平均せん断力 (gf/cm <sup>2</sup> )	壁面平均せん断力 (gf/cm <sup>2</sup> )
2・1	$1.33 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-2}$
2・2	$1.68 \times 10^{-2}$	$2.33 \times 10^{-2}$
2・3	$1.84 \times 10^{-2}$	$2.11 \times 10^{-2}$
3・1	$1.99 \times 10^{-2}$	$2.04 \times 10^{-2}$
4・1	$1.04 \times 10^{-2}$	—————
4・2	$1.61 \times 10^{-2}$	—————

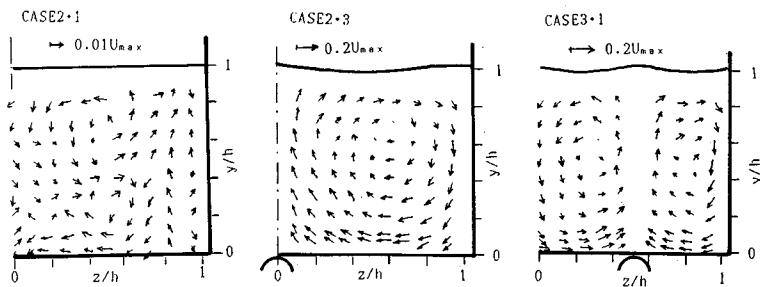


図-10 二次流ベクトル図

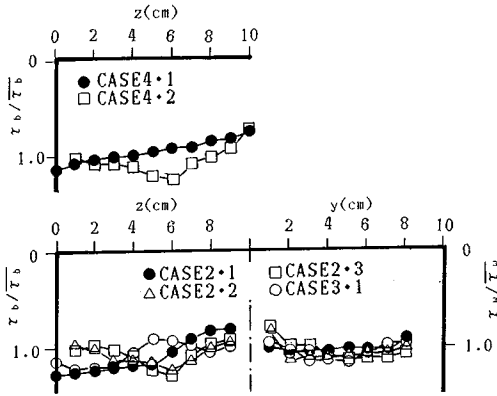


図-11 底面および壁面のせん断力分布図

向の乱れ強度も通常の開水路の乱れ強度より増加することが認められる。これは、気泡噴流により生じる大きな乱れが、二次流により輸送されるためと考えられる。

また、図-13は、レイノルズ応力の等値線図を示している。この図より、 $-U'V'$  および  $-U'W'$  とともに散気した場合には増大することが知られ、図-11のせん断

力分布において極大値を示した付近で最大となる分布であることがわかる。

### 5. 流砂量変化の検討

前章までで明らかになった主流速分布特性、二次流特性およびせん断力分布特性などの情報をもとに、本章では散気による流砂量の変化を定量的に評価し、検討を加える。

#### (1) 散気量増加に伴う流砂量変化

実験Ⅲでは、2種類の実験を行った。1つは、単一孔当たりの散気量  $q_a$  増加に伴う流砂量の変化について定量的に調べる実験である(実験Ⅲ・1)。Series A, B, Cの結果を図-14に示す。図の横軸は、断面平均の無次元せん断力  $\tau^* (=u^*/sgd, s=\sigma-1, u^*=\sqrt{gRl_e}, R$ : 径深,  $l_e$ : エネルギー勾配), 縦軸は、単位幅当たりの無次元平均流砂量  $q_B^* (=q_B/u^*d)$  である。この図より、散気量の増加に伴い流砂量が增大することが認められる。特に、限界掃流力付近の流れの場合にこのことが顕著である。この原因の1つは、図-11に示すように、二次流による底面平均せん断力の増加であり、もう1つ

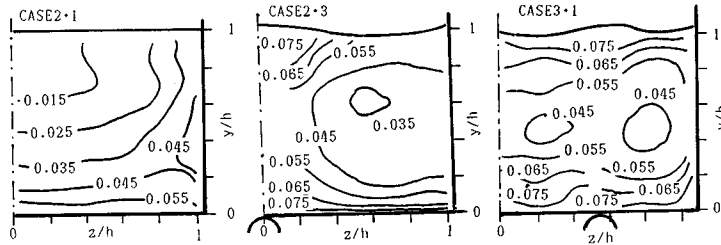


図-12(a) 乱れ強度  $u'$  の等値線図 ( $u'/u_{max}$ )

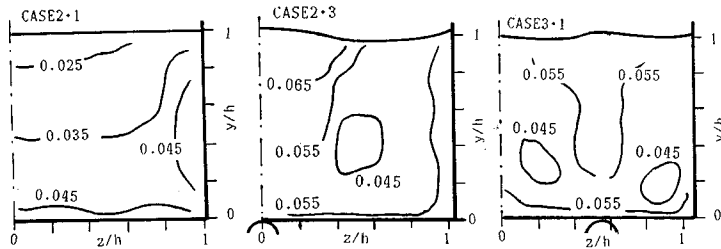


図-12(b) 乱れ強度  $v'$  の等値線図 ( $v'/u_{max}$ )

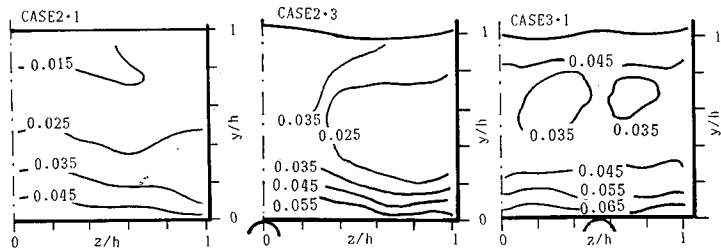


図-12(c) 乱れ強度  $w'$  の等値線図 ( $w'/u_{max}$ )

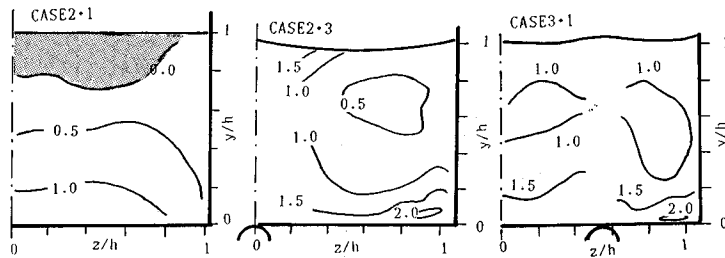


図-13(a)  $-\overline{u'v'}$  の等値線図 ( $-\overline{u'v'}/u_{max}^2 \times 10^3$ )

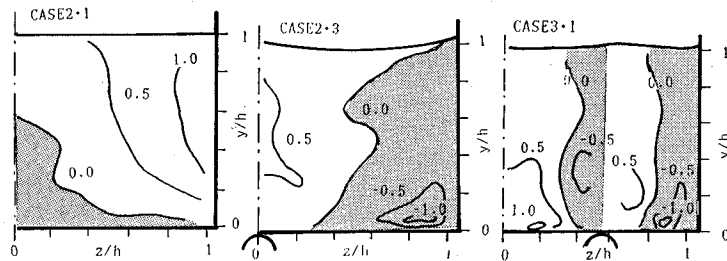


図-13(b)  $-\overline{u'w'}$  の等値線図 ( $-\overline{u'w'}/u_{max}^2 \times 10^3$ )

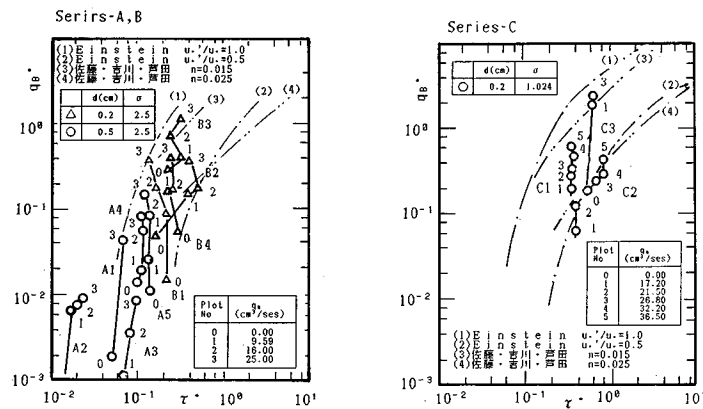


図-14 流砂量変化

は、散気により生ずる底面付近での大きな二次流の影響により、粒子に作用する流速の合ベクトルの大きさが大きくなり、粒子が離脱しやすくなるためであると考えられる。

(2) 散気方法の違いによる流砂量変化

実験Ⅲ・2は、同一水力条件のもとで、散気管を2本にしたり、または、散気管1本で散気孔間隔を変化させて、水路への単位長さ、単位時間当たりの散気量の変化による、それぞれの場合の流砂量の変化を調べるものであるが、その結果を図-15に示す。同図では、横軸に単位長さ、単位時間当たり水路への散気量  $q_a$ 、縦軸は、単位幅、単位時間当たりの掃流砂量  $q_b$  とし、表-3に示した Series-D の5ケースのうち、Series-D2と Series-

D5の2ケースを示してある。これより、以下のことが明らかとなった。

① 特に、Series-D2において顕著であるが、散気孔間隔が小さいほど同一散気量に対する流砂量が多い。すなわち、同一散気量ならば孔の数を増すほど効果があることがわかる。

② 本実験の範囲内では、同一空気量を散気管2本にして散気した方が、1本の場合より流砂量が多く効率がよい。

③ いかなる散気管の条件においても、散気量がある程度まで増加すると、流砂量の増加率は小さくなる。これは、散気量を増加しても、その増加分に相当するだけ水を連行することができなくなるためと考えられる。

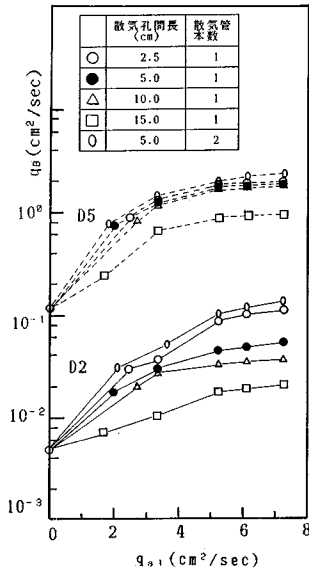


図-15 単位長さ当たり散気量の増加による流砂量変化

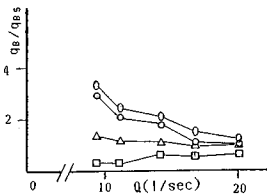


図-16 流砂量比の変化 (記号は図-15と同じ)

よって、効率のよい、経済的な散気量が存在すると考えられ、本実験水路では  $q_{a1}=5.0\sim 6.5\text{ cm}^2/\text{s}$  であった。なお、前述のように水深の変化、水路の規模などによりこの値は変化することが予想されるが、いかなる場合でも効率的な散気量が存在すると考えられる。

次に、同一単位長さ、単位時間当たりの散気量のもとの散気孔間隔の差による流砂量比の変化を示したのが、図-16である。同図では、横軸は、水の流量  $Q$ 、縦軸は単位長さ、単位時間当たりの散気量  $5.2\text{ cm}^2/\text{s}$  の場合のそれぞれの散気孔間隔での流砂量と散気孔間隔  $5\text{ cm}$  で散気管  $1$  本の場合に得られた流砂量  $q_{B0}$  との比を表わしている。この図より、水の流量の多い場合には、散気孔間隔の差が流砂量に及ぼす影響が小さく、逆に流量が少ない場合には、間隔が小さいほど流砂量が多くなることがわかる。

(3) 流砂量の理論的評価

実験結果より、流砂量は二次流およびせん断力増加の影響によることが予想されるが、そのメカニズムを明らかにするために以下のような解析を行った。単位幅当た

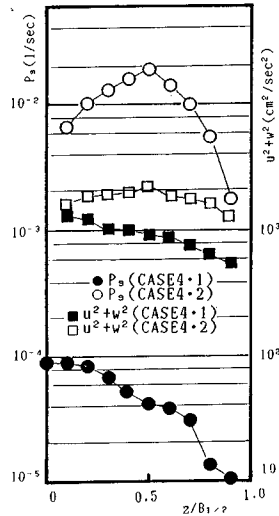


図-17 平均離脱率と底面流速

りの流砂量  $q_B$  は通常、底面濃度  $N_B$ 、平均離脱率  $P_s$ 、掃流砂の存在確率を考慮した断面平均移動速度  $U_s$ 、濃度が零から定常濃度になるまでに要する時間  $t_*$  を用いて、次式のように定義される。

$$q_B = N_B \cdot P_s \cdot U_s \cdot t_* \dots\dots\dots (4)$$

そこで、散気した場合の流砂量を  $q_B$ 、散気しない場合の流砂量を  $q_{B0}$  として、散気による流砂量の増加について考察を加えることとし、式 (4) の両者の比

$$\frac{q_B}{q_{B0}} = \frac{N_B}{N_{B0}} \cdot \frac{P_s}{P_{s0}} \cdot \frac{U_s}{U_{s0}} \cdot \frac{t_*}{t_{*0}} \dots\dots\dots (5)$$

のおのおののパラメーターの比について、定量的な評価を行う。

まず、平均離脱率  $P_s$  については、乱れ成分をモデルに取り込んだ二次元モデルが関根<sup>9)</sup>により提案されているが、これを三次元の流れ場に拡張し、CASE 4・1およびCASE 4・2で得られた実測値を用いて計算を行うと図-17のようになる。この図において縦軸は  $P_s$ 、横軸は  $z$  を水路の半幅  $B_{1/2}$  で無次元化したものである。 $P_s$  の断面平均値を求めると、散気した場合 (CASE 4・2) には

$$\overline{P_s} = 8.55 \times 10^{-3} \text{ 1/s}$$

散気しない場合 (CASE 4・1) には

$$\overline{P_{s0}} = 5.05 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$$

となり、両者の比をとると

$$\frac{\overline{P_s}}{\overline{P_{s0}}} \approx 170 \dots\dots\dots (6)$$

となる。なお、図-17に底面付近 ( $y=0.2\text{ cm}$ ) での  $u^2+w^2$  の横断方向分布もあわせて示してあるが、 $P_s$  と



$u^2 + w^2$  の分布傾向は、ほぼ一致していることがわかる。

次に、断面平均移動速度  $U_s$  に対する検討を行う。断面平均移動速度とは、掃流層内を移動する粒子の代表速度としての平均値であり、関根<sup>9)</sup>によると断面内二次流が著しくない場合に

$$U_s / \sqrt{sgd} = (\alpha_2 / \alpha_1) \times (u_* w_0)^{3/2} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\alpha_1$  : 定数、 $\alpha_2$  : 定数、 $w_0$  : 粒子の静水中での最終沈降速度。

であることから、前述の CASE 4・1 と CASE 4・2 の実測値を用いて散気する場合と散気しない場合との  $U_s$  を求める

$$U_s = 6.63 \text{ cm/s}$$

$$U_{s0} = 5.06 \text{ cm/s}$$

となり、両者の場合を比較すると式 (8) となる。

$$\frac{U_s}{U_{s0}} = 1.3 \dots \dots \dots (8)$$

また、濃度が定常化するまでに要する時間  $t_*$  に関しては、散気しない通常の流れの場合では、1 秒程度となるとされているが、散気した場合にもこの値がほとんど変化しないことがビデオ解析より確認された。よって、ここでは

$$t_* = t_{*0} = 1 \text{ s} \dots \dots \dots (9)$$

とする。

ここで、式 (6)、(8)、(9) を検討してみると、平均離脱率  $P_s$  の散気による増加率が、他のパラメーターより著しく大きい。ここで、平均離脱率  $P_s$  はこれを求めるのに用いたモデルの性質上、二次流の影響によって左右されるのに対し、断面平均移動速度  $U_s$  はせん断力によりその大きさを左右されるパラメーターである。以上のことより、散気により流砂量が増加するのはせん断力増加もわずかに関係があるが、主に気泡噴流により生じる二次流によるものであるという結論が得られた。

なお、参考までに、式 (4) より散気した場合と散気しない場合の流砂量を以上のパラメーターを用いて計算すると、 $N_B = \pi d / 6$  であるため

$$q_{B0} = 6.69 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{s}^2$$

$$q_B = 1.48 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}^2$$

となる。これに対応する流砂量の実測値は、Series-A 1 であるが、それは、

$$q_{B0} = 1.42 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{s}^2$$

$$q_B = 3.32 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}^2$$

である。よって、流砂量の概略値を求めるには、以上の

ような方法で十分であると考えられる。

## 6. おわりに

本論は、気泡噴流を伴う開水路流れの水利特性や散気による流砂量の変化について検討を行ったものである。その結果として、流水中に散気した場合の流砂量の増加傾向を定量的に評価し、かつ気泡噴流を伴う流れの水利特性を解明することにより、流砂量増加の主な原因は、散気による底面せん断力の増加と底面付近の大きな二次流による平均離脱率の増大によることが明らかになった。また、流砂量の推定方法を提案し、移動床実験の結果と比較することによりその妥当性を確かめ、さらに最も効率的な散気方法についても示した。

最後に、本研究において実験およびその整理にあたり、当時早稲田大学学生 高岡達也君 (神奈川県)、中嶋 学君 (千代田化工建設)、大村直也君 (三井信託銀行) の多大な協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 只木禎力・前田四郎：種々の静止液体中を上昇する単一気泡の形状および上昇速度について、化学工学、第 25 巻、第 4 号、pp. 254~264, 1961.
- 2) 松本順一郎・中村玄正：単一孔から発生する気泡の性状と分布特性について、土木学会論文報告集、第 280 号、pp. 75~87, 1977.
- 3) 松尾直規・岩佐義朗・南部茂義・渡辺浩太郎：空気孔ブルームの水利特性に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 29 号 B-2、pp. 579~593, 1986.
- 4) 北野義則・粟谷陽一：線源気泡噴流の性質、第 31 回水理講演会論文集、pp. 623~628, 1987.
- 5) Kobus, H. E. : Analysis of the induced by air-bubble system, Proc. ASCE, Vol. 11, Part 3, pp. 1016~1031, 1968.
- 6) 村岡浩爾：鉛直上向き噴流の水利特性に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 197 号、pp. 71~81, 1972.
- 7) 岩垣雄一・浅野敏之：空気防波堤の相似則と必要空気流量、土木学会論文報告集、第 337 号、pp. 101~110, 1983.
- 8) 関根正人：開水路における流砂に関する基礎的研究、早稲田大学学位論文、1988.
- 9) 関根正人・吉川秀夫：掃流砂の停止機構に関する研究、土木学会論文報告集、第 399 号、pp. 105~112, 1988.
- 10) 関根正人・丹羽克彦・吉川秀夫、ほか：流水中の気泡上昇に伴う流砂量の増加に関する研究、第 32 回水理講演会論文集、pp. 449~454, 1988.

(1989. 3. 23・受付)