

流水中の気泡上昇に伴う流砂量の増加に関する研究
Study on the Sediment-Load in an Open Channel Flow
with a Rising Column of Air Bubbles

早稲田大学理工学部	正会員	関根正人	M. Sekine
早稲田大学理工学部	正会員	吉川秀夫	H. Kikkawa
懶建設環境研究所	正会員	井元利則	T. Imoto
早稲田大学理工学部	学生員	高岡達也	T. Takaoka
早稲田大学理工学部	学生員	中嶋学	M. Nakajima
早稲田大学理工学部	学生員	丹羽克彦	K. Niwa

1. はじめに

近年、都市河川において、河床にヘドロをはじめとした物質が堆積し、河川の通水能力が低下するなどの問題が生じており、結果的に河道の粗度係数が変化するという指摘がなされている。本研究はこのような問題に一つの解決策を与えるために、河道内に底面から圧搾空気を注入し、二次流を強制的に発生させることによって、河床構成材料を河道中央に移動させ、その結果として、これらをより効率的に流送させることを目的としたものである。なお、これまで、水工学の分野で圧搾空気を利用した例としては、エアレーションの問題が有名であり、そのほかにも消波の目的で行われたエアーカーテン^{1), 2)}に関する研究などが挙げられるが、本論では、こうした研究により得られた知見に基づき、空気の注入に伴い生じる二次流の性質や、底面せん断力の増加といった特性に着目し、これを河川における流砂の問題に適用することを考えた。

2. 実験の概要

本研究では、上記の目的を達成するため、主に次の三つの基礎的な実験を行なった。

第一に、幅 26.5cm、高さ 50cm の矩形断面水槽を用い、外径 16mm のパイプを水槽中央部底面上に設置し、5cm間隔でこのパイプにあけた内径 0.1mmの孔を通じて、水槽内に圧搾空気を注入することにより、静水状態で生じている二次流の特性を明らかにする。具体的には、水槽内の水を比重調節した後、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、水の速度分布（二次流）特性に関する詳細な検討を加えた（実験Ⅰ）。実験条件は、表-1に示す通りであり、流れに及ぼすアスペクト比や空気量・水深などの影響についても検討を加えている。

第二に、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なった。実験には、全長 650cm、幅 20cm、高さ 40cm の矩形断面開水路を用い、水路中央部の底面上には、縦断方向に上記と同様のパイプを設置し、流水状態で空気を注入することとし、次に記す移動床実験に先だって、ベニヤ板を敷いた滑面固定床上で行なった。実測は、主に、流速分布とせん断力分布を明らかにすることを目的として行ない、まず、流速については、気泡を注入させている関係上、主に、直径3mmのアプロバ流速計に頼らざるを得ないが、水路中央部を除いては、2チャンネルのX型ホットフィルムによる三次元の乱流計測も行なっており、二次流成分の測定も試みている。また、せん断力の測定に当たっては、内径 1mm、内外径比 0.6のピトー管を用い、アレストンの方法により求めることにし、底面および側面せん断力分布を測定した。さらに、水理量の測定のほか、空気量や気泡の運動特性に関するビデオ解析も行なっている。なお、同一の水理条件下で空気を注入しない通常の開水路流れについても同様の測定を行なっており、上記の測定結果との比較を通じて、空気を注入したことによる影響を明らかにしている（実験Ⅱ）。実験条件は、表-2に示す通りである。

第三に、実験Ⅱで明らかになった流れの諸特性に関する知見に基づき、ベニヤ板の代わりに、水路床上にガラス球、砂およびポリスチレン粒子をそれぞれ平坦に敷き詰め、これによりつくられる移動床上で、空気

注入に伴う流砂量の増加についての定量的な評価を行ない、そのメカニズムを明らかにした(実験Ⅲ)。具体的には、実験Ⅱで用いた水路で、粒径 5mm および 2mm、比重 2.5 のガラス・ビーズを用いて行なった実験 (Series- 1, 2) と、全長 8m、幅 80cm、高さ 50cm の矩形断面開水路で、粒径 2mm、比重 1.024 のポリスチレン・ビーズを用いて行なった実験 (Series- 3) の合計 3 通りを行ない、同一の水理条件下で、空気量を変化させた場合の流砂量の変化について検討した。

3. 静水中で生じている二次流の特性

水路底面部から気泡を注入すると、この気泡の上昇に伴い、流体が上方へと連行されることから、水路中央部では上昇流が生じ、その結果、断面内に二次流が形成される。本研究では、この二次流の特性についての情報を得ることが不可欠であるが、流水中では測定方法の制約上、必ずしも容易とは言えないため、静水中での予備的な実験を行なっている(実験Ⅰ)。以下にその結果を示す。

まず、注入した気泡の形状および上昇速度の分布については、只木³⁾、松本⁴⁾らの研究があるが、本研究の範囲内では、気泡の形状についてはほぼ球形と見て差し支えないこと、その直径 d および上昇速度 V_a は空気量・水深にはよらないこと、底面付近での加速領域を除き d および V_a がほぼ一定値をとること、などを確めている。

図-1 には、表-1 に示した 5 ケースの実験のうち、ケース2 と3 についての二次流ベクトル図を示している。これら一連の図より、二次流に関しては次のことが明らかになった。

(1) 水路中央部では気泡の上昇に伴って上昇流が、側壁付近では下降流がそれぞれ生じ、また、水面付近では水路中央部から側壁へ向かう流れが、底面付近ではその逆の流れが生じる結果として、水路中央軸を境に左右逆向きの2つの循環が生じている。

(2) ケース2 とケース3 との比較から、同一の空気注入量に対しても、アスペクト比の違いにより形成される二次流ベクトルの大きさが異なり、通常の流れの場合と同様に、アスペクト比が 2 程度の場合が流体を循環させるには最も効率がよいことがわかる。

(3) ケース2 とケース4、5 との比較から、同一のアスペクト比の場合でも、空気量の変化により、循環の程度が異なり、必ずしも空気量が多い程強い二次流が形成されているとは言えないことがわかり、注入する空気量についても最適値が存在するものと考えられる。

また、水路中央部付近に生じている上昇流に関しては、図-2 に示したように、その上昇速度が水平方向 (y 方向) にガウス分布に従い、二次元噴流の場合と同様の結果となることがわかった。

なお、こうした二次流が生じるのは、注入された空気が上昇することにより失うポテンシャル・エネルギー E_{pa} が、流体の運動エネルギー E_{kw} に変換されるためと考えられる。そこで、静水状態での実験の場合に限って、各エネルギーを試算したところ、両者の比

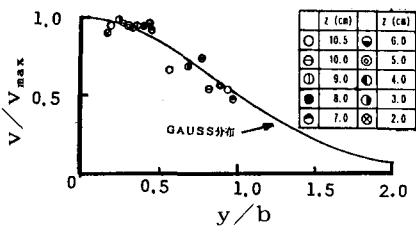


図-2 上昇流の水平方向分布図
(b: $v = v_{max} / 2$ となる y の値, 半値幅)

表-1 静水中での実験条件

CASE	水深 (cm)	水槽幅 (cm)	アスペクト比	空気量 (ml/s)
1	21.0	36.5	1.74	22.3
2	11.0	20.0	1.83	22.3
3	4.7	20.0	4.26	22.3
4	11.0	20.0	1.88	11.2
5	11.0	20.0	1.88	44.6

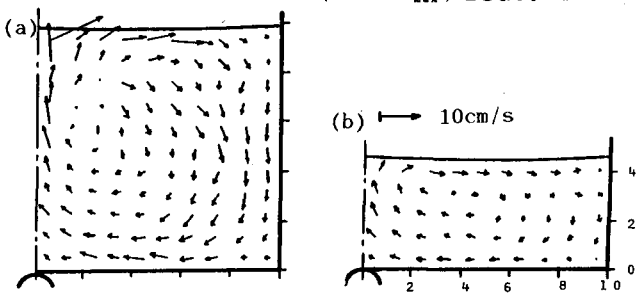


図-1 静水中での二次流ベクトル図 ((a) CASE 1, (b) CASE 2)

Ekw/Epaが 0.7程度となることがわかった。従って、注入された気泡が水面に達するまでに失うポテンシャル・エネルギーの大半が、流体に供給され、それが、循環している流体全体のもと運動エネルギーに変換されていることがわかる。

表 -2 流水中での実験条件

CASE	流量 (l/sec)	空気量 (ml/s)	水 深 (cm)	水 面 勾 配
1	4.98	0.00	3.93	1/374
		9.59	4.03	1/330
		25.0	4.12	1/333
2	16.8	0.00	8.52	1/362
		9.59	8.63	1/235
		25.0	8.77	1/246
3	9.60	25.0	6.90	1/293

4. 気泡上昇を伴う流れの内部構造

4.1 主流速分布特性

気泡上昇を伴う流れの主流速分布の変化を調べたのが、図- 3, 4である。図- 3 では、一例として、アスペクト比が 2の場合の等流速線図を表わしており、これは、実験Ⅰで行なったケース 2に相当する。なお、図- 4 では、分布の変化傾向を定量的に調べるために、2通りの注入空気量に対して得られた流速分布と、空気を注入しない場合の流速分布との差をとって描いた、等流速差線図を示している。これより、主流速が水路中央部付近で減速、側壁付近で加速されている結果として、断面内の主流速が気泡を注入しない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の側壁および底面付近に持ち込まれ、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生じているためと考えられる。なお、ここでは、座標軸および流速成分を、流下方向にx、u、水路中央から側壁方向にy、w、鉛直方向にz、vとしている。

次に、図- 5、図- 6 には、ホットフィルムにより計測した二次流成分のベクトル図、および、VとWの等流速線図を示している。これより、流水中においても、図- 1 に示した静水中での二次流に相当する循環流が生じていること、および、二次流ベクトルの大きさが最大流速 Umax の 20 % にまで達していること、などがわかる。なお、参考までに、気泡を注入しない場合の上記の比が、5 %程度と非常に小さな値であることを確かめている。

また、図- 3 ～6 に示した流速分布が、空気注入点を含む断面(x=480)におけるものであるため、次の図- 7 では、参考までに、隣接する 2つの空気注入点間(x=480～485)の1ピッチについての、流速分布の変化過程を調べている(CASE 3)。同図は、ある断面での流速とその上流側断面での値との差をとって描いた等流速差線図であり、この図より、空気注入点間の1ステップにおいても流速分布が変化すること、特に図中

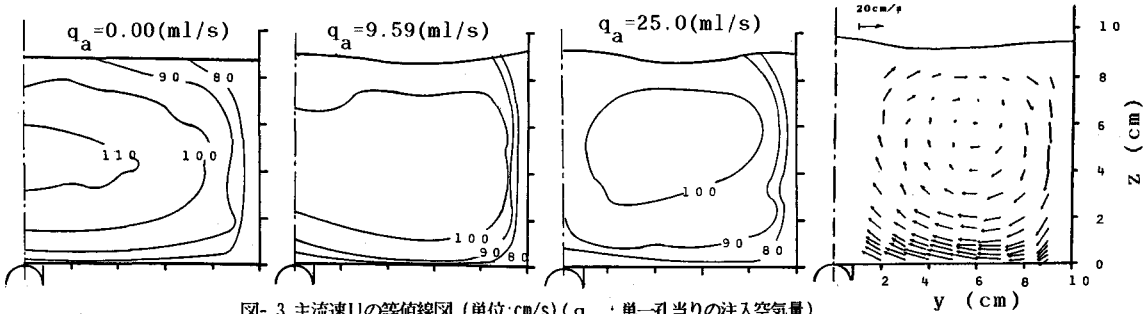


図- 3 主流速Uの等値線図 (単位:cm/s) (qa: 単一孔当りの注入空気量)

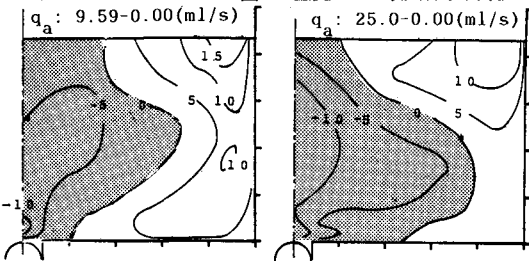


図- 4 主流速Uの等流速差線図 (単位:cm/s)

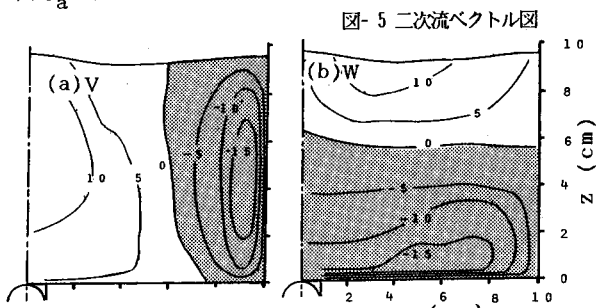


図- 5 二次流ベクトル図

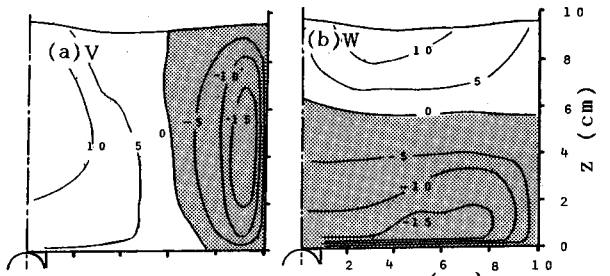


図- 6 VおよびWの等値線図 (単位:cm/s) y (cm)

の加速領域の形状（白い部分）に着目すると、流体が、1ステップ間で時計方向に一回転していることがわかり、これが、可視化実験の際に見られたラセン流に対応するものと考えている。

さらに、空気を注入したことにより流速分布が受ける影響を明らかにするために、上流端($x=0$) から $x=200$ までの区間で空気の注入を止めた場合の流速分布の変化過程についても検討を加えている。その結果が、図- 8 であり、同図は、図- 7 と同様にして描いた等流速差線図である。これより、次のことがわかる。すなわち、気泡の注入を開始した直後は、まず水路中央部の底面付近で減速が、水面付近では加速が、それぞれ始まる((b)参照)。次に、この減速領域が水面にまで及ぶとともに、 $5 \leq y \leq 10(\text{cm})$ の底面付近の領域では逆に加速が生じる((c)参照)。さらに、その下流では、特徴として、底面付近のほぼ全領域で加速が生じる((d)参照)が、 $x=445$ の断面に到って、流速分布は定常化し、それより下流側では同一の分布となる。なお、図- 8 の (b)~(d) を重ね合せたものが、図- 4 に示した等流速差線図に対応している。

4.2 流れの乱流特性

上記のホットフィルムによる乱流計測の結果として得られた、レイノルズ応力の等値線図を図- 9 に示した。これより、 $-\overline{u'v'}$ 、 $\overline{u'w'}$ のいずれについても、 $y=8(\text{cm})$ 付近で大きな値をとる分布となるほか、横断方向へのせん断力に関係する $-\overline{u'w'}$ が、 $-\overline{u'v'}$ と同オーダーの値となることがわかり、このことは、次に記す移動床実験の場合に、水路床を移動する粒子が水路中央部へ向かうベクトルをもつことに対応しているものと考えられる（なお、水路中央部については実測することができなかったが、ここでは、さらに大きな値となるものと考えられる）。また、乱れ強度については、水路中央部に近いほど大きな値となることを確かめているが、ここでは省略する。

4.3 底面および側面せん断力分布特性

上記の主流速分布や流れの乱流構造が変化することに伴う、底面および側面せん断力分布の変化を調べたのが、図- 10, 11であり、図- 11 では、2つの空気注入点間のせん断力の三次元的な分布を表わしている（図- 7 に対応）。まず、図- 10より、次のことがわかる。(1)底面せん断力は、 $y=6\sim 8(\text{cm})$ の領域で最大値をとる分布となり、この位置が、図- 5 に示した二次流ベクトルが底面にぶつかる位置に対応していることがわかる。また、このことは、図- 9 に示したレイノルズ応力が、この点付近でピークをとることにとも対応している。(2)側面せん断力についても、同様に、二次流ベクトルが側面にぶつかる位置で最大値をとる分布となるが、値自体は気泡を注入しない場合に比べて、全般的に増大する結果となった。また、図- 11より、2つの空気注入点間のせん断力分布については、局所的に変化する複雑な分布となっており、特に、図- 7 (a)において底面付近の主流速が加速される領域（ $x=479\sim 480$, $y=7\sim 8$ ）で底面せん断力がピークをとること（図- 11(a)）、および、図- 7 (b)において側壁付近の主流速が加速される領域（ $x=480\sim 481$, $z=7\sim 8$ ）で側面せん断力がピークをとること（図- 11(b)）、などがわかる。

5. 流砂量の変化の評価

前章までに明らかになった流れの特性に関する情報に基づき、実験Ⅲでは、空気量の増大に伴う流砂量の変化についての定量的な評価を行なった。その結果が、図- 12である。図の横軸は、断面平均の無次元せん断力 $\tau^* (= u_*^2 / s g d, u_* = \sqrt{g R I_e}, s = \sigma - 1, R$: 径深, I_e : エネルギー勾配)、縦軸は、単位幅当りの無次元流砂量 $q_b^* (= q_b / u_* d)$ である。この図より、空気量の増大に伴い流砂量が増大することが確かめられたほか、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とがわかった。ただし、図- 12および図- 10, 11 から明らかなように、平均せん断力の変化が、このような流砂量の増加の直接の原因とは考えられない。そこで、この原因について検討したところ次のような結論が得られた。すなわち、空気を注入したことにより生じる底面付近の二次流成分の影響により、 $y=6\sim 8(\text{cm})$ では、底面せん断力が増大し、この領域での水路床構成材料の離脱量が増大するほか、移動を開始した粒子が水路中央部へ向かうベクトル成分をもつこと、さらに、水路中央部では、上昇流の影響により、見掛け上、重力の作用が

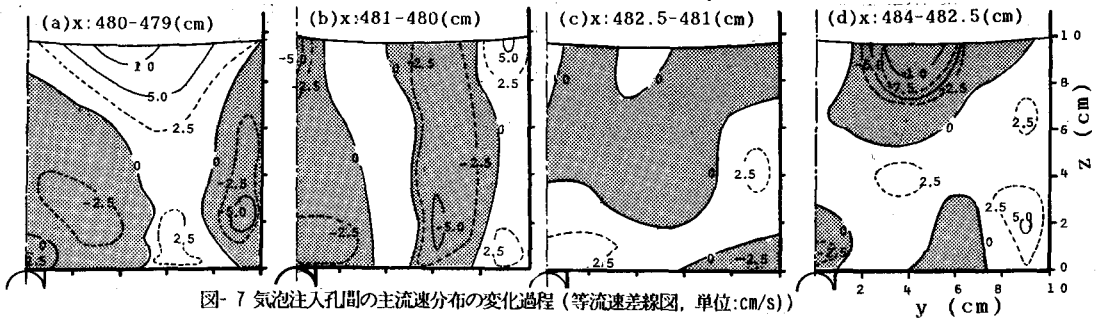


図-7 気泡注入孔間の主流速分布の変化過程 (等流速差線図, 単位: cm/s)

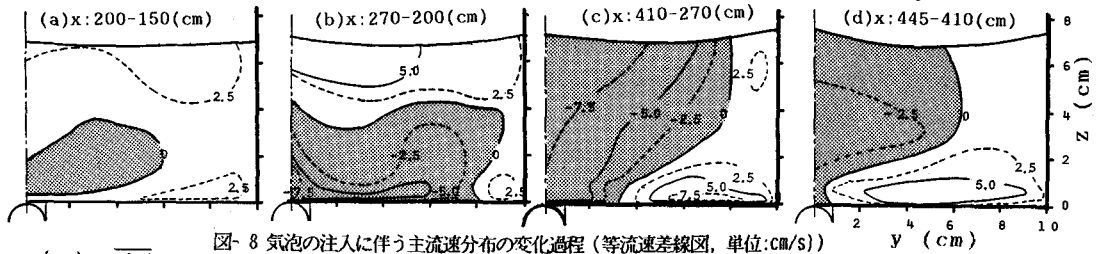


図-8 気泡の注入に伴う主流速分布の変化過程 (等流速差線図, 単位: cm/s)

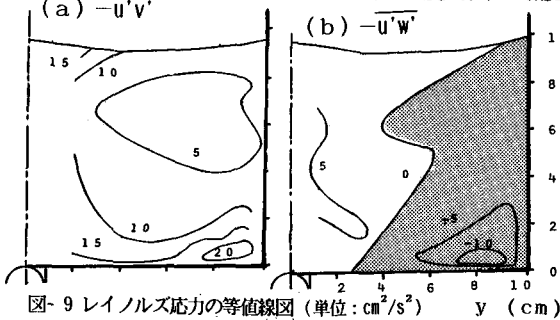


図-9 レイノルズ応力の等値線図 (単位: cm^2/s^2)

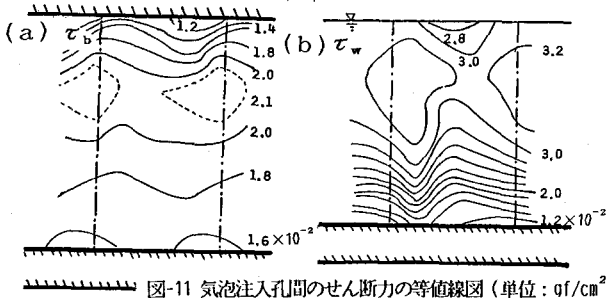


図-11 気泡注入孔間のせん断力の等値線図 (単位: gf/cm^2)

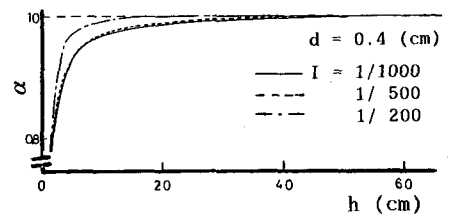
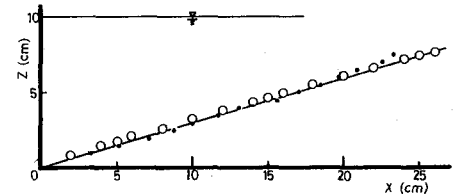
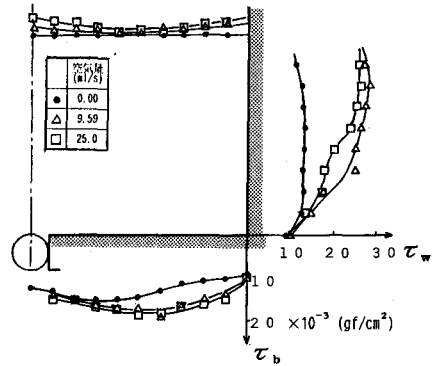
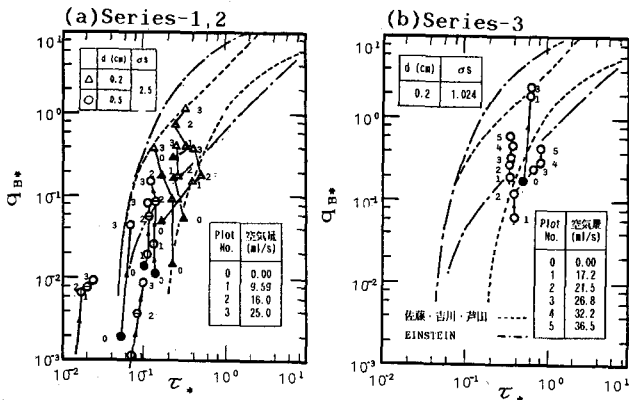


図-12 流砂量変化



減じられる形となり、粒子が移動し易くなること、などの理由から流砂量は増加するものと考えられる。なお、このことは、図- 5 の二次流ベクトル図、図- 9 のレイノルズ応力図 ($-\overline{u'w'}$ 図)、図- 10 のせん断力図などにより裏付けられている。なお、標準砂を用いた実験の結果から、水路床には洗掘・堆積の周期的なパターンが現われるが、この場合の洗掘を受ける位置が、図- 11(a) 中の底面せん断力分布の尾根線と一致することを確かめている。

6. 上昇気泡を用いた流量の推定方法

流水中に気泡を注入した実験結果から、流量の新たな観測方法について検討した。

流水中を上昇する気泡の軌跡の一例を、図- 13 に示したが、底面付近を除いてほぼ直線的に上昇していることがわかる。これは、気泡粒子に作用する流体の速度自体が、底面付近では急激に変化するものの、それより上方ではほぼ一定値となるためと考えられる。一方、気泡の移動速度については、底面付近を除いて、鉛直方向にはほぼ一定の最終上昇速度 V_a に等しく、水平方向には流体の速度に等しい値となることがわかっている。以上により、単位幅当りの流量 q に関しては、次式が成り立つ。

$$q/L = \alpha \times V_a, \quad q = \int_0^h u \, dz \quad (1)$$

ここに、 L は気泡が水面に達するまでに流下する距離、 α は上記の底面付近での影響を補正する係数であり、水深が大きいかほど $\alpha \rightarrow 1$ となる。

式 (1) から流量を推定する場合には、式中の係数 α を定量的に評価する必要があるが、実測結果から検討できる範囲には限りがあるため、水路底面から水面へ到る気泡に対して、その運動方程式を数値解法することにより、任意の気泡径・流速分布に対する式 (1) 中の L および V_a を求め、逆算の形で係数 α を知ることにした。なお、運動方程式については、二次元の浮流砂の運動を解析したときに用いた式 (ただし、Basset 項は無視する)⁵⁾ を適用している。

図- 13 では、数値計算の結果として得られた気泡の上昇軌跡と、実測結果との比較しており、両者は良い対応関係にあることがわかる。このことから、数値計算の妥当性が確かめられた。

次に、上記の方法により求めた補正係数 α を、水深との関係で整理した一例が図- 14 である。この図より、気泡径が 0.4 cm の場合には、水深が数 10 cm 以上であれば、 $\alpha = 1$ として差し支えないことがわかる。なお、気泡径が異なる場合や、上昇途中で変化する場合にも、ほぼ同様の結果となることを確かめている。

以上により、気泡径 d および水深が既知の場合、上昇速度 V_a は d から別途知ることができるから、実測により L さえわかれば、式 (1) を用いて単位幅流量 q を求めることができる。そこで、河川の底面に横断方向に気泡管を設置することにより、全流量を容易にかつ精度よく測定することが可能となった。

7. おわりに

本研究では、流水中に気泡を注入した場合の流砂量の増加傾向を定量的に評価するとともに、流れ自体の内部構造を解明することにより、上記の流砂量増加の原因を定性的にはあるが明らかにすることができた。今後は、流体内に生じている二次流を予測する方法を確立するとともに、流砂量の増加の原因を定量的に評価できるようにしていきたい。また、このことと併せて、土砂をより効率よく流送させるための条件 (例えば、設置するパイプの位置・間隔・本数、注入空気量等) や、このような実験の相似則についても検討していく予定である。

[参考文献]

- 1) 岩垣・浅野、土木学会論文集、第 337号、1983.
- 2) Kobus, H., Wasserwirtschaft, No. 62, 1972.
- 3) 只木・前田、化学工学、第25巻、第 4号、1961.
- 4) 松本・中村、土木学会論文集、第 260号、1977.
- 5) 関根・吉川、土木学会論文集、第 387号、1987.