

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

Fundamental Study For The Field Tests On The Airlift

服部 敦*, 和泉 清**, 吉川 秀夫***

By Atsushi HATTORI, Kiyoshi IZUMI and Hideo KIKKAWA

Purification of water in the slack water reach of rivers and lakes is one of important problems. The purification by means of airlift may be most favorable, and in order to apply such apparatus for practical use, the intensive laboratory tests and hydraulic analysis are made. Based on the results of the fundamental study, the dimensions of the apparatus are decided and field tests are made. The results obtained in the field are acceptable.

Keywords : purification, airlift

1. はじめに

本文は、エアリフトと呼ばれる散気管上に付設した矩形筒を用いた散気装置を利用し、循環流を発生させて水質及び底泥の浄化を行うため、循環流の水理的機構について検討したものである。

循環流により底泥を水中に浮遊させ、河川水にDOを付加する効果を検討するにはエアリフト内の揚水流量、及び水面部の盛り上がり高が重要となる。これらの水理諸元を基礎実験により決定し、江東内部河川のひとつである仙台堀川で現地試験を行い検討した。なおエアリフトの曝気効果については、和泉、山崎、吉川の報告¹⁾を参照されたい。

2. 実験概要

本研究を進めるに当たり以下に示す三つの基礎実験を行った。

第一に揚水流量と散気量の関係を測定するため、高さ160cm、幅120cm、奥行き16cmの長方形断面水槽に、図-1に示すように、水槽中央部に外径16mmの塩化ビニル管に5cm毎に径1mmの孔を設けた散気管、及びエアリフトを設置した水槽を用いた。散気量はフロート式流量計を用いて測定し、また揚水流量はエアリフトの流入流速分布を二次元電磁流速計で測定し求めた。実験条件は水深 $H=140\text{cm}$ でエアリフトの形状を表-1に

* 学生員 早稲田大学理工学部土木工学科

** 正会員 東京都土木技術研究所主任研究員

(〒169 新宿区大久保3-4-1)

(〒108 港区港南1-1-18)

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

(〒169 新宿区大久保3-4-1)

に従い変化させた。またこの電磁流速計で、循環流の流速分布も測定した。第二にエアリフト下端での流入損失を明らかにするため、高さ50cm、幅70cm、奥行き30cmの亚克力製長方形断面水槽に散気管とエアリフトを上記と同様に設置した装置を用いた。エアリフト下端、及び上端での圧力は微差圧計で測定し、揚水流量は上記と同様に測定した。実験条件を表-2に示す。第三に静水中の気泡群の上昇速度を測定するため、内径10cm、長さ150cmの亚克力製円管を鉛直に立て、その下端に散気管を設置した装置を用いた。散気量から気泡群の水中を通過する時間を求め、これより平均的な気泡群の上昇速度を求めた。

仙台堀川における現地実験での実験装置の詳細は、和泉らの報告¹⁾に示してあるのでそちらを参照されたい。

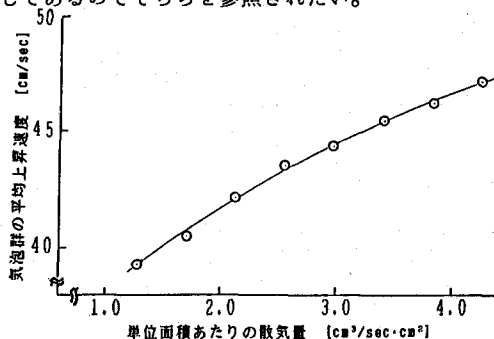


図-2 静水中の気泡群平均上昇速度と散気量の関係

3. エアリフトの水理特性

3. 1 ボイド率 f_g と気液間の相対速度 v_d

ここでボイド率は、水中のある断面において空気が占める面積の割合を示す値である。エアリフト内のある水平断面での単位奥行き当たりの平均ボイド率 f_g は連続式より次式で与えられる。

$$f_g = \frac{Q_w + Q_a + B V_d - \sqrt{(Q_w + Q_a + B V_d)^2 - 4 B V_d Q_a}}{2 B V_d} \quad (1)$$

ここで、 Q_w はエアリフトの単位奥行きあたりの揚水流量、 Q_a は単位奥行きあたりの散気量、 v_d は気泡群と水の相対速度である。エアリフト内の気泡群と水の相対速度が必要となるが、現段階では理論的に求めることは出来ない。実験から得られた円管内静水中の気泡群平均上昇速度を図-2に示す。図-2は松本、中村の報告²⁾と同様な結果であることが確かめられた。また今回の実験結果では、気泡群の平均上昇速度は単位面積あたりの散気量の0.17乗にほぼ比例する。気泡が一定速度で上昇する場合は気泡に働く力が水との相対速度に依存するので、図-2の上昇速度と v_d が同一になるとき気泡群が一定速度で上昇すると考えられる。よって、以下では図-2より v_d を与え f_g を算出する。

3. 2 エアリフトの形状と揚水量 Q_w と散気量 Q_a の関係

(a) エアリフトの長さ、 L

エアリフトの揚水機構は、(1)エアリフト内の総重量が水の場合に比較し軽くなることと、(2)気泡群が上昇運動するため水に作用する力により生じる、ピエゾ水頭差である。 L が長いほどピエゾ水頭差は大きくなるので、揚水量は増えると考えられる。図-3に示す実験結果は h_1 を15cm、 h_2 を15cm、30cm、45cmと変化させた場合の Q_w と Q_a の関係を示す。実験結果では、同一の Q_w では流入損失は同じと考えられるから、エアリフトが長いほど少ない Q_a で Q_w が増加することが認められる。しかし、 h_2 が15cmと30cmとでは Q_w にあま

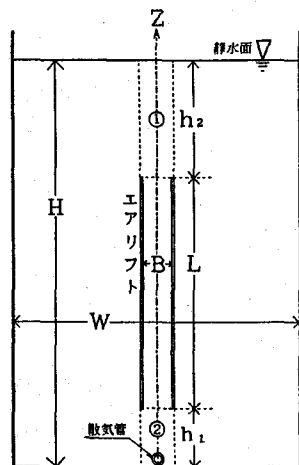


図-1 エアリフト室内実験装置

表-1 流量測定の実験条件

B cm	h_1 cm	h_2 cm	L cm
10	5	30	105
	15	30	95
15	25	30	85
	15	15	110
20	15	45	80

表-2 圧力測定の実験条件

H cm	h_1 cm	h_2 cm	B cm
42.2	7.2	10	10
42.2	7.2	10	5
38.4	3.4	10	10

り差がないか、もしくは逆転している場合もある。これは水面の影響による流出損失が顕著になるためと考えられる。

(b) エアリフトの下空き長さ、 h_1

図-4は h_2 を30cmとし、 h_1 を5cm, 15cm, 25cmと変化させた場合の Q_w と Q_a の関係を示す。図-4より、エアリフトが最も長い $h_1=5$ cmの場合が他に比べ Q_w が小さく、エアリフトが最も短い $h_1=25$ cmの場合に Q_w が大きくなる。よって(a)を念頭において同一水深でエアリフトを長くし h_1 を短くすることは、揚水効率の面から逆効果であることがわかる。つまり、 h_1 の変化による流入損失は、揚水効率に対し大きな影響を持つと考えられる。そこで、幾何条件 h_1 と B 、及び単位奥行きあたりの揚水流量 Q_w から流入抵抗を求める必要がある。

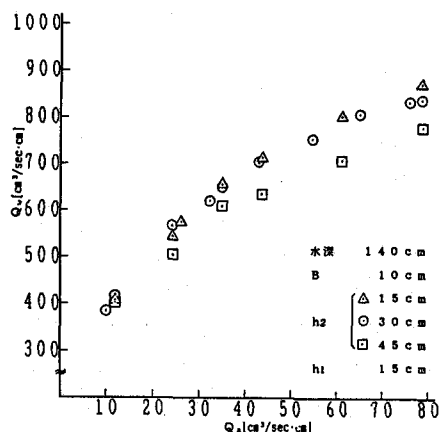


図-3 単位奥行きあたりの散気量 Q_a と揚水流量 Q_w の関係 ($B=10$ cm)

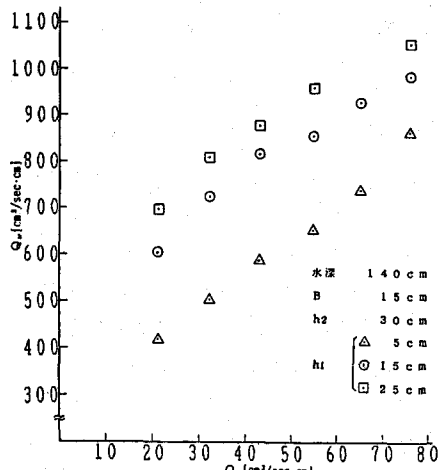


図-4 単位奥行きあたりの散気量 Q_a と揚水流量 Q_w の関係 ($B=15$ cm)

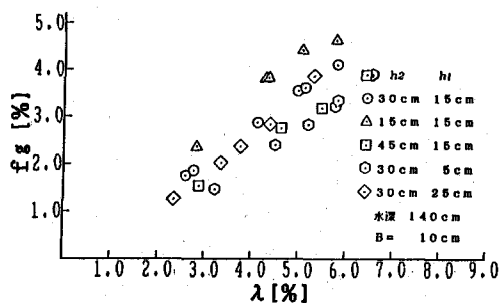


図-5 ボイド率 f_g と λ の関係 ($B=10$ cm)

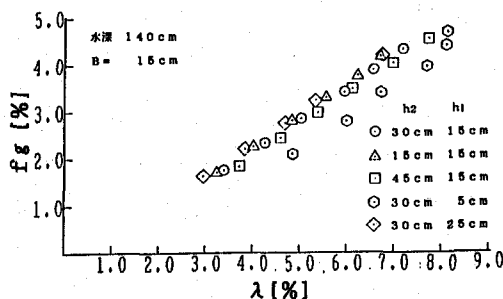


図-6 ボイド率 f_g と λ の関係 ($B=15$ cm)

(c) エアリフト幅、 B

B を変化させると同じ Q_a でも Q_w が変化する。このことは $h_1=15$ cm、 $h_2=30$ cmの場合に B を変化させた図-3と4の○プロットの比較よりわかる。 B の広い方が同じ Q_w ならば流入抵抗は大であると考えられる。しかし、同一の Q_w で比べると $B=10$ cmの方が Q_a は大きい。すなわち揚水効率が低下している。図-5と6は、 f_g と $\lambda=Q_a/(Q_w+Q_a)$ の関係を示す。 B が広くなると f_g は小さくなっており、気泡群のエアリフト内での集散による揚水効率の変化であると考えられる。この効率の変化の簡単な構成は以下のように考察した。

水、及び気泡群の流速分布はエアリフトの壁面摩擦の影響のため、図-1に示す z 軸周辺に山を持つ形状になる。気泡内の圧力は周囲の水とはほぼ同程度と考えられるから、 z 軸周辺ではエアリフトの壁面近くに比べ低圧になる。そのため質量が非常に小さい気泡は z 軸周辺に集まりさらに流速を増す。しかし、気泡が集まりボイド率が高くなるため、気泡間の相互作用による影響は無視できなくなり、単気泡の運動機構とは異なる

る。つまり、ある一つの気泡はその上部周辺にある気泡の後流領域の影響下に入り、気泡と水の相対速度が小さくなっていると考えられる。したがって、エアリフトの揚水効率は、B、ボイド率分布、流速分布により変化するため、本文では気泡群の上昇速度を相対速度でとらえ、浮力の効率という形で実験より決定する。

4. 解析モデル

3章に示したエアリフト内の流れの力学的特性を踏まえ、本研究では気泡群及び水の上昇運動を単純化したモデルによって検討する。エアリフト内の流れは、エアリフト壁面の影響を受け三次元的に変化する。ここでは奥行き方向は十分に長く、幅方向は各種の物理量の幅方向平均値を用いて、図-1に示すようにz軸について一次元的に取り扱うこととする。気泡群と水の運動量式は次式²⁾で与えられる。

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\rho_a Q_a^2}{B f g} \right) - C \gamma_w B f g + F_{gl} B f g + \gamma_a B f g = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\rho_w Q_w^2}{B(1-f)g} \right) + B \frac{dP}{dz} - F_{lg} B(1-f)g + \gamma_w B(1-f)g + F_{lw} B(1-f)g = 0 \quad (3)$$

ここで、 F_{lw} は水の単位体積あたりに作用する壁面せん断力、 F_{gl} は単位体積あたりの気泡群が水に作用する力、 F_{lg} は単位体積あたりの水に気泡群から作用する力、 C は浮力の効率係数、 P は圧力、 ρ_w は水の密度、 ρ_a は空気密度、 γ_w は水の単位体積重量、 γ_a は空気の単位体積重量である。 C は0から1までの値を持つことができ、浮力の揚水に対する効率に関係する。エアリフト内での気泡群及び水の流速分布はその測定困難さのため現段階では得られていないので、ここでは運動量補正係数を1としている。圧力補正係数も同様な理由により1としている。

次式は気泡群から揚水のために作用する力と、水のその力に対する反作用力を F_{gl} 、 F_{lg} として表した力の釣合式である。

$$F_{gl} B f g dz = F_{lg} B(1-f)g dz \quad (4)$$

(a) エアリフトの揚水流量 Q_w と気泡群の流量 Q_a の関係式

エアリフト上下端で境界条件を与えることにより(2)式、(3)式を積分する。エアリフト下端での圧力 P_1 は流入抵抗を考慮しベルヌーイ式より次式で与えられる。

$$\frac{P_1}{\gamma_w} = H - h_1 - \frac{1}{2g} \frac{Q_w^2}{B^3} - \frac{\Delta P_{in}}{\gamma_w} \quad (5)$$

ここで、 ΔP_{in} は流入抵抗による圧力損失である。水槽隅角部近くの比較的流速の小さい部分での圧力を静水圧と比較したところ水頭差は1/10mmのオーダー程度であったので、(5)式は十分に成立すると考えられる。第3項はエネルギー補正係数を乗すべきだが運動量補正係数の場合と同様の理由により1とした。

エアリフト上端での圧力 P_2 は図-7に示すエアリフト上端周辺での流線から周囲流体の圧力に等しいと考えてよく、圧力測定結果からも周囲流体と P_2 は静水圧としてよいことが確かめられたため次式により与える。

$$P_2 = \gamma_w h_2 \quad (6)$$

エアリフト上端でのボイド率 f_{g2} 、及び下端をのぞくエアリフト全領域のボイド率は、図-2の v_d を用い(1)式で近似する。また、下端のボイド率 f_{g1} はゼロとする。以上を境界条件として、(2)式、(3)式を z について積分し次式を得る。

$$F_{gl} B f g L = C \gamma_w B f g L - \gamma_a B f g L \quad (7)$$

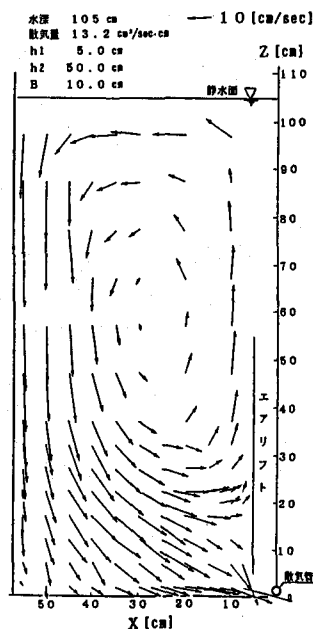


図-7 循環流の流速分布図

$$\frac{\rho_w Q_w^2}{B(1-fg)} - \frac{\rho_w Q_w^2}{B} + B(P_2 - P_1) - FlgB(1-fg)L + \gamma_w B(1-fg)L + FlwB(1-fg)L = 0 \quad (8)$$

(4)式、(5)式、(6)式、及びボイド率の仮定を用いて整理し、気泡群の重量項は無視すると次式となる。

$$\frac{1}{\gamma_w} \{ \Delta P_{in} + Flw(1-fg)L \} - CfgL = fgL - \left(\frac{1}{1-fg} - \frac{1}{2} \right) \frac{Q_w^2}{gB^2} \quad (9)$$

(9)式に ΔP_{in} 、 C 、 Flw を与えれば Q_w と Q_a の関係が定まる。流入抵抗による圧力損失水頭、 $\Delta P_{in}/\gamma_w$ を次の方法で求めた。

図-1に②で示す領域をコントロールボリュームにとる。各面に対し垂直に流入、流出していると仮定する。 z 軸方向の運動量式は気泡の運動量は無視すると次式で与えられる。

$$\beta \frac{\rho_w Q_w^2}{B} + \alpha' P_1 B + h_1 B \gamma_w = PflB \quad (10)$$

ここで、 β は運動量補正係数、 α' は圧力補正係数、 Pfl は水槽底面の圧力である。また補正係数を考慮した(5)式を(10)式を代入して次式を得る。

$$\frac{\Delta P_{in}}{\gamma_w} = H - \frac{Pfl}{\gamma_w} + (2\beta - \alpha) \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_w}{B} \right)^2 \quad (11)$$

ここで、 α はエネルギー補正係数である。水槽底面圧力の静水圧からの変化量は、水槽底面部の速度に支配される。そこで、この速度水頭の代表値を用いて、圧力変化量を次式のように仮定した。

$$H - \frac{Pfl}{\gamma_w} = a \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_w}{2h_1} \right)^2 \quad (12)$$

ここで、 a は係数である。(12)式を(11)式に代入し $b = 2\beta - \alpha$ と表すと、次式が得られる。

$$\frac{\Delta P_{in}}{\gamma_w} = K_{in} \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_w}{B} \right)^2 \quad K_{in} = a \left(\frac{B}{2h_1} \right)^2 + b \quad (13)$$

ここで、 K_{in} は流入損失係数である。(13)式の係数 a 、 b は図-8に実線で示す結果より $a = 1.28$ 、 $b = 0.24$ となった。(9)式に(13)式を代入し、次式を得る。

$$\frac{1}{\gamma_w} Flw(1-fg) - Cfg = fg - \left(\frac{2}{1-fg} - 1 + K_{in} \right) \frac{Q_w^2}{2LgB^2} \quad (14)$$

$Flw(1-fg)$ と Cfg はそれぞれエアリフト内の気液二相の単位体積当たりのせん断力、及び気泡群から水に作用する力である。この2つの力は以下の方法で近似的に決定される。

(14)式右辺に実験値を代入し、左辺を算出する。その値は種々の仮定の影響を受けている。特にボイド率

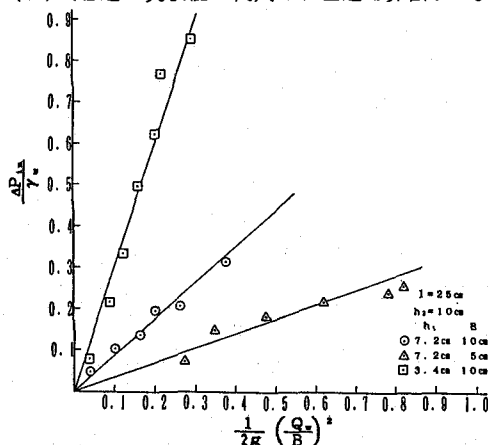


図-8 流入抵抗による圧力損失水頭と速度水頭の関係

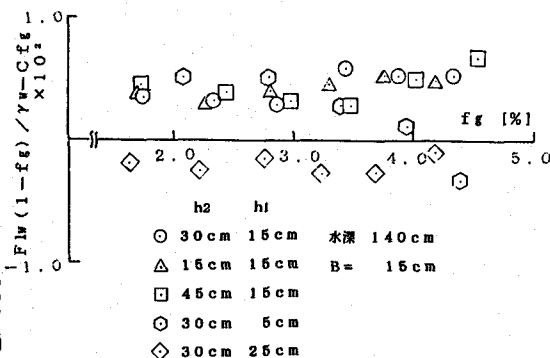


図-9 $Flw(1-fg)/\gamma_w - Cfg$ とボイド率 fg の関係

$f g$ の仮定は揚水量に大きな影響を与えられと考えるので、ここでは $f g$ との関係を図-9に示す。実験条件ごとに多少の傾向があるが、全体的に(14)式の左辺はゼロに近い値をとる。よって今回は、せん断力と気泡群から水に作用する力はほぼ釣り合うと考えられる。(14)式より次式が得られ、これより Q_w を求めることができる。

$$Q_w = \sqrt{\frac{2 g f g L B^2}{K_{in} + \frac{2}{1-f g} - 1}} \quad (15)$$

(b) エアリフト上部の静水面からの水面の盛り上がり高、 Δh

エアリフト上部の水面は静水面より盛り上がり、水は水平方向に運動する。この流れヘドロの拡散、及びDOの運搬が行われる。それらの効果の見積に、 Δh は重要なパラメーターとなる。図-1に示す①の領域をコントロールボリュームにとり、この Δh を(2)式、(3)式から求める。

図-7のエアリフト上端から水面までの流速ベクトル分布を見るとほぼ z 軸と平行であり水面近くで水平方向にまとめて流出する傾向があるので、コントロールボリューム側面から持ち出される z 軸方向の運動量はなく、水面近くで z 軸と垂直方向にのみ流速を持ち水が流出すると仮定する。また $f g$ は水がコントロールボリュームから流出するに従い変化するが、その変化量は実験より僅かであることが知られたので、 $f g$ はエアリフト内と同一であると仮定する。(3)式の左辺第5項はエアリフトの壁面せん断力項であり、コントロールボリューム面に沿って作用する水のせん断力となる。この項は他項に比較して小さいとして無視する。以上の仮定を用いて(2)式、(3)式を z について積分すると次式を得る。

$$F g L B f g (h_z + \Delta h) = C \gamma_w B f g (h_z + \Delta h) - \gamma_a B f g (h_z + \Delta h) \quad (16)$$

$$- \frac{\rho_w Q_w^2}{B(1-f g)} - B P_z - F l g B (1-f g) (h_z + \Delta h) + \gamma_w B (1-f g) (h_z + \Delta h) = 0 \quad (17)$$

(4)式、(6)式、(16)式を用いて(17)式を整理すると次式となる。

$$- \frac{1}{1-f g} \frac{Q_w^2}{B^2 g} - (1+C) f g h_z + \{1-f g(1+C)\} \Delta h = 0 \quad (18)$$

但し気泡群の重量項は他項に比べ無視した。(16)式の左辺第1項に含まれる C は、エアリフト内における流速分布の変化、及びボイド率分布の変化のため異なると考えられるが、ここでは簡単のため $C=1$ とする。

(18)式を Δh について整理すると次式を得る。

$$\Delta h = \frac{1}{1-2 f g} \left(2 f g h_z + \frac{1}{1-f g} \frac{Q_w^2}{B^2 g} \right) \quad (19)$$

(19)式より Δh を求めることができるが上記の仮定のため、実際より大きく算出されると予想される。

5. 解析モデルと実験値の比較

5. 1 揚水流量 Q_w の現地実験との比較

仙台堀川で行った現地実験で測定された Q_w と(15)式により算出した Q_w を表-3に示す。(15)式に含まれる流入損失係数は現地実験条件から、 $K_{in}=0.38$ とした。現地実験での測定精度を考慮すると、(15)式による Q_w は概略値を求めるには十分であると考えられる。また図-7と和泉らの報告¹⁾にある、現地実験で得られた循環流の流速ベクトル図を比較すると、現地でも室内実験と同様な循環流が生じていると考えて良いだろう。

表-3 揚水流量の実測値と計算値の比較

Case No.	実測値 cm ³ /sec·cm	計算値 cm ³ /sec·cm
2	880	1049
3	709	882
7	821	900

5. 2 Δh の比較

(19)式に実験値の Q_w と Q_a を代入して Δh を算出した。その Δh と、 z 軸上のビデオ解析から時間的平均

した Δh の実験値を比較した結果を図-10と11に示す。計算値は4章(b)に示す仮定のため、特に h_2 が長いほど実験値より高くなる結果を与える。また、 h_2 が短い場合は比較的良く合致しているのは以下の理由が考えられる。エアリフト上端から流出する上昇流が水のみであるとするとMurotaとMuraokaの報告⁴⁾により Δh が求められている。この値と今回の実験値を比較すると実験値は Q_a が大きくなるほどMurotaらの報告による Δh より高くなった。つまり、 Δh はボイド率 f_g に大きく影響されると考えられる。よって今回の計算は実際より小さい f_g を与えたため、 f_g の影響からは低く Δh を算出した。そのため短い h_2 の場合は比較的实验値と一致したと考えられる。

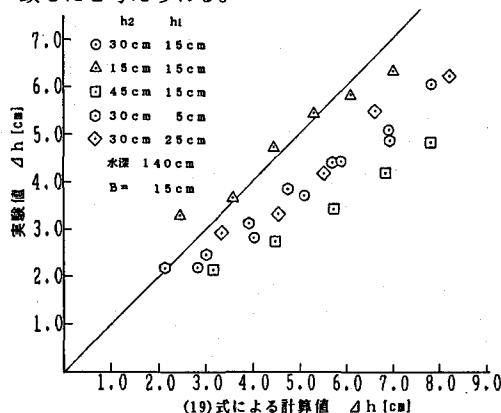


図-10 水面の盛り上がり高 Δh の実験値と計算値の比較 ($B=15\text{cm}$)

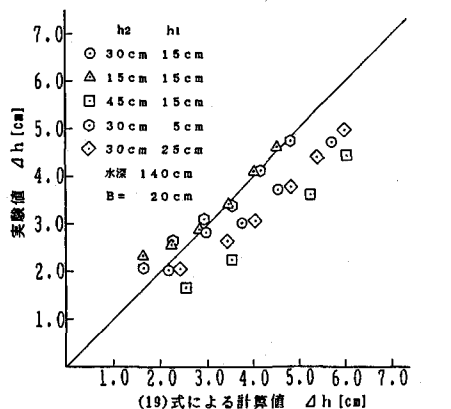


図-11 水面の盛り上がり高 Δh の実験値と計算値の比較 ($B=20\text{cm}$)

6. おわりに

本論は気泡群による力学的特性を考察し、簡単なモデル化により水面の盛り上がり高 Δh 、及び単位幅あたりの散気量 Q_a と揚水量 Q_w の関係を定式化した。それらを実験と比較することによりこのモデルは妥当であり、実用上の水理設計に適用できることが確かめられた。

今後の研究課題としては、ボイド率 f_g 、気泡群の揚水効率に關係する C 、壁面せん断力に關係する F_{1w} の理論に基づいた算出法、およびアスペクト比の変化による循環流の挙動と浄化効果などがあり、実験の計測法を改善して検討はしていく予定である。

最後に本研究の実験に関して多大なる協力をして下さった早稲田大学流体管理室、また現地実験において実験装置の設計、製作及び操作全般についても非常な労力をさいて下さった同管理室の佐々木六造氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

1. 和泉 清、山崎正和、吉川秀夫，循環流式エアレーションによる酸素移動の観測，第35会土木学会水理講演会論文集(投稿中) (1990)
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260号 (1977)
3. 赤川浩爾，気液二相流 (pp.153~163)，コロナ社 (1974)
4. Murota, A. and Muraoka, K., Turbulent diffusion of the vertically upward jet, Proc. 12nd Cong. I.A.H.R. Colorado Vol. 4 (1967)