

気泡噴流に関する現地実験 Field Test about Characteristics of Air Bubble Plume

(財)電力中央研究所 松 梨 史 郎 Shiro MATSUNASHI

(財)電力中央研究所 宮 永 洋 一 Yoichi MIYANAGA

Recently air bubble plume has been suggested as a method of water quality purification. In this study, air bubble characteristics, flow induced by air bubble rise and destratification by the flow have been investigated by field test.

As the results of the study, following consequences were obtained.

1. Bubble diameter is 5~7 cm.
2. Bubble velocity is 50~150 cm/s and can be expressed by way of function of air supply.
3. Volume flux ratio can be explained by the equation which is induced in field in which there is not stratification. But there is the maximum value of volume flux ratio.

Keywords : reservoir, water quality measures, air bubble plume, field test

1. 序 論

貯水池・湖沼等の停滞性の水域における水質浄化対策として、気泡噴流による混合方法が提案されている。空気注入による水質改善効果を確認しようとする研究は、国等の研究機関で室内・現地ともに行われているが、気泡噴流の基礎的な特性量である気泡径や気泡上昇速度、気泡噴流による周囲水の連行量、成層破壊等についての検討が不十分と思われる。

著者らは、これまでに気泡径、気泡上昇速度、連行流量の把握¹⁾、気泡噴流による貯水池内の流動のモデル化²⁾と、さらに気泡噴流による水質改善の理論的背景についての考察³⁾を行い、本水質対策による水質変化についてほぼ予測することができた。しかし、この方法をさらに種々の規模の貯水池に適用するにあたっては、現地規模の水深・成層条件での気泡速度・連行流量について、さらに詳細に検討する必要がある。

本研究は、気泡噴流に関する現地実験を行い、これまでに整理した室内実験結果¹⁾と比較検討したものである。

2. 実験方法

現地実験の計測状況を図1~3、及び表1に示す。気泡に関する実験は、気泡径は水中カメラ、気泡上昇速度は水中ビデオによってそれぞれ鉛直方向に数断面撮影し、各水深における平均値を算出した。気泡噴流による流れと水温分布は、貯水池内に流速計固定用の筏を設置し、3成分測定用の電磁流速計およびCSTD計を設置して行った。実験は、ほぼ同一の成層条件の保たれた場において、空気注入孔形状、注入空気量、注入水深を変えて行った。実験パターンを表2に示す。

3. 結果と考察

3.1 気泡特性量に関する検討

(1) 気泡形状

気泡形状については、化学工学の分野で表3のようなまとめ方⁴⁾がされている。室内実験ではそのほとんどが球形気泡であったが、現地実験では気泡径が5~7 cm、気泡上昇速度が50~150 cm/sでReynolds数にして20000~90000程度となり、表3によるとキノコ笠状気泡となるが、実験では回転楕円体気泡とキノコ笠状気泡が混在して観測された。

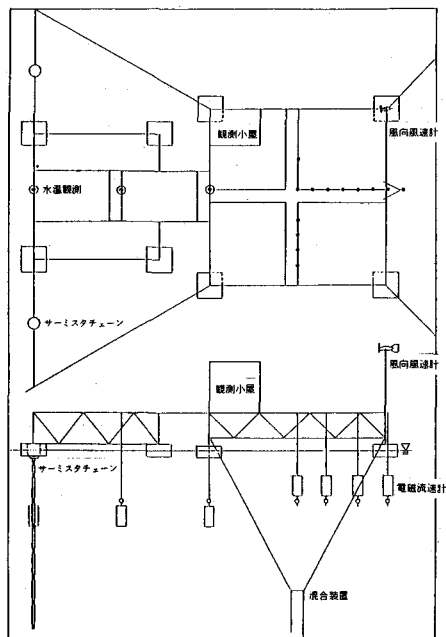


図1 実験装置

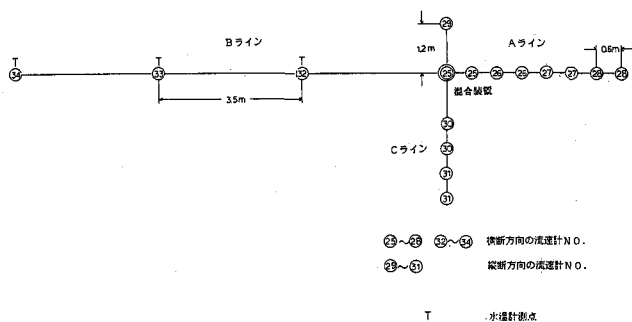


図2 流動調査測定位置

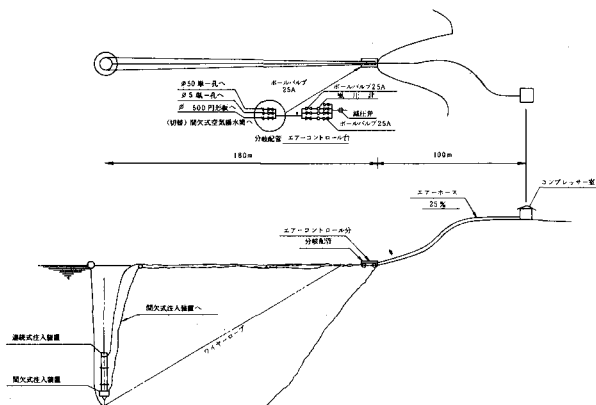


図3 実験装置

表2 実験パターン

パターンNo	空気注入孔	全水深 (m)	空気量 (cm^3/s)
PA01	単孔 0.5	20	6,200
PA02	単孔 5	20	6,200
PA03	単孔 5	30	2,550
PA04	単孔 5	30	6,200
PA05	多孔 0.5*100	20	2,550
PA06	多孔 0.5*100	20	6,200
PA07	多孔 0.5*100	20	12,000
PA08	多孔 0.5*100	30	2,550
PA09	多孔 0.5*100	30	6,200
PA10	間欠	20	2,550
PA11	間欠	20	6,200
PA12	間欠	20	12,000
PA13	間欠	30	2,550
PA14	間欠	30	6,200

表1 空気注入孔

混合方式	空気注入孔	材質
連続式	単孔 直径 0.5 cm	高衝撃塩化ビニール製
	直径 5 cm	
	多孔 直径50cmで 直径 0.5 cmの孔 が 100個	
間欠式	間欠式 直径50cm 筒長10m 空気室容量 78.74t	FRP (強化プラスチック) 製

表3 気泡特性の算定

気泡の形状	球形気泡	回転楕円体気泡	キノコ笠状気泡
気泡の大きさ	0.2 cm以下	0.2~1.8 cm	1.8 cm以上
気泡のレイノルズ数	$Re < 1$	$1 < Re < 5000$	$5000 < Re$
模式図			
体積 V	$V = \frac{\pi}{6} D_a^3 = \frac{\pi}{6} d^3$	$V = \frac{\pi}{6} D_a^2 \cdot D_b = \frac{\pi}{6} d^3$	$V = \frac{\pi D_b^2}{3} (3R - D_b)$ $= \frac{\pi D_b}{24} (3Da^2 + 4D_b^2)$
等価球径 d	$d = D_a = D_b$	$d = (D_a^2 \cdot D_b)^{1/3}$	$d = \left(\frac{Da^2}{4} (3Da^2 + 4D_b^2) \right)^{1/3}$

(2) 気泡径

気泡径の鉛直方向変化の1例と、注入空気量に対する変化をそれぞれ図4、5に示す。

気泡径は5～7 cmで、鉛直方向には微増の場合もあるが、空気量に対してはほとんど変化しない。また室内実験結果が単一気泡の理論式¹⁾で近似できたのに対し、現地実験結果は同式では表わし得ず、室内実験との間にスケール効果の存在するのがわかった。

(3) 気泡上昇速度

気泡上昇速度の鉛直方向変化の1例と、注入空気量に対する変化をそれぞれ図6、7に示す。

気泡上昇速度は50～150 cm/sで、鉛直方向に減少し、注入空気量に対して増加する傾向を示している。鉛直方向の減少傾向は、定性的に気泡が上昇するに伴って気泡径が増大し、抵抗が増大することによって生じると考えられる。また、注入空気量に対する変化も、定性的には空気量の増大に伴って気泡相互間の後流の増大により、見かけ上の抵抗が減少することによって生じると説明し得る⁴⁾。

気泡上昇速度も気泡径と同様、単一気泡に関する理論式から推定することは不可能であるが、図7から現地規模の注入空気量に対しては、注入孔形状や全水深に無関係に空気量のみによって決定できると判断し得る。Kobus⁵⁾の実験結果と今回の実験結果を改めて整理し直し、以下の回帰式を提案する。

$$W_a = 11.3 Q_a^{1/4} \text{ m}^{1/4} \quad (1)$$

ただし、 W_a : 気泡上昇速度(cm/s)

$Q_a^{1/4}$: 大気圧下での注入空気量(cm^3/s)である。

3.2 気泡噴流に関する検討

図8、9の水温測定結果から、流速の測定時間中に成層がほとんど破壊されていないものとして、成層場における気泡噴流による周囲水の連行について検討した。

各流速計は相互の磁界の影響がないように1.2 m間隔に設置し、0.6 mずつ移動して測定した。また、流速はサンプリング間隔0.5秒で、測定時間を1点あたり7分間とし、各

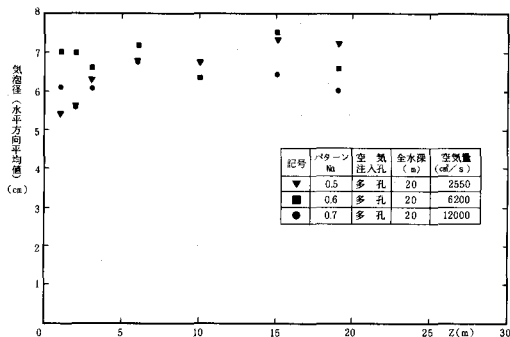


図4 気泡径の鉛直方向変化

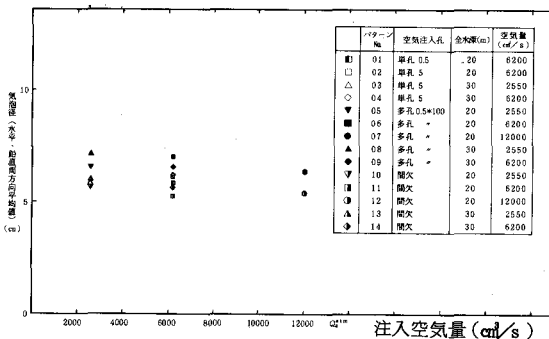


図5 気泡径の空気量に対する変化

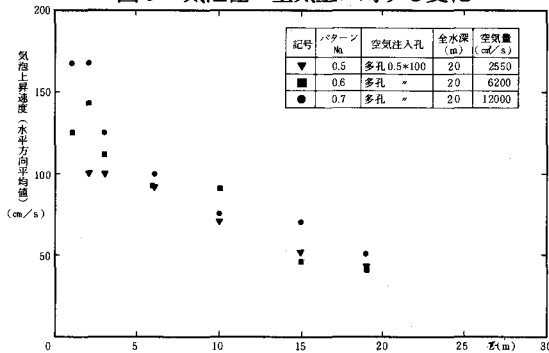


図6 気泡上昇速度の鉛直方向変化

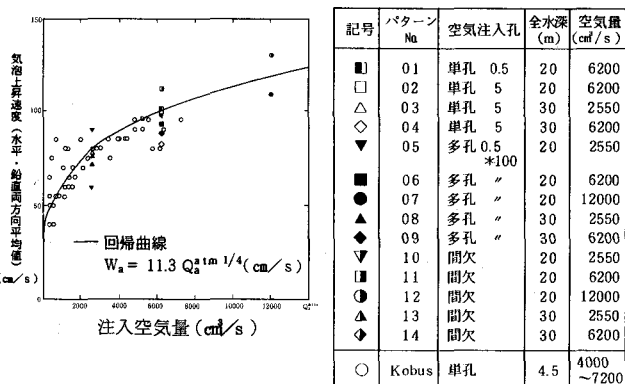


図7 気泡上昇速度の空気量に対する変化

測定時間内の平均値を求めた。間欠式注入の周期は最大でも50秒であったため、最低7周期分の平均データが得られたことになる。

表層付近の水平流速の鉛直分布を図10, 11に示す。混合装置から近い位置では水平流は水深0.6 m以深では噴流軸に向かい、表層のごくすい層を周囲に向かって流れるが、混合装置から離れるに従って、周囲水との相対重量の影響で、連行水のもぐっていく様子がわかる。

噴流の半幅（流速の半値半幅、気泡の拡がり半幅、水温低減の半値半幅）を図12, 13に示す。気泡の拡がり半幅は、噴流の上昇とともに拡がり水面で最大となるのに対して、流速・水温低減の半値半幅は拡がり率が低く、パターンによっては水面に達する前に最大値に達する場合も見られた。

鉛直流速分布は Gauss分布形でほぼ相似形であったが、これを噴流軸のまわりに積分して求めた連行流量を、注入空気量で無次元化すると図14~18のようになる。同図には水平流速分布から求めた連行流量を、表層での連行流量として付記しているが、これらの図から実験パターンによって連行流量（流量フラックス）の増加傾向や、連行効率（単位注入空気量当りの気泡噴流による周囲水の連行流量）が異なるのがわかる。

注入水深の相違による比較を行うと、場の成層により水深30mの場合は、水面に達するかなり前から連行効率が最大値になっている。

注入孔形状の相違による比較を行うと、図15から多孔が単孔や間欠式にまさっているようにも見えるが、図16からは差が明確でなく注入孔形状による相違はあまりないと見てよいと思われる。

注入空気量の相違による比較を行うと、注入空気量の小さい方が必ずしも連行効率が大きいとは言えず、むしろ場の成層のために水面に達するかなり前から最大値になっており、混合が十分とは言えないのがわかる。

実験結果を非成層場において導いた次式¹⁾に基づいて整理すると、図19のようになり、

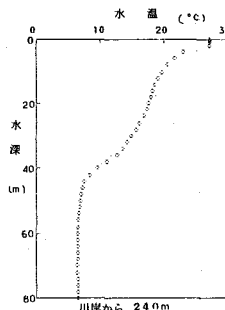


図8 水温鉛直分布（混合実験前）

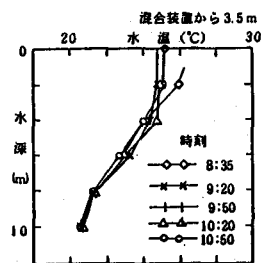


図9 水温鉛直分布（混合実験中）

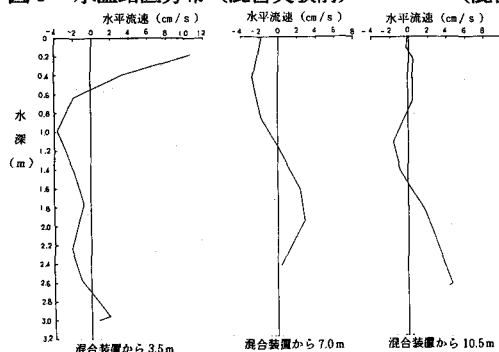


図10 表層付近の水平流速の鉛直分布

（単孔0.5，全水深20m，空気量6,200 cm³/s）

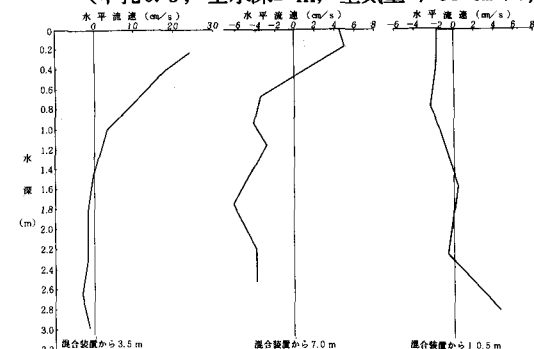


図11 表層付近の水平流速の鉛直分布

（間欠式，全水深20m，空気量12,000 cm³/s）

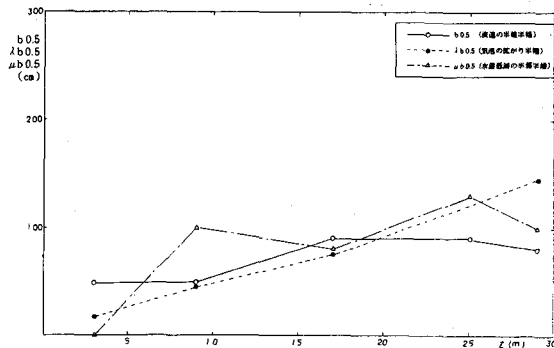


図12 噴流の半幅

（単孔5 cm，全水深30m，空気量6,200 cm³/s）

間欠式の1部を除いて大略実験値を説明し得るのがわかる。

$$\frac{Q_{a,2}}{Q_{a,1m}} = \frac{f}{F_1}, \quad \frac{1}{F_1} \equiv \sqrt{A_1 \frac{\rho - \rho_a}{\rho} g \int_0^z \frac{p_{atm}/(W_{ac} Q_{a,1m})}{p_{a,1m} + \rho g(H_2 - z)} dz} \quad (2)$$

ここに、 $Q_{a,2}$ ：気泡噴流による周囲水の連行流量（流量フラックス）、 $Q_{a,1m}$ ：大気圧下での注入空気量、 f ：分布形より決まる係数、 A_1 ：噴流断面積、 ρ 、 ρ_a ：水、空気密度、 p_{atm} ：大気圧、 W_{ac} ：噴流中心軸上の気泡上昇速度、 H_2 ：空気注入水深である。ただし、図19の実線は理論値、プロットは実験値で、記号はすべて図7と同一である。

また、図14～18の連行効率の鉛直方向変化から気泡噴流による混合形態を検討し、連行水が水面まで達するもの（強混合）と、場の成層の影響のために途中で拡散するもの（緩混合）に分離すると図20のようになり、場の成層のために連行効率の値に上限値が存在し、ほぼ500～600程度となっているのがわかる。

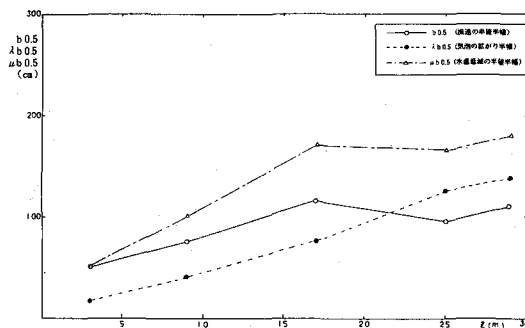


図13 噴流の半幅（多孔、全水深30m、空気量6,200 cm³/s）

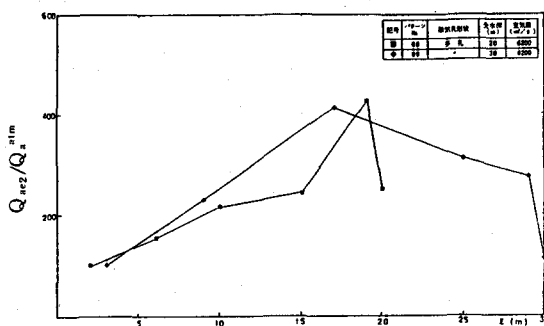


図14 連行効率（注入水深による比較）

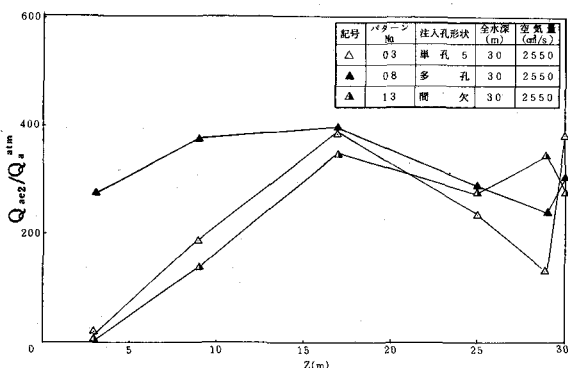


図15 連行効率（注入孔形状による比較）

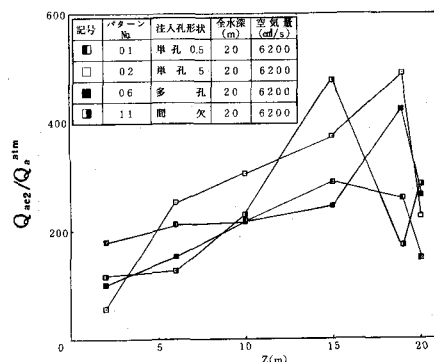


図16 連行効率（注入孔形状による比較）

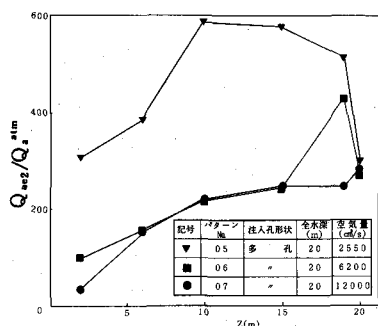


図17 連行効率（注入空気量による比較）

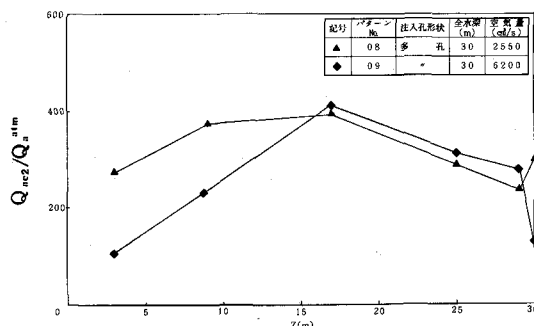


図18 連行効率（注入空気量による比較）

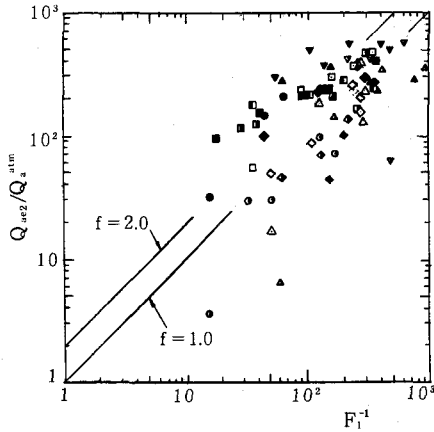


図19 連行効率の理論値と実験値

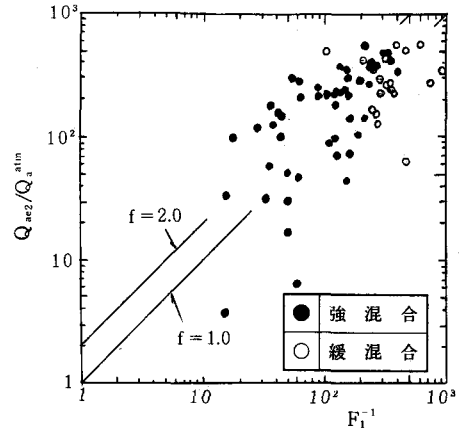


図20 連行効率と混合形態

参考文献

- 1) 松梨・宮永：貯水池水質対策における気泡噴流の基礎的検討，電力中央研究所報告，No U 87066，1988
- 2) 松梨・宮永：気泡噴流による貯水池内流動のモデル化とその適用，電力中央研究所報告，No U 88029，1988.
- 3) 宮永・松梨：貯水池における水理学的富栄養化対策の有効性に関する考察，電力中央研究所報告，No U 88066，1989.
- 4) 松本・中村：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.
- 5) Kobus, H.E.: Analysis of the flow induced by air-bubble systems, Proc., 11th Conference on Coastal Engineering, 1968, pp.1016~1031