

亜熱帯地方の小規模貯水池における気泡循環現地実験 —施設配置条件の設計基礎としての噴流半径とオズミドフ長さとの関係—

埼玉大学工学部建設工学科 学生会員 ○渋谷 翔平
 埼玉大学大学院理工学研究科 正会員 古里 栄一
 琉球大学法文学部人間科学科兼国際沖縄研究所 非会員 廣瀬 孝
 環境システム株式会社 非会員 鮎川 和泰

1. はじめに

富栄養化した湖沼やダムにおいての対策は様々あり、その一つに貯水池下層より圧縮空気を吐出することで貯水池全体の嫌気化を抑制する曝気循環対策がある。しかし、古里ら¹⁾は曝気循環の作用原理を圧縮空気の水の中吐出で生じた気泡噴流により、間接的に貯水池全域的な成層構造を制御することであるため、気泡循環と呼んでいる。本研究では気泡噴流によって生じる流動の解析を主とするため、この考えにならない気泡循環と記すこととした。

現地で対策を行うにあたり、対象水域が大きい場合貯水池内複数地点において吐出口を設ける場合がある。設計に際して影響範囲が重ならないように効率がよい距離は後述する P_N が主に 10~100 の範囲で経験的に提唱されている²⁾。しかし、現地ではこれよりも小さい P_N が観測されている。そこで、我々は P_N が 10 以下の気泡循環による影響範囲を施設設計前から推定するため、噴流半径(表層水平噴流の長さ)の観測を実施し、他パラメータとの関係を考察することを本研究の目的とした。

2. 気泡噴流形態

気泡循環によって生じる気泡噴流形態は以下の指標により分類される。

浮力周波数($N(s^{-1})$)は成層強度に関する基本的な指標である。

$$N = \sqrt{\frac{g \, d\rho}{\rho \, dz}} \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度(m/s^2), ρ : 水の密度 (kg/m^3), z : 水深(m)である。

ブルーム数(P_N)³⁾は、成層強度と気泡浮力との比に関

する無次元数であり室内実験と現地実験を比較する際に有用なパラメータである。

$$P_N = \frac{N^3 H^4}{g Q_B} \quad (2)$$

ここで、 H : 空気吐出水深(m)、 Q_B : 吐出水深での空気量(m^3/s) ($Q_B = Q_A \cdot H_A / H_T$)、 Q_A : 大気圧での空気量(Nm^3/s)、 H_A : 大気圧水頭($\sim 10.2m$)、 H_T : 総水頭(m) ($H_T = H + H_A$)である。

また、気泡浮力と成層強度の比であり、噴流半径の長さスケールとなりうるオズミドフ長さ $l_o(m)$ ⁴⁾を用いる。

$$l_o = \left(\frac{Q_B g}{N^3} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Asaeda&Imberger³⁾は P_N を用いた気泡噴流形態の分類を行っており、現地スケールでは主にType1を示すことが経験的に知られている。古里ら¹⁾は現地において気泡循環を実施し、気泡吐出水深から上層において流向・流速測定を実施した。 P_N から本実験同様Type1を示してはいるが詳細にみれば、外部ブルームの下降流れが噴流半径の外縁部のみで確認されたとしている。(図1参照)Asaeda&Imberger³⁾の実験時最小 P_N はおよそ100であり、古里ら¹⁾の実験時最大 P_N はおよそ10であった。これより、Type1の中においても P_N の小さいものはさらに違った流動形態を示す可能性がある。本実験においては古里ら¹⁾が行った実験に近い P_N が実験前から推定されたので彼らが示す流動形態を仮定し実験を進めることとした。

次に、表層水平噴流についての既往研究結果を示す。Zicら⁵⁾は室内実験において($P_N \approx 1$)サーモグラフィによ

キーワード 水温成層, 噴流半径, 気泡循環, オズミドフ長さ, 現地実験

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学工学部建設工学科

TEL.048-858-3429 E-mail : s.shibuya.049@ms.saitama-u.ac.jp

り表層水平噴流の水面水温分布を観測した。これによれば、瞬間的な水温分布は軸対称方向に均一には広がらないが、時間平均で見ると軸対称方向に均一に広がり、中心が冷たく外縁方向に水温が連続的に上昇している。

3. 方法

本研究は沖縄県久米島に位置する山城池において行われた。図 2 に山城池周辺地形図を示す。灌漑用ため池であり、最大水深は 7.6m と浅いが 2016 年夏季に行われた事前調査における水温・DO 鉛直分布では水温成層が確認され、底層は無酸素であった。混合外力算定のため堤体に気象計を設置した。計測項目は気温(°C)、気圧(hPa)、相対湿度(%), 日射(W/m²), 風向(°), 風速(m/s)であり、計測間隔はおおよそ 10 分である。データは基本的には 10 分間隔で計測され、値は 10 分前平均値である。降水量は山城池からおおよそ 1.5km にある久米島気象観測所のデータを用いた。実験期間は 2017 年 5 月 23-30 日であり、期間中は常時満水位であった。気泡循環装置の空気吐出水深 H は 6.7(m) であり、空気

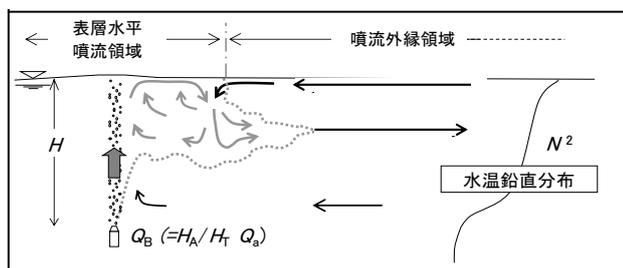


図 1 古里らりにおいてみられた流動形態

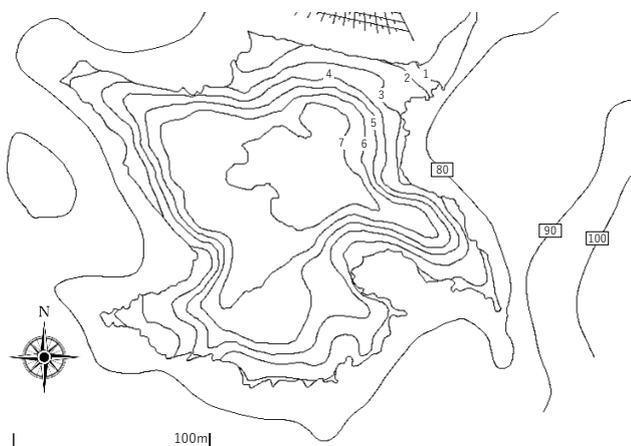


図 2 山城池周辺地形図

黒四角内数字は標高を表し、貯水池内の数字は常時満水時の水深を表す。

量 Q_A は 316(NL/min.) で散気管より吐出した。

貯水池内の諸パラメータ (N, P_N, l_0) を求めるため噴流半径調査直前に噴流半径外縁において水温鉛直計測を実施した。

噴流半径の測定は鉛直計測直後に行い、小型ボートに乗り、水温センサーを水深 0.1m に手で保ちながら、噴流外縁から噴流中心を微速で通過し、反対側の噴流外縁まで到達する、という方法で行った(図 4 参照)。噴流半径の算定方法は、Zic ら⁵⁾の表層水温サーモグラフィ画像を元に、水温が下がり始める地点と水温が上がりきった点を噴流外縁とし、センサーデータには GPS による位置情報が含まれているため、循環装置設置場所の緯度経度と噴流外縁の緯度経度より噴流半径 R を求めることとした。

4. 結果

調査結果を表 1 に示す。Case は日付・時間を表しており 2310 の場合 23 日の 10 時に取得したデータを示す。GPS はデータを取得できていない、もしくは遅延したと推定される箇所もあったため、GPS 信頼度として A: 問題なし、B: 問題ありだが R への影響は無視できる、C: 問題があり R への影響が大きいと評価した。- は水温差が限りなく小さく算定困難であった。獲得したデータの P_N の範囲はおおよそ 1~10 であった。 P_N の低下に伴い R は大きくなる傾向が見て取れる。

図 3.4 は噴流半径調査における水温変化と計測地点と循環装置までの平面距離の変化および噴流半径調査地点、装置位置、風の特性を表す。水温変化は一度低下した後変化率が小さくなり、そこからさらに低下し、最低水温を観測すると水温が上昇をはじめ、また変化

表 1 噴流半径調査結果

Case	P_N	N^2	R	l_0	GPS
2310	6.6	0.0023	11.1	4.2	A
2311	-	-	10.3	-	A
2314	9.0	0.0027	11.3	3.9	A
2410	5.4	0.0019	12.4	4.4	A
2412	8.4	0.0026	13.2	3.9	A
2414	7.9	0.0025	12.7	4.0	B
2416	8.7	0.0026	10.6	3.9	B
2506	3.2	0.0013	26.3	5.0	B
2508	4.3	0.0016	19.3	4.7	A
2510	4.3	0.0016	18.2	4.7	C
2706	1.1	0.0007	-	6.7	B
2708	-	-	-	-	B
2710	1.2	0.0007	26.5	6.4	B

率が小さくなった後、再度上昇するのが確認できる。ただし、本調査の特性上、噴流半径外縁は必ず通るが、表層水平噴流の最低水温は必ず計測できるわけではない。図において最低水温に対し連続的に水温の下降、および最低水温から連続的に上昇している場合観測された最低水温から船の進行方向に垂直な方向に実際の最低水温位置があると仮定することはできるだろう。よって、最低水温周辺の水温変化を考察することは難しいと判断した。1回の調査において2つの噴流半径が得られるがこの2つにおいて差が大きいものが半数近くあった。これらのうち噴流半径が大きいものは噴流外縁における水温変化はもう一方に対し緩やかであった。

図4は縦軸、横軸は緯度経度を表す。これは軸の範囲に応じて図の縦横のアスペクト比を合わせているので距離標は縦横に対応する。青矢印は調査前約10分間の平均風向と平均風速を表す。この図から最低水温位置は装置位置から北東にずれていることが確認できる。よって、噴流半径の中心は最低水温位置からとした。

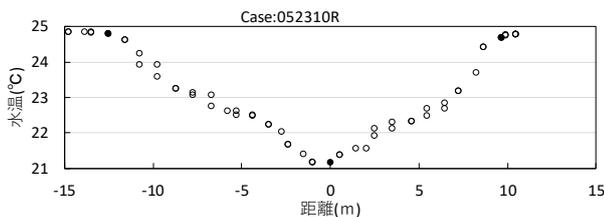


図3 噴流半径調査結果

(最低水温を0mとし、通過前を-通過後は+で表す)

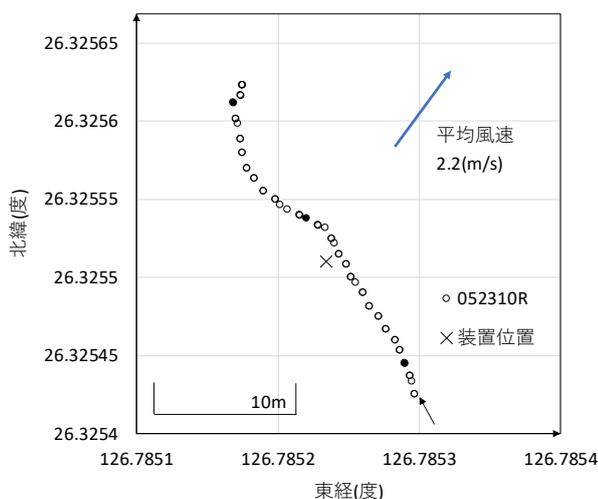


図4 噴流半径調査地点と風特性

(表1はこれに従っている)

5. 考察

表層水平噴流の水温変化、最低水温位置の装置位置とのズレおよび噴流半径の各所における違い、オズミドフ長さ和他パラメータの関係について考察する。古里らの気泡循環中の流向・流速測定結果と照らし合わせれば、図3における最低水温前後の水温変化は底層と噴流近傍水塊の混合と考えられる。また図における外縁の水温変化は表層水平噴流と噴流外縁の混合による変化と考えられる。水温停滞域の原因としては、表層水平噴流は下縁の水を連行するが、この水塊は底層水が湧昇してきた際に混合した水塊と水温差がないためと考える。

また、図3が示すように連続的に水温が下降、上昇するということが古里らが示す流動形態であると考えられる。現象機構としては噴流半径内の表層水平噴流が沈降点まで鉛直混合せず、下部の水塊を連行することによって徐々に水温が増加したと考える。

図4において装置位置から最低水温位置のずれが同じことから風の影響を受けていると推定し、検証したが全データを通してしてみるとそのような相関性は見いだせなかった。また、 R は一度の調査で2回計測できるがそれぞれ違った値を示した。これはZicらと同様の結果を示しており、瞬間的にみれば R は軸対称方向に均一ではない。また、彼らは時間平均でみると軸対称方向に均一な広がりを見せることを示した。これより最終的な R の値は2つの値の平均とした。

Lemchert&Imberger²は既往研究を取りまとめ以下の式(4)を提唱した。

$$R \approx 0.97 \left(\frac{Q_A g}{N^3} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

これはオズミドフ長さにおける空気量を大気圧下吐出空気量としたものでスケール化されたといえる。そこで、我々は本実験データと彼らを取りまとめたデータを用い l_0 と R の相関性を確認した(図5)。図5より $R^2=0.94$ を示す式(5)を得た。

$$R = 1.29 l_0^{1.19} \quad (5)$$

本実験データは既往研究より上方にプロットされており、この結果を R の過大評価と考え、本実験データの

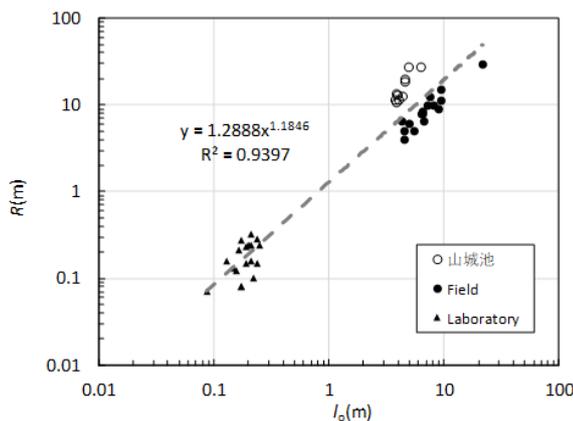


図 5 オズミドフ長さ(l_0)と噴流半径(R)の関係

みを詳細にみてみると、 l_0 の上昇に伴い近似曲線からの開きも大きくなっている。原因としては、噴流半径内外の水温差が小さくなるにつれ、噴流外縁の判別が難しくなることに起因したと思われる。ただし、本実験データのみで見るとある程度直線上にプロットされていることがわかる。これは他のパラメータの違いによって本実験と既往研究データに差異が生じた可能性も考えられる。また、既往研究データのみで l_0, R を比較したところわずかではあるが l_0 の方が相関性が高かった。よって、オズミドフ長さを噴流半径の長さスケールとして用いることは有用であるといえる。これにより、オズミドフ長さによって R を施設設計前にある程度推測することができるといえるだろう。ただし、本実験でも観測されたように噴流半径は瞬間的には軸対称方向に均一ではないのでその点には留意しなければならない。

6. 結論

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- ・噴流半径調査における最低水温位置は気泡循環装置直上には観測できなかった。また、このずれを風の影響と仮定し検証したところ、相関性は見られなかった。
- ・ R と l_0 の関係性を過去の研究データを含めてまとめた結果、気泡噴流の Type 分類によらない比例関係を得た。
- ・この比例関係より、空気量、吐出水深、成層強度を決めれば噴流半径が推定でき、施設設計の際の一基準となりうるだろう。

謝辞：本研究の一部は、公益財団法人 河川財団の河川基金助成事業、公益財団法人 高橋産業経済研究財団研

究助成、独立行政法人水資源機構総合技術センターの受託研究、琉球大学国際沖縄研究所 共同利用・共同研究事業により行われた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 古里栄一, 久納誠, 丹羽薫, 梅田信: 貯水池気泡循環対策による広域水平密度流 ～低ブルーム数における実用式～, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 71, No.7, III_455-III_466, 2015
- 2) Lemckert, C. J. and Imberger, J.: Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 6, 680-703, 1993
- 3) Asaeda, T. and Imberger J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid Mech., 249, 35-57, 1993
- 4) Ozmidov, R.. V.: On the turbulent exchange in a stably stratified ocean, Atmos. Ocean Phys., 1, 493-497, 1965 (Eng. Transl.)
- 5) Zic, K., Stefan, H. G. and Ellis, C.: Laboratory study of water destratification by a bubble plume, Journal of Hydraulic Research, 30(1), 7-27, 1992