

現地実用条件における気泡循環対策のシミュレーションによる
効果評価手法の開発：修正二重ブルームモデルの JWA モデルへの導入

鹿児島大学 正会員 古里栄一
水資源機構 村井大介，今本博臣，久納誠，村田裕
(株)日水コン 羽田紀行，岡田祐也

1. 目的

富栄養化貯水池における水質保全対策として、気泡噴流を活用した気泡循環対策（いわゆる「曝気」循環対策であるが、ここでは学術的に正確な表現として、こう記載する）は数 10 年以上前から国内外で有効な対策手法の一つであり、わが国においても一定の効果が発揮されている。設計や管理においては、数値解析モデルが極めて有用な手法である。ところが、従前の流体力学的な諸研究^{1), 2), 3)}は、実際のダム貯水池における条件（気泡浮力や周囲密度成層強度）とは異なる、室内実験で整備の容易な条件で実施された理論が実貯水池においても用いられていた。このため、これらを実現に適用する場合には問題があることが近年指摘されている^{4), 5)}。従前の二重ブルームモデルを実ダム管理条件に適用した場合、気泡循環対策の効果の過大評価につながる可能性があり、土木工学において大きな課題である。しかしながら現在までに貯水池水理の数値解析モデルにおいてこの問題を解決した事例は存在しない。結果として、社会資本整備においては問題となる、インフラストラクチャー効果の過大評価が行われている可能性があり、解決すべき課題として重要性が大きい。本報告では、こうした観点から実施された気泡噴流の最新研究成果を用いて、実用条件における気泡循環対策の効果評価手法を貯水池水理水質解析モデルに導入する方策について報告する。特に、従前二重ブルームモデルを用いた場合との、気泡循環対策による貯水池水質保全効果を評価する場合の差異について、流動の観点から比較するものである。

2. 材料と方法

貯水池全域の流動については、既に水資源機構において開発された、鉛直二次元流れ場を HSMAC 法で解く JWA モデルを用いる。気泡循環対策で生じる流動は、従前の本モデルと同様な方法として、対策施設が設置されているブロックの上下流側に境界条件として水平流量を与える。気泡噴流そのものは各ブロックの運動方程式や連続式とは別に一般的な二重ブルームモデルを基本として用いる（以降では「従前モデル」と記載する）が、気泡噴流外部の水平流量を評価するにあたっては修正二重ブルームモデル（以降では、「修正モデル」と記載する。）として、図-1 に示した実貯水池条件の関係を用了。

本研究では、修正モデル開発の端緒であるために、任意条件での数値実験として表 1 に示す条件での解析を行うことで従前モデルと修正モデルの比較を行った。表に示したとおり、各外部条件を一定値とするとともに水温成層も理想条件とし、両モデルの違いを検出することを念頭においた条件としている。

3. 結果と考察

図 2 に従前モデルと修正モデルの比較として、気泡噴流周囲の水平流量の鉛直分布を示す(図 2 右)。これは貯水池全域モデルにおいては上述した境界条件に相当するものである。なお図では、この流量分布を駆動する上昇気泡周辺の第 1 循環流内部に相当する、内部ブルーム周囲の水平流量も参考として示す(図 2 左)。これは水の密度の様な鉛直分布条件におけるブルーム周囲水の水平流にも相当する。

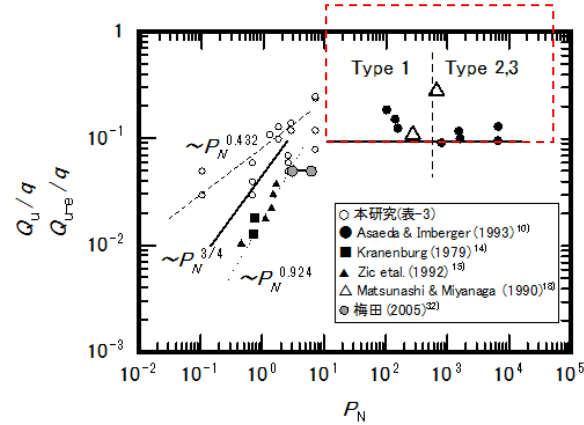


図 1 F_N と気泡噴流外縁 Plunging point における連行係数の関係（古里ら 2015 より改変，図中の赤破線枠内が従前研究の F_N 条件である）

表 1 解析条件

項目	条件	備考
貯水池形状	0ダム*	—
流入流出	0.7m ³ /s 15℃	平水相当で水位一定とした
気象条件	一定値 ²	初期条件から安定しやすい条件
気泡循環	3700NL/min. 1基	水深15m
計算期間	10日間	十分な混合層形成時間
初期条件	二成層 ³	上層15℃, 下層10℃

*1 湛水面積：0.6km²，貯水池容量：18,000 千 m³，
*2 日射量：0cal/cm²，気温：15℃，風速：0m/s，湿度：50%，
雲量：10 分比
*3 躍層水深：10m

キーワード プルーム数，連行係数，第 2 循環流

連絡先 〒〒890-8580 鹿児島市郡元一丁目 21 番 24 号 鹿児島大学 TEL 099-285-7565

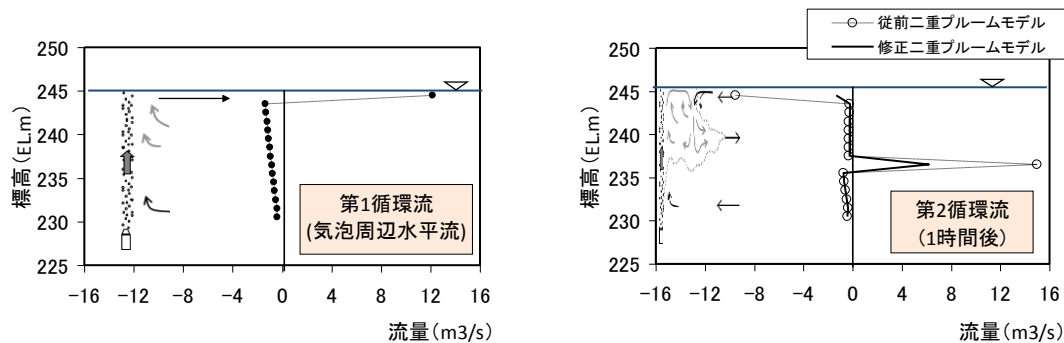


図2 気泡循環で生じる広域水平密度流量の鉛直分布の計算結果：左：第1循環流(内部ブルーム) (両モデルで本流動は共通する)，右：第2循環流の比較(二重ブルームの外部)。負の流量は気泡噴流に連行される収束流を示し，正は放射状に広がる水平流(左図では表層射流，右図ではイントルージョン)を示す。

3.1. 上昇気泡の周囲水平流(第1循環流・内部ブルーム)

図2の左図より，第1循環流内部の上昇気泡周囲で発生する上昇流である内部ブルームの周囲では副次的に形成される水平流量の特性が確認できる。言うまでもないが，小さい R_b 条件では気泡浮力に対する密度成層効果は小さいことから一様密度場における気泡噴流の構造と一致するとみなして良い。図よりわかるとおり，上昇気泡により連行され湧昇する下層および中層水は表層でその全てが放射流として広がり，内部ブルーム周囲の水平流では最も多い流量となる。なおこれらの流動は，従前および修正二重ブルームモデルで共通するものである。また，もし水温成層が気泡吐出高さより上部で完全に消滅した場合は，この流動のみとなる。次に密度成層存在時の流動について，以下に記述する。

3.2. 従前二重ブルームモデルによる気泡噴流外部の流動(第2循環流)

図2の右図より従前モデルの1時間後についてみると，標高237m付近での薄いイントルージョン流動層が形成されていること，他の層ではそれぞれ異なった流量規模ではあるが気泡噴流に連行される収束流が生じていることがわかる。ただしその流量は気泡噴流形態と対応して標高により異なる。空気吐出口(EL. 230m)からイントルージョンまでは，上部ほど流量が増加する。これは，内部ブルームが上昇するに従い直径が大きくなり連行流量が増加してゆくためである。一方イントルージョン上部では，こうした傾向は確認できず，表層を除いてはほぼ一定流量である。イントルージョン水深直上まで沈みこむ外部ブルームの流れは，内部ブルームとは異なり等密度のイントルージョン水深まで徐々に落下のための密度差が小さくなるのに伴い落下速度も遅くなってゆく。このため外部ブルームの落下に伴う連行流量の増加は，内部ブルームに比べて顕著ではない。一方表層では外部ブルーム外縁で沈み込む領域で強い連行が生じ，本計算条件では約 $10\text{m}^3/\text{s}$ もの表層収束流が発生している。イントルージョン流量の多くは外部ブルーム沈下流であることを考えると，表層収束流の流量は気泡噴流によって生じる貯水池全域の流動に大きな影響を与えることが指摘できる。これらの特性は従前の様々な密度成層場での気泡噴流の構造と一致する。

3.3. 修正二重ブルームモデルとの比較

図2右図より修正モデルと従前モデルとを比較する。周囲水の流動構造は両モデルの差異はほぼ無い。顕著な違いは，表層流とイントルージョンの流量である。図-1のデータは様々な条件で得られた実測値であるため修正モデルの方が正確であることを踏まえると， R_b 条件によっては従前モデルは表層流を約10倍，イントルージョン流量を約2倍，実際に貯水池で生じる現象として過大評価をしていたことになる。ただし，図1の関係については幅があるために，この過大評価のレベルは最大として捉えるべきである。なお状況に応じては，外部ブルームの落下する水温がこれらの両モデル間で異なることから，イントルージョン水深も変化する可能性もある。以上より明らかな通り，気泡循環対策の貯水池水質保全効果を評価する上では，修正モデルを用いる方が好ましいと考えられる。特に数値解析で気泡循環装置の必要基数を評価する場合には，従前モデルで得られた必要基数は効果を過大評価しており，その結果として実際には十分な効果が得られない基数であった可能性がある。これは数値解析モデルでの計算に基づき気泡循環対策を導入した多くのダム貯水池で水質保全効果が得られなかったことと対応している。 R_b 条件を確認した上で，過去の気泡循環に関する国内外の全ての数値解析結果の見直しが必要である。

謝辞：本研究の一部は，独立行政法人水資源機構総合技術センターの受託研究，公益財団法人 河川財団の河川基金助成事業，ダム技術センターの共同研究により行われた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Asaeda, T. and Imberger J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, 249, 35-57, 1993
- 2) Socolofsky S. A.: Bubble Plumes, In, *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, Volume Two, CRC Press, New York, 55-67, 557pp, 2013
- 3) Socolofsky, S. A., & Adams, E. E.: Role of slip velocity in the behavior of stratified multiphase plumes. *J. Hydraul. Eng.*, 131(4), 273-282. 2005.
- 4) 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
- 5) 古里栄一，川崎秀明，高須修二，内里清一郎：大量の圧縮空気を活用した気泡循環に関する現地実験—広域水平密度流の水温成層変形法による評価，*ダム工学*, Vol. 28, No. 2, pp.86-97, 2018.