

エアバブルカーテン (A.B.C.) による成層破壊

乃 万 俊 文*・中 村 充**・石 崎 大 輔***

1. 緒 言

閉鎖性の深い湾や深い湖では夏季には温度躍層が発達し水質成層が発生する。つまり表層には溶存酸素 (DO) に富み比較的軽い水塊があり、底層には貧酸素の比較的重い水塊が停滞する。このような場合の水質改善工法として機械的エネルギーを投入して上下混合を起こさせる工法があり、その中でも水中に気泡を放出するエアガン、エアリフト、エアバブルカーテン (以下 A.B.C. と略す) などは施設が比較的軽便にでき、しかも効果があるので実用化の段階にきている。しかしながら水質 (たとえば DO) をある基準 (濃度) に保つためにどれだけの施設が必要か、つまりこの種気泡放出に伴う上昇流による水質改善の設計法については密度成層のない場合を除いて報告されていない。

増養殖漁場の水質改善工法としての A.B.C. は究極的には水質の制御を目的とするが、この場合水質の制御とはとりもなおさずある水域を生物学的および物理・化学的に制御することであり、これは学際的な総合研究により始めて達成できる目的であろう。この目的達成のための一段階として水理学的には A.B.C. によってどういう水理現象が起こるかを解明する必要がある。成層のない場合の A.B.C. による水理現象は中村らの一連の研究^{1)~4)}によって明らかにされている。

ここでは成層のある場合の成層破壊について水理模型実験を行い、成層破壊に伴う水理現象として密度、層厚および湧昇高さを与える式など成層破壊の設計計算法を得たので報告する。

2. 実験の方法

実験は長さ 10 m (うち実験部 8.5 m) × 幅 0.5 m × 高さ 1 m の両面ガラス張りの水槽に所定の密度成層を形成させ、実験部中央の水中に設置した 8 個のエアストーンから所定の空気量を放出して行った。水槽は長さ 8.5 m の実験部と長さ 1.5 m の淡水貯溜部に隔壁で分けられて

おり、この隔壁は全幅にわたって高さを変化させることができる。密度成層は下層高をこの隔壁の高さに一致さすべく実験部に所定濃度の食塩水を貯溜し淡水貯溜部に静かに淡水を流入させ隔壁上端から横溢流・湛水させて成層を形成させた後隔壁板を追加し実験部を完全に隔離した。このようにして求めた密度分布は例えば 図-2 ①に示すような分布となっていて、実験目的を満たしていた。

気泡は 8 個のエアストーンから均等に放出されるよう実験条件に合せてあらかじめ分岐装置で調整して、本実験を行った。

密度は、実験範囲をカバーする密度のわかった 5~6 種の食塩水で電気伝導度計を実験前後に検定して、電気伝導度から読みとった。流速は水素気泡発生装置で流れの可視化をして測定したが、後述するように成層破壊における流れは多層の非定常現象であるので、染料、四塩化炭素とキシレンの混合液小球の追跡と同様流況観察にとどまった。成層の高さは小球 (四塩化炭素+キシレン) の位置で測った。湧昇高さは目視観測した。空気量は実験の終了 (湧昇面が静水面と一致) 時にジョウゴで気泡をメスシリンダーに集め、要した時間と排水容積から求めた。

実験の組み合わせは表-1 のとおりである。

表-1 実験の組み合わせ

上層厚 h_I	20~40 cm	上層密度 ρ_I	1.000
下層厚 h_{II}	35~55 cm	下層密度 ρ_{II}	1.005~1.025
放気水深 h_a	75 cm (1 例 60 cm)	空 気 量 Q_a	(cc/sec/cm)
全 水 深 h	90 cm		0.075~0.723

3. 実験における現象

成層下 h_{II} から放出された気泡に伴って密度大の底層水は境界面をつき破って上層水中を上昇するが、重力の作用で落下する。その落下の際、上層水を混入するため上層厚が減少し下層厚が増加する。また境界面突破、落下の際内部波が発生する。

気放量が大で密度差が小さい場合、下層水は直接静水面まで達し、ここで水平流に転じ、やがて落下し境界面付近を水平に A.B.C. から遠ざかる。気泡量が小、密

* 正会員 農林省農業土木試験場水産土木第 3 研究室
 ** 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木第 3 研究室
 *** 農大 東海大学学生 (現北海道漁業組合連合会)

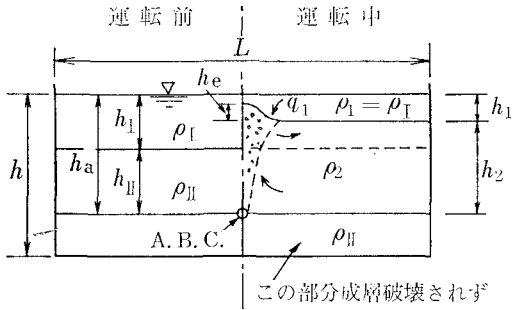


図-1 成層破壊模式図

度差大の場合、下層水の湧昇高は小さくすぐに落下し A.B.C. から遠ざかる。いずれもその落下途中において上層水を混入連行する。したがってどんなに気泡量が小さくても気泡が上昇する限り成層破壊は行われることになる。

成層破壊途中における流況は、湧昇した下層水が落下した後の水平流（中層流）が水槽端の壁面に到達するまでは、表層と下層が A.B.C. へ向い、中層が A.B.C. から遠ざかる 3 層流で（実際にはこれに内部波の波動も加わっている）、壁面に到達し反転してからは壁または A.B.C. に水平流が達するたびごとに流れの層が増え、流況を詳細に測定することは不可能であった。

このように成層破壊は上・下層厚の変化および下層（ただし A.B.C. 以浅）における密度変化として表現され、最終的には上・下層境界面が水面に達し密度差がなくなることである。しかしこの場合 A.B.C. 設置水深より以深は死水層となって混合しない。すなわち密度成層面が A.B.C. 設置水深に残る。

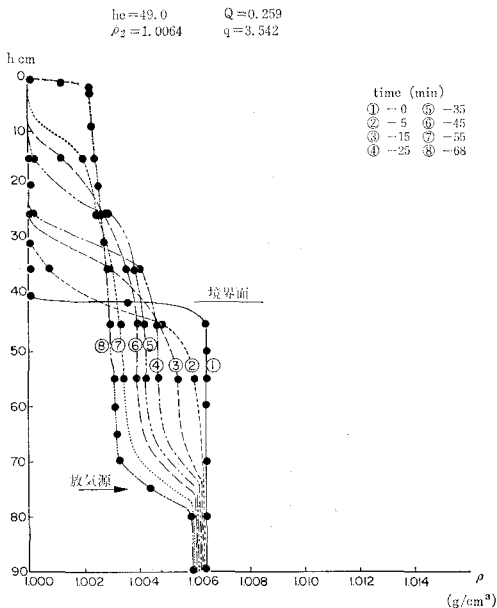


図-2 密度鉛直分布の時間変化

4. 層厚変化

A.B.C. 開始からの時間と共に下層厚 h_2 は 図-3 のように変化する。下層厚の増加は上層厚 h_1 の減少であ

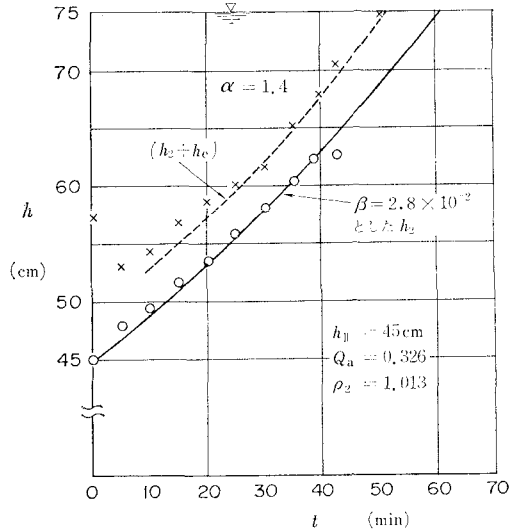


図-3 下層厚と湧昇高

り、これは上層水が下層へ持ち去られたために起こる。すなわち

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{dh_2}{dt} = -\frac{q_1}{L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_1 : 上層からの混入量、 L : 水槽の長さ

混入量 q_1 は A.B.C. によって投入されたエネルギー E に比例し無次元密度差 ε に反比例すると考えると

$$q_1 = \beta \frac{E}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2)$$

また投入エネルギーは空気の密度を水のそれに比べて小さいので無視し、上下層の密度差も水の密度に比べて無視すると、

$$E = \rho g h_a Q_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

下層厚 h_2 中で下層密度 ρ_2 は一様であると考えたと ε は

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} = \frac{(\rho_{II} - \rho_1)h_{II}}{(\rho_{II} - \rho_1)h_{II} + \rho_1 h_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) において $(\rho_{II} - \rho_1)h_{II} \ll \rho_1 h_2$ であるので分母で前者を無視すると

$$\varepsilon \doteq \frac{(\rho_{II} - \rho_1)}{\rho_1} \frac{h_{II}}{h_2} = \varepsilon_0 \frac{h_{II}}{h_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式 (2), (3) および (5) を式 (1) に代入し、 h_2 について解くと式 (6) を得る。

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= h_{II} \exp(K_E t) \quad (h_{II} \leq h_2 \leq h_a) \\ K_E &= \beta \frac{w_0 h_a Q_a}{L \varepsilon_0 h_{II}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 w_0 は水深 h_a までの平均単位容積重量である。

K_E については, β が実験係数であり他は実験条件として与えられる。これは図-4における勾配として表わされその平均値は 3.5×10^{-2} (cm²/gr) であった。図において K_E は式 (6) を変形して層厚の時間的変化から読みとったものの平均値である。また図-3 中の実線は $\beta = 2.8 \times 10^{-2}$ とした式 (6) の曲線である。

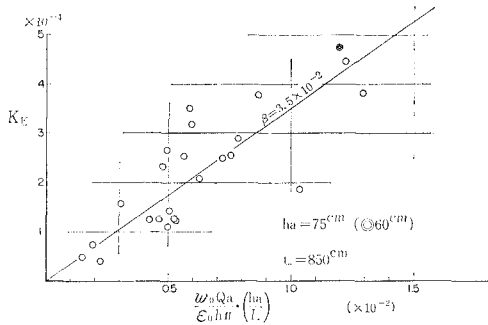


図-4 K_E と $\frac{w_0 Q_a}{\epsilon_0 h_{II}} \left(\frac{h_a}{L} \right)$ の関係

5. 湧昇高さ

密度 ρ_2 の下層水が境界面上 h_e まで湧昇するためには, 位置のエネルギーと運動エネルギーのつり合いから

$$(\rho_2 - \rho_1)gh_e = \frac{\rho_2 v^2}{2} \quad (7)$$

ここに, v は境界面を通過する時の下層水の上昇速度。上昇速度については中村らによると

$$v = \alpha (g Q_a)^{1/3} \quad (8)$$

式 (5), (7) および (8) から湧昇高さは

$$h_e = \frac{\alpha^2 (g Q_a)^{2/3} h_2}{2 \epsilon_0 g h_{II}} \quad (9)$$

すなわち, 湧昇高さは下層厚 h_2 が大きくなるにつれて大きくなる。また, 係数 α の平均値は 1.4 であった。

図-3 には $\alpha = 1.4$ とした式 (9) で計算した h_e と先に計算した h_2 の和を破線で示してある。

6. 現地への応用について

A.B.C. の成層破壊ということでの現地への応用については, すでに発達している密度成層の破壊と, 密度成層を発達させないための応用とが考えられる。後者については湾や湖の形状, 気象条件など地域特性によって密度成層を発達させる要因が異なり, これに対処する

A.B.C. の施設規模の求め方はいずれ報告する予定である。

図-1 に示すような密度成層があった場合, 成層破壊が完了するに要する時間 T は式 (6) において $h_2 = h_a$ とおいて

$$T = \frac{\ln \frac{h_a}{h_{II}}}{K_E} \quad (10)$$

逆に図-1 に示す初期密度成層を時間 T で破壊するのに必要な空気量 (A.B.C. 単位長さ当り) は

$$Q_a = \frac{L \epsilon_0 h_{II}}{\beta w_0 h_a T} \ln \left(\frac{h_a}{h_{II}} \right) \quad (11)$$

また, このために必要なコンプレッサーまたはブローアの馬力は⁴⁾

$$P_A = \frac{w_0 h_a Q_a}{0.53 \gamma} \quad (12)$$

ここに, γ は負荷率である。

7. 結 言

A.B.C. による成層破壊について上, 下層厚の時間的変化に注目して研究を行い, 次のことがわかった。

- ① 成層破壊は, 境界面を突破した密度大の下層水が落下する際に上層水を連行することにより行われる。
- ② 境界面通過する上昇気泡があれば, 必ず成層破壊は行われる。
- ③ 成層破壊途中における水理現象は上下各層の層厚変化および下層における密度変化として表わされる。またこの途中流況は多層流である。
- ④ A.B.C. 設置位置より深い水深は成層破壊されず初期の密度の水塊が残る。

参 考 文 献

- 1) 中村 充: エアカーテンによる上昇流の発生に関する研究, 第18回海岸工学講演会論文集, 1971.
- 2) 中村 充・大西亮一・萩野静也・井上謙一: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 3) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・稲垣 基・矢内正樹: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究-2, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 4) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・大西亮一: エアバブルカーテンの応用に関する研究, 農業土木試験場報告, 第13号, 1975.