

神戸大学工学部

神戸大学都市安全研究センター

復建調査設計（株）

（株）マイカル

正会員 道奥康治

正会員 藤田一郎

正会員 高橋俊之

藪本圭一郎

1. はじめに

貧酸素化した水域では、底質から様々な物質が嫌氣的に溶出し富栄養化を進行させる．底面が傾斜している場合には、塩分浮力によって傾斜プルームが発生する¹⁾．プルームによって様々な栄養塩や金属成分さらに熱が輸送されると凹部に物質が集積すると考えられるため、実際には従来の鉛直次元解析で評価される以上の有機汚濁が底層で生じている可能性がある．先に著者らは、底面からの溶出フラックスが一定の場合に発生するプルームの理論解析と実験を行った²⁾．しかし実際の状況は、ある濃度で底質に含有される物質が溶出する一すなわちフラックス既知ではなく濃度が既知の境界から溶出が生ずると考えられる．本研究では、この場合の溶出プルームについて実験と解析を実施した．

2. 相似解析の概要

図-1 のように底面で一定濃度 C_B を有する物質が $-\kappa_C(\partial C/\partial z)|_{z=0}$ のフラックスで拡散溶出する．溶出した流体塊に

は相対浮力 $\beta C g$ が作用し、傾斜面上をプルームとして流下する．

ここで、 g は重力加速度、 β は物質の浮力換算係数である．境界層近似、静水圧近似、ブシネスク近似を施した二次元 N-S 方程式、連続式、物質保存則を連立させ、定常プルームの流速・濃度分布の解 $u(x, z)$, $C(x, z)$ を求める．流れの自己相似性を仮定して、独立変数を $\eta = axz^{-1}$ 、流れ関数 ψ と濃度 C の相似解を $\psi = bx^m F(\eta)$, $C = ex^n G(\eta)$ のようにおく．ここに、 $F(\eta)$, $G(\eta)$ は ψ と C に対する相似関数である．結局、基礎方程式は $F(\eta)$, $G(\eta)$ に関する二元連立常微分方程式となり、底面と無限上方の二点境界値問題に帰着する．相似解析から以下が得られる．

● 代表スケール： [長さ] $L_0 = (\kappa_C^{-2} C_B \beta g \sin \theta)^{-1/3}$ ， [速度] $U_0 = (\kappa_C C_B \beta g \sin \theta)^{1/3}$ ，

[濃度フラックス] $F_{C0} = (\kappa_C C_B^4 \beta g \sin \theta)^{1/3}$ ， [濃度] $C_0 = C_B$

● $F(\eta)$, $G(\eta)$ の解： [相似変数] $\eta = \tilde{z}\tilde{x}^{-1/4}$ ， [速度分布] $\tilde{u} = \tilde{x}^{1/2} F'(\eta)$ ，

[濃度分布] $\tilde{C} = G(\eta)$ ， [底面濃度フラックス] $\tilde{F}_C = -\tilde{x}^{-1/4} G'(0) = \tilde{H}_S$

3. 実験方法

浮力の底面フラックス供給と浮力計測の便宜上、濃度浮力を熱浮力に置き換える．図-1 を上下逆にして図-2 の実験系により溶出プルームを発生させる．PC 制御によって傾斜面を一定温度に加熱する．流程方向 6 断面において各断面内 20 点（0.1cm 間隔）の水温を熱電対で計測する．また、ナイロントレーサー粒子（粒径 10 μ m 程度、比重 1.02）とレーザー光膜によって流れを可視化し、二値化相関法に基づく PTV によって流速分布を求めた．実験は、種々の底面温度 T_b 、傾斜角度 θ に対して行われた．

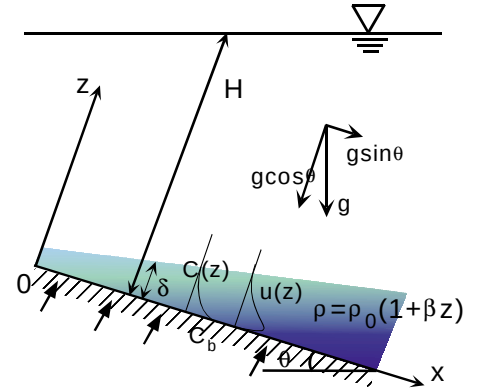


図-1 想定する傾斜プルーム

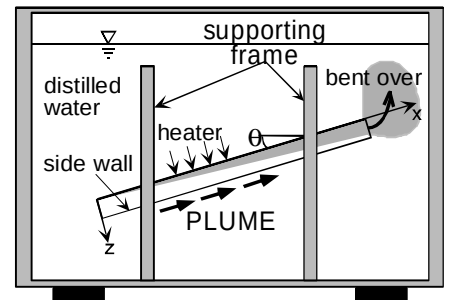


図-2 実験装置

4. 流速・浮力の相似分布

全ての実験条件と全観測点で得られた水温・流速を理論解析に基いて無次元化し、相似関数表示した浮力・流速を理論値とともに図-3,4に示す。速度について底面付近に誤差抽出がみられるが、これは PIV の検出規準を検討することで改良できる。この点を除けば実験値は理論と良好に一致している。

5. 流線

図-5 は(x,z)平面上の流速ベクトルと流線の理論解の比較を示す。両者は概ね一致しているが、上述のように PIV のパラメータを的確に設定してより高い適合性を得る見通しがある。

6. 水温（浮力）分布

(x,z)平面上における水温の二次元分布と相似解の比較例を図-6に示す。浮力場についても本理論によつて的確に記述されている。

7. プルームの流程方向変化

プルームの層厚 δ 、断面内の最大流速 U_{max} 、底面浮力フラックス H_s を上記の代表スケールによって無次元化し、これらの流程方向変化を図-7,8,9に示す（無次元量には $\sim$ を冠する）。やや過大・過小評価がみられるが、相似解から得られるべき乗則は実験値良好に再現している。

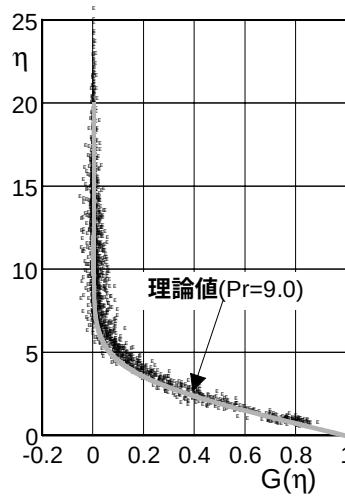


図-3 浮力分布 $G(\eta)$

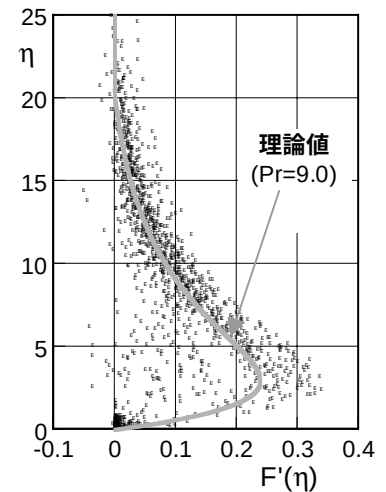


図-4 流速分布 $F'(\eta)$

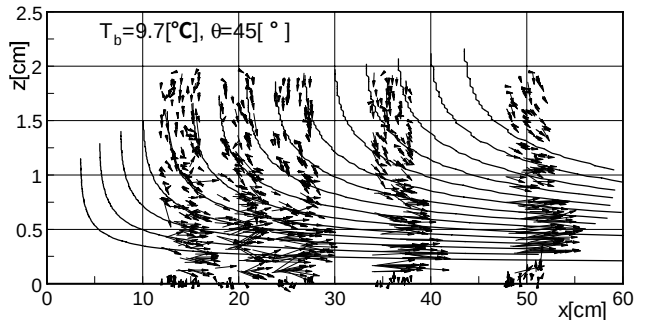


図-5 流線(理論)と流速ベクトル(実験))

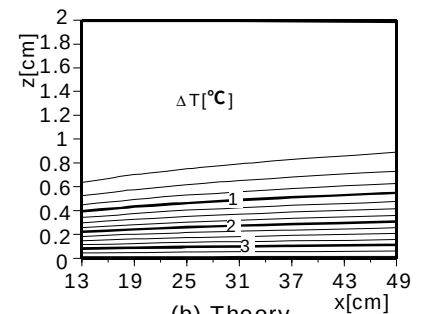
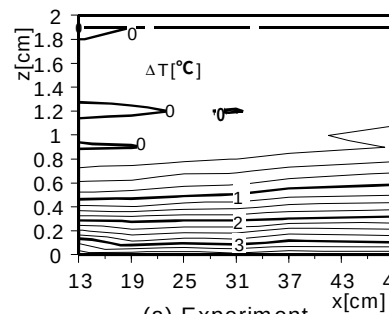


図-6 水温（浮力）分布

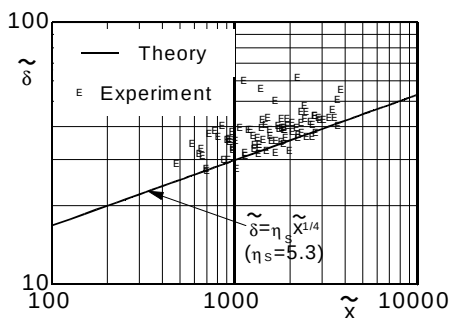


図-7 プルーム層厚

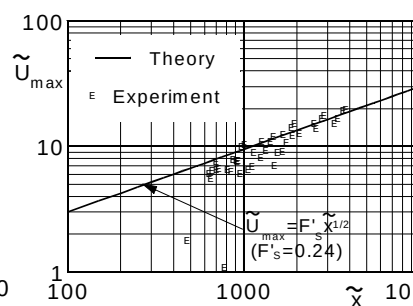


図-8 最大流速

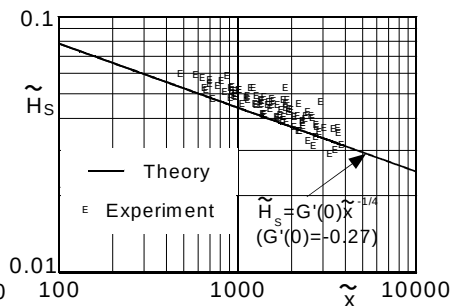


図-9 底面浮力フラックス

8. むすび

以上のように本理論は溶出プルームを記述できることが示された。これを実水域に適用し、貧酸素化した貯水池や海域の地形勾配に起因する水質輸送量を算定する予定である。

参考文献

- 1) 中村・神田・道奥・木戸・東野：部分循環貯水池における熱塩成層の季節変動，第54回年講
- 2) 高橋・道奥・松下：傾斜湖盆上の塩分溶出により発生するプルーム，第54回年講