

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) 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

富栄養化が進行して深水層が貧酸素化すると貯水池の底質から様々な物質が溶出し、その浮力によって図-1のような傾斜ブルームが発生する。これは熱や栄養塩、金属イオンなど様々な物質を輸送し、貯水池底層への物質集積と有機汚濁の要因となる。本文では、溶出に起因するブルーム系の水理特性を実験・理論的に検討する。

2. ブルームの解析

図-2のように物質濃度が底面で C_b に保たれ、底面物質の拡散的溶出によって発生する二次元ブルームを考える。静水圧・境界層・ブシネスクの各近似を施せば、基礎方程式は以下ようになる。

運動方程式：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \beta C(z) g \sin \theta - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta} \beta C(z) g \cos \theta dz + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\text{連続方程式：} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \text{ 物質保存式：} u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \kappa_c \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

ここで、 ν ：動粘性係数、 κ_c ：拡散係数、 β ：密度換算係数、 δ ：ブルームの層厚、 (u, w) ： (x, z) 方向の流速成分である。境界条件は、底面($z=0$)で $u=w=0$ 、 $C(z)=C_b$ 、上方($z=\infty$)で $u=0$ 、 $C(\infty)=0$ である。流れの自己相似性を仮定して、独立変数と未知数を $\eta = axz^{-1}$ 、 $\psi = bx^m F(\eta)$ 、 $C = ex^n G(\eta)$ とおく。ここに、 ψ は流れ関数である。上記の方程式系と境界条件は、相似関数に関して以下のようなになる。

$$\text{方程式：} \frac{1}{2} F'^2 - \frac{3}{4} FF'' - G - \frac{\nu}{\kappa_c} F''' = 0, \quad \frac{3}{4} FG' + G'' = 0$$

$$\text{境界条件：} \eta=0 \text{ において, } F(0)=F'(0)=0, G(0)=1,$$

$$\eta=\infty \text{ において, } F'(\infty)=0, G'(\infty)=0$$

この二元連立常微分方程式系を二点境界値問題として数値的に解けば、 $F(\eta)$ 、 $G(\eta)$ の解が得られる。一方、理論に基づいて、長さ、速度、底面濃度フラックス、濃度の代表スケールは各々、 $L_0 = (\kappa_c^{-2} C_b \beta g \sin \theta)^{-1/3}$ 、 $U_0 = (\kappa_c C_b \beta g \sin \theta)^{1/3}$ 、 $F_{C0} = (\kappa_c C_b^4 \beta g \sin \theta)^{1/3}$ 、 $C_0 = C_b$ と求められる。これによって相似解を無次元化すると $\eta = \tilde{x}^{-1/4}$ 、 $\tilde{u} = \tilde{x}^{1/2} F'(\eta)$ 、 $\tilde{F}_C = -\tilde{x}^{-1/4} G'(\eta)$ 、 $\tilde{C} = G(\eta)$ となる。

3. 実験方法

計測の便宜上、濃度浮力を熱浮力に置き換えるために、図-3のような実験装置を用いた。傾斜面をリレー回路とPC制御によって一定温度に加熱する。断面方向20点(0.1cm間隔)の水温は熱電対によって6断面で計測される。一方、流速を求めるためにナイロン粒子(粒径10 μ m程度、比重1.02)をトレーサーとして、3mm厚のレーザー光膜で縦断面を可視化し、モノクロのCCDカメラ(Sony, XC75)

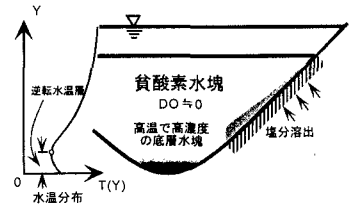


図-1 貯水池の嫌氣的底質から発生するブルーム

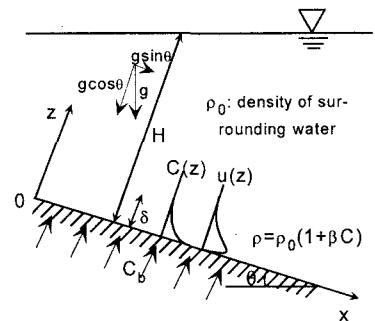


図-2 想定する傾斜ブルーム

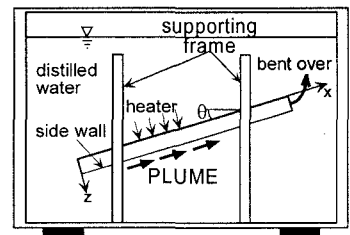


図-3 実験装置

を用いて撮影した。得られたビデオ画像は1/6秒間隔で100枚程度キャプチャーされ、二値化相関法に基づくPTVによって縦断面内の流速分布を求めた。投入したトレーサー粒子の大部分は浮力差によって沈降するが、浮遊する残存粒子の数は十分であり、密度流への追従性は良好であった。

4. 理論と実験の比較

図-4～12の各図中の曲線が理論値、記号が実験値である。図-4,5,6は流下距離 x 、底面傾斜角 θ 、底面との温度差 T_0 に伴う水温分布の変化を示す。同じく流速分布を図-7,8,9に示す。図-4,7から流程方向にブルームが発達すると、周囲水との温度差は減少し、流れは加速される。図-5,6,8,9からは、 θ 、 T_0 が大きいほど、水温差は大きく流速も大きくなる、すなわち浮力輸送量が増大することがわかる。図-10, 11, 12は水温、流速、底面熱フラ

ックスに関する相似解と全断面・全ケースの実験値との比較である。水温と熱フラックスに関しては、理論値との良好な一致が見られる。流速の実験値はばらついていて、画像解析を改善すればより高い整合性を得る見通しがある。これらより、ブルームの自己相似性が確認できる。

5. むすび

水理実験によって検証されたブルーム理論を用いれば、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ことができる。温度制御に関して神戸大学工学部の道脇昭技官から技術的アドバイスを頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋・道奥・松下：第54回土木学会年次学術講演会，1999年

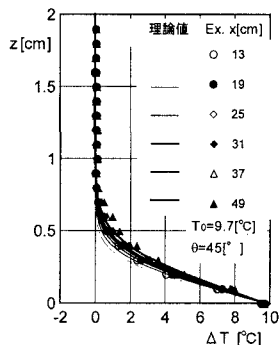


図-4 距離 x に伴う水温分布の変化

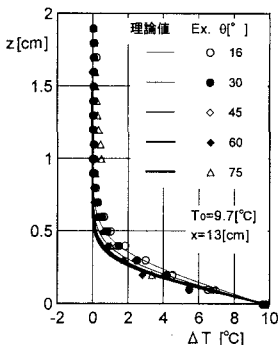


図-5 傾斜角度 θ に伴う水温分布の変化

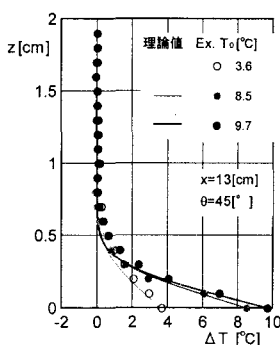


図-6 温度差 T_0 に伴う水温分布の変化

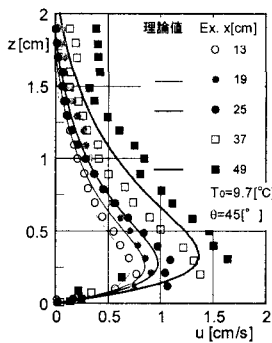


図-7 距離 x に伴う流速分布の変化

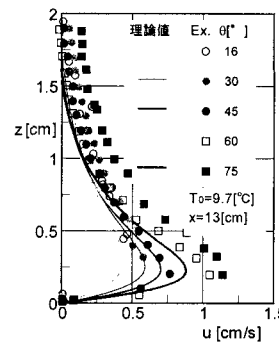


図-8 傾斜角度 θ に伴う流速分布の変化

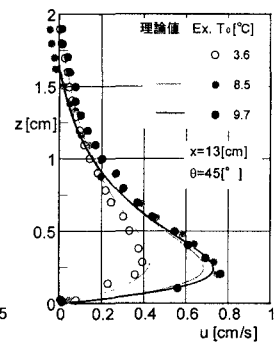


図-9 温度差 T_0 に伴う流速分布の変化

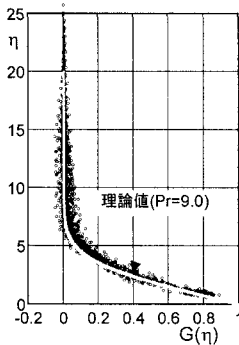


図-10 水温の自己相似分布 $G(\eta)$

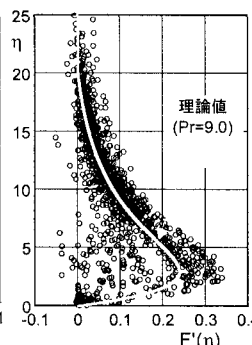


図-11 流速の自己相似分布 $F'(\eta)$

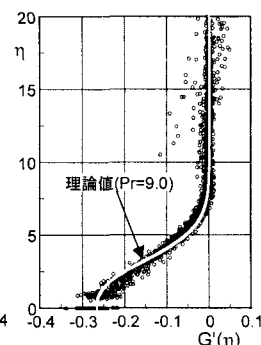


図-12 底面フラックスの自己相似分布 $G'(\eta)$