

数値シミュレーションを用いた 閉鎖性水域における濁水移流拡散機構の解析

東北大学大学院	学生会員	○青柳一輝
東北大学大学院	フェロー	田中 仁
日本大学	正会員	藤田 豊
東北大学大学院	正会員	梅田 信
五洋建設	正会員	金山 進

1. はじめに

湖沼に代表される閉鎖性水域は水の交換が行われにくく、流動も穏やかである。そのため、流入負荷汚濁物質が蓄積しやすく、水質の維持保全及び改善が困難という特徴を持っている。本稿の対象領域である猪苗代湖は水質の汚濁された北部浅水域と水質的に良好な湖心域に大別できるが、近年は北部水と湖心水との混合による湖全体での水質の悪化が懸念されている。

本研究では青柳ら¹⁾によって報告された猪苗代湖における2008年11月9日の北部濁水塊の湖心域への中層貫入を数値シミュレーションにより再現した。さらに猪苗代湖における北部域から湖心域へかけての濁水移流拡散機構の検討を行った。

2. 数値シミュレーションの概要

本研究における数値シミュレーションには静水圧近似及びブジネスク近似に基づく準3次元モデルが用いられている。

2.1 支配方程式

支配方程式では3つの速度成分、水位を未知数として水平方向の流速を運動方程式より、鉛直流速を連続式より、水位を自由表面での運動学的境界条件で連続式の深さ方向の積分に基づいて求めている。

水温及び濁度は移流拡散方程式によって計算されている。沈降速度の値は既往の研究データを用いてStokesの式により算出した0.000074m/sとしている。

鉛直渦動粘性係数及び鉛直渦動拡散係数はQETE(quasi-equilibrium turbulent energy)モデルにより計算されており、以下の式によって与えられる。

$$\nu_z = lqS_m \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = lqS_h \quad (2)$$

ここで l は混合距離、 q は乱流強度、 S_m 及び S_h は無次元係数である。 S_m 及び S_h は以下のように定められている。

$$S_m = \{B_1^{-1/3} - A_1 A_2 G_H [(B_2 - 3A_2) (1 - 6A_1 / B_1) - 3C_1 (B_2 + 6A_1)]\} / \{[1 - 3A_2 G_H (6A_1 + B_2)](1 - 9A_2 A_2 G_H)\} \quad (3)$$

$$S_h = A_2 \left(1 - \frac{6A_1}{B_1}\right) / [1 - 3A_2 G_H (6A_1 + B_2)] \quad (4)$$

ここで $G_H = (Nl/q)^2$ 、 N は浮力振動数である。また A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 は定数でありそれぞれ0.92、0.74、16.6、10.1、0.08という値である。また、水平渦動粘性係数及び水平渦動拡散係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ という一定値を用いている。

支配方程式に関する詳細は青柳ら²⁾に示されている。

2.2 計算条件

計算格子として東西方向に x 軸、南北方向に y 軸、鉛直方向に z 軸を設定した。格子間隔 Δx 、 Δy はともに100mとした。時間ステップ Δt はCFL条件を考慮したうえで10秒に決定した。初期条件は現地観測の結果を基に定めている。 z 方向の層分割は、浅水部で細かく、深水部は粗くしており、最も深い地点で43層となっている。

2.3 中立粒子を用いた濁水中層貫入の可視化

本研究では浅水域から湖心域にかけての中層貫入を視覚的に評価するという目的から、中立粒子を計算対象領域に配置して、その変動の追跡を行った。中立粒子は計算で得られる流速に従って移流するものとし、乱れ及び浮力は加味していない。

各座標系での中立粒子の位置を示す式を以下に示す。

$$x_s^{n+1} = x_s^n + \Delta t u_s^{n+1}(x_s^n, y_s^n, z_s^n) \quad (5)$$

ここで、 x_s 、 y_s 、 z_s は中立粒子のデカルト座標位置である。 y 方向及び z 方向も同様の計算を行っている。

Key Words : 猪苗代湖, 数値シミュレーション, 北部浅水域, 密度流, 湖水混合

住所 : 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06・TEL 022-795-7451・FAX 022-795-7451

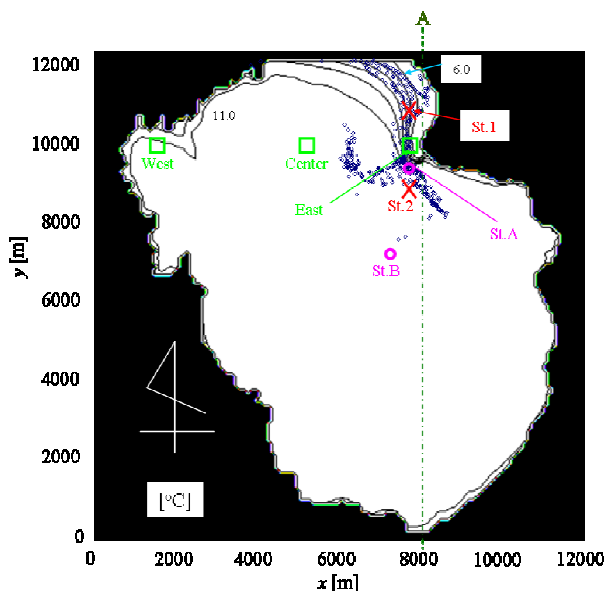


図-1 中立粒子位置及び水表面温度 (24時間後)

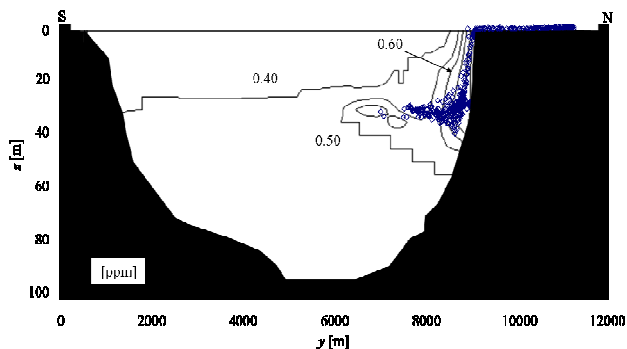


図-2 yz面における中立粒子及び濁度 (A断面, 24時間後)

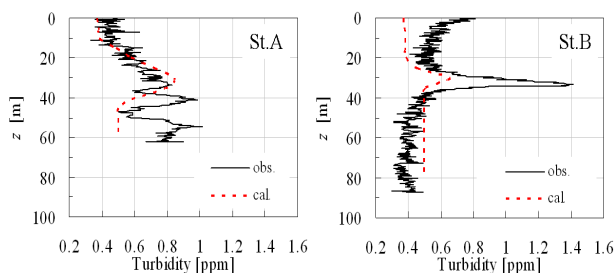


図-3 濁度の実測結果と計算結果 (St.A, B, 24時間後)

3. 計算結果及び考察

図-1に計算開始から24時間後の中立粒子の変位及び水温変化を示す。計算期間中は北西方向からの風が支配的であった。このため浅水域に初期配置した中立粒子が湖東岸より湖心域へと移流していった。また水温も東側で湖心域への貫入が見てとれる。

図-2に計算開始から24時間後のyz面における中立粒子及び濁度の計算結果を示す。代表断面として $x=8000\text{m}$ 地点(図-1, A断面)の濁度及び湖底地形を記載している。これより代表断面において 0.50ppm を境界とした濁度の貫入を見てとれる。また、中立粒子の湖心域への貫入を見てとることができる。中立

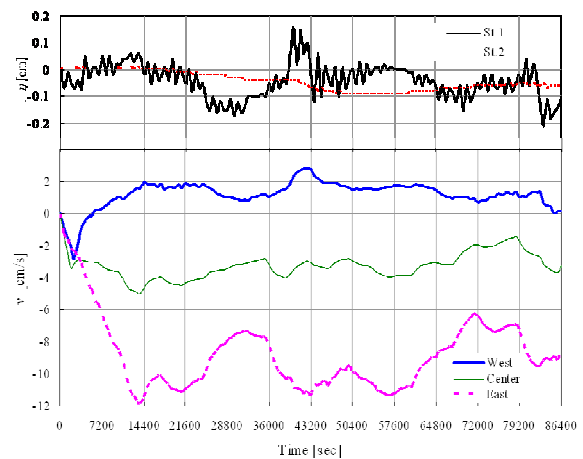


図-4 水位及び南北方向流速の経時変化

粒子の貫入位置は水深 30m 付近であり、現地観測によって補足された密度流の位置と同程度であった。

図-3に計算開始から24時間後のSt.A, B(図-1, St.A, B)における濁度の実測結果と計算結果の比較を示す。これより多少の差異はあるものの、全体としては貫入現象をよく表現できていることが分かる。

図-4に水位及び南北方向流速の経時変化を示す。出力位置は図-1中に示したとおりである。流速は水深 1m のもので北向きを正としている。これより、初めに北部浅水域と湖心域との水温差によって南向きの流速が発生しているが、St.1における吹き寄せによる水位上昇発生時に、St.2との間で水位差が生じている。これに伴い、湖西部では北向きの流れが発生している。また、同時期に湖東部ではよりいっそう南向きの流れが強くなっているのが分かる。

4. おわりに

数値シミュレーションによって2008年秋冬期に行われた猪苗代湖の観測結果により捕捉された北部域から湖心域にかけての中層貫入を再現し、さらに、北部濁水の移流拡散機構を明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、学術フロンティア(代表: 日本大学・長林久夫教授)の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 青柳一輝, 田中仁, 藤田豊, 梅田信, 猪苗代湖の秋冬期における湖水流動特性, 平成20年度土木学会東北支部技術研究発表会公演概要集, 2009. (CD-ROM)
- 2) 青柳一輝, 田中仁, 梅田信, 藤田豊, 金山進, 大規模内部静振に伴う湖水混合の数値シミュレーション, 応用力学論文集, 第12巻, pp823-830, 2009.