長瀬川河口周辺からの凝集塊輸送に関する研究*

- 東北大学大学院工学研究科 青柳一輝
- 東北大学大学院工学研究科 田中 仁
- 東北大学大学院工学研究科 梅田 信
- 日本大学工学部 藤田豊
- 五洋建設技術研究所 金山 進

1. はじめに

猪苗代湖は非常に清澄な湖として著名である.このことは、環境省の公表において 2002 年度から 2005 度年の間 COD 評価において我が国でもっとも水質が良好な湖として評価されていることからもよく分かる. さらに、T-P=0.003mg/l という低いリン濃度でも良く知られている.この理由は、主要流入河川である長瀬川の影響である.

長瀬川はきわめて酸性の強い支川である硫黄川,酸川の影響を受けた酸性河川である.硫黄川は安達太良山 山系の鉄山の西山麓旧火口の沼の平を源流として硫酸酸性の強い水質となっており,源流付近には沼尻湯元の 引湯施設や旧硫黄鉱業所の採掘跡がある.この長瀬川河口付近で生成される凝集塊がリンを吸着し沈降するこ とで,猪苗代湖の良好な水質に大きく寄与していることが既往の研究で明らかになっている^{1,2}.猪苗代湖河 口付近に堆積している凝集塊を図-1(a)に示す.この凝集塊が福島県環境センターによって湖心をはじめとし た湖全域に凝集塊の存在することが報告されている³⁾.図-1(b)に猪苗代湖湖心域湖底付近で撮影された凝集 塊を示す.このことから,長瀬川河口に堆積していた凝集塊が,猪苗代湖全域へ輸送される流動が湖内で生じ ていることが推測されるが,その輸送プロセスはいまだ明らかになっていない.

このように非常に水質の良い猪苗代湖だが、環境省の公表における COD 評価では 2006 年度,2007 年度は 水質ランキング評価対象外となってしまった.この直接的な原因は大腸菌群数が環境基準を超過してしまった ためであるが、pH の上昇に伴う湖水の中性化、黒色浮遊物質浮遊、湖岸に打ち上げられる大量の水生植物な ど、近年は水質汚濁の現象が散見されている.

これら諸問題の中でも、良好な水質を担ってきた酸性湖特有の自然の浄化機能を根本からくつがえすpHの 上昇に伴う湖水の中性化は深刻な問題である.このまま湖の中性化が進むと、猪苗代湖全域に広がっている凝 集塊に吸着して湖底に沈降していたリンが溶出し、急激な水質の悪化が懸念されている.湖水のpHの上昇に 関しては多くの原因が考えられ、いくつかの研究成果も報告されているが、はっきりとは分かっていない.

本研究では長瀬川河口域で生成される凝集塊の湖全体への輸送に着目した. 猪苗代湖における流動ミュレー ションに関する研究としては、著者らのものを除けば、宮村らによって吹送流及び河川流シミュレーションと して水温の非成層期である冬場における河川流及び吹送流の流動解析が報告されている⁴. これによって非成 層期における冬場の河川流の傾向は分かるものの、長瀬川からの凝集塊の輸送に関する報告には関連が無い. 本研究では長瀬川河口付近で生成される凝集塊に着目し、猪苗代湖内への凝集塊輸送過程及び凝集塊堆積過程, 堆積量の評価を行った.

by Kazuki Aoyanagi, Hitoshi Tanaka, Makoto Umeda, Yutaka Fujita and Susumu Kanayama

^{*}Investigation of floc transport from Nagase river mouth



(a) 長瀬川河口部に堆積している凝集塊¹⁾

(b) 猪苗代湖湖心域湖底で確認された凝集塊³⁾

図-1 猪苗代湖で確認される凝集塊

2. 研究方法

図-2 に福島県によって観測された月輪観測所における 2000 年から 2009 年における長瀬川の流量を示す. これより、春から夏の終わりにかけての流量が多くなっていることが分かる. 宮村らによって水温の非成層期 である冬場における河川流の流動解析が報告されている⁴ことを踏まえて、本研究では成層期である夏季にお ける長瀬川河口周辺からの凝集塊の輸送に関する数値シミュレーションを行った.



図-2 長瀬川における平均流量(月輪観測所)

3. 数値シミュレーション概要

(1) 支配方程式

本研究では静水圧近似及びブジネスク近似に基づく準3次元モデルを用いて現象の解析を行っている.この 解法は佐藤ら⁵に示される手順に従っている.支配方程式では、3つの速度成分、水位を未知数としている. x,y方向の流速を求める運動方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} \rho dz + fv$$
(1)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\eta} \rho dz - fu$$
(2)

本研究では東西方向にx軸,南北方向にy軸,水深方向にz軸を取るものとする.ここで,u,v,wはx,y,z方向の流速,tは時間, η は自由水表面の静水面からの高さ,gは重力加速度, ρ_0 は湖水の参照密度, ρ は水の密度, v_x,v_y,v_z はx,y,z方向の渦動粘性係数,fはコリオリパラメータである.

鉛直流速wは連続式によって算定され、ηの計算は自由表面での運動境界条件で連続式の深さ方向の積分に 基づいている.

水温は以下の移流拡散方程式より求められる.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial q_h}{\partial z}$$
(3)

ここで*T*は水温, q_h はヒートフラックス, C_p は水の比熱, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ はそれぞれ x, y, z方向の渦動拡散係数である. また, 濁度の計算を以下の式によって計算している.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$
(4)

ここでCは浮遊物質濃度,w。は沈降速度である.

凝集塊の形成には、流動のみならず化学的なプロセスも重要であるが、現在のところ攪拌強度、最大成長粒形、フロック強度、フロックの破壊形態など定量的な面で不明な点が多い.そのため本計算では湖内における移流・拡散現象の解明を目的として、凝集塊がすでに生成された時点を初期条件として与え、凝集塊を濁質として取り扱い、その後の移流・拡散過程の計算を行っている.凝集塊の沈降速度はStokes 式より算出しており、既往の研究データ²⁰を参考にして粒子の直径 *d*=10µm、粒子の密度*p*=2.36g/cm³、*w*=0.000074m/s としている.

 v_z 及び ε_z は Galperin et al.⁹に示された 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.

$$V_{z} = lqS_{m} \tag{5}$$

(6)

$$\mathcal{E}=lqS_h$$

ここで*1*は混合距離, *q*は乱流速度, *S_m*及び*S_h*は無次元係数である. *S_m*及び*S_h*は以下のように計算している. $S_m = \{B_1^{-1/3} - A_1A_2G_H[(B_2 - 3A_2)(1 - 6A_1 / B_1) - 3C_1(B_2 + 6A_1)]/\{[1 - 3A_2G_H(6A_1 + B_2)](1 - 9A_2A_2G_H)\}$ (7)

$$S_{h} = A_{2} \left(1 - \frac{6A_{1}}{B_{1}} \right) / \left[1 - 3A_{2}G_{H} \left(6A_{1} + B_{2} \right) \right]$$
(8)

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 という値を用いている. また, v_x , v_y , ε_x , ε_y は $1.0 \times 10^4 \text{m}^2$ /s という一定値を用いている.

数値モデルに関する詳細はPurwanto et al.⁷に示されている.本研究で用いられた計算モデルは, Purwanto et al.⁷が沿岸域の解析に,青柳ら⁸が猪苗代湖の内部静振の再現及び数値実験に用いたものとおおむね同様のものであり,本稿の計算でも十分な解析精度を持つことが期待できる.

(2)計算条件

数値シミュレーションに用いられたデータは藤田らによって 2009 年 8 月 4 日に行われた現地観測の結果を 参考に設定した.計算期間は 2009 年 8 月 1 日から 8 月 10 日である.

計算格子として東西方向に x 軸,南北方向に y 軸を設定し格子間隔 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 5 秒に決定した.鉛直方向の層分割に関しては浅水部では細かく,深 水部では粗くなっており,最も深い地点で 38 層となっている.

図-3 に計算期間中における風の状況を示す.データは東北地方整備局郡山事務所により金曲観測所で観測 されたものを用いている.これより、風向は南東方向が卓越しており、風速も南東方向のものが他の方向より も圧倒的に速いことが分かる.図-4 に長瀬川からの流量を示す.データは福島県によって観測された月輪観 測所におけるものである.計算期間において、流量はおおむね 10³m/s となっているが、時折 30m³s を超える 流量が発生している.これは長瀬川上流にある発電所からの放水による影響である.また、河川水温及び河川 水濁度は一定値としており、流入河川水の水温は藤田らの観測結果より 20℃ とし、流入河川水の濁度は既往 の研究⁹を参考に 10mg/l とした.図-5 に猪苗代湖水深コンター図及び河川流入流出地点を示す.計算期間に おいては長瀬川からの流入量と同量、日橋川から流出するとしている.



4. 数値シミュレーション結果及び考察

(1) 水温及び濁度の変遷

図-6 に計算開始から 3 日後及び 10 日後の水温及び濁度の変遷を示す. 代表断面として図-5 における y=9500m を示している. 水温の計算結果より,計算期間においては表層から水深 10m 付近までで水温の低下 は見てとることができるが,他には大きな変化を見てとることはできなかった. 一方,長瀬川から流入した濁 度は,3 日目の時点で水温躍層の上部である水深 20m 程度で西側へと貫入し,x=5000 付近に到達している様 子が見て取れる. これは南東方向の風による吹送流の影響によるもと考えられる. 濁度の広がりとしては,計 算終了の 10 日時点で,y=9500m 断面のおおよそ半分に凝集塊が広がっているという結果となった.

(2) 凝集塊の堆積結果

本計算では、底面における巻上げを考慮せずに凝集塊の堆積量を以下の方法で計算した.

$$F_D = w_s C_b \tag{9}$$

ここで、FDは濁質の堆積量、Cbは底面に接した格子における浮遊物質濃度である.





図7に計算開始から3日後,10日後の凝集塊の堆積結果を示す.この結果より、長瀬川から流入している 濁質の堆積は南東風の影響もあり、反時計回りの方向で北部浅水域へと広がっているのが見てとれる.計算開 始から5日後には北部浅水域をほとんど網羅している.その後濁質は南下して行き、計算開始から10日後に は猪苗代湖西岸の一部と南東部を除く地域に、凝集塊の輸送及び堆積が生じていた.

堆積量が一番大きかったのは長瀬川河口付近で,580.1g/m²/10day となっていた.北部浅水域においては比較 的長瀬川に近い東岸では高く,西側では値が小さくなっており,10g/m²/10day から0.001g/m²/10day と幅のある 堆積状況となっていた.一方,湖心域から湖南域における堆積は0.001g/m²/10day 未満となる箇所が多かった.

以上の結果より、計算開始から10日ほどで猪苗代湖の多くの地域には濁質が輸送されることが分かった.

5. おわりに

本研究は福島県猪苗代湖にいて夏季成層期に長瀬川からの凝集塊の輸送を数値シミュレーションによって 検討したものである.結果として計算期間中においては水温の変化はあまり見られず、凝集塊の輸送過程は水 温躍層の上部に当たる水深 20m 付近で大きく広がりを見せた後に沈降していくことが分かった.また、凝集 塊の堆積は南東風の影響によって反時計回りになされ、浅水域から凝集塊が堆積していくことが明らかになっ た.また長瀬川からの凝集塊は夏季成層期に10日程度で湖のほとんど全域へと広がることが明らかになった. このことは、長瀬川河口域で生成される凝集塊の湖全体への輸送に対する一つの有益な知見となる.

謝辞:本研究を遂行するに当たり福島県より長瀬川の流量データを、国土交通省東北地方整備局郡山国道事務 所より金曲観測所の風向風速データの提供を受けた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1)藤田豊,中村玄正:猪苗代湖の水質保全に寄与する酸性河川長瀬川の凝集塊によるリン除去効果,水環境 学会誌,第30巻,4号,pp.197-203,2007.
- 2)藤田豊,中村玄正:猪苗代湖のリン除去に寄与する酸性河川長瀬川の凝集塊生成機構,水環境学会誌,第 30巻,4号,pp.205-212,2007.
- 3) 町田充弥: 猪苗代湖における浄化作用, 福島県環境センター年報, 第10号, pp.23-26, 2008.
- 4) 宮村倫司,文屋信太郎,中林靖,吉村忍:猪苗代湖の吹送流および河川流シミュレーション,シミュレーション,シミュレーション,第25巻,2号,pp.48-57,2006.
- 5) 佐藤勝弘, 松岡道男, 小林一光: 効率的な 3 次元潮流計算法とその適応性について, 海岸工学論文集, 第 40巻, pp.221-225, 1993.
- Galperin, B., Kantha, L. H., Hassid, S., and Rosati, A.: A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, J. Atmospheric Sci., 45, pp.55–62, 1988.
- 7) Purwanto, B.S., Tanaka, H., Kanayama, S., Takasaki, M. and Yamaji, H.: Transport mechanism in Nagatsura-ura Lagoon, *Proceedings of 2nd International Conference on Estuaries and Coasts,* pp.615-622, 2006.
- 8) 青柳一輝,田中仁,梅田信,藤田豊,金山進:猪苗代湖における風による湖水混合に関する数値実験,応 用力学論文集,第13巻, pp701-708, 2010.
- 9)藤田豊,高橋迪夫,和泉陽,安島正:猪苗代湖長瀬川河口水域における物質輸送,土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集,2-122, pp.360-361, 2005.