

湖盆形状が湖内流動へ与える影響

中央大学大学院 学生員 ○柴田直俊 中央大学理工学部 正会員 岡田将治
中央大学理工学部 フェロー 山田 正

1. はじめに 湖沼における水質問題を扱うには、水物質輸送を担う湖内流動の特徴を適切に捉えることが必要である。湖内流動に影響を与える一要因として、「湖盆形状」が考えられる。特に、水資源として私達の生活に密接している湖沼では、近年、産業資源としての砂利採取や、富栄養化に対する湖沼水質改善を目的とした浚渫作業により、湖盆形状が短期間で急変している。このような現状を踏まえ、本研究では湖沼の水質汚濁メカニズムの解明に関する基礎研究として、湖盆形状が湖内流動へ与える影響を捉えるため、様々な断面形状を有する湖沼での吹送流について数値計算を行い、湖盆形状の違いが湖内流動へ与える影響について考察を行った。

2. 基礎方程式と境界条件 初めに複雑な形状を有する実在湖沼において湖盆形状による影響を考察するために、霞ヶ浦土浦沖(平均水深 4.5m)を対象として二次元不定流数値計算を行った。計算定数は、渦動粘性係数 $0.02[m^2/s]$, マニングの粗度係数 $0.02[m^{1/3}/s]$, 風摩擦係数 0.0026 。境界条件は壁面に沿う流れを全てスリップ条件とした。次に、理想形状の湖沼について、12 種類の断面形状について三次元数値計算を行った。定数は、水平・鉛直渦動粘性係数 $0.02[m^2/s]$, 底面粗度 $0.02[s/m^{1/3}]$, 風摩擦係数 0.0026 。境界条件は全てノンスリップ条件とした。

3. 複雑な形状を有する湖沼の場合 実在の湖沼は複雑な湖岸形状を有し、それらが湖内流動へ影響を与えることは、琵琶湖¹⁾、網走湖²⁾、霞ヶ浦³⁾に代表される多くの研究で明らかになっている。そこで、複雑な形状を有する湖沼での湖盆形状による湖内流動への影響を捉えるため、霞ヶ浦土浦沖について数値計算を行

った。湖沼縦・横幅に対して水深が浅いため二次元不定流計算を用いた。霞ヶ浦の沿岸地域には、農地改良や砂利採取によるものと考えられる多くのすり鉢状の地形が見られる。数値計算では、これらの湖盆形状を人為的に緩傾斜面とした場合(図1上段左)と現状の湖盆形状(図1上段右)との比較検討を行った。計算条件は矩形格子(20m)で、ADI法を用いた。風速は西風(左から右向き)で風速 $4[m/s]$ とし、5時間連続で様に吹かせた。また、開境界部条件は霞ヶ浦湖心で水位変動が微少なため水位一定とした。加えて、境界内外で相互流入も検討している。図1下段に5時間経過後のシミュレーション結果を示す。

(a)湖内流況 共通に見られる現象は、沿岸部で風向と順ずる方向に水深の深い湖中央で風向とは逆向きの流れが生じた。この現象は Csanady による閉鎖性水域での吹送流の理論⁴⁾と一致する。また、湾奥の土浦港付近や北沿岸では、すり鉢状の湖底地形が多く見られるため、この水域での流況は、緩斜面と比べて流れが大きく乱れるようになった。

(b)湖内流速 湖盆形状を緩斜面とした場合では湖心での流速と沿岸部での流速がほぼ同じであるのに対し、すり鉢状の湖底形状が多数ある場合には、その場での流速が周囲に比べて減少し相対的に沿岸部での流速が大きくなる傾向にある。この現象は、すり鉢状の湖底形状が密集しかつ湾奥から離れた沿岸部で顕著に見られる。また、湖中央部でもすり鉢地形に挟まれる水域においても流速が大きくなる現象が見られた。以上のことから、水深の浅い湖沼における湖内流動において、複雑な湖沼形状であっても湖盆形状によって流況・流速共に変化することが明らかとなった。

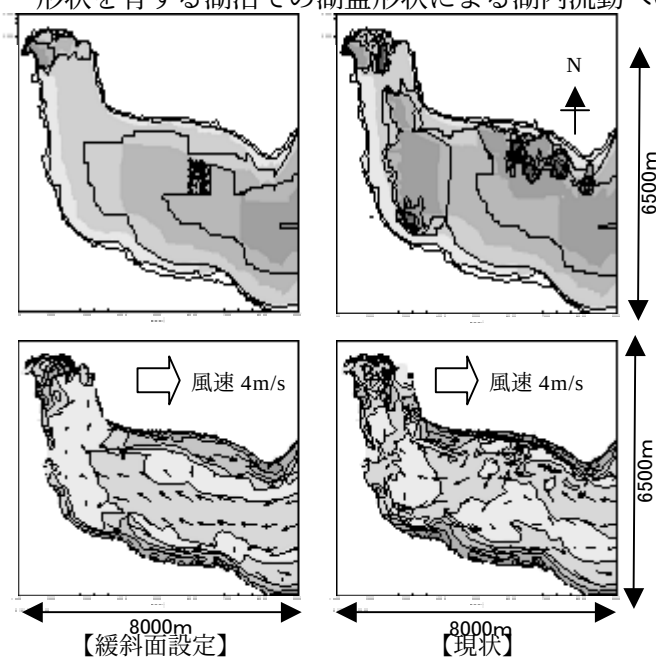


図1 湖盆形状図(上図)、流速図(下図)
上段[湖盆地形図]: 右、現状の霞ヶ浦土浦沖の湖底地形に、左、緩斜面に変更した地形図。下段[流速ベクトル・等流速線図]: 湖盆形状が緩斜面である場合(左)に比べ現状(右)では北・南沿岸での流速が大きくなる傾向が示されている。加えて、すり鉢状湖底地形の多い湖中央・湾奥での流れが乱れた。

キーワード: 湖盆形状, 吹送流, 三次元計算

連絡先(住所) 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 河川・水文研究室
(電話) 03-3817-1805 (FAX) 03-3817-1803

4. 理想形状の湖沼の場合 理想形状である湖沼について三次元数値計算を行った。その概要図を図2に示す。湖沼形状は縦横 100[m]であり、深底部縦幅 10, 50, 90[m]として次の三通りの浅底部水深(Hs), 深底部水深(Hd)について検討を行った。①Hs=0.3[m], Hd=0.6[m], ②Hs=0.3[m], Hd=3.0[m], ③Hs=5.0[m], Hd=8.0[m]。いずれも、鉛直格子幅は 0.1[m]である。また、水深一様の場合(H=0.3, 0.6, 3.0, 5.0, 8.0[m])についても三次元数値計算を行った。以上の湖盆形状である湖沼に対して、風速 5 [m/s]の風が全域に時間変化無く 6 時間継続して吹き続けるものとした。境界条件は全面ノンスリップ条件である。

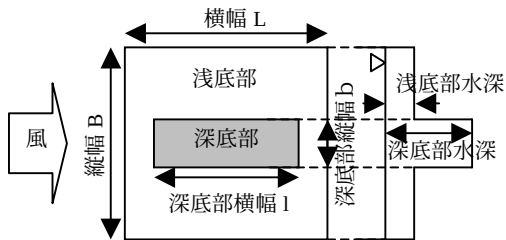


図2 計算対象概要図

縦幅 100[m], 横幅 100[m]の正方形湖を対象とする。中央に深底部を設定し複断面を有する湖盆形状を設定した。外力は右向きの風を与える。

4.1 水深一様である場合 風の吹き寄せによる水位の変化によって強制振動（振動周期 $T_s = 2L/\sqrt{g \cdot H}$ L:横幅, H:水深）が計算開始 1 時間から 2 時間継続して生じた。その後、徐々に振幅が減衰し、いずれの湖沼も 6 時間後には水面が風上から風下にわずかに上向きに傾斜（吹送距離 100[m]に対して水位上昇量数 mm 程度）して定常状態となった。水深が浅いほど最大振幅が大きく、水深が深いほど減衰する時間は短い傾向にある。水面の流況は風向と順ずる方向に流れ、風下側の壁面境界で潜り込み、底側に風向と逆向きの補償流が形成され、鉛直方向の循環流となった。

4.2 深底部を有する場合 (a)湖内流況 共通する特徴として、浅底部で風向と順ずる方向に、深底部で風向と逆向きの流れが生じた。この現象は二次元計算を用いた霞ヶ浦における数値計算結果とも一致する。風下まで到達した流れは、深底部に潜り込み、底部に補償流を形成し、風下側の深底部と浅底部との境界付近で上昇する。さらに 6 時間経過後には全ての湖盆形状で安定状態となった。異なる特徴は、浅底部・深底部水深が共に浅い組み合わせの①の場合と、共に深い場合の組み合わせである③の場合には、深底部水面での流れが風上側でほとんどみられなかった。加えて、③の深底部水深の底部はほとんど流動しない。対して、浅底部水深が浅く深底部が深い②の場合には、深底部での風向と逆向きの流れが、深底部水面全域で生じた。また、深底部幅による影響は少なく、流況の前述した流れの状態は変わらなかった。(b)湖内流速 共通する特徴は、水深（浅底部水深で）一様である場合に比べて、浅底部の流速が大きくなることである。これは、先述した湖沼での流速の特徴と一致する。また、深底部に形成される風向と逆向きの補償流は、風の影響により水面より水中での流速の方が大きくなる。異なる特徴は、深底部での最大流速が、深底部の縦幅が広がるほど小さくなること。その傾向は、深底部水深が浅いほど強くなり、水深が全体に深い③の場合には、ほとんど流速には影響しない。また、浅底部での最大流速は、②のように浅底部水深が浅く深水域と適度な水深差がある場合に大きくなり、深水域縦幅も 50[m]である場合が最も大きくなった。

5. まとめ 湖盆形状が湖内流動へ与える影響について、すり鉢状の湖底地形を沿岸域に多数有する霞ヶ浦土浦沖について二次元不定流数値計算を行い、湖盆形状が緩斜面である場合と起伏の変化が激しい場合とで比較検討した。また、水深一様である場合と水深差を有する場合の矩形湖沼について三次元数値計算を行い、比較検討を行った。

共通する現象は、水面で水深の深い湖心域で風向と逆向きの流れが、水深の浅い沿岸域で風向に順ずる流れが形成されることである。特に、沿岸水域に起伏の激しい湖底形状を有する場合には、沿岸部での流速が大きくなる傾向にある。加えて、沿岸域の水深が浅く、湖心水深と水深差がある場合には、沿岸域での流速が大きくなる傾向が示された。ただし、湖沼で浅底部（水深の浅い水域）が占める割合が少ない場合には、流速差がさほど生じない傾向も示された。

矩形湖沼における流況では、水深一様である場合には水面に風向に順ずる向きに流れが生じ、風下側壁面で湖底部に潜り込み、風向と逆向きの流れを底部で形成し、風上側壁面で上昇する。これに対し、湖沼断面形状が複断面である場合には、浅底部では補償流が形成されず、深底部（水深の深い水域）の底部で補償流が形成される。ただし、深水域の幅が広がるほど、深水域での流速が小さくなる傾向が示された。この現象は、水深が浅いほど強くなり、全体的に水深が深い場合には、深水域幅による流速への影響は小さくなる。

[参考文献]

- 1) 山敷庸亮, 松井三郎, 禰津家久, 熊谷道夫, 琵琶湖環流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 44 巻, pp975-980
- 2) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 大島伸介, 向山公人, 平野道夫, 井出康郎, 田村圭司, 網走湖における塩淡水成層の形成と挙動に関する研究, 水工学論文集, 第 44 巻, pp59-64
- 3) 村岡浩爾, 福島武彦, 陸水域の富栄養化に関する総合研究(III)霞ヶ浦（西浦）の湖流, 国立環境研究所, 研究報告 第 19 号
- 4) G.T. Csanady, Circulation in the Coastal Ocean, D.Reidel Publishing Company