

小規模な浅い湖における日変化する物理過程の研究

九州大学大学院 工学研究院 ○木村 延明
University of Wisconsin-Madison Chin H. Wu, John A. Hoopes

1. はじめに

小規模且つ浅水域のある湖の特徴として、気象条件の影響による弱い水温成層の日変化や湖の地形・周辺の環境は、その水域の生物・化学・物理過程に重要である。一般的に浅い湖では、湖表面の風による擾乱や日射・冷却のエネルギー収支の影響から日変化する弱水温成層を形成する¹⁾。また、河川の流入出や森林などの湖周辺の地形的な特徴は、特に小規模な湖の物理過程（流れ・水温）に影響を及ぼす。例えば、周囲の森林や山によって風の遮蔽が起る場合、遮蔽がない場合のよう風によって生成される湖水の流れに対して、流れの方向・大きさの変化が生じる²⁾。本研究では、小規模の湖、及び浅い湖のそれぞれの特徴を同時に持つ、小規模且つ浅い湖について、日変化する鉛直混合－弱成層状態と湖周辺の森林による風遮蔽の影響を数量的に明らかにするために、現地観測の実施と3次元数値流体モデルを使った数値実験を行ったものである。

2. 方法

本研究のターゲットの Lake Wingra は、WI (USA)の南部 (43°3'13"N, 89°25'11"W) に位置する小規模且つ浅い湖で面積=1.3 km²、平均水深=2.7 m である (図1)。現地観測は2004年9月10–24日の15日間行われ、鉛直分布を測定する水温センサー鎖を3カ所、風の測定を8カ所、流速計の acoustic Doppler current profiler (ADCP)を5カ所に設定した (図1)。但し、ADCPは短時間の観測のみを実施した。その他の気象条件は、この湖から約10 km離れた地域空港のデータを使用した。

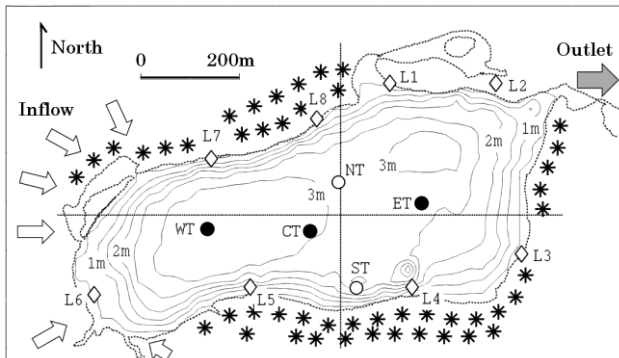


図1 Map of Lake Wingra, showing the locations of thermistor chains (●), ADCP deployment (● and ○), anemometers (◇), dense forest (*) & south–north line and west–east lines, corresponding a cross section.

この湖の数値流体計算を実施するために既存の3次元海洋モデルである Princeton Ocean Model³⁾を用いた。このモデルで弱水温成層の流動現象を再現計算するために、水温の移流－拡散式における移流項の差分法を高精度スキームである Ultimate QUICKEST⁴⁾に改善し、さらにオリジナル乱流モデルによる過剰な鉛直拡散を抑制するために Generic Length Scale turbulence closure (GLS)⁵⁾が導入された。本稿では GLS のみ簡潔に説明する。乱流運動エネルギー(k)と Generic パラメーター(ψ)を用いると乱流モデルの二方程式は以下になる。

$$\frac{d(kD)}{dt} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + dif_k + P + B - \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{d(\psi D)}{dt} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial \psi}{\partial \sigma} \right) + dif_\psi + \frac{\psi}{k} (c_1 P + c_3 B - c_2 \varepsilon F_{wall}) \quad (2)$$

ここで、 dif_k , dif_ψ =水平拡散項、 P =生成項、 B =浮力項、 ε =散逸項、 F_{wall} =壁近傍関数、 D =水深、 K_q =鉛直拡散係数、 c_1, c_2, c_3 =von Karman, 乱流計測、安定性に関する係数、 σ =シグマ座標系である。本件研究では、 $\psi = kl$ (l =長さスケール)と定義し、各係数は、 $c_1=0.9, c_2=0.5, c_3=1.0, K_q = K_m/244$ (K_m =鉛直渦動粘性係数)で与えられた。なお、境界条件の河川流入、湖表面の熱収支・風応力の設定は独自に行った。

3. 結果と検討

現地観測の結果より、周辺の森林の風遮蔽効果⁶⁾ (図2a) で非一様の風分布が確認された。この結果に基づいた湖表面の風分布は1例として図2bに示す。弱水温成層は、雨を伴う強風、夜間の冷却現象により鉛直混合が起り、また、日中の風が弱い時には、約2–3度の水深方向の水温成層が発達したことが理解される (図3)。

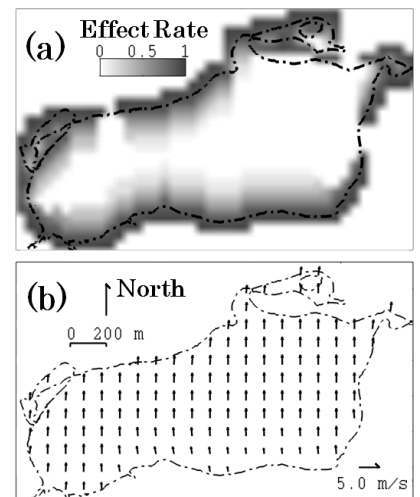


図2 Nonuniform wind: (a) potential sheltered area of wind & (b) sample distribution of ~2.5 m/s from south

キーワード 小規模・浅い湖, 弱水温成層, 風遮蔽

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 W2-1011 九州大学大学院 環境社会部門 TEL092-802-3411

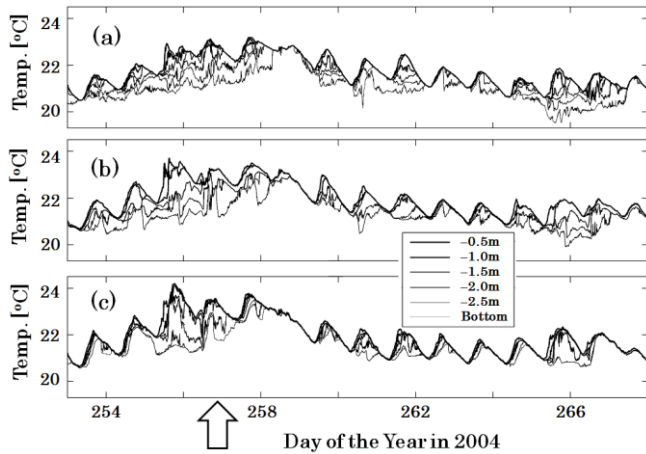


図3 Temporal variations of water temperature, measured at (a) WT, (b) CT, & (c) ET, in Sept. 10–24, 2004.

数値計算は、弱水温成層の日変化と湖周辺の地形的特徴（風遮蔽）が湖水の流動に及ぼす影響を明らかにする為に3つのケースが実施された（表1）。図4は約5m/sの南風が卓越した257日目の水平流速成分の観測・計算値である。東西方向の鉛直分布は、南部の風遮蔽効果による強い西向き流速（図4d）を除けば、全般的に弱い流速を示した。一方、南北成分の鉛直分布は水深1.5–2.0m附近に強いリターン流れが生じた。この時の再現計算結果は、Run 1 がより観測値に近いことを示した。Run 1 の観測値に対する誤差を1とすると、東西方向はRun 2 と3は1.5 倍の誤差を生じ、同様に南北方向Run 2 と3はそれぞれ1.5, 2.0 倍の誤差を生じた。

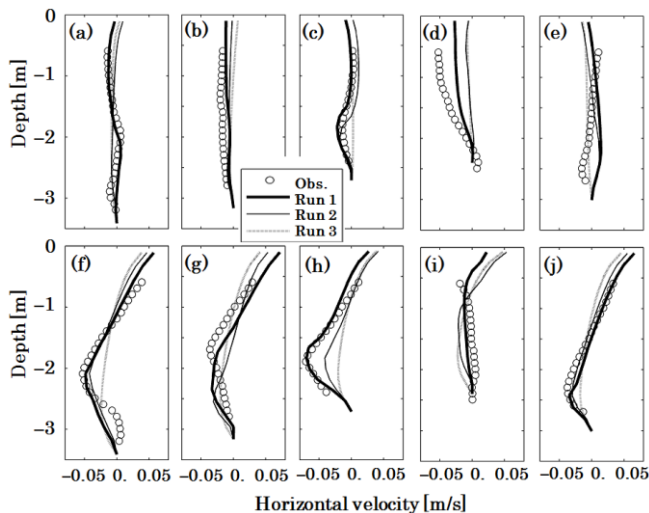


図4 Horizontal velocity profiles for east-west (upper) and south-north (lower) at (a,f) WT, (b,g) CT, (c,h) ET, (d,i) ST, and (e,j) NT.

表1 計算ケース一覧と長期水温計算結果のRMSE

ケース名	風速分布	水温計算	RMSE@CT
Run 1	非一様	有り	0.25–0.32°C
Run 2	一様	有り	0.39–0.52°C
Run 3	一様	なし	–

RMSE=Root Mean Square Error during the measurement.

図5は水深方向に0.5m 間隔の水温分布の時間変化について、観測値とRun 1 の計算結果を示したものである。湖底附近（水深2.5m）の水温変化の再現計算は、地下水流入等で、水温変化が短時間で起こる現象を再現するのが困難な為に、比較的大きな誤差を生じた（RMSE=0.32°C）。しかし、水温の全変化に対して、0.25–0.32°Cの誤差は約8%の割合であったので、現実的な計算条件のRun 1 は十分な再現性があったと考えられる。

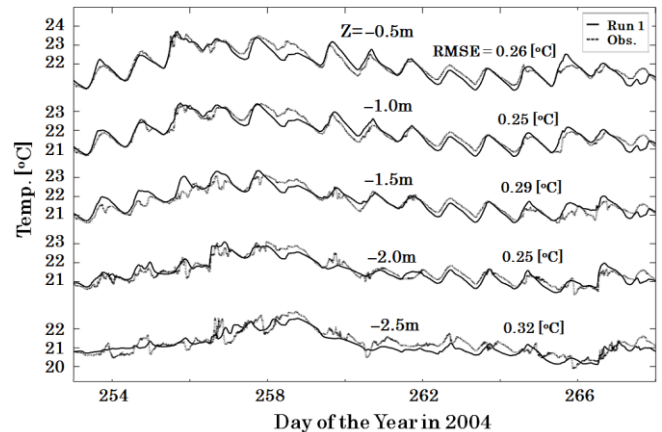


図5 Temporal variations of water temperature, measured at (a) WT, (b) CT, & (c) ET in Sept. 10–24, 2004.

4. まとめ

小規模で浅い湖において、弱水温成層の日変化と森林による風遮蔽の影響を解明する為に、現地観測と数値計算が実施された。数値計算の再現性は良好であり、その結果に拠れば弱水温成層の影響により、下表面のリターン流れが強化され、風遮蔽の影響が顕著な領域では流れが、一様風から生成される流れと比較して、大きく修正されることが確認できた。

参考文献

- 1) Condie, S.A. and Webster, I.T. (2001) Estimating stratification in shallow water bodies from mean meteorological conditions. *J. Hydraul. Eng. (ASCE)*, 124 (4), 286–292.
- 2) Podsetchine, V. and Schernewski, G. (1999) The influence of spatial wind inhomogeneity on flow patterns in a small lake. *Water Res.*, 33, 3348–3356.
- 3) Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987) A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Coastal and Estuarine Sciences Series: vol 4*, H Heaps (ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1–16.
- 4) Leonard, B.P. (1991) The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Comput. Method Appl. Mech. and Eng.*, 88, 17–74.
- 5) Warner, J.C. et al. (2005) Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. *Ocean Model.*, 8, 81–113.
- 6) Davies-Colley et al. (2000) Microclimate gradients across a forest edge. *New Zeal. J. Ecol.*, 24(2), 111–12.