

II-227

日成層の混合モデルの開発

JR東日本 正員 小関昌信
 東京工業大学 工学部 正員 石川忠晴
 東京工業大学 工学部 正員 田中昌宏

1. はじめに

著者らは霞ヶ浦において現地観測を行い、日成層が湖内の流動や水質変化に多大な影響を及ぼすことを明らかにした¹⁾²⁾。また、日成層は季節成層形成の素過程としても重要であることが指摘されている³⁾。したがって、湖の流動、混合及び水質変化を予測するに当たっては、日成層の動きをシミュレートできるモデルを開発する必要がある。

現在のところ日成層の混合モデルで最も優れているのはProf. Imbergerを中心とする西オーストラリア大のモデル³⁾である。このモデルの特徴は混合層内の乱れエネルギーを陽の変数としている点及び界面でのK-H不安定による混合を考慮している点である。しかしモデル中に多くの未定定数を含み、また水面のセットアップの取扱に便宜的な方法を用いているところに問題が残されている。

著者らは安定成層の連行則を理論的に導き⁴⁾、現地観測及び実験からその妥当性を検証している。本研究ではこの連行則をベースに日成層の混合モデルを開発し、現地のシミュレーションを試みた。

2. 基礎方程式

著者らが導いた躍層の降下過程を表す連行則⁴⁾は混合層内部のシアアの強さを表す相対流速差 ΔU が含まれており、これを得るために運動方程式及び連行則を連立させる必要がある。 ΔU は主に風応力によって決定されるが、風の継続時間が長くなると水面のセットアップに伴う圧力勾配及びコリオリ力が影響してくる。そこでこれらを考慮し、上下層で積分した運動方程式は次式となる(簡単のため2層の場合を考える。)

$$\text{上層;} \frac{d}{dt} (h_1 \vec{U}_1) + h_1 f \mathbf{k} \times \vec{U}_1 = -g \vec{\theta}_1 h_1 + \frac{\vec{\tau}_s}{\rho_1} + \vec{U}_2 \frac{dh_1}{dt} \quad (1)$$

$$\text{下層;} \frac{d}{dt} (h_2 \vec{U}_2) + h_2 f \mathbf{k} \times \vec{U}_2 = -g \vec{\theta}_1 h_2 - \varepsilon_{12} g \vec{\theta}_2 h_2 - f_b \vec{U}_2 |\vec{U}_2| - \vec{U}_2 \frac{dh_1}{dt} \quad (2)$$

ここに、 h_1, h_2 ; 上下層厚さ、 \vec{U}_1, \vec{U}_2 ; 上下層の平均流速ベクトル、 $\vec{\tau}_s$; 水面に作用する風応力ベクトル、 $\vec{\theta}_1, \vec{\theta}_2$; 水面、界面勾配、 ρ_1, ρ_2 ; 上下層密度、 ε_{12} ; 上下層相対密度差、 f_b ; 底面の摩擦係数である。

上式は水平方向の移流、拡散項を無視しており、基本的に鉛直1次元モデルである。そこで水面及び界面勾配は、湖の形を一定水深の円形として簡単化し、次式の連続条件から算出する。

$$\text{上層;} \vec{U}_1 h_1 + \vec{U}_2 h_2 = KR^2 \frac{d\theta_1}{dt} \quad (3), \quad \text{下層;} \vec{U}_2 h_2 = KR^2 \frac{d\theta_2}{dt} \quad (4)$$

ここに、 R ; 湖の半径(ここでは10kmとした)、 K ; 湖の形によって決まる定数(円形の場合1/3)である。

著者らが理論的に導出した連行則は熱量が保存される状態のみ有効である。日射による熱量の流入がある場合には、それを混合するためのエネルギーが必要となる。このことを考慮して連行則を変形すると、

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2C(1 - \frac{\beta}{\alpha}) U_s^2 \Delta U - \dot{E}_0}{\varepsilon_s g h (2\zeta - C\alpha \frac{\Delta U^2}{\varepsilon_s g h})} \quad (5)$$

となり、 E_0 が上記した躍層上層を混合するために必要なエネルギーを表している(式中の係数は文献4)参照)。また ΔU は上下層の風方向の相対流速差である。なお日射による熱量の変化はBeerの法則にしたがった。

3. 計算のアルゴリズム

(1)～(5)式は1階の連立常微分方程式であり、基本的には初期条件と各時刻の（気象条件風）と日射強度を与えることによって数値積分できる。しかし(5)式の特長から次のような処理を行う必要がある。

まず(5)式をみると、右辺分子（有効な余剰エネルギー E_{av} と呼ぶ）が正の場合のみ躍層の下降が可能であり、負の場合には既存の躍層より上に新たに躍層が形成される。一方、 $E_{av} > 0$ であっても(5)式の分母がゼロとなった場合、 dh/dt は不定となる。分母の $Riu = \Delta U^2 / \varepsilon_s g h$ は内部フルード数の逆数の2乗であり、(5)は開水路の不等流の式と類似した式形となっている。開水路においては射流から常流に遷移する場合、跳水がおり対応水深に“Jump”する。そこで(5)式の分母が負になる場合を“水理不安定”と呼ぶ。この状態は過剰に運動エネルギーがあることを意味しており、こうした場合には分母が正となる様に躍層を所定の深さまで下降(Jump)させた。計算のフローを図1に示す。なお数値積分にはルンゲクッタ法を用いた。

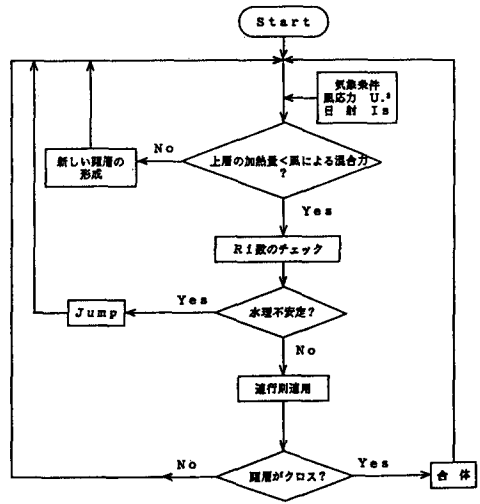


図1 計算のフローチャート

4. 現地のシミュレーション

本モデルの有効性を確認するため、霞ヶ浦における1989年夏の現地観測において底付近の水質変化が急激にみられた8/6-8の計算を行った。

計算結果を実測値と共に図2に示す。6日は日射が強く午前中に成層ができており、午後の強風によりその後躍層は降下して行くが、深さ4m位のところで降下は止まった。7日は日射が弱いので上層には弱い成層しか形成されなかったため上層の躍層は急速に降下して前日の躍層と合体した。8日は再び強い日射により躍層は二段となり、午後の強風のため上層の躍層は降下していき底層の躍層と合体し再び停留している。本モデルはこのような躍層の動きを良くシミュレートしている。

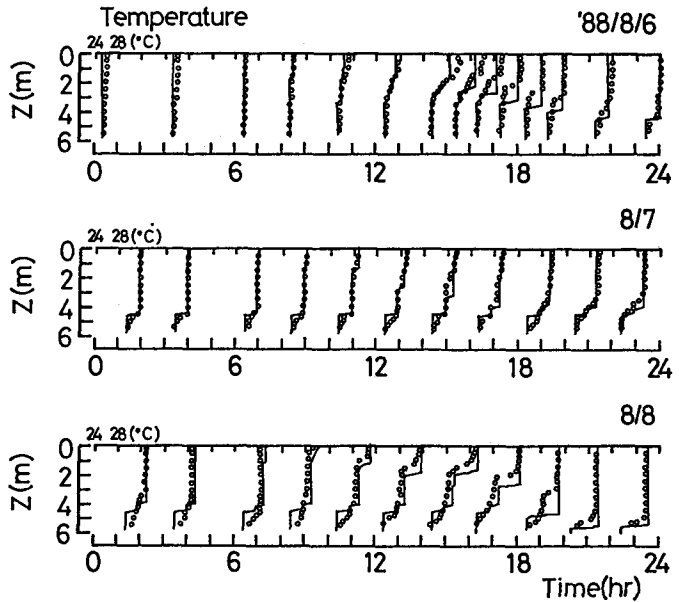


図2 計算結果（'89/8/6-8）○；実測値、— 計算値

参考文献

- 1) 田中・石川：日成層形成時の吹送流の特性について，土木学会論文集，405，II-11，印刷中，1989。
- 2) 石川ら：浅い湖において形成される日成層の水質に及ぼす影響について，第23回水質汚濁学会講演集，1989。
- 3) Spiegel, R. H. et. al.: Modeling the diurnal mixed layer, *Limnol. Oceanogr.*, 31, 533-556, 1986。
- 4) 田中・石川：吹送流による安定成層の連行則の理論的導出，第44回年講，1989。