東京湾における水温の鉛直分布の数値計算

武蔵工業大学　学生会員　○小泉　俊昌
武蔵工業大学　正会員　　村上　和男

１．はじめに

東京湾において大量の植物プランクトンが発生する赤潮と，湾の底層で貧酸素の水塊が発生し，それが湧昇することにより魚貝類に被害をもたらす青潮が問題になっている．海水中の酸素は，表層で大気からの曝気および植物プランクトンの光合成による生産などで供給され，また，底層での有機物の分解などにより消費される．このようにして，酸素は上層で供給され下層で消費される．特に夏期には多量の熱が海水中に入射し，表層の水を温め，表層水は高温で密度が小さく底層水は低温で密度が大きい分布となり，密度的に安定となり，成層が発達する．これにより，表層の酸素が底層に輸送されにくくなり，底層に貧酸素水塊が発生する．本研究では貧酸素水塊の形成において重要な密度成層の形成に注目して，太陽・大気からの熱エネルギーの収支を考慮し，二次元多層モデルによる数値計算を行う．

２．解析手法

ⅰ．潮流モデル

流れの基礎方程式である連続式と運動方程式から，水平流速を水深方向に平均化した水平平均流速$\bar{u}$, $\bar{v}$を求める方程式を導き，差分近似法である ADI 法を用いて解く．多層モデルを用いるのでその平均流速から Mode Splitting 法によりそれぞれの層の流速を求め，各層の流速がわかったところで連続式を用いて鉛直流を算出した．

ⅱ．熱収支モデル

海面に出入りする熱源として，太陽から短波の入射ϕ_{sn}，大気からの長波の入射ϕ_{an}，水中からの長波の放射ϕ_{br}，蒸発による放射ϕ_e，伝導による伝わる熱ϕ_cがある．それぞれ以下の式で求められる．

$$f_{sn} = 3.466 f_{sc}\left(1 - 0.65C^2\right) \quad \cdots (1)$$

$$f_{an} = 1.16\times10^{-13}\left(273.2 + T_a\right)^6\left(1 + 0.17C^2\right) \quad \cdots (2)$$

$$f_{br} = 4.2\times10^{-7}\left(T_s + 273.2\right)^4 \quad \cdots (3)$$

$$e_{sat} = 25.4\exp\left(17.62 - \frac{5278.22}{273.2 + T_s}\right) \quad \cdots (4)$$

$$e_z = R\times e_{sat} \quad \cdots (5)$$

$$f_e = 38.03 W_z\left(e_{sat} - e_z\right) \quad \cdots (6)$$

$$f_c = 0.459\times\left|\frac{T_s - T_z}{e_{sat} - e_z}\right| \quad \cdots (7)$$

ここで，ϕ_{sc}：快晴時の太陽からの短波入射量(ly/day)，T_a：大気温度(℃)，C：雲量(tens)，T_s：海面温度(℃)，W_z：風速(m/s)，e_{sat}：飽和蒸気圧(mmHg)，e_z：蒸気圧(mmHg)，R：湿度(%)である．ここで用いている単位は全て(BTU/ft^2・day)である．

これらの熱交換要素を全て合計したものが大気中から海水中への海面を通しての熱エネルギーの全体の収支ϕ_nであり，以下の式で表せる．

$$\phi_n = \phi_{sn} + \phi_{an} - \phi_{br} - \phi_e + \phi_c \quad \cdots (8)$$

そこで，ϕ_nの単位を次のような変換式を用いて(cal/m^2・s)に直すと，

$$1.0(\mathrm{BTU/ft^2\cdot day}) = 0.0314(\mathrm{cal/m^2\cdot s}) \quad \cdots (9)$$

水温の変化は次式で表せられる．

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{f_n}{r C_p D_i} + \frac{K_{zi}}{D_i}\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} + (\text{水平拡散項}) + (\text{移流項}) \quad \cdots (10)$$

ここに，ρ：密度(kg/m^3)，C_p：比熱(kcal/kg・℃)，D_i：第 i 層厚(m)，T_i：第 i 層の水温(℃)，t：時間(s)，K_{zi}：第 i 層の鉛直拡散係数，ϕ_n：第１層における熱収支（cal/m^2・s)である．

これにより，第１層でϕ_nにより熱が出入り，それ以降の層には鉛直拡散係数の大きさ及び鉛直移流に比例し，熱が下層に伝わっていくと考える．

鉛直拡散係数は成層の安定度の度合いに大きく影響を受け，成層の安定度を示す指標リチャードソン数（R_i）の関数となる．リチャードソン数は層間の密度差と速度差の関数として次式で表せる．

キーワード　熱収支，リチャードソン数，水温分布，東京湾
連絡先　〒158－8577 東京都世田谷区玉堤 1-28-1　武蔵工業大学水圏環境工学研究室　Tel.03-3703-3111(内線 3257)

$$R_i = \frac{\frac{\Delta r}{r} gh}{(\Delta u)^2} \quad \cdots (11)$$

ここで，⊿ρ：上層と下層の密度差，$\bar{\rho}$：基準密度，g：重力加速度，h：層厚，⊿u：上層と下層の流速差である．上層と下層の密度差が大きいほどリチャードソン数が高まり，成層の安定度は高まる．

鉛直拡散係数 K_z は混合期の鉛直拡散係数を K_{z0} とすると R_i の関数として，次式で表せる．

$$K_z = K_{z0}\left(1+3.33R_i\right)^{-1.5} \quad \cdots (12)$$

3．解析条件

東京湾で計算範囲は**図１**のようとし，開境界において水位差を与える．諸条件は**表１**とする．熱収支を考慮するため，第１層にϕ_nを与えた．

ϕ_n を算出するため，観測データとして気象庁 HP から得た[1]2002 年の１月から 10 日ごとの，雲量 C，大気温度 T_a，風速 W_z，湿度 R，快晴時の太陽からの短波エネルギーϕ_{sn}を与えた．

4．解析結果

解析結果として**図２**は 2002 年 7 月 25 日の水深方向に平均化した水温の温度分布となっている．**図３**は図１で示す地点での表層(海面下 4m)と底層(海面下 16m)の水温の季節変化である．

図４には 7 月 25 日の図 1 の地点での水深方向の温度変化の計算値と実測値を示す．（東京環境情報センターの HP より抜粋[2]）．

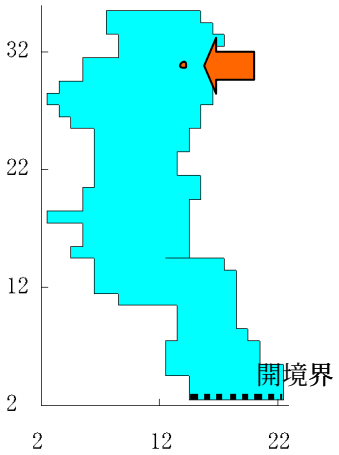

図１　測定値の位置

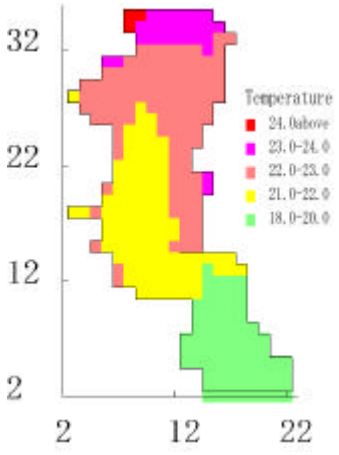

図２ 7/25 の温度分布

5．考察

図３より季節により海水温度が変化しており，夏になるにかけて表層と底層で温度差が生まれ成層が発達し，冬に近づくにつれて温度差がなくなり成層が解消される様子がある程度表現できた．しかし，図４において，計算値と実測値を比較すると，実測値に比べ計算値では水温差が小さく，成層がよく再現されたとは言い難い．この原因として考えられるのは，鉛直拡散に比べ鉛直流の影響が大きすぎて鉛直混合が過剰におきてしまい，鉛直方向の水温差が抑えられてしまった可能性がある．今後の検討課題である．

表１　入力諸元（潮流計算）

諸元	採用した値
計算対象領域	東京湾
座標，格子間隔（⊿S），層数	36× 23, ⊿S= 2km，10層
水深（h），タイムステップ	海図より読み取り（単位m），⊿t/2=15秒
コリオリ係数（f	f = 2ωsinφ，ω=2π/(24×60×60)，緯度φ=35.0 °
粗度係数（C）	$C=\frac{1}{n}\left(\frac{}{h}\right)^{1/6}$，　$n=0.026$
強制水位（潮汐）	城ヶ島：$\zeta_{2,15}$=0.37sin［(2π/T)k（t/2）−146.0］ $\zeta_{2,22}$=0.37sin［(2π/T)k（t/2）−146.0］
河川流量（年平均流量）	江戸川 67.12m³/s，荒川 92.46m³/s，墨田川31.82m³/s，多摩川 23.85m3/s，養老川6.19m3/s，小糸川1.74m3/s，小櫃川6.22m3/s，村田川2.83m3/s，鶴見川5.93m³/s
初期水位及び流速	共に全域0
初期温度及び外洋温度	共に20℃
初期塩分及び外海塩分	共に32‰
計算期間	2002年1月1日から2002年11月1日まで

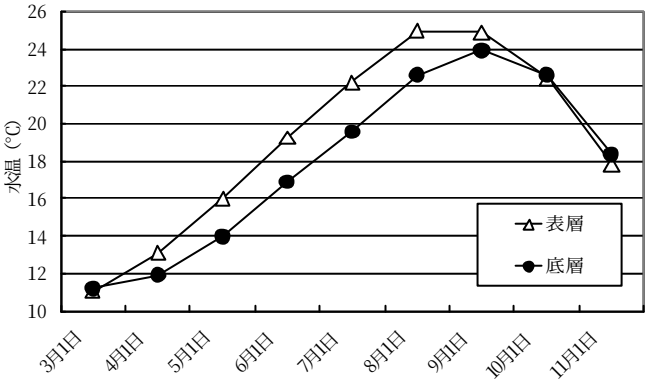

図３　表層と底層の水温の季節変化(計算値)

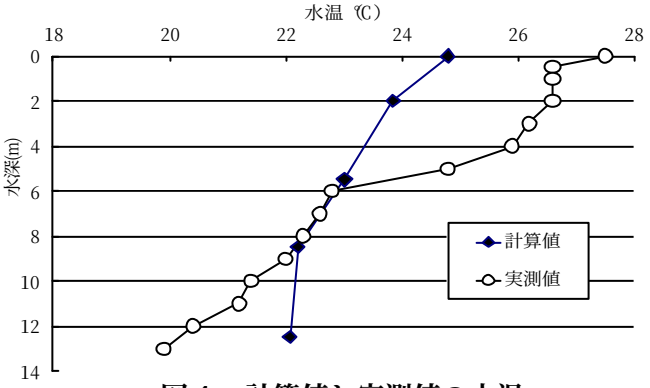

図４　計算値と実測値の水温

参考資料

１）気象庁ホームページ
http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html
２）東京湾環境情報センターホームページ
http://www.tbeic.go.jp/index5.html