

II-605 閉鎖性水域における鉛直一次元水温成層モデルに関する一考察

大阪大学大学院 学生員 尹 鍾星

大阪大学工学部 正会員 中辻啓二

大阪大学工学部 正会員 村岡浩爾

1. はじめに

夏期の閉鎖性内湾などの底層に形成された貧酸素あるいは無酸素水塊は底生生物に直接的被害を及ぼすことのみならず、風によって湧昇して青潮現象を引き起こす。夏期の成層の安定化は貧(無)酸素化に強く係わっており、底層の溶存酸素量は表層・底層間の水温差と強い相関があることが実測から報告されている。閉鎖性水域における水環境、とくに生態系を考える上で、成層化を含む密度流現象は重要な要因の一つである。本研究では水温成層の形成過程の解明が第一義的に重要であるという認識の下に、鉛直一次元水温成層拡散モデルの展開を、とくに鉛直方向渦拡散係数に関して検討する。本論ではそのモデルを江田島湾(広島県)に適用し、実測した水温構造との比較から予測精度の検証を行ったものである。

2. 鉛直一次元水温成層モデル

鉛直1次元熱輸送方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\alpha + K_z(z, t)) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right\} + \frac{\partial q(z)}{\partial z} / \rho C_p, \quad (1)$$

$$q(z) = (1 - \beta) Q_0 \exp(-\eta z), \quad Q_0 = Q_s(1 - A_s)$$

ここで、 T : 水温、 α : 分子拡散係数、 K_z : 鉛直方向渦拡散係数、 q : 熱源関数、 C_p : 比熱、 Q_0 : 太陽からの短波放射、 η : 消散係数、 β : 短波放射のうち水表面近傍で吸収される割合、 Q_s : 日射計から測定される日射量、 A_s : 短波アルベドである。

また、境界条件は水表面-大気間の熱収支を与える。水表面における全熱収支量は次式で与えられる。

$$Q = Q_0 + Q_{r1}(1 - A_L) - Q_{r0} - Q_e - Q_v. \quad (2)$$

ここで、 Q_0 : 太陽からの短波放射、 Q_{r1} : 水表面に入射する長波放射、 Q_{r0} : 水表面から放射する長波放射、 Q_e : 潜熱輸送、 Q_v : 顕熱輸送、 A_L : 長波アルベド(=0.03)である。

式(2)のそれぞれの熱収支量の因子については様々な文献調査および感度分析を行うことによって、水温構造の予測に最も適していると思われる経験式および係数の値を使うことにする。

Henderson-Sellers(1985)と中村ら(1989)は流速分布として対数型の式を、摩擦速度分布として Ekman 型の式を用いて鉛直渦拡散係数を推定した。しかしながら、両者の推定法は両分布則の違いから生じる理論展開に矛盾を含んでいる。そこで、吹送流に関する Ekman型の実測の流速分布式およびコリオリ力の影響を考慮した表面流速式に基づいて、風応力と勾配形リチャードソン数の関係から鉛直渦拡散係数の算定法に関する理論展開を試みた。その結果を示すと、鉛直渦拡散係数 K_z は次式のようにになる。

$$K_z = K_{z0} f(Ri), \quad K_{z0} = \frac{k w_*^* z}{P_0} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} f(Ri) = (1 + 10 Ri / 3)^{-3/2}, \quad w_*^* = w_s^* \exp(-k_* z)$$

$$Ri = \frac{-1 + \left\{ 1 + \frac{40(g/\rho)(\partial \rho / \partial t)}{k_*^2 u_s^2 \exp(-2k_* z)} \right\}^{1/2}}{20}$$

$$k_* = 6.6 \sqrt{\sin \phi} W_{10}^{-1.84}, \quad u_s = w_s^* \frac{24.0}{\sqrt{\sin \phi}}$$

ここで、 k 、 w_s^* 、 k_* 、 u_s はそれぞれ Karman 定数、水表面での摩擦速度、減衰係数、表面流速である。

3. モデルの検証

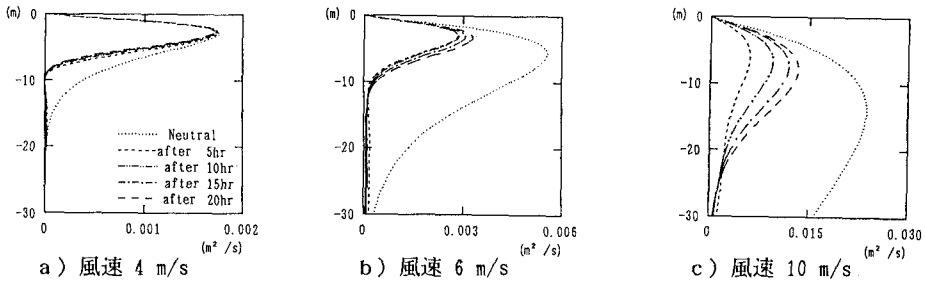


図-1 渦拡散係数の鉛直方向の時間変化

風速 4, 6, 10m/sの風を吹かせたときの渦拡散係数の鉛直方向分布の時間変化を図-1に示す。初期成層状態として上下層（上層水深 10m、下層水深 20m）の密度差を $\Delta\rho=10\text{ kg/m}^3$ と仮定した。破線は中立状態での渦拡散係数の値を示す。成層化の影響を受けて非中立状態の K_z の値は中立状態に比べて小さい。安定度が増し、リチャードソン数が増加すると渦拡散係数は急激に小さくなる。その傾向は風速 4, 6m/sのケースで顕著である。一方、風速 10m/sの場合には、時間の経過とともに、換言すれば混合が進むにつれて、 K_z は20mより浅い水深で増加傾向にあることが分かる。

つぎに、江田島湾の水溫構造に適用した結果を図-2に示す。図-3は対応する1989年7月1日～8月4日にかけての水溫分布の実測結果である。短波放射の消散係数 η は 0.1 と仮定して計算した。予測結果に7月 4, 9, 28, 31日に混合層が低下しているのが特徴的に認められる。このうち混合層の低下の度合いが最も大きいのは7月9日である。これは水表面での全熱収支量が小さいことに加えて風による大きな乱れエネルギーの重なったことが原因していると考えられる。全般的にみて予測結果は実測

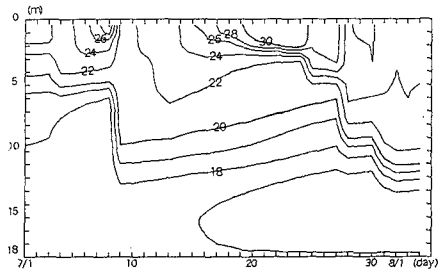


図-2 予測結果

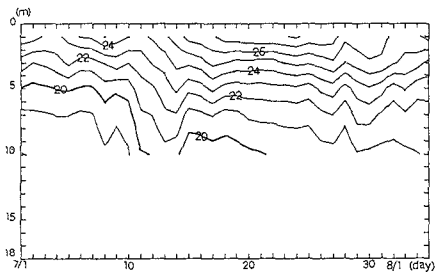


図-3 実測の水溫分布

結果を概ねよく再現していると判断できる。しかし、水深5m以深の水溫分布の勾配が実測のそれと比べて少し異なる傾向にあることに注意する必要がある。これは風の影響をやや大きく評価した結果である。風外力は海水の蒸発による潜熱輸送を制限することによって表層水溫に影響を及ぼして水溫成層に重要な役割を果たすと同時に、風の強いときには乱れエネルギー源として混合層の急激な低下を生じさせる。前時間ステップの水溫をもとに次のステップの水溫分布を算出するシミュレーションにおいては、風応力によって混合層がいったん低下すると、余程の熱供給がない限り水溫の上昇は期待できない。その結果、熱供給があっても、計算での等溫線は風応力の過大評価によって右上がりになったものと考えられる。

4. 結論

拡散モデルによる水溫構造の予測を行い、その有効性を検討した。モデルは実測水溫分布をよく再現しているものの、風外力の評価および水表面における熱収支の取扱いに検討の余地が残っている。

最後に、実測データを心良く提供して頂いた中工試の藤原建記博士に謝意を表します。

参考文献

- 1) Henderson-Sellers, B.; Appl. Math. Modelling, 9, 441-446, 1985.
- 2) 中村由行、西田克司、早川典生、西村 肇；海岸工学論文集, 36, 809-813, 1989.