

II-313 海風前線の数値解析 -モデルパラメータに浮力効果を含めた $k-\epsilon$ 乱流モデル-

豊橋技術科学大学（学）木村哲也・（正）北田敏廣、三浦工業 松浦洋司

（序） 大気汚染の輸送現象を予測するには、流れ場と共に拡散場の情報が必要である。臨海地域に工業地帯をもつ日本の場合には、海陸風がとりわけ重要な局地風であると考えられる。特に海風に伴う熱的内部境界層や海風前線は、その物理的特性の故に、大気汚染と密接なかわりを持つと推測されている。¹⁾このような海風前線や熱的内部境界層を乱れの構造をも含めて明らかにするには、乱流変動の速度スケールとともにその長さスケールも動的に表現する乱流モデルの使用が不可欠であり、この目的の下、標準的な $k-\epsilon$ モデルによる海風の解析はすでに成されている。本研究では、標準モデルの理論的な欠陥を補うべく、浮力効果を広範に取り入れたモデル（拡張モデル）について、Rodi(1985)²⁾のモデルを基に検討を行った。検討の結果、海風現象解析には新たなパラメータ値の設定の必要性が明らかとなった。

（解析方法） 計算領域は鉛直二次元領域(Fig.1)とした。支配方程式には、Boussinesq近似、静力学近似を仮定し、スタガードメッシュを用いて、コントロールボリューム法で差分化した。計算法はSOR法を用いた。

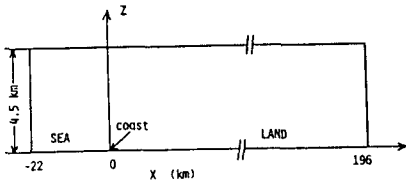


Fig.1. Two-dimensional calculation domain for sea breeze simulation.

Governing equations

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu_{1,h} + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\nu_{1,v} + \nu) \frac{\partial U}{\partial z} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -f + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu_{1,h} + \nu) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\nu_{1,v} + \nu) \frac{\partial V}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,h}}{\sigma_t} + \alpha \right) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,v}}{\sigma_t} + \alpha \right) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + W \frac{\partial k}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,h}}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,v}}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} \\ & + \nu_{1,v} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\} - \beta g \frac{\nu_{1,v}}{\sigma_t} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \epsilon \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,h}}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_{1,v}}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right\} \\ & + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left[\nu_{1,v} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\} - (1-C_{1\epsilon}) \beta g \frac{\nu_{1,v}}{\sigma_t} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\nu_{1,v} = \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

Basic $k-\epsilon$ model

$C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_t = 1$, $C_{3\epsilon} = 1$ (安定成層), 0 (不安定成層)

Buoyancy-extended $k-\epsilon$ model

$$C_\mu = \frac{W^2}{k}, \quad \sigma_t = \frac{W}{\alpha}$$

$$W = \frac{1 - C_2 + \frac{3}{2} C_1 C_2 \nu' f - (1 - C_2) \frac{1 - C_{1t}}{C_{1t}} \alpha B}{C_{1t} + \frac{3}{2} C_1^2 f + \frac{1 - C_2}{C_{1t}} B} \quad \alpha = \frac{1}{C_{1t} + C_{1t}^2 f + 2(1 - C_{1t}) R B} \quad B = \beta g \frac{k^2}{\epsilon^2} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$\frac{W^2}{k} = \frac{2}{3} \frac{C_1 - 1 + \frac{P + G}{\epsilon} (C_2 - 2 C_1 C_2 \nu' f) + \frac{G}{\epsilon} (3 C_2 - 2 C_1 + 2 C_1 C_2 f)}{C_{1t} + 2 C_1^2 f + \frac{P + G}{\epsilon} - 1}$$

$C_1 = 2.2$, $C_2 = 0.55$, $C_1' = 0.55$, $C_2' = 0.3$, $C_{1t} = 3.2$.

$C_{2t} = 0.5$, $C_{3t} = 0.5$, $C_{1t}' = 0.5$, $R = 0.8$ (Gibson and Launder, 1978)

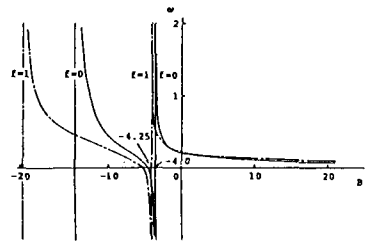


Fig.2. Variation of ω as a function of B and f .

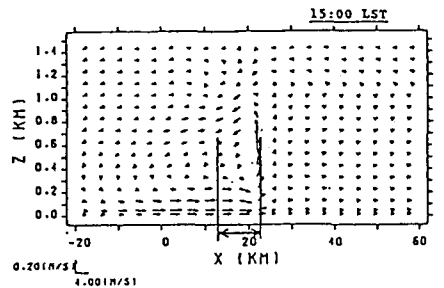


Fig.3. Vertical cross section of calculated flow. The region marked with arrow denote small circulation corresponding to the head of a gravity current forming sea breeze front.

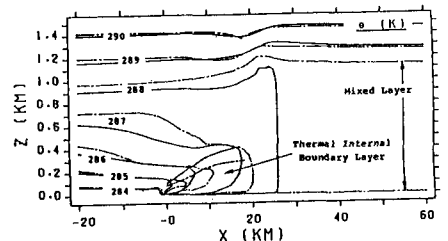


Fig.4. Vertical cross section of calculated potential temperature isoplethes.

計算にあたっては高さ21.2mまでを中立のconstant flux layerと仮定した。地表気温は、午前8時に海面気温と等しく、午後2時に海陸気温差5Kとなるように正弦関数で与えた（海面気温は一日中一定（283.15K））。温位の初期場は、5K/1kmの増加率の安定成層とした。

（結果と考察）（1）拡張モデルのパラメータ値にGibson and Launder(1978)³⁾の値を用いると C_{μ} が負となり負の拡散係数が現れる。その原因は、 ω と α がBの値によっては負になるためである（Fig.2）。これを避けるために、モデルパラメータ値の再評価を行った。その方法は、 ω および α の非負性を保全するために、海風不安定層に現れるB値の絶対値を推定し、新しいパラメータ値の設定に利用するというものである。その結果、中立成層において σ_T の値が壁近傍で約0.9、その他の領域で0.5~0.7であること等を考慮して、 $C_{1T}=3.2 \rightarrow 3.5$ 、 $C_3=0.55 \rightarrow 0.95$ 、 $C_{2T}=C_{3T}=0.5 \rightarrow 0.95$ というパラメータの再評価値を得た。新しいパラメータ値を用いて得た計算結果は、不安定層の下でのより大きな乱流拡散係数を示唆している。流れのパターン等、平均量の分布については、定性的に標準 $k-\epsilon$ モデルとほぼ等しい結果を示しているものの、この拡散係数の違いは、大気汚染の輸送にとって重要な意味をもつものと考えられる。（2）Simpson et al(1977)⁴⁾は、海風前線が、重力流のheadとしての特徴を持ち、孤立した小循環を成すことを観測により指摘している。Fig. 3の流れ場は、前線におけるこれらの特徴をうまく表現している。その時刻の温位場および拡散場をFig. 4, 5に示す。温位場より大気の安定度を考慮している拡張モデルの方が標準モデルより、熱的内部境界層の発達により顕著であることがわかる。また、拡散場よりその値の違いから、混合層、熱的内部境界層および安定成層としての反流層の形成状況が明らかである。Fig. 6は k 方程式中の各項を比較したものであるが、混合層では浮力による生成、熱的内部境界層ではシアによる生成の寄与が大きいことがわかる。このことは、日中から夕方、拡散係数の減少が混合層に比べて熱的内部境界層では小さいことを意味する。

（まとめ）海風に伴う海風前線や熱的内部境界層および混合層について定性的には良好な結果が得られた。さらに、モデルパラメータ値のより詳細な検討および定量的な検証を経て、海風場における汚染物質の輸送現象の研究にこのモデルを用いることができると考えられる。

参考文献 1)Ueda et al:1986;J.Climate Appl.Meteor.,25
2)Rodi:1985;In Turbulence and Diffusion in Stable Environments 3)Gibson et al:1978;J.Fluid Mech.,86 4)Simpson et al:1977;Q.J.Royal Meteor.Soc.,103

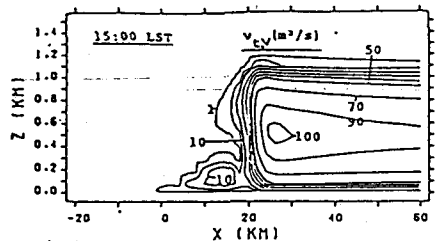
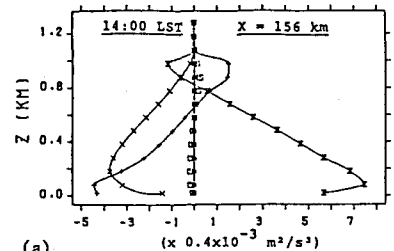
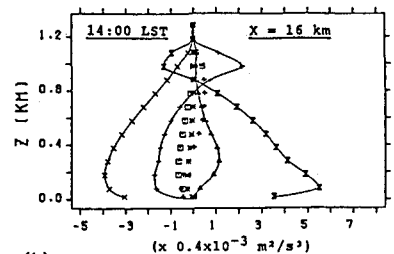


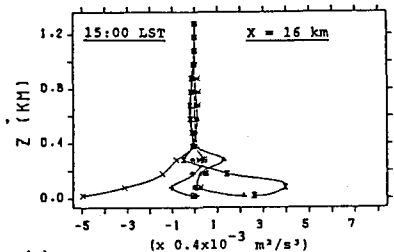
Fig.5. Vertical cross section of calculated vertical eddy diffusivity isopleth.



(a)



(b)



(c)

Fig.6. Vertical profiles of the various rate-terms in the k -equation (i.e., Eq.(6) in the text) at positions and times as indicated; (a) $x=156$ km at 1400LST, mixed layer; (b) $x=16$ km at 1400LST, about the place of sea breeze front; (c) $x=16$ km at 1500LST, thermal internal boundary layer. The symbols in the figures denote

$$x - \epsilon, \quad x - \beta g \frac{v_{t,v}}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad + \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{t,v}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right), \quad \Delta \quad v_{t,v} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}, \quad \square \quad \frac{\partial k}{\partial t},$$

$$\uparrow \quad w \frac{\partial k}{\partial z}, \quad * \quad u \frac{\partial k}{\partial x}, \quad \text{and} \quad | \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{t,v}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right).$$