

## II-401

k-εモデル中のε方程式におけるC<sub>3</sub>εの効果

日本気象協会 正会員 高木久之

豊橋技術科学大学 正会員 北田敏廣

1. はじめに メソスケールでの大気環境においては、海陸風などの局地風が、重要な背景をなす。このような局地風を、流れ場のみでなく乱れ場も含め比較的よい精度でかつ経済的に予測する方法として、k-εモデルを組み込む方法が考えられる。この方法は本研究室で継続的に行われてきた研究で、既に仮想地域を例にとつて、よい結果を得ている<sup>1)</sup>。しかし、実地形を計算するには、いくつかの点でモデルの改良を必要とする。その改良点の一つとして、k-εモデル中のε方程式の浮力項の取扱いが挙げられる。ε方程式は、対をなすk方程式に比べ導出の過程で数多くの仮定に基づく簡略化（モデル化）がなされており、最も工学的な色彩の強い方程式である。その中で浮力項は、通常、経験的にシアー生成項と結合され次のようにモデル化されている<sup>2)</sup>。

$$C_1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} \{ P + (1 - C_3 \varepsilon) G \} \quad (1)$$

ここで、Pはシアー生成項、Gは浮力生成項を表す。またC<sub>1</sub>ε、C<sub>3</sub>εはモデル定数を表す。浮力項を制御するC<sub>3</sub>εについては、色々な流れに即して様々な値が提案されており、他のパラメーター値ほどの普遍性はない。しかも、通常、熱的に成層状態にある環境大気の解析においては、このC<sub>3</sub>ε値の影響は大きいと考えられる。そこで、本研究では、この値に対する海風の感度解析を通じて、C<sub>3</sub>ε値の及ぼす効果を考察し、その最適値を検討した。

2. 解析方法 計算領域は図1に示す半島をもつ3次元計算領域である。数値計算については従来の研究<sup>1)</sup>と同様な扱いをし、(2)～(11)に示す支配方程式系をコントロールボリューム法を用いて離散化しS.O.Rにより計算した。地表気温は、午前8時に海面温度と等しく、午前2時に海陸気温差5Kとなるように正弦関数で与えた。シミュレーションは表1に示すC<sub>3</sub>εの4つの組合せについて行った。

## x方向運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (2\nu_{th} \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_{th} (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x})) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_{th} \frac{\partial U}{\partial z} + \nu_{th} \frac{\partial W}{\partial x}) + f_1 V - f_2 W \quad \dots (2) \end{aligned}$$

## y方向運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} + \frac{\partial VW}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_{th} (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} (2\nu_{th} \frac{\partial V}{\partial y}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_{th} \frac{\partial U}{\partial z} + \nu_{th} \frac{\partial W}{\partial x}) - f_1 U \quad \dots (3) \end{aligned}$$

## 静力学平衡の式

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad \dots (4)$$

## 連続の式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad \dots (5)$$

## 熱輸送の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_1} \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_1} \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_1} \frac{\partial \theta}{\partial z}) \quad (6) \end{aligned}$$

## 状態方程式

$$p = \rho R^* T \quad \dots (7)$$

## 乱流運動エネルギーkの輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial Uk}{\partial x} + \frac{\partial Vk}{\partial y} + \frac{\partial Wk}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}) \\ + P + G - \varepsilon \quad \dots (8) \end{aligned}$$

## 乱流運動エネルギーの消散速度εの輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial V\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial W\varepsilon}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\nu_{th}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) \\ + C_1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} \{ P + (1 - C_3 \varepsilon) G \} - C_2 \varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \dots (9) \end{aligned}$$

$$\nu_{th} = 1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \dots (10)$$

$$\nu_{th} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots (11)$$

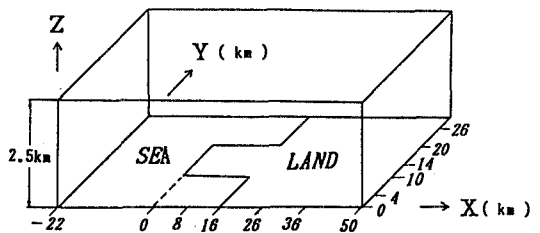


図1 3次元計算領域

表1 シミュレーションケース

| case 1<br>Rodi<br>(1980) <sup>2)</sup> | case 2             | case 3        | case 4<br>Kitada et al<br>(1980) <sup>1)</sup> |
|----------------------------------------|--------------------|---------------|------------------------------------------------|
| 安定 0.8<br>不安定 0.8                      | 安定 2.0<br>不安定 -0.8 | 安定 0<br>不安定 0 | 安定 1.0<br>不安定 0.0                              |

ここでcase 4-2の値はBetts and Haroutunian(1983)<sup>3)</sup>により提案された値（安定成層で2.15、不安定成層で-0.8）をもとに設定した。

3. 結果及び考察 case 1 では  $k$  方程式の浮力項に比べ  $\epsilon$  方程式の浮力項を小さく評価しているため、不安定成層下では  $\epsilon$  が  $k$  に比べ相対的に小さく評価される。その結果、不安定な弱風層の下では、 $\epsilon$  が  $k$  に比べ非常に小さな値となり、 $k-\epsilon$  モデルの渦拡散係数の定義より、非現実的な程拡散係数が大きくなり過ぎる(図 2)。 case 2 では、安定成層下でも不安定成層下でも  $\epsilon$  方程式の浮力項は、 $\epsilon$  を生成するようにはたらし、しかも  $k$  のそれに比べ大きく評価されるため、 $k$  方程式の消散の効果が大きくなり、乱れが抑えられ、混合層が発達しない(図 3)。また、その結果、地表面の温度が上空に伝わらないため、海風を起こす起動力とならず、このケースでは海風も発達しない。 case 3 では、安定成層中、浮力項は  $\epsilon$  を減少させるようにはたらし、その速度が  $k$  のそれに比べ速く、混合層の上端や海風前線通過後にできる安定成層中で、やや渦拡散係数を過大評価している(図 4)。 case 4 のでは、他の3つのケースと比べ、比較的妥当な結果であると考えられる。但し、安定成層下では  $\epsilon$  方程式中の浮力項がはたらず、浮力項による  $\epsilon$  の減少がないため、安定成層中の渦拡散係数の減少速度がやや速く、拡散係数はなっている(図 5)。以上の解析結果より、 $C_3 \epsilon$  の海風に及ぼす効果は大きく、 $C_3 \epsilon$  値により計算結果が大きく変化することがわかった。また、計算結果の比較より  $C_3 \epsilon$  の最適値としては不安定成層下で、 $0 \leq C_3 \epsilon \leq 0.8$  で、0に近い値、安定成層下では、 $C_3 \epsilon \leq 1$  で、1に近い値と考えられる。

4. おわりに 本研究では、 $\epsilon$  方程式中の  $C_3 \epsilon$  値が海風解析に大きな効果を与えていることが明らかになった。また、計算結果の比較より、海風解析における  $C_3 \epsilon$  値のおおよその最適値を得ることができた。

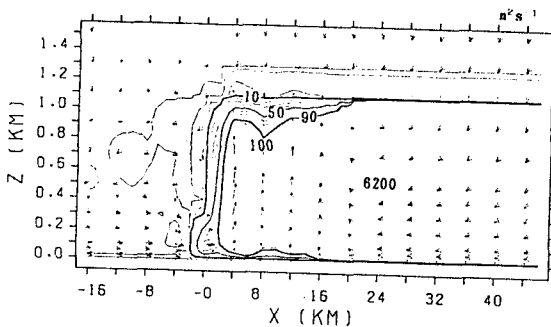


図 2 case 1 の  $\nu_t$  分布 ( $y=14\text{km}$ , 14時)

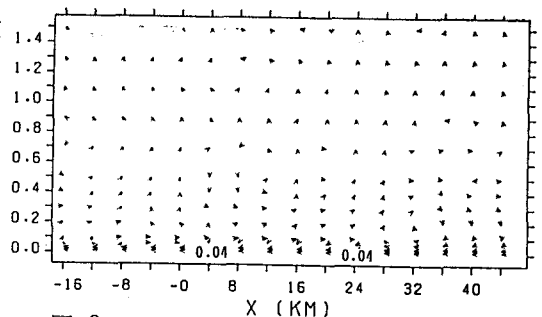


図 3 case 2 の  $\nu_t$  分布 ( $y=14\text{km}$ , 14時)

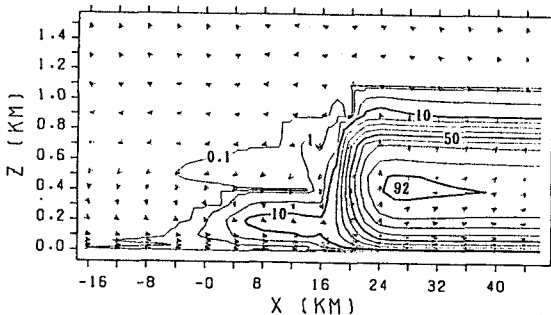


図 4 case 3 の  $\nu_t$  分布 ( $y=26\text{km}$ , 14時)

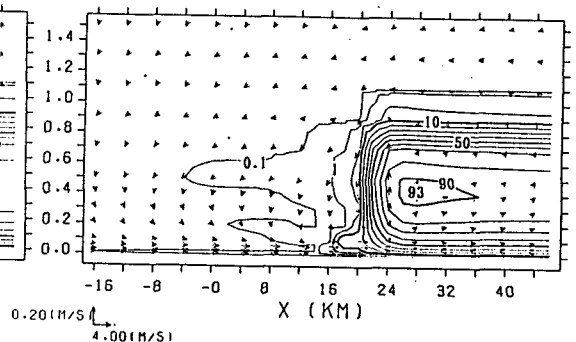


図 5 case 4 の  $\nu_t$  分布 ( $y=26\text{km}$ , 14時)

#### <参考文献>

- 1) T. Kitada, H. Takagi, H. Kato, K. Kunii (1990): Numerical Investigation of the Coastal Air Environment Influenced by Small-Scale Peninsula., Proc. Int. Conf. on Urban Climate, Planning and Building, Elsevier(to appear)
- 2) W. Rodi (1980): Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics., IAHR and AIRH
- 3) P. L. Betts and V. Haroutunian (1983): A  $k-\epsilon$  Finite Element Simulation of Buoyancy Effects in the Atmospheric Surface Layer, ASME paper 83-WA/HT-32