

II-255 大気汚染シミュレーションへの乱流モデルの適用に関する基礎的研究

京都大学 工学部 学生員 安田龍介  
 京都大学 工学部 正員 池田有光  
 京都大学 工学部 正員 平岡正勝

1. はじめに

従来より、大気環境アセスメントにおいて複雑地形上の風系を推定する際には、ポテンシャル流モデルや客観解析法が用いられてきた。しかし、これらの手法では、気流の乱れを考慮することができないため、乱流統計量の推定は風洞実験に頼らざるを得ないのが現状であった。

近年、計算機の高度化に伴い、乱流モデルを大気汚染シミュレーションの風系推定に使用する試みがなされている。そこで本報文では、大気汚染シミュレーションへの適用を前提に、乱流モデルの精度・安定性を調べることにより、その有効性について検討を行った。使用したモデルは T.Yamada<sup>1)</sup>の2次クロージャーマデル(レベル3)で、解析は単純な地形をもつ中立状態の風洞内流れ場を対象とした。

2. モデル方程式系

T.Yamadaのレベル3モデルは  $k - \kappa L$  を算定する2方程式系で、渦動粘性係数は応力方程式を簡略化して求めたものである。モデル方程式系を以下に示す。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_m \frac{\partial U_i}{\partial x_m} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left( K_{um} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right), \quad \frac{\partial U_m}{\partial x_m} = 0 \quad (1),(2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_m \frac{\partial k}{\partial x_m} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left( K_{qm} \frac{\partial k}{\partial x_m} \right) - 2 \left( \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} \right) - 2 \frac{k^{3/2}}{B_1 L} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\kappa L)}{\partial t} + U_m \frac{\partial (\kappa L)}{\partial x_m} = & \frac{\partial}{\partial x_m} \left[ K_{Lm} \frac{\partial (\kappa L)}{\partial x_m} \right] - E_1 L \left( \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ & - \frac{k^{3/2}}{B_1} \left[ 1 + E_2 \left( \frac{L}{\kappa z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\overline{uw} = - K_{u3} \frac{\partial U}{\partial z}, \quad \overline{vw} = - K_{v3} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (5),(6)$$

$$K_{u3} = \frac{(1 - 3 C_1) k^{5/2} A_1 L}{k^2 + 6 A_1^2 \kappa L^2 \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|^2}, \quad K_{q3} = k^{1/2} L \tilde{\zeta}_1, \quad K_{L3} = k^{1/2} L \tilde{\zeta}_2 \quad (7),(8),(9)$$

$$\left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|^2 = \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \quad (10)$$

尚、モデル方程式中に含まれる諸パラメータの値は、Yamadaの提唱値をそのまま用いた。それらを以下に示す。

$$\begin{aligned} & ( A_1, B_1, C_1, E_1, E_2, \tilde{\zeta}_1, \tilde{\zeta}_2 ) \\ = & ( 0.92, 16.6, 0.08, 1.8, 1.33, 0.2, 0.2 ) \end{aligned}$$

### 3. 数値計算法

計算はADI法で行った。座標系は、地形に沿った ( $z'$ ) 座標系を用い、水平方向には正方メッシュ、鉛直方向には対数メッシュを切った。境界条件としては、流入境界で風洞実験計測値を与え、地表境界近傍における風速の鉛直分布には対数則を用いた。

### 4. シミュレーション

シミュレーションには（財）電力中央研究所が行った風洞実験結果<sup>2)</sup>を利用した。図1にテスト地形の形状を示す。計算領域は流れ方向に4.4m, 垂直方向に1.8m, 鉛直方向に1.0mとし、上流境界から1.0mの地点にテスト地形の中心を置いた。風洞内の流れは定常状態にあると考えられるので、計算も定常化判定条件を設定し、定常解を得るまで行った。

### 5. 結果及び考察

a)精度 垂直断面での平均流ベクトルを図2に示す。計算結果には、山頂付近での流速の増加や山越えによる乱流強度の増加が認められ、定性的には風洞内の流れをよく表現しているといえる。但し、鉛直方向の速度成分が過小評価される傾向にあり、風洞実験ほどの乱れは現れない。

b)安定性 移流拡散方程式の差分スキームの安定性はクーラン数 ( $F = U \Delta t / \Delta x$ ) と拡散数とに依存することが知られている。F を 0.12, 0.24, 0.48, 0.72, 0.96 と変化させ、誤差率の推移を調べた。U = 2.0 m/sec の場合の、誤差率と反復回数の関係を図3に示す。図より、本スキームでは F を小さくする方が安定しやすいと言える。また F の誤差率への影響は、初期において小さく反復回数を増す毎に格差が広がって、最終到達誤差率の相違となって現れることがわかる。地形の形状と安定性の関係は定量的に把握しにくい、地形の起伏が激しいほど安定化が遅くなる傾向にある。

尚、1回の反復に要する cpu time は富士通の M-382 で約2秒であった。

### 6. 結論

乱流モデルの使用は、計算時間を多く要する反面、気流の乱れの評価には有効であることが示された。しかしアセスメント手法として定量的な風系予測を行うには、式に含まれる諸定数の更なる検討や初期・境界条件の基準化が必要といえる。

<参考文献>1) T. Yamada; A three-dimensional, second-order closure numerical model (1978), ANL 2) (財) 電力中央研究所; 排ガス拡散に及ぼす地形影響; 研究報告 284010 (1984)

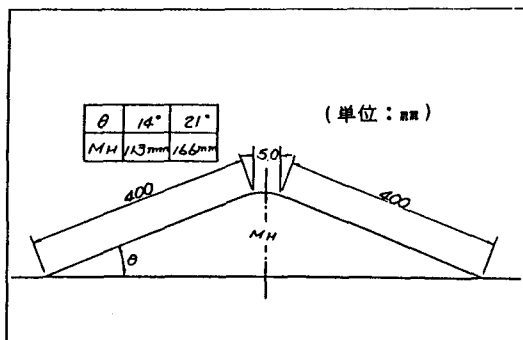


図1 テスト地形の形状

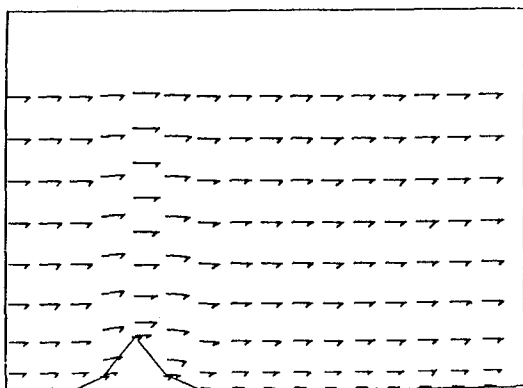


図2 垂直断面での平均流ベクトル

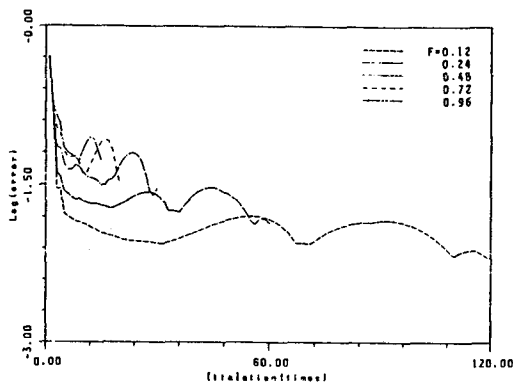


図3 相対誤差率の変化