

1. はじめに

底面から一定の熱フラックス H_s が供給される場合に発生する自然対流場を対象として、MellorとYamadaの乱流完結モデル¹⁾による熱対流の再現性能を検討する。同乱流モデルを鉛直一次元熱対流場に適用した場合、乱流の非等方性に基づき乱流二次相関項の保存式が表-1のように近似されLevel-1~4の階層を持つ。この中で"Level-2.5"モデルは定式化が簡潔であり複雑な密度乱流場の記述に優れているため、大気・海洋の物質拡散予測のための汎用化がなされている。池田らはLevel-2モデルを荒川河川敷の熱環境予測に用いて実測値との良好な一致を得ている²⁾。著者らもLevel-2.5モデルを自然対流場へ適用し、乱れエネルギーや乱流二次相関項の分布形が精度良く再現されることを確認した³⁾。しかし、乱流二次相関項の保存式中の各項の平衡関係や乱流三次相関項の分布形までを議論することはできない。本研究ではLevel-2.5モデルより近似仮定の少ないLevel-3,4を用いて乱流構造の再現性を検討するとともに、各Level間の比較を行う。

2. 乱流エネルギー：乱流強度 $(\bar{u}^2, \bar{w}^2)$ や乱流浮力フラックス $\bar{w}\theta$ の鉛直分布に関しては、Level-2.5,3,4の各モデルにおいて大きな差は見られなかった。図-1は乱れエネルギー $k^2 = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)/2$ の保存式各項の鉛直分布に関して、Level-4モデルとAdrianの実験値⁴⁾との比較を示す。なお、Level-2.5,3,4各モデルの比較を行った結果、一見、三者にはさほど大きな差異は見られないようであったが、表-1に示すようにLevel-2.5モデルには粘性拡散項(Ⅱ)が含まれておらず、これを再現できない点が大きな相違であった。

3. 乱流二次相関項：図-2,3は各々 $\bar{\theta}^2$ および $\bar{w}\theta$ の保存式中の各項をAdrianの実験値とともにあらわす。本論では分子過程を考慮していないので壁面付近の再現精度は劣るが、全体的には平衡関係がほぼ良好に記述されている。表-1に示すようにモデルのLevelが低次になるほど各保存式中で欠落する項が増え

表-1 乱流モデルの各Levelにおける二次相関項保存式の比較

Conservation of $q^2/2$ (TKE)	$\frac{\partial(q^2/2)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [q\lambda_1 (\frac{\partial(q^2/2)}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z})] + \nu \frac{\partial(q^2/2)}{\partial z}$	(I) Turbulent Diffusion	(II) Molecular Diffusion	(III) Buoyancy	(IV) Dissipation
Level-4	○	○	○	○	○
Level-3	○	○	×	○	○
Level-2.5	○	○	×	○	○
Level-2	×	×	×	○	○
Level-1	×	×	×	○	○
Conservation of $\bar{w}^2$	$\frac{\partial \bar{w}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [3q\lambda_1 \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z}] + \nu \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z}$	(I)	(II)	(III)	(IV)
Level-4	○	○	○	○	○
Level-3	×	×	×	○	○
Level-2.5	×	×	×	○	○
Level-2	×	×	×	○	○
Level-1	×	×	×	×	○
Conservation of $\bar{\theta}^2$	$\frac{\partial \bar{\theta}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [q\lambda_2 \frac{\partial \bar{\theta}^2}{\partial z}] + \kappa \frac{\partial \bar{\theta}^2}{\partial z} - 2\bar{w}\theta \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{2q}{\Lambda_2} \bar{\theta}^2$	(I)	(II)	(III)	(IV)
Level-4	○	○	○	○	○
Level-3	×	×	×	○	○
Level-2.5	×	×	×	○	○
Level-2	×	×	×	○	○
Level-1	×	×	×	○	○
Conservation of $\bar{w}\theta$	$\frac{\partial \bar{w}\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [2q\lambda_1 \frac{\partial \bar{w}\theta}{\partial z}] - \bar{w}^2 \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma g \bar{\theta}^2 - \frac{q}{31_2} \bar{w}\theta$	(I)	(II)	(III)	(IV)
Level-4	○	○	○	○	○
Level-3	○	○	○	○	○
Level-2.5	×	×	○	○	○
Level-2	×	×	○	○	○
Level-1	×	×	○	○	○

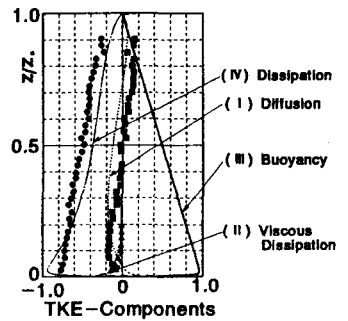


図-1 k の保存式各項の分布

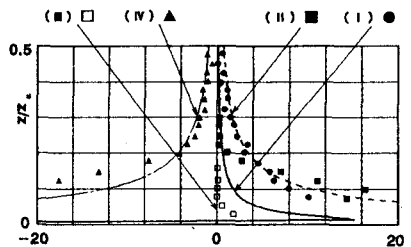


図-2 $\bar{\theta}^2$ の保存式各項の分布

近次精度は低下する。これを見るために各Level のモデルを比較する。

$\overline{\theta^2}$ の保存式に関して、Level-3と Level-4 モデルの相互比較を図-4に示す (Level-2.5 モデルには浮力項(Ⅲ)と散逸項(Ⅳ)しか含まれていないので比較の対象外とする)。壁面付近を除き両者には大きな違いは見られない。 $\overline{w\theta}$ の保存式各項の分布について Level-2.5, 3, 4の三者の比較を図-5に示す。この場合には Level-2.5モデルによっても Level-4モデルとほぼ同様の結果を得ることがわかる。

4. 乱流三次相関項: この乱流モデルでは三次相関項のレベルで完結仮説を導入しているため、本来的には二次以下の乱流相関項および平均量の記述に対しのみ適用すべきであるが、試みに評価が可能な三次相関項についてAdrianらの実験結果との比較を行った。これらを図-6, 7, 8に示す (同図中 Pe はペクレ数)。実験的に三次相関項を精度よく評価することは困難と思われるが彼らの実験データは質がよく、三次相関項の有意な分布形が見られる。モデル

より算定された結果は定性的にもこれを再現しているとは言いがたい。水平方向乱流強度 $\overline{u^2}$ の分布については先に行ったlevel-2.5によっても Level-4 によっても同様に上下端境界付近の $\overline{u^2}$ の値がかなり過少に評価され、著者らのならびにAdrianの実験値とかなり異なる解析結果となった。

このように乱流モデルにはなおかつ検討すべき余地がある。自然対流の乱流構造をよりの確に記述するためには、今後より多くの実験情報を収集し、これに基づく定式化を行う必要があると考えられる。

参考文献: 1) Mellor, J. and Yamada, T., J. Atmos. Sci., Vol. 31, pp. 1791-1806, 1974., 2) 武若・池田・平山, 土木学会論文集, No. 479/II-25, pp. 21-30, 1993., 3) 道奥・島崎, 土木学会論文集, No. 485/II-26, pp. 27-36, 1994., 4) Adrian, R. J., Experiments in Fluids, Vol. 4, pp. 121-141, 1986.

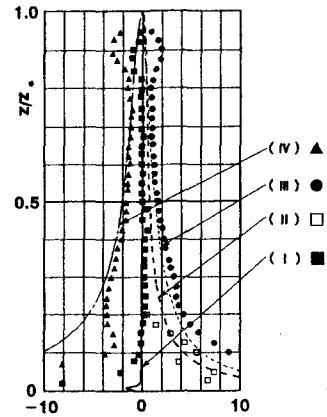


図-3 $\overline{w\theta}$ の保存式の各項

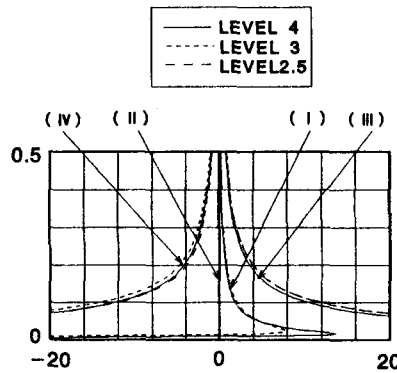


図-4 $\overline{\theta^2}$ の保存式の各項
(Level-3, 4モデルの比較)

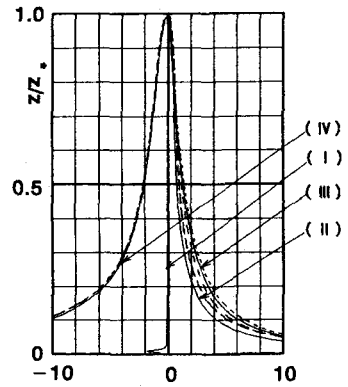


図-5 $\overline{w\theta}$ の保存式の各項
(Level-2.5, 3, 4モデルの比較)

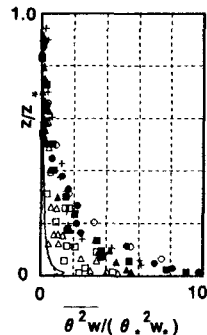
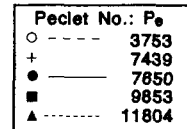
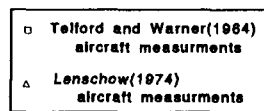


図-6 $\overline{\theta^2 w}$ の分布

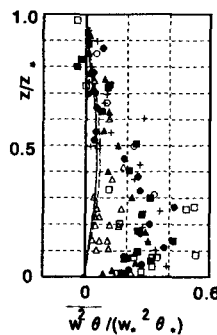


図-7 $\overline{w^2 \theta}$ の分布

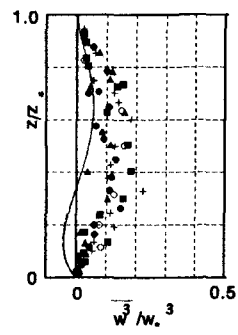


図-8 $\overline{w^3}$ の分布