特　集　11
研 究 解 説

浮力による乱流フラックスの減衰・促進を考慮した修正 k-ε モデル

Modified k-ε Model Including Dumping and Accelerating Effect of Turbulent Flux by Buoyancy

大　平　　昇*・加　藤　信　介*・村　上　周　三**
Noboru OHIRA, Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

空調された室内の気流を計算する際は，安定流、不安定流に対応する必要がある．浮力による減衰効果を考慮したモデルはすでに存在する（MKC モデル）．本報では MKC モデルの減衰関数を拡張し，新しいモデル関数を導出した．このモデル関数により，不安定領域では浮力により乱流フラックスが促進される．このモデルを用いて2次元非等温室内気流の計算を行い，模型実験結果及びその他の乱流モデルによる計算結果と比較した．その結果，促進効果を考慮した方がより実験に近い結果となり，新しいモデル関数が有効なことが明らかとなった．

1. は じ め に

温度成層を成し浮力による乱流拡散が抑制される効果を導入した低 Re 数型 k-ε モデル（MKCモデル）[文1),2)]を温度変動の分散の輸送方程式を連立させて不安定流れ場に拡張し，その効果を検討した．

流体解析領域内で浮力により流れが成層化していたり，不安定となる領域が混在している流れ場の解析を求められることは多い．本報では、MKC モデルの乱流熱フラックスの減衰関数導出過程において，その値が代数的に評価された温度変動の分散 $\overline{\theta^2}$ を方程式を解いて評価すると共に，乱流フラックスの浮力効果を減衰だけでなく，促進にも有効となるようにモデルを修正した[文3)]（以下 MKCO モデル）．このモデルを用いて2次元非等温室内気流を解析して精密模型実験結果[文4),5)]及び他のモデルによる計算結果と比較し，精度を検証した．

2. モデル関数の導出

MKC モデルでは，浮力により鉛直方向のレイノルズストレスを減衰させる f_{BV}，鉛直方向の乱流熱フラックスを減衰させる $f_{B\theta}$ の二つの減衰関数を用いる．MKCO モデルでは，f_{BV} は MKC モデルを簡易に拡張し，$f_{B\theta}$ を新たに導出する[文3)]．導出は MKC モデルの減衰関数導出の手法[文2)]と同様，$\overline{u_i\theta}$の輸送方程式を基礎とし，フラックスの生産項において浮力生産により大きく変化する項に着目して行う．詳細は文献3）参照．$-\overline{u_3\theta}$は WET モデル[文6)]により次式で表される（添字3は鉛直方向，1，2は水平方向を表す）．

$$-\overline{u_3\theta}=\frac{k}{\varepsilon}\left\{C_{\theta1}\left(\overline{u_1u_3}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_1}+\overline{u_2u_3}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_2}+\overline{u_3^2}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3}\right)+C_{\theta2}\left(\overline{u_1\theta}\frac{\partial\overline{U_3}}{\partial x_1}+\overline{u_2\theta}\frac{\partial\overline{U_3}}{\partial x_2}+\overline{u_3\theta}\frac{\partial\overline{U_3}}{\partial x_3}\right)+C_{\theta3}g_3\beta\overline{\theta^2}\right\}$$

ここで，$C_{\theta1}=C_{\theta2}=C_{\theta3}=0.25$　　（1）

（1）式右辺の乱流フラックス $\overline{u_iu_j}$ を含む項で，浮力の影響を大きく受ける項に関しその影響を考慮する．モデル化の最終形態が温度の勾配輸送近似（EDM）となることを考慮し，（1）式の各項のうち，主要な生産項であり浮力により特に大きく影響されるものとして温度勾配による生産項中の $\overline{u_3^2}\,(\partial\overline{\Theta}/\partial x_3)$ 及び直接重力項を含む $C_{\theta3}g_3\beta\overline{\theta^2}$ の2項に着目してモデル化を行う．（1）式を次式に簡略化する．

$$-\overline{u_3\theta}\cong\frac{k}{\varepsilon}\left(C_{\theta1}\overline{u_3^2}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3}+C_{\theta3}g_3\beta\overline{\theta^2}\right)\qquad(2)$$

(2)式右辺第一項の $\overline{u_3^2}$ は MKC モデルと同じく次式で表す．

$$-\overline{u_3^2}\cong\frac{2C'}{3}\frac{k}{\varepsilon}P_k+\frac{4C'}{3}\frac{k}{\varepsilon}g_3\beta\overline{u_3\theta}-\frac{2}{3}k$$

ここで，$C'=0.22$　　（3）

*東京大学生産技術研究所　第5部
**東京大学生産技術研究所　附属計測技術開発センター

（2）式は本モデルでは上下方向の乱流熱拡散に関し，鉛直方向速度変動$\overline{u_3^2}$，鉛直方向温度勾配$\partial\overline{\Theta}/\partial x_3$及び温度変動が$\overline{\theta^2}$支配的となるものとしてモデル化することを示す．$\overline{\theta^2}$の項は乱流熱拡散が温度勾配がなくとも温度変動のより常に重力加速度と逆方向に生じ，特に安定流れにおいて負の勾配輸送が生ずる原因となり，不安定流れでは温度変動が大きくなることによる大きな乱流輸送を表す原因となる項なので，浮力流れでは特に$\overline{\theta^2}$評価の精度が重要となると思われる．本報では長野らと同じく$\overline{\theta^2}$の輸送方程式を解き，より精度よく乱流熱輸送を予測するモデルを考える．

$-\overline{u_3\theta}$を渦粘性モデルで表現するためMKCモデルと同様$f_{B\theta}$を導入する．

$$-\overline{u_3\theta}=\frac{\nu_t}{\sigma_\theta}f_{B\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3} \tag{4}$$

（2），（3），（4）式より，

$$\frac{\nu_t}{\sigma_\theta}f_{B\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3}$$
$$=\frac{k}{\varepsilon}\left\{C_{\theta1}\left(-\frac{2C'k}{3\varepsilon}P_k-\frac{4C'k}{3\varepsilon}g_3\beta\overline{u_3\theta}+\frac{2k}{3}\right)\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3}\right.$$
$$\left.+C_{\theta3}g_3\beta\overline{\theta^2}\right\} \tag{5}$$

$$f_{B\theta}=-\frac{2}{3}\frac{\sigma_\theta C_{\theta1}C'}{C_\mu}\frac{P_k}{\varepsilon}-\frac{4}{3}\frac{\sigma_\theta C_{\theta1}C'}{C_\mu}g_3\beta\frac{\overline{u_3\theta}}{\varepsilon}$$
$$+\frac{2}{3}\frac{\sigma_\theta C_{\theta1}}{C_\mu}+C_{\theta3}\frac{\sigma_\theta}{k}g_3\beta\frac{\overline{\theta^2}}{\partial\overline{\Theta}/\partial x_3} \tag{6}$$

ここで，$\overline{\theta^2}$の方程式を考える．

$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\alpha+\frac{\alpha_t}{\sigma_h}\right)\frac{\partial\overline{\theta^2}}{\partial x_j}\right\}-2\overline{u_j\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_j}-2\varepsilon_\theta \tag{7}$$

（7）式を解くに当たり，ε_θは温度場と速度場のタイムスケール比（$R=(\overline{\theta^2}/2\varepsilon_\theta)/(k/\varepsilon)$）が0.5で一定と仮定し注1)，$\varepsilon_\theta=(\varepsilon/k)\overline{\theta^2}$で評価する．

ここで，$\overline{\theta_e^2}$を局所平衡を仮定した時の温度変動と定義し，次式でモデル化する．

$$\overline{\theta_e^2}=-\frac{k}{\varepsilon}\overline{u_3\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_3}\left(\cong-\frac{k}{\varepsilon}\overline{u_j\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_j}\right) \tag{8}$$

（7）式を解いて得られた$\overline{\theta^2}$を，（8）式の$\overline{\theta_e^2}$とそこからの偏差分$\overline{\theta_v^2}$の和と考えると，

$\overline{\theta^2}=\overline{\theta_e^2}+\overline{\theta_v^2}=\overline{\theta_e^2}(1+C_v)$ （9） 但し，$C_v=\overline{\theta_v^2}/\overline{\theta_e^2}$ (10)

（8），（9），(10) 式を（6）式に代入すると，

$$f_{B\theta}=\frac{2}{3}\frac{\sigma_\theta C_{\theta1}}{C_\mu}-\frac{2}{3}\frac{\sigma_\theta C_{\theta1}C'}{C_\mu}\frac{P_k}{\varepsilon}$$
$$+\left\{\frac{4}{3}C_{\theta1}C'+C_{\theta3}(1+C_v)\right\}\frac{\sigma_\theta}{C_\mu}\frac{G_k}{\varepsilon} \tag{11}$$
$$=C_{B\theta1}-C_{B\theta2}\frac{P_k}{\varepsilon}+(C_{B\theta3}+2.5C_v)\frac{G_k}{\varepsilon}\ \text{注2)} \tag{12}$$

C_vは計算中の各時間ステップ毎に$\overline{\theta^2}$と$\overline{\theta_e^2}$から求める．

定数の決定もMKCモデルと同様に，浮力の影響がなく局所平衡（$P_k=\varepsilon$）が成り立つ時に$f_{B\theta}=1.0$になるよう，$C_{B\theta1}=1.37$，$C_{B\theta2}=0.37$とした．主な基礎式を表1に示す．

表1　低レイノルズ数型k-εモデル（MKCOモデル）注3)

$$\frac{D\overline{U_i}}{Dt}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{P}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial\overline{U_i}}{\partial x_j}-\overline{u_iu_j}\right)-g_i\beta\overline{\Theta} \tag{13}$$

$$\frac{D\overline{\Theta}}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha\frac{\partial\overline{U_i}}{\partial x_j}-\overline{u_i\theta}\right) \tag{14}$$

$$\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\}+P_k+G_k-\varepsilon \tag{15}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right\}+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon1}f_1P_k+C_{\varepsilon3}f_1G_k-C_{\varepsilon2}f_2\varepsilon) \tag{16}$$

$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\alpha+\frac{\alpha_t}{\sigma_h}\right)\frac{\partial\overline{\theta^2}}{\partial x_j}\right\}-2\overline{u_j\theta}\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_j}-2\varepsilon_\theta \tag{17}$$

$$-\overline{u_1u_3}=\nu_t\left(f_{BV}\frac{\partial\overline{U_1}}{\partial x_3}+\frac{\partial\overline{U_3}}{\partial x_1}\right) \tag{18}$$
$$-\overline{u_2u_3}=\nu_t\left(f_{BV}\frac{\partial\overline{U_2}}{\partial x_3}+\frac{\partial\overline{U_3}}{\partial x_2}\right) \tag{19}$$

$$f_{BV}=C_{BV1}-C_{BV2}\frac{P_k}{\varepsilon}+C_{BV3}\frac{G_k}{\varepsilon}\ \text{注4)} \tag{20}$$

その他のストレス成分は通常のEVM近似による。

$$-\overline{u_i\theta}=\alpha_tf_{B\theta}\left(\frac{\partial\overline{\Theta}}{\partial x_i}\right) \tag{21}$$

$$f_{B\theta}=C_{B\theta1}-C_{B\theta2}\frac{P_k}{\varepsilon}+(C_{B\theta3}+2.5C_v)\frac{G_k}{\varepsilon}\ \text{注4)} \tag{22}$$

$$\nu_t=C_\mu f_\mu(k^2/\varepsilon) \tag{23}$$
$$P_k=-\overline{u_iu_j}(\partial\overline{U_i}/\partial x_j) \tag{24}$$
$$G_k=-\overline{u_i\theta}g_i\beta \tag{25}$$

$$f_\mu=\left\{1-\exp\left(-\frac{1}{14}y^*\right)\right\}\left\{1-\exp\left(-\frac{1}{2.4}Rt^{3/4}\right)\right\}\left\{1+\left(\frac{1.5}{Rt^{5/4}}\right)\right\} \tag{26}$$

$$f_1=1.0 \tag{27}$$
$$f_2=\left\{1-\exp\left(-\frac{1}{3.1}y^*\right)\right\}^2\left[1-0.3\exp\left\{-\left(\frac{Rt}{6.5}\right)^2\right\}\right] \tag{28}$$

σ_k:1.4, σ_ε:1.4, σ_h:1.6, C_μ:0.09, $C_{\varepsilon1}$:1.50, $C_{\varepsilon2}$:1.90, $C_{\varepsilon3}$:1.50
C_{BV1}:1.36, C_{BV2}:0.36, C_{BV3}:0.72, $C_{B\theta1}$:1.37, $C_{B\theta2}$:0.37, $C_{B\theta3}$:3.23

表2　計算に用いたモデルと相違点注5)

	MKC	MKCO	MKCO-et	ANK	ANK-fb
f_{BV}, $f_{B\theta}$	有注4)	有注4)	有	無	有
$\overline{\theta^2}$	無	有	有	有	有
ε_θ	無	$\varepsilon_\theta=(k/\varepsilon)\overline{\theta^2}$	輸送方程式	輸送方程式	輸送方程式
Prt	0.9注6)	0.9注6)	0.9注6)	変数	変数

表3　境界条件（図1）

	速度	温度	k	$\overline{\theta^2}$	ε	ε_θ
流入	実験値	←	←	1×10^{-10}	$C_\mu k_{in}^{3/2}/0.5l_{in}$	1×10^{-10}
流出	実験値	Free-slip	←	←	←	←
壁	No-slip	実験値	No-slip	←	$2\nu\left(\frac{\partial\sqrt{k}}{\partial y}\right)^2$	$\alpha\left(\frac{\partial\sqrt{\overline{\theta^2}}}{\partial y}\right)^2$

表4　計算条件

メッシュ	直交メッシュ。(100+2)(X1)×(100+2)(X3)=10404
差分	QUICK(運動方程式). 1st order upwind(スカラー).
解法	ABMAC法。変数は有次元。

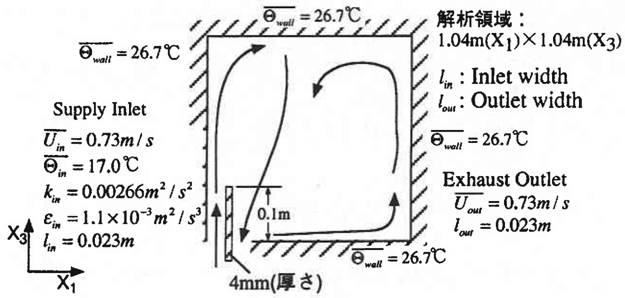


図1　解析対象

3. 解　析　概　要

本モデルでの解析は，Blayらによる2次元精密模型実験[文4),5)]を対象にした．また，本モデルとの比較を行うため，表2に示す通り合計5通りのモデルで計算を行った．解析対象を図1に，境界条件，計算条件を表3，4に示す．なお，解析は二次元で行った．

4. 解　析　結　果

4.1　風速分布

Blayの実験結果，MKCモデル及びMKCOモデルによる計算結果の風速ベクトルを図2，3に示す（計算結果のベクトルは間引いて表示）．MKCモデルとMKCOモデルの結果を比較すると，MKCモデルでは天井付近から中央部にかけて流れが大きく蛇行し，中央部では上向きの成分もみられるのに対し，同じ領域でMKCOモデルでは上向き成分は見られず，MKCOモデルの方が実験に近い流れ場である．

図4に$X_3=0.5$ mでの水平断面の鉛直方向風速$\overline{U_3}$を，図5に$X_1=0.5$ mの鉛直断面での水平方向風速$\overline{U_1}$を示す．ただし，MKCO-et, ANK, ANK-fbは間引いて表示している．図4から，浮力による乱流熱輸送の減衰・促進効果のないANKと減衰効果のみのMKCの計算結果は$X_1=0.4$～0.8 mで鉛直速度成分がほぼ0となり，$X_1=0.4$ m付近ではやや上向きの風速に，また$X_1=0.6$～1.04 mで実験より低めの分布になるのに対し，促進・減衰効果が考慮されているMKCO, MKCO-et, ANK-fbではこれらの部分が改善され，より実験に近い分布となっている．図5でも，減衰効果のみのMKC，促進・減衰効果無しのANKは$X_3=$0.2～0.5 mで，実験，MKCO, MKCO-et, ANK-fbに比べ負に大きい流速となり，促進・減衰を考慮したモデルによる結果が実験に近い結果となった．特にANK-fbが最

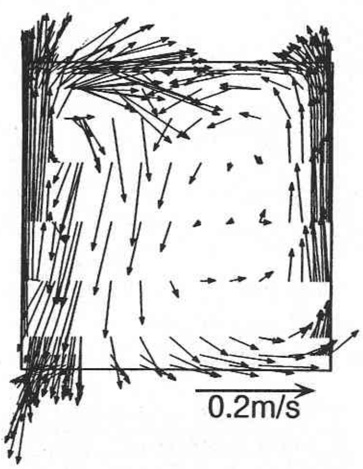
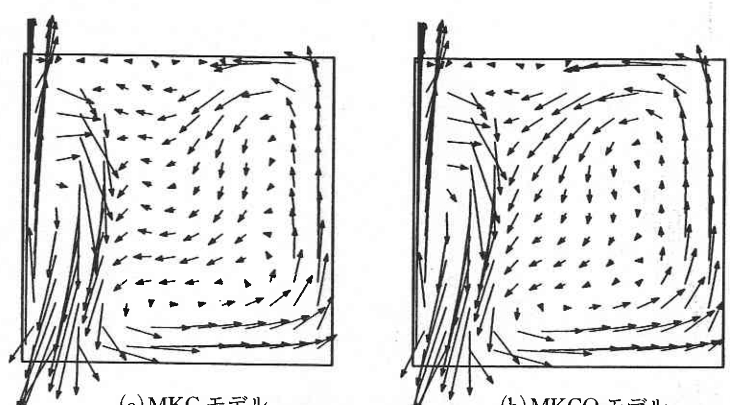


図2　実験結果



(a)MKCモデル　　(b)MKCOモデル

図3　計算結果

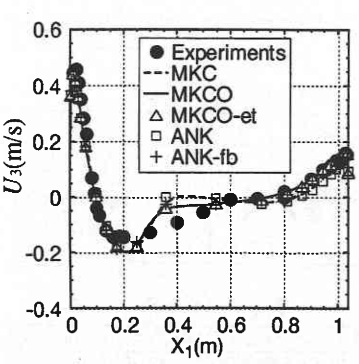


図4　$\overline{U_3}$の分布の比較

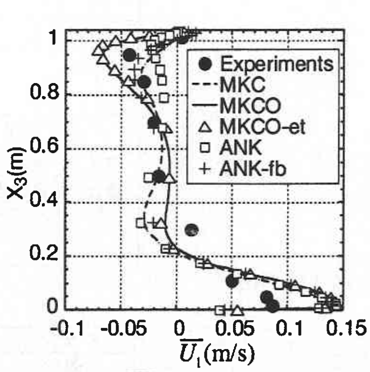


図5　$\overline{U_1}$の分布の比較

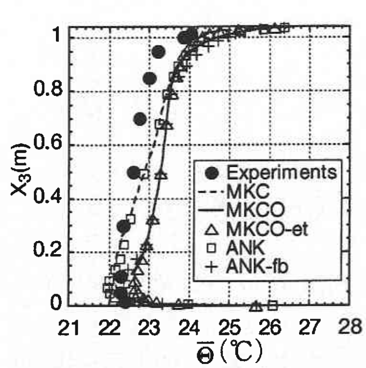
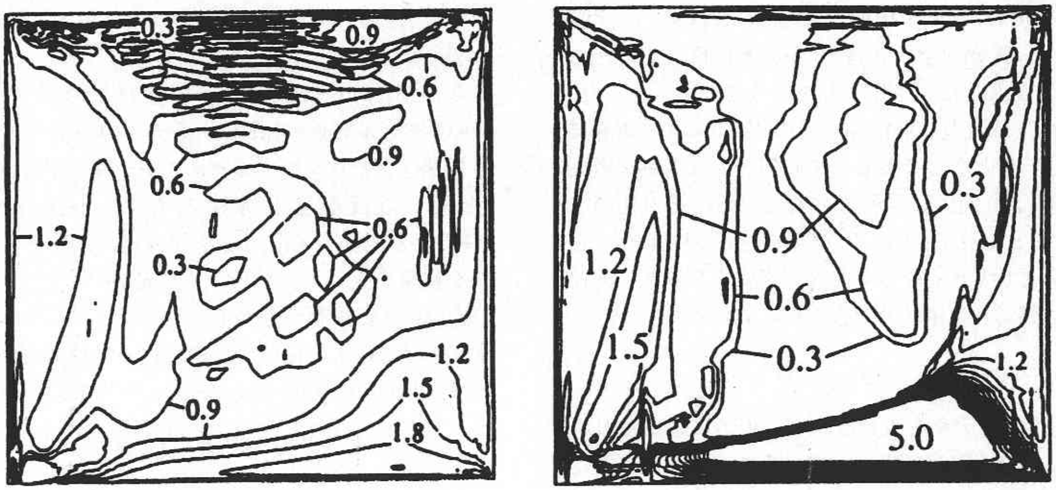


図6　$\overline{\Theta}$の分布の比較



(a) MKC モデル　　(b) MKCO モデル

図 7　$f_{B\theta}$の分布

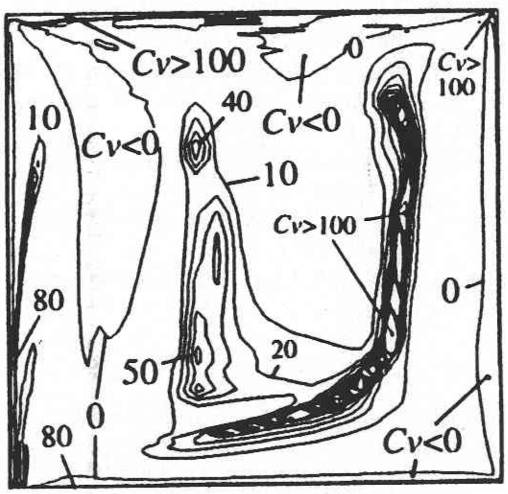


図 8　C_v の分布

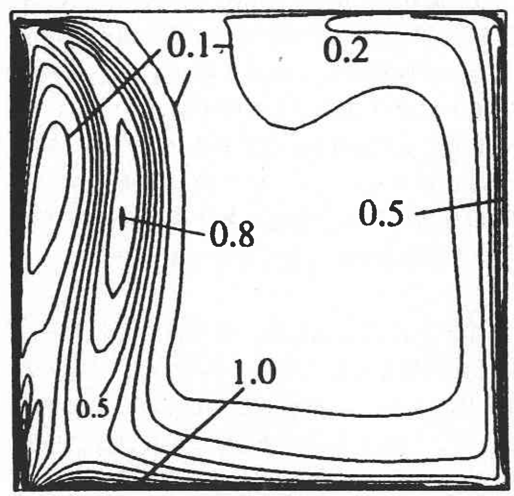


図 9　$\overline{\theta^2}$ の分布

も実験に近い．

4.2　温度分布

図 6 に図 5 と同じ断面での温度分布を示す（MKCO-et, ANK, ANK-fb は間引いて表示）．MKCO, MKCO-et, ANK-fb はほぼ同じ分布で，実験，MKC, ANK よりも全体的に高い温度分布となった．ただし ANK-fb は床面付近でより実験に近い分布となっている．これは ANK-fb が乱流プラントル数を温度 2 方程式モデルでより正確に評価しかつ浮力ダンピングを考慮した効果である．MKCO, MKCO-et, ANK-fb で温度が全体的に高くなったのは壁面からの対流熱伝達量が大きく評価されたためと考えられ，今後改善されるべき課題である．

図 4 ～ 6 の速度，温度分布より MKCO と MKCO-et の結果には殆ど差異が見られず，本流れモデルでは f_{BV}, $f_{B\theta}$ 算出時の ε_θ の評価は速度場と温度場の乱れの時間スケール比 R を一定とする評価で十分な事が示された．

4.3　MKCOモデルの考察

図 7 (a), (b) に MKC モデル，MKCO モデルでの $f_{B\theta}$ の分布を示す．但し，比較のため MKC モデルも $f_{B\theta}$ の上限を5.0とした時の結果である．1.0以上の領域が乱流拡散が促進される領域である．局所平衡を仮定した MKC モデルは $f_{B\theta}$ の最大値が約2.0であるのに対し，$\overline{\theta^2}$ 輸送方程式を解く MKCO モデルでは床面付近に5.0の領域が見られる．

図 8，9 に MKCO モデルでの C_v((10) 式)，$\overline{\theta^2}$ の分布を示す．C_v は各壁面極近傍，右側の渦の中心部及び吹出し噴流部で80以上の大きな数値となる．特に天井近傍は他の壁面と比較して値の大きい領域が広い．しかし，これら

の領域の$\overline{\theta^2}$は0.1以下と，床面付近の$\overline{\theta^2}$（約1.0）と比較すると小さい．C_vが大きいのは$\overline{\theta^2}$が大きい値となるためではなく，$\overline{\theta_e^2}$が非常に小さな値となるためである．また，C_vは左側渦の下降流及び各壁面近傍のC_vの大きい領域に隣接する部分で負となっており，この領域では局所平衡仮定の$\overline{\theta^2}$は実際より過大に見積もられている．その他の広い領域で0〜10となっている．$\overline{\theta^2}$は床面付近，吹出部，左側渦の下降流部で大きくなっており，不安定な領域，流速が速く温度差が大きな領域で大きくなっている．

5. ま と め

①MKC型k-εモデルを更に改良し，浮力による乱れの抑制効果だけでなく促進効果も考慮するモデルを開発した．新たなモデルは温度変動の分散の輸送方程式を連立させるものである．②このモデルを用いて2次元非等温室内気流の解析を行い，実験結果，MKC, ANK等による結果と比較したところ，流れ場に関してMKC, ANKよりも改善した結果が得られ，新たなモデルが有効である事が明らかとなった．また，今回導出したモデル関数を他のモデル（本報ではANK）に組み込んでも有効であった．③しかし，対流熱伝達量が実験より高めに計算されたため，今後さらに検討する必要がある．④モデル関数を求める際のε_θは，今回の解析対象では温度場と速度場の乱れの時間スケールを一定と仮定しての評価で十分であった．

注1）R＝0.5のようにRを流れ場，温度場によらず一定と仮定することが困難なことは多い．そのため，温度2場方程式モデル[文7)]のようにε_θを解くことも多い．本研究では，Rを場で一定と仮定するが，その値が解析結果に与える影響を考慮するためε_θを解いたケース（MKCO-et）に関しても検討を行った．

注2）(12) 式はC_vを除き，元のMKCモデルと同じでモデルの表現には一貫性がある．(6) 式をそのまま解いても計算を実行することは不可能ではないが$\partial\Theta/\partial x_3\to 0$の時の不安定性を避けるため、及び表現上の一貫性をとるため$\overline{\theta_e^2}$, $\overline{\theta_v^2}$を導入して (12) 式の表現を得た．

注3）k-εモデルの定数は文献8)に従ってチューニングされており，標準k-εモデルとは異なる．

注4）f_{BV}は$-\overline{u_1u_3}$, $-\overline{u_2u_3}$算出時に$0.1\leqq f_{BV}\leqq 5.0$, $f_{B\theta}$は$-\overline{u_3\theta}$算出時のみ$0.1\leqq f_{B\theta}\leqq 5.0$とし，それ以外は$f_{BV}=f_{B\theta}=1.0$とする．ただし，MKCモデルでは$-\overline{u_1u_3}$, $-\overline{u_2u_3}$, $-\overline{u_3\theta}$算出時で且つ安定成層化している（$G_k<0$）領域で$0.1\leqq f_{BV}\leqq 1.0$, $0.1\leqq f_{B\theta}\leqq 1.0$とする．それ以外は$f_{BV}=f_{B\theta}=1.0$.

注5）MKCOモデルと比較検討するモデルとして，MKCモデルの他，MKCOモデルの（7）式を解く際のε_θを輸送方程式を解いて求めたモデル（MKCO-et），安倍・長野・近藤温度2方程式モデル（ANK），ANKにMKCOと同様のf_{BV}, $f_{B\theta}$を組み込んだモデル（ANK-fb）の4種類を選んだ．MKCOとANK-fbを比較するとPrtの違いによる影響が分かる．

注6）浮力による拡散係数の増幅または減衰が生ずる領域では，Prtは$0.9f_{BV}/f_{B\theta}$となる．

（1996年10月31日受理）

参 考 文 献

文1） 村上・加藤・近本，1995，日本建築学会計画系論文報告集，476，pp. 9-17

文2） 近本・村上・加藤，1996，日本建築学会計画系論文報告集，481，pp. 67-74

文3） 大平・村上・加藤，1996，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 1253-1256

文4） Blay, D., Mergui, S. and Niculae, C., 1992, HTD-Vol. 213, Fundamentals of Mixed Convection, ASME

文5） Blay, D., 1993, 私信

文6） Launder, B. E., 1988, J. of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1112-1128

文7） 安倍・長野・近藤，1994，日本機械学会論文集（B），60，pp. 1743-1750

文8） 安倍・長野・近藤，1992，日本機械学会論文集（B），58，pp. 3003-3010

記 号

$\overline{U_i}$：i方向平均風速　　u_i：i方向風速変動

Θ：平均温度　　θ：温度変動

k：乱流エネルギー　　ε：kの消散率

ε_θ：$\overline{\theta^2}$の消散率　　ν_t：渦動粘性係数

ν：分子粘性　　R_t：乱流レイノルズ数（$k^2/\nu\cdot\varepsilon$）

β：体膨張率　　g_i：i方向重力加速度（$g_3=9.8\,\mathrm{m/s^2}$）

Prt：乱流プラントル数　　l：乱流長さスケール（$(k^{3/2}/\varepsilon)$）

f_{BV}：$\overline{u_iu_j}$に対する減衰，促進を表す関数

$f_{B\theta}$：$\overline{u_i\theta}$に対する減衰，促進を表す関数

f_μ：渦粘性係数に対する層流化のモデル関数

f_1, f_2：ε方程式中のモデル関数

u_ε：コルモゴルフの速度スケール（$(\nu\cdot\varepsilon)^{1/4}$）

η：コルモゴルフの長さスケール（$(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$）

y：最も近い壁面までの距離

y^*：コルモゴルフの速度スケールを用いた壁座標（$u_\varepsilon y/\nu=y/\eta$）