研究速報
特集 13
UDC 533.6.01：628.83：697.92

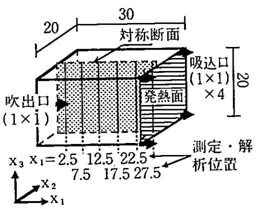
代数応力モデルによる3次元室内非等温流れ場の解析

3-D Study on Room Airflow with Buoyancy by Algebraic Stress Model

村上周三*・加藤信介**・近藤靖史***
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Yasushi KONDO

1. 序

本報では3次元非等温流れ場について代数応力モデル(ASM)を用いて数値解析を行い，実験結果およびk-εモデルの結果との比較からその有効性を検討する．ASMではレイノルズストレス($\overline{u_iu_j}$)および温度フラックス($\overline{u_i\theta}$)の輸送方程式を代数化して解き，$\overline{u_iu_j}$および$\overline{u_i\theta}$の生産項を正しく評価するため，今回の数値解析結果ではk-εに比べ，実験との対応が良かった[11]．



●本報では，諸量を吹出口幅L_0，吹出風速U_0，(吸込－吹出)温度差$\Delta\Theta_0$で無次元化．
●実験においては，$U_0=1.0$m/s，$L_0=0.04$m，$\Delta\Theta_0=12.2$°Cで
$A_r=\frac{-g_3\beta\Delta\Theta_0L_0}{(U_0)^2}=0.016$
室寸法は1.2m×0.8m×0.8m．
吹出噴流のR_e数は2.7×10^3．
●計算では，$L_0=U_0=\Delta\Theta_0=1.0$で，
$A_r=\frac{-g_3\beta\Delta\Theta_0L_0}{(U_0)^2}=-g_3\beta\doteqdot0.016$
としている．

図1　計算対象

表2　境界条件（表中の数値は無次元化されたもの）

(流入境界)　$U_{IN}=1.0$ $k_{IN}=0.0018$ $\ell_{IN}=0.013$ $\Theta_{IN}=0.0$
(流出境界)　$U_{OUT}=0.25$ k,ε,Θ：フリースリップ
(壁面境界)　壁面上のシアストレスは①式．壁面速度勾配は②式．k-方程式中の壁面第1セルのε($\overline{\varepsilon}$)は③式．ε-方程式中の壁面第1セルのε(ε_1)は④式で与える．

$$\frac{U_1}{(\tau_w/\rho)}(C_\mu^{1/2}\cdot k)^{1/2}=\frac{1}{\kappa}\ell_n\left[\frac{E\cdot(h_1/2)\cdot(C_\mu^{1/2}\cdot k)^{1/2}}{\nu}\right] \quad ①$$

$$\left\{(\nu+\nu_t)\cdot\frac{\partial U}{\partial y}\right\}\Big|_{wall}=\tau_w/\rho \quad ②$$

$$\overline{\varepsilon}=\frac{C_\mu^{3/4}\cdot k^{3/2}}{\kappa(h_1/2)}\cdot\ell_n\left[\frac{E\cdot(h_1/2)\cdot(C_\mu^{1/2}\cdot k)^{1/2}}{\nu}\right] \quad ③$$

$$\varepsilon_1=\frac{C_\mu^{3/4}\cdot k^{3/2}}{\kappa(h_1/2)} \quad ④$$

kはフリースリップ．発熱面で$\overline{u_1\theta}=-0.025$，その他の壁面では$u_n\theta=0.0$
$\kappa=0.4$，$C_\mu=0.09$，$E=9.0$，$\nu=1/R_e=1/2670$

表3　計算条件

メッシュ分割は35(x_1)×22(x_2)×54(x_3)．最小メッシュ幅は0.25，最大メッシュ幅は1.0．計算はx_2方向の対称性より，x_2方向の半分のみを計算対象とした．U_i,k,ε,Θの移流項はQUICK，ただし吹出口・吸込口近傍で風上差分．本報では$\overline{\theta^2}$による$\overline{u_i\theta}$の生産($G_{i\theta}$，(18)式)は温度勾配や速度勾配による生産((19)，(20)式)に比べ小さいものと考えてよいのでこれを無視した．

2. 計算概要[注1)]

計算対象（図1）とした居室モデルは，左側壁面中央部から冷気を吹き出し，右側壁面が発熱面でかつ4隅に

〈記号〉U_i：i方向平均流速　u_i：i方向流速の変動成分　P：圧力の平均値　k：乱流エネルギ　D_k：kの拡散項　P_k：kの生産項　G_k:kの浮力による生産項　ε：kの散逸率　Θ：温度の平均値　θ：温度の変動成分　g_i：i方向重力加速度　β：体膨張係数　$\overline{\theta^2}$：温度変動強度　ε_θ：$\overline{\theta^2}$の散逸項　P_{ij}：$\overline{u_iu_j}$の生産項　τ_w：壁面せん断応力　オーバーバは平均．δ_{ij}はクロネッカデルタ．

表1　代数応力モデル（ASM）の基礎式（非等温）[注2)]

(連続式)　$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0 \quad (1)$$

(運動方程式)　$$\frac{DU_i}{Dt}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}-\frac{\partial\overline{u_iu_j}}{\partial x_j}-g_i\beta\cdot\Theta \quad (2)$$

(k-方程式)　$$\frac{Dk}{Dt}=D_k+P_k+G_k-\varepsilon \quad (3)$$

(ε-方程式)　$$\frac{D\varepsilon}{Dt}=D_\varepsilon+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon1}P_k+C_{\varepsilon3}G_k-C_{\varepsilon2}\varepsilon) \quad (4)$$

(Θ-方程式)　$$\frac{D\Theta}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{u_j\theta}) \quad (5)$$

($\overline{\theta^2}$-方程式)　$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt}=D_\theta+P_\theta-2\cdot\varepsilon_\theta \quad (6)$$

($\overline{u_iu_j}$方程式)　$$(P_k+G_k-\varepsilon)\frac{\overline{u_iu_j}}{k}=P_{ij}+\Phi_{ij}+G_{ij}-\varepsilon_{ij} \quad (7)$$

($\overline{u_i\theta}$方程式)　$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{k}(P_k+G_k-\varepsilon)+\frac{1}{\overline{\theta^2}}(P_\theta-2\cdot\varepsilon_\theta)\right)\overline{u_i\theta}=P_{i\theta(1)}+P_{i\theta(2)}+\Phi_{i\theta}+G_{i\theta} \quad (8)$$

$$D_k=\frac{\partial}{\partial x_m}\left(C_k\overline{u_mu_e}\cdot\frac{k}{\varepsilon}\cdot\frac{\partial k}{\partial x_\ell}\right) \quad (9)\qquad D_\varepsilon=\frac{\partial}{\partial x_m}\left(C_\varepsilon\overline{u_mu_e}\cdot\frac{k}{\varepsilon}\cdot\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_e}\right) \quad (10)$$

$$D_\theta=\frac{\partial}{\partial x_m}\left(C_\theta\overline{u_mu_e}\cdot\frac{k}{\varepsilon}\cdot\frac{\partial\overline{\theta^2}}{\partial x_e}\right) \quad (11)\qquad G_k=-\overline{u_i\theta}\cdot g_i\cdot\beta \quad (12)$$

$$P_k=-\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (13)\qquad P_{ij}=-\overline{u_iu_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}-\overline{u_ju_k}\frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad (14)$$

$$P_\theta=-2\cdot\overline{u_i\theta}\frac{\partial\Theta}{\partial x_i} \quad (15)\qquad \varepsilon_{ij}=\frac{2}{3}\cdot\delta_{ij}\varepsilon \quad (16)$$

$$G_{ij}=-\overline{u_i\theta}\cdot g_j\cdot\beta-\overline{u_j\theta}\cdot g_i\cdot\beta \quad (17)\qquad G_{i\theta}=-g_i\cdot\beta\cdot\overline{\theta^2} \quad (18)$$

$$P_{i\theta(1)}=-\overline{u_ku_i}\frac{\partial\Theta}{\partial x_k} \quad (19)\qquad P_{i\theta(2)}=-\overline{u_k\theta}\frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad (20)$$

$$\Phi_{ij}=\Phi_{ij(1)}+\Phi_{ij(2)}+\Phi_{ij(3)}+\Phi^{\omega}_{ij(1)} \quad (21)\qquad \Phi_{ij(1)}=-C_1\frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_iu_j}-\frac{2}{3}\delta_{ij}k\right) \quad (22)$$

$$\Phi_{ij(2)}=-C_2\left(P_{ij}-\frac{2}{3}\delta_{ij}P_k\right) \quad (23)\qquad \Phi_{ij(3)}=-C_3\left(G_{ij}-\frac{2}{3}\delta_{ij}G_k\right) \quad (24)$$

$$\Phi^{\omega}_{ij(1)}=\sum_{w=1}^{wo}C'_1\frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_ku_m}\cdot n_k^{(w)}\cdot n_m^{(w)}\cdot\delta_{ij}-\frac{3}{2}\overline{u_ku_i}\cdot n_k^{(w)}\cdot n_j^{(w)}-\frac{3}{2}\overline{u_ku_j}\cdot n_k^{(w)}\cdot n_i^{(w)}\right)\cdot\frac{k^{3/2}}{C_e\cdot h_n^{(w)}\varepsilon} \quad (25)$$

$$\Phi_{i\theta}=\Phi_{i\theta(1)}+\Phi_{i\theta(2)}+\Phi_{i\theta(3)}+\Phi^{\omega}_{i\theta(1)} \quad (26)\qquad \Phi_{i\theta(1)}=-C_{i\theta1}\frac{\varepsilon}{k}\cdot\overline{u_i\theta} \quad (27)$$

$$\Phi_{i\theta(2)}=-C_{i\theta2}P_{i\theta(2)} \quad (28)\qquad \Phi_{i\theta(3)}=-C_{i\theta3}G_{i\theta} \quad (29)$$

$$\Phi^{\omega}_{i\theta(1)}=\sum_{w=1}^{wo}C'_{i\theta1}\frac{\varepsilon}{k}\cdot\overline{u_k\theta}\cdot n_k^{(w)}\cdot n_i^{(w)}\cdot\frac{k^{3/2}}{C_e\cdot h_n^{(w)}\varepsilon} \quad (30)$$

C_1：1.8 C_2：0.6 C_3：0.6 C'_1：0.5 C_k：0.22 C_ε：0.16 $C_{\varepsilon1}$：1.44 $C_{\varepsilon2}$：1.92 C_θ：0.15 $C_{\varepsilon3}$は$G_k>0$の場合1.44，$G_k\leqq0$の場合0.0．
$C_{i\theta1}$：3.0 $C_{i\theta2}$：0.5 $C_{i\theta3}$：0.3 $C'_{i\theta1}$：0.5 C_ℓ：2.5

*東京大学生産技術研究所　付属計測技術開発センター
**東京大学生産技術研究所　第5部
***民間等共同研究員　(株)日建設計

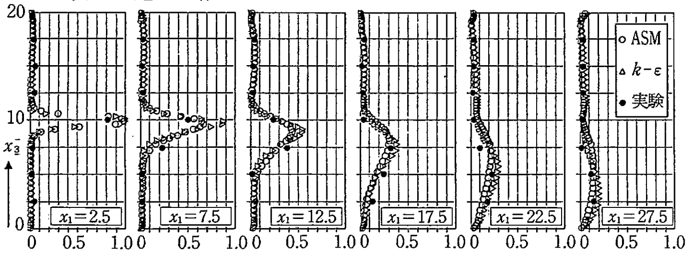


図2　スカラ風速（$\sqrt{U_1^2+U_2^2+U_3^2}$）分布の比較（中心断面）

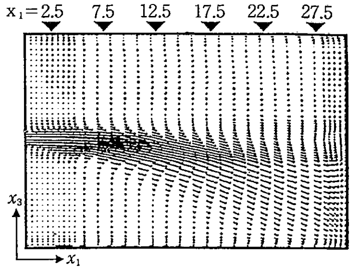


図3　風速ベクトル（ASM）

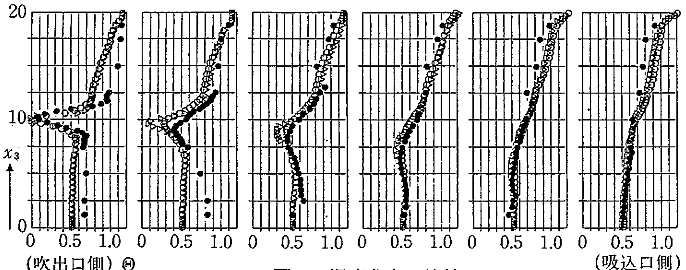


図4　温度分布の比較

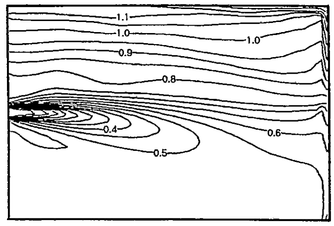


図5　温度分布（ASM）

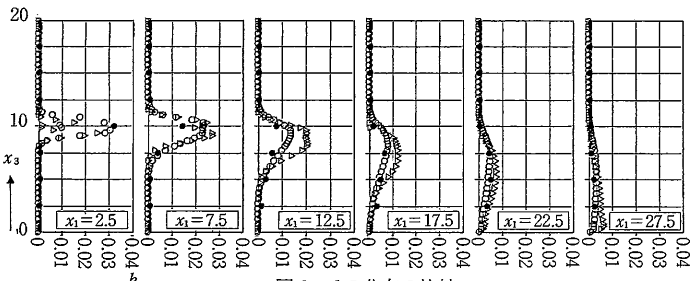


図6　kの分布の比較

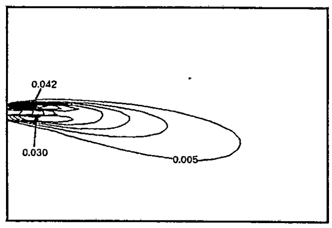


図7　kの分布（ASM）

吸込口を持つ[10)].

3. 結果と考察

3.1　平均風速（図2，3）

ASMの結果はk-εより噴流の中心部でやや風速が小さく，実験結果に近づいている．これは運動方程式中に現れる$\overline{u_iu_j}$の評価がASMのほうが妥当であることに起因すると考えられる（後述）．また温度分布がASMではk-εより滑らかである（後述）ため，風速に対する浮力の影響が小さく，k-εより噴流の降下がやや小さい傾向が見られる．

3.2　温度（図4，5）

温度についても噴流中心部でk-εより実験値に近づいている．これは後述の温度フラックス（$\overline{u_i\theta}$）の評価にASMとk-εでは大きな差があるためである．すなわちASMでは$\overline{u_i\theta}$を大きく評価する（後述）ため，温度の拡散がより活発であることによる．またASM，k-εの両者について吹出口上下の領域で実験値との対応が悪い[注3)]．

3.3　k（図6，7）

吹出口のごく近くの噴流部においては，ASMによるkの値はP_k，G_kを正しく評価している（後述）のでk-εより大きい．一方この領域を除いてはASMのほうがk-εよりkの値が小さく，全般的に実験値と良い対応を示す．

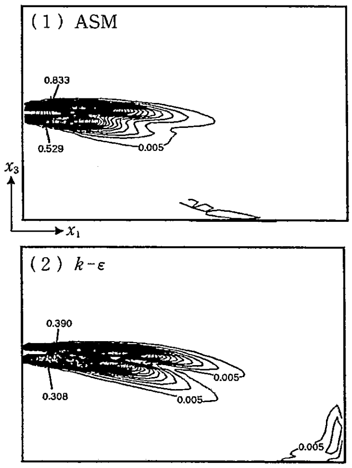


図8　P_kの比較

3.4　P_k（図8）

ASMの結果では吹出口近傍でk-εより，値が大きい．

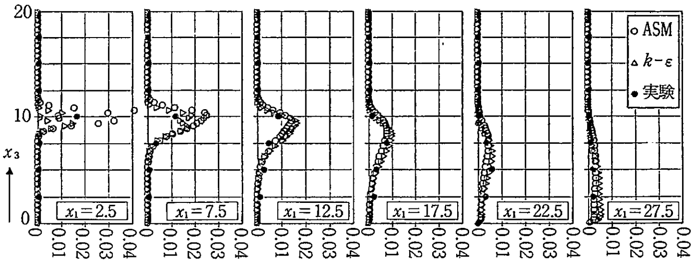


図9　$\overline{u_1^2}$の比較（中心断面）

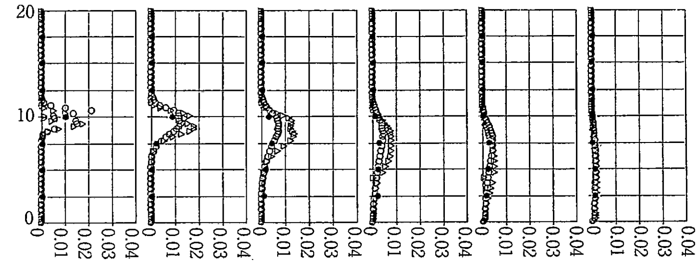


図10　$\overline{u_2^2}$の比較

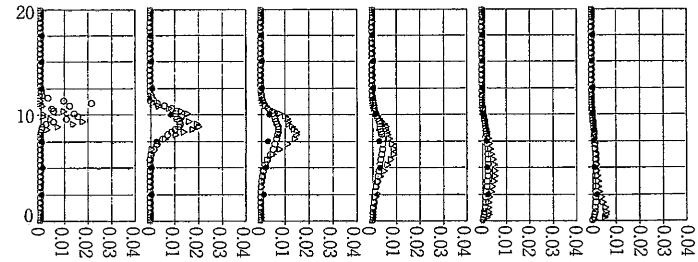


図11　$\overline{u_3^2}$の比較

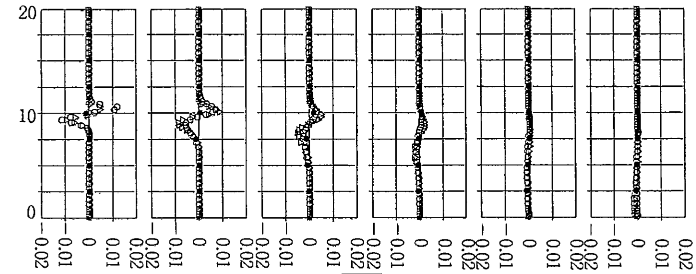
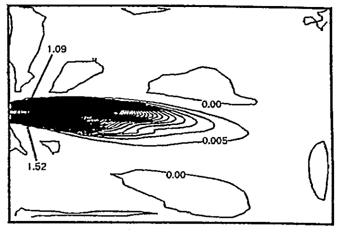
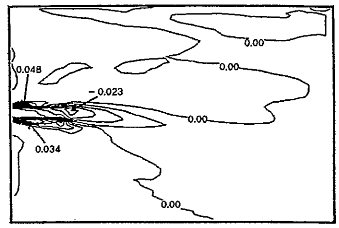


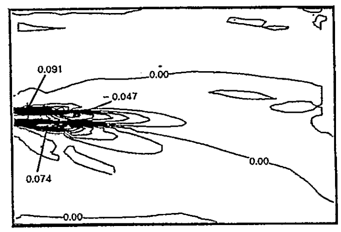
図12　$\overline{u_1u_3}$の比較



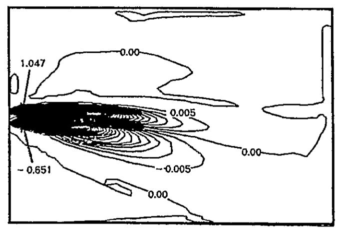
（1）P_{11}



（2）P_{22}



（3）P_{33}



（4）P_{13}

図13　P_{ij}の分布（ASM）

これはASMが$\overline{u_iu_j}$，特に$\overline{u_1u_3}$を正しく評価しているからである（後述）．

3．5　G_k（図14中の$\overline{u_3\theta}$に$-g_3\cdot\beta=0.016$を乗じたもの，(12)式）

G_kは今回の計算条件では壁面近傍を除くほとんどのところでP_kの1/100程度であり，kに対する影響は小さい．ただし，発熱面では$G_k>P_k$であり決して無視できない．

3．6　$\overline{u_iu_j}$（図9～12）

ASMの結果では$\overline{u_iu_j}$の各成分とも全般的に実験結果と良い一致を示す．特にレイノルズストレスの非等方性，すなわち，この場合，$\overline{u_1^2}$が$\overline{u_2^2}$，$\overline{u_3^2}$に比べて大きな値を示すことが実験結果に認められ，これをASMでは再現できている．これに対し，k-εではノルマルストレスを渦粘性の概念（EVM）を用いて$\overline{u_i^2}=-2\nu_t\dfrac{\partial U_i}{\partial x_i}+\dfrac{2}{3}k$（ただし，縮約をとらない）で表すため，等方的な結果となっている．ASMでは$\overline{u_iu_j}$のレベルに最も大きな影響を与えるその生産項P_{ij}（図13）を正しく評価するためであり，一方k-εでは等方的な渦粘性の概念によって$\overline{u_iu_j}$を評価するため，このような差が生じた．また$\overline{u_1^2}$の値が$\overline{u_2^2}$，$\overline{u_3^2}$より大きな値を持つこともP_{ij}（図13）を見ることにより，明

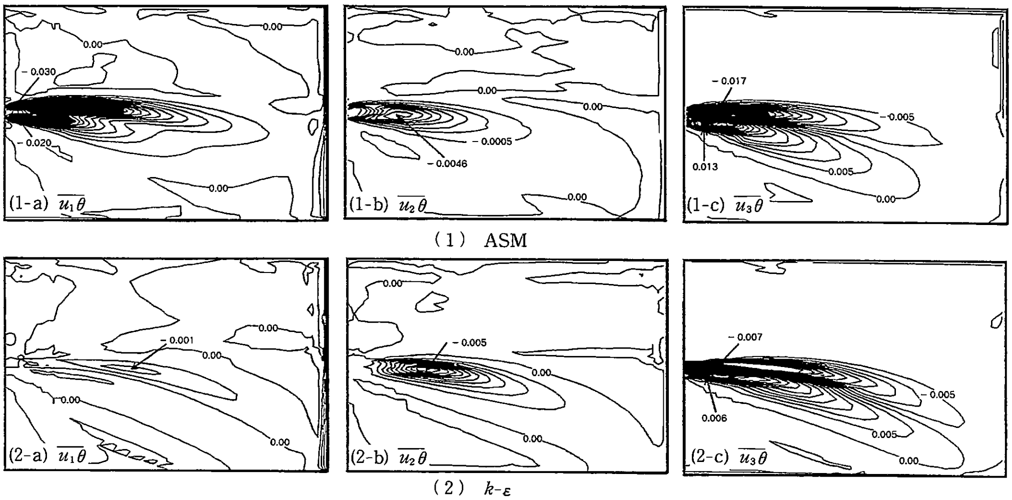


図14　$\overline{u_i\theta}$の比較（中心断面）

確に理解される．すなわち，$\overline{u_1^2}$の生産項P_{11}にはこの場のメインシアである$\frac{\partial U_1}{\partial x_3}$の項が含まれているため，$P_{11}$が大きくなり，$\overline{u_1^2}$が大きい値を持つ．

3.7　$\overline{u_i\theta}$（図14）

$\overline{u_i\theta}$についてもASMとk-εでは大きな差異が見られる．特に$\overline{u_1\theta}$の差が顕著である．これはk-εでは$\overline{u_1\theta}=\frac{\nu_t}{\sigma_t}\cdot\frac{\partial\Theta}{\partial x_1}$とし，この領域では$\frac{\partial\Theta}{\partial x_1}$が小さいため値が小さい．これに対し，ASMでは本来，$\overline{u_i\theta}$の輸送方程式((8)式)に現れる$\frac{\partial U_i}{\partial x_k}$，$\frac{\partial\Theta}{\partial x_k}$等によるすべての生産項（(19)，(20)式）を正しく評価しているためである．この場合，$\overline{u_1\theta}$の生産項にこの場の主要な速度・温度勾配である$\frac{\partial U_1}{\partial x_3}$，$\frac{\partial\Theta}{\partial x_3}$が含まれているため，$\overline{u_1\theta}$の値が大きくなる．このようにASMでは忠実に$\overline{u_i\theta}$の生産項を評価するため，$\overline{u_i\theta}$の値が正確なものとなり，この結果，前述の温度分布も実験結果に近づく．

4．結　　論

①噴流中の平均風速分布についてはASMのほうがk-εより実験と良く対応している．②噴流中の温度分布はASMのほうが実験値と良く対応している．これは温度フラックス($\overline{u_i\theta}$)の評価がASMではその生産項を正しく評価するため，正確であることによる．③k，$\overline{u_iu_j}$についてもk-εより実験結果との対応が良い．これはそれぞれの生産項P_k，P_{ij}を正しく評価するというASMの利点に基づく．

（1989年9月28日受理）

参 考 文 献

1)，2) 村上・加藤・近藤：応力方程式モデルによる室内気流解析（その1）（その2），建築学会大会，S63.10.
3)，4) 村上・加藤・近藤：応力方程式モデルによる室内気流解析（その3）（その4），空調学会，S63.9.
5) 村上・加藤・近藤：代数応力モデルによる室内等温・非等温流れ場の解析，第2回数値流体力学シンポ講演論文集，S63.12.
6) 近藤・村上・加藤：平均運動エネルギの輸送に対する流線の曲率の影響等に関する考察（ASM基づく），同上
7) 村上・加藤・近藤：代数応力モデルによる室内気流解析（2次元等温・非等温流れ場の検討）生産研究1989.1.
8) 近藤・村上・加藤：応力方程式モデルによる室内気流解析（その5），建築学会大会，1989.10.
9) 近藤・村上・加藤：応力方程式モデルによる室内気流解析（その6），空調学会，1989.10.
10) 中川・村上・加藤：非等温室内気流の数値解析に関する研究（その4），Viollet型k-εモデルに基づく水平非等温噴流の解析，空調学会，1989.10.
11) 近藤・村上・加藤：応力方程式モデルによる室内気流解析（その7），空調学会，1989.10.

（注1）　$P_k-\varepsilon<0$の場合はシアストレスの計算においてのみ，(7)式左辺をゼロとし，局所平衡を仮定した．また温度フラックス($\overline{u_i\theta}$)についても(8)式左辺が負となった場合は局所平衡を仮定して，本報の計算を行った．

（注2）　本報表1の基礎式を無次元化すれば，たとえば浮力項（(2)式右辺第3項）$-g_i\cdot\beta\cdot\Theta$は$A_r\cdot\Theta'$の表現になる．ただし，Θ'は無次元化された温度．

（注3）　吹出口上下の領域では図2，3よりわかるように風速がほぼゼロであった．このような領域で温度分布が実験と数値計算で対応が悪い理由は以下のようなものが挙げられる．すなわち，①このように風速が極めて小さい領域では2次流の発生等を含めて模型実験において十分な精度の確保が容易でないこと[10]．②今回の計算では高R_e数であることを前提とした乱流モデルを適用したが，この領域は高R_e数とはいえないことなどである．なお上記の点については今後さらに検討するが，今回は実験値のほうがやや理解し難い傾向が見られると判断している．