

# 空内気流に関する数値計算予測と実験の対応

Correspondence of Numerical Simulation to Model Experiment Concerning Room Air Flow

村上 周三\*・野村 豪\*\*・小峯 裕己\*  
Shuzo MURAKAMI, Takeshi NOMURA, Hiromi KOMINE,  
加藤 信介\*\*\*・佐藤 正章\*\*\*\*  
Shinsuke KATO and Masaaki SATO

単純な形状をした室内空間モデルを用いて、精密な室内気流の3次元的な測定を行い、同じく3次元的な数値計算による予測値との比較を行った。風速測定に際しては、タンデム型熱線風速計を用いた。また、数値計算を行うにあたって、乱流モデルを用い、その数値解法として、差分法を用いた。

## 1. 序

建築室内環境において問題となる暖房、冷房、換気等の計画を行うためには、室内気流の分布を予測する必要がある。予測方法は従来、模型実験(文-1),文-2),文-3)によるものが主であったが、最近では、計算機の進歩と共に、数値計算による予測法も検討されるようになった(文-4)~文-8)今回、単純な形状をした室内空間モデルを用い、実験と数値計算予測を詳細に比較したので、その結果を報告する。

## 2 模型実験概要

### 2.1 室内空間模型

Fig. 2-1に、用いた室内空間模型の形状を示す。また、Fig. 2-2に気流の吹出と吸込の状況を示す。吹出口に乱流格子を取り付けた実験と乱流格子を取り付けない実験の2種類を行った。なお、吹出風速は、6.5 m/sとして、吹出風速と吹出口幅によるRe数は、約65000である。

### 2.2 風速計の移動

Fig. 2-1に示す室内模型を、頑丈な鋼製の枠組の中に設置し、風速計の移動装置をその枠組の上に設置した。風速計の移動、回転はすべて室内模型の外部より操作した。

### 2.3 風速測定

風速の測定には、タンデム型熱線風速計(文-9)注1)を用いた。

風速データを sampling interval 10 msec, sampling number 4096 で採取し、注2) A-D 変換処理を行った後、Table. 2-1 に示される様な乱流統計量を求めた。

\* 東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター  
\*\* 東京大学工学部  
\*\*\* 東京大学大学院  
\*\*\*\* 鹿島建設株式会社

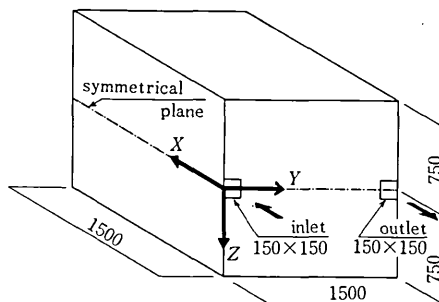


Fig. 2-1 Room model (dimensions in mm)

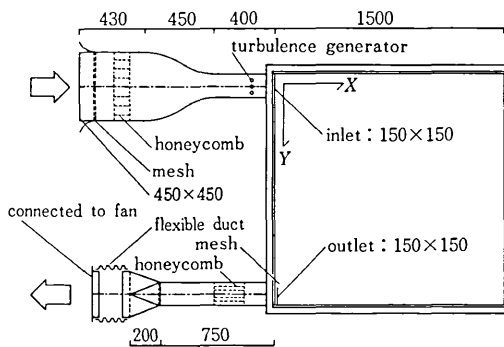


Fig. 2-2 Air flow system for inlet and outlet (dimensions in mm)

## 3. 数値計算概要

### 3.1 乱流モデルと数値計算手法

数値計算は、基礎方程式として平均流の運動方程式の他に、乱流に対する数学モデルとして、2方程式モデル(文-10)を用いている。このモデルによる3次元的な気流の解析法は、野村、松尾、貝塚、坂本らにより開発された(文-4)

この2方程式モデルによる方程式群をTable. 3-1に示す。このモデルは、乱流エネルギー $q$ の輸送方程式(3-3)と粘性消散率 $\epsilon$ の輸送方程式(3-4)を用いて、渦

Table. 2-1 Values measured in this experiment.

turbulence energy	$q = (\overline{u_x^2} + \overline{u_y^2} + \overline{u_z^2})/2$	(2-1)
mean value of dissipation rate	$\epsilon_M = (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/3$	(2-2)
mean value of length scale	$L_M = (L_x + L_y + L_z)/3$	(2-3)
mean value of eddy diffusivity	$K_M = (K_x + K_y + K_z)/3$	(2-4)
here, $T_i = \int_0^{\tau_0} R_i(\tau) d\tau$	characteristic time scale ( $\tau_0 : R_i(\tau_0) = 0$ )	
$R_i$	autocorrelation of $u_i$	
$L_i = \sqrt{\overline{u_i^2}} \cdot T_i$	length scale	
$\epsilon_i = \sqrt{\overline{u_i^2}}^3 / L_i$	dissipation rate	
$K_i = \sqrt{\overline{u_i^2}} \cdot L_i$	eddy diffusivity	
	(subscript $i = x, y, z$ )	

Table. 3-1 Equation for turbulence flow in case of two-equation( $q-\epsilon$ )model.

equation of continuity

$$\partial U_i / \partial x_i = 0 \quad (3-1)$$

momentum equation

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (3-2)$$

transport equation of  $q$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (q U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} \left( \frac{\partial q}{\partial x_j} \right) \right\} + \nu_t S' - \epsilon \quad (3-3)$$

transport equation of  $\epsilon$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{q} \nu_t S' - C_2 \frac{q \epsilon}{\nu_t} \quad (3-4)$$

$$S' = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-5)$$

$$\nu_t = q^{1/2} l = C_D q^2 / \epsilon \quad (3-6)$$

(numerical constants are assumed as follows

$$C_D \sim 0.09, C_1 \sim 1.59, C_2 \sim 0.18, \sigma_1 \sim 1.0, \sigma_2 \sim 1.3)$$

here

$U_i$  : mean velocity

$u_i$  : turbulence component

$q$  : turbulence energy ( $\frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ )

$\epsilon$  : dissipation rate ( $\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ )

$\nu_t$  : eddy viscosity

$l$  : length scale

$\Pi$  : total pressure ( $P + \frac{2}{3} \rho q$ )

$P$  : excessive pressure

$\nu$  : viscosity

$\rho$  : density

動粘性係数  $\nu_t$  を求めるものである。数値計算手法としては、MAC法<sup>文-4),文-11)</sup>を用いている。以上の基礎方程式群を吹出口速度  $U_0$  と吹出口幅  $L_0$  で無次元化し、MAC法に従って差分スキーム<sup>注3)</sup>を導き、数値計算を実行した。

なお、無次元化により、各変数は、 $U^* = U/U_0$ 、 $q^* = q/U_0^3$ 、 $\epsilon^* = \epsilon/(U_0^3/L_0)$ 、 $\nu_t^* = \nu_t/U_0 L_0$ 、 $l^* = l/L_0$ 、 $\Pi^* = \Pi$

$/\rho U_0^3$ 、 $x^* = x/L_0$ 、 $t^* = t/(L_0/U_0)$  となる。

また、模型実験による結果も、数値計算による予測値と比較するため、同様に、吹出口速度  $U_0$  と吹出口幅  $L_0$  で無次元化して示す。各値は、 $U^* = U/U_0$ 、 $q^* = q/U_0^3$ 、 $\epsilon_M^* = \epsilon_M/(U_0^3/L_0)$ 、 $K_M^* = K_M/U_0 L_0$ 、 $L_M^* = L_M/L_0$  の様に無次元化される。

3.2 計算条件

実験対象とした室内空間 (Fig. 2-1) に対し,  $20 \times 20$  の差分メッシュを設定した. 壁面境界条件としては, 速度に関しては, 壁面に隣接する第1セル (メッシュで囲まれた1立方体) の中心まで境界層が存在すると仮定し, その内部の速度分布が,  $1/7$ 乗則に従うとした. また, 乱流量に関しては,  $q$  に対し, 壁面における Free-Slip 条件を用い,  $l$  に対しては, 壁面近傍第1セルに,  $l = C_D^{1/4} \kappa h / 2$  ( $\kappa$ : カルマン定数,  $h$ : セルの一辺長さ,  $l$ ,  $C_D$  に関しては, Table. 3-1 参照) 与えた. 流入乱流量としては, 吹出口セルに,  $q^* = (q/U_0^2) = 0.005$ ,  $l^* = (l/L_0) = 0.1$  を与えた.

4. 平均量に関する実験と数値計算の対応

実験結果と数値計算結果を Fig. 4-2~Fig. 4-4 に示す.

A は実験結果, B は数値計算結果を示す. 実験に際して, 吹出口における乱流格子の有無による室内気流の差

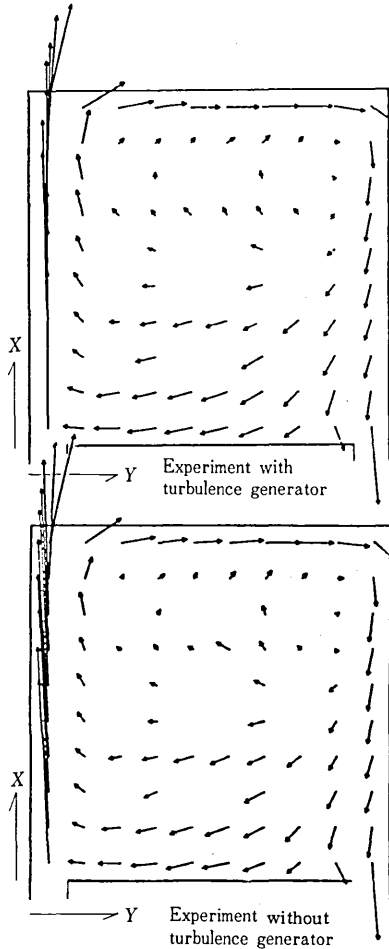


Fig. 4-1 U-V vector on X-Y plane at  $Z^* = 0.0$ , Comparison with and without turbulence generator

は, Fig. 4-1 に示すとおり, 殆んど見られなかったため, ここでは乱流格子を取り付けた実験の結果のみを示した.

流れの特徴をはっきり表している断面は, 対称面, Fig. 4-2 であり, 吹出噴流が対向壁に衝突し, 壁に沿って吸込口に向かう流れと, 吹出噴流に誘引され再循環していく様子が観察される. 吹出噴流の X-Z 断面 (Fig. 4-4) では, 噴流に対する Z 方向の誘引はなく, 壁に沿って噴流が拡散していく. 以上の様に, 実験と数値計算の結果は, 風速, 風向とも非常によく一致している.

また, X-Y 平面  $Z^* = 4.5$  (Fig. 4-3) に現れている小さなスケールの渦 (吸込口への大きな流れと, 噴流へ

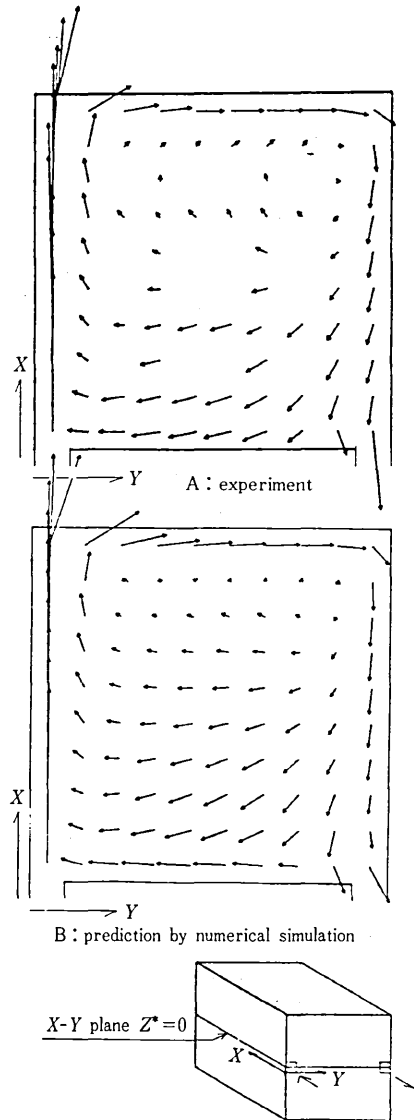
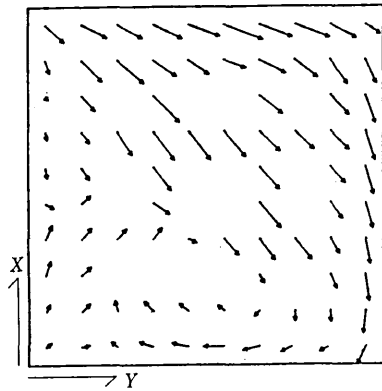
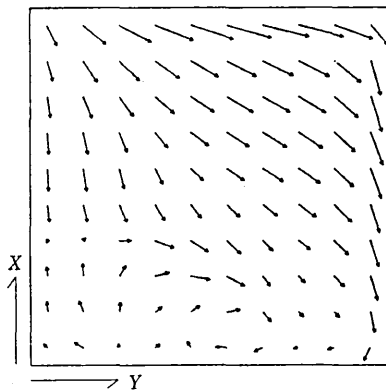


Fig. 4-2 U-V vector on X-Y plane at  $Z^* = 0.0$ , Comparison of experiment and prediction



A : experiment



B : prediction

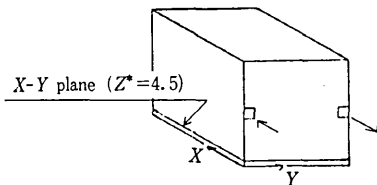
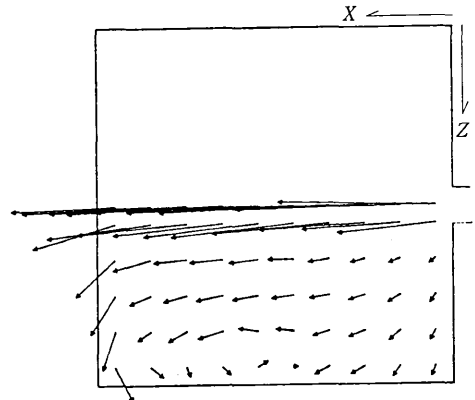
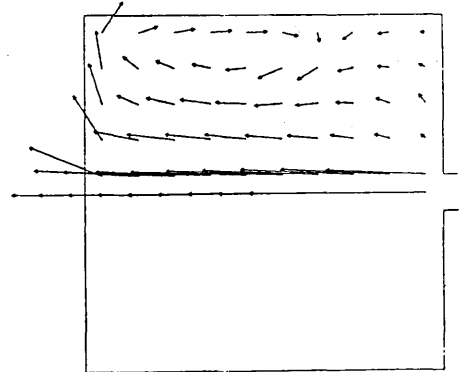


Fig. 4-3 U-V vector on X-Y plane at  $Z^*=4.5$



A : experiment



B : prediction

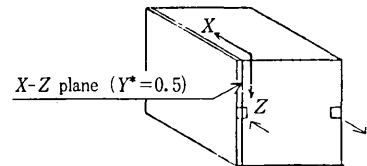


Fig. 4-4 W-U vector on X-Z plane at  $Y^*=0.5$

誘引されていく流れにより形成されると思われる。)に対しても、その位置は多少ずれているが、両者はよく一致している。

5. 乱流量に関する実験と数値計算の対応

各乱流量の分布を Fig. 5-1 ~ Fig. 5-4 に示す。Table. 2-1, Table. 3-1 に各乱流量の定義が示されている。  $q^*$  に関しては、実験と数値計算の定義は同一である。しかし、他の乱流量  $\epsilon_M^*$  と  $\epsilon^*$ ,  $K_M^*$  と  $\nu_t^*$ ,  $L_M^*$  と  $l^*$  に関しては、物理的意味は同じであると考えられるが、その定義は多少異なる。したがって、Fig. 5-4 ~ Fig. 5-4 については、各乱流量の分布の傾向を比較されたい。

1)  $q^*$  [experiment] -  $q^*$  [prediction],  $\epsilon_M$  (experiment) -  $\epsilon^*$  [prediction] の分布について (Fig. 5-1, Fig. 5-2) 噴流域と衝突域で大きな値を示し、また吹出噴流

の対向壁に沿った循環流でやや大きな値を示すという特徴は一致している。ただし、数値計算において、 $q^*$  は吹出口と吸込口近傍で大きく、 $\epsilon^*$  は吸込口近傍で大きく計算されている。この原因は、乱流エネルギーの輸送方程式中の生産項の近似の仕方にあると思われる。

2)  $K_M^*$  [experiment] -  $\nu_t^*$  [prediction],  $L_M^*$  [experiment] -  $l^*$  [prediction] の分布について (Fig. 5-3, Fig. 5-4) 噴流域、壁面近傍で小さな値を持ち、渦中心に行くに従って大きな値を持つという傾向は一致している。

前述のように、 $\epsilon_M^* - \epsilon^*$ ,  $K_M^* - \nu_t^*$ ,  $L_M^* - l^*$  は同一の定義により導かれた統計量ではないが、その物理的な意味はほぼ同一な物であると考えられる事が出来る。したがって

$$\epsilon^* [\text{prediction}] \sim \alpha \epsilon_M^* [\text{experiment}] \quad (5-1)$$

(ただし  $\alpha$ : 比例定数)

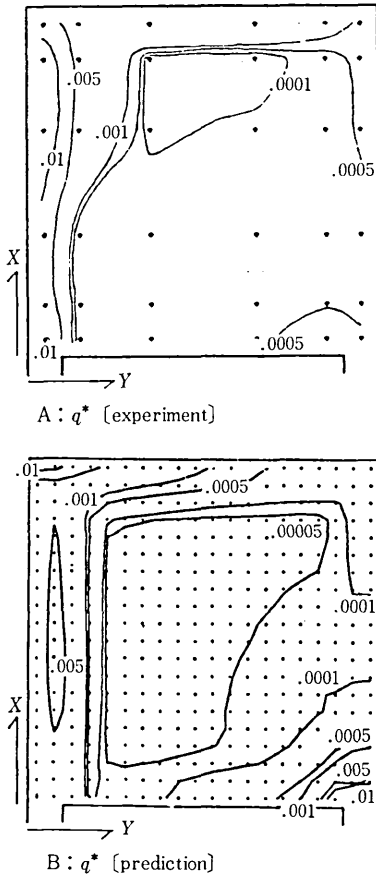


Fig. 5-1 Distribution of  $q^*$  on X-Y plane at  $Z^*=0.0$

と仮定する。また、乱れの等方性の仮定と、Table. 2-1, Table. 3-1 の  $\epsilon$  と  $\epsilon_M$  の定義より、 $K_M^* - \nu_t^* L_M^* - I^*$  の比例関係が次式のように導かれる。

$$I^* \text{ [prediction]} \sim 0.165 L_M^* / \alpha \text{ [experiment]} \quad (5-2)$$

$$\nu_t^* \text{ [prediction]} \sim 0.2 K_M^* / \alpha \text{ [experiment]} \quad (5-3)$$

Fig. 5-5 ~ Fig. 5-8 に各乱流量に対して、横軸に実験による値、縦軸に数値計算による値を取り、各測定点の値をプロットした。各測定点に対し、Fig. 5-9 に示される様なマークを用いてプロットした。Fig. 5-6 より、 $\epsilon \sim \alpha \epsilon_M$  の比例関係はほぼ  $0.1 > \alpha < 1.0$  の範囲で成り立っている事がわかる。これより、 $K_M^* - \nu_t^* L_M^* - I^*$  の対応の図においても、(5-2) 式 (5-3) 式の中で  $\alpha = 0.1$   $\alpha = 1.0$  とした場合の比例関係を示した。各図より以下のことがわかる。

1)  $q^* \text{ [experiment]} - q^* \text{ [prediction]}$  について (Fig. 5-5)

吹出口周辺、吸込口近傍以外では、 $q^*$  に関し実験と数値計算の結果は、ほぼ一致している。吹出口周辺、吹込

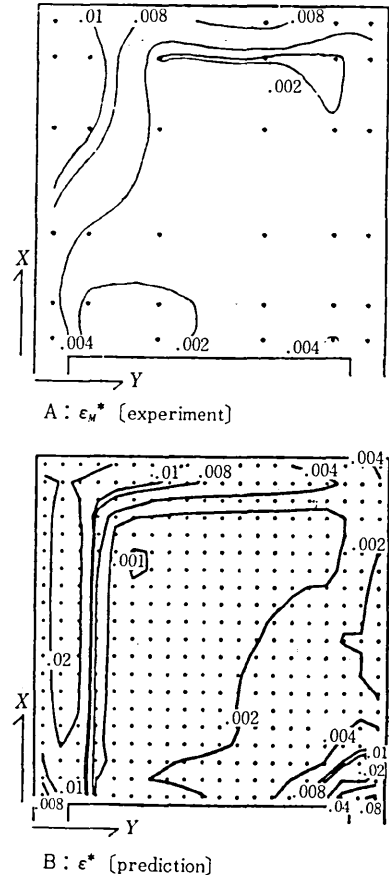


Fig. 5-2 Distribution of  $\epsilon_M^*$  (experiment) and  $\epsilon^*$  (prediction) on X-Y plane at  $Z^*=0.0$

口近傍では、数値計算の方がやや大きな値を示している。この原因は、先に述べたように、乱流エネルギーの輸送方程式中の生産項の近似の仕方にあると思われる。

2)  $\epsilon_M^* \text{ [experiment]} - \epsilon^* \text{ [prediction]}$  について (Fig. 5-6)

吹出周辺、吸込口近傍以外で  $\epsilon^*$  は、 $0.1 \epsilon_M^* < \epsilon^* < \epsilon_M^*$  の範囲にほぼ入っている。吹出口周辺、吸込口近傍では、この範囲に対し大きめに計算されている。

3)  $K_M^* \text{ [experiment]} - \nu_t^* \text{ [prediction]}$  について (Fig. 5-7)

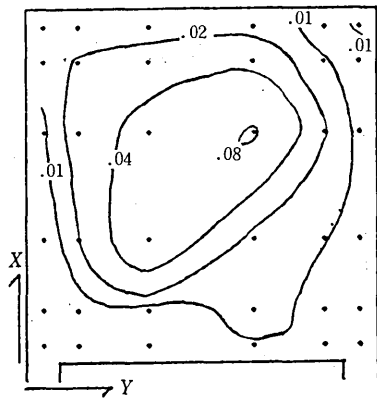
吹出口近傍以外では、 $\nu_t^*$  は、ほぼ  $0.2 K_M^* < \nu_t^* < 2.0 K_M^*$  の範囲に入っている。

4)  $L_M^* \text{ [experiment]} - I^* \text{ [prediction]}$  について (Fig. 5-8)

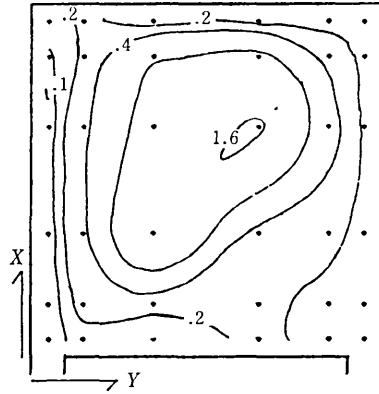
他の統計量と比べ、ばらつきが大きいのが、ほぼ  $0.165 L_M^* < I^* < 1.65 L_M^*$  の関係が成り立っている。

### 6. おわりに

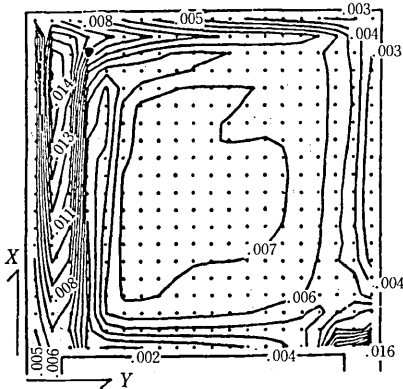
タンデム型熱線風速計による室内気流測定は、平均流が小さく、風速がたえず変化する室内気流の様相をよく捉え、室内気流の微細な構造を観察できる事が示された。



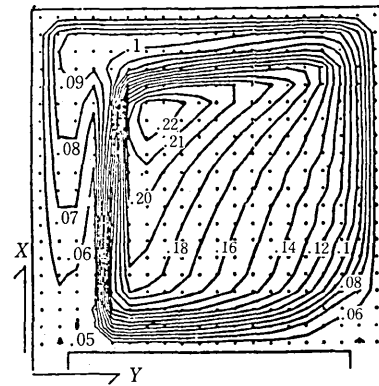
A :  $K_M^*$  (experiment)



A :  $L_M^*$  (experiment)



B :  $\nu_t^*$  (prediction)



B :  $l^*$  (prediction)

Fig. 5-3 Distribution of  $K_M^*$ (experiment) and  $\nu_t^*$  (prediction) on X-Y plane at  $Z^*=0.0$

Fig. 5-4 Distribution of  $L_M^*$ (experiment) and  $l^*$  (prediction) on X-Y plane at  $Z^*=0.0$

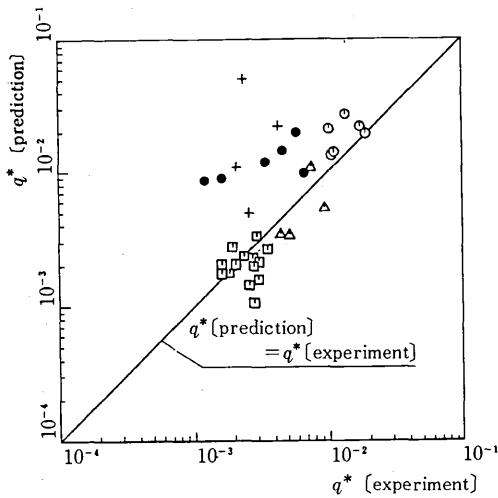


Fig. 5-5 Correspondence of  $q^*$ (experiment) to  $q^*$  (prediction)

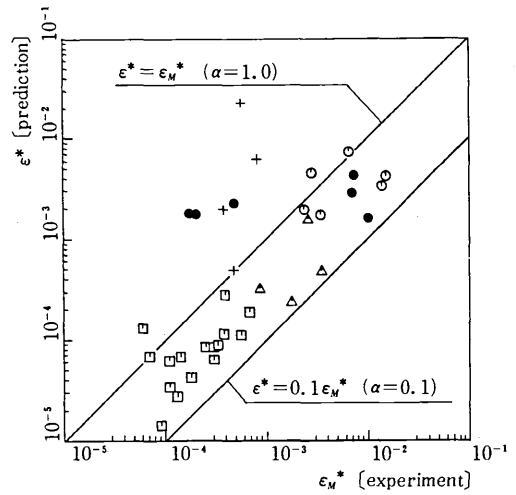


Fig. 5-6 Correspondence of  $\epsilon_M^*$ (experiment) to  $\epsilon^*$  (prediction)

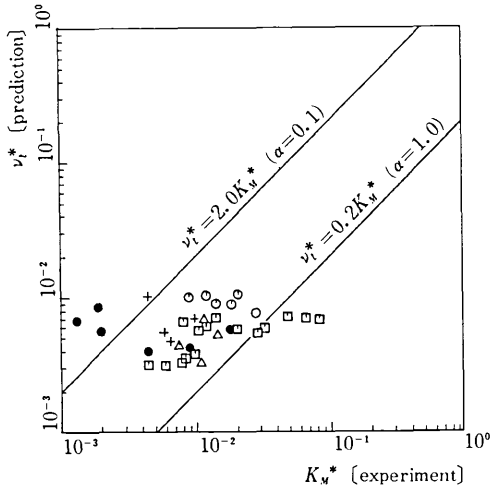


Fig. 5-7 Correspondence of  $K_M^*$  (experiment) to  $\nu_l^*$  (prediction)

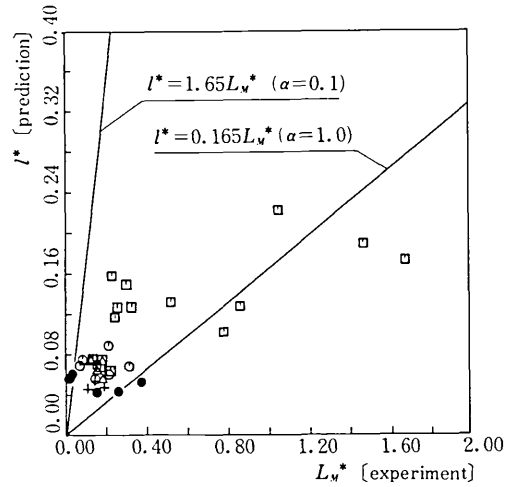


Fig. 5-8 Correspondence of  $L_M^*$  (experiment) to  $l^*$  (prediction)

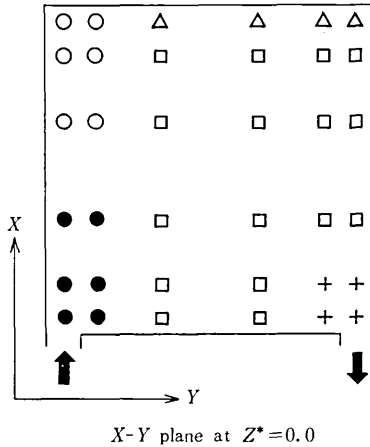


Fig. 5-9 Marks at each measuring point

また、同様に試みられた。2方程式モデル-MAC法を用いた数値計算結果は、平均流に対しては、微細な流れまで実験と極めてよく一致している。乱流量に関しては、未だ両者の間に差が大きく、今後の課題を残している。  
(1979年4月24日受理)

注1) このタンDEM型熱線風速計は、村上研究室で開発したもので、正負の風速変動の3方向成分の測定が可能である。指向性、応答性等の詳細については、(文-9)を参考されたい。

注2) Samplingの際、データレコーダーのノイズ除去のため、500 Hzのlow pass filterを用いている。

注3) 差分スキームとしては、 $q, \epsilon$ の移流項に対して風上差分を用いた以外は、中心差分を用いている。また、時間微分に関しては、Adams-Bashforthスキーム(文-5)を用いた。

文 献

- 文-1) 勝田高司, 土屋喬雄: 室内空気分布の模形実験法について, 日本建築学会関東支部第38回学術発表会(1967).
- 文-2) 勝田高司, 土屋喬雄, 市川智章, 正田良次: 集會室内の空気分布に関する実測および模型実験, 生産研究第21巻第10号(1969).
- 文-3) 勝田高司, 村上周三, 小林信行: 閉鎖的空間の気流性状に関する研究 第1報, 第2報, 日本建築学会論文報告集第234号, 第238号(1975).
- 文-4) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊: 室内空気分布の数値解法に関する研究1, 2, 3, 日本建築学会論文報告集231, 232, 238号(1975)
- 文-5) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊, 加藤信介: 室内空気分布の数値解法に関する研究(1)~(10), 日本建築学会大会学術講演梗概集(1974~1976), 同関東支部研究報告集(1975).
- 文-6) 山崎均, 浦野良美, 西田勝, 渡辺俊行, 三木信博: 2次元流れの数値解と可視化実験, 日本建築学会論文報告集240号(1976).
- 文-7) 吉川暲, 山口克人: 室内気流の数値解析, 空気調和衛生工学vol. 48 No. 10 (1974).
- 文-8) 土屋喬雄, 瀬戸裕直: 室内熱対流の数値計算, 日本建築学会関東支部研究報告集(1977).
- 文-9) 村上周三, 小峯裕己: タンDEM型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定, 生産研究第30巻第8号(1978).
- 文-10) B. E. Launder and D. B. Spalding: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, 1972.
- 文-11) Francis H. Harlow and J. Eddie Welch: Numerical Calculation of Time-dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Surface, The Physics of Fluids, Vol. 8, No. 12, 1965.