

室内気流に関する数値計算予測と実験の対応 (続報)

壁表面に凹凸を設けた場合の気流性状

Correspondence of Numerical Simulation to Model Experiment (Part 2)
Air Distribution in Room Model Bounded with Rough Walls

村上周三*・加藤信介**

Shuzo MURAKAMI and Shinsuke KATO

室内気流を対象とし、十分乱れた3次元流で、精密な模型実験と乱流の数学モデルを基礎式とする数値解析を行い、比較検討する。前報は、室内壁面が比較的滑らかな場合に関する報告しているが、今回は、より実際の居室に近い状態を想定して、壁面に比較的大きな凹凸を並べた場合に関し、実験と数値解析を行っている。凹凸の影響により、平均流が若干変化するほか、乱流エネルギーが減少する現象を、実験と数値解析の双方で観察している。

1. 序

空調・換気設備により最適な室内空気分布を得ようとするとき、室内気流の様相をあらかじめ設計段階で予測しておくことが必要となる。本研究は、こうした室内空気分布予測法の中で、乱流の数学モデルを数値解析により解き、室内気流を予測する手法を扱う。

前報¹⁾では、2方程式型の乱流モデル²⁾をMAC法 (the Marker and Cell Method)³⁾により解析する計算モデルが⁴⁾、精密な模型実験結果と良く対応するという結果を報告したが、本報 (続報) では、流れの境界条件を多少変化させた場合について検討を行う。すなわち、実際の室内気流が、家具等、壁面や床面等に並べられた流れの障害物により、少なからず影響を受けることに着目し、この点から壁面にラフネスを設置した場合の実験および数値解析を行い、両者を比較検討するものである。

2. 模型実験概要

2.1 居室模型と乱流統計量の算出

用いた居室模型および風速測定法は前報¹⁾と同じである。Fig. 2-1 に居室模型の形状、Fig. 2-2 に気流の吹出と吸込の状況を示す。風速測定は、前報と同じくタンデム型熱線風速計⁵⁾を用いている。同熱線風速計の出力を1 kHzのローパスフィルターで処理した後、サンプリング周期6 m sec.でA-D変換し、総数8192個(約50秒の観測時間に相当)のデータとし、これより統計量の算出を行う。以下、本研究で算出した乱流統計量の定義を示す⁶⁾(ただし瞬時風速を $\tilde{u}_i(t)$ 、 $i=x, y, z$ とする。また、同一項で同じ添字が現れても、特に示す場合を除いて縮約をとらない)。

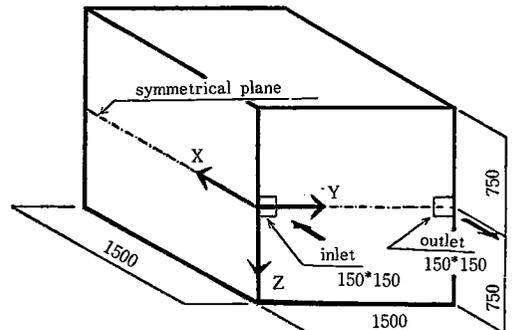


Fig. 2-1 Room model (dimension in mm)

$$i \text{ 方向の平均風速 } U_i = \overline{\tilde{u}_i(t)} \text{ (m/s)} \quad (2-1)$$

$$i \text{ 方向の速度変動 } u_i(t) = \tilde{u}_i(t) - U_i \text{ (m/s)} \quad (2-2)$$

$$i \text{ 方向の速度変動の標準偏差 } \sqrt{\overline{u_i(t)^2}} \text{ (m/s)} \quad (2-3)$$

$$i \text{ 方向の速度変動の自己相関 } R_i(\tau) \text{ (m}^2/\text{s}^2) \quad (2-4)$$

$$i \text{ 方向の特徴時間 } T_i = \int_0^{\tau_0} R_i(\tau) d\tau \text{ (s)} \quad (2-5)$$

$$\tau_0 : R_i(\tau_0) = 0$$

$$i \text{ 方向の特徴長さ } L_i = \sqrt{\overline{u_i(t)^2}} \cdot T_i \text{ (m)} \quad (2-6)$$

$$i \text{ 方向の渦動粘性係数 } K_i = \sqrt{\overline{u_i(t)^2}} \cdot L_i \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (2-7)$$

$$i \text{ 方向の速度変動の標準偏差、特徴長さで評価した乱流散逸}$$

$$\epsilon_i = \sqrt{\overline{u_i(t)^2}}^3 / L_i \text{ (m}^2/\text{s}^3) \quad (2-8)$$

$$\text{乱流エネルギー } q = \frac{1}{2} \sum_i \overline{u_i(t)^2} \text{ (m}^2/\text{s}^2) \quad (2-9)$$

$$E_i \text{ の 3 方向平均 (乱流散逸) } \epsilon_M = \frac{1}{3} \sum_i \epsilon_i \text{ (m}^2/\text{s}^3) \quad (2-10)$$

$$L_i \text{ の 3 方向平均 (特徴長さ) } L_M = \frac{1}{3} \sum_i L_i \text{ (m)} \quad (2-11)$$

$$K_i \text{ の 3 方向平均 (渦動粘性係数) } K_M = \frac{1}{3} \sum_i K_i \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (2-12)$$

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 東京大学工学部

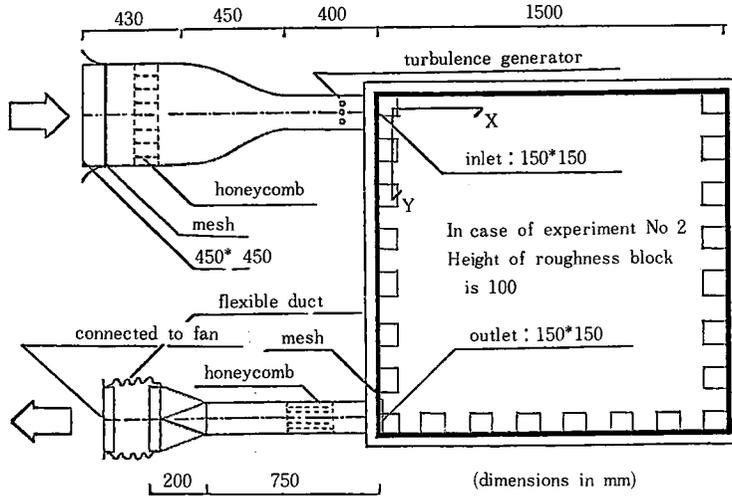


Fig. 2-2 Air flow system for supply inlet and exhaust outlet

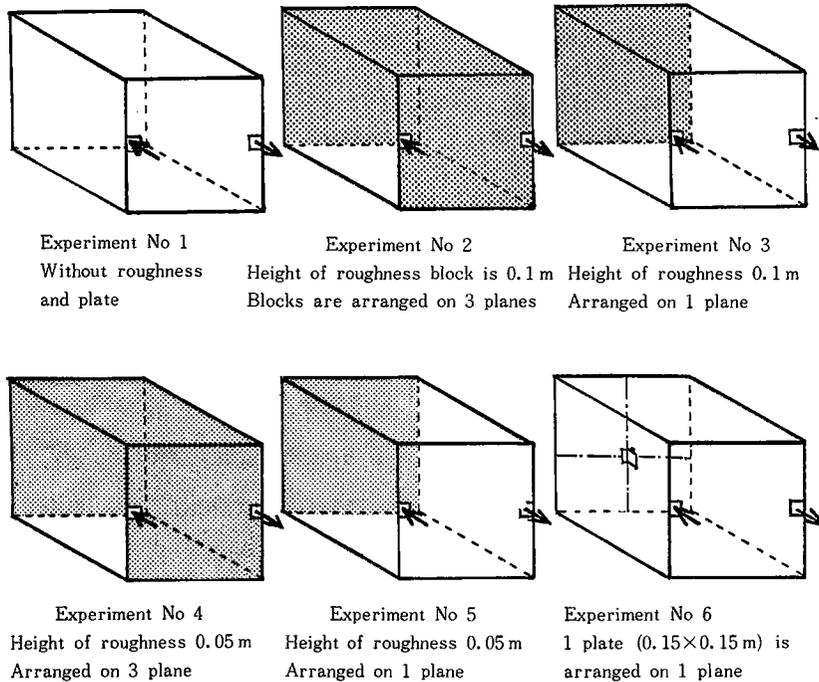


Fig. 2-3 Varieties of experiments Roughness blocks are arranged on gray-colored planes

以上算出された結果は、吹出口速度 U_0 と吹出口幅 L_0 で無次元化して示す。無次元化により各値は、 $U^* = U/U_0$, $q^* = q/U_0^2$, $\epsilon_M^* = \epsilon/(U_0^3/L_0)$, $K_M^* = K_M/(U_0 \cdot L_0)$, $L_M^* = L_M/L_0$, $x^* = x/L_0$ 等々となる。

2.2 室内壁面に設けた凹凸

室内空間の大きさを示すスケールに対し、一桁小さいスケールを持つ凹凸を壁面に並べた場合の室内気流の性状を観察する。今回の実験では、1.5m×1.5m×1.5mの

室内空間に対し、一辺の長さが0.1mの立方体および0.05mの立方体のラフネスブロックを1ないし3壁面に千鳥格子状に配列した場合の室内気流を観察する。0.1m角のラフネスの場合は、0.2m間隔で、0.05m角のラフネスの場合は0.1m間隔で、ラフネスを壁面に均等に設置する。Fig. 2-3に示すように、ラフネスの大きさおよび設置した壁面数の違いにより4種類の実験 (Fig. 2-3 中 Experiment No 2 ~ Experiment No 5) を行い、さら

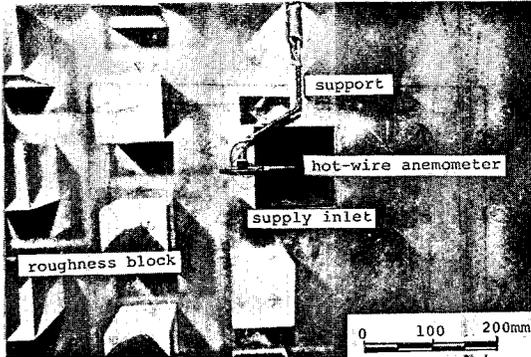


Fig. 2-4 Photo of roughness blocks and anemometer at supply inlet

にラフネスを設置せず、0.15m角のプレート(肉厚3mm)1枚を1壁面にのみ設置したもの(Experiment No.6)、およびラフネス、プレートとも設置しないもの(Experiment No.1)を加えて、合計6種類の実験を行っている。Fig. 2-4に、吹出口付近のラフネス(0.1m角)の設置状況、およびタンデム型熱線風速計測風プローブおよびサポート部分を示す。

なお、吹出口での流入気流は、名実験とも、約6m/sとし、吹出風速と吹出口幅による Reynolds 数は、約6万として模型室内の風速測定を行っている。

3. 数値計算概要

3.1 乱流モデルの基礎方程式

数値計算予測は、前報¹⁾と同じく $q-\epsilon$ 型の2方程式乱流モデル²⁾を基礎方程式とし、MAC法³⁾に準じて差分式を導き、解いている。以下、基礎方程式を示す。(ただし、同一項で同じ添字が2度現れた場合は縮約をとる。Einstein の総和則)

連続の式

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

平均流の運動方程式

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

乱流エネルギー q の輸送方程式

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

乱流散逸 ϵ の輸送方程式

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

ただし、

$$S' = (\partial U_i / \partial x_j) \cdot (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i) \quad (3-5)$$

ここで、渦動粘性係数 ν_t は、乱流エネルギー q および乱流散逸 ϵ を用いて定義する。

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

ただし、 l は、乱れの長さスケールである。また、上式中の定数は

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

とする。²⁾

なお、実験と同様に数値計算でも、吹出口速度 U_0 および吹出口幅 L_0 で無次元化して計算の実行および結果の表示を行う。無次元化により各変数は、 $U^* = U/U_0$, $q^* = q/U_0^2$, $\epsilon^* = \epsilon/(U_0^3/L_0)$, $\nu_t^* = \nu_t/(U_0 \cdot L_0)$, $x^* = x/L_0$ 等々となる。

3.2 計算条件

数値計算は、実験対象とした室内空間 (Fig. 2-1) を $20 \times 20 \times 20$ の差分メッシュに分割する。また、計算境界条件は、ラフネスを設置した壁面を除いて前報と同じである。

i ラフネスを設置しない壁面……壁近傍の速度分布がベキ乗則に従うとし(ベキ指数は1/7を用いる)、速度の境界条件を与える。また乱流エネルギーは、壁に対して法線方向勾配を零とし (free slip) 乱れの長さスケール l は、 $l = C_D^{1/2} \cdot x \cdot z$ (x :カルマン定数, z :壁面からの距離, $C_D = 0.09$) として、乱れの境界条件を与える。²⁾

ii 吹出口および吸込口……一様な吹出速度および吸込速度を与える。また乱れの境界条件は、吸込口では、乱流エネルギー、乱流散逸とも、その吸込面法線勾配を零とし、吹出口では、一定値 (乱流エネルギー $\dot{q}^* = q/U_0^2 = 0.005$, 乱れの長さスケール $l^* = l/L_0 = 0.1$) を与える。²⁾

iii ラフネスを設置した壁面……対数法則を利用した境界条件を用いる。壁面に設置したラフネスにより生ずる流れは、原則的には差分メッシュをラフネスの大きさより十分小さく分割すれば、解析できる。³⁾が、分割数の増加により計算量が極めて多くなり実際上、不利である。しかし、こうした個々のラフネス付近の詳細な流れを知るのではなく、流れ全体の様相を知りたい場合には、比較的大きな分割でも、計算モデルで再現することが可能である。ただし、その場合には、乱流エネルギー等の乱れの境界条件を適切に与えるという工夫が必要とされる。平板境界層の対数法則は、平均速度勾配、乱流エネルギー等に対するラフネスの影響を、ラフネスパラメーター1つにモデル化した点が、たいへん簡便である。室内壁面のラフネスのモデル化に際して今回、これを利用する

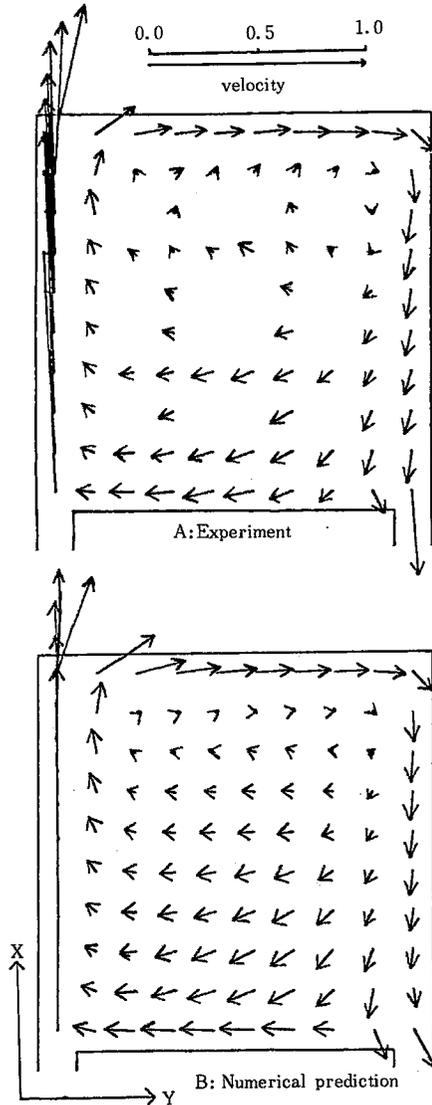


Fig. 4-1 U-V vector on X-Y plane at Z*=0.0, in case of experiment No. 1
Comparison of experiment and numerical prediction

が、室内気流のように十分な助走距離もなく、圧力勾配も複雑な所で、対数法則が適用できるという理論的根拠はない。対数法則の成立する境界層では次式が成立する。

$$U = (u^*/\kappa) \cdot \ln(z/z_0) \quad u^*: \text{摩擦速度} \quad (3-7)$$

$$\nu_t = u^* \cdot \kappa \cdot z \quad \kappa: \text{カルマン定数} \quad (3-8)$$

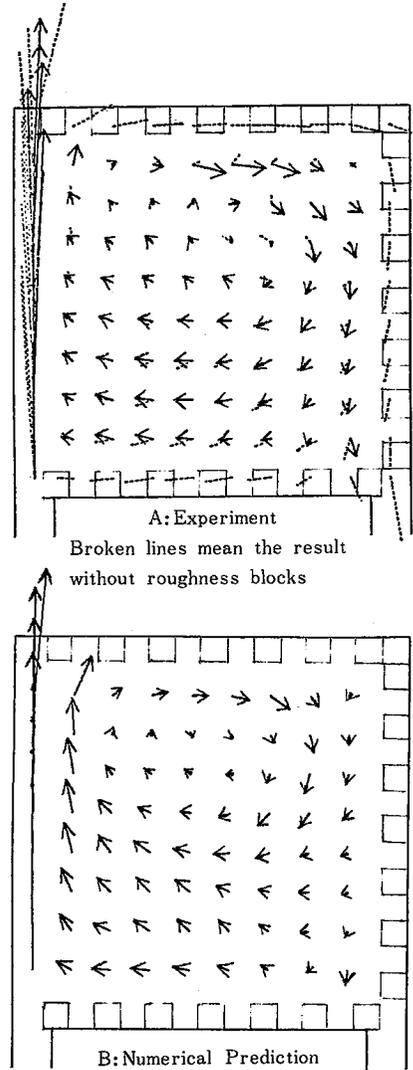


Fig. 4-2 U-V vector on X-Y plane at Z*=0.0, in case of experiment No. 2

$$\nu_t \partial U / \partial z = u^{*2} \quad z_0: \text{ラフネスパラメーター} \quad (3-9)$$

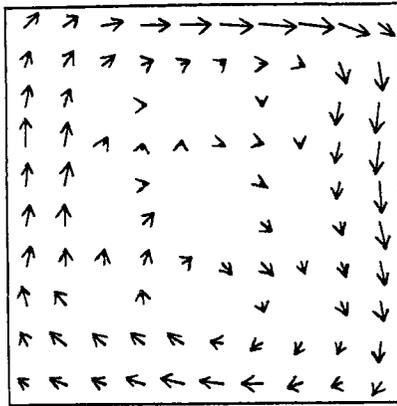
上式より、数値計算の境界条件として、壁面からzだけ離れた第1メッシュでの平均流勾配、乱流エネルギー、乱流散逸を以下のように与える。

$$\partial U / \partial z = U \cdot z^{-1} \cdot (\ln(z/z_0))^{-1} \quad (3-10)$$

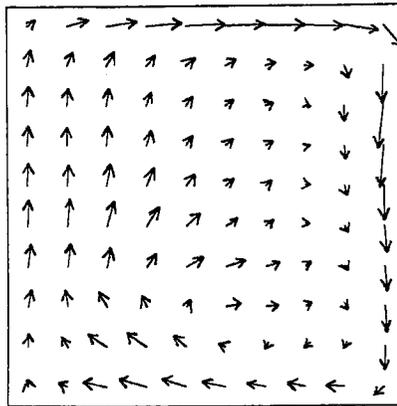
$$q = \kappa^2 \cdot U^2 \cdot C_D^{-1/2} \cdot (\ln(z/z_0))^{-2} \quad (3-11)$$

$$\varepsilon = \kappa^2 \cdot U^3 \cdot z^{-1} \cdot (\ln(z/z_0))^{-3} \quad (3-12)$$

なお、ラフネスパラメーター z_0 は、今回の数値計算では、模倣実験から求めた値を参考にして与えている。^{註-1)}



A: Experiment



B: Numerical Prediction

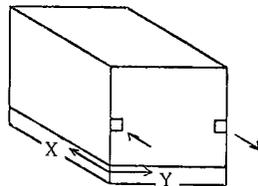


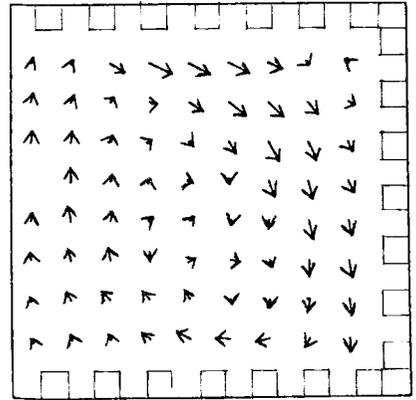
Fig. 4-3 U-V vector on X-Y plane at $Z^*=3.5$, in case of experiment No. 1

4. 実験と数値計算の対応

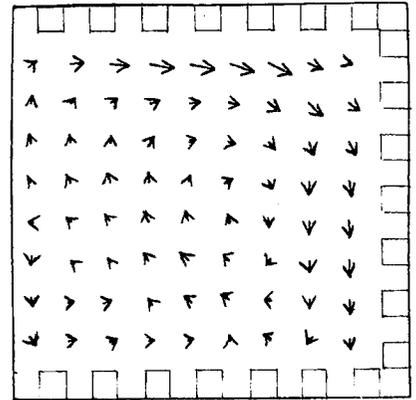
4.1 平均流に関する実験と数値計算の対応

ラフネスを設置しない場合 (Experiment No.1) および、0.1m角のラフネスブロックを3壁面に設置した場合 (Experiment No.2) における実験結果と数値計算解を Fig.4-1~ Fig.4-4 に示す。Aは実験結果、Bは数値計算解を示す。

Fig.4-1は、ラフネスを設置しない場合の対称面 (X-Y平面 $Z^*=0.0$) における流れの様相であり、Fig.4-2は、3壁面にラフネスを設置した場合の様相である。ラフネ



A: Experiment



B: Numerical Prediction

Fig. 4-4 U-V vector on X-Y plane at $Z^*=3.5$, in case of experiment No. 2

スを設置していない場合、比較的壁面近くに速度の高い流域が存在しているのに対し、ラフネスを設置した場合速度の比較的高い流域が室内中心側に移動し、循環流のスケール (すなわち直径) が減少している様子が、実験、数値計算の双方で観察される。Fig.4-4は、同じく、X-Y平面 $Z^*=3.5$ (床面に近い部分) におけるラフネスを設置しない場合、および3壁面にラフネスを設置した場合の様相である。対称面の場合と同じく、ラフネスの設置により循環流のスケールが減少の様子が、実験と数値計算の双方で観察される。また、特に循環流のスケールの減少の割合は、対称面に比べより顕著であると共にもそのパターンも明確に変化していて、ラフネスを設置したことにより、単純に壁面が内側に移動した状態とは異なる。

上述のように、平均流に関して、数値計算解は、ラフネスを設置した場合の流れの変化を良く捉え、実験結果と比較的良好一致している。

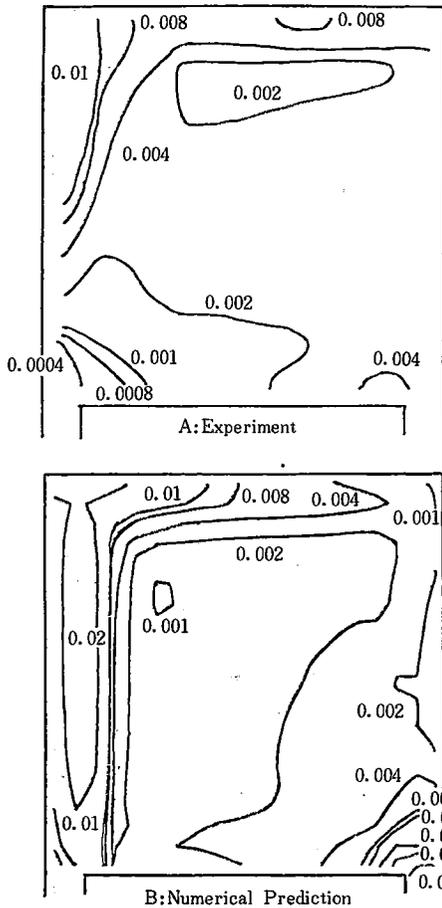


Fig. 4-5 Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 1

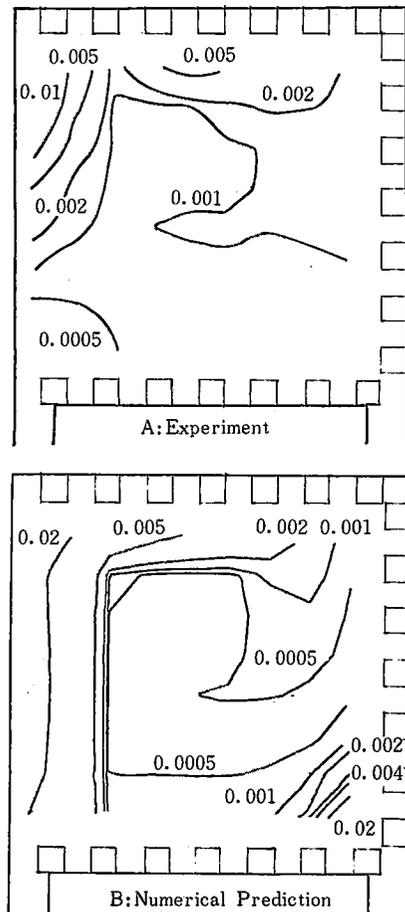


Fig. 4-6 Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 2

4.2 乱流統計量に関する実験と数値計算の対応^{註-2)}

ラフネスを設置しない場合 (Experiment No 1) および、0.1m角のラフネスブロックを3壁面に設置した場合 (Experiment No 2) における実験結果と数値計算解を Fig. 4-5~Fig. 4-8 に示す。Aは実験結果、Bは数値計算解を示す。

Fig. 4-5はラフネスを設置しない場合の、Fig. 4-6は、3壁面にラフネスを設置した場合の、対称面における乱流エネルギー q の分布を示す。ラフネスを設置した場合、乱流エネルギーが大きく減少している様子が、実験と数値計算の双方で観察される。Fig. 4-7, Fig. 4-8 には同じく、渦動粘性係数 $\nu_t - K_M$ のそれぞれの分布を示すがこれもラフネスを設置した場合に $\nu_t - K_M$ が大きく減少している様子が、実験と数値計算の双方で観察される。

なお、紙面の都合で割愛するが、乱れの長さスケール $l - L_M$ 、および、乱流散逸 $\epsilon - \epsilon_M$ についても、ラフネスを設置した場合、その値の減少が、実験、数値計算の双方で観察される。

ラフネスを設置した場合の気流で、これら乱流統計諸量の値が減少するのは、今回の居室模型内気流における大きな特徴となっている。また、こうした乱流統計量の減少に対応し、平均流においても、ラフネスを設置した場合、循環流のスケールが小さくなっている。

ラフネスを設置した場合の乱流エネルギー等の減少は大きなスケールの乱れが減少し、乱れのスペクトルピークが小さなスケールに移行することに対応している。これは、乱れを発生させる原因である壁面近傍における平均流の速度勾配 (その剪断成分) が、ラフネスを設置した場合、乱流混合の促進により、ゆるやかで小さくなり、その結果、大きなスケールの乱れの発生が抑制されるものと考えられる。2方程式乱流モデルによる数値解はこの現象を良く再現し実験結果と一致する傾向を示したものと考えられる。

5. 壁面障害物の室内気流に対する影響

Fig. 5-1~Fig. 5-4 に、Fig. 2-3 に示す各実験種別で

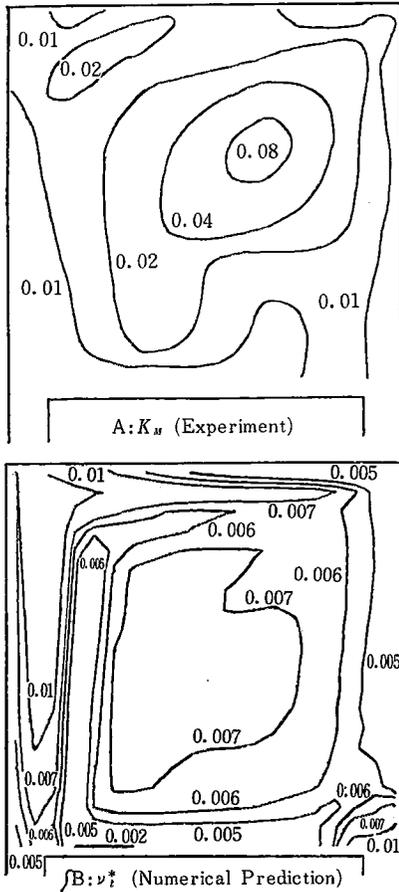


Fig. 4-7 Distribution of K_M^* (experiment) and ν_t^* (prediction) on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 1

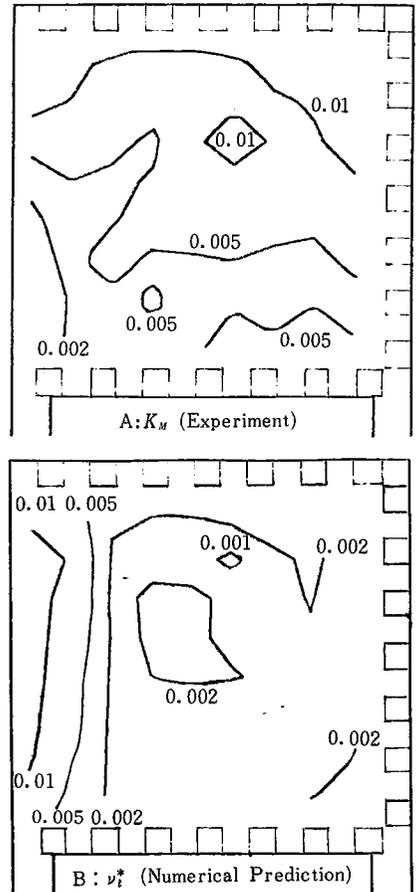


Fig. 4-8 Distribution of K_M^* (experiment) and ν_t^* (prediction) on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 2

の対称面における模型実験による平均流の様相と乱流エネルギーの分布を示す。Fig. 5-1は、0.1m角のラフネスを1壁面に設置した場合 (Experiment No 3), Fig.5-2は、0.05 m角のラフネスを3壁面に設置した場合 (Experiment No 4), Fig. 5-3は、0.05m角のラフネスを1壁面に設置した場合 (Experiment No 5), Fig. 5-4は、0.15m角のプレートを設置した場合 (Experiment No 6) である。Aは平均流ベクトル, Bは乱流エネルギーを示す。図中、平均流ベクトル図内の破線は、ラフネス等を設置しない場合 (Experiment No 1) の平均流ベクトル (Fig. 4-1のA)を参考のため示すものである。

平均流に関しては、噴流の衝突する壁面 (図中上側), およびその右側の壁面で、ラフネスが大きいくほど、またラフネスを設置した面が多いほど、流速の高い域が室内中心部に移動している。しかし、こうした比較的ゆるやかな変化を除けば、ラフネスを設置したことによる局所的な大きな変化は生じていない。こうした壁面全体にラフネスを設置した場合に比べ、壁面からプレートが突起

している場合には、かなり大きな平均流の変化が生じている。

なお、ラフネスを壁面全体に設置した場合、壁面全体として、壁面近傍流の勾配が比較的安定していることは、数値計算の際、ラフネス1つ1つの凹凸を差分メッシュによる解析の対象とせず、平均流勾配および乱れの境界条件によりその影響を代表させる1つの条件となっている。一方、プレートを設置した場合には、その前後に大きな平均流の変化が生じており、数値計算の際、十分差分メッシュを分割し、これを解析する必要がある。

乱流エネルギーに関しては、ラフネスが大きいほど、またラフネスを設置した平面が多いほど、その値が減少している。また、プレートを設置した場合も、乱流エネルギーは減少しているが、平均流の様相が対称面でかなり変化しているのに比べ、さほどの減少でもない。

なお、紙面の都合で割愛するが、乱流散逸、乱れの長さスケール、渦動粘性係数のいずれも、ラフネスが大きいほど、またラフネスを設置した平面が多いほど、その

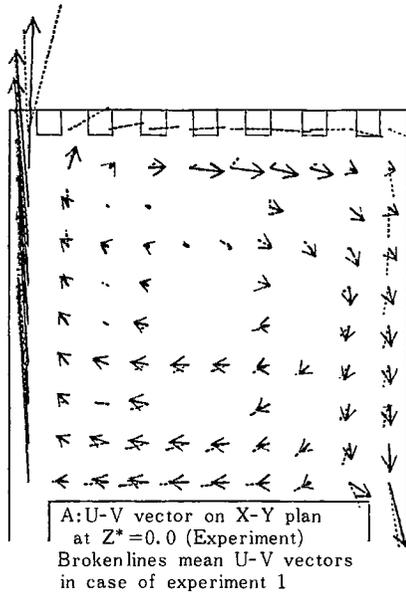


Fig. 5-1 U-V vector and Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 3

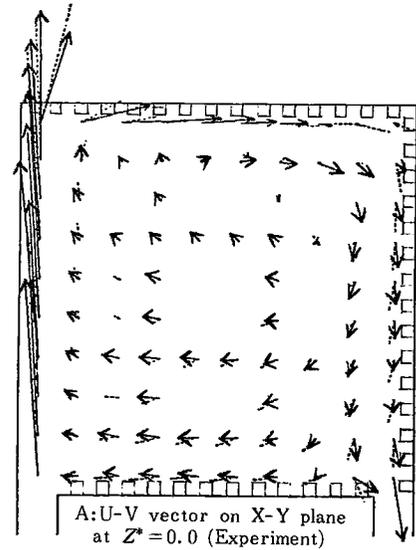


Fig. 5-2 U-V vector and Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 4

値が減少する結果を得ている。

6. 結 論

壁面に、ラフネスブロックによる凹凸を設けた室内気流を、対数法則によりモデル化した境界条件を用いて、2方程式乱流モデルを基礎とする数値計算モデルにより解析した結果、実験結果と対応する良い結果を得た。

また、ラフネスを壁面に設置したことにより、乱流エネルギーを始めとし、各種乱流統計量の値が減少することを実験と数値計算の双方で観察した。これは、ラフネスを設置した場合、その場での乱流混合が促進され、その結果、大きなスケールの乱れを生みだす平均流の速度勾配（その剪断成分）がゆるやかで小さくなるためと考

察される。

(1981年1月8日受理)

<後記> 本研究は、故 野村 豪先生(元東京大学工学部教授)よりご助言をいただいている。記して感謝すると共に先生のご冥福を心よりお祈りする。

注

- 注-1) ラフネスを設置した壁面上数点で、平均流の法線方向勾配を求め、ラフネスパラメーターを推定する。今回の数値計算では、そうして求めた値の中で、平均流の様相が模型実験と良く対応する値を選んでいる。
- 注-2) 前報¹⁾で断わっているように、乱流エネルギー q は、実験、数値計算とも同一の定義であるが、渦動粘性係数 $\nu_t - K_M$ 、乱れの長さスケール $l - L_M$ 、乱流散逸 $\epsilon - \epsilon_M$ は、実験と数値計算では、定義が若干異なる。

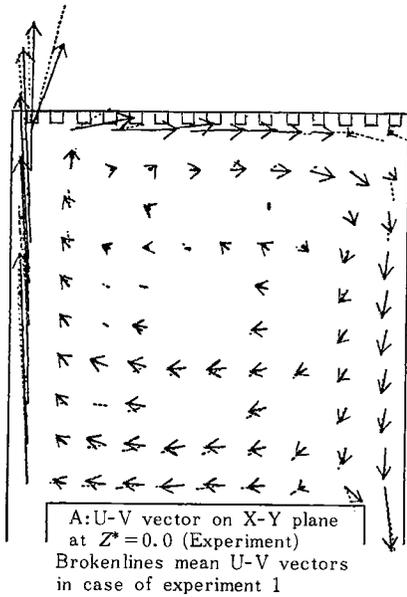


Fig. 5-3 U-V vector and Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 5

文 献

- 1) 村上周三, 野村 豪, 小峯裕己, 加藤信介, 佐藤正章: 室内気流に関する数値計算予測と実験の対応, 生産研究31巻第7号 (1979)
- 2) B.E. Launder and D. B. Spalding: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, 1972
- 3) F. H. Harlow and J. E. Welch: Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Surface, The Physics of Fluid. Vol. 8.No12. 1965
- 4) 野村 豪, 松尾 陽, 目塚正光, 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)
- 5) 村上周三, 小峯裕己: タンデム型熱線風速計による変動風

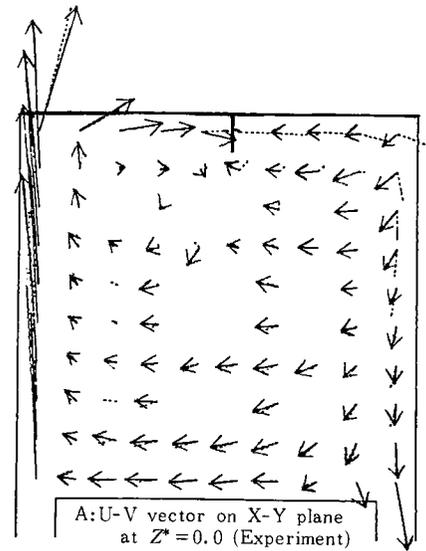


Fig. 5-4 U-V vector and Distribution of q^* on X-Y plane at $Z^*=0.0$, in case of experiment No. 6

- 速の三次元的な測定 — 建物周辺気流に関する実験的研究 (XI) —, 日本建築学会論文報告集, 297号 (1980)
- 6) 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, 234, 238号 (1975)
- 7) 野村 豪, 村上周三, 加藤信介, 佐藤正章: 3次元乱流数値解析と模型実験 — 数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究 — その2 —, 日本建築学会論文報告集, 298号 (1980)
- 8) 野村 豪, 松尾 陽, 加藤信介: MAC法の空間差分間隔に関する考察 — 数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究 — その1 — 日本建築学会論文報告集, 292号 (1980)