

# Large Eddy Simulation による室内気流の数値予測 (その2)

## —数値定数, 流入乱流量, 壁面境界条件に関する検討—

Prediction of Room Air Flow by Means of Large Eddy Simulation Part 2

—Study on Numerical Constant, Inflow Turbulence Intensity and Wall Boundary Condition—

村 上 周 三\*・日 比 一 喜\*\*・持 田 灯\*

Shuzo MURAKAMI, Kazuki HIBI and Akashi MOCHIDA

### 1. 序

Large Eddy Simulation (以下 LES) を用いて, 立方体空間内の気流性状の数値解析を行い, 模型実験との比較を行った. 前報(その1)<sup>1)</sup>では Computer Graphics を用いた Visual Animation により室内気流の性状を可視化した画像出力例を中心に報告したが, 本報では, ①流入風速に乱れを与えた場合, ② Smagorinsky 定数  $C_s$  を 0.1 から 0.2 に変化した場合, ③ 壁面の接線方向風速成分を NO-SLIP とした場合, について各種の乱流統計量について検討を行ったのでこれについて詳細に報告する.

### 2. 数値シミュレーションの概要

#### 2.1 解析対象

図 1 に示すような吹出口と吸込口を 1 個ずつ有する立方体形状の室内空間をモデルとした.

#### 2.2 計算メッシュ

図 2 に示すような  $22(x) \times 22(y) \times 22(z) = 10,648$  の等間隔差分メッシュを用いた. また, 吸込口, 吹出口はともに  $2 \times 2$  の 4 メッシュで構成されている.

#### 記 号

- $u_i$  : 風速の 3 成分  $i$  (または  $x, u$ ),  $j$  (または  $y, v$ ),  $k$  (または  $z, w$ )
- $f$  : 格子平均
- $\langle f \rangle$  :  $f$  : アンサンブル平均からのずれ ( $f' = f - \langle f \rangle$ )
- $\Delta$  : 差分格子スケール
- $\nu_{SGS}$  : (subgrid scale) の渦粘性
- $L_0$  : 吹き出し口幅 (ここでは 1.0)
- $U_0$  : 吹き出し風速 (ここでは 1.0)
- $t^*$  : 無次元時間 ( $t < U_0 L_0$ )
- $R(\tau)$  : 自己相関関数
- $\ell$  : 乱れのスケール ( $\ell x + \ell y + \ell z$ ) / 3
- $\ell_i = \sqrt{\langle u_i'^2 \rangle} \int R_i(\tau) d\tau$

### 2.3 LES の基礎式 (表 1)

時間差分は Adams-Bashforth スキーム, 空間に関しては 2 次の中心差分を用いた. ただし解の振動を防ぐため吸込口周辺の  $4 \times 4 \times 6$  の領域に限り一次精度風上差分を適用している.

### 2.4 初期条件

層流計算の結果に正規乱数を用いて  $u', v'$  に 20% 程度の乱れを与え,  $w$  は連続式を満たすように与えた場合を初期値とした.

### 2.5 計算ケース (表 2)

- ① case-1 : 吹出口で一定流入風速, 吸込口で自由流出の境界条件(境界外の圧力 0)を用いて計算を行った場合. 壁面境界条件は法線方向速度成分は 0, 接線方向速度成分は各計算ステップごとに  $1/7$  乗の速度勾配を仮定.
- ② case-2 : 吹出口風速の噴流の主流方向成分 (図 4 における  $u_1, u_2$  等) に乱れを与えた場合である. この場

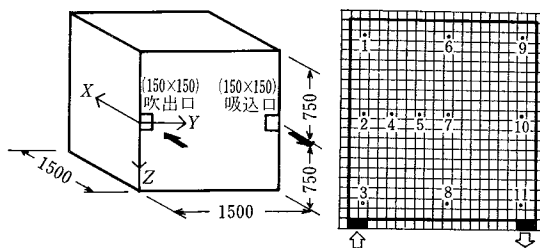


図 1 室内モデル 単位 mm

注) スケールは模型実験の値  
模型実験は文 3), 文 4) 参照

図 2 計算メッシュと  
波形測定点

表 1 LES の基礎式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{e}_{ij} \tag{2}$$

$$\text{ただし } \nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \cdot \left( \frac{\bar{e}_{ij}^2}{2} \right)^{1/2} \tag{3}$$

$$e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad C_s = 0.1$$

\* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

\*\* 清水建設備技術研究所 元民間等共同研究員

合、 $v$  と  $w$  に一定値を与えているが矛盾は生じない。乱れは吸込口近傍（風上差分を適用していない領域）の領域の  $u$  成分だけを利用。この際、各時点で吹出口の流量の総和は 1 となるように調整されている。

③ case-3：吹き出し口風速の噴流の主流方向に垂直な風速 2 成分（図 4 における  $v_1, v_2, v_3, w_1, w_2$  等）に乱れを与えた場合。この場合主流が明確でない室内空間の中央付近の風速 2 成分を用いている。この際、 $u_1, u_2$  等の主流方向成分は case-1 と同様に一定流入となっており、吸込口の境界条件も case-1 と同様自由流出となっている。この条件においては吹出面での  $d\bar{v}/dx, d\bar{w}/dx$  に対して変動する境界条件を課したことになり、 $\nu_{SGS}$  および A, B, C 点で評価される移流項に対しても変動成分を与えたことになる。仮想セル内の  $v_2$  などが変動すれば連続条件から吹出口の主流方向成分も同時に変動するが、仮想セルの外側の主流方向成分 ( $u$ ) が与えられていないため  $v_2$  等を与えても変動する  $u_1, u_2$  等を決定することはできないし、また、矛盾も生じない。

④ case-4：case-1 と同様の境界条件を用いて Smagorinsky 定数  $C_s=0.2$  とした場合で、特に乱れへの影響を検討する。

⑤ case-5：case-1 と同様の境界条件を用いて壁面に平行な速度成分に NO-SLIP の境界条件を適用した場合で、特に乱れへの影響を検討する。なお本報のように粗いメッシュ分割で NO-SLIP の条件を課すことは不適切（粘性底層までメッシュ分割を行えば可能）であるが乱れへの影響を調べるためあえて使用した。なお case-2, case-3 のような流入風速の乱れの与え方は必ずしも合理的な方法ではなく、今後さらに検討を続ける予定である。

### 3. 模型実験の概要

図 1 の室内モデルを用いた。吹出口風速 6.5 m/s と吹出口幅 0.15 m によるレイノルズ数は  $Re=6.5 \times 10^4$  である。また換気回数は約 150 回である。

### 4. 解析結果

表 2 計算条件

ケース	計算条件			
	$C_s$	壁面境界条件	吹出口	吸込口
case-1	0.1	1/7 乗則	一定流入	自由流出
case-2	0.1	1/7 乗則	流入 $u$ 成分変動	自由流出
case-3	0.1	1/7 乗則	流入 $v$ 成分変動	自由流出
case-4	0.2	1/7 乗則	一定流入	自由流出
case-5	0.1	NO-SLIP	一定流入	自由流出

#### 4.1 変動風速の波形とスペクトル

(図 3-(1)-(3), case-1)

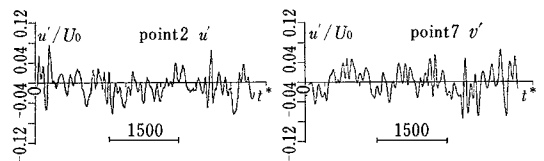
図 3-(1) に case-1 の場合の噴流が対向壁に衝突する近傍 (図 2-point-2) の  $u'$  および室内中央部 (図 2-point-7)  $v'$  の変動風速の波形を示す。スペクトルを見ると噴流中の point-2 の高周波成分が室内中心近くの point-7 の変動に比較して卓越していることがわかる。

#### 4.2 平均風速ベクトル図 (図 5-(1)-(8))

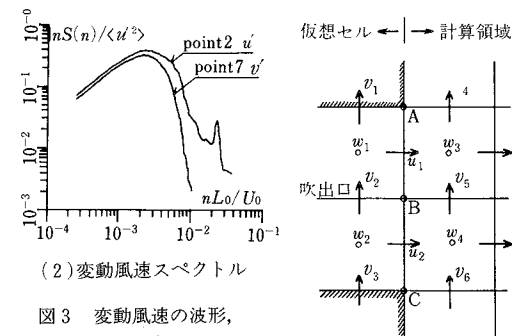
流入の乱れのない case-1 で吹出、吸込口を含む 3 断面で模型実験の結果と比較を行った。各断面とも全体的傾向は実験結果と一致しているが、壁面近傍の風速ベクトルや、吹き出し口の噴流周辺の弱風域の傾向がやや異なる。図 5-(7), (8) に流入風速に乱れを入れた場合の平均流への影響を示す。乱れを入れた case-2 (図 5-(7)) の全体の流れのパターンは、乱れを入れない case-1 (図 5-(2)) と比較してより模型実験の結果 (図 5-(1)) に近くなる。特に噴流や近傍の mixing layer の風速ベクトルの一致の程度が向上している。また  $C_s=0.2$  の case-4 (図 5-(8)) は噴流近くのベクトルにおいて、実験との一致が悪くなっている。

#### 4.3 乱流エネルギー $k$ の分布

図 6 (1), (2) に吹出、吸込口を含む水平断面での乱流エネルギーの分布の比較を示す。ここでは乱流エネルギー  $k$  の値として、(4) 式により Resolvable Scale (メッシュ分割による格子スケール以上の量) に sub-grid scale (格子スケール以下の量) の寄与分を付随した値を示している。



(1) 変動風速波形



(2) 変動風速スペクトル

図 3 変動風速の波形, スペクトル

(数値計算, case-1)

図 4 吹き出し口の境界条件

研 究 速 報

$$k = \langle 0.5 \times (u'^2 + v'^2 + w'^2) + \nu_{sgs}^2 / (C_1 \Delta)^2 \rangle \quad (4)$$

ただし、 $C_1$  は  $C_s=0.1$  の場合 0.094,  $C_s=0.2$  の場合 0.237 である。詳細については文献 2) を参照されたい。流入に乱れを入れていない case-1 の結果 (図 6-(2)) と実験結果 (図 6-(1)) を比較すると、噴流が対向壁に衝突する近傍で大きな値を示す傾向は両者とも一致する。しかし数値計算で、 $k$  の値の大きな領域が吸込口近くまで回り込んでいる点が模型実験とは異なる。

流入風速に乱れを入れた場合の乱流エネルギーに対する影響を検討するため吹出口を含む鉛直断面における  $k$  の分布を図 6-(3)~(6) に示す。流入風速に乱れを入れない case-1 (図 6-(2)) に比較して乱れを入れた case-2 (図 6-(4)), case-3 (図 6-(5)) は噴流やこれが対

向壁に衝突する部分では乱流エネルギーが大きくなっているが、その他の領域では目立った差異は見られない。 $C_s=0.2$  とした case-4 (図 6-(6)) では乱れが大きく減衰している。傾向が同じであるため図の掲載は省略するが、壁面 NO-SLIP とした case-5 も case-4 と同じく乱れが極端に減衰している。これは壁面の大きな速度勾配が乱流散逸を増大させ、乱流エネルギーを減少させたものと推定される。

4.4 乱流散逸  $\epsilon$  の分布

図 7 に乱流散逸  $\epsilon$  に関して流入に乱れない case-1 の計算 (図 7-(2)) と実験結果 (図 7-(1)) の比較を示す。数値計算の乱流散逸は (5) 式を用いて算出した。

$$\epsilon = \langle \nu_{sgs} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j}) \rangle \quad (5)$$

また模型実験に関しては (6) 式を用いた。

$$\epsilon = \langle (2k)^{3/2} / l \rangle \quad (6)$$

両者の物理的意味は同じであるが算出の方法が異なるため値をそのまま比較できないが、数値計算の乱流散逸  $\epsilon$  を模型実験と比較すると  $\epsilon$  の値の大きな領域は吹出、吸込噴流の衝突域に限定される傾向がある。

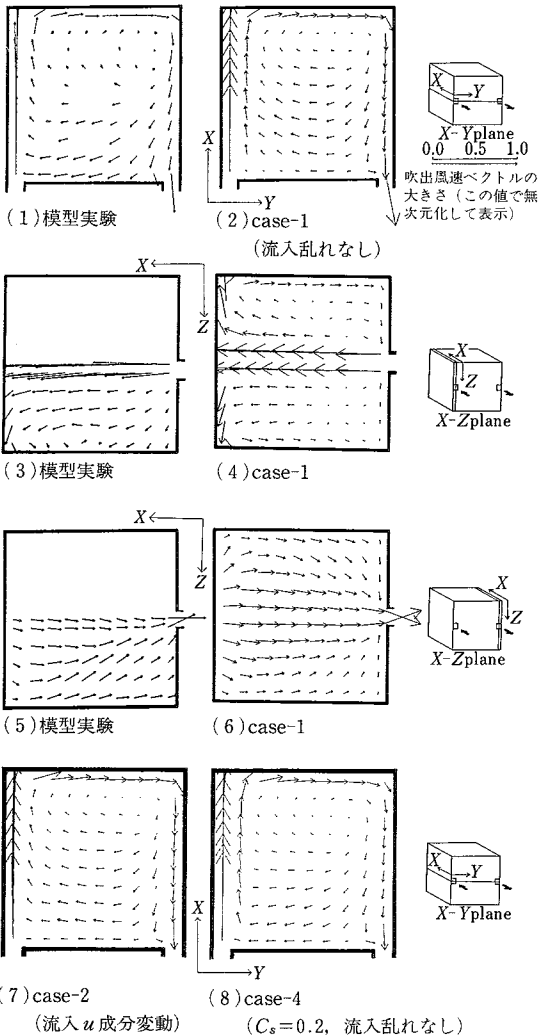


図 5 平均風速ベクトルの分布 (吹出口, 吸込口を含む 3 断面)

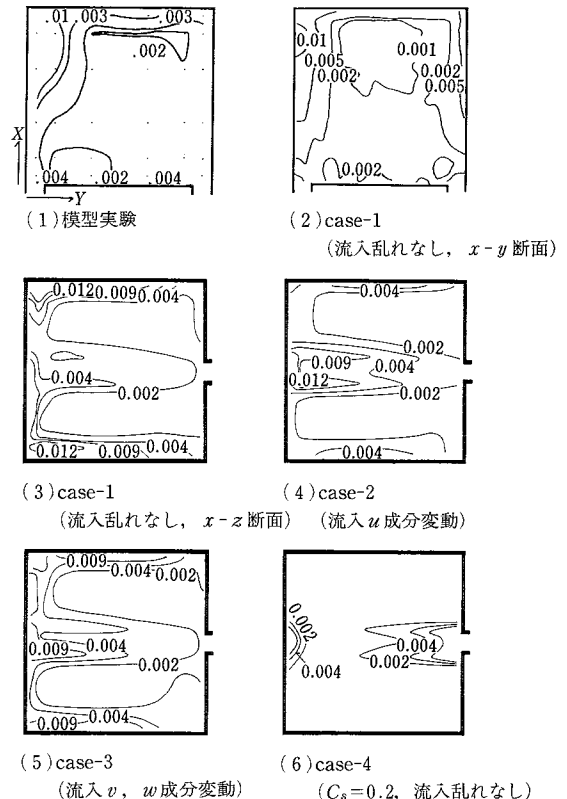


図 6 乱流エネルギー  $k$  (吹出口, 吸込口を含む水平断面)

4.5 自己相関 (図 8-(1)~(3))

ここでは特に流入に乱れを入れた場合の影響を検討するため、吹出噴流内の point-2 における風速 3 成分の自己相関を示した。u (噴流の主流), v (壁面に垂直), w (床面に垂直) 3 成分とも乱れを入れない case-1 の自己相関の減衰が乱れを入れた case-2, case-3 に比較して極端に緩やかである。流入に乱れを入れたことにより、主流の乱れのスケールが小さくなったことがこの結果からわかる。

4.6 乱れのスケール (図 9)

case-1 と case-2 で吹出風速に乱れを入れない場合と入れた場合の乱れのスケールの分布を比較した。噴流内の point-1, point-2 では自己相関にも見られるように乱れを入れた場合のほうがスケールが小さくなるが、全体の分布では両者の値に明確な差異は認められない。

5. 結 論

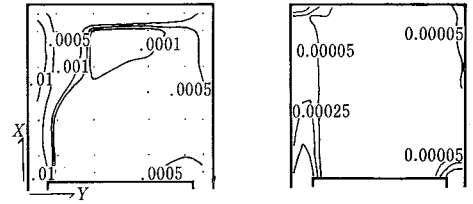
- 1) 平均流に関しては数値計算と模型実験の結果は比較的良く一致する。
- 2) 流入風速に乱れを入れることにより、噴流中や衝突域の乱流量に顕著な差異が出る事が確認された。また噴流やその周縁の平均風速ベクトルも改善される方向にある。この点に関しては今後なんらかの統計モデルを用いて物理的にみて合理的な流入口の疑似変動風を作成する研究を行う必要がある。
- 3) ここで行った予備的な検討によれば、渦粘性モデル中の定数、あるいは壁面境界条件等が室内空間内の乱流エネルギー等の諸量に大きな影響を与えており、より詳細な検討が必要とされることが明らかである。

謝 辞

本研究においては、東大生研の NST (Numerical Simulation of Turbulence) 委員会における討論により得た示唆が大きい。小林敏雄教授、吉沢徹助教授、加藤信介講師、堀内潔助手らを始めとするメンバー各位に謝意を表する。  
(1986 年 10 月 8 日受理)

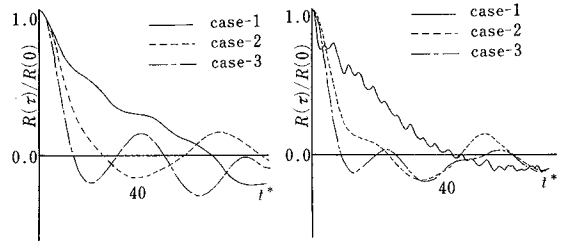
参 考 文 献

- 1) 村上, 持田, 日比: Large Eddy Simulation による室内気流の解析と Visual Animation, 生産研究, vol.38, 8, 1986
- 2) S.Murakami, A.Mochida and K.Hibi: Numerical Simulation of Air Flow around Cubic Model, International Symposium on Computational Fluid Dynamics Tokyo, 1985, 9



(1) 模型実験 (2) case-1 (流入乱れなし)

図 7 乱流散逸 ε (吹出口, 吸込口を含む水平断面)



(1) u' 成分 (噴流の主流方向) (2) v' 成分 (壁面に垂直方向)

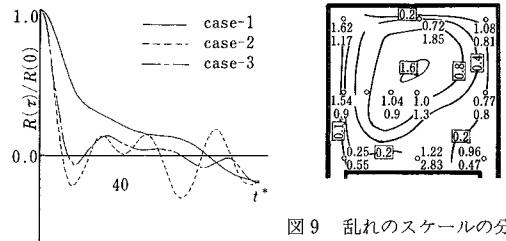


図 9 乱れのスケールの分布  
吹出口, 吸込口を含む  
水平断面コンター上の  
中の値は模型実験  
上段の数字は case-1  
下段の数字は case-2

(3) w' 成分 (床面に垂直方向)

図 8 噴流内の変動風速の  
自己相関関数  
(point-2 において)

- 3) 野村, 村上, 加藤, 佐藤: 3次元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, vol.298, 昭和 55 年
- 4) 村上, 加藤: 室内気流に関する数値計算予測と実験の対応(続報), 壁面に凹凸を設けた場合の気流性状, 生産研究, vol.33, 3, 1983
- 5) 日比, 村上, 持田: Large Eddy Simulation による室内気流の数値予測(その 1)—数値解析と模型実験の比較—, 日本建築学会大会梗概集, 昭和 60 年
- 6) 日比, 村上, 持田: Large Eddy Simulation による室内気流の数値予測(その 2)—数値定数, 流入乱流量, 壁面境界条件に関する予備的検討—, 日本建築学会大会梗概集, 昭和 61 年