

# Large Eddy Simulation による室内気流の解析と Visual Animation

Numerical Analysis and Visual Animation of Room Air Flow by Means of Large Eddy Simulation

村上 周三\*・持田 灯\*・日比 一喜\*\*  
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Kazuki HIBI

## 1. 序

Large Eddy Simulation (以下では LES) により吹出口, 吸込口を持つ室内の気流分布を解析した結果について報告する. LES による 3次元乱流の数値シミュレーションでは乱流の時々刻々の変化を解析することが可能であるため, 膨大な量のデータが算出される. したがって, 数値シミュレーション結果を的確に把握するためには Computer Graphics の導入が不可欠であると考えられる. 本報では LES の結果と模型実験の結果を比較検討するとともに, Engineering Workstation Apollo Domain DN550 を用いた Computer Graphics System により数値シミュレーション結果の可視化を試みた結果について報告する.

## 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, 吹出口と吸込口をおのおの1個ずつ有する一辺Hの立方体の室内モデル.

**2.2 差分メッシュ** 図2に示すような等間隔差分メッシュを使用した, メッシュ数は,  $22(x) \times 22(y) \times 22(z)$  の計 10,648, また, 吹出口, 吸込口はともに  $2 \times 2$  の4メッシュで構成されている.

**2.3 基礎方程式** 表1に示す. 本計算では filtering には Top-hat filter を用いており, Smagorinsky 定数  $C_s$  は 0.1 としている.

**2.4 差分スキーム** 時間に関しては Adams-Bashforth スキーム, 空間に関しては 2次の中心差分を使用. ただし, 解の振動を防ぐために, 吸込口周辺の  $4 \times 4 \times 6$  メッシュでは移流項に対して 1次の風上差分を適用している. また時間差分間隔は無次元時間 ( $t < U_0 > / L_0$ ) で 0.1 としている.

**2.5 初期条件** 層流計算の結果の  $u'$ ,  $v'$  成分に正規乱数により約 20%程度 of 乱れ付加し,  $w'$  は連続式を満たすように与えた流れ場を初期値とした.

## 2.6 境界条件

- (1) 壁面境界条件 法線方向の速度成分は 0 とし, 接線方向の速度成分は各計算ステップごとに  $1/7$  乗の風速勾配を仮定した.
- (2) 吹出口風速 各計算ステップごとに一定値を与えた.
- (3) 吸込口風速 吸込口の仮想セル内に圧力 0 を与え, 風速値は計算より算出した.

## 3. Computer Graphics System の概要<sup>3)</sup>

システム構成を図3に示す. LES による乱流シミュレーションには東京大学大型計算機センター HITAC S810-20 を使用しているが, シミュレーション結果の画像処理は村上研究室に設置された Apollo DOMAIN

### 記号

- $U_i$ : 風速の3成分,  $i$  (または  $x, u$ ): 主流方向,  $j$  (または  $y, v$ ): 横方向,  $k$  (または  $z, w$ ): 鉛直方向
- $\langle f \rangle$ : 変数  $f$  の時間平均 (またはアンサンブル平均)
- $\bar{f}$ : 変数  $f$  の格子平均 (ここでは filtering による空間平均)
- $f'$ : 時間平均からのずれ  $f' = \bar{f} - \langle f \rangle$
- $f''$ : 格子平均からのずれ  $f'' = f - \bar{f}$
- $\Delta$ : 差分格子スケール ( $\Delta_x \cdot \Delta_y \cdot \Delta_z$ )
- $\nu_{sgs}$ : 格子スケール以下 (subgrid scale) の渦粘性
- $L_0$ : 吹出口幅 (模型実験では 0.15 m)
- $U_0$ : 吹出し風速 (模型実験では 6.5 m/s)
- $t^*$ : 無次元時間 ( $t < U_0 > / L_0$ )

表1 LESの基礎式

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

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

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

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

$C_s$ : Smagorinsky 定数,  $C_s = 0.1$ ,

\*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター  
\*\*清水建設技術研究所

DN 550 により行っている。DN550 は 9600 bps の非同期通信回線で大型計算機センターと接続されており、大型計算機センターより直接、データを転送することができる。また、データ量が多い場合は磁気テープを使ってデータを受け渡すことも可能である。

4. 模型実験の概要

実験の場合、 $L_0=0.15\text{ m}$ 、 $\langle U_0 \rangle=6.5\text{ m/s}$ 、 $Re(\langle U_0 \rangle L_0/\nu) \approx 6.5 \times 10^4$  であり、風速の測定にはタンデム型熱線風速計を使用している。実験の詳細については文献 1)、2) を参照されたい。

5. 数値シミュレーション

5.1 平均風速ベクトル

図 4 に吹出口、吸込口を含む水平断面の比較を示す。LES の結果の平均化時間は無次元時間で約 3400 であり、これを  $L_0=0.15\text{ m}$ 、 $\langle U_0 \rangle=6.5\text{ m/s}$  として実時間に換算すると約 78 秒となる。LES の結果は図中下側の壁付近の風速値を小さく見積る傾向にあるものの、全体的傾向はおおむねよく実験と一致している。

5.2 乱流エネルギー  $k$

図 5 に  $k$  の分布の比較を示す。表示断面は図 4 の場合と同じである。LES の結果は grid scale の  $k$  ( $\frac{1}{2} \langle u_i' u_i' \rangle$ ) に subgrid scale の寄与分 ( $\frac{1}{2} \overline{u_i'' u_i''} = \nu_{SGS}^2 / (c_1 \Delta)^2$ 、ここで  $c_1=0.094$ ) を付加した値を示している<sup>4)5)6)</sup>。図 5 を見ると模型実験の結果は吹出噴流が対向する壁に衝突する部分で大きな値を示しているが、LES の結果はこの傾向をよく再現している。

6. Computer Graphics による流れの可視化

図 6 に建物中央の鉛直断面内 ( $x=0.5H$ ) でマーカーを発生させた場合の Streakline の時間的変化を、また、図 7 に建物中央の水平断面内 ( $z=0$ ) でマーカーを発生させた場合の、各マーカー位置の時間的変化を示す。図 6、図 7 は、大型計算機センターで計算された各時刻のマーカーの座標値を Apollo DOMAIN DN550 に転送し、3次元透視図変換を行ったうえで画像表示されたものである。ここではさらに3次元的效果を強調するために、視点からマーカーまでの距離に応じて徐々に輝度を落していくという手法 (Intensity Depth Queing) を用いている。また  $\Delta t^*$  は最初にマーカーが鉛直面上、あるいは水平面上にセットされてからの経過時間(無次元値)を示している。これらの図から、吹出噴流が対向壁に衝突し、周囲に発散していくようすや室内に大きな循環流が形成されていくようす等を3次元的に理解することができる。このように、Computer Graphics による可視化

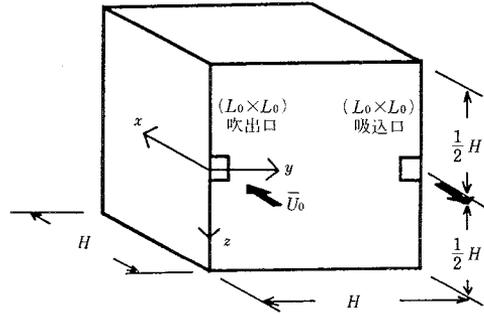


図 1 室内モデル  
( $H=10 \cdot L_0$ )

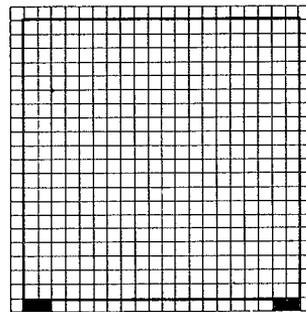


図 2 計算メッシュ  
( $22(x) \times 22(y) \times 22(z)$ )

HITAC S810-20  
(東大大型計算機センター)

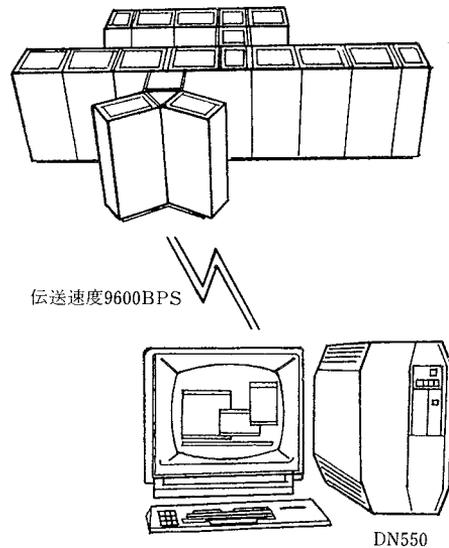


図 3 システム構成

研 究 速 報  
 は複雑な流れ場を正しく把握するうえで極めて有効であり、乱流の数値解析に欠くことのできない技術となりつつある。

助教授、加藤信介講師をはじめとするメンバー各位に謝意を表する。  
 (1986年5月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 野村豪, 小峯裕己, 加藤信介ほか: 室内気流に関する数値予測と実験の対応, 生産研究 Vol.31 No.7 (1979.7)
- 2) 村上周三, 加藤信介: 室内気流に関する数値予測と実験の対応 (続報), 生産研究 Vol.33 No.3 (1981.3)
- 3) 村上周三, 日比一喜, 持田灯: 乱流数値シミュレーションの Computer Graphics—大規模多次元数値情報処理の応用—, 生産研究 Vol.38 No.1 (1986.1)
- 4) 村上周三, 持田灯, 日比一喜: Large Eddy Simulation による建物周辺気流の予測 (その2)—風向45°の周辺気流に関する数値解析と野外実験, 風洞実験の比較—, 生産研究 Vol.38 No.1 (1986.1)
- 5) 村上周三, 持田灯, 日比一喜: Large Eddy Simulation による建物周辺気流の3次元数値解析—立方体まわりの流れの数値予測と風洞実験の比較—, 日本建築学会計画系論文報告集 No.360 (1986.2)
- 6) 日比一喜, 村上周三, 持田灯: Large Eddy Simulation による室内気流の数値予測 (その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1985.10, 1986.8)

7. ま と め

LESにより吹出口, 吸込口を有する室内の気流分布を解析し, 模型実験との対応を調べ, 両者がおおむねよく対応していることを確認した。また Apollo DOMAIN DN550を用いた Computer Graphics Systemを用いて数値シミュレーション結果の可視化を行い, これによりLESの予測結果の時間的変化を3次的に理解することができた。Computer Graphicsは乱流現象を観察, 理解するうえで極めて有効であり, 近年のこの分野の著しい進歩を考えると, その重要性は今後ますます増加していくものと予想される。

謝 辞

本研究を行うにあたっては, 東大生研 NST (Numerical Simulation for Turbulent Flow) 研究グループ内の討論により多くの示唆を得た。小林敏雄教授, 吉澤徹

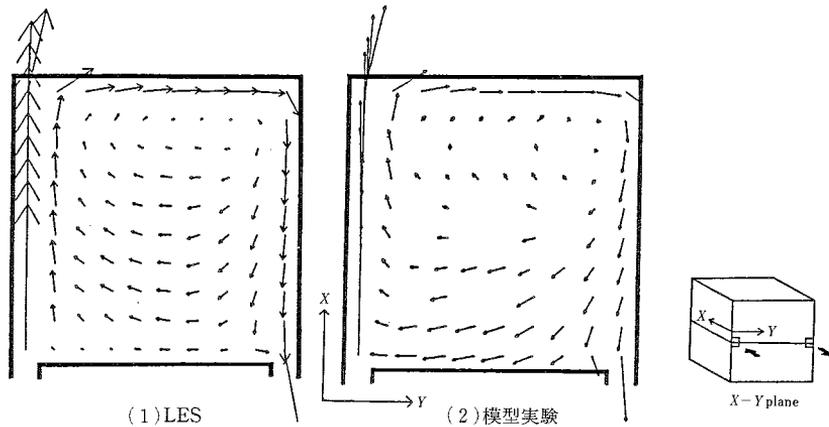


図4 平均風速ベクトルの比較

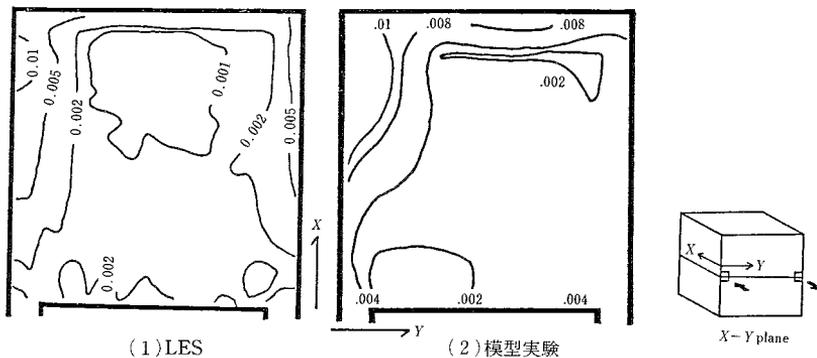
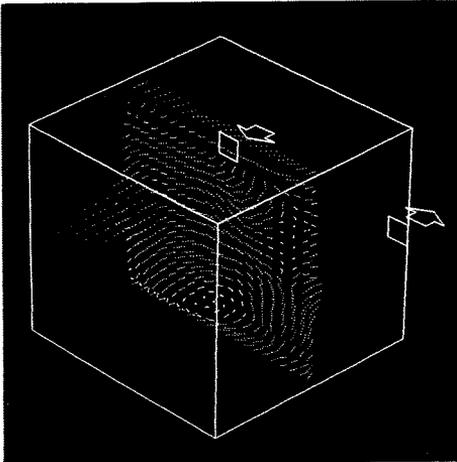
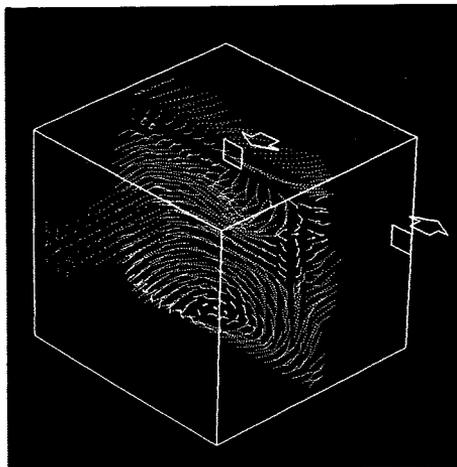


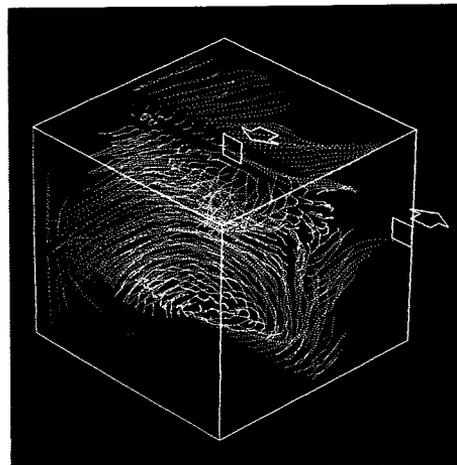
図5 乱流エネルギーkの比較



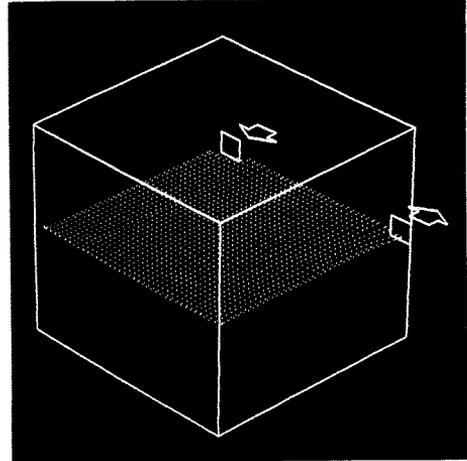
(a)  $\Delta t^* = 10$



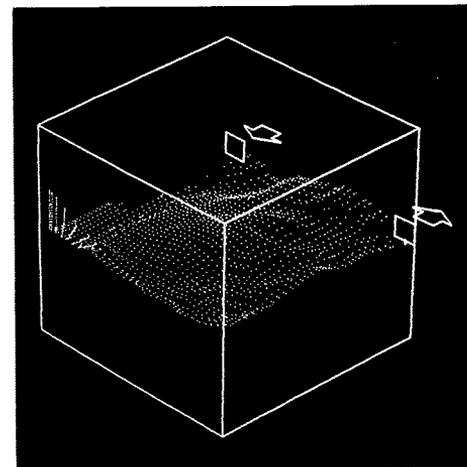
(b)  $\Delta t^* = 20$



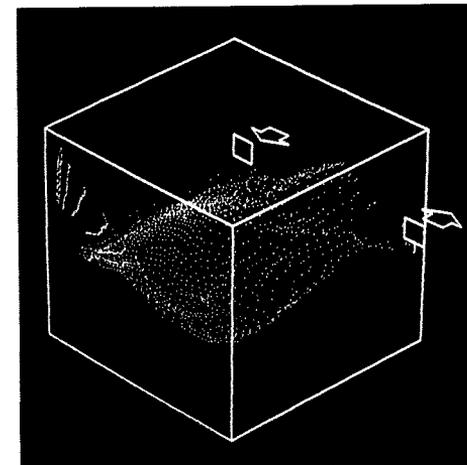
(c)  $\Delta t^* = 50$



(a)  $\Delta t^* = 0$



(b)  $\Delta t^* = 20$



(c)  $\Delta t^* = 50$

図 6 Streaklines

(室中央の鉛直断面内にマーカーをセット ( $x = 0.5H$ ))

図 7 Makers Movement

(室中央の水平断面内にマーカーをセット ( $z = 0$ ))