

乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究

—— 吹き出し・吸い込みを持つ室内気流の場合 ——

Study on Diagnostic System for Simulation of Turbulent Flow

—— Diagnosis of Room Air Flow with Ventilation ——

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・須 山 喜 美***

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Yoshimi SUYAMA

数値シミュレーションは、前提にした条件と与えられる結果との間にブラックボックス的部分が多く、結果の妥当性をシミュレーション結果のみから判断することは一般に困難である。計算を行った当人は、他の誰よりも結果に対して疑惑と不安を抱いていると言っても過言ではない。そこでこれらの不確定な部分の内容を明らかにし、結果の妥当性を検討するシステム（診断システム）を開発することが必要である。本稿では、診断システムの開発を目的として、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを基礎とする数値シミュレーションを吹き出し・吸い込みを持つ三次元の室内気流に適用した場合の一連の数値実験の結果を紹介する。

1. はじめに

乱流のシミュレーションは、乱流の数学モデルおよび、数値解析手法に依存し、必ずしも現実の乱流現象に対応するという保証はなく、シミュレーション結果の妥当性をシミュレーション結果のみから判断することは一般に困難である。したがってシミュレーションを工学分野へ応用するという立場からは、その結果の妥当性に関する絶えざる診断が必要となる。本報では、室内気流を対象とし境界条件、メッシュ分割、差分スキーム等に関する診断結果の一部を報告する。詳細は文献1)~6)を参照されたい。

2. 数値シミュレーションの概要 (図1, 図2, 表1, 表2)

4個の吹出口と4個の吸込口を有する室内モデル (図1) を対象とし、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデル (表1) により3次元的に解析する。解析に用いた代表的メッシュ分割 (以後基本タイプと称す) を図2に、代表的境界条件および差分スキーム (同じく基本タイプと称す) を表2に示す。数値解析はMAC法に準じて行う。また、基本タイプと異なる条件のシミュレーションは異なる点のみ表記する。

シミュレーション結果は、そのつど実験結果と照合され、変化させた各種計算条件のシミュレーション結果への影響を診断する。

3. 模型実験結果 (図3)

診断の基礎となる模型実験結果を図3に示す。測定はタンデム型熱線風速計を用いて3次元的にを行っている。詳細は文献7), 8)を参照されたい。

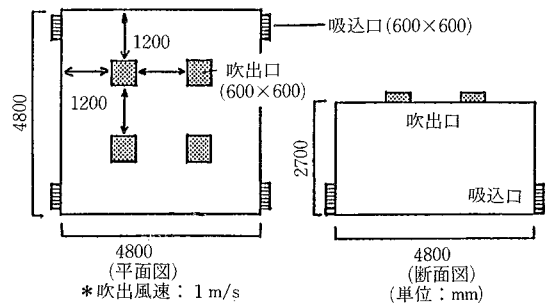


図1 室内モデル

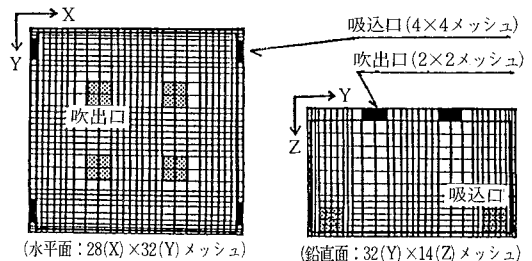


図2 基本タイプのメッシュ分割

* 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)間組技術研究所)

4. 基本タイプの数値シミュレーション (図4)

図2, 表2に示す条件によるシミュレーション結果を図4に示す。運動方程式 (表1, (2)式) の移流項については、吸込口近傍各方向4メッシュ以内のみを風上差分とし他の領域では中心差分としている (7章参照)。図はほぼ定常となった時点のある瞬間の風速分布を示す。

シミュレーションの全体的様相は、①吹出噴流やそれに誘導される下降流 (図3,4-(a)断面)、②壁面近傍での壁面に添う上昇流や入り隅における下降流 (図3,4-(a), (b), (c)断面)、③吹出口間の床面近くの小さい上昇流 (図3,4-(a)断面)、④室中央の上昇流 (図3,4-(b)断面)、⑤壁面近傍の流れ (図3,4-(c)断面)、⑥床面上の発散流 (図3,4-(d)断面) 等実験結果とよく一致する。しかし、①完全な定常解が得られず全体にわずかな周期的振動性が認められること、②①に対応しシミュレーション結果がわずかに非対称性を示すこと等の問題点も生じている。

5. 境界条件の診断

基本タイプに対し、吹出口を4×4とより細かく分割したメッシュ分割を用いて、壁面の各種境界条件を変化させた場合 (参考図参照) の比較を図5~7に示す。

5.1 速度に関する境界条件の影響 (図5)

吹出噴流部およびそれらの間の床面近くの小さい上昇流等、室の中心部の予測結果には差異はないが (図5-(1)~(3))、壁面近傍部分ではかなり様相が異なり、no-slip, 1/7乗則, free-slipの順に風速が大きくなる (図5-(4)~(6))。 (2), (5)の1/7乗則の場合が実験結果 (図3-(a), (c)) との対応が最もよい。

5.2 乱流散逸 ε に関する境界条件の影響 (図6)

壁近傍部分 (図6-(3), (4)) はもちろん、噴流の床面衝突部 (図6-(1), (2)) においても顕著な差異が認められる。壁法則 (ε~k^{3/2}/l, 表2および参考図注参照) とした方が実験との対応が格段によい。壁面では相対的に乱流散逸が大きな役割を果たす。この部分においてεの生産を評価しない free-slip が不適切なことは当然である。そのため乱流エネルギー k の分布の比較では、εを free-slip とした場合 (図6-(6))、全体に高めの値が分布し、壁法則とした場合 (図6-(5)) のほうが、実験結果 (図11-(1)) により近い。εの境界条件は k-ε モデルでは結果に極めて大きな影響を与える条件の1つである。

5.3 乱流エネルギー k に関する境界条件の影響 (図7)

壁面近傍でやや差異を生ずるものの (図7-(1), (2))、風速分布, k の分布ともほぼ同様の傾向を示し、乱流エネルギー k に関する境界条件の影響は少ない (図7-(3), (4))。

表1 数値シミュレーションの基礎方程式

$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$	(1)
$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\}$	(2)
$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon$	(3)
$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{k \epsilon}{\nu_t}$	(4)
$\nu_t = k^{1/2} l = \left\{ C_D \frac{k^2}{\epsilon} \right\}$	(5)

ただし $S = \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$

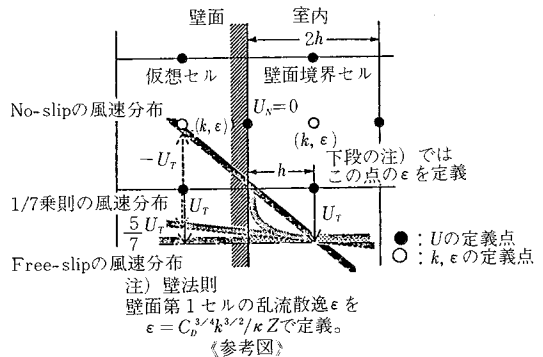
$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3,$
 $C_D = 0.09, \quad C_1 = 1.59, \quad C_2 = 0.18$

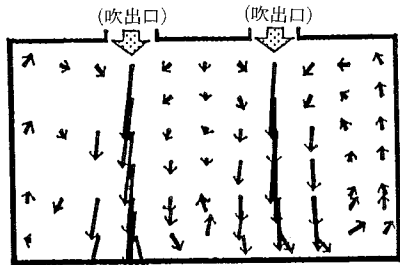
U_i : 平均速度 (m/s) P : 圧力 (N/m²)
 ν_t : 渦動粘性係数 (m²/s) k : 乱流エネルギー (m²/s²)
 ϵ : 乱流散逸 (m²/s³) l : 乱れの長さスケール (m)

表2 基本タイプの流入乱流量, 境界条件および差分スキーム

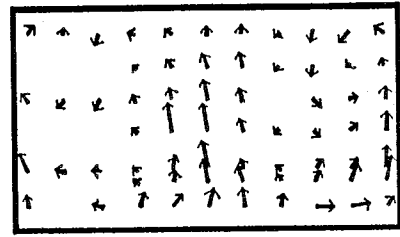
(1)吹出口 : $U_T = 0.0, U_N = U_{out}, k = k_{out}, l = l_{out}$ U_{out} : 吹出風速, $U_{out} = 1.0$ m/s K_{out} : 流入乱流エネルギー, $k_{out} = 0.05$ m ² /s ² l_{out} : 乱れの長さスケール, $l_{out} = 0.45$ m
(2)吸込口 : $U_T = 0.0, U_N = U_{in}, \partial k / \partial Z = 0.0, \partial \epsilon / \partial Z = 0.0$ U_{in} : 吸込風速, $U_{in} = 1.0$ m/s
(3)壁面 : $U_N = 0.0,$ $(\partial U_T / \partial Z)_{z=0} = m (U_T)_{z=h} / h,$ (左記の壁面境界条件は以下の仮定により導かれる) $m = 1/7$ $\cdot U_T \propto Z^{1.7}$ $\partial k / \partial Z = 0.0,$ $\cdot k: \text{free-slip}$ $\epsilon_{z=h} = C_D K_{out}^{3/2} / h / (C_D^{1/4} \nu h)$ $\cdot \epsilon \sim k^{3/2} / l$
(4)差分スキーム : (空間差分) : 運動方程式 (表1-(2)式) の移流項の吸込口周辺の領域および k, ϵ の輸送方程式 (表1-(3), (4)式) の移流項は風上差分, 他は全て中心差分。 (時間差分) : Adams-Bashforth による2次精度スキーム

(注)本シミュレーションは実スケールの物理量を用いてなされている

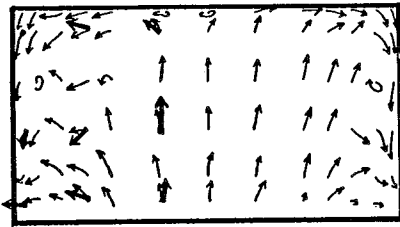




(a) 吹出口を含む鉛直断面

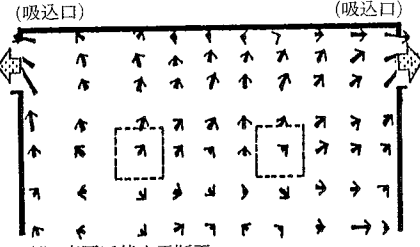


(b) 室中央鉛直断面



(c) 壁面近傍鉛直断面

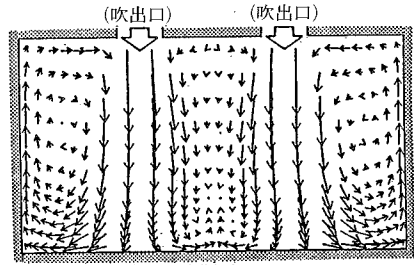
(—: スモークテスターによる可視化実験結果)
 (←: タンデム型熱線風速計による測定結果)



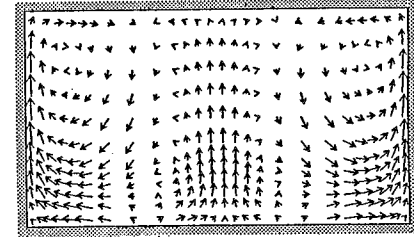
(d) 床面近傍水平断面

図 3 模型実験による気流性状

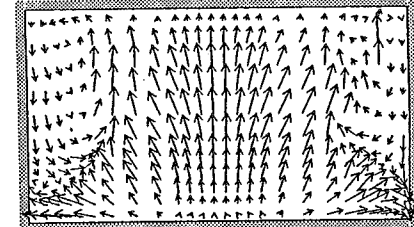
(タンデム型熱線風速計による測定結果)
 (詳細は文献 7 参照)



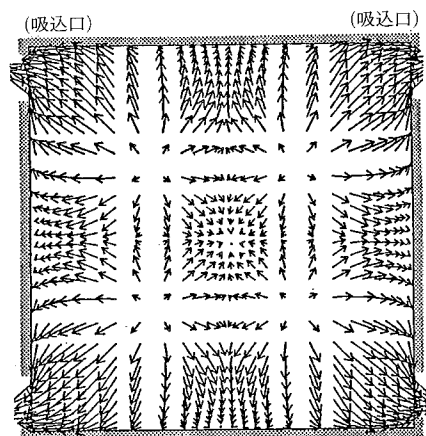
(a) 吹出口を含む鉛直断面



(b) 室中央鉛直断面

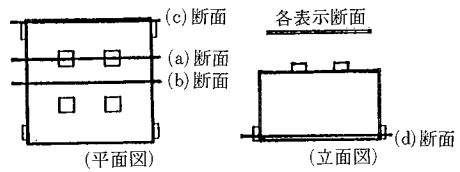


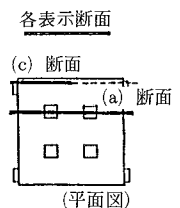
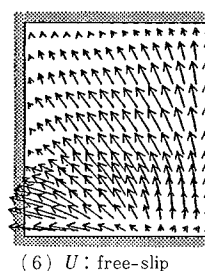
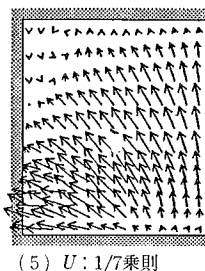
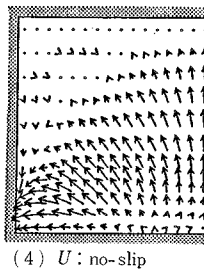
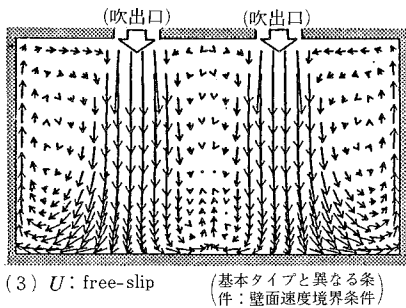
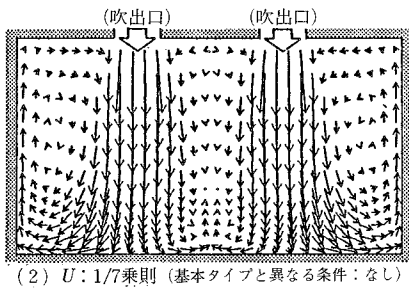
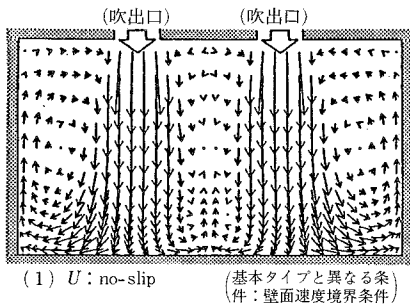
(c) 壁面近傍鉛直断面



(d) 床面近傍水平断面

図 4 基本タイプの条件によるシミュレーション結果





* (1) ~ (3) : 表示断面は (a) 断面 (吹出口を含む鉛直断面)
 * (4) ~ (6) : 表示断面は (c) 断面 (壁面近傍鉛直断面)

図 5 壁面速度境界条件が変化した場合の気流性状

6. メッシュ分割に関する診断 (図 8~11)

6.1 吹出口間の分割の粗密 (図 8,9 の比較)

吹出口間を 4 分割した場合 (図 8), 分割不足のため吹出口間の床面近くの上昇流が再現されていない。8 分割の場合 (基本タイプ, 図 9), 特にこの部分に関して実験結果 (図 3-(a)) との対応が明らかに向上する。

6.2 吹出口面の分割の粗密

(図 9,10 の比較および図 11,12)

吹出噴流の周辺には大きな速度勾配が形成され, これに基づく乱れの生産と散逸が流れ場全体に支配的影響を及ぼすため, この部分のメッシュ分割は重要である。この意味で 2×2 分割 (基本タイプ, 図 9) と 4×4 分割では平均風速ベクトルには大差ないものの (図 10), 乱流エネルギー k の分布および乱流エネルギー生産 $(-\overline{u_i u_i} S_{ij})$ の分布に関しては大きな差が見られる。すなわち, 4×4 分割の結果では, 吹出噴流周辺の shear flow に関する乱流量の明瞭な再現が認められ, 予測結果が大幅に改善される傾向を示す (図 11, 12)。ただし, 計算に用いた k の流入量が大きいいため数値そのものは実験より大きい。

6.3 天井近くの鉛直方向の分割の粗密

(図 10, 13 の比較, 図 14)

噴流方向のメッシュ分割は速度勾配が相対的に小さいことから比較的粗く設定されることが多く, 前項までの計算でも水平方向に比べ粗としてきたが, 特に天井付近でのこの粗密の影響を診断する。鉛直方向のメッシュ分割を天井近傍で密としても平均風速ベクトルには大差ないが (図 10, 13 の比較), 吹出口直下噴流方向 (鉛直方向) の分割を細かくした結果, 噴流部の吹出口からの乱れの長さスケール l の急激な減衰が緩和され, 実験結果に近づく (図 14)。

(他の境界条件)
 • k : free-slip
 • ϵ : 壁法則に固定

7. 吸込口周辺の解の振動と運動方程式移流項の差分形式の関係 (図 4, 15, 16)

運動方程式移流項を吸込口近傍各方向 4 メッシュ以内のみ風上差分とし他の領域では中心差分として計算した基本タイプの結果図 4 に対し, 移流項を全領域で中心差分として計算した結果を図 15 に示す. 図 15-(c), (d)

断面に示されるように吸込口周辺で速度ベクトルが激しく振動しており実験結果および吸込口近傍を風上差分とした結果 (図 4-(c), (d)) と異なる. なお, 室内中央断面 (図 4, 15-(a)) の様相は両者とも全く同一であり, 吸込口周辺で風上差分を用いた影響は現れていない. これに対して領域全体に風上差分を用いた場合, 図 16 に示すように吹出气流間で床面近くの小さい上昇流が消失し

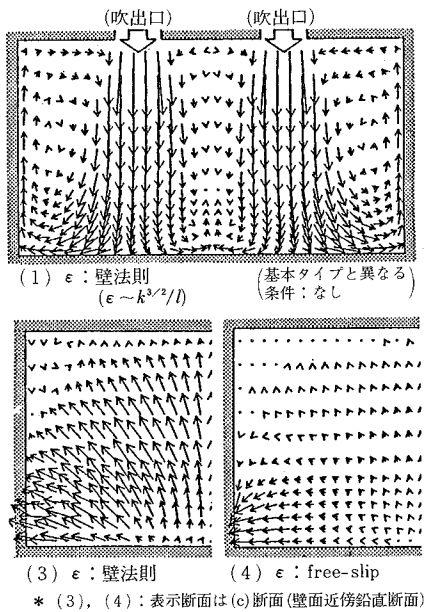
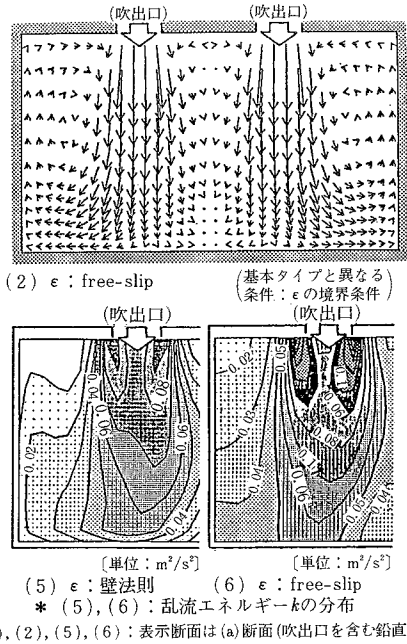


図 6 乱流散逸 ϵ に関する境界条件の影響



他の境界条件
 • U : 1/7 乗則
 • k : free-slip に固定

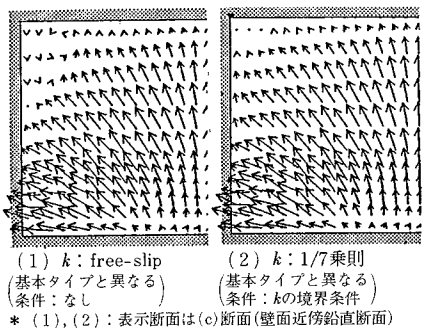
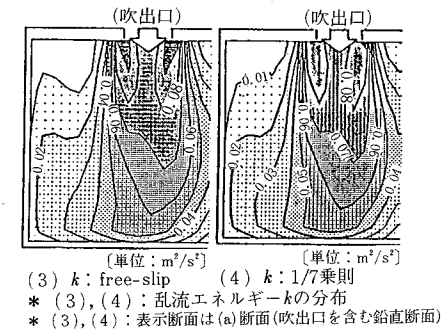


図 7 乱流エネルギー k に関する境界条件の影響



他の境界条件
 • U : 1/7 乗則
 • ϵ : 壁法則に固定

たり、吹出噴流の拡散が早くなる等、全体に粘性が大きくなったと同様の傾向を示し、実験結果(図3-(a))とは異なる様相を示す。風上差分の安易な適用が好ましくない結果をもたらす危険性を示している。

8. シミュレーション領域の対称性を利用した計算領域削減に関する診断(図17)

計算量を削減するためシミュレーション領域の対称性を利用して計算領域を対称部分の片側に限ることがしばしば行われる。図17に基本タイプおよび対称性を利用し基本タイプと同一メッシュ分割により全領域の1/4のみ計算した結果の比較を示す。計算結果の定常性は全体を解く場合に比べ極めてよい(図17-(b')~(d'))。しかし、図17に示す全領域の1/4のみ計算した結果は、①室中央の上昇流の値が小さい((b')断面)、②吸込口特に壁面端部の入り隅における下降流が再現されない((c')断面)等、基本タイプと異なり実験結果(図3-(b)~(d))と

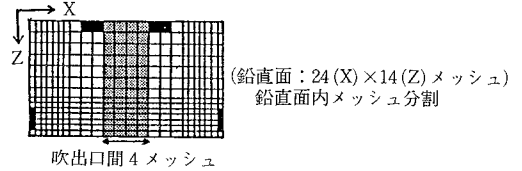
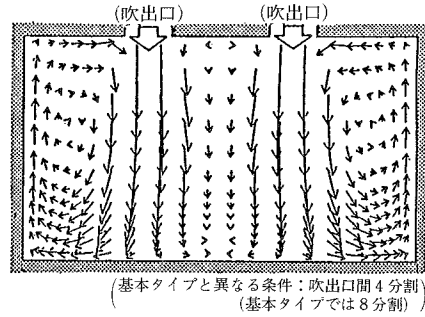
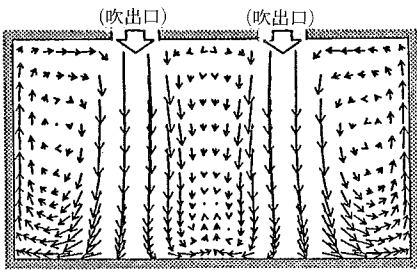
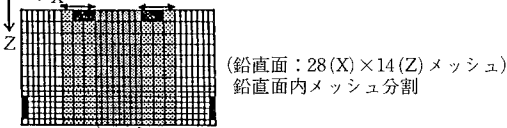


図8 吹出口間の分割を粗にした場合の気流性状



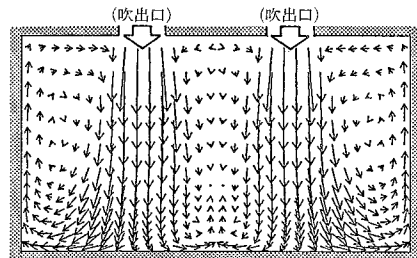
(基本タイプと異なる条件: なし)

吹出口周囲3メッシュ



吹出口間8メッシュ

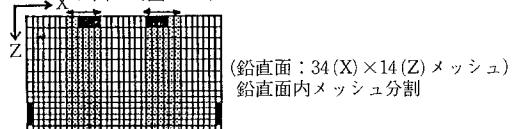
図9 吹出口面の分割を粗にした場合の気流性状



(基本タイプと異なる条件: 吹出口面4×4分割)

(基本タイプでは2×2分割)

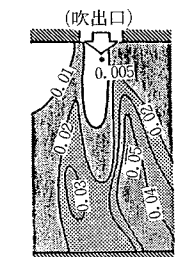
吹出口周囲6メッシュ



(鉛直面: 34(X)×14(Z)メッシュ)

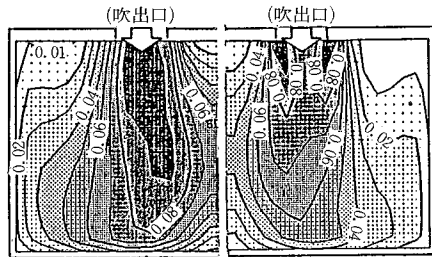
鉛直面内メッシュ分割

図10 吹出口面の分割を密にした場合の気流性状



(1) 実験

(約5~20cm間隔(実物のスケール)で測定して分布を描いた)



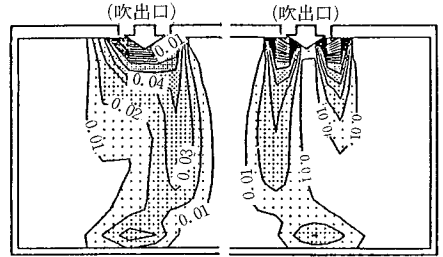
(2) 吹出口面2×2分割

(基本タイプと異なる条件: なし)

(3) 吹出口面4×4分割

(基本タイプと異なる条件: 吹出口面4×4分割)

[単位: m^2/s^2]



(1) 吹出口面2×2分割

(2) 吹出口面4×4分割

[単位: m^2/s^2]

図12 吹出口面の分割の粗密が乱流エネルギー生産(- $u_i u_i S_{ij}$)の分布に及ぼす影響

図11 吹出口面の分割の粗密がkの分布に及ぼす影響

一致しない。対称性を利用して全領域の一部のみを解析する場合、その結果が必ずしも全領域を一度にシミュレートした結果と一致しない場合があることに注意する必要がある。

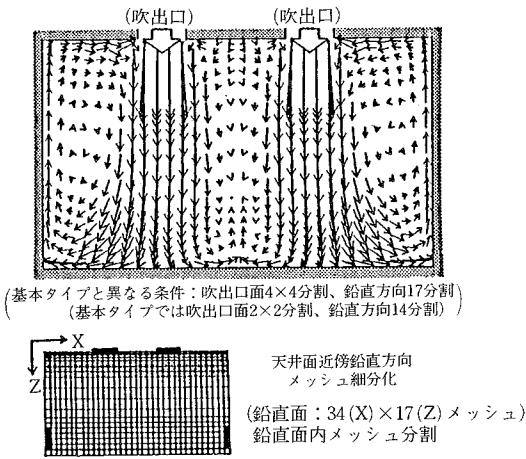


図13 天井面近くの鉛直方向の分割を密にした場合の気流性状

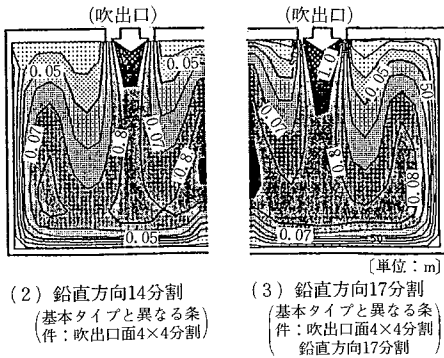
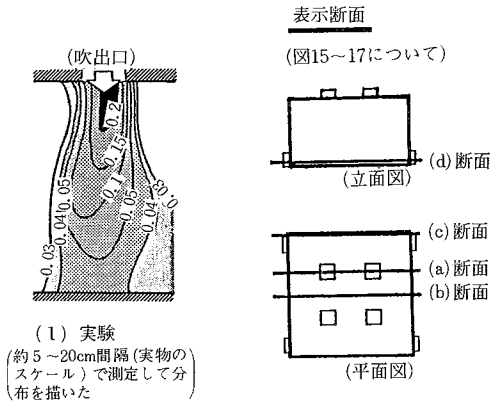


図14 天井面近くの鉛直方向の分割の粗密が l の分布に及ぼす影響

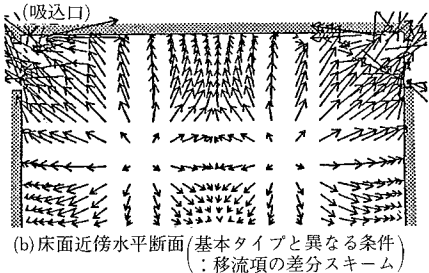
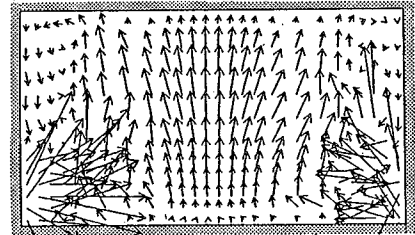
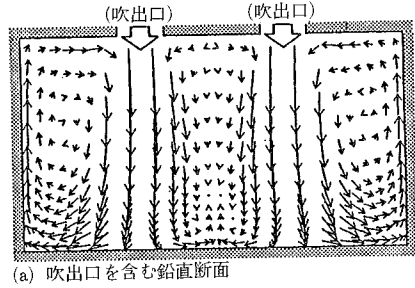


図15 全領域を中心差分とした場合の気流性状

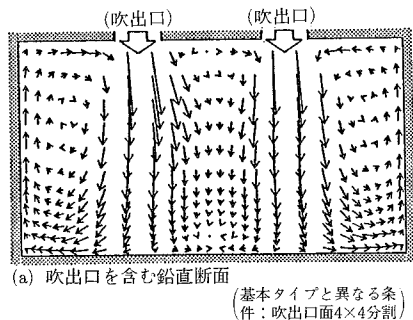


図16 全領域を風上差分とした場合の気流性状

9. ま と め

吹き出し・吸い込みを持つ室内気流について各種計算条件の影響を診断した。主要な診断結果は以下のとおりである。

- ① 壁面における ϵ の境界条件は、結果に極めて強い影響を与える。速度の境界条件の影響は ϵ ほど強くはない。
- ② 差分分割の粗密は平均風速ベクトルの分布に影響を与える。また、乱流統計量の分布の再現を向上させるためには、shear の大きい部分に対してはなるべく細かい分割を行うような配慮が必要である。
- ③ 吸込口周辺の解の振動の除去には吸込口周辺で部分的に運動方程式の移流項を風上差分近似することが有効である。
- ④ 対称性を利用し計算領域の削減を図る場合、その結果が全領域を計算した結果と一致しない場合のあることに注意する必要がある。

謝 辞

本研究は東大生研 NST (乱流数値シミュレーション) 研究グループ内の討論による示唆が大きい。グループメンバーの吉沢徹助教授、小林敏雄助教授をはじめ各メンバーに謝意を表します。(1985 年 11 月 7 日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 加藤信介: 乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究, 室内気流解析において診断の指標として用いられる各種乱流統計量について, 生産研究, 1985.6
- 2), 3), 4), 5) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: 乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究, 第二報, 第三報, 第四報, 第五報, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1985.7 および日本建築学会大会梗概集, 1985.10
- 6) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: 乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究, 第 6 報, 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1985.9
- 7) 加藤信介, 村上周三, 須山喜美: クリーンルーム内の気流性状に関する研究, その 5, その 6, 日本建築学会大会梗概集, 1984.10
- 8) 村上周三, 加藤信介: 室内気流の数値シミュレーションと実験の対応, コンベンショナル型クリーンルーム内気流の解析, 生産研究, 1984.12

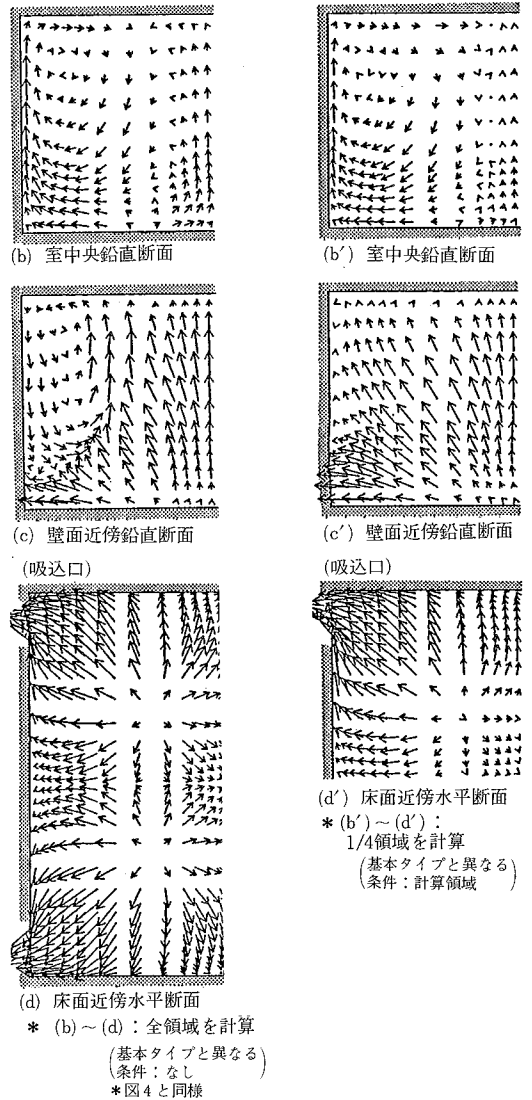


図 17 計算領域が異なる場合の気流性状の比較

(b) ~ (d) : 全領域を計算
(b') ~ (d') : 1/4 領域を計算

注: 1/4 領域計算時の計算条件

- 1) 計算領域 (下図斜線部)
- 2) 対称性を考慮して切断した対称面 (破線部) の境界条件
 - 速度: free-slip
 - k : free-slip
 - ϵ : free-slip

