

圧力型境界条件による屋内の換気，拡散の数値シミュレーション ——大空間の自然通風時の屋内環境解析——

Numerical Simulation on Natural Ventilation in Large-Scale Indoor Space with Pressure Type Boundary Condition

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・大和田 淳*
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Jun OOWADA

巨大空間内の風力による自然換気性状の詳細な検討を，周囲の地形・建物も再現した風洞模型実験と屋内気流の3次元乱流数値シミュレーションの組み合わせにより行い，2つの手法の持つそれぞれの利点を生かした両者の組み合わせによる解析が極めて有用なことを示す。すなわち，ここでは，既往の研究によりその信頼性の高いことが確認されている風洞実験により，開口部周辺の風圧係数分布および屋内全体の換気量を測定する。一方，数値シミュレーションにおいては，風洞実験では測定が困難である室内の風速分布および汚染質拡散性状を解析する。

1. 研究の目的

図1，2に示す幅400m，奥行180m，高さ27mの巨大空間内（東京都品川区に建設予定のO市場）の風力による自然換気性状を周囲の地形・建物も再現した風洞模型実験と屋内気流の3次元乱流数値シミュレーションの組み合わせにより詳細に検討し，両者の組み合わせによる解析が極めて有用であることを確認した結果を報告する。解析は3つの手順よりなる。

第1段階では実物の1/600模型を利用して，大空間の自然換気用の開口周辺の風圧係数および屋内の換気回数を風洞実験により求める。第2段階では3次元乱流数値シミュレーションにより，実験で得られた開口の風圧を既知の境界条件として室内の気流性状を算出する。この際，開口の風速は流入，流出を含め未知でありシミュレーションにより算出される。第3段階は求められた室内気流性状を基にして室内での汚染質発生に対応する汚染質拡散性状を数値シミュレーションにより解析し，室内の換気性状を検討する。

すなわち，本研究では，既往の研究によりその信頼性の高いことが確認されている風洞実験により，1/600模型を用いて開口部周辺の風圧係数分布および屋内全体の換気量を測定する。一方，数値シミュレーションにおいては，1/600模型では測定が困難である室内の風速分布および汚染質拡散性状を解析する。

2. 風洞模型実験

模型実験では東大生研所有の境界層型風洞を使用し，

対象とする大空間を中心とする半径480mまでの周囲の地形・建物を含む全体模型を実物の縮尺1/600で作成した。実験で使用した模型の概要を写真1に示す。

開口部近傍の風圧分布の測定には精密微差圧計(MKSバラトロン)を使用し，屋内全体の換気回数はトレーサー法を用い，屋内で定常発生させたトレーサーの屋内平均濃度から推定している。

実験で仮定したアプローチングウィンドの鉛直プロファイルは，図3に示す U （風速） $\propto Z$ （高さ） $^{1/7}$ の鉛直分布を使用した。

3. 開口部圧力型境界条件による3次元数値解析

解析は開口部境界条件を静圧で与え，開口部流入・流出風速を未知とする $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを用いた数値シミュレーションにより行う。この方法は単純形状の換気モデルに関し開口部流量や内部の気流，汚染質拡散性状を良く再現することが確認されている¹⁾。今回，多数

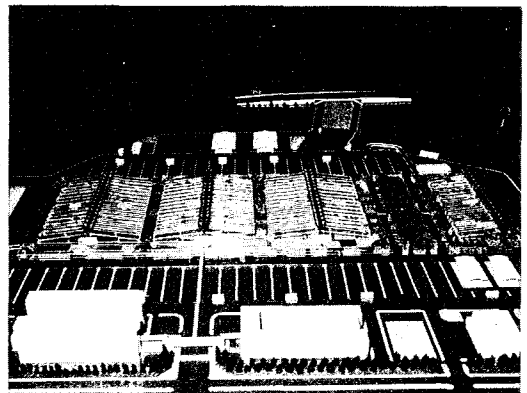


写真1 風洞内に設置された大空間模型

*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

の開口を持つ複雑な形状の大空間に適用して、その有効性を検討した。

3.1 基礎方程式

$k-\epsilon$ 型 2 方程式モデル (表 1) を使用²⁾。

3.2 境界条件

表 2 に示す。ただし、

- (1) 開口部外部仮想セル内の圧力は風洞実験結果を基にモデル化した値を与える。開口部法線方向速度は未知であり数値シミュレーションにより算出される。
- (2) 流入開口での乱流エネルギー k は開口部法線方向速度の 2 乗値の 2.5% (乱れの強さ 13%) とし、乱れの長さスケール l は開口幅の 1/2 と仮定した。

3.3 解析対象空間とメッシュシステム

図 4 に示す、72 (東西方向) × 42 (南北方向) × 16 (鉛直方向) = 48,384 のメッシュシステムを使用した。形状

は模型実験に比べ多少簡略化してある。

3.4 解析種類

南風、南東風、東風の 3 風向について行う。各風向における、仮定した開口部風圧係数を図 4 に示す。風圧係数の値は模型実験結果を基にモデル化した。

汚染質拡散性状は点発生の場合と床面一様発生の場合を解析した。汚染質発生高さは点発生の場合には床上 1 m の高さとし、床面一様発生の場合には床面上より発生させた。

3.5 結果の表示

(1) 風速分布

モニター頂部高さにおける外部風速 U_0 で無次元化した。

(2) 汚染質拡散性状

基準濃度 C_0 で無次元化した。基準濃度 C_0 は、

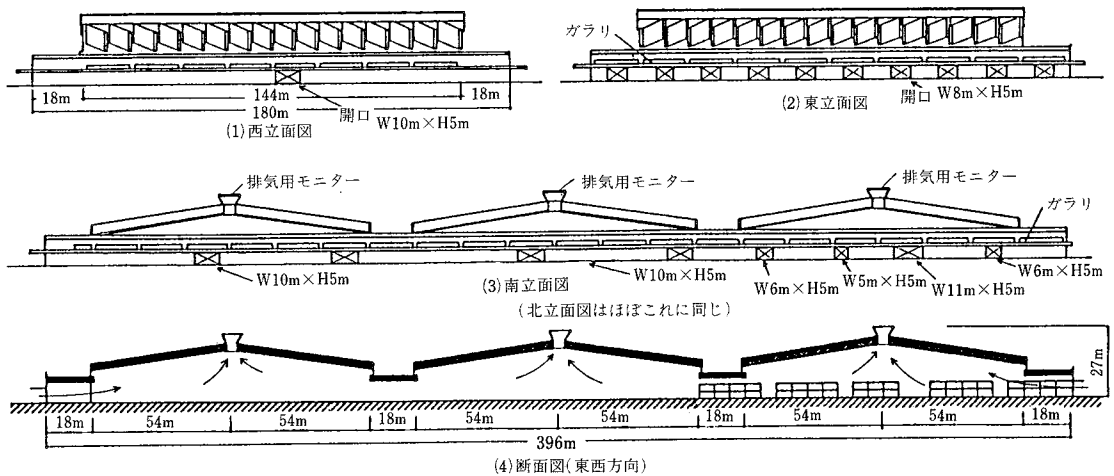
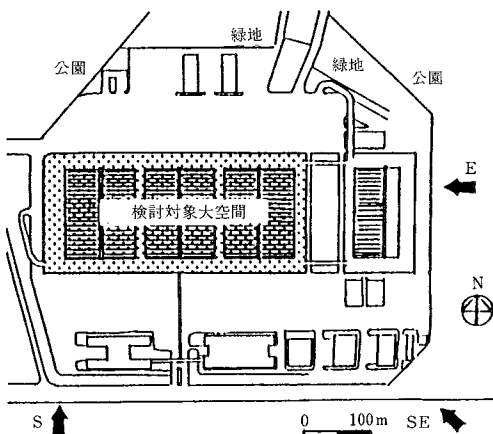


図 2 検討対象大空間の立面図・断面図



(風洞実験は検討対象大空間を中心に半径 480 m 以内の) 建物を模型化して行う

図 1 検討対象大空間の建物配置と実験風向

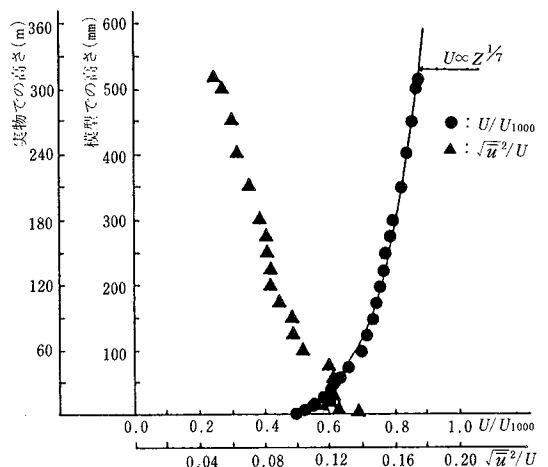


図 3 実験で仮定した接近流の鉛直プロファイル

表1 $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルの基礎方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = k^{1/2} l = \left\{ C_D \frac{k^2}{\epsilon} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right\} + C_s \quad (6)$$

ただし $S = \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$
 $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, C_D = 0.09, C_1 = 1.59,$
 $\sigma_3 = 1.0 \quad C_2 = 2.0$

U_i : 平均速度 (m/s) P : 圧力 (N/m²)
 k : 乱流エネルギー (m²/s²)
 ν_t : 過動粘性係数 (m²/s)
 ϵ : 乱流散逸 (m²/s³) l : 乱れの長さスケール (m)
 C : 濃度 (m³/m³) C_s : 汚染質発生項 (m³/m³/s)

$$C_0 = q / U_0 L_0^2 \quad (1)$$

{ q : 汚染質発生量, L_0 : 代表長さ (モニター頂部高さ: 27 m) }.

(3) 結果の表示断面位置

図 4 に示す.

表 2 境界条件

(1) 吹出口: $U_i = 0.0, P = P_{out}, k = k_{out}, l = l_{out}, C = C_{out}$

P_{out} : 吹出口面における静圧 (風洞実験値)

k_{out} : 流入乱流エネルギー, U_n の 2 乗値の 2.5%

l_{out} : 乱れの長さスケール, 開口幅の 1/2

添字 l, n : 吹出面に対しそれぞれ接線方向, 法線方向を示す.

(2) 吸込口: $U_i = 0.0, P = P_{in}, \partial k / \partial n = 0.0,$

$\partial \epsilon / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0$

P_{in} : 吸込口面における静圧 (風洞実験値)

(3) 壁面: $(\partial U_i / \partial n)_{n=0} = m(U_i)_{n=h} / h, U_n = 0.0,$

$\partial k / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0,$

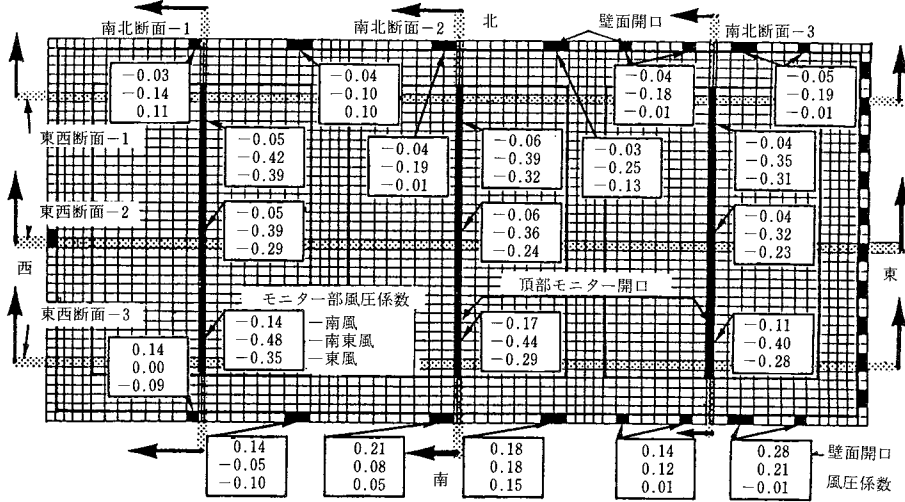
$(\epsilon)_{n=h} = \{ C_D (k)_{n=h}^{3/2} \} / \{ C_D^{1/4} \kappa h \}$

h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離

m : U_i のべき乗分布するときみなした時のべき指数,

ここでは $m = 1/7$

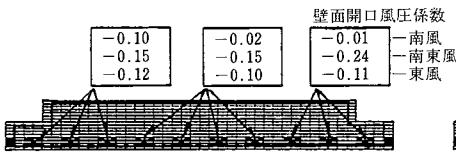
κ : カルマン定数, $\kappa = 0.4$



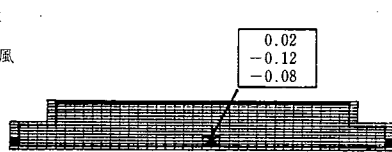
(a) 平面 (72×42メッシュ)



(b) 南(北)面 (72×16メッシュ)



(c) 東面 (42×16メッシュ)



(d) 西面 (42×16メッシュ)

注) 風圧係数は建物がない場合のモニター頂部高さの動圧、静圧を基準値として算出

図 4 メッシュ分割および各開口で仮定した風圧係数

4. 解 析 結 果

4.1 南 風

(1) 気流性状 (図5)

大空間内は外部風に対応して南壁開口から北壁開口に至る気流が生じる。この通気輪道の間には逆方向の流れが生じ、循環流を形成している。西壁沿いには北から南に向かう特に強い、主風向とは逆の気流が発生している。

北壁沿いには東から西に向かう流れが顕著である。これは東西の開口条件が異なるのが原因と思われる。風下側である北壁開口からの屋内空気の流れは僅かであり、大部分が中央および西側モニターの上側約 1/3 の部分で生じる。

開口部風速より求めた換気量は実験値の約 3/4 となり数値シミュレーションは実験値にはほぼ対応する値を示す。実験と開口条件等が多少異なることが換気量に多少

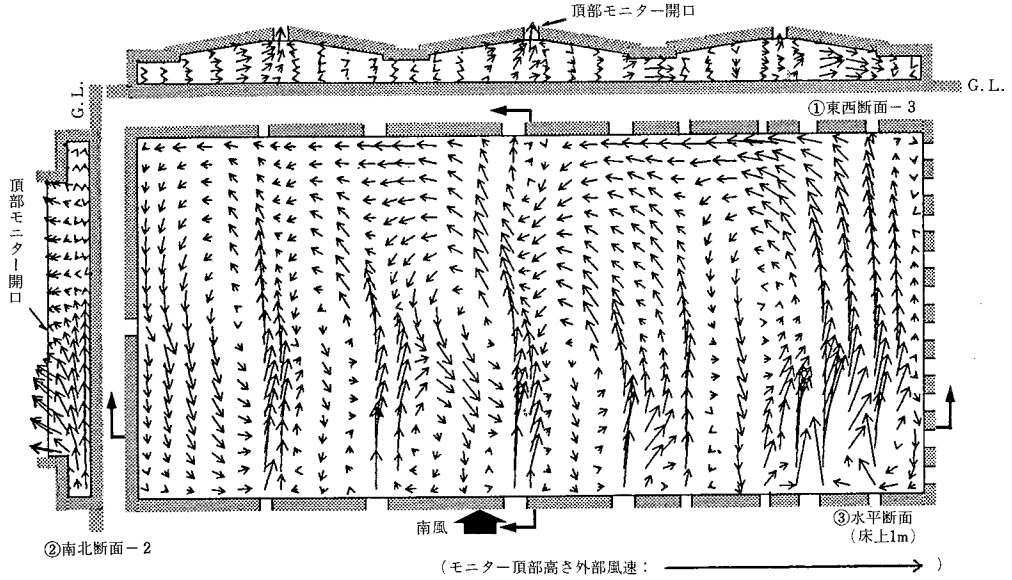


図5 南風の場合の気流性状

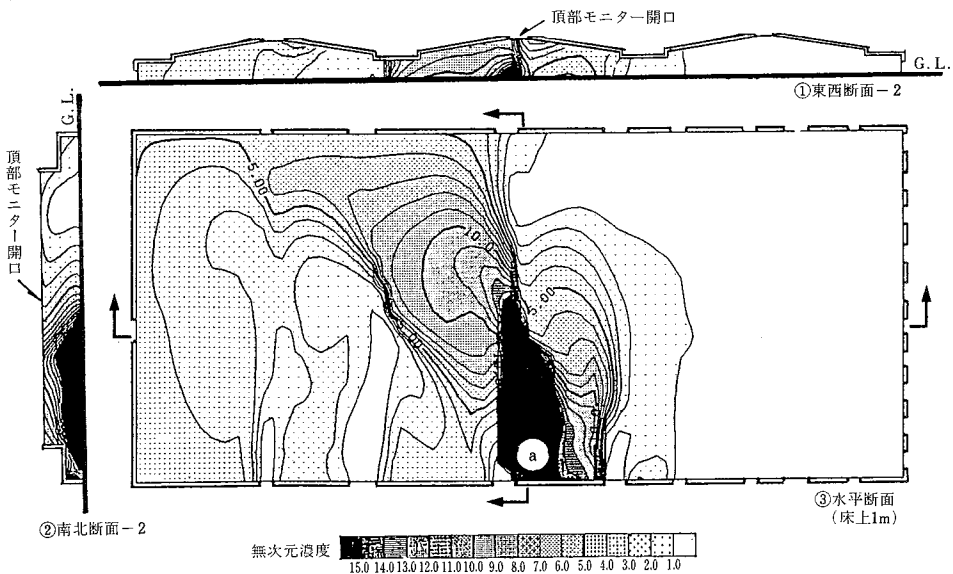


図6 南風の汚染質拡散性状 (汚染質発生 a 点)

の差が生じた原因の一つと考えられる。

(2) 汚染質拡散性状 (図6~8)

中央の南側 a 点で発生した汚染質は南から北への流れにより移流・拡散されて北壁近くに達する。その後、開口の少ない西壁側へは広く拡散するが、東壁近傍へはほとんど拡散しない (図6)。

中央東側 b 点で発生した汚染質も、北側に移流・拡散した後、西壁側へ広く拡散する (図7)。

汚染質が床面で一様発生した場合には、全体的に西側の濃度が高くなり、特に南西隅角部分に非常に濃度の高い部分を生じる。なお、この場合室内汚染質の平均濃度

は約4.6であり、南西側隅角部分には室内平均濃度の3倍以上となる領域が大きく広がっている。東壁近傍の濃度は比較的低めの値となる (図8)。

4.2 南東風

(1) 気流性状 (図9)

大空間内へは風上面である南壁、東壁開口部のみならず風下面である北壁、西壁開口部からも流入する。屋内からの流出は屋根モニターから行われる。大空間内部の気流は大略的に外部風に対応した南東から北西に向かう流れとなる。

(2) 汚染質拡散性状 (図10, 11)



図7 南風の汚染質拡散性状 (汚染質発生 b 点)

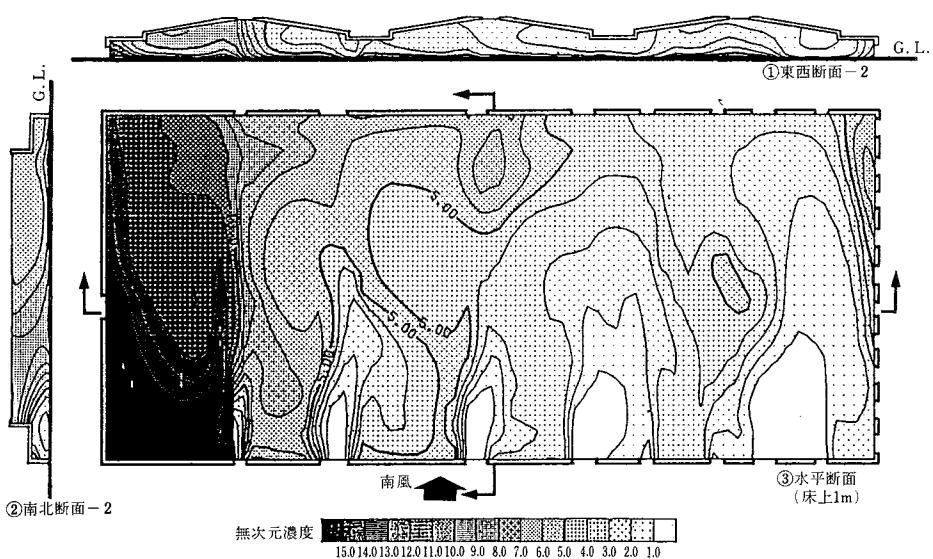


図8 南風の汚染質拡散性状 (床面一様汚染質発生)

b 点で汚染質を発生した場合には南東から北西に向かう流れにより、北西部に移流・拡散する (図 10)。

床面一様に汚染質が発生した場合には、南風の場合と同様に東壁近傍の濃度は比較的lowめであるが西壁近傍の濃度が高めとなる。特に、北西隅角部に汚染質濃度の高い部分を形成する (図 11)。

4.3 東風

(1) 気流性状 (図 12)

風上面である東壁開口部のみならず、風下面となる西壁開口および、南壁、北壁のすべての壁面開口から大空間内への流入がおこる。屋外への流出は南東風の場合と同様、屋根モニター開口を通して行われる。大空間内部の気流は大略的に、外部風に対応した東から西に向かう流れとなる。

(2) 汚染質拡散性状 (図 13, 14)

東から西へ向かう流れにより b 点で発生した汚染質

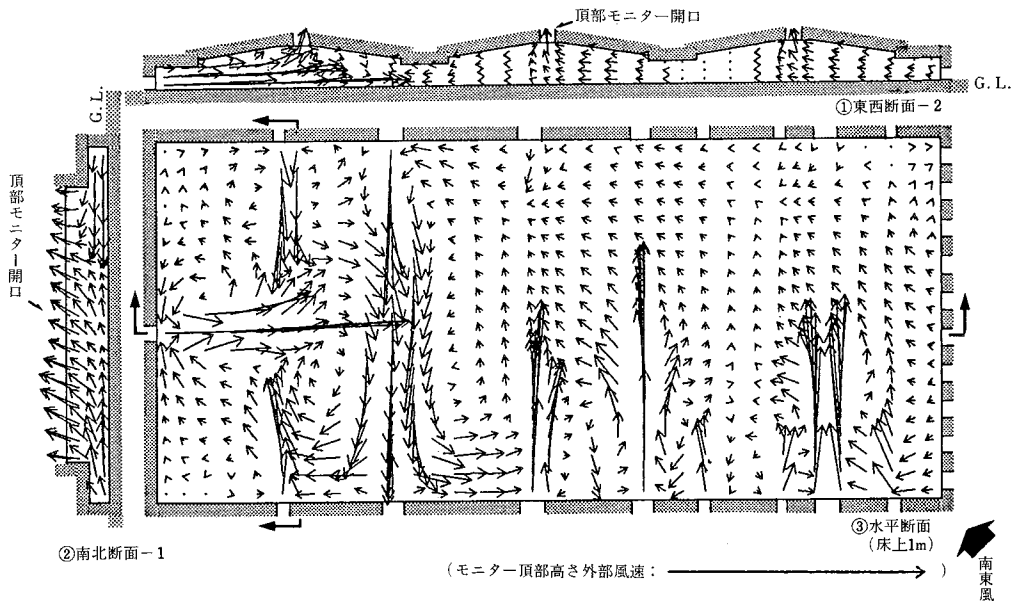


図 9 南東風の場合の気流性状

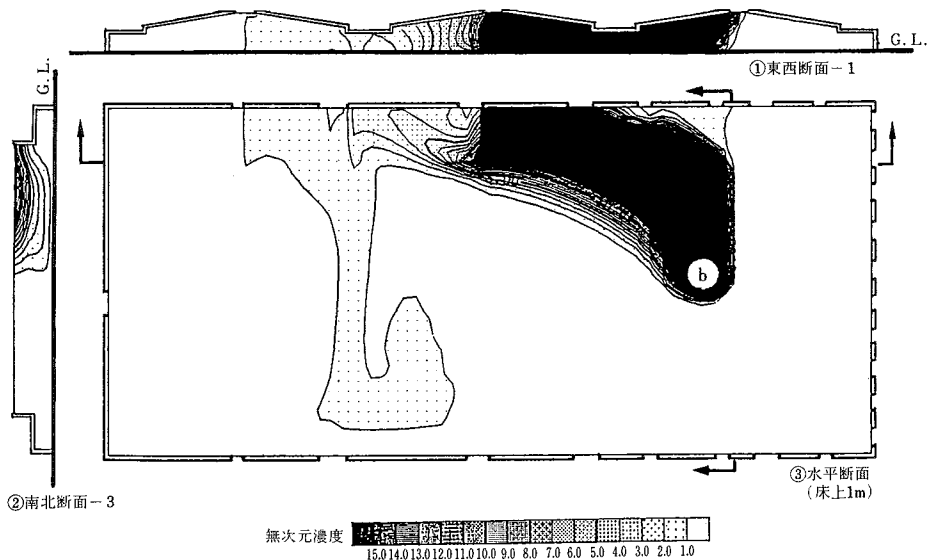


図 10 南東風の汚染質拡散性状 (汚染質発生 b 点)

は西側へ長く移流・拡散する(図13),

床面一様に汚染質が発生した場合には,他の風向と同様,西側の汚染濃度が東側の濃度に比べて高めになり,西側南北隅角部の汚染質濃度が特に高くなる(図14).

5. 結 論

(1) 風洞模型実験により自然換気シミュレーションに必要な風圧係数分布を求め,その複雑な圧力境界条件の下

で大空間の通風換気性状の3次元数値解析を行った.

(2) 3次元乱流シミュレーションで得られた大空間の換気量は模型実験により測定された値にほぼ対応する結果となった.

(3) シミュレーションにより詳細な室内の気流性状,汚染質拡散性状の解析が可能であることを確認した.

(4) 今回検討した大空間では開口の少ない西側南北隅角部に汚染質が滞留しやすいこと等が明らかになった.



図11 南東風の汚染質拡散性状(床面一様汚染質発生)

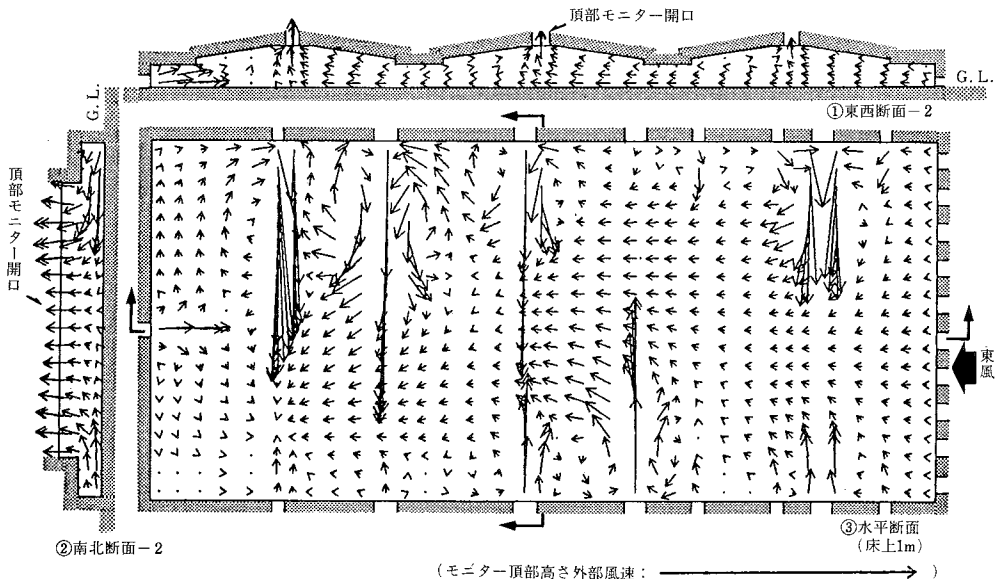


図12 東風の場合の気流性状

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京都 桶川仁省氏、米田亨氏、戸田敬里氏ほかの各位、ならびに(株)日建設計 奥田泰一氏、西村真孝氏、近藤靖史氏ほかの各位から多大の御協力を得ました。また、風洞実験においては東京大学生産技術研究所 技官 高橋岳生氏より多大な御協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

(1986年9月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 倉淵, 鎌田, 加藤「流入流出に圧力境界条件を適用した3次元乱流モデルによる数値解析及び実験」日本建築学会環境工学論文集, Vol.4 昭和57年11月
- 2) 加藤, 村上, 須山「クリーンルーム内の気流性状に関する研究」(その6)日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和59年10月
- 3) 高橋, 村上, 加藤, 大和田「大空間の自然換気に関する研究」(その3)日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和61年8月
- 4) 加藤, 村上, 大和田「大空間の自然換気に関する研究」(その5)日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和61年8月

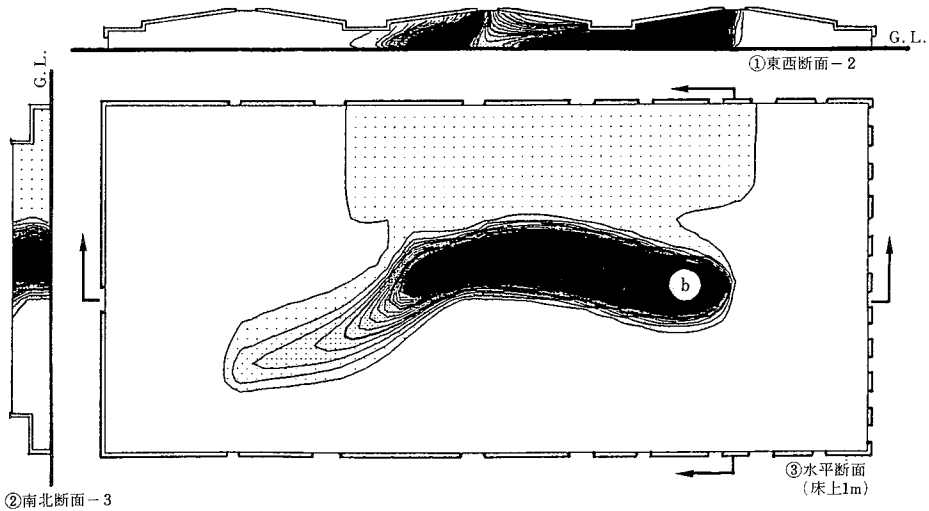


図 13 東風の汚染質拡散性状 (汚染質発生 b 点)

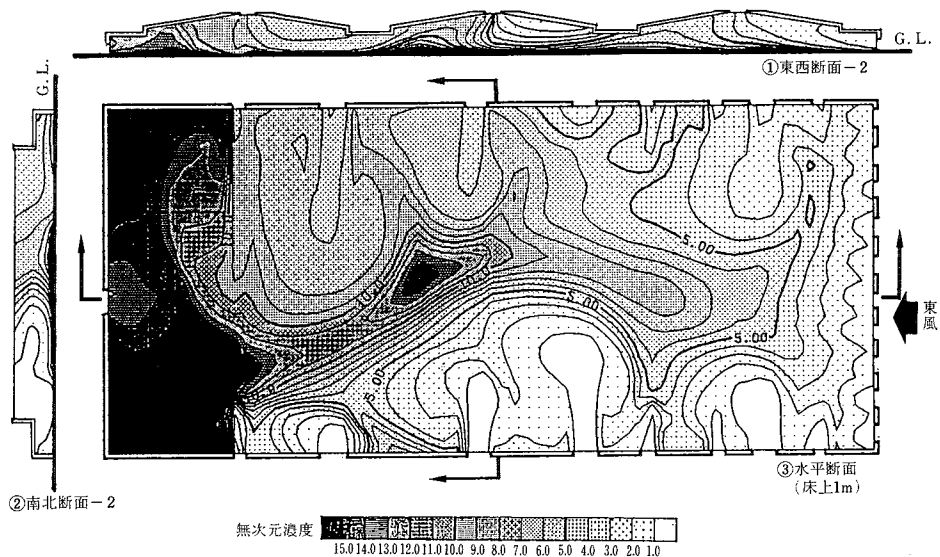


図 14 東風の汚染質拡散性状 (床面一様汚染質発生)