

建物群内における流れと拡散に関する実験的研究

その1. 流れ場の測定

孟 岩*・老 川 進*

大気環境学会誌 第32巻 第2号 別刷 (1997年)

大 気 環 境 学 会

建物群内における流れと拡散に関する実験的研究

その1. 流れ場の測定

孟 岩*・老 川 進*

A Wind-tunnel Study of the Flow and Diffusion Within Model Urban Canopies

Part 1. Flow measurements

Yan MENG* and Susumu OIKAWA*

モデル建物群内の流れ場と拡散場を調べるために風洞実験を行った。本研究のその1では建物群内外における平均速度および乱れの構造を詳細に調べた。モデル建物は、高さ8 cmの立方体を用い、その配置を千鳥状とした。また、建物の密度を10%から40%まで変化させた。流れ方向と鉛直方向の速度成分の計測は、乱れのレベルが高いかつ逆流に伴う流れ場を測定できるスプリットファイバースローブを用いて行った。その結果、モデル建物群内の流れ場は、建物密度を指標として、isolated roughness flow, wake interference flow および skimming flow と呼ばれるような三つのパターンに区分されることが明らかとなった。建物密度の増大に伴い、建物群内の流れ方向の速度が次第に小さくなり、建物密度が40%の時にほぼ0となる。また、建物屋根面上の流れの剥離に伴う大きな乱れの生成は、建物密度が20%を超えると殆ど見られなくなる。

1. はじめに

近年、都市域の建物が密集した場に、高濃度の大気汚染物質を排出するコージェネレーションシステム（熱電併給システム）などの施設が建設され、建物近傍の大気汚染の問題が懸念されている。このシステムは、高いエネルギー効率を有することから、都市域のエネルギー需要増加にともない急速に普及してきた。ここで問題は、燃焼過程で大気汚染物質である窒素酸化物（NO_x）が生成され、建物屋根面などに設置された煙突から高レベルのNO_xが排出されることである。建物表面には空調の取入れ口があり、また最近の都市再開発ではホテル、オフィスビルと多くの人々が居住する高層マンションなどが隣接して建設される。都市に居住および活動する人々の健康への影響を考えた時、高濃度の大気汚染物質が直接人体に取り込まれるのを避ける必要がある。したがって、都市域における

人々の健康を保護し、生活環境を保全するという観点から、建物近傍における大気汚染物質の移流、拡散するプロセスおよびその拡散機構に関わる現象の解明が図られるべきである。

建物周囲の流れは、単体建物を対象とした場合でも、屋根面や壁面での剥離、建物の上流や後流での渦の生成など複雑な流れを形成している¹⁻⁹⁾。都市域においては、さらに多くの建物が混在しその流れ場は一層複雑である。粗度要素近傍の流れ場について、Morris (1955)¹⁰⁾は、管内の摩擦損失係数の変化を調べることにより流れパターンを“isolated roughness flow”, “wake interference flow” および “skimming flow” の3つに区分した。その後、Lee and Soliman (1976)¹¹⁾ および Hussain and Lee (1980) ら¹²⁾は、建物壁面の圧力場の変化を調べ、これらの流れパターン間の遷移が、建物高さ (H)、建物の横幅 (W)、建物間の距離 (s_b) など幾何学的な形態に依存することを示した。

* 清水建設(株)技術研究所 〒135 東京都江東区越中島 3-4-17

彼らは、建物が規則的にまたは交互に配列された時、isolated roughness flow から wake interference flow への遷移は建物密度8%と14%で、wake interference flow から skimming flow への遷移は18%と32%で発生することを示した。Oke (1987)¹³⁾は、この三つの流れパターンを概念図で表した。しかし、彼らの研究の中には、流れ場そのものが測定されておらず、速度場の平均分布や乱れの性質については明らかにされていない。建物が均等に配置された建物群内の流れ場を定量的に測定した例としては、村上ら (1990)¹⁴⁾の研究が上げられる。彼らは、風洞にてタンデム風速計を用いて、モデル間距離 $s_b/H=3$ (建物密度6.25%) の場合の流れ場について、定量的な計測を行っている。また建物間の距離が変化した時の流れ場を、LES (Large Eddy Simulation) を用いた数値計算により調べた。その結果、 $s_b/H=1$ (建物密度25%) の時、循環流 (cavity flow) が形成されることを確認し、 $s_b/H=3$ 以上では孤立した建物に類似した流れ場となることを示した。実際の都市の形態は、キャニオンのように建物が整然と並んでいる場合もあれば、不規則に並んでいる場合もある (たとえば、建物、道路、交差点、公園などの混在)。その時の流れ場は、前後の建物の干渉により影響を受ける以外に、近隣の建物間の相互作用による影響も受ける。こうした流れ場については、これまで定量的に調べた例はない。都市域での拡散現象を考える際には、建物が交互に配置された場合の流れ場も調べる必要がある。

本研究では、風洞において立方体のモデル建物を千鳥状に配列し、建物密度を系統的に変化させた時の流れ場と拡散場を定量的に調べた。本論文その1では、建物間の流れ場の測定結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 風洞とモデル建物の配置

実験は清水建設(株)技術研究所の小型回流式風洞を用いて行った。風洞の測定部の長さは7m、測定断面の

高さとは幅はそれぞれ0.9mと1.1mである。風洞風速は最大20m/s、気流の乱れの強さは1%以下である。風洞の床にモデルを置かない場合、測定部入り口から下流に向かって乱流境界層が形成され、その高さはターンテーブルの中心 (下流側4.6m) において約8cmとなる。Fig. 1には本風洞実験の概要を示した。高さ8cmの木製の立方体モデル建物を測定部入り口より主流方向に千鳥状に配置し、その密度を10%から40%まで変化させた。Fig. 2は建物配置状況を示す。建物群の形状パラメータと代表寸法はTable 1にまとめた。表中には、建物の密度を表す指標として、以下の三つの密度を示した。

鉛直方向の平面密度： $\rho_z = (a_z/A_z = bd/BD)$ ；

流れに垂直方向の平面密度： $\rho_x = (a_x/A_x = b/B)$ ；

等価粗度密度： $\rho_e = (a_x/A_z = bH/BD)$ 。

ここで、 $A_z (=BD)$ は対象空間の垂直方向における平面面積 (xy 平面)、 $A_x (=BH)$ は対象空間の流れ方向に垂直な断面 (yz 断面)、 $a_z (=bd)$ は建物の xy 平面上への投影面積、 $a_x (=bH)$ は建物の yz 面上への投影面積である。記号の定義を Fig. 3 に示し、 x 軸を流れ方向に、 y 軸は風向直角の水平方向に、 z 軸を鉛直方向にとる。垂直方向の平面密度 ρ_z は、建物密度や平面密度などとも呼ばれている。また、等価粗度密度は、有効粗度表面積率や roughness density とも呼ばれ、植生キャノピーの研究によく用いられている。建物として立方体を用いる場合は、垂直方向の平面密度と等価粗度密度が等しくなる。本研究では、鉛直方向の平面密度 ρ_z を建物密度と呼ぶ。流れ方向の平面密度 ρ_x は、本研究で新たに定義した指標であり、その値が50%を越えると、建物高さ以下の層における流れが見かけ上遮断されている状態にある。

2.2 風洞実験の相似則

実スケールでの流れ現象を風洞内に再現するため、一定の相似条件を満たさなければならない。建物近傍の流れ現象を調べる際によく用いられている相似則の

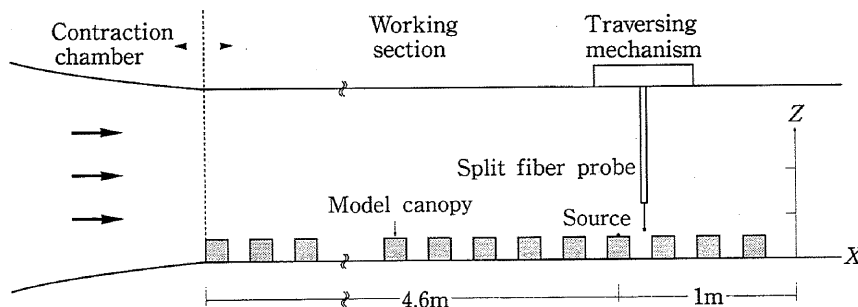


Fig. 1. Schematic of the wind tunnel experimental set-up.

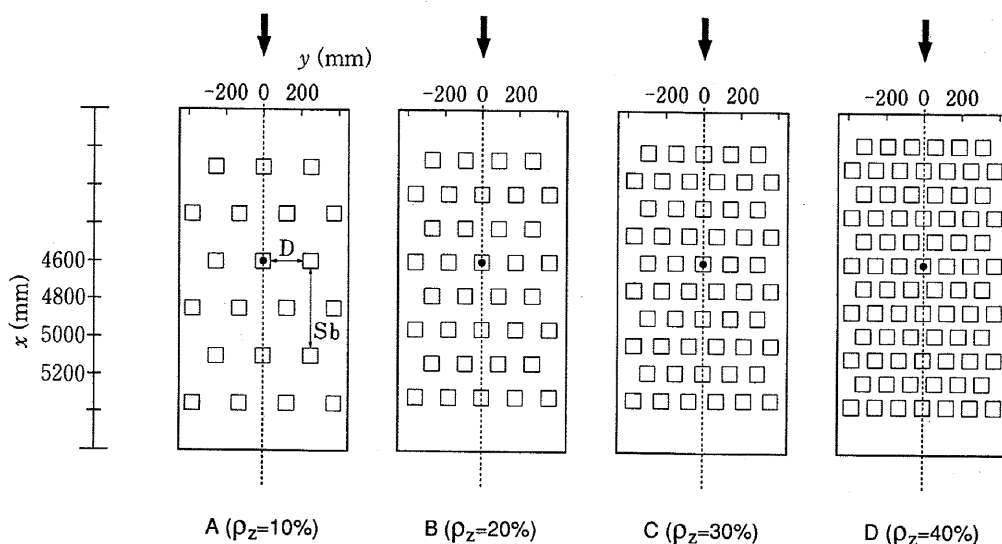


Fig. 2. Array of model buildings for each plan-area density of buildings.

Table 1. Parameters and representative sizes of the model urban canopies.

Mnemonic	A	B	C	D
Array Type	Diamond	Diamond	Diamond	Diamond
Roughness concentration ρ_e	10%	20%	30%	40%
Density in z direction ρ_z	10%	20%	30%	40%
Density in x direction ρ_x	32%	45%	55%	63%
Nearest neighbour separation D	2.1H	1.2H	0.8H	0.6H
Spacing between the building S_b	5.3H	3.5H	2.7H	2.2H

$$p_e = bH/BD, \rho_z = a_z/A_z = bd/BD, \rho_x = a_x/A_x = b/B$$

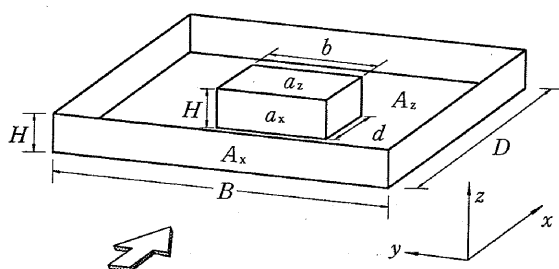


Fig. 3. Determination of variables.

一つは、Inoue (1952)¹⁵⁾により提案された乱流レイノルズ数 $Re_t (= U_h h / K_m)$ 相似である。ここで、 U_h は建物高さ h での風速、 K_m は渦粘性係数で、constant flux layer の中において $ku_* h$ で代表させることができる。更に、 u_* / U_h は σ_{uh} / U_h に比例することを考えると、乱流レイノルズ数の一致は、建物高さでの乱れの強さ $I_{uh} (= \sigma_{uh} / U_h)$ を一致させることとなる。実際の都市において、建物密度によって建物高さでの乱れの強さがどのように変化するかについての定量的なデータは殆ど得られていない。著者ら (1995)¹⁶⁾ の

最近の観測によると、建物密度 25% の場合、建物高さでの乱れの強さは約 40% である。Table 2 には本実験から得られた結果を示す。建物高さの乱れの強さは、建物密度 20% の場合に 34%、建物密度 30% の場合に 44% となっている。観測地点での建物密度が上記の 2 ケースの平均値に等しいことを考えると、本風洞実験は観測結果に近い値を与えたといえる。

2.3 計測機器と測定方法

流れ場の測定はスプリットファイバークロブ (以下 SFP と略記; 55R57; DANTEC)¹⁷⁾ を用いて行った。SFP は、直径 0.2 mm 石英ファイバーに蒸着されたニッケルフィルム (厚さ 0.5 μm , 有効長 1.25 mm) に 2 本の分割線をひき、2 枚の半円筒状熱膜を形成させたものである。X 型熱線プローブに比べ、SFP の最大の特徴は逆流を検出できることである。その原理は、風上にあたる SFP のセンサーからの出力が風下のセンサーからの出力よりも大きくなる特性を利用して風向を判定するものである。SFP による逆流

Table 2. Characteristics of flow field between buildings and on the roof.

建物密度	U (m/s)	I_u (%)	U_{ROOF} (m/s)	I_u_{ROOF} (%)	I_r_{ROOF} (%)
10%	2.49	27.8	1.65	80	13.7
20%	2.30	33.7	2.49	37	0.45
30%	1.57	44.3	2.44	31	0.06
40%	1.64	42.9	2.37	32	0.03

U, I_u : Wind velocity and turbulence intensity between building M1 and M2 at $z=H$

U_{ROOF}, I_u_{ROOF} : Wind velocity and turbulence intensity on the roof at $z=1.125H$

I_r_{ROOF} : Reverse flow rate on the roof at $z=1.125H$

域における乱流場の測定方法は佐々木, 木谷 (1985)^{18,19)}により提案され, その有効性も風洞実験により検証された。本研究では佐々木, 木谷の方法に従い, 流れ場の乱流測定を行った。SFPは, 温度補償付きの定温度型熱線風速計 (DANTEC, 56C-SYSTEM) に接続されており, 風速計からの出力は, 1 kHzのローパスフィルターを通してから, 2 kHzでA-D変換を行った。安定した平均速度と乱れの統計量を得るために, 平均化時間を50秒とした。また風洞風速は, どの建物密度の場合においても, 6 m/s ($z=40$ cm) に設定した。計測は, 測定部入り口より風下方向4.6 mの所に設置される建物の中心からその真後ろの建物の中心まで行った。

3. 実験結果と考察

3.1 平均速度の分布

建物密度の変化が流れ場に及ぼす影響を検討するため, まず速度ベクトルの分布を調べる。Fig. 4(a)~(d)には建物密度を10%から40%まで変化させた時の平均速度のベクトル図 ($y/H=0$ の鉛直断面内)を示す。各速度成分は, 基準風速 U_r で無次元した。基準風速 U_r は建物の影響を受けていない高さ $5H$ ($z=40$ cm)の風速値を用いた。

建物密度10%の場合 (Fig. 4(a)), 建物M1の後流域に顕著な lee eddy が生じ, その下に弱い下降流に伴う2次流 (secondary flow) が存在する。後流の再付着は, 建物背面から約1H離れたところに見られる。再付着点を離れると, 建物下層での風速が回復し始め, 速度ベクトルも上向きに転じる。一方, 建物M2風上面の前方では, 建物高さ2/3以下の領域に frontal eddy と呼ばれる小さな渦が見られ, また, 建物M2前縁の角部に強い上昇流が存在する。建物密度10%の流れのパターンは, 全体的に見ると, 単体建物

の場合 (Ogawa *et al.*)⁷⁾, Case R6) のそれによく似ている。建物密度が20%になると (Fig. 4(b)), 流れのパターンはすこし変化する。建物M1の後流域の lee eddy が小さくなる一方, 建物M2風上面の前方の frontal eddy がかなり大きくなる。建物密度が30%以上になると (Fig. 4(c), (d)), 流れのパターンは単体建物の場合と全く異なっている。まず, 建物M2の前縁の角部には上昇流が全く見られず, 風があたかも建物の屋根面を滑るように流れている。一方, 建物M1と建物M2の間に, 二つの大きな循環流が形成されている。この二つの循環流の大きさは, それぞれ建物M1と斜め後の建物M3 (Fig. 13を参照)の間の距離, または建物M2と斜め前の建物M3との間の距離にほぼ等しい。建物M2の前方に存在する循環流は, 建物M2の前面に強い下降流を引き起こしている。本論文その2に示されるように, 建物高さに排出されるトレーサガスがこの強い下降流によって地表面に運ばれ, 地表面に高い濃度域を発生している。

一般に建物の中間地点での平均速度の鉛直分布は, 建物群内の風速の空間平均値の鉛直分布に近いといわれている²⁰⁾。一方, 建物屋根面上の流れ場の性状は, そこで排出される物質の拡散に大きな影響を与える⁸⁾。Fig. 5には, 建物M1と建物M2間の中間位置における速度成分 U/U_r と逆流率 I_r の鉛直分布を示す。建物の高さ以下の層においては, 建物密度が大きくなるにつれ, 速度成分 U の値は次第に小さくなり, 逆に逆流率は次第に大きくなる。建物密度40%の場合, 速度成分 U の値はほぼ0となり, 逆流率 (全測定時間の中に逆流の占める割合) も40%に近い値となる。一方, 建物の高さ $1.5H$ 以上の層においては, 速度成分 U/U_r の値は建物密度にほとんど依存しない。Fig. 6には, 建物屋根面における速度成分 U/U_r と逆流率 I_r の鉛直分布を示す。建物密度10%の時には, 流れが剥離したために, 屋根面近傍での速度成分 U/U_r の値がかなり小さくなっている。建物密度が20%以上になると, 屋根面上の流れの剥離がなくなり, 速度成分 U/U_r の分布もほぼ同じようになる。屋根面上の流れが剥離しなくなる理由は, 建物密度が高くなると建物間の流れが弱くなり, 建物前面の角部に上昇流が起きにくくなることによるものと説明できる。

建物密度の変化が流れ場に及ぼす影響を検討する上に, 平均速度の水平方向の分布を知ることも重要である。Fig. 7には, 建物M1の後流域 (建物M1の背面から $1/8H$ を離れる高さ $1/8H$ の水平線上) における速度成分 U/U_r の水平分布を示す。建物密度10%と20%の場合, 建物M1の背後域では速度成分 U が

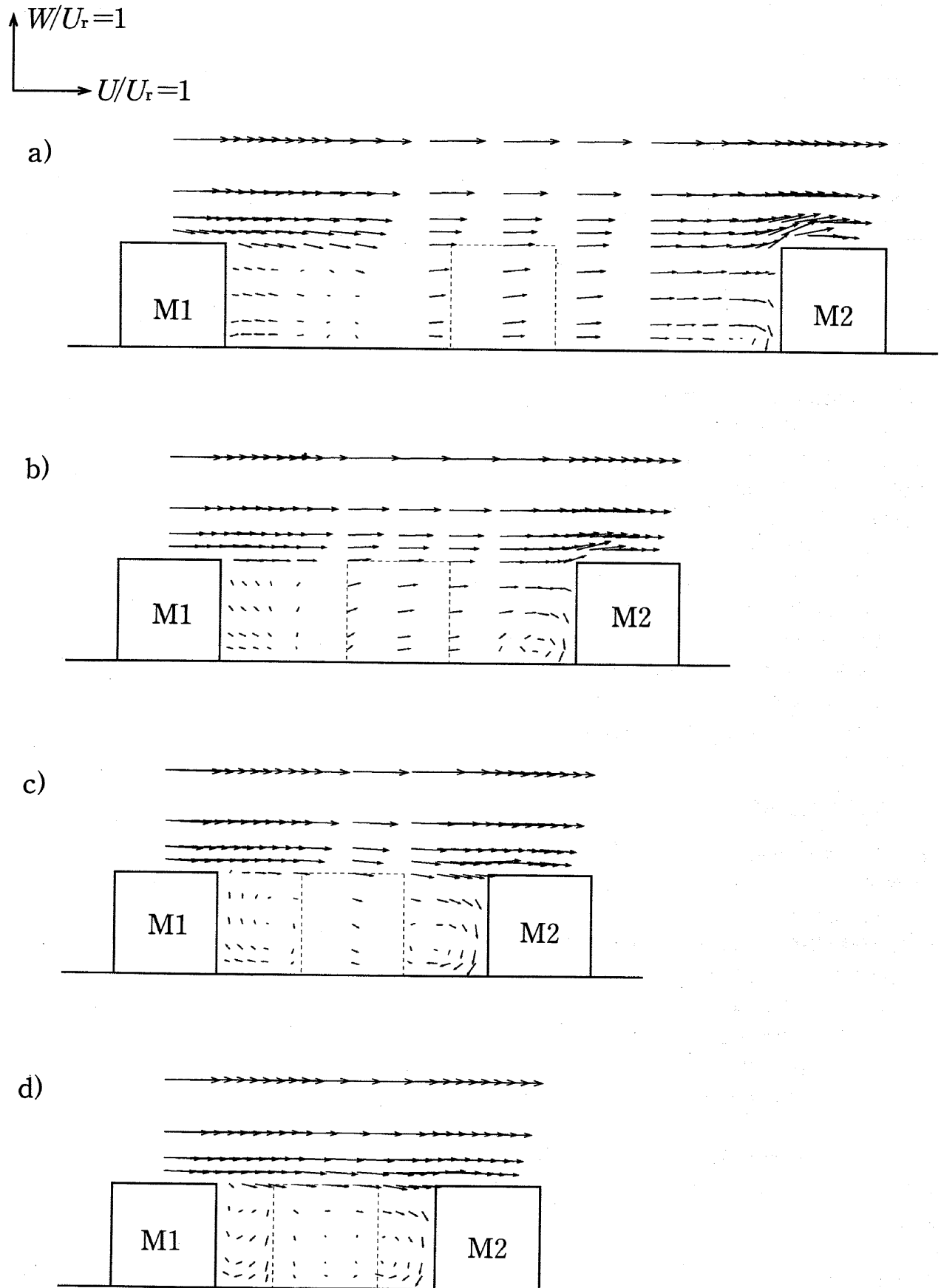


Fig. 4. Time-mean velocity vectors (U/U_r , W/U_r) in the $y/H=0$ plane.
 (a) $\rho_z=10\%$; (b) $\rho_z=20\%$; (c) $\rho_z=30\%$; (d) $\rho_z=40\%$.

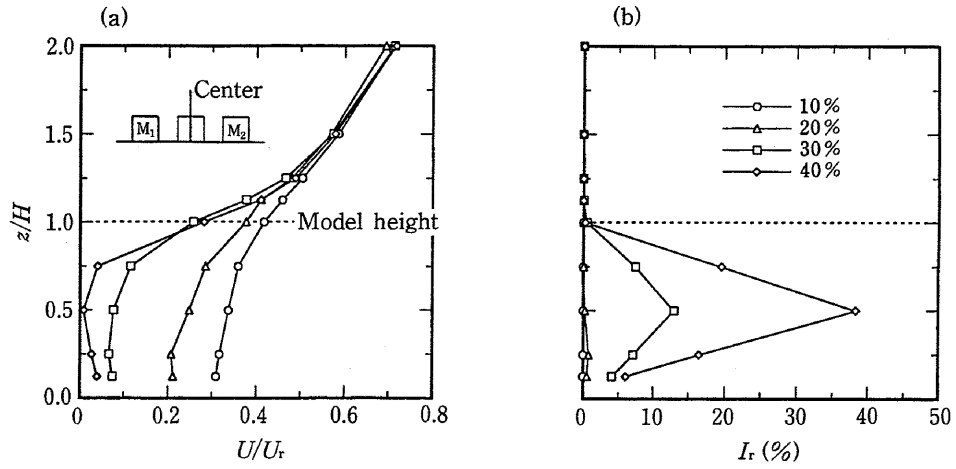


Fig. 5. Vertical profiles of (a) time-mean velocity U/U_r and (b) reverse-flow intermittency I_r at the center.

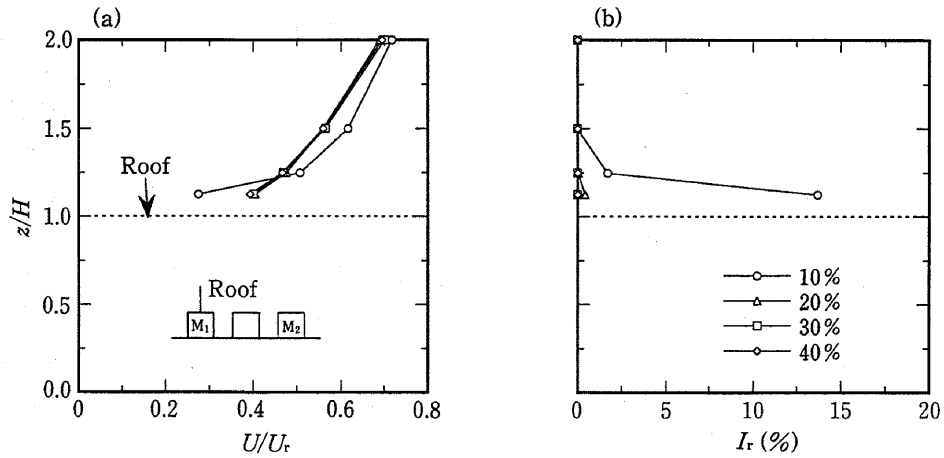


Fig. 6. Vertical profiles of (a) time-mean velocity U/U_r and (b) reverse-flow intermittency I_r on the roof.

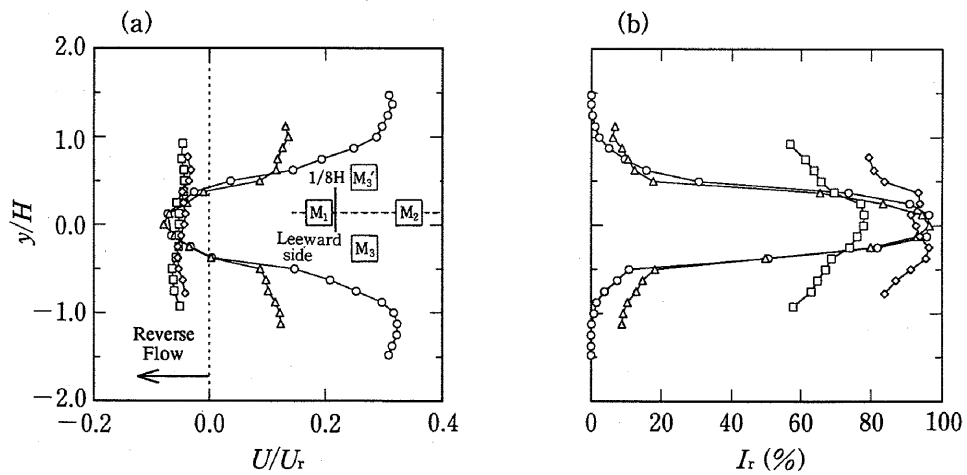


Fig. 7. Horizontal profiles of (a) time-mean velocity U/U_r and (b) reverse-flow intermittency I_r in the region.

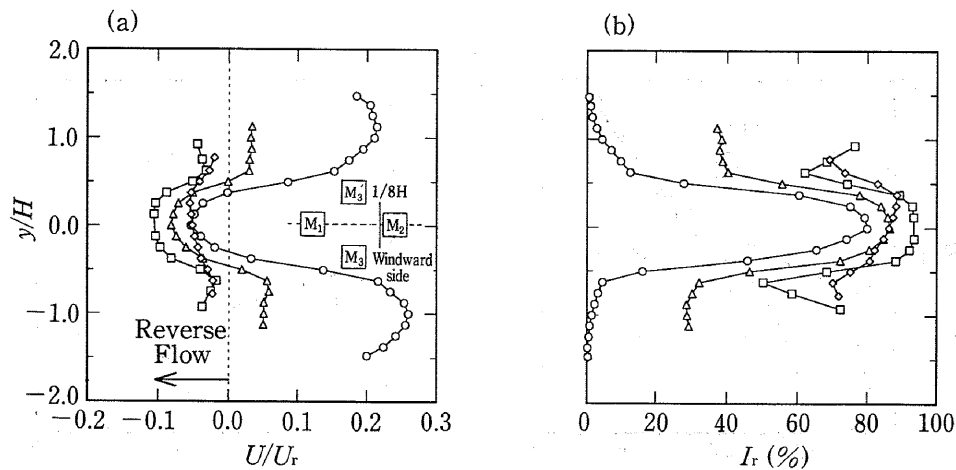


Fig. 8. Horizontal profiles of (a) time-mean velocity U/U_T and (b) reverse-flow intermittency I_r in the frontal region.

負となるが、建物中心軸から横方向へ離れていくに従い、速度成分 U の値は次第に正となる。ただし、ここで注意すべきことは速度成分 U の値が同じ正であっても、その質が異なる。建物密度 10% の時に流れの逆流率は 0% に戻るのに対して、建物密度 20% の時に逆流率 I_r は 10% に近い値となっている。同様な現象は、建物 M2 の風上面の前方域（建物 M2 の風上面から $1/8H$ を離れる高さ $1/8H$ の水平線上）にも見られ (Fig. 8), 建物密度 20% の時の逆流率 I_r は 30% を超える値となっている。この結果は建物 M1 背後の lee eddy と斜め後ろの建物 M3 前方の frontal eddy との間（スパン方向）に間欠的に逆流が発生していることを意味する。実際、建物背後の lee eddy と建物前方の frontal eddy との回転方向が同じである。建物密度が高くなると、建物 M1 背後の lee eddy の軸と建物 M3 の前方の frontal eddy の軸の位置が近くなり、相互作用が生じ、それによって逆流が引き起こされたと考えられる。建物密度が 30% 以上になると、速度成分 U の負の領域が建物 M1 背後から斜め後ろの建物 M3 と建物 M3' の中心軸まで続き、建物 M1 と斜め後ろの建物 M3 の間の地表近傍の全領域において上空風とは逆方向の流れとなっている。流れのスパン方向の周期性を考えると、この結果は、建物 M1 背後の lee eddy と建物 M3 前方の frontal eddy とがスパン方向につながって一つの渦 (cavity flow) となっていることを意味する (Fig. 13 を参照)。

3.2 スカラー風速の分布

Fig. 9 は建物密度を 10% から 40% まで変化させた時のスカラー風速 U_s/U_T ($U_s^2 = U^2 + W^2$) のコンター図 ($y/H = 0$ の鉛直断面内) である。スカラー風速

は、基準風速 U_T で無次元されている。

建物密度 10% の場合 (Fig. 9(a)), 建物 M1 の背後には風速の値が基準風速 U_T の 10% 以下となっている。また、基準風速 U_T の 5% 以下の領域が建物背面から約 $1H$ 離れたところにある。この領域は再付着域に当たる。そこから風下へ離れていくと、建物下層での風速が基準風速 U_T の約 30% まで回復する。一方、後方の建物 M2 風上面の前方では、frontal eddy 渦が形成されている位置と建物 M2 風上面のよどみ点近傍に低風速域が見られる。更に建物 M2 前縁の角部に強い上昇流に伴い、約 25% の風速増が見られる。建物密度が 20% になると (Fig. 9(b)), 建物 M1 の背後の風速値が基準風速 U_T の 10% 以下となる領域はすこし小さくなるが、建物 M2 の前方の低風速域はかなり広がっている。建物下層での風速が基準風速 U_T の 15% までしか回復せず、また、建物 M2 前縁の角部には風速の増加もわずかとなっている。建物密度が 30% 以上になると (Fig. 9(c), (d)), 建物高さ以下の領域の風速値は基準風速 U_T の数% となっているが、建物 M2 の風上面に強い下降流が存在しているため、基準風速の 15% に近い値になっている。一方、建物高さ以上の領域の風速値は流れ方向にほとんど変化しなくなる。

3.3 速度変動 u の標準偏差の分布

建物群内の変動速度はそこで排出されたトレーサガスの乱流拡散に大きな影響を与える。Fig. 10 には、建物密度を 10% から 40% まで変化させた時の速度変動 u の標準偏差のコンター ($y/H = 0$ の鉛直断面内) を示す。速度変動 u の標準偏差は、基準風速 U_T で無次元した。

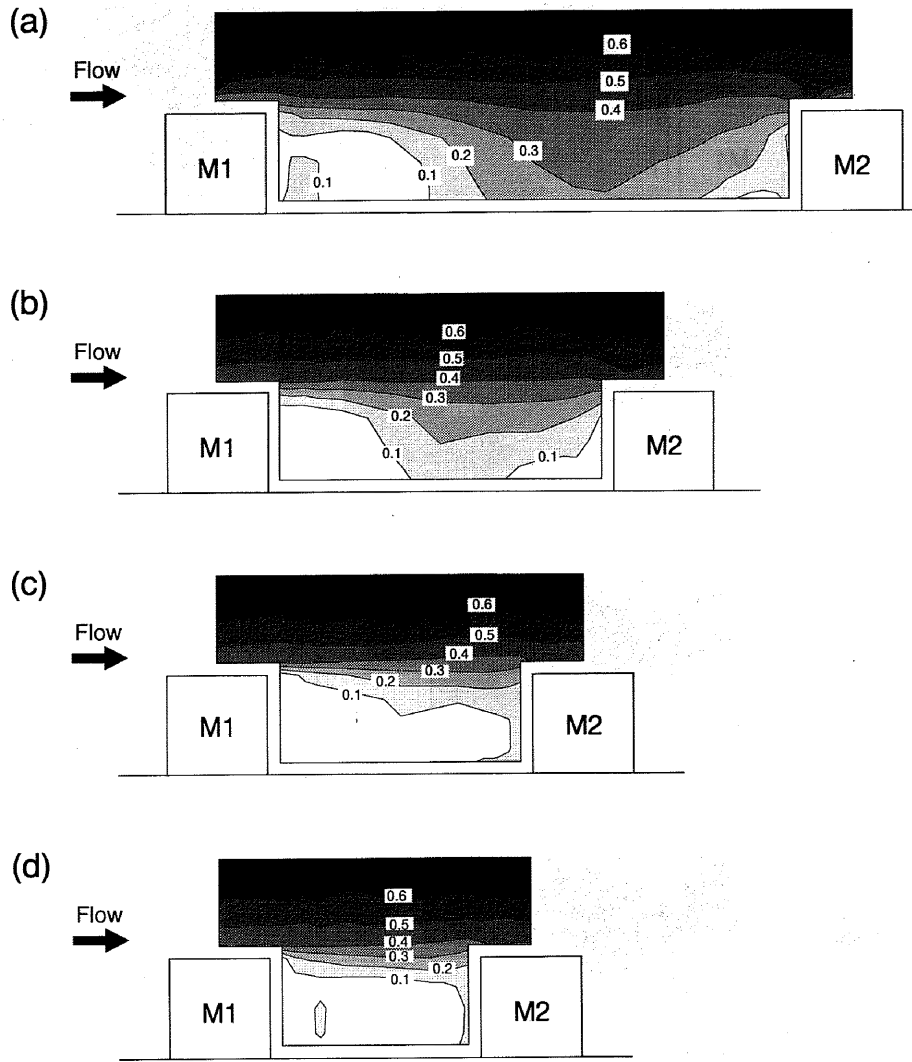


Fig. 9. Contours of scalar wind speed U_s/U_r in the $y/H=0$ plane.
 (a) $\rho_z=10\%$; (b) $\rho_z=20\%$; (c) $\rho_z=30\%$; (d) $\rho_z=40\%$.

建物密度10%の場合 (Fig. 10(a)), 建物 M1 の屋根面上の流れの剥離に伴い、大きな乱れが生成される。この乱れが流れによって風下方向に移流されている。一方、建物 M1 の背後では、風速の低下に伴い、乱れの弱い領域が風下約 $1H$ のところで見られる。また、建物 M2 風上面の前方では、frontal eddy の位置に比較的乱れの大きい領域が形成されている。更に、建物 M2 前縁の角部に発生した強い上昇流に伴い、上流側の乱れが屋根面に輸送される様子が見られる。建物密度が20%になると (Fig. 10(b)), 建物 M1 の屋根面上には、大きな乱れの生成が見られなくなるが、それ以外の領域での乱れの分布は、建物密度10%の場合のそれによく似ている。建物密度が30%になると (Fig. 10(c), (d)), 建物 M1 の屋根面に乱れの大きい領域が見られず、屋根面近傍で作られた乱れは風下への移流も極薄層に限られている。また、建物 M1 と M2 間の建物高さ以下の領域では乱れの小さ

い領域が形成される。

建物密度の変化が流れ方向の乱れ成分に及ぼす影響を詳しく調べるため、建物 M1 と建物 M2 の中間位置と建物屋根面における速度変動 u の標準偏差 σ_u/U_r の鉛直分布を Fig. 11 に示す。建物 M1 と建物 M2 間の中間位置で (Fig. 11(a)) は、建物の高さ $1.5H$ 以上の層において、速度変動 u の標準偏差が、建物密度20%以下の場合と30%以上の場合との間にはっきりした差が見られる。建物密度30%以上の時に速度変動 u の標準偏差が小さくなるのは、建物屋根面における σ_u/U_r の鉛直分布に深く関係している。建物密度10%のケースでは、建物屋根面上の速度変動 u の標準偏差が流れの剥離に伴い大きくなっている (Fig. 11(b)) が、建物密度が30%以上になると、屋根面上の流れの剥離がなくなり、大きな乱れの生成も見られなくなる。

建物密度の変化が流れ方向の乱れ成分の水平方向の

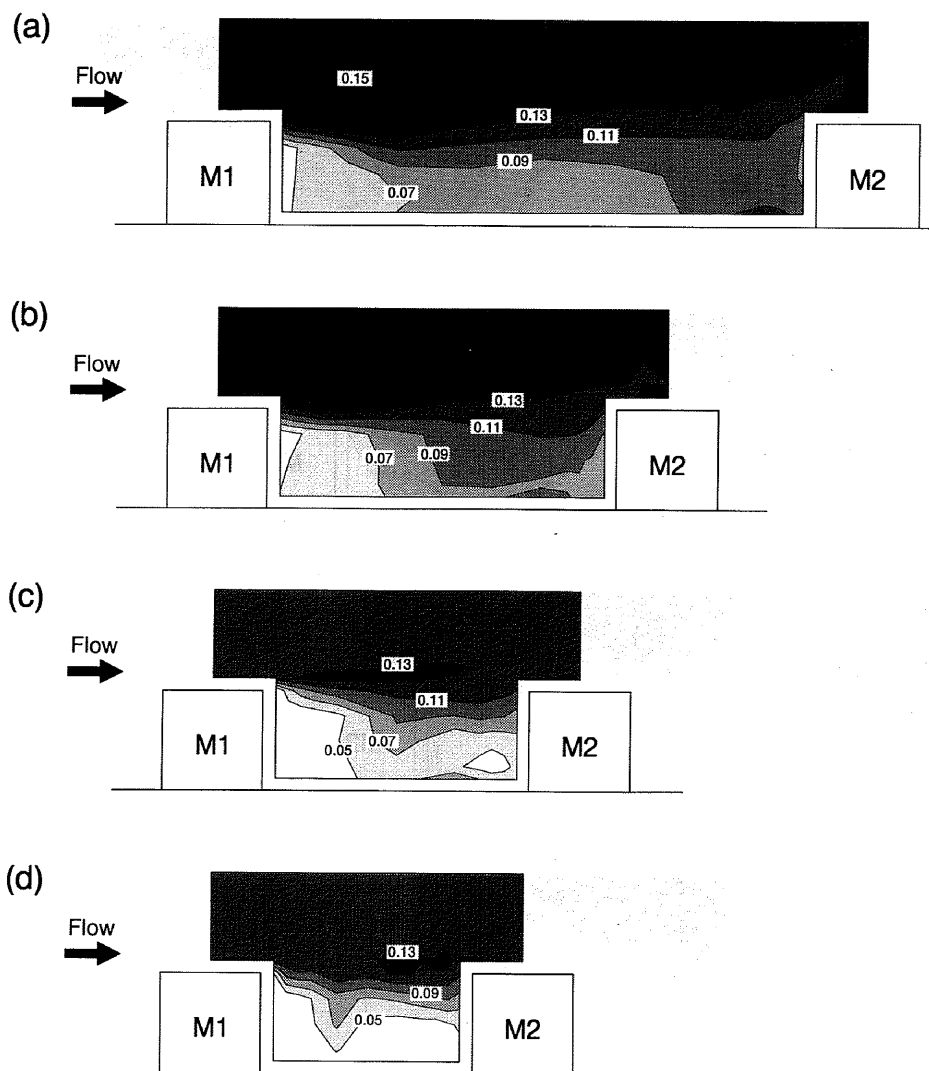


Fig. 10. Contours of the standard deviation of velocity σ_u/U_r in the $y/H=0$ plane.
 (a) $\rho_z=10\%$; (b) $\rho_z=20\%$; (c) $\rho_z=30\%$; (d) $\rho_z=40\%$.

分布にも影響を及ぼしている。Fig. 12(a)には、建物 M1 の後流域（建物 M1 の背面から $1/8 H$ を離れる高さ $1/8 H$ の水平線上）における速度変動 u の標準偏差 σ_u/U_r の水平分布を示す。建物の背後においては速度変動 u の標準偏差が建物密度によらずほぼ一定の値となるが、建物中心軸からスパン方向へ離れていくとその分布は建物密度によって大きく異なる。建物密度 10% の場合、建物 M1 の側面の位置よりすこし外側のところに一対のピークが現れているに対して、建物密度 20% 以上になると、比較的一様な分布となっている。同様な現象は、建物 M2 の風上前面（建物 M2 の風上前面から $1/8 H$ を離れる高さ $1/8 H$ の水平線上）における σ_u/U_r の水平分布にも見られる（Fig. 12(b)）。実際単体建物の場合、建物近傍に馬蹄形渦（horseshoe shaped vortex）あるいは後引渦（trailing vortices）と呼ばれる渦が存在することがよく知られている。建物密度 10% の場合建物 M2

の風上前面に見られる一対の σ_u/U_r のピークは馬蹄形渦によって作られていると考えられる。建物密度 20% 以上になると、このような馬蹄形渦が発生しなくなる。

3.4 流れパターンの模式図

以上の結果を考え合わせると、建物が千鳥状に配列した場合の流れ場の特徴を Fig. 13 に示されるような模式図で表すことができる。

建物密度が 10% 以下の場合（Fig. 13(a)）は、建物風上前面の前方に frontal eddy ができ、建物背面の後方に lee eddy が生成される。また建物側面近くに馬蹄形渦（horseshoe shaped vortex）が存在している。更に、建物屋根の前方の角部から剥離流が生じている。この時に、建物群内の個々の建物周辺の流れ場が単体建物周辺の流れ場とほぼ同様であり、“isolated roughness flow” と呼ぶことができる。一方、建物密

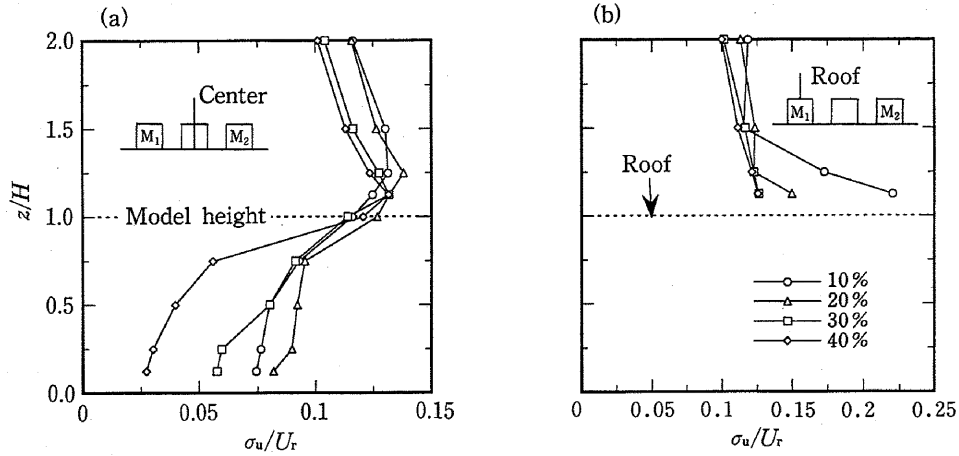


Fig. 11. Vertical profiles of standard deviation of velocity σ_u/U_r , (a) at the center position; (b) on the roof.

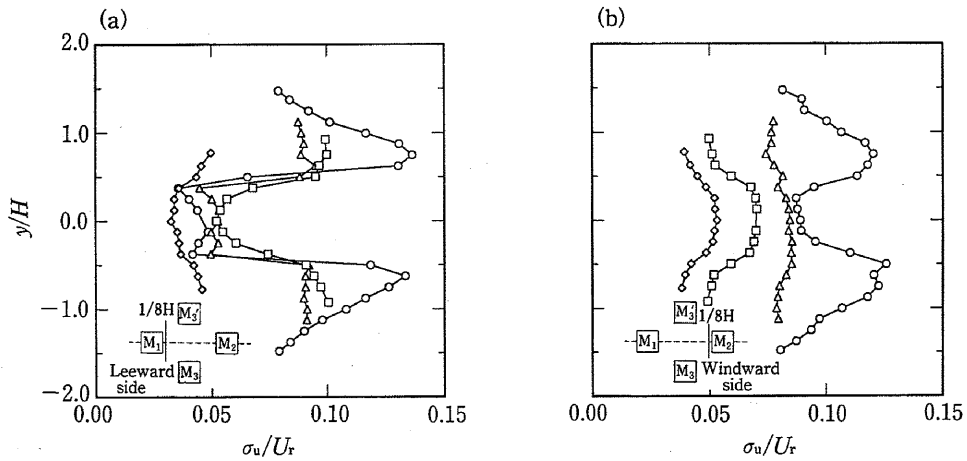


Fig. 12. Horizontal profiles of standard deviation of velocity σ_u/U_r , (a) in the lee region; (b) in the frontal region.

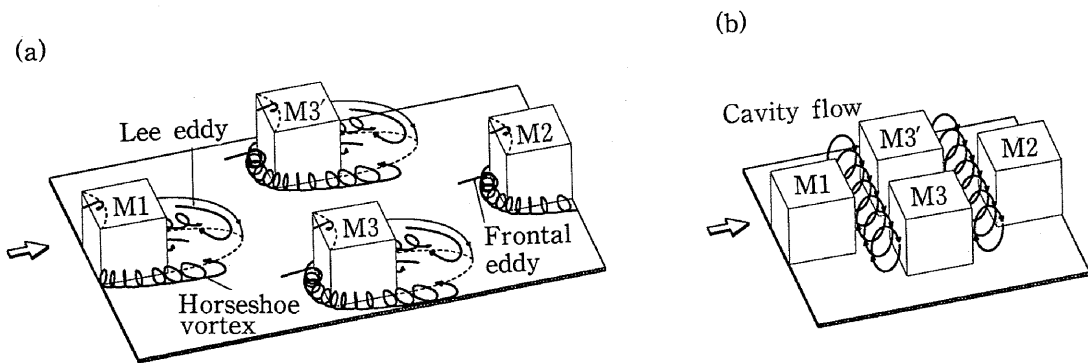


Fig. 13. Schematics of flow patterns associated with the plan-area density of buildings, (a) lower than 10%; (b) higher than 30%.

度が30%を越えると (Fig. 13(b)), 建物前面の frontal eddy と建物背後の lee eddy はもはや存在せず, その代わりに安定した循環流 (cavity flow) が建物間に形成される。また, 建物群の上空の流れも, 建物間に入りにくくなり, “skimming flow” と呼ばれる

ような流れとなる。ただし, 建物が規則的に配列されている場合に比べ, 本研究のように建物が千鳥状に配列される場合, 上流側と真後ろの下流側の建物との間に二つの cavity flow が形成されている。実際, skimming flow の発生は, 流れ方向の平面密度 ρ_x に

深く関係している。これは、流れ方向の平面密度 ρ_x が50%を越えると、建物高さ以下の層において、流れが見かけ上遮断されている状態にあるからである。ちなみに、建物密度30%の場合の流れ方向の平面密度 ρ_x は55%となっている。

Isolated roughness flow から skimming flow への遷移状態である建物密度20%の場合、上流側の建物M1背後の lee eddy と斜め後方の建物M3前方の frontal eddy と、あるいは下流側の建物M2前面の frontal eddy と斜め前の建物M3背後の lee eddy との相互干渉が始まる。その結果、建物背後の lee eddy が小さくなる一方、建物M2前面の frontal eddy がかなり大きくなる。また建物側面近くに馬蹄形渦 (horseshoe shaped vortex) が見られなくなる。この時、上流側の建物の後流が斜め後方の建物前方の流れ場を干渉することで“wake interference flow”と呼ぶことができる。

4. ま と め

本研究では、千鳥状に配列された建物近傍の流れ場を対象とし、乱流測定を行い、建物密度の変化が平均速度成分および乱れの統計量に及ぼす影響を系統的に調べた。その結果、以下ようになる。

(1) 流れのパターンは、建物密度を指標として三つに区分される。建物密度10%の時、流れ場は単体建物の場合のそれによく似た isolated roughness flow となっている。そして、建物密度が20%になると、建物背後の lee eddy と斜め後方の建物前方の frontal eddy との相互干渉が生じ、wake interference flow と呼ばれるような流れ場が形成される。更に、建物密度が30%以上になると、建物を回り込む流れがなくなり、建物高さ以下の層に cavity flow が形成され、また、建物高さ以上の領域に skimming flow と呼ばれるような流れ場が形成される。

(2) 平均速度成分 U については、建物密度が大きくなるにつれ、建物の中地点での値は、次第に小さくなるのに対して、建物の屋根面近傍での値は逆に建物密度10%の時に最小値をとる。更に、建物の後流域と風上面の前方域では、建物密度によらず、速度成分 U の値が負となるが、建物の中心軸から横方向へ離れていくに従い、建物密度10%と20%の時の速度成分 U の値は正となるのに対して、建物密度が30%を越えると、地表近傍の全領域において速度成分 U の値が負となっている。

(3) スカラー風速を比較すると、建物密度が30%以上の場合、キャビティ領域内の風速値が基準風

速 U_r の数%であるのに対して、建物密度10%の場合では基準風速 U_r の約30%となる。また建物密度10%の時には、建物前縁の角部に強い上昇流に伴い、約25%の風速増が見られるが、建物密度が30%以上になると、風速の増加はまったく見られなくなる。

(4) 速度変動 u の標準偏差については、建物密度10%の時に、建物の屋根面およびその風下の領域に乱れの大きい領域が見られるが、建物密度が20%以上になると、乱れの大きい領域が見られなくなる。建物高さ以下の後流域では、建物密度の大小によらず、乱れの弱い領域が形成される。速度変動 u の標準偏差が最小値を示す所は、再付着域と循環流が形成されている場所である。

(受稿 1996.7.19)

文 献

- 1) Halitsky, J.: Gas Diffusion near Building, *Meteorology and Atomic Energy*, **69**, 221~231 (1968).
- 2) Bradbury, L. J. S. and Castro, I. P.: A Pulsed-wire Technique for Velocity Measurements in Highly Turbulent Flows, *J. Fluid Mech.*, **49**, 657~691 (1971).
- 3) Cook, N. J. and Redfearn, D.: Calibration and Use of a Hot-wire Probe for Highly Turbulent and Reversing Flows, *J. Industrial Aerodynamics*, **1**, 221~231 (1975).
- 4) Castro, I. P. and Robins, A. G.: The Flow Around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, *J. Fluid Mech.*, **79**, 307~335 (1977).
- 5) Robins, A. G. and Castro, I. P.: A Wind Tunnel Investigation of Plume Dispersion in the Vicinity of a Surface-mounted Cube-I. The Flow Field, *Atmos. Environ.*, **11**, 291~297 (1977).
- 6) Hunt, C. R., Abell, C. J., Peterka, J. A. and Woo, H.: Kinematical Studies of the Flows Around Free Surface-mounted Obstacles; applying topology to flow visualization, *J. Fluid Mech.*, **86**, 179~200 (1978).
- 7) Ogawa, Y., Oikawa, S. and Uehara, K.: Field and Wind Tunnel Study of the Flow and Diffusion around a Model Cube-I. Flow Measurements, *Atmos. Environ.*, **17**, 1145~1159 (1983).
- 8) Ogawa, Y., Oikawa, S. and Uehara, K.: Field and Wind Tunnel Study of the Flow and Diffu-

- sion around a Model Cube-II. Nearfield and Cube Surface Flow and Concentration Patterns, *ibid.*, **17**, 1161~1171 (1983).
- 9) Martinuzzi, R. and Tropea, C.: Flow Around Surface-mounted Cube, Proc., 6th Symp. on Appl. of Laser Tech. to Fluid Mechanics, *Lisbon*, 399~414 (1992).
 - 10) Morris, H. M.: Flow in Rough Conduits, Trans. *A.S.M.E.*, **120**, 373~398 (1955).
 - 11) Lee, B. E. and Soliman, B. F.: An Investigation of the Forces on Three Dimensional Bluff Bodies in Rough Wall Turbulent Boundary Layers, Trans. *A. S. M. E. J. Fluid Eng.*, **99**, 503~510 (1977).
 - 12) Hussain, M. and Lee, B. E.: A Wind Tunnel Study of the Mean Pressure Forces Acting on Large Groups of Low-rise Buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **6**, 207~225 (1980).
 - 13) Oke, T. R.: *Boundary Layer Climates*, Routledge, pp. 435 (1987).
 - 14) 村上周三, 日比一喜, 持田 灯: Large Eddy Simulationによる街区周辺の乱流場の3次元解析 (その1), 日本建築学会計画系論文報告集, 412, 1~10 (1990).
 - 15) Inoue, E.: The structure of surface wind. Bull. Natn. Inst. Agric. Sci. (Japan) Series A, No. 2, pp. 93 (1952).
 - 16) Oikawa, S. and Meng, Y.: Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **74**, 289~312 (1995).
 - 17) DISA Information Sheet: Split-fiber Probes, Types 55R55, 55R56, 55R57, 55R58 for Two-dimensional Flow Measurements, DISA Elektronik, A/S, Skovlunde, Denmark (1980).
 - 18) Kiya, M. and Sasaki, K.: Structure of a Turbulent Separation Bubble, *J. Fluid Mech.*, **137**, 83~113 (1983).
 - 19) 佐々木久郎, 木谷 勝: スプリットフィルムプローブによる逆流領域の乱流測定, 日本機械学会論文集, B51, 1615~1618 (1985).
 - 20) Raupach, M. R., Coppin, P. A. and Legg, B. J.: Experiments on Scalar Dispersion within a Model Plant Canopy, *Boundary-Layer Meteorol.*, **35**, 21~52 (1986).

A Wind-tunnel Study of the Flow and Diffusion Within Model Urban Canopies

Part 1. Flow measurements

Yan MENG* and Susumu OIKAWA*

Environmental Engineering Department, Institute of Technology, SHIMIZU CORPORATION,
No. 4-17, Etchujima, 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135, JAPAN

A wind tunnel study of the flow and diffusion within model urban canopies was conducted. In the Part 1 of the study, the mean flow and turbulence structure within and above canopies were investigated. The model canopies consisted of the cubes of 8 cm high in a diamond array, and the plan-area density of the cubes was changed from 10% to 40%. Streamwise and vertical velocity components were measured with a split fiber probe designed for measuring flow velocity in those regions of highly turbulent and reversing flows. Three different types of flow patterns were identified through cross-sections of mean velocity vectors, and transitions between them were determined by the density of cubes. The three flow patterns can be referred to as isolated roughness flow, wake interference flow, and skimming flow, following the nomenclature of Morris (1955, Trans. *A.S.M.E.*, **120**, 373~398). As the density of cubes increases, streamwise velocities within the canopy decay until they reach zero at the case of $\rho_z = 40\%$, and streamwise velocity fluctuations due to flow separation on the roof disappear for the cases of $\rho_z > 20\%$.

Key words: urban canopies, density of cubes, flow pattern, isolated roughness flow, wake interference flow, skimming flow, turbulence structure.