

都市郊外における建物近傍の野外拡散実験

老 川 進
(技術研究所)
孟 岩
(技術研究所)

§1. はじめに

近年、これまで都市郊外に設置されていたコ・ジェネレーションシステム(熱電併給システム)が高いエネルギー効率をもつことから、都市域に設置される機会がふえてきた。その排気ガス中には、高濃度の窒素酸化物がふくまれ、建物近傍への大気汚染が問題となる。建物などがある場の濃度予測のために、幾つかの大気拡散モデル式が提案されている(Gifford¹⁾, Vincent²⁾, Huber and Snyder³⁾, Huber⁴⁾。しかし、建物近傍の流れ場は、非常に複雑となっているため、現段階で、単純な建物形状であっても近傍(建物高さの数倍の領域内)の濃度予測には、どの拡散モデル式も成功していない。こうした建物近傍の流れ場および拡散場を解明し、排気ガス濃度を予測することは、都市の大気保全の上、大変重要である。

建物近傍においては、建物表面や地表面に高濃度を生じさせるdowndraftの現象がよく知られており、これらの研究の多くは、風洞実験を中心に行なわれてきた(Halitsky⁵⁾, Wilson⁶⁾, Meroney and Yang⁷⁾, Robins and Castro⁸⁾, Thompson and Lombardi⁹⁾, 鎌田¹⁰⁾, 柿島ら¹¹⁾, Thompson¹²⁾。しかし、実大気での観測は限られている(Daivas and Shair¹³⁾, Smith¹⁴⁾, Ogawa and Oikawa¹⁵⁾, Ogawa et al.¹⁶⁾, Jones et al.¹⁸⁾, 大場ら¹⁹⁾。特に大きな乱れをもつ都市建物群落(都市キャノピー)内の建物近傍の拡散性状に関しては、観測が極めて少ないため十分な知見が得られていない。

一般に、建物周囲の拡散場を変化させる要因として、気象要素(大気安定度、乱れ特性、建物への風の向かい角など)、排出源要素(排出源位置および高さ、排出量、排出速度およびガス温度など)および建物要素(建物形状、建物密度など)などがあげられる。これらの中で、上流の大気の乱れの性状は、

建物屋根面の流れや初期拡散の状態を変化させ、建物表面や後流での拡散現象を支配する重要な要因であることが知られている。最も初期の風洞実験において、Halitsky⁵⁾は、乱れの少ない様な流れの場に立方体モデルを設置し、屋根面上に逆流域が生じていることを濃度分布にて示唆した。一方、Wilson⁶⁾は、乱流境界層中にモデルを設置し、屋根面上に流れが再付着(reattach)している現象を見出している。この再付着は、上流の乱れの小さな流れ場であったHalitskyの実験では見られなかったものである。その後、上流乱れ特性と建物近傍拡散場の関係は、老川ら^{20,21)}, Ogawa et al.^{16,17)}の風洞実験により示された。これらの風洞実験では、上流の乱れの強さ σ_w/U を6%~26%まで変化させ、屋根面上および風下地面上の濃度分布の変化を詳細に検討している。

一方、著者らは、都市建物群落における流れ場を観測し、都市建物群落内に非常に大きな乱れが存在すること(σ_w/U : 35%~47%)、およびこれらの乱れの多くは、組織的な運動(ランダムな動きとは異なる運動)によって作られていることを明らかにした^{22,23)}。

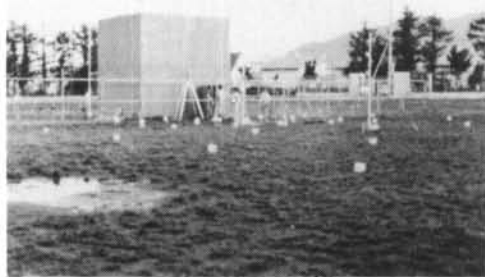
本研究の目的は、(i)大きな乱れをもつ都市建物群落内での建物近傍の拡散場を明らかにすること。および(ii)建物群落内外の組織的な運動が建物屋根面の拡散場へ及ぼす影響を検討することにある。観測は、均一な建物が連なる都市郊外で行ない、立方体モデル建物の屋根面中央よりトレーサーガスを放出し、近傍の濃度計測を行なった。

§2. 観測方法

観測は、札幌市中心より北西10kmに位置する住宅地(平均建物高さ7m)にて、1992年9月~11月に



写真一 観測点から北西側の住宅地の状況

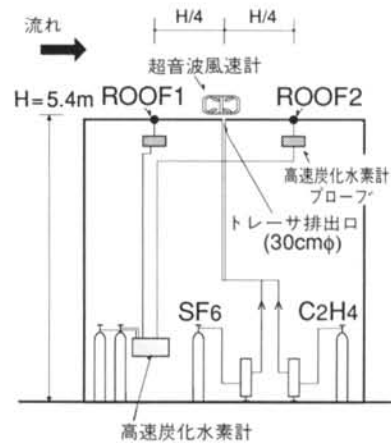


写真二 立方体建物モデル (z=5.4m)

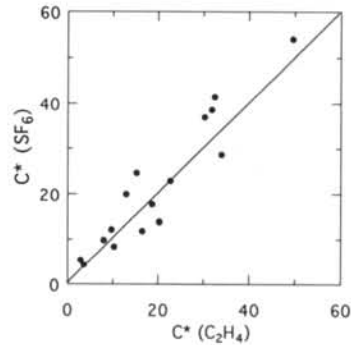
実施した。住宅地より30m離れた地点（北海道工業大学のグラウンド内）に高さ5.4mの立方体のモデル建物を設置した。写真一に観測地点から北西側を撮影した住宅地の様子を示す。均一な高さの建物が連なっている状況がみられる。写真二には、立方体のモデル建物を示す。建物屋上中央には、トレーサガス放出口（30cmφ）を設け、放出口から六フッ化硫黄(SF₆)およびエチレン(C₂H₄)の2種類のトレーサガスを放出した。濃度1000ppmのSF₆（2 l/min）と純C₂H₄（10 l/min）を窒素ガスで希釈し合計70 l/minの排出量で観測の5分前より放出した。排出速度は1.6 cm/sであり、トレーサガスの流れへの影響は少ない。

SF₆濃度は、建物表面および地上表面に50台のオートエアサンプラーを設置し、250cc/minの割合でバックに空気を10分間捕集した。バック中のSF₆濃度は、後日、実験室にてECDガスクロマトグラフにより分析した。

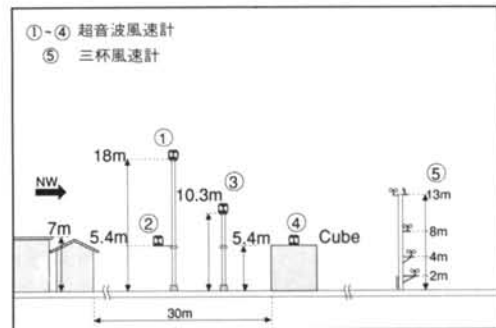
C₂H₄濃度は、屋上に設けた2点の測定点（図一のROOF 1とROOF 2）にて、高速炭化水素計（Cambustion社、HFR-400；測定範囲：数ppm～10,000ppm；応答性：約80Hz）を用い、瞬間濃度を測定した。測定した濃度は無次元化濃度C*（=CUH²/Q）で表示した。ここでC：トレーサガス濃度(ppm)；U：高さHでの風速(m/s)；H：モデル建物高さ(m)；Q：トレーサガス排出量(cc/s)を表す。図二に屋上面（ROOF 1とROOF 2）



図一 トレーサガス放出装置および高速炭化水素分析計



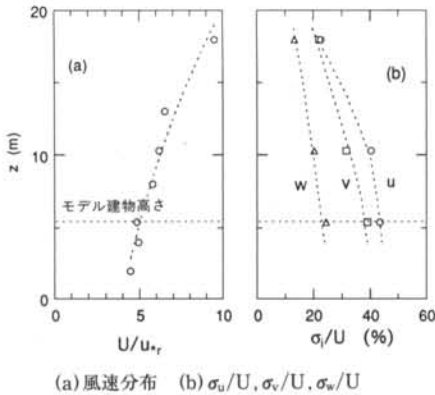
図二 2種のトレーサガスをを用いた無次元化濃度の比較



図三 観測状況

にて同時に測定したSF₆とC₂H₄の無次元化濃度を比較する。おおむね両者の値はよい一致を示す。

上流の乱流量は、高さ5.4m、10.3mおよび18mの3高度で超音波風速計を用いて計測し、平均風速は、4高度（13m、8m、4m、2m）に設置した3杯風速計と合わせて測定した。また、モデル建物の屋上風速は、屋上中央（z=5.5m）に設置した2次元超音波風速計により測定した。流れおよび瞬間



図一四 風速分布および乱流強度分布

濃度のサンプリングは10Hzで行ない、10分間における6000個のデータを1 Runとして用いた。図一三に観測状況を示す。

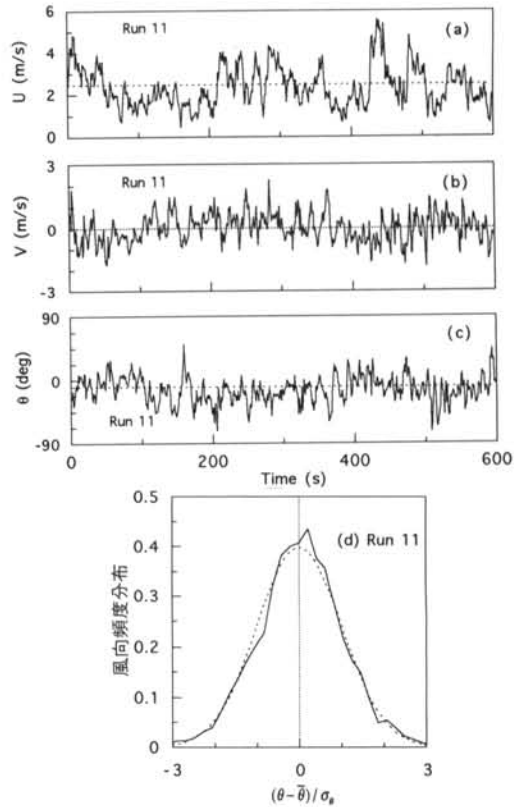
§ 3. 観測結果

3.1 上流の流れ

図一四に観測期間の代表的な平均風速および乱流強度分布の例を示す。ここで、 z は地表からの測定高さ、 U は各高さのベクトル平均風速を表わし、 σ_u 、 σ_v 、 σ_w は平均風向方向、水平直角方向、鉛直方向の風速変動量 (u' 、 v' 、 w') の標準偏差を表わす。また、 u_{*r} は、高さ18mの摩擦速度 ($u_* = \sqrt{\tau / \rho}$) を示す。建物群落上部では平均風速の勾配に変化があるが、建物群落内 ($z = 7$ m以下) では大きな変化がないこと (図一四 (a)) および乱流強度 σ_u/U が約40%と非常に大きな値を示していること (図一四 (b)) など都市キャノピーの流れ場の特徴²⁴⁾を示している。トレーサガス拡散実験は、全16Run実施し、そのうち、日中に実施した大気の状態が中立からやや不安定であり、かつ平均風向 θ (建物前面に直角にあたる風向を 0° とする) が $\pm 15^\circ$ 以内である6 Runを今回の解析対象とした。表

Run	\bar{U} (m/s)	σ_u (m/s)	σ_v (m/s)	σ_w (m/s)	u_* (m/s)	$\overline{w't'}$ (m/s·K)	L (m)	θ (deg)	σ_θ (deg)	θ_x^2
6	1.3	0.64	0.64	0.30	0.27	0.03	-54	3	31	750
9	2.8	1.05	1.08	0.72	0.58	0.08	-167	8	23	123
10	2.3	1.18	0.97	0.68	0.59	0.06	-230	8	27	114
11	2.4	1.00	0.74	0.53	0.45	0.03	-191	-15	20	27
15	5.8	1.94	1.58	0.95	0.70	0.02	-1041	13	15	56
16	1.2	0.46	0.50	0.30	0.21	0.00	-138	-8	25	177

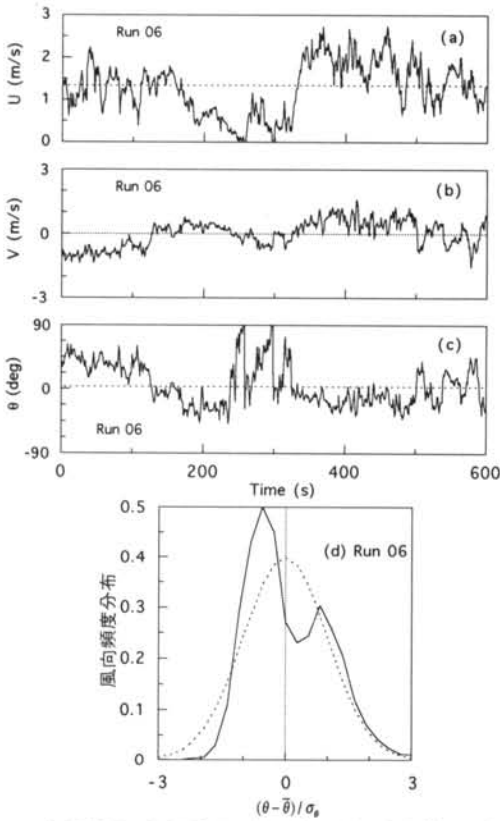
表一 上流の流れの特徴 (at $z = 5.4$ m)



図一五 上流の流れの時系列データおよび風向変動の頻度分布 (Run11, $z = 5.4$ m)

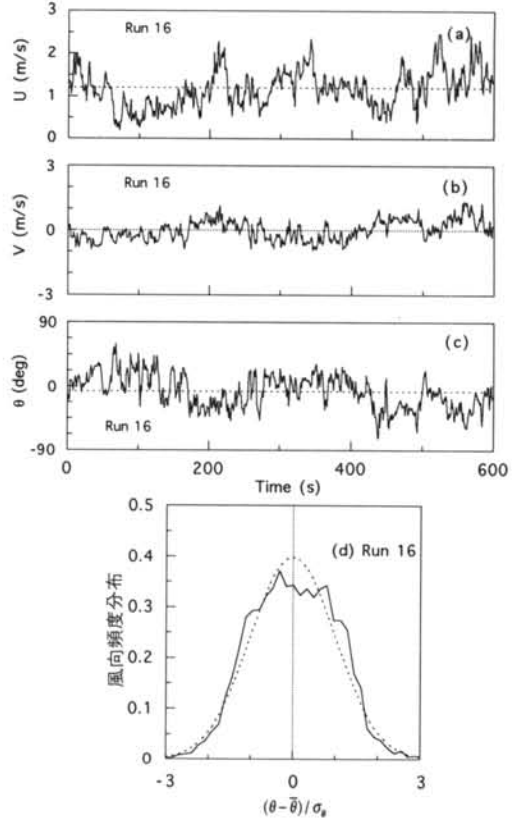
一に、各Runの流れの特性を示す。ここで、 t' は温度変動成分を、 L はMonin-Obukhovの長さを示し、 σ_θ は風向変動の標準偏差を表わす。6 Runの中でRun15は南東方向からの風であり比較的乱れが小さく、他の5 Runは住宅地側 (北西方向) から吹く風である。

風洞など室内実験においては、速度および風向変動の頻度分布は正規分布を仮定し表わすことができるが、実際の気中ではしばしば正規分布からはずれることが知られている。風向変動の頻度分布が正規



(a) 風速U (b) 風速V (c) 風向 (d) 風向変動の頻度分布

図-6 上流の流れの時系列データおよび風向変動の頻度分布 (Run06, $z=5.4\text{m}$)



(a) 風速U (b) 風速V (c) 風向 (d) 風向変動の頻度分布

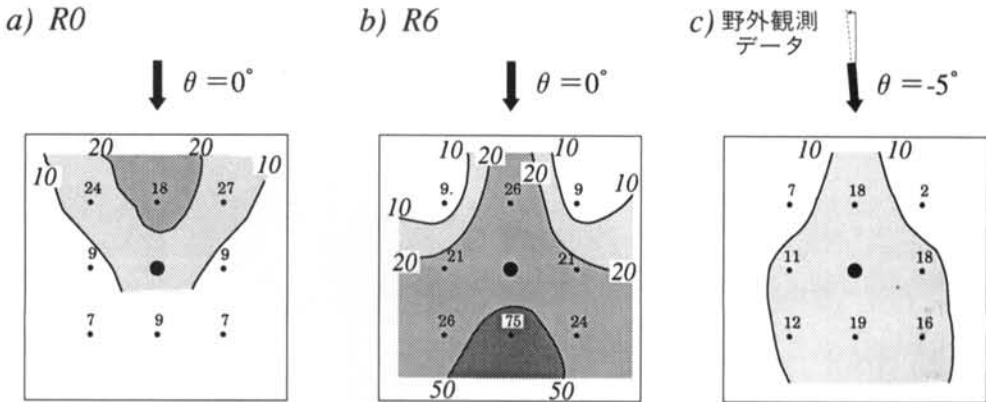
図-7 上流の流れの時系列データおよび風向変動の頻度分布 (Run16, $z=5.4\text{m}$)

分布であれば、拡散するガスの濃度分布も正規分布になることが期待される。一方、風向変動の頻度分布が正規分布からはずれた時、たとえばある風向の所に集中した場合は、通常よりも大きな濃度があらわれ、また、幅の広い分布型では濃度分布が広がり低めの濃度となって現われる。図-5~7には、濃度の解析対象となるデータからいくつかの代表Runを選び、その風速、風向変動の時系列プロットおよび風向の頻度分布を示した。図の(a)~(c)の点線は平均値を示す。図の(d)の実線は観測した風向頻度分布を示し、点線は正規分布を表わす。また表-1には各Runの風向頻度のカイ二乗の値 θ_x^2 ($=\sum (f_i - m_i)^2 / m_i$, f : 観測度数, m : 理論度数)を示した。Run11 (図-5) は10分間で安定した風向変動を示しており、観測した風向頻度分布も正規分布に近い。また、カイ二乗の値 θ_x^2 も小さく ($\theta_x^2=27$)、正規分布からのずれが小さいことを示している。Run 6 (図-6) は10分間に -45° から約 90° と

大きく変化しRun11とは異なる。この変化は風向頻度分布にも現われ2つのピークをもち、正規分布から大きくずれ、カイ二乗の値 θ_x^2 も750と大きな値を示す。Run16 (図-7) は、風向変動において、約300秒の周期でゆっくりと変化している。風向頻度分布では、扁平なピークをもち、正規分布からのずれがみられる ($\theta_x^2=177$)。

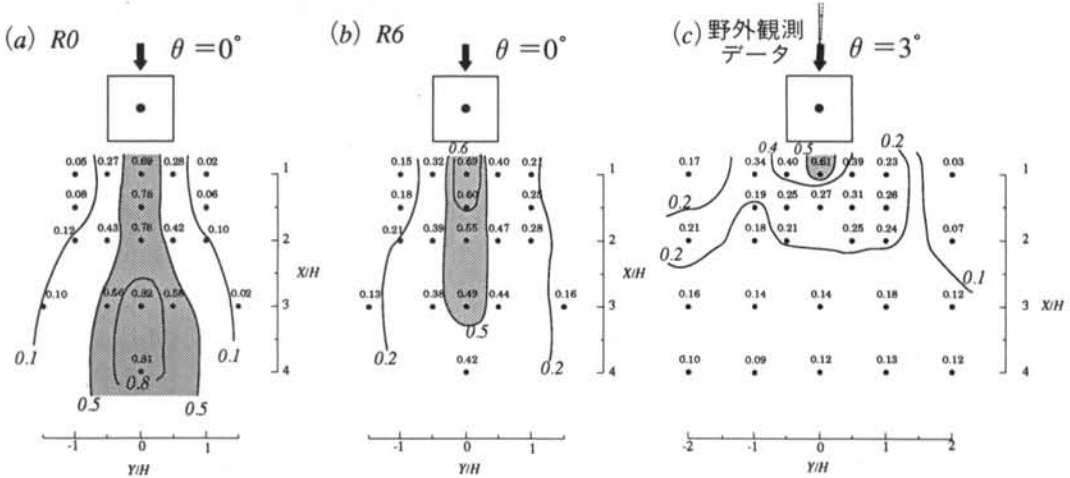
3.2 屋上の濃度分布

図-8に屋根面上の無次元化濃度 C^* ($=CUH^2/Q$)の分布を示す。今回の野外観測データと比較するため老川ら^{20,21}、Ogawa et al.^{16,17}の風洞実験結果を用いた。図-8 (a), 8 (b)は、風洞実験の値である。R 0のケース (図-8 (a)) は、上流の乱れが小さな場合であり ($\sigma_u/U=6.7\%$, $\sigma_v/U=5.3\%$, $\sigma_w/U=4.6\%$ at $z=H$)、R 6のケース (図-8 (b)) は、上流の乱れが比較的大きな場合である ($\sigma_u/U=26.5\%$, $\sigma_v/U=23.7\%$, $\sigma_w/U=22.4$



(a) R0 Case, $\theta = 0^\circ$ (風洞実験17) (b) R06 Case, $\theta = 0^\circ$ (風洞実験17) (c) 野外観測, $\theta = -5^\circ$

図—8 屋根面上の無次元化濃度分布



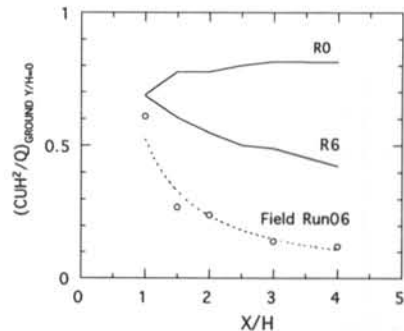
(a) R0 Case, $\theta = 0^\circ$ (風洞実験17) (b) R06 Case, $\theta = 0^\circ$ (風洞実験17) (c) 野外観測 Run06, $\theta = 3^\circ$

図—9 地面上の無次元化濃度分布

%)。上流の乱れの小さな場合は(R0), 排出源の上流に高濃度が検出され下流側は低濃度である(図—8(a))。また, 上流の乱れが比較的大きな場合は(R6), 排出源の下流に高濃度が検出され上流側は低濃度である(図—8(b))。図—8(c)には, 野外観測の結果を示した($\sigma_u/U=39\%$, $\sigma_v/U=32\%$, $\sigma_w/U=18\%$ at $z=5.4\text{m}$)。屋上中央から排出されたトレーサースは, 排出源の上流および下流側の両方に拡散され, 上流側, 下流側ともに顕著な高濃度域が形成されていないのが特徴である。

3.3 地面上の濃度分布

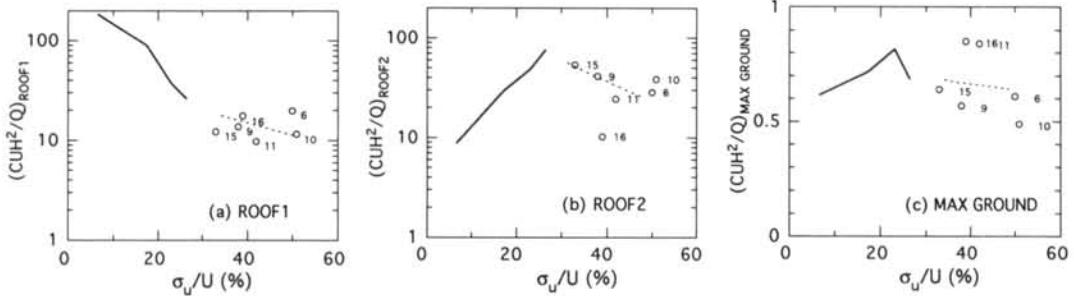
図—9(a)~(c)には, 立方体の風下地面の無次元化濃度分布を示す。R0の場合は(図—9(a)),



実線は風洞実験結果17)を示し, 点線は野外観測 Run06のデータを表わす。

図—10 地面の中心軸上の無次元化濃度

地面上の最大濃度が風下 $X/H=2.5$ 近辺に生じてい



実線は風洞実験結果¹⁷⁾ ($\theta = 0^\circ$)を示し、数字は野外観測のRun番号を表わす
 (a) ROOF 1 (上流点) (b) ROOF 2 (下流点) (c) 地面最大濃度

図—11 無次元化濃度と乱流強度の関係

る。R 6 (図—9 (b)) および野外観測 (図—9 (c)) の場合は、最大濃度が立方体の直後に出現している。図—10には、立方体背後の中心軸上 $Y/H = 0$ の地表面濃度を示した。R 0 のケースでは風下距離が増大するとともに濃度が増加し、濃度ピークが建物から離れた風下に生じている。一方、R 6 のケースおよび今回の野外観測の場合は風下距離の増加とともに濃度が減少し、ピークが建物のそばに生じている。濃度の風下方向の変化については、野外観測データが R 6 のデータに比べ、かなり急に減少していることがわかる。

これら地上濃度分布の差異は屋上の流れ場の差異によるものと説明される。すなわち、R 0 の場合、屋上から排出されたトレーサガスは、逆流により排出源の上流側に高濃度のガスが運ばれる。その高濃度のガスは屋根面の剥離流に沿って移動し風下に流された後、地面に降下する。そのため R 0 の場合は、立方体から離れた地点の地面濃度が最大となる¹⁷⁾。

一方、R 6 と野外観測の場合は、屋根面上に逆流域が形成されにくいため、高濃度のガスが排出源の風下へ運ばれる。屋根面で直接風下方向に運ばれたガスは、建物背後の逆流域に巻き込まれ、立方体の近くの風下地面に高濃度を発生する。また、野外観測の場合は、上流の乱れが風洞実験 R 6 の場合よりもさらに大きく、地表上の濃度分布も広範囲に低濃度となる。

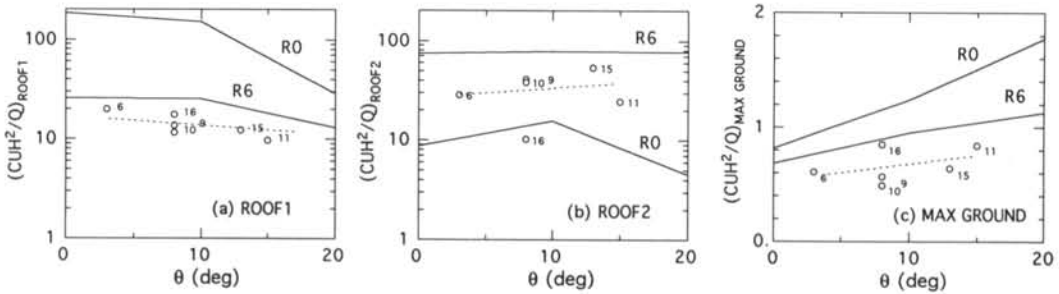
3.4 上流乱れの効果

図—11には、屋根面の ROOF 1 (上流点)、ROOF 2 (下流点) および地表面の最大濃度と上流の乱流強度との対応を示した。野外観測データは平均風向が $0 \sim 15^\circ$ のデータをプロットし、風洞実験

結果 ($\theta = 0^\circ$; 乱流強度 σ_u/U : 6.7%~26.5%) は実線で示した。図中の数字は野外観測のRun番号を表わす。ROOF 1 (図—11(a)) では、上流の乱流強度が増加するに従い、濃度が減少する。一方、ROOF (図—11(b)) では、乱れの小さな時は濃度が低く、その後乱れ強度が増加するに従い濃度も増加し、乱流強度が30%前後でピークを持つ。その後、さらに乱れ強度が増加すると濃度が減少する。ここで、ROOF 2 のRun16の値が低いのは、風向変化の頻度分布が正規分布から大きくずれていることによると考えられる (図—7 (d))。

これらの現象は次の様に説明される。上流の乱れ強度が小さい時は、逆流が生じ排出源の上流側にガスが運ばれROOF 1が高濃度となり、下流のROOF 2が低濃度となる。さらに乱れ強度が増加し20%~30%の乱流強度では、屋上面の逆流が消え(平均風速から見た場合)、中央の排出源から放出されたガスは、直接、下流側に流されROOF 2で高濃度となり、上流のROOF 1では低濃度となる¹⁷⁾。さらに乱れ強度が大きくなるとROOF 2の値は乱流強度が増加しても、風洞実験から外挿される様な高濃度を生じず、逆に濃度が減少する。これは、自然風の大きな乱れが屋根面上の初期拡散を増大させ、排出源の下流側の濃度を低下させたためである。いずれのRunにおいても屋根面の平均風速は正の値であるにもかかわらず上流に濃度が検出される。これら上流点ROOF 1で濃度が検出されるメカニズムおよび上流の流れ場との関係は3.6で述べる。図—11(c)は地表面の最大濃度を示した。最大濃度の地表面上の出現位置は乱れ強度により異なるが(図—9)、その値は大きく変化しない。

3.5 平均風向変化の効果



実線は風洞実験結果¹⁷⁾($\theta = 0^\circ$)を示し、数字は野外観測のRun番号を表わす

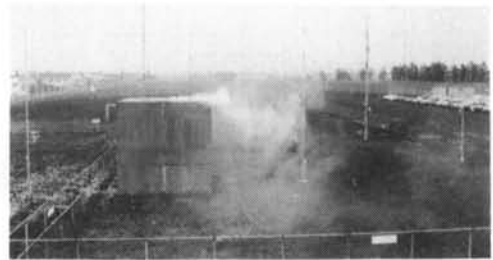
(a) ROOF 1 (上流点) (b) ROOF 2 (下流点) (c) 地面最大濃度

図—12 無次元化濃度と風向の関係

図—12には、屋根面濃度および最大地表濃度の風向による変化を示した。実線は風洞実験のR0とR6の場合を示し、図中の数字は野外観測のRun番号を表わす。屋上のROOF 1 (図—12(a))のR0の場合、風向の増加とともに濃度が減少傾向にあるが、R6と野外観測のデータは減少傾向が小さい。これは、R0では風向角が小さい時に逆流が生じ濃度が高くなり、風向角が大きくなるにつれ逆流が小さくなることによる。一方、乱れ強度の大きなR6と野外観測のデータでは逆流域が小さく、かつ乱れが大きいためトレーサガスの広がり幅が大きく、風向が変化しても大きな濃度の変化がない。また、ROOF 2 (図—12(b))では、風向の増加とともにR0の濃度は減少傾向にあるが、R6および野外観測の濃度はあまり変化しない。屋根面上の測定点は固定されているために、風向変化とともに排出源位置と測定点の相対的な位置が変化する。R0の場合、風向が増大するとトレーサガスの広がり幅が測定点より外れ濃度は減少する。一方、R6および野外観測のデータは、乱れが大きいため下流点では十分に混合されたトレーサガスが測定点に達するため、風向が変化しても大きな濃度の変化がない。地面最大濃度 (図—12(c))のR0の場合、風向の増加とともに濃度が増加傾向にある。R6および野外観測のデータは風向の増加とともに微増傾向にある。

3.6 上流の組織的な運動と屋根面上の拡散現象との関係

都市建物群落における組織的な乱流構造については、著者らによる報告がある^{22,23)}。ここでは、都市建物群落内外における組織的な運動と建物屋根面上の瞬間濃度との関係を調べ、トレーサガスの屋根面上の初期拡散過程を明らかにする。



(a) 煙りは下流に輸送されている

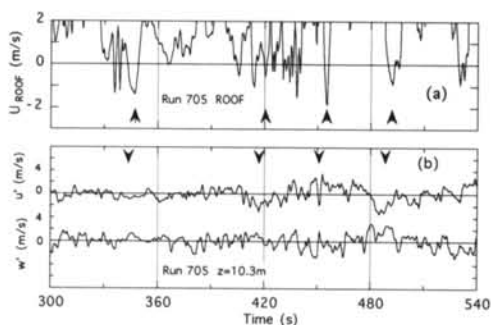


(b) 煙りは上流に輸送されている

写真—3 屋根面中央から放出した煙りの可視化(写真の左側が流れの上流)

瞬間的な屋上の煙のダイナミックな動きをみるために、屋上のトレーサガス放出口より煙を排出し可視化した。ここで、2つの代表的な可視化例を示す。写真—3 (a)には、屋上中央より排出された煙が、屋根面表面に抑えられながら風下に直接流されている様子が示されている。この煙は建物の後流に巻き込まれ、downdraft現象がはっきり生じている。一方、写真—3 (b)では、屋上中央より排出された煙は屋上の上流側にも流れて、屋上が煙に覆われている様子がみられる。この場合はdowndraft現象がはっきり生じていない。

これらの可視化で示された動きを、建物前方5.4 m、高さ10.3 mに設置した超音波風速計と建物屋上



(a) 屋根面上の風速(負の風速は逆流を表わす)
(b) 上流の速度変動($z=10.3\text{m}$)

図-13 屋根面上の風速と上流の速度変動の時系列データ

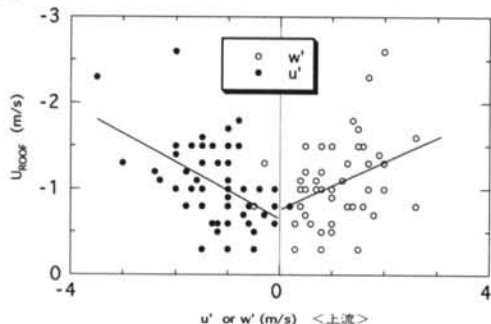
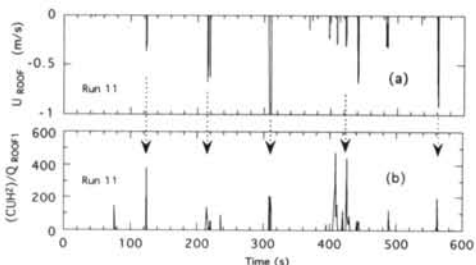


図-14 屋根面上の風速と上流の速度変動との対応
(負の風速は逆流を表わす)



(a) 屋根面上の風速(負の風速は逆流を表わす)
(b) ROOF 1 (上流点)の濃度

図-15 屋根面上の風速とROOF 1 (上流点)濃度の時系列データ

$z=5.5\text{m}$ に設置した超音波風速計により詳細を調べた。さらに、2台の高速炭化水素計を屋上に設置し、屋上の濃度変動と屋上の瞬間速度変動との関係を調べた。図-13には屋上の風速と上流(立方体前面より風上に 5.4m ; $z=10.3\text{m}$)の風速変動の u' 、 w' 成分の時系列プロットを示す。図示したプロットは1秒間の移動平均値である。屋上における負の風速値は、屋根面上で逆流が生じていることを表わす。こ

こで注目すべきことは、上流流れにともなう速度変動 u' が負でかつ w' が正になっている時(低速上昇流:ejection運動)に屋上の風速が負の値を示すことである。ただし、上流点と屋上点の超音波風速計の空間的な設置位置の差があるためejection運動と屋根面上の流れの剥離の出現に時間ずれがみられる。

次に、屋上で逆流($U_{\text{ROOF}} < 0$)が生じた時と上流点の風速変動 u' 、 w' との相関を調べる。上流と屋上の超音波風速計の水平距離 X_n は 8.1m 離れているため、ここで時間ずれ $T_n (=X_n/U_n)$ が生じる。これを補正するために屋上の負の風速の検出点から10秒前までの上流平均風速 U_n を用いた。たとえば、 $U_n=1.5\text{m/s}$ の場合 T_n は5.4秒となる。図-14には、屋上の逆流と上流点の風速変動 u' 、 w' との関係を示した。これらから、負の風速変動 u' と正の風速変動 w' の値が大きくなるとともに、屋上の逆流の値が大きくなることがわかる。すなわち、上流のejection運動($u' < 0$ 、 $w' > 0$)にともなう上昇流は、屋根面上の流れの剥離の引き金となっている。

図-15は屋上の逆流(負の風速)とROOF 1点(上流点)における C_2H_4 の瞬間濃度の関係を示す。屋上風速の逆流時に、ROOF 1にガスが検出され、両者の対応がよい。すなわち、上流点で検出される濃度は、ほとんど逆流によって運ばれていることを示している。図-15(a)に示した屋上の平均風速($U_{\text{ROOF}}=1.8\text{m/s}$)の値は正であるにもかかわらず、排出源の上流側に濃度が検出されるのは、上流の組織的な運動(ejection運動)によって、屋根面上に間欠的に負の風速が形成されたことによる。このことは上流の組織的な運動が、屋上面上の拡散場に大きな影響を与えていることを示唆する。

§4. まとめ

都市郊外において、立方体のモデル建物の屋上中央よりトレーサガスを放出し建物近傍の濃度計測を行なった。その結果を以下に示す。

(1)都市建物群内での流れ場は非常に大きな乱れが存在する。乱れの小さい場合の拡散状況に比べて、屋根面上の濃度分布は、屋根面全体に広く平均的に拡散しており、地表面濃度は建物のすぐ背後に高濃度域が形成されている。

(2)上流乱れと濃度性状との関係において、排出源の上流の屋根面濃度(ROOF 1)は上流乱れ強度が増

加するとともに濃度が減少する。排出源の下流点 (ROOF 2) の濃度は、乱流強度の増加とともに濃度は増加し、乱流強度 σ_u/U が 20~30% の所でピークを持ち、さらに乱流強度が増加すると濃度は減少する。一方、地表面最大濃度は、上流乱れ強さにあまり依存しない。

(3) 上流の負の風速変動 u' と正の風速変動 w' の値が大きくなるとともに、屋上の逆流の値が大きくなり、両者の間に強い相関がみられる。これは、上流の ejection 運動 (低速上昇流: $u' < 0$, $w' > 0$) が屋根面上の流れの剥離の引き金となり、間欠的に負の風速を形成することによる。また、屋上風速の逆流

時に排出源の上流点に濃度が検出される。これらの結果は、上流の組織的な運動が屋根面上の拡散場に大きな影響をあたえていることを示唆している。

謝辞 北海道工業大学建築工学科 苫米地助教授には現地の観測に際し、観測場所および数々のご協力を頂き厚くお礼を申し上げます。本観測に際し、国立環境研究所都市大気保全研究チーム主任研究員上原清氏および(財)計量計画研究所 大原利真博士には、いろいろなご協力を頂き深く感謝を表わします。

<参考文献>

- 1) F.A.Gifford: "Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generalized Gaussian Plume Model" Nuclear Safety, 2 (1960) pp.56~59
- 2) J.H.Vincent: "Model Experiments on the Nature of Air Pollution Transport Near Buildings" Atmos. Environ., 11 (1977) pp.765~774
- 3) A.H.Huber and W.H.Snyder: "Wind Tunnel Investigation of the Effects of a Rectangular-shaped Building on Dispersion of the Effluents from Short Adjacent Stacks" Atmos. Environ., 12 (1982) pp.2837-2848
- 4) A.H.Huber: "Wind Tunnel and Gaussian Plume Modeling of Building Wake Dispersion" Atmos. Environ., 25A (1991) pp.1237~1249
- 5) J.Halisky: "Gas Diffusion near Buildings" ASHRAE Trans., 69 (1963) pp.464~485
- 6) D.J.Wilson: "Concentration of Air Intakes from Roof Exhaust Vents" ASHRAE Trans., 82 (1976) pp.1024~1038
- 7) R.N. Meroney and B.T. Yang: "Wind Tunnel Study on Gaseous Mixing due to Various Stack Heights and Injection Rates above an Isolated Structure" Colorado State Univ. Fluid Dynamics and Diffusion Lab. CER71-72 RNM-BTY16 (1971)
- 8) A.G.Rabins and I.P.Castro: "A Wind Tunnel Investigation of Plume Dispersion in the Vicinity of a Surface-mounted Cube -II. The Concentration Field." Atmos. Environ., 11 (1977) pp.299~311
- 9) R.S.Thompson and D.J. Lombardi: "Dispersion on Roof-top Emissions from Isolated Buildings a Wind Tunnel Study" EPA-600/4-77-006 (1977)
- 10) 鎌田元康: "建物近傍における汚染物質拡散に関する実験的研究(2)" 日本建築学会論文報告集 第281号 (1979年) pp.109~119
- 11) 柿島伸次, 通地克三, 中井真行, 千秋鋭夫, 大場良二, 西島茂行: "発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の研究" 電力中央研究所報告 総合報告 (1985年)
- 12) R.S.Thompson: "Building Amplification Factors for Sources near Buildings: A Wind-Tunnel Study" Atmos. Environ., 27A (1993) pp.2313~2325
- 13) P.J.Daivas and F.H.Shair: "Probing the Air Flow within the Wake Downwind of a Building by Means of a Tracer Technique" Atmos. Environ., 8 (1974) pp.1165~1175
- 14) D.G.Smith: "Influence of Meteorological Factors upon Effluents Concentrations on and near Buildings with Short Stacks" Proc. 68th Annual APCA Meeting, Paper No.75-26.2 (1975)
- 15) Y.Ogawa and S. Oikawa: "A Field Investigation of the Flow and Diffusion around a Model Cube" Atmos. Environ., 16 (1982) pp.207~222
- 16) Y.Ogawa and S. Oikawa and K. Uehara: "Field and Wind Tunnel Study of the Flow and Diffusion around a Model Cube- I. Flow Measurements" Atmos. Environ., 17 (1983) pp.1145~1159

- 17) Y. Ogawa and S. Oikawa and K. Uehara : "Field and Wind Tunnel Study of the Flow and Diffusion around a Model Cube- II. Nearfield and Cube Surface Flow and Concentration Patterns" Atmos. Environ., 17 (1983) pp.1161~1171
- 18) C.D. Jones and R.F. Griffiths : "Full-Scale Experiments on Dispersion around an Isolated Building using an Ionized Air Tracer Technique with Very Short Averaging Time" Atmos. Environ., 18 (1984) pp.903~916
- 19) 大場正昭, 小林信行 : "風向の出現頻度を考慮した重ね合わせ法による建物近傍濃度の予測方法に関する実験的研究" 日本建築学会計画系論文報告集 第368号 (1986年) pp.10~20
- 20) 老川進, 小川靖, 小川フィリス : "建物周囲の流れと拡散 (その3) モデル背後の渦領域の大きさ" 第22回大気汚染学会 (1981年) p.316
- 21) 小川靖, 老川進, 上原清 : "建物周囲の流れと拡散 (その4) 濃度・屋上面の流れ" 第22回大気汚染学会 (1981年) p.317
- 22) 老川進 : "都市キャノピーにおける乱れ場の垂直乱流構造" 大気汚染学会誌, 28 (1993年) pp.348~358
- 23) 孟岩, 老川進 : "都市キャノピーにおける組織的乱流構造" 第25回乱流シンポジウム講演論文集 (1993年) pp.47~50
- 24) M.R. Raupach : "Stand Overstorey Processes" Phil. Trans. R. Soc. Lond., B324 (1989) pp.175~190