

建物後流における短時間ピーク濃度の性状について

老 川 進・孟 岩

A wind-tunnel study of peak concentration in the near-wake region of a cubical model building

Susumu OIKAWA and Yan MENG

立方体形状の建物の後流における短時間のピーク濃度の性状を明らかとするために風洞実験を行った。トレーサガスは建物の屋根面中央から排出し、高応答の濃度分析計を用いて計測した。その結果、建物後流近傍には2つの異なった拡散領域があることを示した。1つは建物高さのおよそ半分以下の層に形成される「混合領域」であり、もう1つは、建物高さの半分より上層に形成される「間欠領域」である。混合領域においては、濃度のスペクトルピークが低周波数側に現れ、間欠領域では、ピークが高周波数側にずれて現れる。建物後流のガストファクターは、大きくばらつき3~20の範囲にある(実大気の平均化時間が約7秒の場合)。一方、ピークファクターは、ばらつきが小さく4~7(実大気の平均化時間が約7秒の場合)の範囲にある。ピークファクター P_f の上限値と実大気の平均化時間 T_a との関係は $P_f = 9.1 \times T_a^{-0.46}$ で表せる。

1. はじめに

建物近傍におけるガスの濃度予測は、従来、主に平均濃度を対象として評価が行われてきた。しかし、対象物質が臭気や可燃性ガスの場合はこれらの評価では不十分である。人間の嗅覚は鋭敏であり、短時間のガス濃度の持続で容易ににおいとして認知する。また、排出されるガスが可燃性ガスや引火性液体から発散した蒸気である場合、その濃度が爆発限界である下限界と上限界に挟まれた領域に達し、着火源などの条件が整うと爆発事故を引き起こす。こうした悪臭ガスや可燃性ガスでは、不快あるいは危険のある閾値を越えるかどうか重要となる。通常、時間平均濃度は、これらの閾値よりも低い値であることが多く、長時間の平均濃度の評価では不適当であり、短い時間におけるピーク濃度を評価する必要がある。

濃度変動を対象とする研究は、これまでいくつか報告されている(Csanady¹⁾, Wilsonら²⁾, Verkatram³⁾, Hanna⁴⁾, Chatwin⁵⁾)。これらの中では、濃度変動の統計量に関するものが多く、ピーク濃度そのものを対

象とする研究は少ない。一方、ピーク濃度に関する研究は、Gifford⁶⁾, Hinds⁷⁾, Ramsdell and Hinds⁸⁾, Wilson⁹⁾, Li and Meroney¹⁰⁾, Higsonら¹¹⁾によって行われている。Wilson⁹⁾は、直方体建物の屋根面からガスを排出し屋根面上の濃度変動を風洞にて計測した。その結果、屋根面上において濃度変動の強度 I_c (=濃度変動の標準偏差/平均濃度) は1~3の範囲にあることを示した。また、彼は、 I_c をパラメータとしたガストファクター (=最大濃度/平均濃度) の実験式で示した。その結果、臭気を対象とする時は、濃度の累積分布関数が95%を越えない値をピーク濃度としてガストファクター値5の上限値を推奨し、高い毒性を有する物質では10(累積分布関数が99%を越えない値を使用)を推奨した。建物後流を対象とした研究は、Li and Meroney¹⁰⁾(以下L&Mと略する)により報告されている。彼らは、立方体建物の屋根面からトレーサガスを排出し建物後流の濃度変動を風洞にて計測した。その結果、建物後流の地表面の濃度変動は、建物がない場合と比較し減少することを示した。また、建物後流の地表面のガストファクターの上限値

は、3以下（累積分布関数が99%を越えない値を使用）であることなどを報告した。建物の後流空間を含めたガストファクターの予測は行われていない。

一般に風洞気流は、慣性小領域が粘性の影響で実大気の気流と比べ狭くなっていることが知られている。しかし、WilsonおよびL&Mの実験ではスペクトルの議論がないために高周波域における実大気現象の再現可能な領域が不明である。また、彼らの示したピーク濃度は、累積分布関数があるパーセントを越えない値より求めたが、この値が実現象の何秒のピーク濃度に相当するかは明らかでない。

本研究の目的は、建物後流における短時間ピーク濃度の性状を明らかにすること、および実大気における

データと対比し、ピーク濃度の予測式を提案することにある。本研究では、風洞に設置した立方体建物モデルの屋根面中央よりトレーサガスを排出し、建物後流のピーク濃度を高応答の濃度分析計を用いて計測した。

2. 実験方法

2.1 風洞および模型

測定部が0.9 H×1.1 W×5.4 L（単位 m）の大きさの風洞に建物モデルとして一辺がH=8 cmの立方体を測定部入口より4.6 mの風下に設置した（Fig. 1）。建物は風に対して前縁が直角になるように設置した。上流の流れは、都市郊外の縮尺1/500に相当する大気境界層を作成し、風洞風速を建物高さで2 m/sに設定

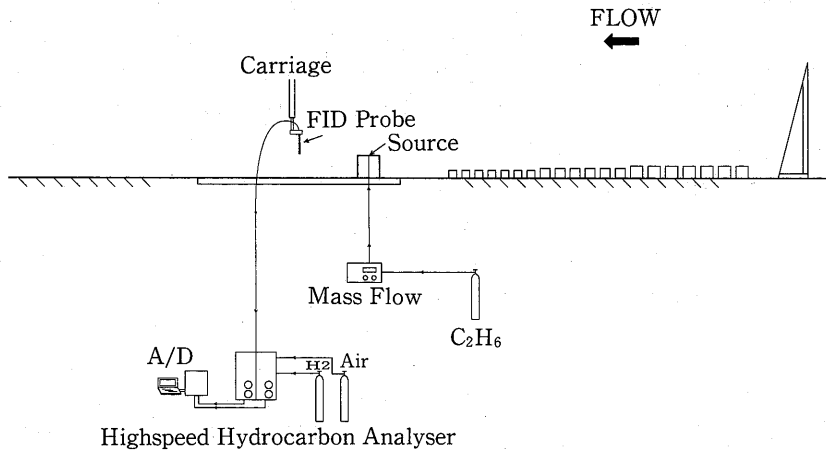


Fig. 1. Schematic of the wind tunnel experimental set-up.

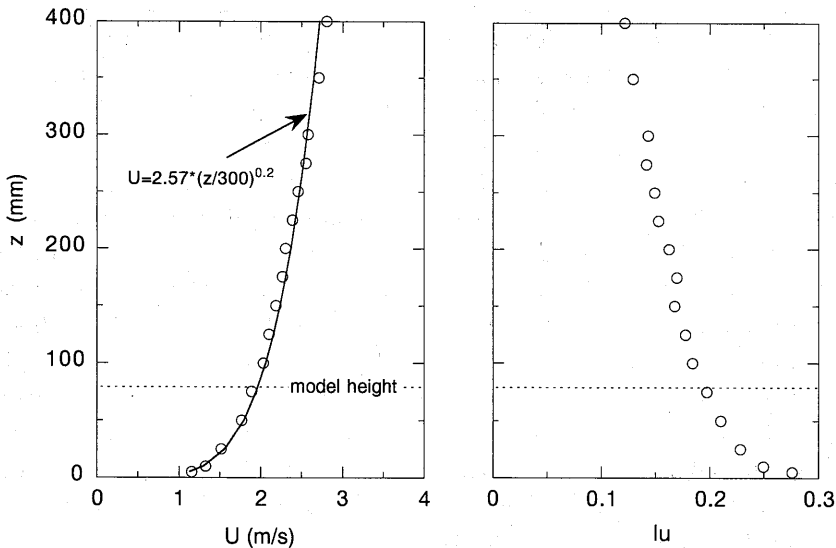


Fig. 2. Mean velocity and longitudinal intensity profile.

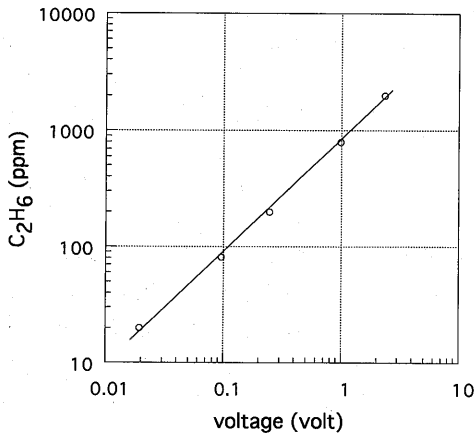


Fig. 3. Example of the calibration relationship between C₂H₆ and output of the FID.

した。Fig. 2 に平均風速 U および乱れの強さ I_u の垂直分布を示す。図中の実線は、べき則により求めた値を示した (べき指数: 0.2)。スペクトル解析した結果¹²⁾、各速度成分のパワースペクトルは、無次元化周波数 (nb/U) が 3 より高い周波数領域において Kolmogorov の $-2/3$ 乗法則で示される勾配から離れ、風洞気流の慣性小領域が粘性の影響により狭くなっていることが分かった。ここで b は建物の見付け幅、 U は軒高風速、 n は周波数である。すなわち、本研究では 75 Hz 以上の高周波数領域は実大気現象を再現していないものと考え、スペクトル解析を除く、すべてのデータ解析において高周波数域を移動平均により除いた。

屋根面中央には、平らなトレーサガス排出口 (内径: $1/10H$) を設け、エタン (C₂H₆) ガス 200 cc/min に窒素ガスを混合し排出した (合計 2775 cc/min)。本実験の排出速度比 V_s/U_H は 0.46 である (排出速度 $V_s=0.92$ m/s, $U_H=2$ m/s)。濃度の計測は流れの中心軸上の垂直断面を行った。測定点したガス濃度 C_e は、モデル高さでの風速 U_H とエタンガスの排出量 Q_s により無次元化された濃度 $C (=C_e U_H H^2 / Q_s)$ で整理した。

2.2 濃度の計測

エタン濃度の分析は、水素炎イオン化検出器 (Hydrogen Flame Ionization Detector, 略して FID) 方式による炭化水素計 (Cambustion 社, HFR-400) を用い、内径 0.25 mmφ、長さ 18 cm のプローブを取り付けた。サンプリング時間は 60 秒とし FID からの出力 2 msec の間隔で A-D 変換を行い 3 万個のデータを採取した。ローパスフィルターのカットオフ周波数

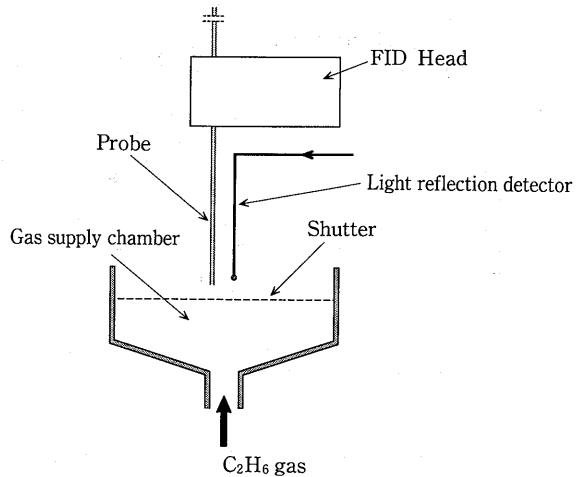


Fig. 4. Setup for testing of the time response of the FID.

は 224 Hz に設定した。また、実験の前後にエタンの標準ガス (0, 20, 78, 199, 802, 1990 ppm) を充たしたバックにプローブを入れ FID の較正を行った。Fig. 3 に較正例を示す。0~2000 ppm の範囲において、 $\pm 1\%$ 以内で比例関係にある。

FID の応答性を調べるために Fig. 4 に示す装置を製作した。この装置はシャッターで区切られたガス供給室と光反射検知器とから構成される。試験は、シャッター面にプローブの先端を接近させ設置し、シャッターを開きガスが放出された時の応答時間を調べた。Fig. 5 に FID 応答性の試験結果を示す。点線は光反射検知器の信号を示し、0 volt の出力がシャッター閉の状態、5 volt が開の状態を表す。また、実線は FID の出力を表す。図中の時間 T_1 はガスがプローブの先端から FID 燃焼室に達するまでの時間を表し、時間 T_2 はガスが FID 燃焼室に達してから出力が一定値の 63% ($=1-e^{-1}$) に到達するまでの時間を表す。 T_1 および T_2 の時間は、各々 10 msec, 3 msec である。この時間 T_1 は、プローブの長さ 18 cm の距離と吸引速度 17 m/s から求めた計算値 10.5 msec とほぼ一致する。ここでは応答時間を後者の $T_2=0.003$ sec で定義すると、FID の応答周波数は 333 Hz である。

プローブの吸引が測定点周囲の流れ場を乱すか否かについて検討する。ここで、プローブ吸込み口を中心とした半径 r の仮想球面を考え、その球面上の速度 U_s を評価する。 Q_p をプローブの吸引流量とすると、速度は $u_s=Q_p/4\pi r^2$ で表される。球面上の速度は距離の 2 乗に反比例し、プローブから離れるにしたがって急激に減少する。距離 $r=5$ mm の球面上の速度を

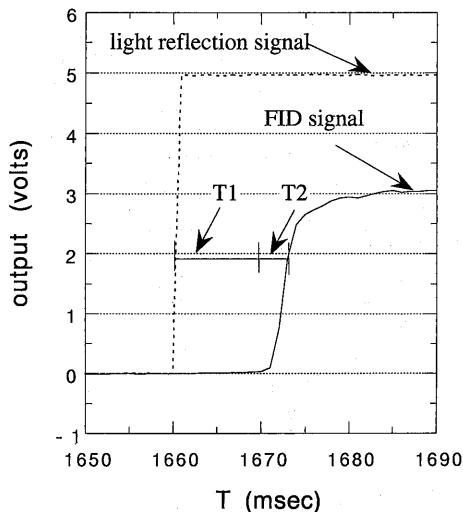


Fig. 5. Time series of the FID signal. The dotted line shows a signal from the light reflection detector (0 volts with the shutter closed, 5 volts with the shutter opened). The solid line shows the signal from the FID.

計算すると 0.26 cm/s と小さな速度となっている。渋谷ら¹³⁾は、同型の計測器を用いてプローブ吸い込み口より 5 mm 離れた速度を熱線風速計により計測した結果、吸引速度が熱線風速計では感知できないほど小さくなっていることを報告している。これらのことより、プローブの吸い込みが周囲の流れ場を乱すことは、ほとんどないと考える。

2.3 時間縮尺について

風洞での時間が実大気の時間にどの様に対応しているかについて述べる。速度スケールと長さスケールの2つの条件から時間スケールの条件が定まる(井上¹⁴⁾)。実大気 (p) の時間変動現象を風洞 (m) にて再現するには、(1) 式で表す無次元化時間を等しくす

ることが必要である。

$$(UT/L)_p = (UT/L)_m \tag{1}$$

ここで U, T, L は各々風速, 時間, 長さの代表スケールを表す。(1) 式を書き換えると (2) 式で表せる。

$$T_m/T_p = (L_m/L_p) \times (U_p/U_m) \tag{2}$$

時間縮尺 (T_m/T_p) は, 長さの縮尺と速度の縮尺の逆数の積で表され, 風洞風速と実風速が同じである場合, 時間縮尺と長さ縮尺とが一致する。本研究では, 速度縮尺を $U_p/U_m = 1$ とし模型の縮尺率を $L_m/L_p = 1/500$ としたので, 時間縮尺は長さ縮尺に一致する。すなわち, 実時間は (2) 式より風洞時間の 500 倍に対応し, 風洞で 1 秒に起こる現象は, 実大気では 500 秒の現象に相当する。

2.4 平均化時間と観測時間

一般に瞬間濃度 C は, 平均化時間 T_a と観測時間 T_r をパラメータとした関数 $C(T_a, T_r)$ で表せる。まず, 本実験の平均化時間 T_a をどう設定するかについて述べる。流れ場のスペクトル解析より, 75 Hz 以上の高周波数領域は実大気の現象を再現していないことから, その逆数 13.3 msec を平均化時間 T_a とする。計測データよりこの平均化時間に相当するデータを作るため, 移動平均操作を行う。その時の標本数 M は, 標本間隔 Δt と移動平均の遮断周波数 f_c とから, $M = 0.443/(\Delta t \times f_c)$ のように表せる¹⁵⁾。本実験の標本間隔 Δt は 0.002 秒であるので標本数を $M = 3$ に設定し, 13.5 msec の平均化時間に相当するデータを作った。実時間は風洞時間の 500 倍に対応するので, 風洞の 13.5 msec は, 実大気の 6.8 秒の平均化時間 T_a に相当する。

次に観測時間 T_r について述べる。建物の近傍の流れ場の乱流特性は, 2つのタイプの組織運動の影響を受けている¹²⁾。1つは, 流れの建物前縁での剥離に伴う渦運動であり, その規模は建物の見付け幅とほぼ同

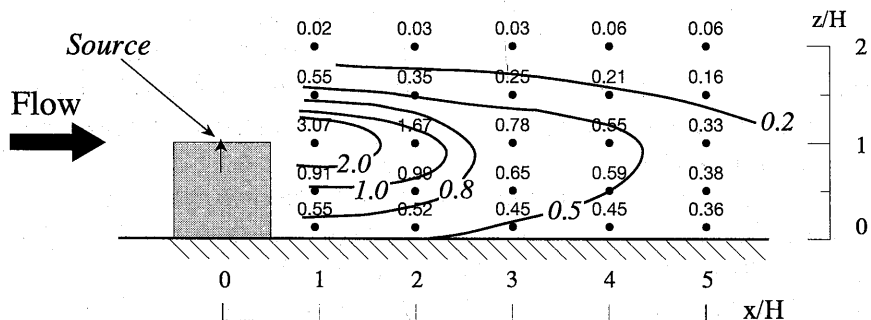


Fig. 6. Averaged concentration confours in y/H=0 plane.

じである。もう1つは、建物の後流域に存在するカルマン型の渦により引き起こされる低周波数運動であり、その規模は建物の見付け幅の数倍である。前者の無次元化周波数 (nb/U) は、1のオーダーであり、後者は0.1のオーダーであることが知られている¹²⁾。本実験では、建物前縁剥離とカルマン渦に対応する各々の渦の放出周期は、0.04 secと0.4 secとなる。ここでは、実時間で10分に相当する観測時間 T_r を選択した。瞬間濃度を対象とする場合、小さなスケールの運動が重要であり、観測時間を10分にするのは妥当と思われる。この10分は風洞で $T_r=1.2$ sec となり、建物前縁剥離とカルマン型では各々30周期と3周期分が含まれる。

本研究では瞬間濃度の期待値を求めるために、観測時間 $T_r=10$ min を1単位として、50単位 (8.3 hour に相当) のデータを解析した。

3. 測定結果

3.1 平均濃度と瞬間濃度

Fig. 6には、流れの中心軸上における建物風下の無次元化平均濃度 C_{ave} の垂直断面の分布を示す。高濃度域が風下の建物高さに現れている。また、非対象性の濃度分布となっており、建物高さより低い領域では相対的に高濃度が現れ、上層よりも大きな拡がり幅となっている。これは排出されたガスが建物の影響を受け、後流に巻き込まれることによる。Fig. 7には、 $x/$

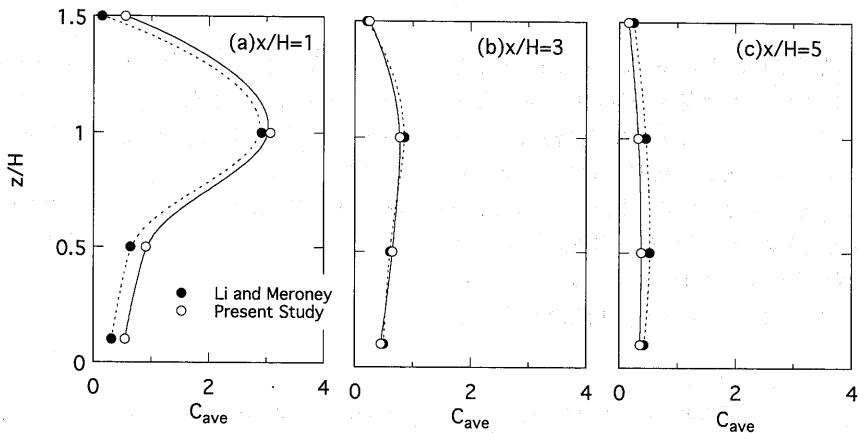


Fig. 7. Vertical profiles of averaged concentration in three typical positions. (a) $x/H=1$ (b) $x/H=3$ (c) $x/H=5$

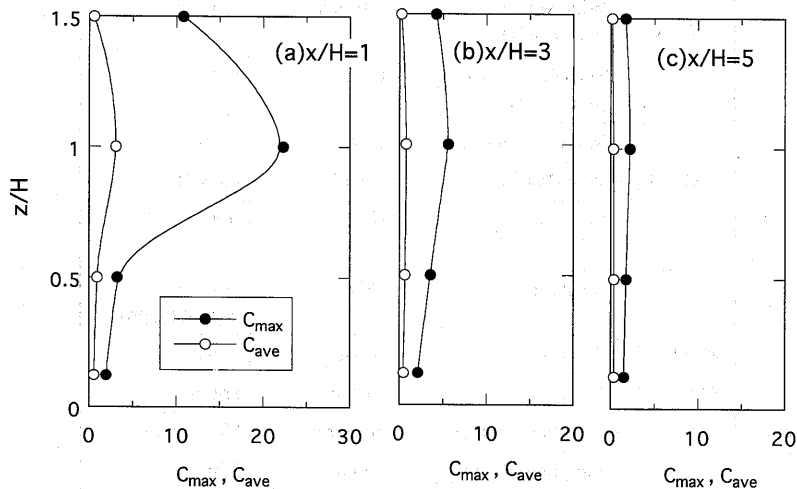


Fig. 8. Vertical profiles of maximum concentration and averaged concentration. (a) $x/H=1$ (b) $x/H=3$ (c) $x/H=5$

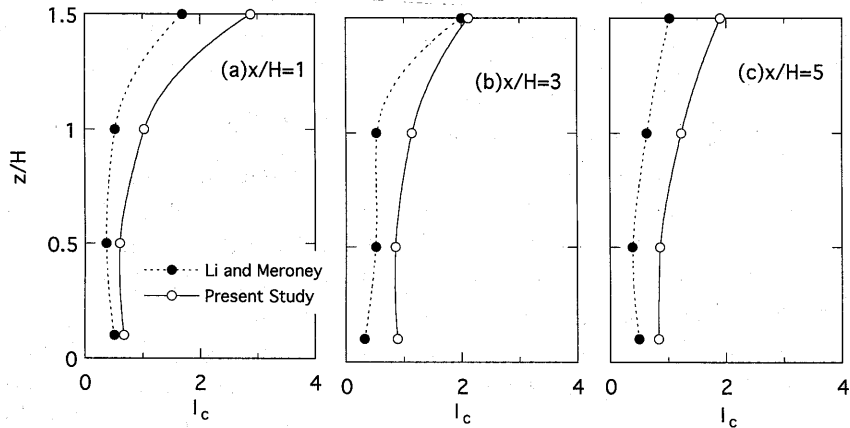


Fig. 9. Vertical profiles of concentration fluctuation intensity.
(a) $x/H=1$ (b) $x/H=3$ (c) $x/H=5$

$H=1, 3, 5$ の風下距離における C_{ave} の垂直分布を示す。 $x/H=1$ において建物高さ $z/H=1$ の所に大きなピークが生じており、後方 $x/H=3$ では幅広いピークを形成している。更に風下の $x/H=5$ では、垂直方向にはほぼ様な分布を示している。比較のために L&M の風洞実験結果を●印で示した。本実験の平均濃度の結果は、概ね L&M の風洞実験に一致している。

Fig. 8 には、 $x/H=1, 3, 5$ の風下距離における平

均濃度 C_{ave} とピーク濃度 C_{max} の垂直分布を示す。 $x/H=1$ では、建物高さ $z/H=1$ の所に大きなピークが生じており、平均濃度の最大値の出現場所と一致している。 $x/H=3$ ではなだらかなピークとなり、更に風下の $x/H=5$ では垂直方向に一様な分布となっている。

Table 1. Summary of experiment condition (Present study and Li and Meroney¹⁰⁾).

		Present study	Li and Meroney
Flow	Power low exponent	0.2	0.2
	Wind velocity (U_H at $z=H$)	2.0 m/s	1.6 m/s
	Turbulence intensity (I_u at $z=H$)	0.20	0.23
Model	Model height(H)	8 cm	15 cm
	Vent Diameter	0.10 H	0.08 H
	Velocity ratio (V_s/U_H)	0.46	0.46
Detector & Analysis	Analyzer	FID	Hot-film aspirating probe
	Response	4 msec	1 msec
	Tracer gas	ethane	argon
	Sampling volume	50 cc/min	890 cc/min
	Sampling period	1 min	3 min
	Low pass cutoff frequency	224 Hz	200 Hz

3.2 濃度変動の強度

Fig. 9には、無次元化した濃度変動の強度 $I_c (= \sigma_c/C_{ave})$ の垂直分布を示す。ここで σ_c は、濃度変動成分 c' の標準偏差を表す ($\sigma_c = \sqrt{c'^2}$)。各風下距離とも、建物高さより低い領域の I_c は1以下であり、建物高さより上層では1~3の値を示している。図中にはあわせてL&Mの結果をプロットした。平均濃度とは異なり I_c の値はL&Mのデータが本実験より低く現れている。本研究とL&Mの実験条件を Table

1に比較し示した。上流の風速分布、乱れの強さなど流れの条件および排出速度比は概ね等しく、また、分析器の応答性については、両者とも高応答である。唯一の違いはプローブから吸引するサンプル空気量の差違である。本実験の吸引量は50 cc/minであるのに対して、L&Mの実験での吸引量は890 cc/minであり、本実験の約18倍となっている。ただし、現段階ではこの違いが濃度変動の測定結果に影響を及ぼすか否かは明らかでない。

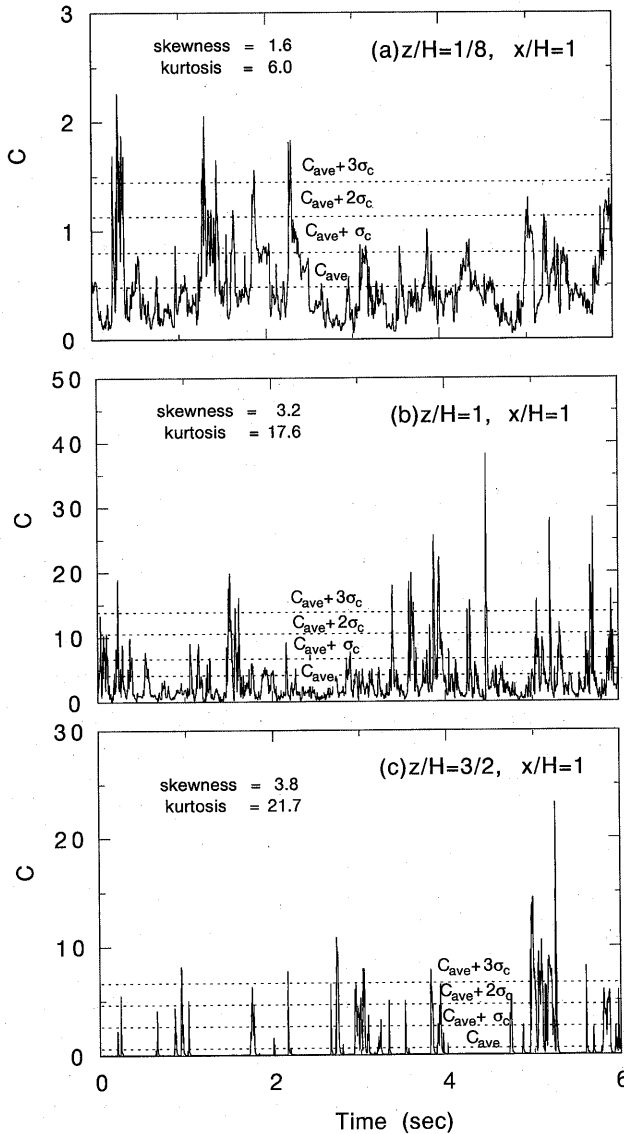


Fig. 10. A sequence of concentration time series measured at different heights at $x/H=1$. Statistic values in these figures are these taken within the time period shown. (a) $z/H=1/8$ (b) $z/H=1$ (c) $z/H=3/2$

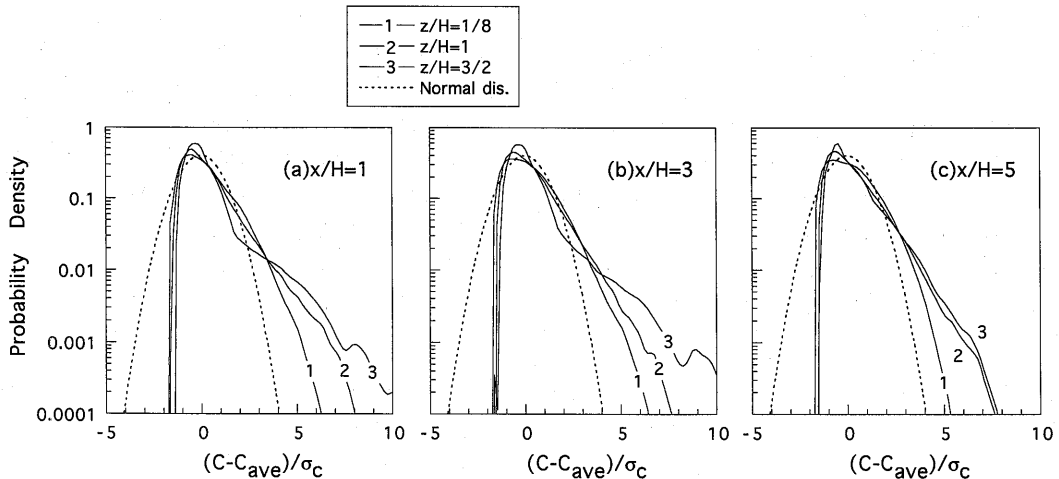


Fig. 11. Probability density function measured at different heights.
(a) $x/H=1$ (b) $x/H=3$ (c) $x/H=5$

3.3 濃度の時間変化と確率密度分布

Fig. 10には、風下 $x/H=1$ における3高度で計測した濃度変動の時系列プロットを示す。地表近く $z/H=1/8$ の濃度変動は (Fig. 10a)、高濃度 ($(C_{ave}+3\sigma_c)$ を越える値) が瞬間的に現れているものの比較的ゆっくりとした大きな変化で推移している。この動きはスケールの大きな構造に関連しているものと考えられる。建物高さ $z/H=1$ では (Fig. 10b)、地表近傍より高濃度の出現が間欠的である。更に上層 $z/H=3/2$ では (Fig. 10c)、ゼロ濃度が現れる期間が増加しており突発的な高濃度が現れている。また、図中には歪度 (skewness) と尖度 (kurtosis) の値 (図示した6秒間の値) を示した。正規分布の場合、skewness=0, kurtosis=3の値となる。歪度は地表から離れるに従い大きくなり、上層ほど正に歪んだ分布である。尖度も高度が大きくなると増大し、上層ほど尖った分布を形成している。

Fig. 11は、風下距離 $x/H=1, 3, 5$ における濃度の確率密度分布を示した。縦軸は対数で標示し、図中の点線は正規分布を表す。風下距離 $x/H=1$ の分布では (Fig. 11a)、いずれの高さも正規分布から外れ正の方向に裾をひいており、高度が上昇するほど正の方向に歪みが大きい。風下距離 $x/H=3$ においても (Fig. 11b) 同様な傾向が現れている。更に風下 $x/H=5$ では (Fig. 11c)、上層 $z/H=1, 3/2$ の高さで正の方向の裾の広がりが上流の地点 $x/H=1, 3$ より小さく、地表近傍 $z/H=1/8$ の分布も正規分布に近づく傾向にある。

3.4 スペクトル

濃度スペクトルは、拡散する煙の特徴的な渦スケール分布を間接的に表している。Fig. 12には、風下距離 $x/H=1, 3, 5$ における縦軸を σ_c^2 で基準化した濃度スペクトル分布を示す。解析は、移動平均を行わない元データを用いMEM (Maximum Entropy Method) の方法により行った。各測定点とも慣性小領域において $-2/3$ 乗法則で示される勾配が認められるが、およそ100 Hz以上の高周波数域では、 $-2/3$ 乗法則から離れる。 $x/H=1$ において (Fig. 12a)、地表近く $z/H=1/8$ のピークは低周波数側2 Hz付近にあるが、建物高さ $z/H=1$ および $z/H=3/2$ では、高周波数側に移動し30 Hz付近に幅広いピークを生じている。 $x/H=3$ では (Fig. 12b)、 $x/H=1$ と同様に地表近く $z/H=1/8$ では低周波数側にピークが現れ、高度が増すとピークが高周波数側に移動する。風下 $x/H=5$ になると (Fig. 12c)、高度の違いによるピークのずれは小さくなる。

このようにスペクトルピークの位置は、高さ $z/H=1$ と $3/2$ ではあまり変化せず、高さ $z/H=1/8$ と1では大きく変化している。よって $z/H=1/8$ と1の間の $z/H=1/2$ 程度の高さに現象の異なる領域が存在し、Fig. 13に示す様な2つの拡散領域が形成されていると考えられる。1つは建物高さのおよそ半分以下の層に形成される領域で本研究では「混合領域 (Mixing regime)」と呼ぶ。他の1つは、建物高さの半分より上層に形成される領域で「間欠領域 (Intermittency regime)」と呼ぶ。

一般に単体建物周囲の流れは、屋根面と後流とでは

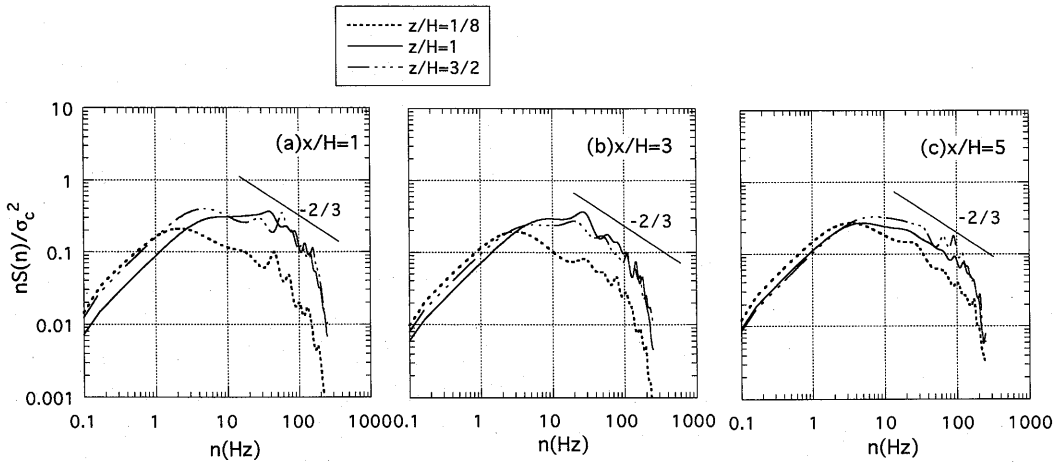


Fig. 12. Concentration spectrum measured at different heights.
(a) $x/H=1$ (b) $x/H=3$ (c) $x/H=5$

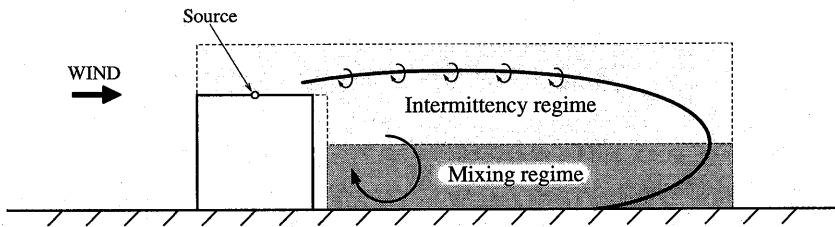


Fig. 13. Schematic of two dispersion regimes in the building wake.

渦のスケールが異なる¹²⁾。屋根面では建物の風上には強い上昇流が生じ建物前縁で流れの剥離が起こる。このためスケールの小さな強い乱れが屋根面に生成され、それが風下方向に運ばれる。この「間欠領域」では、短い周期の濃度変動となり高周波数側にピークが現れる。一方、建物後流にはカルマン渦と呼ばれる建物スケールの大きさの渦が形成される。この渦スケールは、屋根面で生成される剥離渦に比べ10倍大きい。この「混合領域」では、相対的に長い周期の濃度変動となり低周波数側にピークが現れる。

4. ピーク濃度の予測

ピーク濃度を予測する方法は2つある。1つは、最大値と平均値の比 ($=C_{max}/C_{ave}$) で表わせるガストファクター (G_T) から求める方法である。この方法は経験的に得られた既知のガストファクターを用いて、平均値からピーク濃度の予測を行う方法であり、簡便なことから最も一般的に適用されている。2つ目は、ピーク濃度と平均値の差が濃度変動の標準偏差の何倍か ($= (C_{max} - C_{ave}) / \sigma_c$) を表すピークファクター (P_T) を用いてピーク濃度を求める方法である。実験からピ

ークファクターに関する予測式を作り、それを利用してピーク濃度を算定することが可能である。

一般に、ピーク濃度は平均化時間 T_a の増加とともに減少することが知られている^{7,8)}。これは平均化時間を長くすると空間的な拡がりの小さな変動が平滑化され、空間的に大きな拡がりの変動が抽出されることによる。これまでの節では、実大気で $T_a=6.8$ 秒に相当する平均化時間のデータを扱ってきた。本節では、建物近傍のガストファクターおよびピークファクターの特性を述べるとともに、平均化時間とそれらの関連について示し、建物近傍のピーク濃度の予測式を提案する。

4.1 ガストファクター

Fig. 14には、 $x/H=1, 3, 5$ におけるガストファクター (G_T) の垂直分布を示す ($T_a=6.8$ 秒のデータ)。各風下距離において建物高さの半分より下層の G_T は3~6のオーダーであるが、建物高さより上層では、排出源の近傍ほど大きな値となり7~20の範囲で大きくばらつく。

次に、移動平均によりデータを平滑化し平均化時間

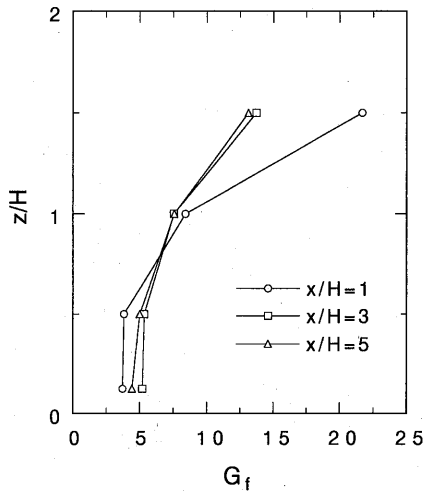


Fig. 14. Vertical profiles of gust factor G_f .

T_a を変化させた場合のガストファクター値を示す。Fig. 15 には、風下3地点 ($x/H=1, 3, 5$) における G_f 値と実大気の前平均化時間 T_a との対応を表した。×印は「間欠領域」のデータを、○印は「混合領域」のデータを表す。平均化時間が増加するとともに G_f 値は減少する。「間欠領域」では「混合領域」よりも G_f 値が大きく、ばらつきも大きい。図中の実線は各領域における G_f 値の上限値を示した。平均化時間 T_a との関係で (3) 式のように表せる。

$$G_f = \begin{cases} 46 \times T_a^{-0.46} & (\text{Intermittency regime}) \\ 8.5 \times T_a^{-0.27} & (\text{Mixing regime}) \end{cases} \quad (3)$$

比較のために著者ら¹⁶⁾が野外にて計測した G_f 値も合わせて示す (□印と◇印)。ただし、測定位置は立方体建物 ($H=5.4$ m) の屋根面中央からトレーサガスを排出した時の屋根面上であり「間欠領域」に属する。サンプリングは 10 Hz で行い、観測時間 T_r は 10 分間である。図示したデータは、6 つの Run の平均値 (文献¹⁶⁾ の Table 1 の Run 6, 9, 10, 11, 15, 16) の風上点 (ROOF1: □印), 風下点 (ROOF2: ◇印) のデータである。平均化時間 T_a が 10 秒と 30 秒の野外観測値は、「間欠領域」における風洞実験の上限値とおおむね対応している。また、 $T_a=1\sim 10$ 秒の範囲の短い平均化時間において、野外観測値は、ほぼ実験式の外挿線上にあり、本風洞実験から得られた (3) 式は 1 秒のような短い平均化時間の G_f 値の予測に使用できることを示している。

4.2 ピークファクター

Fig. 16 には、 $x/H=1, 3, 5$ におけるピークファクター $P_{r,T}$ の垂直分布を示す。ここで、ピークファクターの添字 T は、平均化時間 $T_a=6.8$ 秒の時の濃度変動の標準偏差 $\sigma_{c,T}$ を用いたことを表し、後述する実大気の 10 Hz でサンプリングした標準偏差 σ_c と区別する。ピークファクターは、高度が増加すると緩やかに増加するが、その値は 4~7 のオーダーであり、ガストファクター G_f とは異なり風下距離への依存度は

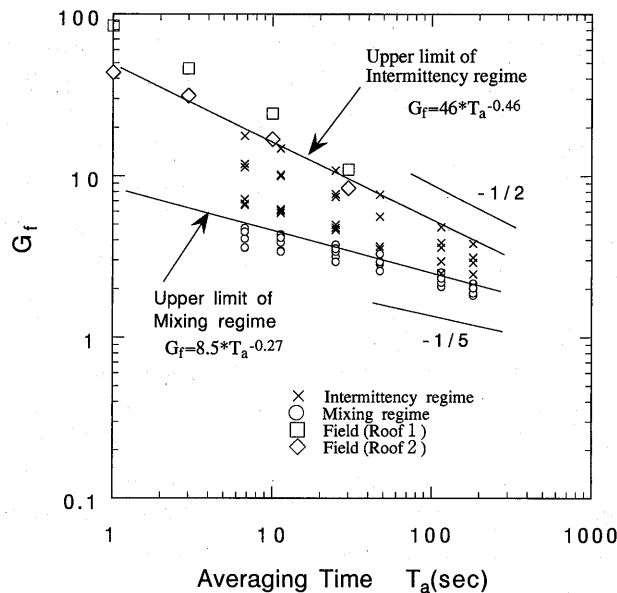


Fig. 15. Variation of gust factor G_f with averaging time T_a .

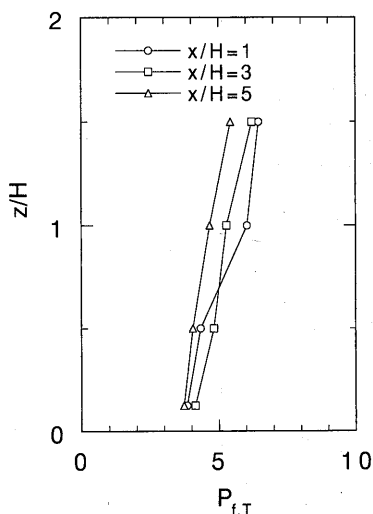


Fig. 16. Vertical profiles of peak factor $P_{f,T}$.

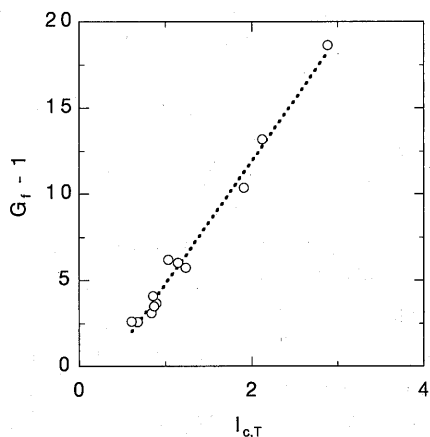


Fig. 17. The relationship between concentration fluctuation intensity $I_{c,T}$ and $G_f - 1$.

低い。ピークファクターのばらつきが小さいことは、ピーク濃度を予測する際適している。ばらつきが小さい理由は、以下のように考えることができる。 $P_{f,T}$ 値と G_f 値の関係は (4) 式で表せる。

$$P_{f,T} = (C_{max} - C_{ave}) / \sigma_{c,T} = (C_{max} / C_{ave} - 1) \times (C_{ave} / \sigma_{c,T}) = (G_f - 1) / I_{c,T} \quad (4)$$

Fig. 17 に示す様に $(G_f - 1)$ と濃度変動の強度 $I_{c,T}$ はほぼ比例関係にあるため (4) 式はほぼ一定値となる。この結果、ピークファクターは、ガストファクターよりも安定している。

ガストファクターを用いてピーク濃度を推定する場合、平均値が分かればピーク濃度を予測できる簡便さはあるが、場所によってガストファクターのばらつき

が大きく予測精度を劣る。ピークファクターはガストファクターに比べばらつきが少ないため予測精度の向上が期待される。ただし、この場合は平均値の他に濃度変動の標準偏差の値が必要である。

本実験により得られたピークファクター $P_{f,T}$ と平均化時間 T_a の関係を Fig. 18 に示した。ここで、 \times 印は「間欠領域」、 \circ 印は「混合領域」でデータを表す。両領域における値のばらつきが小さく、その上限値はべき関数で表わすことができる (図中の点線)。図中には野外¹⁶⁾にて計測したピークファクターを合わせて示した (\square 印と \diamond 印)。ただし、野外の濃度変動の標準偏差は風洞実験の結果と合わせるために、平均化時間 $T_a = 6.8$ 秒の濃度変動の標準偏差の値を用いた。野外観測値は概ね実験式線上にあり、風洞実験から得られた実験式は短い平均化時間のピークファクターの予測に使えることを示している。実大気では、平均化時間 $T_a = 6.8$ 秒より高周波数の濃度変動が存在するため、実大気で計測された濃度変動の標準偏差 σ_c は、本風洞実験で用いた平均化時間 $T_a = 6.8$ 秒の標準偏差 $\sigma_{c,T}$ よりも大きな値となる。その結果、実大気のピークファクター P_f は、風洞で求められた $P_{f,T}$ より低くなっている。図中の \blacksquare 印と \blacklozenge 印は、野外にて 10 Hz のサンプリングで得られた濃度変動の標準偏差 σ_c を用いて定義したピークファクター値 P_f を示す。 $\sigma_{c,T}$ を用いて定義したピークファクター $P_{f,T}$ (\square 印、 \diamond 印) より低めの値となる。したがって、本風洞実験により得られたピークファクター値 $P_{f,T}$ を実大気のピークファクター値 P_f に換算する必要がある、 $P_{f,T}$ に本風洞実験から得られた $\sigma_{c,T}$ と実大気で得られた σ_c との比 $\sigma_{c,T} / \sigma_c$ を乗じる。この比 $\sigma_{c,T} / \sigma_c$ は約 0.55 であり、この値を用いると、実大気でのピークファクター P_f は、(5) 式により表せる。

$$P_f = 9.1 \times T_a^{-0.46} \quad (5)$$

5. ま と め

風洞において、大気境界層中に十分に入っている立方体建物モデルの屋根面中央よりトレーサガスを排出し、建物後流のピーク濃度を高応答の濃度分析計を用いて計測した。その結果を以下にまとめる。

(i) 瞬間濃度のスペクトルピークは測定高さにより異なった周波数域に生じている。このことより建物後流に 2 つの拡散領域が形成されていると考えられる。1 つは建物高さのおよそ半分以下の層に形成される「混合領域」であり、低周波数側にスペクトルピークが現れる。もう 1 つは、建物高さの半分より上層に形成される「間欠領域」であり、高周波数側にスペクトル

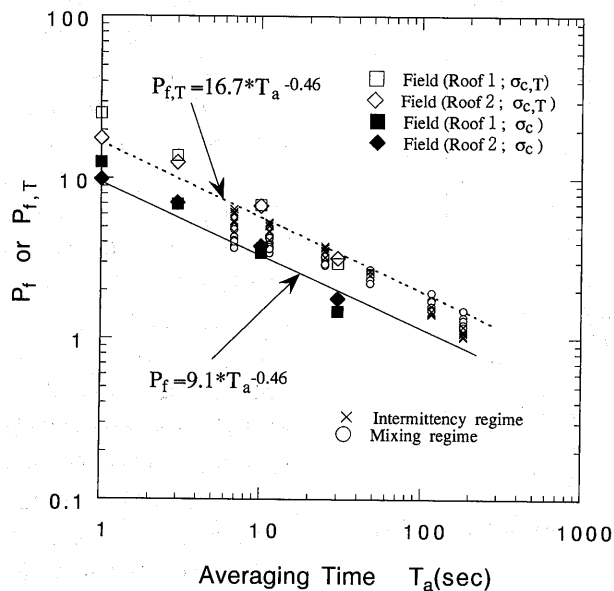


Fig. 18. Variation of peak factor with averaging time T_a .

ルピークが現れる。

(ii) 建物近傍のガストファクター G_r は 3~20 (実大気の平均化時間 T_a が約 7 秒の場合) の範囲にあり測定高さ、風下距離により大きくばらつく。その値は「間欠領域」の方が「混合領域」よりも大きな値となる。その上限値と平均化時間 T_a との関係は「混合領域」で $G_r = 8.5 * T_a^{-0.27}$ 、「間欠領域」では $G_r = 46 * T_a^{-0.46}$ で表せる。

(iii) 建物近傍のピークファクターは、ガストファクターに比べばらつきが少なく 4~7 (実大気の平均化時間が約 7 秒の場合) の範囲にある。また、その上限値と平均化時間 T_a との関係は、 $P_f = 9.1 * T_a^{-0.46}$ で表せる。

(受稿 1997.9.9)

文 献

- 1) Csanady, G. T.: Turbulent Diffusion in the Environment, D. Reidel, Dordrecht, Holland, 222~248 (1973).
- 2) Wilson, D. J., Fackrell, J. E. and Robins, A. G.: Concentration Fluctuations in an Elevated Plume, *Atmos. Environ.*, **16**, 2581~2589 (1982).
- 3) Verkatram, A.: The Uncertainty in Estimating Dispersion in the Convective Boundary Layer, *ibid.*, **18**, 307~310 (1984).
- 4) Hanna, S. R.: The Exponential Probability Density Function and Concentration Fluctuations in Smoke Plumes, *Boundary-Layer Meteorol.*, **29**, 361~375 (1984).
- 5) Chatwin, P. C. and Sullivan, P. J.: A Simple and Unifying Physical Interpretation of Scalar Fluctuation Measurements from many Turbulent Shear Flows, *J. Fluid Mech.*, **212**, 533~556 (1990).
- 6) Gifford, F.: Peak to Average Concentration Ratios according to a Fluctuating Plume Dispersion Model, *Int. J. Air Pollut.*, **3**(4), 253~260 (1960).
- 7) Hinds, W. T.: Peak-to-mean Concentration Ratios from Ground-level Sources in Building Wakes, *Atmos. Environ.*, **3**, 145~156 (1969).
- 8) Ramsdell, J. V. and Hinds, W. T.: Concentration Fluctuations and Peak-to-Mean Concentration Ratios in Plumes from a Ground-Level Continuous Point Source, *ibid.*, **5**, 483~495 (1971).
- 9) Wilson, D. J.: Contamination of Building Air Intake from nearby Vents, Rep. No. 1, Department of Mechanical Engineering, University of Alberta (1976).
- 10) Li, W. W. and Meroney, R. N.: Gas Dispersion near a Cubical Model Building. Part II. Concentration Fluctuation Measurements, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **12**, 35~47 (1983).
- 11) Higson, H. L., Griffiths, R. F., Jones, C. D. and

- Hall, D. J.: Concentration Measurements around an Isolated Building: a Comparison between Wind Tunnel and Field Data, *Atmos. Environ.*, **28**, 1827~1836 (1994).
- 12) 孟 岩, 日比一喜: 高層建物屋上の流れ場の乱流特性と組織運動, 日本風工学会誌, No. 72, 21~34 (1997).
- 13) 渋谷亜紀子, 村上周三, 持田 灯, 高橋岳生, 林吉彦: 高応答性濃度計による建物周辺の濃度変動に関する風洞実験 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 619~620 (1991).
- 14) 井上栄一, 温度成層を考慮に入れた自然風現象の風洞実験について, 農業気象, **15**, No. 2, 1~5 (1959).
- 15) 小澤慎治: デジタル信号処理, 実教出版 (1979).
- 16) 老川 進, 孟 岩, 上原 清, 大原利真: 都市郊外における建物近傍の野外拡散実験, 大気環境学会誌, **30**, 59~68 (1995).

A wind-tunnel study of peak concentrations in the near-wake region of a cubical model building

Susumu OIKAWA and Yan MENG

Environmental Engineering Department, Institute of Technology, SHIMIZU CORPORATION.
No. 4-17, Etchujima, 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135-0044, JAPAN

A wind tunnel study of peak concentrations in the near-wake region of a cubical model was conducted. Tracer gas was emitted from the rooftop at the center of the model and was measured with a fast-response concentration detector. The results showed that there were two dispersion regimes in the building wake. One regime, labeled the "mixing regime", was approximately below the middle of the building. The other regime, designated the "intermittency regime", was approximately above the middle of the building. In the mixing regime, the peak of the concentration spectrum were observed in a low frequency region, while, in the intermittency regime, the peak appeared to shift to wards a higher frequency region. The gust factor (G_r) near the building wake has a considerable scatter range of $G_r=3\sim 20$. On the other hand, the peak factor has a small scatter range of 4~7. The relationship between the peak factor (P_r) and averaging time (T_a) can be expressed by the equation $P_r=9.1 T_a^{-0.46}$ in the range of $T_a=1\sim 200s$, where T_a is the time in prototype time.

Key words: wind tunnel study, building, peak concentration, dispersion, gust factor, peak factor