

単独建屋後流におけるトレーサガス 濃度変動に関する風洞実験

佐藤 歩¹・佐田 幸一²

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 大気科学部 (〒201-8511 東京都狛江市岩戸北 2-11-1)

E-mail: ayumu@criepi.denken.or.jp

²工博 (財)電力中央研究所 大気科学部 (〒201-8511 東京都狛江市岩戸北 2-11-1)

プラント等での可燃性ガスや毒性ガスの漏洩事故に対する安全対策では、漏洩ガスの平均濃度だけでなく瞬間的に生じる濃度変動を含めて評価することが重要である。本研究では、気流に対し前面が直角に置かれた単独の建物後流域におけるガス拡散挙動や最大濃度を評価するための風洞実験を行った。濃度測定用のトレーサガスは建物屋根面から放出し、高応答性の濃度計を用いて濃度変動を測定した。その結果、建物風下近傍ではブルームが逆流域に取り込まれ、ブルーム内の濃度が均一化されることが確認された。また、瞬間濃度の確率分布から求めた最大濃度は、濃度変動強度の大きさに応じて対数正規あるいは指数分布による推定値と良く一致し、後流域の最大濃度は平均濃度の2~3倍程度となることを明らかにした。

Key Words: wind tunnel experiment, concentration fluctuation, building, probability function, peak-to-mean concentration ratio

1. はじめに

従来、大気に係る環境影響評価においては排煙中に含まれる汚染物質の時間平均濃度が対象とされてきた。しかし、化学プラント等での事故時にガス漏洩が生じた場合、漏洩源からの距離や風速、風向等の条件により瞬間的なガス濃度は平均濃度の数倍以上の大きな値を示すことが想定される。漏洩したガスが可燃性成分や毒性成分を含む場合には、時間平均濃度のみではその影響を過小評価する恐れがあり、より短い時間間隔で生じる濃度変動を含めて評価することが求められる。これまでも大気中でのトレーサガス拡散を対象に濃度変動測定を行った風洞実験や野外実験がいくつか報告されている。大気と同様な乱流境界層を模擬した風洞実験¹⁾では、乱流境界層内の地表煙源および上空煙源から放出された煙の濃度変動および乱流フラックスを測定し、煙源高さによる拡散の相違や濃度変動に対する煙源の大きさの影響が検討された。また、比較的に地表粗度が大きな場に相当する気流場を対象とした風洞実験²⁾では、均質な乱れ中のブルームの取扱いに使用される相似的な分布の成立性に着目して濃度変動データの解析が行われた。さらに野外実験^{3), 4), 5)}においても、大気安定度やブルームの間欠性の影響を検討するため、変動成分まで含めた濃度測定が行われている。ただし、これらはいずれも障害物のない平坦

な地形上でのトレーサガス拡散を対象としている。一方、プラントでの事故時にはガス漏洩源周辺に建物が存在するケースが多いと想定されるため、建物が周囲の気流や漏洩ガスの拡散に与える影響を考慮することが必要である。また、可燃性ガスや毒性ガスの漏洩に対する安全対策の観点からは、漏洩ガス中において瞬間的に生じる最大濃度の出現頻度やその大きさに着目して議論することが重要である。建物周辺での濃度変動を評価した例としては建物の屋根面あるいは風下側の地表付近から放出されたトレーサガスの濃度変動を測定した例^{6), 7), 8)}がある。建物屋根面から放出されたトレーサガス濃度を測定した例⁶⁾では、後流域における濃度変動の強度(濃度の標準偏差/平均濃度)は建物の影響により減少することや経験的に最大濃度は平均濃度の3倍を越えないことなどが明らかにされた。同様に建物屋根面からのトレーサガス拡散については、建物後流の濃度スペクトルや平均化時間が最大濃度に与える影響が検討されている⁷⁾。また、建物風下側の地表付近から放出されたトレーサガスを対象とした例⁸⁾では、平均濃度が高くその勾配の大きい領域では分散も大きくなること、高濃度域での濃度変動スペクトルのピークは風速変動に比べ高周波側に存在することなどが明らかにされた。しかし、いずれにおいても後流域における最大濃度の出現頻度やその大きさに関して確率分布関数の形状を含めて詳細な議論は行われていない。そ

ここで本研究では、大気安定度が中立な大気を対象とした大気拡散用の実験手法⁹⁾に従った気流、拡散条件を風洞内に形成し、気流に対し前面が直角に置かれた単独の立方体建屋後流域においてトレーサガスの濃度変動を測定する風洞実験を行い、建物後流域における濃度の確率分布関数より瞬間的に生じる最大濃度の特性を明らかにした。

2. 風洞実験の概要

(1) 実験装置

電中研・狛江研究所に設置されている拡散実験用風洞(測定部長さ20m, 幅3m, 高さ1.5m)を用いて行った。風洞内に中立時の大気境界層を模擬するため、測定部入口付近に乱流発生装置(断面 $5.0 \times 10^{-2} \text{m}$ のL型アングル)を0.2m 間隔で5本設置し、濃度測定範囲において十分に発達した境界層が形成されるように気流の調整を行った。トレーサガス(エチレン C_2H_4) 濃度の測定には高応答性を有する水素炎式高速炭化水素測定装置(株)テクニカ製、写真-1)を使用した。この装置は、小型の濃度測定部(サンプリングヘッド)および燃料の供給量や燃焼温度を調整するコントロールユニットから構成され、サンプリングヘッド内を減圧することにより先端に取り付けられたチューブを通じてトレーサガスを高速で吸引する仕組みとなっている。吸引されたガスはサンプリングヘッド内で水素と空気で構成される燃料ガスと混合して燃焼される。サンプリングヘッド内では、燃焼した炭化水素より生じるマイナスイオンを電極により捕捉し、発生した電流を電気信号として検出している。検出された電気信号はコントロール部にて予め求められた係数により濃度値に変換される。この係数を求めるための装置の検定は、所定のガス濃度に調整された検定ガスを用いて各測定開始前に行った。サンプリングチューブには、内径 $2.5 \times 10^{-4} \text{m}$ 、全長0.2mの微細な金属製チューブを使用し、サンプリングヘッドが測定点周囲の気流および濃度の測定結果に影響を及ぼさないことを事前に確認した。サンプリングガスの吸引速度は12.2m/sと設定し、ガスがサンプリングチューブの先端からサンプリングヘッドに到達するのに要する時間は約 1.6×10^{-2} 秒である。また、過渡的な濃度変化時における濃度変動信号の追従性を検討した結果、100Hz 前後の周波数応答性が確保されていることを確認している。なお、データのサンプリングは測定ごとに 2.0×10^3 秒間隔で40秒間行い、サンプル数は20,000個と設定した。得られたデータはAD変換後ワークステーションで統計処理を行った。一方、速度場の測定には、二方向同時測定・後方散乱型のレーザドップラ流速計を使用した。

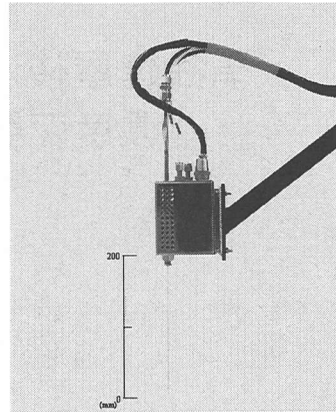


写真-1 水素炎式高速炭化水素測定装置

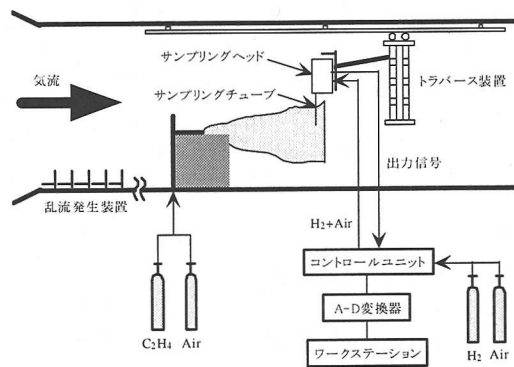


図-1 風洞実験の概略図

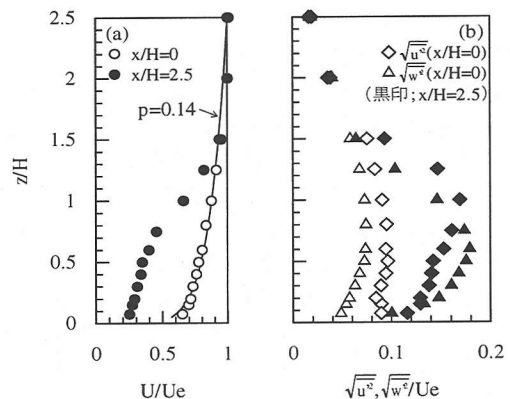


図-2 平均風速(a)および乱流強度(b) ($x/H=0$; 平地, $x/H=2.5$; 建物あり)

(2) 実験条件

建物模型(一辺 $H=0.2\text{m}$ の立方体)はテストセクション

ン入口から4m下流位置の風洞床面中央に、模型前面が流入気流に対して直角になるように設置した。濃度測定に使用するトレーサガスは模型の屋根面中央より内径 $1.8 \times 10^{-3} \text{m}$ の円管を通じて、風洞代表風速 U_e (地表面からの高さ $z=0.5\text{m}$ において $U_e=2.0\text{m/s}$ と設定) と等速で放出した。測定座標系はトレーサガス放出源直下の風洞床面を原点として流れ方向に x 、流れ方向に対して垂直な横断方向に y 、鉛直方向に z とした。図-1 に風洞実験の概略を示す。

気流場の設定を確認するため、トレーサガス放出位置 ($x/H=0, y/H=0$) および建物後流 ($x/H=2.5, y/H=0$) において平均風速および風速変動の測定を行った。なお、トレーサガス放出位置での測定は建物模型を設置しない状態 (以下、平地) で行った。図-2 に平均風速 U および流れ方向、鉛直方向の乱流強度 $\sqrt{u_i'^2}$ (u_i' : 各方向の速度乱れ成分) の鉛直方向分布をそれぞれ示す。平均風速、乱流強度はそれぞれ風洞内の代表風速 U_e により無次元化している。トレーサガス放出位置における平均風速の鉛直分布より、風洞内に形成された境界層の厚さ (代表風速の99%となる高さ) は約 0.4m 、鉛直方向の風速変化を表すべき法則の指数 p は約 0.14 である。建物風下側の $x/H=2.5$ においては、建物の影響により地表付近の平均風速が平地に比べ 1.0m/s 程度減少していることが分かる。なお、図には示していないが $x/H=2.5$ より上流側では建物高さ未満 $z/H < 1.0$ において $U/U_e < 0$ となる逆流域が確認された。一方、流れ方向、鉛直方向の乱流強度はいずれも平地の分布に比べ大きな値を示し、この領域の気流が大きく乱されていることが分かる。これは建物屋根面で生成された乱れが後流域で生じる下降流により下方へ輸送されたためと考えられる。

以上の気流状況が大気境界層と相似であることを確認するため、平地においてトレーサガスを放出し、鉛直方向の濃度分布を測定した。濃度分布より得られた拡散幅の測定結果を大気¹⁰⁾と比較して図-3に示す。横軸は建物高さで無次元化した煙源からの風下距離、縦軸は建物高さで無次元化した鉛直方向拡散幅をそれぞれ表し、大気の拡散幅は模型縮尺 (本風洞実験では一般的な発電プラントの建屋高さがおおよそ 50m 程度であることおよび風洞測定部の寸法を勘案して $1/250$ とした) を考慮して実線で描いた。大気の拡散幅は熱的な条件により変化し、不安定 B、弱不安定 C、中立 D、弱安定 E である。平地で行った風洞実験より、濃度測定を行った範囲内においてはトレーサガス濃度は上空のみで検出され、ブルームは地表の影響をほとんど受けないことが確認されたため、鉛直方向濃度分布を正規分布と仮定し、正規分布の標準偏差より拡散幅を求めた。風洞実験結果より得られた拡散幅を大気と比較すると、本風洞実験における鉛直方向の拡

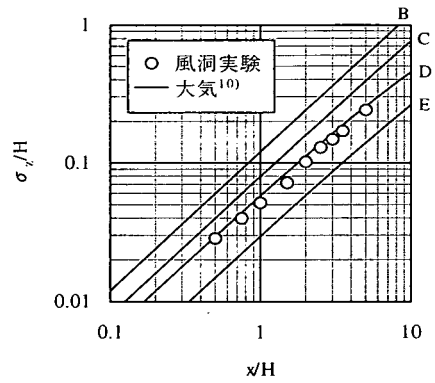


図-3 鉛直方向拡散幅

散幅 σ_z は大気中の熱的な影響がない中立 (大気安定度 D) にはほぼ一致していることが分かる。

3. 測定結果と考察

(1) 平均濃度・標準偏差

図-4、図-5 に建物風下側の中心軸上 ($y/H=0$) における平均濃度 C および濃度変動の標準偏差 $\sqrt{c'^2}$ ($c'=c-C$, c : 瞬間濃度) の鉛直分布を示す。平均濃度、標準偏差はそれぞれ風洞代表風速 U_e および煙源強度 Q により無次元化している。なお、比較のため平地上で測定した結果も合わせて示す。 $x/H=0.75$ における平均濃度は、平地では上空でガウス分布に近い分布を示すのに対し、建物後方では建物高さ以下においても濃度が検出されており、ブルームが逆流域に取り込まれていることが分かる。風下距離の増加に伴いブルームは拡散され、鉛直方向に一樣な分布へ近づく。平均濃度が最大となる高さは平地、建物後方とも風下距離の増加に伴い、地表方向へと下降している。一方、濃度変動の標準偏差は建物の有無に関わらず平均濃度と良く似た分布形状を示すが、建物後方では上空に対する地表付近の値が相対的に小さくなっている。また、いずれの風下位置においても標準偏差の鉛直方向勾配は平均値に比べ小さく、最大値となる高さは平均濃度では上空から地表へ下降するのにに対し、標準偏差ではそのような傾向は見られない。これは建物後流域に取り込まれたブルームは鉛直方向に大きく拡散されるため風下距離の増加に伴い平均濃度は上空より地表付近の方が高くなるが、ブルーム内の濃度は均一化されるため濃度変動は周辺空気との混合が活発な上空に比べ相対的に小さくなるためと考えられる。

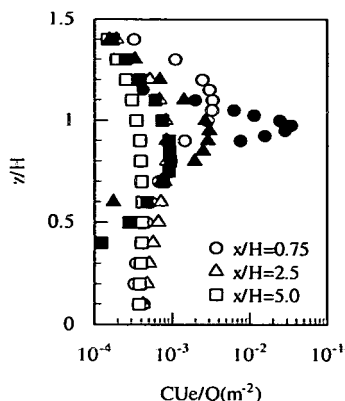


図-4 平均濃度の鉛直分布
(白印;建物後方, 黒印;平地)

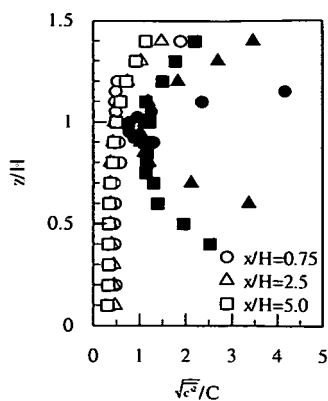


図-6 濃度変動強度の鉛直分布
(白印;建物後方, 黒印;平地)

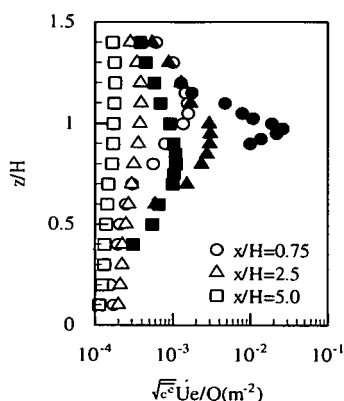


図-5 濃度標準偏差の鉛直分布
(白印;建物後方, 黒印;平地)

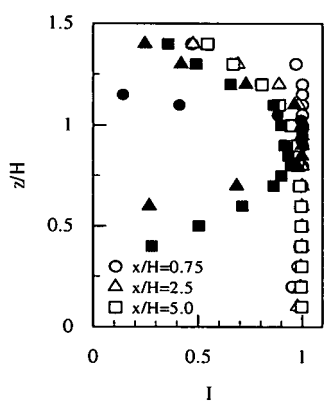


図-7 間欠率の鉛直分布
(白印;建物後方, 黒印;平地)

(2) 濃度変動強度

平均濃度に対する標準偏差の比 ($\sqrt{c^2}/C$) を濃度変動強度と定義し、図-6 にその鉛直分布を示す。平地では、いずれの風下位置においてもトレーサガスの放出源高さである $z/H=1.0$ 付近で最小、プルーム端で最大となる分布を示す。図-4、図-5 から明らかな通り、平地上では $z/H=1.0$ 付近の平均濃度と標準偏差の値はほぼ等しく、濃度変動強度は 1 前後の値を示す。また、プルーム端に向かうに従い、標準偏差に比べ平均値の減少割合が大きいため濃度変動強度は単調に増加する分布となる。これに対し建物後方における濃度変動強度は、風下位置による分布の変化が小さく、建物高さ以下では鉛直方向にはほぼ一様、建物高さより上空では単調に増加する分布を示す。また、建物の影響によりいずれの高さにおいても平地の値より小さな値を示す。建物高さ以下の濃度変動強度が 1 以下 (約 0.4~0.5) の一定値を示すことから、平均濃度に比べ

変動は小さく建物後方に取り込まれたプルーム内の濃度が均一化されていることが分かる。

(3) 間欠率

有意な (すなわちゼロ以外の) 濃度が検出された時間の全測定時間に対する比を間欠率 I と定義してその鉛直分布を図-7 に示す。平地では、 $z/H=1.0$ 付近で最大、プルーム端に向かうに従い減少する分布を示す。これはプルーム中心軸上ではプルームと周辺空気との混合がほとんど起こらないため常に濃度値が検出されるのに対し、プルームの端では周辺空気との混合が活発になりゼロ値の出現頻度が増加するためである。これに対し建物風下側では、建物高さ以下において $I=1$ の一定値を示し、上空に従い単調に減少する分布となる。これは建物高さ以下ではプルームが後流域に取り込まれるため濃度が常に検出されるが、建物高さより上空では周辺空気との混合が活発になるためと考えられる。間欠率の分布は、図-6 に

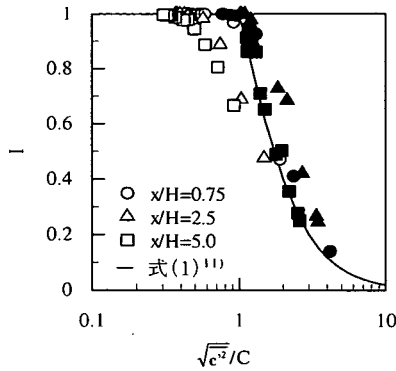


図-8 濃度変動強度と間欠率
(白印:建物後方, 黒印:平地)

示した濃度変動強度の分布と対照的な増減を示し、濃度変動強度が増加するところでは間欠率は減少し、濃度変動強度が減少するところでは間欠率が増加していることが分かる。そこで、濃度変動強度に対する間欠率の分布を求め、図-8に示す。建物の影響に関わらず濃度変動強度の増加に伴い間欠率が一樣に減少していることが分かる。Hanna¹¹⁾は濃度の確率密度関数に指数分布を適用した場合、濃度変動強度と間欠率の間には次式の関係が成り立つことを導いた。

$$\frac{\sqrt{c^2}}{C} = \sqrt{\frac{2}{I} - 1} \quad (1)$$

本実験結果と図中に実線で示した式(1)を比べると、平地上では両者は概ね良く一致しているが、建物後方では濃度変動強度が1以下の範囲において両者のずれは大きい。これは式(1)から明らかな通り、濃度変動強度 $\sqrt{c^2}/C < 1.0$ では間欠率が $I > 1$ となり、その定義に矛盾する値となるためである。図-6に示した通り、建物風下側では建物の影響により濃度変動強度は1未満となり、そのためこの領域での濃度の確率密度関数を指数分布で近似することは難しいと考えられる。

(4) 確率分布関数

ブルーム内における高濃度の出現頻度を検討するため濃度の確率分布関数 $P(c)$ を求めた。図-9に風洞実験において濃度測定を行った風下範囲の中間位置である $x/H=2.5$ の確率分布関数を示す。横軸は平均濃度で無次元化した瞬間濃度、縦軸は $1-P(c)$ を対数表示で表す。縦軸に $1-P(c)$ をプロットすることにより、ある濃度値以上となる確率を表す。建物の影響により対数表示された $1-P(c)$ は、

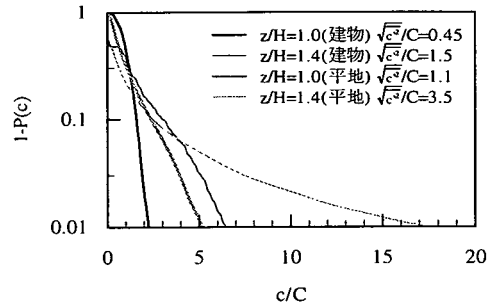


図-9 確率分布関数 ($x/H=2.5$)

表-1 確率分布関数の近似式

近似式	確率分布関数
指数分布	$P(c) = 1 - I \exp\left(-I \frac{c}{C}\right)$
対数正規分布	$P(c) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(c/n_c)}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right\}$ n_c ; 中間濃度 σ_1 ; 対数標準偏差
clipped normal 分布	$P(c) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{c - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right\}$ μ_0 ; 正規分布部の平均値 σ_0 ; 正規分布部の標準偏差

いずれの高さにおいても同じ高さの平地上の分布に比べ急勾配を示す。 $1-P(c)=0.01$ となる (すなわち高い方から時間割合にして1%を占める) 濃度を最大濃度 c_{\max} と定義すると、建物後方における平均濃度に対する最大濃度の比は平地の値に比べ減少する。これは建物の影響によりブルームが大きく拡散されブルーム内の混合が促進されるため、ブルーム端においても平均濃度の10倍を越えるような高い濃度は出現しないものと考えられる。高さによる分布の違いに着目すると、いずれの場合もブルーム中心 $z/H=1.0$ に比べブルーム端 $z/H=1.4$ の方が傾きが緩やかであり、平均濃度に対する最大濃度の比は増加する傾向を示す。なお、図には示していないが、建物高さ以下の後流域ではブルーム内の濃度は均一化され $z/H=1.0$ と

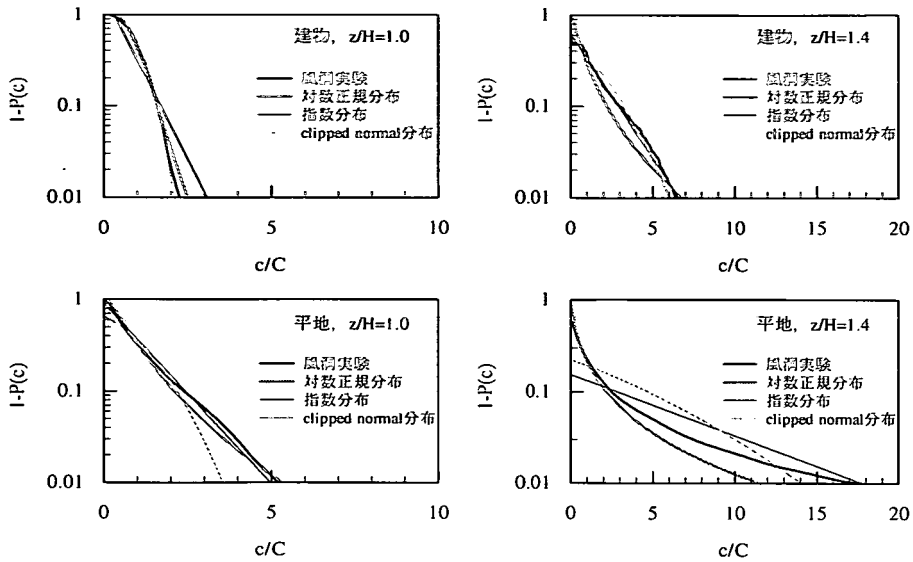


図-10 風洞実験結果と各近似式による確率分布関数の比較

良く似た分布を示す結果が得られている。図中に示した濃度変動強度 $\sqrt{c'^2}/C$ の値と平均濃度に対する最大濃度の比 ($1-P(c)=0.01$ となる c/C) に着目すると、平地、建物後流域のいずれにおいても濃度変動強度の増加に伴い最大濃度比も増加することが分かる。さらに、建物後方の $z/H=1.4$ と平地の $z/H=1.0$ では、濃度変動強度の値が同程度であり、また確率分布関数も似た分布を示す。これらの傾向は他の測定点でも見られ、本研究で測定を行った範囲では建物の影響や測定位置に関係なく、濃度変動強度が同程度の値を示すところでは確率分布関数も等しい分布を示した。

次に、近似式を用いて濃度の確率分布関数を推定することを試みた。確率分布関数を予測する近似式としては、前節で述べた指数分布¹¹⁾の他に、対数正規分布¹²⁾、clipped normal 分布¹³⁾などが提案されている。表-1 に各近似式による確率分布関数の定義式を示す。なお、指数分布における間欠率 I は式(1)より濃度変動強度の風洞実験結果より与えた。また、対数正規分布においては常に間欠率 $I=1$ と仮定した。対数正規分布における n_c 、 σ_1 および clipped normal 分布における μ_0 、 σ_0 は各分布の平均値、標準偏差がそれぞれ風洞実験結果と一致するように与えた。図-10 に $x/H=2.5$ における確率分布関数と各近似式との比較を示す。建物後方のプルーム中心付近 $z/H=1.0$ における確率分布関数は対数正規分布あるいは clipped normal 分布と良く一致しているが、 $1-P(c)$ を対数表示した場合に直線で表される指数分布は、全濃度域で測定値との差異が見ら

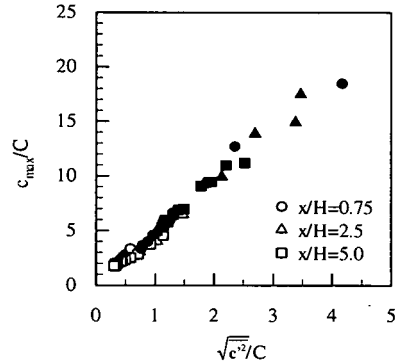


図-11 濃度変動強度に対する最大濃度比の分布 (白印;建物後方, 黒印;平地)

れ、 $1-P(c)=0.01$ となる最大濃度を過大評価する傾向がある。平地のプルーム中心付近では、clipped normal 分布による近似は平均濃度の 2 倍を越える高い濃度域で風洞実験との差が大きい。一方、プルーム端付近 $z/H=1.4$ では、建物後方において指数分布と最も良く一致しており、平地においても分布形状に差が見られるものの $1-P(c)=0.01$ となる最大濃度は指数分布と良く一致している。確率分布に関する以上の傾向は、トレーサガス放出源からの風下距離によらず、濃度測定を行った全ての風下位置において見られた。

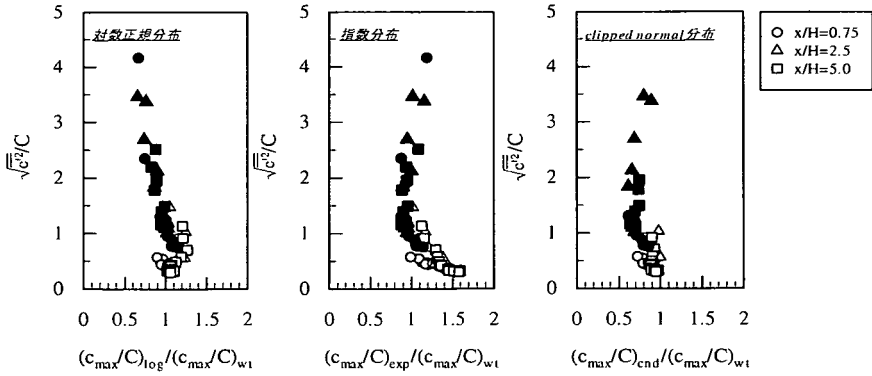


図-12 近似式による高濃度比の推定
(白印;建物後方, 黒印;平地)

(5) 最大濃度

前節で求めた $x/H=2.5$ における確率分布関数より, 濃度変動強度の増加に伴い平均濃度に対する最大濃度の比も増加することが分かった. そこで, その他の測定位置における結果より濃度変動強度と最大濃度比の関係を求め図-11 に示す. 濃度変動強度と最大濃度比の間には明らかな相関があり, 平地, 建物後方ともに煙源からの風下距離によらず,

$$\frac{c_{\max}}{C} = 5 \cdot \frac{\sqrt{c'^2}}{C} \quad (2)$$

の関係が成り立つことが分かる. すなわち, 濃度変動強度の小さいブルーム中心付近では最大濃度比も小さく, 濃度変動強度の増加するブルーム端では最大濃度比も大きな値を示す. 平地を対象とした風洞実験¹⁾より, ブルーム内では $c_{\max} / \sqrt{c'^2} = 4.5 \sim 5.0$ の一定値となることが示されているが, 本研究より平地のみでなく建物後流域においても同様の関係が成り立つことが分かった.

次に, 表-1 に示した指数分布および対数正規分布の各式を用いて最大濃度比を推定することを試みた. 確率分布関数に各近似式を適用して求めた最大濃度比と各風下位置における風洞実験結果との比を取り図-12 に示す. 横軸は各近似式による最大濃度比の推定値/風洞実験値, 縦軸は濃度変動強度を示す. 対数正規分布では, 濃度変動強度が $0.3 \sim 1.5$ の範囲で推定値と実験値の比は 1 前後の値を示し, 平地, 建物後方ともほぼ風洞実験値を再現している. しかし, 濃度変動強度が増加するに従い両者の比は 1 より小さくなり, $\sqrt{c'^2}/C > 1.5$ では対数正規分布による推定値は実験値を過小評価する傾向が見られる. これは濃度変動強度が大きな値を示すブルーム端では濃

度がゼロとなる割合が相対的に増大し間欠率が小さくなるのに対し, 対数正規分布では常に間欠率 $I=1$ を仮定しているためと考えられる. 一方, 指数分布では, 濃度変動強度が 1.0 より大きな範囲における両者の比はいずれの条件下においても 1 前後であり, 推定値は風洞実験値と概ね良く一致している. しかし, 1.0 未満の範囲では両者の比は 1 以上となり, 風洞実験結果を過大評価しており, 特に建物後方では 1.5 倍以上の過大評価となることもある. これは, 3. (4) で述べた通り濃度変動強度の小さな範囲 ($\sqrt{c'^2}/C < 1.0$) では, 式(1)から求めた間欠率が $I > 1$ とその定義に矛盾した値となるためと考えられる. 図-6 に示すように平地ではブルーム中心付近を除いて濃度変動強度は 1 以上の値を示すが, 建物後流域では $0.4 \sim 0.5$ の一定値となり指数分布により最大濃度を推定することは難しい. さらに, clipped normal 分布による推定結果は, 風洞実験値と一致しているところも見られるものの, 濃度変動強度の値に関係なく全般的に実験値を過小評価する傾向が見られる. 以上をまとめると, 濃度変動強度が $0.3 \sim 1.0$ の範囲では対数正規分布, $1.0 \sim 1.5$ では対数正規あるいは指数分布, 1.5 より大きいところでは指数分布を用いて濃度の確率分布関数を近似することにより, 最大濃度を推定できることが分かる.

図-13 に対数正規分布および指数分布の各式 (表-1) から求めた標準偏差に対する最大濃度の比を示す. 上に述べたように, 濃度変動強度が $0.3 \sim 1.0$ の範囲では対数正規分布により最大濃度比を推定することができ, 図-13 より対数正規分布によるこの範囲の最大濃度/標準偏差は約 $4.9 \sim 6.3$ である. また, 濃度変動強度が $1.0 \sim 1.5$ の場合, 最大濃度比は対数正規分布あるいは指数分布いずれの推定値とも良く一致し, 図-13 より最大濃度/標準偏差は $4.5 \sim 4.9$ である. さらに, 濃度変動強度が 1.5 以上での最大濃度比は指数分布により推定することが可能で,

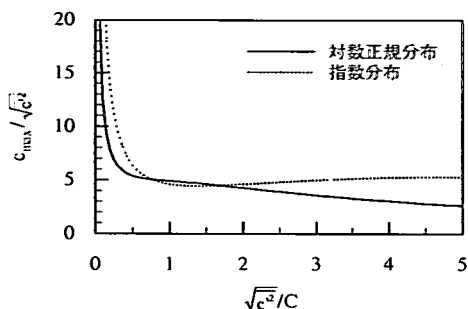


図-13 濃度変動強度と最大濃度/標準偏差

この範囲における最大濃度/標準偏差は約 4.5~5.3 である。このように、濃度変動強度の値に応じて適当な近似式を適用することにより、いずれの濃度変動強度に対しても、濃度の標準偏差に対する最大濃度の比は 5 前後の値が得られることが分かる。すなわち、風洞実験結果より得られた濃度の確率分布関数は、濃度変動強度の小さいプルーム中心付近では対数正規分布、濃度変動強度の大きいプルーム端では指数分布に近い分布形状を有し、それゆえ式(2)で表される通り最大濃度比は建物の影響に関わらず常に濃度変動強度の約 5 倍の値を示す。建物後流域における濃度変動強度は、0.4~0.5 の一定値を示す(図-6)ことから、この領域における最大濃度は平均濃度の 2~3 倍程度と推定することができる。建物後流域で濃度変動を測定した風洞実験⁶⁾より、最大濃度(累積分布関数が 99%となる値と定義)は平均濃度の 3 倍未満($c_{max}/C < 3$)となることが経験的に導かれているが、本研究で得られた結果から濃度変動強度の値に応じて適当な近似式を用いて確率分布関数を近似することにより建物後流域では、

$$2 \leq \frac{c_{max}}{C} \leq 3 \quad (3)$$

の関係が成り立つことが分かった。

4. おわりに

従来から提案されている大気拡散用の風洞実験手法に即した気流場を設定し、気流に対して直角に置かれた単独建物の後流域において屋根面から放出されたトレーサガスの濃度変動を測定する風洞実験を行った。建物がない平地上での測定結果と比較することにより、建物がプルーム内の濃度変動に与える影響を検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 建物屋根面から放出されたプルームは建物後方の逆流域に取り込まれ、鉛直方向に大きく拡散される。後流域における濃度変動強度(濃度の平均値に対する標準偏差の比)は鉛直方向に一樣な分布を示し、その値は 0.4~0.5 である。
- (2) 濃度変動強度と濃度の確率分布には密接な関係があり、建物の影響に関わらず濃度変動強度が大きな値を示すプルーム端では高濃度の出現割合が高く平均濃度に対する最大濃度の比は増加する。また、濃度変動強度が等しい位置では確率分布関数はほぼ等しい分布を示す。
- (3) 最大濃度(高い方から時間割合にして 1%を占める濃度値と定義)は、濃度変動強度が 0.3~1.0 の範囲では対数正規分布、1.0~1.5 では対数正規あるいは指数分布、1.5 以上では指数分布により推定することができる。
- (4) 平均濃度に対する最大濃度の比は測定位置によらず常に濃度変動強度の 5 倍程度の値を示す。よって、建物後流域における最大濃度は平均濃度の 2~3 倍程度と推定することができる。

参考文献

- 1) Fackrell, J. E. and Robins, A. G.: Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 117, pp. 1-26, 1982.
- 2) 佐田幸一, 佐藤 歩: 大気境界層中のトレーサガス濃度変動を対象とした風洞実験(上空放出時プルーム濃度変動の相似性), 日本機化学会論文集(B編), 第 65 巻, 第 636 号, pp.2734-2742, 1999.
- 3) Sawford, B. L.: Conditional concentration statistics for surface plumes in the atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Met.*, Vol. 38, pp. 209-223, 1987.
- 4) Mylne, K. R. and Mason, P. J.: Concentration fluctuation measurements in a dispersing plume at a range of up to 1000m, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 117, pp. 177-206, 1991.
- 5) Mylne, K. R.: Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing in a stable surface layer, *Boundary-Layer Met.*, Vol. 60, pp. 15-48, 1992.
- 6) Li, W. W. and Merony, R. N.: Gas dispersion near a cubical model building. Part II. Concentration fluctuation measurements, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 12, pp. 35-47, 1983.
- 7) 老川 進, 孟 岩: 建屋後流における短時間ピーク濃度の性状について, 大気環境学会誌, 第 33 巻, 第 3 号, pp. 151-163, 1998.
- 8) 持田 灯, 村上周三, 林 吉彦, 金 永徳, 渋谷亜紀子: 高応答性濃度計による建物周辺のガス拡散と濃度変動に関する風洞実験(その 1), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 85-88, 1990.
- 9) 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, 219, pp. 13-16, 1985.
- 10) 環境庁大気保全局大気規制課編, 窒素酸化物総量規制マニュアル[改訂版], 公害研究対策センター, 1993.
- 11) Hanna, S. R.: The exponential probability density function and concentration fluctuations in smoke plumes, *Boundary-Layer Met.*, Vol. 29, pp. 361-375, 1984.
- 12) Csanady, G. T.: *Turbulent diffusion in the environment*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, pp. 222-248, 1973.
- 13) Lewellen, W. S. and Sykes, R. I.: Analysis of concentration fluctuations from lidar observations of atmospheric plumes, *J. Climate and Applied Met.*, Vol. 25, pp. 1145-1154, 1986.

(2001. 6. 18 受付)

A WIND TUNNEL EXPERIMENT ON TRACER GAS CONCENTRATION FLUCTUATION NEAR A CUBICAL MODEL BUILDING

Ayumu SATO and Kouichi SADA

A wind tunnel experiment was conducted to investigate the effects of a building on tracer gas concentration fluctuation in a wake region of a cubic model perpendicular to the wind direction. Measurements were carried out in a plume emitted from a point source on the model roof using a high-frequency-response flame ionization detector. The concentration fluctuation intensity is approximately constant at a value between 0.4 and 0.5 in a building wake. The peak-to-mean concentration ratio in a wake agrees well with that estimated from the lognormal distribution and is always about 5 times the concentration fluctuation intensity.