障害物群内から非定常発生するトレーサーガス濃度の統計的時間推移 TIME TEMPORAL TRANSITION OF CONCENTRATION UNDER THE CONDITION OF NON-STATIONARY GENERATION OF TRACER

中尾圭佑*, 加藤信介**, 高橋岳生***

Keisuke NAKAO, Shinsuke KATO and Takeo TAKAHASHI

In case of terror attacks by biochemical material or accidental leakage of inflammable gas on an urban area, the time dependent aspect of transport of scalar becomes problem. However, there has been little speculation on unsteady emission directly related to time history. One of the way which count the problem is the concept of the ability of the ventilation (Purging Flow Rate), which includes the unit of time. This paper report the time spent for arrival of the concentration after the generation of tracer start and the time spent for decaying of the concentration after the generation of tracer end. The experiment was done in the wind tunnel whose wind profile is similar to the urban wind environment. Under the condition of dispersion in an atmosphere, the realization of each measurement shows different results because of the turbulence. The measurements were conducted for several times and the results will be shown with an ensemble averaged manner. The dependence of these time history to the inflow angle is discussed. The relation between these time history and the virtually calculated PFR is shown. As for the concentration fluctuation, the time development of the root mean square of concentration is also investigated.

Keywords: *Unsteady emission, Time history of mean concentration, Time history of fluctuation, Purging flow rate*

物質非定常発生, 平均濃度の時刻歴, 濃度変動の時刻歴, 排出換気量

1. はじめに

有害危険物質を矩形障害物配列から非定常的に発生させ、各点で濃度の時刻歴を計測した結果について報告する。障害物周辺の濃度輸送の詳細な実験や数値解析結果の報告は豊富にある。単純な矩形形状から複雑市街地まで幅広い条件において知見が集積されてきている。ストリートキャニオンと呼ばれる障害物空間における濃度分布、濃度の分散、乱流濃度フラックス分布などの計測は渋谷ら¹⁾、上原ら²⁾、田中ら³⁾により行われてきた。都市域の有害危険物質による汚染の要因は多数考えられるが、特に近年は事故やテロによる時間非定常な物質発生による問題が顕在化してきている。しかし、上記の研究はすべて定常的な物質発生条件下における報告である。Leitl et al.⁴⁾は Oklahoma City を模擬した風洞実験によりパルス的な濃度発生条件における濃度到達について報告している。筆者ら⁵⁾は日本の実市街地での事故を想定した風洞実験を行った。有害危険物質発生点を複数設定し、トレーサーの濃度応答の時刻歴を調べ、発生点と測定点の距離や地理特性に基づいて結果の考察を行った。しかし、その報告では物質が遠隔地に輸送されるのにかかる時間についての考察にとどまり、発生終了後に遠隔地に滞留する時間について言及をすることはできなかった。

一方、汚染物質が市街地の建物間に巻き込まれて滞留する時間に着目して、都市の風環境を評価する試みが行われてきた。既往の風

環境評価手法創出に関する研究では、室内空気質の評価手法として確立されている Mean Age of Air や Visitation Frequency や Purging Flow Rate などの評価指標⁶⁾を都市部へ適応する試みがバディら⁷⁾によりなされている。彼らはまず、都市における任意の半開放スペースを Void と定義し、Void における風速プロファイルが気象台観測による風配によって 16 風向毎に規格化されることを仮定している。そして、既存の風環境評価尺度として用いられている超過確率⁸⁾を換気指標と運動エネルギーに応用することで新たな手法を提案した。簡易的な条件として、ドライエリアを対象とした換気指標の計算も行われている。建物が地上にない地下開空間の数値計算が張ら⁹⁾により試みられ、続いてトラ¹⁰⁾により都市空間の換気効率計算が、各地域の風配を想定して計算された。また、地下居室に付随するドライエリアにおける換気効率計算がトラ¹¹⁾により風洞実験を通して試みられている。さらに Bu et al.¹²⁾は Large Eddy Simulation による空堀領域の計算を試み、風向毎における換気効率を算出している。また、実市街地における換気効率を数値計算により算出する試みが加藤ら¹³⁾によりなされている。これらの研究で用いられている換気指標は、時間の次元を有しており検査空間の物質除去性能を代表していると考えられる。しかし、これらの指標が示す空間の性能については都市空間において明確ではなく、追究すべき問題として残されたままである。

* 東京大学大学院 大学院生

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 東京大学生産技術研究所 技術専門員

Graduate Student, Univ. Tokyo

Prof., IIS, Univ. Tokyo

Senior Technical Support Specialist, IIS, Univ. Tokyo

また、現実的な汚染物質発生における健康被害要因として高濃度汚染物質を含む空気の突発的な輸送も見逃すことはできない。既往のさまざまな研究報告で濃度変動に関する研究がなされている。定常的な物質発生条件下では Hanna et al.¹⁴⁾が局所的な濃度の頻度分布が指数分布形状でだまかに近似できることを報告している一方で、Csanady ら¹⁵⁾は対数正規分布によるフィッティングの方法を提案している。また、一般的な正規分布形状に近い形状をとりうることもあり¹⁶⁾濃度の確率密度分布形状が測定位置や物質発生条件によって多岐にわたることを示している。老川ら¹⁷⁾は水素ガス漏えい時に爆発危険性のある物質の短時間放出時のピーク性状について報告を行っている。また、老川ら¹⁸⁾は建物後流における物質濃度のピーク性状やガスト性状について報告をしている。これらの濃度変動に関する問題は非定常的な濃度発生時においても見逃してはならない。特に災害時の初動対応者にとっては避難経路選択や救命経路の選択が重要な懸念事項であるが、濃度変動の時間推移に関する知見は筆者の知る限りでは未だない。

そこで本報告では既往の風環境評価手法を背景として矩形障害物配列の中からトレーサを非定常的に発生させた際に、「発生開始後の遠隔地での濃度上昇」、および、「発生終了後の遠隔地での濃度減衰」を計測した結果について記すとともに、濃度の分散に着目し非定常的な物質発生条件において示す挙動について報告する。

2. 実験概要

2.1 風洞

東京大学生産技術研究所環境無音風洞実験室を用いた。吹走距離はおよそ 16m。測定断面は幅 2.2m x 高さ 1.8m。大気安定度は中立条件のもとで実験を行った。風路上流側にはスパイヤーを、吹走領域にはラフネスを設置し境界層の発達を促進させている。境界層厚さを約 1.1m とした。境界層の流入風速を図 1 に示す^{注 1)}。

2.2 計測概要

計測には高応答炭化水素濃度計 FFID を用いた。サンプリングチューブは長さ 0.2m のものを用いた。応答周波数は 175Hz。サンプリング周波数は 1000Hz とした。濃度の信号に 200Hz のローパスフィルターを施した。平均運動エネルギーおよび乱流エネルギー算出に用いた速度は定温度型熱線風速計 CTA(プローブ 55R55)による。信号には 300Hz のローパスフィルターを用いた。

2.3 測定領域

市街地を想定し、風洞内に幅 0.2m×高さ 0.1m (L_0)×奥行き 0.1m の直方体ブロック群を配置した。ブロックの配置間隔は 0.1m とした。ブロックは対称的な模型配置の際に生じる大きな時間スケールで生じる偏流の計測への影響を考慮し、配置に風洞内主流に対して微小な角度の傾斜をつけた。図 2 に風洞内模型配置を示す。計測対象は図 2 中の灰色に示された領域とした。拡大図を図 3 に示す。図中の格子点において計測を行った。測定点は $x_2/L_0 < 0$ に傾向している。 $-0.4 < x_1/L_0 < 0.4$, $-0.5 < x_2/L_0 < 0$, $x_3/L_0 = 0.9$ の障害物空間の上方界面(図 3(a))、 $-0.4 < x_1/L_0 < 0.4$, $x_2/L_0 = -0.5$, $0.1 < x_3/L_0 < 1.0$ の側面(図 3(b))、 $x_1/L_0 = -0.4$, $-0.5 < x_2/L_0 < 0$, $0.1 < x_3/L_0 < 0.9$ の上流壁面(図 3(c)) を測定対象とした。

トレーサガスは 12000ppm の C_2H_4 を用いた。対象領域の中心部から点源発生とした ($Q=3.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$)。無次元発生口径 d/L_0 は $6.0 \times$

10^{-2} とした。

図 1 流入風の前主流速度と $r.m.s$

図 2 風洞内配置模型

図 3 測定点群

(2),(4)に関しては $t^*=9.71$ にて濃度発生終了
点線は t 分布により算出された両側 95% 値

図 4 一回の測定による時刻歴と平均化された時刻歴

2.4 非定常発生装置

本報告では濃度の非定常的な発生を開始、終了を実現するために

ファンクションジェネレーターおよび高速電圧切り替え装置を使用した。ファンクションジェネレーターは、5V の電圧のパルス発生に用いた。高速電圧切り替え装置はその電圧を受けて 25V の電圧パルスを防爆電磁弁へと導き、スイッチの開閉を実現した。切り替え装置の時間応答は 2ms である。データロガー (NR2000,Keyence) を用いてファンクションジェネレーターから発生した電圧を FID の応答電圧と同期させて記録した。1000Hz の周波数でデータ収集を行い、ファンクションジェネレーターの電圧が 1ms のうちにステップアップするのを確認し、この電圧をもってトレーサーの開閉を表す信号とした。

2.5 t-検定による平均値の確からしさ

図 4 に一回の測定による時刻歴と、複数回の測定により平均化された時刻歴を示す。測定点は $x_1/L_0=0.4, x_2/L_0=0.0, x_3/L_0=0.1$ に位置する。図 4(1) が一回の計測による発生開始後の時刻歴を示し、図 4(2) が発生終了後の時刻歴を示す。以降濃度の時刻に関する結果は $t^* = t \times u_0/L_0$ の式で無次元化されている。ここで u_0 は代表高さ L_0 における流入風速 0.971m/s である。ただし、発生終了後の時刻歴の図においては物質発生が $t^*=9.71$ まで継続しており、それ以降で物質発生量が 0 となっている。図 4(3) および図 4(4) が複数回(46 回)の計測による平均処理の結果を示し、(3) は発生開始後の時刻歴、(4) は発生終了後の時刻歴を示している。濃度の時刻歴は、非定常的な傾向が終了し定常発生状態になった際の平均濃度により無次元化されている。一回の計測では濃度の変動が大きく表れており、およそ平均濃度に対して 2 倍から 3 倍程度の濃度も観測されている。平均化処理を施した結果(図 4-(3),(4)) ではおおむね平均的な時間推移が捉えられていることが分かる。図 4(3),(4)では平均化処理結果に加えて、t 検定による確率 95 %の両側区間値を示している。その結果、定常状態付近では標本平均に対して 30 %程度に母平均が含まれていることが推定される。本報告では、定常発生する状態における平均濃度の半値を閾値として定め、各条件を評価する。非定常発生する状態における濃度時刻歴のうち、「発生開始後初めて半値をとるまでにかかる時間」および「発生終了後初めて半値にまで減衰するのにかかる時間」を同定する。同定の方法は平均処理の順番により二通りの方法が考えられる。一つは、平均処理を行った濃度の時間データに関して濃度半値の時刻を、発生開始後および終了後の各条件で求める方法である。この方法で求めた発生開始後の時間を t_r とし、発生終了後の時間を t_d とする。別の一つは、測定の各実現における濃度の時間データに関して濃度半値の時刻を同定し、その各実現における結果を平均処理する方法である。この方法で求めた発生開始後の時間を t'_r 、発生終了後の時間を t'_d とする。図 5(1) に t_r と t_d 、図 5(2) に t'_r と t'_d を示す。(2) の誤差範囲は t 分布による両側 95% の信頼性区間を示している。(1) では、サンプリングを複数の標本集合に分割して、各集合における時刻を算出すれば誤差範囲を示せるが、本報告では測定による全実現の平均値を計算しているため、値に誤差範囲を示せない。図 5 によれば半値まで上昇するのにかかる時間については(1)、(2) では値の比較的良好一致が見られる。また、前者による平均処理方法では濃度半値までの上昇にかかる時間と、減衰までにかかる時間はおおよそ等しい傾向を示し、値も近いことが分かる。これは図 4(3) および(4) にも示されているように平均的な濃度立ち上がりと減衰の傾向が対称的な傾向をとっている

ことから妥当な結果である。一方で後者による平均処理方法では半値まで減衰するのにかかる時刻が、半値まで上昇するのにかかる時刻に比べて小さい結果となった。これは図 4(1) および(2) にも見られるように物質発生終了による濃度減衰のタイムスケールよりも短い時間スケールで濃度が変動するため、必ずしも半値をとるという事象が、その領域への濃度到達の終了を示すものではないことに起因している。定常発生状態においても(図 4(1) における $t^*>0$ の領域) 濃度値は大きく変動しており、半値をとるという閾が、一回の計測結果では必ずしも輸送の終了を代表しないことが分かる。本報告では前者の方法に基づいてそれぞれの時刻を同定することにする。以降複数の風向角ケースについて結果を示すが、5°および 25°のケースでは約 45 回の繰り返し計測による平均処理結果により、10°のケースでは約 35 回の繰り返し計測による平均処理によるものである。

3. 実験結果

3.1 平均濃度分布の風向角依存性

平均濃度分布を図 6 に示す。(1)および(2)はそれぞれ風向角 5°、25°のケースを示す。示している面は $-0.4 < x_1/L_0 < 0.4, x_2/L_0=0.5, 0.1 < x_3/L_0 < 1.1$ の立面分布である。風向角 5°ではトレーサガスが障害物空間内で x_2 方向に対し右回りに生じる循環(キャビティフロー)によって輸送されている。一方で風向角 25°では傾向している流入気流がトレーサガスを $-x_2$ 方向へ輸送するため、顕著な循環の効果はなく、 $x_1/L_0=0.4$ 側には低い濃度値しか検知されていない。

図 5 平均処理による結果の違い

いずれの分布も $x_2/L_0=0.5$ における立面

(1)風向角 5° (2)風向角 25°

図 6 平均濃度分布

図 6 (つづき) 平均濃度分布

図 6(3) および(4) に平均濃度の空間分布を示す。図 6(3) から風向角 5°では発生点に対して $x_2/L_0 > 0$ および $x_2/L_0 < 0$ のどちらにも濃度が輸送されており未だ空間内に水平方向の風速が卓越していないことがうかがえる。一方図 6(4) では、濃度はほぼ $x_2/L_0 < 0$ に輸送されており- x_2 方向の卓越した気流によって一方向的に濃度が輸送されていることがうかがえる。そのため風向角 5°では空間全域にある程度の濃度が輸送されているのに対して、風向角 25°では輸送は局所的な空間に限定されていることが分かる。

3.2 風向角による濃度時刻歴の傾向

各測定回数によって平均化した平均濃度の時刻歴について記す。定常状態において測定された濃度の時間平均値の半値を発生開始後初めて検知するまでにかかる時間 (t_r) の分布および、発生終了後初めて半値に減衰するまでにかかる時間 (t_d) の分布を示す。時間同定に際して閾値を、「初めて連続して $\Delta t^* = 0.195$ の間超過する時」とした。

風向角 5° のケースを図 7 に示す。図 7a. は $x_3/L_0 = 0.9$ における上方界面を示し、縦軸が x_1 方向を示している。各点は $-0.5 < x_2/L_0 < 0$ を示している。図 7b. は $x_2/L_0 = -0.5$ における側面を示し、縦軸が x_3 方向を示している。各点は $-0.4 < x_1/L_0 < 0.4$ を示している。図 7c. は $x_1/L_0 = -0.4$ における上流壁面を示し、縦軸が x_3/L_0 を示している。各点は $-0.5 < x_2/L_0 < 0$ を示している。各図の(1) が t_r を示し、(2) が t_d を示している。

3.3 t_r の分布

t_r の分布を図 7 に示す。上方界面 (図 7 a.(1)) ではそれぞれの測定位置における時間は近い値をとっている。これは空間上方では障害物の抵抗を受けていない速い風洞内気流がトレーサガスを x_1 方向へ連行するためと考えられる。側面 (図 7 b.(1)) では、濃度の到達が底辺で早く壁面に沿って上方に向かうにつれ遅延する結果となった。図 6(1) よりトレーサガスが循環により輸送されることが見て取れたが、時刻歴も、循環による上流側の各点へ輸送が順次なされていることを示している。上流壁面 (図 7 c.(1)) では各測定点における差は顕著ではない。図 6(1) に見るように風向角 5°の条件では濃度の輸送が上流側壁面に主になされる。この測定点はこれらの領域に位置しており濃度の輸送経路として大きな差がないものと考えられる。

図 7 風向角 5°における t_r と t_d

図 7 (つづき) 平均濃度分布風向角 5°における t_r と t_d

3.4 t_d の分布

つづいて t_d について記す。(2) t_d の各結果は全体的な傾向が(1) t_r の各結果と類似しており、発生開始以後に濃度上昇にかかる時間と発生終了後に減衰にかかる時間はほぼ同程度であることが考えられる。上方界面 (図 7a.(2)) において結果はほぼ図 7a.(1) と同様の結果となり、物質濃度の希釈効果にそれほど大きな差は見られない。側面 (図 7b.(2)) では早い時間に濃度が上昇した点 (図 7b.(1)) の順番に、減衰がはじまることを示している。発生終了後、平均的な濃度の減衰は発生点に近い点から先に始まっているものと考えられる。したがって空間内に存在する循環に沿ってもっとも発生点に近い上流側障害物壁面底部から濃度の減衰がはじまり、壁面を上方へゆくにつれ時刻は遅延し下流側壁面底部が一番遅い平均的な濃度減少を示す。

図 7c.(2) においてはわずかに $x_2/L_0=0$ において半減するまでの時刻が早いもののそれ以外の傾向はほぼ半値に上昇するまでの時刻と大きな差はないことがうかがえる。

3.5 風向角による依存性

風向角を 5°、10°、25°と変化した計測結果について示す。図 8a.、b.、c. にそれぞれの風向角で計測した t_r と t_d の空間分布を示す。

5°のケースおよび 10°のケースのいずれにおいても循環による物質輸送が障害物群の空間内部で発達していることが分かる。濃度が発生し循環により輸送されることで $(x_1/L_0, x_2/L_0, x_3/L_0)=(0.4, -0.5, 0.1)$ 近傍の点への物質の到達は遅延している。10°のケースでは風向角の微小な変化に伴い、循環の傾向が不明瞭になっている。また、風向角 25°のケースでは全体的な濃度到達の時間分布が早く、循環の影響も明瞭ではない。 t_d の分布は風向角 5°、10°いずれのケースについても、それぞれの t_r の分布と類似しており循環の傾向に沿って遅延している。25°のケースでは平均濃度時刻歴の減少が他の 2 ケースに比べて早い段階で起きている。 t_r と比較しても早い時間に物質の希釈による濃度減少が起きていることがうかがえる。

3.6 換気指標との比較

既往の研究では $PurginFlowRate$ を用いた局所排出換気回数 $N[s^{-1}]$ が任意の開空間 (Void) において定義されている。

$$PFR = \frac{q}{c} \quad (1)$$

$$N = \frac{PFR}{V} \quad (2)$$

ただし $\bar{c}$ は対象空間における平均濃度。 q は物質発生量。 V は対象空間の体積。本来 PFR は対象空間でトレーサーが一様に発生する条件において定義されるが⁷⁾本報告では点源発生条件

において計測した濃度の空間分布から、仮想的にこの量を算出する。対象空間を $-0.4 < x_1/L_0 < 0.4$ 、 $-0.5 < x_2/L_0 < 0.5$ 、 $0.1 < x_3/L_0 < 1.1$ に定め、物質の定常発生条件における空間平均濃度から値を求めた。

図 8 各風向角における t_r および t_d

図 9 平均運動エネルギー AE^* 、乱流エネルギー TKE^* 、局所排出換気回数 N^*

図 9 に各風向条件における空間平均された運動エネルギー (AE^*)、空間平均された乱流エネルギー (TKE^*)、局所排換回数 (N^*) を示す。 AE^* と TKE^* は u_0^2 により、 N^* は L_0/u_0 により無次元化されている。風向角が大きくなるにつれ水平方向の早い気流による運動量輸送が卓越し、空間内の平均運動エネルギーおよび乱流エネルギーが増大する。一般には換気指標 N が大きな値になると、対象空間を占める汚染された空気の高換率が上がる。したがって N 値の増加に伴い発生終了後の平均的な濃度時刻歴の減少も早くなることが推察されるが、本結果では N の値が大きい 25° のケースで早い t_r が得られており、評価値設定の妥当性が確かめられている。しかし一方で高い換気の効率が早い濃度の到達につながる可能性もあることがわかる。

3.7 濃度 r.m.s の時刻歴

先に平均的な濃度時刻歴を示したが、図 4 に見るよう一回の実現は変動が大きい。本節では濃度 r.m.s の時刻歴について示す。濃度 r.m.s に関しても測定による一回の実現と平均的な濃度時刻歴の差分の二乗値を各時刻歴測定結果により平均処理した。閾値を同じく濃度 r.m.s の時間平均値の半値を閾値とし、「発生開始から閾値を超える時刻」「発生終了から閾値を下回る時刻」を算定した。時間同定に際しては平均濃度と同じ方法による。風向角 5° および 25° のケースについて結果を図 10 に示す。

図 10 各風向における濃度 r.m.s に関する t_r および t_d

風向角 5° のケースについてはおおむね平均的な濃度時刻歴と類似した傾向をとっており濃度変動についても循環による輸送が行われていることが分かる。濃度 r.m.s の発生開始後の上昇の時間のスケールもおおよそ平均濃度のそれとほぼ等しい結果になっている。したがって濃度の変動成分は発生開始後の平均的な濃度上昇と同等の時間のスケールによって発展することが分かる。発生終了後の傾向については部分的に早い時間に閾値を下回る点も見られるが全体的な傾向としてはやはり循環の影響が表れている。風向角 25° のケースについても平均的な濃度時刻歴の示す t_r および t_d と類似した結果が得られた。循環の影響は明瞭ではなく 5° のケースに比べて空間全域への早い濃度変動の到達が観察される。 t_d については、 t_r に比べて小さな値をとり、平均的な濃度変動の減少が、上昇に比べて短い時間で行われることを示しており、 25° における平均濃度時刻歴が示した傾向 (図 8c.(1),(2)) と類似していることが分かった。

4. まとめ

障害物群内を対象に、事故や事件による非定常的な有害危険物質の発生に伴う濃度輸送の時刻歴を調べるための風洞実験を行った。実験では電磁弁による発生口の開閉を行うことで非定常的な濃度の発生開始および発生終了を実現させた。一回の測定で得られる知見は乱流場の影響から再現性が低いため、測定を同一条件で繰り返し行い、時間に対して平均化処理を行うことで時刻歴の様子を明らかにした。単純な都市条件として矩形障害物を配置し、二つの障害物に囲まれた空間を計測対象領域とした。風向は 5° から 25° まで変化させた。測定領域は傾斜によって頻りに物質が輸送される領域に限った。発生開始後は濃度が上昇するが、その後に時間平均値が定常となる。報告ではこの時間平均値の半値を閾値として定め、平均的な濃度時刻歴において、「物質発生後初めて半値を超過する時間」および「物質発生終了後初めて半値を下回る時間」を求めた。ストリートキャニオン内に生じる循環が物質輸送に支配的な条件ではそれぞれの時間は循環の経路に沿って時間が遅延し、二つの時間値はおおむね同じ傾向を示した。風向が空間長手方向へ推移してゆくにつれ時間は早い傾向を示すようになった。既往の研究では時間の次元を有する換気の効率が屋外環境評価指標として提案されているが、本報告でも簡易的に指標値を求め、実際の計測時刻の傾向と比較検討を行った。その結果、換気の効率が低いほど発生終了後の減衰時間が小さいことが分かり、指標値として傾向をとらえていることが分かった。濃度変動の危険性を知るために、濃度変動についても時刻歴を統計的に算出した。その結果濃度変動の発生開始後の上昇と発生終了後の減少の傾向は平均濃度のそれとおおむね等しい時間のスケールでなされることが明らかになった。

謝辞

本研究は平成 20 年度 (第 10 回) 国土技術研究センター研究開発助成 (助成番号 08006「上空風による市街地居住空間の清涼化、清浄化機能に関する確率統計的評価に基づく都市の風通しの研究」) の研究助成を受けて実施した。

電磁弁による発生口開閉のための高速電圧切り替え装置に関しては、作成を依頼したテクニカ (株) より多大な協力をいただいた。

ここに記し、関係者各位に謝意を示す。

注

注 1) 流入風のパワースペクトルはカルマン型スペクトルとよい一致を示すことを確認した。図 11 にパワースペクトルを示す。周波数は、高さ $x3/L0=1$ における代表風速および積分時間スケールから導出した長さスケールにより無次元化した。パワースペクトルは主流速度の分散と周波数により無次元化した。

—:実験、----:カルマン型スペクトル

図 11 パワースペクトル

記号表

AE*	無次元平均運動エネルギー
c	濃度
$\bar{c}$	空間平均濃度
d	発生口直径 6×10^{-3} (m)
E*	無次元パワースペクトル
f^*	無次元周波数
L_0	代表高さ (障害物高さ) 0.1(m)
N	局所排出換気回数(1/s)
N*	無次元局所排出換気回数
PFR	Purging Flow Rate(m ³ /s)
q	物質発生量(m ³ /s)
t	時間(s)
TKE*	無次元乱流エネルギー
t_r	発生開始後初めて閾を超える時刻(s) (平均処理後に同定)
t'_r	発生開始後初めて閾を超える時刻(s) (各実験の実現から同定し、平均処理)
t_d	発生終了後初めて閾を下回る時刻(s) (平均処理後に同定)
t'_d	発生終了後初めて閾を下回る時刻(s) (各実験の実現から同定し、平均処理)
t^*	無次元時間(-)
u_0	代表風速 (高さ L_0) 0.971(m/s)
U_δ	境界層外風速(m/s)
V	対象空間体積(m ³)
Z	鉛直高さ(m)
Γ	分子拡散係数(m ² /s)

参考文献

- 1) 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) 立方体周辺における濃度変動の分散、スペクトルの性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集.D,環境工学,pp.619-620,1991.8
- 2) 上原清,村上周三,若松伸司,池澤正: 高さの異なるストリートキャニオン内の流れと拡散に関する風洞実験市街地における大気汚染物質の拡散に関する実験的研究その 6 日本建築学会計画系論文集,541,pp.37-42,2001.3
- 3) 田中英之,義江龍一郎,白澤多一,栗田剛,小林剛: 逆流を伴う非等温流れ場における風速・温度・濃度の同時測定方法, 日本建築学会環境系論文集,73,628, pp.799-806, 2008.6
- 4) B.Leitl,F.Paschele,M.Schatzmann: Final Report Phase1 08-2004, Generation

of Wind Tunnel Data Sets in Support of the joint Urban 2003,Atmospheric Dispersion Study, Oklahoma City,2003.7

- 5) 中尾圭佑,加藤信介,樋山恭助,高橋岳生: 市街地における有害危険物質非定常発生時の濃度到達時間および濃度変動に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集,76,661, pp255-264, 2011.3
- 6) M.Sandberg,M.Sjöberg: The use of moments for assessing air quality, building and environment,Vol.18,4,pp.181-197,1983
- 7) モハメドバディ,加藤信介,石田義洋,黄弘: 局所排出換気回数に関する超過確率に基づく風環境評価の密集市街地モデルへの適用 市街地の風環境に関する研究 (その 2), 日本建築学会環境系論文集,73,634,pp1394-1400,2008.12
- 8) 村上周三: 新建築学会体系,8,自然環境 (第 3 章), 風論,新建築学大系編集委員会,彰国社,1982
- 9) 張先権,加藤信介,石田義洋,黄弘,大岡龍三,ト震: 地上建物の影響を無視した乱流シミュレーションによる換気効率指標 VF と PFR の解析:地下居室に付属する空堀の換気性能に関する基礎的研究 第一報,日本建築学会計画系論文集 No.618, pp.53-59, 2007.8
- 10) ト震,加藤信介,石田義洋,黄弘: 通風換気性能に関する超過確率に基づく風環境評価法の提案とその空堀モデルへの適用 市街地の風環境に関する研究 (その 1), 日本建築学会環境系論文集,73,629,pp903-910,2008.7
- 11) ト震,加藤信介,高橋岳生,中尾圭佑: ドライエリアを有する地下居室における風力換気性能に関する風洞実験 ドライエリアを有する地下居室における通風換気に関する研究 (その 1), 日本建築学会環境系論文集 ,75,654,pp697-704,2010.8
- 12) Zhen Bu, Shinsuke Kato: Wind-induced ventilation performances and airflow characteristics in an areaway-attached basement with a single-sided opening, Building and Environment,46,4,pp911-921,2011.4
- 13) 加藤信介,黄弘,大岡龍三: CFD 解析による市街地における Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析 高架道路周辺の換気効率の評価に関する研究,第 18 回風工学シンポジウム,pp1-576-581,2004
- 14) Steven.R.Hanna: The exponential probability density function and concentration fluctuations in smoke plumes, Boundary Layer Meteorology 29, pp361-375, 1984.8
- 15) G.T.Csanady: Turbulent Diffusion in the Environment (Geophysics and astrophysics monographs), Dordrecht.Reidel publishing company, 1973
- 16) 佐田幸一,佐藤歩: 乱流境界層中のトレーサガス濃度変動の風洞実験 低濃度領域にしきい値を設定した場合の濃度変動量の特性, 大気環境学会誌 34(5), pp337-351, 1999.9
- 17) 老川進,野津剛: 水素スタンド漏洩ガスの短時間ピーク濃度性状大気環境学会誌 41(2), pp65-77, 2006.3
- 18) 老川進,孟岩: 建物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 33(3), pp151-163, 1998.5

(2012年 2 月 9 日原稿受理, 2012年 6 月29日採用決定)