沿道建物列の隙間がストリートキャニオン内濃度に及ぼす影響 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7

WIND TUNNEL EXPERIMENTS ON THE EFFECTS OF THE WIDTHS OF CONNECTING STREETS ON THE CONCENTRATION OF ROADSIDE AIR POLLUTION IN A STREET CANYON

Experimental studies on gaseous diffusion in urban areas Part 7

上原 清*, 若松伸司**, 老川 進***

Kiyoshi UEHARA, Shinji WAKAMATSU and Susumu OIKAWA

We conducted wind tunnel experiments with simple-shaped block models to study the relationship between the widths of connecting streets across a street canyon and the flow and concentration of roadside air pollution within the street canyon. The main results are as follows: 1) The concentration in the vertical section along the central part of the street canyon increases as the widths of gaps or connecting streets decrease. 2) The vertical concentration distribution within the connecting street implies the existence of a vertical vortex, which was pushed outwards from inside the street canyon. 3) The lateral flow parallel to the main street greatly affects the concentration in the connecting streets.

Keywords: LDV, PIV, Cavity vortex, Flow within a horizontal plane, Airiness factor

LDV, PIV、キャビティ渦、水平断面内の流れ、通風率

1 はじめに

ストリートキャニオン上端付近の流れ場には、剪断応力が特に大きくなる場所がある^{1, 2)}。上空からストリートキャニオン内部への運動エネルギー伝達は、主にここから行われる。道路両側の建物高さに大きな差がない場合には、ストリートキャニオン内のキャビティ渦はこのエネルギーに駆動される。

地表面近くに排出された自動車排気ガスなどの大気汚染物質は、キャビティ渦によって沿道建物列の上端に運ばれる。一部は外部に排出され、残りはストリートキャニオン内を再循環する。既報ではこうしたストリートキャニオン上端からの換気の指標として通風率を定義し^{3, 4), 注1)}、道路幅や建物高さ、大気安定度との関連を示した。

ストリートキャニオンの換気は、その上端から行われるものに加えて沿道建物列の隙間またはストリートキャニオンと直交する接続道路など、沿道建物の側面からも行われる。この換気は主に幹線道路と平行な風向成分に依存し、沿道大気汚染物質の搬出に果たす役割は小さくない。また、高架道路が敷設された時のストリートキャニオン換気にも、幹線道路と平行な風向成分が深く関わっている可

能性がある⁵⁾。しかし、道路と平行な流れと沿道濃度との関連に着目した研究は、楠ら⁶⁾の可視化実験以外にはほとんど見あたらない。

本研究では、道路と平行な風向成分の流れと直接関係すると思われる沿道建物列の隙間の大きさを変化させ、ストリートキャニオン内の流れ場と濃度分布がどのように変化するかを風洞実験によって調べた結果を述べる。

2 実験概要

2.1 風洞と実験風速

国立環境研究所の大気拡散風洞を用いた。風洞の形式は縦型の密閉回流式、測定部寸法は高さ 2m、幅 3m、長さ 24m である⁷⁾。温度成層条件を中立、実験風速は $U_0 = 1.5 \text{ m/s}$ とした^{8, 注2)}。

2.2 粗度と風洞模型の設置方法

1) 粗度 測定部入り口から 2m 風下にトリッピングフェンス(高さ 100 mm)を設置した。その風下 ($x =$) 2m ~ 12m の範囲に、粗度としてスタイロフォーム製のブロック(縦横 100mm、高さ 50mm)を前後左右とも 100 mm の間隔で千鳥に並べた(図 1)。

2) 幹線道路模型 粗度の風下 ($x =$) 12 ~ 14m に、低層市街地模

* 独立行政法人国立環境研究所
PM2.5/DEP 研究プロジェクト上席研究員・工博

** 独立行政法人国立環境研究所
PM2.5/DEP 研究プロジェクトリーダー・工博

*** 清水建設技術研究所 主任研究員・工博

Senior Research Engineer, Dr. Eng.

Project Leader, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Dr. Eng.

型として縦横 100mm、高さ (H_s) 50mm のブロックを主流方向に (L) 100mm、横方向の間隔 (d) を 12.5, 25, 50, 100mm ($d/L = 1/8 \sim 1$) に変化させて格子状に配置した。市街地模型の先頭から 5, 6 列目 ($x = 12.9 \sim 13.1$ m) の模型を周囲より高く ($H = 100$ mm) して幹線道路のストリートキャニオンを模した (図 2)。また、沿道に隙間なく建物が連続する場合を想定して建物模型を 5 個隙間無く連ね、それらをひとかたまりとして、横方向の間隔 $d = 25$ mm ($d/L = 1/4$) で並べたもの (図 3) ^{注 3)} を連続模型とした。

本実験で用いた接近流プロファイルを図 4 に示す。接近流にべき乗則を適用したとき、べき指数は約 1/3 になる。

2.3 風速の測定方法

測定部入り口上部に取り付けたピトー管 (12mm ϕ) によって基準風速を測定した。接近流のプロファイルを LDV (レーザー流速計) によって測定した。ストリートキャニオン内部の速度分布は LDV と PIV ^{注 4)} (画像粒子速度計測法) によって測定した。

グリセリンを電熱によって加熱発生させた白煙をシーディング粒子として用い、測定位置風上の適当な数カ所から供給した。レーザー流速計のサンプリング時間は原則 180 秒とした。PIV では 2 秒ごとに 5 分間 (150 画面) の流れ場を計測した。PIV の計測範囲は主

図 1 粗度と模型の設置方法

図 2 幹線道路模型の配置

流方向に 384mm、鉛直方向に 384mm であり、それぞれを 32 と 64 に分割した領域毎のベクトルデータを得た。

2.4 濃度の測定方法

測定すべき道路幅を 3 等分する位置にトレーサガス排出用のパイプ (線源) を 2 本配置して、それぞれの車線 (上り・下り) からトレーサガスを排出した。トレーサ排出が軸方向に一様になるよう調整された、長さ 1m・直径 8mm の 2 重管 ⁹⁾ を線源として用いた。トレーサにはエタンガス (C_2H_6 、窒素で 20% に希釈) を用い、1m あたり $400\text{cm}^3\text{min}^{-1}$ で排出した。本実験では道路方向の交通流変動による排出強度の変化と、自動車走行による排気ガスの連行・攪拌については考慮しない。

濃度測定には 1 2 チャンネル全炭化水素分析計を用いた。風洞が回流式であるため、1 チャンネルを風洞のバックグラウンド濃度測定にあてた。

図 2 の C と S で示した道路各鉛直断面の濃度分布を測定した。測定点を図 5 に示す。測定結果は無次元濃度 $C_n = C U_\infty H / q$ で表した。C は測定濃度、H はストリートキャニオン両側の建物高さ (100mm)、q はトレーサガスの排出量 ($\text{cc sec}^{-1}\text{m}^{-1}$) である。

3 実験結果と考察

3.1 沿道建物間隔 d/L によるストリートキャニオン濃度の変化

沿道建物間隔を $d/L = 1/8 \sim 1$ の範囲で変化させたときの C 断面 (キャニオン部分) と S 断面 (沿道建物の隙間部分) の濃度分布を図 6-1) ~ 4) と図 7-1) ~ 4) に、連続模型の C 断面と S 断面の濃度分布を図 8-1)、2) に示す。図 6-3) と図 7-3) には LDV による流れ場の測定結果を濃度分布に重ね合わせている。

沿道建物間隔 d/L による C、S 断面

図 3 連続模型の配置

図 4 接近流のプロファイル

の平均濃度の変化を図9に示す。図においてC断面地上とは地上5mmの測定点の平均濃度、全域とはストリートキャニオン断面全域の平均濃度、C断面上端とは幹線道路風下側建物の中央上部5mm高さの濃度である。

1) C断面の濃度

キャビティ渦のために高濃度が風上側に偏っている(図6)。断面の平均濃度は沿道建物間隔 d/L が小さいほど高く、大きいほど低くなる(図6, 図9:○)。連続模型の濃度はさらに高い(図8-1))。

2) S断面の濃度

図7-1)、2)より、 d/L が小さいときのS断面では、建物列の隙間であるにもかかわらず道路断面全体に濃度が拡がり、キャビティ渦に似た流れが存在しているように見える。 d/L が大きくなるほどキャビティ渦らしい流れの影響は弱まるが、依然として、S断面下部から上方への沿道大気汚染物質の拡がりは大きい(図7-3)、4))。

図5 濃度測定点

図8 連続模型(図3)C断面とS断面の濃度分布

図6 C断面(図2)の濃度分布

図7 S断面(図2)の濃度分布

3) S断面からの大気汚染物質の流出

図8-2)に示した連続模型S断面の濃度分布は、図7-3)と非常によく似ている。S断面からの汚染物流出は、連続模型のように建物が連なっているでも $d/L = 0.5$ の間隔で離散的に配置されていてもほとんど変わらない。つまり、S断面からの汚染物質の流出は直近の道路からのもので占められている。このことから、連続模型中央部C断面の大気汚染物質はほとんど道路横方向に移動せず、C断面濃度は建物が隙間無く配置された二次元ストリートキャニオンのそれと大差ないものと考えられる。図9では○、●、* 印の $d/L = 0$ の値として連続模型の濃度値を用いた。図における $d/L = 0$ と各 d/L の濃度差は、ストリートキャニオンの隙間部分からの換気によって生じたものといえる。

3.2 ストリートキャニオン内の流れ

1) 鉛直断面の流れ

PIVによって計測された各鉛直断面(図2)の流れ場を図10-1)~4)に示す。図6-3)と図10-1)、図7-3)と図10-4)は、同じ鉛直断面の風速をそれぞれLDVとPIVによって測定したものである。LDVの測定データがまばらであるのに対して

図9 C断面、S断面の地上濃度とC断面上部の濃度の d/L による変化

図10 PIVによって測定された各鉛直断面(図2)の流れ、($d/L = 0.5$)

図11 ストリートキャニオン水平断面の平均流れ場(5分間平均、 $Z = 25\text{mm}$)

図12 ストリートキャニオン水平断面の瞬間流れ場(対称な流れ、 $Z = 25\text{mm}$)

PIV の測定値が密であることを除けば、両者はおおむね一致している^{注5)}。

すでに述べたように、 d/L が小さい時の S 断面濃度分布は、沿道建物の隙間部分であってもストリートキャニオン内部と同じようにキャビティ渦の影響を受けているように見える。だが、図 7-3) や図 10-4) で示した S 断面の流れ場には一部に少し上向きの流れが見えるだけで、キャビティ渦の存在は確認できない。

S 断面と C 断面の間である建物模型端面の F (図 2) と、F か

図 13 ストリートキャニオン水平断面の瞬間流れ場
(偏った流れ、 $Z = 25\text{mm}$)

ら 5mm だけ S 断面側に寄った F+5mm 断面の流れ場にはキャビティ渦の痕跡らしい、地面近くに大きく山形にふくらんだ流れが見えてくる。

2) 水平断面の流れ

ストリートキャニオン水平断面^{注6)} ($z = 25\text{mm}$) の平均流れ場 (図 11) を見る。前後の建物に囲まれた道路では、主風向を風上に見たとき建物の中央断面で逆流する向きに左右一対の渦が形成されている。流れ場には若干の偏りがみえる。短時間のうちに現れる流れ場は、例えばストリートキャニオンの中心軸 (C 断面) に関して対称 (図 12) であったり、大きく偏ったり (図 13) 様々である。

道路水平断面にどのような流れが生じているかを調べるために、図 2 の ☒ で示した位置 ($z = 25\text{mm}$) の風向によって流れ場を分類する。ストリートキャニオン水平断面の流れ場と、この位置の風向とが、ほぼ対応しながら変化するように見えるからである。☒ 位置

図 14 ☒ 位置 (図 2) における風向頻度分布

図 15 ☒ 位置 (図 2) の各風向に対応する水平流れ場、($Z = 25\text{mm}$)

の風向頻度は図14に示すとおり、主風向（風向0度）と反対の方向から1/16方位だけ偏った風向（157.5度）頻度が最も高い。図位置におけるそれぞれの風向に対応して現れる道路水平断面の流れ場を図15-1)～8)に示す。主風向に関して対称な風向角（112.5度と247.5度、157.5度と202度）どうしても流れパターンもほぼ対称になる。

これらの流れパターンは道

路と建物模型の配置によって決まる。また平均の流れ場は、それらの流れパターンが出現頻度に応じて重なり合うことによって形成される。

本実験での平均流れ場の偏りは、各流れパターンの出現頻度が左右非対称であるために生じたものであり、それらは模型配置の微妙なずれによるものとする^{注7)}。

3) 鉛直断面の流れと水平断面の流れ

S断面の濃度分布が存在を示唆する鉛直渦は、C断面のキャビティ渦が水平方向の流れによってS断面に押し出されたものとする。押し出されたキャビティ渦はS断面の速い流れに入り交じるために、明瞭に見えなくなるものとする（図10-2)～4)）。この流れ場から、渦を押し流す速度（それぞれの断面中央、床面から25mmのU成分と同程度と考えた）を差し引くことによって^{注8)}キャビティ渦の存在が確認できる（図16-1)～3)）。(F断面)→(F+5mm断面)→(S断面)と、測定断面が建物から離れるにつれて渦の中心は風下に移動している。

3.3 沿道建物間隔 d/L によるストリートキャニオン通風率の変化

既報^{3, 4)}では、ストリートキャニオンの換気の良さを表す指標として通風率(A_{ST})を定義し、街区模型を用いた実験から道路幅・建物高さ・大気安定度などと通風率との関連を調べてきた。その後、事例研究から得られた実市街地の通風率や、フィールド観測の結果から推定した通風率と、道路幅と建物高さの比がほぼ等しいストリートキャニオンの通風率を比較したが両者は必ずしも一致しなかった⁵⁾。

この原因は、既報では考慮していなかった建物列の隙間の幅の違いによるものとする。

本実験で得られた A_{ST} を d/L が同等と考えられるフィールド観測や事例研究の結果と比較すると、図17のようになる。本実験とフィールド観測・事例研究から得られた A_{ST} は比較的良く一致している。

4 まとめ

- 1) ストリートキャニオン中央部(C断面)の平均濃度は沿道建物間隔 d/L が小さいほど高く、大きいほど低くなる。
- 2) 沿道建物の隙間部分(S断面)にはキャビティ渦と隙間をまっすぐに通り抜ける流れの影響が混在している。
- 3) d/L が大きいほど、隣接するC断面からS断面への地上近くの

図16 各断面(図2)の流れからおおよその渦の速度を差し引いたときの各鉛直断面の流れ

図17 d/L によるストリートキャニオン通風率

A_{ST} の変化

高濃度流出が増加する。これにはストリートキャニオンと平行な流れが深く関わっている。

- 4) ストリートキャニオン水平断面($Z=25\text{mm}$)の平均流れ場は、道路と建物模型の配置によって決まる様々な流れパターンが、その出現頻度に応じて重なり合うことによって形成される。
- 5) S断面の濃度分布が存在を示唆する鉛直渦は、C断面のキャビティ渦が水平方向の流れによってS断面に押し出されたものである。
- 6) H/L (建物高さ/道路幅) と d/L (沿道建物間隔/道路幅) がほぼ等しい場合、本実験とフィールド観測・事例研究から得られた通風率 A_{ST} は比較的良く一致している。

謝辞

実験に際しては、(株)フォーラムエンジニアリング山尾幸雄氏、河田忠氏(当時)の全面的なご協力と、国立環境研究所総務部・施設課各位のご援助を頂いた。PIV導入に際しては国立環境研究所・大気環境領域、杉本伸夫氏、PM2.5/DEP研究プロジェクト、松本幸雄氏(当時)からご助力を頂いた。また、鹿島建設(株)技術研究所、近藤宏二氏、武政祐一氏、戸河里敏氏から種々ご教示頂いた。

お世話になった方々に、ここに記して感謝の意を表します。

注

- 1) 本稿および本稿以前の一連の報告の中で用いてきた通風率という用語は、既に「外部風速に対する室内風速の比率」を表すものとして存在している^{12, 13)}。本報告以降では、文脈から判断して不要と思われる以外、できる限りストリートキャニオンの通風率と称する。
ストリートキャニオンの通風率 $A_{ST} = (q/C) / (L \cdot U_H)$ q : 大気汚染物質排出量 ($\text{cc sec}^{-1} \text{m}^{-1}$)、 C : ストリートキャニオンの平均濃度、 L : 道路幅 = 100mm、 U_H : $H = 100\text{mm}$ における接近流の風速。
- 2) 既報⁸⁾では群模型内部の流れ場が風洞基準風速が 0.5ms^{-1} 以上であれば、実験風速の影響を受けないことを確認した。
- 3) 沿道建物列に隙間がない完全な2次元配列になると、道路方向に偏った流れが生じやすくなると考えた。これを防ぐために、道路を適当な長さで分割した。
- 4) DANTEC Flow-Map HUB PIV システムを用いた。PIV 演算処理には FFT 相互相関法を用いている。
- 5) 実験に先立って LDV と PIV で測定されたストリートキャニオン内部と平板境界層内の風速値を比較した (図 N1)。左上にまとめられた一群のプロットはストリートキャニオン中央部で測定された風速プロファイルであり、右下のプロットは平板上の風速プロファイル (境界層厚 20mm) である。LDV と PIV で測定された風速値は比較的良く一致している。
- 6) 高出力のレーザーを水平に照射することは危険である。このため、風洞床面に鉛直に立てた平板 (地面盤、図 N2) に模型を貼り付けて縦に 90 度傾けた水平断面を模し、風洞の天井から下方に向けたレーザー光によって流れを可視化・PIV 計測した。横方向の模型歪みや、風上粗度の助走が短いこと、風洞側壁の影響が異なるなど、実験条件としては不備が多い。しかし、定性的な流れ場の構造は直近の模型群によって形成されるものと考え、この方法によって水平断面の流れ場を計測した。
- 7) 水平方向の偏流を確認するために、ストリートキャニオン内部 (道路風上側建物の直後) にトレーサースガス点源を配置し、風下の濃度分布を調べた。図 N3 はストリートキャニオン風下建物の背後、高さ $z=25\text{mm}$ の y 方向濃度分布である。
当初、特別な配慮をせずに模型を配置したとき、最大濃度は模型中心軸から約 75mm ずれて (S 断面と同じ位置、△印) 現れた。これに対して、ストリートキャニオン模型を取り外した (風上粗度だけの) 場合の濃度分布 (●印) には偏りがほとんど見えない。このことから、偏りの原因はストリートキャニオン模型自体の配置にあると考えた。
ストリートキャニオン模型の配置を種々に変えて濃度分布を測定した結果、風上側建物列を一様に反時計方向に約 0.6 度回転させたときに ▲印の分布が得られた。今回用いた模型配置では、微妙な配置のずれによって流れ場の対称性が崩れやすいと考える。
本実験の濃度測定では、あらかじめ各模型配置について S 断面と対称位置にある道路断面の濃度分布を測定し、濃度に大きな偏りがないことを確認した。
- 8) それぞれの断面で風速は少しずつ異なっているが、概ね風洞基準風速の 1/10 程度 ($0.13\text{m/s} \sim 0.16\text{m/s}$) である。この操作によって、渦とともに移動する座標系から観察したのと、同じ流れパターンを見ることができ

図 N1 レーザー流速計と PIV によって測定された風速分布の比較

図 N2 風洞床面と垂直に立てた平板による水平断面の PIV 計測

図 N3 ストリートキャニオン内部 (道路風上側建物の直後) にトレーサースガス点源を配置した時の、ストリートキャニオン風下建物の背後、高さ $z=25\text{mm}$ の y 方向濃度分布

参考文献

- 1) 上原清、村上周三、老川進、若松伸司：温度成層流中のストリートキャニオン内の流れに関する LDV を用いた風洞実験—市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その2、日本建築学会計画系論文集 第492号、39-46、1997.2
- 2) Kiyoshi Uehara, Shuzo Murakami, Susumu Oikawa and Shinji Wakamatsu: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons: Atmospheric Environment, 34/10, 1553-1562, 2000
- 3) 上原清、村上周三、老川進、若松伸司：ストリートキャニオン内部の大気汚染物質拡散に対する道路幅および大気安定度の影響に関する風洞実験—市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その5、日本建築学会計画系論文集 第524号、45-52、1999.10
- 4) 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 —市街地における汚染物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 第541号、27-42、2001.3
- 5) 上原清、若松伸司、松本幸雄、山尾幸夫、林誠司、吉川康夫、森川多津子：実在幹線道路の大気汚染濃度分布に関する風洞実験 —高架道路の覆蓋影響とストリートキャニオン濃度予測手法の検討—、大気環境学会誌、38(6)、358-376、2003
- 6) 楠貴美代、河野仁：都市キャノピー内の渦と流れの基本構造（風洞可視化実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、625-626、2003年9月
- 7) Ogawa Y., Diosey, P. D., Uehara, K., and Ueda, H.: A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere. Atmospheric Environment 15, 807-821, 1981
- 8) Kiyoshi Uehara, Shinji Wakamatsu and Ryoza Ooka: STUDIES ON CRITICAL REYNOLDS NUMBER INDICES FOR WIND-TUNNEL EXPERIMENTS ON FLOW WITHIN URBAN AREAS, Boundary-Layer Meteorology 107: 353-370, 2003
- 9) 上原清、村上周三、老川進、若松伸司：温度成層流中のストリートキャニオン内の濃度分布に関する風洞実験 —市街地における大気汚染物質の拡散に関する研究 その3、日本建築学会計画系論文集 第499号、9-16、1997.9
- 10) 林復基、岡本眞一、山田浩明、小林恵三、北林興二、塩沢清茂：都市内道路でのエアートレーサー拡散実験と SRI ストリートキャニオンモデルの検証、大気環境学会誌、26(4)、235-245、1991
- 11) 石井康一郎、北林興二、岡本眞一：ストリートキャニオンにおけるエアートレーサー拡散実験、第42回大気環境学会年会講演要旨集 北九州市、478、2001
- 12) 福田輝明、片山忠久、石井昭夫、堤純一郎、大町徹：建物近傍における風の特性と住宅の通風に関する調査研究 その4 住戸内の流速分布、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）昭和58年9月
- 13) 原野浩信、片山忠久、石井昭夫、西田勝、堤純一郎：建物近傍における風の特性と住宅の通風に関する調査研究 その6 建物近傍風および室内流速に及ぼす風向の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）昭和59年10月

(2006年1月17日原稿受理、2006年8月28日採用決定)