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

FLOW AND CONCENTRATION FIELDS WITHIN AND ABOVE ASYMMETRIC
MODEL URBAN STREET CANYONS IN A WIND TUNNEL

Experimental studies on gaseous diffusion in urban areas Part 6

上原 清*, 村上周三**, 若松伸司***, 池澤 正****
*Kiyoshi UEHARA, Shuzo MURAKAMI, Shinji WAKAMATSU
and Tadashi IKESAWA*

Results of wind tunnel experiments on the influence of roadside building height on the flow and concentration fields in urban street canyons are presented. 1) A cavity eddy was always formed in the street canyon when the leeward building height was equal to or larger than the windward building; the concentration in the street canyon was low. 2) Cavity eddies were not formed when the windward building was higher than the leeward; the concentration was rather high in the street canyon. 3) Reverse flow occurred in the street canyon bottom regardless of cavity eddy existence; the concentration at the windward side was always higher than at the leeward. 4) The concentration distribution normalized by the average canyon concentration was somewhat similar for various canyon configurations (varying width of street or roadside building height) and the atmospheric stability. 5) It was possible to roughly estimate the concentration distribution by using the airiness factor and the average concentration distribution pattern normalized by the average canyon concentration.

Keywords: urban air pollution, estimation of concentration, airiness factor, concentration pattern, building height, atmospheric stability,

都市大気汚染、濃度予測、通風率、濃度分布パターン、建物高さ、大気安定度

1 序

市街地の風は、周囲の建物や上空風の向きなどによってさまざまに変化する。いくつかの要素がからみあい、不規則でとらえどころがないように見える。しかし、複雑な街中の風も、よく見るといくつかの特徴的な流れパターンによって構成されていることがわかってきた¹⁾。その顕著なものがキャビティ渦である。

周辺の建物高さに極端な差がないとき、道路と直角に風があたる(この風向を0度とする)と建物間の道路には地上で逆流する向きの渦(キャビティ渦)を生じることが、多くのフィールド観測によって確認されている^{2)・12)}。この渦は風向が45度以上に傾いても大きさが変わるだけではない^{13)・14)}。また、道路幅が建物高さの1~2倍のときに最も安定し、道路がそれより広くても狭くても渦は不安定になる¹⁾。市街地における地上付近の風の特徴は、道路断面にできるキャビティ渦の有無、またはそのできぐあいによって説明できるといっても過言ではない。

さまざまな要素がキャビティ渦の生成にかかわっているが、沿道建物の高さはキャビティ渦の強さに最も強く影響する要素のひとつである。Hoydysh¹⁵⁾は沿道建物の高さによってキャビティ渦の速度が大きく変化し、そのために沿道建物壁面の濃度分布が変わることを報告している。

本研究では、沿道建物高さがストリートキャニオン内部の流れ場と濃度分布に与える影響についてさらに詳しく調べた結果と、通風率を用いた沿道濃度分布の簡易予測手法について述べる。

2 実験概要

主流と直交する道路断面(ストリートキャニオン)の流れ場と濃度分布を、道路の風上および風下側の建物高さを種々に変えながら測定し、流れ場と濃度分布の関連について調べた。

2.1 風洞・基準風速・温度成層条件

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

* 環境庁国立環境研究所地域環境研究グループ 工博

** 東京大学生産技術研究所 工博

*** 環境庁国立環境研究所地域環境研究グループ 工博

**** 兵庫県立公害研究所

Senior Research Engineer, National Institute for Environmental Studies, Dr. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
General Research Engineer, National Institute for Environmental Studies, Dr. Eng.
The Environmental Science Institute of Hyogo Prefecture

閉回流式、測定部寸法は高さ 2 m、幅 3 m、長さ 24 m である¹⁶⁾。実験風速は 1.5 ms^{-1} とした。温度成層条件は中立、安定 ($Rb = 0.43$)、不安定 ($Rb = -0.21$) である。安定および不安定成層条件は、それぞれ冬期夜間と夏期日中における大気安定度に近いものを再現していると考えられる¹⁶⁾。

2.2 粗度と風洞模型の設置方法

1) 粗度 測定部の入り口から 2 m 風下にトリッピングフェンス (高さ 100 mm) を設置した。X = 2 m ~ 12 m 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 100 mm、高さ 50 mm) を前後左右とも 100 mm の間隔で千鳥に並べた¹⁷⁾ (Fig. 1)。

2) 街区模型 粗度の風下 (X = 12 ~ 14 m) に、縦横 100 mm の立方体ブロックを横方向に 50 mm、主流方向に 100 mm 間隔で配置し、ブロック列先端から 5, 6 列目の模型間 (X = 12.9 ~ 13.0 m) の道路 (ストリートキャニオン) を測定対象とした。ストリートキャニオン前後の建物高さ (横一列を一様に、風上側を H_U 、風下側を H_D とする) を周辺の模型高さ ($H_S (= 100 \text{ mm})$) の 0 ~ 2.0 倍 (H_U/H_S , $H_D/H_S = 0 \sim 2$) に変えた (Fig. 2, Table 1)。

2.3 風速と温度の測定方法

トラバース装置に 3 次元レーザー流速計のファイバーヘッド (Dantec Measurement Technology 社) を取り付け、3 軸のレーザー光交点を測定位置に一致させて X, Y, Z 三成分の風速を測定した¹⁸⁾。シーディング粒子には炭酸マグネシウム末 ($5 \mu\text{m} \phi$) を用いた。レーザー光の交点よりも 1 ~ 2 mm 風下に、主流と平行になるように設置した白金抵抗温度計 ($5 \mu\text{m} \phi$) によって温度測定した。サンプリング時間は原則として 180 sec とした。

2.4 濃度の測定方法

トレーサガス排出用のパイプ (線源) を測定すべき道路の中央に置き、窒素で 20% に希釈したエタンガス (C_2H_6) を線源 1 m あたり $400 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ の割合で排出した。線源は前報¹⁹⁾ で用いたものと同じで、軸方向に一樣なトレーサ排出が行われるよう工夫した長さ 1 m・直径 8 mm の 2 重管である。線源の設置、トレーサガスの排出方法は前報¹⁹⁾ と大略同じである。濃度の測定には 9 チャンネルの全炭化水素分析計 (紀本電子) を使い、8 点を同時に測定した。風洞が回流式であるため、残り 1 チャンネルは風洞内部のバックグラウンド濃度の測定に当てている。測定位置は Fig. 2 に示すとおりである。測定結果は原則として無次元濃度 $Cn (= C / (q/U_s H_s))$, C: 濃度測定値、q: トレーサガス排出量 $\text{cc sec}^{-1} \text{ m}^{-1}$ で表している。

3 実験結果

3.1 風下側建物高さ (H_D) の変化の影響

Fig. 3 a)~e) に風下側の建物高さが変化した時の、ストリートキャニオン内 (Section C) の流れとトレーサガス濃度分布 (中立時) を示す。Fig. 3 a)~c) より、風下側の建物が周辺街区と同じか、高いとき ($H_D/H_S \geq 1$)、ストリートキャニオンの内部には安定なキャビティ渦を生じる。Fig. 5 に示すように、風下建物の前面に沿う下降流の速度 (W/U_{700}) は H_D が高いほど強い (例えば $\diamond$ 印: $H_D/H_S = 1.0$ と $\star$ 印: $H_D/H_S = 2.0$ の差)。また、キャニオン下部の逆流 (U_{10}/U_{700}) は W に比例して強くなる (Fig. 6)。

ストリートキャニオン内の平均濃度 $C_{ave,C}$ および道路断面 (Section S) の平均濃度 $C_{ave,S}$ と H_D/H_S および H_U/H_S の関係を Fig.

Fig. 1 Set up of wind tunnel model

Fig. 2 Arrangement of asymmetric street canyon model

Table 1 Experimental condition

	H_D / H_S	H_U / H_S
Stable ($Rb=0.43$)	1.00	0, 1.00, 2.00
	0, 1.00, 2.00	1.00
Neutral ($Rb=0$)	1.00	0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00
	0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00	1.00
Unstable ($Rb=-0.208$)	1.00	0, 1.00, 2.00
	0, 1.00, 2.00	1.00

H_D , H_U , H_S : Downwind, upwind and surrounding building height of the street canyon, $H_S = 100 \text{ mm}$

7 に示す。図において $C_{ave,C}$ は、ストリートキャニオンを主流と平行な鉛直断面で四等分したときの、切り口である三つの鉛直断面 (Section C を中央に、その両側の断面) の高さ H_S 以下における濃度の平均値である。図より、ストリートキャニオン内の平均濃度 $C_{ave,C}$ はキャニオン内部の風速変化に対応して H_D が高いほど低いが、 $H_D/H_S > 1.75$ における濃度低下は少ない (Fig. 7, $\circ$ 印)。これは、風下建物高さ H_D がある程度以上に増加しても、建物に遮られた流れは左右に分岐し、キャニオン内部に向かう下降流の増加につながらないためと考える。

Fig. 3

Fig. 4

Vector and concentration(C_n) fields in the Section C (Effect of downwind and upwind building height)

紙面を節約するためFig.3の風下建物の半分を、Fig.4の風上建物の半分をそれぞれ切り取り、二つを前後につなぎ合わせるようにして表示した。

Fig. 5 より、 H_D の増加によるキャニオン風下側($X/H_s > 0.5$)における下降風速の増加に比べると、風上側($X/H_s < 0.5$)における上昇流の増加は小さいことがわかる。濃度の変化もこれに対応し、キャニオン風下側の濃度低下は大きい風上側のそれは小さい(Fig.3 a)~c))。この原因は、風下建物の壁面に沿う下降流の増加分の多くがキャニオン内部(Fig. 2, Section C)を循環せずに、側面の道路

Fig. 5 W/U_{700} distributions at height $Z=1/2H_s$ Fig. 6 Relation between U_{10}/U_{700} and W/U_{700} Fig.7 Change in C_{ave} with downwind or upwind building height

(Section S)にはみ出すようにしてキャビティ渦を膨張形成するためと考える。このために、隣り合うキャビティ渦同士の結びつきが増しキャニオン流れの二次元性が強まる。 H_D が高いほど Section C と Section S の濃度差が小さくなる(Fig. 7 ○印と●印が $H_D/H_s > 1.5$ で漸近する)のは、このためと考える。

風下側の建物が周辺街区より低い時($H_D/H_s < 0.75$)にはキャビティ

Fig. 8 Changes in A_{ST} with height of building along the street canyon

Fig. 9 Changes in A_{ST} with width of road and thermal stratification. [After Uehara (1999).]

Fig. 10 Changes in A_{ST} with thermal stratification [Data from Uehara (1997)]

ィ渦が弱く、 $H_D/H_S < 0.50$ ではキャビティ渦を生じない (Fig. 3 d), e)。風下建物の存在影響が小さいため、流れは建物ひとつ隔てた風下の道路と一体となり、道路幅 $L/H = 3$ のキャニオン流れと似ている¹⁾。また、キャニオン内部の風速は全般に低下するために濃度は高くなる (Fig. 7, ○印)。

3.2 風上側建物高さ (H_U) の変化の影響

Fig. 4 a)~e)に風上側の建物高さが変化した時の、ストリートキャニオン内の流れとトレーサーガス濃度分布 (中立時) を示す。図より、風上側建物が周辺街区よりも高いとき ($H_U/H_S > 1.25$, Fig. 4 a), b))にはストリートキャニオン内部にはキャビティ渦ができないことがわかる。風上建物背後の流れは全体として建物に向かって逆流し、単独建物の後流とよく似ている。また、建物背後の逆流は風上建物 (H_U) が高いほど強くなる。このために $H_U/H_S = 0 \sim 1.25$ の間では H_U が高いほどキャニオン内部の濃度 $C_{ave,C}$ は高くなる (Fig. 7 △印) が、さらに H_U が増すと濃度は低下する。これは $H_U/H_S > 1.25$ になると建物背後の逆流が強まり、キャニオン内部の換気が促進されるためと思われる。 H_U が高いときには、地上の大気汚染物質はキャニオン風上側の建物に向かって逆流上昇し、風下建物の上端を越えて下流に運ばれる。その様子は煙突効果と似ている。道路断面 (Section S) では風上建物高さ H_U が高くなると濃度が低下している (Fig. 7 ▲印)。これは、建物側面道路の風速が増加するため (ビル風) である。

風上建物が周辺街区より低い、同じ時 ($H_U/H_S \leq 1$) キャニオン内部にはキャビティ渦を生じる (Fig. 4 d)。特に風上建物が少しだけ低い ($H_U/H_S = 0.75$) のときには一様な高さのときよりも若干強いキャビティ渦ができる (図は省略する)。風上建物がさらに低くなる ($H_U/H_S \leq 0.25$) とキャビティ渦は上下に圧縮され、建物前後の流れが一体化して道路幅 $L/H = 3$ のキャニオン流れとほぼ同じになる (Fig. 4 e)。キャニオン内部の濃度は H_U が小なほど低い (Fig. 4 d), e), Fig. 7 △印)。

4 ストリートキャニオンの通風率とラフな濃度予測

4.1 道路構造および大気安定度と通風率の関係

前報では道路の風通しを表す指標として通風率 ($A_{ST} = Q_{ST} / (L \times U_H)$), $Q_{ST} = q / C_{ave,C}$) を導入し、道路幅によって中立時の A_{ST} が $0.1 \sim$

0.2 ($L/H = 0.5 \sim 6$) に変化することを示した¹⁷⁾。通風率はストリートキャニオン前後の建物高さによっても変化する。Fig. 8 (□印) に示すように風下側の建物 (H_D) が高い時には大きく、低い時に小さくなる。風上側の建物高さ (H_U) の影響は逆で、 H_U が小さいときに大きく、 $H_U/H_S = 1.25$ のときに $A_{ST} = 0.1$ と最も低くなる (○印)。ストリートキャニオンの通風率に対する建物高さ、道路幅、大気安定度の影響を一覧するために道路幅 L/H と A_{ST} の関係を前報¹⁷⁾より引用して Fig. 9 に、大気安定度 Rb と A_{ST} の関係を前報¹⁹⁾のデータより求めて Fig. 10 に示す。

4.2 平均濃度で基準化した濃度分布パターン

3章で示した実験結果をキャニオン内の平均濃度 $C_{ave,C}$ で無次元化しなおして表す (平均濃度を 1.0 とする) と、例えば風下側建物の高さを変化した時には Fig. 11 ($H_D/H_S = 1.0 \sim 2.0$)、Fig. 12 ($H_D/H_S = 0 \sim 0.75$)、風上側建物のそれは Fig. 13 ($H_U/H_S = 1.25 \sim 2.0$) のようになる。それぞれの図には、いくつかの実験条件の結果を重ね合わせている。同じ値の等高線どうしは比較的近いところをとおり、濃度分布の形状は平均濃度によらずよく似ている。濃度分布のこうした類似性は、沿道における流れ場と大気汚染物質の拡散構造が、ある範囲内の道路構造の変化に対して相似性を保つことを示している。前報^{17), 19)}で示した濃度分布を $C_{ave,C}$ で無次元化しなおして、同じように表示すると Fig. 14 ~ 16 のようになる。図より、濃度分布の相似性は道路幅 (Fig. 14, 15) についても、大気安定度 (Fig. 16) についても存在することがわかる。以上のことから、Oke²⁰⁾がストリートキャニオン内部の流れ場を Skimming flow, Wake interference flow, Isolated roughness flow の三つのカテゴリーに分けたのと同じように、平均濃度分布パターンも道路構造要素 (例えば道路幅、沿道建物高さなど) や大気安定度によって、比較的少数の類型に分類し得るものと考えられる。

4.3 ラフな沿道濃度分布の推定

前節で示した通風率と道路構造の関係が資料として整備され、実市街地の道路形状からおよその通風率を推定できる場合には、風洞実験においてキャニオン内の平均濃度から通風率を求めたのとは逆に、実市街地における汚染ガスの排出量 (交通量) と市街地風速²¹⁾ から通風率を用いて沿道の平均濃度を推定することができる。さら

Fig. 11 $C/C_{ave,C}$ distribution within asymmetric street canyons ($H_D/H_S = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$)

Fig. 12 $C/C_{ave,C}$ distribution within asymmetric street canyons ($H_D/H_S = 0, 0.25, 0.5, 0.75$)

Fig. 13 $C/C_{ave,C}$ distribution within asymmetric street canyons ($H_U/H_S = 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$)

Fig. 14 $C/C_{ave,C}$ distribution under various width of street canyons ($L/H = 1, 1.5, 2.0, 3.0$, Source position: Center) [Data from Uehara (1998)]

Fig. 15 $C/C_{ave,C}$ distribution under various width of street canyons ($L/H = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$, Source position: Windward) [Data from Uehara (1998)]

Fig. 16 $C/C_{ave,C}$ distribution under various stratified condition ($Rb = 0.11 \sim -0.21$, $L/H = 1$) [Data from Uehara (1997)]

に、これを平均濃度パターンとつぎ合わせることによって、あらゆるの沿道濃度分布が予測できる。

5 結論

ストリートキャニオン内部の流れ場・濃度場と沿道建物高さの関連を風洞実験によって調べた。

- 1) 風下側建物高さが風上と同じか、高い($H_D \geq H_U$)とき、ストリートキャニオンの内部には常にキャビティ渦を生じ、濃度は低くなる。
- 2) 風上側建物が高いと($H_U > H_D$)ストリートキャニオン内部にはキャビティ渦を生じない。濃度は全般に高めであるが、風上側建物がある程度以上高くなると($H_U/H_S > 1.75$)濃度は若干減少

する。

- 3) ストリートキャニオン底部ではキャビティ渦の有無にかかわらず逆流が生じており、道路風上側の濃度は風下より常に高い。
- 4) 平均濃度で無次元化したストリートキャニオン内の濃度分布は、ある範囲の道路幅、沿道建物高さ、および大気安定度の変化に対して大きく変化せず、ほぼ相似な形状を示す。
- 5) 道路構造と通風率や濃度分布パターンの関連が資料として整備されている場合には、実市街地における汚染ガスの排出量と市街地風速から通風率を用いて求めたストリートキャニオン内の平均濃度と濃度分布パターンとつぎ合わせることで、沿道濃度分布の概略を推定することができる。

あとがき

風洞実験を行うにあたってフォーラムエンジニアリング(株)山尾幸夫氏、河田忠氏、河合一各氏をはじめとして、国立環境研究所施設課 佐々木寛寿氏、駒場勝雄氏より種々ご援助いただいた。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。

Symbols

A_{st} : airiness factor of the street canyon defined as $Q_{st} / (U_H L)$
 C : concentration, ppm
 C_{ave} : average of C_n within the street canyon, ppm
 C_n : normalized concentration defined as $C/(q/(U_H H))$, ppm ppm⁻¹
 H : model block height = 100 mm
 H_D : Downwind building height of the street canyon, mm
 H_U : Upwind building height of the street canyon, mm
 H_S : Surrounding building height of the street canyon = 100 mm
 L : width of wind tunnel street canyon = 100 mm
 Rb : bulk Richardson number = $gH(T_H - T_0)/\{(T + 273)(U_H)^2\}$
 Q_{st} : rate of ventilation of the street canyon, cm³ s⁻¹ m⁻¹
 q : rate of tracer gas flow within the street canyon, cm³ s⁻¹ m⁻¹
 T : mean temperature, °C
 T_a : ambient temperature measured at the entrance of the wind tunnel test section, °C
 T_f : wind tunnel floor temperature, °C
 T_0 : temperature at height 0 estimated from T profiles, °C
 U_∞ : standard wind speed = 1.5 m s⁻¹
 U_H : mean wind speed at the top of the street canyon, m s⁻¹
 u, v, w : velocity components in the x, y and z directions, m s⁻¹
 U, V, W : mean velocity components in the x, y and z directions, m s⁻¹
 X, Y, Z : Spatial coordinates in the windward, crosswind, and vertical directions, m, $X = 0$ is the entry of the wind tunnel test section, $Y = 0$ is the center of test section in cross wind direction, $Z = 0$ is wind tunnel test floor

注

- 1) 本実験では道路両側の建物高さを変化させているので、建物軒高の風速を定義しにくい。このため、 U_H として市街地模型の高さがすべて等しい時のストリートキャニオン中央の高さ $Z = H_S$ における風速を採用した。風洞実験の結果と実市街地の現象との対応を考える時、共通の尺度となる基準の風速をどう選ぶかは重要である。今後の検討課題としたい。

文献

- 1) 上原清_他: 温度成層下のストリートキャニオン内部流れに対する道路幅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4、日本建築学会計画系論文集 第510号、37-44、1998
- 2) Johnson W.B. et al: An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. JAPCA 23,490-498, 1973
- 3) DePaul F.T. and Sheih C.M.: A tracer study of dispersion in an

urban street canyon, Atmospheric Environment 19, 555-559, 1985

- 4) 林復基_他: 都市内道路でのエア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、気汚染学会誌、26、4、235-245、1991
- 5) 石井康一郎_他: エアトレーサー実験によるストリートキャニオンでの大気拡散に関する検討 (I) 大気汚染学会誌 30,1,38-52、1995
- 6) Berlowicz R. et al.: Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality – meteorological analysis and model calculations, The Science of the Total Environment 189/190, 259-265, 1996
- 7) Buckland A.T.: Validation of a street canyon model in two cities, Environmental Monitoring and Assessment 52: 255-267, 1998.
- 8) 清田誠良_他: 市街地における街路空間の気流性状に関する研究、日本建築学会計画系論文集 第512号、61-66、1998
- 9) Johnson G. T., L. J. Hunter: Some insights into typical urban canyon airflows, Atmospheric Environment 33, 3991-3999, 1999
- 10) Santamouris M. et al.: Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions, Atmospheric Environment 33, 4503-4521, 1999
- 11) Louka P. et al.: Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft, Atmospheric Environment 34, 2613-2621, 2000
- 12) 石井康一郎_他: エアトレーサー実験によるストリートキャニオンでの大気拡散に関する検討 (II) 大気汚染学会誌 35,3,144-157、2000
- 13) Hoydysh W. G. and Dabberdt W. F.: Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons, Atmospheric Environment Vol. 22, No. 12, pp. 2677-2689, 1988
- 14) 上原清: 交差点周辺の汚染物濃度分布に関する風洞実験—市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その1、日本建築学会計画系論文集 第485号、25-34、1996
- 15) Ogawa Y. et al.: A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere. Atmospheric Environment 15, 807-821, 1981
- 16) Uehara K. et al.: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons: Atmospheric Environment, 34/10, 1553-1562, 2000
- 17) 上原清_他: 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
- 18) 上原清_他: 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
- 19) 上原清_他: 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—市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その3、日本建築学会計画系論文集 第499号、9-16、1997
- 20) Oke: Street design and urban canopy layer climate, Energy and Buildings, 11,1988,103-113

(2000年6月10日原稿受理、2000年10月19日採用決定)