

建物キャニオン内の流れと拡散に関する 屋外都市スケールモデル実験

FIELD EXPERIMENTS OF FLOW AND DISPERSION WITHIN A BUILDING
CANYON OF THE COMPREHENSIVE OUTDOOR SCALE MODEL

佐藤 歩¹・瀧本浩史²・道岡武信³・神田 学⁴

Ayumu SATO, Hiroshi TAKIMOTO, Takenobu MICHIOKA and Manabu KANDA

¹正会員 工修 (財) 電力中央研究所 物理環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山二丁目12-1)

³非会員 工博 (財) 電力中央研究所 物理環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁴正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山二丁目12-1)

Filed experiments of flow and dispersion within a building canyon of the Comprehensive Outdoor Scale Model (COSMO) were conducted to investigate the effect of turbulence of outer flow on dispersion in a canyon. Tracer gas concentration was measured using fast-response photo-ionization detectors (PIDs) at several points on the central cross section of the canyon. Three dimensional wind velocity components were also measured using ultra sonic anemometers within and above the same canyon, simultaneously. During most of the experiments, wind direction was perpendicular to the building face. With both concentration and velocity fluctuation data, we investigated the effects of large scale turbulent eddies above the building height on flow and plume dispersion within a building canyon.

Key Words : *Building canyon, cavity eddy, dispersion, outdoor urban scale model*

1. はじめに

都市の建物キャニオン内の自動車や分散型電源、空調設備から排出される排気ガスは周囲の建物等の構造物による気流の変化を受けながら大気中に拡散する。キャニオン内の流れや拡散については、これまで風洞実験¹⁾や数値計算²⁾、野外観測により広く検討が行われてきた³⁾。中でも、キャニオン形状(アスペクト比(建物高さ/道路幅)、建物の幅・長さ、屋根面形状、建物高低差等)がキャニオン内の流れ、拡散に与える影響については多数の報告があり、アスペクト比の減少にともないキャニオン内の汚染物濃度が低下すること、キャニオン内に形成される循環渦が屋根面勾配に大きく依存すること、両側建物の高低差があるキャニオンでは風上側に比べて風下側建物が高い場合に汚染物濃度が低下すること等が知られている。また、流入気流の性状がキャニオン内の流れや拡散に与える影響を調べるため、キャニオン上空の平均風速⁴⁾や大気安定度^{5) 6)}、乱流強度⁷⁾の影響を検討した風洞実験や数値計算が行われており、不安定時や乱流強度の増加時にキャニオン内の換気が促進され、濃度が

低下すること等が知られている。以上のキャニオン内の流れや拡散に関する研究はその大半が単一の2次元ストリートキャニオンを対象としている。一方、3次元の建物が複数並んだ建物群周辺の流れや拡散についても、これまで風洞実験や屋外実験による検討が行われている⁸⁾が、個々のキャニオン内の流れや拡散に着目した例は少ない。近年、粒子追跡法を用いた水槽実験⁹⁾やLES¹⁰⁾、DNS¹¹⁾を用いた数値計算によりキャニオン内の瞬間的な流れの構造やキャニオンの換気プロセスについての検討が行われており、キャニオン内に形成される循環渦は間欠的であり、キャニオンの換気は主に乱流輸送により支配されていること、キャニオン上端から外部への物質輸送は屋根面で発達するせん断層に大きな影響を受けていること等が明らかとなってきた。しかしながら、実大気中で見られる様な大気境界層スケールの乱れがキャニオン内における汚染物質の拡散や換気過程に与える影響については未だ不明な点が多い。そこで本研究では、低層住宅を1/5スケールで模擬した屋外都市スケールモデル¹²⁾の建物キャニオン内および上空に複数の高応答性の濃度計と超音波風速温度計を設置し、風速とトレーサガス濃度を同時に計測することにより、キャニオン内外の流れ

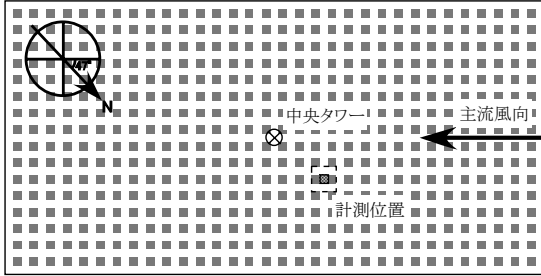


図-1 屋外都市スケールモデル

がキャニオン内の拡散に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 屋外都市スケールモデル

実験は日本工業大学（埼玉県）の敷地内に設置されている屋外都市スケールモデル（Comprehensive Outdoor Scale Model, COSMO）（図-1）にて実施した。COSMOでは100×50mのコンクリート平板上に一辺がH=1.5mの立方体コンクリートブロックが1.5m間隔で様に配置されている（建坪率25%）。COSMOは長辺の方向が真北から約47°傾いており、冬季および夏季に卓越する季節風の風向（それぞれ北西および南東）と一致している。COSMO上空の乱流構造やキャニオン内の流れ場についてはこれまでInagaki and Kanda¹³⁾、瀧本ら¹⁴⁾により検討が行われている。トレーサ拡散実験はサイト長辺の風上端から26H、短辺端から11H離れた中央付近のキャニオンで実施した（図-1）。測定座標系は、対象キャニオン風上側の建物の底面中心を原点とし、主流方向、横断方向、鉛直方向をそれぞれx, y, zとする。また、主流方向、横断方向および鉛直方向の平均風速をそれぞれU, V, W、変動風速 u' , v' , w' の標準偏差をそれぞれ σ_u , σ_v , σ_w と記す。

(2) 気象および実験条件

実験は2008年1月31日～2月1日に実施した。前述の通りCOSMOでは冬季は北西の季節風が卓越し、本実験でも北西から南東へ方向を主流方向として実験を行った。濃度計測用のトレーサガスにはプロピレン（C₃H₆）を使用し、30分間の放出を1RUNとして、計11RUNの計測

表-1 実験時の気象条件

RUN	U (m/s)	θ (deg)	σ_u (m/s)	σ_v (m/s)	σ_w (m/s)	u^* (m/s)	z'/L
1	5.9	-8	2.13	1.87	1.07	0.84	-0.008
2	5.1	-10	2.01	1.76	0.91	0.71	-0.012
3	4.3	-18	1.82	1.83	0.89	0.66	-0.014
4	4.0	-18	1.95	1.62	0.85	0.66	-0.015
5	4.3	-18	1.85	1.86	0.93	0.66	-0.015
6	4.8	-13	2.01	1.75	0.94	0.74	-0.009
7	4.1	-11	1.76	1.35	0.79	0.64	-0.009
8	3.1	-21	1.54	1.13	0.67	0.53	-0.010
9	3.2	-15	1.41	1.28	0.70	0.52	-0.011
10	5.2	9	1.90	1.57	0.88	0.72	-0.011
11	4.9	-1	1.81	1.79	0.88	0.70	-0.013

U: 主流方向の平均風速, θ : ブロック前面に対する風向角
 $\sigma_{u,v,w}$: 変動風速の標準偏差, u^* : 摩擦速度

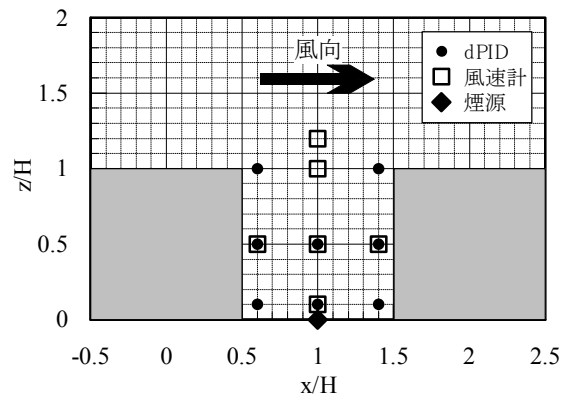


図-2 計測器の配置

を行った。トレーサガスはキャニオン中央の地表面上に主流方向に対して直角（ブロック前面と並行）に設置した直径13mmの塩ビパイプ製の線源（長さL=1.5m間に直径 $\phi=5$ mmの穴を25mm間隔で均等に開けた）よりRUN毎に一定流量（ $Q=1\sim 4$ L/min）で放出した。サイト中央の気象観測用タワーに取り付けられた高さ $z=2H$ の超音波風速温度計（Kaijyo製DA-600, TR-90AH）から求めた30分間の気象条件を表-1に示す。主流方向の平均風速は3.1～5.9m/s、ブロック前面に対する風向角の絶対値は最大で21°である。次式により求めた大気安定度の指標 z'/L は、 $-0.015 < z'/L < -0.008$ であり実験期間中の大気の状態はいずれも中立である¹⁵⁾。

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(\overline{w'T'})}{u_*^3/kz'} \quad (1)$$

ここで $z'=z-d$ 、 d : ゼロ面変位(m)、 L : モニン・オブコフ長さ(m)、 g : 重力加速度(m^2/s^2)、 T : 平均温度(K)、 $\overline{w'T'}$: 熱フラックス($m/s \cdot K$)、 k : カルマン定数(=0.4)である。

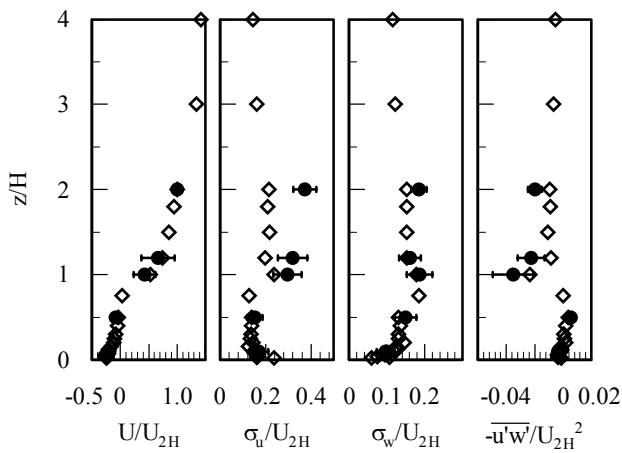


図-3 平均および変動風速の鉛直分布 (●:COSMO, ◇:Uehara et al.⁵⁾)

(3) 計測器とサンプリング条件

トレーサガス濃度の測定にはAurora Scientific Inc製のdigitalPID (以下, dPID) を8台使用した. dPIDは, 試料ガスにそのイオン化ポテンシャルより高いエネルギーを持つ光を照射することにより試料成分がイオン化される現象を利用して濃度に応じた電流値を検出する光イオン化検出器(Photo Ionization Detector, PID)の一種であり, 過去に同様の装置が屋外でのトレーサ拡散実験¹⁶⁾で使用されている. 実験前に純空気と既知濃度のプロピレンガス (10, 100, 400, 1000ppm) を用いて濃度と出力電圧の関係を求める校正を行い, 電圧値から濃度を算出するための二次曲線を得た. 実験ではdPIDをキャニオン内の風上・中央・風下の3断面 ($x/H=0.6, 1.0, 1.4$) \times 3高度 ($z/H=0.1, 0.5, 1.0$, 中央のみ $z/H=0.1, 0.5$ の2高度) に設置した (図-2). 風向変動の影響を最小にするため, 濃度の平均時間を3分間 (11RUN \times 10ケース=110ケース) とし¹⁷⁾, そのうち風向角がブロックの前面に対し ± 10 度以内の57ケースを解析対象とした. トレーサ実験と並行して, キャニオン内および直上に超音波風速温度計プローブ (Kaijyo製TR-90AH) を6台設置し (図-2), 風速測定を行った. サンプリング周波数は, 濃度, 速度ともに50Hzである.

3. 実験結果と考察

(1) キャニオン内の流れ場

図-3に解析対象とした57ケースの平均値より得られたキャニオン中心断面の主流方向平均風速 U , 主流方向および鉛直方向の変動風速の標準偏差 σ_u , σ_w , レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布を示す. 各統計量は中央タワー ($z=2H$) で計測された平均風速 U_{2H} を用いて無次元化した. 図中のエラーバーは解析対象ケースの標準偏差を示す. 主流方向の平均風速はキャニオン内で負値を示し, キャニオン中心断面では主流風向に対し逆流が生じてお

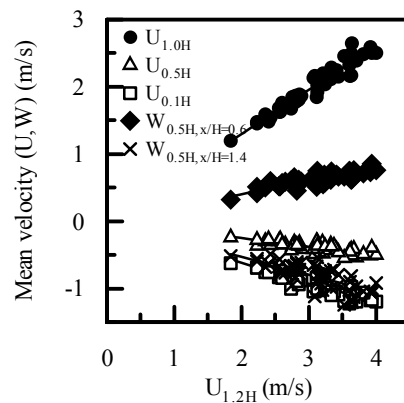


図-4 キャニオン内の水平・鉛直風速

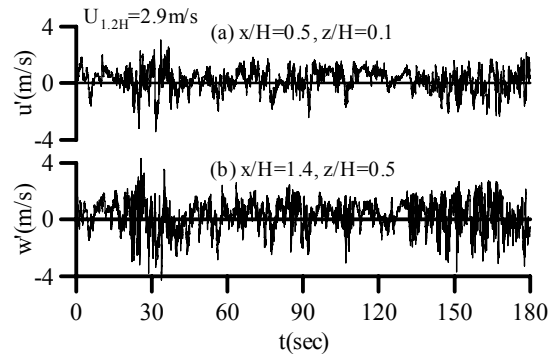


図-5 キャニオン内の風速変動(u', w')時系列(RUN1)

り, Uehara et al.⁵⁾の風洞実験と良く一致している. 主流方向の変動風速は, キャニオン内に比べキャニオン上空で大きな値を示し, キャニオン内では風洞実験と類似の分布を示すのに対し, キャニオン上空では差が見られる. Inagaki and Kanda¹³⁾はCOSMO上空のroughness sublayer¹⁸⁾の高度を $2H$ と見積もっており, この高度で風洞実験値との差が最大となるのは外層の影響が卓越するためである. 一方, 鉛直方向の変動風速は建物高さ付近で最大値を示し, キャニオン上空ではほぼ一定である. また, 風洞実験との差も水平方向に比べて小さい. COSMOで計測された乱流統計量の鉛直分布より, σ_u には外層 (大気境界層) スケールの変動が支配的であるのに対し, σ_w は地表面条件に依存することが指摘されており¹³⁾, 本実験の結果もこれと一致する. レイノルズ応力は建物高さでピークを示し, これはキャニオン風上側の建物屋根面より発達するせん断層の影響である. 上空のレイノルズ応力は, σ_w と同様に風洞実験と同程度の値であり, 外層の影響は小さい.

図-4にキャニオン直上 $z=1.2H$ の主流方向平均風速 $U_{1.2H}$ とキャニオン中心断面 ($x/H=1.0$) の3高度 ($z/H=0.1, 0.5, 1.0$) における主流方向平均風速 U , キャニオン壁面近傍 ($x/H=0.6$ および 1.4 の $z/H=0.5$) における鉛直方向平均風速 W の関係を示す. キャニオン内の風速は上空の風速と良い相関を示し, キャニオン直上風速の増加に対応してキャニオン内の速度も上昇する. また, キャニオン中心の $z/H=0.1, 0.5$ の主流風速および風下側壁面近く

($x/H=1.4$) の鉛直風速は常に負、反対に風上側壁面近く ($x/H=0.6$) の鉛直風速は常に正の値となり、キャニオン内に循環渦が形成されていることが確認される。一般に、キャニオン内の流れの形態はキャニオンのアスペクト比により a) isolated roughness flow, b) wake interference flow, c) skimming flow の三種類に分類される¹⁹⁾。COSMO はキャニオンのアスペクト比が1.0であり、skimming flow (建物上空の流れは屋根面上をかすめるように流れ、建物キャニオン内には循環渦が形成される) に相当する流れが形成されていると考えられる。瀧本ら¹⁴⁾は、COSMOで実施したPIV計測から得られた15分間のベクトル図 (キャニオン直上風速 $U_{1.2H}=0.7\text{m/s}$) よりキャニオン内に単一の循環渦が形成されていることを確認しているが、本実験のように上空風速が速い場合 ($U_{1.2H}=1.8\sim 4.0\text{m/s}$) には、より短い平均時間においても安定的な循環渦が形成されていることが分かる。ただし、地表面近傍の主流方向や壁面近傍の鉛直方向の風速は瞬間的には平均値を中心に大きな変動を示し (図-5)、地表面近傍の乱流強度 σ_c/U は0.87と大きくキャニオン内の流れは強い乱流状態にある。キャニオン循環渦が間欠的に生じることは野外観測^{20), 21)}やLESを用いた数値計算¹⁰⁾でも報告されており、キャニオン内の瞬間的な濃度分布に影響を与えているものと考えられる。

(2) キャニオン内の濃度分布

図-6にキャニオン内の風上 ($x/H=0.6$) および風下 ($x/H=1.4$) 断面で計測したトレーサガスの平均濃度 C および濃度標準偏差 σ_c の鉛直分布を示す。濃度は解析対象57ケースの平均値を主流方向平均風速 $U_{1.2H}$ および建物高さ H 、線源強度 (Q/L) により無次元化した。図中のエラーバーは解析対象ケースの最小値と最大値の範囲を示す。キャニオン内の濃度は風下に比べて風上断面で高く、地表面付近より放出されたガスがキャニオン内の循環渦により風上建物の背後へ運ばれていることが分かる。風上と風下断面の地表面付近の濃度差は平均値で約8倍である。平均濃度、濃度標準偏差ともにケース毎の偏差が大きく、特に風上の地表面付近で大きなばらつきが見られる。キャニオン内の平均濃度は高度とともに急激に減少し、風上断面のキャニオン上端における平均濃度は地表面付近の約1/8である。キャニオン内の濃度の鉛直分布は2次元ストリートキャニオンを対象とした既往の風洞実験結果⁴⁾と同様の傾向である。

図-7にdPIDで計測した瞬間濃度 c の時系列の一例を示す。瞬間的な濃度は、風上断面 ($x/H=0.6$) では地表面付近とキャニオン中央および上端の時系列は良く対応しており、キャニオン下層から上層へとトレーサガスが輸送されていることが分かる。一方、風下断面 ($x/H=1.4$) の上端 ($z/H=1.0$) の濃度変化は風上と対応しており、キャニオン上端で上空の気流と混合されたガスの一部がキャニオン内に再循環していることが分かる。

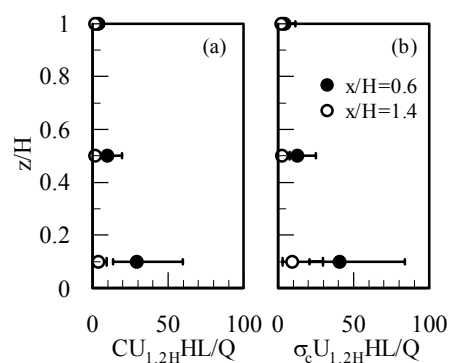


図-6 平均濃度(a)と標準偏差(b)の鉛直分布

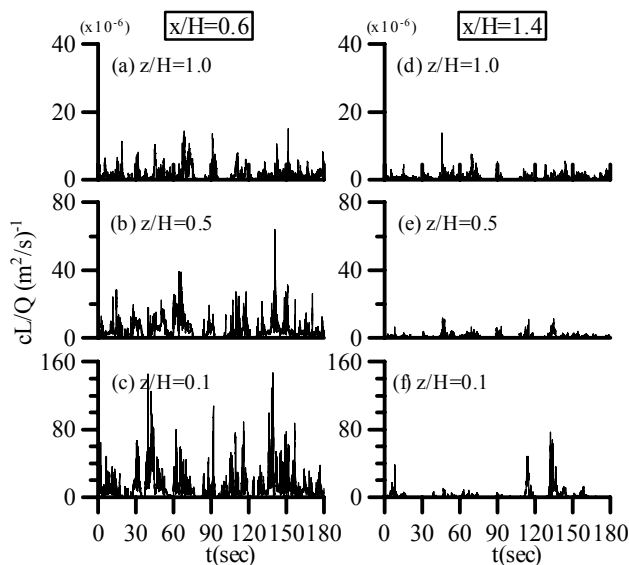


図-7 キャニオン内の瞬間濃度の時系列

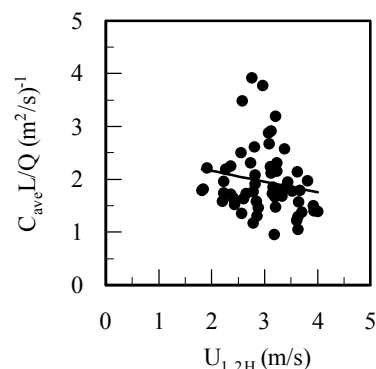


図-8 キャニオン直上風速と平均濃度の関係

また、風下断面の地表面付近の濃度は間欠的であり、濃度が検出されるのは極めて短時間である。しかし、キャニオン上端や中央で高濃度が検出されていない時間帯において比較的高い濃度が検出されていることから、キャニオン内に形成される循環渦とは異なった流れにより風下側へガスが輸送されていると考えられる。上原ら²²⁾は、キャニオン内には平均流れ場に良く似た循環渦と、渦が崩れて形の定まらない流れが生じており、キャニオン風下側への拡散は循環渦が崩れた時に生じていると推察し

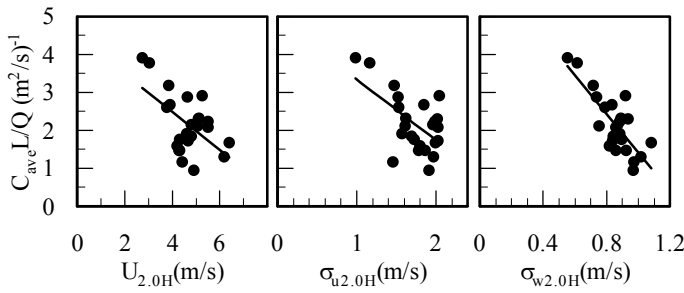


図-9 上空気流 ($z=2.0H$) とキャニオン平均濃度の関係

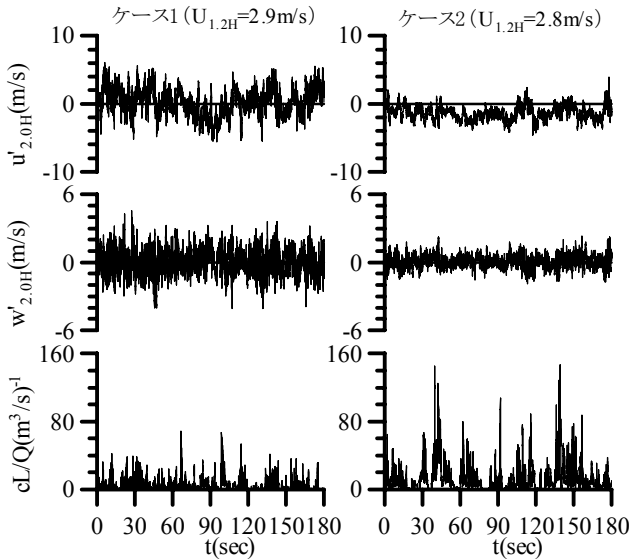


図-10 $z=2H$ の風速変動と瞬間濃度の時系列

ている。図-7に示した建物キャニオン内における複数点での瞬間濃度の同時計測結果より、これらの現象が確認される。

(3) キャニオン平均濃度と上空気流の関係

図-8に $z=1.2H$ の主流方向平均風速とキャニオン内の平均濃度 C_{ave} (8台のdPIDの平均値) の関係を示す。風洞実験ではキャニオン内の濃度は建物高さの風速に比例して一様に減少する結果が得られているが⁹⁾、これはキャニオン上の風速の増加とともにキャニオン内の循環渦が強まることによりキャニオン内の拡散が活発になるためである。図-8に示したCOSMOで計測されたキャニオン平均濃度は風洞実験と同様の傾向であるものの、上空風速に対してばらつきが大きい。図-3に示したようにCOSMOではキャニオン上空の変動風速が風洞実験に比べて大きく、外層の気流乱れがキャニオン内の濃度に影響を与えている可能性がある。

中央タワーで計測された $z=2H$ の気流とキャニオン内の平均濃度の関係を調べるため、解析対象57ケースより $z=1.2H$ の主流方向風速が平均値 (3.0m/s) の $\pm 10\%$ となる $U_{1.2H}=2.7\sim 3.3\text{m/s}$ の24ケースを抽出した。抽出したケースのキャニオン平均濃度と同時刻の $z=2H$ で計測された平均風速および変動風速の関係を図-9に示す。図より、

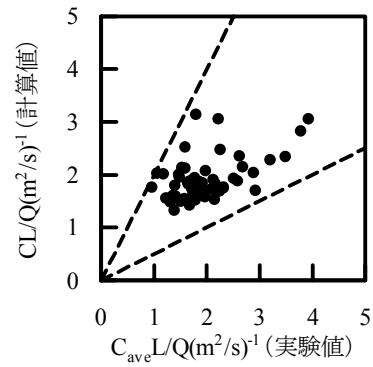


図-11 キャニオン平均濃度の実験値と計算値

キャニオン内の濃度はキャニオン外層の平均風速および乱れの増加とともに一様に減少する傾向を示し、特に鉛直方向の変動風速と相関が高い。 $U_{1.2H}$ がほぼ等しい2ケースに着目して、 $z=2H$ の風速変動およびキャニオン内で濃度が最も高い値を示す風上側の地表付近 ($x/H=0.6, z/H=0.1$) のdPIDで計測された濃度の時系列を図-10に示す。図より明らかな通り、ケース1では水平および鉛直方向の風速変動が大きく、地表付近においてそれほど高い濃度は検出されていない。これは、外層からキャニオン内へ新鮮な空気の供給が定期的に行われているためと考えられる。一方のケース2では、風速の変動が小さく、地表付近ではケース1の2倍近い高濃度値が検出されている。また、比較的高い濃度が連続して観測されており、高濃度の気塊が間欠的に通過している様子が伺える。これは、キャニオン内への空気の流入がケース1に比べ制限されているためである。

Caton et al.⁹⁾は、粒子追跡法を用いた水槽実験によりキャニオン内と外部の間の物質輸送が上空の平均風速だけでなく、流入する乱流特性に依存する可能性があることを示し、キャニオン内濃度の予測式として次式を提案している。

$$C = \frac{Q}{L U_0 W} \left(\sqrt{\frac{\sigma_w^{ext}}{U_0} \frac{l^{ext}}{W}} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 Q/L : 線源強度、 U_0 : キャニオン上空の平均風速、 W : キャニオンの幅、 σ_w^{ext}/U_0 : キャニオン上空の乱流強度、 l^{ext} : 代表的な乱れスケールである。

式(2)はストリートキャニオンを対象として解析的に導かれたものであり、実験値との比較等による検証は行われていない。COSMOで得られた $z=2.0H$ の気流データを用いて式(2)より算出した濃度とキャニオン平均濃度を比較して図-11に示す。なお、式(2)中の l^{ext} は、Caton et al.⁹⁾を参考に0.1Hと与えた。 $z=2.0H$ の気流データを用いて算

出した濃度は、実験値をファクター2の精度（実験値の0.5～2.0倍の範囲、図中の点線）で再現しており、外層の平均風速に加え、気流乱れを考慮することによりキャニオン内の濃度を精度良く予測することができる。

4. おわりに

屋外都市スケールモデル（COSMO）の建物キャニオン内において、地表に設置した線源から放出されたトレーサガス濃度および風速の同時測定を行い、以下の知見を得た。

- (1) 屋外の建物キャニオン内においても安定的な循環渦が形成されており、その強さはキャニオン上空の主流方向風速に比例する。ただし、キャニオン内の流れは強い乱流状態にある。
- (2) 地表付近で放出されたガスは循環渦により風上側の建物背後へ運ばれ、キャニオン内の濃度は風下断面に比べて風上断面で高い値を示す。建物キャニオン内における複数点での瞬間濃度の同時計測により、キャニオン上端におけるガスの再循環や、循環渦と異なった流れによる風下方向への拡散をとらえることができた。
- (3) キャニオン内の平均濃度は上空の平均風速に加え、外層の乱れを考慮することにより予測することができる。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号：18360234）による財政的援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) Ahmad, K., Khare, M. and Chaudhry, K.K.: Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections –a review, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.93, pp.697-717, 2005.
- (2) Li, X.-X., Liu, C.-H., Leung, D.Y.C. and Lam, K.M.: Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.5640-5658, 2006.
- (3) Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K. and Gonzalez-Flesca, N.: Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmos. Environ.*, Vol.37, pp.155-182, 2003.
- (4) Meroney, R.N., Pavageau, M., Rafailidis, S. and Schatzmann, M.: Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.62, pp.37-56, 1996.
- (5) Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., Wakamatsu, S.: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.34, pp.1553-1562, 2000.
- (6) 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, pp.9-16, 1997.

- (7) Kim, J.-J. and Baik, J.-J.: Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.91, pp.309-329, 2003.
- (8) Kanda, M.: Progress in the scale modeling of urban climate: Review, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol.84, pp.23-33, 2006.
- (9) Caton, F., Britter, R.E. and Dalziel, S.: Dispersion mechanisms in a street canyon, *Atmos. Environ.*, Vol.37, pp.693-702, 2003.
- (10) Walton, A. and Cheng, A.Y.S.: Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon –Part II: idealised canyon simulation, *Atmos. Environ.*, Vol.36, pp.3615-3627, 2002.
- (11) Coceal, O., Thomas, T.G., Castro, I.P. and Belcher, S.E.: Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.121, pp.491-519, 2006.
- (12) 神田学, 稲垣厚至: 都市境界層における乱流相似則と組織構造, *ながれ*, Vol.26, pp.361-368, 2007.
- (13) Inagaki, A. and Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow, *J. Fluid Mech.*, submitted.
- (14) 瀧本浩史, 森脇亮, 津國眞明, 神田学: 屋外都市スケールモデルにおけるPIV計測, *水工学論文集*, 第52巻, 2008.
- (15) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- (16) Yee, E. and Bilito, C.A.: Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.111, pp.363-415, 2004.
- (17) Mavroidis, I., Griffiths, R.F. and Hall, D.J.: Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles, *Atmos. Environ.*, Vol.37, pp.2903-2918, 2003.
- (18) Rotach, M.W.: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion, *Atmos. Environ.*, Vol.33, pp.4001-4008, 1999.
- (19) Oke, T.R.: Street design and urban canopy layer climate, *Energy Build.*, Vol.11, pp.103-113, 1988.
- (20) Louka, P., Belcher, S.E. and Harrison, R.G.: Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft, *Atmos. Environ.*, Vol.34, pp.2613-2621, 2000.
- (21) Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C.S.B. and Lindqvist, S.: Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon, *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.1-16, 2006.
- (22) 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, pp.45-52, 1999.

(2008. 9. 30受付)