

# 都市キャニオン内での汚染物質濃度変動に関する高解像度 Large-eddy simulation

## Large-eddy simulation with fine grid resolutions of pollutant concentration fluctuations in urban canyon

- 菊本英紀, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: kkmt@iis.u-tokyo.ac.jp
- 大岡龍三, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ooka@iis.u-tokyo.ac.jp
- Hideki KIKUMOTO, IIS, the University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro, Tokyo
- Ryozo OOKA, IIS, the University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro, Tokyo

We conducted an experiment and large-eddy simulations (LESs) of turbulent dispersion of a passive tracer in a modeled urban canyon. LESs were run on simple orthogonal numerical grids that had a grid spacing of  $H/200$  and  $H/400$  (where  $H$  is the canyon height). Although the grid spacing of  $H/200$  in the canyon was sufficient to allow prediction of mean and variance of concentration, it underestimated concentration fluctuation at high frequency, as compared to the experiment. However, LES with a grid spacing of  $H/400$  successfully provided probability density functions and power spectra of concentration that agreed very well with those in the experiment.

### 1. はじめに

近年、都市空間における汚染物質拡散の解析においても Large-eddy simulation (LES) を採用する事例が増えている<sup>(1),(2)</sup>。また、計算機資源の拡充に伴い、それらの LES で使用される解析格子の解像度も増加する傾向にある。LES は濃度場の非定常性を陽に取り扱うことが可能であるため、平均濃度のみならず瞬時的な高濃度事象を予測・評価する上でも大変有用な手法である<sup>(3)</sup>。

しかし、LES はフィルタ操作を施した粗視化された支配方程式を解くため、本質的に格子解像度以下の小スケール (subgrid-scales, SGS) における濃度分散は陽に評価することができない。SGS での乱流変動が格子スケール (grid-scale, GS) の濃度場に与える影響は、乱流フラックスのモデリングによって評価されているものの、この SGS 濃度分散の無視は濃度変動強度やピーク濃度の過小評価をもたらす可能性がある<sup>(4),(5)</sup>。

そこで本研究では、従来に比べ極めて高い空間解像度をもつ解析格子を用い、都市キャニオン内での汚染物質拡散に関する LES の予測精度評価を行う。都市キャニオンを模擬したチャンパー内でのトレーサーガスの拡散実験を行い、それを再現した LES を実施する。著者らの既往研究では、 $H/100$  程度 ( $H$ : キャニオン高さ) の空間解像度は平均濃度場の解析においては十分なもの、濃度変動の統計量を評価するには不十分であった。本研究では、単純な直交格子系の解析格子を用い、 $H/200$  および  $H/400$  の空間解像度を設定して LES を実施した。LES の解析結果と実験値を比較することで、都市キャニオン内の乱流拡散場における LES に関して変動濃度場の予測可能性を議論する。

### 2. 実験条件

Fig. 1 に実験チャンパーの概略を示す。このチャンパーは都市キャニオンを模擬しており、都市キャニオンに特徴的な循環流が形成されるよう設計されている。キャニオン空間は、 $H(x) \times H(z)$  ( $H = 1,000$  mm) の大きさを持ち、 $10$  mm ( $x$ )  $\times$   $260$  mm ( $y$ ) の排出口面積をもつトレーサーガスの線源が設置されている。風速計速には熱線風速計 (split-fiber probe) を、濃度計測には高速 FID (flame ionization detector) を用いた<sup>(6)</sup>。トレーサーガスには、エチレンと合成空気の混合ガス (エチレン濃度 1.2%) を用いた。サンプリング間隔と時間は、風速計測において  $1.0$  kHz (low-pass filter  $0.3$  kHz) で  $2$  分間、濃度計測において  $1.0$  kHz で  $3$  分間とした。

実験は中立状態にて実施した。流入風速は  $1.0$  m/s (乱れの強さ約 4%) とした。キャニオン高さと同流入風速をもとに計算したレ

イノルズ数は  $6.7 \times 10^4$  である。トレーサーガスの排出流量は、 $3.0$  L/min で一定に制御した。計測は、主に  $y$  方向中心位置 ( $y = 0.15H$ ) において実施した。

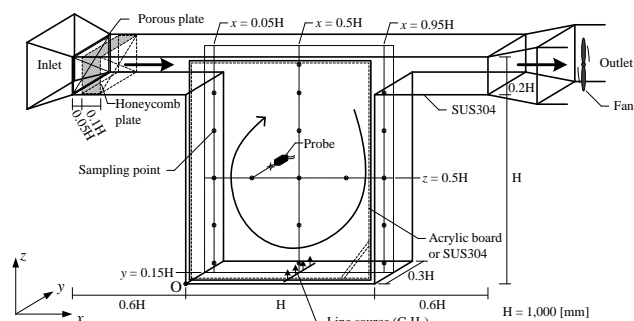


Fig. 1 Schematic diagram of the test chamber for an urban street canyon.

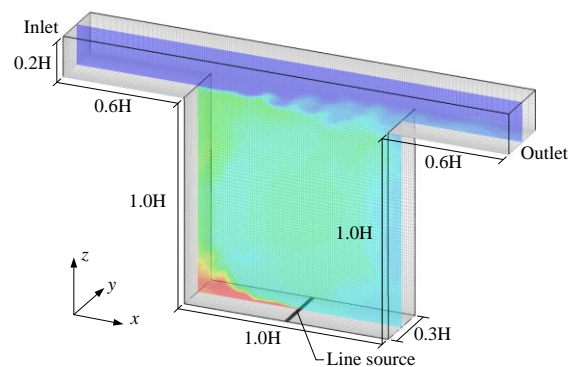


Fig. 2 The computational domain for large-eddy simulations to model the test chamber.

### 3. 解析条件とケース設定

実験条件を再現する形で LES を実施した。Fig. 2 は、LES で用いた解析領域を示している。既往研究<sup>(5)</sup>においては、自作の LES コードを用いたが、本研究においては解析格子数の増大に伴い、並列化計算を実施するために OpenFOAM を用いた。Table 1 には実験・解析ケース名とともに解析格子数を示す。自作コードを用いた結果も LES1 として本論文中に示す。

SGS における乱流運動量フラックスのモデル化には標準スマゴリンスキーモデルを用いた。トレーサの分子拡散のためのシュミット数は1.0とした。SGSにおけるトレーサの乱流輸送は、運動量輸送との相似性を仮定し、乱流シュミット数は0.5とした。いずれの解析ケースにおいても、時間ステップ幅は $1.0 \times 10^{-3}$  sとした。LESにおいては、流れ場・濃度場ともに統計的に定常状態になったと判断された後、3分間以上計算を継続し各種統計量を評価した。その他詳細な解析条件を Table 2 にまとめる。

Table 1 Case name and number of numerical grid points.

Case	Method (Code)	Numerical grid points in the canyon space ( $N_x \times N_y \times N_z$ )	Total number of numerical grid points
EXP	Experiment	-	-
LES1	LES (in-house code)	$100 \times 30 \times 100$	624,000
LES2	LES (OpenFOAM)	$200 \times 60 \times 200$	3,216,000
LES4	LES (OpenFOAM)	$400 \times 120 \times 400$	25,728,000

Table 2 Numerical conditions in LES2 and LES4.

Item	Content
Code	OpenFOAM v2.1.1
Subgrid scale model	Standard Smagorinsky model ( $C_s = 0.12$ ) with van Driest damping function
Time marching	PISO and geometric-algebraic multi-grid (GAMG)
Time discretization	Euler-implicit
Space discretization	2 <sup>nd</sup> -order central difference, total variation diminishing (TVD) scheme for advection terms in scalar transport equations
Inflow B.C.	Vel.: uniform velocity and random fluctuations of 4% ( $u$ ) and 2% ( $v, w$ ) of streamwise velocity; Conc.: constant (= 0.0)
Outflow B.C.	Vel., conc.: gradient-zero
Wall B.C.	Vel.: Spalding's law; Conc.: gradient-zero
Line source	Conc.: constant flux

#### 4. 結果と考察

本研究では、チャンバー内の  $y$  方向中心断面内 ( $y=0.15H$ ) でのデータを比較する。風速は $(x, z) = (0.5H, 1.1H)$ の位置での平均風速  $U_n$  で、濃度は特性濃度  $C_n (= Q_e / U_n HL; Q_e$ : トレーサガス発生速度;  $L$ : キヤニオンの  $y$  方向長さ) にて無次元化する。

Fig. 3 は、 $x$  方向風速の平均値および変動強度のプロファイルである。すべての LES のケースにおいて解析値は実験値と良く一致している。平均的な循環流は、最も高解像度なケース (LES4) においてやや強い傾向にあるがその差は大きくない。LES は、キヤニオン内の乱流強度に関してもよく再現できており、LES1 においても実験値との対応は良い。キヤニオン高さの混合層内に生じる乱流強度のピーク値に関しては LES4 で最大となった。

チャンバーの上部壁面 ( $z/H=1.2$ ) 近傍においては、LES1 が他のケースよりも大きな値を示したが、これは流入変動風の与え方の差に起因するものと思われる。LES1 においては、ダクト内流れの解析を追加で実施し、そこから得られた乱れの情報を一様流に付加することで作成した。一方で、OpenFOAM で実施した解析 (LES2, LES4) においては、ランダムな変動を一様流に加えるこ

とで作成した。ランダムな変動は流入後急速に減衰し、その結果キヤニオン上部 ( $z > H$ ) において乱流強度が小さな値になったと思われる。

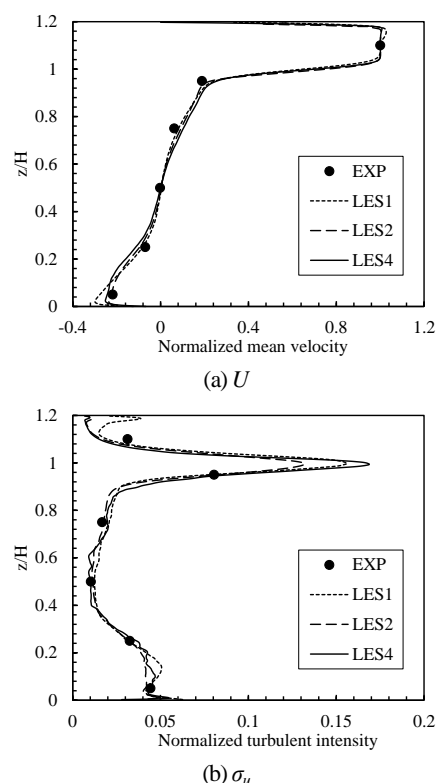


Fig. 3 Mean velocity and turbulent intensity at the grid scale in the  $x$  direction ( $U$  and  $\sigma_u$ , respectively) at the center of the canyon along the  $x$  direction ( $x=0.5H$ ).

平均濃度に関しても LES の結果の全体的な傾向は実験値と概ね一致している (Fig. 4(a)-(c)). LES2 と LES4 においてはやや平均濃度が過大評価される傾向にあったが、より高い解像度のケース (LES4) においては実験値に近づく傾向にあった。

LES1 は、空間解像度の不足および数値粘性の影響によって濃度変動強度を過小評価している (Fig. 4(d)-(f)). 高い空間解像度の解析格子を用いた LES2 および LES4 においては濃度変動強度の再現性が向上しており実験値とより一致するようになった。LES2 と LES4 の値は実験値よりもやや大きくなるような傾向があったが、これは平均濃度の過大評価によるものと思われ、濃度変動強度をその場の平均濃度で基準化することによって得られた乱れの強さの割合に関してはより実験値との対応が良くなった (Fig. 4(g)-(i)). しかし、LES2 においてはトレーサガス排出口の後流近傍においてこの濃度変動をやや小さく予測する傾向にあった (Fig. 4(g)).

キヤニオン空間の中から流入側壁面中央高さの点( $x/H, z/H$ ) = (0.05, 0.5)とキヤニオン高さの中央位置の点( $x/H, z/H$ ) = (0.5, 0.95)の2つを代表的な点として選び、LES2 と LES4 におけるより詳細な濃度の変動特性を調べた (Fig. 5, Fig. 6)。

( $x/H, z/H$ ) = (0.05, 0.5)における LES2 と LES4 の濃度の確率密度関数(probability density function, PDF)は実験値と良く一致している (Fig. 5(a), (b)). しかし、( $x/H, z/H$ ) = (0.5, 0.95)において LES2 は二峰性の形状をもつ PDF を示し、ピークが1つしか無い実験値とは大きく異なる傾向を示した (Fig. 5(c)). 同点においては、LES4 の PDF も二峰性の形状を示しているがピーク値間の差は LES2 より小さくなり、実験の PDF に近づいたように見える。

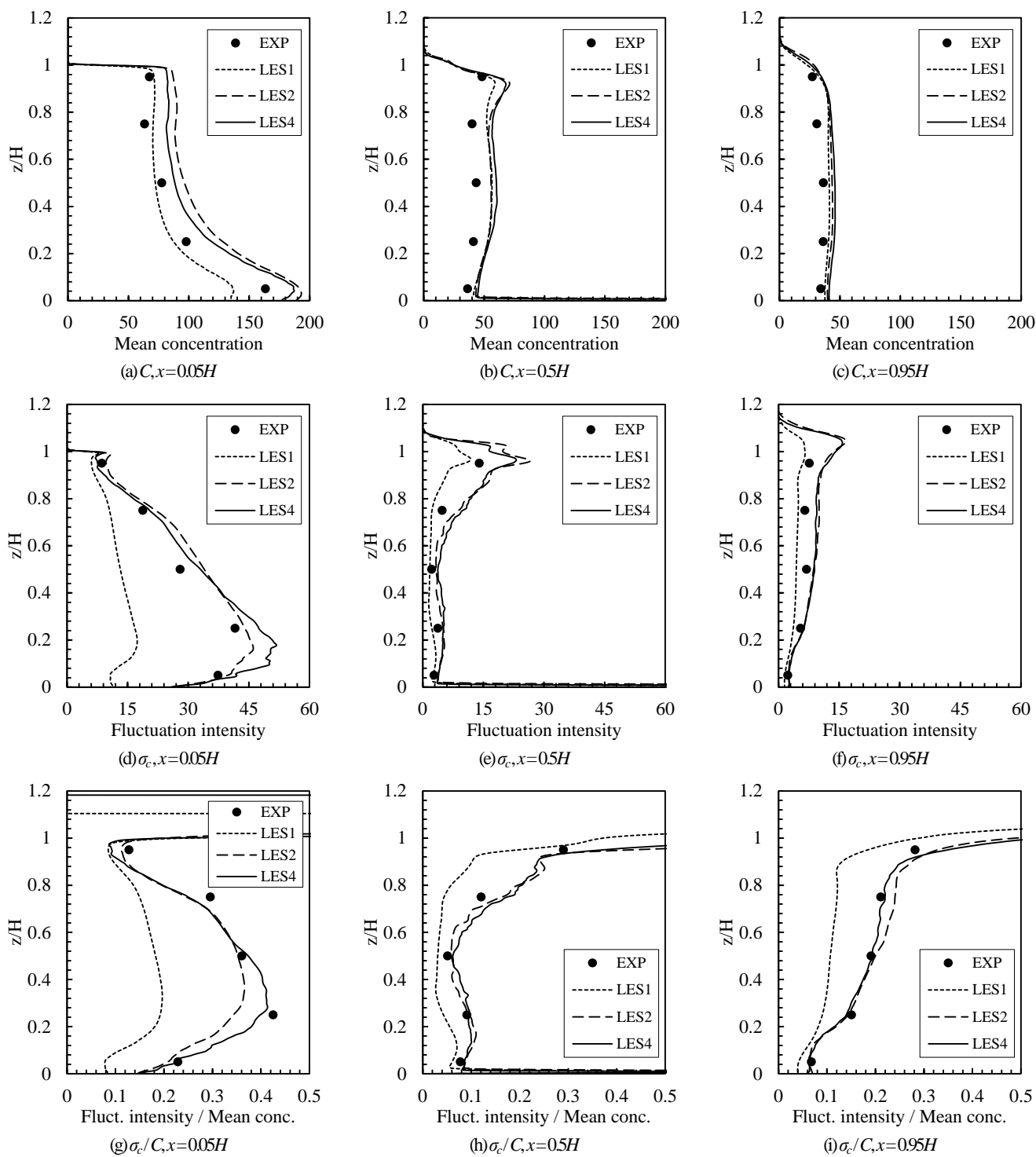


Fig. 4 Mean concentration ( $C$ ), fluctuation intensity of concentration at the grid scale ( $\sigma_c$ ), and ratio of fluctuation intensity to mean value of concentration ( $\sigma_c/C$ ) at  $x=0.05H, 0.5H$ , and  $0.95H$ .

LES2 は、濃度変動強度に関しては前述のように良い再現性を示したが (Fig. 4)、変動パワースペクトルを比較すると高周波数のエネルギーが実験値よりも小さくなっている (Fig. 6)。一方、LES4 ではこのような高周波数での過小評価は生じず、実験値と極めて良く一致した。LES2 の  $(x/H, z/H) = (0.5, 0.95)$  におけるスペクトルを見ると、周波数  $3H/U_n$  の辺りに小さなピークがあり、このようなピークは LES4 や実験においては観察されていない。図は割愛するが、LES2 における濃度の瞬時分布を調べると、キャニオン高さの位置に比較的はっきりとした混合層内の 2 次元渦が発

生している。これはおそらくキャニオン上部空間における乱流成分の不足が原因と考える。このことがキャニオン空間からのトレーサー排出効率を低下させ平均濃度の上昇を引き起こすとともに、キャニオン高さにおける二峰性の PDF を生じさせたものと想像される。LES4 においては、流入部および混合層の解像度がさらに向上したためか、このような 2 次元渦は LES2 ほど明確には存在しなかった。

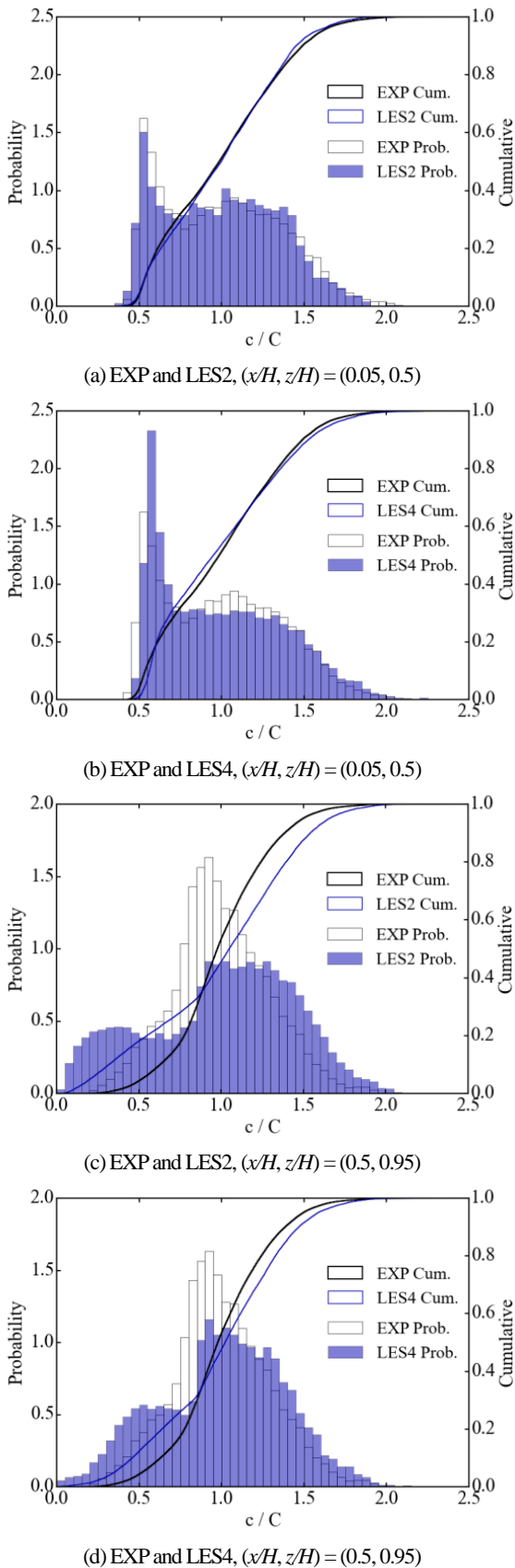


Fig. 5 Probability and cumulative density functions of concentration at  $(x/H, z/H) = (0.05, 0.5)$  and  $(0.5, 0.95)$ .

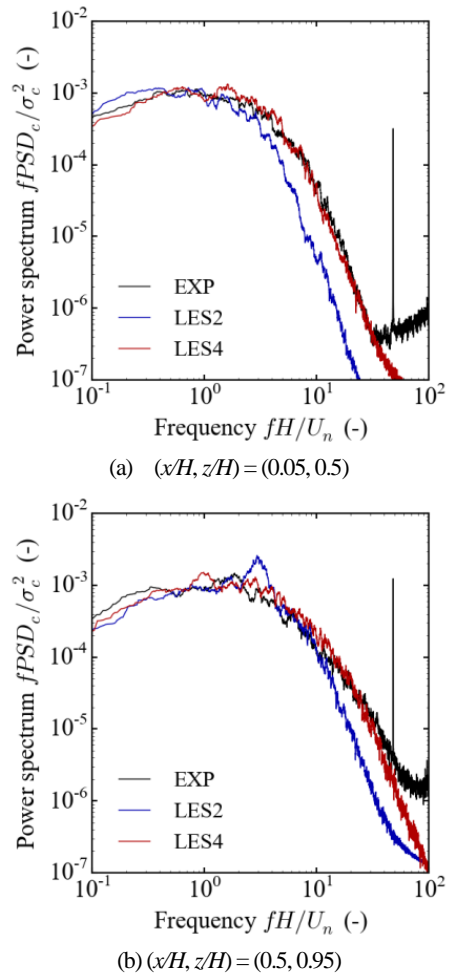


Fig. 6 Power spectral density (PSD) of concentration fluctuation at  $(x/H, z/H) = (0.05, 0.5)$  and  $(0.5, 0.95)$ .

## 5. まとめ

都市キャニオン空間を模擬した実験チャンバー内においてパッシブトレーサーの拡散実験および対応した LES を実施した。LES においては、高い空間解像度をもつ解析格子を用いた。 $H/200$  の空間解像度は、キャニオン内の平均濃度や濃度変動強度を予測するには十分であったが、実験値と比べ高周波での濃度変動を過小評価する傾向にあった。 $H/400$  の空間解像度の解析格子を用いることでそのような過小評価は改善され、濃度の PDF や濃度変動のパワースペクトルも実験値と良く一致するようになった。

## 謝辞

本研究の一部は、財団法人三菱財団平成 22 年度自然科学研究助成 (研究代表者: 大岡龍三) および JSPS 科研費 24226013 (研究代表者: 大岡龍三), 26709041 (研究代表者: 菊本英紀) の助成を受け行われた。記してここに謝意を表す。

記号表

$C$	Mean concentration
$C_n$	Reference concentration, $Q_d/U_n H L$
$C_s$	Model constant in standard Smagorinsky model
EXP	Experiment case
$f$	Frequency
FID	Flame ionization detector
GS	Grid-scale
$H$	Height ( $z$ ) / width ( $x$ ) of the canyon space
$L$	Length ( $y$ ) of the canyon space
LES	Large-eddy simulation
LES1, LES2, LES4	Case names in which LES was used
$N_x, N_y, N_z$	Numerical grid points in the canyon space in the $x$ -, $y$ -, $z$ -direction, respectively
PDF	Probability density function
PSD	Power spectral density
$Q_e$	Emission rate of tracer gas from the line source
SGS	Subgrid-scale
$u, v, w$	Velocity in the $x$ -, $y$ -, $z$ -direction, respectively
$U$	Mean velocity in the $x$ -direction
$U_n$	Reference velocity, mean velocity at $(x, y, z) =$ $(0.5H, 0.15H, 1.1H)$
$\sigma_c$	Standard deviation of concentration
$\sigma_u$	Standard deviation of velocity in the $x$ -direction

参考文献

- (1) Cai, X.-M. et al., "Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—Large-eddy simulations," *Atmospheric Environment*, 42(2008), pp. 5885–5895.
- (2) Michioka, T., et al., "Large-eddy simulation for the mechanism of pollutant removal from a two-dimensional street canyon," *Boundary-Layer Meteorology*, 138(2010), pp. 195–213.
- (3) Sykes, R.I., Henn, D.S., "Large-eddy simulation of concentration fluctuations in a dispersing plume," *Atmospheric Environment*, 26A(1992), pp. 3127–3144.
- (4) 道岡他, "Large-Eddy Simulation による大気境界層中のトレーサガス濃度変動予測," *日本機械学会論文集, B 編* 69(2003), pp. 868–875.
- (5) 菊本他, "Large-eddy simulation における解析格子解像度下での濃度分散評価手法の検討: マイクروسケール大気汚染予測システムの開発 その 4," *日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻第 689 号*(2013), pp. 579–588.
- (6) Pavageau, M., Schatzmann, M., "Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon," *Atmospheric Environment*, 33(1999), pp. 3961–3971.