

# 平成 29 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：平成 29 年度

課題番号：175001

研究課題名（和文）：都市域内を対象とした流れ場および汚染物質拡散予測に関する研究

研究課題名（英文）：Study of pollutant dispersion prediction in flow field of Urban Area

研究代表者：宮下康一

交付決定額（当該年度）： 円

※ページ数の制限はありません。

※成果等の説明に図表を使用させていただいて構いません。（カラーも可）

※提出して頂いた成果報告書をホームページでの公開を予定しております。

## 1. 研究の目的

都市域における汚染物質拡散の予測・評価を行う手段として、風洞実験や数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics : CFD) があげられる。しかし汚染物質拡散の風洞実験や CFD に関する研究は、整形都市街区モデルの内部等の拡散現象の解明など学術的な研究に重きを置かれたものが多く、実在都市域を対象とした検証例は少ない。そのため環境影響評価の実務に応用するまでに至っていないのが現状である。現在の大気汚染の環境影響評価においては、有風時の汚染物質の拡散性状の推定にプルームモデルが用いられている。プルームモデルとは汚染物質が風下に直線的に流されながら、その分布がガウス分布に従うことを仮定したモデルである。都市域において建物が隣接するような風の乱れの大きい場所で、比較的到低い高さから排出される汚染物質の予測に、この手法を用いるのは適切ではないが、大気汚染の環境影響評価ではこのモデルが用いられているのが現状である。その理由として、実在都市を対象とした風洞実験や CFD 解析結果を、屋外拡散実測結果との比較により検証した例が少ないことがあげられる。また CFD 解析の中でも特に LES (Large Eddy Simulation) による流れ場・拡散場の予測は研究面において数多く実施されているが、精度検証や適切な解析条件の整理は不十分であり、実務への応用を目的とした検討があまり進んでいないのが現状である。

## 2. 研究の方法

前節で述べたような問題に対応するために、本研究では都市域を対象とした風洞実験並びに LES 解析を行い、それらの予測精度を明らかにすることを目的とした。そこで、本年度は LES 解析による予測精度の検証を目的とした。LES 解析結果は、格子解像度や流入変動風、対流項の離散化スキームなどのパラメータに大きく依存する。また、予測対象により渦のスケールも異なるため、要求される渦のスケールなど異なるため、解析条件の選定はかなり重要になると考えられる。そこで立方体ブロックを整形に並べた理想的な流れ場を対象に、流入変動風、吹走距離、格子解像度が解析結果に及ぼす影響を調査した。

## 3. 研究成果

### 3.1 風洞実験概要

風洞実験は、東京工芸大学の乱流境界層風洞（幅：1,200mm×高さ：1,000mm）を用いて実施した。図 1 に示すように、風洞内に都市街区モデルとして、一辺 60mm の立方体ブロックを流入気流測定位置より 4D（ブロック高さ D=60mm）後方から 9 行×9 列（計 81 個）の等間隔（幅：60mm）で配置し、流れ場や拡散場の測定を行った。トレーサーガス排出口は、風上側の立方体ブロックから 2 列目の後方の道路中央床面 30mm の位置とした。この場所に、正方形の排出口（一辺 6mm）を設け、濃度 100% エチレン ( $C_2H_4$ ) を 216cc/min（排出速度 0.1m/s）で排出した。実験気流は、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説 2015」における地表面粗度区分 IV 相当の乱流境界層を再現した。風速測定には Split-Film-Probe（ダンテック社製 55R55）を、濃度測定には高速炭化水素測定器（松見科学計測社製 THC）を用いた。図 2 に測定点の概要を示す。測定点は、街区内の上昇流や下降流が生じる場所や道路上など様々な流れが含まれるように設定した。サンプリング周波数と時間は、風速測定においては 1000Hz で 60 秒間、濃度測定においては 1000Hz で 120 秒間である。次項以降に示す風速は基準高さ  $H=200\text{mm}$

の位置での基準風速  $U_H$  [m/s]、濃度は式(1)に示す基準濃度  $Co$  で無次元化している。

$$Co = \frac{q}{U_H H^2} \quad (1)$$

ここで、 $q$ : トレーサーガス排出量 [m<sup>3</sup>/s]

本風洞実験では、濃度分布に対象性が確保できなかったため、次項以降に示す風速と濃度の測定値は、 $Y/H=0$  (図 2) で折り返して、重なる部分を平均化している。

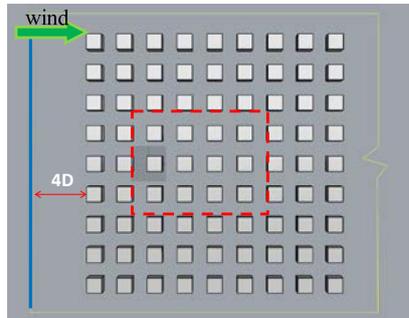


図 1 都市街区モデル

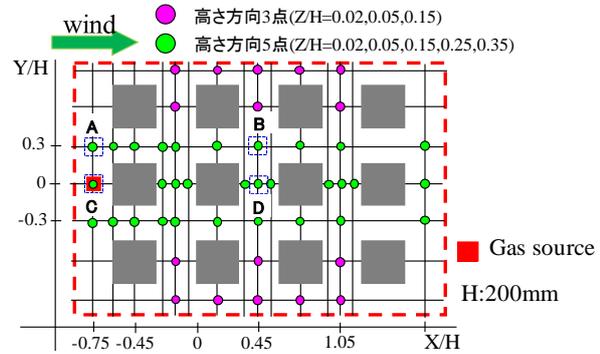


図 2 測定点図

### 3.2 LES 解析概要

LES を用いて、都市街区モデル内の風速、濃度を計算した。表 1 に計算条件を示す。解析領域の幅 (Y 方向) および高さ (Z 方向) は実験を実施した風洞に合わせている。SGS モデルは、WALE モデルを用いており、離散化スキームには小野らが有限体積法を用いた LES で検討した例を参考とし、対流項に Filtered-Linear を設定した。圧力解法は PIMPLE 法を用いた。流入境界条件には、片岡らの手法を用いて作成した流入変動風 (以後、準周期型) と、風洞を再現して作成された流入変動風 (以後、風洞再現型) の 2 種類を用いた。図 3 に流入変動風の鉛直分布を示す。風洞再現型の平均成分と乱れの強さは風洞実験とよく対応している。一方、準周期型による平均風速は実験気流と概ね対応しているものの、乱れの強さは実験気流より小さな値となった。流入境界の位置は風洞実験における実験気流を測定した位置に対応させ、流入境界の位置から立方体ブロックまでの吹走距離を風洞実験に合わせて  $4D$  とした。ガス排出口の形状は実験に合わせ、一辺が  $6\text{mm}$  の正方形で再現した。実験でのガス排出量を排出口の面積で除して求めた排出速度を、LES におけるガス排出口の境界条件として与えた。計算格子はブロック 1 辺あたり 20 分割 (図 4 (a)) としており、総格子数は約 200 万程度である。ただし、測定点のない計算領域の側方および下流側では格子解像度を粗く設定した。また、ガス排出口は図 4 (b) に示すように 4 分割とした。

表 1 LES 計算条件

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Simulation Coad       | OpenFOAM  |
| Analysis Domain       | 31D(X)×20D(Y)×17D(Z)                                    |
| Discretization Scheme | Filtered-Linear   |
| Pressure Solution     | Pimple method   |
| Boundary Condition    |   |
| Inlet                 | Quasi-periodic type or<br>Reproduction wind-tunnel type |
| Top and Side          | Free slip   |
| Ground, Block         | Wall function (Spalding's Law)                          |

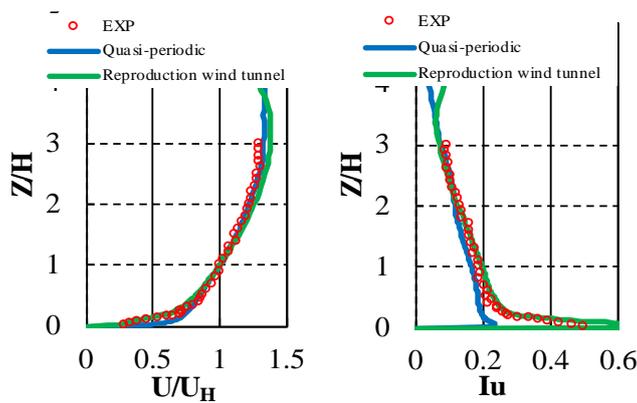
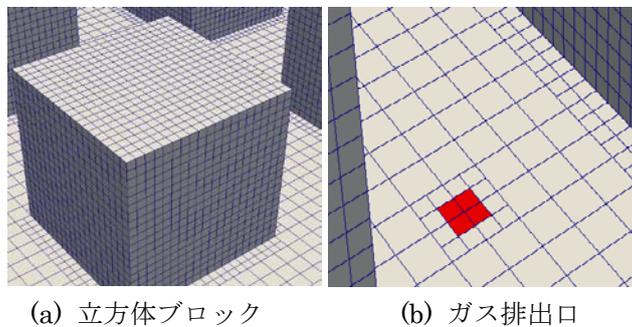


図 3 流入風と実験気流の比較



(a) 立方体ブロック

(b) ガス排出口

図 4 解析格子

### 3.3 流れ場の比較

#### 3.3.1 基準ケースの検討

解析ケースを表 2 に示す。Case1 (図 5(a)) を基準ケースとし、まずその予測精度を示す。図 6 に  $Y/H=0.3$  と  $Y/H=0$  のライン上の測定点における風洞実験による平均風速、風速変動の標準偏差の鉛直分布を示す。ブロック背面 ( $Y/H=0$  のライン) における平均風速および風速変動の標準偏差は LES と風洞実験で概ね一致している。一方で、主流の抜ける道路上 ( $Y/H=0.3$  のライン) における平均風速は、風洞実験に比べて LES の方が高い値を示している。特に風上でその差異が大きくなる傾向にある。また、風速変動の標準偏差も同様の傾向が見受けられる。

表 2 解析ケース

| Case name | Inflow Boundary Condition     | Fetch                  | Simulation grid |
|-----------|-------------------------------|------------------------|-----------------|
| Case1     | Quasi-periodic type           | 4D                     | 1,870,385       |
| Case2     | Quasi-periodic type           | 8D                     | 2,088,385       |
| Case3     | Quasi-periodic type           | 8D                     | 4,202,357       |
| Case4     | Quasi-periodic type           | 8D with small rashness | 6,005,251       |
| Case5     | Reproduction wind-tunnel type | 4D                     | 3,536,357       |

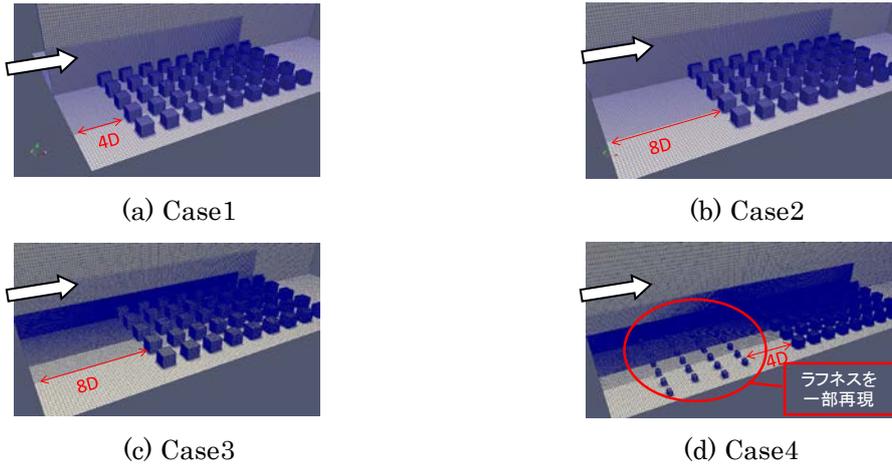


図 5 解析格子と解析領域

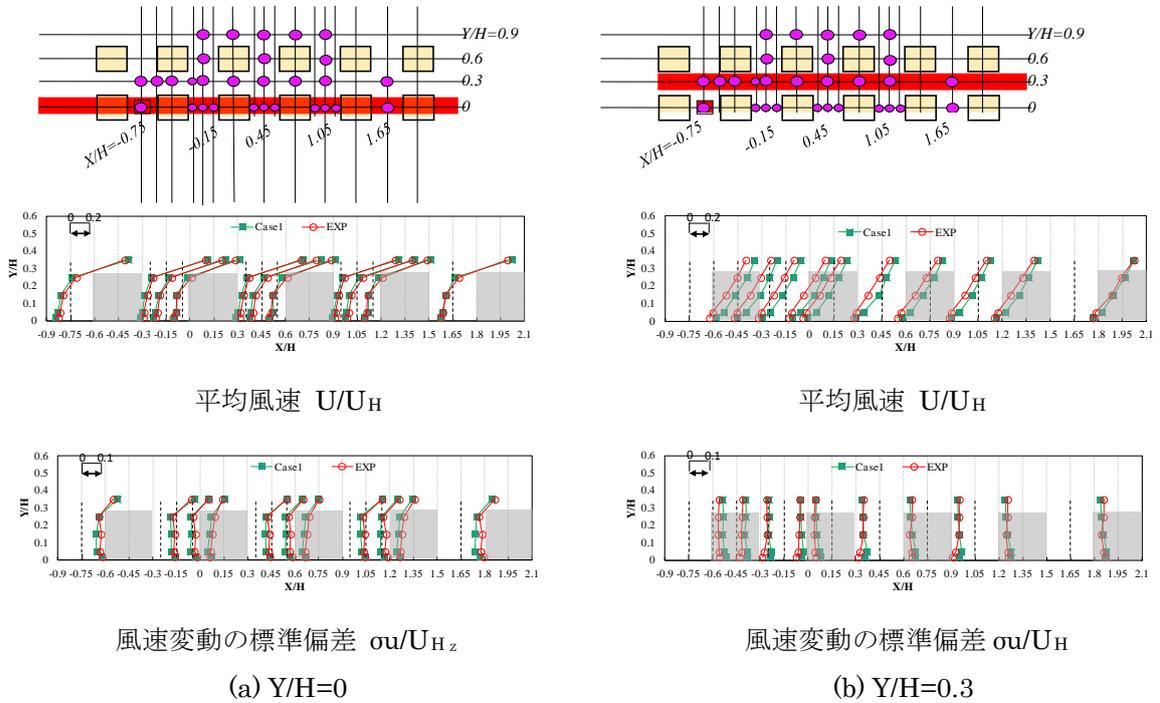


図 6 基準ケースにおける風洞実験と LES 解析の比較

### 3.3.2 検討ケース

Case1で道路上 ( $Y/H=0.3$  のライン) の平均風速が高くなる理由として、流入境界からブロックまでの吹走距離、格子解像度の不足、流入変動風の乱れの不足などが挙げられる。そこで、表2に示すCase2~Case5により、上記の原因に対する検討を実施した。また図5にはケース毎の計算格子および計算領域を示す。Case2では、図5(b)に示すように流入境界からブロック間の吹走距離の影響を確認するため、流入境界からブロックまでの距離を $8D$ とした。Case3は図5(c)に示すように格子依存性を検討すべく、Case2の主要な部分の空間解像度を2倍細かく設定した。Case4では、図5(d)に示すように、下層部の乱れを増幅させるため風洞実験で用いているラフネス(幅、高さ:3mm)を4列再現し検討を行った。なお、ラフネスからブロックまで吹走距離は風洞実験に合わせて $4D$ としている。Case5は、流入変動風の作成方法による計算結果への影響を検討するため、風洞再現型を用いて準周期型との比較を行った。計算領域はCase1と同様としているが計算格子はCase3と同じように主要な部分の空間解像度を2倍細かくして計算している。また、流れ場の検証では、代表的な測定点として図2中の道路上のPoint A, Bに着目して風洞実験結果との比較を行う。

### 3.3.3 吹走距離が予測結果におよび影響

図7(a)と(b)に街区内の水平断面 ( $Z/H=0.15$ ) におけるCase1とCase2の風圧係数  $C_p$  のコンター図を示す。Case1では、流入面付近の風圧係数  $C_p$  が0.4程度を示しており、ブロック前面の高圧部分が流入面にまで達していることが分かる。そのため、流入風が押し出さるようにして道路上に流れ込む可能性が考えられる。一方、Case2では吹走距離が伸びた影響で、風圧係数  $C_p$  は0.1程度まで下がっている。図8にPoint A, BにおけるCase1とCase2による平均風速と風速変動の標準偏差の鉛直分布を示す。吹走距離を伸ばしたCase2は、Case1と比べてほとんど変化が見られなかった。しかし、風圧係数には2割程度の変化があるため、風圧力など圧力を対象とする場合には注意する必要があると考えられる。

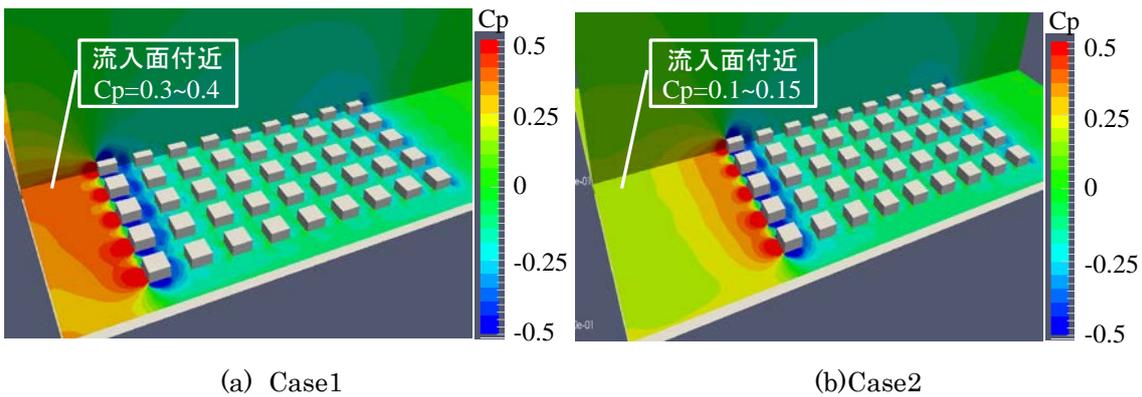


図7 風圧係数のコンター図

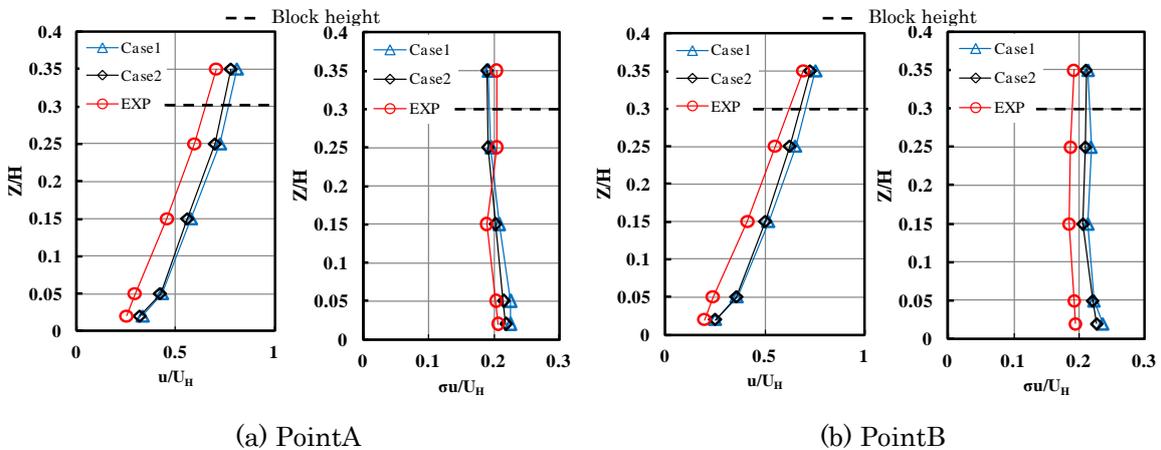


図8 吹走距離が解析結果に及ぼす影響  
(左: 平均風速  $U/U_H$ 、右: 標準偏差  $\sigma u/U_H$ )

### 3.3.4 格子解像度が予測結果に及ぼす影響

吹走距離の影響のほかに格子解像度の不足によって、剥離の性状などが正しく再現されていない可能性が要因の一つとして考えられたため、格子解像度の依存性に対する検討を行った。図9に Case2 と Case3 の平均風速と標準偏差の鉛直分布比較を示す。格子解像度を高めた Case3 と格子解像度が低い Case2 には差異はほとんどなく、格子依存性は見られなかった。

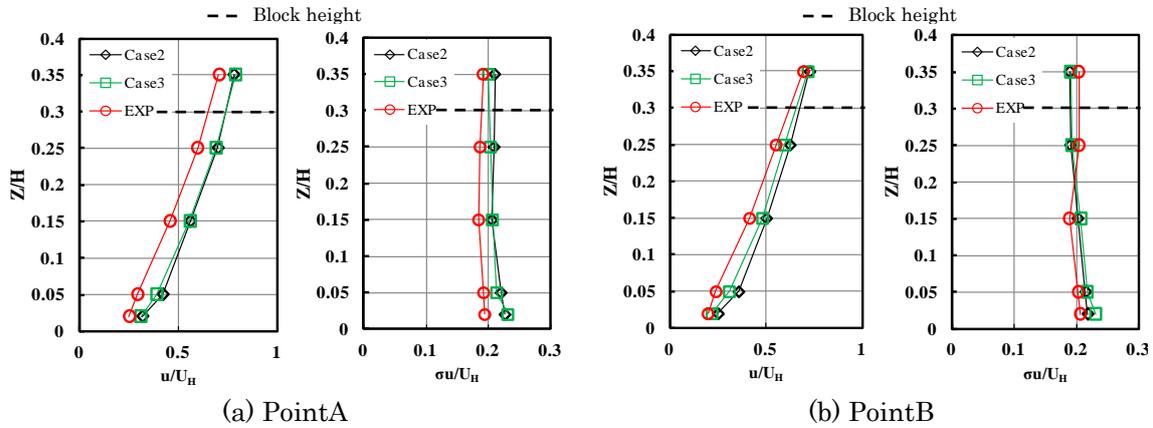


図9 格子解像度が計算結果に及ぼす影響  
(左：平均風速  $U/U_H$ 、右：標準偏差  $\sigma u/U_H$ )

### 3.3.5 乱れが計算結果に及ぼす影響

準周期型の流入変動風は、乱れの強さが風洞に比べて1割から2割程度低く(図3)、特に下層部での差異が大きいため、流れ場や拡散場への影響が懸念される。そこで Case4 では、風洞実験で実験気流を作成するために用いているラフネスブロックを LES 上でも一部再現し、流入風にラフネスブロック上を吹走させることで強制的に下層部の乱れを増幅させた。また Case5 では、風洞実験気流に最も近いと考えられる風洞再現型の流入変動風で計算を実施し、乱れが計算結果に及ぼす影響を検討した。

まず乱れの強さの変化を確認するために、図10に示すようなラフネスブロックのみ計算を LES で実施した。図10中の流入境界面を Point.1、ラフネスブロック上を通過した後を Point.2 とし、それぞれ鉛直方向にデータを取得した。なお、Point.2 は風洞実験で流入風を測定した位置と対応させている。図11に平均風速と乱れの強さの鉛直分布を示す。平均風速分布は Point.1 と Point.2 で大きな差異はないが、乱れの強さは下層部で Point.2 のほうが大きくなっており、風洞実験結果に近づいている。図12に示す Case1 と Case4 の平均風速と風速変動の標準偏差の鉛直分布を比較すると、ラフネスブロックを置いて下層部の乱れを増加させた Case4 は、Case1 に比べて風洞実験にかなり近づいていることが分かる。また流入境界条件として準周期型を与えた Case1 と、風洞再現型を与えた Case5 の平均風速と風速変動の標準偏差を図13に示す。準周期型を用いた Case1 に比べて、風洞再現型の Case5 の方が、風洞実験に近い値を示している。このことから乱れの成分は、計算結果に与える影響が大きいことがわかる。

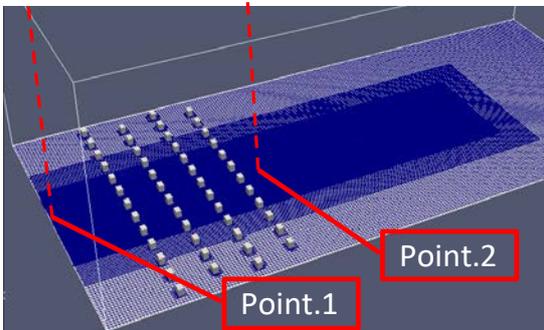


図10 鉛直分布の測定場所

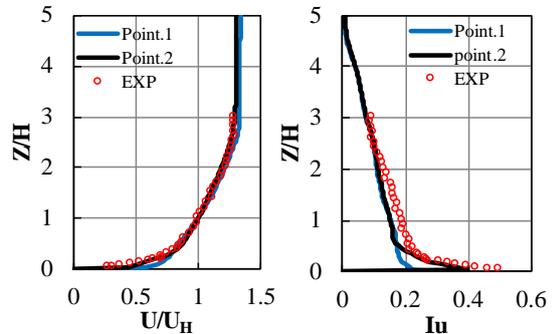
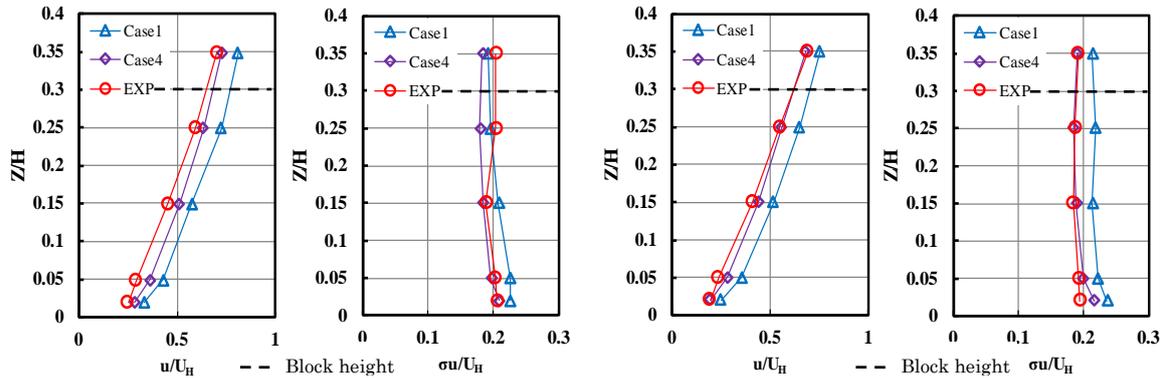
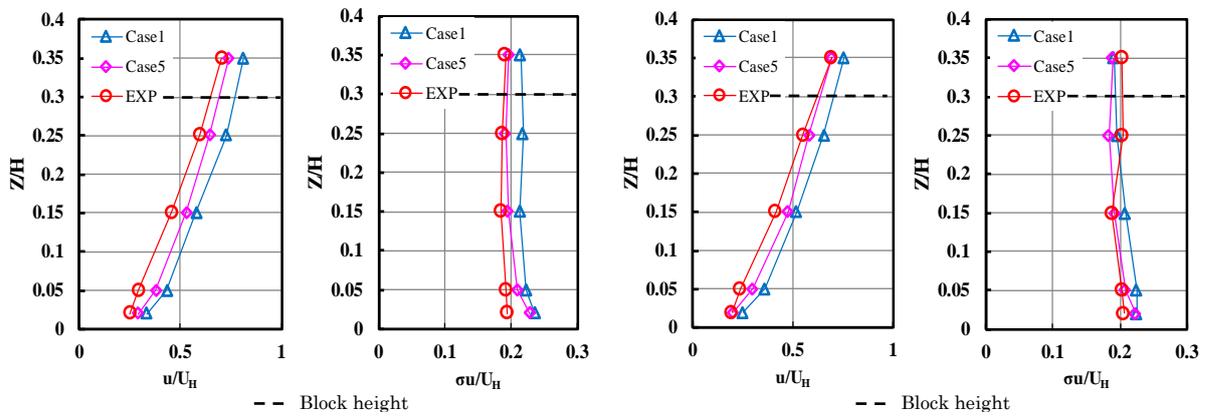


図11 鉛直分布の比較



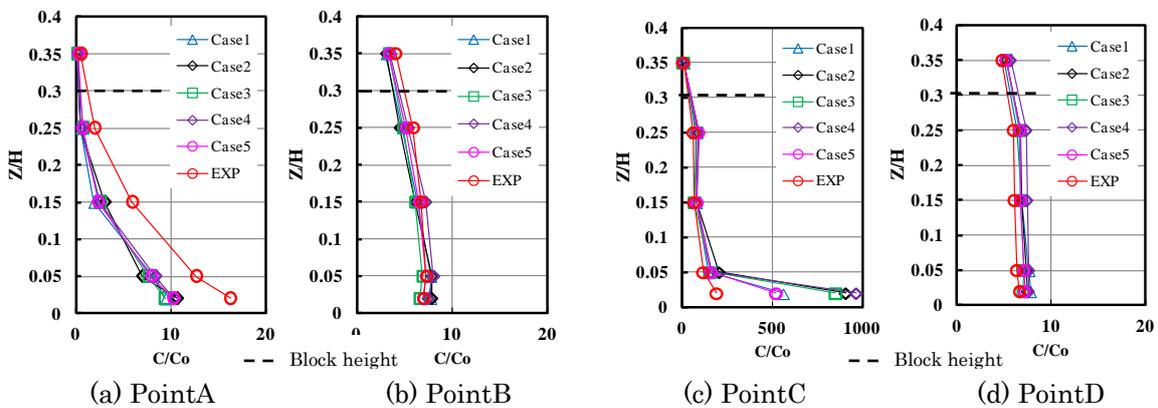
(a) PointA (b) PointB  
 図 12 ラフネスブロックによる乱れが計算結果に及ぼす影響  
 (左：平均風速  $U/U_H$ 、右：標準偏差  $\sigma u/U_H$ )



(a) PointA (b) PointB  
 図 13 流入変動風の作成方法が計算結果に及ぼす影響  
 (左：平均風速  $U/U_H$ 、右：標準偏差  $\sigma u/U_H$ )

### 3.4 拡散場の比較

拡散場については、図中の道路上の Point A, B のほかに、模型背面の Point C, D にも着目して比較を行った。図 14 に Point A, B, C, D における平均濃度の鉛直分布を示す。平均濃度は(1)式で無次元化している。各ケースによる模型背面における平均濃度は排出口直上である Point C を除き風洞実験とよく一致している。道路上では、前節までに見た流れ場に比べて、各ケースの傾向は明確ではなく、ケース間にほとんど差異がない。今回の検討では、全てのケースでガス排出口の格子解像度を 4 分割して計算を実施した。ガス排出の性状を正しくとらえるには、排出口近傍と排出口の格子解像度の高解像度化など更なる検討が必要であると考えられる。



(a) PointA (b) PointB (c) PointC (d) PointD  
 図 14 無次元濃度の比較

#### 4. 主な発表論文

(研究代表者、研究分担者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

なし

〔学会発表〕(計 4件)

1. 立花卓巳、義江龍一郎、岸田岳士、宮下康一、佐々木亮治：LESによる都市街区内の流れ場および拡散場の予測，流体力学シンポジウム，2017
2. 立花卓巳、義江龍一郎、宮下康一、佐々木亮治：拡散風洞実験による相似則の確認模型縮尺率が無次元濃度に及ぼす影響，日本風工学会年次大会，2017
3. 立花卓巳、宮下康一、岸田岳士、義江龍一郎、佐々木亮治：都市域における汚染物質拡散を対象とした風洞実験とLES解析の比較検討，日本建築学会学術講演梗概集，2017
4. 佐々木亮治、宮下康一、岸田岳士、義江龍一郎：厚木地域を対象とした広域の野外拡散実測，日本建築学会学術講演梗概集，2017

〔図書〕(計 0件)

なし

〔その他，産業財産権，ホームページ等〕

なし

#### 5. 研究組織

##### (1)研究代表者

宮下康一 株式会社風工学研究所 所長

##### (2)研究分担者

1. 福留伸高 東京工芸大学 助教
2. 野田博 近畿大学 教授
3. 白澤多一 大妻女子大学 准教授
4. 下瀬健一 防災科学研究所 観測・予測研究領域
5. 萩島真治 株式会社東芝
6. 中山悟 株式会社東芝
7. 岸田岳士 電力中央研究所
8. 勝村章 株式会社風工学研究所
9. 猿川明 株式会社風工学研究所
10. 佐々木亮治 株式会社風工学研究所
11. 赤星明紀 株式会社風工学研究所
12. 立花卓巳 株式会社風工学研究所

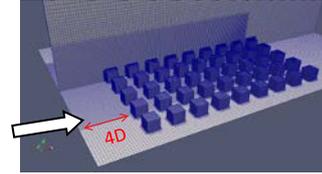
6. 要約 (Abstract)

研究課題名 都市域内を対象とした流れ場および汚染物質拡散予測に関する研究  
 研究代表者名 宮下康一 (株式会社風工学研究所)  
 要約 (700 文字以内) ・ 図

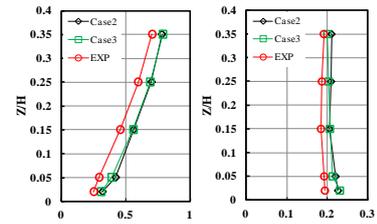
本研究では、都市域を対象とした風洞実験並びに LES 解析を行い、それらの予測精度を明らかにすることを目的としている。本年度は LES 解析による予測精度の検証を目的として、単純な整列配置の街区モデルを対象に LES 解析を実施し、風洞実験結果との比較を行った。

流れ場の検討においては、まず基準となるケースのブロック背面 ( $Y/H=0$ ) の平均風速および風速変動の標準偏差が、風洞実験と概ね一致することを確認した。一方、道路上 ( $Y/H=0.3$ ) の平均風速および風速変動の標準偏差は、風洞実験に比べて LES の方が大きい値を示した。特に風上でその差異が大きくなる傾向であった。その原因として、流入境界からブロックまでの吹走距離、格子解像度、流入変動風の作成方法などの影響が考えられたため、それらを対象とした検討を行った。その結果、吹走距離と格子解像度による影響は、ほとんど見られなかった。しかしながら、流入変動風の作成方法による乱れの大きさは計算結果に与える影響が大きく、準周期型による乱れの大きさが風洞実験に比べて小さいために、上記のような差異が生まれたと考えられる。乱れの成分を増加させるために、LES 解析上で風洞実験の気流の作成に用いるラフネスを再現したケースと風洞再現型を用いたケースが風洞実験とよく合う結果となった。

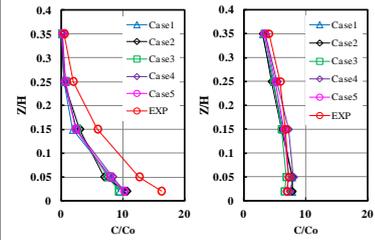
また拡散場においては、流れ場に比べて各ケースの傾向は明確ではなく、排出口直上を除いてどのケースでもほぼ同じ値を示した。今回の検討では、全てのケースでガス排出口の格子解像度を 4 分割して計算を実施した。ガス排出の性状を正しくとらえるには、排出口近傍と排出口の格子解像度の高解像度化など更なる検討が必要であると考えられる。



解析モデル例



流れ場の解析結果例



拡散場の解析結果例