

平成 30 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 30 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：佐々木 亮治
交付決定額（当該年度）： 0 円

1. 研究の目的

都市域において拡散物質の予測は、環境保全あるいは危険物質の拡散予測など様々な実務の場面で用いられつつある。しかしながら、拡散物質の予測は検証の方法が難しく、まだ十分な検証データが得られている状況にはなく、風洞実験や数値流体解析での応用が期待されているものの、普及していない状況が実情と考えられる。

例えば、環境アセスメントでは、大小様々な規模の建物が数多く存在し、逆流など風が単純に流下しないような複雑な流れ場においても、汚染物質の濃度の推定においては実際の風況にそぐわないプルームモデルが使われているが、行政もそれを容認している。

野外観測について拡散予測と風況予測の検証を比較すると、風況の検証では風速計を固定点に設置し、想定する状況の流れを受動的に待ち続け測定することになる。一方、拡散予測の検証においては、拡散物質を気流中に放出して、その濃度を計測する必要がある。そのためには能動的に計測を行わなければならない、拡散物質を放出中の風況が、ある程度想定している状況と近い必要があり、質の高い計測を行うことは経済的にも条件の上でも容易ではない。都市域における屋外拡散実験結果と風洞実験結果あるいは数値流体解析結果を比較した例としては、大場ら、北林、Schatzmann、道岡らの研究が挙げられるものの数は多くない。

2. 研究の方法

本研究では、今までに、無毒性、無臭の拡散物質である PMCH を用いて、平成 25 年度に比較的狭い領域（東京工芸大学周辺）を対象とした野外拡散実験、平成 26 年度に広域の領域（厚木市街）を対象とした野外拡散実験を実施してきた。比較的狭い領域を対象とした野外拡散実験では、上空風を超音波風速計により測定し、地上付近に比較的高密度に超音波風速計を配した観測を行った。一方、広域の野外拡散実験においては、上空風は超音波風速計とドップラーライダを用いて境界条件となる風速の鉛直分布を測定し、地上では広範囲に超音波風速計を配した観測を行った。平成 29 年度までに、これらの野外拡散実験を対象とした風洞実験あるいは数値流体解析を実施し、風洞実験および数値流体解析の精度検証を行ってきた。

平成 30 年度は、LES の流入境界条件となる変動風の生成方法について主に検討してきた。障害物のない境界層流れと、立方体ブロックを整形に並べた都市街区モデルを対象にした流れ場および拡散場の風洞実験結果との比較を通して、3 種類の流入変動風の特徴を調査した。

3. 研究成果

3. 1 流入変動風

本研究では、流入変動風として表 1 に示す 3 種類を用いた。

風洞再現型は、風洞実験で用いるスパイヤ等の障害物を含む助走部を再現し、LES 解析により作成された³⁾。解析条件を表 2 に示す。SGS モデルには WALE、対流項の離散化手法は filteredLinear (2 次精度中心差分+風上差分) を使用した。総格子数は約 1,150 万である。

準周期型はドライバー領域（主流方向×主流直交方向×鉛直方向= 1.0m×1.2m×1.0m）を設

表 1 流入変動風

風洞再現型	風洞のラフネス等を再現した LES 解析値
準周期型	片岡ら ¹⁾ の手法で作成
乱数発生型	野田ら ²⁾ の手法で作成

表 2 解析条件

SGS モデル	WALE モデル
流入境界条件	表 1 に示す変動風
上面、側面境界条件	Slip 条件
床面、壁面境界条件	Spalding 則
対流項の離散化手法	FilteredLinear

け、片岡ら¹⁾の手法を用いて生成した。SGS モデルは標準 Smagorinsky, 対流項の離散化手法に limitedLinear (2 次精度中心差分) を使用した。総格子数は約 40 万である。

乱数発生型では、各発生点のパワースペクトル密度とクロススペクトル密度を用いて流入変動風を生成した²⁾。パワースペクトル密度は、目標とする実験気流をカルマン型のパワースペクトル密度で近似して設定した。また、各発生点間のクロススペクトル密度は、ルートコヒーレンスをダベンポート型で近似した。

3. 2 障害物のない流れ場

3. 2. 1 流入変動風の特徴

図 1 に示すラフネスブロック後流のターンテーブル上の流れ場を解析対象とした。実験気流は、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説 2015」⁴⁾における地表面粗度区分Ⅳを目標として東京工芸大学の乱流境界層風洞で再現されたものである。

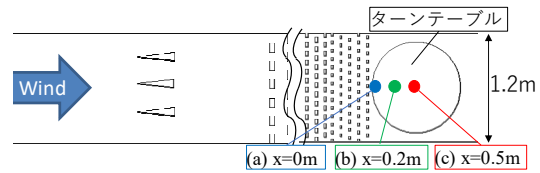


図 1 測定点図

本解析における解析領域の幅 ($Y=1.2\text{m}$)

と高さ ($Z=1.0\text{m}$) は風洞の測定断面に合わせた。風洞実験と LES 解析の比較は、図 1 に示す (a) $x=0\text{m}$ (流入境界面), (b) $x=0.2\text{m}$, (c) $x=0.5\text{m}$ の 3 地点で行った。図 2 には、上から順に地点 (a), (b), (c) における乱流統計量の鉛直分布を示す。また、左から主流方向の平均風速 U/U_{5H} , 主流方向の標準偏差 σ_u/U_{5H} , 主流直交方向の標準偏差 σ_v/U_{5H} , 鉛直方向の標準偏差 σ_w/U_{5H} , シアストレス $(u'w')/U_{5H}$ の順で乱流統計量を示している。基準高さ H は次節で示すブロック高さ (0.06m) とし、基準風速 U_{5H} は高さ $5H$ での平均風速とした (風洞再現型: 5.32m/s, 準周期型: 4.64m/s, 乱数発生型: 4.91 m/s)。なお、平均風速は、両対数軸で表示している。

流入境界面である地点 (a) に着目すると、平均風速 (a-1) は、 $Z/H=1\sim 10$ の範囲で、どの流入風も風洞実験と一致していることが分かる。 $Z/H=1$ 以下の下層部で風洞実験の値が両対数軸上から外れて低くなっている理由は、上流側のラフネスブロック ($Z/H=0.5$) の影響である。風洞再現型はその傾向を捉えているが、風洞実験と比べて値が低い。一方で、準周期型と乱数発生型は風洞実験を指数分布で近似したものであるため、下層部で風洞実験と比べて値が大きくなっている。特に、準周期型は風洞実験との差異が大きい。

風速変動の標準偏差 (a-2~a-4) およびシアストレス (a-5) を見ると、風洞再現型は風洞実験とよく対応していることが分かる。なお準周期型は、風洞実験と比べて低い値となった。一方で、乱数発生型について見ると、主流方向と主流直交方向の標準偏差 (a-2, a-3) は、床面近傍を除いて風洞実験と対応している。床面近傍で風洞実験と差異がある理由としては、流入風作成時に風洞実験の特徴 (ラフネスブロックの影響) が反映されていないことが考えられる。また、鉛直方向の標準偏差 (a-4) は風洞実験と比べて小さく、シアストレス (a-5) も風洞実験に比べてかなり低い値となった。

3. 2. 2 異なる流入変動風による気流性状の比較

地点 (b) と (c) における平均風速 (b-1, c-1) を見ると、3 種類の流入変動風は、 $Z/H=1\sim 10$ の範囲で風洞実験とよく対応している。ただし、 $Z/H=1$ 以下では、風洞再現型と乱数発生型は風洞実験に比べて値が少し低い。

風速変動の標準偏差 (b-2~b-4, c-2~c-4) を見ると、風洞再現型は風洞実験とよく対応している。準周期型は、風洞実験より低い値を示しているが、下流に向かうにつれて乱れが増加している。準周期型の変動風の生成と本解析とは格子解像度が異なっていることから、本計算部の流入境界面に補間された値が入るため、流入境界面で乱れが減衰している。一方、本解析領域の格子解像度は変動風の生成に用いた解析格子より密であるため、流入変動風よりも小さな渦のスケールの変動まで生成される。そのため、下流側で風速変動が大きくなったと考えられる。乱数発生型は、地点 (b) から (c) へと下流に向かうにつれて、風洞実験との差異が見られる。特に、床面近傍で主流方向の標準偏差 (b-2, c-2) は増加する傾向にある。

地点 (b) と (c) におけるシアストレスの鉛直分布 (b-5, c-5) について見ると、風洞再現型は両地点とも風洞実験とよく一致する。準周期型は、(a) で風洞実験より低い値を示していたが、(b), (c) と下流に進むに連れてその差異は小さくなる。乱数発生型も準周期型と同様に、(a) においては風洞実験より小さいが、地点 (b) から (c) へと下流に進むにつれてさらに減衰していく傾向がある。乱数発生型は発生時からシアストレスが小さく、かつ、物理的な渦構造を再現していないため、その影響がシアストレスの減衰に現われたものと考えられる。

3. 3 都市街区モデル内の流れ場

障害物のない流れ場に続き、立方体ブロックを整形に並べた都市街区モデルを対象に、3 種

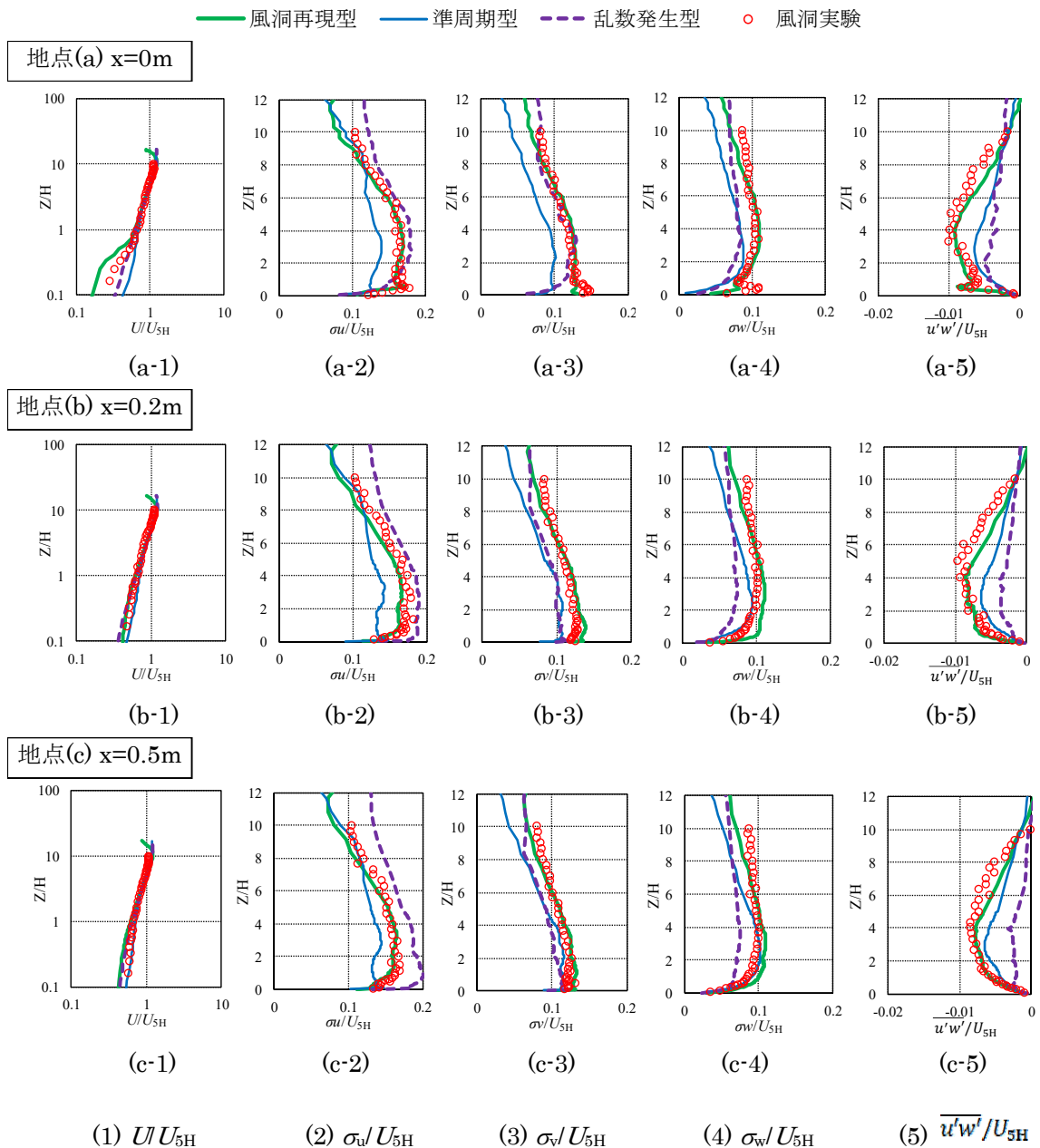


図2 風洞実験と LES 解析結果による乱流統計量の比較

類の流入変動風を用いて LES 解析を実施した。風洞実験結果との比較検討により 3 種類の気流の予測精度の差異を明らかにする。

3. 3. 1 風洞実験概要

図 3 に示すように、風洞内に都市街区モデルとして 1 辺 0.06m の立方体ブロックを、ターンテーブル上端（流入面）より 4H（H=0.06m：ブロック高さ）後方から 9 行×9 列（計 81 個）に等間隔（幅：0.06m）で配置した。測定点を図 4 に示す。風速は、Split-Film-Probe を用いて、各測定点で風速 3 成分を測定した。サンプリング周波数は 1,000 Hz、測定時間は 120 秒間とした。基準高さ H とその高さでの平均風速 U_H から算出したレイノルズ数は、約 1.0×10^4 である。

3. 3. 2 LES 解析概要

図 5 と図 6 に解析領域および解析格子を示す。3. 2 と同様に、風洞の測定断面に合わせている。解析格子はブロック 1 辺あたり 20 分割とし、総格子数は 350 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は、格子解像度を粗く設定した。解析におけるレイ

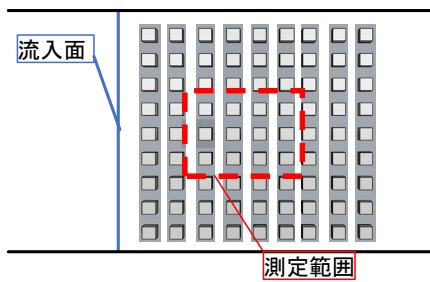


図3 都市街区モデル

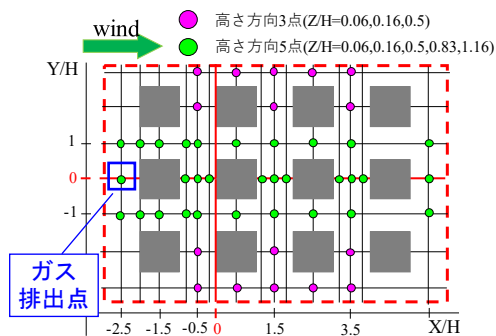


図4 街区内の測定点

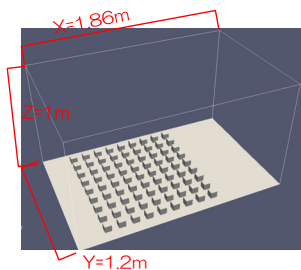


図5 解析領域

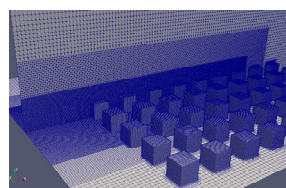


図6 解析格子

ノルズ数は約 1.0×10^4 であり、風洞実験と同程度である。平均化時間は、無次元時間 $T^*(=U_H T/H)$ で約 300 の助走計算した後、約 3,000 とした。

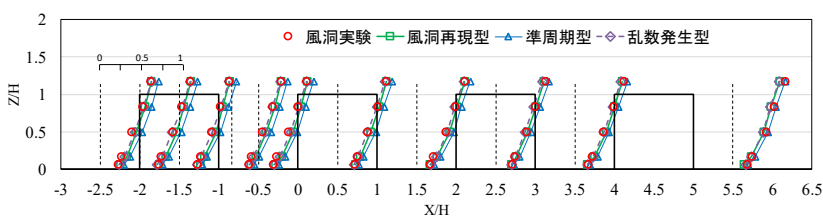
3. 3. 3 風洞実験結果と LES 解析結果の比較

風洞実験結果と LES 解析結果を比較する測定点は、図 4 における $Y/H=-1$ (道路上) と $Y/H=0$ (ブロック背面) とする。なお解析結果は、すべて U_{5H} で無次元化している。

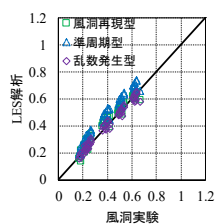
(1) 平均風速の比較

図 7 に $Y/H=-1$ (道路上) における平均風速の鉛直分布、図 8 に風洞実験と LES の平均風速の相関図を示す。また同様の形式で、 $Y/H=0$ (ブロック背面) における結果を図 9 と図 10 に示す。(a)と(b)は、それぞれ主流方向、鉛直方向を示す。

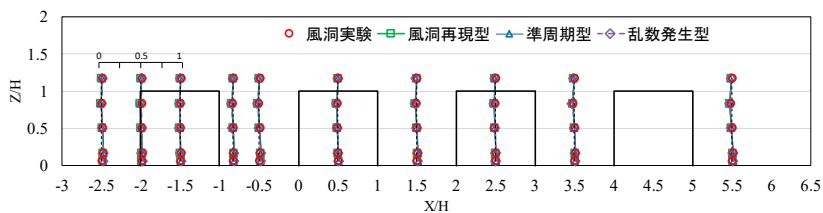
図 7(a)に示す主流方向の平均風速を見ると、風洞再現型と乱数発生型は風洞実験とよく対応している。一方、準周期型は風洞実験と比べて全体的に少し高めの値となっており、図 8(a)に示す相関図からもその傾向が読み取れる。準周期型ではラフネスブロックなどの粗度要素を設



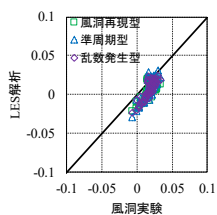
(a) 主流方向の平均風速 U/U_{5H} の比較



(a) 平均風速 U/U_{5H}



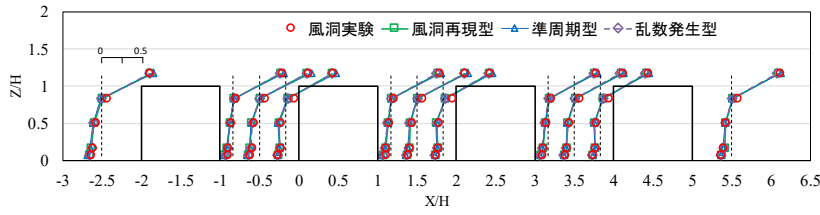
(b) 鉛直方向の平均風速 W/U_{5H} の比較



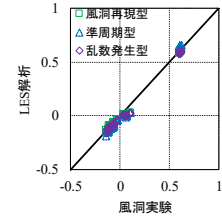
(b) 平均風速 W/U_{5H}

図7 $Y/H=-1$ (道路上) における平均風速の鉛直分布

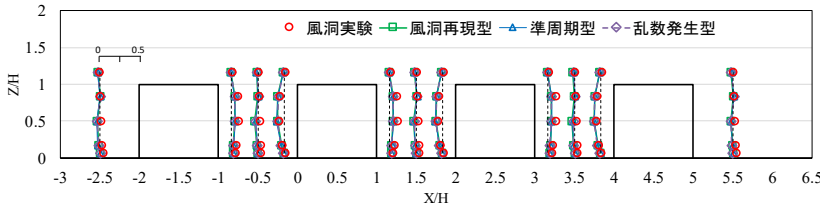
図8 平均風速の相関図



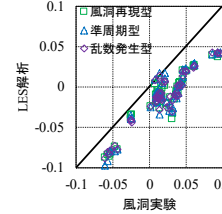
(a) 主流方向の平均風速 U/U_{5H} の比較



(a) 主流方向 U/U_{5H}



(b) 鉛直方向の平均風速 W/U_{5H} の比較



(b) 鉛直方向 W/U_{5H}

図9 Y/H=0 (ブロック背面) における平均風速の鉛直分布

図10 平均風速の相関図

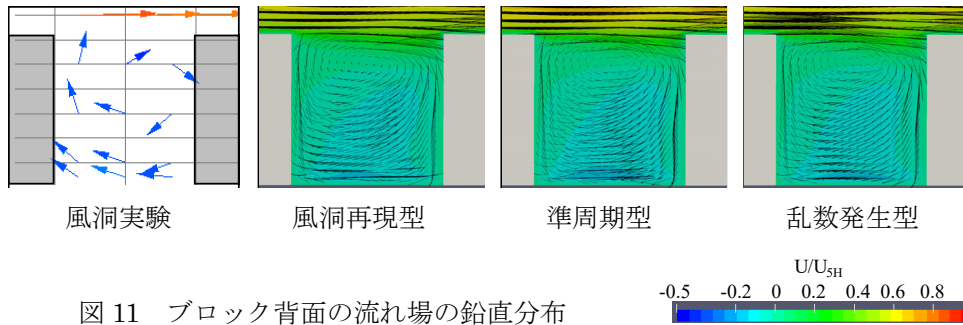


図11 ブロック背面の流れ場の鉛直分布

置せず滑面上で流入変動風を生成しているため、平均風速の値が地表面近傍で風洞実験よりやや大きくなる。そのため、キャニオン内の道路上で平均風速の値が風洞実験より大きくなったと考えられる。

図7(b)に示す Y/H=-1 (道路上) における LES 解析による鉛直方向の平均風速は、風洞実験に比べて若干値が低くなっている。図8(b)からもその傾向が読み取れる。

図9(a)の Y/H=0 (ブロック背面) における平均風速の鉛直分布を見ると、風洞実験と LES 解析はおおむね対応している。ただし、Z/H=0.8 (ブロック頂部付近) では、風上から風下のどの位置においても、LES 解析は風洞実験に比べて小さくなる。

図9(b)における鉛直方向の平均風速を見ると、3種類の LES 解析結果は風洞実験結果に比べて値が小さくなっている。このことは図10(b)に示す相関図からも読み取れる。

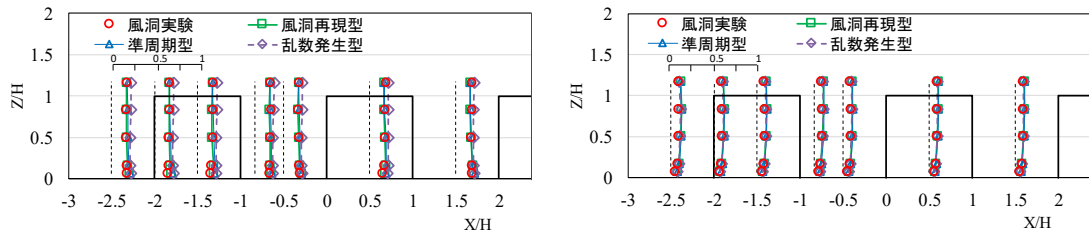
風洞実験と3種類の LES 解析によるブロック背面の流れ場の鉛直断面を図11に示す。ただし、風洞実験結果は熱線流速計を乱流場に置いて測定しているため、Probe 自身が流れ場に影響を及ぼしており、模型背面において LDV で測定された結果⁹⁾に比べて精度が低い。風洞実験では、直接的な循環渦はキャニオン内の風下の中央より少し高い位置に形成されている。一方、LES 解析によるキャニオン内の渦の中心は風洞実験に比べて風上側かつ上方に寄っている。

(2) 風速変動の標準偏差の比較

図12には、Y/H=-1 (道路上) における主流方向および鉛直方向の標準偏差の鉛直分布を示す。図12(a)の主流方向の標準偏差について見ると、風洞再現型と準周期型は風洞実験とよく対応しているが、乱数発生型は風洞実験に比べて全体的に値が大きくなっている。一方、図12(b)の鉛直方向の標準偏差については、3種類の LES 解析は風洞実験とよく対応している。

(3) シアストレスの比較

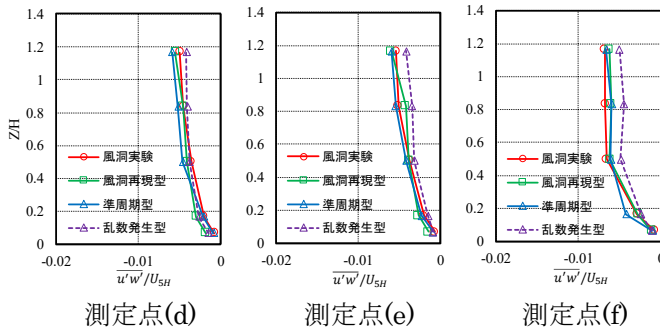
図13には Y/H=1(道路上)における、シアストレスの鉛直分布を示す。比較する測定点は図14に示す下流側の3点である。風洞実験によるシアストレスは測定方法の関係上、逆流のある個所では正しく計測されていない。そのため、風洞実験と LES 解析による結果の比較は、逆流のほとんどない箇所を選定した。



(a) 主流方向の標準偏差 σ_u/U_{5H}

(b) 鉛直方向の標準偏差 σ_w/U_{5H}

図 12 Y/H=-1における変動成分の標準偏差の比較



測定点(d)

測定点(e)

測定点(f)

図 13 シアストレス $\overline{u'w'}/U_{5H}$ の比較

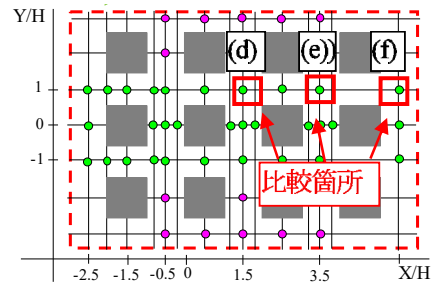


図 14 風洞実験と LES 解析の比較する測定点

3種類の LES 解析と風洞実験にはばらつきがみられる。しかしながら、流入変動風の違いによる明確な傾向は見られない。

3. 4 都市街区モデル内の拡散場

3. 4. 1 風洞実験概要

拡散場の実験も、図 3 と同様な都市街区モデルを対象とし、濃度測定点も図 4 と同じである。トレーサーガスには 100%エチレン (C_2H_4) を使い、図 4 に示す 6mm 角の穴より排出した。ガス排出量はマスフローコントローラーによって制御し、216cc/min (吹出速度 0.1m/s) とした。濃度測定は高速炭化水素計を用い、サンプリング周波数 1000Hz で 2 分間の測定を行った。無次元濃度 C^* は(1)式により求めた。

$$C^* = \frac{C * U_{5H} * (5H)^2}{q} \quad (1)$$

ここで、 C : 各測定点の濃度 [-],
 q : トレーサーガス排出量 [m³/s]
 $5H$: 基準高さ[m] ($H=0.06$ m),
 U_{5H} : 基準高さにおける風速 [m/s]

3. 4. 2 LES 解析概要

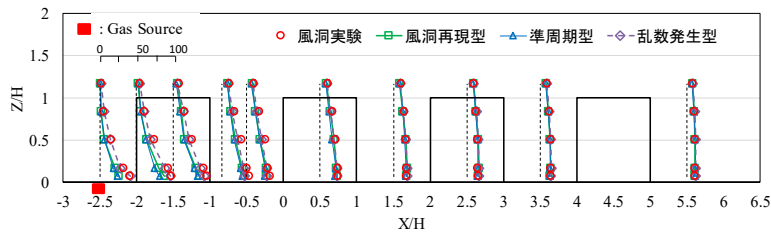
流れ場の解析条件 (解析格子, 境界条件, SGS モデル, 移流項スキーム等) および流入変動風は、流れ場の解析と同様とした。SGS シュミット数を 0.9 とし、濃度輸送方程式の移流項には TVD スキームを用いた。

3. 4. 3 風洞実験と LES 解析の比較

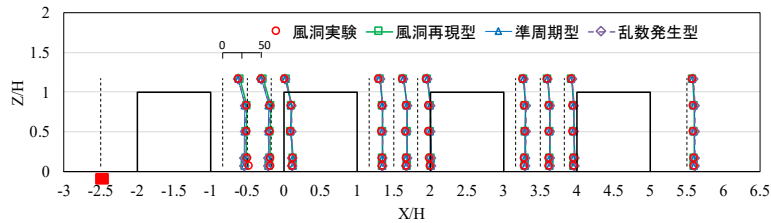
(1) 無次元濃度の時間平均値

道路上およびブロック背面の無次元濃度の時間平均値の鉛直分布を図 15 に、実験結果と解析結果の相関図を図 16 に示す。(a)と(b)は道路上 ($Y/H=1$ と -1 の平均) とブロック背面 ($Y/H=0$) をそれぞれ示す。また図 16 中には、風洞実験と解析結果との相関係数も合わせて示す。ただし、図 16(a)の相関図では、 $X/H=0.5$ 以降の風下側のデータのみをプロットしている。

図 15(a)を見ると、 $X/H=0.5$ 以降の風下側では、風洞実験と 3 種類の LES 解析はよく一致しており、図 16(a)に示す相関図からもその傾向が確認できる。風上側は LES 解析の間で差異が見られるが、これは流入変動風がブロック群に流入して間もないため、流入変動風自体の差異が影響として現れたと考えられる。一方で、図 15(b)および図 16(b)に示すブロック背面 ($Y/H=0$)

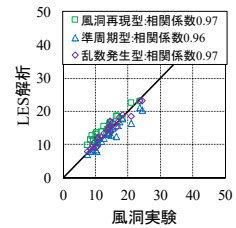


(a) 道路上

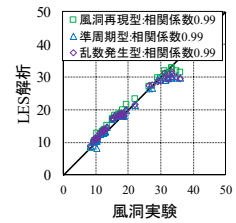


(b) ブロック背面

図 15 無次元濃度の時間平均値の鉛直分布

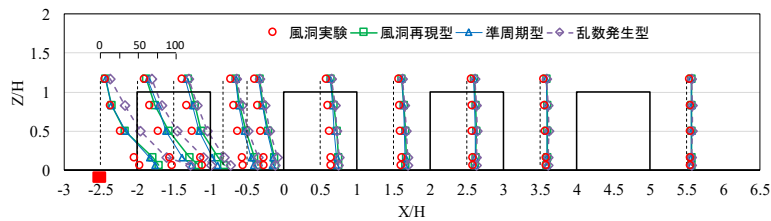


(a) 道路上

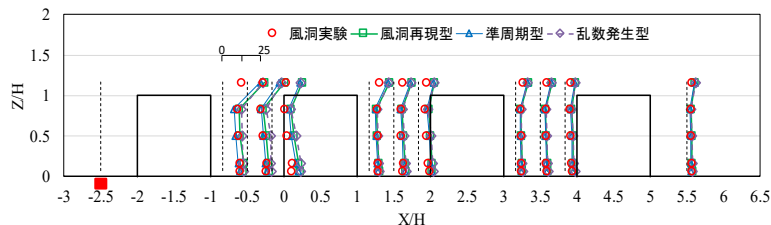


(b) ブロック背面

図 16 無次元濃度の時間平均値の相関図

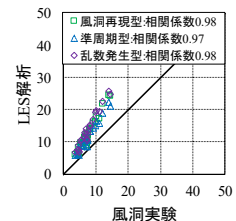


(a) 道路上

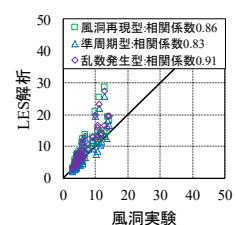


(b) ブロック背面

図 17 無次元濃度の標準偏差の鉛直分布



(a) 道路上



(b) ブロック背面

図 18 無次元濃度の標準偏差の相関図

では、風洞実験と 3 種類の LES 解析はどの地点においてもよく一致している。以上のことから、ブロックで乱された流れ場では、流入変動風の作成方法による影響が少ないと言える。

(2) 無次元濃度の標準偏差の比較

前項と同様の形式で、図 17 および図 18 に無次元濃度の標準偏差の分布と相関図をそれぞれ示す。

図 17 (a)と図 18 (a)の道路上 ($Y/H=1$ と -1 の平均) を見ると、 $X/H=0.5$ 以降の風下側において、風洞実験と LES 解析の相関は高いものの、風洞実験の値が小さい。実験で用いた高速炭化水素計はトレーサーガス燃焼室の体積によって平均化され応答性が低い。このことが風洞実験の濃度変動の標準偏差が小さくなった要因の一つとして考えられる。図 17 (b), 図 18 (b) に示すブロック背面 ($Y/H=0$) では、3 種類の LES 解析が風洞実験よりやや大きめの値となる。また、ブロック頂部付近で風洞実験と LES 解析に大きな差異が見られる。ブロック頂部付近の測定点において、解析結果が風洞実験に比べて大きくなる理由は検討中であるが、LES 解析の時刻歴波形を確認すると、風洞実験に比べて間欠的な高濃度の変動が生じている。

参考文献

- 1) 片岡ら: 流入変動風を用いた三次元角周りの気流解析, 日本建築学会構造系論文集, 523, pp.71-77, 1999.9.
- 2) Noda, H et.al, Turbulent Boundary Layer Generated using Stochastic Method for Inflow Conditions of LES, International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (2018) 10(2), pp.146-148
- 3) 小野ら: LESのための風洞実験を再現した流入変動風の作成とその利用に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.797-798, 2016.
- 4) 日本建築学会, '建築物荷重指針・同解説 2015'
- 5) 上原ら: 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, 492, pp.39-46, 1997.2

4. 主な発表論文等

(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 3 件)

1. 立花卓巳, 野田博, 岸田岳士, 宮下康一, 佐々木亮治, 義江龍一郎: 作成方法の異なる流入変動風を用いた都市街区内の流れ場の再現精度, 第 25 回風工学シンポジウム, 2018, pp.205-210
2. 立花卓巳, 宮下康一, 佐々木亮治, 野田博, 岸田岳士, 義江龍一郎: 流入変動風の違いによる流れ場の予測精度の検証, 日本建築学会学術講演梗概集, 2018, pp.839-840
3. Ryoji Sasaki, Koichi Miyashita, Ryuichiro Yoshie: Field measurement of gas dispersion in the Atsugi area, IN-VENTO 2018, XV Conference of the Italian Association for Wind Engineering, pp.665-678

[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 佐々木 亮治 株式会社風工学研究所

(2)研究分担者

1. 玄 英麗 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 防災科学技術研究所
5. 平野 洪賓 防災科学技術研究所
6. 中山 悟 株式会社東芝インフラシステムズ
7. 岸田 岳士 電力中央研究所
8. 宮下 康一 株式会社風工学研究所
9. 勝村 章 株式会社風工学研究所
10. 赤星 明紀 株式会社風工学研究所
11. 大坪 和広 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 (所属) : 佐々木 亮治 (株式会社風工学研究所)
内容・図

本研究では、障害物のない流れ場と都市街区モデル内を対象とし、異なる流入変動風を用いて流れ場および拡散場を LES 解析し、それぞれ風洞実験結果と比較した。流入変動風としては、風洞再現型、準周期型、乱数発生型の 3 種類を用いた。

障害物のない流れ場では、風洞再現型は全体的に風洞実験との対応が良いことが確認された。準周期型の風速変動の標準偏差は、流入境界面では風洞より小さい値を示したが、下流に向かうにつれて乱れが増加し、風洞実験に近い値を示す傾向が見られた。一方、乱数発生型の風速変動の標準偏差は、下流に向かうにつれて風洞実験との差異が見られるようになった。

都市街区モデル内の流れ場では、主流方向の平均風速は、道路上では風洞再現型と乱数発生型は風洞実験と良く対応していたが、準周期型は風洞実験と比べて全体的に少し高めの値となった。またブロック背面では、風洞実験と LES 解析結果は概ね対応していた。主流方向の標準偏差は、風洞再現型と準周期型は風洞実験によく対応しており、乱数発生型は風洞実験に比べて全体的に大きい値となった。道路上のシアストレスは、風洞実験と LES 解析にばらつきは見られるが、流入変動風の違いによる明確な傾向は見られなかった。

都市街区モデル内の拡散場では、風下側の道路上およびブロック背面では、無次元濃度の時間平均値は風洞実験と LES 解析でよく一致していた。一方、無次元濃度の標準偏差は、風洞実験が LES 解析より小さい値を示したが、実験で用いた高速炭化水素計の応答の低さなどが原因とも考えられる。

作成方法の異なる 3 種類の流入変動風を用いて LES 解析を行い、流れ場および拡散場を風洞実験結果と比較した。流入直後では、風洞実験と LES 解析で差が見られる場合もあるが、都市街区モデルなどの乱れた領域では、大きな差異は見られなかった。

