

# 平成 28 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 28 年度

課題番号：152009

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）：340,000 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ために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、想定している状況に近い必要があり、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、無毒性、無臭の拡散物質である PMCH を用いた比較的狭い領域を対象とした野外拡散実験ならびに広域の領域を対象とした野外拡散実験を既に行っている。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ている。広域の野外拡散実験では、上空風を超音波風速計とドップラーライダーを用い風速の鉛直分布を測定して、検証時の境界条件を与えることが可能となっている。また、地上においては広範囲に超音波風速計を配した観測を行っている。

本研究では、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行い、風洞実験および数値流体解析の精度検証を行う。なお、風洞実験では、3D プリンタで作成した模型を用いる。これにより、風洞実験および数値流体解析の都市域における流れ場および汚染物質濃度予測の精度を明らかにしていく。

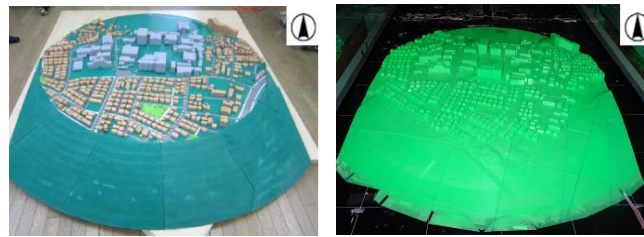
## 3. 研究成果

### 3. 1 模型縮尺率が無次元濃度に及ぼす影響

今までの研究により、模型縮尺率 1/300~1/600 の範囲では、無次元濃度の時間平均値が模型縮尺率にほとんど依存しないことを明らかにしている。そこで、縮尺率の影響をさらに調査するため 1/1000 模型を用いた風洞実験を実施した。また無次元濃度の時間平均値だけでなく、標準偏差および最大瞬間値についても調査した。

東京工芸大学厚木キャンパスを対象に、縮尺率 1/300, 1/600, 1/1000 の模型を作成し実験を行った。ただし、1/300 の模型は建物の屋根勾配や樹木、掲示板等が再現された精巧模型であ

り、1/1000 模型はこれらが再現されていない 3D プリンタで作成した簡易模型である。1/600 模型については、図 1 に示すように精巧模型と簡易模型の両者を作成した。また当該地域には地形の起伏があるため、模型風上にテーパーを設置した。縮尺率 1/300 と 1/600 の精巧模型同士は幾何学的に相似であり、縮尺率 1/600 と 1/1000 の簡易模型同士も幾何学的に相似である。ただし、トレーサーガス排出口の直径は、どの縮尺率の模型でも 6mm とした。



(a) 精巧模型 (b) 簡易模型

図 1 縮尺率 1/600 の風洞実験模型

縮尺率 1/600 と 1/1000 の模型を用いた実験は東京工芸大学の乱流境界層風洞（以下、工芸大）で行った。一方、縮尺率 1/300 の模型を用いた実験は、(株)IHI 技術開発本部の大型温度成層風洞（以下、IHI）で行った。

風洞実験の測定点は、図 2 に示す①～⑮の 15 点とした。測定高さは実高さで 3m に合わせた。なお北側にあるグラウンドは崖の下にあるため、測定点⑭、⑮は他の測定点より 30m 程度低い位置にある。本実験では、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相当の平均風速と乱れの強さの鉛直分布を風洞内に再現した。

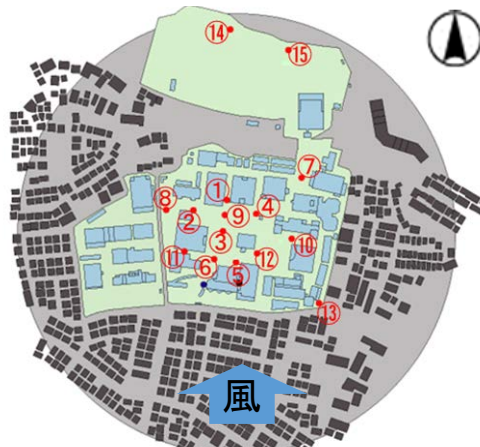


図 2 測定点

濃度の測定には高速炭化水素測定器を用いた。トレーサーガスには 100%エチレン( $C_2H_4$ )を用いた。排出量はマスフローコントローラによって 150 cc/min (吹き出し風速 0.088 m/s) で制御した。また基準風速を 4m/s, サンプル周波数 1000 Hz とし 4 分間の測定を行った。無次元濃度  $C^*$  は式 1 により求めた。以上の実験方法は工芸大と IHI で同一である。

$$C^* = \frac{C \cdot U_{ref} \cdot Z_{ref}^2}{q} \quad (式 1)$$

ここで、 $C$ : 各測定点の濃度 [-],  $q$ : トレーサーガス排出量 [ $m^3/s$ ],  
 $Z_{ref}$ : 基準高さ[m] (41m),  $U_{ref}$ : 基準高さにおける風速 [m/s]

最大瞬間濃度の評価は、工芸大で実施した縮尺率 1/600 と 1/1000 の簡易模型による実験結果について行った。風速、時間、長さスケールに関する模型と実物の相似関係は式 2 のとおりである。

$$\left(\frac{UT}{L}\right)_{\text{模型}} = \left(\frac{UT}{L}\right)_{\text{実物}} \quad (\text{式 2})$$

ここでは、代表風速は模型と実物で同程度 (4m/s) と仮定する。長さの縮率を 1/600, 1/1000 としているため、模型実験での時間スケールは式 2 より、それぞれ実時間の 1/600, 1/1000 となる。最大瞬間濃度を評価する際の平均時間は、実時間で 2 秒と仮定する。実時間 2 秒は、1/600 模型実験の場合は 0.003 秒、1/1000 模型実験の場合は 0.002 秒に相当する。したがって、実験で得られた濃度の時刻歴波形を、それぞれ 0.003 秒、0.002 秒で移動平均した。安定した最大瞬間値を得るために、移動平均により得られた濃度の時刻歴波形を実時間 10 分 (1/600 模型実験では 1.0 秒、1/1000 模型実験では 0.6 秒) で区切り、計 240 個それぞれについて最大瞬間値を求め、それらを平均化した。

図 3 に模型縮尺率が無次元濃度の時間平均値に及ぼす影響を示す。1/600 模型は精巧模型と簡易模型の両方があるが、1/300 の模型は精巧模型のみ、1/1000 模型は簡易模型のみしかないので、図 3(a)では精巧模型同士の縮尺率 1/300 と 1/600 模型、図 3(b)では簡易模型同士の縮尺率 1/600 と 1/1000 模型による実験結果を比較している。同図より、無次元濃度の時間平均値は縮尺率に依存しないことがわかる。

図 3 と同様な形式で、図 4 に無次元濃度の標準偏差に与える影響を示す。同図より、無次元濃度の標準偏差も縮尺率に依存しないことがわかる。

図 5 には、模型縮尺率が無次元濃度の最大瞬間値に及ぼす影響を示す。同図より無次元濃度の最大瞬間値についても模型縮尺率に依存しないことがわかる。

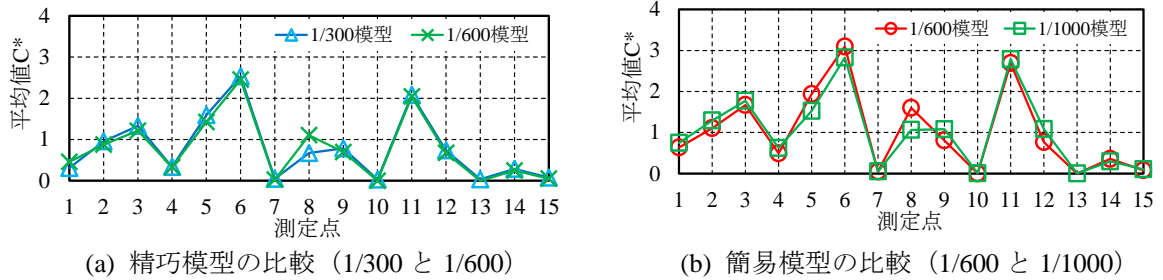


図 3 無次元濃度の時間平均値の比較

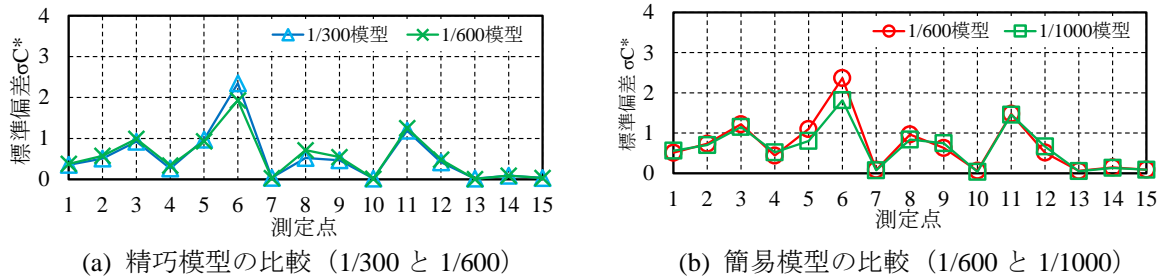


図 4 無次元濃度の標準偏差の比較

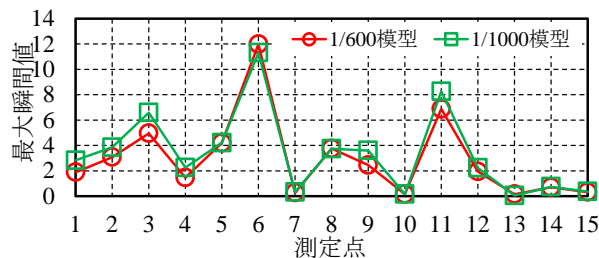


図 5 無次元濃度の最大瞬間値の比較

### 3. 2 風洞実験と LES 解析の比較検討

東京工芸大学厚木キャンパスを対象に、複数の拡散場の検証を行うために風向を変化させた LES 解析を行い、風洞実験との比較検証を行った。

実験模型は縮尺率 1/600 の簡易模型である図 1(b)を用いた。測定点は図 2 と同じで、測定高さは実高さで 3m とした。なお、当該地域には地形の起伏があるため、模型風上にテーバーを設置した。この実験模型およびテーバーは CAD データを基に 3D プリンタで作成した。実験風向は、南 (180 度) とし、実験気流は日本建築学会「建築物荷重指針・同解説 2015」の地表面粗度区分 IV 相当の平均風速と乱れの強さの鉛直分布に合わせた。

風速測定には Split-Film-Probe を用いて、風速の 3 成分 (U 成分: 南北方向, V 成分: 東西方向, W 成分: 鉛直方向) を測定した。サンプリング周波数は 1000Hz とし、測定時間は 3 分間とした。

濃度測定には、高速炭化水素測定器を用いた。トレーサーガスに濃度 100% エチレン ( $C_2H_4$ ) を用い、直径 6mm の排出口から排出した。排出量はマスフローコントローラによって 150cc/min (吹出風速 0.088m/s) で制御した。サンプリング周波数は 1000Hz とし濃度の測定時間は 4 分間とした。無次元濃度は式 1 により求めた。

LES 解析における解析領域の幅 (Y 方向) と高さ (Z 方向) は、実験を行った風洞の大きさに合わせた。また地形や建物のモデル化には、風洞実験模型作成時と同じ CAD データを使用した。表 1 に LES 解析条件を示す。流入面の境界条件として、片岡らの手法を用いて作成した流入変動風を与えた。図 6 に作成した流入風の平均風速、風速変動の標準偏差の鉛直分布を示す。作成した流入風は風洞実験気流をよく再現している。計算格子は非構造格子であるテトラおよびプリズム要素で構成されている。格子解像度は上空から地上に近づくほど小さくなるように設定し、壁近傍では 2 層の境界要素 (プリズム要素) を設けた。トレーサーガス排出源近傍の水平方向最小格子解像度は約 1.7mm (実スケールで約 1m) である。計算格子の総要素数は約 1500 万である。

表 1 LES 解析条件

解析ソルバー	OpenFOAM
SGSモデル	WALEモデル <sup>1)</sup>
流入境界	準周期境界条件による LES計算値
上面、側面境界	Slip条件
流出境界	ノイマン型
壁面・地表面境界	壁関数(Spalding則)
対流項の離散化スキーム	limitedLinear

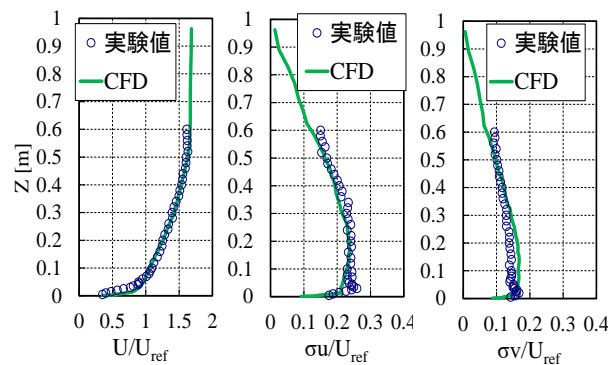


図 6 流入気流の鉛直分布

図 7 と図 8 に、各測定点のスカラー風速の時間平均値と標準偏差を基準風速  $U_{ref}$  で除した風速比として示す。風洞実験と LES 解析による風速の時間平均値および標準偏差は概ね良く一致している。

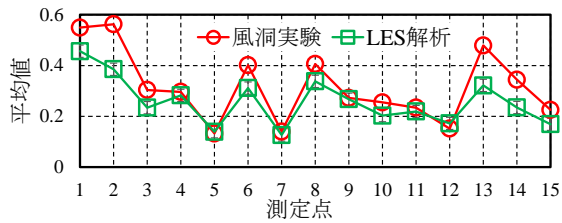


図7 風速の時間平均値の比較

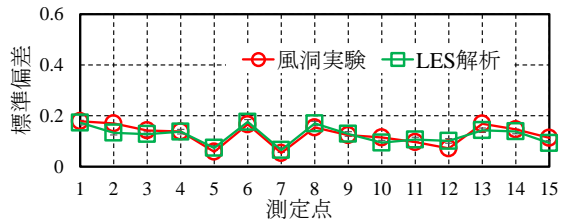


図8 風速変動の標準偏差の比較

図9と図10に、風洞実験とLES解析による無次元濃度の時間平均値と標準偏差を示す。風洞実験の無次元濃度の時間平均値は、LES解析結果に比べて2倍程度高めの値を示している点も見られる。一方で、無次元濃度の標準偏差は、時間平均値に比べて風洞実験とLES解析で良く対応している。これは、風洞実験に比べてLES解析では、高濃度の濃度変動が顕著であるため、標準偏差が大きくなったと考えられる。

風洞実験による無次元濃度の平均値がLES解析に比べて大きくなる要因として、微小な風向角の差異がキャンパス内の濃度に大きな影響を及ぼしている可能性が考えられる。実験風向が180度(南)の場合の基準点(本館屋上)におけるLES解析の平均風向は177度である。また風洞実験で小旗を用いて基準点での風向を観察したところ、平均的に190度程度(南西寄り)を示した。すなわち流入気流の風向角が180度(南)であっても、本館屋上に到達するまでの間に+10度ほど風向角が変化していることになる。したがって、風洞実験では流入風がテーパーや隣隣住宅の影響を受けて、キャンパス内に到達するまでの間に風向角がプラスの方向(南西寄り)にずれ、ガスがキャンパス内に入りやすくなっていると考えられる。

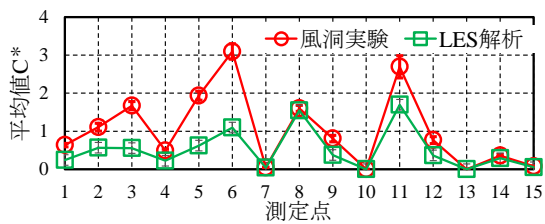


図9 無次元濃度の時間平均値の比較

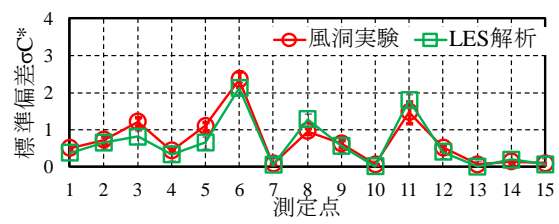


図10 無次元濃度の標準偏差の比較

#### 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)

1.

[学会発表] (計 3 件)

1. 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
2. 立花 卓巳, 宮下 康一, 岸田 岳土, 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
3. 佐々木 亮治, 宮下 康一, 岸田 岳土, 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)

[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 東京工芸大学 大学院生