

平成 27 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：H27 [平成 27 年度で終了]
課題番号：152009
研究課題名（和文）：都市域内の流れ場を対象とした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）： 600,000 円

※平成 27 年度で終了となる研究課題は最終成果報告書となりますので、下記項目について詳細な報告をお願いします。

※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場面で用いられ、もしくは、用いられようとしている。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が広く応用されていないのが実情と考えられる。

例えば、環境アセスメントでは、様々な規模の建物が数多く存在する為に複雑な流れの様相を呈する中においても、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ブルームモデルが使われているのが現状である。

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少ない。

2. 研究の方法

本研究では、比較的狭い範囲の野外拡散実験ならびに広域の野外拡散実験を対象としている。風洞実験を行う際には、流入気流の設定が重要となる。そこで本検討では、第 1 に東京工芸大学に設置したドップラーライダの観測結果を基に、ドップラーライダによる観測の有効性を検討し、上空風の特性を明らかにする。これにより、風洞実験における流入気流を適切に設定することが可能となる。

また実験の対象範囲により、風洞実験の縮尺が異なってくる。そこで第 2 に、同じ範囲を対象として縮尺を変えた風洞実験により、模型縮尺率が風速比と無次元濃度に及ぼす影響の検討を実施する。

3. 研究成果

3. 1 ドップラーライダによる上空風の観測

東京工芸大学 5 号館屋上にドップラーライダ（三菱電機㈱DIABREZZA）を設置し、上空風の観測を実施した。観測期間は、2015 年 5 月 12 日～2015 年 8 月 9 日の 90 日間である。

観測機器の設置状況を図 1 に示す。これまでのドップラーライダのビーム走査方法は、機械的に回転する方式が多く使われてきたが、本観測に用いた機器は図 2(a)に示すように、5 方位のビームを電氣的に連続で切り替える方式である。このため、従来の方式のように駆動系がなく、メンテナンスフリー化が実現されている。それぞれの方向のビームはその視線方向の風速

成分しか得ることができないため、複数のビームの観測結果をベクトル合成して3次元の風速を算出する。また、風速の更新周期は従来のタイプより高周波な観測が可能で、本観測では2(sec)とした。観測高さの設定は図2(b)に示すように20mピッチで20レベルとし、最低高さはドップラーライダーから50m(地上70m)となるように設定した。また、観測パラメータを自動処理することにより設定した高度でのデータ取得率を向上させる機能があり、本観測では70m～250mに設定した。

ドップラーライダーのデータの比較対象とした既設の超音波風速計(株ソニック 三次元超音波風速計 SAT-500)は、西隣にある本館屋上のペントハウス上の高さ9mのポールに設置されており、地上からの高さは41mである。またサンプリング周期は0.1(sec)である。

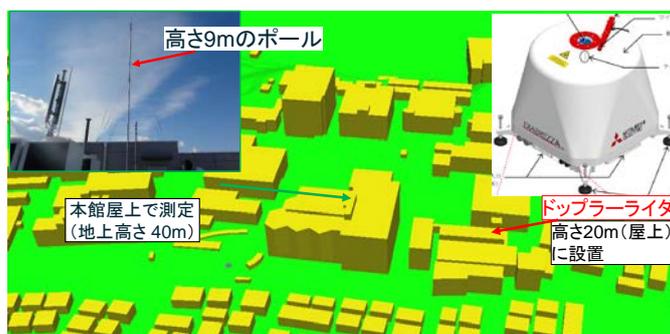


図1 観測機器の設置状況

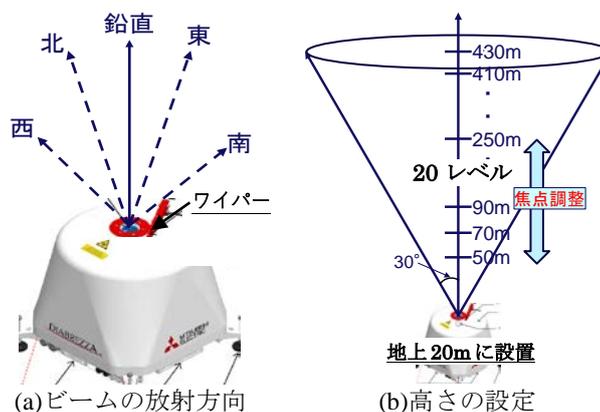


図2 ドップラーライダーの概要

図3はドップラーライダーと超音波風速計の10分間平均風速の全風向での比較である。図中の黒線は45度のライン、赤線は線形回帰直線である。ドップラーライダーは最も低い高度の70mのデータで、超音波風速計の観測高さより30m高い。観測高度が異なることもありドップラーライダーの方が大きめの傾向となるが、おおよそ良い対応を示している。

図4は、風向Sと風向Nに限定した分布である。図4(a)風向Sではドップラーライダーと超音波風速計の平均風速は同程度の大きさとなり、図4(b)風向Nではドップラーライダーの方が超音波風速計より大きくなった。図5に示す南よりの風向(191.25°)を対象にしたLES解析結果による本館近傍の平均流れ場から、超音波風速計の近傍では、建物自身の影響で水平方向風速が増速されている様子がわかる。従って、風向Sでは建物自身の影響で増速されたため、超音波風速計の風速がドップラーライダーと同程度になったと考えられる。

図6にドップラーライダーと超音波風速計の風向の比較を示す。低風速の場合、10分間統計値の風向はかなり大きくばらつくため、ここでは2(m/s)以上のデータについて整理した。図6(a)の度数表示の風向の比較を見ると、ばらつきはあるもののおおよそ良い対応となっている。このばらつきは、30mの観測高さの違いではなく、設置されている建物自身や周辺建物の影響が大きいと推測される。16風向で整理した図6(b)では、ドップラーライダーの風向は超音波風速計と良く対応していた。

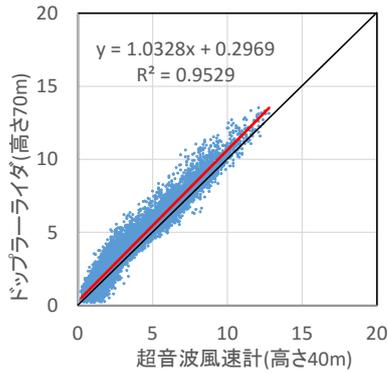
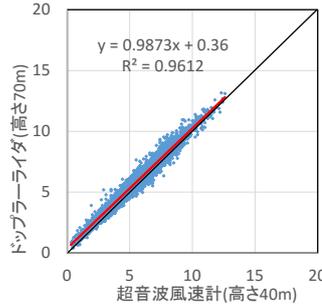
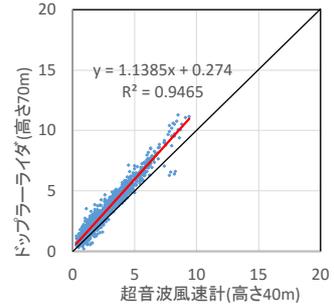


図3 平均風速の比較 (全風向)



(a) 風向 S



(b) 風向 N

図4 風向別の平均風速の比較

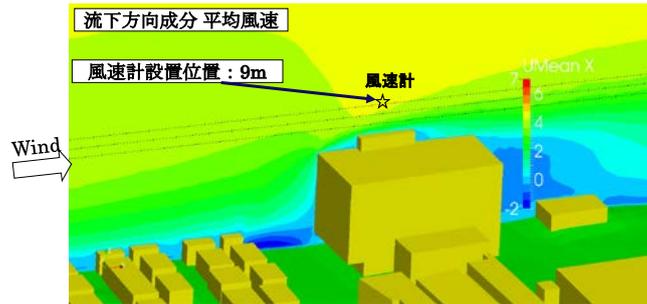
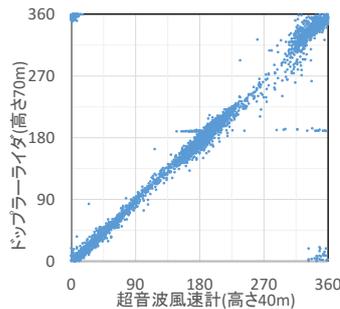
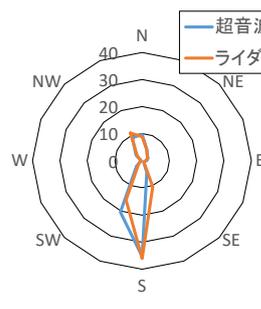


図5 本館近傍の流れ場 (LES 解析結果)



(a) 風向(degree)



(b) 風向発生頻度

図6 風向の比較

図7に強風時におけるドップラーライダーと超音波風速計の風速変動の比較を示す。これらは10分間の統計値を1日間に亘りプロットした時系列データであり、ドップラーライダーの観測データは一番低い高度の70mのものである。ここで示した強風事例は2015年7月14日のデータで、日本の南海上に台風12号があり、強い南風が吹いていた事例である。図7(a)平均風速・風向の比較を見ると、風速はドップラーライダーがやや大きいものかなり良く一致しており、風向はほぼ一致している。平均風速の大きさは1日を通してほぼ10m/s前後で変化は小さいが、図7(b)風速変動の標準偏差、および図7(c)乱れの強さは日中よりも早朝の方が小さくなっている。また、日中はドップラーライダーの風速は超音波風速計と良く一致しているが、値が小さくなる早朝の時間帯ではドップラーライダーの方がやや小さくなる結果となった。70mよりも上層については今後検討する必要があるものの、今回比較した高さ70mのデータについてはドップラーライダーと超音波風速計の風速変動はおおよそ一致し、少なくとも、低い高度でかつ高風速の場合にはドップラーライダーによる変動風速の観測値は有効であると考えられる。

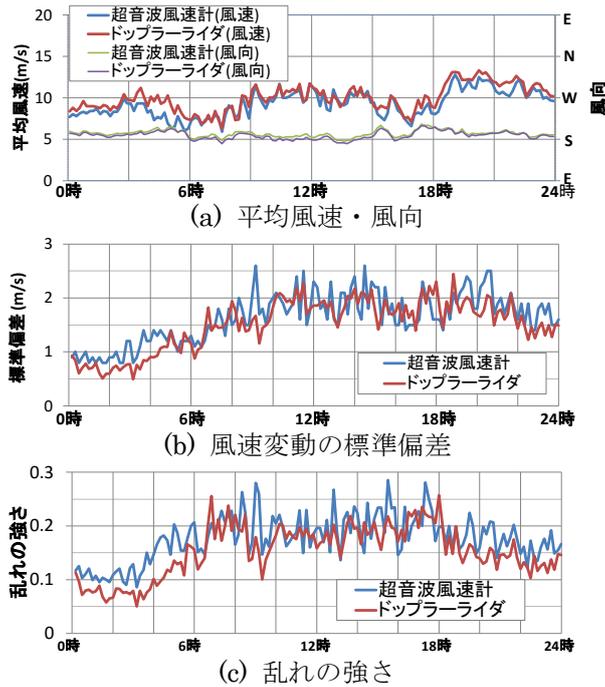


図7 強風時における観測記録の比較 (1日間)

図8に強風時における10分間分の水平風速の時系列波形を示す。なお、この10分間は風向の変化は少なく南よりの風(平均風向: 202.5°)であった。図8(a)は超音波風速計で観測された10(Hz)の生データ、図8(b)はドップラーライダの風速更新周期と合わせるために図8(a)の観測データの平均化時間を2(sec)にしたもの、図8(c)はドップラーライダの時系列波形である。サンプリング周波数を合わせた図8(b)の時系列波形は、図8(c)のドップラーライダの時系列波形と比較すると、例えば330(sec)付近の風速が急激に上昇する部分の変動の様子など、かなり似た時系列波形となっていることがわかる。表1に図8に対応するデータの平均風速および乱れの強さの10分間統計値を示す。観測高さが30m異なっていることもあり、ドップラーライダの方が平均風速はやや大きめ、乱れの強さはやや小さめとなっているものの、かなり近い値であり、対応が良いことが分かる。

図8に示した時系列波形のパワースペクトル密度の比較を図9に示す。ドップラーライダによるスペクトル形状は超音波風速計のものとかかなり良く対応している。

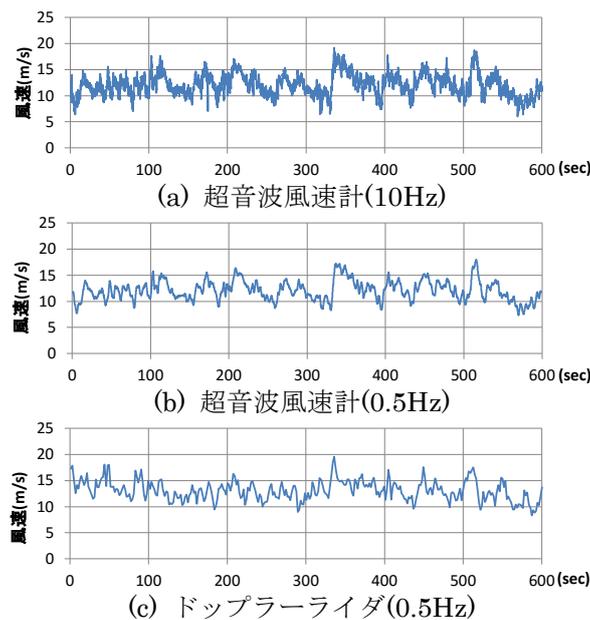


図8 風速の時系列波形 (10分間)

表 1 10 分間統計値の比較

	平均風速 m/s)	乱れの強さ
超音波風速計(10Hz)	12.1	0.170
超音波風速計(0.5Hz)	12.1	0.157
ドップラーライダー(0.5Hz)	13.1	0.148

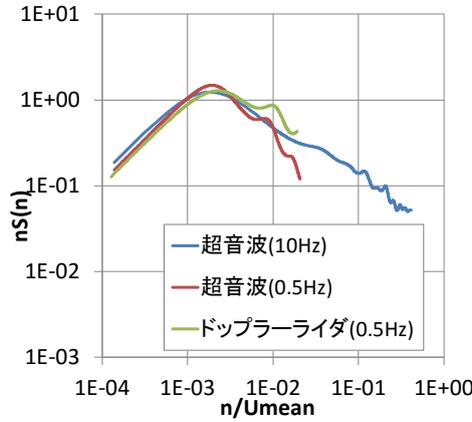


図 9 パワースペクトル密度の比較

ドップラーライダーと超音波風速計の風速変動の標準偏差 σ_u および乱れの強さの比較を、それぞれ図 10 および図 11 に示す。 σ_u はばらつきが大きいものの超音波風速計とドップラーライダーには相関関係が見られる。また乱れの強さについては、図 11 (a) 全データの場合は低風速の値も含むのでばらつきがかなり大きくなるが、図 11 (b) 平均風速 7(m/s) 以上に限定した場合にはばらつきは小さくなり、ドップラーライダーと超音波風速計には相関関係が見られる。

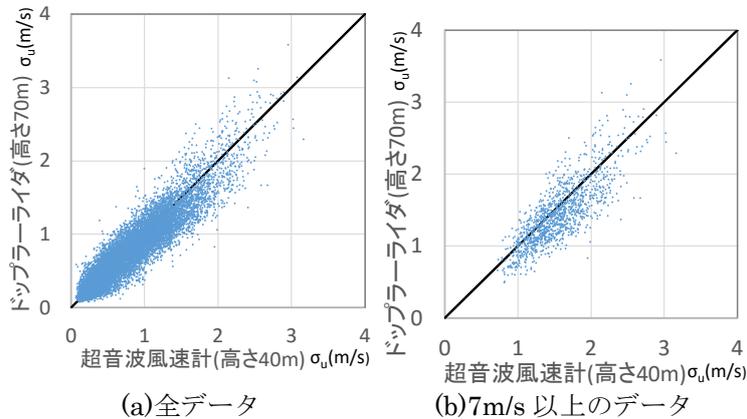


図 10 風速変動の標準偏差の比較

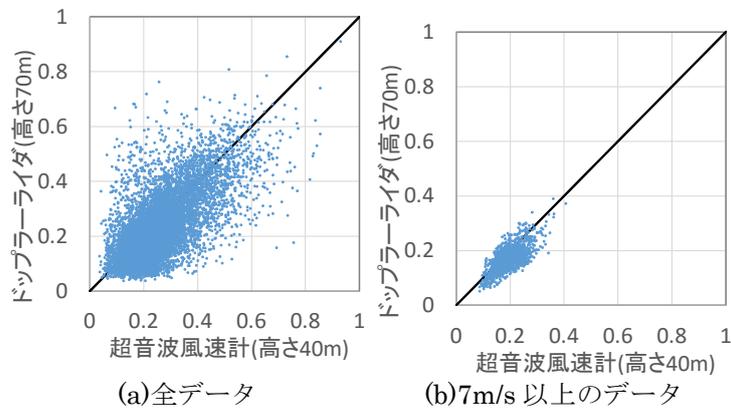
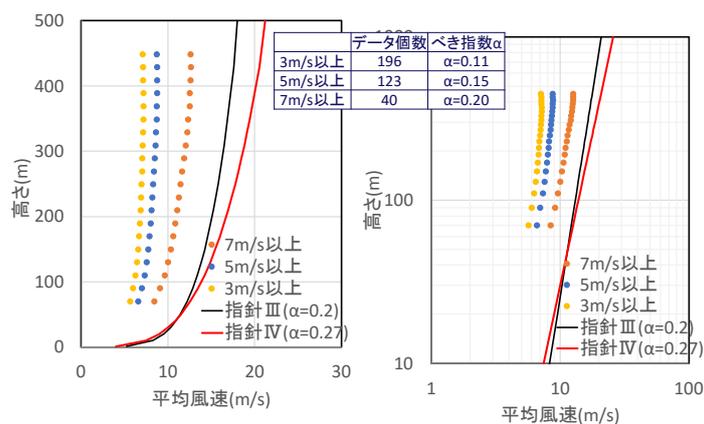


図 11 乱れの強さの比較

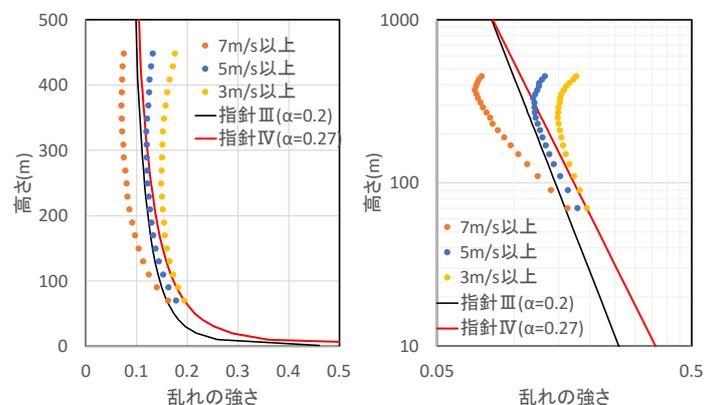
図 12 は風向の発生頻度が高く，過去に東京工芸大学で実施した野外拡散実測においても対象風向であった風向 S における風速の鉛直分布を示す。図 12 (a) はリニアスケール，図 12 (b) はログスケールで示した結果である。参考に日本建築学会「建築物荷重指針・同解説 2015」の地表面粗度区分ⅢおよびⅣの勾配に相当する直線も併記する。なお地上 70m～450m までの 20 レベルでデータが揃っている時間を抽出して平均化処理をしている。風速レベルごとに整理すると，風速が大きくなるほど風速勾配のべき指数 α は大きくなり，7m/s 以上の場合には $\alpha=0.20$ となる。この傾向は大気安定度に関係しているものと考えられ，風速値が小さい場合には不安定，大きくなるほど中立に近くなっていると思われる。

図 13 に乱れの強さの鉛直分布を示す。風速レベルが大きい場合の方が乱れの強さは小さくなっている。また，各風速レベルともに，上空に行くほど小さくなる傾向となるが，高さ 300m より上空では大きくなっている。高さ 70m については超音波風速計との比較でドップラーライダーの変動風速の有効性を確認したが，それより上層については，今後もう少し詳細に検討する必要があると思われる。



(a) リニアスケール (b) ログスケール

図 12 風向 S における平均風速の鉛直分布



(a) リニアスケール (b) ログスケール

図 13 風向 S における乱れの強さの鉛直分布

3. 2 模型縮尺率が風速比と無次元濃度に及ぼす影響の検討

風洞実験による予測では，広範囲に及ぶ汚染物質拡散を対象とする場合，風洞の大きさの制限から模型の縮尺率を小さくせざるを得なくなる。その場合に，実験精度が低下する可能性がある。そこで模型の縮尺率を 1/600 と 1/300 の 2 種類に変えた拡散風洞実験を行い，縮尺率が風速比や無次元濃度に及ぼす影響を検討した。

表 2 に風洞実験概要を示す。東京工芸大学（以下，工芸大）の乱流境界層風洞で縮尺率 1/600 の模型を用いた実験，(株)IHI 技術開発本部（以下，IHI）の大型温度成層風洞で 1/300 の模型を用いた実験を行った。

図 14 に工芸大の風洞で用いた縮尺率 1/600 の実験模型を示す。トレーサーガス排出地点で

ある工芸大厚木キャンパス正門前を中心に、半径 300m の範囲を再現した (図 15)。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て実験を行った。なお IHI の風洞で用いた縮尺率 1/300 の模型の形状は、テーパーの形状を含め、工芸大の風洞で用いた模型と全て幾何学的に相似である。

表 2 風洞実験概要

		1/600模型	1/300模型
風洞実験	実験施設	東京工芸大学	IHI
	測定洞	幅1.2m×高さ1.0m	幅5.0m×高さ1.8m
	ターンテーブル	直径1.0m	直径2.0m
風速測定	測定機器	Split Film Probe	I型熱線流速計
	サンプリング周波数	1000Hz	1000Hz
	測定時間	3分間	3分間
濃度測定	測定機器	高速炭化水素測定器	高速炭化水素測定器
	ガス排出量	150cc/min	150cc/min
	サンプリング周波数	1000Hz	500Hz
	測定時間	4分間	4分間
測定高さ		5mm	10mm

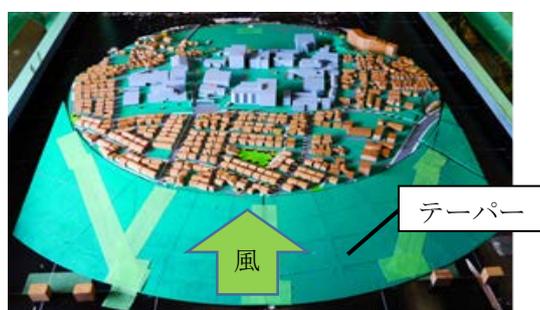


図 14 実験模型



図 15 測定点

実験気流は対象地域で想定される自然風の状況とする。本実験では、基準風速での乱れの強さの観測結果を基に、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相当の気流を選択した。図 16 に両者の実験気流の鉛直分布、乱れの強さを、荷重指針と合わせて示す。基準高さ Z_{ref} は本館屋上の風速計設置高さである 41m とし、基準風速 U_{ref} は Z_{ref}

での風速とした。図 16 より工芸大と IHI の実験気流の無次元鉛直分布の対応は良いことが分かる。

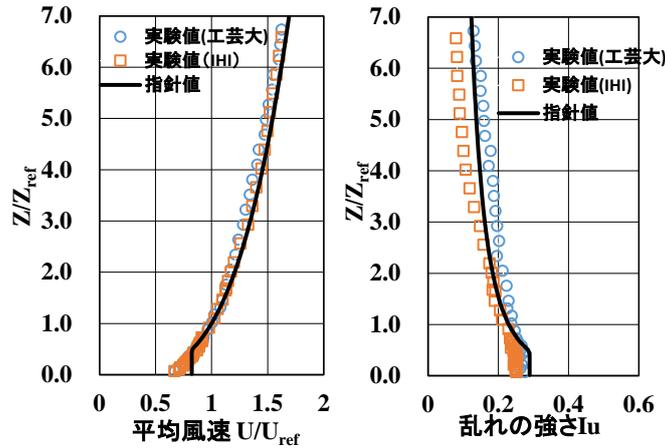


図 16 実験気流の鉛直分布

実験風向は南とし(図 14, 図 15 参照), 測定点は図 15 に示す 15 点とした。測定高さは実スケールで地上 3m 相当とし, 1/600 模型では高さ 5mm, 1/300 模型では高さ 10mm とした。

風速は, 工芸大では 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。一方, IHI では I 型熱線流速計を用いて水平方向のスカラー風速を測定した。

濃度は, 両者とも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(C₂H₄)を用い, 直径 6mm の排出口から 150cc/min (吹出風速 0.088m/s) で排出した。基準風速 U_{ref} は約 4m/s とした。濃度測定方法, 実験条件は工芸大と IHI で同一である。従って, 無次元パイナンバーである排出速度比 (吹出風速と基準風速との比) も両実験で一致している。

図 17 に各測定点のスカラー風速を基準風速 U_{ref} で除した風速比の比較を示す。1/600 模型と 1/300 模型の実験結果は, 比較的よく一致している。しかしながら, 測定点 1, 2, 11, 13 のように, 建物の隅角部近傍や, 近接する建物の中の点で差異が大きい。こうした場所では, 1/600 模型と 1/300 模型での測定位置のわずかなずれが, 風速の測定値に大きく影響している可能性がある。また図 18 に示した相関図を見ても上記の 4 点を除けば, データは 45°線付近に分布している。上記 4 点も測定点の位置決めを厳密に行っていれば, 1/300 模型実験でも 1/600 模型実験でも, ほぼ一致した風速比が得られたのではないかと考えられる。

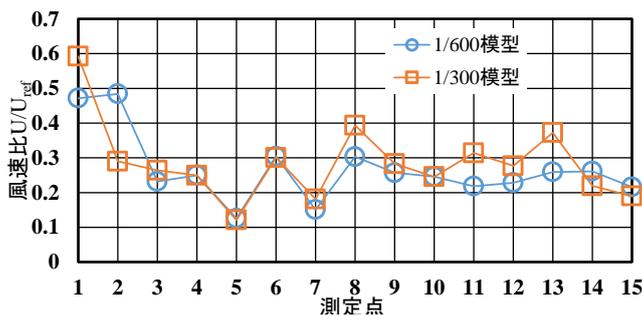


図 17 風速比の比較

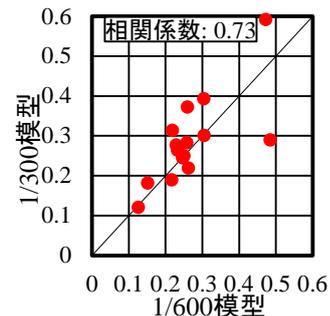


図 18 風速比の相関図

図 19 に無次元濃度の比較を示す。無次元濃度 C*は次式により求めた。

$$C^* = \frac{C \cdot U_{ref} \cdot Z_{ref}^2}{q}$$

C: 各測定点の濃度[-], q: 排出量[m³/s]

測定点 8 を除き, 両実験結果は非常によく一致している。風速比に比べてかなり対応が良い理由として, 風速よりも濃度は局所性が小さいため, 測定点位置のずれによる影響が小さいと考

えられる。図 20 の相関図を見てもデータはほぼ 45°線上に分布しており、相関係数も 0.98 と高い。

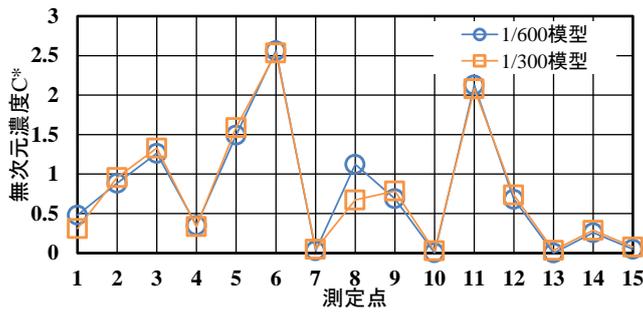


図 19 無次元濃度の比較

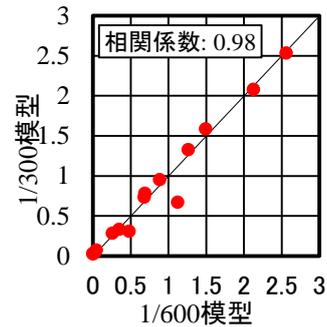


図 20 無次元濃度の相関図

東京工芸大学厚木キャンパスを対象として、縮尺 1/600 模型と 1/300 模型を用いた 2 種類の拡散風洞実験を行った。その結果、両者の実験による無次元濃度は極めてよく一致することを確認した。風速比に関しては、建物の隅角部近傍や近接する建物間のように、風速の局所性が強い場所でやや大きな差が見られたが、その他の場所ではほぼ一致した。測定点の位置決めを厳密に行えば、上記の場所でも両者の対応は向上すると考えられる。

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

宮下 康一、義江 龍一郎、岸田 岳土、佐々木 亮治：東京工芸大学厚木キャンパスを対象としたドップラーライダーによる風観測 その 1 観測の概要，日本建築学会学術講演梗概集，2016

岸田 岳土、義江 龍一郎、宮下 康一、佐々木 亮治：東京工芸大学厚木キャンパスを対象としたドップラーライダーによる風観測 その 2 変動風速および鉛直分布の検討，日本建築学会学術講演梗概集，2016

立花 卓巳、宮下 康一、岸田 岳土、義江 龍一郎、佐々木 亮治：東京工芸大学厚木キャンパスを対象とした風洞実験 模型縮尺率が風速比と無次元濃度に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，2016

岸田 岳土、義江 龍一郎、宮下 康一、佐々木 亮治：ドップラーライダーによる都市上空の平均・変動風速の観測，第 24 回風工学シンポジウム，2016 (掲載予定)

[雑誌論文] (計 1 件)

[学会発表] (計 4 件)

[図書] (計 1 件)

[その他]

産業財産権，ホームページ等

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

義江 龍一郎 東京工芸大学 教授

野田 博 近畿大学 教授

白澤 多一 大妻女子大学 助教

下瀬 健一 防災科学研究所
岡田 玲 東京工芸大学 GCOE 准教授
並木 慎一 株式会社東芝
荻島 真治 株式会社東芝
中山 悟 株式会社東芝
勝村 章 株式会社風工学研究所
猿川 明 株式会社風工学研究所
佐々木 亮治 株式会社風工学研究所
赤星 明紀 株式会社風工学研究所
岸田 岳士 電力中央研究所（平成 27 年 12 月まで株式会社風工学研究所）
立花 卓巳 東京工芸大学 大学院生