平成 26 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：H 25～ H 26 ［平成 26 年度で終了］
課題番号：132009
研究課題名（和文）：都市域内の流れ場を対象とした気象モデルと LES モデルの接続に関する研究
研究課題名（英文）：Study of coupling for LES model considering mesosclae meteorological model for flow field of Urban Area
研究代表者： 宮下 康一

交付決定額（当該年度）：220,000 円

※平成 26 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し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

近年，広域の風況予測を行う気象モデルは，コンピュータ性能の向上および，そのソースコードの公開により研究の分野および実務の分野で広く使われている。また，市街地などの建物周りの流れ場の予測などには，ビル風の問題や耐風設計の観点からツールとしての数値流体解析(CFD)が広く使われるようになってきている。市街地などの建物周りの流れ場を，ある特定の日時に対して予測を行う場合，気象モデルで得られた広域の予測結果を，CFD の入力条件として用い予測することが有効となるが，いまだ開発途上である。

気象モデルでは，気象擾乱に起因する物理現象を RANS でモデル化(RANS 型の気象モデル)する場合の再現する周波数帯は，地表面に存在する建物などの地表面粗度に起因する乱れに比べ低周波数となり，表現できる空間（解像度）も広くなる。一方，市街地など都市を対象とした CFD の入力気流は，地表面粗度に起因する乱れに対応した空間の解像度が必要となり，気象モデルの解像度と大きなギャップがある。

本研究では，任意の気象場における拡散の状況を予測するために RANS 型のメソ気象モデルの計算結果を入力情報として，都市域内の流れ場を LES 解析によって予測することを目指し検討を実施している。

２．研究の方法

本検討では RANS 型のメソ気象モデルと数値流体解析モデル（LES）を接続することにより実在都市域における流れ場，濃度場の予測を実施するのが最終的な目標であるが，それぞれの解析手法の精度を向上することも重要なこととなる。特に，数値流体解析による予測では，これまで RANS モデルによる予測が多く行われてきたが，非定常解析である LES による予測手法はまだ確立されていない。本検討では，第 1 に，厚木地区で実施された野外拡散実験を対象に気象モデル WRF により解析を実施し，観測結果と比較してその有効性を確認する。第 2 に東京工芸大学厚木キャンパスを対象に実施された野外拡散実験を対象に LES 解析モデルを構築し，その有効性についても検討を実施する。

３．研究成果

野外拡散実験を対象とした気象モデル WRF の気象場の予測

本検討では，2014 年 8 月 5 日～8 月 8 日の計 4 日間に亘り厚木地区で実施した野外拡散実験を対象に WRF による予測を実施した。当該地域の夏季は南寄りの風の頻度が高いことが既往の観測記録により確認されており，南から吹く海風をターゲットに野外拡散実験を実施することとした。図-1 に野外拡散実験の観測地点の概要，表-1 に測定項目を示す。拡散物質の放出地点は地上 22m のビル屋上とし，捕集地点は図-1 に示すように地上に計 35 地点とした。上空の風速を測定するために，ドップラーライダーによる風速の測定も併せて実施している。

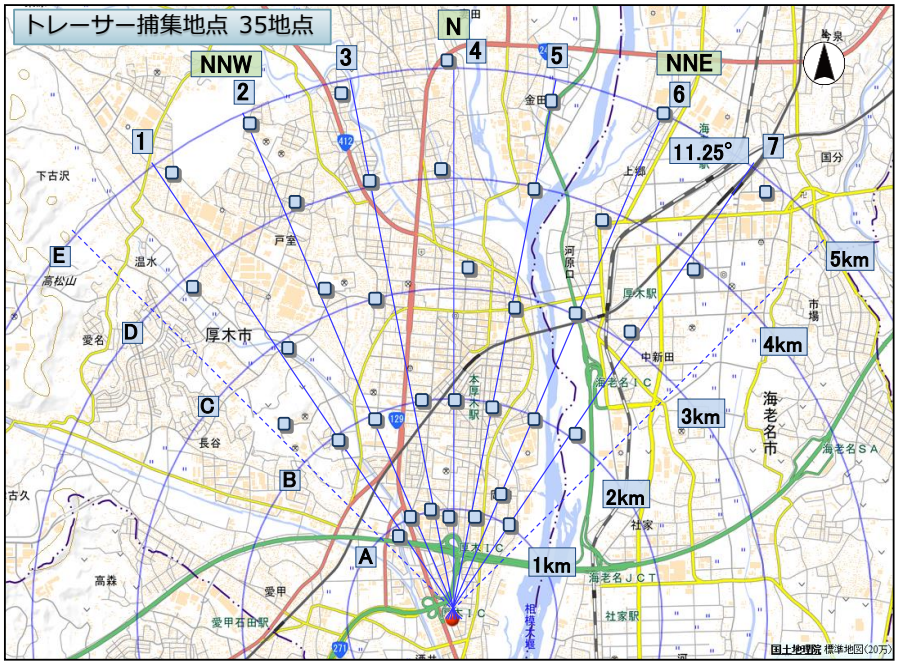


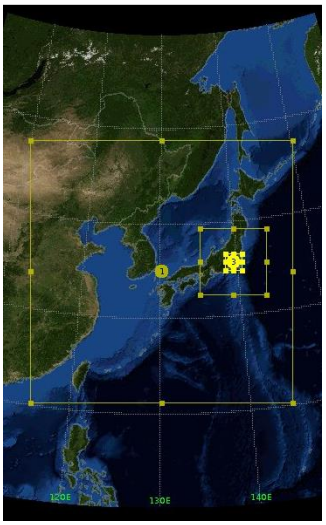
図-1 厚木地区を対象とした野外拡散実験の観測地点の概要

表-1 野外拡散実験の測定項目

濃度測定（地上）	
拡散物質	PMCH(C7F14，人体に対して無害)
拡散物質放出地点	サンモール厚木屋上（高さ 22m）
拡散物質捕集地点	35 地点（地上 2m）
風速測定(上空)	
ドップラーライダー	高さ 19.3m に設置
超音波風速計	観測高さ 25.5m
三杯式風速計・矢羽根式風向計	観測高さ 25.5m
風速測定(地上)	
超音波風速計	5 地点，地上 2m

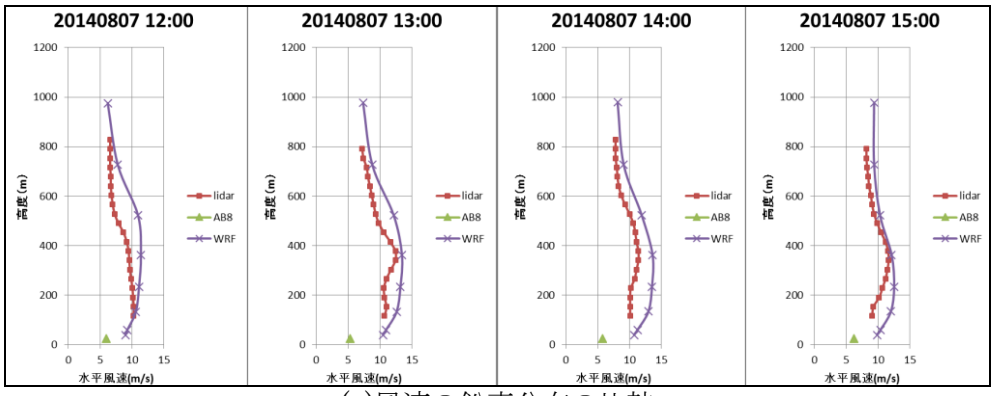
図-2 に WRF の解析条件の概要を示す。解析領域は 3 段階のネスティングを設定しており水平方向の格子解像度はそれぞれ 16km, 4km および 1km とした。都市モデルには多層 canopy モデルを採用した。図-3 に WRF 解析結果と観測結果の比較の 1 例を示す。観測結果はライダーの鉛直分布と放出点近傍に設置されている超音波風速計の値を併記している。風向についてはかなり観測結果とよく対応している。風速については，WRF の方がやや大きいものの，定性的な傾向は良く似た分布となっている。

	領域1	領域2	領域3
水平解像度	16 km	4 km	1 km
鉛直	50 層	50 層	50 層
サイズ	200x200	201x201	201x201
雲微物理	WSM6	Morrison	Morrison
放射	RRTMG	RRTMG	RRTMG
地表面	Noah-LSM	Noah-LSM	Noha-LSM
境界層	BouLac	BouLac	BouLac
都市モデル	多層 canopy	多層 canopy	多層 canopy
積雲対流	KF	KF	None

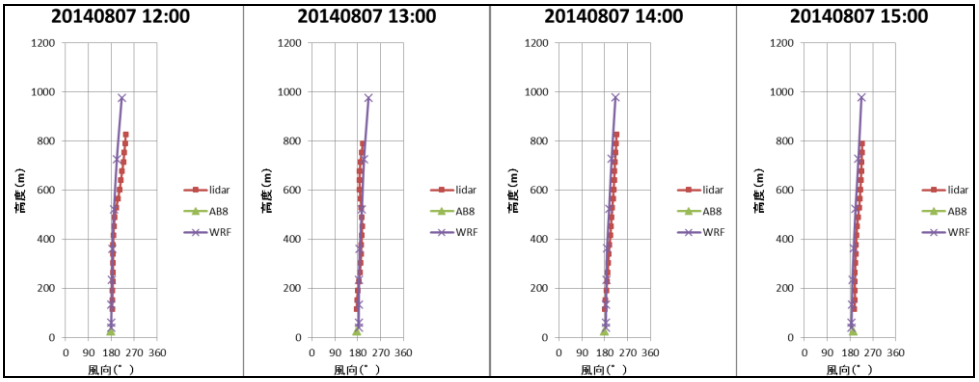


初期値：NCEP FNL（水平解像度1度，6時間毎）
積分時間：2014年8月5,6,7日09 JST
2014年8月5.6.7日21 JST（12時間）

図-2 WRF 解析条件



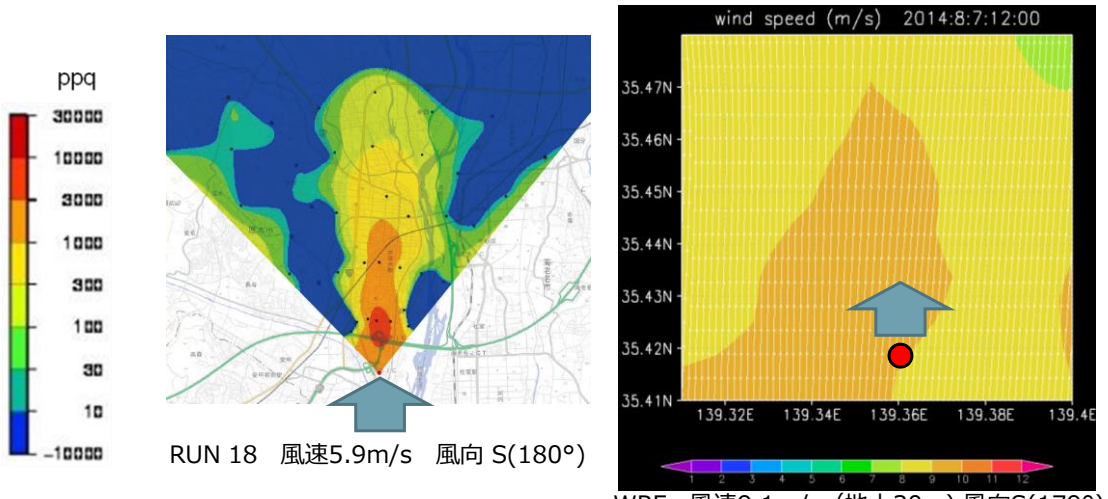
(a)風速の鉛直分布の比較



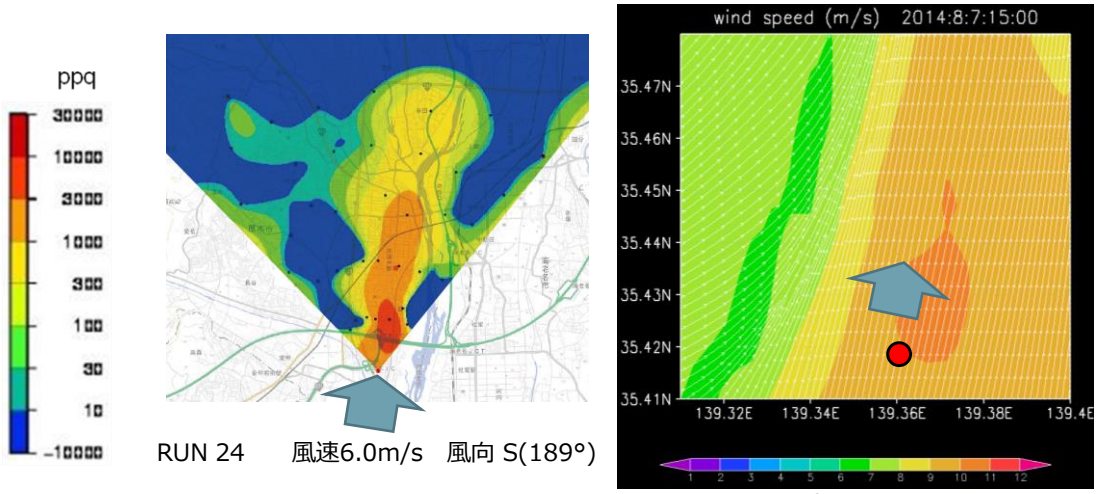
(b) 風向の鉛直分布の比較

図-3 WRF 解析結果と観測結果の比較

図-4 に濃度の野外観測結果と WRF による風速場の解析結果の対応を示す。(a)は 8/7 12:00 の結果であり放出点における風向（高さ 22m）では風向 180°，(b)は 8/7 15:00 の結果で放出点の風向は(a)よりやや西寄りの 189° である。なお，観測結果については 30 分間の平均値，WRF 解析結果については平均化処理をしていない該当する時間の値である。WRF の予測結果は野外観測結果の時間による変化を追随できていることが確認できる。



(a) Run18(風向 180°)



(b) Run24(風向 189°)

図-4 WRF 解析結果と観測結果（濃度）の対応

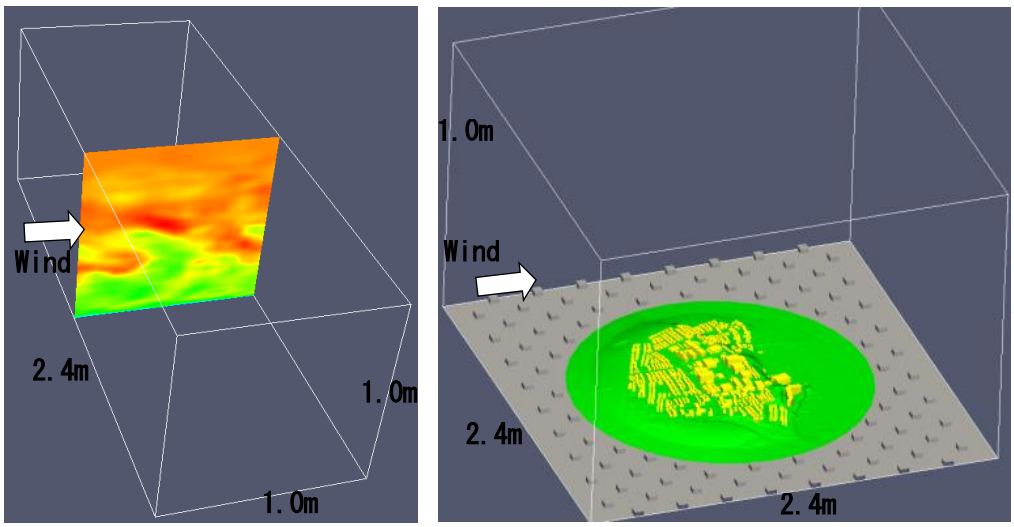
実在都市を対象とした LES による汚染物質の拡散に関する検討

近年，ビル風予測や汚染物質の拡散など環境アセスメントの実務の現場では CFD が使われるようになってきているが，予測方法としてはアンサンブル平均に基づく RANS によるものが多い。危険物質などの拡散を対象とした場合には瞬間濃度を評価することが重要となり，LES などの非定常計算により予測することが不可欠となるがまだ確立されていない。ここでは都市域における大気拡散予測の適切な LES 解析モデルを構築することを目的に検討を進める。

表-2 に本研究で実施した数値解析手法の概要を示す。解析のソルバーは OpenFOAM とし，LES(標準 Smagorinsky モデル)により非定常解析を実施した。図 5 に数値解析モデルの概要を示す。LES を実施するには時々刻々変動する流入変動風を作成する必要があるが，本検討では図 5 に示すように流入変動風を作成する(a)ドライバー領域と(b)実在都市を計算する領域を別々に設定している。解析領域の大きさはドライバー領域で「風方向×水平風直交方向×鉛直方向」=「1.0m×2.4m×1.0m」,実在都市領域では「2.4m×2.4m×1.0m」としている。実在都市領域では対象とした風洞実験と同様に模型スケールを 1/600 とし，東京工芸大学を中心に半径 0.5m(実スケールで半径 300m)の建物についてモデル化を実施している。なお，地形の起伏については国土地理院の数値標高モデル(10m メッシュ)により作成しており，地形の起伏を徐々に低くするテーパーを風洞実験同様に 300m より外側の領域に設定している。(a)ドライバー領域では構造格子で格子分割し，(b)実在都市領域ではテトラおよびプリズム要素で構成される非構造格子により格子を生成している。図 6 に示すように実在都市の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，壁面近傍では 2 層の境界層要素を設定している。煙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)，要素数はドライバー領域では 20×280×73=408,800，都市解析領域では約 1800 万としている。流入変動風は準周期境界型の手法で作成した。図 7 に流入風の鉛直分布の風洞実験結果との比較を示す。平均風速，風速の乱れ成分ともに対象とした風洞実験と良く対応していることが確認できる。

表 2 解析条件の概要

解析ソルバー	OpenFOAM
乱流モデル	LES（標準型 Smagorinsky モデル）
離散化手法	有限体積法
流入境界条件	準周期境界条件を用いた LES[3)]により別途作成
上面，側面境界	Slip 条件
流出境界条件	ノイマン型
地表面境界条件	壁関数（Spalding 則）
移流項のスキーム	2 次精度中心差分
解析風向	191.25°



(a)ドライバー領域　　(b)都市解析領域(191.25°)

図-5 数値解析モデル

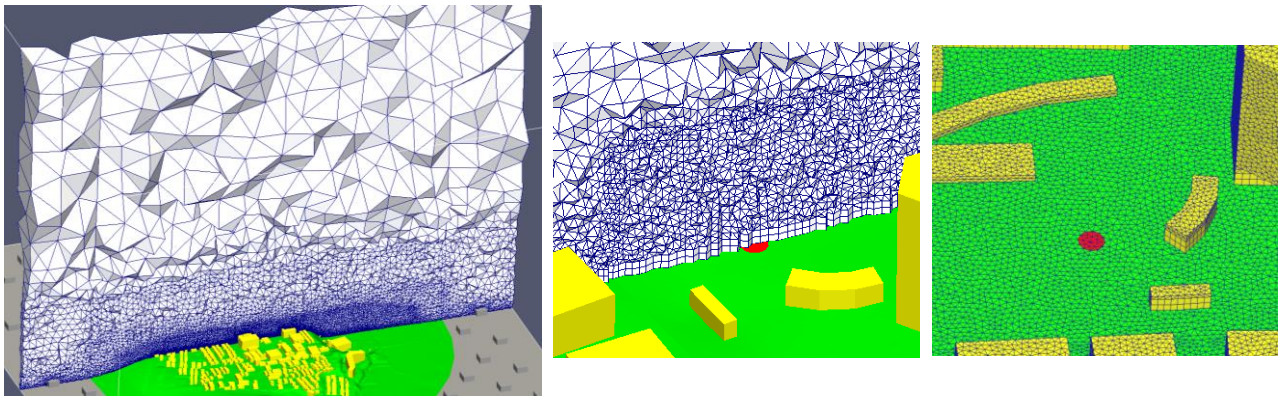
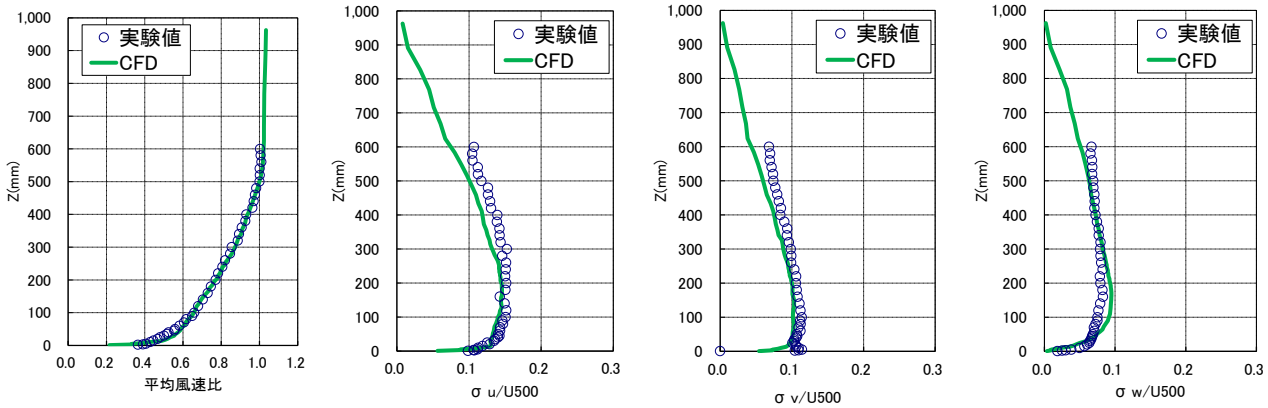


図-6 解析格子の概要



(a)平均風速　(b)主流方向成分乱れ　(c)主流直角方向成分乱れ　(d)鉛直方向成分乱れ

図-7 流入風の鉛直分布の比較

図-8 に風洞実験で測定点を設定した高さ 5mm(実高さ 3m)における鉛直方向成分の平均風速および水平方向成分のベクトル図を，図-9 に水平方向成分平均風速のベクトルコンター図を示す。図中の赤丸が煙の放出点である。図-8 に示すように，本館は周辺の建物よりも高さが高くなっており，本館の南側の壁面へ到達した流れが下降流となって地表面へと降下し（図中の黒丸），煙源の方へと廻り込むように流れ込む様子がわかる。そのため，煙源付近の流れは上空の風向とは直交する方向（紙面上では東から西への方向）への流れとなっている。その後，上空の風向と同じ方向へ徐々に向きを変えながら本館と 11 号館の間の通りへと到達し，キャンパスの中へと流入していく。

図-9 は水平方向成分の平均風速のコンター図であるが，煙源近傍の流れ場は東側にある障害物（図中の黒丸）に遮られているため，風速が弱くなっていることがわかる。本館および 11 号館の隣棟間では風速は強くなっている。図-10 に平均濃度のコンター図を示す。流れ場で検討したように，煙源から放出されたガスは横方向へと広がりながら北方向の本館と 11 号館の間へと流れこんでいく様子がわかる。

図-11 に風速比および濃度の相関図を示す。風速の予測結果はある程度のばらつきはあるものの，風洞実験結果および実測と良く対応している。濃度については，風洞実験結果と比較すると全体的に小さめとなっているものの，実験との比は 2 倍以内となっている。今回の検討では風洞実験結果のほうがキャンパス内へと流入する濃度の割合が大きくなる結果となった。

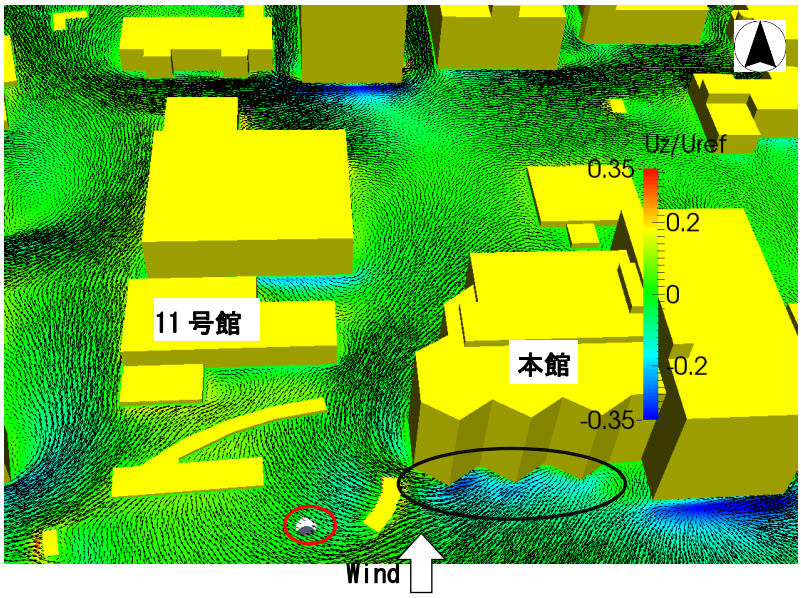


図-8 鉛直成分平均風速のコンター図

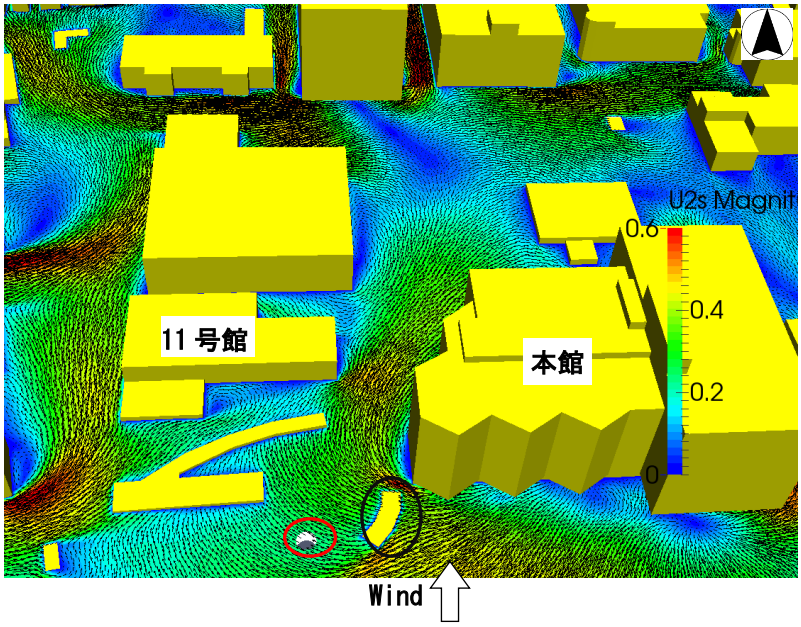


図-9 水平方向成分平均風速の分布

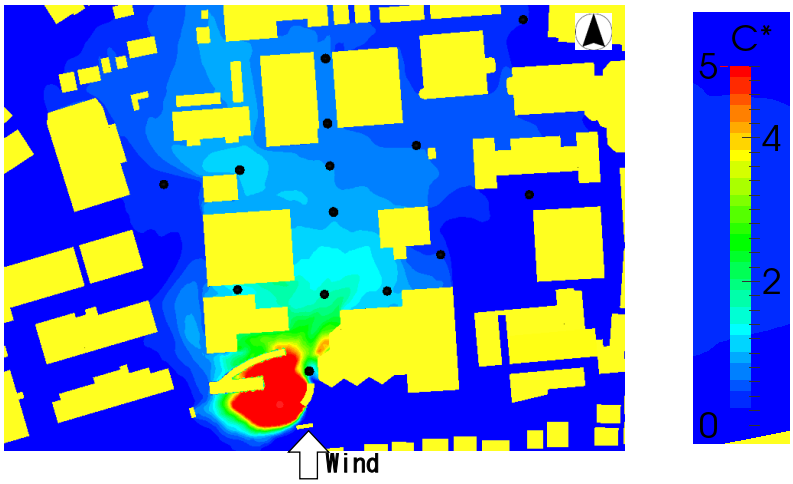
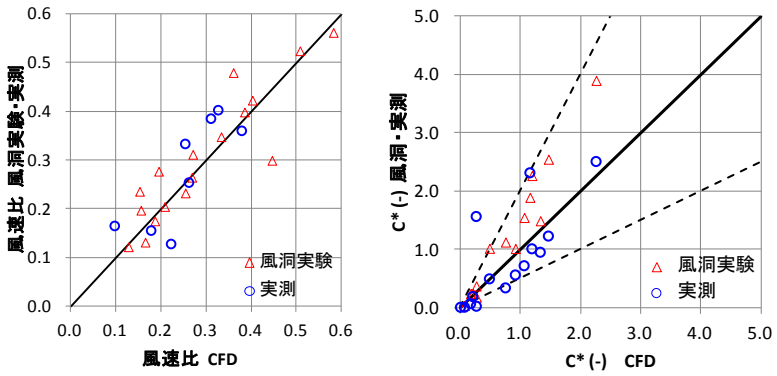


図-10 平均濃度の分布



(a)風速比　　(b)無次元濃度

図-11 相関図

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，並木　慎一，中山　悟：都市域内のガス拡散に関する野外実験と，風洞実験およびLES解析による予測，その1　野外拡散実験，日本風工学会年次研究発表会・梗概集，2015

佐々木　亮治，義江　龍一郎，田辺　剛志，宮下　康一，並木　慎一，中山　悟：都市域内のガス拡散に関する野外実験と，風洞実験およびLES解析による予測，その2 風洞実験結果と実測結果の比較，日本風工学会年次研究発表会・梗概集，2015

立花卓巳，義江　龍一郎，田辺　剛志，宮下　康一，佐々木　亮治，並木　慎一，中山　悟：都市域内のガス拡散に関する野外実験と，風洞実験およびLES解析による予測，その3 拡散風洞実験における相似則の確認，日本風工学会年次研究発表会・梗概集，2015

岸田　岳士，義江　龍一郎，並木　慎一，中山　悟，宮下　康一：都市域内のガス拡散に関する野外実験と，風洞実験およびLES解析による予測，その4 数値流体解析と風洞実験の比較，日本風工学会年次研究発表会・梗概集，2015

立花卓巳，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野外拡散実測，風洞実験，LES 解析　その 1 屋外拡散実測と風洞実験，日本建築学会学術講演梗概集，2015

宮下康一，義江龍一郎，立花卓巳，佐々木亮治，岸田岳士：東京工芸大学厚木キャンパスを対象とした野外拡散実測，風洞実験，LES 解析　その 2 数値流体解析と風洞実験，日本建築学会学術講演梗概集，2015

〔雑誌論文〕（計　　件）
〔学会発表〕（計　6件）
〔図書〕（計　　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
岸田 岳士 株式会社風工学研究所
赤星 明紀 株式会社風工学研究所
田辺 剛志 東京工芸大学 大学院生