

平成 25 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：H25 ～ H26 [平成 26 年度も研究継続]

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 mesoscale 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）：390,000 円

※平成 25 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

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[1]。また、市街地などの建物周りの風速場の予測などには、ビル風の問題[2]や耐風設計[3]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風速場を、ある特定の日時に対して予測を行う場合、気象モデルから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)する場合に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。橋本ら[4]は、水平方向格子解像度を 1000m から 333m へと上げる段階で、ある程度計算精度に頭打ちの傾向があることを示している。また、畑村ら[5]は、微細な地形を再現する為に、水平方向格子解像度を 1000m, 333m および 111m の計 3 通りで検討し、高解像度化により多くの地点で精度が向上するものの、地形の変化が急な観測点では精度がむしろ悪化する可能性があることを述べている。

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。岸田ら[6]は、気象モデルの解析結果における上空の平均風速のみを参照し、实在都市域に対して LES 解析を行い実測と比較している。竹見ら[7]は、気象モデルを高解像度化しながら、その結果を境界値として参照し都市域の LES 解析を行い、接続の問題点を指摘している。

RANS 型の気象モデルの解析結果を LES 解析などの境界条件とする場合、風速の変動を与える必要があり、近藤ら[8]は、Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく流入変動風の生成方法の提案をしている。また、片岡ら[9]は、広域の都市群の風況を RANS により求め、その解析結果の平均風速およびレイノルズ応力の分布を用い、LES 解析の境界条件となる変動流入風を作成している。また、野田ら[10]は、変動風速のパワースペクトル密度、空間相関を仮定し、

変動風速をシミュレートする方法を示している。

一方、道岡ら[11]は、RANS型の気象モデルを用いず、LES型の気象モデルを用い、その結果を接続の境界条件として、直接実在都市域を対象としたLES解析を行っている。

本研究は、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的としている。

2. 研究の方法

気象モデルを用い、東京近郊の風況解析を行う。気象モデルとしては、NCEP/NCARが開発したオープンソースのコードであるWRF(The Weather Research and Forecasting)を用いる。WRFから与えられる乱流の性状は、気象現象を鉛直方向一次元にモデル化したものであり、都市域の建物群などの影響によって生成されたものは十分反映されていないと考えられる。そこで、WRFで得られた結果と、実際に風速計によって実風観測された結果の比較を行い、乱流性状の違いについて検討する。

3. 研究成果

表-1および図-1に解析領域の概要および設定を示す。解析領域は図-1に示すように広域領域および狭域領域の2段階の設定とし、ネスティングして解析を実施した。水平方向の格子解像度はそれぞれ5kmおよび1kmとし、解析領域の大きさは1500km×1500km、301km×301kmとした。初期値および境界値には気象庁のMSMを使用している。表-2に設定した物理モデルの解析条件の概要を示す。乱流モデルにはMYNN3(Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3)を用いた。設定する乱流モデルにより、予報することができるパラメータが異なってくるが、このモデルでは乱流エネルギーQKEについても解析を実施し予報変数として出力可能である。なお、このQKEは一般的な乱流エネルギーTKEの2倍の値となっているため、観測結果との比較に際しては0.5倍する必要がある。

表-1 解析領域の概要

項目	広域領域	狭域領域
中心緯度・経度	35.0度,137.0度	
基準経度	140.0度	
地図投影	ランベルト(投影緯度30度、40度)	
格子間隔	5km	1km
格子数	300×300	301×301
領域	1500km×1500km	301km×301km
鉛直層	31層	
初期・境界値	MSM、Near-goos	広域領域

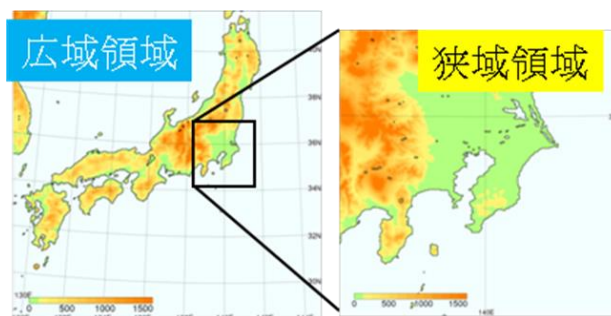


図-1 解析領域の設定

表-2 物理モデルの解析条件の設定

項目		設定値
WRF バージョン		V3.2.1
雲物理		Morrison
放射	短波放射	RRTMG
	長波放射	RRTMG
地表面モデル		MYNN
陸面過程		Thermal Diffusion
乱流モデル		MYNN3
積雲パラメタリゼーション		なし

WRF による解析結果の精度検証は、都心の高層ビル屋上で観測された計 5 地点の風向・風速の風観測記録との比較により実施した。観測高さは標高約 100m~300m である。観測に使用したセンサーは三杯型風速計および矢羽型の風向計である。観測結果との比較は、風速の平均成分のみならず、変動成分についても実施した。変動成分の比較は、乱流エネルギー k の平方根を平均風速 U で除した(1)式に示す乱れの強さにより行った。

$$\text{乱れの強さ } Iu = \frac{\sqrt{k}}{U} \quad (1)$$

なお、三杯型風速計は水平方向 2 成分のスカラー風速であり、鉛直方向成分については加味されないので、WRF 解析結果との比較に際し、観測結果に対して以下のような処理を行っている。

WRF から得られる乱流エネルギー k は(2)式で示すように 3 成分の変動成分より得られる。

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2)$$

一方、観測結果は(3)式に示すように水平 2 成分により表わされる。

$$k^* = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (3)$$

流れ場の変動 3 成分の比率は、既往の研究¹²⁾より(4)式のように見積もられる。

$$\sqrt{\overline{u'^2}} : \sqrt{\overline{v'^2}} : \sqrt{\overline{w'^2}} \cong 2.39 : 1.92 : 1.25 \quad (4)$$

WRF による乱流エネルギー k と観測結果の乱流エネルギー k^* の比率は(4)式の間係を用いると(5)式のように表わされる。

$$\frac{\text{WRF } k}{\text{観測結果 } k^*} = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}} \cong 1.17 \quad (5)$$

以上より、観測による Iu^* は(5)式を(1)式に代入すると(6)式のようになる。

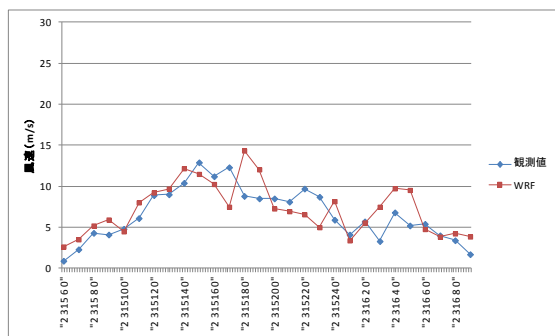
$$Iu^* = \frac{\sqrt{1.17k^*}}{U} \quad (6)$$

表-3 に検討ケースの概要を示す。風速の強弱や風向の異なる計 6 ケースを解析の対象日に設定した。図-2 は WRF 解析結果と観測結果の比較の一例で、Case2 の高さ約 100m の観測点の場合の比較である。観測結果は 10 分間の統計値である。このケースでは、平均風速、風向および乱れの強さともに観測結果とよく一致した結果となる。なお、ここでは示さないが、風向についてはどの解析ケースでも WRF 解析結果と観測結果は良く一致している。図-3 に平均風速の観測結果と WRF 解析結果を全ケースプロットして比較したものを示す。風向により分類して示しており、(a)が北風、(b)が南風の結果となる。(a)の北風の場合にはばらつきは大きいものの WRF 解析結果と観測結果の相関はおおよそ良い。一方で、(b)の南風の場合には、WRF 解析結果の方が観測結果よりも大きくなっている。図-4 は乱れの強さの分布であるが、北風の場合にはおおよそ対応する分布となるが、南風では観測結果より小さくなる傾向となった。

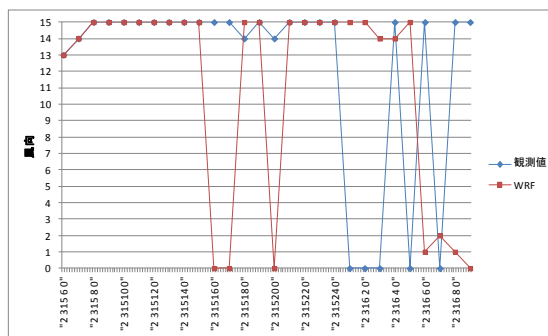
今回、このように風向により異なる結果となった理由の一つとして考えられるのは、都市部における都市キャノピー層内の粗度効果を計算上では十分に表現できていなかったことが挙げられる。比較対象とした観測点は高層ビルが立ち並ぶ都心部にあるが、海から観測点までの吹走距離の短い南風の場合にその影響が大きく表れたと考えられる。今後、地表面境界条件などの計算条件の設定を吟味することで精度の向上が期待されるものと思われる。

表-3 検討ケース

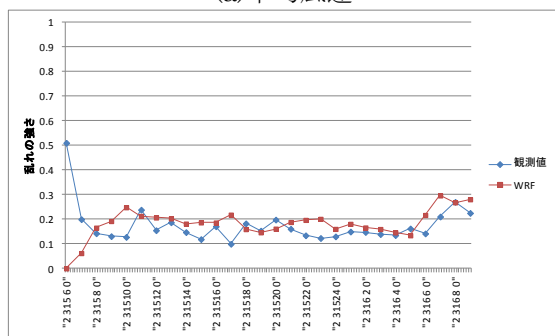
	日付	弱風 or 強風	風向	天候
Case1	2011/09/21	台風	南	雨
Case2	2012/03/15	強風	北	晴
Case3	2012/07/12	強風	南	雨
Case4	2012/07/26	弱風	南	晴
Case5	2013/01/14	強風	北	雨
Case6	2013/04/07	強風	南	晴



(a)平均風速

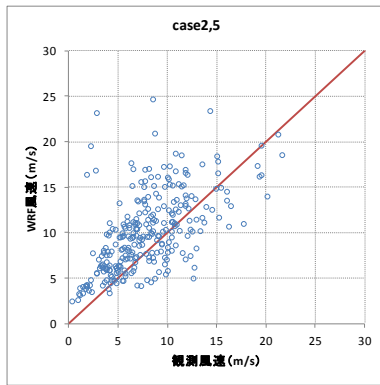


(b)風向

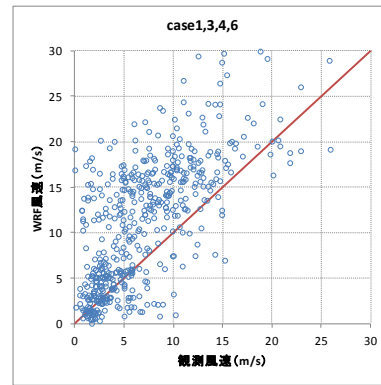


(c)乱れの強さ

図-2 WRF 解析結果と観測結果の比較(Case-2, 観測高さ約 100m)

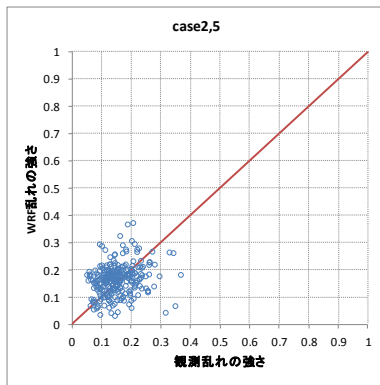


(a)北風

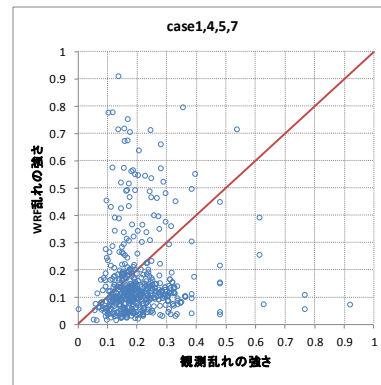


(b)南風

図-3 WRF 解析結果と観測結果の比較(平均風速)



(a)北風



(b)南風

図-4 WRF 解析結果と観測結果の比較(乱れの強さ)

参考文献

- 1) 例えば, 義江 龍一郎, 望月 政法: 領域気象モデル WRF による風速鉛直プロファイルの再現, 日本風工学研究会誌, NO127, pp197-200, 2011.4
- 2) 日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック, 2007.2
- 3) 日本建築学会: 建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック, 2005.10
- 4) 橋本篤, 大澤輝夫, 安田孝志: 複雑地形上でのメソ気象モデル MM5 の風況計算精度と高解像度化の限界に関する検討. 日本風工学会論文集, No.104, pp65-74, 2005.7
- 5) 畑村真一, 竹見哲也, 田村哲郎: 根室半島における風況の局所性に関する高解像度シミュレーション, 第 20 回数値流体力学シンポジウム, F4-2, 2006
- 6) 岸田岳士, 田村哲郎, 奥田泰雄, 中村 修, 宮下康一: 都市域における高層建物屋上での風観測値に関する数値的研究—風速基準値の設定方法—, 日本建築学会構造系論文集, NO.643, P.1559-1565, 2009.9
- 7) 竹見哲也, 中山浩成: 微細規模大気流れの気象モデルと CFD モデルの融合解析, ながれ (日本流体力学会誌) 第 28 巻, 第 1 号, P13-20, 2009 年 2 月
- 8) 近藤 亮彦, 飯塚 悟: Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく人工的な LES 流入変動風生成手法の検討 気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合手法の開発(その 1), 日本建築学会環境系論文集 NO.678, P.661-669, 2012.8
- 9) 片岡浩人, 田村哲郎: RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測, ながれ, No 31, pp.509-512, 2012

- 10) H.Noda and A.Nakayama, Reproducibility of flow past two-dimensional rectangular cylinders in a homogeneous turbulent flow by LES, Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics,91,2003
- 11) 道岡 武信 , 佐藤 歩:メソスケール擾乱を考慮した市街地内のガス拡散予測方法の開発, 電力中央研究所報告 研究報告 : V09024, pp.1-21, 2010.5
- 12) Panofsky,H.A. and J.A.Dutton : Atmospheric Turbulence,Models and Methods for Engineering Applications,John Wiley & Sons,Inc.,NY,NY,1984

4. 研究組織

(1)研究代表者

宮下康一 株式会社 風工学研究所

(2)研究分担者

義江龍一郎	東京工芸大学建築学科
野田 博	近畿大学建築学部建築学科
岡田 玲	東京工芸大学 風工学研究センター
白澤 多一	大妻女子大学
下瀬 健一	独立行政法人 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター
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
三浦 翔	東京工芸大学大学院・建築学・風工学専攻
田辺 剛志	東京工芸大学大学院・建築学・風工学専攻
宮里 龍太郎	東京工芸大学大学院・建築学・風工学専攻
東海林 諭	東京工芸大学大学院・建築学・風工学専攻