

## 空間フィルタリング・リスケーリング手法による WRF-LES 解析結果への高周波風速変動成分の付加

### Addition of high-frequency wind fluctuation to WRF-LES result by rescaling and spatial filtering technique

- 河合英徳, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G5-7, kawai.h.ac@m.titech.ac.jp  
Tao Tao, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G5-7, tao.t.aa@m.titech.ac.jp  
田村哲郎, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G5-7, tamura.t.ab@m.titech.ac.jp

Hidenori KAWAI, Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-7 Nagatsutacho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa  
Tao TAO, Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-7 Nagatsutacho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa  
Tetsuro TAMURA, Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-7 Nagatsutacho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa

This study assumes the flow field with low frequency fluctuations (e.g. meteorological model results), which cannot contain the high frequency fluctuation by the coarse spatial resolution, as a kind of spatial filtered inflow. Therefore, this study focuses on a driver region calculation with spatial filtering technique, which is able to physically decompose the computed wind velocity to the scale of spatial filtered inflow and residual fluctuation appropriately. Then, the present method to add appropriate-scale high frequency fluctuation to WRF-LES is proposed.

Then, the proposed method is used for adding high-frequency fluctuation to WRF-LES result. In WRF-LES result, the high frequency component of wind velocity fluctuation is decayed. As a result, it is confirmed that the high frequency fluctuation is added in the developing process of the driver region.

#### 1. 研究の背景と目的

都市・建築の耐風性能、熱環境等の予測において、より広域の影響を考慮するために、気象モデルと LES のハイブリッド解析が試みられている。しかしながら、気象モデルで得られた解析結果は空間解像度が相対的に粗く、乱流モデルに数値粘性を含んでいることから、一種の空間フィルタリングが施されたような変動の少ない流れ場となり、これを LES 解析に利用するためには高周波の風速変動成分を付加する必要がある。特に筆者ら<sup>1)</sup>はダウンスケーリングを用いた WRF-LES 解析を実施し、その結果として数十 m の空間解像度の解析を実施した場合においても耐風設計に必要な時間スケール(0.1~数秒)の風速の高周波変動が得られないことを確認している。

気象モデルのような比較的低い周波数で変動する流れ場に対して、変動を付加し、都市乱流境界層の LES のための流入変動風を作成する方法としては、すでにいくつかの方法が試みられている。

Xie ら<sup>2)</sup>や Kondo<sup>3)</sup>らは特定の乱流統計量を満たすように風速の変動成分を生成する方法を提案しているが、人工的に生成された変動場は厳密に連続の式及び運動量方程式を満たしていない。一方で Nakayama ら<sup>4)</sup>は片岡らの方法<sup>5)</sup>に基づくドライバ領域の解析によって風速の時間平均に対する変動値を再導入し、気象モデルの解析結果に風速の変動成分を付加する方法を提案している。しかしながら、気象モデルの解析結果のような低周波で変動する風速に対して適切な高周波変動成分を付加することは依然として課題である。

本研究では、空間発達する境界層に対し準周期境界により流入変動風を作成するリスケーリングの方法<sup>6)</sup>に着目し、広域解析によって得られる変動の少ない風をドライバ領域で吹走させることにより変動成分を増幅させ、それを空間フィルタリングしたものの偏差から変動成分を抽出し、リスケーリングすることにより風速の高周波変動成分を付加する方法を提案する。

さらに、本報では本方法の有効性を確認するために既往研究にて得られた WRF-LES の解析結果を接続した解析を実施し、

WRF-LES で得られた流速への高周波変動成分の付加を試みる。

#### 2. 空間フィルタリングとリスケーリングを用いた解析方法

ドライバ解析を用いて風速に高周波変動成分を付加する場合、ドライバ解析内を吹走させて変動が増幅された風速から高周波な変動成分を適切に分離し、再導入する方法が必要となる。

そこで、本研究では気象モデルの解析結果など、比較的粗い区間解像度で解かれ、低い周波数で変動する風速の変動を空間フィルタリングによって粗視化された流れ場と仮定したうえで、空間フィルタリングと風速の変動成分を適切なスケールで再導入するリスケーリングを用いた方法を提案する。

提案する方法では、初めに気象モデルの解析結果のような空間フィルタリングによって粗視化されたと仮定される流入風をドライバ領域に接続し、風速の変動を増幅させる。増幅された風速の変動は、風下のリサイクル点において抽出され、空間フィルタリングによって空間フィルタリングされた流速(以下、Spatial filtered 成分とする)と空間フィルタリングとの偏差分として得られる偏差成分(以下、偏差成分とする)に分解される。本方法ではリサイクル点での Spatial filtered 成分と変動成分の分解において、流入風の空間解像度と同等のフィルタ幅の空間フィルタリングを施すことで、流速はドライバ領域に接続された流入風とより高周波な成分に適切に分離することが可能となる。

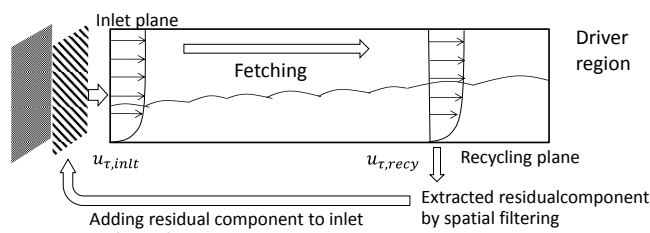


Fig.1. Driver region calculation for adding high-frequency fluctuation to spatially-filtered inflow

行う。まず domain 01-03 では、WRF モデルにより 24 時間の台風の通過経路を予測し、実際の経路と比較した。解析領域の設定では domain 01 の領域が台風の経路を左右することから既往文献では解析領域のサイズの検討を行い、図 1、表 1 のような解析領域を設定している。WRF の解析スキームは表 2 に示すとおりで、domain 01-03 のダウンスケーリングでは 2-way ネスティングが用

$$(u_i)_{init} = (U_{i0}) + [(u'_i)_{init}^{inner}][1 - W(\eta_{init})] + [(u'_i)_{init}^{outer}][W(\eta_{init})] \quad (1)$$

$$u'_i(x, y, z, t) = u_i(x, y, z, t) - \bar{U}_i(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$(u'_i)_{init}^{inner} = \gamma(u'_i)_{recy}(y_{init}^+, z, t) \quad (3)$$

$$(u'_i)_{init}^{outer} = \gamma(u'_i)_{recy}(\eta_{init}, z, t) \quad (4)$$

$$W(\eta) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[ \frac{\alpha(\eta-b)}{(1-2b)\eta+b} \right] / \tanh(\alpha) \right\} \quad (5)$$

( $U_{i0}$ ):空間フィルタリングされた流れ場の時系列データ Time series of spatial filtered infow,  $u_i$ :流速,  $u'_i$ :流速の偏差成分,  $\bar{U}_i$ :流速の Spatial filtered 成分,  $\gamma$ :リサイクル点に対する流入点の摩擦速度比,  $y^+$ :壁座標,  $\eta$ :境界層厚,  $W$ :重みづけ関数(Lund の方法に基づく) init: 流入点, recy: リサイクル点, inner: 内層, outer: 外層,  $\alpha=4, b=0.2$

さらに、得られた偏差成分はリスケーリングすることで、流入風の乱流特性に対応した偏差成分が流入面に付加される (図 1)。なお、リスケーリングはリサイクル点で流速の偏差成分のみを抽出したうえで、Lund の方法<sup>6)</sup>と同様に内層と外層においてそれぞれスケール変換される。内層では壁座標とリサイクル点と流入点の摩擦速度比で、外層では境界層厚さとリサイクル点と流入点の摩擦速度比で変換される (図 1、式 3.4)。スケール変換された内層外層の流速の偏差成分は重みづけ関数  $W(\eta)$  で合成され、流入風に接続される。また、リサイクル点から流入点への一連の再導入のプロセスでは偏差成分は連続条件を満たしている。

### 3. WRF-LES の解析結果を流入風に用いた解析

#### 3.1 ダウンスケーリングによる WRF-LES 解析の概要

対象は強風を伴う台風 15 号 (ROKE) が横浜市に接近した 2011 年 9 月 20 日~21 日を対象とする。本解析では解析対象地を東京工業大学すずかけ台キャンパス (神奈川県横浜市) とし、本州ほぼ全域をカバーする領域 domain 01 からキャンパス周辺の 3km 四方を対象地域とする domain 06 までダウンスケールによる解析を

Table 1. Outer three domains information

Domain	Grids number	Grids resolution	Domain size	Time step	Vertical levels
1	153*153	9km	1377*1377km	30 sec	100
2	151*151	3km	453*453km	10 sec	100
3	124*124	1km	124*124km	10/3 sec	100

Table 2. Physical schemes of each domain

Domain	1-7
microphysics	WSM6
long/short radiation	RRTMG
Surface layer	Monin-Obukhov
Land surface	Unified Noah
Cumulus parameterization	Kari-Fritsch(1-3) None(4-7)
Planet boundary layer	YSU(1-3) None(4-7)

Table 3. Inner four domains information

Domain	Grids number	Domain size	Time step
4	100*100	33.0*33.0km	1s
5	100*100	11.0*11.0km	1/3s
6	100*100	3.67*3.67km	1/9s

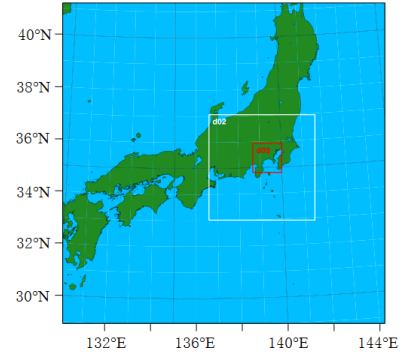


Figure 2. Outer three domains location

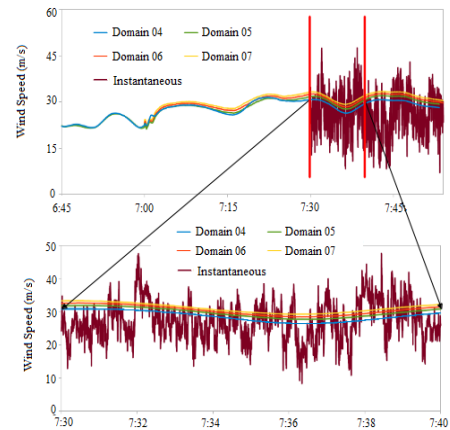


Figure 3. Time series data of wind velocity obtained from WRF-LES

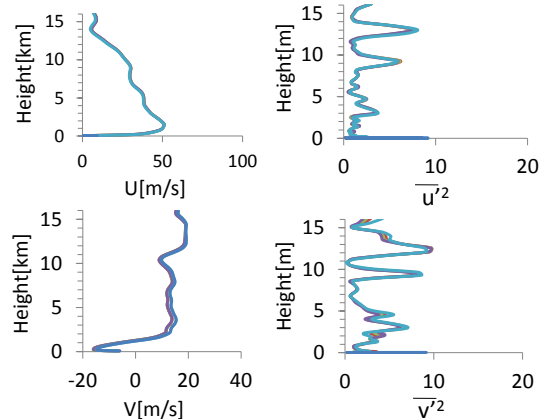
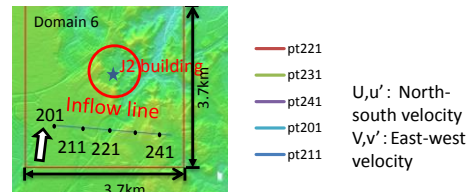


Figure 4. Vertical profile of wind velocity obtained from WRF-LES

いられる。

Domain 04-06 では、WRF で得られた解に対して高周波の風速変動を予測するために WRF-LES により、より狭い領域を表 3 のように高空間解像度で解像した解析を実施している。

図 3 は東京工業大学すずかけ台キャンパス内の高層建物における風速実測値と WRF-LES による解析結果である。WRF-LES によって得られた風速変動は Domain6 の空間解像度 37m、時間刻みは 1/9s の解析結果においても実測値と比べて十分な風速変動が得られていないことが確認できる。

### 3.2 空間フィルタリング・リスケージング手法による WRF-LES への高周波風速変動成分の付加

3.1 に示すように WRF-LES 解析において十分な風速変動が得られなかったことから、本研究では空間フィルタリング・リスケージング手法を用いたドライバ領域の解析によって高周波風速変動成分の付加を試みた。まず、本研究では解析対象を東京工業大学すずかけ台キャンパスの J2 棟としたうえで、解析時間の風上にドライバ領域用の Inflowline を設定する。Inflowline ではライン上の 30 地点の風速鉛直プロファイルの時系列データを保存し、ドライバ領域の解析に接続している。

図 4 は Inflow ライン上にある流速の平均値、分散の鉛直プロファイルである。

図 4 では各地点において流速の平均値、分散についてはほぼ一様のプロファイルが得られていることが確認できる。また、下方（地面から  $1.5\delta$  の領域）では平均流速のプロファイルは一般的な大気境界層のプロファイルに近似可能な傾向が得られていることから、この領域の流速の時空間データをドライバ解析の領域に接続する。解析条件の詳細は表に示す。

次に上記の解析によって得られた結果を図 5, 6 に示す。

まず図 5 の水平方向断面の流速分布に着目すると風下で生成されたストリーク構造がリスケージングののち再導入されている様子が確認できる。また観測地点相当の高さにおける風速の時系列に着目すると、元の WRF-LES の結果に対して細かい変動が得られていることが確認できる。

さらに乱流統計量の確認として、鉛直方向の平均流速、分散のプロファイル（図 6）に着目すると平均流速では  $0.2\delta$  以上の高さにおいてプロファイルがほぼ一致していることが確認できる。さらに分散においては  $0\sim 0.4\delta$  の領域において分散の値が増加が著しい。以上より、本方法を用いることで WRF-LES 解析で得られる流速の平均的なプロファイルを保ちながら、高周波の変動成分を付加することが可能であることが確認できる。

### 4. まとめ

本研究では、ドライバ領域の解析によって空間フィルタリングされた流入風を高周波の変動成分を加えるために、リサイクル面の流速に空間フィルタリングを施して変動成分を抽出し、リスケージングにより変動成分を流入面に付加する方法を示した。

さらに、本手法の有効性を確認するために WRF-LES によって得られた流速の時空間データをドライバ領域に接続し、高周波の風速変動成分を生成した。その結果、空間フィルタリングとリスケージングにより流入面に偏差成分が付加されるプロセスから、空間フィルタリングによって失われた高周波の変動成分が生成されることを確認した。

今後はスペクトル・相関特性解析等を行いながら解析領域のサイズなど解析条件の比較を行い本手法の有効性に関する検証を行う。

Table 3. Calculation settings of driver region

Turbulence model	Smagorinsky model (Cs=0.1)
Dumping function	Van Driest type
Spatial discretization	4 <sup>th</sup> order central difference
Time marching	Adams-Bashforth
Pressure solver	SOR
Domain size(X,Y,Z)	(86, 0.76, 1.56)
Grid number(N <sub>x</sub> ,N <sub>y</sub> ,N <sub>z</sub> )	(400, 100, 100)
Spatial resolution (dx*,dy*,dz*)	(44, 22,1-54)
Time resolution	$\Delta t^*=0.00005$
Reynolds number	$U_r \cdot \delta / \nu = 2360$

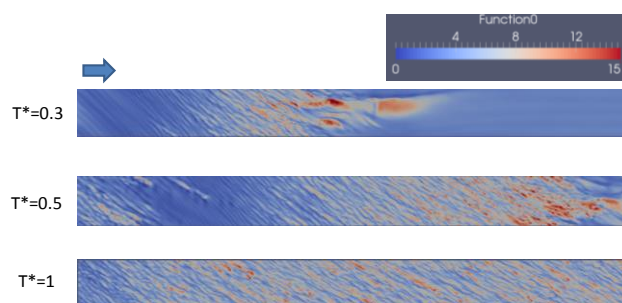


Figure5. Flow field distribution (horizontal plane  $y^+ = 10$ )

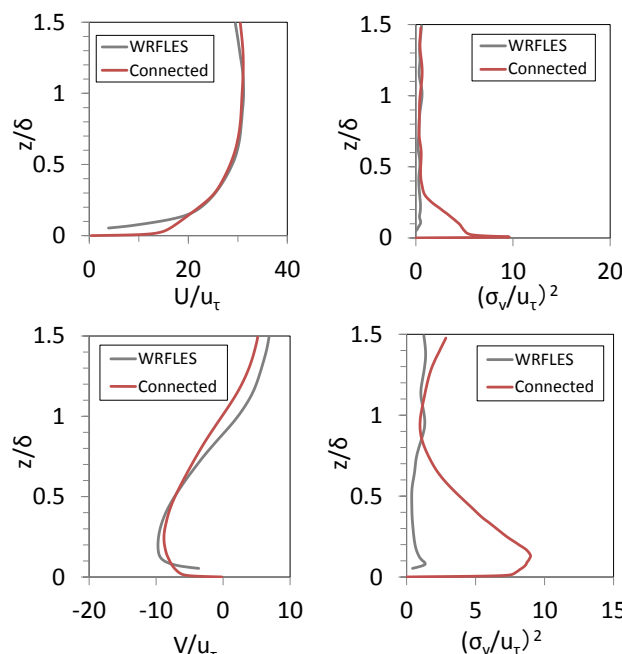


Figure6. Turbulent statistics of wind velocity

参考文献

- 1) Tao Tao, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai, Shuyang Cao :Turbulent wind analysis for typhoon attack using WRF-LES, ICWE14 The 14th International Conference on Wind Engineering, Porto Alegre, Brazil, 2015
- 2)Xie, Z., Castro, I. P.,2008: Efficient generation of inflow conditions for large eddy simulation of street-scale flows, *FlowTurbulence and Combustion*, 81, 449-470
- 3)近藤亮彦, 飯塚悟:Raynolds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方法の開発 日本建築学会環境系論文集, Vol.678, pp.661-669,2012
- 4)Nakayama, H., Takemi, T. and Nagai, H.: Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations, *Atmospheric science letters*, Vol.13, pp.180-186, 2012
- 5) 片岡浩人, 水野稔: 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 523 号, pp.71-77, 1999.9
- 6)Lund, T.S., Wu, X., and Squires, K.D. : Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations, *J. Comput. Phys.*, Vol.140, pp.233-258, 1998