

気象モデル/工学的 LES ハイブリッド手法による

強風下の東京都心における乱流解析

Turbulent Flow Analysis in Tokyo City Area in Strong Winds by Meteorological Model/Engineering LES Hybrid Approach

- 川口真晴, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, kawaguchi.m.ag@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, tamura.t.ab@m.titech.ac.jp
- 河合英徳, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, kawai.h.ac@m.titech.ac.jp
- Masaharu Kawaguchi, Tokyo Institute of Technology, Nagatusta-cho4259, Yokohama, Kanagawa
- Tetsuro Tamura, Tokyo Institute of Technology, Nagatusta-cho4259, Yokohama, Kanagawa
- Hidenori Kawai, Tokyo Institute of Technology, Nagatusta-cho4259, Yokohama, Kanagawa

We employed meteorological model/Engineering LES hybrid approach to flow analysis of the urban area in strong winds considering multi-scale physics including lower frequency component in the energy containing range and temporal wind direction change as well as possible near-ground gust structures. The analysis was performed for Tokyo city area and the result was validated with the observational data.

1. 背景

近年, 平成 30 年台風第 24 号をはじめ各種建築物への風害をもたらす気象現象が発生している. 従来, 建築物への安全性評価として, 乱流成分を適切に再現した境界層型風洞による実験やそれを模擬した数値シミュレーションが行われてきたが, エネルギーカスケードの上流に当たりエネルギーを多く保有する低周波成分や, 風向の時間的な変化の影響を含めることの必要性が指摘されている. また, 台風に伴う雲の下では局所的に突風が発生することが知られており, このような突風構造が市街地にどのような影響をもたらすのか明らかにすることも期待されている.

このような事象を適切に再現し市街地の風況解析を行うためには, 気象場のシミュレーションを出発点として, 乱流成分を適切に復元したうえで接続し, 市街地の計算を行う, 気象モデル/工学的 LES (ラージ・エディター・シミュレーション) ハイブリッド手法¹⁾が有効であると考えられる. 本研究では, 台風下の市街地を対象にこのハイブリッド手法を用いてマルチスケールの物理過程と風速変動を考慮した非定常乱流解析を行い, 得られた結果と実観測データとの比較について報告する.

2. 計算手法

気象モデル/工学的 LES ハイブリッド解析の流れを Fig. 1 に示す. 初めに広域の大気境界層内の様々な過程を考慮した気象モデルで計算を行った. 次に, 気象場に基づいて, より高周波な乱流成分を復元し元の気象場に重層することで乱流成分が復元された気象場を得た. 最後に乱流成分が復元された気象場のデータを流入変動風に用いて気象場を導入した市街地空間の LES を実施した.

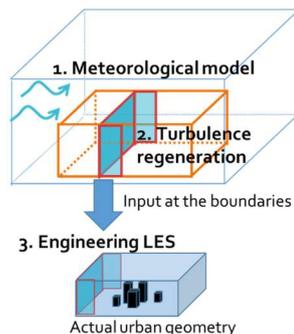


Fig. 2 Meteorological model/engineering LES hybrid approach

2. 1 気象モデルでの計算

実測と比較する強風の事例として今回平成 24 年台風 4 号の計算を行った. 台風は平成 24 年 6 月 19 日夜遅くから 20 日未明にかけて関東に接近し, 東京都江戸川区江戸川臨海では最大風速 26.1m/s を記録したほか⁴⁾, 関東一円で多数の強風被害が発生した²⁾. 気象モデルの計算は東京湾東京港付近を中心とした計算領域を設定した. 計算領域および数値スキームの詳細をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す.

Table 1 Domain configuration for meteorological model simulation

Domain	Grid number	Grid resolution	Temporal resolution	Meteorological model
1	456*456*75	3km	9 s	WRF
2	391*391*75	1km	3 s	WRF
3	361*361*75	1/9km	1/3 s	WRF-LES

Table 2 Calculation conditions for meteorological model simulation

PBL scheme	YSU for Domain 1 and 2
Surface layer	Monin-Obukhov
Land surface	Unified Noah land surface model
Field data	GPV/JMA(5-km resolution) for Domain 1
Sea surface temperature	ECMWF ERA5
Soil temperature	ECMWF ERA5
Topography	USGS30 s for Domain1 and 2, GSI100 m for Domain 3

2. 2 乱流成分の復元計算

気象モデルの乱流成分を復元し, より高周波の変動成分を付加する手法として, 野澤・田村の方法⁴⁾を温熱場に拡張して使用した. 領域気象モデル WRF では圧縮性の基礎方程式を用いており水の相変化や潜熱の物理過程等も考慮されるが, 市街地での LES 解析, および, 乱流成分の復元計算は非圧縮性流体の基礎方程式に基づいて流速と圧力のみを計算する. このため, 高度変化に伴う気圧変化による連続の式の誤差が大きくなりすぎないように, 850hPa の高さの相当する高度 1500m を計算領域の高度上限とした.

乱流成分の復元計算では高周波の乱流成分のみ計算を行う。これは気象モデルの比較的粗い実効格子幅($\bar{\Delta}$)では解像できないが、復元計算に用いたより細かい格子幅(Δ)で解像できる成分であり、流速 U と温位 θ に対するこの気象モデルに基づく高周波乱流成分 \bar{u} , $\bar{\theta}$ について、それぞれ式(1), (2)の方程式を導くことができる⁽¹⁾。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j - \bar{u}_i \bar{U}_j) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{p} - \bar{P}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\tau}_{ij}) + \beta g (\bar{\theta} - \bar{\Theta}) \delta_{i3} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\theta} \bar{U}_j - \bar{\theta} \bar{U}_j) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{h}_j - \bar{h}_j) \quad (2)$$

ここで、大文字の各物理量はグリッド (GS) 成分であり、チルダとバーは、それぞれ気象モデルの格子系および復元計算の格子系のどちらの格子系において基礎方程式 (Navier-Stokes 方程式, エネルギー方程式) を構成する成分であることを示している。例えば、 \bar{U} は気象モデルの粗い格子系で解像される流速成分、 \bar{u} は復元計算の細かい格子系で解像される流速成分である。気象モデル格子の SGS 項 $\bar{\tau}$, \bar{h} にはスケール相似則モデル⁽²⁾, 復元計算の細かい格子の SGS 項 $\bar{\tau}$, \bar{h} には Smagorinsky モデルを用い、温位の風速場への影響は Boussinesq 近似により導入した。 f は Goldstein の方法⁽³⁾に基づく時間平均を 0 とするための feed-backforcing 項である。

最終的な乱流復元後の気象場の成分は \bar{U} , $\bar{\theta}$, 復元した高周波変動をもとの気象場に重畳させることで得られる。 ($\bar{U} = \bar{U} + \bar{u}$, $\bar{\theta} = \bar{\theta} + \bar{\theta}$)。生成する高周波成分について初期値は領域全体で 0, 境界値は常時勾配なしの条件を課した。今回、乱流復元計算の水平方向の格子解像度を約 28m として、台風通過時の時間方向および高さ方向の風向変化を考慮し、次の計算領域のための変動流入風を、計算領域の主流方向の流入境界面および側方境界面のの上流側での位置での値を取得した。

2.3 建物空間を再現した工学 LES

建築物空間の工学 LES には、理化学研究所が開発した非圧縮性流体解析コード CUBE⁽⁴⁾を用いた。CUBE は領域を同数 (16³ 個) のセルからなるキューブで分割するマルチグリッドシステム Building Cube Method (BCM)を採用しており、並列性能が良い特長を有する。基礎方程式は通常非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と連続の式であり、乱流モデルには Dynamic Smagorinsky モデルを用いた。

境界条件は、主流方向の流入境界面および側方境界の上流側には前段階より得た変動流入風を与えた。主流方向の流出面および側方境界の下流側、上面は対流条件、下面は Fig.2 の地形および建物データを immersed boundary method (IBM)により再現し、滑りなし条件を課した。建物を解像するため地表面での格子幅は約 5m 以下とした。

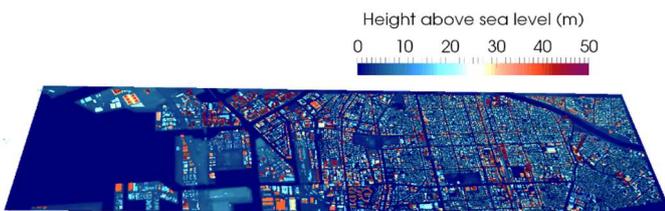


Fig.2 Ground condition (boundary on the left corresponds to the primary inflow boundary and south of the domain)

2.4 実観測データとの比較

Fig.3 に建築物空間を再現した工学 LES の地図上での計算範囲を示す。この範囲内の株式会社 NTT ドコモによる環境センサーネットワークなどの実観測結果との比較を行うとともに、地表付近での乱流統計量についての検討を行う。

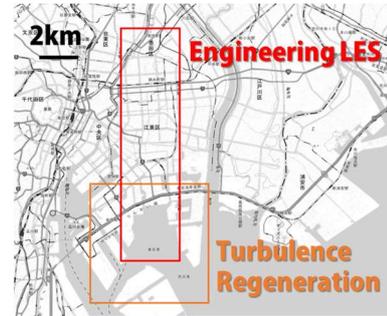


Fig.3 Actual location of Engineering LES domain (Background map is adapted from Geospatial Information Authority of Japan)

3 結果

気象モデルによる解析について示す。図 4 は第 3 領域全体の海拔高さ 40m の水平断面における台風の最接近した時間帯の瞬間の水平風速場である。111m の格子解像度を用いて WRF-LES 解析を行ったが、気象モデルで解像される流れの構造は 500m から 1km 程度にとどまっている。この結果は Rai ら⁽⁵⁾により示された WRF-LES は WRF のモデルと同等の実効解像度 (実格子幅の 7 倍程度) を持ち、WRF-LES ではその実効解像度に基づいた乱流構造が捉えられるという結果と符合する。

Fig.5 は台風の接近から通過後までの風速の大まかな推移 (計算で得られた瞬間値を 10 分間隔で取得したもの) および最接近中の詳細な風速時系列 (計算で得られた全瞬間値に対して 3 秒平均を行ったもの) を示す。乱れの強度が非常に小さく、乱流成分が大幅に減衰していることが確認された。

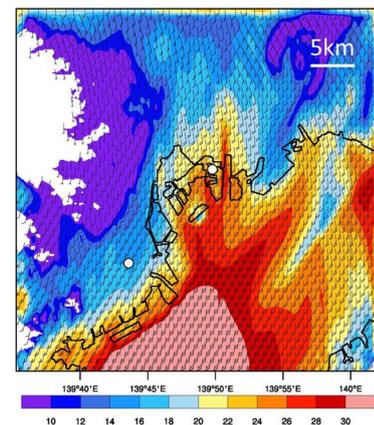
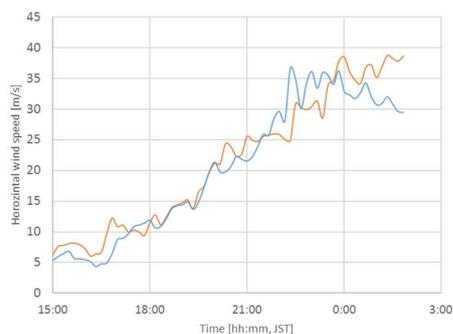
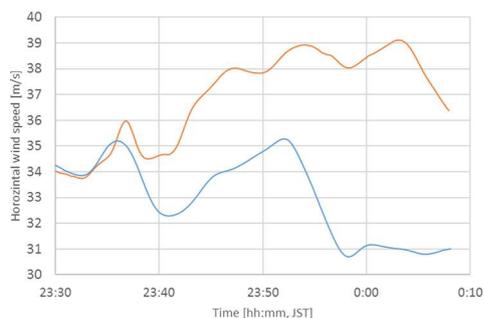


Fig.4 Simulated horizontal instantaneous wind speed in Domain 3 at Z=40m above sea level, 2012/6/19 23:40 JST



(a) Time history of the entire calculation period (data frequency: 10 min)



(b) During period of the closest approach (data frequency: 0.3s)

Fig 5. Time history of horizontal instantaneous wind speed
at the locations marked by a circle in Fig. 4
($Z=140\text{m}$ above sea level)

参考文献

- (1) M. Kawaguchi, T. Tamura, T. Tao and H. Kawai, LES method for generating broad-banded turbulence for meteorological events, Proceedings of ETMM12 (2018), 138
- (2) 東京管区気象台, 平成 24 年 台風第 4 号に関する気象速報 (2012)
- (3) 内閣府, 平成 24 年台風第 4 号による被害状況等について (2012)
- (4) K. Nozawa. and T. Tamura, Coupling method of WRF-LES and LES based on scale similarity model, The Seventh International Proceedings of Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (2012), pp.1942-1948
- (5) J. Bardina, J. H. Ferziger and W. C. Reynolds, Improved subgrid scale models for large eddy simulation, AIAA Paper (1980), 88-1357
- (6) D. Goldstein, R. Handler and L. Sirovich, Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, J. of Comp. Phys. (1993), 105, pp. 354-366
- (7) 伊藤, 近藤, 菊池, 野津, 大竹, 田中, 河合, 田村, 建築物の耐風設計への数值流体計算の導入に関する研究 その 2 高層オフィス・高層集合住宅の風洞実験, 2016 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (2016), pp. 235-236
- (8) R. K. Rai, L. K. Berg, B. Kosović, J. D. Mirocha, M. S. Pekour, W. J. Shaw, Comparison of measured and numerically simulated turbulence statistics in a convective boundary layer over complex terrain, Boundary-Layer Meteorol. (2017), 163, pp.69-89