

都市の風の道評価のための数値流体計算手法の検討

片岡 浩人

Numerical Flow Computation Technique for Assessing Urban Ventilation Path

Hirotto Kataoka

Abstract

Securing an urban ventilation path is an efficient measure for mitigating the heat island phenomenon. One promising numerical technique for assessing urban ventilation paths is the Hybrid RANS/LES method, which combines the Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS) for broad urban areas and the Large Eddy Simulation (LES) for narrow areas around a target building. As a preliminary test, both LES and RANS computations were conducted over a broad urban area. The obtained turbulence statistics were used as inflow boundary conditions for the LES over a detailed urban area with fine grid resolutions. This paper presents the computed flow patterns, and the validation of this approach.

概要

風の道確保による都市域の通風換気はヒートアイランド対策の一つである。計画建物が風下の市街地に及ぼす影響を数値流体計算により評価するには、広域を計算負荷の小さいReynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS)で解き、計画建物周辺のみを予測精度の高いLarge Eddy Simulation (LES)で解くハイブリッドな予測手法が有望である。本論文ではHybrid RANS/LES手法による風の道評価手法について検討する。予備検討として広域市街地を対象としたRANSおよびLESの結果から乱流統計量を抽出し、詳細領域のLES用に変動流入風を生成する。また広域を対象としたLESの結果と比較する事で本計算手法の妥当性を示す。

1. はじめに

風の道確保による都市域の通風換気はヒートアイランド対策の一つである。東京都は風の道確保のためのガイドライン¹⁾を制定し、建築計画が風下市街地に与える影響の評価に数値流体計算による予測を推奨している。しかしビル風などの建物周りの強風域の予測に用いられるReynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS)による計算は、建物後流の非定常な流れ場を再現できないため、風速を過小評価する傾向にある。一方で予測精度の高いLarge Eddy Simulation (LES)は計算負荷が大きく、広域の市街地を対象とするのは難しい。そこで広域をRANSで解き、計画建物周辺のみをLESで解くハイブリッドな予測手法 (Hybrid RANS/LES) が有望となってくる。しかしHybrid RANS/LESでは、平均流れ場を対象としたRANSの結果から、非定常流れを対象とするLESで必要となる時々刻々変化する流入境界条件 (流入変動風) をどのように作成するかが課題となる。

Jarrinら²⁾は、レイノルズ応力からランダムな速度変動を与える方法として、合成渦法 (Synthetic-Eddy Method: SEM) を提案した。同手法では、主流方向に移動する渦点を計算領域内にランダムに発生させ、格子点から個々の渦点までの距離に応じた風速変動を求めて足し合わせる。その際にレイノルズ応力のコレスキー分解を用いる事で、所定の乱流統計量に一致させる。またPolettoら³⁾はSEMを改良して、連続条件を満たした合成渦法 (Divergence Free Synthetic-Eddy Method: DFSEM) を提案

している。筆者ら^{4,5)}は地表面に建物等の障害物が無い滑面上を発達する境界層流を対象として、SEMおよびDFSEMによる流入変動風の生成を試みた。その結果、RANSから得られた統計量を反映できる事、両手法で得られる変動風に大きな違いは無い事などを確認した。

そこで実在市街地を対象としたHybrid RANS/LES計算手法の構築を目的として、流入境界での乱流統計量を与条件としたLESを実施した。対象となるのは東西1.7km×南北1.7kmの範囲の実在市街地 (全体領域) で、この領域から切り出した300m×700mの範囲 (詳細領域) でHybrid RANS/LES計算を行う。詳細領域の流入境界では、DFSEMにより流入変動風を生成する。

本報告では、乱流統計量を介した流入変動風の生成による市街地気流の再現に焦点を絞った予備検討として、以下の手順で解析を行った。

- 1) 全体領域を対象として、LESとRANSそれぞれで解析を行う。
 - 2) 詳細領域の流入境界では、平均風速分布を全体領域のLESの結果から与える。また乱流統計量はレイノルズ応力分布をLESから、乱れ長さスケールを全体領域のRANSの結果からそれぞれ与える。
 - 3) 詳細領域での結果を、全体領域をLESの結果と比較することで予測精度を検証する。
- 2)で与える平均風速やレイノルズ応力の分布は本来であればRANSの結果を用いることになる。ただし今回のRANSは標準 $k-\epsilon$ モデルを採用しており、特に乱れの非等方性の再現に課題がある。この問題は非線形型のRANS

モデルを用いる事で解決されるものとするが、ここでは便宜上比較対象となるLESの結果を用いた。

2. 計算対象領域

計算対象となる実在市街地のモデル図をFig. 1に示す。東京都心の東西1.7km×南北1.7kmを全体領域とし、建物形状はGISデータAREA II市街図(ゼンリン)、地形は5mメッシュ標高データ(国土地理院)を、それぞれ用いてモデル化した。領域の高さは700mとした。このうちHybrid RANS/LES計算の対象となる詳細領域は、Fig. 1中に赤で示す対象建物を中心とした幅300m×長さ700mの大きさで、風向に応じて領域の配置を変える。風向は、北北東から南南西方向の高速道路に沿った32.4度と190.5度、そして対象建物の長辺に直交する風向の315度の3風向とした。

3. 解析手法

3.1 DFSEM

Polettoら³⁾によるDFSEMは、仮想的な領域内にN個の渦点をランダムに発生させ、流入境界での格子点上で各渦点からの影響を積算し、変動速度成分を(1)式から求める。

$$u_i = U_i + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \mathbf{K}_\sigma \left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}^k}{\sigma} \right) \times \alpha^k \quad (1)$$

ここで u_i : 格子点 \mathbf{x} における速度成分
 U_i : 同平均速度成分
 \mathbf{x}^k : k番目の渦点位置
 σ : 乱れ長さスケール

格子点と渦点との距離を乱れ長さスケールで除した無次元流さスケールを引数として用いる関数として以下の関係を用いる。

$$\mathbf{K}_\sigma(\mathbf{y}) = \frac{q(|\mathbf{y}|)}{|\mathbf{y}|^3} \mathbf{y} \quad (2)$$

$$q(\mathbf{y}) = \begin{cases} \sqrt{\frac{16V_B}{15\pi\sigma^3}} (\sin(\pi|\mathbf{y}|))^2 & |\mathbf{y}| < 1 \\ 0 & |\mathbf{y}| \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

ここで V_B : 渦点を発生させる領域の体積

また(1)式中の α^k は各渦点の渦強度を同位置でのレイノルズ応力と関連づけるためのベクトルで、各成分は次式より求められる。

$$\alpha_i^k = \sum_{j=1}^3 \Lambda_j^i \varepsilon_j^k \sqrt{2(k' - \lambda_j)} \quad (4)$$

$$k' = \frac{1}{2} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

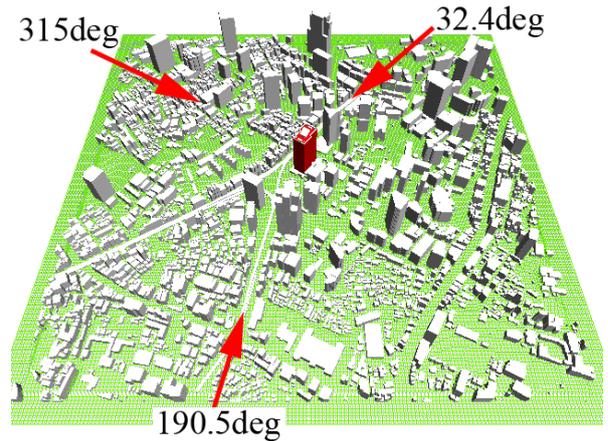


Fig. 1 計算対象となる実在市街地のモデル図
 Model for Target Urban Area
 © 2014 ZENRIN CO., LTD. (Z09KA第039号)

ここで λ_j : レイノルズ応力テンソルの固有値
 Λ^i : レイノルズ応力テンソルのi番目の固有ベクトル
 ε_j^k : -1または1のランダム符号

ただし(4)式中の平方根内が正値となる必要があるため、本手法で再現できるノルマルストレスの非等方性の範囲に制限が加わる事となる。

ある時刻 $t + \Delta t$ における個々の渦点位置は、鉛直方向に平均をとった風速 \mathbf{U}_c と時刻 t の位置座標を用いて次式から時間発展で求める。渦点領域の外に出た場合は、再び乱数を用いて渦点領域の風上断面に移動させる。

$$\mathbf{x}^k(t + \Delta t) = \mathbf{x}^k(t) + \mathbf{U}_c \Delta t \quad (5)$$

3.2 全体領域を対象とした計算

はじめにHybrid RANS/LES計算の流入境界における統計量を抽出するために、Fig. 1に示した全体領域を対象とした計算を行った。Fig. 2に風向190.5度での格子ブロックの位置関係を示す。全体領域の計算は以下の手順で行った。

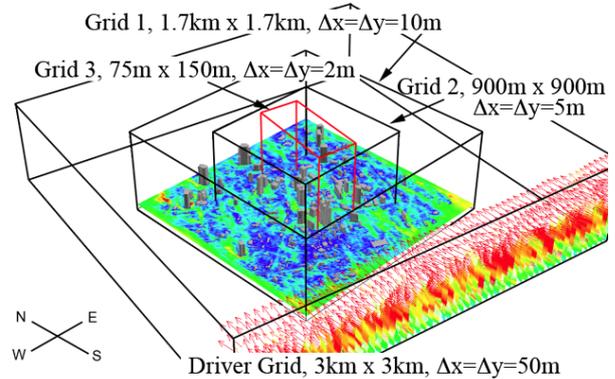


Fig. 2 風向190.5度における格子ブロックの配置図
 Layout of Computational Grid Blocks (190.5 deg)

まず全体領域を格子解像度の異なる3個の格子ブロックで覆う。Grid 1とGrid 2は東西南北方向に正方形の領域で、風向にかかわらず同じ位置とする。Grid 3がHybrid RANS/LES計算を行う詳細領域に相当し、風向に応じてその位置を変える。水平格子解像度は、Grid 1が170×170（格子幅10m）、Grid 2が180×180（同5m）、Grid 3が150×300（同2m）。高さ方向の格子分割は、地表面付近と対象建物の屋上付近が最小格子幅2mとなる101個の不等間隔格子である。全体領域の外側に3km×3kmの大きさのドライバ領域を風向に沿うように配置し、風上境界で流入気流を与える。計算格子は、水平方向に60×60（格子幅50m）の直交等間隔格子。これらの格子ブロックは、双方向にデータを補完（ネスティング）を行いながら、同時に計算する。

全体領域の計算はRANSとLESの二通りの方法で行った。計算で用いた基礎式は三次元擬圧縮性の基礎式で、有限体積法で離散化する。空間微分は二次中心、対流項は三次精度の風上差分（数値粘性項はUTOPIAスキームの1/2）、時間微分項は二次精度の陰解法をそれぞれ用いた⁶⁾。LESでは対流項の数値粘性でSGSモデルの代用とした。格子ラインと一致しない建物形状はFAVOR法で近似し、表面は滑面の対数則（RANS）もしくはno-slip条件（LES）を課した。RANSには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

ドライバ領域の流入気流分布は建築学会荷重指針⁷⁾の鉛直プロファイルの式に従って次式のように与えた。

$$U(z) \begin{cases} = U_{z_G} \times (z/z_G)^\alpha & z < z_G \\ = U_{z_G} & z \geq z_G \end{cases}$$

$$k(z) = \left\{ 0.1 \times U(z) \times (z/z_G)^{-\alpha-0.05} \right\}^2 \quad (6)$$

$$\times \exp \left\{ - \frac{\max(z - z_G, 0)}{0.1z_G} \right\}^2$$

$$\epsilon(z) = \sqrt{C_\mu} k(z) \left| \frac{\partial U(z)}{\partial z} \right|$$

ただし、 $\alpha=0.27$ 、 $C_\mu=0.09$ 、 $z_G=\delta=550\text{m}$ 。境界層厚 δ よりも上空では乱れエネルギーが減衰するように与えた。またドライバ部の側方および上空ではfree-slipとした。

LESではDFSEMでドライバ領域の流入変動風を生成する。この際に必要となる、ドライバ部の流入境界でのレイノルズ応力は次のように与えた。

$$\langle u'w' \rangle = k \quad \langle v'v' \rangle = 0.64k \quad \langle w'w' \rangle = 0.36k \quad (7)$$

$$\langle u'w' \rangle = -v_i \frac{\partial U}{\partial z}$$

$$\langle u'v' \rangle = \langle v'v' \rangle = 0$$

また長さスケールは次式で与えた。

$$\sigma = \max \left(\min \left(C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\epsilon}, \kappa \delta \right), \Delta \right) \quad (8)$$

$$\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z), \quad \kappa = 0.4$$

対象建物頂部に相当する高さ（海拔約200m）の風速 U_H を1.0m/sとおき、LESでは時間刻み1秒で4200ステップの計算を行い、後半の1800秒間で統計量を求めた。

3.3 詳細領域を対象としたHybrid RANS/LES

Grid 3単独で行うHybrid RANS/LESは以下の手順で実施した。

流入境界では、風上断面における平均速度分布ならびにレイノルズ応力の分布を全体領域の計算結果から抽出する。得られた結果とDFSEMを用いて、流入変動風を作成する。今回は、平均流れ場とレイノルズ応力の分布には、全体領域のLES結果を、長さスケールにはRANSの k と ϵ の結果を用いて、(8)式より与えた。

側壁ならびに流出境界では、全体領域のLESの計算結果のうちGrid 2における平均流れ場に対して一方向のネスティングを行い、境界で不自然な流れ場が形成されるのを防いだ。また初期条件は全体領域のLES結果の瞬時値を用い、同LESと同等の手法で解析を行った。

4. 計算結果

4.1 全体領域の分布

Fig. 3に全体領域の水平断面内スカラー風速分布として、海拔105mの水平断面内におけるLESによる瞬間場（Fig. 3a）、同平均分布（Fig. 3b）、RANSによる結果（Fig. 3c）をそれぞれ示す。スカラー風速は対象建物高さの風速 U_H で無次元化してある。

Fig. 3aに示すLESのスカラー風速の瞬間分布から、個々の建物からの渦放出に伴って、建物群風下では複雑な流れ場が形成されているのがわかる。特に赤枠で示す詳細領域のうち風向315度は、領域の風上にある建物群による後流域の中に位置している。

LESの平均場とRANSの結果との比較から、Fig. 3b, 3cの矢印に示されるような箇所、RANSでは建物風下の後流域の大きさや風速の低下量を過大に評価しているなど、既往の研究⁶⁾と同等の傾向が現れている。

4.2 Hybrid RANS/LESへの流入気流分布

Fig. 4に全体領域から抽出された流入気流分布として、風直交方向に領域の両端と中央の三カ所における鉛直分布を示す。

風向32.4度では、風直交方向の三カ所において、平均風速、変動風速、ならびにレイノルズ応力に関する極端な差は見られない。

風向190.5度では、点aは直近風上建物の影響を受けて地上100m付近の風方向の乱れ σ_u が強い。点b, cは直ぐ風下に高層建物が存在するが、平均風速の逆流までは生じていない。

風向315度では、風上建物の後流域からはずれる左端の点aでは、他の二カ所と比べて上空200m高さの範囲まで風速が高い。一方変動風速 σ_u 、 σ_v は、風上建物の後流の

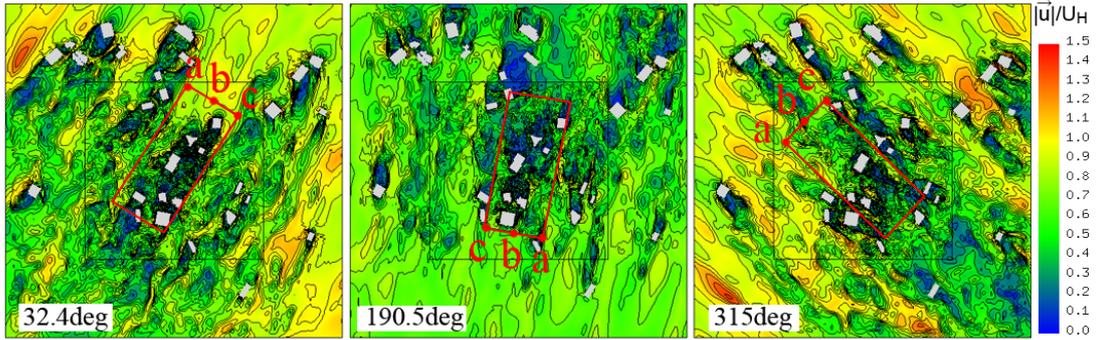


Fig. 3a LESによる瞬時風速分布 $z=105\text{m}$
LES, Instantaneous Velocity Distributions

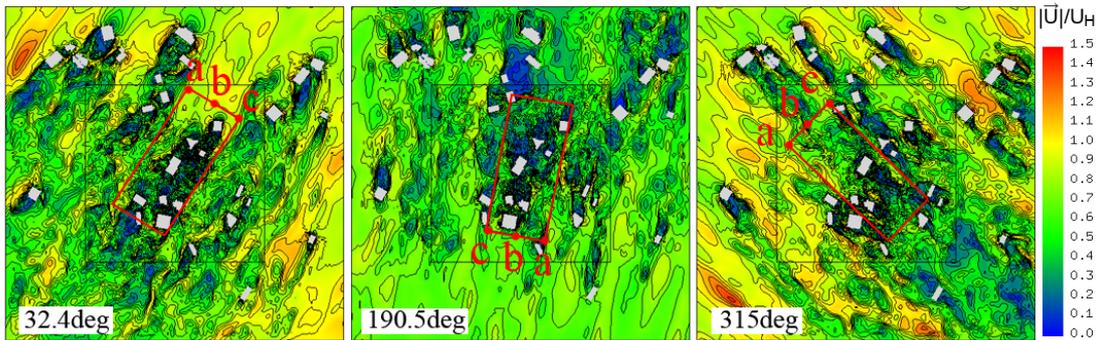


Fig. 3b LESによる時間平均風速分布 $z=105\text{m}$
LES, Time-averaged Velocity Distributions

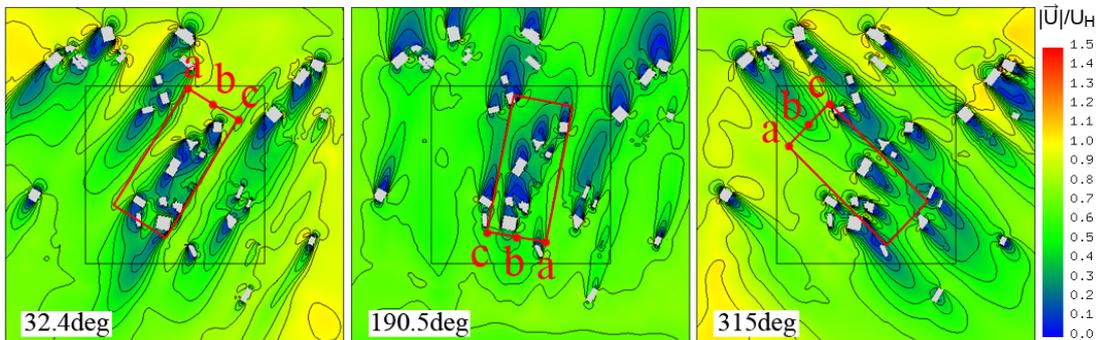


Fig. 3c RANSによる平均風速分布 $z=105\text{m}$
RANS, Velocity Distributions

影響をまともに受ける断面中央の点bが最も高い。レイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$ も変動風速と同様の傾向を示す。

4.3 Hybrid RANS/LESによる計算結果

Fig. 5にHybrid RANS/LESによるスカラー風速の分布を示す。あわせて全体領域のLESによる結果のうち、Grid 3におけるスカラー風速分布も、比較のため示す。

Hybrid RANS/LES (Fig. 5a, 5c, 5e)の結果では、DFSEMにより流入境界で生成された乱れが、減衰する事なく計算領域内部まで到達しているのが確認できる。これは、DFSEMで再現された風速変動が単なるランダム変動と

は異なり、流れ場の構造をそれなりに再現したものであると考えられる。

風向角32.4度のHybrid RANS/LES (Fig. 5a)では、計算領域の風下端に高層建物が存在する。このような場合、当該建物からの後流域が発達しすぎて計算が不安定になるが、平均流れ場でネスティングを行っているおかげで破綻する事なく解が得られている。

風向角190.5度では、計算領域外側の南東 (Fig. 3bのa点付近) に高さ100m程度の高層建物があり、Fig. 5c高さ105mの風上境界東側から内部に流入する低風速域と乱れは、この建物の影響を表している。

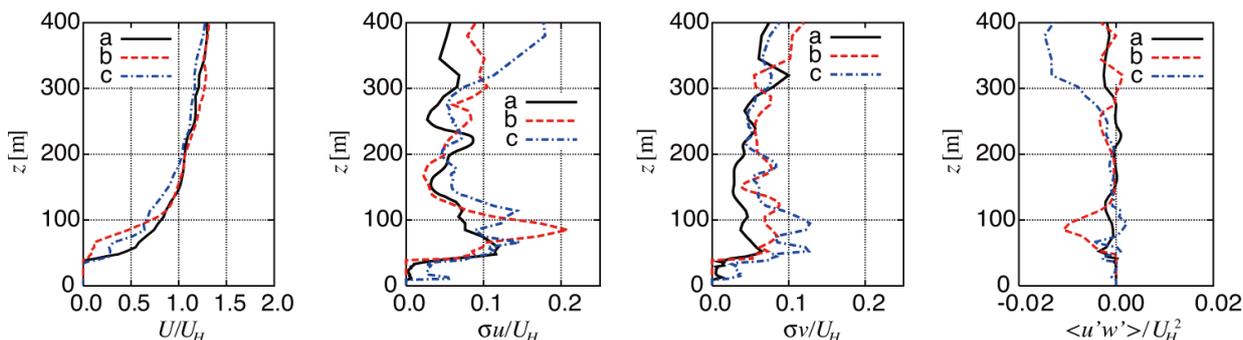


Fig. 4a 風向角32.4度のHybrid RANS/LES流入気流分布
Vertical Profiles at the Inflow Boundary of Hybrid RANS/LES (32.4 deg)

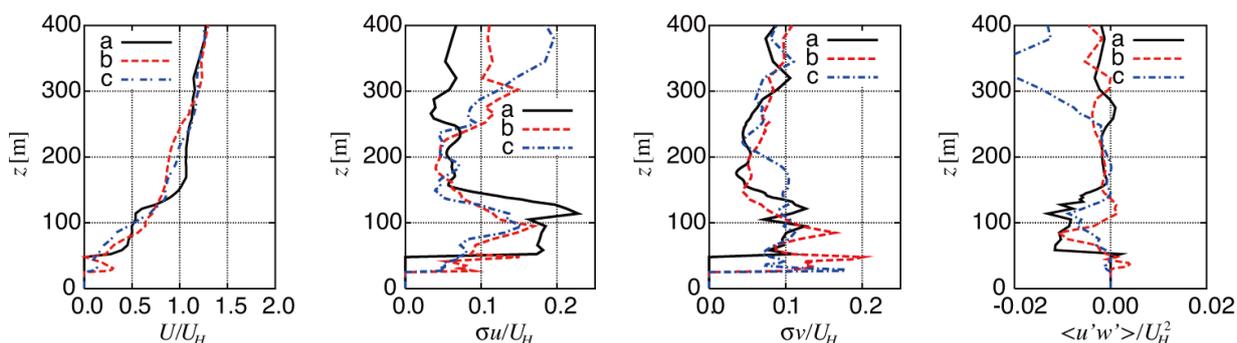


Fig. 4b 風向角190.5度のHybrid RANS/LES流入気流分布
Vertical Profiles at the Inflow Boundary of Hybrid RANS/LES (190.5deg)

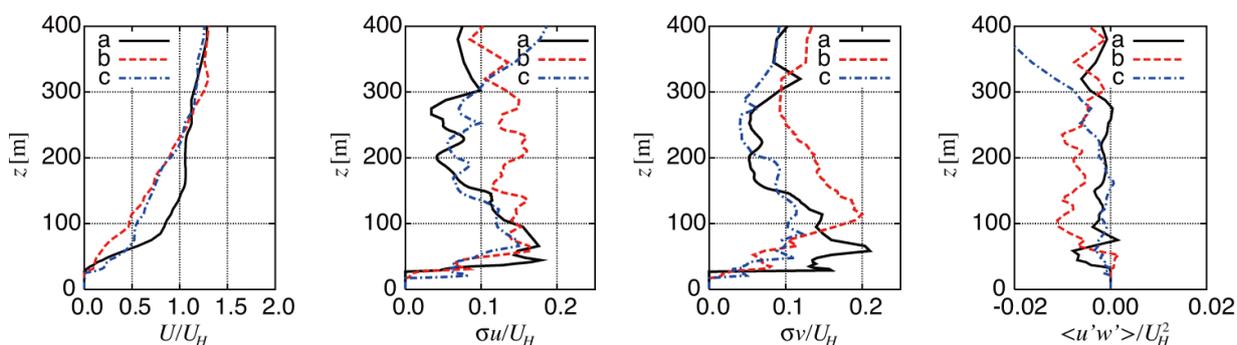


Fig. 4c 風向角315度のHybrid RANS/LES流入気流分布
Vertical Profiles at the Inflow Boundary of Hybrid RANS/LES (315 deg)

風向角315度 (Fig. 5e) では、風上遠方にある高層建物群からの後流の影響が、高さ105mや167mで見られる中央部の低速域として現れている。また、風向角32.4度 (Fig. 5a) と比べて、流入境界から細かいスケールの乱れが現れている。

いずれの風向でもHybrid RANS/LESの結果による平均風速分布は、全体領域を対象としたLESの平均分布と非常によく対応している。このように、街区の一部分を切り取ったHybrid RANS/LESが、全体領域を対象としたLESと同じ状況を再現しているのがわかる。

風の道評価を対象としたLESを行う場合、計算負荷の関係から対象となる建物の風上領域を制限せざるを得な

い。しかしHybrid RANS/LES法を用いれば、比較的計算負荷の軽いRANSによる広域の計算結果をもとにLESの流入境界条件の作成が可能であり、より実態に近い条件で風の道評価が期待できる。

また、市街地の任意の部分の切り出して計算する場合、通常は風下方向に計算領域の余裕をもたせて、領域の風下端部にある建物からはく離流れがスムーズに領域外に流出させる事を行う。しかし、今回用いた境界値を平均場にネスティングする方法では、流出境の直前に建物があっても破綻せずに流れ場の計算が可能である。これもHybrid RANS/LES法を用いる事の利点の1つである。

5. まとめ

Hybrid RANS/LES計算手法による風の道評価手法の構築を目的として、流入境界での乱流統計量を与条件としたLESを実施した。本論文で得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) はじめに全体領域を対象としたRANSとLESの計算をそれぞれ行った。RANSの結果はLES平均場と比較して、建物風下の後流域の大きさや風速の低下量を過大に評価する事が確認できた。
- 2) 次に全体領域の計算結果から抽出した境界条件を用いて、詳細領域のHybrid RANS/LESを実施した。

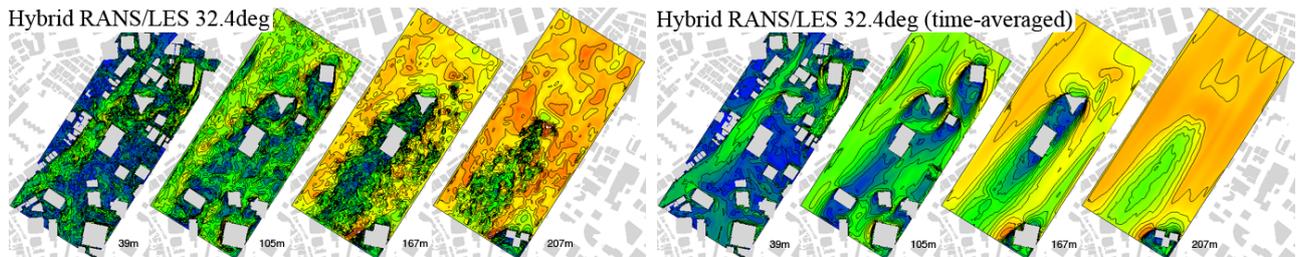


Fig. 5a 風向角32.4度 Hybrid RANS/LES (左：瞬時風速分布, 右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Hybrid RANS/LES Results (32.4deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

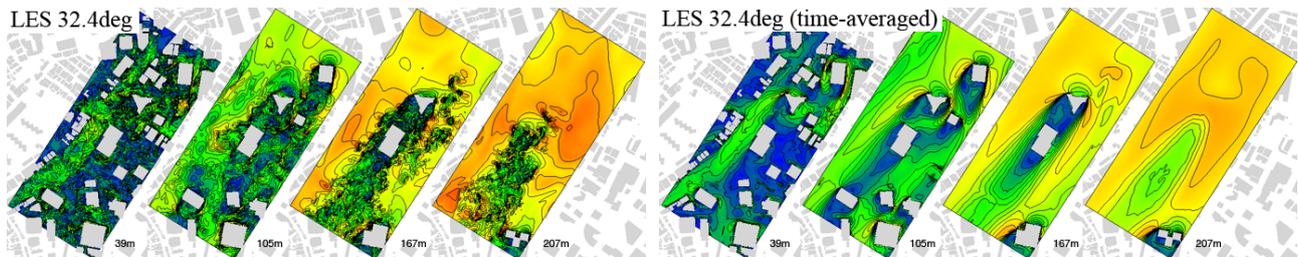


Fig. 5b 風向角32.4度 LES結果の一部分 (左：瞬時風速分布, 右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Corresponding LES Results (32.4deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

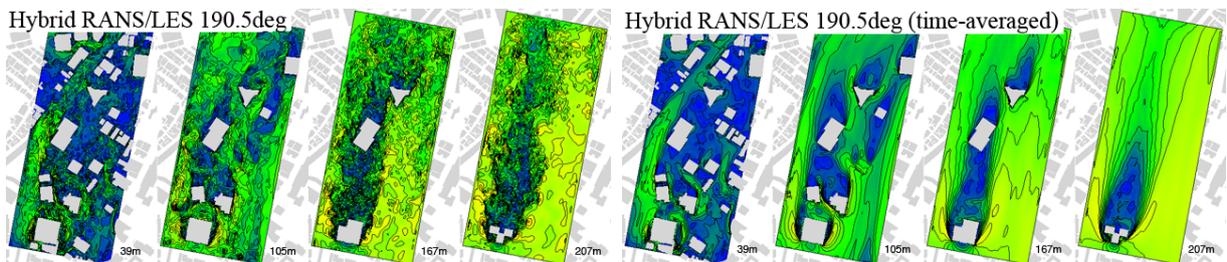


Fig. 5c 風向角190.5度 Hybrid RANS/LES (左：瞬時風速分布, 右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Hybrid RANS/LES Results (190.5deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

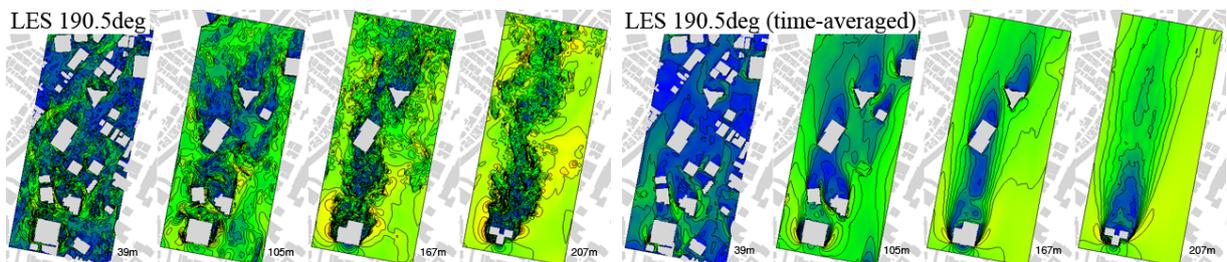


Fig. 5d 風向角190.5度 LES結果の一部分 (左：瞬時風速分布, 右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Corresponding LES Results (190.5deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

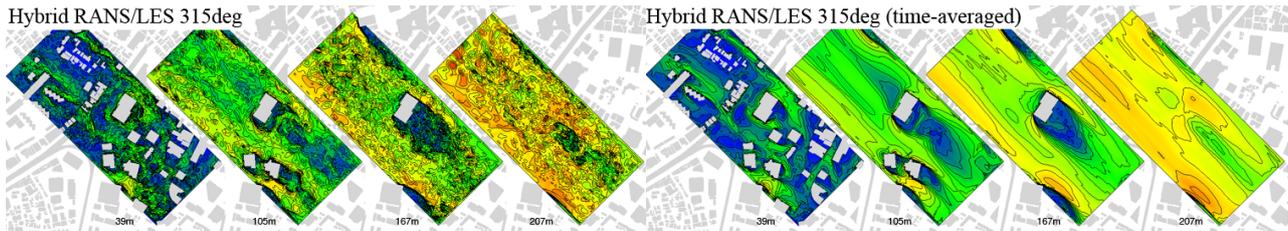


Fig. 5e 風向角315度 Hybrid RANS/LES (左：瞬時風速分布，右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Hybrid RANS/LES Results (315deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

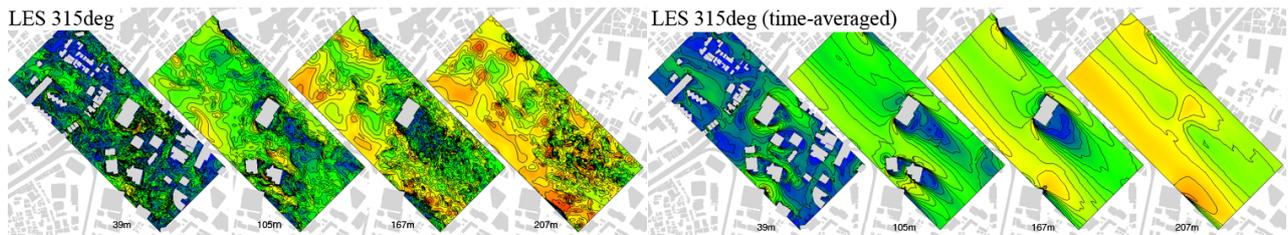


Fig. 5f 風向角315度 LES結果の一部分 (左：瞬時風速分布，右：時間平均風速分布) z=39m, 105m, 167m, 207m
Corresponding LES Results (315deg, Left: Instantaneous, Right: Time-averaged)

得られた平均風速分布は、全体領域を対象としたLESの平均分布とよく対応しており、本計算手法が妥当である事が確認できた。

- 3) DFSEMにより詳細領域の流入境界で生成された乱れは、減衰する事なく計算領域内部まで到達し、詳細領域外にある建物からの後流が再現可能である。
- 4) 境界値を平均場にネスティングする方法は、任意の部分の切り出した市街地を対象とした計算に有効である。

広域を対象としたRANSの計算結果を境界条件としたLESを実施することで、風の道の評価が高精度で可能になる。今後は、風洞実験結果などとの比較を通して、このHybrid RANS/LES法の精度検証を行いたい。

謝辞

本報告は、科学研究費補助金基盤研究B (25289182) 「遠隔観測・LESに基づく耐風設計用鉛直風速分布の再評価と乱れの不確定性の定量化」の助成を受けた研究成果の一部をまとめたものです。研究代表者である東京工業大学・大学院総合理工学研究科田村哲郎教授には、多くの助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東京都：品川駅・田町駅周辺における環境配慮型都市開発の誘導方策「風の道の確保」(案), 2007
- 2) Jarrin, N. et al. : Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a synthetic-eddy method, *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 435-442,

2009

- 3) Poletto, R. et al. : Divergence free synthetic eddy method for LES inflow conditions, *Seventh International Symposium On Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-7)*, 2011
- 4) 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 その1 合成渦法(SEM)を用いた流入変動風の作成, *日本建築学会大会学術講演梗概集B-1*, pp. 95-96, 2011
- 5) 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 その2 連続条件を満たした合成渦法(DFSEM)による流入変動風の作成, *第25回数値流体力学シンポジウム*, B04-5, 2011
- 6) 片岡浩人, 他: RANSおよびLESに基づく高層建物群交流域の特性に関する予測評価 風洞実験結果との比較検討, *第19回風工学シンポジウム論文集*, pp.73-78, 2006
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 21-22, 2004
- 8) Counihan, J. : *Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972,* *Atmospheric Environment*, Vol.9, pp.871-905, 1975
- 9) 義江龍一郎, 他: 高密度市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響, *日本建築学会環境系論文集* Vol.73, No.627, pp.661-667, 2008
- 10) 片岡浩人, 他: 風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発, *大林組研究所報*, No.64, pp.49-54, 2002
- 11) 吉田智哉, 他: ドップラーソーダを用いた地表面粗

度の異なる地点の風速の鉛直分布に関する研究 その22市街地モデルの風洞実験, 日本建築学会大会講演梗概集B-1, pp.85-86, 2003

- 12) 片岡浩人, 他: 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, No.523, pp.71-77, 1999

- 13) 大塚清敏, 他: 小型ドップラーライダー観測による境界層の日変化, 日本建築学会大会講演梗概集B-1, pp.93-94, 2010

本論文で使用した地図データの許諾番号: Z09KA第039号 (ゼンリン)