

対流境界層の乱流熱輸送機構における都市キャノピの影響 Effects of Urban Canopy on Turbulence Heat-Transfer Process in Convective Boundary Layer

服部 康男 (電中研) 石原 修二 (DCC) 須藤 仁 (電中研)
中尾 圭佑 (電中研) 長谷部 憂磨 (DCC) 平口 博丸 (電中研)

Yasuo HATTORI, Central Research Institute of Electric Power Industry

Shuji ISHIHARA, Denryoku Computing Center

Hitoshi SUTO, Central Research Institute of Electric Power Industry

Keisuke NAKAO, Central Research Institute of Electric Power Industry

Yuma HASEBE, Denryoku Computing Center

Hiromaru HIRAKUCHI, Central Research Institute of Electric Power Industry

FAX: 04-7184-7142, E-mail: yhattori@criepi.denken.or.jp

Large-eddy simulations (LES's) for a thermally convective flow above buildings and streets (an urban canopy) in the atmospheric boundary layer are performed. Special attention is paid to the effects of the buildings on turbulence heat transfer processes in the vertical direction of the atmospheric boundary layer. LES's clearly show that the buildings yield the dissimilarity between thermal and flow fields, i.e., the vertical profiles of turbulence statistics and also coherence structures in the thermal fields significantly differ from those in the flow fields.

1. 緒言

都市キャノピにおける乱流熱輸送機構の解明は、都市熱環境評価や数値気象モデルの再現精度向上などに関わる実用的に重要な課題である。課題解決を目指した、現地観測、風洞実験、数値解析に基づく研究が実施されている^{1),2)}。近年では、ラージ・エディ・シミュレーションの援用とともに、都市を模擬した建物群直上に存在する組織構造³⁾の強い関与が解明されている^{4),6)}。本研究では、模擬建物群による、乱流組織構造の発達過程の変化を、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) により調べる。

2. 解析手法および条件

LES には、有限体積法をベースにしている OpenFOAM を用いた⁷⁾。Boussinesq 近似を施した基礎方程式系に PIMPLE アルゴリズム (buoyant BoussinesqPimpleFoam) を適用した。SGS 成分を 1 方程式モデルにより見積もった。2 次精度中心差分スキームによる空間離散および 2 次精度 Back Euler スキームによる時間積分を行った。ただし limited-linear スキームを用いた。ただし、1 方程式モデルの移流項には TVD 制限付きの線形補間を施した。

対流境界層に関する初期条件を、先行研究⁸⁾に準じて設定した。10 ms⁻¹の地衡風とともにコリオリパラメータ $f=1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ を付与した。気温について、地上高さ 940 m 以下 ($z < 940 \text{ m}$) で 300 K 一定とし、1060 m 以下で 8/120 Km⁻¹、その上空では 3/1000 Km⁻¹ で増加する鉛直分布を設定した。

解析対象とする模擬建物群として、図 1 に示す Kanda et al.⁹⁾による Comprehensive Outdoor Scale Model (COSMO) 形状^{3),5),6)}を取り上げた。建物を模擬した一辺が $1H$ ($H=40 \text{ m}$) の立方体ブロックを $1H$ 間隔 (街路幅に相当) で一様に配置している。建蔽率は 25% となる。作動流体には空気を想定した。建物および街路の表面が加熱された状態として、道路表面および建物上面では Monin-Obukof 相似則とともに、0.24 Km⁻¹ の熱流束を与えた。粗度長さを 0.16 m とした。建物側面では断熱・non-slip 条件を与えた。

解析領域として、水平方向に $150H \times 150H$ 、鉛直方向に $50H$ を考慮した。格子形状を立方体とし、一辺の長さを $H/4$ (地上高さ 200m 以下), $H/2$ (地上高さ 400m 以下), H (地上高さ 1300m 以下), $2H$ ($1300\text{m} < z < 2000\text{m}$) とした。時間ステップをクーラン数が 0.5 になるよう、可変設定した。

スピニアップも含めて、 $1.5 \times 10^4 \text{ sec}$ の計算を実行し、 $1.25 \times 10^4 \text{ sec}$ 以降の値により統計量を算出した。

図 1 には座標系およびデータ抽出地点も併記した。以下では、水平方向に x, y 軸、鉛直方向に z 軸とする。地点 A, B, C での結果に注視する。比較のため、模擬建物群のない条件での計算結果も記載した。

3. 結果および考察

図 2 に、鉛直方向乱流運動量フラックスの境界層内の鉛直分布を示す。実線・破線は、それぞれグリッド成分・サブグリッド成分を示す。サブグリッド成分の寄与が、地表面ごく近傍を除く境界層全域において小さいことから、グリッド成分による乱流構造の捕捉を確認できる。模擬建物群の影響として、乱流運動量フラックスの増加を理解できる。地表面近傍の非一様性を強化およびそれに伴うストリートキャニオンでの活発な輸送も視認できる。

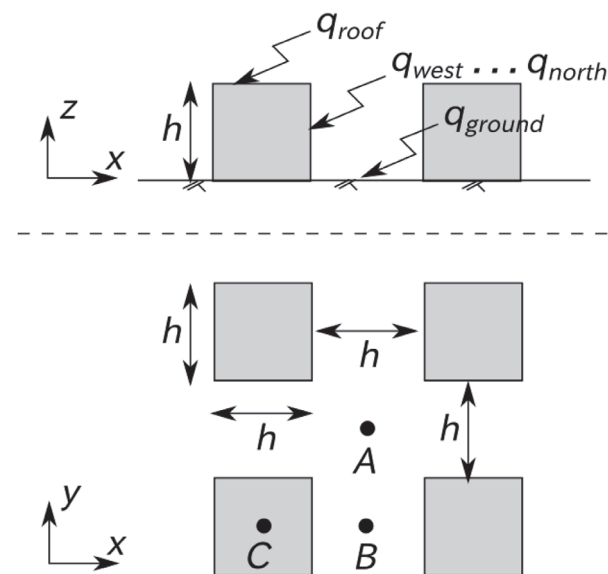


Fig. 1 Schematics of flow configuration.

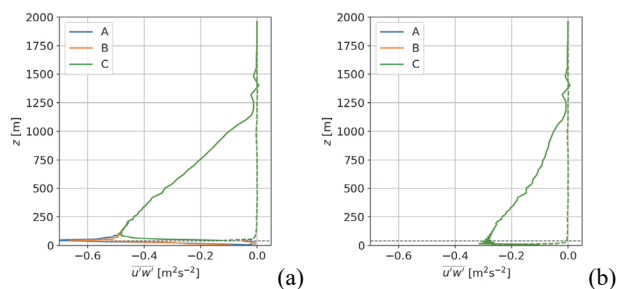


Fig. 2 Vertical profile of turbulence momentum flux in boundary layer, with, (a), and without, (b), cubes.

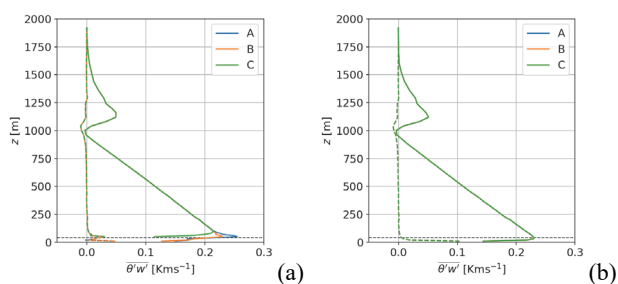


Fig. 3 Vertical profile of turbulence heat flux in boundary layer, with, (a), and without, (b), cubes.

図3に、鉛直方向乱流熱フラックスの境界層内の鉛直分布を示す。実線・破線は、それぞれグリッド成分・サブグリッド成分を示す。サブグリッド成分の寄与は、作動流体である空気のプロントル数が0.7であることから、運動量フラックスと同様に地表面ごく近傍を除く境界層全域において小さい。一方、模擬建物群の影響については、運動量に比べて軽微になる。地表面近傍での非一様性は生じるものの、運動量フラックスに見られた最大値の急増は認められない。また、フラックスの値自体も建物群の有無に依らず同程度となる。

図4、5に、地表面近傍 ($z=4\text{m}$) の水平断面における水平方向風速および温度の瞬時値のコンターを示す。模擬建物群による組織構造の変調を観察できる。水平方向風速は、模擬建物群が存在する場合、主流方向 (図中横方向) に伸長する筋状の構造を明瞭に形成する。一方、模擬建物群が存在しない場合、スパン方向 (図中縦方向) に伸びるロール状の構造をもたらす。温度場も類似の挙動を示すが、より微細な構造の重畳も認められる。また、主流方向風速に対する負の相関も確認できる。

これらの結果から、建物群が対流境界層の乱流輸送過程に与える影響を理解できる。建物群により運動量の乱流輸送は活性化される。熱の乱流輸送量には大きな変化がなく、速度場と温度場との間に明確な非相似性が現れる。一方、瞬時風速や温度の可視化において、地表面近傍に形成される組織構造には、顕著な非相似性が認められなかった。また、この組織構造が、建物群の付加により、ロール状から筋状に変調することも明らかになった。今後、建物群の影響とともに、組織構造による速度場・温度場の輸送過程への更なる精査を進める予定である。また、建物群の付加による、対流境界層の時間発展および乱流遷移挙動の変化も確認された。非定常挙動の分析とともに時空間構造特性の把握も重要な課題と認識している。

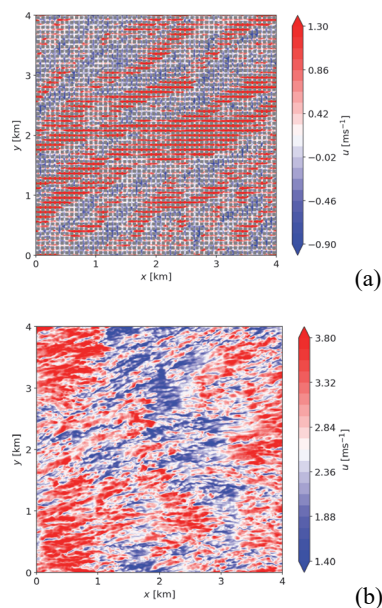


Fig. 4 Contour of instantaneous horizontal (x direction) velocity fluctuation at $z = 44\text{ m}$ in boundary layer, with, (a), and without, (b), cubes.

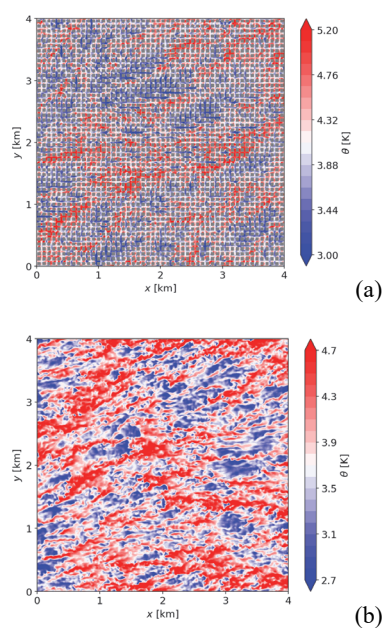


Fig. 5 Contour of instantaneous temperature fluctuation at $z = 44\text{ m}$ in boundary layer, with, (a), and without, (b), cubes.

参考文献

- 1) Roth M, Q J R Meterol Soc 126 (2000) 941.
- 2) Britter RE and Hanna SR, Ann Rev Fluid Mech 35 (2003) 469.
- 3) Kanda M, J Meterol Soc J 85B (2007) 363.
- 4) Michioka T et al., Boundary-Layer Meterol 138 (2011) 195.
- 5) Takimoto H et al., Boundary-Layer Meterol 140 (2011) 295.
- 6) Castillo MC et al., Boundary-Layer Meterol 140 (2011) 453.
- 7) Hattori Y et al., Proc ICONE19 (2011) 43775.
- 8) Moeng C-H and Sullivan PP, J Atmos Sci 51 (1994) 999.
- 9) Kanda M et al. J Appl Meteorol Climatol 46 (2007) 1067.