

対流境界層を対象とした LES のための流入境界条件の検討

A Study of inflow boundary condition for LES targeting Convective Boundary Layer

佐藤拓人^{*1}, 日下博幸^{*1}
Takuto SATO, Hiroyuki KUSAKA

In this study, turbulent boundary conditions including turbulence generation are developed for large-eddy simulations of convective boundary layers. Specifically, we extend the recycle-rescale method to account for the growth of the convective boundary layer. Comparing the proposed method with the periodic boundary condition, the proposed method underestimates the convective boundary layer height. This may be due to the fact that the transition layer above the convective boundary layer is not included. However, the proposed method reproduces turbulence well upwind of the computational domain.

1. はじめに

都市上に発達する対流境界層(CBL)の Large-eddy simulation は, 都市内の熱・風環境シミュレーションにとって有用な手法である. LES はある程度の乱れを直接解像する手法であり, 乱れの様子や乱れによる物理量輸送の精度が向上する. そのため, LES を用いることで, 実都市での熱環境悪化の評価や暑熱適応策の評価などの精度向上が期待される. しかしながら, LES の流入境界条件はレイノルズ平均応力モデル(RANS)のものよりも複雑である. これは, 乱れを直接解像する特性のために, 流入境界から解像可能な渦を加味しておく必要があるためである.

この問題に対処するため, 様々な乱れを含む流入境界条件が開発・検討されてきた(e.g., Tabor and Baba-Ahamdi, 2010). 乱れを含む境界条件は, 事前計算の有無という観点から, Precursor method と Synthetic method という2つに大別できる.

Precursor method は, 本計算と別に計算領域を確保し, 乱流生成のためのシミュレーションを行う手法である. 具体的には, 事前に風洞を模したフルサイズの計算からデータベースを得る方法(Yoshida et al., 2018)や, Recycle-rescale 法に基づく方法(Lund et al., 1998)がある. これらの手法は, 運動量や熱の保存則のもとで乱れを生成できるため精度に優れるというメリットがある. しかし, 事

前の計算等が必要であるため, 計算コストが高くなりやすいというデメリットもある.

Synthetic method は, 計算対象とする場の平均値や乱れの情報と乱数をベースに流入境界における乱れを診断的に生成する方法である. 具体的には, フーリエ変換を利用して目的のパワースペクトルを持つ乱れを生成する方法(飯塚ほか, 1992)や Reynolds 応力の Cholesky 分解と digital filter に基づく方法(Okaze et al., 2017)などがある. 特に平均値や乱れの情報が事前に得られる場合には, 乱れ生成のための事前計算を省略できるため, synthetic method は precursor method より低い計算コストで乱れ生成できる. しかし, 一般に運動量や熱の保存則を満たさないことから, 流入境界付近において流れ場や乱れの精度が低下する可能性がある. 以上のことから, precursor method と synthetic method には計算コストと精度のトレードオフの関係がある.

これら2つの手法は主に中立大気を仮定して開発されてきた. しかし, 熱環境シミュレーションに適用するには, 浮力による乱れを考慮できる境界条件の方が望ましい. precursor method と synthetic method の両方とも, 熱的な乱れを考慮できるように改良が進められている. しかし, サーマルが卓越する CBL を対象とした場合の各手法の精度はまだ十分に調査されていない. また, い

*1 筑波大学計算科学研究センター sato.takuto.gu@u.tsukuba.ac.jp
Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

くつかの手法は CBL を対象とした開発が行われていないことから、CBL の成長を対象とした計算に適用できるように拡張を施す必要がある。

そこで本研究では、CBL が成長するような場合でも適切に乱れ生成を行うことができる流入境界条件の開発を目指す。具体的には、事前計算を行う Precursor 法の一つである Recycle-rescale 法を CBL に適用可能なように拡張する方法を検討する。この拡張を施すことで、CBL を対象とした計算のための流入境界条件を提案するのみならず、現在提案されている別の境界条件も含めて精度を相互に比較することも可能となると思われる。

2. 手法

シミュレーションの対象は、時空間一定の平均流入風の中で、理想都市上で成長する CBL である。これは、ある程度環境風がある中で実際の都市上で成長する CBL を単純化したものである。この条件下で、提案手法が周期境界条件と比べて風速・温位・乱れが境界条件によってどの程度再現できるかを調査する。

2. 1 使用モデルと計算設定

使用したモデルは筑波大計算科学研究センターで開発が進められている 3 次元建物解像都市気象 LES モデルである City-LES (Ikeda et al., 2015) である。このモデルは非静力 Boussinesq 近似方程式系を基礎方程式とするモデルである。大気安定度の影響を考慮できることから、本研究での使用に適したモデルである。SGS モデルは標準 Smagorinsky モデルを使用し、 $C_s=0.18$ とした。

空間解像度は、水平・鉛直解像度ともに 40m とした。本計算の東西・南北・鉛直方向の格子点数は $(n_x, n_y, n_z) = (412, 256, 62)$ とした。ただし、後述する Recycle-rescale 法を用いる場合は、この本領域の風上側を広げ、ドライバー領域を設けた 1. ドライバー領域は x 方向に 100 格子分とし、Recycle-rescale 法を用いる場合の格子点数は $(n_x, n_y, n_z) = (512, 256, 62)$ である。積分はいずれの境界条件の場合も 2 時間行い、最後の 10 分を解析対象とした。領域の模式図を図 1 に示す。

風速の初期条件は全層で 5m/s の西風を与えた。温位は基準温位を 312.65K とし、全層で 0.004 K/m の温位減率を与えた。

運動量に関する下部境界条件は、建物を粗度として与えた。このときの粗度は $z_0=1.0\text{m}$ として、

運動量フラックスはバルク法で計算した。熱に関する下部境界条件は、ドライバー領域・本領域ともに 100W/m^2 の顕熱フラックスを与えた。

流出境界条件は、対流流出境界を用いた。流出速度は流出面における速度の最大値と最小値の平均とした。

流入境界は 2.2 節で述べる Recycle-rescale 法を拡張した提案手法と、周期境界条件とした。ただし、周期境界条件を用いる場合は、流れが過度に減衰しないように背景圧力勾配を与えた点に注意されたい。

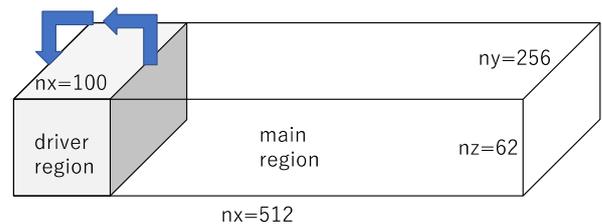


図 1：計算領域の模式図。

2. 2 Recycle-rescale 法の拡張

本研究では、主に中立大気を仮定した実験の際に用いられる Lund et al. (1998) の方法を CBL に適用できるように拡張した。領域内にリサイクル平面を設定して乱れ成分をサンプリングし、流入境界に戻して再利用する。もとの Lund et al. の方法では乱流境界層厚さと摩擦速度を長さスケールと速度スケールとして利用して、リサイクル面における乱れをスケールしながら再利用することで、効率的に乱れを成長させる。CBL の場合を考えると、CBL 内で卓越する乱れは地表面近くの機械乱れではなくサーマルであることから、この乱れをスケールできるようなパラメータを用いる方がよいものと考えられる。そこで本研究では、長さスケールとして CBL 厚さ D を、速度スケールとして CBL 内の鉛直速度スケール w^* を用いた。

$$D = \left(\frac{2}{c_p \rho_a \Gamma} \int_0^\tau H d\tau \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$w^* = \left[\frac{g}{\Theta} DH \right]^{\frac{1}{3}}$$

このとき、 $c_p, \rho_a, \Gamma, H, g, \Theta$ はそれぞれ、定圧比熱、大気密度、基準温位減率、顕熱フラックス、重力加速度、基準温位である。これらのスケールを用

いて、速度と温位の摂動成分を以下のようにスケールリングする。

$$u'_{inlt} = \sqrt[3]{\frac{D_{inlt}}{D_{recy}}} u'_{recy} (z_{inlt}^{*inner})$$

$$\theta'_{inlt} = \frac{D_{inlt}}{D_{recy}} \theta'_{recy} (z_{inlt}^{*inner})$$

ここで、下添字 *inlt*, *recy* はそれぞれ流入面, リサイクル面における値を示す。*z**は無次元高さである。流入面, リサイクル面における CBL 高さは以下の通りである。先述の通り、速度スケールは境界層厚さの 1/3 乗となることから、速度は境界層厚さの 1/3 乗でスケールリングすることとした。

$$D_{inlt} = \left(\frac{2}{c_p \rho_a \Gamma} \int_0^\tau H d\tau \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{recy} = \left(\frac{2}{c_p \rho_a \Gamma} \int_0^{\tau+x/u_\infty} H d\tau \right)^{\frac{1}{2}}$$

ここで、*x*はドライバ領域の長さである。

自由大気(CBL より上層)では流入時の状態を保持するために乱れがないと大胆に仮定し、以下のように初期状態で固定した。

$$u'_{inlt}{}^{outer} = 0$$

$$\theta'_{inlt}{}^{outer} = \Gamma z$$

3. 結果

図 2 に、周期境界を用いた場合と提案手法を用いた場合の主流方向風速の鉛直プロファイルを示す。周期境界条件の場合、乱れ成分と平均成分の区別なく再利用する。そのため、特に下層においてプロファイルが変形している。これに対して提案手法の場合は、平均成分は初期値と同じく 5m/s に固定して乱れ成分のみを再利用するため、特に流入境界近くにおいて風速を固定する効果が顕著に現れ、全層で 5m/s に近い値となっている。

図 3 に、周期境界を用いた場合と提案手法を用いた場合の温位摂動のプロファイルを示す。完全周期境界の場合は、高度約 650m 程度まで中立層が存在していることがわかる。CBL の高度は主として顕熱フラックスで規定されており、この中の

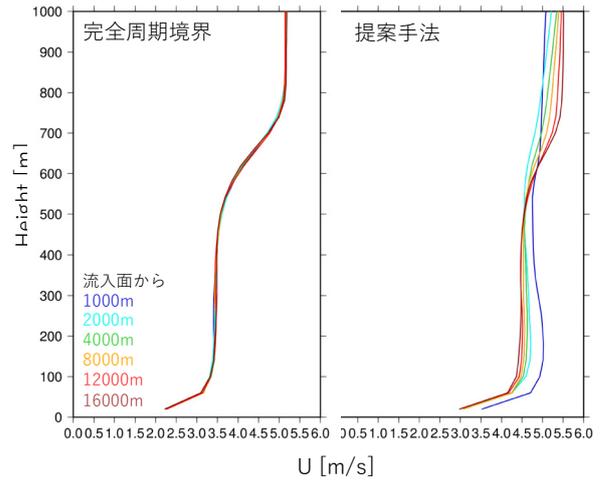


図 2：流入境界から風下各位置における主流方向風速の鉛直プロファイル。左：周期境界条件の場合、右：提案手法の場合。

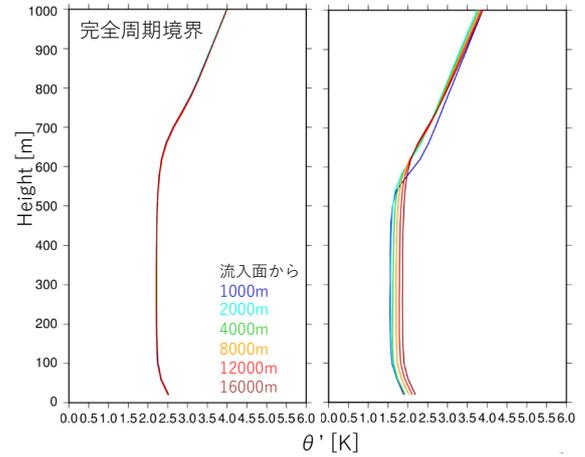


図 3：流入境界から風下各位置における温位摂動のプロファイル。ここで、摂動は基準温位からの摂動を表す。左：周期境界条件の場合、右：提案手法の場合。

最大スケールの乱れ(サーマル)は CBL 高さと同程度の空間スケールのもと考えられる。そのため、周期境界と似たプロファイルを示す境界条件は、最大スケールであるサーマルを含む乱れの状態をよく再現しているものと思われる。この視点でみると、提案手法は流入境界近くで中立層の高さがおよそ 550m 程度となっており、CBL 高さを過小評価していることがわかる。この過小評価は流下とともに緩和していく。風上境界近くにおける CBL 高さの過小評価は、提案手法が遷移層を考慮しなかったためと思われる。本研究で推定した CBL 高さは下部からの顕熱フラックスのみを考慮したものであり、オーバーシュート部分を考慮

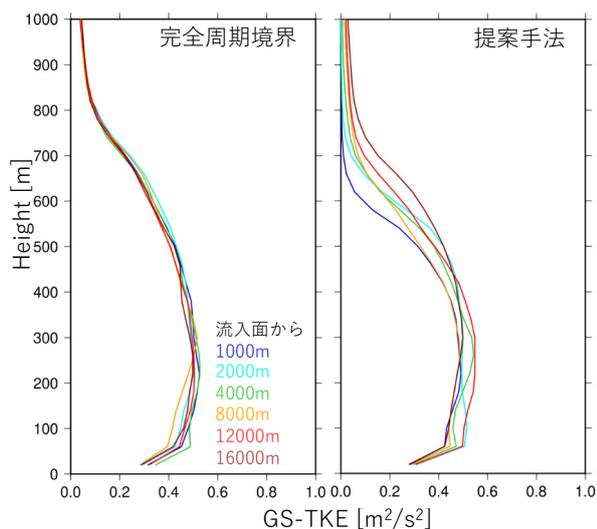


図4：流入境界から風下各位置におけるグリッドスケールの乱流運動エネルギーの鉛直プロファイル。左：周期境界条件の場合，右：提案手法の場合。

できていない。また、CBL より上部の自由大気においては乱れがないものとしたため、オーバーシュートが押さえこまれている。これらの理由から、特に流入境界近くで CBL 高さが過小評価されたものと思われる。温位の上昇量を見ると、周期境界の場合ではどの位置においても同様に 2K 以上の上昇が見られる。これに対して提案手法の場合は、温位の上昇量が小さく、特に風下 1km, 2km 程度では地上付近の温位上昇が大きい高度でも 2K に満たない。これは、温位のスケールリングに用いたスケールリング係数の誤差が原因であると思われる。このスケールリング係数にはさらなる検討が必要であろう。ただし、この上昇量の過小評価も、CBL 高さの過小評価と同じく流下に伴って解消されていくことから、この過小評価はリサイクル領域に加え、領域内の乱流と馴染ませるような助走領域を設ける等の工夫を施すことで緩和することが可能である。

図4に、周期境界を用いた場合と提案手法を用いた場合のグリッドスケールの乱流運動エネルギー(GS-TKE)を示す。GS-TKE の場合も、周期境界の場合の結果に近い方が乱れをより再現できているものと考えられる。また、風上から周期境界条件を用いた場合と近ければ、流入境界から積極的に乱れが生成できているものと思われる。この視点で見ると、提案手法は、風下どの位置においても周期境界条件の場合と似たプロファイルで

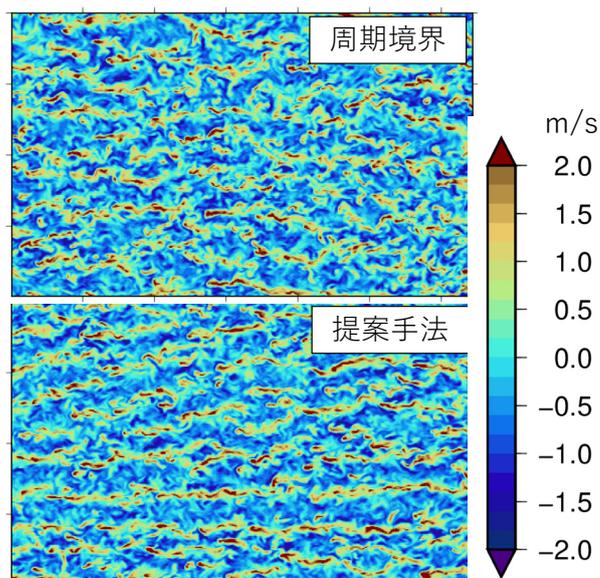


図5： $z=180\text{m}$ における鉛直風の水平分布。上：周期境界条件の場合，下：提案手法の場合。

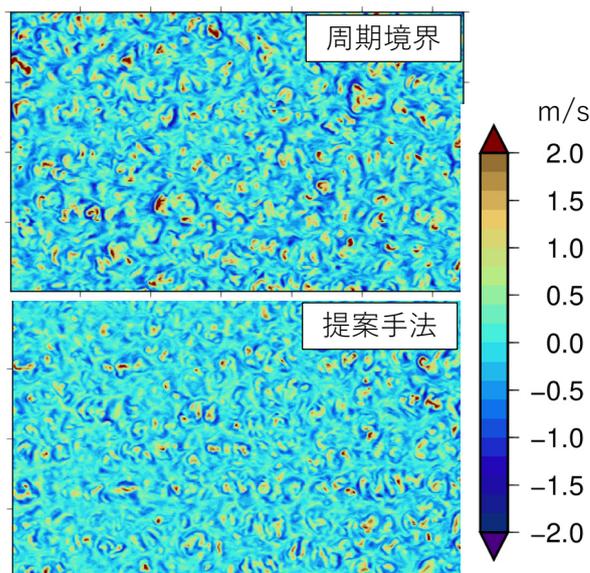


図6： $z=580\text{m}$ における鉛直風の水平分布。上：周期境界条件の場合，下：提案手法の場合。

あることがわかる。ただし、特に風下 1km で顕著なように高度 600m 以上で過小評価している。これは先に温位のプロファイルで指摘したように、CBL 高さを過小評価したためと思われる。

乱れ生成の様子を確認するため、両手法を用いた場合の $z = 180\text{m}$ と $z = 580\text{m}$ における鉛直風速を図5、図6にそれぞれ示す。図5みると、周期境界の場合と提案手法の場合で顕著な違いは見られない。このことから、流入境界直後から積極的に乱れが生成されている様子がわかる。乱れの空間

的な大きさも周期境界条件の場合と似たものとなっていることから、サーマルも含めた乱れをよく生成できていると言えるだろう。これに対して図6を見ると、周期境界の場合と提案手法の場合で違いがある。具体的には、両者とも散発的な上昇流は確認できるが、提案手法の場合の方が周期境界の場合より上昇流が弱く、水平スケールも小さい。これは、先に述べた CBL 高さの過小評価に起因するものと思われる。提案手法では、顕熱フラックスから推定した CBL 高さより上は安定層であると仮定した。そのため、本来よりオーバーシュートが抑制されたことで、CBL 上端に近い $z = 620\text{m}$ における上昇流の様子に違いが出たものと思われる。

以上の結果をまとめると、提案手法は接地境界層から CBL への拡張をある程度実現できたと言えるだろう。具体的には、サーマルを含む CBL 内の乱れを流入境界近くから再現できた。特にサーマルを流入境界近くから適切に再現できるという特徴は、他の診断的に乱れを生成する手法にはない点であろう。

4. まとめ

本研究では、CBL の成長を伴う場の LES に適用できる流入境界条件を開発するため、既存の Recycle-rescale 法に拡張を施した。拡張した手法の場合と周期境界条件の場合の結果を比較したところ、提案手法は風速の平均値を固定するという目標を達成できた。しかし、CBL 高さを過小評価した。この過小評価はリサイクル時に遷移層を考慮しなかったためと思われる。ただし、この過小評価は流下とともに緩和される。乱れの様子をみると、提案手法は流入境界近くから周期境界と似た乱れを生成できた。これは自身の計算した乱れを再利用するためであると思われ、診断的に乱れを生成する手法より高精度に乱れが再現できることを示唆している。ただし、CBL 高さの過小評価に起因して、CBL 上端付近の上昇流の様子に違いが現れた。CBL 上部の遷移層の再現性を高めることで、さらなる精度向上が見込まれる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K03656 の助成を受けたものです。また、本研究成果の一部は筑波大学計算科学研究センターの学際共同利用プログラム(Oakforest-PACS, Cygnus)を利用して

得られたものです。また、本研究を行うにあたり、東京工業大学大風翼准教授より、境界条件の実装などに関して貴重な助言をいただいた。

参 考 文 献

- Tabor, G. R., and Baba-Ahmadi, M. H., “Inlet conditions for large eddy simulation: A review”, *Computers & fluids*, 39 (2010), 553-567
- Yoshida, T., Takemi, T., Horiguchi, M., “Large-eddy simulation study of the effects of building-height variability on turbulent flows over an actual urban area”, *Boundary-Layer Meteorol.*, 168 (2018), 127-153
- Lund, T. S., Wu, X., Squires, K. D., “Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations”, *J. Comp. Phys.*, 140 (1998), 233-258
- 飯塚悟, 村上周三, 持田灯, 李相山, “波数空間の3次元エネルギースペクトルに基づくLESのための流入変動風の生成”, *生産研究*, 49 (1992), 27-30
- Okaze, T. and Mochida, A., “Cholesky decomposition-based generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation”, *Computers and Fluids*, 159 (2017), 23-32
- Ikeda, R., Kusaka, H., Iizuka, S., Boku, T., “Development of urban meteorological LES model for thermal environment at city scale”, 9th International Conference on Urban climate, (2015)