

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06570

研究課題名（和文）都市街区スケールとメソスケールをつなぐ大規模数値計算

研究課題名（英文）Numerical simulation of atmospheric boundary layer and turbulence in urban district

研究代表者

稲垣 厚至（Inagaki, Atsushi）

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：80515180

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では浮力を考慮した格子ボルツマン法LESモデルを開発し、それを用いた都市大気境界層の計算を実施した。熱の輸送過程を差分法で表現し、ブジネスク近似を用いて格子ボルツマン法に浮力効果を導入した。水平面に均一な正の熱負荷を与えた大気境界層の計算を実施し、一般的な大気境界層の特性を再現することを確認した。また、既存の差分法に基づくLESモデルとの比較からほぼ同精度の計算結果が得られることを確認した。都市大気境界層の計算を実施し、浮力に起因するロール渦と、それによる街区内温度場への影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

格子ボルツマン法は従来の流体計算手法に比べGPUを用いた並列計算性能が高く、大規模計算に向いている。本研究ではそれを日中の大気境界層計算に適用したが、これにより例えば大気境界層の流れと都市街区の流れを同時に解くことができ、都市の歩行者が実際に受ける大気環境の形成過程について数値計算により検討することが可能となる。また現在の計算資源を考慮すると計算領域は数百km程度まで拡張可能であり、局地循環の影響なども陽的に考慮することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a model to compute non-neutral atmospheric boundary layer in urban area by means of lattice Boltzmann method with large eddy simulation model. The advection of heat is expressed by a finite difference method, and the effect of buoyancy is implemented using the Boussinesq approximation. A test simulation of air flows over a homogeneously heated flat surface represents the basic characteristics of the convective boundary layer, and quantitatively equivalent results to a finite difference model. The developed model is used to simulate a convective urban boundary layer. A direct interaction of the flows in the urban district and the mixed layer convection was confirmed.

研究分野：都市気象

キーワード：大気境界層 都市大気環境 建物後流 格子ボルツマン法 LES 大規模構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の大気観測及び数値計算において、大規模乱流構造を介した混合層と地表面近傍(接地境界層、粗度境界層、各種キャノピー層)の流れの非定常な相互作用が生じていることが示唆されている。その物理過程を明らかにすることは、局所的な地表面状態(都市や森林など)が広域気象場へ及ぼす影響や、逆に地表面近傍の微気象環境が広域気象場からどのような影響を受けているか評価する上で重要である。本研究は大気境界層及び地表面近傍の物理過程(地物の起伏など)を陽的に解像する大規模な数値計算を実施し、混合層と地表面近傍流れの相互作用を明らかにすることを目的とする。そのためには大規模な計算資源を効果的に活用できる計算モデルが必要である。格子ボルツマン法は流体計算手法の一つであるが、比較的新しい手法であるため気象場への応用事例は少ないものの、その計算効率の高さから気象場への応用、特に都市大気境界層のように主要な渦スケールが数オーダーに渡って存在するような場への応用が期待される。

2. 研究の目的

本研究課題において、(1)浮力を考慮した格子ボルツマン法 LES モデルを開発し、(2)本モデルを用いて都市街區の流れから、浮力で駆動される日中の大気混合層までを陽的に解像した、都市大気境界層の大規模計算を実施する。その計算結果を踏まえ、(3)都市の熱対流構造の発達過程と、それに対する街區構造との関連、あるいは混合層の流れが都市街區の風・温熱環境に及ぼす影響を評価する。

3. 研究の方法

格子ボルツマン法は、巨視的な流れを構成する仮想的な粒子群の動きを離散的な速度分布関数で表現し、その時間発展を計算する。粒子は併進及び衝突するものとし、単一時間緩和係数を用いることで、分布関数の時間変化が次の式で表現される。

$$f_i(\vec{x} + c\Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau}(f_i - f_{eq}) + \left(1 - \frac{1}{2\tau}\right)F_i\Delta t \quad (1)$$

ここで、 $f_i$ は速度分布関数の  $i$  方向成分、 $\vec{x}$ は位置ベクトル、 $c$  は粒子速度、 $t$ 及び $\Delta t$ は時間とその刻み幅、 $\tau$ は時間緩和係数、 $f_{eq}$ は平衡分布関数である。 $F_i$  は外力であり本計算では浮力が与えられる。粒子の速度分布関数から以下の式により巨視的な風速及び密度が計算される。

$$\rho = \sum_i f_i \quad (2)$$

$$\vec{u} = \sum_i \vec{c}f_i + \frac{1}{2}\vec{F}\Delta t. \quad (3)$$

熱の移流拡散は差分法で計算し、ブジネスク近似で表現した浮力効果を外力として式(1)及び(3)に添加した。

4. 研究成果

テスト計算として、水平一様な地表面から一定量の顕熱フラックスを与えた計算を実施した。計算領域は水平 6.4 km×6.4 km、鉛直 2 km とし、格子間隔は 20 m とした。地表面から水平一様な顕熱フラックス 0.1 K m s<sup>-1</sup> を与えた。水平方向境界には周期境界条件を用いた。初期条件として、水平方向に 1 m s<sup>-1</sup> の一様流速を与え、温位の鉛直分布は高度 500 m までは 300 K で一定値、それより上は 0.01 K m<sup>-1</sup> の割合で増加させた。図 1 は時間及び水平方向に平均した温位と顕熱フラックスの鉛直分布であり、混合層内の一様な温位分布や、連行、顕熱フラックスの直線分布など、それぞれ典型的な混合層の特徴が再現されている。また、これらの計算結果を他の気象 LES モデルと比較し、同等の結果が得られていることを確認した。

次に東京都臨海部を対象とした、水平 19.2 km × 4.8 km、鉛直 2 km の領域について、格子幅 2m で個々の建物形状を陽的に解像した計算を実施した。地表面及び屋根面から 0.1 K m s<sup>-1</sup> で一定の顕熱フラックスを与えた。初期境界層高度を 500m とし、一様な水平風速を与えて流れ方向に熱

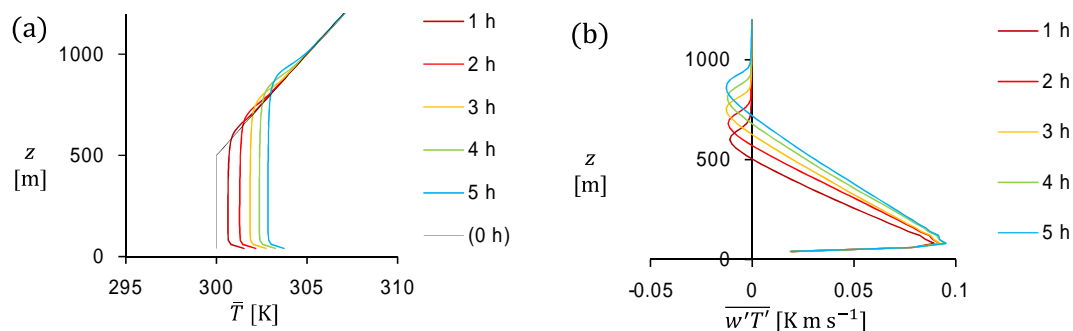


図 1 一様平板加熱上の温位(a)と顕熱フラックス(b)の鉛直分布  
色の違いは計算開始からの経過時間を示す。

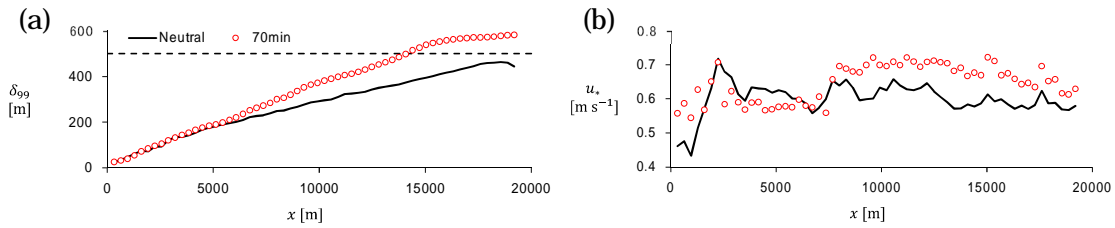


図2 主流風向に沿った(a)境界層高度と(b)摩擦速度の変化  
 シンボルは大気安定度が不安定な場の計算結果、実線は中立の場の計算結果を示す。

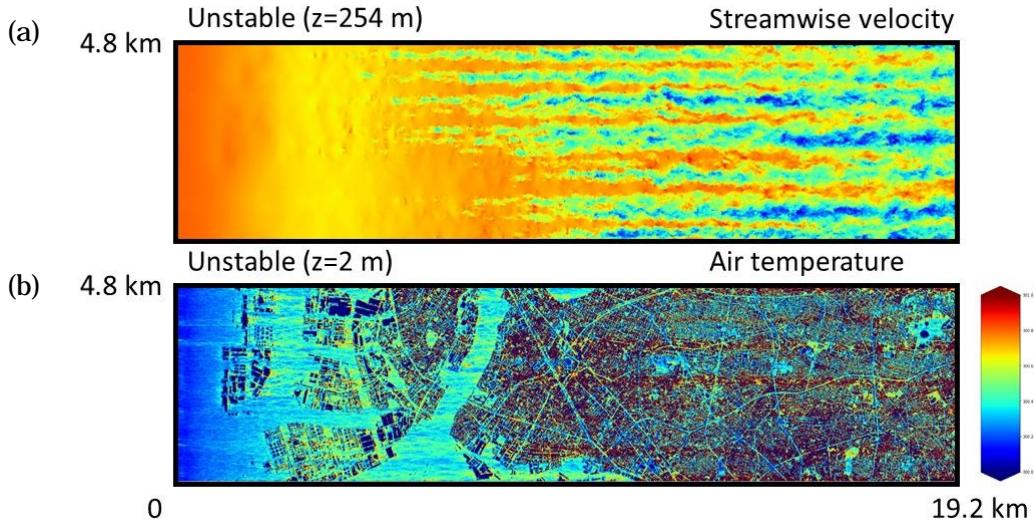


図3 同時刻の(a)主流風速（高度 254m）と(b)温位（高度 2m）の水平断面分布

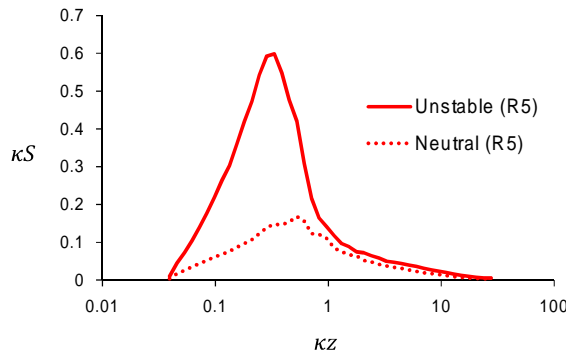


図4 主流風速変動のスパン方向波数スペクトル  
 実線は不安定時、破線は中立時の値。x=12.8~16km の範囲で平均した。

的及び機械的作用により発達する都市大気境界層の計算を行った。大気安定度は-0.02 程度となっていた。この計算事例と、先行研究で行った中立大気安定度での計算事例との比較を行った。

図2は主流方向に発達する境界層高度を示しており、中立大気安定度の計算結果と比べて主流方向への発達率が大きくなっていることが確認できるが、初期境界層高度に達した後は逆転層の影響で発達率が中立の事例と同程度かやや小さくなっていることが確認できる。摩擦速度は境界層の発達に伴い大きくなっている。図3(a)は高度254mにおける主流風速の水平分布を示している。高速及び低速領域が筋状に連なっており、これは浮力により駆動される水平ロール渦の水平断面分布を見たものである。図3(b)は高度2mの気温の水平分布であるが、街区形状によらずに筋状の高温域が形成されていることが確認できる。図3(a)と比較すると、この街区内の高温域は上空の低速領域と対応していることが分かり、混合層における熱対流の影響が街区内の気温場に直接影響を与えていることを意味している。これまで均一に並べられた立方体粗度群においてこのような影響が確認されているが、本研究においてより一般的な都市幾何配列においても気温場への直接影響を今回確認することができた。

図4はx=12.8-16kmにおける主流風速変動のスパン方向波数スペクトルを示している。中立時においても類似の筋状大規模構造の形成が確認されているが、スペクトル強度を見ると不安定場の方が大きな乱流強度を有することが分かる。しかしながら、その代表幅（スパン方向の卓越波数）については両者とも概ね同オーダーであり、それぞれ境界層高度程度となっていることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsushi Inagaki, Yovita Wangsaputra, Manabu Kanda, Meral Yucel, Naoyuki Onodera, Takayuki Aoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Inner and outer-layer similarity of the turbulence intensity profile over a realistic urban geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters on the Atmosphere	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.2151/sola.2020-021">https://doi.org/10.2151/sola.2020-021</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 何 暁卿・稲垣 厚至・神田 学	4. 巻 74(5)
2. 論文標題 地上水平風速の年間スペクトル特性とモデリング	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1195-I_1200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 河本陸, 稲垣厚至, 神田学, Muhammad Rezza	4. 巻 74(4)
2. 論文標題 移動観測に基づく都市街区内の微気候のアンサンブル平均特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_253-I_258
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Inagaki A, Onodera N, Kanda M, Aoki T
2. 発表標題 Lattice Boltzmann simulation of unstable urban boundary layer over heterogeneous topography
3. 学会等名 10th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Onodera N, Idomura Y
2. 発表標題 ACCELERATION OF PLUME DISPERSION SIMULATION USING LOCALLY MESH-REFINED LATTICE BOLTZMANN METHOD
3. 学会等名 Proceedings of 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-26) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Onodera N, Idomura Y, Yussuf A, Shimokawabe T
2. 発表標題 Communication Reduced Multi-time-step Algorithm for Real-time Wind Simulation on GPU-based Supercomputers
3. 学会等名 Proceedings of 9th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScalA 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Onodera N, Idomura Y, Yussuf A, Shimokawabe T
2. 発表標題 Communication reduced multi-time-step algorithm for the AMR-based lattice Boltzmann method on GPU-rich supercomputers
3. 学会等名 The 1st R-CCS International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wangsaputra Y, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, Aoki T
2. 発表標題 Urban boundary layer analysis of flat and realistic slope cases in a large-scale
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Inagaki A
2. 発表標題 Numerical Simulation of Urban-boundary Layer with Explicitly Resolving Buildings Structures
3. 学会等名 16th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小野寺 直幸  (Onodera Naoyuki)  (50614484)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職    (82110)	