

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0105

研究課題名（和文）都市歩行者レベルにおける大気環境の超解像評価システムの構築

研究課題名（英文）Super-resolution evaluation system of air pollution at pedestrian level

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） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はジャカルタを対象とした大気環境システムを構築することを目的とし、以下の成果を得た。これまで使用してきた格子ボルツマン法LESモデルに、確率過程を考慮した粒子動態の運動方程式を導入し、ラグランジュ的に追跡するモデルを構築した。本モデルを用いて、ジャカルタの中心部5x20km程度の範囲を2mの空間解像度で分解した、乱流境界層の計算を実施した。移動排出源を想定し、交通量分布に基づき重みづけした物質フラックス分布を街区内の地表面近傍に与え、境界層内での動態を調べた。ジャカルタ市内の5か所に地上観測点を構築し、数値計算結果との比較や、ジャカルタ地上付近大気環境の気候学特性を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義として、大規模な計算を高速に実施可能な格子ボルツマン法LESモデルに、確率過程を考慮した粒子動態モデルを導入したこと、それを用いてジャカルタの移動排出源からの粒子動態を分析したこと、ジャカルタ現地での地上大気観測網を構築し、ジャカルタ都市における地上付近（大気境界層内）の微気候学的特徴を明らかにしたこと等に意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to make a system to analyze the atmospheric environment in Jakarta. (1) Lagrangian stochastic model is implemented for the kinematics of passive particles, which is performed in the simulation of the lattice Boltzmann equation model. A simulation of the turbulent boundary layer with particle dispersion from mobile emission is conducted for a central part of Jakarta. The size of the simulation domain extends about 5x20 km horizontally with 2m grid spacing. (2) Near-surface atmospheric observation points are constructed at 5 location within Jakarta region. The data is used to compare with the numerical simulation, and also for the assessment of the climatological characteristics of the near surface atmospheric environment.

研究分野：都市気象

キーワード：都市大気境界層 街区 大気環境計測 格子ボルツマン法 ラグランジュ粒子

1. 研究開始当初の背景

ジャカルタは世界のメガシティの一つであり、今後更なる人口の増加と急激な都市開発により大気汚染の悪化が懸念されている。これに対してジャカルタ市では、2018年にグランドデザインの一环として縦割りを排除した各種行政・研究機関が一体となって大気汚染対策に取り組むことを公表しており、具体案策定の社会的機運が高まっている。

都市の大気汚染物質濃度を把握することを目的として、衛星及び地上リモートセンシングを用いた観測や、全球及び領域気象モデルを用いた物質の動態解析が盛んに行われ、広域の大気汚染物質モニタリングと予測について多くの成功を収めている。その一方で、都市で生活する人々が直接接触する、都市街区内の歩行者レベルにおける大気環境を把握するには、上記の手法では空間解像度が不十分であり、直接的かつ定量的な評価をするのが難しい。地表面近傍の大気環境については主に地上定点観測網によって観測されているが、都市街区内における局所的で非定常な汚染物質排出過程や、街区の幾何形状に強く依存した複雑な気流分布のため、個々の観測点の空間代表性が乏しく、街区内の空間分布を包括的に把握することは困難である。

都市街区内の複雑な流れと物質動態を把握するには、建物を陽的に解像してその周りの流れを解くことができる数値流体力学モデルの利用が有効である。近年の計算機資源の向上と相まってモデル研究開発が飛躍的に進んでおり、複雑な物理・化学現象の取り扱いができるようになってきている。しかしながら高度なモデルを用いて高解像度で都市全体を評価したような研究事例は未だ多くない。また、街区レベルでモデルの精度検証に使えるような、都市大気観測データも不十分であり、そのような観測点が整備された都市は限られている。

2. 研究の目的

都市街区の詳細な流れを解像し、その中で排出された物質動態を解析可能な数値モデルの開発を行い、ジャカルタ都市部での移動排出源を想定した物質動態のシミュレーションを実施する。また、ジャカルタの大気環境を常時モニタリングするための地上大気観測点網を構築し、数値計算結果との比較及び、現地の気候学的特性と大気環境との関連に着目した解析を行う。

3. 研究の方法

(1) LBM-LES と LSM (Lagrangian stochastic model) に基づく都市物質拡散シミュレーション
街区構造と排出源の関係について検討するため、これまで使用してきた格子ボルツマン法 LES モデルに大気中の浮遊物質をラグランジュ的に追跡するためのモデルを導入する。物質拡散のシミュレーションについて、既往の研究では粒子が壁面近傍格子内に拘束され高濃度になってしまう傾向が指摘されている。それを回避するため、粒子の確率論的な運動成分を考慮した LSM (Lagrangian stochastic model) を用い、また壁関数を用いた壁面近傍風速の精度向上を試みる。壁関数については Hang ら (引用文献) と同様に、スリップ条件で計算された流れが流速ゼロとなるように摩擦抵抗を計算し、対数速度分布を仮定して壁面近傍第一格子の水平風速を修正した。その際、壁面上の速度勾配が保たれるように分布関数の値を修正した。LSM の導入においては、Weil ら (引用文献) を参考に確率過程を考慮したラグランジュ粒子の運動方程式を導入した。確率過程のパラメータとして乱流強度が必要であるが、Suga ら (引用文献) の方法に基づき計算した。

(2) ジャカルタにおける地上大気観測網の構築

ジャカルタ市内に合計 5 か所の地上観測点を設けた。3 地点 (海洋水産省、市庁舎、気象気候地球物理大学校) では建物屋上から 2m 程度の高さに、超音波風速計、温湿度計、日射計を設置した。風速や気温などの基本的な気象要素の他に、渦相関法による顕熱フラックスや大気安定度などを計測した。西ジャワ環境保護局では建物屋上面から 8m 程度の高さに超音波風速計、温湿度計、放射収支計の他に、オープンパスの CO₂ センサを設置し、CO₂ フラックスの計測を行った。地上高 70m の高さのタワーに超音波風速計と温湿度計を 4 台設置し、鉛直分布を測定した。

4. 研究成果

(1) LBM モデルへのラグランジュ粒子動態モデルの実装 (引用文献)

ラグランジュ粒子動態モデルを組み込んだ、格子ボルツマン法 LES モデルを用いて、ジャカルタの移動排出源から放出された粒子の動態計算を実施した。計算領域はジャカルタ湾岸を含む水平 19.2 × 4.8 km² の区画とし、格子幅 2m で解像した計算を実施した。流入条件として、北部の海から 10 m s⁻¹ の一様風を与えた。排出源濃度は Google の交通量に基づき、混雑具合に応じて排出される粒子数を 4 段階に調節した。図 1 はある一時刻の粒子拡散の様子を示している。モデ

ルパラメータの調整により現実的な濃度分布となっていることを確認した。局所的な排出源から放出された粒子にはIDが付与されており、近傍街区起因の物質と風上の排出源から飛来した濃度の比率について分析した。他に、仮想的に洋上の大規模構造物(防潮堤)が建設された場合との比較を行い、境界層発達には大きな違いがある一方で、街区内の平均濃度場にはそれほど大きな変化は見られなかった。

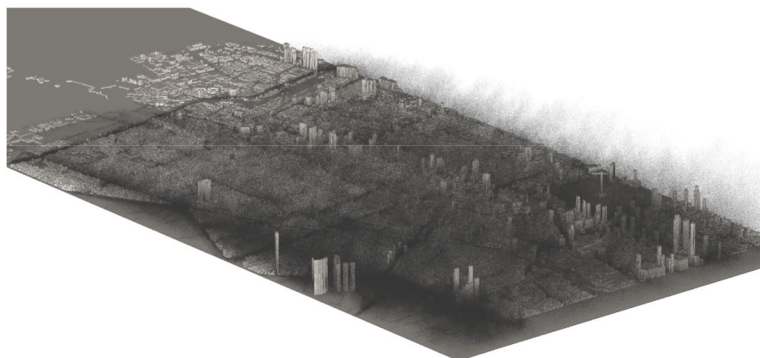


図 ジャカルタにおける移動排出源から放出された粒子の拡散シミュレーション

(2) 長期気象観測に基づくジャカルタの微気候環境の把握(引用文献)

観測データに基づき、沿岸部都市の大気環境に大きな影響を及ぼし得る海風発生気候学的特性について検討し、ジャカルタ湾岸からの海風発生時刻及び侵入速度に関する季節変化について明らかにした。ジャカルタの海風は乾季より雨季の方が早い時刻に発生し、速い速度で侵入することが分かった。その原因として、(1) 雨季における日の出前後の雲からの下向き長波放射量が大きく地表面近傍の気温が乾季より早く暖まることと、(2) 雨季は夜間も下向き長波放射量が大きいいため陸域での放射冷却が起こりにくくなり、夜間の陸風が弱められるためであることが分かった。月平均した海風侵入速度について分析したところ、室内実験で提案されている実験式がそれを概ね良い精度で再現できることが示された。海風の持続時間について分析したところ、乾季の方が雨季より3時間程度長くなることが示された。その理由として乾季では都市が持つ大きな熱慣性により、海上気温との温度差がより長い時間持続されるのに対し、雨季は降雨による表面流出と蒸発の効果により都市が冷やされることで、より早く海風が止むことを指摘した。その他に、地上観測システムの観測結果から渦相関法を用いてCO₂濃度フラックスを計測した。これまで観測例のなかったジャカルタにおけるCO₂フラックスの日変化から経年変化までの傾向を実測に基づき示した(図2)。

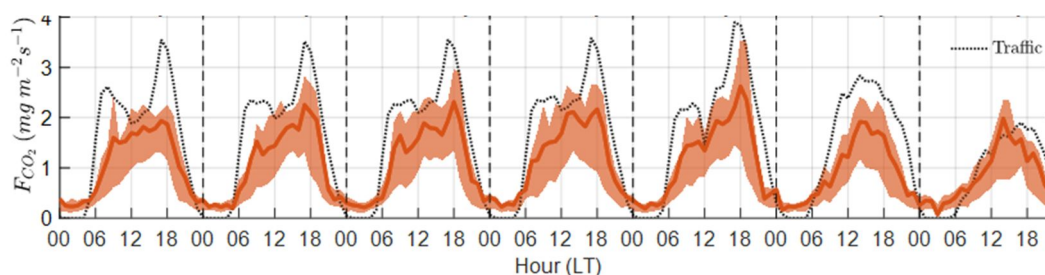


図2 渦相関法で測定されたジャカルタ中心部におけるCO₂フラックスの時系列変化

引用文献

横内浩志, 稲垣厚至, 神田学, 小野寺直幸: 格子ボルツマン法によるジャカルタ都市街区のラグランジュ粒子状汚染物質シミュレーション. 土木学会論文集 B1(水工学), 76(2), p. I_253-I_258, 2020.

Han M, Ooka R, Kikumoto H: Implementation of wall function in lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation, Proceedings in JSFM Annual Meeting 2019, March, 2019.

Weil JC, Sullivan PP, Moeng C-H: The use of large-eddy simulations in lagrangian particle dispersion models. J Atmos Sci., 61:2877-2887, 2004.

Suga K, Kuwata Y, Takashima K, Chikasue R: A d3q27 multiple-relaxation-time lattice boltzmann method for turbulent flows. Computers and Math Appl, 69:518-529, 2015.

Junnaedhi IDGA, Inagaki A, Ferdiansyah MR, Kanda M: Dewa Seasonal sea breeze variation analysis based on multi year near surface observations in Jakarta, Indonesia. Int J Climatol, 43(11), 5177-5195, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Junnaedhi IDGA, Inagaki A, Ferdiansyah MR, Kanda M	4. 巻 43(11)
2. 論文標題 Seasonal sea breeze variation analysis based on multi-year near-surface observations in Jakarta, Indonesia	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Climatology	6. 最初と最後の頁 5177-5195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/joc.8139	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 該当する

1. 著者名 稲垣厚至, 渡辺佑, Makedonas A, Khanh DN, 神田学	4. 巻 78
2. 論文標題 高層高密度建物群を対象とした地表面粗度モデルの修正	5. 発行年 2022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_709-I_714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_709	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 Junnaedhi IDGA, Inagaki A, Varquez ACG, Kanda M	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 Evaluation of multiple simulated seabreeze events in tropical megacity using high-temporal-resolution observation data	5. 発行年 2021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_1309-I_1314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1309	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 横内 浩志・稲垣 厚至・神田 学・小野寺 直幸	4. 巻 76
2. 論文標題 格子ボルツマン法によるジャカルタ都市街区のラグランジュ粒子状汚染物質シミュレーション	5. 発行年 2020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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Junnaedhi IDGA, Inagaki A, Ferdiansyah MR, Trilaksono NJ, Abdillah MR, Kanda M
2. 発表標題 Diurnal Variation of Carbon Dioxide (CO2) Flux and Concentration in Urban Area of Jakarta, Indonesia
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺佑, 稲垣厚至, MAKEDONAS Alexandros, 神田学
2. 発表標題 LES都市データベースに基づく高層高密度建物群の地表面粗度モデルの修正
3. 学会等名 流体力学学会年会2022
4. 発表年 2022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	長谷川 雄太 (Hasegawa Yuta) (10851016)	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)	
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)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------