

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

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：2020～2023

課題番号：20KK0098

研究課題名（和文）健康都市計画手法の開発と2つの深刻な温暖化に直面する成長国都市への応用

研究課題名（英文）Development of planning methodology for healthy cities and its application to cities in a growing country facing two serious warming issues

研究代表者

飯塚 悟 (Iizuka, Satoru)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：40356407

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、成長著しい新興国（成長国）の都市の1つで、地球温暖化と都市温暖化（ヒートアイランド）の2つの深刻な温暖化に直面するインドネシア・ジャカルタを対象として、地球スケールから大陸・国スケール、地域スケール、都市スケールに至るまでの気候・気象予測を一貫通貫に行う温暖化ダウンスケーリングシミュレーションにより、将来（2030年代および2050年代）気候・気象予測を実施し、将来の厳しい暑熱環境下において住民の健康被害を極力防ぎ、健康的な暮らしを可能とする「健康都市計画手法」の開発検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した温暖化ダウンスケーリングシミュレーションによる「健康都市計画手法」の手法論は、対象都市の将来都市像（それぞれの都市に対して提案されている都市計画マスタープランなど）の入手または作成、さらに土地利用データとしての再整備が必要となるが、成長国都市を始めとして、世界各国の様々な都市への展開が容易に可能であり、幅広い社会・国際貢献を果たすことが期待できる。また、本研究は建築・都市環境工学分野と都市計画分野の専門家の協働で実施したものであり、学際的研究の進展に寄与するものとして学術的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined the development of planning methodology for healthy cities that would prevent health damage to residents as much as possible and enable healthy living in the expected severe hot environment based on the future (the 2030s and 2050s) climate and weather projections using dynamical downscaling simulations from a global scale, a continental/country scale, a regional scale up to an urban scale. The city targeted in this study is Jakarta, Indonesia, a city in a rapidly growing country that faces two serious warming issues, i.e., global warming and urban warming (urban heat island).

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：温暖化 暑熱環境予測 都市計画 健康

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象としたインドネシア・ジャカルタを始めとして、成長著しい新興国（成長国）の都市では、地球温暖化と都市温暖化（ヒートアイランド）の2つの深刻な温暖化に直面し、今後、ますます厳しい暑熱環境になることが想定される。暑熱化が進めば、熱中症や睡眠障害といった健康被害のさらなる増加だけではなく、デング熱などの感染症の蔓延や深刻化の懸念も生じる。厳しさを増す暑熱環境への対策（緩和策および適応策）は、熱的快適性を議論する段階を超えて、健康維持さらには生命維持のために不可欠である。都市開発の余地を多く残し、2つの深刻な温暖化に直面する成長国都市の場合は特に、今後の都市計画において暑熱対策が重要項目となることは明白であり、暑熱対策に重きを置く都市計画手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、今後、ますます厳しい暑熱環境になることが想定される成長国都市において、住民の健康被害を極力防ぎ、健康的な暮らしを可能とする「健康都市計画手法」の開発検討を行うことを目的としている。対象国であるインドネシアで研究対象とする都市については、ジャカルタ、スラバヤ、ブカシ、バンドン、メダンの5都市を選定することを当初予定していたが（表1参照：立地、人口、気候区分、気象観測情報、都市計画マスタープラン情報などを基に選定）、研究初年度の2020年度よりコロナ禍となり、対象予定都市への渡航や現地調査ができず、コロナ禍収束の見通しも（当時は）立たなかったため、様々な情報が入手しやすいジャカルター都市に対象を絞る決断をした。ジャカルタは、インドネシアの現首都で同国最大人口を有し、ジャワ島に位置する熱帯モンスーン気候区分の沿岸都市である。

表1 情報評価に基づく対象都市の選定（一部抜粋）

No	City name	Location Type	Population	Köppen Climate Classification	Weather data situation					Land Use/Land Cover (LULC) Data situation				Notes		
					Overall Data resolution (based on WMO)	Data Format	Coverage Period of digitized data	Automatic Solar Radiation System	Precipitation data quality	Solar radiation data quality	Type of master plan (RT/RW)	Format of LULC data	Established Year		Target Year	Data source (Where to get the RAW data)
1	Banda Aceh	Coastal city	2mil-.5mil	Tropical rainforest climate (Af)	hourly	Digital	2013*	Available	hourly	hourly (2017)	Long-term	GIS	2009	2029	Contact municipal office	Pemko Banda Aceh http://bandaceah.go.id
2	Balipapan	Coastal city	500k-1mil	Tropical rainforest climate (Af)	hourly	Digital	2013*	n/a	hourly	Others	Long-term	GIS	2012	2032	Contact municipal office	Bappeda Kota Balikpapan http://bappeda.balikipan.go.id/
3	Bandung	Inland-high altitude	2mil-.5mil	Tropical monsoon climate (Am)	3-hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2011	2031	Already available	Distansip Kota Bandung (require re-approval from the staff)
4	Banjarasin	Inland-low altitude	500k-1mil	Tropical rainforest climate (Af)	hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2013	2032	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
5	Batam	Coastal city	1mil-.2mil	Tropical rainforest climate (Af)	3-hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	CAD	2019	2030	No information	Pemerintah Kota Bappeda
6	Bekasi	Inland-low altitude	2mil-.5mil	Tropical rainforest climate (Af)	n/a	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2011	2031	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
7	Bogor	Inland-high altitude	1mil-.2mil	Tropical rainforest climate (Af)	3-hourly	Partly Digital	>20 years	Available	Others	Others	Long-term	GIS	2011	2031	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
8	Denpasar	Coastal city	500k-1mil	Tropical savanna climate (Aw)	hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2011	2031	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
9	Depok	Inland-low altitude	1mil-.2mil	Tropical monsoon climate (Am)	n/a	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2012	2032	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
10	Jakarta (Province)	Coastal city	>5mil	Tropical monsoon climate (Am)	hourly	Digital	2013*	n/a	hourly	hourly (2017)	Long-term	GIS	2015	2030	Contact municipal office	Pemprov DKI Jakarta
11	Jambi	Inland-low altitude	500k-1mil	Tropical rainforest climate (Af)	3-hourly	Partly Digital	>20 years	Available	Others	Others	Long-term	GIS	2013	2033	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
12	Makassar	Coastal city	1mil-.2mil	Tropical monsoon climate (Am)	hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2015	2034	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
13	Malang	Inland-high altitude	500k-1mil	Tropical savanna climate (Aw)	3-hourly	Partly Digital	>20 years	Available	Others	Others	Long-term	GIS	2010	2030	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
14	Manado	Coastal city	<500k	Tropical rainforest climate (Af)	hourly	Partly Digital	>20 years	n/a	Others	Others	Long-term	GIS	2014	2034	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda
15	Medan	Inland-low altitude	2mil-.5mil	Tropical rainforest climate (Af)	hourly	Partly Digital	>20 years	Available	Others	Others	Long-term	GIS	2011	2031	Contact municipal office	Pemerintah Kota Bappeda

3. 研究の方法

本研究では、温暖化ダウンスケーリングシミュレーションと呼ばれる、地球スケールから大陸・国スケール、地域スケール、都市スケールに至るまでの気候・気象予測を一貫通貫に行うシミュレーション技術（図1参照）を用いて、本研究の対象都市であるジャカルタの将来気候・気象予測を実施し、健康都市計画手法の検討を行った。

対象とする将来は2030年代と2050年代とした。対象年代の将来都市像として、ジャカルタ州政府立案の2030年都市計画マスタープラン情報を入手し、それを土地利用データとして再整備

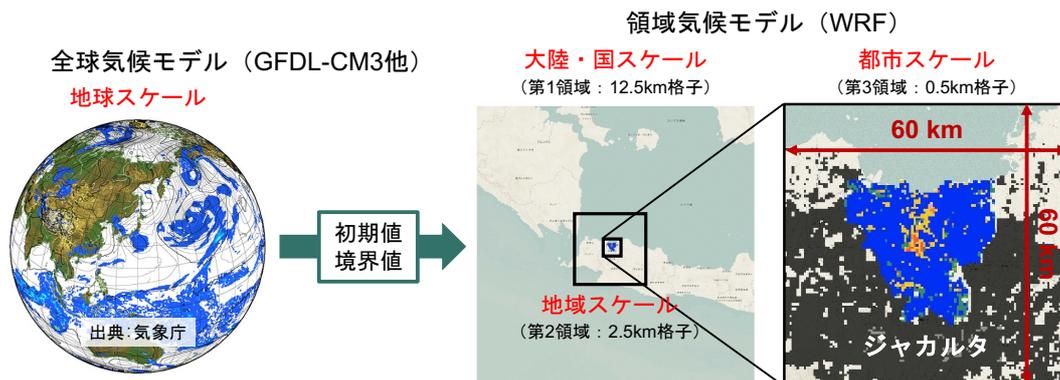


図1 温暖化ダウンスケーリングシミュレーションの概要

して、温暖化ダウンスケーリングシミュレーション（都市スケール）の入力条件に用いた。

厳しい暑熱環境下において住民の健康被害を極力防ぎ、健康的な暮らしを営むためには、適度の空調（冷房）が欠かせない。本研究では特に、将来的に急速な普及が見込まれる冷房の使用（井原（2018）によれば現状の冷房使用率は約 15%）が都市スケールの気候・気象（都市温熱環境）に及ぼす影響に着目しながら検討を行った。

4. 研究成果

（1）高温多湿期（雨季）と高温乾燥期（乾季）における将来予測とその不確実性の検討

ジャカルタの気候は、高温多湿期（雨季）と高温乾燥期（乾季）に大別される。本研究では、将来予測の対象年代を 2030 年代と 2050 年代にしたが、高温多湿期の代表月と高温乾燥期の代表月をまず選定し、各対象年代でそれらの代表月に対して温暖化ダウンスケーリングシミュレーションによる将来気候・気象予測を実施した。高温多湿期、高温乾燥期それぞれの代表月は、欧州中期気象予報センターが提供している再解析データ ERA5 の 41 年間（1980 年－2020 年）の日中（11 時－14 時）平均の気温・相対湿度・降水量データを基にして選定した。選定結果は、高温多湿期の代表月が 4 月、高温乾燥期の代表月が 9 月となった（図 2 参照）。

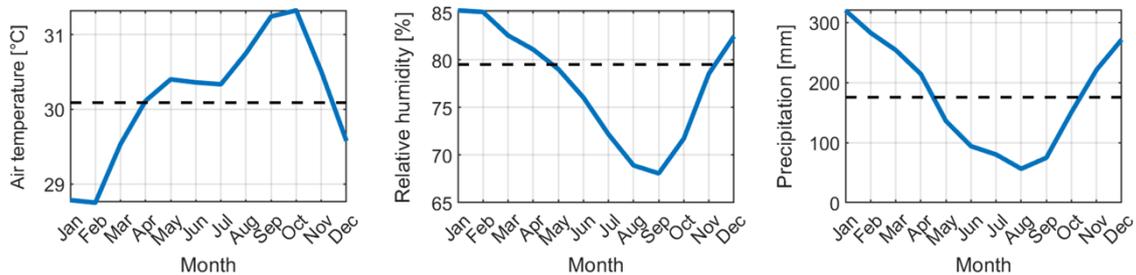


図 2 ジャカルタの気温・相対湿度・降水量の月別データ（ERA5 の 41 年間日中平均データ）

将来気候・気象予測に関しては、将来シナリオの選択、シミュレーションモデルの選択、物理モデル（スキーム）の選択などに起因する不確実性が多々含まれる。その不確実性の幅を定量的に評価するため、温暖化ダウンスケーリングシミュレーションの出発点となる全球気候モデルの結果（この結果を大陸・国スケール、地域スケール、都市スケールのシミュレーションモデルの初期値・境界値として使用：図 1 参照）に対して、2 種類の温室効果ガス排出シナリオ（排出量の少ない RCP2.6 と排出量の多い RCP8.5）と 2 種類のシミュレーションモデル（気候感度の高い GFDL-CM3 と気候感度の低い GISS-E2-R）の結果を導入して検討を行った。対象年代の将来予測において、これらの全球気候モデルの結果に伴う都市気候・気象予測の不確実性の幅は、土地利用変更（現状土地利用 → 都市計画マスタープラン導入）に伴う都市気候・気象の変化よりも大きいことが確認された。

（2）冷房普及に伴う人工排熱変化が都市気候・気象（都市温熱環境）に及ぼす影響の評価

上述したように、厳しい暑熱環境下において住民の健康被害を極力防ぎ、健康的な暮らしを営むためには、適度の空調（冷房）が欠かせない。一方、冷房が普及するほど、屋外に放出される人工排熱量が増加することになり、それに伴う都市温熱環境の悪化が懸念される。冷房普及に伴う人工排熱変化が都市温熱環境に及ぼす影響について、対象年代の地球温暖化の進行に伴う気温上昇との比較や、緩和策・適応策の導入による気温低減効果との比較に基づいて定量的に評価した結果（温暖化ダウンスケーリングシミュレーションの結果：ここでは、冷房に対して厳しい環境条件となる 2050 年代の高温多湿期（雨季）の代表月（4 月）のみを対象）を後述の図 3、図 4 に示す。表 2 はそれらの検討ケースを一覧にしたものである。

表 2 検討ケース

ケース名	建物形態	冷房普及率	背景気候	温室効果ガス排出シナリオ	冷房システム	冷房設定温度
Current	現状	0%	2015 年	—	—	—
Morphology	将来					
RCP2.6/8.5	現状					
BaU	将来	100%	2050 年代	RCP8.5	全て空冷式	21°C
Adaptation						26°C
Mitigation					住宅は空冷式 非住宅は水冷式	21°C
Both						住宅は空冷式 非住宅は水冷式 (COP 向上)
COP						

図3は、Morphology、RCP2.6、RCP8.5、BaUそれぞれのケースとCurrentケースの気温差（対象とした4月の時刻別1ヶ月平均+ジャカルタ市内の「都市域（住宅域と非住宅建物域の両方）平均」の地上2m気温差）の日変化を比較したものである。MorphologyケースではCurrentケースに対し、将来の人口増加に応じて建物形態を変化させているが（高さ方向に建物容積増加）、それに伴う気温上昇は24時間を通じて0.1℃未満の小さい値である。RCP2.6ケースとRCP8.5ケースはCurrentケースに対し、将来気候の影響（地球温暖化の進行）を加味したものであるが、図3の24時間平均値、すなわち4月1ヶ月平均の気温差はそれぞれ1.1℃、2.4℃となっている。予測される地球温暖化の進行は、他の状況変化に比べて都市域の気温上昇への寄与が大きい。

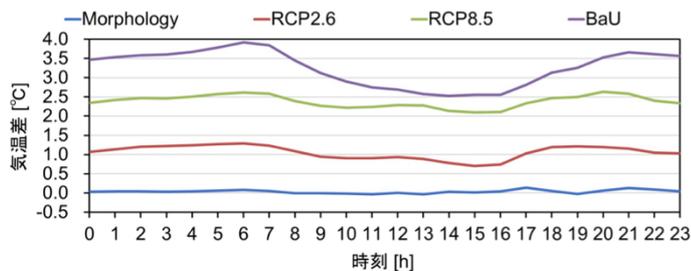


図3 Currentケースとの気温差の日変化

BaUケースは、将来の建物形態、将来気候の影響（RCP8.5ベース）、冷房普及（普及率100%）を考慮したものであるが、冷房普及に伴う人工排熱量の増加でRCP8.5ケース（冷房普及なし）よりもさらにCurrentケースに対する気温上昇量が大きく、24時間平均値で3.3℃の上昇となっている。

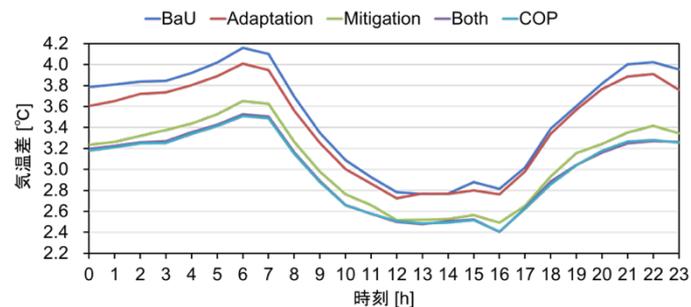


図4 Currentケースとの気温差の日変化

図4は、BaU、Adaptation、Mitigation、Both、COPそれぞれのケースとCurrentケースの気温差（対象とした4月の時刻別1ヶ月平均+ジャカルタ市内の「非住宅建物域」平均の地上2m気温差）の日変化を比較したものである。図示した5つのケースは全て将来気候下の予測であり、現在気候下の予測であるCurrentケースよりも気温が上昇しているが、気温低減効果はBaU < Adaptation < Mitigation < Both < COPの順で大きい。BaUケースとAdaptationケース、MitigationケースとBothケース、AdaptationケースとMitigationケースのそれぞれの差を比較すると分かるように、冷房設定温度の変更（上昇）による気温低減効果は小さいが（24時間平均値で0.1℃程度）、冷房システムの変更（空冷式 → 空冷式・水冷式の混在）による気温低減効果はそれよりも大きい（24時間平均値で0.3℃程度）。COPケースは最も気温低減効果が大きい、本研究で設定したCOP向上（非住宅建物の水冷式冷房システムのCOPを向上）自体がもたらす気温低減効果は小さい。

以上の結果などを通じて、成長国都市であっても、都市の将来の暑熱化に対して、地球温暖化の進行の影響が大きいことが明らかとなった。将来の暑熱化に対しては、地球温暖化の全世界的な緩和努力がまず必要となるが、IPCC評価報告書を始めとして、地球温暖化を（緩和ではなく）防止することは難しいと予測されており、すなわち、地球温暖化の今後の進行、それに伴う都市の気温上昇は避けがたいことを前提として受け入れる必要がある。その際に重要なことは、地球温暖化の進行に起因する気温上昇を相殺できる方向に向かうような様々な（都市スケールでの）局所的暑熱対策の積極的な導入である。地球温暖化の避けられない進行と、局所的暑熱対策の積極的な導入を通じた防御の兼ね合いにより、住民の健康被害を極力防ぎ、健康的な暮らしを可能とする都市温熱環境の形成が目指せることになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Bhanage Vinayak, Lee Han Soo, Cabrera Jonathan Salar, Kubota Tetsu, Pradana Radyan Putra, Fajary Faiz Rohman, Nimiya Hideyo	4. 巻 12
2. 論文標題 Identification of optimal CMIP6 GCMs for future typical meteorological year in major cities of Indonesia using multi-criteria decision analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Environmental Science	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fenvs.2024.1341807	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Bhanage, V., Lee, H.S., Kubota, T., Pradana, R.P., Fajary, F.R., Arya Putra, I.D.G., Nimiya, H.	4. 巻 11
2. 論文標題 City-wise assessment of suitable CMIP6 GCM in simulating different urban meteorological variables over major cities in Indonesia	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Climate	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） 10.3390/cli11050100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内藤裕崇, 飯塚悟
2. 発表標題 ジャカルタにおける冷房普及に伴う人工排熱変化が都市温熱環境に及ぼす影響評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ocharina, D. T., Iizuka, S., Takatori, C.
2. 発表標題 Future projections of the impacts of global warming and urban planning on the thermal environments under hot-humid and hot-dry climate conditions in Jakarta, Indonesia
3. 学会等名 第1回都市極端気象シンポジウム
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	玄 英麗 (Xuan Yingli) (20770564)	東京工芸大学・工学部・助教 (32708)	
研究分担者	久保田 徹 (Kubota Tetsu) (80549741)	広島大学・先進理工系科学研究科(国)・教授 (15401)	
研究分担者	村山 顕人 (Murayama Akito) (60396760)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	高取 千佳 (Takatori Chika) (10736078)	九州大学・芸術工学研究院・准教授 (17102)	

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
---------	---------