

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

アジアのメガシティにおける緩和を考慮した適応策の実施事例研究  
(S-14-4)

平成27年度～令和元年度

Case Study on Mitigation and Local Adaptation to Climate Change in an Asian Megacity, Jakarta

〈研究代表機関〉

国立大学法人東京工業大学

〈研究分担機関〉

国立大学法人東北大学

国立大学法人東京大学

〈研究協力機関〉

公立大学法人富山県立大学

学校法人明星学苑明星大学

国立研究開発法人産業技術総合研究所

東京電力ホールディングス株式会社

令和2年5月

## 目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した都市気候変動の予測に関する研究	・・・・・・・・	25
（国立大学法人東京工業大学）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-2 緩和・適応統合実施による都市水害減災評価と費用便益分析に関する研究	・・・・・・・・	50
（国立大学法人東北大学、公立大学法人富山県立大学）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-3 緩和・適応統合実施による都市健康影響評価と費用便益分析に関する研究	・・・・・・・・	64
（国立大学法人東京大学、学校法人明星学苑明星大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、東京電力ホールディングス株式会社）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		

- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

Ⅲ. 英文Abstract

.....88

## I. 成果の概要

課題名 S-14-4

アジアのメガシティにおける緩和を考慮した適応策の実施事例研究  
(国立大学法人東京工業大学)

課題代表者名 神田 学 (国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院 教授)

研究実施期間 平成27～令和元年度

研究経費 (累計額) 237,738千円

(平成27年度：49,141千円、平成28年度：47,746千円、平成29年度：47,746千円  
平成30年度：45,359千円 令和元年度：47,746千円)

本研究のキーワード メガシティの気象、適応策、都市水災害、都市暑熱

### 研究体制

- (1) 緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した都市気候変動の予測に関する研究  
(国立大学法人東京工業大学)
- (2) 緩和・適応統合実施による都市水害減災評価と費用便益分析に関する研究  
(国立大学法人東北大学)
- (3) 緩和・適応統合実施による都市健康影響評価と費用便益分析に関する研究  
(国立大学法人東京大学)

### 研究協力機関

早稲田大学理工学術院、富山県立大学、明星大学、産業技術総合研究所、  
東京電力ホールディングス

## 1. はじめに (研究背景等)

2013年にWG2/AR5では新たに地域の気候変動問題が加えられ、特にアジアの問題について誌面を多く割き報告された。その中で人口増加が顕著で1000万人を超える巨大都市の抱える将来リスクが重要視された。都市の人口集中という社会的条件だけではなく、都市では、グローバルな気候変動による温暖化に加え、ヒートアイランドによる温暖化が嵩上げされる。多くの都市で、ヒートアイランド寄与は、気候変動寄与を凌駕している。都市の将来の気温予測だけでなく、暑熱環境や水害といった物理的リスクを適切に評価する上でも、気候変動およびヒートアイランド2つの温暖化を科学的に予測・評価することが不可欠である。主に、2000年以降、気象・土木・建築・エネルギー・都市計画・生気象学などの横断的学問分野として「都市気象学」が急速な発展を遂げてきた。都市温暖化予測技術も成熟しつつあり、日本はこの分野でリーディングな役割を果たしてきた。残念ながら、その最先端技術が、気候変動対策の文脈では十分に活用されてこなかった。AR5では、先進国では各国の行政レベルで、途上国では国際機関や民間団体が途上国援助として緩和策・適応策を実施しているとされている(例えば、低炭素アジア研究ネットワークやアジア太平洋地域適応ネットワークなど)。しかしこれらは、温暖化が無くても存在する都市の脆弱性を緩和するための策がそのまま温暖化後の世界にも役に立つというロジックによるものが多く、都市気象学の先端的温暖化予測が生かされているとは現状では言いがたい。実際、グローバルな気候変動に対する緩和策を考慮しながら、それぞれの国・都市の実情に合わせた現実性の

ある適応策を検討していくためには、従来の気候変動予測・評価手法に、最先端の都市気象の予測・影響評価手法を融合させていくことが必要であるが、そのような試みはほとんどなされておらず、気候変動研究の多くでは、都市温暖化はローカルなノイズとして注意深く取り除かれてきたのが現状である。

2015年国連防災世界会議では、途上国の災害の脆弱性と気候変動の災害リスクの上昇が大きな議題となった。また、アジア太平洋地域適応ネットワーク (APAN) では脆弱な都市域の問題がクローズアップされている。巨大都市が抱える各問題の重要性や感度、相互影響、個別対策、総合対策等の有効性を最先端の都市気象の予測・影響評価手法で分析する必要がある。途上国大都市は技術・予算的問題から気候変動に対して脆弱であり、きめ細かな地域毎の適応策策定を助けることは社会的意義の大きなものである。費用便益に基づく適応策の提案は経済的意義も大きく、環境省が掲げるアジアの環境問題解決に貢献できるものである。

## 2. 研究開発目的

全プロジェクトにおけるテーマ4の研究開発の目的は2つである。1つは、発展著しくマルチストレスに曝されるアジアのメガシティにおいて緩和を考慮した適応策の事例研究を実施し、プロジェクト全体のグローバルな評価における地域検証研究としての役割を担うこと。1つは、単なるケーススタディで終わらず、今回開発される予測・評価技術をグローバルに展開する枠組みを提示することである。

サブテーマ1は、2つの温暖化を融合した最先端の都市温暖化予測技術の開発を担い、テーマ4全体の研究フローの最上流に位置付けられる。(1) 単純な物理的ダウンスケーリングではなく、グローバルな社会経済シナリオと都市のローカルな社会経済シナリオを考慮した上で、最先端の数値予報技術を駆使してジャカルタの将来の都市気候変動の予測を行い、サブテーマ2 (水害影響評価)・サブテーマ3 (暑熱影響評価) にデータを提供すること、(2) ジャカルタを対象に開発される都市温暖化予測技術を、世界の任意の都市にグローバル展開できるよう、その枠組みを確立・提示すること、である。

サブテーマ2は、サブテーマ1から提供される社会・経済シナリオおよび気象予測データを基に、いまだに人口が増加し、地盤沈下が継続し、熱帯多雨で気候変動の影響を受けやすいなど、将来の洪水リスクが極めて高いインドネシアのジャカルタを対象に、有効な適応策と緩和策を統合した政策を提案することを目的とする。具体的には、(1) 高時空間解像度の気象予測データに対応した洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の算定手法を開発し、(2) そのモデルを用いて、将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響を予測・評価し、(3) 各種適応策の検討と費用対効果を提示する。

サブテーマ3は、サブテーマ1から提供される社会・経済シナリオおよび気象予測データを基に、都市健康影響評価を実施する。(1) ジャカルタの熱関連死亡・睡眠障害について詳細な調査を行い、影響評価を行う、(2) テーマ1から提供される気象予測データを基に、気象モデルとビルのエネルギー需要を連成させた都市気象-ビルエネルギー連成モデルをジャカルタに適応できるよう開発し、

(3) 開発した数値モデルを用いて、テーマ4共通の社会経済シナリオに加え、それらを詳細化した各種緩和策や適応策 (屋上緑化・高反射率塗料・エアコン導入・電気自動車・ヒートポンプ型給湯機) を実施した場合の都市健康影響評価および緩和策・適応策の費用便益分析を実施する。

## 3. 研究開発の方法

### (1) 緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した都市気候変動の予測に関する研究

#### a 人工衛星データのみを使用した、高時空間解像度の全球都市GISデータベースの構築

人工衛星データのみを使用して作成した都市GISデータベースは、人工排熱・3次元建物データ (平均建物高さ・建物高さ分散・建蔽率・建物投影面積率・天空率など)・土地利用 (含む都市スプロール) であり、現状版および、社会経済シナリオ別の将来シナリオ版、である。中間評価時は、ジャカル

タ版だけであったが、プロジェクト終了時点で、上記すべての項目のデータベースの全球版が完備された。

人工的に排出されるエネルギーは、EIA(Energy Information Administration)が公開している国別の1次エネルギー年間消費量を基本データとして、それを1kmグリッドに配分する。まず、人口密度データを空間配分の基本とする。さらに、人工衛星から得られる夜間光強度のデータを用いて人口密度を補正し、人工排熱量は「夜間光で補正された人口密度データ」に比例すると仮定してデータベースを構築した。次に、年間の1km人工排熱量を、月別に分配する。エネルギー消費量はその時の気温に大きく依存し、エネルギー消費量の気候感応度と呼ばれる。本プロジェクトでは、日本、アメリカなどの膨大な気候感応度のデータを基に、インドネシアだけでなく全球に適応することを前提とした年平均気温と気候感応度のチャートを提案した。

現状の全球人工排熱の推定手法を拡張・改良し、SSPシナリオに基づいた、国別の将来人口・将来GDP・将来エネルギー消費量および将来気候変動から、1km・1時間の全球人工排熱データを推定し、データベース化した。この推定プロセスにおいて、将来の都市域の変貌（スプロール化）の予測が必要となる。ここでは、都市計画の分野におけるSLEUTHモデルを基本アルゴリズムとして使用し、独自にGDPおよび人口の時間変化率を外制条件として与えることにより、社会経済シナリオによって都市化の速度が変化するように修正を行った。このアプローチは、物理モデルを用いて全球にわたって高空間解像度の都市領域の変化予測を行った最初の研究事例となる。3次元建物データ（平均建物高さ・建物高さ分散・建蔽率・建物投影面積率・天空率など）については、それぞれの都市において、あらかじめ現状の3次元建物パラメータと人工排熱・人口分布との間の相関関係を回帰した上で、上記で説明した将来の人工排熱・人口分布をもとに、予測を行った。

## b 2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測

グローバルな社会経済共通シナリオ（温暖化シナリオ）と都市計画シナリオ（都市化シナリオ）の両者を考慮し、設定した将来シナリオの一覧表を図3.1.1に示す。図3.1.1のシナリオに沿った2050年の都市気候予測計算を行った。2050年の予測計算とは、2046-2055年の10年間の結果のアンサンブル平均である。2050年のGCM出力としてCMIP5を使用した。暑熱環境の影響評価や適応策の詳細な検討は、サブテーマ3で実施されたが、サブテーマ1では、熱関連死亡リスクに着目し、平林チームのテーマ3の本田先生と協力して、評価を行い、グローバル解析との比較、サブテーマ間の結果の整合性を図った。

建物やインフラが複雑に存在する都市の屋外空間における温熱環境は、メソスケールの気象場だけでなく、建築的なミクロな街区構造にも大きく依存する。そこで、中心市街地において、建物構造や緑被率の異なるシナリオを相互比較することにより、影響を評価した。6つのシナリオを図3.1.2に示す。街区構造の違い・植生(街路樹)の影響なども検討した。

基本的な社会経済シナリオでの将来予測・影響評価に加え、ジャカルタ独自の特色ある適応策を検討するよう、採択時・中間評価時にアドバイスがあった。ここでは、ガルーダプロジェクトを取り上げた。アジアの大都市では近年大規模な都市開発が進んでおり、巨大な建造物が年々増築されている。一般論として大規模構造物は風速の低減効果を生み出し、風が淀むことで、風下域の気温上昇や汚染物質の高濃度化につながる。その定量評価のため、インドネシアの国策であったガルーダプロジェクトにおける大規模防潮堤を例に、都市中心部を包含する計算領域（水平20km×5km）を、個々の建物を2mの格子間隔で解像した都市の大規模乱流計算を実施した。この解析には、従来のほとんどの気象予測計算や環境解析に用いられてきた数値流体力学的手法(CFD)とは全く異なる新しい、「格子ボルツマン法(LBM)」というアルゴリズムを世界に先駆けて採用し、従来の期初予測計算よりも10数倍以上の計算負荷を軽減した。これにより、現状のコンピューター性能でも、マイクロスケールの高解像度(2m)を維持しながら、都市全体(数10km四方)を丸ごと解析することが可能となった。

## c 都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築

気候変動研究では、都市温暖化は局所的なノイズとして注意深く除去されてきた。本研究では、それを逆に利用し、都市温暖化影響を除去したグローバルな気温変動量データベースをバックグラウンド気温と定義し、都市の観測点の気温から、バックグラウンド気温を差し引くことにより、都市温暖化だけを定量化することにした。グローバルなバックグラウンド気温として、Berkeley Earth Surface Temperature dataset (BEST) を利用し、1960～2009の半世紀にわたる世界中の大都市における気温観測データの精度や測定条件を詳細に検討した上で、286の都市気温データを抽出し、一世紀換算のヒートアイランド強度 (UHI強度) を定義した。UHI強度を、地理的要因 (気候区分・緯度など)、気象的要因 (風速・土壌乾燥度など)、文明的要因 (人工排熱・緑化率など)、との相関関係を調べ、グローバルな視点からの都市温暖化の実態解明・要因分析を初めて行った。

次に、上記で得られたグローバルな都市温暖化の実測値を、チームが開発した気象予測モデルで再現することを試みた。まず、人工衛星から推定される過去から現在までの土地利用データを基に、都市域が存在しない＝都市以前の土地利用を、独自のアルゴリズムで推定し、「都市化以前土地利用」の全球データベースを作成した。現在都市域である領域は、周辺の支配的な土地利用などに置き換えられる。その上で、世界の286都市において、「現在土地利用」での10年気候と、「都市化以前土地利用」での10年気候の2つの比較再現計算を行い、両者の気温差をヒートアイランド強度と定義することによって、グローバルな都市温暖化の実態が再現可能かを検討した。

次に、上記の都市温暖化の再現計算を行った大都市について、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオのみについて、2050年の将来気候予測計算を行った。この際、入力データとして、本プロジェクトで開発した、全球都市データベース (人工排熱・都市領域・3次元建物データベース) を使用した。

## (2) 緩和・適応統合実施による都市水害減災評価と費用便益分析に関する研究

### a 洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の算定手法の開発

地球温暖化の影響のみならず、深刻と懸念されている流域の市街化と地盤沈下が洪水氾濫に与える影響を定量的に評価するために、洪水氾濫モデルの構築を行った。洪水氾濫モデルは、サブ分布型の降雨流出計算過程、1次元不定流計算に基づく河道部の洪水追跡および2次元不定流計算に基づく氾濫計算で構成される。入力降雨としてレーダ雨量データを用いてモデルパラメータのキャリブレーションを実施した (Moe et al., 2016a)。標高データはJAXAの30 mメッシュを使用し空間的に高解像度での計算を実施した。本モデルを用い2013年洪水を対象とした計算を実施し、ジャカルタ政府が公表した実測の浸水範囲との比較を通じ、構築したモデルの検証を行った。

洪水氾濫計算の実施後に洪水被害額の算定も行っている。これにより、各種適応策の費用対効果などの算定が可能となる。日本の国土交通省が発表している治水経済調査マニュアル (案) をジャカルタで利用できるように各資産単価を市場調査ならびに住民ヒアリングから求め、さらにGDPをもとに経済価値を他国に変換できる関数を提案し、ジャカルタの被害単価を求めた。上で得られた洪水氾濫計算による浸水深と浸水期間から洪水被害額を異なる再現期間の降雨を入力として求めた。これらの計算から洪水氾濫被害額の分布を求めた。

上記の洪水氾濫モデルと氾濫被害額の算定手法は、高解像度かつローカル地域の情報を組み込んだ強みがある。これら地域 (ローカル) 的なモデル・算定手法と全球 (グローバル) での解析結果との比較も行った。全球モデルで算出した洪水氾濫解析結果と被害額はテーマ3から提供されたものを使用する。これにより地域モデルの強みや全球モデルの注意すべき点などを明らかとすることが可能となる。

### b 将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響

上記で構築した洪水氾濫モデルを用い、将来の地球温暖化の影響および都市の拡張によって生じる地盤沈下と流域の市街化が洪水氾濫に与える影響を評価した。土地利用に関しては、過去の状況はLandsat衛星画像より抽出したものを使用する (Moe et al., 2016b)。将来の土地利用はVarquez et al. (2017)が都市の成長を表現するSLEUTHモデルを用いて、最悪シナリオ (RCP8.5-BaU) と最善シナリオ (RCP2.6-SSP1) の土地利用を算出しており、それらの土地利用を用いた。過去の地盤沈下状況は複数の現地調査等より報告されている地盤沈下量を基に推定し、将来の地盤沈下は過去の地盤沈下速度がそのまま継続するという仮定のもと線形外挿で推定した。

温暖化時の雨に関しては最悪シナリオ (RCP8.5-BaU) と最善シナリオ (RCP2.6-SSP1) の土地利用、都市の熱環境などを考慮した領域気象モデルWRFの動的ダウンスケーリングより得られた豪雨を使用している。その他にも、シナリオ数の増加と不確実性評価のために、別途8つのGCMと3つのRCPシナリオの計24通りの入力降雨シナリオも使用している。被害額は、雨量強度の数年のデータを用いて年期待被害額としている。

### c 適応策の検討と費用対効果

これらの将来被害に対する適応策を検討するために、気候変動と土地利用、地盤変化を加えたシナリオをベースラインとして、複数の適応策の被害減少額を求めた。ここでは、建物の屋上・壁面を緑化するグリーンインフラ(GI)、沿岸域に長大な防潮堤を築くとしているガルーダプロジェクト(GP)、河川・運河に接する地域の住居を認めず遊水地にする居住制限(RC)、多くの洪水氾濫水を浸透させる浸透井戸(RW)、リスクの高い浸水地域の遊水地化(河道の拡大)(RRP)を適応策として評価を行った。

GIについては、1降雨について2 mmの損失雨量を屋上と壁面の面積に乗じて与えた。GIの費用は既存資料(東邦レオ)より75 USD/m<sup>2</sup>と算定された。GPは、洪水氾濫計算の下流端境界条件である沿岸水位を1 m下げることによって防潮堤建設を表現し、計算を行った。また、その費用は既存プロジェクト(Rayakonsult, 2013)より、1 mあたりの防潮堤建設費用99 Million IDRを用いた。RCは、河道兩岸の30 mの範囲として、費用はその地域の建物費用とした。河道から拡幅した地域は、6 mの掘削をして遊水池としている。RWは、200井戸/1 km<sup>2</sup>を対象全域に設置するとして、1 m<sup>3</sup>の浸透について既往レポート(JICA, 2013)よりIDR 70,000の費用とした。RRPは、設置する地域の資産価値を費用とした。洪水氾濫の多い3か所の上流を対象とし、全体で14.5 km<sup>2</sup>の面積を遊水池として確保した。上記の適応策の評価として、被害軽減額と費用対効果について調べた。

## (3) 緩和・適応統合実施による都市健康影響評価と費用便益分析に関する研究

### a ジャカルタの都市健康影響評価

ライフサイクルアセスメントでは、人間健康の被害量は障害調整生存年(DALY)で評価する。そこで、各種文献から1死亡あたりのDALYを取得することによって、被害量をDALYで示した。また、インドネシアにおけるこれらの疾病に関する資料を整理した。

熱ストレスの代表格である熱中症の被害は、DALYで評価すると、死亡が非死亡を圧倒する。そのため死亡のみの評価で社会的な被害量は評価可能である。熱中症に関しては、日最高気温の84パーセントイル値(至適気温)の日に死亡率が最も低くなるのが世界各地で見られるとした本田・高橋(2009)の研究に基づき、ジャカルタと東京の至適気温の違いを考慮して、東京の関数を水平移動させることによって、ジャカルタの関数を開発した。

WHOが0.5度単位で実施した被害評価からジャカルタを抜き出し、それと本テーマが0.5分単位で実施している被害評価を比較した。対象カテゴリーポイントは両者が対等に比較できる暑熱ストレス(暑熱時のすべての死亡。日本の場合、熱中症は暑熱ストレスのうちの1割程度)とした。地域スケールで必要となる人口密度には、サブテーマ(1)がLandscanのデータを加工して整備したデータを利用した。



ジャカルタの暑熱影響を把握するために、ジャカルタで疫学調査を、2016年2月（雨季）および10-11月（乾季）のそれぞれ連続3週間の火・水・木曜日に実施した。対象者は、ジャカルタに居住する20歳以上の男女であり、性別・年代・社会階級の各構成が均等になるように抽出した。サンプル数は約250人とした。日本と異なり、インターネットにアクセスできない居住者が多いため、訪問留め置きにて調査を実施した。調査項目としては、対象者の属性（性別・年代など）を質問するほか、暑熱に伴う軽度健康影響を計測するため、睡眠と疲労に関する自記式質問を盛り込んだ。睡眠困難は住居や空調に大きく依存するため、住居や空調に関する質問も含めて、東京と同様の疫学調査を、ジャカルタ在住の約200名を対象に3週間かけて実施した。室内の温湿度は貸し出した温湿度計で計測した。質問票（インドネシア語）の一部を図3.3.1に示す。

睡眠に関しては、過去1か月の睡眠の質を問うピッツバーグ睡眠質問票(PSQI)のほか、前夜の睡眠の質を問う毎日の睡眠を評価するための質問票(SQIDS2)を用いた（いずれもインドネシア語版）。

疲労に関しては、過去1週間の疲労を問うチャルダの疲労尺度(CF)を、また、質問対象を前日1日の疲労に差し替えた毎日のチャルダの疲労尺度(DCF)を用いた（いずれもインドネシア語版）。

ジャカルタにおける睡眠困難の損失余命分布（障害調整生存年(DALY)にて評価）の年間値も評価した。損失余命分布は、作成した睡眠困難の被害関数、および気温データとしてOGIMETの22時気温、人口密度としてLandscanを用いた。また、DALYを計算するため必要な重篤度は、Fukuda et al (2013)による睡眠困難の重篤度データを参照した。

## b 都市健康影響評価のための数値シミュレーションの開発

都市気象-ビルエネルギー連成モデルCM-BEMの入力条件として建物構造データ（建物構造およびエネルギー使用スケジュール）、交通排熱データを整備した。

## c ジャカルタの都市健康に対する適応策の導入効果の評価

ジャカルタ市の事務所街区を対象に、適応策としてのインテンシブ屋上緑化、エクステンシブ屋上緑化、または高反射率塗料の導入効果を評価した。まず、CM-BEMを用い、2014年8月におけるジャカルタの気候・エネルギー消費量を再現した。そして、屋上緑化や高反射率塗料を導入した場合の気候とエネルギー消費量を評価した。入力データとして、サブテーマ(1)およびサブテーマ(3)で整備された都市構造（建物構造、交通排熱）および地域気象条件を用いた。

次に、費用便益分析を実施した。社会的には、緑化は気温低下を通じて冷房需要の削減や暑熱ストレスの緩和など、環境面においてさまざまな便益をもたらす。一方、その製造や運用のためにエネルギーを必要としたり暖房需要を増加させたり負の便益ももたらす。同時に、導入にはコストもかかる。ただし、堤防の建設と異なり、建物への屋上緑化や高反射率塗料の導入は私的に実施されると考えられる。そこで、私的な項目に限定し、40年間にわたる費用便益分析を実施した。具体的には、導入コスト、運用に伴う灌水の上水コスト・揚水動力のエネルギーコスト、および空調（冷房・暖房）のエネルギーコストの変化量を、聞き取り調査や関連文献から評価した。そして、これらのコストを合算し、ライフサイクルコストを評価した。

エアコンは暑熱影響への最も代表的な適応策と考えられる。しかし、エアコンを導入すると、室外機からの排熱により気温が上昇し、さらにエアコンが必要となる悪循環が予想される。CM-BEMはキャンピー気象モデルとビルエネルギーモデルが連成されているため、悪循環を評価できる。ジャカルタにおけるエアコンの導入効果を評価するべく、まず、2016年2月および10-11月の疫学調査の結果を再解析し、エアコン導入時とエアコン非導入時における睡眠困難と疲労の被害関数を開発した。次に、サブテーマ(1)による現在気候、RCP 8.5シナリオの2050年代の気候、および緩和策が反映されたRCP 2.6シナリオの2050年代の気候におけるメソ気象モデルWRFを上端境界として、CM-BEMを用い、各シナリオにおける気温と空調エネルギー消費量を計算した。なお、エアコンは外気条件や負荷によって電力消費が変

化するが、エアコンの部分負荷特性式として利用可能なのは、山崎ほか(2002)のみであり、インバーター採用機種のパフォーマンスを再現できない。そこで、エアコンメーカー各社のカタログをレビューして成績係数(COP)の年別推移を収集するとともに、かつメーカーに部分負荷特性についてヒアリングした。その結果、インバーター機種を含むエアコンのCOPを部分負荷率および外気条件で表現できる式を作成した。エアコン使用率の上昇値は自律的に導入できる水準に設定した(現在では日本を参照した90%、RCP 8.5シナリオでは60%、RCP 2.6シナリオでは90%)。開発した被害関数に基づき、各シナリオにおける睡眠困難罹患数と疲労罹患数をDALYで評価した。さらに、テーマ1サブテーマ(3)によるエアコンの製造段階の影響評価結果、CM-BEMによる空調エネルギー消費量をLCAソフトウェアMiLCAと影響評価手法LIME2を用いて環境影響に評価した結果、および睡眠困難・疲労のDALY値を、影響評価手法LIME3を用いて金銭換算することで、エアコンの導入の費用便益を考慮した統合評価をおこなった。以上をまとめた評価フローを図3.3.4に示す。エアコンは私的財であり、便益を享受するのが導入者自らに限定されるため、公共財のような費用便益分析は実施できない。しかし、社会における健康影響を改善することは社会にとっても便益につながる。そこで、政府の立場からエアコンの導入に対しいくらかまでならば補助しても、社会的便益が政府支出を上回るかを評価することで、費用便益分析とした。評価シナリオとしては、使用率の向上(未導入世帯へのエアコン導入)と高効率化(導入世帯における高効率エアコンへの買い換え)の2種類を設定した。また、便益は睡眠困難・疲労、および他の環境影響の増減の金銭換算値の差分(純便益)とし、費用は政府の補助金とした。補助金はエアコン代と使用電気代の合計に対して補助率を乗じて支出されるものとした。

電気自動車は、ガソリン自動車に比べて、燃料効率と車両効率を合算した総合効率が向上するため、一般には緩和策と見なされている。しかし、車両効率が80%とガソリン自動車の16%から飛躍的に向上するため、人工排熱を大幅に削減し、適応策としての効果も期待される。そこで、ジャカルタにおける交通排熱の空間分布および時間変動のデータを整備し、気温低下効果を評価した。また、ヒートポンプ型給湯機は、定格COPが4超に達し、既存の給湯器に比べて高効率であることから、省エネルギー技術であり、一般的には緩和策と見なされている。しかし、大気から吸熱してお湯を作るため、多大な負の人工排熱を発生させ、適応策と視点効果も期待される。そこで、ジャカルタにおける給湯使用量の空間分布やタイムスケジュールのデータを整備し、ヒートポンプ型給湯機が2050年代のジャカルタ都市圏全域に普及した場合を評価した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した都市気候変動の予測に関する研究

###### a 人工衛星データのみを使用した、高時空間解像度の全球都市GISデータベースの構築

本プロジェクトで作成・公開した高空間解像度(1km)の全球都市GISデータベースは、いずれも世界で類を見ないものである(図4.1.1~図4.1.3)。都市温暖化解析は、気象モデルそのものではなく、途上国などにおける入力データの未整備が、解析実行上の大きなボトルネックとなってきた。本プロジェクトチームだけでなく、気象予測モデルを有する世界的な研究者チームは、これらの全球都市GISデータベースを入力データとして用いることにより、本プロジェクトで行ったような現状分析・将来予測が、世界の任意の都市で実行できることになる。現状の全球人工排熱データは国際誌に出版・公開済みである。シナリオ別2050年将来の人工排熱データは、投稿中である。将来の都市領域の全球推定データ(2050年まで10年間隔;解像度1km)は、国際誌に出版・公開済みである。現状および将来の全球3次元建物データは、投稿中である。人工排熱・都市領域・3次元建物GIS、いずれの全球データベースも、先進国の特定の都市を抽出し、現地で計測・推定された精度の高いデータと比較しても、気候予測計算の入力値としての使用に耐えうる十分な精度を有することが確認された。

## b 2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測

図3.1.1の6つの温暖化・都市化シナリオの結果から、最も重要な部分をハイライトして以下に記す。図4.1.4は、2050年2m気温分布の結果を示している。以下の事が推察される。(1) ジャカルタにおけるグローバルな温暖化シナリオによる影響は0.5~1.5℃程度である。(2) 都市化シナリオ影響は、都市周辺に局所的に強く表れており、1.5~2.5℃に達する。(3) すなわち、都市化影響は局所的には温暖化影響と同等かそれ以上になり得る。(4) ジャカルタ中心部のスプロール化に伴い、気温上昇域はその周辺に移動する。以上の結果を空間統計的に示したものが、図4.1.5である。2m気温について現況(2015)と将来(2050)の差をジャカルタ域の空間統計量としてBox plotで示している。以下の知見が得られる。(1) グローバルな温暖化シナリオによって空間平均的に1.0℃程度の差が生じている。(2) 都市シナリオの影響はジャカルタ全体平均でみると0.2~0.3℃とグローバルな温暖化寄与と比べて小さい。(3) しかしながらBox plotのバー(空間分散)の大きさからわかるように、都市シナリオを考慮した計算(Urbanization)は、局所的には空間平均値としての気温変動幅(0.6~1.6℃)より大きな気温変動が付加される。気温上昇域は、おもにスプロール化による人口増加域に対応しているため、熱中症や睡眠障害などの健康影響を、どのような空間解像度において評価するかによって結果に大きな違いが生じる。シナリオ別気温予測結果に基づき、2050年における60歳以上高齢者の熱関連死亡リスクを図4.1.7に示した。影響関数は、平林チーム(テーマ3)の本田先生の提案されている式を用いた。SSP1およびRCP2.6の最善シナリオ、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ、いずれも熱関連死亡者は、現状よりも大幅に増加することが予想される。最悪シナリオでは、気温上昇の顕著な中心市街地で、1平方キロメートルあたり、8月の1月で、80名を超える死亡者に達する街区も存在する。これは、高齢者人口が相対的に増加するという人口構成の影響と、2つの温暖化による影響の両者が考慮されている。高齢者人口の増加の影響のほうが2つの温暖化影響よりも相対的に大きい、それでも、気候変動による気温上昇の寄与だけで12.5%、ヒートアイランドによる寄与分だけで14.4%、都市全体での熱関連死亡者を増加させている。なお、この暑熱環境の適応策については、サブテーマ3で掘り下げられる。

図4.1.9は、図3.1.2のシナリオに基づいて予測された中心市街地の体感温度指標(SET\*)の結果である。SET\*は温度、湿度、風速、放射、衣服、代謝の影響をすべて考慮した体感温度の指標である。中央部分に高い建物を立てたため、日射が遮られることにより平均放射温度が下がり、SET\*が低くなっている場所がみられる。また、図は割愛するが、高さの異なる建物群を混合させて配置させることにより、上限の乱流混合が促進され、局所的には、地上付近の気温を低下することができ、そこに、さらに植栽を適切に配置すると体感温度を優位に低下させることができる。

ガルダプロジェクトにおける大規模防潮堤を風上側に配備した、都市大気境界層の大規模乱流数値計算(水平20km×5km程度、格子解像度2m)の結果を示す。図4.1.10は、都市表面に疑似的なトレーサーを置いて、流れの様子を可視化したものである。風上の海上に位置するガルダプロジェクトの超高層大規模構造物が、筋状の大規模乱流構造発生トリガーとなり、中心市街地に至るまで、風下数十kmに渡り筋状の低速領域を形成している。この低速領域に向かって、地表面付近で発せられたスカラー(トレーサー)が吸い寄せられて、低速領域で高濃度となっている。図左下の既存の高層ビル群で、濃度集積が著しい。ガルダのような大規模開発は、風下数十キロにわたる都市全体の、スカラー濃度や気温に大きな影響を及ぼし得ることを示している。

## c 都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築

全球286都市の観測点における過去1世紀換算の気温上昇量を統計的に分析した。図4.1.12には、日最低気温上昇量の発生頻度ヒストグラムを示した。全球平均的に見ても、都市温暖化による気温上昇寄与は、気候変動による気温上昇寄与の2~2.5倍に達しており、都市の立地条件に関わらず、都市における気候変動適応策を考える上で、都市温暖化の影響を適切に考慮しなければならないことを強く示唆している。全球平均のヒートアイランド強度であるが、日最低気温上昇量が $2.36 \pm 0.69$  (°C/century)、

日最高気温上昇量が $1.60 \pm 1.50$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{century}$ ) となった。平均値に対して分散値が大きいのは、それぞれの都市における温暖化要因の違いによるためである。図4.1.13は、UHI強度との相関関係がとりわけ強く認められた、DTR（気温の日変化振幅）、風速、緑化率、人工排熱、とUHI強度との相関図を示した。DTRは、地表面の熱的慣性力を示す指標であり、砂漠のような乾燥地域は、熱容量（＝熱慣性力）が小さいため、DTRは大きく、ジャカルタのような湿潤域は、水分を多く含むためDTRは小さくなる。地理的要因としては、このDTRがUHI強度と強く関係していることが分かった。砂漠のような乾燥域は、バックランド気候として、日最高気温が高く、日最低気温が低い。都市では郊外に比べて蒸発潜熱が小さいこと、余分な人工排熱が排出されることにより、一日を通じて気温を押し上げる傾向にあることは当然であるが、もう1つの要因として、インフラストラクチャーによる膨大な体積熱容量が、巨大な熱貯蔵庫として作用するため、気温の日変化振幅を（昼夜の気温差）を減少させることはあまり指摘されていない。そのため、乾燥域では、UHI強度が、日中（日最高気温）は小さく、場合によってクールアイランド（つまり砂漠の都市の日中は、砂漠より涼しい）になることもあり一方、夜間（日最低気温）の上昇は著しくなる。湿潤地帯は、その逆である。その他、風速との相関も強く、強風域は、UHIを緩和する。また、緑被率・人工排熱量といった、都市化指標は、UHI強度と強く相関している。

世界の286都市において、「現在土地利用」における10年気候と、「都市化以前土地利用」における10年気候の2つの比較再現計算を行い、両者の気温差をヒートアイランド強度と定義することによって、グローバルな都市温暖化の実態が再現可能かどうか検討した結果を図4.1.14に示す。日平均気温、日最低気温、日最高気温、いずれも、ヒートアイランド（UHI）強度の実測値（緑色）と計算値（青色）はよく一致している。

都市温暖化の再現計算を行った大都市について、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオのみを用いて、2050年の将来気候予測計算を行った結果を図4.1.15に示す。2050年における2010年からの年平均気温の上昇量は、2つの温暖化を考慮すると、 $1^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度と大きい。時に北京、天津など、これから更なる都市開発の進展が予測される中国の大都市は、過去一世紀のデータ解析に示したと同様に、気候変動影響をはるかに凌駕する都市温暖化影響により、 $4^{\circ}\text{C}$ 前後の大幅な気温上昇が懸念される。

## （2）緩和・適応統合実施による都市水害減災評価と費用便益分析に関する研究

### a 洪水氾濫モデルと洪水被害額の算定手法

2013年1月の洪水を対象とした洪水氾濫計算結果とジャカルタ政府が公表した実測の浸水範囲の比較を図4.2.1に示す。計算より算定された氾濫箇所は実測の浸水範囲と極めて良好に一致しており、レーダ雨量情報、高解像度の地形データ等の利用によって精度の高い洪水氾濫計算を実施することが出来た。また、他の既往研究やインドネシア、オランダなどの研究チームの洪水再現計算よりも格段と精度のよい計算となっており、日本の水工学や洪水氾濫計算の技術力の高さを示すものとなっている。

次に、日本の治水経済マニュアル（案）に基づいた2013年の洪水によるジャカルタ市の被害額の分布を図4.2.2に示す。同時に全球モデルでテーマ3によって算定されたジャカルタの洪水被害額も同時に示している。なお、2013年の洪水被害額はトータルで、全球モデル：3百万ドル、地域モデル：63億ドル、インドネシアのレポート・報告書などの実測：10～33億ドルと、全球モデルのみ大きな差が生じた。これは国平均原単位のダウンスケール計算（グローバル）と土地利用データ積み上げ計算（ローカル）の差によるものと考えられている。よって、グローバルの計算結果を地域レベルに落として推定する場合は極めて注意が必要であり、特にアジアのメガシティなどでは独自の地域スケールでの計算が必要不可欠であることが示された。

### b 将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響

上記でキャリブレーション・検証された洪水氾濫モデルを用い、土地利用の変化および地盤沈下の

影響を考慮し、1983年から2050年までの洪水氾濫計算を行った結果のまとめを図 4.2.3に示す。ここで土地利用の変化は最悪シナリオ(RCP8.5-BaU)に基づいている。図 4.2.3に示されるように過去の土地利用・地盤沈下状況では洪水氾濫面積・浸水量が現在(2013年)と比較して少ない。また将来の土地利用の変化と地盤沈下の影響で年々徐々に氾濫面積・浸水量が増加し、2050年では1983年の2倍以上に増加していることがわかる。両者の影響を比較すると、土地利用の変化の影響が地盤沈下の影響よりも大きい。しかしながら本洪水氾濫計算は豪雨起源のものであり、海域からの高波や異常潮位等に伴い海岸堤防の決壊が生じ海水の浸入が発生した場合等は、地盤沈下が浸水域や浸水深に大きく影響するものと考えられる。また、同時に地盤沈下が2020年にストップした場合の計算結果も示している。図に示されるよう、地盤沈下のみの対応では不十分なことは明らかである。これらの影響は温暖化というよりは、人間活動の直接的な影響(上流域の森林伐採や地下水の過剰摂取に伴う地盤沈下の発生)を議論したものであるが、これに温暖化時の降雨強度の増加等の影響が加わり、更なる洪水氾濫面積・浸水量の増加が懸念される。

次に、温暖化時の極端豪雨と都市の拡張を考慮した計算を実施した結果を図 4.2.4に示す。極端豪雨では、領域気象モデルWRFの動的ダウンスケーリングにより得られた豪雨を使用している。これらの豪雨は温暖化のみならずヒートアイランドの影響をも加味したものであり、テーマ4サブテーマ1から提供された豪雨を使用している。結果より洪水規模は温暖化・ヒートアイランドの影響でも増大することが明らかとなった。また、最善シナリオ(RCP2.6&Compact)、最悪シナリオ(RCP8.5&BaU)と浸水面積の増加が確認され、温暖化に都市の拡張が加わり洪水リスクの更なる悪化が懸念される結果となった。最善シナリオと最悪シナリオでそれほど大きな差がないのは、市街化の拡張が最善シナリオでも流域内では顕著であるためである。

しかしながら、上記の極端豪雨はWRFを用いて動的にダウンスケーリングを行っており、多くのシナリオを100年規模で計算するためには、計算負荷が極めて高く、長い計算時間を要する。よって、以下では統計的ダウンスケーリングを行い、複数シナリオを長期間にわたり検討している。24通り(8 GCM, 3 RCPシナリオ)の将来100年間の計算の結果を図 4.2.5に示す。気候変動のみの影響で、2050年期、2100年期において77%、99%ほどの年期待被害額が上昇することが示された。なお、本報告書で示す被害額は全て年期待洪水被害額である。次に、土地利用の変化と地盤沈下を加えたシナリオを加えると、2050年期と2100年期ともに360%以上も被害額が上昇することが示された。つまり、気候変動よりも地盤沈下・土地利用変化による被害額の増加が深刻である。

### c 適応策の検討と費用対効果

上述した5つの適応策(グリーンインフラ(GI)、ガルーダプロジェクト(GP)、居住制限(RC)、浸透井戸(RW)、遊水地化(RRP))に加えて、浸透井戸(RW)と遊水地(RRP)の組み合わせを加えた、6つの適応策の効果について、現在の気候・土地利用・地盤沈下の状態と、2050年の気候・土地利用・地盤沈下の状態に対する、被害軽減額の割合を算出した。求めた結果のまとめを表4.2.1に示す。もっとも軽減割合の大きい適応策は、遊水地(RRP)と浸透井戸(RW)の組み合わせであり、将来で36%の軽減となる。また、現在気候については住居制限(RC)の軽減率が大きい(33%)が、2050年期では遊水地(RRP)の効果が大きい(31.5%)。一方、グリーンインフラ(GI)の効果は低い(将来で2.6%)。大型プロジェクトとされるガルーダ防潮堤(GP)の効果もそれほど大きくはない(将来で11%)。

上記の被害軽減率とは別に、年期待被害軽減額を図 4.2.6に示す。最も軽減額が大きいのは浸透井戸(RW)と遊水地(RRP)の組み合わせである。個別適応策をみると、遊水地(RRP)と居住制限(RC)の軽減額が大きい。居住制限(RC)は河道の拡幅部に遊水地機能を持たせるとしており、実質的な洪水氾濫量の減少が最も効くことを示している。一方、グリーンインフラ(GI)や浸透井戸(RW)による被害額の軽減の効果は低い。ガルーダプロジェクト(GP)の軽減被害額も大して大きくはない。

次に、それぞれの適応策の費用を考慮した費用便益比を図 4.2.7に示す。グリーンインフラ(GI)、浸透井戸(RW)、ガルーダプロジェクト(Garuda)、遊水地(RRP)、居住制限(RC)それぞれの費用便益比

は、0.004, 9.7, 0.006, 2.3, 1.4となり、浸透井戸の費用対効果がもっとも良いことが明らかになった。ガルダ防潮堤(GP)は費用が膨大であるため、洪水対策のみの便益が低いことが原因であり、防潮堤域に建設されるリゾートや港湾の便益はここでは考慮されていない。また、グリーンインフラ(GI)についても気候緩和機能や景観などの便益は含まれていない。一方、他の大型なインフラに対して安価な浸透井戸の設置は大きな費用便益比を示した。浸透井戸は地盤沈下を止める効果もあり、さらに大きな費用便益比が期待できる。

以上、本研究では構築した洪水氾濫モデル、洪水被害額算定手法を用い、将来の地球温暖化、都市の拡張が洪水被害額に与える影響を定量的に評価した。更に6つの適応策を検討することで、どの適応策の費用便益比が高いかなどを評価することができた。

### (3) 緩和・適応統合実施による都市健康影響評価と費用便益分析に関する研究

#### a ジャカルタの都市健康影響評価

LIME2やGlobal Burden of Diseaseなどを参照し、1死亡あたりのDALYを整理した。東南アジアの予測死亡数に、その値を乗算することで、気候変動(SRESシナリオA1b)に伴う2030年・2050年のDALYを算出した。結果を図4.3.1に示す。死亡数で評価した場合(WHO報告書)、直接暑熱が最も大きく、続いて低栄養、そしてマラリア・デング熱・下痢症はさほど大きくなかった。しかし、DALYで被害量を評価すると、低栄養が圧倒的に大きい。一方、直接暑熱はマラリアより小さい。これは、低栄養のDALY値が106.1年と大きいのに対し、直接暑熱は2年と小さいためである。低栄養のDALYが大きいのは、低栄養が年少者に多く発生し生命を奪うこと、さらに1件の死亡の背後に複数の死亡に至らない症例があると考え、それを見込んだDALY値となっているためである(LIME2の値)。一方、同じくLIME2にある直接暑熱は、もともと心疾患や呼吸器系疾患を患っている人々に発生し、彼らの余命は長くないと考えられているためである。ただし、直接暑熱のDALY値は、主に先進国を対象とした疫学研究から求められているため、途上国では年少者にも多く発生し、DALY値は大きくなると考えられる。また、死亡に至らない症例数を考慮していない図4.3.1を単純に解釈すると、低栄養が重要な疾病に見えるが、上記のDALY値の設定に関する問題、および、直接暑熱影響以外は公衆衛生に大きく依存し、緩和策・適応策が導入されずとも経済発展とともに公衆衛生が改善されれば減少が見込まれるため(実際、直接暑熱影響以外のすべての疾病において2050年の方が2030年より値が小さい)、本サブテーマでは、直接暑熱影響に着目する。他方、より詳細な統計が存在する個別疾病も存在した。たとえばマラリアである。WHOのWorld Malaria Report 2014によると、インドネシアでは毎年数百人程度の死者が発生している。しかし、隔年の数値に大きな変動が見られ、数値そのものの信憑性が高くないこと、また都市部のジャカルタの公衆衛生を踏まえるとマラリアの発生は見込まれにくいことから、詳細な解析は実施しないこととした。

死亡率を縦軸として、被害関数を開発した。開発した被害関数を図4.3.2に示す。至適気温(OT)の違いが暑熱障害に影響すると考えると、東京に比べてジャカルタは熱中症になりやすいといえる。熱ストレス死亡に関する全球スケールの結果と地域スケールの結果を並べて示す(図4.3.3)。全球スケールの結果は0.5度単位であるが、その格子は、ジャカルタ市どころかジャカルタ都市圏よりもさらに大きくなっていることがわかる。そのため、都心も郊外も同じだけの被害が発生している。一方で、地域スケールの結果は、人口密度に応じて被害量の濃淡がはっきり出ている。全体の影響を把握するだけであれば全球スケールで評価される概ねの数値で十分であるかもしれないが(ただし都市効果は含まれない)、適応策を立案するにあたっては、具体的にどこで被害が発生しているのかを明確にする必要があり、地域スケールでの評価は、それに叶っていると考えられる。

表4.3.1に、PSQIの構成要素の平均得点とPSQIから算出される睡眠困難罹患率を示す。調査方式の違いがあるが、東京に比べて格段に睡眠困難罹患率が小さいことがわかる。ここで示す睡眠困難罹患率は気温の上昇に関係なく睡眠困難である人の割合であるため、もともとの睡眠困難罹患率が小さいジャカルタの方が、東京よりも気温の上昇を受けやすい可能性があることがわかった。毎日の、疫学調査から

得られたSQIDSの睡眠困難罹患率を被説明変数に、OGIMETから取得した22時の気温を説明変数として、3次の平滑化スプライン回帰により、被害関数を求めた。また、疲労に関しても、DCFの睡眠困難率を被説明変数に、OGIMETから取得した日最高気温を説明変数として、3次の平滑化スプライン回帰により、被害関数を求めた。上述の被害関数と人口分布に基づいた、現状のジャカルタにおける睡眠困難の損失余命の分布を図4.3.6に示す。損失余命分布は人口密度に大きく依存するため、夜間人口が大きくなる地域で多く発生する一方、昼間人口は大きい夜間人口はそれほどではない都心での発生量は少ない。費用便益分析の観点からは、被害が集中する格子で適応策を導入した方が大きな健康影響改善効果が見られると考えられる。

## b 都市健康影響評価のための数値シミュレーションの開発

ジャカルタにおける5種類の用途の建物を対象に、標準的な建物構造（天井高、窓面積率、壁体構造など）、内部発熱（居住スケジュール、空調スケジュールなど）のデータを整備した。整備したデータは膨大であるため、そのうちの一部を表4.3.2に示す。壁体構造が特徴的であり、日本の標準的建物（オフィス用標準問題や住宅用標準問題）と異なり、断熱材が挿入されていないことがわかった。そのため、日本に比べて適応策の導入効果が大きくなる可能性がある。

## c ジャカルタの都市健康に対する適応策の導入効果の評価

図4.3.9は、評価対象街区の地上1.5 m気温のBMKGにおける観測値（OGIMETより取得）とCM-BEM（WRFの計算結果を上端境界条件として使用）の計算値の比較である。概ね一日の気温変化が再現されていることがわかる。CM-BEM屋上緑化や高反射率塗料を導入した場合の地上1.5 mの気温を図4.3.10に示す。インテンシブ屋上緑化は1日を通して0.05℃以上の気温低下が見込める一方、エクステンシブ屋上緑化による気温低下は見込めなかった。高反射率塗料は夜間の気温低下はないものの、日中はインテンシブ屋上緑化に準ずる気温低下が見込めた。エクステンシブ屋上緑化は植生の蒸発散が見込めないためと考えられる。空調エネルギー消費量の結果を図4.3.11に示す。空調エネルギー消費量に関しても、インテンシブ屋上緑化・高反射率塗料の導入効果は認められる一方、エクステンシブ屋上緑化の導入効果は小さいことがわかる。私的項目（導入者視点のみ）に限定したライフサイクルコスト(LCC)の結果を図4.3.12に示す。屋上緑化は、便益 < 費用となる一方、高反射率塗料は、便益 > 費用となった。これは、屋上緑化は形態にかかわらず、導入にも運用・維持にも多額の費用を要するためである。高反射率塗料は（相対的に）更新費用の占める割合が大きい、導入、運用・維持、更新ともに低コストであるため、私的にも便益が正となることがわかった。

疫学調査の結果を再解析し、エアコンを使用していないグループとエアコンを使用したグループの22時気温と睡眠困難罹患率の関係を求めた。結果を図4.3.13に示す。エアコンを使用すると、気温が上昇しても、睡眠困難罹患率の上昇が大きく抑制されることがわかる。同様に、エアコン有り無し別の日最高気温と疲労罹患率の関係を図4.3.14に示す。疲労に関してはエアコン導入の効果はやや小さいが、一部の気温区間を除き、エアコンの仕様は疲労を抑制しているという結果が得られた。次に、各シナリオのエアコン使用率別の日最高気温の計算結果（8月平均）を図4.3.15に示す。エアコン使用率の上昇に伴い、室外機からの排熱が増大するため、どのシナリオにおいても気温が上昇してしまっている。なお、都心部で気温の上昇（と次項の空調電力消費量の増加）が見られないのは、都心部は業務街区として計算しており、業務街区においては空調導入率を現時点で100%としているためである。空調電力消費量の計算結果（8月合計値）を図4.3.16に示す。エアコン使用率の上昇に伴い、空調電力消費量は3倍以上に増大することがわかる。また、将来シナリオは気温が高い分、電力消費も顕著となる一方、エアコンの使用率が向上すると、睡眠困難は削減される。結果を図4.3.17に示す。いずれのシナリオでも4割程度削減された。その効果は大きく、たとえば人口が増加し気温も上昇し2050年のRCP2.6+SSP1の社会でも、エアコン使用率を増加させると、現在の社会よりも、ジャカルタ都市圏の睡

眠困難に伴う健康影響を削減できることがわかった。疲労（図省略）も削減されたが、ここでは疲労罹患率は昼間の気温（日最高気温）に影響されるとして評価しており、昼間のエアコン使用率の上昇幅は限定的に設定したため（現時点：4%→現在気候・RCP2.6+SSP1：23%、RCP8.5+SSP3：15%）、DALYの削減は最も大きいRCP2.6+SSP1シナリオでも800年にとどまった。最後に、統合評価結果を図4.3.17に示す。現在気候・2050年代のRCP8.5+SSP3シナリオ・2050年代のRCP2.6+SSP1のどのシナリオにおいても、被害額の観点からは、睡眠困難・疲労の軽減効果は、電力消費に伴う環境影響を上回ることがわかった。また、日本で一般的であるインバーターエアコンを普及させると、電力消費増はやや抑えられた。一方、エアコン使用率を上昇させた住宅街区に限定し、現在気候シナリオにおいて、エアコン使用率の上昇に伴う悪影響を緩和策で軽減する方法についても検討した（図4.3.17参照）。その結果、エアコン使用率向上による健康被害軽減効果は、製造～使用～廃棄によって発生する環境影響と比べて大きいことがわかった。また、断熱材や屋上緑化よりもインバーター化が悪影響の軽減には効果的であり、インバーター化をおこなった場合、ネットでの被害軽減効果を約1.3倍に拡大できる。政府の適応策としての観点からのエアコンを位置づけて分析した結果を表4.3.3に示す。まず、高効率化（インバーター化+COPの向上）は、私的範囲で健康影響を含まない便益が費用を上回るため、政府が補助金を支出せずとも自立的に導入が進むと評価された。一方、使用率の向上については、私的範囲では便益が費用を下回り、政府の補助金が期待された。しかし、社会的純便益のみに着目して政府が補助率を設定した場合、補助率は最大でも0.021%にとどまることわかった。なお、ここでは健康影響の削減という便益のみではなく環境影響の増大を含んだ純便益を対象とし、補助金もエアコンではなく電気代に対しても設定しているため、直接的な便益や導入しか着目しない費用便益分析と比較すると厳しい設定での結果であることに留意する必要がある。

電気自動車は2050年代のジャカルタ都市圏全域に普及した場合をCM-BEMで評価したところ、11時頃と20時頃の気温を低下させた。2050年代のRCP8.5+SSP3シナリオにおける14時と20時の月平均低下効果を図4.3.18に示す。特に20時のピークは大きく、最大0.95℃にも達した。電気自動車の気温低下効果は被覆対策の導入面積が限られる都心街区、被覆対策の気温低下効果が望みにくい20時の気温を低下させることから、都市圏の中で、電気自動車は被覆対策と相補的な関係にあることも分かった。また、ヒートポンプ型給湯機の結果を図4.3.19に示す。その結果、住宅街区において5時の気温を著しく低下させ、その低下量は最大1.2℃にも達した。さらに地上緑化と組み合わせると、地上緑化が大気を安定させるため、双方の線形和以上の効果を発揮することがわかった。

被覆対策による気温低下量は限定的で、都市部では導入量も限られるため、エアコン、電気自動車、ヒートポンプ型給湯機といった適応策との併用が重要であることがわかった。これらは都市型適応策と名付けることができる。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### （1）科学的意義

- ・緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した上で、気候変動にヒートアイランドを加えた2つの温暖化を適切に反映した都市気候変動の予測を行う最先端の数値予報技術を開発した。このようなアプローチは、世界の他都市においては見られず、都市の気候変動研究における先進的事例と言える。
- ・ジャカルタを対象に開発される都市温暖化予測技術を、世界の任意の都市にグローバル展開できるよう、その枠組みを確立・検証・提示した。世界の任意の大都市に適用可能で、世界をリードできる新たな都市気象予測技術が構築された。
- ・高時空間解像度の都市気象予測モデルの出力に対応した、精度のよい洪水氾濫モデルが開発された。
- ・このモデルにより、ジャカルタで毎年のように生じている洪水被害のメカニズムを明らかにすることが出来た。地盤沈下および土地利用・被覆の変化が洪水氾濫に与える影響を評価することができ、これらの影響が2050年には極めて深刻な状況になることを明らかにした。また、効果的な洪水対策を考察す



るための基礎資料の提供、洪水被害金額ならびに対策の便益を計算することが可能となった。

- ・地球温暖化、土地利用の変化、地盤沈下が洪水氾濫および洪水被害額に与える影響を定量的に評価し、さらに複数の適応策について評価を行った。遊水地が最も被害軽減額ならびに軽減率が大きく、費用便益比では浸透井戸の効果が他よりも大変大きな値を持った。
- ・従来ほぼ検討されていなかった都市健康分野における適応策に関して、具体的な適応策の費用便益分析の枠組みを開発し、その中で実際に適応策の評価を実施した。
- ・都市気候研究とLCA研究を具体的に結びつけた研究も他に例がなく、今後の合理的な適応策設計につながっていくと考えられる。
- ・従来、緑化や高反射率塗料といった建築被覆対策が主に評価されてきたが、本研究は、建築被覆対策にとどまらず、エアコンや電気自動車、ヒートポンプ型給湯機といった都市で導入しやすい電化対策を対象とし、成果をあげた。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

- ・インドネシア海洋・水産省、ジャカルタ特別州環境局、インドネシアのバンドン工科大学との協力により、ジャカルタ市内に気象観測ネットワークを形成し、現地微気象特性把握に利用されている。
- ・JICAのジャカルタ地盤沈下プロジェクト（The Project for Promoting Countermeasures Against Land Subsidence in Jakarta）に対して、遊水地や浸透井戸の効果の提供を行い、より実践的な政策立案に入力した。地盤沈下と併せて今後、インドネシアの環境政策として流域市街化の抑制とともに地下水位の上昇を目指すための政策を多く提案した。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

- ・開発した都市気候変動予測手法は、ジャカルタを対象としているが、現地でのデータ取得が困難な発展途上国のメガシティへの応用を前提に設計されたものであり、今後、他国への環境政策支援のツールとして活用できる可能性がある。
- ・インドネシア バンドン工科大学と共同で設置したタワー観測サイトは、グローバル研究に使用可能な精度・設置条件・観測項目を備えており、同大学が継続的にメンテナンスと運用を行っている。今後、インドネシア気象局（BMKG）も含めて、質の高い気象観測データとして、各種政策決定の基礎データとして使用可能である。
- ・環境省が予定されている気候変動研究情報のデータベース化、とりわけ、東南アジアのメガシティを対象としたコンテンツ（数値予測データ・現地観測データ）の提供が可能である。
- ・JICAだけでなく、途上国のメガシティの洪水対策・暑熱対策について、都市計画政策と緩和策、保健政策などを包括的な視点で進める指標を提供した。アジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）へのデータ提供への貢献によって日本の環境、外交プレゼンスが増し、今後、これらを通じて各国の適応策の進展が期待できる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) M.Esteban, H.Takagi, L.Jamero, C.Chadwick, J.E.Avelino, T.Milami, D.Fatma, L.Yamamoto, N.D.Thao, M.Onuki, J.Woodbury, V.P.B.Valenzuela, and R.N.Crichton : Ocean & Coastal Management, 189, Adaptation to Sea Level Rise: Learning from Present Examples of Land Subsidence, (in press) 1,May 2020
- 2) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, Y. Honda, T. Ihara and M. Kanda: Future increase in elderly heat-related mortality of a rapidly growing Asian megacity. N. Scientific Reports (final review), 2020

- 3) Y. Narita, A.C.G. Varquez, M. Nakayoshi and M. Kanda: Construction of land use database before urbanization for global urban climate analyses. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.75, No.2, I\_1039-I\_1044, 2019*
- 4) M.Asami, M. Nakayoshi, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Mechanism of the urban heat island considering geography and background climate. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.75, No.2, I\_37-I\_42, 2019*
- 5) N.S.Darmanto, A.C.G. Varquez, and M.Kanda : Future Urban Climate in A Tropical Megacity Based on Global Climate Change and Local Urbanization Scenario, *Urban Climate, (accepted), (2019)*
- 6) Y. Zhou, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model. *Scientific Data Volume 6, Article number: 34 (2019)*
- 7) M.Esteban, H.Takagi, R.J.Nicholls, D.Fatma, M.B.Pratama, S.Kurobe, X.Yi, I.Ikeda, T.Mikami, P.Valenzuela and E.Avelino: *Maritime Policy & Management, Adapting Ports to Sea-level Rise: Empirical Lessons based on Land Subsidence in Indonesia and Japan (in press) , Published online: 18 July 2019*
- 8) Y. Hashimoto, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa, T. Ihara: *Sustainable Cities and Society, 45, 38–47 (2019), Sensitivity of electricity consumption to air temperature, air humidity and solar radiation at the city-block scale in Osaka, Japan*
- 9) 桑山忠弘, 山口和貴, 岡田和樹, 亀卦川幸浩, 神田学, Alvin Christopher Galangc Varquez, Nisrina Setyo Darmanto, Prihadi Setyo Darmanto, 井原智彦. *日本LCA学会誌, 15, 1, 2–9 (2019), エアコンによる睡眠困難および疲労の障害調整生存年 (DALY) の軽減効果 –インドネシア・ジャカルタにおける評価–*
- 10) 居石貴史, M. Yucel, 足永靖信, 稲垣厚至, 仲吉信人, A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, 神田学: *土木学会論文集B1(水工学) vol.74, 4, I\_259-I\_264, (2018)“全球・都市の将来シナリオを考慮した都市街区の温熱環境予測*
- 11) S. Kiyomoto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Anthropogenic Heat Flux Distribution with Point Sources for Global Urban Climatology, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 74, No. 5, I\_1171-I\_1176, 2018*
- 12) H. Takagi: *Sustainability, 10, 1045, (2018) “Long-Term Design of Mangrove Landfills as an Effective Tide Attenuator under Relative Sea-Level Rise”*
- 13) A.C.G. Varquez, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), (accepted) (2018) “Future population distribution of an urban agglomeration given climate change scenarios”*
- 14) T. Sueishi, M. Yucel, Y. Ashie, A. Inagaki, M. Nakayoshi, A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto and M. Kanda: *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) (accepted) (2018) “Influence of Climate Change and Urbanization to Future Thermal Environment within A Megacity” (Japanese)*
- 15) Priyambodoho A.B., S. Kure, I.R. Moe, and S. Kazama, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), Vol.74, No.5, I\_265-I\_271 (2018) “Numerical Experiments of Future Land Use Change for Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”*
- 16) 菅原雄太, 風間聡, 峠嘉哉, *土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp. I\_343-I\_348(2018) “レーダー・アメダス解析雨量を用いた豪雨の空間分布特性の分析”*
- 17) N.F. Januriyadi, S. Kazama, Moe I.R., and S. Kure, *Hydrological Research Letters, Vol.12, No.3, pp.14-22 (2018) “Evaluation of future flood risk in Asian megacities: a case study of Jakarta”*
- 18) A.C.G. Varquez and M. Kanda: *Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009), npj Climate and Atmospheric Science volume 1, Article number: 32 (2018)*
- 19) H. Takagi: *Long-Term Design of Mangrove Landfills as an Effective Tide Attenuator under Relative Sea-Level Rise. Sustainability, 10, 1045 (2018)*
- 20) Y.Dong, A.C.G. Varquez and M.Kanda: *Atmospheric Environment, 150, pp.276-294, 2017 “Global*

anthropogenic heat flux database with high spatial resolution”

- 21) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, N. Kawano, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 73, No. 4, I\_103-I\_108, 2017, “Representative urban growing scenarios for future climate models”
- 22) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: Urban Climate Vol. 21, 243-261, 2017, “High-resolution Satellite-derived Urban Roughness Parameters for Mesoscale Modeling in Megacities”
- 23) A.C.G. Varquez and M. Kanda: Global urban Climatology, “Analyses of urban heat island trends derived from global surface temperature datasets and meteorological stations” (For Submission)
- 24) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: International Journal of Urban Climate No.21, 243–261, DOI: 10.1016/j.uclim.2017.07.001 (2017) “Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities”
- 25) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, N. Kawano, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 73, No. 4, I\_103-I\_108 (2017) “Representative Urban Growing Scenarios For Future Climate Models”
- 26) N.S.Darmanto, A.C.G. Varquez, and M.Kanda : Urban Climate, 21, 243-261,(2017) “Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities”
- 27) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Atmospheric Environment, 150, 276-294, (2017) “Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution”
- 28) H.Takagi, D.Fujii, M.Esteban and X.Yi: Sustainability, DOI: 10.3390/su9040619 (2017) “Effectiveness and Limitation of Coastal Dykes in Jakarta: The Need for Prioritizing Actions against Land Subsidence”
- 29) H. Takagi, D. Fujii, M. Esteban and X. Yi: Sustainability, 9, 619, (2017) “Effectiveness and Limitation of Coastal Dykes in Jakarta: The Need for Prioritizing Actions against Land Subsidence”
- 30) M.Esteban, H. Takagi, T. Mikami, A. Aprilla, D. Fujii, S. Kurobe and N.G. Utama: International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 23, 70-79, (2017) “Awareness of coastal floods in impoverished subsiding coastal communities in Jakarta: Tsunamis, typhoon storm surges and dyke-induced tsunamis”
- 31) Nurul F. Januriyadi, Sotephen G. So Kazama, Idham R. Moe, Shuichi Kure, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Theme 2, 2D, pp.2343-2349(2017) “Estimation of spatial flood damage costs in Jakarta, Indonesia”
- 32) Golam Salem Ahmed Salem, So Kazama, Shawsuddin Shahid, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Theme 6, 6A, pp.4346-4353(2017) “Estimation of direct and indirect impacts of climate change on groundwater level in a groundwater dependent irrigation region”
- 33) I. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Hydrological Research Letters, Vol.11, No.2, pp.99-105 (2017) “Future projection of flood inundation considering land-use changes and land subsidence in Jakarta, Indonesia”
- 34) Y. Takane, Y. Kikegawa, M. Hara, T. Ihara, Y. Ohashi, S. A. Adachi, H. Kondo, K. Yamaguchi, N. Kaneyasu. International Journal of Climatology, 37, S1, 1035–1052 (2017), A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity
- 35) 河野なつ美,董 玥,M. Yucel,A.C.G. Varquez,神田学:土木学会論文集B1 (水工学) Vol.72, 4, I\_97-I\_102, (2016) “グローバル都市気象学-都市温暖化の汎用解析手法の提案”
- 36) M. Yucel, A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto and M. Kanda: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 72, 4, I\_91-I\_96(2016) “Improvements of Urban Representation in Weather Models Using Global Datasets”
- 37) A.C.G. Varquez: Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 29(5), pp.313-325 (2016) “Global urban Climatology”
- 38) H. Takagi, M. Esteban, T. Mikami and D. Fujii: Urban Climate, Elsevier, 17, 135-145, DOI:

- 10.1016/j.uclim. 2016.05.03, “Projection of coastal floods in 2050 Jakarta”
- 39) H. Takagi, T. Mikami, D. Fujii, M. Esteban and S. Kurobe: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., EGU, 16, 1629-1638, DOI:10.5194/nhess-16-1629-2016, “Mangrove forest against dyke-break-induced tsunami on rapidly subsiding coasts”
- 40) I. Moe, S. Kure, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 72, 4, I\_1243-I\_1248 (2016a) “Evaluation of Flood Inundation in Jakarta Using Flood Inundation Model Calibrated by Radar Rainfall”
- 41) I. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), 72, 5, I\_247-I\_252 (2016b) “Effect of Land Subsidence on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 42) 秋間将宏, 風間聡, 小森大輔, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, pp.I\_1267-I\_1272(2016) “再現確率にもとづく洪水氾濫・高潮複合災害潜在被害額推定”
- 43) I. Moe, S. Kure, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), 71, 5, I\_29-I\_36 (2015) “Numerical Simulation of Flooding in Jakarta and Evaluation of a Countermeasure to Mitigate Flood Damage”

## (2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) B. A. Priyambodoho, S. Kure, N.F. Januriyadi and S. Kazama, 土木学会中部支部2019年度研究発表会, 長野高専, 長野市, 2020. “Climate change impact study for flood inundation in Jakarta, Indonesia based on dynamical downscaling of future scenarios”
- 2) B. A. Priyambodoho and S. Kure, 土木学会中部支部2019年度研究発表会, 長野高専, 長野市, 2020. “Evaluation of GSMaP-NRT for Flood Inundation Modeling in Jakarta, Indonesia”
- 3) Lorenz Ray Payonga、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「Application of endpoint modeling in quantifying the impacts of power interruptions on quality of life」
- 4) 姜怡達、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「An estimation of household activity emissions and the potential for emission mitigation through behavior change」
- 5) 周楚韻、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「Implementation of Bike-sharing System in Japan: The case study in Oita City」
- 6) T. Ihara, D. Narumi, S. Fukuda, H. Kondo : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Evaluation of sleep disorder caused by urban heat island based on the Pittsburgh Sleep Quality Index”
- 7) T. Ota, Y. Kikegawa, K. Yamaguchi, M. Kanda, A. C. G. Varquez, T. Ihara : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Evaluation of countermeasures for thermal environment in Delhi by urban canopy-building energy coupled simulation”
- 8) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Urban Climate Adaptation Strategy for Tropical Megacities Utilizing Energy Efficient Technologies”
- 9) S. Karkour, T. Ihara, T. Ota, N. Itsubo : The 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (2019)  
“Life cycle assessment of residential air-conditioners: comparison between India, Indonesia and Japan”
- 10) 方儒玥、山口和貴、玄地裕、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「東京都区部の各街区における鏡面反射・再帰反射を考慮した都市キャノピーモデルを用いた再

帰反射フィルムによる屋外熱環境の改善効果及び省エネ効果の評価」

- 11) 大田宇春、亀卦川幸浩、山口和貴、高根雄也、神田学、Alvin Christopher Galangc Varquez、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「都市気象-ビルエネルギー連成シミュレーションによるインド・デリーにおける高温熱環境の再現」
- 12) 張典、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「2050年代のジャカルタにおける性別を考慮した睡眠障害の予測」
- 13) 梅野凌矢、カーコーセリム、伊坪徳宏、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「ジャカルタにおける地球温暖化対策の費用便益分析」
- 14) A.C.G. Varquez: Global Urban Climatology (Invited) International Workshop on Urban Climate Projection, University of Tsukuba, Japan, Oct. 1, 2019
- 15) A.C.G. Varquez and M. Kanda: Global Urban Climatology Framework: New Perspective and Highlights, American Geophysical Union Fall Meeting 2019, San Francisco, CA, USA, Dec. 9 – 13, 2019
- 16) 劉宇、山口和貴、亀卦川幸浩、村山和義、井原智彦：2018年度日本建築学会関東支部研究発表会 (2019)  
「インテンシブおよびエクステンシブ屋上緑化の熱収支の計測」
- 17) Selim Karkour、井原智彦、伊坪徳宏：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「Mitigation and Adaptation to Climate Change through Life Cycle Assessment of Air-Conditioners: comparison between Japan and developing countries with consideration of the future environmental impacts」
- 18) 姜怡達、井原智彦：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「家計支出と生活時間の統計を用いた家庭内の行動に伴うCO<sub>2</sub>排出量の評価」
- 19) 廣川達也、井原智彦、吉田好邦：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「ジェンダー・福利厚生・賃金など各種労働問題を考慮したS-LCAの実装」
- 20) B. A. Priyambodoho, S. Kure, N.F. Januriyadi and S. Kazama, 水文・水資源学会2019年度研究発表会, 千葉工業大学, 習志野市, 2019. “Effects of Regional Climate Change on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 21) B. A. Priyambodoho and S. Kure : Evaluation of GSMaP Satellite Rainfall Dataset in Jakarta, Indonesia, 水文・水資源学会2019年度研究発表会, 千葉工業大学, 習志野市, 2019.
- 22) B.A. Priyambodho, S. Kure, I.R. Moe, N.F. Januriyadi, M. Farid and S. Kazama, 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019) Hanoi, Vietnam, 2019. “Regional Climate Change Impacts on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 23) A.C.G. Varquez, N.Kawano, M.Kanda, and M.Nakayoshi, 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Sept.19-20,2018 “The atmospheric effect of anthropogenic emissions to large Asian urban agglomerations.” (oral; best presentation)
- 24) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Sept.19-20,2018“Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate and local urbanization scenarios”
- 25) A.C.G. Varquez, N.Kawano, M.Kanda, and M.Nakayoshi : 10th International Conference on Urban Climate (ICUC), 6-10 August 2018, New York, USA. “Numerical Investigation of the World's Large Urban Agglomerations Using Distributed Roughness and Anthropogenic Emissions.”
- 26) M.R. Ferdiansyah, A. Inagaki, M. Kanda, A.J.P. Calheiros, and D.A. Villa: 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung,

- Indonesia, Sept. 19 - 20, 2018 “Information of sea-breeze inland penetration in tropical-coastal urban region derived from Himawari-8 visible band images.”
- 27) M.R. Ferdiansyah, A. Inagaki and M. Kanda: Jakarta, Indonesia October 8-10, 2018 “Atmospheric boundary-layer flow retrievals from Himawari-8 images using thermal image velocimetry Aomsuc9”
  - 28) M.R.Ferdiansyah, A.Inagaki and M.Kanda : S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018 “Spatial-temporal Detection of Sea-breeze Penetration Over Megacities from Himawari-8.”
  - 29) A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, N.Kawano, S.Kiyomoto, Y.Zhou, S.Takakuwa and M.Kanda : S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018.“ Linking Urbanization and Climate Change in Dynamical Downscaling Models.”
  - 30) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, S. Takakuwa, N. Kawano, M. Kanda and Y. Zhou: S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018. “Future Urban Climate Projection in a Tropical Mega City Based on Global and Local Urbanization Scenarios.”
  - 31) M. Yucel, A. Inagaki and M. Kanda: 10th International Conference on Urban Climate (ICUC), 6-10 August 2018, New York, USA. “Effect of the Great Garuda Sea Wall on pedestrian-level wind and thermal comfort.
  - 32) Nurul Fajar Januriyadi, So Kazama, Idham R. Moe, Shuichi Kure, Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, 2018. “How will anthropogenic activities change the flood risk in Jakarta megacity?”
  - 33) Qing Chang, Yoshiya Touge, So Kazama, The 6th International Symposium on Water Environment Systems --with Perspective of Global Safety, pp.38-40, 仙台, 2018.“The impact of spatial distribution scale on urban hydrological modeling performance and prediction”
  - 34) B. A. Priyambodoho, S. Kure and S. Kazama, 水文・水資源学会2018年度研究発表会, 三重大学, 津市, 2018. “Future Projections of Flood Inundation at Ciliwung River Basin in Jakarta, Indonesia”
  - 35) B. A. Priyambodoho and S. Kure : Evaluation of GSMaP rainfall for flood inundation simulation in Jakarta, Indonesia, 水文・水資源学会2018年度研究発表会, 三重大学, 津市, 9月12日-14日, 2018.
  - 36) B.A. Priyambodoho, S. Kure, and S. Kazama, 15th Annual Meeting AOGS, Honolulu, USA, 2018. “Impacts of land-use/cover change at upstream region on flood inundation in Jakarta, Indonesia”
  - 37) B. A. Priyambodoho and S. Kure, 平成30年度土木学会中部支部技術研究発表会, 愛知工業大学, 豊田市, 2019. “Evaluation of a GSMaP NRT data for Flood Inundation Model in Jakarta, Indonesia”
  - 38) Nurul Fajar Januriyadi, So Kazama, Daisuke Komori, JSCE Tohoku Branch Conference, Kooriyama, 2018, II-18, “Comparison three interpolation methods for statistical downscaling of GCMs”
  - 39) 橋本侑樹、榘元慶子、大橋唯太、亀卦川幸浩、井原智彦：第57回日本生気象学会大会 (2018) 「住宅内熱環境観測に基づく室温による熱中症搬送率の統計的予測」
  - 40) T. Kuwayama, S. Omune, N. Itsubo, K. Yamaguchi, K. Okada, Y. Kikegawa, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto, T. Ihara : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Integrated assessment of the health damage reduction effect and the environmental impact of air conditioner usage”
  - 41) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Evaluation for Heat Island Mitigating Potential of Improving Energy Efficiency in Jakarta”
  - 42) T. Ihara, K. Yoshida, Y. Yoshida : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Impact of knowledge on purchase decision making of fair trade products”
  - 43) 山口和貴、鈴木基、井原智彦、玄地裕、田中稔：平成30年度空気調和・衛生工学会大会

「東京都のオフィスビルにおける夏季空調使用実態調査」

- 44) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
 “Evaluation for Heat Island Mitigating Potential of Improving Energy Efficiency in Jakarta”
- 45) T. Ihara, T. Kuwayama, S. Omune, N. Itsubo, K. Yamaguchi, K. Okada, Y. Kikegawa, P. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, M. Kanda : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
 “Role of air conditioner as mitigation and adaptation to climate change”
- 46) T. Ota, Y. Kikegawa, K. Yamaguchi, T. Ihara : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
 “Current status of urban heat island and adaptations in Delhi, India”
- 47) 張典、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「気温変化による睡眠障害への影響の地域別分析 —名古屋とジャカルタのケーススタディ」
- 48) 大田宇春、亀卦川幸浩、山口和貴、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「都市キャノピー・ビルエネルギー連成シミュレーションによるデリーにおける高温熱環境の対策技術の評価」
- 49) 長沼康太、福田早苗、鳴海大典、近藤裕昭、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「疲労に関する連続日数の疫学調査における問題点」
- 50) 西本隆、橋本侑樹、山口和貴、亀卦川幸浩、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「都市気象—建物エネルギー連成サブグリッドモデルを用いた東京都の建物種類別エネルギー需要予測」
- 51) 小楠智子、関山牧子、橋本侑樹、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「関東地方における熱中症の社会経済要因に関する調査」
- 52) 橋本侑樹、榊元慶子、大橋唯太、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「都市における住宅内熱環境と熱中症リスクの評価」
- 53) 井原智彦、三木勝夫：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
 「高反射率塗料が15年間の研究成果を経て乗用車で実用化される」
- 54) Y. Hashimoto, K. Masumoto, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
 “Survey and prediction of summertime indoor temperature and humidity in urban areas, Japan”
- 55) Y. LIU, K. Yamaguchi, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
 “Simulated impact of green roofs on cooling energy and daily temperature in Jakarta, Indonesia”
- 56) T. Nishimoto, T. Tashiro, Y. Hashimoto, K. Yamaguchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
 “Development and verification of urban canopy - building energy coupled model considered multiple building types”
- 57) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
 “Evaluation for heat island mitigating potential of e-mobility in Jakarta”
- 58) 井原智彦、桑山忠弘、大棟俊、伊坪徳宏、山口和貴、岡田和樹、亀卦川幸浩、Priyadi Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galang Varquez、Nisrina Setyo Darmanto、神田学：第37回エネルギー・資源学会研究発表会 (2018)

「ジャカルタにおけるエアコンの健康被害軽減効果と環境影響の統合評価」

- 59) 山口和貴、桑山忠弘、井原智彦、亀卦川幸浩、岡田和樹、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Prihadi Setyo Darmanto：第37回エネルギー・資源学会研究発表会 (2018)  
「ジャカルタにおける電気自動車普及によるヒートアイランド緩和ポテンシャルの評価」
- 60) 桑山忠弘、伊坪徳宏、大棟俊、亀卦川幸浩、岡田和樹、山口和貴、神田学、Alvin Christopher Galangc Varquez、Nisrina Setyo Darmanto、Prihadi Setyo Darmanto、井原智彦：第13回日本LCA学会研究発表会 (2018)  
「2050年代のジャカルタにおけるエアコンの使用割合向上や高効率化による睡眠困難軽減効果のシナリオ分析」
- 61) 大棟俊、桑山忠弘、井原智彦、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会研究発表会 (2018)  
「家庭用空調機の気候変動緩和策と新興国導入による適応効果の定量分析」
- 62) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22-26 Jan, 2017. “Satellite-derived Urban Parameters for Mesoscale Weather Modeling in A Megacity”
- 63) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22-26 Jan, 2017. “Global High-Resolution Anthropogenic Heat Flux Database”
- 64) N. Kawano, A.C.G. Varquez, Y. Dong, M. Kanda and M. Roth: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22-26 Jan, 2017. “Weather Modelling of Urban Heat Island in Megacities Using Distributed Urban Parameters Derived from Global Datasets”
- 65) A.C.G. Varquez and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22-26 Jan, 2017. “Analyses of Multiple Urban Heat Islands from Global Surface Temperature Datasets”
- 66) M.Esteban, H. Takagi, T. Mikami, D. Fujii and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb.2017 “Awareness about tsunamis and dyke-break induced tsunami in low-lying coastal communities in Jakarta”
- 67) T. Mikami, H. Takagi, M. Esteban, D. Fujii and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb. 2017. “Evacuation Simulation for a Vulnerable Coastal Community in Jakarta”
- 68) H. Takagi, M. Esteban, T. Mikami, D. Fujii, and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb.2017. “Mechanisms of coastal floods in Jakarta: the need for immediate action against land subsidence”
- 69) A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, M.Kanda, and S.Takakuwa : Cities and Climate Conference 2017, Potsdam, Germany,19-21,Sept.2017. “Global urban climatology: advance strategy for representing urban areas in global weather models”
- 70) A.C.G. Varquez, M. Kanda, N.S. Darmanto, T. Sueishi, and N. Kawano: American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, USA,11-15 Dec.2017. “Advance strategy for climate change adaptation and mitigation in cities”
- 71) Masafumi Kon, Daisuke Komori, Pimsri Suwannapat, AOGS, Singapore, AS18-D3-PM1-P-014(2017) “Dynamics Evapotranspiration Fluxes Over the Heterogeneous Land Covers”
- 72) Satoshi Anzai, So Kazama, AOGS, Singapore, HS14-D4-AM1-327-005(2017) “Tendencies of High-Risk People on Floods Using Social Media”
- 73) 中口幸太, 小森大輔, 風間聡, 土木学会年次講演会, 福岡, II-015, pp. 29-30 (2017) “内水氾濫頻発区域の地理的・人為的分布特性”
- 74) 岡田和樹、亀卦川幸浩、井原智彦、Alvin C.G. Varquez、稲垣厚至、神田学：日本気象学会2017年



度秋季大会 (2017)

「ジャカルタを対象としたWRFの都市キャノピースキームに関する比較実験」

- 75) 橋本侑樹、井原智彦、大橋唯太、鍋島美奈子、重田祥範、亀卦川幸浩：日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)  
「熱中症リスク評価指標としての障害調整生存年(DALY)の検討」
- 76) 井原智彦、近藤裕昭：日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)  
「ピッツバーグ睡眠質問票を用いた気温上昇による睡眠悪化の評価」
- 77) Y. HASHIMOTO, T. IHARA : The 21th International Congress of Biometeorology (2017)  
“Calculating disability-adjusted life years (DALYs) for heat related illnesses due to urban heat island in Japan”
- 78) T. IHARA, R. KUSAMA : The 21th International Congress of Biometeorology (2017)  
“Estimation of fatigue by air temperature increase and reduction by air conditioners in Jakarta, Indonesia”
- 79) 橋本侑樹、塩野大和、亀卦川幸浩、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「住宅における空調室と非空調室の室内熱環境に関する実測調査 —2016年千葉県・東京都の事例—」
- 80) 西本隆、田代太一、橋本侑樹、徳竹衿也、亀卦川幸浩、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「複数の建物用途を考慮できる都市キャノピー-建物連成モデルの開発と検証」
- 81) 井原智彦、草間蓮：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおけるエアコン導入による疲労軽減効果の評価」
- 82) 小楠智子、橋本侑樹、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「熱中症による搬送の気象的・社会的要因分析」
- 83) 桑山忠弘、前田健太郎、亀卦川幸浩、岡田和樹、山口和貴、高根雄也、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Prihadi Setyo Darmanto、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおけるエアコンの使用率向上による睡眠困難の緩和効果の評価」
- 84) 劉宇、前田健太郎、山口和貴、亀卦川幸浩、岡田和樹、高根雄也、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Prihadi Setyo Darmanto、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の気温低減および冷房需要削減効果」
- 85) 草間蓮、井原智彦：第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)  
「ジャカルタにおける睡眠困難の実態把握とエアコン導入効果定量化」
- 86) A.C.G. Varquez and M.Kanda : The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University (Hachioji, Japan), 2–4 Mar 2016. “The roadmap to global urban climatology”
- 87) M.Kanda: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University (Hachioji, Japan), 2–4 Mar 2016. “Case study on mitigation and local adaptation to climate change in Jakarta” “Cost and benefit of rooftop energy saving technologies – case study in Jakarta –”
- 88) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, M. Kanda, and S. Takakuwa: American Geophysical Union Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016. “Future Climate Prediction of Urban Atmosphere in A Tropical Megacity: Utilization of RCP/SSP Scenarios with an Urban Growth Model”
- 89) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: American Geophysical Union Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016 “1-km Global Anthropogenic Heat Flux Database for Urban Climate Studies”
- 90) N. Kawano, A.C.G. Varquez, Y. Dong, and M. Kanda: American Geophysical Union Fall Meeting, 12–16 Dec, 2016. “Global distribution of urban parameters derived from high-resolution global datasets for weather modeling”
- 91) A.C.G. Varquez, M. Kanda, N. Kawano, N.S. Darmanto, and Y. Dong: American Geophysical Union Fall

- Meeting, 12-16 Dec, 2016. “Introduction to Global Urban Climatology”
- 92) I. R. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, K. Udo, S. Kazama, S. Koshimura: 13th Annual Meeting AOGS, Beijing, 2016, HS27-D4-AM1-302B(L3S)-004, p205. “Flood Inundation Characteristic in Jakarta and Its Evaluation Considering Land Use Change and Land Subsidence”
- 93) 呉修一, Idham Riyando Moe, Nurul Fajar Januriyadi, 風間聡: 水文・水資源学会2016年度研究発表会要旨集, 土地利用の変化および地盤沈下がジャカルタ洪水氾濫に与えた影響.
- 94) Kure, S., I. Moe, S. Kazama: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, 2016. “Historical reconstruction of floods in Jakarta, Indonesia considering land use change and land subsidence”
- 95) 中口幸太, 小森大輔, 井上亮, 風間聡, II-111, pp. 221-222, 土木学会年次学術講演会, 仙台, 2016 “仙台. 大都市における内水氾濫頻発区域の分布とその特性—大阪市を対象とした解析—”
- 96) 秋間将宏, 風間聡, 小森大輔, II-124, pp. 247-248, 土木学会年次学術講演会, 仙台, 2016 “洪水氾濫と高潮複合災害の被害額と伊勢湾台風被害額との比較”
- 97) Kure, S., I. Moe, S. Kazama: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, 2016 “Historical reconstruction of floods in Jakarta, Indonesia considering land use change and land subsidence”
- 98) Januriyadi, N., I. Moe, S. Kure and S. Kazama: 土木学会東北支部技術研究発表会, 2016 “Estimation of 2013 Jakarta Flood Damage Costs”
- 99) Idham Moe, S. Kure, M. Farid, S. Kazama, K. Udo, S. Koshimura and A. Mano: AOGS 12th Annual Meeting, APHW02-A021, Singapore, 2015 “Flood Inundation Characteristic in Jakarta City, Indonesia and its Evaluation by Numerical Simulation”
- 100) K. Maeda, K. Yamaguchi, N. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, Y. Kikegawa, M. Kanda, T. Ihara : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Cost and benefit of rooftop energy saving technologies - case study in Jakarta –”
- 101) R. Kusama, T. Ihara : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Quantitative evaluation of impact of climate change on human health in Jakarta”
- 102) T. Ihara : he 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Comparison of case studies on cost-benefit analysis of green roof”
- 103) 前田健太郎, 山口和貴, 亀卦川幸浩, 井原智彦: 第11回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2016)  
「ジャカルタにおける、屋上緑化の冷房需要削減効果」
- 104) 橋本侑樹, 井原智彦, 亀卦川幸浩: 日射を考慮した壁面緑化導入時の街区電力消費への影響評価. 第11回日本ヒートアイランド学会全国大会, 広島工業大学 (広島), 8-10 Jul 2016.
- 105) 井原智彦: 第11回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2016)  
「緑化のメリットとデメリット」
- 106) Y. Hashimoto, T. Ihara, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa : The 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2016)  
“Simulations of summer energy consumption considering insolation by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures in Osaka city, Japan”
- 107) R. Maeda, K. Yamaguchi, N. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, Y. Kikegawa, M. Kanda, T. Ihara : The 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2016)  
“Evaluating the effectiveness of countermeasures against urban heat island in Jakarta”
- 108) T. Ihara, K. Yamaguchi, K. Oka, Y. Ohashi, Y. Kikegawa, Y. Takane, Y. Genchi. The International Science Conference on MAHASRI (2016)  
“Cost-benefit analysis of green roof based on life cycle assessment”
- 109) 草間蓮, 井原智彦: 第11回日本LCA学会研究発表会 (2016)  
「ジャカルタにおける気候変動に伴う健康影響の定量評価」
- 110) 井原智彦, 山口和貴, 岡和孝, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 玄地裕: 第11回日本LCA学会研究発表会

(2016)

「LCAに基づく屋上緑化の費用便益分析」

- 111) A.C.G. Varquez and M.Kanda: 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, July 20-24, 2015 “Changing perspectives: Significance of long-term temperature observations in major cities”
- 112) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: Proceeding of the 9th International Conference on Urban Climate, 20th-24th July 2015. “Detection of Urban Environment from Landsat 8 for Mesoscale Modeling Purposes”
- 113) Y. Hashimoto, T. Ihara, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa : The 9th International Conference on Urban Climate (2015)  
“Sensitivity of electricity consumption to air temperature, air humidity and solar radiation in city-block scale - Based on 2013 Osaka city observation -”
- 114) T. Ihara, Y. Takane, Y. Genchi : The 9th International Conference on Urban Climate (2015)  
“Estimation of DALY loss due to heat stroke and sleep disturbance caused by air temperature rise in Tokyo, Japan”

## 7. 研究者略歴

### 研究代表者

神田 学

国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院 教授

国立大学法人東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程修了、博士(工学)、  
現在、国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院 教授

### 研究分担者

1) 高木 泰士

国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授

横浜国立大学工学部卒業、博士(工学)、五洋建設株式会社係長、  
現在、東京工業大学環境・社会理工学院 准教授

2) 風間 聡

国立大学法人東北大学 大学院理工学研究科 教授

東北大学大学院理工学研究科博士課程後期終了、博士(工学)、  
現在、国立大学法人東北大学 大学院理工学研究科 教授

3) 呉 修一

富山県立大学環境・社会基盤工学科 准教授

中央大学理工学部卒業、東北大学災害科学国際研究所助教、博士(工学)  
現在、富山県立大学環境・社会基盤工学科 准教授

4) 井原 智彦

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授

東京大学工学部卒業、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士(工学)  
産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター研究員、  
同安全科学研究部門研究員

現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授

## II. 成果の詳細

### II-1 緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した都市気候変動の予測

国立大学法人東京工業大学

環境・社会理工学院

神田 学

国立大学法人東京工業大学

環境・社会理工学院

高木 泰士

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：119,894千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：25,231千円、平成28年度：23,978千円、平成29年度：23,961千円、平成30年度：22,763千円、令和元年度：23,961千円）

#### 【要旨】

本研究では、発展著しくマルチストレスに曝されるアジアのメガシティ(インドネシア・ジャカルタを対象)において、緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した上で、最先端の数値予報技術を駆使して都市気候変動の予測を行い、水災害および健康影響の統合評価（それぞれサブテーマ2および3）に資する基礎物理データを提供した。また、ジャカルタのケーススタディに留まらず、本プロジェクトで開発された先進的都市気象予測手法を、世界の任意の大都市にも適用できるよう全球展開するためのデータベース・フレームワークを構築・提案・検証した。具体的な成果は以下である。

（1）人工衛星データのみを使用した高時空間解像度の全球都市GISデータベースの構築：人工衛星データのみを使用して作成した都市GISデータベースは、人工排熱・3次元建物データ（平均建物高さ・建物高さ分散・建蔽率・建物投影面積率・天空率など）・土地利用（含む都市スプロール）であり、現状版および、社会経済シナリオ別の2050年版、を作成・公開した。

（2）2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測：グローバルな社会・経済共通シナリオ（温暖化シナリオ）と都市計画シナリオ（都市化シナリオ）の両者を考慮し、都市全体（1km解像度）の気象予測、および中心市街域（2m解像度）の温熱環境予測を行った。最悪シナリオでは、2050年のジャカルタの気温は現在より1.5℃以上上昇した。都市温暖化の影響は、都市全体平均では0.2～0.3℃と小さいが、人口集中の著しい中心市街地では、局所的に3～4℃の気温上昇が見込まれた。この局所的な高温化と人口集中・高齢化の影響により、高齢者の熱中症死亡リスクは、現状より大幅に増加した。街区レベルでの適応策として、建物容積率が同じ場合、高さの異なる建物を交互に配置することにより、大気の下層混合の促進、高層建物による日陰の創出、により、高温化が緩和されること、さらに植栽を増加させることで、屋外の熱中症リスクを低減させることを示した。沿岸海上の超高層建築のクラスターによる大規模開発（ガルーダプロジェクト）は、東京汐留地区と同様、風下全体に及ぶ広範囲な低速域を形成し、温熱・汚染物質環境を悪化させることを示した。

（3）都市沿岸域の浸水予測とマングローブを活用した防潮効果の評価：複数の堤防整備条件に対して2050年までの沿岸域浸水予測を行った。地盤沈下が進行すると、堤防の損壊リスクが急激に高まっていく。万が一堤防が破堤した場合、どのような洪水が押し寄せるか、数値解析による試算を行った。また、グリーンインフラによる適応策として、既設堤防前面にマングローブ植林帯を設置することを提案した。本試算では、20m程度の植林帯であっても破堤による水の勢いを激減する。人工地盤の沈下、将来の海面上昇、植生の成長、底質の堆積を時間的に予測し、マングローブによる防潮効果を将来に渡って予測できる世界初となる数値モデルを開発した。

（4）都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築：全球286都市の観測点における過去1世紀換算の気温上昇量を統計的に分析し、都市温暖化による気温上昇寄与は、気候変動による気温上昇寄与の2～2.5倍に達していることを示した。また、ヒートアイランド強度は、土地の乾燥度（熱慣性

力)、風速、緑被率、人工排熱と強い相関が示された。さらに、世界の286都市において、「現在土地利用」での10年気候と、「都市化以前土地利用」での10年気候の2つの比較計算を行い、本プロジェクトで開発された先進的都市気象予測システムは、ジャカルタだけでなく、世界中の都市の2つの温暖化を適切に再現できることが確認された。さらに、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオを用いて、世界の主要都市の2050年の将来気候予測計算を行った。2050年における年平均気温の上昇量は、2つの温暖化により1℃～5℃程度と大きい。これから更なる都市開発の進展が予測される中国の大都市は、気候変動影響をはるかに凌駕する都市温暖化影響により、4℃前後の大幅な気温上昇が懸念される。

## [キーワード]

2つの温暖化、ヒートアイランド、都市気象、先進的気候予測、メガシティ

### 1. はじめに

IPCC第5次評価報告書(AR5)において気候変動の多くの世界的リスクが都市域に集中していることが指摘されている。都市に人口が集中しているという社会的条件がリスクを高める大きな理由であるが、それだけではない。都市では、グローバルな気候変動による温暖化に加え、ヒートアイランドによる温暖化が嵩上げされる。図1.1.1は、世界中の主要な大都市における過去1世紀における気候変動による気温上昇分と都市温暖化(ヒートアイランド)による気温上昇分の寄与を示した。多くの都市で、ヒートアイランド寄与は、気候変動寄与を凌駕している。都市の将来の気温予測だけでなく、暑熱環境や水害といった物理的リスクを適切に評価する上でも、気候変動およびヒートアイランド2つの温暖化を科学的に予測・評価することが不可欠である。主に、2000年以降、気象・土木・建築・エネルギー・都市計画・生気象学などの横断的学問分野として「都市気象学」が急速な発展を遂げてきた。都市温暖化予測技術も成熟しつつあり、日本はこの分野でリーディングな役割を果たしてきた。残念ながら、その最先端技術が、気候変動対策の文脈では十分に活用されてこなかった。AR5では、先進国では各国の行政レベルで、途上国では国際機関や民間団体が途上国援助として緩和策・適応策を実施しているとされている(例えば、低炭素アジア研究ネットワークやアジア太平洋地域適応ネットワークなど)。しかしこれらは、温暖化が無くとも存在する都市の脆弱性を緩和するための策がそのまま温暖化後の世界にも役に立つというロジックによるものが多く、都市気象学の先端的温暖化予測が生かされているとは現状では言いがたい。実際、グローバルな気候変動に対する緩和策を考慮しながら、それぞれの国・都市の実情に合わせた現実性のある適応策を検討していくためには、従来の気候変動予測・評価手法に、最先端の都市気象の予測・影響評価手法を融合させていくことが必要であるが、そのような試みはなされておらず、気候変動研究の多くは、都市温暖化はローカルなノイズとして取り除かれてきたのが現状である。

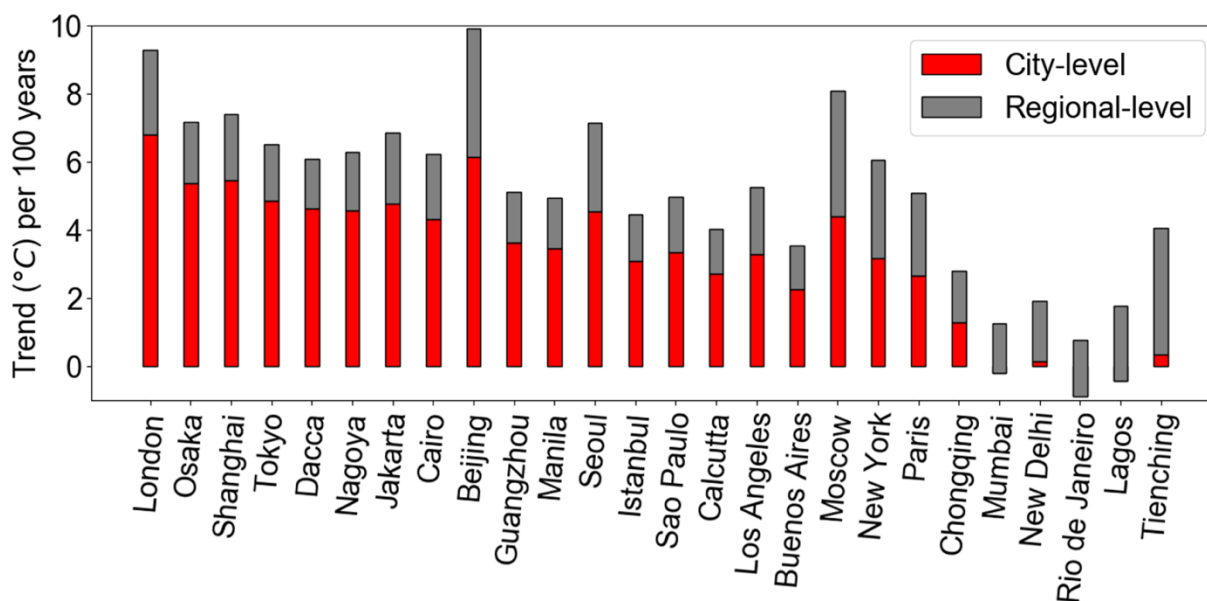


図1.1.1 主要なメガシティにおける1世紀換算の日最低気温の上昇量。灰色カラムは気候変動による気温上昇寄与、赤カラムは都市温暖化による気温上昇寄与。多くの大都市で、都市温暖化寄与が、気候変動寄与を凌駕している (Varquez and Kanda, 2018 から修正引用)

## 2. 研究開発目的

テーマ4のプロジェクト全体における研究開発目的（ミッション）は、大きく2つである。1つは、発展著しくマルチストレスに曝されるアジアのメガシティ(インドネシア・ジャカルタ)において緩和を考慮した適応策の事例研究を実施し、プロジェクト全体のグローバルな評価に対する地域検証研究としての役割を担うこと。もう1つは、単なるジャカルタのケーススタディで終わらず、今回開発される都市気象予測・評価技術をグローバルに展開する枠組みを提示すること、である。その中で、サブテーマ1は、2つの温暖化を融合した最先端の都市温暖化予測技術の開発を担い、テーマ4全体の研究フローの最上流に位置付けられる。具体的には、（1）単純な物理的ダウンスケーリングではなく、グローバルな社会経済シナリオと都市スケールのローカルな社会経済シナリオを考慮した上で、最先端の数値予報技術を駆使してジャカルタの将来の都市気候変動の予測を行い、サブテーマ2（水害影響評価）およびサブテーマ3（暑熱影響評価）にデータを提供すること、（2）ジャカルタを対象に開発される都市温暖化予測技術を、世界の任意の都市にグローバル展開できるよう、その枠組みを確立・提示すること、である。後者の目的は、プロジェクトスタート時には契約内容（採択条件）には謳われておらず、アドバイザー会合や中間評価などにおいて強く助言されたものであるが、結果としては、世界の任意の大都市に適用可能で、世界をリードできる新たな都市気象予測技術が構築されたことを、謝意とともに付記しておきたい。

## 3. 研究開発方法

ケーススタディは、アジアのメガシティの一つであるジャカルタを対象とした。気候変動による気温上昇には、明瞭な緯度依存性があり、低緯度ほど、気温上昇が小さい。そのため、アドバイザーからなぜジャカルタなのか、という疑問を幾度となく、いただいた。ジャカルタの選定にあたっては、発展著しい開発途上国であること、日本との社会的・経済的・政治的関係性が強い国であること、水害・暑熱など2つの温暖化による社会影響を受けやすい立地であること、プロジェクト前後で研究協力体制を維持・発展できる高い人的交流ポテンシャルを有していること、を勘案して決定した。研究成果として明らかになることではあるが、ジャカルタは、気候変動上昇とヒートアイランド気温上昇がそれぞれに適度に寄与しており、2つの温暖化影響を検証する上では適切な対象であった。どちらかの温暖化のみが卓越する都市では、手法の有効性に説得力を欠いていたであろう。また、都市温暖化予測には、高度な

地理情報データ（人工排熱・建物情報など）が必須の入力条件であるが、途上国であるジャカルタ現地にはそれらのGISデータがほとんど整備されていないがために、衛星データなど世界中で安価で容易に入手可能な汎用データだけから、高度な都市GISデータを推定せざるを得ず、そのことが逆に、世界の任意の大都市に適用できる堅牢な技術と全球データベース構築に繋がった。その点においても、適切な研究対象であったと言える。

### （1）人工衛星データのみを使用した、高時空間解像度の全球都市GISデータベースの構築

人工衛星データのみを使用して作成した都市GISデータベースは、人工排熱・3次元建物データ（平均建物高さ・建物高さ分散・建蔽率・建物投影面積率・天空率など）・土地利用（含む都市スプロール）であり、現状版および、社会経済シナリオ別の将来シナリオ版、である。中間評価時は、ジャカルタ版だけであったが、プロジェクト終了時点で、上記すべての項目のデータベースの全球版が完備された。

#### a 現状の全球データベース

人工的に排出されるエネルギーは、EIA(Energy Information Administration)が公開している国別の1次エネルギー年間消費量を基本データとして、それを1 kmグリッドに配分する。まず、人口密度データを空間配分の基本とする。さらに、人工衛星から得られる夜間光強度のデータを用いて人口密度を補正し、人工排熱量は「夜間光で補正された人口密度データ」に比例すると仮定してデータベースを構築した。この際、最新の夜間光強度データVIIRS（可視・短波長赤外線帯）を用いることにより、工場や発電所などの膨大な人工排熱を伴う点熱源の特定を行うことにも成功した。次に、年間の1 km人工排熱量を、月別に分配する。エネルギー消費量はその時の気温に大きく依存し、エネルギー消費量の気候感応度と呼ばれる。本プロジェクトでは、日本、アメリカなどの膨大な気候感応度のデータを基に、インドネシアだけでなく全球に適応することを前提とした年平均気温と気候感応度のチャートを提案した。土地利用については、LANDSAT-8の反射強度スペクトルを利用して、水域、植生、森林、裸地など都市以外の地表面被覆を7種類、都市被覆を3種類に分類した。建物高さの推定は、合成開口レーダの1つである人工衛星ASTERを利用した。さらに、3次元建物付帯情報（建ぺい率、風向き投影面積率など）は、先に説明した3種類の都市被覆の混入率と、上記2つの指標の相関関係を経験的に決定することにした。

#### b 2050年版シナリオ別全球データベース

現状の全球人工排熱の推定手法を拡張・改良し、SSPシナリオに基づいた、国別の将来人口・将来 GDP・将来エネルギー消費量および将来気候変動から、1km・1時間の全球人工排熱データを推定し、データベース化した。この推定プロセスにおいて、将来の都市域の変貌（スプロール化）の予測が必要となる。ここでは、都市計画の分野において将来の都市スプロール化予測に使われるSLEUTHを基本アルゴリズムとして使用した。SLEUTHは、セルオートマトンの手法で、将来の都市拡大（縮小）を予測する。斜面角度(Slope)・土地利用(Land use)・開発抑制地域(Undeveloped area)・都市域(Urban)・交通網(Transportation)・陰影起伏(Hillshade)を内部パラメータとして、過去の土地利用変化からキャリブレーションによってパラメータを決定する。この手法は、短期的予測には有効であるが、社会経済シナリオを考慮できない。そこで、独自にGDPおよび人口の時間変化率を外制条件として与えることにより、社会経済シナリオSSPによって都市化の速度が変化するように修正を行った。将来の人口分布は、SLEUTHの出力する将来の都市域の変化を考慮した上で、現状の人口空間分布との相似形を仮定する（すなわち急激な人口空間分布の変化を予測することはできない）。このアプローチは、物理モデルを用い、全球にわたって高空間解像度の都市領域の変化予測を行った最初の研究事例となる。3次元建物データ（平均建物高さ・建物高さ分散・建蔽率・建物投影面積率・天空率など）については、それぞれの都市において、あらかじめ現状の3次元建物パラメータと人工排熱・人口分布との間の相関関係を回帰した上で、上記で説明した将来の人工排熱・人口分布をもとに、予測を行った。

## (2) 2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測

将来の都市気候予測に先立って、物理的ダウンスケーリング手法による広域都市スケール（解像度1km）、および中心市街スケールの都市気候シミュレーション（解像度2m）の精度検証を行い、良好な結果が得られているが、中間評価報告と重複するので、ここでは説明を割愛する。

### a メソスケール（1km解像度）：シナリオ別都市全体の気象予測

グローバルな社会経済共通シナリオ（温暖化シナリオ）と都市計画シナリオ（都市化シナリオ）の両者を考慮し、設定した将来シナリオの一覧表を図3.1.1に示す。ケースⅠが現況計算で、将来気候予測結果との比較に供されるベースとなる。ケースⅡ、Ⅲは、都市は現況を維持し、温暖化シナリオに最悪（RCP8.5；ケースⅡ）および最善（RCP2.6；ケースⅢ）を設定した。ケースⅡ、ⅢをケースⅠと比較することにより、都市変容は考慮せず、気候変動だけで都市気候がどのように変化するかを評価できる。ケースⅣ～Ⅵは、温暖化・都市化シナリオを組み合わせた現実的な設定である。ケースⅣは、最悪の温暖化シナリオ（RCP8.5）と、都市が過去20年間と同様の発展を遂げると仮定した都市シナリオ（規制なしシナリオ）、を組み合わせた設定となっている。すなわち、緩和策・適応策などを取ることなくグローバル・ローカルの社会経済が進展した場合の最悪シナリオである。ケースⅤは、最善の温暖化シナリオ（RCP2.6）と、スプロール化を抑制した都市シナリオ（コンパクトシナリオ）、を組み合わせた設定である。すなわち、緩和策・適応策を考慮した極端な楽観的な社会経済シナリオとなっている。ケースⅥは、ケースⅤを推し進め、都市形態（コンパクト化）に加え、緑化によって緩和・適応を図ろうとする設定である。温暖化寄与だけを考慮したケースⅡ・Ⅲの都市気候予測結果と、都市化シナリオも考慮したケースⅣ～Ⅵの予測結果を比較することにより、将来気候における温暖化（気候変動）寄与と都市化（ヒートアイランド）寄与を定量的に分離・評価することが可能となる。図3.1.1のシナリオに沿った2050年の都市気候予測計算を行った。2050年の予測計算とは、2046-2055年の10年間の結果のアンサンブル平均を意味する。気候モデルは汎用気象モデルWRF-UCMに、都市の抵抗や人工排熱の効果を付加したものである。2050年のGCM出力としてCMIP5を使用した。暑熱環境の影響評価や適応策の詳細な検討は、サブテーマ3で実施されたが、サブテーマ1では、熱関連死亡リスクに着目し、平林チームのテーマ3の本田先生と協力して、その評価を行い、グローバル解析との比較や、サブテーマ間の結果の整合性を図った。

Case	都市化	温暖化	シナリオ設定（擬似温暖化）
I	現況	現況	ベース計算
II	現況	RCP8.5	擬似温暖化
III	現況	RCP2.6	擬似温暖化
IV	将来（規制なし）	RCP8.5	擬似温暖化+都市化
V	将来（コンパクト）	RCP2.6	擬似温暖化+都市化
VI	将来（緑化適応）	RCP2.6	緑化適応策 (都市被覆5%減) (都市緑化20%増)

図3.1.1 2050年のジャカルタ気候変動予測に用いた6つの温暖化・都市シナリオ（Darmanto et al., 2019から修正引用）

### b マイクロスケール（2m解像度）：シナリオ別中心市街域の温熱環境予測

建物やインフラが複雑に存在する都市の屋外空間における温熱環境は、メソスケールの気象場だけでなく、建築的なマイクロな街区構造にも大きく依存することが予想される。そこで、中心市街地において、建物構造や緑被率の異なるシナリオを相互比較することにより、その影響を評価した。6つのシナリオを図3.1.2に示す。Case1は2016年8月13日14時頃に行われた現地観測の状況を再現し、数値解析の精度検証を目的とした。Case2は2006～2015年における上述したメソスケール気象解析データをアンサンブル



平均し、現在の代表的なジャカルタの気象状況を再現した。Case3～6では擬似温暖化手法により、2046～2055年のメソ気象解析のデータをアンサンブル平均してバックグラウンド気象データとして用いた。Case3～4の目的は、温暖化シナリオの違い（それぞれ、RCP2.6・SSP1およびRCP8.5・SSP3）による温熱環境の変化を調べることである。さらに、Case4～6は街区構造の違いによる影響を調べることを目的としている。3つのケースは、街区における建物の総体積を保存しつつ、Case4は現実の街区構造、Case5は高さの異なる建物が混在する複雑な街区、Case6は植生（街路樹）を10%増やしている。

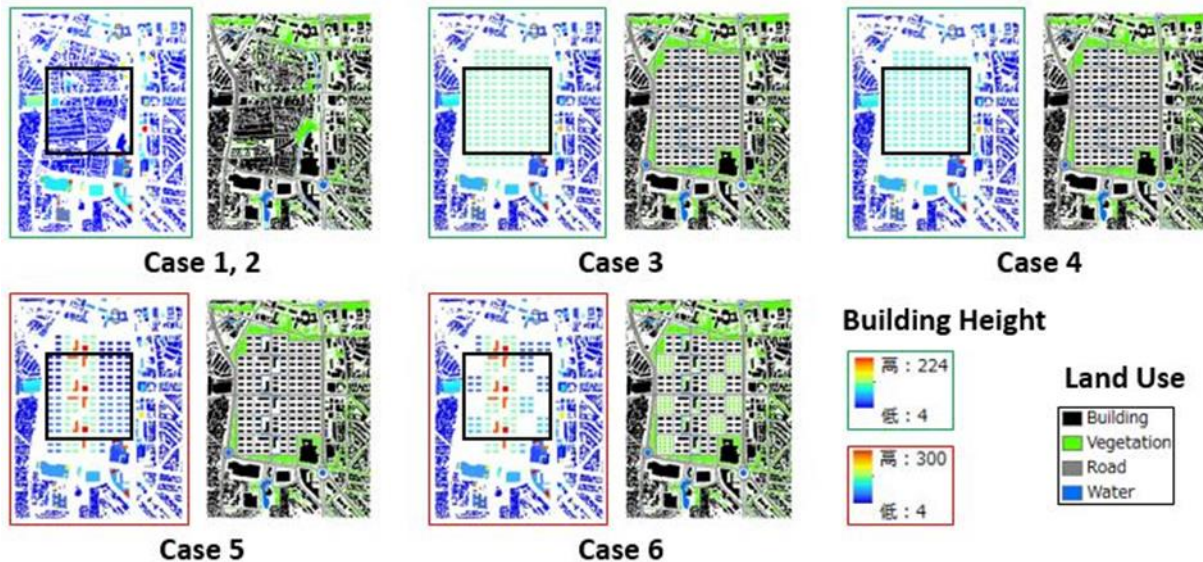


図3.1.2 2050年の中心市街区の温熱環境予測に用いた6つのシナリオ（居石他, 2018から修正引用）

### c マイクロスケール（2m解像度）：都市域全体への適用例（ガルーダプロジェクトを例に）

基本的な社会経済シナリオでの将来予測・影響評価に加え、ジャカルタ独自の特殊ある適応策の検討をプロジェクト中に検討するよう、採択時・中間評価時にアドバイスがあった。ここでは、ガルーダプロジェクトを取り上げた。R1年に、ガルーダプロジェクトは延期され、代わりに首都移転が政府によって仮決定されたため、リアリズムを欠く結果となったが、同種の首都大規模開発に対する影響評価の科学的アプローチの手法検証としては十分な成果をあげた。

アジアの大都市では近年大規模な都市開発が進んでおり、巨大な建造物が年々増築されている。一般論として大規模構造物は風速の低減効果を生み出し、風が淀むことで、風下域の気温上昇や汚染物質の高濃度化につながる。その定量評価のため、インドネシアの国策であったガルーダプロジェクトにおける大規模防潮堤を例に、都市中心部を包含する計算領域（水平20km×5km）を、個々の建物を解像する2mの格子間隔で解像した都市の大規模乱流計算を実施した。ガルーダプロジェクトにおけるマスタープランに基づき、妥当な建物配置プランを作成した。

この解析には、従来の気象予測計算や環境解析にこれまでほぼ100%用いられてきた数値流体力学的解析方法(CFD)とは全く異なる新しい、「格子ボルツマン法(LBM)」というアルゴリズムを世界に先駆けて採用した。運動方程式の代わりに、疑似流体塊をラグランジュ的に追跡する物理法則(ボルツマン方程式)を解析し、従来の予測計算よりも10数倍以上計算負荷を軽減した。これにより、現状のコンピューター性能でも、マイクロスケールの高解像度(2m)を維持しながら、都市全体(数10km四方)を丸ごと解析することが可能となった。

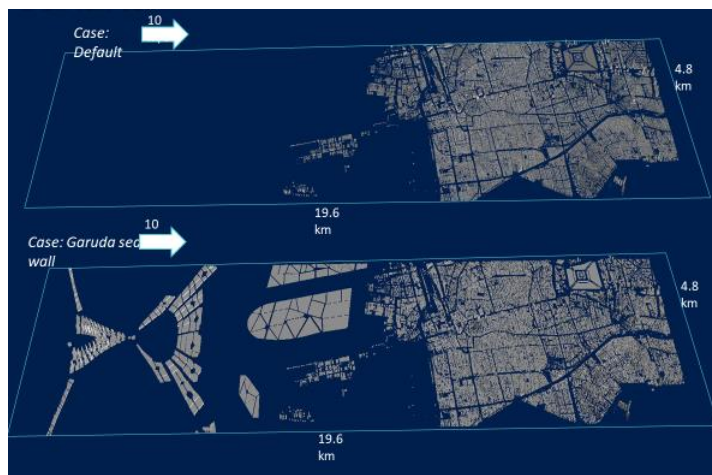


図3.1.3 都市中心部を包含する計算領域（水平20km×5km）を、個々の建物を解像する2mの格子間隔で解像した都市の大規模気象計算の領域図：上図が現状のジャカルタ、下図がガルダプロジェクト（投稿準備中）

### （3）都市沿岸域の浸水予測とマングローブを活用した防潮効果の評価

ジャカルタでは台風起因の高潮リスクは非常に小さく、潮位偏差も小さいため、平均的な満潮位程度では大規模な洪水は生じない。しかし、ENSOの影響や長周期潮汐振動が重畳することで、10年程度の周期で異常潮位が発生している。近年では、2007年11月と2017年12月に各々偏差30～40cm程度の異常潮位が発生し、海岸堤防を海水が越流したため、沿岸部を中心に大きな被害が発生した。この状況を数値流体モデルで再現するため、ジャカルタ湾内の海底モデルおよび陸域の地形モデルを詳細に作成するとともに、湾沖の境界条件として主要8分潮を推定した。長周期潮汐振動は日周潮を増幅する作用を及ぼすため、検潮所での観測潮位に適合するように主要成分のキャリブレーションを行った。これにより、ジャカルタ沿岸域を対象とした潮汐起因の洪水予測を行うことが可能となった（Takagi et al., 2016）。

現在のジャカルタの海岸保全・治水水準は東京の1960年代前後と同等と考えられる。大きく遅れているものの、今後の対応によっては東京のように高潮の問題を克服できる可能性はある（Esteban et al., 2019; Esteban et al., 2020）。しかし、現在ジャカルタ全域で地盤沈下が進行しており、特に沿岸部でその程度が著しく、終息の兆しを見せていない。地盤沈下速度は海面上昇の数倍～数十倍にも達するため、2050年までの浸水予測において、支配因子になることが予想される。そこで、ジャカルタのGPS 測量ネットワークによる標高データをもとに、将来の地盤沈下および海面上昇による相対標高変化の空間分布図を作成し、それに基づき経年的な浸水予測を行うことができる解析モデルを開発した。さらにこの地形モデルをもとに、ジャカルタ首都圏沿岸域開発計画(NCICD)を参考にして、複数の堤防整備条件に対して 2050年までの沿岸域浸水予測を行った。

### （4）都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築

#### a 過去半世紀の都市温暖化のグローバルな実態把握と要因分析

気候変動による気温上昇の分析については多くの知見が得られているが、都市温暖化いわゆるヒートアイランドの研究は、そのほとんどが観測データの完備した先進国に限られ、グローバルな視点からの都市温暖化の実態解明・要因分析は行われていなかった。気候変動研究では、都市温暖化は局所的なノイズとして注意深く除去されてきた。本研究では、それを逆に利用し、都市温暖化影響を除去したグローバルな気温変動量データベースをバックグランド気温と定義し、都市の観測点の気温から、バックグランド気温を差し引くことにより、都市温暖化だけを定量化することにした。グローバルなバックグ

ランド気温として、Berkeley Earth Surface Temperature dataset (BEST) を利用し、1960～2009の半世紀にわたる世界中の大都市における気温観測データの精度や測定条件を詳細に検討した上で、286の都市気温データを抽出し、一世紀換算のヒートアイランド強度 (UHI強度) を定義した。UHI強度を、地理的要因 (気候区分・緯度など)、気象的要因 (風速・土壌乾燥度など)、文明的要因 (人工排熱・緑化率など)、との相関関係を調べ、グローバルな視点からの都市温暖化の実態解明・要因分析を初めて行った。

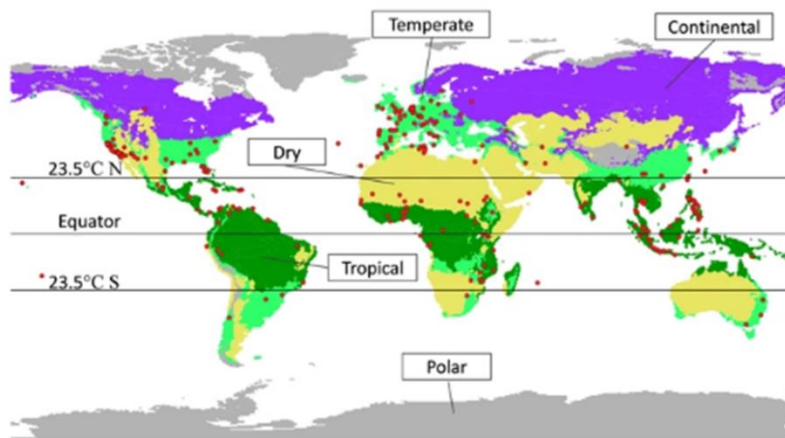


図3.1.4 過去半世紀の都市温暖化のグローバルな実態把握に用いられた都市の観測データ286地点 (図中赤丸) および要因分析で使用した5つの気候区分 (Varquez and Kanda, 2018 より引用)

#### b 過去半世紀の都市温暖化のグローバルな再現計算

上記aで得られたグローバルな都市温暖化の実測値を、チームが開発した気象予測モデルで再現することを試みた。まず、人工衛星から推定される過去から現在までの土地利用データを基に、都市域が存在しない=都市以前の土地利用を、独自のアルゴリズムで推定し、「都市化以前土地利用」のグローバルデータベースを作成した。現在都市域である領域は、周辺の支配的な土地利用などに置き換えらる。その上で、世界の286都市において、「現在土地利用」における10年気候と、「都市化以前土地利用」における10年気候の2つの1比較再現計算を行い、両者の気温差をヒートアイランド強度と定義することによって、グローバルな都市温暖化の実態が再現可能か検討した。

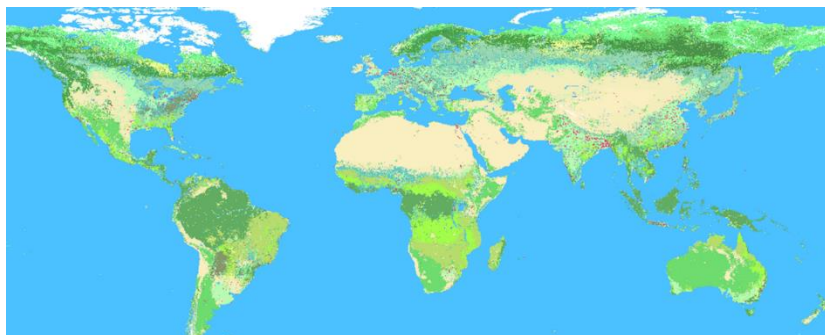


図3.1.5 都市温暖化再現計算のために整備した全球の都市化以前土地利用データベース (成田他2019から修正引用)

#### c 最悪シナリオに基づく将来の都市温暖化のグローバル予測

上記bで都市温暖化の再現計算を行った大都市について、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオのみを用

いて、2050年の将来気候予測計算を行ってみた。この際、入力データとして、本プロジェクトで開発した、全球都市データベース（人工排熱・都市領域・3次元建物データベース）を使用した。

#### （5）中間評価時に指摘された事項に関する補足的検討

中間評価時に指摘された以下の3つの重要事項について、補足的検討を加えた。1つ目は、ジャカルタの成果を他都市へ応用展開するフレームワークを検討すること、2つ目は、グリーンインフラの効果を検討すること、3つ目はジャカルタの極端気象について検討すること、の3点である。このうち、1つ目の全球展開のためのフレームワーク構築は極めて重要であることから、上記（4）「都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築」で特別に章を設けて検討した。2つ目のグリーンインフラについては、上記（2）「2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測」で、メソ・マイクロの適応策シナリオの1つに盛り込んで検討すると同時に、サブテーマ2（水害評価）・サブテーマ3（暑熱影響評価）でも詳細に検討した。3つ目の極端気象についてのみ、以下の4．結果と考察（5）で、概説する。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 人工衛星データのみを使用した、高時空間解像度の全球都市GISデータベースの構築

本プロジェクトで作成・公開した高空間解像度（1km）の全球都市GISデータベースは、いずれも世界で類を見ないものである。都市温暖化解析は、気象モデルそのものではなく、途上国などにおける入力データの未整備が、解析実行上の大きなボトルネックとなってきた。本プロジェクトチームだけでなく、気象予測モデルを有する世界的な研究者チームは、これらの全球都市GISデータベースを入力データとして用いることにより、本プロジェクトで行ったような現状分析・将来予測が、世界の任意の都市で実行できることになる。現状の全球人工排熱データは国際誌に出版・公開済みである。シナリオ別2050年将来の人工排熱データは、投稿中である。将来の都市領域の全球推定データ（2050年まで10年間隔；解像度1km）は、国際誌に出版・公開済みである。現状および将来の全球3次元建物データは、投稿中である。人工排熱・都市領域・3次元建物GIS、いずれの全球データベースも、先進国の特定の都市を抽出し、現地で計測・推定された精度の高いデータと比較しても、気候予測計算の入力値としての使用に耐えうる十分な精度を有することが確認された。

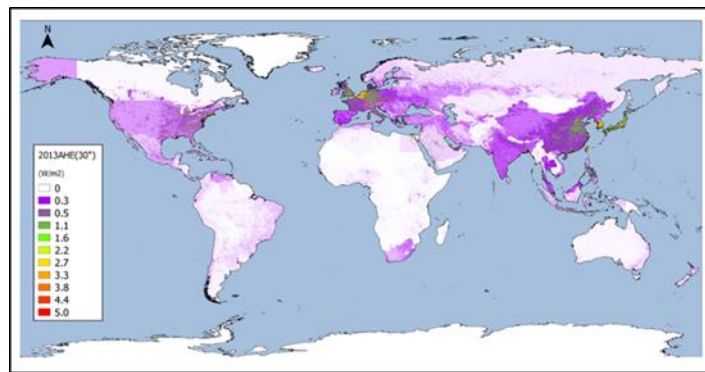


図4.1.1 全球人工排熱データベース（現状値）の構築と公開（Dong et al., 2017より修正引用）

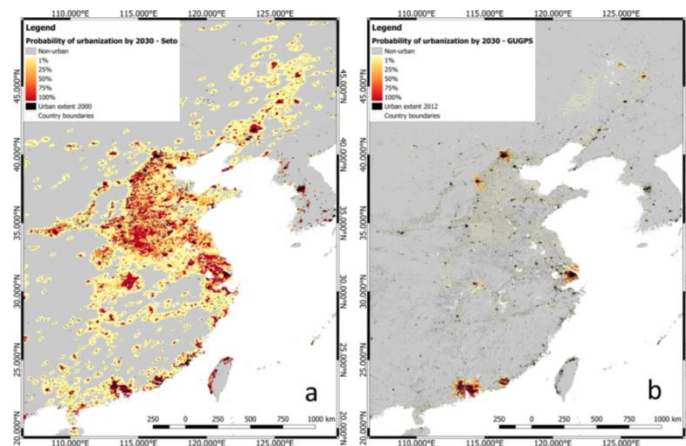


図4.1.2 2050までの将来の全球都市域変容予測データベースの中から中国部分を抜き出したもの。左図は、本研究プロジェクトが公開したデータベース、右図が既存の簡易モデルの予測結果(Zhou et al., 2019からそのまま引用)。

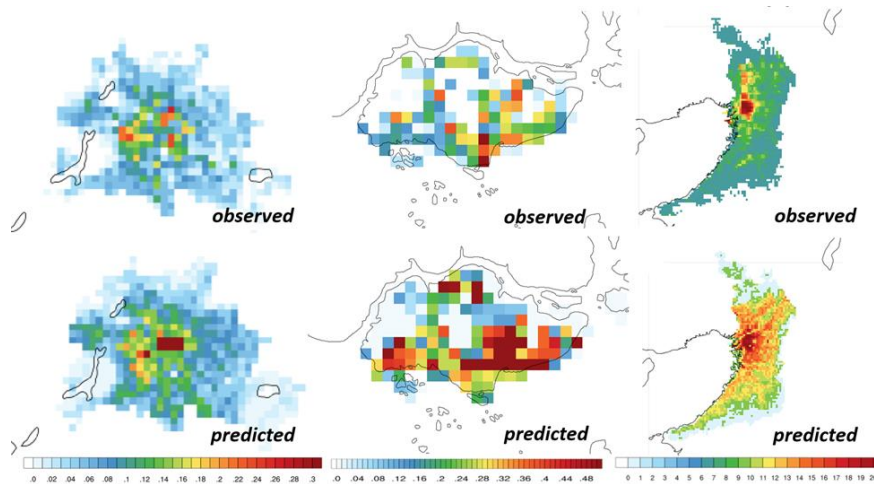


図4.1.3 全球都市建物データベース（現状）の中から3つの都市を抜き出したもの。左：ベルリン、中央：シンガポール、右：大阪。上図は、各都市においてレーザーを用いた航空機測量によって得られた高精度の建蔽率実測値、下図は、本研究プロジェクトにおいて人工衛星とグローバルデータだけから推定された建蔽率推定値。

## （2）2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測

### a メソスケール（1km解像度）：シナリオ別都市全体の気象予測

図3.1.1の6つの温暖化・都市化シナリオの結果から、最も重要な部分をハイライトして以下に記す。図4.1.4は、2050年2m気温分布の結果を示している。まず、上の段は、最も楽観的な温暖化シナリオRCP2.6を用いた一連の計算結果、下段は、最も悲観的な温暖化シナリオRCP8.5を用いた一連の計算結果である。左図は、主要な5つのGCM出力をアンサンブル（CMPI5）したそのままの結果、真ん中の図は、CMPI5を入力として、3重ネストで物理的なダウンスケーリングを行った結果（上図がケースⅢ、下図がケースⅡ）、右上図が、ケースⅤのコンパクトシナリオ、右下図が、ケースⅣの規制なしシナリオ、の結果である。以上から以下の事が推察される。(1) ジャカルタにおけるグローバルな温暖化シナリオによる影響は0.5～1.5℃程度である（下図と上図の比較）。(2) 都市化シナリオ影響（右の2つの図）は、都市周辺に局所的に強く表れており、1.5～2.5℃に達する。(3) すなわち、都市化影響は局所的には温暖化影響と同等かそれ以上になり得る。(4) ジャカルタ中心部のスプロール化に伴い、気温上昇域はその周辺に移動する。

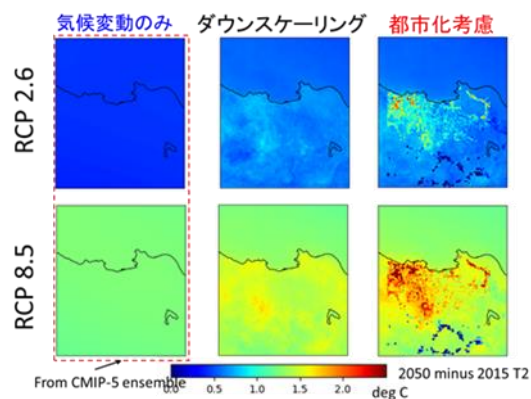
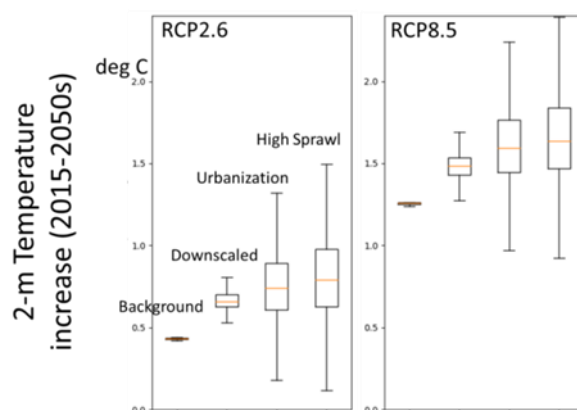


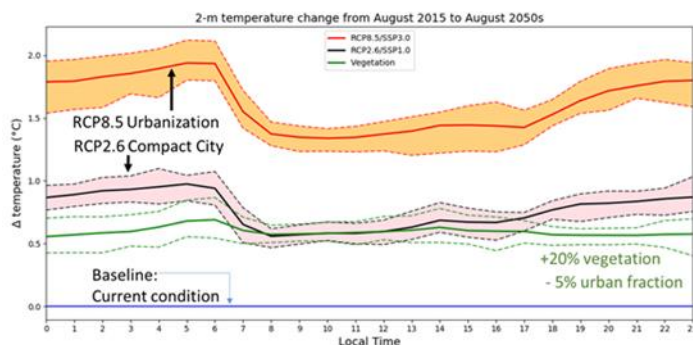
図4.1.4 都市化シナリオに基づく2050年の気温計算結果の一例：空間分布図（Darmanto et al., 2019より修正引用）

以上の結果を空間統計的に示したものが、**図4.1.5**である。2m気温について現況(2015)と将来(2050)の差をジャカルタ域の空間統計量としてBox plotで示している。左の図がRCP2.6、右の図がRCP8.5の結果であり、BackgroundがGCM出力であるCMPI5そのままの結果、Downscaledは、CMIP5の結果について、都市化を考慮せずに単純にダウンスケーリングしたもの（左図ケースⅡ、右図ケースⅠ）、Urbanizationは、コンパクト（左図ケースⅤ）・規制無（右図ケースⅣ）のそれぞれの都市化シナリオを考慮したもの、High Sprawlは、Urbanizationと同じ結果であるが、空間統計の取り方をジャカルタだけでなく、森林部など3重ネストの細密計算領域全体で示したものである。以上より、以下の知見が得られる。(1) グローバルな温暖化シナリオによって空間平均的に1.0℃程度の差が生じている（左右の比較）。(2) 都市シナリオの影響はジャカルタ全体平均でみると0.2～0.3℃とグローバルな温暖化寄与と比べて小さい（DownscaleとUrbanizationとの比較）。(3) しかしながらBox plotのバー（空間分散）の大きさから分かるように、都市シナリオを考慮した計算（Urbanization）は、局所的には空間平均値としての気温変動幅(0.6～1.6℃)より大きな気温変動が付加される。気温上昇域は、おもにスプロール化による人口増加域に対応しているので、熱中症や睡眠障害などの健康影響を、どのような空間解像度において評価するかによって結果に大きな違いが生じるであろう。



**図4.1.5** 都市化シナリオに基づく2050年の気温計算結果の一例：空間統計量（Darmanto et al., 2019より修正引用）

同様の結果を、8月の日変化（10年間のアンサンブル平均であることに留意）の結果として示したのが、**図4.1.6**である。オレンジが規制なしシナリオ（ケースⅣ）、ピンクがコンパクトシナリオ（ケースⅤ）、緑が緑化政策シナリオ（ケースⅥ）、青が現況（ケースⅠ）でベースラインとしている。緑化政策の結果を他の結果と比較すると、20%緑化は日中の気温低下にはそれほど寄与していないが、夜間では0.5℃程度の気温低下に寄与しており、夜間の熱中症や睡眠障害への適応効果が期待される。



**図4.1.6** 都市化シナリオに基づく2050年の気温計算結果の一例：気温の日変化（Darmanto et al.,

2019より修正引用)

シナリオ別気温予測結果に基づき、2050年における60歳以上高齢者の熱関連死亡リスクを図4.1.7に示した。影響関数は、平林チーム（テーマ3）の本田先生の提案されている式を用いた。SSP1およびRCP2.6の最善シナリオ、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ、いずれも熱関連死亡者は、現状よりも大幅に増加することが予想される。最悪シナリオでは、気温上昇の顕著な中心市街区で、1平方キロメートルあたり、8月の1月で、80名を超える死亡者に達する街区も存在する。これは、高齢者人口が相対的に増加するという人口構成の影響と、2つの温暖化による影響の両者が考慮されている。高齢者人口の増加の影響のほうが2つの温暖化影響よりも相対的に大きいですが、それでも、気候変動による気温上昇の寄与だけで125%、ヒートアイランドによる寄与分だけで144%、都市全体での熱関連死亡者を増加させている。なお、この暑熱環境の適応策については、サブテーマ3で掘り下げられる。

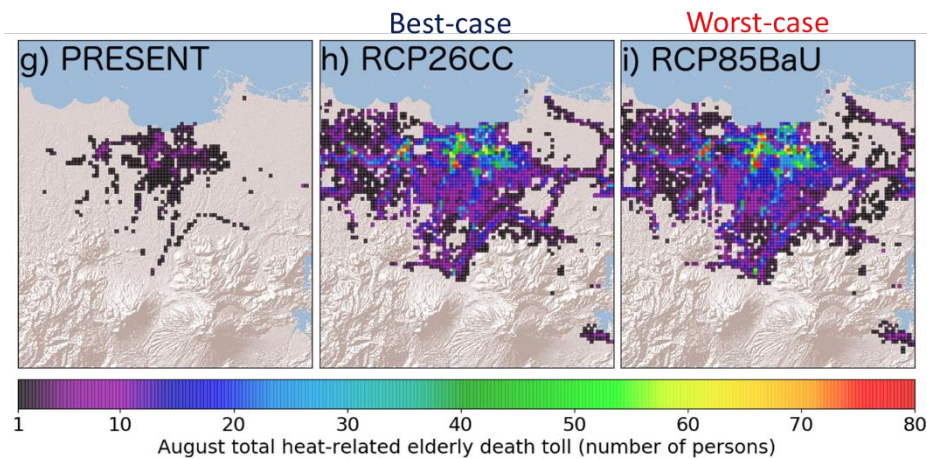


図4.1.7 シナリオ別気温予測結果に基づく2050年における60歳以上高齢者の熱関連死亡リスク  
左：現状、中央：最善シナリオ（SSP1およびRCP2.6）、右：最悪シナリオ（SSP3およびRCP8.5）（Varquez et al., 2020より修正引用）

#### b マイクロスケール（2m解像度）：シナリオ別中心市街域の温熱環境予測

図4.1.8は、図3.1.2のシナリオCase2～6における建物から大気へ伝達される顕熱フラックスを南東方向から見て3次元的に表したものである。ジャカルタは南半球にあるため、直接日射が当たる建物の北面、西面、屋上では顕熱フラックスが大きく、日射が遮られる建物の南面や東面、また建物や植生の影となる場所では顕熱フラックスが小さい。道路では、交通による人工排熱のため、顕熱フラックスが大きい。建物や植生の影では直接日射が当たらないため、顕熱フラックスは小さい。

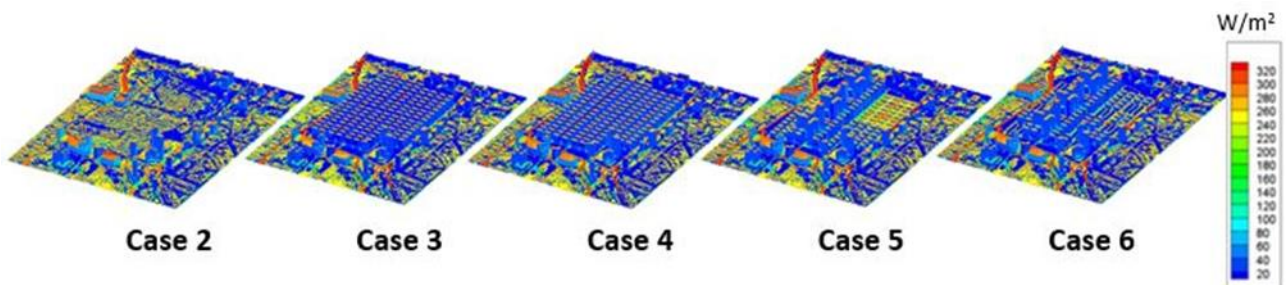


図4.1.8 建物・道路などインフラからの顕熱フラックスの3次元分布図（居石他、2018より引用）

図4.1.9は、Case2～6の地上1mにおけるSET\*のContour図である。SET\*は温度、湿度、風速、放射、衣服、



代謝の影響をすべて考慮した体感温度の指標である。Case3～6では中央部分に高い建物を立てたため、日射が遮られることにより平均放射温度が下がり、SET\*が低くなっている場所がみられる。また、図は割愛するが、高さの異なる建物群を混合させて配置させることにより、上限の乱流混合が促進され、局所的には、地上付近の気温を低下することができ（Case5）、そこに、さらに植栽を適切に配置すると体感温度を優位に低下させることができる（Case6）。

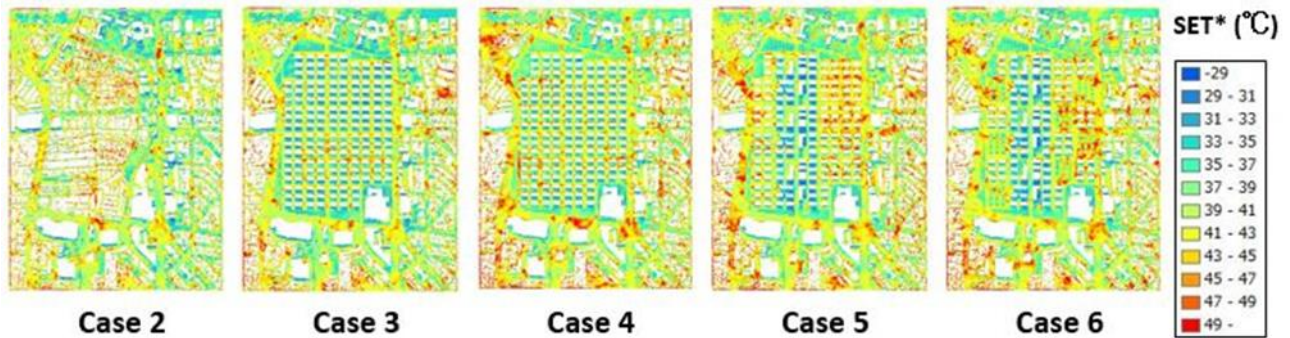


図4.1.9 体感温度指標SET\*の空間分布図（居石他、2018より引用）

### c マイクロスケール（2m解像度）：都市域全体への適用例（ガルダプロジェクトを例に）

ガルダプロジェクトにおける大規模防潮堤を風上側に配備した、都市大気境界層の大規模乱流数値計算（水平20km×5km程度、格子解像度2m）の結果を示す。図4.1.10は、都市表面に疑似的なトレーサーを置いて、流れの様子を可視化したものである。風上の海上に位置するガルダプロジェクトの超高層大規模構造物が、筋状の大規模乱流構造発生トリガーとなり、中心市街地に至るまで、風下数十kmに渡り筋状の低速領域を形成している。この低速領域に向かって、地表面付近で発生されたスカラー（トレーサー）が吸い寄せられて、低速領域で高濃度となっている。図左下の既存の高層ビル群で、濃度集積が著しい。ガルダのような大規模開発は、風下数十キロにわたる都市全体の、スカラー濃度や気温に大きな閲覧影響を及ぼし得ることを示している。

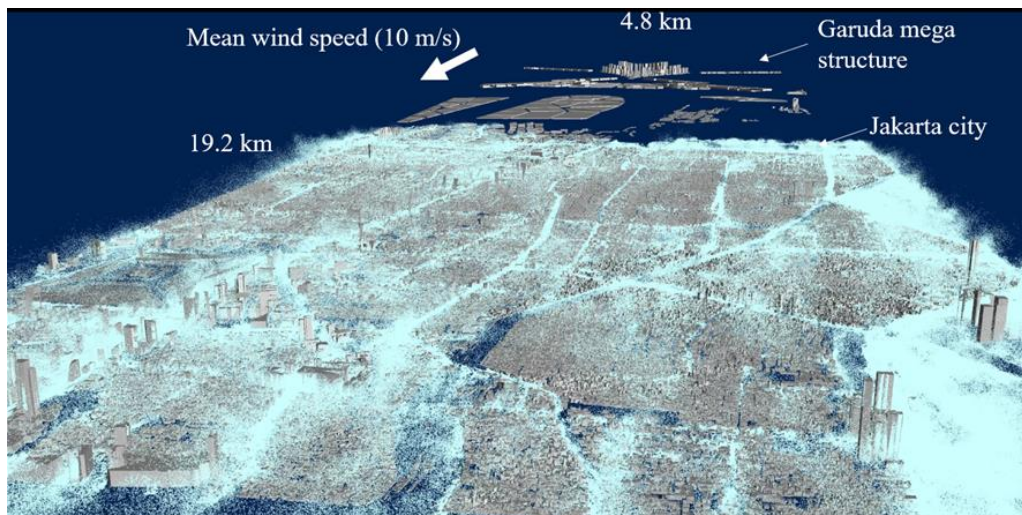


図4.1.10 都市中心部を包含する計算領域（水平20km×5km）を、個々の建物を解像する2mの格子間隔で解像した大規模気象計算 地表面に疑似的なトレーサー物質を配置し、流れのパターンを可視化している。

### （3）都市沿岸域の浸水予測とマングローブを活用した防潮効果の評価

図4.1.11に複数の堤防整備条件に対して2050年までの沿岸域浸水予測を行った結果を示す。地盤沈下が進行すると、堤防により大きな水圧が作用するようになるため、時間とともに堤防の損壊リスクが急激に高まっていく。そこで、ジャカルタ沿岸域で脆弱性が特に高いと考えられる集落を現地調査により特定し(Esteban et al, 2017)、現状の堤防の状況や形状、強度、その背後の密集住宅地の地形を詳細に調査した。これらの調査に基づき、万が一堤防が破堤した場合、どのような洪水が押し寄せるか、数値解析による試算を行った。また、越流の勢いを軽減するための方策として、既設堤防前面にマングローブ植林帯を設置することを提案し、その流体力学的効果を数値シミュレーションによって推定した(Takagi et al., 2016)。本試算では、20m程度の植林帯であっても破堤による水の勢いを激減する効果があることが認められた。

マングローブは、ジャカルタをはじめ東南アジアの多くの都市周辺で自生しているため、グリーンインフラの切り札として期待されている。しかし、ジャカルタの海岸集落で約200人の住民に対して行ったアンケート調査では、マングローブ対策を求める意見は8%と少なく、既設堤防のかさ上げ・補強を求める意見が圧倒的に多いという結果が出た。このように、学術的な期待と地域のニーズは必ずしも一致していないことがわかった(Takagi et al., 2017)。また、ジャカルタのように都市自体が沈下している場合、植林直後はマングローブが成長できたとしても、沈下に伴って繁茂に不適な水域環境になる可能性が高い。そのため、開発が進む都市の沿岸部でマングローブを人為的に根付かせるためには、そのプラットフォームとなる人工地盤を最初に構築する必要がある。しかし、人工地盤を造成すると、それにより周辺の沈下を加速させてしまうというジレンマを抱えている。このためマングローブが永続的に防潮効果を発揮するためには、植生の成長段階を考慮した人工地盤の最適化が不可欠である。本研究では、人工地盤の沈下、将来の海面上昇、植生の成長、底質の堆積を時間的に予測し、同時にSt. Venant 方程式に基づく非線形長波モデルを組み込むことで、マングローブによる防潮効果を将来に渡って予測できる世界初となる数値モデルを開発した(Takagi et al., 2018)。このモデルを使用してジャカルタ沿岸部に広がる地質と優占種である*Avicennia marina*を仮定し、概念的ではあるが、マングローブの防潮効果の試算を行うことができた。

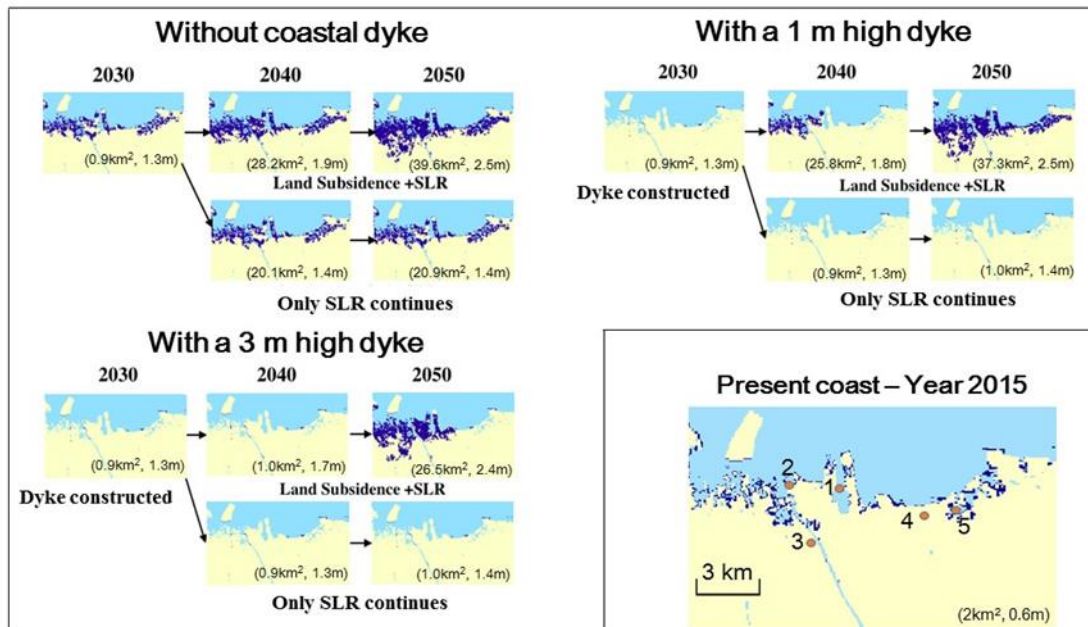


図4.1.11 複数の堤防整備条件に対する2050年の沿岸域浸水予測 (Takagi et al., 2017より引用)

#### (4) 都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築

### a 過去半世紀の都市温暖化のグローバルな実態把握と要因分析

全球286都市の観測点における過去1世紀換算の気温上昇量を統計的に分析した。図4.1.12には、日最低気温上昇量の発生頻度ヒストグラムを示した。全球平均的に見ても、都市温暖化による気温上昇寄与は、気候変動による気温上昇寄与の2~2.5倍に達しており、都市の立地条件に関わらず、都市における気候変動適応策を考える上で、都市温暖化の影響を適切に考慮しなければならないことを強く示唆している。中間発表において、テーマ3（平林チーム）の本田先生による気候変動寄与だけのジャカルタの暑熱環境解析結果が、本テーマの解析結果を大きく過小評価していることを示したが（図は割愛）、都市温暖化を考慮しない従来の都市域の気候変動研究の問題点を浮き彫りにしている。全球平均のヒートアイランド強度であるが、日最低気温上昇量が $2.36 \pm 0.69$  (°C/century)、日最高気温上昇量が $1.60 \pm 1.50$  (°C/century) となった。平均値に対して分散値が大きいのは、次に述べるそれぞれの都市における温暖化要因の違いによるためである。

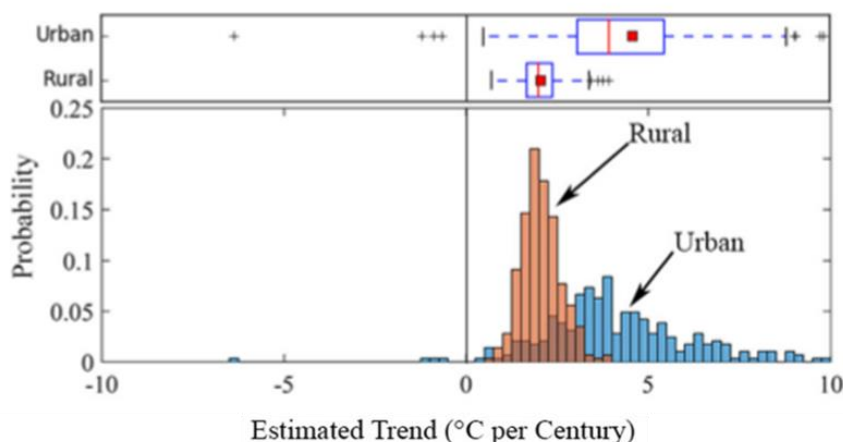


図4.1.12 全球286都市の観測点における過去1世紀換算の日最低気温上昇量の発生頻度ヒストグラム。Rural（気候変動分）とUrban（ヒートアイランド寄与分）（Varquez and Kanda, 2018 より引用）

この286地点の統計値を基に、ヒートアイランド（UHI）強度と、地理的要因（気候区分・緯度など）、気象的要因（風速・土壌乾燥度など）、文明的要因（人工排熱・緑化率など）、との相関関係を調べた。図4.1.13は、UHI強度との相関関係がとりわけ強く認められた、DTR（気温の日変化振幅）、風速、緑化率、人工排熱、とUHI強度との相関図を示した。DTRは、地表面の熱的慣性力を示す指標であり、砂漠のような乾燥地域は、熱容量（＝熱慣性力）が小さいため、DTRは大きく、ジャカルタのような湿潤域は、水分を多く含むためDTRは小さくなる。地理的要因としては、このDTRがUHI強度と強く関係していることが分かった。砂漠のような乾燥域は、バックランド気候として、日最高気温が高く、日最低気温が低い。都市では郊外に比べて蒸発潜熱が小さいこと、余分な人工排熱が排出されることにより、一日を通じて気温を押し上げる傾向にあることは当然であるが、もう1つの要因として、インフラストラクチャーによる膨大な体積熱容量が、巨大な熱貯蔵庫として作用するため、気温の日変化振幅を（昼夜の気温差）を減少させることはあまり指摘されていない。そのため、乾燥域では、UHI強度が、日中（日最高気温）は小さく、場合によってクールアイランド（つまり砂漠の都市の日中は、砂漠より涼しい）になることもあり一方、夜間（日最低気温）の上昇は著しくなる。湿潤地帯は、その逆である。その他、風速との相関も強く、強風域は、UHIを緩和する。また、当然のことながら、緑被率・人工排熱量といった、都市化指標は、UHI強度と強く相関している。

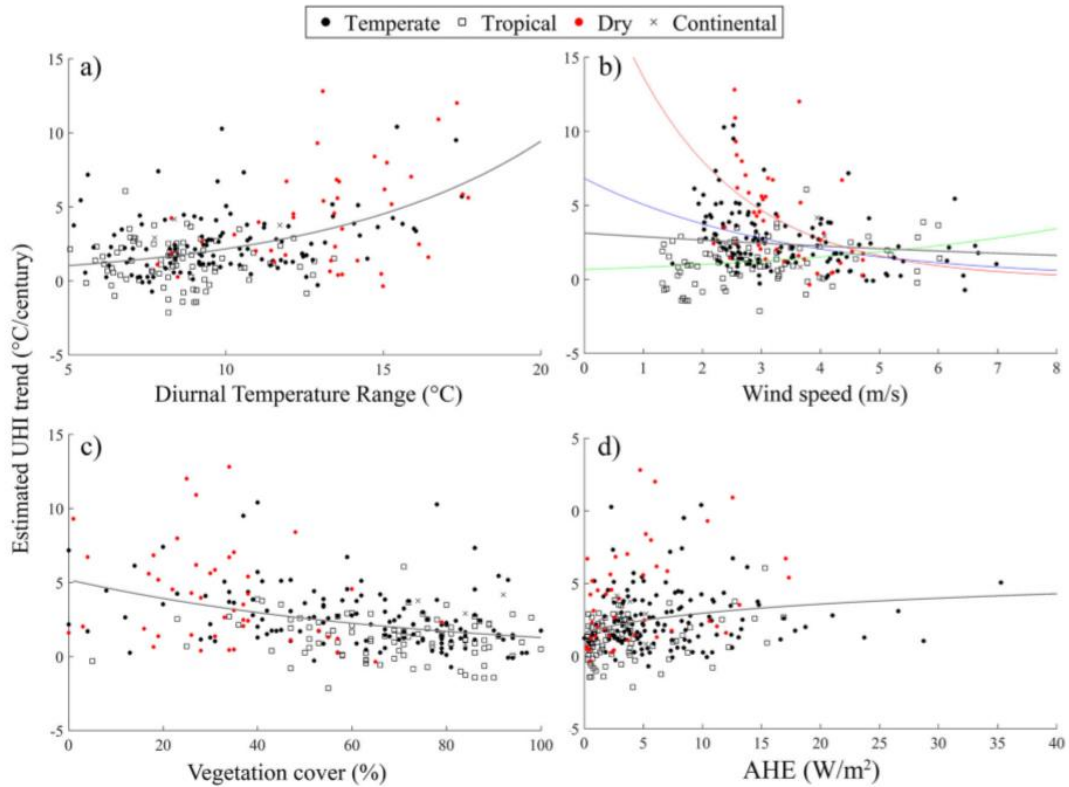


図4.1.13 全球286都市の観測点における過去1世紀換算のヒートアイランド（UHI）強度と、(a) 気温の日変化振幅（DTR）、(b) 風速、(c) 緑被率、(d) 人工排熱（AHE）との相関関係。シンボルの違いは、その都市が帰属する気候帯の違い（温帯：熱帯：乾燥：大陸）を示す（Varquez and Kanda, 2018より引用）。

#### b 過去半世紀の都市温暖化のグローバルな再現計算

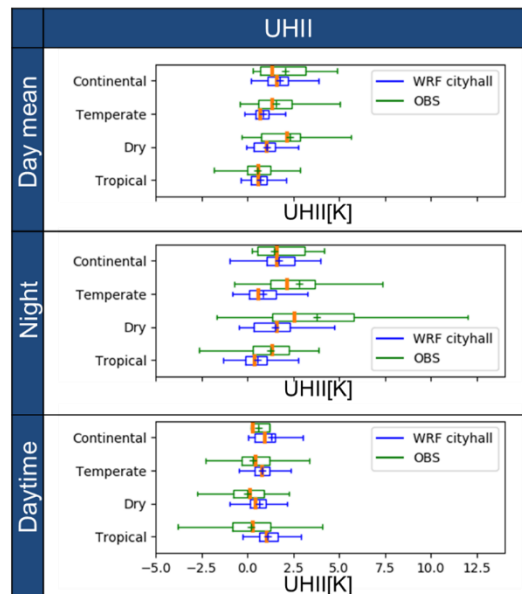


図4.1.14 全球286都市の観測点における過去1世紀換算のヒートアイランド（UHI）強度の実測値（緑色）と計算値（青色）の比較。上から、日平均気温、日最低気温、日最高気温に関する、平均値と分散

のボックスプロット表示。

世界の286都市において、「現在土地利用」における10年気候と、「都市化以前土地利用」における10年気候の2つの比較再現計算を行い、両者の気温差をヒートアイランド強度と定義することによって、グローバルな都市温暖化の実態が再現可能かどうか検討した結果を図4.1.14に示す。日平均気温、日最低気温、日最高気温、いずれも、ヒートアイランド(UHI)強度の実測値(緑色)と計算値(青色)はよく一致している。これにより、本プロジェクトで開発された先進的都市気象予測システムは、ジャカルタだけでなく、世界中の都市の2つの温暖化を適切に再現できることが確認された。

### c 最悪シナリオに基づく将来の都市温暖化のグローバル予測

上記bで都市温暖化の再現計算を行った大都市について、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオのみを用いて、2050年の将来気候予測計算を行った結果を図4.1.15に示す。2050年における2010年からの年平均気温の上昇量は、2つの温暖化を考慮すると、1℃～5℃程度と大きい。時に北京、天津など、これから更なる都市開発の進展が予測される中国の大都市は、過去一世紀のデータ解析と示したと同様に、気候変動影響をはるかに凌駕する都市温暖化影響により、4℃前後の大幅な気温上昇が懸念される。

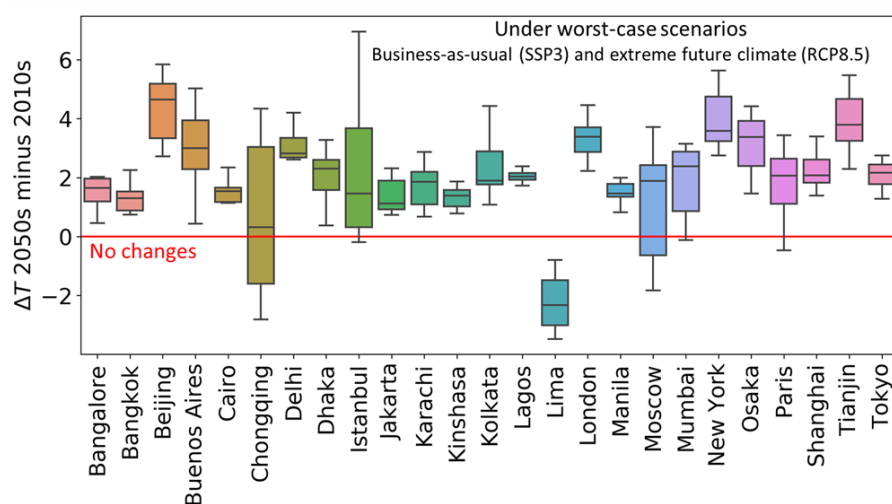


図4.1.15 主要な大都市における年平均気温の2050年と2010年の差（当該年の前後10年間のアンサンブル平均）。SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオが想定されている。

#### (5) 中間評価時に指摘された極端気象に関する補足的検討

中間評価時に指摘された重要な項目は以下の3つである。1、ジャカルタの成果を他都市へ応用展開するフレームワークを検討すること、2、グリーンインフラの効果を検討すること、3、ジャカルタの極端気象について検討すること。このうち、1については、(4)「都市温暖化予測技術のグローバル展開に向けた枠組み構築」検討した。2については、(2)「2050年における全球・都市2つの社会・経済シナリオに基づくジャカルタの都市気候予測」で検討すると同時に、サブテーマ2（水害評価）・サブテーマ3（暑熱影響評価）でも詳細に検討した。3について以下、概説する。

図4.1.16は、ジャカルタにおける8月の日最高気温の生起分布をヒストグラムで示したものであり、2010年（10年間アンサンブル気候値）、2050年におけるSSP1およびRCP2.6の最善シナリオと、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ（いずれも、10年間アンサンブル気候値）について、比較したものである。とりわけ、最悪シナリオのヒストグラム形状は、2010年を高温側に平行移動させたものとは異なり、高温側がより高頻度となっており、2つの温暖化の非線形性が表れている。図らずも、東京オリンピック・マラソンでの暑熱健康面での影響が取り沙汰されたが、このような下記の極端な高温日の増加は、屋外

スポーツに制約を与えるもので、社会・経済的影響が大きい。

図4.1.17は、ジャカルタ都市平均の日総雨量の超過確立分布であり、2010年（10年間アンサンブル気候値）、2050年におけるSSP1およびRCP2.6の最善シナリオと、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ（いずれも、10年間アンサンブル気候値）について、比較したものである。日降水量80mmを超える強い降水については、シナリオに関わらず大きな変化は見られない。一方、日降水量40mm～80mm帯では、シナリオによる差が顕著であり、最善シナリオの場合は降水確率が減少、最悪シナリオの場合は降水確率が増加、という結果となった。

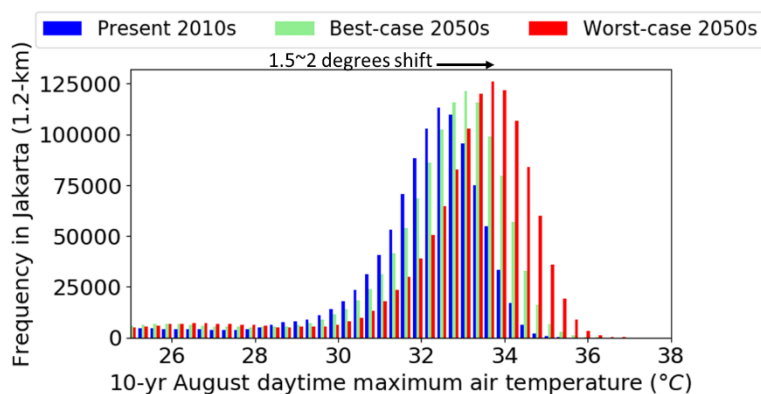


図4.1.16 ジャカルタにおける8月の日最高気温の生起分布をヒストグラム。2010年（10年間アンサンブル気候値）、2050年におけるSSP1およびRCP2.6の最善シナリオと、SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ（いずれも、10年間アンサンブル気候値）

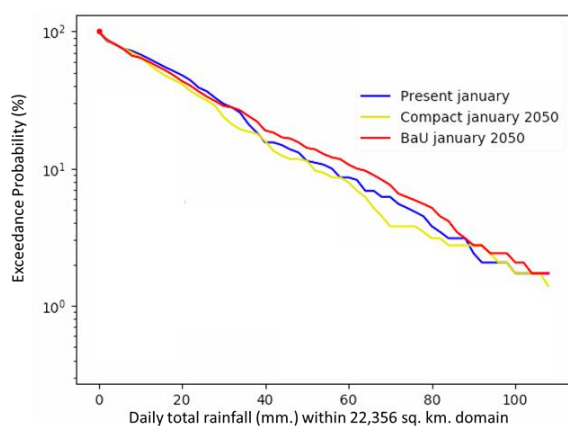


図4.1.17 ジャカルタ都市平均の日総雨量の超過確立分布。青色：2010年（10年間アンサンブル気候値）、黄色：2050年におけるSSP1およびRCP2.6の最善シナリオと、赤色：SSP3およびRCP8.5の最悪シナリオ（いずれも、10年間アンサンブル気候値）。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

・本研究では、発展著しくマルチストレスに曝されるアジアのメガシティ（インドネシア・ジャカルタを対象）において、緩和・適応統合実施の基本シナリオを考慮した上で、最先端の数値予報技術を駆使した気候変動の予測を行った。このようなアプローチは、世界の他都市においては見られず、都市の気候変動研究における先進的事例と言える。得られた結果は、気候変動にヒートアイランドを加えた2つの温暖化を適切に考慮することが不可欠であることを強く示唆している。AR6およびAR7では、都市がハイライトされるという情報があり、本プロジェクトの成果はその先鞭をつけるものである。

・ジャカルタを対象に開発される都市温暖化予測技術を、世界の任意の都市にグローバル展開できるよう、その枠組みを確立・検証・提示したが、これは、プロジェクトのスタート時には契約内容（採択条件）には謳われておらず、アドバイザー会合や中間評価などにおいて強く助言されたものである。結果としては、世界の任意の大都市に適用可能で、世界をリードできる新たな都市気象予測技術が構築されたことを、謝意とともに付記しておきたい。公開された成果はいずれも、Atmospheric Environment や Nature 系列 (NPJ Journal; Scientific Database; Scientific Report) など、インパクトファクターの高い国際誌に掲載された。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

・開発した都市気候変動予測手法は、ジャカルタを対象としているが、現地でのデータ取得が困難な発展途上国のメガシティへの応用を前提に設計されたものであり、今後、他国への環境政策支援のツールとして活用できる可能性がある。

・インドネシア バンドン工科大学と共同で設置したタワー観測サイトは、グローバル研究に使用可能な精度・設置条件・観測項目を備えており、同大学が継続的にメンテナンスと運用を行っている。今後、インドネシア気象局 (BMKG) も含めて、質の高い気象観測データとして、各種政策決定の基礎データとして使用可能である。

・環境省が予定されている気候変動研究情報のデータベース化、とりわけ、東南アジアのメガシティを対象としたコンテンツ (数値予測データ・現地観測データ) の提供が可能である。

## 6. 国際共同研究等の状況

インドネシアのバンドン工科大学、インドネシア海洋・水産省、ジャカルタ特別州環境局との共同研究によりジャカルタ市内に気象観測ネットワークを形成し、モデルのバリデーションや現地微気象特性把握に利用されており、あるいはCO<sub>2</sub>の排出量などの直接モニタリングも行っている。また、本プロジェクトを通じて、インドネシア気象気候地球物理庁における大気環境分野の研究者との学術交流ができ、それがジャカルタにおける都市区大気汚染診断プロジェクトに派生した。現在このプロジェクトにより共同研究開発を行っていると同時に、更なる観測拠点の増加や人材交流などが継続して進められている。また、全球の都市建物GISデータベースの作成においては、主にその検証段階で高精度の建物データとの比較が必要なことから、そのデータ提供に点において、シンガポール大学、ドイツ国ハノーバー大学と国際共同研究を実施した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文 (査読あり) >

- 1) M.Esteban, H.Takagi, L.Jamero, C.Chadwick, J.E.Avelino, T.Milami, D.Fatma, L.Yamamoto, N.D.Thao, M.Onuki, J.Woodbury, V.P.B.Valenzuela, and R.N.Crichton : Ocean & Coastal Management, 189, Adaptation to Sea Level Rise: Learning from Present Examples of Land Subsidence, (in press) 1,May 2020
- 2) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, Y. Honda, T. Ihara and M. Kanda: Future increase in elderly heat-related

- mortality of a rapidly growing Asian megacity. N. Scientific Reports (final review), 2020
- 3) Y. Narita, A.C.G. Varquez, M. Nakayoshi and M. Kanda: Construction of land use database before urbanization for global urban climate analyses. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.75, No.2, I\_1039-I\_1044, 2019
  - 4) M.Asami, M. Nakayoshi, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Mechanism of the urban heat island considering geography and background climate. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.75, No.2, I\_37-I\_42, 2019
  - 5) N.S.Darmanto, A.C.G. Varquez, and M.Kanda : Future Urban Climate in A Tropical Megacity Based on Global Climate Change and Local Urbanization Scenario, Urban Climate, (accepted), (2019)
  - 6) Y. Zhou, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model. Scientific Data Volume 6, Article number: 34 (2019)
  - 7) M.Esteban, H.Takagi, R.J.Nicholls, D.Fatma, M.B.Pratama, S.Kurobe, X.Yi, I.Ikeda, T.Mikami, P.Valenzuela and E.Avelino: Maritime Policy & Management, Adapting Ports to Sea-level Rise: Empirical Lessons based on Land Subsidence in Indonesia and Japan (in press) , Published online: 18 July 2019
  - 8) 居石貴史, M. Yucel, 足永靖信, 稲垣厚至, 仲吉信人, A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, 神田学 : 土木学会論文集B1(水工学) vol.74, 4, I\_259-I\_264, (2018)“全球・都市の将来シナリオを考慮した都市街区の温熱環境予測
  - 9) S. Kiyomoto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Anthropogenic Heat Flux Distribution with Point Sources for Global Urban Climatology, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 74, No. 5, I\_1171-I\_1176, 2018
  - 10) H. Takagi: Sustainability, 10, 1045, (2018) “Long-Term Design of Mangrove Landfills as an Effective Tide Attenuator under Relative Sea-Level Rise”
  - 11) A.C.G. Varquez, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), (accepted) (2018) “Future population distribution of an urban agglomeration given climate change scenarios”
  - 12) T. Sueishi, M. Yucel, Y. Ashie, A. Inagaki, M. Nakayoshi, A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto and M. Kanda: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) (accepted) (2018) “Influence of Climate Change and Urbanization to Future Thermal Environment within A Megacity” (Japanese)
  - 13) A.C.G. Varquez and M. Kanda: Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009), npj Climate and Atmospheric Science volume 1, Article number: 32 (2018)
  - 14) H. Takagi: Long-Term Design of Mangrove Landfills as an Effective Tide Attenuator under Relative Sea-Level Rise. Sustainability, 10, 1045 (2018)
  - 15) Y.Dong, A.C.G. Varquez and M.Kanda: Atmospheric Environment, 150, pp.276-294, 2017 “Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution”
  - 16) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, N. Kawano, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 73, No. 4, I\_103-I\_108, 2017, “Representative urban growing scenarios for future climate models”
  - 17) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: Urban Climate Vol. 21, 243-261, 2017, “High-resolution Satellite-derived Urban Roughness Parameters for Mesoscale Modeling in Megacities”
  - 18) A.C.G. Varquez and M. Kanda: Global urban climatology, “Analyses of urban heat island trends derived from global surface temperature datasets and meteorological stations” (For Submission)
  - 19) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: International Journal of Urban Climate No.21, 243–261, DOI: 10.1016/j.uclim.2017.07.001 (2017) “Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities”
  - 20) A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto, N. Kawano, S. Takakuwa, M. Kanda and Z. Xin: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 73, No. 4, I\_103-I\_108 (2017)



“REPRESENTATIVE URBAN GROWING SCENARIOS FOR FUTURE CLIMATE MODELS”

- 21) N.S.Darmanto, A.C.G. Varquez, and M.Kanda : Urban Climate, 21, 243-261,(2017) “Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities”
- 22) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: Atmospheric Environment, 150, 276-294, (2017) “Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution”
- 23) H.Takagi, D.Fujii, M.Esteban and X.Yi: Sustainability, DOI: 10.3390/su9040619 (2017) “Effectiveness and Limitation of Coastal Dykes in Jakarta: The Need for Prioritizing Actions against Land Subsidence”
- 24) H. Takagi, D. Fujii, M. Esteban and X. Yi: Sustainability, 9, 619, (2017) “Effectiveness and Limitation of Coastal Dykes in Jakarta: The Need for Prioritizing Actions against Land Subsidence”
- 25) M.Esteban, H. Takagi, T. Mikami, A. Aprilla, D. Fujii, S. Kurobe and N.G. Utama: International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 23, 70-79, (2017) “Awareness of coastal floods in impoverished subsiding coastal communities in Jakarta: Tsunamis, typhoon storm surges and dyke-induced tsunamis”
- 26) 河野なつ美,董 玥,M. Yucel,A.C.G. Varquez,神田学:土木学会論文集B1 (水工学) Vol.72, 4, I\_97-I\_102, (2016) “グローバル都市気象学-都市温暖化の汎用解析手法の提案”
- 27) M. Yucel, A.C.G. Varquez, N.S. Darmanto and M. Kanda: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 72, 4, I\_91-I\_96(2016) “Improvements of Urban Representation in Weather Models Using Global Datasets”
- 28) A.C.G. Varquez: Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 29(5), pp.313-325 (2016) “Global urban Climatology”
- 29) H. Takagi, M. Esteban, T. Mikami and D. Fujii: Urban Climate, Elsevier, 17, 135-145, DOI: 10.1016/j.uclim.2016.05.03, Projection of coastal floods in 2050 Jakarta”
- 30) H. Takagi, T. Mikami, D. Fujii, M. Esteban and S. Kurobe: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., EGU, 16, 1629-1638, DOI:10.5194/nhess-16-1629-2016, “Mangrove forest against dyke-break-induced tsunami on rapidly subsiding coasts”

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) A.C.G. Varquez: Global Urban Climatology (Invited) International Workshop on Urban Climate Projection, University of Tsukuba, Japan, Oct. 1, 2019
- 2) A.C.G. Varquez and M. Kanda: Global Urban Climatology Framework: New Perspective and Highlights, American Geophysical Union Fall Meeting 2019, San Francisco, CA, USA, Dec. 9 – 13, 2019
- 3) A.C.G. Varquez, N.Kawano, M.Kanda, and M.Nakayoshi, 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Sept.19-20,2018 “The atmospheric effect of anthropogenic emissions to large Asian urban agglomerations.” (oral; best presentation)
- 4) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Sept.19-20,2018“Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate and local urbanization scenarios”
- 5) A.C.G. Varquez, N.Kawano, M.Kanda, and M.Nakayoshi : 10th International Conference on Urban Climate (ICUC), 6-10 August 2018, New York, USA. “Numerical Investigation of the World's Large Urban Agglomerations Using Distributed Roughness and Anthropogenic Emissions.”
- 6) M.R. Ferdiansyah, A. Inagaki, M. Kanda, A.J.P. Calheiros, and D.A. Villa: 1st International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences (ICTMAS 2018), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Sept. 19 - 20, 2018 “Information of sea-breeze inland penetration in tropical-coastal urban region

derived from Himawari-8 visible band images.”

- 7) M.R. Ferdiansyah, A. Inagaki and M. Kanda: Jakarta, Indonesia October 8-10, 2018 “Atmospheric boundary-layer flow retrievals from Himawari-8 images using thermal image velocimetry Aomsuc9”
- 8) M.R.Ferdiansyah, A.Inagaki and M.Kanda : S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018 “Spatial-temporal Detection of Sea-breeze Penetration Over Megacities from Himawari-8.”
- 9) A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, N.Kawano, S.Kiyomoto, Y.Zhou, S.Takakuwa and M.Kanda : S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018.“ Linking Urbanization and Climate Change in Dynamical Downscaling Models.”
- 10) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, S. Takakuwa, N. Kawano, M. Kanda and Y. Zhou: S-14 Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, September 17-18, 2018. “Future Urban Climate Projection in a Tropical Mega City Based on Global and Local Urbanization Scenarios.”
- 11) M. Yucel, A. Inagaki and M. Kanda: 10th International Conference on Urban Climate (ICUC), 6-10 August 2018, New York, USA. “Effect of the Great Garuda Sea Wall on pedestrian-level wind and thermal comfort.
- 12) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22-26 Jan, 2017. “Satellite-derived Urban Parameters for Mesoscale Weather Modeling in A Megacity”
- 13) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22–26 Jan,2017. “Global High-Resolution Anthropogenic Heat Flux Database”
- 14) N. Kawano, A.C.G. Varquez, Y. Dong, M. Kanda and M. Roth: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22–26 Jan, 2017. “Weather Modelling of Urban Heat Island in Megacities Using Distributed Urban Parameters Derived from Global Datasets”
- 15) A.C.G. Varquez and M. Kanda: 97th American Meteorological Society Annual Meeting and 13th Symposium of the Urban Environment, 22–26 Jan, 2017. “Analyses of Multiple Urban Heat Islands from Global Surface Temperature Datasets”
- 16) M.Esteban, H. Takagi, T. Mikami, D. Fujii and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb.2017 “Awareness about tsunamis and dyke-break induced tsunami in low-lying coastal communities in Jakarta”
- 17) T. Mikami, H. Takagi, M. Esteban, D. Fujii and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb. 2017. “Evacuation Simulation for a Vulnerable Coastal Community in Jakarta”
- 18) H. Takagi, M. Esteban, T. Mikami, D. Fujii, and S. Kurobe: 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structure (ICOPMAS 2016), 2p., Feb.2017. “Mechanisms of coastal floods in Jakarta: the need for immediate action against land subsidence”
- 19) A.C.G. Varquez, N.S.Darmanto, M.Kanda, and S.Takakuwa : Cities and Climate Conference 2017, Potsdam, Germany,19-21,Sept.2017. “Global urban climatology: advance strategy for representing urban areas in global weather models”
- 20) A.C.G. Varquez, M. Kanda, N.S. Darmanto, T. Sueishi, and N. Kawano: American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, USA,11-15 Dec.2017. “Advance strategy for climate change adaptation and mitigation in cities”
- 21) A.C.G. Varquez and M.Kanda : The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University (Hachioji, Japan), 2–4 Mar 2016. “The roadmap to global urban climatology”
- 22) M.Kanda: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University (Hachioji,

- Japan), 2–4 Mar 2016. “Case study on mitigation and local adaptation to climate change in Jakarta” “Cost and benefit of rooftop energy saving technologies – case study in Jakarta –”
- 23) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez, M. Kanda, and S. Takakuwa: American Geophysical Union Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016. “Future Climate Prediction of Urban Atmosphere in A Tropical Megacity: Utilization of RCP/SSP Scenarios with an Urban Growth Model”
- 24) Y. Dong, A.C.G. Varquez, and M. Kanda: American Geophysical Union Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016 “1-km Global Anthropogenic Heat Flux Database for Urban Climate Studies”
- 25) N. Kawano, A.C.G. Varquez, Y. Dong, and M. Kanda: American Geophysical Union Fall Meeting, 12–16 Dec, 2016. “Global distribution of urban parameters derived from high-resolution global datasets for weather modeling”
- 26) A.C.G. Varquez, M. Kanda, N. Kawano, N.S. Darmanto, and Y. Dong: American Geophysical Union Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016. “Introduction to Global Urban Climatology”
- 27) A.C.G. Varquez and M.Kanda: 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, July 20-24, 2015 “Changing perspectives: Significance of long-term temperature observations in major cities”
- 28) N.S. Darmanto, A.C.G. Varquez and M. Kanda: Proceeding of the 9th International Conference on Urban Climate, 20th-24th July 2015. “Detection of Urban Environment from Landsat 8 for Mesoscale Modeling Purposes”

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「気候変動～その影響と対策」（2015年6月6日、東京大学生産技術研究所An棟コンベンションホール、観客約100名）
- 2) 一般公開シンポジウム「都市と気候変動問題」（2016年6月4日、東京大学生産技術研究所An棟コンベンションホール、観客約100名）
- 2) 環境ワークショップ「異常気象と地球温暖化」（主催：目黒区所属環境団体、2016年12月17日 東京工業大学大岡山キャンパス、聴講者 70名）
- 3) 環境ワークショップ「地球温暖化と都市温暖化」（主催：目黒区シルバー大学、2017年6月15日 目黒区シルバー大学、聴講者 50名）
- 4) SYMPOSIUM OF STRATEGIC RESEARCH ON GLOBAL MITIGATION AND LOCAL ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE,（主催：バンドン工科大学、インドネシア、2018年9月17日～18日、聴講者 80名）
- 5) 環境ワークショップ「地球温暖化と我々にできること」（主催：パイオニア株式会社（東京）、2018年8月30日、聴講者 120名）
- 6) 講演会「見逃せない都市の温暖化～熱中症とゲリラ豪雨～それによる生活への影響」（主催：田園調布学園校友会、2019年11月16日、聴講者 100名）

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2020年開催予定の東京オリンピックを背景に、地球温暖化が進む中、夏季五輪に適した都市はどれほどあるのかー2050年の気象予測データを分析。  
見出し「夏季五輪VS気候変動 2050年、世界の大都市の6割で開催困難に」  
日本経済新聞（2020年01月24日 公開）  
<https://vdata.nikkei.com/newsgraphics/summer-olympics-host/>

#### (6) その他

- 1) 特任講師のVarquezが、将来の都市発展モデルを組み入れた都市気象予測技術で土木学会水工学講演会において **Best International Paper Award 2017** を受賞
- 2) PDのYucelが、都市影響を考慮した気候シミュレーションで、アメリカ気象学会の優秀学生発表賞、土木学会水工学講演会において **Best International Paper Award 2017** を受賞
- 3) 特任講師のVarquezが、「1<sup>st</sup> International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences, Indonesia」で **Best Presenter Award 2018** を受賞

#### 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない

## II-2 緩和・適応統合実施による都市水害減災評価と費用便益分析

国立大学法人東北大学

大学院工学研究科土木工学専攻

風間 聡

公立大学法人富山県立大学

工学部環境・社会基盤工学科

呉 修一

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：59,052千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：12,422千円、平成28年度：11,805千円、平成29年度：11,805千円、平成30年度：11,215千円、令和元年度：11,805千円）

### 【要旨】

本研究では、地球温暖化および都市の拡張がインドネシア・ジャカルタの洪水氾濫に与える影響を評価するため、洪水氾濫モデルの適用および洪水被害額推定手法の構築を行った。構築したモデル・手法を用い、最悪シナリオ（RCP8.5-BaU）と最善シナリオ（RCP2.6-SSP1）の温暖化および都市化による洪水計算に基づき2050年までのジャカルタの洪水被害の計算を実施した。更に、気候変動のシナリオ・計算期間を増やすため、8つのGCMと3つのRCPシナリオの計24通りの計算を実施した。その結果、気候変動のみで、2050年期、2100年期において77%、99%ほど年期待被害額が上昇することが示された。次に、土地利用の変化と地盤沈下を加えたシナリオを考慮すると、2050年期と2100年期ともに360%以上も被害額が上昇することが示された。このシナリオでは2050年に地盤沈下が止まるとしており、地盤沈下の影響が特に強いことが理解された。この気候変動と土地利用、地盤変化を加えたシナリオをベースラインとして、複数の適応策の効果を調べた。建物の壁面、屋上を緑化するグリーンインフラ(GI)は2050年期に被害額を2.6%減少することができる。防潮堤の効果を持つガルーダプロジェクト(GP)は2050年期に11%被害額を軽減できる。河川沿岸の居住制限(RC)では2050年期において29%の被害額を減少できる。その他も加えてまとめると、グリーンインフラ(GI)、浸透井戸(RW)、ガルーダプロジェクト(GP)、遊水地(RRP)、居住制限(RC)の適応策はそれぞれ、近未来において2.6、5.6、11.1、33.2、29%の被害額減少できる。同様にそれぞれの費用便益比は、0.5、9.7、0.05、2.3、1.4となり、浸透井戸(RW)の費用対効果をもっとも良いことが明らかになった。

### 【キーワード】

遊水地、浸透井戸、グリーンインフラストラクチャー、極値降雨、都市化

### 1. はじめに

2013年にWG2/AR5では新たに地域の気候変動問題が加えられ、特にアジアの問題について誌面を多く割き報告された。その中で人口増加が顕著で1000万人を超える巨大都市の抱える将来リスクが重要視された。低平地の巨大都市の多くは洪水ハザードが大変高く、将来の気候変動に対し大きな経済損失リスクがある。2015年国連防災世界会議では、途上国の災害の脆弱性と気候変動の災害リスクの上昇が大きな議題となった。また、アジア太平洋地域適応ネットワーク(APAN)では脆弱な都市域の問題がクローズアップされている。そのため、巨大都市が抱える各問題の重要性や感度、相互影響、個別対策、総合対策等の有効性を数値地図情報で分析する必要がある。途上国大都市は技術・予算的問題から気候変動に対して脆弱であり、きめ細かな地域毎の適応策策定を助けることは社会的意義の大きなものである。費用便益に基づく適応策の提案は経済的意義も大きく、環境省が掲げるアジアの環境問題解決に貢献できるものである。

## 2. 研究開発目的

インドネシアの首都ジャカルタは華々しい経済発展を謳歌する一方で、インフラ整備が不十分であり、5年に一度程度の頻度で発生する甚大な洪水被害をいかに軽減するかという課題を抱えている。近年では2013年に大規模な洪水が発生して以降、1月から2月の雨期に洪水が毎年のように発生しており、最近の2020年1月に発生した洪水では67名が犠牲になるなど大きな人的被害が生じている。このような状況下でもジャカルタへの人口流入は継続しており、今後も都市拡張・洪水リスクの増加が懸念されている。

このように、いまだに人口が増加し、地盤沈下が継続し、熱帯多雨で気候変動の影響を受けやすいなど、将来の洪水リスクが極めて高いインドネシアのジャカルタを対象に、有効な適応策と緩和策を統合した政策を提案することが本研究の目的である。具体的には、(1) 高時空間解像度の気象予測データに対応した洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の算定手法を開発し、(2) そのモデルを用いて、将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響を予測・評価し、(3) 各種適応策の検討と費用対効果を提示する。

(1) では、ローカルの高解像度データに基づいた高精度な洪水氾濫モデルを構築する。さらに洪水被害額の算定手法の開発では、日本の治水経済調査マニュアルの改良を行い、よりジャカルタの被害額推定に適した推定手法を開発する。また開発した手法は他のメガシティへの適用も可能なものを目指す。

(2) では地球温暖化のみならず都市の拡張を考慮する。都市の拡張では、流域上流部の土地利用・被覆の変化、沿岸部の地盤沈下およびヒートアイランドによる豪雨の増加の影響をも考慮する。(3) 各種適応策の検討と費用対効果を提示する。適応策の検討では、一般的な適応策に加えて、グリーンインフラやジャカルタ特有のプロジェクトとしてガルーダプロジェクトをも検討する。

## 3. 研究開発方法

対象領域のジャカルタ特別州は、インドネシアの首都であり人口950万人以上のアジアのメガシティの一つである。対象領域の全体およびジャカルタ特別州の詳細を図 3.2.1に示す。ジャカルタを流れる河川は13あり、主要なものはチリウン川(流域面積：485 km<sup>2</sup>、流路延長：145 km、標高：0~2681 m)である。チリウン川流域は、明瞭な雨季(11月-4月)と乾季(5月-10月)を有しており、殆どの洪水は雨季の1月から2月に発生する。ジャカルタで発生する浸水の起源の多くはチリウン川などの外水氾濫によるものとジャカルタ北部都市域や沿岸域の内水氾濫によるものである。

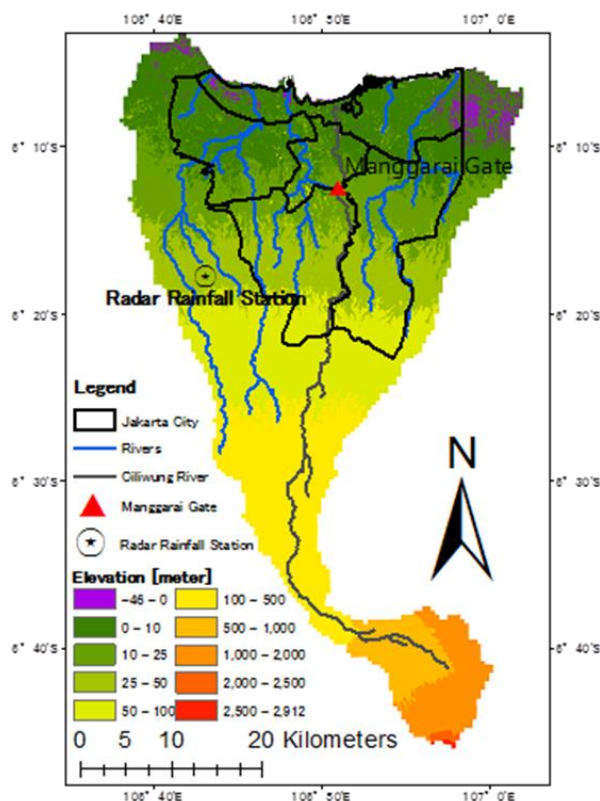


図 3.2.1 対象流域の概要とジャカルタ特別州の位置

### (1) 洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の算定手法の開発

地球温暖化の影響のみならず、深刻と懸念されている流域の市街化と地盤沈下が洪水氾濫に与える影響を定量的に評価するために、洪水氾濫モデルの構築を行った。洪水氾濫モデルは、サブ分布型の降雨流出計算過程、1次元不定流計算に基づく河道部の洪水追跡および2次元不定流計算に基づく氾濫計算で構成される。入力降雨としてレーダ雨量データを用いてモデルパラメータのキャリブレーションを実施した (Moe et al., 2016a)。標高データはJAXAの30 mメッシュを使用し空間的に高解像度での計算を実施した。本モデルを用い2013年洪水を対象とした計算を実施し、ジャカルタ政府が公表した実測の浸水範囲との比較を通じ、構築したモデルの検証を行った。

洪水氾濫計算の実施後に洪水被害額の算定も行っている。これにより、各種適応策の費用対効果などの算定が可能となる。日本の国土交通省が発表している治水経済調査マニュアル (案) をジャカルタで利用できるように各資産単価を市場調査ならびに住民ヒアリングから求め、さらにGDPをもとに経済価値を他国に変換できる関数を提案し、ジャカルタの被害単価を求めた。上で得られた洪水氾濫計算による浸水深と浸水期間から洪水被害額を異なる再現期間の降雨を入力として求めた。これらの計算から洪水氾濫被害額の分布を求めた。

上記の洪水氾濫モデルと氾濫被害額の算定手法は高解像度かつローカル地域の情報を組み込んだ強みがある。これら地域 (ローカル) 的なモデル・算定手法と全球 (グローバル) での解析結果との比較も行った。全球モデルで算出した洪水氾濫解析結果と被害額はテーマ3から提供されたものを使用する。これにより地域モデルの強みや全球モデルの注意すべき点などを明らかとすることが可能となる。

### (2) 将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響

上記で構築した洪水氾濫モデルを用い、将来の地球温暖化の影響および都市の拡張によって生じる地盤沈下と流域の市街化が洪水氾濫に与える影響を評価した。土地利用に関しては、過去の状況はLandsat

衛星画像より抽出したものを使用する (Moe et al., 2016b)。将来の土地利用はVarquez et al. (2017)が都市の成長を表現するSLEUTHモデルを用いて、最悪シナリオ (RCP8.5-BaU) と最善シナリオ (RCP2.6-SSP1) の土地利用を算出しており、それらの土地利用を用いた。過去の地盤沈下状況は複数の現地調査等より報告されている地盤沈下量を基に推定し、将来の地盤沈下は過去の地盤沈下速度がそのまま継続するという仮定のもと線形外挿で推定した。

温暖化時の雨に関しては最悪シナリオ (RCP8.5-BaU) と最善シナリオ (RCP2.6-SSP1) の土地利用、都市の熱環境などを考慮した領域気象モデルWRFの動的ダウンスケーリングより得られた豪雨を使用している。その他にも、シナリオ数の増加と不確実性評価のために、別途8つのGCMと3つのRCPシナリオの計24通りの入力降雨シナリオも使用している。被害額は、雨量強度の数年のデータを用いて年期待被害額としている。

### (3) 適応策の検討と費用対効果

これらの将来被害に対する適応策を検討するために、気候変動と土地利用、地盤変化を加えたシナリオをベースラインとして、複数の適応策の被害減少額を求めた。ここでは、建物の屋上・壁面を緑化するグリーンインフラ(GI)、沿岸域に長大な防潮堤を築くとしているガルーダプロジェクト(GP)、河川・運河に接する地域の住居を認めず遊水地にする居住制限(RC)、多くの洪水氾濫水を浸透させる浸透井戸(RW)、リスクの高い浸水地域の遊水地化 (河道の拡大) (RRP)を適応策として評価を行った。

GIについては、1降雨について2 mmの損失雨量を屋上と壁面の面積に乗じて与えた。GIの費用は既存資料 (東邦レオ) より75 USD/m<sup>2</sup>と算定された。GPは、洪水氾濫計算の下流端境界条件である沿岸水位を1 m下げることによって防潮堤建設を表現し、計算を行った。また、その費用は既存プロジェクト(Rayakonsult, 2013)より、1 mあたりの防潮堤建設費用99 Million IDRを用いた。RCは、河道兩岸の30 mの範囲として、費用はその地域の建物費用とした。河道から拡幅した地域は、6 mの掘削をして遊水池としている。RWは、200井戸/1 km<sup>2</sup>を対象全域に設置するとして、1 m<sup>3</sup>の浸透について既往レポート(JICA, 2013)よりIDR 70,000の費用とした。RRPは、設置する地域の資産価値を費用とした。洪水氾濫の多い3か所の上流を対象とし、全体で14.5 km<sup>2</sup>の面積を遊水池として確保した。上記の適応策の評価として、被害軽減額と費用対効果について調べた。



## 4. 結果及び考察

### (1) 洪水氾濫モデルと洪水被害額の算定手法

2013年1月の洪水を対象とした洪水氾濫計算結果とジャカルタ政府が公表した実測の浸水範囲の比較を図 4.2.1に示す。計算より算定された氾濫箇所は実測の浸水範囲と極めて良好に一致しており、レーダ雨量情報、高解像度の地形データ等の利用によって精度の高い洪水氾濫計算を実施することが出来た。また、他の既往研究やインドネシア、オランダなどの研究チームの洪水再現計算よりも格段と精度のよい計算となっており、日本の水工学や洪水氾濫計算の技術力の高さを示すものとなっている。

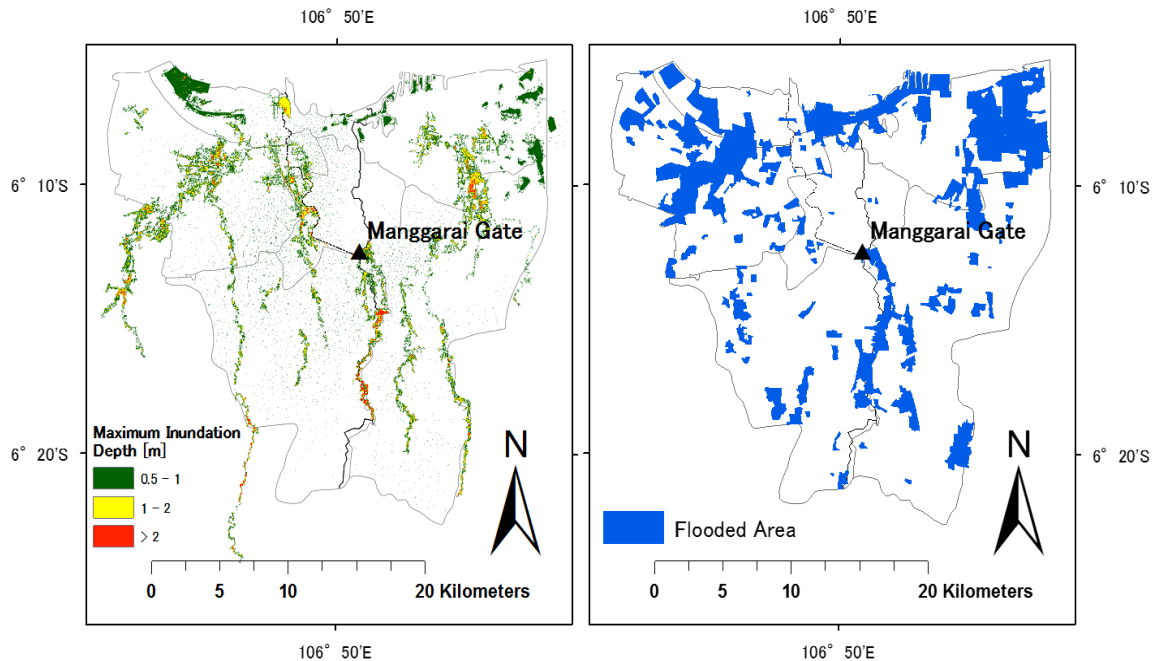


図 4.2.1 洪水氾濫計算結果（左）と実測の浸水範囲（右）との比較

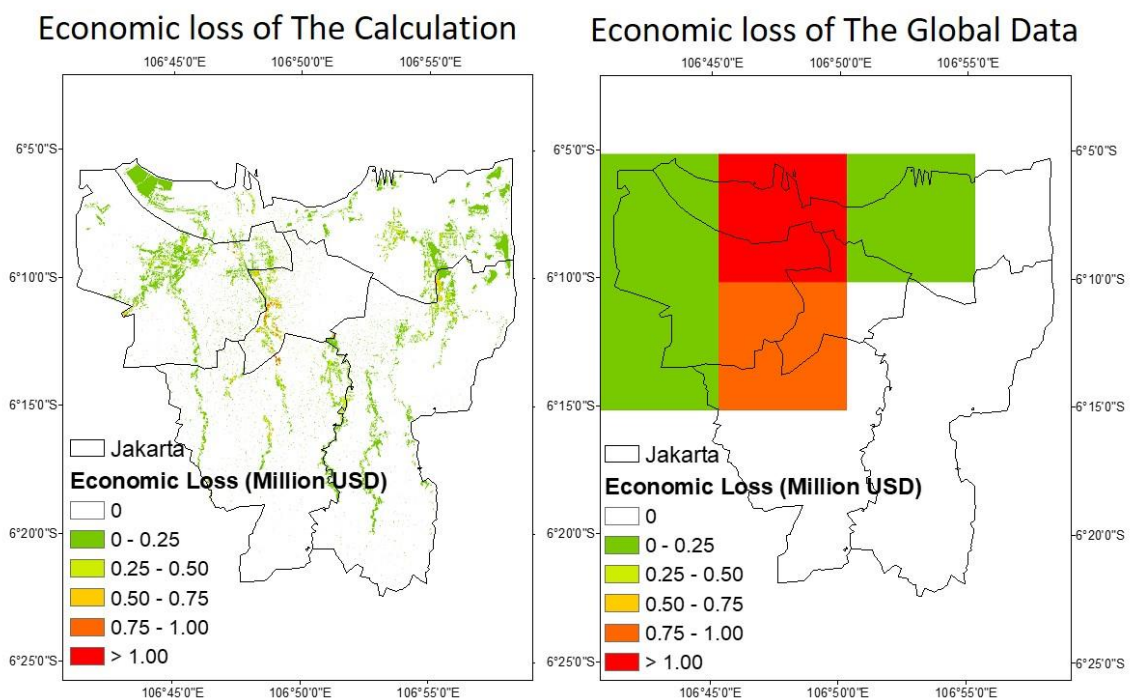


図 4.2.2 地域モデル(左)と全球モデル(右)による洪水氾濫被害額の比較

次に、日本の治水経済マニュアル（案）に基づいた2013年の洪水によるジャカルタ市の被害額の分布を図 4.2.2に示す。同時に全球モデルでテーマ3によって算定されたジャカルタの洪水被害額も同時に示している。なお、2013年の洪水被害額はトータルで、全球モデル：3百万ドル、地域モデル：63億ドル、インドネシアのレポート・報告書などの実測：10～33億ドルと、全球モデルのみ大きな差が生じた。これは国平均原単位のダウンスケール計算（グローバル）と土地利用データ積み上げ計算（ローカル）の差によるものと考えられている。よって、グローバルの計算結果を地域レベルに落として推定する場合は極めて注意が必要であり、特にアジアのメガシティなどでは独自の地域スケールでの計算が必要不可欠であることが示された。

## （２） 将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響

上記でキャリブレーション・検証された洪水氾濫モデルを用い、土地利用の変化および地盤沈下の影響を考慮し、1983年から2050年までの洪水氾濫計算を行った結果のまとめを図 4.2.3に示す。ここで土地利用の変化は最悪シナリオ(RCP8.5-BaU)に基づいている。図 4.2.3に示されるように過去の土地利用・地盤沈下状況では洪水氾濫面積・浸水量が現在(2013年)と比較して少ない。また将来の土地利用の変化と地盤沈下の影響で年々徐々に氾濫面積・浸水量が増加し、2050年では1983年の2倍以上に増加していることがわかる。両者の影響を比較すると、土地利用の変化の影響が地盤沈下の影響よりも大きい。しかしながら本洪水氾濫計算は豪雨起源のものであり、海域からの高波や異常潮位等に伴い海岸堤防の決壊が生じ海水の浸入が発生した場合等は、地盤沈下が浸水域や浸水深に大きく影響するものと考えられる。また、同時に地盤沈下が2020年にストップした場合の計算結果も示している。図に示されるよう、地盤沈下のみでの対応では不十分なことは明らかである。

これらの影響は温暖化というよりは、人間活動の直接的な影響（上流域の森林伐採や地下水の過剰摂取に伴う地盤沈下の発生）を議論したものであるが、これに温暖化時の降雨強度の増加等の影響が加わり、更なる洪水氾濫面積・浸水量の増加が懸念される。

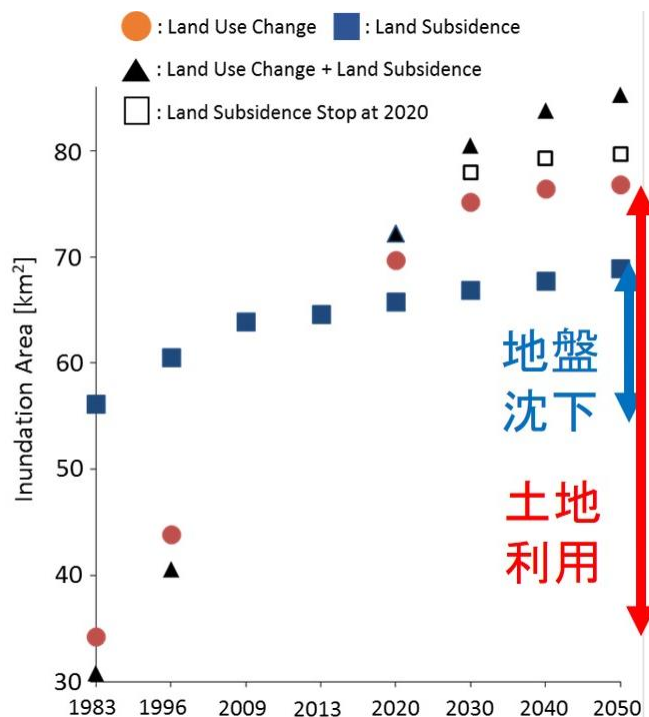


図 4.2.3 地盤沈下と土地利用の変化が洪水氾濫面積に与える影響

次に、温暖化時の極端豪雨と都市の拡張を考慮した計算を実施した結果を図 4.2.4 に示す。極端豪雨では、領域気象モデル WRF の動的ダウンスケーリングにより得られた豪雨を使用している。これらの豪雨は温暖化のみならずヒートアイランドの影響をも加味したものであり、テーマ 4 サブテーマ 1 から提供された豪雨を使用している。結果より洪水規模は温暖化・ヒートアイランドの影響でも増大することが明らかとなった。また、最善シナリオ(RCP2.6&Compact)、最悪シナリオ(RCP8.5&BaU)と浸水面積の増加が確認され、温暖化に都市の拡張が加わり洪水リスクの更なる悪化が懸念される結果となった。最善シナリオと最悪シナリオでそれほど大きな差がないのは、市街化の拡張が最善シナリオでも流域内では顕著であるためである。

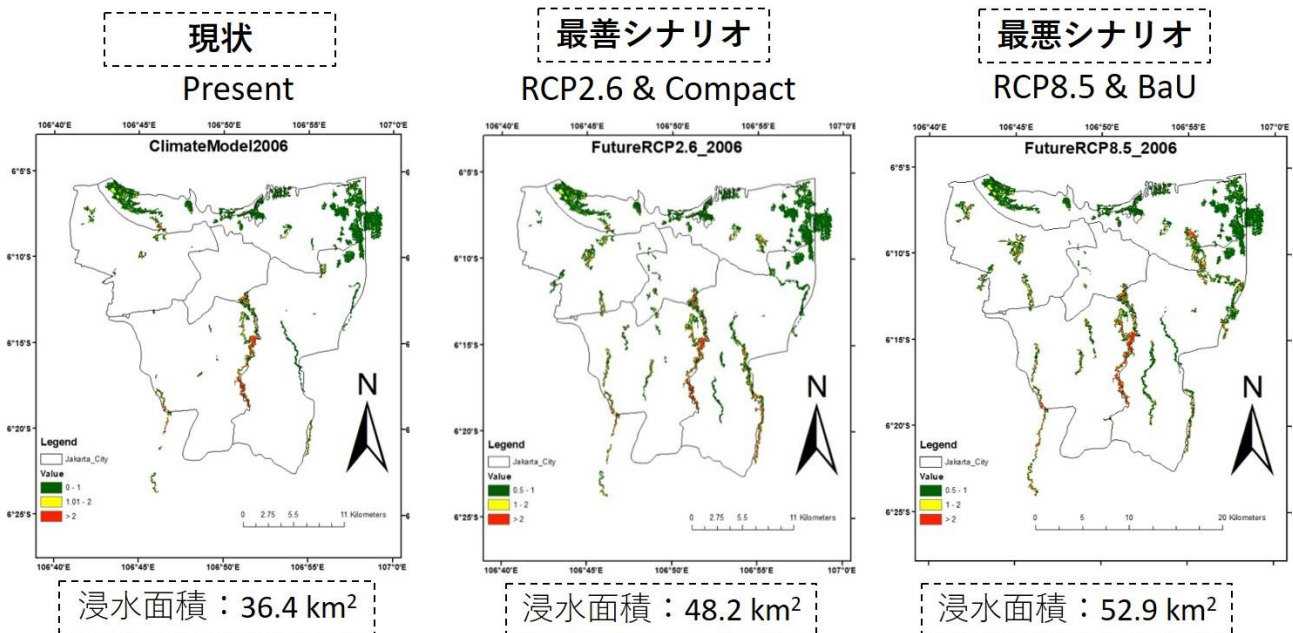


図 4.2.4 現在および将来（最善・最悪シナリオ）の洪水氾濫計算結果

しかしながら、上記の極端豪雨は WRF を用いて動的にダウンスケーリングを行っており、多くのシナリオを 100 年規模で計算するためには、計算負荷が極めて高く、長い計算時間を要する。よって、以下では統計的ダウンスケーリングを行い、複数シナリオを長期間にわたり検討している。24 通り(8 GCM, 3 RCP シナリオ)の将来 100 年間の計算の結果を図 4.2.5 に示す。気候変動のみの影響で、2050 年期、2100 年期において 77%、99%ほどの年期待被害額が上昇することが示された。なお、本報告書で示す被害額は全て年期待洪水被害額である。次に、土地利用の変化と地盤沈下を加えたシナリオを加えると、2050 年期と 2100 年期ともに 360%以上も被害額が増加することが示された。つまり、気候変動よりも地盤沈下・土地利用変化による被害額の増加が深刻である。

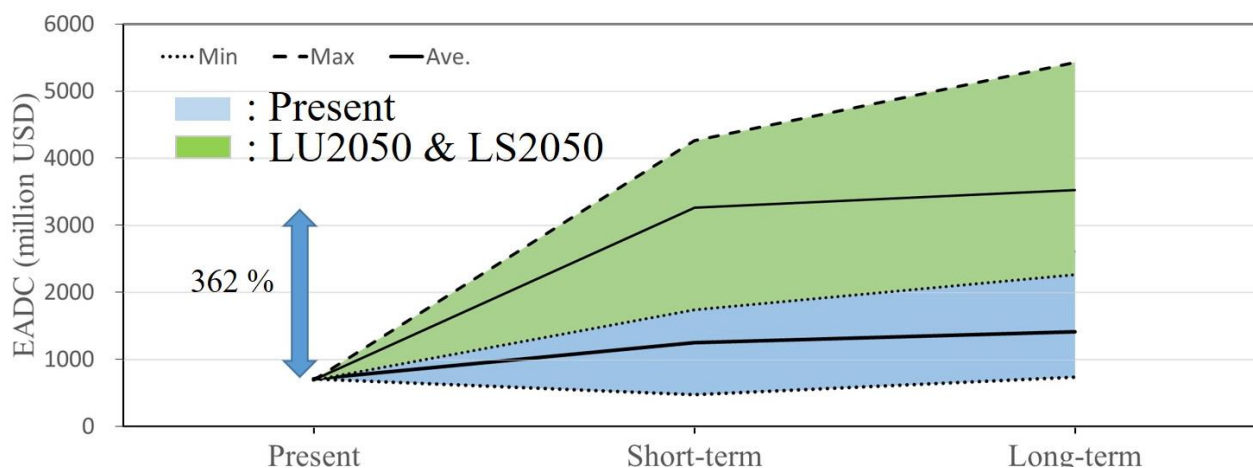


図 4.2.5 現在および将来の洪水被害額の変化

### (3) 適応策の検討と費用対効果

上記した5つの適応策（グリーンインフラ(GI)、ガルーダプロジェクト(GP)、居住制限(RC)、浸透井戸(RW)、遊水地化(RRP))に加えて、浸透井戸(RW)と遊水地(RRP)の組み合わせを加えた、6つの適応策の効果について、現在の気候・土地利用・地盤沈下の状態と、2050年の気候・土地利用・地盤沈下の状態に対する、被害軽減額の割合を算出した。求めた結果のまとめを表4.2.1に示す。もっとも軽減割合の大きい適応策は、遊水地(RRP)と浸透井戸(RW)の組み合わせであり、将来で36%の軽減となる。また、現在気候については居住制限(RC)の軽減率が大きい(33%)が、2050年期では遊水地(RRP)の効果が大きい(31.5%)。一方、グリーンインフラ(GI)の効果は低い(将来で2.6%)。大型プロジェクトとされるガルーダ防潮堤(GP)の効果もそれほど大きくはない(将来で11%)。

表 4.2.1 各種適応策の現在と将来(2050年)の洪水被害軽減率[%]

適応策	洪水被害軽減率 [%]	
	Present	Future (Short-term)
GI 壁面屋上緑化	-2.1	-2.6
RW 浸透井戸	-8.6	-5.6
GP ガルーダプロジェクト	-16.4	-11.1
RRP 遊水池	-31.5	-33.2
RC 住居制限	-33.0	-29.0
RRP + RW	-34.1	-36.0

上記の被害軽減率とは別に、年期待被害軽減額を図4.2.6に示す。最も軽減額が大きいのは浸透井戸(RW)と遊水地(RRP)の組み合わせである。個別適応策をみると、遊水地(RRP)と居住制限(RC)の軽減額が大きい。居住制限(RC)は河道の拡幅部に遊水地機能を持たせるとしており、実質的な洪水氾濫量の減少が最も効くことを示している。一方、グリーンインフラ(GI)や浸透井戸(RW)による被害額の軽減の効果は低い。ガルーダプロジェクト(GP)の軽減被害額も大して大きくはない。

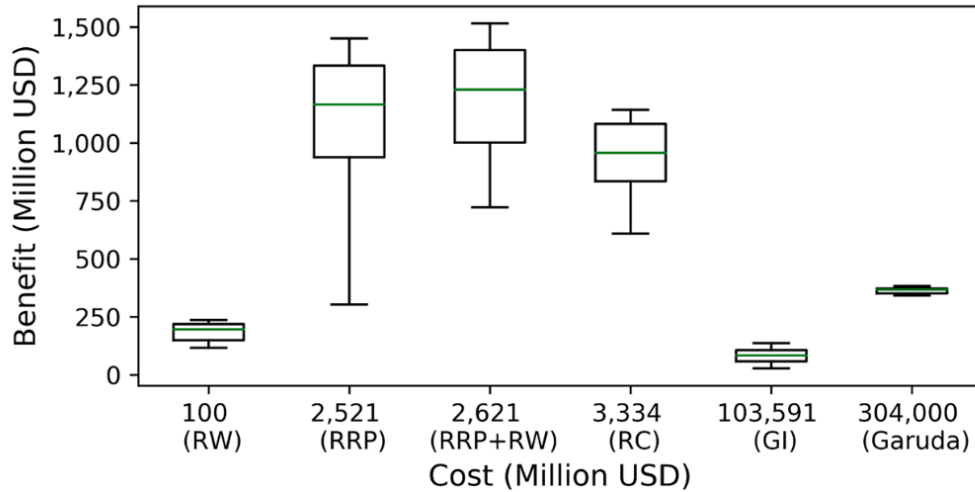


図 4.2.6 各種適応策の費用と年期待被害軽減額の関係

次に、それぞれの適応策の費用を考慮した費用便益比を図 4.2.7 に示す。グリーンインフラ(GI)、浸透井戸(RW)、ガルダプロジェクト(Garuda)、遊水地(RRP)、居住制限(RC)それぞれの費用便益比は、0.004、9.7、0.006、2.3、1.4 となり、浸透井戸の費用対効果をもっとも良いことが明らかになった。ガルダ防潮堤(GP)は費用が膨大であるため、洪水対策のみの便益が低いことが原因であり、防潮堤域に建設されるリゾートや港湾の便益はここでは考慮されていない。また、グリーンインフラ(GI)についても気候緩和機能や景観などの便益は含まれていない。

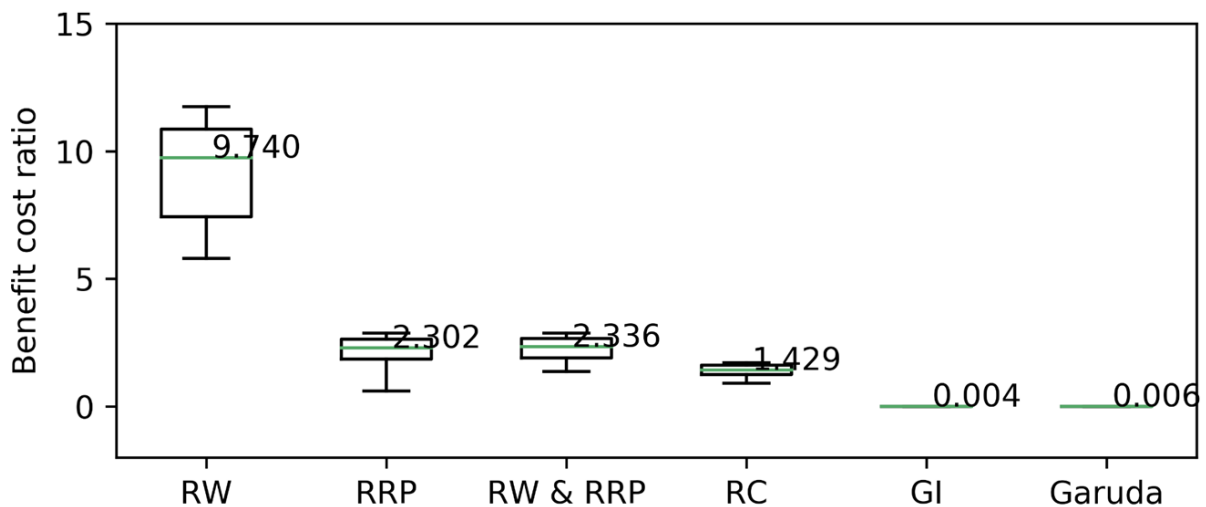


図 4.2.7 各種適応策の費用便益比

一方、他の大型なインフラに対して安価な浸透井戸の設置は大きな費用便益比を示した。浸透井戸は地盤沈下を止める効果もあり、さらに大きな費用便益比が期待できる。

以上、本研究では構築した洪水氾濫モデル、洪水被害額算定手法を用い、将来の地球温暖化、都市の拡張が洪水被害額に与える影響を定量的に評価した。更に6つの適応策を検討することで、どの適応策の費用便益比が高いかなどを評価することができた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、①高時空間解像度の気象予測データに対応した洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の算定手法を開発し、②そのモデルを用いて、将来の地球温暖化および都市の拡張が洪水氾濫に与える影響を予測・評価し、③各種適応策の検討と費用対効果を提示した。以下にそれらで得られた科学的意義を述べる。

①では、精度のよい洪水氾濫モデルおよびジャカルタの実情を反映した洪水被害額の推定手法が開発された。本モデルを適用することで、ジャカルタで毎年のように生じている洪水被害のメカニズムを明らかにすることが出来た。これらのモデルにより、洪水被害額ならびに対策の便益を計算できるなど、洪水に伴う経済損失を抑え効果的な洪水対策を考察するための基礎資料の提供が可能となった。また、グローバル計算との洪水被害額の比較を行うことで、グローバルの計算結果を地域レベルに落として推定する場合は極めて注意が必要であり、特にアジアのメガシティなどでは独自の地域スケールでの計算が必要不可欠であることが示された。本研究で開発された洪水氾濫モデルおよび洪水被害額の推定手法は他のメガシティへの適用が可能な普遍的なものとなっている。

②では、地球温暖化および都市の拡張（土地利用・被覆の変化、地盤沈下、ヒートアイランド）が洪水氾濫および洪水被害額に与える影響を定量的に評価した。開発した高時空間解像度の洪水氾濫モデル、被害額推定手法を用いることで、温暖化および都市拡張の影響が2050年には極めて深刻な状況になることを明らかにした。ジャカルタの洪水氾濫に与える影響では、上流域の土地利用の変化が沿岸部の地盤沈下の影響よりも大きいことや、地球温暖化の影響にヒートアイランドの影響が加わることで更に洪水氾濫が拡大することなどが初めて示されている。

最後の③では、アジアのメガシティであるジャカルタで、グリーンインフラやガルーダプロジェクトを含む複数の適応策について評価を行った。遊水地が最も被害軽減額ならびに軽減率が大きく、費用便益比では浸透井戸の効果が他よりも大変大きな値を持つことを示した。一方、グリーンインフラやガルーダプロジェクトによる洪水被害額の軽減効果は低いことも指摘することが出来た。このように本研究を通じて、ジャカルタで現在考えられている洪水に対する適応策について、不確実性も含めて様々な評価検討を行うことが可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

JICAのジャカルタ地盤沈下プロジェクト（The Project for Promoting Countermeasures Against Land Subsidence in Jakarta）に対して、遊水地や浸透井戸の効果の提供を行い、より実践的な政策立案に介入した。地盤沈下と併せて今後、インドネシアの環境政策として流域市街化の抑制とともに地下水位の上昇を目指すための政策を多く提案した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

JICAだけでなく、途上国のメガシティの洪水対策について、都市計画政策と緩和策、保健政策などを包括的な視点で進める指標を提供した。アジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）へのデータ提供への貢献によって日本の環境、外交プレゼンスが増し、今後、これらを通じて各国の適応策の進展が期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

インドネシア国バンドン工科大学において、本モデルが研究教育に利用されている。モデル計算を有効活用し、インドネシア国環境省、公共事業省との打ち合わせによって適応策の議論を行っている。

特にJICAの地盤沈下プロジェクト（The Project for Promoting Countermeasures Against Land Subsidence in Jakarta）に対しては、遊水地や浸透井戸の効果の提供を行い、より実践的な政策立案と対策をすることとしている。地盤沈下と併せて今後、インドネシアの環境政策として流域市街化の抑制とともに地下水位の上昇を目指すための政策を多く提案し、それらを定量的に評価することが可能になるなど、本研究手法・成果が環境政策提言のために大きなツールとなりえる。

本プロジェクトに貢献したインドネシア留学生のIdham R. Moe博士はインドネシア共和国公共事業および住宅省水資源部に、Nurul J. Fajar博士はプルタミナ大学工学部の教員として、現在もジャカルタ洪水対策プロジェクトに携わっている。JICAの地盤沈下対策プロジェクトにも治水から関わり、開発したモデルシミュレーションを利用している。Fajar博士は2019年度に最終成果とりまとめのために来日するとともに、本プロジェクトのジャカルタ調査に現在も貢献している。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Priyambodoho A.B., S. Kure, I.R. Moe, and S. Kazama, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), Vol.74, No.5, I\_265-I\_271 (2018) “Numerical Experiments of Future Land Use Change for Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 2) N.F. Januriyadi, S. Kazama, Moe I.R., and S. Kure, Hydrological Research Letters, Vol.12, No.3, pp.14-22 (2018) “Evaluation of future flood risk in Asian megacities: a case study of Jakarta”
- 3) Nurul F. Januriyadi, Sotephen G. So Kazama, Idham R. Moe, Shuichi Kure, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Theme 2, 2D, pp.2343-2349(2017) “Estimation of spatial flood damage costs in Jakarta, Indonesia”
- 4) Golam Salem Ahmed Salem, So Kazama, Shawsuddin Shahid, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Theme 6, 6A, pp.4346-4353(2017) “Estimation of direct and indirect impacts of climate change on groundwater level in a groundwater dependent irrigation region”
- 5) I. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Hydrological Research Letters, Vol.11, No.2, pp.99-105 (2017) “Future projection of flood inundation considering land-use changes and land subsidence in Jakarta, Indonesia”
- 6) 菅原雄太, 風間聡, 峠嘉哉, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp. I\_343-I\_348(2018) “リーダー・アメダス解析雨量を用いた豪雨の空間分布特性の分析”
- 7) I. Moe, S. Kure, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 72, 4, I\_1243-I\_1248 (2016a) “Evaluation of Flood Inundation in Jakarta Using Flood Inundation Model Calibrated by Radar Rainfall”
- 8) I. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), 72, 5, I\_247-I\_252 (2016b) “Effect of Land Subsidence on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 9) 秋間将宏, 風間聡, 小森大輔, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, pp.I\_1267-I\_1272(2016) “再現確率にもとづく洪水氾濫・高潮複合災害潜在被害額推定”
- 10) I. Moe, S. Kure, M. Farid, K. Udo, S. Kazama, and S. Koshimura, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environment), 71, 5, I\_29-I\_36 (2015) “Numerical Simulation of Flooding in Jakarta and Evaluation of a Countermeasure to Mitigate Flood Damage”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) I.R. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, S. Kazama, K. Udo and S. Koshimura (2017). “Development of a Rainfall Runoff and Flood Inundation Model for Jakarta, Indonesia, and Its Sensitivity Analysis of Datasets to Flood

Inundation”, ASCE, Proceedings of World Environmental & Water Resources Congress 2018, pp.104-116.

- 2) A. Priyambodho, S. Kure, I. R. Moe, and S. Kazama, 第25回土木学会地球環境シンポジウム講演集, pp.45-49, (2017) “Sensitivity Analysis of DEM resolutions on Flood Inundation Simulations in Jakarta, Indonesia”
- 3) Nurul Fajar Januriyadi, So Kazama, Idham Riyando Moe, Shuichi Kure, “Urban flood damage costs estimation in developing country”, 2A024, pp.1-6, APD-IAHR (2016). Colombo.
- 4) S. KURE, I. MOE, M. FARID, S. KAZAMA, Proceedings of the ICWR 2015 (2015) “Factors Contributing to the Jakarta Flooding and Those Evaluations by a Flood Inundation Model”

### (3) 口頭発表 (学会等)

- 1) B. A. Priyambodoho, S. Kure, N.F. Januriyadi and S. Kazama, 土木学会中部支部2019年度研究発表会, 長野高専, 長野市, 2020. “Climate change impact study for flood inundation in Jakarta, Indonesia based on dynamical downscaling of future scenarios”
- 2) B. A. Priyambodoho and S. Kure, 土木学会中部支部2019年度研究発表会, 長野高専, 長野市, 2020. “Evaluation of GSMaP-NRT for Flood Inundation Modeling in Jakarta, Indonesia”
- 3) B. A. Priyambodoho, S. Kure, N.F. Januriyadi and S. Kazama, 水文・水資源学会2019年度研究発表会, 千葉工業大学, 習志野市, 2019. “Effects of Regional Climate Change on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 4) B. A. Priyambodoho and S. Kure : Evaluation of GSMaP Satellite Rainfall Dataset in Jakarta, Indonesia, 水文・水資源学会2019年度研究発表会, 千葉工業大学, 習志野市, 2019.
- 5) B.A. Priyambodho, S. Kure, I.R. Moe, N.F. Januriyadi, M. Farid and S. Kazama, 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019) Hanoi, Vietnam, 2019. “Regional Climate Change Impacts on Flood Inundation in Jakarta, Indonesia”
- 6) Nurul Fajar Januriyadi, So Kazama, Idham R. Moe, Shuichi Kure, Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, Bandung, Indonesia, 2018. “How will anthropogenic activities change the flood risk in Jakarta megacity?”
- 7) Qing Chang, Yoshiya Touge, So Kazama, The 6th International Symposium on Water Environment Systems --with Perspective of Global Safety, pp.38-40, 仙台, 2018. “The impact of spatial distribution scale on urban hydrological modeling performance and prediction”
- 8) B. A. Priyambodoho, S. Kure and S. Kazama, 水文・水資源学会2018年度研究発表会, 三重大学, 津市, 2018. “Future Projections of Flood Inundation at Ciliwung River Basin in Jakarta, Indonesia”
- 9) B. A. Priyambodoho and S. Kure : Evaluation of GSMaP rainfall for flood inundation simulation in Jakarta, Indonesia, 水文・水資源学会2018年度研究発表会, 三重大学, 津市, 9月12日-14日, 2018.
- 10) B.A. Priyambodoho, S. Kure, and S. Kazama, 15th Annual Meeting AOGS, Honolulu, USA, 2018. “Impacts of land-use/cover change at upstream region on flood inundation in Jakarta, Indonesia”
- 11) B. A. Priyambodoho and S. Kure, 平成30年度土木学会中部支部技術研究発表会, 愛知工業大学, 豊田市, 2019. “Evaluation of a GSMaP NRT data for Flood Inundation Model in Jakarta, Indonesia”
- 12) Nurul Fajar Januriyadi, So Kazama, Daisuke Komori, JSCE Tohoku Branch Conference, Kooriyama, 2018, II-18, “Comparison three interpolation methods for statistical downscaling of GCMs”
- 13) Masafumi Kon, Daisuke Komori, Pimsri Suwannapat, AOGS, Singapore, AS18-D3-PM1-P-014(2017) “Dynamics Evapotranspiration Fluxes Over the Heterogeneous Land Covers”
- 14) Satoshi Anzai, So Kazama, AOGS, Singapore, HS14-D4-AM1-327-005(2017) “Tendencies of High-Risk People on Floods Using Social Media”
- 15) 中口幸太, 小森大輔, 風間聡, 土木学会年次講演会, 福岡, II-015, pp. 29-30 (2017) “内水氾濫頻発区域の地理的・人為的分布特性”
- 16) I. R. Moe, S. Kure, N.F. Januriyadi, K. Udo, S. Kazama, S. Koshimura: 13th Annual Meeting AOGS, Beijing,



2016, HS27-D4-AM1-302B(L3S)-004, p205. “Flood Inundation Characteristic in Jakarta and Its Evaluation Considering Land Use Change and Land Subsidence”

- 17) 呉修一, Idham Riyando Moe, Nurul Fajar Januriyadi, 風間聡: 水文・水資源学会2016年度研究発表会要旨集, 土地利用の変化および地盤沈下がジャカルタ洪水氾濫に与えた影響.
- 18) Kure, S., I. Moe, S. Kazama: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, 2016. “Historical reconstruction of floods in Jakarta, Indonesia considering land use change and land subsidence”
- 19) 中口幸太, 小森大輔, 井上亮, 風間聡, II-111, pp. 221-222, 土木学会年次学術講演会, 仙台, 2016 “仙台. 大都市における内水氾濫頻発区域の分布とその特性—大阪市を対象とした解析—”
- 20) 秋間将宏, 風間聡, 小森大輔, II-124, pp. 247-248, 土木学会年次学術講演会, 仙台, 2016 “洪水氾濫と高潮複合災害の被害額と伊勢湾台風被害額との比較”
- 21) Kure, S., I. Moe, S. Kazama: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, 2016 “Historical reconstruction of floods in Jakarta, Indonesia considering land use change and land subsidence”
- 22) Januriyadi, N., I. Moe, S. Kure and S. Kazama: 土木学会東北支部技術研究発表会, 2016 “Estimation of 2013 Jakarta Flood Damage Costs”
- 23) Idham Moe, S. Kure, M. Farid, S. Kazama, K. Udo, S. Koshimura and A. Mano: AOGS 12th Annual Meeting, APHW02-A021, Singapore, 2015 “Flood Inundation Characteristic in Jakarta City, Indonesia and its Evaluation by Numerical Simulation”

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change, 2018.9.18, Bandung, Indonesia. (80名)

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 豪州 THE CONVERSATION誌にジャカルタの洪水被害とその対策についてFajar博士のインタビューが掲載され、本プロジェクトの成果が引用された。見出し「Jakarta's flood costs will increase by up to 400% by 2050, research shows」(2020年1月11日)  
<https://theconversation.com/jakartas-flood-costs-will-increase-by-up-to-400-by-2050-research-shows-129698>

https://theconversation.com/jakartas-flood-costs-will-increase-by-up-to-400-by-2050-research-shows-129698

Jakarta's flood costs will incr...

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)

MSN Japan - ニュース, 天気, ... 沿革

Editor: Australia - Job Board - Donate

Get newsletter

Become an author Sign up as a reader Sign in

THE CONVERSATION

Academic rigor. Journalistic flair

Search analysis, research, academics...

Arts + Culture Business + Economy Cities Education Environment + Energy Health + Medicine Politics + Society Science + Technology

**Jakarta's flood costs will increase by up to 400% by 2050, research shows**

January 11, 2020 6:54pm AEDT

A resident sits inside a styrofoam box as he wades through a flooded area in Jakarta in early January. [View photo gallery](#)

Indonesia started 2020 with flood waters inundating parts of the capital Jakarta and surrounding areas, killing at least 67 people and displacing 300,000. This is something that Jakarta and other coastal cities may face more frequently in the

Author

**Nurul Fajar Janurlyadi**  
Lecturer of Civil Engineering, Universitas Pertamina

ここにを入力して検索

10:36  
2020/01/15

## (6) その他

特に記載すべき事項はない

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない

## II-3 緩和・適応統合実施による都市健康影響評価と費用便益分析

国立大学法人東京大学

大学院新領域創成科学研究科

井原 智彦

<研究協力者>

学校法人明星学苑明星大学

理工学部

亀卦川 幸浩

国立研究開発法人産業技術総合研究所

環境管理研究部門

高根 雄也

東京電力ホールディングス株式会社

経営技術戦略研究所

山口 和貴

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：58,811千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：11,490千円、平成28年度：11,980千円、平成29年度：11,980千円、平成30年度：11,381千円、令和元年度：11,980千円）

### [要旨]

本研究では、アジアのメガシティの一つであるインドネシア・ジャカルタにおいて、現在および将来の気候変動とヒートアイランド現象による健康影響を評価するため、文献レビュー、統計解析、および疫学調査を実施した。その結果、さまざまある気候変動に伴う健康影響の中で熱ストレス（直接暑熱影響）は障害調整生存年では小さいが、実効的な適応策が存在しないため今後も増大すること、また適応策の設計のためには地域レベルでの評価が必要であることがわかった。さらに疫学調査の結果、現時点で主要な熱ストレス影響である睡眠困難によって1か月あたり14,000年、疲労によって同8,700年の被害が既に発生していることがわかった。

これらの被害を評価するために、数値シミュレーションで使用可能な、ジャカルタにおける各種用と建築物の標準的な仕様を構築した。

そして、都市気象-ビルエネルギー連成モデルCM-BEMによる数値シミュレーション、被害関数を用いた健康影響評価、およびライフサイクルアセスメントを組み合わせることによって、各種の適応策を評価した。インテンシブ屋上緑化・エクステンシブ屋上緑化とも空調エネルギー消費を削減するが導入・維持管理費用が大きい私的には導入しにくい一方、高反射率塗料は自律的な導入が期待できた。エアコンは電力使用を通じて気候変動や大気汚染を引き起こすが、それ以上に睡眠困難や疲労の削減効果が大きいため、適応策として位置づけられた。特にインバーターエアコンが推奨された。エアコンは電力料金のため私的には導入しにくい、既存エアコンのインバーターエアコンへの切り替えは自律的な導入が期待された。また、電気自動車やヒートポンプ型給湯機は、緑化可能面積が限られる都心部で有効であり、特に朝夕や夜間の気温を緑化以上に低下するため、適応策としても位置づけられることが示された。

### [キーワード]

都市気候、ライフサイクルアセスメント、緑化、エアコン、電気自動車

### 1. はじめに

都市は21世紀に入り世界の人口の過半が居住するようになった。また都市の気温はヒートアイランド効果を伴うため世界の気温の数倍の速度で上昇している。このことから都市でこそ気候変動がもたらす影響が大きいと予想され、分野としては人間と直接関連する健康分野における影響が重要であると考えられる。一方、世界の都市の仲では、現在も人口が引き続き増大する一方、低緯度に位置し、また都

市の基盤整備が十分ではないアジアのメガシティが重要と考えられる。しかし、アジアのメガシティを始め、都市の特性を考慮した健康影響に対する研究は十分ではなく、また適応策の研究は従来の公衆衛生政策の一環で実施されているものを除くと、ほぼ実施されていない。これらを踏まえると、都市において、適応策の導入効果を含めて健康影響を評価し、かつ行政が必要とする適応策の費用便益分析を実施することは、社会的にきわめて意義があり、また環境省が掲げるアジアの環境問題解決に貢献できるものである。

## 2. 研究開発目的

アジアのメガシティであり、中所得国都市の代表例といえるインドネシアのジャカルタを対象とし、ジャカルタにおける都市健康影響評価を実施する。また、各種の緩和策・適応策を評価すべくジャカルタに適応可能な数値シミュレーションを開発する。開発した数値シミュレーションを用いて、緩和策や適応策を実施した場合の都市健康影響評価および緩和策・適応策の費用便益分析を実施する。

具体的には、以下の3項目を実施する。

最初に、ジャカルタにて発生しうる気候変動に伴う健康影響を文献レビューを通じて整理する。その中でも問題と考えられる直接暑熱に伴う死亡（熱ストレスによる死亡）の被害量を既往研究を参照して評価する。また、既往文献には記載されていないが被害が大きいと予想される、死亡に至らない直接暑熱である睡眠困難と疲労の被害を疫学調査を通じて定量化する。

次に、メソ気象モデルと連成可能な都市気象-ビルエネルギー連成シミュレーションモデルを、ジャカルタに適用可能なように、また各種の緩和策・適応策を評価できるように、改良する。また、シミュレーションに当たって必要なジャカルタのデータを整備する。

最後に、各種の緩和策・適応策の費用便益分析を評価する枠組みを開発し、枠組みに従って、数値シミュレーションを活用し、評価する。ヒートアイランド対策として注目される屋上緑化および高反射率塗料を対象とする。気候変動や大気汚染の原因となり得るが健康影響を直接削減できるエアコンも評価する。また、都市に適用しやすい観点から電気自動車およびヒートポンプ型給湯機も評価する。

## 3. 研究開発方法

### (1) ジャカルタの都市健康影響評価

#### a 気候変動に伴うさまざまな健康影響の整理

世界保健機関(World Health Organization, WHO)の報告書“Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death”では、気候変動に伴う健康リスクとして、熱ストレスによる死亡、沿岸部の洪水に関する死亡、下痢症、マラリア、デング熱、低栄養の6疾病を挙げている。しかし、ライフサイクルアセスメントの観点からは人間健康の被害量は障害調整生存年(disability-adjusted life year, DALY)で評価する。そこで、WHOの死亡数をレビューし、各種の文献から1死亡あたりのDALYを取得することによって、被害量をDALYで示した。合わせて、インドネシアやジャカルタにおけるこれらの疾病に関する資料を整理し、詳細な評価が可能かどうかを判断した。

#### b 熱ストレスによる死亡の影響評価

熱ストレスの代表格である熱中症の被害は、DALYで評価すると、死亡が非死亡を圧倒する。そのため死亡のみの評価で社会的な被害量は評価可能である。熱中症に関しては、日最高気温の84パーセントイル値（至適気温）の日に死亡率が最も低くなることが世界各地で見られる、とした本田・高橋(2009)の研究に基づき、ジャカルタと東京の至適気温の違いを考慮して、東京の関数を水平移動させることによって、ジャカルタの関数を開発した。気温データはOGIMETより取得した。

一方、気候変動の被害評価の多くは全球スケールで実施されてきた。このため、全球の影響が評価できる一方、解像度は粗く、都市特有の効果（気象や人口など）が含まれない。健康被害は人口が多い

ところで発生するにもかかわらず、世界の過半数の人々が居住している都市の効果を無視してしまうと、影響を過小に評価しかねない。そこで、世界保健機関(WHO)が0.5度単位で実施した被害評価のうちジャカルタを含む格子を抜き出し、それと本テーマが0.5分単位で実施している被害評価を比較した。対象カテゴリーポイントは両者が対等に比較できる暑熱ストレス（暑熱時のすべての死亡。日本の場合、熱中症は暑熱ストレスのうちの1割程度）とした。地域スケールで必要となる人口密度には、サブテーマ(1)がLandscanのデータを加工して整備したデータを利用した。

### c 睡眠困難および疲労の影響評価

ジャカルタの暑熱影響を把握するために、ジャカルタで疫学調査を、2016年2月（雨季）および10-11月（乾季）のそれぞれ連続3週間の火・水・木曜日に実施した。対象者は、ジャカルタに居住する20歳以上の男女であり、性別・年代・社会階級の各構成が均等になるように抽出した。サンプル数は約250人とした。日本と異なり、インターネットにアクセスできない居住者が多いため、訪問留め置きにて調査を実施した。調査項目としては、対象者の属性（性別・年代など）を質問したほか、暑熱に伴う軽度健康影響を計測するため、睡眠と疲労に関する自記式質問を盛り込んだ。睡眠困難は住居や空調に大きく依存するため、住居や空調に関する質問も含めて、東京と同様の疫学調査を、ジャカルタ在住の約200名を対象に3週間かけて実施した。室内の温湿度は貸し出した温湿度計で計測した。質問票（インドネシア語）の一部を図3.3.1に示す。

睡眠に関しては、睡眠疫学の分野でよく用いられ、過去1か月の睡眠の質を問うピッツバーグ睡眠質問票(PSQI)インドネシア語版のほか、ピッツバーグ睡眠質問票に基づいて開発された、前夜の睡眠の質を問う毎日の睡眠を評価するための質問票(SQIDS)をインドネシア語に翻訳したものを用いた。なお、PSQIは各0-3点の7項目から構成され、合計得点（0-21点）が5.5点以上であると睡眠困難と判断される。PSQIと同じ項目から構成されるSQIDSについても、5.5点以上を睡眠困難と判断した。

疲労に関しては、疲労医学の分野でよく用いられ、過去1週間の疲労を問うチャルダの疲労尺度(CF)をインドネシア語に翻訳したものの、また、質問対象を前日1日の疲労に差し替えた毎日のチャルダの疲労尺度(DCF)をインドネシア語に翻訳したものを用いた。なお、CFは各0-3点の14項目から構成され、合計得点（0-42点）が16.5点以上であると疲労と判断される。CFと同じ質問文・項目から構成されるDCFについても、16.5点以上を疲労と判断した。

また、ジャカルタにおける睡眠困難の損失余命分布（障害調整生存年(DALY)にて評価）の年間値を評価した。損失余命分布は、作成した睡眠困難の被害関数、および気温データとしてOGIMETの22時気温、人口密度としてLandscanを用いる。また、DALYを計算するため必要な重篤度は、Fukuda et al (2013)による睡眠困難の重篤度データを参照した。

The figure displays two pages of a questionnaire in Indonesian. The left page is titled '2 Februari (Selasa)' and contains several questions related to sleep quality and fatigue. The right page is also titled '2 Februari (Selasa)' and contains more questions and a table for data entry. The table has columns for 'Lain waktu' (Other time), 'Lain minggu' (Other week), 'Lain hari' (Other day), 'Lain bulan' (Other month), and 'Lain tahun' (Other year). The table rows correspond to the questions on the left page.

図3.3.1 ジャカルタでの疫学調査に用いた質問票の一部

## (2) 都市健康影響評価のための数値シミュレーションの開発

### a ジャカルタにおける建物構造データの整備

都市気象-ビルエネルギー連成モデルCM-BEMの入力条件として建物構造データ（建物構造およびエネルギー使用スケジュール）が必要となる。しかし、ジャカルタを始め、アジアのメガシティでは、標準的なデータが整備されていなかったり、平均的なデータを算出するための統計が整備されていなかったりする状況があった。そこで、実際に、インドネシアで建築を専門とする研究者、ならびに建築コンサルティング会社（バンドン工科大学のDarmanto研究室、およびジャカルタの建築コンサルティング会社であるPT Skemanusa Consultana Teknik、PT Sigmatech Tata Karsa）のエキスパートジャッジにより、建物構造データを構築した。ただし、同時に現地調査および各種の資料のレビューもおこなうことにより、構築する建物構造データをよりもっともらしいものとした。

また、シミュレーションにあたっては、交通排熱データも必要となるため、これも整備した。

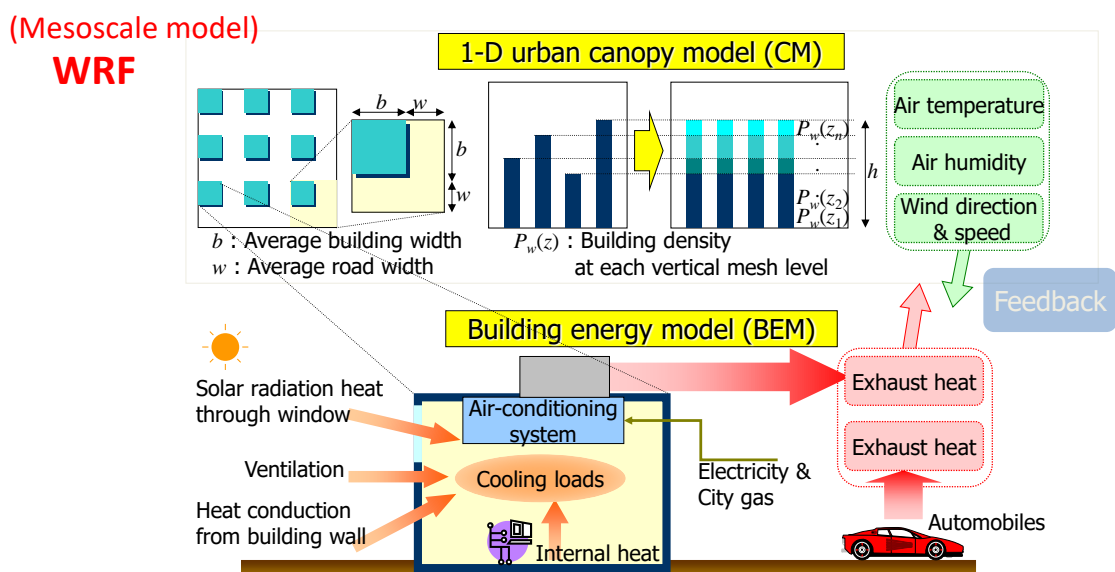


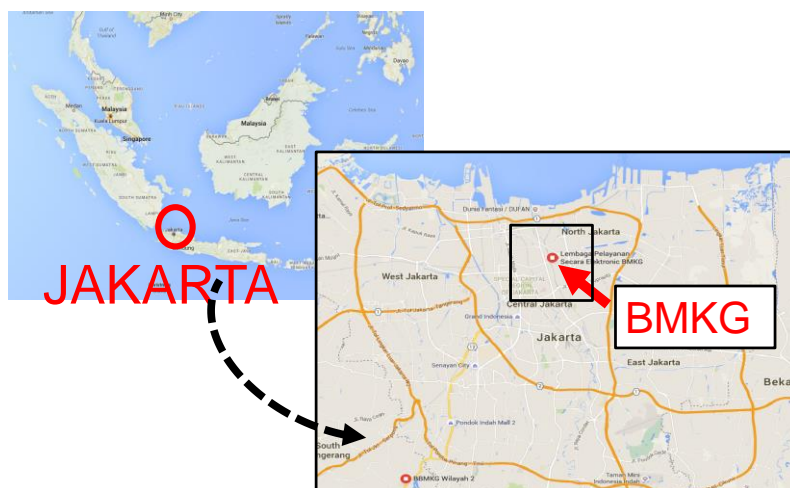
図3.3.2 都市気象-ビルエネルギー連成モデルCM-BEM

## (3) ジャカルタの都市健康に対する適応策の導入効果の評価

### a 屋上緑化および高反射率塗料

ジャカルタ市の事務所街区を対象に、適応策としてのインテンシブ屋上緑化、エクステンシブ屋上緑化、または高反射率塗料の導入効果を評価する。対象街区は、気温を観測しているインドネシア気象気候地球物理町(BMKG)の建物を含む1.2 km×1.2 kmの大きさの街区とした（図3.3.3）。対象期間は、2014年7月30日から2014年8月29日の1か月間とした。

まず、CM-BEMを用い、2014年8月におけるジャカルタの気候・エネルギー消費量を再現した。そして、屋上緑化や高反射率塗料を導入した場合の気候とエネルギー消費量を評価した。入力データとして、サブテーマ(1)およびサブテーマ(3)で整備された都市構造（建物構造、交通排熱）および地域気象条件（WRFの計算結果をCM-BEMの上端境界条件とする）を用いた。



simulated period : from July 30<sup>th</sup> to August 29<sup>th</sup> in 2014.

図3.3.3 屋上緑化・高反射率塗料の評価対象街区

次に、費用便益分析を実施した。社会的には、緑化は気温低下を通じて冷房需要の削減や暑熱ストレスの緩和など、環境面においてさまざまな便益をもたらす。一方、その製造や運用のためにエネルギーを必要としたり暖房需要を増加させたり負の便益ももたらす。同時に、導入にはコストもかかる。ただし、堤防の建設と異なり、建物への屋上緑化や高反射率塗料の導入は私的に実施されることが考えられる。そこで、私的な項目に限定し、40年間にわたる費用便益分析を実施した。具体的には、導入コスト、運用に伴う灌水の上水コスト・揚水動力のエネルギーコスト、および空調（冷房・暖房）のエネルギーコストの変化量を、聞き取り調査や関連文献から評価した。そして、これらのコストを合算し、ライフサイクルコストを評価した。

#### b エアコン

エアコンは暑熱影響への最も代表的な適応策と考えられる。しかし、エアコンを導入すると、室外機からの排熱により気温が上昇し、さらにエアコンが必要となる悪循環が予想される。CM-BEMはキャノピーモデルとビルエネルギーモデルが連成されているため、悪循環を評価できる。

ジャカルタにおけるエアコンの導入効果を評価するべく、まず、2016年2月および10-11月の疫学調査の結果を再解析し、エアコン導入時とエアコン非導入時における睡眠困難と疲労の被害関数を開発した。

次に、サブテーマ(1)による現在気候、RCP 8.5シナリオの2050年代の気候、および緩和策が反映されたRCP 2.6シナリオの2050年代の気候におけるメソ気象モデルWRFを上端境界として、CM-BEMを用い、各シナリオにおける気温と空調エネルギー消費量を計算した。なお、エアコンは外気条件や負荷によって電力消費が変化するが、エアコンの部分負荷特性式として利用可能なのは、山崎ほか(2002)のみであり、インバーター採用機種のパフォーマンスを再現できなかった。そこで、エアコンメーカー各社のカタログをレビューして成績係数(COP)の年別推移を収集するとともに、かつメーカーに部分負荷特性についてヒアリングした。その結果、インバーター機種を含むエアコンのCOPを部分負荷率および外気条件で表現できる式を作成した。エアコン使用率の上昇値は自律的に導入できる水準に設定した（現在では日本を参照した90%、RCP8.5シナリオでは60%、RCP 2.6シナリオでは90%）。

開発した被害関数に基づき、各シナリオにおける睡眠困難罹患数と疲労罹患数をDALYで評価した。

さらに、テーマ1サブテーマ(3)によるエアコンの製造段階の影響評価結果、CM-BEMによる空調エネルギー消費量をLCAソフトウェアMiLCAと影響評価手法LIME2を用いて環境影響に評価した結果、および睡眠困難・疲労のDALY値を、影響評価手法LIME3を用いて金銭換算することで、エアコンの導入の費用便益を考慮した統合評価をおこなった。以上をまとめた評価フローを図3.3.4に示す。

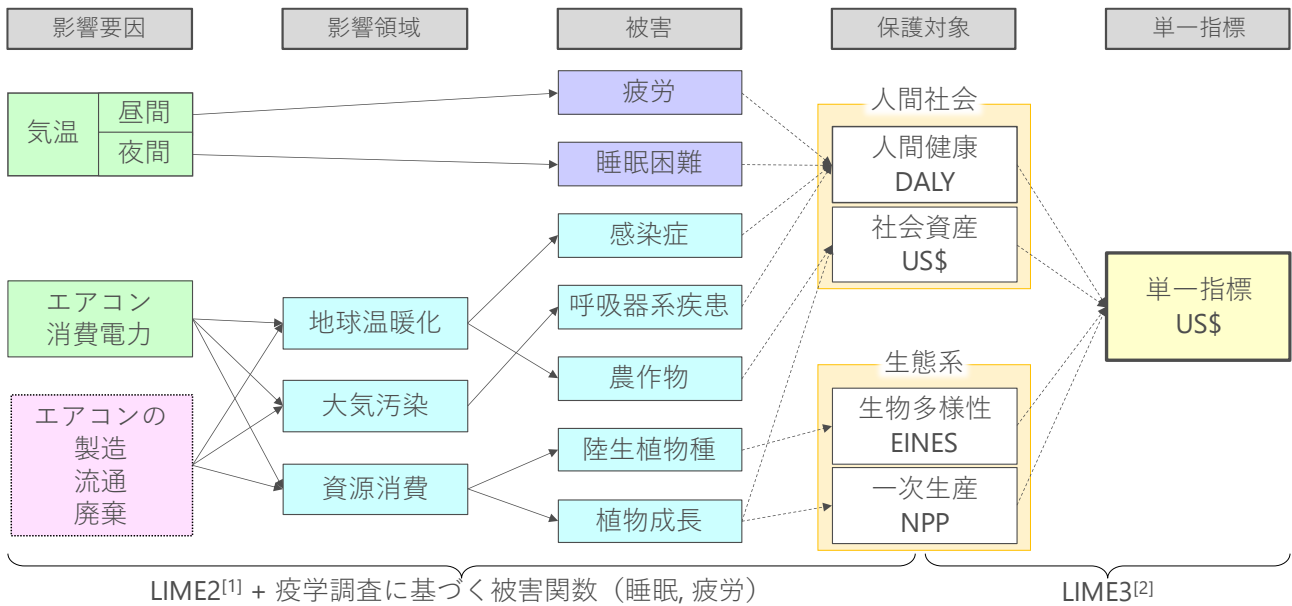


図3.3.4 影響評価フロー

エアコンは私的財であり、便益を享受するのが導入者自らに限定されるため、公共財のような費用便益分析は実施できない。しかし、社会における健康影響を改善することは社会にとっても便益につながる。そこで、政府の立場からエアコンの導入に対しいくらまでならば補助しても、社会的便益が政府支出を上回るかを評価することで、費用便益分析とした。評価シナリオとしては、使用率の向上（未導入世帯へのエアコン導入）と高効率化（導入世帯における高効率エアコンへの買い換え）の2種類を設定した。また、便益は睡眠困難・疲労、および他の環境影響の増減の金銭換算値の差分（純便益）とし、費用は政府の補助金とした。補助金はエアコン代と使用電気代の合計に対して補助率を乗じて支出されるものとした。

### c 電気自動車およびヒートポンプ型給湯機

電気自動車は、ガソリン自動車に比べて、燃料効率と車両効率を合算した総合効率が向上するため、一般には緩和策と見なされている。しかし、車両効率が80%とガソリン自動車の16%から飛躍的に向上するため、人工排熱を大幅に削減し、適応策としての効果も期待される。そこで、ジャカルタにおける交通排熱の空間分布および時間変動のデータを整備し、気温低下効果を評価した。

また、ヒートポンプ型給湯機は、定格COPが4超に達し、既存の給湯器に比べて高効率であることから、省エネルギー技術であり、一般的には緩和策と見なされている。しかし、大気から吸熱してお湯を作るため、多大な負の人工排熱を発生させ、適応策と視点効果も期待される。そこで、ジャカルタにおける給湯使用量の空間分布やタイムスケジュールのデータを整備し、ヒートポンプ型給湯機が2050年代のジャカルタ都市圏全域に普及した場合を評価した。なお、ジャカルタにおける既存の給湯器は電気温水器である。

## 4. 結果及び考察

### (1) ジャカルタの都市健康影響評価

#### a 気候変動に伴うさまざまな健康影響の整理

LIME2やGlobal Burden of Diseaseなどを参照し、1死亡あたりのDALYを整理した。東南アジアの予測死亡数に、その値を乗算することで、気候変動（SRESシナリオA1b）に伴う2030年・2050年のDALYを



算出した。結果を図4.3.1に示す。死亡数で評価した場合（WHO報告書）、直接暑熱が最も大きく、続いて低栄養、そしてマラリア・デング熱・下痢症はさほど大きくなかった。しかし、DALYで被害量を評価すると、低栄養が圧倒的に大きい。一方、直接暑熱はマラリアより小さい。これは、低栄養のDALY値が106.1年と大きいのに対し、直接暑熱は2年と小さいためである。低栄養のDALYが大きいのは、低栄養が年少者に多く発生し生命を奪うこと、さらに1件の死亡の背後に複数の死亡に至らない症例があると考え、それを見込んだDALY値となっているためである（LIME2の値）。一方、同じくLIME2にある直接暑熱は、もともと心疾患や呼吸器系疾患を患っている人々に発生し、彼らの余命は長くないと考えられているためである。ただし、直接暑熱のDALY値は、主に先進国を対象とした疫学研究から求められているため、途上国では年少者にも多く発生し、DALY値は大きくなると考えられる。また、死亡に至らない症例数を考慮していない。

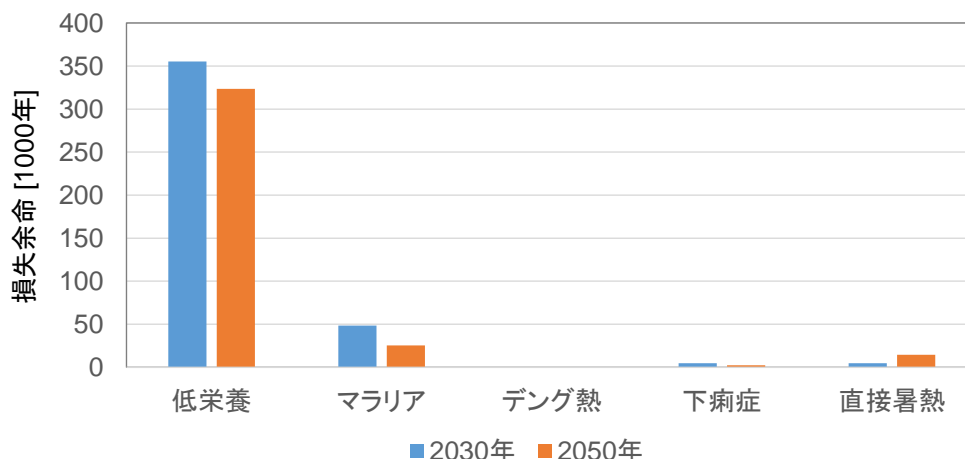


図4.3.1 東南アジアにおける気候変動による総障害調整損失余命(DALY)

図4.3.1を単純に解釈すると、低栄養が重要な疾病に見えるが、上記のDALY値の設定に関する問題、および、直接暑熱影響以外は公衆衛生に大きく依存し、緩和策・適応策が導入されずとも経済発展とともに公衆衛生が改善されれば減少が見込まれるため（実際、いずれも2050年の方が2030年より値が小さい）、本サブテーマでは、直接暑熱影響に着目する。

他方、より詳細な統計が存在する個別疾病も存在した。たとえばマラリアである。WHOのWorld Malaria Report 2014によると、インドネシアでは毎年数百人程度の死者が発生している。しかし、隔年の数値に大きな変動が見られ、数値そのものの信憑性が高くないこと、また都市部のジャカルタの公衆衛生を踏まえるとマラリアの発生は見込まれにくいことから、詳細な解析は実施しないこととした。

#### b 熱ストレスによる死亡の影響評価

死亡率を縦軸として、被害関数を開発した。開発した被害関数を以下に示す。OTの違いが暑熱障害に影響すると考えると、東京に比べてジャカルタは熱中症になりやすいといえる。

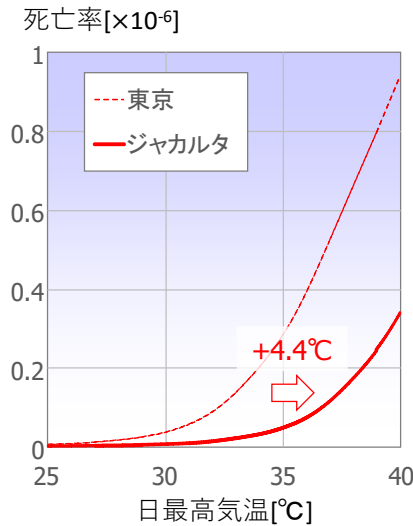
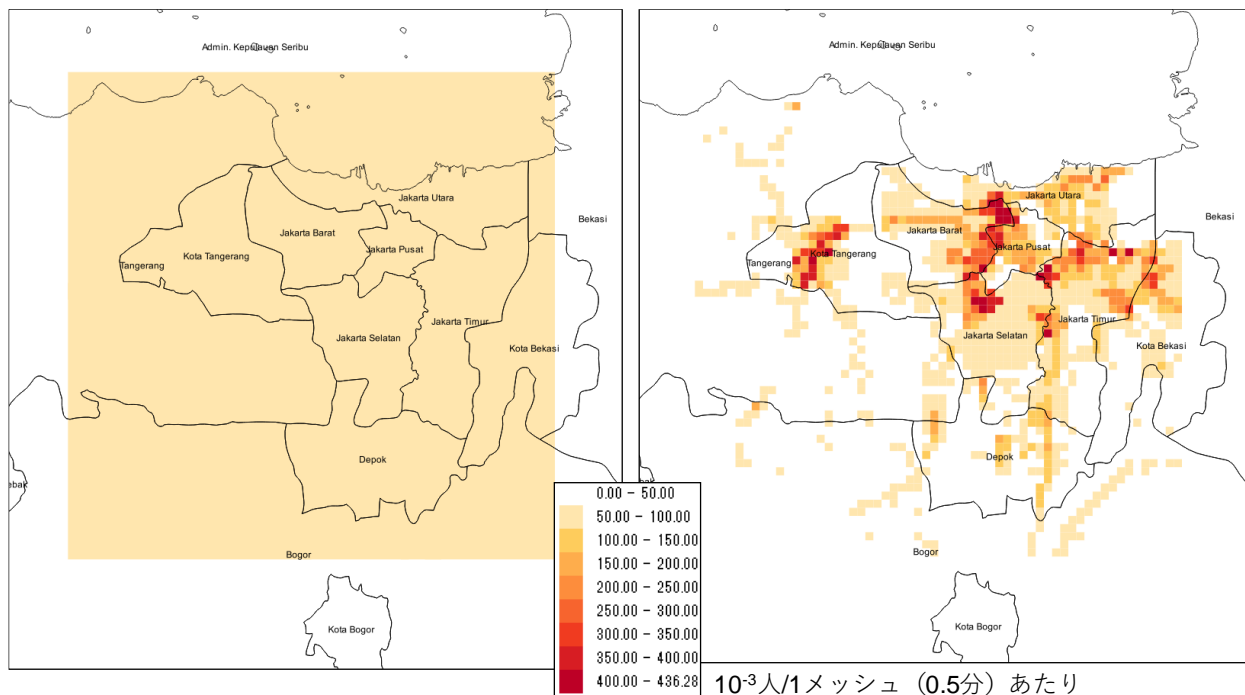


図4.3.2 熱中症の被害関数

熱ストレス死亡に関する全球スケールの結果と地域スケールの結果を並べて示す。全球スケールの結果は0.5度単位であるが、その格子は、ジャカルタ市どころかジャカルタ都市圏よりもさらに大きくなっていることがわかる。そのため、都心も郊外も同じだけの被害が発生している。一方で、地域スケールの結果は、人口密度に応じて被害量の濃淡がはっきり出ている。全体の影響を把握するだけであれば全球スケールで評価される概ねの数値で十分であるかもしれないが（ただし都市効果は含まれない）、適応策を立案するにあたっては、具体的にどこで被害が発生しているのかを明確にする必要があり、地域スケールでの評価は、それに叶っていると考えられる。



(a) 全球スケール

(b) 地域スケール

図4.3.3 全球スケールおよび地域スケールでの暑熱ストレス分布

### c 睡眠困難および疲労の影響評価

2016年2月・2016年10-11月の疫学調査の対象者数はそれぞれ263名、264名となった。比較のため、雨季の2月と乾季の10-11月の結果を並べて示す。

まず、就寝時刻を示す。2月においても10月においても22時に就寝する人が最も多い。一般に就寝時

が最も環境温度と目標体温のずれが大きくなるため、その差が睡眠の質を左右すると考えられる。そこで、被害関数を開発する際の説明変数は22時の気温とする。

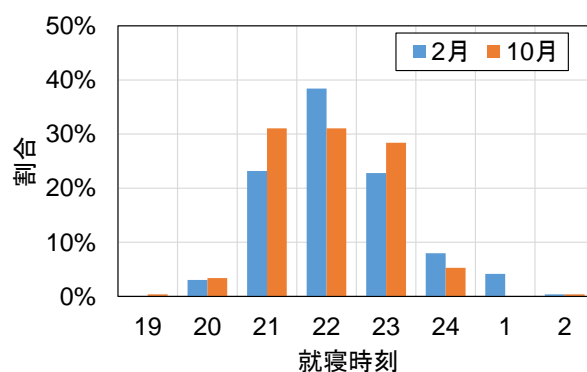


図4.3.4 調査対象者の就寝時刻の度数分布

次に、PSQIの構成要素の平均得点とPSQIから算出される睡眠困難罹患率を示す。調査方式の違いがあるが、東京に比べて格段に睡眠困難罹患率が小さいことがわかる。ここで示す睡眠困難罹患率は気温の上昇に関係なく睡眠困難である人の割合であるため、もともとの睡眠困難罹患率が小さいジャカルタの方が、東京よりも気温の上昇を受けやすい可能性があることがわかった。

表4.3.1 調査対象者のPSQIの構成要素の平均得点と睡眠困難罹患率

	C1 睡眠の質	C2 入眠時間	C3 睡眠時間	C4 睡眠効率	C5 睡眠困難	C6 眠剤の使用	C7 日中覚醒	睡眠困難 罹患率
2016年2月 (初日)	0.65	0.76	0.84	0.00	0.78	0.01	0.30	14.0%
2016年2月 (第3週1日目)	0.65	0.59	0.89	0.00	0.72	0.02	0.31	9.5%
2016年10-11月 (初日)	0.80	0.70	0.80	0.00	1.03	0.02	0.44	6.1%
2016年10-11月 (第3週1日目)	0.77	0.49	0.63	0.00	0.95	0.05	0.42	8.3%
東京 2007年8月 *1	1.28	1.08	1.40	0.19	0.83	0.26	0.90	46.6%

\*1 インターネット調査 (岡野ほか, 2008)

毎日の、疫学調査から得られたSQIDSの睡眠困難罹患率を被説明変数に、OGIMETから取得した22時の気温を説明変数として、3次の平滑化スプライン回帰により、被害関数を求めた。また、疲労に関しても、DCFの睡眠困難率を被説明変数に、OGIMETから取得した日最高気温を説明変数として、3次の平滑化スプライン回帰により、被害関数を求めた。被害関数を以下に示す。なお、いずれもエアコンを使用していない調査対象者を解析対象者とした。

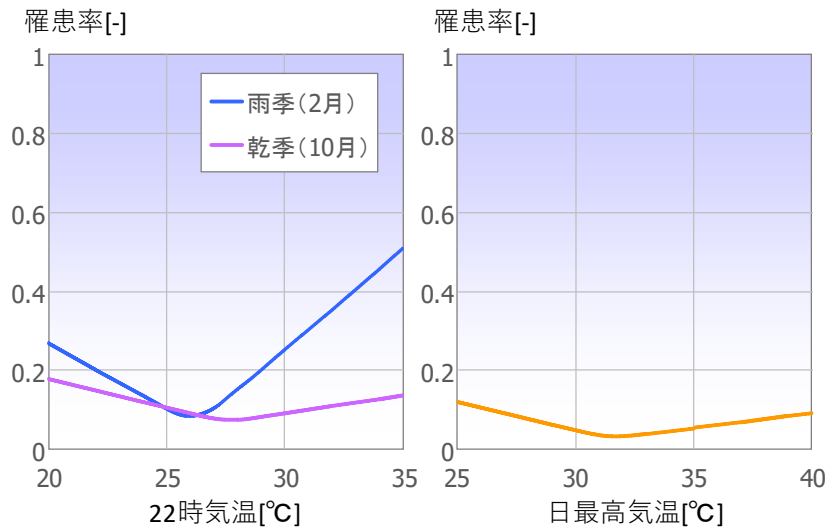


図4.3.5 睡眠困難（左）と疲労（右）の被害関数

上述の被害関数と人口分布に基づいた、現状のジャカルタにおける睡眠困難の損失余命の分布を図4.3.6に示す。損失余命分布は人口密度に大きく依存するため、夜間人口が大きくなる地域で多く発生する一方、昼間人口は大きい夜間人口はそれほどではない都心での発生量は少ない。費用便益分析の観点からは、被害が集中する格子で適応策を導入した方が大きな健康影響改善効果が見られると考えられる。

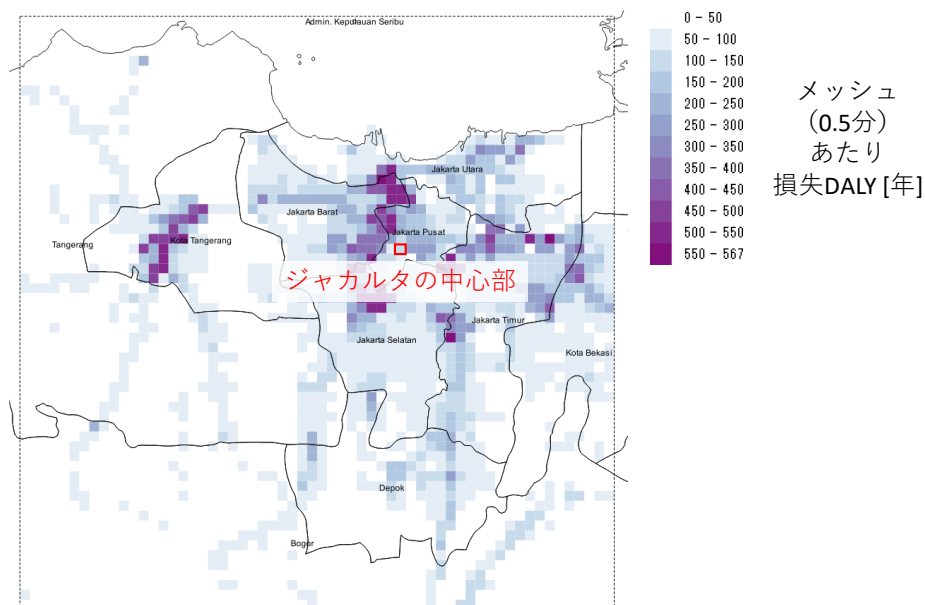


図4.3.6 地域スケールでの睡眠困難に伴う損失余命分布（年間値）

## (2) 都市健康影響評価のための数値シミュレーションの開発

### a ジャカルタにおける建物構造データの整備

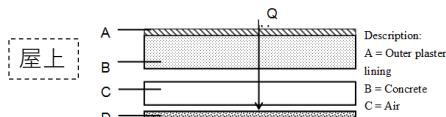
ジャカルタにおける

- 事務所
- 商業施設
- 宿泊施設
- 集合住宅
- 戸建住宅

の5種類の建物を対象に、標準的な建物構造（天井高、窓面積率、壁体構造など）、内部発熱（居住スケジュール、空調スケジュールなど）のデータを整備した。整備したデータは膨大であるため、そのうちの一部を示す。壁体構造が特徴的であり、日本の標準的建物（オフィス用標準問題や住宅用標準問題）と異なり、断熱材が挿入されていないことがわかった。そのため、日本に比べて適応策の導入効果が大きくなる可能性がある。

表4.3.2 ジャカルタにおける各種建物の建物構造・内部発熱

NO	Parameter	Unit	Value						
			Office	Retail	Hotel	Apartment	Housing		
							Average	Slum	
<b>Building structure</b>									
1	Building floor height	m	4.2	5	3.5	3.5	3.5		
	Total floor area per family	m <sup>2</sup>	-	-	-	-	???	???	
	Number of family members	people	-	-	-	-	???	???	
14	Window Area	%	90 (10 for pillars)	50 (50 for walls)	80 (20 for pillars)	50 (50 for brick wall)	30 (70 for walls)		
2	Building wall type (e.g. Wooden, glass, concrete)		Concrete % Glass	Cement mortar % Glass	Cement mortar % Glass	Cement mortar % Glass	Cement mortar % Glass		
12	Material by wall layer (thickness, heat conductivity, volumetric heat capacity)	Sidewall	Concrete : 150 mm (No insulation)	Cement mortar : 25 mm Brick : 100 mm	Cement mortar : 25 mm Brick : 100 mm	Cement mortar : 25 mm Brick : 100 mm	Cement mortar : 25 mm Brick : 100 mm		
		Rooftop	???	???	???	???	Tile : ???		
		Window	Double glass : 26 mm	Single glass : 8 mm	Double glass : 26 mm	Single glass : 8 mm	Single glass : 8 mm		
		(Sidewall) Thermal conductivity	W/mK	1.448	0.807	0.807	0.807	0.807	
		(Sidewall) Density	kg/m <sup>3</sup>	2400	1760	1760	1760	1760	
		(Rooftop) Thermal conductivity	W/mK	???	???	???	???	???	
		(Rooftop) Density	kg/m <sup>3</sup>	???	???	???	???	???	
		(Window) Thermal conductivity	W/mK	1.503	???	???	???	???	
13	Outside wall surface physical property (solar reflectivity & long wave emittance)	Solar absorptance (1 - solar reflectivity)	White color : 30 or 25 Grey color: 88	White color : 30 or 25 Grey color: 88	White color : 30 or 25 Grey color: 88	White color : 30 or 25 Grey color: 88	White color : 30 or 25 Grey color: 88		
		Long wave emittance	???	???	???	???	???		
15	Window physical property (solar transmittance & reflectivity)	Solar transmittance	38	64	38	64	64		
		Solar reflectivity	23	6	23	6	6		
	Ventilation volume		0.15	0.15	???	???	???	15 cubic feet / min /people	
<b>Internal heat</b>									
	People occupancy capacity	people /m <sup>2</sup>	???	???	???	???	-		
10	People occupancy schedule		Midnight - 7 am = 0	Midnight - 8 am = 0	Midnight - 9 am = 70	Midnight - 7 am = 90	Midnight - 6 am = 100		
			7 am - 8 am = 30	8 am - 9 am = 10	9 am - 10 am = 50	7 am - 9 am = 50	6 am - 6 pm = 30		
			8 am - 12 am = 100	9 am - 10 am = 30	10 am - 4 pm = 30	10 am - 4 pm = 30	9 am - 5 pm = 30	6 pm - midnight = 100	
			12 am - 1 pm = 60	10 am - 11 am = 60	4 pm - 5 pm = 50	5 pm - 6 pm = 50			
			1 pm - 5 pm = 100	11 am - 5 pm = 80	5 pm - midnight = 70	6 pm - midnight = 90			
			5 pm - 6 pm = 30	5 pm - 9 pm = 60					
			6 pm - 8 pm = 10	9 pm - 10 pm = 20					
			8 pm - midnight = 0	10 pm - midnight = 0					



Heat transfer scheme for concrete roof

Heat transfer	Material	Depth (m)	k (W/m K)	R (m <sup>2</sup> K/W)
Outside air layer resistance on the exterior roof surface (convection)	High emissivity			0,044
Conduction in roof	Plaster lining	0,01	0,533	0,019
	Concrete	0,2	1,448	0,138
	Air	0,1		0,174
	Gypsum	0,012	0,17	0,071
Inside air layer resistance on the interior gypsum surface (convection)	High emissivity			0,120
R Total (m <sup>2</sup> K/W)				0,566
U (W/m <sup>2</sup> K)				1,768

断熱材なし

図4.3.7 標準的な事務所ビルの壁体構造

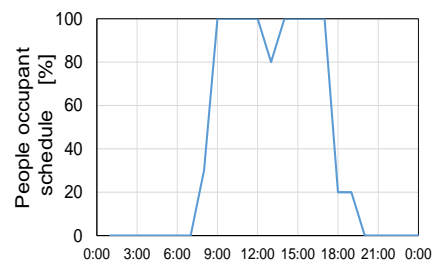


図4.3.8 標準的な事務所ビルの在室スケジュール

(3) ジャカルタの都市健康に対する適応策の導入効果の評価

a 屋上緑化および高反射率塗料

図4.3.9は、評価対象街区の地上1.5 m気温のBMKGにおける観測値（OGIMETより取得）とCM-BEM（WRFの計算結果を上端境界条件として使用）の計算値の比較である。概ね一日の気温変化が再現されていることがわかる。

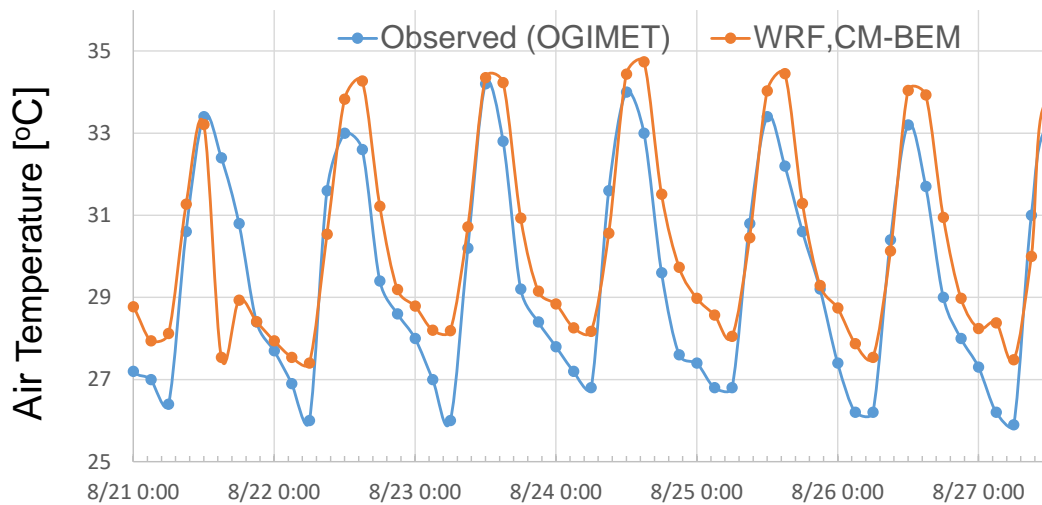


図4.3.9 観測された気温とCM-BEMにより計算された気温の比較

CM-BEM屋上緑化や高反射率塗料を導入した場合の地上1.5 mの気温を図4.3.10に示す。インテンシブ屋上緑化は1日を通して0.05°C以上の気温低下が見込める一方、エクステンシブ屋上緑化による気温低下は見込めなかった。高反射率塗料は夜間の気温低下はないものの、日中はインテンシブ屋上緑化に準ずる気温低下が見込めた。エクステンシブ屋上緑化は植生の蒸発散が見込めないためと考えられる。空調エネルギー消費量の結果を図4.3.11に示す。空調エネルギー消費量についても、インテンシブ屋上緑化・高反射率塗料の導入効果は認められる一方、エクステンシブ屋上緑化の導入効果は小さいことがわかる。

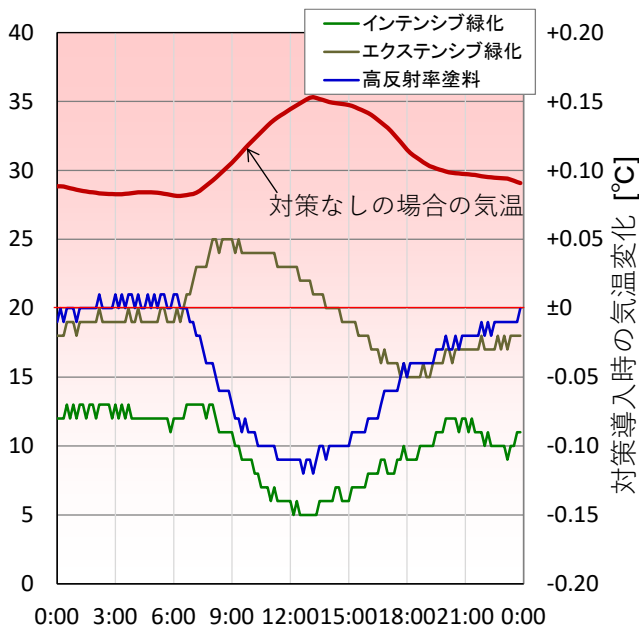


図4.3.10 気温変化（2014年8月24日）

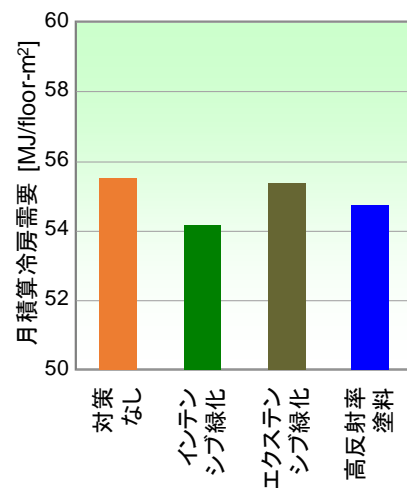


図4.3.11 月積算冷房エネルギー需要の変化（2014年8月）

私的項目（導入者視点のみ）に限定したライフサイクルコスト(LCC)の結果を図4.3.12に示す。屋上緑化は、便益 < 費用となる一方、高反射率塗料は、便益 > 費用となった。これは屋上緑化は携帯にか

かわらず、導入にも運用・維持にも多額の費用を要するためである。高反射率塗料は（相対的に）更新費用の占める割合が大きいが、導入、運用・維持、更新ともに低コストであるため、私的にも便益が正となることがわかった。

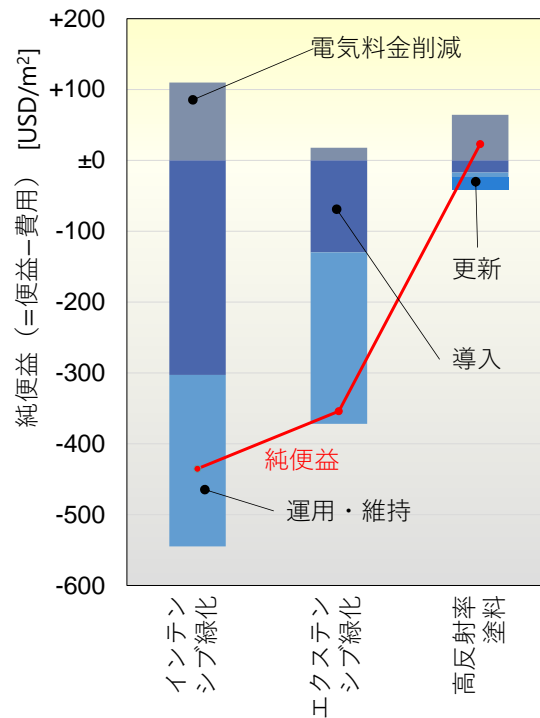


図4.3.12 40年間のライフサイクルコスト（私的項目のみ）

## b エアコン

疫学調査の結果を再解析し、エアコンを使用していないグループとエアコンを使用したグループの22時気温と睡眠困難罹患率の関係を求めた。結果を図4.3.13に示す。エアコンを使用すると、気温が上昇しても、睡眠困難罹患率の上昇が大きく抑制されることがわかる。同様に、エアコン有り無し別の日最高気温と疲労罹患率の関係を図4.3.14に示す。疲労に関してはエアコン導入の効果はやや小さいが、一部の気温区間を除き、エアコンの仕様は疲労を抑制しているという結果が得られた。

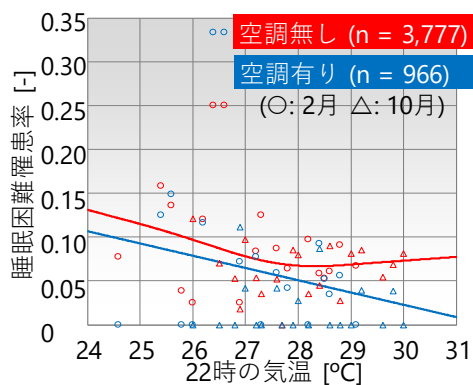


図4.3.13 22時の気温と睡眠困難罹患率の関係

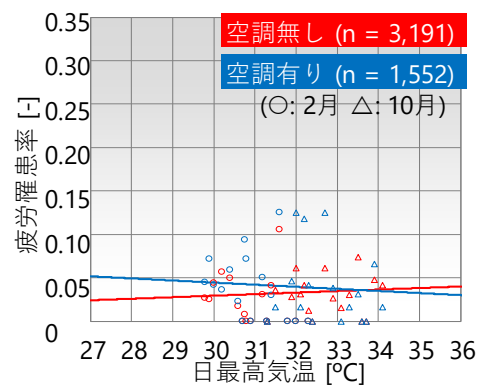


図4.3.14 日最高気温と疲労罹患率の関係

次に、各シナリオのエアコン使用率別の日最高気温の計算結果（8月平均）を図4.3.15に示す。エアコン使用率の上昇に伴い、室外機からの排熱が増大するため、どのシナリオにおいても気温が上昇してしまっている。なお、都心部で気温の上昇（と次項の空調電力消費量の増加）が見られないのは、都心

部は業務街区として計算しており、業務街区においては空調導入率を現時点で100%としているためである。

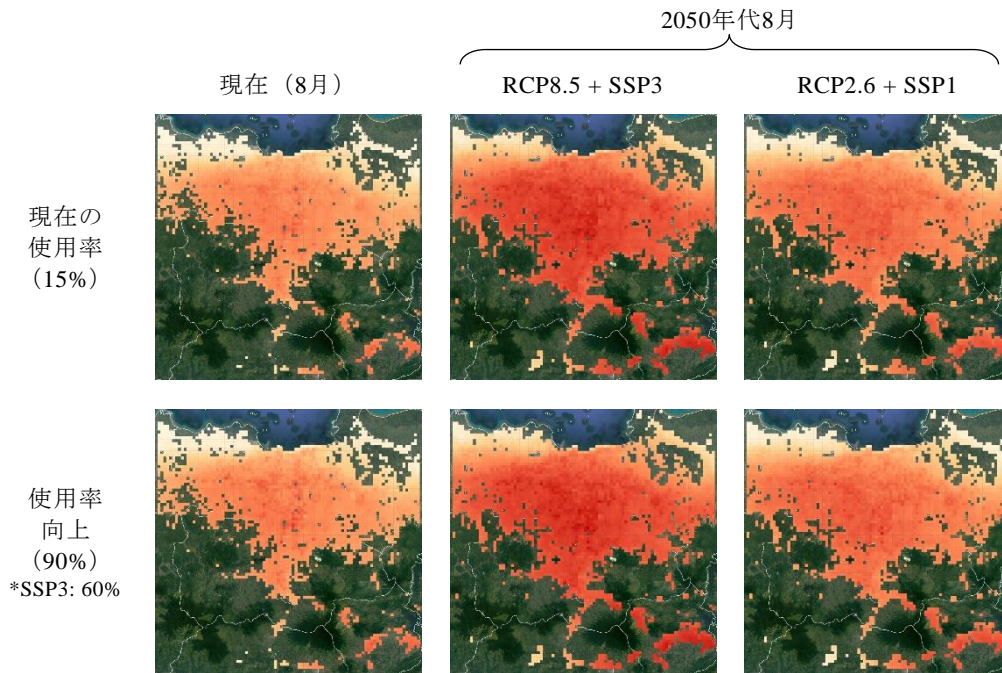


図4.3.15 日最高気温の計算結果

空調電力消費量の計算結果（8月合計値）を図4.3.16に示す。エアコン使用率の上昇に伴い、空調電力消費量は3倍以上に増大することがわかる。また、将来シナリオは気温が高い分、電力消費も顕著となる。

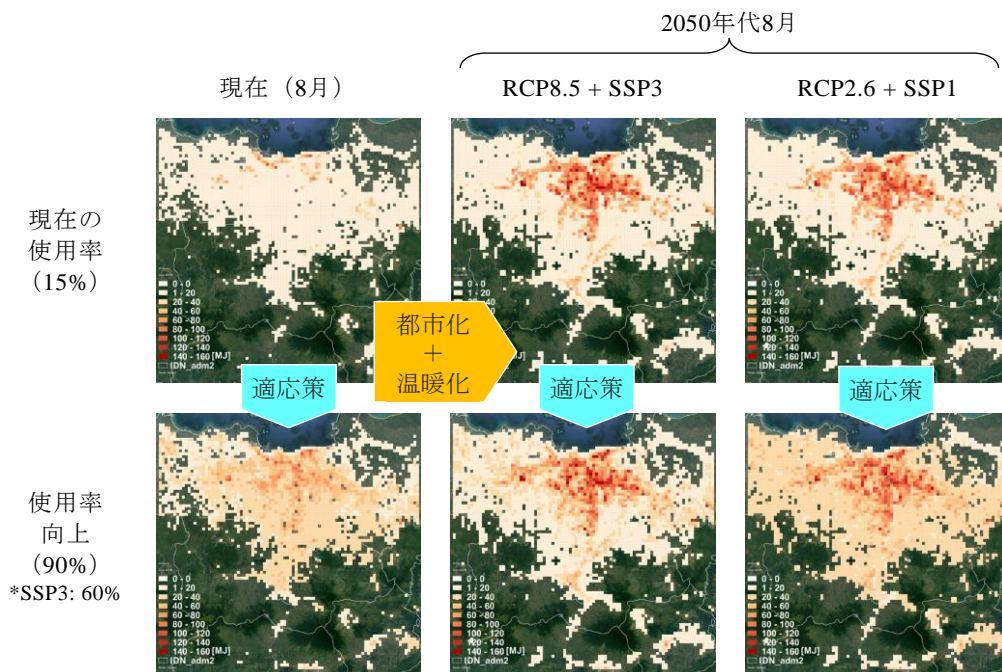


図4.3.16 空調電力消費量の計算結果

一方、エアコンの使用率が向上すると、睡眠困難は削減される。結果を図4.3.17に示す。いずれのシナリオでも4割程度削減された。その効果は大きく、たとえば人口が増加し気温も上昇し2050年のRCP2.6+SSP1の社会でも、エアコン使用率を増加させると、現在の社会よりも、ジャカルタと試験の睡



眠困難に伴う健康影響を削減できることがわかった。疲労（図省略）も削減されたが、ここでは疲労罹患率は昼間の気温（日最高気温）に影響されるとして評価しており、昼間のエアコン使用率の上昇幅は限定的に設定したため（現時点: 4%→現在気候・RCP2.6+SSP1: 23%、RCP8.5+SSP3: 15%）、DALYの削減は最も大きいRCP2.6+SSP1シナリオでも800年にとどまった。

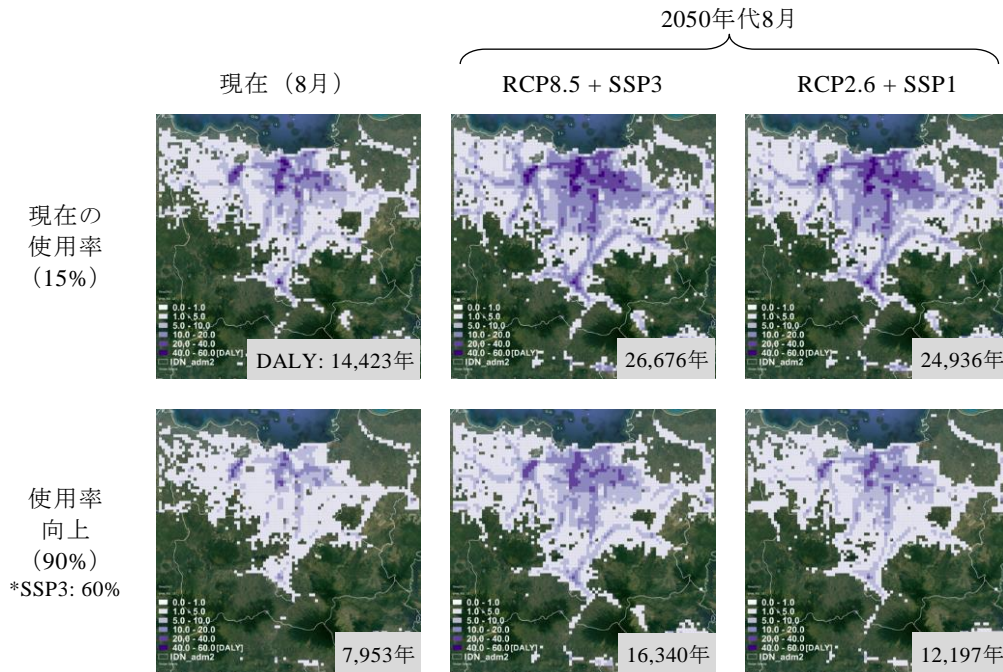


図4.3.17 睡眠困難の計算結果

最後に、統合評価結果を図4.3.18に示す。現在気候・2050年代のRCP8.5+SSP3シナリオ・2050年代のRCP2.6+SSP1のどのシナリオにおいても、被害額の観点からは、睡眠困難・疲労の軽減効果は、電力消費に伴う環境影響を上回ることがわかった。また、日本で一般的であるインバーターエアコンを普及させると、電力消費増はやや抑えられた。一方、エアコン使用率を上昇させた住宅街区に限定し、現在気候シナリオにおいて、エアコン使用率の上昇に伴う悪影響を緩和策で軽減する方法についても検討した（図4.3.18参照）。その結果、エアコン使用率向上による健康被害軽減効果は、製造~使用~廃棄によって発生する環境影響と比べて大きいことがわかった。また、断熱材や屋上緑化よりもインバーター化が悪影響の軽減には効果的であり、インバーター化をおこなった場合、ネットでの被害軽減効果を約1.3倍に拡大できる。

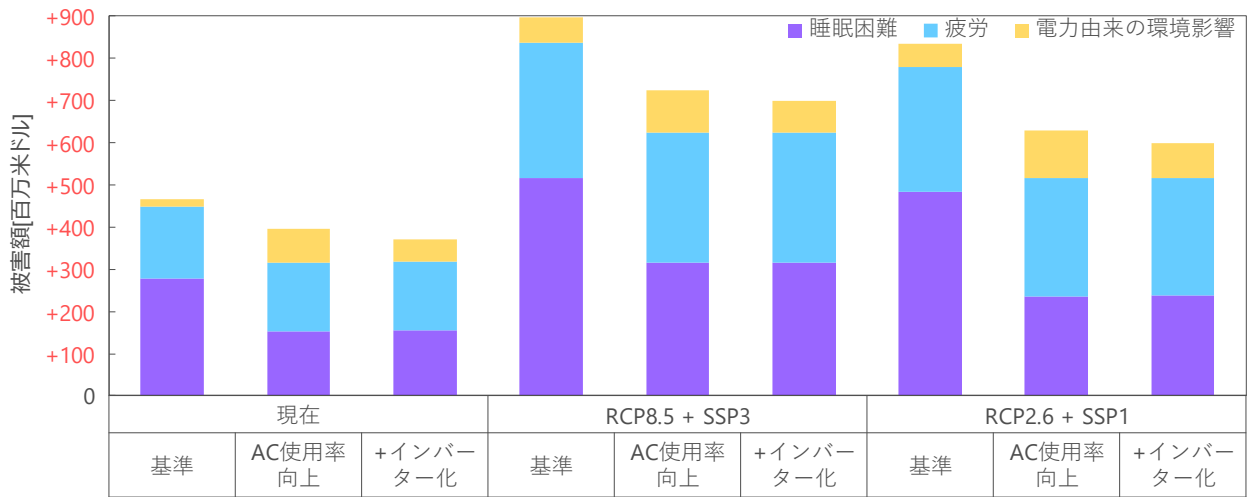


図4.3.18 統合評価結果（睡眠困難、疲労、電力消費のみ）

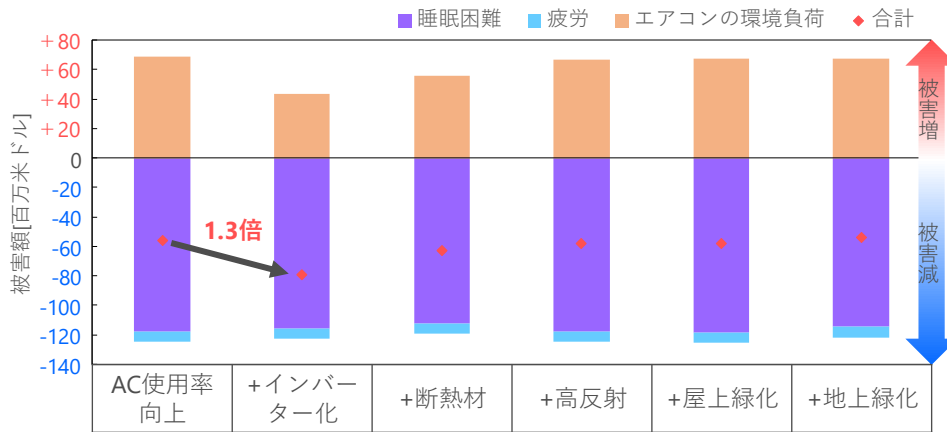


図4.3.18 住宅街区における統合評価結果（現在気候の基準シナリオからの差分値）

政府の適応策としての観点からのエアコンを位置づけて分析した結果を表4.3.3に示す。まず、高効率化（インバーター化+COPの向上）は、私的範囲で健康影響を含まない便益が費用を上回るため、政府が補助金を支出せずとも自立的に導入が進むと評価された。一方、使用率の向上については、私的範囲では便益が費用を下回り、政府の補助金が期待された。しかし、社会的純便益のみに着目して政府が補助率を設定した場合、補助率は最大でも0.021%にとどまることわかった。なお、ここでは健康影響の削減という便益のみではなく環境影響の増大を含んだ純便益を対象とし、補助金もエアコンではなく電気代に対しても設定しているため、直接的な便益や導入しか着目しない費用便益分析と比較すると厳しい設定での結果であることに留意する必要がある。

表4.3.3 エアコン導入補助金の費用便益分析

		被害軽減額 [USD]	1台あたり エアコン 代 [USD]	1台あたり 使用電気 代 [USD]	対象台数	総支出額 [USD]	B/C=1となる 政府の補助率
現在	(1)使用率向上	17,000,000	200	4,320	54,435,448	246,048,223,152	0.007%
	(2)高効率化	3,500,000	600	-1,507	9,072,575	-8,228,825,162	(自立的)
RCP8.5 +SSP3	(1)使用率向上	36,500,000	200	4,473	54,435,448	254,376,846,635	0.014%
	(2)高効率化	3,666,667	600	-1,454	9,072,575	-7,747,978,708	(自立的)
RCP2.6 +SSP1	(1)使用率向上	56,000,000	200	4,626	54,435,448	262,705,470,118	0.021%
	(2)高効率化	3,833,333	600	-1,620	9,072,575	-9,254,026,092	(自立的)

### c 電気自動車およびヒートポンプ型給湯機

電気自動車が2050年代のジャカルタ都市圏全域に普及した場合をCM-BEMで評価したところ、11:00と20:00頃の気温を低下させた。2050年代のRCP8.5+SSP3シナリオにおける14時と20時の月平均低下効果を図4.3.に示す。特に20:00頃のピークは大きく、最大0.95°Cにも達した。電気自動車の気温低下効果は被覆対策の導入面積に限られる都心街区、被覆対策の気温低下効果が望みにくい20時の気温を低下させることから、都市圏の中で、電気自動車は被覆対策と相補的な関係にあることも分かった。

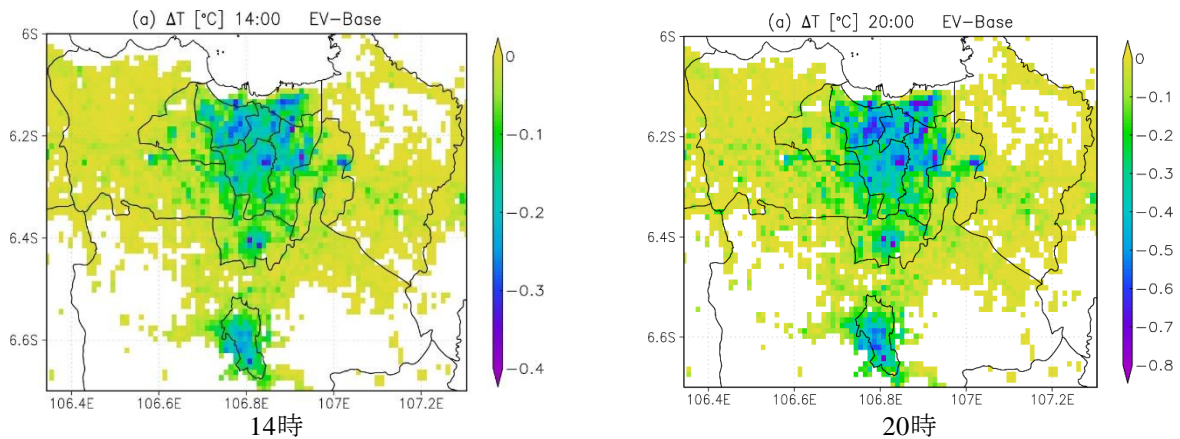


図4.3.19 2050年8月平均の電気自動車による月平均気温低下効果

ヒートポンプ型給湯機の結果を図4.3.に示す。その結果、住宅街区において5:00の気温を著しく低下させ、その低下量は最大1.2°Cにも達した。さらに地上緑化と組み合わせると、地上緑化が大気を安定させるため、双方の線形和以上の効果を発揮することがわかった。

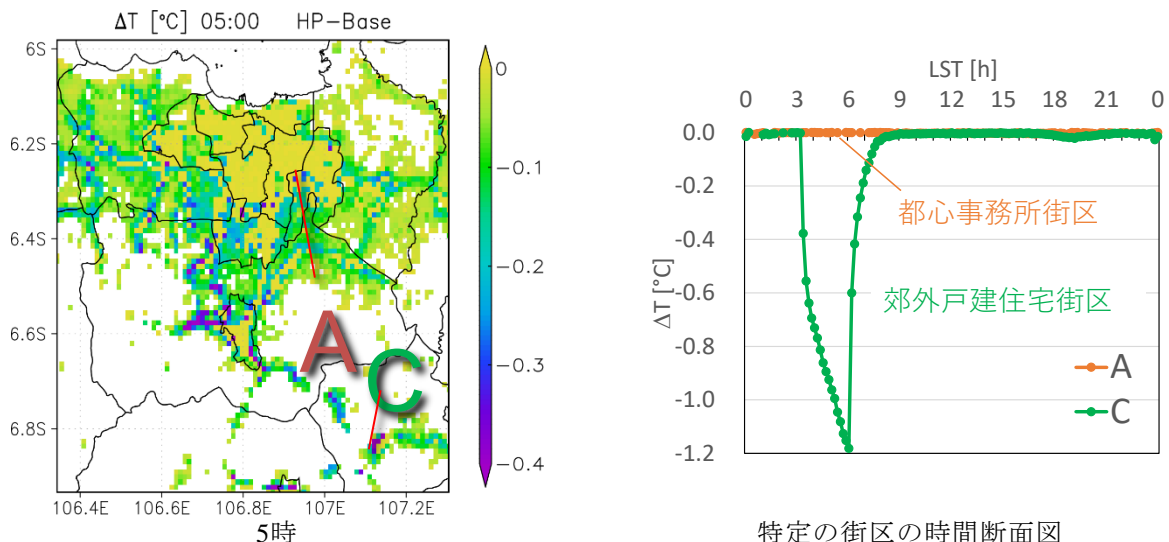


図4.3.20 2050年8月平均のヒートポンプ型給湯機による月平均気温低下効果

被覆対策による気温低下量は限定的で、都市部では導入量も限られるため、エアコン、電気自動車、ヒートポンプ型給湯器といった適応策との併用が重要であることがわかった。これらは都市型適応策と名付けることができる。

## 5. 本研究により得られた成果

## (1) 科学的意義

従来ほぼ検討されていなかった都市健康分野における適応策に関して、本研究は、具体的な適応策の費用便益分析の枠組みを開発し、その中で実際に適応策の評価を実施した。健康分野の研究は従来の公衆衛生上のものを除くとほぼすべてが影響評価の研究にとどまっており、適応策の費用便益分析の手法を示したことは、今後の適応策の設計研究に向けて非常に有意義であると考えられる。都市気候研究とLCA研究を具体的に結びつけた研究も他に例がなく、今後の合理的な適応策設計につながっていくと考えられる。また、都市気候の分野からは、従来、緑化や高反射率塗料といった建築被覆対策が主に評価されてきたが、本研究は、建築被覆対策にとどまらず、エアコンや電気自動車、ヒートポンプ型給湯機といった都市で導入しやすい電化対策を対象としたため、建築被覆対策にとらわれない研究が今後活発になることが期待される。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

従来ほぼ検討されていなかった都市健康分野における適応策に関して、具体的な適応策およびその導入効果と費用便益分析の結果を提供した。本成果は評価対象としたジャカルタのみならずアジアのメガシティ、さらには世界の都市に共通する知見である。アジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）へのデータ提供への貢献によって日本の環境、外交プレゼンスが増し、今後、これらを通じて各国の適応策の進展が期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

ジャカルタにおける都市健康分野の適応策を評価するにあたって、インドネシアのバンドン工科大学のDarmanto准教授と共同研究を実施し、さらに現地の建築コンサルティング会社を巻き込んで、インドネシアにおける標準的な建築物仕様を作成した。また、Darmanto准教授とはさらに連携を拡大し、実際の適応策の導入可能性を探るべく、ジャカルタ都市内の多数の住戸における継続的な屋内熱環境モニタリングに発展している。一方、ジャカルタの知見を他のアジアのメガシティに拡大すべく、インドのインド工科大学デリー校のMohan教授とも共同研究を開始し、デリーにおける地域気象条件や都市基盤データ、さらには建築データなどの作成をおこなっている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Y. Hashimoto, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa, T. Ihara: Sustainable Cities and Society, 45, 38–47 (2019), Sensitivity of electricity consumption to air temperature, air humidity and solar radiation at the city-block scale in Osaka, Japan
- 2) 桑山忠弘, 山口和貴, 岡田和樹, 亀卦川幸浩, 神田学, Alvin Christopher Galangc Varquez, Nisrina Setyo Darmanto, Prihadi Setyo Darmanto, 井原智彦. 日本LCA学会誌, 15, 1, 2–9 (2019), エアコンによる睡眠困難および疲労の障害調整生存年（DALY）の軽減効果 —インドネシア・ジャカルタにおける評価—
- 3) Y. Takane, Y. Kikegawa, M. Hara, T. Ihara, Y. Ohashi, S. A. Adachi, H. Kondo, K. Yamaguchi, N.

Kaneyasu. International Journal of Climatology, 37, S1, 1035–1052 (2017), A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) K. Yamaguchi and T. Ihara. 15–58, (2020)  
“Countermeasures to Urban Heat Island Considering Urban Energy Usage”  
In N. Enteria, H. Awbi, M. Santamouris (ed) “Building in Hot and Humid Regions”
- 2) 井原智彦、山口和貴：化学工学、83, 2, 121–124 (2019)  
「気候変動とヒートアイランド現象に伴う都市の気温上昇、およびその対策」
- 3) 山口和貴：電気評論、654, 44–45 (2018).  
「都市の温暖化適応策としての電化推進」
- 4) 井原智彦：月刊ガバナンス、174, 29–31 (2015)  
「健康分野の適応策」
- 5) 井原智彦：日本ヒートアイランド学会誌、10, 36–37 (2015)  
「人間健康に関するヒートアイランド対策研究の今後の展望」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Lorenz Ray Payonga、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「Application of endpoint modeling in quantifying the impacts of power interruptions on quality of life」
- 2) 姜怡達、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「An estimation of household activity emissions and the potential for emission mitigation through behavior change」
- 3) 周楚韵、井原智彦：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)  
「Implementation of Bike-sharing System in Japan: The case study in Oita City」
- 4) T. Ihara, D. Narumi, S. Fukuda, H. Kondo : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Evaluation of sleep disorder caused by urban heat island based on the Pittsburgh Sleep Quality Index”
- 5) T. Ota, Y. Kikegawa, K. Yamaguchi, M. Kanda, A. C. G. Varquez, T. Ihara : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Evaluation of countermeasures for thermal environment in Delhi by urban canopy-building energy coupled simulation”
- 6) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2019)  
“Urban Climate Adaptation Strategy for Tropical Megacities Utilizing Energy Efficient Technologies”
- 7) S. Karkour, T. Ihara, T. Ota, N. Itsubo : The 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (2019)  
“Life cycle assessment of residential air-conditioners: comparison between India, Indonesia and Japan”
- 8) 方儒玥、山口和貴、玄地裕、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「東京都区部の各街区における鏡面反射・再帰反射を考慮した都市キャノピーモデルを用いた再帰反射フィルムによる屋外熱環境の改善効果及び省エネ効果の評価」
- 9) 大田宇春、亀卦川幸浩、山口和貴、高根雄也、神田学、Alvin Christopher Galangc Varquez、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「都市気象-ビルエネルギー連成シミュレーションによるインド・デリーにおける高温熱環境の

- 再現」
- 10) 張典、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「2050年代のジャカルタにおける性別を考慮した睡眠障害の予測」
  - 11) 梅野凌矢、カーコーセリム、伊坪徳宏、井原智彦：第14回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019)  
「ジャカルタにおける地球温暖化対策の費用便益分析」
  - 12) 劉宇、山口和貴、亀卦川幸浩、村山和義、井原智彦：2018年度日本建築学会関東支部研究発表会 (2019)  
「インテンシブおよびエクステンシブ屋上緑化の熱収支の計測」
  - 13) Selim Karkour、井原智彦、伊坪徳宏：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「Mitigation and Adaptation to Climate Change through Life Cycle Assessment of Air-Conditioners: comparison between Japan and developing countries with consideration of the future environmental impacts」
  - 14) 姜怡達、井原智彦：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「家計支出と生活時間の統計を用いた家庭内の行動に伴うCO<sub>2</sub>排出量の評価」
  - 15) 廣川達也、井原智彦、吉田好邦：第14回日本LCA学会研究発表会 (2019)  
「ジェンダー・福利厚生・賃金など各種労働問題を考慮したS-LCAの実装」
  - 16) 橋本侑樹、榊元慶子、大橋唯太、亀卦川幸浩、井原智彦：第57回日本生気象学会大会 (2018)  
「住宅内熱環境観測に基づく室温による熱中症搬送率の統計的予測」
  - 17) T. Kuwayama, S. Omune, N. Itsubo, K. Yamaguchi, K. Okada, Y. Kikegawa, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto, T. Ihara : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Integrated assessment of the health damage reduction effect and the environmental impact of air conditioner usage”
  - 18) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Evaluation for Heat Island Mitigating Potential of Improving Energy Efficiency in Jakarta”
  - 19) T. IHARA, K. YOSHIDA, Y. YOSHIDA : The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (2018)  
“Impact of knowledge on purchase decision making of fair trade products”
  - 20) 山口和貴、鈴木基、井原智彦、玄地裕、田中稔：平成30年度空気調和・衛生工学会大会  
「東京都のオフィスビルにおける夏季空調使用実態調査」
  - 21) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
“Evaluation for Heat Island Mitigating Potential of Improving Energy Efficiency in Jakarta”
  - 22) T. Ihara, T. Kuwayama, S. Omune, N. Itsubo, K. Yamaguchi, K. Okada, Y. Kikegawa, P. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, M. Kanda : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
“Role of air conditioner as mitigation and adaptation to climate change”
  - 23) T. Ota, Y. Kikegawa, K. Yamaguchi, T. Ihara : Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)  
“Current status of urban heat island and adaptations in Delhi, India”
  - 24) 張典、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「気温変化による睡眠障害への影響の地域別分析 —名古屋とジャカルタのケーススタディ」
  - 25) 大田宇春、亀卦川幸浩、山口和貴、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)

- 「都市キャノピー・ビルエネルギー連成シミュレーションによるデリーにおける高温熱環境の対策技術の評価」
- 26) 長沼康太、福田早苗、鳴海大典、近藤裕昭、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「疲労に関する連続日数の疫学調査における問題点」
- 27) 西本隆、橋本侑樹、山口和貴、亀卦川幸浩、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「都市気象－建物エネルギー連成サブグリッドモデルを用いた東京都の建物種別エネルギー需要予測」
- 28) 小楠智子、関山牧子、橋本侑樹、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「関東地方における熱中症の社会経済要因に関する調査」
- 29) 橋本侑樹、榊元慶子、大橋唯太、井原智彦：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「都市における住宅内熱環境と熱中症リスクの評価」
- 30) 井原智彦、三木勝夫：第13回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2018)  
「高反射率塗料が15年間の研究成果を経て乗用車で実用化される」
- 31) Y. Hashimoto, K. Masumoto, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
“Survey and prediction of summertime indoor temperature and humidity in urban areas, Japan”
- 32) Y. Liu, K. Yamaguchi, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
“Simulated impact of green roofs on cooling energy and daily temperature in Jakarta, Indonesia”
- 33) T. Nishimoto, T. Tashiro, Y. Hashimoto, K. Yamaguchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, T. Ihara : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
“Development and verification of urban canopy - building energy coupled model considered multiple building types”
- 34) K. Yamaguchi, T. Kuwayama, T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Okada, M. Kanda, A. C. G. Varquez, N. S. Darmanto, P. S. Darmanto : The 10th International Conference on Urban Climate (2018)  
“Evaluation for heat island mitigating potential of e-mobility in Jakarta”
- 35) 井原智彦、桑山忠弘、大棟俊、伊坪徳宏、山口和貴、岡田和樹、亀卦川幸浩、Priyadi Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Nisrina Setyo Darmanto、神田学：第37回エネルギー・資源学会研究発表会 (2018)  
「ジャカルタにおけるエアコンの健康被害軽減効果と環境影響の統合評価」
- 36) 山口和貴、桑山忠弘、井原智彦、亀卦川幸浩、岡田和樹、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Priyadi Setyo Darmanto：第37回エネルギー・資源学会研究発表会 (2018)  
「ジャカルタにおける電気自動車普及によるヒートアイランド緩和ポテンシャルの評価」
- 37) 桑山忠弘、伊坪徳宏、大棟俊、亀卦川幸浩、岡田和樹、山口和貴、神田学、Alvin Christopher Galangc Varquez、Nisrina Setyo Darmanto、Priyadi Setyo Darmanto、井原智彦：第13回日本LCA学会研究発表会 (2018)  
「2050年代のジャカルタにおけるエアコンの使用割合向上や高効率化による睡眠困難軽減効果のシナリオ分析」
- 38) 大棟俊、桑山忠弘、井原智彦、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会研究発表会 (2018)  
「家庭用空調機の気候変動緩和策と新興国導入による適応効果の定量分析」
- 39) 岡田和樹、亀卦川幸浩、井原智彦、Alvin C.G. Varquez、稲垣厚至、神田学：日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)  
「ジャカルタを対象としたWRFの都市キャノピースキームに関する比較実験」

- 40) 橋本侑樹、井原智彦、大橋唯太、鍋島美奈子、重田祥範、亀卦川幸浩：日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)  
「熱中症リスク評価指標としての障害調整生存年(DALY)の検討」
- 41) 井原智彦、近藤裕昭：日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)  
「ピッツバーグ睡眠質問票を用いた気温上昇による睡眠悪化の評価」
- 42) Y. Hashimoto, T. Ihara : The 21th International Congress of Biometeorology (2017)  
“Calculating disability-adjusted life years (DALYs) for heat related illnesses due to urban heat island in Japan”
- 43) T. Ihara, R. Kusama : The 21th International Congress of Biometeorology (2017)  
“Estimation of fatigue by air temperature increase and reduction by air conditioners in Jakarta, Indonesia”
- 44) 橋本侑樹、塩野大和、亀卦川幸浩、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「住宅における空調室と非空調室の室内熱環境に関する実測調査 —2016年千葉県・東京都の事例—」
- 45) 西本隆、田代太一、橋本侑樹、徳竹衿也、亀卦川幸浩、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「複数の建物用途を考慮できる都市キャノピー-建物連成モデルの開発と検証」
- 46) 井原智彦、草間蓮：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおけるエアコン導入による疲労軽減効果の評価」
- 47) 小楠智子、橋本侑樹、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「熱中症による搬送の気象的・社会的要因分析」
- 48) 桑山忠弘、前田健太郎、亀卦川幸浩、岡田和樹、山口和貴、高根雄也、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Prihadi Setyo Darmanto、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおけるエアコンの使用率向上による睡眠困難の緩和効果の評価」
- 49) 劉宇、前田健太郎、山口和貴、亀卦川幸浩、岡田和樹、高根雄也、神田学、Nisrina Setyo Darmanto、Alvin Christopher Galangc Varquez、Prihadi Setyo Darmanto、井原智彦：第12回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2017)  
「ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の気温低減および冷房需要削減効果」
- 50) 草間蓮、井原智彦：第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)  
「ジャカルタにおける睡眠困難の実態把握とエアコン導入効果定量化」
- 51) K. Maeda, K. Yamaguchi, N. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, Y. Kikegawa, M. Kanda, T. Ihara : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Cost and benefit of rooftop energy saving technologies - case study in Jakarta –”
- 52) R. Kusama, T. Ihara : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Quantitative evaluation of impact of climate change on human health in Jakarta”
- 53) T. Ihara : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance (2016)  
“Comparison of case studies on cost-benefit analysis of green roof”
- 54) 前田健太郎、山口和貴、亀卦川幸浩、井原智彦：第11回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2016)  
「ジャカルタにおける、屋上緑化の冷房需要削減効果」
- 55) 橋本侑樹、井原智彦、亀卦川幸浩：日射を考慮した壁面緑化導入時の街区電力消費への影響評価。第11回日本ヒートアイランド学会全国大会、広島工業大学 (広島), 8-10 Jul 2016.
- 56) 井原智彦：第11回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2016)  
「緑化のメリットとデメリット」
- 57) Y. Hashimoto, T. Ihara, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa : The 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2016)



“Simulations of summer energy consumption considering insolation by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures in Osaka city, Japan”

58) R. Maeda, K. Yamaguchi, N. S. Darmanto, A. C. G. Varquez, Y. Kikegawa, M. Kanda, T. Ihara : The 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2016)

“Evaluating the effectiveness of countermeasures against urban heat island in Jakarta”

59) T. Ihara, K. Yamaguchi, K. Oka, Y. Ohashi, Y. Kikegawa, Y. Takane, Y. Genchi. The International Science Conference on MAHASRI (2016)

“Cost-benefit analysis of green roof based on life cycle assessment”

60) 草間蓮、井原智彦：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）

「ジャカルタにおける気候変動に伴う健康影響の定量評価」

61) 井原智彦、山口和貴、岡和孝、大橋唯太、亀卦川幸浩、玄地裕：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）

「LCAに基づく屋上緑化の費用便益分析」

62) Y. Hashimoto, T. Ihara, Y. Ohashi, M. Nabeshima, Y. Shigeta, Y. Kikegawa : The 9th International Conference on Urban Climate (2015)

“Sensitivity of electricity consumption to air temperature, air humidity and solar radiation in city-block scale - Based on 2013 Osaka city observation -”

63) T. Ihara, Y. Takane, Y. Genchi : The 9th International Conference on Urban Climate (2015)

“Estimation of DALY loss due to heat stroke and sleep disturbance caused by air temperature rise in Tokyo, Japan”

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1) 環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14 一般公開シンポジウム「都市と気候変動問題」（主催：東京大学生産技術研究所、2016年6月4日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて「都市における温暖化適応策のコストとベネフィット」を講演

2) 環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14 一般公開シンポジウム「気候変動の影響の適応への道筋」（主催：東京大学生産技術研究所、2018年6月9日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて「エアコンは、温暖化対策となりうるのか？ インドネシア・ジャカルタにおけるケーススタディ」を講演

3) 大阪市「気候変動に関するシンポジウム」（主催：大阪市、2018年12月9日、大阪イノベーションハブ、観客約100名）にて「気温上昇と健康リスク」を講演

### (5) マスコミ等への公表・報道等

1) 毎日新聞（2018年6月7日、全国版、24頁、「<地球温暖化>夏の睡眠4割支障 東大准教授『社会的損失』」）

他に、TBSテレビ「ひるおび！」（2018年6月7日）、TBSラジオ「森本毅郎・スタンバイ！」（2018年6月7日）でも紹介。

2) TBSテレビ「あさチャン」（2018年8月6日）の「けさコレ！チェック5：30」コーナーにて、熱帯夜におけるエアコンの有用性を紹介。

### (6) その他

1) 修士課程の桑山忠弘が、2050年代のジャカルタにおけるエアコンの使用割合向上や高効率化による睡眠困難軽減効果のシナリオ分析で、第13回日本LCA学会研究発表会の学生優秀発表賞を受

賞。

- 2) 修士課程の西本隆が、複数用途を考慮した都市キャノピー-ビルエネルギー連成モデルの開発と検証で、The 10th International Conference on Urban ClimateのPoster Best Presentation Awardを受賞。
- 3) 井原智彦が、実社会における高反射率塗料の実用化と評価で、第13回日本ヒートアイランド学会全国大会ベストポスター賞を受賞。

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない

### III. 英文Abstract

#### Case Study on Mitigation and Local Adaptation to Climate Change in an Asian Megacity, Jakarta

Principal Investigator: Manabu KANDA

Institution: Tokyo Institute of Technology  
 2-12-1, Oookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, JAPAN  
 Tel: +81-3-5734-2768 / Fax: +81-3-5734-2768  
 E-mail: kanda.m.aa@m.titech.ac.jp

Cooperated by: Tohoku University, Toyama Prefectural University, The University of Tokyo, Meisei University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, and Tokyo Electric Power Company Holdings

[Abstract]

Keywords: Urban climate, Advanced climate forecasting, Megacity, Retention pond, Green Infrastructure, Life cycle assessment, Air conditioner

Plausible urbanization scenarios are often lacking when assessing climate change impacts and formulating adaptation and mitigations strategies. Here, a framework was developed to assess, mitigate, and adapt to the combined influence of urbanization and climate change to future urban climate, hydrology, and human health at high spatiotemporal scales (1-km, hourly). Using a sophisticated weather model which utilizes detailed distribution of urban morphology and anthropogenic heat emissions, it was found that dry-season air temperatures over Jakarta will increase by up to 1.5° C in 2050s. Densely-populated areas may possibly experience lower wind speeds and air temperature increases of up to 3-4° C. Long-term air temperature trends of 286 urban areas reveal that intensity of urban warming may double that of background climate warming. Because of temperature increase and population growth, elderly heat-related mortality was predicted to drastically increase in the 2050s. Heat stress (sleep difficulty and fatigue), measured in disability-adjusted life years, was also confirmed through epidemiological surveys. Flood risks in terms of expected annual damage costs will also increase in the 2050s because of precipitation changes caused by climate change and urbanization. Climate change alone will increase flood risks by 54%~100%; while including land cover change and land subsidence will lead to an increase of up to 402% in the 2050s. At coastal areas, increasing inundation risks, flash floods, and potential levee damage at coastal areas were also confirmed using an integrated coastal model. To reduce heat stress, mitigation and adaptation strategies were proposed; such as afforestation and alternating configurations of tall and short buildings to promote shading and vertical mixing of air. Additional strategies were also evaluated using an urban weather-building energy coupled model, damage functions, and life-cycle assessment. Green roofing and reflectance paints are effective but are not feasible for Jakarta. Air conditioning reduces heat

stress most effectively but has negative feedback to the environment. For cities where afforestation is difficult, electric vehicles and heat-pump water heaters are recommended. Near the coast, 20-m mangrove plantations may reduce the momentum of water flow during embankment breaches. Inland, retention ponds and recharge wells were found to reduce flood risks by up to 33.8%, while proper land management may alleviate it by 33%. The framework developed in this study may be applicable for other cities. Through a deeper understanding of the effects of urbanization and climate change, better adaptation and mitigation strategies may be formulated for any city.