

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

令和元年度

修士論文

インド・デリーにおける高温暑熱環境の再現と  
対策技術の評価

2020 年 2 月 26 日 提出

指導教員 井原 智彦 准教授

大田 宇春



# 目次

1. 背景 .....	1
1.1 ヒートアイランド .....	1
1.1.1 ヒートアイランドの概要 .....	1
1.2.2 ヒートアイランドの原因と影響 .....	2
1.2.3 ヒートアイランドの対策技術 .....	4
1.2 世界の動向 .....	5
1.2.1 人口増加と都市人口の増加 .....	5
1.2.2 途上国の発展 .....	7
1.2.3 途上国におけるヒートアイランド .....	10
1.3 インド・デリーについて .....	11
1.3.1 インドの概要 .....	11
1.3.2 首都デリーの概要 .....	13
1.3.3 デリーの気候 .....	15
1.4 デリーのヒートアイランド .....	16
1.4.1 デリーのヒートアイランド研究 .....	16
1.4.2 デリーの将来 .....	18
1.5 研究目的 .....	19
2. 研究手法 .....	20
2.1 領域気象モデル .....	20
2.1.2 Weather Research and Forecasting (WRF) .....	20
2.1.2 GIS4WRF .....	21
2.2 都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル (CM-BEM) .....	22
2.2.1 概要 .....	22
2.2.2 入力項目・出力項目 .....	24
3. データの整備 .....	27
3.1 WRF の計算条件 .....	27
3.1.1 計算領域 .....	27
3.1.2 物理パラメータ .....	29
3.1.3 その他の計算条件 .....	30
3.2 CM-BEM の計算条件 .....	31
3.2.1 建物用途別の街区分類 .....	31

3.2.2 水平面の街区形状 .....	36
3.2.3 街区の高度別建物存在割合 .....	38
3.2.4 交通排熱 .....	40
3.2.5 壁体構成・熱物性値 .....	41
3.2.6 スケジュール .....	43
3.2.7 その他の入力パラメータ .....	43
3.3 まとめ .....	44
4. 計算結果 .....	45
4.1 WRF による計算結果の妥当性の検証 .....	45
4.1.1 妥当性の検証に用いた観測データおよび計算条件 .....	45
4.1.2 日射 .....	46
4.1.3 気温 .....	48
4.2 CM-BEM による計算 .....	51
4.2.1 計算条件 .....	51
4.2.2 計算結果 .....	52
4.3 対策技術の評価 .....	54
4.3.1 計算条件 .....	54
4.3.2 ケース 1（屋上面の高反射化）の計算結果 .....	55
4.3.3 ケース 2（断熱材の導入）の計算結果 .....	57
4.3.4 ケース 3（エアコンの普及率増加）の計算結果 .....	59
5. 結論 .....	62
参考文献 .....	64
付録 .....	70
謝辞 .....	73

## 図表目次

図 1-1	2013 年 8 月 11 日 05 時（左図）、15 時（右図）の関東地方の気温分布[2]	1
図 1-2	世界の各都市の平均気温の長期的な変化[3]	1
図 1-3	世界人口の推移[7]	5
図 1-4	都市人口、農村人口と都市人口率の推移（文献[8]を基に作成）	6
図 1-5	1950 年から 2020 年にかけての世界人口の推移（地域別）（文献[7]を基に作成）	7
図 1-6	1950 年から 2020 年にかけての世界人口の推移（途上国・先進国）（文献[7]を基に作成）	8
図 1-7	地域別の GDP 成長率[9]	9
図 1-8	地図上におけるインドの位置	11
図 1-9	インドの人口の推移[7]	12
図 1-10	インドの実質 GDP と GDP 成長率の推移（文献[12][13]を基に作成）	12
図 1-11	デリーの土地利用の変化（(a)1997 年, (b)2000 年, (c)2004 年, (d)2008 年）[15]	14
図 1-12	2017 年のデリーの気温と降水量（文献[22]を基に作成）	15
図 1-13	世界の主要都市の人口の推移（文献[8]を基に作成）	18
図 2-1	GIS4WRF で計算・可視化した 2018 年 7 月のヨーロッパにおける熱波	21
図 2-2	CM-BEM の概説図	23
図 2-3	CM-BEM の入力項目（計算条件、境界条件）	24
図 2-4	CM-BEM の入力項目（BEM での計算に必要なパラメータ）	25
図 3-1	本研究における計算領域	27
図 3-2	本研究における d03	28
図 3-3	CM-BEM における都市のモデル化[48]	31
図 3-4	17 種の LCZ 分類（文献[49]を基に作成）	32
図 3-5	本研究で用いたデリーの LCZ	33
図 3-6	LCZ を参考に分類したデリーの建物用途別の街区分類	35
図 3-7	一次元キャノピーモデルにおける街区内の建物の配列	36
図 3-8	高度別建物存在割合の概念図	38
図 3-9	Google Earth Pro 上で確認できる建物の 3 次元データ数の比較（上図；東京駅周辺, 下図；Sadar Bazar 駅周辺）	39
図 3-10	デリーの値に更新したオフィス街区の一部のスケジュール（平日）	43
図 4-1	観測地点の分布[66]	45
図 4-2	全天日射量の観測値と計算値の比較（観測地点 14）	46
図 4-3	全天日射量の観測値と計算値の比較（観測地点 18）	47
図 4-4	観測気温と WRF 計算気温の平均値の比較（時刻別）	49

図 4-5	観測気温と WRF の計算気温の比較（散布図） .....	50
図 4-6	CM-BEM の計算街区 .....	51
図 4-7	CM-BEM 計算気温と観測気温および WRF 計算気温の比較 .....	53
図 4-8	全街区平均した交通排熱（顕熱）の時刻別データ（文献[23]を基に作成） .....	53
図 4-9	ケース 1（屋上面の高反射化）とケース 0 の気温差 .....	55
図 4-10	ケース 1（屋上面の高反射化）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差の割合 .....	56
図 4-11	事務所系街区における空調エネルギー消費量の日間パターン .....	56
図 4-12	ケース 2（断熱材の導入）とケース 0 の気温差 .....	57
図 4-13	ケース 2（断熱材の導入）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差の割合 .....	58
図 4-14	ケース 2（エアコンの普及率増加）とケース 0 の気温差 .....	60
図 4-15	ケース 2（エアコンの普及率増加）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差の割合 .....	60
図 4-16	戸建て住宅街区の非空調室と空調室の室温の日間パターン .....	61
図 4-17	ケース 4（すべての対策技術の考慮）とケース 0 の気温差 エラー! ブックマークが定義されていません。	
図 4-18	ケース 4（すべての対策技術の考慮）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差の割合 .....	エラー! ブックマークが定義されていません。
表 1-1	ヒートアイランドによる環境影響とそれを捉える指標例[5] .....	3
表 1-2	ヒートアイランドの主な対策技術（文献[4]を基に作成） .....	4
表 1-3	インドの都市人口のラインキング（文献[18][19]を基に作成） .....	13
表 1-4	近年のデリーにおけるヒートアイランドの観測事例 .....	17
表 2-1	CM-BEM の出力項目 .....	26
表 3-1	本研究で用いた WRF の物理パラメータ .....	29
表 3-2	色分けと LCZ の対応 .....	33
表 3-3	本研究における LCZ 分類に基づいた街区分類 .....	34
表 3-4	オフィス街区の建物の壁体構成と熱物性値 .....	41
表 3-5	戸建て住宅街区の建物の壁体構成と熱物性値 .....	42
表 3-6	集合住宅街区の建物の壁体構成と熱物性値 .....	42
表 4-1	本研究での CM-BEM 計算の 計算条件 .....	51
表 4-2	考慮する対策技術の詳細 .....	54

## 1. 背景

### 1.1 ヒートアイランド

#### 1.1.1 ヒートアイランドの概要

ヒートアイランド現象とは、都市の気温が周囲よりも高温になる現象のことを指す[1]。等温線を描いたときに、等温線の形状が地図上の島の等高線のような形状になることからヒートアイランド現象と呼ばれるようになった[1]。図 1-1 に関東地方におけるヒートアイランドの様子を示す。周囲に比べて首都圏の気温が高くなっていることがわかる。また、図 1-2 に世界の都市の気温変化を示す。日本だけの地域限定的な現象ではなく、グローバルに発生が確認されている現象であることがわかる。

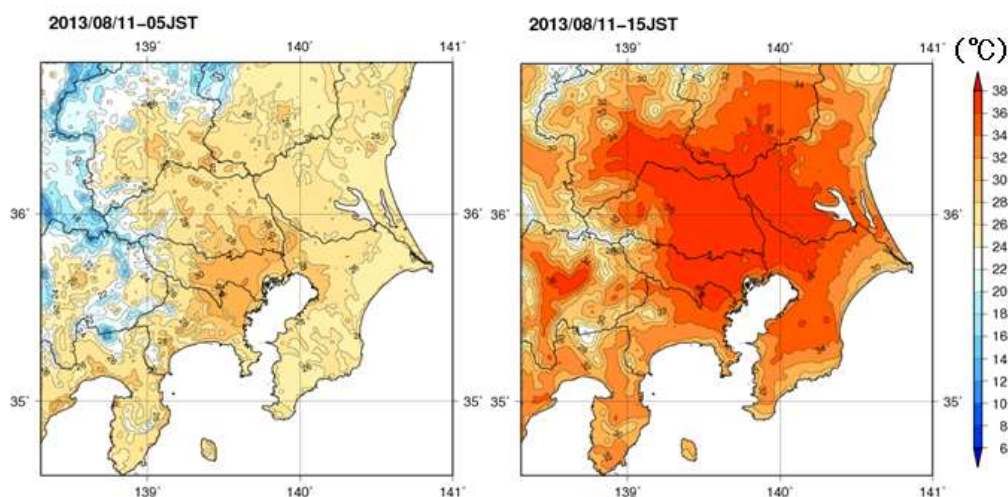


図 1-1 2013 年 8 月 11 日 05 時（左図）、15 時（右図）の関東地方の気温分布[2]

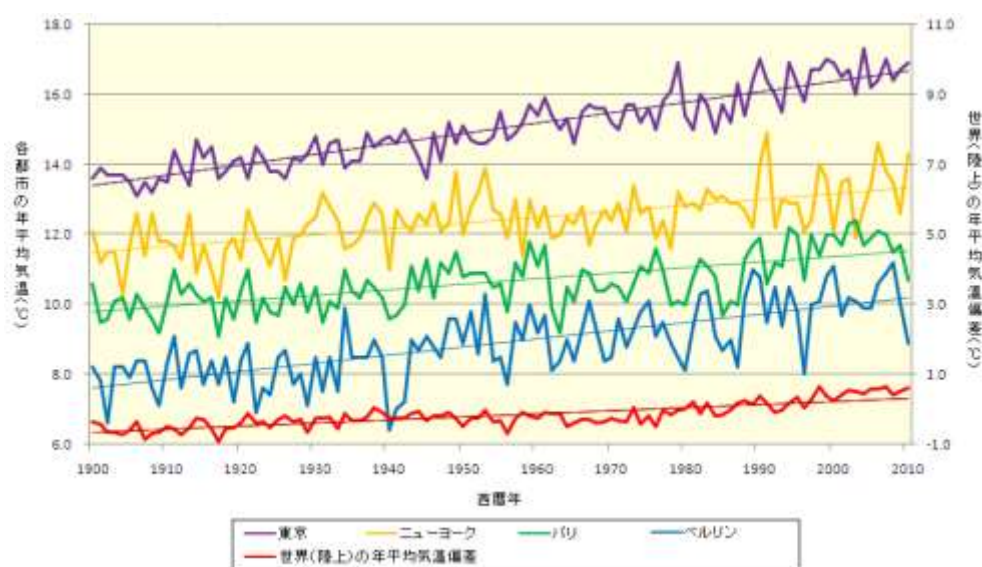


図 1-2 世界の各都市の平均気温の長期的な変化[3]

### 1.2.2 ヒートアイランドの原因と影響

ヒートアイランドの主な原因には、①人工排熱（建物や工場、自動車などの排熱）の増加、②地表面被覆の人工化（緑地の減少とアスファルトやコンクリート面などの拡大）、③都市形態の高密度化（密集した建物による風通しの阻害や天空率の低下）が挙げられる[4]。以下、それぞれの要因について文献[4]に基づいて概説する。

#### ① 人工排熱の増加

空調機器や自動車などから面的に排出される熱や、工場や火力発電所からの排熱の増加がヒートアイランドの大きな要因となる。日本では、かつては工場からの排熱が大きな割合を占めていたが、工場からの排熱は少なくなり、徐々に自動車や建物からの排熱が増加している。

#### ② 地表面被覆の人工化

都市の発展が進み、緑地が減りアスファルトやコンクリートなどの人工被覆が増えることにより地表面の温度が増加する。これには二つの原因がある。一つは、植物の減少によって蒸散作用による潜熱輸送が減るためである。もう一つは、アスファルトやコンクリートは自然の被覆に比べて熱容量が大きいため、昼間に蓄えた熱を夜間に持ち越し放出することで夜間の気温を上昇させるためである。ヒートアイランドは日中よりも夜間に観測されることが多く、地表面被覆の人工化も大きな要因であると言える。

#### ③ 都市形態の高密度化

中高層の建物が密集することで風通しが阻害され、都市内部の熱が拡散されず溜まりやすくなる。また高いビルが密集した地域では天空率（空の見える割合）が低下し、夜間の放射冷却が進まず夜間気温が上昇する。日本の都市部の建物高さはここ 50 年で 2・3 倍に増加しており、都市内部の熱がこもりやすい状況になっている。

ヒートアイランドは熱中症や睡眠障害のリスクの増加、冷房需要の増加、生態系の変化など、人間の健康や生活、都市気象、動植物に対してさまざまな影響を与える[4]が、その多くは悪影響として捉えられている。表 1-1 にヒートアイランドの影響とそれを捉える指標例を示す。表に挙げられる環境影響の中で便益として捉えることができるものはエネルギー消費量の減少のみで、残りの項目はすべて、人間社会にとって悪影響として捉えられる。



表 1-1 ヒートアイランドによる環境影響とそれを捉える指標例[5]

対象		影響指標	現象の指標	指標の適用例
人の健康	熱中症	発生数	最高気温	年齢階層により、発生数が急増する気温に違いがある。(生産年齢層(15~64歳): 35℃、高齢者(65歳以上): 33℃)
			WBGT	WBGT(湿球黒球温度)28℃以上で熱中症発生が急増する。
	循環器系疾患	死亡率	最高気温	33℃以上で高齢者(65歳以上)の心疾患による死亡率が上昇する。
	疲労感	主観的回答	屋内外往来頻度	冷房空間と屋外の往来頻度が多いほど疲労感を生じる。一般的に気温差が5℃以上で体温調節機能に影響をおよぼす。
	睡眠障害	-	室内温度	-
	ウイルス感染	媒介蚊生息域の拡大	年平均気温	ヒトシシカの分布は年々北上しており、その分布は年平均気温11℃以上の地域と類似している。
		媒介蚊の個体群密度の増加	日平均気温	平均気温11℃以上の積算温日数(ヒトシシカの1世代当たりの積算温日数は350℃・日)
生態系	生物相	個体数の変化	(経年変化)	ある一定の地域に生息する生物種の経年変化
	植物の成長	光合成速度	気温・湿度	最適温度(スギの場合25℃)を境にして光合成速度は低下する。
大気汚染	NO <sub>x</sub> 等	汚染濃度の上昇	-	冬季における混合層内、夏季における海風前線の前面で大気汚染濃度が上昇する。
	光化学オキシダント	汚染濃度の上昇	最高気温	都市上空(混合層内)で光化学反応が促進される。
気象	集中豪雨	集中豪雨の頻度	-	都内における積乱雲の発生にヒートアイランド現象が関与している可能性がある。
エネルギー	消費量	消費量の増加	気温・最高気温	電力消費量の増加
		消費量の減少	気温・最低気温	電力消費量、灯油消費量、ガス消費量の減少

### 1.2.3 ヒートアイランドの対策技術

表 1-2 に主要なヒートアイランド対策技術をまとめる。ヒートアイランド対策技術には緩和策と適応策の二種類が存在する。緩和策は、排熱や日射による熱を削減してヒートアイランドの原因を取り除き、ヒートアイランドの発生を抑制する対策である。一方適応策は、ヒートアイランドによって生じる影響の被害を抑制する対策である。ここで興味深いのが、例えばエアコンの使用は適応策として挙げられるが、エアコンの使用によって排出される排熱はヒートアイランドの原因となるため、緩和策の観点からは逆効果になってしまいう可能性があることである。そのためどちらか一方を重要視するのではなく、緩和と適応の二つの観点をもって対策を導入することが望まれる。

また対策技術を導入する際には、金銭面や技術面を考慮した評価や、夏季だけでなく通年の評価をおこなうことが望まれる。例えば文献[6]では、通年で気温を低下させるヒートアイランド対策は寒冷ストレスの被害を発生させるため、夏季以外の気温低下を招く対策は有効ではないと結論づけている。

表 1-2 ヒートアイランドの主な対策技術（文献[4]を基に作成）

	手法
緩和策	自動車・エアコンの高効率化 地表面緑化・壁面緑化・屋上緑化 屋上面の高反射化
適応策	エアコンの使用 打ち水・ミスト 日除けの導入 帽子・日傘の使用、クールビズの導入

## 1.2 世界の動向

### 1.2.1 人口増加と都市人口の増加

図 1-3 に世界の人口の推移を示す。1950 年から世界人口は急速に増え続け、2050 年頃には 100 億人を超す見込みとなっている。これは 1950 年と比較して約 3 倍に成長することになる。また図 1-4 に、1950 年から 2050 年における都市人口、農村人口および都市人口率の推移を示す。人口増加と同時に都市への人口集中が進み、1950 年には 29%だった都市人口率が 2050 年には 68%にまで増加する見通しがなされている。

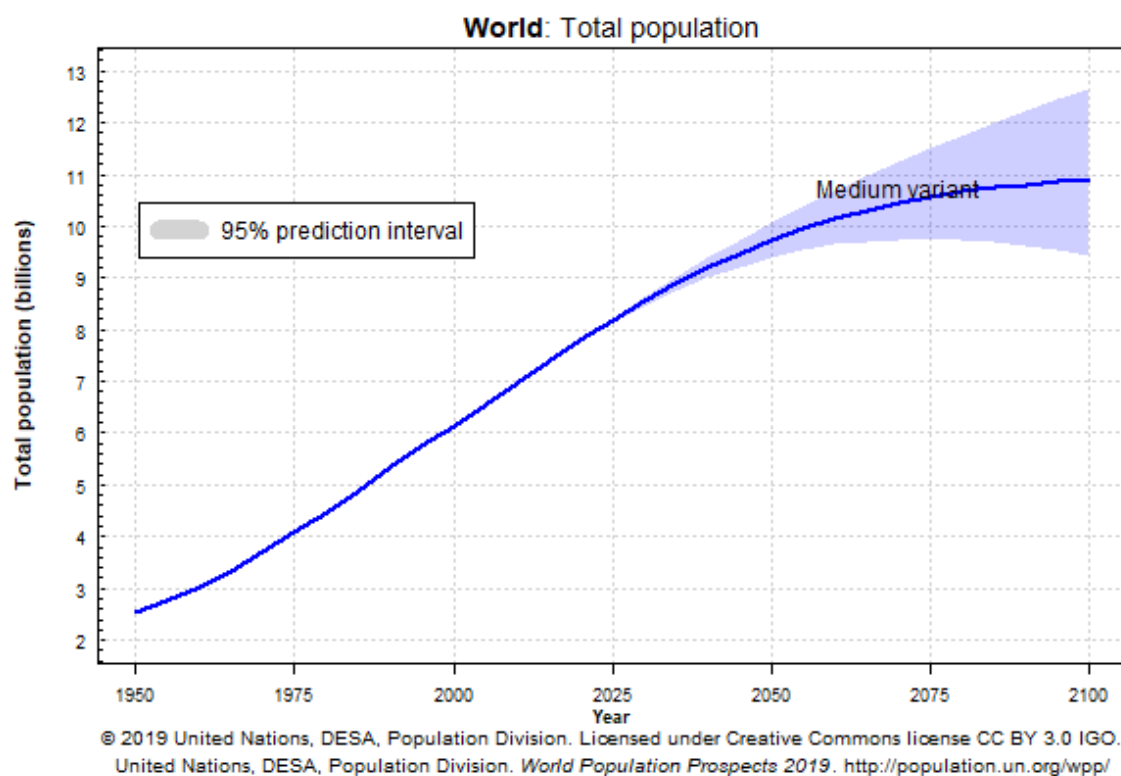


図 1-3 世界人口の推移[7]

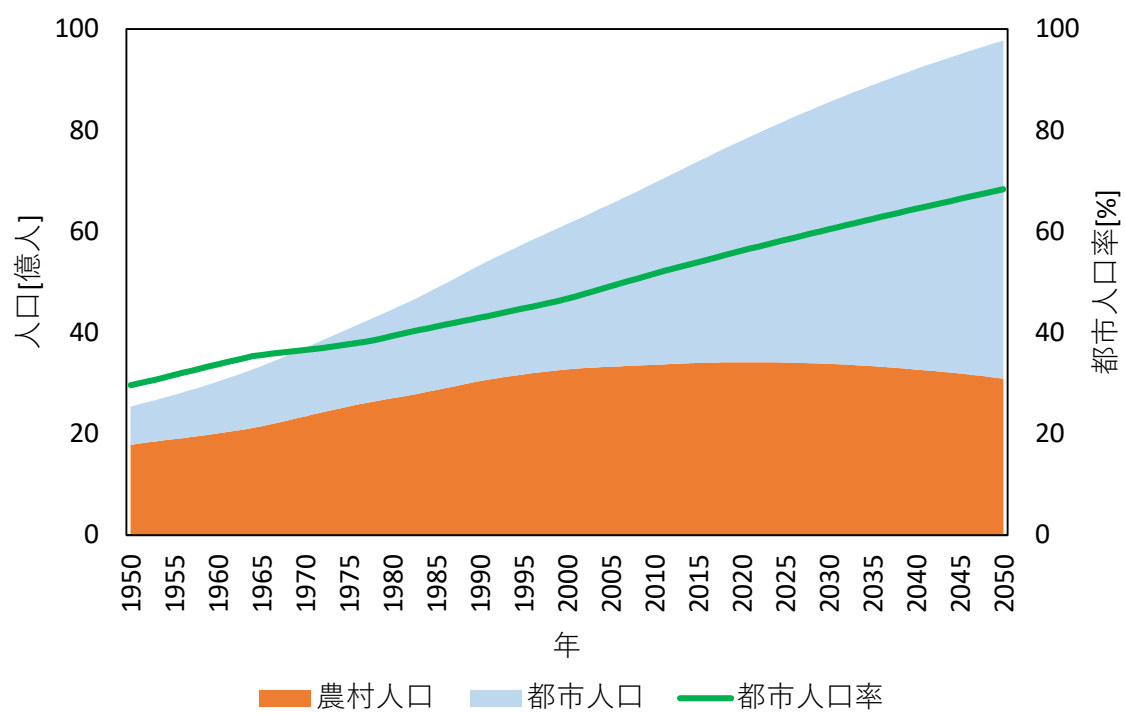


図 1-4 都市人口、農村人口と都市人口率の推移（文献[8]を基に作成）

### 1.2.2 途上国の発展

図 1-5 および図 1-6 に 1950 年から 2020 年にかけての世界人口の推移を示す。先進国の人口はほぼ一定だが、途上国の人口が急速に増加していることがわかる。地域別に見ると、アジア、アフリカ、南米・中米の人口が増加していることがわかる。また図 1-7 に地域別の GDP 成長率を示す。2017 年の先進国の GDP 成長率が 2.3 %なのに対し、新興国市場および途上国の GDP 成長率が 4.8 %となっている。なお前項に示した都市人口率においても、1950 年には途上国の都市人口率は 18 %だったが 2050 年には 66 %に増加するとされている[8]。人口および GDP 成長率の観点から、この数十年で途上国が大きく発展したことがわかる。

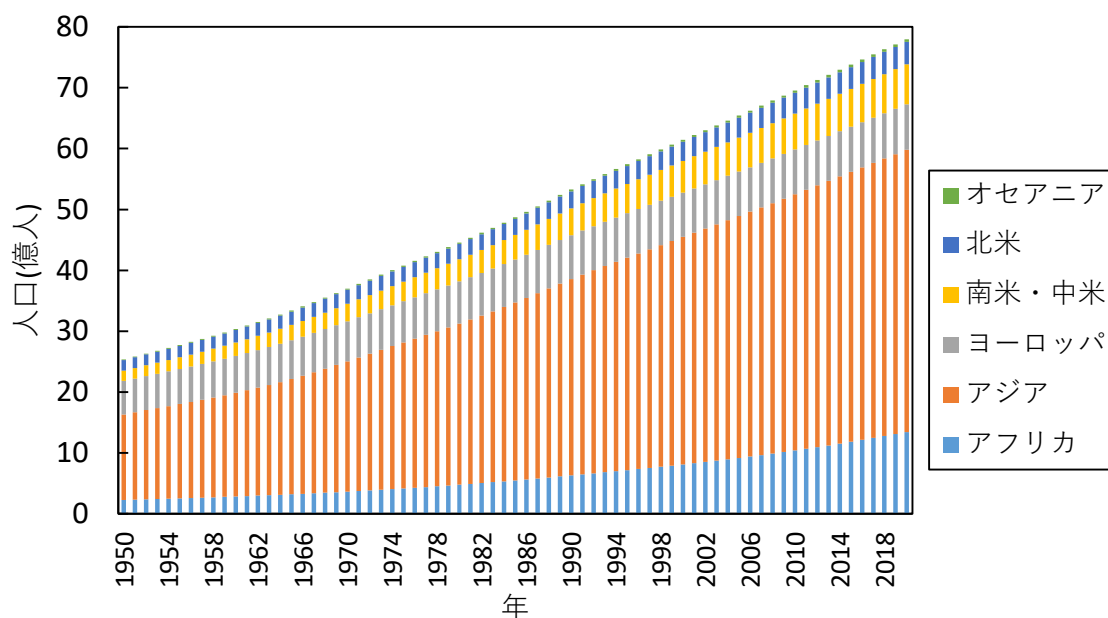


図 1-5 1950 年から 2020 年にかけての世界人口の推移（地域別）（文献[7]を基に作成）

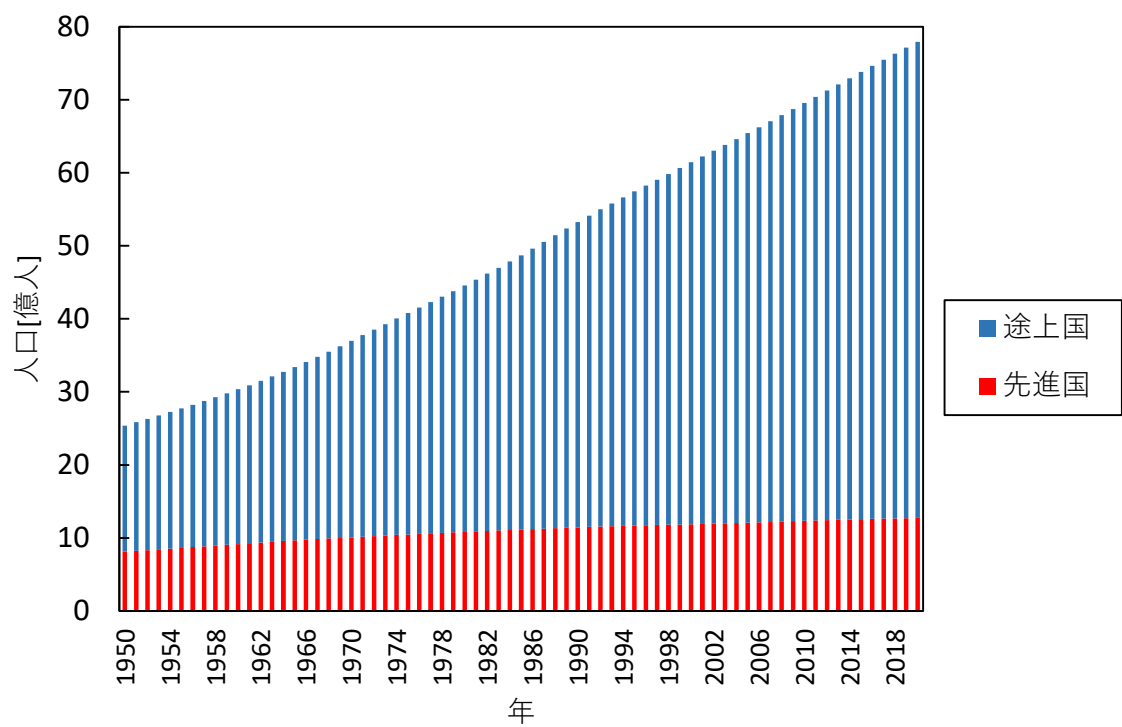


図 1-6 1950 年から 2020 年にかけての世界人口の推移（途上国・先進国）（文献[7]を基に作成）

(%)

	2017 年	2018 年 (予測)	2019 年 (予測)
世界	3.8	3.9	3.9
先進国・地域	2.3	2.5	2.2
米国	2.3	2.9	2.7
ユーロ圏	2.3	2.4	2.0
ドイツ	2.5	2.5	2.0
フランス	1.8	2.1	2.0
イタリア	1.5	1.5	1.1
スペイン	3.1	2.8	2.2
日本	1.7	1.2	0.9
英国	1.8	1.6	1.5
カナダ	3.0	2.1	2.0
新興国市場及び途上国・地域	4.8	4.9	5.1
ロシア	1.5	1.7	1.5
中国	6.9	6.6	6.4
インド	6.7	7.4	7.8
ASEAN5	5.3	5.3	5.4
ブラジル	1.0	2.3	2.5
メキシコ	2.0	2.3	3.0
サウジアラビア	-0.7	1.7	1.9
ナイジェリア	0.8	2.1	1.9
南アフリカ	1.3	1.5	1.7

資料：IMF WEO（2018 年 4 月）から作成。

図 1-7 地域別の GDP 成長率[9]

### 1.2.3 途上国におけるヒートアイランド

ヒートアイランド研究はこれまで、ニューヨークやロンドン、東京といった先進国の主要都市で盛んにおこなわれてきたが、近年の途上国の発展に伴い、ナイジェリアやエチオピア、オマーン、メキシコ、アルゼンチン、マレーシアといった国でもヒートアイランドが観測されるようになった[10]。しかしこれらの国におけるヒートアイランド研究は観測が主であり、シミュレーションによる再現や対策技術の評価はほとんどおこなわれていない。その原因として推察されるのが、途上国におけるデータの整備の難しさである。先進国では国や自治体による気象観測地点が充実しており、インターネット上で自由に閲覧・ダウンロードすることが可能な場合が多い。また気象データ以外にも、建築材の基準や電力消費量データなど、都市気象計算をおこなう上で必要なデータを容易に得ることができる。しかし途上国ではこれらのデータを得ることが難しいため、実測ベースのヒートアイランド研究に留まっていると思われる。



### 1.3 インド・デリーについて

#### 1.3.1 インドの概要

図 1-8 に地図上でのインドの位置を示す。インドは北部を山、南部を海に面している。また図 1-9 にインドの人口の推移を示す。インドの人口は 2011 年の国勢調査で 12 億 1,000 万人という数字が公表されているが、2024 年には中国を抜いて世界一位になり、2050 年には 15 億人を突破する見通しがなされている[7]。

インドは人口の増加に伴い著しい経済発展を遂げた。図 1-10 にインドの実質 GDP および GDP 成長率を示す。GDP は指数関数的に増加しており、GDP 成長率も近年は世界全体と比較して高水準を保っている。2018 年の GDP のランキングでは世界 7 位になった[11]。



図 1-8 地図上におけるインドの位置

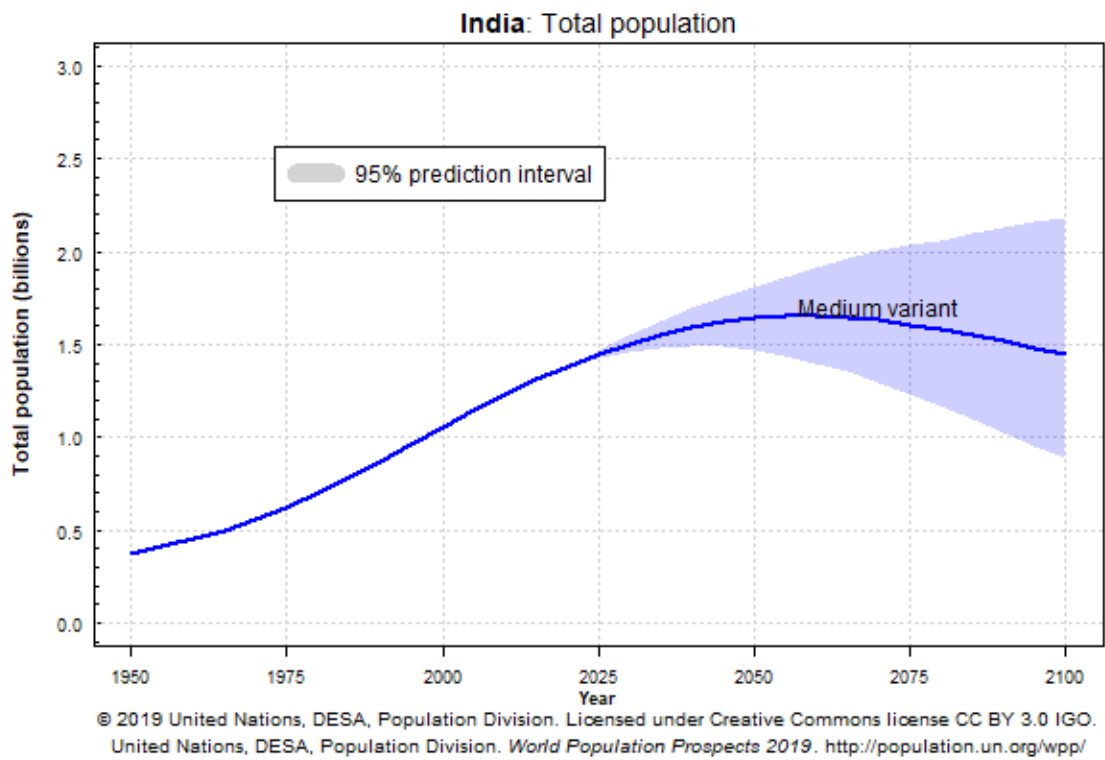


図 1-9 インドの人口の推移[7]

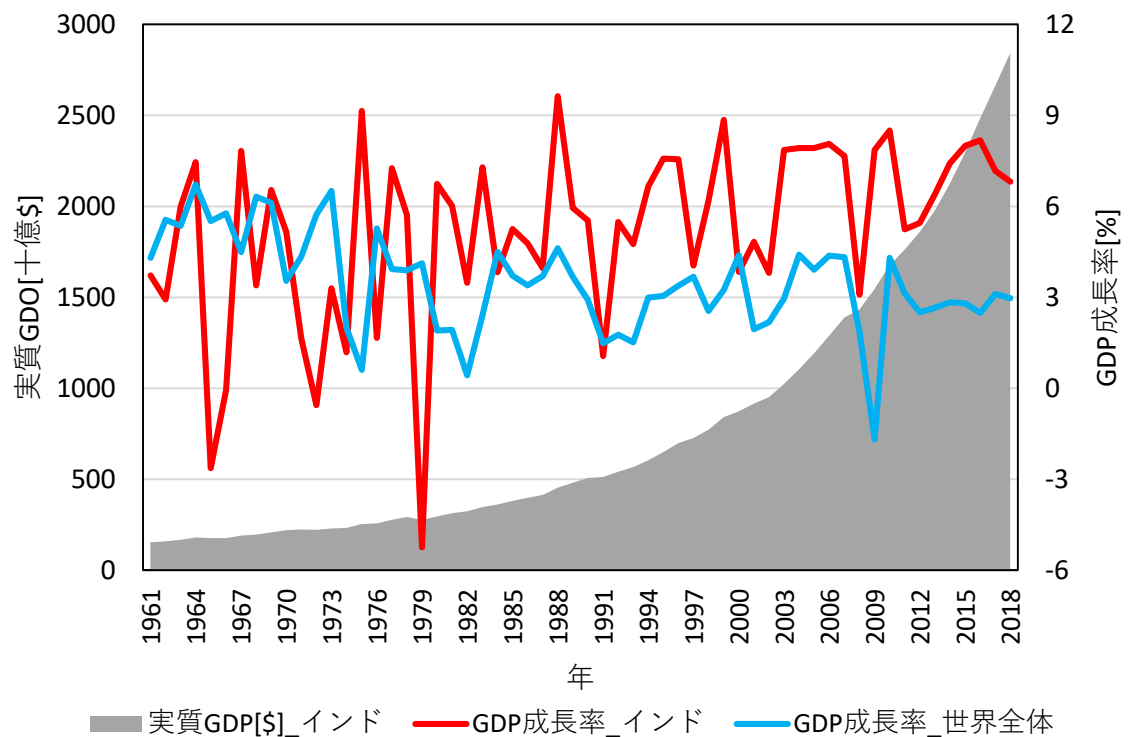


図 1-10 インドの実質 GDP と GDP 成長率の推移（文献[12][13]を基に作成）

### 1.3.2 首都デリーの概要

デリーはインドの首都であり、2011 年の国勢調査では都市集積（Urban Agglomeration, UA）を含めるとインド全域で一位の都市圏人口を誇る都市である。表 1-3 にインド国内の都市人口のランキングを示す。都市自体の人口はムンバイの方が多いが、周辺の都市や町の人口を加えることでデリーが一位になる。統計の取り方で異なる人口が算出されるケースは多いため注意されたい。なおデリーの首都をニューデリーと表記する場合もあるが、ニューデリーはデリー市内にある首都機能を集めた地域であり、単独の都市ではない[14]。東京都と 23 区のような違いだと考えていただきたい。

デリーでは近年の経済成長により急速に開発が進んでいる。図 1-11 に 1997 年から 2008 年にかけてのデリーの土地利用の変化を示す。1997 年から 2008 年にかけて、市街地面積は 540.7 km<sup>2</sup> から 791.96 km<sup>2</sup> に増加し、これはデリー全体の 16.86 % に相当する[15]。都市人口は 1951 年から 2001 年にかけて毎年 4-5 % 増加し、2006 年のデリー市民の収入はインド全体の収入と比較して 2.4 倍高い[16]。一方で急速な人口増加に伴って住宅不足の問題が深刻となり、また景観美化活動のため、スラムの破壊やホームレスの排除が過激化し問題となっている[16]。また 1990 年から 2000 年にかけて、市内の CO や SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM といった物質の濃度が上昇し、大気汚染が深刻化している[17]。急速な発展により経済的に成長する一方、その代償が顕在化しつつあるように見受けられる。

表 1-3 インドの都市人口のランキング（文献[18][19]を基に作成）

City	Extended UA [people]	Population [people]	Metropolitan [people]	Literacy [%]
デリー	21,753,486	11,034,555	16,314,838	87.59
ムンバイ	20,748,395	12,442,373	18,414,288	89.73
コルカタ	14,617,882	4,496,694	14,112,536	86.31
チェンナイ	8,917,749	4,646,732	8,696,010	90.18
バンガロール	8,728,906	8,443,675	8,499,399	88.71
ハイデラバード	7,749,334	6,731,790	7,749,334	83.26
アフマダーバード	6,352,254	5,577,940	6,352,254	88.29
プネ	5,049,968	3,124,458	5,049,968	89.56
スーラト	4,585,367	4,467,797	4,585,367	87.89
ジャイプル	3,073,350	3,046,163	3,046,163	83.33

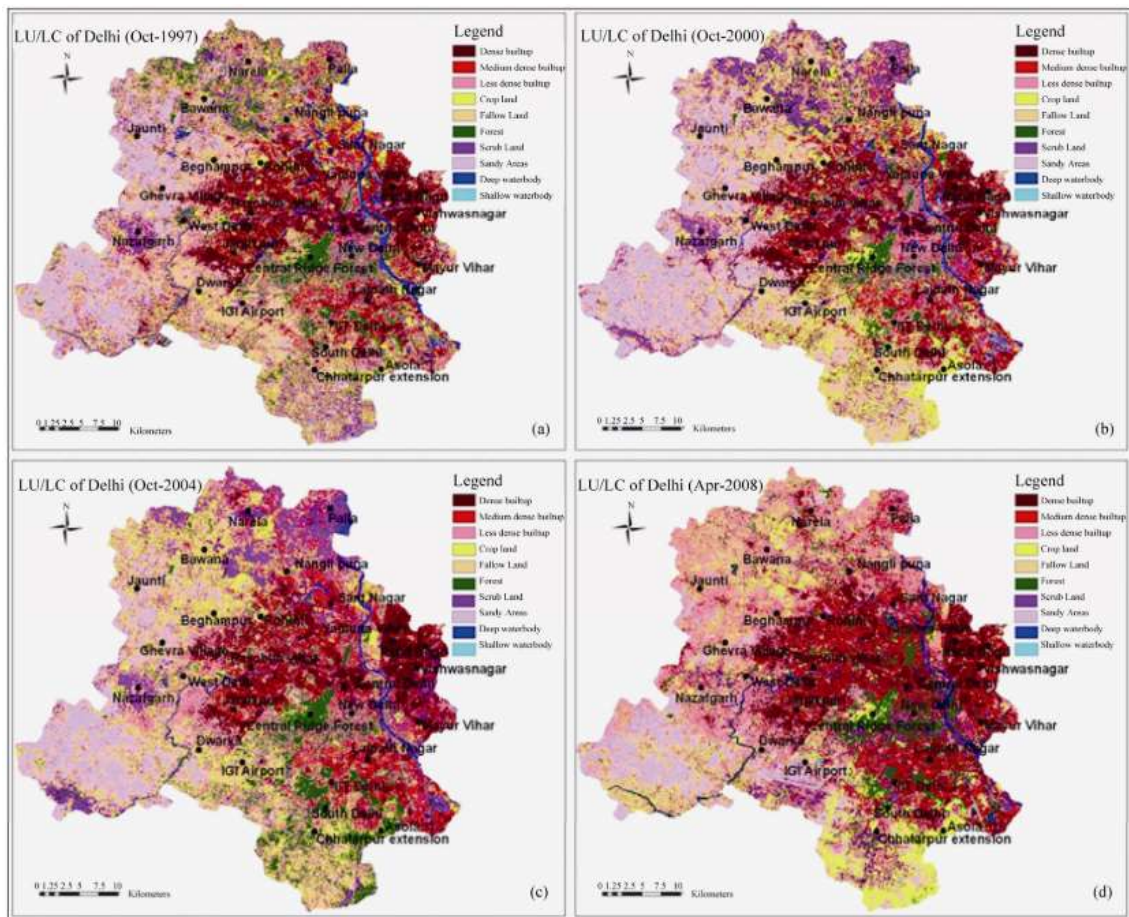


図 1-11 デリーの土地利用の変化 ((a)1997 年, (b)2000 年, (c)2004 年, (d)2008 年) [15]

### 1.3.3 デリーの気候

図 1-12 に 2017 年のデリーの気温と降水量を示す。デリーの気候で特徴的な点が 3 点ある。以下文献[20]に基づいて概説する。一つ目は最高気温が 40 °C 近くにまで上昇することである。デリーでは 4 月から 5 月にかけて最も気温が上昇し、特に熱波が発生した際には多くの犠牲者が生まれる。2015 年の熱波では高温により道路が溶け、最高気温は 45 °C を記録し、少なくとも 3 人のホームレスが亡くなった[21][22]。二つ目は年間を通じた寒暖差があることである。インドと言えば非常に暑い国だというイメージが強いが、デリーの 11 月から 2 月の最高気温は 30 °C 程度かそれを下回る。また最高気温と最低気温の気温差も激しく、最低気温は 10 °C を下回ることもある。三つ目は、6 月から 9 月にかけて集中的に雨が降ることである。この期間は雨季に該当し、気温の高さと相まって蒸し暑い季節となる。

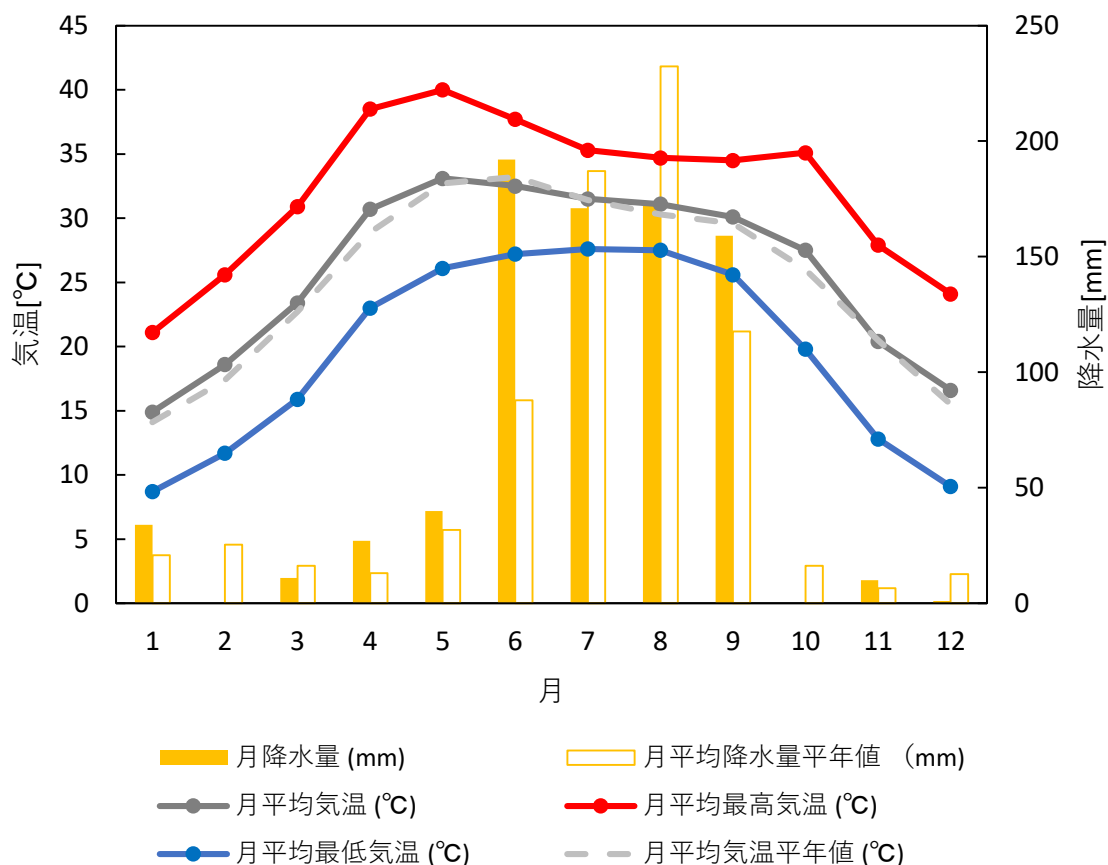


図 1-12 2017 年のデリーの気温と降水量（文献[23]を基に作成）

## 1.4 デリーのヒートアイランド

### 1.4.1 デリーのヒートアイランド研究

デリーのヒートアイランドは 1970 年代から確認されるようになった[24]。しかしここからデリーの都市気候の研究例は乏しく[24]、2010 年頃から再びデリーのヒートアイランドに注目が集められるようになった。表 1-4 にデリーにおける近年のヒートアイランドの観測事例を示す。ヒートアイランド強度とは観測地点と基準地点の気温差のことで、ヒートアイランドの激しさを表す指標である。ただし基準地点の定義は統一されておらず、例えば文献[10]では基準地点をデリーから 60 km 離れた農村に設けているが、文献[25][26]では市内の研究所に設けている。そのため研究によってヒートアイランド強度に大きなバラつきが生じる。

デリーのヒートアイランド研究は実測ベースの研究がほとんどであり、シミュレーションモデルによって再現したケースはごく僅かしかない。文献[27]ではデリーにおける気象計算モデルの感度分析をおこなった。文献[28]では感度分析の結果を用いて簡易的な都市モデルを組み込んだ計算をおこない、計算値と観測値を比較して良好に合致することを確認した。これらの研究では詳細な都市モデルが組み込まれていないため、外気温や湿度、風向・風速の再現に留まっている。また文献[24]ではより詳細な都市モデルを組み込んだ計算をおこない、簡易的な対策技術の評価をおこなった。都市モデルの精度は上がったが入力パラメータは簡略化されているものが多く、デリーという都市の再現精度が低い点が問題点として挙げられる。しかしこれは、1.2.3 節でも説明した「途上国の都市気象シミュレーションのためのパラメータが整備されていない」という状況を鑑みれば仕方のない問題とも考えられる。

表 1-4 近年のデリーにおけるヒートアイランドの観測事例

ヒートアイランド 強度[°C]	時期	定義	気温の算出方法	出典	出典 (詳細)
10.7	2010 年 3 月	Sitaram Bazar (オールドデ リー)と Tomi village (Delhi から 60km 離れた農 村地帯) との気温差	地上 1.5m の気温を定点観測	[10]	Mohan M, Kikegawa Y, Gurjar B, Bhati S, Kolli N, Assessment of urban heat island effect for different land use-land cover from micrometeorological measurements and remote sensing data for megacity Delhi, Theoretical and Applied Climatology, 112 (2013), pp647-658
4-7	2007-2010 年 11-12 月	デリー市内と市外の気温差	MODIS 衛星データから地表 面気温を算出	[29]	Pandey P, Kumar D, Prakash A, Masih J, Singh M, Kumar S, Jain V, Kumar K, A study of urban heat island and its association with particulate matter during winter months over Delhi, Science of the Total Environment, 414 (2012), pp494-507
6.1	2014 年 11 月	Shardra (N28.68 : E77.29) と NPL (National Physical Laboratory, N28.64 : E77.17) の測定値の差	車上に測器を固定し移動観測	[25]	Yadav N, Sharma C, Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi, Sustainable Cities and Society, 37 (2018), pp298- 306
2.8-3	2010-2013 年 3-5 月	Safdarjung (N28.58 : E77.21) と NPL (National Physical Laboratory, N28.64 : E77.17) の気温差	各地点における定点観測	[26]	Yadav N, Sharma C, Peshin S.K., Masiwal R, Study of intra-city urban heat island intensity and its influence on atmospheric chemistry and energy consumption in Delhi, Sustainable cities and Society, 32(2017), pp202-211

#### 1.4.2 デリーの将来

デリーは既に 1,000 万人以上の人口を誇る大都市だが、今後も人口は増加し続ける見込みである。図 1-13 に世界の主要都市の人口の推移を示す。デリーの人口は右肩上がりに増え続け、2030 年には東京を抜いて世界一位の首都圏人口を誇る都市に成長する見通しがなされている。

デリーの人口増加や全球の温暖化に伴い、暑熱による犠牲者が増加すると予想されている。文献[30]では、RCP8.5 シナリオ下では 2070 年から 2099 年において、熱波が発生した際のデリーの犠牲者は現在の倍以上になると予測している。また文献[31]では、都市気象シミュレーションによって将来の熱波の日数、年間の熱波の発生回数、熱波の強度が現在よりも激化することが示唆された。これらの予測の精度は低いが、人口増加に伴う都市化の進行により、将来において現在よりもさらに高温化することは妥当である。デリーは今まさに都市として発展している段階であるため、早期段階で暑熱対策技術を導入することが重要である。そのためにはシミュレーションによる再現および評価が必要である。

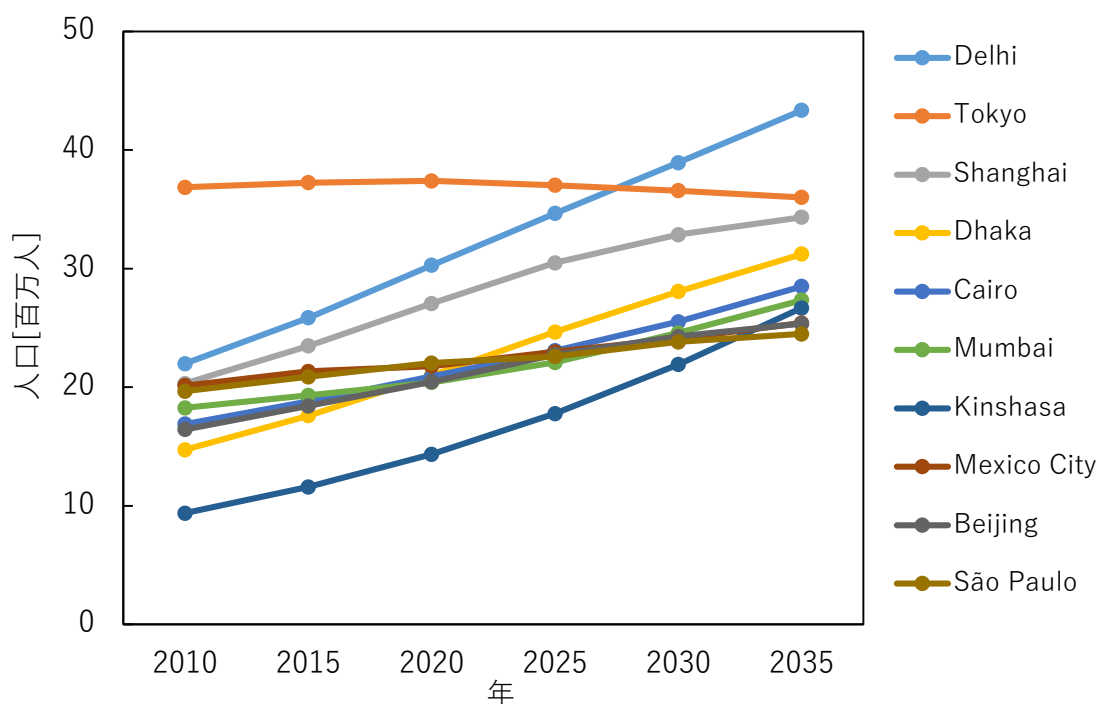


図 1-13 世界の主要都市の人口の推移（文献[8]を基に作成）



## 1.5 研究目的

ここまで世界と途上国の発展の状況をまとめつつ、その代表例としてインドおよび首都デリーについて解説した。途上国では都市気象シミュレーションに必要な入力データを用意することが難しく、さまざまな都市で利用することのできる汎用的なデータの整備手法の確立が望まれる。1.2.3 節および 1.4.1 節で述べたように、途上国でも既にヒートアイランドが発生しており、実測ベースの研究だけでなく対策技術の導入に向けたシミュレーションベースの研究が今後は重要になると考える。

そこで、本研究では以下の 3 つを目的とした。

- ① データの少ない途上国でも適応策を評価できるレベルの都市気象シミュレーションがおこなえるようにする手法を模索・開発する。
- ② モデルケースとして、デリーにおけるヒートアイランドを都市気象シミュレーションによって再現する。
- ③ 再現をおこなった後、デリーにおける暑熱対策技術の評価をおこなう。

2 章では本研究で用いるシミュレーションモデルである、領域気象モデルと都市気象モデルについて説明する。3 章では、2 章で挙げたシミュレーションツールのインプットデータの整備方法について説明する。4 章では実際に計算をおこない、計算値と実測値を比較することでモデルとインプットデータの妥当性を検証する。また、パラメータを変化させることでヒートアイランドの対策技術を表現し、対策技術を導入した際の効果を確認する。

## 2. 研究手法

### 2.1 領域気象モデル

#### 2.1.2 Weather Research and Forecasting (WRF)

本研究では都市気象計算の上空上端境界条件を作成するために Weather Research and Forecasting (WRF)を用いた。WRF は米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research, NCAR) と米国環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) を中心とするプロジェクトによって開発された気象シミュレーションモデルである[32]。ユーザーは計算格子や領域のサイズ、計算期間を任意に設定することが可能であり、過去の計算であれば、ユーザズページ[33]に掲載されている再解析データを利用することができる。本研究で用いた WRF のバージョンは 4.0 である。

WRF には都市の影響を考慮して計算をおこなうオプションが内蔵されている。本研究の対象地域のデリーにおいても、都市モデルを考慮した場合に、考慮しない場合と比較して二乗平均平方根誤差 (RMSE) が  $1^{\circ}\text{C}$  以上小さくなったことが示されている[28]。一方で WRF 計算だけで都市気象を再現することには限界がある。例えば都市に特有な現象として、都市気温の上昇の伴い屋内のエアコンの使用が増加し、その排熱によってさらに都市の気温が上昇する、というフィードバックが挙げられるが[34]、WRF の計算ではそのフィードバック効果を再現することができない。フィードバック効果の他にも、都市内部の詳細な交通排熱データや建築物の熱物性値、建物内部における電気機器の使用率などのデータを考慮することで、精緻な都市気象計算をおこなうことができる。そのことを踏まえ、本研究では WRF の計算結果は都市気象計算開始時の境界条件として使用することに留めるものとする。

なお WRF を使用する上で、計算対象地域に適した物理パラメータの選択や計算領域の設定が必要になる。それらの条件については第 3 章で説明する。

## 2.1.2 GIS4WRF

本研究では WRF の計算条件の設定および計算において、地理情報ツール・QGIS のプラグインツールである GIS4WRF を用いた。GIS4WRF はデータセットのダウンロードおよび計算条件の設定の簡易化、計算結果の可視化を目的に開発されたプラグインツールである[35]。従来の WRF 計算では Linux 環境においてコマンド入力することでしか計算をおこなうことができなかったが、GIS4WRF では Windows 環境においてマウスカーソルによる操作により計算条件を設定できるようになっている。

本研究で用いた QGIS のバージョンは 3.4.3、GIS4WRF のバージョンは 0.14.1 である。GIS4WRF はバージョン 3 以降の QGIS にのみ対応しているため留意する必要がある。

以下の図 2-1 に、GIS4WRF の公式ホームページ[36]に記載されたチュートリアルに従って著者が計算をおこない、結果を可視化した様子を示す。WRF によって計算された変数および表示する時点において、マウス操作により簡便に可視化することが可能になっていることがわかる。

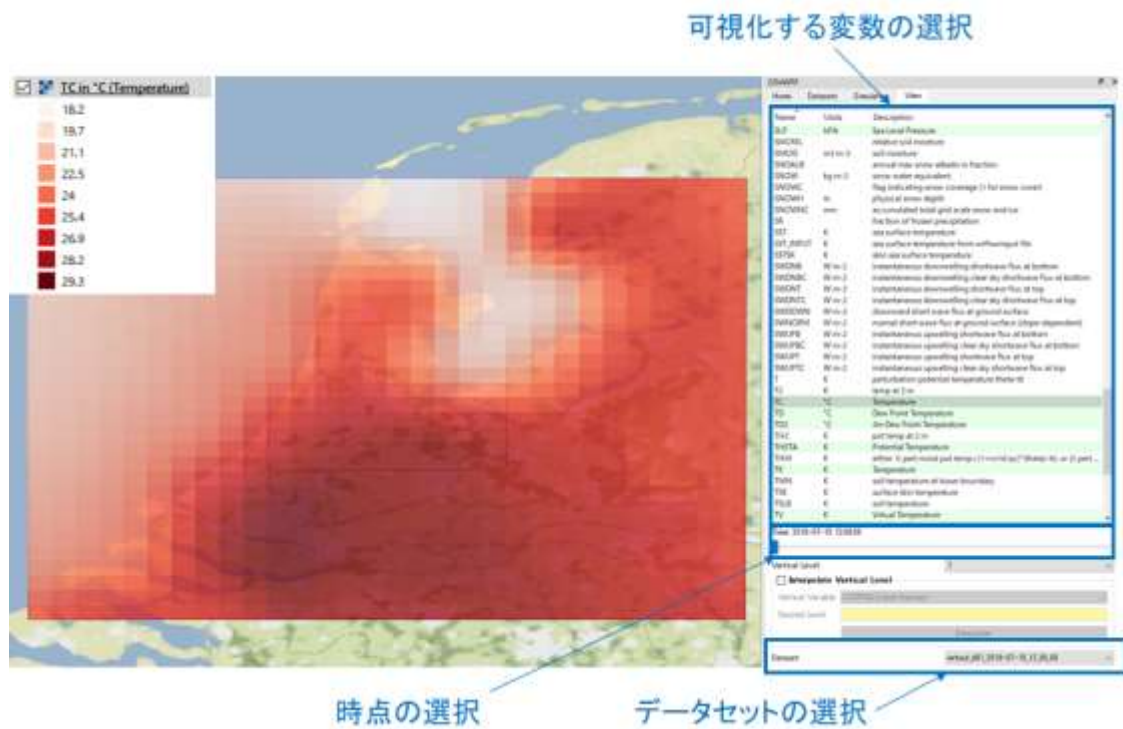


図 2-1 GIS4WRF で計算・可視化した 2018 年 7 月のヨーロッパにおける熱波

## 2.2 都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル (CM-BEM)

### 2.2.1 概要

本研究では都市気象計算をおこなうために、都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル (CM-BEM) を使用した。CM-BEM は、都市における建物規模の地表面の凹凸や、建物内部のエネルギー消費およびエアコンによるフィードバック効果を考慮することにより、都市気象を数値モデルによって再現し評価することを目的に開発されたものである [37]。建物内のエネルギー消費を考慮する都市気象モデルは他にも BEP+BEM[38]や TEB-BEM[39]が存在するが、CM-BEM はそれらのモデルに比べてエアコンの排熱によるヒートアイランドへのフィードバック効果を詳細に考慮することができる。本研究ではデリーにおける将来の空調エネルギー需要の推定も目的としており、数値流体解析のように計算格子も数 m 四方と細かく設定する必要がないため、CM-BEM の使用意図に即していると考え、用いることにした。

図 2-2 に CM-BEM の概要を示す。計算開始時の上空上端境界条件には、2.2 節で説明したように WRF の計算結果を使用する。都市キャノピーモデル (CM) において算出された気温や風速といった気象要素の結果は、建物エネルギーモデル (BEM) における計算に用いられる。CM からの気象要素と、日射や建物の熱伝導、建物内の機器使用率 (スケジュール)などを考慮することにより、建物内部でのエネルギー消費量を算出することができる。また、BEM によって算出されたエアコンからの排熱を CM にフィードバックすることで、電力需要の増加による都市の気温上昇を評価することが可能になる。

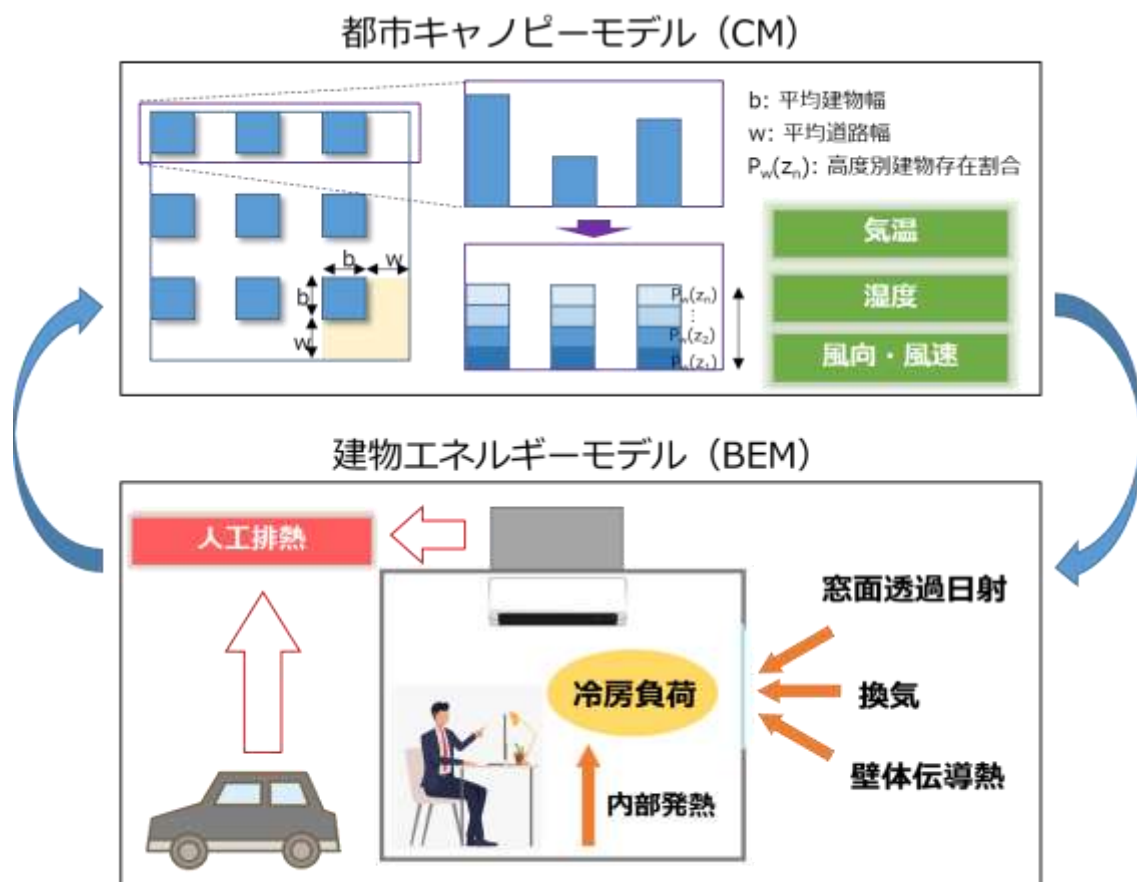


図 2-2 CM・BEM の概説図

### 2.2.2 入力項目・出力項目

図 2-3 および図 2-4 に CM-BEM の主な入力項目を示す。これらのパラメータは都市によって大きく異なるため、都市ごとに調査・作成する必要がある。CM-BEM はこれまで東京[40][41]や大阪[42]、ジャカルタ[43][44]といった都市において、ヒートアイランドの再現や気温・エネルギー消費量の分析、ヒートアイランドの対策技術の評価に用いられてきた。しかしデリーにおいて詳細に都市気象計算をおこなうのは本研究が初めての試みであるため、図 2-3 と図 2-4 に示すパラメータのうちの大半を新たに整備する必要がある。本研究では可能な限り汎用的にデータを収集する方法を模索し、デリー以外の都市にも応用できるように努めた。CM-BEM のインプットデータを整備する手法の詳細については 3 章で詳しく述べるものとする。

表 2-1 に CM-BEM の主な評価項目を示す。CM-BEM は都市気象モデルと建物エネルギーモデルを連成させているため、都市気象要素と建物内外のエネルギー収支に関する諸要素を計算することができる。この点は他の都市気象モデルにはない、CM-BEM の大きな強みとなっている。なお、評価したい対策技術に応じて評価項目を増やすことも可能である。

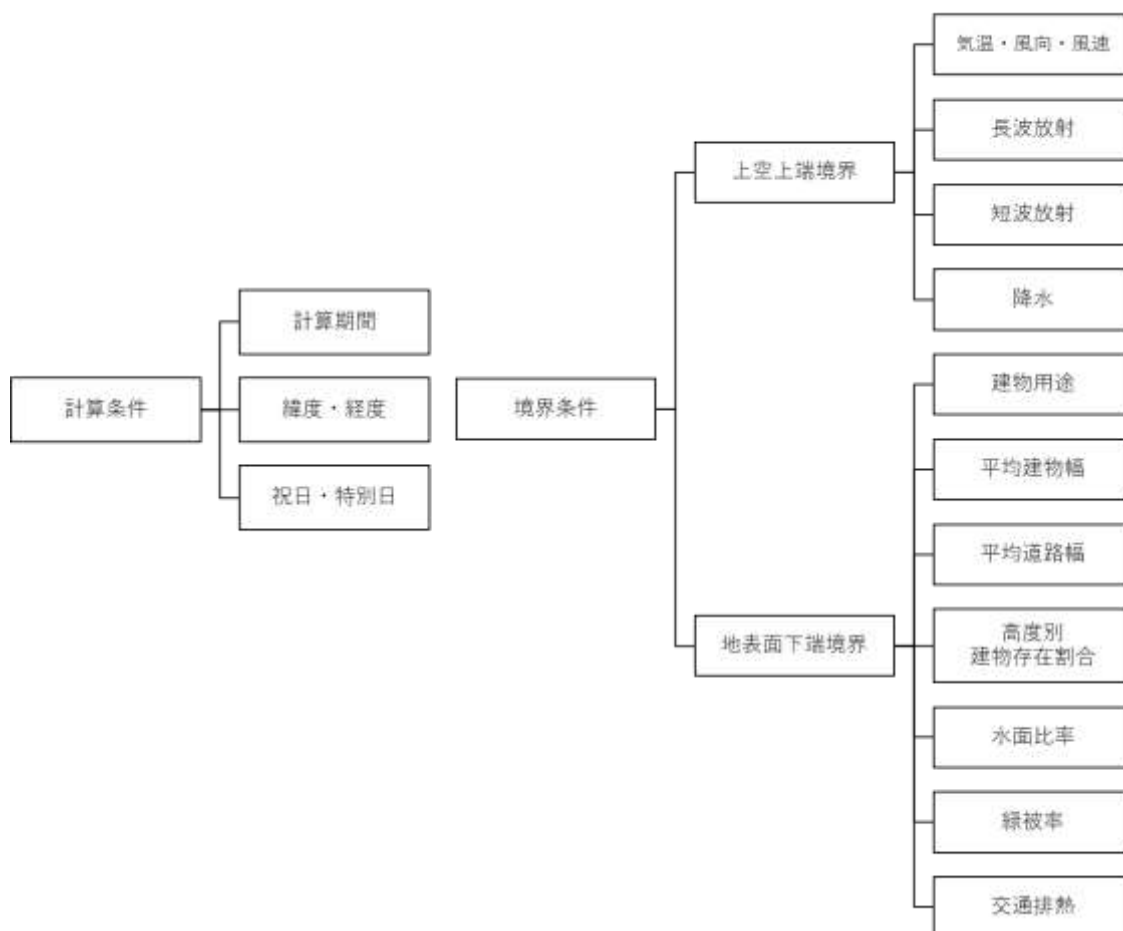


図 2-3 CM-BEM の入力項目（計算条件、境界条件）

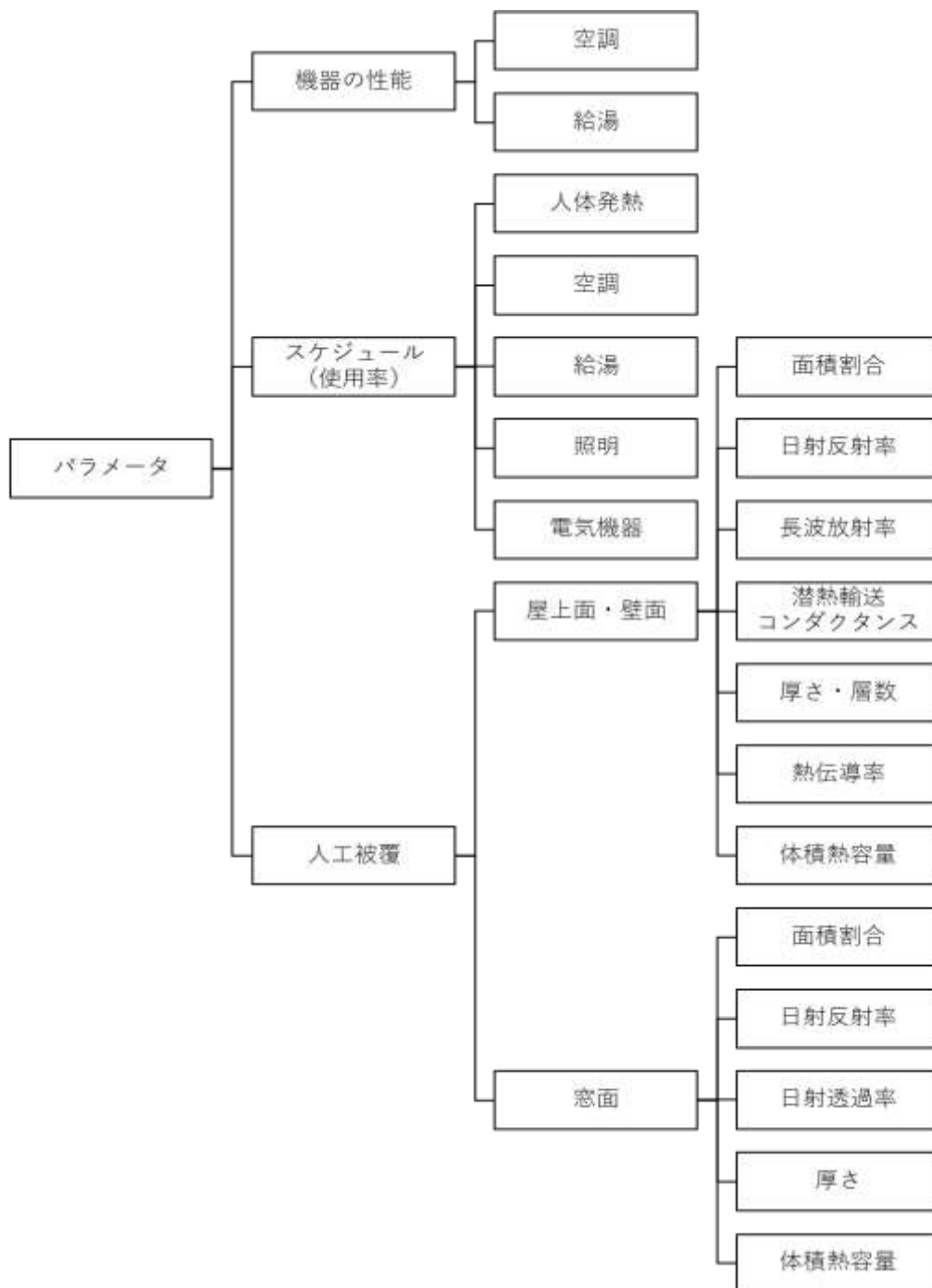


図 2-4 CM-BEM の入力項目 (BEM での計算に必要なパラメータ)

表 2-1 CM-BEM の出力項目

主な出力項目	詳細
気象要素	気温, 湿度, 風向, 風速, 日射量
建物表面	建物表面熱収支, 建物表面温度, 長波/短波放射量
地表面	地表面熱収支, 地表面温度, 長波/短波放射量
屋内熱環境	室温, 室内湿度
空調熱負荷	空調顕熱/潜熱負荷, 換気顕熱/潜熱負荷
エネルギー消費量	空調エネルギー消費量, 給湯エネルギー消費量
空調排熱量	人工排顕熱/潜熱量



### 3. データの整備

#### 3.1 WRF の計算条件

##### 3.1.1 計算領域

図 3-1 に WRF 計算で使用した計算領域を示す。NCEP の再解析データを WRF の初期条件として用いる場合には領域を段階的にネスティングする必要がある[45]。本研究では計算領域を空間解像度別に 3 段階に分け、大きい方から 18 km, 6 km, 2 km 四方のサイズに設定した。これらを d01、d02、d03 と呼称する。本研究における計算領域のサイズおよび数は、デリーで WRF 計算をおこなった既往研究[24]の領域の設定を参考にした。d02 はヒマラヤ山脈を含むように、d01 はインド全域を覆い南部の海を含むように設定した。

図 3-2 に本研究の d03 を示す。d03 の内部に研究対象地域であるデリーが含まれており、d03 の計算結果 (wrfout\_d03) を CM-BEM の上空上端境界として使用する。本研究では d03 の中心座標を北緯 28.66°、東経 77.36°に設定し、水平方向に 63 個、垂直方向に 57 個のグリッドが入るように設定した。なお、計算資源に余裕があるならば、d03 をより大きいサイズにすることが望ましい。

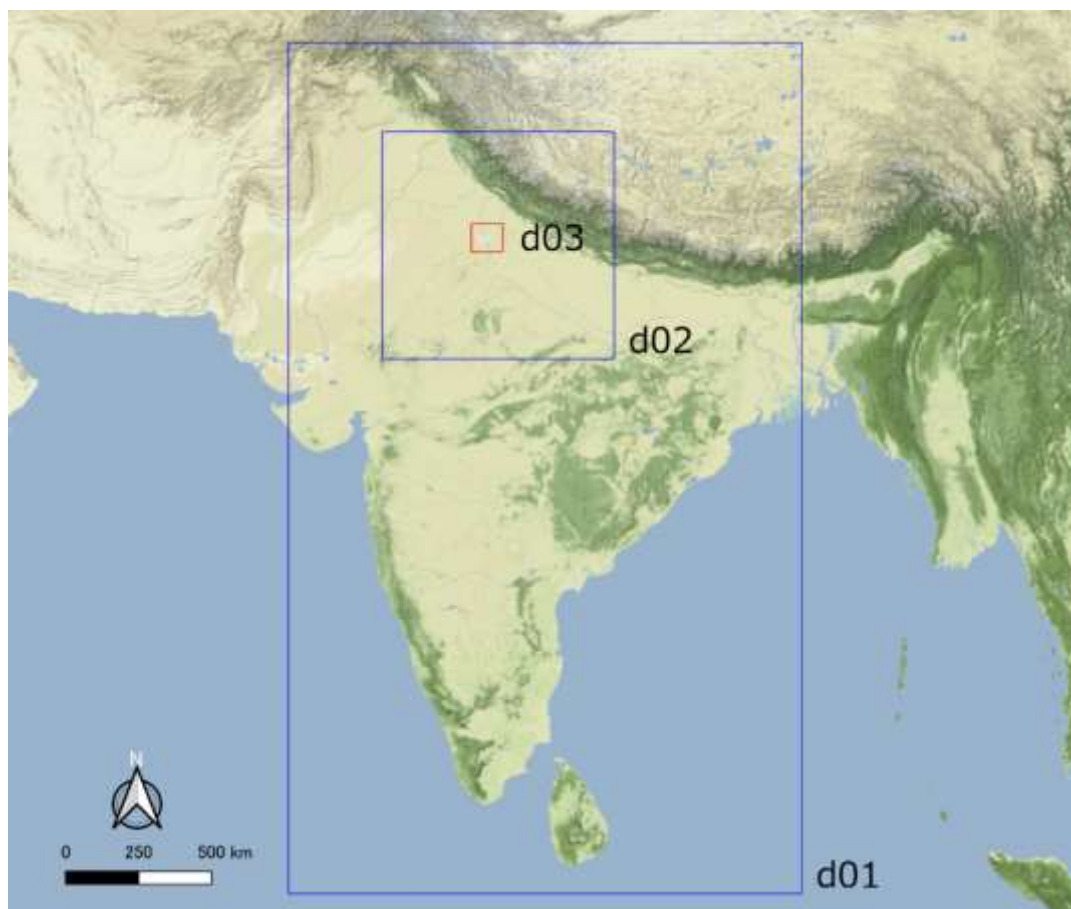


図 3-1 本研究における計算領域

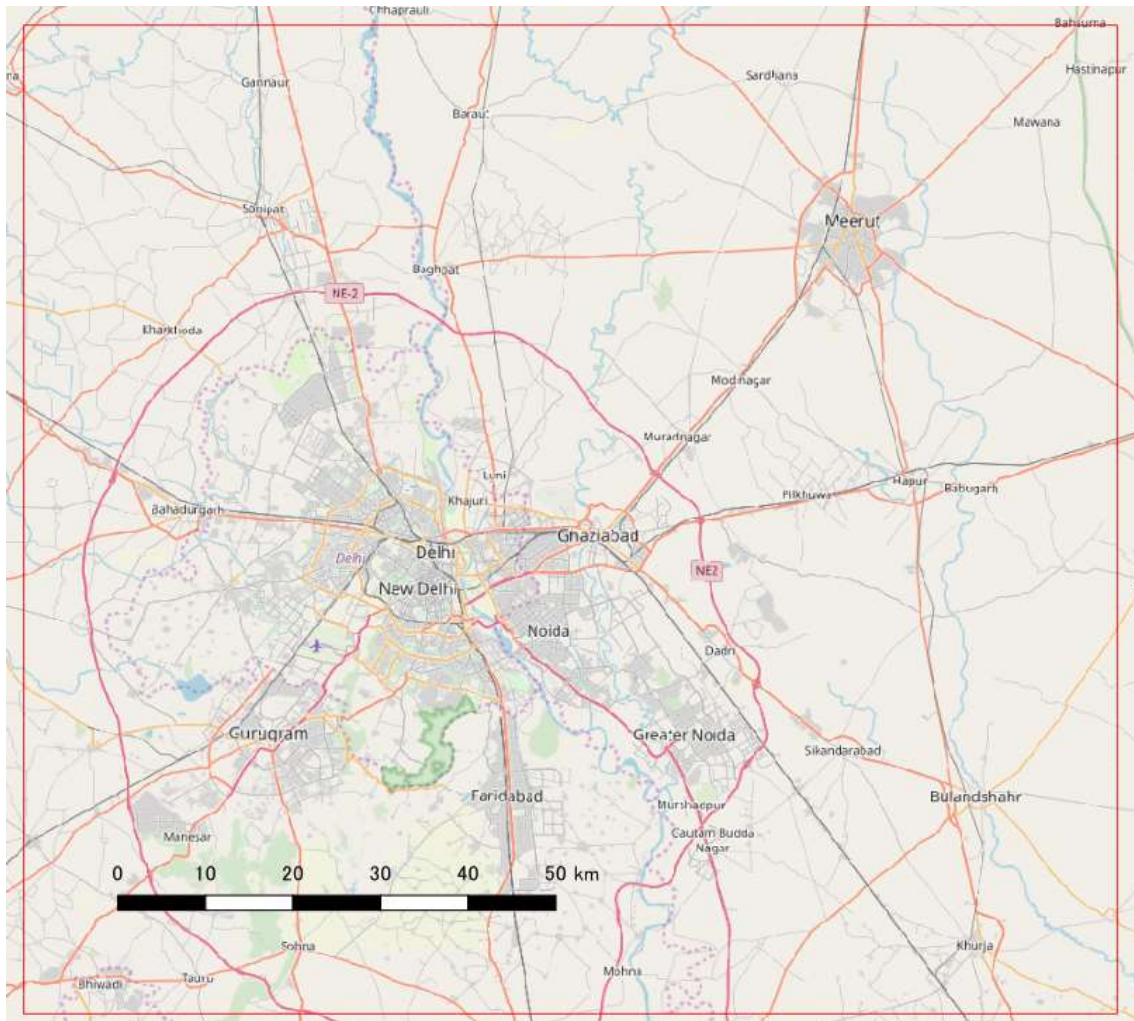


図 3-2 本研究における d03

### 3.1.2 物理パラメータ

WRF の計算では、対象地域に応じて使用する物理オプションを変更する必要がある。表 3-1 に本研究で使った WRF の物理オプションを示す。本研究で用いた物理オプションは既往研究[27][28]を参考にした。特に文献[27]では感度分析をおこなってデリーにおける最適な物理パラメータの組み合わせを導出しており、精度の高い結果であると思われる。ただしこの結果は 10 年ほど前のデータセットにおける最適な組み合わせであり、WRF のバージョンが更新されることに伴い、新しく高精度な物理パラメータのオプションが追加されていることに留意する必要がある。本研究では WRF の計算結果は CM-BEM の上空上端境界条件としてのみ用いること、および汎用的なデータの収集を目的としているという観点から、新しいパラメータで感度分析をすることは断念し文献[27]の値を参考にすることにした。

表 3-1 本研究で用いた WRF の物理パラメータ

パラメータ名	スキーム名	No.
Microphysics	Lin	2
Longwave Radiation	RRTMG	4
Shortwave Radiation	RRTMG	4
Surface Layer	Pleim-Xiu	7
Planet Boundary Layer	ACM2	7
Land Surface	Noah-LSM	2
Cmulus Parametarization	Kain-Fritsch	1

### 3.1.3 その他の計算条件

大気の初期条件には NCEP の最終再解析データである ds083.2 を使用した。時間解像度は 6 時間、空間解像度は  $1^\circ$  となっている[46]。なお、例えば ds083.3 や ds084.1 のように、時間解像度も空間解像度も ds083.2 よりも高精度なデータセットも存在する。しかし、後述するように本研究では 2010 年 3 月の計算をおこなうため、2015 年以降のデータセットである ds083.3 や ds084.1 は用いることができなかった。計算期間が該当する場合には、これらのより高解像度なデータセットを用いることを推奨する。

WRF で計算をおこなう際、簡易的な都市モデルを組み込んでより現実に近い計算をおこなうことができる。本研究では、最も簡易的な都市モデルである単層キャノピーモデルを使用した。既往研究[32]では、単層モデルを導入した方が導入しないケース（平板モデル）と比較してモデルの再現性が高いことが示されている。都市モデルを使用する場合のパラメータ（URBPARM.TBL ファイル内に存在する）はデフォルト値を用いた。本来であれば都市によって URBPARM.TBL 内のパラメータは変更すべきであり、デリーのパラメータは World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) のホームページ[47]から入手することができる。しかし WUDAPT のホームページから入手した URBPARM.TBL を利用するには、WRF 計算の工程である WRF Pre-Processing System (WPS) をおこなう際に土地利用の設定を変更する必要がある。その作業が煩雑だったため、本研究では URBPARM.TBL の更新はおこなっていない。

その他の計算条件は巻末の付録を参照されたい。なお日本の研究結果ではあるが、大気の初期条件を全球客観解析データから日本の気象庁のメソ客観解析データに変更した場合、また土地利用データをデフォルトの United States Geological Survey (USGS) のデータから日本の国土地理院の国土数値情報データに変更した場合、関東地方における地上気温の計算結果が大きく変わることが確認されている[48]。4 章で詳細に述べるが、本研究における WRF の計算結果には改善の余地があるため、感度分析やデータセットの更新をおこないより精度の高い計算条件を利用すべきだと考える。

## 3.2 CM-BEM の計算条件

### 3.2.1 建物用途別の街区分類

CM-BEM では計算対象の都市を数 km 四方の街区に分割し、それらの街区を建物用途別にオフィス街区、集合住宅街区、戸建て住宅街区の 3 種類に分類する。図 3-3 に CM-BEM における都市のモデル化の概要を示す。スケジュールや壁体構成などの値はこれらの街区種別に用意する必要がある。

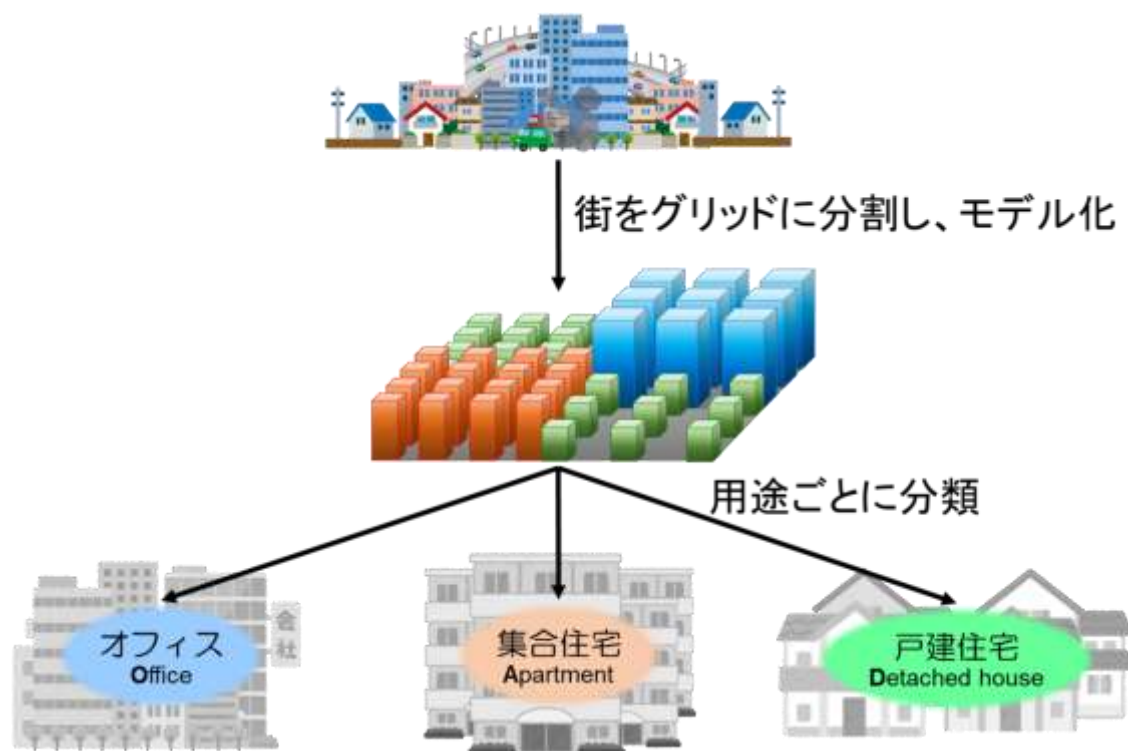


図 3-3 CM-BEM における都市のモデル化[49]

本研究では、汎用的に建物用途を類推する手法として Local Climate Zone (LCZ) を基にする分類方法を採用した。LCZ とは、都市の地表面の構造を 17 種類に分類し標準化するために開発された分類方法である[50]。図 3-4 に LCZ の分類を示す。これらの 17 種類の土地分類ごとに天空率やアスペクト比、建物高さ（A から G の分類では樹高）が設定されている。これらの街区の特徴は実地調査によって得る必要があり、莫大な費用と手間がかかるものであるが、World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) を使用することで任意の都市の LCZ データを作成することが可能になる。WUDAPT はアメリカの人工衛星 Landsat のデータやフリーの地理情報ソフトである SAGA を用いることで、Google Earth 上で LCZ 分類を可能にするツールである。実際にデリーでの LCZ 分類に成功した既往研究も存在する[51]。本研究では WUDAPT のホームページ[47]からダウンロードすることができる、既に LCZ 分類が済んでいるデータを使用する。図 3-5 に本

研究で用いる LCZ データおよび表 3-2 に色と LCZ の対応を示す。空間解像度は 100m 四方である。この LCZ の結果の作成過程について説明する文献はなかったが、世界 50 都市の LCZ を活用する研究[52]でも引用されており、十分信用に値する結果ではないかと考える。

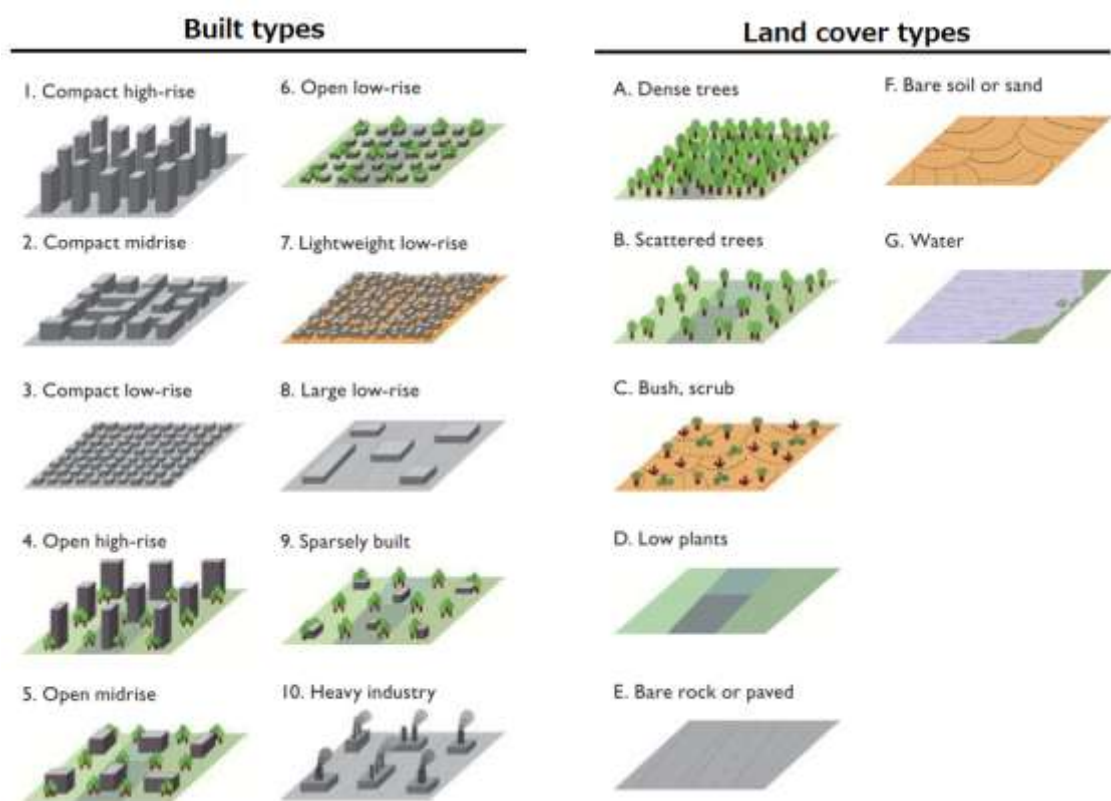


図 3-4 17 種の LCZ 分類（文献[50]を基に作成）



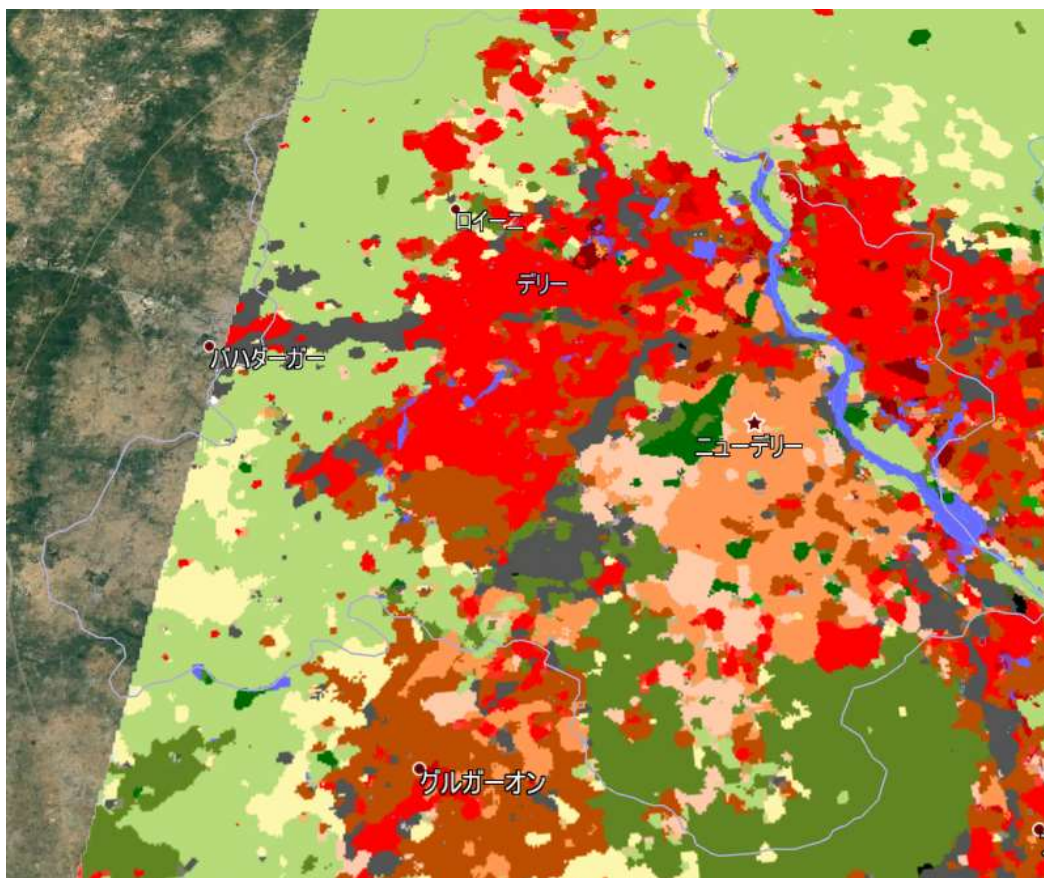


図 3-5 本研究で用いたデリーの LCZ

表 3-2 色分けと LCZ の対応

No.	LCZ分類	カラーコード		No.	LCZ分類	カラーコード	
1	compHR	8C0000		A	denseTree	006A00	
2	compMR	D10000		B	scatTree	00AA00	
3	compLR	FF0000		C	bush	648525	
4	openHR	BF4D00		D	lowPlant	B9DB79	
5	openMR	FF6600		E	paved	000000	
6	openLR	FF9955		F	soil	FBF7AE	
7	light	FAEE05		G	water	6A6AFF	
8	largeLow	BCBCBC					
9	sparse	FFCCAA					
10	industry	555555					

表 3-3 に本研究での建物用途別の街区分類を示す。LCZ を基に建物用途別に街区を分類する方法は文献[44]を参考にした。文献[44]の中では、分類に際して定量的な根拠を確認することができなかったが、おそらく建物高さと LCZ の内容に依存して街区を分類しているのではないかと考える。具体的には、高さが 10 m 以下の街区を戸建て住宅街区、10 m から 25 m の街区を集合住宅街区、25 m よりも高い街区をオフィス街区とし、Large low-rise や Heavy industry といった明らかに住宅向けでない街区をオフィス街区として分類している。本研究では街区の大きさを 2 km 四方と定め、街区の中で占める割合が最も大きい LCZ に表 3-3 の分類を当てはめた。その際に A から G の土地被覆は考慮せず、1 から 10 の分類のみ考慮するものとする。

表 3-3 本研究における LCZ 分類に基づいた街区分類

Local Climate Zone	No.	建物高さ[m]	街区種類
Compact high-rise	1	>25	オフィス街区
Compact midrise	2	10-25	集合住宅街区
Compact low-rise	3	3-10	戸建て住宅街区
Open high-rise	4	>25	オフィス街区
Open midrise	5	10-25	集合住宅街区
Open low-rise	6	3-10	戸建て住宅街区
Lightweight low-rise	7	2-4	戸建て住宅街区
Large low-rise	8	3-10	オフィス街区
Sparsely built	9	3-10	戸建て住宅街区
Heavy industry	10	5-15	オフィス街区

上記の手法に基づいて計算対象地域を分類した結果を図 3-6 に示す。計算対象の 89 街区のうち、戸建て住宅街区が 79 街区、オフィス街区が 10 街区、集合住宅街区がまったく存在しないという結果になった。デリーはインドの首都であるが、都市計画により高層ビルの建設が難しいとの報告がある[53]。筆者が実際にデリーを訪問した際も、高層ビルのすぐ傍に戸建て住宅群が存在する様子を確認し、日本の丸の内や新橋に存在するような高層ビル群は確認できなかった。そのためオフィス街区の数が少ないことは妥当ではないかと思われる。また、デリーでは近年開発が進み大量の RC 造の高層集合住宅が建設されているが、今なお伝統的なレンガ造の中庭式住宅が多く残るという報告がある[54]。本研究の街区のサイズが 2 km 四方とやや大きいということもあり、大規模なマンション群がなか



ったために集合住宅街区に分類される街区が存在しなかったと思われる。またジャカルタでの既往研究[49]においても、戸建て住宅街区と比較して集合住宅街区の割合は非常に小さかったため、集合住宅街区が少ないことは途上国の首都圏に共通する特徴である可能性が示唆される。以上の考察から、本研究における LCZ に基づいた街区分類は妥当であると判断した。

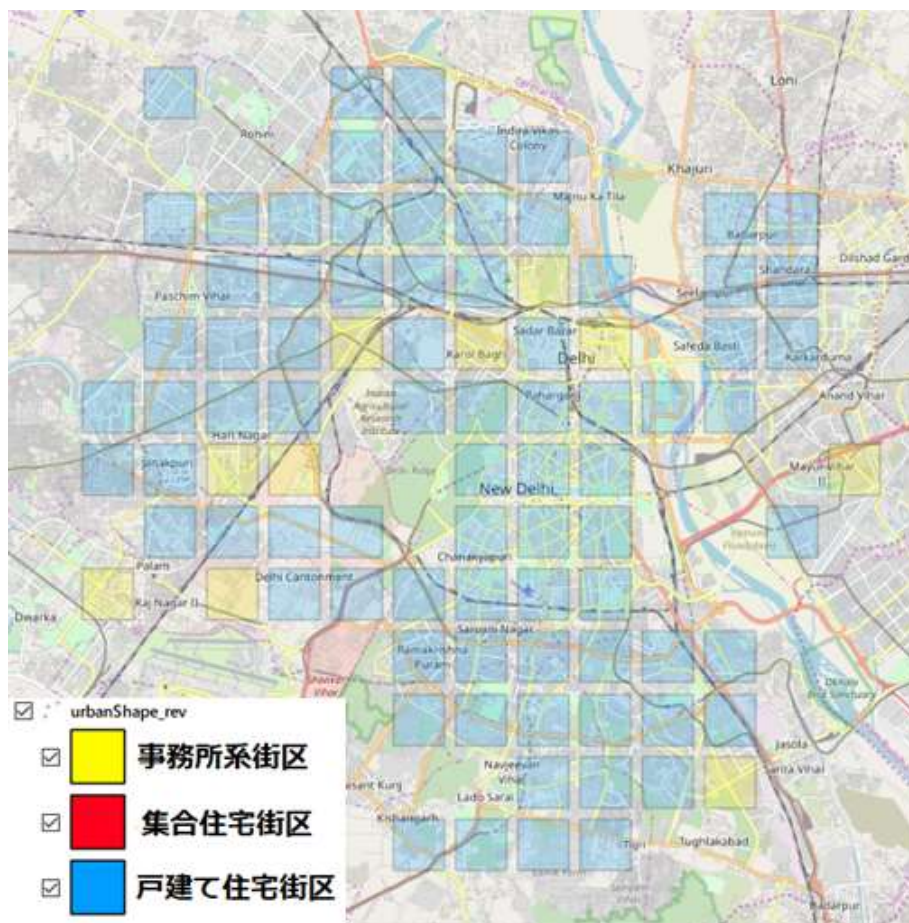


図 3-6 LCZ を参考に分類したデリーの建物用途別の街区分類

### 3.2.2 水平面の街区形状

CM-BEM では、一つの街区内に底面の形が正方形で底面積が同じ建物が格子状に配列していると仮定する[55]。図 3-7 にその様子を示す。ここで  $b$  は平均建物幅、 $w$  は平均道路幅である。

本研究では、文献[56][57]を参考に、夜間の人口密度と GDP から  $b$  と  $w$  を求める手法を提案する。式(3-1)から(3-8)に平均建物幅  $b$  と平均道路幅  $w$  を求める計算の流れを示す。ここで  $GDP_{city}$  と  $PD_{city}$  はそれぞれ対象の都市の GDP と人口密度、 $GDP_{country}$  と  $PD_{country}$  はそれぞれ対象の都市が存在する国全体の GDP と人口密度、 $PDNL$  は夜間照明で補正された人口密度 (Population Density adjusted by nighttime lights)、 $PDNL_{max}$  は対象の都市において最も大きい値となる  $PDNL$  の値、 $H_{avg}$  は平均建物高さ、 $\lambda_p$  は建蔽率、 $\lambda_f$  は粗度立面積密度を指す。 $PDNL$  は、Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) [58]によって得られた夜間照明データを用い、LandScan™[59]の人口分布のデータセットを補正することで算出することができる。

本研究では、東京工業大学神田研究室が作成した $\lambda_p$ 、 $\lambda_f$ 、および $H_{avg}$ から、街区の大きさに応じた  $b$  と  $w$  を抽出した。

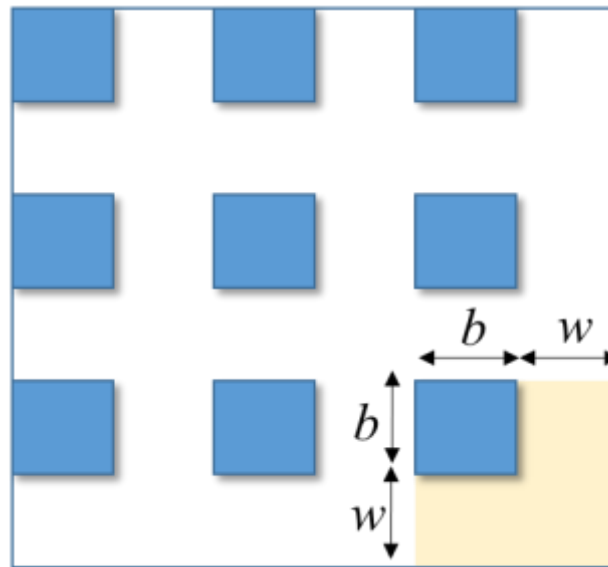


図 3-7 一次元キャノピーモデルにおける街区内の建物の配列

$$\text{GDP}_{\text{city}} = \text{GDP}_{\text{country}} \times \frac{\text{PD}_{\text{city}}}{\text{PD}_{\text{country}}} \quad (3-1)$$

$$\beta_{H_{avg}} = -2 \times 10^{-12} \times \text{GDP}_{\text{city}} + 9.18 \quad (3-2)$$

$$\alpha_{H_{avg}} = 2 \times 10^{11} \times \text{GDP}_{\text{city}} + 9.80 \quad (3-3)$$

$$H_{avg} = \alpha_{H_{avg}} \times \left( \frac{\text{PDNL}}{\text{PDNL}_{\text{max}}} \right) + \beta_{H_{avg}} \quad (3-4)$$

$$\lambda_p = -0.2532 \times \left( \frac{\text{PDNL}}{\text{PDNL}_{\text{max}}} \right)^2 + 0.4562 \times \left( \frac{\text{PDNL}}{\text{PDNL}_{\text{max}}} \right) + 0.1125 \quad (3-5)$$

$$\lambda_f = 1.42\lambda_p^2 + 0.4\lambda_p \quad (0.45 > \lambda_p > 0.05) \quad (3-6)$$

$$b = \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \times H_{avg} \quad (3-7)$$

$$w = b \times \frac{1 - \sqrt{\lambda_p}}{\sqrt{\lambda_f}} \quad (3-8)$$

### 3.2.3 街区の高度別建物存在割合

前節の式(3-4)において街区内の平均建物高さ $H_{avg}$ を求めたが、CM-BEMでは $H_{avg}$ ではなく、街区内の高度が $z$ を超えるビル数の全ビル数に対する割合（高度別建物存在割合） $P_w(z)$  ( $0 < P_w(z) < 1$ ) が入力データとして必要になる[55]。図 3-8 に高度別建物存在割合 $P_w(z)$ の概念図を示す。

高度別建物存在割合 $P_w(z)$ の算出には、対象地域内の建物の高さを一つ一つ算出することが必要である。建物高さのデータは、例えば日本であれば Google Earth Pro を用いることで、web 上において無料で多くの建物高さデータを入手することができる。一方デリーの建物高さデータは不足しており、都心部においても高さデータが存在する建物はほとんどなかった。図 3-9 にその様子を示す。そこで本研究では、文献[60]の手法を参考に、衛星画像から対象地域の建物高さを抽出し、そこから土地の標高を引くことで個々の建物高さを求め、そこから街区ごとの高度別建物存在割合を求める手法を採用した。

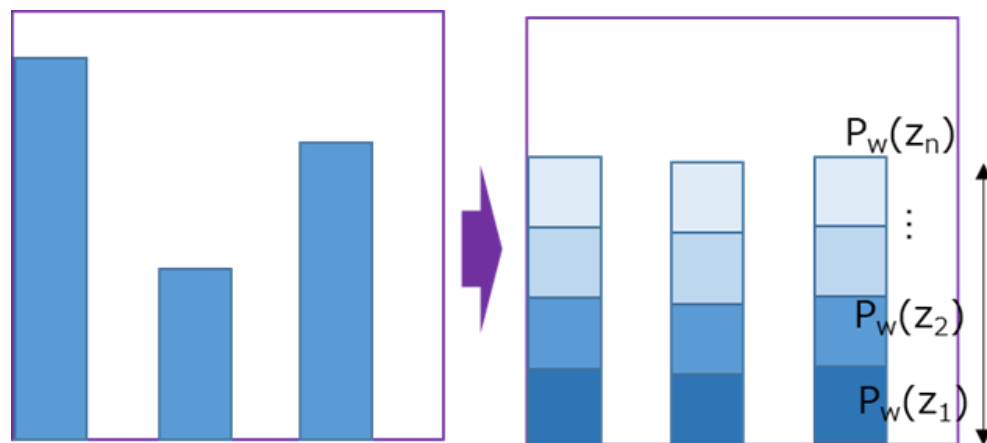


図 3-8 高度別建物存在割合の概念図



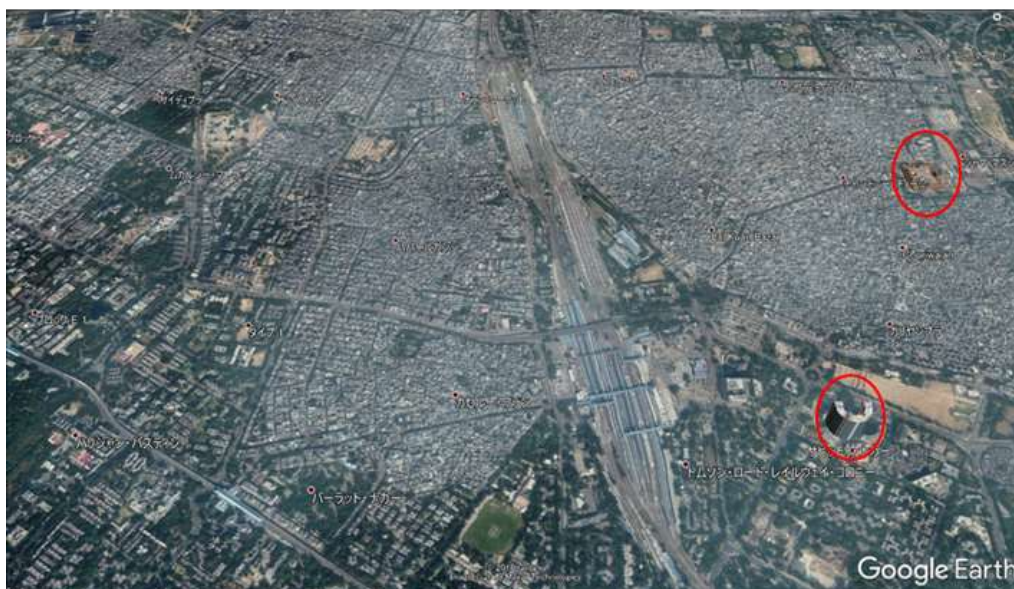
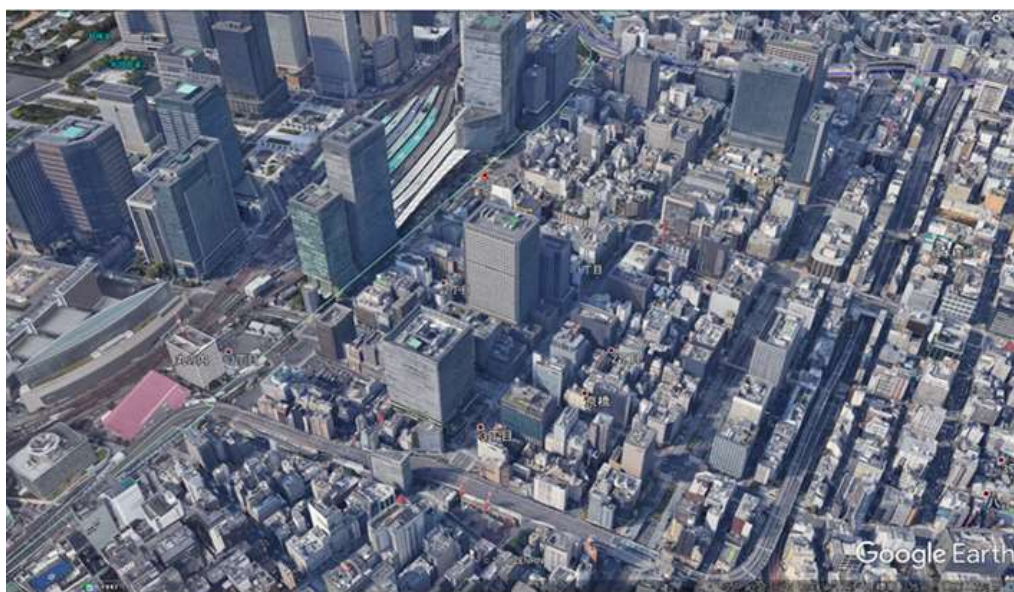


図 3-9 Google Earth Pro 上で確認できる建物の 3 次元データ数の比較（上図; 東京駅周辺, 下図; Sadar Bazar 駅周辺）

衛星画像は株式会社 PASCO から購入した人工衛星 Pleiades のデータ[61]を使用した。また画像処理には NASA が提供するステレオマッチングツールである Ames Stereo Pipeline (ASP) のバージョン 2.6.0[62]を使用した。ステレオマッチングとは、同じ対象物を異なる二つ以上の点から撮影した画像を用いて、対象物の 3 次元情報を抽出する手法である。ASP によって得られた高さデータは地形の高さを含んでいるため、GIS の地理統計ツールを用いて地形の高さを差し引く必要がある。これらの手法の詳細は文献[60]を参照されたい。なお ASP は Linux および Mac OS でのみ扱うことが可能なので注意する必要がある。

これらの手法に基づいて高度別建物存在割合の抽出を試みたが、衛星画像データの容量が大きく、GIS による抽出作業中にフリーズしてしまった。手法としては汎用的だが、実際に処理をおこなう上では、ワークステーションを拡充する、GIS 上の作業の前に画像を分割し領域を狭めて作業する、といった工夫が必要になるだろう。本研究では高度別建物存在割合を求めることができなかったため、前節で求めた  $H_{avg}$  を基にインプットデータを作成した。

#### 3.2.4 交通排熱

交通排熱データは街区別・時刻別に用意する必要がある。本研究では既往研究[24]で用いた交通排熱データをそのまま使用した。このデータは文献[17]で作成されたものであり、以下の式に従って運輸部門での排出物質を算出している。

$$E_{T_i} = \frac{A_i}{A_{Total}} \times E_T \quad (3-9)$$

$$A_i = \sum_{n=1}^3 A_{i_n} \quad (3-9)$$

$E_{T_i}$  および  $A_i$  はそれぞれ  $i$  番目の街区の排出物質の排出量と道路面積を、 $n$  は道路の種類を（文献[17]では高速道路、一般道路、支線の 3 種類を設定している）、 $E_T$  および  $A_{Total}$  はデリー全体の排出物質の排出量と道路面積を表している。そうして得られた排出物質からガソリン・軽油・CNG の総消費量を熱量換算し推計した[24]。なお、デリー市内の道路面積や排出物質の排出量の出典は記載されていたが、街区ごとの道路面積の算出方法は明記されていなかった。

### 3.2.5 壁体構成・熱物性値

BEM の計算に必要な建物の壁体構成および熱物性値、日射反射率といったパラメータは、インドの建築基準である Energy Conservation Building Code (ECBC) [63]および現地の建築コンサルタントへのヒアリング調査を参考にした。

表 3-4 にオフィス街区の壁体構成および熱物性値を示す。今回得られたデータは延床面積が 10,000m<sup>2</sup> より小さい小規模なオフィスのものである。そのために側壁の主な材質がコンクリートではなくレンガになっていると推察される。ECBC は業務建物に関して子細に分類しており、ホテルや学校、病院、ショッピングモールなどの建築基準も定めている。そのため、モデル側で業務建物の種類を細分化することができればより精度の高い計算をおこなえるようになるだろう。

住宅建物の建築基準は Eco-Niwas Samhita 2018 (Energy Conservation Building Code for Residential Buildings, ECBC-R) [64]によって規定されている。しかしこのデータは個々の建築素材の熱物性値の基準を設定していることに留まり、代表的な住宅建物の壁体構成や壁の厚みなどの情報は記載されていなかった。これらの情報は現地のカウンターパートに依頼して調達する必要があるだろう。本研究では戸建て住宅の壁体構成として、デリーと同じアジアの新興国のメガシティであるジャカルタの結果を暫定的に使用するものとする。表 3-5 に戸建て住宅街区、表 3-6 に集合住宅街区の壁体構成および熱物性値を示す。なお表の値はジャカルタでの既往研究[43]で用いられたものを一部改変しているが、これは既往研究において誤ってジャカルタではなく東京の値が一部使用されており、本研究でその誤りを修正したためである。

表 3-4 オフィス街区の建物の壁体構成と熱物性値

屋上面	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
モルタル	0.02	0.67	1554784.86	0.03	31095.70	33.33
レンガ	0.05	0.63	1916674.44	0.08	95833.72	12.60
コンクリート	0.15	1.67	1072265.42	0.09	160839.81	11.13
石膏	0.01	0.73	1554784.86	0.01	12438.28	90.15
側壁	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
石膏	0.01	0.73	0	0.02	0	60.77
レンガ	0.23	0.72	1608398.13	0.32	369931.57	3.13
石膏	0.01	0.73	1554784.86	0.01	12438.28	91.15

表 3-5 戸建て住宅街区の建物の壁体構成と熱物性値

屋上面	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
タイル	0.02	1.30	2009304.00	0.01	30139.56	86.53
密閉中空層	0.10	0	0	0.17	0	6.06
石膏ラスボード	0.01	0.17	1028512.49	0.07	12342.15	14.17
側壁	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
石膏	0.02	0.53	1632559.50	0.04	32651.19	26.65
レンガ	0.15	0.64	1389768.60	0.23	208465.29	4.26
石膏	0.02	0.53	1632559.50	0.04	32651.19	26.65

表 3-6 集合住宅街区の建物の壁体構成と熱物性値

屋上面	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
石膏	0.01	0.533	1632559.5	0.018761726	16325.595	53.3
コンクリート	0.20	1.45	1933955.10	0.14	386791.02	7.24
密閉中空層	0.10	0	0	0.17	0	5.75
石膏ラスボード	0.01	0.17	1028512.49	0.07	12342.15	14.17
側壁	長さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗	熱容量	熱貫流率
	[m]	[W/mK]	[J/m <sup>3</sup> K]	[m <sup>2</sup> K/W]	[J/m <sup>2</sup> K]	[W/m <sup>2</sup> K]
石膏	0.02	0.53	1632559.50	0.04	32651.19	26.65
レンガ	0.15	0.64	1389768.60	0.23	208465.29	4.26
石膏	0.02	0.53	1632559.50	0.04	32651.19	26.65



### 3.2.6 スケジュール

スケジュールとは、建物内における日間の在室率や各種機器の稼働率のことである。壁体構成や熱物性値と同様に、スケジュールも ECBC[63]および現地の建築コンサルタントへのヒアリングを基に作成した。図 3-10 に本研究で更新したスケジュールを示す。また前節と同様に住宅街区においてはスケジュールを入手することができなかったため、住宅街区のスケジュールはジャカルタの既往研究[49]のものを使用した。

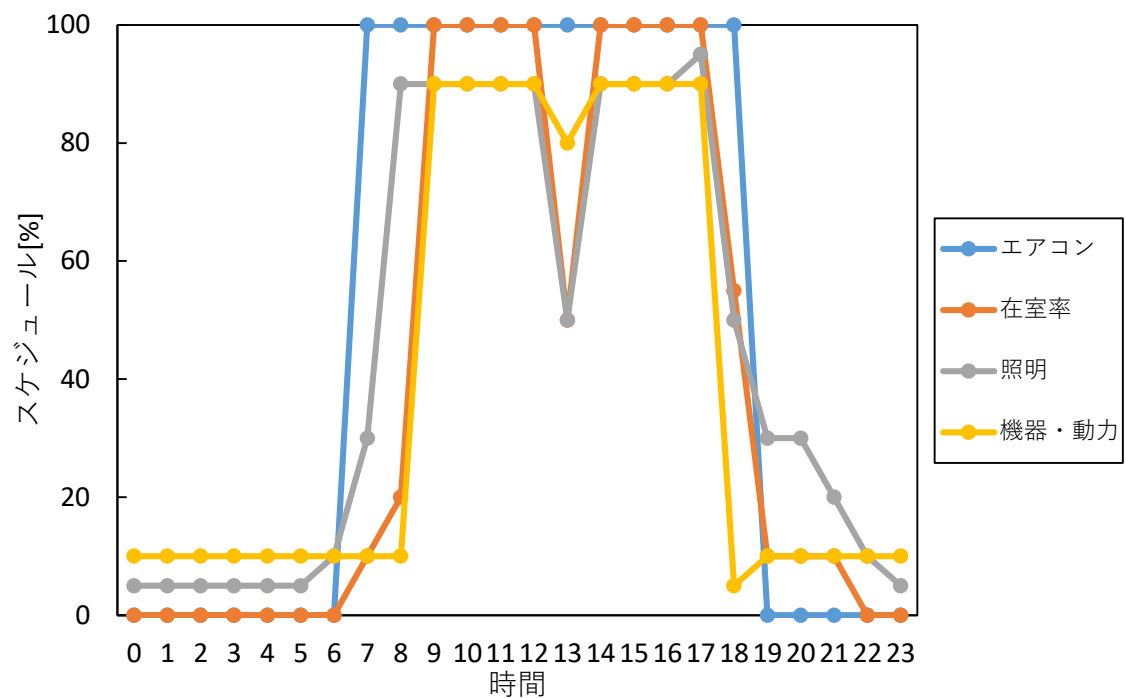


図 3-10 デリーの値に更新したオフィス街区の一部のスケジュール（平日）

### 3.2.7 その他の入力パラメータ

その他本研究で用いたパラメータとしては、緑被率や水面率はデリーの既往研究[24]の値を、空調機器の性能や建物の日射反射率はジャカルタの既往研究[49]の値を用いた。土壌や大気の温度の初期値は、東京の既往研究[65]の値を基に作成したジャカルタの既往研究[66]の値を用いた。

### 3.3 まとめ

この章では、本研究において使用した **WRF** および **CM-BEM** の入力パラメータについて、入手方法や汎用性について詳細に説明した。

**WRF** については、**GIS4WRF** を使うことで **WRF** に馴染みがない人でも簡単に計算がおこなえるようになった。一方で **WRF** の計算には入力項目が非常に多く、**GIS4WRF** によって操作性が向上してもなお短期間での習得は難しいと感じた。入力項目のほとんどはデフォルト値で差し支えないと思われるが、一方で計算領域のサイズや物理パラメータの設定などは自分で設定する必要がある、それらについては対象地域の既往研究のレビューが必要になる。4 章で詳細に述べるが、本研究の **WRF** の計算結果の精度には難があるため、上記の項目以外にも適切な設定を模索すべきであろう。

**CM-BEM** の入力項目については、街区の種類、街区の水平面の形状、高度別の建物高さ割合の 3 つについて、現地に赴くことなく汎用的にデータを集める手法として提案した。交通排熱データは、道路面積データを入手すれば計算することができ、その際に現地のカウンターパートへのヒアリング調査が必要である。スケジュールや建物の熱物性値については、事務所系建物については建築基準から入手することができたが、住宅系建物については現地のカウンターパートへのヒアリングが必要であった。また、デリーの建築基準は英語で記述されていたが、ジャカルタなど、現地の母語で記述されている建築基準のみ存在する場合もある。建物に関する入力パラメータは現地のカウンターパートに対するヒアリングが不可欠であり、汎用的に入手する手法を提案することは難しいと結論付ける。

## 4. 計算結果

### 4.1 WRF による計算結果の妥当性の検証

#### 4.1.1 妥当性の検証に用いた観測データおよび計算条件

本研究では既往研究[10]において観測されたデータを計算値との比較に用いた。図 4-1 に観測地点の分布を示す。観測期間は 2010 年 3 月 6 日から 3 月 10 日であり、デリー市内 27 箇所で地上 1.5 m の気温を計測した。また 2 箇所で日射や風向・風速といった気象要素の観測をおこなった。気温は 0.1 °C 単位、10 分間隔で観測し、センサーの誤差は ± 0.3 °C であった。

観測期間に合わせ、WRF の計算期間は 2010 年 3 月 4 日 0 時から 2010 年 3 月 11 日 0 時の 8 日間に設定した。最初の 3 日間を助走期間とし、3 月 7 日から 3 月 10 日の 4 日間の計算結果を観測値との比較に用いた。WRF の計算格子の大きさは、CM-BEM に合わせるために 2 km 四方に設定した。本研究では都市気象シミュレーションによって外気温とエネルギー消費量を評価するため、それらに対して大きく影響を与える可能性がある日射と気温について、計算値と観測値の比較をおこない妥当性を検証した。

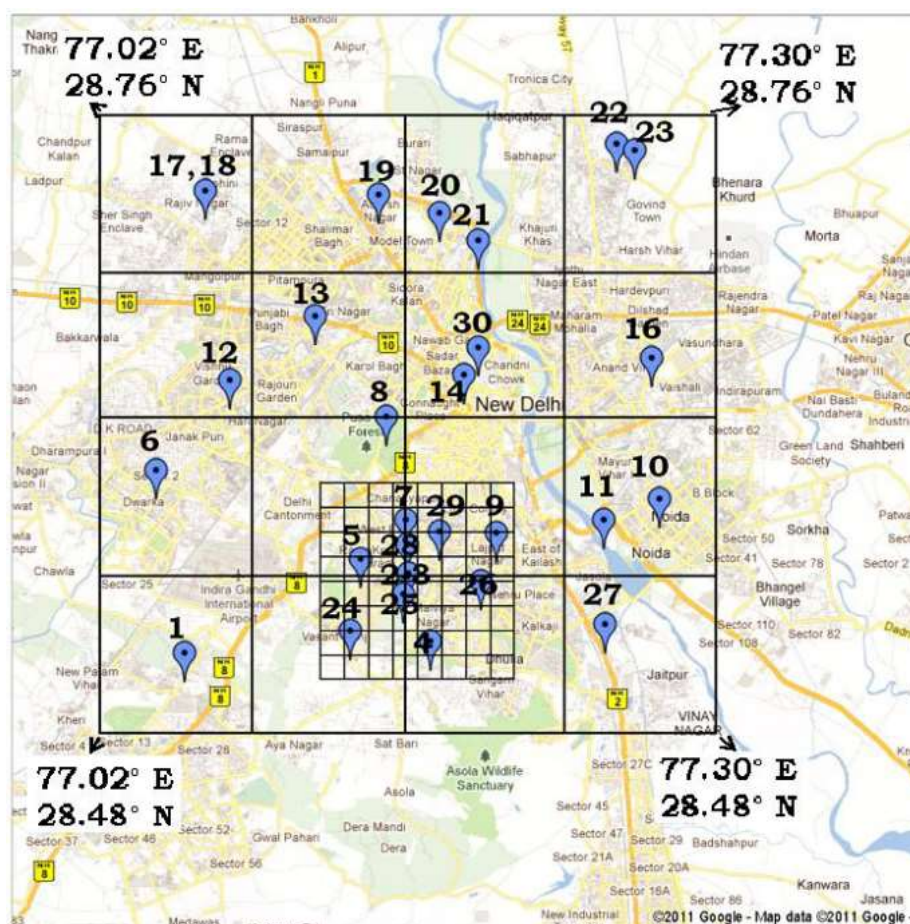


図 4-1 観測地点の分布[67]

#### 4.1.2 日射

図 4-2 および図 4-3 に日射の観測値と WRF の計算値を比較した結果を示す。図 4-2 は図 4-1 における観測地点 14、図 4-3 は観測地点 18 での比較の結果を示している。どちらも日間の気温パターンの変化は概ね再現できているが、観測値に比べて計算値が過大評価している。観測値に対する観測値と計算値の差分の割合は、観測地点 14 では 18.3 %、観測地点 18 では 16.9 %だった。なお、差分の割合を求める際、日の出および日の入り前後の時間は日射量が少なく誤差が極端に大きくなってしまったため、それらの時間を排除し 10 時から 16 時の日射データを基に算出した。

この過大評価は、WRF の放射スキームが雲の影響を正しく考慮できていないためだと考えられる。本来であれば補正すべきであるが、補正をするためには曇天日の日射データが必要である。デリーでは観測データが少なく曇天日の日射データを得ることができず、補正を試みたものの妥当な結果を得ることができなかった。

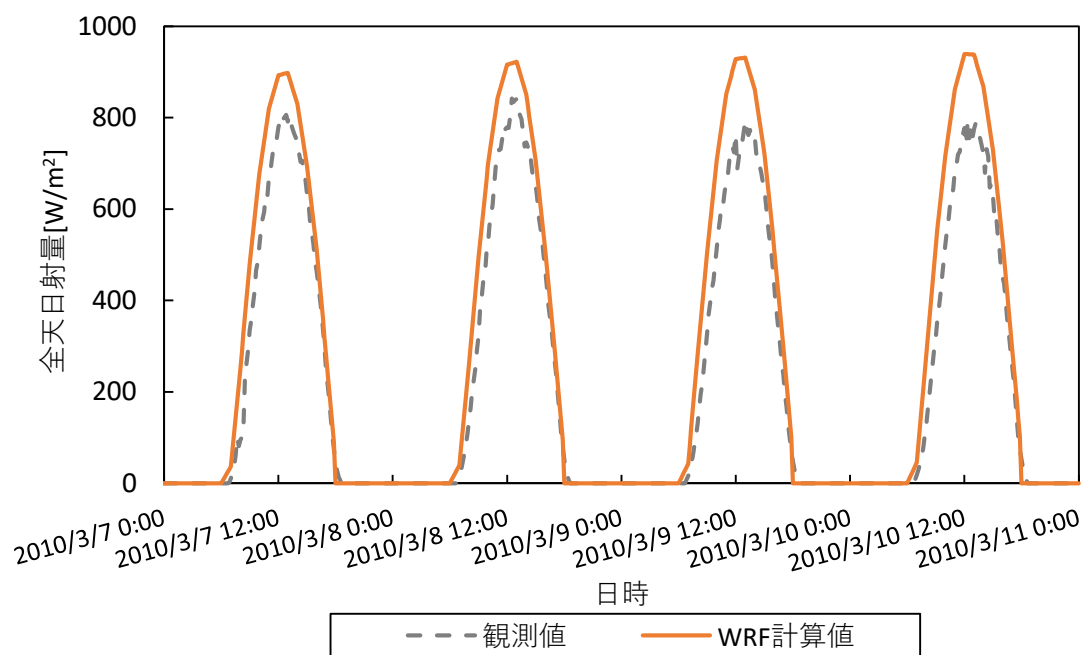


図 4-2 全天日射量の観測値と計算値の比較（観測地点 14）

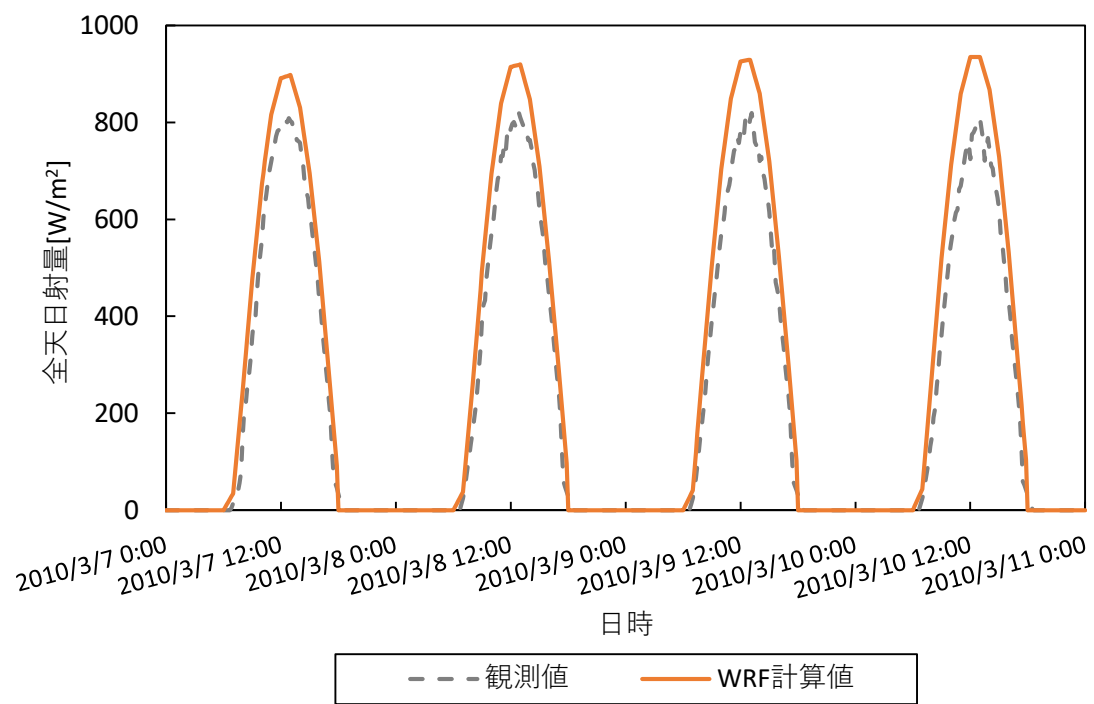


図 4-3 全天日射量の観測値と計算値の比較（観測地点 18）

#### 4.1.3 気温

図 4-4 に WRF の計算気温と観測気温の時刻別の比較を、図 4-5 に散布図による比較を示す。図 4-4 の観測気温は 25 箇所の観測値の平均値を、計算気温には、観測地点の存在するグリッドの計算値の平均を使用した。図 4-5 のサンプル数は 14,425 である。

図 4-4 では、再現性における難点として二つの点が挙げられる。まずは、最高気温のピークが計算気温と観測気温で異なる点である。比較に用いた 4 日間における気温のピークの平均は、観測気温は 14:30、計算気温は 16:30 だった。前節より、日射のピーク時間は大きく異なることから日射以外の要因が原因だと思われる。助走期間が 3 日間と十分長いとは言えないため、土壌の含水率や初期温度の設定が実際の観測時の状況と乖離しており、土壌の熱容量が大きくなり日中の気温上昇が過大になってしまった可能性がある。しかし、本研究と同じ実測値を使って WRF の計算結果と比較した既往研究[28]では、本研究よりもさらに短い助走期間だったにも関わらず、本研究と比較してピーク気温の時間の誤差が小さい結果になっている。土壌の熱容量に関する設定や助走期間以外にも確認すべき点がある可能性がある。

二点目として、WRF の計算気温が観測気温よりも過大評価している点が挙げられる。前節で述べた日射の過大評価の他、計算領域の土地被覆が単一の都市街区で統一されており、緑地や河川の被覆を反映できていないことが原因である可能性がある。WRF 計算時の LU\_INDEX というパラメータを変更することで土地被覆を変更することができるが、調査が足りずデフォルト値を使っていた。なお、既往研究[28]では土地被覆を変更して計算をおこなっていたが、論文から出典を知ることができなかった。LU\_INDEX のデータを汎用的に得ることができるかどうかについては調査する必要がある。

最後に統計的な正しさについて議論する。図 4-5 における平均絶対誤差 (MAE) は  $2.69^{\circ}\text{C}$ 、平均平方二乗誤差 (RMSE) は  $3.36^{\circ}\text{C}$ 、線形回帰式の決定係数 ( $R^2$ ) は 0.67 となった。既往研究[28]では多くの地点で MAE が  $2^{\circ}\text{C}$  を下回り、都市街区においては MAE が  $0.92^{\circ}\text{C}$  から  $1.32^{\circ}\text{C}$  だった。また RMSE については、既往研究[28]では  $1.13^{\circ}\text{C}$  から  $1.63^{\circ}\text{C}$ 、既往研究[27]では  $2.54^{\circ}\text{C}$ 、既往研究[24]では  $1.793^{\circ}\text{C}$  だった。既往研究[28][27]はデリーでの WRF 計算、既往研究[24]はデリーでの都市気象計算による計算結果である。既往研究と比較して、本研究の WRF の計算精度は低いと言える。既往研究[28][27]を参考に条件を設定したにも関わらず結果が一致しない点は不可解であり、本研究で確認した入力項目以外の項目について確認する必要があると思われる。

本研究の WRF の計算結果は統計的に観測値と一致したとはいえないが、気温の日間パターンを概ね再現できていること、および本研究では対策技術の導入効果を分析し、その際には対策導入前と導入後の差異にのみ注目することから、本研究の WRF の計算結果を CM-BEM の初期気象条件として使用することは妥当であると判断した。

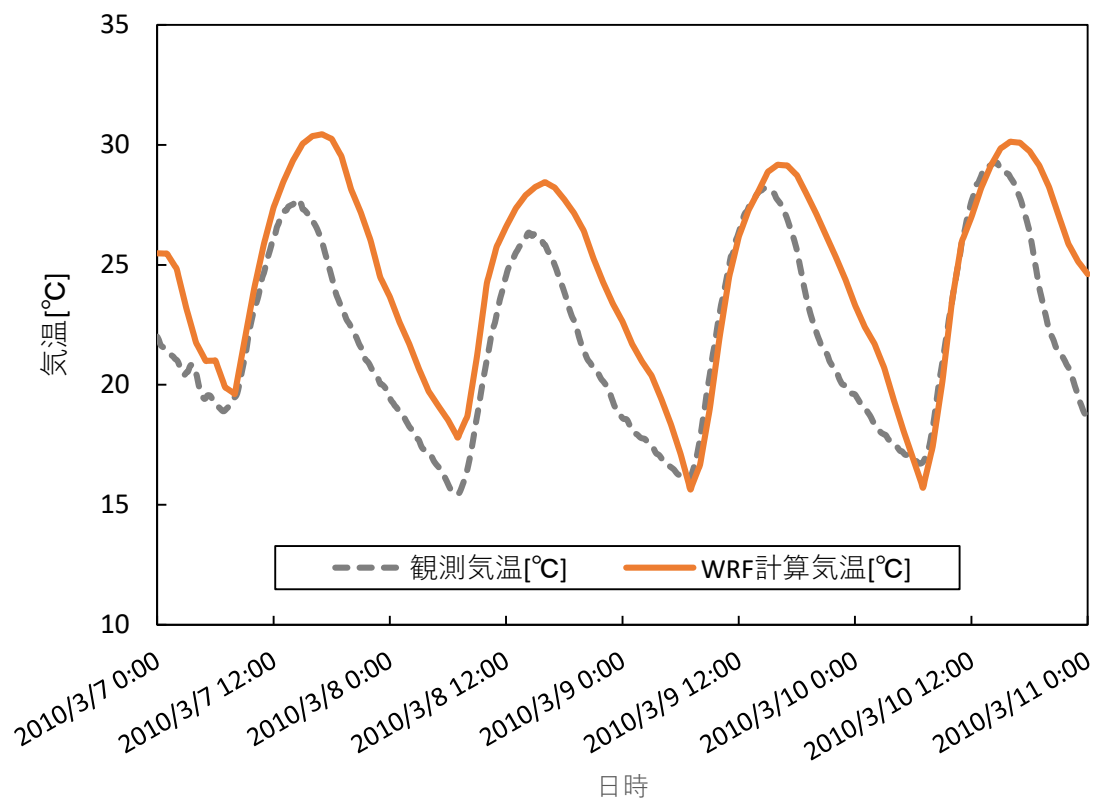


図 4-4 観測気温と WRF 計算気温の平均値の比較 (時刻別)

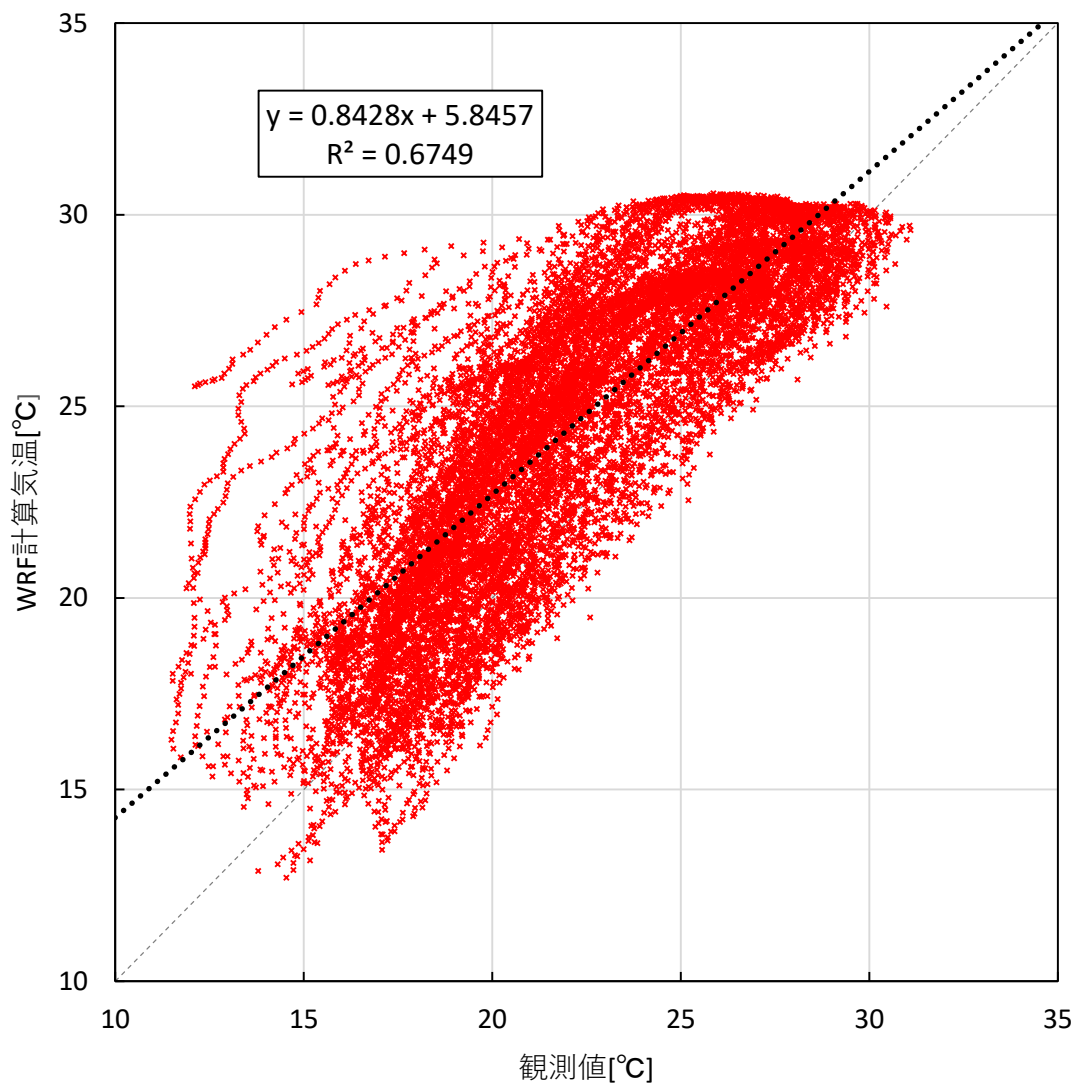


図 4-5 観測気温と WRF の計算気温の比較（散布図）



## 4.2 CM-BEM による計算

### 4.2.1 計算条件

表 4-1 に本研究での CM-BEM 計算の基本的な計算条件を示す。計算期間は WRF の計算期間に準拠し、2010 年 3 月 4 日から 3 月 11 日までとした。計算街区の大きさおよび計算街区数は既往研究[24]の交通排熱データに準拠した。街区の分類は 3.2.1 節を参照されたい。また図 4-6 に CM-BEM の計算街区を示す。黄色い街区が事務所系、青い街区が戸建て住宅、赤い点が観測地点である。

表 4-1 本研究での CM-BEM 計算の 計算条件

計算期間	2010/03/04 IST0:00 - 2010/03/11 IST0:00
街区の大きさ	2 km × 2 km
計算街区数	89 (事務所系 : 10、戸建て住宅 : 79)

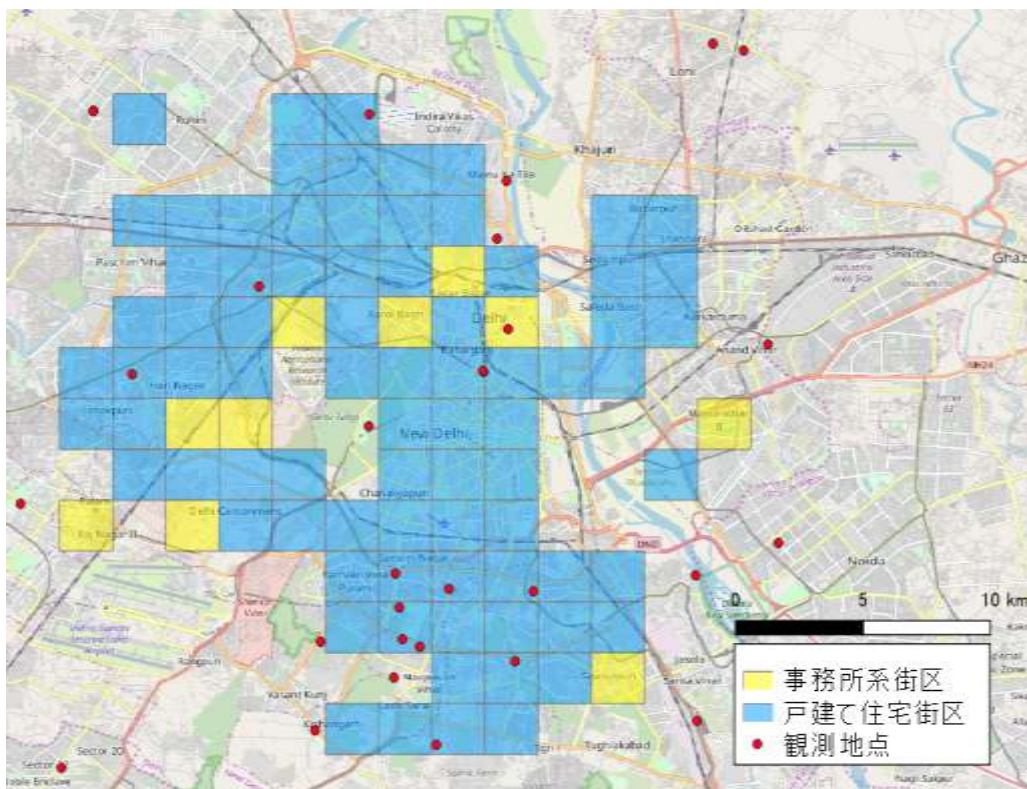


図 4-6 CM-BEM の計算街区

#### 4.2.2 計算結果

図 4-7 に CM-BEM の計算気温と、観測気温および WRF の計算気温との比較を示す。観測地点を含む街区のうち CM-BEM の計算に成功した街区が 10 街区あり、図 4-7 はそれらの平均値を取ったものである。CM-BEM の計算気温は WRF の計算気温よりもさらに観測気温より過大評価している。しかしこれは、WRF の計算気温を初期条件とし都市の排熱や熱容量をより詳細に考慮した結果であるため、必ずしも CM-BEM の気温の再現精度が低いことを表しているわけではない。

図 4-7 より、昼（12 時から 15 時）と明け方（3 時から 6 時）に CM-BEM の計算気温が WRF の計算気温より高くなることがわかる。日射は WRF で算出したものを CM-BEM の計算にも用いているため、4.1.2 節で示した日射の過大評価が原因ではないと思われる。昼に CM-BEM の計算気温が高くなるのは、WRF で考慮しなかった人工排熱の影響を詳細に考慮しているためだと思われる。図 4-8 に全 89 街区の交通排熱を平均し時刻別にプロットした様子を示す。交通排熱は 8 時から 18 時の日中に特に増加し、これが CM-BEM 計算気温の昼間の上昇に寄与しているのではないかと考える。また明け方の CM-BEM 計算気温が高くなったことについては、WRF の計算よりも壁体の熱容量を詳細に考慮した結果、WRF よりも都市全体の熱容量が大きくなり、昼間に蓄えた熱を夜間に放出したためだと考える。

以上より、CM-BEM の計算気温が WRF の計算気温よりも高くなった原因を考察し、人工排熱および熱容量の増加が原因であると推察した。WRF の計算気温よりも CM-BEM の計算気温の方が観測気温に対して過大評価しているものの、本研究では対策技術の導入による気温低減効果、およびエネルギー消費量の削減効果を確認することが目的であること、また 4.1.3 節でも議論したように WRF 計算の時点で大きく過大評価しており、CM-BEM の計算結果は WRF の計算結果に大きく基づいていることから、CM-BEM の計算結果が観測気温を高精度に模擬できていないことについての議論は省略する。

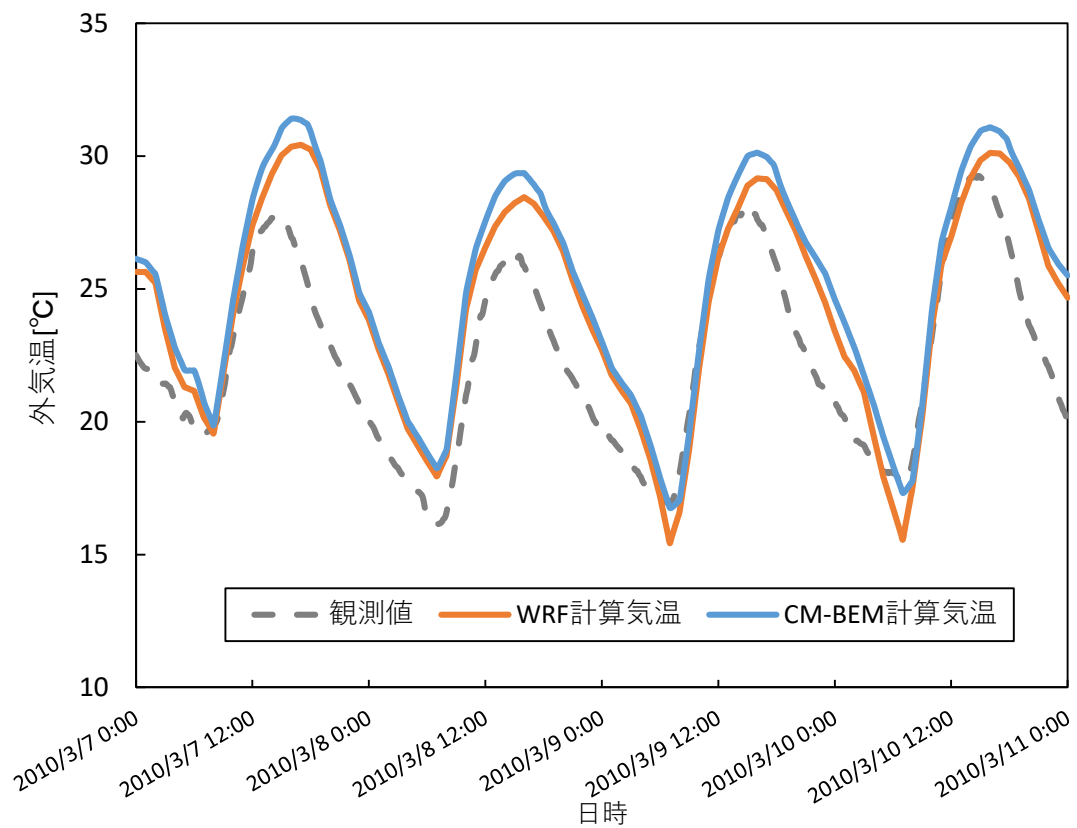


図 4-7 CM-BEM 計算気温と観測気温および WRF 計算気温の比較

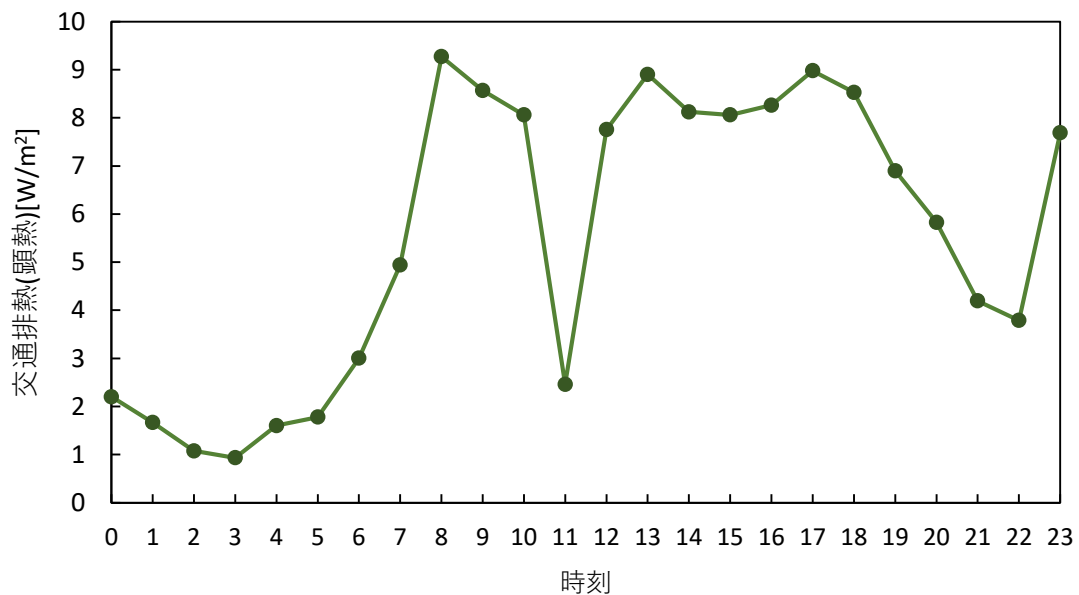


図 4-8 全街区平均した交通排熱（顕熱）の時刻別データ（文献[24]を基に作成）

## 4.3 対策技術の評価

### 4.3.1 計算条件

表 4-2 に本研究で評価する対策技術をまとめる。これらの対策技術は CM-BEM の入力パラメータの一部を変更することで再現することが可能になる。屋上面の高反射化は屋上面の日射反射率を 20 %から 60 %に引き上げることで表現した。断熱材の導入は、戸建て住宅にグラスウールを、事務所系建物にスチレン発泡板を挿入することで表現した。エアコンの普及率の増加は、デリーの実際の住宅における普及率である 30 %から 100 %に増加することを想定した。なお、デリーの住宅におけるエアコンの普及率は現地の建築コンサルタントへのヒアリング調査によって入手した。これらの対策技術のケース設定およびパラメータについては既往研究[49]を参考にした。

対策技術を導入しないケースをケース 0 とし、屋上面の高反射化を実施したケースをケース 1、断熱材を導入したケースをケース 2、エアコンの普及率を増加させたケースをケース 3 とした。それぞれのケースについて、外気温と空調エネルギー消費量の削減効果を確認した。計算期間や計算街区については表 4-1 と同じ条件で計算する。計算結果は 7 日間の平均値を用いる。

表 4-2 考慮する対策技術の詳細

No.	対策技術	詳細
ケース 0	なし	
ケース 1	屋上面の高反射化	屋上面の反射率を増加 (20%→60%)
ケース 2	断熱材の導入	戸建て住宅：グラスウール (屋上：8.7 cm, 側壁：3.7 cm) 事務所系：スチレン発泡板 (屋上：15.8 cm, 側壁：6.4 cm)
ケース 3	エアコン	戸建て住宅街区のエアコンの普及率の増加 (30%→100%)

#### 4.3.2 ケース 1（屋上面の高反射化）の計算結果

図 4-9 にケース 1 とケース 0 の気温差を示す。屋上面の反射率を上げたことにより屋上面が日射の熱によって暖められにくくなり、その影響で都市全体の気温が下がっていることがわかる。戸建て住宅と事務所系建物で若干のピークの差異はあるものの、どちらも日中に気温削減量のピークを迎える。戸建て住宅街区のピークは $-0.040^{\circ}\text{C}$ 、事務所系街区のピークは $-0.022^{\circ}\text{C}$  だった。両街区ともに日射が出ていない時間帯の気温も下がっており、これは日中の気温が下がったことにより空調エネルギー消費量が減り、排熱が削減され都市全体の気温が下がったためであると思われる。

図 4-10 にケース 1 とケース 0 の空調エネルギー消費量の差を示す。戸建て住宅では気温の削減に伴うように、12 時をピークに日中の削減量が大きくなっている。戸建て住宅と比較して事務所系建物は不規則な削減パターンを示しているが、これは図 4-11 に示すように、事務所系建物の空調のエネルギー消費パターンに依存していると思われる。朝（7時から 9 時）や夜（19 時から 21 時）は空調を稼働・停止するため部分負荷運転になりエネルギー効率が悪化するため、空調エネルギーの削減ポテンシャルが大きい時間帯となり、図 4-10 に示すようなピークが生まれたと考えられる。

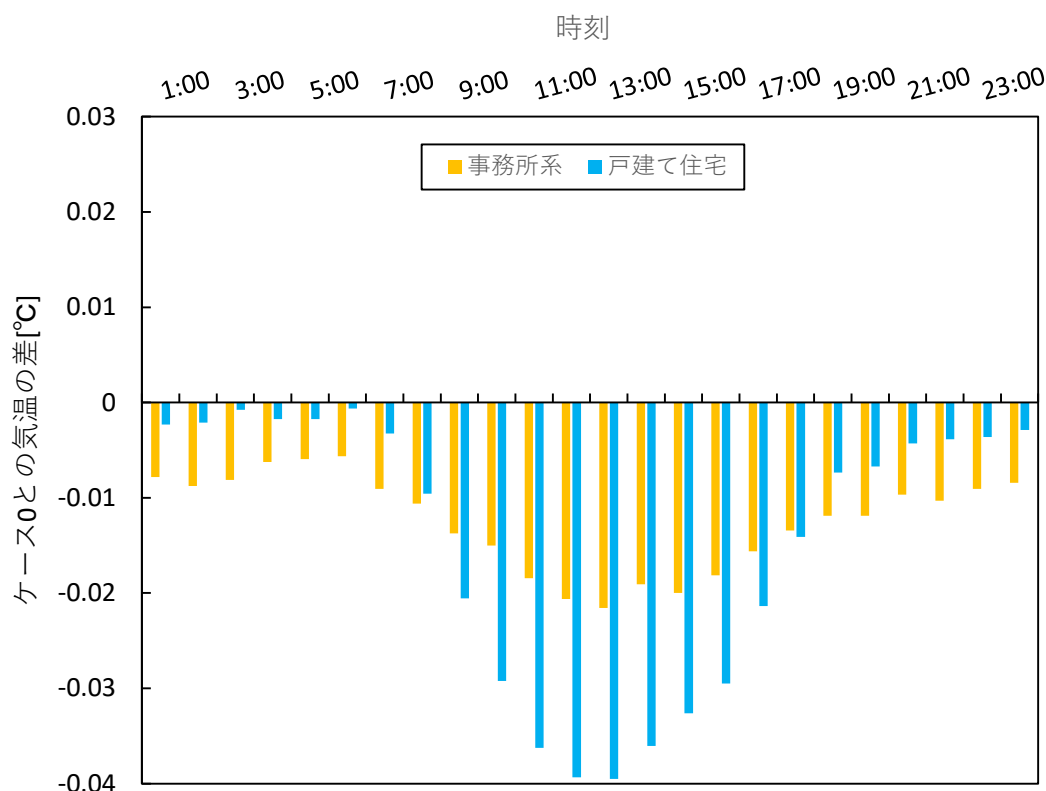


図 4-9 ケース 1（屋上面の高反射化）とケース 0 の気温差

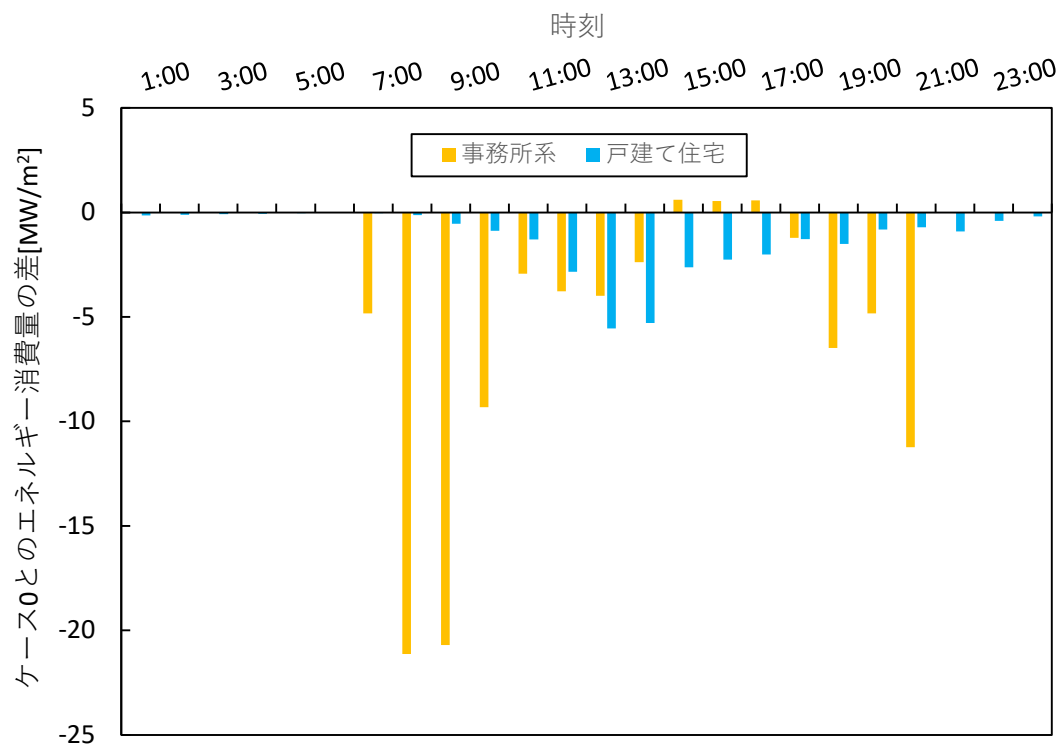


図 4-10 ケース 1（屋上面の高反射化）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差

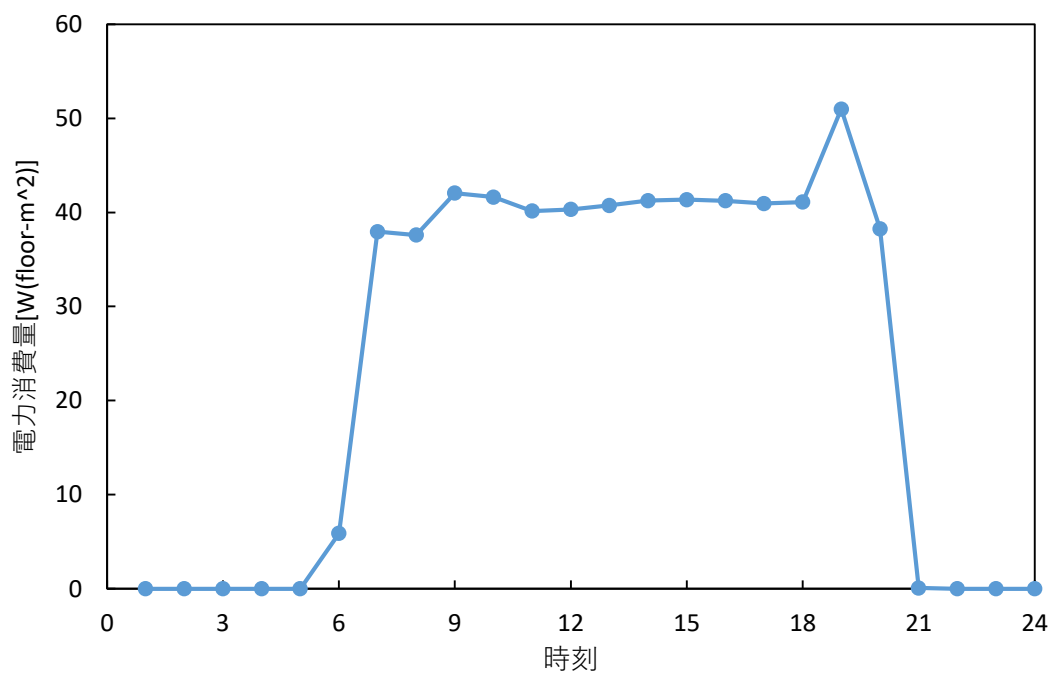


図 4-11 事務所系街区における空調エネルギー消費量の日間パターン

#### 4.3.3 ケース 2（断熱材の導入）の計算結果

図 4-12 にケース 2 とケース 0 の気温差を示す。事務所系建物は一日を通じて気温が削減されているが、最大削減気温は $-0.006^{\circ}\text{C}$ と非常に小さい。これは事務所系建物の方が戸建て住宅に比べて断熱材導入前の断熱性が高く、断熱材を導入した際の効果が弱いためだと思われる。一方で戸建て住宅は最大で $-0.029^{\circ}\text{C}$ の気温を削減している一方、昼間は 12 時をピークに対策の導入によってむしろ気温が上昇している。気温の上昇は最大で $0.020^{\circ}\text{C}$ と、削減気温のオーダーに等しく無視できない結果である。これは、本来であれば日中は屋外の方が屋内より気温が高くなり屋外から屋内に向けて熱の移動がおこなわれるところを、断熱材を導入したことによりその移動が阻害され、屋内に移動するはずの熱が屋外に留まったためだと推察される。夜間は逆に、屋内の方が屋外より気温が高くなるため、昼間と逆の減少が起き気温の削減につながったと思われる。

図 4-13 にケース 2 とケース 0 の空調エネルギー消費量の差を示す。事務所系建物は機器や照明の内部発熱が多く、ケース 1 と比較して断熱材の導入効果が小さくなっていると推察される。戸建て住宅では日中のエネルギー消費量の増減はほとんどなく、夜間にエネルギー消費量を大きく削減している。これは戸建て住宅では夜間に空調使用率が増加するため、断熱性を高めたことで空調効率が増加し、夜間のエネルギー消費量が減少したためであると推察される。

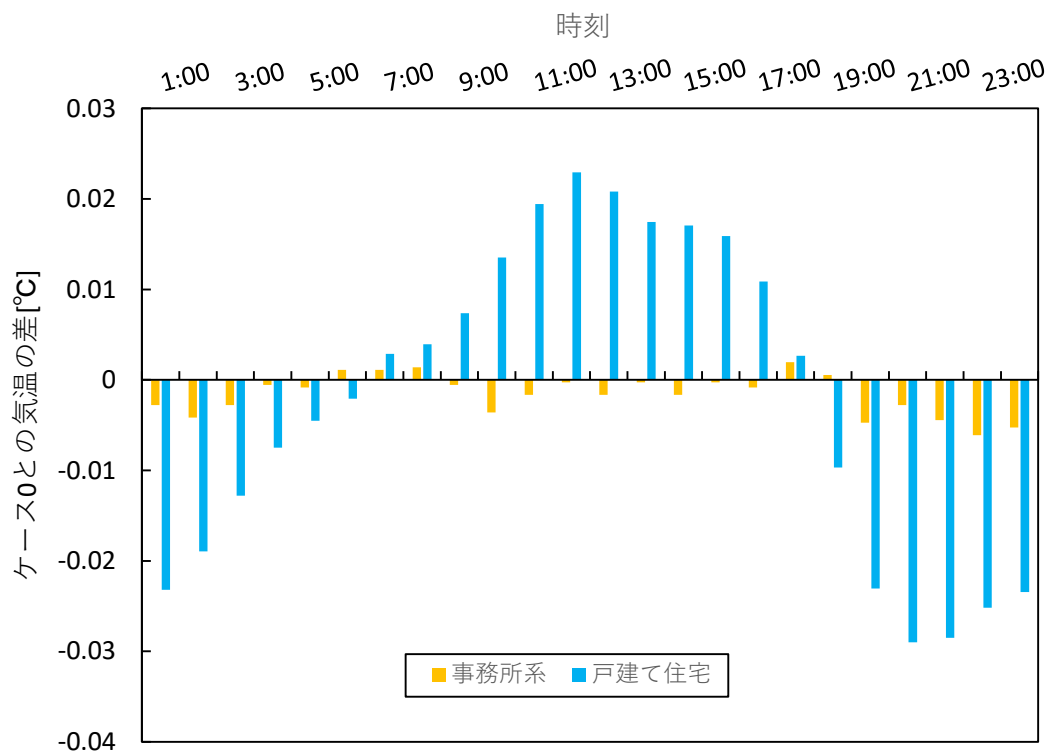


図 4-12 ケース 2（断熱材の導入）とケース 0 の気温差

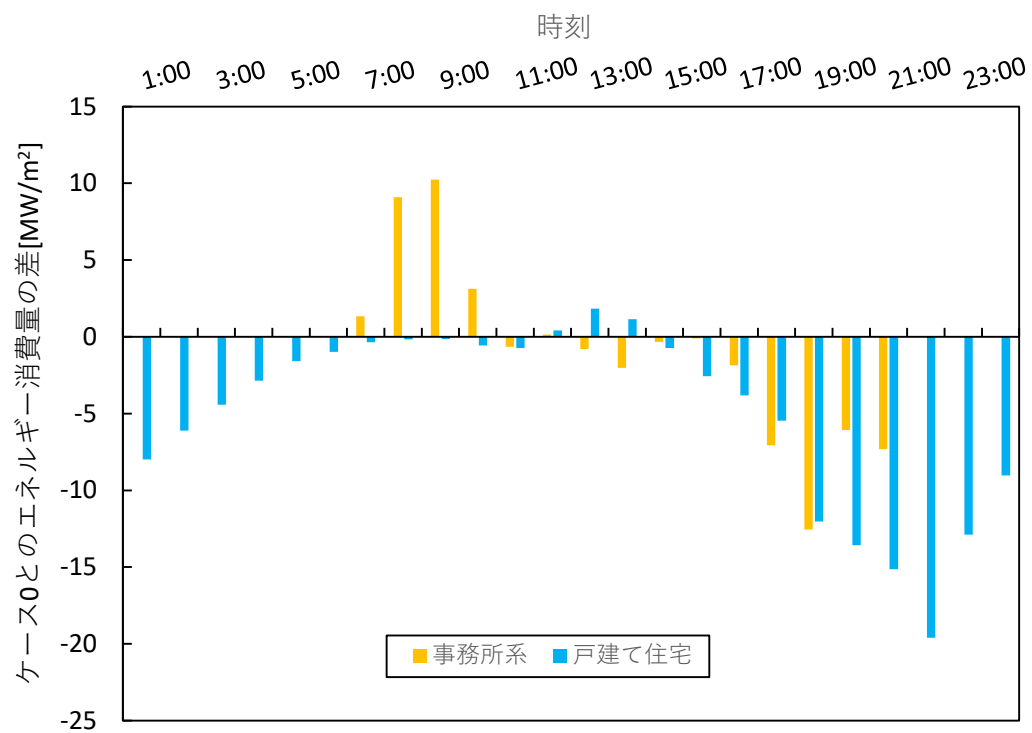


図 4-13 ケース 2（断熱材の導入）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差



#### 4.3.4 ケース 3（エアコンの普及率増加）の計算結果

図 4-14 にケース 3 とケース 0 の気温差を、図 4-15 にケース 3 とケース 0 の空調エネルギー消費量の差を示す。事務所系街区の気温差および空調のエネルギー消費量はほとんど変化がなかったが、これは戸建て住宅街区のエアコンの普及率のみを変化させているため妥当である。戸建て住宅街区について、エアコンの普及により昼間に気温が上昇し夜間に気温が下がっている。また、空調エネルギー消費量の割合は多くの時間帯で増えているが、朝（4時から9時）にかけて微量ながら減少している。エアコンの普及によってエアコンによるエネルギー消費量は増加し、その排熱によって外気温が上昇するのが妥当な解釈であり、これらの結果は一見不可解である。それを説明しうるのが空調室と非空調室の概念である。

BEM の計算において、空調が設置されている部屋の内空調が使用されている部屋を空調室、空調が使用されていない部屋を非空調室と呼称する。また BEM の計算では、一つの建物の内部に空調室と非空調室の二部屋のみ存在すると仮定する。今回はエアコンの普及率の増加を考慮したが、建物内における空調室の割合を変化させることで普及率の変化を表現している。具体的には、ケース 0 では建物内の空調室の割合が 24.8 %だが、ケース 3 では 82.8 %に設定した。ここで図 4-16 に、本研究で求めた戸建て住宅の空調室と非空調室の室温の日間パターンを示す。空調室は設定温度の 24 °C 前後に保たれているが、非空調室は空調の影響を受けないため一日の間で気温の変動があり、4時から9時の間にかけては空調室の気温を下回る。このとき、空調室の気温は非空調室よりも高くなる。これは即ち、空調室を 24 °C に保つために外気から熱を空調室内に取り入れているということである。このため、エアコンの普及率を上げることで大気の熱をより建物内に入れるようになり、屋外の熱が減って気温が下がると考えられる。また、4時から9時の間は空調室の室温が非空調室よりも高くなっており、裏を返せば非空調室が空調室よりも室温が低く、空調室を冷やしているという解釈が成り立つ。空調室は 24 °C を保つ必要があるので、非空調室の空気で冷やされれば、大気からより多くの熱を取り入れようと空調が稼働することになる。したがって、ケース 3 では空調面積割合を増やし非空調面積割合を減らしたため、非空調室によって空調室が冷やされる効果が弱まり、図 4-15 に示されるように朝に空調のエネルギー消費量が削減されたと思われる。

しかし上記の議論において、空調室を常に 24 °C に保とうとするエアコンの挙動は現実的でないことから、プログラム上の空調の稼働パターンを指定する箇所には誤りがある可能性がある。

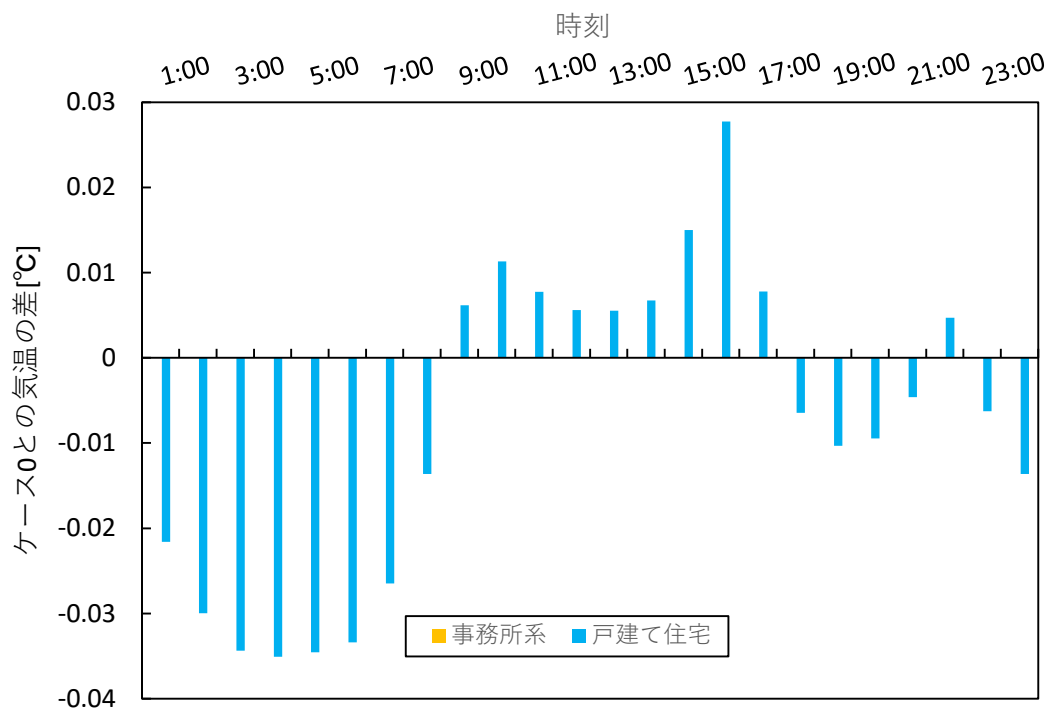


図 4-14 ケース 3（エアコンの普及率増加）とケース 0 の気温差

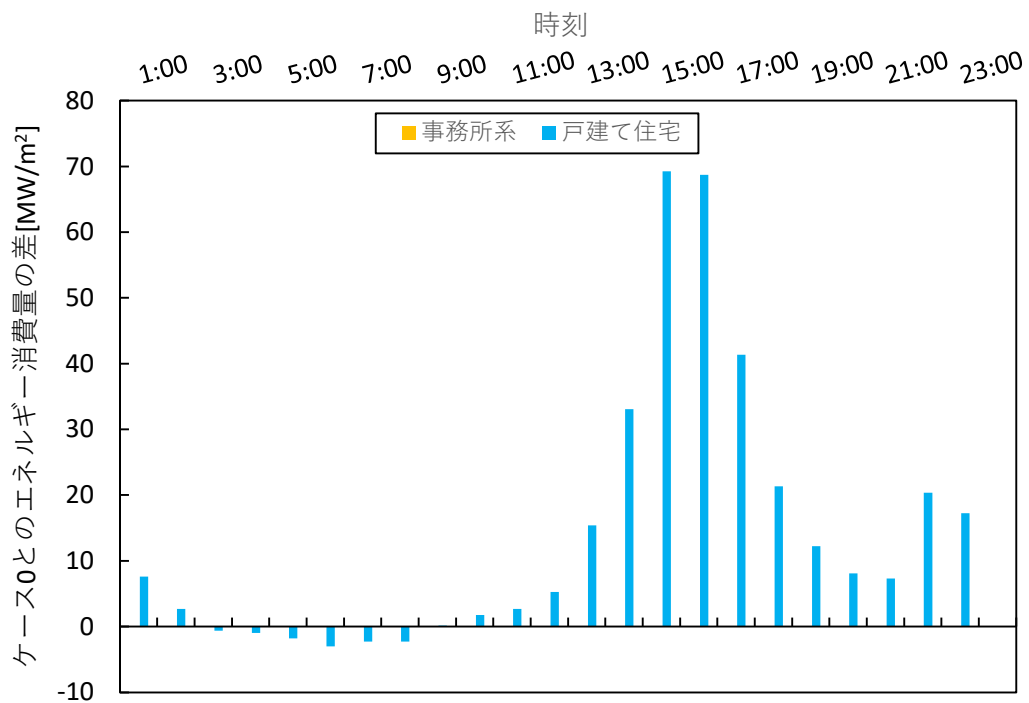


図 4-15 ケース 3（エアコンの普及率増加）とケース 0 の空調エネルギー消費量の差

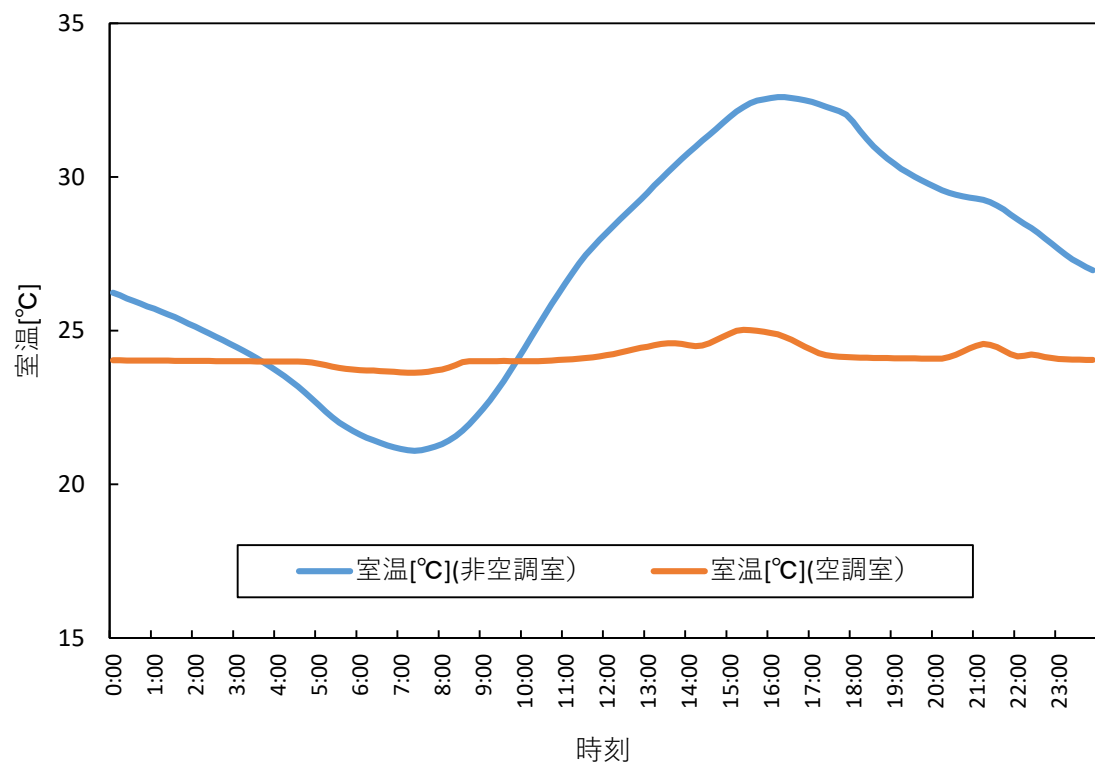


図 4-16 戸建て住宅街区の非空調室と空調室の室温の日間パターン

## 5. 結論

本研究では、インド・デリーにおいて現時点で既にヒートアイランドが発生していること、および将来の発展に伴いヒートアイランドが激化する可能性に注目し、デリーにおいて都市気象シミュレーションをおこなうための入力データを整備し、実際に計算をおこなうことでヒートアイランド対策技術の導入効果を評価した。都市に依らず汎用的な手法で都市気象シミュレーションに必要なインプットデータを収集することを試み、都市キャンपीモデルのパラメータの多くが汎用的に入手できることを示した。対策技術は屋上面の高反射化、断熱材、エアコンの普及率の向上について、外気温と空調エネルギー消費量の観点から評価した。なお本研究の WRF および CM-BEM による計算の再現の精度は既往研究と比較して低く、また CM-BEM の入力パラメータの中でジャカルタのものを使用しているものも多く、デリーの都市を十分に再現できていない可能性が残る。上記の観点から、本研究の対策技術の評価の精度には過信せず、汎用的な手法によって作成したパラメータを用いた計算によって適応策を評価する枠組みを構築した、といった認識に留めていただきたい。

本研究の課題を以下に挙げる。

- ① 本研究の目的の一つに途上国における都市気象計算のパラメータを汎用的な手法で入手することが挙げられるが、これらのパラメータを作成するために各種ツールの操作の習得が必要になることを考えると、総合的には必ずしも汎用的とは言えない可能性がある。CM-BEM においてパラメータの感度分析をおこない、重要度の低いパラメータは更新せずに既往研究の値を使いまわす、ということにも一考の余地がある。
- ② WRF の計算結果の再現性が低く、CM-BEM の計算結果にも影響を与えてしまっている。WRF 計算の入力項目を見直す必要がある。また助走期間が短くなってしまったため、十分な助走期間を設定して計算すべきである。
- ③ 都市気象計算に必要なパラメータのうちのいくつかを本研究で作成したが、その妥当性について定量的な確認はおこなっていない。
- ④ 本研究における対策技術の影響評価はパラメータの一つを変更して表現したものが多く、詳細な将来シナリオに基づいているわけではない。
- ⑤ 4.3.4 節において、シミュレーションによって模擬された空調の挙動が現実在即していない可能性が示唆されている。

今後の展望としては、複数の都市間での対策技術の効果の比較、通年での評価、費用便益分析、将来シナリオの作成と将来街区における入力パラメータの整備、本研究で評価していない対策技術（再帰性反射塗料や電気自動車など）の評価などが挙げられる。本研究で得られた知見を用いて、デリーでのヒートアイランド対策技術をより詳細に評価するこ

と、あるいは他の途上国において都市気象シミュレーションを実施することに期待したい。

## 参考文献

- [1] 日本ヒートアイランド学会, ヒートアイランドの事典. 2015.
- [2] 気象庁, “気象庁 | ヒートアイランド現象とはどのようなものですか?.” [Online]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/01/qa.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/01/qa.html). [Accessed: 11-Jan-2020].
- [3] 気象庁, “気象庁 | 都市化の影響は外国の都市でも現れているのですか?.” [Online]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/06/qa.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/06/qa.html). [Accessed: 11-Jan-2020].
- [4] 環境省, “ヒートアイランド対策ガイドライン,” 2012.
- [5] 環境省, “平成15年度 ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書,” 2004.
- [6] 井原智彦 and 玄地裕, “被害算定型ライフサイクル影響評価手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価,” 日本建築学会環境系論文集, vol. 73, no. 634, pp. 1407-1415, 2008.
- [7] UN Department of Economics and Social Affairs, “World Population Prospects - Population Division - United Nations,” *The International Journal of Logistics Management*, 2015. [Online]. Available: <https://esa.un.org/unpd/wpp/>.
- [8] United Nations, “World Urbanization Prospects - Population Division - United Nations,” *United Nations*, 2019. [Online]. Available: <https://population.un.org/wup/>. [Accessed: 13-Jan-2020].
- [9] 経済産業省, “通商白書2018,” 2018.
- [10] M. Mohan, Y. Kikegawa, B. R. Gurjar, S. Bhati, and N. R. Kolli, “Assessment of urban heat island effect for different land use-land cover from micrometeorological measurements and remote sensing data for megacity Delhi,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 112, no. 3-4, pp. 647-658, 2013.
- [11] The World Bank, “GDP Ranking.” [Online]. Available: <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/gdp-ranking>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [12] The World Bank, “GDP (constant 2010 US\$).” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [13] The World Bank, “GDP growth (annual %).” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [14] 平凡社地図出版, “インドの首都はニューデリー? デリー?.” [Online]. Available: [www.hcpc.co.jp/faq/faq004.html](http://www.hcpc.co.jp/faq/faq004.html). [Accessed: 15-Jan-2020].

- [15] M. Mohan, S. K. Pathan, K. Narendrareddy, A. Kandya, and S. Pandey, “Dynamics of Urbanization and Its Impact on Land-Use/Land-Cover: A Case Study of Megacity Delhi,” *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 02, no. 09, pp. 1274-1283, Nov. 2011.
- [16] V. D. N. Dupont, “The Dream of Delhi as a Global City,” *Int. J. Urban Reg. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 533-554, May 2011.
- [17] M. Mohan, L. Dagar, and B. R. Gurjar, “Preparation and validation of gridded emission inventory of criteria air pollutants and identification of emission hotspots for megacity Delhi,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 130, no. 1-3, pp. 323-339, Jul. 2007.
- [18] Press Information Bureau Government of India, “INDIA STATS : Million plus cities in India as per Census 2011.” [Online]. Available: <http://pibmumbai.gov.in/scripts/detail.asp?releaseId=E2011IS3>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [19] Census 2011, “List of Most populated cities of India,” *Census of India*, 2011. [Online]. Available: <http://www.census2011.co.in/city.php>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [20] JTB, “インド旅行前に知っておきたい！都市ごとの気候・服装.” [Online]. Available: [https://www.jtb.co.jp/kaigai\\_guide/report/IN/2016/12/india-climate.html](https://www.jtb.co.jp/kaigai_guide/report/IN/2016/12/india-climate.html). [Accessed: 16-Jan-2020].
- [21] GIZMODE, “死者2千人突破。インド、熱波で道路が溶ける.” [Online]. Available: [https://www.gizmodo.jp/2015/05/post\\_17239.html](https://www.gizmodo.jp/2015/05/post_17239.html). [Accessed: 16-Jan-2020].
- [22] Response., “インド・デリー、熱波による死者3名に,” 2015. [Online]. Available: <https://response.jp/article/2015/05/30/252324.html>. [Accessed: 19-Feb-2020].
- [23] 気象庁, “地点別データ・グラフ (世界の天候データツール (ClimatView 月統計値)).” [Online]. Available: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>. [Accessed: 16-Jan-2020].
- [24] 亀卦川 幸浩, 石坂 泰斗, 保刈 和也, Manju Mohan, and Bhola Ram Gurjar, “乾季デリーにおける気温分布構造とヒート アイランド対策ポテンシャルに関する研究,” *土木学会論文集G (環境)*, vol. 67, no. 6, p. II\_315-II\_326, 2011.
- [25] N. Yadav and C. Sharma, “Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 37, pp. 298-306, Feb. 2018.
- [26] N. Yadav, C. Sharma, S. K. Peshin, and R. Masiwal, “Study of intra-city urban heat island intensity and its influence on atmospheric chemistry and energy consumption in Delhi,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, pp. 202-211, Jul. 2017.

- [27] M. Mohan and S. Bhati, “Analysis of WRF Model Performance over Subtropical Region of Delhi, India,” *Adv. Meteorol.*, vol. 2011, pp. 1-13, 2011.
- [28] S. Bhati and M. Mohan, “WRF model evaluation for the urban heat island assessment under varying land use/land cover and reference site conditions,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 126, no. 1-2, pp. 385-400, Oct. 2016.
- [29] P. Pandey *et al.*, “A study of urban heat island and its association with particulate matter during winter months over Delhi,” *Sci. Total Environ.*, vol. 414, pp. 494-507, Jan. 2012.
- [30] K. K. Murari, S. Ghosh, A. Patwardhan, E. Daly, and K. Salvi, “Intensification of future severe heat waves in India and their effect on heat stress and mortality,” *Reg. Environ. Chang.*, vol. 15, no. 4, pp. 569-579, 2015.
- [31] R. Sharma, H. Hooyberghs, D. Lauwaet, and K. De Ridder, “Urban Heat Island and Future Climate Change-Implications for Delhi’s Heat,” *J. Urban Heal.*, vol. 96, no. 2, pp. 235-251, Apr. 2019.
- [32] 日下博幸, “領域気象モデルWRFの都市気候研究への応用と課題,” *地学雑誌*, vol. 120, no. 2, pp. 285-295, 2011.
- [33] NCAR, “WRF Model Users Site,” 2012. [Online]. Available: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>. [Accessed: 08-Jan-2020].
- [34] Y. Ashie, V. T. Ca, and T. Asaeda, “Building canopy model for the analysis of urban climate,” 1999.
- [35] D. Meyer and M. Riechert, “An integrated open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF modelling system,” *Environ. Model. Softw.*, 2018.
- [36] “GIS4WRF.” [Online]. Available: <https://gis4wrf.github.io/>. [Accessed: 08-Jan-2020].
- [37] Y. Kikegawa, Y. Genchi, H. Yoshikado, and H. Kondo, “Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings’ energy-demands,” *Appl. Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 449-466, 2003.
- [38] F. Salamanca, A. Martilli, M. Tewari, and F. Chen, “A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF,” *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 50, no. 5, pp. 1107-1128, 2011.
- [39] B. Bueno, G. Pigeon, L. K. Norford, and K. Zibouche, “Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme,” *Geosci. Model Dev. Discuss.*, vol. 4, no. 4, pp. 2973-3011, 2011.



- [40] Y. Kikegawa, Y. Genchi, H. Kondo, and K. Hanaki, “Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building’s energy-consumption for air-conditioning,” *Appl. Energy*, vol. 83, no. 6, pp. 649-668, 2006.
- [41] T. Ihara, Y. Kikegawa, K. Asahi, Y. Genchi, and H. Kondo, “Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures,” *Appl. Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 12-25, 2008.
- [42] 西本隆, “都市気象-建物エネルギー連成モデルを用いた街区スケールでの中小規模業務建物の省エネ改修の評価,” 東京大学大学院, 2019.
- [43] 桑山 忠弘 *et al.*, “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-,” *日本LCA学会誌*, vol. 15, no. 1, pp. 2-9, 2019.
- [44] 岡田 和樹, “都市気候と空調エネルギー需要の相互作用感度 (PFB 感度) の定量化とその国際比較 ~ジャカルタ事例研究~, ” 明星大学大学院, 2017.
- [45] 高根雄也 and 日下博幸, “気象予測の注意点,” 電力土木学会, vol. 377, no. 5, pp. 99-104, 2015.
- [46] NCAR, “Input data for WRF.” [Online]. Available: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free\\_data.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free_data.html). [Accessed: 09-Jan-2020].
- [47] WUDAPT, “World Urban Database and Access Portal Tools,” 2015. [Online]. Available: <http://www.wudapt.org/>. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [48] 秋本祐子 and 日下博幸, “入力データおよび地表面パラメータの変化に対する領域気象モデルWRFの感度実験—夏季晴天日の関東平野を対象として—,” *地理学評論 SeriesA*, vol. 83, no. 3, pp. 324-340, 2010.
- [49] 桑山忠弘, “ジャカルタにおけるエアコンの健康影響軽減効果を考慮した都市気候変動対策の統合評価,” 東京大学大学院, 2018.
- [50] I. D. Stewart and T. R. Oke, “Local climate zones for urban temperature studies,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 12, pp. 1879-1900, Dec. 2012.
- [51] 石田紘章, “LCZ分類にもとづくインド・デリーの地上 気温分布の解析,” 明星大学, 2017.
- [52] B. Bechtel *et al.*, “SUHI analysis using Local Climate Zones-A comparison of 50 cities,” *Urban Clim.*, vol. 28, no. January, p. 100451, 2019.
- [53] 由井 義通 and 日野 正輝, “デリー都心部になぜ高層ビルが建設されないのか—その意味と大都市圏の空間構造に及ぼす影響—,” in 日本地理学会発表要旨集, 2017.

- [54] 柳沢 究, 吉永美香, 塚本英勝, and 山本慧, “デリー (インド) 近郊の伝統的中庭式住居と現代的集合住宅における温湿度環境の実態,” 日本建築学会技術報告集, vol. 23, no. 54, pp. 603-606, Jun. 2017.
- [55] 近藤裕昭 and 劉發華, “1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究,” 大気環境学会誌, vol. 33, no. 3, pp. 179-192, 1998.
- [56] M. Kanda, A. Inagaki, T. Miyamoto, M. Gryschka, and S. Raasch, “A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces,” *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 148, no. 2, pp. 357-377, Aug. 2013.
- [57] A. C. G. VARQUEZ, N. DARMANTO, N. KAWANO, S. TAKAKUWA, M. KANDA, and Z. XIN, “REPRESENTATIVE URBAN GROWING SCENARIOS FOR FUTURE CLIMATE MODELS,” *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. B1 (Hydraulic Eng.)*, vol. 73, no. 4, p. I\_103-I\_108, Feb. 2018.
- [58] E. Masuoka and G. Ederer, “Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) - LAADS DAAC,” 2019. [Online]. Available: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/download-nrt-data/viirs-nrt%0Ahttps://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/>. [Accessed: 10-Jan-2020].
- [59] Oak Ridge National Laboratory, “Home | LandScan,” 2018. [Online]. Available: <https://landscan.ornl.gov/>. [Accessed: 10-Jan-2020].
- [60] 富沢 哲郎, “全球情報を用いた都市幾何形状情報作成手法の提案,” 東京工業大学, 2019.
- [61] 一般財団法人リモート・センシング技術センター, “Pleiades-HR (1A \_ 1B).” [Online]. Available: <https://www.restec.or.jp/satellite/pleiades-hr-1a-1b>. [Accessed: 11-Jan-2020].
- [62] Intelligent Robotics Group, “The Ames Stereo Pipeline: NASA’ s Open Source Automated Stereogrammetry Software,” p. 195, 2017.
- [63] M. of P. G. of India, *Energy Conservation Building Code 2017*. 2017.
- [64] G. of I. Ministry of Power, *Eco-Niwas Samhita 2018 (Energy Conservation Building Code for Residential Buildings)*, vol. 1. Bureau of Energy Efficiency, 2018.
- [65] 玄地祐 *et al.*, “都市ヒートアイランド現象が地温に与える影響 -東京都内における観測結果-,” 天気, vol. 45, no. 9, pp. 707-715, 1998.
- [66] 前田健太郎, “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効果と費用および便益の評価,” 東京大学大学院, 2017.

- [67] M. Mohan, Y. Kikegawa, B. R. Gurjar, S. Bhati, A. Kandya, and K. Ogawa,  
“Urban Heat Island Assessment for a Tropical Urban Airshed in India,” *Atmos.*  
*Clim. Sci.*, vol. 02, no. 02, pp. 127-138, 2012.

## 付録

付録：WRF 計算時の入力ファイル (namelist.input)

```
&time_control
start_year = 2010, 2010, 2010
start_month = 3, 3, 3
start_day = 4, 4, 4
start_hour = 0, 0, 0
end_year = 2010, 2010, 2010
end_month = 3, 3, 3
end_day = 12, 12, 12
end_hour = 0, 0, 0
interval_seconds = 21600
input_from_file = .true., .true., .true.
history_interval = 30, 30, 30
frames_per_outfile = 385, 385, 385
restart = .false.
restart_interval = 7200
io_form_history = 2
io_form_restart = 2
io_form_input = 2
io_form_boundary = 2
start_minute = 0, 0, 0
start_second = 0, 0, 0
end_minute = 0, 0, 0
end_second = 0, 0, 0
nocolons = .true.
/
```

```
&domains
time_step = 40
time_step_fract_num = 0
time_step_fract_den = 1
max_dom = 3
e_we = 116, 157, 64
```

```

e_sn = 192, 154, 58
e_vert = 33, 33, 33
p_top_requested = 5000
num_metgrid_levels = 27
num_metgrid_soil_levels = 4
dx = 18000.0, 6000.0, 2000.0
dy = 18000.0, 6000.0, 2000.0
grid_id = 1, 2, 3
parent_id = 1, 1, 2
i_parent_start = 1, 22, 61
j_parent_start = 1, 121, 73
parent_grid_ratio = 1, 3, 3
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3
feedback = 1
smooth_option = 0
/

```

&physics

```

mp_physics = 2, 2, 2
cu_physics = 1, 0, 0
ra_lw_physics = 4, 4, 4
ra_sw_physics = 4, 4, 4
bl_pbl_physics = 7, 7, 7
sf_sfclay_physics = 7, 7, 7
sf_surface_physics = 2, 2, 2
radt = 9, 3, 3
bldt = 0, 0, 0
cudt = 0, 0, 0
icloud = 0
num_land_cat = 21
sf_urban_physics = 0, 1, 1
/

```

&dynamics

```

hybrid_opt = 2
w_damping = 0

```

```
diff_opt = 1, 1, 1
km_opt = 4, 4, 4
diff_6th_opt = 0, 0, 0
diff_6th_factor = 0.12, 0.12, 0.12
base_temp = 290.0
damp_opt = 3
zdamp = 5000.0, 5000.0, 5000.0
dampcoef = 0.2, 0.2, 0.2
khdif = 0, 0, 0
kvdif = 0, 0, 0
```

## 謝辞

本研究の遂行、ならびに修士論文の執筆に際し、指導教員の井原智彦准教授には多大なご指導を賜りました。毎週の面談を始め、学会や実地調査の手配など、本研究をおこなう上で非常に多くのサポートをしていただきました。副査の肱岡靖明客員教授には、副査面談を通じてシミュレーションの条件の整理や発表のシナリオ作りなど、大変有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

また、WRF および CM-BEM の条件設定とインプットデータについて、本研究では多くの方にご協力いただきました。明星大学の亀卦川幸浩教授、東京電力ホールディングス株式会社の山口和貴主管研究員、国立研究開発法人産業技術総合研究所の高根雄也主任研究員、東京工業大学の Alvin Christopher Galange Varquez 特任講師、インド工科大学の Manju Mohan 教授および Bhati Shweta 博士、U.S. Green Building Council の Tanmay Tathagat 氏には多くのご指導・ご助言を賜り、またデータを整備する際にご協力いただきました。重ねて御礼を申し上げます。

研究室のメンバーにも多くの面で助けていただきました。秘書の久保さんには、事務手続きの面から研究をサポートしていただきました。井原研究室に在籍していた先輩には、シミュレーションモデルの使い方からプライベートな相談まで、数多くの面でお世話になりました。特に、卒業後にもかかわらず相談に乗ってくださった先輩方には大変感謝しております。また、研究室の後輩および居室の同輩からは多くの刺激をいただき、研究の上での励みになりました。この二年間が有意義なものになったのはみなさまのおかげです。深く感謝いたします。

最後に、井原研究室への進学および一人暮らしを許可し、学生生活を見守ってくれた家族に感謝の意を表します。