

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

平成 28 年度
修士論文

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

2017 年 2 月 21 日提出
指導教員 井原 智彦 准教授

前田 健太郎

目次

第1章 研究の背景と目的	- 4 -
1.1. 都市の気温上昇	- 4 -
1.2. ヒートアイランド現象の要因とその影響	- 4 -
1.3. ヒートアイランド対策	- 7 -
1.3.1. 屋上ヒートアイランド対策	- 8 -
1.3.2. 屋上ヒートアイランド対策の既往研究の実施地域	- 12 -
1.4. 屋上ヒートアイランド対策の費用と便益	- 13 -
1.5. ジャカルタのヒートアイランド対策	- 13 -
1.6. ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の費用と便益	- 15 -
1.7. 研究の目的	- 17 -
第2章 手法	- 17 -
2.1. 概要	- 17 -
2.2. オフィス街区の抽出と計算期間、シナリオの設定	- 18 -
2.3. オフィス街区における気象と冷房需要の計算(CM-BEM)	- 20 -
2.3.1. 街区キャノピー・ビルエネルギー連成モデル(CM-BEM)の概要	- 20 -
2.3.2. CM-BEM で用いたデータとパラメータ	- 21 -
2.3.3. 上空気象条件	- 26 -
2.3.4. 街区形状パラメータ	- 27 -
2.3.5. 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策なしの場合）（表 10） - 29 -	
2.3.6. 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策導入時）（表 11） ... 32 -	
2.3.7. 空調・熱源関連のパラメータ（表 12）	- 33 -
2.3.8. スケジュールとその他の設定（表 13）	- 35 -
2.4. 費用と便益の算出	- 41 -
第3章 結果と考察	- 42 -
3.1 気温の計算結果	- 42 -
3.2 冷房需要の計算結果	- 44 -
3.3 費用と便益、純便益の算出	- 45 -
3.4 対策の気温低減量と導入者の純便益の関係（図 36）	- 48 -

第4章 まとめと今後の展望	- 49 -
参考文献.....	- 51 -
謝辞.....	- 54 -

図表目次

図 1 東京、日本、世界の年平均気温の経年変化 ^{注)}	- 4 -
図 2 ヒートアイランド現象の要因	- 5 -
図 3 様々な人工排熱	- 5 -
図 4 屋上緑化の効果（気温低減効果と冷房負荷の削減メカニズム）	- 9 -
図 5 インテンシブ緑化の例[10].....	- 10 -
図 6 エクステンシブ緑化の例[11].....	- 11 -
図 7 屋根面の高反射化の例（ギリシャ） [9]	- 11 -
図 8 屋根面の高反射化の効果（気温低減効果と冷房負荷の削減メカニズム）	- 12 -
図 9 対策導入者の費用と便益（屋上ヒートアイランド対策の場合）	- 13 -
図 10 ジャカルタの都市圏人口の予測	- 14 -
図 11 インドネシアの位置	- 15 -
図 12 ジャカルタの位置（図 11 の黒い太枠内を拡大したもの）	- 15 -
図 13 ジャカルタと東京の月平均気温（最高気温・最低気温）と月間降水量の比較[15]	- 17 -
図 14 研究の流れ	- 18 -
図 15 本研究で屋上ヒートアイランド対策の評価を行ったオフィス街区（黄色の枠内）	- 18 -
図 16 抽出した街区内の幹線道路周辺	- 19 -
図 17 抽出した街区の周縁	- 19 -
図 18 CM における街区の模式図（水平方向）	- 20 -
図 19 CM における街区の模式図（鉛直方向）	- 20 -
図 20 BEM の模式図.....	- 21 -
図 21 CM と BEM の連成	- 21 -
図 22 WRF の計算領域.....	- 27 -
図 23 東京工業大学神田研究室が米国人工衛星の画像解析から作成した、ジャカルタ の土地利用データ	- 28 -
図 24 ジャカルタの代表的なオフィスの屋根面壁体構造（模式図）	- 30 -
図 25 ジャカルタの代表的なオフィスの側壁壁体構造（模式図）	- 31 -

図 26 ジャカルタの代表的なオフィスビルの平面図.....	- 35 -
図 27 都道府県別のガソリン消費量[24]と自動車保有台数[25]の関係	- 39 -
図 28 東京の参照街区	- 40 -
図 29 ジャカルタの計算街区における面積あたり交通排熱.....	- 41 -
図 20 ジャカルタの代表的なオフィスビルの壁体構造（模式図）	- 42 -
図 31 気温の計算結果と観測気温の比較（8/23~8/29）.....	- 43 -
図 32 ジャカルタの気象観測地点（インドネシア気象庁(BMKG)）	- 43 -
図 33 日最高気温の比較（8/23-8/29）	- 44 -
図 34 延床面積あたり月積算冷房需要の比較（8月）	- 45 -
図 35 対策導入面積あたりの純便益とその内訳（40年間）	- 48 -
図 36 対策の気温低減量と導入者の純便益の関係.....	- 49 -

第1章 研究の背景と目的

1.1. 都市の気温上昇

ヒートアイランド対策ガイドライン[1]によると、世界の年平均気温はここ 100 年で約 0.7 °C 上昇している（図 1）。これは主に地球温暖化が原因であるとされる[1]。一方、図 1 によると東京の年平均気温はこの 100 年で約 3 °C 上昇しており、世界の年平均気温や日本の年平均気温より上昇幅が大きい。これは、東京では地球温暖化による気温上昇に加え、ヒートアイランド現象によって気温が上昇していることが原因とされる。

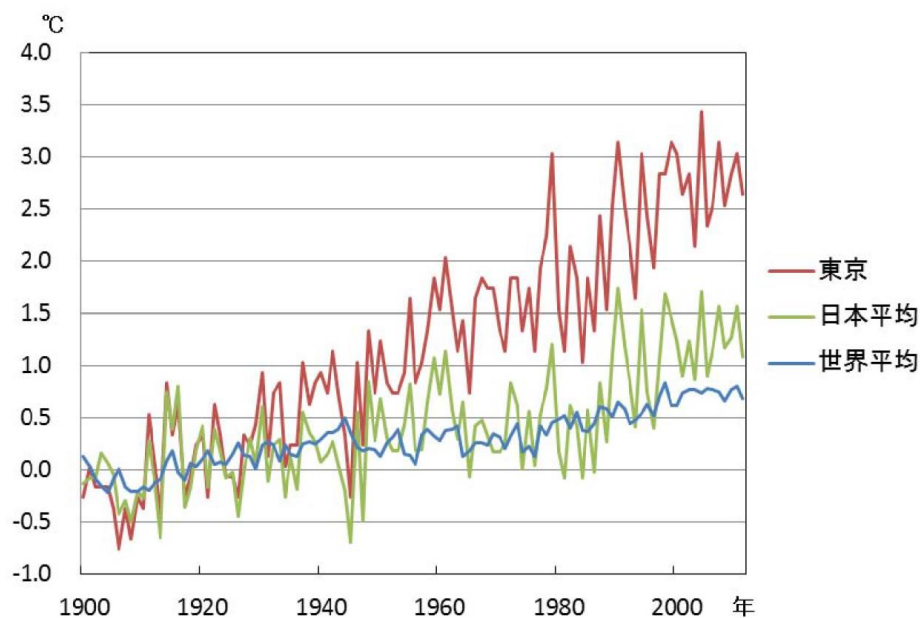


図 1 東京、日本、世界の年平均気温の経年変化^{注)}

資料) 気象庁 HP 掲載データより作成

注) 1900 年から 1929 年の 30 年間を基準としてグラフを作成

出典: 文献[1]より抜粋

1.2. ヒートアイランド現象の要因とその影響

ヒートアイランド現象とは、都市の中心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象を指す[1]。ヒートアイランド現象の主な要因は 3 つ挙げられ、(1) 人工排熱の増加、(2) 地表面被覆の人工化、(3) 都市形態の高密度化 である（図 2）。(1) は局所的な気温上昇の要因となり、(2) は主に昼間の気温上昇、(3) は主に夜間の気温上昇をもたらす。以下、(1)~(3)の要因について簡単に説明する。

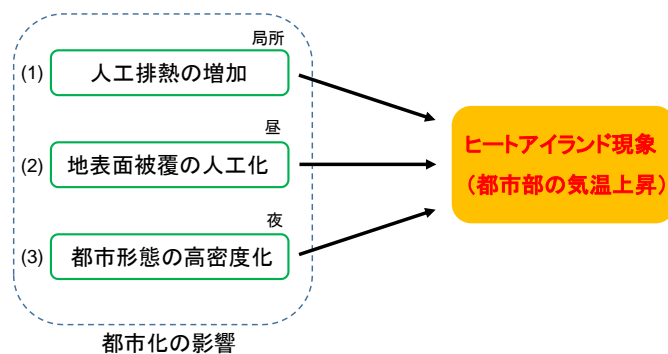


図 2 ヒートアイランド現象の要因

(1) 人工排熱の増加

人工排熱とは、建物の空調機器や自動車、火力発電所やごみ焼却場からの排熱を指す（図 3）。これらの排熱は都市の大気を温め、都市の気温を局所的に上昇させる要因となる。人口排熱が気温をどの程度上昇させるかについては、 $0.7^{\circ}\text{C} \sim 1.1^{\circ}\text{C}$ [2]、 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度[3]という報告がある。



図 3 様々な人工排熱

出典：文献[1]より抜粋

(2) 地表面被覆の人工化

地表面被覆の人工化とは、緑地・水面の減少とアスファルト・コンクリートによる被覆が増加することを指す。緑地と水面はともに気温上昇を抑制する機能を持つ¹が、都市部で

¹水面では水の蒸発によって、緑地では植物の葉の表面から蒸散によって、日射のエネルギーを潜熱として大気中に放出している。よって、地表面から大気へ伝わる熱が減少し、気温上昇を緩和する効果がある[1]。

は都市化の進展によって農地や山林が減少し、海面の埋め立てや河川の暗渠化によって水面の割合が減少している[4]。代わってコンクリート建造物やアスファルト舗装道路が増加しているが、これらは夏季の日中には表面温度が 50℃~60℃ 程度まで上昇し、大気を加熱する[1]。

(3) 都市形態の高密度化

都市形態の高密度化とは、密集した建物による風通しの阻害や天空率²の低下を指す。中高層の建物が密集すると、地上付近の風通しを弱め熱がこもりやすくなる。また、日射や地面で反射された日射の一部と、地面から大気へ放出される赤外線の一部を建築物が吸収し熱として蓄積する。この熱が夜になって大気に放出されることで夜間の気温低下を妨げる[5]。また、夜間の放射冷却を阻害するため、夜間の気温上昇をもたらす。

続いて、ヒートアイランド現象による環境影響について述べる。表 1 はヒートアイランド現象が引き起こす影響をまとめたものである。熱中症や睡眠障害などの人間健康、エネルギー消費や集中豪雨などの人間生活、桜の開花や紅葉などの生態系に影響を与えていることが示唆されている。

ここでは、気温上昇が与えるエネルギー消費量への影響に注目したい。ただし、夏季と冬季ではエネルギー消費に与える影響が異なることに注意する必要がある。すなわち、夏季の気温上昇はオフィス等の冷房使用を促進し、冷房エネルギー消費が増加する。逆に、冬季は

暖房負荷が減るため暖房エネルギー消費が減少する。よって、通年のエネルギー消費の観点からは夏季と冬季のエネルギー消費をトータルで考える必要がある。一般にはこれは部門とその地域の気候の影響を受ける。例えば文献[6]では、日本ではヒートアイランド現象により通年のエネルギー消費量は全国的に家庭部門で減少するが、北海道などの寒冷地を除き業務部門では増加すると推定されている（参考:表 2）。また、近年地球温暖化への対策として省エネルギーの重要性が増しており、ヒートアイランド現象が引き起こす業務部門のエネルギー消費量の増加は課題であるといえよう。

² 天空率: 周囲にビル群などにより取り囲まれる、ある地点から見ることができ天空部分の立体角投射率を意味し、その地点の明るさの指標[5]。

表 1 ヒートアイランド現象による影響の例

影響項目	内容
熱中症	熱中症患者の増加
睡眠障害	夜間の気温上昇による睡眠障害患者の増加
大気汚染	大気汚染濃度の上昇
エネルギー消費	冷房エネルギー消費の増大（夏季）と暖房 エネルギー消費の減少（冬季）
生態系	桜の開花時期の変化、紅葉の遅れ

出典: 文献[1]を参考に筆者が作成

表 2 ヒートアイランド現象が通年のエネルギー消費量に与える影響（部門別）

部門	ヒートアイランド現象による 通年のエネルギー消費量への影響
産業	軽微
運輸	軽微
民生	家庭 減少 業務 増加 ^{注)}

注) 関東、東海、関西、九州の結果

出典: 文献[6]より筆者が作成

1.3. ヒートアイランド対策

概要

1.2 節で述べたように、ヒートアイランド現象による気温上昇は人間健康や人間生活、生態系へ様々な影響を与える。その対策は緩和策と適応策の 2 種類の観点から考えることができる。

緩和策とは、ヒートアイランド現象を生じさせる要因を取り除く対策を指す。例えば、人工排熱の削減や地表面被覆の改善、都市形態の改善を行う対策は緩和策に分類される。

一方、適応策はヒートアイランド現象によって生じる影響を軽減する対策を指す。例えば、夏季の日中の気温上昇に伴う健康影響を軽減するため、街中に人工日除けを設置したりミストを活用したりすることが適応策に分類される。

緩和策を中心に、ヒートアイランド対策の例を導入場所とともに表 3 に示す。

表 3 ヒートアイランド対策の例

対策の内容	導入場所
屋上緑化	屋上
屋根面の高反射化	

保水性舗装	地面
緑地化（建物敷地、駐車場など）	
電気自動車の普及	その他
地域冷暖房システムの利用	

1.3.1. 屋上ヒートアイランド対策

高密度に建物が立ち並ぶ都市において、一般にヒートアイランド対策として地表面を大規模に緑化したり水面を作ったりすることは物理的側面からも経済的側面からも容易ではない。そこで、都市において比較的活用されておらず、かつヒートアイランド対策を導入できる場所として屋上注目されている[7]。以下、屋上に導入するヒートアイランド対策である、(1)屋上緑化と(2)屋根面の高反射化 について、簡単に説明する。

(1) 屋上緑化

屋上緑化とは、建物の屋上に軽量土壌などの植栽基盤を敷き、その上に芝生や樹木を用いて緑化することである[1]。表 4 は屋上緑化カタログの一部であるが、防水層、耐根層、緑化システム、土壌などが屋上に敷き詰められ、その上に植物が植えられることがわかる。

1.1 節で述べたように、植物は葉の表面から蒸散を行っており、日射によって受けたエネルギーを潜熱として大気中に放出する。屋上緑化はこの蒸発潜熱を利用することで、屋根面から大気への顕熱を削減し、同時に屋根面から建物内部への貫流熱を削減している（図 4）。これによって付近の気温上昇を緩和し（ヒートアイランド現象の緩和）、また空調負荷を削減（冷房エネルギー消費量を削減）することができる。

またヒートアイランド現象の緩和や冷房エネルギー消費削減以外にも、屋上緑化は様々な効果を持つ。例えば、都市景観の向上、人々が集まる憩いの場としての機能、生態系の保全、不動産価値の向上などである[39]。一方留意点としては、導入にかかる費用や適切な維持管理（定期的な散水や肥料の頒布）が必要であること、建築物の耐荷重制限を超える屋上緑化システムは導入できないこと、が挙げられる[1]。

表 4 屋上緑化システムの構造例

システムイメージ図			
土 壌		FDソイル3号 300mm以上	FDソイル3号 200mm以上
緑化システム	土壌流出防止フィルター	FDフィルター	FDフィルター
	保水空間維持パーライト	ホワイトローム	—
	保水・排水・通気パネル	FDドレインLN	FDドレインLN
	防水保護マット	FDマット	FDマット
	耐根補助フィルム	FDフィルム	FDフィルム
植栽見切り材		FDウォールGRC、FDウォールRW、レンガ、コンクリート、ブロックなど	
耐根層	自着層付耐根シート	ルートガードD	ルートガードD
推奨防水仕様例	断熱アスファルト防水	PX-335R	*ルートガードDは防水層の上貼付とします
	アスファルト防水	PX-335	
	アスファルト断熱露出防水	—	
	アスファルト露出防水	—	

出典：文献[8]より抜粋

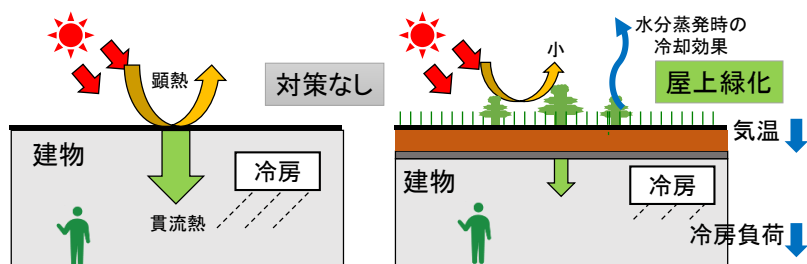


図 4 屋上緑化の効果（気温低減効果と冷房負荷の削減メカニズム）

出典：文献[9]を参考に筆者が作成

最後に、屋上緑化の種類について述べる。屋上緑化は大きく2種類に分けることができ、（イ）インテンシブ緑化（ロ）エクステンシブ緑化と呼ばれる。以下、この2種類について簡単に説明する。

（イ）インテンシブ緑化（図 5）

インテンシブ緑化は管理型緑化とも呼ばれ、低木や植栽など様々な植栽を選択することができる。初期投資や散水などの維持管理が頻繁に求められる一方、景観を向上させ、憩いの空間や生態系の保全など緑化の様々な効果を生み出すことが可能である。

(ロ) エクステンシブ緑化 (図 6)

エクステンシブ緑化は省管理型緑化とも呼ばれ、セダム類など維持管理が容易な植物を採用することで低コスト、低管理を特徴としている。インテンシブ緑化に比べ初期投資も抑えることができる。水やりの頻度も少なく、夏場でも2週間に一度程度でよいとされる[29]。その反面、セダム類は蒸散量がインテンシブ緑化で使用されている芝などと比べると小さく、ヒートアイランド減少の緩和策としての効果は限定的であるとされる[1]。インテンシブ緑化とエクステンシブ緑化の特徴を表 5 にまとめた。

表 5 インテンシブ緑化とエクステンシブ緑化の特徴

	インテンシブ緑化	エクステンシブ緑化
植物の種類	芝、低木	セダム類
初期投資	高	中程度
水やりの頻度 (夏)	毎日	2 週間に一度
ヒートアイランド現象の緩和策としての効果	あり	限定的



図 5 インテンシブ緑化の例[10]



図 6 エクステンシブ緑化の例[11]

(2) 屋根面の高反射化

屋根面の高反射化とは、建物の屋根面に太陽光線の中でも赤外線領域を効率的に反射する塗料（高反射率塗料）を塗布することである[1]。図 7 はギリシャの伝統的な建物であり、屋根に白い塗料を塗布することで屋根面の反射率（アルベド）を上げている。これにより、屋根の表面温度の上昇を抑え、周辺の気温上昇を抑制するとともに建物内部への熱侵入を低減し夏季の冷房負荷を削減することができる（図 8）。ただし、冬季にも熱の侵入が減少するため、地域によっては暖房負荷を増加させることがあることに注意が必要である。屋上緑化と比較すると導入費用が圧倒的に安く、維持管理も容易である。

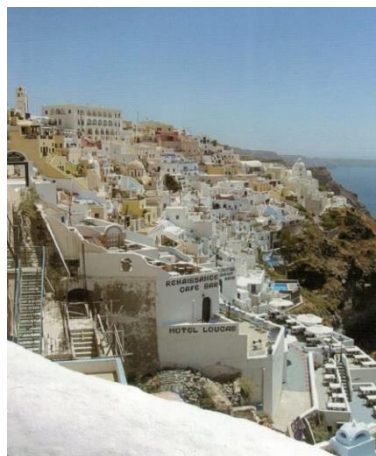


図 7 屋根面の高反射化の例（ギリシャ）[9]

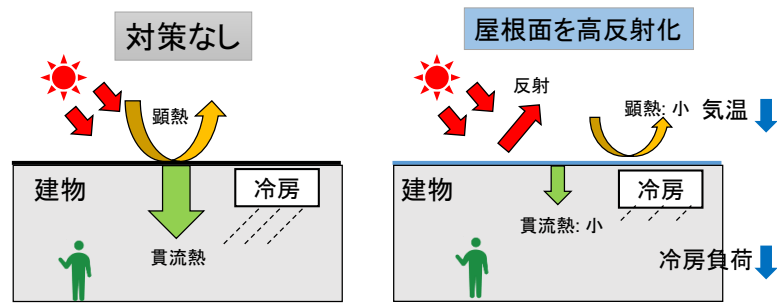


図 8 屋根面の高反射化の効果（気温低減効果と冷房負荷の削減メカニズム）

出典: 文献[9]を参考に筆者が作成

1.3.2. 屋上ヒートアイランド対策の既往研究の実施地域

屋上ヒートアイランド対策を導入した場合の既往研究はこれまでも行われてきたが、そのほとんどはアメリカや日本、ヨーロッパを対象にしたものである。表 6 は過去の既往研究で対象とされた都市の一部を示しているが、アメリカや日本、中国の中～高緯度地域に位置する都市が多いことがわかる。

表 6 既往研究における屋上ヒートアイランド対策の対象都市一例

		対象都市
屋根面の 高反射化	Sailor	ロサンゼルス（米国）
	Rosenfield et al	ロサンゼルス（米国）
	Millistein and Menon	アメリカの複数の都市
	Zhou and Shepherd	アトランタ（米国）
屋上緑化	Smith and Roeber	シカゴ（米国）
	Savio et al.	ニューヨーク（米国）
	Chen et al.	東京（日本）
	Ng et al.	香港（中国）

出典: 文献[7]を参考に筆者が作成

1.4. 屋上ヒートアイランド対策の費用と便益

対策導入には、気温低減効果を始めとする便益のほかに、導入や維持・管理に要する費用がかかる。1.3.2 節で述べた屋上ヒートアイランド対策の場合、対策導入者（ビルの所有者など）は導入、維持・管理、更新に要する費用を負担する一方、冷房需要削減による電気料金の節約という便益を得る³（図 9）。導入者の視点では、便益に比べ費用が非常に大きい対策を導入する動機は小さくなる。また、高い初期投資も導入者にとっては対策導入の障壁となりうる。屋上緑化の場合、初期投資（設置に要する費用）が高く対策導入の障壁となることが考えられる。そこで、費用の一部を補助金という形で自治体が負担することで対策導入を促す例がみられる[1]。このように、対策普及のための制度設計を考える上では導入者の費用と便益を把握することが重要となる。特に屋上ヒートアイランド対策においては、導入から更新を含む期間で評価する必要がある。

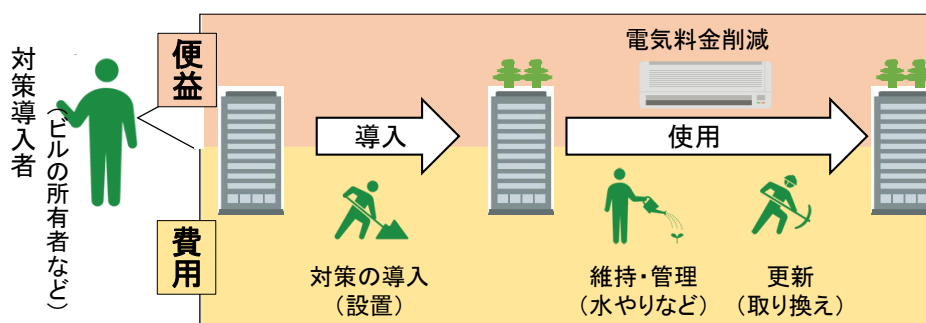


図 9 対策導入者の費用と便益（屋上ヒートアイランド対策の場合）

1.5. ジャカルタのヒートアイランド対策

1.4 節で述べたように、屋上ヒートアイランド対策に関する研究は、中高緯度に位置するアメリカや日本の都市で多く見られる。日本やアメリカなど先進国の都市では早くから都市化の進展によってヒートアイランド現象が観測されてきた。近年になり、急激な人口増加と都市開発を背景にして先進国以外でもヒートアイランド現象が報告されるようになってきている。

Maru and Ahmad [12]は 2012~2013 年にかけてインドネシアのジャカルタ市（図 11、図 12）の日中の気温の東西断面と南北断面を観測し、郊外と都心部の気温差（ヒートアイランド強度）が約 2 °C であることを報告した。ジャカルタはその人口規模と人口増加速度を背景

³ 大規模なオフィスビルでは、ビルの所有者がテナントとしてビルを貸し出すこともある。この場合、冷房需要削減による電気代節約という便益を享受するのは所有者ではなくテナントであり、厳密には費用負担者と便益を受ける主体が異なる。ただし、本論文では簡単のため、ビルの所有者と使用者が同一である場合（費用負担と便益の享受が同一主体である場合）を考える。

に、新興国の中でも代表的な都市として注目を集めている。例えばジャカルタの広域都市圏人口⁴は東京・横浜圏に次ぐ世界第2位であり（2010年：約2200万人）、2030年には2010年比で1.7倍に増加すると予測されている（図10）[13]。今後の人口増加とそれに伴う都市開発を考慮すると、ヒートアイランド現象による都市気温の上昇は今後も継続すると予想される。都市気温の上昇は、1.2節で述べたように冷房エネルギー消費を増大させる。インドネシア政府は経済発展に伴う急激なエネルギー消費の増大への対応や地球温暖化対策の観点から、「エネルギー消費の抑制」を政策として掲げており[14]、この観点からもヒートアイランド対策の導入が急務であるといえる。しかし、ジャカルタにおいてヒートアイランド対策の導入事例はほぼなく、対策導入時の効果を調査・検討した事例もない。特に、屋上ヒートアイランド対策は都市における未利用地の活用という点で近年注目されているにもかかわらず、1.4節で述べたように既往研究がアメリカや日本など中高緯度の先進国に集中しており、ジャカルタにおける研究事例はみられない。インドネシアでは地理情報データやエネルギー統計データが入手困難な場合も多く、屋上ヒートアイランド対策の導入効果を調査・検討する際の障壁となっている。

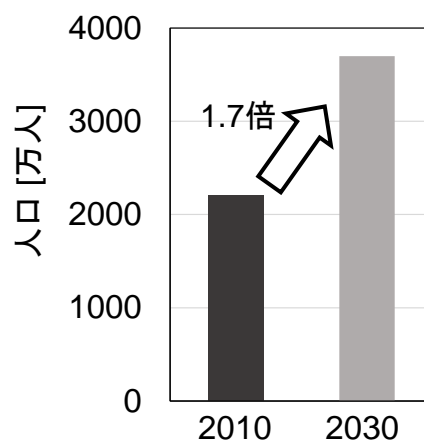


図10 ジャカルタの都市圏人口の予測
出典：文献[13]より筆者が作成

⁴ ジャカルタ首都特別州(DKI Jakarta)の人口に、近郊の Tangerang, South Tangerang, Bogor, Bekasi and Karawang の人口を加えたもの



図 11 インドネシアの位置

出典: Google Map

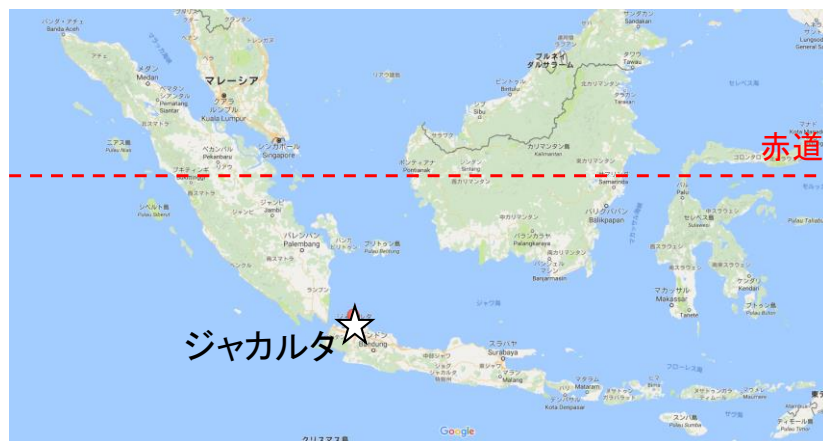


図 12 ジャカルタの位置 (図 11 の黒い太枠内を拡大したもの)

出典: Google Map

1.6. ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の費用と便益

1.4 節で述べたように、対策普及のための制度設計を考える上では導入者の費用と便益を導入から更新を含む期間で把握することが重要である。屋上ヒートアイランド対策の費用便益分析の既往研究の例としては Sproul et al. [38]、Bianchini and Hewage [39]が挙げられるが、いずれも中高緯度に位置するアメリカの都市を対象としている。一方、インドネシアのジャカルタのような熱帯に位置する都市を対象とした屋上ヒートアイランド対策の費用便益分析は見られない。ここで、中高緯度に位置する都市の費用便益分析の結果を、ジャカルタのような熱帯に位置する都市にそのまま適用することは適切ではないと考えられる。なぜなら、ジャカルタでは 1 年を通して冷房を使用しており、便益の評価が異なる可能性

があるからである。

ジャカルタは東南アジアの赤道付近に位置し（図 12）、熱帯雨林気候に属している（表 7）。図 13 にジャカルタと東京の月平均気温と月間降水量を示す。東京では夏季と冬季で月平均最低気温が 3–25 °C まで変動するが、ジャカルタでは年間を通して気温の変化が小さく、月平均最低気温は 25 °C 付近を推移している。よって、東京では冷房を使用する期間は夏季のみであるが、ジャカルタでは一年間を通して冷房を使用している。例えば、Sivak [16] は建物の空調エネルギーの指標として Cooling Degree Days (CDD) と Heating Degree Days (HDD) を次のように定義し、世界の都市について年間の CDD と HDD を計算した（表 8）。

$$CDD = \sum \{ (日平均気温) - 18 \text{ }^{\circ}\text{C} \} \quad \text{ただし、} (日平均気温) \geq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$HDD = \sum \{ 18 \text{ }^{\circ}\text{C} - (日平均気温) \} \quad \text{ただし、} (日平均気温) \leq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

その結果、東京の CDD は 938、HDD は 1590 であるのに対し、ジャカルタでは CDD が 3390、HDD が 0 であった。東京では夏季と冬季で冷房と暖房を使い分けるが、ジャカルタでは年間を通して冷房のみを使用していることがわかる。よって、屋上ヒートアイランド対策の（導入者の）費用と便益を考えると、ジャカルタでは冷房需要削減による電気代削減効果という便益が 1 年を通して発生する。すなわち、ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の導入者費用と便益は、中高緯度の費用・便益と構造が異なる可能性が高い。よって、ジャカルタにおける屋上ヒートアイランド対策の導入者の費用と便益を明らかにする必要がある。

表 7 ジャカルタと東京の気候の比較

	ジャカルタ	東京
気候区分	熱帯雨林気候 (Af)	温暖湿潤気候 (Cf)
気温	1 年を通して気温が高い	夏季と冬季の気温差が大きい
降水量	雨季 (11–4 月) と乾季 (7–10 月)	夏: 多雨 冬: 少雨

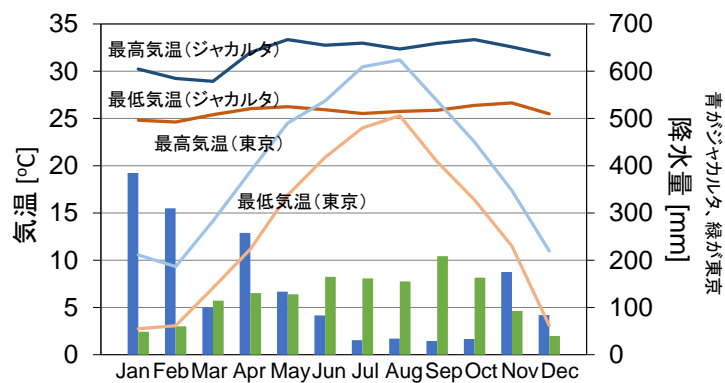


図 13 ジャカルタと東京の月平均気温（最高気温・最低気温）と月間降水量の比較[15]

表 8 東京都ジャカルタの CDD と HDD

	東京	ジャカルタ
Cooling Degree Days (CDD)	938	3390
Heating Degree Days (HDD)	1590	0

1.7. 研究の目的

以上の背景より、本研究ではジャカルタを対象に屋上ヒートアイランド対策を導入した際の対策導入者の費用および便益を導入から更新を含む期間で評価する。また、気温低減効果と対策導入者の費用および便益の関係を分析する。

第2章 手法

2.1. 概要

研究の流れは以下の通りである（参考: 図 14）。

まず、ジャカルタのオフィス街区を抽出し、気象条件や都市の街区形状、建物構造や自動車排熱などのデータを入手する。そして、シミュレーションモデルで使用するデータやパラメータを作成する。次に、モデルを用いて気象、都市の冷房エネルギー需要を計算する。最後に、モデルの計算結果を用いて屋上ヒートアイランド対策の費用と便益を算出する。

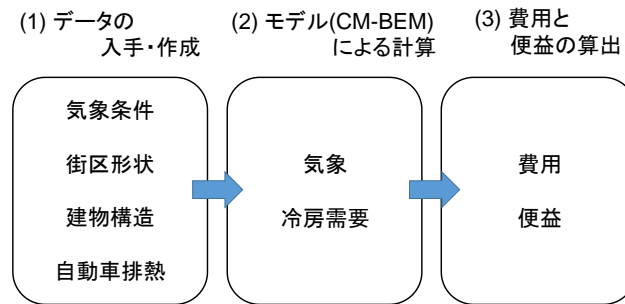


図 14 研究の流れ

2.2. オフィス街区の抽出と計算期間、シナリオの設定

屋上ヒートアイランド対策導入時の費用・便益と気温低減効果を評価する対象として、本研究ではジャカルタ中心部にある 1.2 km 四方のオフィス街区を抽出した（図 15）。この街区はジャカルタの市街地の中心部であり、街区の中央を交通量の多い幹線道路が通り、幹線道路の周囲にはオフィスを中心とした中高層ビルが立ち並んでいる（図 16）。また、後述するように気象・冷房需要のモデル計算に必要な建物ポリゴンデータを入手できたことも本街区を選択した理由の 1 つとなった。



図 15 本研究で屋上ヒートアイランド対策の評価を行ったオフィス街区（黄色の枠内）

出典: Google Map より

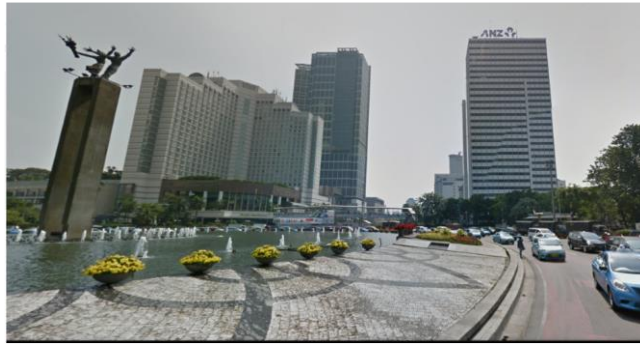


図 16 抽出した街区内の幹線道路周辺

出典: Google Street View

ただし、実際は街区の周縁には図 17 のような低層の住宅が立ち並んでいる。しかし、街区全体のエネルギー消費量に占める業務の割合を考え、以下ではこの街区をオフィス街区として計算を行った。



図 17 抽出した街区の周縁

出典: Google Street View

計算の対象とした期間は 2014/7/30–2014/8/29 の 1 ヶ月間である。東京の既往研究は 8 月を対象としていたため、比較のため東京の 8 月の気温と最も気温が近い月（8 月）を選んだ（参考: 図 13）。また、後述する CM の上空気象条件が入手できたのが 8 月であったことも計算期間を上記のように設定した理由である。

考慮したシナリオは対策なし、インテンシブ屋上緑化、エクステンシブ屋上緑化、屋根面の高反射化の 4 種類である。いずれの対策も、オフィス街区の屋上面積の 50% に導入すると仮定した⁵。

⁵ 文献[37]の対策導入面積割合と等しくなるように設定した。屋上面積の内、（空調の排熱機器などを除いた）自由に使用できる面積は 50% 程度といわれている。そのため、屋上面積の 50% に対策を導入することは、最大対策導入量と考えることができる。

2.3. オフィス街区における気象と冷房需要の計算(CM-BEM)

2.3.1. 街区キャノピー・ビルエネルギー連成モデル(CM-BEM)の概要

抽出したオフィス街区内の気象と冷房需要の計算するため、本研究では街区キャノピー・ビルエネルギー連成モデル(CM-BEM)を用いた[17]。CM-BEMは2つのモデル、すなわち都市キャノピーモデル(CM)とビルエネルギーモデル(BEM)から構成される。

CMは街区内の気象要素(気温、湿度、風向・風速など)を計算するモデルである。CMは街区内の建物と道路を平均化し、水平方向には同じ底面積のビル(1辺が b の正方形)が間隔 w で等間隔に並ぶと仮定する(図18)。すなわち、 b は街区の平均ビル幅、 w は街区の平均道路幅に相当する。一方、鉛直方向には各ビルが街区のビル高度分布に基づいた分布密度 $P_w(z)$ を持つと仮定する(図19)。ここで、 $P_w(z)$ は高度 z におけるビルの存在割合(0-1)である。CMにおける街区の構造からも示唆されるように、CMは街区内における水平方向の気象要素の変化は考慮せず、鉛直方向の変化のみを考慮するモデルである(鉛直1次元大気の仮定)。(ただし、大気の上端境界を別に設定する必要がある。)モデル内では、鉛直1次元大気内の運動量、熱、水蒸気の乱流拡散モデルに加え、街区表面(建築面と地表面)の熱収支モデル、放射モデルが組み込まれている[17]。

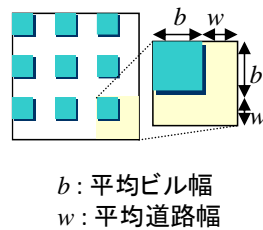


図18 CMにおける街区の模式図(水平方向)

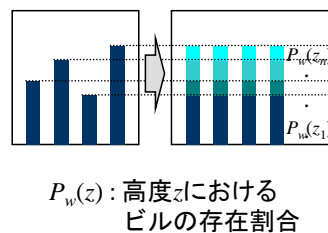


図19 CMにおける街区の模式図(鉛直方向)

一方、BEMは建物内部における熱負荷(顕熱と潜熱)を計算し、都市内部の大気と建物との間の熱交換過程を表現するモデルである(図20)。建物内部の顕熱負荷としては、換気侵入熱、窓面透過日射熱、壁体貫流熱、室内の照明・機器の発熱、在室人員の発熱を考慮している。潜熱負荷は換気に伴う湿気の流入、在室人員の人体からの水分蒸発を考慮している[17]。加えて、空調稼働時の室温と湿度を計算し、熱源機器動力から空調機器のエネルギー消費と空調からの排熱を計算している[17]。

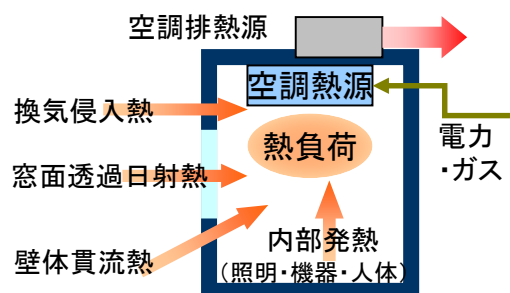


図 20 BEM の模式図

本研究で用いた CM-BEM は、上で説明した CM と BEM を図 21 のように連成させたモデルである。CM で計算された気象要素が BEM に入力され、建物の熱負荷計算を通して空調エネルギーや空調排熱が計算される。すると、空調排熱は CM での気象計算にフィードバックされる（この時、空調排熱だけでなく自動車排熱も合わせて CM に人工排熱としてフィードバックされる）。これにより、CM-BEM は夏季の気温上昇と冷房需要増大の悪循環（気温上昇が冷房の使用を促し、空調排熱が増大することでさらに外気温が上昇すること）を表現することが可能である。

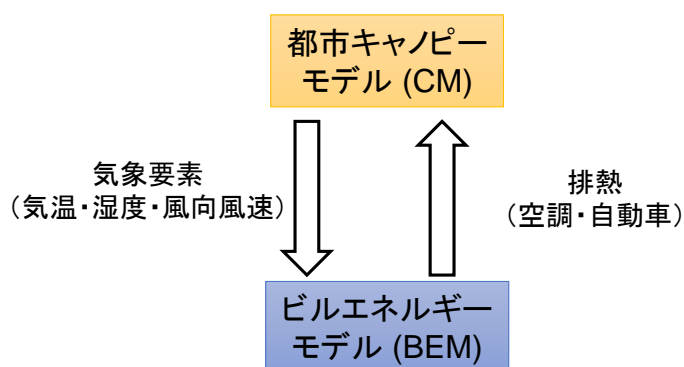


図 21 CM と BEM の連成

2.3.2. CM-BEM で用いたデータとパラメータ

CM-BEM で用いたデータとパラメータを表 9-表 13 に示す。ここで、*のついたものは、本研究で新たに入手、作成したものである。それ以外のデータとパラメータは、東京における CM-BEM を用いた既往研究（[18]）と同じ値を使用している。本研究で新たに入手、作成したデータについては 2.3.3 節以降で説明する。

表 9 上空気象条件と街区形状パラメータ(CM)

		本研究で新たに入手したもの(*)
--	--	------------------

上空気象条件		*
街区形状	平均ビル幅(b)	*
	平均道路幅(w)	*
	高度 z における ビルの存在割合 ($Pw(z)$)	*
	緑被率	*
	水面比率	*

表 10 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策なしの場合）

				本研究で新たに 作成したもの(*)
屋根面	通常時	面積割合	1	
		日射反射率	0.2	
		長波放射率	0.9	
		潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	
	対策導入時	面積割合	0	
		日射反射率		
		長波放射率		
		潜熱輸送コンダクタンス		
	層長合計		0.322 m	*
	層数		16	*
	通常層	熱伝導率	0.85 W/m/K	*
		体積熱容量	1.29 MJ/m ³ /K	*
	断熱層	熱伝導率		
		体積熱容量		
		挿入範囲	0	*
側壁	壁面（窓を除く）	面積割合	0.1	*
		日射反射率	0.2	
		長波放射率	0.9	
		潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	

		クタンズ		
	窓	面積割合	0.9	*
		日射反射率	0.51	
		長波放射率	0.87	
		潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	
	層長合計		0.144 m	*
	層数		16	
	通常層	熱伝導率	0.45 W/m/K	*
		体積熱容量	1.5 MJ/m ³ /K	*
	断熱層	熱伝導率		
		体積熱容量		
		挿入範囲	0	
	側壁窓面	日射透過率	0.38	*
		日射反射率	0.23	*
		厚さ	0.026 m	*
		体積熱容量	1.2 MJ/m ³ /K	*
		中空層厚さ	0.012 m	*
道路	表面 1 (アスファルト)	面積割合 ⁶	0.384	
		日射反射率	0.124	
		長波放射率	0.9	
		潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	
	表面 2 (緑被)	面積割合 ⁶	0.043	
		日射反射率	0.15	
		長波放射率	0.9	
		潜熱輸送コンダクタンス	3 mm/s	
	表面 3 (水面)	面積割合 ⁶	0	
		日射反射率	0.2	
		長波放射率	0.9	
		潜熱輸送コンダクタンス	999	
	層長合計		9	

⁶ この面積割合は街区全体に占める面積割合である。

	層数		300	
	表層	熱伝導率	0.64 W/m/K	
		体積熱容量	2.2 MJ/m ³ /K	
		挿入範囲	1-4	
	基層	熱伝導率	1.58 W/m/K	
		体積熱容量	1.5 MJ/m ³ /K	
		挿入範囲	5-11	
	路盤	熱伝導率	0.59 W/m/K	
		体積熱容量	1.5 MJ/m ³ /K	
		挿入範囲	12-24	
	路床	熱伝導率	0.61 W/m/K	
		体積熱容量	1.6 MJ/m ³ /K	
		挿入範囲	25-58	
	路体	熱伝導率	1.0 W/m/K	
		体積熱容量	1.7 MJ/m ³ /K	
		挿入範囲	58-300	

表 11 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策導入時）

					本研究で新たに作成したもの(*)
屋根面	通常時		面積割合	0.5	
			日射反射率	0.2	
			長波放射率	0.9	
			潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	
	対策導入時	インテンシブ緑化	面積割合	0.5	
			日射反射率	0.19	
			長波放射率	0.9	
			潜熱輸送コンダクタンス	9 mm/s	
		エクステンシブ緑化	面積割合	0.5	
			日射反射率	0.18	
			長波放射率	0.9	
			潜熱輸送コンダクタンス	0.08 mm/s	

		屋根面 の 高反射 化	クタンズ		
			面積割合	0.5	
			日射反射率	0.6	
			長波放射率	0.9	
			潜熱輸送コンダクタンス	0 mm/s	
	上記以外		表 10 と同じ		
側壁	表 10 と同じ				
道路	表 10 と同じ				

表 12 空調・熱源関連のパラメータ

				本研究で新たに作成したもの(*)
空調関連	冷房設定温度		24 °C	*
	冷房吹出温度		16 °C	
	冷房設定期間		1/2-12/30	*
	換気(外気導入)口の位置		各階(2)	
	都市ガスの高位発熱量		11000 kcal/m ³	
	都市ガスの低位発熱量		9960 kcal/m ³	
	換気回数	自然換気	0.5 回/h	
		機械換気	0.7 回/h	
		排熱換気	0.5 回/h	
	床面積あたり在室人員		0.1 人/m ²	*
	ビル延床面積に占める空調面積割合		0.76	*
	人体発熱量	顕熱	59 W/人	
		潜熱	31 W/人	
	建物階高		4.2 m	*
	単位部屋容積あたり 人工構造物(家具+書類)	顕熱容量	100000 J/m ³ -k	
		潜熱容量	25100 J/m ³ -(g/kg)	
熱源関連	熱源機種数		3	
	熱源方式(冷房)		MEACH1	

			CEASCH CAWDCH	
	熱源機器構成比	MEACH1	0.53	
		CEASCH	0.13	
		CAWDCH	0.34	
	冷却塔負荷率		0.83	
	最大冷房熱負荷床面積原単位		160 W/m ²	

表 13 スケジュールとその他の設定

		本研究で新たに作成 したもの(*)
スケジュール	室温による空調稼働率	
	空調スケジュール (冷房)	*
	給湯スケジュール	
	機器 (コンセント, EV など) 発熱スケジュール	
	照明発熱スケジュール	
	電気機器発熱スケジュール	
	燃焼機器発熱スケジュール	
	人体発熱スケジュール	*
その他	祝日、特別日	*
	自動車排熱	*

2.3.3. 上空気象条件

CM の上空気象条件には、東京工業大学神田研究室による The Weather Research and Forecasting Model (WRF)の計算結果を使用した。WRFはメソスケール気象モデルの1つであり、メソスケールとは気象学において1~10³ kmの水平空間スケール、数時間~1日の時間スケールを指す[17]。図 22のように、WRFは第1領域(d01)、第2領域(d02)、第3領域(d03)の3つの領域について順に計算を行っており、空間解像度は順に30 km、6 km、1.2 kmである[20]。今回は空間解像度が最も小さいd03領域のWRF計算結果をCMの上空気象条件として使用した。

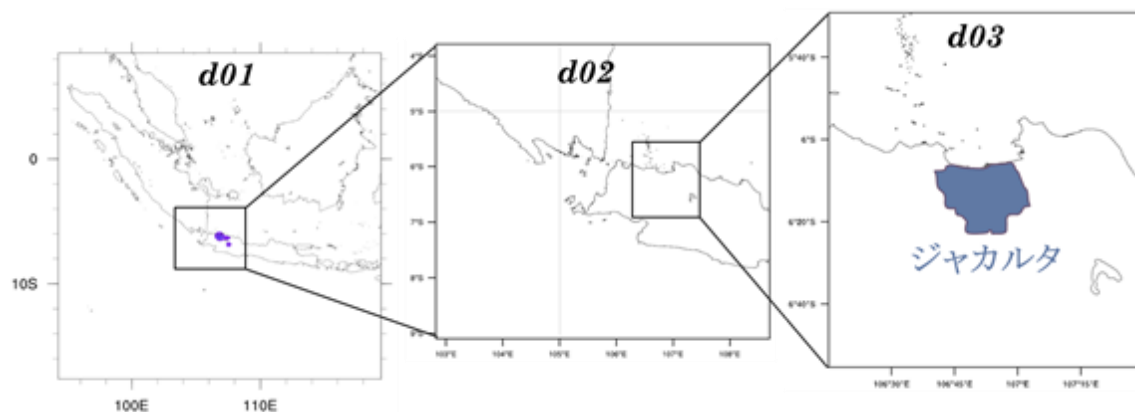


図 22 WRF の計算領域

出典: 文献[20]より抜粋

2.3.4. 街区形状パラメータ

東京工業大学神田研究室は米国人工衛星(Landsat)の衛星画像を解析し、ジャカルタ市街地の土地利用データを作成した(図 23)。これは Stewart and Oke [19] が提唱した Local Climate Zone (LCZ) という土地分類方法に基づき、100 m 間隔で土地利用を 17 種類に分類している(表 14)。このデータに基づき、岡田[20]はジャカルタの市街地の土地利用分類をオフィス、住宅、その他の 3 種類に再分類した(表 15)。そして、岡田[20]は WRF の d03 領域の計算格子(解像度 1.2 km)を利用し、ジャカルタ市街地を含む領域の各格子(各街区)について土地利用(オフィス、住宅、その他)を設定した。この各街区について、岡田[20]はジャカルタの建物ポリゴンデータから街区ごとの平均ビル幅(b)、平均道路幅(w)、高度 z におけるビルの存在割合($Pw(z)$)を算出した。ここから 2.2 節で述べたオフィス街区の $b, w, Pw(z)$ を取り出し、本論文で表 9 の街区形状パラメータとして使用した。

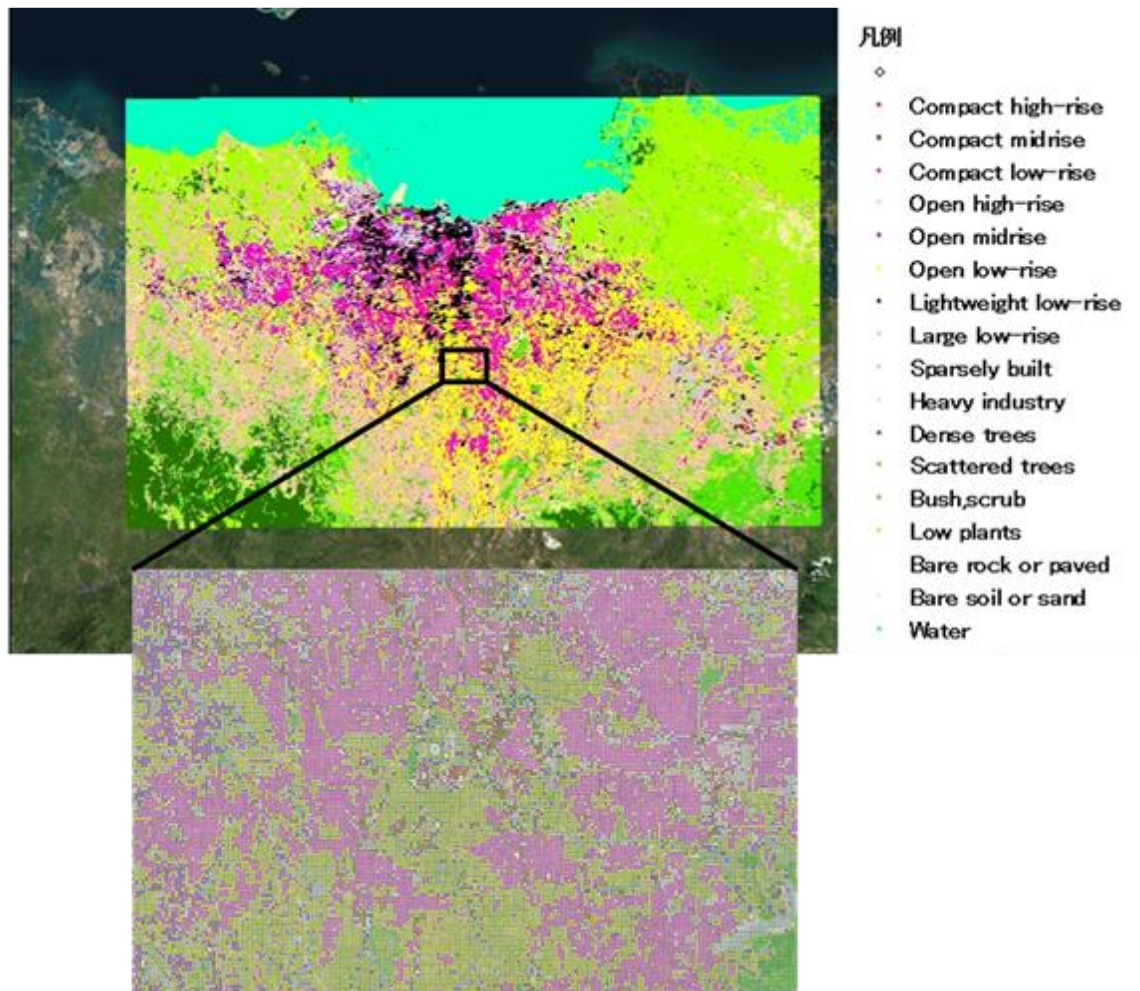


図 23 東京工業大学神田研究室が米国人工衛星の画像解析から作成した、ジャカルタの
土地利用データ
出典 文献[20]より抜粋

表 14 LCZ の土地利用分類（17 種類）

土地利用分類
COMPACT HIGH-RISE
COMPACT MIDRISE
COMPACT LOW-RISE
OPEN HIGH-RISE
OPEN MIDRISE
OPEN LOW-RISE
LIGHTWEIGHT LOW-RISE

LARGE LOW-RISE
SPARSELY BUILT
HEAVY INDUSTRY
DENSE TREES
SCATTERED TREES
BUSH, SCRUBS
LOW PLANTS
BARE ROCK OR PAVED
BARE SOIL OR SAND
WATER

表 15 岡田[20]によるジャカルタ市街地の土地利用再分類

土地利用分類(LCZ)	岡田[20]による再分類	
Compact high-rise	市街地	オフィス
Compact midrise		
Open high-rise		
Compact low-rise		住宅
Open midrise		
Open low-rise		
Lightweight low-rise		
Sparsely built		
Large low-rise		その他
Heavy industry		
Dense trees	郊外	
Scatterd trees		
Bush, scrubs		
Low plants		
Bare rock or paved		
Bare soil or sand		
Water		

2.3.5. 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策なしの場合）（表 10）

(1) 屋根面

バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント（PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa）の協力により、ジャカルタの代表的なオフィス

ビルの屋根面壁体構造のデータと図面を入手した。

図 24 はジャカルタの代表的なオフィスビルの屋根面壁体構造を示した模式図である。表 16 に壁体構造を物性値とともに示す。日本の標準的なオフィスビルの屋根面（表 17）と比較すると、ジャカルタのオフィスビルでは屋根に断熱材が使用されていないことがわかった。そのため、表 10 の屋根面の断熱層を 0 層と設定した。そして屋上全体の厚さ、熱伝導率、容積比熱を計算し（表 16）、表 10 のように屋根面のパラメータを設定した。日射反射率、長波放射率、潜熱輸送コンダクタンスは、ジャカルタの代表的なオフィスビルにおける値が入手できなかったため、日本の標準的なオフィスビルの値（文献[21]）で代用した。

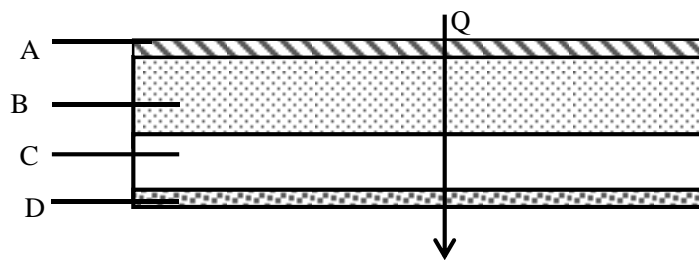


図 24 ジャカルタの代表的なオフィスビルの屋根面壁体構造（模式図）

図中の A-D は表 16 と対応している

表 16 ジャカルタの代表的なオフィスビルの屋根面壁体構造

	材料	厚さ [m]	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [J/m³K]	熱抵抗 [m²K/W]
A	プラスター	0.01	0.79	1632559	0.01
B	普通コンクリート	0.2	1.4	1933955	0.14
C	密閉中空層	0.1			0.15
D	石こう板・ラスボード	0.012	0.17	1028512	0.07
	壁全体	0.322	0.85	1290245	0.38

出典：バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント

(PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) のデータより筆者が作成。

熱伝導率、容積比熱、熱抵抗は文献[22]より引用。

表 17 東京の代表的なオフィスビルの屋上壁体構造

材料	厚さ [m]	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [MJ/m³K]	熱抵抗 [m²K/W]
軽量コンクリート	0.06	0.78	1.6	0.01

スチレン発泡板	0.025	0.04	1.9	0.14
アスファルト類	0.01	0.11		0.15
普通コンクリート	0.15	1.4	1.0	0.07
非密閉中空層	0.01			
プラスター	0.009	0.79		
岩綿吸音板	0.012	0.06		
断熱層		0.026	0.05	
非断熱層		0.47	1.6	
壁全体	0.276	-	-	-

注) 赤字は断熱材を示す

出典: 文献[21]より筆者が作成

(2) 側壁

屋根面の場合と同様、バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタントからジャカルタの代表的なオフィスビルの側壁壁体構造のデータとビルの図面を入手し (図 25)、屋上全体の厚さ、熱伝導率、容積比熱を計算した (表 18)。これから、表 10 のパラメータを設定した。

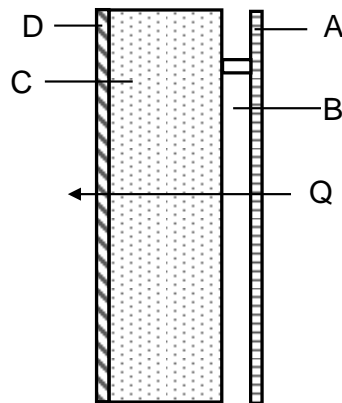


図 25 ジャカルタの代表的なオフィスビルの側壁壁体構造 (模式図)

図中の A-D は表 18 と対応している

表 18 ジャカルタの代表的なオフィスビルの側壁壁体構造

材料		厚さ	熱伝導率	容積比熱	熱抵抗
		[m]	[W/mK]	[J/m³K]	[m²K/W]
A	アルミニウム	0.004	210	2373490	1.9×10 ⁻⁵
B	密閉中空層	0.01			0.15
C	軽量コンクリート	0.12	0.78	1607443	0.15
D	プラスター	0.01	0.79	1632559	0.01

壁全体	0.144	0.45	1518838	0.32
-----	-------	------	---------	------

出典：バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント
(PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) のデータより筆者が作成。
熱伝導率、容積比熱、熱抵抗は文献[22]より引用。

(3) 道路

ジャカルタにおけるデータが入手できなかったため、東京の既往研究（[18]）と同じパラメータを使用した。

2.3.6. 街区被覆（屋根面、側壁、道路）パラメータ（対策導入時）（表 11）

屋上ヒートアイランド対策導入時の街区被覆パラメータは以下のように求めた。

(1) インテンシブ屋上緑化、エクステンシブ屋上緑化（表 19）

灌水に関するデータは田島ルーフィング株式会社の屋上緑化カタログ[29]より、夏季の値を参考にした。表面のアルベドと土壌のデータは文献[30][31]を参考にした。表面の潜熱輸送コンダクタンスは灌水量を最大蒸発量と仮定したときの値である。

表 19 屋上ヒートアイランド対策技術のパラメータ設定

		対策 なし	インテン シブ緑化	エクステン シブ緑化	高反射率 塗料
灌水 ^[29]	灌水量 [L/m ² / 回]	-	9.2	4.6	-
	灌水頻度 [回/週]	-	7	0.5	-
表面	アルベド[-] ^[30]	0.2	0.19	0.18	0.6
	放射率[-]	0.9	0.9	0.9	0.9
	潜熱輸送コン ダクタンス [mm/s]	0	9	0.08	0
土壌 ^[31]	密度[kg/m ³]	-	870	870	-
	熱伝導率 [W/mK]	-	0.24	0.2	
	比熱[J/kgK]	-	1217	999	-
	厚さ [mm]	-	300	30	-

出典：文献[29]、文献[30]、文献[31]より

(2) 屋根面の高反射化

日射反射率は 0.6 とした。文献[32]によると高反射塗料の反射率は 0.8 であるが、空気中の塵やほこりが屋根表面に付着するため反射率は低下することが知られている。その点を考慮し、0.6 に設定した。

2.3.7. 空調・熱源関連のパラメータ（表 12）

冷房設定温度、建物階高はバンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント (PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) へのヒアリングの結果である。

冷房設定期間は本論文の計算期間(7/29–8/30)を含む通年(1/2–12/30)とした。

床面積あたり在室人員[人/m²]は表 20 の Business の値(9.3 m²/人)の逆数をとって 0.1 人/m²とした。

ビル延床面積に占める空調面積割合はバンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタントから入手した図面（図 26）をもとに計算した。廊下、階段、トイレを非空調面積とし、フロア全体に占める空調部分の面積割合を求めた結果、0.76 となった。

表 20 Occupancy Load Factor

Utilization	m ² per person
1. Assembly space/gathering space	
Dense, without fixed installed chairs	0.65
Less dense, without fixed installed chairs	1.4
With chairs	1 person/455 mm straight
With fixed installed chairs	Based on installed chairs
Waiting area	
Kitchen	9.3
Library	9.3
Reading room	4.6
Swimming pool	4.6 (on water surface)
Swimming pool deck	2.8
Exercise room with equipment	4.6
Exercise room without equipment	1.4
Stage	1.4
Catwalk, gallery	9.3
Casino	1
Skating area	4.6

2. Educational	
Class room	1.9
Garage, laboratory, vocational space	4.6
3. Daily care	3.3
4. Health services	
Procedure room	22.3
Inpatient area	11.1
Outpatient area	9.3
5. Jails and prisons	11.1
6. Housing	
Hotel and hostel	18.6
Apartment	18.6
Hospice	18.6
7. Industry	
General and high risk industry	9.3
Special purpose industry	-
8. Business	9.3
9. Warehouse	
In the warehouse occupancy	-
In trade occupancy	27
In other occupancy	46.5
10. Commerce	
Sales area on ground floor	2.8
Sales area on two or more ground floor	3.7
Sales area below ground floor (basement)	2.8
Sales area above ground floor	5.6
Floors used for office	(look business)
Floors used for warehouse, receiveing, delivery, and not open to public	27.9

Based on Minister of Public Work Regulation (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum)
 Nomor 26/PRT/M/2008

出典: バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント
 (PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) から入手

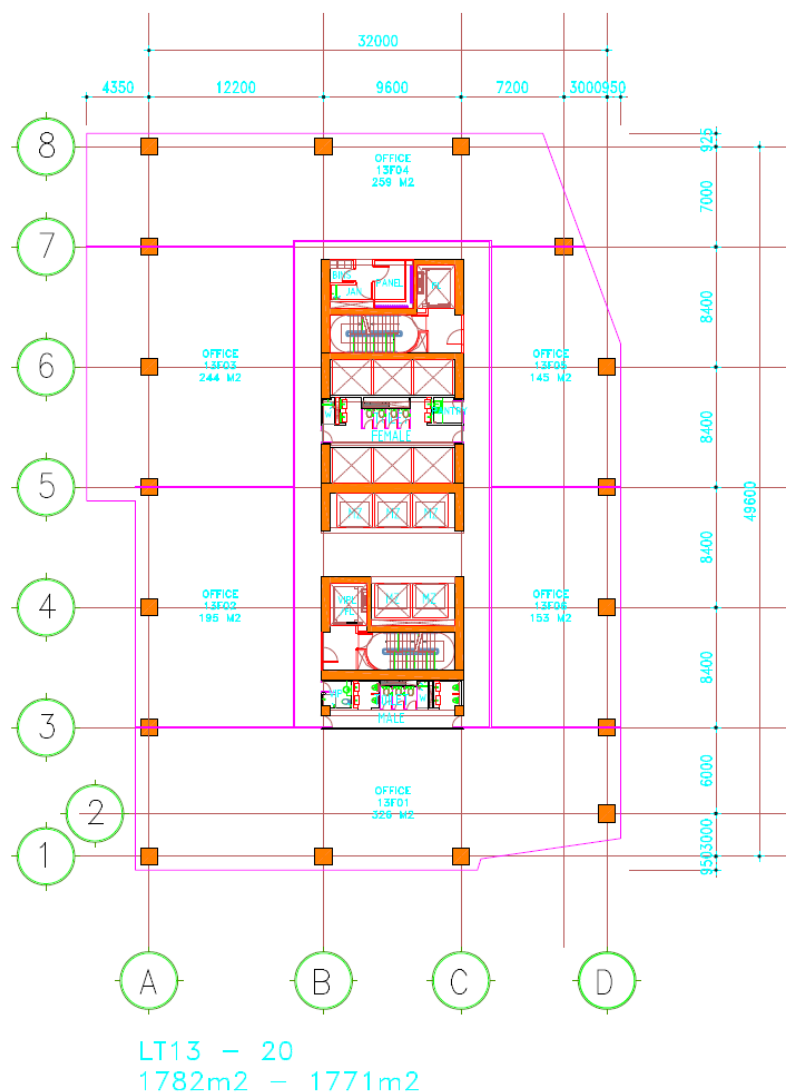


図 26 ジャカルタの代表的なオフィスビルの平面図

出典: バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント
(PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) から入手

2.3.8. スケジュールとその他の設定 (表 13)

(1) 空調スケジュール (冷房)

バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント(PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa)から空調スケジュールを入手した (表 21)。ただし、スケジュールは 18 時以降の値が欠損し、また平日のスケジュールしか入手できなかった。そこで、欠損している 18 時以降については人体発熱スケジュール (表 24) の値を用いた。また、時刻 t における休日のスケジュールは、時刻 t における平日のスケジュールを $a(t)$ 倍した。 $a(t)$ は田代[33]が大阪で電力の実測値を用いて調整した空調スケジュールを入手

し、平日と休日のスケジュールの値の時刻別の比をとったものである（式(1)、表 22）。作成した空調スケジュールを表 23 に示す。なお、(3)で述べるように特別日は設定しないため、スケジュールも作成していない。

$$a(t) = \frac{\text{休日の時刻}t\text{のスケジュール}}{\text{平日の時刻}t\text{のスケジュール}} \quad (1)$$

表 21 入手した空調スケジュール

時刻（時）	平日
0-6	0
6-7	0.1
7-8	0.3
8-12	1
12-13	0.8
13-17	1

表 22 $a(t)$ の値

時刻(時)	$a(T)$		
	土	日	祝
1	1.22	0.73	0.73
2	1.11	0.83	0.83
3	0.99	0.56	0.56
4	1.02	0.63	0.63
5	1.05	0.69	0.69
6	0.93	0.59	0.59
7	1.03	0.69	0.69
8	0.67	0.39	0.39
9	0.58	0.34	0.34
10	0.58	0.31	0.31
11	0.56	0.29	0.29
12	0.60	0.32	0.32
13	0.60	0.28	0.28
14	0.57	0.31	0.31
15	0.56	0.31	0.31
16	0.55	0.33	0.33
17	0.54	0.33	0.33

18	0.48	0.30	0.30
19	0.49	0.33	0.33
20	0.57	0.27	0.27
21	0.56	0.40	0.40
22	0.54	0.47	0.47
23	0.71	0.45	0.45
24	0.64	0.49	0.49

表 23 空調スケジュール

時刻(時)	平日	土	日	祝
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0.1	0.10	0.07	0.07
8	0.3	0.20	0.12	0.12
9	1	0.58	0.34	0.34
10	1	0.58	0.31	0.31
11	1	0.56	0.29	0.29
12	1	0.60	0.32	0.32
13	0.8	0.48	0.22	0.22
14	1	0.57	0.31	0.31
15	1	0.56	0.31	0.31
16	1	0.55	0.33	0.33
17	1	0.54	0.33	0.33
18	0.2	0.10	0.06	0.06
19	0.2	0.10	0.07	0.07
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

(2) 人体発熱スケジュール

バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント (PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) から人体発熱スケジュールを入手した (表 24)。

表 24 人体発熱スケジュール

時刻	平日	土日・ 祝日・特別日
1-7	0	0
8	0.3	0
9-12	1	0
13	0.8	0
14-17	1	0
18-19	0.2	0
20-24	0	0

出典: バンドン工科大学 Darmanto 研究室とジャカルタの建築コンサルタント
(PT Skemanusa Consultana Teknik, PT Sigmatech Tata Karsa) から入手

(3) 祝日、特別日

文献[34]を参考に、2014 年のジャカルタの祝日を以下のように設定した。なお、特別日は設定していない。

- 1 月 1 日 (水) 新年
- 1 月 14 日 (火) ムハマッド降誕祭
- 1 月 31 日 (金) イムレック (中国暦 2565 年正月)
- 3 月 31 日 (月) ニュピ (サカ暦 1936 年新年)
- 4 月 18 日 (金) キリスト受難日
- 5 月 1 日 (木) レイバーデー
- 5 月 15 日 (木) ワイサック (仏教大祭)
- 5 月 27 日 (火) ムハマッド昇天祭
- 5 月 29 日 (木) キリスト昇天祭
- 7 月 28 日 (月) イドゥル・フィトリ (1435 年断食明け)
- 8 月 17 日 (日) インドネシア共和国独立記念日
- 10 月 5 日 (日) イドゥル・アドハ 1435 年 (メッカ巡礼最終日)
- 10 月 25 日 (土) イスラム暦 1436 年新年
- 12 月 25 日 (木) クリスマス
- 12 月 26 日 (金) 政令指定休日

(4) 自動車排熱

Kikegawa et al. [23]は東京と大阪における交通排熱を道路のセンサスデータ[35]と自動車の燃料統計[36]から推計した。しかし、ジャカルタでは同様のデータを入手できなかったため、別の方法で推計する必要があった。そこで本論文では、Kikegawa et al. [23]によって東京で推計された交通排熱データから、ジャカルタにおける交通排熱データを推計した。

図 27 は日本の都道府県別のガソリン消費量と自動車保有台数の関係を示している。面積あたりの自動車保有台数と面積あたりのガソリン消費量は比例関係にあることがわかる。

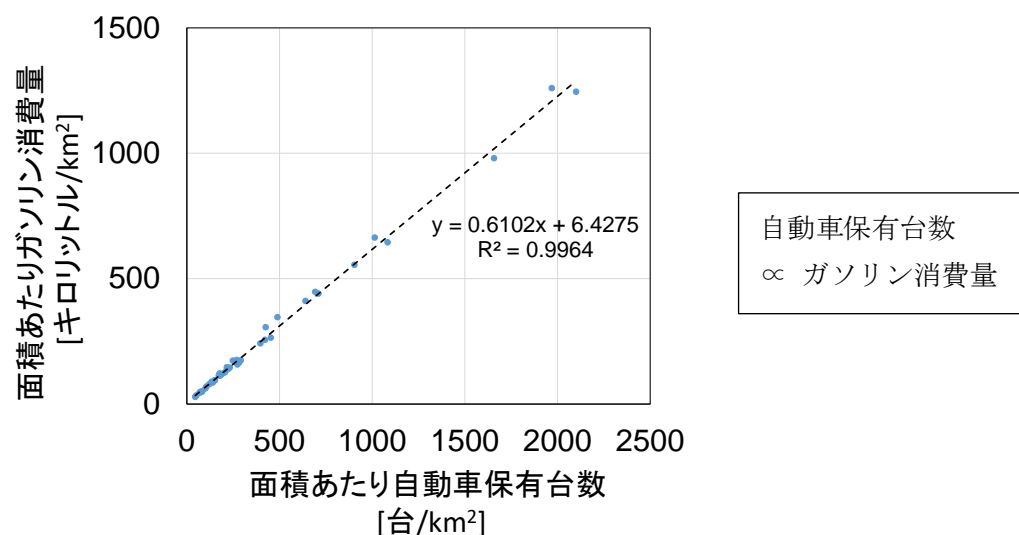


図 27 都道府県別のガソリン消費量[24]と自動車保有台数[25]の関係
(ともに面積あたり)

[24] 二輪車を含まず [25] 二輪車を含む

面積あたりのガソリン消費量は面積あたりの交通排熱量と比例するため、面積あたりの自動車保有台数と面積あたりの交通排熱量は比例すると考えられる。そこで、東京 23 区とジャカルタの面積あたり自動車保有台数を比較し（表 25）、ジャカルタの面積あたり交通排熱量を推計した。すなわち、ジャカルタの面積あたり交通排熱量は、東京 23 区の面積あたり交通排熱量を 1.5 倍することで求めた。

表 25 東京とジャカルタの自動車保有台数の比較

面積あたり自動車保有台数 [台/km²]	
東京 23 区	4149 _[28]
ジャカルタ	6018

1.5 倍

出典: 東京 23 区は[28]より。

注) ジャカルタの面積あたり自動車保有台数は表 23 から(*)式によって計算した

$$\text{自動車保有台数} = \text{人口密度} \times (\text{四輪車の普及率} + \text{二輪車の普及率}) \quad (*)$$

ジャカルタの面積あたり交通排熱量

$$= \text{東京 23 区の面積あたりの交通排熱量} \times 1.5$$

表 26 日本とインドネシアにおける自動車の普及率（一人当たりの台数）[26]

	四輪車	二輪車
日本	0.61	0.09
インドネシア	0.08	0.33

四輪車は貨物車（トラック）・乗合車（バス）等を含む
 データは 2014 年（インドネシアの二輪車のみ 2012 年）

ジャカルタの計算街区における道路面積率、交通量、市街地の有無、高速道路の有無を考慮し、東京の参照街区を抽出した（図 28）。この街区の面積あたり交通排熱量を 1.5 倍して作成した、ジャカルタの計算街区の面積あたり交通排熱量を図 29 に示す。



図 28 東京の参照街区

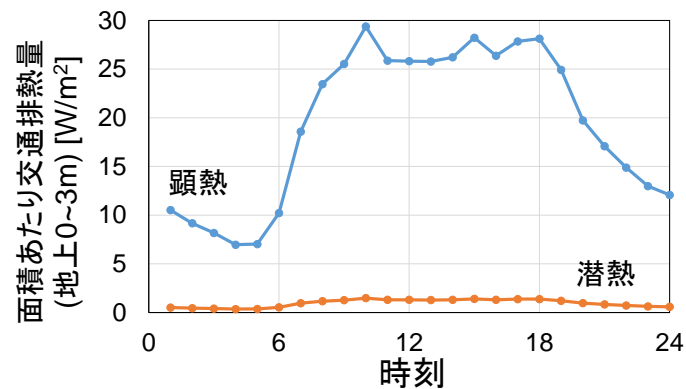


図 29 ジャカルタの計算街区における面積あたり交通排熱

2.4. 費用と便益の算出

屋上ヒートアイランド対策の導入者の費用は、導入、維持・管理、更新にかかる費用の和とした（式(a)）。ここで導入費用は導入時に1度だけ発生するが、維持・管理費用は毎年生じることに注意する。また、更新費用は更新時に導入費用と同じだけの費用が発生すると仮定した。

屋上ヒートアイランド対策の導入者の便益は冷房需要削減による電気料金節約とし、CM-BEMによって計算された冷房需要削減量とジャカルタの電気料金の積から計算した（式(b)）ただし、本研究で計算された冷房需要は8月の1か月間の値であるため、年間の冷房需要削減量は8月の冷房需要削減量を12倍することで算出した⁸。

最後に、上で求めた便益と費用の差を取って導入者の純便益を求めた（(c)式）。

$$(\text{費用}) = (\text{導入費用}) + (\text{維持管理費用}) + (\text{更新費用}) \quad (\text{a})$$

$$(\text{便益}) = (\text{冷房需要削減量}) \times (\text{ジャカルタの電気料金}) \quad (\text{b})$$

$$(\text{純便益}) = (\text{便益}) - (\text{費用}) \quad (\text{c})$$

文献[38]によると、屋上緑化の耐久年数（導入から更新までの期間）は40年以上、屋根面の高反射化の耐久年数は20年である。そこで本研究では、導入者の費用と便益および純

⁸ 1.6節で述べたように、ジャカルタは1年を通して気温の変化が小さく、月平均最低気温は概ね25℃程度である。よって、1年を通して冷房を使用しており、8月の冷房需要を12倍することで年間の冷房需要を推定した。

便益を緑化の最低耐久年数に合わせて 40 年間で評価した。

第 3 章 結果と考察

3.1 気温の計算結果

CM-BEM により計算された 8/23–8/29 の気温⁹を図 31 に示す。図 31 の観測気温はインドネシア気象庁(Badan Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika: BMKG)で観測されたもの[15]である。1 日の気温変化を概ね再現できていることがわかる。ただし、CM-BEM の計算結果は夜間を中心に気温を 1–2 °C 程度高めに再現している。そこで、CM-BEM により計算された気温と観測気温の差の目安である平均二乗誤差(Root Mean Square Error: RMSE)を求めると $RMSE = 1.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。

Kikegawa et al. [23]は 2007 年 8/6–8/9 に東京を対象に CM-BEM によって気温を計算し、同時に計算街区において連続気象観測を行った。その結果、CM-BEM により計算された気温と観測気温の RMSE は $RMSE = 1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。ジャカルタにおける本研究は Kikegawa et al.[23]よりも RMSE が $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度高い結果となった (表 27)。

ジャカルタの気象観測地点である BMKG は本研究で注目したオフィス街区から約 5 km 離れた場所に位置しており、観測地点は芝生の広場に位置している (図 32)。日本の気象庁が発行する気象観測ガイドブック[41]によると、気象観測地点は周囲の地形や建物の影響を避けるため風通しの良い場所を選んで設置されている。よって、地表面がアスファルトに覆われ、建物が密集している場所では気象観測地点より気温が上昇することがある。今回気温を計算した街区は地表面や建物影響を受けているため、実際の気温が気象観測点(BMKG)の気温より高かった可能性がある。

今後、本研究の計算対象であったオフィス街区で気象観測を行うことで、CM-BEM による計算結果と実際の観測気温との差を把握することが可能になると考える。

⁹ 地上 1.5 m の気温

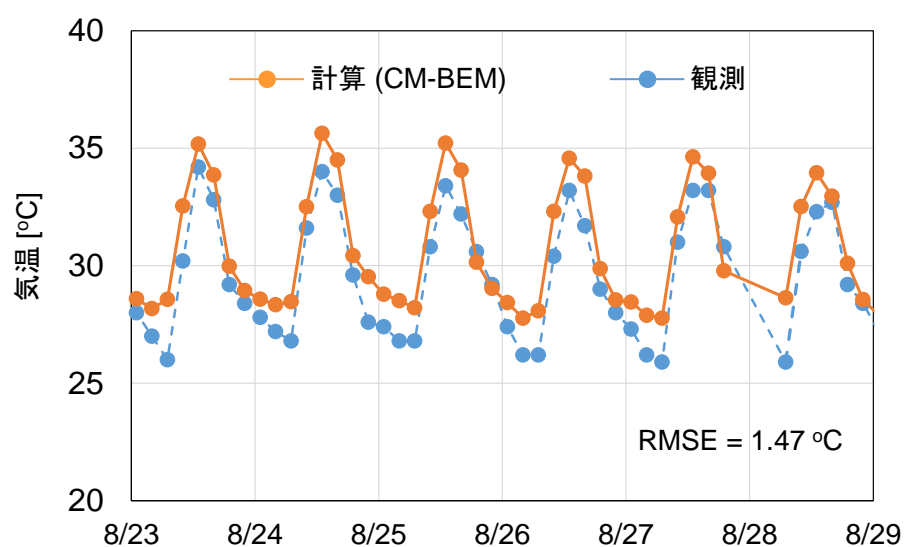


図 31 気温の計算結果と観測気温の比較 (8/23~8/29)

表 27 本研究と Kikegawa et al.[23]の比較

	本研究	Kikegawa et al.[23]
場所	ジャカルタ	東京
気象観測地点	計算街区と異なる地点 (インドネシア気象庁)	計算街区と同じ
観測気温と計算気温の RMSE	1.47 °C	1.08 °C



図 32 ジャカルタの気象観測地点 (インドネシア気象庁(BMKG))

図 33 は CM-BEM により計算された 8/23-8/29 の日最高気温を示している。日最高気温の低減量はインテンシブ緑化>エクステンシブ緑化>屋根面の高反射化の順であることがわかる。また、対策導入による日最高気温の低減量を東京の既往研究（山口[37]）と比較した（表 28）。ジャカルタを対象にした本研究と山口[37]の気温低減量の差は 0.01-0.03 °C であり、屋上ヒートアイランド対策はジャカルタにおいても東京と同程度の気温低減効果があると考えられる。

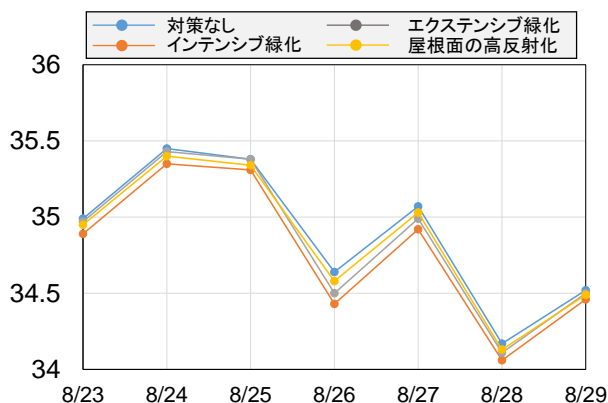


図 33 日最高気温の比較 (8/23-8/29)

表 28 屋上ヒートアイランド対策導入時の日最高気温低減量の比較（8月）

		インテンシブ緑化	エクステンシブ緑化	屋根面の高反射化
対策導入による 気温低減量 [°C]	本研究 (ジャカルタ)	-0.11	-0.05	-0.04
	山口[37] (東京)	-0.12	-0.02	-0.06

3.2 冷房需要の計算結果

図 34 は CM-BEM により計算された 8 月の延床面積あたり月積算冷房需要を示している。インテンシブ緑化とエクステンシブ緑化は 12% の削減、屋根面の高反射化は 1% の削減となった。

対策導入による冷房需要削減効果を山口[37]と比較した（表 29）。本研究と山口[37]では、インテンシブ緑化の冷房需要削減効果に違いがみられた。すなわち、ジャカルタではインテンシブ緑化は冷房需要を削減したが、東京では冷房需要を増加させた。

インテンシブ緑化が冷房需要を削減する要因は 2 つあり、第 1 に日中の気温低減、第 2 に屋根面の断熱率上昇である。第 1 の効果は本研究と山口[37]では大きな差はない（表 28）ため、冷房需要削減効果の差には影響していないと考えられる。また、屋上緑化による冷房需要削減効果は屋根面の断熱率上昇の影響が大きいとされる[39]。よって、屋根面の断熱

率の差がインテンシブ緑化の冷房需要削減効果の差の原因であると考えられる。2.3.5 節で述べたように、ジャカルタと東京では屋根面の断熱材の使用に違いがみられた（表 16、表 17）。すなわち、東京では屋根に断熱材が使用されているが、ジャカルタでは断熱材は使用されていない。よって、ジャカルタのビルではエクステンシブ緑化が断熱材の役割を果たし、冷房需要を削減したと考えられる。

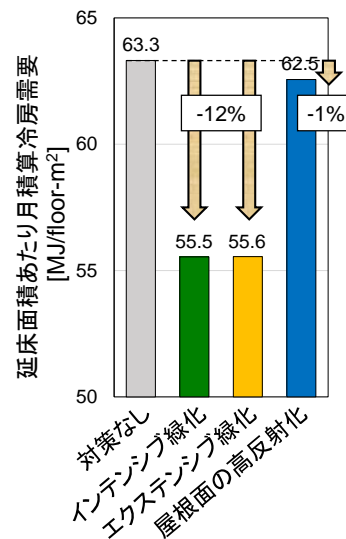


図 34 延床面積あたり月積算冷房需要の比較（8 月）

表 29 屋上ヒートアイランド対策導入時の冷房需要への影響の比較（8 月）

		インテンシブ緑化	エクステンシブ緑化	屋根面の高反射化
対策導入による月積算冷房需要	本研究（ジャカルタ）	削減	削減	削減
	山口[37]（東京）	削減	増加	削減

3.3 費用と便益、純便益の算出

2.4 節で述べた方法で導入者の費用と便益、純便益を算出し、40 年間で評価した。本研究では物価の変動やエネルギー価格の変動などは考慮せず、現状と同じ状況が 40 年間続くと仮定している。すなわち、1 年あたりの費用・便益を 40 倍して 40 年間の費用・便益を求めた。

(1) 費用

表 30 はアメリカの都市における屋上ヒートアイランド対策技術の導入面積あたり費用

である。この値に 0.865（ジャカルタのワールドアーキテクチャ国際建築コスト指数¹⁰[40]）をかけて（(d)式、(e)式）ジャカルタの導入面積あたり費用を求めた。

表 30 アメリカにおける、屋上ヒートアイランド対策技術の費用（導入面積あたり）

	対策 なし	インテン シブ緑化	エクステン シブ緑化	高反射率 塗料
導入費用 (=更新費用) [USD/m ²]	-	350	150	20
維持・管理費用 (1年あたり) [USD/m ² /year]	-	7.0	7.0	0.2
耐久年数 [年]	20	40	40	20

出典: 文献[38][39]

$$(\text{ジャカルタの導入費用}) = (\text{アメリカの導入費用}) \times 0.865 \quad (\text{d})$$

$$(\text{ジャカルタの維持・管理費用}) = (\text{アメリカの維持・管理費用}) \times 0.865 \quad (\text{e})$$

表 31 ジャカルタにおける、屋上ヒートアイランド対策技術の費用（導入面積あたり）

	対策 なし	インテン シブ緑化	エクステン シブ緑化	高反射率 塗料
導入費用 (=更新費用) [USD/m ²]	-	303	130	17
維持・管理費用 (1年あたり) [USD/m ² /year]	-	6	6	0.17
40年間の費用 [USD/m ² /]		545	372	42
耐久年数 [年]	20	40	40	20

(2) 便益

¹⁰ ワールドアーキテクチャ国際建築コスト指数とは、国による建築資材や人件費、建築基準の差をふまえ、同じ水準のビルを建てると仮定したときの、アメリカにおける費用を 1 として各国の建築コストを示したもの

ジャカルタの電気料金は 0.12 USD/kWh であった[42]。よって、2.4 節(c)式によって便益を求めた（表 32）。ここで、年間の延床面積あたり電気料金削減額を 2.5 倍¹¹し、年間の導入面積あたり電気料金削減額を求めている。

表 32 ジャカルタにおける、屋上ヒートアイランド対策技術の便益

	インテン シブ緑化	エクステン シブ緑化	高反射率 塗料
延床面積あたり 冷房需要削減量（8 月） [MJ/floor-m ² /month]	7.8	7.7	0.8
延床面積あたり 電気料金削減額（年間） [USD/floor-m ² /year]	3.1	3.1	0.3
導入面積あたり 電気料金削減額（年間） [USD/m ² /year]	7.8	7.8	0.8
40 年間の導入面積あたり 便益 [USD/m²]	313	312	30

(3) 純便益

(1)(2)の結果から純便益、および費用と便益の内訳を求めた（図 35）。純便益はすべての対策でマイナスとなり、その値は屋根面の高反射化>エクステンシブ緑化>インテンシブ緑化の順となった。屋根面の高反射化はインテンシブ緑化、エクステンシブ緑化よりも便益が小さいが、導入と維持管理にかかる費用が小さいため純便益の観点では最も良い結果となった。ただし耐久年数が屋上緑化よりも短いため、40 年間のうちに更新費用が 1 回発生している。エクステンシブ緑化は電気料金削減という便益はインテンシブ緑化と同程度だが、導入費用が安いためインテンシブ緑化よりも純便益は良い結果となった。逆に、インテンシブ緑化は導入費用が高く純便益の結果に影響した。

¹¹ 延床面積/導入面積の値

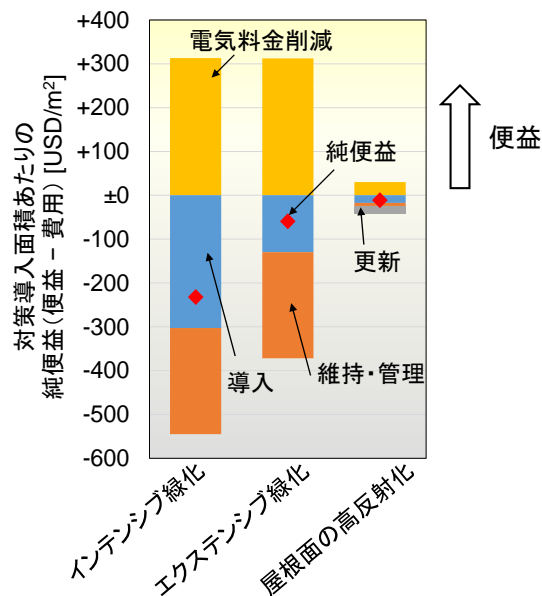


図 35 対策導入面積あたりの純便益とその内訳（40 年間）

3.4 対策の気温低減量と導入者の純便益の関係（図 36）

図 36 は対策導入時の気温低減量と 1 年あたりの純便益の関係を示している。対策導入時の気温低減量は 3.1 節の表 28、1 年あたりの純便益は 3.3 節の図 35 から求めた。図 36 の横軸は導入者の純便益、すなわち導入者の私的便益である。一方縦軸は日最高気温の平均低減量であり、これは社会的な便益と考えることができる。なぜなら、1.2 節で述べたように日中の気温を低減することによって熱中症リスクの削減や大気汚染の改善、エネルギー消費の抑制につながり、対策の導入者にとどまらず地域の広範な人に便益が及ぶからである。

図 36 より、すべての対策が気温を削減する一方で導入者に負の便益（すなわち、費用）をもたらす結果となった。ただし、その特徴には違いがみられる。図 36 における各対策のプロットは、右に行くほど導入者の私的便益が高くなることを意味し、上に行くほど社会的な便益（日最高気温の平均低減量）が大きくなることを意味する。よって、屋根面の高反射化は導入者の負の便益（費用）は最も小さいが、社会的な便益（日最高気温の平均低減量）も最も小さい。エクステンシブ緑化は導入者の私的便益、社会的な便益（日最高気温の平均低減量）ともに 3 つの対策の中では 2 番目であった。インテンシブ緑化は導入者の負の私的便益（費用）が最大であるが、社会的な便益（日最高気温の平均低減量）は 3 つの対策の中で最も大きい。

以上の結果より対策普及のための制度設計を行う上で示唆が得られる。例えば社会的な便益（日最高気温の平均低減量）が最も大きいインテンシブ緑化を普及させるためには補

助金によって導入者の私的便益を正の領域まで引き上げることが有効であると考えられる。

ジャカルタにおける最適な対策は、導入者の便益と社会的な便益（日最高気温の平均低減量）のどちらを重視し、またどのように重み付けするかによって異なる。その地域・都市の状況に即した対策を選ぶ必要があるといえる。

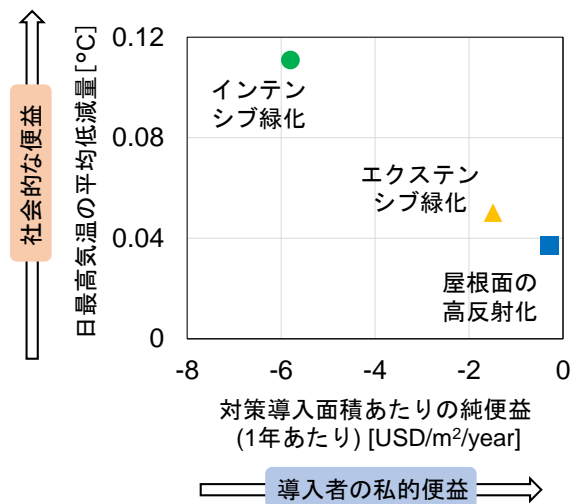


図 36 対策の気温低減量と導入者の純便益の関係

第4章 まとめと今後の展望

本研究は、ジャカルタのオフィス街区を対象に、屋上ヒートアイランド対策を導入したときの気温低減効果と導入者の費用および便益を40年間で評価した。

インテンシブ緑化とエクステンシブ緑化、屋根面の高反射化はすべて平均日最高気温を低減し(0.04–0.11 °C)、同時に冷房需要を削減した(1–12%)。また導入者の純便益はすべてプラスとなり、大きい順にエクステンシブ緑化、インテンシブ緑化、屋根面の高反射化となった。

東京の既往研究と比較すると、日最高気温の低減量は本研究と0.01–0.03 °Cの差でありジャカルタでも東京と同程度の気温低減効果が期待できることが分かった。冷房需要削減効果はエクステンシブ緑化に東京の既往研究と違いがみられ、本研究（ジャカルタ）ではエクステンシブ緑化はインテンシブ緑化と同程度（12%）冷房需要を削減した。これは、ジャカルタのオフィスビルの屋根面には断熱材が使用されていないため、エクステンシブ緑化の緑化システムが断熱材として機能したためと考えられる。

対策によって気温低減量と導入者の純便益の大きさは異なり、両者を比較することで各対策の特徴を把握することができた（図36）。屋根面の高反射化は導入者の負の便益（費用）は最も小さいが、社会的な便益（日最高気温の平均低減量）も最も小さい。一方インテンシブ緑化は導入者の負の私的便益（費用）が最大であるが、社会的な便益（日最高気

温の平均低減量）も最大であった。ジャカルタにおける最適な対策は導入者の私的便益と社会的な便益（日最高気温の平均低減量）にどのような優先順位をつけるかにより、対策を導入する地域の社会情勢を踏まえて決定する必要がある。

本研究では導入者の費用と便益を考え、屋上ヒートアイランド対策の便益は冷房需要削減による電気料金節約効果とした。しかし、3.4 節で述べたようにヒートアイランド対策の効果は対策導入者にとどまらず、熱中症リスクの削減や大気汚染の改善、エネルギー消費の抑制など広い範囲に便益をもたらす。例えば、本研究で明らかにした平均日最高気温低減量を熱中症の被害関数¹²に適用することで、熱中症リスクの削減を定量的に評価することが可能になる。今後はそのような社会的視点の便益も考慮することで、ジャカルタにおける最適なヒートアイランド対策の提案につながると考える。

¹²日最高気温と熱中症死亡者数の関係を表す。

参考文献

- [1] 環境省：ヒートアイランド対策ガイドライン平成 24 年度版
<http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guideline/h24.html> 2017/01/22 閲覧.
- [2] 神成陽容, 三上岳彦, 泉岳樹: 人工排熱による首都圏大気の気温上昇. *地学雑誌*, **113**(6), pp.802–815. 2004.
- [3] Taha, H.: Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, **25**(2): pp.99–103, 1997.
- [4] NHK そなえる防災 コラム 「ヒートアイランドはどうして起こる？」
<<http://www.nhk.or.jp/sonae/column/20140924.html>> 2017/01/22 閲覧.
- [5] 気象庁: ヒートアイランド現象の要因は何ですか？
<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html> 2017/01/24 閲覧.
- [6] 環境省: 平成 16 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, 2005.
<<http://www.env.go.jp/air/report/h17-02/>> 2017/01/22 閲覧.
- [7] Santamouris, M.: Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, **103**, pp.682–703, 2012.
- [8] 田島ルーフィング株式会社: 屋上緑化カタログ, p.18.
<<http://www.maruhou.co.jp/images/catalog02.pdf>> 2017/01/24 閲覧.
- [9] 日本建築学会 (編): クールルーフガイドブック 都市を冷やす技術, 地人書館, 2014.
- [10] エコ・ガーデン.jp <<http://www.ecogarden.jp/>>, 2017/1/24 閲覧.
- [11] GREEN ROOF TECHNOLOGY: Modern Green Roof Technology
<<http://www.greenrooftechology.com/extensive-green-roof>> 2017/1/24 閲覧.
- [12] Maru, R., Ahmad, S.: Daytime temperature trend analysis in the city of Jakarta, Indonesia, *World Applied Sciences Journal*, **32** (9), pp1808–1813, 2014.
- [13] Demographia: World Urban Areas Population Projections, 2010.
- [14] Kebijakan Energi Nasional: National Energy Policy 2003–2020, 2004.
- [15] OGIMET <<http://www.ogimet.com/home.phtml.en>> 2016.7 閲覧.
- [16] Sivak, M.: Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: Implications for developing countries, *Energy Policy*, **37**, pp.1382–1384, 2009.
- [17] 亀卦川幸浩: 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学博士論文, 2001.
- [18] Ihara, T., Kikegawa, Y., Asahi, K., Genchi, Y., Kondo, H.: Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures. *Applied Energy*, **85**(1), pp12–25, 2008.
- [19] Stewart, I.D., Oke, T.R.: Local Climate Zones for urban temperature studies, *Bulletin of the*

American Meteorological Society, **93**, pp.1879–1900, 2012.

- [20] 岡田和樹: 領域気候・都市気候・建物エネルギー連成モデルを用いたジャカルタの気候解析, 明星大学卒業論文, 2016.
- [21] 滝沢博: 標準問題の提案(オフィス用標準問題), 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム, pp.35–42, 1985.
- [22] 住宅・建築省エネルギー機構(編): 建築物の省エネルギー基準と計算の手引, 改訂1版, 1993.
- [23] Kikegawa, Y., Tanaka, A., Ohashi, Y., Ihara, T., Shigeta, Y.: Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese Major Cities, Tokyo and Osaka, *Theoretical Applied Climatology*, **117**, pp175–193, 2014.
- [24] 国土交通省:自動車燃料消費量統計年報, 2015.
- [25] 自動車検査登録情報協会: 都道府県別・車種別保有台数表, 2016.
- [26] 日本自動車工業会: 主要国の四輪車普及率
<http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t2.html> 2017/01/12 閲覧.
- [27] 日本自動車工業会: 世界各国の二輪車普及率
<http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t3.html> 2017/01/12 閲覧.
- [28] 国土交通省関東運輸局: 市区町村別自動車保有台数, 2016.
- [29] 田島ルーフィング株式会社: 屋上緑化カタログ, p.66.
<<http://www.maruhou.co.jp/images/catalog02.pdf>> 2017/01/17 閲覧.
- [30] Lundholm, J., Scott, M.J., MacDougall, Z., Ranalli, M.: Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions, *PLoS ONE*, **5**(3), pp.1–11, 2010.
- [31] Sailor, D.J.: A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings*, **40**, pp.1466–1478, 2008.
- [32] 東貴博: ヒートアイランド対策技術の評価, 工学院大学修士論文, 2004.
- [33] 田代太一: 都市気象 - 建物エネルギー連成モデルの街区電力需給予測への応用, 東京大学修士論文, 2017.
- [34] 2014年度インドネシアの祝祭日 <<http://gadogado.exblog.jp/18425027/>> 2017/02/19 閲覧.
- [35] Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Nation-wide road traffic condition study (road traffic census), Fiscal 1999, 2001.
- [36] Environment Agency of Japan: The survey result on automobile exhaust unit rate and total amounts, 1998.
- [37] 山口和貴: ヒートアイランド対策の効果と LCCO₂, *コンクリート工学*, **48**(9), pp.28–32, 2010.
- [38] Sproul, J., Wan, M.P., Mandel, B.H., Rosenfield, A.H.: Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States, *Energy and Buildings*, **71**, pp20–27, 2014.

- [39] Bianchini and Hewage: Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach, *Building and Environment*, **58**, pp.152–162, 2012.
- [40] 株式会社サトウファシリティーズコンサルタンツ: 各国の建築コストと工事発注調達方式の現状, p.8
<<https://www.sfc-net.co.jp/wp/wp-content/themes/sfc/pdf/430/cost01.pdf>> 2016/10/01 閲覧.
- [41] 気象庁: 気象観測ガイドブック, 2004.
- [42] The Jakarta Post: PLN cuts electricity price in September, 2015/9/1
<<http://www.thejakartapost.com/news/2015/09/01/pln-cuts-electricity-price-september.html>>
2017/1/26 閲覧.

謝辞

本論文を執筆するにあたり、まずは修士課程の2年間にわたって熱心に指導していただいた指導教員の井原智彦准教授にお礼を申し上げます。井原准教授からは研究指導にとどまらず、ジャカルタの現地調査や国内・海外での学会発表、留学の機会など、様々なチャンスを与えていただきました。心より感謝申し上げます。

また、副査の脇岡靖明教授からは研究の方向性や全体像について幾度も有益なアドバイスをいただきました。重ねてお礼申し上げます。

明星大学の亀卦川幸浩教授からはCM-BEMのパラメータ作成方法について指導していただきました。ジャカルタの現地調査も含め、2年間を通して大変お世話になりました。同亀卦川研究室の岡田和樹さんからはCM-BEMで使用するジャカルタの街区形状パラメータを提供していただきました。本研究で最重要なデータの1つであり、大変感謝しております。

東京工業大学の神田学教授からは、プロジェクト（環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト S-14）のリーダーとして異なる分野の視点から幾度もアドバイスをいただきました。同神田研究室のAlvin Christopher Galang Varquez 特任講師にはジャカルタの土地利用データの整備、建物ポリゴンデータの入手を行っていただき、Nisrina Setyo Darmanto さんからはジャカルタのWRF計算結果をいただきました。神田研究室の皆様からのデータ提供がなければ、本研究は行えませんでした。心より感謝申し上げます。

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の山口和貴主管研究員からは、CM-BEMの使用方法について2年間を通して幾度となく指導していただきました。厚くお礼申し上げます。

バンドン工科大学のDarmanto 講師にはジャカルタの街区被覆、空調関連、スケジュールなど各種パラメータの入手・作成においてご尽力いただき、貴重なデータを提供していただきました。また、現地の建築コンサルタントをご紹介いただき、現地調査にも協力していただきました。心からお礼申し上げます。同研究室のNicholas James さん、Galang Erlangga さんにも現地調査では大変お世話になりました。

井原研の先輩である天沢逸里さん、橋本侑樹さんには普段から研究の相談にのっていただき、スライドの作成や発表練習でも幾度となく指導いただきました。本当にありがとうございました。一緒に大学院を過ごした井原研の同期（田代さん、草間さん、船津さん）や後輩のみなさん（栞山さん、環野さん、小楠さん、土屋さん）にもお礼申し上げます。

最後に、大学入学からの6年を支え、見守ってくれた両親と兄弟にお礼を言いたいと思います。ありがとうございました。