

# 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3月修了 環境システム学専攻  
環境社会システム学分野 47-156683 前田 健太郎  
指導教員：井原 智彦 准教授

Keywords: ジャカルタ、ヒートアイランド、屋上緑化、高反射塗料

## 1. 研究の背景と目的

昨今、地球温暖化による気温上昇が問題となっているが、都市部では温暖化に加えてヒートアイランド現象によって気温が上昇している。さまざまなヒートアイランド対策が存在するが、建物が密集して地価が高い都市部において大規模なヒートアイランド対策（例：緑地化）を地表面に導入することは現実的ではない。そこで、建物の屋上に導入できる屋上ヒートアイランド対策（屋上緑化や屋根面の高反射化）が注目されている。

屋上緑化は植物の蒸散による気化熱を利用し、屋根面から大気への顕熱を削減して気温の上昇を防ぐ。同時に屋根面から建物内部への貫流熱を削減して空調エネルギー消費を削減する。屋上緑化はインテンシブ緑化とエクステンシブ緑化の2種類に分類でき、用いる植物の種類や初期投資費用、維持管理の有無が異なる（表1）。一方屋根面の高反射化は反射率を上昇させることで表面温度の上昇を防ぎ、大気への顕熱と建物の空調負荷を削減する。

表1 インテンシブ緑化とエクステンシブ緑化の特徴[1]

	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
ヒートアイランド緩和策としての効果	あり	限定的

従来、ヒートアイランド現象は日本や米国をはじめとする中高緯度に位置する先進国の都市を中心に研究されてきた[2]。しかし、近年では急激な人口増加と都市開発を背景に、先進国以外でもヒートアイランド現象が報告されている。Maru and Ahmad[3]によると、2012–2013年に観測されたインドネシアのジャカルタのヒートアイランド強度（都市中心部と郊外の気温の差）は約2.0℃であった。ジャカルタの都市圏人口は2030年には2010年比で約1.7倍に増加すると予測されており[4]、今後の人口増加を考慮するとヒートアイランド対策の導入が急務である。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少なく、対策導入時の効果を調査した事例もない。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一般には公開されていないことも多く、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。

対策導入者の視点では、私的な費用が便益を上回れば対策を導入し、私的な費用が便益を上回れば対策を導入しないと考えられる。よって対策を推進するためには、導入者の視点からの私的な費用と便益の評価を行う必要がある。

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導入時の気温低減効果と私的な費用および便益を評価することを目的とし、評価をするために必要なデータの入手とそれを用いたシミュレーションモデルによる計算を行った。

## 2. 手法

研究の流れを(1)–(3)に分けて説明する。(1) ジャカルタの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し、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。(2) モデルを用いて気象計算、都市の冷房需要を計算する。本研究ではKikegawa et al.[5]が開発した都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデル(CM-BEM)を用いた。都市キャノピーモデル(CM)は街区形状を入力条件とし、メソスケール気象モデルThe Weather Research and Forecasting Model(WRF)の計算結果を上端境界にして都市内部の気象条件(気温や湿度)を計算する。一方、ビルエネルギーモデル(BEM)はCMの

気象条件を入力条件にして建物内部の熱負荷を計算し、冷房需要が計算される。(3) CM-BEM の計算結果を用いて屋上ヒートアイランド対策導入時の気温低下量や冷房需要削減量を評価し、導入面積あたりの費用と便益を算出する。費用は対策導入、維持・管理、更新にかかる費用の和である (式 (a))。便益は冷房需要削減量にジャカルタの電気料金を乗じる (式 (b))。ここで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。純便益は便益と費用の差である (式 (c))。

$$\begin{aligned} \text{(費用)} &= \text{(導入費用)} + \text{(維持・管理費用)} + \text{(更新費用)} && \text{式 (a)} \\ \text{(便益)} &= \text{(冷房需要削減量)} \times \text{(ジャカルタの電気料金)} && \text{式 (b)} \\ \text{(純便益)} &= \text{(便益)} - \text{(費用)} && \text{式 (c)} \end{aligned}$$

### 3. 計算に必要なパラメータの作成

ジャカルタの建物構造パラメータは統計資料が手に入らなかったため、バンドン工科大学やジャカルタの建築コンサルタントを通じ、現地の代表的なオフィスビルの屋上壁体構造 (図 1) のデータ (表 2) を入手した。入手したデータより壁全体の熱伝導率と容積比熱を計算し、CM-BEM のパラメータとして採用した。表 2 に東京の代表的なオフィスビルの屋上壁体構造も示す。東京では断熱材であるスチレン発泡剤が用いられるが、ジャカルタでは対応する断熱材は用いられていないことがわかった。

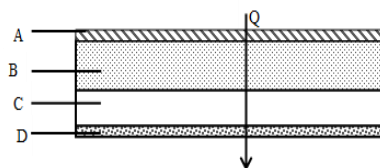


図 1 ジャカルタの代表的なオフィスビルの屋上壁体構造の模式図。図中の A-D は表 2 の材料名と対応している。

また CM-BEM の計算条件と入力条件を表 3、費用と便益の算出に必要なパラメータを表 4 に示す。

表 2 ジャカルタと東京の代表的なオフィスビルの屋上壁体に用いられる材料の物性値  
(注) 斜字の数値は壁体や層全体の値である。

材料名	厚さ[m]	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [MJ/m <sup>3</sup> K]	熱抵抗 [m <sup>2</sup> K/W]
ジャカルタ	0.322	0.85	1.29	0.38
(A) プラスタ	0.01	0.79	1.63	0.01
(B) 普通コンクリート	0.2	1.4	1.93	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	1.03	0.07
東京	0.276	断熱層 0.026 非断熱層 0.47	断熱層 0.051 非断熱層 1.60	-
軽量コンクリート	0.06	0.78	1.63	0.01
スチレン発泡剤	0.025	0.04	1.93	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	1.03	0.07
非密閉中空層	0.01	-	-	-
プラスタ	0.009	0.79	-	-
岩綿吸音板	0.012	0.06	-	-

表 3 CM-BEM の計算条件と入力条件

計算条件		
計算街区	ジャカルタ中心部のオフィス街区 (1.2 km 四方)	
計算期間	2014/7/30-2014/8/29 (1 か月間)	
シナリオ	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、屋根面を高反射化 の 4 種類。計算街区の屋上面積の 50% に対策を導入すると仮定した。	
入力条件		
CM	上端境界条件	東京工業大学による WRF の計算出力データ
	街区形状	ジャカルタの建物ポリゴンデータ[6]
BEM	建物構造	バンドン工科大学とジャカルタの建築コンサルタントから入手したデータを基に筆者が作成
	空調機器等	
	自動車排熱	東京の自動車排熱データから筆者が推定

表 4 費用便益分析に必要なパラメータ

パラメータ	
費用	アメリカの文献値[7],[8]にインドネシアの物価を考慮。
電気料金	電気料金は 0.12 USD/m <sup>2</sup> [9]

#### 4. 結果と考察

8/23-8/29 の 1 週間の気温計算結果と同期間のインドネシア気象庁 (BMKG) による観測結果を図 2 に示す。この期間における CM-BEM の気温計算結果と観測結果の平均二乗誤差 (RMSE) は 1.5 °C であった。なお、BMKG は計算街区の中心部から約 5 km 離れていた。東京の 56 街区での CM-BEM の気温計算結果と気象観測結果の RMSE が 1.0°C[10]であることをふまえると、本研究での気温計算結果と観測結果との誤差はやや大きいといえる。その原因として、気象観測地点 (BMKG) は芝生の広場に設定されており風通しもよい場所に位置するため、建物が密集し地表面がアスファルトに覆われたジャカルタの計算街区は気象観測点よりも気温が高い可能性がある。

屋上ヒートアイランド対策導入時の平均日最高気温を表 5 に示す。3 つの対策の中ではインテンシブ緑化の気温低減量が最も大きかった。本研究と同じ対策導入時の東京における気温低減量[11]を比較すると、本研究との差は 0.01-0.03 °C であった。

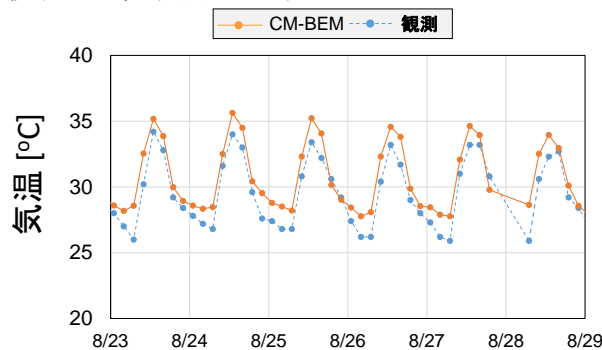


図 2 CM-BEM による気温計算結果と観測結果の比較 (8/23-8/29)

表 5 屋上ヒートアイランド対策導入時の日最高気温の比較 (7/30-8/29)

	対策なし	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
平均日最高気温 [°C]	34.84	34.73	34.79	34.80
(対策導入による気温低減量 [°C])		(-0.11)	(-0.05)	(-0.04)

図 3 に 8 月の月積算冷房需要の計算結果を示す。山口[11] による東京の計算結果では、インテンシブ緑化と屋根面の高反射化は月積算冷房需要を削減したが、エクステンシブ緑化は削減しなかった。ジャカルタでは屋根に断熱材が使用されていないため、エクステンシブ緑化が断熱材として機能して冷房需要を削減したと考えられる。

図 4 に各対策に関して 40 年間のライフサイクルコストの計算結果を示す。純便益はすべてプラスとなったが、インテンシブ緑化に比べて導入費用が小さいエクステンシブ緑化の純便益が最大となった。屋根面の高反射化は導入と維持管理費用は小さいが、冷房による電気代削減効果も小さかった。

図 5 に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す。すべての対策が気温を削減すると同時に便益をもたらす結果となった。純便益を気温削減量で除した値で比較すると、エクステンシブ緑化が最も優れていた。

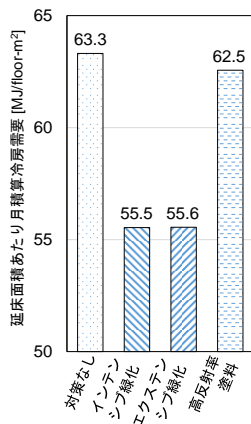


図 3 延床面積あたり月積算冷房需要 (8月)

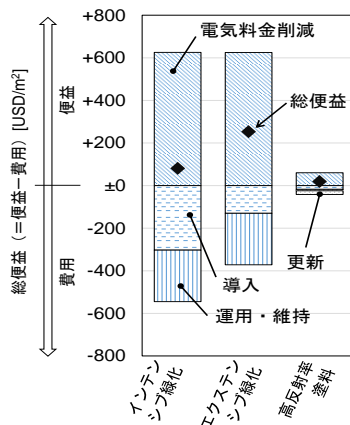


図 4 40 年間のライフサイクルコスト

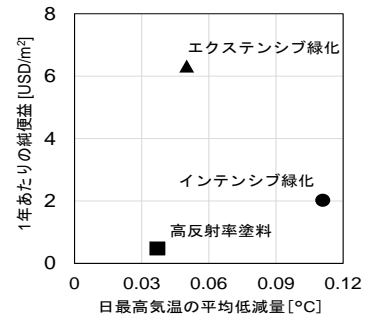


図 5 対策の気温低減量と便益の関係

## 5. まとめと今後の展望

本研究では、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費用および便益を 40 年間のライフサイクルで評価した。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削減し、冷房需要を削減したが、その量は対策によって異なる結果となった。気温低減量と便益を考慮すると、ジャカルタではインテンシブ緑化が最も優れた対策であることが示唆される。

今回は便益として冷房需要削減による電気代削減効果という私的費用のみを考慮したが、屋上ヒートアイランド対策を導入する効果は大気汚染や人間健康への影響など、社会的な便益ももたらす。社会的便益も評価項目に加えることで、社会にとって望ましいヒートアイランド対策の提案につながると考える。

### 参考文献

- [1] 日本建築学会編: クールーフガイドブック, 地人書館, 2014.3.
- [2] Santamouris, *Solar Energy*, **103**, pp682–703, 2012.7
- [3] Maru and Ahmad, *World Applied Sciences Journal*, **32** (9), pp1808–1813, 2014
- [4] Demographia: World Urban Areas Population Projections (2010)
- [5] Kikegawa et al., *Applied Energy*, **76** (4), pp449–466, 2003.
- [6] 岡田和樹, 明星大学修士論文, 2016.3
- [7] Sproul et al, *Energy and Buildings*, **71**, pp20–27, 2014.
- [8] Bianchini and Hewage, *Building and Environment*, **58**, pp152–162, 2012
- [9] The Jakarta Post: PLN cuts electricity price in September, 2015/9/1
- [10] Kikegawa et al., *Theoretical Applied Climatology*, **117**, pp175–193, 2014.
- [11] 山口和貴, *コンクリート工学*, **48** (9), pp28–32, 2011