テラスハウス周辺の緑被率と周辺気温低減効果に関する定量的把握
東南アジア・蒸暑気候地域における環境配慮型住宅地デザイン手法に関する研究（その2）QUANTITATIVE STUDY ON GREEN COVERAGE RATIO AND ITS EFFECTIVENESS
OF AMBIENT TEMPERATURE REDUCTION IN SURROUNDING TERRACED-HOUSE

Environmental-friendly housing area design methods in Tropical Southeast Asia Part 2

斉藤 圭*, イスマイル サイド**, モハマト ヒシャム ラシディ***, 篠崎 道彦****

Kei SAITO, Ismail SAID, Mohd Hisyam RASIDI

and Michihiko SHINOZAKI

The aim of this study is to investigate environmental situation surrounding terraced houses with greenery patterns, and to accumulate objective data and features in the new developed residential area in Malaysia. A computer microclimate simulation technique is applied by combining stored digital spatial data on GIS as main tools. As a results, i) There is almost no temperature changes between the current building shape and after changing the building aspect ratio without additional greening. However after green space added, some contributions for reducing surrounding temperature can be observed. ii) The relatively higher cooling effects of greenery in the surrounding building and block can be observed in the afternoon and evening. iii) Increasing approximately 11% green coverage ratio make effects of reducing about 0.5°C above the green spaces and about 0.3°C on the surrounding area.

Keywords: Terraced House, Green Coverage Ratio, Building Aspect, Ambient Microclimate, Malaysia

テラスハウス, 緑被率, 建物縦横比, 周辺微気候, マレーシア

1 研究の背景と目的

気候変動やアーバンヒートアイランドなど地球規模での環境変化が広く問題視されており, その主要因のひとつである二酸化炭素排出量の削減に資する取り組みが各国・各分野で進められている。特に, 近年更なる発展成長を続ける東南アジア諸国における温暖化への対策の在り方・推進は, 今後ますます重要になると考えられる。ここで東南アジア圏の主要国のひとつであるマレーシアにおいては, 80年代以降の都市部への人口流入に伴い都市型住宅地が急速に増加してきた。しかし, これらの住棟形式やレイアウトの多くは気候・生活スタイルの大きく異なる他国から輸入されたものがほとんどであり^{注1)}, 高温多湿な現地の環境に配慮されたものではない。また, 建物や街区などハード面だけでなく, 周辺環境の冷却機能や二酸化炭素の吸収を担う緑被部分や日中の強い直射日光を遮る樹木の植栽などについても, 植物の成長に大変適した気候にもかかわらずその効果を十分に活かした計画が進められているとは言い難い。そこで本研究ではマレー半島南端の都市であるジョホールバルに位置する前報³⁾と同じ住宅地を対象とし, 熱帯蒸暑の地域性・気候性を考慮した将来的な環境配慮型の住宅地計画に資する緑化に関する方策とその周辺冷却効果について定量的検討を行うことを目的とする。

ここで, マレーシアにおける新規開発型の標準的な住宅地には, 戸

建て型・二戸一型・テラスハウス・フラッツの大きく4タイプの住戸形式が含まれており, 2009年時点で全体の約40%がテラスハウスで占められている⁴⁾。先に述べた前報内での検討を通じ, このテラスハウスの周辺は他形式と比べて1~1.5°C程度高い気温となる傾向が見られることが明らかとなっている。各住戸が独立した形状をもつ戸建て・二戸一型では, 敷地内にある程度まとまったサイズの緑被空間が確保されているが, 一方, 共用壁によって各戸が連続し大きな建物縦横比の形状をもつテラスハウスでは, 個々の敷地内における緑被空間のサイズが限られているといった相違がある。しかしこれら建物形状の相違と周辺緑被空間量の相違の何れがこの傾向に強く寄与しているかは定量的に明らかとなっていない。そこで本研究では, このテラスハウス住宅群の周辺環境に着目し, 建物形状および緑被空間量の変更とその両者を組み合わせた場合に, 周辺気温の低減に対してどの程度の効果を示すかについて検討を行う。具体的には, 平行・連続的に配置されたテラスハウスの, 建物および街区周辺の地表面に緑被率を変えながら段階的に緑化を施した場合と, これとの組み合わせとして建物縦横比を変更し住棟間に空隙を設けた場合に, 地区内のどこで(面・点)どの程度気温が変化しているかについて数値シミュレーションを用いて定量的に評価・比較を行う。本検討を通じ, 緑化によるソフト面と建物形状の相違といったハー

本研究の一部は国際シンポジウム(The 9th ISAIA 2012, Gwangju-South Korea¹⁾)にて発表したものである。

* マレーシア工科大学建築都市環境学部
上級講師・博士(工学)

** マレーシア工科大学建築都市環境学部 准教授・Ph. D.

*** マレーシア工科大学建築都市環境学部 上級講師・Ph. D.

**** 芝浦工業大学デザイン工学部 教授・工博

Senior Lecturer, Faculty of Built Environment, University Technology Malaysia, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Built Environment, University Technology Malaysia, Ph. D.

Senior Lecturer, Faculty of Built Environment, University Technology Malaysia, Ph. D.

Prof., College of Engineering and Design, Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

ド面の両方から、地区内気温の低下・環境改善に効果的な街区レベルの緑化手法提案に繋げる基礎的データおよび知見の蓄積を目指す。

2 研究方法と手順

本研究は、以下の方法と手順に従い進める。

1. 先ず、本研究内で重点的に取り組むべき点の把握をするため、文献レビューによる研究到達点・事例の整理を行う。この中でマレーシアと類似の気候に属する東南アジア地域およびその近隣諸国における先行研究事例を収集・整理する。
2. 次に、現地調査を踏まえた検討住宅地モデルの構築を行う。ここではケーススタディとして、実在するテラスハウス住宅で構成される一般的な新規開発の都市型住宅地において、建物縦横比（建物間口を奥行きで除した値）および緑化手法（街区内緑被率・緑化位置）をパラメータとし、「緑化手法の相違」「建物形状の相違」「両者の組み合わせ」とタイプ分けし、その効果を量的・場所的な情報と共に検討するための住宅地モデルを準備する。
3. 次に、空間データと微気候シミュレーションソフトウェアを組み合わせ、構築した検討モデルを対象とした外部空間の微気候シミュレーションを行う。検討モデル毎に周辺空気温度および風速を面的・数量的に把握する。結果の数値は GIS に格納され、他レイヤと組み合わせた解析・図化を行う。
4. 最後に、結果の比較として、分析の結果を基に周辺気温低減の観点から効果の高い緑化状況の組み合わせとそれら効果の相違・程度について数量的・客観的にまとめ、科学的知見として整理を行う。

3 文献レビュー

ここでは、東南アジアの蒸暑気候地域、またはそれと類似する気候下の国における自然共生型の都市・市街地環境研究事例を中心にその到達点をまとめる。例えば Ng⁵⁾らは、香港の高密度市街地において、建物周辺の緑被率と H/W 値（建物高ささと道路幅員の比）をパラメータとし、数値シミュレーションによるモデル間の比較研究を行っている。この中で、周辺気温を 1°C 減少させるためには建物周辺の緑被部分について緑被率として約 33%以上が必要であることを述べている。また Song⁶⁾らは、シンガポールにおける緑被空間の周辺冷却効果に関する検討として、グリーンスペースを含む現状の市街地と、開発によって緑被部分が建築物＋人工被覆に変化した場合のシナリオに基づくシミュレーション比較を行っている。この結果から、緑被周辺部分の気温は約 0.3~0.6°C 人工被覆周辺部分よりも低くなることを示している。Wong²⁾らは同じくシンガポールを含む熱帯気候下の市街地環境研究の一連としてその著書の中で、都市公園など大規模な緑地を確保することが難しい市街地において、小規模な緑地でも建物の周辺に計画的・集合的に配置することで周辺冷却の大きな効果が得られることを示している。

これら東南アジアやその近隣諸国での都市環境調査や緑化手法と効果に関する先行研究は、その多くが大都市圏などの発展が著しいエリアにおけるヒートアイランド問題に着目した研究である。このため、検討対象とするエリアは比較的広域であり、住宅地における住棟周辺といったスケールでの検討例はまだ数が限られている。このことから本研究では、熱帯蒸暑気候であるマレーシアの発展著しい市街地近傍に位置する住宅地に着目し、先行研究の知見を踏まえ

ながら、街区レベルのマクロな視点から建物周辺の緑化とその周辺冷却効果についての検討を加えるものである。

4 対象地域・検討モデルの設定

4.1 対象地域の設定

本研究では、マレー半島南端のジョホール州の州都であるジョホールバル地域（図 1(a) 中の濃いグレー部分）に位置する住宅地のひとつ（図 1(b) 参照）に着目する。当該住宅地は 90 年代前半に開発された一般的なロケーションおよび規模の郊外型住宅地であり、主として平屋と 2 階建ての低層住宅で構成されている。

図 1 対象地域のロケーション

4.2 緑化・建物形状変更による効果検討モデルの設定

図 2(a) は、対象地域内の、主としてテラスハウスで構成されるエリアの現況の建物形状・高さと建物周辺の緑被空間を示している。また同図内の丸囲み数字は、次章以降での検討に用いる評価点位置を示している。図中のテラスハウスは何れも間口（正面幅）が約 103m、奥行きが約 17m（建物縦横比は約 1:6）、高さは 7~8m（全て 2 階建て）と、ほぼ同一の形状をもつ住棟群で構成されている。ここで取りあげたテラスハウスは、ジョホールバル地域内で一般的にみられる構成・配置・規模である^{注2)}。

(a) 現況建物および緑被空間

(b) 同上・パードビュー

図 2 現況の建物および緑被空間モデル

図2(b)は、テラスハウスとその周辺緑地の現況をモデル化したものである。前報³⁾で同対象地域内の土地被覆割合について述べたが、当エリア内の人工被覆率は約86%であり、土地被覆の改変を行わずに緑化可能なスペースは非常に限られている。そこで本研究では将来的な緑化検討空間として、各戸の敷地内に加えて、住戸背面の共用道路であるバックレーンに着目する。この空間は、本来ごみ収集や雑排水処理、また、緊急時の避難道路や防災を目的として法律で設置ならびに最低幅員(14ft, 約4.27m)などが規定されている。

図3 建物縦横比・緑化位置によるタイプ分け

しかし実際には適切な管理・運用が為されておらず、衛生面やセキュリティ面などの問題が指摘されている⁷⁾。ここでは、デザインガイドライン⁷⁾内でも推奨されているインターロッキングブロックと組み合わせた緑化舗装材の適用を想定し検討を進める。このことで、必要車両の進入を妨げることなく、かつ、周辺居住者の新たな歩行・コミュニティ空間としての活用や、バックレーン環境の維持・管理面での向上も合わせて期待できると考えた。

これらを踏まえ、図2(a)の現況モデルを基準とし、1.建物縦横比を変更し、建物間に通路を設けた場合、2.テラスハウス周辺の敷地内とバックレーンを対象として2段階で緑化を施した場合を組み合わせた計5パターンを用意し、建物縦横比および緑化による緑被率の変化が周辺気温の低減に寄与するかについて定量的に把握する。ここで建物縦横比の変更に際しては既存の周辺建築物の平均隣棟間隔である4.5mを確保できるように間口と奥行きを設定している。

図3は、現況モデルを含む計6タイプの詳細情報を示している(図中数値の単位はm)。何れのモデルも、各図中に示す住戸南側のバックレーンを背にして南北に平行配置した2棟を基本形として、図2(a)中に濃いグレーで示すテラスハウス住戸群(中央部の12棟)を形成するものとする。

5 建物周辺における気温低減効果に関する検討

5.1 微気候シミュレーションについて

ここでは微気候シミュレーションモデル(ENVI-met^{注3)})を用い、上述した6タイプのテラスハウスを対象とした建物および街区周辺の微気候環境の把握を行う。この際、屋外空間における保健性・快適性と結びつく基本指標のひとつである気温と風速の2指標に着目する。シミュレーション実行時に与える主要パラメータの初期設定^{注4)}は表1の通りである。土地被覆^{注5)}については、土壌・コンクリート・アスファルトの3種の何れかに分類し、その上に建物^{注6)}、芝、および、樹木データ^{注7)}を配置している。なお、人工排熱については計算モデルに含まれていないため本研究では考慮しないこととする。

表1 主要入力パラメータ

位置	北緯 1.50 度, 東経 103.65 度
計算日時・天候	3 月 21 日 (晴天日)
計算時間	24 時間 (20 日 19 時から)
風速・風向	1.6 (m/s) 高さ 10m 地点, 40° (北東方向から) ^{注8)}
境界・初期条件	気温 298.5(K), 相対湿度 87.9(%)
グリッドサイズ	400m×400m×50m, Δx=Δy=Δz=2.5m ^{注9)} (高さ方向 2.5m まで Δz=0.5m)

表2は、図3に示した6タイプのレイアウトパターンと各々に対応する緑被率を示している。次節以降でこれら6タイプの周辺微気候に関する定性・定量的な特徴について詳細を見ていく。

表2 各タイプの名称・レイアウトパターン・緑被率

タイプ名	建物および緑被空間のレイアウトパターン	緑被率
T1	現建+現況緑被パターン	12.8%
T2	現建+敷地内緑化	18.5% (+5.7%)
T3	現建+敷地内緑化+バックレーン緑化	23.4% (+10.6%)
T4	変建+現況緑被パターン	12.8%
T5	変建+敷地内緑化	18.5% (+5.7%)
T6	変建+敷地内緑化+バックレーン緑化	24.5% (+11.7%)

(現建: 現況建物, 変建: 縦横比変更建物)

図4 建物周辺緑化・建物縦横比変更による風速・気温差分の分布

5.2 建物周辺の風速・気温の変化とその特徴

建物周辺の緑化と建物縦横比の変更を組み合わせた場合に、周辺気温の変化にどの程度影響が及ぶかについて数値シミュレーションの結果をもとに、まずはその分布を定性的に考察する。図4はそれぞれ、T2~T6の各タイプの結果から、基準となる現況モデルタイプ(T1)の結果を面的に引き算した差分の分布(全て14時時点、地表面からの高さ1.5mの位置。)を示している。

5.2.1 建物周辺の風速分布変化

周辺気温変化に着目するに際し、緑被率の変更と建物形状の変更による影響を分けて考える必要がある。そのためここでは、図4(a)に示す、緑被率は現況のままで建物縦横比のみ変更した場合について、まず建物周辺の風速の変化に着目する。結果の分布形状より得られた特徴は以下の通りである。

- 図4(a)中2箇所破線A部分をみると、建物縦横比の変更による南北の建物間通路上で、0.2~0.25m/sの風速が生じていることを示す濃いグレーが現れている。
- 同図B部分内に示す建物間通路の出入り口付近に着目すると、風速が僅かながら生じている部分が面的な分布として現れている。
- 同図C部分内では、A部分に示す街区内の建物間通路部分から東西方向に50m程度離れているが、風速が若干向上している箇所を見ることができ、建物比変更による影響が僅かながら現れている。

これらより、風速の変化について分布形状から見た場合、検討エリア全体に影響を与えるような大きな差異は生じていないものの、各テラスハウス間の通路付近や地区内の南北道路上など局所的な部分で風速値が向上していることが分かった。建物縦横比を現況の約1:6から約1:3と長手方向を約半分にして建物を分割することにより、値は小さいものの、各建物間を流れる通風の役割として周辺環境に寄与していると考えられる。

5.2.2 建物周辺の気温分布変化

次に、5.2.1と同様の方法により、緑被率と建物形状を変更した場合のモデルから基準となるT1を面的に引き算し、建物周辺の気温低減効果について、分布形状からその特徴について述べる。

現況建物+緑化による周辺気温への影響

- まず、現況建物の周辺に緑化を加えたT2とT3の場合に着目する。
- 図4(b)から、敷地内の住戸前面部分の緑化による直上部分で0.4~0.6°Cの気温の減少を示す分布が見られる。また向かい合う住戸前面の道路上やエリア南側のA部分など、街区境界から最大で約15m離れた位置まで0.2~0.4°Cの減少を示す薄いグレーの分布が広がっている。
- 同図中のB部分に示す交差点部分に注目すると、東西方向の道路上における気温の低減効果が、交差点の中央部分から南北方向の道路上にかけて15~20m程度広がっていることが分かる。

- 図 4(c) から、A 部分に示す緑化したバックレーン上で、 0.7°C 前後の気温低下を示す濃いグレーの分布がみられる。また図 4(b) と同様に住戸周辺の道路上にも気温低下の効果が広がっており、B 部分の南北方向の道路上などでも $0.2\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ の減少を示す分布が周辺の一帯に広がっている。
- 同図中の特に C 部分をみると、図 4(b) の同位置では気温の低減効果は見られなかったが、周辺より濃いグレーの分布となっており効果が部分的に強く現れている。

これらより、建物形状は現況のまま敷地内およびバックレーンを緑化することで、周辺気温の低減効果は緑被部分の直上だけでなく、住戸前面の道路上や、緑被部分とは直接繋がっていない周辺の道路上にも広がることが分布形状から分かった。敷地内緑化だけでは気温低下が見られる影響の分布が局所的であったが、バックレーンの緑化と組み合わせることで一帯での効果が得られることが明らかとなった。

変更建物+緑化による周辺気温への影響

続いて、建物縦横比を変更し各建物間に通路を設け (T4)、かつ、緑化を加えた場合 (T5, T6) に着目する。

- 図 4(d) から、建物周辺の緑被空間は現況のままで建物縦横比のみを変更し建物間に通路を設けた場合、これによって対象エリア内の地上 1.5m 部分で気温が減少する箇所は確認できない。
- 図 4(e) から、緑被部分の直上およびその付近で $0.4\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 程度の気温低下を示す分布が、緑化のみの図 4(b) と比較してより広範囲にみられる。例えば図中の A 部分では住戸前の道路方向へ約 3m ほど濃いグレーの分布が広がっていることが分かる。
- 同図中の B 部分に示すエリア南側付近では、図 4(b) の同位置と比較して、より濃いグレーの分布が南西方向に 4m から最大で 10m 程度広がっていることが分かる。同様に C 部分の南北道路上においても図 4(b) よりも範囲が広がっていることが分かる。
- 図 4(f) から、図 4(c) の場合と比較してエリア全体に気温低下を示す分布の面積が大きくなっており、特にエリア南側の A 部分や、B 部分に示す南北方向の道路上で、より濃いグレーの分布が広がりベルト状に繋がっていることが分かる。

これらより、現況の緑被率のまま建物を 2 棟に分割して建物間に通路を設けた場合、周辺気温の低減への効果は見られないが、建物周辺の緑化と組み合わせることでエリア内とその周辺での気温低下に対してより高い効果を示すことが明らかとなった。

5.3 モデル内の各評価点における時間帯別の気温変化

次に、図 2(a) に示すシミュレーションモデル内に配置した各評価点上の気温変化について検討する。評価点は表 3 に示す通り、住戸の前面および背面部分 (A エリア) に 3 点と中央の南北道路上 (B エリア) に 4 点、計 7 点を配置する。ここでは、本対象地内の建物および街区がグリッド状の単純形状で構成されているため、居住者や地域住民の生活・歩行空間を考慮した周辺環境を把握する上で、設定した住戸近傍上の 3 点と主要道路上の 4 点で代表できると判断し

表 3 各評価点の名称と位置説明

A エリア：住戸前面・背面に配置	B エリア：南北道路上に配置
No.1: 敷地内空地	No.4: バックレーン間
No.2: 住戸前面道路	No.5: 住戸前面道路間
No.3: バックレーン	No.6: 住戸前面道路交差点
	No.7: 緑化エリア外交差点

た。評価点配置に際して参照した実際の住宅地における周辺状況は図 5 の通りである。

図 5 モデル内評価点周辺の実際の様子 (評価点 1 から 4 を抜粋)

本小節では、5.2 と同様に、現況モデル (T1) と緑被率および建物形状を変更したタイプ (T2~T5) の各モデルとの気温差分について、各評価点・各タイプ間による効果の程度について着目する。この際、計測結果を便宜上、午前 (8 時~11 時・図 6(a))、午後 (12 時~15 時・図 6(b))、夕方 (16 時~19 時・図 6(c)) のそれぞれ 3 時間ずつに区切り^{注10)}、タイプ別気温差の平均値を算出することで時間帯による効果の相違を切り口に、その特徴を述べる^{注11)}

- 図 6(a)~(c) から、現況緑被率のまま建物縦横比を変更したモデル (T4、図中●記号) では、気温の差分が何れも 0.1°C 以下であり、時刻や位置に関係無く周辺気温の低減効果は低い。
 - 図 6(a) に示す午前中の値をみると、A エリアでは差分が何れも 0.3°C 以下、B エリアでは何れも約 0.15°C 以下に収まっている。加えてタイプ間の値の相違も小さく、ばらつきが少ない。
 - 図 6(b) に示す午後の値をみると、A エリアでは評価点 No.1, No.3 の T6 で約 0.6°C 、また No.2 の T6 および T5 でそれぞれ約 0.45°C 、 0.35°C の値を示している。B エリアでは、T4 を除くほぼ全てのタイプで道路上の位置によらず $0.15\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ の差が生じている。
 - 図 6(c) に示す夕方の値を見ると、A エリアでは評価点 No.1, No.3 の T6 で約 0.5°C 、また No.2 の T6 および T5 でそれぞれ約 0.4°C 、 0.3°C を示しており、図 6(b) に示す午後の値と比較して若干低い値を示している。また B エリアでは同午後の値とほぼ同じである。
- これらより、現況緑被率のまま建物縦横比を変更した場合、前小節の図 4(d) で述べた 14 時の時点についてだけでなく、終日で周辺気温の低下に資する効果にはほとんど結びつかないことが分かった。また、時間帯別にみた場合、気温がピークとなる午後に最大で約 0.6°C 、続いて夕方に最大約 0.5°C 、最後に午前に最大約 0.25°C の順で緑化による気温低減効果が大きく現れることが分かった。

5.4 緑被率増加と周辺気温低減効果の関係

最後に、建物縦横比変更と緑化によるエリア内の気温低減効果と緑被率変化との関係性について考察する。図 7 は、各評価点における 14 時時点の各評価点の気温とタイプ別の緑被率を示している。また図中の数字は評価点番号 (下線無しは A エリア、下線有りは B エリアの評価点を示す。) と対応している。

図6 タイプ別・各評価点上における気温変化 (地上 1.5m)

- 図7の左側(現況建物タイプ:T1, T2, T3)と右側(建物縦横比変更タイプ:T4, T5, T6)の評価点上の値を比較すると、同位置において後者が僅かながら前者の値を下回る箇所があるが、特筆すべき大きな相違はみられない。
- 緑被直上部分では、図7左側の住戸敷地内の評価点 No.1 に着目すると、タイプ T2 の約 5.7% の緑被率増で、現況タイプ T1 から約 0.5°C の気温低下がみられるが、これと比較してタイプ T3 のさらに約 5% の緑被率増では同地点での変化は僅かである。
- 緑被直上部分以外では、図7左側でみると評価点 No.4 から No.7 では、約 5% ずつ計約 11% の緑被率の増加によって約 0.15°C ずつ合計で約 0.3~0.4°C と、ほぼ直線的に同地点の気温が低下している。これらより、エリア内の緑被率と周辺気温の低減効果について、影響を直接的に享受できると考えられる緑被直上部分での効果の程度(約 0.5°C の気温低下)に併せ、居住者の生活歩行空間である周辺道路上においても緑被部分からの間接的な効果(緑被率の約 5% 増加に対して 0.15~0.2°C 程度の気温低下)が得られることが分かった。このことは、3 章内で述べた香港における緑被率と周辺気温低減の関係性⁵⁾、また、シンガポールにおける緑被空間の周辺冷却効果に関する指摘⁶⁾とほぼ同様の結果が確認されたことを示している。

図7 モデル別・評価点別の周辺気温と緑被率 (地上 1.5m, 14:00)

6 結語

ここまで、マレーシアの市街地において実在する典型的な形状・密度と緑被空間で構成されるテラスハウスの周辺における緑被率の増

加および建物形状の変更による周辺気温の低減効果について分析を行ってきた。本研究内で設定した住宅地モデルを用いて検討した結果から得られた特徴を小節毎に整理する。

小節 5.2 において、住戸を約半分の縦横比に分割し、建物中央部に風通しを考慮した街路を設けて検討したが、気温の面的な分布形状および評価点上における数値変化の両面から、この建物形状の操作のみでは周辺気温の低減に殆ど影響を及ぼしていないことが分かった。これはこの地域における風環境の特徴として、年間を通じて微風^{注12)}であることが関係していると考えられる。しかしながらテラスハウス周辺の緑化と組み合わせることで、気温低減がみられる部分の周辺への拡大に寄与していることが確認できた。

また小節 5.3 の検討から、気温がピークとなる午後やまだ暑さの残る夕方に気温低減効果がより大きく現れることが分かった。このことは例えば、緑被空間の乏しい住宅地エリア、特にテラスハウス周辺において暑い時間帯に敬遠されがちな屋外空間における居住者のアクティビティの増大などにも繋がることが期待でき、積極的に緑化を検討することの重要性を示せたものと考えられる。

最後に小節 5.4 の検討から、住戸および街区周辺の緑化(緑被率変化)と冷却効果の関係性として、緑化後に約 23% の緑被率(現況から約 11% の増加)とした場合に緑被直上部分で約 0.5°C、直上以外の周辺部分で 0.3~0.4°C の気温減少が確認された。これらの定量的なデータは既往研究による蓄積と併せ、今後の住宅地デザイン手法の提案に向けた基礎データとして活用することが期待できる。

本研究を通じて、住宅地開発エリア内の限られた検討範囲においても、緑化による周辺への気温低減に関する効果を定量的に把握することができた。個々の値の変化は小さいが、より広範囲に計画的に緑化を施すことで、一層の気温低減効果が期待できることを示している。東南アジアおよびその近隣諸国では、本研究を通じて検討したような客観的指標に基づく住環境の把握はまだ十分為されていない。今後も引き続き定量的な知見を蓄積していくことが重要であると考えられる。現在、この地域の気候や植物種を考慮し、一般住宅の屋上にも適用可能な軽量・簡易型の緑化技術開発も検討が行われつつある。これらの新しい緑化手法と既存のものとを組み合わせた検討も今後行っていく予定である。

謝辞

本研究は、公益財団法人大林財団および University Technology Malaysia（マレーシア工科大学）の研究助成を受けて行った研究成果の一部です。記して感謝申し上げます。

注

- 注1) 例えば文献²⁾p.23 参照。
- 注2) サンプル調査として、ジョホールバル地域内で同年代に開発された 3 住宅地を対象とし、テラスハウスを計 221 棟（それぞれ 82, 40, 99 棟）抽出して建物幅 (W)・奥行き (D)、同縦横比 (W/D)、バックレーン (BL) の幅員について調べた。以下の結果より、本研究内で扱うテラスハウスおよび BL の形状・幅員は、サンプルの最小・最大サイズ内に収まり、かつ、平均サイズとの乖離も小さいことから、一般的なものとして代表できると判断した。
	W	D	W/D	BL 幅員
サンプル最小サイズ	38m	16m	2.2	4.5m
サンプル最大サイズ	127m	19m	7.5	6.2m
サンプル平均サイズ	82.4m	17.3m	4.8	5.5m
本研究内検討モデル	103m	17m	6.1	5.9m
- 注3) 3 次元都市気候モデルおよびシミュレータ。開発元であるヨーロッパにおける研究事例に加え、例えば東南アジアのマレーシア、シンガポールにおける緑化手法の研究³⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、香港の高密市街地における都市緑化と冷却効果の関係に関する検討⁹⁾、熱帯地方のスリランカにおける建物高さや道路幅の関係 (H/W) に着目した都市冷却手法の検討¹¹⁾、また日本国内における複数街区スケールでの建物形態と周辺微気候の関係の検討¹²⁾など、学術的用途で複数の利用実績がある。計算モデルの詳細は、開発者による文献¹³⁾¹⁴⁾および公式サイト¹⁵⁾で公開されている。本研究内では Ver3.1β5 を使用。なお、本研究内で扱う対象地において、同シミュレーションモデルによって算出される気温値と最寄りの公共気象観測地点における観測値との関係性やその乖離理由などについては前報³⁾での検討を参照されたい。
- 注4) 月別気象観測データ (Malaysian Meteorological Department, 2008) の値を利用している。全ての指標値が年間平均と最も近い値となる 3 月を選択し、計算日として昼夜の時間の長さがほぼ等しくなる春分日を用いた。計算・境界設定の概要は以下の通りである。
- 乱流モデル: 標準 $k-\epsilon$ モデル
 - 流入境界: z_0 型の対数則, 粗度長: 0.1m
 - 流出境界: 法線方向の勾配ゼロ
 - 側面・上空境界: slip 壁
 - 地表面・建物壁面境界: no-slip 条件
- 注5) 土地被覆の設定条件についてはシミュレーションモデル内にあらかじめ登録されている Soil Database から最も対象地の現況に近いものを選択しその値を用いて計算した。主なものは以下の通りである。
- 日射反射率: 土壌 (0), コンクリート (0.4), アスファルト (0.2)
 - 長波放射率: 土壌 (0.98), コンクリート (0.9), アスファルト (0.9)
 - 地表面・土壌および内部の初期温度設定は 293(K), 相対湿度は地下 0-0.2m まで 50%, 0.2-2m が 60%
- 注6) 建物の設定条件については、全ての建物共通で以下の通りである。
- 初期室内温度: 298(K)
 - 日射反射率: 壁面 (0.25), 屋根面 (0.3)
 - 熱貫流率: 壁面 (1.94), 屋根面 (6)
- 注7) 樹木・草についてはタイプ、高さ (m)、高さ方向に 10 分割したそれぞれの地点における LAD (Leaf Area Density:葉密度) によって記述される。ここではシミュレーションモデル内にあらかじめ登録されている Plant Database から最も対象地の現況に近いものを選択しその値を用いて計算した。
- 樹木モデル:
 - タイプ (deciduous:落葉性), 高さ (H) 10m
 - LAD 値 ($z/H=0.1, 0.2, \dots, 1.0$, z :地面からの高さ, H :樹木高さ) 0.075, 0.075, 0.075, 0.075, 0.250, 1.150, 1.060, 1.050, 0.920, 0.000 (m^2/m^3)
 - 草モデル:
 - タイプ (grass:草), 高さ (H) 0.1m
 - LAD 値 ($z/H=0.1, 0.2, \dots, 1.0$, z :地面からの高さ, H :草高さ) 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300, 0.300 (m^2/m^3)
- 注8) ここでは注 4 で述べた気象観測データ内から得られた対象月の平均風速と、月内最大風速時の風向きから値を設定した。風速については、本研究の対象地と程近いシンガポールにおいて同シミュレーションモデルを用いた先行研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾内でも同値を用いて検討を行っており設定値は妥当であると考えられるが、今後はさらに現地でのデータ収集を深め、年間最多風速・風向の値を用いるなど、より一般性を考慮した検討を行う必要がある。

- 注9) ここでは単純形状の建物モデルを用いること、計算範囲内で最小の形状となる緑被部分をカバーできること、これらと計算時間とのバランスを考慮してグリッドサイズを設定した。また実在する住宅地を対象としており、計算に用いる風向・風速等の各種条件のパラメータを気象観測データを参照しているため、実際の方位に基づくレイアウトで解析を行った。今後テラスハウスを含む建物の外形や屋根勾配などのディテールの再現を勘案した検討を行うに際しては、シミュレーション内の計算範囲を限定し、より目の細かいグリッドを用いる必要がある。
- 注10) 気象庁による 1 日の時間細分に関する用語・定義を参照した。
- 注11) 3 次元空間の時刻別気温については、熱収支による屋外空間の全表面温度（表面温度の初期値などは注 5 および注 6 を参照）と移流による熱拡散によって算出される¹⁵⁾。この際、解析エリアに流入する空気のみ湿度について、表 1 に示した 24 時間の平均値を用いており、例えば計算日の観測値を用いて時間的に変化させるなどの対応は現バージョンではサポートされていない。ここでは気温差の時間的な変化を切り口に検討を行っているが、各時間帯において得られる差分は限定された条件下での結果に基づいた値であることに留意する必要がある。今後同様の検討を行うに際しては、流入空気のみ湿度変化の算入や、より充分な助走時間を確保することによる地物の表面温度や蓄熱状況の再現性向上を考慮する必要がある。
- 注12) 月別気象観測データ (Malaysian Meteorological Department, 2008) を参照。

参考文献

1) Kei Saito, Owen Yeo Thian Seng, Ismail Said and Michihiko Shinozaki : Quantitative Study of Urban Greenery Methods and Its Effects Surrounding Terraced Houses in Malaysia, Proceedings of the 9th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA), 2012

2) Wong, N.H. and Chen, Y. : Tropical Urban Heat Islands –Climate, buildings and greenery–, Taylor & Fancis, 2009

3) 齊藤 圭, イスマイル サイド, モハマド ヒシャム ラシディ, 篠崎 道彦: 新規開発住宅地の空間構成と周辺微気候環境に関する定量的把握 東南アジア・蒸暑気候地域における環境配慮型住宅地デザイン手法に関する研究 (その 1) , 日本建築学会計画系論文集, 第 664 号, pp.1155~1162, 2011.6

4) Ministry Finance of Malaysia : Residential Property Stock Report Q1 2009, Property Stock Report, 4, 2009

5) Ng, E., et al. : A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong, Building and Environment 47, pp.256~271, 2012

6) Song, J. and Li, X. : A study on the cooling effects of greenery on the surrounding areas by computer simulation for green built environment, Life System Modeling and Intelligent Computing, pp.653~661, 2010

7) Federal Department of Town and County Planning Peninsular Malaysia : Lorong Belakang, garis panduan perancangan No.025, (英題: Back Lane, planning guidelines No.025), 2012

8) Chen, Y. and Wong, N.H. : Thermal benefits of city parks, Energy and Buildings 38, pp.105~120, 2006

9) Wong, N.H. and Jusuf, S.K., et al : Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics, Building and Environment 42, pp.2949~2970, 2007

10) Wong, N.H. and Jusuf, S.K. : GIS-based greenery evaluation on campus master plan, Landscape and Urban Planning 84, pp.166~182, 2008

11) Emmanuel, R., et al : Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka, International Journal of Climatology 27, pp.1995~2004, 2007

12) Kakon, A. N. : An Evaluation of Increasing Building Height in Respect of Thermal Climate in a High Density City in South Asia Using Numerical Modeling, Journal of Asian Architecture and Building Engineering 8(2), pp.401~406, 2009

13) Michael Bruse and Heribert Fleer : Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, Environmental Modelling & Software 13, pp.373~384, 1998

14) Michael Bruse : ENVI-met 3.0: Updated Model overview, <http://www.envi-met.de/documents/papers/overview30.pdf>, 2004, 2012.8.10 参照

15) ENVI-met 3 by Michael Bruse & Team, <http://www.envi-met.com>, 2012.8.10 参照

16) Berkovic, S., et al. : Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate, Solar Energy 86(5), pp.1173~1186, 2012

(2012年10月10日原稿受理, 2013年 3 月21日採用決定)