

〈寄稿〉

## 高温多湿気候下の都市住宅を対象とした パッシブクーリングによる省エネ改修手法の開発 —ニチアス・エコハウスによる実証研究への期待—

広島大学 大学院国際協力研究科 准教授 久保田 徹

### 1. はじめに

高い経済成長を続ける東南アジアの新興国・途上国では、現在も都市化が進行しており、都市のエネルギー消費を大きく増加させている。筆者らの研究グループは、こうした高温多湿な東南アジアをフィールドとして都市住宅の省エネルギー手法に関する研究を進めてきた。筆者には、学位取得後の2003年から2009年までの6年間をマレー半島南端に位置するジョホールバルのマレーシア工科大学（以下UTMと略記）で過ごした経験がある。この滞在期間中に、現地研究者や学生とともに、既に膨大なストックを有する同国の中間層向け都市住宅の省エネ改修手法に関する基礎研究を行った。2009年度より現在の広島大学に着任したが、上記の研究はUTMとの共同研究という形で継続させている。

本稿では、この研究によって得られた成果の詳細について述べる。なお本研究に対してはニチアス株式会社より深い共感とご理解を頂き、研究助成と技術協力をいただいた。その助成により、現在UTMキャンパス内に建設中の省エネルギー実証住宅「ニチアス・エコハウス」（2015年5月竣工予定）について紹介する。

### 2. マレーシアの都市住宅

マレーシアの国土面積はおよそ日本と等しいが、人口は2,900万人程度しかなく人口密度は低

い。戦後の社会的混乱も少なく、経済的に大きな発展を遂げた。アジア開発銀行の資料によれば、中間層（一日の支出がUS\$2 - \$20）の割合は2004年の時点で既に89%に達している<sup>1)</sup>。

マレーシアに限らず、東南アジアの伝統的建築の多くは木造高床式であり、深い庇で日射を遮り、また開放的なつくりで風通しを確保するものがほとんどであった。しかし、現在の都市住宅の多くは、レンガを用いた熱容量の大きな建物がほとんどを占める（マレーシア国内の都市住宅の約91%）<sup>2)</sup>。また、住宅形式は、軒を連ねたテラスハウスが44%で最も多い（図1）。つまり、戦後、都市に流入し中間層となった世帯の多くが、こうしたレンガ造のテラスハウスに居住している。テラスハウスは、マレーシア国内に既に230万戸ほどあるため、筆者らは、こうした既存のテラスハウスを対象とした省エネ改修方法に焦点を当てている。



図1 マレーシアのテラスハウス住宅地

### 3. エネルギー消費量調査と室内熱環境実測

住宅内のエネルギー消費量については複数回実測を行っている。2009年にジョホールバルで行った調査<sup>3)</sup>では、世帯の年間エネルギー消費量(2次エネルギー)は平均24.5GJであった(図2)。その内訳を見ると、調理用のエネルギー消費量の割合が最も高く(約37%),それに次いで冷房用の消費量の占める割合が高かった(約29%)。また、エアコンの普及率は65%程度であり、世帯収入の増加に伴い所有台数が増える傾向が見られた。マレー半島部では、月平均気温は27-29℃程度、相対湿度は約80%で一年を通じてほぼ一定である。なお、2004年に同市内で行った調査によって、エアコンは主寝室に優先して設置される傾向があり、夜間の就寝時に長時間(平均7-8時間/日)使用されていることが分かった<sup>4)</sup>。そこで筆者らは、エアコンを用いることなく室内の熱的快適性を得る方法(パッシブクーリング)によって、住宅内のエネルギー消費量を削減する方法を検討している。

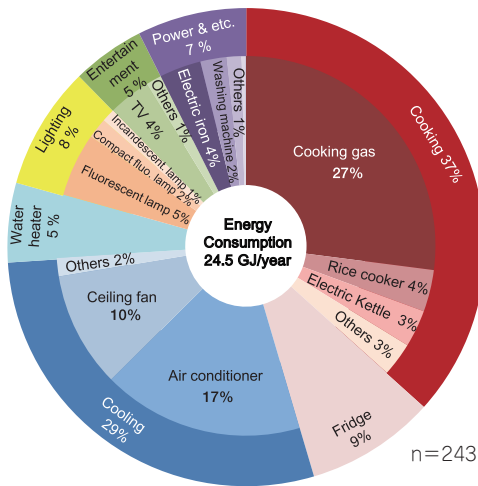


図2 ジョホールバルの都市住宅における世帯当たりの年間エネルギー消費量 (2009年調査)<sup>3)</sup>

2007年に、ジョホールバルに立地する典型的テラスハウスにおいて室内熱環境の実測を行った<sup>4)</sup>。隣り合う2棟(空き家)を対象に、異なる自然換気条件下で室内熱環境を同時計測することでそれらの室温低減効果を明らかにした。この結果、現状を示す昼間換気状態(昼は窓を開け、

夜は閉める)では、夜間の室温は外気温(約25℃)に比べ4-5℃高く、夜間のエアコンの使用を促していることが分かった。また、こうした現状に対し、夜間換気(昼は窓を閉め、夜は開ける)を採用した場合には、一日を通じて室温を2-3℃低下できることを明らかにした(図3)。

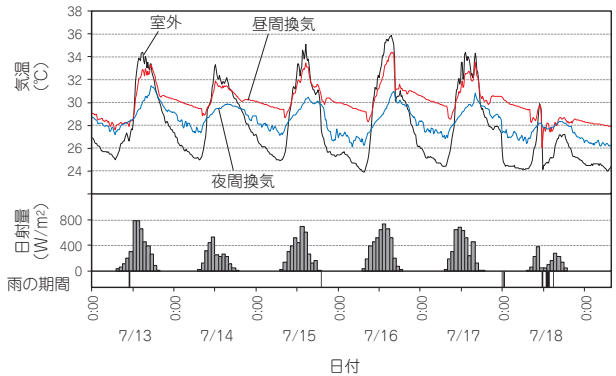


図3 ジョホールバルのテラスハウスにおける室内熱環境の実測結果：昼間換気と夜間換気と比較 (2007年7月)<sup>4)</sup>

### 4. 省エネ改修に関するシミュレーション

前節のとおり、熱容量の大きいテラスハウスの場合、現在の居住者が行う昼間換気を夜間換気に変更するだけで大きな室温低減効果があることが分かったが、それでも一日を通じて熱的快適性を得るには不十分であった。そこで、夜間換気に、さらなるパッシブクーリング手法を加えた場合の室内熱環境改善効果をシミュレーションによって検討した。

冷房に頼らずパッシブクーリングのみで熱的快適性を満たすことが理想であるが、一方では、前述のとおり、マレーシアの都市住宅においては既に6-7割の住宅にエアコンが設置されているという実状がある。また、新興国の都市でもヒートアイランドは着実に進行しており、地球温暖化と相まって都市はますます高温化している。そこで本研究では、①冷房に頼らずパッシブクーリングのみを用いた方法(以下、パッシブクーリング)を検討する一方で、②主寝室における冷房使用を前提に、その他のスペースにパッシブ手法を導入することで、主寝室の冷房

負荷を低減する方法（以下、部分冷房）の2通りを検討している。

4.1 シミュレーション条件

ここでは、現地のデベロッパーを訪問するなどして収集した219件のテラスハウスの図面を分類して標準的事例を選定し、これをシミュレーションの対象住宅とした。図4に対象住宅の平面図を示す。対象住宅の敷地面積は143m<sup>2</sup>で、延べ床面積は155m<sup>2</sup>である。テラスハウスでは、通常、鉄筋コンクリートのフレームにセメントプラスター塗りレンガ壁が用いられる。隣接する住宅と戸境壁を共有するため、換気不足になり排熱が上手く行われないなどの問題が生じやすい。また、現状では屋根材の下部に一層のアルミ箔遮熱材が敷かれるケースがほとんどであるが、天井や屋根、外壁などに断熱材が使用されることは少ない。したがって、室内熱環境を改善する余地はまだ十分にあると考えられる。

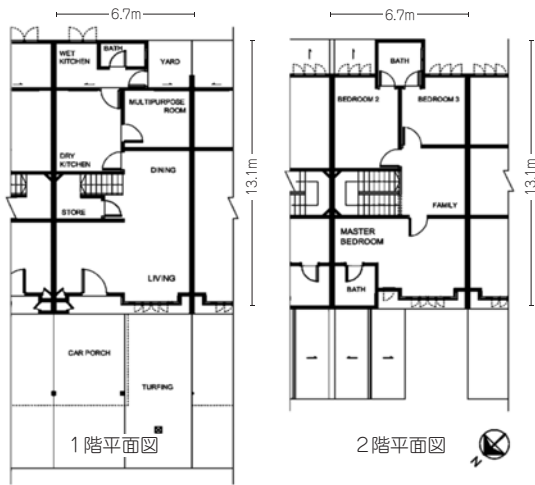


図4 シミュレーション対象住宅の平面図

ジョホールバルの現在の人口は約130万人であるが、前述のとおり都市ヒートアイランドが深刻化している。2008年に行った移動計測では、都心と郊外の気温差は晴天日の夜間に最大で約4℃に達していた<sup>5)</sup>。そこで本研究では、ヒートアイランド影響下にある都心の気象条件の下でシミュレーションを行うことで、高温化した気象条件でも熱的快適性を満たす改修方法を検討した。図5にシミュレーションに用いた気象デー

タを示す。対象期間中の都心と郊外の気温差の平均は日中、夜間ともに約2.2℃であった。

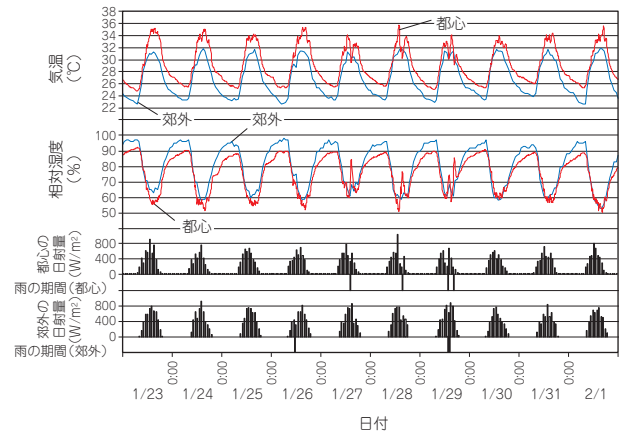


図5 シミュレーションに使用した気象データ(2010年1月)

本シミュレーションでは熱計算ソフトTRNSYSを用いた。表1にシミュレーションで扱ったパッシブクーリング手法を示す。ここでは、マレーシアの建材市場で扱われるもので、なおかつ既存のテラスハウスの改修方法として導入可能なものを選定した。断熱については、各部位に $R = 4\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ の断熱材を導入した場合を検討した。また、屋根裏と主寝室に換気扇を設置し強制換気を行った場合、さらに、現状の窓ガラスをLow-Eガラスに変更した場合、屋根に高反射塗料を塗布した場合、窓面の内側/外側で日射遮蔽を行った場合をそれぞれ検討した。なお、住宅内の内部発熱に関しては、人体、照明、家電からの発

表1 シミュレーションで検討したパッシブ手法

導入手法	詳細
方位	4方向（東、西、南、北）
自然換気	夜間換気、昼間換気、終日閉鎖、終日換気
強制換気(主寝室)	10回/h（夜間のみ）
強制換気(屋根裏)	10回/h（夜間のみ）
断熱材	屋根、天井、外壁外側、外壁内側、内壁、境界壁、床 ( $R = 4\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )
Low-E ガラス	遮熱タイプ ( $U\text{-value} : 2.54\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , $G\text{-value} : 0.44$ )
日射遮蔽(窓面)	外部・内部（遮蔽率：0.75）
高反射塗料(屋根)	日射反射率：0.8、長波放射率：0.9



熱を考慮した。世帯人数は4名とし、在室スケジュールはこれまでのアンケート調査結果を基に決定した。

#### 4.2 パッシブクーリングの場合のシミュレーション結果

夜間換気に加えて表1に示す各パッシブクーリング手法を複合的に導入した場合の寝室の作用温度を算出し、筆者ら<sup>6)</sup>の開発した高温多湿気候下の自然換気建物のための適応モデル(ACE: Adaptive Comfort Equation)を用いて熱的快適性の評価を行った(図6)。ここでは、各パッシブ手法のすべての組み合わせをシミュレーションし、効果の最も大きい順に累積的に導入していった。

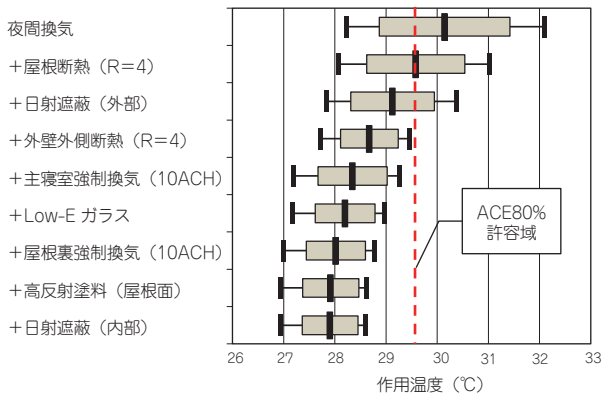


図6 夜間換気に加えて各パッシブクーリング手法を複合導入した場合の主室温の作用温度(建物方位:南)

建物方位が北、南、西の場合は、夜間換気に加えて、①屋根断熱、②日射遮蔽(外部)、③外壁外側断熱の3つの手法を組み合わせることで、主寝室の作用温度は日平均で28.5°C程度にまで低下し、一日を通じてACEの快適域を満たすことができた。また、建物方位が東の場合には、上述の3つの手法だけでは、日中、僅かに快適域を超えるが、これらにLow-Eガラスを加えることでACEの快適域を満たすことが可能となった。

#### 4.3 部分冷房の場合のシミュレーション結果

ここでは、対象住宅の主寝室においてのみ冷房を使用し、その他のスペースにパッシブクーリング手法を導入することで、主寝室の冷房負荷を出来る限り削減する方法を考察した。なお、主寝室における冷房スケジュールは、これまでのアン

ケート調査結果に基づき、21:00から6:00までの9時間とし、設定温度・相対湿度は23°C・60%とした。主寝室以外のスペースで夜間換気を行った条件で、表1に示す各パッシブクーリング手法を複合的に導入した場合の主寝室の一日当たりの冷房負荷を算出した(図7)。

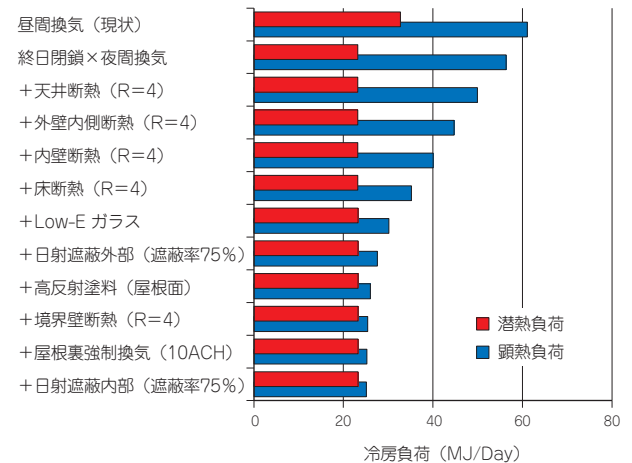


図7 部分冷房時に各パッシブクーリング手法を複合的に導入した場合の主寝室の一日当たりの冷房負荷(建物方位:南)

その結果、例えば建物方位が北、南の場合には、主寝室を終日閉鎖し、その他のスペースを夜間換気することに加えて、①天井断熱、②外壁内側断熱、③内壁断熱、④床断熱を導入することで、主寝室の顕熱負荷を現状に比べ約45%、潜熱負荷を約30%削減できることが分かった。

### 5. 省エネ実験住宅「ニチアス・エコハウス」の建設

前節のとおり、室内の熱的快適性の向上と冷房用エネルギー消費の削減を同時に満たすことを目的としたパッシブクーリングによる既存テラスハウスの改修方法を検討しているが、これらの効果を実証することを主な目的として、これまで共同研究を行ってきたUTMのキャンパス内に実験住宅「ニチアス・エコハウス」を建設する予定である(図8)。建設予定地はUTMのジョホールバル・キャンパス(都心より約15km)の中心部近くに位置し、キャンパス内だけでなくジョホールバル市内からのアクセスも良い場所

にある。こうした実スケールの実験住宅は東南アジアでは例が少なく、また既存住宅の改修方法を検討するものとしてはおそらく同地域で初めての実験施設となる。2015年5月に竣工予定で、その後、3年間に渡って実証実験を行った後、同大学の研究教育施設として末永く用いられる予定である。本実験住宅で得られた実証データに基づき、断熱材などを使った省エネ改修方法を基準化し、それを政府関係機関に提案する予定である。

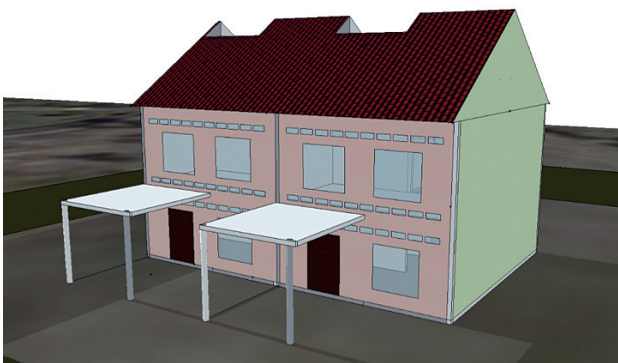


図8 実験住宅「ニチアス・エコハウス」の完成イメージ

## 6. おわりに

UTMは工科系の国立大学としてはマレーシア国内でトップに位置づけられ、政府関係機関や民間企業に数多くの優秀な人材を輩出している。そのメイン・キャンパス中心部に省エネルギー実験住宅を建設することの意義は大きい。この実験住宅は、単に現地の研究教育施設となるだけでなく、省エネルギーという両国に共通するテーマの下で日本とマレーシアの研究者や学生が学術交流を行う人的ネットワークの拠点となるものと期待される。

また、筆者らは、マレーシアのみならず東南アジア地域の都市住宅を広く研究しているが、同地域で急成長する中間層向けの都市住宅の殆どがレンガ造の建物となっているように見える。従来、欧米諸国や比較的乾燥した地域で多用されてきたレンガ造の建物が、高温多湿な東南アジアに適応可能かという点は未だに大きな疑問である。巨大な人口を抱える東南アジア全体が

レンガ造の住宅で占められ、レンガ造ゆえに夜間の室温を上昇させ、寝苦しさのあまりエアコンを過度に使用することになれば、エネルギー消費量はおそろしく跳ね上がり地球環境へのさらなる脅威となることは明らかである。こうした熱帯地域における都市住宅の省エネルギーに関する研究には、まだ十分な蓄積がない。したがって、UTMに建設される「ニチアス・エコハウス」による実証研究への期待は大きい。

末筆ながら、本プロジェクトを全面的にご支援くださっているニチアス株式会社に対し深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Asian Development Bank (2010) Key Indicators for Asia and the Pacific 2010, 41st Edition, Asian Development Bank.
- 2) Department of Statistics Malaysia (2012) Characteristics of Living Quarters, Population and Housing Census of Malaysia 2010, Department of Statistics Malaysia, Putrajaya.
- 3) Kubota, T., Jeong, S., Toe, D.H.C., Ossen D.R. (2011) Energy consumption and air-conditioning usage in residential buildings of Malaysia, J. of Int'l Development and Cooperation, 17(3), pp.61-69.
- 4) Kubota, T., Toe, D.H.C. and Ahmad, S. (2009) The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia, Energy and Buildings, 41(8), pp.829-839.
- 5) Kubota, T, Ossen, D.R.: A Field measurement of temperature distribution in Johor Bahru, Malaysia: A preliminary study of mitigation measures for urban heat island in the tropics, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), D1, pp.919-920, 2010.9.
- 6) Toe, D.H.C., Kubota, T. (2013) Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database, Frontiers of Architectural Research 2(3), pp.278-291.

## 筆者紹介



### 久保田 徹

広島大学 大学院国際協力研究科 准教授  
日本建築学会など  
博士(工学)  
東南アジア地域の都市住宅の省エネルギーに関する研究に従事