

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 ーニチアス・エコハウスによる実証研究ー

広島大学大学院国際協力研究科 准教授 久保田 徹
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia 講師 Mohd Azuan Zakaria

弊社はCSR活動の一環として、2012年度から広島大学大学院とマレーシア工科大学が共同で進めているマレーシアの都市住宅の省エネ化プロジェクトに対して、研究助成と技術協力を行っています。本号では弊社の支援により建設した実証実験住宅による省エネルギー改修実証実験の結果について寄稿いただきましたのでご紹介いたします。

1. はじめに

マレーシアでは2010年までの過去30年間で人口は倍増し、現在は約3千万人に達している。堅調な経済成長を経験したことで、同期間に国内の最終エネルギー消費量は5倍以上の伸びを示した^{1, 2)}。アジア開発銀行の資料³⁾によれば、総人口に占める中間所得者層の割合は、1990年の時点ですでに8割を超え、現在の比率は約9割に達する。一方、住宅数は特に1990年代から2010年までの増加が大きく、2016年現在で500万棟ほどの住宅ストックがある⁴⁾。東南アジア各国で開発段階は大きく異なるため、住宅の省エネルギー手法や政策を均一に論じることはできないが、マレーシアに限っていえば、こうして近年に何百万と建設されたレンガ造の既存都市住宅をいかに効率的に改修するかが重要な課題といえる。

こうした背景から、筆者らは、ニチアス株式会社より研究助成をいただき、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(UTM)のキャンパス内に実大スケールの実験住宅「ニチアス・エコハウス」(2015年12月竣工)を建設し、これまでに検討した省エネ改修手法の効果を実証する実験を始めた^{5), 6)}。本報では、この実証実験の結果の一部をその背景となったシミュレーション結果とともに紹介する。

2. 実験住宅の概要

UTMのキャンパス内(1° 29'N 103° 44'E)に建設した実験住宅(隣り合う2棟のテラスハウス)を図1に示す。

この実験住宅は、現地のデベロッパーを訪問す

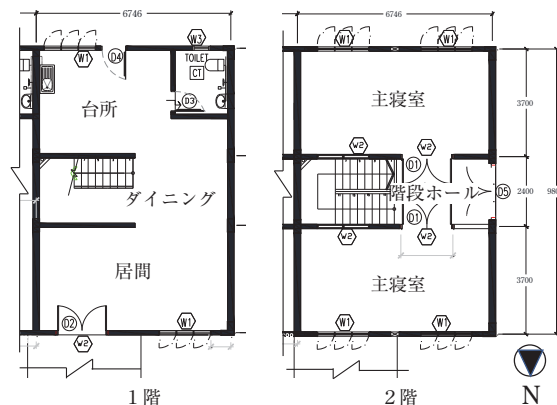


図1 マレーシア工科大学キャンパス内に建設した省エネ実験住宅「ニチアス・エコハウス」

るなどして収集した219件のテラスハウスの図面を外観や敷地面積、部屋の配置などの観点から分類して標準的建物を定めて模したものであり、既存都市住宅をよく代表していると考えている。各ユニットの大きさは約6.7m×9.8mで、延床面積は127m²である。建物正面は真北に面しており、熱帯において直達日射を建物正面と背面の壁面で受けにくい配置である。構造は、RCのフレームにレンガ壁を用いた現地で典型的な仕様である。改修手法の検討を目的とするため、できるだけ現行の仕様に従ったが、建設後に変更することが難しいものについては予め取り付けを行った（図2）。



図2 設置した排気ファンとスリット窓

3. 熱環境シミュレーション

3.1 シミュレーション方法

シミュレーションでは、熱計算プログラム TRNSYSと換気量計算プログラム COMISを用いた。上述の実験住宅を再現した建物モデルは、小屋裏を含む12個のゾーンによって構成された。シミュレーションで再現した各部位の構成と熱貫流率は文献⁷⁾に詳述している。

シミュレーション結果は、気温・湿度、放射温度とともに同実験住宅を対象とした実測結果と良く一致し、採用した数値モデルの妥当性を確認でき

た。精度検証結果の詳細は文献⁷⁾に示している。

表1にシミュレーションで検討した改修方法を示す。ここでは、マレーシアの建材市場で扱われるもので、なおかつ上述した一部の例外を除き、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。自然換気は現状の昼間換気に加え、夜間換気、終日換気、終日閉鎖の4通りを採用した。断熱については屋根、天井、外壁、内壁、境界壁、床にそれぞれ熱抵抗値 $R=1.5, 3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ の断熱材を導入した場合を検討した。なお、本シミュレーションでは、無居住の実験住宅を対象としたため、内部発熱は考慮していない。

表1 シミュレーションで検討した改修方法

導入手法	詳細
建物方位	4方位（東、西、南、北）
自然換気*	夜間換気（20：00－8：00）、 昼間換気（8：00－20：00）、 終日閉鎖（0 h）、終日換気（24 h）
強制換気	小屋裏（40 ACH）、 主寝室（40 ACH）、 建物全体換気（30 ACH） （稼働時間：20：00－8：00）
断熱材	屋根（ $R=3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ ）、 天井（ $R=3$ ）、外壁外側（ $R=3$ ）、 外壁内側（ $R=1.5$ ）、内壁（ $R=1.5$ ）、 境界壁（ $R=1.5$ ）、床（ $R=1.5$ ）
日射遮蔽（窓面）	窓外側、 窓内側（Shading factor, SF: 0.75）
高反射塗料（屋根）	日射反射率: 0.8, 長波放射率: 0.8
窓ガラス	Low-E ガラス （ $U\text{-value: } 2.54 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$ 、 $G\text{-value: } 0.44\%$ ）

※括弧内は窓の開放時間

シミュレーションには、首都クアラルンプール（3° 07'N 101° 33'E）の気象データを基に作成された標準年気象データ⁸⁾の4～5月の2ヶ月間のデータを用いた。以下では、特に典型的晴天日が続いた10日間を解析対象とした。この対象期間中の気温は25～36℃で、相対湿度は40～95%であった。なお、シミュレーションでは、すべて5日以上 of 助走期間を与えた。

3.2 シミュレーション結果

まず、いずれの改修も行わない状況で、異なる自然換気条件下における2階寝室の気温と相対湿度の期間平均値を比較した。図3に示すように、

夜間換気（20:00 – 8:00に窓を開放）を採用した場合に、日最高気温と日平均気温は最も低くなった。これまでの研究⁹⁾でも見られた傾向である。夜間換気の場合には、夜間の室温が現状の昼間換気（8:00 – 20:00に窓を開放）に比し約1.6℃低下するが、それでも外気温に比べ約2.2℃高い。また、夜間換気よりも終日換気の方がわずかに夜間の気温低減効果大きい。このように、夜間換気は熱容量の大きいレンガ造のテラスハウスにおいて気温低減については非常に効果的といえるが、一方で相対湿度が高くなり、一日を通じて60%を下回らない（図3）。昼間の室温上昇は避けられないものの、相対湿度の点から、昼間、窓を閉める夜間換気よりも、窓を開放し風通しを重視した終日換気の方が好ましいと考えることもできる。そこで以下では、室温低減を重視した夜間換気と風通しを重視した終日換気の2通りの場合に絞って考察を進める。

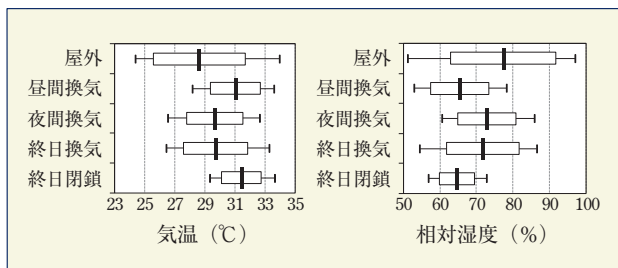


図3 異なる自然換気条件下における2階寝室内の気温・相対湿度（図中のデータはシミュレーション期間中の5%、95%値と平均値、および、平均値±標準偏差を示す。以降の図も同様）

本シミュレーションでは、夜間の2階寝室における作用温度を低減し、なおかつ、1階リビングの昼間の作用温度が熱的快適域の上限値を超える時間を最小とすることを条件として、各省エネ改修方法の導入の優先順位を定めた。なお、上記の検討の際には、実験計画法を用いて検討する省エネ改修方法の組み合わせ数を減じた。

夜間換気の場合の組み合わせの検討結果を図4に示す。この図では、検討したすべての組み合わせのうち、効果の大きい順に累積的に改修方法を導入していった。なお、図中の快適域は筆者ら¹⁰⁾によって開発され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

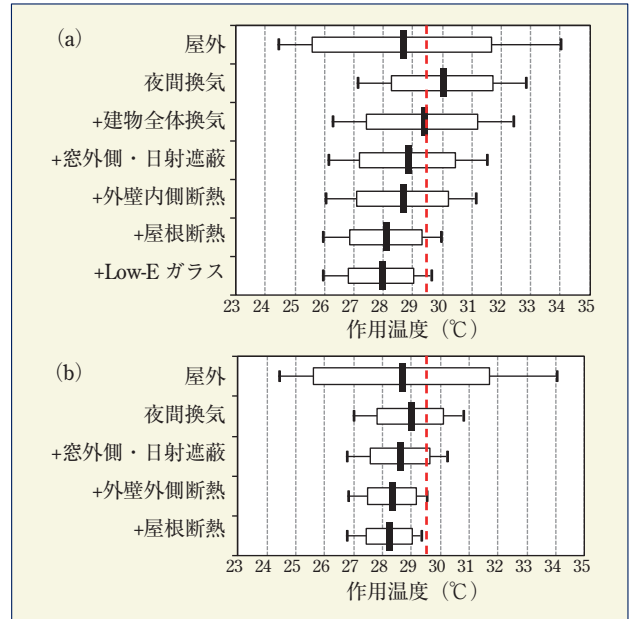


図4 夜間換気時に各改修方法を複合的に導入した場合の2階寝室の作用温度（図中の破線はACE¹⁰⁾による快適域の80%上限値）

Comfort Equation）によって導出された80%上限値を示す。

夜間換気を前提とした場合、2階寝室において、まず選択されたのは大型の排気ファンを用いた建物全体換気（20:00 – 8:00稼働）であった（図5）。建物全体換気の導入により、寝室内の作用温度の日最低値は約0.8℃、日最高値は約0.4℃低下した。次に選択されたのは窓外側の日射遮蔽であり、この場合、日最低値はさらに約0.2℃低下し、また日最高値は約0.9℃低下した。これらに続いて、外壁の内断熱、屋根断熱、窓のLow-Eガラスへの変更が選択された。一方の1階リビングでは、最も効果が高かったのは窓外側の日射遮蔽であり、この場合、室内の作用温度の日最高値

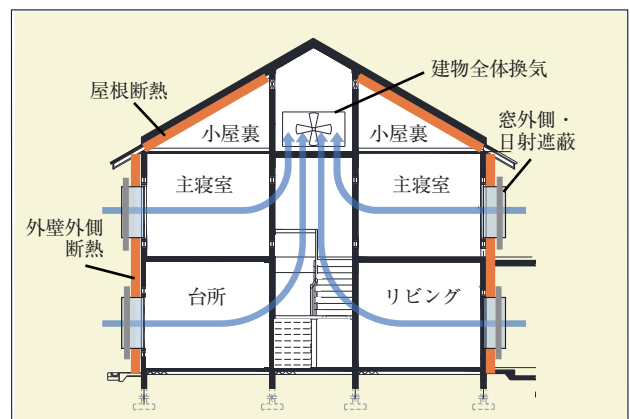


図5 パッシブクーリングの場合の省エネ改修方法の組み合わせ

は約0.6℃低下した。これに続いて、外壁の外断熱、屋根断熱が選択された。

昼の風通しを重視した終日換気（一日中、窓を開放）の場合にも、選択された改修方法の優先順位は夜間換気の場合とほぼ変わらなかった。しかし、昼間窓を開けることを前提とするため、各改修方法による日最高値の低減効果は夜間換気に比べて大きく減少した。

以上の分析より、2階寝室における夜間の作用温度をできるだけ低減し、なおかつ1階リビングの昼間の作用温度を抑える最適な改修方法の組み合わせを導いた。その結果、夜間換気と終日換気の両方に共通して、①屋根断熱、②外壁の外断熱、③窓外側の日射遮蔽、④排気ファンを用いた夜間の建物全体換気の4つの組み合わせを提案した（図5）。

4. 実大スケールの実証実験

東南アジアの新興の都市住宅のほとんどは、今やレンガ造の住宅である。前節でも示したとおり、こうした熱容量の大きいレンガ造の住宅では、昼の室温は外気温に比し比較的低温に保たれる。内部発熱による影響を無視すれば、この室温低減効果は、無論、窓を閉鎖した場合の方が大きい、しかし自然風による室内風速の増加は望めない。また、相対湿度が高くなりがちなことは前節までに見てきたとおりである。一方で夜だけでなく昼も窓を開放すれば、当然、日中の室温は上昇し外気温に近づくが、しかし風通しによる風速増加が見込まれる。つまり、室温低下を優先した夜間換気と、風通しを重視した終日換気には一長一短がある。以下の実証実験では、提案した省エネ改修方法の効果の実証のみならず、特にこの点についても考察したい。

4.1 実験方法

実証実験は2016年6～9月に実施した。ここでは、2棟ある住宅のうちの東側 House 1は制御ユニットとして変化を与えず、一方の西側 House 2を実験ユニットとして改修を施し、2棟の差を見るこ

とで各改修方法による効果を分析した（図1参照）。

計測点位置および計測項目の詳細は文献⁷⁾に譲るが、特に2階寝室では気温の鉛直分布等も計測した。実験は、夜間換気を前提とする場合（Case 1～3）と終日換気を前提とする場合（Case 4～6）に分けて行った。断熱材、日射遮蔽や排気ファンの性能はシミュレーションと同じ条件のものを採用した。実験住宅の北側と南側の両方で計測を行ったが、ここでは主に南側の寝室の結果を基に考察する。

4.2 実験結果

夜間換気を前提とした Case 1～3における2階寝室の高さ1.1mにおける気温の時間的変動を図6に示す。Case 1は、①屋根断熱、②外壁・外断熱、③窓外側の日射遮蔽の3手法を導入したケースであり、Case 2では、さらにこれらに④夜間の建物全体換気を加え、さらに Case 3では⑤小屋裏換気を加えている。

Case 1の改修は日射対策であるため、その効果は昼間においてのみ表れる（図6a）。日中の平均で0.6℃、ピーク時では最大で0.9℃低減した。建物全体換気を加えた Case 2では夜間の気温低減効果が顕著に表れた（図6b）。日中の低減効果は Case 1から変化がないものの、夜間の平均気

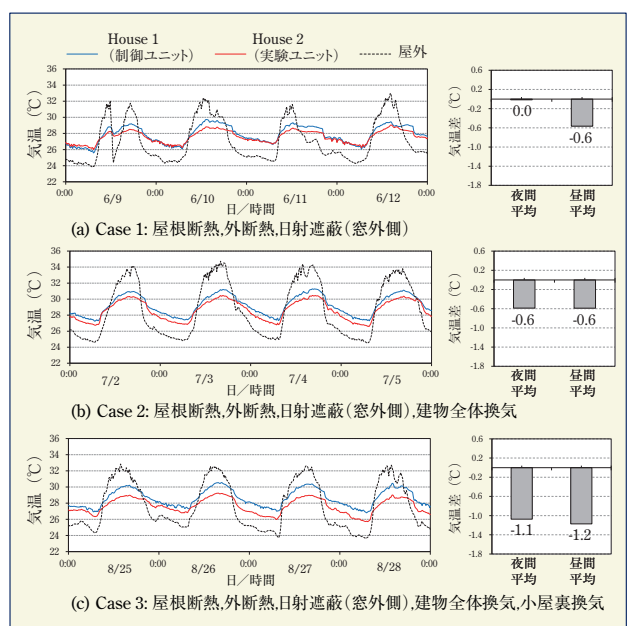


図6 夜間換気の場合の各改修方法の効果（2階寝室中央高さ1.1mにおける気温）

温は 0.6°C 低下した。これに小屋裏換気（夜間のみ稼働）を加えたCase 3では、夜間のみならず日中の気温低減効果も増大した（図6c）。日中の平均で 1.2°C 、ピーク時で最大 1.3°C 低減し、さらに夜間においても平均で 1.1°C 低下した。

最も気温低減効果が大きかったCase 3における建物全体の気温の空間分布を図7に示す。制御ユニット（House 1）と実験ユニット（House 2）を比較すると、まず、屋根断熱の効果が昼のピーク時の小屋裏内の気温によく表れていることが分かる。House 1では外気温とほぼ等しい 32°C 程度まで上昇しているのに対し、House 2では 30°C 程度に抑えられている。これが2階寝室天井の表面温度に影響し、さらにHouse 1では寝室上部の気温を上昇させている。窓外側の日射遮蔽と外壁断熱の効果もあり、1階リビングにおいてもHouse 2の室温はHouse 1よりも $0.6 \sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 程度低い。

Case 3では、夜間（20:00～8:00）、排気ファンを用いた建物全体換気と小屋裏換気が同時に行われた。このため、House 2の小屋裏内はHouse 1に比して夜間も低温に保たれている（図7）。なお、Case 3に限って、夜間、House 2では、通常の主窓ではなく、その上下に位置するスリット窓が開けられていた。その効果もあって、House 2では、天井と床の表面温度が比較的大きく低下した。結果として、室温の鉛直分布がほとんど無くなっている。

次に、終日換気を前提としたCase 4～6における2階寝室における気温の時間的変動を図8に示す。Case 4で導入した改修方法はCase 1と同様であるが、日中に窓を開放するCase 4では、夜間のみならず、昼間の気温低減効果は表れない（図8a）。むしろ、わずかではあるが夜間の室温を上昇させている。これはシミュレーション結果でも確認されたが、外壁の外断熱によって夜間の屋外への放熱が妨げられた結果であろう。夜間の建物全体換気を加えたCase 5では、夜間の気温低減効果が顕著に表れた（図8b）。Case 2とほぼ等しく、夜間の平均気温は 0.7°C 低下した。これに小屋裏換気を加えたCase 6では、夜間の気温低減効果がわずかに増大した（図8c）。

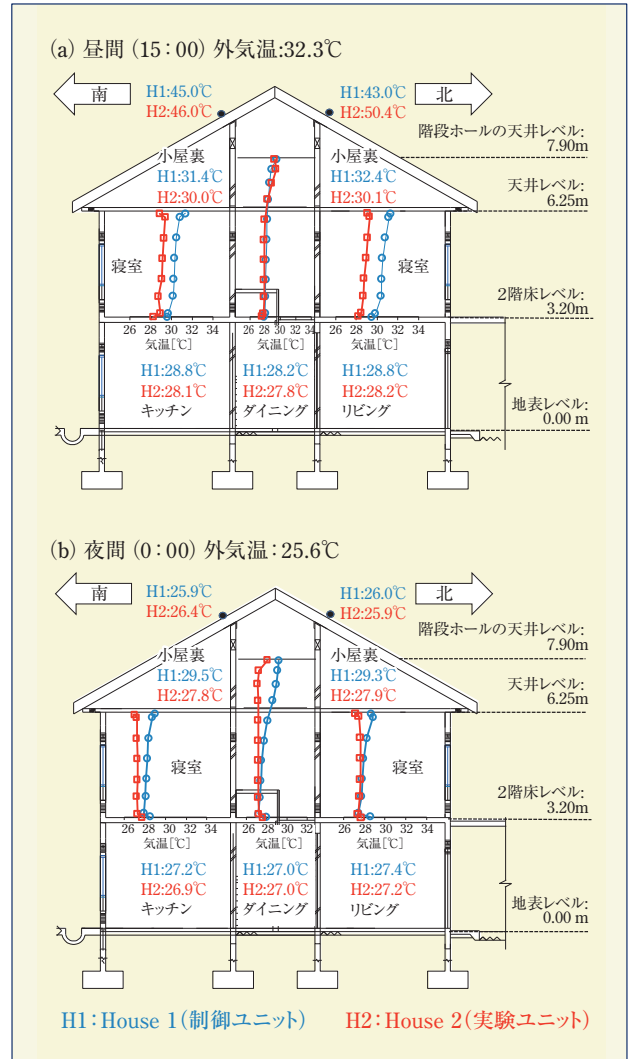


図7 Case 3における建物全体の気温の空間分布

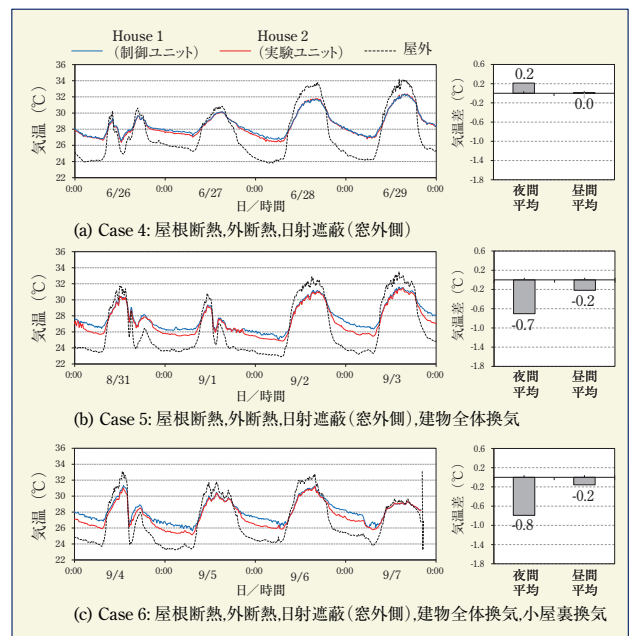


図8 終日換気の場合の各改修方法の効果（2階寝室中央高さ1.1mにおける気温）

4.3 2階寝室における熱的快適性の評価

マレーシアを含む東南アジア都市では、通常、寝室にエアコンが設置され、夜間就寝時に長時間にわたって使用される傾向がある⁹⁾。ここでは、提案した省エネ改修方法を導入した場合の2階寝室と1階リビングにおける熱的快適性を評価した。前節では、制御ユニットと実験ユニットの比較を通じて各改修方法の効果を検討したが、ここでは同様の条件で行った実験結果をまとめ、1日当たりで平均し、条件ごとの比較を行う(図9)。

図9aは、室温低下を優先し夜間換気を採用した場合の1日当たりの平均気温・相対湿度、平均風速の変動を示す。また、作用温度とSET* (0.4 clo, 1.0 met) を算出し評価に用いた。なお、図中の快適域は前述のACE¹⁰⁾に基づく80%上限値である。

前節までに見てきたとおり、夜間換気の場合の室温低減効果は大きく、日中の気温は外気温に比し、2階寝室で約4℃、1階リビングで約4.5℃低い(図9a)。一方の夜間の室温も大きく低下するが、それでもまだ外気温よりも2℃程度高い。終日換気の場合では、日中の気温は外気温に比し、2階寝室で約2℃、1階リビングで約3℃低い(図9b)。夜間の室温低減効果は、夜間換気の場合とほぼ等しい。終日換気の場合には、昼に窓が開放されるため0.2m/s程度の室内風速が得られている。このため、作用温度で見ると終日換気の場合の方が日中高温になるが、SET*で評価した

場合には、両条件でほとんど違いが無くなる(日中で30℃ SET*程度)。つまり、風速増加に伴う発汗・蒸発による冷却効果を考慮すると、風通しを重視した終日換気と室温低下を優先した夜間換気の場合の室内の熱的快適性はおおむね等しいレベルと評価できる。

熱的快適性のみならず、健康性の観点から、相対湿度は40～60%が望ましいとされている¹¹⁾。特に70%を超えると、カビ・ダニの発生が問題となるとの指摘は多い¹²⁾。図9aのとおり、夜間換気の場合には一日を通じて75%以上の非常に高い相対湿度が続く。これに対して、終日換気の場合には、十分とはいえないまでも、日中の相対湿度は一部で70%以下に低下する。したがって、これまでの結果からまとめると、エアコンをまったく使用しないパッシブクーリングの場合には、熱的快適性と健康性の観点からレンガ造の住宅にあってここで提案するような改修を施したうえで、終日換気を採用することが望ましいといえそうである。風速が足りない場合には、天井ファンなどを併用することで補うことが可能であろう。

5. ま と め

本報では、マレーシアに建設した実大スケールの実験住宅を用いた省エネ改修方法に関する研究結果を報告した。得られた主な知見は以下のとおり。

- 東南アジアの都市住宅の多くは熱容量の大きいレンガ造の住宅である。住宅形式については、マレーシア都市ではテラスハウスが約45%を占める。
- こうしたレンガ造のテラスハウスでは、室温低減については夜間換気が非常に効果的といえるが、その場合、室内の相対湿度は一日を通じて高くなりやすい(70%以上)。
- エアコンを使わないパッシブクーリングの場合、①屋根断熱、②窓外側の日射遮蔽、③外壁の外断熱、排気ファンを用いた④建物全体換気、⑤小屋裏換気などが特に有効であり、これらの改修方法の組み合わせによって室内

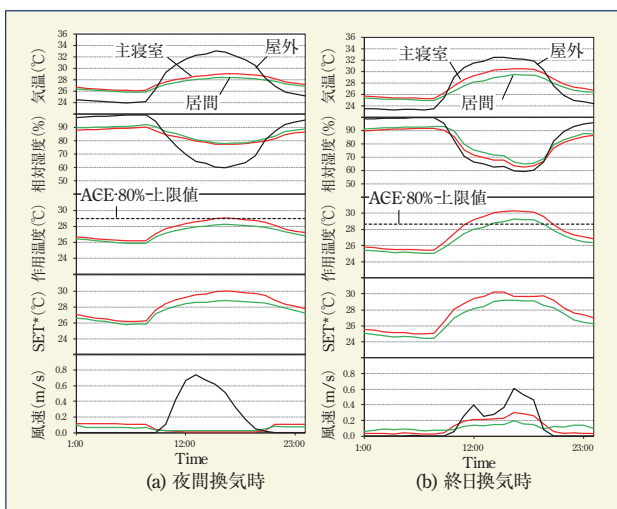


図9 2階寝室における気温・湿度、風速の日変化、および、熱的快適性の評価結果

の熱的快適性は大きく改善されることを実証した。

○高温多湿気候下に立地したレンガ造の住宅において、エアコンを使わずに熱的快適性を得る方法には、主に、夜間換気を採用し室温低下を優先させる方法と、室温上昇を犠牲にしても昼の風通しを重視し終日換気を行う方法の2通りが考えられる。本実験では、SET*を用いて評価したところ、室内風速の増加のため、室内の熱的快適性は2通りの方法でほとんど等しいとの結果を得た。熱的快適性だけでなく、カビ・ダニなどの健康性を考慮すれば、昼に窓を閉める夜間換気よりも、窓を開放する終日換気の方が適しているといえそうである。

本報では、まったくエアコンを使わないパッシブクーリングによる改修方法を検討したが、現実的には、エアコン使用は避けられないと考えている。これは、マレーシアの都市では、すでに6-7割の住宅にエアコンが普及していることや、また都市ヒートアイランド現象や地球温暖化の影響によって都市の気温はかなりのスピードで上昇しているためである。筆者らは、寝室のみでエアコンを使用する部分冷房が望ましいと考えている。エアコンを使用するスペース以外で最大限パッシブ手法を導入することで、冷房負荷を抑えエアコン消費を最小化する考えである。この場合に最適な改修方法は、完全なパッシブクーリングの場合と異なる。次報において詳細に論じたい。

冒頭に記したとおり、本研究の実施にあたって、ニチアス株式会社から多大な支援を受けている。また、本研究はこれまでの本研究室に在籍した学生の手によるものであり、彼らの努力に敬意を表したい。特に、杉山君、安福君、楠木君、森下君、大橋君、阿部君からの貢献は多大であった。ここに記し深く感謝の意を表します。

参考文献

1) Department of Statistics Malaysia, Population Distribution and Basic Demographic Characteristics, Population and Housing Census of Malaysia (2010, 2011), Department of Statistics Malaysia.

- 2) Economic Planning Unit, Malaysia Plan (1986, 1991, 1996, 2001, 2006).
- 3) Natalie Chun, Middle Class Size in the Past, Present, and Future: A Description of Trends in Asia, ADB Economics Working Paper Series No. 217 (2010), Asian Development Bank.
- 4) Pusat Maklumat Harta Tanah Negara, Residential Property Stock Report (1990-2016).
- 5) 久保田徹：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－，ニチアス技術時報，No.1, pp.11-15, 2015.
- 6) 久保田，Mohd Azuan Zakaria：マレーシア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，太陽エネルギー，Vol. 43, No.4（通巻240号），2017.
- 7) T. Kubota, M. Ohashi, M. A. Zakaria, Full-scale experiments on energy-saving modification for existing urban houses in Malaysia: Part 1. Numerical simulation on optimum combinations of passive cooling techniques, 日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）（2017）.
- 8) Q. Zhang, Development of Weather Data for Building Simulations and Air-Conditioning Design for Asian Locations, Proceedings of SET2013, Aug.26-29, Hong Kong (2013).
- 9) 杉山奨，安福悟志，久保田徹，D. H. C. Toe：高温多湿気候下のマレーシア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ルギー改修効果の検討，日本建築学会環境系論文集，80（714），673-683, 2015.8.
- 10) D. H. C. Toe, T. Kubota, 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), 278-291 (2013).
- 11) E. M. Sterling, A. Arundel, T.D. Sterling, Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings, ASHRAE Trans. 91 (1B) (1985) 611-622.
- 12) P. Johansson, A. Ekstrand-Tobin, T. Svensson, G. Bok, Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials, Int. Biodeterior. Biodegrad. 73 (2012) 23-32.

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



Mohd Azuan Zakaria

Universiti Tun Hussein Onn Malaysia
講師

日本建築学会など

博士（工学）

熱帯地域における住宅内の熱的快適性とパッシブクーリングに関する研究に従事