

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

EFFECTIVENESS OF ENERGY-SAVING RENOVATION TECHNIQUES THROUGH PASSIVE COOLING FOR URBAN HOUSES IN HOT-HUMID CLIMATE OF MALAYSIA

杉山 奨^{*1}, 安福 悟志^{*2}, 久保田 徹^{*3}, トー ドリス フーイチャー^{*4}
*Susumu SUGIYAMA, Satoshi YASUFUKU, Tetsu KUBOTA and
Doris Hooi Chyee TOE*

The main objective of this study was to examine the effectiveness of energy-saving renovation techniques through passive cooling for urban houses in hot-humid climate of Malaysia. Effects of two strategies, i.e. complete natural ventilation (NV) strategy and partial air conditioning (AC) strategy, were simulated using TRNSYS. The results revealed that indoor thermal comfort was achieved in the complete NV strategy by applying multiple passive cooling techniques that prevented external heat on the outer building envelope and night ventilation, even under heated urban climatic conditions. In the partial AC strategy, reductions of about 45% in the sensible cooling load and about 30% in the latent cooling load compared to the current condition were obtained by insulating inner surfaces of the master bedroom while applying several passive cooling techniques to the other spaces.

Keywords : *passive cooling, natural ventilation, energy-saving, renovation, hot-humid climate, Malaysia*
パッシブクーリング, 自然換気, 省エネルギー, 改修, 高温多湿気候, マレーシア

1. はじめに

近年、東南アジアの多くの国々は急激な都市化を伴う経済成長を遂げ、都市のエネルギー消費を著しく増加させた。例えばマレーシアでは、人口は2010年までの過去30年間でおよそ2倍になり¹⁾、最終エネルギー需要は過去30年において5倍以上に増加した²⁾。

こうした中、一年を通して高温多湿な東南アジア諸国では、住宅におけるエアコンの普及率が大きく増加している。2009年に久保田ら³⁾によって行われたアンケート調査では、マレーシアのジョホールバルの都市住宅において、年間のエネルギー消費量の約29%が冷房や天井扇などの冷房機器に使用されていることが明らかとなった。またジョホールバルなどの主要都市ではヒートアイランド現象が確認されており⁴⁾、冷房用エネルギー消費の一層の増加が予測される。東南アジア諸国における今後のさらなる成長を考えれば、住宅にパッシブクーリングを出来る限り導入し、冷房使用を適切に抑えることが省エネルギー対策のひとつとして重要と考えられる。

こうした背景から、東南アジアの住宅を対象としたパッシブクーリングに関する研究は、近年、日本においても増加傾向にある⁵⁻¹⁰⁾。例えば宮崎ら¹¹⁾は、カンボジアの戸建住宅及びテラスハウスを対象として、外壁断熱、熱線反射ガラスなどの複数のパッシブクーリング手法を導入した場合の冷房用エネルギー消費の削減効果を熱負荷

計算によって分析した。また宇野ら¹²⁾は、インドネシアの既存住宅を対象に室内温熱環境や冷房の使用状況を調査するとともに、数値計算によって建物の気密化や開口部の開閉パターンが冷房用エネルギー消費に与える影響について検討している。さらに、村上ら¹³⁾はベトナムにポーラス型住棟を建設した場合を想定し、自然換気量の増加による冷房負荷削減効果を分析している。

パッシブクーリングに関する研究は、マレーシアの都市住宅を対象とした研究に限ってみても国内外でいくつかの例が挙げられる。例えば久保田ら⁸⁻¹⁰⁾は、ジョホールバル市内の都市住宅における窓の開閉状況やエネルギー消費量を調査するとともに、実測によって夜間換気の室温低減効果を明らかにしている。また、Zakiら¹⁴⁾は、テラスハウスを対象としたシミュレーションによって、建物の方位を変更し植栽を施すことで室温低減効果が得られ、一日を通して熱的快適性を満たすことが可能と論じている。その他にも、テラスハウスへの中庭の導入を検討したSadafiら¹²⁾、屋根断熱などを検討したOng¹³⁾、屋根裏換気や反射材の導入などを検討したAl-Obaidiら¹⁴⁾、窓面への水膜形成を検討したQahtanら¹⁵⁾の研究がある。

マレーシアの都市住宅の約85%はレンガ壁を用いており¹⁶⁾、躯体の熱容量が大きい。これに加え、現状では日射遮蔽や断熱が不十分であることから、そうしたレンガ造の建物では外気温に比して夜

*1 ニチアス(株) 修士(工学)(当時 広島大学大学院)

*2 榎竹中工務店 修士(工学)(当時 広島大学大学院)

*3 広島大学大学院国際協力研究科 准教授・博士(工学)

*4 マレーシア工科大学建設環境学部 上級講師・博士(工学)

NICHIAS Corp., M. Eng.

Takenaka Corp., M. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School for International Development and Cooperation,

Hiroshima University, Dr. Eng.

Senior Lect., Faculty of Built Environment, Universiti Teknologi Malaysia, Dr. Eng.

間の室温が高湿となりやすく、寝室における長時間の冷房使用に繋がっている⁸⁾⁹⁾。マレーシアの中間層は既に人口の約9割に達しており¹⁷⁾、その多くが上述のレンガ造の住宅に居住している状況にある。したがって、既に膨大なストックを有する同国内の都市住宅を効率的な改修によって省エネルギー化することの意義は大きい。

上述のとおり、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関する研究には既にいくつかの例があるが、それらの多くは夜間換気や中庭の導入といった各パッシブ手法の効果を個別に検討したものであり、導入可能な複数の手法の総合化を試みた研究は今のところ少ない。複数のパッシブ手法の最適な組み合わせを検討することは、実際に省エネルギー改修を行う際に有用な指針を得るうえで重要である。そこで本研究では、マレーシアの典型的都市住宅であるテラスハウスを対象として、冷房用エネルギー消費の削減を目指した複数のパッシブクーリング手法による総合的な省エネルギー改修効果を検討することを目的とする。なお、熱帯地域の住宅内の冷房使用に影響を与える要因は、室内の熱的快適性のみならず、経済性や健康性、文化的側面等も含まれると予想されるが、本研究では、まず熱的快適性に絞って論を進める。

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のが実状である⁸⁾⁹⁾。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)を検討する。本報では、まずテラスハウス居住者を対象に行った冷房機器の使用状況と室内の熱的快適性に関するアンケート調査結果を報告する。次に、既存テラスハウスを対象とした上述の2通りの改修方法を熱環境シミュレーションによって考察する。

2. テラスハウス居住者を対象としたアンケート調査

2.1 調査概要

久保田らは、これまでジョホールバル(人口:137万人)の典型的テラスハウス住宅地(2004年)⁸⁾および集合住宅団地(2006年)⁹⁾において、それぞれアンケート調査を実施し、冷房の使用状況や窓の開閉状況を明らかにした。本研究では、同市内に立地する同様の典型的テラスハウス住宅地を対象として類似の調査を行った。今回の調査では窓の開閉状況に代わって、特に冷房と天井扇の使用状況と室内の熱的快適性に関する情報を収集した。調査期間は2012年12月29~30日であり、質問票を用いた面接調査によって合計356世帯から回答を得た。前回調査⁸⁾⁹⁾において、エアコン設置台数と世帯収入に関係が見られたので、所得水準の異なる世帯を含むよう留意して地区選定を行った。

2.2 回答者の基本的属性

表1に、今回の調査(2012年)と前回調査(2004年:テラスハウス、2006年:集合住宅)の調査概要と主要な調査結果を示す。マレーシア国民は主にマレー系、中華系、インド系の3種の民族によって構成されるが¹⁸⁾、サンプル全体に占める各民族の割合は、マレー系67%、中華系19%、インド系11.4%で、前回調査と概ね一致した。回答世帯の世帯人数は、平均4.9人であった。回答者の住宅

表1 調査概要・主な結果の比較

調査年	2004年	2006年	2012年
	テラスハウス住宅地 ⁸⁾	集合住宅団地 ⁹⁾	テラスハウス住宅地
回収票数	366	306	356
世帯人数(人)	5.4	4.6	4.9
寝室数	3.5	2.7	3.5
世帯主の年齢(歳)	45	41	47
世帯収入(RM)	4,122	2,835	3,238
在宅時間(時間)	平日:19 週末・休日:21	平日:15 週末・休日:20	平日:19 週末・休日:22
窓の開放頻度	9am-6pm:80% 1am-5am:10%	9am-7pm:80% 1am-5am:30%	-
窓の開放時間	11.8	13.9	-
窓を開けない理由	1.虫の侵入(38%) 2.防犯(35%) 3.雨の浸入(22%) 4.埃・空気の汚れ(18%)	1.雨の浸入(56%) 2.埃・空気の汚れ(30%) 3.虫の侵入(28%) 4.防犯(17%)	-
エアコン普及率(%)	62	36	56
エアコン使用頻度	7am-7pm:<20% 10pm-5am:>50%	7am-7pm:<20% 10pm-5am:>50%	8am-6pm:<20% 9pm-6am:>50%
エアコン使用時間(時間)	7.6	7.1	8.8
天井扇普及率(%)	98	92	99
天井扇使用頻度	12am-12pm:>60% 1am-7am:40%	12am-11pm:>60% 1am-7am:40%	10am-11pm:>60% 1am-7am:40%
天井扇使用時間(時間)	14.5	14	14.7

については、80%以上の人が持家であり、1階建が全体の約6割で、2階建が約4割で平均して3.5部屋の寝室を持っていた。

2.3 冷房の使用状況

本調査では、エアコンを所有する世帯は回答者全体の56%であった。同様のテラスハウス住宅地を対象とした2004年の調査では、この普及率は62%であり、本調査では普及率が僅かに低下した結果となった。これは、サンプル世帯の平均収入の違いによるところが大きいと考えられる。前述のとおり、エアコン所有台数と世帯収入には相関があったが、2004年の前回調査における平均世帯収入(RM4,122)と本調査の平均値(RM3,238)には5%水準で有意差が見られ($t(663)=5.591, p<.05$)、およそ1.3倍の差があった(表1)。なお、本調査では、エアコンを所有する世帯の平均設置台数は2.3台であり、①主寝室(90%)、②他の寝室(47%)、③居間(30%)の優先順位で設置されていた。また、エアコンの設定温度は平均で21.4℃であり、最頻値(18%)は23℃と低かった。

図1に過去2回の調査結果と合わせて、エアコンを所有する世帯の主寝室における時刻別使用率を示す。上述のとおり、エアコンの多くは主寝室に設置される場合が殆どであるため、日中使用されることは少なく、夜間に高い割合で使用されることが分かる。前回調査では、22:00から翌朝の5:00までの間で平均使用率が50%を越えていたが、今回の調査では、これが21:00から6:00までに拡大した。エアコンは、主寝室において就寝時に長時間に渡って使用されることが改めて確認された。表1のとおり、テラスハウス住宅地を対象とした2004年の調査では、1日当たりの平均使用時間は7.6時間であったが、今回の調査ではこれが8.8時間となった。

2.4 天井扇の使用状況

マレーシアの都市住宅の殆どでは、建設時から天井扇が設置されている。過去2回の調査では回答者世帯で少なくとも1台の天井扇が使用されていた。本調査においても、普及率は99%と高かった。天井扇所有世帯に対して、居間における天井扇の使用時間帯を聞いた結果を過去2回の調査結果を含めて図2に示す。天井扇については、一日を通じて比較的長時間使用する世帯が多い。1:00から7:00までの夜間でも、所有世帯の約4割が使用している。最も使用頻度が高いのは19:00から21:00の3時間であり、この時間帯には所有世帯の約8割が使用していた。これは夕食前後の家族団らん時に使用されていたためと推測される。

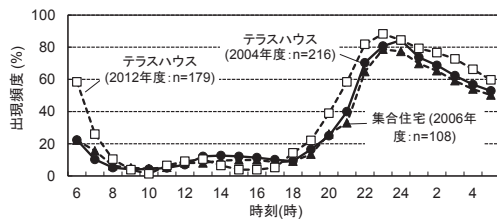


図1 主寝室における冷房使用頻度 (平日～休日を合わせた平均)

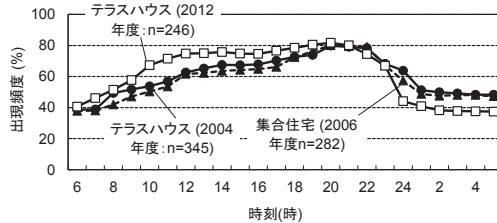


図2 居間における天井扇の使用頻度 (平日～休日を合わせた平均)

表1に居間における一日当たりの天井扇使用時間の平均値を示す。居間における天井扇の平均使用時間は14.7時間であり、所有世帯のおよそ20%が一日中天井扇を使用していた。また、主寝室における天井扇の使用時間帯を聞いた結果では、日中使用する世帯は少なく、冷房と同様に夜間に使用率が高くなることが分かった。夜間に主寝室で冷房を使用する世帯の20%が天井扇と併用していた。主寝室における一日当たりの天井扇使用時間は平均で11.8時間であった。

2.5 窓の開閉状況

2012年の調査では窓の開閉状況に関して質問を行っていないが、テラスハウス住宅地を対象とした2004年⁸⁾の調査と集合住宅団地を対象とした2006年⁹⁾の調査では、いずれも8:00から20:00までの昼の時間帯で回答者全体の50%以上が窓を開けていることが分かった。しかし、その割合は20:00以降減少し、1:00から明け方5:00までの夜間に窓を開けている世帯は全体の10%に満たなかった(表1)。また、エアコン所有世帯と非所有世帯で同様の解析を行った結果、居住者の窓の開閉行為はエアコン所有の有無に殆ど関係しないことが分かった。

2.6 室内の熱的快適性

図3に、主寝室における居住者の温冷感(7段階)と温熱環境をどう改善したいかを示す適温感(3段階)をそれぞれ選択肢式質問によって評価させた結果を示す。なお、この評価をさせる際には、エアコンを使用しない自然換気状態を想定させた。図3より、温冷感申告において「寒い」、「涼しい」や「中立」と回答する居住者でも、適温感において「涼しくしたい」と回答するケースが多いことが分かる。上記の回答者の割合は、朝(31%)、昼(18%)、夜(30%)となった。また温冷感において「やや暖かい」「暖かい」「暑い」を選んだ割合は、朝(25%)、昼(56%)、夜(40%)となり、昼に暑い側を選んだ割合が最も高くなった。しかし、適温感における「涼しくしたい」と選択した割合は、昼(63%)と夜(66%)で殆ど差が見られない。つまり、温冷感によらず、現在の環境よりも涼しい環境を望んでいる回答者が多いことが分かる。こうした適温感が、前節までに見た冷房の低い設定温度や夜間の長時間の使用、さらには天井扇との併用といった行為に反映されているものと考えられる。

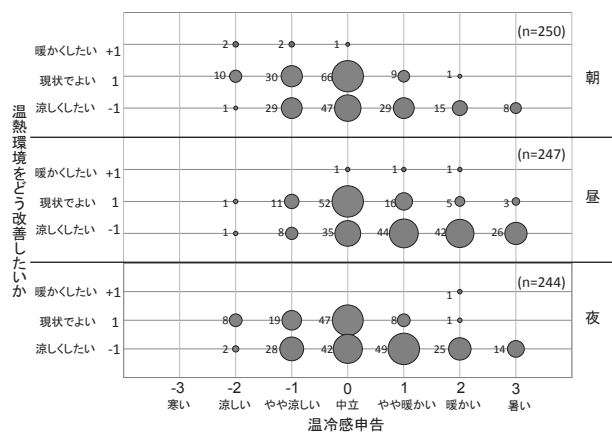


図3 主寝室における熱的快適性

3. シミュレーションの入力条件

3.1 シミュレーション対象住宅

本研究では、マレーシアの典型的都市住宅であるテラスハウスを対象にシミュレーションを行った。テラスハウスは、同国の都市住宅数の約42%を占める最も一般的な住宅形式である¹⁰⁾。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。そのため熱容量は比較的大きい。また、風力換気を前提に考えた場合には、テラスハウスは開口部(窓)の設置可能方位が前面と背面のみに限られるため、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。なお、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は多いが、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。

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外観や敷地面積、部屋の形態などの観点から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とした¹⁸⁾。図4、5に対象住宅の外観と平面図を示す。対象住宅の敷地面積は143m²で、延床面積は155m²である。また外壁・内壁と境界壁の厚さは、それぞれ140mmと240mmである。前節のとおり、これまでの調査⁸⁾によって、テラスハウス居住者の殆どは2階前面に位置する主寝室で冷房を使用することが分かっている。そこで、以下のシミュレーションでは、この主寝室を対象に分析する。

3.2 実測データを用いた自然換気回数の同定

シミュレーションは、熱計算ソフトTRNSYSを用いた。対象住宅を再現した建物モデルは屋根裏を含む17個のゾーンによって構成し、対象住宅の外壁のディテールや周辺住宅も再現して計算を行った。表2、3にシミュレーションに用いた各部材の物性値と各部



図4 対象住宅の外観

位の熱貫流率を示す。

2009年に久保田ら¹⁰⁾によって、本住宅を対象とした室内熱環境に関する実測が行われている。そこで、ここではこの実測データを用いて室内の換気回数の同定を行った。具体的には、窓の開閉状況を実測当時に合わせたうえで、各室の換気量を室内の気温・湿度及び風速に関して実測値と一致するよう定めた(図6)。その結果、窓とドアを同時に開けている場合の主寝室の換気回数は、日中は15回/h、夜間は7.5回/h、すべて閉じている場合は終日0.5回/h(漏気)となった^{注1)}。一方、本研究では外部風の風向・風速を考慮せず、いずれの建物方位の場合でも、対象住宅内のすべての部屋に上記の換気回数を入力条件として与えた^{注2)}。今後は、CFD(数値流体力学)や換気計算プログラムと連成させるなどして計算精度を高めることが課題である。

3.3 気象条件

前述のとおり、ジョホールバルでは都市ヒートアイランドが観測されており、都心と郊外の気温差は晴天日の夜間に約4℃と報告されている⁴⁾。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する。久保田ら⁴⁾は2009年8月から2010年5月まで、ジョホールバルの都心と郊外の気象観測を行っているため、本研究ではこの期間内で都心と郊外の気温差が特に大きい期間(1月23日～2月1日)を選出し、この期間(10日間)の都心の実測データを入力条件として分析を行った(図7)。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。なお、シミュレーションでは1月1日～1月22日までの22日間を助走期間として設けた。

前述のとおり、本研究では、①冷房に頼らず熱的快適性を満たす「パッシブクーリング」と、②主寝室以外のスペースにパッシブ手法を導入し、主寝室の冷房負荷を削減させる「部分冷房」の2通りの改修方法を検討する。表4に今回のシミュレーションで扱うパッシブ手法を示す。ここでは、マレーシアの建材市場で扱われるものを選定した。自然換気は夜間・昼間・終日換気および終日閉鎖の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 $R=4 \text{ m}^2\text{K/W}$ の断熱材を導入した場合を検討した。また、

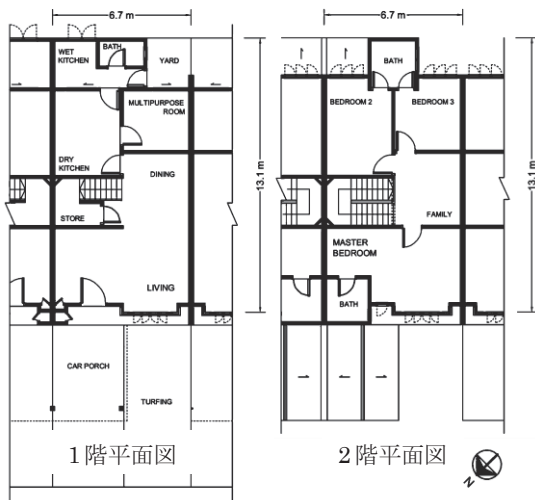


図5 対象住宅の平面図

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^{注3)}。なお、住宅内の内部発熱に関しては、人体、照明、家電からの発熱を考慮した(表5)。これらのスケジュールは、世帯人数を4名^{注4)}としたうえで、前節のアンケート調査結果を基に決定した。

4. パッシブクーリングによる室内熱環境改善効果

本節では、対象住宅において冷房に頼らず室内の熱的快適性を確保することを目的として、現状をベースに各種のパッシブ手法を導入した場合の主寝室内の熱環境改善効果を分析する。なお、現状とは、建物全体で昼間換気が行われ(前節2.5参照)、表4に示すパッシブ

表2 シミュレーションに用いた物性値

部材	熱伝導率(W/mK)	熱容量(kJ/m ³ K)
レンガ	0.84	1557
セメント・プラスター	0.53	1331
コンクリート	1.80	2133
セメント・スクリード	0.66	1386
セラミック・タイル(床材)	1.11	2528
土壌	1.30	2016
木材	0.22	1707
コンクリート・タイル(屋根材)	1.50	3150

表3 各部位の熱貫流率

部位	概要	熱貫流率(W/m ² K)
外壁・内壁	レンガ・プラスター仕上げ(140mm)	2.75
境界壁	レンガ・プラスター仕上げ(240mm)	2.07
1階床	RCタイル仕上げ(130mm)	3.75
2階床(フローリング)	RCフローリング仕上げ(150mm)	2.81
2階床(タイル)	RCタイル仕上げ(150mm)	3.29
天井(主寝室)	セメントボード(6mm)	4.55
天井(その他)	セメントボード(3.2mm)	5.54
傾斜屋根	瓦葺き	2.67
平屋根	RCプラスター仕上げ(142mm)	3.37
窓	透明ガラス(6mm)	5.61

注：壁体表面での熱伝導率は、外気側を25W/m²K、室内側を7.7W/m²Kとした。

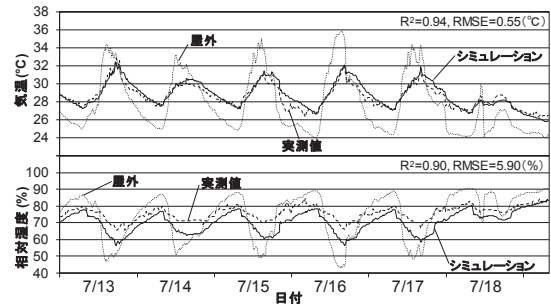


図6 主寝室における実測値とシミュレーション値の比較

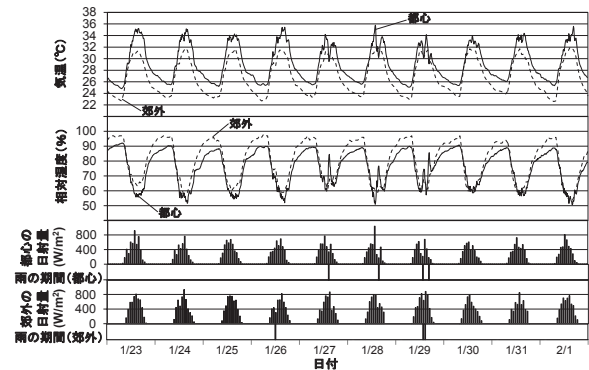


図7 シミュレーションに入力した気象データ(2010年)

シブ手法がいずれも導入されていない状況とする。また、以下のシミュレーションにおいて、建物方位は2階主寝室の面する方向を基準に東西南北の4方位を検討する。

4.1 自然換気による室温低減効果

ここでは、テラスハウス全体に各種の自然換気を採用した場合の主寝室の気温低減効果を分析する。前述のとおり、マレーシアでは現状として昼間換気が行われている。しかし、テラスハウスは躯体の熱容量が大きいため、夜間換気による室温低減効果が大きいことが既報¹²⁾の実測によって明らかにされている。本シミュレーションでは、建物方位を変化させた場合も夜間換気は有効かを検討する。

図8に、東西南北の4方位において、建物全体の自然換気方法を変更した場合の主寝室内の気温のシミュレーション結果を示す。ここでは、前述の2010年1月23日～2月1日の10日間の気象データを入力条件として求めた10分間隔のシミュレーション値の全サンプルの平均値、標準偏差、パーセンタイル値を示している（以下の分析でも同様）。図8のとおり、いずれの方位においても、現状の昼間換気に比べ、最も室温低減効果が得られたのは夜間換気を行った場合であり、例えば方位が北の際には最高室温は約1.6℃減少し、平均室温は約1.4℃減少した。この時の主寝室へ流入する熱流の内

表4 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=4m ² K/W)
Low-E ガラス	遮熱タイプ (U-value: 2.54 W/m ² K, G-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

表5 照明・機器発熱スケジュールと各部屋の在室人数

照明・機器発熱スケジュール(時刻)	0	1213	192021	23
照明(リビング)(5W/m ²)		Off	On	On
照明(各寝室)(5W/m ²)		Off	Off	On
照明(キッチン)(5W/m ²)		Off	On	Off
炊飯器(キッチン)(88W)		Off	On	Off
冷蔵庫(キッチン)(276W)		On	On	On
在室人数(時刻)	0	8 9	1213	192021 23
リビング	0	3 1	0 1	3 4 1 0
キッチン	0	1 0	1 0	1 0
主寝室	2		0	1 2
寝室 2,3	2		0	2

発熱量: 100W/人

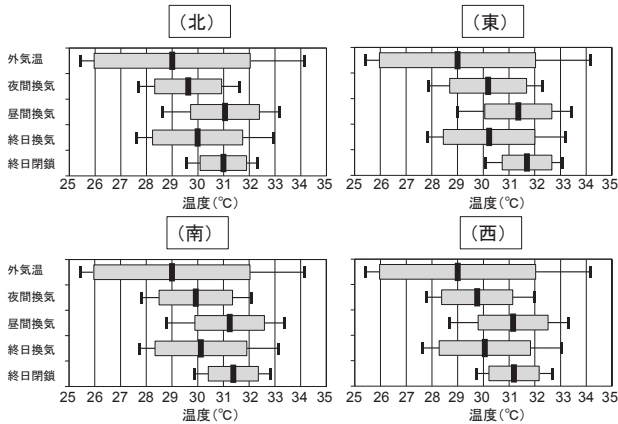


図8 建物全体に各自然換気を採用した場合の主寝室の室温(これらの図はシミュレーション期間中の5.95パーセンタイル値、平均値±標準偏差を示す。以下の図も同様)

訳を図9、10に示す。昼間換気の場合には、窓を閉鎖する夜間の換気(漏気)による熱の流出は僅か(0.05 kW)である。また、窓を開放する昼間は、外気温よりも室温の方が高い午前中こそ換気による熱の流出がなされるが、10:40以降は流入に転じ、正午過ぎに熱流の流入は約0.35 kWに達している。これに対し、夜間換気の場合には、窓を開放する夜間の換気による熱の流出は0.4 kW程度と大きく、また外気温の高い日中は窓を閉鎖するため、換気(漏気)による熱の流入は殆ど無い(最大で0.03 kW程度)。

なお、建物方位に関しては、いずれの換気条件においても、室温が低い方から北、西、南、東の順番になった。東西で比較すると東向きの方が室温が高いが、これはジョホールバルの都心においては、午後はスコールが頻繁に発生するなど概して雲量が多く、一般に午後よりも午前の日射量の方が多いためである(図7参照)。

4.2 各パッシブクーリング手法を単一で導入した場合の効果

次に、前節の4通りの自然換気方法の中で最も室温低減効果が高かった夜間換気と現状の昼間換気の各自然換気条件下で、それぞれ各種のパッシブ手法を単一で導入した場合の効果进行分析した。

図11、12に主寝室の室温のシミュレーション結果を示す。全体として、昼間換気時には各パッシブ手法の室温低減効果は後述の夜間換気時の場合と比べ僅かに小さい(図11)。シミュレーション期間中の室温の平均値と比較すると、例えば建物方位が北の場合、建物全体を夜間換気したうえで各パッシブ手法を導入すると、最大で0.5℃、平均で0.2℃の低減効果が得られたが(図12)、昼間換気の場合には、最大で0.4℃、平均で0.1℃の低減にとどまった(図11)。

昼間換気の場合で最高室温の低減に最も効果があったのはいずれの方位においても屋根面に高反射塗料を塗布した場合で、方位が北の際に約0.3℃減少した。また、最低室温の低減に最も効果があったのは、方位が北、南、西の際には高反射塗料を塗布した場合で、方位が北の際に約0.2℃減少した。方位が東の際には日射遮蔽(外

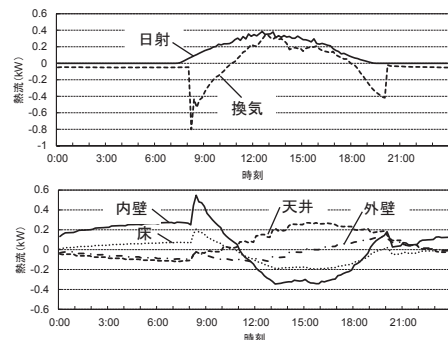


図9 昼間換気時の主寝室への熱流(期間内の平均値)

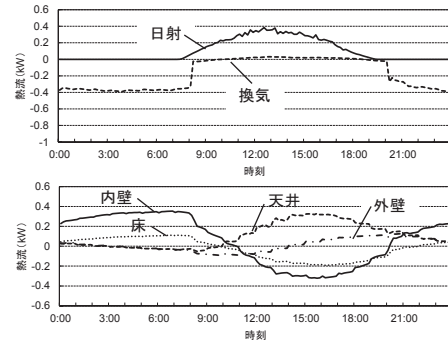


図10 夜間換気時の主寝室への熱流(期間内の平均値)

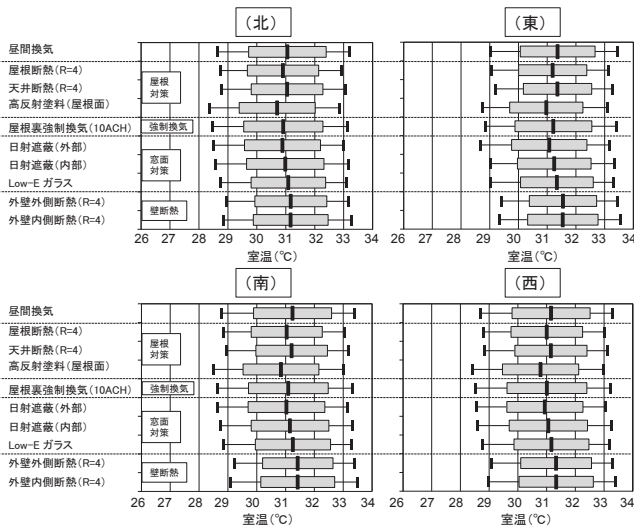


図 11 昼間換気時において各パッシブ手法を単一で導入した場合の主寝室における室温低減効果

部)を導入した場合で、約 0.3°C 減少した。一方、夜間換気時において各パッシブ手法の中で最高室温の低減に最も効果があったのは、いずれの方位においても屋根断熱を行った場合で、建物方位が北の際に約 0.9°C 減少した。これは、最高で 0.27 kW 程度あった天井からの熱の流入が屋根断熱によって 0.09 kW 程度まで抑えられたためである。また、最低室温の低減に最も効果があったのは、いずれの方位においても主寝室強制換気を行った場合で、方位が北の際に約 0.8°C 減少した。これは、最高で 0.39 kW 程度あった夜間の換気による熱の流出が強制換気によって 0.56 kW 程度まで増加したためである。

図 13 に、昼間・夜間換気のそれぞれの条件下で室温低減効果が最も大きかった、高反射塗料、日射遮蔽 (外部)、屋根断熱、主寝室強制換気を導入した場合の主寝室の室温の日変化の例を示す。図 13a のとおり、昼間換気の場合には、日中の室温は外気の流入によって外気温と同程度にまで上昇する (28.0-34.4°C)。一方で夜間に窓を閉じると、室温は 30°C 以上に保たれる。このように日中、窓を開放した状態で屋根や外壁に高反射塗料や断熱を導入しても室温には殆ど変化は見られない。また、窓を閉鎖する夜間も同様に効果は低い。これに対し、夜間換気の場合には、自然換気のみで日中の平均室温は現状に比べて 0.6°C 程度低下した (図 13b)。さらに、これに屋根断熱を加えた場合、室温は夜間換気による効果と合わせて 1.4°C 程度低減した。また、夜間の室温も、夜間換気による効果は大きく、現状に比べ 2.2°C 程度低下した。さらに、これに寝室の強制換気を行うことで、室温は外気温よりも 1.6°C 程度高い温度まで低下した。すなわち、熱容量の大きいテラスハウスの場合、まず夜間換気を行い、その上で日中の対策として屋根や天井の断熱を行い、さらに夜間の室温低減が必要な場合には、換気扇などで夜間換気を促進することが特に効果的といえる。

4.3 各パッシブ手法を複合導入した場合の効果

次に前節の結果を踏まえ、現状の昼間換気と夜間換気に加えて前節 4.2 で検討した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作用温度を算出し^{注5)}、Toe ら¹⁹⁾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

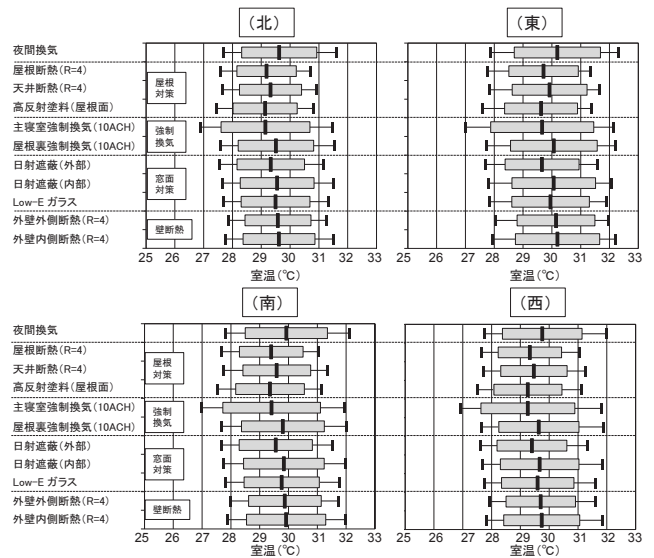


図 12 夜間換気時において各パッシブ手法を単一で導入した場合の主寝室における室温低減効果

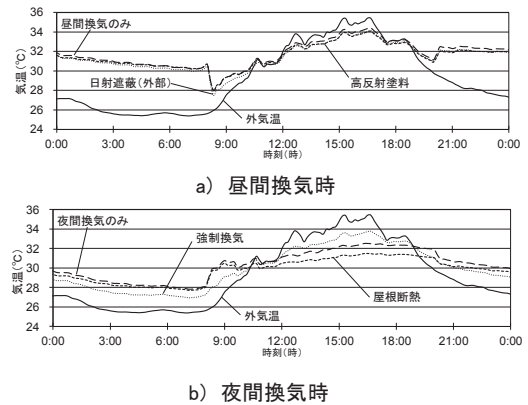


図 13 晴天日における主寝室の気温の日変化

Comfort Equation)を用いて熱的快適性の評価を行った (図 14、15)^{注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。なお、ACE の評価には作用温度が用いられるが、この評価指標は高温多湿気候下に立地する自然換気建物内の実際の居住者の温冷感申告データに基づくものであるため、熱的快適性に及ぼす湿度の影響は既に評価に含まれていると見ることができる¹⁹⁾。

現状の昼間換気の場合は、各方位で得られたパッシブ手法の導入順位は等しく、①高反射塗料、②日射遮蔽 (外部)、③屋根裏強制換気、④外壁外側断熱、⑤日射遮蔽 (内部)、⑥屋根断熱、⑦Low-E ガラスの順となった (図 14)。これは、昼間換気時には各パッシブ手法導入による効果がそもそも小さく、方位による影響が少なかったためと考えられる。図 14 のとおり、昼間換気の場合は、すべての手法を導入しても ACE の快適域を満たすことはできなかった。

一方で、夜間換気の場合は、建物方位によって導入順位が若干異なる結果となった。図 15 のとおり、建物方位が北、南、西の場合は、①屋根断熱、②日射遮蔽 (外部)、③外壁外側断熱、④主寝室強制換気の順となったが、建物方位が東の場合は、①屋根断熱、②日射遮蔽 (外部)、③外壁外側断熱、④Low-E ガラスの順と僅かに変化した。建物方位が東の場合に Low-E ガラスの優先順位が上がった

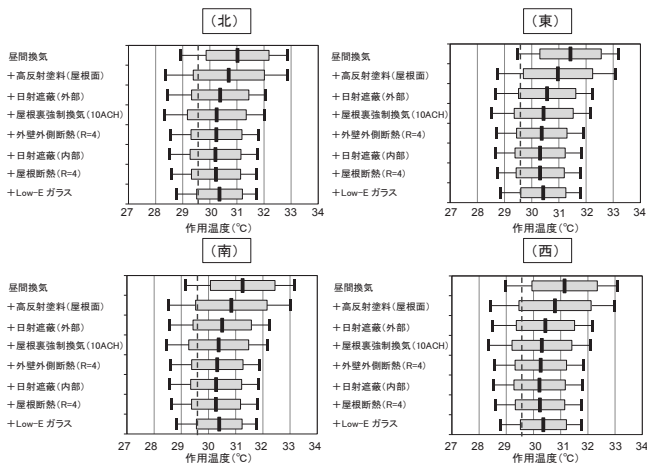


図 14 昼間換気時に各パッシブ手法を複合導入した場合の主寝室の作用温度(図中の破線は ACE⁽¹⁹⁾による快適域の 80%上限値)

理由は、前述のとおり、午後よりも午前中の日射量の方が概して大きいと考えられる。建物方位が北の場合の主寝室へ流入する熱流の内訳を図 16 に示す。日射遮蔽が施されることで、導入なしの状況(図 10)と比べ日射の入射は大きく抑えられている(最高で 0.10 kW)。また、外壁と屋根への断熱材の導入によって、各天井と壁面からの熱流の流入は殆ど防がれている。結果として、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℃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。

4.4 省エネルギー改修方法の提案

ここでは、4.3 のシミュレーション結果に基づいて、建物方位別の省エネルギー改修方法を提案する(図 17)。ここで提案する改修方法によれば、当地のヒートアイランド現象が進行する都心の気象条件下においても、エアコンに頼らず一年を通じて概ね熱的快適性を満たすことが可能と考えられる。

5. 部分冷房の場合の主寝室における冷房負荷の削減効果

本節では、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する。なお、換気条件は前章と同様に、建物全体で昼間換気を行った場合を現状と考え、これに表 4 に示すパッシブ手法を採用した場合の主寝室における冷房負荷削減効果を検討した。なお、主寝室における冷房スケジュールは、前節 2 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・湿度は 23℃・60%とした。

5.1 自然換気による冷房負荷削減効果

ここでは、冷房を使用する主寝室の自然換気条件(昼間換気・終日閉鎖)と主寝室以外のスペースの条件(昼間換気・夜間換気・終日閉鎖)をそれぞれ変えた場合の主寝室における冷房負荷削減効果を考察する。図 18 は各方位における各換気条件の一日当たりで平均した主寝室の顕熱・潜熱負荷を示す。

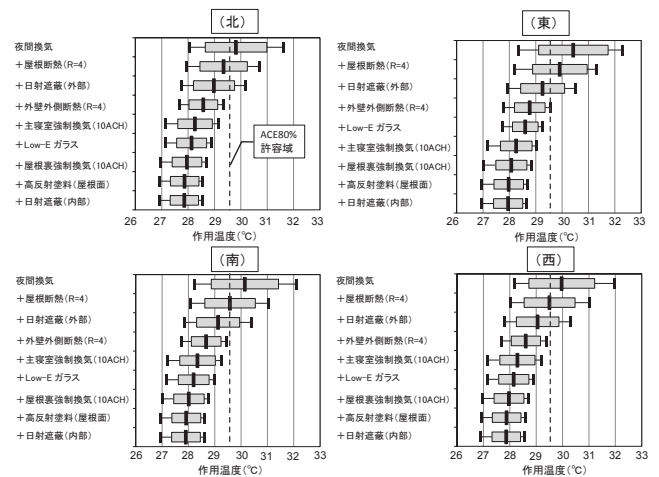


図 15 夜間換気時に各パッシブ手法を複合導入した場合の主寝室の作用温度(図中の破線は ACE⁽¹⁹⁾による快適域の 80%上限値)

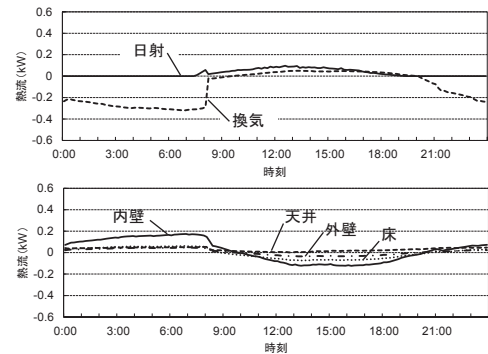


図 16 複合導入時の主寝室への熱流(期間内の平均値)

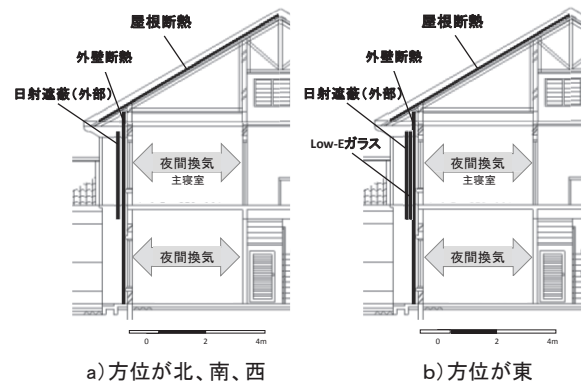


図 17 パッシブクーリングの場合の省エネ改修方法

図 18 のとおり、建物方位による冷房負荷の変化は少ない。いずれの換気条件の組み合わせにおいても、顕熱負荷は主寝室の窓が北向きの場合に僅かに少なく、東向きの場合に比較的大きい結果となった。これは前節 4 で見た傾向と同様である。また、建物方位による潜熱負荷の変化は殆ど見られない。

換気条件の組み合わせによる違いに着目すると、顕熱負荷については、主寝室の換気条件に拘わらず、その他のスペースに夜間換気を導入することで比較的大きな削減効果が得られることが分かる。建物方位が北向きで、主寝室を終日閉鎖した場合(Case 6)に削減率は最大となり、建物全体で昼間換気を行った現状(以下、Case 1)と比較して顕熱負荷は約 9%減少した。

図 19 に、現状の Case 1 と最も効果のあった Case 6 の換気条件

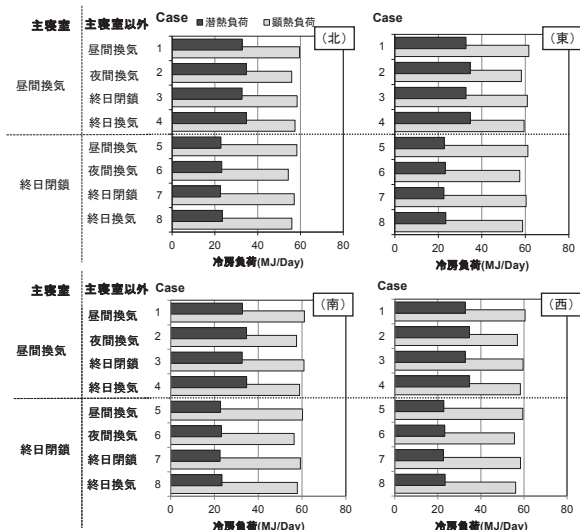


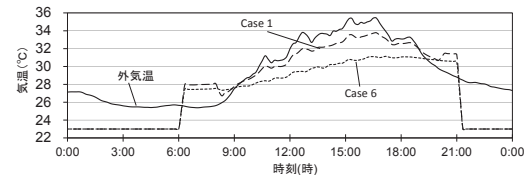
図 18 換気状態の違いによる一日当たりの主寝室の冷房負荷

における主寝室の室温と相対湿度の日変化の例を示す。図 19a のとおり、現状の Case 1 の場合には、日中は窓を開くため、室温は外気の流入によって外気温と同程度まで上昇する。一方、最も効果のあった Case 6 の室温は、Case 1 と比べ日中 2℃程度低く保たれる。これらは前節 4.1 で見た結果 (図 13) と同様である。これにより、Case 6 の冷房稼働時 (21:00) の室温は Case 1 よりも約 0.8℃低い。さらに、Case 6 では、主寝室以外のスペースが夜間換気されているため、それらの室温は Case 1 の場合よりも低く、また、その間に躯体が冷却される。これらの総合的效果によって、前述のとおり Case 6 では約 9%の顕熱冷房負荷の削減が可能となった。一方の潜熱負荷については、前述のとおり、主寝室以外のスペースの換気条件よりも、主寝室における換気条件の方が大きく影響を与える。図 19b のとおり、冷房稼働時の Case 6 の主寝室の相対湿度は Case 1 よりも約 9%低い。

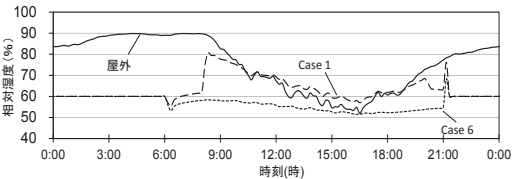
5.2 各パッシブ手法を単一で導入した場合の冷房負荷

次に、①建物全体で昼間換気を採用した現状 (Case 1) と、②前節で最も冷房負荷削減効果のあった Case 6 の各自然換気条件下で、それぞれ各種のパッシブ手法を単一で導入した場合の主寝室の冷房負荷を算出した (図 20、21)。

図 20 のとおり、現状を示す Case 1 の場合には、パッシブクーリングのみの前節 4 の結果と同様に、顕熱・潜熱負荷ともに各パッシブ手法の導入による削減効果は後述の Case 6 に比べて全体的に僅かに小さかった。いずれの建物方位の場合も最も効果があったのは天井断熱で、北向きの場合に現状と比較して顕熱負荷は約 8%低減した。また、天井断熱に次いで効果があったのは主寝室の床面に断熱材を導入した場合で、現状と比較して顕熱負荷は 7%程度削減した。また、屋根面への高反射塗料の塗布も効果的であった。一方、主寝室以外のスペースで夜間換気を行った Case 6 の場合にも、同様に天井断熱を導入した場合で効果は最大となり、北向きの場合に顕熱負荷を約 19%程度削減できた (図 21)。また、この場合には、天井断熱に次いで、屋根断熱、高反射塗料の塗布による削減効果が高かった。建物方位による削減効果の違いは少ないが、前節 4.1 と同様に、日射量の多い東向きでは削減効果が比較的小さいという結果を得た。



a) 主寝室の室温 (°C)



b) 主寝室の相対湿度 (%)

図 19 晴天日における主寝室の気温と相対湿度の日変化

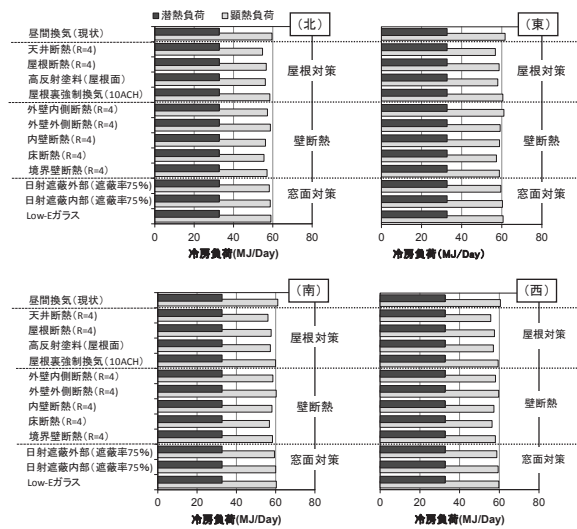


図 20 各パッシブ手法を単一で導入した場合の一日当たりの主寝室における冷房負荷 (Case 1)

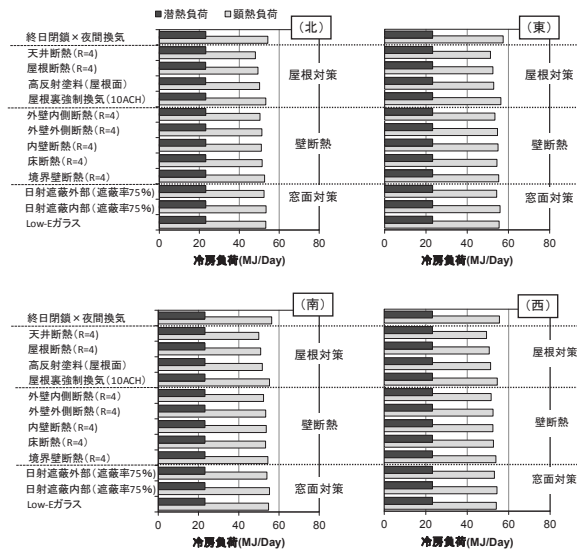


図 21 各パッシブ手法を単一で導入した場合の一日当たりの主寝室における冷房負荷 (Case 6)

5.3 各パッシブ手法を複合導入した場合の冷房負荷

次に前節の結果を踏まえ、現状の Case 1 と、最も効果のあった Case 6 の換気条件において、それぞれ前節 5.2 で検討した各パッシブ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

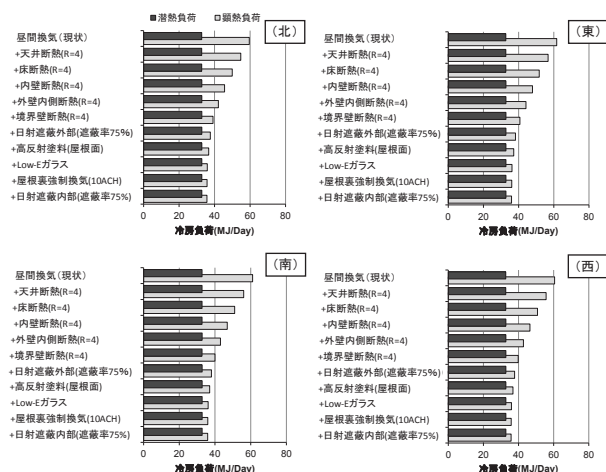


図 22 各パッシブ手法を複合導入した場合の一日当たりの主寝室における冷房負荷 (Case 1)

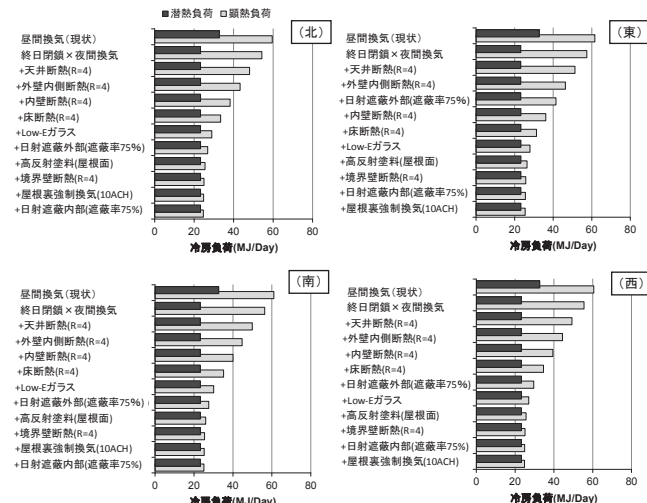


図 23 各パッシブ手法を複合導入した場合の一日当たりの主寝室における冷房負荷 (Case 6)

算出した (図 22、23)。前節 4.3 と同様に、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。なお、潜熱負荷については各パッシブ手法の導入による効果は見られなかったため、ここでは顕熱負荷の削減効果のみに着目して順位を決定した。

図 22 のとおり、現状の Case 1 の場合はすべての方角でパッシブ手法の導入順位は等しく、①天井断熱、②床断熱、③内壁断熱、④外壁内側断熱の順となった。上記の 4 つの手法の組み合わせだけで、現状に比し、主寝室の顕熱負荷を約 30%削減できる。これらの 4 つの手法以降の導入では削減率が鈍化するが、図中のすべての手法を導入した場合には主寝室の顕熱負荷を最大で約 40%削減することが可能となった。

Case 6 の換気条件の場合には、建物方位によって、各パッシブ手法の導入順位に若干の変化があった。図 23 のとおり、北向きと南向きの場合は、①天井断熱、②外壁内側断熱、③内壁断熱、④床断熱の順になるのに対し、東向きと西向きの場合では日射遮蔽の順位が上がり、例えば東向きの場合では、①天井断熱、②外壁内側断熱、③日射遮蔽 (外部)、④内壁断熱の順となった。Case 6 は Case 1 よりも全体として冷房負荷削減効果は高く、北向きと南向きの建物方位ですべての手法を導入した場合には、現状に比べて顕熱負荷は約 60%削減される。また、削減効率の高い、①天井断熱、②外壁内側断熱、③内壁断熱、④床断熱の上位の 4 つの手法を導入するだけでも現状に比し約 45%程度削減できる。すなわち、テラスハウスの主寝室において夜間の部分冷房を行う場合には、冷房を使用する主寝室を終日閉鎖するとともに、その他のスペースで夜間換気を行うことがまず重要であり、次に、冷房を使用する主寝室の内壁のすべてを取り囲むように断熱することが特に効果的といえる。

5.4 省エネルギー改修方法の提案

上述のとおり、建物方位が北、南の場合には、主寝室を終日閉鎖し、それ以外のスペースで夜間換気を行うことに加え、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。この 4 つの組み合わせに加えてパッシブ手法を導入した場合の削減率は大きく減少するため、本研究では削減効率の観点から以上の換気条件と 4 つの手法の組み合わせを部分冷房の場合の省エネルギー

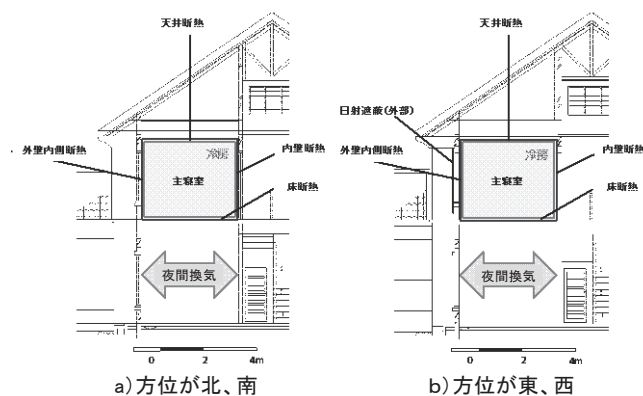


図 24 部分冷房の場合の省エネ改修方法

改修方法として提案する (図 24)。なお、前述のとおり建物方位が東と西の場合では日射遮蔽 (外部) や Low-E ガラスの優先順位が上がる。したがって、これらの方位の場合には、上記の 4 つの手法の組み合わせに加えて窓面における日射遮蔽を行うことが効果的といえる。

6. まとめ

本研究で得られた主な知見は下記のとおり。

(1) 2004 年と 2012 年に行ったアンケート調査では、テラスハウスの約 6 割で冷房が使用されていた。冷房は、主寝室において就寝時に長時間に渡って使用されるケースが多かった (2012 年調査で 8.8 時間/日)。

(2) 主寝室における温冷感申告において「寒い」、「涼しい」や「中立」と回答する居住者でも、適温感において「涼しくしたい」と回答するケースが多かった。こうした適温感が、冷房の低い設定温度や夜間の長時間の使用、さらには天井扇との併用といった行為に反映されていることが示唆された。

(3) 熱容量の大きいテラスハウスにおいては、いずれの建物方位の場合も、現状の昼間換気を夜間換気に変更するだけでかなりの室温低減効果があることが分かった (平均室温で約 1.3°C)。さらに、複数のパッシブ手法を含めて総合的に検討した結果、テラスハウスの場合、まず夜間換気を行い、その上で日中の対策として屋根や天

井の断熱を行い、さらに夜間の室温低減が必要な場合には、換気扇などで夜間換気を促進することが特に効果的であることが分かった。

(4) 都市ヒートアイランドが進行した都心の気象条件を与えた場合でも、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、作用温度は日平均で28.5℃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。本報では、上記の組み合わせをパッシブクーリングによる省エネルギー改修手法として提案した。

(5) 一方、主寝室で部分冷房を行う場合には、顕熱負荷については、主寝室以外のスペースで夜間換気を導入することが効果的であり、これだけで最大9%の負荷削減が可能となった。また、潜熱負荷については、主寝室の窓を終日閉めることが効果的で、これによって最大30%の負荷削減が可能となった。さらに、複数のパッシブ手法を含めて総合的に検討した結果、部分冷房の場合には、上述のとおり主寝室を終日閉鎖し、その他のスペースで夜間換気を行ったうえで、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。そこで本報では、以上の換気条件と4つの手法の組み合わせを部分冷房の場合の省エネルギー改修方法として提案した(建物方位が北、南の場合)。

謝辞

本研究を進めるに当たり、ニチアス株式会社からの支援を受けている。また、アンケート調査においてはマレーシア工科大学 Mohd. Hamdan bin Ahmad 教授と大学院生 Ms. Farhana よりデータの提供を受けている。また、広島大学大学院生の楠木利周君、森下真登君より多大な貢献を受けた。ここに記し、感謝の意を示します。

注

注1) 窓とドアを開放した場合の室内外の気温差は、昼間は約1℃、夜間は約2℃と非常に小さく、また、対象住宅は2階建てで上下開口部の距離を確保することは難しいため、温度差換気は殆ど期待できない。故に、本対象住宅では風力換気が自然換気の主駆動力と考えられる。シミュレーション対象期間の外部風速の実測値には、昼間8:00-20:00(平均1.4 m/s)と夜間20:00-8:00(平均0.3 m/s)で大きな差が見られたので、この特徴を考慮して昼間と夜間に区分して換気回数を設定した。

注2) 各室の換気回数は、外部風の風向・風速に大きく影響するため、これらを考慮することは非常に重要である。しかし、本研究では熱の動的シミュレーションプログラムであるTRNSYSのみを用い、換気計算を行わなかったため、こうした外部風による影響は考慮しなかった。

注3) 本シミュレーションにおける外部遮蔽と内部遮蔽は、窓直近に設置された外付け、内付けのブラインドを想定している(文献20)。ここでは、窓から入射する日射の遮蔽率を両条件とも0.75と定めた。内付けブラインドの場合には、室内に設置されたブラインドからの放射・対流熱と窓面への再反射が考慮される。

注4) マレーシアの国勢調査(文献16)によれば、都市部の世帯人数の平均は4.3人であった。

注5) TRNSYSでは、室空間内の気温分布は考慮されず一つの質点で代表される(文献20)。また、室内の作用温度は、室内風速が0.2m/s未満で、なおかつ室内気温と平均放射温度の差が4℃未満の場合には、気温と平均放射温度の平均値としている。なお、平均放射温度は、室空間を構成する各壁面の表面温度を面積に応じて重み付け平均する簡易的方法によって求められている(文献20)。

注6) Toeら(文献19)は、ASHRAEによって提供される自然換気建物に

おける熱的快適性調査データベース(RP-884 database)を気候区分ごとに分類し再分析することによって、高温多湿気候下にある自然換気建物に用いるための適応モデルを提案している。ここでは、日平均外気温、または、月平均外気温による一次関数として、作用温度に基づく快適域が定められる。高温多湿気候の場合には、いずれの外気温の場合にも作用温度の下限値はなく、80%の上限値のみが与えられている。図14、15では、外気温の月平均値によって求めた、この上限値が示されている。

参考文献

- 1) Department of Statistics Malaysia: Population Distribution and Basic Demographic Characteristics, Population and Housing Census of Malaysia 2010, 2011.
- 2) Economic Planning Unit: Malaysia Plan, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006.
- 3) Kubota, T, Jeong, S., Toe, D.H.C., Ossen, D.R.: Energy Consumption and Air-Conditioning Usage in Residential Buildings of Malaysia, J. of Int'l Development and Cooperation 17(3), pp.61-69, 2011.3.
- 4) 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, D1, pp.919-920, 2010.9.
- 5) 宮崎恵子, 山本裕貴, 鷲谷聡之, 高口洋人: カンボジアにおける住宅内エネルギー消費急増の抑制方法に関する研究 - 省エネルギーモデル住宅の提案 -, 日本建築学会環境系論文集, 第673号, pp.193-202, 2012.3.
- 6) Uno, T, Hokoi, S, Ekasiwi, S.N.N., Majid, N.H.A.: Reduction of Energy Consumption by AC due to Air Tightness and Ventilation Strategy in Residences in Hot and Humid Climates, J. of Asian Architecture and Building Engineering 11(2), pp.407-414, 2012.11.
- 7) Murakami, S, Kato, S, Ooka, R, Shiraishi, Y: Design of a porous-type residential building model with low environmental load in hot and humid Asia, Energy and Buildings 36(12), pp.1181-1189, 2004.12.
- 8) 久保田徹, スピアン アーマッド: ジョホールバル市のテラスハウス住宅地における冷房の使用状況と窓の開閉状況に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, 第608号, pp.81-87, 2006.10.
- 9) 久保田徹: ジョホールバル市の集合住宅団地における冷房の使用状況と窓の開閉状況に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, 第616号, pp.83-89, 2007.6.
- 10) 久保田徹, Toe, D.H.C.: 高温多湿気候のマレーシアの都市住宅における夜間換気の効果, 日本建築学会環境系論文集, 第635号, pp.89-95, 2009.1.
- 11) Zaki, W.R.M., Nawawi, A.H., Sh.Ahmad, S.: Environmental Prospective of Passive Architecture Design Strategies in Terrace Houses, Procedia-Social and Behavioral Sciences 42, pp.300-310, 2012.
- 12) Sadafi, N., Salleh, E., Haw, L.C., Jaafar, Z.: Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation, Energy and Buildings 43(4), pp.887-893, 2011.4.
- 13) Ong, K.S.: Temperature reduction in attic and ceiling via insulation of several passive roof designs, Energy Conversion and Management 52(6), pp.2405-2411, 2011.6.
- 14) Al-Obaidi, K.M., Ismail, M., Rahman, A.M.A.: Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses, Energy Conversion and Management 85, pp.488-504, 2014.9.
- 15) Qahtan, A., Rao, S.P., Keumala, N.: The effectiveness of the sustainable flowing water film in improving the solar-optical properties of glazing in the tropics, Energy and Buildings 77, pp.247-255, 2014.7.
- 16) Department of Statistics Malaysia: Characteristics of Living Quarters, Population and Housing Census of Malaysia 2010, 2012.12.
- 17) Asian Development Bank: Key Indicators for Asia and The Pacific 2010, 2010.8.
- 18) Toe, D.H.C.: Application of Passive Cooling Techniques to Improve Indoor Thermal Comfort of Modern Urban Houses in Hot-Humid Climate of Malaysia, Doctoral Dissertation (unpublished), Hiroshima University, 2013.
- 19) Toe, D.H.C., Kubota, T.: 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, 2013.9.
- 20) Klein, S.A. et al.: TRNSYS 17: Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys> (2015年6月1日参照)

EFFECTIVENESS OF ENERGY-SAVING RENOVATION TECHNIQUES
THROUGH PASSIVE COOLING FOR URBAN HOUSES
IN HOT-HUMID CLIMATE OF MALAYSIA

Susumu SUGIYAMA^{*1}, *Satoshi YASUFUKU*^{*2}, *Tetsu KUBOTA*^{*3} and
Doris Hooi Chyee TOE^{*4}

^{*1} NICHIA Corp., M. Eng.

^{*2} Takenaka Corp., M. Eng.

^{*3} Assoc. Prof., Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University, Dr. Eng.

^{*4} Senior Lect., Faculty of Built Environment, Universiti Teknologi Malaysia, Dr. Eng.

Energy use in buildings is becoming a major concern in developing regions such as Southeast Asia. Unlike traditional vernacular architecture, most of the urban houses in Malaysia are of brick and concrete construction despite the year-round hot and humid climate. In fact, the air-conditioner ownership has been rising rapidly over the last few decades especially in the urban areas according to the economic growth. Therefore, it is important to apply passive cooling strategies wherever possible to these urban houses for energy-saving. The main objective of this study was to examine the effectiveness of energy-saving modifications through passive cooling for urban terraced houses in Malaysia. This paper firstly presented the results of a survey on usage patterns of cooling appliances and indoor thermal comfort in typical Malaysian residential areas. Secondly, effects of two strategies, i.e. complete natural ventilation (NV) strategy and partial air conditioning (AC) strategy, were simulated using TRNSYS. The complete NV strategy relied fully on naturally ventilated condition in the whole house for achieving thermal comfort in the master bedroom while the partial AC strategy was aimed at reducing the cooling load in the air-conditioned master bedroom by applying passive cooling techniques to the other spaces.

From this study, the following conclusions were drawn:

1. The results of the survey conducted in 2004 and 2012 showed that about 60% of the respondents owned at least one air-conditioner. Most of the air-conditioner owners have installed them in the master bedroom and operate them during the sleep at night (8.8 hour/day).
2. Many respondents who reported cold, cool and neutral for indoor air temperature in their master bedroom still preferred cooler temperature regardless of their thermal sensations. This result implied that the preference for cooler air temperature may lead to the relatively low set-point air temperature for air-conditioning (average: 21.4°C), its long usage time, and simultaneous use of air-conditioning and ceiling fan.
3. In the complete NV strategy, when the rooms were night ventilated, roof/ceiling insulation was effective to further reduce the daytime indoor air temperature, whereas forced ventilation was effective to reduce the nocturnal indoor temperature in particular. When the building was facing North, South and West, the mean indoor operative temperature was lowered to about 28.5 °C by applying the roof insulation, external shading and external wall-outside surface insulation in addition to night ventilation. The above condition can meet the required adaptive thermal comfort levels even under the heated urban climatic conditions. When the building was facing East, indoor operative temperature was slightly increased, but still, it was possible to achieve indoor thermal comfort by applying Low-E glass in addition.
4. In the partial AC strategy, reduction of about 9% in sensible cooling load compared to the current scenario was obtained by applying night ventilation to the whole house except for the master bedroom. On the other hand, reduction of about 30% in latent cooling load was achieved by applying no ventilation to the master bedroom. The results showed that the maximum reduction of about 45% in sensible cooling load and that of about 30% in latent cooling load were achievable if the ceiling, external wall-inside, internal wall and floor insulations were applied, while the master bedroom adopted no ventilation and the other spaces were night ventilated.

(2014年11月10日原稿受理, 2015年5月18日採用決定)