

マレーシアの住宅における断熱・換気技術の導入効果

Effect of Insulation and Ventilation of House in Malaysia

梅本大輔
Daisuke Umemoto

東木宏樹
Hiroki Toboku

西尾和典
Kazunori Nishio

要 旨

本研究では、東南アジアの住宅における健康・快適な住空間づくりを狙いとし、マレーシアのモデルハウスを対象に断熱・換気技術導入の有用性を実測により検証した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 断熱技術の導入によって、冷房の効きが改善（冷房立ち上がり時間を約60%短縮）でき、現地の一般住宅で想定される低温の冷房設定にすることなく、快適な温度を維持できる。さらに、長時間の低温冷房運転を抑制することで約63%の省エネ効果が期待できることを確認した。
- (2) 微小粒子用フィルターの活用と給気量に対して排気量を60%程度に調整し、住宅内を正圧化する換気システムを導入することで、隙間からの侵入を含めて微粒子状物質の室内への侵入抑制が可能となり、外気に比べて室内の微粒子濃度を約60%低減できることを確認した。

Abstract

This study was conducted to help ensure healthy and comfortable houses in Southeast Asia. Measurements of the thermal environment and indoor air quality were taken experimentally in a show house with insulation and ventilation. The results of this study were as follows: (1) The insulation of housing can improve the effect of air conditioners (air conditioner rise time: approximately 60% reduction) and keep a room comfortable even when the air conditioner is turned down. In addition, insulation can reduce the length of time that an air conditioner operates by about 63%. (2) A ventilation system with filters for micro-particles and adjusting the exhaust air volume to about 60% of the supply air volume which creates positive pressure in a room effectively prevents particulate matter from entering, and can greatly reduce the concentration of indoor particulate matter to about 60% that of outdoor air.

1. はじめに

東南アジアでは、著しい経済成長、生活水準の向上と世帯数の増加が予測されており、長中期的に住宅市場の拡大が期待[1]されている。特に、マレーシアでは国民の生活の質向上のため、住宅供給量の確保とともに国民の生活水準を高めることを目的に、政府による住宅政策が展開[1]されており、今後、さらに健康・快適な室内環境を実現できる質の高い住宅の普及・展開が望まれると予測される。

一方、現地における一般的な住宅は、レンガまたはコンクリートで形成された熱容量の大きい無断熱住宅が主流となっており、日本では一般的な断熱・換気技術はいまだ普及するに至っていない。

エアコンが普及してきた近年、無断熱で熱容量が大きい現地の一般的な住宅では、冷房の効きが十分でないことから、就寝時に低温の冷房設定でエアコンが運転されるケースが多く、その影響から、長時間低温冷房の副作用として健康被害も報告[2][3]されている。また、空気質の面においても、現地では1980年代から発生しているインドネシア・スマトラ島などにおける野焼きや森林火災が発生源と見られる煙害（ヘイズ：Haze）の影響で、大気汚染[4]が年々深刻化している。煙害は人体に深刻な健康被害を及ぼす危険性があることから、現地では空気質

に対する関心が高まっている実情がある。

東南アジアの住宅を対象とした既往研究[2][3][5]～[8]の多くは現地実態調査・シミュレーションによるケーススタディにとどまっており、断熱・換気技術を導入した実住宅における実証例は極めて少ない。

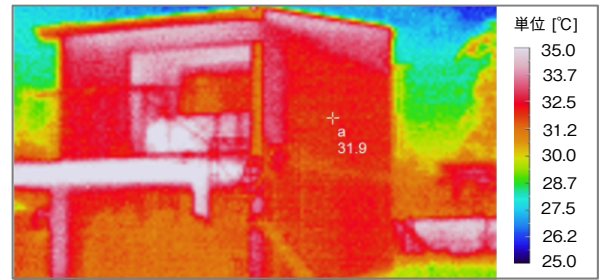
このような背景のもと、筆者らは、東南アジアの住宅における健康・快適な住空間づくりを狙いとして、マレーシアに建設されたモデルハウスに断熱・換気技術を導入し、実測によりその効果と有用性を検証した。

2. 建物概要

第1図に実証したモデルハウスの概要を示す。実測は、クアラルンプールに建設された延べ床面積112.68 m²のモデルハウスを対象に実施した。モデルハウスは、マレーシアでは一般的である複数の住宅が連なり両隣と壁を共有する長屋形式の2階建てリンクハウス1住戸を想定して建設された建物である。鉄筋コンクリートパネル（PCパネル）を組み立て、強固に一体化したWPC（Wall Precast Concrete）構法を採用して施工された住宅である。



第1図 モデルハウスの概要
Fig. 1 Overview of the show house



第3図 夜間における建物外部の熱画像
Fig. 3 Thermal image of outside in the night-time

3. 断熱技術導入効果の検証方法

3.1 断熱部位の構成と目論見（もくろみ）

第2図に測定概要および断熱部位の構成、第3図に夜間における建物外部の熱画像をそれぞれ示す。文献[5][6][7]によると、現地では主に夜間就寝時にエアコンが使用されていることから、建物の2階部分に寝室を想定した無断熱室および断熱室の2室を設け、測定を行うこととした。第3図に示した熱画像は、外気温度が夜間に28℃まで低下した際に撮影した画像である。躯体の表面温度は、外気温度が低下しているにもかかわらず31.9℃を示しており、日中に熱容量の大きいコンクリート躯体が蓄熱していることが伺える。現地の一般的な無断熱住宅では、このように熱容量の大きい躯体に蓄熱された熱が夜間室内へと放熱されるために冷房の立ち上がりづらい環境となっているものと推測できる。

断熱室における断熱部位の構成は、現地の一般的な無断熱住宅の課題である冷房立ち上がり性の改善を狙いに内

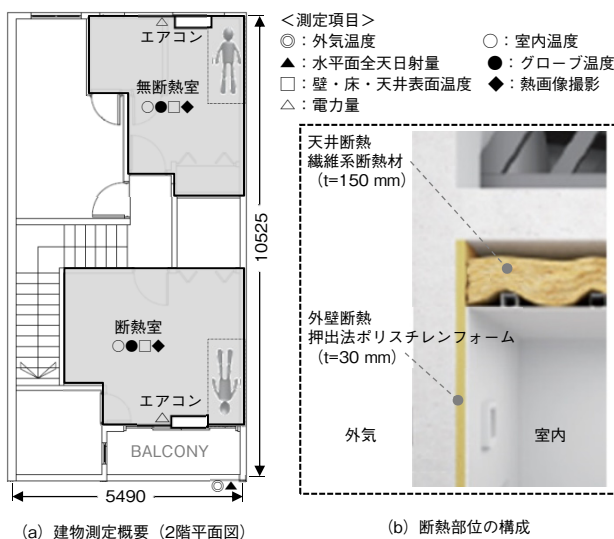
断熱を基本とし、天井は繊維系断熱材：150 mm、壁は押出法ポリスチレンフォーム：30 mmを配置した仕様としている。なお、測定対象とした各室における部位の熱貫流率（内外の温度差1℃の場合に1 m²を貫流する単位時間当たりの熱量）は、断熱室で外壁0.74 W/（m²・K）・天井0.24 W/（m²・K）、無断熱室で外壁3.49 W/（m²・K）・天井3.16 W/（m²・K）である。

熱負荷計算による事前予測から、断熱技術導入によって、冷房立ち上がり時の顕熱負荷をおおむね半減できる見込みを得たことから、冷房立ち上がり時間を50%以上短縮することを期待して実測を行った。

3.2 測定条件

第1表に測定日の外気条件を示す。測定は2015年5月26日～5月29日で実施したが、同一日の比較ができなかったため、外気温度、絶対湿度および水平面全天日射量が同等となる代表日の測定データを比較した。なお、測定対象とした断熱室および無断熱室は、床面積を合わせた条件に区画している。エアコンの運転は、就寝時間帯を想定し、23時～翌朝6時までの計7時間とし、風量・風向とも自動運転とした。また、各室とも同一容量のエアコンを選定している。

無断熱室のエアコン設定温度は、無断熱で熱容量が大きいことから、冷房立ち上がり時において壁・天井の表面温度が低下しづらく、冷房の効きが十分でない。よって、快適性を担保するために、低温の冷房設定でエアコンが運転される現地一般住宅の実態[2][3]を再現する狙いで、既往文献を参考にマレーシアの平均的な設定温度



第2図 測定概要および断熱部位の構成
Fig. 2 Outline of measurements and insulation configuration

第1表 測定日の外気条件

Table 1 Outdoor air conditions on the measurement date

	無断熱室 測定代表日	断熱室 測定代表日
日平均外気温度 (日最低～日最高)	30.0℃ (25.1℃～35.8℃)	29.8℃ (26.4℃～37.1℃)
日平均絶対湿度	18.1 g/kg (DA)	17.8 g/kg (DA)
日積算 水平面全天日射量	15.7 MJ/m ²	16.2 MJ/m ²

となる22℃[3]とした。一方、断熱室では冷房の立ち上がり性が改善できることを期待し、日本で一般的な冷房設定温度の水準に相当する27℃[9]の設定とした。

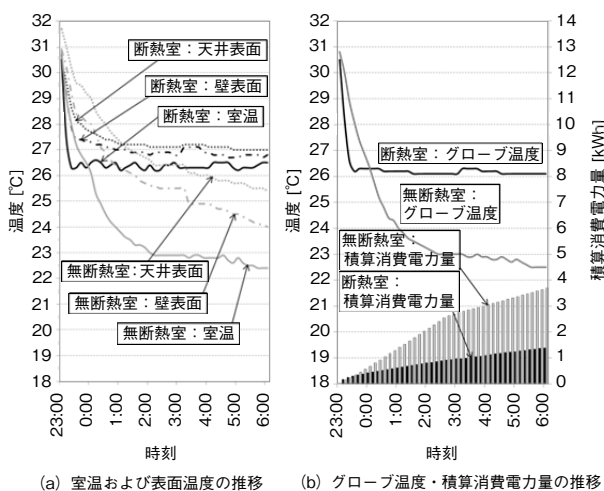
3.3 測定項目

第2図に示すとおり外気・室内（床面からの高さ：h=100 mm, 1100 mm, 2700 mm）・壁表面・天井表面の各温度、室内のグローブ温度（周囲の温度のほかに壁・天井などからの熱放射の影響を含めた等価温度）、日中の水平面全天日射量、エアコン消費電力量をそれぞれ測定した。また、冷房開始前、冷房運転30分経過後および起床時を想定した7時間経過後においてベッド上仰臥（ぎょうが）位の被験者を対象に熱画像を撮影した。熱画像の撮影は、それぞれの時間帯において皮膚温を順応させるため、入室後20分以上経過した後に撮影している。

4. 断熱技術導入効果の検証結果

4.1 室内各部位の温度推移への影響

第4図に各部位の温度および消費電力量の推移を示す。無断熱室と比較して断熱室では室温および壁・天井の表面温度の低下も早く、グローブ温度も短時間で低下する傾向を示した。室内が快適な温度（グローブ温度27℃）に低下するまでに要する時間を比較すると無断熱室では50分必要であったが、断熱室では20分で達成しており、断熱技術の導入により冷房の立ち上がり時間を短縮（約60%）できることを確認した。また、現地の実態を想定した無断熱室の室内環境は、22℃の冷房設定でエアコンが運転されることが影響し、起床時まで温度が低下し続けたが、断熱室では起床時まで快適な温度26℃～28℃[9]



第4図 温度・消費電力量の推移

Fig. 4 Transition of temperature and power consumption

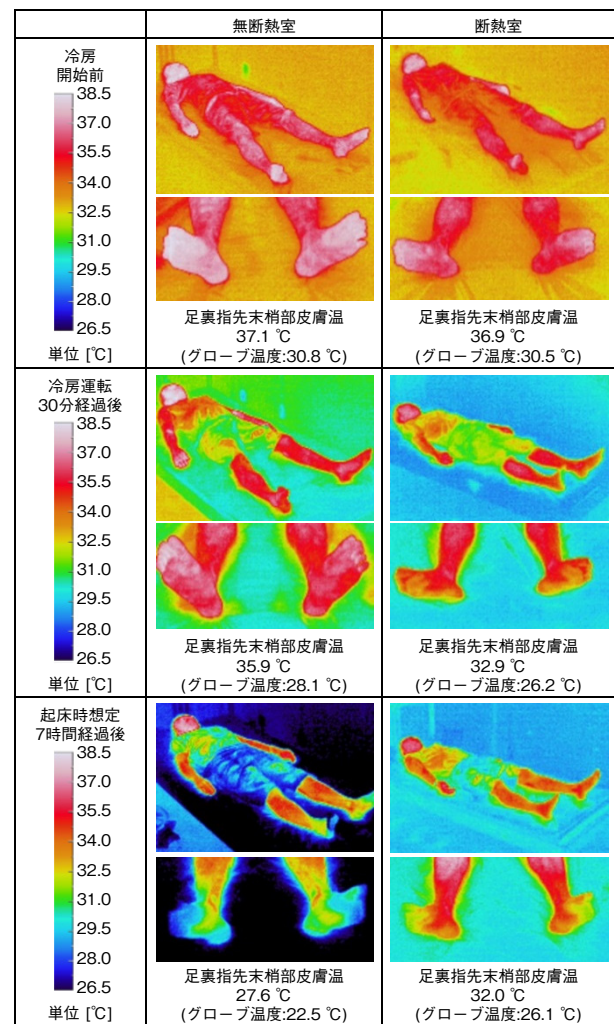
を維持できることを確認できた。

4.2 エアコン消費電力量の推移への影響

第4図に示した消費電力量の推移より、室内が快適な温度（グローブ温度27℃）に達するまでのエアコン消費電力量を比較した結果、無断熱室567 Whに対し、断熱室では251 Whであり、冷房立ち上りに要する消費電力量をおおむね半減できていることが確認できた。また、就寝時間帯を想定した計7時間のエアコン消費電力量は無断熱室3700 Whに対し、断熱室では1376 Whであり、断熱技術の導入による冷房の効き改善と長時間の低温冷房運転の抑制で約63%の省エネ効果が得られた。

4.3 足裏指先末梢（まっしょう）部皮膚温への影響

第5図に人体表面の熱画像および足裏指先末梢部皮膚温の時間推移をグローブ温度とあわせて示す。なお、図



第5図 人体表面の熱画像および足裏指先末梢部皮膚温の時間推移

Fig. 5 Transition of thermal images and peripheral skin temperature of bottom of toe

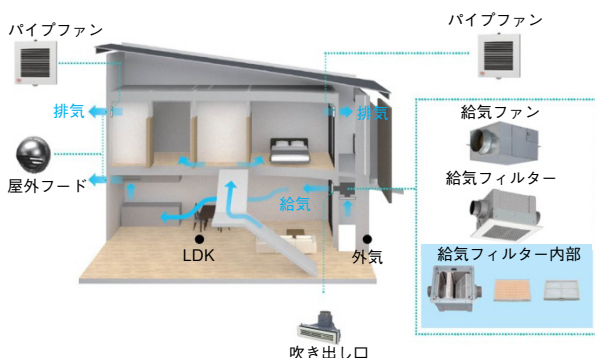
中に示した足裏指先末梢部皮膚温は、熱画像より左右指計10本の最低皮膚温を抽出し、平均した値を示している。皮膚温は特に末梢部において室内環境による影響が大きい[10]ことから、足裏指先末梢部皮膚温は、入室後20分程度の順応でおおむね安定しているものと見なし、各室の末梢部皮膚温の変化傾向を比較した。

冷房開始前の末梢部皮膚温は、各室ともに同等の室内環境であることから、無断熱室で37.1℃、断熱室で36.9℃とはほぼ等しい値を示した。冷房運転30分経過後の末梢部皮膚温は、無断熱室で35.9℃、断熱室で32.9℃であり、無断熱室では冷房が効くまで時間を要することで皮膚温も低下しづらい傾向を示した。一方、断熱室では、冷房の効きの改善により短時間で皮膚温を低下させることが可能であったと伺える。また、起床時を想定した7時間経過後の末梢部皮膚温は、無断熱室では27.6℃であり、低温の冷房温度で長時間連続運転されることで30分経過後から大きく低下する傾向が確認できた。一方で、断熱室では起床時まで安定した室内環境を維持できていることから、皮膚温についても32.0℃を示しており、30分経過後から大きな変動なく安定した皮膚温で推移することが確認できた。

5. 換気技術導入効果の検証方法

5.1 換気システムの構成と目論見

第6図に換気システムの構成、第2表にマレーシアの大気汚染指標をそれぞれ示す。換気システムは、室内で発生する臭気、湿気などを効果的に排出させるため、LDKから給気し、水廻（まわり）（洗面、浴室、トイレ）から排気する第一種換気システムを基本とした。マレーシアでは、換気に関する基準が定められていないことから北米の換気基準ASHRAE（American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers）[11]に基づき



第6図 換気システムの構成

Fig. 6 Constitution of the ventilation system

第2表 マレーシアの大気汚染指標[4]

Table 2 Air pollutant index of Malaysia

大気汚染指数API	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	大気状態
0-50	0-50	良好 (Good)
51-100	51-150	普通 (Moderate)
101-200	151-350	不健康 (Unhealthy)
201-300	351-420	非常に不健康 (Very Unhealthy)
>300	>420	危険 (Hazardous)

給気風量を設定した。給気部には、第2表に示す大気汚染指数API (Air Pollutant Index) の環境基準物質の1つとして定められているPM10の濃度低減を狙いとして、空気中の微粒子状物質を除去し清浄な空気の導入を図るため、粒径2.5 μm 以下の微小粒子にも対応した微小粒子用フィルター（当社製エアテクト^(注1)）を搭載した。なお、PM10は粒子径がおおむね10 μm 以下の微粒子を示す。また、住宅内の正圧を確保することで、建物の隙間を介した微粒子状物質の侵入を抑制する目的で、給気量に対して排気量が60%程度となるよう排気量を調整し、相当隙間面積[12]（以降、C値）は、日本で一般的な気密住宅に相当する水準5.0 cm^2/m^2 を目標とした。

設定した給気量と排気量の風量差およびC値の場合、外気風速が約1.5 m/s以下であれば、建物外皮に風圧力が作用した場合においても、換気の風量差による圧力が上回り、住宅内を正圧化できる。よって、建物の隙間からの微粒子状物質の侵入抑制が可能となる。また、現地の外気平均風速3 m/s[13]で試算すると、住宅内のPM10の濃度を約60%低減できると見込み、第2表に示す大気状態が「不健康」相当のPM10の濃度（151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ～350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）である場合においても室内の濃度を約60%低減し、「普通」相当の濃度（60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ～140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）に低減できることを目論んで実測を行った。

5.2 建物性能

第3表に建物性能、第7図にモデルハウスの内外差圧と通気量（レンジフードの排気風量）の関係をそれぞれ示す。第3表に示すとおり、実際に建設されたモデルハウスにおける実測の結果、設定した換気の風量およびC値ともに目標性能を満足することを確認した。C値は、既設のレンジフードを3段階で運転させ、それぞれの通気量における建物内外の差圧を微差圧計で測定し、(1)式、(2)式[12]より算出した。なお、通気率 a および隙間特性値 n は第7図に示すとおり、差圧と通気量の回帰直線から求めた。

(注1) 当社の日本国内における登録商標。

第3表 モデルハウスの建物性能

Table 3 Building performance of the show house

項目		設定値	実測値	参考
風量 [m ³ /h]	給気量	112	112~115	ASHRAE[11]
	排気量	70	70~72	
相当隙間面積 (C値) [cm ² /m ²]		5.0	4.6	住宅の気密性能 試験方法[12]

$$aA = 2.78 \times (\rho/2)^{0.5} \times a \times (9.8)^{1/n-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$C = aA/S \dots\dots\dots (2)$$

ρ : 隙間を流れる空気密度 [kg/m³]

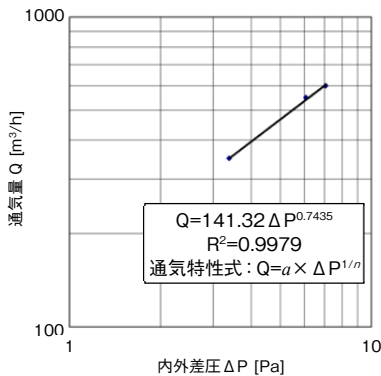
a : 通気率 [m³/h・Pa^{1/n}] (圧力差1 Pa時の通気量)

n : 隙間特性値 [無次元] (回帰直線の傾き)

C : 相当隙間面積 [cm²/m²]

aA : 総相当隙間面積 [cm²]

S : 実質延べ床面積 [m²]



内外差圧 ΔP [pa]	レンジ フード風量 Q [m ³ /h]
3.4	350
6.1	550
7.1	600

第7図 モデルハウスの内外差圧と通気量の関係

Fig. 7 Relationship between the inside and outside differential pressure and ventilation volume

5.3 微粒子濃度の測定方法

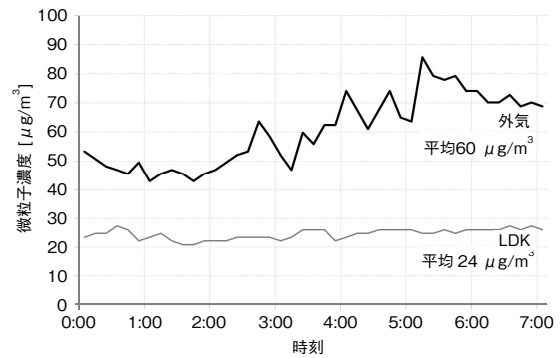
測定は、散乱光強度から粉塵(ふんじん)質量濃度を測定する粉塵計を用いて、LDK・外気(床面からの高さ: h=1000 mm)それぞれの微粒子濃度(PM10)の時間推移を測定した。

6. 換気技術導入効果の検証結果

第8図に微粒子濃度の推移を示す。外気の微粒子濃度が80 μg/m³以上まで上昇している時間帯においても、LDKは濃度変化が見られず30 μg/m³以下で安定した推移を示した。換気運転計7時間のLDKの平均濃度は24 μg/m³を示しており、外気平均濃度60 μg/m³に対して目論見どおり約60%低減できることを確認した。

以上より、微小粒子用フィルターの活用と給気量に対して排気量を60%程度に調整し住宅内を正圧化する換気

システムを導入することで、隙間からの侵入を含めて微粒子状物質の室内への侵入抑制が可能となり、外気に比べて室内の微粒子濃度を大きく軽減できることを確認した。



第8図 微粒子濃度の推移

Fig. 8 Transition of particulate concentration

7. まとめ

マレーシアに建設されたモデルハウスを対象に断熱・換気技術の導入効果を実測し、以下の知見を得た。

- (1) 断熱技術の導入により、冷房立ち上がり時間を約60%短縮でき、現地の一般住宅で想定される低温の冷房設定にすることなく、就寝時に快適な温度環境を維持できる。さらに、長時間の低温冷房運転を抑制することで約63%の省エネ効果が得られた。
- (2) 微小粒子用フィルターの活用と給気量に対して排気量を60%程度に調整し、住宅内を正圧化する換気システムを導入することで、隙間からの侵入を含めて微粒子状物質の室内への侵入抑制が可能となり、外気に比べて室内の微粒子濃度を約60%低減できることを確認した。

無断熱で熱容量が大きい住宅での長時間の低温冷房に伴う健康被害、空気質への関心は、マレーシアのみならず、年間を通じて高温な気象条件かつ大気汚染が年々深刻化している東南アジア共通の課題と考えられる。今後、これら断熱・換気技術を東南アジアの各地へと導入・展開していくことで居住環境の質の改善と健康・快適な住空間づくりに貢献していけるものと考えられる。

参考文献

[1] 駒村和彦 他, “東南アジアの住宅事情と参入戦略の考え方,” NRI パブリックマネジメントレビュー, vol. 61, pp. 1-5, 2008年8月, <https://www.nri.com/jp/opinion/region/2008/pdf/ck20080803.pdf>, 参照 Apr. 15, 2016.

- [2] 鉦井修一 他, “蒸暑地域に居住する人々が選択する空調時の室温に関する実態調査 第1報 アンケート調査の概要,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 565-566, 2010年9月.
- [3] 鉦井修一 他, “蒸暑地域に居住する人々が選択する空調時の室温に関する実態調査 第2報 エアコンの使用状況,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 567-568, 2010年9月.
- [4] “Air Pollutant Index of Malaysia,” マレーシア環境庁, <http://apims.doe.gov.my/v2/index.html>, 参照 Apr. 15, 2016.
- [5] 久保田徹 他, “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年10月.
- [6] 久保田徹 他, “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年6月.
- [7] 宇野朋子 他, “インドネシア・スラバヤにおけるエアコン使用状況に関する研究 その1 アンケート調査結果,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp. 309-310, 2003年9月.
- [8] 久保田徹 他, “高温多湿気候下のマレーシアの都市住宅を対象とした省エネ改修方法の提案 その4 部分冷房の場合のバッシブクーリング手法,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp. 507-508, 2014年9月.
- [9] 健康維持増進住宅研究委員会/健康維持増進住宅研究コンソーシアム(編), 健康に暮らすための住まいと住まい方エビデンス集, 技報堂出版, 東京, pp. 56-62, 2013年6月.
- [10] 栃原裕 他, 人工環境デザインハンドブック, 丸善出版, p.67, 2007年12月.
- [11] “American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,” 米国暖房冷凍空調エンジニアリング協会, <https://www.ashrae.org/>, 参照 Apr. 15, 2016.
- [12] “住宅の気密性能試験方法,” (一財) 建築環境・省エネルギー機構”第8版, 2013年6月.
- [13] “Free Wind and Solar Resource Maps,” Vaisala Corp., <http://www.vaisala.com/en/energy/support/Resources/Pages/Free-wind-And-Solar-Resource-Maps.aspx>, 参照 Apr. 15, 2016.
- [14] 住宅の省エネルギー基準の解説, (一財) 建築環境・省エネルギー機構, 第3版, 2011年11月.

執筆者紹介



梅本 大輔 Daisuke Umemoto
パナホーム(株) 住宅・技術研究所
Technology and Housing Research Institute,
PanaHome Corp.



東木 宏樹 Hiroki Toboku
パナホーム(株) 住宅・技術研究所
Technology and Housing Research Institute,
PanaHome Corp.



西尾 和典 Kazunori Nishio
パナホーム(株) 住宅・技術研究所
Technology and Housing Research Institute,
PanaHome Corp.