

高温多湿気候下のインドネシアにおける 低炭素アフォーダブル集合住宅の社会実装 －省エネ・低炭素と健康・快適性の両立－

広島大学大学院先進理工系科学研究科 准教授 久保田 徹

1. はじめに

世界人口は、少なくとも今世紀末までは増加を続けると予想されるが、その人口増加のほとんどは、アジア、アフリカの熱帯気候下の都市で生じるといわれている。従って、今世紀末までの地球温暖化対策を考えた場合、特に熱帯気候下に立地する成長都市の低炭素化を進めることが重要である。

インドネシアは、2億5千万人以上の人口を擁する東南アジア最大の国である。近年の経済成長は目覚ましく、主要都市では中間層が急増している。一日の支出（US\$2～20）で定義した中間層の割合をみると、1990年ではまったく見られなかった中間層が僅か18年後の2008年に46.8%まで増加し、さらに2030年までに100%に達するとの予測すらある¹⁾。

筆者らは、ニチアス株式会社よりいただいた研究助成によって、ジャワ島北岸に位置するTegal市（人口約24万人）に実大スケールの実験住宅“Low-Carbon Passive House I”（2020年1月竣工）を建設した。さらに、上記のプロジェクトを一層展開させた研究課題が、JST/JICAによる地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）に採択された（研究課題「パリ協定による2030年目標に向けた高温多湿気候下のインドネシアにおける低炭素アフォーダブル集合住宅の開発」2020～2026年、研究費約5億円）。本プロジェクトでは、インドネシア政府機関をメインカウンターパートとし、日本の6大学、民間企業7社

と連携して、同国で急成長する中間層向け集合住宅を対象としたアフォーダブルな低炭素建築技術を共同開発し、それをインドネシアの国家規格（SNI）や地方自治体の建築基準等として社会実装することを目的としている。本稿では、前述のTegal市に建設した実験住宅プロジェクトに関連した研究成果の一部を紹介する。

2. 鉛直ヴォイドによる通風促進効果に関するCFD解析

日本の集合住宅の多くは片廊下型で、伝統的に南面配置が好まれるが、インドネシアでは中廊下型の集合住宅がほとんどを占める。実際に、ジャカルタ、バンドンなどの主要都市に立地する高層集合住宅の図面を200件程度収集してみたが、9割以上の物件が中廊下型の集合住宅であった。熱帯では、直達日射はむしろ避けるべきものであり、建物方位は日本ほど重視されない。すると、経済的利益の方が遥かに優先され、床面積を最大化させるべく中廊下型の集合住宅がより多く建設されるのだろう。

中廊下型の集合住宅では、廊下側の開口部が限られるため、換気・通風の問題が生じやすい。また、熱帯では一年を通じて外部風がそもそも弱く、たとえ高層階であっても、特に風下側住戸では風力換気を期待することが難しい。こうして熱帯新興国に次々と建設される中廊下側の集合住宅の換気・通風をいかに改善するかは非常に重要なテーマだと思う。

本研究は、新潟工科大学の風・流体工学研究センター（富永禎秀教授）、インド工科大学、ケンブリッジ大学との共同研究の一環として行われた。新潟工科大学所有の境界層風洞を用いた風洞実験とCFD解析によって、上述の熱帯の高層集合住宅を対象として、鉛直ヴォイドを設置した場合の住戸内の換気・通風促進効果を検討している²⁾。

これまでの鉛直ヴォイドは、ヴォイド上部が開放したものがほとんどであった（図1のType A）。このような開放型ヴォイドは、高層建物の屋上に生じる負圧を利用し、風上側（a）・風下側（b）の両方の住戸から風を引き上げる効果を期待するものであり、実際の導入例も数多くある。これに対し、本研究で提案するのは、閉鎖型ヴォイドを用いたType Bである。建物1階部分がピロティになった集合住宅は、熱帯アジア地域でよく見られる建物形態であるが、ピロティ内の風速は本来低

速であるはずの地表面にあって驚くほど速い。これは、風上側の建物外壁に当たった風の一部分が地表面に向かい、それらがピロティ入り口で縮流を起こすからである。この比較的風速の速いピロティ内の風をフィンを使って鉛直ヴォイド内に導く。これによって上部が閉じた鉛直ヴォイド内は正圧となり、風下側の住戸にも効率的に通風を生じさせることができるというのが本研究の仮説である。

風洞実験とCFD解析結果では、ほぼ仮説通りの結果が得られた（図2）。従来の開放型ヴォイドを用いたType Aではヴォイド内が負圧になっているのに対し、提案する閉鎖型ヴォイドを用いたType Bではヴォイド内が正圧になった。建物高さの風速を基準とした風速比で見ると、風上側の住戸ではType Aの方が流入開口部付近で僅かに風速が速い（図3）。しかし、一方の風下側の住戸においては、Type Aでは風下側から風上側に

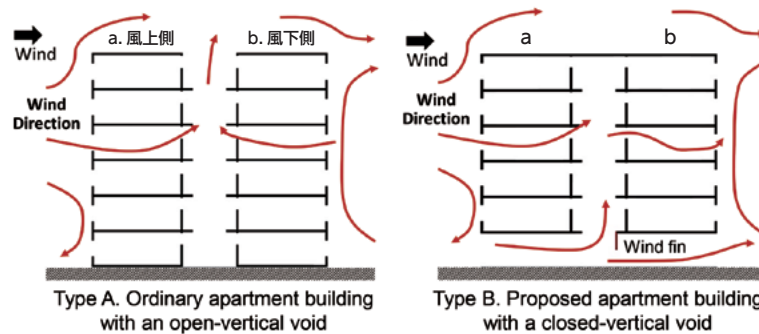


図1 従来型の開放型ヴォイド（Type A）と提案する閉鎖型ヴォイド（Type B）による通風イメージ²⁾

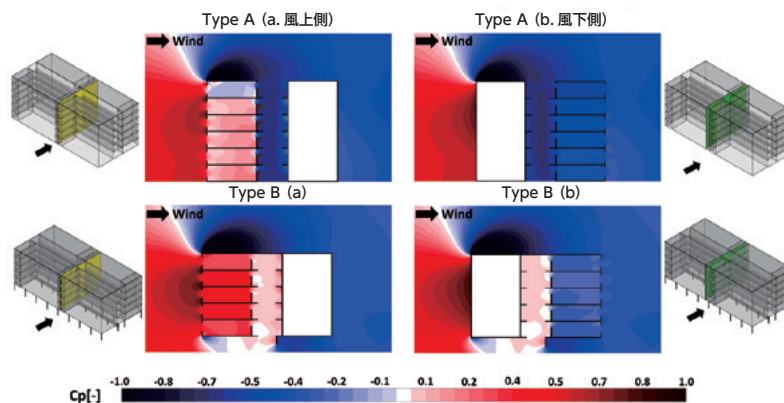


図2 Type AとType Bにおける風圧係数の分布²⁾

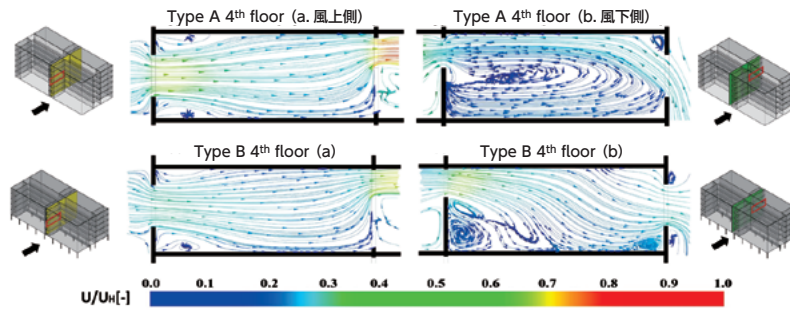


図3 Type AとType Bにおける住戸内の風速比の分布²⁾

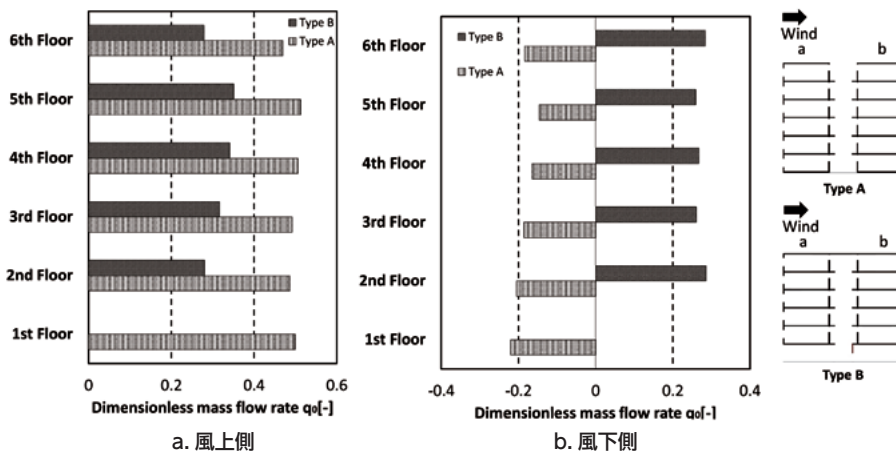


図4 Type AとType Bにおける住戸内の換気量²⁾

風が流れているのに対して、Type Bでは風上のヴォイド側から風下の屋外側に風が流れ、なおかつ、Type Aよりも風速が速いことが分かる。各階の住戸で得られる標準化した換気量を見ると、風上側住戸では、Type BよりもType Aの方が概ね1.5倍程度大きい換気量が得られているが、風下側住戸では、逆に、Type Bの換気量の方がType Aよりも概ね1.5倍大きい(図4)。つまり、Type AとType Bで風上側と風下側の換気量の総量は概ね等しいものの、提案するType Bの方が風下側住戸に通風を生じさせるうえでは効率が良い。

3. PCMを用いた床放射冷房システムの開発

本研究は、東京工業大学浅輪貴史准教授の研究グループとYKK AP株式会社との共同研究の一

環として行われた。YKK APインドネシア社の工場敷地内(タンゲラン市)に設置された実験ユニットを用いた実証実験とCFD解析によって、熱帯気候に適応する窓の開放を前提とした床放射冷房システムの開発を行っている(図5)。

インドネシアやマレーシアの一般住宅では、通常、エアコンは寝室に置かれ、夜間就寝時に長時間使用されることが明らかとなっている。エアコンを2台、3台と増やしていくにつれ、次第にリビングにも置かれるようになるが、現時点では稀であり、昼間は窓を開放し、自然換気をして過ごす世帯がほとんどである。窓を開放した状態でも熱的に快適な環境を提供することができれば、これ以上のエアコンの過度な使用を抑えられることになり重要である。

本研究で考案するシステムでは、床下にPCM(潜熱蓄熱材)を設置し夜間強制換気することで

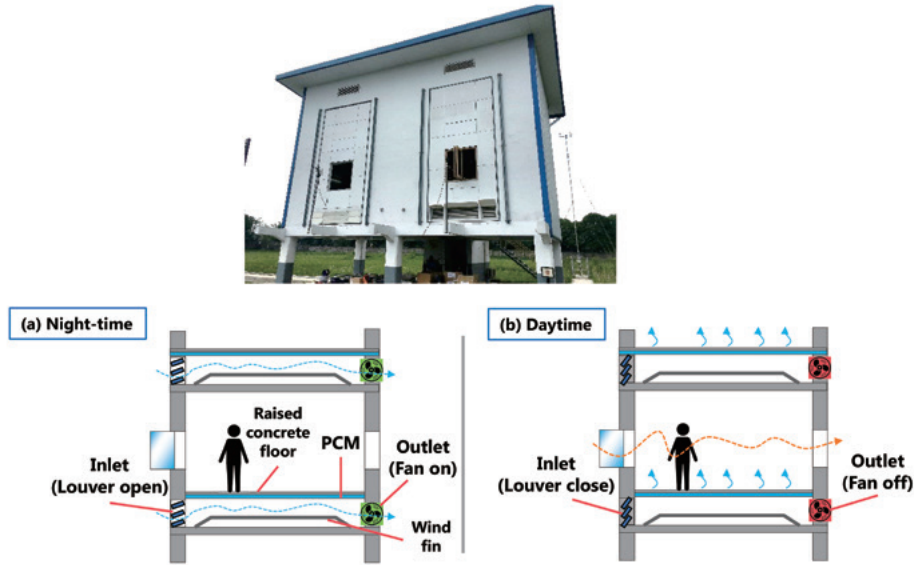


図5 PCMを用いた床放射冷房システムの概要³⁾

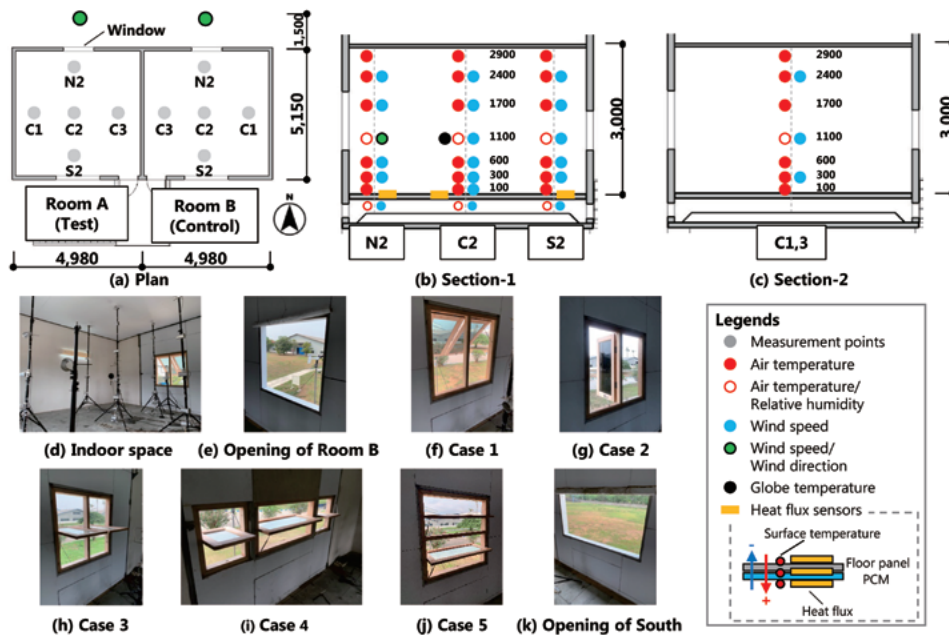


図6 実験方法³⁾

(a) 測定室のレイアウト, (b, c) 測定位置, (d) 測定室内の様子, (e) Room Bの風上側開口部, (f~j) Room Aの風上側の窓, Case 1-5, (k) Room AおよびBの風下側開口部

躯体蓄冷を促す(図5)。これにより、翌日の昼間に、窓を開けて室温は上昇する状態でも風通しと放射冷却効果によって居住者の熱的快適性を満たすことを目的としている。このようなシステムでは、蓄冷した床に昼間の高温外気を当てることなく、居住者レベルだけに風を通すことが求められるが、そうした目的の場合に理想的な窓デザ

インは何かを検討している(図6)。本実験では、Room A(実験室)の風上側の開口に突き出し窓(Case 1)、外開き窓(Case 2)、横軸回転窓(Case 3~Case 5)を取り付ける一方、Room B(制御室)は窓を取り付けない単純開口にして、両室の熱環境を比較した。

現在も検討段階にあるが、上述の目的を満たす

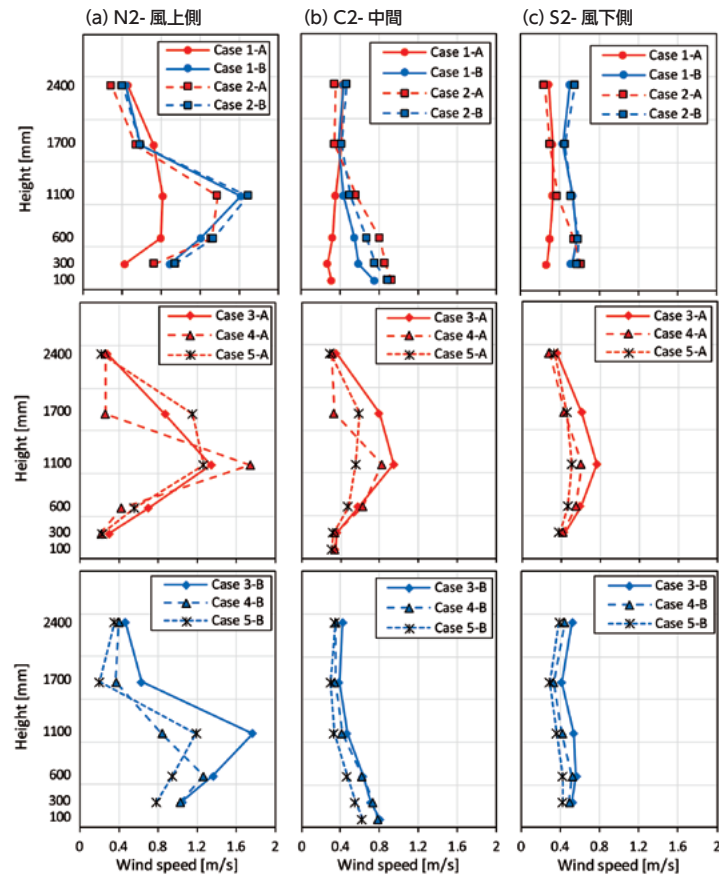


図7 室内風速の鉛直分布³⁾

ためには、横軸回転窓 (h ~ j) がひとつの有効な選択肢になりそうだ (図7)。窓の縦横比なども重要な要因であるが、横軸回転窓を用いた冷房システムによって総合的な熱快適性指標である SET* で 0.8℃ 程度の効果が得られた。しかし、躯体冷却効果を維持させるべく床に外部風を当てまいとする必要はそれ程ないようだ。床の放射冷却効果は、主に夜間の強制換気と PCM 設置による躯体冷却効果によって得られるところが大きく、床面に外部風を当てないことにそれほど効果はないことが分かった。そうすると、熱帯の昼間の窓は、人体の発汗・蒸発を促すべく居住者レベルに風を通すことに特に注力すればよいのかもしれない。いずれにせよ、熱帯ならではの窓が見つけれそうである。

なお、一方の寝室ではエアコンを効率的に使用することが重要であり、断熱材を用いた省エネ技術が強く求められる。インドネシアの高層集合住

宅では、外壁に軽量コンクリートパネルを用いたケースが多いが、気密性に加え断熱性能は十分ではない。熱帯アジア新興国においてエアコンが急速に普及していることは周知のとおりであるが、その普及に合わせて熱帯仕様の断熱技術を開発し浸透させることが必要であろう。

4. 実験住宅“Low-Carbon Passive House I”の建設

ニチアス株式会社よりご支援いただいた研究助成プロジェクトの成果として、他の日本企業からの協力も受けながら、Tegal市において省エネ・低炭素技術の実証研究を目的とした実験住宅“Low-Carbon Passive House I”を建設した。基本設計は、バンドン工科大学 Dewi 准教授の研究グループを中心に、筆者の研究室とインドネシア政府研究機関である Puskim (人間居住研究所) や

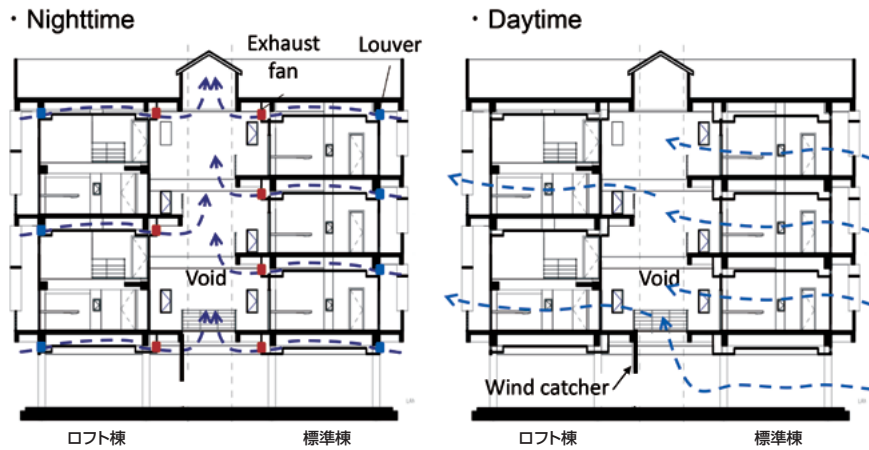


図8 Tegal実験住宅の通風計画

YKK AP株式会社との連携のもとで行われた。

前述の研究成果を踏まえ、1階部分をピロティとするとともに、建物中央に閉鎖型ヴォイドを配置した(図8)。ピロティには可動式のフィンも取り付けており、考案する閉鎖型ヴォイドによる通風促進効果を実証できる。住棟は、鉛直ヴォイドを介して、天井高の大きなロフト棟(南側)と標準的な高さの標準住戸棟(北側)に分かれる。

2020年3月12日には、Tegal市長も参加した開所式が行われた(図9)。冒頭で紹介したSATREPSプロジェクトでも引き続きTegal市を対象とする予定であり、数年後に、低コストの集合住宅を想定した低炭素型実験住宅を新たに建設予定である。パリ協定の目標年を前に、低炭素を実現する集合住宅モデルを実際に提示し、さらに基準化を行うことで、開発する低炭素技術をインドネシア全土へ広く普及させることを目標としている。

5. おわりに

新型コロナウイルスが猛威を振るっているが、奇しくも、これを機に熱帯の人々の意識も開放型の住宅に向かうのではないかと思う。戦後の日本の住宅がそうであったように、熱帯アジア新興国の都市住宅は、エアコンの普及とともに窓を閉じた閉鎖型の住宅へと変化しつつあった。このまま放置すれば、瞬く間にエアコンがすべての部屋に行き渡り、都市が閉鎖的な住宅で埋め尽くされるのではないかと予想していた。パリ協定の目標年も近づくなか、コロナ後の熱帯アジア新興国の住宅がどのように変化していくのかを予想することは極めて重要である。

コロナ・パンデミックまでのインドネシアでは、住宅の気密性と断熱性を確保する前にエアコンが普及していた。その結果、非効率な運転により冷房用エネルギーが過度に消費され始めていた。筆



図9 Tegal市に建設した実験住宅“Low-Carbon Passive House I”

者らは、エアコンを使用する空間は気密性と断熱性を高める一方、窓の開放を前提とした開放型の空間が取り込まれることが望ましいと考える。つまり、開放型と閉鎖型の空間を併せ持つメリハリのあるハイブリッドな住宅がひとつの解になると予想している。そこでは、熱的な棲み分けを可能とする遮熱・断熱技術が必要となるだろう。いずれにせよ、コロナ後の熱帯アジア新興国で、省エネ・低炭素と健康・快適性を両立させる技術の開発が喫緊の課題である。

謝辞

本研究の一部は、ニチアス株式会社とYKK AP株式会社より多大なご支援をいただいている。さらに、Tegal市の実験住宅の建設に際しては、パナソニック株式会社とAGC株式会社からも資材提供を受けている。さらに、本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST, JPMJSA1904）と独立行政法人国際協力機構（JICA）の連携事業である地球規模課題対応国際科学技術協力プ

ログラム（SATREPS）の支援を受けて実施した。ここに記し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Chun, N. (2010) Middle class size in the past, present, and future: a description of trends in Asia (ADB Economics Working Paper Series No. 217), Asian Development Bank.
- 2) Kumar, N., Kubota, T., Bardhan, R., Tominaga, Y. (2019) CFD analysis of airflow in voids for better cross ventilation in midrise buildings in hot and humid climates, in Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, Italy, 2-4 Sep.
- 3) Kitagawa, H., Asawa, T., Kubota, T., Trihamdani, A.R., Sakudara, K., Mori, H. (2021) Optimization of window design for ventilative cooling with radiant floor cooling systems in the hot and humid climate of Indonesia, Building and Environment. (in Press)

筆者紹介



久保田 徹

広島大学大学院先進理工系科学研究科
准教授

日本建築学会など
博士（工学）

熱帯アジア地域の都市住宅の省エネ・低炭素技術に関する研究に従事

「断つ・保つ」で明るい未来へ

さまざまな地球環境負荷の低減が求められています。
私たちはいろいろなステージで、
安全で快適な暮らしを作り出す製品・サービスを提供します。
ニチアスは、そんな明るい未来の実現に貢献していきます。

