

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 元年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0210

研究課題名（和文）インドネシア主要都市で急成長する中間層を対象とした集合住宅のパッシブクーリング（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Passive cooling for rapidly growing middle-class apartments in major cities of Indonesia(Fostering Joint International Research)

研究代表者

久保田 徹 (Kubota, Tetsu)

広島大学・国際協力研究科・准教授

研究者番号：80549741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000円

渡航期間：12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、バンドンのインドネシア人間居住研究所に長期滞在し、同国で急増する中間層向け中高層集合住宅を対象とした省エネルギー基準を共同策定することを目標とする。本課題を大きく次の5つの分科会に分け、それぞれの課題について共同研究を行った。(1)敷地調査、(2)適応行動および熱的快適性、(3)建物外皮、(4)健康：空気質、(5)設計と建設。最終年度に、これまでの研究成果を導入した実大の実験住宅の詳細設計を行い、テガル市において2019年4月に着工した。今後は、本実験住宅を用いた実証を行い、提案する省エネ基準化方法を精査し、最終的に既存の集合住宅設計ガイドラインに盛り込む予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高温多湿という気候的共通性を有する日本とインドネシアの連携の下で、同国の気候特性に適応した省エネルギー基準を開発するものである。特に、従来の建築技術の多くは高気密・高断熱化を志向するものが多かったのに対し、窓開放を前提とした開放系建物のクーリング技術の開発や基準化に関する研究は新しく学術的意義は大きい。

インドネシアの人口は約2億5千万人であり、集合住宅の既存の設計ガイドラインに省エネ基準を盛り込んだ際の波及効果は国内のみを想定しても非常に大きい。さらに、東南アジア周辺諸国では、都市化とともに中間層が急成長する国が多く、そうした新興国に本研究で得られた成果を適用できる可能性は高い。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is to develop energy-saving standards for mid-to-high-rise apartments for middle-class, jointly with the Research Institute for Human Settlements in Bandung, Indonesia. These apartments have rapidly been increased in major cities. We divided the research topic into the following five clusters and then conducted joint researches respectively: (1) fundamental site analysis, (2) occupants' adaptations and thermal comfort, (3) building envelope, (4) health; indoor air quality, and (5) design and construction. During the final year, we completed the detailed design for the full-scale experimental house. The construction has just been started in Tegal in April 2019. We will conduct experiments using the house to confirm the proposed building techniques and determine the proposed energy-saving measures based on the results. Finally, we plan to include our research findings into the existing design guidelines for the apartments.

研究分野：建築・都市環境工学，国際協力学

キーワード：パッシブクーリング 省エネルギー 低炭素技術 蒸暑気候 東南アジア インドネシア 自然換気  
国際研究者交流

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在のインドネシアの人口は約 2 億 5 千万人であるが、さらなる人口増加によって 2035 年までに 3 億人を超えると予測されている。堅調な経済成長 (GDP 増加率: 5-7%) に伴い都市人口の割合はごく近年に 50%を超え、2035 年には 66.6%に達すると予測されている。加えて、一日の支出 (US\$2-20) で定義した中間所得者層の割合を見ると、1990 年に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%まで上昇し、さらに 2030 年までに 100%に達するとの予測すらある (Chun, 2010)。つまり、こうした主要都市を中心に急成長する中間層の住宅をいかに省エネで低炭素にするかが重要なポイントといえる。

(2) 一方、現在のインドネシアが直面する喫緊の課題のひとつは都市部の住宅不足である。Lamudi (2017)によれば、2017 年時点において、全国で 1,140 万戸の住宅不足が生じている。こうした都市部での住宅不足に対し、インドネシア政府はアフォーダブルな中高層集合住宅の建設を国策として強く推進している。しかし、こうした新興の集合住宅では、建設コストの制約が大きく、住棟方位、日射遮蔽や断熱等まったく無考慮な低質な住宅が標準となっている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、平成 29~30 年度にバンドンのインドネシア人間居住研究所 (Puskim) に長期滞在し (合計 1 年間)、先行研究を展開させた共同研究を行った。本研究は、同国の公共事業・住宅省の傘下にある国立研究機関であり、防火・耐震などの建築分野に関わる各種試験を行い、基準を策定する機関である。

(2) 本研究では、Puskim と共同で現地の実験施設を用いた実証研究を行い、インドネシアの中間層向け中高層集合住宅を対象とした省エネルギー基準を共同開発し、その基準を既存の集合住宅設計ガイドラインに盛り込むことを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 研究期間 2 年間の各年度の前半 6 ヶ月 (4~9 月) は日本で研究を行い、後半 6 ヶ月間 (10~3 月) に現地滞在した。平成 29 年度は、パッシブクーリング手法に関する先行研究をさらに展開させ、最終的に既存集合住宅の省エネ改善案を作成した。

(2) 平成 30 年度は、実験ユニットを用いた実証研究等を通じて提案手法を具体化し、最終的に開発したパッシブクーリング技術を総合的に導入した実験住宅を設計し、テガル市において建設を開始した。

## 4. 研究成果

### (1) 自然換気条件下での居住者の窓の開閉パターンと熱的快適性

インドネシアなどの高温多湿気候下では、冷房用エネルギー消費が家庭用エネルギー消費量に大きく寄与する。従って、特にアフォーダブルなクーリング技術を考える場合、自然換気の利用が欠かせない。しかし日中ピーク時の外気温が 33-34°Cに達するような状況下では、通風を得て発汗・蒸発によって涼を取ることで、高温の外気が流入することのトレードオフを検討する必要がある。本研究では、インドネシアのスラバヤに立地する低コスト集合住宅の居住者を対象とした実態調査結果を基に窓の開閉行動パターンとその影響要因を明らかにし、さらに物理環境や熱的快適性との関係を検討した。

本研究では、2016 年 9~10 月に行われた実態調査結果を基にデータ解析を行った。調査では、スラバヤ市内に立地する典型的な低コスト公共集合住宅 (賃貸) から 10 棟を選出し、まず、それらに居住する 315 世帯を対象として窓の開閉行動に関するアンケートを行った。次に、対象世帯から 57 人の回答者を選出し、温冷感等の熱的快適性に関するアンケートを行うと共に、屋内外で温湿度、グローブ温度、風速を計測した。

居住者の日常的な 24 時間の窓の開閉パターンをクラスター分析したところ、4 つのパターンに分類できることが分かった (図 1)。A は日平均の窓開放時間は 7 時間でサンプル全体の 9.6%を占めた。B は平均 11.8 時間で 10.4%を占め、C は 16.1 時間で 27.9%を占め、D は 23.9 時間、57.1%で最頻値となった。これらの窓やドアを開放/閉鎖する理由を聞いたところ、開ける理由で最も多かった回答は、「新鮮空気を取り込む: 90%」であり、「通風: 85%」、「気温低下: 82%」と続いた。閉める理由は、「虫: 50%」、「防犯: 47%」、「プライバシー: 37%」と続いた。特に、就寝前には「虫」が重要視されていた。

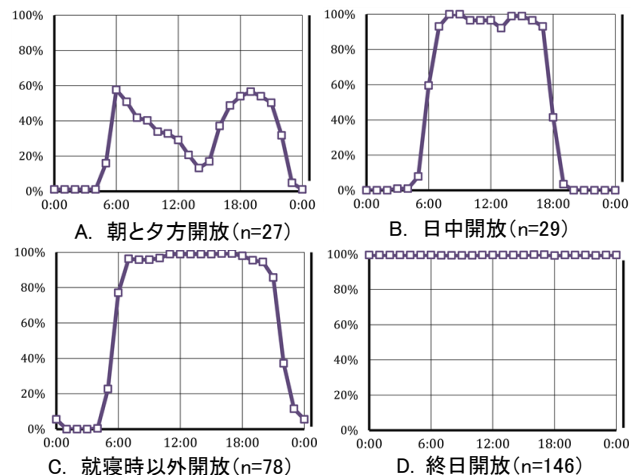


図1 窓の開閉パターン(スラバヤ)

温熱主観申告と物理環境実測データを窓開閉行動パターン別に解析した。その結果、パターンBの温冷感が他のパターンに比べて比較的涼しい側の回答に偏っていることが分かった。このパターンBのサンプルは他のパターンに比べて扇風機の使用時間が長く、これが温冷感の差を生じさせた要因と考えられる。また、この温熱主観申告を申告時の窓の開閉状態別に分類すると、開放時に比べて閉鎖時の方が温冷感の回答が涼しい側に偏ることが分かった。これは涼を得るために窓を開放するものの、実際には涼が得られていないことを示唆している。即ち、ある一定以上の風速が得られない場合、暑い外気が流入するだけで、蒸発冷却の効果が得られていない可能性がある。

## (2) 熱帯気候に適応するグリーンウォールの開発

集合住宅の場合、概して8-9割の熱収支が開口部を含めた外壁面を通じてなされる。従って、集合住宅の省エネ化を図る上で建物外皮の設計が極めて重要といえる。上述のとおり自然換気を前提とすれば、インドネシアのような高温多湿気候下で求められる外皮性能は、日射遮蔽と換気・通風を同時に満たし、さらに気温低下と調湿を可能とするものであろう。こうした性能を有する建物外皮を開発することを最終的な目的として、本研究ではまず、緑のカーテンに着目し、インドネシアのバンドンにおいて実験ユニットを用いた実測を行った。

約3×3×3mの実験ユニット3棟を長期滞在したバンドン市内に建設した(図2)。これら3棟のうちの2棟の窓外側に①緑のカーテンと②木製ブラインドをそれぞれ取り付け、何も取り付けない1棟と比較することで、それらの熱的效果を考察した。実測は、雨季に差し掛かった2018年11月に行った。同期間中の外気温は19.6-32.2°Cで平均値は24.1°Cであり、一方の相対湿度は45.2-98.6%であった。バンドン市内は標高が高く(約760m)、比較的気温が低い。

実測結果は当初の予想と異なり、部屋中央の気温で見ると、緑のカーテンによる冷却効果は得られず、むしろ僅かに(約0.2°C)気温は高かった。また、風速は低下した。従って、部屋中央のSET\*は、何も取り付けないユニットよりも緑のカーテンを取り付けた場合に約1.0°C、木製ブラインドでは約0.3°C高かった。図3のとおり、デバイスの直近では、緑のカーテンの気温低減効果(Unit 1)は何も設置していない場合(Unit 3)に比べて緑の面積密度を増加させた場合(Case 2)に最大1°Cに達しているが、上述のとおり部屋中央には影響を与えていない。日射遮蔽効果は立面投影面積に関係し、緑のカーテン、木製ブラインドともに効果があったが、元々、実験ユニットに等しく取り付けられた庇によって直達日射が遮蔽されていたため、何も取り付けしていない場合(Unit 3)との差が小さかった。即ち、緑のカーテンによる日射遮蔽効果が小さかったうえに、上述のとおり風速減少量が大きく、また、気温低減効果は部屋中央には達しなかったことから、総じて、今回の実験では緑のカーテンによる熱環境改善効果は得られなかった。



図2 実験ユニット(バンドン)

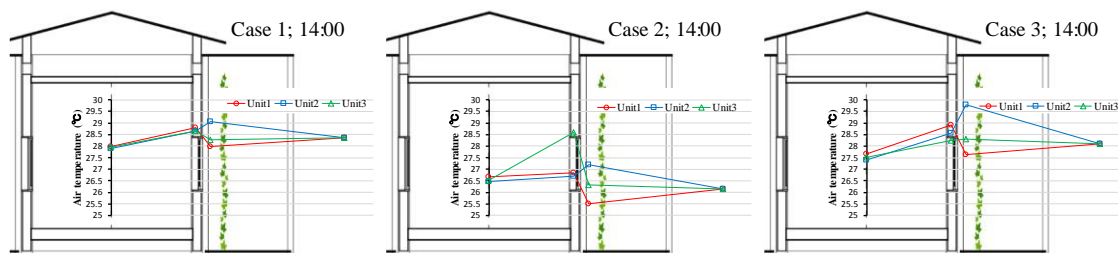


図3 緑のカーテンによる気温低減効果

## (3) 潜熱蓄熱材を用いた床放射冷房システムの開発

窓の開放を前提とした集合住宅のクーリング手法として、次に床放射冷房に着目した。熱帯地域では気温の年較差(1-2°C)は僅かであり、日較差(9-10°C)の方が大きい場合が殆どである。例えば、ジャカルタの夜間の最低気温は24°C程度まで低下するので、これを用いて建物躯体を冷却し、さらに蓄冷すれば、翌日の日中の室内の熱的快適性の向上に寄与できる。本研究では、潜熱蓄熱材(PCM)を用いた床放射冷房システムを提案し、ジャカルタ郊外の実験住宅を用いた初期実験によってその効果を検討した(図4)。

提案システムでは、まず天井ボードを張り(現在のインドネシアの集合住宅には適用されていない)、高さ60cm程度の空間を作る。その上部に位置する上階居室の床スラブの裏面にアルミパックに詰めたPCMを隙間なく貼り付ける。さらに、天井裏空間の屋外側にルーバー窓を設置し、一方の廊下側の流出口に換気扇を設置することによって天井裏を夜間のみ強制換気し、PCM表面付近の風速を高めることで、熱伝達率を高め冷却効果を向上させる。2019年3月より実測を開始し、現在(4月)も実施中である。なお、PCMの設定温度は29°Cとした。実測期間

中の晴天日の屋外気温は約 25-34°Cであった。

実験室内の床表面温度を比較すると、上記の床冷房システムのあるユニットは、何も取り付けていないユニットに比べ日中最大で約 1.6°C低く、外気温が 30°Cを超える晴天日においては十分な冷却効果が得られることが分かった。一層のデータ蓄積が必要であるが、本提案システムは、熱帯における開放系住宅のクーリング手法のひとつとして十分なポテンシャルが見込まれる。

#### (4) ヴォイドによる自然換気促進効果に関する風洞実験

インドネシア主要都市の高層集合住宅の図面を分析したところ、全体の約 9 割の住宅が中廊下型の住戸配置であった。低緯度に位置する熱帯地域の集合住宅は、冬季の日射取得を必要としないため、例えば日本のように片廊下型にし南面配置にする必要はない。結果として、建物方位は考慮されず、床面積を最大限確保する目的から中廊下型の集合住宅が大多数を占める。こうした中廊下型の集合住宅では、基本的に、各居室で 2 面の窓を確保することは難しく、概して自然換気・通風が不足する傾向がある。そこで本研究では、こうした中高層集合住宅に Void を導入することによって、特に風下側の換気・通風を向上させる方法を検討した。

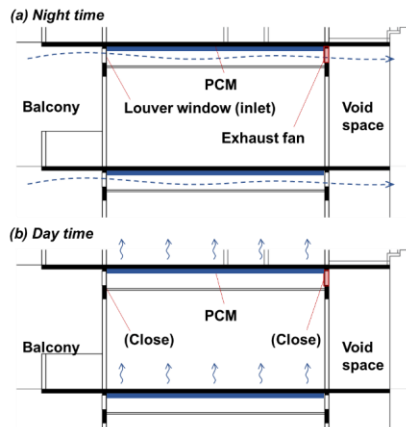


図4 提案する床放射冷房システム

ここでは、風洞実験によって Void の効果を検討した (2018 年 9 月実施)。風洞は新潟工科大学の所有する境界層風洞 (長さ 13m) を用いた。流入風はべき指数 1/4 の鉛直分布に従うと仮定した。実験では 4 つの典型的な集合住宅タイプを対象とした (図 5)。2 階、4 階、6 階を代表階として、住戸中心の風速を計測するとともに、風上側・風下側それぞれの住戸の内壁と外壁における風圧を計測した。また、2 つの住戸列の間に Void を配する Type C では、Void の幅を 1.2m、3m、6m の 3 通りに変化させた。

風洞結果の結果、Type C のような 1.5-3m 程度の幅で上部が閉じた Void の下部に板状の Wind Catcher を取り付けた場合 (図 5 参照)、1 階ピロティを通して流入する風が Void 内に導かれ内部の風圧を増加させた。この効果によって、風下側住戸の Void 側の壁に正の風圧が生じ、風下側にあっても住戸内の通風が促進されることが分かった。この Void による効果は風向が垂直である場合に最大となるが、45-60° 程度まで効果は保たれた。

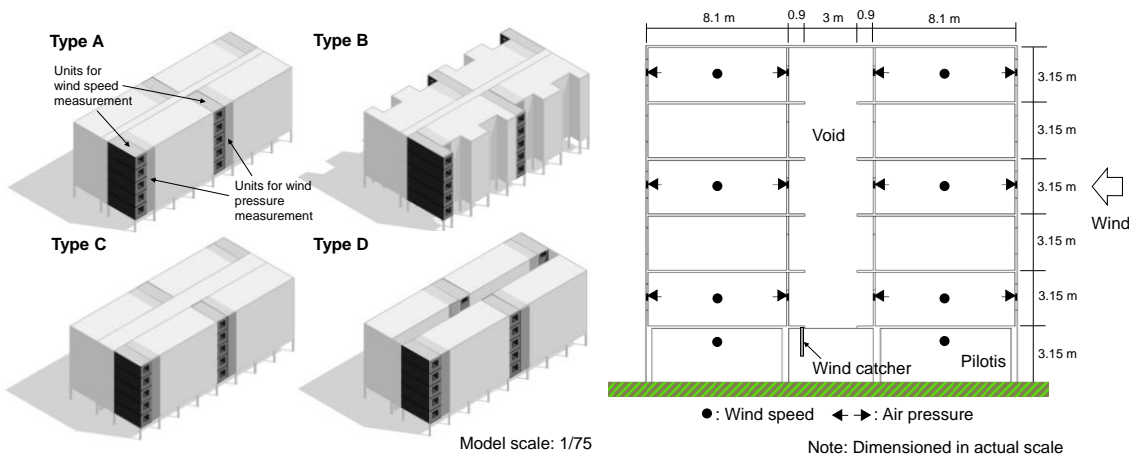


図5 風洞実験に用いた集合住宅モデルと Type C を例とした計測点配置

#### (5) テガル市に建設する実験住宅の概要

以上の研究成果に基づき、現地研究者と共同で実験住宅を設計した (図 6)。敷地は、ジャワ島中央に位置するテガル市 (人口: 約 28 万人) の所有する約 1.4ha の土地である。海岸沿いに位置し、特に乾季には、季節風と相まって、日中、北北東の風が卓越する。ここでは、この卓越風を Wind Catcher を用いて建物中央に配した Void に取り込み、風下側の住戸の通風を確保する。建物全体は通常の階高の 2LDK の住戸 (北側 6 戸) と階高を 6m 程度にしたロフトタイプの住戸 (南側 6 戸) によって構成され、延床面積は約 1,800m<sup>2</sup> である。1 階部分はピロティとなり、Void とは空間的に連続している。各住戸では部分冷房が採用される。寝室にだけエアコンが用いられ、リビングは自然換気だけで熱的快適性を満たすよう設計した。寝室では断熱材を 6 面に取り付けるとともに、開口部の断熱・気密性を高め冷房負荷を減じる。一方のリビングでは、ベランダによって十分な日射遮蔽を行うとともに、上述の床放射冷房システムを導入し、窓を開放した状況下でも採涼できるようデザインした。

この実験住宅は 2019 年 4 月に着工済で、2020 年 1 月に竣工する予定である。今後は、本実験住宅を用いた実証を行い、検討する省エネ基準化方法を精査し、最終的に提案基準を既存の集合住宅設計ガイドラインに盛り込む予定である。

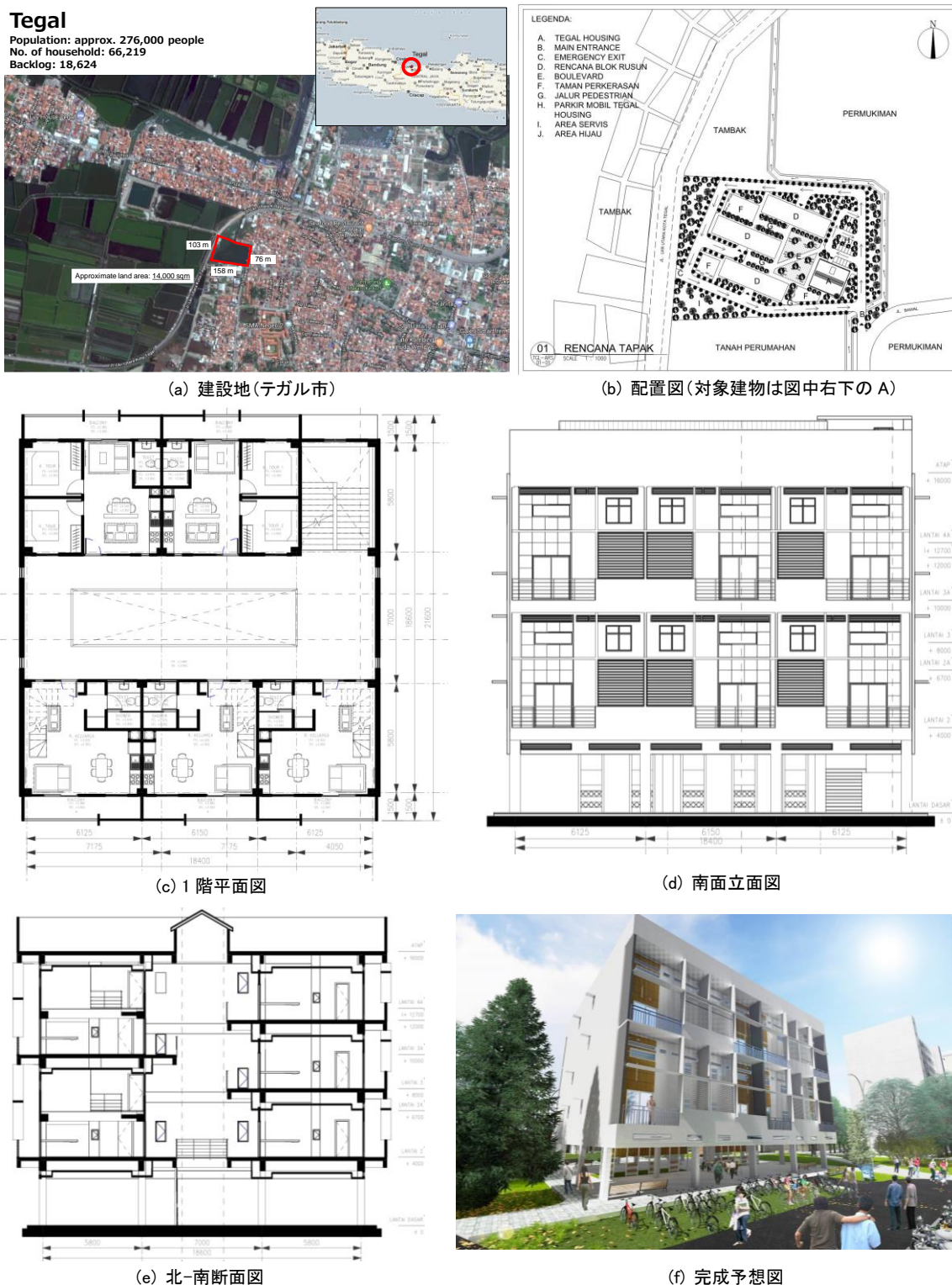


図6 テガル市に建設する低炭素集合住宅の概要 (2020 年 1 月竣工予定)

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

〔雑誌論文〕 (計 8 件)

- ① Hildebrandt S., Kubota T., Sani H.A., Surahman U. Indoor air quality and health in newly constructed apartments in developing countries: A case study of Surabaya, Indonesia, Atmosphere, 査読有, 10(4), 2019, 182. <https://doi.org/10.3390/atmos10040182>
- ② Hosham, A.F., Kubota, T. Effects of building microclimate on the thermal environment of traditional Japanese houses during hot-humid summer, Buildings, 査読有, 9(1), 2019, 22. <https://doi.org/10.3390/buildings9010022>
- ③ Kubota T., Zakaria M.A. Energy-saving modification techniques through passive cooling for urban

- houses in Malaysia, Journal of Japan Solar Energy Society, 査読有, 43(4), 2017, pp. 9-17.
- ④ Trihamdani A.R., Kubota T., Lee H.S., Sumida K., Phuong T.T.T. Impacts of land use changes on urban heat islands in Hanoi, Vietnam: scenario analysis, Procedia Engineering, 査読有, 198, 2017, pp. 525-529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.107>
  - ⑤ Kubota T., Lee H.S., Trihamdani A.R., Phuong T.T.T., Tanaka T., Matsuo K. Impacts of land use changes from the Hanoi Master Plan 2030 on urban islands: Part 1. Cooling effects of proposed green strategies, Sustainable Cities and Society, 査読有, 33, 2017, pp. 295-317. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.001>
  - ⑥ Lee H.S., Trihamdani A.R., Kubota T., Iizuka S., Phuong T.T.T. Impacts of land use changes from the Hanoi Master Plan 2030 on urban islands: Part 2. Influence of global warming, Sustainable Cities and Society, 査読有, 31, 2017, pp. 95-108. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.015>
  - ⑦ Kubota T., Zakaria M.A., Abe S., Toe D.H.C. Thermal functions of internal courtyards of traditional Chinese shophouses in the hot-humid climate of Malaysia, Building and Environment, 査読有, 112, 2017, pp. 115-131. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.005>
  - ⑧ Surahman U., Higashi O., Kubota T. Evaluation of current material stock and future demolition waste for urban residential buildings in Jakarta and Bandung, Indonesia: Embodied energy and CO2 emission analysis, Journal of Material Cycles and Waste Management, 査読有, 19(2), 2017, pp. 657-675. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-015-0460-1>

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① Kumar N., Kubota T., Bardhan R., Tominaga Y. CFD analysis of air flow in voids for better cross ventilation in multistory buildings in hot and humid climates, The 16th International Building Performance Simulation Association, Rome, Italy, 2-4 Sep. 2019. (forthcoming)
- ② Kumar N., Wang Z., Kubota T., Tominaga Y., Bardhan R. Wind tunnel experiments on ventilation effect of void spaces for low-cost apartments in the tropics, The 15th International Conference on Wind Engineering, Beijing, China, 1-6 Sep. 2019. (forthcoming)
- ③ Kubota T., Sani H.A., Hildebrandt S., Surahman U., Paramita B., Ray H.R.D. Indoor air quality and its effects on health in urban houses of Indonesia: a case study of Surabaya, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Hong Kong, China, 10-12 Dec. 2018.
- ④ Putra P.M., Surahman U., Kubota T., Household energy consumption of residential buildings in the tropics: factors affecting cooling energy, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Hong Kong, China, 10-12 Dec. 2018.
- ⑤ Mori H., Kubota T. Daily patterns of occupants' window-opening and air-conditioning usage in hot-humid climates of Southeast Asia, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Hong Kong, China, 10-12 Dec. 2018.
- ⑥ Kubota T., Alfata M.N.F. Low-emission affordable apartments in Indonesia towards Paris Agreement 2030, The 5th International Seminar on Tropical Eco-Settlements, Bali, Indonesia, 14-15 Nov. 2018. (keynote address)
- ⑦ Alfata M.N.F., Kubota T., Wibowo A.S. The effects of veranda space on indoor thermal environments in Dutch colonial buildings in Bandung, Indonesia, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Edinburgh, U.K., 3-5 July. 2017.

〔図書〕（計 1 件）

- ① Kubota T., Rijal, H.B., Takaguchi, H. (Eds.) Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia, 559p, Springer, 2018.

〔産業財産権〕

- 出願状況：該当なし
- 取得状況：該当なし

〔その他〕

ホームページ等

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/tetsu/index.html>

## 6. 研究組織

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：Sabaruddin, A.

所属研究機関名：インドネシア人間居住研究所

部局名：－

職名：所長