

東南アジア蒸暑地の都市住宅における自然通風の利用と窓の在り方

D151422

森 博史

広島大学大学院国際協力研究科博士論文

2021年9月

広島大学大学院国際協力研究科

論文名: 東南アジア蒸暑地の都市住宅における自然通風の利用と窓の在り方
学位の名称: 博士(工学)
学生番号: D151422
氏名: 森 博史

令和3年 7月 26日

審査委員会

委員長・教授

久保田 徹



教授

張 峻屹



教授

西名 大作



准教授

李 漢洙



先進理工系科学研究科 教授

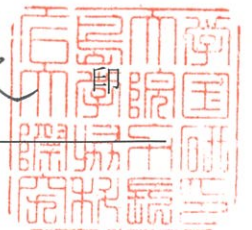
田中 貴宏



令和3年 9月 3日

研究科長

市橋 勝



目次

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 概要 | v |
| 図一覧 | vii |
| 表一覧 | xi |
| 1 背景 | 1 |
| 1.1 気候変動と東南アジア | 1 |
| 1.2 住宅設計における課題..... | 2 |
| 1.3 窓デザインにおける課題..... | 3 |
| 1.4 本研究の目的..... | 3 |
| 2 既往研究 | 7 |
| 2.1 ヒトの暑熱暴露時の体温維持反応..... | 7 |
| 2.1.1 暑熱環境での生理的反応..... | 7 |
| 2.1.2 暑熱馴化..... | 8 |
| 2.1.3 熱帯居住者が獲得している長期暑熱馴化..... | 8 |
| 2.2 東南アジア蒸暑地のパッシブクーリング手法..... | 10 |
| 2.3 環境制御装置としての窓..... | 11 |
| 2.3.1 居住者の窓開閉行動と物理環境要因..... | 11 |
| 2.3.2 居住者の窓開閉行動とその他の要因..... | 11 |
| 2.3.3 東南アジア蒸暑地の窓開閉行動..... | 12 |
| 2.3.4 窓デザインが室内気流分布に与える影響..... | 13 |
| 2.4 章まとめ..... | 14 |
| 3 実験：熱帯居住者の温熱生理特性 | 17 |
| 3.1 実大スケール実験住宅..... | 17 |
| 3.2 実測・調査項目..... | 20 |
| 3.2.1 物理環境項目..... | 20 |
| 3.2.2 人間生理項目..... | 21 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.2.3 アンケート調査項目 | 21 |
| 3.2.4 環境設定および実測手順 | 23 |
| 3.3 被験者 | 24 |
| 3.4 有効サンプル | 24 |
| 3.4.1 実験期間とセッション数 | 24 |
| 3.4.2 馴化期間の影響 | 24 |
| 3.5 結果・考察 | 26 |
| 3.5.1 物理環境項目 | 26 |
| 3.5.2 人間生理項目 | 28 |
| 3.5.3 アンケート調査項目 | 32 |
| 3.5.4 気流に関する考察 | 34 |
| 3.6 章まとめ | 36 |
| 4 調査：窓開閉行動パターンと要因 | 37 |
| 4.1 調査方法 | 37 |
| 4.2 対象住宅 | 38 |
| 4.2.1 調査地 | 38 |
| 4.2.2 インドネシアの賃貸型公営集合住宅 | 39 |
| 4.2.3 インドネシアの分譲型民間集合住宅 | 39 |
| 4.2.4 マレーシアのテラスハウス | 41 |
| 4.3 調査期間とサンプルプロファイル | 42 |
| 4.4 調査項目 | 43 |
| 4.5 居住者適応行動のパターン分析 | 43 |
| 4.5.1 分析方法 | 43 |
| 4.5.2 窓開閉行動 | 44 |
| 4.5.3 冷房使用 | 46 |
| 4.5.4 扇風機使用 | 46 |
| 4.5.5 窓開閉・冷房・扇風機を統合してのパターン分類 | 49 |
| 4.6 要因の考察 | 51 |
| 4.6.1 窓を開けない理由 | 51 |
| 4.6.2 窓を閉める理由 | 53 |
| 4.6.3 窓開閉行動パターンに対する他の変数のオッズ比 | 53 |
| 4.6.4 エアコン台数と設置場所 | 56 |
| 4.7 インドネシアの賃貸型公営集合住宅の実際の温熱環境 | 57 |
| 4.8 章まとめ | 60 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 5 | ケーススタディ：窓デザインによる自然通風利用効果の向上..... | 63 |
| 5.1 | 実験方法..... | 63 |
| 5.1.1 | 実物大実験施設..... | 64 |
| 5.1.2 | 実測項目..... | 64 |
| 5.1.3 | 数値解析方法..... | 66 |
| 5.1.4 | 精度検証..... | 68 |
| 5.2 | 実験ケース..... | 70 |
| 5.3 | 実験結果..... | 71 |
| 5.3.1 | 窓の開閉形式・開き角度が与える影響..... | 71 |
| 5.3.2 | 開口の縦横比が与える影響..... | 77 |
| 5.3.3 | 開時の障子位置・長さが与える影響..... | 89 |
| 5.4 | 空気齢による換気性能評価..... | 92 |
| 5.4.1 | 評価方法..... | 92 |
| 5.4.2 | 窓の開閉形式が与える影響..... | 94 |
| 5.4.3 | 開口の縦横比が与える影響..... | 102 |
| 5.5 | 章まとめ..... | 107 |
| 6 | 全体考察..... | 109 |
| 6.1 | 自然通風によるパッシブクーリングの妥当性..... | 109 |
| 6.2 | 自然通風によるパッシブクーリングと窓デザイン..... | 110 |
| 6.3 | 東南アジア蒸暑地に適した窓の在り方についての展望..... | 110 |
| 6.4 | 本研究の限界と今後の課題..... | 112 |
| 7 | 結論..... | 115 |
| | 参考文献..... | 119 |
| | 謝辞..... | 127 |
| | 付録..... | 129 |
| | 付録1 居住者インタビュー調査（2016年、スラバヤ）調査票 | |
| | 付録2 階層的クラスター解析による居住者適応行動パターンの抽出過程 | |

概要

本研究の目的は、東南アジア蒸暑地の都市住宅における自然通風の利用実態とその有効性を明らかにするとともに、同地域において省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方方向性を考察することである。エアコンによる冷房用エネルギー消費が急増する東南アジア新興国では、自然換気などのパッシブクーリング手法をできる限り導入し、その消費量をエアコン普及段階から抑える必要がある。しかし、従来の窓の研究は主に寒冷地・温暖地を対象に行われてきており、高气密化・高断熱化を志向してきた一方で、窓の開放を前提としたクーリング手法における窓の在り方はこれまでほとんど考察されていない。本研究では、インドネシアとマレーシアの主要都市を対象として、（１）実際の住宅を用いた被験者実験によって、熱帯において気流が熱帯居住者の熱的快適性に与える影響について考察したのち、（２）複数の都市における広域調査結果に基づき、熱帯居住者の窓の開閉行動と冷房や扇風機の使用パターンを明らかにし、（３）インドネシアでの実測データを基に作成した通風解析モデルでのケーススタディによって、窓の開放を前提とした場合の窓デザインの最適化を行った。これらの結果から（４）東南アジア蒸暑地の都市住宅において省エネルギーと熱的快適性を両立させる窓の在り方を考察した。

図一覧

| | | |
|--------|---|----|
| 図 1.1 | 世界人口予測 | 2 |
| 図 1.2 | 本論文の構成 | 6 |
| 図 2.1 | 環境温と熱放散、熱産生、深部体温の関係 | 8 |
| 図 2.2 | Communal house of Dadoq Kenyah in Kalimantan Island | 10 |
| 図 3.1 | 実験住宅の外観と主寝室内観 | 18 |
| 図 3.2 | 実験住宅の平面図と断面図 | 18 |
| 図 3.3 | 物理環境実測プランおよび実測センサー設置の様子 | 20 |
| 図 3.4 | 実測セッションの手順 | 23 |
| 図 3.5 | 屋外の気温・相対湿度 | 27 |
| 図 3.6 | 室内の気温・相対湿度 | 27 |
| 図 3.7 | 屋外と各種寝室の気温・相対湿度の分布 | 27 |
| 図 3.8 | 実測セッション時の室内温熱状況の分布 | 28 |
| 図 3.9 | 人間生理項目の測定結果 | 29 |
| 図 3.10 | 熱的中立時の代謝量と平均皮膚表面温度の関係 | 31 |
| 図 3.11 | 温冷感、湿度感、皮膚の濡れ感、気流感の主観申告結果 | 32 |
| 図 3.12 | 温冷感と温冷感の好み | 33 |
| 図 3.13 | 熱的快適性と温冷感の好み | 33 |
| 図 3.14 | 気流感と気流感の好み | 33 |
| 図 3.15 | 気流速度レベル別の中立温度 | 34 |
| 図 3.16 | 温冷感と気流速度 | 35 |
| 図 4.1 | 調査地の気候 | 38 |
| 図 4.2 | インドネシアの賃貸型公営集合住宅 | 40 |
| 図 4.3 | インドネシアの分譲型民間集合住宅 | 40 |
| 図 4.4 | マレーシアのテラスハウス | 41 |
| 図 4.5 | 各サブグループの1日の窓開閉パターン | 44 |
| 図 4.6 | 各サブグループの1日の冷房使用パターン | 47 |
| 図 4.7 | 各サブグループの1日の扇風機使用パターン | 48 |
| 図 4.8 | 各サブグループの1日の冷房使用・窓開閉・扇風機使用パターン | 50 |
| 図 4.9 | 窓を開けない理由 | 52 |
| 図 4.10 | 窓を閉める理由 | 52 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 図 4.11 | 各サブグループの1日の冷房使用パターン（エアコン所有世帯のみ） | 56 |
| 図 4.12 | エアコン設置場所と所有台数 | 57 |
| 図 4.13 | 外気温と各集合住宅の室内気温 | 59 |
| 図 4.14 | 屋外湿度と各集合住宅の室内湿度 | 59 |
| 図 4.15 | 窓まわりの状況 | 59 |
| 図 5.1 | 実験施設詳細図 | 65 |
| 図 5.2 | Room A 流入側窓 | 65 |
| 図 5.3 | 計測位置と計測項目 | 66 |
| 図 5.4 | ソフトウェア STREAM 解析実行手順 | 67 |
| 図 5.5 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° の場合の気流分布 | 72 |
| 図 5.6 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° の場合の気流分布 | 75 |
| 図 5.7 | 開口面および床上 1.5m の風速分布 | 77 |
| 図 5.8 | 単純開口の場合の気流分布 | 78 |
| 図 5.9 | 外開き、窓開き角度 90° の場合の気流分布 | 80 |
| 図 5.10 | 縦軸回転窓、窓開き角度 90° の場合の気流分布 | 82 |
| 図 5.11 | 横軸回転窓、窓開き角度 90° の場合の気流分布 | 84 |
| 図 5.12 | 突出し窓、窓開き角度 90° の場合の気流分布 | 86 |
| 図 5.13 | 窓開き角度 45° および 90° の場合の開口面および床上高さ 1.5m の平均風速 | 88 |
| 図 5.14 | 横軸回転窓（開き角度 90° ）における縦横比と床上高さ 1.5m 平均風速 | 89 |
| 図 5.15 | 横軸回転窓の障子長さに関する検討項目 | 90 |
| 図 5.16 | 横軸回転窓（開き角度 90° ）の位置別の障子長さと平均速度 | 91 |
| 図 5.17 | 障子長さ 600 mm の横軸回転窓（開き角度 90° ）の位置別の開口部中心軸上風速 | 91 |
| 図 5.18 | 空気の年齢 | 93 |
| 図 5.19 | 空気齢評価のための室内分割方法 | 93 |
| 図 5.20 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の 空気齢分布 | 95 |
| 図 5.21 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° 場合の室内空気齢分布 | 96 |
| 図 5.22 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の 空気齢分布 | 99 |
| 図 5.23 | 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° 場合の室内空気齢分布 | 100 |
| 図 5.24 | 開口縦横比 1 : 4、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の | |

| | | |
|--------|--|-----|
| | 空気齢分布 | 103 |
| 図 5.25 | 開口縦横比 4 : 1、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の 空気齢分布 | 104 |
| 図 5.26 | 開口縦横比 1 : 4、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の 空気齢分布 | 105 |
| 図 5.27 | 開口縦横比 4 : 1、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の 空気齢分布 | 106 |
| 図 6.1 | 自然通風に適した窓デザインの案 | 111 |
| 図 6.2 | 蒸暑地の部分冷房住宅における窓の考え方 | 111 |

表一覧

| | | |
|--------|---|----|
| 表 2.1 | 長期暑熱馴化と短期暑熱馴化..... | 9 |
| 表 3.1 | 調査項目..... | 19 |
| 表 3.2 | 物理環境実測の使用機器..... | 19 |
| 表 3.3 | 物理量の算出方法..... | 21 |
| 表 3.4 | 人間生理実測の使用機器..... | 21 |
| 表 3.5 | 生理量の計算式..... | 21 |
| 表 3.6 | アンケート内容..... | 22 |
| 表 3.7 | 熱的主観申告・好みの尺度..... | 22 |
| 表 3.8 | 被験者概要..... | 25 |
| 表 3.9 | 実験期間とセッション数..... | 25 |
| 表 3.10 | 馴化期間の有無についての t 検定結果..... | 26 |
| 表 3.11 | セッション時の被験者の服装..... | 30 |
| 表 3.12 | セッション直前の被験者の行動..... | 30 |
| 表 4.1 | 回答者プロフィール..... | 42 |
| 表 4.2 | 窓開閉行動パターンにより分類されたサブグループ..... | 45 |
| 表 4.3 | 冷房使用パターンにより分類されたサブグループ..... | 47 |
| 表 4.4 | 扇風機使用パターンにより分類されたサブグループ..... | 48 |
| 表 4.5 | 窓開閉・冷房使用・扇風機使用パターンにより分類されたサブグループ..... | 49 |
| 表 4.6 | 居住者の適応行動の主要パターン..... | 51 |
| 表 4.7 | 分類された窓開閉行動パターンに対する調査変数の調整オッズ比と 95%信頼区 間..... | 55 |
| 表 4.8 | 冷房使用パターンにより分類されたサブグループ (エアコン所有世帯のみ) .. | 56 |
| 表 5.1 | 数値解析計算条件..... | 68 |
| 表 5.2 | 各差分スキームおよび乱流モデルによる解析値と実測値の相関係数と RMSE.. | 69 |
| 表 5.3 | 数値解析検討パラメータ..... | 70 |
| 表 5.4 | 主な窓種の分類と本研究での検討窓種..... | 71 |
| 表 5.5 | 横軸回転窓のガラス面の長さに関する検討項目..... | 90 |

1

背景

1.1 気候変動と東南アジア

欧米や東アジア諸国を中心に発展してきたエネルギー消費型社会は転換期を迎えた。地球温暖化などの気候変動が目に見える問題となり、エネルギー消費型社会から持続可能型社会へどのように転換するかが人類共通の課題と認識されるようになった。二酸化炭素排出量削減へ向けた国際的な協調体制が構築され、2015年採択されたパリ協定を契機に、各国が具体的な目標値を掲げて、さまざまな分野で技術開発と社会実装に取り組んでいる[1]。東南アジア諸国では、インドネシアは2030年までにBAU比GHG排出量を条件なしで29%（条件付きで41%削減）、マレーシアは2030年までに対GDP GHG排出量原単位を条件なしで35%（条件付きで45%削減）、タイは2030年までにBAU比GHG排出量を条件なしで20%（条件付きで25%削減）、ベトナムは2030年までにBAU比GHG排出量を条件なしで8%（条件付きで25%削減）などとされている[2]。

世界の人口分布は、図1.1が示すように、二酸化炭素排出量ランキング上位の中国や欧米諸国の人口は今後減少し、発展途上国が多く含まれるアジアとアフリカの割合が多くを占めるようになることが予測される。東南アジア蒸暑地の国々もその一部であり、人口増加、都市化、経済成長が益々進行すると考えられるため、エネルギー消費量の増大が懸念される。International Energy Agency（IEA）の調査報告[3]によると、東南アジアのエネルギー需要予測において、特に、車などのモビリティと並んで、家庭での冷房使用によるエネルギー消費量の増加が懸念されている。IEAの試算では、東南アジアで主に住宅で使用されるエアコン台数は経済成長に伴って激増し、2018年には約4000万台であったものが2040年までに約3億5000万台になる見通しだ。電気消費量に換算すると、約80TWhから330TWhへ4倍超の増加となり、警鐘が鳴らされている。冷房依存を抑えながらも室内の熱的快適性を確保できる住宅の開発・普及が必要である。

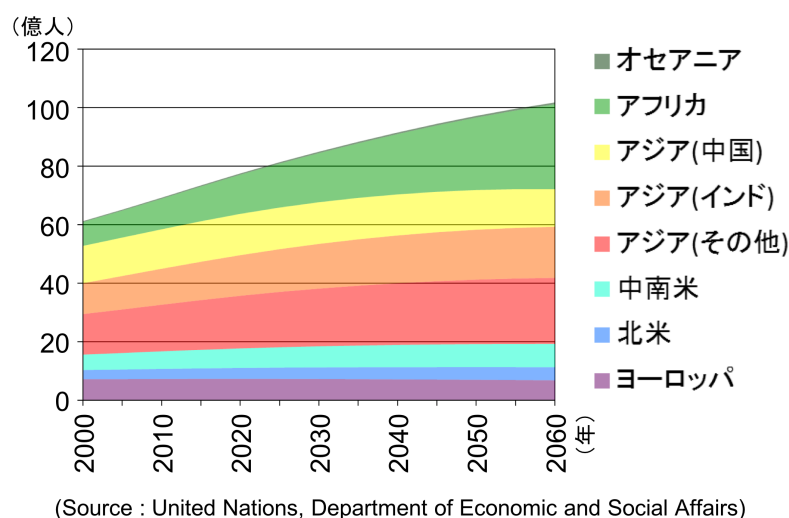


図 1.1 世界人口予測

1.2 住宅設計における課題

パッシブデザインは、建築的手法により、外部環境と適応しながら自然エネルギーを利用・制御し室内環境をつくる設計アプローチ[4]であり、建物の省エネルギーと熱的快適性を両立する考え方である。暑熱環境においてはパッシブクーリング技術が用いられる。日本を例にすると、日射熱の侵入を極力排除したうえで通風を図り、自然エネルギーを使って温度を下げて涼房効果を狙うことが原則とされる。主に、季節変化のある温帯地域で研究されてきたが、東南アジアを対象としたパッシブクーリング手法の研究も近年盛んになっている。日射遮蔽などに加えて、室温が皮膚表面温度近くまで達することも珍しくないこの地域では、自然風を生かす通風や換気の手法が重要だと考えられる。また、年間を通して高温多湿な気候であるため、温帯地域で行なわれている夏季の冷房期間を短縮するアプローチではなく、一日の中での冷房使用量を低減することが求められる。

東南アジア蒸暑地の都市住宅に自然通風・換気によるパッシブクーリング技術を適用しようとする際に、居住者の窓開閉行動の不確かさが一つの課題である。室内の温熱環境は窓の開閉状況によって大きく影響を受けるが、住宅における窓開閉行動は居住者にとって私的な領域であり、手軽に、あるいは無意識的に開閉状況を変化できる。パッシブクーリングの設計意図を居住者が自ずと理解して、適切に窓開閉行動を実施することは困難と思われる。そのため、住宅設計者や住宅を供給する者は、居住者にとって自然な窓開閉行動がどのようなものか理解し、設計意図との間にギャップがあることを想定して、適切な窓開閉方法とそれによる効果を居住者に説明する必要がある

だろう。しかしながら、東南アジア蒸暑地の居住者が、現状どのような窓開閉行動をしているかについては、十分な研究が為されていない。

1.3 窓デザインにおける課題

Bayら(2006)が述べたように、蒸暑地における建物の快適性要件は、温暖地や寒冷地とは大きく異なる[5]。温暖地では日射エネルギーを利用するが、蒸暑地では日射を遮蔽し日陰をつくることが大切である。寒冷地では風を遮ることが必要だが、蒸暑地では通風・換気がより求められる。しかし、従来の窓の研究は主に寒冷地や温暖地を対象に行われてきた。建物内部から外部への熱損失は開口部による割合が大きいため、寒冷地での快適性を確保するために窓の気密性や断熱性などを高める技術開発が重ねられてきた。また、建物の高層化や窓の大型化に伴う耐風圧への要求や、都市化の影響と思われる防犯性や遮音性などへの要求を受けて、採光や眺望の機能を有しつつ建物内外を如何に隔てるかという点に窓研究の軸足は置かれてきた。参考までに日本サッシ協会が定めている窓の性能評価項目を見ると、耐風圧、水密性、気密性、防火性、バリアフリー、防犯性、断熱性、遮音性、防露性、遮熱性の10項目である。日本には高温多湿な夏季があるにも関わらず、10項目中9項目は開口部を「閉じる」技術であり、残りの1項目は通行の利便性に関する技術である。一般に、暖房期間のある地域においては、暖房期間の快適性と省エネルギーを考慮して開口部での熱損失を抑える建物設計が為されるが、夏季において窓を開放することを前提とした設計がなされることは稀であるため、開口部を閉じたまま冷房を使用することが定着してしまっている。

暖房期間のない蒸暑地において、建物の快適性要件として通風・換気が重要であるならば、窓を開放することを前提にした窓の在り方があって不思議ではない。けれども、蒸暑地に適した窓の開き方に関する研究は、これまでほとんど為されていない。

1.4 本研究の目的

住宅での冷房エネルギー消費量の削減が求められる東南アジア蒸暑地において、気候特性を踏まえた当地仕様のパッシブクーリング戦略としての有効策は、他地域で研究開発されてきた日射遮蔽などの技術に加えて、「通風・換気の利用促進」により「1日の中での冷房エネルギー消費量を削減」することであると考えられる。この戦略を成功させるためには、開口部を筆頭に住宅設計へのパッシブクーリング技術の適用と、居住者による適切な窓開閉行動の実施が不可欠である。しかし、高温多湿な環境下での開放を前提とする窓の在り方についてはこれまで研究されていない。そこで、本研究は、東南アジア蒸暑地の都市住宅へのパッシブクーリング技術普及に寄与するため、

当地における自然通風の利用実態とその有効性を明らかにすること、及び、省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性を考察することを目的とする。また、本研究は、近い将来に住宅取得やエアコン購入の中心的存在になると想定される現在の低中所得者層を対象とし、この層へ向けて建設・供給される都市住宅への知見提供を目標としている。本研究の成果は、今後のさらなる研究によって導かれるであろう同住宅のパッシブクーリング戦略や目標設定に対して、基礎的役割を果たすものである。以下に、本研究の論文構成について説明する（図 1.2 参照）。

まず、2章にて、既往研究調査により明確にした本研究で取り扱う具体的な課題について説明する。ここでは3つの観点から既往研究を調査した。第一は、温熱生理学の観点であり、ヒトの暑熱対応反応について熱帯居住者と温帯居住者の間にどのような違いがあるかを確認した。第二は、東南アジア蒸暑地を対象としたパッシブクーリング手法の観点であり、気候特性を踏まえてどのような手法が有効と捉えられているのかを確認した。第三の観点は、居住者の窓開閉行動および窓デザインについてである。クーリング効果に影響する窓に関して、現在までにどのような知見が得られているのかを確認した。これらの結果を踏まえ、3章および4章において、東南アジア蒸暑地の都市住宅における自然通風の利用実態とその有効性を明らかにするために、熱帯居住者の生理的特性と適応行動パターンの2面から検証を行った。さらに、続く5章において、省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性を考察するために、ケーススタディを実施した。

3章では、マレーシアで実施した暑熱発汗についての被験者実験を報告する。現地で一般的な都市住宅を再現した実大実験住宅を使用し、被験者を一定期間住まわせて実験を行った。熱帯居住者を対象に、実際の自然換気モードかつ非定常の住環境において、①気流速度などの物理環境項目、②発汗量や体温などの人間生理項目、③熱的主観申告・好みなどのアンケート調査項目、について測定した。熱帯居住者が発汗蒸発による体温調節に優れていることを実環境に近い状況において確認するとともに、彼らの気流に関する感覚についても分析した。

4章では、インドネシアおよびマレーシアで実施した居住者の窓開閉行動に関する広域調査を報告する。気温の年較差が小さい気候特性を踏まえ、本研究では1日の中での行動パターンに焦点が当てられた。調査票を用いたインタビュー調査で得られたデータをデータマイニング手法にて分析し、窓開閉、冷房使用、扇風機使用について典型的な行動パターンを抽出した。東南アジア蒸暑地の都市居住者の窓開閉行動パターンを明らかにし、その行動には気温以外の要因を受けて多様性があることを明らかにした。また、多重ロジスティック回帰分析による要因の分析を行い、窓開け行動の阻害要因を特定した。加えて、現状の冷房使用状況をもとに過度の冷房使用を防ぐポイントについて考察した。

5章では、自然通風や換気を利用するパッシブクーリング効果を最適化する窓デザインについてのケーススタディを報告する。ここでは、2面開口の単室空間でのクロスベンチレーションを前提として、流入側開口の窓開閉形式、開き角度、開口縦横比を比較検討した。室内気流が居住者の発汗蒸発を効果的に促進するように座位や立位で上半身が位置する高さにおいて、流入風が風速の減衰なく水平に気流分布することを評価基準とした。単純化した自然換気空間モデルとしてインドネ

シアの実験施設を使用し、そこで得られた実測データを基に解析モデルが作成された。通風シミュレーションによるパラメトリックスタディが実施され、自然通風に適した窓デザインの仮説が導かれた。

6章では、本研究で得られた結果を基に、自然通風や換気を利用するパッシブクーリング手法の妥当性について、及び、省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性について考察する。さらに、東南アジア蒸暑地でのパッシブクーリングに必要な「通風・換気の利用促進」による「1日の中での冷房エネルギー消費量を削減」を推進する上での、今後の課題について著者の考えを述べる。

7章に本研究の成果をまとめる。

| | |
|---|--|
| 研究目的 東南アジア蒸暑地の都市住宅へのパッシブクーリング技術普及に寄与するため、当地における自然通風の利用実態とその有効性を明らかにすること、及び、省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性を考察すること。 | |
| 1章 背景 | <ul style="list-style-type: none"> 冷房エネルギー消費量を抑制する都市住宅の必要性 |
| 2章 既往研究 | <ul style="list-style-type: none"> 熱帯居住者の暑熱に対する生理的特性 <ul style="list-style-type: none"> 医学分野で熱帯居住者は発汗等の暑熱対応に違いがあるとされるが、熱快適性への影響は不明 東南アジア蒸暑地におけるパッシブクーリング研究 <ul style="list-style-type: none"> 自然換気や通風によるクーリング効果の報告があるが、最適なパッシブクーリング手法は未確立 東南アジア蒸暑地の都市居住者の窓開閉行動 <ul style="list-style-type: none"> 平均的な窓開閉パターンは日中換気型との報告があるが、詳細不明 窓デザインと室内気流分布 <ul style="list-style-type: none"> 換気性能に優れた開口部の位置関係や大小関係は明らかだが、居住域高さでの通風によるクーリング効果を最大化する窓デザインは不明 |
| 3章 実験： 熱帯居住者の温熱生理特性 | <ul style="list-style-type: none"> ●温熱生理の観点から自然通風によるパッシブクーリングの妥当性を検証 熱帯居住者が気流による発汗蒸発をより効果的にできるか確認 熱帯居住者の熱的主観の確認 |
| 4章 調査： 窓開閉行動パターンと要因 | <ul style="list-style-type: none"> ●適応行動パターンから自然通風によるパッシブクーリングの妥当性を検証 窓開閉、冷房使用、扇風機使用パターンの抽出 行動パターンは一様か多様か 窓開け行動の障害となる要因は何か |
| 5章 ケーススタディ： 窓デザインによる自然通風利用効果の向上 | <ul style="list-style-type: none"> ●自然通風によるパッシブクーリング効果を高める窓デザインの方向性検討 発汗蒸発しやすい床上1.5m付近に風速を減衰させずに風を通す窓 |
| 6章 考察 | <ul style="list-style-type: none"> ●自然通風によるパッシブクーリングの妥当性 ●自然通風によるパッシブクーリング効果を高める窓デザインの方向性 |
| 7章 結論 | <ul style="list-style-type: none"> 本研究の成果 |

図 1.2 本論文の構成

2

既往研究

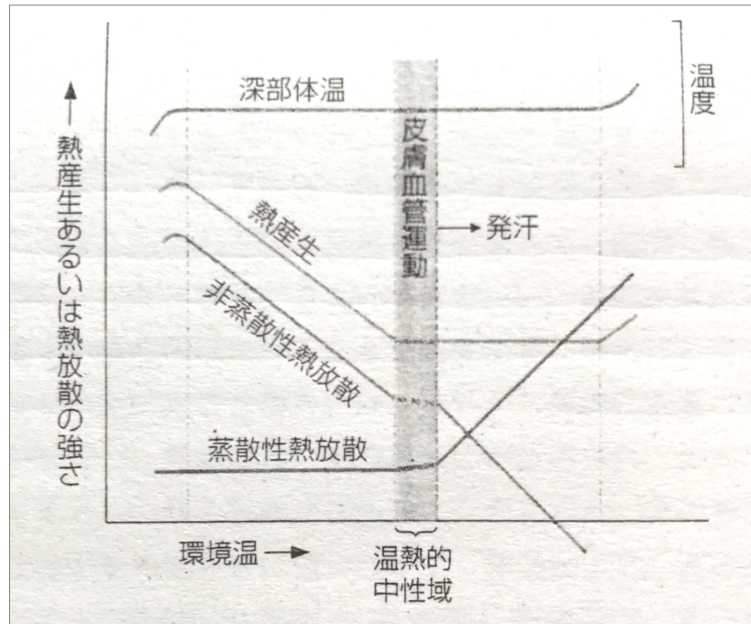
2.1 ヒトの暑熱暴露時の体温維持反応

2.1.1 暑熱環境での生理的反応

熱帯居住者と温帯居住者で、暑熱環境での生理的反応に違いがあることが明らかにされている。本項では、まず共通するヒトの体温維持反応について説明し、次に両者の違いを説明する。

ヒトは、暑熱環境下でも体温を正常に維持するために2種類の方法で熱を周囲へ放散する。1つは、皮膚表面温度と周囲との温度差を利用した非蒸発性熱放散であり、対流・放射・伝導によって体外へ熱を逃がす。もう1つは、皮膚表面で汗が蒸発する際に気化熱が奪われることを利用した蒸発性熱放散である[6]。ただし、ヒトは体温維持と同時に体内の水分量と血中塩分濃度を維持する必要があるため、発汗を伴う蒸発性熱放散よりも非蒸発性熱放散が優先される[7]。

図2.1は、環境温と熱放散、熱産生、深部体温の関係を表したものである[6]。暑くも寒くもない温熱的中性域から徐々に環境温が上昇する場合を例にすると、ヒトが暑さを感じ始める程度の暑熱負荷においては非蒸発性熱放散により深部体温が一定に保たれる。このとき体内では血液分布がコントロールされ、内臓の血流量が減少して体表面近くの血流量が増加することで、皮膚表面温度が高くなり熱放散がしやすくなる[6]。さらに環境温が上昇すると蒸発性熱放散が開始され、ほぼ全身に分布するエクリン腺から発汗が始まる。最初は非蒸散性熱放散の占める割合が多いが、暑熱負荷が高まるにつれて蒸発性熱放散の占める割合が増していく。そして、環境温が皮膚温近くにまで達すると非蒸発性熱放散ができなくなり、約35℃以上の環境では発汗が唯一の体温調節方法となる[6, 8, 9]。



(出典：本間研一『標準生理学』)

図 2.1 環境温と熱放散、熱産生、深部体温の関係

2.1.2 短期暑熱馴化

ヒトの暑熱馴化には、短期馴化と長期馴化の 2 つがある。短期馴化は一過性のものであり、同じ暑熱レベルであっても冬季より夏季の方が過ごしやすい、あるいは、温帯居住者が熱帯地域へ長期滞在していて暑さに慣れる、といった変化がこれに当てはまる。短期馴化が起こると発汗能力が上がり、蒸発しやすい良い汗を多くかくようになる。具体的には、①発汗開始の閾値体温が低下して早いタイミングから汗をかき始める、②汗腺の発汗速度および最大発汗量が増加する、③汗の塩分濃度が高いと皮膚上で蒸発しにくい、塩分濃度の低いサラサラとした汗をかくようになる[6-8]。このような短期馴化による生理的变化は、暑熱環境下で生活することによって約 2 週間で完成する[10]が、暑熱環境から脱すると約 3 週間で消失する[11]。

2.1.3 熱帯居住者が獲得している長期暑熱馴化

長期馴化は短期馴化の延長線上にあるのではなく、成因が異なる。これは熱帯と温帯の気候特性、即ち、暑熱が連続的（常に暑い）か反復的（季節変化を繰り返す）かの違いによるものだと考えられる[7]。長期馴化は、生後 2 年半ほどを暑熱環境下で過ごすことにより獲得される[9]ため、熱帯地域の人種であっても温帯や寒帯で幼少期を過ごした場合には獲得されない。

長期馴化は発汗能力も高めるが、短期馴化との根本的な違いは、体内の水分や塩分の損失を最小限に済ませるために発汗以外の体温調節能力を高めている点だと言える[7]。熱帯居住者は、温帯居住者に比べて基礎代謝量が低く、排熱しなければならぬ熱量がそもそも少ない。痩せ型で手足が長い体型は、体積あたりの体表面積を大きくしている[12]。末梢部の血流量が多く、皮膚表面温度が高めである[13]。これらの特徴により、皮膚表面から周囲への温度差を利用した熱放散が効果的に行われる。そして、発汗開始の閾値体温が高い[14]ため、温帯居住者ならば短期馴化を得て大量の汗をかき始めているような場面でも、熱帯居住者は汗が出ず涼しげに見えるというようなことが起こる。

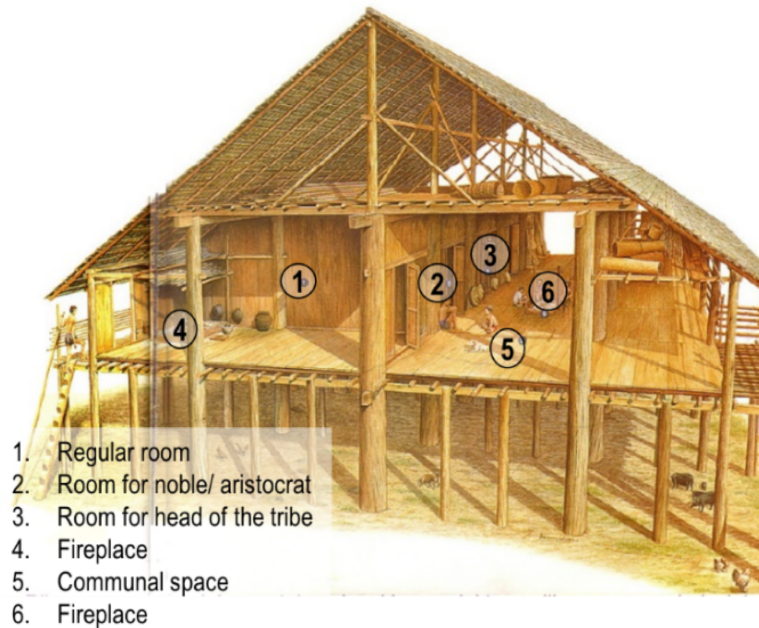
より厳しい暑熱環境下では、長期馴化による発汗能力の効率化が見られる。能動汗腺の密度が高く、分布も体幹に少なく四肢に多くなっている[15]。塩分濃度の低い汗[16]は体表面に薄く広がりやすく、また、皮膚表面温度が高いため蒸発が速やかに起こる。このことは、汗が蒸発できずに水滴のまま皮膚にとどまり汗腺に蓋をしてしまったり、滴り落ちてしまったりという無効発汗を防ぐ[17]。さらに、強烈な暑さに対する最大発汗能力も高い。表 2.1 に、長期馴化者の生理的特性をまとめる。

表 2.1 長期暑熱馴化と短期暑熱馴化

| 体温調節方法 | 長期暑熱馴化 | 短期暑熱馴化 |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 非蒸発性熱放散 (皮膚から熱放散) | 基礎代謝が低い | — |
| | 痩せ型体型、手足が長い | — |
| | 末梢部の血流量が多い | — |
| | 皮膚表面温度が高い | — |
| | 発汗開始閾値体温が高い (より高温まで発汗しないで良い) | — |
| 蒸発性熱放散 (発汗蒸発) | — | 発汗開始閾値体温が低い (より低温から発汗開始) |
| | 能動汗腺の密度が高い | — |
| | 汗腺が体幹より四肢に多く分布 | — |
| | 汗中塩分濃度が低い | 汗中塩分濃度が低い |
| | 発汗速度が速い | 発汗速度が速い |
| | — | 発汗量が多い |
| | 最大発汗量が多い | — |

2.2 東南アジア蒸暑地のパッシブクーリング手法

東南アジア蒸暑地の伝統的な住宅建築の例を図 23 に示す。インドネシアのカリマンタン島に見られる伝統建築である。この例のみに限らず、この地域の様々な伝統住宅は木や竹で造られたものが多かった。大屋根、高床などの特徴が共通して見られ、居室に壁は少なく、深い軒下の日陰を通過した涼しい自然風を室内に通す工夫が見られた。



(Source : Tjahjono G., Indonesian Heritage: Architecture)

図 2.2 Communal house of Dadoq Kenyah in Kalimantan Island

一方、木造からレンガ造が主流となって以降の伝統的建築においても、自然風を利用したクーリングの工夫が報告されている。Toe ら (2015) が実測したマレーシアのショップハウス型住宅では、その特徴である中庭の存在が夜間に冷気を蓄え、夜間換気効果を高めていることが示された [18]。また、Alfata ら (2016) が実測したインドネシアのコロニアル様式の建物は、外壁や内壁に穿たれた換気口を介する自然換気がクーリング効果をもたらしていることが明らかにされた [19]。

現代の一般的な都市住宅においても、夜間換気による躯体冷却が、高温多湿気候でも高熱量の建物において効果的であることが明らかにされている [20-23]。夜間換気は、換気を使用して夜間に建物の躯体を冷却することによって機能するが、その効果は建物の熱容量に依存する。この戦略は、外気温が高すぎる日中は窓を閉め、外気温が低い夜間に窓を開けるという 2 つのプロセスによって行われる。夜間換気は、気温の日較差が大きく、夜間の気温が快適ゾーンより低い地域で効果的である。久保田ら (2009) はマレーシアのジョホールバルにおいて夜間換気の効果について実測を行

い、高温多湿なこの地域においても夜間換気は排熱と躯体冷却によって日中の熱的快適性を向上させる効果があることを明らかにした[20]。

2.3 環境制御装置としての窓

2.3.1 居住者の窓開閉行動と物理環境要因

自然風を利用するパッシブクーリング手法は、実際には個々の居住者による窓開閉操作に依存するため、パッシブクーリングを前提に設計された建物であっても居住者が適切に開閉操作を行わなければ効果は得られない。そのため、居住者の窓開閉行動に影響を与える可能性のある要因を特定することが重要である。多くの研究者は、窓開閉行動が、複雑な方法で相互作用するさまざまな要因の影響を受けると主張してきた。例えば、Fabi ら (2012) は、考えられる要因が物理的、文脈的、心理的、生理学的、社会的要因に分類されると結論付けた[24]。しかし、これまでの研究の多くは、居住者の窓開閉行動への主要な影響要因として気温や二酸化炭素濃度などの物理的な環境変数のみが考慮されてきた。

Yao ら (2017) や、Stazi ら (2017) など多くの研究結果から、物理的要因の中で、屋外と室内の気温は、一般的に窓開閉行動に最も影響を与える要因だと言える[25-28]。さらに、Barthelmes ら (2017) の研究では、室内の二酸化炭素濃度が重要な要因として特定された[29-30]。Rijal ら (2007) はイギリスでの調査を元に、居住者の窓開け行動が最も多いのは夏で、最も少ないのは冬であると報告した。居住者は、室内と屋外の気温が高いときに窓を開ける傾向があり、気温が低いときに窓を閉める傾向があると結論付けられた。彼らは日本の岐阜県と関東地方でも調査を行い、自然換気型建築で窓が開けられる確率は平均気温の変化に伴い、夏に向かって徐々に増加し、夏以降は減少することを明らかにした。ロジスティック回帰分析の結果、彼らは、窓開閉行動が室内または屋外の気温に基づいて予測可能であることを示した[31-34]。

2.3.2 居住者の窓開閉行動とその他の要因

Fabi らが主張したように、様々なパラメータが居住者の窓開閉行動に影響を与える可能性がある。Cali ら (2016) は、ドイツ南部の集合住宅で 4 年間に渡り、室内の温熱環境と窓開閉の変化を観察した。ロジスティック回帰分析の結果は、窓開け行動に影響を与える要因は時刻と二酸化炭素濃度であり、窓閉め行動に影響を与える要因は 1 日の平均外気温と時刻であった[35]。適応行動の要因に関する既往研究をレビューした Stazis ら (2017) は、住宅の窓開閉行動は室内と屋外の気温

と二酸化炭素濃度の影響を受け、主に居住者の室内活動に関係していると指摘した[36]。Andersen ら (2009) は、デンマークでの住宅調査から、一部の居住者が気温に関係なく毎日 10 分間窓を開けたことを報告した。この事実は、窓開閉行動に影響を与える要因は熱的条件だけでなく、文化的要因や日常生活などの他の要因もあり得ることを意味した[37]。Brager ら (1998) は、空調された建物と自然換気された建物の中で、居住者の熱的快適性の応答に違いがあることを発見した。これは、建物の状況の違いが、熱環境に関する居住者の期待に大きく影響するためだ[38]。

Schweiker ら (2020) の調査[39]によると、文脈的要因には、時刻または帰宅／出発[29, 40-45]、直前の開閉状態[40]、地理的位置[46-47]、換気形式[40 47-48]、建物外皮の特性と採用システム[45, 49]、ファサードの方角[50]、ドレスコード[51]、季節や雲量および社会経済的地位[52]、占有率[53]が含まれた。特に、住宅では、窓開閉の習慣は時間に依存するのではなく、活動に依存すると考察された[27]。他方、Jeong ら (2016) は、居住者の窓開閉行動は、睡眠、料理、掃除などの活動のために時間に依存することを確認した[54]。さらに、Shi ら (2019) は、同じ環境条件下であっても住居が異なれば窓開閉行動も異なると主張した[55]。この住居レベルの多様性は、個人や世帯の属性に起因する可能性がある。ただし、個人や世帯の属性が住宅での窓開閉行動に及ぼす影響についての分析は、まだほとんど研究されていない。

2.3.3 東南アジア蒸暑地の窓開閉行動

近年、居住者の行動に関するいくつかのレビュー論文が発表されている[24, 36, 39, 56-60]が、熱帯地域では居住者行動に関する研究がほとんどされていないことが指摘されている。例えば、Schweiker ら (2020) は、すべての調査は暖房と冷房の季節が識別可能な地域で行われており、熱帯および亜熱帯では調査が行われていなかったと報告した[39]。また、Du ら (2020) は、これまでの研究はほとんどの気候帯をカバーしているものの、高温多湿帯については限られたデータしか利用できないと結論付けた[60]。

東南アジア蒸暑地の多くの都市では、降水量と風の状況を除いて、気温など温熱条件の季節変化はほとんど見られない。例えば、インドネシアのジャカルタでは月平均気温が 2°C以内の変動に収まる。そのため、この地域の居住者の窓開閉行動は、年間を通して均一である可能性がある。言い換えると、(1) 時刻や住居タイプなどの文脈的要因、(2) 個人／世帯属性などの社会的要因、(3) 個人的嗜好などの心理的要因、など温熱条件以外の変数が、この地域ではより窓開閉行動に影響する可能性がある。

久保田ら (2009) は、マレーシアでの調査を通じて、居住者の 80%近くが通常、日中の午前 10 時から午後 6 時まで窓を開けたが、夜に窓を開けたのは 10%に過ぎないことを報告した[20]。Arethusa ら (2014) による研究結果でも同様に、インドネシアの集合住宅では、居住者の 80~90%が日中 (午前 6 時から午後 7 時まで) 窓を開け、30~50%が夜間 (午後 7 時から翌午前 6 時まで)

に窓を閉めることが報告された[61]。冷房使用に関しては、宇野ら（2003）の研究において、インドネシアのほとんどの居住者が、夜間は午後9時から翌午前6時まで、日中は午後1時から3時まで使用すると回答した[62]。Ekasiwiら（2013）による研究結果は、インドネシアとマレーシアの一部の居住者は、冷房使用中であっても同時に窓を開けていることを示した[63]。

東南アジア蒸暑地で実施されたこれらの研究は、居住者の行動の現在の平均的な状態を明らかにしている。居住者は、概ね日中に窓を開放して夜間は窓を閉めている。ただし、この1日間の窓開閉行動パターンが温熱条件を要因とし、それ故に居住者間で一様なものなのか、あるいは、個人や世帯の属性など他の要因によって居住者間で多様性のあるものなのかは、明らかにされていない。

2.3.4 窓デザインが室内気流分布へ与える影響

開口部性状と通風性能や室内気流との関係に関する研究は、様々な条件や方法により行われている。Karavaら（2011）は、開口部の大きさや位置関係が室内の気流分布に与える影響について風洞実験を行った[64]。結果から、2つの開口部が対面する壁に設けられ、開口位置が高所または中間高さであり、開口面積が流入側より流出側で大きいケースにおいて、室内風速がより強くなることが明らかにされた。Heiselbergら（2001）は、実験室内に屋内外空間を再現し、屋内外の温度差条件をいくつか設定して、窓の開閉形式が室内気流分布に与える影響を調べた[65]。結果は、温度差が小さい夏季には外倒し窓よりも外開き窓が有効であることを示した。Gaoら（2011）は、香港の典型的な住宅ユニットを対象に、CFD解析によって開口部に関する様々な条件を変化させたパラメトリックスタディを実施し、平均空気齢によって自然換気性能を評価した[66]。この研究ではドアの位置、複数の部屋を持つ住宅ユニット、建物の方角などの実際の住宅設計時に直面する具体性を考慮している点で特徴的だ。ただし、窓の開閉形式は現地に一般的な外開き窓に限定された。結果は、自然換気性能に最も影響を与えるのは各部屋に対する窓の位置であり、次に建物の方角、ドアの位置の順であった。樋山ら（2005）は、風洞実験とCFD解析によって、大型開口を持つ単室空間における自然通風条件下での開口条件と換気性能との関係を分析した[67]。2つの開口部が中心軸上に位置する場合、風下側開口面積が風上側開口より小さい条件では、風下側開口面積が大きいほど通風量が多くなるが、風下側開口面積が風上側開口より大きい条件では、風下側開口面積に関係なく通風量がほぼ一定となることが明らかになった。Yinら（2010）によって中国の建物を対象に行われた数値解析では、対面する壁の開口部は、どちらも中間の高さに配置することで高い換気性能・通風性能が得られることが示されている[68]。

このように、開口部の数や位置など住宅全体の設計に関わる要素を中心に、開口部性状と換気量の関係については住宅設計に寄与する具体的な知見が得られている。しかし、窓単体のデザイン

に関しては、換気性能の研究はいくつか行われているが[69-71]が、熱帯地域での研究は少なく、気流によるクーリング効果に与える影響については不明である。

小川によると、ヒトの温熱性発汗においては、額、頸部、前胸部、背部、腰部などの上半身の発汗量が多い[8]。従って、自然風を利用して居住者の発汗蒸発を促すためには、屋外風を室内の特に上半身の高さ域へ呼び込むことが有効だと考えられる。例えば、アメリカ暖房冷凍空調学会 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE) が示す ASHRAE Standard 55 では、腹部の高さと頭部の高さを椅座位時でそれぞれ0.6 m と 1.1 m、立位時で 1.1 m と 1.7 m と定めており[72]、一般に、床上0.6~1.7 mの範囲を居住レベルとして熱的快適性の評価を行うことが多い。つまり、自然通風によるパッシブクーリング効果を高めるためには、室内の気流分布を鉛直方向にコントロールする視点が重要であり、室内の一定高さに水平方向に風を通すことのできる開口部性状を明らかにすることが有益であると考えられる。

2.4 章まとめ

本研究を進めるにあたり、3つの観点から既往研究を調査した。以下に結果をまとめる。

- 温熱生理学分野での研究により、ヒトが暑熱環境下で汗をかくなどする生理的反応は、温帯居住者と熱帯居住者の間に差があることが明らかにされていた。一般に熱帯居住者は長期暑熱馴化を獲得しており、体内の水分や塩分を排出する蒸発性熱放散がより効率的に行われるような特性がある。熱帯居住者はより高温な環境まで発汗せずに排熱でき、発汗開始後もより少ない発汗量で排熱でき、さらに最大発汗能力も高い。しかし、主に温帯地域で研究・開発されてきた熱的快適性の評価方法では、このような熱帯居住者の生理的特性が正確に反映されていない。また、温熱生理の被験者実験は人工気候室で実施されたものがほとんどであるため、実際の住環境を想定した気流のある条件下で熱帯居住者を対象に被験者実験を行い、その生理的特性を確認する必要があるものと考えられる。
- 東南アジア蒸暑地を対象としたパッシブクーリング研究は近年活発化しており、熱容量の小さい伝統建築における自然通風や換気効果の検証が為されていた。一方、現代の熱容量の大きい建物においても自然通風や換気の有効性が報告されていた。また、一年中高温多湿な気候であるため、年間における自然換気モード期間の拡大という視点ではなく、昼夜の外気温較差を利用するクーリング効果に焦点が当てられていた。しかしながら、都市住宅のクーリング手法の最適解は定まっておらず、さらなる研究が求められている。

- クーリング効果に影響を与える居住者の窓開閉行動に関して、温帯地域ではその要因について多くの研究がされてきた。気温などの物理的要因が主に焦点とされ、季節変化での平均気温上昇に伴い窓を開ける確率が高まることなどが明らかにされていた。その一方で、窓開閉行動には文脈的・心理的など多面的な要因が複雑に影響していることも指摘されており、同様な気候条件下でも住居間で窓開閉行動が異なることが報告されていた。東南アジア蒸暑地においては、一日の窓開閉行動パターンについて平均的に日中に窓が開放されていると報告されていたが、その詳細や要因については明らかにされていなかった。また、窓デザインと室内気流分布に関しては、主に換気量について研究されてきた。しかし、自然通風によるパッシブクーリング効果を高める目的において、窓の位置や形状等については解明されていなかった。

以上を踏まえ、本研究では、東南アジア蒸暑地の都市住宅における自然通風の利用実態とその有効性を明らかにするために、熱帯居住者の生理的特性と適応行動パターンの2面から検証することとし、3章および4章にその内容を報告する。その後、省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性を考察するためにケーススタディを実施した。5章にその内容を報告する。

3

実験：熱帯居住者の温熱生理特性

マレーシアの実大スケール実験住宅で暑熱発汗についての被験者実験を行った。本章では、まず、実験方法について記す。次に、物理環境項目と人体生理項目の結果から、発汗量などに違いがあるとされる長期暑熱馴化者の特性を確認する。さらに、アンケート項目結果から、熱帯居住者の温熱感覚について分析する。

3.1 実大スケール実験住宅

熱帯居住者と温帯居住者を比較した暑熱発汗に関するこれまでの研究において、熱帯居住者はより少ない発汗量やより高い皮膚表面温度を示し、少ない水分損失量で効率的に体温調節を行っていることが明らかにされた。それらは人工気候室内での被験者実験によるものであり、気流がほぼない条件で暑熱負荷を受けることによる、体内での血流量の変化やエクリン腺の発汗活動などの生理的応答を調べるものであった[73-76]。そのため、東南アジア蒸暑地の実際の住環境において、熱帯居住者に対して室内気流による直接蒸発冷房が有効であるかどうかは不確実である。従って、本研究では、当地域の自然換気型住宅において被験者実験を実施し、その有効性の検証を行った。

実験には、マレーシア工科大学（UTM）キャンパス内に建設された実大スケール実験住宅が用いられた。この住宅は、マレーシアで広く普及している都市住宅であるテラスハウスを再現するために、現地のデベロッパーを訪問するなどして収集した 219 件の図面に基づいて設計された。外観・敷地面積・部屋の配置等の観点からプランが分類され、標準的なテラスハウスを模して建設された。そのため、この実験住宅は既存都市住宅をよく代表しているものといえる（図 3.1～図 3.2）。各ユニットの面積は 127 m²で、構造はRCのフレームにレンガ壁を用いている。境界壁の厚さは 225 mm で、その他の壁は 150 mm である。通常のテラスハウスは左右方向に数十戸が連続した長屋形状の建物であるが、この実験住宅はそのうちの 2 住戸を再現しており、隣家が接しているはずの左右の側壁には外断熱が施された。各主寝室外壁・小屋裏・階段ホール上部には排気ファンが設置さ

れている。主窓の上下および内壁の一部にはスリット窓が取り付けられている。リビングルーム、キッチン、各主寝室には天井扇が取り付けられており、1～5段階で回転速度を変えることができる。



図 3.1 実験住宅の外観と主寝室内観

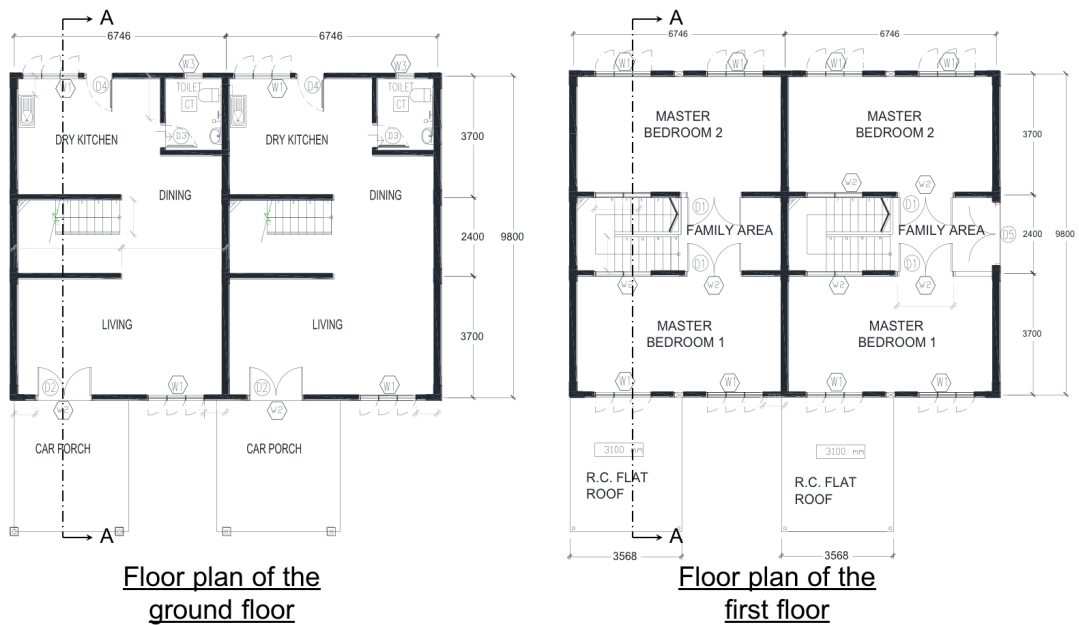
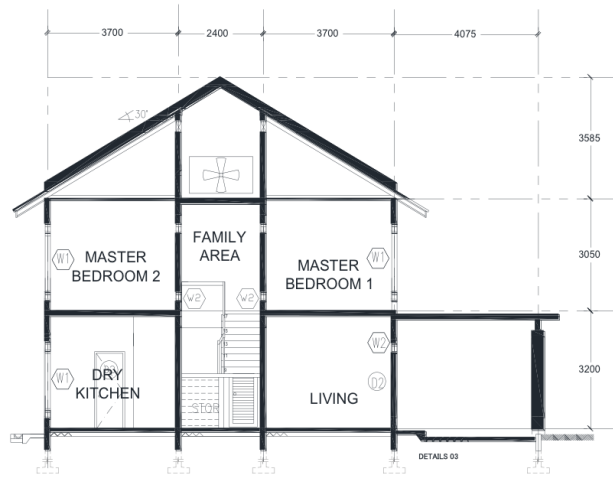


図 3.2 実験住宅の平面図と断面図



Cross-section of the house (A-A)

図 3.2 実験住宅の平面図と断面図 (続き)

表 3.1 調査項目

| 実測項目 | 内容 | 方法 |
|---------|-------------------------------|----------------------------|
| 物理環境 | 気温、相対湿度、グローブ温度、風速、表面温度、屋外気象 | 熱電対、おんどとり、Weather station |
| 物理環境 | 深部体温、皮膚表面温度、発汗量、血圧、心拍数、Clo値 | 精密体重計、コア温度計、血圧計、皮膚表面温度センサー |
| 熱的主観・好み | 温冷感、熱的快適感、皮膚発汗感、湿度感、気流感、気流快適感 | アンケート票 |

表 3.2 物理環境実測の使用機器

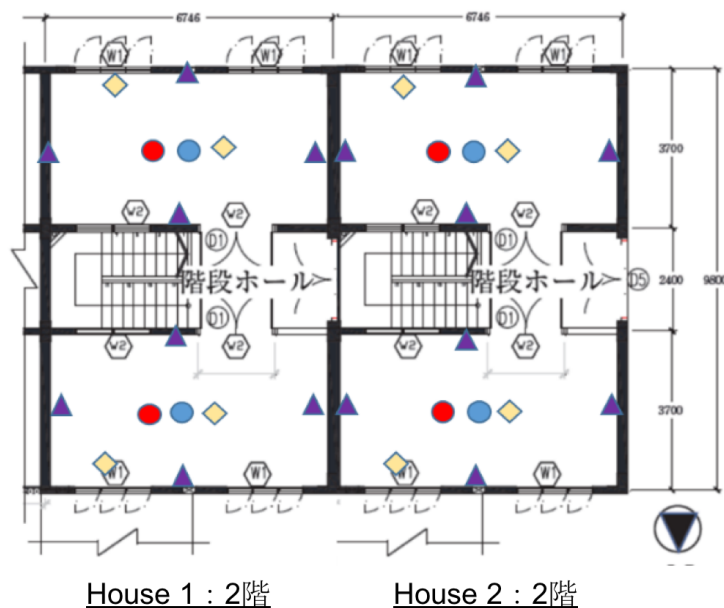
| 実測内容 | 使用機器 | 備考 |
|------------------------------|---|-----------------------|
| 気温 相対湿度 グローブ温度 表面温度 | T&D TR-72U T&D TR-72WF T&D TR-73U T&D TR-52 Type T thermocouple Graphtec GL820 | グローブ温度はピンポン球を黒塗りし代用した |
| 風速 | Kanomax 0965-03 | |
| 屋外気象 | Delta OHM Weather Station | |

3.2 実測・調査項目

調査項目は、表 3.1 に示す通り、屋内外の物理環境、人間生理、熱的主観申告・好みの 3 項目から成る。

3.2.1 物理環境項目

図 3.3 に実験住宅の屋内物理環境実測プランを示す。主寝室中央に気温・湿度センサーとグローブ温度計（床上 1.1 m）、垂直分布温度計（床上 0.1m、0.6m、1.1m、1.7m、2.3m、2.9m）を、主寝室中央と窓付近の 2ヶ所に風速センサーを、東西南北の壁面と床面の 5ヶ所に壁表面温度計を設置した。図 3.3 の他に、1 階リビング中央にも温度・湿度センサーを設置した。屋外気象は、気温・相対湿度・風速・風向・気圧等を実測した。測定間隔はすべて 1 分間隔とした。使用機器を表 3.2 に、本研究で使用した物理量の算出方法を表 3.3 に記す。



- 気温・相対湿度・グローブ温度
- 垂直分布温度 (0.1m, 0.6m, 1.1m, 1.7m, 2.3m, 2.9m)
- ◆ 室内風速
- ▲ 表面温度 (Floor, N, S, E, W)



図 3.3 物理環境実測プランおよび実測センサー設置の様子

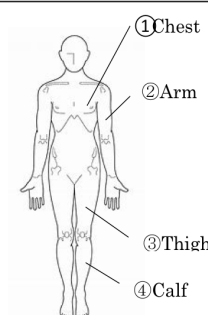
表 3.3 物理量の算出方法

| 物理量 | 算出方法 |
|--------|--|
| 作用温度 | 作用温度OT = GLOBE温度として計算 |
| 平均放射温度 | 平均放射温度 MRT = $\theta_g + 2.35v_v(\theta_g - \theta)$ (θ_g =GLOBE温度、 v = 風速) |

表 3.4 人間生理実測の使用機器

| 実測内容 | 使用機器 | 備考 |
|----------|------------------------|----------------------------------|
| 深部体温 | OMRON コア温度計 | 耳内温を測定 |
| 皮膚表面温度 | 皮膚温センサー (Thermocouple) | |
| 血圧・心拍数 | OMRON 血圧計 | 耳内温を測定 |
| 発汗量・Clo値 | 精密体重計 (1g精度) | 発汗量は体重減少量から算出 Clo値は衣服の総重量から算出 |

表 3.5 生理量の計算式

| 生理量 | 算出方法 |
|-------|---|
| 平均皮膚温 | <p>“Ramanathanの4点法”</p> <p>平均皮膚温 Tsk $= ① \times 0.3$ $+ ② \times 0.3$ $+ ③ \times 0.2$ $+ ④ \times 0.2$</p>  |
| 発汗量 | <p>有効発汗量 = 着衣状態での体重差(g) / 時間(min) 無効発汗量 = 衣服のみの総重量差 / 時間(min) 総発汗量 = 裸体での体重差(g) / 時間(min)</p> |
| 血圧 | <p>2回測定した平均値を採用 平均血 = (最高血圧 - 最低血圧) + 最低血圧</p> |
| Clo値 | <p>花田ら (1981、1983、1985) の三式にて算出 組合せ衣服のClo値 $Y = 0.00161 W + 0.043$ 重ね着 (女性用衣類) のClo値 $Y = 0.00103 W - 0.0253$ 重ね着 (男性用衣類) のClo値 $Y = 0.000558 W + 0.068$ (W : 衣服重量の総和 [g])</p> |

3.22 人間生理項目

人間生理項目として、深部体温、皮膚表面温度、発汗量、血圧、心拍数、Clo 値を測定した。深部体温、皮膚表面温度、血圧、心拍数は被験者本人が測定をしたものを記録した。発汗量は体重測定方にて算出し、Clo 値は花田らによる計算式[77-79]を用いて求めた。使用機器を表 3.4 に、生理量の計算式を表 3.5 に記す。

3.23 アンケート調査項目

被験者にアンケートを回答してもらうことで熱的主観申告・好みを調査した。アンケートは 2 種類あり、被験者に 1 度のみ答えてもらう基本情報アンケートと、毎回の実験セッションで回答してもらうメインアンケートとがある。基本情報アンケートでは、被験者の温熱環境に対する意識や特徴を調査するため、被験者の出生時・3 歳児まで・現在の 3 つの期間について居住地や住宅の環境などについて尋ねている。メインアンケートでは実測時の熱的主観を主に尋ねている。活動量・着衣量・熱的主観申告の尺度は ASHRAE に基づき作成された。表 3.6 にアンケート内容、表 3.7 に熱的主観申告・好みの尺度を示す。

表 3.6 アンケート内容

| アンケート票 | 実施 | 質問内容 |
|----------|--------|--|
| 基本アンケート | 1人1回 | 基本情報（身長・年齢・国籍等）、出身地、住宅形状、住宅内の温熱環境（出生時・3歳まで・現在）、適応行動・熱的好み |
| メインアンケート | セッション毎 | セッション日時、活動量（代謝量）、飲食物、着衣量、体重（実測の前後）、適応行動、熱的主観申告・好み |

表 3.7 熱的主観申告・好みの尺度

| 温冷感 | 湿度感 | 皮膚の濡れ感 | 気流感 | 熱的快適感 |
|--|--|--|--|--|
| 3. 暑い 2. 暖かい 1. やや暖かい 0. 中立 -1. やや涼しい -2. 涼しい -3. 寒い | 3. 非常に湿っている 2. 湿っている 1. やや湿っている 0. 中立 -1. やや乾いている -2. 乾いている -3. 非常に乾いている | 3. 非常に湿っている 2. 湿っている 1. やや湿っている 0. 中立 -1. やや乾いている -2. 乾いている -3. 非常に乾いている | 3. 非常に強い 2. 強い 1. やや強い 0. 中立 -1. やや弱い -2. 弱い -3. 非常に弱い | 6. 非常に快適 5. 快適 4. やや快適 3. やや不快 2. 不快 1. 非常に不快 |
| 許容感 | 温冷感の好み | 湿度感の好み | 濡れ感の好み | 気流感の好み |
| 1. 許容できる 0. 許容できない | 1. より涼しく 0. このまま -1. より暑く | 1. より乾いた 0. このまま -1. より湿った | 1. より乾いた 0. このまま -1. より湿った | 1. より強く 0. このまま -1. より弱く |

3.2.4 環境設定および実測手順

本実験は、東南アジア蒸暑値の都市住宅における熱帯居住者の暑熱に対する生理反応を確認することが目的である。そこで、暮らし方および適応行動の自由度を実際の生活環境に近付けるために、マレーシアの標準的なテラスハウスを忠実に模した実験住宅で被験者に実際に生活をしてもらい、その中で一週間に 10 回程度の実測セッションを実施した。実験住宅で生活する間、エアコン等の空調機器は使用せず、窓の開閉および天井扇の使用は可能とした。

被験者が実測セッションを行う時間帯は、①朝 8 時～10 時の間、②昼 12 時～14 時の間、③夜 20 時～22 時の間、のいずれかとした。1 回のセッションに、およそ 50～60 分を要した。セッションの流れを図 3.4 に示す。

セッションは 3 段階で構成されている。最初に、被験者自ら体重・血圧等の生理量を測定する。次に、被験者は皮膚温センサーを装着し、20 分間以上を椅子に座ったまま安静に過ごしながらアンケート回答を行う。物理環境項目、人間生理項目、アンケート項目の相関を見るために、被験者は主寝室中央の温湿度や風速センサーの近くに設置された椅子に座り、温熱主観申告を回答した。最後に、皮膚温センサーを外して、再び生理量を測定する。

実際の生活条件に近付ける意図から、セッション直前に安静時間は設定せず、服装は自由とした。Met 値と clo 値の算出のため、被験者は直前の行動および飲食の有無や内容と、着衣の詳細についてアンケート票に記録した。セッション前後の体重測定では、必ず同一の着衣が測定された。また、体重測定方によって求める発汗量に誤差をなくすため、セッション中の飲食と排泄は禁止された。

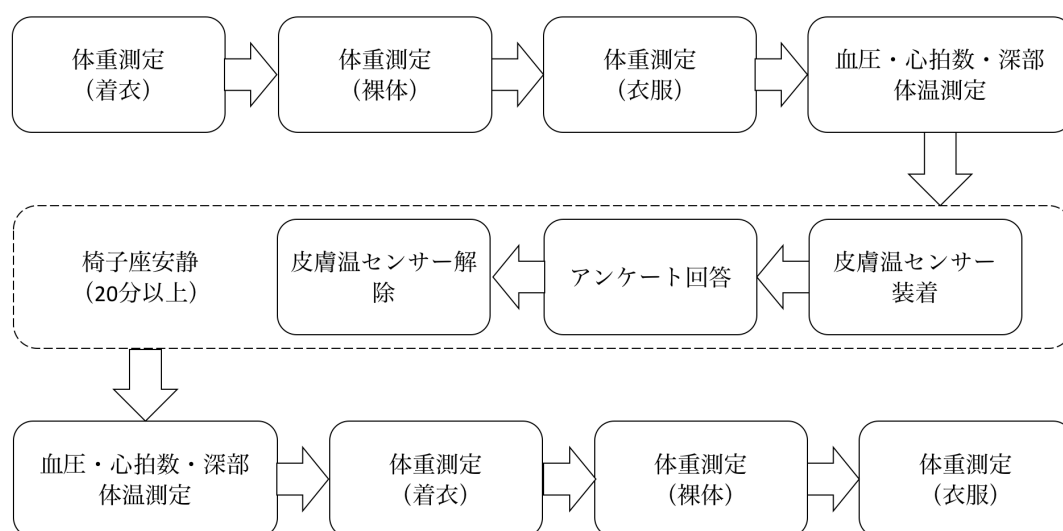


図 3.4 実測セッションの手順

3.3 被験者

マレーシア工科大学の男女学生を被験者とした。表 3.8 に被験者概要を示す。体表面積はデュボア式で計算した。実験住宅には寝室が 4 部屋あり、各寝室に対し 1 人の被験者を住ませた。1 バッチ中に最大 4 人の実測を並行した。本研究では男女比をほぼ均等に実施できたが、年齢が 18~30 歳の若年層に限られた。既往研究によると、暑熱ストレスに対する体温調節反応は加齢に伴い弱まるとされる。深部体温は有酸素運動能力が同等であれば高齢者と若年者の間に有意差がないが、発汗能力は低下する[80-82]。そのため、本研究は熱帯居住者と温帯居住者の相違を確認するものであるが、熱帯居住者の中においても発汗能力に幅のあることを留意する必要がある。

3.4 有効サンプル

3.4.1 実験期間とセッション数

実験期間は、前半が 2018 年の 1 月から 5 月に、後半が 2018 年の 9 月から 12 月に実施された。合計で、被験者は 43 人（女性 22 人、男性 21 人）、セッション数は 1102 であった（表 3.9）。全体で 12 バッチが実施された中で、Batch 1~4 では馴化期間を設けなかったが、Batch 5 以降では被験者が実験住宅で生活を開始してから初回セッション実施までに 4 日間以上の馴化期間を設けた。

3.4.2 馴化期間の影響

馴化期間を設けなかった Batch 1~4 と設けた Batch 5~12 とで、実測データを統合して良いかどうか判断するために、両期間の結果に t 検定を実施し、馴化期間が被験者に与えた影響について考察した。表 3.10 に示す通り、馴化期間の有無は被験者の人間生理に影響を与えたことが分かった。従って、本研究では馴化期間を設けた実測データのみを、即ち Batch 5~12 の実測データを採用することとした。

表 3.8 被験者概要

| Batch | 回答者数 | 平均年齢 | 平均身長(cm) | 平均体重(kg) | 平均体表面積(m ²) |
|-------|------|------|----------|----------|-------------------------|
| 1 | 4 | 26 | 163 | 54.9 | 1.58 |
| 2 | 4 | 25 | 171 | 59.0 | 1.69 |
| 3 | 3 | 24 | 159 | 56.7 | 1.58 |
| 4 | 1 | 25 | 173 | 56.9 | 1.68 |
| 5 | 4 | 27 | 156 | 75.9 | 1.76 |
| 6 | 4 | 20 | 168 | 65.9 | 1.75 |
| 7 | 4 | 24 | 159 | 66.1 | 1.68 |
| 8 | 4 | 20 | 172 | 74.2 | 1.87 |
| 9 | 4 | 26 | 161 | 55.3 | 1.57 |
| 10 | 4 | 22 | 170 | 65.3 | 1.76 |
| 11 | 3 | 22 | N/A | 45.0 | N/A |
| 12 | 4 | 23 | 172 | 65.0 | 1.77 |

表 3.9 実験期間とセッション数

| Batch | 被験者の居住期間 | | | 馴化期間 | セッション数 | |
|-------|------------|------------|----|-------|--------|-----|
| | 開始日 | 終了日 | 日数 | | 女性 | 男性 |
| 1 | 2018/1/5 | 2018/1/10 | 6 | なし | 80 | 44 |
| 2 | 2018/1/12 | 2018/1/18 | 7 | | | |
| 3 | 2018/1/19 | 2018/1/25 | 7 | | | |
| 4 | 2018/2/13 | 2018/2/14 | 2 | | | |
| 5 | 2018/2/27 | 2018/3/12 | 14 | 4日間以上 | 114 | 192 |
| 6 | 2018/3/13 | 2018/4/1 | 20 | | | |
| 7 | 2018/4/2 | 2018/4/15 | 14 | | | |
| 8 | 2018/4/23 | 2018/5/6 | 14 | | | |
| 9 | 2018/9/9 | 2018/9/25 | 17 | 4日間以上 | 80 | 84 |
| 10 | 2018/9/28 | 2018/10/18 | 21 | | | |
| 11 | 2018/10/21 | 2018/11/10 | 21 | | | |
| 12 | 2018/11/21 | 2018/12/16 | 26 | | | |
| Total | | | | | 538 | 564 |
| | | | | | 1102 | |

表 3.10 馴化期間の有無についての t 検定結果

| 実測内容 | t検定結果 | 評価 |
|----------|--------------------------------|----------------------|
| 深部体温 | t= 2.854, df= 514, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に低かった。 |
| 平均皮膚表面温度 | t= -8.444, df= 191.745, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に高かった。 |
| 有効発汗量 | t= -5.523, df= 409, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に多かった。 |
| 総発汗量 | t= -3.943, df= 222.651, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に多かった。 |
| 収縮期血圧 | t= -9.524, df= 279.318, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に高かった。 |
| 拡張期血圧 | t= -5.273, df= 514, p< .05 | 馴化期間あり被験者の方が有意に高かった。 |
| 心拍数 | t= -1.077, df= 265.394, n.s. | 有意差は見られなかった。 |

3.5 結果・考察

3.5.1 物理環境項目

図 3.5 に、2018 年 3 月 1 日 0:00 から 2018 年 3 月 4 日 12:00 の屋外気温・相対湿度の推移を示す。実験住宅所在地のジョホールバルは 1 年を通して高温多湿気候である。外気温は午前 8 時頃から上昇し始め、12 時～15 時にピークを迎える。日沈から朝方までは気温が下がる。相対湿度は概ね気温と逆の推移を示し、日中は約 60%ほどだが、18 時頃から翌朝までは 100%に近くなる。

図 3.6 に、同期間の室内気温・相対湿度の推移を、4 部屋ある主寝室のうちの 1 部屋を代表して示す。また、屋外と各種寝室の気温と相対湿度の分布を図 3.7 に示す。を室内気温・相対湿度の推移は先に述べた屋外気象の影響を受け、近い様子を示す。しかし、室内の最高値と最低値の幅は屋外のそれと比較すると小さく、また、平均室内気温は平均屋外気温より高かった。これは久保田ら [20, 83]が述べるように、この地域の居住者は平均的に日中換気の窓開閉行動パターンを取るため、本実験においても被験者により窓が日中開放されて熱容量の大きいレンガ造実験住宅が蓄熱され、夜間の室温が高くなったものと考えられる。実測セッション時の主寝室の温熱状況の平均は、室温：平均 29.0 °C、相対湿度：平均 75.5 %、グローブ温度：平均 29.1 °C、気流速度：平均 1.2 m/s、SET*：平均 27.7 °Cであった（図 3.8）。

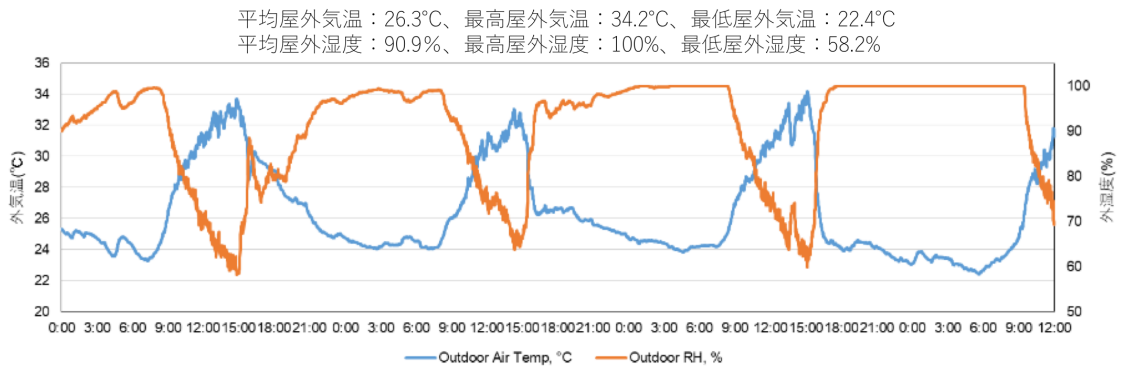


図3.5 屋外の気温・相対湿度

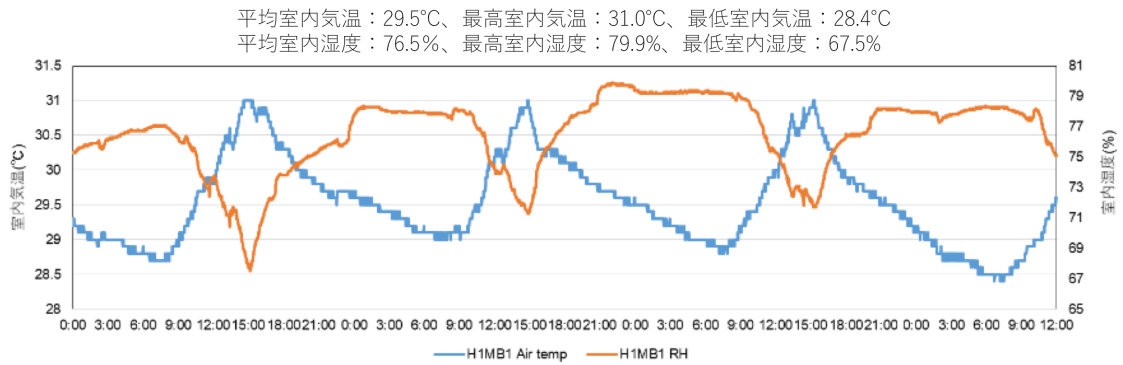


図3.6 室内の気温・相対湿度

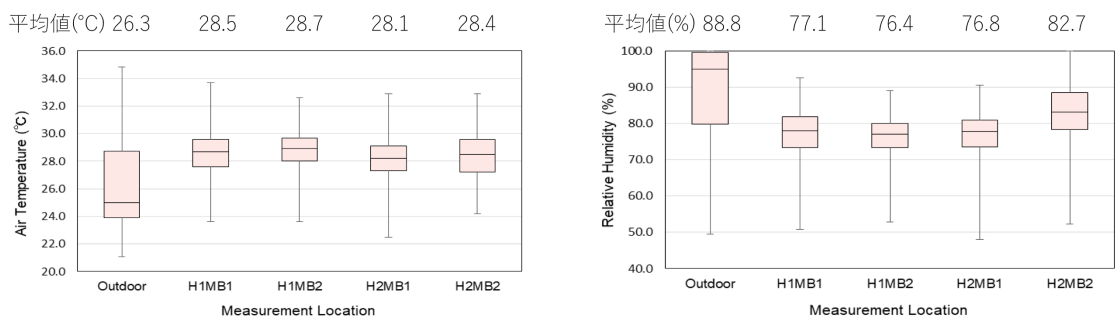
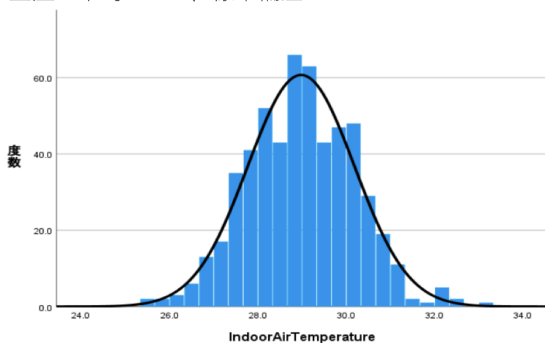
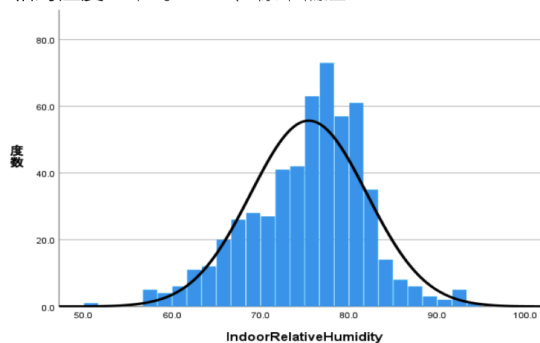


図3.7 屋外と各種寝室の気温・相対湿度の分布

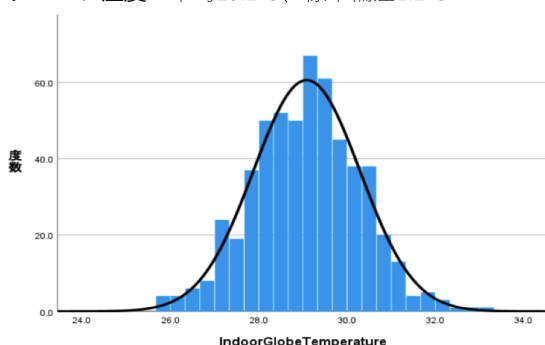
室温：平均29.0°C、標準偏差1.2°C



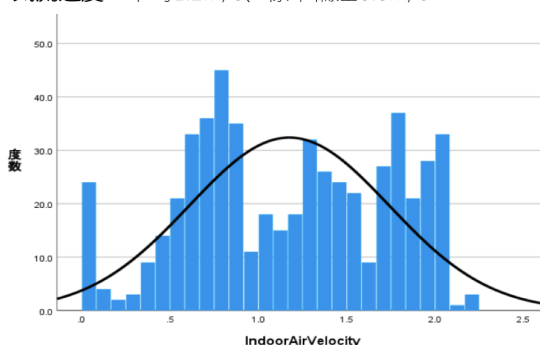
相対湿度：平均75.5%、標準偏差6.6°C



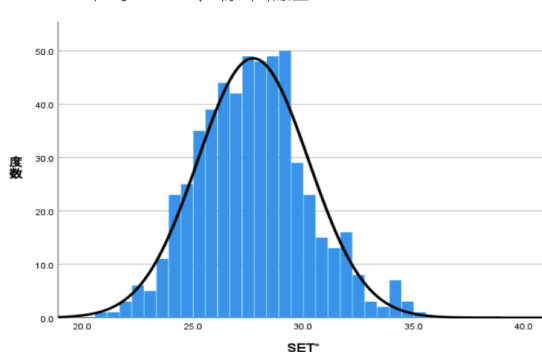
グローブ温度：平均29.1°C、標準偏差1.2°C



気流速度：平均1.2m/s、標準偏差0.6m/s



SET*：平均27.7°C、標準偏差2.5°C



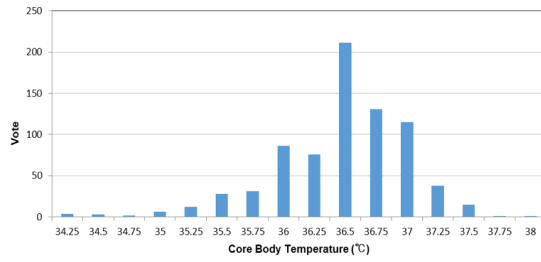
(n=551)

図 3.8 実測セッション時の室内温熱状況の分布

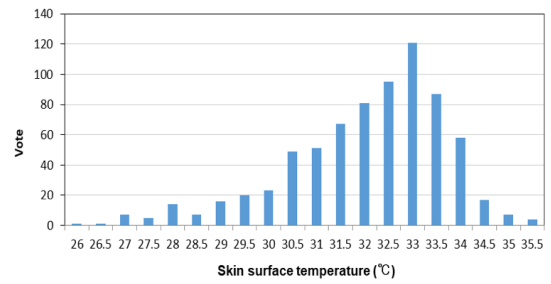
3.5.2 人間生理項目

人間生理項目の測定結果を図 3.9 に示す。平均値は、深部体温：36.3°C、平均皮膚表面温度：32.5°C、総発汗量：1.11 g/min、有効発汗量：1.13 g/min、収縮期血圧：109 mmHg、拡張期血圧：72 mmHg、心拍数：85.3 回/min、Clo 値：0.66 clo であった。セッション時の被験者の服装を表 3.10 に示す。半袖Tシャツにショートという組み合わせが最も多く、半数近くを占めた。次に多かった服装は半袖Tシャツに薄手の長ズボンであった。その他の組み合わせの中にはシャツやブラウスの重ね着が多く含まれた。スリッパの着用が約2割あり、イスラム教徒の女性が頭を覆うヒジャブの着用

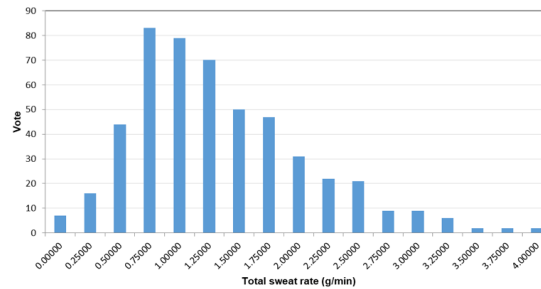
深部体温：平均 36.3°C



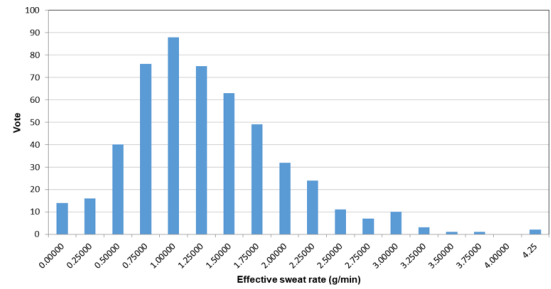
平均皮膚表面温度：平均 32.5°C



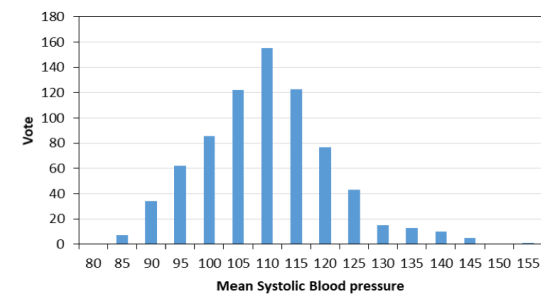
総発汗量：平均 1.11 g/min



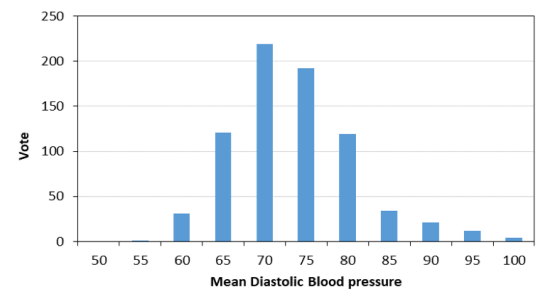
有効発汗量：平均 1.13 g/min



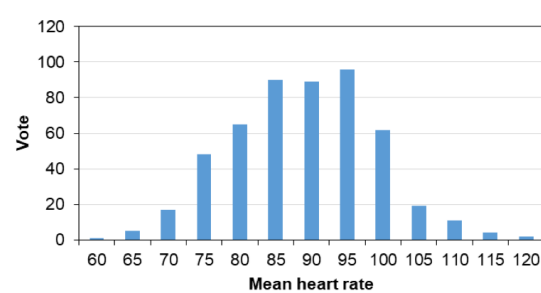
収縮期血圧：平均 109 mmHg



拡張期血圧：平均 72 mmHg



心拍数：平均 85.3 回/min



Clo値：平均 0.66 clo

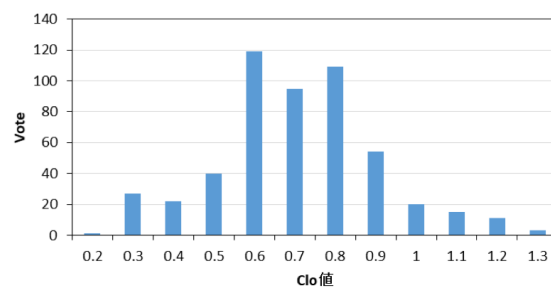


図 3.9 人体生理項目の測定結果

(17.3%)、食事 (15.8%)、昼寝 (9.6%)、歩行 (9.0%) の順に多かった。

発汗量について温帯居住者の結果と比較する。日本人を対象に被験者実験を行った南ら (2008) の研究によると、気温 35°C、MRT35°C、気流速度 0.1m/s、代謝量 2met、着衣量 0.5clo の状態で、水分減少量はおよそ 2.6 g/min~5.8 g/min であった[84]。都築 (1998) によると、気温 31°C、相対湿度

表 3.11 セッション時の被験者の服装

| Clothes | Frequency | % |
|--|-----------|--------|
| long sleeve T-shirt, trousers (thick) | 10 | 1.1% |
| long sleeve T-shirt, trousers (thin) | 14 | 1.5% |
| long sleeve T-shirt, jeans | 10 | 1.1% |
| long sleeve one-piece | 25 | 2.7% |
| short sleeve T-shirt, trousers (thick) | 17 | 1.9% |
| short sleeve T-shirt, trousers (thin) | 130 | 14.2% |
| short sleeve T-shirt, ankle-length skirt (thick) | 24 | 2.6% |
| short sleeve T-shirt, knee-length skirt (thin) | 11 | 1.2% |
| short sleeve T-shirt, jeans | 26 | 2.8% |
| short sleeve T-shirt, sweatpants | 42 | 4.6% |
| short sleeve T-shirt, shorts | 424 | 46.4% |
| sweatpants | 16 | 1.8% |
| other combinations | 164 | 18.0% |
| total | 913 | 100.0% |
| with hijab | 20 | 2.2% |
| with slippers | 182 | 19.9% |

表 3.12 セッション直前の被験者の行動

| Activity | Frequency | % |
|----------------|-----------|--------|
| sleeping | 171 | 18.7% |
| seated, relax | 158 | 17.3% |
| eating | 144 | 15.8% |
| napping | 88 | 9.6% |
| walking about | 82 | 9.0% |
| reading | 66 | 7.2% |
| typing | 55 | 6.0% |
| reclining | 37 | 4.1% |
| exercise | 24 | 2.6% |
| showering | 13 | 1.4% |
| house cleaning | 10 | 1.1% |
| others | 65 | 7.1% |
| total | 913 | 100.0% |

50%、気流速度 0.2 m/s 以下の条件で、全身発汗量の平均は $60 \text{ g/m}^2 = 3.2 \text{ g/min}$ であった[85]。登倉 (1981) によると、ポリエステル綿敷布団に仰臥し、環境温 33°C 、湿度 45%の状態、2 時間あたり $200.8 \pm 53.5 \text{ g} = 1.67 \pm 0.45 \text{ g/min}$ であった[86]。本実験では、総発汗量 1.11 g/min と少ないことが分かる。この結果は、前述した熱帯居住者の生理的特性と合致した。

一方、本実験結果において有効発汗量が総発汗量を上回っており有効発汗率が 100%を超えたことについて考察する。有効発汗量は着衣状態での体重をセッションの前後で計測した差であり、総発汗量は裸体での体重差であった。有効発汗率が 100%を超えたのは、セッション中の衣類重量の減少が起きたことを意味する。考えられる理由としては、セッション開始時点で既に被験者が発汗していて衣類に多くの水分が含まれており、セッション中にその水分が蒸発したか、無効発汗となって流れ落ちた場合である。図 3.10 は、Fanger (1970) が示した熱的中立時の代謝量と皮膚表面温度の関係をもとに作成した[87]。本実験で被験者が温冷感を「中立」と回答したセッションは 251 回あり、それらに限った平均皮膚表面温度の平均は 32.7°C であった。これは約 1.7 Met の活動を被験者が行っていたことに相当する。本実験ではセッション中に座位で安静に過ごしてアンケート回答をするよう被験者に指示し、代謝量を 1.2 Met と想定していたが、実際には被験者はセッション直前まで通常的生活行動をして過ごしていたことで代謝量が高く、発汗もしていたと考えられる。

さらに、平均皮膚表面温度については、全セッションの平均が 32.5°C と既存の研究結果に比較して低かった。Hori ら (1986) の実験によると、気温 30°C 、相対湿度 70%において 34.9°C であった[74]。Lee ら (2010) によると、気温 28°C 、相対湿度 50%において 33.9°C であった[88]。Wakabayashi ら (2011) の実験では、気温 32°C 、相対湿度 70%の環境下で、安静時に約 33.5°C 、運動中は約 35.5°C まで上昇した[89]。これらの研究は実験室内で行われており風速は小さいのに対して、本実験では生活環境を再現した中での計測であり、主に天井扇の使用による影響で気流速度が平均 1.2

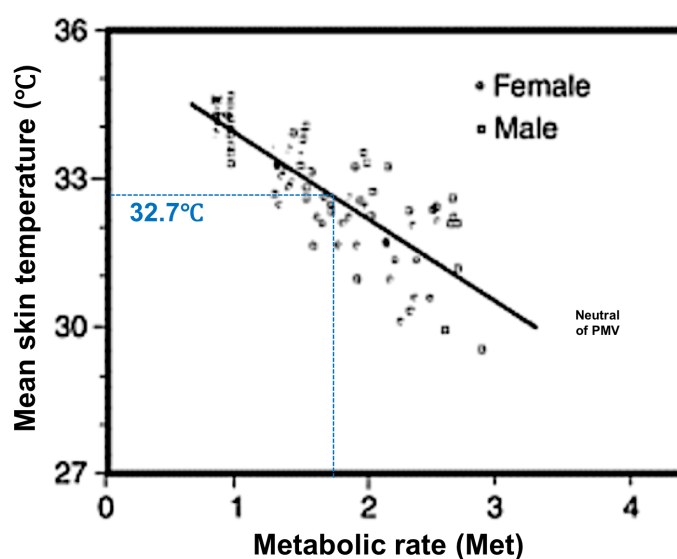


図 3.10 熱的中立時の代謝量と平均皮膚表面温度の関係

m/s と高かった。そのため、皮膚表面での発汗蒸発が常に促進されたことで気化熱が奪われ、皮膚表面温度の低下が起きたと考えられる。

3.53 アンケート調査項目

熱的主観申告の集計結果を図 3.11 に示す。温冷感は平均 -0.23 で、4 割近くの被験者が「少し涼しい」または「涼しい」と回答した。湿度感は平均 0.20 で、半数以上の被験者が「中立」と回答しているが、湿っているとの申告の方が乾いているとの申告よりも若干多かった。皮膚の濡れ感は平均 0.08 で、半数以上の被験者が「中立」と回答した。気流感は平均 0.63 で、約 6 割の被験者が「少し気流が強い」または「強い」と申告した。

温冷感と温冷感の好みの関係を見ると、「中立」と回答した被験者のほとんどが「そのままが良い」とし、「暖かい」と回答した被験者の多くが「より涼しい」環境を好んだが、「涼しい」と回答した被験者の好みは「より暖かい」と「より涼しい」が混在する結果となった（図 3.12）。熱的快適性と温冷感の好みの関係（図 3.13）では、快適度を低く回答した被験者ほど「より涼しい」環境を好んだ。また、気流感と気流感の好みの関係（図 3.14）では、気流感が「強い」と回答した被験者の多くが「そのままが良い」とした一方で、「弱い」と回答した回答者の多くが「より強い」気流を好んだ。前述の通り、本実験では平均 1.2 m/s 、標準偏差 0.6 m/s の気流速度があったが、強い気流を求める被験者の傾向が明らかになった。

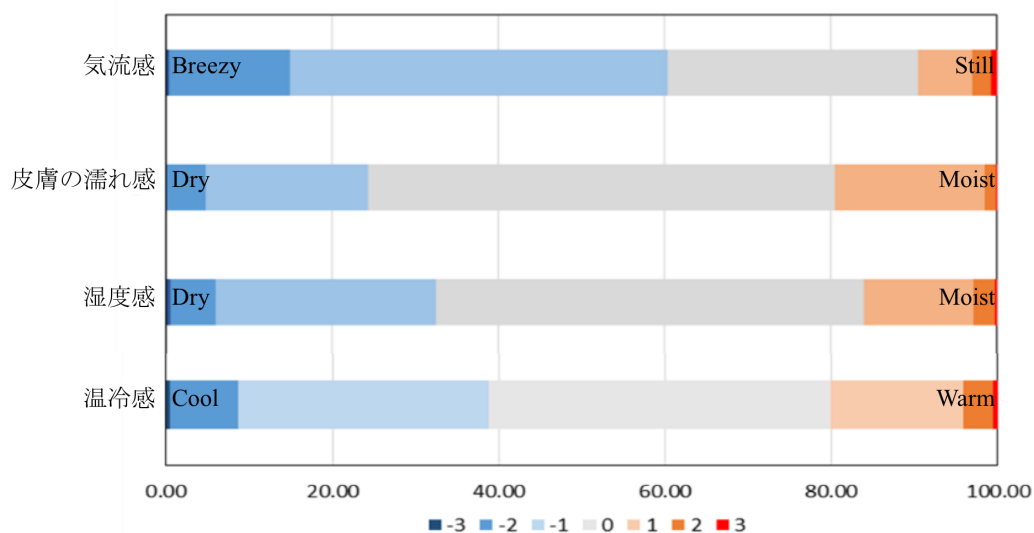


図 3.11 温冷感、湿度感、皮膚の濡れ感、気流感の主観申告結果

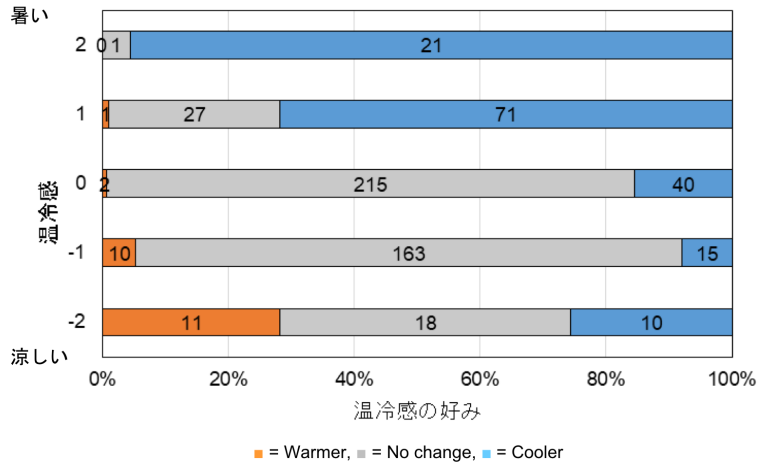


図 3.12 温冷感と温冷感の好み

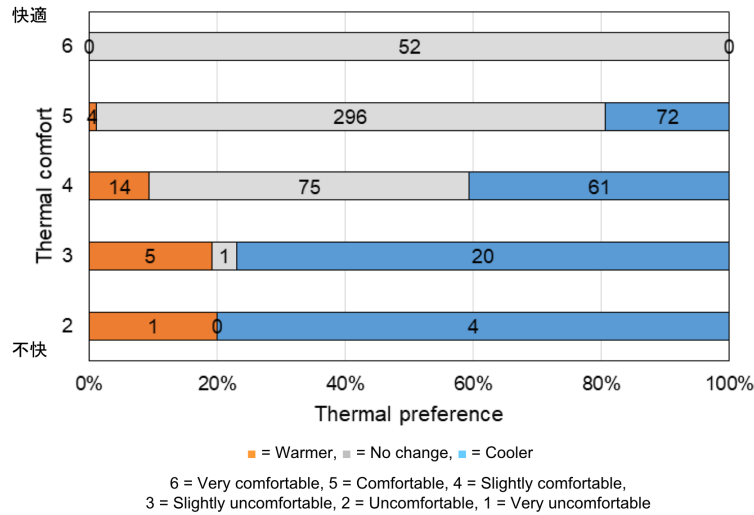


図 3.13 熱的快適性と温冷感の好み

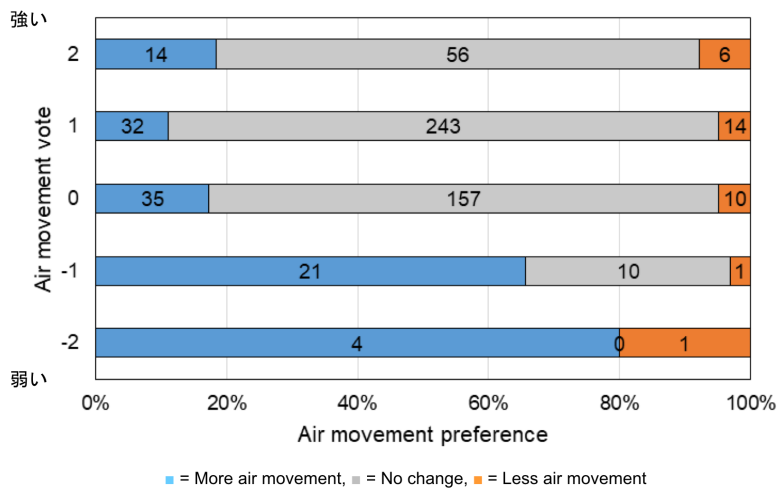


図 3.14 気流感と気流感の好み

3.5.4 気流に関する考察

ASHRAE 指標では、気温が 25℃以上の条件下において、風速の上昇に伴い中立温度を引き上げることができることと示されている。風速が 0.3 m/s 以上、0.6 m/s 以上および 0.9 m/s 以上で、それぞれ中立温度は 1.3℃、1.8℃および 2.2℃上昇可能である。本実験データでもこれを検討した。図 3.15 に結果を示す。気流速度が 0.3~0.6 m/s であったセッションの実測データを用いて作用温度から予測された中立温度は 29.93℃であった。同様に、0.6~0.9 m/s での中立温度は 29.84℃、0.9~1.2 m/s での中立温度は 29.39℃であった。ASHRAE によって与えられている風速による中立温度へのボーナスは、本実験データとは合致しなかった。

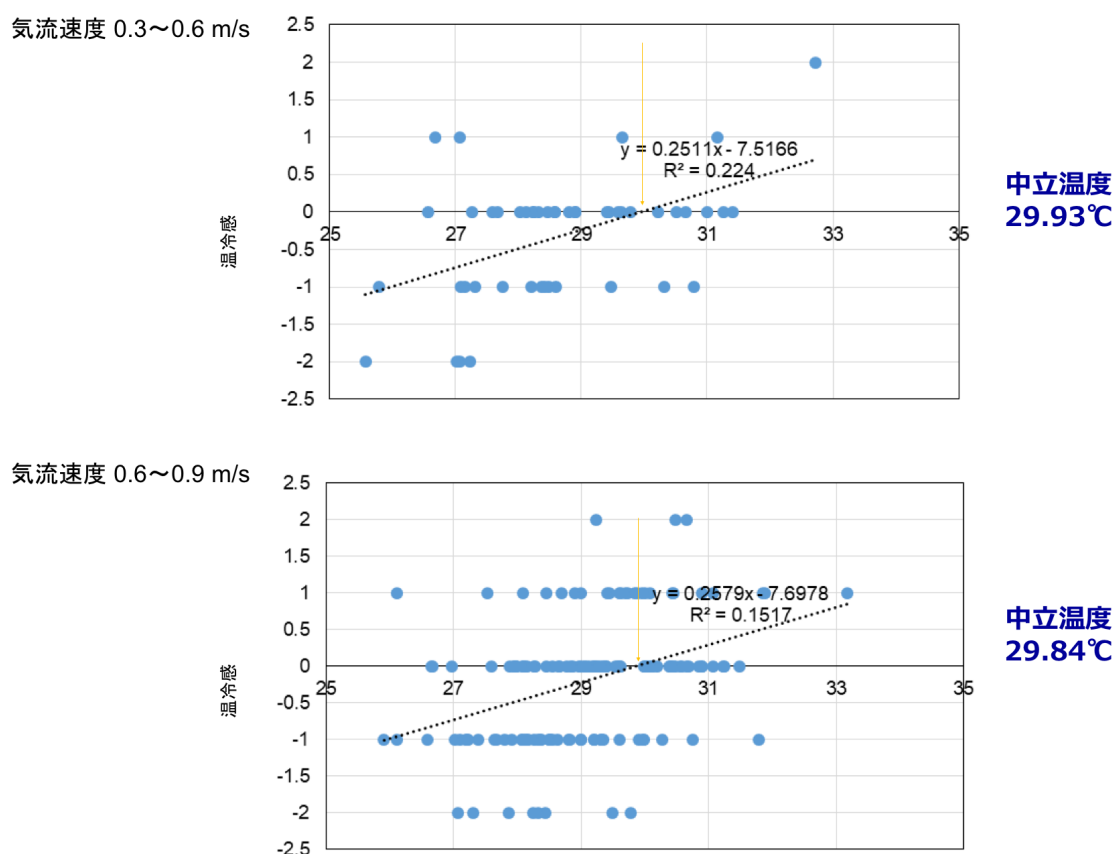
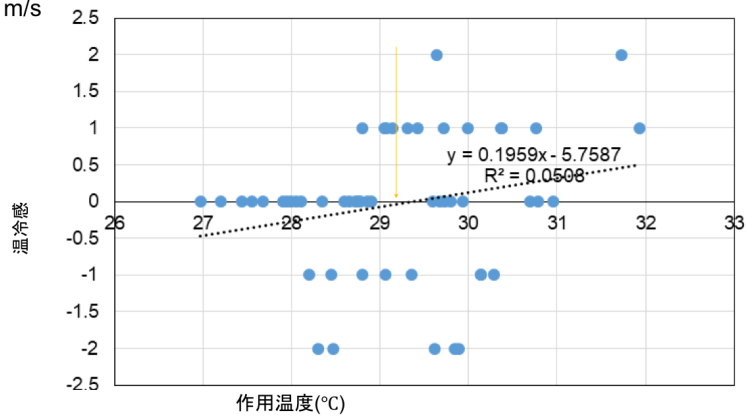


図 3.15 気流速度レベル別の中立温度

気流速度 0.9~1.2 m/s



中立温度
29.39°C

図 3.15 気流速度レベル別の中立温度 (続き)

次に、温冷感申告と気流速度の関係を図 3.16 に示す。図中の折れ線は中央値を示している。これを見ると、室内環境を涼しいと感じたケースほど、気流速度が速かったことが明らかである。

本実験では、気流速度が熱的快適性に与える影響について中立温度により定量的に示すことができなかったが、被験者の意識においては気流速度が温冷感に影響を与えていることが示された。

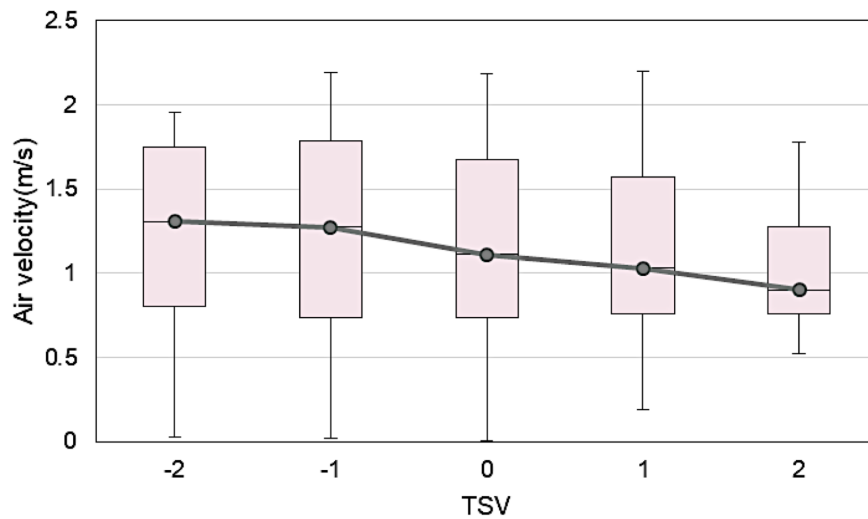


図 3.16 温冷感と気流速度

3.6 章まとめ

マレーシアのジョホールバルに建設した実験住宅を用いて被験者実験を行った。長期暑熱馴化を獲得している熱帯居住者を対象として、実際の都市住宅に近い状況において温熱物理環境・人体生理・熱的主観のデータを収集し、分析を行った。主に以下について明らかになった。

- 室内の気温および相対湿度は、屋外の気温および相対湿度と比較して、最高値と最低値のレンジは狭く、平均値は高かった。これは、日中の窓開放による躯体の蓄熱による影響だと考えられた。また、被験者は実験住宅で生活する中で、窓開けと天井扇の使用をよく行っていた。室内の気流速度は平均 1.2m/s であった。
- 本実験における被験者の発汗量は平均 1.11 g/min であった。以前の研究における温帯居住者の発汗量よりも少なく、長期暑熱馴化による生理的特性が確認された。
- 本実験では実際の都市住宅に近い状況を再現した点で、人工気候室で行われた以前の研究と異なる結果が得られた。被験者は実測直前まで通常的生活行動（家事をする、移動する、など）を行えたことと、天井扇を稼働させて平均 1.2 m/s の気流を受け続けていたことにより、有効発汗率が 102 %にもなり、平均皮膚表面温度が 32.5°Cと低下した。熱帯において気流によるクーリング効果の実効性の高さが示された。
- 気流感申告と気流感の好みの関係から、被験者はより強い気流を望む傾向が明らかになった。気流が強いと感じた被験者の多くが気流の維持を希望し、気流が弱いと感じた被験者の多くが気流の増加を期待した。また、温冷感と気流速度の関係から、被験者が涼しいと感じている場合ほど気流が強かった。しかし、気流速度が中立温度へ与える影響については本実験データでは示されなかった。気流速度 0.3-0.6m/s では 29.93°C、0.6-0.9m/s では 29.84°C、0.9-1.2m/s では 29.93°Cであった。

本実験では、実際の住環境を想定した実験条件とし、実験住宅において直前の安静時間を設けずに被験者実験を実施した。そのため、自然換気モード建物での非定常での熱帯居住者の暑熱対応について、気流による効率的な発汗と熱放散を確認することができた。これにより、温熱生理の観点から自然通風を利用するパッシブクーリング手法は熱帯居住者に対して有効だと考えられる。しかし、一方で、気流速度が中立温度へ与える影響について裏付けるデータは得られなかった。今後の課題として、気候室での被験者実験により定常での気流速度および代謝量と暑熱対応の関係性を分析することで、より精度の高い実測データを用いて、熱帯居住者への直接冷却に適した住環境に必要な室内気流速度を検証していくことが期待される。

4

調査：窓開閉行動パターンと要因

インドネシアおよびマレーシアにおいて、都市居住者の窓開閉・冷房使用・扇風機使用についての大規模調査を実施した。本章では、まず、調査・分析方法について説明する。結果と考察では、最初に、窓開閉・冷房使用・扇風機使用の典型的な1日の居住者行動パターンの抽出結果を示す。次に、それら適応行動の相互の関連について説明し、続いて、行動パターンへの文脈的要因について説明する。

4.1 調査方法

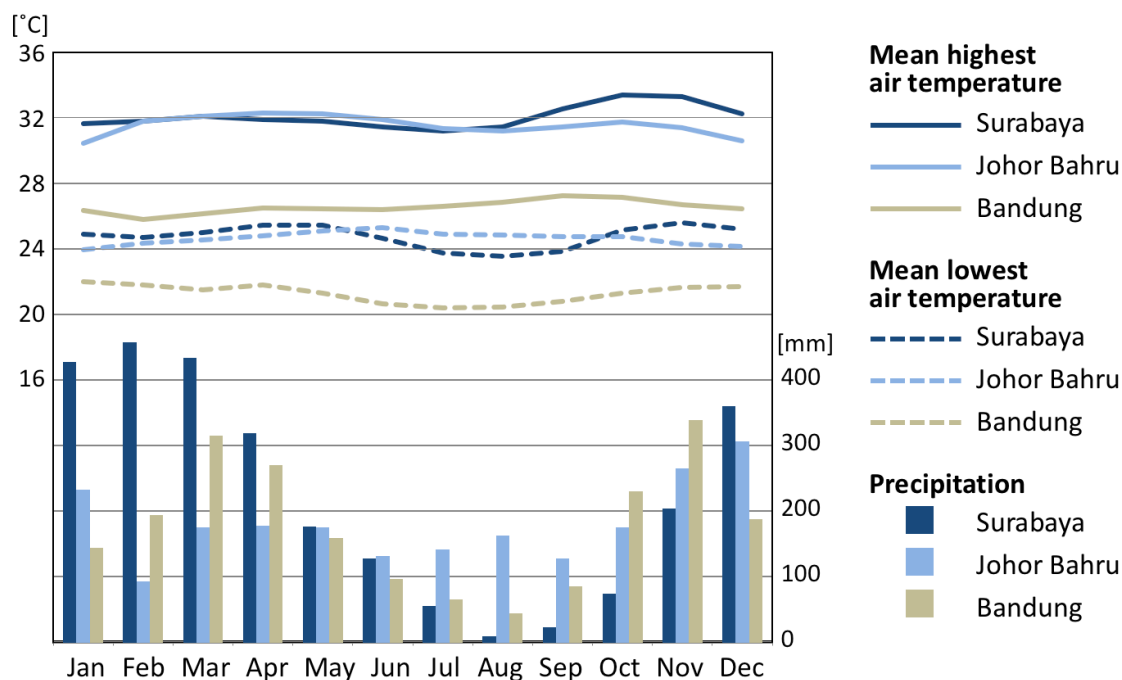
一般に、建物の居住者を調査する目的で居住者関連のデータを収集するには、現場、実験室、大規模調査の3つの主要なアプローチがある[90]。これまでの研究で最も一般的に使用されたアプローチである現場調査は、日常環境（職場、家庭、学校など）で居住者を観察することを含み、通常、データ収集期間が長い（数週間または数年）メリットがあるが、サンプル数が対象の建物の自発的な参加者の数に制限されることが多いデメリットがある。O'Brienらは、母集団である居住者の多様性を観察するためにはサンプル数が非常に重要であることを示した。これまでの研究のほとんどが用いた居住者サンプル数は10~15であるが、数百の居住者サンプルがより適切であると示唆した[56, 90-91]。従って、本研究は大規模調査を採用し、多数のサンプル（N=1570）を使用したデータマイニングアプローチを通じて、典型的な窓開閉行動パターンにおける世帯属性の違いを分析することとした。データマイニング技術は、大規模なデータセットから隠されたパターンと知識を抽出するための強力な方法であり、居住者の行動モデルの開発にも適用されている[92-94]。さまざまなデータマイニング手法の中で、決定木、ベイジアンネットワーク、クラスター分析、アソシエーション分析が、居住者行動パターンの認識と予測に一般的に使用される。例えば、D'Ocaらは、クラスター分析を使用して個別のデータセットに基づいて窓開閉行動パターンを取得し、次に

アソシエーション分析を実行して同時に存在する頻繁なパターンを発見した[95]。本研究もクラスター分析を採用した。

4.2 対象住宅

4.2.1 調査地

調査は、2004年から2016年にかけて、マレーシアのジョホールバルと、インドネシアのスラバヤおよびバンドンで実施された。ジョホールバルはマレーシア第2の都市で、北緯1度27分、東経103度45分に位置し、年間平均気温は27.9°C、年間降水量は2174mmである。スラバヤはインドネシア第2の都市で、南緯7度16分、東経112度44分に位置し、年間平均気温は27.7°C、年間降水量は2677mmである。バンドンはインドネシア第3の都市で、南緯6度54分、東経107度36分に位置し、年間平均気温は23.7°C、年間降水量は2141mmである。バンドンは海拔768mと標高が高く、他の2都市とは異なり比較的涼しい気候である。図4.1は、調査期間中のこれら3つの都市の月平均最高気温と最低気温および降水量を示している。雨季と乾季があるが、年間を通して気温が高く、月平均気温の年格差はそれぞれ26.8~28.7°C、27.0~28.8°C、23.3~24.1°Cと非常に小さい。



(Resource: NOAA, Johor Bahru (Changi, Singapore); 2005–2015, WMO, Surabaya; 2005–2017 and Bandung; 2005–2017)

図4.1 調査地の気候

一方、日最高気温と日最低気温の差は図 4.1 が示すとおり 8℃前後ある。気温の年格差よりも日較差の方が大きいことは、一般的な熱帯東南アジアの気候の特徴である。

本調査では、住宅分野の冷房エネルギー消費量増加の主人公になると目される人々が暮らす、主に低中所得者層向けに普及している都市住宅を対象とした。以下に、調査住宅の特徴を説明する。

4.22 インドネシアの賃貸型公営集合住宅

インドネシア政府は、低中所得者への住宅供給を促進するために、集合住宅建設に対する補助金政策を実施してきている。これには、公営住宅であり賃貸型の通称ルスナワと呼ばれるものと、民間企業が建設する分譲型の通称ルスナミとがある。賃貸型公営集合住宅のルスナワを図 42 に示す。一般的に 3～5 階建ての自然換気型の建物である。各住戸の間取りは、年代によりシングルルームタイプと 2 ベッドルームタイプの違いがあるが、共通点として外にバルコニーが設けられており、物干しスペースとして利用されることが多い。屋根の軒の出が深く、窓庇も設置されており、バルコニーの存在と合わせて日射遮蔽の工夫が見られる。各住戸はバルコニー側と廊下側の 2 面に開口部を持ち、それぞれに窓とドアがある。開閉できる窓は全て突き出し窓である。加えて、両側の開口部の上部には換気窓が付けられている（日本建築の欄間に当たる位置に横方向に連続的に設置されており、2 つの固定ガラス板の間に恒久的なスリットが開いているため室内は常時換気される）。住戸は共用廊下の両側に配置されているが、共用廊下の両端部の壁面は開放されており、全体的に風通しの良い設計となっている。

4.23 インドネシアの分譲型民間集合住宅

図 43 は分譲型民間集合住宅のルスナミで、一般的に高層住宅である。住戸の間取りにはシングルルームタイプ、2 ベッドルームタイプなど幾つかの種類があるが、開口部の設計は共通している。廊下側開口は玄関ドアのみであり、窓や上部換気窓は設置されていない。屋外側には窓とドアがあるが、上部換気窓はない。従って、各住戸は屋外側だけの片側換気である。開閉できる窓は全て突き出し窓である。賃貸型集合住宅と比べてバルコニーは小さく、主にエアコン室外機を置くためだけに使われている。住戸外壁面は簡素でフラットなデザインであり、寝室の窓に日射が直接注いでしまう。全体的に、自然換気や日射遮蔽などの工夫は見受けられず、居住者がエアコンを購入・設置することを前提とした住宅設計になっている。

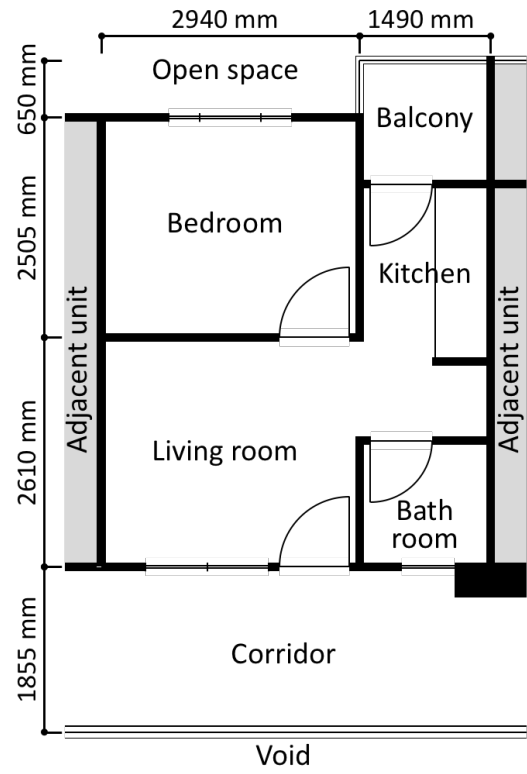


図42 インドネシアの賃貸型公営集合住宅

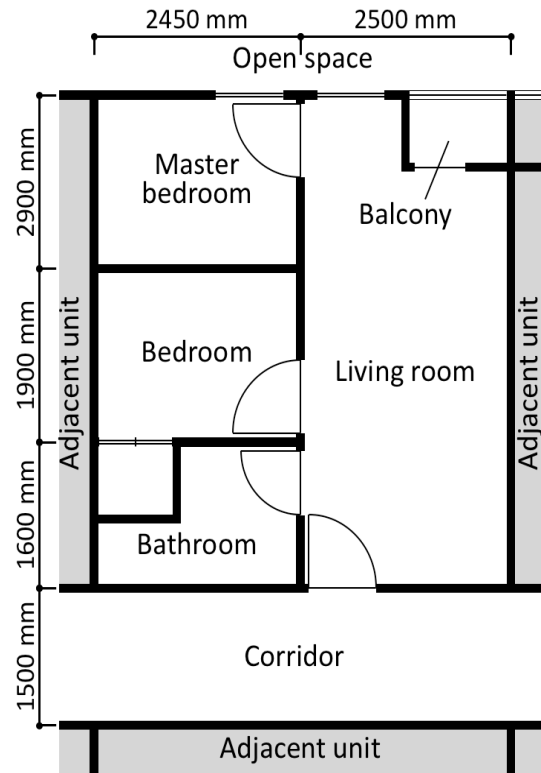


図43 インドネシアの分譲型民間集合住宅

4.24 マレーシアのテラスハウス

マレーシアでは、インドネシアで見られるような公営集合住宅や民間集合住宅に加えて、テラスハウスと呼ばれる長屋型住宅（図 44）でも調査を実施した。テラスハウスはマレーシアで最も一般的な都市型住宅である。集合住宅に比べて室数が多くて床面積も広いが、各住戸の1階と2階の表裏両面に窓があり、居住者はこれらの窓を開けることで容易に室内に自然通風を得ることが可能である。開閉できる窓には、外開き窓と突き出し窓が使われている。また、窓外に軒の出もあり、日射対策もされている。



図 44 マレーシアのテラスハウス

表 4.1 回答者プロフィール

| | Total | Survey 1 | Survey 2 | Survey 3 | Survey 4 | Survey 5 |
|--|-------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------|
| Sample size | 1570 | 356 | 303 | 347 | 265 | 299 |
| Survey city | - | Johor Bahru | Johor Bahru | Surabaya | Surabaya | Bandung |
| Mean daily air temp. (°C) | - | 27.9 | 27.9 | 27.7 | 27.7 | 23.7 |
| Mean daily relative humidity (%) | - | 82.2 | 82.2 | 76.5 | 76.5 | 75.2 |
| Survey period | - | Sep.–Oct. 2004 | Apr.–Jun. 2006 | Sep.–Oct. 2013 | Sep.–Oct. 2016 | Sep. 2014 |
| Household attributes | | | | | | |
| Average household size | 3.8 | 5.4 | 4.6 | 3.4 | 3.6 | 1.9 |
| Average age of respondent | 41.8 | 45.0 | 40.7 | 39.7 | 41.6 | N/A |
| Age of respondent (%) | | | | | | |
| ≤30 | 22.6 | 8.3 | 13.8 | 22.0 | 18.3 | 51.2 |
| 31–40 | 31.4 | 24.2 | 37.7 | 34.6 | 28.8 | 32.4 |
| 41–50 | 29.7 | 41.6 | 37.7 | 25.2 | 31.3 | 12.0 |
| 51–60 | 11.6 | 19.8 | 9.3 | 11.3 | 14.2 | 2.7 |
| ≥60 | 4.7 | 6.2 | 1.4 | 6.9 | 7.5 | 1.7 |
| Median household income ratio ¹ | 8.5 | 9.4 | 8.8 | 7.6 | 7.9 | 8.3–9.0 |
| Building attributes | | | | | | |
| Housing type; (a) apartment | 842 | 0 | 238 | 309 | 265 | 30 |
| Housing type; (b) apartment | 372 | 0 | 65 | 38 | 0 | 269 |
| Housing type; (c) terraced house | 356 | 356 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Floor number | - | N/A | 4.6 | 3.5 | 3.3 | N/A |
| Unit floor size (m ²) | - | N/A | N/A | 19.5 | 25.5 | 31.8 |
| Ownership | | | | | | |
| AC ownership (%) | 29.6 | 61.0 | 35.3 | 10.7 | 0.0 ² | 34.8 |
| AC in bedroom (%) | 24.3 | 58.4 | 32.0 | 3.4 | 0.0 ² | 19.7 |
| AC in living room (%) | 12.6 | 16.6 | 11.2 | 0.6 | 0.0 ² | 33.4 |
| AC quantity (unit) | 0.6 | 1.4 | 0.7 | 0.1 | 0.0 ² | 0.5 |
| Fan ownership (%) | 91.5 | 97.7 | 92.4 | 85.6 | 89.8 | N/A |
| Duration | | | | | | |
| Window-opening (h) | 12.3 | 11.7 | 13.7 | 14.2 | 18.9 | 3.8 |
| AC usage (h) | 2.2 | 4.6 | 2.6 | 1.2 | 0.0 ² | 1.9 |

¹ Converted by the exchange rate (Source: The World Bank, Indicators). ² This survey (Surabaya in 2016) was conducted only for low-cost apartments, in which AC was not used.

4.3 調査期間とサンプルプロフィール

調査は、2004年9月から10月と2006年4月から6月にジョホールバルで、2013年と2016年の9月から10月にスラバヤで、2014年9月にバンドンでそれぞれ実施された。スラバヤの集合住宅から612世帯、バンドンの集合住宅から299世帯、ジョホールバルの集合住宅から303世帯、ジョホールバルのテラスハウスから356世帯を含む、合計1570世帯が有効サンプルとして収集された。

各調査のサンプルプロフィールを表4.1に示す。前述のように、バンドンは標高が高いため、年間平均気温は他の都市よりも約4°C低くなっている。平均世帯人数はスラバヤで3.4~3.6人、バンドンで1.9人、ジョホールバルで4.6~5.4人、全体では3.8人であった。回答者の年齢で最も多かったのは、バンドンでは30歳以下、スラバヤとジョホールバルでは30~40代であった。世帯収入については、各調査間で比較をするために、各調査年の調査国通貨の2011年の米ドルに対する平均為替レートで換算し、さらに対数変換した値で表している。平均世帯収入レベルが最も高かったのはジョホールバルで8.8~9.4、続いてバンドンが8.3~9.0、スラバヤが最も低くて7.6~7.9であった。

エアコン所有率はスラバヤで 0~10.7%、バンドンで 34.8%、ジョホールバルで 35.3~65.0%であった。エアコン所有率と世帯収入レベルの間には正の相関関係が見られた。

本研究では、スラバヤとバンドンの調査結果を高温多湿都市の分析に使用し、同じ熱帯東南アジアにあっても気温の比較的涼しいバンドンの調査結果と比較することで、特徴の考察に活かすこととした。両調査ともに回答者年齢が若年層に多く、エアコン所有率は3割前後であることなどが一致しており、両者の世帯収入の t 検定結果から有意差は見られなかった ($t = -1077$, $df = 607.7$, ns)。

4.4 調査項目

調査員が各世帯を訪問し、調査票を使用しながら居住者にインタビューを実施した。すべての調査は乾季に実施され、回答者は1日の各世帯の通常の適応行動パターンについて質問された。特に、リビングと寝室の窓やドアの開閉状態と、冷房と扇風機の稼働状況については、24時間を1時間間隔で回答することが求められた。開閉可能な窓とドアのみが考慮され、リビングまたは寝室の1つ以上の窓やドアが開けられている場合に、窓開放と見なされた。平日と休日は区別され、それぞれについて回答された。その他に、世帯属性に関する基礎情報（世帯人数、年齢、世帯収入、電気料金）、住戸属性（住宅タイプ、建築年、居住階、床面積）、室内の温冷感や熱快適感、窓を開けない理由について質問された。さらに、2016年のスラバヤでの調査では、窓開閉行動要因についての考察を深めるために、部屋および時刻を区別した上で窓を閉める理由についても質問された。また、いくつかの住戸にて物理環境実測と温熱主観申告調査を実施した。

4.5 居住者適応行動のパターン分析

4.5.1 分析方法

データマイニングアプローチを採用して、同様の気候条件下での居住者適応行動に隠された典型的な日常パターンを抽出した。1570世帯の全サンプルは、適応行動を詳細に分析する前に、まず気候によって2つのグループに分類された。高温多湿の都市（スラバヤとジョホールバル）と比較的涼しい都市（バンドン）である。次に、窓開閉・冷房使用・扇風機使用の1時間ごとの状態データ（オープン/クローズ、または、オン/オフの2値データ）に基づいて階層的クラスタ分析（ユークリッド二乗距離、ウォード法）を実施し、サンプルを同様のパターンを持ついくつかのサブグループへと分類した。状態データは平日5日と休日2日の加重平均とした。クラスタ分析で

は、24時間分の生の状態データの代わりに主成分値が採用された。2つの属性グループのそれぞれについて、典型的な行動パターンを表すのに効果的なクラスターの数が、クラスター分析の結果から選択された。このサブグループへの分類作業を、まず、窓開閉・冷房使用・扇風機使用のそれぞれについて実施した。次に、それら3項目の状態データ全てをクラスター分析に投入してサブグループへ分類した。

4.52 窓開閉行動パターン

居住者の典型的な1日の窓開閉行動パターンの分類結果を表4.2と図4.5に示す。前述のように、すべてのサンプルは、気候に基づいて2つの属性グループに分割された後、階層的クラスター分析によってそれぞれいくつかのサブグループに分類された。図4.5の折れ線グラフは、1日の間の窓開け率の推移を表しており、そのサブグループの窓開閉行動パターンを示している。高温多湿都市の世帯は、「All-day」、「Daytime & evening」、「Daytime」、「Never」の4つのサブグループに分類された。言い換えれば、高温多湿都市での居住者の窓開閉行動には、これら4つの典型的パターンが存在した。最も頻度の高いグループは「Daytime & evening」(34.1%)で、居住者は朝5時から8時の間に窓を開け、夜20時から翌午前1時の間に窓を閉める。日中と夕方は窓を開けたままで、1日の窓開放時間は平均14.5時間であった。2番目に頻度の高いグループは「Daytime」(25.3%)で、前のグループと同じく朝5時から8時の間に窓を開けるが、夕方18時から20時の間に窓を閉める。1日の窓開放時間は平均11.5時間であった。3番目のグループ「All-day」(23.5%)は、窓を一日中開けたままで、1日の窓開放時間は平均23.2時間であった。「Never」グループ(17.2%)は、どの時間帯も窓を開けない傾向があり、1日の窓開け時間は平均6.1%であった。高温多湿都市の分類結果を全体的に見ると、「Never」を除く3グループ(82.8%)が日中は窓を開けたままにし、「All-day」を除く3グループ(76.5%)が夜間に窓を閉じたままにして入る。以前の研究[19, 60]で報告されていたように、熱帯の自然換気型住宅の居住者の窓開閉行動は日中換気が熱主流であることが本調査でも確認された。さらに、今回の結果は、同様の高温多湿気候下でも、少なくとも4つの典型的な窓開閉行動パターンを抽出できることを示しており、気候条件以外の要因が窓開閉行動パターンに影響していることを示している。1日の平均窓開放時間は15.4時間であり、例えば、韓国の非暖房期間の調査結果(1.8時間/日)よりもはるかに長い[54]。

また、比較的涼しい都市の居住者の窓開閉行動パターンは、高温多湿都市のそれとは大きく異なった(図4.5(b))。「Sunrise & sunset」と「Sunrise」の2つの行動パターンが抽出されたが、ほとんど全ての世帯で、窓は1日1~2回のごく短時間にしか開けられていない。朝5時から7時の間に窓を開ける「Sunrise 1」と「Sunrise 2」のグループは31.8%と26.6%を占めた。一方、「Sunrise & sunset」のグループは朝5時から7時の間と夕方16時から18時の間の1日2回窓を開け、41.6%を占めた。1日の平均窓開放時間は3.0時間で、高温多湿都市よりも大幅に短かった。

図 4.5(c)は、分類された 4 つの高温多湿都市の窓開閉行動パターンの構成比を、住宅タイプ別（公営集合住宅、民間集合住宅、テラスハウス）に示している。3つの住宅タイプの間には大きな違いがあり、このことは、建物の特徴が窓開閉行動に影響を与える要因の1つであることを示している。

表 4.2 窓開閉行動パターンにより分類されたサブグループ

| Climate | Group | n | Share (%) | Window-Opening (h) |
|-----------------|---------------------|------|-----------|--------------------|
| Hot-humid | All-day | 299 | 23.5 | 23.2 |
| | Daytime and evening | 433 | 34.1 | 14.5 |
| | Daytime | 321 | 25.3 | 11.5 |
| | Never | 218 | 17.2 | 6.1 |
| | Total | 1271 | 100.0 | 15.4 |
| Relatively cool | Sunrise and sunset | 119 | 41.6 | 4.8 |
| | Sunrise 1 | 91 | 31.8 | 2.9 |
| | Sunrise 2 | 76 | 26.6 | 1.9 |
| | Total | 286 | 100.0 | 3.4 |

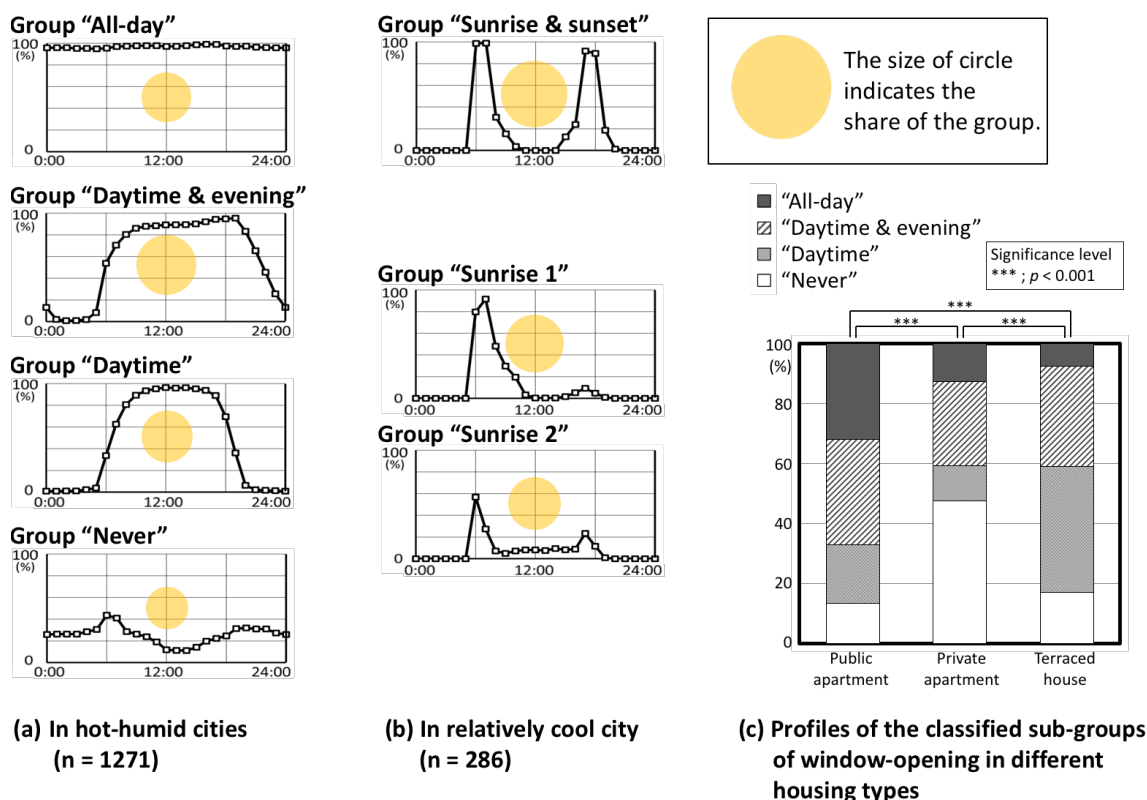


図 4.5 各サブグループの1日の窓開閉パターン

4.53 冷房使用パターン

表 4.3 と図 4.6 に、居住者の平均的な 1 日の冷房使用パターンの分類結果を示す。エアコンを所有している世帯と所有していない世帯の両方がこの分析に含まれている。冷房使用パターンは、高温多湿都市と比較的涼しい都市の間で大幅に異なった。高温多湿都市では、冷房使用パターンは、睡眠時に冷房を使用する「Night-time」（11.5%）と、睡眠時間中だけでなく夕方にも冷房を使用する「Evening&night-time」（6.8%）に分類された。両グループともに 1 日の平均冷房使用時間は 75 時間であった。本調査においても、エアコンは主に夕方と夜間に使用されることが確認された。

「Never」グループは、エアコン非所有世帯がほぼすべて（94.2%）を占めている。エアコン所有世帯のほとんどが、民間集合住宅とテラスハウスの居住者であった。

対照的に、比較的涼しい都市では、午後と夕方にのみ冷房が使用されていることがわかった。冷房使用率が夕方 16 時から 20 時にピークになる「Early evening」グループが 15.9%を占め、冷房使用率が夕方 20 時から夜 24 時にピークになる「Evening」グループが 12.5%で続いた。3 番目は「Afternoon」グループで、冷房使用率が昼の 11 時から 15 時にピークに達し、5.4%を占めた。1 日の平均冷房使用時間は、「Early evening」で 4.7 時間、「Evening」で 5.9 時間、「Afternoon」で 6.3 時間であった。グループ「Never」は、エアコン非所有世帯のみで構成された。いずれのサブグループも夜間就寝中に冷房を使用しておらず、高温多湿都市と比較的涼しい都市の間の冷房使用パターンに明らかな違いがあった。

4.54 扇風機使用パターン

表 4.4 と図 4.7 は、居住者の平均的な 1 日の扇風機使用パターンの分類結果を示している。高温多湿都市の居住者は、扇風機使用パターンによりは 5 つのサブグループに細分された。特に大きなシェアを持つ支配的なグループはなかった。最も多かったグループは「Afternoon & night-time」（23.6%）で、次に「All-day」（23.1%）、「Evening & night-time」（22.3%）、「Daytime & evening」（16.2%）、そして「Never」（14.9%）が続いた。「Afternoon & night-time」と「Evening & night-time」グループでは、夜間の扇風機使用率が約 80%以上と高く、1 日の平均扇風機使用時間はそれぞれ 14.2 時間と 11.7 時間であった。「Daytime & evening」グループでは、扇風機は朝 8 時までにオンになり夜 22 時以降にオフにされ、平均使用時間は 12.8 時間であった。「Never」グループには多くの扇風機非所有世帯（43.9%）が含まれるが、高温多湿都市の扇風機所有世帯も 8.3%はほとんど使用していなかった。さらに、図 4.7(c) に示すように、扇風機使用パターンは住宅タイプの影響が見受けられ、民間集合住宅の居住者は他の居住者よりも扇風機使用が少ない傾向があった。

一方、比較的涼しい都市では扇風機が使用されることはめったにないため、非所有者の 94.1%を含むすべての世帯が「Never」（100%）に分類された。この結果は、高温多湿都市と比較的涼し

い都市の間で扇風機使用パターンに明確な違いがあることを示している。扇風機使用は、高温多湿都市でのみ見られる。

表 4.3 冷房使用パターンにより分類されたサブグループ

| Climate | Group | n | Share (%) | AC Usage (h) | AC Ownership (%) |
|-----------------|------------------------|------|-----------|--------------|------------------|
| Hot-humid | Night-time | 137 | 11.5 | 7.5 | 100.0 |
| | Evening and night-time | 81 | 6.8 | 7.5 | 100.0 |
| | Never | 966 | 81.6 | 0.2 | 5.8 |
| | Total | 1184 | 100.0 | 1.5 | 23.1 |
| Relatively cool | Afternoon | 16 | 5.4 | 6.3 | 100.0 |
| | Evening | 37 | 12.5 | 5.9 | 100.0 |
| | Early evening | 47 | 15.9 | 4.7 | 100.0 |
| | Never | 195 | 66.1 | 0.0 | 0.0 |
| | Total | 295 | 100.0 | 1.8 | 33.9 |

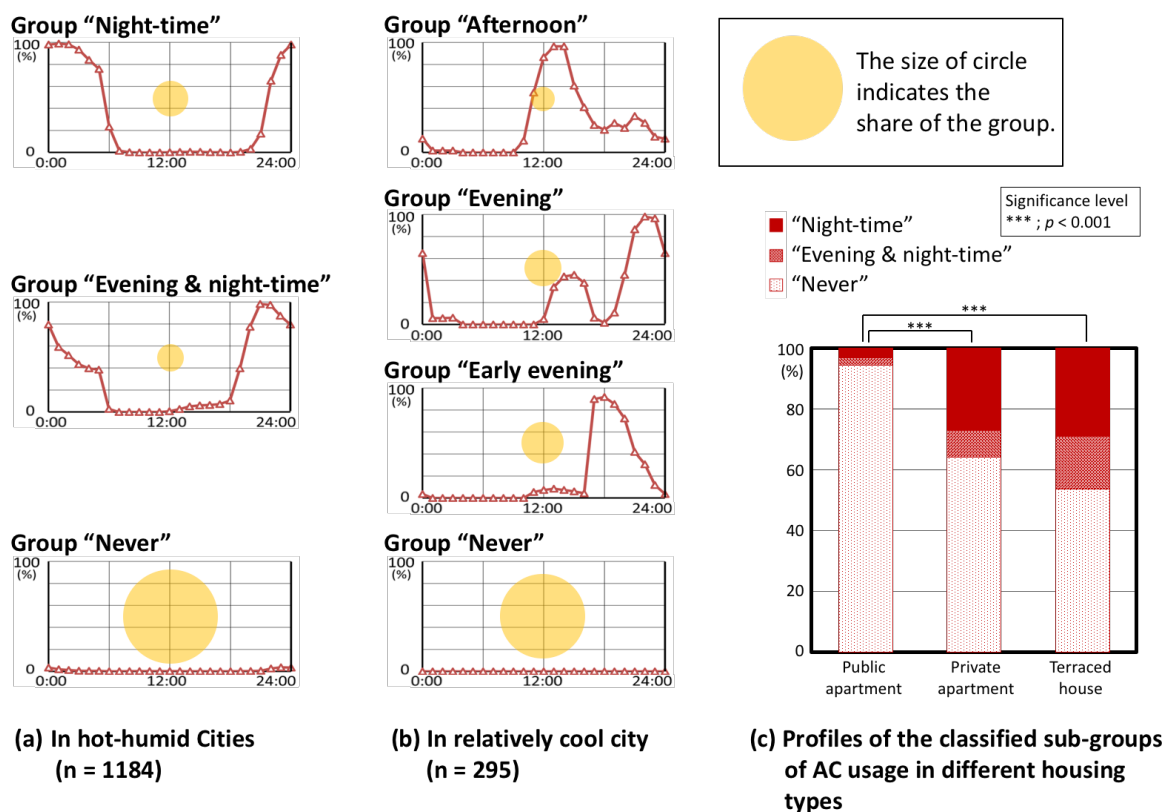
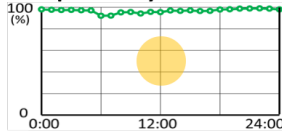


図 4.6 各サブグループの1日の冷房使用パターン

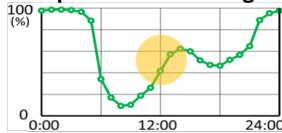
表 4.4 扇風機使用パターンにより分類されたサブグループ

| Climate | Group | n | Share (%) | Fan Usage (h) | Fan Ownership (%) |
|-----------------|--------------------------|------|-----------|---------------|-------------------|
| Hot-humid | All-day | 293 | 23.1 | 23.2 | 98.0 |
| | Afternoon and night-time | 300 | 23.6 | 14.2 | 96.3 |
| | Evening and night-time | 283 | 22.3 | 11.7 | 96.8 |
| | Daytime and evening | 206 | 16.2 | 13.8 | 99.5 |
| | Never | 189 | 14.9 | 2.9 | 56.1 |
| | Total | 1271 | 100.0 | 14.0 | 91.3 |
| Relatively cool | Never | 272 | 100.0 | 0.1 | 5.9 |
| | Total | 272 | 100.0 | 0.1 | 5.9 |

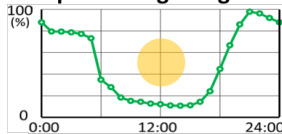
Group "All-day"



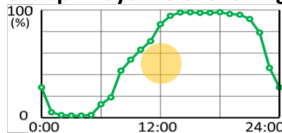
Group "Afternoon & night-time"



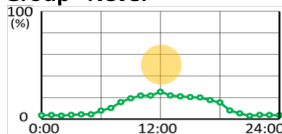
Group "Evening & night-time"



Group "Daytime & evening"

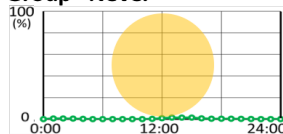


Group "Never"



(a) In hot-humid cities
(n = 1271)

Group "Never"

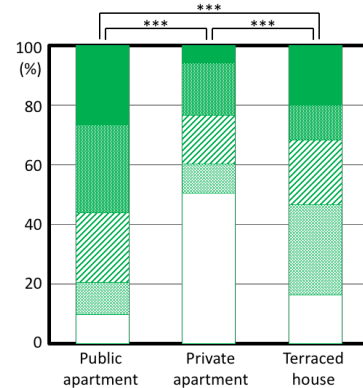


(b) In relatively cool city
(n = 272)

The size of circle indicates the share of the group.

Significance level
***; $p < 0.001$

- "All-day"
- "Afternoon & night-time"
- ▨ "Evening & night-time"
- "Daytime & evening"
- "Never"



(c) Profiles of the classified sub-groups of fan usage in different housing types

図 4.7 各サブグループの1日の扇風機使用パターン

4.5.5 窓開閉・冷房・扇風機を統合してのパターン分類

このセクションでは、3つの適応行動（窓開閉・冷房使用・扇風機使用）全ての24時間の状態データを使用して実行した、階層的クラスタ分析結果を考察する。図4.8と表4.5に見られるように、高温多湿都市のすべての世帯は5つのサブグループに分類された。主に、グループA1～A2にはエアコン所有世帯が分類され、グループA3～A5にはエアコン非所有世帯が分類された。

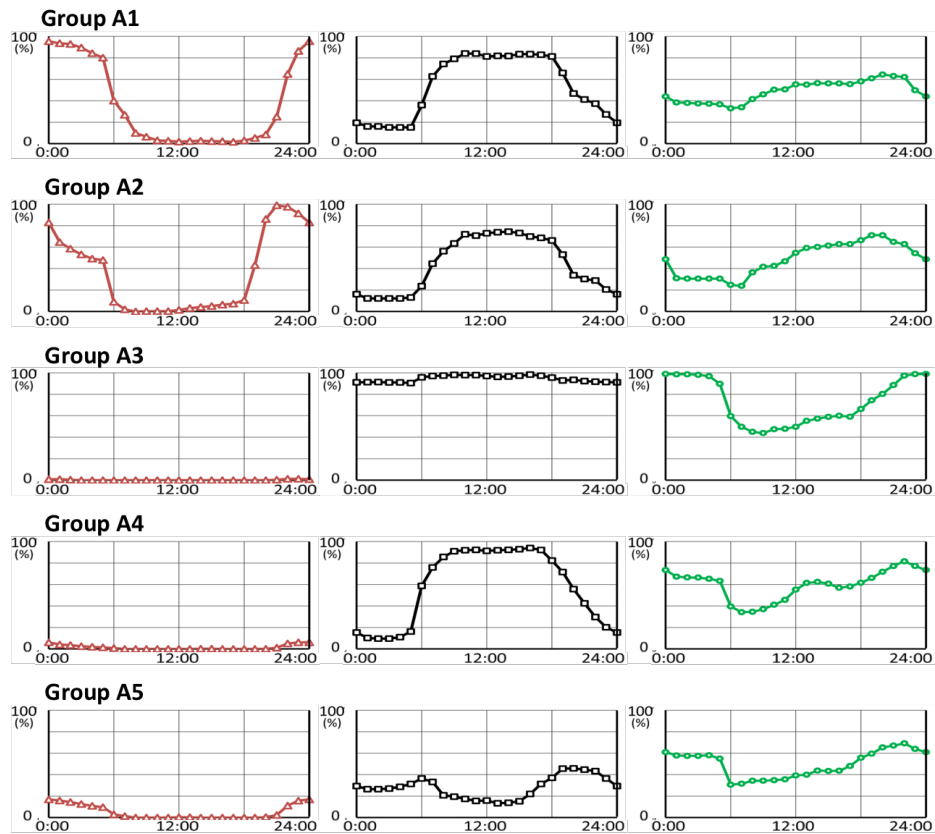
グループA1とA2の違いは主に冷房使用パターンの違いであり、つまりグループ「Night-time」と「Evening&night-time」の違いによるものだ（図4.6を参照）。一方、グループA3～A5は、窓開閉動作パターンの違いを示している。グループA4は、エアコン非所有世帯の中で最もシェアの大きなグループ（49.3%）であり、日中に窓が開放される。グループA3（18.7%）の世帯では一日中窓が開放され、グループA5（13.8%）の世帯ではどの時間帯にも窓があまり開けられない。グループA1～A2とグループA3～A5を比較すると、前者では日中よりも夜間の扇風機使用率が低く、後者では逆に日中よりも夜間の扇風機使用率が高くなっている。このことから、エアコンの無い世帯（グループA3～A5）では、夜間に扇風機がよく使用されていると言える。

表4.6は、居住者の適応行動の主たるパターンをまとめたものである。高温多湿都市では、大多数の世帯がエアコンの所有／非所有に関係なく、日中は窓を開放する。夜間はエアコン所有世帯であれば冷房を使用し、非所有世帯は扇風機を使用する。比較的涼しい都市では、ほとんどの世帯が朝と夕方のごく短時間のみ窓を開放する。冷房使用は午後から夕方にかけてのみである。居住者の適応行動パターンは、最初に高温多湿および比較的涼しい気候などの気候条件に応じて異なると結論付けることができる。しかしながら、図4.8が示すように、特に高温多湿な都市においては同様の気候条件であっても様々な適応行動パターンが存在する。

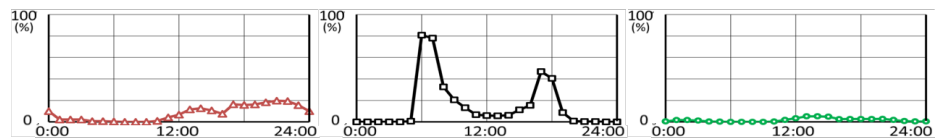
表 4.5 窓開閉・冷房使用・扇風機使用パターンにより分類されたサブグループ

| Climate | Group | n | Share (%) | AC Usage (h) | AC Ownership (%) | Window-Opening (h) | Fan Usage (h) | Fan Ownership (%) |
|-----------------|-------|------|-----------|--------------|------------------|--------------------|---------------|-------------------|
| Hot-humid | A1 | 149 | 12.2 | 8.3 | 100.0 | 11.7 | 11.8 | 84.6 |
| | A2 | 76 | 6.2 | 8.2 | 100.0 | 10.7 | 11.7 | 89.5 |
| | A3 | 229 | 18.7 | 0.1 | 1.7 | 22.7 | 12.7 | 94.3 |
| | A4 | 604 | 49.3 | 0.3 | 8.8 | 14.2 | 14.3 | 93.4 |
| | A5 | 168 | 13.8 | 1.2 | 20.2 | 6.8 | 11.9 | 87.5 |
| | Total | 1226 | 100.0 | 1.8 | 25.8 | 14.2 | 13.2 | 91.4 |
| Relatively cool | | 297 | 100.0 | 1.9 | 35.0 | 3.7 | 0.4 | 13.8 |

In hot-humid cities



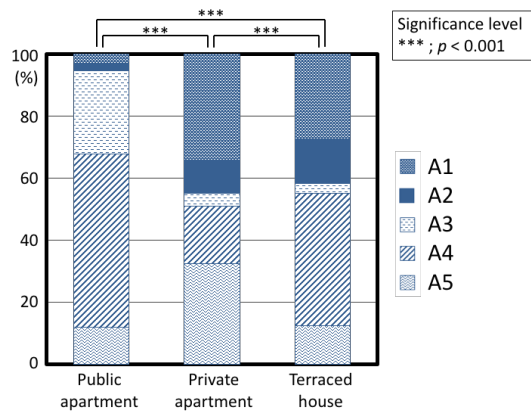
In relatively cool city



(a) AC usage

(b) Window-opening

(c) Fan usage



(d) Profiles of the classified sub-groups of AC use, window-opening, fan use in different housing types

図48 各サブグループの1日の冷房使用・窓開閉・扇風機使用パターン

表 4.6 居住者の適応行動の主要パターン

| Attributes | | Daytime | Night-Time |
|----------------------|-------------|--|------------|
| Hot-humid city | With ACs | Daytime ventilation | AC use |
| | Without ACs | Daytime ventilation | Fan use |
| Relatively cool city | With ACs | Window-opening in morning and evening AC use in the evening | - |
| | Without ACs | Window-opening in morning and evening | - |

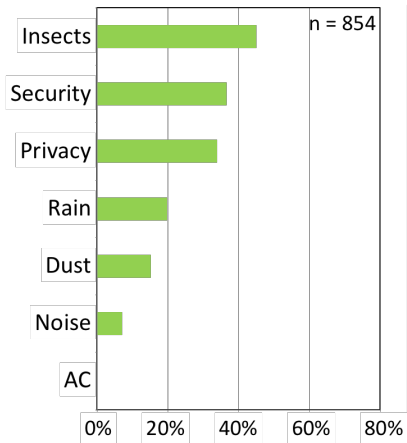
4.6 要因の考察

4.6.1 窓を開けない理由

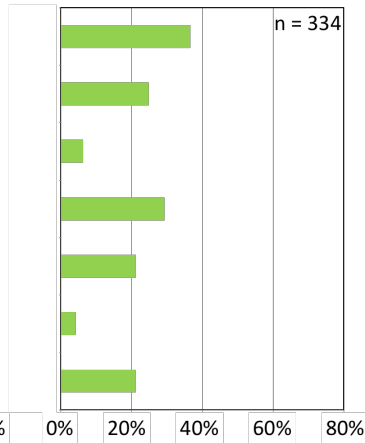
図 4.9 は、居住者が複数選択回答形式で回答した窓を開けない理由を示している。高温多湿都市では、エアコン非所有世帯は「虫」（36.0%）、「セキュリティ」（28.6%）、「プライバシー」（30.7%）の回答が多かった。エアコン所有世帯では、「虫」（33.2%）、「雨」（26.6%）、「セキュリティ」（24.1%）の順が多かった。前述のように、窓開閉行動パターンは、エアコンの所有／非所有に関わらず、多くの世帯は日中に窓を開けて夜間に窓を閉める。従って、これらの理由は、主に夜間に窓を開けない理由であると考えられる。

比較的涼しい都市では、夜間だけでなく日中も窓を開ける世帯はほとんどなかった（図 4.8 を参照）。図 4.9 に示すように、居住者は「セキュリティ」（71.6%）、「プライバシー」（65.9%）、「雨」（62.2%）、「虫」（54.5%）などに関心を持っている。これらの 4 つの理由は高温多湿都市でも同様に選択されていたが、夜間に窓を開けない理由だと考えられた。比較的涼しい都市で日中も窓を開けない理由はこれらの理由ではなく、気候条件、つまり比較的涼しい気候に起因すると思われるのが妥当である。

In hot-humid cities



(a) AC non-owners



(b) AC owners

In relatively cool city

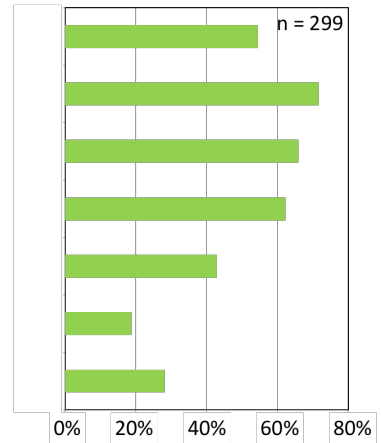
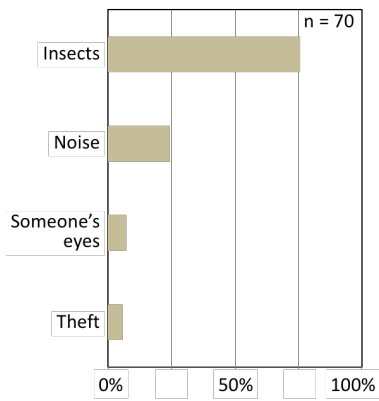
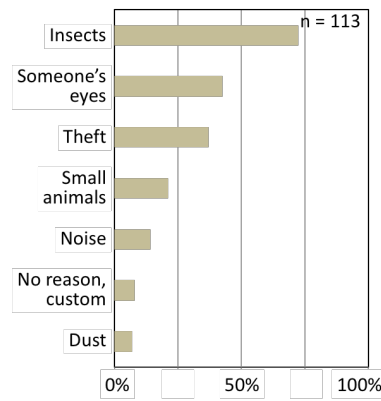


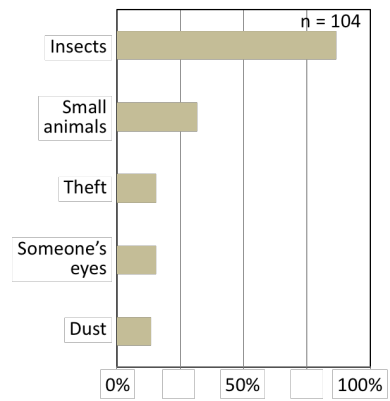
図 4.9 窓を開けない理由



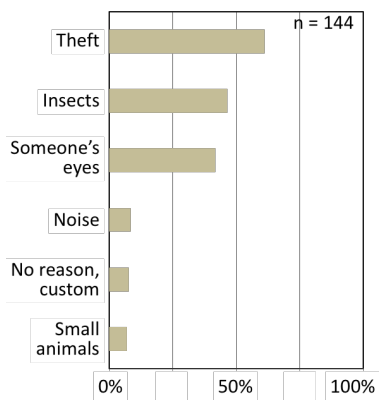
(a) In living room during midday



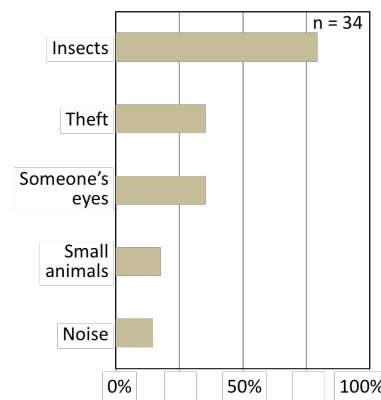
(b) In living room during evening



(c) In bedroom during evening



(d) In living room during night-time



(e) In bedroom during night-time

図 4.10 窓を閉める理由

4.62 窓を閉める理由

2016年のスラバヤ（高温多湿都市）の調査では、より詳細なインタビューが行われた。ここでは、エアコン非所有世帯の窓を閉める理由が、時間帯（朝・夕方・夜間）と部屋（リビング・寝室）を区別して尋ねられた。図48で示したように、高温多湿都市のエアコン非所有世帯の行動パターンは、A3～A5の3つのグループに分類された。これらは、終日換気グループ（A3）、日中換気グループ（A4）、無換気グループ（A5）である。従って、図4.10(a)は主にグループA5が日中に窓を閉める理由を説明しており、図4.10(b)～(e)は、グループA4が夜間に窓を閉める理由を説明している。図4.10(b)～(c)に示すように、夕方に窓を閉める理由で最も多いのは、リビングと寝室の両方において「虫」（72.6%と86.5%）であった。「虫」は夜間においても両部屋で窓を閉める主な理由であった。一方、「盗難」と「視線」も特に居間で窓を閉める理由として多く挙げられた（図4.10(d)～(e)）。

前述の通り、夜間換気は、蒸暑地においても屋内の熱的快適性を実現するための効果的なパッシブクーリング技術の1つである[20-23]。ただし、ここに示したように、高温多湿都市の多くの世帯は、エアコンを所有していても夜間は窓を開けていない。夜間換気による熱的快適性と省エネ効果を確保するには、現在の窓開閉行動パターンを再検討する必要がある。夜間に窓を開ける際の障害となっている「虫」、「盗難」、「視線」への懸念を排除することが、開口部や窓を設計する際に取り組む必要のある重要な課題だと考えられる。

4.63 窓開閉行動パターンに対する他の変数のオッズ比

表47は、4つの分類された窓開閉行動パターンを従属変数として、調査された各変数のロジスティック回帰分析（オッズ比と95%信頼区間）の結果を示している。その結果に基づいて、それぞれの窓開閉行動パターンに影響を与える世帯属性および建物の特徴を特定することができる。

最初に、世帯人数が重要な要素であることがわかる。世帯規模が大きいほど「Daytime」または「Daytime & evening」の窓開閉行動パターンを持つ可能性が高く、世帯規模が小さいほど「Never」または「All-day」パターンを持つ傾向がある。これは、[27, 54]で説明されているように、大規模世帯の窓開閉行動パターンが、小規模世帯よりも料理、掃除、睡眠などの生活行動の影響を受けているためと考えられる。回答者年齢は、「Daytime」と「Daytime & evening」を多少区別している。若い世帯はおそらく夜に長い時間を過ごし、窓を開けている時間が長くなると考えられるので、理解できる。以前のいくつかの研究でも、年齢が重要な要因として報告された[96]。世帯収入は、興味深いことに、窓開閉行動パターンに強く影響する。オッズ比は「Never」（OR: 1.70）で最も高く、次に「Daytime」（1.21）、「Daytime & evening」（0.94）、「All-day」（0.61）が続く。この窓開閉行動パターンの順序は、1日の窓開放時間の順序に対応する（表42を参照）。つまり、世帯収入が高

ければ高いほど、1日の窓開放時間が短くなる。これはおそらく間接的にエアコン所有率に関連している。表4.7に示すように、「Never」世帯はエアコン使用時間が長い傾向があり、「All-day」世帯は使用時間が短い傾向がある。さらに、「Daytime」世帯は、「All-day」世帯よりも多くのエアコンを所有する傾向がある。従って、電気料金は、サブグループ「All-day」の窓開閉行動にも関連しており、「All-day」世帯は、より少ない電力を使用する傾向がある。窓開閉行動とエアコン使用量との関連は、Yunらなどの以前のいくつかの研究で議論されたが[97]、世帯収入が窓開閉行動に影響を与える要因であることを明らかにした研究はこれまでなかった。

第二に、前述のように、住宅タイプが影響力のある要因であることがわかる。ここでは、次のように名目変数が住宅タイプに使用された。1=公営集合住宅、2=民間集合住宅、3=テラスハウス。その結果、テラスハウスは「Daytime」窓開閉行動パターンの可能性が高いのに対し、公営集合住宅は「All-day」パターンである傾向が見られた。Johnsonらの以前の研究でも、住宅の種類が影響力のある要因であると報告されていたが[98]、本調査ではさらに、テラスハウスと公営集合住宅の違いが夜間の窓開閉行動に見られることを明らかにした。この違いは、部分的に居住階に起因していると考えられる。表4.7が示すように、低層階に住む世帯は「Daytime」パターンになる傾向があり、上方階に住む世帯は夜間にも窓を開放して「All-day」パターンになる傾向がある。

第三に、前述のように、エアコン所有世帯は「Daytime」パターンである可能性が高く、「All-day」パターンである可能性は低くなる。これは、エアコンの所有が、夕方と夜間の窓開放の阻害要因であることを意味する。これは主に、以前の研究[20, 22, 62-63]で報告されているように、熱帯地域のエアコン所有者が主に寝室で夕方と夜間に冷房を使用し、窓を閉めているためだ。従って、リビングにエアコンが設置されているかどうかは、本調査での窓開閉行動パターンとは関係が見られない。一方で、扇風機の所有者は「Daytime」パターンである可能性が高くなる。さらに、在宅時間の長さも影響力のある要因であることがわかる。在宅時間が短い世帯は「Never」パターンの傾向があり、在宅時間が長い世帯は「All-day」パターンの傾向がある。

第四に、温冷感と窓開閉行動パターンとの間に有意な関連性がないことに注意する必要がある。この結果は、熱帯における平均的な1日の窓開閉行動パターンが主に熱的要因以外によって決定されるという当初の仮定を裏付けている。一方、気流感と窓開閉行動パターンとの間には重要な関連性が見られる。風をより感じている世帯は、窓をより開ける傾向があり「All-day」パターンになる。

最後に、窓を開けない理由については、虫が気になる世帯は「Daytime」パターンが多く、「Never」と「All-day」パターンが少ない傾向がある。これは、虫の侵入が日中ではなく夕方と夜間に懸念されていることを意味する。さらに、セキュリティを懸念している世帯は、「All-day」パターンの可能性が高くなる。これは矛盾した結果だが、居住階に関連している可能性が考えられる。

「All-day」パターンの世帯は、前述のように上方階に住んでいる傾向がある。また、雨、プライバシー、エアコンは、いくつかの窓開閉行動パターンに関連していることがわかる。

全体として、世帯人数、回答者年齢、世帯収入、虫への懸念は、3つ以上の窓開閉行動パターンに影響を与えているため、本調査において最も影響力のある要因だと言える。さらに、住宅タイ

プ、居住階、エアコン所有は、それぞれ「Daytime」および「All-day」パターンに影響を及ぼしているため、これらの要因は、間接的夕方と夜間の窓開閉行動の重要な決定要因にもなり得る。特に、虫への懸念、セキュリティへの懸念、雨への懸念は、居住者に夜間の窓開閉を促すために考慮が必要な要素だと考えられる。

表 4.7 分類された窓開閉行動パターンに対する調査変数の調整オッズ比と 95%信頼区間

| Surveyed Variables | Classified Window-Opening Patterns | | | |
|---|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Never | Daytime | Daytime and Evening | All-Day |
| Household attributes | | | | |
| Household size | 0.75 (0.67–0.84) *** | 1.13 (1.04–1.22) ** | 1.12 (1.04–1.21) ** | 0.89 (0.81–0.98) * |
| Age of respondent | 0.98 (0.96–1.00) ** | 1.03 (1.01–1.04) *** | 0.99 (0.98–1.00) * | 1.01 (0.99–1.02) |
| Household income ratio | 1.70 (1.41–2.05) *** | 1.21 (1.05–1.41) * | 0.94 (0.83–1.08) | 0.61 (0.52–0.71) *** |
| Electricity bills ratio | 1.00 (0.74–1.34) | 1.23 (0.95–1.59) | 1.09 (0.86–1.37) | 0.69 (0.52–0.92) * |
| Household income divided by electricity bills | 1.17 (0.08–16.24) | 6.34 (0.67–59.73) | 1.94 (0.27–14.14) | 0.05 (0.00–0.47) ** |
| Building attributes | | | | |
| Housing type | 1.07 (0.85–1.34) | 1.63 (1.35–1.97) *** | 0.96 (0.81–1.15) | 0.47 (0.36–0.60) *** |
| Age of building | 0.91 (0.63–1.33) | 0.76 (0.55–1.06) | 1.09 (0.83–1.42) | 1.13 (0.85–1.50) |
| Floor level | 0.94 (0.83–1.08) | 0.86 (0.76–0.98) * | 1.03 (0.93–1.14) | 1.12 (1.00–1.24) * |
| Unit size | 0.97 (0.92–1.02) | 0.96 (0.92–1.00) | 0.98 (0.95–1.02) | 1.05 (1.01–1.08) ** |
| Ownership | | | | |
| AC ownership | 1.45 (0.96–2.18) | 1.45 (1.03–2.04) * | 0.99 (0.72–1.37) | 0.40 (0.26–0.63) *** |
| AC in bedroom | 1.41 (0.92–2.17) | 1.43 (1.01–2.03) * | 0.93 (0.66–1.30) | 0.45 (0.29–0.72) ** |
| AC in living room | 1.15 (0.63–2.08) | 1.23 (0.75–2.02) | 1.03 (0.63–1.68) | 0.45 (0.50–1.01) |
| AC quantity | 1.13 (0.97–1.32) | 1.09 (0.96–1.24) | 0.96 (0.84–1.09) | 0.74 (0.60–0.91) ** |
| Fan ownership | 0.67 (0.37–1.20) | 2.11 (1.03–4.34) * | 1.16 (0.69–1.93) | 0.76 (0.45–1.28) |
| Duration | | | | |
| AC usage | 1.07 (1.03–1.12) ** | 1.03 (1.00–1.07) | 0.98 (0.94–1.01) | 0.89 (0.84–0.94) *** |
| Fan usage | 0.98 (0.96–1.01) | 1.02 (0.99–1.04) | 0.99 (0.98–1.01) | 1.00 (0.98–1.02) |
| Stay in house | 0.91 (0.88–0.94) *** | 1.02 (0.99–1.04) | 1.02 (0.99–1.05) | 1.03 (1.00–1.07) * |
| Sensations³ | | | | |
| Thermal (daytime) | 1.01 (0.86–1.18) | 0.94 (0.82–1.08) | 1.03 (0.92–1.15) | 1.01 (0.91–1.12) |
| Thermal (night-time) | 1.00 (0.85–1.16) | 0.98 (0.85–1.13) | 1.08 (0.96–1.21) | 0.95 (0.85–1.06) |
| Wind flow (daytime) | 0.87 (0.74–1.03) | 0.99 (0.86–1.14) | 0.94 (0.83–1.07) | 1.30 (1.09–1.54) * |
| General comfort (daytime) | 1.05 (0.87–1.27) | 0.82 (0.70–0.95) * | 1.08 (0.93–1.25) | 1.13 (0.94–1.37) |
| Reasons for not opening windows | | | | |
| Insects | 0.61 (0.4–0.88) ** | 2.09 (1.57–2.77) *** | 0.91 (0.71–1.18) | 0.72 (0.54–0.97) * |
| Security | 0.92 (0.63–1.33) | 0.93 (0.68–1.27) | 0.78 (0.59–1.03) | 1.53 (1.13–2.06) ** |
| Rain | 0.64 (0.41–0.97) * | 0.96 (0.68–1.34) | 1.72 (1.27–2.61) *** | 0.69 (0.47–1.01) |
| Privacy | 0.82 (0.54–1.26) | 0.56 (0.39–0.83) ** | 1.26 (0.93–1.70) | 1.32 (0.96–1.81) |
| Dust | 1.33 (0.89–2.01) | 0.93 (0.63–1.35) | 0.91 (0.65–1.27) | 0.99 (0.67–1.45) |
| AC | 2.21 (1.23–3.99) ** | 0.69 (0.37–1.30) | 0.84 (0.47–1.48) | 0.62 (0.27–1.41) |
| Noise | 0.91 (0.42–1.96) | 0.85 (0.42–1.73) | 1.03 (0.59–1.80) | 1.11 (0.63–1.96) |

¹ Adjusted for household size, age of respondent and household income ratio; ² significance levels are ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$; ³ sensations in the living room.

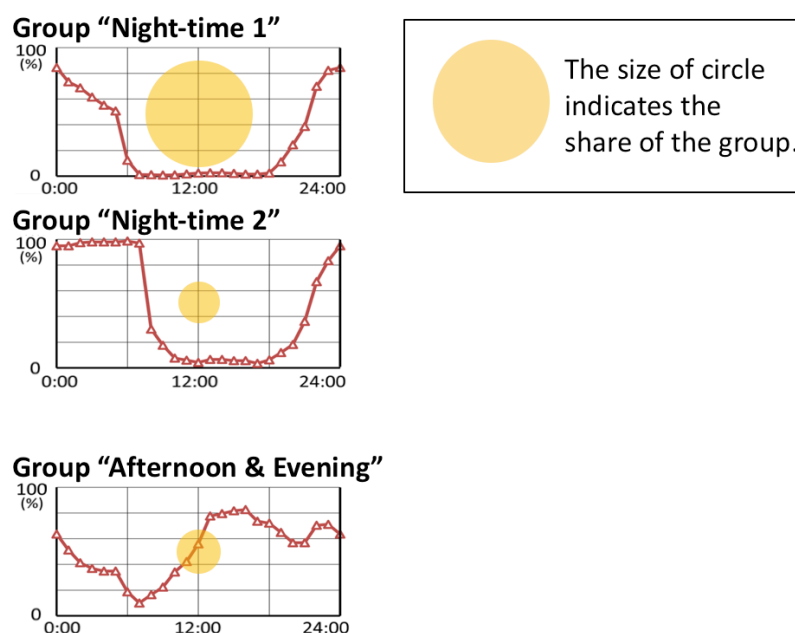
4.64 エアコン台数と設置場所

高温多湿都市のエアコン所有世帯のみの冷房使用データを使用して、階層的クラスター分析を実施した（表 4.8 および図 4.11）。既に説明した通り、エアコン非所有世帯を含む全世界帯データを使用して分析した結果は、高温多湿都市での冷房使用は、夕方と夜間だけであった（図 4.6 (a) を参照）。ただし、エアコン非所有世帯を分析から除外すると、新たな冷房使用パターンを持つ「Afternoon & evening」グループが抽出された。このグループは昼の 12 時頃から夜 24 時頃まで冷房を使用し、1 日の平均冷房使用時間は 12.7 時間で、全体平均の 7.8 時間よりも大幅に長かった。

図 4.12 (a) は、夜間に冷房を使用するグループ「Night-time 1」と「Night-time 2」と、午後と夕方に冷房を使用するグループ「Afternoon & evening」を比較して、エアコン設置場所を表している。ピア

表 4.8 冷房使用パターンにより分類されたサブグループ（エアコン所有世帯のみ）

| Climate. | Group | n | Share (%) | AC Usage (h) | AC Ownership (%) |
|-----------|-----------------------|-----|-----------|--------------|------------------|
| Hot-humid | Night-time 1 | 272 | 75.3 | 6.5 | 100.0 |
| | Night-time 2 | 43 | 11.9 | 10.9 | 100.0 |
| | Afternoon and evening | 46 | 12.7 | 12.5 | 100.0 |
| | Total | 361 | 100.0 | 7.8 | 100.0 |



AC owners in hot-humid cities (n = 361)

図 4.11 各サブグループの 1 日の冷房使用パターン（エアコン所有世帯のみ）

ソンのカイ 2 乗検定の結果、2つのグループ間に有意差が見つかった ($\chi^2=14.825$, $df=2$, $p<0.01$)。前者の約 70%は寝室にのみエアコンを設置しているのに対し、後者はリビングにエアコンを設置する傾向があった(約 58%)。つまり、リビングにエアコンのある世帯は、午後早くから冷房を使用している。図 4.12(b)は、寝室にのみエアコンがある世帯と、リビングのみ、あるいはリビングと寝室の両方にエアコンがある世帯とを比較して、エアコン台数を表している ($\chi^2=71.479$, $df=3$, $p<0.001$)。前者の 55%以上がエアコンを 1 台しか所有していないのに対し、後者の約 74%は 2 台以上のエアコンを所有していた。これは、居住者は最初に寝室にエアコンを設置し、その後リビングにエアコンを追加する傾向があることを意味する。

現在、エアコン所有世帯のうちの約 87.3%が寝室で夜間のみ冷房を使用しており(1日 7.1時間)、残りの 12.7%が午後から夜まで長期間(12.5 時間)使用している。本調査の結果は、世帯収入の増加に伴い今後もエアコンの普及が進行し続けると、冷房エリアは寝室だけでなくリビングへと拡大し、冷房使用時間も劇的に増加することを示唆している。

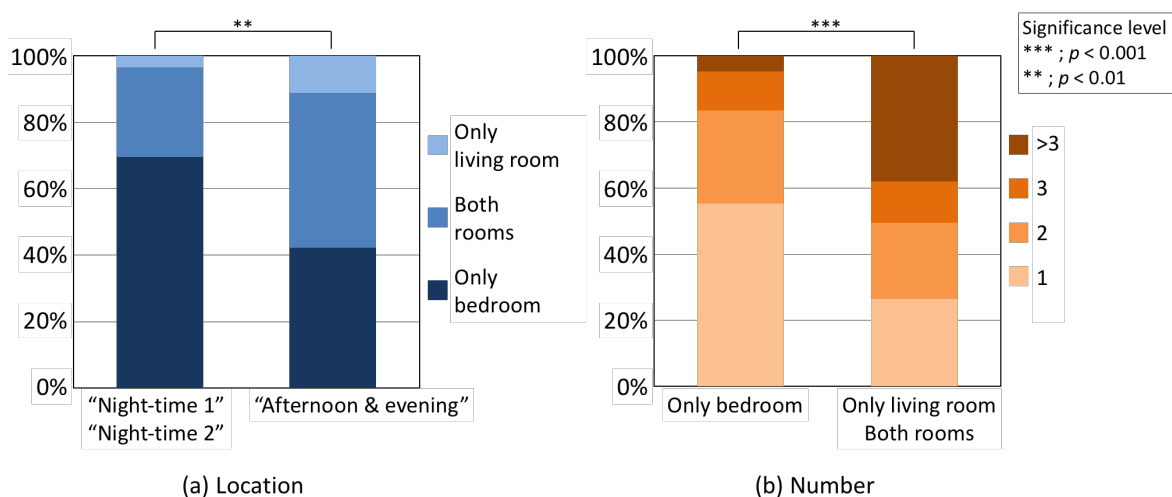


図 4.12 エアコン設置場所と所有台数

4.7 インドネシアの賃貸型集合住宅の実際の室内温熱環境

インドネシア、スラバヤでの 2016 年調査では、居住者への適応行動に関するインタビュー調査に並行して、市内 6 地点の集合住宅の各 2~4 世帯のリビングおよび寝室に計測機器を設置し、1 世帯につき 3 日間前後の温熱実測を行った。対象住戸は賃貸型公営集合住宅であり、自然換気で、エアコン所有世帯はなかった。

外気温と各集合住宅の室内気温の箱ひげ図を図 4.13 に示す。外気温の最大値は 32.3°C、最小値は 23.2°C、平均は 27.0°C であった。日中(6時~18時)の平均外気温は 30.0°C、夜間(18時~翌 6 時)

の平均外気温は27.3℃であった。室内気温は全住戸の集計で最大値が34.8℃、最小値は26.0℃、平均は30.3℃であった。6地点の集合住宅それぞれの平均室内気温は30℃±1℃であり、違いは見られなかった。外気温に比べて室内気温が高い。

室外湿度と各集合住宅の湿度の箱ひげ図を図4.14に示す。屋外平均湿度は82.7%であり、室内平均湿度は60%～75%と集合住宅ごとに幅があったが、全体では室内平均湿度は69.1%となり、室外湿度に比べて低いものが、高い値を示した。

リビングおよび寝室の中央付近の床上1.1mで計測した室内風速は、最大値が0.41m/s、平均が0.06m/sであった。屋外の平均風速が0.81m/sあり、窓の開放率も高かったのに反して、実際に得られた室内風速は非常に低かった。この要因は、開口部周辺の利用状況が影響しているものと考えられる。使用されている窓は、屋外側・廊下側ともに腰窓サイズで、高さが1m程度ある十分に大きなものだが、突き出し窓で居住者が実際に窓を開く角度は10～30°程度である。また、バルコニーが物干しスペースとして使われることから、大量の衣類などが窓のすぐ外側に掛けられている場面が多く見られた。さらには、窓を開けていながらも厚手のカーテン等で開口面を覆っている事例が頻繁に見られた。インタビュー調査で理由を尋ねると、屋外側の窓では眩しさ（直射でなく拡散光）を防ぐために、廊下側の窓では外部からの視線を遮るためという回答が多かった。

| | 平均気温 |
|--------|--------|
| 室外 | 27°C |
| House1 | 30.5°C |
| House2 | 30.6°C |
| House3 | 29.7°C |
| House4 | 30.9°C |
| House5 | 30.7°C |
| House6 | 29.1°C |

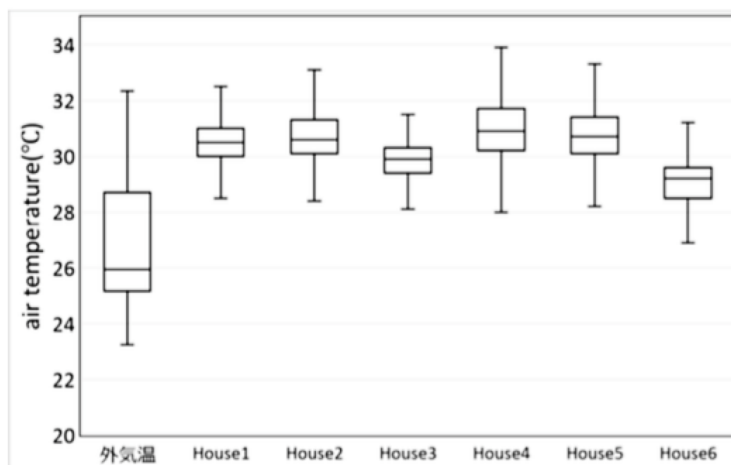


図 4.13 外気温と各集合住宅の室内気温

| | 平均湿度 |
|--------|-------|
| 室外 | 82.7% |
| House1 | 68.4% |
| House2 | 67.4% |
| House3 | 75.6% |
| House4 | 61.4% |
| House5 | 67.5% |
| House6 | 74.5% |

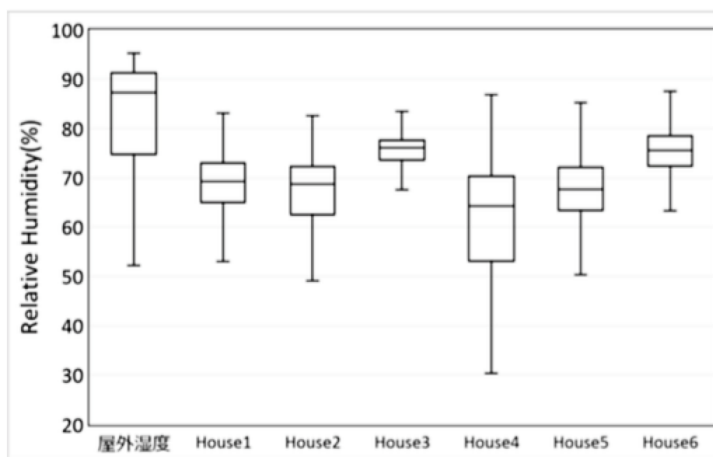


図 4.14 屋外湿度と各集合住宅の室内湿度



図 4.15 窓まわりの状況

4.8 章まとめ

マレーシアとインドネシアでの都市住宅居住者を対象とした適応行動に関する大規模調査により、主に以下について明らかになった。

- 居住者の窓開閉、冷房使用、扇風機使用の典型的な 1 日の行動パターンが、それぞれ抽出された。窓開閉行動パターンは、高温多湿都市と比較的涼しい都市とで大きく異なり、気候条件の影響を受けていることが明らかであった。それにもかかわらず、同じ高温多湿の気候下であっても様々な行動パターンが存在した。この結果は、温度変化以外に窓開閉行動に影響を与える要因があることを示唆した。本調査では、温冷感と窓開閉行動パターンとの間に有意な関連はなかった。
- 世帯人数、回答者年齢、世帯収入、虫への懸念が、窓開閉行動パターンに最も影響を与える要因であることがわかった。さらに、住宅タイプ、居住階、エアコン所有は、それぞれ、夕方や夜間の窓開閉行動に影響を与えていた。虫、セキュリティ、雨への懸念は、夜間の窓開放の阻害要因として関連付けられた。
- 冷房使用パターンおよび扇風機使用パターンは、高温多湿都市と比較的涼しい都市の間で大きく異なっていた。前者では、エアコン所有世帯のほとんどが夜間に冷房を使用し、非所有世帯は代わりに扇風機を使用していた。後者では、扇風機は使用されず、冷房は夕方に使用されていた。
- 高温多湿都市のエアコン非所有世帯の多くが、日中にのみ窓を開放した。夕方または夜間に窓を閉める理由には、リビングルームと寝室の両方において「虫」が多く挙げられた。夜間にリビングルームの窓を閉める理由として「盗難」と「視線」も多く回答された。この結果は、夜間換気による躯体冷却を促進するために、これらの障害を取り除く必要があることを示唆した。
- 高温多湿都市では、エアコンは最初に寝室に設置され、その後リビングルームに追加される傾向がわかった。また、リビングルームにエアコンがある世帯では午後早い時間から長時間冷房使用していることがわかった。今後さらなるエアコン普及により、空間的にも時間的にも冷房使用範囲が拡大し、世帯当たりのエネルギー消費量がさらに増加することが示唆された。
- インドネシアの公営住宅での温熱実測結果は、室内が高温多湿な現状と、窓開けがされていても室内風速が非常に弱い現状を示した。窓まわりに大量の洗濯物が干されたり、遮光

や視線除けのために窓が布や紙で塞がれたりしている様子が観察された。居住者の開口部周辺の利用方法や、プライバシーなどに関わる開口部設計面での課題が示唆された。

以上の結果から、本研究のターゲットである東南アジア蒸暑地の低中所得者層の現状の適応行動パターンは、日中の窓開放による自然通風利用に対して大勢的に合致しており、自然通風を利用するパッシブクーリング手法は居住者に受容され得るものと考えられる。加えて、居住者の適応行動パターンには多様性が存在することから、居住者に向けてクーリング効果を最適化する行動パターンを明示、推奨することでパッシブクーリングの実効性を高めることも重要である。けれども、日中に窓開放している世帯が多いにも関わらず室内の熱的快適性が不十分であることと、夜間の窓開放している世帯が少ないことは課題である。具体的には、遮光や視線遮断を考慮した開口部設計、通風を妨げない方法での物干しニーズへの対応、夜間の窓開放の阻害要因である虫やセキュリティなどへの懸念の解消により、パッシブクーリング戦略に即した適応行動を居住者が実行しやすくなるであろう。

本調査結果を踏まえ、戦略的な住宅設計方針として部分冷房の考え方が適切ではないかと考える。既往研究より、東南アジア蒸暑地においても夜間換気による躯体冷却効果が期待されており、本調査結果の通り、世帯当たりのエアコン台数が増えると冷房使用シーンが拡大される傾向がある。そこで、リビングルームでの自然通風と夜間換気を促進することで日中の熱的快適性を向上させ、一方で、寝室のみにエアコン使用を限定することで過度な冷房使用を抑える戦略である。この方法は現状の居住者の適応行動パターンに合致する。当然ながら、冷房エネルギー消費量を可能な限り削減するために、窓外部での十分な日射遮蔽と冷房空間の断熱を採用する必要がある。

※本章は、以下にて公開した内容を基に翻訳したものである。

森博史、久保田徹、I.G.N. Antaryama、S.N.N. Ekasiwi 「Analysis of Window-Opening Patterns and Air Conditioning Usage of Urban Residences in Tropical Southeast Asia.」 『Sustainability』 第12巻 24号、No. 10650、Multidisciplinary Digital Publishing Institute、2020年12月

5

ケーススタディ：窓デザインによる自然通風利用 効果の向上

これまで説明してきた通り、熱帯居住者は発汗蒸発による暑熱対応能力に優れており、気流の存在が重要である。また、マレーシアとインドネシアの高温多湿都市の住民の多くが日中換気型の窓開閉行動パターンで生活しており、自然通風によるパッシブクーリングを既に実践していると言える。しかし、エアコンを複数台所有する世帯では夜間就寝中のみならず日中にリビングでも冷房使用する傾向があり、冷房用エネルギー削減と熱的快適性の観点からパッシブクーリング効果の向上が必要である。屋外の自然風を室内にいる居住者へと効果的に導き、居住者の皮膚表面で発汗蒸発が無理なく行われるような住宅設計が求められる。

自然換気された住宅において、室内気流分布は、屋外気象条件のみならず建物性状や開口部性状に大きく依存する。屋外気象条件を制御することは難しいが、住宅設計時に開口部性状を工夫することによって室内気流分布をコントロールすることは比較的容易である。そこで、本研究では、開口位置・開口寸法・窓の開閉方式などの開口部性状に着目し、室内気流分布の観点から東南アジア蒸暑地の自然換気住宅に適した窓デザインを検討した。

5.1 実験方法

本研究では、窓が開放された状態での窓デザインと室内気流分布の関係を明らかにするために、風上側と風下側に対面する2つの開口を持つ最もシンプルな居室を想定した。最初に、インドネシアにある実物大の実験施設にて風環境を実測し、そのデータを用いてCFD解析モデルの精度検証を行い、使用する解析モデルを決定した。次に、CFD解析により、窓の開閉形式、開き角度、窓寸法の縦横比の3要素についてパラメトリックスタディを行った。開口部中心高さ（床上1500mm）

での室内風速分布などを比較し、室内の居住レベルの風速を上げるために最適な窓デザインを検討した。また、室内の空気齢分布についても確認した。

5.1.1 実物大実験施設

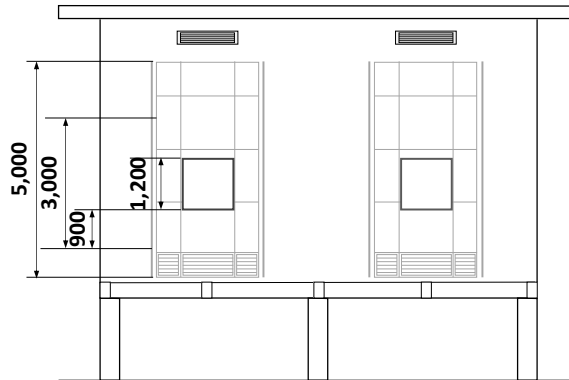
インドネシア共和国バンテン州のタンゲラン県に立地する YKK AP R&D センター内の実験棟を対象として、CFD解析モデルの精度検証に用いるための実測を行った。この実験棟はジャワ島北西部の首都ジャカルタから約 20 km 西方の南緯 6 度 11 分、東経 106 度 38 分に位置し、熱帯モンスーン気候下にある。雨季と乾季があるが年間を通して高温多湿であり、月平均気温は 25°C を超える。11 月～3 月頃にかけては雨季となり日中の降水量が多くなる。図 3.1 に対象建物の概要を示す。実験棟内部は同一形状の 2 部屋で構成されており、両部屋を比較実測できるように東西面の外壁には外断熱が施されている。各部屋の床面積は 25.6 m²、天井高は 3 m である。各部屋の北面（正面）と南面（背面）の外壁には縦 5.0 m×横 2.4 m の可変パネルが設置され、窓サッシだけでなく開口位置や開口寸法の変更も容易な構造となっている。本実測では Room A と Room B 共通で北面（恒常風の流入側）開口寸法を 1.2 m×1.2 m、南面（流出側）開口寸法を 1.7 m×0.85 m とした。床面積に対する開口部の開口率は、両室とも約 10% となった。そして、Room A の北面のみに窓（図 3.2：横軸回転窓）を取り付け、その他は窓を取り付けない単純開口として実測を行った。

5.1.2 実測項目

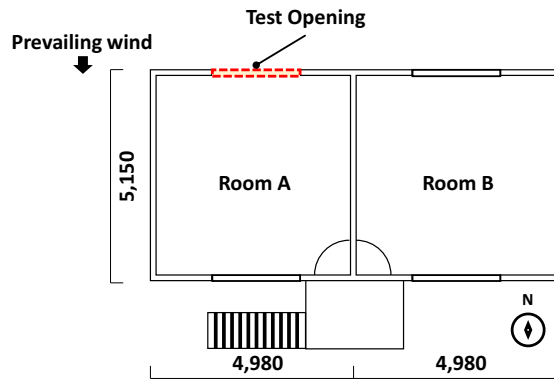
2019 年 11 月 9 日から 2020 年 1 月 22 日の間に実測を行った。本実測期間は雨季に含まれるが、晴天日を選んでデータを収集した。実験施設がある地域では、雨季・乾季によらずに晴天日の日中は北からの海風が卓越する。そこで、本実測では、特に北風が吹く状況下での室内風速分布を両室で測定し、比較した。図 3.3 に室内の計測位置と計測項目を示す。各部屋の 5 点において、気温と風速の鉛直分布を計測した（Kanomax 6332D with Probe 0965-3）。また、屋外の主風向に面した北面開口部の前部に 2 次元超音波風速計（Young CYG-86000）を設置し、風向・風速を計測した。屋内外の風速計の測定間隔は 5 秒とした。さらに、実験住宅から 10 m 離れた地点に気象ステーション（Hobo RX 3000）を設置し、屋外気象を観測した。風速・風向の測定高さは地表面から 10 m であり、測定間隔は 1 分とした。



(a) photograph



(b) north elevation



(c) floor plan

図 5.1 実験施設詳細図



図 5.2 RoomA 流入側窓

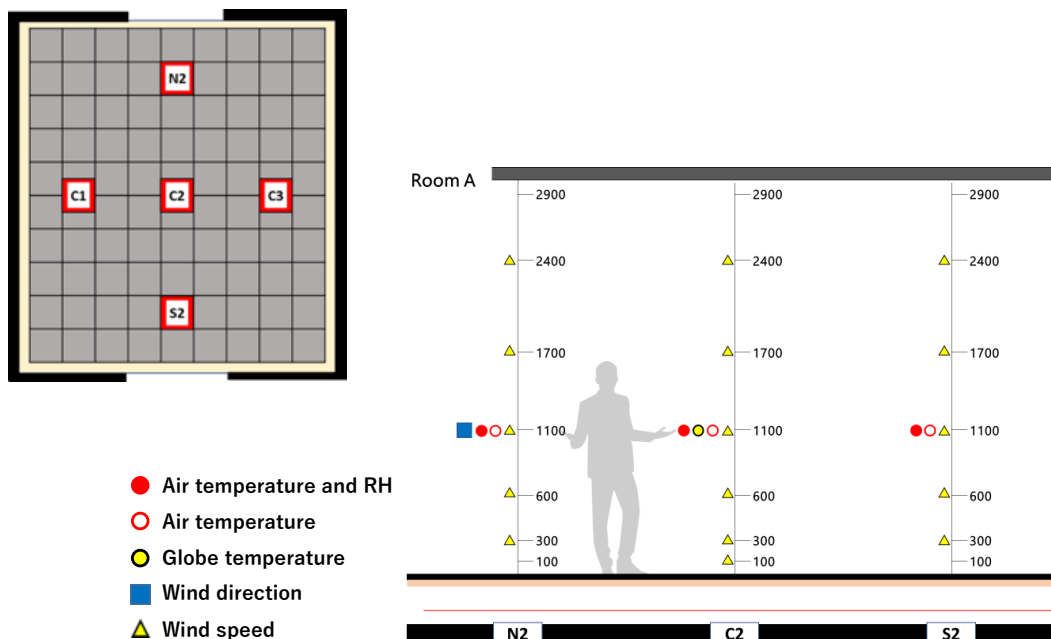


図 5.3 計測位置と計測項目

5.13 数値解析方法

汎用数値流体解析ソフト STREAM ver.14 (ソフトウェアクレイドル) を使用して数値解析を行った。環境・設備設計シミュレーションに用いられる CFD ソフトウェアには、実務レベルから研究レベルまでのニーズに合わせた様々なものが存在するが、1984 年に販売開始された STREAM は構造格子を採用する三次元汎用流体解析ソフトウェアで、建築空調分野で高い出荷実績を有する[99]。日射機能や空調機モデル、蒸発及び結露解析機能、空気齢などの換気効率指標、植栽抵抗など、建築空調分野に特化した機能が充実している。STREAMは、解析対象モデルの設計や解析条件などを入力するプリ、プリでセットアップされた解析モデルの計算を実行するソルバー、ソルバーで計算された解析結果の出力と評価を行うポストの 3 つのプログラムで構成される。図 3.4 にこれらのプログラムと実行手順を示す。

表 5.1 に CFD の解析条件を示す。解析ソフト STREAM ver.14 を使用し、等温条件下で定常解析を行った。移流項差分スキームとしては、以下に詳しく記す通り、2 種類の差分スキーム法を比較し精度検証を行い、一次精度風上差分法を選択した。非圧縮性流れ計算アルゴリズムとして SIMPLE 法とした。解析領域は、富永らによる AIJ ガイドラインに則して[100]、解析対象物の最大長さを L とした場合に流入面側を $2L$ 、流出面側を $10L$ 、側面側を $5L$ とし、解析対象物の影響が及ばないよ

う十分な広さを確保した。これにより、流出側では流れが均一になることを確認している。さらに、解析領域内の解析対象建物周辺に Block を設置して 2 つのブロックに分割した。それぞれのメッシュ数は表のとおりで、合計要素数は 6,436,328 である。流入境界条件には、法線方向に基準高さ 10 m、基準風速 3.0 m/s を与えた。基準風速は、流入側開口外側の風速実測値を参考に設定した (0.1 m/s 以上の値における平均値に近い値)。実測を行った解析対象とする実験施設は広いオープンスペースに建てられており、その周辺の建物も低層であった。さらに、風上側約 50 m は空地であったため、風速鉛直プロファイルはべき乗則 ($\alpha=0.2$) に従うものとした。べき乗則とは乱流境界層の流速分布式のことで、境界層暑さを δ 、主流速度を U_0 とすると、流速 u の分布は以下の式で与えられる。

$$u(y) = U_0 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \dots \dots \dots \text{(式5.1)}$$

また、流出境界条件として表面圧力 $P=0$ を与えた。壁境界条件は、地表面以外の壁面をフリースリップ、地表面をノースリップとした。室内気流に影響を及ぼす乱流モデルに関しては、以降に示す通り、試行可能な 4 種類の高レイノルズ数型の $k-\epsilon$ モデルを比較した上で精度検証を行った。

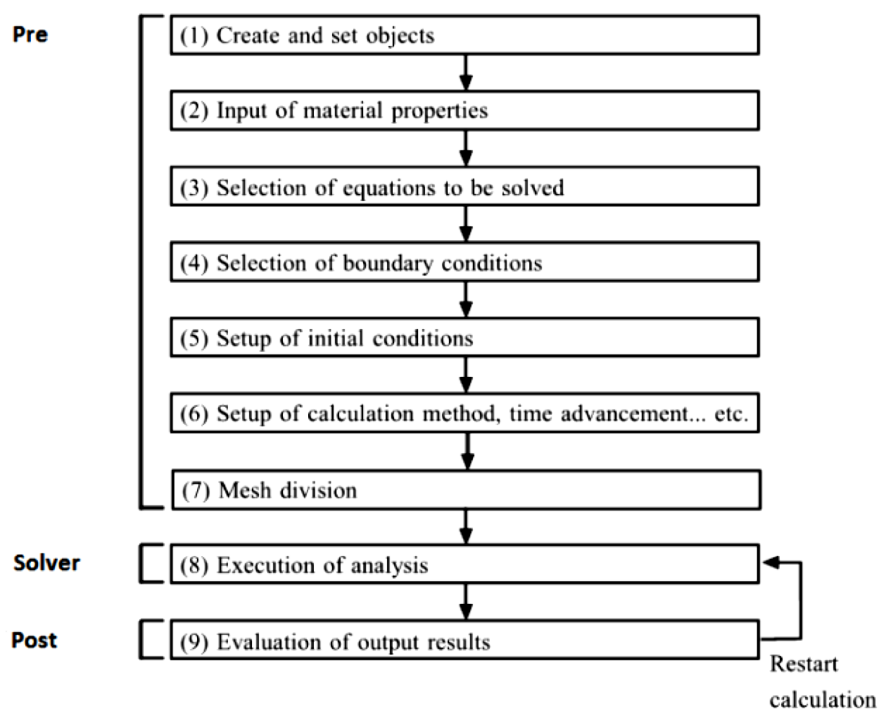


図 5.4 ソフトウェア STREAM 解析実行手順

表 5.1 数値解析計算条件

| | | |
|---|--|--|
| CFD Code | STREAM | |
| Discretization Scheme for advection term | First order upwind scheme | |
| Algorithm | SIMPLE | |
| Domain volume (m) | Root; 132 × 152.6 × 68.7 (m) Block; 12.4 × 9.7 × 8.7 (m) | |
| Standard length (mm) | Root; 225 (mm) Block; 60 (mm) | |
| Mesh elements | Root; 71 × 68 × 44=212,432 Block; 233 × 168 × 159=6,223,896 Total 6,436,328 elements | |
| Reynolds number | 1.67 × 106 | |
| Boundary condition | Inlet | Velocity : 3.0 m/s Reference height : 10 m Exponent $\alpha=0.2$ |
| | Outlet | Fixed static pressure |
| | Walls | Wall : No slip Symmetry : Free slip |
| Turbulence model | Modified LK $k-\epsilon$ model | |

5.14 精度検証

CFD シミュレーションモデルに関する精度検証は建築分野においても多くの研究がなされている[101-105]。方法としては、風洞実験や、実大スケールの建物での実証実験との比較があり、対象物としては、比較的狭い居住空間を対象から、複数の集合住宅が並ぶ街区レベルまで様々である。本研究では、前述した実大スケール実験棟での実測データを使用して、モデルの精度検証を行った。実測期間は2020年1月21日から22日の2日間であった。この期間のうち、(1) 比較的風向・風速が安定していた8:00から20:00のデータ、(2) 窓面前方の2次元超音波風速計の設置点において北風($0^\circ \pm 22.5^\circ$)を示すデータ、(3) 窓面前面と室内の双方において風速値が0.1 m/s以上のデータ、の3条件を満たすデータのみを抜粋して、固定風速による定常解析のモデル精度検証を行った。

乱流の計算方法には大きく、直接数値計算：DNS、レイノルズ平均モデル：RANS、ラージエディーションシミュレーション：LESの3つがある[106]。このうちRANSは最もよく使われる乱流の計算方法であり、非定常現象を捉えない代わりに、計算規模を大幅に下げることができる。本研究では、外部環境の変化、特に風速の変化が室内の気流分布に与える影響を解析することは目的とせず、一

定の外部風を流入条件として設定し、同じ条件下で開口部性状を変化させ、室内の気流分布に与える影響をより多くのケースで解析することが目的であるため、RANS を選択した。RANS には多くのモデルが開発されているが、建築分野で利用されることの多い高レイノルズ型モデルの中から、ソフトウェアで使用可能な4種類を比較検討した。ここで検討した乱流モデルは、標準 $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 、改良 LK $k-\epsilon$ 、MP $k-\epsilon$ である。また、移流スキームにもいくつか方法があるが、建築室内空間の解析によく用いられているのが QUICK 法と一次風上差分法である[99, 107]。そのため、移流スキームについてもこの2種類を比較検討した。

表 52 に、室内3箇所 (N2、C2、S2) の実測値とシミュレーション解析値との相関係数 (R) および RMSE (平均平方2乗誤差) を示す。移流スキーム2種類と乱流モデル4種類を比較し、再現性の観点から、本研究では一時風上差分法と改良 LK $k-\epsilon$ モデルを採用した。

表 52 各差分スキームおよび乱流モデルによる解析値と実測値の相関係数と RMSE

| | | | N2 | | C2 | | S2 | |
|--------|----------|--------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Room | Scheme | Turbulent model | R | RMSE | R | RMSE | R | RMSE |
| Room A | QUICK | Standard $k-\epsilon$ | 0.982 | 0.144 | 0.941 | 0.095 | 0.912 | 0.107 |
| | | RNG $k-\epsilon$ | 0.969 | 0.186 | -0.778 | 0.352 | -0.570 | 0.349 |
| | | MP $k-\epsilon$ | 0.992 | 0.149 | 0.885 | 0.113 | -0.077 | 0.159 |
| | | Modified LK $k-\epsilon$ | 0.987 | 0.127 | 0.950 | 0.169 | -0.451 | 0.161 |
| | 一次精度風上差分 | Standard $k-\epsilon$ | 0.990 | 0.142 | 0.976 | 0.152 | 0.959 | 0.138 |
| | | RNG $k-\epsilon$ | 0.961 | 0.209 | 0.904 | 0.381 | 0.454 | 0.170 |
| | | MP $k-\epsilon$ | 0.994 | 0.080 | 0.984 | 0.179 | 0.833 | 0.059 |
| | | Modified LK $k-\epsilon$ | 0.996 | 0.084 | 0.974 | 0.212 | 0.060 | 0.135 |
| Room B | QUICK | Standard $k-\epsilon$ | 0.244 | 0.675 | -0.066 | 0.250 | -0.191 | 0.135 |
| | | RNG $k-\epsilon$ | 0.484 | 0.552 | 0.131 | 0.357 | -0.384 | 0.237 |
| | | MP $k-\epsilon$ | 0.361 | 0.653 | 0.254 | 0.372 | 0.379 | 0.212 |
| | | Modified LK $k-\epsilon$ | 0.423 | 0.610 | 0.131 | 0.309 | 0.255 | 0.111 |
| | 一次精度風上差分 | Standard $k-\epsilon$ | 0.318 | 0.665 | 0.055 | 0.312 | -0.049 | 0.174 |
| | | RNG $k-\epsilon$ | 0.493 | 0.521 | 0.392 | 0.230 | 0.724 | 0.118 |
| | | MP $k-\epsilon$ | 0.476 | 0.586 | 0.443 | 0.304 | 0.686 | 0.123 |
| | | Modified LK $k-\epsilon$ | 0.558 | 0.512 | 0.697 | 0.209 | 0.699 | 0.097 |

5.2 実験ケース

表 5.3 に示すように、流入側開口部の窓を対象に開閉方式・開き角度・縦横比の3要素を比較した。流出側開口部は単純開口で固定した。窓の開閉型式には非常に多くの種類が存在するが、本研究では開閉回転軸の向き（垂直か水平か）とその位置（開口の端部か中央か）に注目して4種類を選択し、これらにガラスの存在しない単純開口を加えた5種類を検討対象とした。すなわち、単純開口（Simple）、外開き窓（Casement）、縦軸回転窓（Vertical pivot）、横軸回転窓（Horizontal pivot）、突き出し窓（Top-hung）の5種類である。軸回転により開閉する他の窓種は、これらのいずれかの派生か組み合わせと捉えることができる。また、軸回転方式の窓種とともに普及しているものとして引違い窓や上げ下げ窓などがあるが、これらのスライディング方式の窓種は開時に障子やガラスの突出が無いいため単純開口の結果から推測できると考えた（表 5.4）。単純開口以外の窓については、 45° と 90° の2通りの開き角度で分析を行った。窓の縦横比が1:1の場合、突き出し窓のような一辺が固定されている窓種では、角度が 90° から 45° に下がると流量係数が約8割になり、 15° では約5割にまで低下することから、角度 45° 未満では通風性能が著しく悪化すると予測されるため検討しない。また、流入側開口面積を約 1.44 m^2 で固定し、縦横比 1:4 (600×2400)、1:2 (850×1700)、1:1 (1200×1200)、2:1 (1700×850)、4:1 (2400×600) の5種類を検討した。

表 5.3 数値解析検討パラメータ








| 開閉方式 | 単純開口 Simple | 外開き窓 Casement | 縦軸回転窓 Vertical pivot | 横軸回転窓 Horizontal pivot | 突き出し窓 Top-hung |
|------|---|---|---|---|---|
| 開き角度 | 45° | 90° | | | |
| 開口寸法 | 1:4 (600 x 2400 mm) | 1:2 (850 x 1700 mm) | 1:1 (1200 x 1200 mm) | 2:1 (1700 x 850 mm) | 4:1 (2400 x 600 mm) |
| |  |  |  |  |  |

表 5.4 主な窓種の種類と本研究での検討窓種


| 開閉方式 | スライド | 回転 | | |
|------|--|---|--|--|
| | | 端部に回転軸 | | 中央に回転軸 |
| | | 外に開く | 内を開く | 内外に開く |
| 横 | <ul style="list-style-type: none"> 引違い窓 引込み窓 | <ul style="list-style-type: none"> 外開き窓 折れ戸 | <ul style="list-style-type: none"> 内開き窓 | <ul style="list-style-type: none"> 縦すべり出し窓 縦軸回転窓 |
| 縦 | <ul style="list-style-type: none"> 上げ下げ窓 | <ul style="list-style-type: none"> 突き出し窓 | <ul style="list-style-type: none"> 内倒し窓 | <ul style="list-style-type: none"> 横すべり出し窓 横軸回転窓 オーニング窓 ガラスルーバー窓 |



単純開口で解析



外開き窓
突き出し窓



縦すべり出し窓
横すべり出し窓

5.3 実験結果

5.3.1 窓の開閉形式と開き角度が与える影響

図 5.5 に、窓の縦横比が 1 : 1 で、開き角度が 45° の場合の窓開閉形式別の室内風速分布を、開口部中心軸上の鉛直断面と水平断面で示す。鉛直断面図から、単純開口、外開き窓、縦軸回転窓では開口部位置で平均約 1.5~1.6 m/s 程度の流入風がやや下向きに吹き込むことが分かる。これは、外部風が外壁中央付近を中心に放射線状に分散した結果、開口部付近の接近流は外壁に沿ってやや下向きに流れるためである。外開き窓と縦軸回転窓の流入風の到達距離は単純開口よりも短い。単純開口と同様に室内に循環風を形成し、居住レベルの風速は非常に弱く、天井付近の風速が高くなる。一方、横軸回転窓は、障子で隔てられた開口部の上部と下部のそれぞれで風が障子に沿ってやや上向きに流入する。天井付近の風速が強く、床付近の風速は弱くなる。また、突き出し窓は、下向きの流入風の影響を受けにくい。風はほぼ真っ直ぐに流入し、居住レベルに弱い流入風がそのまま吹き込む。同様に、水平断面図を見ていくと、全体的にどの窓開閉形式も開口部付近の風向きがやや右向きに流れているが、これは対象とする実験室 (Room A) の開口部が建物壁面の中心よりも右手に位置するためである。単純開口と外開き窓で、開口部中心高さ (すなわち居住レベル) の室中央付近まで風速が強い。一方、縦軸回転窓は、45° に開けられた障子に沿ってより右寄りに風が流入してしまい、室中央を風が通らない。また横軸回転窓は、居住レベルで強い風速が得られるのは開口部付近のみである。

(a) Vertical air flow pattern of 1:1, 45°

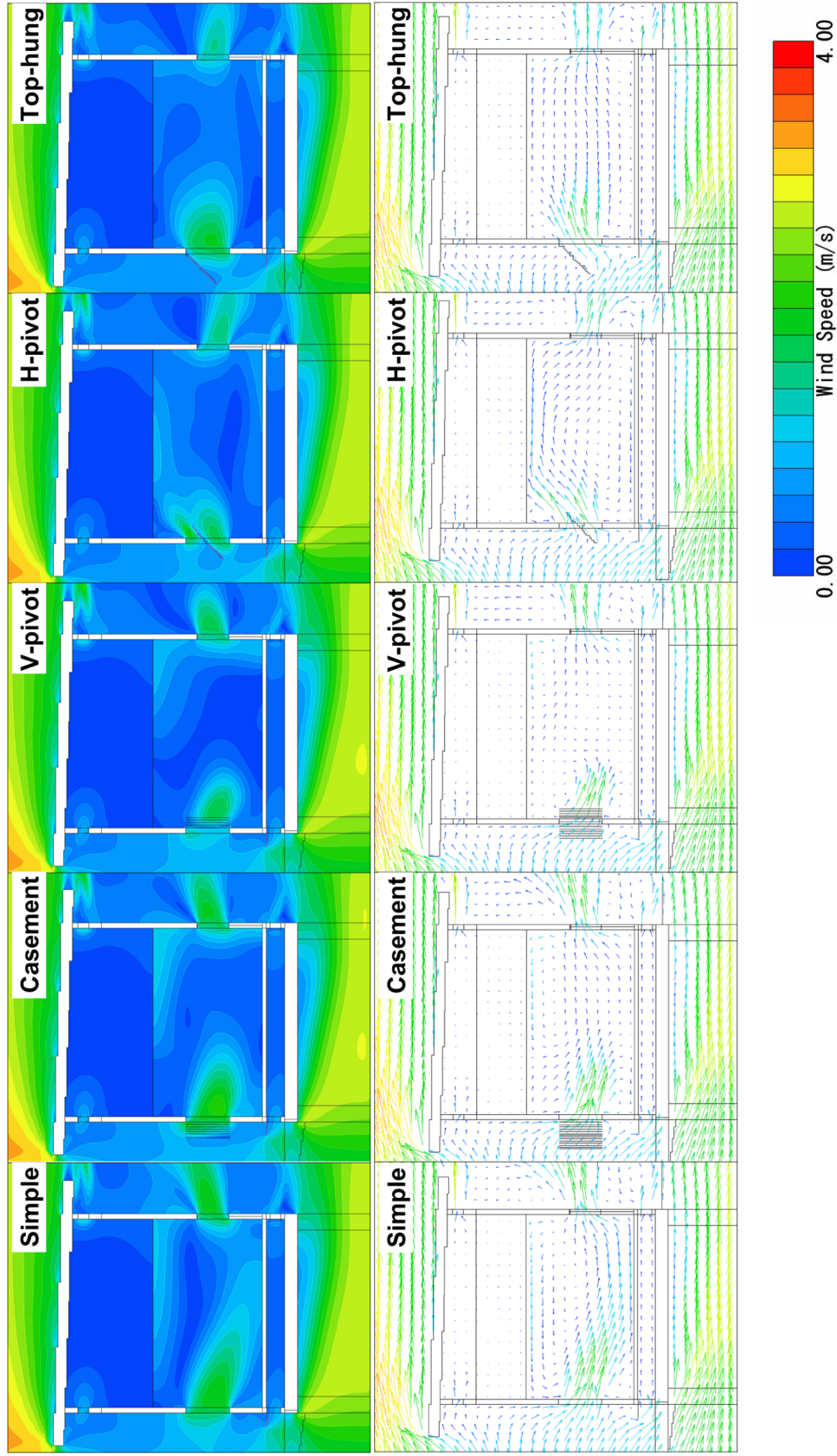


図 5.5 開口縦横比 1:1、窓開き角度 45° の場合の気流分布

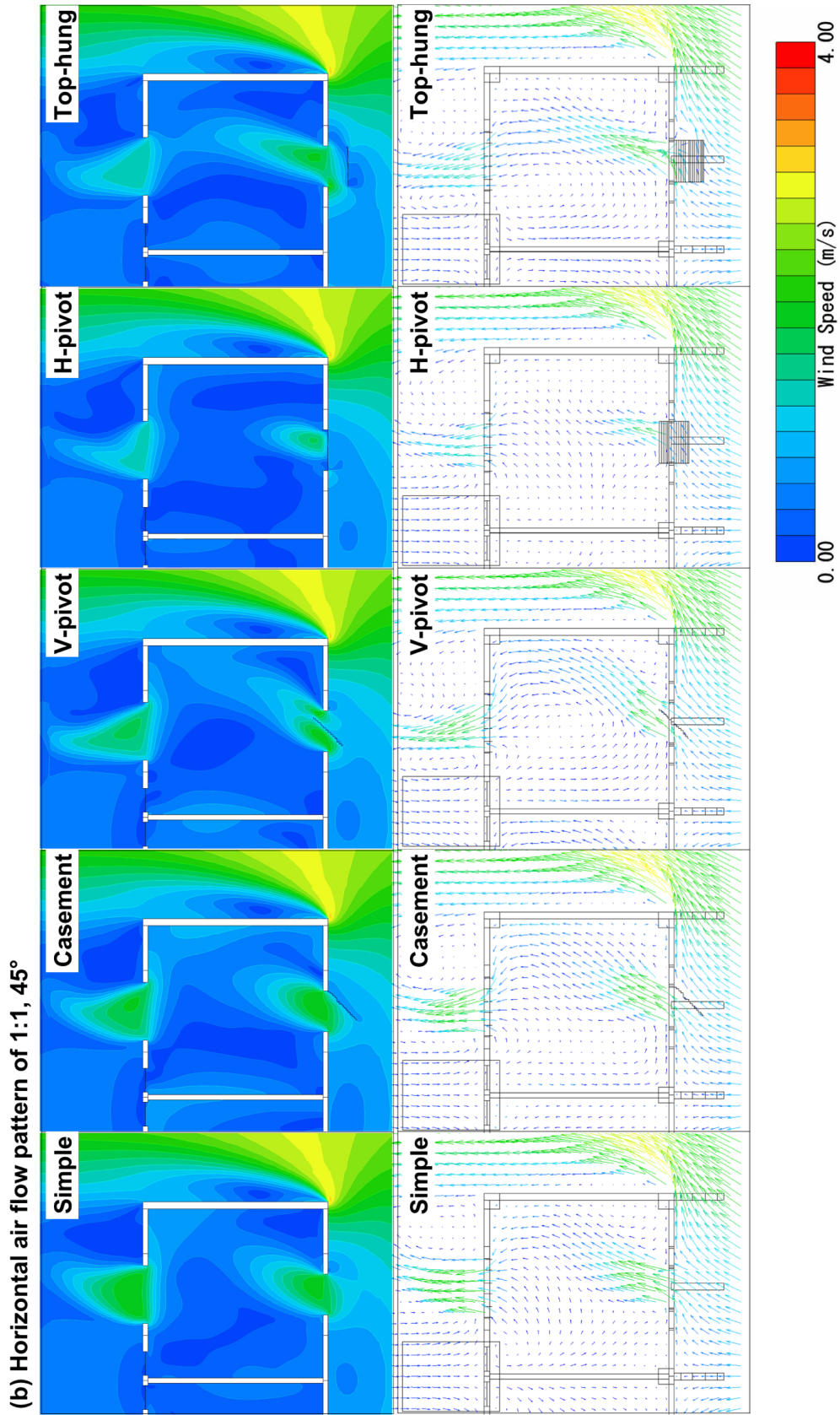


図 5.5 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° の場合の気流分布 (続き)

続いて、図 5.6 に、窓の縦横比は 1:1 で、開き角度を 90° の場合の室内風速分布を示す。鉛直断面図を見ると、まず全体的に、開き角度 45° の場合よりも流入風の到達距離が長くなっており、室内のより広範囲で居住レベルに強い風速を得ることができる。各窓を比較すると、外開き窓と縦軸回転窓は、45° の場合よりも流入風が下向きに吹き込んでおり、室内後方では居住レベルよりも低い位置を風が通ってしまう。一方、横軸回転窓と突き出し窓は、流入風が真っ直ぐに吹き込んでおり、横軸回転窓の方が室内後方まで居住レベルで高い風速を維持している。開口面の平均流入風速にほとんど差が見られなかったが、窓中心位置の風速には差があり、突き出し窓 1.77 m/s に対し、横軸回転窓は約 1.3 倍の 2.28 m/s であった。このことから、両者の通風量は同等であるが、横軸回転窓の方が細く速い流入風を通すことがわかる。また、開口部の外側に注目すると、外開き窓で最も顕著であるが、外側に開いた障子の表面に沿って風速が強まっており（最大で約 24 m/s）、障子が建物接近流を取り込むウィンドキャッチャーの働きをしていることがわかる。外開き窓と単純開口とで開口面の平均流入風速にほとんど差は見られないが（0.1 m/s 程度）、外開き窓の方が室内中央付近まで比較的強い風速が維持されている。

図 5.7 に、窓の縦横比 1:1、開き角度 45° と 90° の場合の、開口面（開口部室内側鉛直面）および開口部中心高さ（床上 1.5 m の室内水平面）の風速分布を示す。開口面の平均風速が単純開口（約 1.62 m/s）よりも速い窓は、開き角度 90° の外開き窓と横軸回転窓（約 1.70 m/s）であった。これらの窓は、単純開口よりも多く風を取り込むことができると言える。なお、外開き窓は開き角度 45° であっても単純開口と同等であった。そして、床上 1.5 m の室内平均風速が最も高かったのは、開き角度 90° の水平回転軸窓であった。しかし、一方で、東南アジア蒸暑地の都市住宅で現状最も一般的な突き出し窓は、実際の生活シーンにおいて開き角度は 45° を下回ると考えられるが、45° まで開けた場合でも、開口面平均風速と床上 1.5 m 室内平均風速ともに単純開口より低い結果となった。

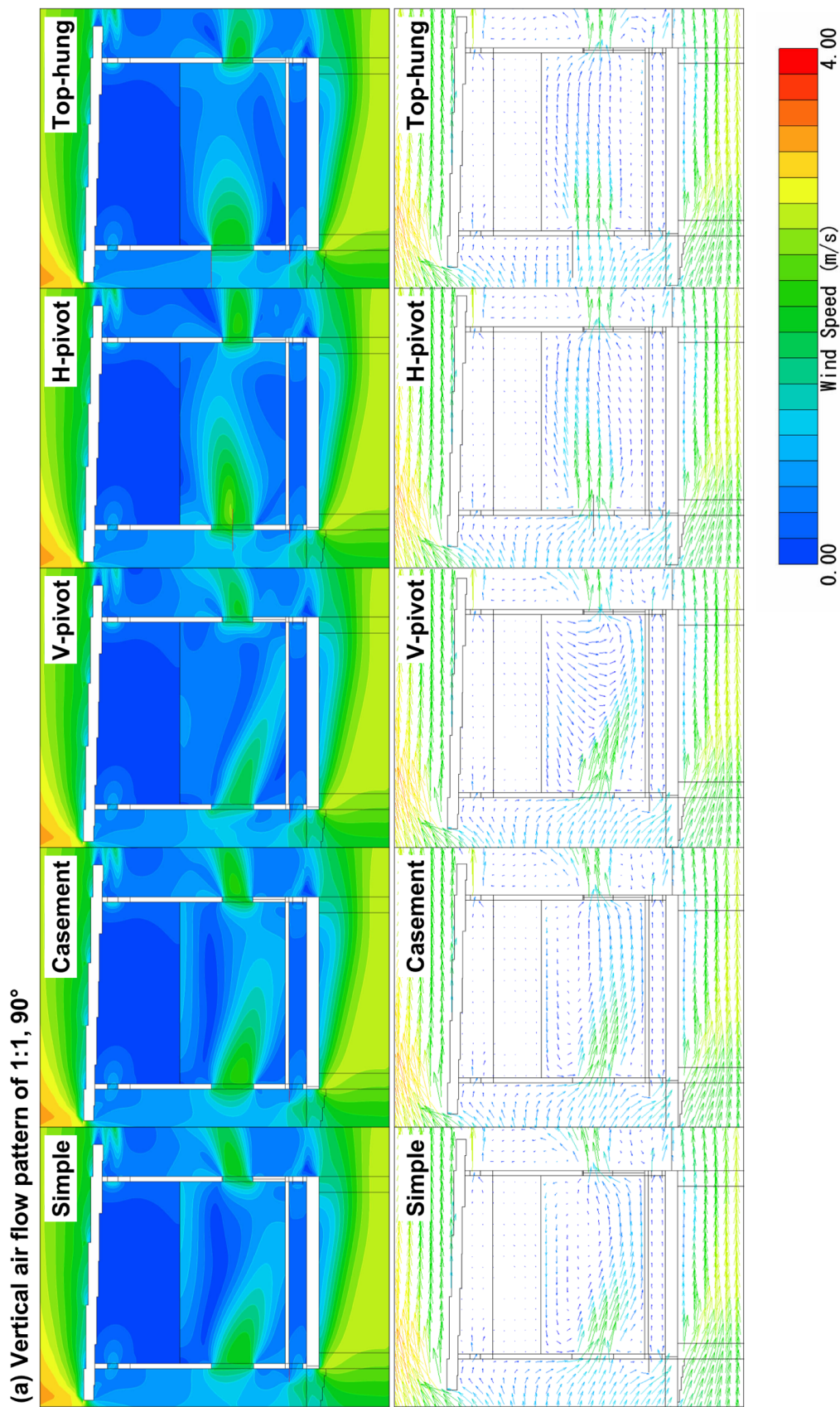


図 5.6 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° の場合の気流分布

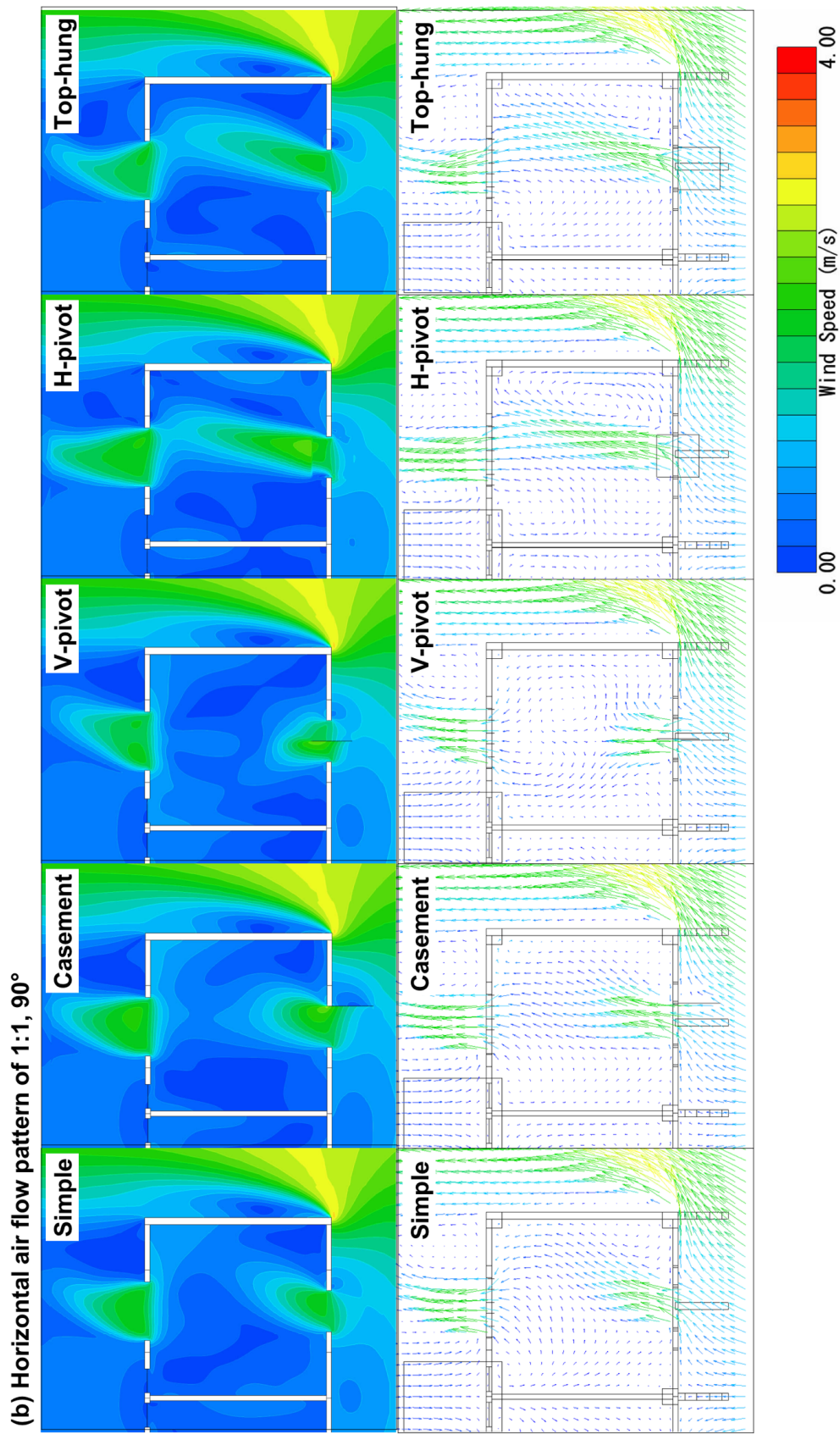
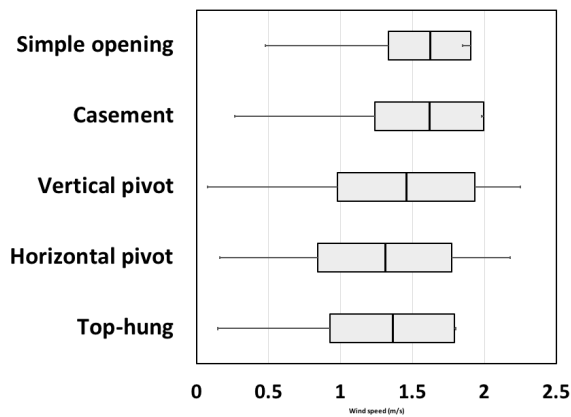
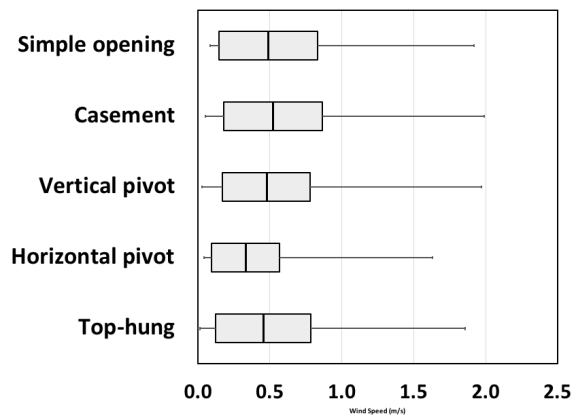


図 5.6 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° の場合の気流分布 (続き)

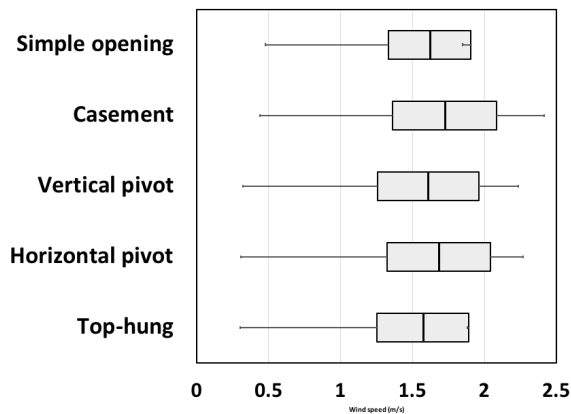
Wind speed in the opening plane



Wind speed at FL +1.5m



Wind speed in the opening plane



Wind speed at FL +1.5m

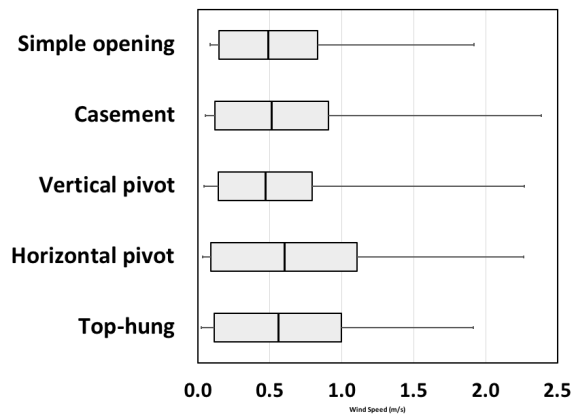


図 5.7 開口面および床上 1.5m の風速分布

5.32 開口の縦横比が与える影響

開き角度 90° の場合の、開口縦横比を 1 : 4、1 : 2、1 : 1、2 : 1、4 : 1 と変化させた結果を、各窓種について図 5.8、図 5.9、図 5.10、図 5.11、図 5.12 にそれぞれ示す。流入風の吹き込む向きは、縦長であっても横長であっても同様に、単純開口、外開き窓、縦軸回転窓は下向きとなる。一方、横軸回転窓と突き出し窓は真っ直ぐに流入するが、横軸回転窓は室内後方まで到達するのに対して突き出し窓はすぐに減衰する。この気流の到達距離の違いは、縦横比が横長 4 : 1 の場合に最も顕著である (図 5.11(a) 参照)。ベクトル図からは、横軸回転窓では壁面接近流を障子の上下から室内に引き込み、上下面で障子に接する部分で強い気流となり、流出側開口まで直進していることが窺える。

(a) Vertical air flow pattern of simple opening

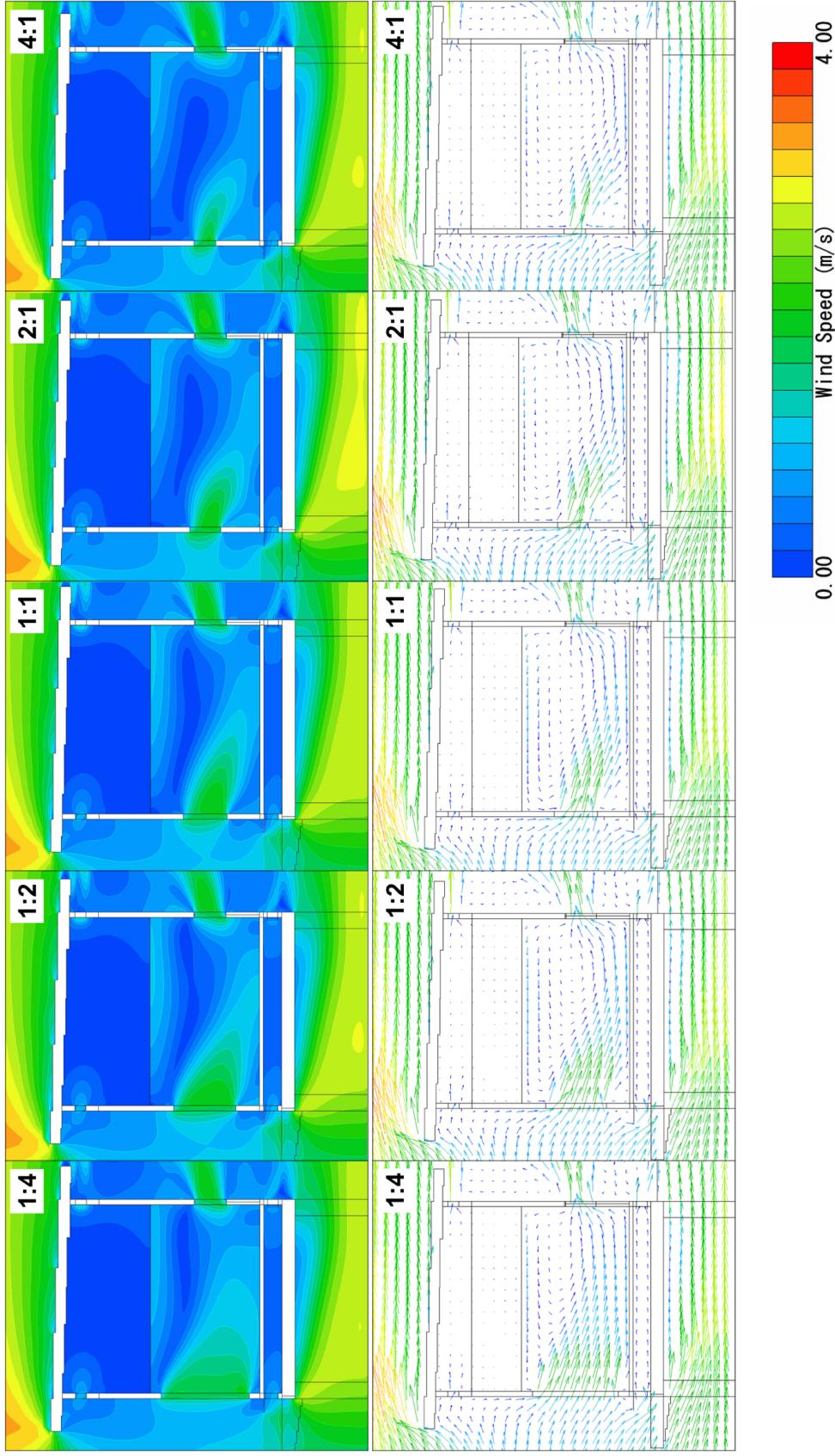


図 58 単純開口の場合の気流分布

(b) Horizontal air flow pattern of simple opening

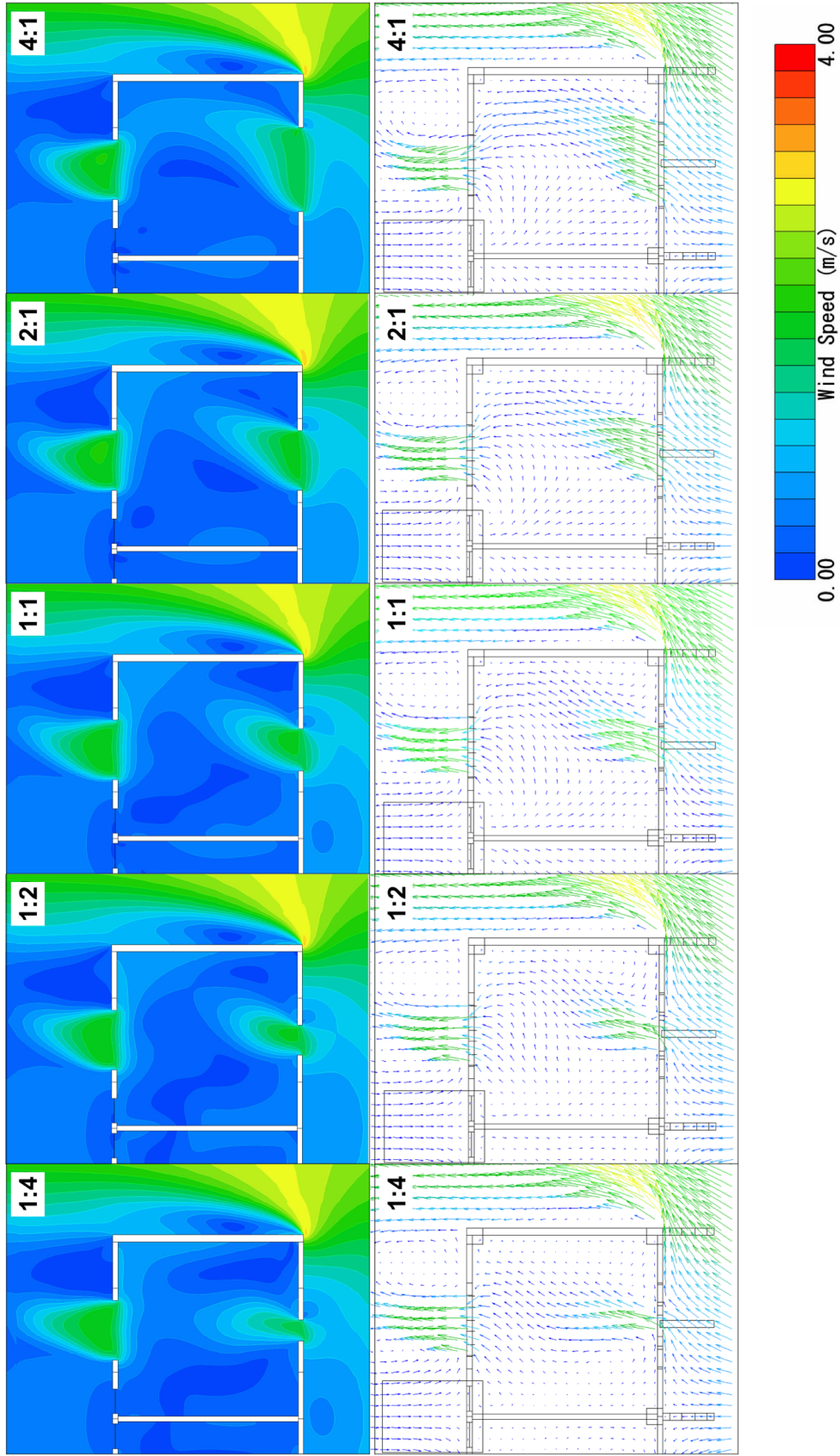


図 58 単純開口の場合の気流分布 (続き)

(a) Vertical air flow pattern of casement 90°

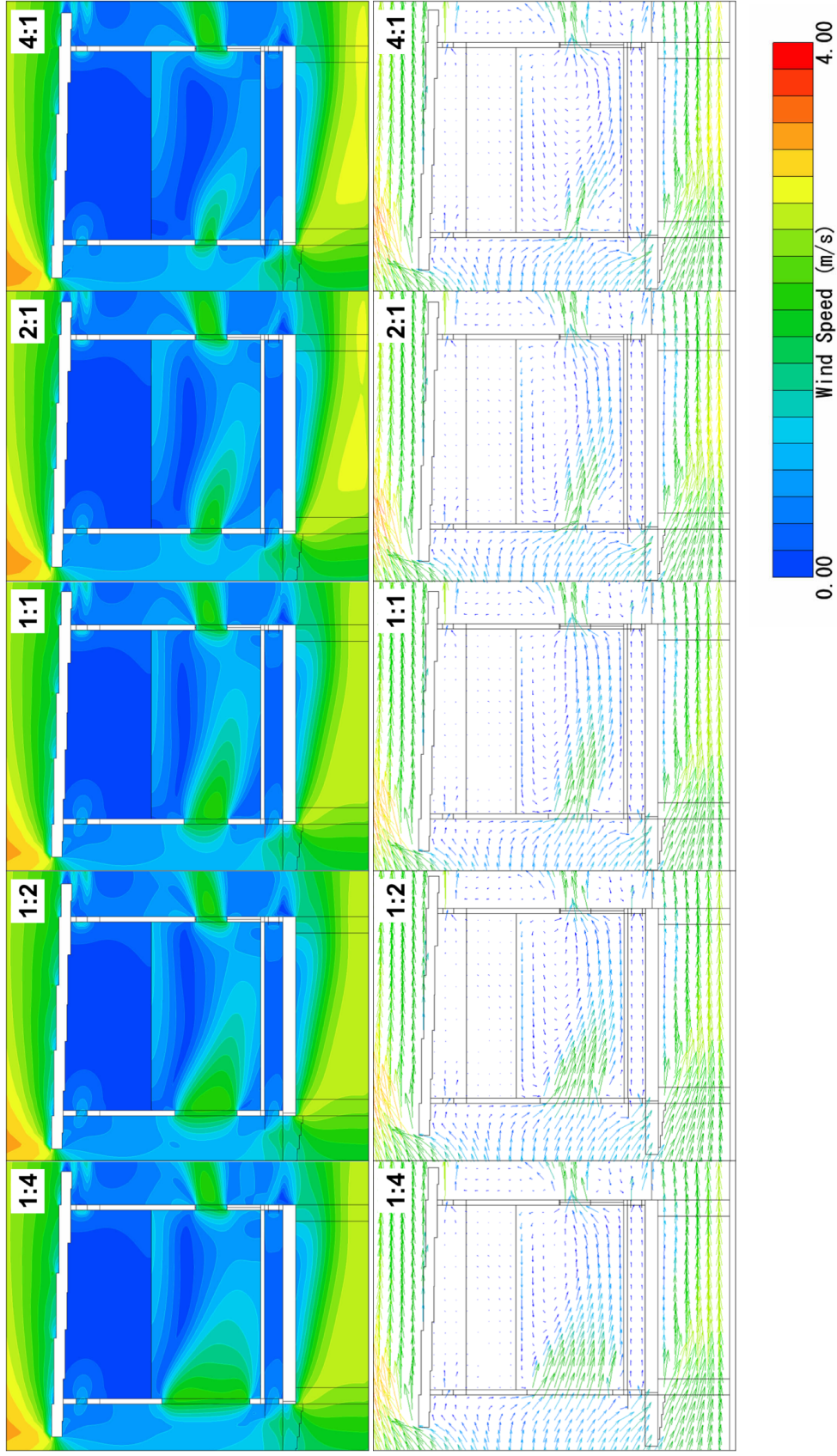


図 59 外開き窓、開き角度 90° の場合の気流分布

(b) Horizontal air flow pattern of casement 90°

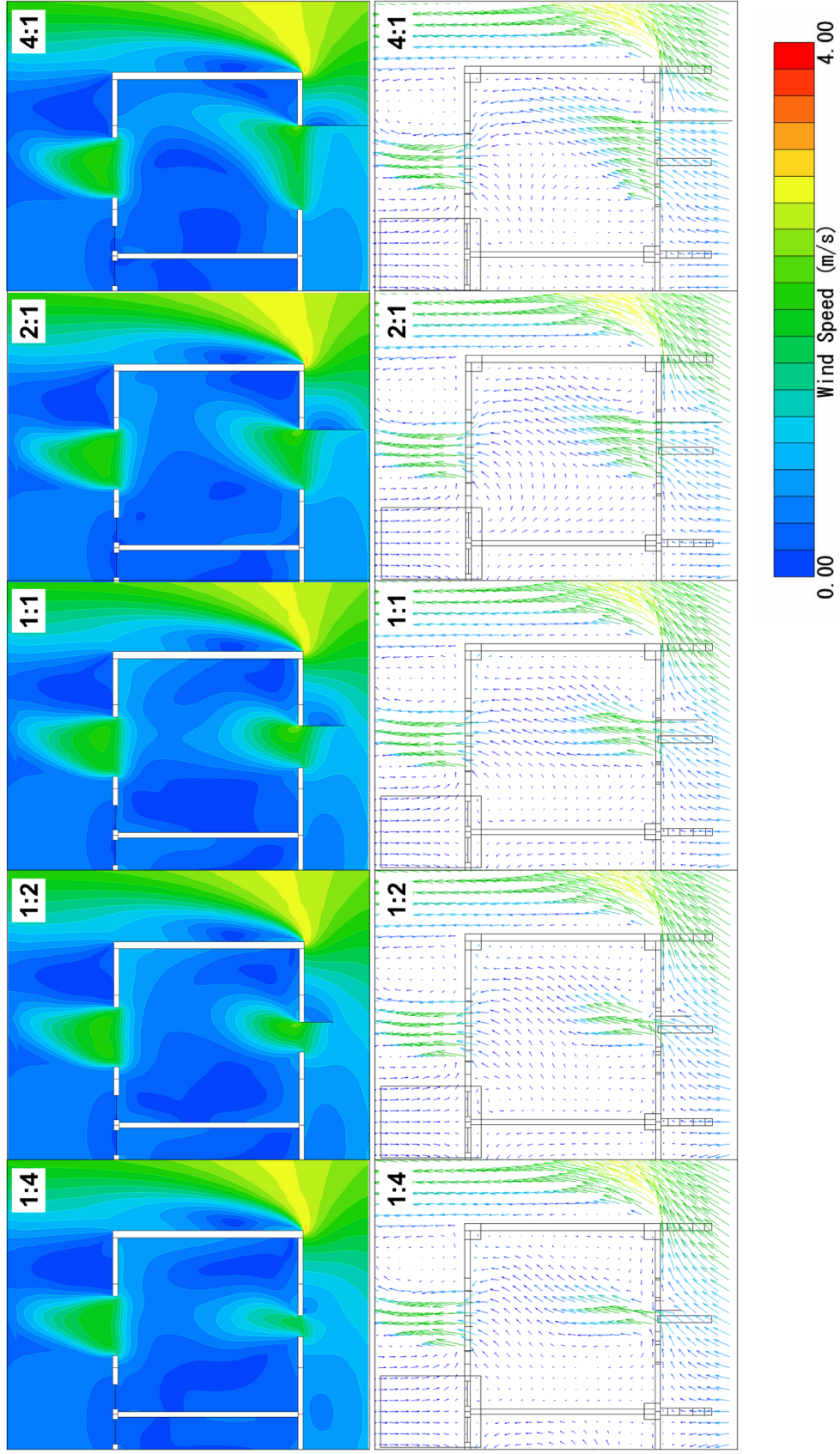


図 59 外開き窓、開き角度 90° の場合の気流分布 (続き)

(a) Vertical air flow pattern of vertical pivot 90°

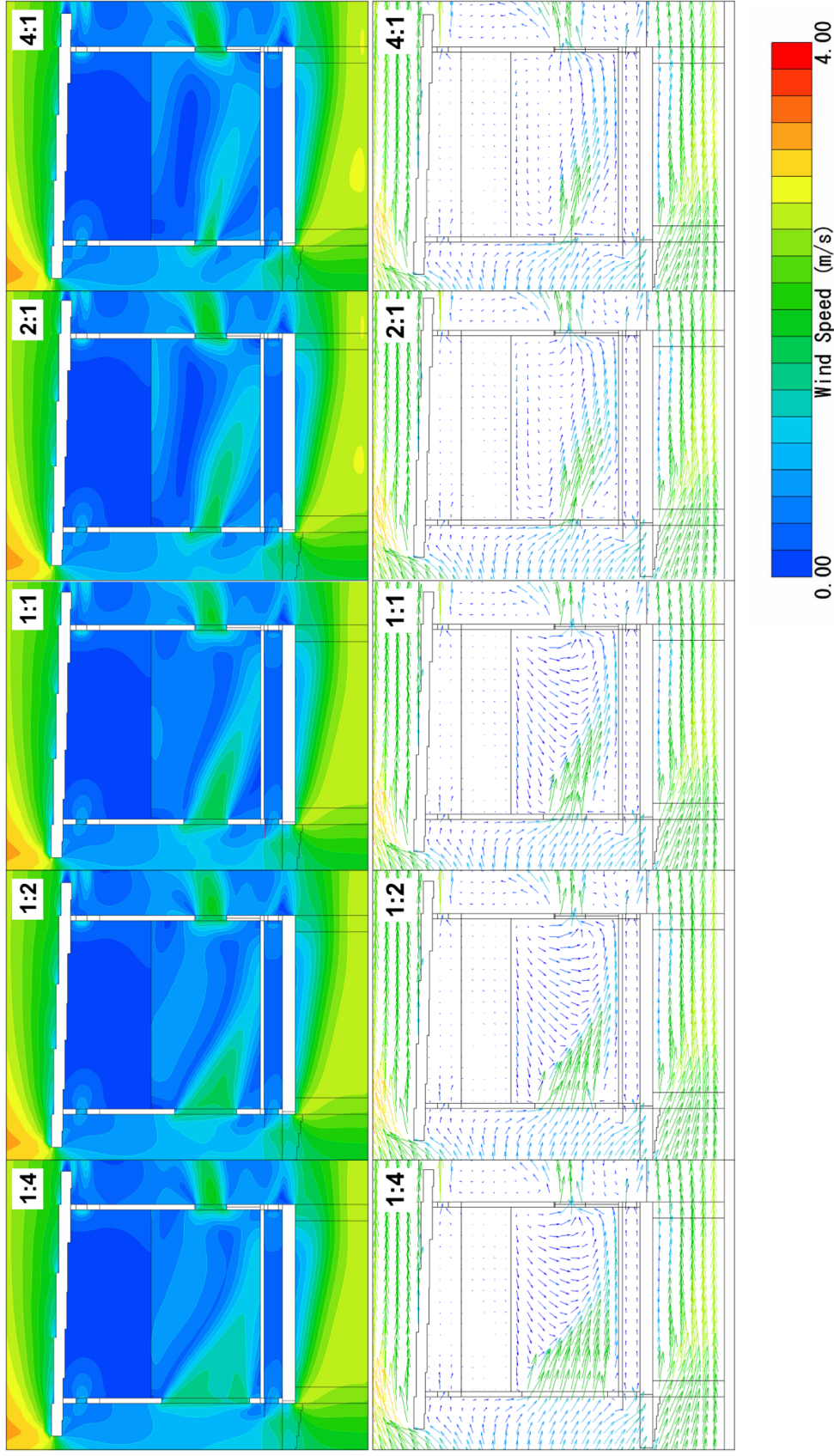


図 5.10 縦軸回転窓、開き角度 90° の場合の気流分布

(b) Horizontal air flow pattern of vertical pivot 90°

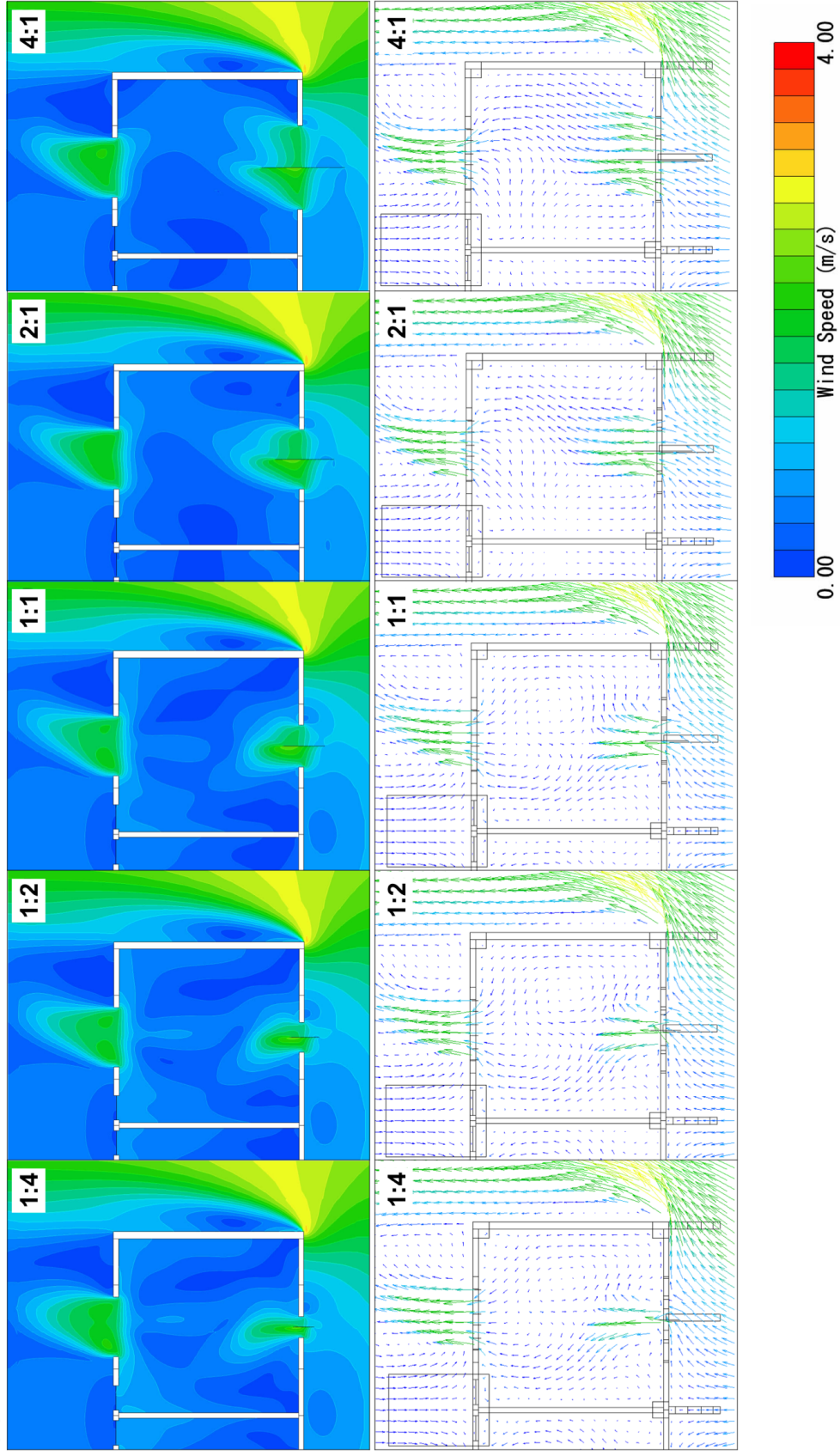


図 5.10 縦軸回転窓、開き角度 90° の場合の気流分布 (続き)

(a) Vertical air flow pattern of horizontal pivot 90°

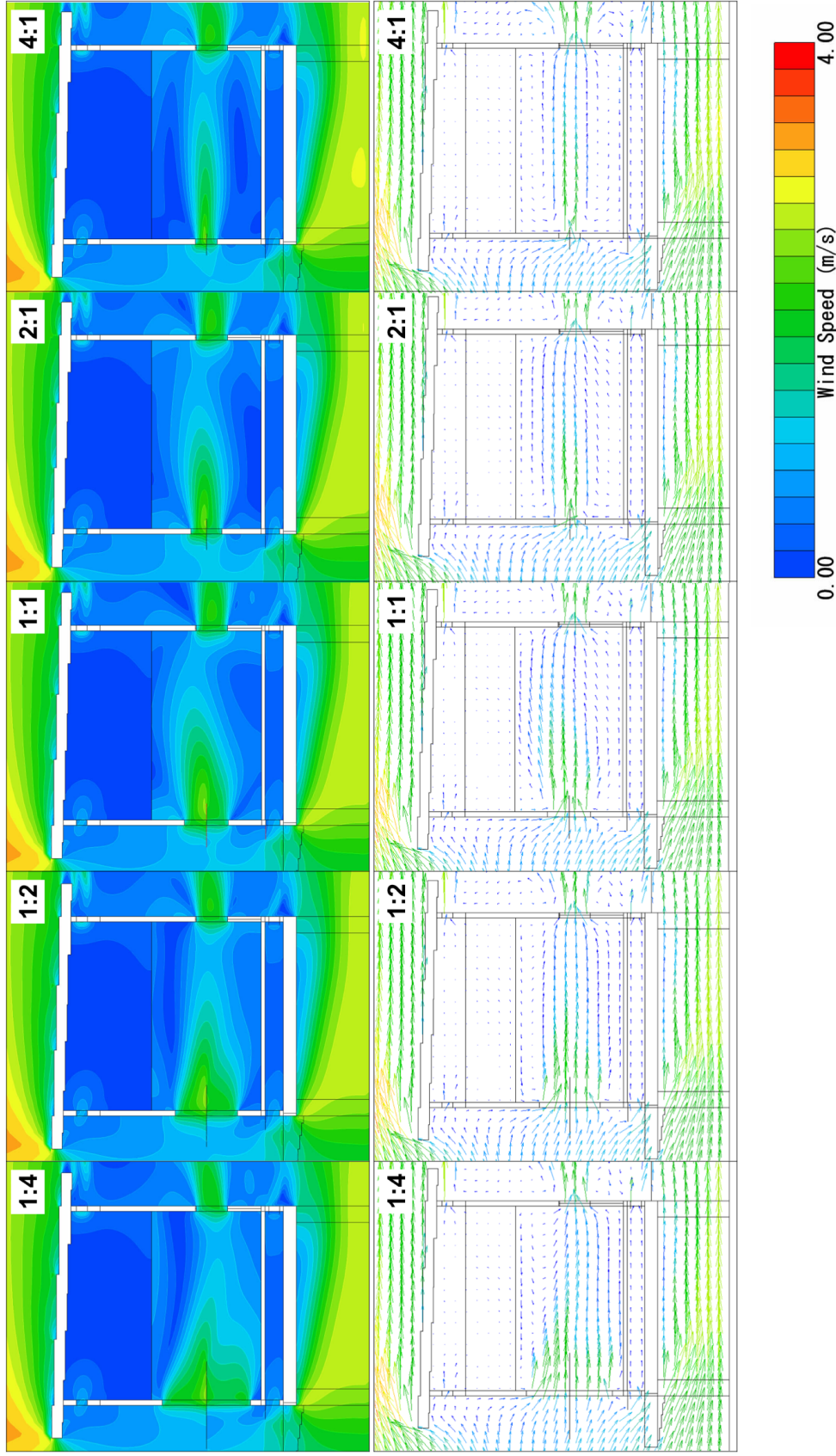


図 5.11 横軸回転窓、開き角度 90° の場合の気流分布

(b) Horizontal air flow pattern of horizontal pivot 90°

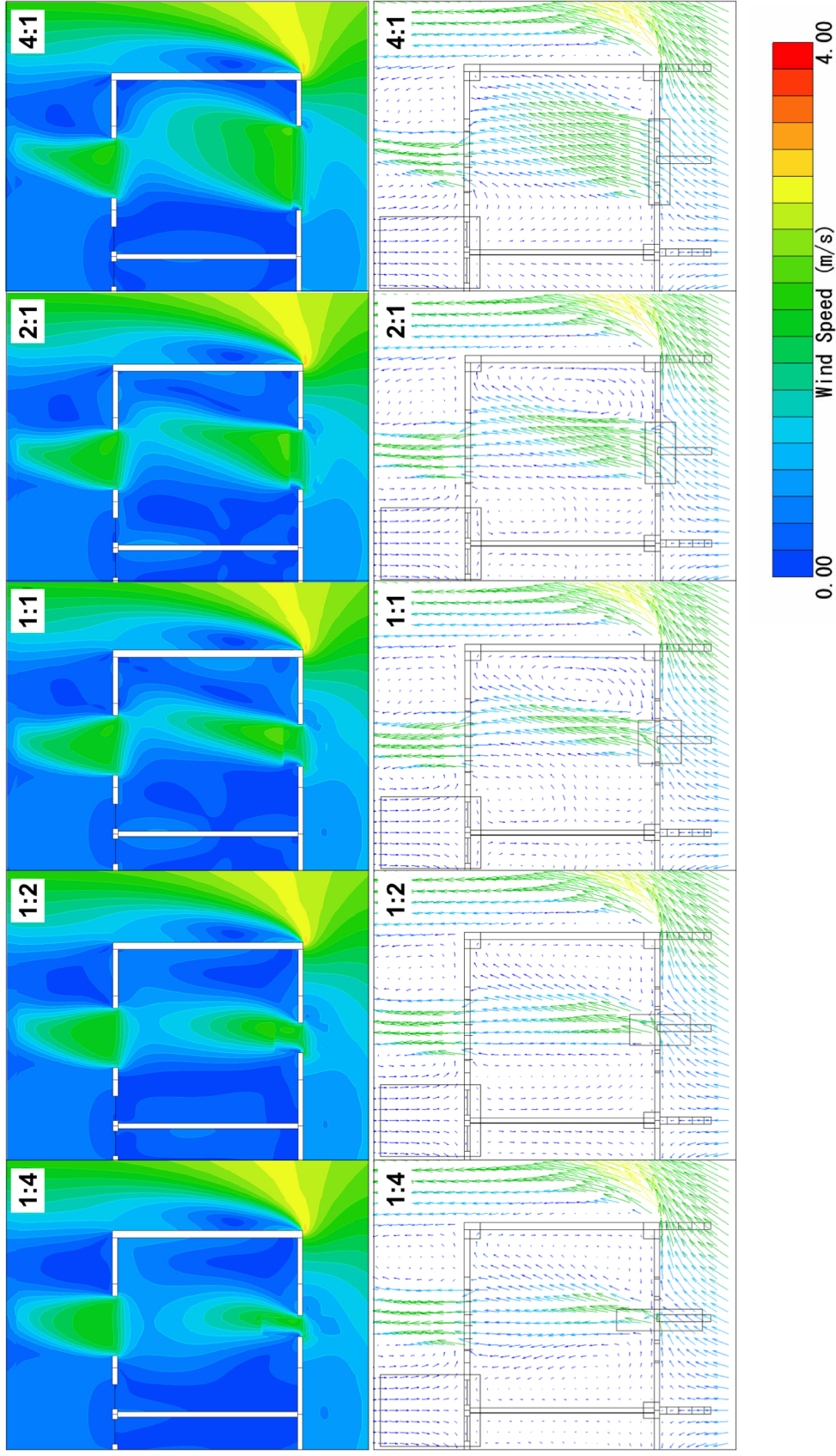


図 5.11 横軸回転窓、開き角度 90° の場合の気流分布 (続き)

(a) Vertical air flow pattern of top-hung 90°

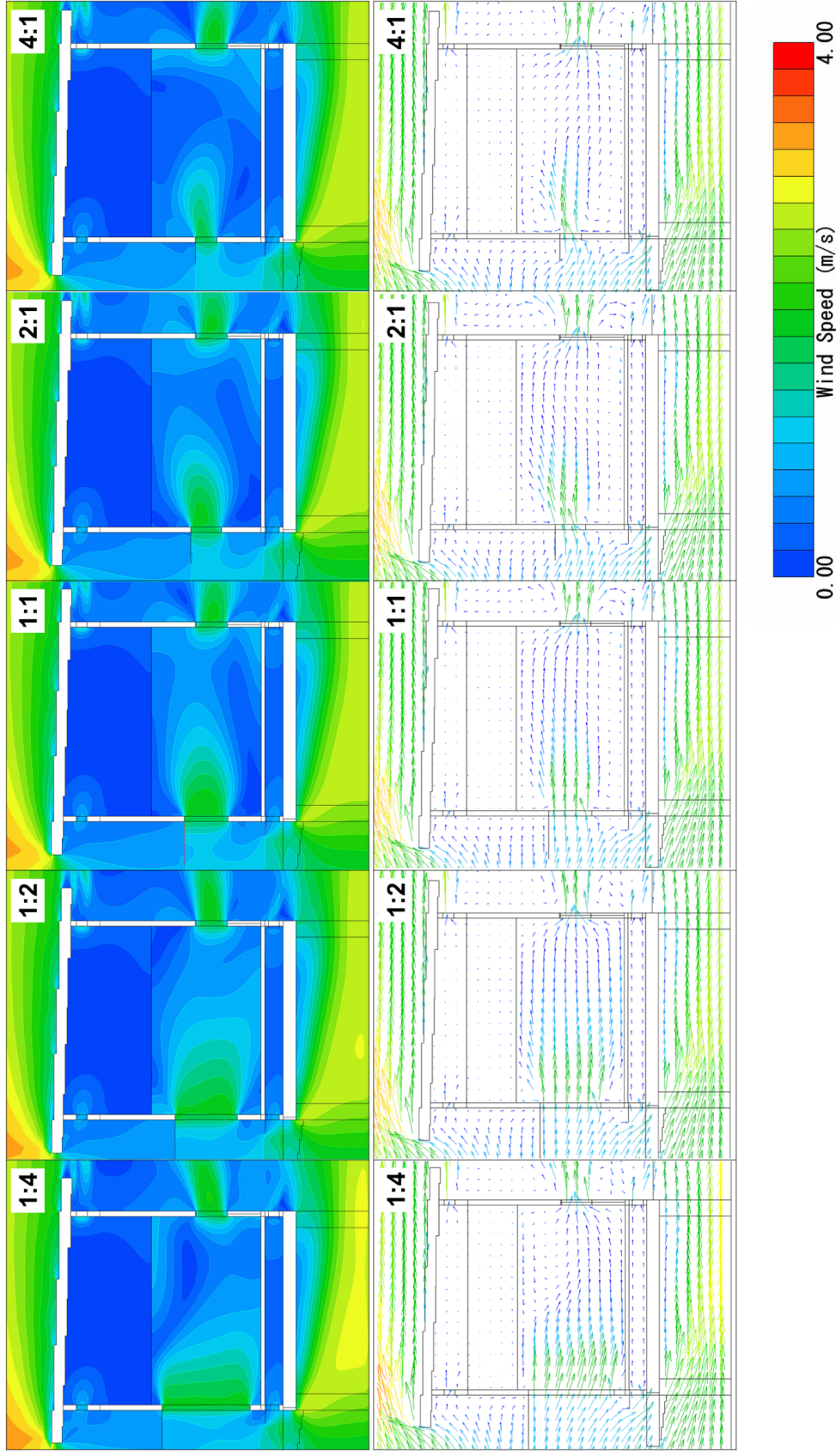


図5.12 突き出し窓、開き角度90° の場合の気流分布

(b) Horizontal air flow pattern of top-hung 90°

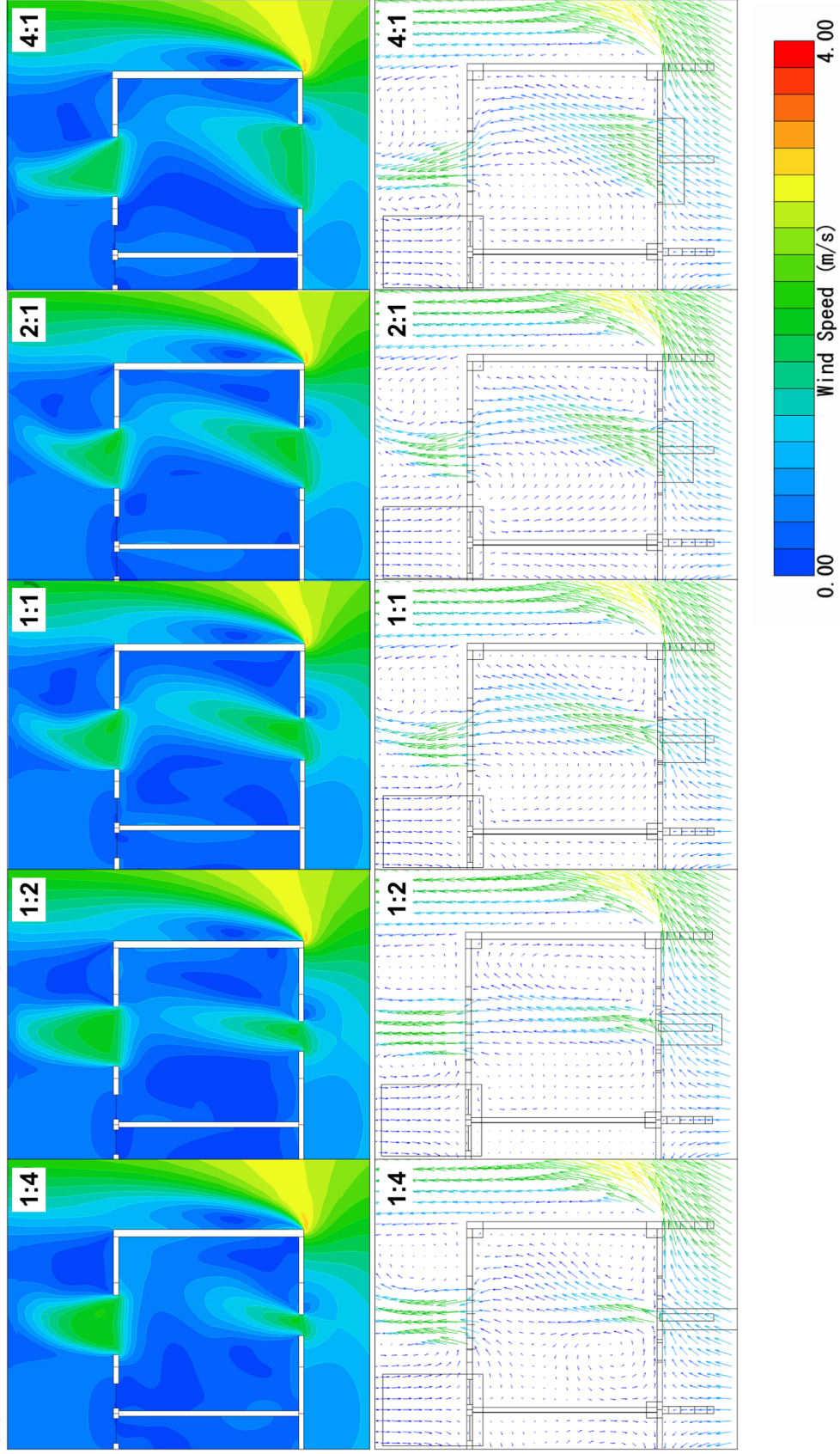


図 5.12 突き出し窓、開き角度 90° の場合の気流分布 (続き)

次に、開口面平均風速と床上 1.5m 室内平均風速を図 5.13 に示す。開き角度 45° の場合は、開閉形式によって開口面の平均風速に違いがあるが、開き角度 90° の場合は、検討した全ての開閉形式で約 $1.6\sim 1.7\text{m/s}$ となり、縦横比の変化による差も小さかった (0.1m/s 未満)。即ち、開口の縦横比は室内の換気量にはそれほど影響しないことが分かる。また、非常に興味深いことに、床上 1.5 m 室内平均風速の結果は、横軸回転窓を横長に変化させたケースが突出して良い値となった。縦横比 $4:1$ のケースで、床上 1.5m 室内平均風速 (約 0.85m/s) は開口面平均風速の約 50% を維持している。これは、 90° に開けられた横軸回転窓の水平な障子がコアンダ効果によって周辺の気流を取り込み、障子付近の風速が強められるためだと考えられる。横軸回転窓は、同様に全開時に障子が水平となる突き出し窓と比べて、このコアンダ効果が障子の両面で発生する。また、本研究で評価基準とした床上 1.5 m 高さが、横軸回転窓の障子位置とちょうど一致したため、コアンダ効果による風速増加の効果が顕著に現れたと考えられる。

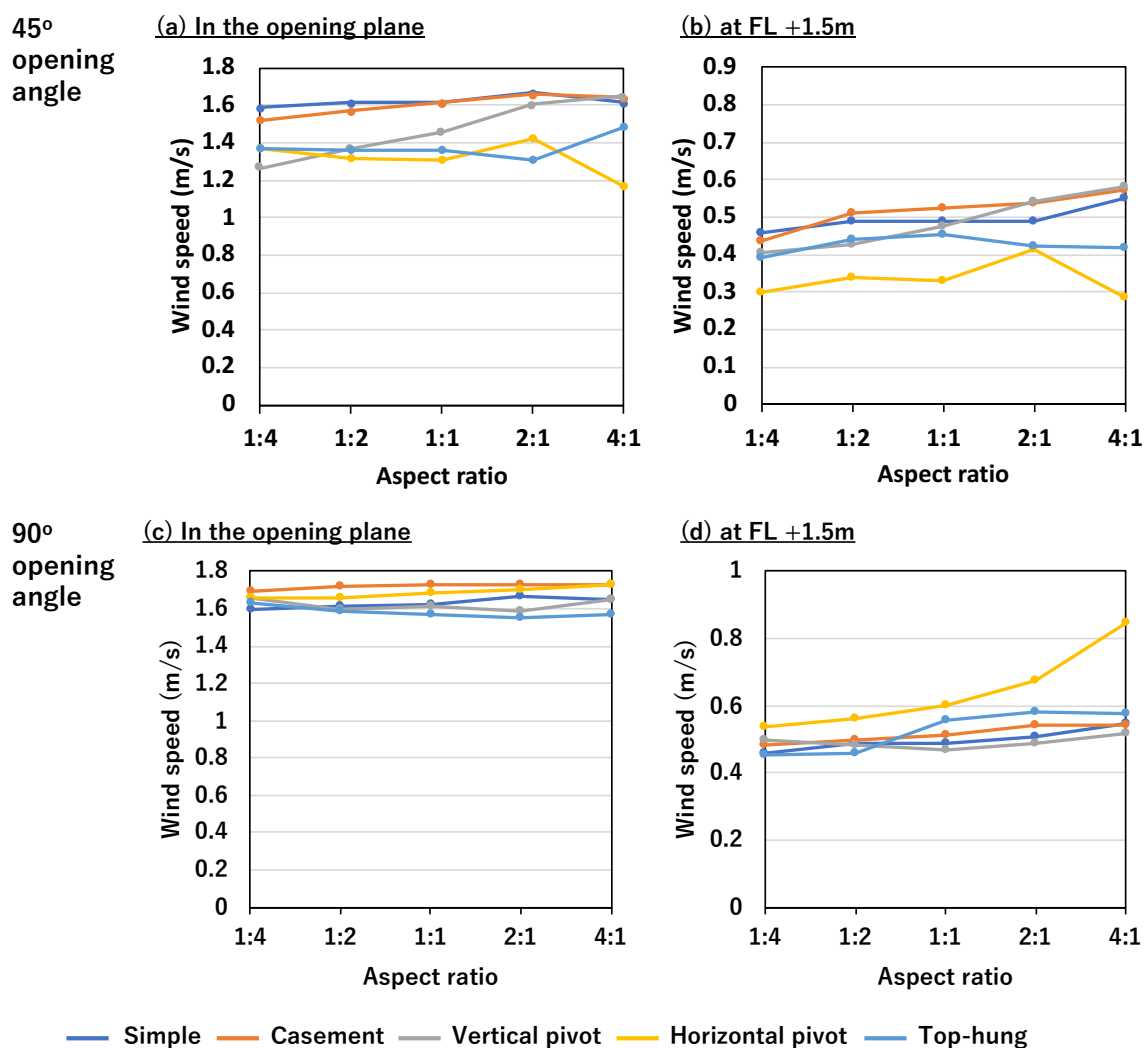


図 5.13 窓開き角度 45° および 90° の場合の開口面および床上高さ 1.5m の平均風速

横長の横軸回転窓を 90° 開ける場合が効果的であることがわかったが、さらに、最良の縦横比を特定するために、縦横比を 7:1 まで変化させる追加検討を行った。図 5.14 に結果を示す。縦横比が 4:1 以上では、床上 1.5m 室内平均風速の増加割合が小さくなる。これは、開口部の変形により形状抵抗が増加して流入風速が減衰し、コアンダ効果による風速増大分を相殺したためだと考えられる。

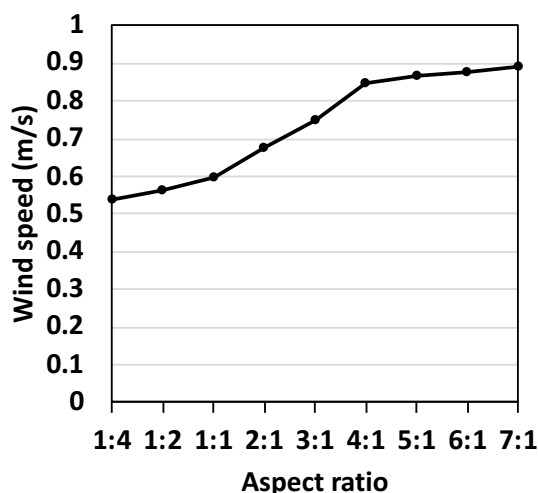


図 5.14 横軸回転窓（開き角度 90°）における縦横比と床上高さ 1.5m 平均風速

5.3.3 開時の障子位置・長さが与える影響

前項までの検討で、室内居住レベルに最も高い風速を取り込めた開き角度 90° の横軸回転窓を対象として、さらに効果を高めるために全開時の障子の位置と長さについて分析した。位置については、障子がすべて室外側にある場合（Outside）、すべて室内側にある場合（Inside）、内外に均等な長さで張り出した場合（Half+half）の 3 通りを比較した。長さについては、ここでは実際の窓の開閉機構を無視して、開口寸法を固定したままで、障子の長さ（閉時の縦寸法にあたる長さ）を 150mm から 1200mm までの 8 通りを比較した（表 5.5、図 5.15）。

図 5.16 に開口面平均風速と床上 1.5m 室内平均風速を示す。結果から、障子の位置は Outside が他の 2 つよりも開口面平均速度が強く（約 1.6~1.8 m/s）、より多くの風を室内へ取り込めることがわかった。Outside は、障子の長さが 450mm 以上で開口面平均速度が微増した。床上 1.5m 室内平均風速は、障子長さ 150mm では位置 Inside が良く、300~600mm では Half+half が良く、750mm 以上では Outside と Half+half が同等に良い結果となった。ただし、長さ 450mm 以上では床上 1.5m 平均風速にほとんど変化がなかった。

図 5.17 に、単純開口と横軸回転窓（縦横比 4:1、角度 90°、障子長さ 600mm）の、流入側開口から流出側開口までの開口部中心軸上の風速分布を示す。単純開口は、流入後の風速の減衰が急で

あり、室中央より手前で気流を感じられないレベルまで低下する。一方、横軸回転窓は、流入時の風速が単純開口よりも高く（約 2.2 m/s）、流入後の風速の減衰も緩やかで、流出側まである程度の風速が維持される。障子の位置に着目すると、**Inside** と **Half + half** は室内側に障子が張り出した部分で風速が強まるが、流出側開口までの全体を見ると **Outside** の方が風速を保つことがわかる。

従って、障子長さが等しい場合、障子の位置は **Outside** が最適だと考えられる。流入風を増加させ、流入後室内での直進性を高め、室内の居住レベルへ風速を保ったまま通風することに適する。

表 5.5 横軸回転窓の障子の長さに関する検討項目

| Windowpane position | Fix | Changeable |
|---------------------|---|---|
| Outside | <ul style="list-style-type: none"> Total windowpane size 1200 mm Inside windowpane size 0 mm | <ul style="list-style-type: none"> Outside windowpane size (mm) 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200 |
| Half + half | <ul style="list-style-type: none"> Total windowpane size 1200 mm | <ul style="list-style-type: none"> Outside windowpane size (mm) 75, 150, 225, 300, 375, 450, 525, 600 Inside windowpane size (mm) 75, 150, 225, 300, 375, 450, 525, 600 |
| Inside | <ul style="list-style-type: none"> Total windowpane size 1200 mm Outside windowpane size 0 mm | <ul style="list-style-type: none"> Inside windowpane size (mm) 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200 |

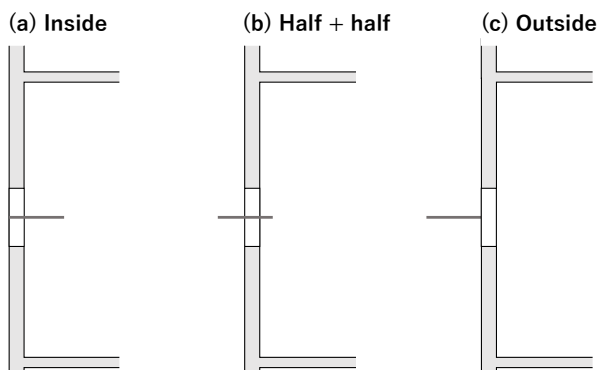
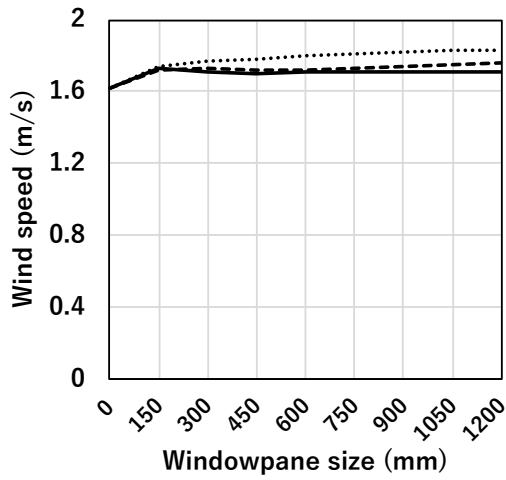
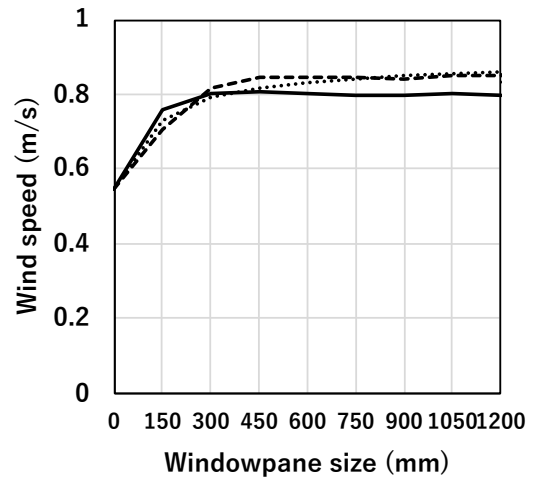


図 5.15 横軸回転窓の障子長さに関する検討項目

(a) In the opening plane

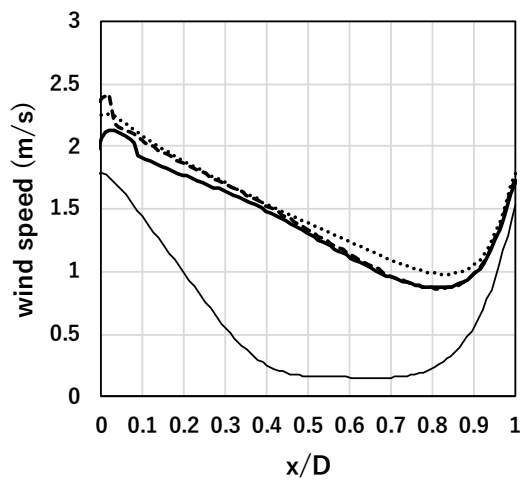


(b) at FL +1.5m



— Inside --- Half + half Outside

図 5.16 横軸回転窓（開き角度 90° ）の位置別の障子長さとお平均速度



— Simple — Inside --- Half + half Outside

図 5.17 障子長さ 600mm の横軸回転窓（開き角度 90° ）の位置別の開口部中心軸上風速

5.4 空気齢による換気性能評価

5.4.1 評価方法

前節までに検討した開口部形状が換気性能に与える影響について、評価基準に空気齢を用いて分析した。

代表的な換気率評価指標として、換気量やそれを室内容積で除した換気回数が挙げられる。これらの指標は、日本においても建物の使用用途や使用人数などによって必要な値を求める方法が確立されており、頻繁に使用されている[108]。建築基準法では、自然換気のみの場合、居室に必要とされる換気上有効な開口面積は居室床面積の1/20以上と定められている。一方で、例えば、熱帯のインドネシアでの自然換気の基準は開口部の位置や方角で定められており、賃貸型公営集合住宅においてはさらに日本同様に床面積5%以上の開口面積という基準がある[108]。また、換気量は、室容量に対する開口面積からある程度把握可能で、前述のように明確な基準があることが多いため換気性能評価指標として多く使用されている。

室内における汚染質の拡散性状を評価する換気効率指標 (Scale for Ventilation Efficiency) には、村上ら[110]によって提案されたSVE1~SVE3や、小林ら[111]によって提案されたSVE4~SVE6などがある。SVE1はある汚染源に対応して得られる室内平均濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化して定義された室内平均濃度とその分布を表す指標。SVE2はある汚染源に対応する濃度分布の2次モーメントを室内平均濃度で基準化し、その平方根で定義された汚染質の平均拡散半径とその分布を表す指標。SVE3は吹き出し空気がその点に到達するまでの時間が長いほど汚染の確立が上昇するという想定に基づき、吹き出し空気の平均到達時間を表す指標である。SVE4は、その吹き出し気流自身の室内濃度分布で定義される、吹き出し口の環境形成寄与率指標。SVE5はその吸い込み口を経て室外へ排出される空気の室内での分布性状を示す、吸い込み口の環境形成寄与率指標。SVE6はその点を通過した空気が排出されるまでの平均時間分布(空気余命分布)を示す指標である。空気齢、空気余命、滞在時間に関する概念を図5.18に示す[112]。

換気量による評価は室内の空気を完全混合状態とみなし平均的な換気効率を測る指標である。一方で、空気齢は室内の不均一な気流分布を評価することで空気のよどみ域や局所循環域を評価することが可能であり、室内の汚染質分布や換気効率分布を考慮し、室内空気環境の局所制御を目的とする場合に有効な評価方法であるといえる。本研究では、開口部形状のパラメータを変化させ、室内空気齢分布の感度分析を行うことによって流入風が室内にどのように到達するかを評価した。

図5.19に室内の空気齢分布を解析するための室内の分割方法を示す。天井高3mの室内を垂直方向に3つの高さに分割(Low、Middle、High)し、床面積約 $5 \times 5 = 25 \text{ m}^2$ の室内を東から西へ(風上

から向かって左から右へ) C1~C5 に分割し、北から南へ (風上から風下へ) R1~R5 に分割した。
 合計 $5 \times 5 \times 3 = 75$ か所の空間を定め、5cm 間隔で空気齢を算出した。

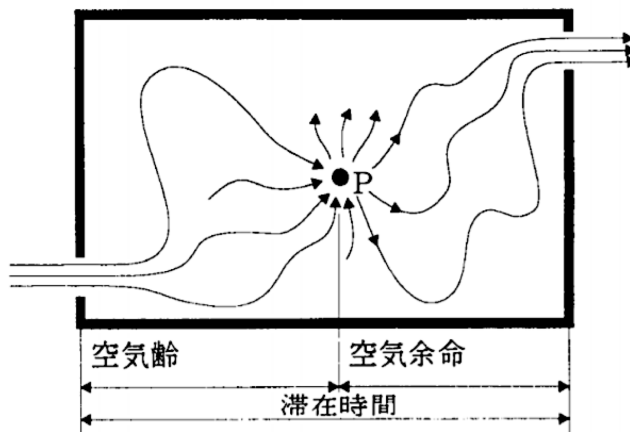


図 5.18 空気の年齢

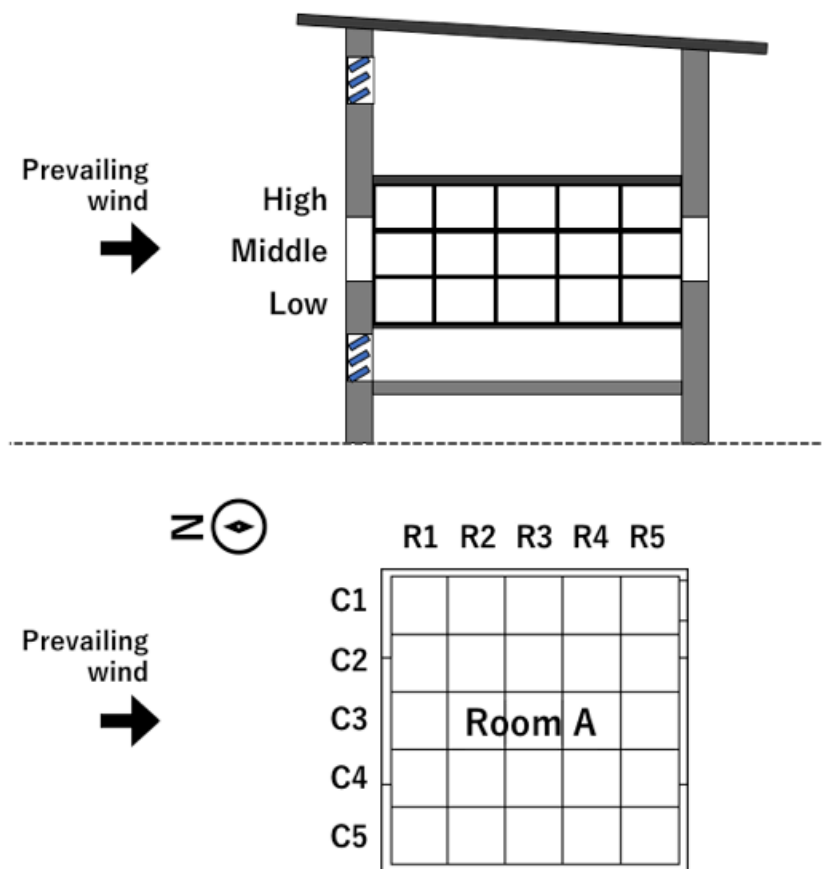


図 5.19 空気齢評価のための室内分割方法

5.42 窓の開閉形式が与える影響

図 5.20 に、検討した 5 種類の窓開閉形式について、縦横比が 1:1 で開き角度が 45° の場合の室内空気齢分布を、開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面で示す。水平断面で比較すると、いずれも東寄りに傾いて流入風が吹き込む影響で、東側の空気齢が西側に比べて高くなる。外開き窓は、室内全体の空気齢が約 1.0 程度と他に比べて小さく、均等に分布している。縦軸回転窓、横軸回転窓、突き出し窓は室内の東側の広い範囲で空気齢が高くなる。特に、横軸回転窓と突き出し窓では室内のより広い範囲で空気齢が 2.0 以上と値が大きくなる。鉛直断面で比較すると、単純開口と外開き窓の空気齢は他に比べて小さく、単純開口ではどの高さも空気齢の値が約 1.0 程度で均等に分布し、外開き窓では床付近が約 1.4 とやや高い。縦軸回転窓は全体的に空気齢が約 2.0 程度と高い。横軸回転窓は流入風が上向きに吹き込むため循環し、天井付近と床付近の空気齢が相対的に低くなる。突き出し窓は流入風が概ね真っすぐに吹き込むが、天井付近では約 2.0 程度と高い。

図 5.21 に東西分割および南北分割での空気齢分布をそれぞれ示す。東西分割で比較すると、コーナー図でも見られた通り、すべての窓開閉形式で室内の東側が西側に比べて空気齢の値が高い。中でも、突き出し窓、縦軸回転窓、横軸回転窓が悪く、どの高さレベルにおいても東側へ風到達に時間を要している。南北分割で比較すると、突き出し窓は全体的に空気齢が高い。縦軸回転窓は流入側開口付近の空気齢が高い。横軸回転窓は床上 1~2m の流出側で空気齢が高く、天井付近ではバラツキが大きい。

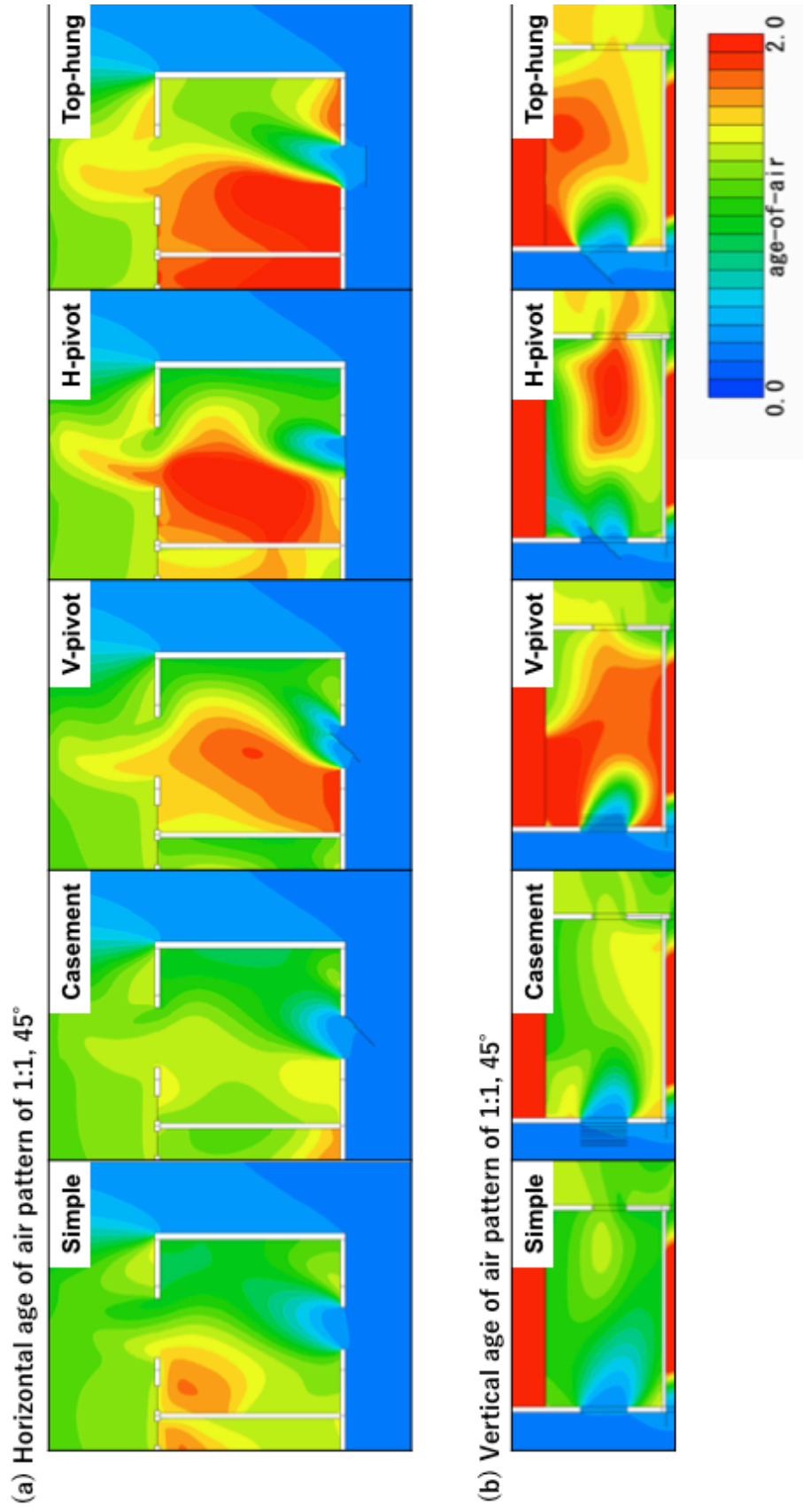


図 5.20 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

(a) 東西分割

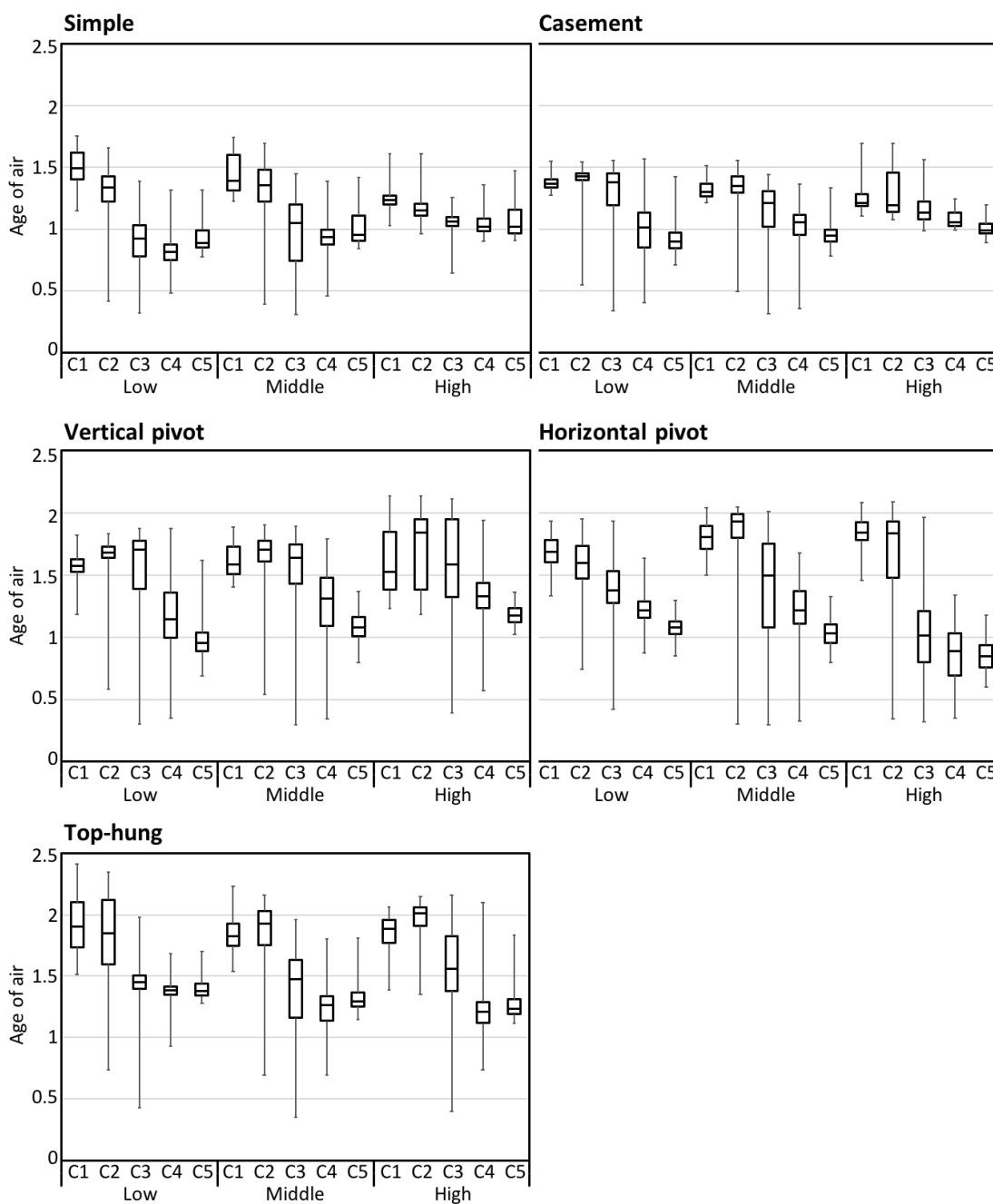


図 5.21 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° 場合の室内空気齢分布

(b)南北分割

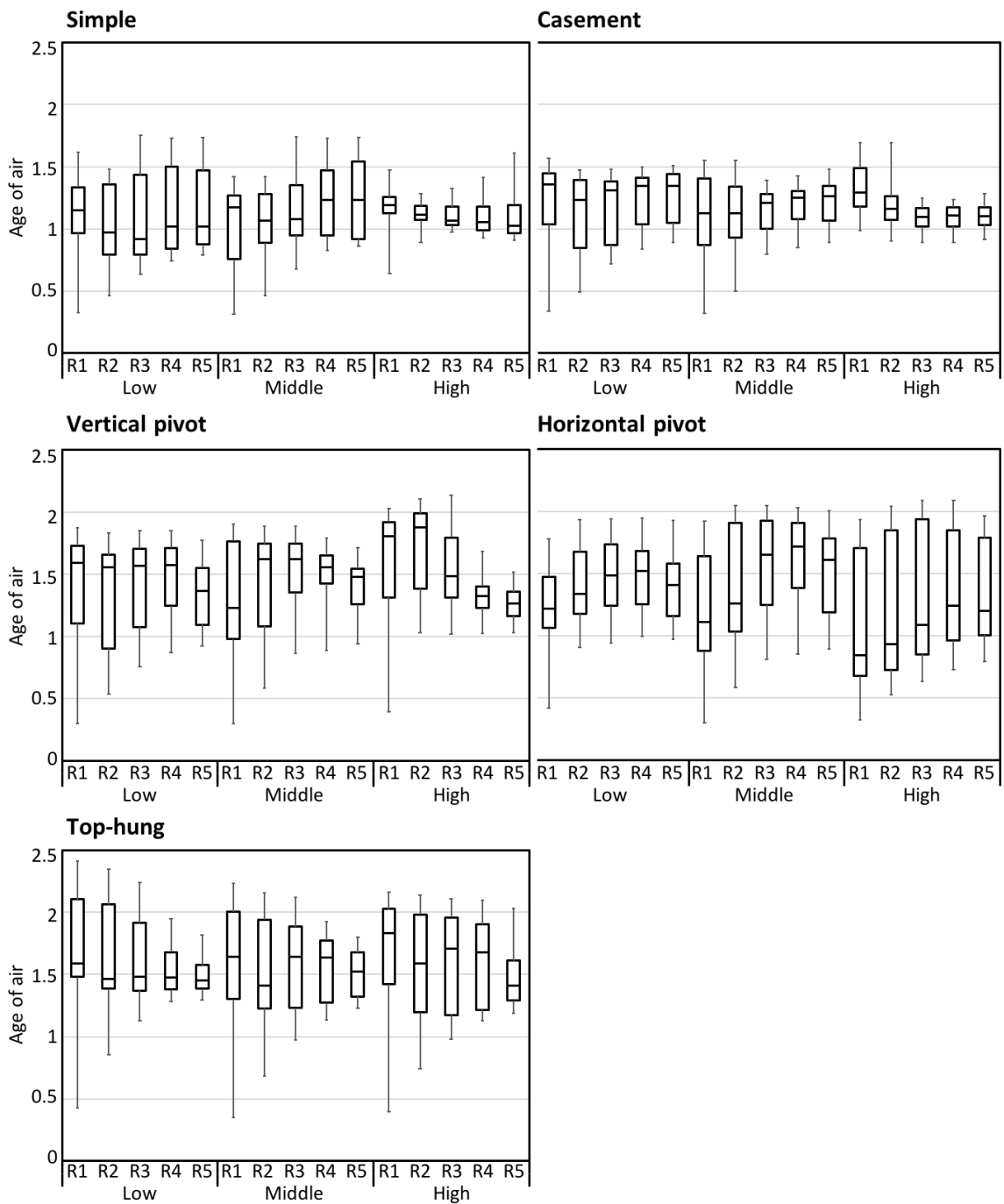


図 5.21 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 45° 場合の室内空気齢分布 (続き)

図 5.22 に、縦横比が 1 : 1、開き角度が 90° の場合の空気齢分布を、窓開閉形式別に、開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面で示す。水平断面で比較すると、外開き窓、横軸回転窓、突き出し窓では開き角度 45° の場合と同様に室内東側が西側に比べて空気齢の高めであるが、開き角度 45° の場合よりも全体的にも低くなっている。縦軸回転窓は、流入側開口の両脇の空間で空気齢値が約 1.4~1.8 と高い。次に鉛直断面で比較すると、やはり全ての窓種で開き角度 45° の場合よりも全体的に空気齢が低い。単純開口と外開き窓では流入風が下向きに吹き込むが、約 1.0 程度の空気齢値が室内に概ね均等に分布している。これは室内の床付近から天井方向に空気が循環するためである。また、流入風が真っすぐ吹き込む横軸回転窓と突き出し窓では室内全体に約 1.0~1.2 の空気齢値が均等に分布するが、横軸回転窓では床付近で、突き出し窓では流入側天井付近で空気齢のやや高いエリアができる。

図 5.23 に、東西分割および南北分割での空気齢分布をそれぞれ示す。東西分割で比較すると、単純開口と横軸回転窓は、室内東西で差はあるものの、バラツキが少なく安定して低い空気齢である。外開き窓の Low~Middle 高さレベルと突き出し窓の Middle~High で、東側の空気齢が高い値である。次に南北分割で比較すると、縦軸回転窓と突き出し窓では流出側開口に近いほど空気齢が高くなる。横軸回転窓と単純開口は、値のバラツキが少なく全体的に空気齢が低い。言い換えると、室内のどの場所でも新鮮な気流を得られやすいのは、横軸回転窓と単純開口だと考えられる。

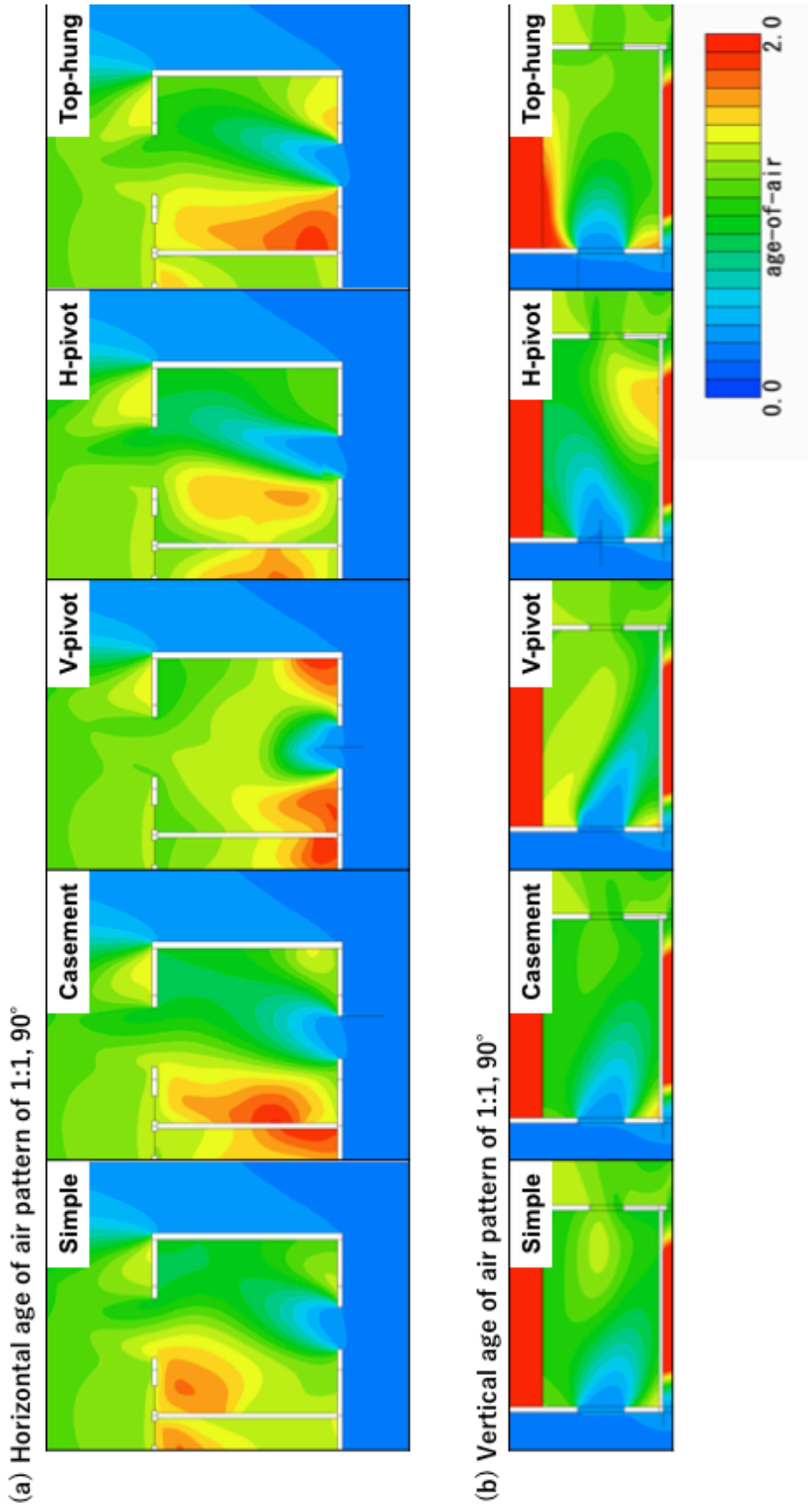


図 5.22 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

(a) 東西分割

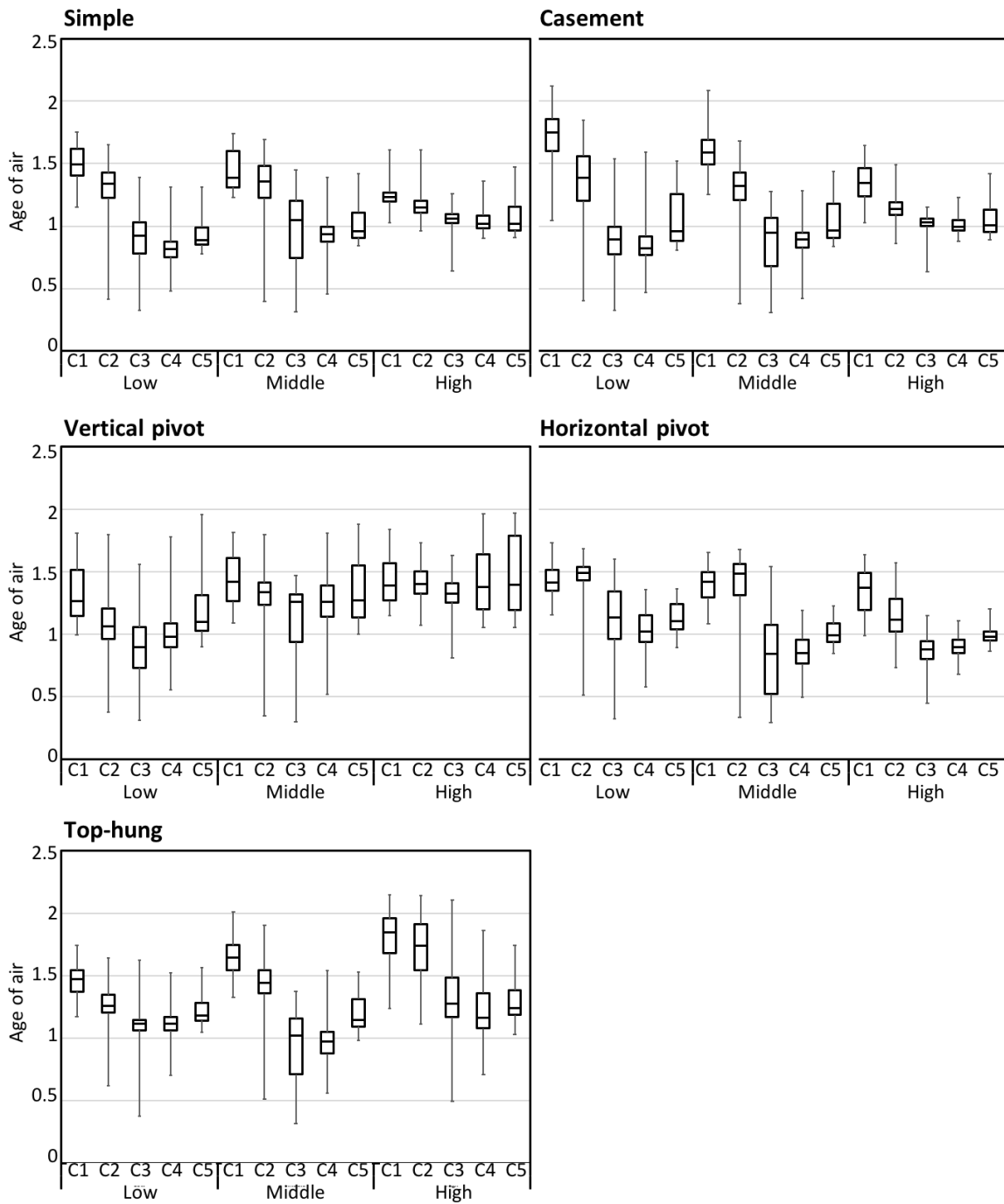


図 5.23 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° 場合の室内空気齢分布

(b) 南北分割

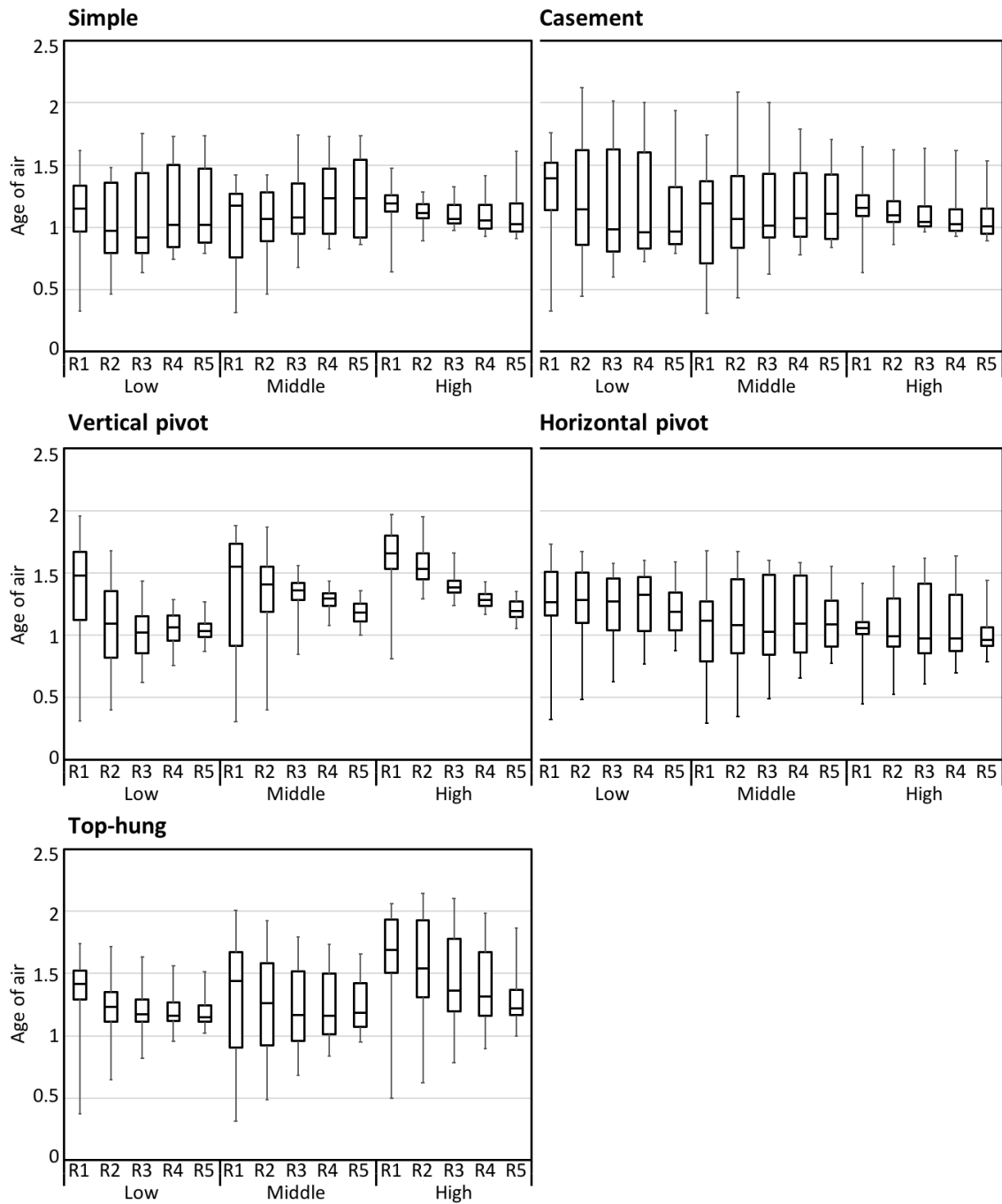


図 5.23 開口縦横比 1 : 1、窓開き角度 90° 場合の室内空気齢分布 (続き)

5.43 開口の縦横比が与える影響

窓開き角度 45° 、開口縦横比を縦長の $1:4$ とした場合の窓開閉形式別の室内空気齢分布の結果を、開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面で図 5.24 に示す。開口縦横比を $1:1$ から $1:4$ に変化させた場合（図 5.20 参照）、単純開口では大きな差は見られない。外開き窓では、鉛直断面で床付近の空気齢がやや高くなった。縦軸回転窓では、空気齢の高い赤色で塗られたエリアが大幅に拡大した。逆に、横軸回転窓では、東側半分と流出側の間高さの広い範囲で空気齢がやや低くなった。突き出し窓もまた、東側半分と天井付近の広範囲で空気齢が低くなった。縦長開口の場合、回転軸が縦である外開き窓と縦軸回転窓を半開した状態では、室内によどみ域が生じてしまう結果となった。

次に、窓開き角度 45° 、開口縦横比を横長の $4:1$ とした場合の窓開閉形式別の室内空気齢分布の結果を、図 5.25 に示す。開口縦横比を $1:1$ から $4:1$ に変化させた場合（図 5.20 参照）、単純開口には目立った違いは見受けられない。外開き窓、縦軸回転窓、突き出し窓は空気齢の高かった箇所が部分的に改善される。外開き窓では床付近が約 14 からやや下がる。縦軸回転窓では東側の広範囲が約 18 から約 13 まで下がる。突き出し窓では東側の流入側寄りでは 20 以上から約 14~15 に下がる。一方、横軸回転窓では空気齢が 20 以上のエリアが拡大した。

続いて、窓開き角度 90° 、開口縦横比を縦長の $1:4$ とした場合の窓開閉形式別の室内空気齢分布の結果を図 5.26 に示す。開口縦横比を $1:1$ から $1:4$ に変化させた場合（図 5.22 参照）、どの窓種においても大幅な改善または悪化はなかった。外開き窓と突き出し窓では、空気齢の高いエリアが若干減少した。一方、単純開口、縦軸回転窓、横軸回転窓では、空気齢の高いエリアが微増した。

窓開き角度 90° 、開口縦横比を横長の $4:1$ とした場合の窓開閉形式別の室内空気齢分布の結果を、図 5.27 に示す。開口縦横比を $1:1$ から $4:1$ に変化させた場合（図 5.22 参照）、縦軸回転窓では、流入側開口の両脇スペースの空気齢が高かったものが改善されたが、東側壁付近に空気齢 2.0 のエリアができた。単純開口、外開き窓、横軸回転窓、突き出し窓では大きな差はなかった。

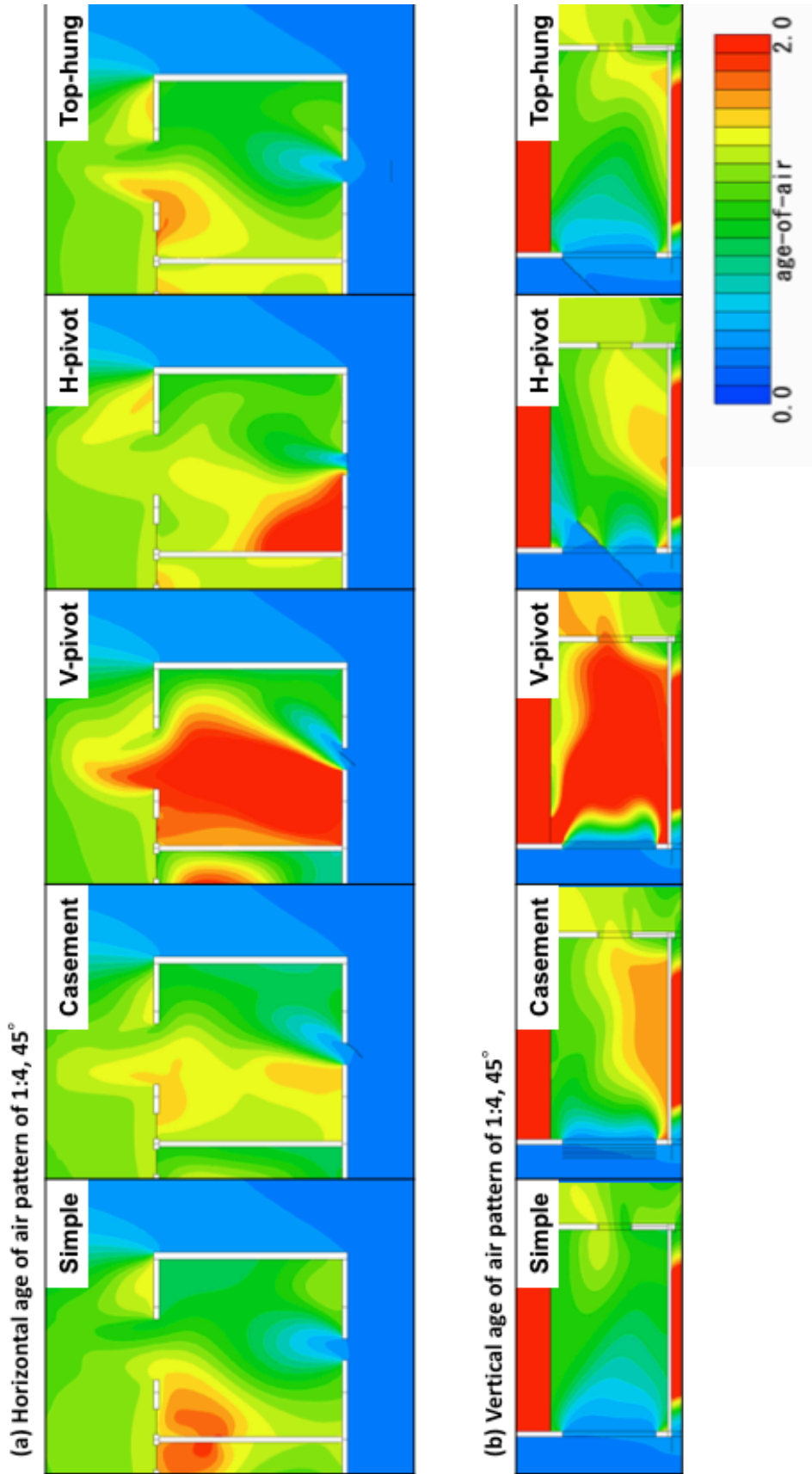


図 5.24 開口縦横比 1 : 4、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

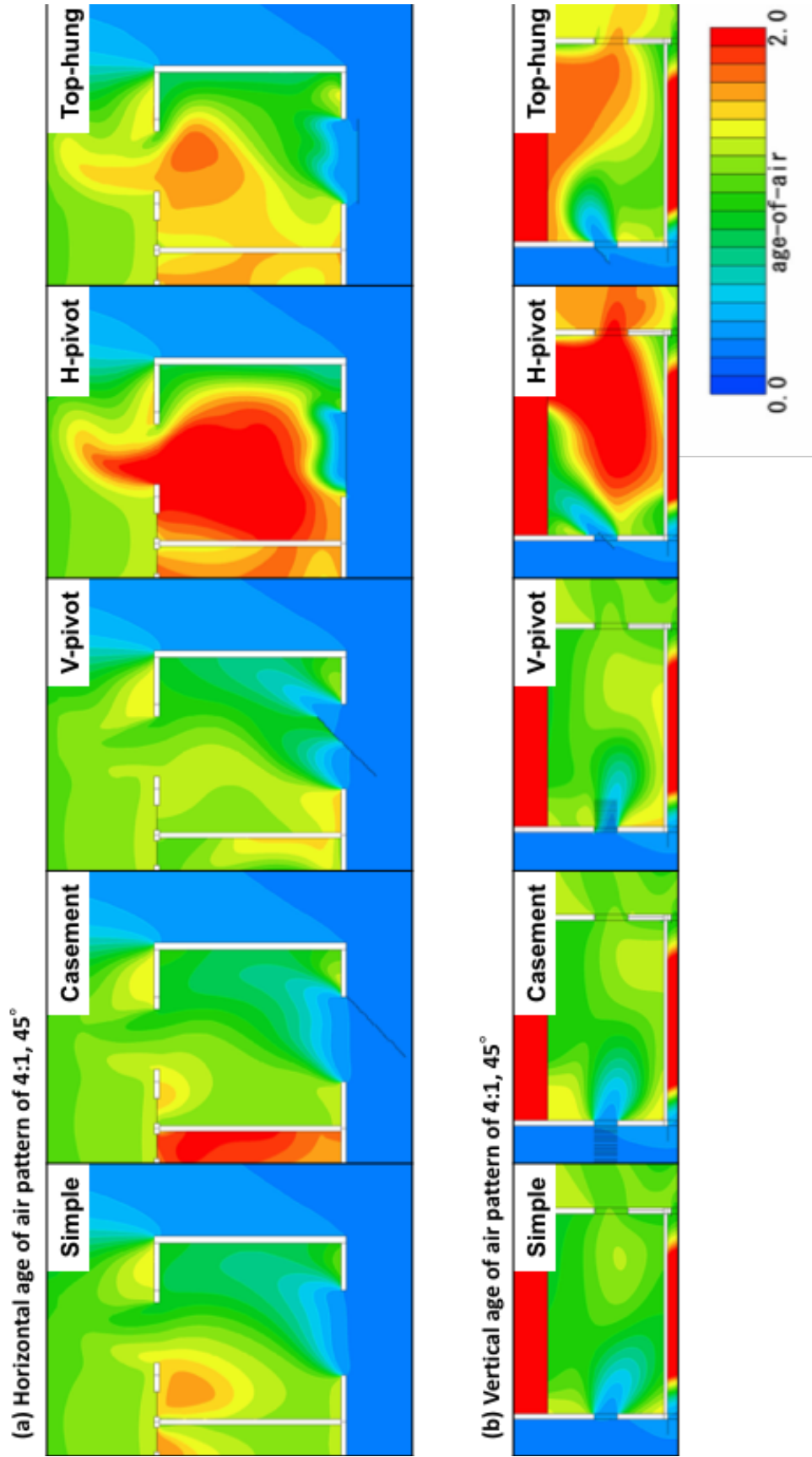


図 5.25 開口縦横比 4 : 1、窓開き角度 45° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

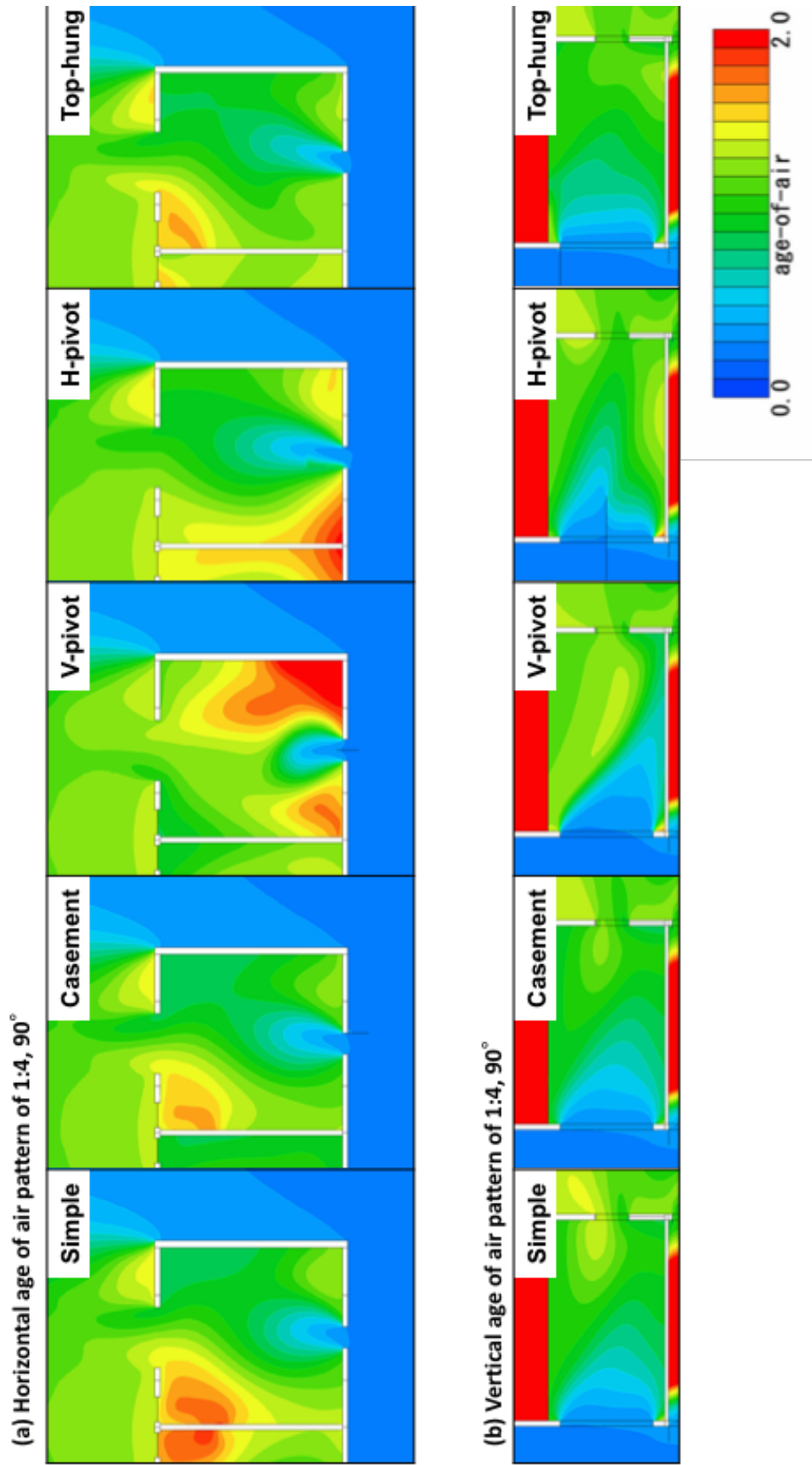


図 5.26 開口縦横比 1 : 4、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

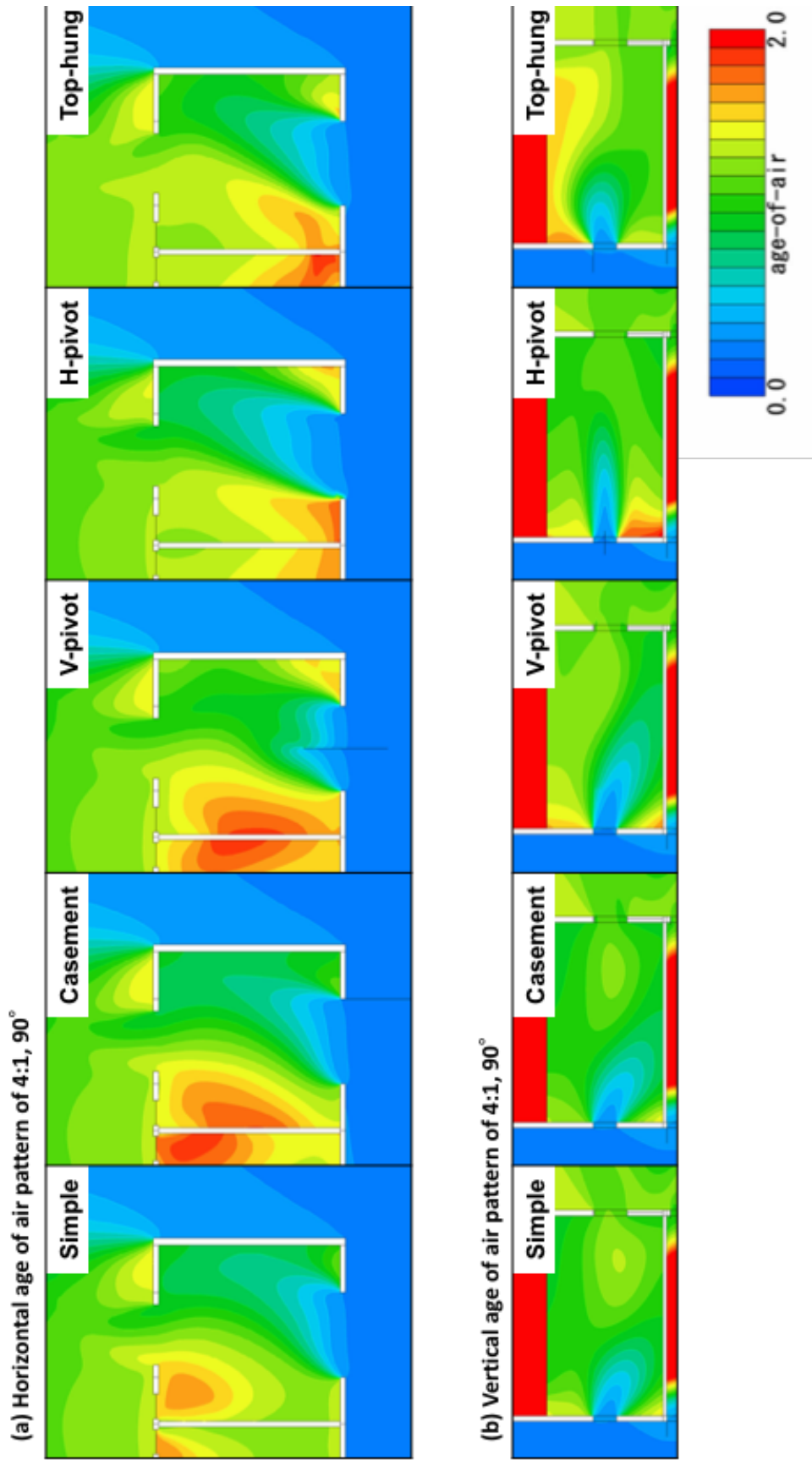


図 5.27 開口縦横比 4 : 1、窓開き角度 90° の場合の開口部中心軸上の水平断面と鉛直断面の空気齢分布

5.5 章まとめ

室内の居住レベルに効率的に自然風を取り込むのに適した開口部性状を決定するため、CFD 解析によって窓開閉形式 5 種類、開き角度 2 種類、開口縦横比 5 種類を検討し、室内の気流分布と空気齢分布により評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 窓開閉形式と開き角度は、窓面全体の平均風速および床上 1.5 m 程度の居住レベルの風速分布に大きく影響を与えた。建物接近流がやや下向きとなる本研究の条件では、外開き窓と縦軸回転窓は窓の開き角度に拠らずに流入風が下向きに吹き込むため、居住レベルの風速は減衰した。横軸回転窓は障子面に沿って流入風が吹き込むため、開き角度 45° では上向きとなり居住レベルの風速は減衰したが、開き角度 90° では水平に吹き込んで居住レベルの平均風速が単純開口よりも増加した。同様に、突き出し窓も開き角度 90° では居住レベルの平均風速が単純開口よりも増加した。すなわち、横軸回転窓と突き出し窓を 90° 開ける場合に、流入風を居住レベルへ比較的減衰させずに通すことができた。加えて、これら 2 ケースでは窓面平均風速が単純開口より増加しており、室全体の換気量の増加も期待される。
- 開口縦横比が気流分布に与える影響は一律ではなかった。単純開口や外開き窓では、開口縦横比が 1 : 4 や 4 : 1 のようになると形状抵抗が増大して流入風速が低下した。このため、開口縦横比 4 : 1 の横長窓であっても、開口縦横比 1 : 1 に比較した居住レベルの平均風速の増加割合は小さかった。しかし、横軸回転窓の開き角度 90° では、他の場合とは異なり、開口縦横比 4 : 1 の横長窓の居住レベル平均風速が増加し、風速 3 m の条件において単純開口の約 1.5 倍となった。これは、水平に開けられた障子の上下面で生じるコアンダ効果による気流促進効果および気流を水平方向に整える効果が、形状抵抗による減衰効果を上回ったためと考えられる。縦横比をさらに横長に変化させても、縦横比 1 : 1 から 4 : 1 までは室内風速が急激に増大したが、4 : 1 から 7 : 1 までは微増であった。すなわち、今回検討したケースの中では、横軸回転窓、開き角度 90°、縦横比 4 : 1 以上の横長の窓デザインが床上 1.5 m 程度の居住レベルに強い風速で気流を通すのに最も適していると言える。
- 横軸回転窓の開き角度 90° の場合について、全開時の障子の位置と奥行方向の寸法について追加検討を実施した。障子奥行寸法が大きいほど室内風速が強まった。障子位置は、障子全体または半分が屋外側に突出する場合の方が、室内側のみ突出する場合よりも有効であった。これは、屋外に突出した障子がウィンドキャッチャーの役割を果たし、建物接近流をより多く室内へ誘導するためだと考えられる。しかし、障子位置と奥行寸法の効果は、前述の窓開閉形式、開き角度、開口縦横比の影響に比べると小さかった。

- 窓開閉形式、開き角度、開口縦横比は、室内の空気齢分布に影響を与えた。本研究ではやや東よりの流入風が下向きに吹き込む条件であったが、単純開口では流出側東側で空気の淀み域ができた。外開き窓と縦軸回転窓、および、縦長の開口形状は流入風の水平方向の傾きが補正されないため、室内東側での空気の淀み域が生じた。突き出し窓と横軸回転窓、および、横長の開口形状は流入風の垂直方向の傾きが補正されないため、室内上部に淀み域が生じた。しかし、横軸回転窓、開き角度 90° 、縦横比 4 : 1 横長窓では、幅広い開口面から水平に流入風が吹き込むために室内全体で空気齢が小さく均等に分布した。本研究結果における最適案は空気齢分布の観点でも比較的良好であると言える。

ケーススタディにより、自然通風によるパッシブクーリングに適した窓デザインの方向性の仮説を得られた。この結果は、現状の対象住宅に 100%近いシェアで使用されている突き出し窓に比べ、室内居住レベルの平均風速を大きく向上できると考えられる。今後は、実環境での実測検証が必要である。

また、本研究は、2面開口によるクロスベンチレーションを前提としており、定常風で解析を行った。実際の住宅の風環境は多様であり、1面開口と2面開口それぞれでの最適解の研究や、風向、風速を変化させての分析により精度を上げていくことが期待される。

6

全体考察

6.1 自然通風によるパッシブクーリングの妥当性

3章で報告した通り、東南アジア蒸暑地の都市住宅を想定したマレーシアでの被験者実験の結果から、熱帯居住者の温熱生理的特性である効率的な発汗蒸発機能により、自然換気モードで熱放散がスムーズに行われている様子が確認された。実測ケースを平均した室内環境は、気温 29.0°C、相対湿度 75.5%、気流速度 1.2 m/s であり、SET*は 27.7°Cであった。被験者を平均した深部体温（耳内）は 36.3°C、平均皮膚表面温度は 32.5°Cであり、既往研究から推測される熱帯居住者の椅子座安静時の体温よりも大幅に低かった。これは、被験者が平均でおよそ 1.7 Met の代謝量の生活行動をとっていた直後に平均 1.2m/s の気流を継続的に受けたことで蒸発性熱放散が促進され、体温が低下したと考えられる。総発汗量は 1.11 g/min で、温帯居住者を対象とした既往研究結果に比べて少なく、熱帯居住者の発汗効率の高さが示された。温冷感申告の平均は -0.23 で、約 4 割の被験者が「-2：涼しい」または「-1：少し涼しい」と回答した。気流感に関する申告では、気流が「強い」「少し強い」と回答した被験者のほとんどが「そのままが良い」と感じた一方で、「弱い」「少し弱い」と回答した被験者のほとんどが「より強い」気流を好んだ。この被験者実験により、自然通風によるパッシブクーリング手法は、東南アジアの熱帯居住者に対して温熱生理的に妥当性があると考えられる。

4章で報告した窓開閉行動の大規模調査と分析からは、居住者の一日の温熱適応行動パターンが明らかになった。高温多湿な都市では、エアコンの所有/非所有に関わらず、8 割以上の世帯が日中には窓を開放する行動パターンであった。2 割弱の残りの世帯は一日中窓を開けない行動パターンであったが、その影響要因として、世帯規模の小ささ、回答者年齢の若さ、世帯収入の高さ、エアコン使用時間の長さ、在宅時間の短さ、虫への懸念、雨への懸念、が関連付けられた。このうち、エアコン使用と、虫および雨への懸念については住宅設計上の課題である。熱的快適性の向上や、虫侵入および雨吹き込みの懸念を払拭することにより、居住者の窓開閉行動の受容性をさらに高め

ることも可能だと考えられる。現在の適応行動パターンを踏まえて、自然通風によるパッシブクーリング手法は、東南アジア蒸暑地の都市住宅の居住者に対して妥当性があると考えられる。

6.2 自然通風によるパッシブクーリングと窓デザイン

5章で報告したケーススタディの結果から、室内の居住域高さへの効果的な通風を得るのに適した窓デザインについての知見が得られた。横軸回転窓を 90° 全開した場合に、室内気流は最も水平に風速を減衰せずに流れた。これは、開口部中央にある水平面（すなわち全開状態の障子）の上下を通過する気流が水平に方向付けられるためと、かつ、屋外側に突出した水平面がウィンドキャッチャーの役割をするためだと考えられた。なお、全開時の障子位置は、室内側に突出する場合よりも内外にまたがる場合や屋外側に突出する場合の方が、室内後方まで風速が維持されていた。開口寸法の縦横比は横長 4 : 1 までは横長になるほど効果的で、それ以上扁平にしても効果にあまり差がなかった。また、開口寸法を変えずに全開時の障子の大きさのみを変化させた場合には、障子が大きいほど効果的であったが、窓種や開口縦横比などの要素に比べて影響は小さかった。

一方で、4章で明らかになったように、居住者の窓開閉行動パターンには世帯間で多様性があり、複数の典型パターンが存在した。気温の上昇する日中に自然通風によるクーリング効果を検討する場合、日中の窓開け行動の阻害要因を排除する必要がある。本研究では、世帯規模の小ささや世帯収入の高さなどの世帯属性のほか、虫や雨への懸念が影響していた。

さらに、一般的に求められる窓の要件として、窓を開けた際に障子が突出することの安全性、開閉操作の容易性、転落防止や防犯の観点での開口寸法の制限、なども挙げられる。

以上を踏まえて、自然通風によるパッシブクーリングに適した窓デザインを検討すると、5章で取り上げた水平回転軸窓の利点を活かしつつ、障子を屋外側のみに突出する開閉方法（横すべり出し窓）とし、内側に網戸を設置することなどが考えられる（図 6.1 (b)）。あるいは、障子を数枚に分割したルーバー窓とする案（図 6.1 (c)）や、窓の開閉方法を網戸操作不要な上げ下げ窓等として、窓の外側に水平面を別部材で設置する案（図 6.1 (d)）なども考えられる。これらの窓デザインは、インドネシアやマレーシアの住宅で圧倒的な普及率を占めている突き出し窓よりも効果的であると予測できるが、今後の実測検証および居住者のモニタリング検証などが必要である。

6.3 東南アジア蒸暑地に適した自然通風の利用と窓の在り方

4章で確認された居住者の行動パターンの主流は、日中に窓を開放して夜間に窓を閉鎖するものであった。冷房使用状況は、現在はエアコン所有者のほとんどが寝室で夜間のみを使用しているが、

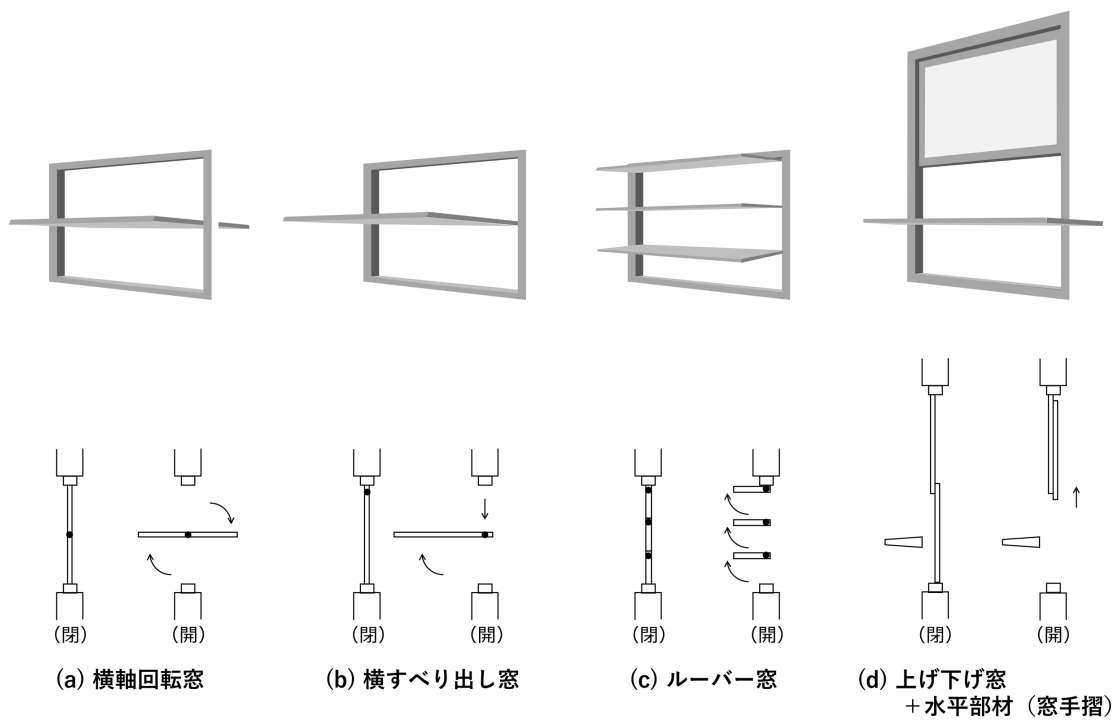


図 6.1 自然通風に適した窓デザインの案

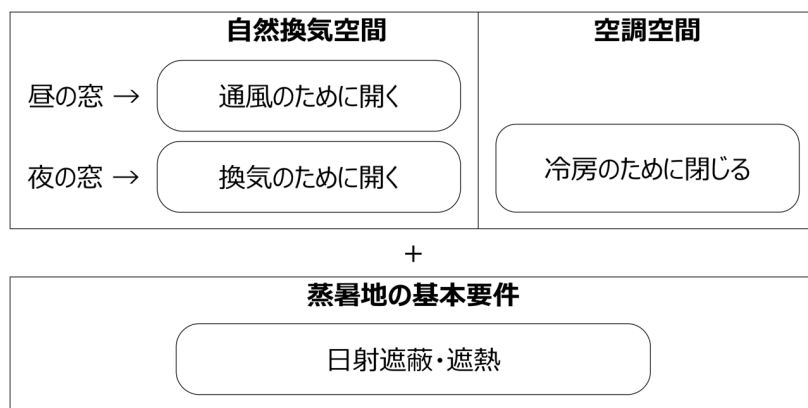


図 6.2 蒸暑地の部分冷房住宅における窓の考え方

今後さらなるエアコン普及による日中への時間的拡大とリビングルームへの空間的拡大が示唆された。一方で、既往研究には東南アジア蒸暑地においても高容量な建物においては夜間換気冷却効果が期待できると報告されている。そのため、日中の自然通風利用と夜間の自然換気利用によるクーリング効果を最大化することで、熱的快適性を確保できない最小限範囲に冷房使用を留めることが適切だと考えられる。

日中の自然通風利用に対しては、前述したような窓デザインが有効だと思われるが、部分冷房の住宅においては冷房空間と自然換気空間とで異なるコンセプトの窓が求められる。言わば、「閉じる窓と開く窓」である（図 62）。また、同一空間において日中は通風、夜間は換気の最適化を目指すためには、窓を使い分けるコンセプトがより適切かもしれない。こちらは、「昼の窓と夜の窓」である。これまで、窓単体の技術開発は主に寒冷地や温暖地で進められてきた経緯があり、断熱性能などのように上手に閉じる技術は発展してきた。しかし、蒸暑地においては開く技術も必要であり、この視点での窓技術の発展は温暖化する世界において建築設計の選択肢を広げるものである。それ故に、窓の開き方についてさらなる研究が求められる。

加えて、4章で示されたように、住宅の窓開閉操作は居住者行動に委ねられており、様々な要因によって開閉パターンが異なるのが実情である。パッシブクーリングを普及させるためには、省エネルギーかつ熱的快適性を実現する行動パターンを、住宅設計者や住宅供給者が居住者にわかりやすく示して教導する必要がある。本研究でも、居住者が窓を開けながらも屋外の眩しさや視線遮断のために布で覆っていたり、たくさんの洗濯物を干していたりという窓の使用実態が観察された。住宅設計者らには、熱的快適性や省エネルギーに留まらない多面的な配慮がパッシブクーリング効果を実現するために求められている。設計の早期段階でシミュレーション評価等による建物個々の最適解が見出された後に、専門家と居住者がコミュニケーションをとりながら導入と実践をすることが重要である。

6.4 本研究の限界と今後の課題

本研究の限界について記す。本研究は、都市住宅居住者の中でも、特に、近い将来に建設される住宅のメインターゲットであり、経済成長による生活レベルの上昇から冷房エネルギー消費量増加の主役となると考えられる低中所得者層にフォーカスしており、この層において普及している集合住宅とテラスハウスを実験および調査の対象とした。既に冷房普及が進んでしまっている中所得者層や高所得者層向け住宅においては、他地域で従来進められているような窓を含めた建物外皮での遮熱の徹底や、断熱化による冷房効率向上を図ることが先決だと思われる。ただし、居住者に対する冷房エネルギー消費量削減に関する情報提供は、同様に重要である。

次に、本研究で窓デザインのケーススタディを実施したが、その前提条件は限定的である。流入側開口部性状にフォーカスし、室内気流分布に与える影響について原理的な知見を得るために、卓越風が安定して1つの方角から吹く状況での実測データを基に解析モデルを作成し、通風解析を行った。また、開口部配置については、相対する2つの壁面に開口部を設けたクロスベンチレーションを前提にしている。都市住宅の中でこのようなプランが採用できるケースは限定されていて、周囲の建物の密度や、高層階であるかどうか等によっても本研究結果を適用できない場合がある。

1面開口と2面開口のそれぞれにおいて最適な開口部設計方針が示されるべきであり、本研究のケーススタディはその一端である。また、屋外風の風向と風速が好ましくない場合には、建物配置の工夫やウィンドフィン設置等で流入風量の増加や調整を図ることや、天井扇を併用して最低限必要な室内気流を確保することなどが検討されるべきだと考えられる。東南アジア蒸暑地での自然通風によるパッシブクーリングを意図した窓デザインは、さらなる研究が必要である。次なる課題としては、本研究でシミュレーションにより示された窓デザインの効果について実測検証が必要である。そして、1面開口や異なる屋外風向においてなど条件の場合分けを行い、より実用的に最適解を示すことが期待される。

7

結論

本研究では、東南アジア蒸暑地の都市住宅へのパッシブクーリング技術普及に寄与するために、まず、熱帯居住者の生理的特性と適応行動パターンの2面から検証を行った。次に、ケーススタディにより省エネルギーと熱的快適性を同時に満足させる窓デザインの方向性を考察した。主な成果を以下に記す。

- 温熱生理の観点から、東南アジア蒸暑地での自然通風によるパッシブクーリングの妥当性を検証した。既往研究においては、熱帯居住者が温帯居住者や寒帯居住者よりも発汗蒸発能力に優れていることが主に人工気候室での被験者実験により明らかにされていた。本研究では、実際の典型的な都市住宅を想定したマレーシアの実験住宅での被験者実験により、天井扇のある自然換気空間（平均風速 1.2 m/s）において、熱帯居住者は少ない発汗量（平均 1.11 g/min）で蒸発性熱放散を行い、低い平均皮膚表面温度（平均 32.5°C）と深部体温（平均 36.3°C）を示した。これにより、熱帯居住者が発汗蒸発による体温調節に優れていることを実環境に近い状況において確認することができた。また、被験者の気流感申告結果にはより強い風速を期待する傾向があり、気流による発汗蒸発に対する感覚面での受容性を確認できた。一方で、本研究のデータからは気流速度が中立温度へ与える影響が示されなかった。今後の課題として、気候室での被験者実験により定常での気流速度および代謝量と暑熱対応の関係性を分析することで、より精度の高い実測データにより、熱帯居住者への直接冷却に適した住環境に必要な室内気流速度を検証していくことが期待される。
- 適応行動パターンの観点から、東南アジア蒸暑地での自然通風によるパッシブクーリングの妥当性を検証した。既往研究においては、居住者の平均的な行動パターンとして日中の窓開放と夜間の窓閉鎖、夜間のエアコン使用が報告されていた。本研究では、大規模調査とデータマイニング手法によるパターン抽出により、高温多湿な同じ都市にあっても典型的な窓開閉行動パターンが複数存在することを明らかにした。これは、窓開閉行動に気候

以外の要因が影響していることを裏付けた。居住者の現状の適応行動パターンは、大勢としては日中の自然通風を利用するパッシブクーリング手法と合致するものであった。しかし、日中の通風利用と夜間換気の実効性を高めるための課題も抽出された。多重ロジスティック回帰分析の結果は、世帯人数、回答者年齢、世帯収入、虫への懸念が行動パターンの違いに最も影響していることを示した。夜間の窓開け阻害要因に虫、セキュリティ、雨への懸念があることが明らかになった。また、現状の冷房使用状況の分析から、進行するエアコン普及に対して過度の冷房使用を防ぐためには、冷房使用を寝室夜間に限定する部分冷房の考え方が有効である可能性が示唆された。

- 自然通風によるパッシブクーリング効果を最大化する窓デザインの方向性を、通風解析によるパラメトリックスタディにて考察した。既往研究では、開口部配置による建物全体の通風経路への影響や、窓単体の設計が居室の換気量に与える影響について知見が多く得られていた。本研究では、2面開口の単室空間でのクロスベンチレーションを前提として、室内居住域高さへ風速の減衰なく水平に風を通すことを目標とした場合に最適な開口部性状を特定した。横長形状（比率4:1以上）の横軸回転窓を90°全開した場合に最も効果が高く、屋外風速3 m/sの条件で開口中心高さの室内平均風速は開口面平均風速の50%を維持した。この結果は、開口面の中心付近の屋外側に障子が水平に突出することにより、壁面接近流が室内へ誘導され、障子の上下表面付近で風速および直進性が高められることが原因だと考察された。本結果を踏まえ、一般的に住宅の窓に求められる与件も考慮すると、横すべり出し窓、ルーバー窓、上げ下げ窓と窓手摺の組み合わせ、等の窓デザインが有効だと考えられる。本仮説に対して、今後の実測検証やモニタリング検証が期待される。また、住宅設計への適応へ向けた一般化を図る上で、1面開口や他の風条件における研究も必要である。

最後に、本研究は、従来研究されてきた温帯地域でのパッシブクーリング手法との相違点と考えられ、東南アジア蒸暑地でのパッシブクーリングに特に必要な「通風・換気の利用促進」による「1日の中での冷房エネルギー消費量を削減」に貢献するために、十分な研究の為されていない「蒸暑地での開放を前提にした窓の在り方」について新たな知見を得た。通風・換気の利用促進については、居住者の窓開放行動を助長する開口部設計の改善点として虫・セキュリティ・雨などの懸念解消、住宅設計の改善点として物干しスペースの再考などの必要性が明らかになった。また、世帯間で適応行動パターンが多様であったことから、居住者が適切な行動パターンを理解するためのコミュニケーションも重要である。もう一つの、1日の中での冷房エネルギー消費量削減に向けては、エアコン所有者であっても日中の通風利用の受容性が確認された一方で、世帯当たりエアコン所有台数の増加が冷房使用シーンを空間的・時間的に拡大する傾向が示された。そのため、部分冷房の考え方が適切である可能性があり、窓の在り方は「冷房空間で閉じる」「通風のために開く」

「換気のために開く」という使い分けの上に検討される必要がある。これまでの窓研究は主に閉時の性能向上に主眼が置かれてきたが、これからは開くことの技術も重要になると考えられる。本研究では、「通風のために開く」場合のごく限られた設定条件において窓デザインの考察を実施したが、これを一端として、今後も「開くことを前提にした窓の在り方」の研究が進められることを願う。

参考文献

- [1] 環境省; 平成 29 年度環境白書. **2017**
- [2] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). INDC's as communicated by Parties.
<https://www4.unfccc.int/sites/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>
- [3] International Energy Agency; Southeast Asia Energy Outlook; International Energy Agency: Paris, France, **2019**
- [4] 鈴木聖明, 市川尚紀; 現代住宅のパッシブ設計手法とその選定要因に関する事例調査研究. *日本建築学会環境系論文集*, **2009**, vol. 74(642), pp. 1001-1008
- [5] Bay J.H., Ong B.L.; Tropical Sustainable Architecture: Social and Environmental Dimensions. *Routledge*, **2006**
- [6] 本間研一監修; 標準生理学. *医学書院*, **1985**
- [7] 菅谷潤壹; 汗はすごい. *ちくま新書*, **2017**
- [8] 中山昭雄編; 温熱生理学. *ジュピター書房*, **2014**
- [9] 久野寧; 汗の話. *光生館*, **1963**
- [10] Ladell W.S.S.; Terrestrial Animals in Humid Heat: Man. In *Handbook of Physiology*: Dill D.B., Eds.; Am. Physiol. Soc.: Washington, **1964**, Section 4, pp. 625-659
- [11] Williams C.G., Wyndham C.H., Morrison J.F.; Rate of Loss of Acclimatization in Summer and Winter. *J. Appl. Physiol.*, **1967**, vol. 22, pp. 21-26
- [12] Allen J.C.; The Influence of Physical Condition on the Genesis of Species. *Radial Rev.*, **1877**, 1, pp. 108-140
- [13] Nguyen M., et al.; Observations of Normal Body Temperatures in Vietnamese and Japanese in Vietnam. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.*, **2002**, vol. 21(1), pp. 59-65
- [14] Matsumoto T., et al.; Study on Mechanisms of Heat Acclimatization due to Thermal Sweating: Comparison of Heat-Tolerance between Japanese and Thai Subjects. *Trop. Med.*, **1993**, vol. 35, pp. 23-34
- [15] Hofler W.; Changes in Regional Distribution of Sweating during Acclimatization to Heat. *J. Appl. Physiol.*, **1968**, vol. 25, pp. 503-506

- [16] Nillsen B., et al.; Acute and Adaptive Responses in Human to Exercise in a Warm, Humid Environment. *Pfugers Arch*, **1997**, vol.434, pp.49-56
- [17] Matsumoto T., et al.; Long-Term Heat Acclimatization in Tropical Inhabitants. *International Symposium on Thermal Physiology Abstracts*, **1997**
- [18] Toe D.H.C., Kubota T.; Comparative Assessment of Vernacular Passive Cooling Techniques for Improving Indoor Thermal Comfort of Modern Terraced Houses in Hot-Humid Climate of Malaysia. *Solar Energy*, **2015**, vol.114, pp.229-258
- [19] Alfata M.N.F., Hirata N, Hirose, T, Kubota T.; Analysis of Passive Cooling Strategies Employed in Dutch Colonial Buildings in Indonesia. *日本建築学会学術講演梗概集*, **2016**, pp.1307-1310
- [20] Kubota T, Toe D.H.C., Ahmad S.; The Effects of Night Ventilation Technique on Indoor Thermal Environment for Residential Buildings in Hot-Humid Climate of Malaysia. *Energy Build*, **2009**, vol.41, pp.829-839
- [21] Sorgato M.J., Melo A.P., Lamberts R.; The Effect of Window Opening Ventilation Control on Residential Building Energy Consumption. *Energy Build*, **2016**, vol.113, pp.1-13
- [22] Kubota T., Zakaria M.A., Ahmad M.H., Toe D.H.C.; Energy-Saving Experimental House in Hot-Humid Climate of Malaysia. In *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climate of Asia*; Kubota T., Rijal H.B., Takaguchi H., Eds.; Springer: Singapore, **2018**, pp.457-471
- [23] Kitagawa H., Asawa T., Kubota T., Trihandani A.R., Sakurada K., Mori H.; Optimization of Window Design for Ventilative Cooling with Radiant Floor Cooling Systems in the Hot and Humid Climate of Indonesia. *Build Environ.*, **2020**, vol.188, 107483
- [24] Fabi V., Andersen R.V., Corgnati S., Olesen B.W.; Occupants' Window Opening Behavior: A Literature Review of Factors Influencing Occupant Behavior and Models. *Build Environ.*, **2012**, vol.58, pp.188-198
- [25] Yao M., Zhao B.; Window Opening Behavior of Occupants in Residential Buildings in Beijing. *Build Environ.*, **2017**, vol.124, pp.441-449
- [26] Stazi F., Naspì F., D'Orazio M.; Modeling Window Status in School Classrooms: Results from a Case Study in Italy. *Build Environ.*, **2017**, vol.111, pp.24-32
- [27] Pan S., Xiong Y., Hana Y., Zhang X., Xia L., Wei S., Wu J.; Han M.; A Study on Influential Factors of Occupant Window-Opening Behavior in an Office Building in China. *Build Environ.*, **2018**, vol.133, pp.41-50
- [28] Pan S., Han Y., Wei S., Wei Y., Xia L., Xie L., Kong X., Yu W.; A Model Based on Gauss Distribution for Predicting Window Behavior in Building. *Build Environ.*, **2019**, vol.149, pp.210-219

- [29] Barthelmes V.M., Heo Y., Fabi V., Corgnati S.P.; Exploration of the Bayesian Network Framework for Modelling Window Control Behavior. *Build Environ.*, **2017**, vol.126, pp.318-330
- [30] Fabi V., Andersen R.K., Corgnati S.; Verification of Stochastic Behavioural Models of Occupants' Interactions with Windows in Residential Buildings. *Build Environ.*, **2015**, vol.94(1), pp.371-383
- [31] Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A., Nicol J.F., Samuel A., Clarke J.; Using Results from Field Surveys to Predict the Effect of Open Windows on Thermal Comfort and Energy Use in Buildings. *Energy Build.*, **2007**, vol.39, pp.823-836
- [32] Rijal H.B., Humphreys M.A., Nicol J.F.; How Do the Occupants Control the Temperature in Mixed-Mode Buildings? Predicting the Use of Passive and Active Controls. In *Proceedings of the Windsor Conference 2008, Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Windsor, UK, 27-29 July **2008**
- [33] Rijal H.B., Honjo M., Kobayashi R., Nakaya T.; Investigation of Comfort Temperature, Adaptive Model and the Window Opening Behaviour in Japanese Houses. *Archit. Sci. Rev.*, **2013**, vol.56, pp.54-69
- [34] Rijal H.B., Humphreys M.A., Nicol J.F.; Development of a Window Opening Algorithm Based on Adaptive Thermal Comfort to Predict Occupant Behavior in Japanese Dwellings. *Jpn. Archit. Rev.*, **2018**, vol.1, pp.310-321
- [35] Cali D., Andersen R.K., Müller D., Olesen B.W.; Analysis of Occupants' Behavior Related to the Use of Windows in German Households. *Build Environ.*, **2016**, vol.103, pp.54-69
- [36] Stazi F., Naspi F., D'Orazio M.; A Literature Review on Driving Factors and Contextual Events Influencing Occupants' Behavior in Buildings. *Build Environ.*, **2017**, vol.118, pp.46-88
- [37] Andersen R.V., Toftum J., Andersen K.K., Olesen B.W.; Survey of Occupant Behaviour and Control of Indoor Environment in Danish Dwellings. *Energy Build.*, **2009**, vol.41, pp.11-16
- [38] Brager G.S., Dear, R.J.; Thermal Adaptation in the Built Environment: A Literature Review. *Energy Build.*, **1998**, vol.27, pp.83-96
- [39] Schweiker M., Ampatzi E., Andargie M.S., Andersen R.K., Azar E., Barthelmes V.M., et al.; Review of Multi-Domain Approaches to Indoor Environmental Perception and Behavior. *Build Environ.*, **2020**, vol.176, 106804
- [40] Yun G.Y., Steemers K.; Time-Dependent Occupant Behaviour Models of Window control in Summer. *Build Environ.*, **2008**, vol.43, pp.1471-1482

- [41] Markovic R., Grintal E., Wölki D., Frisch, J., Treeck, C.V.; Window Opening Model Using Deep Learning Methods. *Build. Environ.*, **2018**, vol. 145, pp. 319-329
- [42] Mahdavi A., Mohammadi A., Kabir E., Lambeva, L.; Occupants' Operation of Lighting and Shading Systems in Office Buildings. *J. Build Perform Simul.*, **2008**, vol. 1, pp. 57-65
- [43] D'Oca S., Hong, T.; A Data-Mining Approach to Discover Patterns of Window Opening and Closing Behavior in Offices. *Build. Environ.*, **2014**, vol. 82, pp. 726-739
- [44] Haldi F., Robinson D.; Adaptive Actions on Shading Devices in Response to Local Visual Stimuli. *J. Build Perform Simul.*, **2010**, vol. 3, pp. 135-153
- [45] Jones R.V., Fuetes A., Gregori E., Giretti, A.; Stochastic Behavioural Models of Occupants' Main Bedroom Window Operation for UK Residential Buildings. *Build. Environ.*, **2017**, vol. 118, pp. 144-158
- [46] Nicol J.F., Humphreys M.A.; A Stochastic Approach to Thermal Comfort–Occupant Behavior and Energy Use in Buildings. *Build. Environ.*, **2004**, vol. 110, pp. 551-568
- [47] Rijal H.B., Humphrey M.A., Nicol J.F.; Understanding Occupant Behaviour: The Use of Controls in Mixed-Mode Office Buildings. *Build Res. Inf.*, **2009**, vol. 37, pp. 381-396
- [48] Manu S., Shukla Y., Rawal R., Thomas L.E., Dear R.D.; Field Studies of Thermal Comfort Across Multiple Climate Zones for the Subcontinent: India Model for Adaptive Comfort (IMAC). *Build. Environ.*, **2016**, vol. 98, pp. 55-70
- [49] Madsen L.V.; Materialities Shape Practices and Notions of Comfort in Everyday Life. *Build. Res. Inf.*, **2018**, vol. 46, pp. 71-82
- [50] Rea M.S.; Window Blind Occlusion: A Pilot Study. *Build. Environ.*, **1984**, vol. 19, pp. 133-137
- [51] Haldi F., Robinson D.; Modelling Occupants' Personal Characteristics for Thermal Comfort Prediction. *Int. J. Biometeorol.*, **2011**, vol. 55, pp. 681-694
- [52] Hansen A.R., Gram-Hanssen K., Knudsen H.N.; How Building Design and Technologies Influence Heat-Related Habits. *Build. Res. Inf.*, **2018**, vol. 46, pp. 83-98
- [53] Schweiker M., Wagner A.; The Effect of Occupancy on Perceived Control, Neutral Temperature, and Behavioral Patterns. *Energy Build.*, **2016**, vol. 117, pp. 246-259
- [54] Jeong B., Jeong W., Park J.S.; Occupant Behavior Regarding the Manual Control of Windows in Residential Buildings. *Energy Build.*, **2016**, vol. 127, pp. 206-216
- [55] Shi S.S., Li H.J., Ding X., Gao X.; Effects of Household Features on Residential Window Opening Behaviors: A Multilevel Logistic Regression Study. *Build. Environ.* **2019**, vol. 170, 106610

- [56] Li J., Yu Z. Haghghat F., Zhang G.Q.; Development and Improvement of Occupant Behavior Models towards Realistic Building Performance Simulation: A Review. *Sustain. Cities Soc.*, **2019**, 101685
- [57] Carlucci S., Simone M.D., Firth S.K., Kjergaard B.K., Markovic R., Rahaman M.S., et al.; Modeling Occupant Behavior in Buildings. *Build. Environ.*, **2020**, vol.174, 106768
- [58] Dai X.; Liu D.; Zhang X. A Review of Studies Applying Machine Learning Models to Predict Occupancy and Window-Opening Behaviours in Smart Buildings. *Energy Build.*, **2020**, vol.223, 110159
- [59] Day J.K., McIlvennie C., Brackley C., Tarantini M., Piselli C., et al.; A Review of Select Human-Building Interfaces and Their Relationship to Human Behavior, Energy Use and Occupant Comfort. *Build. Environ.*, **2020**, vol.178, 106920
- [60] Du J., Pan W., Yu C.: In-Situ Monitoring of Occupant Behavior in Residential Buildings: A Timely Review. *Energy Build.*, **2020**, vol.212, 109811
- [61] Arethusa M.T., Kubota T., Nugroho A.M., Antaryama I.G.N., Ekasiwi S.N.N., Uno T.; A Field Survey of Window-Opening Behavior and Thermal Conditions in Apartments of Surabaya, Indonesia. *Intercult. Underst.*, **2014**, vol.4, pp.17-25
- [62] Uno T., Hokoi S., Ekasiwi S.N.N.; Survey on Thermal Environment in Residences in Surabaya, Indonesia: Use of Air Conditioner. *J. Asian Archit. Build. Eng.*, **2003**, vol.2, pp.15-21
- [63] Ekasiwi S.N.N., Majid N.H.A., Hokoi S., Oka D., Takagi N., Uno T.; Field Survey of Air Conditioners Temperature Settings in Hot, Humid Climates, Part 1: Questionnaire Results on Use of Air Conditioners in Houses during Sleep. *J. Asian Archit. Build. Eng.*, **2013**, vol.12, pp.141-148
- [64] Karava P., Stathopoulos T., Athienitis, A.K.; Airflow Assessment in Cross-Ventilated Buildings with Operable Façade Elements, *Build. Environ.*, **2011**, Vol.46(1), pp.266-279
- [65] Heiselberg P., Svdt K., Nielsen P.V.; Characteristics of Airflow from Open Windows. *Build. Environ.*, **2001**, Vol.36(7), pp.859-869
- [66] Gao C.F., Lee W.L.; Evaluating the Influence of Openings Configuration on Natural Ventilation Performance of Residential Units in Hong Kong. *Build. Environ.*, **2011**, Vol.46(4), pp.961-969
- [67] 樋山恭助, 加藤信介, 高橋岳生, 河野良坪; 開口面積比及び開口位置関係が通風時気流性状に与える影響の分析. *日本建築学会環境系論文集*, **2005**, Vol.70(596), pp.21-27
- [68] Yin W., Zhang G., Yang W., Wang X.; Natural Ventilation Potential Model Considering Solution Multiplicity: Window Opening Percentage, Air Velocity and Humidity in China. *Build. Environ.*, **2010**, Vol.45(2), pp.338-344
- [69] 南雄三; 南雄三のパッシブ講座 通風トレーニング, *建築技術*, **2014**

- [70] 北海道立北方建築総合研究所, 株式会社カネカ, 株式会社シャノン, トステム株式会社, YKK AP株式会社; 夏季の常時通風可能な開口部の基本性能評価に関する研究. *調査研究報告*, **2008**, Vol.229
- [71] Derakhshan S., Shaker A.; Numerical Study of the Cross-Ventilation of an Isolated Building with Different Opening Aspect Ratios and Locations for Various Wind Directions. *International Journal of Ventilation*, **2017**, Vol.16(1), pp.42-60
- [72] ASHRAE; ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta, **2004**
- [73] Hori S., Iizuka H., Nakamura M.; Studies on Physiological Responses of Residents in Okinawa to a Hot Environment. *Jap. J. Physiol.*, **1976**, Vol.26, pp.235-244
- [74] Hori S., Iizuka H.; Comparison of Physical Characteristics, Body Temperature and Resting Metabolic Rate at 30°C between Subtropical and Temperate Natives. *Int. J. Biometeor.*, **1986**, Vol.30(2), pp.115-122
- [75] Katsuura T., Tachibana M.E., Okada A., Kikuchi Y.; Comparison of Thermoregulatory Responses to Heat between Japanese Brazilians and Japanese. *J. Therm Biol.*, **1993**, Vol.18(5/6), pp.299-302
- [76] Lee J.B., Bae J.S., Matsumoto T.; Tropical Malaysians and Temperate Koreans Exhibit Significant Differences in Sweating Sensitivity in Response to Iontophoretically Administered Acetylcholine. *Int. J. Biometeorol.*, **2009**, Vol.53, pp.149-157
- [77] 花田嘉代子, 三平和雄, 大幡久仁子; 婦人用下着類の熱抵抗の計測に関する研究. *Jpn. Res. Assn. Text. End-Uses.*, **1981**, vol.22(10), pp.430-437
- [78] 花田嘉代子, 三平和雄, 佐藤由美; 男子用下着類の熱抵抗の計測に関する研究. *Jpn. Res. Assn. Text. End-Uses.*, **1983**, vol.24(8), pp.363-369
- [79] 花田嘉代子, 三平和雄, 長谷川陽子; 服種の異なる着衣の熱特性の比較. *Jpn. Res. Assn. Text. End-Uses.*, **1985**, vol.26(9), pp.397-403
- [80] Inoue Y., Kuwahara T., Araki T.; Maturation and Aging Related Changes in Heat Loss Effector Function. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.*, **2004**, vol.23, pp.289-294
- [81] Larose J., Wright H.E., Stapleton J., et al.; Whole Body Heat Loss is Reduced in Older Males during Short Bouts of Intermittent Exercise. *J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **2013**, vol.305, pp.619-629
- [82] 上野哲; 年齢と体温調節機能の関連性. *日本職業・災害医学会会誌日職災医誌*, **2016**, vol.64(6), pp.308-318
- [83] 杉山奨, 安福悟志, 久保田徹, ドリストーフイーチー; 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. *J. Environ. Eng.*, **2015**, Vol.80(714), pp.673-683

- [84] 南百合子, 大岡龍三, 沢崎慎祐, 佐古井智紀, 都築和代; 2 ノードモデルにおける発汗モデルの改良と暑熱環境安全性評価への適用. *J. Environ. Eng.*, **2008**, Vol. 73(623), pp. 107-114
- [85] 都築和代; 暑熱および温暖環境における子供と母親の体温調節反応の比較. *日本家政学会誌*, **1998**, Vol. 49(4), pp. 409-415
- [86] 登倉尋実, 小野愛子, 辰尾聖子; 敷布団のわたの材質の相違がヒトの発汗反応に与える影響. *日本家政学会誌*, **1981**, Vol. 32(1), pp. 47-52
- [87] Fanger P.O.; Thermal Comfort. Danish Technical Press: Copenhagen, **1970**
- [88] Lee J.Y., Saat M., Chou C., Hashiguchi N., Wijayanto T., Wakabayashi H, Tochiyama Y.; Cutaneous Warm and Cool Sensation Thresholds and the Inter-threshold Zone in Malaysian and Japanese Males. *J. Thermal Biology*, **2010**, Vol. 35, pp. 70-76
- [89] Wakabayashi H., et al.; Comparison of Heat Dissipation Response between Malaysian and Japanese Males during Exercise in Humid Heat Stress. *International Journal of Biometeorology*, **2011**
- [90] O'Brien W., Wagner A., Day J.K.; Introduction to Occupant Research Approaches. In *Exploring Occupant Behavior in Buildings*; Wagner A., O'Brien W., Dong B., Eds.; Springer: Singapore, **2018**, pp. 107-127
- [91] O'Brien W., Gunay H.B., Tahmasebi F., Mahdavi A.; A Preliminary Study of Representing the Inter-Occupant Diversity in Occupant Modelling. *J. Build. Perform. Simul.*, **2017**, Vol. 10, pp. 509-526
- [92] Yu Z., Haghghat F., Fung B.C.M., Yoshino H.; A Decision Tree Method for Building Energy Demand Modeling. *Energy Build.*, **2010**, Vol. 42, pp. 1637-1646
- [93] Yu Z., Haghghat F., Fung B.C.M., Morofsky E., Yoshino H.; A Methodology for Identifying and Improving Occupant Behavior in Residential Buildings. *Energy*, **2011**, Vol. 36, pp. 6596-6608
- [94] Yu Z., Haghghat F., Fung B.C.M.; Advances and Challenges in Building Engineering and Data Mining Applications for Energy-Efficient Communities. *Sustain. Cities Soc.*, **2016**, Vol. 25, pp. 33-38
- [95] D'Oca S., Hong T.; A Data-Mining Approach to Discover Patterns of Window Opening and Closing Behavior in Offices. *Build. Environ.*, **2014**, Vol. 82, pp. 726-739
- [96] Schweiker M., Carlucci S., Andersen R.K., Dong B., O'Brien, W.; Occupancy and Occupants' Actions. In *Exploring Occupant Behavior in Buildings*; Wagner A., Dong B., O'Brien W., Eds.; Springer: Berlin / Heidelberg, Germany, **2018**, pp. 7-38
- [97] Yun G.Y., Steemers K.; Behavioural, Physical and Socio-Economic Factors in Household Cooling Energy Consumption. *Appl. Energy*, **2011**, Vol. 88, pp. 2191-2200

- [98] Johnson T., Long T.; Determining the Frequency of Open Windows in Residences: A Pilot Study in Durham, North Carolina during Varying Temperature Conditions. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, **2005**, Vol.15, pp.329-349
- [99] 伊藤一秀, 上田俊克, et al.; はじめての環境・設備設計シミュレーションCFDガイドブック; 空気調和・衛生工学会 編; 株式会社オーム社: Japan, **2017**
- [100] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa, T.; AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **2008**, Vol.96(10-11), pp.1749-1761
- [101] Posner J.D., Buchanan C.R., Dunn-Rankin D.; Measurement and Prediction of Indoor Air Flow in a Model Room. *Energy Build.*, **2003**, Vol.35(5), pp.515-526
- [102] Kato M., Launder B.E.; The Modeling of Turbulent Flow around Stationary and Vibrating Square Cylinders. *Ninth Symposium on "Turbulent Shear Flows"*, Kyoto, Japan, **1993**
- [103] Rohdin P., Moshfegh B.; Numerical Predictions of Indoor Climate in Large Industrial Premises: A Comparison between Different k- ϵ Models Supported by Field Measurements. *Build Environ.*, **2007**, Vol.42(11), pp.3872-3882
- [104] Hussain S., Oosthuizen P.H.; Validation of Numerical Modeling of Conditions in an Atrium Space with a Hybrid Ventilation System. *Build Environ.*, **2012**, Vol.52, pp.152-161
- [105] Rouaud O., Havet M.; Computation of the Airflow in a Pilot Scale Clean Room Using k- ϵ Turbulence Models Utilisation. *International Journal of Refrigeration*, **2002**, Vol.25(4), pp.351-361
- [106] CFD 熱流体解析 ソフトウェアクレイドルHP, 技術コラム
- [107] 酒井考司, 小野浩己, 伊藤一秀, 倉渕隆; 室内CFD解析の解析条件に関する文献調査: 解析条件の動向と解析格子の目安に関する検討. *空気調和・衛生工学会学術講演論文集*, **2015**, Vol.4, pp.205-208
- [108] 日本建築学会編; 実務者のための自然換気設計ハンドブック. *技報堂出版*, **2013**
- [109] SNI-03-6572-2001 Codes for the Design of Ventilation and Air-Conditioning Systems in Buildings
- [110] 村上周三, 加藤信介; 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法: 換気効率の評価モデルに関する研究. *空気調和・衛生工学論文集*, **1986**, Vol.11(32), pp.91-102
- [111] 小林光, 加藤信介, 村上周三; 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究: 第1報CFDに基づく局所領域の換気効率評価指標の開発. *空気調和・衛生工学論文集*, **1998**, Vol.23(68), pp.29-36
- [112] 村上周三; CFDによる建築・都市の環境設計工学. *東京大学出版会*, **2000**

謝辞

この論文は、多くの方々のご指導とご支援により遂行させることが出来ました。まず、私の指導教官である広島大学の久保田徹先生に心より感謝申し上げます。建築環境工学分野の知識に乏しく、論文執筆のノウハウのない私に対して、とても根気強く、丁寧なご指導をしてくださいました。研究の計画・実施・分析・考察の全般に渡って、豊富な知識と経験から重要なアドバイスを賜りました。東南アジアと日本を行き来しながら多方面の御専門の先生方との国際的な連携を築いて研究を推進されている御姿から、研究者としての視座を教えて頂いたと感じます。また、本論文の審査をくださった張峻屹先生、西名大作先生、田中貴宏先生、李漢洙先生にも心より御礼申し上げます。的確なご指摘を賜り、本研究の位置付けの再認識と内容向上につながることが出来ました。

本研究に用いた基データの多くは、アジア建築都市環境研究室（BUESA）の先輩方および同僚から提供頂きました。また、フィールドワークや分析作業の細部において技術継承と協力を頂きました。Meita Tristida Arethusa 様、Usep Surahman 様、Muhammad Nur Fajri Alfata 様、Mohd Azuan Zakaria 様、Anhang Rakhmat Trihandani 様、重兼寛人様、阿部誠司様、谷本葵様、北川遥様、櫻田葵香様、手塚彩水様の名前をここに記し、感謝致します。遠隔での学生生活をサポートしてくださった秘書の但馬裕美様と高橋英子様にも大変お世話になりました。

スラバヤ市での居住者行動調査では、事前の検討段階において東京都市大学の Hom Bahadur Rijal 先生と武庫川女子大学の宇野朋子先生から貴重なアドバイスを頂戴しました。また、調査実現のために多大なご協力を頂きましたスラバヤ工科大学の I Gusti Ngurah Antaryama 先生と Sri Nastiti N. Ekasiwi 先生、学生チームをまとめてくださった Soful Ulum 様と Fajrul Faiz 様に感謝致します。現地で実際の住環境を調査して回った2ヶ月間は私にとってかけがいのない経験であり、文化風習の違いを知るのみならず、インドネシアや東南アジアを起点に国際社会の未来と窓の可能性を考える上で一つの拠り所となっています。

さらに、対象地の気象データ収集にあたっては鹿児島大学の二宮秀與先生のご協力を賜りました。被験者実験の考察にあたっては信州大学の佐古井智紀先生のアドバイスを参考にさせて頂きました。ケーススタディの考察にあたっては東京工業大学の浅輪貴史先生からアドバイスを頂戴しました。また、統計分析手法の進め方については東京工業大学の添田昌志先生が親身に相談に乗ってくださいました。心より御礼申し上げます。

本研究は、YKK AP株式会社の「大学院派遣プロジェクト」により実施されました。直属上司の藤井猛様とメンターの堀慶朗様をはじめ、論文執筆のために直接的／間接的にご支援を頂きま

した社員の方々に深く感謝致します。また、同社が 2007 年から取り組む「窓学」が、多面的かつ
ヒトに寄り添う存在である窓の魅力を私に気付かせてくれました。久保田徹先生との出会いや蒸暑
地の窓に関する興味は、このプロジェクトがきっかけでした。本研究に従事する機会を与えてく
ださった吉田忠裕様と山本絹子様へ深く感謝申し上げます。

最後に、度重なる引越にもめげずに、私を支えて常に勇気付けてくれた家族に、心から感謝し
ます。本当にありがとうございます。

広島大学大学院国際協力研究科

アジア建築都市環境研究室

森 博史

付録

付録1； 居住者インタビュー調査（2016年、スラバヤ）調査票

- （1） 質問シート
- （2） 観察記録シート
- （3） 熱的主観申告シート

付録2； 階層的クラスター解析による居住者適応行動パターンの抽出過程

- （1） 窓開閉行動
- （2） 冷房使用
- （3） 冷房使用（エアコン所有世帯のみ）
- （4） 扇風機使用
- （5） 窓開閉行動・冷房使用・扇風機使用の総合

Questionnaire [Interview part]

Interviewer name Date / / Start time : :

Name of apartment Unit number Relationship status (Respondent) Sample ID #

[1] Basic information of the apartment unit

Q.1 Number of rooms and air-conditioners

| | Living | Bedroom | Kitchen | Bath | Other () |
|------------------|--------|---------|---------|------|-----------|
| Rooms | | | | | |
| Air-conditioners | | | | | |
| Ceiling fans | | | | | |
| Standing fans | | | | | |

Ceiling fan



Standing fan



Q.2 Unit area m² Q.3 Year of moving in Year

Q.4 Unit status [choose one]

Owned

Rented

[2] Occupants profile

Q.1 Household members

| | Relationship status | Gender | Age | Occupation | Education | Monthly income |
|---|---------------------|--------|-----|------------|-----------|----------------|
| 1 | (Respondent) | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |

Code:

Relationship status
 1: Head
 2: Spouse
 3: Child
 4: In law
 5: Grand child
 6: Parent
 7: Housemaid
 8: Others, specify...

Gender
 M: Male
 F: Female

Occupation
 1: Government permanent employee
 2: Government temporary employee
 3: Private permanent employee
 4: Private temporary employee
 5: Housewife
 6: Student
 7: Others, specify...

Highest education
 1: Pre-elementary
 2: Elementary
 3: Junior high school
 4: Senior high school
 5: Vocational Course
 6: Undergraduate
 7: Graduate
 8: Post graduate
 9: Others, specify...

Q.2 Monthly household income IDR

Q.3 Monthly electric bills IDR

[3] Average daily schedule

(a) Weekdays

Q.1 Please specify time when the household members **sleep** respectively during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | ← | | → | | | | | | ← |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

Q.2 Please specify time when the household members **go out** respectively during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | ← | | | | | |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

Q.3 Please specify time when the household members **eat at home** respectively during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

(b) Weekends

Q.4 Please specify time when the household members **sleep** respectively during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | ← | | → | | | | | | ← |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

Q.5 Please specify time when the household members **go out** respectively during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | ← | | | | | |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

Q.6 Please specify time when the household members **eat at home** during dry season.

| | Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|---------------|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | ✓ | | | | | ✓ |
| 1: respondent | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |

[4] Thermal sensation

(a) Weekdays

Q.1 How do you feel thermal condition in the house during dry season?

Please specify it respectively in the living room and in the master bedroom.

In case you are sleeping or going out of the room, please mark a tick at 'Don't know'.

| | Living room | | | | | Master bedroom | | | | | | | | | | |
|-------------|---|----|----|---|----|----------------|----|---|----|----|----|---|----|----|----|---|
| | [Choose one] -3: very cold, 0: neutral, +1: slightly hot, N: Don't know | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | N | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | N |
| (Example) | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | |
| 0:00-3:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:00-6:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6:00-9:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:00-12:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12:00-15:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:00-18:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18:00-21:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21:00-24:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Q.2 Where do you usually stay during dry season? [Choose one]

| | Living room | Master bedroom | Others in the apartment | Out of apartment |
|-------------|-------------|----------------|-------------------------|------------------|
| (Example) | | ✓ | | |
| 0:00-3:00 | | | | |
| 3:00-6:00 | | | | |
| 6:00-9:00 | | | | |
| 9:00-12:00 | | | | |
| 12:00-15:00 | | | | |
| 15:00-18:00 | | | | |
| 18:00-21:00 | | | | |
| 21:00-24:00 | | | | |

(b) Weekends

Q.3 How do you feel thermal condition in the house during dry season?

Please specify it respectively in the living room and in the master bedroom.

In case you are sleeping or going out of the room, please mark a tick at 'Don't know'.

| | Living room | | | | | Master bedroom | | | | | | | | | | |
|-------------|---|----|----|---|----|----------------|----|---|----|----|----|---|----|----|----|---|
| | [Choose one] -3: very cold, 0: neutral, +1: slightly hot, N: Don't know | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | N | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | N |
| (Example) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0:00-3:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:00-6:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6:00-9:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:00-12:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12:00-15:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:00-18:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18:00-21:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21:00-24:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Q.4 Where do you usually stay during dry season? [Choose one]

| | Living room | Master bedroom | Others in the apartment | Out of apartment |
|-------------|-------------|----------------|-------------------------|------------------|
| (Example) | | ✓ | | |
| 0:00-3:00 | | | | |
| 3:00-6:00 | | | | |
| 6:00-9:00 | | | | |
| 9:00-12:00 | | | | |
| 12:00-15:00 | | | | |
| 15:00-18:00 | | | | |
| 18:00-21:00 | | | | |
| 21:00-24:00 | | | | |

[5] Living room

(A) Target window

Target window of this investigation is the largest openable window which is connected with outside of the apartment unit.

(a) Weekdays

Q.1 Please specify time when the window is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (a) Weekdays | | | | | | | | | |

Q.2 Why do you open/close the window at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- To enter fresh air
- To let wind into the room
- To cool the room
- To reduce humidity
- To be exposed open air
- To be blown by the wind
- To change mood
- To let out smoke or odor
- To dry something
- To clean the room
- To make the room lighter
- To view
- To hear
- To use outside and inside spaces, specify...
- To spend time outside, specify...
- Because air-conditioning is expensive
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Reason for closing

- To shut off dust
- To shut off hot air
- To shut off wind
- To shut off humidity
- To shut off rain
- To shut off smell
- To shut off light
- To shut off noise
- To shut off someone's eyes
- To prevent invasion of insects
- To prevent invasion of small animals, specify...
- To prevent theft
- To prevent fall
- To prevent sound or voice from being heard
- To use air-conditioner
- Because it is enough cool
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Timing

- Waking up
- Cooking breakfast
- Eating breakfast
- Preparing for an outing
- Cleaning room
- Washing clothes
- Relaxing
- Working at home
- Cooking lunch
- Eating lunch
- Taking a nap
- Having guests
- Praying
- Coming back home
- Eating supper
- Eating supper
- Enjoying each other's company
- Taking a shower
- Before sleeping
- During sleeping
- Others, specify...

(b) Weekends

Q.3 Please specify time when the window is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (b) Weekends | | | | | | | | | |

Q.4 Why do you open/close the window at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- To enter fresh air
- To let wind into the room
- To cool the room
- To reduce humidity
- To be exposed open air
- To be blown by the wind
- To change mood
- To let out smoke or odor
- To dry something
- To clean the room
- To make the room lighter
- To view
- To hear
- To use outside and inside spaces, specify...
- To spend time outside, specify...
- Because air-conditioning is expensive
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Reason for closing

- To shut off dust
- To shut off hot air
- To shut off wind
- To shut off humidity
- To shut off rain
- To shut off smell
- To shut off light
- To shut off noise
- To shut off someone's eyes
- To prevent invasion of insects
- To prevent invasion of small animals, specify...
- To prevent theft
- To prevent fall
- To prevent sound or voice from being heard
- To use air-conditioner
- Because it is enough cool
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Timing

- Waking up
- Cooking breakfast
- Eating breakfast
- Preparing for an outing
- Cleaning room
- Washing clothes
- Relaxing
- Working at home
- Cooking lunch
- Eating lunch
- Taking a nap
- Having guests
- Praying
- Coming back home
- Eating supper
- Eating supper
- Enjoying each other's company
- Taking a shower
- Before sleeping
- During sleeping
- Others, specify...

(B) Target door

Target door is connected with outside of the apartment unit, and arranged side by side of the target window which you answered above. (If there is not the target door in this room, please move to Q.7)

(a) Weekdays

Q.5 Please specify time when the door is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (a) Weekdays | | | | | | | | | |

Q.6 Why do you open/close the door at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- (a) To enter fresh air
- (b) To let wind into the room
- (c) To cool the room
- (d) To reduce humidity
- (e) To be exposed open air
- (f) To be blown by the wind
- (g) To change mood
- (h) To let out smoke or odor
- (i) To dry something
- (j) To clean the room
- (k) To make the room lighter
- (l) To view
- (m) To hear
- (n) To communicate with someone through the window
- (o) To use outside and inside spaces, specify...
- (p) To spend time outside, specify...
- (q) Because air-conditioning is expensive
- (r) Because air-conditioning is too cold
- (s) No reason, custom
- (t) I don't know
- (u) Others, specify...

Reason for closing

- (a) To shut off dust
- (b) To shut off hot air
- (c) To shut off wind
- (d) To shut off humidity
- (e) To shut off rain
- (f) To shut off smell
- (g) To shut off light
- (h) To shut off noise
- (i) To shut off someone's eyes
- (j) To prevent invasion of insects
- (k) To prevent invasion of small animals, specify...
- (l) To prevent theft
- (m) To prevent fall
- (n) To prevent sound or voice from being heard
- (o) To use air-conditioner
- (p) Because it is enough cool
- (q) No reason, custom
- (r) I don't know
- (s) Others, specify...

Timing

- (a) Waking up
- (b) Cooking breakfast
- (c) Eating breakfast
- (d) Preparing for an outing
- (e) Cleaning room
- (f) Washing clothes
- (g) Relaxing
- (h) Working at home
- (i) Cooking lunch
- (j) Eating lunch
- (k) Taking a nap
- (l) Having guests
- (m) Praying
- (n) Coming back home
- (o) Cooking supper
- (p) Eating supper
- (q) Enjoying each other's company
- (r) Taking a shower
- (s) Before sleeping
- (t) During sleeping
- (u) Others, specify...

(b) Weekends

Q.7 Please specify time when the door is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (b) Weekends | | | | | | | | | |

Q.8 Why do you open/close the door at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- (a) To enter fresh air
- (b) To let wind into the room
- (c) To cool the room
- (d) To reduce humidity
- (e) To be exposed open air
- (f) To be blown by the wind
- (g) To change mood
- (h) To let out smoke or odor
- (i) To dry something
- (j) To clean the room
- (k) To make the room lighter
- (l) To view
- (m) To hear
- (n) To communicate with someone through the window
- (o) To use outside and inside spaces, specify...
- (p) To spend time outside, specify...
- (q) Because air-conditioning is expensive
- (r) Because air-conditioning is too cold
- (t) I don't know
- (u) Others, specify...

Reason for closing

- (a) To shut off dust
- (b) To shut off hot air
- (c) To shut off wind
- (d) To shut off humidity
- (e) To shut off rain
- (f) To shut off smell
- (g) To shut off light
- (h) To shut off noise
- (i) To shut off someone's eyes
- (j) To prevent invasion of insects
- (k) To prevent invasion of small animals, specify...
- (l) To prevent theft
- (m) To prevent fall
- (n) To prevent sound or voice from being heard
- (o) To use air-conditioner
- (p) Because it is enough cool
- (q) No reason, custom
- (r) I don't know
- (s) Others, specify...

Timing

- (a) Waking up
- (b) Cooking breakfast
- (c) Eating breakfast
- (d) Preparing for an outing
- (e) Cleaning room
- (f) Washing clothes
- (g) Relaxing
- (h) Working at home
- (i) Cooking lunch
- (j) Eating lunch
- (k) Taking a nap
- (l) Having guests
- (m) Praying
- (n) Coming back home
- (o) Cooking supper
- (p) Eating supper
- (q) Enjoying each other's company
- (r) Taking a shower
- (s) Before sleeping
- (t) During sleeping
- (u) Others, specify...

(C) Another window and door

Q.9 Do you open a door or a window on another side of the room when you open the target window or door during dry season? [Choose one]

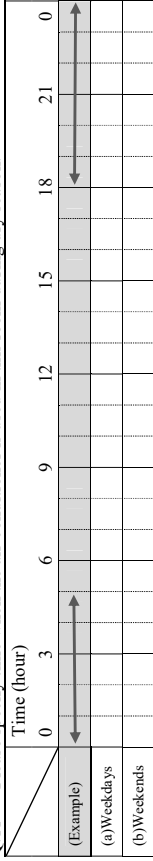
- Usually open Relatively open Relatively close Usually close

(D) Cooling appliances

Q.10 Do you have an air-conditioner in this room?

- Have Don't have (Please move to Q.12)

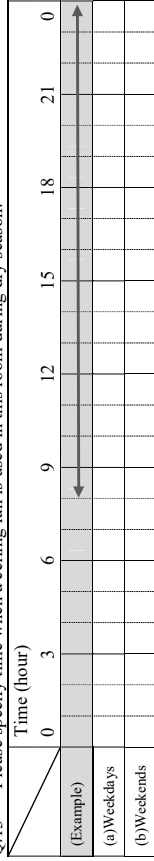
Q.11 Please specify time when the air-conditioner is used in this room during dry season.



Q.12 Do you have a ceiling fan in this room?

- Have Don't have (Please move to Q.14)

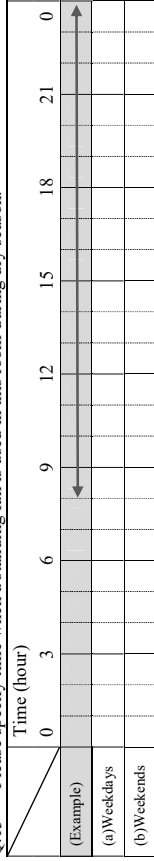
Q.13 Please specify time when a ceiling fan is used in this room during dry season.



Q.14 Do you have a standing fan in this room?

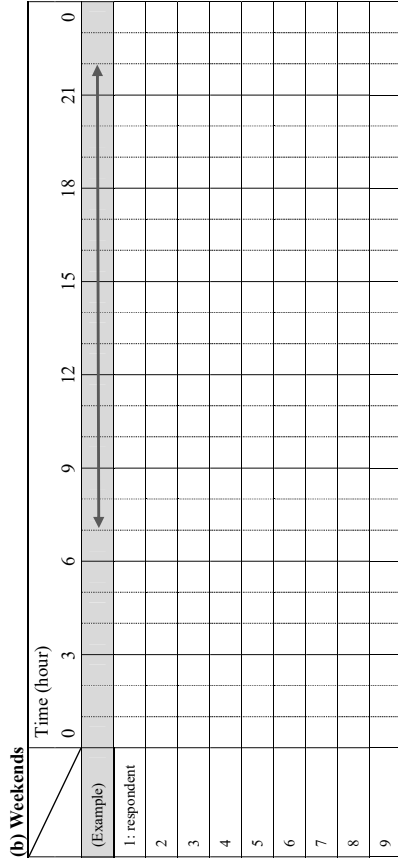
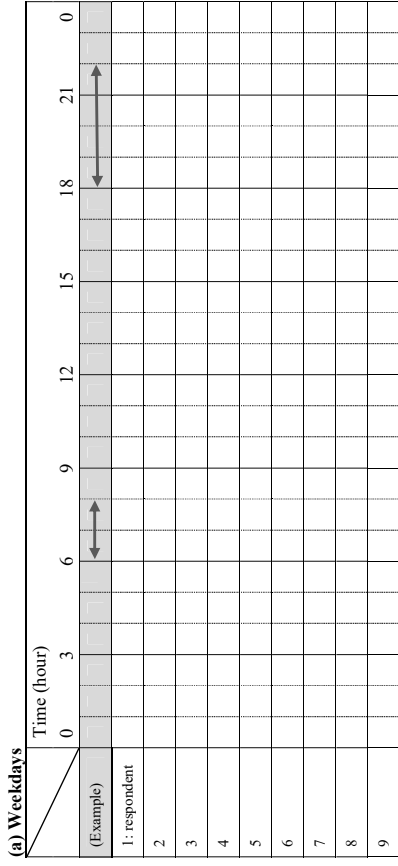
- Have Don't have (Please move to Q.16)

Q.15 Please specify time when a standing fan is used in this room during dry season.



(E) Presence in living room

Q.16 Please specify time when the household members are in this room respectively during dry season.



[6] Master bedroom

(A) Target window

Target window of this investigation is the largest openable window which is connected with outside of the apartment unit.

(a) Weekdays

Q.1 Please specify time when the window is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (a) Weekdays | | | | | | | | | |

Q.2 Why do you open/close the window at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- To enter fresh air
- To let wind into the room
- To cool the room
- To reduce humidity
- To be exposed open air
- To be blown by the wind
- To change mood
- To let out smoke or odor
- To dry something
- To clean the room
- To make the room lighter
- To view
- To hear
- To communicate with someone through the window
- To use outside and inside spaces, specify...
- To spend time outside, specify...
- Because air-conditioning is expensive
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Reason for closing

- To shut off dust
- To shut off hot air
- To shut off wind
- To shut off humidity
- To shut off rain
- To shut off smell
- To shut off light
- To shut off noise
- To shut off someone's eyes
- To prevent invasion of insects
- To prevent invasion of small animals, specify...
- To prevent theft
- To prevent fall
- To prevent sound or voice from being heard
- To use air-conditioner
- Because it is enough cool
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Timing

- Waking up
- Cooking breakfast
- Eating breakfast
- Preparing for an outing
- Cleaning room
- Washing clothes
- Relaxing
- Working at home
- Cooking lunch
- Eating lunch
- Taking a nap
- Having guests
- Praying
- Coming back home
- Eating supper
- Eating supper
- Enjoying each other's company
- Taking a shower
- Before sleeping
- During sleeping
- Others, specify...

(b) Weekends

Q.3 Please specify time when the window is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (b) Weekends | | | | | | | | | |

Q.4 Why do you open/close the window at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- To enter fresh air
- To let wind into the room
- To cool the room
- To reduce humidity
- To be exposed open air
- To be blown by the wind
- To change mood
- To let out smoke or odor
- To dry something
- To clean the room
- To make the room lighter
- To view
- To hear
- To communicate with someone through the window
- To use outside and inside spaces, specify...
- To spend time outside, specify...
- Because air-conditioning is expensive
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Reason for closing

- To shut off dust
- To shut off hot air
- To shut off wind
- To shut off humidity
- To shut off rain
- To shut off smell
- To shut off light
- To shut off noise
- To shut off someone's eyes
- To prevent invasion of insects
- To prevent invasion of small animals, specify...
- To prevent theft
- To prevent fall
- To prevent sound or voice from being heard
- To use air-conditioner
- Because it is enough cool
- No reason, custom
- I don't know
- Others, specify...

Timing

- Waking up
- Cooking breakfast
- Eating breakfast
- Preparing for an outing
- Cleaning room
- Washing clothes
- Relaxing
- Working at home
- Cooking lunch
- Eating lunch
- Taking a nap
- Having guests
- Praying
- Coming back home
- Cooking supper
- Eating supper
- Enjoying each other's company
- Taking a shower
- Before sleeping
- During sleeping
- Others, specify...

(B) Target door

Target door is connected with outside of the apartment unit, and arranged side by side of the target window which you answered above. (If there is not the target door in this room, please move to Q.7)

(a) Weekdays

Q.5 Please specify time when the door is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (a) Weekdays | | | | | | | | | |

Q.6 Why do you open/close the door at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- (a) To enter fresh air
- (b) To let wind into the room
- (c) To cool the room
- (d) To reduce humidity
- (e) To be exposed open air
- (f) To be blown by the wind
- (g) To change mood
- (h) To let out smoke or odor
- (i) To dry something
- (j) To clean the room
- (k) To make the room lighter
- (l) To view
- (m) To hear

Reason for closing

- (a) To shut off dust
- (b) To shut off hot air
- (c) To shut off wind
- (d) To shut off humidity
- (e) To shut off rain
- (f) To shut off smell
- (g) To shut off light
- (h) To shut off noise
- (i) To shut off someone's eyes
- (j) To prevent invasion of insects
- (k) To prevent invasion of small animals, specify...
- (l) To prevent theft
- (m) To prevent fall
- (n) To prevent sound or voice from being heard
- (o) To use air-conditioner
- (p) To spend time outside, specify...
- (q) Because air-conditioning is expensive
- (r) Because air-conditioning is too cold.
- (s) No reason, custom
- (t) I don't know
- (u) Others, specify...

Timing

- (a) Waking up
- (b) Cooking breakfast
- (c) Eating breakfast
- (d) Preparing for an outing
- (e) Cleaning room
- (f) Washing clothes
- (g) Relaxing
- (h) Working at home
- (i) Cooking lunch
- (j) Eating lunch
- (k) Taking a nap
- (l) Having guests
- (m) Praying
- (n) Coming back home
- (o) Cooking supper
- (p) Eating supper
- (q) Enjoying each other's company
- (r) Taking a shower
- (s) Before sleeping
- (t) During sleeping
- (u) Others, specify...

(b) Weekends

Q.7 Please specify time when the door is opened during dry season.

| Time (hour) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 0 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|---|
| (Example) | | | | | | | | | |
| (b) Weekends | | | | | | | | | |

Q.8 Why do you open/close the door at that time during dry season?

| Time (hour) | Open/close [Choose one] | Reason [Multiple answers] | Timing [Multiple answers] |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |
| : | open | close | |

Alternatives:

Reason for opening

- (a) To enter fresh air
- (b) To let wind into the room
- (c) To cool the room
- (d) To reduce humidity
- (e) To be exposed open air
- (f) To be blown by the wind
- (g) To change mood
- (h) To let out smoke or odor
- (i) To dry something
- (j) To clean the room
- (k) To make the room lighter
- (l) To view
- (m) To hear

Reason for closing

- (a) To shut off dust
- (b) To shut off hot air
- (c) To shut off wind
- (d) To shut off humidity
- (e) To shut off rain
- (f) To shut off smell
- (g) To shut off light
- (h) To shut off noise
- (i) To shut off someone's eyes
- (j) To prevent invasion of insects
- (k) To prevent invasion of small animals, specify...
- (l) To prevent theft
- (m) To prevent fall
- (n) To prevent sound or voice from being heard
- (o) To use air-conditioner
- (p) Because it is enough cool
- (q) No reason, custom
- (r) I don't know
- (s) Others, specify...

Timing

- (a) Waking up
- (b) Cooking breakfast
- (c) Eating breakfast
- (d) Preparing for an outing
- (e) Cleaning room
- (f) Washing clothes
- (g) Relaxing
- (h) Working at home
- (i) Cooking lunch
- (j) Eating lunch
- (k) Taking a nap
- (l) Having guests
- (m) Praying
- (n) Coming back home
- (o) Cooking supper
- (p) Eating supper
- (q) Enjoying each other's company
- (r) Taking a shower
- (s) Before sleeping
- (t) During sleeping
- (u) Others, specify...

(C) Another window and door

Q.9 When you open the target window or door during dry season, a window or door on another side of the room is opened? [Choose one]

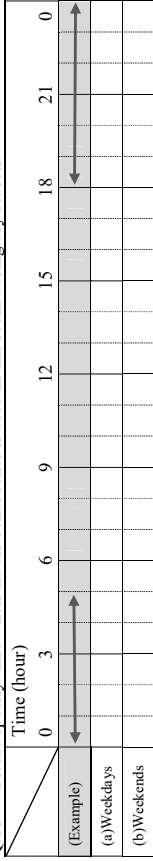
- Usually opened Relatively opened Relatively closed Usually closed

(D) Cooling appliances

Q.10 Do you have an air-conditioner in this room?

- Have Don't have (Please move to Q.12)

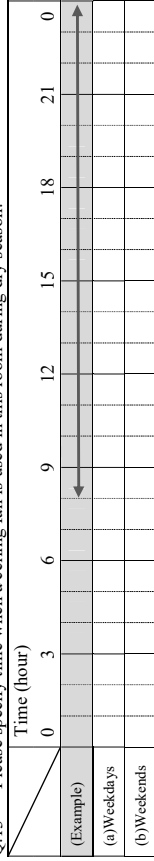
Q.11 Please specify time when the air-conditioner is used in this room during dry season.



Q.12 Do you have a ceiling fan in this room?

- Have Don't have (Please move to Q.14)

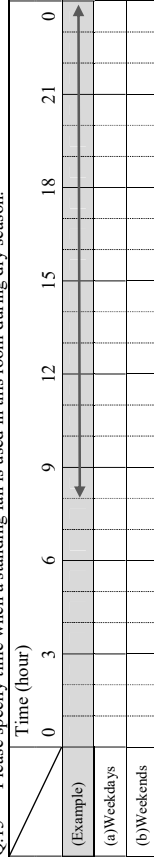
Q.13 Please specify time when a ceiling fan is used in this room during dry season.



Q.14 Do you have a standing fan in this room?

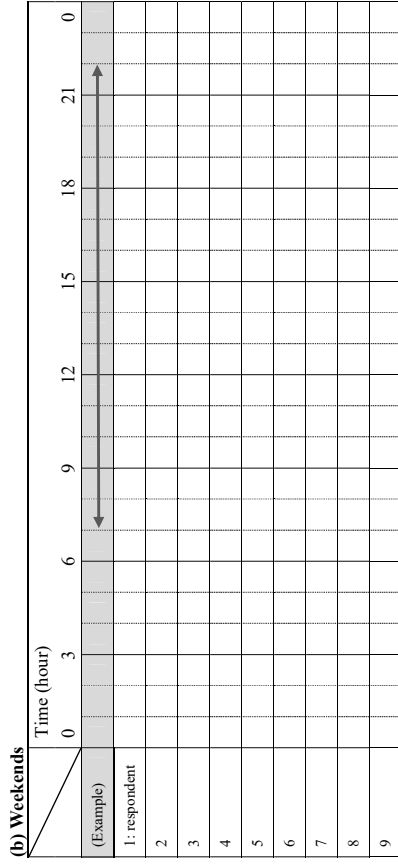
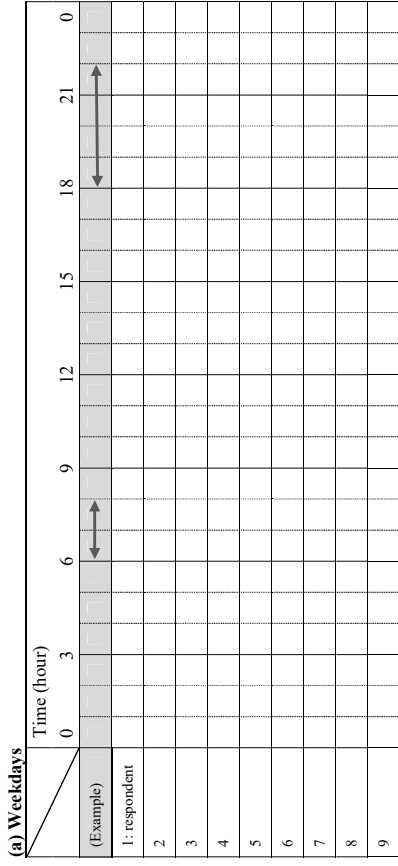
- Have Don't have (Please move to Q.16)

Q.15 Please specify time when a standing fan is used in this room during dry season.



(E) Presence in master bedroom

Q.16 Please specify time when the household members are in this room respectively during dry season.



[7] Reason for not opening windows and doors

The interviewer is expected to check the occupant's answers about [5]Q1, [5]Q4, [6]Q1 and [6]Q4. If the occupant doesn't open any windows and doors in the morning (5:00-9:00), in the evening (16:00-20:00) or before the sleeping time (20:00-24:00), please ask the following questions.

(A) In case the occupants do not open windows and doors in the morning (5:00-9:00)

Q.1 Why do you keep the windows and doors closed in the morning? [Free answer]

(B) In case the occupants do not open windows and doors in the evening (16:00-20:00)

Q.2 Why do you keep the windows and doors closed in the evening? [Free answer]

(C) In case the occupants do not open windows and doors before the sleeping time (20:00-24:00)

Q.3 Why do you keep the windows and doors closed before the sleeping time? [Free answer]

When free answers are not obtained, please ask about the following examples.

Examples:

- (a) To shut off dust
- (b) To shut off hot air
- (c) To shut off wind
- (d) To shut off humidity
- (e) To shut off rain
- (f) To shut off smell
- (g) To shut off light
- (h) To shut off noise
- (i) To shut off someone's eyes
- (j) To prevent invasion of insects
- (k) To prevent invasion of small animals, specify...
- (l) To prevent theft
- (m) To prevent fall
- (n) To prevent sound or voice from being heard
- (o) To use air-conditioner
- (p) Because it is enough cool
- (q) No reason, custom
- (r) I don't know
- (s) Others, specify...

[8] Reason for keeping opening windows or doors

The interviewer is expected to check the occupant's answers about [5]Q1, [5]Q4, [6]Q1 and [6]Q4. If the occupant keeps opening one of windows and doors in the morning (5:00-9:00), in the evening (16:00-20:00) or before the sleeping time (20:00-24:00), please ask the following questions.

(A) In case the occupants keep opening in the morning (5:00-9:00)

Q.1 Why do you keep one of windows and doors open in the morning? [Free answer]

(B) In case the occupants keep opening in the evening (16:00-20:00)

Q.2 Why do you keep one of windows and doors open in the evening? [Free answer]

(C) In case the occupants keep opening before the sleeping time (20:00-24:00)

Q.3 Why do you keep one of windows and doors open before the sleeping time? [Free answer]

When free answers are not obtained, please ask about the following examples.

Examples:

- (a) To enter fresh air
- (b) To let wind into the room
- (c) To cool the room
- (d) To reduce humidity
- (e) To be exposed open air
- (f) To be blown by the wind
- (g) To change mood
- (h) To let out smoke or odor
- (i) To dry something
- (j) To clean the room
- (k) To make the room lighter
- (l) To view
- (m) To heat
- (n) To communicate with someone through the window
- (o) To use outside and inside spaces, specify...
- (p) To spend time outside, specify...
- (q) Because air-conditioning is expensive
- (r) Because air-conditioning is too cold
- (s) No reason, custom
- (t) I don't know
- (u) Others, specify...

[9] Conscientness

(A) Acceptability of a sliding window

There are various ways to open and close windows. Please answer about a sliding type window to show with a photograph and a miniature.

Q.1 What do you think of this type of window?

[Scale]
Very good ----- +3 +2 +1 0 -1 -2 -3 ----- Very bad

Q.2 Why do you think so? [Free answer]

Q.3 Please tell us about everything you think what are positive points of a sliding window?

| | |
|---|-------------------------------|
| To let in the fresh air. | To remove the hot air. |
| To cool the room. | To remove odor. |
| To get natural light. | To get view. |
| To use the space near window effectively. | To operate the window easily. |
| To adjust opening size of window. | |
| Others (specify) | |

Q.4 Please tell us about everything you think what are negative points of a sliding window?

| | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| To allow entrance of rain. | To allow entrance of insects. |
| To allow entrance of hot air. | To allow entrance of dust. |
| To allow entrance of criminal. | To drop something outside. |
| To get sunlight too much. | To leak out sound. |
| To let in the wind too much. | |
| Others (specify) | |

Q.5 Do you want to use a sliding type window if it is same price as what you use now?

[Scale]
Want to use ----- +3 +2 +1 0 -1 -2 -3 ----- Not want to use

Q.6 Why do you think so? [Free answer]

(B) Acceptability of an insect screen

Please answer about an insect screen to show with a photograph.

Q.7 Do you usually hesitate to open windows because of worrying about insects entering?

[Scale]
Very often ----- 5 4 3 2 1 0 ----- Never

Q.8 Do insects actually get in through the window?

[Scale]
Very often ----- 5 4 3 2 1 0 ----- Never

Q.9 What kinds of insects do enter?

Q.10 Have you used an insect screen?

Using Used before Never

Is there something you are/were worried about the insect screen?

Example: ill-ventilation, usability, cleaning, torn easily, etc.

Q.11 Do you think the insect screen can prevent the insects from entering?

[Scale]
Can prevent ----- +3 +2 +1 0 -1 -2 -3 ----- Can't prevent

Please tell us the reason you think why it can't prevent.

Q.12 If a window has an insect screen, do you think you can open the window?

[Scale]

Increase ----- 5 4 3 2 1 0 ----- Not increase

Q.13 Do you want to use the insect screen?

[Scale]

Want to use ----- +3 +2 +1 0 -1 -2 -3 ----- Not want to use

Q.14 Why do you think so? [Free answer]

(C) Specification downgrading of a window

Q.15 Assume that you buy a new window for your house.

To what extent do you compromise if a cost reduction is necessary?

| | Everything that apply [Multiple answers] | First choice [Choose one] |
|--|---|------------------------------|
| 20% smaller height and width. | | |
| Not openable. | | |
| Not lockable. | | |
| Not able to see the outside when it is closed. | | |
| Rattling at the time of strong wind. | | |
| Letting some drops of water in at the time of storm. | | |
| Others () | | |
| Others () | | |
| I can't compromise anything. | | |

Thank you very much for your cooperation.

All information derived from this interview will remain strictly confidential and will be exclusively for this research purpose.

Questionnaire [Observation part]

Observer name Date / / Start time : :

Name of apartment Unit number Sample ID #

[1] Basic information of the apartment unit

Q.1 Floor number [Choose one]
 1F 2F 3F 4F 5F 6F 7F 8F Others ()

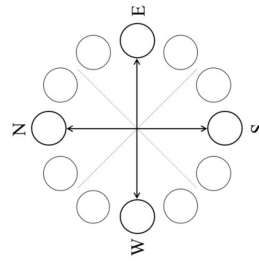
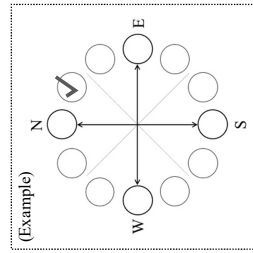
Q.2 Top floor
 Yes No

[2] Living room

(A) Basic information of the room

Q.1 Direction that the target window* faces [Mark one]

Target window of this investigation is the largest openable window which is connected with outside of the apartment unit.



Q.2 Is there an air-conditioner in this room?

Yes No

Q.3 Is there a ceiling fan in this room?

Yes No



Ceiling fan

Standing fan

Q.4 Is there a standing fan in this room?

Yes No

(B) Condition outside of the target window

Q.5 Outside space of target window [Choose one]

Balcony Corridor Outside Others ()

Q.6 Is there a roof or eaves out of the window?

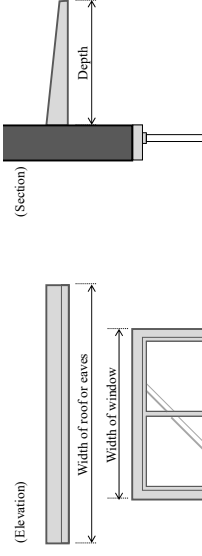
Yes No

Q.7 How wide is a roof or eaves?

Shorter than window Almost same as window Longer than window

Q.8 How deep is a roof or eaves?

≤ 100 cm > 100 cm



Q.9 What kinds of outer shading device are there?

| Material | Fixing method |
|-----------------|-------------------------------|
| (Example) cloth | Tied to the grill of balcony. |
| | |
| | |

Q.10 Is there an insect screen on the window?

Yes No

Q.11 Is there anything that makes occupants' window-opening difficult? [Multiple answer]

| | |
|--|-----|
| Window cannot move smoothly. (specify...) | () |
| Something covers the window. (specify...) | () |
| There is not an enough space to open. (specify...) | () |
| Outdoor environment seems bad. (specify...) | () |
| Others. (specify...) | () |

Q.12 What makes a shadow on the window? (for example; tall building, tree, etc.)

(C) Condition outside of the target door*

Target door is connected with outside of the apartment unit, and arranged side by side of the target window which you observed above.

Q.13 Outside space of target door [Choose one]

Balcony Corridor Outside Others ()

Q.14 Is there a roof or eaves out of the door?

Yes No

Q.15 How wide is a roof or eaves?

Shorter than door Almost same as door Longer than door

Q.16 How deep is a roof or eaves?

≤ 100 cm > 100 cm

Q.17 What kinds of outer shading device are there?

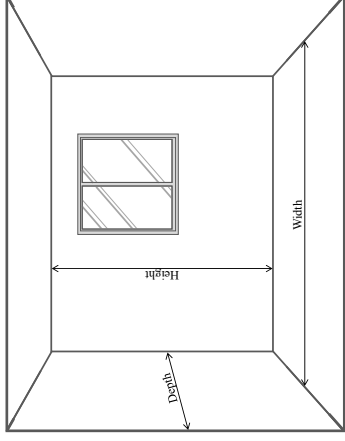
| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Material | Fixing method |
| (Example) paper | Put on the glass pane of door. |
| | |
| | |
| | |

(D) Dimension measurement of the room

Q.18 Height cm

Q.19 Width cm

Q.20 Depth cm



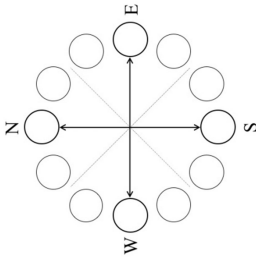
(Remarks)

[3] Master bedroom

(A) Basic information of the room

Q.1 Direction that the target window* faces [Mark one]

Target window of this investigation is the largest openable window which is connected with outside of the apartment unit.



Q.2 Is there an air-conditioner in this room?

Yes No

Q.3 Is there a ceiling fan in this room?

Yes No

Q.4 Is there a standing fan in this room?

Yes No

(B) Condition outside of the target window

Q.5 Outside space of target window [Choose one]

Balcony Corridor Outside Others ()

Q.6 Is there a roof or eaves out of the window?

Yes No

Q.7 How wide is a roof or eaves?

Shorter than window Almost same as window Longer than window

Q.8 How deep is a roof or eaves?

≤ 100 cm > 100 cm

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Q.9 Outer shading device | Fixing method |
| Material | Tied to the grill of balcony. |
| (Example) cloth | |
| | |
| | |

Q.10 Is there an insect screen on the window?

Yes No

Q.11 Is there anything that makes occupants' window-opening difficult? [Multiple answer]

| | |
|---|-----|
| <input type="checkbox"/> Window cannot move smoothly. (specify...) | () |
| <input type="checkbox"/> Something covers the window. (specify...) | () |
| <input type="checkbox"/> There is not an enough space to open. (specify...) | () |
| <input type="checkbox"/> Outdoor environment seems bad. (specify...) | () |
| <input type="checkbox"/> Others. (specify...) | () |

Q.12 What makes a shadow on the window? (for example, tall building, tree, etc.)

(C) Condition outside of the target door*

Target door is connected with outside of the apartment unit, and arranged side by side of the target window which you observed above.

Q.13 Outside space of target window [Choose one]

Balcony Corridor Outside Others ()

Q.14 Is there a roof or eaves out of the door?

Yes No

Q.15 How wide is a roof or eaves?

Shorter than door Almost same as door Longer than door

Q.16 How deep is a roof or eaves?

≤ 100 cm > 100 cm

Q.17 What kinds of outer shading device are there?

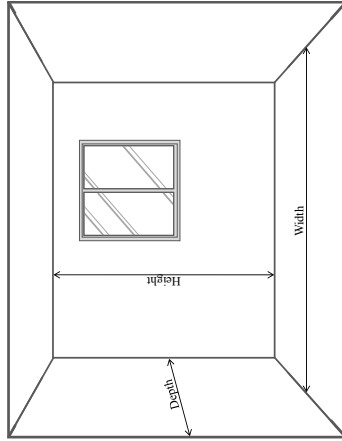
| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Material | Fixing method |
| (Example) paper | Put on the glass pane of door. |
| | |
| | |

(D) Dimension measurement of the room

Q.18 Height cm

Q.19 Width cm

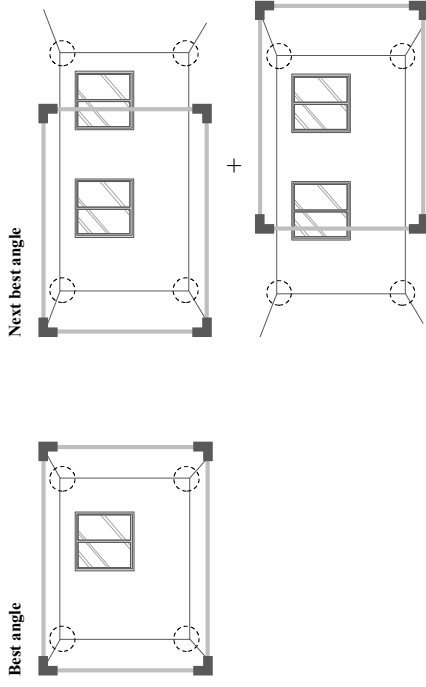
Q.20 Depth cm



[4] Check list of pictures

| Subject of picture | Check | Picture file number | |
|--|-------|---------------------|---|
| 1. Outside appearance of the apartment building | | # | |
| 1-1. Entire form | | ~ | |
| 1-2. Windows | | | |
| 1-3. Corridor | | | |
| 2. Living room of the apartment unit | | # | |
| 2-T1. Inside appearance of the target window and door (a) Closed state (b) Opened state as the occupant usually does | | ~ | |
| 2-T2. Outside through the target window and door | | | |
| 2-T3. Outside appearance of the target window and door (if possible) | | | |
| 2-T4. Something put outside of the target window and door | | | |
| 2-1a. First wall*1 | | | |
| 2-1b. All openings on the first wall*2 | | | |
| 2-2a. Second wall*1 | | | |
| 2-2b. All openings on the second wall*2 | | | |
| 2-3a. Third wall*1 | | | |
| 2-3b. All openings on the third wall*2 | | | |
| 2-4a. Forth wall*1 | | | |
| 2-4b. All openings on the forth wall*2 | | | |
| 2-5. Cooling appliances in the room (i.e. air-conditioner, fan) | | | |
| 3. Master bedroom of the apartment unit | | | # |
| 3-T1. Inside appearance of the target window and door (a) Closed state (b) Opened state as the occupant usually does | | | ~ |
| 3-T2. Outside through the target window and door | | | |
| 3-T3. Outside appearance of the target window and door (if possible) | | | |
| 3-T4. Something put outside of the target window and door | | | |
| 3-1a. First wall*1 | | | |
| 3-1b. All openings on the first wall*2 | | | |
| 3-2a. Second wall*1 | | | |
| 3-2b. All openings on the second wall*2 | | | |
| 3-3a. Third wall*1 | | | |
| 3-3b. All openings on the third wall*2 | | | |
| 3-4a. Forth wall*1 | | | |
| 3-4b. All openings on the forth wall*2 | | | |
| 3-5. Cooling appliances in the room (i.e. air-conditioner, fan) | | | |

*1: Please set four corners of a wall in a frame. If needed, please take several pictures of it.



*2: Please take pictures of all openings on the walls (i.e. window, door, ventilator, slit of wall) as another person can understand later how the opening is (i.e. shape, approximate size, way to open/close).



Examples (entire form, windows and corridor)



Thank you very much for your cooperation.

Recording Sheet

Name of apartment Unit number

Sample ID
#

Q1. Please fill out your profile.

| Gender | Age | Height | Weight |
|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> cm | <input type="text"/> kg |

Q2. How many hours do you usually take exercise (including walk) per a day?

Average : hours

Q3. Are you sensitive to heat?

Yes No

Q4. Are you sensitive to cold?

Yes No

Q5. Are you relatively sweaty?

Yes Neither No

Q6. Are you apt to become ill?

Yes Neither No

Q7. Are you sensitive to light?

Very sensitive Sensitive Slightly sensitive Not sensitive

Q8. Are you sensitive to noise?

Very sensitive Sensitive Slightly sensitive Not sensitive

Q9. Are you sensitive to odor?

Very sensitive Sensitive Slightly sensitive Not sensitive

Q10. Please choose all environment where you usually spend.
[Multiple answers]

- Naturally ventilated (e.g. window-opening)
- Fan using
- Dehumidified
- Air-conditioned

Q11. What kinds of clothes do you usually wear in the house? [Multiple answers]

*In case you change your clothes within a day (for example, day and night), please check about daytime clothes as pattern A and night time clothes as pattern B separately.

*If a specific clothing item you wear is not on the list, select the option that is most similar with that item.

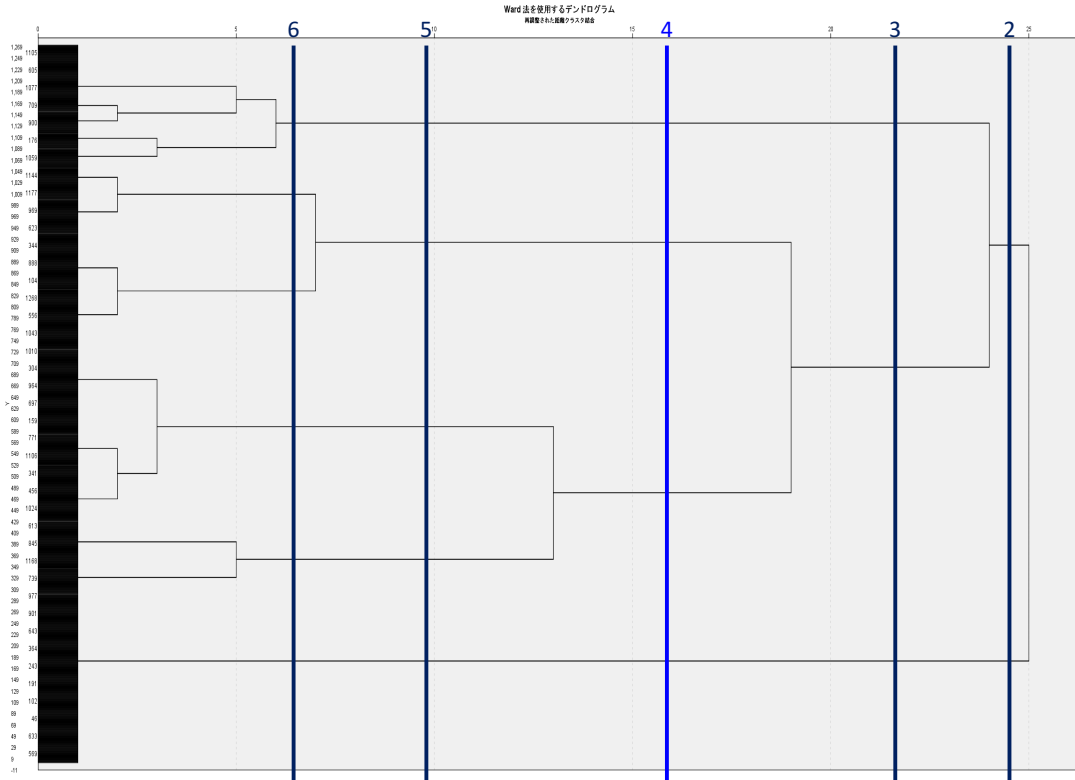
| | Pattern A | Pattern B |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| Underwear | | |
| Bra | | |
| Panties | | |
| Men's briefs | | |
| T-shirt | | |
| Half-slip | | |
| Long underwear bottoms | | |
| Full slip | | |
| Long underwear top | | |
| Footwear | | |
| Ankle-length athletic socks | | |
| Panty hose/stockings | | |
| Sandals/thongs | | |
| Slippers (quilted, pile lined) | | |
| Calf-length socks | | |
| Shirts and Blouses | | |
| Sleeveless/scoop-neck blouse | | |
| Short-sleeve knit sport shirt | | |
| Short-sleeve dress shirt | | |
| Long-sleeve dress shirt | | |
| Long-sleeve flannel shirt | | |

| | Pattern A | Pattern B |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| Long-sleeve sweatshirt | | |
| Trousers and Coveralls | | |
| Short shorts | | |
| Walking shorts | | |
| Straight trousers | | |
| Overalls | | |
| Dress and Skirts (knee-length) | | |
| Skirt | | |
| Sleeveless, scoop neck | | |
| Short-sleeve skirdress | | |
| Long-sleeve skirdress | | |
| Sweaters | | |
| Sleeveless vest | | |
| Long-sleeve | | |
| Suit, Jackets and Lined Vests | | |
| Sleeveless vest | | |
| Single-breasted | | |
| Double-breasted | | |
| Sleepwear and Robes | | |
| Sleeveless short gown | | |
| Sleeveless long gown | | |
| Short-sleeve hospital gown | | |
| Short-sleeve short robe | | |
| Short-sleeve pajamas | | |
| Long-sleeve long gown | | |
| Long-sleeve short wrap robe | | |
| Long-sleeve pajamas | | |
| Long -sleeve long wrap robe | | |

| | Pattern A | Pattern B |
|-------------|-----------|-----------|
| Others | | |
| Sarung | | |
| Hijab | | |
| Daster | | |
| Kebaya | | |
| Kaos Kutang | | |
| Baju Gamis | | |
| Baju Safari | | |
| | | |
| | | |

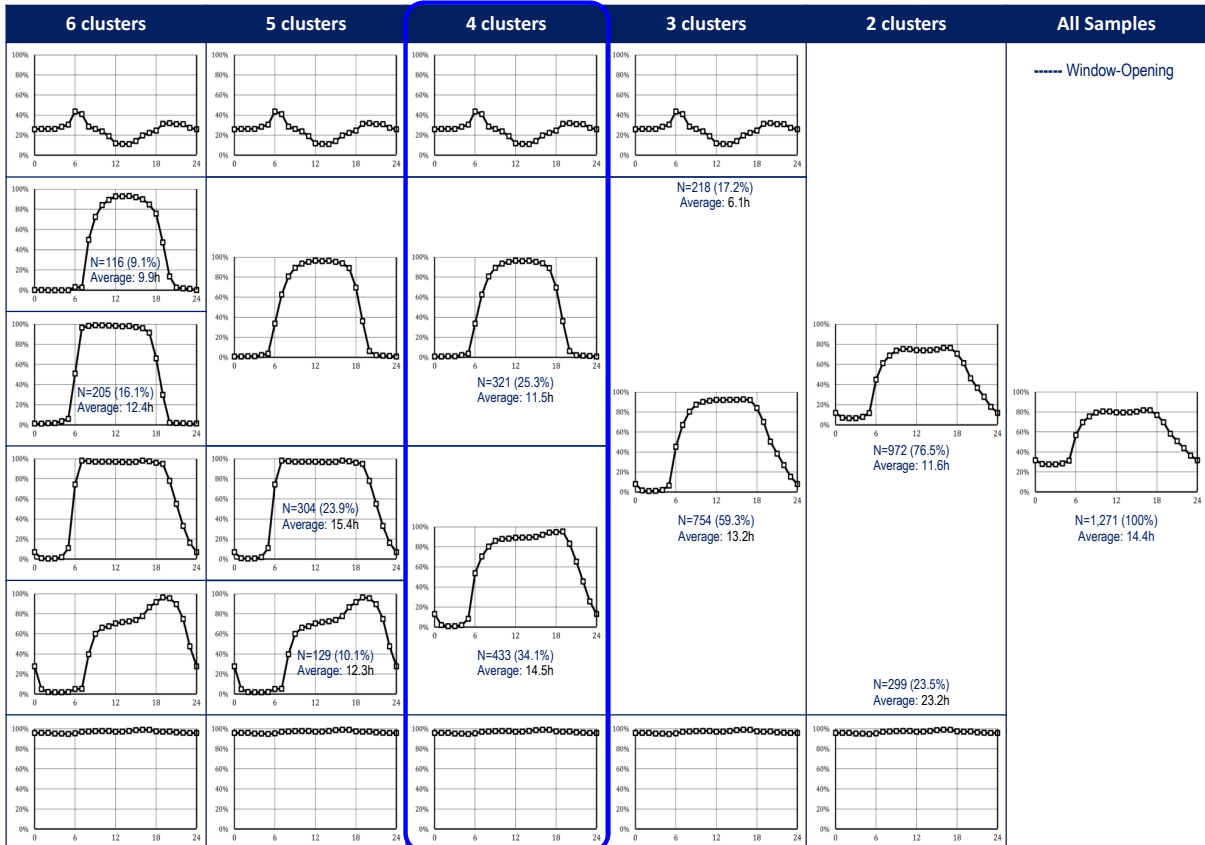
典型パターン抽出 ; (1) 窓開閉行動

■ 高温多湿な都市

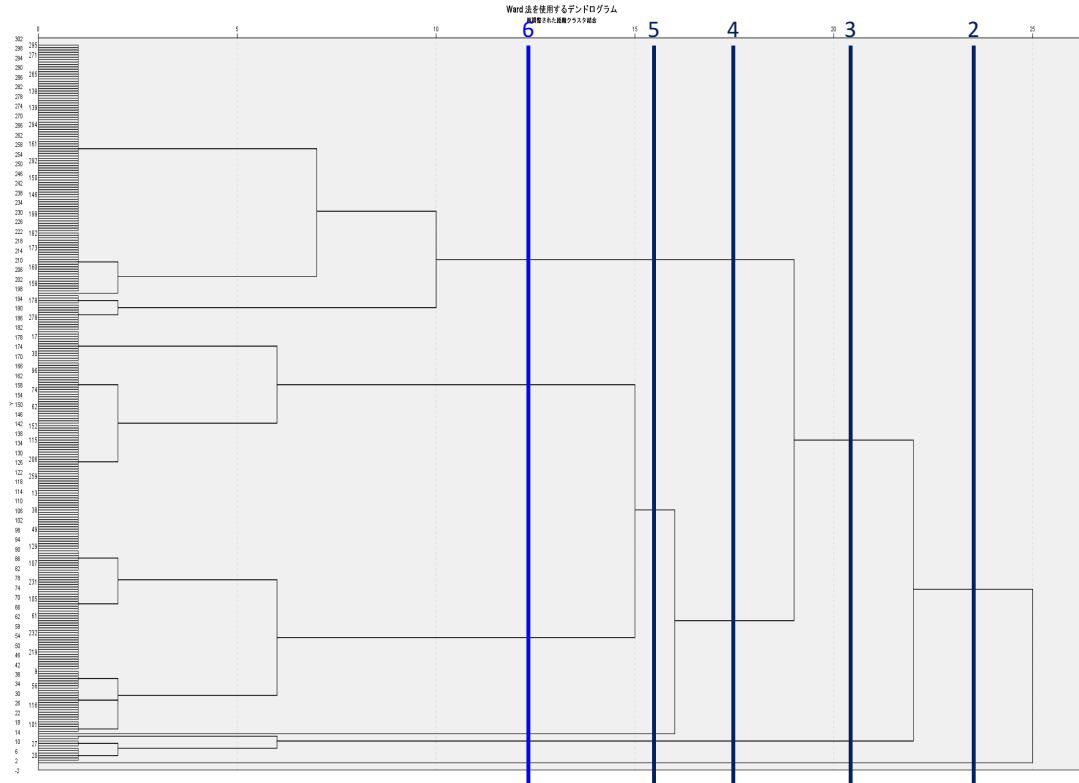


Window-Opening Patterns (Hot-Humid Cities)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)

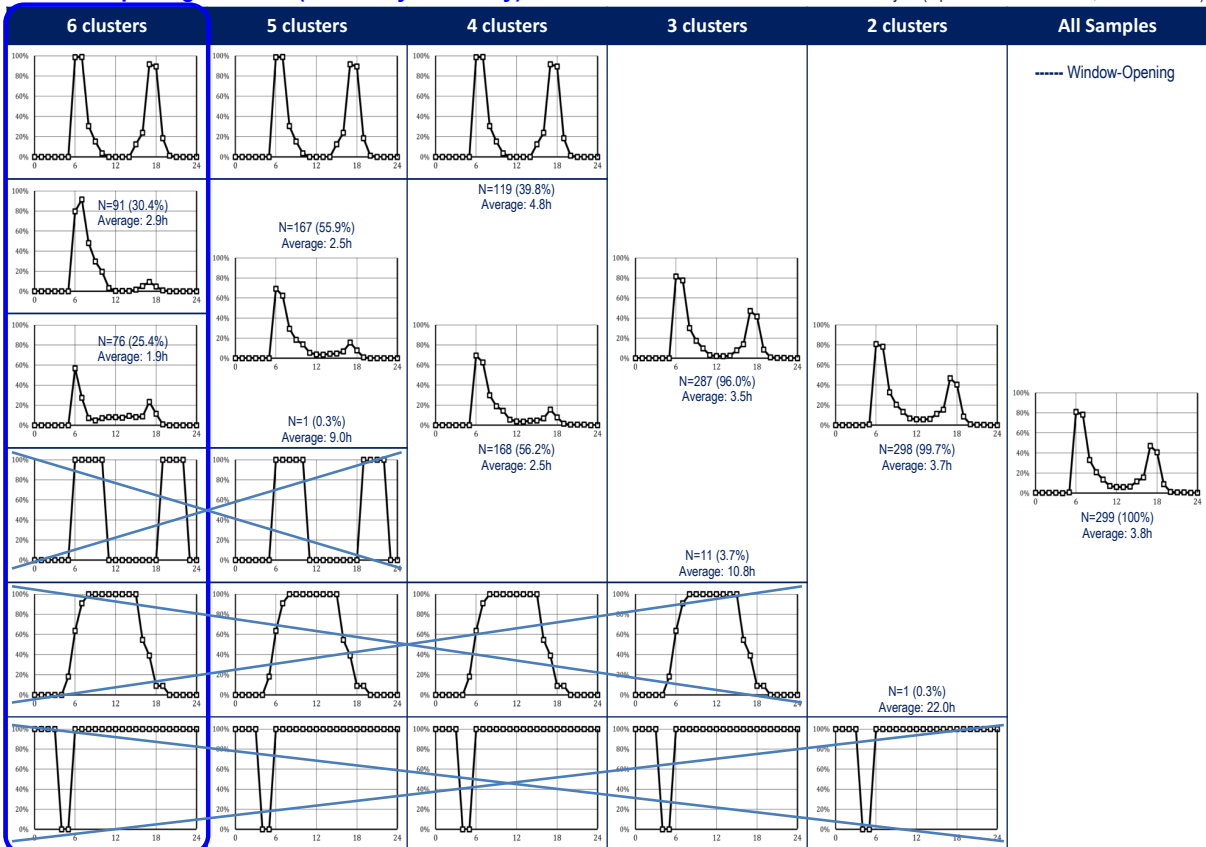


■比較的涼しい都市



Window-Opening Patterns (Relatively Cool City)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)



Classification Results of Cluster Analyses Using Window-Opening Variables

Profile of the Groups

| Climate | N | Share (%) | Hours with high performed rate (>50%) | | | | Window-opening (hour) |
|-----------------|--------------|--------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | | | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 24:00 | |
| Hot-Humid | 299 | 23.5 | █ | █ | █ | █ | 23.2 |
| | 433 | 34.1 | █ | █ | █ | █ | 14.5 |
| | 321 | 25.3 | █ | █ | █ | | 11.5 |
| | 218 | 17.2 | | | | | 6.1 |
| <i>Total</i> | <i>1,271</i> | <i>100.0</i> | | | | | <i>15.4</i> |
| Relatively Cool | 119 | 41.6 | █ | █ | █ | | 4.8 |
| | 91 | 31.8 | | | | | 2.9 |
| | 76 | 26.6 | █ | | | | 1.9 |
| | <i>Total</i> | <i>286</i> | <i>100.0</i> | | | | |

5

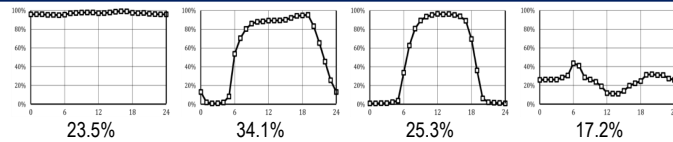
Classification Results of Cluster Analyses Using Window-Opening Variables

Window-Opening Patterns



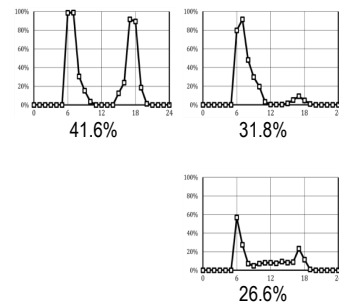
Households in Hot-Humid Cities

N=1,271



Households in Relatively Cool City

N=286



6

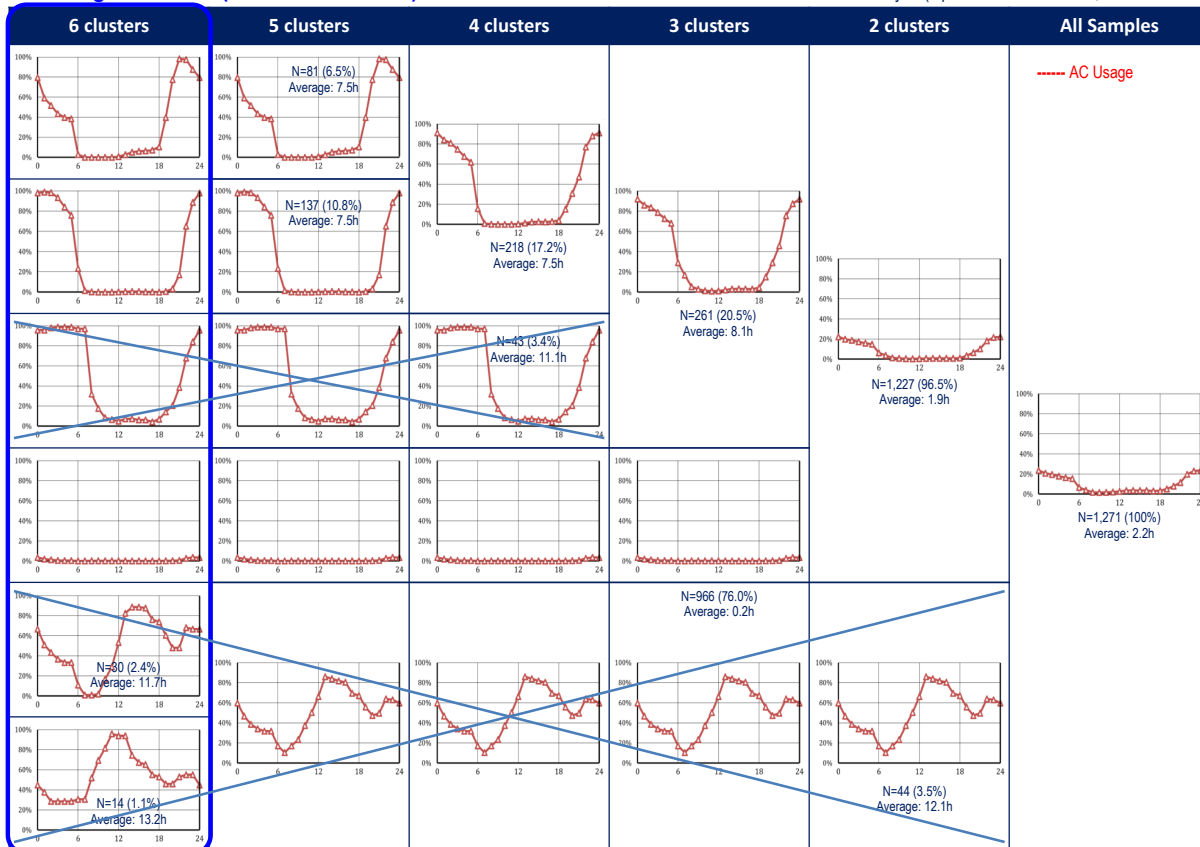
典型パターン抽出 ; (2) 冷房使用

■ 高温多湿な都市

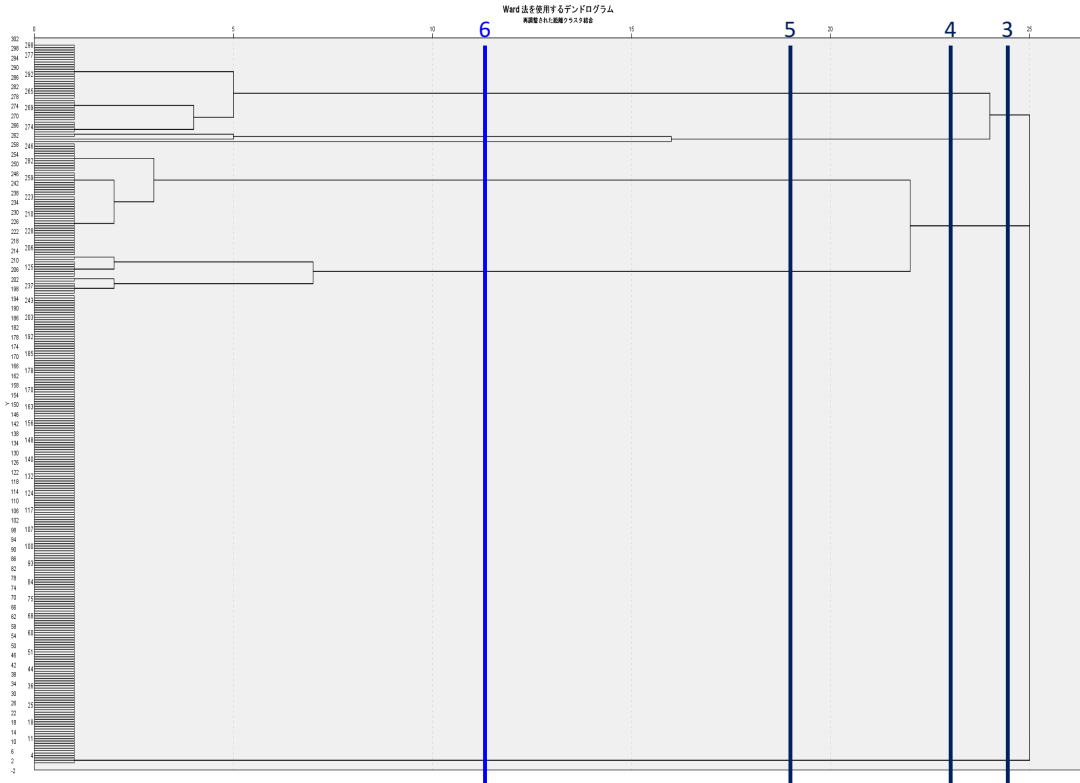


AC Usage Patterns (Hot-Humid Cities)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)

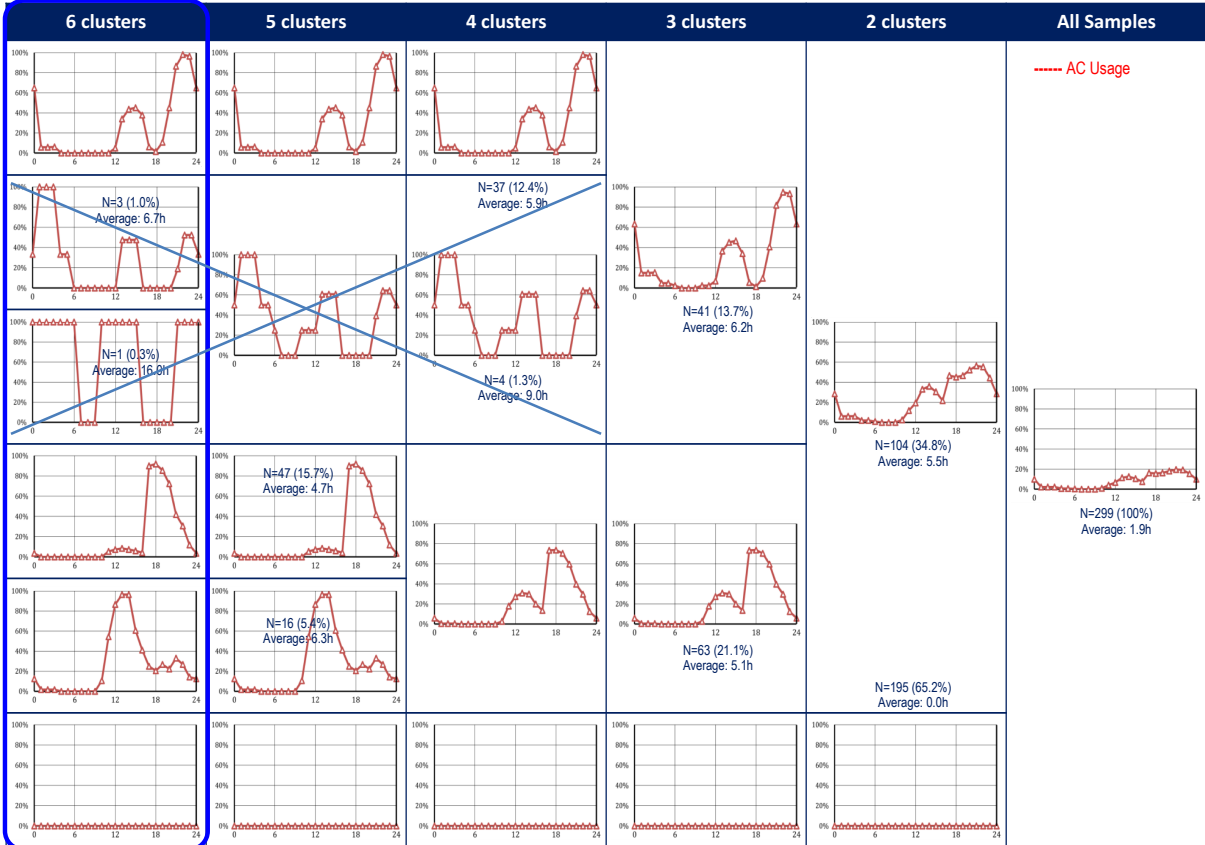


■比較的涼しい都市



AC Usage Patterns (Relatively Cool City)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)



Classification Results of Cluster Analyses Using Air Conditioner Usage Variables

Profile of the Groups

| Climate | N | Share (%) | Hours with high performed rate (>50%) | | | | AC Usage (hour) | AC Ownership (%) |
|-----------------|--------------|--------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|
| | | | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 24:00 | | |
| Hot-Humid | 137 | 11.5 | ■ | ■ | ■ | ■ | 7.5 | 100.0 |
| | 81 | 6.8 | ■ | | | ■ | 7.5 | 100.0 |
| | 966 | 81.6 | | | | | 0.2 | 5.8 |
| Total | 1,184 | 100.0 | | | | | 1.5 | 23.1 |
| Relatively Cool | 16 | 5.4 | | ■ | ■ | | 6.3 | 100.0 |
| | 37 | 12.5 | | | | ■ | 5.9 | 100.0 |
| | 47 | 15.9 | | | ■ | ■ | 4.7 | 100.0 |
| | 195 | 66.1 | | | | | 0.0 | 0.0 |
| Total | 295 | 100.0 | | | | | 1.8 | 33.9 |

11

Classification Results of Cluster Analyses Using Air Conditioner Usage Variables

Air Conditioner Usage Patterns

| | | | | | |
|-----------|---------------------|---------------|---------|-----------|-------|
| Nighttime | Evening & Nighttime | Early Evening | Evening | Afternoon | Never |
|-----------|---------------------|---------------|---------|-----------|-------|

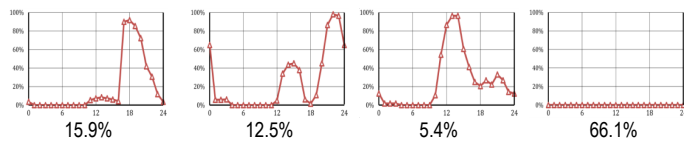
Households in Hot-Humid Cities

N=1,184



Households in Relatively Cool City

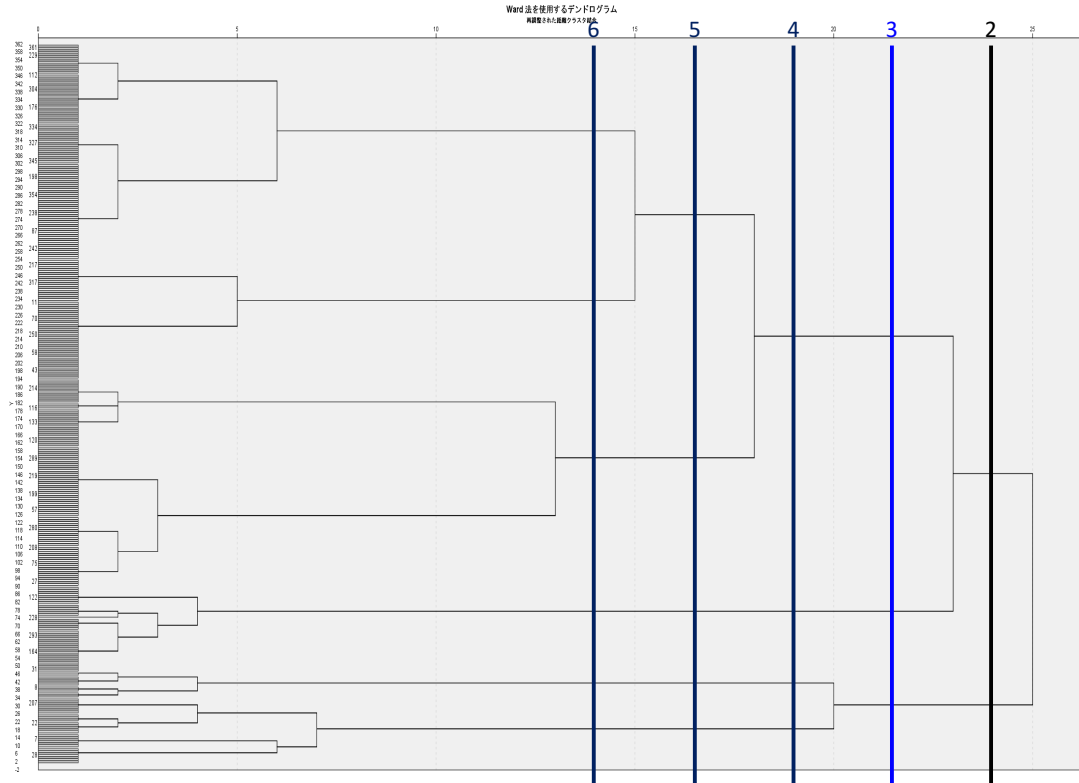
N=295



12

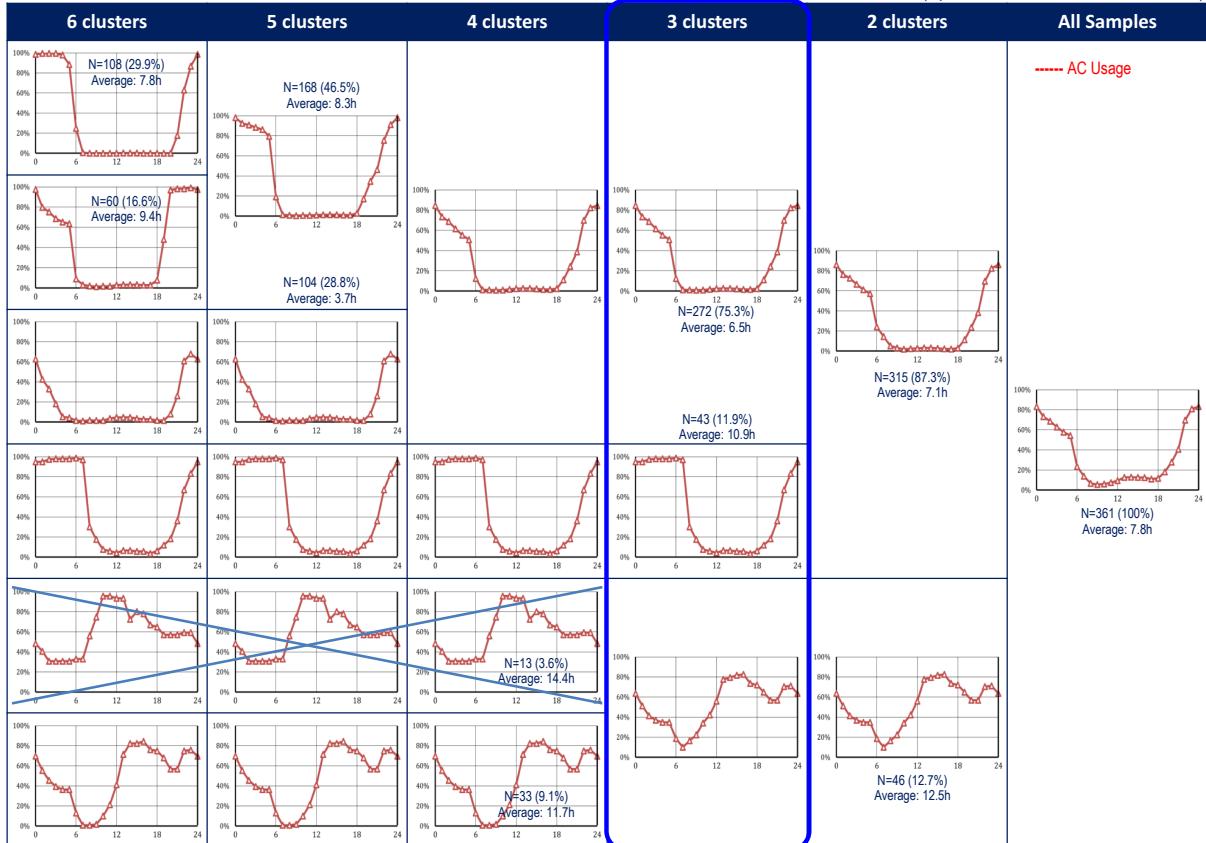
典型パターン抽出 ; (3) 冷房使用 (エアコン所有世帯のみ)

■ 高温多湿な都市

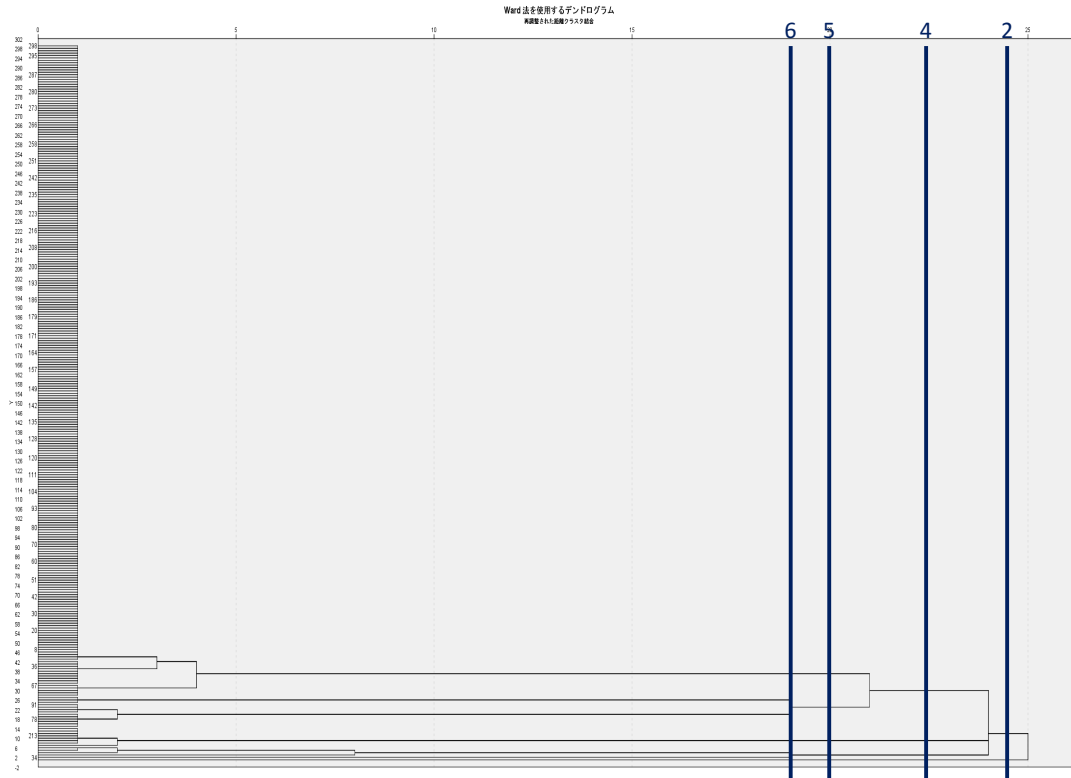


AC Usage Patterns (Households with ACs in Hot-Humid Cities)

Result of Hierarchical Cluster Analysis
(squared Euclid's distance, Ward's method)

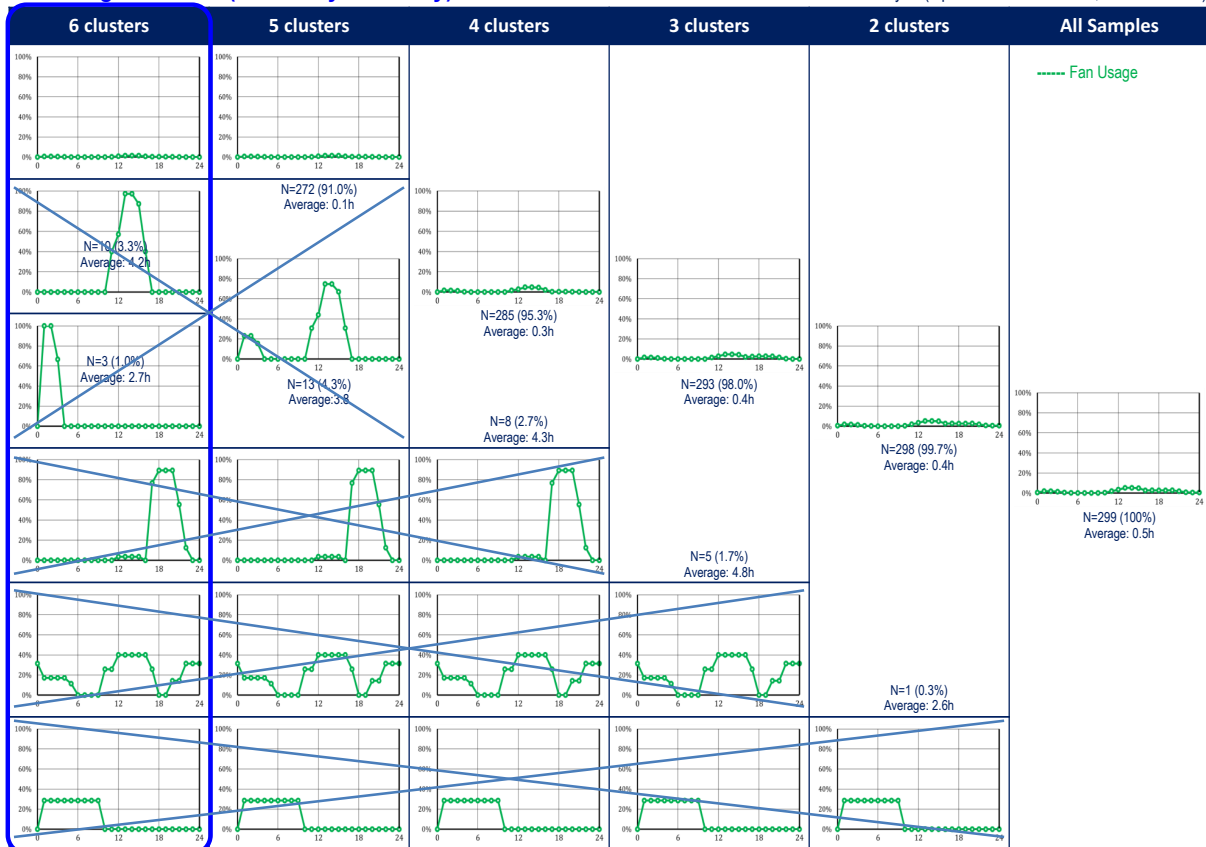


■比較的涼しい都市



Fan Usage Patterns (Relatively Cool City)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)



Classification Results of Cluster Analyses Using Fan Usage Variables

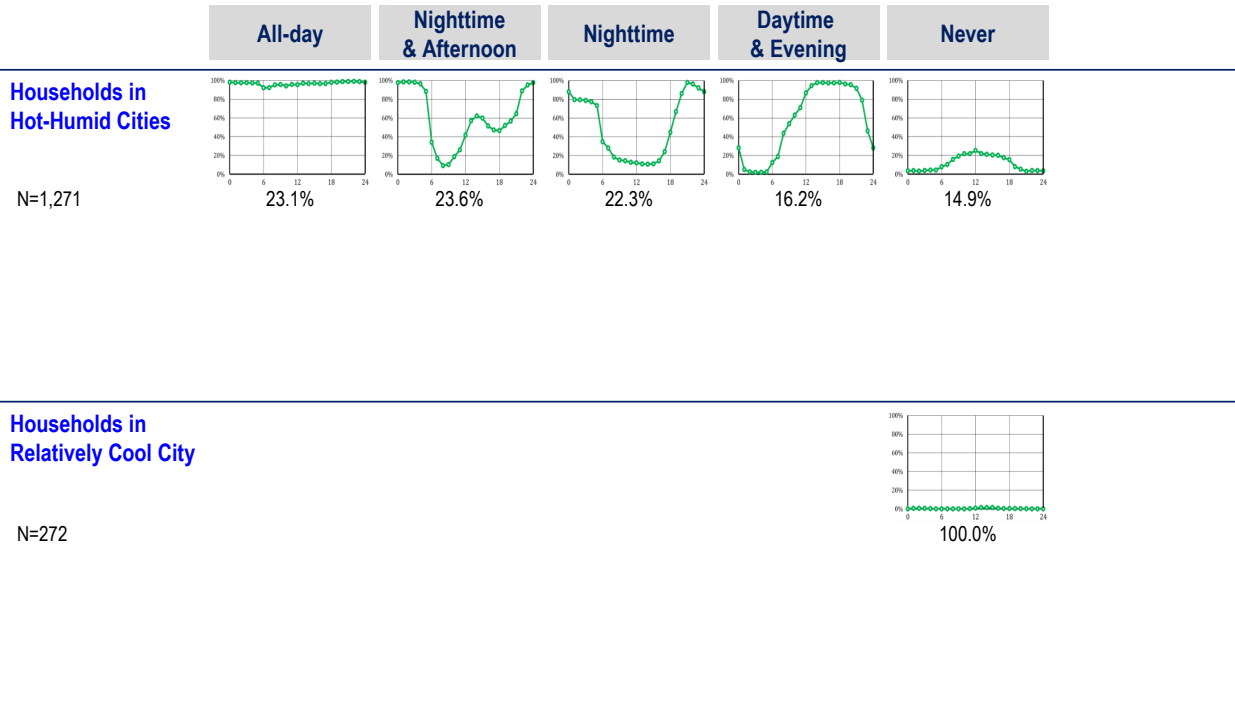
Profile of the Groups

| Climate | N | Share (%) | Hours with high performed rate (>50%) | | | | Fan Usage (hour) | Fan Ownership (%) |
|-----------------|-------|-----------|---------------------------------------|-------|-------|-------|------------------|-------------------|
| | | | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 24:00 | | |
| Hot-Humid | 293 | 23.1 | █ | █ | █ | █ | 23.2 | 98.0 |
| | 300 | 23.6 | █ | █ | █ | █ | 14.2 | 96.3 |
| | 283 | 22.3 | █ | █ | █ | █ | 11.7 | 96.8 |
| | 206 | 16.2 | | █ | █ | █ | 13.8 | 99.5 |
| | 189 | 14.9 | | | █ | █ | 2.9 | 56.1 |
| <i>Total</i> | 1,271 | 100.0 | | | | | 14.0 | 91.3 |
| Relatively Cool | 272 | 100.0 | | | | | 0.1 | 5.9 |
| <i>Total</i> | 272 | 100.0 | | | | | 0.1 | 5.9 |

19

Classification Results of Cluster Analyses Using Fan Usage Variables

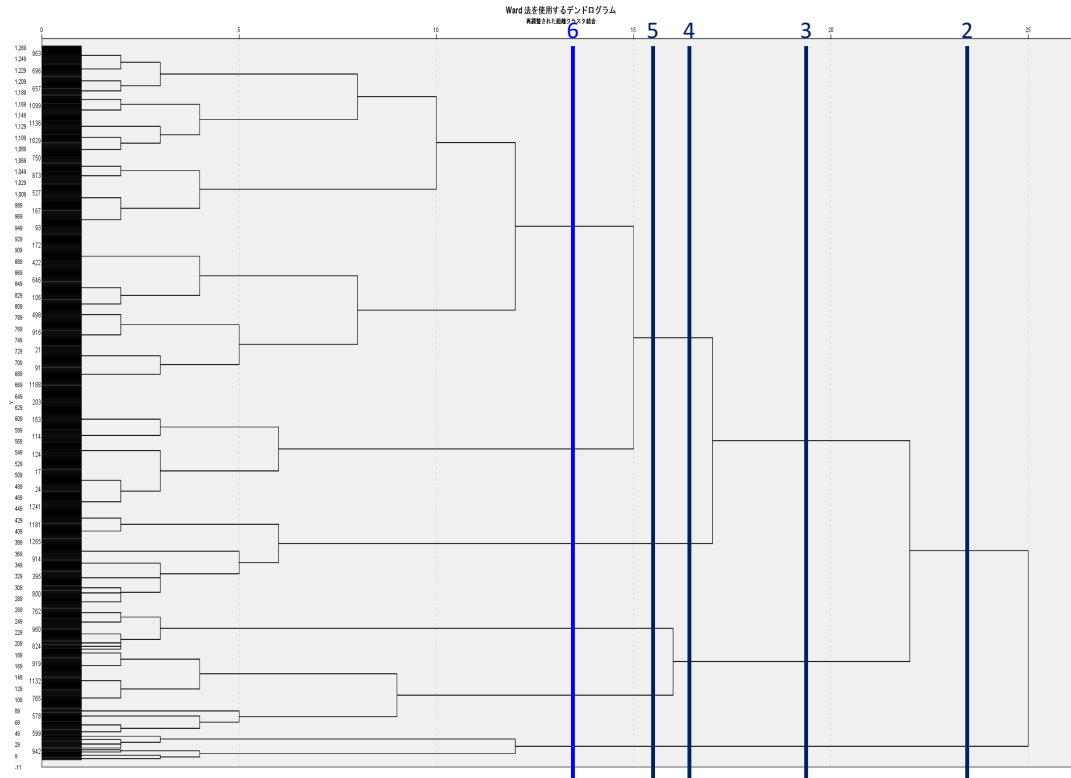
Window-Opening Patterns



20

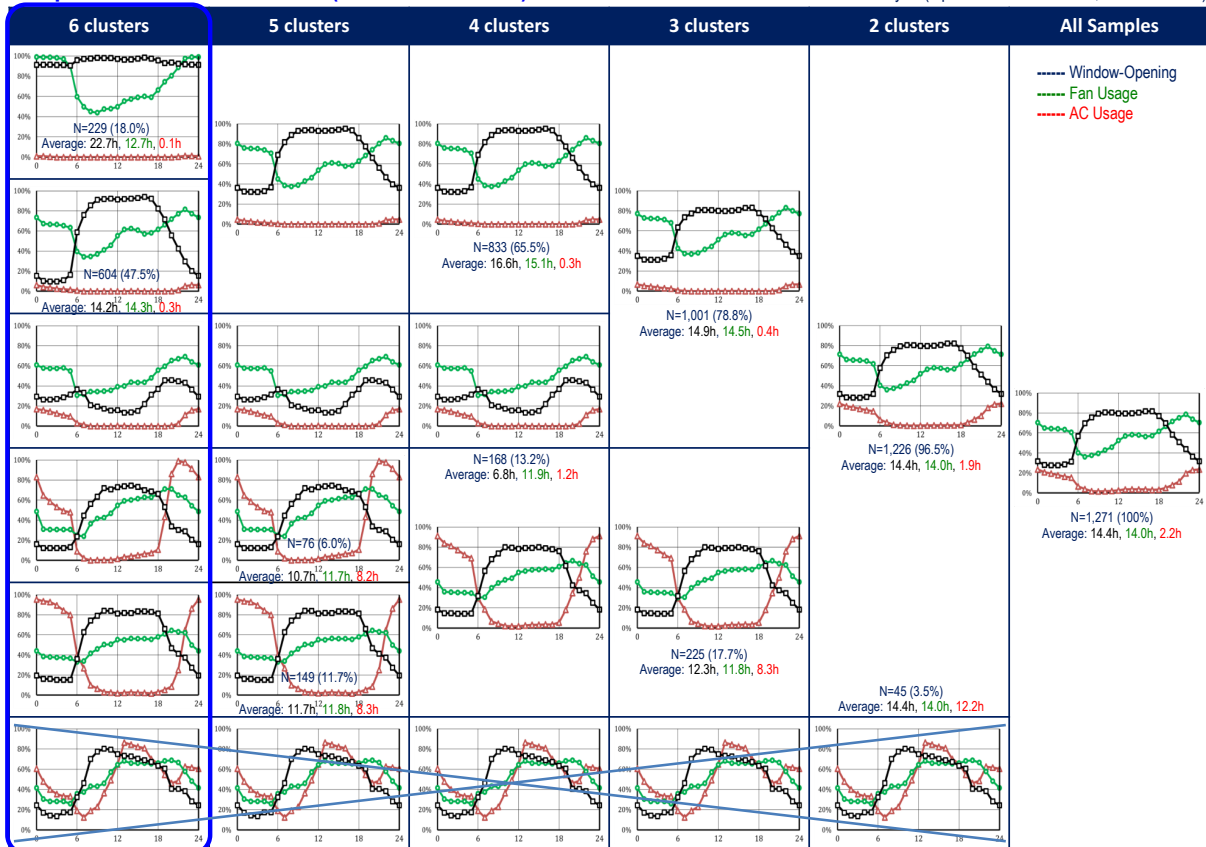
典型パターン抽出 ; (5) 窓開閉行動・冷房使用・扇風機使用の総合

■ 高温多湿な都市

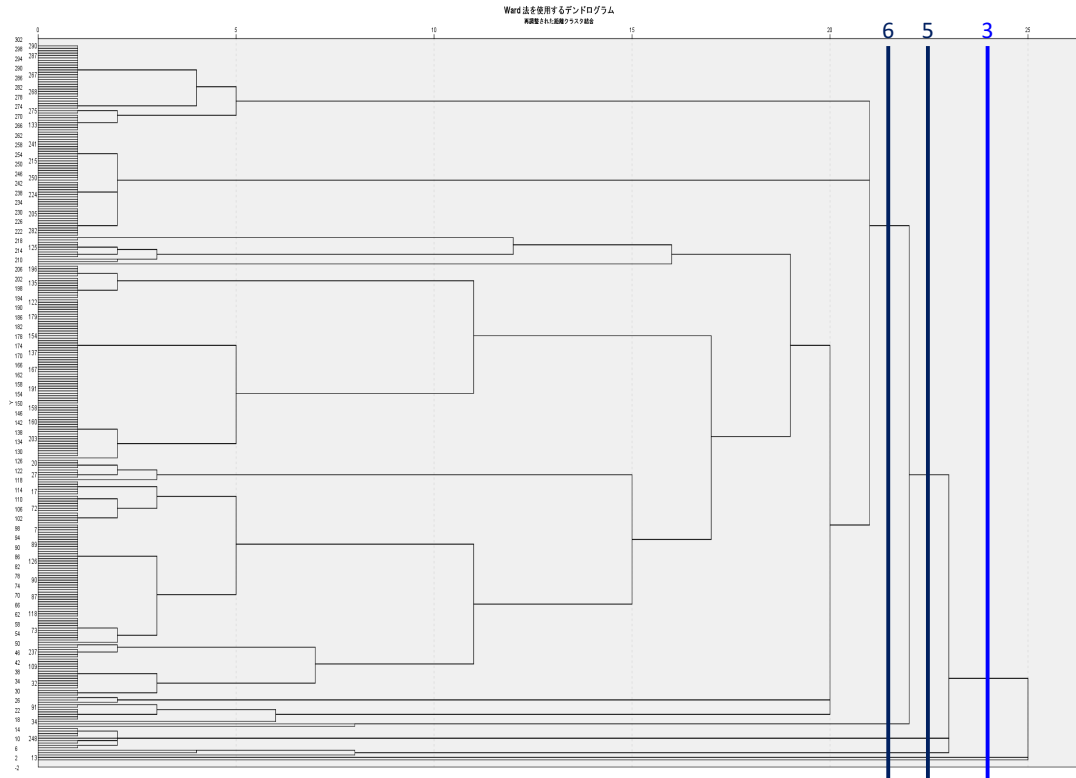


Adaptive Behavioral Patterns (Hot-Humid Cities)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)

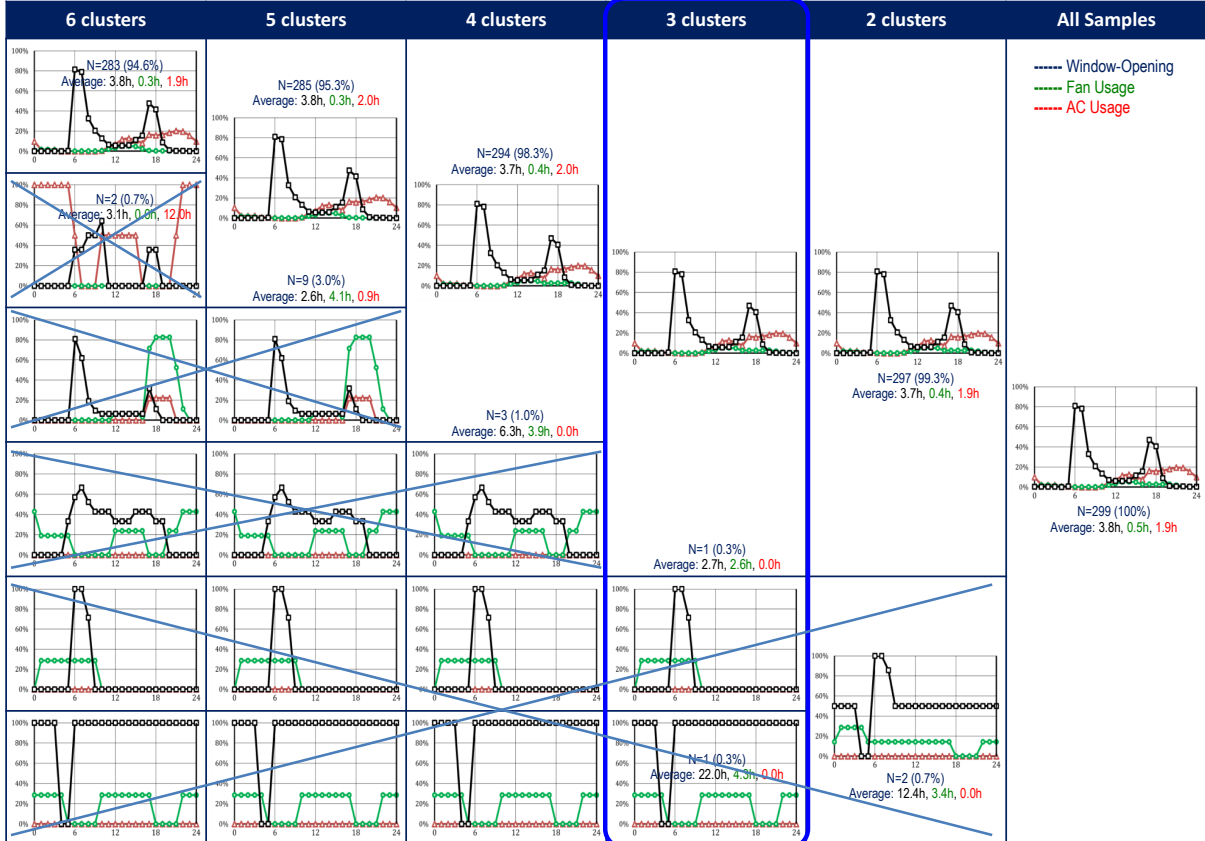


■比較的涼しい都市



Adaptive Behavioral Patterns (Relatively Cool City)

Result of Hierarchical Cluster Analysis (squared Euclid's distance, Ward's method)

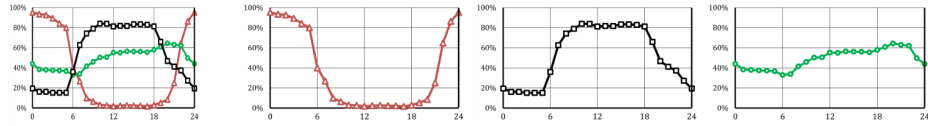


Adaptive Behavioral Patterns (Hot-Humid Cities)

----- Window-Opening
----- Fan Usage
----- AC Usage

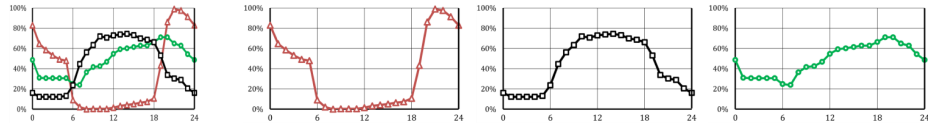
Group A1

N=149 (11.7%)
 Average: 11.7h, 11.8h, 8.3h



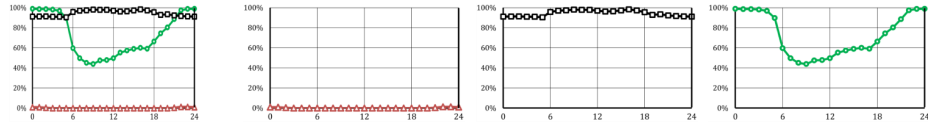
Group A2

N=76 (6.0%)
 Average: 10.7h, 11.7h, 8.2h



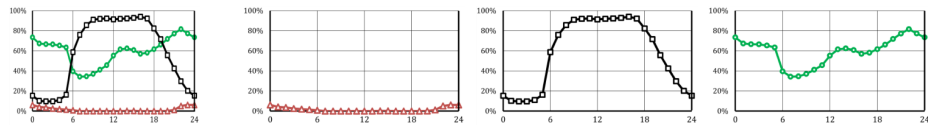
Group A3

N=229 (18.0%)
 Average: 22.7h, 12.7h, 0.1h



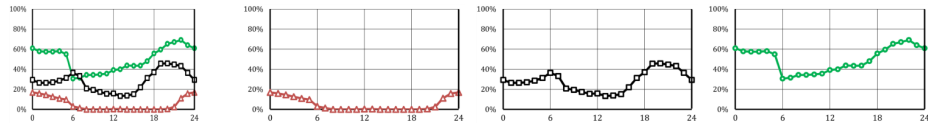
Group A4

N=604 (47.5%)
 Average: 14.2h, 14.3h, 0.3h



Group A5

N=168 (13.2%)
 Average: 6.8h, 11.9h, 1.2h

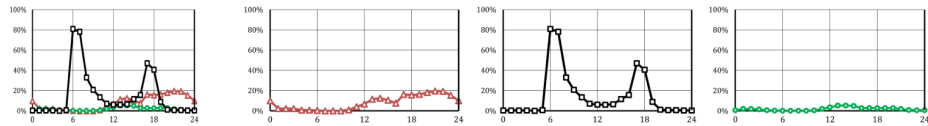


Adaptive Behavioral Patterns (Relatively Cool City)

----- Window-Opening
----- Fan Usage
----- AC Usage

Group B

N=297 (99.3%)
 Average: 3.7h, 0.4h, 1.9h



Classification Results of Cluster Analyses Using Three Adaptive Behavioral Variables

Profile of the Groups

| Climate | Group | N | Share (%) | AC Usage (hour) | Window-opening (hour) | Fan Usage (hour) | AC Ownership (%) | Fan Ownership (%) |
|-----------------|--------------|-------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Hot-Humid | A1 | 149 | 12.2 | 8.3 | 11.7 | 11.8 | 100.0 | 84.6 |
| | A2 | 76 | 6.2 | 8.2 | 10.7 | 11.7 | 100.0 | 89.5 |
| | A3 | 229 | 18.7 | 0.1 | 22.7 | 12.7 | 1.7 | 94.3 |
| | A4 | 604 | 49.3 | 0.3 | 14.2 | 14.3 | 8.8 | 93.4 |
| | A5 | 168 | 13.8 | 1.2 | 6.8 | 11.9 | 20.2 | 87.5 |
| | Total | 1,226 | 100.0 | 1.8 | 14.2 | 13.2 | 25.8 | 91.4 |
| Relatively Cool | B | 297 | 100.0 | 1.9 | 3.7 | 0.4 | 35.0 | 13.8 |
| | Total | 297 | 100.0 | 1.9 | 3.7 | 0.4 | 35.0 | 13.8 |

